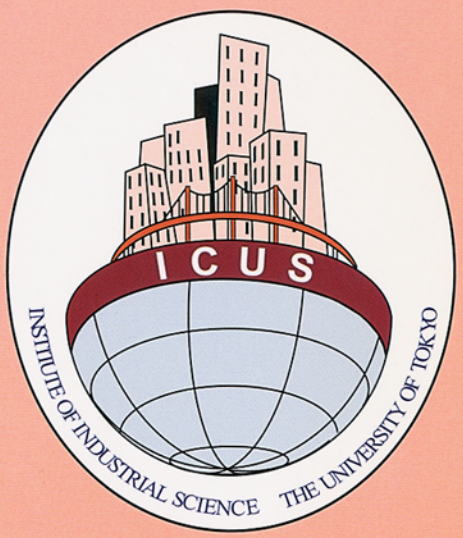
ICUS REPORT 2006-09



都市基盤安全工学国際研究センター

東京大学生産技術研究所

マルチハザードマップを活用した巨大都市の防災都市空間の最適化設計方法の開発

都市基盤安全工学国際研究センター
東京大学生産技術研究所

ISBN 4-903661-11-3

Serial Number 21

マルチハザードマップを活用した
巨大都市の防災都市空間の最適化設計方法の開発

ICUS Report No.21

2007 年 3 月

都市基盤安全工学国際研究センター

Utilization of Multimedia Hazard Map for Disaster Prevention in Mega Cities through Optimum Urban Planning

ICUS Report No.21, March 2007

ABSTRACT

It is impossible for the people to be well prepared before the event if they cannot understand what a disaster situation looks like. This includes all society members: politicians, public officials, researchers, mass media people, professionals, general public, etc. In our opinion, increasing the number of people that can imagine the pre- and post-disaster scenario is the key issue to be addressed in order to effectively reduce the disaster damage. Only by increasing the people's imagination capabilities, they can appropriately prepare measures before a disaster and react during a disaster situation because most of the times this will be their first disaster experience.

Recent technological advances allow a very efficient management of data as well as simulation of various situations through powerful computers. This technology can be applied in the disaster mitigation field to help the people imagine a disaster situation and in this way enhance their actions previous, during and after the event. This paper presents utilization of multimedia hazard map for disaster prevention in mega cities through optimum urban planning for the purpose of disaster reduction. Multimedia hazard map is composed of three modules: 1) universal disaster environment simulation module, 2) data archive module 3) Web 3D-GIS module. These modules help people to discuss optimum disaster mitigation planning considering various kinds of hazard.

マルチハザードマップを活用した
巨大都市の防災都市空間の最適化設計方法の開発

目　次

1．序論 1
1.1　研究の背景 1
1.2　研究の目的 1
1.3　研究体制 3
1.4　研究計画 4

2．災害シミュレーションモデルの開発 7
2.1　地震災害シミュレーション 7
2.2　リモートセンシングデータと数値気候モデルとの結合による
ヒートアイランドシミュレーション 23
2.3　都市の火災・大気汚染シミュレーション 35
2.4　施設劣化シミュレーション 45
2.5　Urban Flood Simulation 69

3．災害アーカイブスの開発 81

4．3 次元 GIS ハザードマップを活用した都市空間の最適設計 85
4.1　3 次元地域危険度マップを用いた都市空間の最適設計 85
4.2　トルコ共和国イスタンブールでの WS を通した都市空間の最適設計 91

5．結論と今後の課題 99
5.1　結論 99
5.2　今後の課題 99

6．付録 101
6.1　発表論文リスト 101
6.2　発表論文 103

1. 序論

1.1 研究の背景

20 世紀の我が国は欧米諸国に追いつくことを最大目標に，産業の育成，設備の拡充，新製品の製造等に全力を尽くしてきた．その結果，経済は高度に成長し我が国は世界的に見ても裕福な国に変貌した．しかし，現在の我々を取り巻く環境に目をやると，高度経済成長期以来の環境負荷の代償ともいえるヒートアイランド現象に代表される環境問題，異常気象ともいえる台風および集中豪雨による大規模洪水災害，活発期に入ったと想定されている地震災害や施設の老朽化に伴う新幹線のコンクリート剥落事故など，我々の生活基盤を脅かすような状況となっている．このような様々な災害に対する防災力向上の基本は，発災からの時間経過の中で，自分の周辺で起こる災害状況を具体的にイメージできる人をいかに増やすかに尽きると考えられる．効果的な防災対策は，「災害状況の進展を適切にイメージできる能力」に基づいた「現状に対する理解力」と「各時点において適切なアクションをとるための判断/対応力」があってはじめて実現する．イメージできない状況に対する適切な心がけや準備などは無理である．現在の防災上の問題は，社会の様々な立場の人々，すなわち，政治家，行政，研究者，エンジニア，マスコミ，そして一般市民が，災害状況を適切にイメージできる能力を養っておらず，この能力の欠如が最適な事前・最中・事後の対策の具体化を阻んでいる点にある．なぜなら，災害は，地震，洪水や火災に代表されるような，被害の規模の甚大さは漠然とイメージできるが，非日常的なイベントであるために自らの問題として認識しない場合や，環境問題や施設の経年劣化に代表されるような，日々進行していながらその環境負荷量や施設の耐力低下量が目に見えないために，顕在化したときには取り返しのつかない状況になっているものがあり，何れの場合も，事象としてイメージできないという問題と，自ら進んでイメージしようとはしない問題点があるからである．

1.2 研究の目的

本研究では，これらの様々なハザード（マルチハザード）への適切な対応策を提示することを最終目標とし，特に，都市を対象としたケーススタディを通して提案する手法の妥当性を検証する．具体的には，①様々な災害（地震，洪水，火災，環境負荷，施設劣化）の物理・化学現象を適切に捉えたシミュレーションモデルの開発と被害結果が社会に及ぼす影響の大きさの評価（災害シミュレーション），②過去の大規模災害の事例およびシミュレーション結果のデータベース化（災害アーカイブス），③①，②の結果を３次元ＧＩＳ上に統合することにより，任意の時空

間上での災害の状況をバーチャル体験できるシステムの開発（３次元ＧＩＳ），④マルチハザードを考慮した場合の，適切な都市空間の創造方法の提案，から構成される（都市空間の最適設計）．これらの関係を図-1.2.1に示す．

① 災害シミュレーション：

ここでは，前述した災害，地震，洪水，火災，環境負荷（主にヒートアイランドおよび大気汚染），施設の経年劣化を対象として，各イベントにより発生する物理・化学的現象をシミュレーションし，この結果をインプットとして社会に及ぼす影響の定量的評価が可能となるシステムの構築を目指す．

② 災害アーカイブス：

これは，災害情報を利用しやすい形で標準化した上でこれを蓄積・管理するシステムであり，過去の災害調査報告，新聞記事，教訓集などはもちろん，①によって作成された情報もこの中に入る．しかも①の精度向上と③の地域特性の変化に伴って，常に動的・かつインターラクティブにアップデートされるアーカイブスシステムを構築する．

③ ３次元ＧＩＳ：

対象となる地域の時空間都市情報であり，３次元ＧＩＳ環境を基本として，その中に時間パラメータを有した地域住民や地域特性データが常にアップデートされて格納されているようなシステムの開発を目指す．

④ 都市空間の最適設計：

大都市を対象として，現状の経済活動を維持（あるいは，向上）させつつ，災害に強い都市空間の形成方法を，①～③の結果をベースにケーススタディし，この結果を基に，大都市の最適な都市空間設計方法の提案を目指す．

本システムは，平時は危機管理/防災教育支援システムとして働き，緊急時には危機管理/防災対応支援システムとして機能することで，利用者の災害イメージ能力，現状理解力，対応力が向上するとともに，事前・最中・事後の対策の効果が定量的に評価され，総合的な防災力の向上に寄与するものであり，災害に強い都市形成を目指す上で極めて有効なツールとなる．

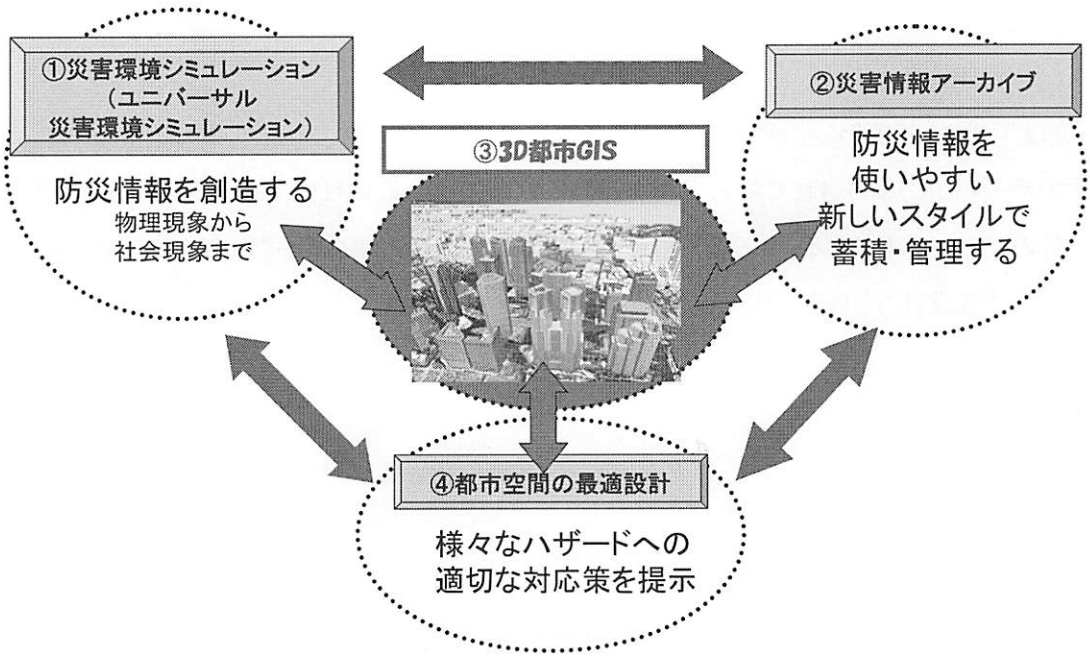


図-1.2.1 研究目的の概要

1.3 研究体制

本研究における研究体制は表-1.3.1 の通りである．各研究分担者はそれぞれシミュレーション技術の開発とその適用方法の検討を担当する．

表-1.3.1 研究体制

氏名	所属	専門	担当
魚本健人	東京大学生産技術研究所 ＩＣＵＳセンター長，教授	建設複合材料学	研究総括，施設劣化ｼﾐｭﾚｰｼｮﾝ，都市空間最適化
安岡善文	東京大学生産技術研究所 教授	リモートセンシング	３次元ＧＩＳ，都市空間最適化
目黒公郎	東京大学生産技術研究所 ＩＣＵＳ　教授	都市震災軽減工学	災害ｼﾐｭﾚｰｼｮﾝ（地震），社会現象ｼﾐｭﾚｰｼｮﾝ，都市空間最適化
大岡龍三	東京大学生産技術研究所ＩＣＵＳ　助教授	建築都市環境工学	火災，環境負荷ｼﾐｭﾚｰｼｮﾝ，都市空間最適化
加藤佳孝	東京大学生産技術研究所 ＩＣＵＳ　助教授	建設材料マネジメント	施設劣化ｼﾐｭﾚｰｼｮﾝ，都市空間最適化
デュシュマンタ・ダッタ	元・東京大学生産技術研究所ＩＣＵＳ助教授	水資源工学	洪水シミュレーション，都市空間最適化

1.4 研究計画

本研究は平成 17 年度から平成 18 年度の 2 年間にかけて実施した. 前述のように, 本研究は大きく4つのサブテーマにより構成されており, 平成17年度については, 最終目標である災害に強い都市空間の最適設計のための要素である①～③の検討を実施した. 平成 18 年度は, これらの検討結果に基づき, 都市空間の最適設計方法を検討した.

①災害シミュレーション

各研究者が保有しているシミュレーションモデルの高精度化および個々のシミュレーションモデルの有機的結合の検討を実施した.

- 地震災害シミュレーション:

  研究分担者が保有するシステムとしては, 地震動シミュレーション, 構造物完全崩壊シミュレーション, 家具の動的挙動シミュレーション, 避難行動シミュレーションがあり, 地震発生による影響を, 従来の施設などを対象としたマクロなスケールのみならず, 施設を利用する人に及ぼす影響までを統一的に評価することができるシステムである. 平成17年度は, 本システムの精度検証および施設劣化シミュレーション結果の活用と社会現象への影響を評価する手法の検討を実施した. 具体的には, 日常時と非常時における構造物の劣化や損傷の程度と箇所を迅速に特定する機能を有する構造物健全度モニタリングシステムの開発を行い, シミュレーション結果の検証を行うとともに, モニタリングシステムの活用方策についても検討した. まずは, 構造体が比較的シンプルな橋梁を対象として研究に取り掛かり, 橋梁システムの健全度/地震時損傷モニタリングと, その評価システムの構築を目指した.

- 火災・大気汚染シミュレーション:

  現状の都市火災延焼シミュレーションモデルに, 1次元熱伝導モデル並びに材料燃焼モデルの組み込みを行い延焼の時間変化を組み込んだモデルの構築を行った. 更にそのモデルによる解析結果と火災風洞実験結果の比較を行い予測精度の向上を図った. 現状の大気汚染予測モデルに自動車の移動モデルを組み込む. また天候による大気安定度の効果も組み込んだ. これらの予測精度は風洞実験結果と比較して, 検証された.

- 洪水シミュレーション:

  現状の洪水シミュレーションモデルの精度向上を目指した. また, 洪水に関しては, 十分な対策が講じられる前に著しい都市化が進んでいるタイ・バンコク市等での被害が日本よりも甚大であるため, 精度検証の対象としては, バンコク市など海外でのケーススタディを実施した.

・ 施設劣化シミュレーション:

施設の劣化は，施設が置かれている環境条件によって様々であり，環境作用を考慮したシミュレーション手法を開発する必要がある．環境作用のシミュレーションの際に重要なことは，あくまでも施設の劣化を予測することが主目的であり，劣化を精度良く予測するための適切な境界条件を与えることにある．無論，時々刻々と変化する環境作用をシミュレーションすることも可能であり，飛躍的に発展した計算機能力を駆使すれば不可能ではないと思われるが，時間・コストの無駄であり，時空間に対して適切な境界条件の設定法が必要不可欠である．これに関しては，各種劣化環境再現試験装置内に供試体を暴露し，コンクリートの耐久性能評価試験装置で劣化程度を定量化し，実測値と解析結果を用いて，適切な境界条件の設定方法の確立を行った．また，実際の施設の劣化を考慮する場合には，施設の構造形式や配筋等の情報が必要不可欠となるが，これまでの調査の結果，殆どの管理者が設計図書を保管していないという事実が明らかになった．この場合，前述した地震災害シミュレーションのインプット情報も欠落することになる．この様な状況に対応するために，既存施設の自動再設計システムの開発も同時に実施した．各施設は，基本的には建設された年代や用途に応じて，当時の設計規準に基づいて行われていることを活用して，基本システムとしては，年代，用途を入力することにより当時の設計が自動的に完了するシステムを開発した．ただし，施設が置かれた環境により，詳細な情報は適宜変更されていることや施工要因による変更が想定されるため，このままでは，適切な予測が不可能である．そこで，基本設計をもとにして，劣化予測および地震予測を実施することにより，最も重要となる情報を選定することで，必要最低限の情報を各種非破壊検査(申請者が開発済み)により取得した．この結果を活用して，基本設計を再計算し，既設施設の復元設計を実施可能となるシステムとした．

②災害アーカイブス

兵庫県南部地震教訓集や時刻歴対応活動記録，WTC テロ事件，大規模洪水，施設劣化事例をはじめとして，過去の事故や災害の調査報告や新聞記事，さらに地域危険度分析や被害想定結果などを新しいスタイルでデータベース化したものとして構築した．また，①で開発した各種シミュレーションを用いてケーススタディした過去・現在・未来における災害被害状況の結果も併せてデータベース化した．

③3次元GIS

①で開発する各種シミュレーションモデルでは，その基盤データとして，さまざまな分野に応用可能な，都市の3次元モデルが必要である．従来，主に施設の3次元モデルを構築することに焦点を当てられており，樹木等の植生を含めた都市の3次元モデルを構築した例はない．本研究では，環境の影響も考慮したマルチハザードを対象としているため，植生等の情報も必要不可欠となる．研究分担者は，都市空間情報を都市の3次元モデルを通じて，より実際的に表現するために，高解像度衛星画像と航空機搭載型

レーザースキャナ(ALS)データを用いて，都市域の樹木を抽出し，3次元樹木成長モデルと統合することにより，都市域の樹木の3次元モデル化を行っている．①で必要となる入力情報が過不足無く収集できるか等を検討することにより，このモデルの精度の検証および高度化を行った．さらに，①，②で開発された各種シミュレーション，およびシミュレーション結果を含んだアーカイブスを3次元GIS上で統合し，①，②の変化に応じて動的に変化させることが可能となるシステムとして開発した．

④都市空間の最適設計：

平成17年度に開発した各種システムを用いてマルチハザードマップを作成する．このとき，対象とする現象が複数有るために，アウトプットをユーザの使用しやすい形として表現することが極めて重要となる．基本的にはシミュレーションの結果を見て，マルチハザードマップの表現方法を検討することになるが，現時点で想定される切り口としては，時間軸，空間軸(マクロ，メゾ，ミクロ)，被害額，の軸が想定され，各々の軸で個別のハザードマップを整理し，有機的に結合することを目指す．例えば，最もユーザに理解しやすい方法としては，全体の被害額を任意の時空間上に整理したものをフェーズ1(空間情報としては施設情報を取り込まないマクロスケール)として，マップ上のある位置をクリックすると施設毎の被害状況，災害原因がわかるフェーズ2(空間情報としては各施設の外観が分かるメゾスケール)，各施設の部位をクリックすると，対象とした部位の被害状況(建築物であれば，部屋内の被害状況)が分かるフェーズ3(空間情報としては，各施設の形状およびユーザ情報等が分かるミクロスケール)を想定している．

2. 災害シミュレーションモデルの開発

ここでは，災害，地震，洪水，火災，環境負荷（主にヒートアイランドおよび大気汚染），施設の経年劣化等を対象として，各イベントにより発生する物理現象をシミュレーションし，この結果をインプットとして社会に及ぼす影響の定量的評価を行うことが可能となるシステムの構築を目指す．

2.1 地震災害シミュレーション

まずは，地震災害時に発生する様々な現象に対するシミュレーションモデルを開発・精緻化した．多様な災害時の状況をより高いリアリティで体験できるとともに，事前対策を行うことによる災害現象の軽減効果もシミュレーションすることができ，対策の重要性を実感できる．対象とした災害現象は下記に列挙した通りであり，これらの全体像を図-2.1.1 に示した．以降の節では，これらのシミュレーションモデルのうちいくつかについて，シミュレーション手法と実例を報告する．

シミュレーション成果はバーチャルリアリティー技術を利用して表示させることで，リアルな災害イメージを想起させる環境整備を目指した．ヘッドマウントディスプレイ(HMD) を用いた没入型３次元バーチャルリアリティー端末によりシミュレーション画像を閲覧すれば，実体験に近い災害体験をすることができる（図-2.1.2）．

・地震時木造建物崩壊および耐震化効果シミュレーション
・地震時家具転倒および転倒防止装置効果シミュレーション
・津波災害時避難行動および避難誘導効果シミュレーション
・災害時地下空間避難行動および避難誘導効果シミュレーション
・災害時高層建築ビル内避難行動および避難誘導効果シミュレーション
・地震時ビル崩壊シミュレーション
・地震時高架橋崩壊シミュレーション
・地震時鉄道車両内乗客挙動シミュレーション

図-2.1.1 地震災害シミュレーションの全体像

図-2.1.2 3HMD を用いた没入型3次元 VR 端末によるシミュレーションの体験

2.1.1 地震時木造建物崩壊および耐震化効果シミュレーション

家屋全体での安全性の理解を目指して，3 次元拡張個別要素法（3D-EDEM）を用いた地震時の木造家屋の動的破壊挙動シミュレーション手法を開発した．3D-EDEM は、要素同士の連続性を表現する連結バネ(間隙バネ)を導入することで，構造物の連続体から非連続体にいいたる挙動を統一的に表現できる解析法である．3D-EDEM では，対象の構成単位を頂点と辺に任意の丸みを持っ

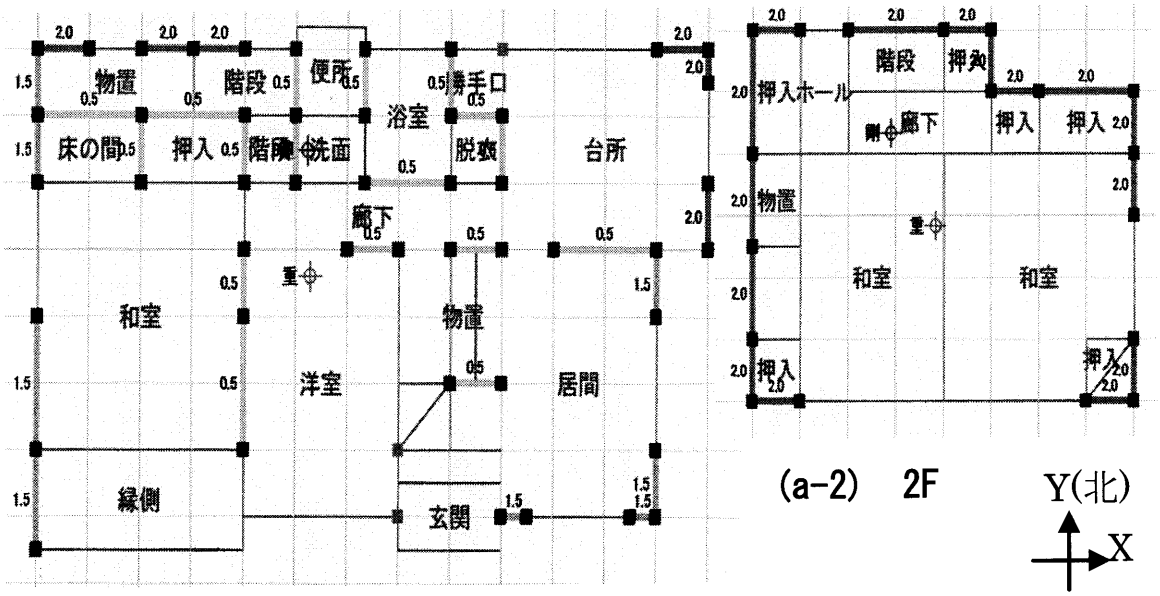
た直方剛体ブロックでモデル化することにより，単体構造物やこれを組み合わせた構造物の挙動を三次元空間上で追跡することが可能な動的破壊解析法である．

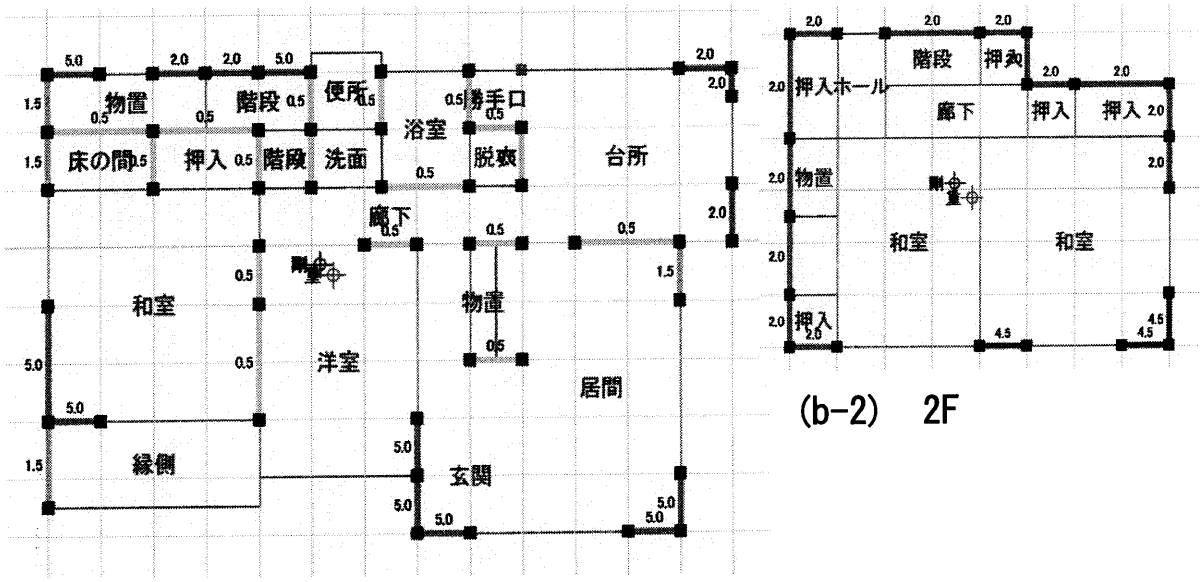
耐震改修が行われた実在の木造住宅を対象に，耐震改修前後の動的挙動解析を行い，耐震改修の有無による住宅の動的挙動の差を目で見て分かる形で表現することを試みた．図-2.1.3 は，対象とした木造軸組建物に兵庫県南部地震時の揺れが作用した場合の動的挙動をシミュレーションした結果である．この建物は瓦葺の重い屋根を有する 1960 年に建設された木造２階建てである．図-2.1.2 に，耐震改修前後の図面を示す．

耐震改修以前の建物の耐震診断の結果は，総合評点 0.25（X 方向：0.25，Y 方向：0.44）であり，南側（－Y 方向）の壁量の不足とバランスの悪さが指摘されている．壁量の不足を筋交いと合板で補強した耐震改修後の耐震診断点は 1.24 である．

解析に用いたシミュレーションモデルには，接合部や耐力壁の力学特性をモデル化した間隙バネを新たに付与し，在来木造軸組住宅の耐力壁の静的水平加力実験結果との挙動の比較によって，事前にキャリブレーションを行った．

キャリブレーション済みの解析モデルを用いた解析結果からは，耐震補強前の状態では、対象建物は兵庫県南部地震並みの揺れが作用すると倒壊してしまうが，壁量の不足していた南側部分を中心として補強することにより，同様の強い揺れが作用した場合にも倒壊を回避できることがわかった．





5.0 筋交い+構造合板　4.5 たすき筋交い　2.0 筋交い+モルタル壁

1.5 筋交い　0.5 土壁

図-2.1.2 耐震改修以前(a)と以後(b)の図面

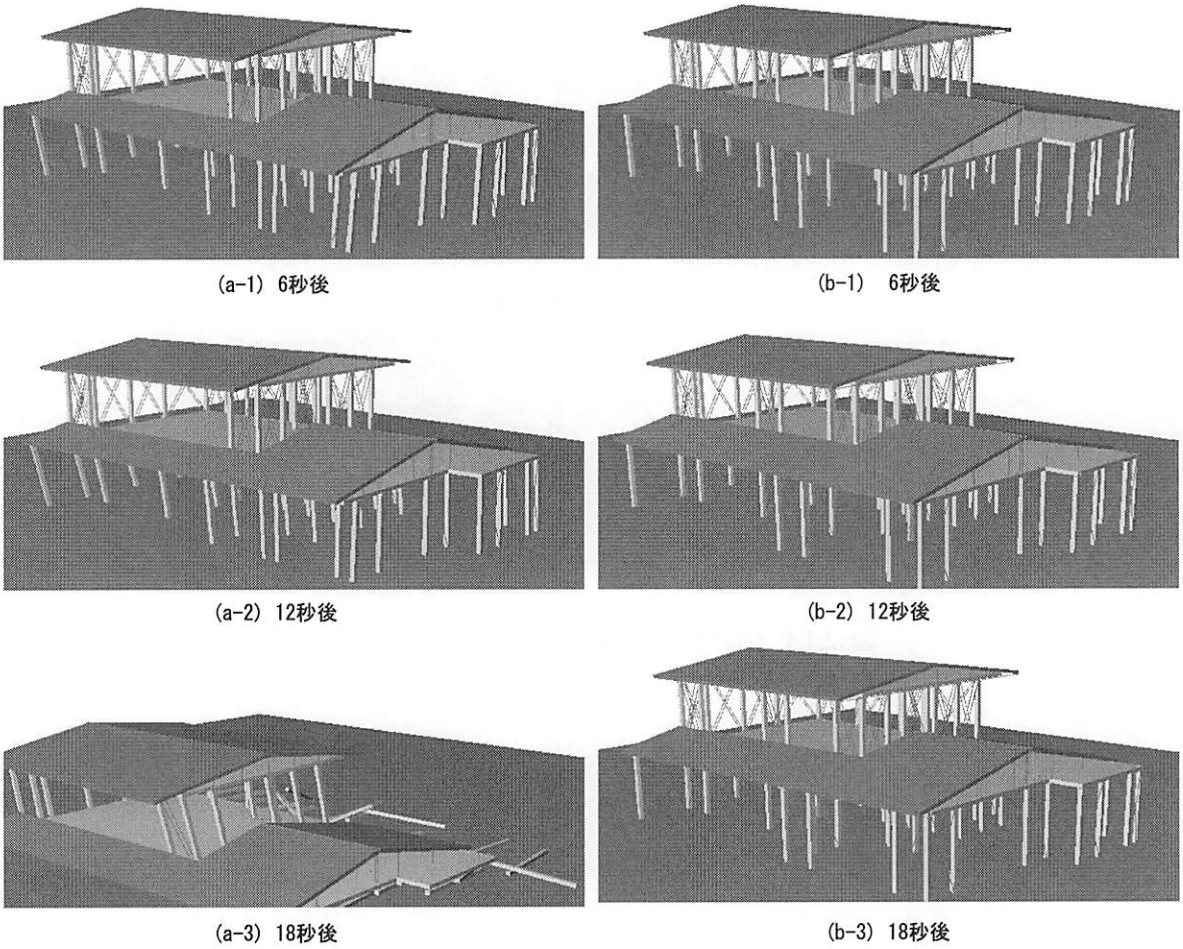


図-2.1.3 耐震補強前(a)と後(b)での地震時の対象建物の動的挙動の違い

2.1.2 地震時の家具転倒および転倒防止装置効果シミュレーション

家具の動的挙動を解析するため，木造建物の挙動解析で用いたと同様な３次元拡張個別要素法（３D-EDEM)を用いたシミュレーションシステムを開発した．家具（要素）の間には引張力に抵抗できるばね，連結バネ（間隙バネ）を設定することによって対象物の連続性を表現した．クローゼットの挙動をシミュレーションした結果を図-2.1.4に示す．

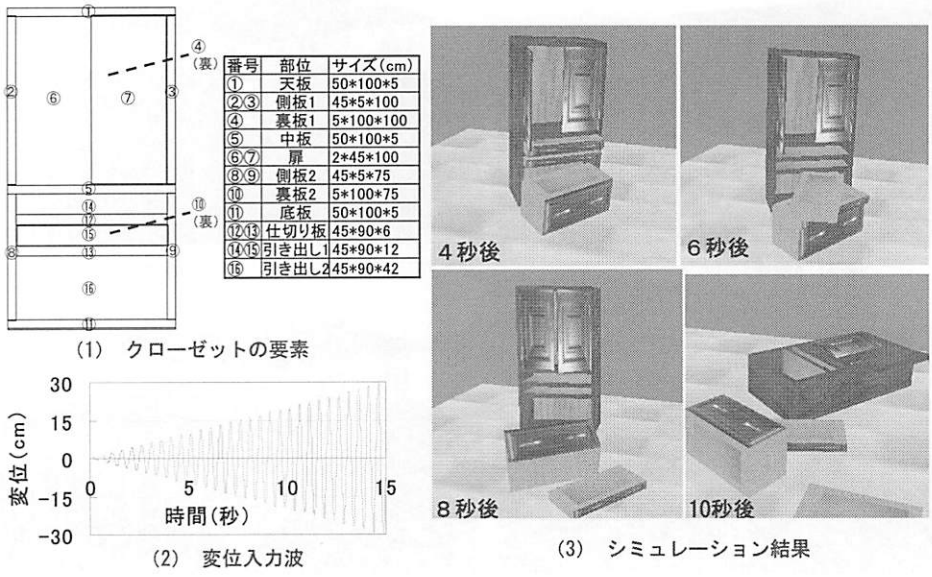


図-2.1.4 クローゼットの挙動のシミュレーション

一つの家具の挙動だけではなく，部屋全体での家具の挙動を解析し，バーチャルリアリティー技術を用いて立体的に可視化することにより，専門的な知識のない一般市民がリアルに挙動をイメージできる環境も整備した．また，ＷＥＢ環境を使って，自分の部屋の間取りや家具のレイアウトを入力した上で家具の挙動をシミュレーションできるシステムも構築した（図-2-1-5）．このシステムを用いると，自分の部屋の間取りや家具のレイアウトや転倒防止器具の有無，床の状況を入力した上で家具の挙動をシミュレーションすることができる．また，条件を変えた場合を比較することにより，室内の現状の問題点や転倒防止対策の効果を理解することも可能となる．階の異なるマンションの各フロアでの家具の挙動の再現を試みた結果の一例が図-2-1-6 である．

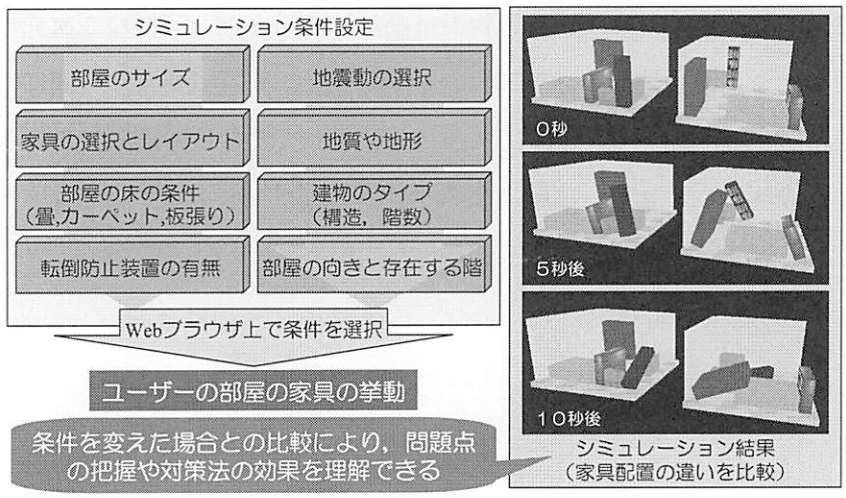


図-2.1.5 WEBシステム上での家具情報の入力

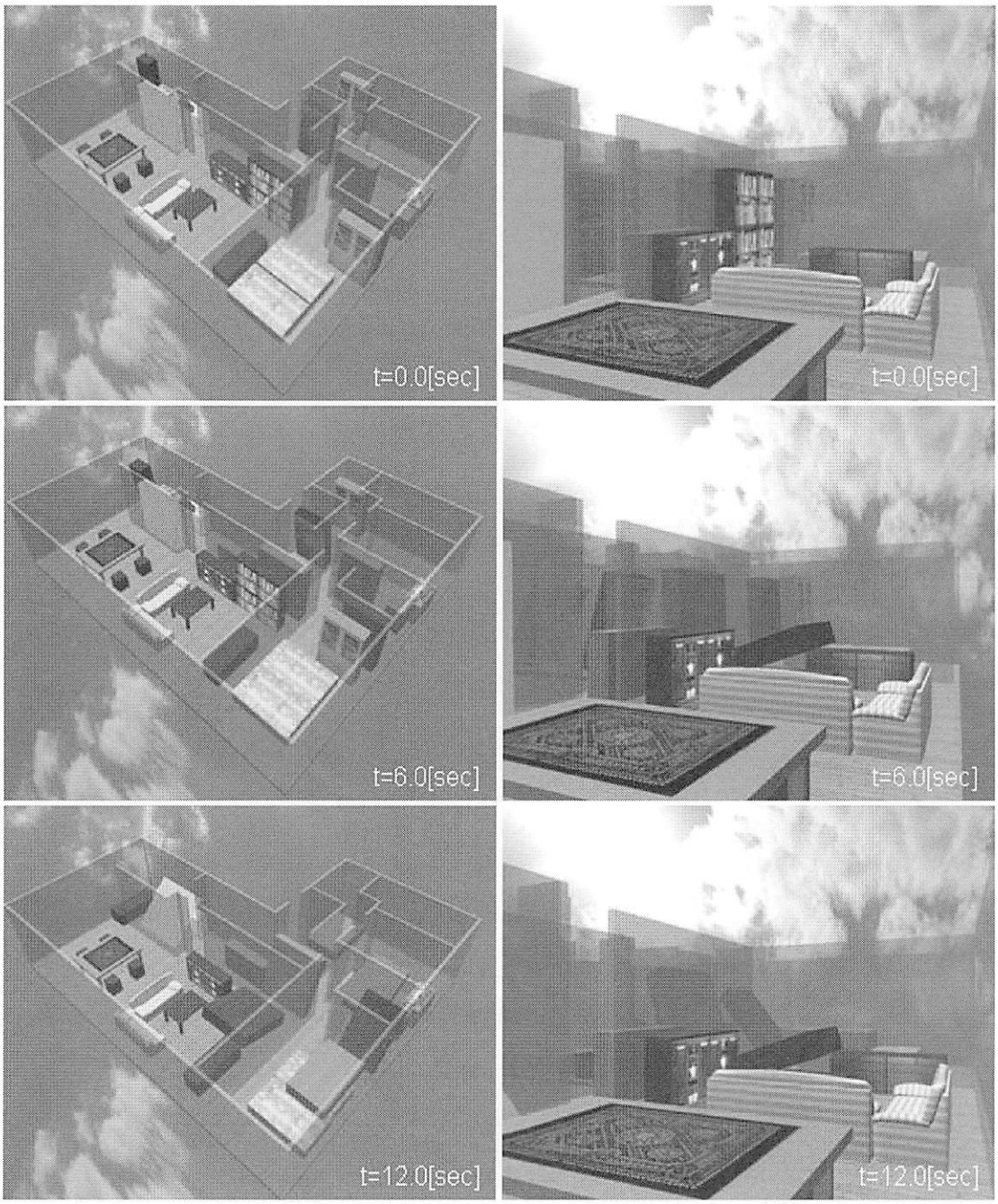


図-2.1.6 マンションでの家具の動的挙動シミュレーション

2.1.3 津波災害時避難行動および避難誘導効果シミュレーション

(1) 避難行動のモデル化

本研究ではポテンシャルモデルに基づいた避難行動モデル[1)]を用いてシミュレーションを行った．このモデルは対象空間を図-2.1.7に示すように，「物理的な要因」「個人特性」「災害要因」の３つのポテンシャル分布の重ね合わせとして考えることで，異なった個人特性を有する多数の人間の避難行動を簡単に取り扱うことを可能にしたモデルである．

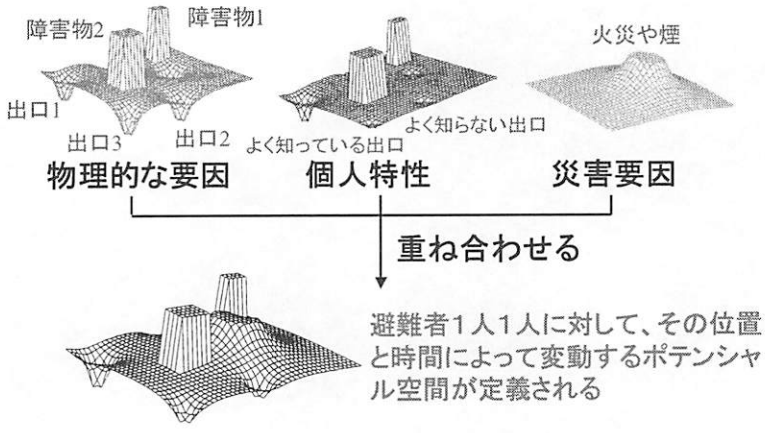


図-2.1.7 ポテンシャルのイメージ

３つのポテンシャルを重ね合わせることによって，避難者１人１人に対して，その位置と時間によって変動するポテンシャル空間が定義される．このようにして決められた対象空間内において，それぞれの避難者は，時間ステップごとにポテンシャルの低い方を進行方向として選択し，移動を繰り返すことによって，最終的に出口に辿り着く．

また，それぞれの避難者は自分の周囲のメッシュの混雑度を認知し，その混雑度に応じた速度で避難する．なお，走行による避難速度は歩行速度の経験式[2)]を基にして，図-2.1.8に示す曲線で表現することとした．図中の空間モジュールとは，人口密度の逆数で混雑度を示す指標である．

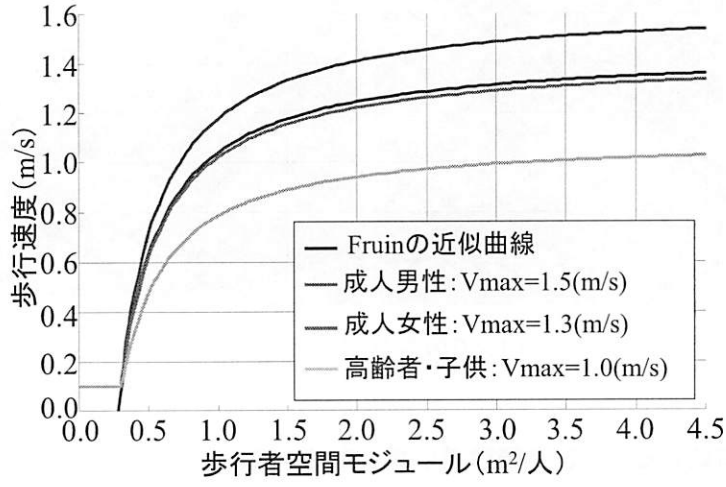


図-2.1.8 歩行者空間モジュール(1/歩行者密度)と避難速度

災害時に行政や報道機関などから発信される『災害情報』は，住民にとっては適切な対応を行うための重要な判断材料である．本研究で用いる避難行動シミュレーションでは，各種情報伝達メディアによる時系列的な情報伝達の過程を再現した情報伝達モデルも導入している[3)]．

災害情報伝達モデルは，被災状況下において避難勧告・指示などの災害情報が地域住民に対して発令されてから，その情報が各種伝達メディア「防災行政無線，広報車，マスメディア（テレビ・ラジオ等）」を通じて住民に伝達されていく過程を表現するモデルである．**表-2.1.1** に示す伝達メディアをとりあげ，シミュレーションモデルに組み込んだ．これらの各種メディアによる情報伝達過程の様子や特性パラメータは図-2.1.9 に示す通りである．

図-2.1.1 伝達メディアと情報伝達特性パラメータ

伝達メディア	情報伝達特性パラメータ	対象
地震の揺れ	発信タイミング，取得率	全住民
マスメディア	放送タイミング，取得率	
防災行政無線（屋外拡声器）	発信タイミング，配置数，音声到達範囲，取得率	音声到達エリア内にいる住民
広報車	発車タイミング，台数，速度，音声到達範囲，取得率	

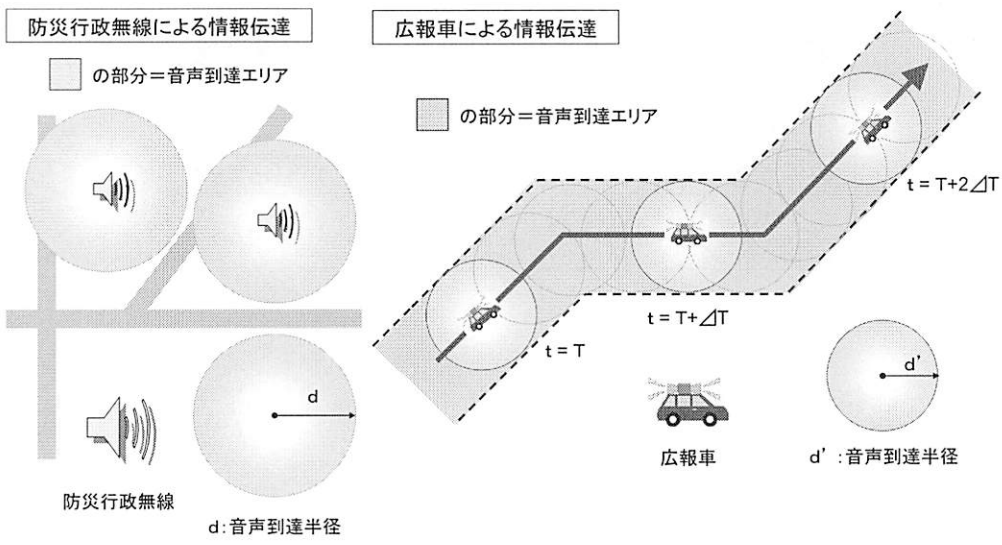


図-2.1.9 防災行政無線，広報車による情報伝達の様子

(2) 津波のモデル化

本研究では，東南海・南海地震において大規模津波災害が懸念される三重県尾鷲市を対象地域とする．解析では住民の集中する市街地沿岸部の区域を対象として，シミュレーションを行った．

尾鷲市は平成 18 年 11 月 1 日現在，人口 22,664 人，世帯数 10,313 世帯の都市である．住民の集中する市街地は熊野灘に面したリアス式海岸の湾奥に位置しているため，津波の常襲地域となっている．過去の東海・東南海・南海地震においても津波によって被害を被っており，1944 年の東南海地震では最大で 9m 以上の津波が来襲したことで尾鷲市において死者 30 人，行方不明者 26 人を出した．また，中央防災会議では今後発生する東南海・南海地震において，津波によって三重県全域で 400 人～1,000 人の死者が想定されている．

シミュレーションでは，越村による尾鷲市における津波氾濫シミュレーション[4]の解析結果（波高分布，流速分布）を使用した．より高分解能な津波データを避難解析に反映させるため，メッシュサイズ 5.6m，時間間隔 1.2 秒のデータを基に，それぞれ 1.0m，1.0 秒に補間したデータセットを作成した．津波の浸水深や流速の変化は，歩行速度の低下を招き避難効率を悪化させるため，本研究では，浸水深や流速の変化が歩行速度に影響を及ぼすような歩行速度減衰モデルを利用した（図-2.1.10）．表-2.1.2 に示す避難者属性別に歩行限界水深・流速の限界値を設定している．

表-2.1.2 各避難者の歩行限界水深／流速と最高速度

	限界水深	限界流速	最高速度
成人男性	0.7(m)	2.5(m/s)	1.5(m/s)
成人女性	0.5(m)	2.0(m/s)	1.3(m/s)
子供 高齢者	0.3(m)	1.5(m/s)	1.0(m/s)

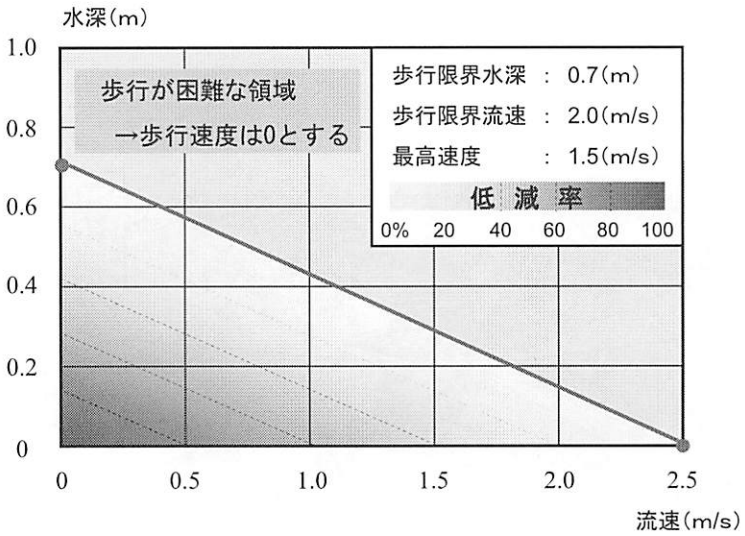
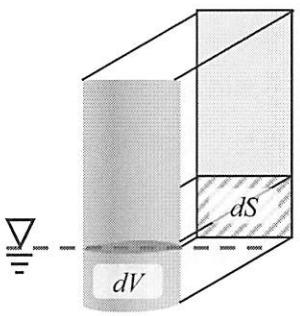


図-2.1.10 歩行速度減衰モデル(成人男性)

これまでの目黒らによる研究[3]においては，人的被害発生の基準を「避難者が存在する領域の水深が1.0mを越えた時点」としてきた．しかし本研究ではより詳細な検討を行うために，流体中の物体に作用する流体力と人体の歩行面に作用する摩擦力を比較することで，力学的に人的被害を評価した[5]．図-2.1.11に人体のモデルと算出に用いた式を示す．

$$f(mg-w) \le \alpha \int 0.5\rho C_D u^2 dS + \int \rho C_M \frac{\partial u}{\partial t} dV$$



f:歩行面における静止摩擦係数(=0.5)
m:考慮する人体の質量
(男性:64.5kg,女性53.1kg,高齢者51.4kg)
w:流水中の人体に作用する浮力
α:歩行者の体力，流れに対する感じ方を考慮した係数(=2.0)
ρ :水の密度(=1.0g/cm²)
C_D:抗力係数(=1.0)
C_M:付加質量係数(=2.0)
dS:人体モデルの流れに対する微小投影面積
dV:浸水した人体部分の体積要素

図-2.1.11 人体のモデルとモリソン式

この式によって得られる人体の歩行面に作用する摩擦力と流体力に加えて，浸水深の時刻暦を主要な交差点においてグラフ化したものを図-2.1.12に示す．このグラフにより各地点において，いつどれだけ浸水するかが明確になると共に，人的被害が発生すると予測される時間も表示することができる．これを用いて各交差点をいつまでに通らなければいけないか，個々の住民がいつ

までに避難を開始しなければいけないかなど，各個人に与えられる猶予時間を含めたミクロな視点から避難方法を議論することができる．

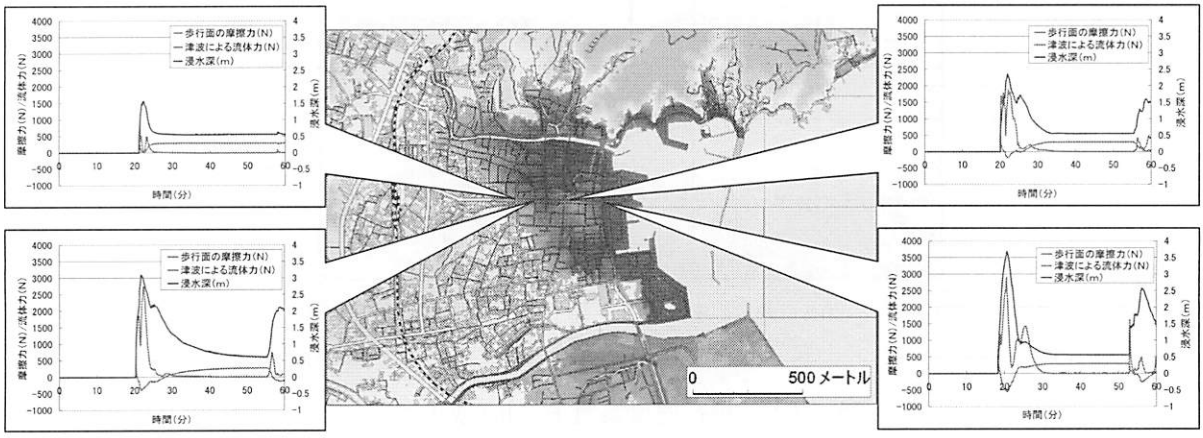


図-2.1.12 主要な交差点における浸水深と人体に作用する力

(3) 防潮堤の効果の検証

尾鷲市の沿岸部には高さ約 2.0m の防潮堤が県道に沿って南北に約 570m 設置されている．この防潮堤は 1959 年の伊勢湾台風の際の被害を基準にして建設されたものであるが，適切に使用することで津波発生時にも効果を発揮することが予想される．そこで本研究では，この防潮堤が機能する場合としない場合での人的被害発生の比較を行なった．

越村による津波氾濫シミュレーション[4]では防潮堤を考慮しない場合の浸水深を算出している．この結果を用いて，防潮堤を越流した際には防潮堤の後ろ側にある地域の浸水深から 2.0m 分差し引き，単純化して防潮堤が機能する場合の浸水深を求めた．実際の防潮堤の写真とモデル化の様子を図-2.1.13 に示す．

図-2.1.14(1) は防潮堤が機能する場合の各地点における最大浸水深を示したものである．上で説明したような簡単な仮定に基づいて解析した結果であるが，図-2.1.14(2)に示す中央防災会議による同様の結果とよく合っている．図-2.1.14(1)の津波データを用いたシミュレーションによる死者数の変化を 図-2.1.15 に示す．これによると防潮堤が機能した場合，死者数を 513 人から 78 人にまで減らすことが可能という結果が得られた．なおこのシミュレーションは，行政などからの情報伝達に遅れはなく，情報取得率 30%，避難準備時間 15 分という条件のもとで行ったものである．

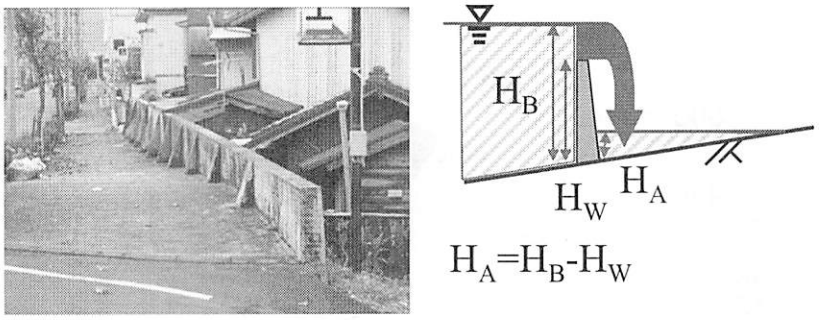
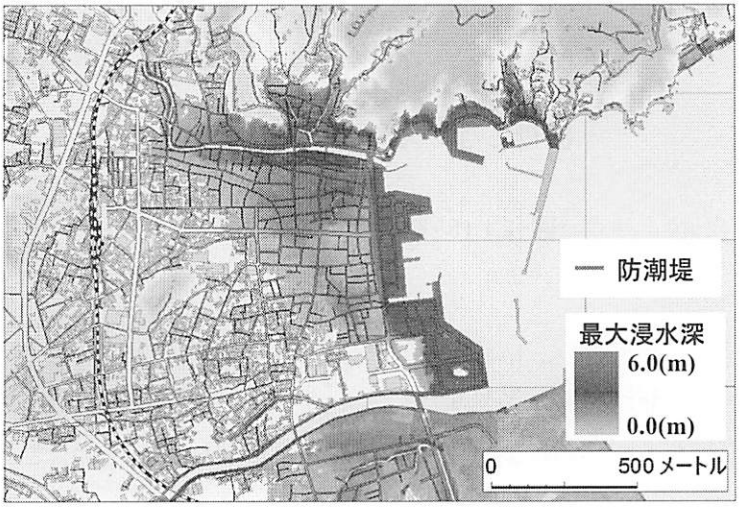
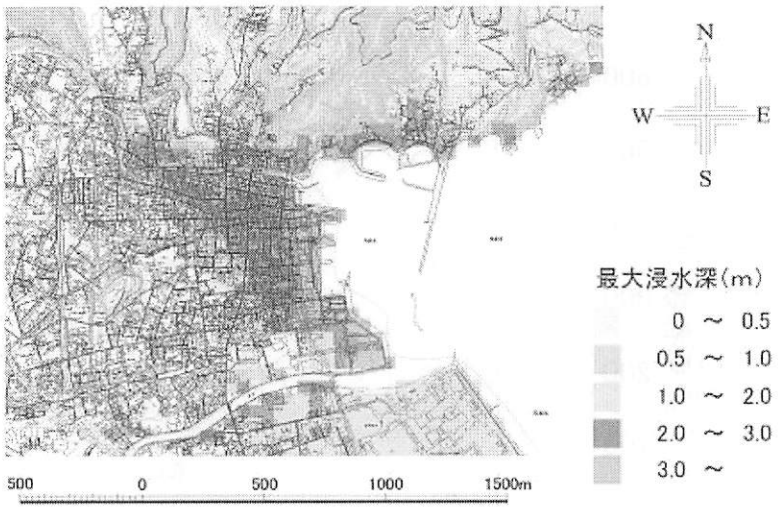


図-2.1.13 防潮堤の写真とモデル化



(1) 本解析による津波最大浸水深



(2) 中央防災会議による防波堤を考慮した場合の津波最大浸水深

図-2.1.14 防潮堤が機能する場合の最大浸水深

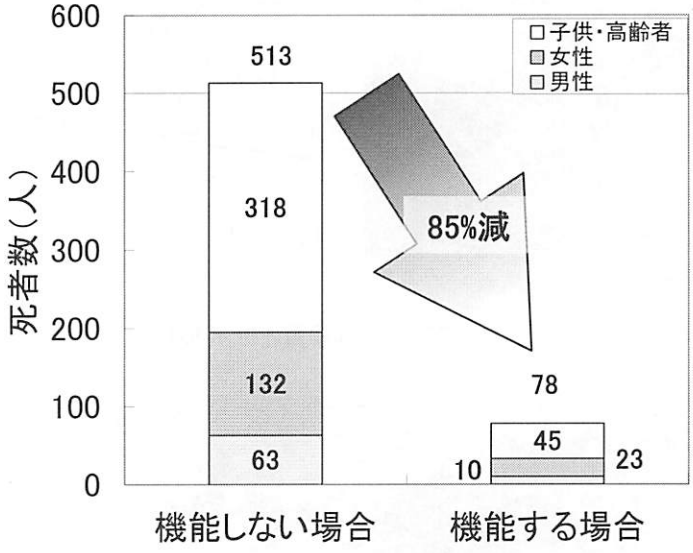


図-2.1.15 防潮堤の効果の検証

(4)避難経路の検討

次に，得られたシミュレーション結果を用いて，より効果的な避難経路の検討を試みた．具体的には，海岸線に平行な方向への移動よりも垂直方向の移動を優先させることで図-2.1.16 に示すように人的被害数を 513 人から 287 人に減らすことができた．実際の場合においても，事前にシミュレーション結果を用いて地域ごとに避難経路を検討しておくことで，被害を軽減できると考えられる．

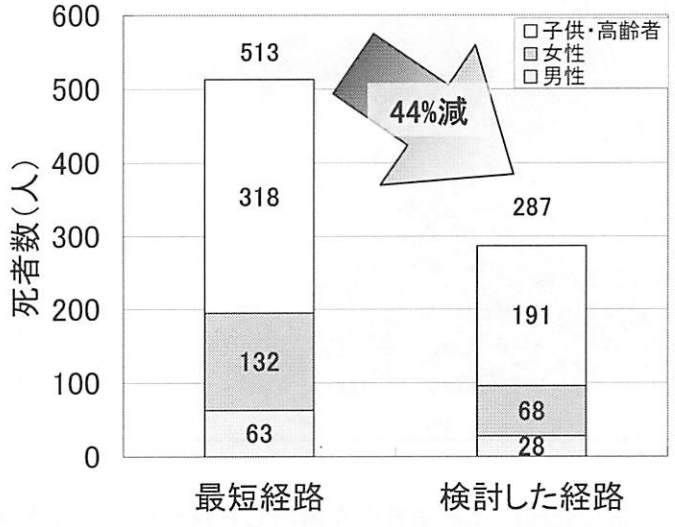


図-2.1.16 避難経路の検討

(5)　避難困難度マッピングシステムの構築

本研究では来襲する津波の浸水深とそれによって人体に作用する力の算出を交差点ごとに行った．またこの結果を住民に開示するための閲覧システムもあわせて作成した．システムの全体像は図-2.1.17 のようになっている．

本システムでは，津波のパターン・住んでいる地域を選択することで，その地点での浸水深・人体に作用する力を表示することができる．それに加えて，避難場所までの距離や標高など，選んだポイントについての避難に関する基本的な情報を表示するものとなっている．

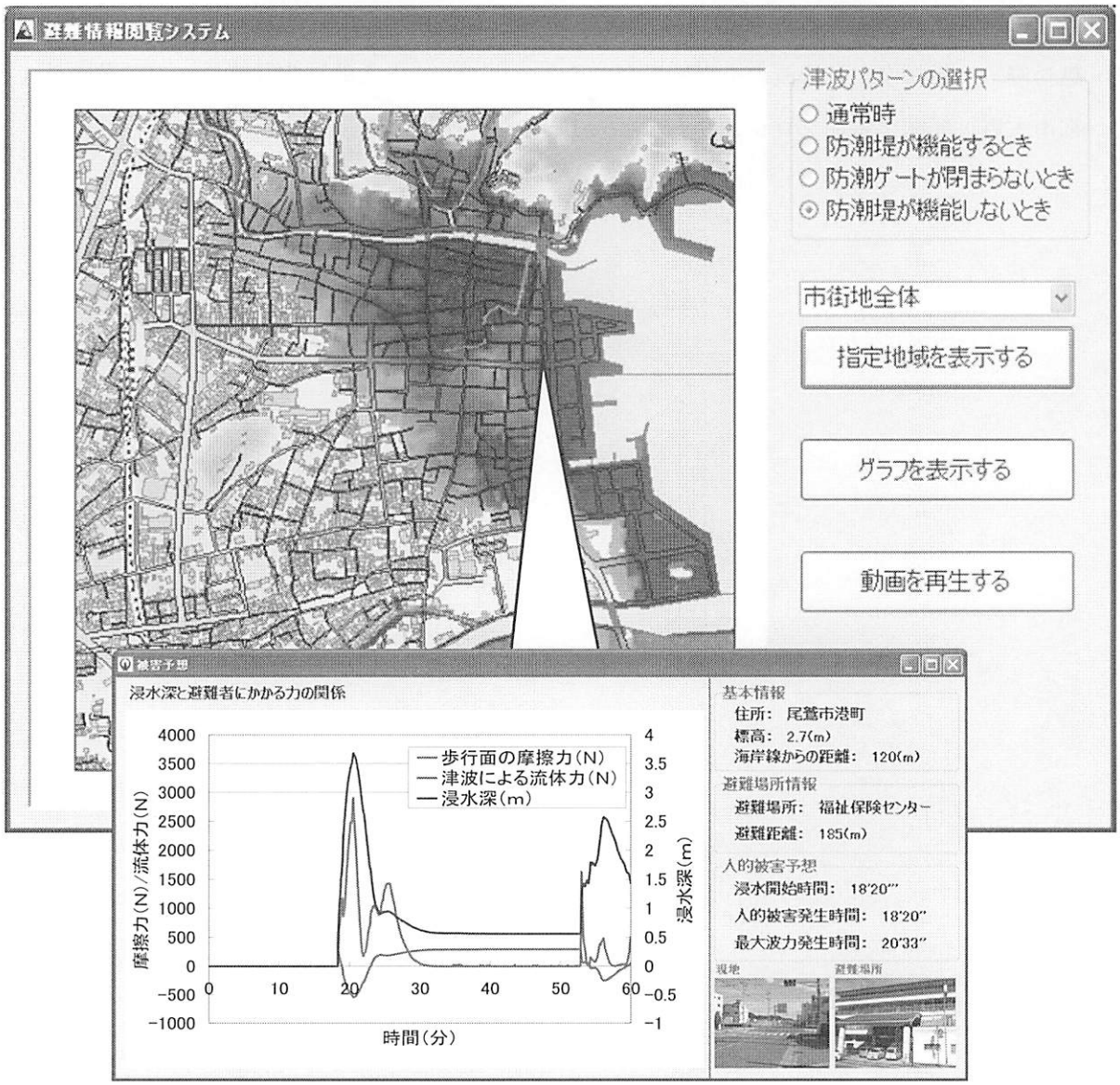


図-2.1.17　避難困難度マッピングシステム

参考文献

1) 原田雅也・目黒公郎：ポテンシャルモデルを用いた最適避難誘導のための基礎的研究，東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻修士論文，1998.

2) Fruin. J：歩行者の空間, 鹿島出版会，1974. 12.

3) 織田浩平・目黒公郎:津波災害時の避難行動シミュレーションモデルの開発，中央大学大学院理工学研究科土木工学専攻修士論文，2005.

4) 越村俊一：津波の市街地氾濫シミュレーションと人的被害評価，文部科学省「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」平成 16 年度成果報告書

5) 越村俊一：越村俊一：津波の市街地氾濫シミュレーションと人的被害評価，文部科学省「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」平成 14 年度成果報告書

2.2 リモートセンシングデータと数値気候モデルとの結合によるヒートアイランドシミュレーション

2.2.1 背景と目的

近年、東京を始めとする都心部において、その気温が郊外に比べて高くなる、ヒートアイランド現象の問題が顕在化してきている。その要因は、都市の土地被覆変化や人口排熱の増大、さらには、高層ビルによる都市被覆の凹凸など都市の 3 次元構造の変化などが考えられる。ヒートアイランド現象の顕在化が進むにつれ、ヒートアイランド現象を対象とした研究が数多く見られるようになっている。それらを大別すると、観測による研究と数値シミュレーションモデルによる研究との 2 つに分けられる。前者は、主に現象の実態を捉えようとするものであり、後者は、主に影響分析や対策評価を行うために広く用いられている。

東京を中心とした領域で都市構造がヒートアイランドに与える影響を評価する場合、メソスケールのシミュレーションモデルによる解析がヒートアイランドの影響を評価するサイズとして適当である。近年、これらのモデルの予測精度を向上させるため、詳細な都市の 3 次元構造を反映させることが可能な都市キャノピーモデルを組み込む試みがなされている。一方、広域の土地被覆状態を均一な精度で継続的に観測可能なリモートセンシングデータを利用した研究も進められてきている。リモートセンシングデータを用いたヒートアイランド現象を解析する研究は、その多くが土地被覆との関係に関するもの、シミュレーションモデルのインプットデータとして緑被率を用いるもの、地表面温度を算出するものなどに分類でき、いずれも、シミュレーションの精度を向上させるために広範囲の建物や樹木の 3 次元構造分布を表現するデータが必要であると指摘している。

最近、リモートセンシング分野において、レーザー測量による地物の高さデータ、つまり、都市の 3 次元構造情報が詳細に観測できるようになってきている。そのため、リモートセンシングにより取得された都市の 3 次元構造情報を既存のシミュレーションモデルの入力データとして結合することにより、シミュレーションモデルの予測精度が向上することが期待される。

そこで、本研究では、リモートセンシングにより東京 23 区における建物と樹木の 3 次元構造を表現するデータを整備し、シミュレーションモデルの入力データとして用いることで、観測とシミュレーションモデルとを融合したモ手法の高精度化を図り、より現実に近いシミュレーションモデルを開発することを目的とする。具体的には、都市キャノピー内に存在する建物群、樹木群と土地利用分類データの緑被に関する入力データにリモートセンシングされた観測値を利用することにより、既存のシミュレーションモデルの予測精度を向上させる。特に、建物高さの平均値、建物高さに分布を与えるための建物高さ標準偏差値、樹木高さの平均値、樹木被覆率に注目し、モデルの高度化を試みる。

2.2.2 数値気候シミュレーションモデル

本研究では、東京大学生産技術研究所大岡・加藤研究室が開発している数値気候モデルを用いて解析を行う。本モデルは、乱流モデルにMellor-Yamadaレベル2.5を利用したメソスケール解析モデルの地表面境界条件に都市キャノピーモデルを組み込んだモデルである。都市キャノピー内の建物群と植生群の影響として9つが想定されている。図-2.2.1に建物群と植生群が及ぼす影響について示す。さらに、都市キャノピーメソスケールモデルへの都市キャノピーモデルの組み込みについて図-2.2.2に示す。モデルの詳細については既存研究[1)~5)]を参照されたい。

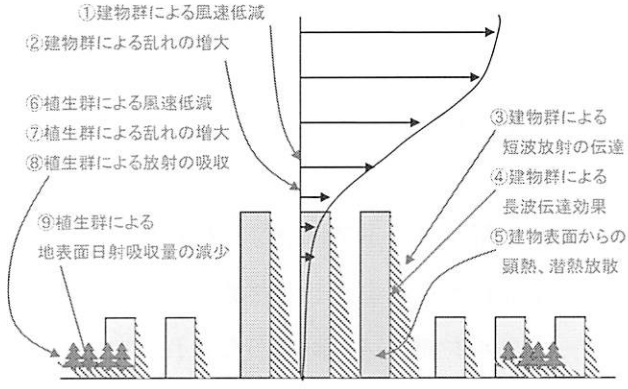


図-2.2.1 建物群と植生群が及ぼす影響

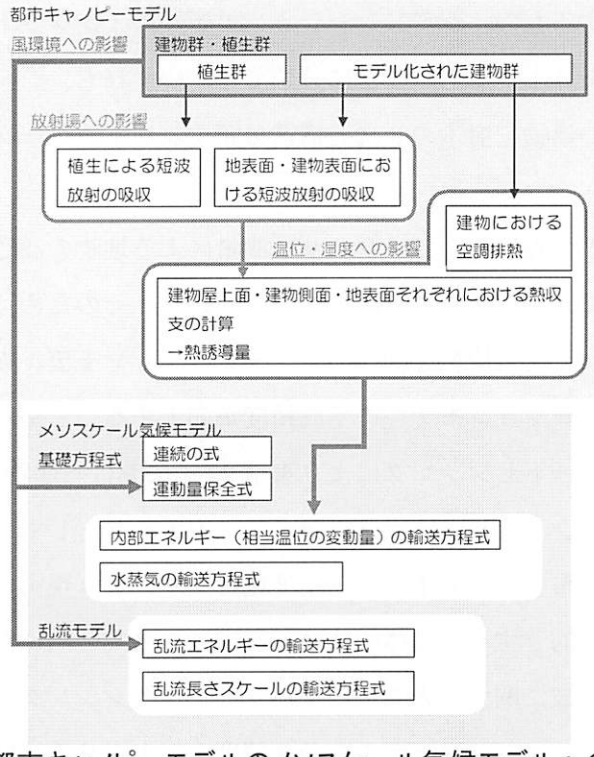


図-2.2.2 都市キャノピーモデルのメソスケール気候モデルへの組み込み

2.2.3 リモートセンシングデータによるデータセットの作成

(1)使用するリモートセンシングデータ

本研究では、リモートセンシングによって得られた、高さ情報と地表面情報を用いての建物と樹木の3次元構造分布を表すデータセットを作成する。高さ情報として、DEM（数値標高モデル：Digital Elevation Model）データ、DSM（数値表層モデル：Digital Surface Model）データ、地表面情報としてASTER 画像を用いる。

1) DEMデータ、DSMデータ

地物の高さ情報を得るために、10mにメッシュ化されたDSMとDEMを用いた。これらのデータは、約2m間隔で計測された航空機搭載レーザースキャナデータをフィルタリング処理したものを、更に10mにメッシュ平均化したものである。レーザースキャナは、建物や樹木等地表にある物体の地表面の形状を高密度の点群の3次元位置座標として直接に計測できるセンサである。

2) ASTER画像

ASTER画像は地球観測衛星TERRAに搭載されているASTERセンサによって取得されるマルチスペクトル画像である。0.52μmから11.65μmまでの波長帯を14バンドでカバーしており、最大空間分解能は15mである。本研究で用いる画像を航空機搭載レーザースキャナによる高さデータの取得時期に近い夏期という条件で絞ったところ、2001年9月24日の画像であった。しかしながら、この画像では東京23区全域をカバーしきれていないため2001年9月21日の画像と2004年9月16日の画像を用いて補完する。

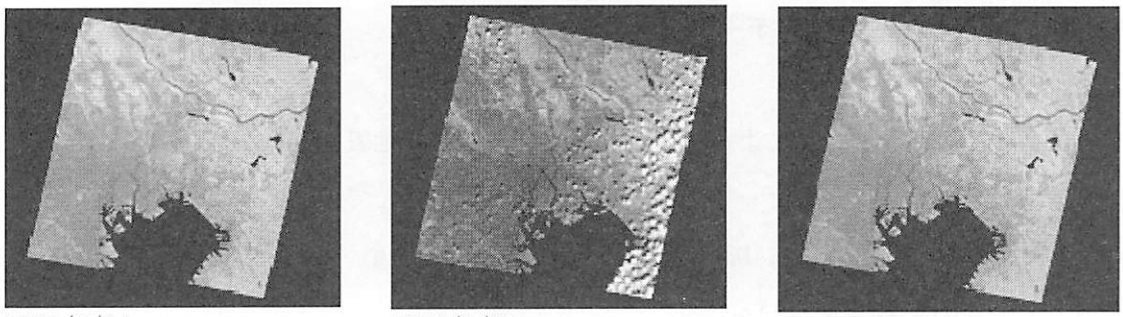
画像の前処理過程を含め使用するバンドを表1に示す。表2にDSMおよびDEMデータに関する概要を示す。図-2.2.3に本研究で利用したASTER画像とその撮影日時を示す。

表-2.2.1 ASTER画像使用バンド情報

波長域	バンド名	観測波長帯	空間分解能
可視・近赤外域	バンド1	0.52～0.60μm	15m
	バンド2	0.63～0.69μm	
	バンド3	0.76～0.86μm	
熱赤外域	バンド13	10.25～10.95μm	90m

表-2.2.2 DSM・DEMデータの概要

データ取得時期	平成13年～平成14年
データ領域	東京23区
空間分解能	10m



2001/9/24　　2001/9/21　　2004/9/16

図-2.2.3 使用したASTERの擬似カラー画像(R:バンド2、G:バンド3、B:バンド1)

(2)データ処理

図-2.2.4に建物、樹木の3次元構造抽出の手法を示す。

1) データの前処理

各10mメッシュにおけるDSMとDEMから地物高さを算出し、地物高さ分布を作成する。本研究では、建物や樹木を対象とするため、DSMからDEMを引いた地物の高さが2m以上のメッシュのみ当該地物の高さとし、それ以外は0mの地面とする。次に、ASTER画像の座標系と測地系を高さデータに合わせて幾何補正し、更に、位置誤差を目視で確認して高さデータと重なるように補正する。補正された3日分の画像を処理し合成したのち、その画像からNDVI(正規化植生指標)算出する。

NDVIは、植生中に含まれる葉緑素の分光反射特性が近赤外域で急激に変化する特性を用いて、次式(1)により算出される。

$$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)} \qquad (1)$$

NIR:近赤外域の観測地(ASTER画像のバンド3)

R:赤色域の観測地(ASTER画像のバンド2)

NDIVIは-1≦NDVI≦1の範囲に分布し、植生が存在するところでは高い値を示す。よってこの指標を用いることにより、ASTER画像から植生領域を抽出することができる。

2) 地物高さの分離

地物の高さをNDVIによって建物高さと樹木高さに分離する。一般的にはNDVIに閾値を設定して植生域か否かを分離するが、ここでは建物の屋上緑化による分離ミスを少なくするために、図-2.2.4のような処理を行った。

3)　緑被分布の作成

NDVI の閾値 0.25 により緑被分布を作成する。次に、樹木に関して、7m を閾値として低木林と高木林に分ける。これにより、数値解析に用いる土地利用のデータと合わせて用いることができる。

4)　3 次メッシュ対応メッシュ処理

数値シミュレーションのインプットデータとして用いるために、解析で用いる 3 次メッシュごとに、抽出された情報を一般化する必要がある。そこで、建物高さから、メッシュ毎の建物高さ平均値と標準偏差、樹木高さから樹木平均、緑被分布から、メッシュ毎の緑被率、低木林被率、高木林被率を算出する。

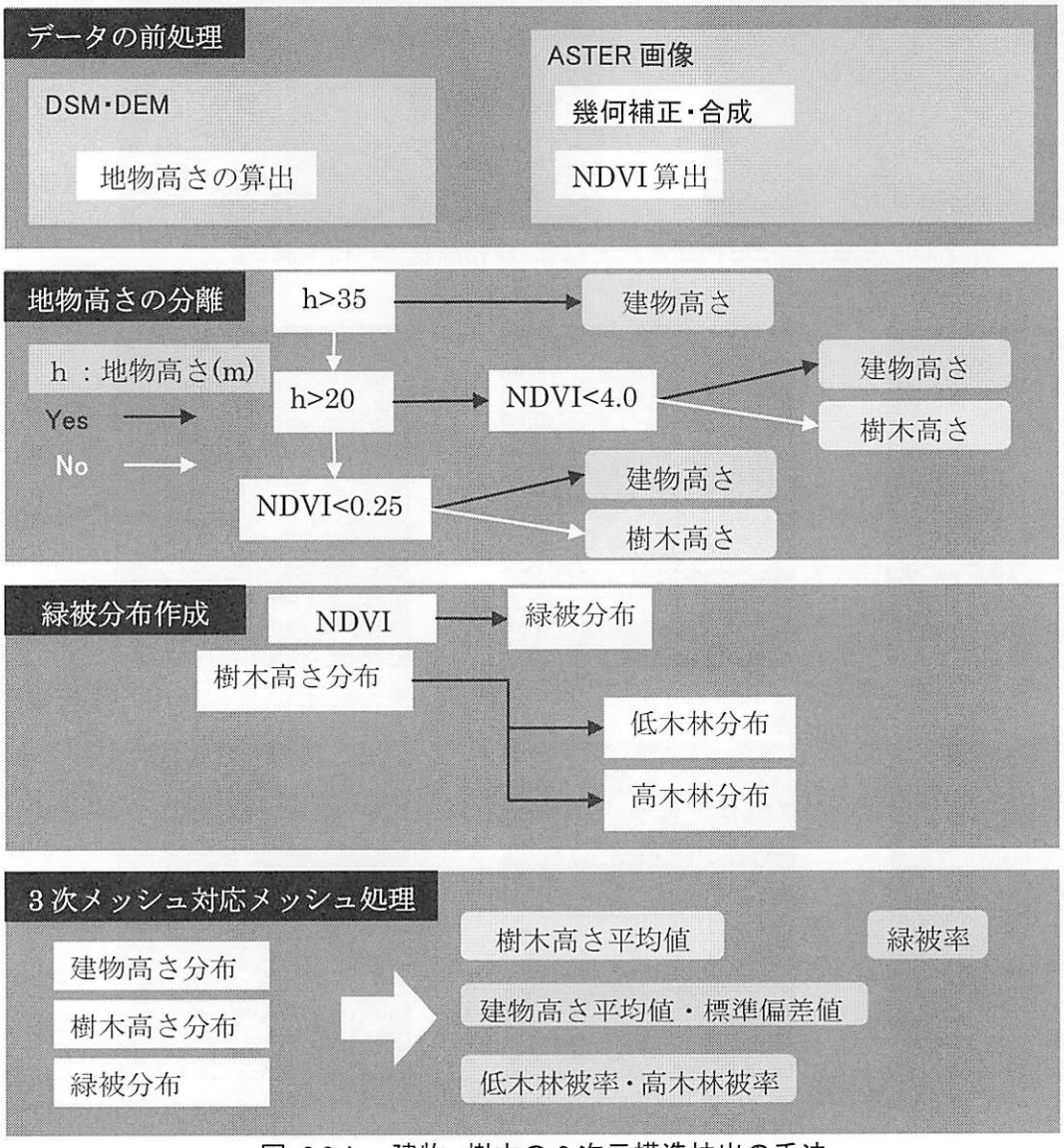


図-2.2.4　建物、樹木の 3 次元構造抽出の手法

(3)作成されたデータセット

(2)の手法により作成されたデータセットはメッシュ毎に、①建物高さ平均値、②建物高さ標準偏差値、③樹木高さ平均値、④低木林被覆率、⑤高木林被覆率、⑥緑被率である。それぞれの空間分布を図-2.2.5および図-2.2.6に示す。

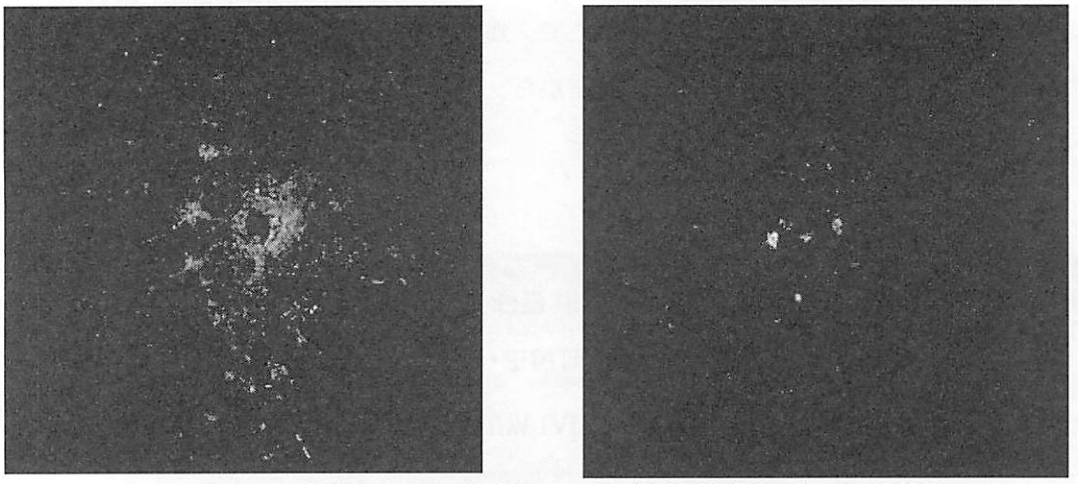
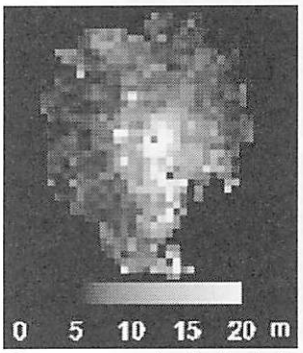
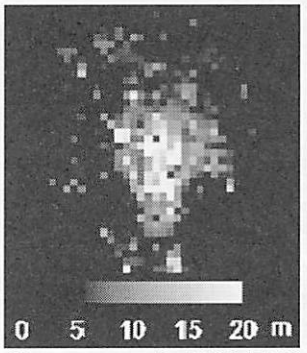


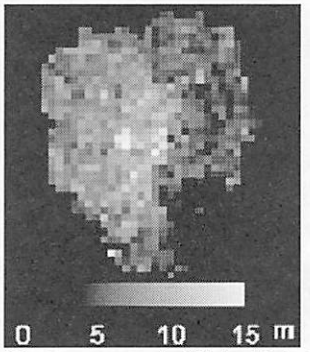
図-2.2.5 分離された地物高さデータ(左:建物高さ、右:樹木高さ)



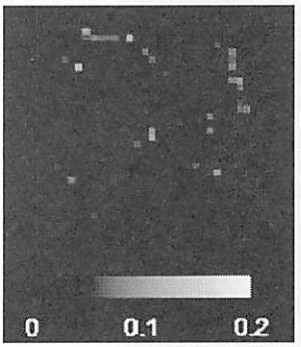
①メッシュ毎建物高さ平均値分布



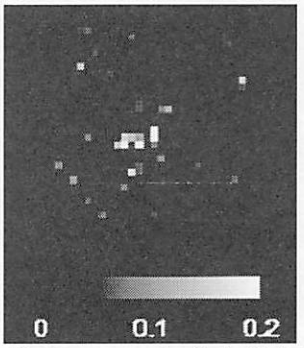
②メッシュ毎標準偏差値分布



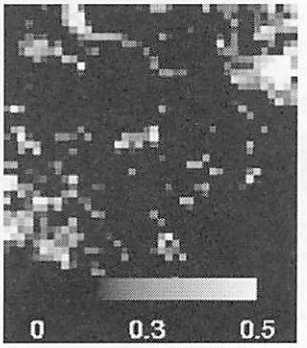
③メッシュ毎樹木高さ平均値分布



④メッシュ毎低木被覆率分布



⑤メッシュ毎高木林被覆率分布



⑥メッシュ毎緑被率分布

図-2.2.6 作成したデータセット

2.2.4 RS データと数値気候モデルとの結合によるヒートアイランドシミュレーション

(1)解析条件

解析領域は図-2.2.7に示した領域で、メッシュ分割については表3に示す。典型的な夏期晴天日を想定し、7月23日6:00～7月24日24:00の解析を行い、24日を解析対象とした。解析対象日の初期および気象条件を表4に示す。地表面パラメータであるアルベド、粗度長、蒸発効率を土地利用から設定している。東京23区内は、平成13年度東京都GISデータから算出、その他のエリアについては平成8年度国土数値情報より算出している。土地利用分類は、田、畑、低木林、高木林、公園、荒地、建物用地、幹線交通用地、その他の用地、内水地となっている。東京23区内に関しては、土地利用の内、低木林・高木林の比率に関して、2.3.3.2にて作成したデータセットを用いて行う。

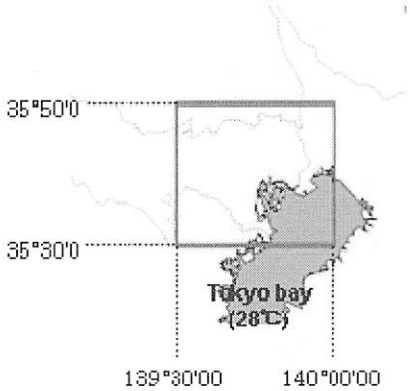


図-2.2.7 解析対象領域

表-2.2.3 解析領域、メッシュ分割数、メッシュ幅

解析領域 x×y×z[km]	メッシュ分割	水平方向メッシュ幅[km]
40×40×9.6	40×40×96	1

表-2.2.4 初期条件、気象条件

解析対象日	7/23
初期温位（地表面付近）	25.6℃
水蒸気圧	20hPa
温位勾配	5.0 (K/km)
上空風速（風向）	2.0m/s (S)
地表面付近の相対湿度	70%
雲量（10分比）	3.0
下降水量	3.5(上空800hPaまで) 1.3(全層)

(2)シミュレーションを行うケーススタディ

本研究でシミュレーションするケーススタディを表5に示す。本研究では、6つのケースを設定した。データセット①~⑥は2.3.3に対応する。

表-2.2.5 ケーススタディ

ケース	建物高さ	樹木高さ	土地利用
Case1	平均階高×3m	一律 10m	東京都 GIS データ、国土数値情報
Case2	(DSM-DEM) の平均値	一律 10m	Case1 と同様
Case3	データセット①	データセット③	Case1 と同様
Case4	データセット①と②により分布を持たせる	データセット③	Case1 と同様
Case5	データセット①	データセット③	Case1 に対し、データセット④⑤⑥を用いて改善
Case6	データセット①と②により分布を持たせる	データセット③	Case1 に対し、データセット④⑤⑥を用いて改善

2.2.5 結果および考察

図-2.2.8 にすべてのケースにおける大手町エリアと練馬エリアの地上 1m における 0 時から 24 時までの気温変動を示す。大手町エリア、練馬エリアのどちらにおいても建物に分布を持たせたケース (Case4 と Case6) は他のケースに比べて日中の気温上昇幅が大きくなった。さらに、上昇幅の変化を両エリアで比較した場合、練馬の方が大きくなっている。また、練馬エリアにおける樹木被覆と緑被のデータを更新したケース (Case5 と Case6) では、それぞれ Case3 と Case4 より日中の気温が下がっている。

14 時 1m における気温の平面分布 (図-2.2.9) をそれぞれのケースで比較すると、Case4 と Case6 において既存の研究と同じ高温域に気温上昇が見られ、さらに、高温域の領域変化がおこっていることが判別できる。

ケーススタディにおける温度変化の要因を解析するため、ケース間の温度差分量と入力変数の差分量との関係を比較した。気温の差分量を図-2.2.10 に、入力データの差分量を図-2.2.11 に示す。Case1 と Case2 との差分において、中心部の建物高さ平均が高くなっているが、気温の変化は北西部に現れている。Case2 と Case3 の差分において、入力変数値に大きな変化は見られない。しかし、気温差分図において、中心部の皇居があるエリアでは樹木高さと建物高さとを分離して入力しているために、建物高さ平均が下がり、気温が下がっていると解釈できる。Case3 と Case4 の差分においては、建物のバラツキを反映させた影響が出ているものと考えられるが、中心部でバラツキが大きいにも関わらず建物のバラツキが中心部の西側と北西側に見られる。これは、ヒートアイランド現象が海風による影響を受けていることを考えると、中心部が建物の凹凸による熱交換で暖められた空気が海風によって運ばれたと解釈できる。Case3 と Case5 の差分においては、中心から西にかけては樹木被覆率の増加による気温低下が見られる。Case4 と Case6 および Case5 と Case6 の差分は、それぞれ Case3 と Case5 との差分、Case3 と Case6 との差分と

同じであった。以上より、建物の標準偏差値を用いて建物にバラツキを持たせたことによる影響が、メソスケールにおけるヒートアイランドのシミュレーションを行ううえで、もっとも大きいことが示唆された。そこで、Case3 と Case4 における気温平面分布の時間変動(図-2.2.12、図-2.2.13)を比較すると、ヒートアイランド現象の形成の過程と高温域の形状が異なっていることがわかる。

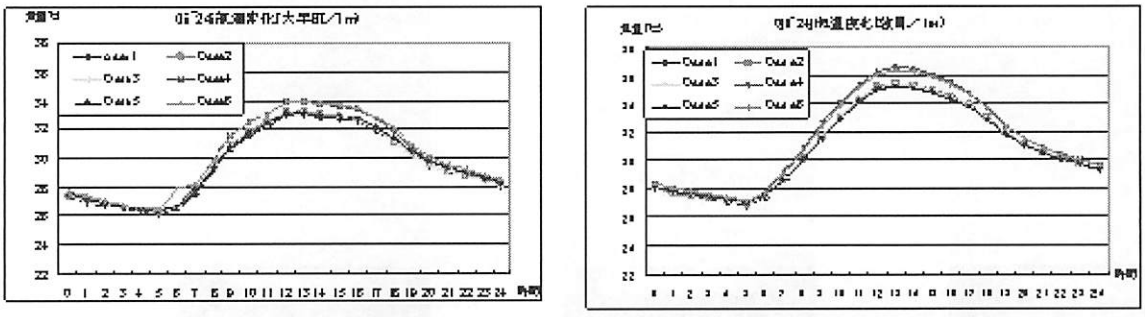


図-2.2.8 地上 1m における 0 時から 24 時の気温変動(左:大手町、右:練馬)

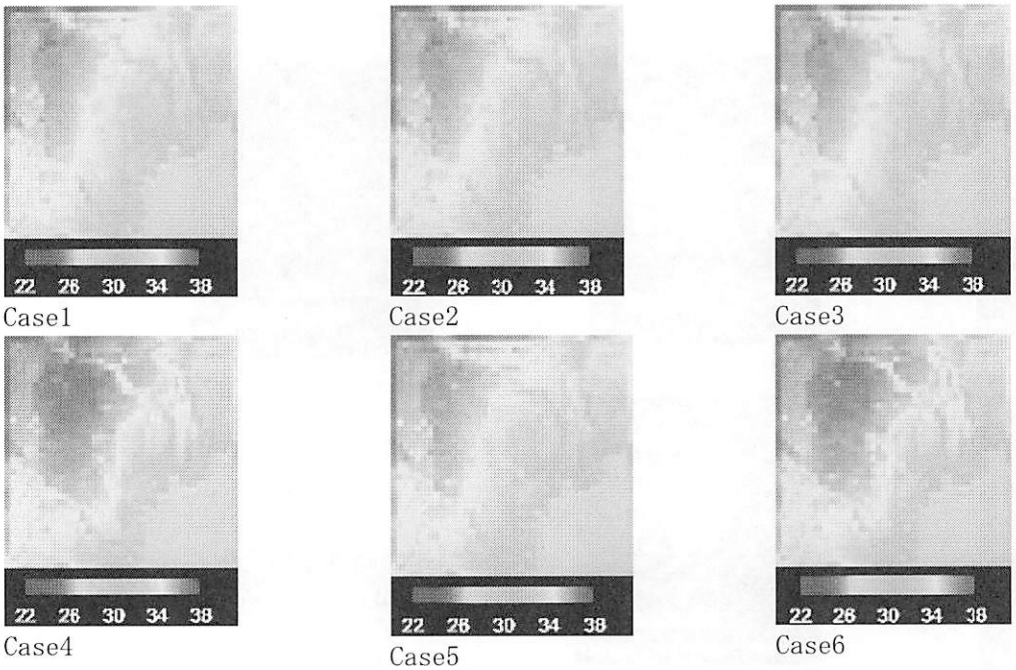
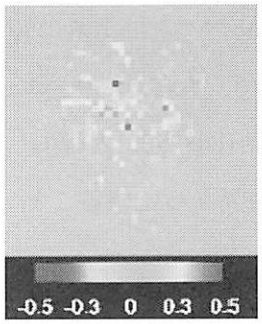
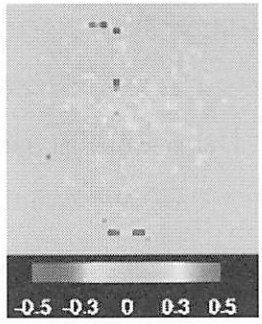


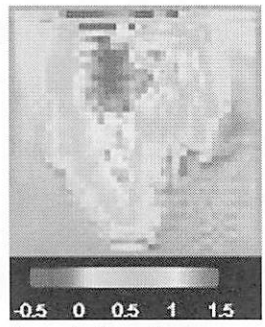
図-2.2.9 各ケース、14 時地上 1m における気温平面分布



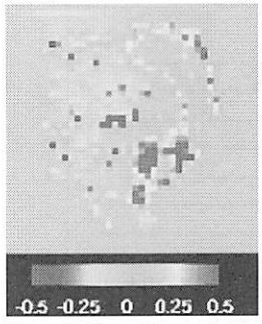
Case2-Case1



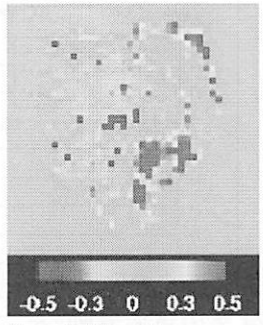
Case3-Case2



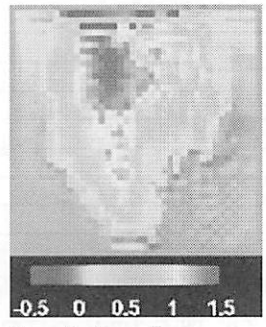
Case4-Case3



Case5-Case3

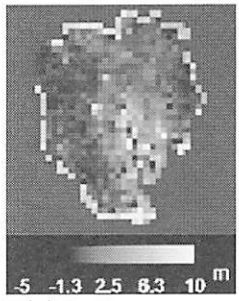


Case6-Case4

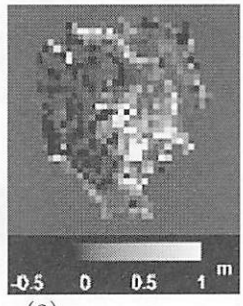


Case6-Case5

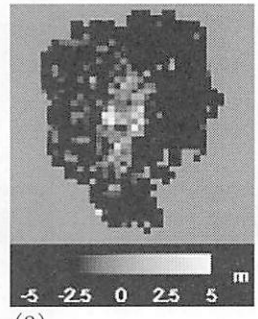
図-2.2.10 14 時地上 1m におけるケース間気温変化量



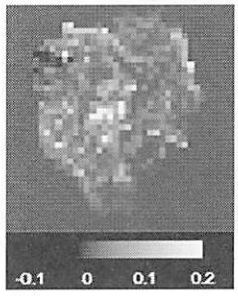
(1)



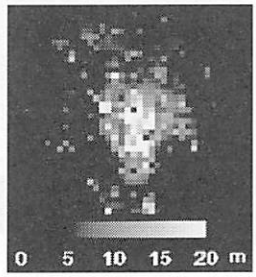
(2)



(3)



(4)



(5)

(1) Case2-Case1
建物高さ平均変化
(2) Casse3-Casse2
建物高さ平均変化
(3) Casse3-Casse2
樹木高さ平均変化
(4) Casse3-Casse2
総樹木被率変化
(5) 建物高さ標準偏差値

図-2.2.11 ケース間の入力データの変化量

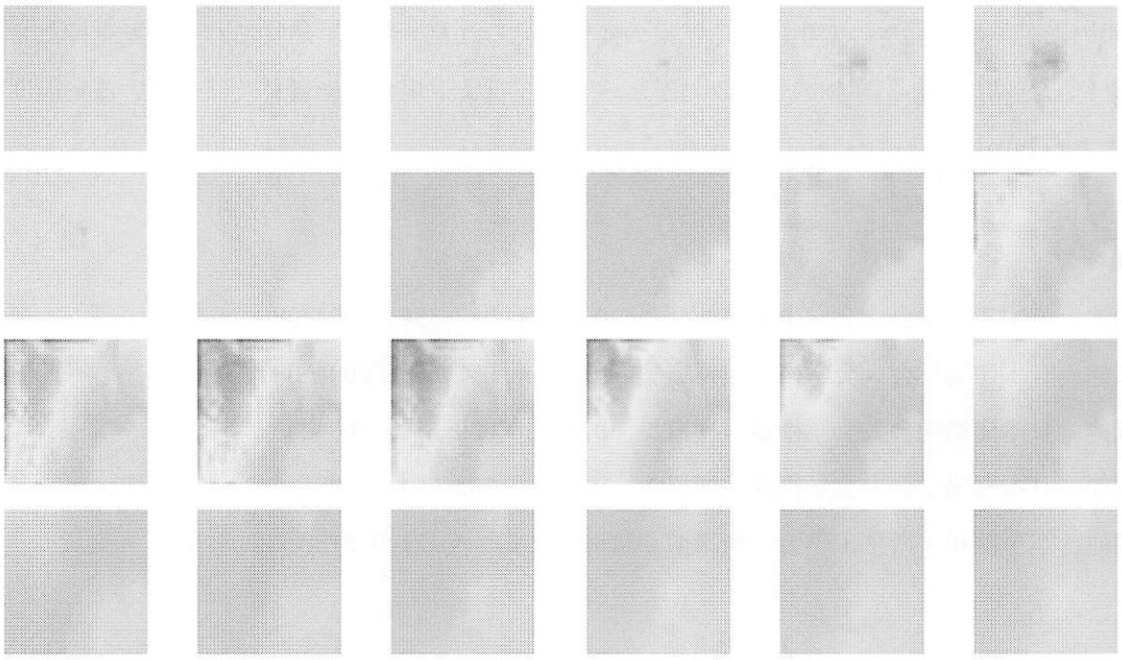


図-2.2.12 Case3 における 0 時から 23 時の気温平面分布変動(地上 1m);左上から 0 時

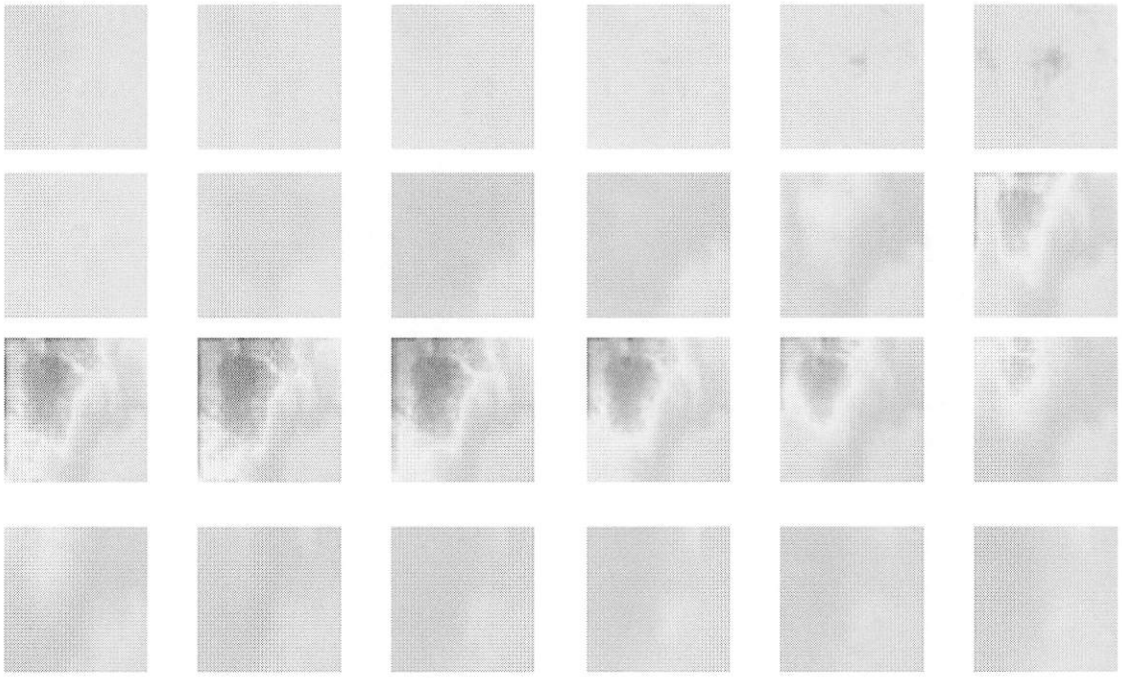


図-2.2.13 Case4 における 0 時から 23 時の気温平面分布変動(地上 1m);左上から 0 時

2.2.6 結論

本研究においてリモートセンシングデータを用いて、東京 23 区内の建物、樹木に関する 3 次元構造を表現するデータセットを作成し、数値解析シミュレーションモデルのインプットデータとして用いることにより、より現実に即したインプットデータによる解析を行った。その結果、

樹木被覆の影響と建物高さの変化による結果の変化が見られた。特に、建物にバラツキを持たせて解析を行った結果から、建物のバラツキがヒートアイランド現象に影響を及ぼしている可能性があることがわかった。

参考文献

1) 原山他、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-1, pp. 655-656、2004. 08

2) 原田他、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-1, pp. 657-658、2004. 08

3) 大岡他、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-1, pp. 659-660、2004. 08

4) 川本他、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-1, pp. 753-754、2005. 09

5) 大岡他、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp. 2149-2152、2005. 08

2.3 都市の火災・大気汚染シミュレーション

2.3.1 都市の火災シミュレーション

大都市で大地震が発生すると、同時多発火災が発生することが予測される。木造住宅密集市街地は全国的にも未だに数多く存在する。このような木造密集市街地では大きな火災に発展すると考えられ、街区内部の地震火災に対する防災性能の脆弱さが大きな脅威となっている。都市火災において、建物間の延焼を引き起こす要因は、図-2.3.1 に示すように接炎、放射熱、熱気流、火の粉などが挙げられる。この市街地の延焼拡大を定量的に評価するための手法の開発が必要である。延焼拡大予測のためのシミュレーション手法は各種の提案がある。最も古典的なものとして、浜田の延焼速度式[1]および堀内の式[2]などがあるが、これらは火災伝搬過程を過去の被災記録からの統計解析に基づいた単純な延焼モデルによる予測するものである。近年、急速なコンピュータの発達により、個々の建物属性を与えて、隣接する建物が着火するまでの時間を求めて延焼拡大を予測するシミュレーションも可能になっている。ここで、近年開発された区画火災の物理的メカニズムに基づいた延焼モデル[3,4]と Computational Fluid Dynamics(CFD、数値流体力学)を用いた市街地火災延焼予測[5,6,7]を例として、都市火災数値シミュレーションの動向を紹介する。

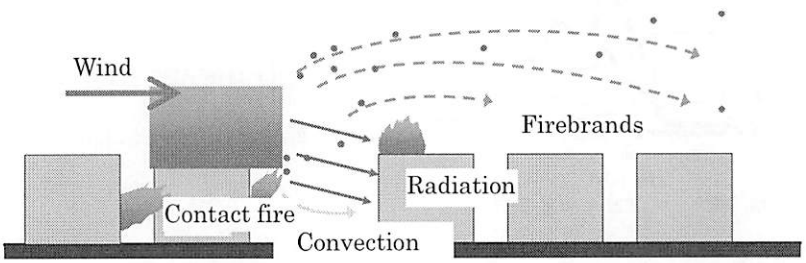


図-2.3.1 市街地火災延焼プロセス

(1) 都市火災の物理的モデルによる火災延焼予測[3,4]

都市火災のモデル化

経験則などに基づいた予測は、モデルの適応範囲には限界がある。そこで、樋本ら[3,4]が都市火災の延焼性状を火災の物理的メカニズムに則して定式化することで、より一般性のある延焼モデルを開発した。都市火災は多くの建物火災の集合に他ならないから、他の火災からの熱的影響を受ける個々の建物の燃焼性状予測が、そのまま都市全体の延焼性状予測となる。こうした考えに基づき、建物内の各室(区画)空間を検査体積とみなし、任意の検査体積について出火から、拡大、火盛り期を経て終息するまでの一連の火災性状のモデル化を行った。

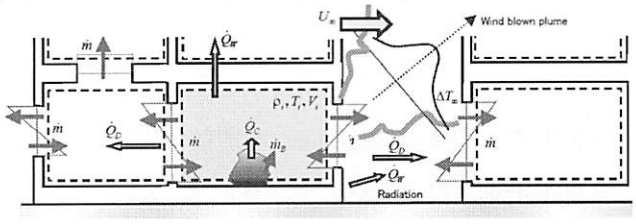


図-2.3.2　延焼モデルの概念

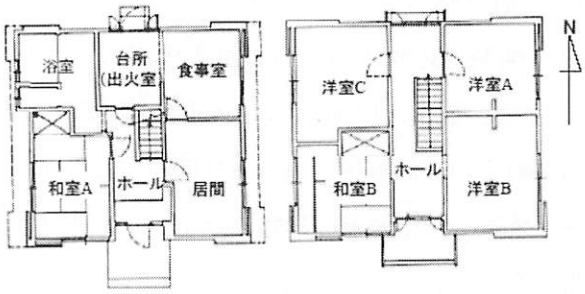


図-2.3.3　実験建物の平面図(左1階、右2階)

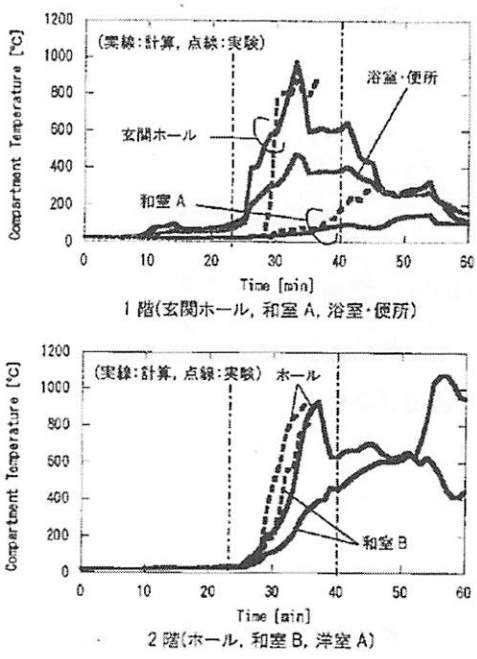


図-2.3.4 温度の比較(実線:計算、点線:実験)

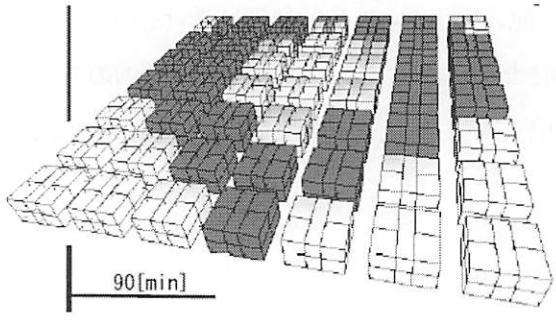


図-2.3.5 市街地での延焼シミュレーション

図-2.3.2 に示したように火災室での発熱は熱輻射と熱気流の形で他の建物へと伝達され、延焼を引き起こす。したがって本モデルは、(a)個々の建物火災を記述するモデルと、(b)建物間の熱伝達を記述する外部熱環境モデルの 2 つのサブモデルから構成される。建物火災について、任意の検査体積空間(区画)i に充満する気体に関して、質量とエネルギーの保存式、化学種である酸素と可燃ガスの輸送方程式、そして状態方程式を立てモデル化した。区画内の収納可燃物の燃焼速度に関しては、可燃物は(I)着火までの温度上昇期、(II)有炎燃焼期、(III)無炎燃焼期の過程を経て燃焼を進行させると想定し、モデル化を行った。特に燃え抜けによる新たな開口の形成について、燃え抜けは部材温度が燃え抜け温度に達した時点で始まり、その後は部材への単位体積辺りの入射熱量に比例して起こるものとし、部材の欠損率をモデルした。また、建物間の火災延焼モデルとして、(a)輻射による熱伝達、(b)熱気流による熱伝達のモデル化を行った。

モデル化の検証と仮想的な市街地での延焼シミュレーション

上述で構築したモデルで計算した火災温度を建築研究所で行われた実大火災実験結果と比較した。図-2.3.3 は実験で使用された 2 階建ての鉄鋼系組立住宅である。図-2.3.4 は区画温度の比較を行ったもので、点線が実験結果、実線が計算結果を示している。実験値と計算値が全般的に一致した。さらに、上述の 2 階建ての建物が東西方向に 7 棟、南北方向に 7 棟、計 49 棟、格子状に並んだ仮想的な市街地での延焼シミュレーションを行った。結果は図-2.3.5 に示す。今後、さらにモデル信頼性の向上などを図る。

(2) CFD による市街地火災延焼予測 [5,6,7]

数値モデル

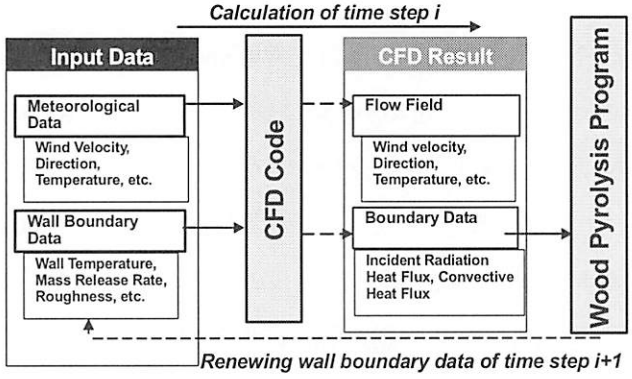


図-2.3.6 建物間の火災延焼予測フローチャート

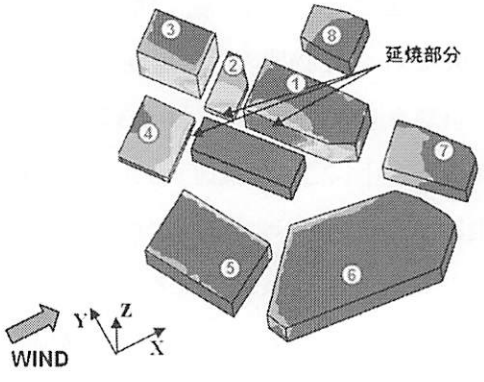
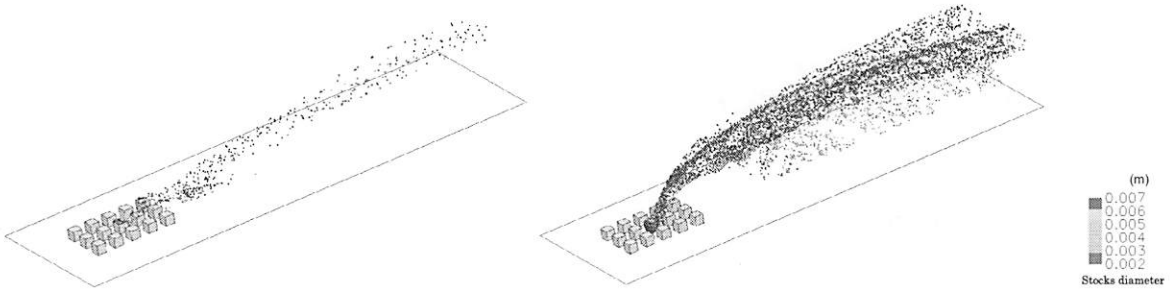


図-2.3.7 建物間の火災延焼予測



(1) 屋上面火災　　(2)建物全焼

図-2.3.8 火の粉の飛散解析（風速 5m/s）

計算機能力の急速な発達により、火災安全分野においてより詳細な解析のためや複雑計算空間への適用には、CFD を使った火災の数値シミュレーションが盛んに行われるようになってきた。火災を対象とした CFD 計算コードも世界中で開発されている。たとえば、FDS(アメリカ)、SOFIE(イギリス)、SMARTFIRE(イギリス)、JASMINE(イギリス)、KAMELEON(ノルウェー)、FrontFlow/red(日本)などがあり、また、CFD の汎用コード、Star-CD、FLUENT、CFX などにも火災計算用のモジュールが入っている。ここ

でCFDを利用した市街地建物間の火災延焼予測と火の粉の飛散予測[5,6,7]を例として紹介する。火災をシミュレーションするには、火災気流を解析するCFDモデルに、火炎燃焼モデル、火炎放射モデルを組み込む必要がある。ここで、CFDモデルは密度変化を考慮した低マッハ数近似による圧縮性流体としての方程式系を用い、乱流モデルはTahry[8]が提案した圧縮往復エンジン内の燃焼過程に適応したk-εモデルを用いた。火災燃焼モデルはMagunussen[9]が提案したEddy Dissipation Combustion Modelを使用し、火災放射モデルは離散伝達法[10]を用いた。建物壁体の高温熱分解につき、Kungら[11]より提案された近似的な一次元熱分解方程式に従う。火の粉の挙動は固気二相流と見なし、重力と抗力を考慮したラグランジュ方程式を使った。

市街地建物間の火災延焼予測と火の粉の飛散解析

図-2.3.6に建物間の火災延焼予測フローチャートを示しており、CFDの定常解析と壁体の熱分解非定常計算を連成させている。図-2.3.7に計算結果の一例で、炎上建物から隣に延焼して、着火させる様子が分かる。図-2.3.8に風速5m/s(高さ10m)のとき、屋上面火災と建物全焼の2ケースの場合、火の粉の飛散予測結果を示す。全焼の場合、非常に強い上昇流が起きるので、全ての大きさの火の粉は400m以上の広範囲に渡って飛散することができ、1998年に起きた和歌山県白浜温泉の大火の記録と同等の結果を示すことができた。また、室内外を連成させた延焼計算や火の粉の燃焼の取り扱いなどは今後の課題である。

参考文献

1) 浜田稔:火災の延焼速度について、火災の研究第I巻、相模書房、(1951)

2) 堀内三郎:建築防火、朝倉書店、(1972)

3)樋本圭佑、田中哮義:都市火災の物理的延焼モデルの開発、日本建築学会大会学術講演梗概集 A2、289-290、(2002)

4) 樋本圭佑、田中哮義:区画間の火災拡大を考慮した建物燃焼性状予測モデル、日本建築学会環境系論文集、573、1-8、(2003)

5) 蒋太峰、黄弘、大岡龍三、加藤信介:CFD解析と固体高温熱分解モデルとの組み込みによる市街地における火災延焼予測システムの開発に関する研究、生産研究、57巻4号、173－176, (2005)

6) Jiang, T., Huang, H., Ooka, R.: Application of a Coupled Simulation Method for Predicting Fire Spread in a Modeled Urban Area, 4th International Symposium on New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia, Singapore, Oct. 18-19, (2005)

7) 黄弘、大岡龍三、加藤信介、大竹宏、林吉彦:市街地火災における火の粉の飛散のCFD解析、日本建築学会環境系論文集、593、1-8、(2005)

8) EI Tahry, S. H.: k-ε Equation for Compressible Reciprocating Engine Flows, AIAA, J. Energy, 7, 4, 345-353, (1983)

9) Magnussen, B. F. and Hjertager, H.: On Mathematical Modeling of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion, in Proceedings of 16th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 719-729, (1976)

10) Lockwood, F. C. and Shah, N. G.: A New Radiation Solution Method for Incorporation in General Combustion Prediction Procedures, 18th Symposium (International) on Combustion, 1405-1414, (1981)

11) Kung, H.siang-Cheng: A Mathematical Model of Wood Pyrolysis, Combustion and Flame. 185-195, (1972)

2.3.2 都市の大気汚染シミュレーション

大気汚染とは人為的に、または自然によって大気中に過剰に発生した物質が、個人の安全または健康を損ね、その財産に対して物質的な損害を与える大気の状態をいう。また、大気汚染物質が地形や建造物、気象条件などのために、十分に希釈されずに高濃度を保ったまま生活圏に流入、あるいは滞留することによって起こる。

火山性ガス等の自然による発生を除けば、大気汚染物質は主に、石油・石炭などの化石燃料や原料鉱石などの燃焼によって、またそれらが大気中で化学反応することによって生成する。

ここでは大気汚染物質の拡散現象のシミュレーション手法を中心に解説する。

都市の大気汚染のシミュレーションには、大きく分けて広域都市全域を解くメソスケールの解析と、建物周辺の流れ場拡散場を行うCFD解析がある。メソスケールの気象モデルは、気象分野で発達したモデルであり、CFD解析は工学分野で発達してきた手法である。

(1)メソスケールモデル

メソスケールモデルは局所領域(数 100km オーダー)を対象とする気象モデルである。格子の解像度は約 1 - 10km 程度である。大気汚染物質は発生源から数 10km から数 100km 輸送されながら化学反応を起こしていく。そのためメソスケールモデルは輸送を伴う広域的な大気汚染の予測に対しては非常に有用である。下記にメソスケールモデルの基礎方程式を示す。

$$\frac{D\overline{u_i}}{Dt} = -\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho_0}\frac{\partial}{\partial x_j}\overline{u_i' u_j'} - 2\varepsilon_{ijk}\Omega_j \overline{u_k} \qquad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x_j}\overline{\rho u_j} \tag{2}$$

$$\overline{p} = \rho R_d \overline{T} \tag{3}$$

$$\frac{D\overline{\theta}}{Dt} = -\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial}{\partial x_j}\overline{u_j'\theta'} - S_\theta \tag{4}$$

$$\overline{\theta} = \overline{T}\left(\frac{1000hPa}{\overline{p}(in\,hPa)}\right)^{R_d/C_p} \tag{5}$$

ここで、x_i：i座標（$i=1,2,3$），u_i：風速のi方向成分，p：圧力，ρ：密度，ρ_0：水平平均密度，Ω_j：角回転速度ベクトル，R_d：気体定数，T：気温，θ：温位，C_p：低圧比熱，$\overline{\ }$：アンサンブル平均である。上式群においてレイノルズストレス$\overline{u_i'u_j'}$と温位フラックス$\overline{u_j'\theta'}$がわかれば、方程式系はクローズする。$\overline{u_i'u_j'}$と$\overline{u_j'\theta'}$に関しては様々なモデルが提案されており、特にMellor-Yamadaモデルが有名である。また現在までのメソスケールモデルでは、圧力は上下方向の密度バランスから求める静水圧近似を用い、鉛直方向の運動方程式は解かないことが多かった。しかしながら、より詳細な予測精度を必要とすることにより、近年では、式(2)、式(3)より圧力を求め、鉛直方向の運動方程式を解く非静水圧モデルを利用することが一般的になりつつある。特に非静水圧モデルにおいて、式(2)において密度の時間微分を考慮するモデルを弾性モデル、考慮しないモデルを非弾性モデルという。

大気汚染物質の排出・反応モデル

大気汚染シミュレーションを行うためには、気流を予測するだけではなく、大気汚染物質の排出・反応モデルを考慮する必要がある。この代表的なものにCMAQ(Community Multiscale Air Quality Model)がある。CMAQはアメリカ環境保護庁(EPA)が1998年リリースを行ったオイラー型大気質シミュレーションモデルで、地形、土地利用、発生源、気象とその他の入力条件をもとに大気環境の様々な問題に適用され、様々な大気汚染質濃度の分布を予測することができる。CMAQでは都市や地域が直面する大気中の大気汚染を、汚染物質相互の影響も含めて同時に取り扱い、それらに関連する多くの物理・化学過程を含めて扱うことにより現象を解明することを目指している。CMAQは局地的なスケール、都市スケール、地域スケールを1つのフレームワークでまとめて扱うことができるマルチスケールのモデルで、1つの格子サイズの想定解像度は1km－100km程度である。第3世代の物質輸送モデルと言われ、日本ではまだ多く使われていないが、今後積極的に応用されると期待する。

大気汚染シミュレーションの解析例

図-2.3.9, 図-2.3.10にメソスケールモデルとCMAQを連成した関東地方の大気汚染シミュレーション結果を示す。解析日時は2005年8月5日である。図-2.3.9は同日午後3時の高さ10mの風速ベクトルを示

している。太平洋側から関東平野へ流入する海風がよく再現されている。図-2.3.10は同日午前9時と午後3時の関東地方のオゾン濃度分布の比較を表わしている。午前9時の結果より日中である午後3時の方が、非常に高い濃度となっている。これは光化学反応の影響を如実に示しているものと考えられる。

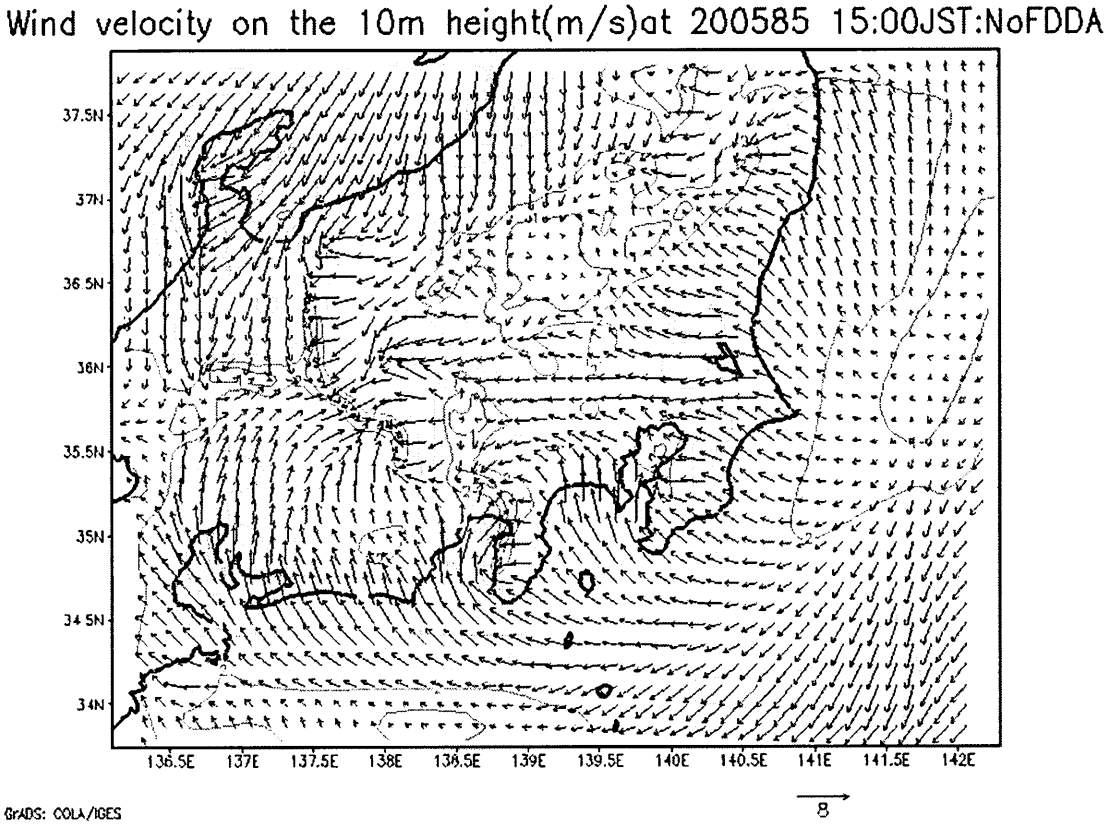
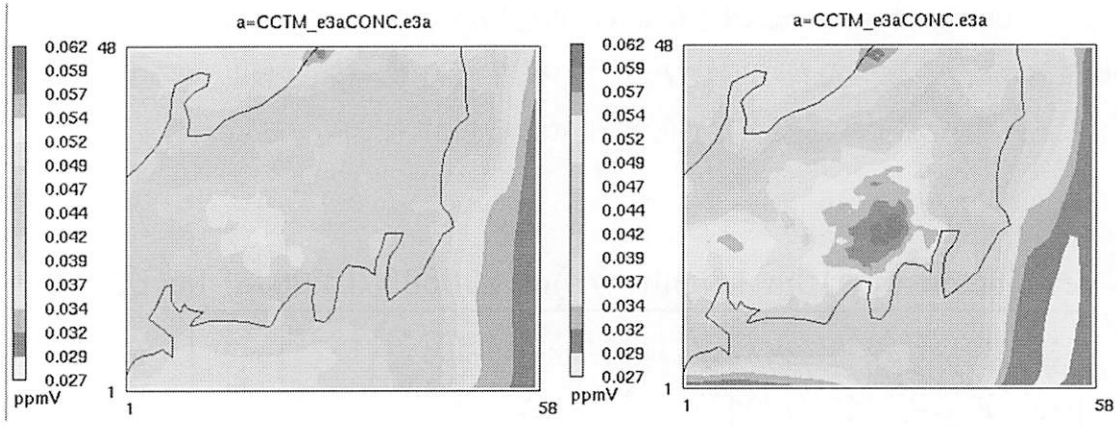


図-2.3.9 風速ベクトルの分布(2005年8月5日午後3時, 高さ10m)



(1) 午前 9 時　　(2) 午後 3 時

図-2.3.10 オゾン濃度分布(2005 年 8 月 5 日, 高さ 10m)

(2) CFD解析

上記メソスケールモデルにより、広域な大気汚染現象のあらましは理解できるようになった。しかしながら大気汚染問題が日常化してくると、自然物や人工建設物背後における高濃度局所汚染や自動車排ガスによる局所的・局時的な汚染がクローズアップされ、広域的な解析結果のみでは対応できなくなってきた。そこでCFD解析によるより詳細な解析が必要とされるようになった。CFD解析では、空間解像度が 1m 程度であり、建物形状や道路形状等を再現し、ヒューマンスケールの汚染現象を解析するモデルである。支配方程式は運動方程式(Navier-Stokes 方程式)と大気汚染物質の輸送方程式、ならびに放射伝達モデルに基づいており、メソスケールモデルとほぼ同じであるが、空間スケールは格段に異なる。また最近では、都市部の複雑形状に対応するため非構造格子を採用することが一般的となりつつある。

計算概要

図-2.3.11、12 に計算領域並びにメッシュ分割図を示す。計算領域は交差点を中心に、幅 1,550m×1,400m、高さ 100m の範囲である。このような複雑市街地において CFD 解析を行うには、非構造格子の使用が有効である。ここでは、黄らが開発した複雑形状に対応する屋外温熱環境解析手法を利用した。国土交通省の地形データ及び別途得られる建物データを利用して形状を確定し、これより約 1,830,000 メッシュの非構造格子を作成した。乱流モデルは標準 k-ε モデルを用いた。2003 年 9 月 3 日午前を対象として、計算を行った。

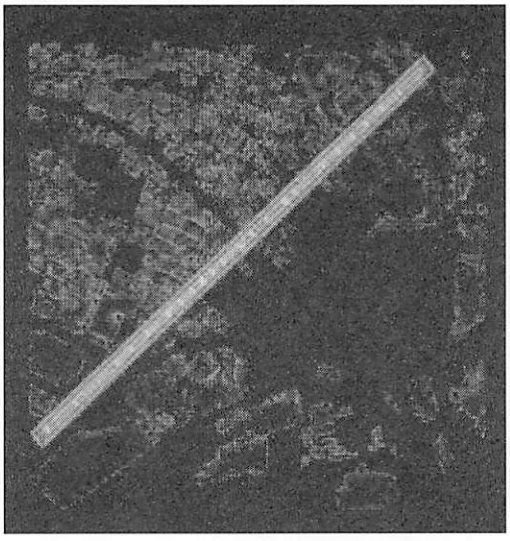


図-2.3.11 計算領域メッシュ分割図

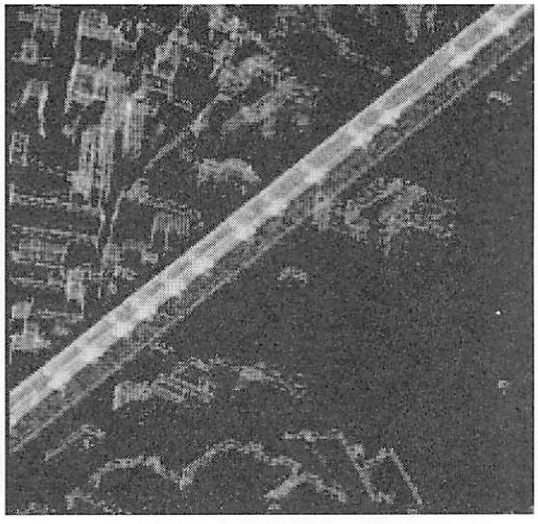


図-2.3.12 高速道路周辺メッシュ分割図

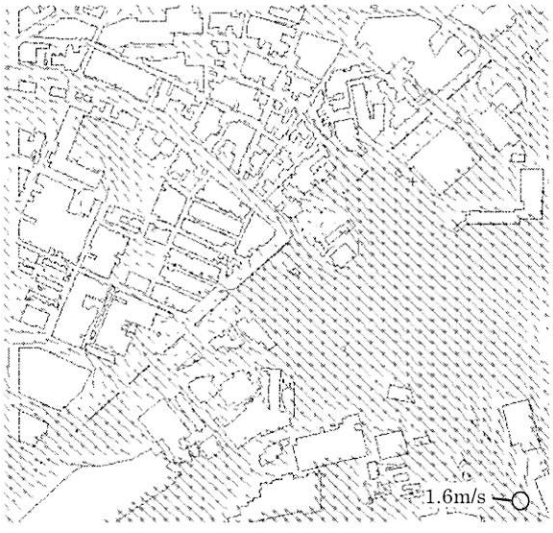


図-2.3.13 風速ベクトル水平分布
（高さ 1.8m、SE 風向）

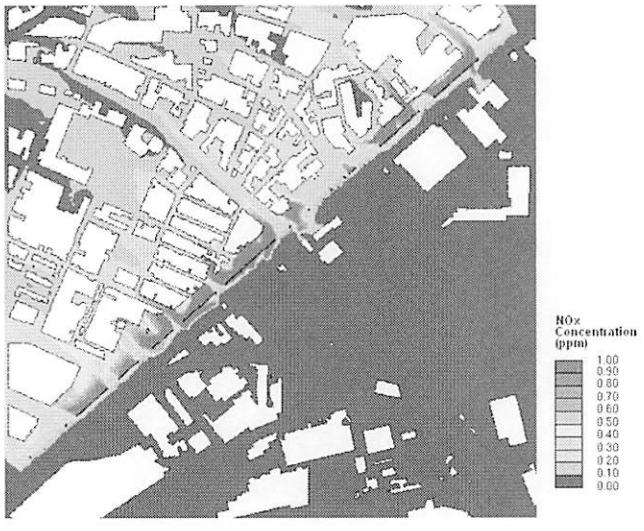


図-2.3.14 CFD によるNOxの予測例
（高さ 1.8m、SE 風向）

結果及び考察

図-2.3.13 に高さ 1.8m における風速ベクトルの水平分布を示す。図-2.3.14 に NOx 拡散性状の結果を示す。風速は高架道路の南東側の建物密度の低いところでは 1.4~1.6m/s 程度、北西側の建物密度の高いところでは 0.2～1.0m/s 程度である。交差点近傍では、フェンスがないため風がよく通る。また、高架道路下にフェンスのある箇所において、かなり減衰することが分った。高架道路の下、風速の弱いところに、汚染質が滞留し易く、NOx濃度が 1ppm 以上になる場所がある。フェンスのある場所に NOx が風上側に拡散されることが分かる。これはフェンスの風下側に渦が生じるためと考えられる。また、汚染質が風下側に

拡散され、300mぐらい離れた場所に 0.1ppm に減衰となる。CFD 解析により発生源付近では建物やフェンスなどの影響を精度良く表現することができた。

2.4 施設劣化シミュレーション

2.4.1 はじめに

国土交通白書 [1]によると，我が国のストック量は約 405 兆円（2001 年度）（図-2.4.1 参照）であり，これまでの維持管理および更新費用を実績として計算した場合，2005～2025 までの 20 年間に必要とされる費用は，約 135 兆円にのぼると試算されている（図-2.4.2 参照）．なお，図-2.4.2 は，2002 年度以降の建設投資額が前年度比 −2 % と仮定して計算した場合の将来推計を示している．このような資料からも明らかなように，膨大な社会資本ストックを抱える我が国においては，効率的に構造物の維持管理を行うことが必要不可欠である．このような現状に対して，社会資本ストックを効果的・効率的に運用することを目的として，アセットマネジメント技術の社会資本ストックへの応用に関する検討が実施され始めてきている [2]．ここでは，アセットマネジメントの確立に向けた第 1 段階として，ライフサイクルコスト（以下，LCC）の最小化を目的とする維持管理の最適化を定義している．現在では，LCC を考慮した維持管理対策に関する研究も，各研究機関において活発に検討が行われている [3]．このようなシステムの概略は，調査・点検結果を用いて，構造物の診断および評価を実施し，LCC を最小化する維持管理計画を立案するものであり，基本的に調査・点検結果を必要とする．しかし，このようなシステムを実行するために必要となる調査・点検結果が整備されておらず，国土交通省は，2007 年度末を目標として，2004 年度から直轄国道で長さ 2m 以上の約 2 万橋全てを対象に，橋梁管理カルテを作成し始めたのが現状のレベルである [4]．調査・点検も含めた維持管理の予算が潤沢にあるような状況では，現存するストックに対して画一的に管理カルテを作成することも可能であるが，現状の経済状況等を鑑みれば，特に地方公共団体においては，全ての管理構造物を対象とした，画一的な管理カルテの作成は困難であると考えられる．このような状況を解決するためには，複数管理構造物の維持管理の優先順位を決定する手法の確立が必要不可欠である．

コンクリート構造物は社会資本ストックの多くを占めているとともに，複合材料であること，施工時の全量検査が困難であること等の要因により，実際の構造物の品質が設計時に想定した品質と異なる可能性が

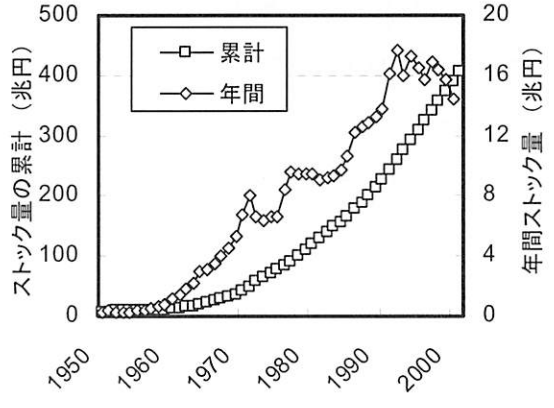


図-2.4.1 我が国のストック量の推計 [1]

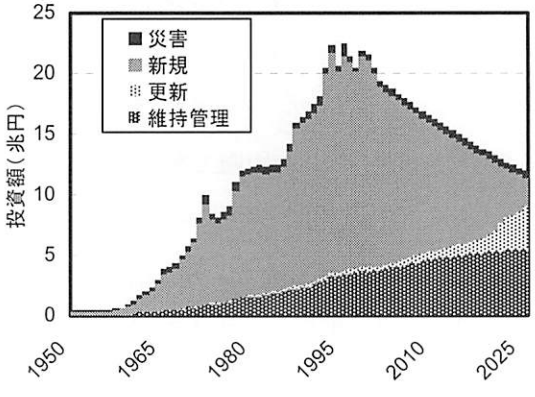


図-2.4.2 建設投資額と費用内訳の推計 [1]

極めて高い．通常は，種々の安全係数を導入することにより，実際の構造物の品質が設計時に想定した品質を上回るように計画されている．しかし，前述したように今後は，LCC を最小化する維持管理を実施することが必要であり，これを実現するための最低条件として，構造物の劣化予測を精度良く行うことがあげられる．図-2.4.3[5]は，既存コンクリート構造物の調査結果の一例を示しており，左図は同一部材内から採取したコア供試体を用いた塩分量分析の結果から得られたコンクリートの見かけの拡散係数を示し，右図は鋼材位置での塩分量の分布を示している．これらの調査結果より，実構造物のかぶりコンクリートの品質は，施工などの要因により，設計時点で想定した品質とは異なりばらつきがあることが分かる．つまり，実構造物の劣化を適切に予測するためには，このような品質のばらつきを的確に捉えることが極めて重要である．

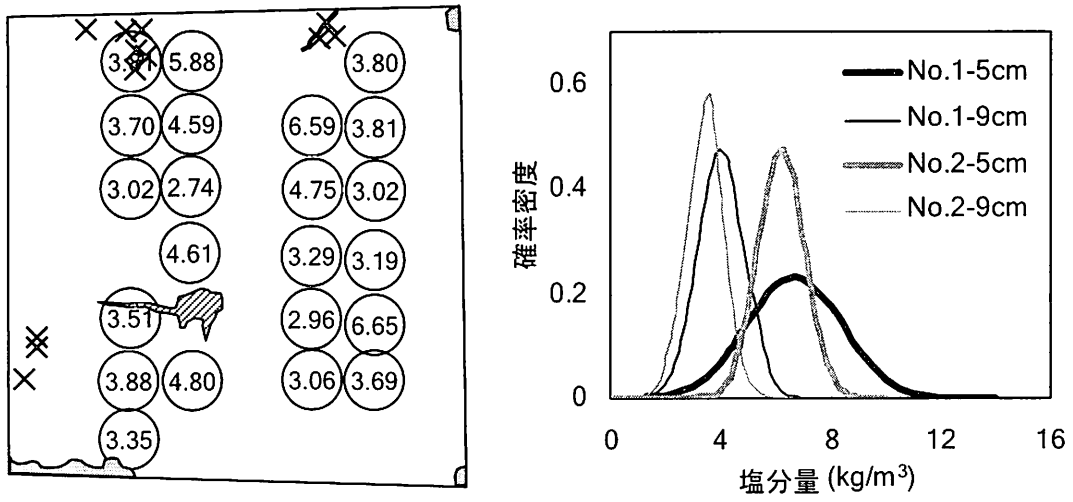


図-2.4.3 既存コンクリート構造物の調査結果の一例 [5]

コンクリートの品質のばらつきは，結合材（セメント，フライアッシュ，高炉スラグなど），水，骨材（細骨材，粗骨材）を混合した複合材料であるが生じるばらつき（先天的ばらつき）と，施工によるばらつき（後天的ばらつき）によって生じる．例えば，図-2.4.4 は，コンクリートを NaCl3%の塩水に 91 日間浸漬した後に，電子線マイクロアナライザーで塩分量を測定した結果を示しているが，実際のコンクリート中の塩分量は，コンクリート表面から等しい距離であっても，コンクリートの非均質性によって一定値とはならない．さらに，構造物の劣化は構造物の品質のみで決定されるものではなく，外力作用（荷重，塩分，酸，温度，湿度，降雨等）の影響を受ける．すなわち，これら 3 つの要因（先天的ばらつき，後天的ばらつき，外力作用）を適切に評価し，施設劣化を予測することが極めて重要となる．

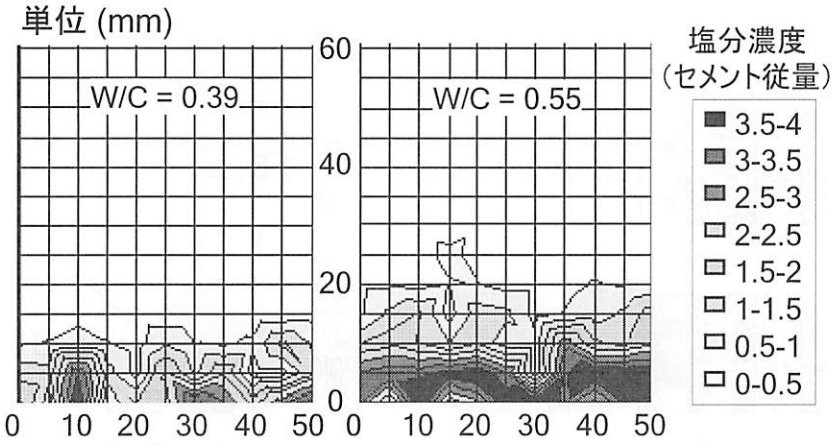


図-2.4.4 EPMA による塩分量の測定例

2.4.2 先天的ばらつきを評価するためのシミュレーションモデル

コンクリートを均質体と捉えない場合，構成する相の空隙構造の特徴を考慮してコンクリートを分類すると，セメントペースト，遷移帯，骨材の三相となる．一般的な骨材は物質の移動が無いと考えてよく，空隙構造のモデル化の対象はセメントペーストおよび遷移帯となる．現時点では，実構造物中のこれらの空隙構造を物理化学的な理論に基づいて表現することは極めて困難である．コンクリートを非均質体と捉える意義は，実際のコンクリート中を移動する物質の濃度（量）の分布（ばらつき）を定量的に把握することにある．

この場合，一つのアプローチ方法として，空隙構造を図-2.4.5 の左図にあるように，固相（あるいは空隙相）をランダムに配置して表現する方法がある．これは，同一の空隙率でも様々な空隙構造を表現することができ，網羅的に実現象で想定される可能性を検索していることになる．検索すべきパターン数は，算出結果の変動係数が収束するまでパターン数を増やし決定するのが一般的である．ただし，ある大きさの固相（あるいは空隙相）を単純にランダム配置することで空隙構造を表現しているため，実際の空隙構造を表現していない可能性はある．右図は，この方法によって計算した実効拡散係数であり，空隙部分の拡散係数を 25℃における塩化物イオンの分子拡散係数（2.03×10^{-9} (m^2/s)）とし，Fick の第二法則に従って二次元有限要素法拡散解析を行った結果である．100 パターン計算した結果の平均値をプロットで，平均値±標準偏差を点線で示している．これにより，ある固体の空隙率が決定すれば，その固体全体の塩化物イオン実効拡散係数の平均値および標準偏差が求まる．

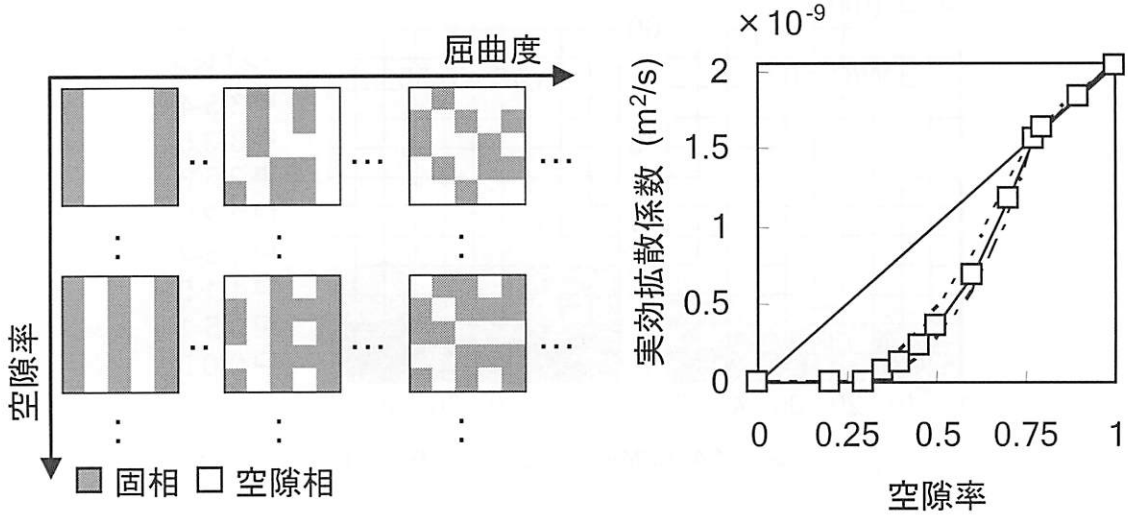


図-2.4.5 空隙構造のモデル化の概念と実効拡散係数の計算例

ここで，固相（あるいは空隙相）のランダム配置による空隙構造の表現方法は，セメントペーストおよび遷移帯の何れの箇所に適用可能か考えてみる．セメントの水和反応によって，内部生成物が水和以前のセメント粒子内部に形成され，ゲル空隙や層間空隙といわれる空隙部分が存在する．しかし，これらの空隙は毛細管空隙と比べて極めて小さい径であり，コンクリート全体の非均質性を検討する場合はその影響を無視しできるとする．つまり，セメント粒子が存在していた箇所は物質の移動が無く，水が存在していた領域（セメント粒子間）が物質の通り道となり，この箇所の空隙率が水和の進行とともに減少していくと捉えることができる．遷移帯は，壁効果およびブリーディングによりその領域が決定され，水和生成物によりその領域が埋められる．以上のことから，セメントペースト中の水が存在していた領域および遷移帯領域に，固相（あるいは空隙相）のランダム配置による空隙構造の表現方法が適用できる．このような仮定を用いた場合，セメント粒子は固相であり物質の移動が無い相となるため，その配置が重要となる．最も単純な方法は，解析対象内にセメント粒子をランダムに配置することであるが，図-2.4.6 に示すように，セメント粒子が片寄りすぎるパターンが生じる可能性がある．実際は，化学混和剤の使用や適切な練混ぜにより，セメント粒子は，ある程度分散して存在している．そこで，W/C から決定される水とセメントの割合を満足する 1 つのユニットを考え，セメント粒子をこのユニット内にランダムに配置し，このユニットを解析対象内に規則正しく配置する．セメントの水和の進行とともに，図中白色の箇所の空隙率が変化し，この空隙率に応じて白色箇所の実効拡散係数が図-2.4.5 より決定される．右図は，セメントペーストの実効拡散係数と W/C の関係を算出した結果であり，100 パターンの平均値および平均値±標準偏差を示している．

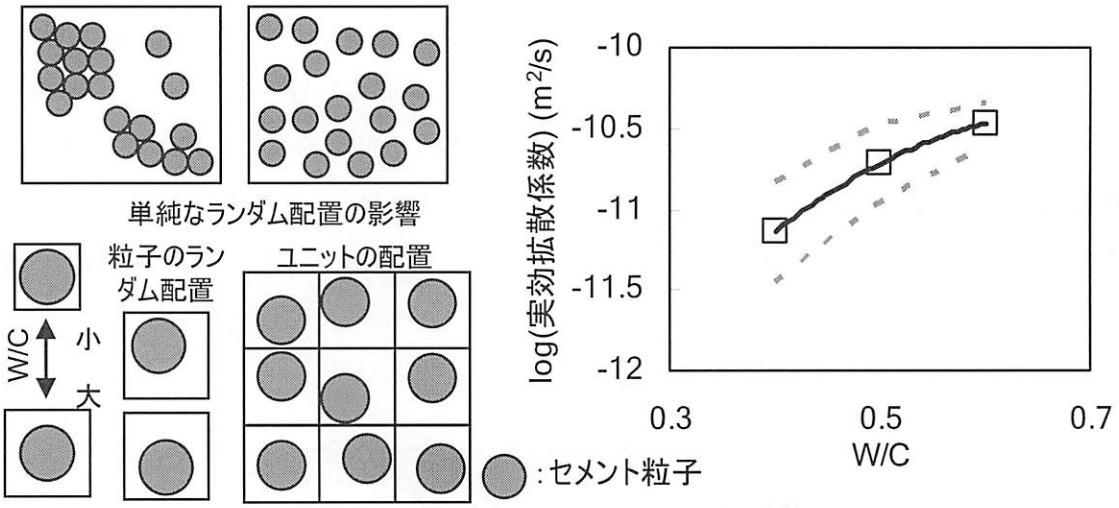


図-2.4.6 セメントペーストのモデル化の概念と実効拡散係数の計算例

これまでにより，コンクリートを構成する各相の実効拡散係数が推定されたわけであるが，これらを用いてコンクリート中の塩化物イオンの拡散移動を表現する．構成材料を考慮してコンクリートを模式的に描くと，図-2.4.7 の左図のようになる．ここで，細骨材（図中黒色）および粗骨材（図中白斑点）周辺には遷移帯（図中灰色）が存在し，この存在領域（厚さ）は，骨材径，骨材量，W/C によって変動する．塩化物イオンはコンクリートを構成する相のうち，セメントペーストおよび遷移帯を移動経路として拡散していく．右図は，Fick の第二法則に従って二次元有限要素法拡散解析を行った結果の一例である．なお，骨材は解析領域内にランダムに配置している．

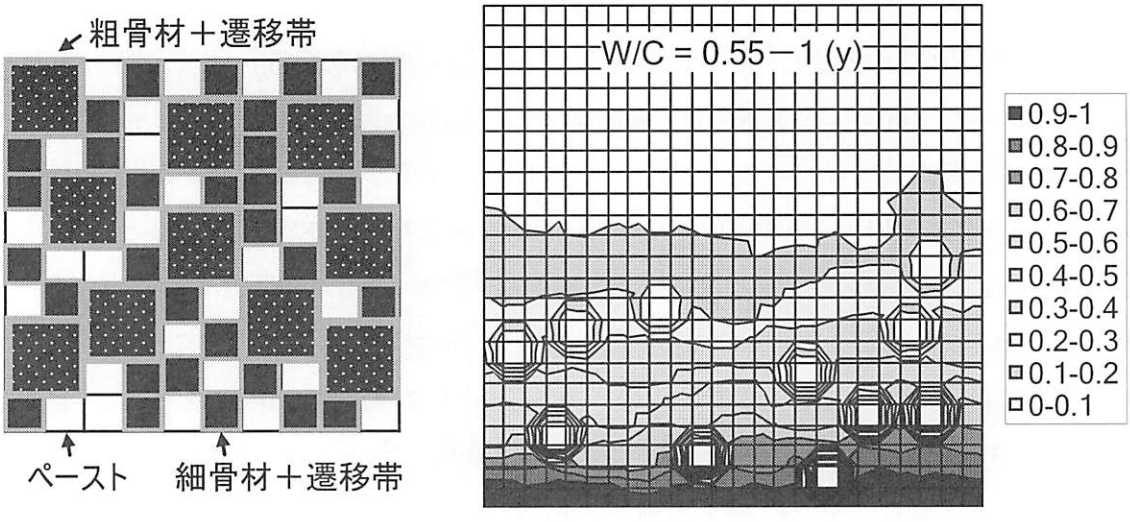


図-2.4.7 コンクリートのモデル化の概念図と拡散解析の例

図-2.4.8 は，コンクリート表面から同一距離における塩分量の変動係数を浸透深さ毎に求め，100 パターンを母集団とする累積確率分布を示している．図中の括弧内の数字は W/C を，実線は塩分量のばらつきが正規分布と仮定した場合の計算結果，一点破線は EPMA の測定結果を示している．各構成材料の空間的な特性を考慮することにより，コンクリートの非均質性を考慮した物質移動（塩化物イオンの拡散）の表現，すなわち，先天的なばらつきを正規分布に従った平均と標準偏差で表現することが可能であることが分かる．

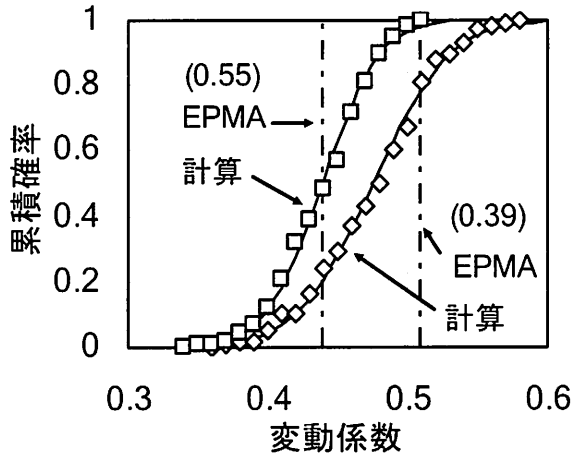


図-2.4.8 塩分量の変動係数分布

2.4.3 後天的ばらつきを評価するためのニューラルネットワークモデル

実験条件を設定するために，過去の不具合事例調査結果 [6]等を参考に，かぶりコンクリートの品質に与える影響が大きいと思われる要因，配合条件（スランプ），配筋条件（主鉄筋間隔，帯筋間隔），打込み落下高さ，締固め時間を選択した．実験条件の範囲は，施工実態報告書 [7]やアンケート結果 [8]等を参考に基準となる条件を設定し，示方書で定められている標準的施工の範囲内で設定した．使用した材料特性および配合条件を表-2.4.1 に，実験条件を表-2.4.2 に示す．図-2.4.9 は，作成した試験体とサンプル箇所を示している．なお，採取したサンプル数は総計約 3,000 個であり，これらの空隙率を測定した．

測定した空隙率と施工要因の因果関係を定量化するために，ニューラルネットワークを用いて分析を行った．本研究では，統計解析ソフト JMP[9]を用いて，非線形最小 2 乗法の回帰分析を使った誤差逆伝播学習法による 3 層階層型ニューラルネットワークによる学習を行った．ネットワーク構成は，構築したネットワークが施工品質の管理，供用後の検査計画の策定において利用されることを想定し，入力因子は空気量，スランプ，閉塞率，締固め時間，打込み高さとし，出力因子はかぶり空隙率とかぶり空隙率変動係数とした．なお，中間層数は，学習状況を勘案してトライアンドエラーにより 12 個と決定した．学習開始値の当てはめは，乱数によってランダムに 50 パターン行い，各当てはめにおける学習反復最大回数を 1000

回と設定し学習を行った．図-2.4.10 に学習結果を示す．本研究で実施した施工条件の範囲内では，良好な学習結果が得られていることが分かる．

表-2.4.1 配合条件

空気量 (%)	Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)			
				C	W	S	G
4.5±1	20	55	45	170	309	813	1020

	スランプ (cm)	混和剤 (Cx%)	
		AE剤	AE減水剤
配合1	8±2	0.013	0
配合2	12±2	0.009	0.55
配合3	18±2	0.009	1.09

表-2.4.2 実験条件

配合(スランプ (cm))	8, 12, 18
主鉄筋間隔 (mm)	35, 50, 100
帯鉄筋間隔 (mm)	100, 150
締固め時間 (s)	10, 15, 25
打込み高さ (cm)	50, 100, 150

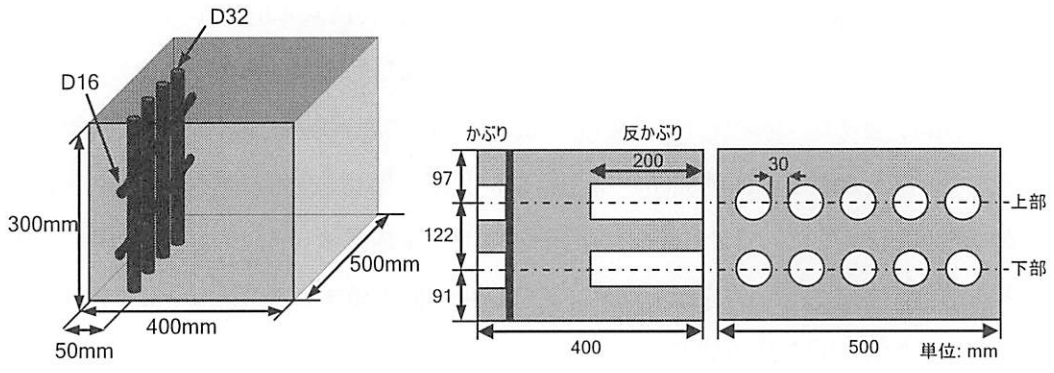


図-2.4.9 試験体概要図とコア抜き箇所

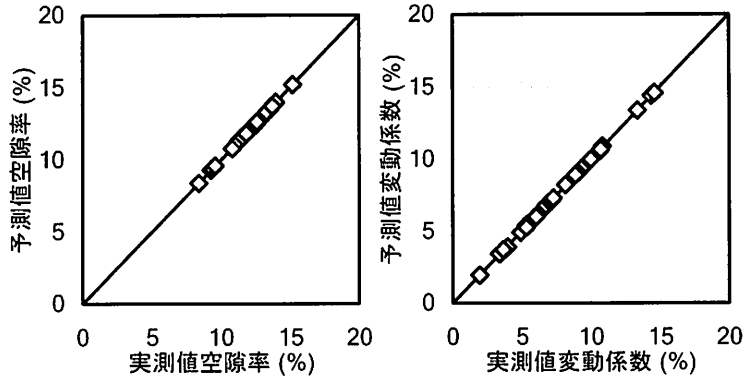


図-2.4.10 学習状況

ニューラルネットワークは，入力と出力が直接つながっていないため，通常の回帰分析のように結果を説明することができないという欠点がある．そこで，入力データの出力結果への影響を調べるために感度解析を行った．本研究における感度解析では，ある一つの因子のみを最小値 ～ 最大値まで変動させたときの予測結果の変化を，その要因が予測結果に及ぼす影響として捉えている．各入力因子が予測結果に及ぼす感度を考察する際に注意すべき事項は，各入力因子の変動幅を同等に評価することである．例えば，スランプを 8 cm から 9 cm に変動させた場合と，閉塞率を 30 %から 31 %に変動させた場合を比較することが妥当であるかを検討することである．両者ともに，各因子を"1"の幅で変動した結果であり，"1"という数字としては同じ意味を持つが，この変動幅が予測結果に及ぼす影響が同等で無いことは容易に想像できる．本研究で設定した施工条件の範囲は，前述したように基本的に示方書で定められる標準的な施工範囲である．示方書は過去の経験および知見を集積した情報であり，ここで定められている標準的な施工範囲は，適切なコンクリート構造物を構築するために許容された各因子の変動幅と捉えることができる．そこで，各入力因子の変動範囲が予測結果に及ぼす影響を同じにするため，表-2.4.3 のように入力データの範囲を決定した．これは，各入力因子の中間点を基準値(0.5)とし，実験条件の最小値または最大値と基準値の差の大きい方を，入力データの範囲の最小値または最大値としている．このため，締固め時間では実験における最小値が 10 秒であるのに対して感度解析の最小値は 5 秒と設定している．なお，感度解析は学習範囲内のみの結果を用いて考察する．本感度解析では，ある一つの因子のみを 0 ～ 1 まで 0.01 ずつ変動させたときの予測結果の変化を，その因子が予測結果に及ぼす影響として捉えている．この時，その他の因子は基準値である 0.5 で固定している．

表-2.4.3 入力データの範囲

変動幅	空気量 (%)	スランプ (cm)	締固め時間 (s)	閉塞率 (%)	打込み高さ (m)
0	3.5	6	5	23.5	0.5
0.5	4.5	12	15	37.1	1
1	5.5	18	25	50.7	1.5

図-2.4.11 は，感度解析結果の微分値を 0.1 刻みで離散化した結果である．閉塞率，スランプ，空気量の順に各入力因子が 1 割変動した場合の空隙率変動係数の変化の割合が多いことが分かる．閉塞率の場合は，特に閉塞率が小さい値(23.5 ～ 31.7 %)のときに空隙率変動係数は大きく低下，スランプの場合は，特にスランプが大きい値(14.4 ～ 18 cm)のときに空隙率変動係数は大きく増加，空気量の場合は，空気量が小さいときは空隙率変動係数が低下し，大きいときは増加する傾向を示している．また，空隙率と空隙率変動係数の変化の傾向は必ずしも一致しておらず，品質が悪くなればなるほど(空隙率の増加)，ばらつきも大きくなる(変動係数の増加)という傾向は特に見られない．これは，前述したように，本研究で対象とした施工範囲が，標準的な範囲内であることによると考えられる．

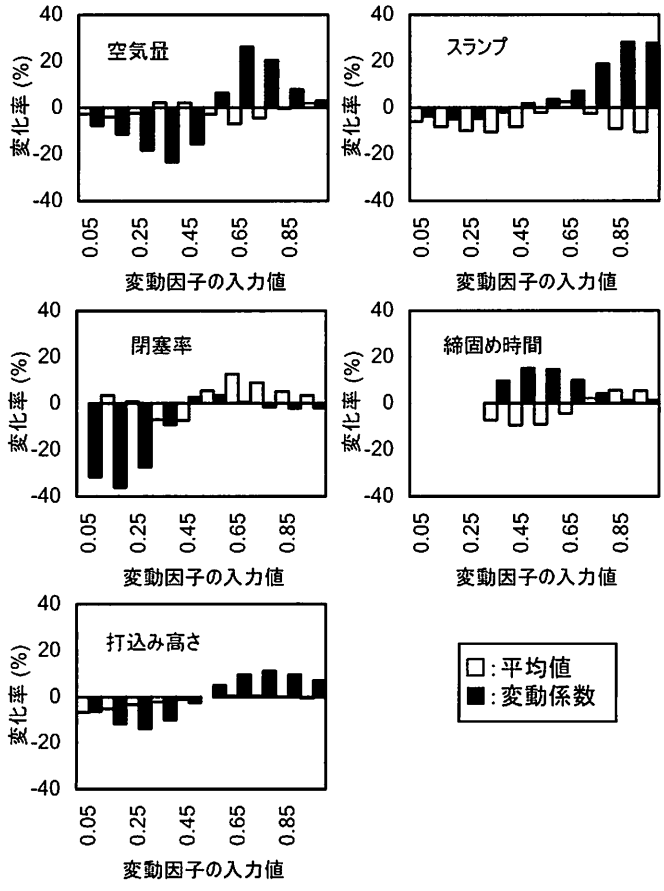


図-2.4.11 感度解析結果の変化率

ニューラルネットワークの学習結果を利用して，施工によるかぶりコンクリートの品質変動を考慮した劣化予測の例を示す．設定した施工条件および構築したネットワークによる予測結果を表-2.4.4 に示す．なお，打込み高さは全ての条件において 1 m とした．この予測結果を用いて，施工要因によるばらつきを考慮した鋼材の腐食発生確率を示方書に基づいて算出する．結果を図-2.4.12 に示す．なお，図中には標準供試体の空隙率から求められる拡散係数を用いて算出した結果(標準)と，これにコンクリートの材料係数として 1.3 を用いて算出した結果(安全係数(1.3))の場合もあわせて記載した．施工要因によって，腐食発生年の平均値および分布形状が大きく異なることが分かる．今回のケーススタディでは，標準供試体の品質を用いてコンクリなお，本研究では供試体本数確保のため耐久性能をートの材料係数を 1.3 にすることで，十分に安全側の評価が可能となっていることが分かる．しかし，過大に安全側に評価することは，初期コストおよび維持管理コストの増大を招きやすく，必ずしも適切な方法ではない．できる限り，実際の状況に即した評価をすることが重要であることは言うまでもない．このように，実験結果をベースとしたニューラルネットワークモデルにより，後天的ばらつきを考慮した施設劣化シミュレーションが可能となる．

表-2.4.4 与えた施工条件と予測結果

	空気量 (%)	スランプ (cm)	閉塞率 (%)	締固め時間 (s)	空隙率 (%)	変動係数 (%)
C1	4.5	8	35	20	13.1	4.5
C2	5	12	40	15	9.2	7.8
C3	5.5	18	45	10	12.7	10.6

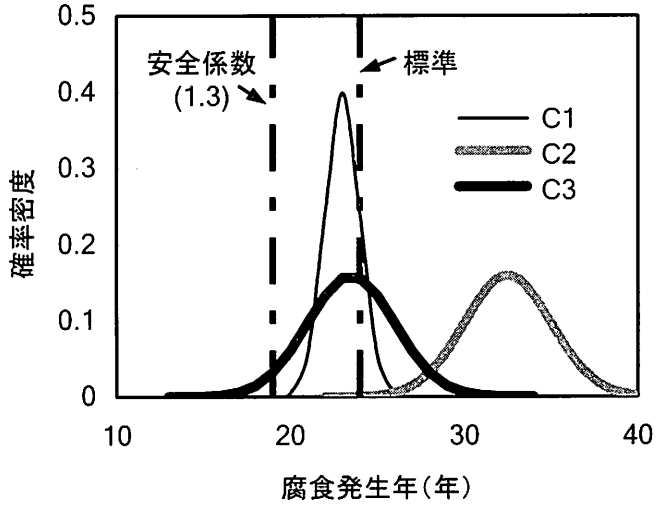


図-2.4.12 腐食発生年の確率分布

2.4.4 外力作用のシミュレーション

コンクリートの劣化進行は，劣化外力と構造物の品質によって支配されるものであるが，従来，劣化外力の評価は殆どなされてこなかった．ここでは，コンクリート構造物の経年劣化を支配する基本的な劣化外力である"水"の供給を，降雨シミュレーションによって再現し，劣化予測時に適切な境界条件を提供することが可能となる，環境データベースの構築を試みる．

本研究では CHAM 社製流体解析ソフト Phoenics を使用して，コンクリート構造物周辺の風況解析・降雨量分布を解析的に求めた．流体解析で使用した基礎式を以下に示す．下式は，それぞれ連続の式，運動方程式，エネルギー保存式である．

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0,\ \frac{D\mathbf{V}}{Dt} = \mathbf{g} - \frac{1}{\rho}\nabla p + \nu\left[\nabla^2 \mathbf{V}\right],\ \rho\frac{D\hat{E}}{Dt} = -\left(\nabla \cdot \mathbf{q}\right) - \left(\nabla \cdot \mathbf{V}\right) + \mu\Phi + q'$$

ここで，V:速度ベクトル (m/s)，t:時間 (s)，ρ:密度 (kg/m3)，p:圧力 (N/m2)，ν:動粘度 (m2/s)，μ:粘性係数 (kg/ms)，E:流体の単位体積あたりの内部エネルギー (J)，q:単位体積あたりの熱流速 (J/m2s)，Φ:粘性散逸関数 (/s2)である．

構造物に付着する雨滴粒子の挙動は様々な気象因子に左右されている．粒子の総量を表す降雨量と，輸送を行う空気の流れを表す風況とがそれである．厳密に考えると気温の差異による微小な対流なども影響を及ぼすと思われるが，それらは非常に微小なものだと考え，本研究では取り扱っていない．本項では入力条件として使用した降雨モデルにおける降雨量から雨滴の平均粒径および終端速度の導出について記す．雨は言うまでもないが粒子となって地表へと到達する．それらの粒径の分布は地域や気候，気象条件，季節や時間によって大きくことなっている．しかし，粒子の挙動を表す上でその大きさを知ることは必要不可欠である．そのため，それらを一般的に表現しているとされる Marshall-Palmer の下式 [10]を用いて粒径分布から粒子の平均粒径を算出した．導出方法は粒子の再現性と解析時間を考慮し，単位体積中の総雨滴量を三等分し，それぞれの平均粒子径 D1，D2，D3 を求めた．

$$N_D = 8000\exp\left(-4.1DR^{-0.21}\right)$$

各降雨量における D1，D2，D3 を求めた結果を表-2.4.5 に示す．このようにして求められた平均粒径のそれぞれに対して Gunn and Kinzer の実験値 [11]から Mook が求めた終端速度の下式 [12]を用いることで，各粒子の終端速度を求めた．この結果も併せて表-2.4.5 に記す．

$$v = 9.4 - 9.4\exp\left(-1.57 \cdot 10^{3} D^{1.15}\right)$$

ここで，v:終端速度 (m/s)，D:雨滴粒子直径 (m)である．

表-2.4.5 降雨量と平均粒径の関係

R(mm/h)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
s(mm)	0.71	0.82	0.90	0.95	1.00	1.04	1.07	1.10	1.13	1.15
t	1.11	1.29	1.40	1.49	1.56	1.62	1.67	1.72	1.76	1.80
D1(mm)	0.32	0.37	0.40	0.43	0.45	0.47	0.48	0.49	0.51	0.52
D2	0.87	1.01	1.10	1.17	1.22	1.27	1.31	1.35	1.38	1.41
D3	1.40	1.62	1.77	1.88	1.97	2.04	2.11	2.17	2.22	2.27
V1(m/s)	1.32	1.53	1.67	1.78	1.87	1.94	2.00	2.06	2.11	2.16
V2	3.56	4.05	4.35	4.57	4.74	4.89	5.01	5.12	5.21	5.30
V3	5.27	5.84	6.18	6.42	6.60	6.75	6.88	6.98	7.07	7.16

構造物の劣化を予測する際の境界条件を与えるために，降雨のシミュレーションを逐次実施するのは，工学的には無駄が多いと言える．そこで，構造物への水の供給状況を環境条件（降雨量，風速，風向）毎に事前に算出した環境データベースを作成し，劣化のシミュレーションをする際には，このデータベースから対象となる環境条件に即した境界条件を読み込むことが効率的である（図-2.4.13）．そこで，雨量 1,3,5,7,10(mm/h)，風速 1,3,5,7,10(m/s)，風向 0,22.5,45,67.5 度を代表値として，全ての組み合わせ（100 ケース）における，降雨が接触する状況を，前記した降雨シミュレーションを用いて再現し，データベースを作成した．シミュレーションの一例を図-2.4.14 に示す．

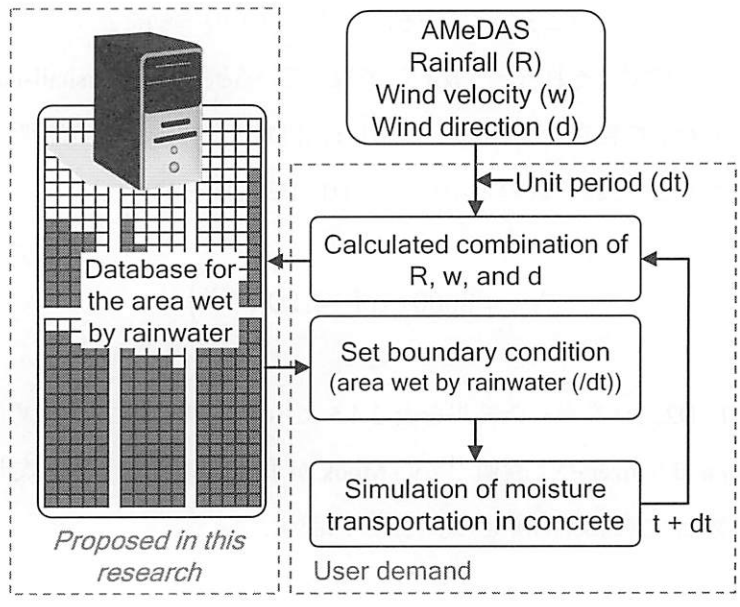


図-2.4.13 環境データベースとその位置づけ

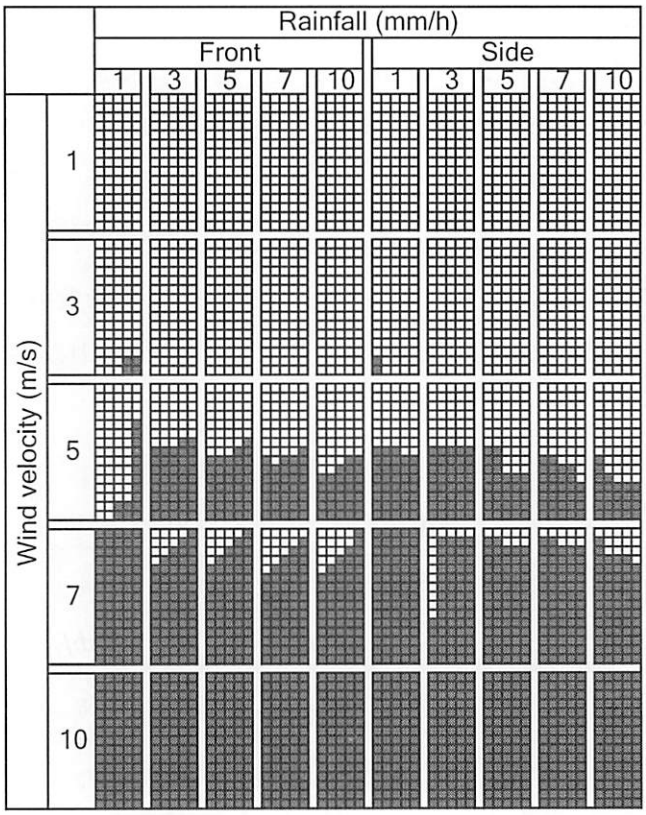


図-2.4.14 降雨接触箇所のシミュレーションの一例(風向:22.5 度)

作成したデータベースを用いて，実際の構造物の含水状態の履歴を解析的に検討した結果を図-2.4.15 に示す．左図は，降雨の接触を考慮せずにアメダスデータの相対湿度のみを利用して予測した結果，右図は作成したデータベースを活用した結果である．図から明らかなように，降雨を考慮するか否かで構造物中の含水状態は大きく異なることが分かる．

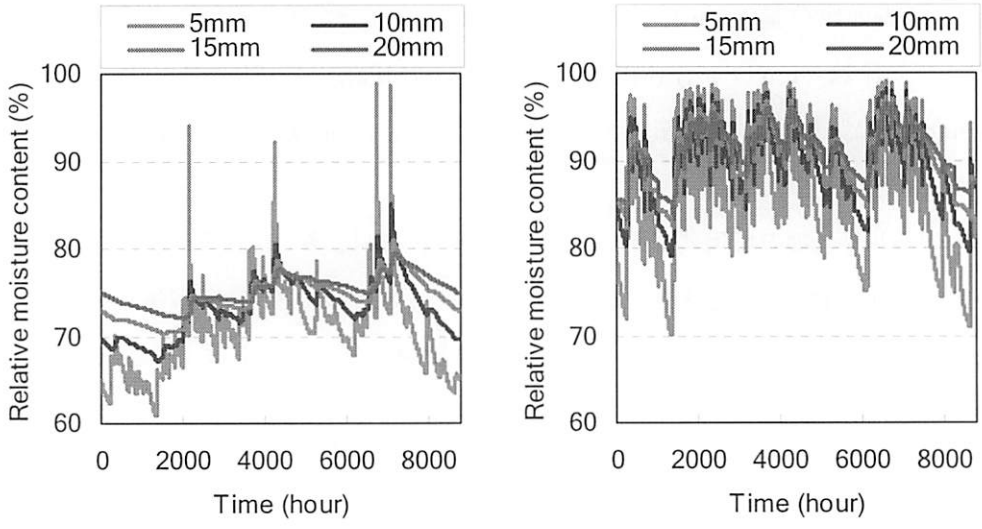


図-2.4.15 構造物中の含水状態履歴解析例

2.4.5 様々なばらつきを考慮した構造物の劣化予測とLCC

前項までの検討により，複合材料による先天的ばらつき，施工による後天的ばらつき，環境作用のばらつきを定量的に評価することが可能となった．これらのばらつき情報を用いて，実際のコンクリート構造物の劣化を予測する．ここでは，島国である我が国で最も劣化事例の多く，その劣化進行速度が速い塩害劣化を対象とする．

塩害劣化は，塩化物イオンがコンクリート中に浸透し，鉄筋表面の塩分量が 1.2(kg/m^3)を超えると鉄筋の腐食が開始し，腐食生成物の体積膨張によって鉄筋に沿ったひび割れが生じる．これらの現象は，以下の式郡によって表現することが可能である．

$$t_i = \frac{(0.1x)^2}{4D_{cl}}\left[erfc^{-1}\left(\frac{C_{\lim}}{C_s}\right)\right]^{-2}$$

$$w_c = \frac{4\pi d_s(t)}{(1-\upsilon_c)\left(\frac{a}{b}\right)^{\sqrt{\alpha}} + (1+\upsilon_c)\left(\frac{b}{a}\right)^{\sqrt{\alpha}}} - \frac{2\pi b f_t}{E_{ef}}$$

$$d_s(t) = \frac{W_{rust}(t)}{\pi(D+2d_0)}\left(\frac{1}{\rho_{rust}} - \frac{\alpha_{rust}}{\rho_{st}}\right)$$

$$W_{rust}(t) = \sqrt{2\int_{t_i}^{t}\left(\frac{0.105\pi D i_{corr}(t)}{\alpha_{rust}}\right)dt}$$

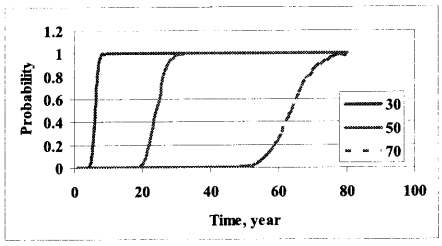
$$w_c(t) \geq w_{\lim}$$

ここに，t_i：腐食発生時間（年），x：かぶり(mm)，D_{cl}：見掛けの拡散係数(cm^2/year)，C_{lim}：腐食発錆限界塩分量(kg/m^3)，C_s：表面塩分量(kg/m^3)，w_c：ひび割れ幅(mm)，υ_c：ポアソン比，α：低減係数，f_t：引張強度(MPa)，E_{ef}：有効係数＝$E_c/(1+\phi_{cr})$ (MPa)，Ec：弾性係数(MPa)，ϕ_{cr}：クリープ係数，$W_{rust}(t)$；腐食生成物質量(mg/mm)，ρ_{rust}：腐食生成物密度，ρ_{st}：鉄筋密度，α_{rust}：腐食生成物種に関する係数，w_{lim}：許容ひび割れ幅(mm)

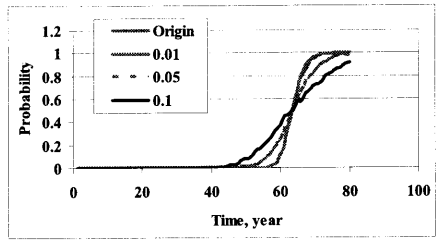
実際にコンクリート構造物の塩害劣化予測を実施するためには，多くの条件を設定する必要があり，これら全ての入力因子のばらつきを考慮することは現実的ではない．そこで，塩害劣化を支配する主な要因を取り上げて，それぞれの因子が予測結果に及ぼす影響を感度解析によって事前に確認する．表-2.4.6 は，感度解析条件を示しているが，これらの入力値（平均値及び変動係数）は，既往の研究成果を参照して決定した．

表-2.4.6　感度解析条件

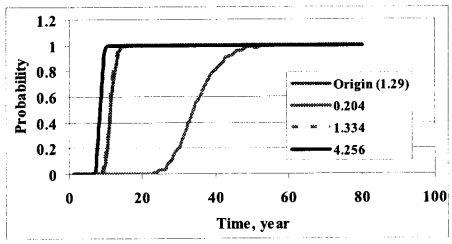
Parameters	Unit	Mean	COV
x	mm	30, 50, 70	0.01, 0.05, 0.1
D_{cl}	cm^2/year	0.20, 1.33, 4.26	0.05, 0.1, 0.2
C_s	% by weight of concrete	0.06, 0.19, 0.54	0.05, 0.1, 0.2
f_c'	MPa	20, 30, 40	0.05, 0.2, 0.4



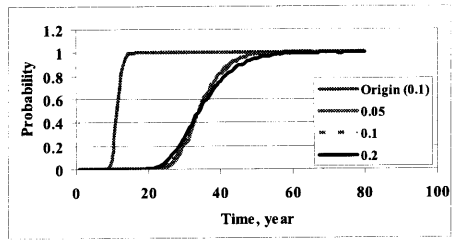
(a)



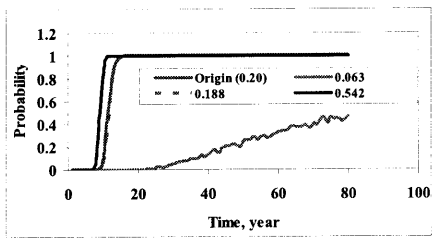
(b)



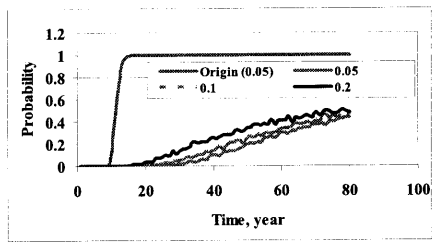
(c)



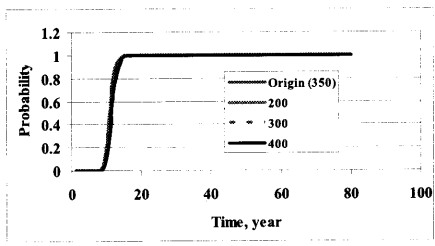
(d)



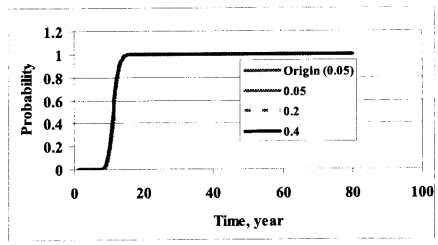
(e)



(f)



(g)



(h)

((a), (b)かぶりの平均値と変動係数, (c), (d)拡散係数の平均値と変動係数, (e), (f)表面塩分量の平均値と変動係数, (g), (h)強度の平均値と変動係数)

図-2.4.16　感度解析結果

図-2.4.16 は，各因子の感度解析の結果を，供用年数と腐食ひび割れ幅が許容ひび割れ幅を超える確率の関係として示している．図から明らかなように，平均値の影響は，塩化物イオンの見掛けの拡散係数およびかぶり，変動係数に関してはかぶりが影響を及ぼし，強度の変化は平均値および変動係数ともに，殆ど影響していないことが分かる．また，表面塩分量の平均値の影響は，構造物が置かれる環境条件の違いと解釈することができ，環境条件を適切に評価することが重要であることが分かる．

前節までの検討は主に，配合条件，配筋条件，施工条件，環境条件から，各種シミュレーション技術を駆使して，コンクリートの品質および劣化外力のばらつきを評価してきた．これらの技術は，各種条件を入力情報として机上で結果を得ることができるため，極めて簡便であるがその推測精度の信頼性に欠ける．一方，これらの情報は，各種計測技術により収集可能であるが，一般に，構造物全体の計測では無く，ある限られた代表値のサンプリングにとどまる．また，代表値との表現が必ずしも適切ではない．なぜなら，様々なばらつきがある構造物の，どの位置からどの程度のサンプルを得れば，構造物全体を表現することが可能か？ということは，未だに明らかとされていない．ここでは，比較的容易に計測できるかぶりおよび反発硬度に関しては，数多くの計測結果から品質のばらつきを同定し，それ以外の情報に関しては数点の計測に関して，前節までのシミュレーションによって同定されるばらつきの程度を利用し，コンクリート構造物の塩害劣化予測を実施する．表-2.4.7 は，設定した各入力因子の平均値と変動係数および分布形状を示している．

表-2. 4. 7　設定した入力因子

入力因子	平均値	変動係数　(分布形状)
x	88.34mm	0.22 (Weibull)
D_{cl}	0.92 cm^2/year	0.16 (Normal)
C_{lim}	0.05 % by mass of concrete	0.10 (Log normal)
C_s	0.35 % by mass of concrete	0.43 (Uniform)
D_t	1.6 cm	0.015 (Normal)
f_c	34.3 MPa	0.16 (Normal)
i_{corr}	2 μA/cm^2	Constant
d_0	12.5 μm	Constant
α_{rust}	0.57	Constant
ρ_{rust}	3600 kg/m^3	Constant
ρ_{st}	7850 kg/m^3	Constant
f_t'	$0.23 f_c'^{2/3}$	-
E_c	30.1 GPa	Constant
φ_{cr}	1.1	Constant
υ_c	0.20	Constant

施設劣化のシミュレーションは，将来における施設メインテナンスの意志決定の基本情報となり，通常は劣化予測結果を基に算定したライフサイクルコスト(LCC)が，意志決定の情報として用いられる．本研究では，施設の維持管理におけるLCCを下式により算定する．

$$LCC = \sum_{i=1}^{n} \frac{(R_{f,i} + R_{v,i} \times p_{r,i}) + (C_{f,i} \times p_{f,i})}{(1+\nu)^{t_i}}$$

ここに，LCC:ライフサイクルメンテナンスコストの予測値，$R_{f,i}$:時間 t_i における補修の固定費用(足場の設置費用など)，$R_{v,i}$:時間 t_i における補修費用，p_r:時間 t_i における補修箇所の割合，$C_{f,i}$:時間 t_i における損失費用 $p_{f,i}$:時間 t_i における損失確率，ν:社会的割引率．

補修の固定費用，補修費用，損失費用は何れも，時間 t_i における費用であり，これらの値は補修市場の経済，技術革新などの影響を受けて，上昇あるいは下降する可能性がある．また，これらの将来の投資を現在の価値として評価するために，一般的には社会的割引率が用いられる．長期間の利用が前提となる都市基盤施設の場合，社会的割引率が 1%違うだけでも，その結果は大きく異なってしまう．日本での費用便益分析においては，社会的割引率は一般に 4%が用いられているが，例えば，既往の実証的研究 [13]を参照すれば，約 2%が妥当であるとの見解もあり，統一した見解がないのが現状のようである [14]．前記の費用および社会的割引率は，時間軸上でのコストの変化を，現在の価値として正しく評価するためのコンセプトであるが，現実的には，これらの値を適切に設定することは難しい．そこで，これらの値を概念的に捉えてみることとする．まず，補修に関わる固定費と補修費用は，社会全体の物価動向と補修技術の技術革新によって変動するものと考えられる．先進国であるわが国であれば，一般的には，物価動向は上昇傾向を，技術革新によって下降傾向を示すと思われる．図-2.4.17 は，国内のセメント市況の推移(東京地区)を示したものであるが，産業として 100 年以上の歴史があるセメントであっても，下降傾向を示していることが分かる．ただし，これらのデータは 95 年以降の推移であり，この期間はバブル崩壊後の失われた 10 年の期間に相当し，厳しい財政状況の中でも，生き残りをかけた値下げ競争が繰り広げられたと考えられる．そのため，一般的な物価動向の参考にはならないが，セメント産業と比較して新しい補修産業においては，今後も技術革新が続き，現時点と同価格で高性能，あるいは同性能で低価格な技術が開発されると思われる．

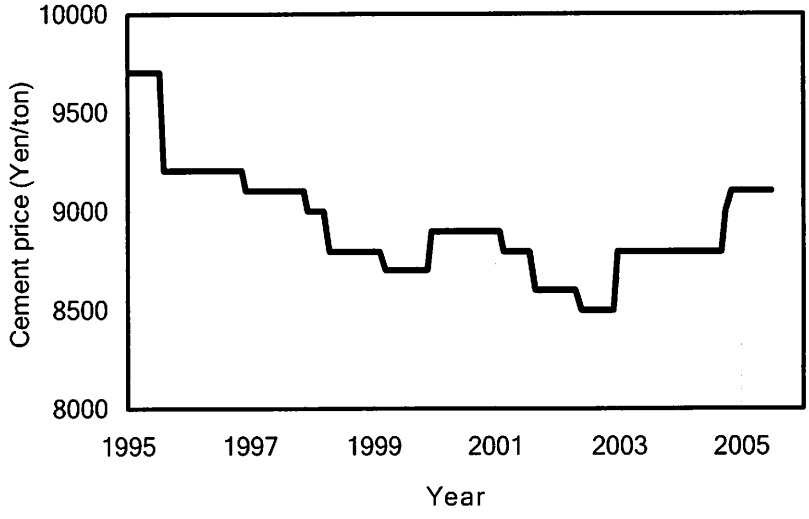


図-2.4.17　国内セメント市況の推移（東京地区 95.1～05.1）

以上より，補修費用の将来推計には技術的な要素が強く影響すると考えられ，社会的割引率とある程度連動すると考えられるが，異なる値を用いるのが適切である．一方損失費用は，社会に及ぼす影響，例えば，道路において適切な時期に補修しなかったことによって，交通規制を伴う補修工事が必要となれば，この交通規制に伴う社会的影響を費用換算するものである．つまり，その値の設定方法に関しては，社会的割引率の設定に近いと考えられる．以上のことから，LCC を以下のように再定義する．すなわち，補修に関しては，現在の費用を基準として前述の価格変動要因を補修技術の価格変動率 r で表現し，損失費用の変動は社会的割引率によって相殺されると仮定した．

$$LCC = \sum_{i=1}^{n} \frac{(R_f + R_v \times p_{r,i}) \times (1+r)^{t_i}}{(1+v)^{t_i}} + (C_f \times p_{f,i})$$

ここに，R_f: 現在の補修の固定費用，R_v: 現在の補修費用，r: 補修技術の価格変動率，C_f: 現在の損失費用．

補修の固定費用，補修費用および損失費用をそれぞれ，1000，2000，5000 と仮定し，補修技術の価格変動率および社会的割引率に関して，LCC の感度解析を行う．ここで，予定供用期間を 80 年，劣化予測の結果(図-2.4.18)から，補修回数は 1 回とする．

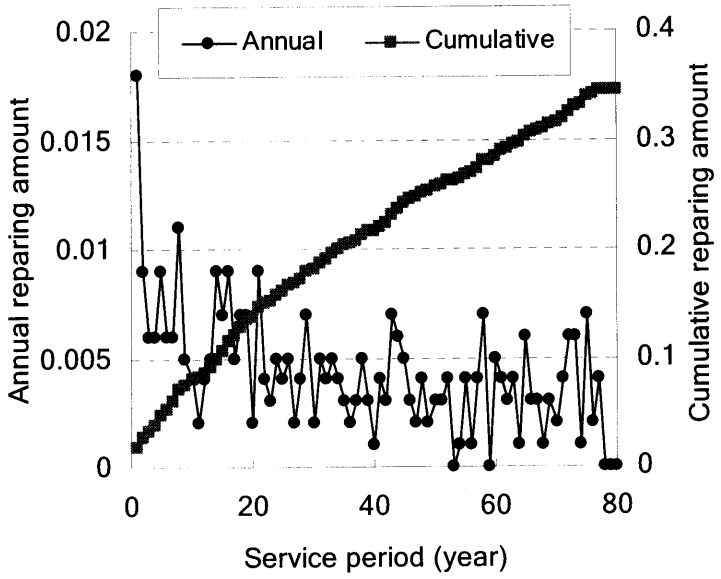


図-2. 4. 18　補修割合の予測結果

再定義した LCC において損失費用は，社会的割引率の影響を受けず損失確率のみに影響を受ける．損失確率は，施設の劣化程度に依存するものであり，つまり，母材の劣化速度と補修部の劣化速度に依存する．図-2.4.19 は，補修タイミングと損失費用の関係を示したものであり，左図は，補修部の劣化速度が母材と同一，右図は補修部の劣化速度が母材の 1/10 として計算した．なお，色分けは補修前後の損失費用を示しており，当然のことながら，補修タイミングが遅くなれば，補修前の損失費用が増加する．しかし，合計の損失費用に大きな変化はない．また，補修部の劣化速度を変化させても殆ど影響が無いようであるが，もう少し両者の差を詳細に見てみる．図-2.4.20 より，補修部の劣化速度が遅くなると，若干ではあるが補修後の損失費用が減少し，供用約 20 年で補修を実施するのが，全体の損失費用を最小化できることが分かる．今回のケーススタディーでは，母材の劣化進行がそれほど速くないために補修部の割合が少なく，このような結果になったと考えられるが，劣化速度が速いような状況では，補修部の劣化速度の影響がより顕著に表れてくると思われ，今後，補修後の劣化進行予測方法の確立が望まれる．

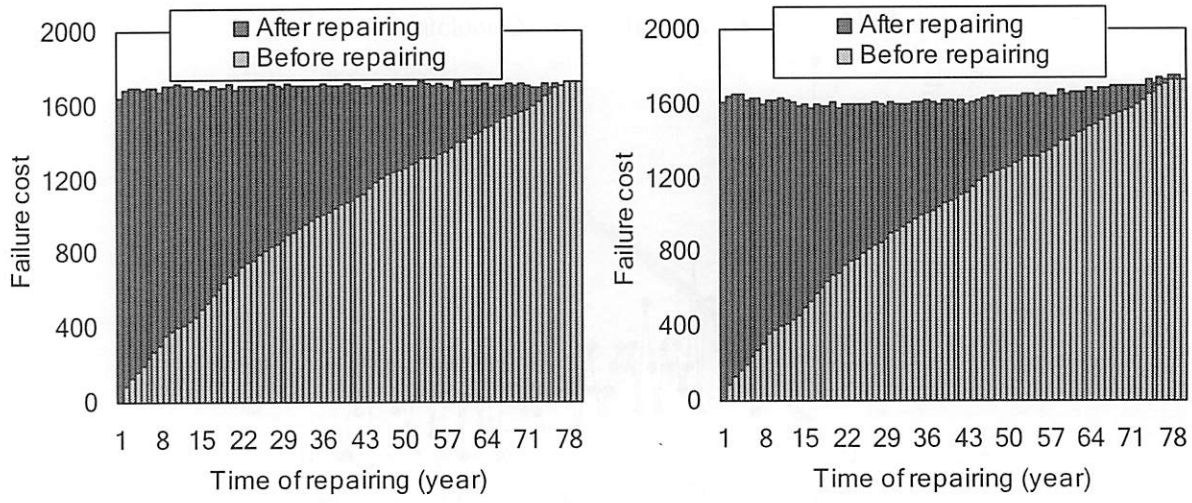


図-2.4.19　補修タイミングと損失費用の関係

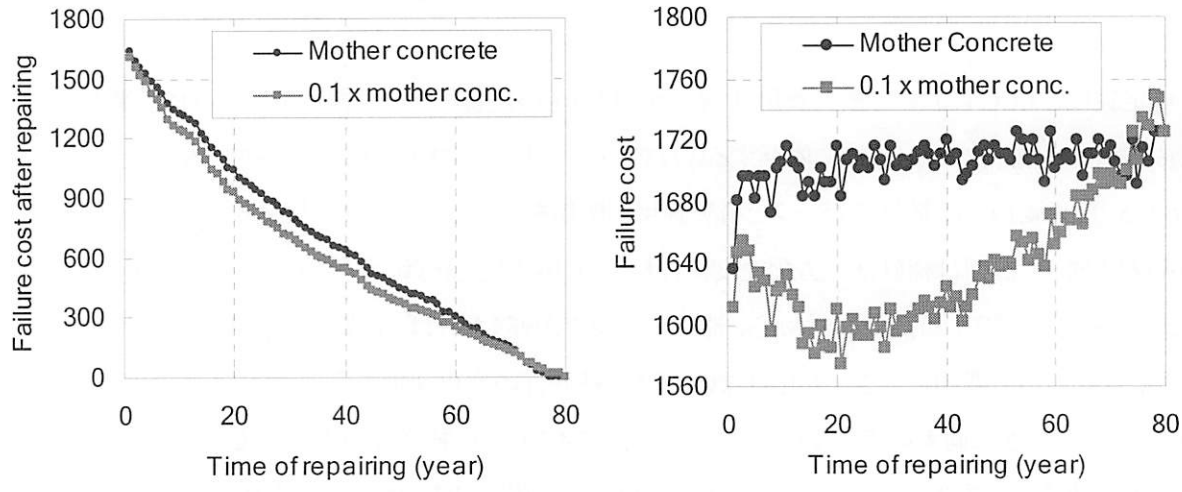


図-2.4.20　補修部の劣化速度が損失費用に与える影響

次に，LCC において補修に関わる費用に関して，感度解析の結果を図-2.4.21 に示す．なお，数学的には補修技術の価格変動率と社会的割引率は，下式のように一つの変数によって表現が可能であり，これを全変動割合（TR）と表現し感度解析を実施する．

$$\frac{(1+r)^{t_i}}{(1+v)^{t_i}} = TR^{t_i}$$

図から明らかように，全変動割合が 1 よりも大きいと，補修タイミングが遅くなるほど補修費用が増加しており，0.99 の場合は，7 年後に最大を，27 年後以降は 1 年目の補修費を下回る結果となり，補修タイミング遅いほど，補修費は低下する結果となっている．図-2.4.22 は，全変動割合に対する，補修技術の価格

変動率と社会的割引率の組み合わせを示している．日本における社会的割引率が一般に 4%であることを想定すると，補修技術の価格変動率は，全変動割合の低い順に，-2.24(0.94)，-1.2(0.95)，-0.16(0.96)，0.88(0.97)，1.92(0.98)，2.96(0.99)，4(1.00)，5.04(1.01) %となる．すなわち，2%程度以上の価格上昇となると想定される場合は，補修タイミングは早いほど補修費用は低下し，逆に価格上昇が 2%以下であれば，補修タイミングは遅いほど補修費用は低下する．社会的割引率が 2%の場合は，この境界が約 1%となり，6%の場合は約 5%となる．

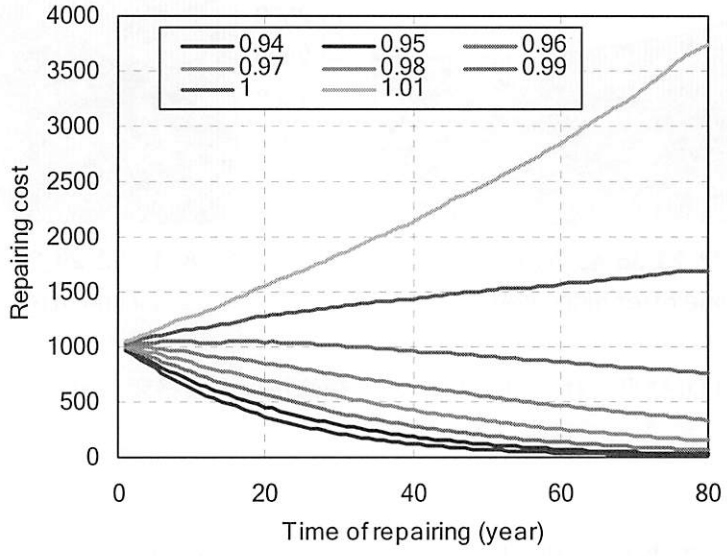


図-2.4.21　全変動割合が補修費用に与える影響

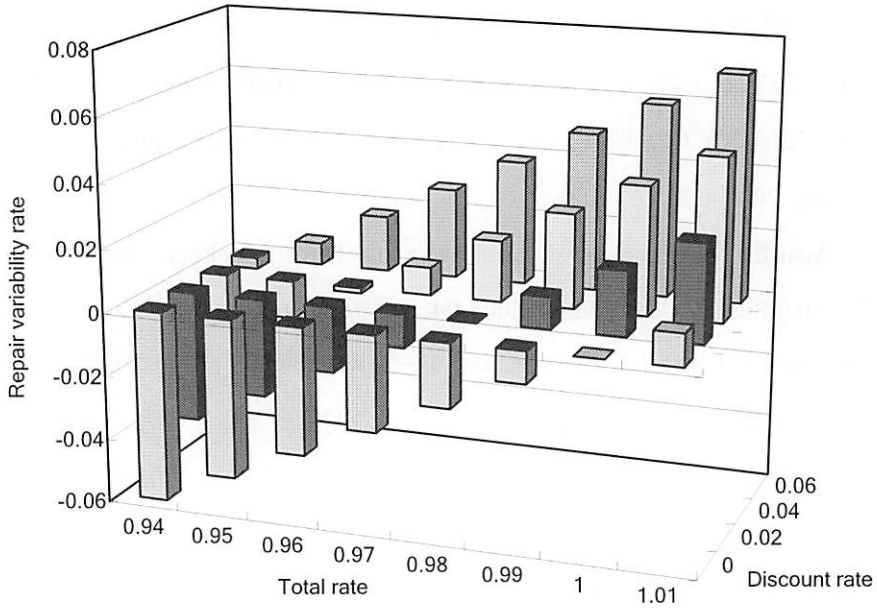


図-2.4.22　補修技術の価格変動率と社会的割引率の組み合わせ

最後に，社会的割引率を 2%とし，補修技術の価格変動率を-2%，+2%の場合の LCC の算定結果を図-2.4.23 に示す．これまで検討してきたように，長期における適切な LCC を確定的に論じることは現状では難しく，様々なケーススタディー，感度解析の結果，適切な補修を実行することが重要となる．

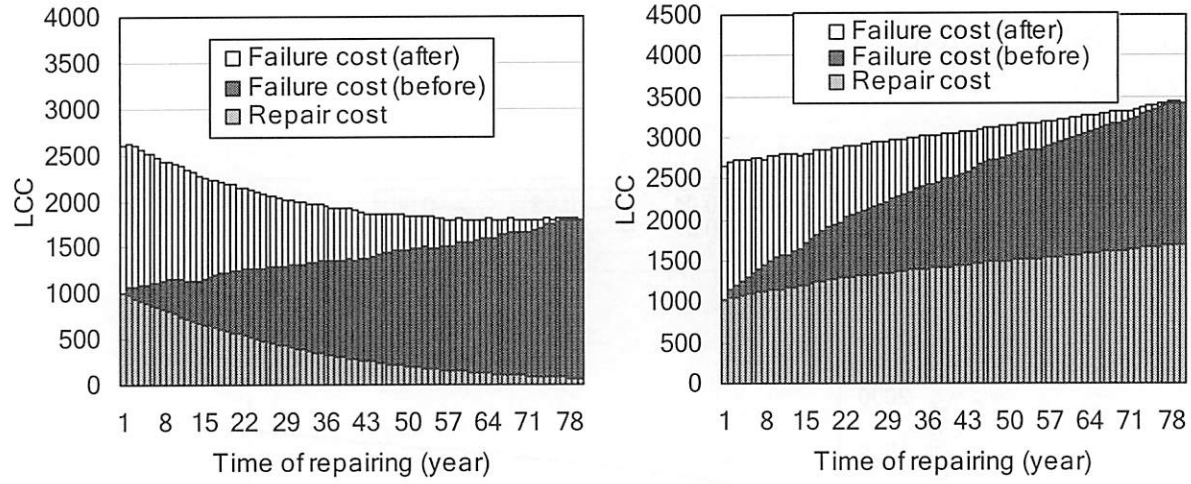


図-2.4.23 LCC 結果（社会的割引率=2%，補修技術の価格変動率 左-2%，右+2%）

参考文献

1) 国土交通省編：平成 15 年版国土交通白書，ぎょうせい，2003.4
2) 例えば，アセットマネジメント導入への挑戦 －新たな社会資本マネジメントシステムの構築に向けて－，土木学会建設マネジメント委員会，2003.8
3) 例えば，河村圭・宮本文穂・中村秀明・小野正樹：Bridge Management System (BMS)における維持管理対策選定システムの開発，土木学会論文集，No.658／VI-48，pp.121-139，2000.9
4) 建設通信新聞，2004.4.28
5) Ema Kato, Atsushi Yokozawa, Yoshikazu Akira and Hiroshi Yokota, Study on Durability of RC Deck of Existing Pier, ICUS REPORT 2005-04, pp.69-77, 2006
6) 旧建設省・旧運輸省・農林水産省：土木コンクリート構造物耐久性検討委員会の提言，2000.3
7) 旧建設省土木研究所：コンクリート施工の改善方法に関する調査報告書，1988.2
8) 日本土木工業協会：コンクリート構造物の施工に関するアンケート，2003.6
9) JMP: http://www.sas.com/ (2007.1.31 確認)
10) J. S. Marshall and W. Mck. Palmer: The Distribution of Raindrops with Size, J. Meteor., 5. pp165-166, 1948

11) Gunn R. and G. D. Kinzer.: The terminal velocity of a fall for water droplets in stagnant air, J. Meteor., 6, pp243-248, 1949

12) Fabien J. R. van Mook: Driving rain on building envelopes, the Eindhoven University Press, pp29-30, 2002

13) 阪田和哉, 林山泰久: 社会資本ストックの社会的割引率に関する実証的研究, 応用地域学研究, No.7, pp.99-109, 2002

14) IPCC. : Climate Change 1995 : Economic and Social Dimensions of Climate Change, Cambridge University Press, 1996

2.5 Urban Flood Simulation

2.5.1 Introduction

The Mekong basin, one of the important and largest river basins in the world, originates in the highland of Tibet in China and ends in the South China Sea comprising the territories of six Southeast Asian countries- China, Myanmar, Lao PDR, Thailand, Cambodia and Vietnam. The drainage area of the basin is 795,000 km^2 with a total length of 4,620 km (Hori, 2000). The Lower Mekong basin covers 78% of the total basin area which includes four riparian countries of the region: Laos, Thailand, Cambodia and Vietnam (Figure-2.5.1).

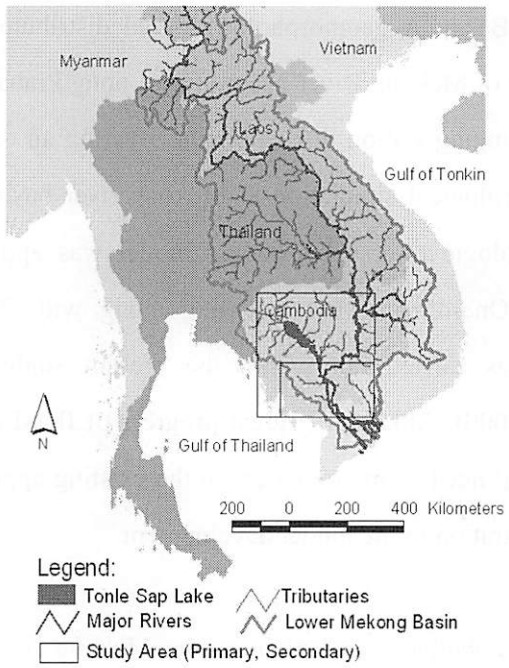


Figure-2.5.1: Location map of study area

The flooding in the Mekong basin, a very common phenomenon occurring several times a year, greatly varies in magnitude and extent in different parts due to spatial variability and local hydro meteorological characteristics including rainfall distribution. In the lower reaches of Cambodia, where the land is low and flat, a larger area is usually inundated. In 2000 during the period of August-November, the Lower Mekong region observed a record breaking flood in Cambodia and Vietnam estimating about 600 casualties, over 300,000 evacuated people and altogether with highest recorded water level in Phnom Penh since records began (Dutta, 2000). The reasons for the recent year's floods are reportedly due to deforestation, reclaiming of land, urban expansion and the decrease of natural

channels for the basin development (Kazama, et al., 2001). The frequency of flooding is also increased in the lower part.

The flood modeling in the Mekong was first initiated in the decade of 1960 with a view to an establishment of a basin wide flood warning system for the alleviation of adverse effect of floods in the areas along the Mekong River and the Delta (Dutta and Herath, 2001). After the development of a flood forecasting system through UNDP program in 1970, the flood modeling has got a momentum to continue in different forms from simple black box or conceptual modeling to complex hydrodynamic system by various organizations. With the rapid progress in computational resources, there have been tremendous development in modeling approaches over the world, and some of these approaches have also been applied in Mekong Basin. A geomorphology based distributed hydrological model was applied to the upper central part of Mekong River basin, from Luong Prabang station at the boarder of China up to the Stung Treng gauging station in Cambodia, covering an extent of 402,636 km^2 as an initial study on distributed hydrological simulation in Mekong river basin (Herath et al., 2000). To evaluate multi-functional hydrologic role, a hydrologic model was applied to Tonle Sap and its vicinities (Masumoto, 2000). One-dimensional modeling along with 2-d model in Chaktomouk junction of Mekong River was carried out within the present study area in connection with morphological study (Olesen, 2000). Although, a great progress of flood modeling in Mekong River basin could be seen, there is still need of improvement in the existing approaches. Another limitation is that data availability and integration in the model development.

In this research, the Cambodian flood plain of the Mekong river, Tonle Sap Channel and Bassak river is selected as study area for modeling. These lower reaches of the Mekong River (below Kratie) have different hydrologic and hydraulic characteristics than the rest of the Mekong basin. The flow patterns in these portions of the basin are characterized by very low water surface slopes, inundation of a huge floodplain during and after the annual flood peak, and deposition of a fraction of the suspended sediment on the river dykes and adjacent floodplains (MRC, 2003).

2.5.2 Modeling Aproach

(1) Outline of the model

The distributed model used in this study is a coupled surface-river flow model, which has been designed to calculate the flow parameters in the river channel and floodplain simultaneously. The model was originally developed by the Public Work Research Institute (PWRI), Japan (Yoshimoto et al., 1992). The main characteristic of the model is the link between unsteady calculation in river channel and calculation of flood depth in river basin to reproduce the flood inundation phenomenon in large scale over the whole river system. The relation between stage in river channel and height of levee decides the points and scale of flood levee failure with unsteady calculation in river channel. A schematic diagram of the model is shown in Figure-2.5. 2.

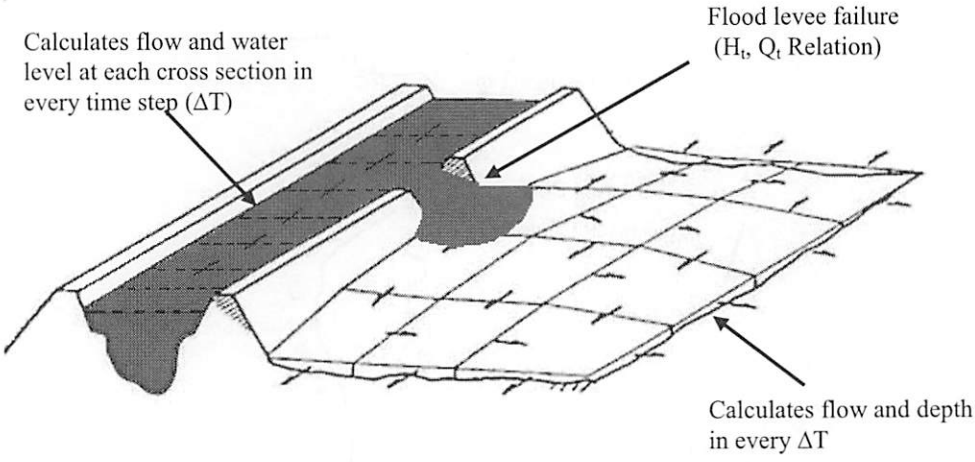


Figure-2.5.2: Outline of the model (adapted from Yoshimoto et al., 1992)

(2) Governing equations

Basically, the model uses two dimensional unsteady flow equations for flood flow calculation in basin, and one dimensional unsteady equation for river flow. However, outside of these, flow from river channel to flood area caused by flood levee failure or over flow of levee, flow from flood area to river channel such as sluice, pump etc., moreover, condition of basin or river channel, in some cases these equations are not applicable, where some suitable equations are used in conditions. For example, in case of calculation about flood plain, local phenomena which is unable to solve with energy equation as long as not using empirical coefficient occurred at the points where gradient of flood plain changes suddenly except the effects due to weir of bank, calculation is done using other equations as discussed in the sections below (Yoshimoto et al., 1992). Besides, model uses empirical equation for calculation of flow in box culvert or over banking flow when embankment exists on the flood plain. The unsteady equations are derived from continuity and momentum equations for one dimensional as well as for two dimensional flows.

(3) Model setup

1) *River system*

For preliminary simulation, a small part of river system near Phnom Penh city has been considered which includes Mekong River (Below Kompong Cham), Bassak River and Tonle Sap Channel as shown in Figure-2.5. 3 with hydrological gauging stations. The river setup has been assigned with cross sections. The raw cross sections data have been processed and given as H-B-A-R (Height-Width-Area- Hydraulic Radius) relation in the model. The details of cross-section of the the river system are given in Table 1.

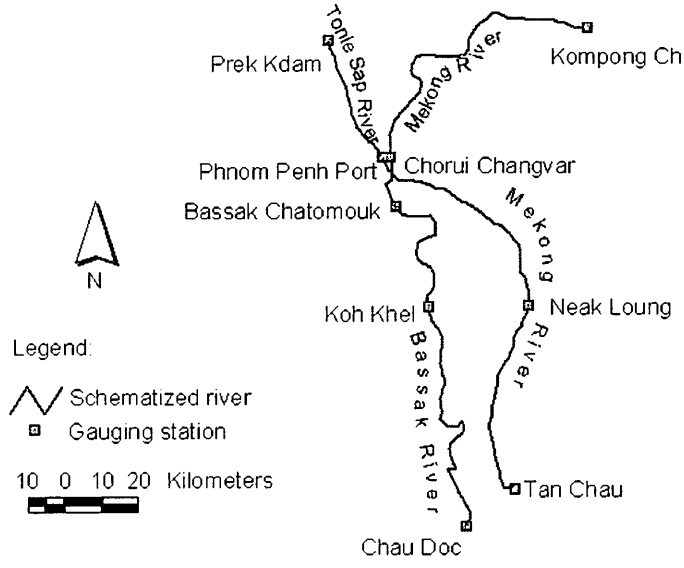


Figure-2.5.3: Model River Network

In river cross sections the link between the 2-D grids of the flood plain and the river channel is specified. The relation between stage in river channel and height of levee decide the points and scale of flood levee failure with unsteady calculation.

Table-2.5.1: Details of Model Rivers

Rivers	U/s locations	D/s location	No. of cross sections
Mekong	Kompong Cham	Tan Chau	84
Bassak	Mekong Ch.213.0 km	Chau Doc	32
Tonle Sap	Mekong Ch.213.0 km	Prek Kdam	38

2) *Model grid*

Rectangular grid of 1 km resolution has been used in this study. The total number of grids within the study area is 121113. The source of the Digital Elevation Model (DEM) is the Mekong River Commission Secretariat (MRCS), which has originally been derived from various sources data (Figure-2.5. 4).

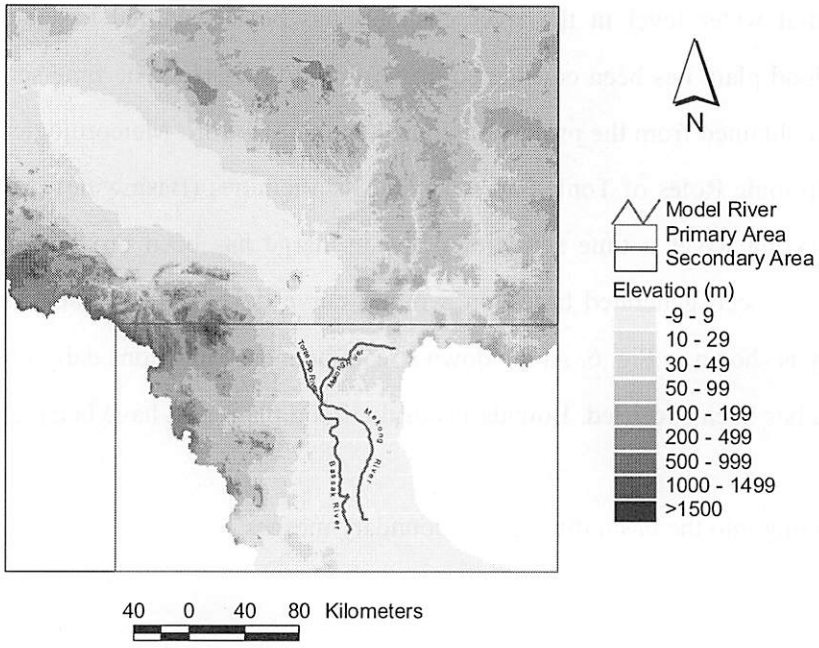


Figure -2.5.4: DEM of the Model Area (Source: MRCS)

3) *Structures and other information*

The model has the provision of incorporating hydraulic structures like weir, culvert and pumping options for drainage and retarding basin. The embankment or road alignment along with structures information gives the true description of the physical system. However, not all of these information are incorporated properly yet in this simulation, which are being updated from the available source for final calibration of the model.

(4) Model application

The model has been applied for simulation of flooding during the period of 1st of July to 31st October of 2000. The stability of simulation is very much dependent on grid spacing and the time step used in computation. In use of 1 hour time step, stable simulation has been obtained. Rainfall has been specified as an internal runoff on the model grid. Evaporation value has been deducted from daily rainfall value to calculate the net rainfall. Based on the Thiessen polygon developed for the project

area, rainfall has been distributed over the grid as internal runoff (m^3/s). At 46 locations the rainfall data is available for 2000 and evaporation data available only in one station at the MRCS Headquarter. The average of daily rainfall of 46 stations is shown in Fig. 5.

(1) *Initial and boundary conditions*

The initial water level in the river channels has been specified based on observed data. However, the flood plain has been considered dry at initial time step. The time series boundary data has mainly been obtained from the project of Consolidation of Hydro-Meteorological Data and Multi-Functional Hydrologic Roles of Tonle Sap Lake and Its Vicinities (Basinwide) (MRC, 2003). At the upstream of Mekong River a time series of daily discharge has been provided as an inflow. The discharge data has been generated based on a rating curve developed by 2002 observed data. The inflow boundary is shown in Fig. 6. At the down stream boundary locations daily observed time series water level data has been specified. Boundaries of the flood plain grid have been assumed closed, i.e. no flow is

going out or coming into the basin through the boundary meshes.

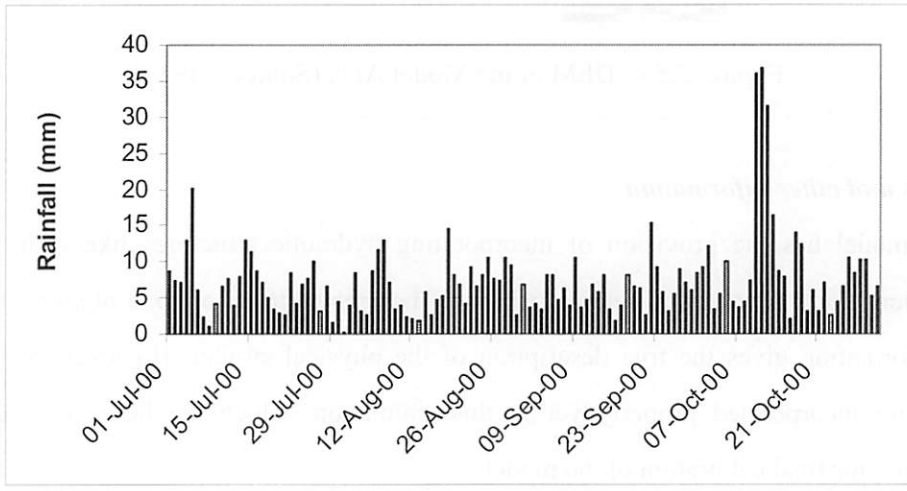


Figure-2.5.5: Average of daily rainfall of 46 stations around the study area

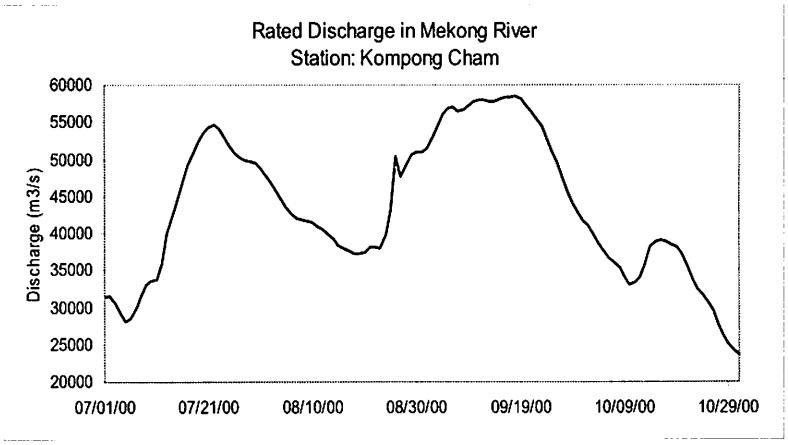


Figure-2.5.6: Inflow boundary to the upstream of Mekong River

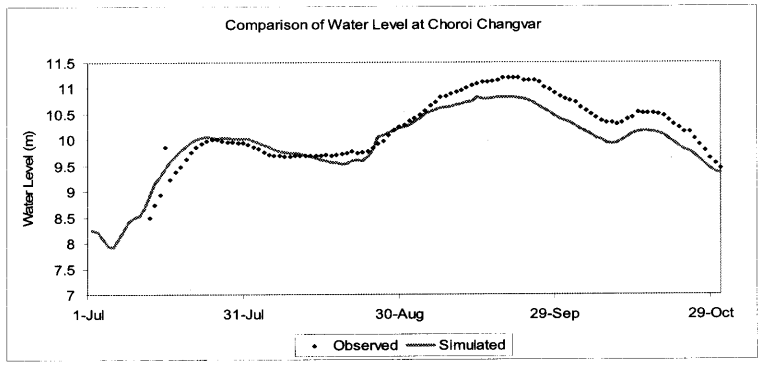
(2) *Roughness coefficient*

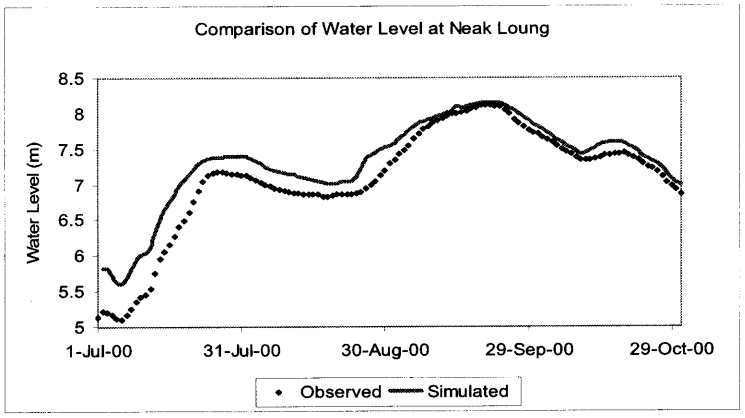
A fixed value of Manning roughness coefficient has been specified in each cross section of river channels. The roughness value for river channels is 0.03. For the flood plain grid the roughness value has been used based on the land use type. The landuse map of 1km resolution for the study area was obtained from Global mapping project. Besides, in roughness calculation, model also considers the occupied housing ratio in the each grid of the flood plain.

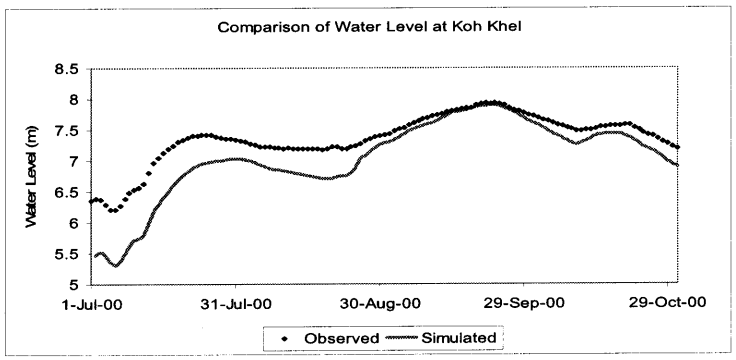
2.5.3 Results and Discussions

The simulation results of river water levels for the period of July 1st to October 31st of 2000 have been compared with the observed water levels at different gauging stations along the four river branches in the study area. In absence of any field observation, the simulated extents of flood inundation have been compared with satellite imagery. Fig. 7 shows the comparison of simulated and observed daily water levels at the gauging stations of Meklong river (Choroi Changvar and Neak Loung stations), Basak river (Koh Khel station) and Tonle Sap river (Phnom Penh Port station). The locations of these gauging stations are shown Fig. 3. It can be observed from the comparison that the simulated water levels match well with observed ones in Mekong and Basac Rivers. However, the simulated water level is much higher than observed water level at Phnom Penh Port in Tonle Sap river. The Tone Sap lake in the upstream of this river influences the flow characteristics greatly. For improvement of the simulated results, it will be important to incorporate this lake in the simulation.

The simulated maximum flood inundation extents and depths of September 20, 2000 are shown in Fig. 8. By comparing simulated inundation map with the flood extent observed from the LANDSAT TM image of September 26, 2000 (as shown Fig. 9), it can be noticed that the simulated flood pattern and locations agree well with the actual flooding. However, the simulated flood extent is much lesser than the observed flood extent from the remote sensing image along the Mekong and Tone Sap rivers. There are two major possible reasons for this. The first reason is that in simulation there no consideration of flood water entering to the study area from outside over the ground, only inflow along the river system is considered as the upstream boundary conditions. However in reality, there is a large amount of water entered to the study area as overland flow. The other possible reason is the low resolution of the DEM considered in the model. Flood modeling is very sensitive to DEM, it is required to consider high resolution topography dataset for obtaining better modeling outcomes.







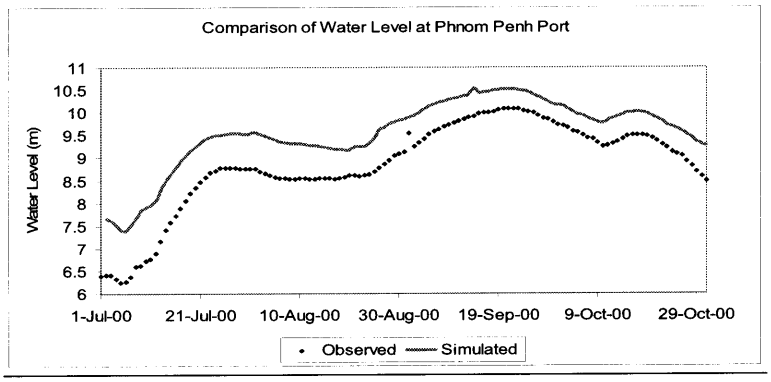


Figure-2.5.7: Comparison of simulated and observed water levels at the gauging stations Choroi Changvar, Neak Loung, Koh Khel, and Phnom Penh Port

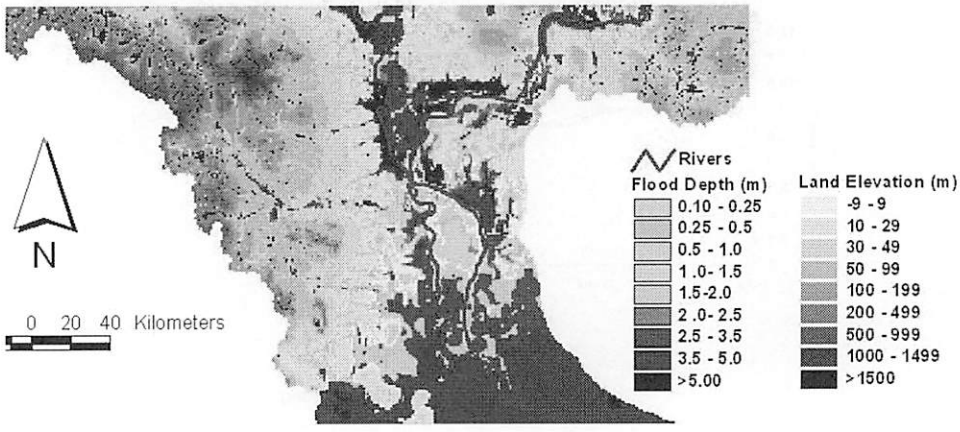


Figure-2.5.8: Simulated maximum flood depths and extents

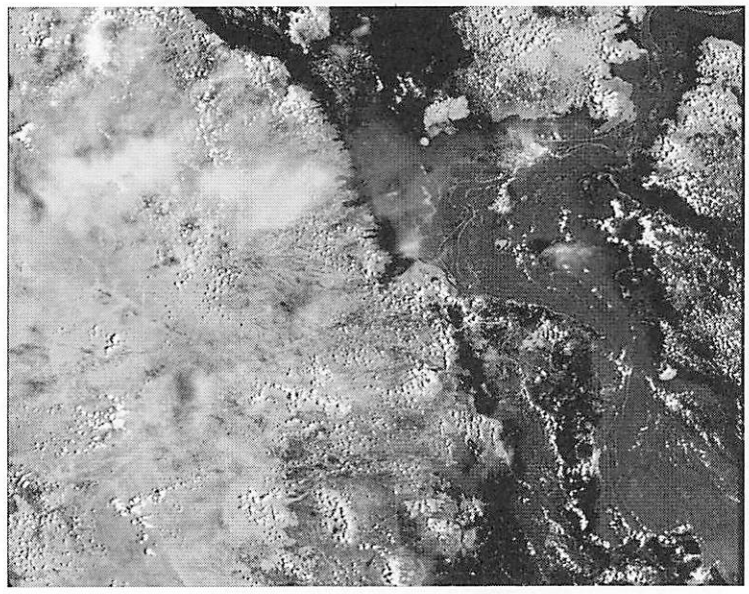


Figure-2.5.9: LANDSAT image on flood of 26 September 200

2.5.4 Conclusions

In this paper, a physically based distributed surface-river model has been introduced and the results of flood inundation simulation in an urban area in the lower Mekong basin have been presented. The simulated water levels along the Mekong and Basac rivers show close agreement with the observation. However, the extent of simulated flood inundation is lesser than that is observed from

satellite data. It is required to improve the simulated inundation with realistic consideration of inflow from outside and higher resolution of DEM and the simulated flood inundation parameters in different locations should be thoroughly verified with the ground observation.

This is an on-going research project. In the next phase of simulation, the study area will be extended to cover the Tonle Sap Lake, which has a great influence in flood characteristics and flood inundation simulation will be carried out with updated details of topography and surface boundary conditions to consider the flow influx from outside of the study area.

REFERENCES

Chow, Ven Te, Maidment, David R., Mays, Larry W. 1988. *Applied Hydrology.* McGraw-Hill, Inc., pp35.

Dutta, D. and S. Herath 2001. *Flood Modelling Experiences in Mekong River Basin.* Proceedings of the International Symposium on Achievements of IHP-V in Hydrological Research, Hanoi, Vietnam, IHP-V Technical Document in Hydrology No. 8, pp.51-52.

Dutta, D. 2000. *Devastating Floods in Cambodia*, 2000. INCEDE Newsletter. Vol. 9, No. 1, pp. 1-4.

Herath, S and Yang, D.2000. *Distributed Hydrologic Modeling in Mekong Basin.* Proceedings of the workshop on Hydrologic and Environmental Modelling in the Mekong Basin, 11-12 September 2000, Phnom Penh, pp30.

Hori, H. 2000. *The Mekong: Environment and Development.* United Nations University Press, Japan, ISBN: 92-808-0986-5, pp1.

Kazama, S., Hagiwara, T. and Sawamoto, M. 2001. *Temporal and Spatial Inundation Pattern Revealed by Numerical Simulation of the 2000 Flood in the Lower Mekong.* Proceedings of the International Symposium on Achievements of IHP in Hydrological Research, Hanoi, Viet Nam, 19-22 November 2001, IHP-V Technical Document in Hydrology No.8, International Hydrological Programme, UNESCO Jakarta Office.

Masumoto, T. 2000. *Modelling of Multi-Functional Hydrologic Roles of Tonle Sap Lake and Its Vicinities.* Proceedings of the workshop on Hydrologic and Environmental Modelling in the Mekong Basin, 11-12 September 2000, Phnom Penh, pp181.

Mekong River Commission (MRC). 2003. *Consolidation of Hydro-Meteorological Data and Multi-Functional Hydrologic Roles of Tonle Sap Lake and Its Vicinities (Basinwide).* Draft Final, Main Report, pp1-1.

Olesen, K. W. 2000. *Morphological Modelling of the Chaktomuk Junction, Proceedings of the workshop on Hydrologic and Environmental Modelling in the Mekong Basin*. 11-12 September 2000, Phnom Penh, pp289.

Yoshimoto,T., Fueda, T., Ikeda, Y., Kawakami, T. 1992. *Technical Memorandum of Public Work Research Institute (PWRI)*. Flood Simulation of Two Dimensional Unsteady Flood Model, Public Works Research Institute, Japan , T. M. of PWRI No.3105, ISSN 0386-5878.

Geographical Survey Institute. 1997. *Global Map'97 Dataset.* Secretariat of the International Steering Committee for Global Mapping, Kitasato 1, Tsukuba, Ibaraki, 305-0811, JAPAN.

3. 災害アーカイブスの開発

適切な防災対策の構築や災害に強い都市の設計には、過去の災害体験に学ぶことが重要である。しかしそれぞれの災害は、対象地域の特性、季節や天候、発災時刻などの影響を受けるし、対象者の立場によっても大きく変わる。ゆえに過去の事例をそのままの形で用いることはできない。そこで、本研究では、過去の災害で発生した事象、対応活動や教訓などを、発災からの経過時間や空間、対象者の組織や立場など、様々な角度から検索し分析できる災害情報のアーカイブを開発した。この背景には、従来の災害情報が、「ある分野の専門家が自分の専門分野の調査を行い、報告書を書いて終わり」の結果として残されているだけで、他の人が異なった目的で活用したい場合などには全く使えないものであったことの反省がある。

また、このコンセプトの災害情報アーカイブスは、種々の物理・社会現象に関する最新のシミュレーションモデルとデータベースの組合せにより、ただ単に過去の危機管理事例を収集・整理するだけでなく、異なる発災時刻、自然条件、地域の防災力、社会情勢のもとでの危機発生状況をシミュレートし、それを「擬似危機事例」として蓄積・更新していくことを可能とする。「擬似危機事例」を量産し、教材として用いることで、実際の危機事例の稀少性を補完し、危機に対するイマジネーション能力を高めることが可能となる。また、災害発生時においては、実際の物理・社会環境条件を逐次入力することで、ごく近未来の災害状況を高精度に予測・更新し、危機対応時の意志決定を支援することが可能となる。

以上のような考えに基づき、過去の危機事例や将来発生しうる危機評価結果に関する情報のデータベース化の一貫として、関東大震災の被災写真の収集と、同一地点・同一アングルから写真の撮影を行い、過去の大都市災害である関東大震災時の東京をよりリアリティをもって体験可能な、「関東大震災 Web フォトギャラリー(図-3.1, 図-3.2)」を構築した。また、このアーカイブ・モジュールをさらに充実させる上で、将来日本を襲うであろうと予想される災害を見据えたコンテンツの充実が不可欠と考え、21 世紀前半の発生が予想されている南海・東南海・東海地震で危惧されている津波被害対策用に、「インド洋地震津波災害被災地映像データベース」やインド洋地震津波災害の被災地において GPS 情報を付与したデジタルビデオカメラ映像のデータベース化、阪神・淡路大震災(図-3.3)や新潟県中越地震の対応記録, NY 同時多発テロにおける関係組織の対応記録(図-3.4)などのデータベース化を行った。

図-3.1 関東大震災 Web フォトギャラリー（その1）

図-3.2 関東大震災 Web フォトギャラリー（その 2）

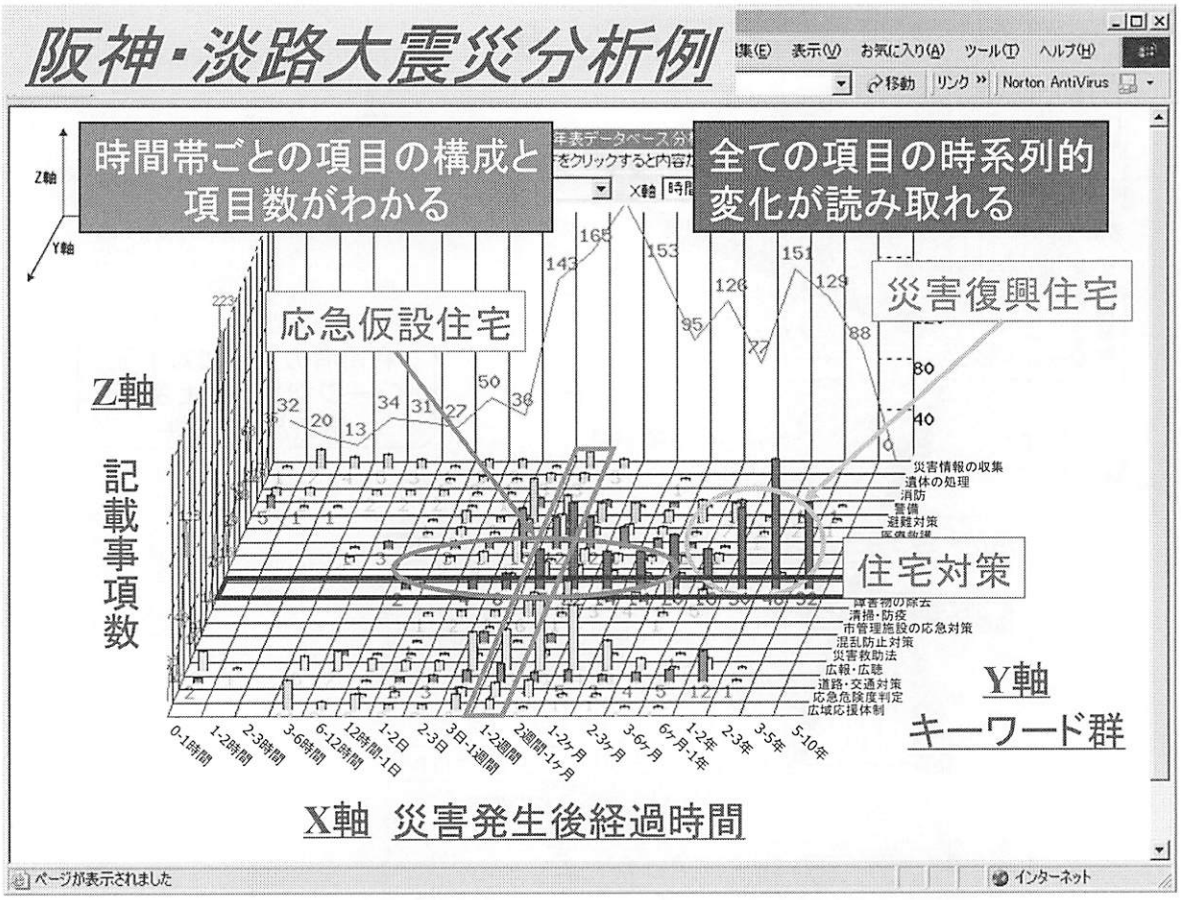


図-3.3 阪神・淡路大震災の教訓データベース

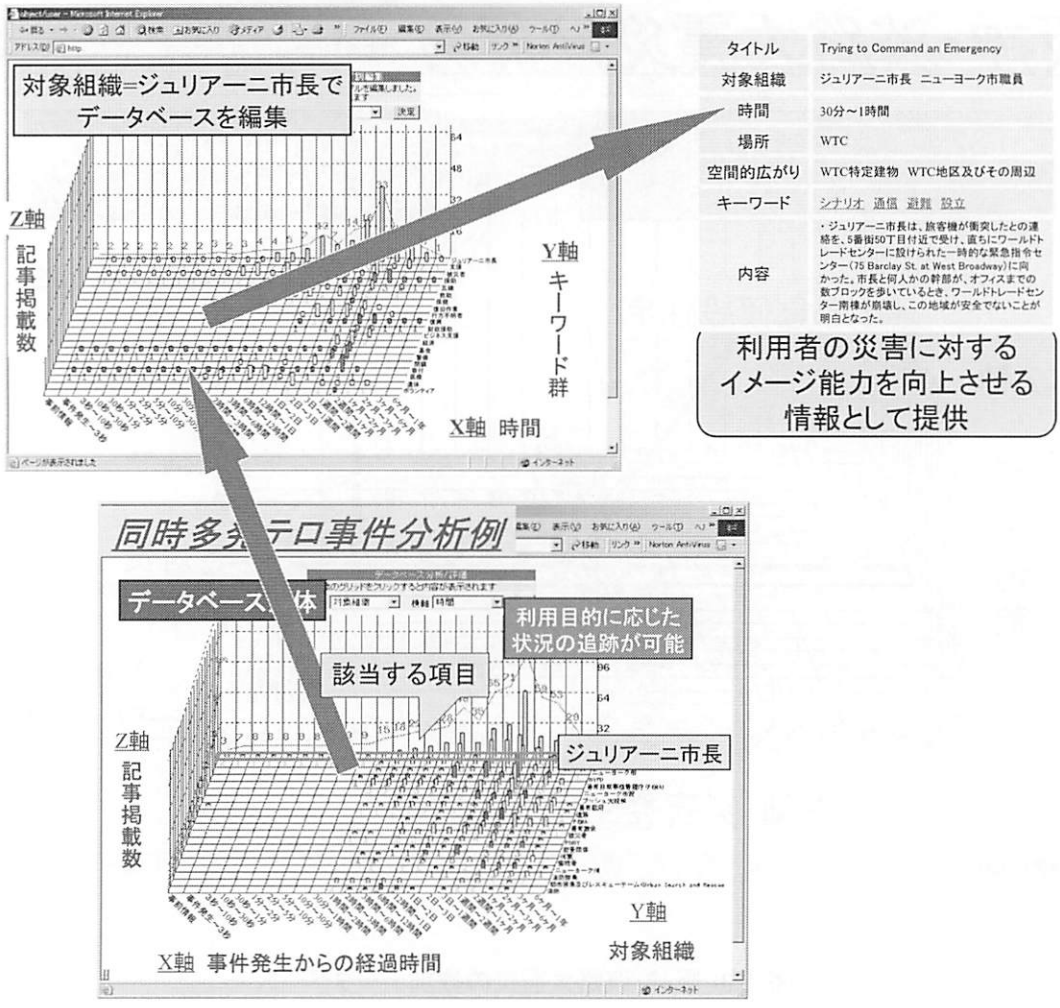


図-3.4　NY 同時多発テロにおける関係組織の対応記録のデータベース

4. 3次元GISハザードマップを活用した都市空間の最適設計

4.1 3 次元地震地域危険度マップを用いた都市空間の最適設計

4.1.1 地域地震危険度と地震被害想定の違い

適切な地震防災対策を講じるためには，将来直面するであろう地震被害の様相や，地域の地震に対する脆弱性を知っておくことが重要である．これらの情報を得る手段として，「地震被害想定」と「地震危険度評価」と呼ばれる検討が一般的に行われる．この２つは「似て非なるもの」で，その違いを含めて正しく理解されていない場合が多い．ここでは 3 次元地震地域危険度マップを用いる上で、その違いについて簡単に説明しておく．

首都圏を対象としては，東京都の総務局が 1997 年に複数の震源案を検討した上で，ゆれのパターンの異なる区部直下，多摩直下，神奈川県堺直下，埼玉県堺直下の４つの M7.2 の首都直下地震を対象にした「地震被害想定」を行っている．「地震危険度評価」は東京都の都市整備局によって昭和 50 年 11 月に第 1 回（その時は区部のみ）が公表され，以来 5 年おきに地域危険度測定調査が行われ，最後は 2002 年に第 5 回目の危険度が公表されている．

この２つの基本的な違いを説明する前に，地震による被害の性質や程度が何によって変化するのかについてまず簡単に述べておく．

地震災害の様相は，地震の揺れの強さ(これを地震動と呼ぶ)と地域の持つ危険な要因との組み合わせで決まる．地震動の強さは，地震そのものの大きさ(マグニチュード)，震源位置と対象地域までの距離，対象地域の地形や地盤の良し悪しによって変化する．地域の持つ危険な要因とは，自然環境特性と社会環境特性から決定される地域特性のことである．地域の気象や気候，地形や地盤条件などは自然環境特性の代表である．一方，社会環境特性とは対象地域の都市システム，インフラ，政治や経済，文化や教育，歴史や伝統，宗教や思想などの特性である．地域の人々の生活は自然環境特性と社会環境特性によって決定され，この地域特性が異なれば，同じ地震動が作用しても被害の様相は変化する．また地域活動や住民生活が時間によってダイナミックに変化することから，地域特性を表現する変数には，季節・曜日・時刻などの時間の項が入ってくる．

まず「地震被害想定」について説明する．地震被害想定では、最初に a)対象地域に起こる可能性の高い地震(地震断層)を選定(これをシナリオ地震とかシナリオ断層という)し，この地震の場所と大きさ(さらに詳しくは断層の角度や破壊の開始点，進展方向など)を決める．対象地域の位置と地形や表層地盤の特性を考慮して，b)各所を襲う地震動の特性(強さと周波数特性)を求める．c)各所に存在する基盤インフラ設備や住宅をはじめとする構造物の強度特性と b)で求めた地震動を比較することで各種の物理的な被害の量(直接被害とも言う)を評価する．d)最後に，c)

で求めた被害量を基に，出火・延焼件数や人的被害，さらには経済的な被害(間接被害と言う)を評価する．

一方，「地域危険度評価」とは何か？　基本的な作業の流れは「地震被害想定」と同じであるし，用いる解析手法も同様である．最大の違いは，a)のシナリオ断層の選定法にある．「地震被害想定」では対象地域で発生する可能性高い地震をシナリオ地震に設定するのに対して，「地域危険度評価」では対象地域全体を巨大な振動台の上に載せて同じ特性(強さの周波数)の揺れを地面の基盤に作用させる点にある．ゆえに「地域危険度評価」で用いられる地表動では断層からの距離による差は生じない．単純に各地の地形や表層地盤の特性のみを踏まえた地震動が襲うことになる．これを用いて行う b)から d)の検討はまったく同じである．最終的なアウトプットは，d)によって得られた被害量の大小を地域ごとに比較し，それぞれの被害項目ごとに順番をつけたもので，それを被害別の地震危険度と定める．

このような違いを有する「地震被害想定」と「地域危険度評価」の結果の意味と利用法の違いは何か？まず被害の絶対量としての意味は「地震被害想定」の結果は持つが，「地域危険度評価」の結果は意味を持たない．ゆえに被害量に応じた量を定める必要のある備蓄量など決める指標には，「地域危険度評価」の被害結果は適さない．限られた資源や時間を有効に活用して防災対策を講じようとする際に，対象地域のシナリオ断層が精度高く決定しにくい場合や優先順位がうまくつけにくい場合，地域全体を対象として特定の地震断層を対象としないで危険度の相対的な順番付けをしたい場合などは，「地域危険度評価」の値が使いやすい．

4.1.2 用いたデータ

ここでは，震災時に身の回りで起こる地震被害発生過程を都市の 3 次元空間情報システム上で再現してみせる情報システムの構築を行った．用いたデータは，都市の 3 次元空間情報データベースと東京都による第 5 回地域危険度測定調査結果[1]である．都市の 3 次元空間情報としては，株式会社キャドセンターによる「MAPCUBE(R)（マップキューブ）」の東京都 23 区内のデータを用いた．これは，航空機からのレーザー測量データ、縮尺 1/2500 精度のベクター地図、航空写真画像データをもとに構築した地形や建築構造物の高精度なモデルである．

東京都では，既に説明したように，東京都震災予防条例（現：東京都震災対策条例）に基づき，昭和 50 年 11 月に第 1 回（区部）を公表して以来，5 年おきに地震に関する地域危険度測定調査を行っている．第 5 回目の調査では，都内都市計画区域の 5,073 町丁目について，各地域における地震に対する危険性が建物，火災，避難の面から 1 から 5 までのランクで相対的に評価され，地域の地震に対する危険度を公表されている．建物倒壊危険度は，地震動によって建物が壊れたり傾いたりする危険性の度合いを評価したもので，地盤と地域にある建物の状況により判定され

る．構造別（木造、鉄筋コンクリート造など），建築年次別，階数別などに分類し，その耐震性能を評価している．危険度の高い地域は，谷底低地や沖積低地に分類される地盤上にあたる地域に多く，古い木造や軽量鉄骨造の建物が多く集積している地域である．

火災危険度は，地震による出火の起こりやすさと，それによる延焼の危険性を測定して火災の危険性の度合いを評価したものである．延焼の危険性は，出火した場合の燃え広がりのシミュレーションを実施し，焼失する建物の面積をもとに算定している．火災危険度は，木造建物が密集している地域で高くなり，耐火建物が多く，道路，公園などの公共施設が整備された地域では低くなる．火災危険度の高い地域は，区部の環状７号線の周辺にドーナツ状に広がっている．避難危険度は、避難場所に到達するまでに要する時間と，避難する人の数を組み合わせて評価したものである．避難危険度は，避難場所までの距離が長く避難道路沿いに避難の障害となる要因が存在し，避難する人の数が多いほど高くなる．総合危険度は，「建物倒壊危険度」，「火災危険度」，「避難危険度」の三つの危険度の和を５ランクにランク分けして表示したものである．地震に対する総合的な危険性を考える指標として算出されている．総合危険度の高い地域は，区部の城南と城北方面及び下町地区に点在している．総合危険度のマップを一例として図 4.1.1 に示す．

図-4.1.1 東京都地域危険度測定調査による総合危険度

4.1.3 3次元地域危険度マップシステムの開発

前述の地域危険度測定調査結果を3次元空間情報システムで表示させ，自由に閲覧できる3次元地域危険度マップシステムを開発した．システム操作時の画面を図-4.1.2～4.1.4 に示す．ユーザーはまず，自分の居住する地域を選択して，見たい地域をクローズアップする．ここで建物倒壊危険度・火災危険度・避難危険度・総合危険度をメニューボタンから選ぶことにより，地震時の自分の居住する地域の危険度を確認することができる．居住する建物の周辺状況も合わせて確認することができ，地域全体での地震時の安全性の理解と事前対策の必要性の認識を促進することが可能である．「防災情報表示」ボタンをクリックすれば，見たい地域の危険度ランクおよび最寄りの広域避難場所の場所と到達距離を閲覧することができる．避難場所までの距離から避難困難度を把握するとともに，避難経路となる地域の建物倒壊危険度や火災危険度も閲覧できるため，最適な避難経路を検討することが可能となる．

これらのシステムにより，地震時に自分が置かれる周辺状況をリアルにイメージすることができうると考える．しかし，市民が気軽に本システムを利用するためには，ユーザーにとって見やすく，使いやすい，触ってみたいと思わせるシステムである必要がある．画像表示のためのモニターは見やすく，大人から子供まで誰でもが容易く使えるユーザーインターフェースを有していることが不可欠である．都市の3次元空間情報は膨大なデータ量のデータベースである．都市を3次元的に自由な角度で俯瞰したり，特定の地域や建物にクローズアップしたりできなければ，地震時の周辺状況のリアルなイメージを想起できない．しかし，このような画像の拡大・縮小・移動・視点の変化をマウスやキーボードで自由に操作することはパソコンに不慣れな高齢や子供にとっては難しい．そこで，ユーザーにとって容易な操作を可能とするために，タッチパネル式のユーザーインターフェースである多指認識型 VR 時空間情報システム「NEXTRAX」（株式会社キャドセンター開発）を採用した．これは，1 本の指にて操作する通常のタッチパネルとは異なり，2 本、3 本以上の指を使って画像の拡大・縮小・移動・視点の変化を自由に操作できる．赤外線センサーと三角測量方式の組み合わせにより，従来のタッチパネルでない，多指認識型 VR(バーチャルリアリティー空間の表示が可能となっている． 操作の様子を図-4.1.5 に示す．

開発したマップシステムは多数の自治体・防災関係者，小・中・高校生等に体験利用してもらい，利用者のコメントをもとにインターフェイスの構成，コンテンツの改善を行った．利用者からは概ね「わかりやすい」，「災害時の状況をイメージしやすい」等の評価を得ている．本システムはインターネット上で公開しており，事前登録(サイトは http://risk-mg.iis.u-tokyo.ac.jp/risk_map.html)により Web を介してコンテンツにアクセスすることができる．さらに多数の市民に利用してもらうことにより，市民一人一人による耐震化対策や事前の防災対策の実施の推進に貢献していきたいと考えている．

最後に示した図-4.1.6 はこの種のシステムの近未来像の例である．実在の 3 次元都市空間を対象に，直後の様々な被害状況（ここでは地震動被害、津波、火災など）から災害対応や復旧復興までを対象とする災害環境をシミュレーションするもので，このようなシステムを活用することで，事前対策を含め総合的な防災力の向上が期待される．

参考文献

1) 東京都都市整備局：第５回地域危険度測定調査結果 http://www.toshiseibi.metro.tokyo.jp/bosai/chousa_5/home.htm

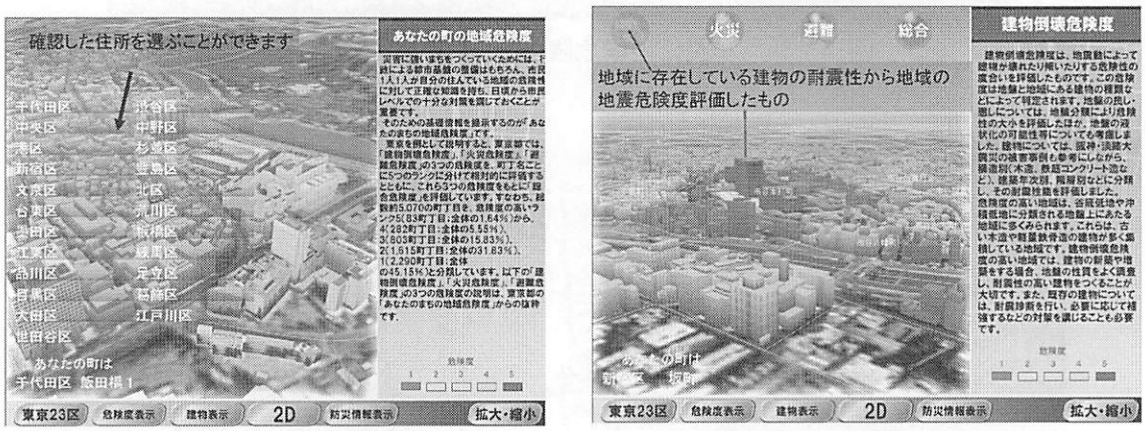


図-4.1.3　3 次元地域危険度マップの操作画面（その 1、その 2）

図-4.1.4　3 次元地域危険度マップの操作画面（その 3）

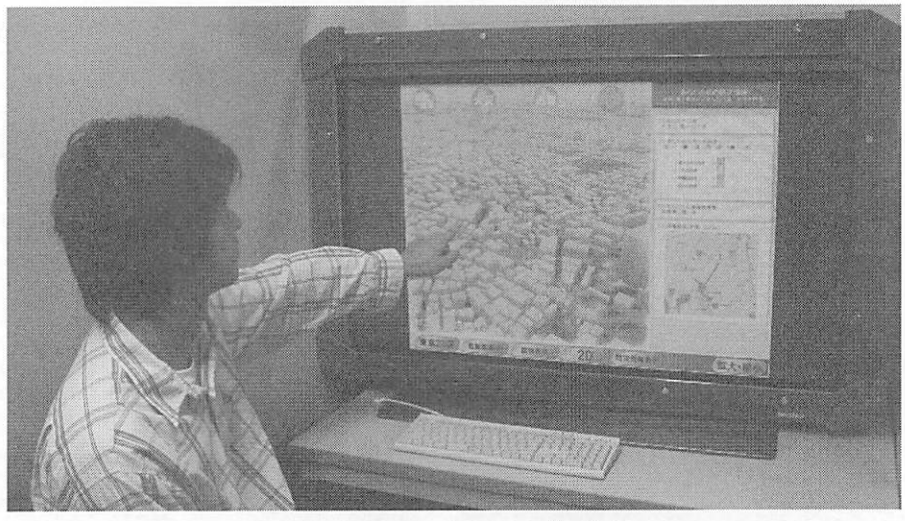


図-4.1.5　3 次元地域危険度マップの操作画面（その 4）

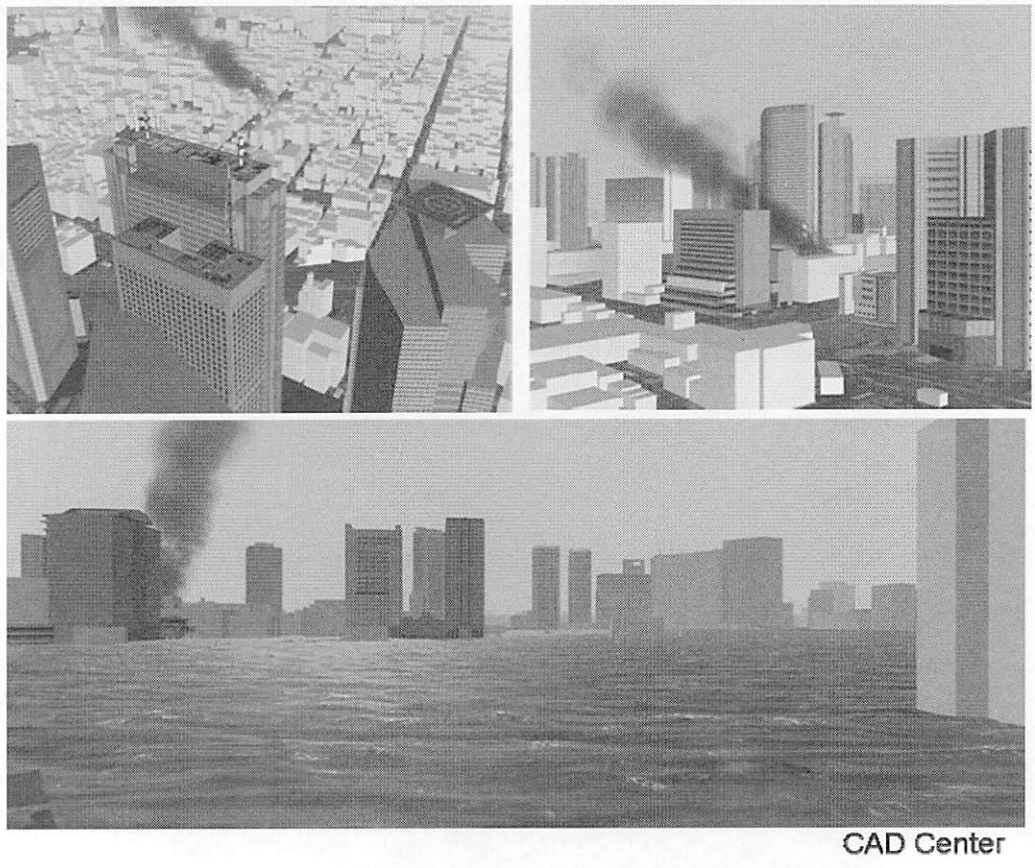


図-4.1.6　3 次元都市 GIS を用いた将来のシステムの例

4.2 トルコ共和国イスタンブールでのWSを通した都市空間の最適設計

トルコ共和国イスタンブール地域を対象として，3 次元ＧＩＳマップシステムを用いたワークショップを通した都市空間の最適設計のケーススタディーを行った．

トルコ共和国北部は世界でも有数の地震頻発地域の一つである．国内には，北アナトリア断層(図-4.2.1)[1] と東アナトリア断層という 2 つの巨大な断層が存在する．北アナトリア断層は東西に 1,000km 以上続く断層であり， 1939 年の地震以降，8 つの大地震を引き起こしている [2]．1999 年 8 月 17 日午前 3 時 1 分 27 秒に発生したコジャエリ地震では，北アナトリア断層の西部分の 100-125km が破壊した [2]．図-4.2.1 に示した通り，それまでの地震の震源は，東から西へと進展してきており，コジャエリ地震の震源域は典型的な空白域の一つとして認識されていた．イスタンブール市は，中東における巨大都市の一つであり，北アナトリア断層の西端に位置する．過去の断層の震源が東から西へ移動していることから，今後，イスタンブール地域が新たな巨大地震に襲われるという可能性が指摘されている [3]．

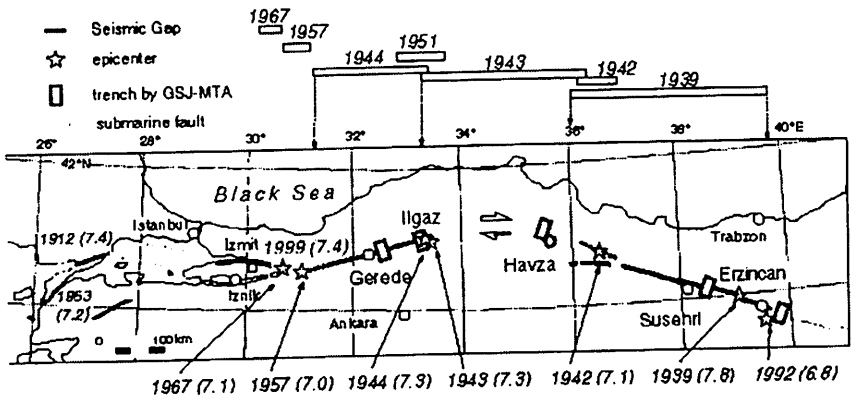


図-4.2.1 北アナトリア断層沿いの地震[1]

JICA と IMM (Istanbul Metropolitan Municipality) では，イスタンブール市におけるシナリオ地震による被害想定を行っている [3]．その中では 4 つの断層モデルを想定しているが，そのうち最も発生の可能性が高いものとして，**図-4.2.2** に太線で示した断層モデルを提示している．これは，1999 年のコジャエリ地震による断層の西側から Silivli までの 120 キロのセクションを断層としたもので，断層長が 119km の横ずれ断層である．モーメントマグニチュード(Mw)は 7.5 とされている．**図-4.2.2** の着色部分がイスタンブール市であるが，この地域において想定されている震度分布を**図-4.2.3** に示す(飛び地を除く)．この地震による建物被害は，総建物

724,623 棟のうち，全壊が 51,477 棟，半壊が 113,535 棟，一部損壊が 252,370 棟と推定されている．

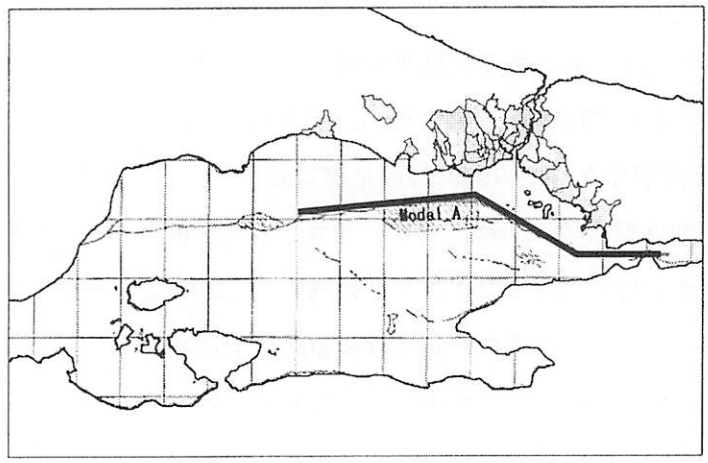


図-4.2.2 シナリオ地震の断層モデル

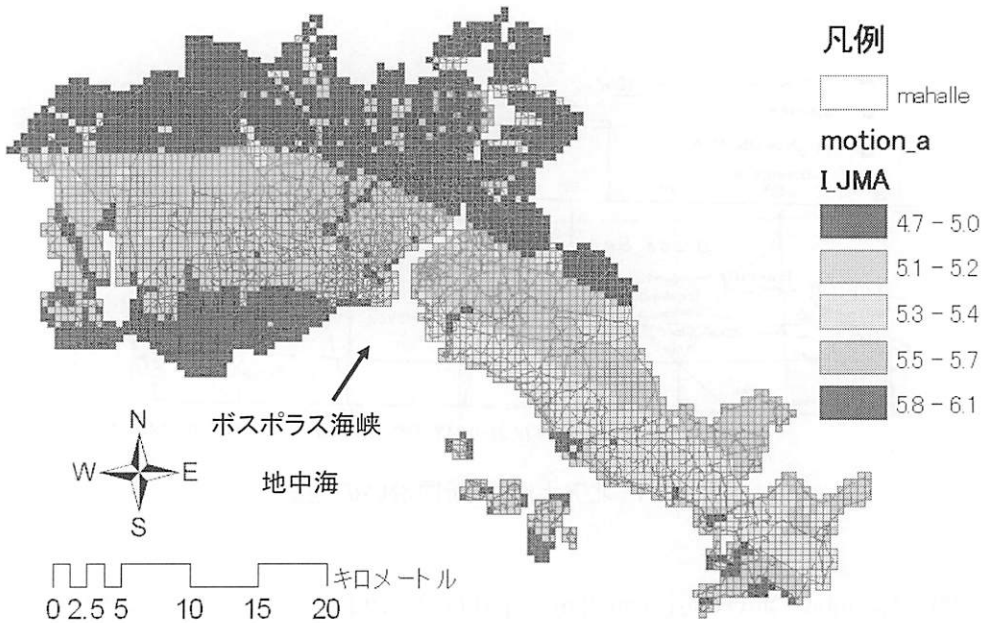


図-4.2.3 イスタンブール市内の想定震度分布

2006 年 9 月 10－16 日にかけて，イスタンブール工科大学と東京大学によるジョイントワークショップ「Ordinary/Emergency UTITU Workshop on Galata」が開催された．これは，東京大学 21 世紀ＣＯＥプログラム「都市空間の持続再生学の創出」の活動によるもので，東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻・社会基盤学専攻・建築学専攻の防災・水環境・都市・建築デザイ

ン・歴史の各分野におけるスタッフおよび学生がイスタンブールに派遣された．ワークショップでは，日本とトルコの学生が 3 チーム(1 チーム 10 人程度)にわかれ，生死を分ける地震直後の 3 日間，避難生活を行う最初の 7 日間，災害に備える日常生活という 3 つの時間フェーズを想定し，平常時・緊急時双方の利便性を考慮した地域の災害対策を議論した．我々の研究グループからは，防災の専門家としてスタッフ 2 名・学生 3 名が参加した．

本ワークショップにおいて，我々の研究グループは 3 次元空間情報を用いた地域の最適設計を提案し，イスタンブール地域における 3 次元マップ閲覧システムを開発するとともに，事前に参加学生に対するマップシステム操作およびデータ編集の講習会を開催した．学生は各々のＰＣにマップ閲覧システムをインストールし，現地では地域の土地利用，被害想定，歴史的建物の分布状況などを閲覧しながら，平常時の都市再生プラン・地震直後の避難計画・地震後 1 週間における応急仮設住宅立地計画などに関する議論を行った．ワークショップの最後の最終講評会においては，学生がマップシステムを操作しながら，事前に行うべき防災対策の提案のデモンストレーションを行った．3 次元マップシステムの画面および，現地でのワークショップの様子を図-4.2.4～4.2.13 に示す．このようなマップ閲覧システムを利用してジョイントワークショップを開催することにより，日本人学生側の地域の現状に対する理解も深まった．また，提案策を 3 次元空間情報上で可視化することにより，より実感を伴った議論が可能となった．

図-4.2.4 イスタンブールの 3 次元マップ閲覧システム

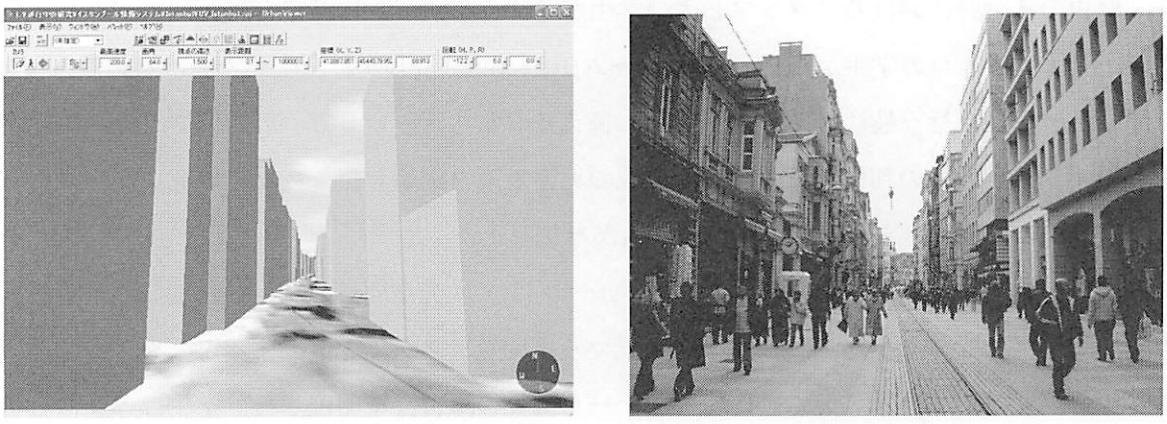


図-4.2.5 イスタンブールの 3 次元マップ閲覧システムと実施の写真（その1）

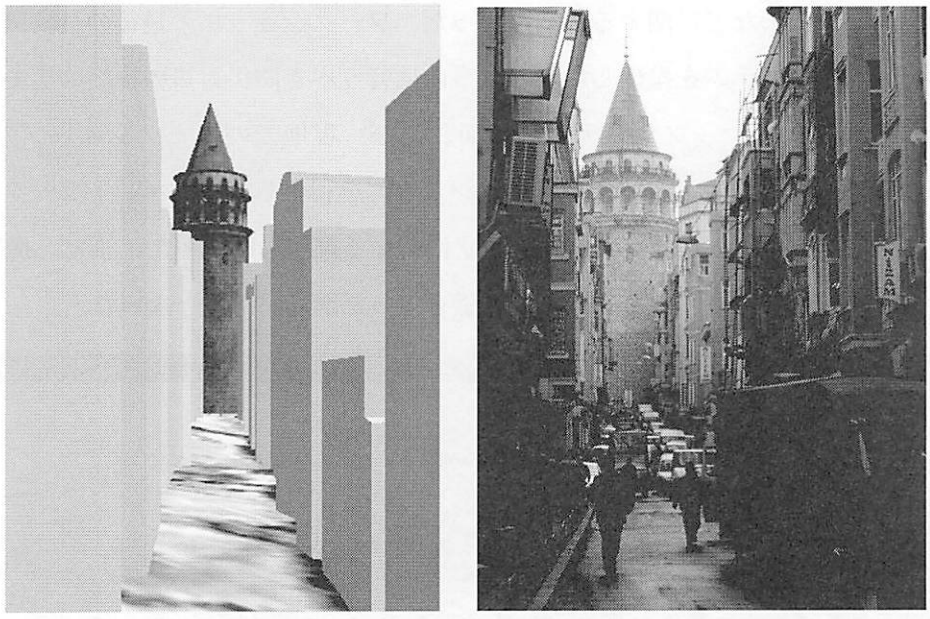


図-4.2.6 イスタンブールの 3 次元マップ閲覧システムと実施の写真（その2）

図-4.2.7 WS 参加メンバーによる集合写真

図-4.2.8 WS 参加学生による議論の様子

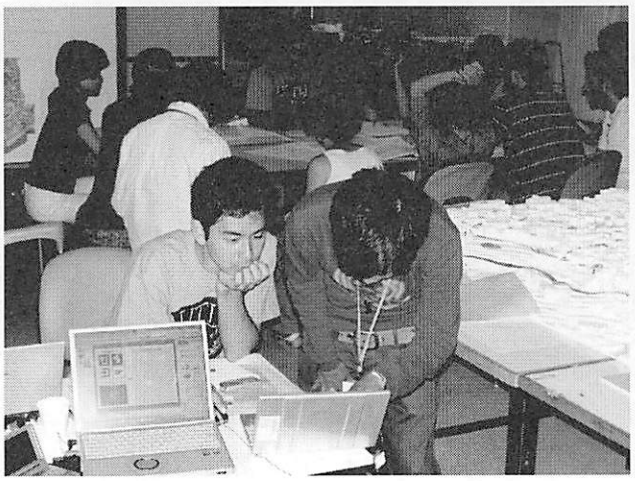


図-4.2.9 学生によるマップ編集作業の様子

図-4.2.10 現地見学の様子

図-4.2.11 3 次元マップ上での避難すべきエリアの分類

図-4.2.12 地震時の落下物防止対策を兼ねたアーケードの提案

図-4.2.13 最終講評会の様子(その1)

図-4.2.14 最終講評会の様子(その 2)

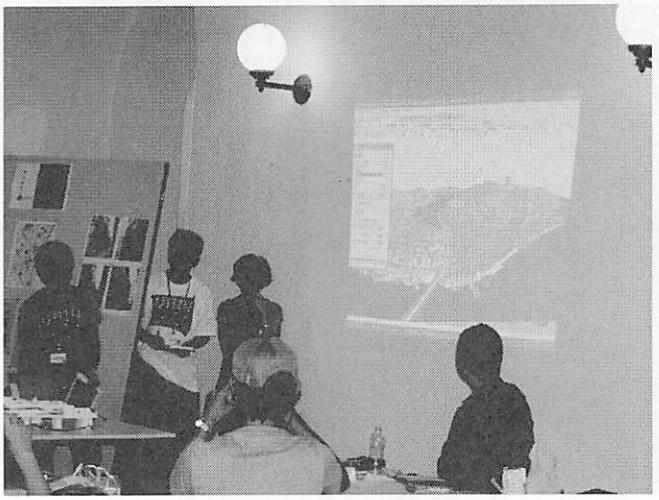


図-4.2.15 最終講評会の様子(その 3)

参考文献

1) 神戸大学都市安全研究センター：トルコ・コジャエリ地震調査合同報告書(一次・二次・三次調査隊), 2000.3

2) 文部科学省 1999 年トルコ・コジャエリ地震調査団：1999 年トルコ・コジャエリ地震とその災害に関する調査・研究, 自然災害科学, 18-3, pp.369-379, 1999

3) JICA・IMM: The Study on A Disaster Prevention/ Mitigation Basic Plan in Istanbul including Seismic Microzonation in the Republic of Turkey, 2002.9

5. 結論と今後の課題

5.1 結論

本研究では，マルチハザードマップを活用した巨大都市の防災都市空間の最適設計方法の開発を行った．最終的な成果は，①様々な災害（地震，洪水，火災，環境負荷，施設劣化）の物理・化学現象を適切に捉えたシミュレーションモデルの開発と被害結果が社会に及ぼす影響の大きさの評価（災害シミュレーション），②過去の大規模災害の事例およびシミュレーション結果のデータベース化（災害アーカイブス），③①，②の結果を３次元ＧＩＳ上に統合することにより，任意の時空間上での災害の状況をバーチャル体験できるシステムの開発（３次元ＧＩＳ），④マルチハザードを考慮した場合の，適切な都市空間の創造方法の提案（都市空間の最適設計）という 4 つから構成される．災害シミュレーションに関しては，地震災害シミュレーション，ヒートアイランドシミュレーション，火災．大気汚染シミュレーション・施設劣化シミュレーションという 4 種類のシミュレーションモデルを開発した．これらをそれぞれケーススタディーエリアに適用し，モデルの妥当性と効果の検証を行った．

災害アーカイブスについては、過去の災害で発生した事象、対応活動や教訓などを、発災からの経過時間や空間、対象者の組織や立場など、様々な角度から検索し分析できる災害情報のデータアーカイブを開発した。この災害情報アーカイブスは、種々の物理・社会現象に関する最新のシミュレーションモデルとデータベースの組合せにより、ただ単に過去の危機管理事例を収集・整理するだけでなく、異なる発災時刻、自然条件、地域の防災力、社会情勢のもとでの危機発生状況をシミュレートし、それを「擬似危機事例」として蓄積・更新していくことを可能とする。「擬似危機事例」を量産し、教材として用いることで、実際の危機事例の稀少性を補完し、危機に対するイマジネーション能力を高めることが可能となる。また、災害発生時においては、実際の物理・社会環境条件を逐次入力することで、ごく近未来の災害状況を高精度に予測・更新し、危機対応時の意志決定を支援することが可能となる。

さらに東京 23 区を対象とした地域危険度マップシステムを開発し，市民が適切な防災対策を行うための環境整備を行った．この際，特別な技術を持たない一般市民（高齢者・子供も含め）も容易に操作できるユーザーフレンドリーなインターフェースの構築に配慮した．また，同様の技術を用いて，トルコ共和国イスタンブール地域を対象とした 3 次元マップシステムも開発し，これを活用した都市空間の最適設計のためのワークショップを提案した．現地における日本人学生とトルコ人学生によるワークショップでは，このマップシステムを利用した議論および最適設計の可視化が行われた．

本システムは，3 次元空間情報を用いて災害に関する情報を可視化することにより，利用者の災害イメージ能力，現状理解力，対応力が向上し，災害に強い都市形成を目指す上で極めて有効なツールとなると考えられた.

5.2 今後の課題

本研究では、以下の 4 つのシステムを融合して、マルチハザードマップを活用した巨大都市の防災都市空間の最適設計方法の開発を試みた。

① 様々な災害（地震，洪水，火災，環境負荷，施設劣化）の物理・化学現象を適切に捉えたシミュレーションモデルの開発と被害結果が社会に及ぼす影響の大きさの評価（災害シミュレーション）

② 過去の大規模災害の事例およびシミュレーション結果のデータベース化（災害アーカイブス）

③ ①と②の結果を３次元ＧＩＳ上に統合することにより，任意の時空間上での災害の状況をバーチャル体験できるシステムの開発（３次元ＧＩＳ）

④ マルチハザードを考慮した場合の，適切な都市空間の創造方法の提案（都市空間の最適設計）

今回は、個々のシステムの完成度を高めるよりも、統合すること、統合させることで新しく見えることの抽出に力点を置いた。しかし個々のシステムが将来的な統合を念頭に当初から開発されていたわけでは無いので、必ずしもうまく統合されたものばかりではない。この点については、防災対策の合理化や高度化が、個別の災害のみを対象にするのではなく、マルチハザードを対象にすることによって、より促進されることを踏まえ、今後は開発当初からこの点を強く意識したシステム開発を進めることが重要である。

またこの種のシステムに共通して難しいのは、開発したシステムを適切に維持管理するための仕組みづくりである。個々のシミュレーションモデルの精緻化は別としても、その更新や災害関連情報の定期的な更新などは、研究的な課題と認識されにくく、研究者の課題と考えられない場合も多い。この点は、システムの運用法も合わせた研究が重要であり、これは今後の大きな課題と認識している。

付録

発表論文リスト

Daisuke ITO, Yoshihito SATO and Kimiro MEGURO: EFFICIENCY OF FURNITURE OVERTURNING PROTECTION DEVICES DURING EARTHQUAKES - A EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY -, 5th International Symposium on New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia, Thailand, 2006.

加藤佳孝，藤野学：ニューラルネットワークによるかぶり品質変動の定量的評価，コンクリート工学論文集，第18巻No.1，2007-1（掲載決定）

Yoshitaka KATO and Naoki Takeshita : Concrete Structure Moisture Supply by Rainfall using Meteorological Conditions, Journal of Advanced Concrete Technology（投稿中）.

Pakawat SANCHAROEN, Raktipong SAHAMITMONGKOL, Yoshitaka KATO and Taketo UOMOTO : UTILIZATION OF INSPECTION RESULT OF RC STRUCTURE IN THAILAND TO PLAN MAINTENANCE FOR CHLORIDE ATTACK, コンクリート工学年次論文報告集，Vol.29（投稿中）.

原山和也，大岡龍三，村上周三，吉田伸治，瀬戸島政博，近藤裕昭：都市キャノピーモデルを組み込んだメソスケールモデルによる関東地方の都市気候解析，日本建築学会環境系論文集 第592 号，pp.75-82，2005.6.

川本陽一，大岡龍三：メソスケールモデルに組み込んだ都市キャノピーモデルにおける放射解析手法の改良，日本建築学会環境系論文集 第609 号，pp.63-70，2006

Ryozo Ooka : Development Assessment Tools for Urban Climate and Heat Island Mitigation, The 6th International Conference on Urban Climate, Goteberg, Sweden, 2006.6.

Huang, H., Ooka, R., Kato, S., Jiang, T., Takahashi, T., Watanabe, T. : Validation and application of CFD modeling for predicting traffic induced air pollution in a complex urban area, 86th American Meteorological Society Annual Meeting, Atlanta, GA, USA, 2006.2.

Jiang, T., Huang, H., Ooka, R. : Application of a Coupled Simulation Method for Predicting Fire Spread in a Modeled Urban Area, 4th International Symposium on New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia, Singapore, 2005.10.

黄弘、大岡龍三、加藤信介、大竹宏、林吉彦、市街地火災における火の粉の飛散のCFD解析、日本建築学会環境系論文集、593，1-8，2005.

Dushmanta DUTTA : VULNERABILITY OF COASTAL CITIES OF ASIA TO RISING SEA LEVEL: A CASE STUDY IN BANGKOK, 4th International Symposium on New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia, Singapore, 2005.10.

EFFICIENCY OF FURNITURE OVERTURNING PROTECTION DEVICES DURING EARTHQUAKES - A EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY -

Kimiro MEGURO
International Center for Urban Safety Engineering
Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Japan

Daisuke ITO, Yoshihito SATO
Department of Civil Engineering
The University of Tokyo, Japan

ABSTRACT

To reduce earthquake damage in the future, it is very important that each of us take countermeasures on our own initiative. After the 1995 Kobe Earthquake, strengthening houses and attachment of furniture to prevent its overturning were identified as the main issues. Reportedly, these problems have not been properly addressed yet. One of the principal causes for this is that many people do not have disaster prevention consciousness and ability to prepare against earthquakes.

In this study, we aim at improving the people's capacity to imagine disasters so that they implement specific disaster countermeasures. At first, we analyze the effect of furniture overturning prevention devices and evaluate its efficiency through shaking table tests. The effectiveness of the devices is discussed based on the ground motion intensity which they can withstand, their installation easiness, whether their performance depends on external factors such as wall and floor characteristics, and so on. Then, we try to promote people's danger and risk awareness by showing animations obtained by numerical simulations of furniture's dynamic behavior when an earthquake occurs, especially focusing on a particular house space, the living room. For this purpose, advanced visualization software is used so that people can feel as if they were at their own rooms during a shake. Finally, we promote people's recognition of disaster countermeasures by discussing the furniture overturning ratio decline when prevention devices are installed.

1. INTRODUCTION

In order to implement efficient disaster prevention measures, it is very important and indispensable for the general public to take proper countermeasures by themselves. Unfortunately, even after the 1995 Kobe earthquake, real countermeasures are not well implemented. Furthermore, the priority of securing the safety of structures and living spaces, although extremely high, is not recognized. One of the main reasons why proper countermeasures are not implemented well is the lack of disaster imagination capacity of the people.

In this study, shaking table tests with solid wooden blocks emulating commonly used furniture and furniture itself were performed to help increase people's imagination capacity and to evaluate/show the efficiency of available overturning protection devices. Potential risks, strengths and weaknesses of each protection system were identified. Based on these observations, the best ways to protect furniture against overturning were suggested. The overturning ratios for each device, i.e. the percentage of cases in which the furniture fixed with a particular device overturned, were determined. Through numerical simulations, the risk reduction in a typical house room attained by the installation of overturning prevention devices was evaluated.

2. SHAKING TABLE EXPERIMENTS

To simulate the dynamic behavior of furniture during earthquakes and evaluate the efficiency of overturning protection devices, shaking table experiments using solid wooden blocks and real furniture were carried out. The former were useful to determine key parameters to consider in the latter and also in the numerical simulation.

2.1 Shaking table experiments using solid wooden blocks

These tests were carried out on a 1.5m by 1.5m shaking table. The geometrical characteristics of the wooden blocks are listed in Table 1. The specimen A-1 was a single block whereas the specimen A-2 consisted of two blocks one over the other. A total of 38 ground motions were applied with amplitude and frequency varying from 100 to 1,400 Gals and 0.5 to 3.5 Hz, respectively. The Japanese Meteorological Agency Intensity (JMAI) for each motion was calculated. Several types of overturning protection devices available in the market, such as steel L-shape, stopper, gel mat, pole, honeycomb board, and chain/belt, were evaluated. In the case of steel L-shape and chain/belts, relatively small screws were used considering the relation between the sizes of wooden blocks and real scale furniture. Stoppers and gel mats were also scaled down. The tests were carried out considering that the blocks were standing against a fixed wall.

Table 1. Characteristics of the wooden blocks used in shaking table tests

Block	Size			V [cm^3]	m [kg]	d/h
	h [cm]	b [cm]	d [cm]			
A-1	75	37.5	22.5	63,281	41.55	0.3
A-2	50	25	15	18,750	11.20	0.3

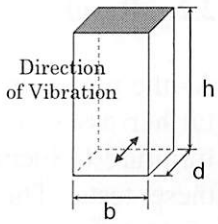
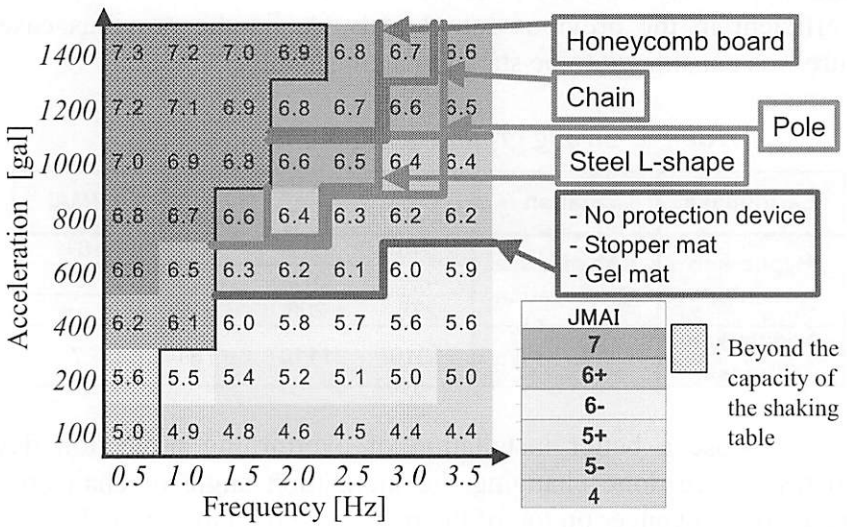
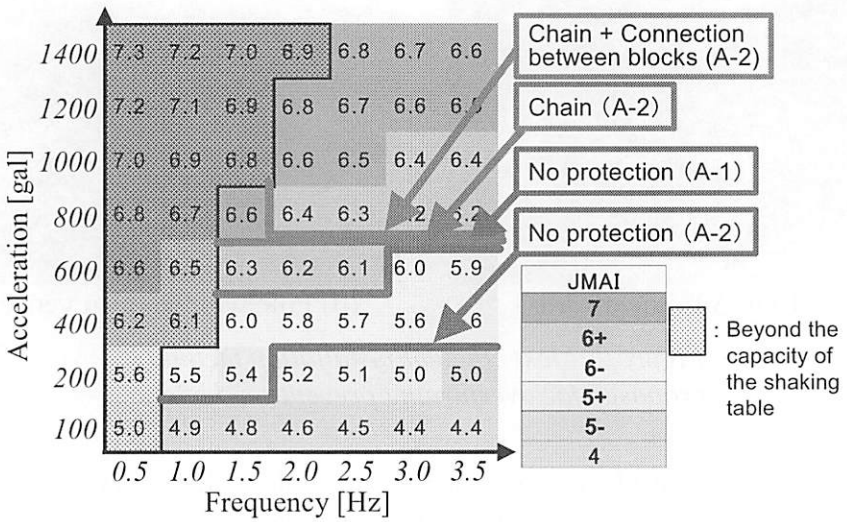


Figure 1 shows the overturning critical intensity level. Above it, the furniture overturned and below it, it remained standing up. This figure shows the results for the case in which the floor surface was smooth, i.e. flooring finishing, and the wall was relatively strong. Tests were also carried out over *tatami* (traditional Japanese flooring mat) and using a, relatively weak, gypsum wall.



(a) Block A-1



(b) Block A-2

Figure 1. Overturning criteria obtained from shaking table tests (Floor surface: flooring, wall surface: strong timber)

2.2 Results of shaking table tests using real furniture

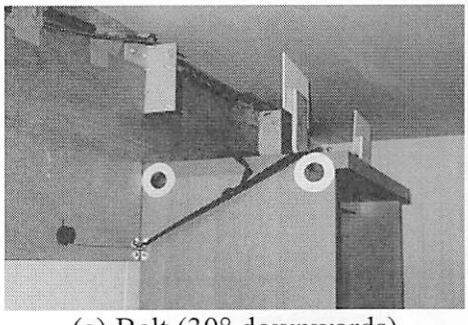
As the next step, shaking table tests using real furniture were performed to further assess the efficiency of overturning protection devices. Real scale furniture (180cm by 59cm by 39cm) available in the market was used for these tests. Their self weight was 24.5kg and 60kg to account for its contents while in use were added. The shaking table dimensions were 4.0m by 4.0m.

Two strong ground motions were used: 1995 Hyogo-ken Nambu Earthquake (Kobe Earthquake) recorded at the Kobe Maritime Observation station and the 2004 Niigata-ken Chuetsu Earthquake recorded at K-NNET Ojiya station. The former was scaled to obtain input motions with JMAI 5+, 6- and 6+. Two floor surfaces were considered: flooring and *tatami*, and two overturning protection devices, chain and poles, which were found to be the most efficient in the previous set of tests. As in the previous case, the furniture was considered to be standing against walls.

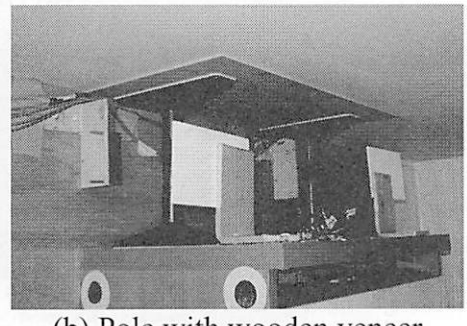
Table 2. Strong ground motions characteristics

Earthquake	Station	PGA [Gal]			JMAI
		X-dir	Y-dir	Z-dir	
Hyogo-ken Nambu	Kobe Marine Observation	818	617	332	6+
		491	370	119	6-
		276	208	112	5+
Niigata-ken Chuetsu	K-NET Ojiya	1310	1110	781	7

To propose a better installation of overturning protection devices, several tests were done changing the inclination angle of chains/belts or pasting a wooden veneer on top of the poles as shown in Figure 2.



(a) Belt (30° downwards)



(b) Pole with wooden veneer

Figure 2. Most efficient installation method proposed for overturning prevention devices

A summary of all results is shown in Table 3. It is very common to use belts/chains oriented 30 to 60° upwards. However, it was found that it is more efficient to use them 30° downwards because in this way, the vertical component of the belt/chain tension prevents uplift, and therefore, sliding and overturning are avoided.

Table 3. Summary of experimental results

		Hyogo-ken Nambu Eq. 5+	Hyogo-ken Nambu Eq. 6-	Hyogo-ken Nambu Eq. 6+	Niigata-ken Chuetsu Eq. 7
No protection	Flooring	○	●	-	-
	Tatami	○	●	-	-
Belt	30° Upwards	○	○	○	-
	30° Downwards	○	○	○	●
	60° Upwards	-	-	◐	-
Pole	Without veneer	○	○	○	●
	With veneer	-	-	-	○

● :Overturning
◐ :Damage to contents
○ :Exhibits displacement
○ :No displacement

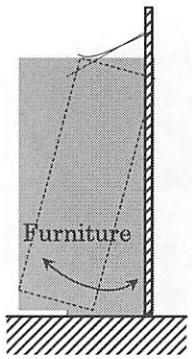


Figure 3. Furniture movement observed during shaking when chain/belts are used upwards

If the downward angle is increased, as depicted in Figure 4, the efficiency of the belt/chain decreases because the same horizontal inertial force has to be resisted by an increasing tension on the belt/chain. This large force eventually leads to the belt/chain connection failure. Based on these observations, it was concluded that 30° is the optimum inclination.

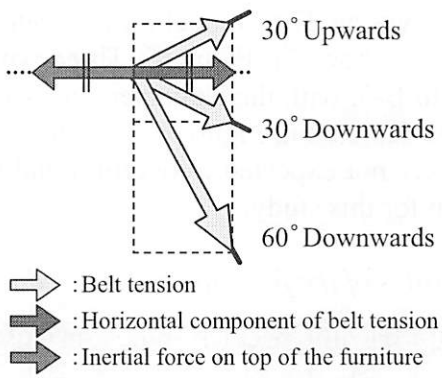


Figure 4. Restraining mechanism of chain/belt

When poles are used as protection devices, usually two poles, which shake independently, are used. The system performance can be greatly improved if both poles work together. This can be achieved by installing a wooden veneer between the poles and the ceiling. This measure guaranties not only that both poles will work together but also avoids the ceiling local damage at the points where poles are installed. With this system, furniture could stand the severe Niigata-ken Chuetsu Earthquake strong ground motion, which was not possible without it.

3. SAFETY EVALUATION OF LIVING SPACES

In order to evaluate the safety of living spaces simulations using 3-dimensional Extended Distinct Element Method (3D-EDEM) were carried out. The simulation accuracy was previously evaluated using the results obtained from the shaking table tests. Figure 5 shows the comparison of the experimental and numerical results. It is clear that the simulation captured well the behavior observed during the experiments.

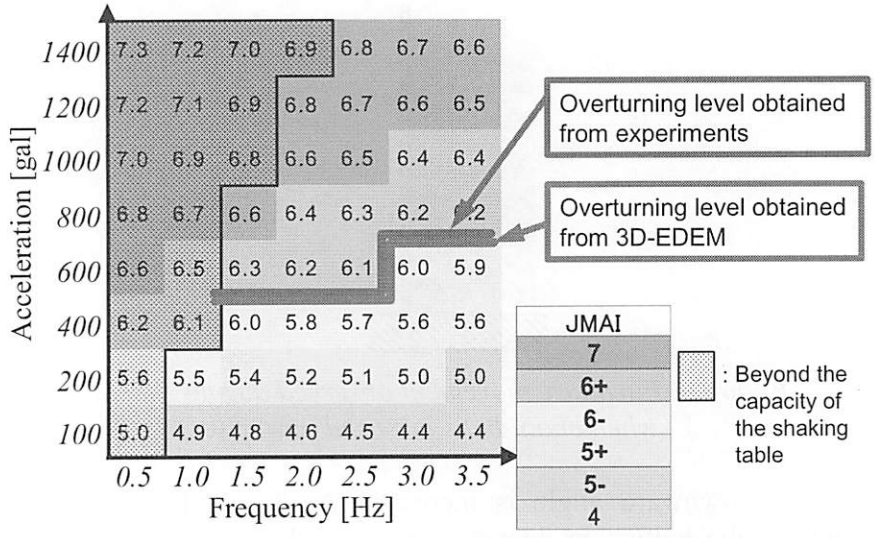


Figure 5. Comparison of numerical simulation and experimental results

3.1 Study of the living space

The target living space was an 87m^2 model room located at different stories of a 20-story building, as shown in Figure 6. Three types of furniture were considered, from B-1 to B-3, with the characteristics shown in Table 4. The furniture distribution is depicted in Figure 6. The elements in gray represent stable bodies which were not expected to overturn and therefore were not a matter of consideration for this study.

Table 4. Characteristics of the furniture considered for the simulations

	h [cm]	d [cm]	b [cm	d/h	m [kg]	ρ [kg/cm3]
B-1	180	54	90	0.3	200	2.29E-04
B-2	180	36	90	0.2	133.3	2.29E-04
B-3	135	54	90	0.4	150	2.29E-04

3.2 Input motion calculation using a multi-degree freedom system

In order to obtain the input motion to the model room, a multi-degree freedom system was excited with past strong ground motions having a wide range of predominant periods as shown in Table 5. Eleven strong ground motions obtained from K-NET were used and the responses at floors 1, 5, 10, 15, and 20 were determined and used as input to the model room.

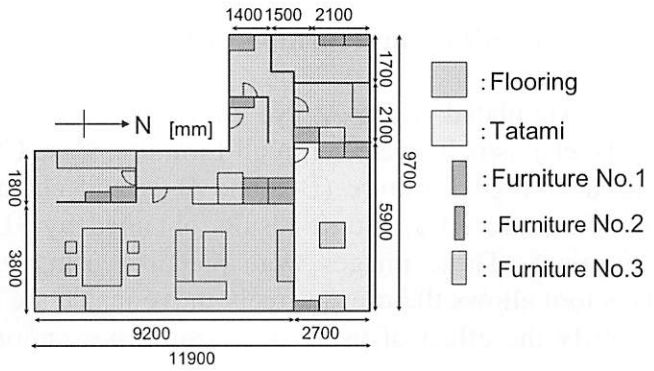


Figure 6. Layout of the living space considered for the study

Table 5. Input motions used for the living space safety evaluation

Date	Name of Earthquake	Observation Station	Magnitude	Focal Depth [km]	JMAI	Predominant Period [sec]
1/17/1995	Hyogoken-Nanbu	Kobe Marine Observatory	7.3	16	6.40	0.71
10/6/2000	Tottoriken-Seibu	Yuki	7.3	11	5.06	0.29
3/24/2001	Geiyo	Yuki	6.4	51	5.71	0.46
12/2/2001	Iwateken-Nairiku-Nanbu	Daitoh	6.4	122	4.49	0.11
5/26/2003	Miyagiken-Hokubu	Oga	7.0	71	6.20	0.37
9/26/2003	Tokachioki	Hiroo	8.0	42	6.07	0.27
9/26/2003	Tokachioki	Tomakomai	8.0	42	4.49	4.50
9/5/2004	Kiihanto-Nantooki	Hakusan	7.4	44	4.69	0.18
9/5/2004	Kiihanto-Nantooki	Sakai	7.4	44	3.76	6.40
10/23/2004	Niigataken-Chuetsu	Ojiya	6.8	13	6.73	0.60
3/20/2005	Fukuokaken-Seihooki	Hirado	7.0	9	5.09	0.46

Figure 7 shows the obtained floor responses in terms of seismic intensity calculated using the JMA definition. Based on the original definition of JMA, the maximum seismic intensity is 7. However, in order to have a clearer picture of this parameter in the upper range, it was divided in three sub-ranges: 7- for intensities from 6.5 to 6.9, 7+ for intensities from 7.0 to 7.4 and 7++ for intensities above 7.5.

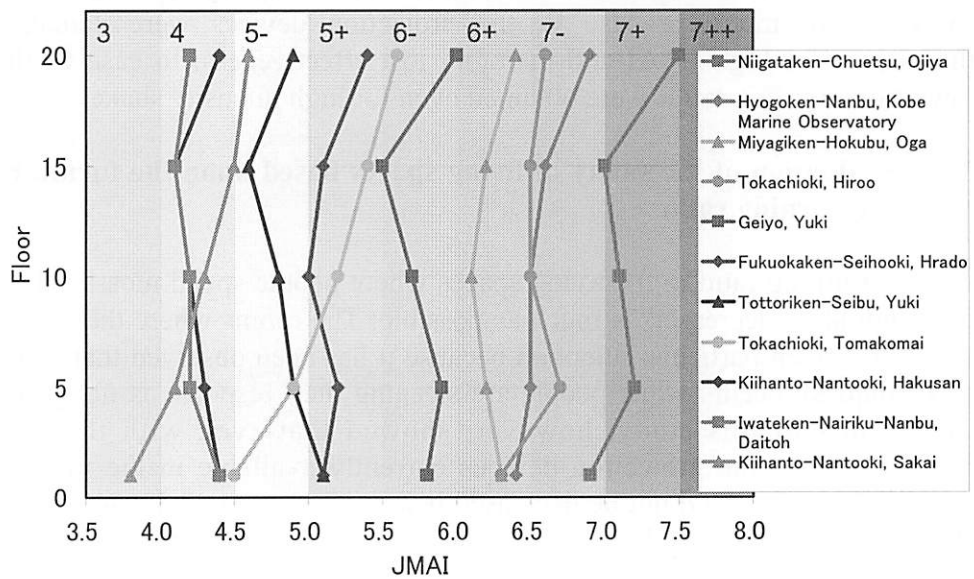
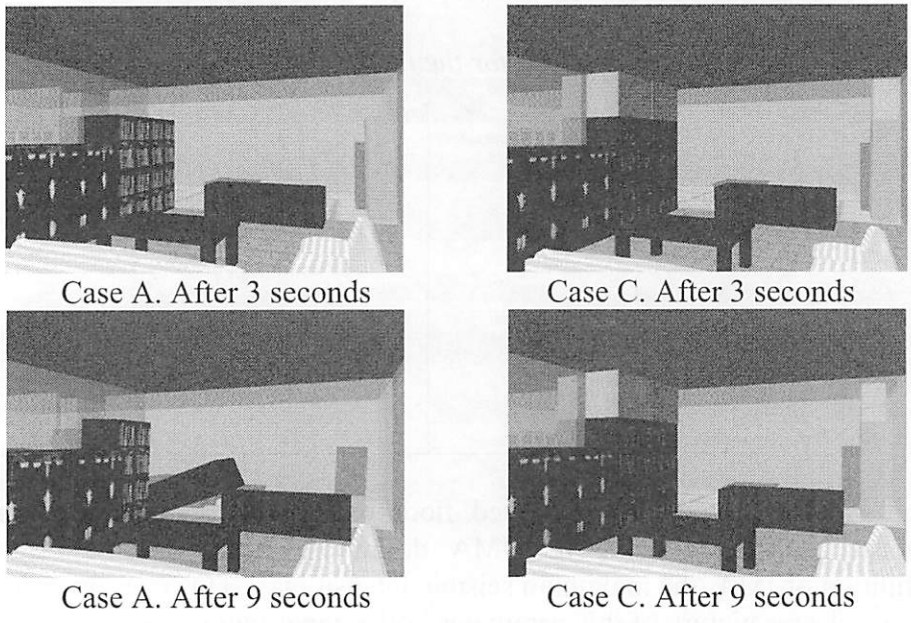


Figure 7. Floor response in terms of seismic intensity

3.3 Calculation of furniture overturning ratio

Three cases were simulated: Case A: No overturning protection devices provided; Case B: chains/belts were set in all furniture, Case C: honeycomb boards were used in high furniture (B-1 and B-2) and chains/belts were installed in low furniture (B-3). Some results obtained by 3D-EDEM are displayed in Figure 8. These images were prepared using virtual reality technology. This tool allows the user to freely move inside the virtual space and therefore verify the effect of using overturning prevention devices by himself.



Case A. After 3 seconds | Case C. After 3 seconds

Case A. After 9 seconds | Case C. After 9 seconds

Figure 8. Floor response in terms of seismic intensity

Figure 9 shows the overturning ratio versus input motion intensity for the three cases considered. In case A, risk increases rapidly for shakes with JMAI 7+ or more. In case B, the protection devices were damaged themselves for high JMAI and therefore lost effectiveness. In case C, the lowest overturning ratios were obtained even for high intensity shakes.

3.4 Evaluation of the safety of living spaces based upon the furniture overturning ratio

The overturning ratio in the living spaces where people spend most of their time should be decreased as much as possible. The rooms where they sleep should be given particular attention because it has been observed that when an earthquake occurs while people are sleeping their response is not good. The results of this study, however, showed that even with the best performance of the protection devices currently available in the market, overturning ratio could not be decreased below 17.5% and 33.3% in case of shakes with JMAI 7+ and 7++, respectively. In order to further decrease this

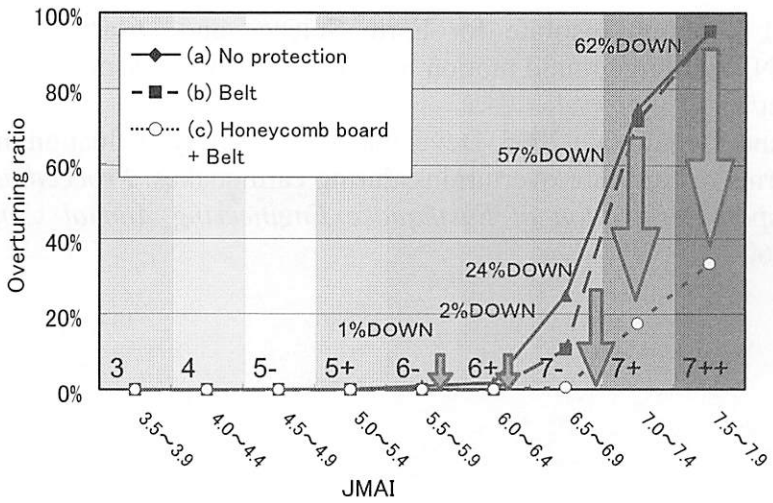


Figure 9. Overturning ratio versus seismic intensity for each case considered

percentage, it is proposed to install building vibration control systems, to use more efficient protection devices, and to establish some regulation by which only built-in furniture can be used in high rise buildings.

4. CONCLUDING REMARKS AND FUTURE ISSUES

In the first part of this study, shaking table tests to evaluate the efficiency of existing overturning protection devices were performed with solid wooden blocks and furniture. After the last series of tests, the best way to install the overturning protection devices available in the market was proposed.

To evaluate the safety of the living space, 3D-EDEM numerical simulations combined with virtual reality applications were carried out. The accuracy of the simulations was verified with the obtained experimental data. Based upon the results for a 20-story building case, it was concluded that it was very difficult to avoid overturning using protection devices currently available in the market for shakes JMAI 7+ and 7++, which are experienced in the upper stories. Therefore, three possible solutions were suggested: to decrease the structural response using building vibration control systems, to use more efficient overturning prevention systems, or to use only built-in type of storing spaces so that potential overturning objects are not used at all. The present study can be very useful to further study these options.

REFERENCES

Cabinet Office, 2004. *Guideline of earthquake disaster mitigation measures in living space*

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention. KNET strong ground motion network, http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/

Ito, D. and Meguro, K., 2005. Development of a safety evaluation method in terms of furniture overturning during earthquakes. *Proceedings of the Japan Association of Earthquake Engineering Annual Conference*, p.60-61.

ニューラルネットワークによるかぶり品質変動の定量的評価

加藤　佳孝*1・藤野　学*2

概要：本研究では，施工がコンクリート品質変動に及ぼす影響を実験的に明らかにし，既設コンクリート構造物における施工による品質変動を配合条件や構造物条件等の施工条件から推定できる手法を確立することを目的としている。ニューラルネットワークを用いて実験結果を分析することで，かぶりコンクリートの品質変動の定量的な評価を行った。本研究によって，施工の影響度の感度を把握すること，かぶり品質とその変動を定量的に予測することが可能となった。

キーワード：かぶり，空隙率，品質変動，施工条件，ニューラルネットワーク

1. はじめに

総額900兆円を超えるとも言われる膨大な量の社会資本ストックを抱える我が国では，効率的・効果的に社会資本の維持管理を行うことが必要不可欠である。効率的・効果的に社会資本の維持管理を行うためには，ライフサイクルコスト（以下，LCC）の最小化を行うことで，維持管理の最適化を図る必要がある。適切なLCCを算出する条件の一つとして，構造物の劣化予測が精度良く行われることが挙げられるが，実際のコンクリート構造物の劣化予測は環境・品質等の情報が不確定なもとにおいて実施されることが多い。環境・品質等の情報が不確定な理由として，複合材料であること，現場施工を行うこと，施工時の全量検査が困難であること等が挙げられ，結果として設計時に想定された品質と異なる可能性があることは良く知られている。特に施工については，コンクリート構造物の品質に影響を及ぼす要因数が多いだけでなく，人的要因も影響するため，各施工要因が品質に与える影響は定量的に明らかにされていないのが現状である。

通常の設計においては，様々な不確実な情報に対して種々の安全係数を導入することにより，実際のコンクリート構造物の品質が設計時に想定した品質を上回るように計画されている。コンクリート標準示方書[1]の耐久性照査では，施工の影響として，ブリーディングの影響による高さ方向の品質変動については，「コンクリートの材料係数」で考慮し，高さ方向に関係の無い品質のばらつきについては，「構造物の耐久性能に関する設計値の精度を考慮する安全係数」で考慮している。コンクリートは本来有している性能に応じて，施工の影響の受けやすさは異なる。例えば，高流動コンクリートは材料分離に対する抵抗性が高く，構造物中のコンクリートの均一性確保に対する信頼性が高いと考えられる。そこで示方書[1]では，設計段階において，コンクリートが標準的な施工性能を有していること，施工が標準的条件で行われることを前提条件として安全係数の標準値が設定されている。

しかし，可能な限りLCCを最小化することを前提とした戦略的な維持管理においては，構造物の経年劣化を過度に安全側で評価することは，結果として無駄な投資となりうる。従って，実際の構造物の品質の変動を定量的に把握し，構造物の劣化を予測することが重要である。

このような現状を考慮し，著者ら[2]は品質のばらつきを考慮した劣化予測，および予測結果に基づいて算出した補修リスクを用いることで，品質のばらつきが維持管理に及ぼす影響を定量的に評価できる手法を提案し，その補修リスクにより，検査すべき項目の優先順位の決定，優先的に検査を実施すべき構造物の決定ができる手法を提案している。しかし既報[2]は，方法論の提案を主眼においたものであり，ケーススタディの際に設定した環境条件や品質のばらつきの値は，一般性や妥当性に欠けるものである。

本研究では，コンクリート構造物の耐久性能に最も影響を与えるかぶりコンクリートを対象とし，施工による品質変動を配合，構造物条件，施工条件から推定できる

*1 東京大学助教授　生産技術研究所　博士（工）　（正会員）　〒153-8505　東京都目黒区駒場4-6-1
*2 株式会社リクルート　FIT　〒104-0061　東京都中央区銀座8-4-17

手法を確立することを目的として実験的に検討した。実験結果をニューラルネットワークに学習させることによって，かぶりコンクリートの品質変動の定量的な評価を行い，施工による品質変動を推定する手法を提案した。

2. 品質変動測定試験

2.1 試験概要

実際のコンクリート構造物を想定した供試体を作製し，各条件下での品質変動を測定した。本研究では，コンクリートが示方書[1]で設定されている標準的な施工性能を有していること，同様に施工も標準的条件で行われることを前提条件とした場合に，施工がコンクリート品質とそのばらつきに及ぼす影響度を実験的に明らかにすることを目的としている。

品質の評価指標には空隙率を用いた。空隙率はコンクリート中のセメントペーストの体積率(もしくは骨材率)と水セメント比に依存する指標である。セメントペーストの体積率が大きくなると（骨材率が小さくなると）空隙率は増加し，小さくなると（骨材率が大きくなると）空隙率は減少する。また水セメント比が大きくなると空隙率は増加し，小さくなると減少する。故に，空隙率が小さいコンクリートは密実で強度および物質移動抵抗性が高いコンクリート，空隙率の大きいコンクリートは粗で強度および物質移動抵抗性の低いコンクリートと言える。つまり，空隙率は直接耐久性能を表す指標ではないが，間接的には表し得るものであると考えられる。本来は品質の指標として，コンクリートの耐久性能を直接評価できる指標（中性化速度係数，塩化物イオン拡散係数など）を用いて検討すべきであるが，統計処理を行うという研究の趣旨上，比較的簡便に多量の供試体の測定を行うことができる空隙率を品質の指標として選定した。**図-1** に空隙率と塩化物イオンの実効拡散係数の測定結果を示す[3]。前述したとおり，空隙率の増加に伴い実効拡散係数が増加しており，コンクリートの品質評価の指標として空隙率を用いることの妥当性が理解できる。

2.2 実験条件

実験条件を設定するために，過去の不具合事例調査結果[4]等を参考に，かぶりコンクリートの品質に与える影響が大きいと思われる要因，配合条件（スランプ），配筋条件（主鉄筋間隔，帯筋間隔），打込み落下高さ，締固め時間を選択した。

実験条件の範囲は，施工実態報告書[5]やアンケート結果[6]等を参考に基準となる条件を設定し，示方書[1]で定められている標準的施工の範囲内（**表-1**）で設定した（一部範囲外の条件もある）。使用した材料特性および配合条件を**表-2** に，実験条件を**表-3** に示す。なお本研究では，フレッシュコンクリート品質の影響を単純化するために，水，セメント，細・粗骨材の割合を一定とし，混和剤のみで目標スランプ値が得られるよう調整した。混和剤の過剰添加がコンクリートの品質に及ぼす影響を排除するために，メーカーが推奨する標準使用量（セメント質量

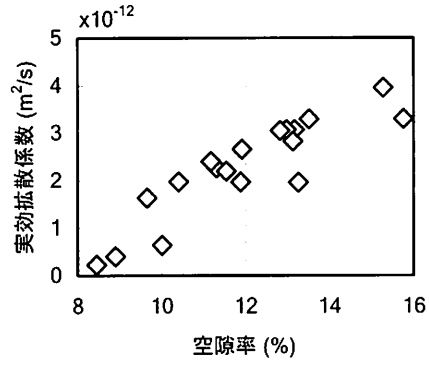


図-1 空隙率と実効拡散係数の関係

表-1 標準的施工条件[1]

項目		標準
運搬方法	現場内運搬方法	コンクリートポンプ
打込み方法（スラブ，はり除く）	吐出口から打込み面までの落下高さ	1.5m以下
	打込み1層の高さ	40～50cm
締固め方法	締固め方法	内部振動機
	挿入間隔	50cm
	1ヶ所当りの振動時間	5～15秒
養生方法	養生方法	湿潤養生（湿布，散水，型枠残存）
	養生期間（日平均 約15℃以上）	普通ポルトランドセメント 5日間

表-2 材料特性および配合条件

普通ポルトランドセメント	密度 3,150 (kg/m^3)，比表面積 3,300 (g/cm^2)
細骨材（富士川産砂）	表乾密度 2,630 (kg/m^3)，吸水率 1.67 (%)，F.M. 2.81
粗骨材（両神産砕石）	表乾密度 2,690 (kg/m^3)，吸水率 0.96 (%)，F.M. 6.67
AE剤（Ⅰ種）	密度 1025 - 1045 (kg/m^3)
AE減水剤（標準型Ⅰ種）	密度 1070 - 1090 (kg/m^3)，標準的な使用量 1.0 (C x %)

空気量 (%)	Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)			
				C	W	S	G
4.5±1	20	55	45	170	309	813	1020

	スランプ (cm)	混和剤 (Cx%)	
		AE剤	AE減水剤
配合1	8±2	0.013	0
配合2	12±2	0.009	0.55
配合3	18±2	0.009	1.09

表-3 実験条件

配合(スランプ (cm))	8, 12, 18
主鉄筋間隔 (mm)	35, 50, 100
帯鉄筋間隔 (mm)	100, 150
締固め時間 (s)	10, 15, 25
打込み高さ (cm)	50, 100, 150

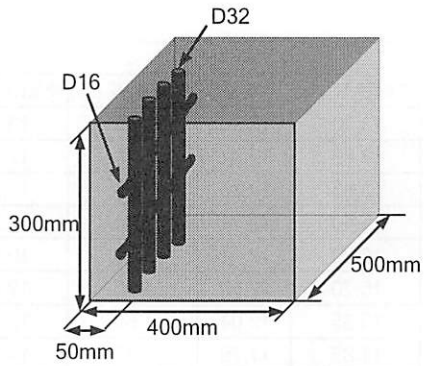


図-2 試験体図

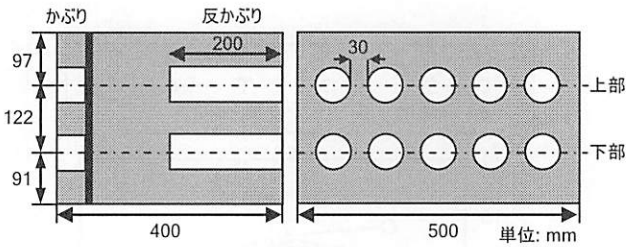


図-3 コア抜き箇所

に対して 1.0 %）を基準として，同一配合で異なるスランプ値が得られるような配合を試験練りにより決定した。なお，定量的な測定値としてはスランプおよび空気量のみであるが，標準供試体および試験体に打設した際のフレッシュコンクリートの状況およびブリーディング状況等は，普通コンクリートと同様な状況であり，著しい材料分離やブリーディング量が生じているような状況は無かった。使用したコンクリートの品質が不適切ではないことは，後述する標準供試体の圧縮強度試験結果からも推察できる。**表-3** に示した実験要因の全組み合わせは 182 通りである。本研究では，最終的にこれら実験要因と空隙率およびその変動係数の関係を，ニューラルネットワークを用いて表現するため，ニューラルネットワークによる学習が適切に行われる実験条件数を確保することが重要となる。そこで，実験条件の範囲を検討する際に参考とした既往の成果から，影響度の大きさを考慮して 54 通りの実験条件を選定した。試験体の概要を**図-2** に示す。試験体の大きさは，実際の振動締固め機の挿入間隔を考慮して決定した。すなわち，施工実態報告書[5]によると，その挿入間隔は 400 ～ 600 mm が大半であることを考慮した。また，高さに関しては，ブリーディングの影響を極力排除しつつ，空隙率測定用の供試体が採取できることを考慮して決定した。

養生条件もかぶりコンクリートの品質に影響を及ぼす要因の一つであるが，本研究ではこの影響を考慮していない。養生は，セメントの水和反応に影響を及ぼし，結果として硬化体の細孔構造に影響を及ぼすものと考えられる。本研究で設定した施工要因は，コンクリートの充填性に起因した品質変動を定量的に評価するために選定しており，これらの要因と養生とではかぶりコンクリートの品質及ぼす影響の意味が大きく異なる。そこで本研究での養生条件は，示方書の標準的な条件に準じ，全ての試験体において打設後 1 日脱型・5 日間の湿潤養生（湿布散水）とした。

2.3 実験手順

本研究で実施した実験の手順は以下の通りである。

1）試験体打込み（標準供試体（φ10×20cm）作製，スランプ，空気量測定）
2）試験体 1 日後脱型，5 日間湿布養生
3）試験体毎に指定箇所のコア採取（かぶり部，反かぶり部それぞれ 10 本，φ62mm）
4）湿式カッターでコアを 5cm 毎にカット
5）ASTM C624-97 に準拠して空隙率測定

（1）コア抜き方法

コア抜き方法は，直径 62mm のコアを，かぶり側から上下 5 本ずつ合計 10 本を 5cm の深さで採取し（**図-3** 参照），反かぶり側から上下 5 本ずつ合計 10 本を 20cm の深さまで採取した。その後，各々のコアを 5cm 毎にカットし空隙率測定に用いた。なお，本研究で扱った総コア供試体数は約 3000 個を数える。

（2）空隙率測定（ASTM C624-97）の手順

1）24 時間以上 100 ～ 110℃の炉で乾燥後，20 ～ 25℃まで自然冷却し質量測定。24 時間を 1 サイクルとして，測定値の差が 0.5 % 以下に収まるまで数サイクル繰り返し乾燥質量（V_a）を決定。
2）乾燥質量測定後に 21℃前後の水に 48 時間以上浸漬。乾燥質量の測定と同様に，24 時間を 1 サイクルとして，測定値の差が 0.5%以下に収まるまで数サイクル繰り返し，表面の水分を除き表乾状態にしてから浸漬質量を決定。
3）浸漬質量測定後，水道水で 5 時間煮沸。煮沸後，20 ～ 25℃になるまで 14 時間以上自然冷却を行い，表乾状態にし，煮沸質量（V_b）を測定。
4）煮沸質量測定後，水中でみかけ質量（V_c）を測定。
5）空隙率（V_p(%)）は，式(1)により算出。

なお，予備段階において乾燥，浸漬ともに 48 時間で完了することを確認し，それぞれ 48 時間後に測定した。

$$V_p = (V_b - V_a)/(V_b - V_c) \times 100 \quad (1)$$

3. 試験結果

3.1 全体的な傾向

本研究では，混和剤の使用量を変化させることによりスランプ値の異なる 3 種類のコンクリートを製造しているため，使用したコンクリートの品質を確認する必要がある。各コンクリートの基本的な品質（スランプ，空気

表-5 施工条件を無視した場合の実験結果

		標準供試体			反かぶり			かぶり		
		平均 (%)	標準偏差 (%)	変動係数 (%)	平均 (%)	標準偏差 (%)	変動係数 (%)	平均 (%)	標準偏差 (%)	変動係数 (%)
スランプ 8cm	上部	12.36	0.77	6.23	11.88	1.63	13.70	12.86	1.70	13.24
	下部				11.51	1.59	13.83	12.01	1.49	12.40
	全体				11.70	1.62	13.85	12.35	1.63	13.22
スランプ 12cm	上部	12.66	0.56	4.44	12.42	1.91	15.40	12.71	1.44	11.32
	下部				11.83	1.92	16.22	12.71	1.29	10.12
	全体				12.18	1.91	15.70	12.55	1.60	12.73
スランプ 18cm	上部	11.28	1.04	9.20	11.55	1.54	13.35	12.04	1.50	12.45
	下部				10.93	1.62	14.85	11.79	1.67	14.17
	全体				11.23	1.61	14.36	11.89	1.60	13.48

表-4 標準供試体の基本品質

		SL (cm)	Air (%)	f'_c (N/mm^2)
SL8cm	平均値	8.3	4.3	39.9
	標準偏差	1.19	0.78	1.38
SL12cm	平均値	12.0	4.1	40.5
	標準偏差	1.51	0.67	0.94
SL18cm	平均値	17.7	4.5	41.2
	標準偏差	1.00	0.40	0.52

量，圧縮強度）の測定結果を**表-4** に示す。このように，目標スランプ値および空気量を満足するとともに，圧縮強度の品質変動も極めて小さいことが分かる。既往の調査結果[7]によると，設計基準強度 27 (N/mm^2)のコンクリートの強度の平均値と標準偏差は，35.89 (N/mm^2)，3.84 (N/mm^2)であり，この値と比較しても，本研究で使用したコンクリートは施工の要因を議論するに十分な品質を有していると考えられる。

スランプのみに着目し施工条件を無視した場合の，試験結果を**表-5** に示す。表中の平均は空隙率の平均値，標準偏差はその標準偏差，上部，下部，反かぶりおよびかぶりは，**図-3** 中に記載したとおりである。また，全体とは上下部を分けずに計算した結果である。空隙率の平均値および変動係数とスランプの関係を**図-4** に示す。なお，凡例中の「反」は反かぶり側，「か」はかぶり側，「上」は上部，「下」は下部，「全」は全体（上下部），「標準」は標準供試体を示し，平均空隙率および変動係数ともに同じ凡例である。標準供試体の変動係数は 4 ～ 9 %程度であり，先ほどの圧縮強度の調査結果（変動係数 11%）と比較して同等以下の変動であり，空隙率の測定が適切に行われていることが分かる。

平均空隙率は，スランプ 8 cm と 12 cm では殆ど変動がないが，18 cm になると若干ではあるが低下する傾向がみられる。測定箇所の違いによる変化は，スランプ 8 cm のかぶり上部を除けば，スランプ値によらず約 1 %の変動範囲に入っていることが分かる。

変動係数は，標準供試体の変動係数が他の場合に比べて小さい値を示していることが分かる。変動係数のスランプに対する変化に着目すると，標準供試体およびかぶり側は下に凸の傾向を，反かぶり側は上に凸の傾向を示しており，スランプ 12 cm の変動係数は大きく変動することが分かる。

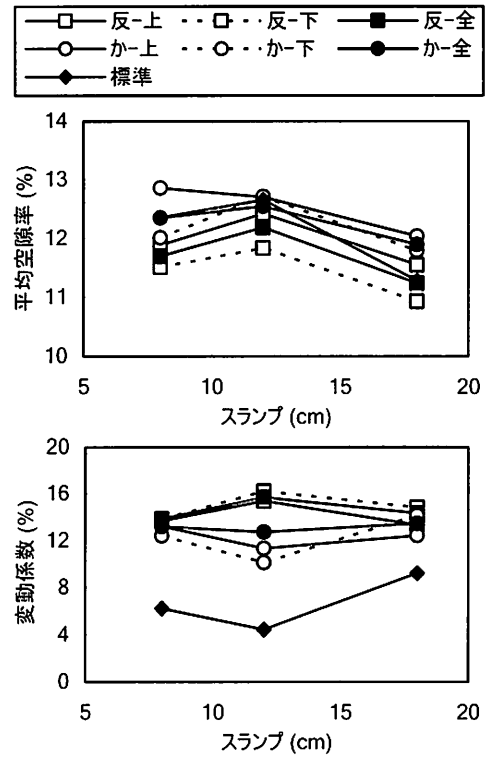


図-4 平均空隙率および変動係数とスランプの関係

本研究で設定した施工条件は，標準的な施工の範囲に殆ど含まれており，この範囲内で施工が行われれば，構造物の平均的な品質は標準供試体と比べても遜色ないが，品質変動は 1.5～3.5 倍にもなることが分かる。

3.2 施工条件がかぶり空隙率に与える影響

各施工要因がかぶり空隙率に及ぼす影響を考察するために，他の施工要因の値を可能な限り固定したパターンを数点選定し考察する。打込み高さについては，比較するパターンを確保できないので，ここでは考察を行わない。なお，帯鉄筋間隔が 2 パターンのみの設定であるため，比較検討に耐えうる条件数を確保できない。そこで，主鉄筋および帯鉄筋の鉄筋間隔の影響をそれぞれ単独で

考察するのではなく，断面積あたりの鉄筋の量を閉塞率に置き換え，主鉄筋と帯鉄筋をまとめて考察を行った。閉塞率は式(2)によって定義され，一般的に 45 %から 60 %で充填性が低下するため，閉塞率は 50 %以下に制限した方が良いと考えられている [8]。本研究での閉塞率は概ね 20 %から 50 %の間であり，この条件を満足している範囲であることが分かる。

$$q = \frac{S}{A} \times 100 \qquad (2)$$

ここに，q ：コンクリートの打込み方向に直角な任意の断面における閉塞率 (%)

S ：上記断面における全鋼材の断面積 (mm^2)

A ：上記断面における型枠内法断面積 (mm^2)

なお，比較する条件は何れの場合も，かぶり，反かぶり内部（表面から 100 ～ 200 mm の間サンプル），反かぶり表面（表面から 0 ～ 50 mm 間のサンプル）とした。

（1）スランプの影響

実験条件を**表-6** に，実験結果を**図-5** に示す。**図-5** から，かぶり部と反かぶり部が，スランプの影響を同程度受けていることが分かる。かぶり部と反かぶり部ともに，スランプ値が大きくなっても，空隙率の平均値の大きさは，多少の変動があるものの変化があまり見られない。かぶり側の空隙率の変動係数は，概ねスランプ 12 cm 程度で最小値をとり，スランプが小さくなっても，大きくなっても，変動係数は増加する傾向が見られた。ここで示した実験条件の範囲では，スランプが 8 cm 前後と小さい場合は，締固めが不足することでフレッシュコンクリート中のエントラップドエアーを充分に取り除くことができず，スランプが 18cm 前後と大きい場合には，締固めが過度になることによって変動係数が増加したと考えられる。反かぶり側の変動係数は，内部および表面何れの場合も，スランプと変動係数の関係には明確な関係は見られず，概ね 4 ～ 8 %の変動係数となっている。

（2）閉塞率の影響

実験条件を**表-7** に，実験結果を**図-6** に示す。平均値への明らかな影響はスランプ同様に見られないが，かぶり側の変動係数は，閉塞率が増加するほど低下するという傾向が見られた。一般に，鉄筋間隔が狭い（閉塞率が高い）と骨材の移動が鉄筋に阻害され，かぶりの骨材率が低下しペースト分が増すことで，空隙率が増大しばらつきも大きくなると予想される。しかし，本研究の実験では，空隙率はどちらとも言えないものの，ばらつきについては逆の挙動が見られた。この理由は，本研究の実験条件の範囲内では，打込み方向と直角方向に鉄筋が配置されていることもあって，直ちに材料分離の原因になるような厳しい鉄筋配置がなかったと考えられる。鉛直方向に配置された鉄筋は，骨材に対して鉛直方向のみにし

表-6 スランプ検証 実験条件

実験条件	閉塞率 (%)	締固め時間 (s)	打込み高さ (m)
No.1	27.8	15	1
No.2	39.3		
No.3		25	

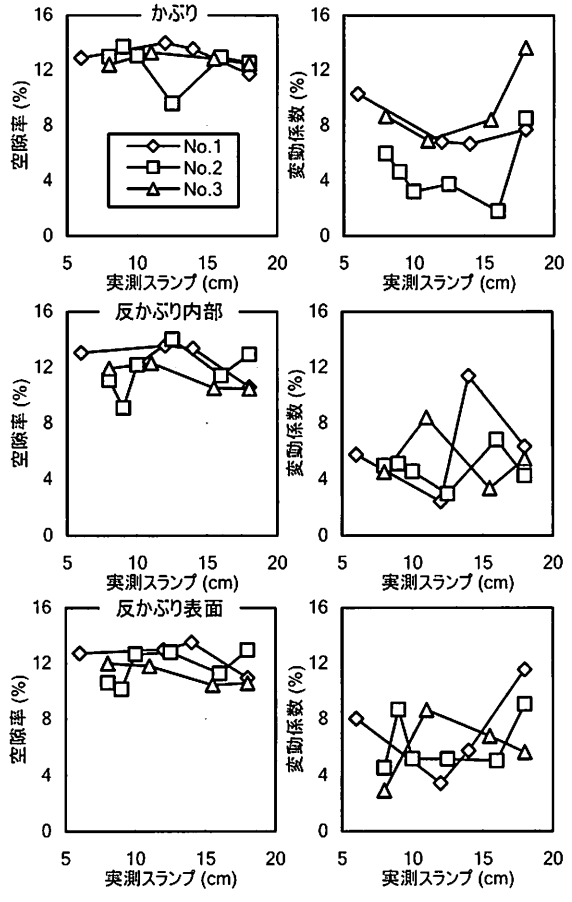


図-5 スランプの影響

か障害にならず，横移動するコンクリートの充填性には，水平鉄筋が大きな影響を与えると言われている [9]。また鉄筋間隔が 35 mm 以下で，始めてかぶりコンクリートの配合変動が急激に発生するとも報告されている [10]。本研究では水平鉄筋の間隔が 100 mm と 150 mm であり，その間隔が充填性に及ぼす影響は小さかったと考えられる。本研究の設定条件において，鉛直方向の鉄筋間隔が充分に広い範囲では，骨材の移動が妨げられる影響が殆ど見られず，逆に鉄筋間隔が広がったことで，ブリーディング水の移動可能な断面積が広がり，かぶりコンクリートにブリーディング水が移動しやすくなったということが考えられる。故に，本研究の範囲内において鉄筋間隔が広がることは，かぶりの振動締固めを阻害する物が減るためコンクリートが充填しやすくなり，結果として密実さが増す一方で，ブリーディング水の影響を受けやすくなり品質が低下する，二つの現象が同時に発生したと予想される。その結果，双方の効果が打ち消しあう形で，空隙率の平均値は殆ど変化がなく，かぶり中での不均一

表-7 閉塞率検証 実験条件

実験条件	スランプ (cm)	締固め時間 (s)	打込み高さ (m)
No.1	8	15	1
No.2	12		
No.3	18		
No.4		25	

表-8 締固め時間検証 実験条件

実験条件	スランプ (cm)	閉塞率 (%)	打込み高さ (m)
No.1	8	39.3	1
No.2	12		
No.3	18		
No.4		50.7	

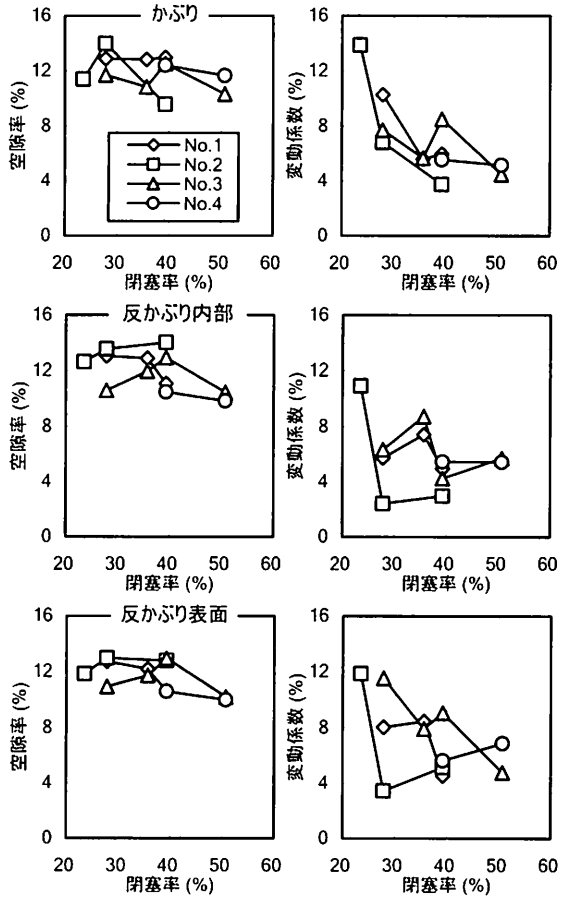


図-6 閉塞率の影響

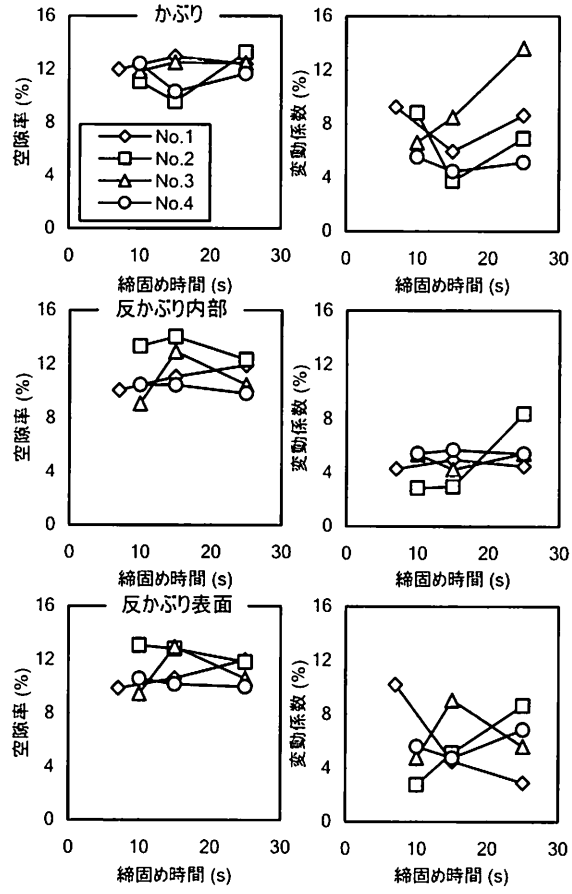


図-7 締固め時間の影響

性が発生，という現象が起きたものと考えられる。

（3）締固め時間

実験条件を表-8 に，実験結果を図-7 に示す。本研究の設定範囲内では，概ね締固め時間 15 秒程度で，かぶり空隙率の変動係数は最小となり，締固め時間がそれ以上長いあるいは短い場合の何れの場合も，変動係数は増加する傾向が見られる。締固め時のコンクリートの挙動は，①締固め開始と同時に表層部にモルタルの高密度層が形成され，②気泡が上昇しまだ締固められていない下層の粗骨材間隙にモルタルが流入，③高密度層が底面にまで達するとモルタルの動きが上昇に転じ，粗骨材間の間隙を充填しながら上昇しつづけ上層に達する[11]，という過程を経るとされている。このことから，締固め時間 10 秒では②まで完了していない状態で，エントラップトエアーがまだコンクリート中に残っている状態であり，25 秒では締固めが完了し，過振動の状態になったことで材料分離が発生した結果，変動係数が増加したと考えられる。一方でかぶり空隙率の平均値は，スランプおよび閉塞率同様に，締固め時間による変化は見られない。

3.3 まとめ

上記の実験結果の考察から，何れの施工要因でも，示方書で設定されている標準的な施工が行われた場合に，ばらつきが最も小さくなる最適な値は確認できる。すなわち，本研究で設定した実験条件では，スランプが 10～15cm 程度，閉塞率が大きいほど（本研究での最大値は 50.7 %），締固め時間が 15 秒の時である。また，全体的な傾向でも確認できたように，空隙率の平均値は大きな変化は無いことが分かった。

しかし，施工要因間には交互作用が存在し，施工要因のかぶり品質へ与える影響は非線形的な影響であることが明らかであり，施工が品質変動に与える影響は非常に複雑なものであると言える。そこで本研究では次章にて，ニューラルネットワークを用いた分析を行った。

4. ニューラルネットワークを用いた品質変動分析[12),13),14)]

4.1 ニューラルネットワークの特徴

ニューラルネットワークとは，脳における神経細胞の信号伝達系をモデルとした情報処理手法である。特徴としては，線形近似よりも強力な非線形の近似システムであること，繰り返し情報を与えられることによって正しい答えを導き出そうと自己組織化していくという学習能力を持つこと，並列処理システムであること，の3つが挙げられる。このような特徴を持っていることから，パターン認識問題，数式化や定式化が困難な問題の解決，組み合わせが膨大な問題の最適解の究明などで適用されている手法である。コンクリートの分野においても，これまでに多くの適用事例が報告されている[例えば 15)]。本研究の実験結果の評価においても，これらの特徴が非常に有効であると考え，ニューラルネットワークを用いた分析を行った。

4.2 ネットワーク構成と学習状況

本研究では，統計解析ソフト JMP[14)]を用いて，非線形最小2乗法の回帰分析を使った誤差逆伝播学習法による3層階層型ニューラルネットワークによる学習を行った。ネットワーク構成は，構築したネットワークが施工品質の管理，供用後の検査計画の策定において利用されることを想定し，入力因子は空気量，スランプ，閉塞率，締固め時間，打込み高さとし，出力因子はかぶり空隙率とかぶり空隙率変動係数とした。なお，中間層数は，学習状況を勘案してトライアンドエラーにより 12 個と決定した。学習開始値の当てはめは，乱数によってランダムに 50 パターン行い，各当てはめにおける学習反復最大回数を 1000 回と設定し学習を行った。**図-8** に学習結果を示す。本研究で実施した施工条件の範囲内では，良好な学習結果が得られていることが分かる。

4.3 構築したネットワークの評価

ニューラルネットワークは，入力と出力が直接つながっていないため，通常の回帰分析のように結果を説明することができないという欠点がある。そこで，入力データの出力結果への影響を調べるために感度解析を行った。本研究における感度解析では，ある一つの因子のみを最小値 ～ 最大値まで変動させたときの予測結果の変化を，その要因が予測結果に及ぼす影響として捉えている。各入力因子が予測結果に及ぼす感度を考察する際に注意すべき事項は，各入力因子の変動幅を同等に評価することである。例えば，スランプを 8 cm から 9 cm に変動させた場合と，閉塞率を 30 %から 31 %に変動させた場合を比較することが妥当であるかを検討することである。両者ともに，各因子を" 1" の幅で変動した結果であり，" 1" という数字としては同じ意味を持つが，この変動幅が予測結果に及ぼす影響が同等で無いことは容易に想像できる。本研究で設定した施工条件の範囲は，前述したように基本的に示方書で定められる標準的な施工範囲である。示方書は過去の経験および知見を集積した情報であり，ここで定められている標準的な施工範囲は，適切なコンクリート構造物を構築するために許容された各因子の変動幅と捉えることができる。そこで，各入力因子の変動範囲が予測結果に及ぼす影響を同じにするため，**表-9** のように入力データの範囲を決定した。これは，各入力因子の中間点を基準値（0.5）とし，実験条件の最小値または最大値と基準値の差の大きい方を，入力データの範囲の最小値または最大値としている。このため，締固め時間では実験における最小値が 10 秒であるのに対して感

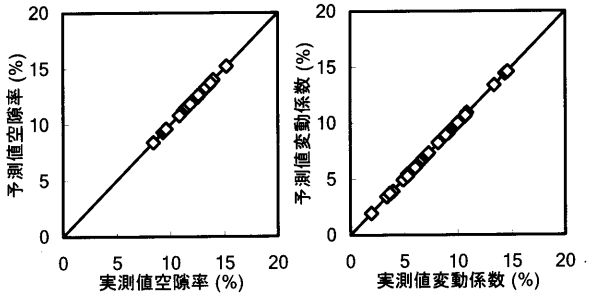


図-8 学習状況

表-9 入力データの範囲

変動幅	空気量 (%)	スランプ (cm)	締固め時間 (s)	閉塞率 (%)	打込み高さ (m)
0	3.5	6	5	23.5	0.5
0.5	4.5	12	15	37.1	1
1	5.5	18	25	50.7	1.5

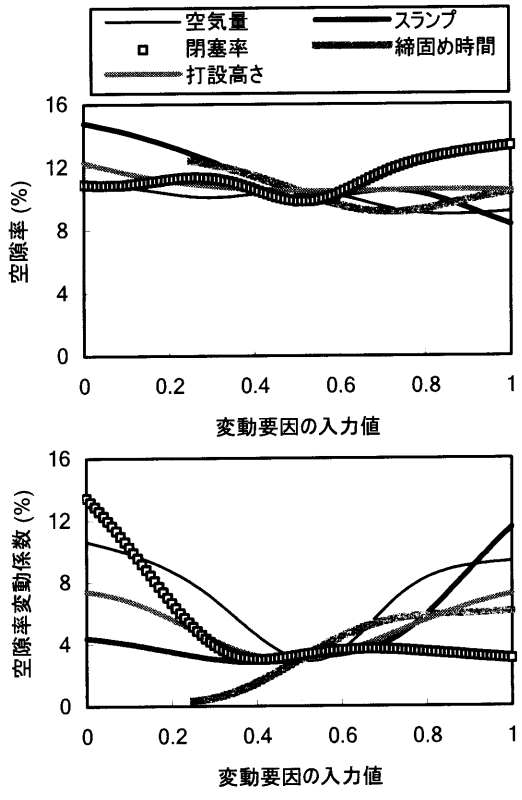


図-9 感度解析結果

度解析の最小値は5秒と設定している。なお，感度解析は学習範囲内のみの結果を用いて考察する。本感度解析では，ある一つの因子のみを0 ～ 1まで0.01ずつ変動させたときの予測結果の変化を，その因子が予測結果に及ぼす影響として捉えている。この時，その他の因子は基準値である0.5で固定している。

感度解析の結果を**図-9**に示す。なお，スランプおよび締固め時間は，実験条件の最小値からの表示となっている。ここで，**図-5** ～ **図-6**に示した実験結果を用いたスランプ，閉塞率，締固め時間の影響と感度解析の結果を比較する。ただし，感度解析の場合は，対象とする因子以外は基準値で固定しているのに対して，実験結果を用いた場合は，空気量およびその他の因子が基準値とは異なる場合もあるため，あくまでも傾向としての比較にとどめる。空隙率に関しては，実験結果および感度解析ともに，それほど変動がないことが分かる。一方，空隙率の変動係数に関しては，入力因子によって大きく変動する場合が見られる。スランプの場合は，両者ともにスランプ値の増加に伴い変動係数が増加し，閉塞率の場合は，閉塞率の増加に伴い急激に減少しその後は殆ど変化がない傾向を両者ともに示し，締固め時間の場合は，締固め時間の増加に伴い増加傾向を示していることが分かる。これらのことから，感度解析の結果は概ね実験結果を再現していることがわかり，学習の結果構築されたネットワークは概ね妥当であることが分かる。

図-10は，感度解析結果の微分値を0.1刻みで離散化した結果である。閉塞率，スランプ，空気量の順に各入力因子が1割変動した場合の空隙率変動係数の変化の割合が多いことが分かる。閉塞率の場合は，特に閉塞率が小さい値（23.5 ～ 31.7 %）のときに空隙率変動係数は大きく低下，スランプの場合は，特にスランプが大きい値（14.4 ～ 18 cm）のときに空隙率変動係数は大きく増加，空気量の場合は，空気量が小さいときは空隙率変動係数が低下し，大きいときは増加する傾向を示している。

また，空隙率と空隙率変動係数の変化の傾向は必ずしも一致しておらず，品質が悪くなればなるほど（空隙率の増加），ばらつきも大きくなる（変動係数の増加）という傾向は特に見られない。これは，前述したように，本研究で対象とした施工範囲が，標準的な範囲内であることによると考えられる。

4.4 予測結果の利用例

前項で得られたニューラルネットワークの学習結果を利用して，施工によるかぶりコンクリートの品質変動を考慮した劣化予測の例を示す。設定した施工条件および構築したネットワークによる予測結果を**表-10**に示す。なお，打込み高さは全ての条件において1 m とした。

この予測結果を用いて，施工要因によるばらつきを考慮した鋼材の腐食発生確率を示方書[1)]に基づいて算出する。なお，本研究では供試体本数確保のため耐久性能を

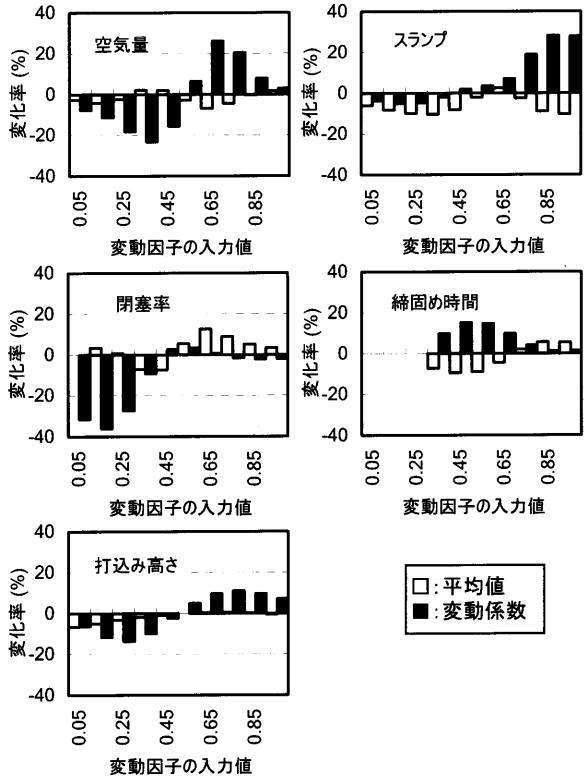


図-10 感度解析結果の変化率

表-10 与えた施工条件と予測結果

	空気量 (%)	スランプ (cm)	閉塞率 (%)	締固め時間 (s)	空隙率 (%)	変動係数 (%)
C1	4.5	8	35	20	13.1	4.5
C2	5	12	40	15	9.2	7.8
C3	5.5	18	45	10	12.7	10.6

間接的に評価しうる空隙率を対象としたため，直接塩化物イオンの見かけの拡散係数（以下，拡散係数）を求めることができない。そこで，本研究の対象である配合の標準供試体の拡散係数を，示方書にて提案されているW/Cの関数式によって求めた。次に，標準供試体の空隙率を本研究で測定した全標準供試体の平均値とし，空隙率と拡散係数の関係は比例関係が成立すると仮定し，各ケースの拡散係数を算出した。得られた拡散係数を用いて，かぶり50 mm，表面塩分量2 kg/m^3（海岸からの距離0.5 kmに相当[1)]），腐食発生限界塩分量1.2 kg/m^{3}の場合の腐食発生年の確率分布を，施工要因による変動を考慮して算出した。なお，変動係数に関しても空隙率と拡散係数の関係は比例関係が成立すると仮定している。

算出した結果を**図-11**に示す。なお，図中には標準供試体の空隙率から求められる拡散係数を用いて算出した結果（標準）と，これにコンクリートの材料係数として1.3を用いて算出した結果（安全係数(1.3)）の場合もあわせて記載した。施工要因によって，腐食発生年の平均値および分布形状が大きく異なることが分かる。今回のケーススタディでは，標準供試体の品質を用いてコンクリ

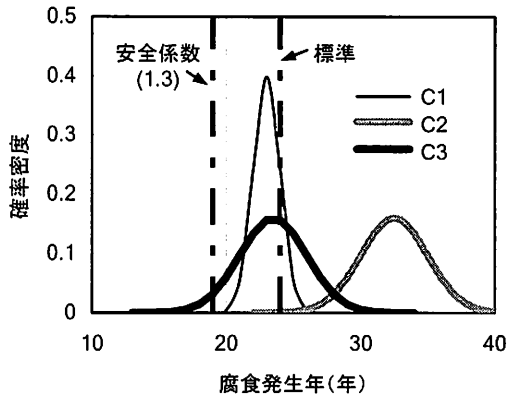


図-11 腐食発生年の確率分布

ートの材料係数を 1.3 にすることで，十分に安全側の評価が可能となっていることが分かる。しかし，過大に安全側に評価することは，初期コストおよび維持管理コストの増大を招きやすく，必ずしも適切な方法ではない。できる限り，実際の状況に即した評価をすることが重要であることは言うまでもない。本研究の検討範囲は限定されたものであり，現時点での実施工への適用は難しいが，今後，更なる検討を行っていくことで，施工による品質の変動が定量的に評価できるようになると考えている。それにより，竣工後の維持管理においても，実際に即した劣化予測の結果を基本情報として，戦略的な対策を講じていくことができるようになる。また，施工要因の影響を定量的に評価することは，当然のことながら，要求する品質を達成するための適切な施工の組み合わせを提示することも可能であり，本研究の意義は大きいと言える。

5. まとめ

本研究は，施工要因がかぶりコンクリートの品質に及ぼす影響を定量的に把握することを目的とし，54 施工パターンの実験を実施した。本研究により得られた成果は以下の通りである。

1) 各施工要因が，かぶりコンクリートの空隙率および空隙率変動係数に及ぼす影響は必ずしも一致せず，品質が悪くなればなるほど（空隙率の増加），ばらつきも大きくなる（変動係数の増加）という傾向は特に見られない。これは，本研究で対象とした施工範囲が，標準的な範囲内であることによると考えられる。
2) 品質のばらつきは，あるひとつの原因によるものでなく，複数の原因による交互作用が複雑に絡み合って発生するもので，線形分析を行うこと，理論的に理解することは非常に難しい。
3) ニューラルネットワークを用いた分析を行うことにより，標準的な施工条件においては，施工条件からかぶり品質とその変動を推定することができる。また，かぶり品質に与える施工要因の影響度の大きさを定量的に評価することができる。
4) 本研究の成果を活用することにより，施工による品質変動を考慮した劣化予測が可能となり，より正確な予測結果を算出することが可能となる。

本研究の指標は，実験上の制約等を考慮し，直接的に耐久性能を表すもの（例えば中性化速度係数など）ではなく空隙率を用いたが，今後は直接的指標での検証を行う必要がある。さらに，ニューラルネットワークによる分析において，本研究では実験結果を全て学習データに用いたが，今後教師データを用いた検証が必要であり，調査・実験結果の蓄積を行う予定である。

謝辞：本研究は東京大学生産技術研究所魚本・岸・加藤研究室で行ったものであり，研究遂行にあたりご協力いただいた関係各位に謝意を表します。特に，本研究を一緒に実施した元芝浦工業大学 4 年生永森寛明氏，実験を手伝って頂いた同大学修士 2 年佐藤雅義氏，多くの助言を頂いた東急建設（株）伊藤正憲氏にここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

1) 土木学会：2002 年制定コンクリート標準示方書[施工編]
2) 加藤佳孝・魚本健人：補修リスクを用いた検査実施の優先順位決定法の提案，コンクリート工学論文集，vol.16，No.2，2005.5
3) 小根澤淳志・加藤佳孝・魚本健人：コンクリートの熱特性を活用した塩化物イオン拡散係数推定に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，2006.7
4) 旧建設省・旧運輸省・農林水産省：土木コンクリート構造物耐久性検討委員会の提言，2000.3
5) 旧建設省土木研究所：コンクリート施工の改善方法に関する調査報告書，1988.2
6) 日本土木工業協会：コンクリート構造物の施工に関するアンケート，2003.6
7) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会報告書，1998
8) 泉満明・秋元泰輔，宮崎修輔：コンクリート構造物の配筋とそのディテール，技報堂出版，2000.8
9) 尾上幸造・松下博通・亀澤靖・陶佳宏：コンクリートの充填性におよぼす配筋の影響，土木学会年次学術講演会論文集，V-495，2001
10) 尾上幸造・松下博通・鶴田浩章・亀澤靖・山上裕也：かぶりコンクリートの充填性と配合変動に与える配筋の影響，土木学会年次学術講演会講演概要集，V-628，2003
11) 谷川恭雄：フレッシュコンクリートの流動特性とその予測，セメントジャーナル社，2004.9
12) 熊沢逸夫：学習とニューラルネットワーク，森北出版，2005.8
13) 古富康成：ニューラルネットワーク，朝倉書店，2002.7
14) JMP: http://www.sas.com/ (2006.1.31 確認)
15) 大矢孝・魚本健人・堤知明：ニューラルネットワークを用いたコンクリート製造管理システムに関する研究，土木学会論文集，Vol.514/V-27 号，pp.9-18，1995.5

（原稿受理年月日：2006 年 7 月 24 日）

Quantitative Evaluation of Variation in Concrete Quality by using Neural Network

By Yoshitaka Kato and Manabu Fujino

Concrete Research and Technology, Vol.18, No.1, Jan. 2007

Synopsis: The purpose of this research is to clarify the influence of construction works on variation in concrete quality, and to establish estimation method of quality variation considering construction conditions (mix-proportions, re-bar conditions, cover concrete depth, etc). In this research, variation in concrete quality obtained by the experiment was quantitatively evaluated using neural network. As a result, the influence of construction conditions on the variation in concrete quality could be clarified quantitatively and the cover concrete quality and its variation could be estimated.

Keywords: cover concrete, void ratio, variation, construction conditions, neural network

Concrete Structure Moisture Supply by Rainfall using Meteorological Conditions

Yoshitaka KATO[1] and Naoki Takeshita[2]

[1]Associate professor, International Center for Urban Safety Engineering, Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Japan

[2] Real Estate Department, Mitsubishi UFJ Trust and Banking Corporation, Japan

Abstract

Environmental conditions, such as rain, have been shown to contribute to the deterioration speed of concrete structures. This study attempted to clarify the relationship between local rainfall conditions and the volume of rain adhering to the surface of a concrete structure using simulation methods and computational fluid dynamics. By determining the amount of water adhering to the surface, the moisture content of the concrete can be predicted. Water absorption velocity was found to be small relative to the volume of rainfall, showing that the supply of water by rain has a significant influence on moisture content. Rainfall was proposed as a boundary condition for predicting moisture content based on analytical and experimental results. An example was performed demonstrating the processing of weather data in the simulation method.

1. Introduction

It is well known that the deterioration of concrete structures is caused by a variety of environmental effects. For example, carbon dioxide and chloride ions destroy the passive state film formed on the surface of rebar, which allows the rebar to easily corrode in the presence of water and oxygen. Such deterioration may cause the failure of a concrete structure unless remedial measures are performed; however, proper remedial measures should be based on diagnosis result of existing concrete structure. To address this, several prediction models for concrete structure deterioration have been proposed. These proposed models can predict deterioration progress with limited accuracy within the applicable range of each model under laboratory test conditions. However, it is difficult to apply these models to existing concrete structures because actual environmental conditions have greater variation than laboratory test conditions. Variables such as temperature, humidity, and amount of supplied chloride ions are treated as boundary conditions in the models in order to predict the progress of deterioration considering actual environmental conditions. It is difficult to predict such progress in concrete structures because the treatment of actual environmental conditions as boundary conditions in the proposed models has not been clarified yet.

There are many environmental variables that must be considered when predicting the progress of deterioration in concrete structures. Although moisture is not a direct cause of deterioration, it does effect several kinds of deteriorations indirectly. For instance, chloride ion can not diffuse into concrete without water, and carbonation, freezing and thawing, and ASR will not occur unless there is some water in the pore structure. The moisture content of concrete is typically affected by rainfall and mist. The boundary condition for mist can be set using humidity measurements. However, the effect of rainfall on concrete surface may be complicated by the combined influences of rainfall, wind, and structure form. In this research, the wetting of a structure by rainwater was simulated using computational fluid dynamics (CFD) based on meteorological conditions. A treatment method for rainfall as a boundary condition for predicting the moisture content of concrete was proposed based on the analysis results.

2. Scope and limitation of this research

The variables which affect how rainwater is supplied to a structure are rainfall, wind velocity, wind direction, and structure form. The raindrops that adhere to the surface of the structure area are adsorbed into the concrete. There are many models which simulate water transfer in concrete, so that phenomenon will not be discussed in this research. The goal of this research is to simulate the area wetted by rainwater on a structure and its water supply rate considering the above mentioned factors. Then, if the water supply rate is faster than the water absorption rate, the water supply rate can be disregarded because the situation will be similar to submersion. First, the water absorption rate of mortar was measured to determine the relevance of the water supply rate.

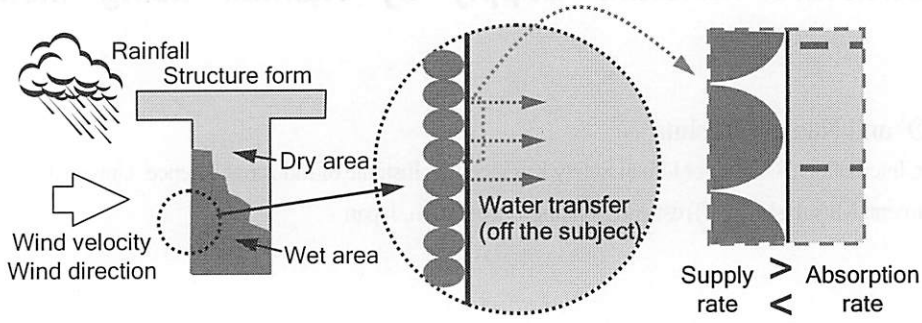


Fig. 1 Image of examination range of this research.

3. Water absorption test

3.1 Effective diffusion coefficient of chloride ions in porous media

The water absorption rate of concrete was obtained experimentally using mortar specimens. Mortar was used in order to maintain the accuracy of the experiment at a reasonable level. The water absorption rate was measured as an increment of specimen weight. The incremental increase of specimen weight due to water absorption was small, so it was necessary to use a very thin specimen. Furthermore, this emulated an actual concrete surface covered with a mortar layer.

The mix proportion for the mortar specimen was W/C = 0.5 and S/C = 1.5, and the dimensions were 60 x 60 x 5 (mm). The moisture content of the specimen was set to 0 (%) using D-dry processing. All surface sides except the supply side were sealed to control water absorption. The water supply rates were 0.22, 0.33, 0.43, 0.55, 0.77, 1.1 and 2.2 (mm/h). The specimen weight was measured every 15 minutes. **Figure 2** shows the method of water supply which simulated raindrops.

Figure 3 shows the experiment results. The amount of water absorbed in mortar increases with time and with an increase in water supply rate. **Figure 4** shows the water absorption rate every 15 minutes. The water absorption rate gradually decreases over time because the moisture content of mortar increases due to water supply. In this research, the specimen was dried completely before beginning the water absorption test, so that the initial water absorption rate would be the fastest. Also, later water absorption rates nearly simulate the practical situation because existing concrete structures contain some water. The fastest water absorption rate was around 0.6 (mm/h) but settled to 0.2 (mm/h) over time progress. These values are quite small, so it can be concluded that the water supply rate is not important. Therefore, this research concentrated on simulating the area wetted by

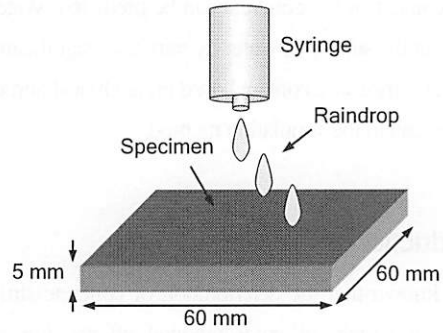


Fig. 2 Experiment situation.

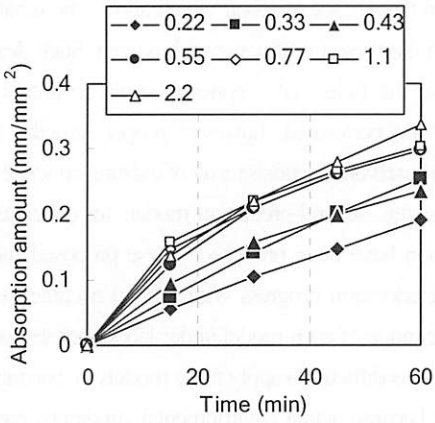


Fig. 3 Water absorption amount with time.

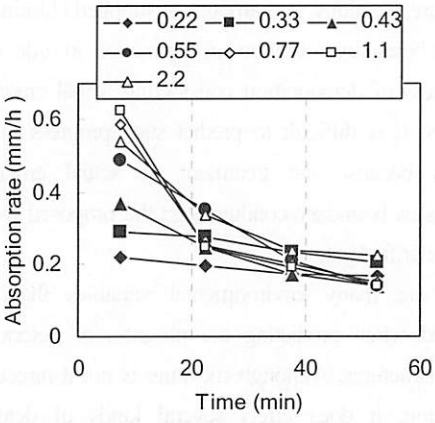


Fig. 4 Water absorption rate with time.

rainwater on a structure.

4. Outline of simulation method

The marketed CFD (computational fluid dynamics) software (Phoenics, CHAM-Japan) was used to simulate the area wet by rainwater considering meteorological conditions. The outline of the simulation method is shown as follows.

4.1 Basic equations

The basic equations used in this simulation are as follows. Eq. (1), Eq. (2) and Eq. (3) are the equations of continuity, motion, and conservation of energy, respectively.

$$\nabla \cdot V = 0 \tag{1}$$

$$\frac{DV}{Dt} = g - \frac{1}{\rho}\nabla p + \nu\left[\nabla^2 V\right] \tag{2}$$

$$\rho\frac{D\hat{E}}{Dt} = -(\nabla \cdot q) - (\nabla \cdot V) + \mu\Phi + q' \tag{3}$$

where, V = rate vector (m/s), t = time (s), ρ = density (kg/m^3), p = pressure (N/m^2), ν = movement viscosity (m^2/s), μ = viscous coefficient (kg/ms), E = internal energy of fluid (J), q = heat flow velocity (J/m^{2}s), Φ = viscous dissipation function (/s^2)

The finite volume method was utilized, and the simple method, one of the implicit methods, was used as a calculation algorithm.

4.2 Modeling of rainfall

The characteristics of raindrop particles are governed by the amount of rainfall, air flow (wind velocity and direction), and temperature. The influence of temperature was neglected in this research because its influence is small relative to the other factors. The cumulative particle number distribution of raindrops can be expressed by Eq. (4) (Marshall, J. S. and Palme, W. M., 1948).

$$N_D = 8000\exp\left(-4.1DR^{-0.21}\right) \tag{4}$$

where, N_D = cumulative distribution function of number of raindrops per unit volume, D = diameter of raindrop (mm), R = amount of rainfall per one hour(mm/h)

Three representative particle diameters were used for simulation considering analysis time and accuracy. The representative particle diameters were calculated from the volume ratio distribution curve as shown in **Figure 5**. Then, the total volume of raindrops and the particle size, which exists from a to infinity, can be expressed as Eq. (5) and Eq. (6), respectively.

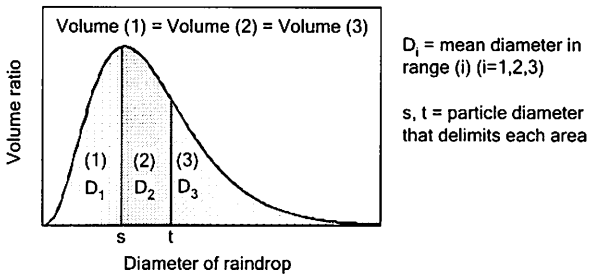


Fig. 5 Determination of mean raindrop particle diameter.

$$f_1(a) = \int_a^\infty \frac{1}{6}\pi D^3 \cdot N_D dD = \frac{6\beta}{\alpha^4}e^{-\alpha a} + \frac{6\beta}{\alpha^3}ae^{-\alpha a} + \frac{3\beta}{\alpha^2}a^2e^{-\alpha a} + \frac{\beta}{\alpha}a^3e^{-\alpha a} \tag{5}$$

$$f_2(a) = \int_a^\infty N_D dD = \frac{8000}{\alpha}e^{-\alpha a} \tag{6}$$

where, $\alpha = 4.1R^{-0.21}$ $\beta = 1/6 \cdot 8000\pi$

A raindrop does not fall if its diameter is less than 0.02mm (Marshall, J. S. and Palme, W. M., 1948). Eq. (7) and Eq. (8) can be obtained considering this fact and the definition of each parameter described in **Figure 5**. From these equations, both s and t can be obtained.

$$f_1(0.02) - f_1(s) = \frac{1}{3}f_1(0.02) \tag{7}$$

$$f_1(t) = \frac{1}{3}f_1(0.02) \tag{8}$$

The mean diameter of each area can be obtained by the following equations.

$$\frac{1}{6}\pi D_1^3\left(f_2(0.02) - f_2(s)\right) = \frac{1}{3}f_1(0.02) \tag{9}$$

$$\frac{1}{6}\pi D_2^3\left(f_2(s) - f_2(t)\right) = \frac{1}{3}f_1(0.02) \tag{10}$$

$$\frac{1}{6}\pi D_3^3 f_2(t) = \frac{1}{3}f_1(0.02) \tag{11}$$

The terminal velocity of a raindrop can be calculated using Eq. (12) (Fabien J.R. van Mook, 2002). This empirical equation was proposed based on previous experimental results (Gunn, R. and Kinzer, G D., 1949).

$$v = 9.4 - 9.4\exp\left(-1.57 \cdot 10^3 D^{1.15}\right) \tag{12}$$

where, v = terminal velocity of raindrop (m/s), D = diameter of raindrop (m)

Table 1 shows the calculation results. These values were used in the simulation study.

Table 1 Calculation results of mean diameter and terminal velocity of raindrop.

R (mm/h)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
s (mm)	0.71	0.82	0.90	0.95	1.00	1.04	1.07	1.10	1.13	1.15
t (mm)	1.11	1.29	1.40	1.49	1.56	1.62	1.67	1.72	1.76	1.80
D_1 (mm)	0.32	0.37	0.40	0.43	0.45	0.47	0.48	0.49	0.51	0.52
D_2 (mm)	0.87	1.01	1.10	1.17	1.22	1.27	1.31	1.35	1.38	1.41
D_3 (mm)	1.40	1.62	1.77	1.88	1.97	2.04	2.11	2.17	2.22	2.27
v_1 (m/s)	1.32	1.53	1.67	1.78	1.87	1.94	2.00	2.06	2.11	2.16
v_2 (m/s)	3.56	4.05	4.35	4.57	4.74	4.89	5.01	5.12	5.21	5.30
v_3 (m/s)	5.27	5.84	6.18	6.42	6.60	6.75	6.88	6.98	7.07	7.16

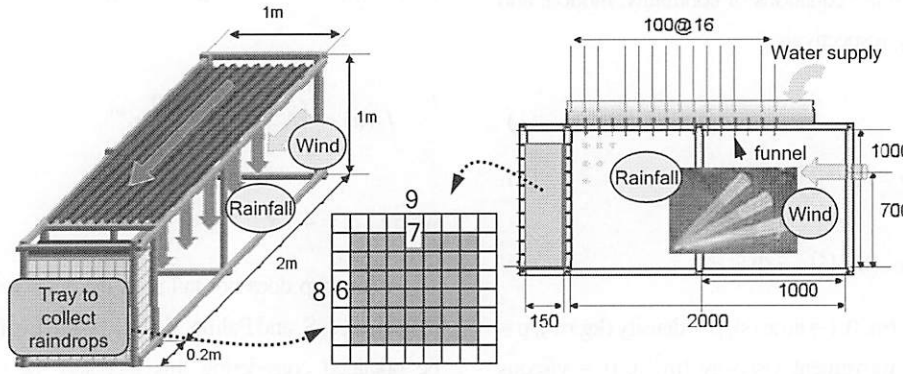


Fig. 6 Schematic of mock rainfall experiment device.

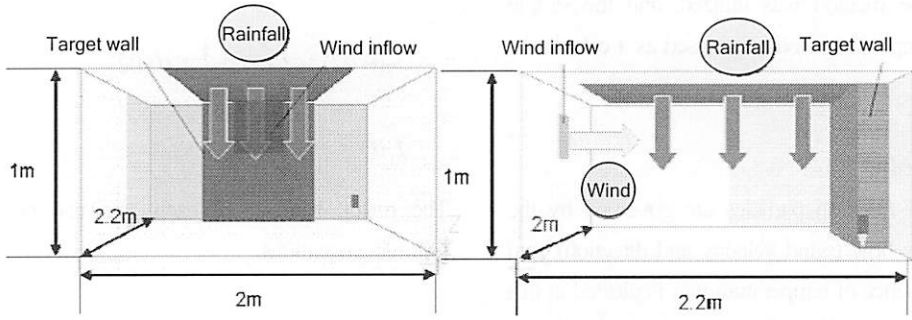


Fig. 7 Schematic of simulation area.

5. Mock rainfall experiment

A mock rainfall experiment was conducted in order to verify the validity of the simulation results.

5.1 Outline of experiment

Figure 6 shows the experimental setup of the mock rainfall device. Downspouts were set on top to supply water to experiment area. The holes were made in the downspouts at intervals of 100 (mm) and small, narrow funnels were put in the holes. The amount of rainfall was controlled by the depth of water in the downspout and these funnels. Wind was simulated using a fan at a height of 700 (mm). Raindrops carried by the wind were collected by trays. Each tray is 100 x 100 (mm), and the trays were arranged in a 8 x 9 grid (height x width). Measurement was taken from the center 6 x 7 grid (height x width, gray area in **Figure 6**) because the edge trays were assumed to be affected by boundary conditions such as rebound from the ground or the device frame. The mass difference of the tray before and after the experiment was measured. The test period was 15 minutes. There were four total experimental cases which combined two rates of rainfall (30, 45 (mm/h)) with two wind velocities (6.3, 8.0 (m/s)). Experimental measurement began after confirming the rainfall had reached a steady state.

5.2 Outline of simulation for mock rainfall experiment

Figure 7 shows the schematic of the simulation area for the

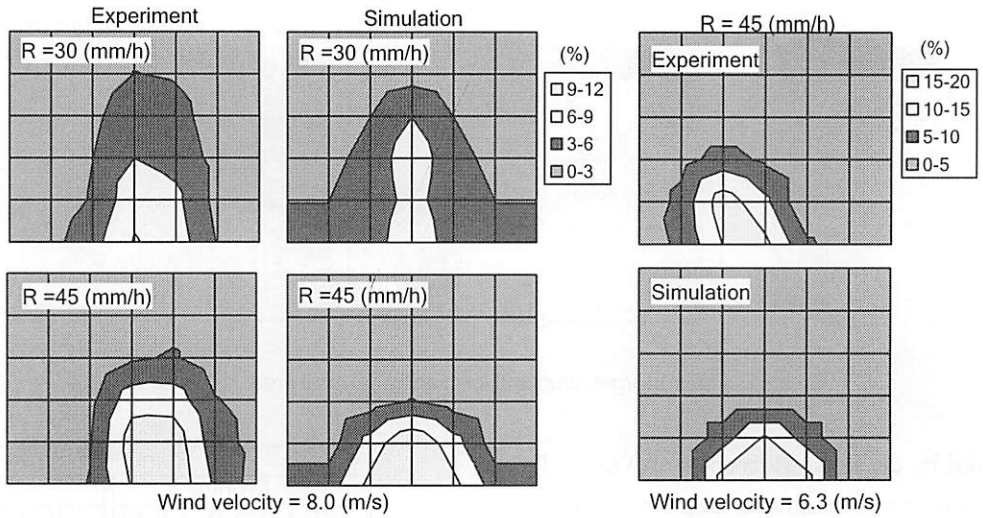


Fig. 8 Raindrop distribution.

mock rainfall experiment. To reduce the influence of the boundary condition on the analytical result, the width of the analytical area was set larger than that of the experiment. The analytical area was composed of 100mm cubes. This value is the same as the spacing between the funnels, as well as the dimensions of the trays. Input environmental data was same as the experimental case.

5.3 Verification of simulation validity

Figure 8 shows the experimental and analytical results. There was no data for rainfall = 30 (mm/h) and wind velocity = 6.3 (m/s) because the rain did not affect the measurement area. As discussed earlier, the water supply rate (the number of raindrops over a specified period) is not important. Therefore, the numerical value of each element represents the ratio of total volume of water measured to that calculated by the experiment or analysis. It was found that the simulation result nearly reproduces the experiment result. When comparing R = 30 (mm/h) with R = 45 (mm/h) for w = 8.0 (m/s), water adhered to a higher position when the rainfall was less (R = 30 (mm/h)). Therefore, the influence of the wind on each raindrop is larger when the rainfall is less. However, the water did not adhere to the target wall when the rainfall was light and the wind velocity low. It was thought that this phenomenon depended on the amount of rainfall itself. Thus, the movement of the raindrop was decided by a complex compound action between the rainfall and wind velocity.

It was concluded that the area wet by rainfall on a structure could be simulated using the proposed method based on meteorological condition and structure form.

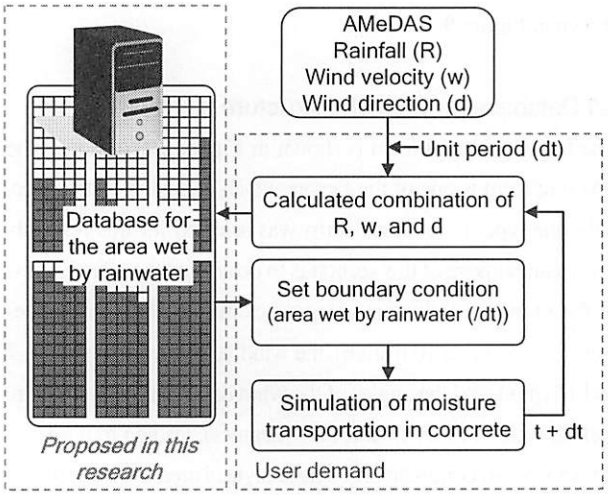


Fig. 9 Simulation process of moisture transportation in concrete.

6. Application to real structure

It is not realistic to apply the rainfall simulation every time when obtaining the boundary conditions of moisture supply for simulation of moisture transport in concrete. Moreover, the period of the required boundary condition, such as per hour, day, week, month, year, etc., depends on the model used for moisture transport and the purpose of the analysis. To deal with this problem, the following approach was proposed in this research. The area wet by rainfall can be determined using a combination of rainfall, wind velocity, and wind direction (with respect to the structure surface). Analyses are executed for representative cases beforehand, and analytical results are stored in a database. The user sets the unit period of the necessary boundary conditions for the moisture supply considering the future and usage of the model. The combination of rainfall, wind velocity and wind direction is calculated based on a meteorological database. The standard database in Japan is the AMeDAS meteorological

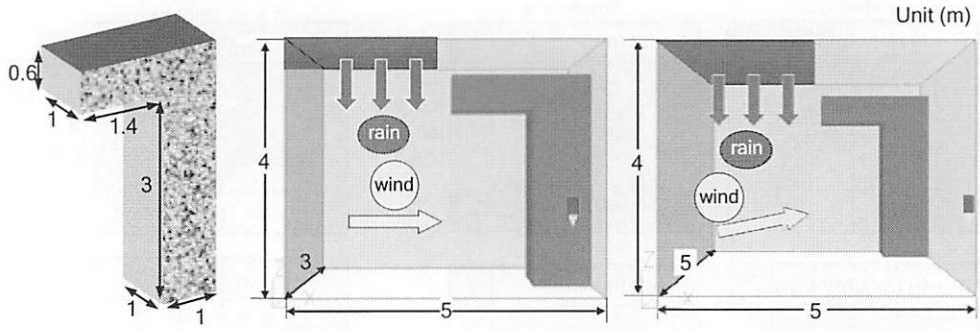


Fig. 10 Target structural form and analytical area.

database, provided by the Japan Meteorological Agency. The area wet by rainwater can be determined using this combination of calculations, which can then be used for the boundary condition for moisture transport in concrete. This procedure is shown in **Figure 9**.

6.1 Database for area of a structure wet by rainwater

The target structural form is shown in **Figure 10**. Although the structure form is one of the factors which effect the wetted area, only one type of structural form was selected for this research. The main purpose of this section is to determine the effectiveness of the proposed technique using an example. The rainfall rates were 1, 3, 5, 7 and 10 (mm/h), the wind velocities were 1, 3, 5, 7 and 10 (m/s), and the angles of the wind direction to the structure surface were 0, 22.5, 45 and 67.5 (degrees), leading to a total of 100 (5 x 5 x 4) combinations. The analytical area was determined considering the influence of wind direction (see **Figure 10**). One element of the analytical area was a 200 (mm) cube.

Figure 11 shows an example calculation result for wind direction = 22.5 degrees. For wind velocity equal to or less than 3 (m/s), there was little wetting of the structure. The wetted area increases as the wind velocity increases, and more than 80% of the total surface area was wet when wind velocity = 7 (m/s). At wind velocity = 10 (m/s), the wetted area was 100%.

6.2 Analysis of meteorological data at select observation points

In this section, analysis of meteorological data at select observation points was conducted based on EA AMeDAS data (Akasaka, H. et al, 2003). EA AMeDAS data provide standard metrological data for one year; the period from year 1981 to 1995 was used, and Tokyo, Yokohama, Chiba, Choshi, and Kumagai were selected as the targeted observation points.

The annual integrated wind velocity (the sum total of the wind velocity) for each wind direction and annual frequency of

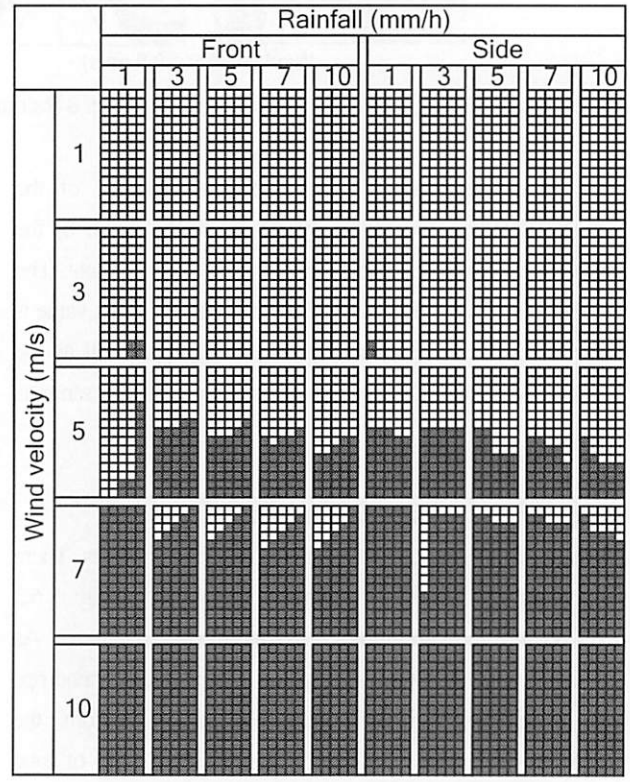


Fig. 11 Calculation result of the area wet by rainwater (22.5 degrees).

Table 2 Annual rainfall characteristics.

	Tokyo	Yokohama	Chiba	Choshi	Kumagai
Total rainfall (mm/year)	915	1,414	1,004	1,754	1,139
Rainfall duration (h/year)	471	552	467	643	552

the wind direction were calculated to understand the regional characteristics (see **Figure 12**). The numbers below the integrated wind velocity represent the total integrated wind velocity in one year regardless of wind direction. **Table 2** shows the total annual rainfall and total annual rainfall duration, and **Table 3** lists the correlation coefficients between each factor. It was found that all correlation coefficients were small, therefore each factor was independent. The annual integrated wind

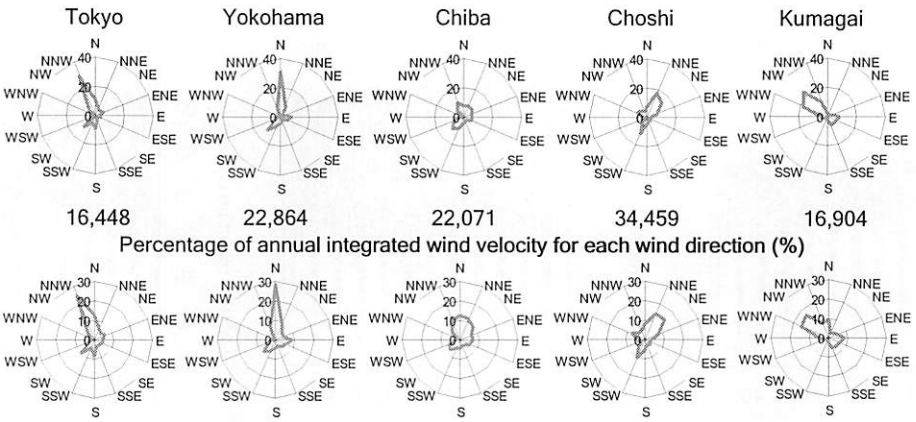


Fig. 12 Regional characteristic of metrological data.

Table 3 Correlation coefficient between each factor.

	Tokyo	Yokohama	Chiba	Choshi	Kumagai
d - w	0.056	0.068	0.019	8.0×10^{-5}	0.122
d - R	0.001	0.002	7.0×10^{-8}	0.003	2.0×10^{-5}
w - R	0.001	0.016	0.003	0.020	0.001

d: wind direction, w: wind velocity, R: rainfall

Table 4 Case studies of the combinations of R, w and d.

Time (h)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R	7	7	5	10	3	7	5	5	3	1
w	1	7	10	5	7	5	10	5	10	7
d	N	NNW	NNW	NNE	N	NE	NE	N	N	NW

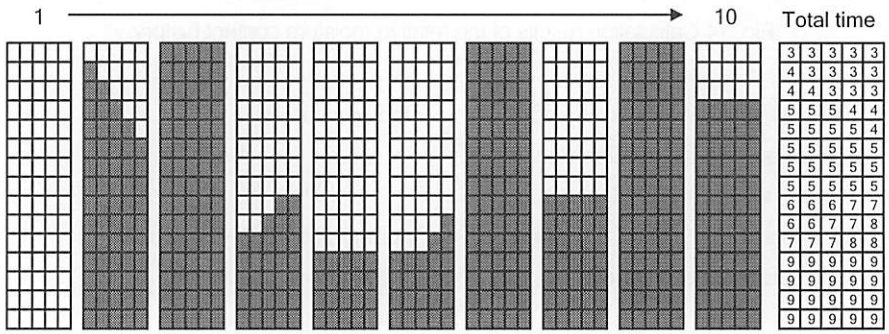
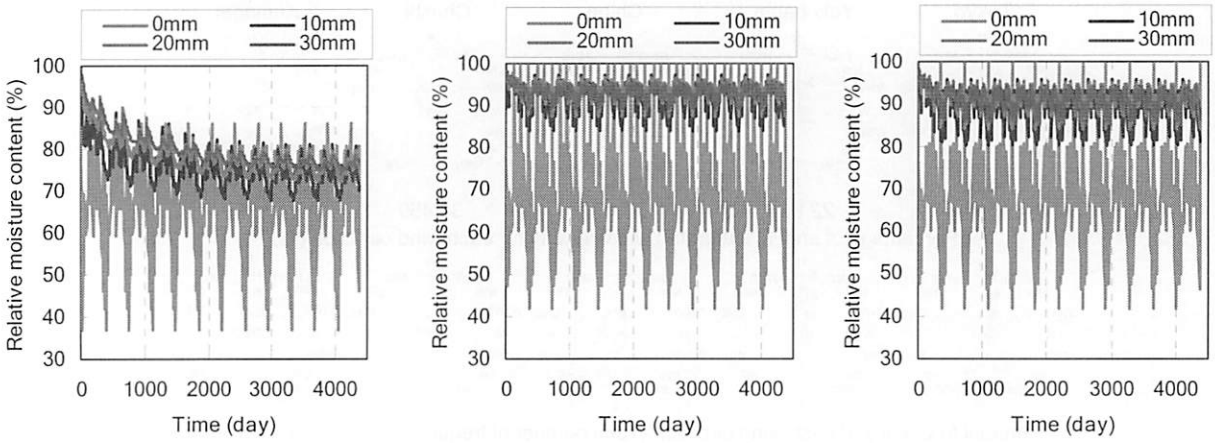


Fig. 13 Calculated results of case studies.

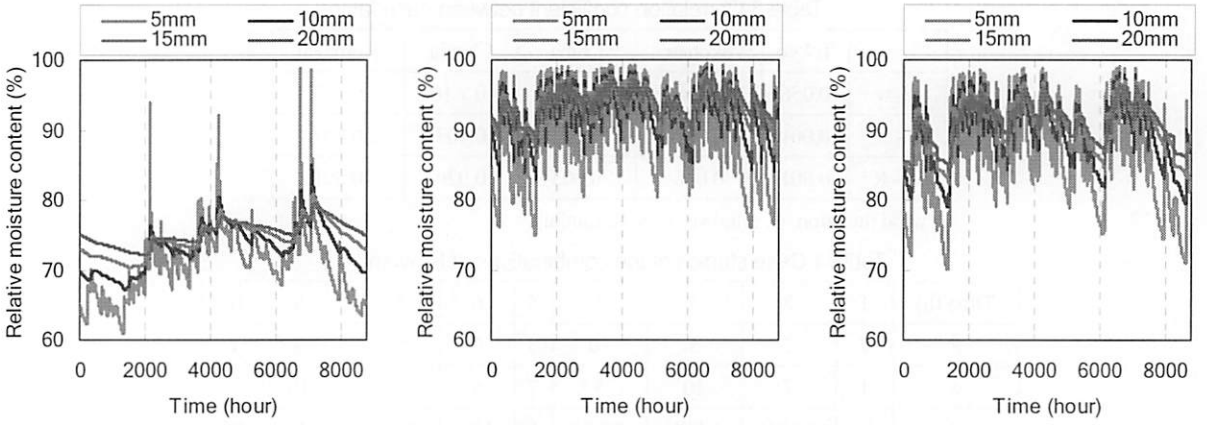
velocity was highest in Choshi, Yokohama and Chiba were in the middle, and Tokyo and Kumagai were lowest. For Tokyo and Yokohama, the wind between NNW to N had highest frequency and the integrated wind velocity of between NNW to N was also superior, whereas Chiba, Choshi and Kumagai displayed no clear tendency. The total annual rainfall in Choshi was the highest, followed by Yokohama, then the remaining cities. The regional characteristic of annual rainfall duration followed a similar tendency as the total amount of rainfall.

6.3 Case studies of the applicability of the proposed method

The calculation results of the area wet by rainwater considering the combinations of rainfall, wind velocity, and wind direction were stored in the database. Users can set the required boundary conditions of the moisture supply based on this database. For example, if the user wants to set the boundary condition from every hour based on meteorological data (see **Table 4**), this information can be obtained easily from the database (see **Figure 13**).



(a) Year 0 to 12 (RH only, RH + rainfall, RH + database).



(b) Year 13 (RH only, RH + rainfall, RH + database).

Fig. 14 Calculation results of the relative moisture content history.

In general, moisture transport in concrete is greatly affected by cyclic wetting-drying conditions. The simulation studies of moisture transport in concrete were conducted based on a previously proposed model (Akita et al. 1990). In this proposed model, moisture transport in concrete was expressed by Eq. (13).

$$\frac{\partial R}{\partial t} = \nabla(D\nabla R) \tag{13}$$

where, R: relative moisture content in concrete (%), t: time (day), D: moisture conductivity (cm/day)

In the previous research, it was found that the moisture conductivity (D) was affected by the relative moisture content in concrete (R) and environmental conditions – drying condition, moisture absorption condition, and water absorption condition. The relationship between the moisture conductivity (D) and the relative moisture content in concrete (R) was defined by the following equations, based on experimental results under each environmental condition.

Drying condition:

$$D = \frac{4.2}{\{29(1-R/100)+1\}^{1.4}} \tag{14}$$

Moisture absorption condition:

$$D = 2.2(41R/100+1)^{1.3} \tag{15}$$

Water absorption condition:

$$\begin{aligned} D &= 100\{1-2.5(1-R/100)^2\}D_1 && R \geq 80(\%) \\ D &= 100\{0.004+0.0031/(R/100+0.095)^{1.4}\}D_1 && R < 80(\%) \end{aligned} \tag{16}$$

where, D_1: water conductivity at R = 100 (%) (cm/day) (D_1 is decreasing with increase in the water absorption period)

The influence of meteorological conditions on moisture transport in concrete was investigated using this proposed moisture transport model. Three boundary conditions were set: 1) Only RH (only datasets of relative humidity used as the boundary condition = the area not wet by rainfall), 2) RH + rainfall (the total rainfall duration set as the water absorption condition = the area always wet by rainfall), and 3) RH +

database (moisture condition or water absorption condition selected based on the database). The initial relative moisture content in concrete was assumed to be 100 (%), and the standard metrological data for one year at Yokohama city was used. The calculated results of the relative moisture content in concrete are shown in **Figure 14**. From this information, it was found that the behavior of the relative moisture content was changing according to the boundary condition. It was also found that the influence of rainfall was large.

7. Conclusions

An estimation method for the area of a structure wet by rainwater using Computational Fluid Dynamics (CFD) based on meteorological conditions was proposed. The validity of the proposed method was verified based on results of a mock rainfall experiment. The treatment method of rainfall as boundary condition for predicting the moisture content in concrete was proposed using the database created from calculated results. An example of the application of the proposed method was presented using actual meteorological data. From this case study, it was concluded that the history of relative moisture content in concrete was changing according to the boundary condition, on which the influence of rainfall was large. The proposed method is a useful tool for discussing the phenomenon at the boundary between a concrete structure and the environment. For example, the flushing phenomenon of chloride ions on the surface of concrete structures due to rainfall may be simulated using the proposed method.

Acknowledgement

The authors wish to express their gratitude and sincere appreciation to our laboratory members, especially Mr. Michael W. Henry for his support to edit this document.

References

Akita, H., Fujiwara, T. and Ozaka, Y, 1990, "Water Movement within Mortar due to Drying and Wetting", Jornal of Materials, Concrete Structures and Pavements, No.420, pp.61-69 (in Japanese)

Akasaka, H. et al, 2003, "Expanded AMeDAS Weather Data", Architectural Institute of Japan

Fabien J.R. van Mook, 2002, "Driving Rrain on Building Envelopes", Technische Universiteit Eindhoven, pp.28-37

Gunn, R. and Kinzer, G. D., 1949, "The Terminal Velocity of a Fall for Water Droplets in Stagnant Air", J.Meteor, Vol.6, pp.243-248

Marshall, J. S. and Palme, W. M., 1948, "The Distribution of Raindrops with Size", J.Meteor, Vol.5, pp.165-166

UTILIZATION OF INSPECTION RESULT OF RC STRUCTURE IN THAILAND TO PLAN MAINTENANCE FOR CHLORIDE ATTACK

Pakawat SANCHAROEN [*1], Raktipong SAHAMITMONGKOL [*2],
Yoshitaka KATO [*3] and Taketo UOMOTO [*4]

ABSTRACT

Currently, the importance of maintenance work for deteriorated RC structures increases significantly. In order to ensure safety and serviceability, maintenance has to be planned in advance based on the prediction result. In this study, examples of RC structures in Thailand was inspected the actual variation of their conditions. The method to plan the maintenance work by utilizing these actual inspection results is discussed. Finally, benefit of using actual inspection results in maintenance planning over an ordinary method considering the safety factor is also discussed.

Keywords: maintenance, deterioration, corrosion, life cycle cost, non-destructive testing, inspection, probability, uncertainty

1. INTRODUCTION

Corrosion of reinforcing steel due to chloride attack is one of main mechanisms deteriorating RC structure. There are great efforts to maintain deteriorated structures to ensure their safety and serviceability. In 2002, JSCE [1] regulated the durability design to ensure the performance of structure during their service life based on the performance based design. In this specification, safety factor is considered to deal with the variation and uncertainties of actual condition from design condition. This leads to the over-design and higher cost than the actual requirement. In addition, JSCE [2] also regulates the guideline for maintenance the RC structure and have already recommended to periodically inspect the structure to ensure their safety and serviceability. Therefore, there are a lot of useful inspection results available. However, they are rarely used to planning the maintenance program in the future.

In this study, RC structures attacked by marine environment in Thailand were inspected and inspection result of the actual structures is used to plan the maintenance program based on probability theory. Finally maintenance program is decided by the lowest life cycle cost including repairing and failure cost. When maintenance planning considers the actual variation of structure properties, maintenance cost is expected to be lower than that of the method considering only general safety factor.

2. INSPECTION PROGRAMS

In order to investigate the variation of properties of actual RC structure against steel corrosion due to chloride, RC structures located close to marine environment in Thailand were inspected by both of destructive testing and non-destructive testing.

2.1 Sites of inspection

Sites of inspection are mainly road bridges located nearby Bangkok, Thailand as shown in the Fig.1. Totally 3 bridges were inspected. Age of these structures is 1 year, 5 years and 43 years at the time of inspection in November 2006. Picture of one of the structures is shown in Fig. 2. The deterioration level due to chloride attack can be classified from no damage to severely damaged. Concrete spalling can be clearly seen in one of these bridges as shown in Fig.3. Average day-time temperature during the inspection program was about 34°C without any rain. Concentration of NaCl concentration in surrounding sea water is

*1 Graduate Student, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, JCI Member
*2 Research Associate, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Dr.E., JCI Member
*3 Associate Prof., Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Dr.E., JCI Member
*4 Prof., Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Dr.E., JCI Member

about 3.0% except the site in Samutprakan province that is attacked by brackish water which concentration of NaCl is about 0.03%. Used cementitious material is not only ordinary Portland cement but some structures were used also sulfate resistant cement or coal fly ash cement as a cementitious material. In order to prevent the deterioration due to chloride, designer specified minimum covering depth, compressive strength, and unit cement content. Background information of each structure is shown in Table 1.

2.2 Parameters of inspection

Previous research [3] revealed that variable of parameters, including steel covering depth, chloride diffusion coefficient, surface chloride content, and concrete compressive strength, significantly affect the performance of RC structure against chloride attack as well the prediction result of maintenance planning. Therefore, inspection program conducted in this study was mainly focused to determine the random variable of those parameters and are explained below.

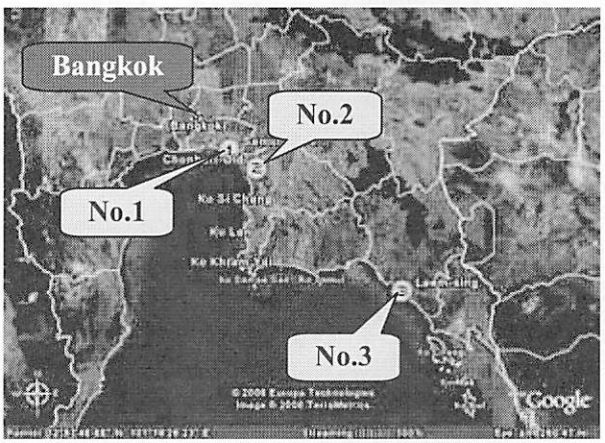


Fig.1 Area of inspection

Fig.2 Picture of actual inspected structure

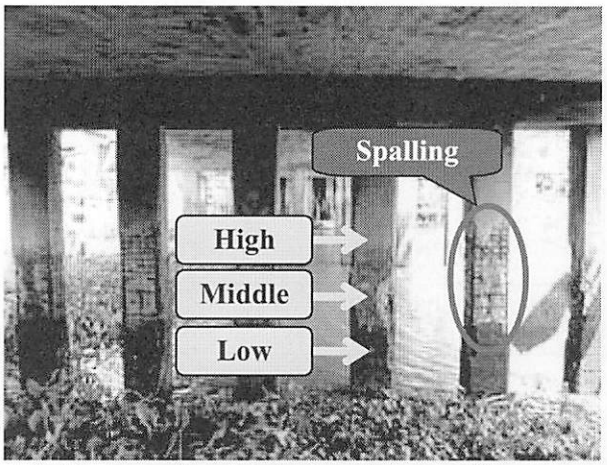


Fig.3 Example of deterioration condition and location of collecting concrete powder sample

(1) Covering depth of reinforcing steel

Covering depth of stirrup was measured by commercial rebar detector of Hilti (Ferroscan model PS200M). Its principle of detecting steel is based on techniques of electromagnetic wave. Scanning was conducted on Quickscan mode to many small sections with the length of each section around 1.5 meters. Only concrete with smooth surface was inspected. Then all of data is collected together for each structure to finalize its variations.

(2) Chloride diffusion coefficient and surface chloride content

Chloride diffusion coefficient was calculated from the profile of chloride content. Sample of concrete powder was collected on site by drilling machine with the diameter of drilling bit of 14mm based on the method of JSCE G573 [4]. Sample powder was collected from three adjacent holes with the depth of 0-2cm, 2-4cm, 4-6cm, 6-8cm, and 8-10cm from the surface to minimize the effect of aggregate size. Sample was collected not only at the same level from sea water level but also at different height in order to determine the effect of height from the sea level. Total chloride content in powder was measured based on method of JCI SC5. Then chloride diffusion coefficient and surface chloride content were calculated from the profile of chloride content.

(3) Concrete compressive strength

In order to inspect the variation of concrete quality, concrete compressive strength was measured by Schmidt hammer. Although there are other NDT methods such as air permeability test., Schmidt hammer is still one of the methods that are most convenient to be conducted. Twenty points were tested for one set of sample. Only smooth concrete surface was tested. From Eq. 1, concrete compressive strength can be calculated from rebound number JSCE [5].

Table 1 Information of inspected structures

No. Bridge	Location	Age, years	Cementitious material
1	Samutprakan Province	43	OPC cement
2	Chonburi Province	5	Sulfate resistance cement
3	Chantaburi Province	1	Coal fly ash cement

$$f_c^{'} = -18 + (1.27 \times RN) \quad (1)$$

where, $f_c^{'}$ is concrete compressive strength (MPa), and RN is rebound number.

2.3 Distribution fitting

As explained, inspections were conducted at many locations on each structure. In order to conclude the distribution of all inspected data, they are combined together for each structure as one set of data. Then distribution fitting program called Bestfit was used to select the most fitting distribution to our set of data based on chi-square goodness of fit test. Distribution type, mean value, and coefficient of variation are reported in following section.

3. INSPECTION RESULTS

In order to determine the distribution and random variable of properties of structures, inspection results were processed as explained and will be discussed. Table 2 concludes total number of samples being inspected for each inspection item and bridges.

3.1 Covering depth of reinforcing steel

Results of scanning from many small sections of structure are combined together and the distribution fitting is conducted. From the combined inspection data, the distribution fitting was conducted as explained earlier. Fig. 4 shows the example of comparison between distribution of actual inspection result and the fitting curve. The results of type of distribution, random variable are shown in Table 3 as well as the specified covering depth. Most of mean value of measured covering depth is significantly less than the required value as shown in the design drawing. Also their coefficient of variation is more than 20%. It should be noted that assigned safety factor should also be high to compensate this high variation of actual measured value. As a result, the life cycle cost of maintenance is expected to be more expensive than the actual requirement of the structure and will be discussed in the later section.

3.2 Chloride diffusion coefficient and surface chloride content

As explained, powder of concrete sample was collected and analyzed for chloride content. However, the number of samples is limited due to difficulties of sample collection. Therefore, it is difficult to reliably determine their random variable. As a result, only actual variations of the data are shown in Table 4. Very high variation is observed in both of surface chloride content and chloride diffusion coefficient. Local effects of chloride attack due to location of members, wind direction, etc., can be seen from this result. Also variation of the concrete permeation due to effects of casting and curing can be seen from the result.

Table 2 Number of sample

No.	Item	Level	No. of Sample
1	Covering depth	Middle	916
	Chloride analysis	Middle	3
	Compressive Strength	Middle	252
2	Covering depth	Middle	1252
	Chloride analysis	Low	4
		Medium	12
		High	4
	Compressive Strength	Middle	713
3	Covering depth	Middle	334
	Chloride analysis	Middle	6
	Compressive Strength	Middle	1493

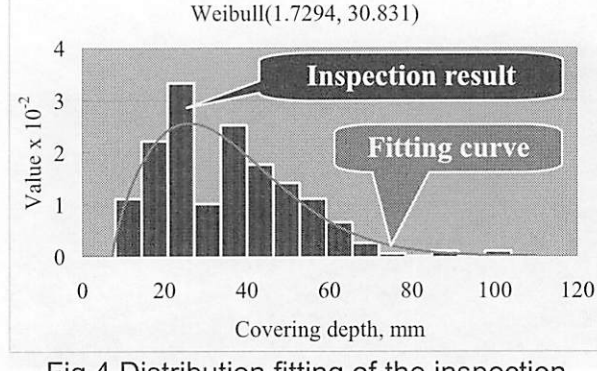


Fig.4 Distribution fitting of the inspection result

Table 3 Inspection result of covering depth

No	Required covering depth	Type of Distribution	Mean (mm)	COV
1	50mm	Gamma	24.21	0.38
2	70mm	Gamma	41.61	0.46
3	70mm	Weibull	88.34	0.22

In one of the bridges, concrete samples were collected from different height from the water level. Results of chloride analysis are shown in Fig. 5 and 6. As expected, results of samples closer to the water level show higher surface chloride content than samples from the higher position. Average surface chloride content of low, middle, and high level are 15.33, 9.40, and 3.42 kg/m^3, respectively. This shows that the effect of local variation of chloride attack can be considered in both of horizontal and vertical directions in each structure. But the effect of distance from water level cannot be clearly seen on the variation of the properties of concrete. The chloride diffusion coefficient is in the similarly wide range for all of three levels of measurements.

3.3 Concrete compressive strength

Due to handiness of Schmidt hammer, it was conducted on a large number of members to determine the variation of the concrete compressive strength used to represent the concrete quality. The results of reading rebound number as well as the calculated concrete compressive strength are shown in Table 5 together with the minimum required concrete compressive strength in design drawing. All of calculated compressive strength is higher than regulated value. This may be due to regulated value is based on compressive strength at 28days but the inspection was conducted at a minimum of 1 year after the casting. Variations of concrete quality are in the range of 10 to 20%; however, they are significantly lower than that of covering depth.

Due to difficulties of collecting the concrete powder sample for chloride analysis, the variation of concrete compressive strength is also applied as the variation of chloride diffusion coefficient.

4. MAINTENANCE PLANNING

From the obtained inspection results shown in the last section, maintenance program will be decided by using the obtained results as the actual conditions of each structure. Comparison of the maintenance life cycle cost between consideration of safety factor and actual uncertainties is given in this section. However, only inspection results of bridge No. 3 is used as an example.

Table 4 Inspection results of surface chloride content and chloride diffusion coefficient

No	Results	1	2	3	4
1	C_s (kg/m^3)	11.17	7.82	7.14	-
	D_{cl} (cm^2/year)	0.82	2.00	1.19	-
2	C_s (kg/m^3)	10.60	14.10	17.10	19.50
	D_{cl} (cm^2/year)	0.75	0.58	0.39	0.36
3	C_s (kg/m^3)	8.60	5.58	14.39	6.52
	D_{cl} (cm^2/year)	0.35	0.73	0.75	1.01
	C_s (kg/m^3)	3.95	11.13	-	-
	D_{cl} (cm^2/year)	1.32	1.38	-	-

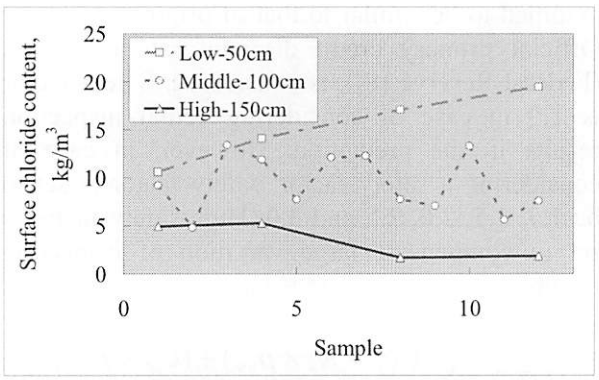


Fig.5 Effect of height from sea water level on surface chloride content

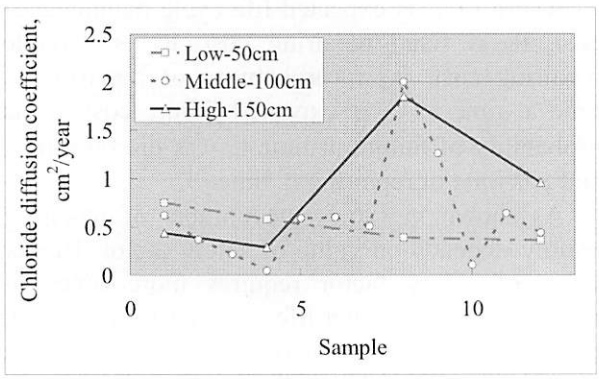


Fig.6 Effect of height from sea water level on chloride diffusion coefficient

Methods of deterioration prediction and life cycle cost calculation are reported previously by Sancharoen and Uomoto [6]. Random variables of parameters used in the prediction are concluded in Table 6. Please be noted that distribution of

surface chloride content is assumed to be uniform within the range of 3.95 to 14.39 kg/m^3. Also it is assumed that deterioration rate of the structure after being repaired is same with that of original structure.

Table 5 Inspection results of concrete compressive strength

No	Required strength	Type of Distribution	Mean (MPa)	COV
1	24MPa	Ext Value	34.47	0.17
2	30MPa	Beta General	44.66	0.16
3	30MPa	Normal	36.22	0.16

Life cycle cost analysis is one of tools that decision makers normally used to decide the best solution for their objectives. In this study, life cycle cost is calculated from undiscounted fixed repairing cost, variable repairing cost, and failure cost. They are assumed as 1000, 2000, and 5000, respectively for a service life of 100 years. The formula to calculate life cycle cost is shown in Eq. 2. Properties of structures after being repaired are assumed to be similar to that of original structure. Official primary credit discount rate of 6.25% (Federal Reserve [8]), is considered. Safety factor is 1.0 in case of considering actual inspection results in the prediction. However, in case of considering a safety factor, safety factor is set to be 1.3, 1.5, 2.0, 2.5 and 3.0. High safety factor is set to compensate large variation of inspection results.

$$LCC = \sum_{i=1}^{n} \frac{(R_f + R_v \times p_{r,i}) + (C_f \times p_{f,i})}{(1+\nu)^{t_i}} \quad (2)$$

where LCC is expected life cycle maintenance cost, R_f is fixed repairing cost, R_v is variable repairing cost, $p_{r,i}$ is probability of repairing i^{th} time at time t_i, C_f is expected failure cost, $p_{f,i}$ is probability of failure at time t_i, ν is discount rate, and t_i is time of repairing i^{th} time.

As shown in Fig.7, the number of repairing mainly depends on value of safety factor. Higher value of safety factor requires more times of repairing as well higher life cycle cost. In contrast, there are three alternative results of repairing program in case of actual variation of concrete properties is considered. As shown in Fig.8, repairing can be conducted 1 time at 77th year, 2 times at 42nd, and 80th year, or 3 times at 4th, 42nd, and 80th year. Please be noted that the cost of these schedule of repairing is optimized by considering both of number of repairing time and time of repairing. Due to effect of discount rate, the repairing conducted early shows very high life cycle cost.

Table 6 Random variables

Parameters	Mean	Coefficient of variation (Distribution Type)
x	88.34mm	0.22 (Weibull)
D_{cl}	0.92 cm^2/year	0.16 (Normal)
C_{lim}, [9]	0.05 % by mass of concrete	0.10 (Log normal)
C_s	0.35 % by mass of concrete	0.43 (Uniform)
D	1.6 cm	0.015 (Normal)
f_c'	34.3 MPa	0.16 (Normal)
i_{corr}, [7]	2 μA/cm^2	Constant
d_0, [7]	12.5 μm	Constant
α_{rust}, [7]	0.57	Constant
ρ_{rust}, [7]	3600 kg/m^3	Constant
ρ_{st}, [7]	7850 kg/m^3	Constant
f_t', [1]	$0.23 f_c'^{2/3}$	-
E_c, [1]	30.1 GPa	Constant
φ_{cr}, [1]	1.1	Constant
υ_c, [1]	0.20	Constant

The results show that life cycle cost of maintenance program of the structure predicted by considering the actual variation of the inspection results is lower than that of the prediction by considering safety factor.

Fig. 9 shows the reliability of the structure along its service life. In case of considering safety factor, reliability of structure becomes zero at year before repairing. In case of considering variation of structure properties, the actual reliability of the structure can be predicted. Reliability is maintained over 60% of the original performance.

5. CONCLUSIONS

As shown in the inspection results, there are very large uncertainties in the properties of the structures, especially the covering depth. The reason can be lack of quality control, knowledge, or mistake of construction lead to large variation of the result. However, not only the quality of construction but also environment causes uncertainties in durability of RC structure. As shown, the variation of surface chloride content

can be seen in both of horizontal direction as well vertical direction. Uncertainties are very significant in the actual condition.

Comparison of life cycle cost of repairing between predictions based on safety factor and prediction by using variation of actual inspection result. It can be concluded that method considering variation of inspection result shows lower life cycle repairing cost than that considering safety factor.

In conclusion, the benefit of the method of maintenance planning with considering the variation of structure properties based on the actual inspection result can be seen over the method of considering safety factor.

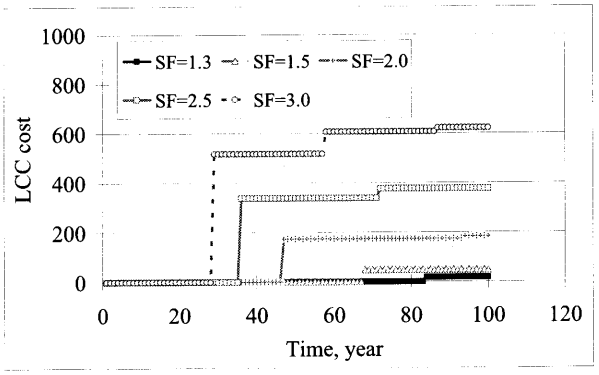


Fig.7 Life cycle cost based on using safety factor

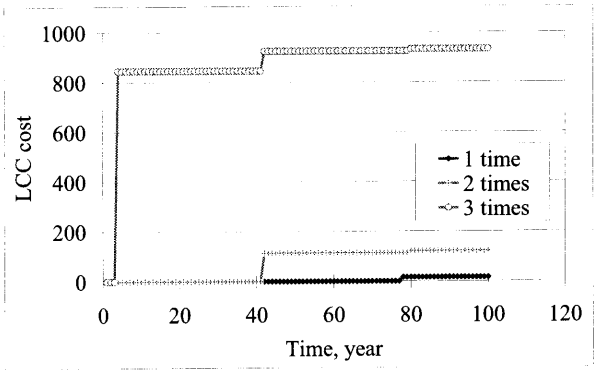


Fig.8 Life cycle cost based on using actual inspection result

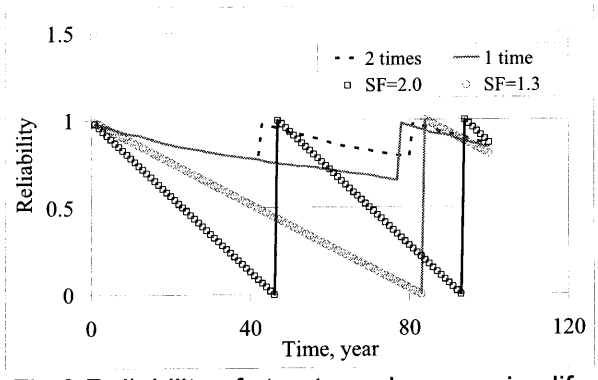


Fig.9 Reliability of structure along service life

REFERENCES

[1] JSCE, "Standard Specifications for Concrete Structures-2002 "Structural Performance verification"," JSCE, 2005

[2] JSCE, "Standard Specifications for Concrete Structures-2001 "Maintenance"," JSCE, 2005

[3] Sancharoen, P., Kato, Y., and Uomoto, T., "Effect of Variation of Parameters Used in the Deterioration Prediction Model on the R&M Plan," Proceedings of the second ACF International Conference (ACF2006), Bali, Indonesia, 2006.

[4] JSCE, "JSCE-G573: Measurement Method for Distribution of Total Chloride Ion in Concrete Structure," JSCE, 2003.

[5] JSCE, "Guideline for Experiment on Materials of Civil Works," JSCE, 2005.

[6] Sancharoen, P., and Uomoto, T., "Life Cycle Repairing Cost Considering Uncertainties of Deterioration Prediction Model," Proceedings of the Annual Convention of Japan Concrete Institute, 2006, 1639-1644

[7] Liu, Y. and Weyers, R. E., "Modeling the Time-to-Corrosion Cracking in Chloride Contaminated Reinforced Concrete Structures," ACI Materials Journal, Vol.95, No.6, Nov.-Dec., 1998, pp.675-681

[8] Federal Reserve Discount Window, "Current Discount Rate," Jan., 2006, Available online at http://www.frbdiscountwindow.org/

[9] Enright, M. P. and Frangapol, D. M., "Condition Prediction of Deteriorating Concrete Bridges Using Bayesian Updating," J. of Structural Div., ASCE, Vol.125, No.10, Oct., 1999, pp.1118-1125

ACKNOWLEDGEMENT

This study was greatly supported by Regional Network Office of Urban Safety (RNUS) - Asian Institute of Technology, International Center for Urban Safety Engineering (ICUS) - The University of Tokyo, Hilti (Thailand) Ltd., Mr.Nanayakara Ominda, and students of Rachamangala Institute of Technology. Also authors would like to be thankful to Department of Rural Roads and Department of Public Works and Town & Country Planning, Thailand for their authorizations.

日本建築学会環境系論文集　第592号，75-82，2005年6月
J. Environ. Eng., AIJ, No.592, 75-82, Jun., 2005

都市キャノピーモデルを組み込んだメソスケールモデルによる関東地方の都市気候解析

Study on urban climate analysis based on meso-scale climate model incorporated with the urban canopy model

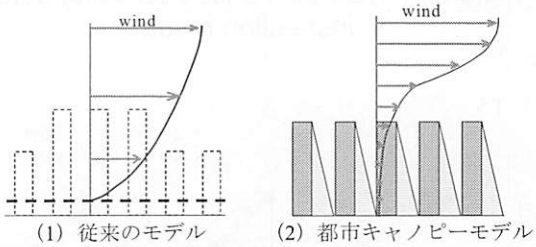
原山和也*，大岡龍三**，村上周三***，
吉田伸治****，瀬戸島政博*****，近藤裕昭******
Kazuya HARAYAMA, Ryozo OOKA, Shuzo MURAKAMI,
Shinji YOSHIDA, Masahiro SETOJIMA and Hiroaki KONDO

Three-dimensional meteorological meso-scale model is often used to solve the mechanism of urban heat island. On the meso-scale analysis, one-dimensional heat balance model is used mainly as ground boundary conditions. However it is necessary to include the effects of building canopy exactly in order to analyze thermal environment at pedestrian level in urban area. On the other hand, one-dimensional urban canopy model is also used commonly to analyze urban climate. This model can predict thermal environment at pedestrian level easily. However it is impossible to analyze three-dimensional property of climate including effects of advection and diffusion by this model due to the assumption of horizontally homogeneous flow and temperature field. In this paper, meteorological meso-scale model is incorporated with the urban canopy model as the boundary conditions. The 3D detailed digital map information is utilized for representing the building canopy model. The urban thermal environment in Tokyo metropolitan area is analyzed by means of this new method proposed here and the structure of urban heat island is clarified.

Keywords: *Urban Climate Analysis, Urban Canopy Model, Heat Island, 3D GIS, Outdoor Thermal Environment*
都市気候解析、都市キャノピーモデル、ヒートアイランド、3次元地理情報システム、屋外温熱環境

1. 序

都市の熱環境問題としてヒートアイランド現象が注目されている。これはこの現象が熱帯夜の増加、熱中症患者の増加、エネルギー消費の増大などの諸問題を生じさせている原因と考えられるからである。ヒートアイランド現象の緩和方策の検討手法のひとつに数値シミュレーション技術を用いた都市気候解析があり、筆者らはこの解析手法を用いて東京首都圏を中心としたメソスケール（数十 km から数百 km）の気候分析を行ってきた[文1),2)]。これらの解析では、境界条件として地表面熱収支モデルを用い、地表近傍の建物や樹木などの流体力学的影響を粗度長の値によってモデル化していた。この粗度長を用いたモデル化は、図1 (1) に示すように都市キャノピー高さの上層の流速プロファイルを再現するものであるため、都市キャノピー内において格子分割をすることができない。そのため、従来の解析における快適性や熱収支の評価領域は実際の人間が活動する領域に比べてかなり広範囲のものとなり、厳密な意味での都市内における居住域の温熱環境評価は不可能であった。また実際の都市は凹凸があり、それぞれの表面での熱収支が成り立っているはずであるが、現状の地表面熱収支モデルを境界条件としたモデルでは、地表面だけで都市表面を表現しており、粗度長を利用している関係上、地表面からの顕熱フラックス、潜熱フラックスは都市キャノピー上端のそれと仮定して計算している。このような条件の下で計算した地表面温度は、地表面そのものの温度なのか、都市キャノピーの平均的な温度なのか、その定義が極めて曖昧である。一方、近藤ら[文3)]や萩島ら[文4)]は高さ方向に格子分割を細かくできるモデルとして図1（2）に示すような鉛直1次元の都市キャノピーモデルを利用した研究を行っている。このモデルでは人間が活動する高さの温熱環境を評価できる反面、水平方向には無限に均等な街区が並ぶ領域を対象とした解析手法であるため、水平方向への移流や拡散の影響が考慮できない。これらの問題に対し、鳴海ら[文5)]、亀卦川ら[文6)]は3次元のメソスケール解析手法の解析結果を1次元の都市キャノピーモデルの計算条件に用いた、1方向の連成解析手法を開発して、都市気候の解析を行っている。しかし、この手法では都市キャノピーの影響がメソ気候に反映されないこと、2つのモデ



（1）従来のモデル　（2）都市キャノピーモデル
図1　モデルの違いの概念図

* 株式会社山武（当時　東京大学大学院）　博士(工学)　Yamatake Corporation, Ph.D.
** 東京大学生産技術研究所　助教授・博士(工学)　Assoc. Prof., Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Ph.D.
*** 慶應義塾大学理工学部　教授・工博　Prof., Faculty of Science and Technology, Keio University, Dr. Eng.
**** 福井大学工学部　講師・博士(工学)　Lecturer, Faculty of Engineering, University of Fukui, Ph.D.
***** 国際航業株式会社　工博　KOKUSAI KOGYO CO., LTD., Dr. Eng.
****** 産業技術総合研究所環境管理研究部門 大気環境評価研究グループ　グループ長・理博　Group Leader, Atmospheric Environment Study Group, Institute for Environmental Management Technology, A.I.S.T., Dr. Sci.

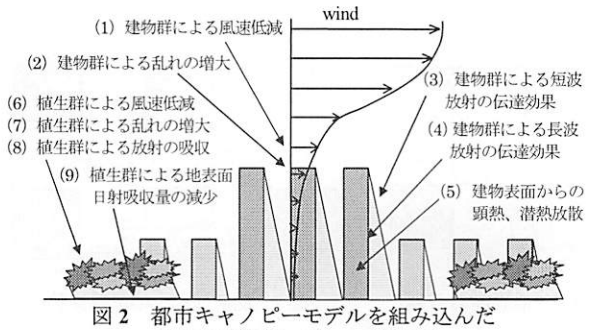


図 2　都市キャノピーモデルを組み込んだ都市気候解析モデルの概念図

ルによる計算を実行する必要があるため、両モデル間のデータの受け渡しが煩雑になることなどの問題点がある。そこで、本研究では 3 次元のメソスケール解析に都市キャノピーモデルを地上の境界条件サブモデルとして組み込む手法の開発を目的としている。類似した試みとしては、ヴタンカ、足永ら[文7),8)]も k-ε モデルに基づいた都市キャノピーモデルを 3 次元に拡張し、乱流フラックスを Mellor-Yamada モデルレベル 2.5 相当にモデル化することにより、メソスケール解析も可能な都市気候予測システム（UCSS : Urban Climate Simulation System）を開発している[注1)]。本研究では、既報[文1),2)]において十分に局地気象の再現精度を確認しているメソスケールモデルをベースに、境界サブモデルとして都市キャノピーモデルを組み込んでいる。

また、都市キャノピーモデルを組み込むためには、精緻な土地利用データと実態に即した建物形状情報を取り入れる必要がある。筆者らは従来の都市気候解析には国土地理院が作成している国土数値情報の標高データと土地利用面積データを利用して、地表面境界条件を作成してきた。そのうち土地利用面積データは国土地理院により発行されている 25,000 分の 1 の地図をデジタイザで読み込み作成したものである。しかし、これらのデータは元々の地図以上の詳細な情報は表現できないため、本解析のように精緻な都市キャノピーモデルの組み込みを行うためには、これ以上に詳細なデータを利用しなければならない。そこで本報では土地利用データに関しては東京都都市計画局の都市計画地理情報システム[文9)]を利用した。また建物形状データに関しては、航空機レーザープロファイラによる DSM（Digital Surface Model）と DEM（Digital Elevation Model）の 3 次元地理情報システムデータ[文10)]（3D GIS : 水平方向の分解能 2m）を利用して、統計的にモデル化を行った。

2.　都市キャノピーモデルの組み込み

都市キャノピーの建物群がメソスケール気候解析モデルに及ぼす効果としては次の 5 つが考えられる（図 2）。

(1) 建物群による風速低減効果
(2) 建物群による乱れの増大効果
(3) 建物群による短波放射の伝達効果
(4) 建物群による長波放射の伝達効果
(5) 建物表面からの顕熱、潜熱放散

(1) と (2) は風環境に関するもの、(3) と (4) は放射環境に関するもの、(5) は気温と湿度に関するものである。また、都市キャノピー内には街路樹、庭木など、多様な植生群も存在する。本研究ではこれら植生群の効果として次の 4 つを組み込んだ（図 2）。

(6) 植生群による風速低減効果
(7) 植生群による乱れの増大効果
(8) 植生群による放射の吸収
(9) 植生群による地表面日射吸収量の減少

以下、これらについての説明を示す。

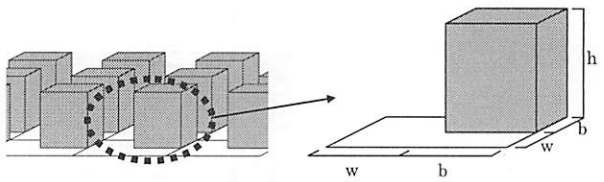


図 3　建物群のモデル化

2.1　建物群のモデル化

メソスケールの解析を行う場合に、都市の建物を 1 つ 1 つ表現することは計算格子の分解能の観点から不可能である。そのため前述の 3D GIS データを用いて街区内の建物群を統計的にモデル化した。ここでは、メソスケール解析の 1 メッシュ内に図 3 に示すような均等街区が存在すると仮定し、平均建物間隔（w）、平均建物幅（b）、平均建物高さ（h）の 3 つのパラメータで街区形状をモデル化する。これらのパラメータは 3D GIS から設定されるが、その設定方法については 3 章で詳述する。

2.2　建物群、植生群が流れ場に及ぼす影響の組み込み

2.2.1　風速低減効果の組み込み（図 2 (1)、(6)）

樹木キャノピーモデル[文11)]を参考に、(1) 式の下線部の項でモデル化される抵抗を平均流の運動方程式の右辺に付加する。

$$\frac{DU}{Dt}=f(V-V_g)-g\frac{\overline{H}-z^*}{\overline{H}}\left(1-\frac{\langle\Theta_v\rangle}{\Theta_v}\right)\frac{\partial z_g}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xx}\frac{\partial U}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_{xy}\frac{\partial U}{\partial y}\right)+\frac{\overline{H}}{H-z_g}\frac{\partial}{\partial z^*}\left(-\overline{uw}\right)\underline{-\eta C_d a U\sqrt{\left(U^2+V^2+W^2\right)}} \quad (1)$$

［U、V、W：平均風速の 3 成分［m/s］、η：建物や樹木を含むメッシュの水平面積のうち建物や樹木で覆われている水平面積の割合［-］、C_d：建物群や樹冠の抵抗係数（建物：0.1、樹木：0.2）［-］、a：建物群の面積密度[注2)] or 樹冠の葉面積密度［m^2/m^3］］

2.2.2　乱れの増大効果の組み込み（図 2 (2)、(7)）

(1) 式の運動方程式の抵抗項に対応させて、乱流エネルギー$q^2/2$と乱れ長さスケール q^2l の方程式（(2) 式、(3) 式）の下線部の項をそれぞれ付加する。

$$\frac{D}{Dt}\left(\frac{q^2}{2}\right)=\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{K_{xx}}{\sigma_q}\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{q^2}{2}\right)\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\frac{K_{yy}}{\sigma_q}\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{q^2}{2}\right)\right]+\left(\frac{\overline{H}}{H-z_g}\right)^2\frac{\partial}{\partial z^*}\left[\left(qlS_q\right)\frac{\partial}{\partial z^*}\left(\frac{q^2}{2}\right)\right]-\frac{\overline{H}}{H-z_g}\left(\overline{uw}\frac{\partial U}{\partial z^*}+\overline{vw}\frac{\partial V}{\partial z^*}\right)-\beta_T g\overline{w\theta_v}-\frac{q^3}{B_1 l}\underline{+\eta C_d a\left(U^2+V^2+W^2\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (2)$$

［$q^2/2$：乱流エネルギー（$q^2=\overline{u'^2}+\overline{v'^2}+\overline{w'^2}$）［$m^2/s^2$］］

$$\frac{D\left(q^2l\right)}{Dt}=\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{K_{xx}}{\sigma_t}\frac{\partial\left(q^2l\right)}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\frac{K_{yy}}{\sigma_t}\frac{\partial\left(q^2l\right)}{\partial y}\right]+\left(\frac{\overline{H}}{H-z_g}\right)^2\frac{\partial}{\partial z^*}\left[\left(qlS_l\right)\frac{\partial\left(q^2l\right)}{\partial z^*}\right]-lF_1\left[\frac{\overline{H}}{H-z_g}\left(\overline{uw}\frac{\partial U}{\partial z^*}+\overline{vw}\frac{\partial V}{\partial z^*}\right)+\beta_T g\overline{w\theta_v}\right]-\frac{q^3}{B_1}\left[1+F_2\left(\frac{l}{kz}\right)^2\right]\underline{+2\eta C_d al\left(U^2+V^2+W^2\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (3)$$

［l：乱れ長さスケール［m］］

2.3　建物群、植生群が放射場に及ぼす影響の組み込み

2.1 節で述べたように、本解析では街区の幾何形状をモデル化する。そのため、従来は定義が曖昧であった表面温度についても、地表面、建物屋上面、建物側壁面の各々について熱収支式を解くことにより、各表面温度を再現可能とする。この場合、各面における熱収支式の各項のうち、それぞれの面に入反射する放射量については地表面、屋上面、側壁

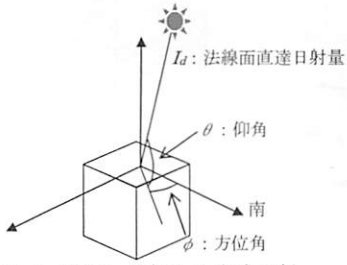


図 4　建物へ入射する直達日射

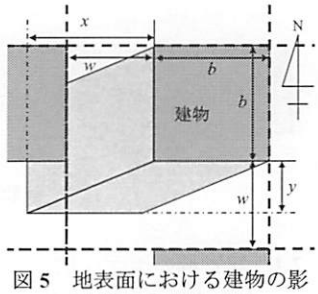


図 5　地表面における建物の影
（斜線部が建物の影）

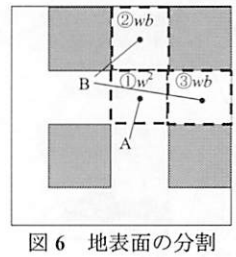


図 6　地表面の分割

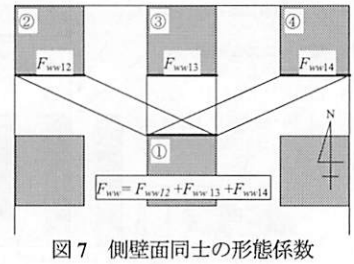


図 7　側壁面同士の形態係数

面、天空面間の複雑な熱交換を考慮する必要がある。筆者らは複雑市街地における放射熱移動解析に対してモンテカルロ法に基づく予測手法を開発している[文12)]。この手法は高い予測精度が期待できる一方、計算負荷が増大するのでサブモデルとしての利用には向いていない。そこで、本解析では比較的簡易な市街地の放射熱伝達モデルとして近藤らのモデル[文3)、13)]をベースに改良並びに簡易化を加えたものを採用する[注3)]。以下にその概要について説明する。

2.3.1　地表面や建物表面における短波放射の吸収量（図 2（3））

（1）建物屋上面

均等街区を想定しているため、屋上面における短波放射の入射は直達日射、天空日射の 2 種類のみが入射するので、各々の建物屋上面における吸収量は以下の式より求めることができる。

$$I_{dra} = (1\text{-}r_r)\, I_d \sin\theta \tag{4}$$

$$I_{sra} = (1\text{-}r_r)\, I_{sr} \tag{5}$$

I_{dra}：直達日射の吸収量［W/m²］、r_r：屋上面のアルベド［-］、I_d：法線面直達日射量[注4)]［W/m²］、θ：太陽の仰角［rad］、I_{sra}：建物屋上面における天空日射吸収量［W/m²］、I_{sr}：水平面天空日射量[注5)]［W/m²］

（2）建物側壁面及び地表面

建物側壁面や地表面に入射した日射の一部は反射し、他の側壁面、地表面へ相互反射する。本解析で用いた放射伝達モデルでは 1 回目の反射だけを考慮し、2 回目以降は考えないものとする。

a）直達日射

直接入射する成分と他の面で反射したのちに入射する成分を計算する。初めに、地表面へ直接入射する日射量については、建物によってできる地表面への影が地表面全体の面積に占める割合を計算し、影がない場合の直達日射量からこの割合を差し引くことにより求める。図 5 に示すように、水平面上での東西方向の影の長さを x、南北方向の影の長さを y とすると、周りに障害物がなければ影の大きさは $(x+y)b$ である。$x>w$ あるいは $y>w$ のとき、影は隣のブロックに侵入することになるが、このときの侵入する影の面積は次式で表せるものと仮定する。

$$A_{gs}{}' = \{\max(x-w,0)+\max(y-w,0)\}b \tag{6}$$

この影は、建物自身や既にある建物の影と重なる可能性がある。建物のブロックに侵入する影がそこのブロックの建物や既にある影と重ならない割合を $\{w^2/(w+b)^2\}$ と仮定すると、結局隣のブロックに侵入してできる実質的な面積は以下で表すことができる。

$$A_{gs}{}'' = \{\max(x-w,0)+\max(y-w,0)\}b\left(\frac{w^2}{(w+b)^2}\right) \tag{7}$$

従って影の総面積 A_{gs} は次式で示される。

$$A_{gs} = (x+y)b - A_{gs}{}' + A_{gs}{}'' \tag{8}$$

これが地表の面積 w^2+2wb を上回る場合は影の面積は w^2+2wb に等しいとする。つまり、直達日射の直接入射する成分により地表面が吸収する量 I_{dga} は以下となる。

$$I_{dga} = (1-r_g)\left(1-\frac{A_{gs}}{w^2+2wb}\right) I_d \sin\theta \tag{9}$$

次に、建物側壁面に直接入射する成分については、本来建物がなければ地表面に到達する量が建物によって遮られ影となる。すなわち、地表面の影の面積に到達する直達日射量が側壁面に直接入射する量となる[注6)]。従って、直達日射の直接入射する成分により建物側壁面が吸収する量 I_{dwa} は次式になる。

$$I_{dwa} = (1-r_w) I_d \sin\theta \frac{A_{gs}}{4bh} \tag{10}$$

［r_w は側壁面のアルベド［-］］

次に、反射成分については、まず地表面の sky view factor を計算する。図 6 に示す交差点中心 A 点での sky view factor と建物に挟まれた地表面中央 B 点の sky view factor を求め、地表面全体の平均 sky view factor を面積加重で算出する。1 メッシュ内では建物は同じ高さ、同じ間隔であるので、文献 13 に従えば、A 点における sky view factor を F_{asky}、B 点における sky view factor を F_{bsky} とすると、解析的に次式で示すことができる。

$$F_{asky} = \frac{4w}{\pi\sqrt{4h^2+w^2}}\left\{\frac{\pi}{2}-\tan^{-1}\left(\frac{w}{\sqrt{4h^2+w^2}}\right)\right\} \tag{11}$$

$$F_{bsky} = \frac{w}{\sqrt{4h^2+w^2}} \tag{12}$$

そして、それぞれの道路の面積の加重平均で得られた値、すなわち

$$F_{gsky} = (w^2F_{asky}+2wbF_{bsky})/(w^2+2wb) \tag{13}$$

が求める道路面の平均 sky view factor であると仮定する。

次に、各側壁面および地表面の形態係数を求める。例えば、図 7 のような建物配置の場合、建物①の北面は建物②③④の南面からと道路面からの反射日射の影響のみを受け、他の側壁面からの影響は考慮しないものと仮定する。建物①の北面の建物②の南面に対する面平均形態係数 F_{ww12}、建物①の北面の建物③の南面に対する面平均形態係数 F_{ww13}、建物①の北面の建物④の南面に対する面平均形態係数 F_{ww14} はそれぞれ相対する直行 2 面間の形態係数の解析解[文14)]を利用して推定できる。これら 3 つの形態係数を用いて、側壁面の他の側壁面に対する面平均形態係数 F_{ww} を次式で表すこととする。

$$F_{ww} = F_{ww12}+F_{ww13}+F_{ww14} \tag{14}$$

また、建物側壁面の地表面に対する面平均形態係数 F_{wg} を建物壁面から見た地表面と天空面の対称性より以下のように推定する。

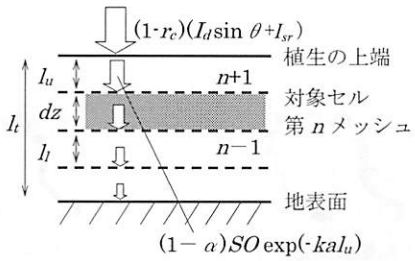


図 8　植生による放射の吸収

$$F_{wg}=(1-F_{ww})/2 \tag{15}$$

これらの形態係数を用いると、直達日射が建物側壁や地表面で 1 回反射して、別の側壁面や地表面に吸収される量はそれぞれ (16) 式、(17) 式となる。

$$I_{drwa}=(1-r_w)(F_{ww}r_wI_{dww}+F_{wg}r_gI_{dgw}) \tag{16}$$

$$I_{drga}=(1-r_g)F_{gw}r_wI_{dww} \tag{17}$$

b) 天空日射

直接入射する成分について、屋上面と同様、天空日射に方位依存性がないと仮定して、側壁面の sky view factor を F_{wsky} とすると、同一計算メッシュ内では街区モデルが高さ一定の均等街区を仮定しているので、

$$F_{wsky}=F_{wg} \tag{18}$$

となる。よって、天空入射の直接入射する成分のうち実際に側壁面に吸収される量 I_{swa} は、以下のように表される。

$$I_{swa}=(1-r_w)F_{wsky}I_{sr} \tag{19}$$

次に、道路面を考えると、(13) 式より道路面の sky view factor (F_{gsky}) は求められているので、それを用いて次式を得る。

$$I_{sga}=(1-r_g)\,F_{gsky}\,I_{sr} \tag{20}$$

天空日射の反射成分については直達日射の反射成分の算出法と同様にして、側壁面では (21) 式、地表面では (22) 式になる。

$$I_{srwa}=(1-r_w)(F_{ww}r_wI_{sww}+F_{wg}r_gI_{sgw}) \tag{21}$$

$$I_{srga}=(1-r_g)F_{wg}r_wI_{sww} \tag{22}$$

2.3.2　植生による放射の吸収 (図 2 (8)、(9))

本研究では、都市キャノピー内に存在する植生による、短波放射の吸収と、それに伴う地表面温度の低下を考慮した。本来、植生が吸収した短波放射量は植生の葉表面の温度を上昇させ、周辺の気温や湿度の上昇に寄与する。温度場と湿度場への影響は 2.6 節に示す。ここでは植生の熱容量を 0 と仮定し、植生が吸収した短波放射量によってそれが存在するメッシュの気温や湿度が上昇することとした。図 8 に示すように、植生の上端において、吸収する短波放射量は次式となる。

$$(1-r_c)\,(I_d\sin\theta+I_{sr}) \tag{23}$$

〔r_c：植生のアルベド〕

図 8 における第 n メッシュ上端に入射する短波放射量は植生内での放射吸収による減少分を考慮して、以下で表されるものとモデル化する[文 11)]。

$$(1-r_c)\,(I_d\sin\theta+I_{sr})\exp(-k'al_u) \tag{24}$$

〔k'：消散係数 [-]、a：葉面積密度 [m^2/m^3]、l_u：植生の上端から第 n メッシュの上端までの距離 [m]〕

従って、第 n メッシュが吸収する短波放射量は以下となる。

$$(1-r_c)\,(I_d\sin\theta+I_{sr})\exp(-k'al_u)\{1-\exp(-k'adz)\} \tag{25}$$

〔dz：第 n メッシュのメッシュ幅 [m]〕

(25) 式で示した量だけ植生の各メッシュでは短波放射を吸収し、地表面に到達する短波放射量は植生がなかった場合の短波放射量から植生により吸収された分を差し引く。その結果、植生を通過して地表面に到達する短波放射量は次式で表すことができる。

$$(1-r_c)\,(I_d\sin\theta+I_{sr})\exp(-k'al_t) \tag{26}$$

〔l_t：植生の高さ [m]〕

2.3.3　長波放射量の収支 (図 2 (4))

a) 射出分

建物屋上面、建物側壁面、地表面から射出される長波放射は、それぞれの面における熱収支を計算した結果求まる各面の表面温度に依存した赤外線が放射されるものとする。なお、負の符号は表面への吸収を正としているために付加したものである。

$$R_{r\uparrow}=-\varepsilon_r\sigma T_r^4 \tag{27}$$

$$R_{w\uparrow}=-\varepsilon_w\sigma T_w^4 \tag{28}$$

$$R_{g\uparrow}=-\varepsilon_g\sigma T_g^4 \tag{29}$$

〔$R_\uparrow$：絶対値が各表面から射出する長波放射量 [W/m^2]、ε：各面の長波放射率 [-]、σ：ステファンボルツマン定数 ($=5.67\times10^{-8}$ [$W/m^2/K^4$])、T：表面温度 [K]、添字 r：屋上面、添字 w：側壁面、添字 g：地表面〕

天空面については、近藤の実験式[文 15)] を用いた。

$$R_{sky\downarrow}=\sigma T_m^4(0.74+0.19x+0.07x^2) \tag{30}$$

$$x=\log_{10}w_\infty \tag{31}$$

〔T_m：地表面付近の大気の温度 [K]、w_∞：可降水量 [cm]〕

放射量が決まった後の幾何学的な取り扱いは建物側壁面や地表面における短波長の拡散日射や反射日射の取り扱いに準ずる。

b) 入射分

建物屋上面では、sky view factor が 1 であるので以下より求まる。

$$R_{r\downarrow}=\varepsilon_rR_{sky\downarrow} \tag{32}$$

また、建物側壁面や地表面が受ける長波放射量も天空からの長波放射量および建物側壁面ならびに地表面からの長波放射量の和になる。これらの取り扱いも、短波放射の拡散日射、反射日射の取り扱いに準じ、側壁面は (33) 式、地表面は (34) 式となる。

$$R_{w\downarrow}=\varepsilon_w(F_{wsky}R_{sky\downarrow}+F_{ww}R_{w\uparrow}+F_{wg}R_{g\uparrow}) \tag{33}$$

$$R_{g\downarrow}=\varepsilon_g(F_{gsky}R_{sky\downarrow}+F_{gw}R_{w\uparrow}) \tag{34}$$

2.4　熱収支式を用いた建物表面、地表面温度の算出

建物外表面や地表面の各微少面要素における熱収支を計算し、熱伝導量を算出する。ここで、地表面を例に挙げて各成分の式を示す[注 7)]。

$$S_g+R_{g\downarrow}+R_{g\uparrow}+H_g+L\cdot E_g+G_g=0 \tag{35}$$

$$S_g=I_{dga}+I_{drga}+I_{sga}+I_{srga} \tag{36}$$

$$R_{g\downarrow}=\varepsilon_g(F_{gsky}R_{sky\downarrow}+F_{gw}R_{w\uparrow}) \tag{37}$$

$$R_{g\uparrow}=-\varepsilon_g\sigma T_g^4 \tag{38}$$

$$H_g=\rho_aC_pu^*T^* \tag{39}$$

$$L\cdot E_g=\rho_aLu^*Q^* \tag{40}$$

(35) 式より求めた伝導熱量 G_g と (41) 式を用いて、地中内温度および地表面温度を求める。

$$\frac{\partial T_g}{\partial t}=\kappa\frac{\partial^2T_g}{\partial x_g^{\,2}} \tag{41}$$

2.5 人工排熱・空調排熱の取り扱い

既報[文16]では、東京23区に関しては、人工排熱データを東京都のエネルギー消費関連資料[文17]を参考として、民生、産業、交通の3要素に分類し、それぞれ地表面熱収支式へ組み込む割合と大気中の流体セルに放出する割合を考慮して取り扱っている[注8]。建物内の内部発熱量の把握ができていないために空調負荷の算出は行わず、既報[文16]に基づき、人工排熱のうち空調用エネルギー消費量に想定したシステムCOP（=3.0）を乗じたものを空調排熱として、全て顕熱で屋上から排出している。

2.6 温度場と湿度場への影響

建物屋上面や側壁面が熱せられて、それぞれの高さにおいて顕熱フラックスや潜熱フラックスが発生する。また、人工排熱や空調排熱の排出位置と排熱量と排出形態に従って、気温上昇や湿度上昇が生じる。更に、樹木の樹冠高さにおいては（25）式に従って樹冠が日射を吸収すると仮定しているので、その吸収熱は植生の蒸散過程によって当該メッシュの気温や湿度が上昇することになる[注9]。以下に、人工排熱、空調排熱、建物表面からの顕熱、潜熱フラックスを組み込んだ場合の温位変動量（気温）と水蒸気混合比（湿度）の輸送方程式をそれぞれ示す。

$$\frac{D\Delta\Theta_v}{Dt}=\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{K_{xx}}{\sigma_{\Theta v}}\frac{\partial\Delta\Theta_v}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\frac{K_{yy}}{\sigma_{\Theta v}}\frac{\partial\Delta\Theta_v}{\partial y}\right]$$
$$+\frac{\overline{H}}{H-z_g}\left[\frac{\partial}{\partial z^*}\left(-\overline{w\theta_v}\right)+\underline{\frac{1}{\rho C_p}\frac{B}{1+B}\frac{\partial R_N}{\partial z^*}}-W^*\frac{\partial\langle\Theta_v\rangle}{\partial z^*}\right]+\underline{\frac{1}{\rho C_p}\left(A_{DH}+HV_c+A_iH_i\right)} \quad (42)$$

$$\frac{DQ_w}{Dt}=\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{K_{xx}}{\sigma_{Qw}}\frac{\partial Q_w}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\frac{K_{yy}}{\sigma_{Qw}}\frac{\partial Q_w}{\partial y}\right]$$
$$+\frac{\overline{H}}{H-z_g}\left[\frac{\partial}{\partial z^*}\left(-\overline{wq_w}\right)+\underline{\frac{1}{\rho C_p}\frac{1}{1+B}\frac{\partial R_N}{\partial z^*}}\right]+\underline{\frac{1}{\rho L}\left(A_{DL}+HV_a+A_iLE_i\right)} \quad (43)$$

$B=BR_v/BR_w$：ボーエン比（=0.2）、R_N：樹冠が吸収した短波放射量、A_{DH}：人工排熱のうち顕熱放散量、HV_c：空調排熱の顕熱放散量、A_i：建物外表面面積、H_i：建物外表面からの顕熱放散量、A_{DL}：人工排熱のうち潜熱放散量、HV_a：空調排熱のうち潜熱放散量、LE_i：建物外表面からの潜熱放散量

3. 3D GISを用いた地表境界条件に関する街区パラメータの算定

従来、地表境界条件の作成には国土地理院が発行している国土数値情報を用いていたが、それは25,000分の1の地図を0.4mmピッチでデジタイプしているため、幅員10m以下の道路や内水地が正しく再現されていない可能性がある。従って、今回土地利用分類に関しては東京都の都市計画地理情報システムを利用した。国土数値情報と東京都都市計画地理情報システムの土地利用データの精度の差は文献18を参照されたい。また都市キャノピーモデルの導入に伴い、新たに建物高さデータ等の街区パラメータが必要になる。それについて以下のように対応した。解析領域の中心である東京23区に関して、航空機レーザープロファイラで取得した約2m間隔の計測データをフィルタリング処理したDSM（数値表層モデル：Digital Surface Model）とDEM（数値標高モデル：Digital Elevation Model）の2データ[文10]を用い、メッシュ毎の平均建物高さを算出した。図9にDSMとDEMの差より求めた東京を中心とする2kmメッシュにおける平均建物高さhの分布を示す。なお、23区以外の領域は全てのメッシュで6mとした。大手町や新宿を中心として高層街区が再現されていることがわかる。また

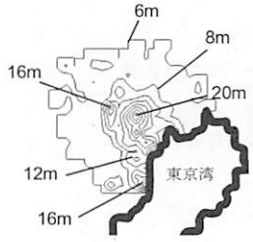


図9 平均建物高さ（=DSM−DEM）（2kmメッシュ）

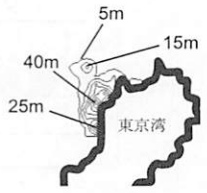


図10 平均建物幅（2kmメッシュ）

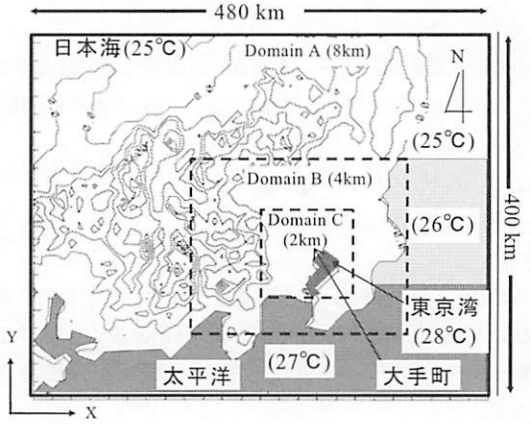


図11 解析領域

表1 計算領域、メッシュ分割数、メッシュ幅

	計算領域 (x[km]×y[km]×z[km])	メッシュ分割数	水平方向メッシュ幅[km]
Domain A	480×400×9.6	60×50×49	8
Domain B	232×200×9.6	58×50×49	4
Domain C	96×96×9.6	48×48×49	2

表2 土地利用ごとの地表面パラメータ

	アルベド [-]	蒸発効率 [-]
田	0.20	0.5
畑	0.10	0.3
果樹園	0.20	0.3
森林	0.15	0.3
荒れ地	0.20	0.3
建物用地	0.10	0.0
幹線交通用地	0.10	0.0
その他の用地	0.10	0.0
内水地	0.03	1.0

東京都の都市計画地理情報システム[文9]から、計算対象メッシュにおける建物棟数並びに建物面積より、そのメッシュ内の平均建物幅並びに平均建物間隔を設定した。図10に平均建物幅の分布を示す。なお、23区以外は平均建物幅bを7mと仮定し、平均建物間隔は平均建物幅と国土数値情報を利用して推定した。

4. 解析概要

太平洋高気圧が張り出した典型的な夏季の気候であった1995年7月24日の24時間を評価対象日とした。計算は7月23日午前6時からスタートした。海抜0m付近の気温と地中温度の初期値は共に25.6℃である。また上空風は南風2.0m/sとしている。解析には、3段階のネスティング手法を用いた。図11に解析対象領域、表1にメッシュ分割、表2に土地利用ごとの地表面パラメータを示す。メッシュ分割は水平方向には等間隔、鉛直方向には不等間隔なメッシュ分割（地上第1メッシュ幅は4m）として、実際に人間が活動する領域の熱環境を評価できるようにした。また都市キャノピーモデルにおける

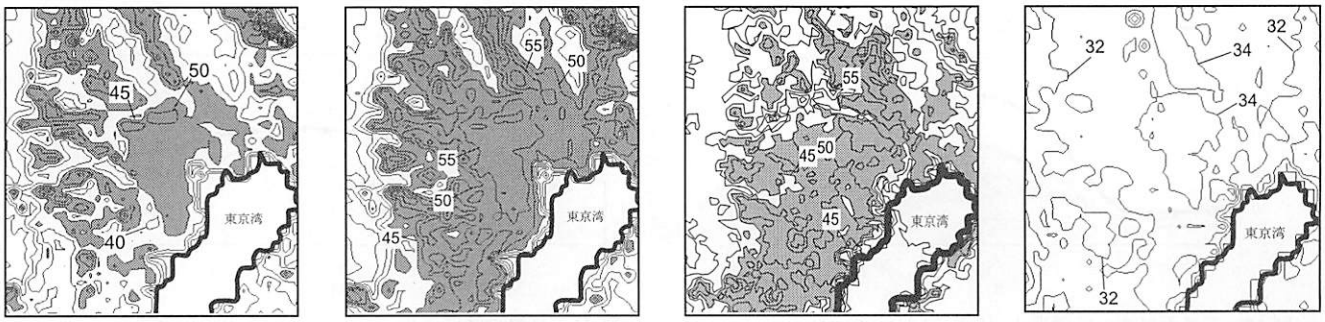


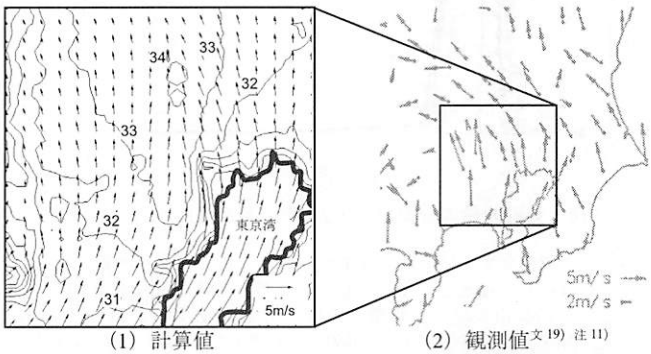
図 12　地表面温度分布［℃］
（7 月 24 日 13:00）
（灰色部は 45℃以上の領域）

（1）本モデルを用いた計算値
（5℃間隔等温線）

（2）観測値[文 17)]
（5℃間隔等温線）

（3）従来のモデルを用いた計算値
（2℃間隔等温線）

図 13　表面温度分布［℃］（7 月 24 日 13:00）（灰色部は 45℃以上の領域）



（1）計算値
（気温：地上 2m、風速：地上 88m）

（2）観測値[文 19)] [注 11)]
（風速：地上 100m に補正）

図 14　気温と風速ベクトル分布［℃］
（7 月 24 日 13:00）

建物は解析領域内すべてにわたり 26℃で空調されている事務所ビルが建っていると想定し、壁体の構成は、空気調和衛生工学会中規模事務所ビルに準じ、屋外側からコンクリート（150mm）、スチレン発泡板（25mm）、石膏板（9mm）、岩綿吸音板（12mm）であり、建物天井の構成は屋外側からモルタル（20mm）、コンクリート（150mm）、グラスウール成形板（18mm）、石膏板（10mm）としている。なお、建物表面のアルベドは 0.2、長波放射率は 0.9 とした。植生キャノピーの葉面積密度は $1.0m^2/m^3$ としている。他の初期条件、境界条件は文献 1、2 参照。また人工排熱・空調排熱条件は第 2.5 節参照。

5. 解析結果

1）地表面温度分布（図 12）

図 12 に 7 月 24 日 13 時の地表面温度分布を示す。また、図 13（2）に人工衛星から見た地表面温度分布を示す[注 10) 文 17)]。地表面温度分布は観測値に比べて全体的に 5℃程度低温になった。これは図 13（2）が上空から見た建物屋上などを含めた表面温度観測結果であるのに対し、図 12 が実際の地表面温度を示しており、地表面では建物や樹木による影が存在するためと考えられる。

2）表面温度分布（図 13）

上記の理由から、人工衛星や航空機からの熱画像と対応を可能とするため、建物屋上面などを含めた表面温度の解析結果を図 13（1）に示す。屋根温度、植生部上端の気温、並びに地表面温度をそれぞれメッシュ毎の面積比で重みづけたものである。また図 13（3）に従来の地表面熱収支モデルを用いた場合の地表面温度を示す。従来の方式では、比較的高温となる都心部でも 34℃程度であり、図 13（2）の観測値に比べて非常に低い値を示す。これは、従来のモデルは表面温度を求める場合の熱収支が地表面であるかキャノピー高さであるか曖昧であったため、算出された温度が実際の表面温度に対応していなかったことが原因と考えられる。都市キャノピーモデルを組み込んだ今回の計算では、都心では 55℃以上の高温域が出現し、観測値に近い結果となった。

3）気温と風速ベクトル分布（図 14）

図 14（1）に 7 月 24 日 13 時における地上 2m の気温と地上 88m（地上 100m に一番近いメッシュの中央高さ）の風速ベクトルの水平分布の計算値、図 14（2）に 1985 年夏季の AMeDAS の平均値[文 19)] を示す。沿岸の強風や内陸の弱風がよく再現されている。また、東京湾と相模湾からの南風が東京 23 区北部でぶつかり、その周辺で気温が高くなっている。

4）建物屋上面、建物側壁面、地表面温度の時間変化（図 15）

図 15 に大手町に相当するメッシュ（図 11 参照）の建物屋上面、建物側壁面、地表面温度の時間変化を示す。屋上面は日中でも影ができないため、午前中に急速に表面温度が上昇し、12 時頃には最高の 60℃程度になる。側壁表面温度は東西南北 4 面の平均値のため日中緩やかに上昇するが、蓄熱効果により夕方まで高温を保っている。地表面は建物の影の影響で日中 45℃程度までしか上昇しない一方、夜間には放射冷却で 25℃程度まで低下する。

5）気温の時間変化（図 16）

図 16 に図 15 と同じメッシュにおける気温の時間変化について計算結果と観測値として AMeDAS のデータ[文 20)] を示す。計算結果は観測値と比べて日較差が小さく最高気温や最低気温となる時間が遅くなっている。また、気温の時間変化が図 15 に示す建物側壁面温度の時間変化に追随した傾向になっている。この理由は都市キャノピー内の気温に建物の持つ熱容量などの影響が顕著に表れたことが一つの原因であると考えられる。これは建物壁面の対流熱伝達率や天空率の算定誤差のために、その顕熱フラックスが過大評価されたことが原因の一つと考えられる。このため、都市キャノピーを表す各種パラメータの見直しを行いたい。

6）風速の鉛直分布（図 17）

図 17 に図 15 と同じメッシュにおける 3 時間毎の風速の鉛直分布を示す。このメッシュは平均建物高さが 17.0m であるため、それより下部では 0.5～2.0m/s 程度の弱風となり、キャニオン空間内の風速プロファイルが再現できている。

7）気温の鉛直分布（図 18）

図 18 に図 15 と同じメッシュにおける 3 時間毎の気温の鉛直分布を示す。屋上面の高さに相当する地上 17.0m において、日中は屋

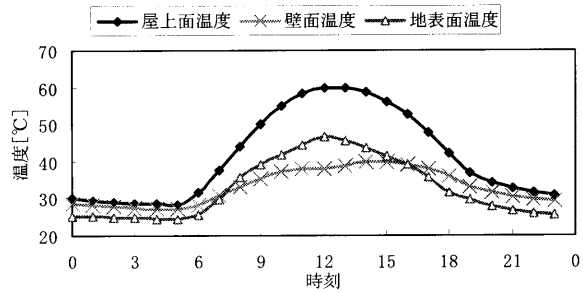


図 15　各表面温度の時間変化（7 月 24 日、大手町）［℃］

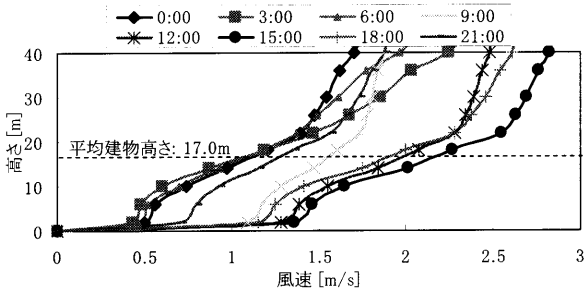


図 17　スカラー風速の鉛直分布（7 月 24 日、大手町）［m/s］

上面や側壁面からの顕熱放散によりキャニオン空間より上空に比べて気温が若干高温となっている。これは従来のモデルでは表現できなかったものである。

6. まとめ

(1) 既存のメソスケール解析手法の地表付近の境界条件に都市キャノピーモデルを組み込み、建物や樹木の取り扱いを粗度長から変更した。

(2) 都市キャノピーモデルにおける街区パラメータを同定するため、東京 23 区において 3D GIS データを利用した。

(3) 東京を中心とした都市の熱環境解析を行い、従来の解析結果では表現できなかった都市の表面温度を算出し、観測値とよく対応していることを示した。

(4) メソスケール解析手法を用いてキャニオン空間内の風速鉛直プロファイルや気温の鉛直プロファイルを再現した。

(5) 今後、今回導入した都市キャノピーモデルの放射熱伝達モデルの精度検証、建物側壁面での対流熱伝達率や植生におけるボーエン比などの各種パラメータの同定を行い、本モデルの予測精度を向上させると共に、人工排熱や空調排熱の精緻な取り扱いを行い、都市活動がヒートアイランドや都市温熱環境に及ぼす影響について検討していく予定である。

注 1) 文献 21～23 などでは、簡単な大気境界層を対象に各気候モデルの予測精度の比較が行なわれている。乱れ長さスケール l は本報で示した Mellor-Yamada モデル level2.5 のような輸送方程式を解く場合と代数式で与える場合がある。l の輸送方程式に関しては、代数式を利用する場合に比べて、その値を過大評価する等の問題が指摘されている。しかし、今回は 3 次元の都市気候の解析を行っているため、移流拡散の影響を考えて、l を決定するにあたり l の輸送方程式を利用した。

注 2) 植生キャノピーモデルにおいて葉面積密度に相当する建物群の面積密度 a は $\frac{4b}{(b+w)^2}$ [m²/m³]とする。これは、1 区画の面積が$(b+w)^2$ [m²]、建物 1 辺の長さが b [m] より、この領域内にある全建物の周長は $4b$ [m] となる。従って、建物群の面積密度は $\frac{4bh}{(b+w)^2 h}$ [m²/m³]、つまり $\frac{4b}{(b+w)^2}$ [m²/m³]（[1/m]）となる。

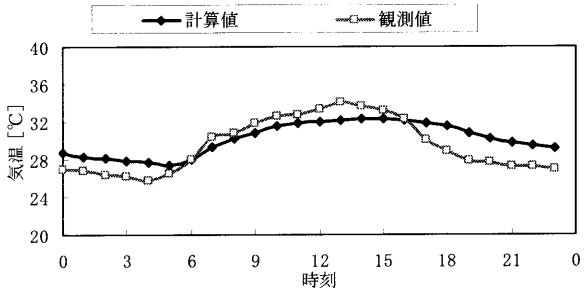


図 16　気温の時間変化（7 月 24 日、大手町）［℃］

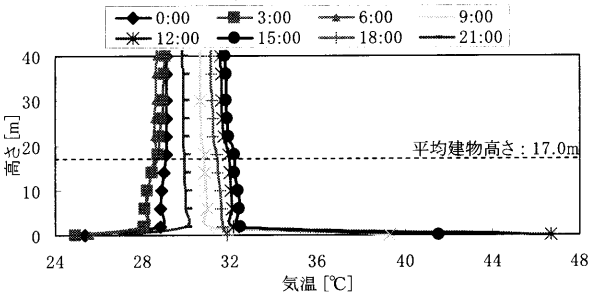


図 18　気温の鉛直分布（7 月 24 日、大手町）［℃］

注 3) ここで紹介する放射熱伝達モデルにおける日影面積の算定などは必ずしも解析的には正しくない。しかしながら文献 3 や文献 13 においてある程度の都市の屋外温熱環境の再現精度が確認されているため採用した。今後、都市キャノピーの放射熱伝達モデルの精度向上のため、より一層の検討を行う予定である。

注 4) 法線面直達日射量 I_d はブーガの式より算出する。

$$I_d = I_0 P^{\frac{1}{\sin\theta}} \tag{44}$$

ただし、I_0：太陽定数（=1353[W/m²]）、P：大気透過率［-］

注 5) 水平面天空日射量 I_{sr} はベルラーゲの式より算出する。

$$I_{sr} = \frac{1}{2} I_0 \sin\theta \frac{1 - P^{\frac{1}{\sin\theta}}}{1 - 1.4 \ln P} \tag{45}$$

注 6) 屋上面に直接入射する直達日射も影の要因となるが、それに相当する直達日射量は、建物面積として地表面日射量の計算から差し引いて考えているので、ここでは考慮する必要がない。

注 7) H_G、LE_G は、モニン・オブコフの相似則に基づき、u^*、T^*、Q^*を用いて以下のように与えられる。

$$u^* = V_s(z)\,\kappa\,[\ln\{(z+z_0)/z_0\} - \Psi_m]^{-1} \tag{46}$$

$$T^* = (\Theta(z_1) - \Theta_G)(Pr_t/\kappa)^{-1}[\ln\{(z_1+z_{0t})/z_{0t}\} - \Psi_h]^{-1} \tag{47}$$

$$Q^* = \beta(Q(z_1) - Q_{sat})(S_{ct}/\kappa)^{-1}[\ln\{(z_1+z_{0v})/z_{0v}\} - \Psi(\zeta_2)]^{-1} \tag{48}$$

Q^*は β 法によって与えられ、蒸発効率 β が大きいほど、地表面からの水蒸気発生量が増加する。ただし、建物側壁面の顕熱フラックス H_w については対流熱伝達率（α_c=11.6［W/m²K］）、潜熱フラックス $L{\cdot}E_w$ については湿気伝達率（$\alpha_w=7.0\times10^{-6}\,\alpha_c$［kg/m²skPa］）を用いて計算した。

注 8) 民生からの排熱の構成としては、①冷暖房機器の稼働、②給湯機器の利用、③厨房からの放熱、④その他の内部発熱が考えられる。このうち、①は各建物の冷房機器の COP（ここでは 3.0 と仮定）に対応する建物空調負荷分と機器発熱量を大気への放熱量とした。②、③に関しては、その半分が大気中に放出され、半分が下水として地中に潜り込むと考えた。④の内部発熱は全て一度建物躯体に吸収されるものと考え、地表面熱収支式に加える。ただし①で与えた発熱のうち建物空調負荷分は、一度建物に流入した外部からの熱が再び大気へ汲み出されるもので、正確には人工排熱とは呼べない。従って、大気にこの分の熱を付加する場合には、地表面熱収支式中の地中への伝導熱量よりこの部分を差し引くこととした。次に、産業からの排熱はそのうちの 80%が大気中へ、20%が地中へ排出されるものと仮定した。最後に、交通からの排熱はその全てが大気中に放出されるものと仮定した。

注 9) 植生が短波放射を吸収して顕熱フラックスと潜熱フラックスに変換するときのボーエン比をここでは 0.2 と仮定している。

注 10) NOAA に搭載しているセンサーは AVHRR（Advanced Very High Resolution Radiometer）。表面温度導出方法の内、大気補正手法に関しては Double-band 補正（スプリットウィンドウ式）により推定している。その他、観測値に関する詳細は文献 17 参照。

注 11) 観測値はモニンオブコフのプロファイルを仮定して 100m 高さに補正。

謝辞　都市計画情報は東京都より借用させていただきました。本研究の遂行にあたり今井靖晃氏（国際航業株式会社）には甚大なご協力とご助言をいた

だきました。記して謝意を表します。また本研究の一部は、日本学術振興会平成 14・15 年度科学研究費基盤研究（B）「CO_2排出を半減する環境共生都市・建築・設備技術の開発」（研究代表：大岡龍三）によるものである。

主な記号

添字 i：微小面要素 i　　添字 g：地表面
添字 r：建物屋上面　　添字 w：建物側壁面
a：建物の表面積密度や樹冠の葉面積密度［m^2/m^3］
A_{gs}：地表面にできた建物の影の面積［m^2］
b：平均建物幅［m］
B：ボーエン比（$=BR_v / BR_w$）
B_1：モデル定数（=16.6）［-］
C_d：建物や樹木の抵抗係数（建物：0.1、樹木：0.2）［-］
f：コリオリパラメータ［s^{-1}］
F_1, F_2：モデル定数（F_1=1.8、F_2=1.33）［-］
F_{asky}、F_{bsky}：F_{gsky}を算出するための地表面の sky view factor［-］
F_{gsky}：地表面の sky view factor［-］
F_{gw}：地表面の建物側壁面に対する形態係数［-］
F_{wsky}：建物側壁面の sky view factor［-］
F_{ww}：建物側壁面の道路を挟んで対面する建物側壁面に対する形態係数［-］
F_{ww12}、F_{ww13}、F_{ww14}：F_{ww}を算出するための建物側壁面同士の形態係数［-］
g：重力加速度（=9.8）［m/s^2］
G_g：地中への伝導熱量［W/m^2］
h：平均建物高さ［m］
$\overline{H}$：大気層の厚さ［m］
H_g：地表面における顕熱放散量［W/m^2］
I_d：法線面直達日射量［W/m^2］
I_{dga}：地表面が吸収する直達日射量［W/m^2］
I_{dra}：建物屋上面における直達日射吸収量［W/m^2］
I_{drga}：地表面が吸収する直達日射の反射成分［W/m^2］
I_{drwa}：建物側壁面が吸収する直達日射の反射成分［W/m^2］
I_{dwa}：建物側壁面が直接吸収する直達日射量［W/m^2］
I_{sga}：地表面が吸収する天空日射量［W/m^2］
I_{sr}：水平面天空日射量［W/m^2］
I_{sra}：建物屋上面における天空日射吸収量［W/m^2］
I_{srga}：地表面が吸収する天空日射の反射成分［W/m^2］
I_{srwa}：建物側壁面が吸収する天空日射の反射成分［W/m^2］
I_{swa}：建物側壁面が直接吸収する天空日射量［W/m^2］
k^*：樹木の消散係数［-］
K_{xx}、K_{xy}：水平方向の拡散に関する渦動粘性係数［m^2/s］
l：乱れ長さスケール［m］
$L \cdot E_g$：地表面における潜熱放散量［W/m^2］
$q^2/2$：乱流エネルギー（$q^2 = \overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2}$）［$m^2/s^2$］
Q^*：摩擦比湿［-］
Q_w：水蒸気混合比［-］
r_c：植生群のアルベド［-］
r_g：地表面のアルベド［-］
r_r：建物屋上面のアルベド［-］
r_w：建物側壁面のアルベド［-］
$R_{g\downarrow}$：地表面における下向き長波放射入射量［W/m^2］
$R_{g\uparrow}$：地表面における上向き長波放射量［W/m^2］
$R_{r\downarrow}$：建物屋上面における下向き長波放射入射量［W/m^2］
$R_{r\uparrow}$：建物屋上面における上向き長波放射量［W/m^2］
$R_{sky\downarrow}$：天空からの長波放射量［W/m^2］
$R_{w\downarrow}$：建物側壁面における下向き長波放射入射量［W/m^2］
$R_{w\uparrow}$：建物側壁面における上向き長波放射量［W/m^2］
S_{ag}：単位街区内の地表面における影の面積［m^2］
S_g：地表面における短波放射吸収量［W/m^2］
S_1, S_q：モデル定数（S_1=0.2、S_q=0.2）［-］
T^*：基準温度スケール［K］　　T_g：地表面温度［℃］
T_r：建物屋上の表面温度［℃］　　T_w：建物側壁の表面温度［℃］
u^*：摩擦速度［m/s］
u_i：風速 i 方向成分のアンサンブル平均値［m/s］
U：x 方向の平均風速［m/s］
V：y 方向の平均風速［m/s］
w：平均建物間隔［m］
W：z 方向の平均風速［m/s］
z^*：z*座標系における鉛直方向高さ（$=\overline{H}(z - z_g)/(H - z_g)$）［m］
β_v：体積膨張率［$℃^{-1}$］
ε_g：地表面の長波放射率［-］
ε_r：建物屋上面の長波放射率［-］
ε_w：建物側壁面の長波放射率［-］
η：建物や樹木を含むメッシュの水平面積のうち建物や樹木で覆われている水平面積の割合［-］
θ：太陽の仰角［rad］
σ：ステファンボルツマン定数（$=5.67\times10^{-8}$）［W/m^2K^4］
σ_q、σ_t：モデル定数（σ_q=1.0、σ_t=1.0）［-］
ϕ：太陽の方位角［rad］
Θ_v：温位［K］

参考文献

1) 村上周三、持田灯、金相瑾、大岡龍三、関東地方における土地利用状況の変化と流れ場・温度場の関係、Mellor-Yamada 型の都市気候モデルによる局地気象解析、日本建築学会計画系論文集、No.491、pp.31-39、1997.1
2) 金相瑾、村上周三、持田灯、大岡龍三、吉田伸治、数値気候モデルによる都市化がもたらす関東地方の気候変化のメカニズムの解析、日本建築学会計画系論文集、No.534、pp.83-88、2000.8
3) 近藤裕昭、劉発華、1 次元都市キャノピーモデルによる都市の熱環境に関する研究、大気環境学会誌、33（3）、pp.179-192、1998
4) 萩島理、谷本潤、片山忠久、大原健志、改良・建築－都市－土壌連成系モデル(AUSSSM)による都市高温化の構造解析、第 1 報　モデルの理論構成及び標準解、日本建築学会計画系論文集、No.550、pp.79-86、2001.12
5) 鳴海大典、大谷文人、近藤明、下田吉之、水野稔、都市における人工廃熱が都市熱環境に及ぼす影響、都市熱環境評価モデルを用いたヒートアイランド現象の改善策に関する検討　その 1、日本建築学会計画系論文集、No.562、pp.97-104、2002.12
6) 亀卦川幸浩、玄地裕、大橋唯太、近藤裕昭、電源・空調システムの構成が夏季の都市熱環境に及ぼす影響、第 19 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス、2003.1
7) ヴタンカ、足永靖信、浅枝隆、都市大気境界層の乱流モデリング、都市建築計画における都市気候予測システムの開発　その 1、日本建築学会計画系論文集、No.536、pp.95-99、2000.10
8) Y. ASHIE, V. T. Ca and T. ASAEDA: Numerical analysis of heat island phenomena for the control of cooling energy in cities, Journal of Global Environment Engineering, Vol. 7, pp.101-117, 2001
9) 東京都都市計画局総合計画部、東京都都市計画地理情報システム、平成 8･9 年度土地利用現況および建物用途現況、1998.10
10) 瀬戸島政博、赤松幸生、船橋学、今井靖晃、天野正博、航空機レーザスキャナによる森林域の計測とその適用性、写真測量とリモートセンシング、Vol.41、No.2、pp.15-26、2002
11) 吉田伸治、大岡龍三、持田灯、富永禎秀、村上周三、樹木モデルを組み込んだ対流・放射・湿気輸送連成解析による樹木の屋外温熱環境緩和効果の検討、日本建築学会計画系論文集、No.536、pp.87-94、2000.10
12) 吉田伸治、村上周三、持田灯、大岡龍三、富永禎秀、大森敏明、対流・放射・湿気輸送連成解析による屋外環境共生空間の解析（その 1）、モンテカルロ法を用いた放射計算の概要、日本建築学会関東支部研究報告集、pp.301-304、1998
13) NEDO 提案公募研究開発事業研究成果報告書 H10 年度・11 年度、高効率の熱交換・熱拡散促進型の省エネ都市形成手法の開発（研究代表者：村上周三）、2000.3
14) 宿谷昌則、数値計算で学ぶ　光と熱の建築環境学、丸善株式会社、1993.
15) 近藤純正、水環境の気象学、朝倉書店、1994.
16) 吉田伸治、大岡龍三、村上周三、原山和也、CFD 解析による人工排熱が都市のヒートアイランドに及ぼす影響の検討、第 18 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集、PP.499-502、2002.1
17) 資源環境技術総合研究所　環境影響予測部、大都市における夏季高温化対策技術の評価手法の開発、研究資料 97-1、1997.3
18) 原山和也、大岡龍三、村上周三、東京都心のヒートアイランド現象のメカニズム解析（その 1）、東京都の都市計画情報を利用した都市気候解析、日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1、pp. 649-650、2003.9
19) 桑形恒男、近藤純正、東北南部から中部地方までのアメダス地点における地表面粗度の推定、天気、pp.55-59、1990.3
20) 気象庁ホームページ http://www.jma.go.jp/JMA_HP/jma/index.htm
21) Freedman F. R. and Jacobson M. Z., Modification of the standard ε-equation for the stable abl through enforced consistency whth Monin-Obukhov similarity theory, Boundary-Layer Meteorology, 106, pp.383-410, 2003
22) Weng W. and Taylor P. A., On Modeling The one-dimensional atmospheric boundary layer, Boundary-Layer Meteorology, 107, pp.371-400, 2003
23) Teixcira J. and Cheinet S., A simple mixing length formulation for the eddy-diffusivity parameterization of dry convection, Boundary-Layer Meteorology, 110, pp.435-453, 200

日本建築学会環境系論文集　第609号，63-70，2006年11月
J. Environ. Eng., AIJ, No.609, 63-70, Nov., 2006

メソスケールモデルに組み込んだ都市キャノピーモデルにおける放射解析手法の改良

IMPROVEMENT OF THE PREDICTION ACCURACY OF RADIATION CALCULATION IN THE URBAN CANOPY MODEL INCORPORATED INTO THE MESO-SCALE METEOROLOGICAL MODEL

川本陽一*，大岡龍三**

Yoichi KAWAMOTO and Ryozo OOKA

The authors have incorporated an urban canopy model into a meso-scale meteorological model. However, the accuracy of view factors in the canopy model is insufficient under certain urban configurations. Therefore, a new method for radiation calculation in the urban canopy region, which has accuracy to some extent and low computational load, is developed. The accuracy of the new methods is examined by the comparison with the results from the Monte Carlo method. Next, in the meso-scale meteorological model, the authors adopted these methods and the thermal environment in the Tokyo metropolitan area is analyzed. The results show better agreement with observation data for a typical summer's day than those derived from the conventional method. In addition, a revised method of estimating Mean Radiant Temperature (MRT) in the urban canopy is also developed.

Keywords: *Urban Climate Analysis, Urban Canopy Model, Radiation Calculation, Heat Island, Outdoor Thermal Environment*
都市気候解析、都市キャノピーモデル、放射解析、ヒートアイランド、屋外温熱環境

1. 序

ヒートアイランド現象は数 100km から人体のスケールに至るまで、広範な影響をもたらす現象である。そのため数値解析によるヒートアイランド現象の予測についても、これら様々なスケールに対して包括的に捉える必要がある。以上の背景より筆者らは、都市キャノピーモデルを地表面境界条件として組み込んだメソスケール解析手法を開発し、東京首都圏の都市気候の解析を行った[文1)]。

しかし前報で組み込まれた都市キャノピーモデル[文2)]において、地表面から臨む建物壁面の形態係数や天空率の算出に関し、大胆な仮定に基づいており、大きな誤差を含む可能性がある。また、建物により地表面に形成される日陰面積の算出についても、これまで検討は不十分であった。一方で筆者らと同様、メソスケールモデルの地表面境界条件に都市キャノピーモデルを組み込んだ解析モデルとして、足永ら[文3)]による UCSS、Kusaka et al. [文4)]によるモデル、Martilli et al. [文5)]によるモデルがあり、いずれに関しても簡易な手法により天空率や日陰面積の算出を行っているが、しかしそのモデルの十分な精度検証、ならびにその報告はなされていないのが実状である。従って、これらのモデルの精度検証を欠くことが出来ない。

以上を踏まえ本研究では、前報における街区内放射解析モデルの改良を行い、計算負荷の増大を避けるために簡易な手法によるが、高い精度を有する新たな手法の提案を行う。またその予測精度について、モンテカルロ法を用いた放射解析[文6)]を併せて行い[注1)]、その解析結果と比較することにより精度検証を行う。本報での放射解析の改良点は以下の 2 つから成る。

1) 地表面から臨む各種形態係数の算出
2) 建物によって地表面に形成される日陰の面積の算出

更に都市キャニオン内での人体の温熱快適性の推定のため、平均放射温度（Mean Radiant Temperature; MRT）の算出法の提案も併せて行う。従来のメソスケール気候モデルでは、MRT の算出は上下方向からの短波・長波放射量から一次元の放射収支より簡易に算出していたに過ぎないが[文7)]、地表面境界条件に都市キャノピーモデルを組み込むことにより、建物側壁面を含め三次元の放射収支を考慮することが可能となる。本報では、人体を微小立方体と仮定する[文8)]ことによって、都市キャニオン空間内での MRT の算出を行う。

2. 放射解析サブモデルの改良

メソスケールモデルに組み込んだ都市キャノピーモデルでは、各解析メッシュ内の建物を統計的にモデル化している。メッシュ内には均等な街区が存在すると仮定し、平均建物間隔 w[m]、平均建物幅 b[m]、平均建物高さ h[m]の 3 変数で街区形状をモデル化する。なお各変数は、東京 23 区内については東京都都市計画地理情報システム[文9)]より得られた GIS データを用い、メッシュ内の全建物の建築面積

* 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻　大学院生・修士（工学）　Graduate Student, Dept. of Architecture, Faculty of Eng., the Univ. of Tokyo, M. Eng
** 東京大学生産技術研究所　助教授・博士（工学）　Assoc. Prof., Institute of Industrial Science, the Univ. of Tokyo, Ph. D

及び建物棟数より平均建物間隔 w、平均建物幅 b を算出した。平均建物高さ h は各建物の地上階数データを用いて、GIS データ中の建物を住宅と非住宅に分類し、住宅を各階 3.0m、非住宅を各階 4.0m と設定し建築面積により加重平均することによって算出した。それ以外の地域では平均建物幅 b、平均建物高さ h を固定値で与え、平均建物間隔 w は設定した建ぺい率に応じて算出している。

上述した均等街区で用いることを前提とし、放射解析サブモデルの改良を行う。

参考のため、前述した Kusaka et al.[文4]と Martilli et al.[文5]による都市キャノピーモデルで採用されている天空率と日陰面積算出の簡易法について検討を行った結果も併せて示す。

精度検証のため、簡易法との比較に用いるモンテカルロ法を用いた放射解析は、大森ら[文6]や、筆者ら[文10]が開発したモデルを利用した。解析に際しては、各面から射出する放射束は 10,000 本とした。

2.1. 地表面から臨む各種形態係数の算出

前報のモデル[文1]では、地表面から臨む建物壁面の形態係数を算出する際に建物が無限に続くと仮定し、実際は建物と建物の間から見える空を考慮していなかった。そこで本報では、建物間に見える空を考慮して形態係数を算出するよう、以下に示すように改良を施す。

地表面から臨む形態係数は、建物側壁面と天空面のみを考える。まず、地表面から建物側壁面を臨む形態係数を求める。図 1 に示す交差点中心の A 点と、建物にはさまれた道路中心の B 点での形態係数を次式で面積加重して平均したものを、地表面から側壁面を臨む形態係数 F_{gw} とする。

$$F_{gw} = \left(w^2 F_{agw} + 2wbF_{bgw}\right) / \left(w^2 + 2wb\right) \tag{1}$$

ここで、被放射面 1（地表面の微小面要素）と放射面 2（側壁面）が垂直であるとき、形態係数 F_{n12} を次式のように解析的に表すことができる[文11]ので、式(2)を用いて図 1 中の F_{gw1}～F_{gw6} を算出する。求められた各形態係数は式(3)、(4)を用いてそれぞれ A 点と B 点から臨む建物側壁面の平均形態係数とし、式(1)によって F_{gw} を求める。

$$F_{n12} = \frac{1}{2\pi}\left[\tan^{-1}\frac{b}{h} - \frac{h}{\sqrt{a^2+h^2}}\tan^{-1}\frac{b}{\sqrt{a^2+h^2}}\right] \tag{2}$$

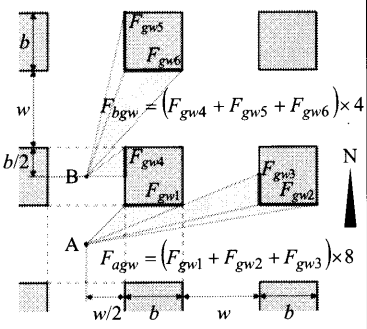


図 1　地表面より臨む建物壁面の形態係数

$$\left[\begin{array}{l} a：\text{放射面 2 の高さ[m]、}b：\text{放射面 2 の幅[m]、}h：\text{被放射面 1 の中心から放射面 2 までの距離[m]} \end{array}\right]$$

$$F_{agw} = \left(F_{gw1} + F_{gw2} + F_{gw3}\right) \times 8 \tag{3}$$

$$F_{bgw} = \left(F_{gw4} + F_{gw5} + F_{gw6}\right) \times 4 \tag{4}$$

地表面から臨む形態係数は建物側壁面と天空のみなので、地表面から臨む天空率 F_{gsky} は次式となる。

$$F_{gsky} = 1 - F_{gw} \tag{5}$$

表 1 に本報で改良を行った簡易法と前報で用いた簡易法、そしてモンテカルロ法により求められた地表面からの天空率[文12)、13)、注2)]の比較を示す。併せて、Kusaka et al.[文4]によるキャノピーモデルで採用されている Sakakibara[文14]による簡易法と、Martilli et al.[文5]による簡易法の算出結果についても示す[注3]。従来の簡易法では誤差が 10% を超えるケースも多く見られるが、本報で提案する簡易法では今回検証した全てのケースで誤差が±5%以内に収まっており、概ね良い結果である[注4]。一方、Sakakibara による簡易法、Martilli et al. による簡易法では共に、全てのケースにおいて大きな誤差が見られる。前者はキャニオン空間が無限に続くと仮定した 2 次元の解析であり、後者についてもキャニオン空間の奥行がメソスケール解析のメッシュ幅に等しいと仮定していることに起因していると考えられる。

2.2. 建物により形成される日陰面積の算出

前報[文1]で用いていた放射解析サブモデルでは、隣接するブロックに進入する日陰の面積が、ブロック中の内で建物が無い部分の面積の割合によって決定されると仮定していた。そこで本報では、第一に、前報のモデルによる日陰面積の算出結果とモンテカルロ法による結果との比較を行い、続いて、より高精度な算出式を提案する。

2.2.1. 従来の簡易モデルの問題点

モンテカルロ法と比較する対象街区は、低層（b=18, w=12, h=9）、中層（b=13.5, w=16.5, h=16）、高層（b=9, w=21, h=36）の 3 街区と、GIS データ[文9]より得られた大手町を含む 1km メッシュの平均値（b=13.0, w=8.0, h=17.5）により構成される街区を対象とする。以後、建物 1 棟と空地部分により形成される（1 辺が(b + w)で表される）領域をブロックと称する。

表 1　地表面の天空率の算出結果比較

No.	b [m]	w [m]	h [m]	モンテカルロ法*1	改良した簡易法		前報で用いた簡易法		Sakakibara による簡易法[文14)注1)]		Martilli et al. による簡易法[文5)注1)]	
				F_{gsky}	F_{gsky}	誤差*2	F_{gsky}	誤差*2	F_{gsky}	誤差*2	F_{gsky}	誤差*2
1	25	25	25	0.557	0.579	3.9%	0.516	-7.3%	0.447	-19.7%	0.417	-25.1%
2	30	20	25	0.456	0.460	0.9%	0.422	-7.4%	0.371	-18.6%	0.483	5.9%
3	35	15	25	0.348	0.338	-2.7%	0.320	-8.0%	0.287	-17.4%	0.568	63.1%
4	40	10	25	0.228	0.219	-3.9%	0.213	-6.8%	0.196	-14.0%	0.678	197.4%
5	25	25	30	0.505	0.521	3.2%	0.453	-10.3%	0.385	-23.8%	0.471	-6.7%
6	25	25	40	0.424	0.434	2.3%	0.361	-14.9%	0.298	-29.7%	0.557	31.3%
7	25	25	50	0.363	0.371	2.3%	0.299	-17.7%	0.243	-33.2%	0.621	70.9%
8	18	12	9	0.603	0.629	4.2%	0.604	0.2%	0.555	-8.0%	0.335	-44.5%
9	13.5	16.5	16	0.601	0.624	3.9%	0.537	-10.6%	0.458	-23.7%	0.407	-32.3%
10	9	21	36	0.596	0.602	1.0%	0.378	-36.5%	0.280	-53.0%	0.577	-3.3%
11	10.1	11.9	17	0.499	0.503	0.8%	0.403	-19.2%	0.330	-33.8%	0.522	4.6%

*1 No.1～7 は文献 12、No.8～11 は文献 13 による

*2 誤差[%]＝（簡易法による F_{gsky}－モンテカルロ法による F_{gsky}）／（モンテカルロ法による F_{gsky}）×100

表2に、各時刻においてモンテカルロ法により算出された地表面の日陰面積率（1 ブロック内の地表面積に対する日陰面積の割合）と比較した、前報で用いた簡易法と Kusaka et al.[文4]による簡易法[注5]により算出された日陰面積率との誤差を示す。解析には 7 月 24 日の東京での太陽方位角、太陽高度を用いている。Kusaka et al. による簡易法は天空率算出と同様、キャニオン空間を 2 次元として取り扱っているため、キャニオン空間が東西方向に無限に続く場合を想定した。また、2 次元での取り扱いのため算出結果は日陰が到達する距離 l_{shadow} であり、建物間隔 w に対する l_{shadow} の比を以って日陰面積率とした。Martilli et al.[文5]による簡易法は Kusaka et al. と同じ手法のため省略する。モンテカルロ法による解析では、東西、南北共に 9 ブロックが並ぶ計 81 ブロックの領域の解析を行い、その中心 1 ブロックの地表面に形成される日陰の面積を用いている。

前報のモデルでは太陽高度が低い 7 時から 8 時にかけ、特に建物高さが高層となる街区で誤差が大きく見られる。これらは、従来の簡易モデルでは隣接するブロックに進入する日陰についてのみ考慮しているため、日陰が複数ブロックにまたがる場合については十分な考慮が為されていないことに起因すると考えられる。対する Kusaka et al. による簡易法は、2 次元形状でモデル化されている為に日陰の重なり等の取り扱いが不十分であり、全てのケースにおいて大きな誤差が見られる。また、設定したキャニオン空間の方位により、日陰の影響に差異が生じると考えられる。

表 2　既存の簡易法による日陰面積率の誤差*

	前報で用いた簡易法				Kusaka et al. による簡易法			
	低層	中層	高層	大手町	低層	中層	高層	大手町
6時	-0.9%	-1.7%	0.0%	0.0%	-2.2%	11.4%	0.0%	0.0%
7時	3.5%	11.3%	25.8%	13.8%	-59.9%	-44.2%	-12.9%	21.4%
8時	-0.3%	5.6%	42.7%	20.1%	-93.1%	-89.9%	-78.0%	-82.5%
9時	-0.3%	-1.4%	-1.9%	0.3%	-54.4%	-45.5%	-17.3%	-34.8%
10時	-0.4%	-1.1%	-2.5%	-1.1%	-11.8%	5.8%	40.3%	-11.8%
11時	-0.6%	-0.4%	-0.2%	0.5%	52.0%	84.2%	148.1%	50.7%
12時	-1.6%	-1.4%	0.2%	-0.1%	119.0%	165.2%	262.2%	118.0%

* 誤差[%]＝（簡易法による日影面積率－モンテカルロ法による日影面積率）／（モンテカルロ法による日影面積率）×100

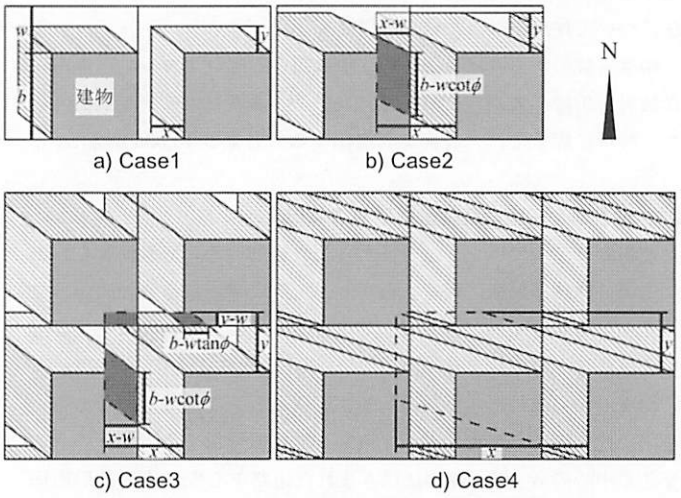


図 2　地表面に形成される日陰の概念図（斜線部分が日影）

2.2.2. 日陰面積算出法の改良

前項を踏まえ、複数ブロックにまたがる日陰について考慮した地表面の日陰の面積の算出法を考案する。

ある太陽高度θ、太陽方位角ϕの条件下において、先述の 3 変数で表される建物によって地表面に形成される日陰の面積 A_{gs}[m²]は、他に遮る物がない場合、以下の様に表される。

$$x = \left| h \cot\theta \sin\phi \right| \tag{6}$$

$$y = \left| h \cot\theta \cos\phi \right| \tag{7}$$

$$A_{gs} = (x+y)b \tag{8}$$

ここで、x[m]は建物から陰の端までの東西方向の距離、y[m]は建物から陰の端までの南北方向の距離を示す（図 2 参照）。

しかし日陰が隣接するブロックに進入する場合、即ち $x>w$ または $y>w$ となる場合、隣接するブロックの建物やその建物の日陰と重なる部分が生じる。従来のモデルではこのように日陰が重なる部分の面積を算出する際の検討が不十分であったため、誤差が生じる原因となっていた。そこで本報では以下の 4 つのケースに分け、地表面の日陰面積の算出を行う。各ケースの概念図を図 2 に示す。

・Case1：日陰が他のブロックに進入しない場合（図 2 a)）

建物による日陰が他のブロックに進入しない場合、日陰面積は式(8)によって表される。

・Case2：日陰が隣接する西側ブロックにのみ進入する場合（図 2 b)）

ある建物によって地表面に形成される日陰が隣接するブロックの建物、及びそれによる日陰と重なる面積は、図中に示す濃い灰色の平行四辺形部分となる。この部分の面積を差し引くことにより、A_{gs} は以下の式で表される。

$$A_{gs} = (x+y)b - (x-w)(b - w\cot\phi) \tag{9}$$

また、北側のブロックのみに進入する場合は次式で表される。

$$A_{gs} = (x+y)b - (y-w)(b - w\tan\phi) \tag{10}$$

・Case3：日陰が隣接する西・北側ブロックに進入する場合（図 2 c)）

日陰が隣接する西及び北側にそれぞれ 1 ブロックずつ進入する場合、建物及び他の建物による日陰に重なる部分の面積は図中の 2 つの平行四辺形と 1 つの長方形となる。よって次式により A_{gs} が算出される。

$$\begin{aligned} A_{gs} = {} & (x+y)b - (x-w)(b - w\cot\phi) \\ & - (y-w)(b - w\tan\phi) - (x-w)(y-w) \end{aligned} \tag{11}$$

・Case4：日陰が西側に複数ブロック、及び隣接する北側ブロックに進入する場合（図 2 d)）

西側に 2 ブロック以上、さらに隣接する北側ブロックにも日陰が進入する場合、地表面は全て日陰で覆われると仮定する。

以上に示したケースは午前中の太陽高度、太陽方位角を想定しているが、対象性の点から全ての場合において同様の計算となる。

上記の算出式による日陰面積率の時間変化を図 3 に示す。対象と

する街区は、前項で誤差が大きく見られた高層街区（b=9, w=21, h=36）と大手町（b=13.0, w=8.0, h=17.5）、そして高層であるほど誤差が大きく見られた点を踏まえて大手町の建物高さを 40m に変更した大手町高層化（b=13.0, w=8.0, h=40.0）の計 3 ケースである。モンテカルロ法、従来の簡易法、改良した簡易法の全てにおいて、7 月 24 日の 6 時から 12 時の間を 2 分間隔で計算している。

例示する 3 つの街区において、従来の簡易法では午前 8 時前後に日陰の面積を過大評価しており、また反対に大手町高層化を想定した街区では 9 時から 11 時頃までは過小評価する結果となっている。一方の改良した簡易法では、全ての時刻においてモンテカルロ法と同様の結果を示しており、精度の向上が顕著に示されている。

3. キャニオン空間内に位置する人体を想定した MRT の算出方法

ラフネスパラメータを用いた従来のメソスケール解析では、上方と下方からの放射フラックスを用いて微小平面に入射する放射エネルギー量を算出し、MRT を算出していた[文 7]。しかし地表面境界条件に都市キャノピーモデルを組み込むことにより、建物壁面からの放射についても解析が可能となったので、人体を想定した微小立方体[文 8]に入射する放射エネルギーを算出することにより、キャニオン空間内の MRT を算出する方法へと改良する。前述した地表面から臨む天空率、及び壁面の形態係数の算出方法と同様の手法を用いて、キャニオン空間内に位置する人体を想定した微小立方体各面からの形態係数を算出し、その微小立方体各面に入射する放射エネルギー量を算出することにより、MRT を算出する。

3.1. 微小立方体から臨む各種形態係数の算出

地表面から臨む各種形態係数の算出と同様、人体を想定した微小立方体各面から臨む各種形態係数は図 4 に示す交差点中心の A 点と、建物の間に位置する B 点での値をそれぞれの領域の面積で加重平均した値とする。なお、微小立方体の側面はそれぞれ東西南北を向いていると仮定している。また微小立方体の辺長を l、地上よりの高さを m とする。

各点に位置する微小立方体の上面、及び下面から臨む形態係数の算出については、地表面から臨む場合と同様に求めるため省略する。

次に微小立方体側面から臨む形態係数に関して示す。A 点に位置する微小立方体はそれぞれ東西南北を向いているため、各側面から臨む建物側壁面の形態係数 F_{ahw} は等しくなる。なお、A 点に位置する微小立方体側面から臨む建物側壁面の形態係数 F_{ahw} は、図 4 に示す F_{hw1}～F_{hw6} を対象とする。建物にはさまれた道路中心の B 点に位置する微小立方体側面から臨む形態係数は、北側側面と西側側面から臨む場合に分けて算出する。B 点に位置する微小立方体側面から臨む建物側壁面の形態係数は、図 4 に示す F_{hnw1}～F_{hnw3}（北側側面から臨む）及び F_{hww1}～F_{hww3}（西側側面から臨む）を対象とする。また B 点から建物側壁面を臨む平均的な形態係数 F_{bhw} は、北側側面から臨む場合と西側側面から臨む場合の平均値とする。さらに A 点と B 点で算出された形態係数をそれぞれの領域の面積で加重平均することにより、人体を想定した微小立方体の側面から建物側壁面を臨む形態係数 F_{hw} とする。

$$F_{hw}=\left(w^2F_{ahw}+2wbF_{bhw}\right)/\left(w^2+2wb\right) \tag{12}$$

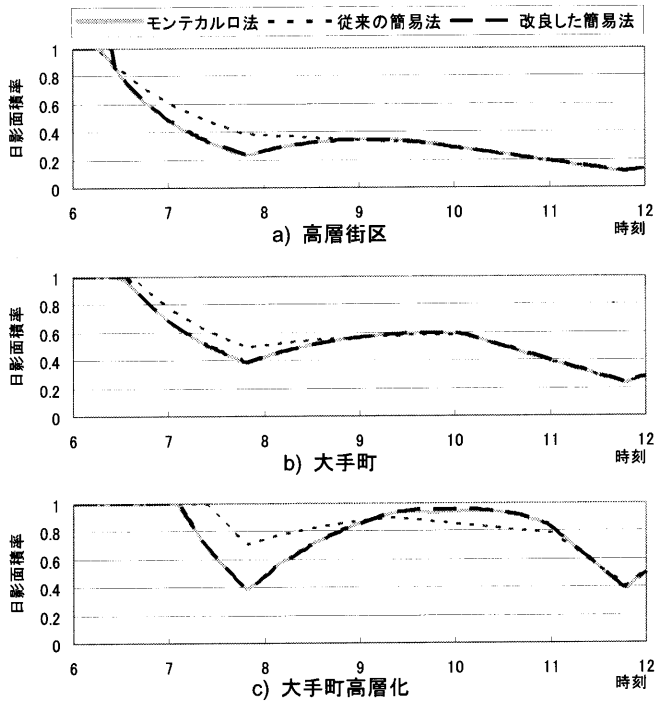


図 3　日陰面積率の推移

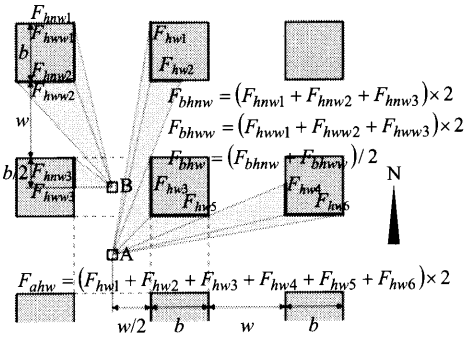


図 4　人体を想定した微小立方体より臨む建物側壁面の形態係数

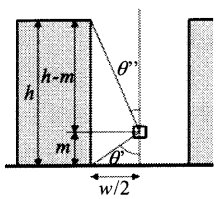


図 5　人体を想定した微小立方体より臨む仰角

微小立方体各面からの形態係数の算出に際しては、被放射面 1（微小面要素）と放射面 2（側壁面）が垂直である場合の式(2)と、平行である場合の式(13)[文 11]を組み合わせて用いる。

$$F_{p12}=\frac{1}{2\pi}\left[\frac{a}{\sqrt{a^2+h^2}}\tan^{-1}\frac{b}{\sqrt{a^2+h^2}}+\frac{b}{\sqrt{b^2+h^2}}\tan^{-1}\frac{a}{\sqrt{b^2+h^2}}\right] \tag{13}$$

［a：放射面 2 の高さ[m]、b：放射面 2 の幅[m]、h：被放射面 1 の中心から放射面 2 までの距離[m]］

微小立方体側面から臨む形態係数は、建物側壁面以外に地表面 F_{hg} と天空面 F_{hs} がある。これらは直接求めることが出来ないため、1 から F_{hw} を引いた残りが、図 5 に示すそれぞれの仰角に応じて分配されると仮定する。

3.2. MRT の算出方法

メソスケール解析より得られた各面からの放射フラックス、及び前述の人体を想定した微小立方体各面の各種形態係数を用いて、人

体を想定した微小立方体に入射する全放射エネルギーを算出し、最終的に MRT を求める。

$$6l^2\sigma T_r^4 = 6l^2\sum_{i=1}^{6} I_i\alpha_h c_i + 6l^2\sum_{i=1}^{6} R_i c_i \qquad (14)$$

σ: ステファン・ボルツマン定数 [W/m^{2}K^4] (=5.67×10^{-8})、T_r: MRT [K]、α_h: 人体の短波放射（日射）反射率 [-] (=0.5 とする)、i: 微小立方体の面インデックス、I_i: i 面に入射する短波放射 [W/m^2]、R_i: i 面に入射する長波放射 [W/m^2]、c_i: i 面の日射吸収に関わる重み係数 [-]（上下面=0.024、側面=0.238 [文8]）

4. 解析概要

都市キャノピーモデルの放射解析サブモデルに上述の改良を施し、メソスケール解析を行った。以下に解析の概要を示す。

4.1. シミュレーションモデル概要

本報で用いるメソスケール気候モデルは、乱流モデルに気象分野で一般に用いられる Mellor-Yamada モデル Level 2.5 [文15]を採用した Software Platform [文16]に、境界サブモデルとして近藤らによる都市キャノピーモデル[文2]を組み込んだものである。モデルの詳細については、文献 1 に詳しい。

4.2. 解析領域

図 6 に示す領域を、ネスティング処理を施して解析した。メッシュ分割については表 3 に示す。

4.3. 解析条件

典型的な夏季晴天日を想定し、7 月 23 日 6:00～7 月 24 日 24:00 の解析を行い、24 日を評価対象とした。その他の条件については文献 1 及び 17 を参照されたい。

5. 解析結果

5.1. AMeDAS データとの比較による精度検証

本報では、キャニオン空間内の放射解析サブモデルの改良並びに MRT 算出法について述べた。放射解析サブモデルについては、モンテカルロ法による解析との比較を行い、十分な精度を有することを確認した。しかし MRT の算出に関しては、観測による結果との比較を行うことが望ましいが、広域かつ継続的な MRT の観測データの蓄積が無く、比較対象足り得るデータを得ることが出来なかった。そこで本報では、解析結果より得られた気温と AMeDAS 観測値[文18]との比較を行う。評価対象は Grid4（1km メッシュ）の結果である。

東京 23 区内では大手町、新木場、羽田、練馬の 4 点で気温の観測が行われているが、東京湾に面する新木場と羽田は境界条件の影響を大きく受けること、またメソスケール解析の結果はメッシュ平均値であるが、新木場と羽田が位置するメッシュは海面が多くを占めるため結果に代表性がないことから、大手町と練馬で解析結果と観測値の比較を行う。比較対象とする AMeDAS 観測値は、夏季晴天日[注6]の平均値を用いた。図 7 に気温日変化の比較を示す。なお、比較のため前報の解析結果[文1]も示す。ただし、前報と本報の解析では、本報で示す改良以外にも、解析メッシュの差異[文17]や、土地利用データや建物現況データの更新等、種々の改良が為されているため、放射解析サブモデルの差異のみに着目した比較ではないことに注意されたい。

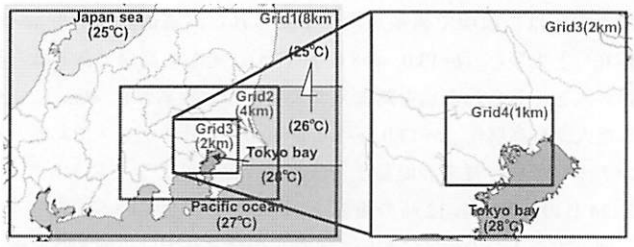


図 6　解析領域

表 3　メッシュ分割

	解析領域 x×y×z[km]	メッシュ分割数	メッシュ幅[km]
Grid1	480×400×9.6	60×50×49	8
Grid2	232×200×9.6	58×50×49	4
Grid3	96×96×9.6	48×48×49	2
Grid4	40×40×9.6	40×40×49	1

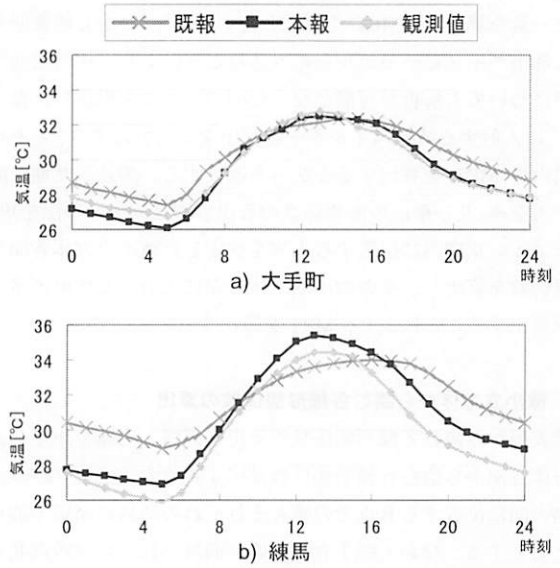


図 7　気温日変化（7 月 24 日、Grid4、地上 1.5m）

本報における大手町の気温日変化の結果は、前報の解析結果よりも昼夜の気温差が大きくなり、観測値により近い性状を示す結果となった。これは上述したように、放射解析の差異のみによるものとは言えないが、天空率の算出結果の改善により、建物間に見える筈の空の部分を考慮したために地表面からの天空率が大きくなり、結果として日中の地表面の短波放射による受熱量が増加、また夜間では、放射冷却による放熱量が増加することにより、1 日を通しての気温の変動が大きくなったものと考える。

練馬の解析結果は、前報と本報の解析結果で非常に大きな差異が見られる。結果に差異が生じた理由としては、大手町と同様に地表面からの天空率が大きくなることに起因する部分が大きいと考える。本報の解析結果は、前報に比して観測値の日変化性状に各段に近づいたものの、1 日を通して気温が高目の結果となっている。これは、現在の解析では建物を全て RC 造と想定して各種物性値を設定しており、主に RC 壁の蓄熱の効果が効いているためと考えられる[注7]。

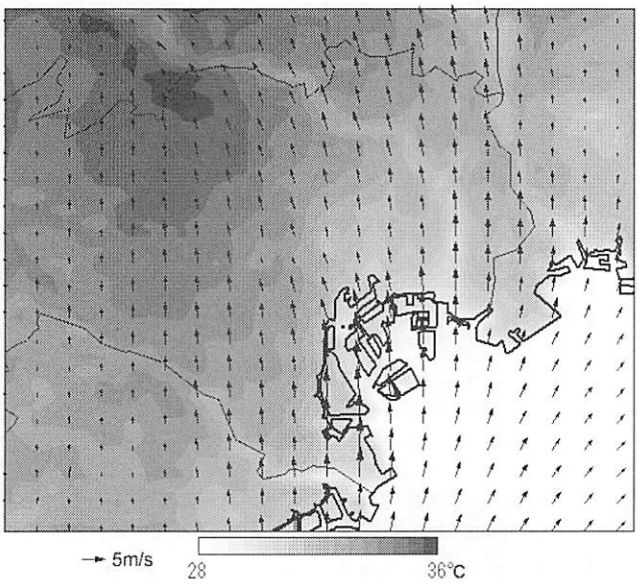


図 8　気温・風速ベクトル水平分布
（7 月 24 日 13 時、地上 1.5m）

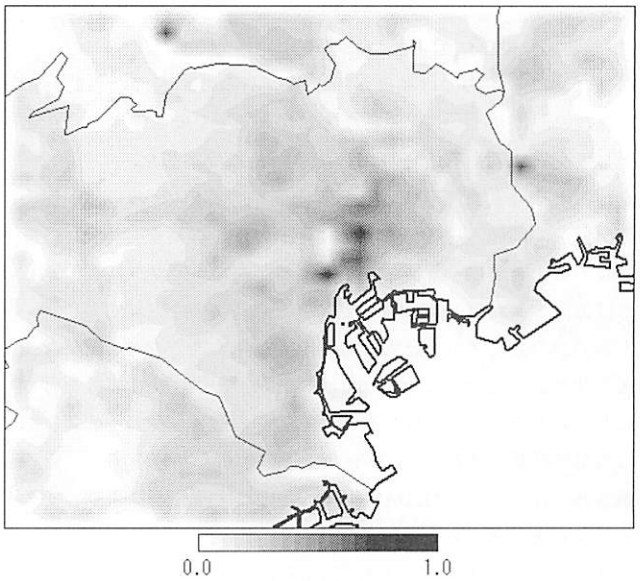


図 9　地表面日陰面積率の分布
（7 月 24 日 13 時）

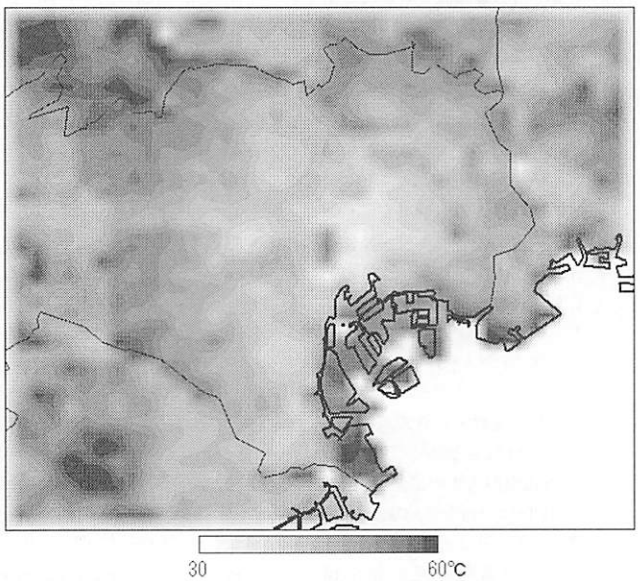


図 10　MRT 水平分布
（7 月 24 日 13 時、地上 1.5m）

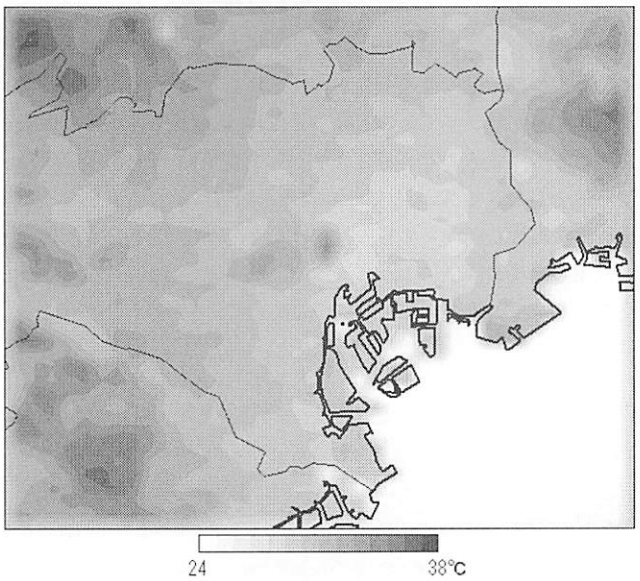


図 11　SET*水平分布
（7 月 24 日 13 時、地上 1.5m）

5.2. 気温・MRT・SET*算出結果

図 8 に解析によって得られた気温と風速ベクトル、図 9 に建物により地表面に出来る日陰面積率[注8)]、図 10 に MRT [注9)]の水平分布を示す。また図 11 に、人体の温熱感指標の 1 つである SET*（Standard Effective Temperature）[注10)]の水平分布を示す。評価対象領域は東京 23 区を中心とした 1km メッシュで分割された領域（Grid4）であり、評価対象日時は 7 月 24 日 13:00 である。また、人体を想定した微小立方体の高さは 1.5m としており、SET*算出に際しては体重 70kg、体表面積 1.8m^2 の人体を想定し、着衣の熱抵抗を 0.5clo、代謝量を 1met とした。気温・MRT・風速・相対湿度は、解析により得られたメッシュ平均値を使用した。

気温は地表面や建物表面からの顕熱フラックスのみでなく、移流や乱流拡散による顕熱の流出入の影響を受けるため、海風が吹き込む沿岸部では気温が低く、反対に陸地部の抵抗によって風速が弱まる内陸部で高くなるという地理的条件による分布性状が明らかに見て取れる。対する MRT は街区形状により決定される部分が非常に大きく、地域性がより顕著に現れる結果となっている。即ち、都心部は高層建物が過密に並ぶために地表面の日陰面積率が大きく、MRT の上昇が抑制され、結果として SET*の上昇も抑制されるのに対し、低層住宅が並ぶ郊外では建物による日陰面積が小さく、日中は日射（短波放射）の影響を大きく受け MRT が上昇する傾向にある。また内陸部のため風速が弱まり、SET*が上昇する結果となっている。

以上の結果より、気温による一義的な評価のみでなく、放射環境や風速等を含めた多義的な温熱環境の評価の必要性が示唆される。

6. 結論

本報の結論を以下に示す。

1) 前報における手法では精度が不十分であった地表面から臨む形態係数の算出について、簡易な方法によるが、モンテカルロ法と比して高い精度を有する算出方法を新たに提案した。
2) 建物により地表面に形成される日陰面積の算出について、前報の算出方法の問題点を指摘、新たな算出方法の提案を行った。形態係数の算出と同様、簡易な方法によるが、モンテカルロ法と比してほぼ同等の精度を有する手法であることを確認した。
3) 上記の改良点により、計算負荷の増大を招くことなく、簡易な街区形状においてはモンテカルロ法に近い精度の放射解析を行うことを可能とした。改良を施したモデルの解析結果は、前報における解析結果と比較し、より実状に近い解析を可能とすることが示された。これはAMeDAS観測値と比較することにより、その差異が顕著に示された。
4) 人体を微小立方体と想定と想定し、それに入射する放射エネルギーを算出することによって、都市キャノピーモデルに対応したMRT算出法を提案した。
5) 上記の改良を施したモデルを用いた解析結果より、気温とMRTの分布性状の差異を示した。結果より東京首都圏の日中は、海風により沿岸部では気温の上昇が抑制されるのに対し、内陸部では海風の効果が弱まり気温の上昇が見られ、地理的条件が気温性状に大きく寄与することが示された。対するMRTは、街区形状に因る部分が大きく、都心と郊外の差異を顕著に示す結果となった。
6) 今後は気温性状に注目するのみではなく、放射環境も含めた総合的な温熱環境の評価によって人体の温熱環境の評価を行い、ヒートアイランド対策の評価を行う予定である。

注

注1) ここでは、大森ら[文6)]により開発され、筆者ら[文10)]により屋外空間に拡張されたモンテカルロ法による放射計算手法を用いて検証値の計算を行う。もちろん、モンテカルロ法で得られる形態係数等は確率的な手法に基づいて計算されており、厳密な正確値ではない。しかしながら査読者が指摘する積分理論を都市域等の複雑形状の放射場に厳密に適用することは計算の繁雑性からほぼ不可能であり、大森ら[文6)]の研究によれば1つのメッシュあたり5,000本以上の放射束を射出すればほぼ正確な形態係数が得られることが報告されていることから、本研究では射出放射束を10,000本とし、本手法を採用した。

注2) ここで引用したモンテカルロ法による形態係数の結果は、原山らによる解析（表1 No.8～11）[1)]については本報と同条件で行われている[文13)]。近藤らによる解析（表1 No.1～7）の詳細については文献12を参照。

注3) Sakakibara[文14)]による天空率算出法は、次式で表される。

$$F_{gsky} = 1 - F_{gw} = 1 - 2 \times \frac{1}{2}\left[1 - \frac{h}{\sqrt{h^2 + w^2}}\right] \tag{15}$$

また、Martilli et al.[文5)]による天空率算出法は、次式で表される。

$$F_{gsky} = 1 - F_{gw} = 1 - 2 \times f_{nrm}(h,d,w)\frac{w}{h} \tag{16}$$

$$f_{nrm}(a,b,c) = \left(\frac{1}{\pi Y}\right)\left(\frac{1}{4}\left(\ln\left(\frac{(1+X^2)(1+Y^2)}{1+Z}\right) + Y^2\ln\left(\frac{Y^2(1+Z)}{Z(1+Y^2)}\right) + X^2\ln\left(\frac{X^2(1+Z)}{Z(1+X^2)}\right)\right) + Y\tan^{-1}\left(\frac{1}{Y}\right) + X\tan^{-1}\left(\frac{1}{X}\right) - \sqrt{Z}\tan^{-1}\left(\frac{1}{\sqrt{Z}}\right)\right) \tag{17}$$

［w：建物間隔[m]、h：建物高さ[m]、d：ストリートキャニオンの奥行（メッシュの大きさに等しい。ここでは2000とした）[m]
a, b, c：引数、$X = a/b$, $Y = c/b$, $Z = X^2+Y^2$］

注4) モンテカルロ法による形態係数の算出では、各面要素内から一様に放射束を放出させるため、一様乱数を用いて放出点を決定している。対して提案する簡易手法では、各面要素の中心の1点で算出された値で代表させているという差異がある点に注意する必要がある。

注5) Kusaka et al.[文4)]による日陰の長さは、次式で表される。

$$l_{shadow} = \min\left(h\tan\theta_z \sin\theta_n, w\right) \tag{17}$$

［w：建物間隔[m]、h：建物高さ[m]、θ_z：太陽高度、θ_n：太陽方位角θ_{sun}とキャニオンの方位θ_{can}が成す角（ここではキャニオンの方位は東西方向と仮定）］

注6) 本報では、夏季晴天日を大手町で日照時間が10時間を越えた日と定義し、1996～2005年の各年の7月下旬と8月上旬から選出した。上記条件に該当する日数は計43日であった。

注7) 本報で用いた建物現況データでは、練馬のAMeDAS観測点が位置する1km×1kmに存する建物4,013棟を建物構造別で分類すると、耐火構造1,128棟（28%）、木構造2,885棟（72%）であった。

注8) 本モデルでは、日陰は建物に起因するもののみ取り扱っており、植生や他の地物による日陰の影響は考慮していない点に注意されたい。なお、短波放射に関しては植生による吸収を考慮している[文1)]。

注9 MRTの算出は、図4に示すように建物間隔の中心部分で算出している。しかし実際の都市においてその部分は、一般的には車道の中心であり、その様な位置で放射環境の解析を行うことの是非については議論の余地が残されている。しかし本報では、メッシュ内で空間平均された値を取り扱うメソスケールモデルの特質に合わせ、交差点中心のA点と建物の間に位置するB点（図4）を代表点とすることで、メッシュ内の平均的なMRTの値としている。

注10) 屋外環境の人体の温熱環境評価には、SET*が広く使われている。しかしSET*は静謐な室内環境で用いることを前提に開発されたため、屋外環境に用いることに対して数々の指摘がなされている[文19, 20)]。また、屋外環境の温熱環境評価指標であるPET（Physiological Equivalent Temperature）、熱中症の指標であるWBGT（Wet Bulb Globe Temperature）、室内の作業環境の評価指標であるPHSモデル（Predicted Heat Strain Model）等、様々な指標が提案されており、指標の選定に際しては十分な検討を要する。

参考文献

1) 原山和也、大岡龍三、村上周三、吉田伸治、瀬戸島政博、近藤裕昭、都市キャノピーモデルを組み込んだメソスケールモデルによる関東地方の都市気候解析、日本建築学会環境系論文集、No.592、pp.75-82、2005.6
2) 近藤裕昭、劉発華、1次元都市キャノピーモデルによる都市の熱環境に関する研究、大気環境学会誌、33（3）、pp.179-192、1998.5
3) 足永靖信、ヴ タンカ、空間平均処理を施した3次元都市キャノピーモデルの開発 都市建築計画における都市気候予測システムの開発 その2、日本建築学会環境系論文集、No.586、pp.45-52、2004.12
4) Kusaka, H., H. Kondo, Y. Kikegawa and F. Kimura, A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multi-layer and slab models, Boundary-Layer Meteorology, Vol.101, No.3, pp.329-358, 2001.12
5) Martilli, A., A. Clappier and M.T. Rotach, An urban surface exchange parameterization for mesoscale models, Boundary-Layer Meteorology, Vol.104,

No.2, pp.261-304, 2002.8
6) 大森敏明、梁禎訓、加藤信介、村上周三、大規模・複雑形状に対応する対流・放射連成シミュレーション用放射伝熱解析法の開発　第1報　モンテカルロ法をベースとした高精度放射伝熱解析法、空気調和・衛生工学会論文集、No.88、pp.103-113、2003.1
7) 金相璡、村上周三、持田灯、大岡龍三、艾勇強、数値気候モデルによる関東地方の都市気候解析（その1）建物のalbedoを増加させた場合の変化、日本建築学会学術講演梗概集D-1、pp.881-882、1999.9
8) 中村泰人、建築都市空間内の人体に対する熱放射場の表現方法について、日本建築学会計画系論文報告集、No.376、1987.6
9) 東京都都市計画局総合計画部、東京都都市計画地理情報システム、平成8･9年度土地利用現況および建物用途現況、1998.10
10) 吉田伸治、村上周三、持田灯、大岡龍三、富永禎秀、金相璡、対流・放射・湿気輸送を連成した屋外環境解析に基づく緑化の効果の分析、日本建築学会計画系論文集、No.529、pp.77-84、2000.3
11) E. R. G. Eckert et al., Heat and Mass Transfer, McGraw-Hill, 1959
12) 近藤明、山口克人、前田健太郎、田村直道、都市キャノピー内の放射量の算定方法と放射量が温度分布に及ぼす影響、大気環境学会誌、33（5）、pp.306-321、1998.9
13) 原山和也、大岡龍三、村上周三、吉田伸治、瀬戸島政博、近藤裕昭、都市キャノピーモデルを組み込んだメソスケール気候モデルの開発（その1）都市キャノピーモデルの基本構成、日本建築学会学術講演会梗概集D-1、pp.655-656、2004.8
14) Sakakibara, Y., A numerical study of the effect of urban geometry upon the surface energy budget, Atmospheric Environment, Vol.30, No.3, pp.487-496, 1996.2
15) Mellor, G.L. and T. Yamada, Development of a Turbulence Closure Model for Geophysical Fluid Problems, Reviews of Geophysics and Space Physics, Vol.20, No.4, pp.851-875, 1982.11
16) 持田灯、村上周三、金相璡、近藤裕昭、島田昭男、大岡龍三、ヒートアイランド現象の解析とその対策技術の総合的評価のためのSoftware Platformの開発（その1）概念設計とPrototype Systemの構成、日本建築学会大会学術講演梗概集D-1、pp.1099-1100、2000.9
17) 川本陽一、大岡龍三、都市キャノピーモデルを組み込んだメソスケール気候モデルの開発（その4）天空率算出法の改良とメッシュ解像度の再検討、日本建築学会学術講演梗概集D-1、pp.771-772、2005.8
18) 気象庁ホームページ（http://www.data.kishou.go.jp/etrn/index.html）
19) 小野剛司、村上周三、大岡龍三、高橋岳生、大森敏明、早乙女強、屋外空間における人体表面の平均対流熱伝達率の予測式の開発-風洞実験とCFD解析による人体表面の平均対流熱伝達率の予測式の提案-、日本建築学会環境系論文集、No.601、pp9-14、2006.3
20) Sawasaki, S., R. Ooka, T. Sakoi, K. Tsuzuki and Y. Minami, Study on thermal evaluation method for hot outdoor environment, the 6th International Conference on Urban Climate, pp.221-225, 2006.6

DEVELOPMENT ASSESSMENTT TOOLS FOR URBAN CLIMATE AND HEAT ISLAND MITIGATION

Ryozo Ooka*
*Institue of Industrial Science, The University of Tokyo, Japan

Abstract

In recent years, problems concerning the urban climate – including the urban heat island effect and urban air pollution – have attracted much attention with the widespread urbanization throughout Japan. Assessment tools for urban climate are very important to understand the effective counter-measures for heat island mitigation. In this paper, various assessment tools are introduced and the future subjects are discussed.

Key words: Assessment tool, Heat Island, Urban Climate

1. INTRODUCTION

In recent years, problems concerning the urban climate – including the urban heat island effect and urban air pollution – have attracted much attention with the widespread urbanization throughout Japan. Various counter-measures for the problems of urban climate are proposed and carried out. However the effect of these counter-measures are not confirmed clearly. The assessment tools for urban climate are very important to estimate the effectiveness of these measures. In this paper, various assessment tools are introduced and the future subjects are discussed..

2. CLASSIFICATION OF ASSESSMENT TOOLS

The assessment tools for urban climate using the computer simulation can be roughly classified into the models which have been developed in the meteorological or geographical field and the models in the engineering field such as wind engineering or civil engineering. The meteorological models are also classified into the meso-scale meteorological model and the one dimensional urban canopy model. Originally the one dimensional urban canopy model has been developed as the surface sub-layer model for the meso-scale meteorological model. However, the one dimensional urban canopy model is often used independently to estimate the effect of counter measures for the urban heat island because it is very easy to deal with. As the calculation load is very small, a lot of case studies of various heat island mitigation measures can be practical. As to the meso-scale meteorological model, it is good at predicting the phenomena in the region of 100kms order (meso-scale) such as the land and sea breezes. However, the size of the mesh of the meso-scale meteorological model is about 1km even at minimum, and it is unsuitable to evaluate the pedestrian level outdoor thermal environment. On the other hand, the engineering model is usually based on three dimensional CFD (Computational Fluid Dynamics) model, and often coupled with radiation and conduction calculation. This model is good at predicting the detailed space distributions of flow, temperature, scalar field inside the complex urban area and also referred as a micro climate model. These models are used sometimes separately and sometimes simultaneously according to the targeted scale and the resolution level required. Thus, in this paper, the assessment tools are classified into three models, meso-scale meteorological model, one dimensional urban canopy model and three dimensional CFD model. The present situations and application of these models are described below.

3. METEOROLOGICAL MODEL

3.1 Meso-scale meteorological model for analysis on urban climate and urban heat island

LEE et al [1] have carried out a simulation of heat island phenomena using a meteorological model. In Japan, Kikuchi et al [2] have conducted a numerical simulation of sea breeze over Kanto plain in 1981. From then, a lot of organizations have developed their own models. For example, NCAR and Pennsylvania State University have developed MM5 (5^{th} Generation Meso-scale Model), and Colorado State University developed CSUMM (Colorado State University Meso-scale Model) and later RAMS (Regional Atmospheric Modeling System). Yamada et al have developed HOTMAC(Higher Order Turbulence Model for Atmospheric Circulation). Recently WRF (Weather Research and Forecasting model) was developed by NCAR. Many researchers of the urban climate employ these models. Table 1 shows a comparison of various meso-scale meteorological models which are used for the urban climate and heat island researches.

3.2 Application using the meso-scale meteorological model

Mochida et al [20] have analyzed the flow and temperature fields in summer in the greater Tokyo area using HOTMAC. Air and surface ground temperatures under the land use conditions of between the present situation and Edo era (about 200 years ago) were compared. Air temperature and surface temperature at the central part of Tokyo in the present situation increases by about 1 and 4 degree C respectively compared with those of Edo era. This means that the urbanization such as decrease of green area and increase of anthropogenic heat causes the progress of urban heat island. Ichinose et al [21] have evaluated the impact of anthropogenic heat and green coverage ratio on urban climate in Tokyo metropolitan area using CSUMM. The air temperature without anthropogenic heat is lower by about 1.5 degree C at 22:00 in Otemachi than that of the present situation. The air temperature in the case, where all of the study area is assumed to be grassland, is lower by about 2.5 degree C at 21:00 in Otemachi than that of the present situation. Fan et al [22] have also evaluated the impact of anthropogenic heat on urban climate of Philadelphia using MM5. Kondo, A. et al [10] have evaluated the effects of high albedo painting on the road on the urban heat island in Osaka area using OASIS. The air temperature at the pedestrian level in the case that the albedo value of the road surface is 0.45 is lower by about 0.15 degree C at 12:00 in the central part of Osaka than that in the present situation (the albedo value = 0.15). Taha [23,24] has evaluated the impacts of urban vegetation increase and albedo change on the air quality in California's South Coast Air Basin. Although the urban vegetation increase and albedo change decrease air temperature in the area, the urban vegetation increase causes more biogenic hydro-carbon emissions and high ozone concentration through photochemical reaction. Thus, Taha recommended albedo change in the view point of the air quality in the urban area. Kanda et al [25] have simulated small-scale cloud over a main street in the Tokyo metropolitan area using RAMS.

Murakami et al [26] have proposed a concept of heat balance model in which heat balance within the virtual control volume in urban space is estimated from the calculation results of the meso-scale meteorological model. This model enables quantitative consideration of various factors which form urban thermal environment.

Table 1 Comparison of various meso-scale meteorolosical models for urban climate and heat island study

NAME	Developer	Equation	Turbulence Model	Surface sublayer	Main User for Hear Island Study
LSM[3]	Tsukuba-Univ	Hydro	0 equation	Monin Obukhov	F. Kimura, H. Kusaka
AIST-MM [4]	AIST*1	Hydro	0 equation Gambo's model[19]	Monin Obukhov AIST-CM	H. Kondo, Y. Genchi, Kikegawa
Software Platform[5]	NEDO*2	Hydro	k-l two equation Mellor and Yamada[12]	Monin Obukhov urban canopy	S. Murakami, A. Mochida, R. Ooka
UCSS [6,7,8,9]	BRI*3	Non-hydro	k-ε two equation VuThanh Ca's [7,8]	urban canopy	Y. Ashie
OASIS [10,11]	Osaka-Univ.	Non-hydro optional	k-l two equation Mellor and Yamada[12]	urban canopy	D. Narumi, A. Kondo
HOTMAC[12]	YSA*4	Non-hydro optional	k-l two equation Mellor and Yamada[12]	Monin Obukhov forest canopy	S. Murakami, A. Mochida
CSUMM[13]	CSU*5	Hydro	0 equation Pielke's model	Monin Obukhov	T. Ichinose, I. Uno
RAMS[14]	CSU*5	Non-hydro optional	k-l two equation, LES optional	Monin Obukhov	M. Kanda, A. Velazques-Lozada C. Sarrat
MM5[15]	PSU*6 and NCAR	Non-hydro	k-l two equation	Monin Obukhov	A. Kondo, H. Fan
MC2[16,17]	Environment Canada	Non-hydro	0 equation	Monin Obukhov	E. Krayenhoff
WRF[18]	NCAR	Non-hydro	k-l two equation	Monin Obukhov urban canopy	H. Kusaka

*1 Advanced Institute of Science and Technology *2 New Energy Development Organization *3 Building Research Institute, Japan
*4 Yamada Science and Art Co. *5 Colorado State University *6 Pennsylvania State University

3.3 One dimensional urban canopy model

There are three kinds of surface sub-layer models for the surface boundary condition of the meso-scale meteorological model, i.e. Surface-layer scheme, Single-layer model and Multi-layer model. Here, Single-layer model and Multi-layer model is called as a canopy model. However the urban canopy model is often used independently because it is very easy to use as described above. Sometimes the urban canopy model is coupled with building energy model in order to investigate interaction between urban climate and building energy use. Table 2 shows various urban canopy models.

Table 2 Comparison of various urban canopy models for urban climate and heat island study

NAME Developer	Turbulence Model	Building Area Density	Drag Coefficient	Radiation Calculation
AIST-CM Kondo, H.[27,28]	0 equation Gambo's model[18]	$a = BP_W(z)/((B+W)^2 - B^2 P_W(z))$	Fixed value Cdrag=0.4	Kondo's model [26,27]
RAUSSSM Hagishima, A. [29]	0 equation Gambo's model[18]	$a = B/((B+W)^2 - B^2)$	Maruyama [37]	Radio City
UCSS [6,7,8,9] Ashie, Y.	k-ε two equation VuThanh Ca's [8]	$a = \sqrt{bldr}$	Fixed value	Ashie's model[6]
Kusaka, H.[30]	Simple Layer	Simple Layer	Simple Layer	Sakakibara's model [38]
SUMM Kanda, M.[31,32]	Simple Layer	Simple Layer	Simple Layer	Kanda's model[31]
Martilli, A.[33]	k-l two equation Bougeault's et al[36]	$a = 4\xi B/(B+W)^2$	Fixed Value Cdrag=0.4	Martilli's model[33]
Hiraoka, H.[34]	k-ε two equation	$a = 2B/((B+W)^2 - B^2)$	-	-
Authors [35]	k-l two equation Mellor and Yamada[12]	$a = 4B/(B+W)^2$	Fixed Value Cdrag=0.1	Kondo's model[27]

B: Building width, W: Building Interval, bldr: Building Area Ratio (Gross)

3.4 Application using the urban canopy model

Kikegawa et al [39] and Genchi [40] have evaluated the effect of heat release from air-conditioning unit of buildings in Tokyo area using AIST-CM. Three cases are conducted; the outside unit of air conditioning is placed at the roof of building (case1), or at a height of 3m from the ground (case2), heat from air conditioning system is injected into the ground (case3). The daily averaged temperatures at a height of 3m of case1,2 and 3 are 30.37, 30.99, 29.09 degree C, respectively. Thus, the treatment of heat release from air-conditioning system is very important. Hagishima et al [41] have carried out variation study as to various factors which are closely related with the urban heat island such as building density, ground coverage condition, roof and wall surface condition of buildings, kinds of air conditioning system and so on. It is clarified that the highest temperature inside the urban canopy is influenced by mainly kinds of air conditioning system, internal heat generation of the building and the ground coverage condition. Recently, the urban canopy model is sometimes coupled with the meso-scale meteorological model interactively in order to estimate the relationship between human activity and meso-scale climate. For example, please see the references [28, 35, 42, 43].

4 MICRO CLIMATE MODEL

CFD has been developed with the recent development of computational technology. Although the prediction accuracy of LES (Large Eddy Simulation) is better than that of RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) model such as the k-ε model as reported by Murakami et al [44], RANS model is still generally used because of its' easiness to deal with and

low computational load. Yoshida et al [45] proposed the prediction method for micro climate in the city blocks, which is a coupled simulation of CFD, radiation and conduction calculations. Human thermal sensation index, SET*(a new standard effective temperature) [46] is also predicted in this method. The prediction accuracy of this method was confirmed by Chen et al [47] compared with the field measurement. Mochida et al [48] have estimated the effect of increased albedo of building surface on the outdoor thermal environment. Although increased albedo of building wall decreases air temperature at the pedestrian level, SET* increases at the same level because of the excessive reflection radiation from the wall into a pedestrian. Thus, it is the advantage that micro climate model can estimate detailed spatial distribution of various quantities in human scale. Yoshida et al [49] have developed a tree plant model for three dimensional CFD calculations. Oguro et al [50] have simulated the flow and temperature fields in a complex building block area with unstructured mesh system. In this study, the cooling effect of river wind is estimated. Recently, increased computer performance enables huge CFD calculations for urban climate in several km scale with relatively fine mesh resolution of m order. For example see the references [51, 52, 53]. Some trials, which combine a meteorological model and a micro climate model, have been also carried out [5, 54].

5 Discussion and Future Subjects

As described above, various assessment tools have been proposed. These are very powerful tools to estimate the mechanism of urban heat island and the effect of the counter-measures. However, there are still some problems. Validations of the prediction accuracy of these methods are not sufficient. Thus, the application limit is not clear in the present situation. Old data such as the reference [55] is still used for the validation of meso-scale meteorological models. Especially the validation database of surface boundary layer is required. The results of the reference [56, 57, 58, 59, 60, 61]. Benchmark tests are required in order to understand the properties of various model developed. The authors have compared some radiation models in the urban canopy in the reference [62]. Surface data and GIS data for boundary conditions of these models are also required. Finally, in order to realize better urban environment, these assessment tools should evolve to design tools, which include a optimization system and a decision making process.

References

[1] Lee, R.L. and Olfe, D.B., 1974, Numerical calculations of temperature profiles over an urban heat island, Boundary-Layer Meteorology 7, pp.39-52.

[2] Kikuchi, Y., Arakawa, S., Kimura, F. and Shirasaki, K., 1981, Numerical study on the effects of mountains on the land and sea breeze circulation in the Kanto District, Journal of Meteorological Society of Japan, 59, pp.723-738

[3] Kimura, F. and Arakawa, S., 1983, A numerical experiment on the nocturnal low level jet over the Kanto plain, Journal of the Meteorological Society of Japan 61, pp.848-878

[4] Kondo, H., 1995, Thermally induced local wind and surface inversion over the Kanto plainon calm winter nights, Journal of Applied Meteorology 34, pp.1439-1448

[5] Murakami. S, Mochida, A., Kim, S., Ooka, R., Yoshida, S., Kondo.S., Genchi, Y. and Shimada, A., 2000, Software Platform for the total analysis of wind climate and urban heat island, -integration of CWE simulations from human scale to urban scale-, Computational Wind Engineering 2000, pp. 23-26

[6] Ashie, Y., Vu Thanh, C, and Asaeda, T., 1999, Building canopy model for the analysis of urban climate, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 81, pp.237-248

[7] Vu Thanh CA, Ashie, Y. and Asaeda, T., 2000, Development of the urban climate simulation system for urban and architectural planning part1, Turbulence modeling of urban atmospheric boundary layer (in Japanese), J. Archi. Plann. Environ. Eng., AIJ, No.536, pp. 95-99

[8] Vu Thanh CA, Ashie, Y. and Asaeda, T., 2002, A k–ε Turbulence Closure Model for the Atmospheric Boundary Layer including Urban Canopy, Boundary-Layer Meteorology 102, pp.459–490

[9] Ashie, Y. and Vu Thanh CA, 2004, Development of the urban climate simulation system for urban and architectural planning part 2, Developing a three-dimensional urban canopy model by space averageing method (in Japanese), J. Archi. Plann. Environ. Eng., AIJ, No.586, pp. 45-51

[10] Oh, E., Kondo, A., Yamaguchi, K. and Mizuma, K., 2000, Transactions of the society of heating, air-conditioning and sanitary engineers of Japan (in Japanese), No.76, pp.29-39

[11] Kondo, A., Goda, E., Mizuma, K. and Kaga, A. and Yamaguchi, K., 2001, Prediction of micro climate change in developed area of a few km2 scale by numeri cal method (in Japanese), Transactions of the society of heating, air-conditioning and sanitary engineers of Japan 83, pp.1-10

[12] Yamada, T. and Bunker, S., 1988, Development of a nested grid, second moment turbulence closure model and application to the 1982 ASCOT Brush Creek data simulation, Journal of Applied Meteorology 27, pp.562-578

[13] Pielke, R.A., 1974, A three-dimensional numerical model of the sea breezes over south Florida, Monthly Weather Review 102, pp. 115-134

[14] Pielke, R.A., Cotton, W.R., Walko, R.L., Tremback, C.J., Lyons, W.A., Grasso, L.D., Nicolls, M.E., Moran, M.D., Wesley, Lee, T.J. and Copeland, 1992, A comprehensive meteorological modeling system -RAMS, Meteorol. Atmos. Phys. 49, pp. 69-91

[15] Grell, G., Dudhia, J., Satuffer, D., 1994, A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5), NCAR/TN-398 +STR, NCAR Technical Note, National Center for Atmospheric Sciences, Boulder, CO.

[16] Laprise, R., 1995, The formulation of Andre Robert's MC2 (Mesoscale Compressible Community) model, Atmos.-Ocean, 35, pp. 195-220

[17] Benoit, R., Desagne, M., Pellerin, P., Pellerin, S. , Chartier, Y. and Desjardins, S., 1997, The Canadian MC2: A semi-Lagragian, semi-implicit widebend atmospheric model suited for finescale process studies and simulation, Monthly Weather Review 125, pp.2382-2415

[18] Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D.M., Wan, W. And Powers, J.G., 2005, A description of the advanced research WRF version2, NCAR/TN-468 +STR, NCAR Technical Note, National Center for Atmospheric Sciences, Boulder, CO.

[19] Gambo, K., 1978, Notes on the turbulence closure model for atmospheric boundary layers, Journal of the Meteorological Society of Japan 56, pp. 466-480

[20] Mochida, A., Murakami, S., Ooka, R. and Kim, S., 1999, CFD study on urban climate in Tokyo, -effects of urbanization on climatic change- , 10th International Conference on Wind Engineering, Copenhagen, Denmark.

[21] Ichinose, T. , Shimodozono, K. and Hanaki, K., 1999, Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo, Atmospheric Environment 33, pp.3897-3909

[22] Fan, H. and Sailor, Modeling the impacts of anthropogenic heating on the urban climate of Philadelphia: a comparison of implements in two PBL schemes, Atmospheric Environment 39, pp.73-84, 2005

[23] Taha, H., 1996, Modeling impacts of increased urban vegetation on ozone air quality in the south coast air basin, Atmospheric Environment 30, pp.3423-3430

[24] Taha, H., 1997, Modeling impacts of large-scale albedo changes on ozone air quality in the south coast air basin, Atmospheric Environment 31, pp.1667-1676

[25] Kanda, M., Inoue, Y. and Uno, I., 2001, Numerical study on cloud lines over an urban street in Tokyo, Boundary-Layer Meteorology 98, pp.251-273

[26] Murakami, S., Mochida, A., Ooka, R., Yoshida, S., Yoshino, H., Sasaki, K., and Harayama, K., 2003, Evaluation of the Impacts of Urban Tree Planting in Tokyo Based on Heat Balance Model, 11th International Conference on Wind Engineering, Texas, USA

[27] Kondo, H. and Liu, Fa-Hua, 1998, A study on the urban thermal environment obtained through one-dimensional urban canopy model (in Japanese). J. Japan Soc. Atmos. Environ. 83, pp.179-192
[28] Kondo, H., Genchi, Y., Kikegawa, Y., Ohashi, Y., Yoshikado, H. and Komiyama, H., 2005, Development of a multi-layer urban canopy model for the analysis of energy consumption in a big city: Structure of the urban canopy model and its basic performance, Boundary-Layer Meteorology 116, pp. 395-421
[29] Hagishima, A., Tanimoto, J., Katayama, T. and Ohara, K., 2001, An organic analysis for quantitative estimation of heat island by the revised architecture urban soil simultaneous part1, Theoretical frame of the model and results of standard solutions (in Japanese), J. Archi. Plann. Environ. Eng., AIJ, No.550, pp.79-86.
[30] Kusaka, H., Kondo, H., Kikegawa, Y. and Kimura, F., 2001, A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: comparison with multilayer and slab models, Boundary-Layer Meteorology 101, pp. 329-358
[31] Kanda, M. , Kawai, T. and Nakagawa, K., 2005, Simple theoretical radiation scheme for regular building array, Boundary-Layer Meteorology 114, pp. 71-90
[32] Kanda, M. , Kawai, T., Kanega, M., Moriwaki, R., Narita, K. and Hagishima, A., 2005, Simple energy balance model for regular building array, Boundary-Layer Meteorology 116, pp. 423-443
[33] Martilli A., Clappier, A., and Rotach, M.W., 2002, An urban surface exchange parameterization for mesoscale models, Boundary-Layer Meteorology 104, pp. 261-304
[34] Hiraoka, H., Maruyama, T., Nakamura, Y. and Katsura, J., 1989, A study on modelling of turbulent flows within plant and urban canopies, Formalization of turbulence model (in Japanese), J. Archi. Plann. Environ. Eng., AIJ, No.406, pp.1-9
[35] Ooka, R., Harayama, K. , Murakami, S., and Kondo, H., 2004, Study on urban heat islands in Tokyo metropolitan area using a meteorological mesoscale model incorporating an urban canopy model, Fifth Symposium on the Urban Environment, 9.15, Vancouver
[36] Bougealt, P. and Lacarrere, P., 1989, Parameterisation of Orography-Induced Turbulence in a Mesobeta-Scale Model', Monthly Weather Review 117, pp.1872–1890.
[37] Maruyama, T., 1991, Numerical simulation of turbulent boundary layer over complicated surfaces such as urban areas (in Japanese), Journal of Wind Engineering, 47, pp.81-82
[38] Sakakibara, Y., 1995, A numerical study of the effect of urban geometry upon the surface energy budget, Atmospheric Environment 30, pp. 487-496
[39] Kikegawa, Y., Genchi, Y., Yoshikado, H. and Kondo, H.,2001, Development of a numerical simulation toward comprehensive assessments of urban warming countermeasures including their impacts upon the urban buildings energy demands (in Japanese), Energy and Resources, vol.22, pp.235-240
[40] Genchi, Y., 2001, New countermeasures for mitigating the heatisland effect – district heat supply systems, underground thermal energy storage, systems using underground as a heat sink – (in Japanese), Energy and Resources, vol.22, pp.306-315
[41] Hagishima, A., Tanimoto, J., Katayama, T. and Ohara, K., 2002, An Organic, An organic analysis for quantitative estimation of heat island by the revised architecture urban soil simultaneous part2, Quantitative analysis based on a series of numerical experiments (in Japanese), J. Archi. Plann. Environ. Eng., AIJ, No.553, pp.91-98.
[42] Narumi, D., Otani, F., Kondo, A., Shimoda, Y. and Mizuno, M., 2002, Analysis of countermeasure for mitigating heat islands phenomena using a numerical model part1 Effect of anthropogenic waste heat upon urban thermal environment(in Japanese), J. Archi. Plann. Environ. Eng., AIJ, No.562, pp.97-104.
[43] Kusaka, H. and Kimura, F., 2004, Coupling a single-layer urban canopy model with a simple atmospheric model: Impact on urban heat island simulation for an idealized case, Journal of Meteorological Society of Japan 82, pp. 67-80
[44] Murakami, S., Mochida, A. and Hayashi, Y., 1990, Examining the $k\varepsilon$ model by means of a wind tunnel test and large-eddy simulation of the turbulence structure around a cube, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 35, pp.87-100
[45] Yoshida, S., Murakami, S., Ooka, R.,Mochida, A., Tominaga, Y., 2000, CFD prediction of thermal comfort in microscale wind climate, Abstracts of papers presented at the 3rd International Symposium on Computational Wind Engineering, 27-30.
[46] Gagge, A.P., Fobelets, A.P. Berglund, P.E., 1986, A Standard Predictive Index of Human Response to The Thermal Environment, ASHRAE Transactions, vol.92-1, pp.709-731
[47] Chen, H., Ooka, R., Harayama, K., Kato, S., Li, X., 2004, Study on outdoor thermal environment of apartment block in Shenzhen, China with coupled simulation of convection, radiation and conduction, Energy and Buildings, 36, pp.1247-1258
[48] Mochida, A., Yoshino, H., Murakami, S., Yoshida, S., Oba, M. and Sasaki, K., 2001, Numerical study on effects of increased albedo for building surface on outdoor thermal comfort, Summaries of technical papers of annual meeting, architectural institute of Japan, D-1, pp. 923-924
[49] Yoshida, S., Ooka, R., Mochida, A., Murakami, S. And Tominaga, Y., 2006, Development of Three Dimensional Plant Canopy Model for Numerical Simulation of Outdoor Thermal Environment, 6th International Conference for Urban Climate (submitted)
[50] Oguro, M., Murakami, S., Morikawa, Y., Mochida, A., Ashie, Y., Ooka, R., Yoshida, S. and Ono, K., 2002, A study on design methodology for outdoor thermal environment based on CFD analysis, – Analysis of the effect of wind from rivers on outdoor thermal environment – (in Japanese), AIJ Journal of technology and design 16, pp. 185-190
[51] Ashie, Y., Yoon, S. and Kono, T., 2004, CFD analysis of temperatures and air flows in an urban area by a highly parallel vector supercomputer system - Case study of the area of five square kilometers in Tokyo region (in Japanese), Technical Papers of Annual Meeting, The Society of Heating, Air Conditioning and Sanitary Engineers of Japan, pp. 1035-1038
[52] Coirier, W.J. and Kim, S., 2006, Summary of CFD-URBAN results in support of the Madison square garden and urban dispersion program field test, 86th AMS Annual Meeting, Sixth Symposium on Urban Environment, Atlanta, J5.5
[53] Camelli, F.E., Hanna, S.R., and Lohner, R., 2006, FEFLO CFD model study of flow and dispersion as influenced by tall buildings in New York city, 86th AMS Annual Meeting, Sixth Symposium on Urban Environment, Atlanta, J5.7
[54] Yamada, T., 2006, Numerical simulations of urban heat islands and transport and dispersion of airborne materials around building clusters, 86th AMS Annual Meeting, Sixth Symposium on Urban Environment, Atlanta, J3.5
[55] Clarke, R.H., et al., 1971, The Wangara experiment: Boundary layer data. Tech. Paper. 19, Div. Meteor. Phys. CSIRO, Australia
[56] Uehara, K., Murakami, S., Oikawa, S. and Wakamatsu, S., 2000, Wind tunnel experiments on how thermal stratification affects flow in and above urban street canyons, Journal of Atmospheric Environment 34, pp. 1553-1562
[57] Christen, A., Bernhofer, C., Parlow, E., Rotach, M. and Vogt, R., 2003, Partitioning of turbulent fluxes over different urban surfaces, Proceedings of 5th International Conference for Urban Climate, pp.285-288
[58] Moriwaki, R., Kanda, M. and Kimoto, Y., 2003, A field experiment on how atmospheric stability affects vertical profiles of momentum and heat fluxes in an urban surface layer, Proceedings of 5th International Conference for Urban Climate, pp.297-300
[59] Offerle, B., Grimmond, S., Fortuniak, K., Oke, T.,2003, Temporal variability in heat fluxes over a northern European downtown. Proceedings of 5th International Conference for Urban Climate, pp.301-304
[60] Rotach, M., Christen, A., and Vogt, R., 2003, Profiles of turbulence statistics in the urban roughness sublayer with special emphasis to dispersion modelling, Proceedings of 5th International Conference for Urban Climate, pp.309-312
[61] Mutoh, J. and Narita, K., 2005, Field experiments of energy exchange process in an urban canopy layer using scale model (part1), Outline of experiments and the measurements of transfer velocity by water evaporation method at each type of surface.
[62] Kawamoto, Y. and Ooka, R., 2006, Analysis of the radiation field at pedestrian level using a meso-scale meteorological model incorporating the urban canopy model, 6th International Conference for Urban Climate (submitted)

VALIDATION AND APPLICATION OF CFD MODELING FOR PREDICTING TRAFFIC INDUCED AIR POLLUTION IN A COMPLEX URBAN AREA

J5.4

Hong HUANG*, Ryozo OOKA, Shinsuke KATO, Taifeng JIANG,
Takeo TAKAHASHI, Takeaki WATANABE
Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Japan

1. INTRODUCTION

During the last several decades, a great many urban areas throughout the world have experienced significant growth in terms of urbanization and industrial activities. Such urban development, accompanied with increase in population and housing density, reduction of land resource and growth of transportation load, has given negative effect on human health and resulted in various environmental problems. Among these, urban air pollution is causing serious concern. Meanwhile, the public's rapidly growing awareness of life quality and sustainable resource planning and management makes the control of air pollution an urgent task in urban environmental engineering nowadays.

Urban air pollution involves physical and chemical processes and depends on the total emissions, transport and transformation phenomena in the atmosphere. In this discipline, urban wind environment is essential to determine the pollutants dispersion characteristics under meteorological conditions. Traditional approaches to investigating wind effects on buildings and structures in both the past and present days have employed flow visualization and measurement using scaled models in meteorological or environmental wind tunnels. Full-scale field survey are sometimes carried out to provide data for wind loading on buildings and structures for to determine the characteristics of atmospheric wind which is needed to simulate the natural wind in wind tunnels (Kim 1999). Accompanying the revolutionary progress in numerical modeling and radical improvements in computational capacity, the application of CFD technique began to play an important role in urban climate engineering. It allows assessing the wind environment around a specified area even if the objective is only described on a blueprint. It also enables pollution dispersion characteristics to be scrutinized without real observation. However, there are several difficulties involving the practical use of CFD in urban terrain due to the sophistication of the geometrical topography, violent fluctuations of meteorological conditions and traffic load. Nevertheless, CFD methods are expected to give satisfactory results in terms of environmental issues, such as pedestrian level winds and dispersion of pollutants. On the other hand, it is thought that atmospheric stability conditions play a significant role in the dispersion of traffic generated pollutants (Nakamura et al, 1988; Kim et al, 2001; Vardoulakis et al, 2003; Huang et al, 2005).

In this paper, CFD simulation is validated by a field survey in a complex urban area, and the effect of atmospheric stability on the dispersion of the pollutants has been analyzed.

2. CFD MODEL DESCRIPTION

Air flow in urban environment issue is generally assumed to be three-dimensional and incompressible. As is already well known, the base of CFD is the Navier-Stokes (NS) equation set, expressed for turbulent flows in terms of suitably-averaged velocities and pressures to make them amenable to numerical solution without excessive computing overheads. The conventional and still most widely-used approach is time averaging, also described as Reynolds averaging, in which the NS equations are transformed as the Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) set (Gosman 1999). Moreover, the approach of the standard k-ε model(Launder and Spalding 1974), which is widely and practically useful, is adopted for solutions. Although the standard k-ε model shows some problem in the prediction of the wake phenomenon around buildings, such as the overestimate of turbulent kinetic energy around windward corner (Murakami et al, 1988), it stills has a good reputation for reliability in the field of wind engineering (Murakami, 1990) and air pollutant diffusion analysis (Huang et al. 2000). The effect of

* *Corresponding author address:* Hong Huang,
Institute of Industrial Science, The University of Tokyo,
4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo, 153-8505, Japan
email: hhong@iis.u-tokyo.ac.jp

Table 1 Governing equations

Continuity equation

$$\frac{\partial\langle u_i\rangle}{\partial x_i}=0 \tag{1}$$

Momentum equation

$$\frac{\partial\langle u_i\rangle}{\partial t}+\frac{\partial\langle u_i\rangle\langle u_j\rangle}{\partial x_j}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial\langle p\rangle}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\nu(\frac{\partial\langle u_i\rangle}{\partial x_j}+\frac{\partial\langle u_j\rangle}{\partial x_i})-\langle u_i'u_j'\rangle\right)-g_i\beta\left(\langle\theta\rangle-\theta_0\right) \tag{2}$$

Temperature transport equation

$$\frac{\partial\langle\theta\rangle}{\partial t}+\frac{\partial\langle u_i\rangle\langle\theta\rangle}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\alpha\frac{\partial\langle\theta\rangle}{\partial x_i}-\langle u_i'\theta'\rangle\right) \tag{3}$$

Species transport equation

$$\frac{\partial\langle C_i\rangle}{\partial t}+\frac{\partial\langle u_i\rangle\langle C_i\rangle}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(D\frac{\partial\langle C_i\rangle}{\partial x_i}-\langle u_i'C_i'\rangle\right) \tag{4}$$

Turbulent energy transport equation

$$\frac{\partial k}{\partial t}+\frac{\partial\langle u_j\rangle k}{\partial x_j}=P_k+G_k+D_k-\varepsilon \tag{5}$$

Turbulent dissipation rate equation

$$\frac{\partial\varepsilon}{\partial t}+\frac{\partial\langle u_j\rangle\varepsilon}{\partial x_j}=D_\varepsilon+\frac{\varepsilon}{k}\left(C_{\varepsilon1}P_k+C_{\varepsilon3}G_k-C_{\varepsilon2}\varepsilon\right) \tag{6}$$

$$-\langle u_i'u_j'\rangle=\nu_t\left(\frac{\partial\langle u_i\rangle}{\partial x_j}+\frac{\partial\langle u_j\rangle}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}k\delta_{ij} \tag{7}$$

$$\nu_t=C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon} \tag{8}$$

$$-\langle u_i'\theta'\rangle=\frac{\nu_t}{\sigma_\theta}\frac{\partial\langle\theta\rangle}{\partial x_i} \tag{9}$$

$$-\langle u_i'C_i'\rangle=\frac{\nu_t}{\sigma_w}\frac{\partial\langle C_i\rangle}{\partial x_i} \tag{10}$$

$$P_k=-\langle u_i'u_j'\rangle\frac{\partial\langle u_i\rangle}{\partial x_j} \tag{11}$$

$$G_k=-g_i\beta\langle u_i'\theta'\rangle \tag{12}$$

$$D_k=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\nu_t}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x_j}\right) \tag{13}$$

$$D_\varepsilon=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right) \tag{14}$$

$\sigma_k=1.0,\quad \sigma_\varepsilon=1.3,\quad \sigma_\theta=0.9,\quad \sigma_w=0.9,$

$C_{\varepsilon1}=1.44,\quad C_{\varepsilon2}=1.92,\quad C_{\varepsilon3}:1.44(G_k>0);0(G_k<0)$

buoyancy is considered using the Boussinesq approximation, and the extra terms (Gk in Table 1) in the k and equations are introduced to allow for the production of turbulence due to buoyancy and the effect of thermal stratification on the turbulence dissipation rate. The equations governing the mass and momentum transportation of wind flow are shown in Table 1 as Equations (1) ~ (14).

3. OUTLINE OF COMPUTATION

3.1 Topography Configuration of Objective Domain

Kawasaki city is between Yokohama and Tokyo city, in the Kanto region of Japan. It is well known as being a center for heavy industry and has been developed as an extent urbanized region, as illustrated in Fig. 1. The buildings here are of various geometrical configurations and functions, such as residential houses, commercial offices, shopping centers, heavy industrial facilities. All of these building blocks are seemingly integrated to form a big congregation. Intensive human and industrial activities in this area generate heavy transportation load and raise the concern of air pollution induced by traffic road. In addition, house colony with excessive density narrow the width of street canyons and give negative effect on pollutants dispersion more or less.

The analysis objective in this study is a small part of Kawasaki city, which is shown as the square region enclosed by black broken line in Fig. 1. It covers a

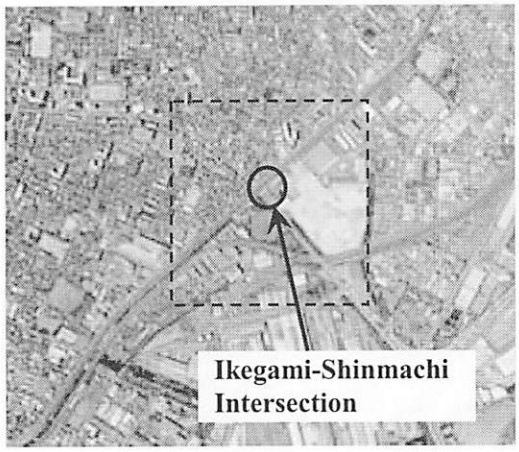


Fig. 1 Objective domain in Kawasaki city

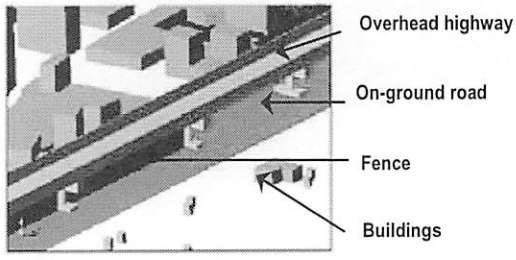


Fig. 2 Geometric Configuration near the Ikegami-Shinmachi Intersection

large scale of width 920m×800m and 70m in height. The Ikegami-Shinmachi intersection is the center of the analysis domain, through out which a SW-NE direction trunk road and an elevated expressway –the Capital Expressway run throughout. The trunk road lies on ground while expressway flies over at height of 8m. There are also several pieces of fence installed under part of the expressway. Fig. 2 shows the geometric configuration for all building elements near the intersection. The objective is densely populated residential area, most of which is covered by two-storey houses of about 4~5m height. It can be concerned that the topography in the domain is considerably sophisticated.

3.2 Mesh Discretization

In such a complex urban area, the use of an unstructured grid is effective means of conducting a CFD simulation (Huang et al. 2005). The official geographical data of analysis objective provided by Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Japan, was employed to set up the geometric frame for mesh discretization. Narrow gaps between real buildings have been modified manually to save on excessive meshes, which only incur additional computational expense.

In this calculation, an unstructured grid system including 2,969,130 meshes was created. The smallest width is about 1.0m near the expressway and intersection.

3.3 Meteorological Condition and Pollutant Intensity

A field survey was carried out on 1st, February ~ 3rd, February, 2005. The measurements were taken at 17 points at 20-minute intervals from 8:45 to 15:05. Pollutant emission rate from vehicular transportation was estimated by investigating the traffic load via a video recording taken from a pedestrian bridge. The main pollutants considered in this study are carbon monoxide (CO) and nitrogen monoxide (NO). The meteorological data used was provided by Kawasaki city observation station.

Since the objective domain is mainly for residential use, only the trunk road and overhead expressway in the SW-NE direction were taken as the sources for pollutants with constant emission intensity during the calculation. Furthermore, it was also assumed that hardly any of the pollutants emitted from the vehicles on the elevated expressway would reach pedestrian level, and thus only the ground level trunk road was considered as an exhaust source (Takahashi et al. 2005).

During simulation in this study, four cases were conducted under the conditions associated with that of

Table 2 Pollutant emission intensity

Case Definition		Predicted emission rate			
		CO[g/m*h]		NO[g/m*h]	
		UP*1	DOWN*2	UP	DOWN
case1	10:45-11:05	2.79	2.26	1.41	1.16
case2	12:45-13:05	2.95	1.81	1.20	0.96
case3	12:45-13:05	3.12	2.04	1.39	0.97
case4	14:45-15:05	3.09	2.10	1.40	0.89

*1 Towards Tokyo City (Northeast)

*2 Towards Yokohama City (Southwest)

Table 3 Meteorological conditions

Case Definition		Meteorological Condition	
		Velocity[m/s]	Wind Direction
case1	10:45-11:05	3.7	W
case2	12:45-13:05	2.7	NW
case3	13:45-14:05	1.9	WNW
case4	14:45-15:05	0.9	SSE

Table 4 Simulation cases for the effect of the atmospheric stability

Case	Atmospheric condition	Inflow air temperature	Ground and wall temperature
case1-1	Stable	10°C	5°C
case1-2	Unstable	30°C	40°C

Table 5 Analysis condition

Turbulent model	Standard k-ε model
Difference scheme	Second order upwind
Inlet	$U = U_0 \cdot (Z / Z_0)^{1/4}, Z_0 = 16m$ $k = 1.5 \cdot (I \times U)^2, I = 0.1$ $\varepsilon = C_\mu \cdot k^{3/2} / l$ $l = 4(C_\mu \cdot k)^{1/2} Z_0^{1/4} Z^{3/4} / U_0$ (Murakami et al 1988)
Side, sky	Free slip
Wall	Generalized logarithmic law

field survey (2nd, Feb, 2005). The meteorological conditions and pollutants emission intensity are listed out in Table 2 and Table 3, respectively. Here, the thermal effect is not considered, so the atmospheric stability is neutral condition. In order to evaluate the effect of atmospheric stability, the selected stable and unstable conditions shown in Table 4 are simulated. The other conditions are the same as case1 in Table 2

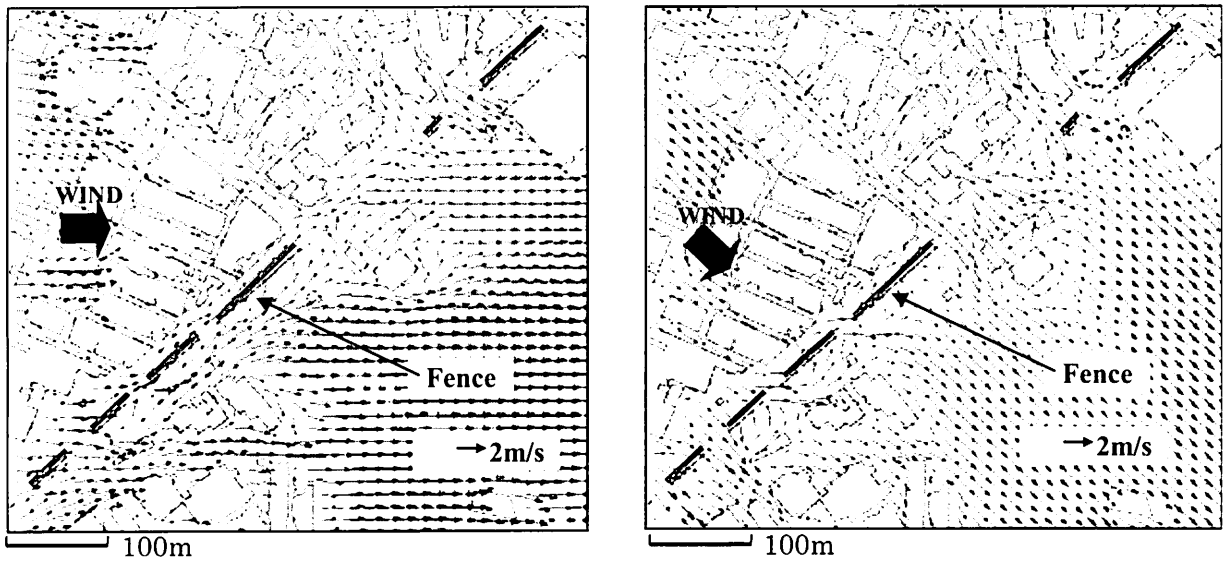
Table 5 shows the analysis conditions. In the equation for calculating the inlet wind velocity profile, U_0 and Z_0 are velocity and height at the representative point. Meteorological data offered by the observation station was surveyed at about 16m height above from ground, thus Z_0=16m. The 'constant flux layer' assumption was adopted to generate turbulent energy k and dissipation rate ε of the inlet boundary. The turbulent intensity 'I' was set to be 10% of the representative velocity –U_0.

CFD simulation was performed using a commercial code - STAR CD. The principle of discretization is obtained by using first-order upwind scheme for the convection term. The pressure and velocity coupling is achieved by the SIMPLE algorithm.

4. RESULT DISCUSSION

4.1 Average Wind Distribution

Fig. 3 presents the CFD simulation results of the wind velocity distribution at a horizontal section of 1.5m height around Ikegagmi-Shinmachi intersection for case1 and case2. In the case of western wind (Fig. 3(a), case1), the average wind velocity in bulk area is about 2.0m/s, while in building colony, it decreases significantly even to a lower magnitude, because of the blocking effect produced by buildings to wind flow. The similar situation appears in case2. In case2 (Fig. 3(b)), where the wind blows in a NW direction, it is parallel with the street canyon. Wind maintains a high velocity as it is flowing until meeting obstacles near the intersection. In the area around orphan buildings, circulation flow occurs in leeward region. Both in case1 and case2, the fences orient against the wind direction, and thus probably produce a greater sheltered area. A low velocity can be observed in the region behind these fences. Since the fences locate right on line source of pollutants, it is likely that such pollutants stagnate and conduce high concentration



(a) (b)

Fig. 3 Velocity vector distribution: a - case1; b – case2

here.

4.2 Pollutants Dispersion Characteristics

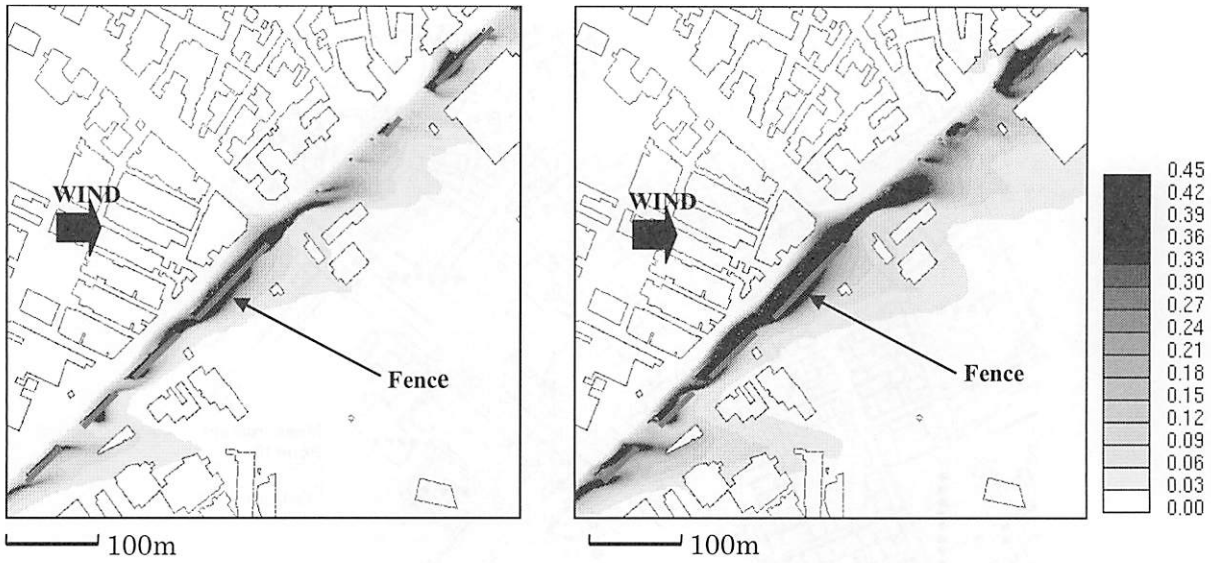
Fig. 4 and Fig. 5 present the pollutants dispersion characteristic under meteorological condition of case1 and case2. Pollutants are first emitted from the traffic road, then transport away with wind flow and disperse in the air. In both case1 and case2, the concentration of both NO and CO are nearly zero in the upstream regions. Contrarily, great range of the downstream area is covered with NO and CO. It should be noted that the concentrations in some upstream areas near the fences appear non-zero concentration because the circulation flow takes place here and transports the pollutants in windward direction. It is illustrated clearly that the concentration of NO and CO in the areas near the emission source-traffic road, are significantly higher than that of any other areas. Concentration decreases gradually as the distance away from trunk road increases in leeward region. In case1, concentration of NO and CO in the downstream place 100m away from the source is 0.03ppm and 0.06ppm, while in case2 0ppm and 0.06ppm. Moreover, the concentrations in the regions behind fences are averagely high due to the low wind velocity and poor ventilation status. Comparatively, in the gaps between two fences where wind can flows through, concentrations are averagely lower. In each case, the emission intensity of CO is about twice that of NO. Accordingly, the average concentration of CO is reasonably greater than NO concentration.

From the discussion above, it is clear that the phenomenon of serious pollution in urban areas depends not only on the escalating emission intensity induced by traffic load, but also result from the unfavorable wind environmental conditions. The fences installed under the expressway obstacle wind flow and cause contaminants to accumulate nearby, which results in excessive pollution problems.

4.3 Validation and the Effect of Atmospheric Stability

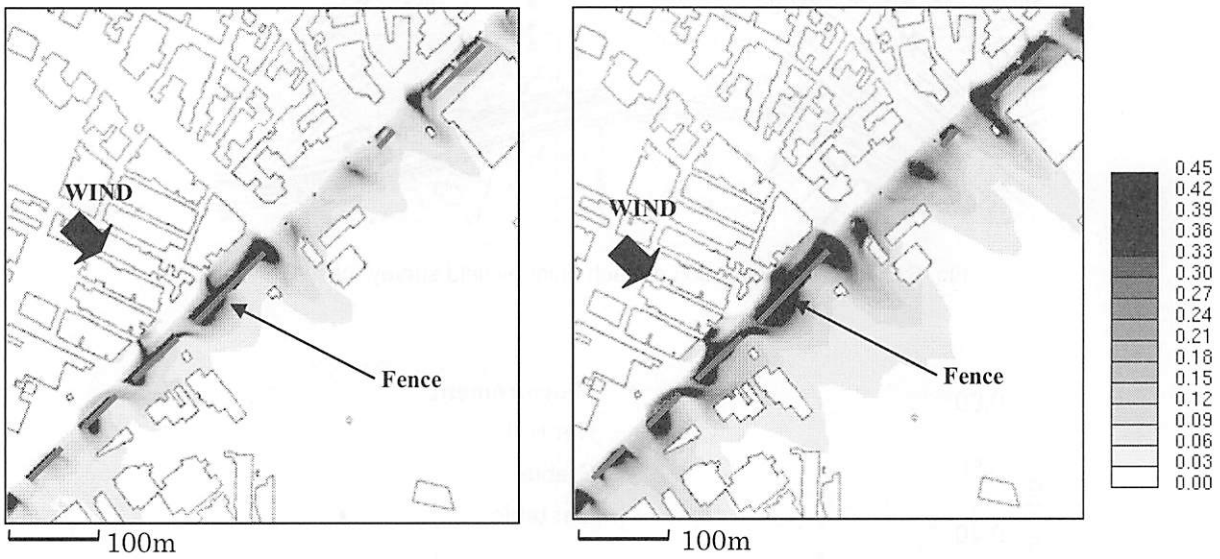
Comparing the numerical simulation with the survey data is performed here. The field survey was carried out by measuring the concentrations of NO and CO at the specified points (Nos. 3~ 17), as shown in Fig. 6. During the survey process, not only were the southwest-northeast oriented roads the emission sources, but pollutant exhaust also includes numerous other components, such as roads in other directions. Therefore, it is appropriate to consider the measurement results of the concentration in the upstream area as the background concentration. Here, the background values in case1 are 0.006ppm and 1.15ppm for NO and CO respectively.

The concentrations of NO at each point in case1 (Neutral condition), case1-1 (Stable condition) and case1-2 (Unstable condition) in the CFD simulation and field survey are presented in Fig. 7. It can be seen that there is little difference between neutral condition and stable condition. Therefore, the stable condition is a weak stable condition. Agreement between the case1, case1-1 and field survey results can be seen. Though some disagreement in concentration can be observed at Points 6, 7 and 15, it is considered acceptable from several points.



(a) (b)

Fig. 4 Pollutants concentration in case1 (ppm): a – NO; b – CO



(a) (b)

Fig. 5 Pollutants concentration in case2 (ppm): a – NO; b – CO

The disagreement can be explained as following: there is another trunk road running in SE-NW direction lies within the objective domain, which was not set as a pollutant source in the calculation. Since points 7, 8 and 15 are all very close to that road, it is entirely reasonable to observe a higher concentration in the survey data than the simulation result.

The effect of atmospheric stability on pollutant dispersion can be also known from the Fig. 7. The concentration is the lowest under unstable condition, while it is the highest under stable condition. This is because that the convective mixing is increased under the unstable atmosphere.

5. CONCLUSIONS

In this research, CFD simulation has been carried out to study the air pollutants in a built-up area in Kawasaki city, Japan. The meteorological conditions and pollutant emission intensity associated with that of a field survey was utilized.

The simulation results show the velocity distribution and pollutants dispersion characteristic at pedestrian level. The wind velocity in the buildings colony with high density is averagely very low, which is detrimental to pollutants dispersion. Furthermore, it is known that the regions behind fences are subject to much higher levels of pollutants because of the low local velocity and circulation flow which prevents pollutants from

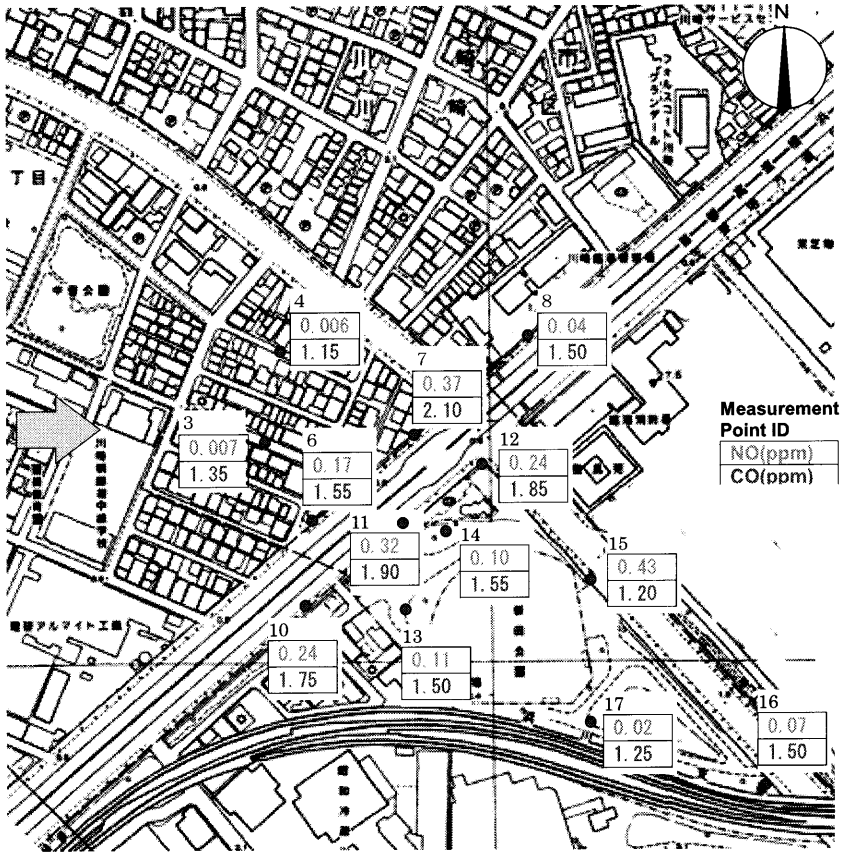


Fig. 6 CO/NO concentration at each point by field survey (case1)

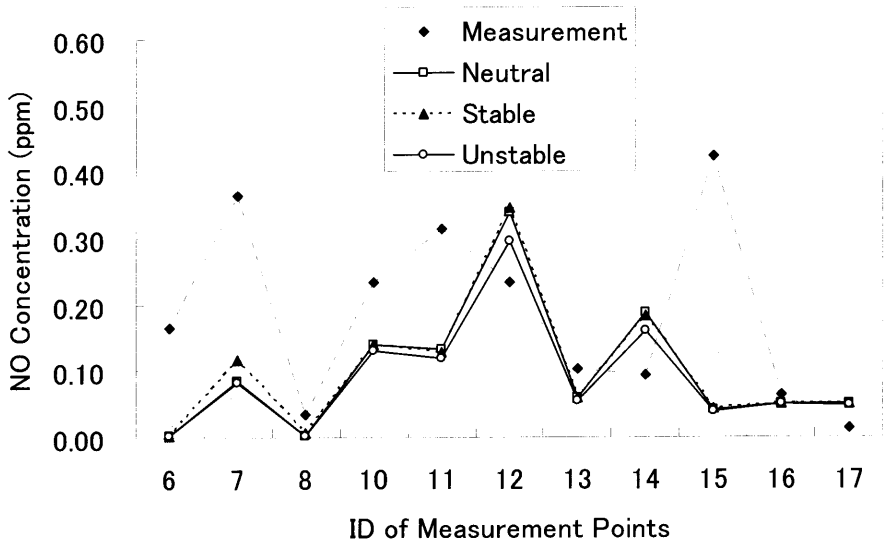


Fig. 7 Comparative study of simulation result and measurement data (NO)

escaping.

The accuracy of the CFD simulation is studied by comparing its results with field survey data. The results show good agreement, thus proving that the CFD method is highly competent in handling complex urban air pollution issues. The effect of atmospheric stability was analyzed. The concentration is the lowest under unstable condition due to the convective mixing, while there is little difference between the neutral condition and stable condition.

References

Huang, H., Akutsu, Y., Arai, M. and Tamura, M., 2000: A two-dimensional air quality model in an urban street canyon: evaluation and sensitivity analysis. *Atmos. Environ.,* 34, 689-698.

Huang, H., Ooka, R. and Kato, S., 2005: Urban thermal environment measurements and numerical simulation for an actual complex urban area covering a large district heating and cooling system in summer, *Atmos. Environ.*, 39, 6362-6375, 2005.

Kim, J. and Baik, J., 2001: Urban street-canyon flows with bottom heating. *Atmos. Environ.*, 35, 3395-3404.

Kim, S.E., 1999: Application of CFD to environmental flows. *J. Wind and Ind. Aerodyn.*, 81, 145-158.

Gosman, A. D., 1999: Developments in CFD for industrial and environmental applications in wind engineering. *J. Wind and Ind. Aerodyn.*, 81, 21-39.

Launder, B.E. and Spalding, D.B., 1974: The numerical computation of turbulent flows. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 3, 269-289.

Nakamura, Y. and Oke, T. R., 1988: Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon. *Atmos. Environ.*, 22, (12), 2691-2700.

Takahashi, T., Kato S., Ooka, R., Kono, R. and Watanabe, T., 2005: Prediction of Pollutant Dispersion Caused by Automotive Exhaust- A Comparison between Field Measurements and Wind Tunnel Data. *The Sixth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, Submitted, Seoul, Korea,* Sep. 12-14, Korea.

Murakami, S., 1990: Numerical simulation of turbulent flow field around cubic model current status and applications of k-ε model and LES, *J. Wind and Ind. Aerodyn.*, 33, 139-152.

Murakami, S., Mochida, A. and Hayashi, Y., 1988: Modification of production terms in k-ε Model to remove overestimate of k value around windward corner. *10th Wind Engineering Symposium*, 199-204. (In Japanese)

Vardoulakis, S., Fisher, B. E. A., Pericleous, K., and Gonzalez-Flesca, N., 2003: Modeling air quality in street canyons: a review. *Atmos. Environ.*, 37, 155-182.

APPLICATION OF A COUPLED SIMULATION METHOD FOR PREDICTING FIRE SPREAD IN A MODELED URBAN AREA

TAIFENG JIANG
Graduate School, the University of Tokyo, Japan
HONG HUANG, RYOZO OOKA
Institute of Industrial Science, the University of Tokyo, Japan
tfjiang@iis.u-tokyo.ac.jp

ABSTRACT

Research into fire spread dynamics in built-up districts under certain meteorological conditions is of critical importance to fire safety issues. The objective of this paper is to apply an approached coupled simulation method for the prediction of urban fire growth and spread by combining a one-dimensional wood pyrolysis model, gaseous combustion model, with computational fluid dynamics (CFD) method. In this research, the application of the coupled method is conducted on basis of al CFD code and divided into four sequential steps, which is also elaborated in this paper. As well, the calculation over a modeled urban area under certain assumed meteorological condition has been carried out to analyze the feasibility of the method. The simulation results illustrate detailed temperature and concentration distribution as well as the heat transfer characteristics on the wall surface via both convection and radiation. The phenomena of fire spread within the objective domain are also reproduced.

1. INTRODUCTION

Fire is arguably one of the most complex phenomena, embracing as it does in many cases subsonic chemical reaction flows, fluid dynamics, combustion, kinetics, radiation, and multi-phase flow (Novozhilov, 2001). Companying with the revolutionary progress in CFD modeling and radical improvements in computation capacity over the last several decades, simulations of the fire dynamic have advanced significantly in terms of the algorithms for combustion physics and mathematical modeling across almost all respects related to fire phenomena. In order to minimize the life and property loss caused by fire accidents, especially large scale fires occur in urban districts with dense populations and building, the simulation of fire behavior is of great interest and critical importance to fire safety issues. As early as the 1950s, researches into fire had been already developed as a science. However, because of its complexity, fire simulations were still a long way off and required great effort. Di Blasi (1993) developed a

theoretical model to study the effect of gas flow on the spreading flames, while Quintiere (1981) proposed a semi-empirical method. In terms of the essential importance of burning wood and other cellulosic materials, Kung (1972) has made significant contribution in developing a wood pyrolysis model. Recently, the CFD method was also undertaken for a temporal study of flame propagation and fire growth in indoor fires in order to closer approximate reality. Yan (1996) has analyzed flame propagation over surface lining material in an indoor corner fire by means of CFD. Three-dimensional transient turbulent gas flow, combustion, heat transfer, and pyrolysis of a charring material were all taken into consideration. However, that study is still in its preliminary stage, and restricted to compartmental fires.

This paper aims to extend the simulation of fire growth and spread from indoor scale to urban districts, which are apparently larger in scale and complexity of geometrical configuration. In this research, a one-dimensional wood pyrolysis model is proposed to be utilized and coupled with a CFD code. The method is introduced and as well a trial case in a modeled urban area is carried out.

2. URBAN FIRE SPREAD MECHANISM

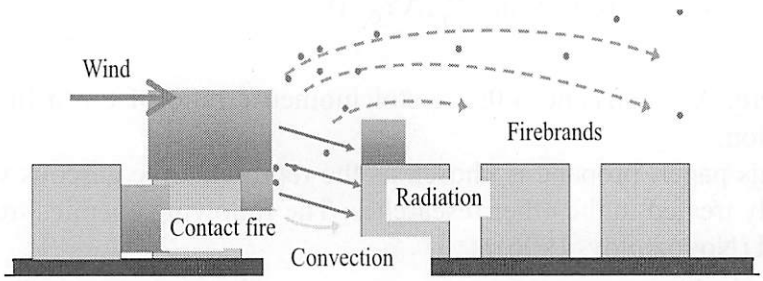


Figure 1: Illustration of urban fire spread

The mechanism for urban fire spread phenomena can be roughly divided into four sequential stages as follows (Novozhilov, 2001):

1). Heating up: The building blocks' surface temperature increases as it receives the incident net radiative heat flux and convective, conductive heat flux transferred by fluid flow from an upwind high temperature region.

2). Ignition: As it continues to be heated, once the surface temperature exceeds the material's critical temperature for pyrolysis, ignition occurs. In this stage, the surface material is converted to gaseous volatiles and residual char.

3). Fire growth and spread: After ignition, the combustion of material and gaseous volatiles produces a thermal plume and exports thermal energy feedback to the surfaces of contiguous and nearby blocks. Moreover, the firebrands bringing high energy will potentially contribute to great increase of surface temperature at their landing areas. If the surface temperature reaches up to the critical temperature of pyrolysis, combustion begins. Therefore, the fire zone expands. The schematic is shown in figure 1 (Otake, 2004).

4). Decay: At this stage, since all volatile fuel is consumed, the fire gradually goes extinct.

3. DESCRIPTION OF THE MATHEMATICAL MODEL

3.1 CFD model

Both the density and temperature in the fire flame experience extreme fluctuations. Therefore, the assumption of the incompressible fluid (Boussinesq approximation) doesn't stand up, thus the plume must be considered as the compressible fluid. For this solution, the Favre-averaged (Favre, 1969) process is introduced for the mass, momentum, enthalpy, and gas species transport. Moreover, a modified k-ε model, proposed by El Tahry (1983) for compressible reciprocating engine flows, is employed.

3.2 Gaseous combustion model

Burning reaction in the gaseous phase is modeled by employing the eddy break-up model (Magunussen, 1976) here, which has already been in widespread used in fire modeling. The reaction rate is determined by the slower of the turbulence dissipation rates for either the fuel or oxygen:

$$\bar{w}_f = -\bar{r}(e/k)\min(A\tilde{Y}_f, A\tilde{Y}_{O_2}/i) \tag{1}$$

Where, A – constant, 4.0; i – stoichiometric ratio of O_2 to fuel; Y – mass fraction.

In this paper, propane is chosen as the representative gaseous volatile as generally treated in the other researches. The following chemical reaction is assumed (Novozhilov, 1996):

$$C_nH_m + (n-s+\frac{m}{4})(O_2+3.76N_2) \rightarrow sC+(n-s)CO_2+\frac{m}{2}H_2O+3.76(n-s+\frac{m}{4})N_2 \tag{2}$$

S is a parameter to define the amount of soot produced. A non-zero value results in some of the carbon remaining as soot, with a consequent reaction to CO_2. The value of s can be determined from the soot conversion factor which is chosen from experimental data; for example, 2% for propane (Yan, 1996). The soot concentration is determined from the species equation and treated as a gas-phase species.

Radiation is solved in parallel with the governing equations. The absorption and emission of gas and soot are considered. Scattering is omitted due to the small diameter of the soot. The effect on radiation intensity is represented by the following radiation transport equation:

$$\frac{dI}{ds} = -(k_g+k_s)I + \frac{\sigma}{\pi}(k_g+k_s)T^4 \tag{3}$$

where I – radiation intensity in the direction of the solid angle Ω, W/sr; s – transfer distance of the radiation flux, m; k_g, k_s – absorption coefficients for gas and soot.

The calculations for k_g and k_s are based on equation (4), which is proposed by Novozhilov (2001):

$$k_g=0.28\exp(-\frac{T}{1135}) \quad k_s=1264 f_v T \tag{4}$$

3.3 Wood pyrolysis modeling

In this research, the walls of building blocks are assumed to be wooden slabs with a constant depth of 0.20m. It is because wooden apartment still remain in widespread use by residents in modern-day Japan.

Wood pyrolysis contains varieties of phenomena related to transient conduction, incident radiation, variable properties, Arrhenius decomposition, and heat of reaction. A pyrolysis model by Kung (1972), based on partial differential equation, is employed as a simplified description of these phenomena. As described above, heat received on surfaces penetrates into the interior virgin wood along a direction normal to the surface. When the temperature in any element reaches pyrolysis temperature, ignition occurs. The decomposition rate is controlled by the Arrhenius reaction (7).

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\dot{q}_{0x} \tag{5}$$

$$\dot{q}_{0x}=-\frac{\partial\rho}{dt}Q_{pyro}+S_x \tag{6}$$

$$\frac{\partial\rho}{dt}=-\rho_w a A_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \tag{7}$$

$$a=(\rho-\rho_c)/(\rho_w-\rho_c) \tag{8}$$

$$\lambda=a\lambda_w+(1-a)\lambda_c \tag{9}$$

$$C_p=aC_{pw}+(1-a)C_{pc} \tag{10}$$

Here, Q_{pyro} – heat of pyrolysis, J/kg; S – hear source in local element except pyrolysis heat release, W/m^3; subscripts w and c denote virgin wood and char respectively. Detail properties can be referred to table 1 (Kudou, 1999).

In this modeling, three assumptions are adopted additionally:

1) Ignition temperature in considered as constant value.

2) All volatiles escape to the surface as propane and soon after are consumed in pyrolysis.

3) Pyrolysis converts the material from virgin wood to char, while residual char will not pyrolyze further.

Table 1: Material properties used.

Parameter	**Unit**	**Value**
Wood Density: ρ_w	[kg/m^3]	525.0
Wood Heat Conductivity: λ_w	[W/m/k]	0.11
Specific Heat of Wood : C_{pw}	[J/kg/k]	1300.0
Wall Thickness : σ_w	m	0.15
Char Density: ρ_c	[kg/m^3]	191.0
Char Heat conductivity : λ_c	[W/m/k]	0.07

Specific Heat of Char : C_{pc}	[J/kg/k]	1000.0
Pyrolysis Temperature : T_{pyro}	K	623.0
Reaction heat of Pyrolysis : Q_{pyro}	[J/kg]	1.8×10^{6}
Activation Energy : E	[J/mol]	1.04×10^{5}
Pre-exponential factor A_0	1/s	4.33×10^{6}

4. DESCRIPTION OF COUPLED SIMULATION METHOD

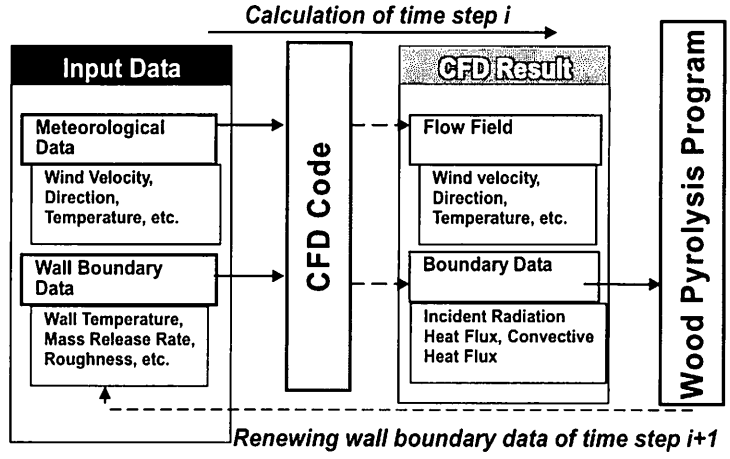


Figure 2: Algorithm of the proposed coupled simulation method

In this research, an alternative calculation is utilized for the coupled simulation. The approach is so called semi-unsteady method since CFD simulation is carried out in steady status, while wood pyrolysis in unsteady.

The calculation for each time step consists of four distinct processes.

1). First, meteorological conditions, wall temperatures, mass flux at wall et al, are read into the CFD code as initial data.

2). Steady CFD simulation is employed via a CFD code to obtain flow specifications including gas velocity, temperature, species concentration, radiant and convective heat flux to building surfaces, and surface temperatures.

3). Radiant and convective heat flux data at building surfaces are read from the CFD results and then input into the wood pyrolysis program. Calculation covers all meshes on the building surfaces as well as the interior elements arranged along the normal line according to each surface mesh. Updated surface temperatures, heat flux, propane release rates for the next time step are prepared.

4). CFD simulation for the next time step is carried out by using the boundary conditions updated by the newest data obtained from the pyrolysis routine.

In terms of such proposed semi-unsteady prediction, the time stream is divided into time steps with constant interval. Here, for example, if the time interval is set in 10 seconds, time step i+1 means 10 seconds later from time step i.

5. OUTLINE OF COMPUTATION

To specify the validation of the coupled simulation method, prediction of the fire spread with a modeled urban area was carried out. The details of the calculation are described as follows.

5.1 Calculation domain configuration

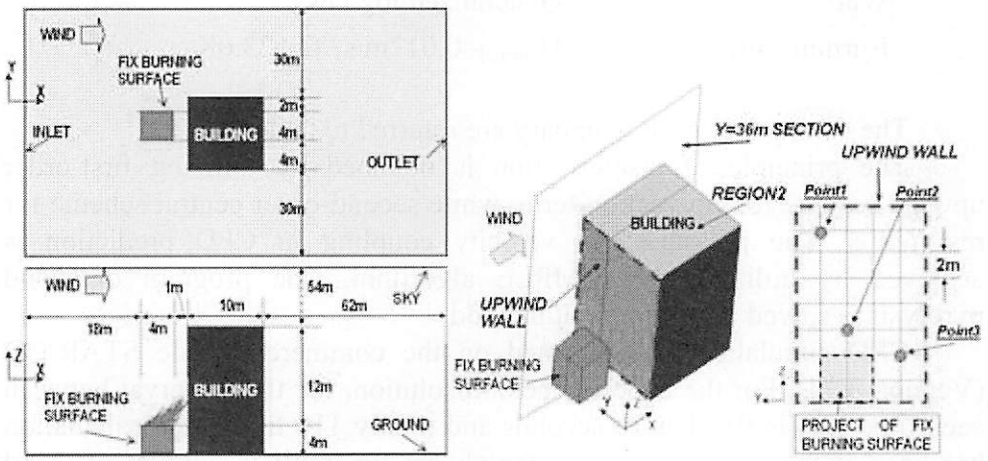


Figure3: Geometrical configuration of the modeled urban area

The whole calculation domain covers a dimension of 95m(X) × 70m(Y) × 70m(Z), in which one block in upwind location with a scale of 4m(X) × 4m(Y) × 4m(Z) is defined as fix burning surface (fire source), exhibiting a constant heat release. The block in bigger size (10m(X) × 10m(Y) × 16m(Z)) is positioned 1.0 m downstream from fire source and is treated as the prediction objective. The mesh system is in unstructured form, with a total number of 140,669. For better prediction accuracy, extruded mesh is created with a size of about 0.2m adjacent to block's surface.

For convenience of the following examination to simulation results, one Y=36m section in X-Z plane and three check points on the upwind wall of building block are defined, which can be referred to figure 3.

From previous investigations, in the case of wooden apartment fires, the average surface heat release rate is generally 1.5MW/m^2. From equation (23)(Hayashi, 2002), the surface heat release rate can be converted into the mass release rate of propane.

$$V=AQ/(\rho_{C3H8} \times Q_{C3H8}) \tag{23}$$

Where, A – area, m^2; Q – average surface heat release rate, 1.5 MW/m2; ρ_{C3H8} – density of propane, 1.9kg/m^3; Q_{C3H8} – heat of combustion of propane, 4.646×10^{7}J/kg; V– presumed propane mass release rate, m^3/s.

Hereby, the boundary condition of the fix burning surface is defined as inlet, with a constant concentration 1.0 of propane, and fix velocity along normal direction U_{normal}=0.017m/s.

5.2 Boundary settings

Table 2: Boundary conditions.

Inlet	U=2.0m/s, V=W=0.0, T=293.0K $k=1.5\times(I\times U)^{2.0}$, I=0.1 $\varepsilon=C_\mu k^{3/2}/L$, L=1.0m, C_μ=0.09
Sky, Side-boundary	Free slip wall
Wall	Generalized log law
Burning surface	U_{normal}=0.017m/s, T=623.0K

The settings for each boundary are referred to table 2.

The principle of discretization is obtained by utilizing first-order upwind scheme for convection term, while second-order central scheme for rest terms. The pressure and velocity coupling in CFD prediction is achieved by utilizing the SIMPLE algorithm. The program of wood pyrolysis is solved in full implicit method

CFD simulation is performed on the commercial code STAR-CD (Version 3.24). For the coupled method solution, the time interval between each time step is fixed at 10 seconds and totally 110 time steps calculation has been carried out. The time intervals set for implicit solution of wood pyrolysis is 0.1s.

For reasonable solution accuracy, a strict convergence criterion for residual is specified as 10^{-4}.

6. RESULT DISCUSSION

Simulation results created by supposed couple method are discussed in this part. From the investigation, feasibility of the approach to fire spread simulation for a modeled urban area is examined.

6.1 Temperature distribution

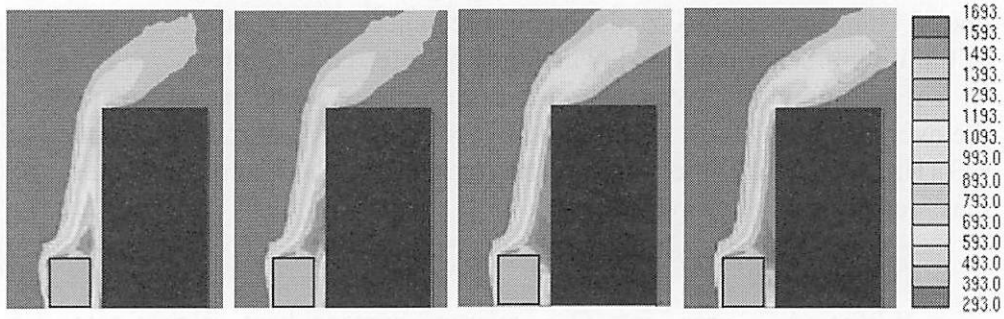


Figure4: Temperature distribution at each time step in the Y=36m section (K)

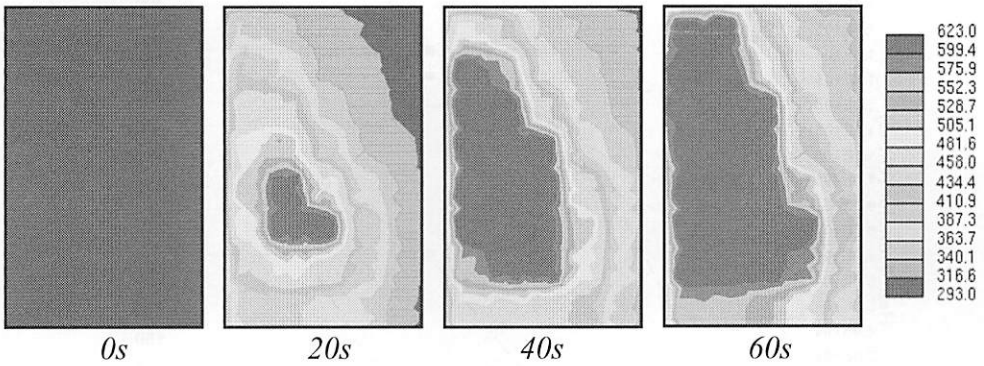


Figure5: Temperature distribution in the upwind wall (K)

The Y=36m vertical section locates in the X-Z plane along the center-line of the fire source. The temperature distributions of this section at specified time step are demonstrated in figure 4. While figure 5 shows the temperature change of the upwind wall of the building block at the same time step.

At initial stage (time = 0s), gaseous propane runs out from the fire source (fix burning source) and starts to combust immediately, thus to heat up the local air where reaction occurs. The air with extremely high temperature, appearing as fire flame, climbs up by buoyancy driven force and is suppressed and inclines to leeward region from effect of urban wind and hence embraces the upwind wall of the building block locating at the downstream area. Observing the contour figure, the temperature of the core part of flame is as high as over 1693K. Moreover, large part of the windward side and rooftop of the building are found to be covered with hot air with the temperature of over 800K. Hence, significant heat flux given from fire flame to this region can be estimated.

Examining the surface temperature change from figure 5, the fire growth in the upwind wall of the building block can be observed apparently. From 20s, the area adjacent to flame exhausted from fix burn surface has appeared began to be burning. Moreover, an expected expansion of the burning area has been reproduced from the result at 40s and 60s in Figure 5. At 40s, about 30% of the upwind wall reaches pyrolysis stage, while at 60s nearly half of the wall can be found burning.

Since material of the upwind wall began to pyrolyze and thus release propane, combustion reaction occurs at the region near to the wall. In figure 4, the temperature distribution from 20s changes as fire flame has been exhausted from the block surface in downstream area. The high temperature areas specified by red color increase gradually as time go on. At time step equals to 60s, in lower part of the gap between the two buildings, flame with high temperature air can be observed

From this discussion, the fire spread behaviors are considered to be reproduced.

6.2 Profiles at the check points

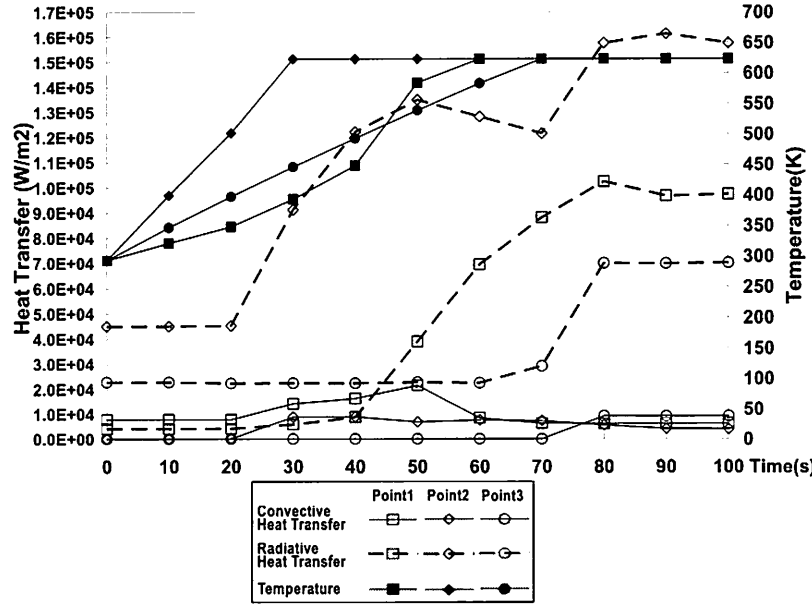


Figure6: Heat flux and surface temperature profiles at each check point.

Figure 6 illustrates the comparison of incident radiation, convective heat flux obtained in the three check points at each time step, as well as the surface temperature profile. The definition of each check point can be referred to figure 3.

Point 2 is located straightly behind the exhausting flame from fix burning surface, which results into reasonable highest heat flux get among the three points. At 20s, the heat flux obtained at point 2 is shown an intensive increase; it is because the flame begins to be exhausted from its adjacent area at this time step. Therefore, the surface temperature of point 2 climbs up quickly and reaches the pyrolysis temperature, thus ignition occurs in local area at 30s. The location of point 1 and point 3 are not right into the area embraced by flame from the fire source, the temperature change much slower than point 1.

In addition, for each check point, the incident radiation flux can be found far greater than the convective heat transfer. In case of point 1, radiation flux get various in range of 4.5×10^4~$1.6\times10^5 W/m^2$, while the convective heat flux is averagely one order smaller than it. Therefore, radiation flux given from fire source can be considered as the critical factor to cause fire spread between the buildings.

7. CONCLUSION

In this research, a coupled method is supposed for the fire spread simulation within urban district. In this approach, a combination of CFD model, combustion model, radiation model, and wood pyrolysis model, is considered. The feasibility of the method is examined by conducting validation simulation over a modeled urban area. From the prediction results, a detailed temperature distribution, either at the surface or in fluid flow, and

any other parameter data can be obtained, which proves urban fire and its spread behaviors to be reproduced.

To discuss the prediction accuracy of the coupled method in this urban fire spread simulation, a comparison between the simulation results and fire tunnel experimental data or other investigation result of the real accidents are taken into consideration in future research work.

REFERENCES

B. F. Magunussen, 1976, On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion, *Proceedings 16th Symposium (International) on Combustion*, 719-729.

Di Blasi, 1993, Modeling and simulation of combustion process of charring and non-charring solid fuels, *Prog. Energy Combust Sci*, 71-104.

EI Tahry, 1983, k-ε Equation for Compressible Reciprocating Engine Flows, *AIAA, J. Energy*, 345-353.

Favre, A., 1969, Problem of hydrodynamics and continuum mechanics, *Soc. Indust. Appl. Mech.*, 231-266.

H. C. Kung, 1972, A Mathematical Model of Wood Pyrolysis, *Combust. Flame*, 185-195.

H. Otake, 2004, Simulation of flames and thermal plume in urban fire under windy condition, *J. of Industrial Science Research, University of Tokyo*, 11-16.

Quintiere, J. G., 1981, A simplified theory for generalizing results from a radiant panel rate of flame spread apparatus, Fire Mater., 5.

V. Novozhilov, B. Moghtaderi, D. F. Fletcher and J. H. Kent, 1996, Computational fluid dynamics modeling of wood combustion, Fire Safety Journal, 69-84.

V. Novozhilov, 2001, Computational fluid dynamics modeling of compartment fires, *Prog. Energy Combust Sci*, 611-666.

Y.Kudou, H.Hayasaka, 1999, Internal temperature distribution and combustion characteristics of wood, The *36th national heat transfer symposium (in Japanese)*

Y.Hayashi, Y. Ohmiya, 2002, Study on flames and thermal plumes induced by fires under windy condition. *The 17th national symposium on wind engineering (in Japanese)*, 173-184

Yan, Z. H., 1996, CFD experimental studies of room fire growth on wall lining materials, *Fire safety journal*, 201-238.

【カテゴリーII】

日本建築学会環境系論文集　第 593 号, 1-8, 2005 年 7 月
J. Environ. Eng., AIJ, No 593, 1-8, Jul., 2005

市街地火災における火の粉の飛散の CFD 解析

CFD Analysis of Firebrands Scattering in Urban Fire

黄弘*, 大岡龍三**, 加藤信介***,
大竹宏****, 林吉彦*****

Hong HUANG, Ryozo OOKA, Shinsuke KATO,
Hiroshi OTAKE and Yoshihiko HAYASHI

In order to predict firebrands scattering in urban fire, Computation Fluid Dynamics (CFD), turbulent combustion model, radiation model and firebrand scattering model are coupled and it is verified by a fire wind tunnel experiment. The density, terminate velocity and Stokes diameters of firebrands which are necessary for the firebrand scattering model are measured. The ratio of Stokes diameter and proportionate diameter is focus on 0.2~0.7. A firebrands scattering simulation in a modeled urban area has been conducted using the coupled model and the firebrand experimental data. It is found that in urban fire when the inflow wind velocity is comparatively slow, the size of the thermal plume becomes significant, and when the inflow wind velocity is high, the thermal plume is suppressed and greatly inclines to the leeward side, which increases the risk of the fire spreading to neighboring buildings. Firebrands can be scattered over 400m. Firebrands are blown up by the thermal plume and the scattering distances are influenced by the background flow field, the magnitude of thermal plume, and the Stokes diameters of firebrands.

Keyword: *Urban Fire, CFD, Firebrands, Combustion Reaction*
市街地火災, CFD, 火の粉, 燃焼反応

1. はじめに

市街地火災において、建物間の延焼を引き起こす要因は、図 1 に示すように接炎、放射熱、熱気流、火の粉などがあげられる。特に、強風下においては、大量の火の粉が原因となって、火炎発生場所から離れた所で飛び火による延焼被害が起こる事例も多い[文 1,2]。しかしながら、火の粉は、火元建物の状態、着火形態、気象条件など、工学的にモデル化しにくい多くの不確定要因があるため、その性状や機構に関する研究が十分進められていないのが現状である。白石ら[文 3]は比較的小粒径の火の粉(1mm から 5mm の径)を気中浮遊微粒子と見なし、火の粉飛散の CFD 解析を行ったが、実際の火災においてよく観察されている粒径の大きい火の粉(≧1cm)に対しては異なる扱いが必要である。林ら[文 4]は火の粉の重力と抗力を考慮し、飛散範囲を計算し、実測調査結果と比較したが、火の粉の密度やストークス径等の流体力学的特性は明確ではない。一方、火災をシミュレーションするとき、発熱量を直接与える場合が多いが、火炎の本質を捕らえるために、燃焼反応を考慮する必要がある。燃焼反応モデルを利用した例としては、森林火災と室内火災の研究例[文 5,6]があるが、都市火災伝搬において利用した例は少ない。

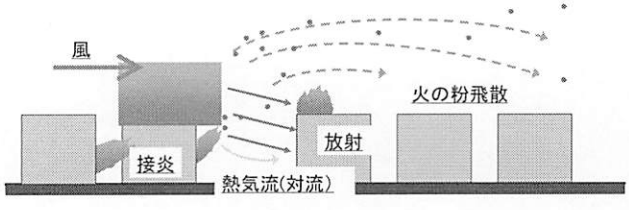


図 1　市街地火災拡大要因

本研究では、火の粉の飛散に着目し、まず、火の粉の飛散性状の解明のために必要な市街地火災時の流れ場をシミュレーションするための CFD モデル、火炎燃焼モデル、火炎放射モデルの連成および検証を行う。そして、火の粉飛散モデルの組み込み、火の粉の流体力学的特性の測定実験を行うとともに、最終的には市街地スケールにおける市街地火災および火の粉飛散シミュレーションを行い、火の粉の飛散による近隣建物への影響の評価を行う。ただし、今回の火の粉飛散のモデル化においては、特に火の粉の飛行現象に着目し、火の粉自体の燃焼時間は火の粉の飛行時間に比べ十分に長いものと想定し、飛行中には火の粉の表面温度が流体運動に及ぼす影響並びに火の粉の形状変化についてはないものと仮定した。

2. 市街地火災数値モデル

2.1 CFD モデル

火災時の気流は激しい温度差に伴い、密度も大きく変化する。そのため、主に、室内や屋外の温熱環境シミュレーションの際に用いられる非圧縮の仮定(Boussinesq 近似)を適用することはできず、圧縮性流体として取扱う必要がある。圧縮性流体に対する平均操作として、ファブル平均[文 7]を行い、乱流モデルは Tahry[文 8]が提案した圧縮往復エンジン内の燃焼過程に適応した k-ε モデルを用いている。表 1 に CFD 解析用の基礎方程式を示す。(T1)-(T6)式はそれぞれ連続式、運

* 東京大学生産技術研究所　助手・博士(工)　Research Associate, Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Dr. Eng.
** 東京大学生産技術研究所　助教授・博士(工)　Assoc. Prof., Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Dr. Eng.
*** 東京大学生産技術研究所　教授・工博　Prof., Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Dr. Eng.
**** 三菱商事株式会社　工修　Master. Eng., Mitsubishi Corporation
***** 建築研究所　上席研究員・工博　Chief Researcher, Building Research Institute, Dr.Eng.

動量保存式、エネルギー保存式、ガス成分輸送式、乱れエネルギー輸送式と散逸率輸送式である。

2.2 火炎燃焼モデル

CFD 基礎方程式を閉じるため、成分の燃焼反応速度(式(T4)の $\overline{w}_n$)を表す乱流燃焼モデルが必要になる。本研究では Magunussen [文9]が提案した Eddy Dissipation Combustion Model を使用した。このモデルでは、可燃ガス、酸素の渦が崩壊していく過程での燃焼反応速度は、二者の内最も少ないものの量に支配されると考え、

$$\overline{w}_f = -\overline{\rho}(\varepsilon/k)\min(A\widetilde{Y}_f, A\widetilde{Y}_{O_2}/i) \tag{1}$$

と表している。i は量論酸素燃料比で、A は経験定数である。建物の火災時は木材、プラスチックなど様々な物質が燃焼している。すべての燃焼を表現することは非常に困難であるが、そこで、文 10)に従い、代表としてプロパン（C_3H_8）を可燃性ガスとしてモデル化する。放射に多大な影響を与えるすすの生成メカニズムは複雑であり、十分解明されておらず、本研究では、(2)、(3)式の化学式のように 1mol の燃焼性ガスは燃焼により、s mol（s =0.02 [文11)]）のすすを生成すると仮定し、計算を行う。

$$C_3H_8 + (5-s)O_2 \rightarrow sC + (3-s)CO_2 + 4H_2O \tag{2}$$

$$C + O_2 \rightarrow CO_2 \tag{3}$$

2.3 放射モデル

放射強度の伝達式である(4)式によりガス放射およびすす放射の計算を行い、離散伝達法[文12)]を用いた。気体の吸収係数 k_g およびすすの吸収係数 k_s は(5)、(6)式から求める[文6)]。すすは非常に小さい粒子なので、散乱は省略する。

$$\frac{dI}{ds} = -(k_g + k_s)I + \frac{\sigma}{\pi}(k_g + k_s)T^4 \tag{4}$$

$$k_g = 0.28\exp\left(-\frac{T}{1135}\right) \tag{5} \qquad k_s = 1264 f_v \tag{6}$$

2.4 火の粉飛散モデル

火炎熱気流中の火の粉の挙動は固気二相流と見なすことができ、ラグランジュ方程式を用いる。火の粉の粒子に関してはストークスの抗力と重力および圧力勾配による影響を考慮して火の粉の運動方程式は(7)式で与えられる。回転について本研究においては無視し、また、1 節で述べたように火の粉自体の燃焼時間は火の粉の飛行時間に比べ十分に長いものと仮定し、飛行中には火の粉の表面温度が流体運動に及ぼす影響並びに火の粉の形状変化はないものとした。

$$m_p \frac{d\bar{u}_P}{dt} = \bar{F}_{dr} + \bar{F}_p + \bar{F}_g \tag{7}$$

$\bar{F}_g$ は重力項、$\bar{F}_p$ は粒子を取り囲む流体の加速度運動により生じた圧力勾配による力であり[文13)]、火源付近で熱プリュームが生じ、流体が加速されるため、無視できない項と考えられる。$\bar{F}_{dr}$ は抗力項である。それぞれ(8)、(9)、(10)式により与える。筆者らは三つの力のオーダーを評価した結果(詳細はページ数の関係で割愛する)、火源付近でおよそ $\bar{F}_g : \bar{F}_p : \bar{F}_{dr}$ =3 : 0.3 : 4 である。

表 1　基礎方程式

$$\frac{\partial\overline{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial(\overline{\rho}\widetilde{u}_j)}{\partial x_j} = 0 \tag{T1}$$

$$\frac{\partial(\overline{\rho}\widetilde{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{\rho}\widetilde{u}_i\widetilde{u}_j) = -\frac{\partial\overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{\tau}_{ij} - \overline{\rho}\widetilde{u_i''u_j''}) + \overline{\rho}g_i \tag{T2}$$

$$\frac{\partial(\overline{\rho}\widetilde{h})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{\rho}\widetilde{u}_j\widetilde{h}) = \frac{\partial\overline{p}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\lambda}{c_p}\frac{\partial\widetilde{h}}{\partial x_j} - \overline{\rho}\widetilde{u_j''h''} + \sum_{n=1}^{N}\overline{h}_n\overline{\rho}D_n\frac{\partial\widetilde{Y}_n}{\partial x_j}\right) + \overline{u}_j\frac{\partial\overline{p}}{\partial x_j} + \overline{\tau}_{ij}\frac{\partial\overline{u}_i}{\partial x_j} - \overline{S}_R \tag{T3}$$

$$\frac{\partial(\overline{\rho}\widetilde{Y}_n)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{\rho}\widetilde{u}_j\widetilde{Y}_n) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{\rho}D_n\frac{\partial\widetilde{Y}_n}{\partial x_j} - \overline{\rho}\widetilde{u_j''Y_n''}) + \overline{w}_n \tag{T4}$$

$$\frac{\partial(\overline{\rho}\widetilde{k})}{\partial t} + \frac{\partial(\overline{\rho}\widetilde{u}_j\widetilde{k})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}((\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k})\frac{\partial\widetilde{k}}{\partial x_j}) + \mu_t(\frac{\partial\widetilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial\widetilde{u}_j}{\partial x_i})\frac{\partial\widetilde{u}_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3}(\mu_t\frac{\partial\widetilde{u}_k}{\partial x_k} + \overline{\rho}\widetilde{k})\frac{\partial\widetilde{u}_i}{\partial x_i} - g_i\frac{\mu_t}{\sigma_h}\frac{1}{\overline{\rho}}\frac{\partial\overline{\rho}}{\partial x_i} - \overline{\rho}\widetilde{\varepsilon} \tag{T5}$$

$$\frac{\partial(\overline{\rho}\widetilde{\varepsilon})}{\partial t} + \frac{\partial(\overline{\rho}\widetilde{u}_j\widetilde{\varepsilon})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}((\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon})\frac{\partial\widetilde{\varepsilon}}{\partial x_j}) + C_{\varepsilon 1}\frac{\widetilde{\varepsilon}}{\widetilde{k}}(\mu_t(\frac{\partial\widetilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial\widetilde{u}_j}{\partial x_i})\frac{\partial\widetilde{u}_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3}(\mu_t\frac{\partial\widetilde{u}_k}{\partial x_k} + \overline{\rho}\widetilde{k})\frac{\partial\widetilde{u}_i}{\partial x_i} + C_{\varepsilon 3}\max(-g_i\frac{\mu_t}{\sigma_h}\frac{1}{\overline{\rho}}\frac{\partial\overline{\rho}}{\partial x_i}, 0)) - C_{\varepsilon 2}\overline{\rho}\frac{\widetilde{\varepsilon}^2}{\widetilde{k}} + C_{\varepsilon 4}\overline{\rho}\widetilde{\varepsilon}\frac{\partial\widetilde{u}_i}{\partial x_i} \tag{T6}$$

$$h = \sum_{n=1}^{N}Y_nh_n = \sum_{n=1}^{N}Y_n(h_{0,n} + \int_{T_0}^{T}c_{p,n}dT) \tag{T7}$$

$$\overline{\rho} = \frac{\overline{p}}{R\sum_{n=1}^{N}(\frac{\widetilde{T}\widetilde{Y}_n}{M_n})} \tag{T8}$$

$$\overline{\tau}_{ij} = \mu(\frac{\partial\overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial\overline{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\frac{\partial\overline{u}_k}{\partial x_k}\delta_{ij}) \tag{T9}$$

$$\overline{\rho}\widetilde{u_i''u_j''} = -\mu_t(\frac{\partial\widetilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial\widetilde{u}_j}{\partial x_i}) + \frac{2}{3}(\mu_t\frac{\partial\widetilde{u}_k}{\partial x_k} + \overline{\rho}\widetilde{k})\delta_{ij} \tag{T10}$$

$$\overline{\rho}\widetilde{u_j''h''} = -\frac{\mu_t}{\sigma_h}\frac{\partial\widetilde{h}}{\partial x_j} \tag{T11}$$

$$\overline{\rho}\widetilde{u_j''Y_n''} = -\frac{\mu_t}{\sigma_n}\frac{\partial\widetilde{Y}_n}{\partial x_j} \tag{T12}$$

$\sigma_k = 1.0$,　$\sigma_\varepsilon = 1.22$,　$\sigma_h = 0.7$,　$\sigma_n = 0.7$,　$C_{\varepsilon 1} = 1.44$,　$C_{\varepsilon 2} = 1.92$,　$C_{\varepsilon 3} = 1.0$,　$C_{\varepsilon 4} = -0.33$

$n = fuel, oxygen, product$

$$\vec{F}_g = V_d(\rho_p - \rho_f)\vec{g} \quad (\vec{g} = (0,0,-9,8)m/s^2) \tag{8}$$

$$\vec{F}_p = -V_d \nabla p_a \tag{9}$$

$$\vec{F}_{dr} = \frac{1}{2} C_d \rho_f A_p |\vec{u} - \vec{u}_p| (\vec{u} - \vec{u}_p) \tag{10}$$

抗力係数 C_d の値は(11)式に示す。

$$C_d = \begin{cases} 24(1 + 0.15\,\mathrm{Re}_P^{0.687})/\mathrm{Re}_P, & \mathrm{Re}_P \le 10^3 \\ 0.44 \quad , & \mathrm{Re}_P > 10^3 \end{cases} \tag{11}$$

また、粒子のレイノルズ数は(12)式により算出する。

$$Re_p = \frac{\rho_f |\vec{u} - \vec{u}_p| d_p}{\mu} \tag{12}$$

火の粉を輸送する気流速度 $\vec{u}$ は平均の速度成分に変動速度成分を加えたものとして、以下の式に与える。

$$\vec{u} = \bar{\vec{u}} + \vec{u}' \tag{13}$$

変動速度成分は以下の標準偏差 σ のガウス分布確率密度関数からランダムに選択される。

$$\sigma = \sqrt{2k/3} \tag{14}$$

$$G(\vec{u}') = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{\vec{u}'^2}{2\sigma^2}\right) \tag{15}$$

3. 市街地火災数値モデルの検証

強風時における市街地火災を想定した火災シミュレーションの正当性の確認を行うため、2.1～2.3 において示した計算モデルを用いた計算結果と屋根面の火災時の温度性状の測定を行った火災風洞実験結果[文14)]の比較を行った。

3.1 計算条件

火災風洞実験と同じ条件で計算が行えるように計算条件、解析領域および境界条件の設定を行った。表 2 に計算ケースを示す。図 2 に計算領域を示す。解析領域は X=4.5m, Y=3.3m, Z=3.0m とし、燃焼建物および周辺建物の大きさは 0.3m×0.3m×0.2m の直方体とした。実験では今回の計算より多く、縦 6 列の建物ブロックを配置していたが、一番外側の建物ブロックは燃焼面にあまり影響を及ぼさないと考えられるので、計算負荷低減のため省略し、火災風洞実験よりも小さい領域を設定した。火炎気流の CFD 計算では、差分スキームは MARS (Monotone Advection and Reconstruction Scheme、二次精度差分スキーム)[文15)]、計算アルゴリズムは SIMPLE 法[文16)]を用い、定常計算を行った。境界条件は表 3 に示す。風速と乱流強度は火災風洞実験と同じプロフィルを設定し、高さ D(=0.4m)における風速 U_D は表 3 における設定風速に等しいものとする。

3.2 計算結果

図 3 に計算された A-A' 断面の気流温度分布を示す。燃焼量の違

表 2　計算ケース

	流入風速 (高さ 0.4m)(m/s)	発熱量 (kW)
CASE1	1	15
CASE2	2	15
CASE3	1	26
CASE4	2	26

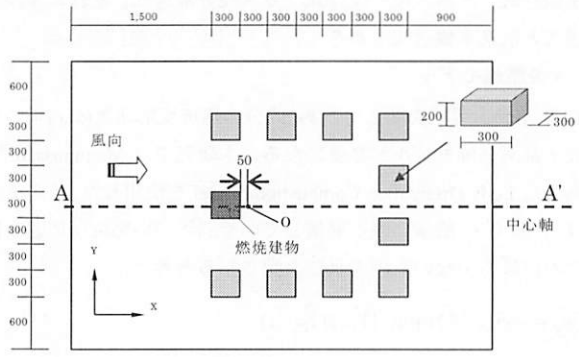
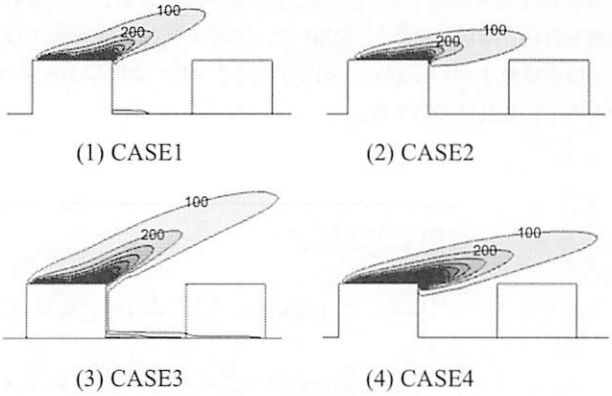


図 2　計算領域 (mm)

表 3　境界条件

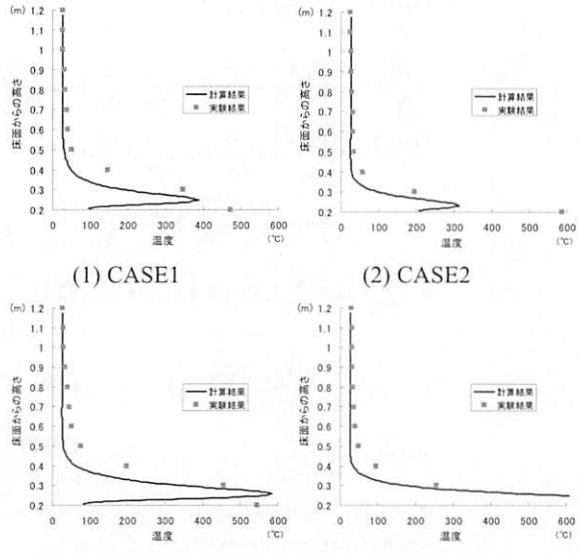
流入面	$U=U_D(z/z_0)^{1/3}$, $k(z)=1.5I^2U^2$, $\varepsilon(z)=C_\mu^{3/4}k(z)^{3/2}/l(z)$, $I=0.2-0.1z(0 \le z < 1.8)$, $I=0.02(z \ge 1.8)$ $l(z)=(4C_\mu k(z))^{1/2}D^{1/4}z^{3/4}/U_D$[文16)], T=293(K)
流出面	Free flow
壁面境界	断熱設定、速度境界は一般化対数則
燃焼面 (inlet)	W_z=0.0019m/s(Case1,Case2) W_z=0.0031m/s(Case3,Case4) I=0.05 W_z:燃焼面における垂直方向のプロパンの噴出速度



(1) CASE1　(2) CASE2

(3) CASE3　(4) CASE4

図 3　計算結果-鉛直方向温度分布(℃)



(1) CASE1　(2) CASE2

(3) CASE3　(4) CASE4

図 4　計算結果と実測結果の比較

いと流入風速の違いにより気温分布の差が生じる。火の粉の飛散は火源の影響を大きく受けるので、火源付近の予測精度の確認は非常に重要である。ここで、火源付近の実験結果と計算結果の比較を行った。また、火源から離れた領域で圧縮性が少なく、ほとんど非圧縮性となる。既往の研究により、非圧縮性流れ場の拡散現象は標準 k-ε モデルでもそこそこの予測精度が確立されていると考えられる。よって、今回は火源付近を中心に精度検証を行った。比較の詳細は文 17)を参照されたいが、ここで、図 4 に中心断面(A-A? 断面、Y=1.65m)上で火災面の中心(X=1.65m)から 0.2mX 方向にずれた地点(X=1.85m)で、高さは z=0.2～1.2m の地点(図 2 の O 点)での計算結果と実験結果の比較を示す。計算結果は実験結果とほぼ等しい結果を算出することができ、2 節で示した数値予測手法は実市街地の火災において十分適応可能であると考えられる。なお、計算結果は実験結果に比べて多少小さい数値を示したが、それは、計測の際使用した熱電対が放射熱および伝導熱を感知したため、計算結果に比べて多少大きな数値になっているためと考えられる。

4. 火の粉形状の測定

火の粉は複雑な形状(球状、棒状、板状など)をしており、また種類も様々であり、すべての形状に関して揚力および抗力の形状を評価することは非常に難しい。そこで、本研究では火の粉は球状であると仮定し、ラグランジュ方程式を使い、火の粉の飛散を計算する際の直径についてはストークス径で代表させた。ストークス径の決定は火災風洞実験 [18]で得られた特定の火の粉[注 1] の密度と終末速度の測定により行った。

4.1 火の粉の密度測定

火の粉の密度の測定を行った。今回の計測は簡易手法として液浸法を用いて算出した。20 個を対象として測定を行った。測定結果は平均 130kg/m^3(100-180kg/m^3)となった。

4.2 ストークス径の測定

(a) 実験概要

十分な高さから自由落下させた火の粉を高速カメラで測定するこ

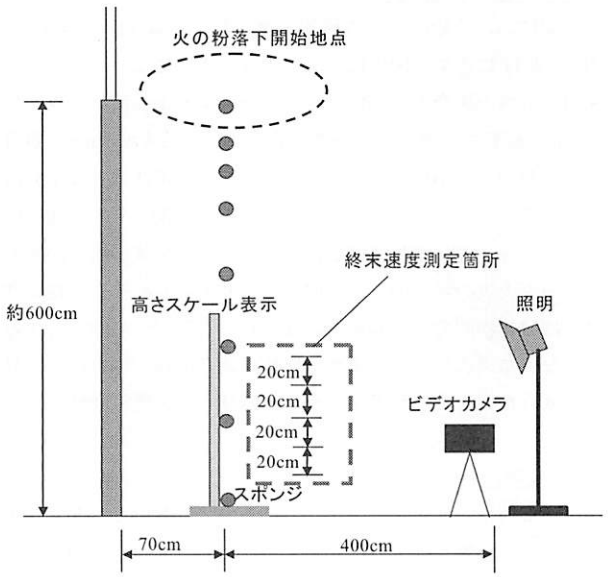


図 5　火の粉落下実験概要図

とによって各測定箇所を通過する時間を算出し、終末速度を導いた。実験概要図を図 5 に示す。測定した終末速度を元にして(16)式によってストークス径の算出[注 2]を行った。

$$D_d = \frac{1.32\rho_f v_t^2}{4g(\rho_d - \rho_f)} \tag{16}$$

(b) 測定対象

見かけ面積に応じて火の粉を 4 種類に分類した(CLASS 1～4)。分類条件および測定個数を表 4 に、測定対象火の粉の一部を図 6 に示す。CLASS2 と CLASS3 は同じ大きさの火の粉を形状の違い(球状または棒状)により分類した。CLASS3 に関しては、形状が特異であるため、測定誤差が大きいと考えられるので、2 回測定を行った。

(c) 実験結果

ストークス径の測定結果を図 7 に示す。ストークス径は 0.2～0.8 に集中している。また、火の粉が完全な球状とした場合の火の粉の直径(相当直径)[注 3]との比較結果を図 8 に示す。全てのケースにおいてストークス径相当直径比は 0.2～0.7 の間に集約した。CLASS2 と CLASS3 の結果はストークス径の違いはほとんど無かった。また、CLASS3 では CLASS2 に比べて落下地点が分散していたことより、火の粉形状の違いは鉛直方向ではなく水平方向に影響を与えることが確認できた。

以上の数値を用いて次節において実市街地スケールにおける火の粉飛散シミュレーションを行う。

5. 実市街地スケール火災数値シミュレーション

3 節において示した市街地火災シミュレーションモデルおよび 4

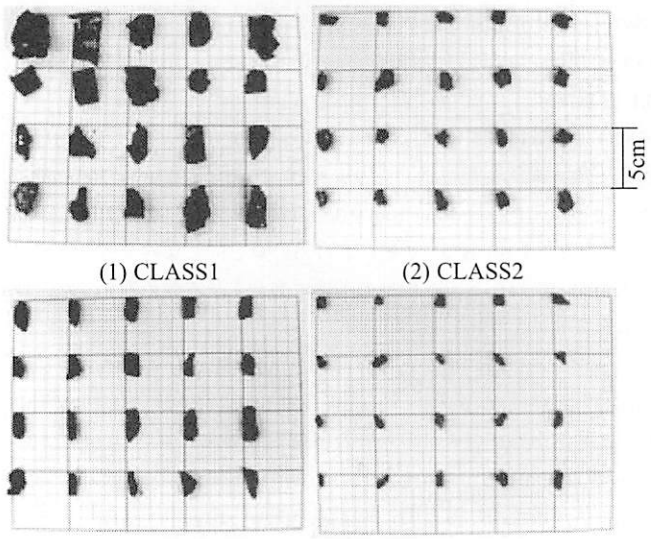


図 6　測定対象火の粉

表 4　測定対象火の粉

	見かけ面積(cm^2)	個数
CLASS1	S＞4	27
CLASS2	1≦S＜4(球状)	46
CLASS3	1≦S＜4 (棒状)	22 × 2 回
CLASS4	1 ＜S	45

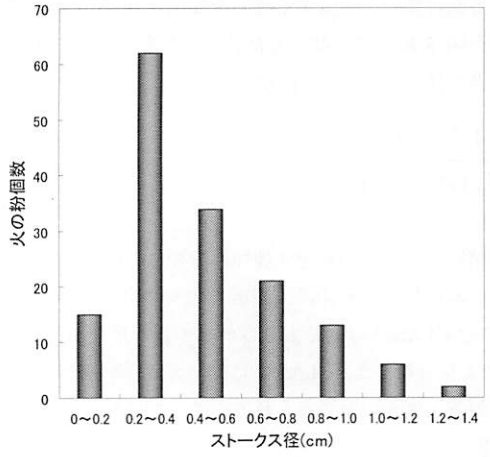


図 7 ストークス径測定結果

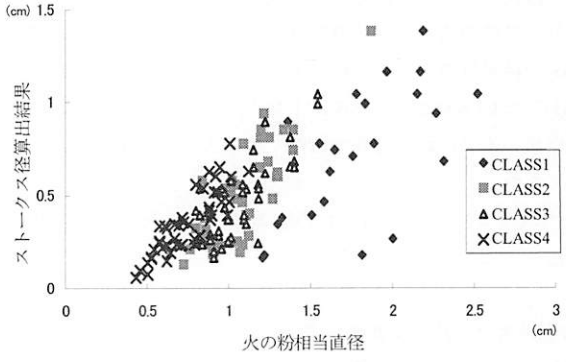


図 8 ストークス径と相当直径の比較

節の火の粉の形状測定結果を使用して、実スケールモデル街区においてシミュレーションを行う。以下にその概要を示す。

5.1 計算条件

図 9 に計算領域を示す。領域は火の粉の飛散の測定を行うため市街地下流方向に距離を長くとり、X×Y×Z＝510m×110m×200mとした。建物の大きさは 10m×10m×10m の立方体とし、建物間隔も 10mとした。境界条件は概ね、3 節における計算と同じ条件で行ったが、流入条件と燃焼面は実市街地の条件に適合させるため変更した。変更点を表 5 に示す。

計算ケースは燃焼面からの発熱量が 1.6MW/m^2[文 3)]になるように燃焼面から可燃性ガス(プロパン)を発生させた。流入風速は 1998 年に起きた和歌山県白浜温泉の大火の調査[文 1)]を参考に高さ 10m において 5m/s と 10m/s とし、1/4 乗則に従う市街地風のプロファイルを与えている。燃焼面は屋上面、風下側の側面、全焼の三つの場合を想定した。計算ケースを表 6 に示す。火の粉の飛散に関しては直径 1cm 程度の火の粉が最も多く発生する[文 19)]ことから火の粉は相当直径 1cm、ストークス径相当直径比が 0.2～0.7 の場合のケースの計算を行う。密度を一定とした。また、1 節で述べたように火の粉自体の燃焼時間は火の粉の飛行時間に比べ十分に長いものと仮定し、飛行中には火の粉の表面温度が流体運動に及ぼす影響並びに火の粉の形状変化はないものとした。発生位置から、ストークス径相当直径比が 0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 と 0.7 の火の粉を同じ発生割合で発生させた。火の粉の発生位置は燃焼面の 1m上方より水平方向に 1m間隔で格子状の点から発生するとする。初速は燃焼面に対して鉛直方向に 5m/s と設定した。

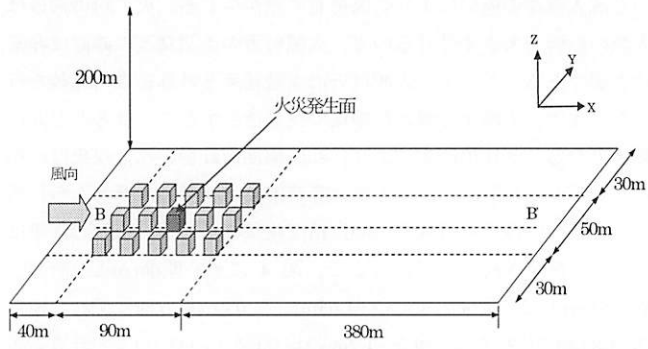


図 9 計算領域

表 5 境界条件変更点

流入面	$U=U_D(z/10)^{1/4}$, T=293(K) $\varepsilon(z)=C_\mu^{3/4}k(z)^{3/2}/l(z)$ $l(z)=(4C_\mu k(z))^{1/2}D^{1/4}z^{3/4}/U_D$ [文 18)] k:実験データ[文 18)]
燃焼面 (inlet)	燃焼面と垂直方向に 0.018m/s の噴出速度でプロパンを発生する。

表 6 計算ケース

	流入風速 (高さ 10m)(m/s)	燃焼面
CASE1	5m/s	屋上面
CASE2		風下側側壁
CASE3		全焼
CASE4	10m/s	屋上面
CASE5		風下側側壁
CASE6		全焼

5.2 計算結果

(a) 風速・風向および温度分布

中心断面における鉛直方向の風速・風向および温度(単位:K)分布を図 10 と図 11 に示す。図中に示したように火炎により上昇流が生じ、屋根面火災の場合の方が側壁火災の場合より上昇流は大きくなった。また、建物が全焼するケースにおいては、風速が 5m/s の場合のケースにおいても 10m/s のケースにおいても非常に大きな上昇流を示す結果になった。上昇流に伴う巻き込み流に関して、風速が強い場合は弱くなった。燃焼部位別に分類すると、全焼の場合が最も強く、屋根面火災の場合の方が側壁火災よりも強くなった。側壁燃焼の場合には建物間での上昇気流は強く見られるが、上空に対する影響は少ない結果になった。また、風速が比較的速い場合は、上昇気流が抑制され、火炎の傾きが大きく、隣棟への延焼危険性が高くなる。

(b) 火の粉飛散結果

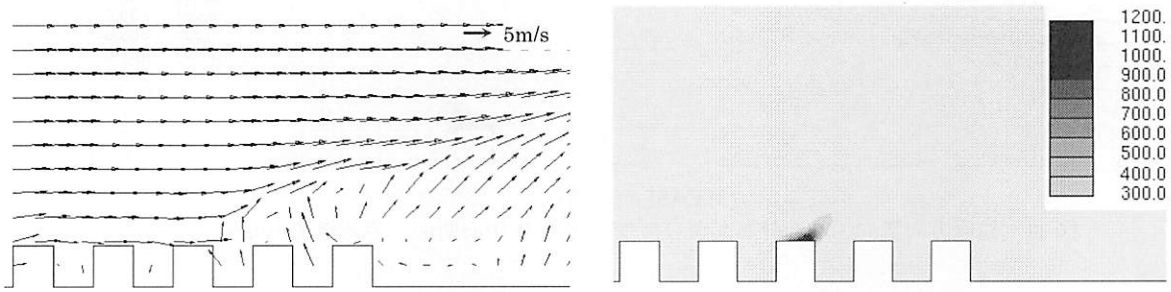
火の粉の飛散結果を図 12 に示す。どのケースにおいても非常に広範囲にわたって影響を与える結果となった。屋上面の火災の場合にはすぐ近くに落下するもの、100m 程度飛散するものと 400m以上飛

散するものに分類することができる。風速は 5m/s の時(CASE1)、ストークス径が 0.2cm の火の粉は 400m以上飛散し、0.3cm の火の粉は 100m程度飛散する火の粉が多かった。ストークス径が 0.4cm 以上の火の粉に関してはほとんどが隣接する建物に落下する結果になった。風速は 10m/s の時(CASE4)、ストークス径が 0.2cm の火の粉の一部は 400m以上飛散したが、0.3cm 以上の火の粉のほとんどは隣接建物に落下した。CASE4 では、CASE1 に比べて風速が強くなったため、上昇流が抑制され、飛散距離は全ての種類の火の粉に関して短くなった。

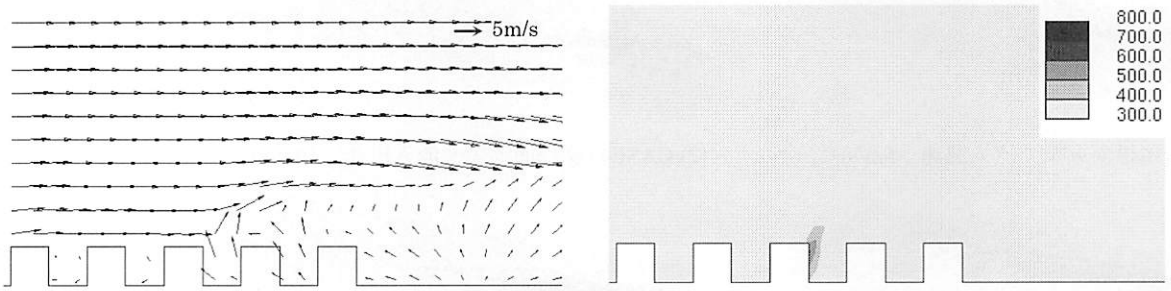
側壁面の火災の場合には、300m以内の領域に幅広く火の粉が落下した。風速は 5m/s の時(CASE1)、300m 以内の領域にまんべんなく火の粉が落下する結果になった。ストークス径が 0.2cm の火の粉は 200m程度、0.3cm の火の粉も 100m程度、0.4cm の火の粉は 50m程度飛散した。ストークス径が 0.5cm 以上の火の粉に関してはほとんどが隣接する建物に落下する結果になった。風速は 10m/s の時(CASE4)、150m 以内の領域にまんべんなく火の粉が落下する結果になった。ストークス径が 0.2cm の火の粉は 150m程度飛散し、0.3cm の火の粉も 80m程度飛散した。ストークス径が 0.4cm 以上の火の粉に関してはほとんどが隣接する建物に落下する結果になった。CASE5 では、流入風の弱い CASE2 に比べると燃焼面付近の上昇気流が弱かったために、火の粉の飛散距離は全体的に短くなった。

全焼のケースの場合には、非常に強い上昇流が起きるので、全ての大きさの火の粉が 100m以上飛散する結果になった。CASE6(風速 10m/s)は CASE3(風速 5m/s)に比べて、ストークス径の大きな火の粉は飛散距離が伸びる結果になった。これは、風速が強まったことにより上昇流が CASE3 に比べて多少弱まったが、火の粉が上昇流によって、上空に巻き上げられ、上空の市街地風に乗り、市街地風の風速が強まった分だけ飛散距離が増えたと考えられる。

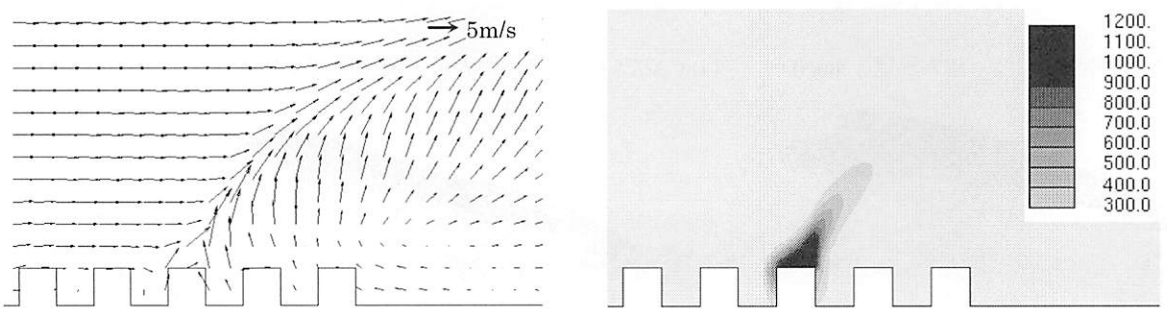
今回の火の粉のモデルでは火の粉の飛散挙動に及ぼす要因として、重力、浮力、市街地風、熱上昇流などが挙げられる。火源付近で熱上昇流による抗力と圧力勾配力が働き、それが重力よりも大きくなるため、火の粉が上空に巻き上げられる。火源から離れた領域では、上昇流が小さいのでそれによる抗力と圧力勾配力が小さくなり、重力沈降が起る。その時の市街地風並びに火の粉のストークス径によって、飛散距離が変わると考えられる。また、1998 年に起きた和歌山県白浜温泉の大火では、直径 1cm の火の粉が 400m 程度飛んだ記録があり[文1)]、今回の計算は、それと同等の結果を示すことができ、火の粉の飛散による広範囲の延焼の危険性があることを表現することができた。



(1) CASE1 (屋上面火災)

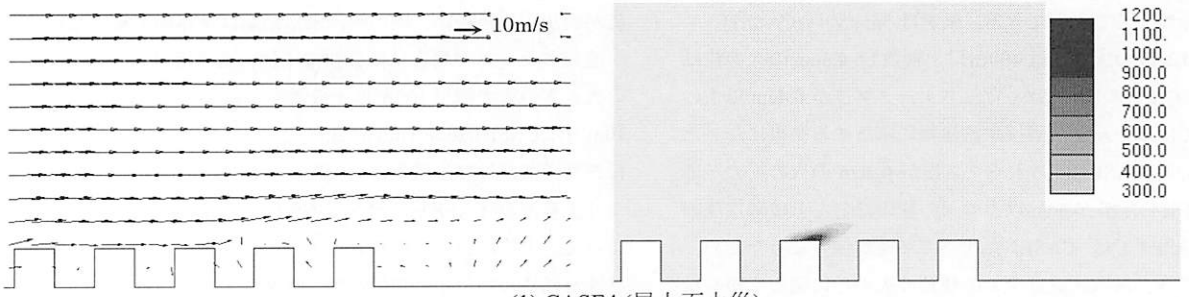


(2) CASE2 (風下側側壁火災)

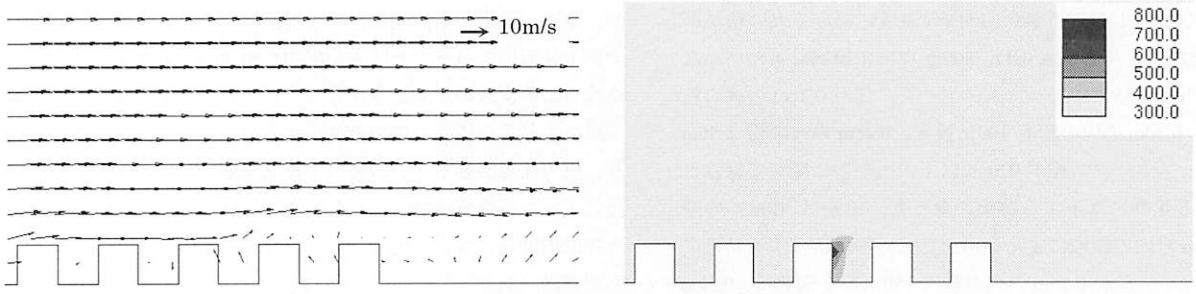


(3) CASE3 (全焼)

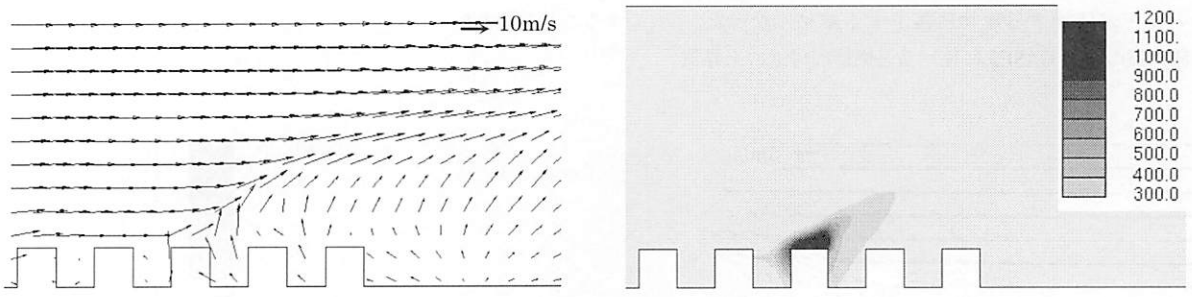
図 10　鉛直方向風向・風速分布および温度分布(B-B'中心断面、流入風速 5m/s)



(1) CASE4 (屋上面火災)

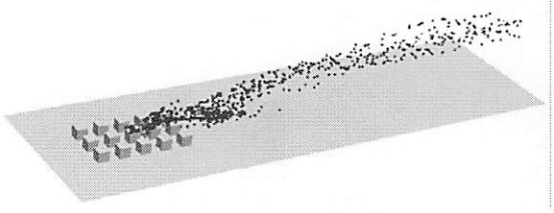


(2) CASE5 (風下側側壁火災)

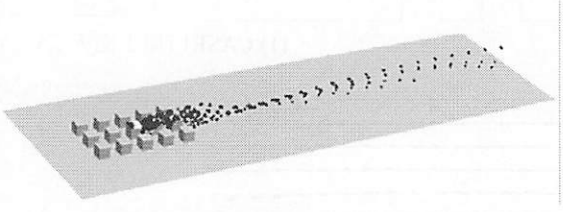


(3) CASE6 (全焼)

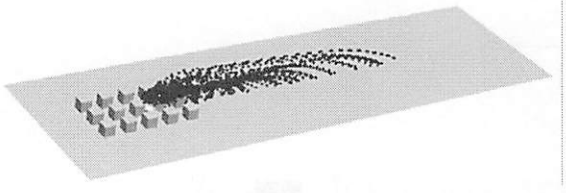
図 11　鉛直方向風向・風速分布および温度分布(B-B'中心断面、流入風速 10m/s)



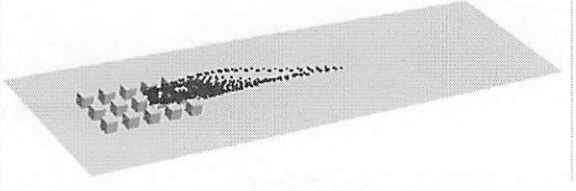
(1) CASE1 (屋根面火災、流入風速：5m/s)



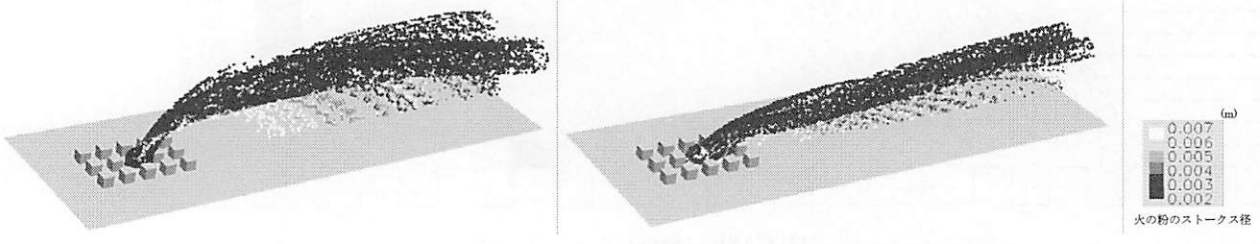
(2) CASE4 (屋根面火災、流入風速：10m/s)



(3) CASE2 (風下側側壁火災、流入風速：5m/s)



(4) CASE5 (風下側側壁火災、流入風速：10m/s)



(5) CASE3 (全焼、流入風速：5m/s)　　(6) CASE6 (全焼、流入風速：10m/s)

図 12　火の粉飛散性状

6. まとめ

(1)市街地火災をシミュレーションするためのＣＦＤモデル、燃焼モデル、火炎放射モデルおよび火の粉飛散モデルの連成を行った。次に、ＣＦＤモデル、燃焼モデル、火炎放射モデルの信頼性の評価を行うため、実験結果と比較を行い、その信頼性の確認を行った。

(2)火の粉飛散モデルを用いる際必要となる、火の粉の流体力学的性状の測定実験を行い、火の粉の密度および終末速度を測定し、ストークス径の算出およびストークス径と相当直径の比の粒度分布を示した。ストークス径相当直径比は 0.2～0.7 の間に集約した。

(3)市街地火災予測モデルおよび火の粉性状実験のデータを用いてモデル街区における市街地火災シミュレーションを行い、燃焼時間は飛行時間に比べ十分に長いと考えられる火の粉の飛散性状の評価を行った。火の粉は 400m以上の広範囲に渡って飛散することができ、1998 年に起きた和歌山県白浜温泉の大火の記録と同等の結果を示すことができた。また、火の粉が火炎による上昇流によって巻き上げられ、その時の市街地風並びに火の粉のストークス径によって、飛散距離が変わることが示唆された。

謝辞

本研究を行うに当たり、大宮喜文博士(当時建築研究所、現在東京理科大学講師)及び岩見達也博士(国土交通省)のご助言を得た。ここに記して謝意を表す。

記号

A_d 火の粉の断面積(m^2)
C_d 抗力係数
C_p 定圧比熱 (J/kg/K)
C_μ k-ε モデル定数
$C_{\varepsilon i}$ k-ε モデル定数
d_p 火の粉の直径 (m)
D 代表高さ (m)
D_n 分子拡散係数 (m^2/s)
D_p ストークス径 (m)
$\overline{f}$ 変数 f のアンサンブル平均値
$\underline{f}$ 変数 f のファブル平均値
$\vec{F}_{dr}$ 抗力 (N)
$\vec{F}_p$ 圧力勾配による力 (N)
$\vec{F}_g$ 重力 (N)
f_v すすの体積分率
h エンタルピー (J/kg)
$h_{0,n}$ 標準生成エンタルピー (J/kg)
h_n 成分 n の生成エンタルピー (J/kg)
I 放射強度 ($J/m^2/s$) または、乱流強度
k 乱流エネルギー(m^2/s^2)
k_g ガス吸収係数
k_s すす吸収係数
l 乱流スケール (m)
L モデルスケール (m)
m_p 火の粉の質量 (kg)
M_n 成分 n の分子量
P 圧力 (Pa)
Re_p 火の粉のレイノルズ数
s すすの転換率、または放射束がある方向に進行した距離 (m)
S_R 放射熱ソース (W/m^3)
t 時間 (s)
T 温度 (K)
u_p 火の粉の瞬時速度 (m/s)
u_i 速度の 3 成分 (m/s)
(u_1 =U: X 方向速度, u_2 =V:Y 方向速度, u_3 =W: Z 方向速度)
U_D 代表風速 (m/s)
W_z 燃焼面における垂直方向のプロパンの噴出速度(m/s)
V_d 火の粉の体積 (m^3)
x_i: 空間座標の 3 成分
(x_1 =X, 主流方向、 x_2 =Y, 横方向、 x_3 =Z, 高さ方向、)
Y_n 成分 n の質量分率

Greek symbols

σ_h 乱流 Prandtl 数
σ_n 乱流 Schmidt 数
σ_k k-ε モデル定数
σ_ε k-ε モデル定数
λ 熱伝導係数 (W/m/K)
ε 乱流散逸率 (m^2/s^3)
w_n 成分 n の燃焼反応速度 ($kg/m^3/s$)
w_f 燃料の燃焼反応速度 ($kg/m^3/s$)
σ Stefan-Boltzmann 定数 5.67×10^{-8} ($W/m^2/K^4$) または標準偏差
μ 分子粘性係数 (kg/m/s)
μ_t 乱流粘性係数 (kg/m/s)
ρ_f 空気密度 (kg/m^3)
ρ_p 火の粉の密度 (kg/m^3)
τ_{ij} 応力テンソルの成分 (N/m^2)
v_t: 火の粉の終末速度 (m/s)
∇p_a 粒子を取り囲む流体の加速度運動により生じた圧力勾配(N/m^3)

注

1) 火災風洞実験で得られた火の粉を使用する。実際の火災の際の火の粉は燃焼しているが、今回の落下実験では火の粉は燃焼させずに落下させた。
2) 今回測定した火の粉は落下時のレイノルズ数が 1000 を超えるので抗力係数は 0.44 としている。
3) 電子天秤で測定した火の粉重量を密度($130kg/m^3$)で除した数値を体積として算出している。

参考文献

1) 大宮喜文、岩見達也：建物火災に伴う火の粉の飛散と飛び火に関する実態調査、日本建築学会技術報告集、第 9 号、pp. 133-136、1999.12
2) 岩見達也、鍵屋浩司：稚内市街地火災調査報告、その 2、周辺の被害状況および火の粉の飛散状況、火災、52、pp. 51-53、2002.10
3) 白石靖幸、加藤信介、吉田伸治、村上周三：都市火災伝搬における火の粉飛散の数値解析、日本建築学会計画系論文集、第 546 号、pp. 187-192、2001.8
4) 林吉彦、大宮喜文、岩見達也、筧雅行、後藤伸寿、佐賀武司：火の粉飛散範囲に関する数値シミュレーション、日本建築学会技術報告集、第 17 号、pp. 203-208、2003. 6
5) Morvan, D. and Dupuy, J. L. : Modeling of Fire Spread Through a Forest Fuel Bed Using a Multiphase Formation, Combustion and Flame, 127, pp. 1981-1994, 2001
6) Novozhilov,V., Harvie, D. J. E, Kent, J. H.. Apte, V. B. and Pearson, D. : A Computational Fluid Dynamics Study of Wood Fire Extinguishment by Water Sprinker, Fire Safety Journal, 29, pp. 259-282, 1997
7) Favre, A : Problems of Hydrodynamics and Continuum Mechanics, Soc. Indust. Appl. Mech., pp. 231-266, 1969.
8) El Tahry, S. H. : k-ε Equation for Compressible Reciprocating Engine Flows, AIAA, J. Energy, 7, 4, pp. 345-353, 1983
9) Magnussen, B. F. and Hjertager, H. : On Mathematical Modeling of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion, in Proceedings of 16th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, pp. 719-729, 1976
10) McGrattan, K., Floyd, J., Forney, G., Baum, H. and Hostikka, S. : Development of Combustion and Radiation Models for Large Scale Fire Simulation, The Third Technical Symposium on Computer Applications in Fire Protection Engineering, pp. 14-22, 2001
11) Yan, Z. H. and Holmstedt, G. : CFD and Experimental Studies of Room Fire Growth on Wall Lining Materials, Fire Safety Journal, 27, pp. 201-238, 1996
12) Lockwood, F. C. and Shah, N. G. : A New Radiation Solution Method for Incorporation in General Combustion Prediction Procedures, 18th Symposium (International) on Combustion, pp. 1405-1414, 1981
13) Hinze,J.O., Turbulence, McGraw-Hill, New York, pp. 460-471, 1975
14) 林吉彦、佐賀武：有風下の火炎気流の温度分布に関する実験的検討、日本建築学会環境系論文集、第 566 号、pp. 25-32、2003.4
15) van Leer, B : Towards the Ultimate Conservation Difference Scheme, V: A Second-order Sequel to Godunov's Method, Journal of Computational Physics, 32, pp. 101-136, 1979
16) スハス V. パタンカー原著、水谷幸夫、香月庄司共訳、コンピュータによる熱移動と流れの数値解析、森北出版、1985
17) 大竹宏、黄弘、大岡龍三、加藤信介、林吉彦：有風下における市街地火災シュミレーション、第 17 回数値流体力学シンポジウム E2-2, 2003
18) 村上周三、持田灯、林吉彦：k-ε モデルにおける建物風上の k の過大評価とモデルの改良、第 10 回風工学シンポジウム論文報告集、pp. 199-204、1988
19) 吉岡英樹：有風下における火災家屋からの火の粉の発生性状に関する実スケール火災風洞実験、東京大学修士論文、2002

VULNERABILITY OF COASTAL CITIES OF ASIA TO RISING SEA LEVEL: A CASE STUDY IN BANGKOK

DUSHMANTA DUTTA
School of Applied Sciences and Engineering,
Monash University, Australia
dushmanta.dutta@sci.monash.edu.au

ABSTRACT

The paper presents the outcomes of a case study conducted to analyze the flood characteristics in Bangkok under sea level rising scenarios. A physically based distributed hydrological model, which combines surface and river flow, was adopted to simulate the flood scenarios due to different magnitudes of sea level rising. The input rainfalls and the upstream boundary conditions of a worst flood event of 1995 were considered as the baseline for the modeling based on the available records of rainfall and water level datasets of the last three decades. The study was aimed to capture a macro picture of floods to present an overview of severity of flood situations under climate change conditions.

1. INTRODUCTION

The 20th century was the warmest the world has seen in 1,800 years. A warming climate leads to changes in many aspects of climate system and earth environment including precipitation, wind pattern, the frequency and severity of extreme weather events and rise of sea level. Based on a study of 2001, the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) has predicted that the global mean sea level (msl) may rise as much as 88 cm by the end of the 21st century. Approximately 20% of the global population lives within 30 km of coastal areas and the number is expected to become double by 2025 (Cohen et al., 1997). The sea level rise will have wide ranging effects on coastal population and ecosystem, such as saline water intrusion, erosion of shorelines, amplified intensity and frequency of coastal flood inundation, etc.

The socio-economic impacts of climate change in the coastal cities of Asia will be enormous due to the rapid urbanization and high population growth. The combined effects of potential sea level rise and extreme rainfall events triggered by climate change may lead to catastrophic flood disasters in many of the coastal cities of Asia, which are located in the low-lying floodplains of major rivers. So far only a few studies have been conducted in this direction and a very few countries have prepared long-term plans to deal with these problems. It is important to assess the impacts of mean sea level rise on flooding in coastal cities and prepare long-term plans for risk management (Dam, 2003).

A study that was conducted to analyze the socio-economic impacts of floods in several large coastal cities of Asia under projected climatic and socio-economic scenarios using a distributed hydrological model and an

agent based land use change model. The paper presents the outcomes of a case study which was conducted to analyze the flood characteristics in Bangkok under sea level rising scenarios. A physically based distributed hydrological model, which combines surface and river flow, was adopted to simulate the flood scenarios due to different magnitudes of sea level rising. Input rainfalls and upstream boundary conditions of a worst flood period were considered based on the records of the last three decades as the baseline for modeling. The study was aimed to capture a macro picture of flooding to present an overview of severity of flood situation utilizing surface elevation of 1km resolution and without going into micro details of urban topography and drainage.

2. STUDY AREA

Bangkok, the capital city of Thailand, is one of the major cities in Asia and a regional hub. It is located on the lower flat basin of the Chao Phraya River, which is originated in the northern most part of Thailand and discharges to the Gulf of Thailand after flowing approximate 900 km (Fig. 1). The catchment area is 157,925km^2, which covers about 30% of Thailand's land area. The average annual discharge of the Chao Phraya Basin is about 770 m^3/s with a peak of 4,560 m^3/s recorded in 1995 (Thammasittirong, 1999).

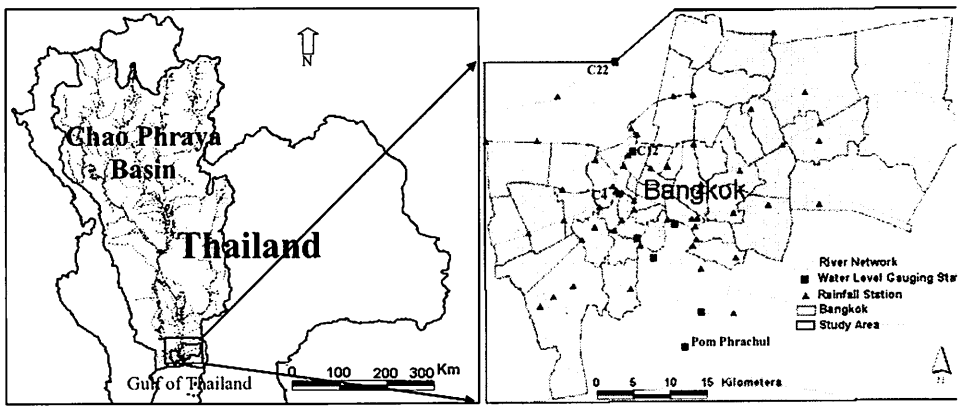


Figure 1. Location of the study area

Floods, mainly caused by upstream inflow and high intensity rainfalls, are the most frequent natural disasters in Bangkok. It affects a large number of populations and causes huge economic damage every year. Due to its low elevations, ranging from 0m to 4m above msl, tidal effect is prominent in the Chao Phraya river upto several kilometers inside Bangkok and that attributes significantly to floods. There are usually two high tides and two low tides per day in Gulf of Thailand, but these are often asymmetrical with amplitude of 1-2m. The daily variation of tides is normally from -0.5 m to 1.5 m with a peak of 2.5 m recorded in 1995.

3. METHODOLOGY

The surface and river components of the IISDHM, a physically based distributed hydrological model (Jha, et al, 1997, Dutta et al., 2000), were used for flood inundation simulation. In this model, 1D Saint-Venant's equations of continuity and momentum equations are used for river network flow simulation and 2D form of the equations for surface flow routing. The exchange of flow between the channel network and flood plains is simulated using the floodplain compartment concept (Dutta, et al., 1997).

3.1 Model Setup

The model setup for this case study was done with 1km spatial resolution and 1hour temporal resolutions. Elevation data was obtained from HYDRO1K DEM of USGS and landuse data from the USGS global landuse database. Surface roughness coefficients for different grids were assigned based on the landuse types. For river network, only the main stream of the Chao Phraya river was considered with the hydrological gauging station C22 as the upstream boundary and Pom Phrachul as the downstream boundary (Figure 1). River cross section data, hourly rainfall data in the 4 gauging stations within the study area, hourly water level data for upstream and downstream boundary stations were obtained from various local sources including the Bangkok Metropolitan Administration (BMA), Royal Irrigation Department (RID) and the Port of Thailand Authority.

3.2 Model Calibration and Verification

The model was calibrated and verified two selected flood events of 1995. The calibrated parameters were Manning's roughness in the river and runoff coefficient. Calibration and verification was performed using the observed water level data for the C12 and C4 water level gauging stations in the Chao Phraya River (Figure 1). Figures 2 and 3 show the observed hourly water level data for the upstream and downstream boundary stations and the average hourly rainfall in the study area for the period of calibration and verification of the model.

The calibrated value of runoff coefficient was 0.4 and Manning's roughness for river was 0.04. Figures 4 and 5 show the comparison of simulated and observed water levels at C12 and C4 stations during the period of verification. As can be seen from Fig. 4, the simulated water level agrees well with the observed water levels at C12 for the peak and pattern of flow. However there are some overestimations of the simulated water level at C4. The simulated maximum surface inundation during the period of verification for the flood event of 1995 is shown Figure 6. It shows that surface inundation was highest at the lowest part of the study area. Inundation height in most of the areas was within 1m, as mentioned in several reports on the 1995 floods. However, in absence of any ground actual flood inundation map, simulated results could not be verified.

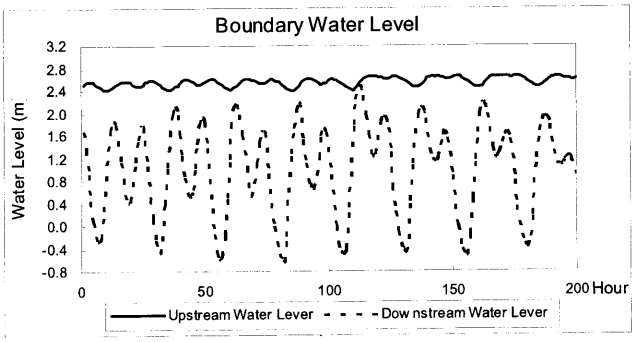


Figure 2. Input hourly boundary water levels at u/s and d/s (from October 23rd to 31st, 1995)

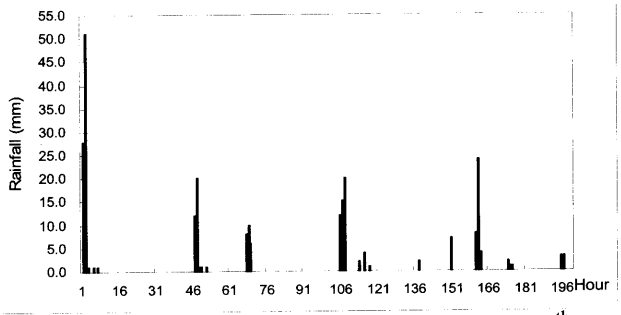


Figure 3. Input hourly average rainfall data (from August 4th to 13th, 1995)

4. IMPACTS OF SEA LEVEL RISING ON FLOODS

For analyzing the impacts of sea level rising on floods in Bangkok, two scenarios are considered, one for 50cm rising of the highest recorded period of sea level based on the past 20 years record and another is 100cm rising. These are close to the highest level of prediction of global average sea level rise in different SRES Scenarios in IPCC study as shown in Figure 7. This is close to the scenario of the highest value predicted by IPCC as 88 cm by the end of the 21st century (Watson, 2001). The hourly time series of water level of floods in 1995 is used as upstream boundary condition and hourly time series of sea level as the downstream boundary condition. The boundary condition data was selected from 23-31 October 1995, the highest water level duration recorded in 1995. Hourly rainfall data was taken for the higher rainfall duration of 1995 floods that is from 4-13 August.

The simulated maximum flood inundation maps for the two selected scenarios of sea level rising are shown in Figures 8 and 9. The simulated results show that almost 55% of the study area will be affected by flood if mean sea level rises by 50 cm and 72% area will be affected if mean sea level rises by 100 cm. Table 1 shows the possible areas of inundation under different flood depths as compared to the 1995 floods, which shows that overall inundation in the study area will be increased by 16% due to 50cm rise of sea level and 34% due to 100cm rise. Similarly, the inundation heights will increase significantly in many locations as shown in Figure 10 for the location a (Pak Num) (Figure 9). These results show there will be serious effects of sea level rising in flooding conditions in Bangkok city and that will in turn lead to high socio-economic consequences.

Table 1. Flood inundation areas in different scenarios

Flood depth in cm	Simulated flood Area in km^2 (in %)		
	Floods in 1995	Sea level rise 50cm	Sea level rise 100cm
10-20	987 (29.6)	1025 (30.9)	891 (26.8)
21-50	188 (5.6)	593 (17.8)	1,219 (36.6)
51-100	37 (1.1)	141 (4.2)	189 (5.7)
101-150	37 (1.1)	1 (0.1)	43 (1.3)
151-200	24 (0.7)	43 (1.3)	9 (0.3)
201-250	6 (0.2)	22 (0.7)	51 (1.5)
251-300	0 (0.0)	5 (0.2)	9 (0.3)
301-350	0 (0.0)	0 (0.0)	1 (0.2)
Total	1,279 (38)	1,830 (54)	2,412 (72)

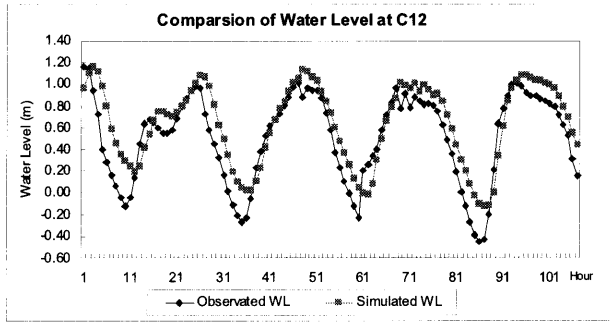


Figure 4. Comparison of simulated and observed water level at station C12

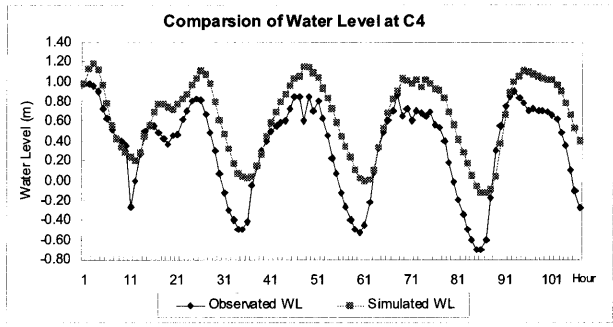


Figure 5. Comparison of simulated and observed water level at station C4

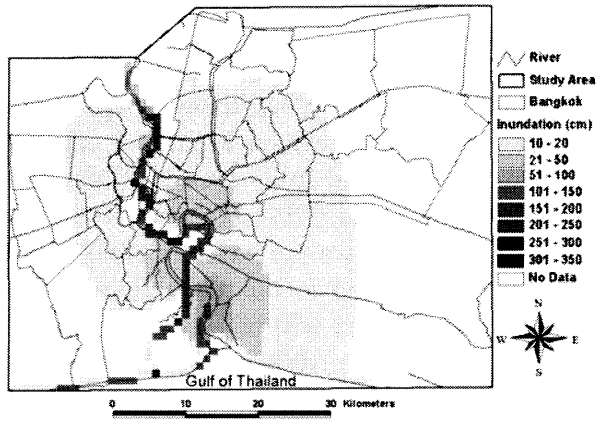


Figure 6. Simulated maximum flood inundation in 1995

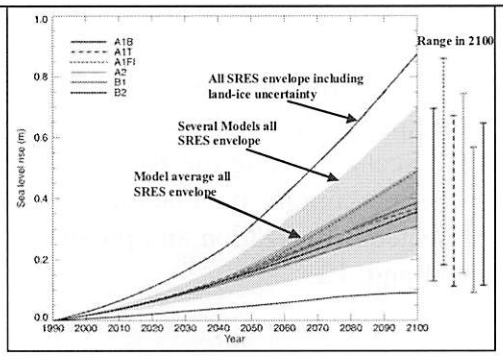


Figure 7. Global average sea level rise (1990-2100) (Church et al, 2001)

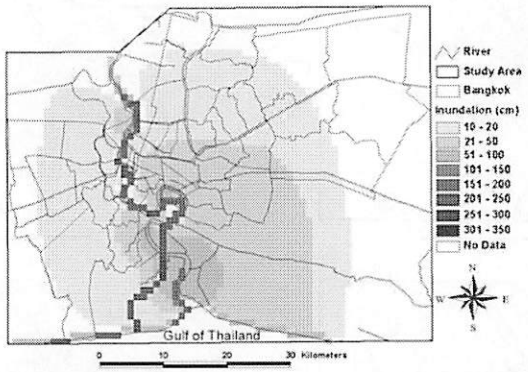


Figure 8. Simulated flood inundation map due to sea level rising to 50cm

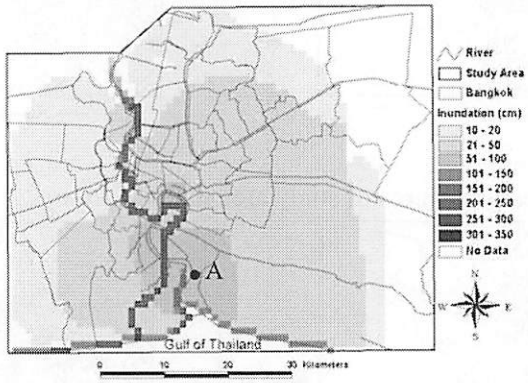


Figure 9. Simulated flood inundation map due to sea level rising to 100cm

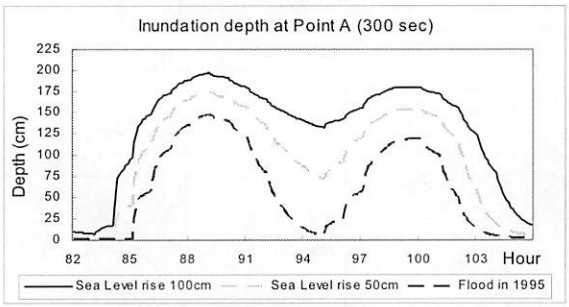


Figure 10. Comparisons of temporal inundation depth variation at Point A between simulated floods in 1995 and floods due to sea level rise by 50 cm and 100 cm

5. ASSESSEMENT OF SOCIO ECONOMIC IMPACTS AND VULNERABILITY

For the assessment of socio-economic impacts of floods, three main socio-economic aspects were considered, they were population, buildings and transportation infrastructure. The existing data and information for three

categories for 2000 were collected at the district levels. The spatial simulation of the future population and urbanization was carried out based on the IPCC SRES B1 Scenario using the AGENT-LUC model (Rajan and Shibazaki, 2000). The maximum population density was designed as 20,000Km-2. The projected urbanization and population of future scenarios are shown in Figures 11 and 12.

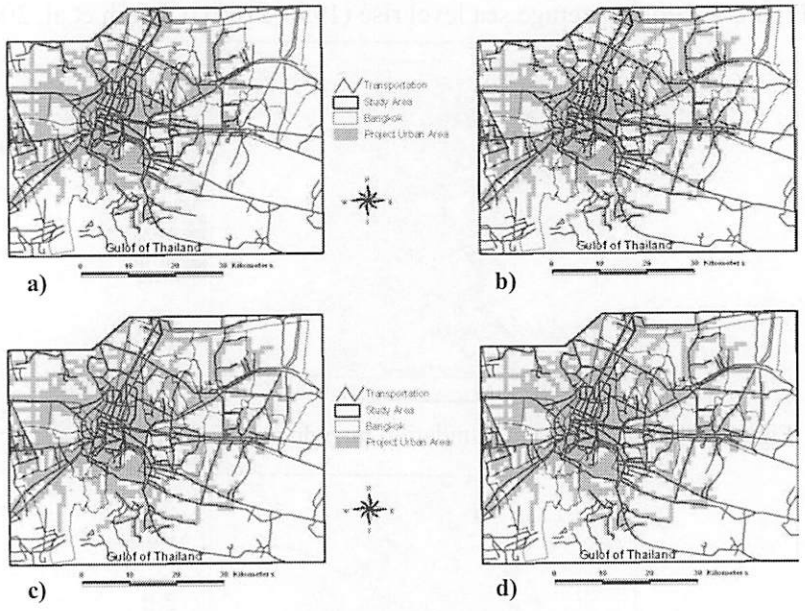


Figure 11. Projected urban area of study area in: a) 2025, b) 2050, c) 2075 and d) 2100

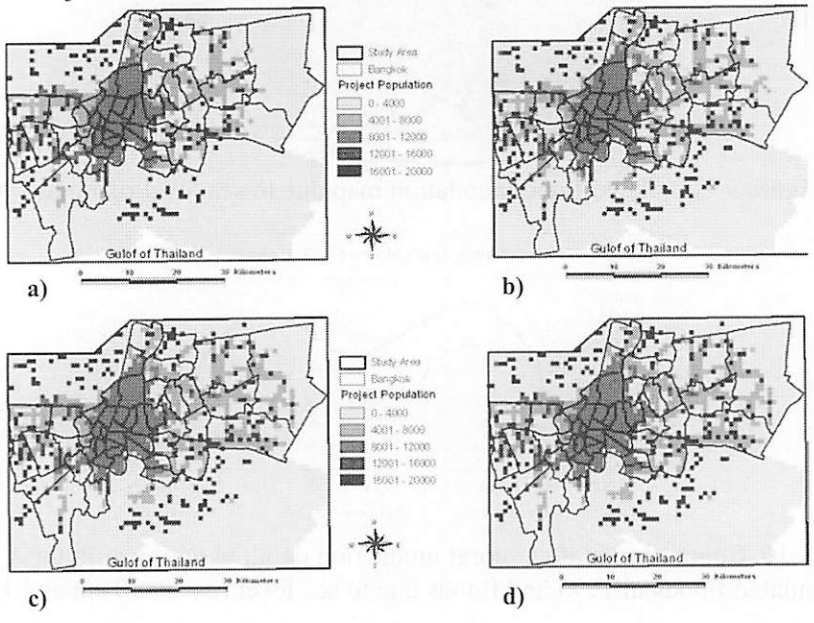


Figure 12. Projected population growth in the study area in: a) 2025, b) 2050, c) 2075 and d) 2100

Flood simulation was carried out by the hydrological model for four scenarios of mean sea level rise in the high predicted levels by IPCC for 2025, 2050, 2075 and 2100 for socio-economic impact analysis. A set of qualitative indices were developed for flood impact estimation for the three

selected categories based on the outcomes of a questionnaire survey conducted among some affected people of the study area in the recent past. Using these indices, outcomes of flood inundations for the projected mean sea level rises and growth of populations, urban buildings and road networks for the selected years, flood impacts for these three sectors were estimated.

Table 2 presents the flood impact indices for buildings. The estimated flood impacts on buildings for the selected years are presented in Table 3. It is observed that the number of affected of buildings in the 'less impact' class increases by 1.5 times in 75 years period from 2025 to 2100. Similarly, the number of affected of buildings in 'moderate impact' class increases by 30% in 75 yrs period from 2025 to 2100. The increase is not only resulted by the expansion of flood inundation area but also by the growth of urbanization. The flood impact indices for population and number of flood affected people under different categories for the selected years are presented in Tables 4 and 5. Table 5 shows that the number of affected of people in all the three categories will increase significantly during 75 years period from 2025-2100.

Table 2. Flood impact indices of buildings

Depth of flood (m)	Duration of flood (day)				
	< 1	1-2	3-4	5-7	> 7
< 0.1	A	A	A	A	A
0.10-0.60	B	B	B	B	B
0.60-1.00	B	C	C	C	C
1.00-3.50	C	C	C	D	D
> 3.50	D	D	D	D	D

A: No impact, B: Less impact, C: Moderate Impact, D: High Impact, E: Highest Impact

Table 3. Summary of the affected buildings

Impact Index	No. of affected buildings in study area			
	2025	2050	2075	2100
Less	1,145,980	1,451,322	1,629,826	1,791,502
Moderate	82,008	97,071	105,328	110,577

Table 4. Flood Risk Indices of population

Depth of flood (m)	Duration of flood (day)				
	< 1	1-2	3-4	5-7	> 7
< 0.1	A	A	A	A	A
0.10-0.60	B	B	C	C	C
0.60-1.00	C	C	C	C	D
1.00-3.50	E	E	E	E	E
> 3.50	E	E	E	E	E

A: No impact, B: Less impact, C: Moderate Impact, D: High Impact, E: Highest Impact

The flood impact indices for road and length of affected road lengths in the study area during the selected years are presented in Tables 6 and 7. It can be observed that total affected of road in scenario 2100 is much higher than the total affected road length in 2025 which may be attributed to larger flood inundation area in 2100 compared to 2025. The flood impact indices for railways and affected lengths of railway in the study area are presented in Tables 8 and 9. It can be observed that total affected lengths of railway in

future scenarios increases significantly, while the affected railway length under high impact category remains constant.

Table 5. Summary of the affected population

Impact Index	No. of affected population in study area			
	2025	2050	2075	2100
Less	5,720,020	6,804,316	7,632,711	8,969,668
Moderate	134,405	227,777	340,657	446,810
Highest	293,047	311,898	312,903	329,816

Table 6. Flood Risk Indices of road

Depth of flood (m)	Duration of flood (day)				
	< 1	1-2	3-4	5-7	> 7
< 0.1	A	A	A	A	A
0.10-0.60	B	B	B	B	B
0.60-1.00	C	C	C	C	C
1.00-3.50	C	C	C	D	D
> 3.50	C	C	D	D	D

A: No impact, B: Less impact, C: Moderate Impact, D: High Impact, E: Highest Impact

Table 7. Summary of the affected road

Impact Index	Length of affected road in study area (m)			
	2025	2050	2075	2100
Less	569,742	624,118	695,961	837,332
Moderate	65,522	80,041	110,741	133,836

Table 8. Flood Risk Indices of railway

Depth of flood (m)	Duration of flood (day)				
	< 1	1-2	3-4	5-7	> 7
< 0.1	A	A	A	A	A
0.10-0.60	B	B	B	C	C
0.60-1.00	C	C	C	D	D
1.00-3.50	D	D	D	D	D
> 3.50	D	D	D	D	D

A: No impact, B: Less impact, C: Moderate Impact, D: High Impact, E: Highest Impact

Table 9. Summary of the affected railway

Impact Index	Length of affected railway in study area (m)			
	2025	2050	2075	2100
Less	89,050	95,627	105,913	122,016
Moderate	-	-	-	966
High	1,430	1,430	1,430	1,430

6. CONCLUSIONS

The simulated outcomes of the flood model show that almost 55% of the Bangkok City will be affected by floods if mean sea level rises by 50 cm and 72% will be affected if mean sea level rises by 100 cm, which are higher by 16% and 34% respectively as compared to the simulated inundated areas due to the 1995 floods and that will lead to adverse impacts on socio-economic sectors. The outcomes of social-economic impacts

analysis show that number of flood affected buildings and population and road lengths will be rapidly increased due to possible sea level rise from 2025 to 2100.

The outcomes present a macro picture of floods and its socio-economic impacts in the Bangkok City under mean sea level rise scenarios in the 21st Century. Although the severity of the flood magnitudes simulated by the hydrological model is overestimated to a certain extend due to non-inclusion of the existing structural flood control measures such as the east and west dyke systems, retaining walls, pumping stations, diversion canals and the micro details of the topography in the modeling, nevertheless, the model outcomes present a clear picture of potential risk of severe floods and its impacts due to the predicted mean sea level rising in the Bangkok city.

Acknowledgement
The authors gratefully acknowledge the financial supports obtained from the APN Project Grant 2004-CB01-NSY for conducting this study.

References

Cohen, J.E., Small C., Mellinger A., Gallup J. and J. Sachs (1997). Estimates of Coastal Populations, *Science*, Vol. 278, pp 1211- 1212.

Dam Jan C. van (2003). Impacts of Climate Change and Climate Variability on Hydrological Regimes, 1st edition, Cambridge University Press.

Dutta D., Herath S. and Musiake K. (1997). Distributed Hydrological Model For Flood Inundation Simulation, *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE,* Vol. 43, pp 25-30.

Dutta, D., Herath, S. and Musiake, K. (2000). Flood inundation simulation in a river basin using a physically based distributed hydrologic model. *Hydrological Processes* 14: 497-519.

Jha, R., Hearth S. and Musiake K. (1997). Development of IIS Distributed Hydrological Model (IISDHM) and its application in Chao Phraya River Basin, Thailand, *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE,* Vol. 41, pp 227-232.

Rajan, K.S. and Shibazaki, R. (2000). Land Use/Cover Change and Water Resources – Experiences from AGENT-LUC Model, *Proceedings of the APFRIEND Workshop on Mekong Basin Studies, INCEDE Report 19,* University of Tokyo, Japan, pp. 1-16.

Thammasittirong (1999).*Operational Flood Forecasting for Chao Phraya River Basin,* Thesis WM-99-23, AIT, Thailand,

Waston, R.T. (2001). Climate Change 2001, *Six conference of Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change.*

東京大学 生産技術研究所
都市基盤安全工学国際研究センター
〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1
http://icus.iis.u-tokyo.ac.jp/
E-mail: icus@iis.u-tokyo.ac.jp

Tel: (+81-3)5452-6472
Fax: (+81-3)5452-6476