



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

サステナブル都市システム研究委員会

平成17年度報告書

サステナブル都市システム研究委員会 (RC-39)

報告書

平成 18 年 3 月

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

まえがき

都市基盤安全工学国際研究センター(ICUS)では、都市の安全問題のみならず、地球環境問題の視点から膨大な社会資本ストックへの対応および環境破壊問題への対応など、今後、持続的な社会の構築のために必要となる事項を都市基盤に携わる技術者・研究者の視点から検討することを目的として、(財)生産技術研究奨励会の特別研究会として、平成14年から2年間、「サステナブル構造システム研究委員会」(RC-39)を発足し、活動を行った。この委員会では、①老朽化構造物WG、②防災WG、③都市環境WG、④地球環境WG、⑤モニタリングWGのそれぞれの立場から、サステナブルな都市構造とは何か、また現在の都市が内包している問題点は何かを抽出することを一応の活動成果とした。

平成16年度から新たに2年間の予定で「サステナブル都市システム研究委員会」(RC-39)として衣替えを行い、前研究委員会の成果を引継ぎつつ、サステナブルな都市を実現するためのより具体的なアクションについて模索することをその目的としている。WGも①老朽化構造物WG、②防災WG、③環境WGの3つに絞り、更に具体性を高めた研究テーマに取り組んできた。老朽化構造物WGでは老朽化構造物の寿命予測、簡易で精度の高い管理手法の構築、防災WGでは災害情報データベースの構築、耐震補強推進のための地震リスクファイナンス金融商品の開発、環境WGでは都市環境指標の調査、持続可能な都市形成のための環境総合評価指標の作成をターゲットとし、2年間の活動成果を報告書としてまとめた。

これらの研究成果が今後、この分野における発展の一助となれば幸いである。最後に本研究委員会の活動にあたり、終始熱心なご協力をいただいた委員諸氏ならびに関係各位に厚く御礼申し上げる次第である。

平成18年3月

サステナブル都市システム研究委員会
委員長 魚本健人

サステナブル都市システム研究委員会 (平成 17 年度)
委員会名簿

| | | |
|-----|--------|--|
| 委員長 | 魚本 健人 | 東京大学生産技術研究所 教授 |
| 委員 | 安岡 善文 | 東京大学生産技術研究所 教授 |
| | 目黒 公郎 | 東京大学生産技術研究所 教授 |
| | 林 省吾 | 東京大学生産技術研究所 客員教授 |
| | 天野 玲子 | 東京大学生産技術研究所 客員教授 |
| | 沖 大幹 | 東京大学生産技術研究所 助教授 |
| | 大岡 龍三 | 東京大学生産技術研究所 助教授 |
| | 加藤 佳孝 | 東京大学生産技術研究所 助教授 |
| | 須崎 純一 | 東京大学生産技術研究所 講師 |
| | 遠藤 貴宏 | 東京大学生産技術研究所 助手 |
| | 吉村 美保 | 東京大学生産技術研究所 助手 |
| | 今村 遼平 | アジア航測(株) 技術統括部 |
| | 加藤 康広 | アジア航測(株) 防災地質部 防災地質課 |
| | 小林 公一 | アジア航測(株) 土壌・水環境事業部 土壌・水環境事業部 (前委員) |
| | 滝川 正則 | アジア航測(株) システム開発部 情報システム課 |
| | 永井 正和 | アジア航測(株) 東北コンサルタント部 施設構造課 (橋梁グループ) |
| | 野田 浩二 | アジア航測(株) 新規事業部 システムインテグレートプロジェクト |
| * | 二木 重博 | アジア航測(株) 防災地質部 |
| | 三富 創 | アジア航測(株) 防災地質部 防災地質課 |
| * | 深沢 哲也 | 鹿島建設(株) 土木管理本部 土木技術部 |
| * | 菅野 安男 | 基礎地盤コンサルタンツ(株) 関東支社 技術4部 |
| | 岡本 卓慈 | (株)計測リサーチコンサルタント 代表取締役 |
| | 羅 黄順 | (株)計測リサーチコンサルタント 管理部 企画開発室 (前委員) |
| * | 松井 義昌 | (株)計測リサーチコンサルタント 東京事業部 保全技術担当 (平 17.10 から羅委員と交代) |
| | 菊池 禎二 | (株)建設企画コンサルタント 顧問 |
| * | 藤田 久和 | (株)建設企画コンサルタント 東京事業本部 技術センター |
| * | 石田 辰英 | (株)建設技術研究所 東京本社 社会システム部 アセットマネジメント室 |
| | 北村 隆理 | (株)建設技術研究所 東京本社 社会システム部 アセットマネジメント室 |
| | 山根 立行 | (株)建設技術研究所 東京本社 社会システム部 アセットマネジメント室 |
| | 河合 雅己 | 国際航業(株) デジタルセンシングセンター 地球環境グループ |
| * | 瀬戸島 政博 | 国際航業(株) 技術センター |
| | 寺田 晃 | 国際航業(株) 道路計画部 |
| | 船橋 学 | 国際航業(株) デジタルセンシングセンター 地球環境グループ |
| | 山崎 淳 | 国際航業(株) 防災部 |
| * | 佐藤 登 | 三協(株) 代表取締役 |
| | 岡田 敬一 | 清水建設(株) 技術研究所 インキュベートセンター |
| * | 栗田 守朗 | 清水建設(株) 技術研究所 社会基盤技術センター |

| | | |
|-----|--------|--|
| | 柴 慶治 | 清水建設(株) 技術戦略室 企画部 |
| | 高橋 郁夫 | 清水建設(株) 技術研究所 特別プロジェクト (災害情報) |
| | 田中 博一 | 清水建設(株) 技術研究所 社会基盤技術センター |
| | 平間 敏彦 | 清水建設(株) エンジニアリング事業本部 |
| * | 志波 由紀夫 | 大成建設(株) 技術センター 土木技術研究所 土木構工法研究室 防災・耐震チーム |
| * | 安藤 慎一郎 | (株)竹中土木 技術本部 技術グループ |
| | 田中 芳行 | (株)竹中土木 技術本部 企画グループ |
| | 松本 由美子 | (株)竹中土木 技術本部 技術グループ |
| | 和田 直也 | (株)竹中土木 技術研究所 建設技術開発部 材料部門 |
| * | 肥田 研一 | (株)千代田コンサルタント 事業統括部 構造・保全部 |
| | 高田 励 | 東京電力(株) 建設部 海外事業グループ |
| * | 中井 秀信 | 東京電力(株) 建設部 土木・建築技術センター 都市土木技術グループ |
| | 中嶋 まどか | 東京電力(株) 建設部 土木・建築技術センター 建築設備技術グループ |
| | 貫井 泰 | 東京電力(株) 建設部 土木・建築技術センター 建築構造技術グループ |
| * | 福島 誠一郎 | 東電設計(株) 技術開発本部 防災プロジェクト部 防災技術グループ |
| * | 山本 郁夫 | (株)東横エルメス 特機事業部 |
| | 玉置 一清 | 三井住友建設(株) 技術研究所 土木研究開発部 PC 構造研究室 |
| * | 山田 哲也 | 三井住友建設(株) 技術研究所 研究開発管理部 知的財産室 |
| 事務局 | 金田 尚志 | 東京大学生産技術研究所 特任助手 |

*印: 幹事

サステナブル都市システム研究委員会平成 17 年度報告書

目次

まえがき

委員会の構成

研究の目的

老朽化構造物 WG 報告書

| | |
|--|----|
| 1. 研究計画 | 1 |
| 1.1 研究目的 | 1 |
| 1.2 研究内容 | 1 |
| 2. 老朽化構造物をはかる「ものさし」 ～「一般的な老朽橋梁を対象にして」～ | 4 |
| 2.1 検討の方向性(SWG1) | 4 |
| 2.2 対象橋梁と実施した計測の概要 | 4 |
| 2.3 対象構造物の構造特性や材料特性に基づく寿命のあり方 | 6 |
| 2.3.1 劣化と寿命 | 6 |
| 2.3.2 対象構造物の寿命 | 7 |
| 2.4 非破壊検査結果に対する評価 | 8 |
| 2.4.1 赤外線サーモグラフィ法 | 8 |
| 2.4.2 デジタル画像法 | 11 |
| 2.4.3 打音法 | 17 |
| 2.4.4 X線法 | 19 |
| 2.4.5 超音波法(トモグラフィ法) | 22 |
| 2.4.6 インパクトエコー法 | 25 |
| 2.4.7 反発硬度法 | 29 |
| 2.4.8 自然電位法 | 31 |
| 2.4.9 ドリル法 | 33 |
| 2.4.10 AE法 | 37 |
| 2.4.11 加速度計法 | 41 |
| 2.4.12 速度計法 | 44 |
| 2.4.13 光ファイバー計測 | 47 |
| 2.4.14 鉄筋切断法、スロットストレス法 | 49 |
| 2.4.15 透気法 | 50 |
| 2.4.16 打撃応答法 | 52 |
| 2.4.17 超音波法(直接回折波法) | 53 |
| 2.4.18 地中レーダー(マルチパスアレイレーダ)法 | 56 |
| 2.5 まとめ(非破壊検査に基づく老朽構造物評価の方向性) | 61 |

| | |
|------------------------------|----|
| 3. 根岸橋の調査診断 | 63 |
| 3.1 根岸橋の概要 | 63 |
| 3.1.1 現橋梁の設計標準 | 66 |
| 3.1.2 現橋梁の設計方針 | 68 |
| 3.1.3 工事費 | 69 |
| 3.2 根岸橋調査概要 | 70 |
| 3.2.1 概要 | 70 |
| 3.2.2 床版ひび割れ調査(デジタルカメラ) | 73 |
| 3.2.3 赤外線サーモグラフィ法 | 73 |
| 3.2.4 振動計測 | 74 |
| 3.3 調査結果 | 75 |
| 3.3.1 デジタルカメラによる調査結果 | 75 |
| 3.3.2 赤外線サーモグラフィ法による調査結果 | 77 |
| 3.3.3 振動計測による調査結果 | 78 |
| 3.4 根岸橋の診断結果 | 83 |
| 4. まとめ | 84 |
| 4.1 一般的な老朽橋梁の非破壊検査の検討から見えるもの | 84 |
| 4.2 今年度の成果と課題 | 84 |
| 4.3 今後の方針 | 84 |
| 5. 活動経過 | 85 |
| 謝辞 | 88 |
| 参考資料 | 88 |

防災 WG 報告書

| | |
|---|-----|
| 1. 研究概要 | 103 |
| 1.1 研究目的 | 103 |
| 1.2 研究内容 | 103 |
| 1.2.1 SWG-1 の活動概要(災害情報データベースの構築法) | 103 |
| 1.2.2 SWG-2 の活動概要(耐震補強推進のための地震リスクファイナンス金融商品の開発) | 105 |
| 2. 災害情報データベースの構築法 | 107 |
| 2.1.1 危機管理に関する情報収集 | 107 |
| 2.1.2 災害イメージーションに関する体験的学習 | 107 |
| 2.2 災害情報データベースの構築法に関する検討 | 110 |
| 2.2.1 新潟県中越地震を例にしたKJ法による検討 | 110 |
| 2.2.2 災害情報の流れと対応 | 114 |
| 2.3 まとめと課題 | 125 |
| 3. 耐震補強推進のための地震リスクファイナンス金融商品の開発 | 126 |
| 3.1 耐震補強推進策の現状と課題 | 126 |

| | | |
|------------------|--------------------------------------|-----|
| 3.2 | リスクファイナンス技術 | 127 |
| 3.3 | 耐震補強推進のための新ファイナンスモデルの提案 | 128 |
| 3.3.1 | 検討項目フローチャート | 128 |
| 3.3.2 | フローチャート各ステップの説明 | 129 |
| 3.4 | 他のファイナンスモデルとの特性の比較 | 135 |
| 3.5 | 提案モデルのケーススタディ1 | 139 |
| 3.5.1 | ハザード曲線 | 139 |
| 3.5.2 | 補強レベルと被害率改善度 | 142 |
| 3.5.3 | オプション取引曲線(精算金の支払条件) | 144 |
| 3.5.4 | 償還年数 | 146 |
| 3.5.5 | 割引率の影響 | 147 |
| 3.5.6 | 耐震補強ローンとの比較 | 147 |
| 3.5.7 | 他の金融商品との比較 | 147 |
| 3.6 | 提案モデルのケーススタディ 2(ハザード指標をマグニチュードにした場合) | 148 |
| 3.6.1 | 地震ハザード(マグニチュードと発生確率の関係) | 148 |
| 3.6.2 | マグニチュードと被害額の関係 | 148 |
| 3.6.3 | パラメトリックスタディ | 150 |
| 3.7 | 提案モデルの考察 | 160 |
| 3.7.1 | WG 内意見 | 160 |
| 3.7.2 | 有識者との意見交換会 | 162 |
| 3.8 | 今後の課題および展開 | 163 |
| 4. | まとめ | 164 |
| 5. | 活動経過 | 165 |
| | 付録 専門家による講義 | 170 |
| | | |
| 環境 WG 報告書 | | |
| 1. | 研究目的 | 174 |
| 2. | 研究内容 | 175 |
| 3. | 研究成果 | 176 |
| 3-1 | 都市環境指標の調査 | 176 |
| 3-1-1 | 従来の環境指標の調査 | 176 |
| 3-1-1-1 | 調査対象とした環境指標 | 176 |
| 3-1-1-2 | 使用頻度の高い環境指標の抽出 | 177 |
| 3-1-1-3 | 指標の評価事例 | 178 |
| 3-1-1-4 | 本章のまとめ | 178 |
| 3-1-2 | 建築物総合環境性能評価システム(CASBEE) | 179 |
| 3-2 | 持続可能な都市形成のための環境総合評価指標(EIUS) | 180 |
| 3-2-1 | はじめに | 180 |
| 3-2-2 | 都市環境総合評価指標の基本的コンセプト | 180 |
| 3-2-3 | 評価項目 | 181 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 3-2-4 | 計算結果 | 185 |
| 3-2-5 | まとめ | 187 |
| 3-3 | EIUS のための衛星リモートセンシングによるパラメータ抽出 | 190 |
| 3-3-1 | はじめに | 190 |
| 3-3-2 | リモートセンシングによる環境データ収集の可能性 | 191 |
| 3-3-3 | 異なる年代での都市域の抽出 | 193 |
| 3-3-4 | 考察 | 194 |
| 3-3-5 | 結論 | 195 |
| | 参考文献 | 195 |
| 3-4 | 衛星 RS を利用したアジアメガシティへの適用方法(案) | 199 |
| 3-4-1 | 概要 | 199 |
| 3-4-2 | 解析の手順 | 200 |
| 3-4-3 | 衛星 RS データと既存情報を用いた環境保全面からの評価 | 201 |
| 3-4-4 | 衛星 RS データと既存情報を用いた自然災害面からの危険性評価 | 202 |
| 3-4-5 | 周辺都市圏を対象とした土地利用適正評価について | 202 |
| 4. | 活動経過 | 203 |
| | <参考資料> | |
| ○ | 資-1 | |
| | DEVELOPMENT OF NEW ENVIRONMENTAL INDICES FOR URBAN SUSTAINABILITY | |
| ○ | 資-2 | |
| | Extraction of Parameters from Remote Sensing Data for Environmental Indices for Urban Sustainability | |
| ○ | 資-3 | |
| | ASEAN 諸国の民生施設における省エネルギーへの取組状況 | |
| ○ | 資-4 | |
| | EIUS 評価シート | |

研究目的

20 世紀の我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、我国は世界的に見ても裕福な国に変貌した。都市基盤設備のストック状況として、橋梁を例にとると、1950年からピーク時の1970年頃まで年平均約 2500 の橋梁が新設され、現在約 13.6 万橋のストックが存在しているといわれている。これは、日本の全人口で考えれば、約 1000 人に 1 橋の割合で存在していることとなる。年平均 2500 橋が新設されてきたということは、今後、同程度の割合で維持管理(長寿命化)あるいは更新をすることを物語っており、更新は大量の建設廃棄物が発生することに直結してくる。更に、高度経済成長の代償として地球温暖化に代表される環境破壊が問題視され、温室効果ガスの大幅な削減、最終処分場の逼迫や天然資源の消費抑制のために循環型社会形成が急務であるとされている。今後、日本の人口が減少していく状況で、これまでの大量生産・大量消費型から脱却し、全く異なる視点で膨大な社会資本ストックを管理していかなければならない。

都市基盤設備は、大量の資源(天然、リサイクル)が投入され、製造・施工過程を経て建造されるサービスを開始する。このとき、全ての場面において環境負荷が発生すると考えられる。例えば、天然資源を利用すること、製造・施工時の環境汚染、都市基盤設備を利用することによる環境負荷、更新時に発生する産業廃棄物など。また、都市基盤設備は、供用期間中に様々な環境作用(荷重、炭酸ガス、塩化物イオンなど)を受けることにより、構造性能が低下し、社会情勢の変化に伴いユーザーニーズに合致しなくなるなど、その機能は経時的に変化する。更に、地震、洪水、火災などの突発的に発生する環境作用によって、その機能が著しく低下することがある。

このように、都市基盤の観点から考えると、「都市基盤設備自体に関する問題」とそれが与える「環境インパクトに関する問題」を解決していくことが、持続的な生存を可能とするためには必要不可欠であるといえる。そこで、本委員会では、都市基盤設備自体の問題として「老朽化構造物」、「防災」、「環境」を取り上げ、検討している。都市基盤設備自体の問題は、膨大な社会資本ストックの有効活用および災害に強い社会システムの形成により、常時・非常時への対策を検討し、環境インパクトは、都市基盤設備のライフサイクルにおける環境への影響を検討している。平成 16 年度から「老朽化構造物 WG」、「防災 WG」、「環境 WG」の 3 つワーキングを軸に以下の研究テーマに取り組んできた。

- ①老朽化構造物の寿命予測、簡易で精度の高い管理手法の構築
- ②災害情報データベースの構築、耐震補強推進のための地震リスクファイナンス金融商品の開発
- ③都市環境指標の調査、持続可能な都市形成のための環境総合評価指標

今年度は 2 年間のそれぞれの分野における研究成果をまとめ、WG ごとにこれまでの検討と議論の内容を示す。

老朽化構造物 WG

報告書

老朽化構造物WG 名簿

| 氏名 | 会社名 | 所属 |
|-------|------------------|--------------------------|
| 魚本 健人 | 東京大学生産技術研究所 | ICUS 教授 |
| 加藤 佳孝 | 東京大学生産技術研究所 | ICUS 助教授 |
| 小林 公一 | アジア航測(株) | 土壌・水環境事業部 土壌・水環境事業部(前委員) |
| 滝川 正則 | アジア航測(株) | システム開発部情報システム課 |
| 永井 正和 | アジア航測(株) | 東北コンサルタント部 施設構造課(橋梁グループ) |
| 菅野 安男 | 基礎地盤コンサルタンツ(株) | 関東支社 技術4部 |
| 岡本 卓慈 | (株)計測リサーチコンサルタント | |
| 羅 黄順 | (株)計測リサーチコンサルタント | 管理部 企画開発室(前委員) |
| 菊池 禎二 | (株)建設企画コンサルタント | |
| 藤田 久和 | (株)建設企画コンサルタント | 東京事業本部 技術センター |
| 石田 辰英 | (株)建設技術研究所 | 東京本社 社会システム部 アセットマネジメント室 |
| 山根 立行 | (株)建設技術研究所 | 東京本社 社会システム部 アセットマネジメント室 |
| 寺田 晃 | 国際航業(株) | 国土マネジメント事業本部 道路計画部 |
| 佐藤 登 | 三協(株) | |
| 柴 慶治 | 清水建設(株) | 技術戦略室 企画部 |
| 栗田 守朗 | 清水建設(株) | 技術研究所 社会基盤技術センター |
| 田中 博一 | 清水建設(株) | 技術研究所 社会基盤技術センター |
| 安藤慎一郎 | (株)竹中土木 | 技術本部 技術グループ |
| 和田 直也 | (株)竹中土木 | 技術研究所 建設技術開発部 材料部門 |
| 肥田 研一 | (株)千代田コンサルタント | 事業統括部 構造・保全部 |
| 山本 郁夫 | (株)東横エルメス | 特機事業部 |
| 玉置 一清 | 三井住友建設(株) | 技術研究所 土木研究開発部 PC 構造研究室 |

1. 研究計画

1.1 研究目的

我が国の社会資本整備は、国土の均衡ある成長を目指し、その時々¹の社会経済的ニーズに即して進められてきた。その経済発展のけん引力としての役割は、社会へ多大なる貢献を果たしてきたが、厳しい社会経済情勢を背景とした今日、膨大なストックを抱え、これまでの「スクラップ and ビルド」から「ストック and メンテナンス」の時代へと移行の転換期にある。

この「ストック and メンテナンス」の時代にあつて、膨大な量の老朽化構造物を適切に維持管理していくためには、各構造物の劣化現象を定量的、かつ容易に診断できることが必要とされるが、その劣化現象は様々な要因によって引き起こされており、その診断には構造物を新設する以上に高いレベルの技術が求められるといえる。

しかしながら、この状況に対応できる経験豊富な技術者は限られているのが実情である。今後増加する老朽化構造物に対して精度の高い点検・診断を迅速に行うことは困難であり、早急な対応が求められる状況にあると判断される。

以上の状況に鑑み、本 WG では都市のサステナビリティを念頭に、2002～2003 年度の研究において、膨大な社会ストックの合理的な運用・活用方法に関する 1)技術的、2)経済的、3)機能的、4)制度設計の各側面から検討を行い、物理的な寿命予測、機能（社会ニーズ）の変化が、老朽化構造物の運用を考える上で重要であることを明らかにした。

本年度（2005 年度）の研究では、上記研究に引き続き、老朽化構造物の寿命予測を可能とする、簡易で精度の高い管理手法の構築に向けた提言を行うことを目的として、コンクリート橋を対象としたケーススタディーを中心に検討を行った。

1.2 研究内容

本年度の研究内容は、上記を踏まえて「コンクリート橋を対象とした、簡易でも必要な精度を保て、調査者による差の小さい、構造物の全体状況を把握しやすい調査システム（カルテなど）の検討」とした。

一般に、大都市の主要幹線道路の橋梁が、各企業者によって適切な管理がなされているのに対して、地方公共団体では多くの一般道路を抱え、老朽化構造物の維持管理に関する必要性を認識しながらも、財政基盤や技術力の弱さのため、対応に苦慮していることに着目したものである。

昨年度（2004 年度）は、各企業者が保有する点検要領（案）について検討したが、調査によって確認された点検要領（案）について、簡易で精度の高い点検・診断を迅速に行えるシステム作りの観点から検討した結果、以下に示す項目を抽出できた。

- ・点検にあたって、構造物の大きさや重要度に関わらず同レベルのカルテ記述が求め

られる傾向にあり、地方自治体レベルでは対応への負担が大きい。

- ・点検調査データはあっても簡単な劣化チェックシート程度でバラツキが大きい。
- ・上記点検要領（案）の対象となる構造物は、主に国や公団レベルで、適切に管理されカルテへの記録も行われているが、地方自治体レベルでは満足に点検も行われていないのが実情である。
- ・各種点検要領が存在し、取得されたデータ間の比較、評価がしにくい。
- ・カルテへの記載事項は膨大であり、損傷のあるなし、また多いか少ないかでランク分けが行われることで、対象構造物全体の健全度を把握しにくい。
- ・独自のカルテを考案し、既存カルテに比べて全体系の把握しやすいカルテによる点検を試みている自治体もあるが、今後増大する維持管理の量を考慮すると、更なる簡易化が求められる。

これは、労力のわりには構造物全体系の状況がわかりにくい、従来の点検調査の課題を明らかにしている。本年度（2005年度）は、簡易でも必要な精度を保て、構造物の全体状況を把握しやすく耐荷力評価に通じる調査（カルテなど）への検討として、以下の2つのサブワーキング（以下、SWGという）によって進めるものとした。

- ◆ SWG 1 : (テーマ) 寿命の考え方についての検討 (石田リーダー)
- ◆ SWG 2 : (テーマ) 簡易なカルテ作成についての検討 (肥田リーダー)

以下に各SWGの研究内容を示す。

◆ SWG 1 :

RC-7委員会（コンクリート構造物の劣化診断に関する研究委員会：RC-39委員会と同様、(財)生産技術研究奨励会の特別研究会、以下RC-7という。）が進める既設PC、RC橋に関する調査結果の評価支援によって、以下の内容を検討した。

- ・上記橋梁に対する各種非破壊試験結果の比較評価。
- ・余寿命の考え方、評価手法の検討。
- ・効果的な調査項目・方法の選定、SWG2実橋調査へのフィードバック。

◆ SWG 2 :

横浜市道路局建設部橋梁課のご協力を得て選定した実橋調査を通じて、以下の内容を検討した。

- ・具体的調査項目、方法等の検討。
- ・「根岸橋」に関する非破壊調査結果の評価（RC-7と共同）。
- ・SWG1検討結果を含めた、調査項目の選定および簡易調査カルテの作成。

国土交通省 橋梁定期点検要領 (案)

点検調査 (その1) 橋梁の諸元と総合検査結果

| | | | | | | | | | |
|-------------|----------------------|------|------------------------------------|--------|-----------|---------|--------------|-------|-------------------|
| フリガナ 橋梁名 | 〇〇橋 | 路線名 | 一般国道〇〇号 現道 | 〇〇 | 地方整備局 | 橋梁コード | 〇〇〇〇 | | |
| 所在地 | 自 〇〇市〇〇町 至 〇〇市〇〇町 | 距離標 | 自 123.0km + 45m 至 123.0km + 73m | 管 轄 | 〇〇 事務所 | 調査更新年月日 | 〇〇〇〇年〇〇月〇〇日 | | |
| 供用開始日 | 昭和〇〇年〇月〇日 | 橋長 | 100.00m | 活荷重・等級 | TL-20 1等橋 | 適用示方書 | 昭和47年 道路橋示方書 | | |
| 上部構造形式 | 桁橋 | 全幅員 | 11.80m | 地覆幅 | 歩道幅 | 車道幅・車線 | 車道幅・車線 | | |
| 下部構造形式 | 橋台 | 有効幅員 | 10.80m | 0.60m | - | 6.50m 2 | 2.50m 0.40m | | |
| 基礎形式 | 鋼管基礎 | 備考 | | | | | | 調査年 | 1997年 |
| | | | | | | | | 交通量 | 5,833台 昼間1.2時間 |
| | | | | | | | | 大型車比率 | 58.0% |
| | | | | | | | | 荷重制限 | |

総合検査結果

例1: 本橋は、竣工後7年経過しており、下部構造において、アルカリ骨材反応が疑われる網目状のひび割れが確認されたことから、アルカリ骨材反応に関する詳細調査を実施する必要がある。なお、ひび割れ幅は小さく、判定区分は「損傷が軽微で補修を行う必要がない」に相当する程度である。

例2: 本橋は、竣工後10年経過しており、主要部材については「損傷が認められないか、損傷が軽微で補修を行う必要がない」損傷が局所的に発生している程度であるが、伸縮装置や排水施設の損傷により漏水が生じ局所的な支承の腐食が見られ、「状況に応じて補修を行う必要がある」損傷と判定している。対策に際しては、支承、伸縮装置、排水施設の交換では同様の損傷が繰り返されることが懸念され、伸縮装置を損傷させた根本原因を突き止めた上での対策が必要である。

例3: 本橋は、竣工後20年経過しており、「状況に応じて補修を行う必要がある」損傷が局所的に発生し、「損傷が認められないか、損傷が軽微で補修を行う必要がない」程度の損傷が橋梁全体に発生している。また、山間部に架かる橋梁のため凍結防止剤の使用により塩害が懸念される。現在損傷は全体的に軽微であるが、鋼部材及びコンクリート部材共々劣化が促進する可能性があり、凍結防止剤の影響を調査し、対策を検討する必要がある。

国土交通省 橋梁定期点検要領 (案)

点検調査 その1 橋梁点検結果 総括表

| | | | | | | | | | | |
|-------|----------------------|--------|------------------------------|-------|-------|--------|--------|-----|------|------|
| 名称 | 〇〇〇 | 路線名 | 一般国道〇〇号 | 近畿 | | | | | | |
| 所在地 | 自 〇〇県〇〇市 至 〇〇県〇〇市 | 距離標 | 自 〇〇km + 〇〇m 至 〇〇km + 〇〇m | 管 轄 | 〇〇国道 | | | | | |
| 供用開始日 | 昭和47年 4月 1日 | 活荷重・等級 | TL-20 1等橋 | 適用示方書 | 昭和39年 | | | | | |
| 点検種別 | 定期点検 (近接) | 幅員 | 全幅員 10.5m 有効幅員 9.5m | 地覆幅 | 歩道幅 | 車道幅・車線 | 車道幅・車線 | 歩道幅 | 地覆幅 | |
| 点検年月日 | 平成10年10月6日 | | 0.50 | 1.50 | 3.50 | 1 | 3.50 | 1 | 0.00 | 0.50 |
| 点検者 | 道路保全技術センター | 使用器具 | | | | | | | | |

| 区間番号 | 部材区分 | ランク | 損傷の種類 |
|------|----------|-----|-----------------------|
| 1 | コンクリート床版 | III | III: 床版ひびわれ IV: 変色・劣化 |
| | 橋台 | IV | IV: 変色・劣化 |
| | 鋼製高欄 | IV | IV: 変形 |
| | 鋼製伸縮装置 | IV | IV: 漏水・摩耗 |
| | 排水施設 | II | II: 土砂詰り |

日本道路公団 道路構造物点検要領 (案)

点検カルテ 橋梁

| 点検番号 | 橋梁名 | 路線名 | 車道幅員 | 車道幅 |
|------|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| 橋梁写真等記録 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---------|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | |

横浜市 橋梁点検要領 (案)

橋梁点検結果概要表

| | | | |
|--------|---------------------------|--------|---|
| 区 名 | | 上部構造形式 | 単純桁橋 (3連) |
| 橋梁番号 | | 下部構造形式 | A1A3: 重力式橋台 RC 杭基礎 P1: 壁式橋脚 RC 杭基礎 (何れも推定) |
| 橋梁名 | | 架設年時 | 昭和29年3月(1954) |
| 場 所 | | 交差物件 | |
| 路線名 | | 点検日 | 2008年3月3日 |
| 橋長 (m) | 27.3m | 点検者 | |
| 幅員 (m) | 9.3m 車4.0m+歩2.5m+歩2.8m | 点検方法 | 船・目視 |
| 総合評価 | a, b, c, ok | | |

コメント

- 本橋において損傷度判定Bの損傷箇所は主部材である床版、横桁、横橋、支者と2次部材である伸縮装置、袖擁壁、添架物に確認されている。
- 主部材である床版、横桁、横橋の損傷は橋梁の耐久性、耐荷力に影響を及ぼすことが考えられるため、速やかに補修の対応が必要である。
- 2次部材である伸縮装置からの雨水浸透は、主部材である主桁、横桁、床版、支承の損傷を誘発する要因となるため、速やかに補修の対応が必要である。
- 添架物 (φ150 水道管) の漏水はこのまま放置すると水浸透により主部材に影響を及ぼす恐れがあるため詳細調査を実施し補修検討を行うのが望ましい。
- 現橋調査において耐荷力不足による損傷は確認されていないことより、補強による耐荷力向上の必要性については、今後検討を行う必要がある。

| | |
|----------|--|
| 損傷度判定 A | なし |
| ・早急に対応 | |
| 損傷度判定 B | 伸縮装置の破断、床版のひび割れ、遊離石灰、漏水、鉄筋露出 ・すみやかに補修 ・機会をみて補修 その他: 袖擁壁のひび割れ、遊離石灰、添架物 (φ150 水道管) 漏水 |
| 損傷度判定 C | 舗装のわだち損れ、ひび割れ、欠損、高欄の塗装劣化、床版の豆板 ・通常業務で補修 ・追跡調査 その他: 添架物の腐食 |
| 損傷度判定 OK | なし |
| ・経過観察 | |
| 次回点検の目安 | 5年 橋梁グループ |
| 今回の点検方法 | 点検車 地上 足場 はしご (船) その他() |

- 橋梁定期点検要領(案): 国土交通省国道・防災課 (H16/3)
- 道路トンネル定期点検要領(案): 国土交通省道路局国道課 (H14/4)
- 道路構造物点検要領(案): 日本道路公団 (H14/6)
- 橋梁点検・補修の手引き(近畿地方整備局版): 道路保全技術センター (H13/7)
- MICHI システムマニュアル: 道路保全技術センター (H16/10)
- 橋梁点検要領(案): 横浜市道路局建設部 (H12 年度)

2. 老朽化構造物をはかる「ものさし」 ～「一般的な老朽橋梁を対象にして」～

2.1 検討の方向性（SWG1）

老朽化構造物WGでは、2003年度に横浜みなとみらい地区に位置する「万国橋」を題材として老朽化橋梁のあり方を検討してきた。

万国橋の検討からは、社会資本が十分な設計、施工および施工管理のもとで建設され、重大な初期欠陥が無ければ、物理的な側面から寿命が定まらない可能性が指摘でき、経済的側面からの寿命の考え方に一定の成果を得た。

一方、ごく一般的な橋梁が老朽化し、物理的な側面から寿命が定まる場合の考え方については課題として残されていた。

本年度の老朽化構造物WGでは、この物理的な側面から定まる寿命に焦点を当て、耐久性や安全性、使用性について構造物の状態を評価する手法について検討を試みた。

具体的には、土木構造物の物理的な寿命の評価方法として、既に非破壊検査が数多く提案されている。その適用には以下に示すとおり、未だに多くの課題を有している。それを踏まえ、RC-7委員会が2004年度に実施した塩害により損傷が進んだPCポストテンションT桁橋や、ひびわれが主桁や床版に発生したRCT桁橋における複数の非破壊検査の適用結果を整理した。その上で、老朽橋梁の評価として、どの様にアプローチを行えばよいかについて検討を試みた。

- ・その精度や再現性など、信頼性が必ずしも明確になっていないものが多いこと
- ・もしくはそのように受け止められている手法が多いこと、
- ・計測結果が構造物の耐久性と明確に関連付けられていないものが多く、構造物の劣化を、ある一面から捉えて評価している場合が多いこと
- ・どの様な場合に効果的な評価が可能となるのか、適用性や、手法の組み合わせ等について定まった知見がないこと

2.2 対象橋梁と実施した計測の概要

本研究で計測対象としたPC橋の概要は次の通りである。

- ・架設年：昭和41年
- ・橋長：約1000m
- ・支間長：30m
- ・全幅員：18.0m
- ・橋種・上部工形式：PC，単純ポストテンT桁
- ・交通量：17,500台（昼間12H），大型車17%
- ・立地条件等：海岸線に位置
- ・変状損傷の主要因：塩害

本研究で計測対象とした RC 橋の概要は次の通りである。

- ・ 架設年：昭和 45 年
- ・ 橋長：約 100m
- ・ 支間長：15m
- ・ 橋種・上部工形式：RC, 3 径間連続 T 桁
- ・ 交通量：23,900 台（昼間 12H），大型車 12%
- ・ 立地条件：都市部
- ・ 変状の主要因：過大繰り返し荷重

検討対象とした PC 橋および RC 橋における検査項目を表-2.1.1 に示す。

表-2.1.1 PC 橋、RC 橋の検査項目

*出展；コンクリート構造物の劣化診断に関する研究委員会 報告書（H17/3）

| 検査・測定項目 | 目的 | 対象 | | | | | | 備考 |
|----------|--------------------------|------|----|----|------|----|----|------|
| | | PC 橋 | | | RC 橋 | | | |
| | | 主桁 | 横桁 | 床版 | 主桁 | 横桁 | 床版 | |
| 赤外線法 | かぶりコンクリートの浮き・剥離の検出 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | 路面調査 |
| デジタルカメラ法 | ひび割れ分布(本数・幅), 断面欠損の評価 | ○ | | ○ | ○ | | ○ | |
| 打音法 | コンクリート強度の評価, 浮き・剥離の検出 | ○ | | ○ | ○ | | ○ | |
| X線法 | PC グラウト充填状況, 鋼材配置の評価 | ○ | | | | | | |
| | PC グラウト充填状況の評価 (トモグラフィ法) | ○ | | | | | | |
| 超音波法 | ひび割れ密度の評価 (透過法) | | | | ○ | | | |
| | ひび割れ深さの評価 (回折法) | | | | | | | |
| 衝撃弾性波法 | 空隙の検出(PCグラウト充填状況の評価) | ○ | | | | | | |
| | 床版厚さの測定 | | | | | | ○ | |
| レーダ法 | 床版の配筋 | | | | | | ○ | |
| 反発硬度法 | コンクリート強度の評価 | | | ○ | | | | |
| 自然電位法 | 鋼材(鉄筋)腐食可能性の評価 | ○ | | | | | | |
| | 中性化深さ | ○ | | | | | | |
| ドリル法 | 塩分量の測定 | ○ | | | | | | |
| 透気法 | コンクリートの密実度の評価 | ○ | | | | | | |
| AE 法 | ひび割れ発生・進展の検出 | ○ | | | ○ | | ○ | |
| 加速度計測 | 固有振動数, 減衰定数, たわみの評価 | ○ | | | ○ | | | |
| レーザ速度計測 | 固有振動数, 減衰定数, たわみの評価 | ○ | | | ○ | | | |
| 光ファイバ計測 | 断面内ひずみ分布の評価 | ○ | | | ○ | | | |
| | たわみ | | | | ○ | | | |
| 応力測定 | プレストレスの推定 | ○ | | | | | | |

2.3 対象構造物の構造特性や材料特性に基づく寿命のあり方

2.3.1 劣化と寿命

従来、コンクリート構造物はメンテナンスフリーに近いものと考えられ、橋梁の維持管理においても、次のように考えられていた。

「橋梁は、新設されてしばらくは、メンテナンスフリーに近い状態が続きほとんど維持補修費が発生しない（但し初期欠陥が明らかとなり多大な補修費が発生することも希にある）。次いで、徐々に直接使用に供する部分や目に付きやすい部分で損傷が進み、補修が行われるようになる（舗装劣化、高欄の腐食・損傷、地覆や伸縮装置の損傷など）。さらには、鋼橋の塗装が劣化し、点錆等が目立つようになると、景観上の問題や、腐食による劣化の進行を抑えるため塗装の塗り替えが行われる。」

ところが近年、コンクリート構造物には、塩害、アルカリ骨材反応、床版疲労を始め、様々な劣化要因のあることが明らかとなっている。

また車両の大型化や社会的ニーズの変化から、通過車両の重量が増大し、法令を越えた過積載車両も横行することで、RC床版の疲労損傷や鋼部材の疲労亀裂の発生が問題となっている。地震などの災害に目を向けると、近年発生する地震は、これまで想定してきた規模を上回るものが目立つようになり、耐震基準がここ十年ほどの間に大きく様変わりしている。

このような実態交通の変化や耐震性能に関しては、老朽化というより機能的陳腐化の問題とも考えられるが、そのような場合も安全性を担保できなければ、一つの寿命と捉えることができ、大規模な補強工事、或いは架替工事の選択を迫られることとなる。（疲労損傷による劣化は、機能的陳腐化の放置による結果であると見ることもできる。）

道路ネットワークで考えた交通規制と迂回路をうまく利用することで、日常の利用を続けるという、近年の重要課題であるコスト縮減要求にも応じた長寿命化策も考えられるが、機能的陳腐化が運用により回避された後には、材料の劣化による寿命の評価が求められるものになると考えられる。

2.3.2 対象構造物の寿命

PC 橋では、導入プレストレスの低下やコンクリートの強度低下による耐荷力の低下が安全性に関する寿命を決める要素となる。その原因として施工不良等の初期不良によるもの以外を考えると、塩害に伴う PC 鋼材の腐食による破断、過積載車の通行による PC 鋼材の破断、もしくは曲げひびわれの発生と、それによる水分・塩分・酸素などの侵入による複合的な要因などが考えられる。

その他、塩害や中性化による鉄筋腐食や ASR 等によるコンクリートの剥離、また剥離による鉄筋腐食の進行といった劣化の継続的な進行がある。この損傷が進行することによって、コンクリートの剥落につながれば、第三者影響度に問題が発生する。またこの問題を放置するといずれは、PC 鋼線の腐食破断につながる事が考えられる。

また RC 橋でも同様であり、主に主鉄筋の痩せや破断に至るような問題の発生が寿命を決める要素となる。

したがって、構造物の耐荷力に着目した判断をする上で、非破壊検査によって以上の点が直接または間接的に評価できるか、もしくは評価するとしたらどの様にすれば良いかが要点となる。

2.4 非破壊検査結果に対する評価

非破壊検査を用いた耐荷力評価への可能性について、既設PCおよびRC橋梁に対して行った各非破壊検査方法に基づき評価を行った。以下に、各試験の目的、測定原理、利点、問題点、留意事項、測定結果および考察について示す。

2.4.1 赤外線サーモグラフィ法

コンクリート構造物は、経年劣化（中性化や塩害など）により、鉄筋腐食の膨張圧でかぶりコンクリートが浮いて、剥落を生じさせる。これらの現象は第三者への障害となるばかりではなく、構造物の耐荷力を低下させることとなる。

赤外線サーモグラフィ法は、これらかぶりコンクリートの浮き部を検出する手法として昨今試行されるようになってきた。調査対象構造物表面の赤外線画像を撮影し、画像に示される温度分布状態から浮き発生箇所を検出する手法である。国土交通省の橋梁定期点検や建築物外壁仕上げ材の剥離調査などに利用されている。

【目的】

- ・経年劣化や塩害環境下の構造物に対するかぶりコンクリートの浮き調査
- ・保護被覆材の浮き調査
- ・滞水・漏水調査

【測定原理】

健全な構造物表面が受けた熱は、温度勾配により躯体深部へと伝播する。しかし、躯体内部に剥離などの空気層が発生していると、熱の伝播は遮断されて剥離層直上に熱溜まりが生じて、健全部より高温を示す。

赤外線サーモグラフィ法で得た熱画像は、表面温度分布の相対比較から剥離などの発生部位を検出するものである。

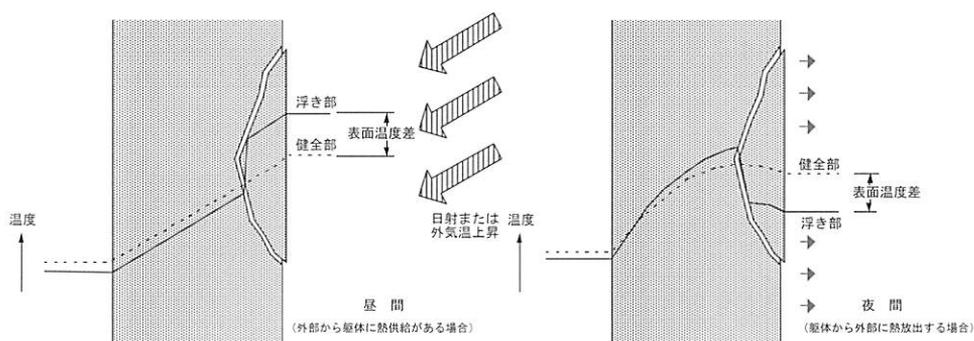


図-2.4.1 赤外線サーモグラフィ法の測定原理

【利点】

- ・足場架設が不要であり、遠望からの非破壊調査が可能である。
- ・面的な広がり分布を把握することが出来る。
- ・ポータブル型は持ち運びが容易であり、様々な場所からの調査が可能である。

- ・バッテリー駆動のため発電機等の大型機材が不要である

【問題点】

- ・日射が期待できない環境では解析が困難となる場合がある
- ・外気温の日較差が小さな環境では解析が困難となる場合がある
- ・雨天時の調査が出来ない
- ・撮影角度が45度以上の場合、解析が困難となる場合がある
- ・汚れや表面色が種々混在する場合は解析が困難となる場合がある
- ・検出深さ限界が30mm～50mm程度と比較的表層の欠陥であること

【留意事項】

- ・赤外線サーモグラフィ法で得られる熱画像は、表面の汚れや色合の影響を大きく受けるため、調査部位は必ず可視画像も記録して画像解析上の基礎資料とする。
- ・調査時には、外気温、前日の天候や雨量などを確認しておく必要がある。
- ・調査対象建造物の構造図を収集し、事前に異常個所の温度分布予測を行う。

【測定結果】

3径間を対象に3社3機種で調査を実施したが、内、2社は日較差の小さな曇天での測定を余儀なくされたため、満足な結果を得ることが出来なかった。

1社は晴天の日較差9.6℃という好条件での測定であったため、T47のG1、G6で浮きと思われる温度異常が検出された。検出した面積は最大で約2㎡であった。浮きはウェブ下方と下フランジ部に集中して発生しており、塩害による浮きである可能性が伺えた。

表-2.4.1 測定結果まとめ

| 調査対象径間 | 桁番号 | 浮き面積 (㎡) | |
|--------|-----|----------|-------|
| | | ウェブ | 下フランジ |
| T 2 6 | G 1 | 0 | 0 |
| | G 6 | 0 | 0 |
| T 3 7 | G 1 | 0 | 0 |
| | G 6 | 0 | 0 |
| T 4 7 | G 1 | 0.1 | 1.1 |
| | G 6 | 1.080 | 2.08 |

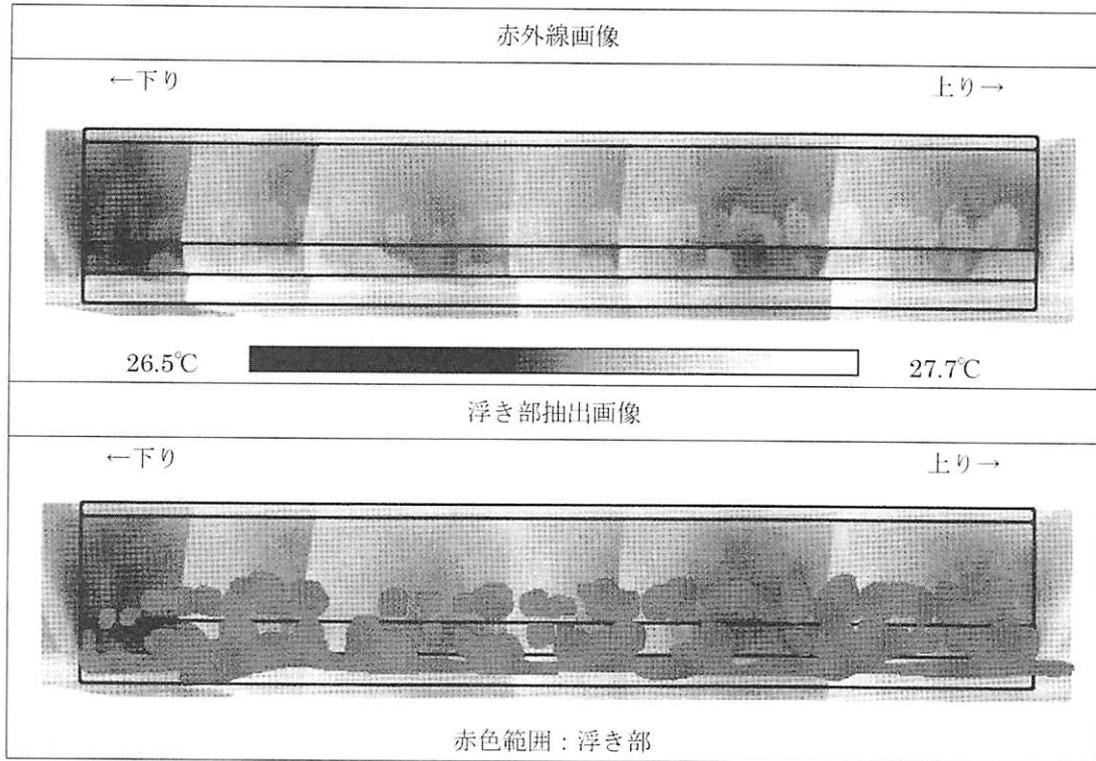


図-2.4.2 T47の赤外線画像

【老朽構造物評価への適用性】

- ・ 浮き剥離の検知を効率よく行える。浮き・剥離の量と耐荷力低下の関連性の評価が課題である。
- ・ 浮きとして検出した異常温度領域の周辺部との温度差が示されておらず、健全部と浮き部との温度差の閾値が明確ではない。画像上の濃淡がかなり鮮明に現れていることから、比較的表層の浮きである可能性が伺え、躯体かぶりコンクリートの浮きの他、塗装の浮きが含まれている可能性も推測される。

2.4.2 デジタル画像法

デジタル画像法は、コンクリート構造物の表面損傷を把握するため、コンクリート構造物の壁面をデジタルカメラで撮影・解析し、ひびわれや損傷部を判読する技術である。

手法の特徴は、デジタルカメラ画像から展開画像を作成することで、コンクリート構造物の現況把握やクラックの形状・密度等を計測・判読できる点である。

デメリットは、撮影条件により画像の明るさが変化しやすい傾向があり、判読・計測の精度が一定しない場合があることである。

現在、鉄道や道路等のトンネルや地下洞道の点検調査に用いられている。

【目的】

- ・コンクリート構造物の表面状況の記録
- ・展開画像の作成（現況スケッチ図）
- ・ひびわれの分布の把握と定量化
- ・断面欠損の評価

【利点】

- ・展開画像を作成することで、クラックの形状や密度等を計測することができる。
- ・従来の目視観察とは異なり現況が画像記録され後確認が可能であり見落としが少ない。
- ・ひびわれの定量化が容易である。

【問題点】

- ・撮影条件によって画像の明るさが変化し、判読に適さない画像を取得する場合がある。
- ・斜めに撮影した画像では、後処理で解像度が変化して判読・計測が難しい場合がある。

【留意事項】

- ・対象構造物の撮影面に正対し、安定した足場を確保する。
- ・撮影時は対象面の照度を正確に計り、撮影機材の露出を最適に設定する。
特に屋外撮影では、太陽光線の逆光や反射に注意する。
- ・再現性のある撮影をするためには、撮影位置を正しく記録しておく。

【計測結果】

- ・デジタル画像によるひびわれ抽出では、幅 0.2mm 以上のひびわれを検出している。
- ・事前に行われたひびわれをチョークでマークした箇所においては、全てのひびわれを検出している。
- ・第1回測定結果と第2回測定結果のひびわれ検出差は±5%程度である。

表-2.4.2 計測結果のまとめ

| | | 第1回目 | 第2回目 | 考察 |
|-----------------|---------|--|---|--|
| PC橋 (小余綾高架橋) | 計測日 | H16.9.22 | H17.2.1 | <ul style="list-style-type: none"> 幅 0.2mm 程度のひび割れを、安定して測定でき、有効性が確認出来た。 撮影角度が十分に確保できない箇所、露出オーバーによる測定不能の問題が生じた。 |
| | 気候 | 晴 | 晴 | |
| | 気温 | 22.3~31.9℃ | 1.1~8.5℃ | |
| | 日較差 | 9.6℃ | 7.4℃ | |
| | 計測結果の概要 | <ul style="list-style-type: none"> T26にはひび割れが少なく、ほとんどが幅 0.25mm 未満で、G6の一部に0.25mmを超えるひび割れが観測された。 T37にはひび割れが少なく、幅 0.25mm 未満のひび割れのみであった。 T47には全体的にひび割れが見られ、幅 0.5mm 以上の顕著なひび割れが多い。 | <ul style="list-style-type: none"> 各スパンとも一回目と同様な結果であった。 一部露出オーバーで測定不能の箇所があった。 | |
| RC橋 (下赤塚高架橋) | 計測日 | H16.11.22 | H17.2.9 | <ul style="list-style-type: none"> 2回の検出差は±5%以内とほぼ同じ結果であり、安定した検出制度が確認できた。 撮影角度や露出の違いにより、画像の歪み程度や画質が異なり、検出精度が若干異なる傾向があった。 |
| | 気候 | 晴 | ? | |
| | 気温 | 15.1~21.8℃ | 0.3~11.6℃ | |
| | 日較差 | 6.7℃ | 11.3℃ | |
| | 計測結果の概要 | <ul style="list-style-type: none"> 全体的に 0.25mm 未満のひび割れのみであった。 | <ul style="list-style-type: none"> 1回目と同様の結果であった。 | |

表-2.4.3 測定範囲におけるひびわれ数量一覧

| 撮影対象 | 対象部位 | ~0.25mm | | 0.25~0.5mm | | 0.5mm~ | |
|--------|---------|---------|------|------------|------|--------|------|
| | | 第1回目 | 第2回目 | 第1回目 | 第2回目 | 第1回目 | 第2回目 |
| SP26G1 | ウェブ部 | 1.41 | 3.48 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | 下フランジ側面 | 2.82 | - | 0.00 | - | 0.00 | - |
| SP26G6 | ウェブ部 | 1.73 | 1.43 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | 下フランジ側面 | 1.80 | 1.42 | 0.32 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| SP37G1 | ウェブ部 | 1.95 | 1.08 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | 下フランジ側面 | 0.48 | 3.07 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| SP37G6 | ウェブ部 | 0.00 | 1.52 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | 下フランジ側面 | 1.08 | 0.95 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| SP47G1 | ウェブ部 | 1.29 | 1.32 | 0.24 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | 下フランジ側面 | 0.48 | - | 0.37 | - | 0.00 | - |
| SP47G6 | ウェブ部 | 3.13 | 0.39 | 5.40 | 3.98 | 0.87 | 0.98 |
| | 下フランジ側面 | 1.04 | 2.24 | 5.41 | 4.41 | 3.31 | 3.19 |

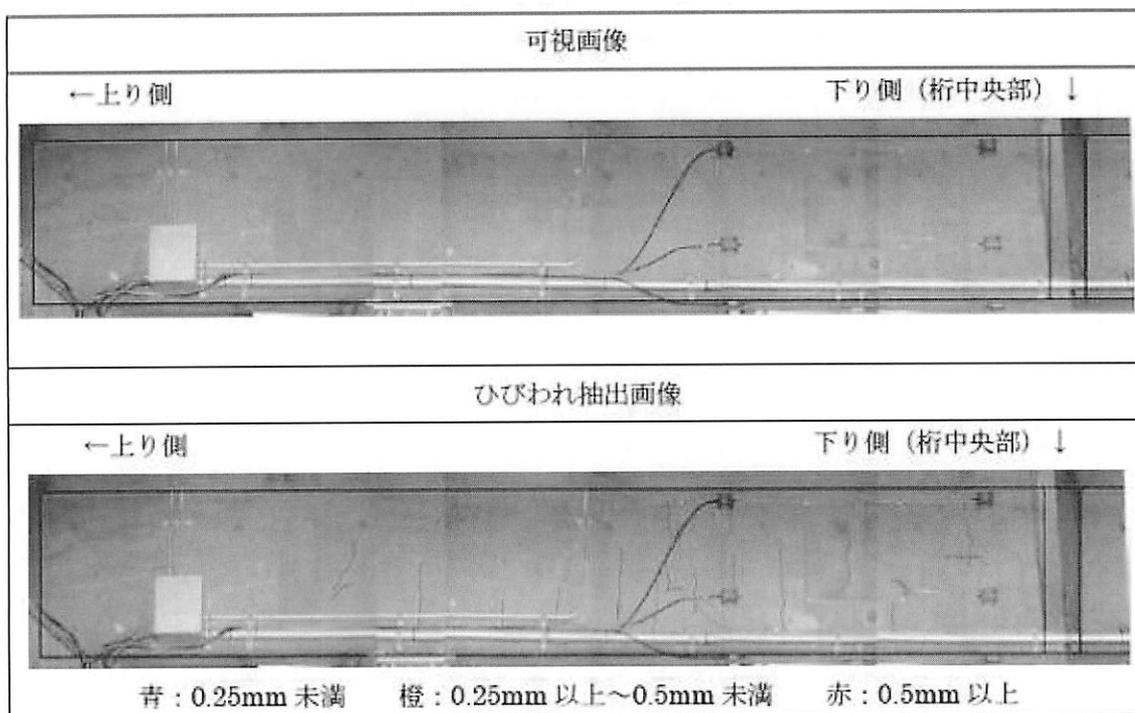


図-2.4.3 デジタル画像法による東 03 桁東面(1 回目 : H16.11.2 撮影)のひびわれ抽出結果

【考察】

- ・コンクリート構造物の表面損傷の現状を手軽に記録し判読する手法として有効である。
- ・PC橋の報告に露出オーバの記載があり、逆光や反射による露出超過が考えられる。
- ・PC橋の結果では、ひびわれ数量抽出値の一部で1回目と2回目のひびわれ数量が50%減少している。これは太陽光線の逆光や反射による露出超過が原因と考えられる。この結果は、先に述べたように、屋外での撮影時の測光と撮影機材の露出設定の重要性を示している。

【技術課題】

(1) 目的に合わせた画像取得方法の区分検討

一般的なデジタルカメラ画像によるひびわれ抽出は、画像の解像度を下回るひびわれは、濃度変化して写り込むため、クラック部分の画像濃度を解析することで、ひびわれを検出できるという方法である。たとえば、解像度 1mm の撮影で、5 倍の 0.2mm 程度のひびわれまで検出できるとされる。この方法は、室内やトンネル等、撮影対象の明るさが一定な場所で、しかも撮影位置を一定に設定できる場合に有効だが、撮影時の太陽の位置や天候による光量が急激に変化する屋外では、一定の成果を取得できない可能性がある。特にこの考え方によるひびわれの自動検出は困難が予想される。

一定の精度でひびわれを計測（自動抽出を含む）する場合は、正しい標本化に必要な精度として、必要な計測精度の 2 倍以上の解像度が必要で、ひびわれの計測精度が 0.2mm の場合は、0.1mm の解像度での撮影が必要である。

以上の点から、「判読（確認）」を目的とする場合は、濃度変化を利用した画像取得を、「計測（自動抽出含む）」を目的とする場合は、2 倍以上の解像度で画像取得を行うなど、目的に応じた画像取得方法の区分を検討する必要がある。

また、濃度変化で判読を行う場合、対象の壁面にクラックスケール標識を貼り付け同時撮影を行い、指標データとして判読精度を高める方法の検討も必要である。

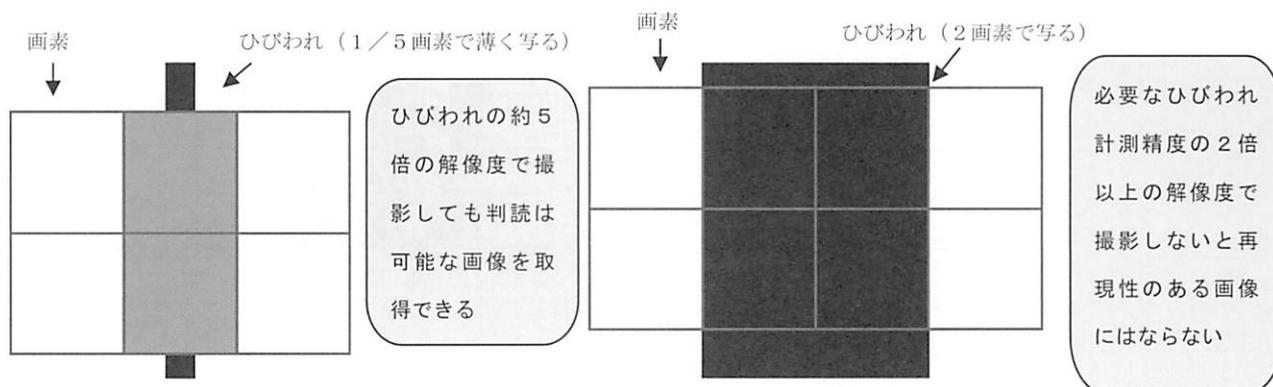


図-2.4.4 判読用画像取得

図-2.4.5 計測用画像取得

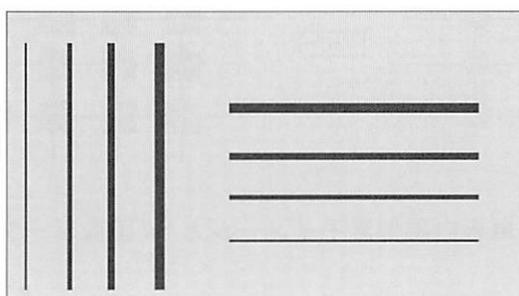


図-2.4.6 クラックスケール標識例

(2) センサ構造の特性と画像処理手法の検討

一般的なデジタルカメラは、単板カラー型の画像素子が搭載されており、その上にカラーフィルターが市松模様に設置され、赤 (R)、緑 (G)、青 (B) のそれぞれの光の波長を測定している。このような型で記録されたデータから RGB 画像を生成するため、画像素子の実寸から算出された画像解像度を実現していない可能性がある。

計算解像度に近い計測を目的とする場合は、単板白黒型の画像素子の使用や元画像データ (ベイヤー) から白黒単板に近い画像を作成する手法の研究が必要である。

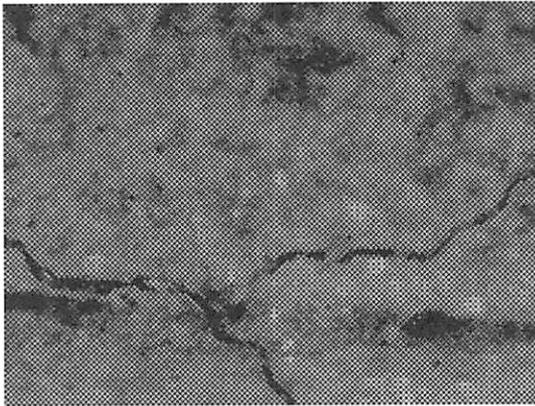


図-2.4.7 元画像 (ベイヤー)

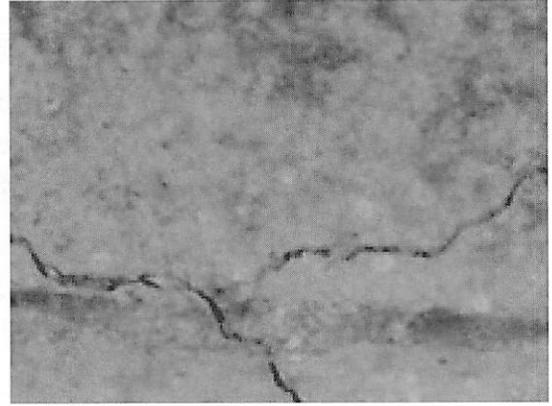


図-2.4.8 RGB 処理後

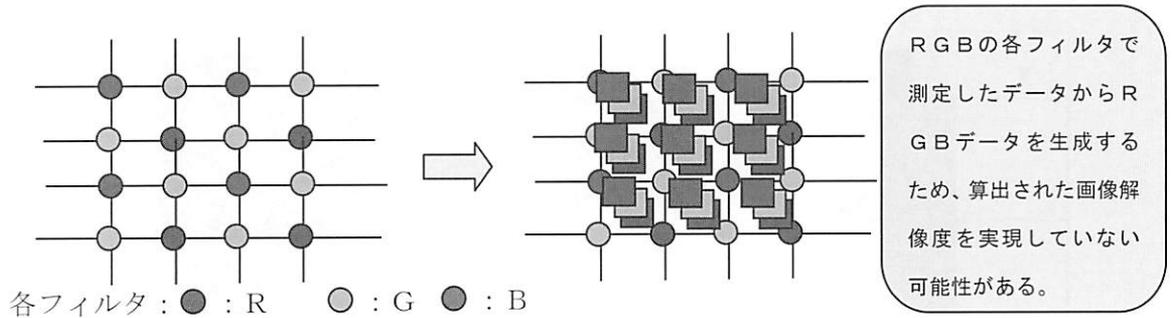


図-2.4.9 単板カラー素子イメージと RGB 画像データ変換後のイメージ

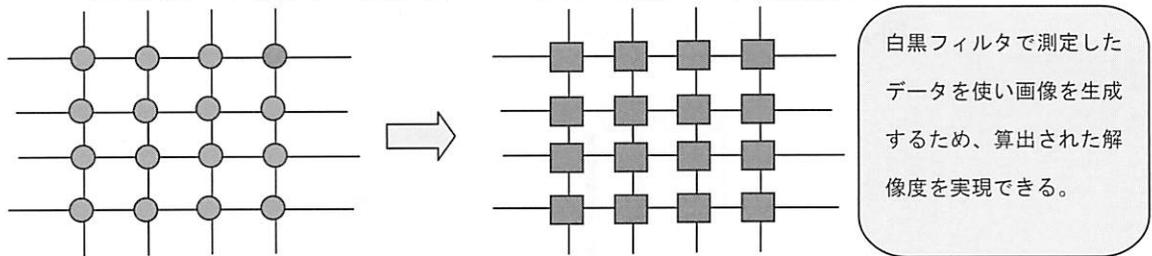


図-2.4.10 単板白黒型素子イメージと BW 画像データ変換後のイメージ

【技術詳細】

・使用機材の選定

目的に合わせた機材選定が必要である。

レンズはデジタルカメラ専用に設計され歪みの少ない非球面レンズの使用表記がなされている製品が推奨される。

フィルム時代の旧レンズを使用した場合は、レンズの歪みが大きく、色収差等の問題から理論分解能を発揮できない場合がある。これは、CCDの画素間隔がフィルム粒子より小さいことが原因である。

高精度の計測位置が要求される場合には、デジタルカメラの中心とレンズ歪みのパラメータを算出して単画像補正を行う必要がある。

デジタルカメラは、できるだけ計測に向けた構造の物を使う方が良い。理想は単板白黒素子のデジタルカメラである。

・撮影方法

撮影は、対象構造物の撮影面に正対し、安定した足場で撮影する。斜め撮影等を行うと、後処理での幾何補正が難しい場合がある。

再現性のある撮影を行うためには、撮影位置関係の座標と撮影方向のマーキング、カメラ高や撮影設定を記録する必要がある。

撮影前に照明を含めた測光を行い、撮影機材の露出を最適に設定する必要がある（特に屋外は太陽光線の影響が大きいため、撮影位置と撮影時間から逆光や反射の影響も考慮する必要がある）。

・画像処理

取得した画像データは、色調整とレンズの歪みの調整及び幾何補正を行う必要がある。

・画像フォーマット

画像のフォーマットは、画像保存性と表示の早さを考慮し、可逆圧縮が可能な方式で階層構造を格納可能な形式であるTIFF (Tagged Image File Format) やJPEG2000等が推奨される。

2.4.3 打音法

打音法は、一般にコンクリート表面をハンマーで打撃し、その音質によって、その表面近傍の浮き、はく離、空洞の有無を推定する方法である。

今回検査では、機械的にほぼ一定の打撃をコンクリート表面に与え、センサによって打撃によるコンクリート表面のたわみ振動を検出し、その振動性状によりコンクリート内部の割れや浮きなどを検出する方法を用いている（図 2.4.12 参照）。この方法は、人力によるハンマリングで発生した打撃音を検査員が聴覚によりコンクリートの割れや浮きを判別する一般的な方法とは異なる。



図-2.4.11 打音検査装置(診断テスト：三菱電機製)



図-2.4.12 検査状況

【目的】

- ・かぶりコンクリートの浮き調査
- ・保護被覆材の浮き調査
- ・表面近傍の空洞調査

【利点】

- ・比較的簡易な器具で、判断が可能。
- ・検査員によるばらつきがなく誰にでも検査が可能。
- ・ユニットへの延長スティック取り付けにより、高所でも足場なしで検査可能。

【問題点】

- ・判断基準が未公開であり、検査対象毎の判定レベルが不明。
- ・判定範囲はコンクリート表面近傍までである。
- ・周囲の騒音によっては判断が異なる恐れがある。

【留意事項】

- ・割れや浮きの生じたコンクリートモデルを用いた閾値の設定が必要。
- ・閾値と割れや浮きが存在する深さの3段階評価の設定確認が必要。

【測定結果】

- ・2回の検査の結果、地上から7m程度の高所の検査となるT26径間ではそれぞれの検査結果が若干異なった。
- ・その他の場合には2回ともほぼ同様の傾向で、コンクリートの浮きの状況を確認。

表-2.4.4 測定器の表示と浮きの状況との関係

| LED表示色 | コンクリート浮きの位置 |
|--------|-----------------|
| 緑色 | 表面から20cm以上：浮きなし |
| 黄色 | 表面から10cm～20cm |
| 赤色 | 表面から15cm以下 |

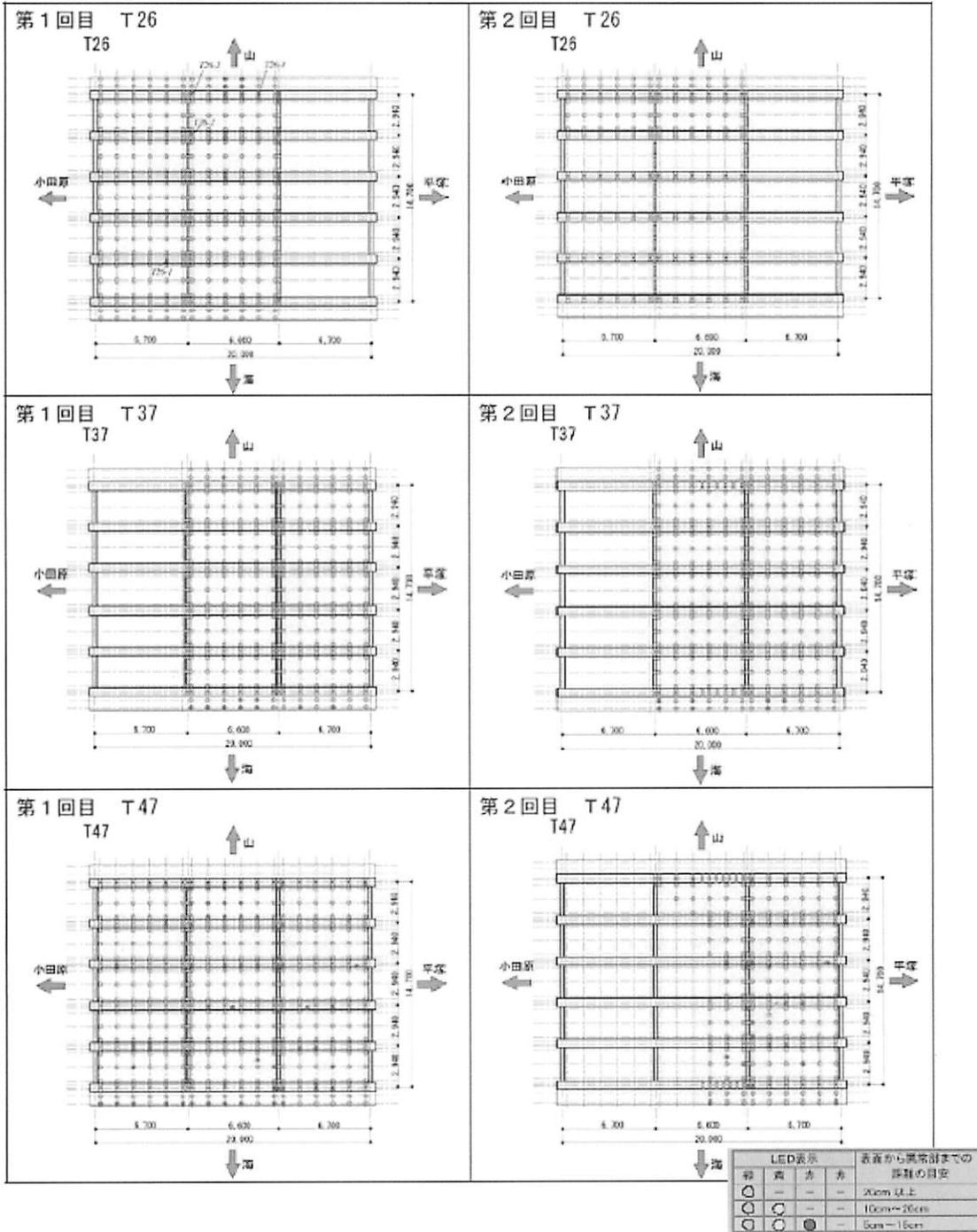


図-2.4.13 調査結果

【老朽構造物評価への適用性】

- ・比較的簡易に、ひび割れ、はく離、空洞を把握できる方法として有効である。浮き・剥離の量と耐荷力低下の関連性の評価が課題である。
- ・打撃箇所のみでの判断であるため、検査面積が広い場合には見落としのないように調査位置を設定することが必要である。
- ・目視調査との組合せで構造物診断に有用なデータを得ることができる。

2.4.4 X線法

X線法は、物体を透過する性質を持ったX線を利用し、物体内部の状態を映像化し視覚的に確認する手法である。コンクリート構造物を対象とした場合には、鉄筋、配管等の埋設物、および空洞やひび割れ等の変状を確認することができる。

X線法による撮影では、X線発生装置、および物体を透過したX線を捕らえるためのX線撮影媒体が用いられるが、X線発生装置には高エネルギーのX線を発生させる装置、低エネルギーのX線を発生させる管球タイプの装置がある。現場での使用においては法規制のため低エネルギータイプのX線発生装置を使用することがほとんどである。

またX線撮影媒体にはアナログ媒体として工業用X線フィルム、デジタル媒体としてイメージングプレート、フラットパネル等がある。

【目的】

- ・鉄筋、かぶり厚さの調査
- ・埋設物の調査
- ・空洞の調査

【利点】

- ・信頼性のある埋設物情報を得られる。

【問題点】

- ・X線撮影に作業時間を要し1回の撮影範囲も狭くコスト高である。
- ・安全上の制約から、実現場ではX線照射装置に制限がある。
- ・一方向一画像からでは、例えばPC鋼線と鉄筋の判別は困難であるといった状況が生じる。

【留意事項】

- ・実際の撮影においては撮影現場の状況、求められる品質、即時性等を勘案し、最適かつ現実的な装置、撮影媒体を組み合わせた撮影が必要。
- ・放射線被爆に対する安全上の制約から「安全衛生法」「電離放射線障害防止規則」にしたがって、「X線作業主任者」の有資格者作業、低エネルギータイプの使用が必要。
- ・低エネルギータイプ機器使用でも管理区域の設定が必要。
- ・放射線被爆に対する安全上の制約から用いる低エネルギータイプの使用では、対象物によって異なるが、コンクリートでの適用限界厚さは350～400mm程度。

- ・透過写真は幾何学的に拡大された投影像であり、そこから得られた情報には位置補正が必要。

【測定結果】

今回調査においては、X線発生装置として管電圧 300kVp の低エネルギーX線発生装置を使用し、X線撮影媒体としてイメージングプレートを使用した。

- ・今回の撮影条件では鉄筋、PC鋼線の腐食は確認出来なかった。
- ・全画像において、主鉄筋、スターラップ筋に節、リブが確認出来なかった。使用されている鉄筋が丸鋼であったことが考えられる。
- ・横桁シース管において、
 - ・シース管内の他の領域と比較して濃度の濃い部分が確認され、グラウトの充填不足が予想された (T26-G1-Y)。
 - ・他のPC鋼線とは異なる方向に伸びるPC鋼線（鉄筋の可能性もあり）の存在が確認され、PC鋼線であった場合、張力不足の恐れが予想された (T37-G6-Y)。(ただし、本画像のみからではPC鋼線と鉄筋の区別は困難で、条件を変えた撮影による検証が必要。)
 - ・シース管の上部にグラウトの充填が不足している可能性の高い部分が確認された (T37-G6-Y)。
 - ・桁ウェブのシース管において、
 - ・シース管の上部にグラウトの充填が不足している可能性の高い部分が確認された (T47-G1-W) (T47-G6-Y)。

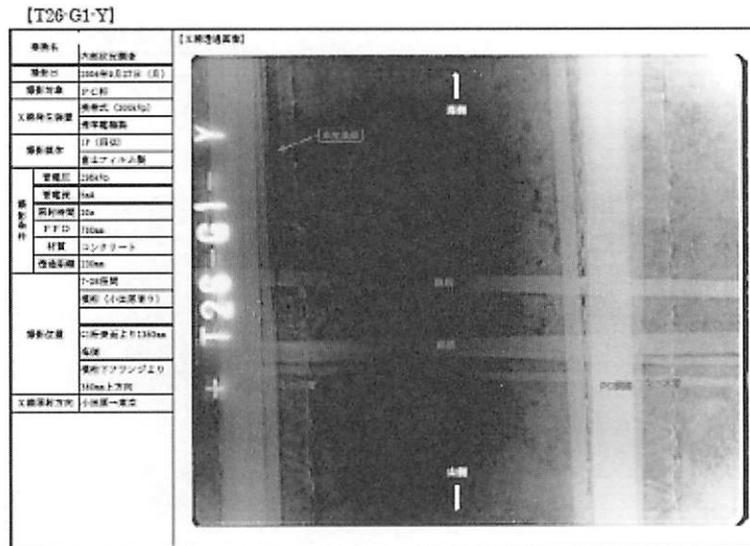


図-2.4.14 T26-G1-Y 撮影画像

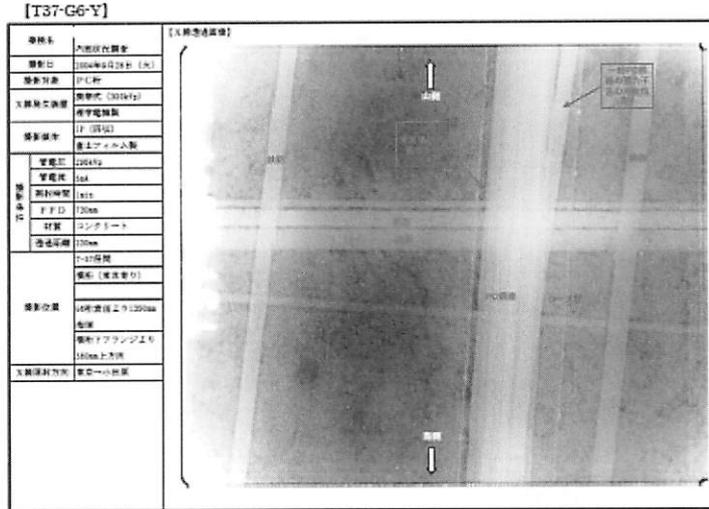


図-2.4.15 T37-G6-Y 撮影画像

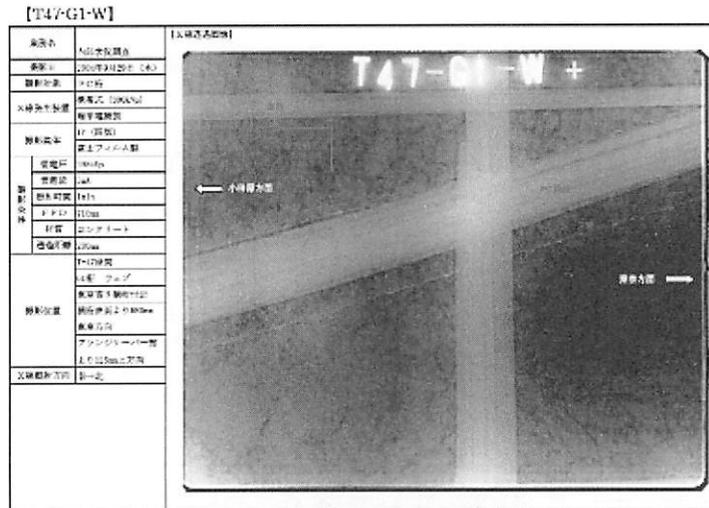


図-2.4.16 T47-G1-W 撮影画像

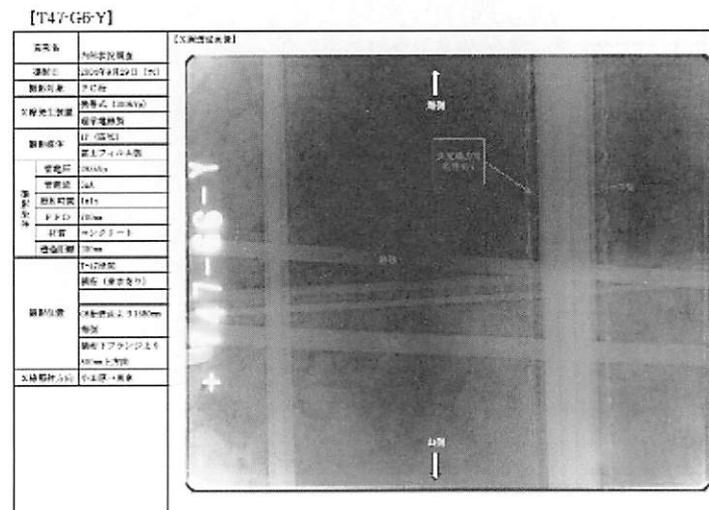


図-2.4.17 T47-G6-Y 撮影画像

【老朽構造物評価への適用性】

- ・鋼材本数を特定する必要がある場合に有効であり、P C 鋼材の破断が確認できる可能性がある。
- ・一方向一画像からでは、類似形状、例えばP C 鋼線と鉄筋の区別は困難であるといった状況を生じるため、条件を変えた撮影による検証が必要となる場合がある。
- ・現在は安全管理の面から低エネルギー X 線の利用に限定され、作業効率、コストから部分的な調査とならざるを得ないが、高エネルギー X 線の利用により 500mm を超える柱や梁全体の撮影が可能となれば、C T との組合せによって、配筋、空洞、ひび割れなどの断面位置や 3 次元表示が可能となるなど、新たな適用可能性への要請が高まるものと考えられる。
- ・現状は X 線の透過による X 線発生、撮影媒体の両側を利用した手法があるが、これを片側からのアクセスによる後方散乱光トモグラフィによれば、表層の数 10mm 以内の性状の断層画像が可能となり、かぶり部分までの調査に有効になると考えられる。

2.4.5 超音波法（トモグラフィ法）

超音波法は、超音波を情報の媒体として物体内部の情報を得ようとする方法である 1)。金属関係の非破壊検査法としての実績が多く、コンクリートには強度推定、ひび割れ深さ、内部欠陥の検査に適用されている。

物性の異なる媒質の境界面でそのエネルギーの一部が反射する性質を利用しており、コンクリートでは、ひび割れ、はく離、空洞などの欠陥の存在する空気層との境界で、弾性波のほとんどが反射してしまうことを利用している。

【目的】

- ・金属関係の内部欠陥の把握
- ・コンクリートの強度推定、ひび割れ深さ、内部欠陥検査

【利点】

- ・弾性波はすべての固体を伝播するので、基本的にはどのような構造物に対しても適用可能である。

【問題点】

- ・構成分子が小さく高密度で密度分布の安定している物体の調査は、波動の伝播がよく、内部の欠陥検出、対象物の位置評定等を正確にできるが、構成分子が大きく密度の不均一なコンクリートでは、適用にあたって課題が残されている。
- ・実構造物での適用に際しては、以下に示すように測定条件によって大幅に低下する可能性がある。
 - ・弾性波の減衰
 - ・周波数の限界
 - ・欠陥の複数・重層

・欠陥形状・寸法による限界

【留意事項】

コンクリートへの適用にあたっては、対象物体の形状、材質または検査項目によって、以下の手法から適切に選定することが必要である。

- 1)発振子・受振子の配置：透過法、反射法
 - 2)伝播する超音波の振動様式の種類：縦波（P波、L波）、横波（S波）、表面波
 - 3)検出項目の種類：伝播時間（時間差）、周波数、位相、他
- 検査項目とその適用の技術レベルを、下表に示す。

表-2.4.5 検査項目と測定手法*

| 検査項目 | 手法 | | 振動子の配置 | | | 振動様式 | | | 検出項目 | | |
|---------|-----|-----|--------|----|-----|------|-----|----|------|---|--|
| | 透過法 | 反射法 | 縦波 | 横波 | 表面波 | 時間 | 周波数 | 振幅 | 位相 | 他 | |
| 強度 | ○ | | ○ | △ | | ○ | | | | | |
| 変形特性 | ○ | ○ | ○ | ○ | | ○ | ○ | | | | |
| ひび割れ深さ | | ○ | ○ | △ | △ | ○ | ○ | | | ○ | |
| 剥離 | | ○ | ○ | ○ | | ○ | | ○ | | | |
| ジャンカ・空洞 | ○ | ○ | ○ | ○ | | ○ | ○ | △ | | | |
| 厚さ | | ○ | ○ | ○ | | △ | ○ | | | | |
| 鉄筋かぶり厚さ | | ○ | ○ | ○ | | ○ | | | | | |
| (中性化) | △ | △ | △ | △ | | △ | | | | | |

○：よく用いる △：一部用いる

1)魚本、加藤、広野：コンクリート構造物の非破壊検査、pp31、1996

【測定結果】

今回行った超音波法（トモグラフィ法）では、PC桁断面を対象としてシース内部のグラウト充填状況の評価が行われた。上表のジャンカ・空洞の検査項目に示されるように、透過法、縦波を用いた伝播時間の検出を、50mm等間隔で密に行い、その測定結果をトモグラフィ解析することでPC桁内部の伝播速度の分布を求めてPCグラウトの充填性の評価を行った。

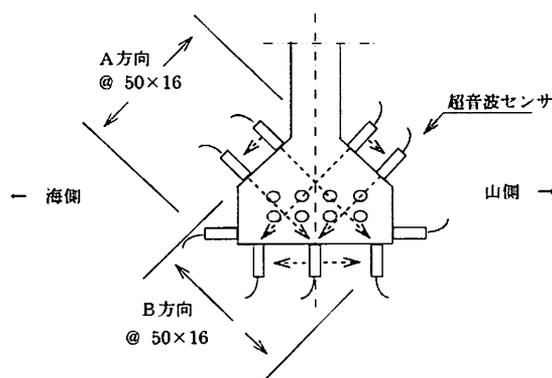


図-2.4.18 測定位置

伝播速度はPCグラウト以外、コンクリート内部のひび割れや剥離、表面劣化などでも変化を生じるため、できるだけ上記のような変状のない箇所を測定位置としている。シー스가配された位置に伝播速度の遅い箇所があればグラウト不良と考えられる。

2回の測定の結果、以下に示すとおり、耐荷力評価に有用な情報が得られることがわかった。

- ・ G 1桁には中央部に伝播速度の遅い箇所があり、シース部の充填不良が疑われる。
- ・ G 6桁では塩害による表面劣化の影響により、内部の状態が不明確になっている。
- ・ G 1桁、G 6桁ともに海側下部の端部から 100mm 内部まで伝播速度が 3200 m/sec 以下と遅くなり、塩害による劣化の進行が伺えるが、シース箇所は健全と考えられる。

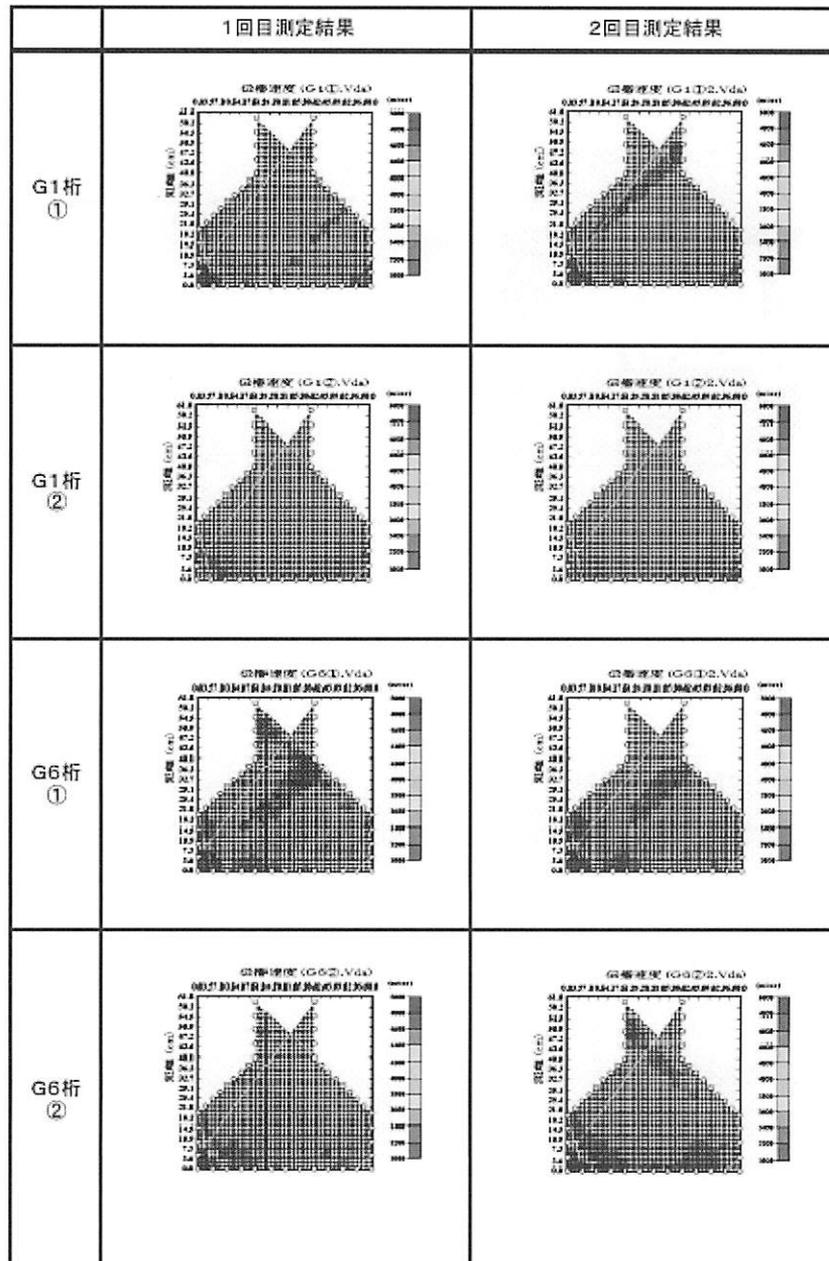


図-2.4.19 測定結果

【老朽構造物評価への適用性】

- ・グラウト不良ではないことを検証する場合には有効である。グラウト不良が疑わしい場合は、鋼材破断の調査実施についての判断材料として有効である。
- ・本方法によって耐荷力評価に結びつくPCグラウトの充填評価に一定の効果を確認できた。
- ・調査にあたっては、測定位置の選定に注意が必要である。
- ・他調査手法との組合せによる精度向上も必要ではないかと考える。

2.4.6 インパクトエコー法

インパクトエコー法は衝撃弾性波法の一つで、コンクリートの厚さ測定を目的とする。コンクリート表面を鋼球で打撃し、底面からの反射音の繰り返しを打撃点近傍に配置されたセンサーで捉え、リアルタイムで時系列の音圧データを高速フーリエ変換（FFT）して得られた周波数をもとに厚さを求める手法である。

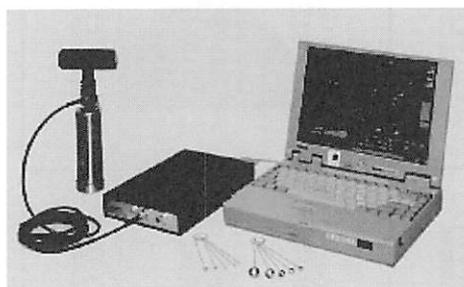


図-2.4.20 インパクトエコー法装置

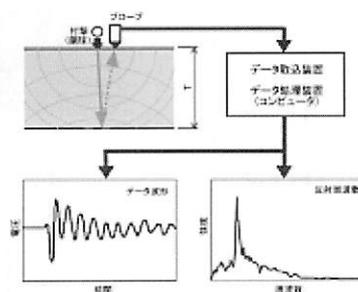


図-2.4.21 システム構成

【目的】

- ・コンクリート厚さ調査
- ・ひび割れ、空洞調査
- ・PCグラウト充填調査

【利点】

- ・利用される音波は可聴音領域の周波数であり、鉄筋などの音の反射が小さい対象の検出は困難であるが、それらにあまり影響されずに厚さを比較的精度よく測定できる。

【問題点】

- ・測定精度は音速の設定に依存。
- ・鉄筋などの音の反射が小さい対象の検出は困難。
- ・測定位置によっては、端部の影響等によりデータの解釈が困難で、評価精度の向上が期待できない場合もある。

【留意事項】

- ・健全部との比較による評価が有効。
- ・コンクリート内部の埋設物やきずの検出の可否は、対象物の材質又は性状、対象物の大きさ、表面から対象物までの距離及び弾性波の波長（又は周波数）に関係。
- ・鉄筋直径 D_s 、そのかぶり厚 T_c とすると、 D_s/T_c が 0.3 以下の場合、鉄筋径が 40mm

以下で衝撃を与える鋼球(インパクト)の径が 8mm 以上の場合、鉄筋検出は困難。

- ・鉄筋径、かぶり厚を考慮し、長めの波長（低めの周波数）をもった弾性波を発生させれば鉄筋による反射波の影響を受けずに厚さを測定することが可能。

【測定結果】

1) P C 橋（内部空洞）

この探査は、P C 桁の内部空洞、グラウト充填評価を目的に実施された。桁フランジ下面・桁軸方向中心線上からの探査によって、ケーブルダクト内にグラウトが充填されていない場合、コンクリート内に空洞が存在するのと同じ状態となる。音波はその部分を迂回して伝わって伝播時間が長くなり、FFT によって得られるハンチ部に起因する周波数のピークが低い方に移動し、移動する量は空洞の大きさに比例して大きくなることから内部空洞を確認できる。桁軸方向および桁軸直角方向の探査が行われる。

- ・ 2 回の探査を同位置で行った結果、探査時期による変化又は再現性には、解析に関わる有意差は認められず、インパクトエコー法による P C ケーブルダクト内グラウトの場合、探査時期（気象的条件の違い）による影響はないと判断された。
- ・ 多点測定データを組み合わせることによって音の反射源を特定することが可能であることが確認され、耐荷力評価に一定の効果が認められた。ただし、反射源が P C ダクト内の未充填部やダクト周りのコンクリートの不具合部なのかは、実証による確認が必要である。

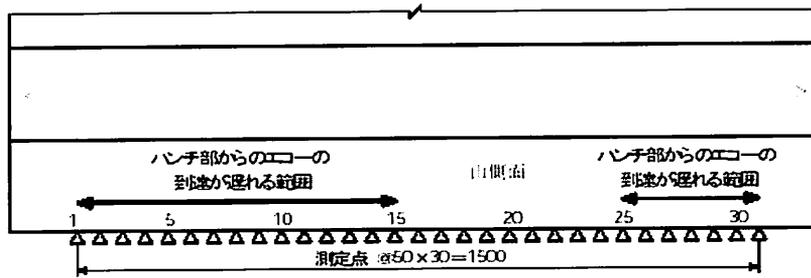


図 4.2.22 海側析・下フランジ面析中心軸上探索の解析結果

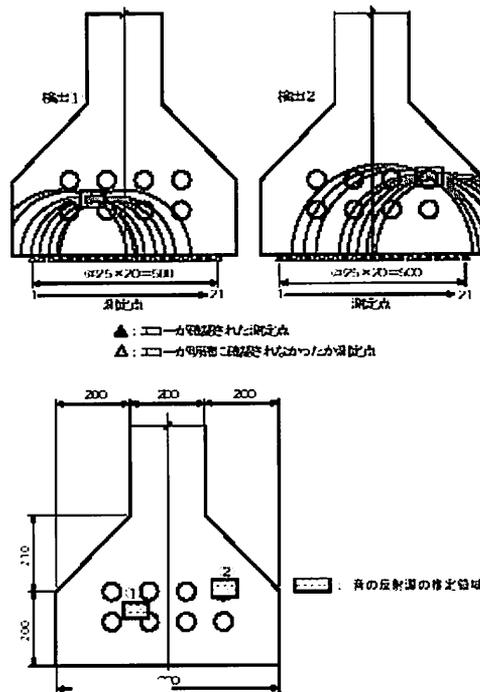


図 4.2-24 山側析・ライン①の解析結果

図-2.4.22 解析結果例

2) RC橋 床版厚さ

この探査は、アスファルトとコンクリートの2層構造の床版厚さの測定を目的としたものである。約 25% (70 個所中、17 個所) の位置で測定ができなかったが、これは2層境界部の状況によっては明瞭な反射波が得られないことや、測定領域にひび割れが存在して一部は測定のためにならなかったことなどが理由として考えられる。

施工状況確認を目的とした測定としては有効な測定結果が得られたと考えられる。

表-2.4.6 床版厚さ測定結果一覧画像

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| ① | 186 | 177 | 202 | --- | 202 | 196 | 196 | --- | 202 | 196 |
| ② | 196 | 172 | 208 | 208 | 208 | 202 | --- | 208 | 202 | 202 |
| ③ | 196 | 186 | 186 | 208 | 208 | 208 | 202 | 196 | 196 | 208 |
| ④ | 196 | 208 | 196 | 196 | --- | --- | 208 | --- | 202 | 202 |
| ⑤ | 196 | 208 | 196 | 196 | --- | --- | --- | 196 | --- | 196 |
| ⑥ | 202 | 208 | 208 | --- | 196 | --- | 202 | 208 | 208 | 202 |
| ⑦ | 202 | --- | --- | 196 | 202 | --- | --- | 208 | 186 | --- |



図-2.4.23 床版厚さ測定結果例 (音圧データおよび FFT 処理結果)

【老朽構造物評価への適用性】

- ・グラウト不良ではないことを検証する場合は、有効である。
- ・内部空洞・グラウト不良が疑わしい場合は、他の調査方法のと組み合わせで使用する必要がある。
- ・床版厚などコンクリート部材の寸法測定では高い精度が期待でき、耐荷力を評価する上で、基本情報の入手という点で有効である。
- ・PC、RC橋について内部空洞および床版厚さ調査を行った結果から、コンクリート厚さ、ひび割れ、空洞、PCグラウト充填調査が可能であり、耐荷力評価手法として一定の効果が期待できる。
- ・一次探査 (桁軸方向) で異常なしと判断されても二次探査 (桁軸直角方向) では欠陥と推定される個所が検出された場合もあり、一次探査と二次探査の関連性を検討する必要がある。

2.4.7 反発硬度法

コンクリート構造物はコンクリートの強度、特に圧縮強度に基づいて設計され、また、コンクリート構造物の劣化に関連した物理特性の変化と圧縮強度とが関連している。このため、コンクリート構造物の寿命を考える上で強度を把握することは極めて重要である。

コンクリート構造物の強度を調べる方法には、採取したコンクリートコアの強度試験から求める方法、コンクリート表面の反発度から強度を推定する方法、局所的な破壊試験により強度を推定する方法などがある。

反発硬度法は、コンクリートの表面をテストハンマーによって打撃し、その反発硬度から圧縮強度を求める方法で、我が国では（社）日本材料学会で試験方法の規準が制定されたのを始めとして、（社）日本建築学会、（社）土木学会等にも試験方法に関する規準が示されている。

【目的】

- ・ 詳細調査を実施する前の予備試験
- ・ 何らかの理由でコア採取による強度試験が困難な場合
- ・ コンクリートの強度分布など、多くの箇所での強度推定が必要な場合
- ・ コンクリートの材齢に伴う強度増加を確認したい場合

【利点】

- ・ 試験方法が簡便で、構造物を破壊することなしに測定できる。

【問題点】

- ・ 打撃力が逸散するような箇所や状態では測定が困難
- ・ 測定可能なコンクリート強度の範囲はおよそ $10\sim 60\text{N/mm}^2$
- ・ コンクリートの表面状態（乾湿、粗度）の影響を大きく受ける
- ・ 使用骨材、骨材寸法、配合、施工・環境条件に影響される。

【留意事項】

- ・ 反発度から圧縮強度を求める換算式については、種々提案されているが、必ずしも十分な精度を発揮しない場合があるので、測定対象ごとに圧縮強度試験を行うことによって実験的に求める方法が望ましい。
- ・ 推定結果の標準偏差は 3N/mm^2 との報告もある。

【測定結果】

- ・測定値は 20～30N/mm² の範囲にあり、P C 橋の設計基準強度 40N/mm² に比べ、かなり低い値となっている。
- ・測定値の相対的な関係で見ると、海側と山側あるいは径間ごとの強度分布については、損傷ランクとの相関性は取れている。

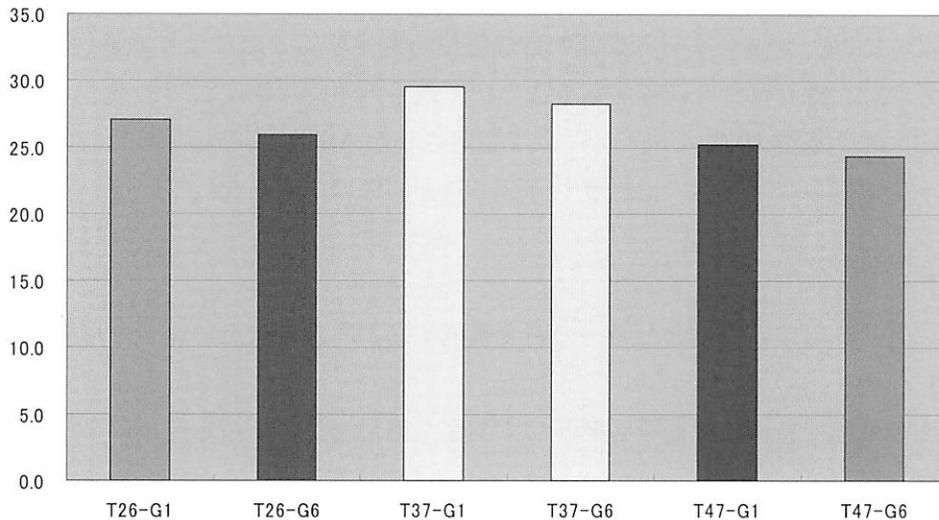


図-2.4.24 各桁毎の圧縮強度平均値 (G 1 : 海側、G 6 : 山側)

【老朽構造物評価への適用性】

- ・健全部と劣化部の相対的な評価は可能であると考えられる。したがって、劣化診断の補助検査としては、手軽な方法で有効であると言える。
- ・初期値や定期的な測定データがあると尚良い。コンクリート強度の変化と耐荷力低下の関連性の評価が課題である。
- ・測定値はかなり低く、桁全体の強度を評価したものとは思われない。コンクリート表面が劣化していたのか、測定方法に問題があったのか不明であるが、各種補正方法とともに測定方法についても課題があるようである。
- ・建設時の強度を推定するために材齢補正を行うが、構造物の耐荷力や耐久性を考える場合には、建設時ではなく現在のコンクリート強度が重要であるので、材齢補正を一律に行うことには問題があると考えられる。

2.4.8 自然電位法

鉄筋コンクリート構造は、コンクリートと鉄筋が一体となって機能を発揮するものであるため、鉄筋が腐食して断面欠損すると耐荷力に直接影響する。また、鉄筋腐食により、かぶりコンクリートのひび割れ・剥離・剥落といった問題が生じ、第三者被害を招くとともに、コンクリート構造物の耐久性に影響をおよぼすため、鉄筋の腐食可能性を調べるのは、コンクリート構造物の寿命の観点から極めて重要である。

自然電位法は、コンクリート表面の自然電位を測定することにより鉄筋腐食の発生を推定するもので、鉄筋腐食を調査する方法の中で最も汎用的な測定法である。

代表的な評価基準 1977年にアメリカで制定された ASTM C876 があり、(社)日本コンクリート工学協会など国内の指針等もほぼこれと同様の内容となっている。

【目的】

- ・コンクリート中の鉄筋など鋼材の腐食環境すなわち調査時点の腐食の可能性を知る。

【利点】

- ・原理が単純で特殊な機器を必要とせず測定も簡単なことから広く用いられている。

【問題点】

- ・かぶりコンクリートの状態（含水率、中性化深さ、塩分含有量、温度など）の影響を大きく受ける。

【留意事項】

- ・調査時点での腐食の可能性を測定するものであり、鉄筋の腐食速度を測定するものではない。
- ・コンクリートが十分に湿っている場合にのみ、正確な電位が得られる。
- ・コンクリート表面に塗装等の絶縁材料が被覆されている場合や常に水に覆われている場合には測定不可能である。
- ・エポキシ樹脂塗装鉄筋や亜鉛メッキ鉄筋など、表面がコーティングされている鉄筋には適用できない。

【測定結果】

- ・腐食度Ⅰ（腐食なし）～Ⅴ（著しい膨張性さび）の範囲の自然電位が計測され、必ずしも目視点検の結果とは一致しないが、概ね妥当と判断できる結果が得られている。
- ・径間ごとの劣化程度については、他の非破壊検査の傾向と一致している。
- ・同一箇所について異なる時期で2回の計測を行ったが、径間によっては測定値に10%を超える誤差が生じている。（T37）

表-2.4.7 測定結果

| | | 第1回目 | 第2回目 | 考察 |
|-------------|---------|---|--|--|
| P C 橋 | 計測日 | H16.9.28～H16.10.6 | H17.1.31～H17.2.2 | 1回目と2回目の計測結果は、概ね一致しているが、対象径間によって傾向が若干異なっている。これは、径間ごとに計測日が異なること、2回目の計測日は風が強く、コンクリート表面が乾きやすい状況であったこと、などのため含水率補正に誤差が生じたことが要因と考えられる。 注) 腐食度は下記のとおり Ⅰ：腐食なし Ⅱ：わずかな点錆 Ⅲ：薄い浮き錆 Ⅳ：膨張性錆 Ⅴ：著しい膨張性錆、断面欠損 |
| | 気候 | 晴 | 晴 | |
| | 気温 | 23～25℃ | 5℃ | |
| | 中性化 | 0～10 数 mm | ほぼ1回目と同じ | |
| | 含水率 | 3～4% | ほぼ1回目と同じ | |
| | 計測結果の概要 | 全般に底面より海側側面の腐食度が大きい傾向にあり、各桁の腐食度と、自然電位の平均値は次のとおりであった。 ・T26…Ⅰ～Ⅲ（-298） ・T37…Ⅰ～Ⅱ（-260） ・T47…Ⅱ～Ⅴ（-400） 注)（ ）内は自然電位の平均値 | ほぼ1回目と同様の結果で、自然電位の平均値もあるがT26とT37では1回目よりやや電位が高く（腐食度小）なっている。 ・T26…Ⅰ～Ⅱ（-270） ・T37…Ⅰ～Ⅱ（-228） ・T47…Ⅲ～Ⅴ（-395） | |

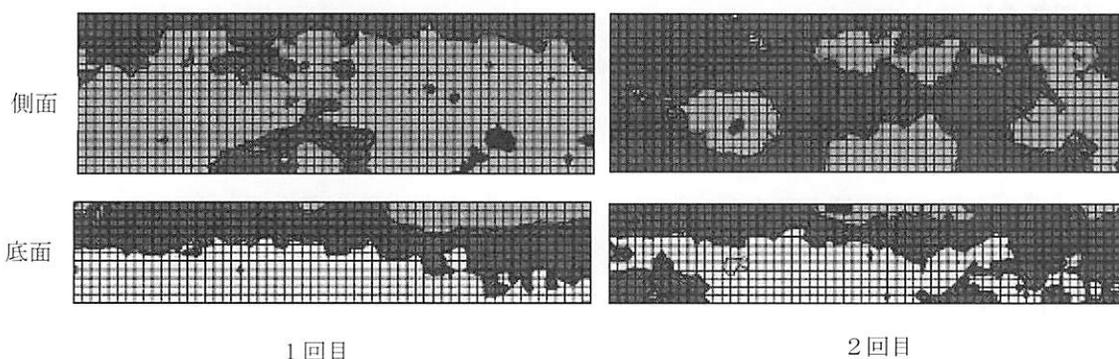


図-2.4.25 自然電位計測例

【老朽構造物評価への適用性】

- ・自然電位と、P C鋼材の腐食の関連性は現時点では不明確である。R C構造では、主筋の断面欠損との関連性の評価が課題となる。
- ・鉄筋腐食の可能性を検査する手法としては、手軽であるにも関わらず信頼性が高く、有効な検査であると言える。
- ・2回の測定値に開きがあったことから、かぶりコンクリートの湿潤状態の正確な把握のための含水率測定と補正方法に今後の課題があるようである。

2.4.9 ドリル法

1) 中性化深さ

コンクリートの中性化が進んでもコンクリートの組織そのものが劣化するとは考えられないが、鉄筋コンクリート構造物の場合は、鉄筋の不動態被膜の破壊・発錆、かぶりコンクリートのひび割れ・剥離・剥落といった問題が生じ、コンクリート構造物の耐久性や耐荷性に影響をおよぼすため、中性化の進行度つまり中性化深さの測定は劣化予測の観点から重要である。

ドリル法は、電動ドリルで削孔して落下した削孔粉を、1%フェノールフタレイン溶液を染み込ませた試験紙をゆっくり回転させながら受け、削孔粉が赤色に変色した時の削孔深さを測定して、中性化深さ試験する方法である。(社)日本非破壊検査協会より、「ドリル削孔粉を用いたコンクリート構造物の中性化試験方法」として制定されている。

【目的】

- ・中性化深さを知る

【利点】

- ・コア採取による方法に比べ、破壊程度、作業量、補修量が大幅に削減されるため、試験箇所を多くすることが可能で、中性化深さの面的な分布把握にも有効である。また、計測は現場で迅速に行うことができる。

【問題点】

- ・コア採取による方法に比べ、中性化深さを大きめに評価する。
- ・小規模ではあるが、破壊試験である。

【留意事項】

- ・削孔3個の平均値を算出し、少数1位に丸めて平均中性化深さとする。
- ・平均値との偏差は30%以下でなければならない。

【測定結果】

- ・測定値は0～14.3mmと大きくばらついており、また、一般的に用いられる岸谷式での推定値(18mm)を大きく下回る結果となっている。
- ・2回行った測定値の整合性が悪く、径間ごとの損傷度ランクとも一致しない。

表-2.4.8 ドリル法測定結果

| 計測回数 | 1回目 | | 2回目 | |
|----------|------------|---------------|------------|---------------|
| | 含水率 (%) | 中性化深さ (mm) | 含水率 (%) | 中性化深さ (mm) |
| T26G1 側面 | 2.3 | 14.3 | 2.3 | 13.9 |
| T26G1 底面 | 2.3 | 0.0 | 2.3 | 2.9 |
| T26G6 側面 | 2.9 | 13.8 | 2.9 | 11.7 |
| T26G6 底面 | 2.8 | 0.0 | 2.8 | 6.9 |
| T37G1 側面 | 2.9 | 0.5 | 3.3 | 0.3 |
| T37G1 底面 | 3.1 | 0.0 | 2.8 | 0.0 |
| T37G6 側面 | 2.8 | 0.4 | 3.3 | 1.0 |
| T37G6 底面 | 2.5 | 0.0 | 3.1 | 0.5 |
| T47G1 側面 | 4.7 | 1.6 | 3.6 | 5.2 |
| T47G1 底面 | 4.0 | 3.5 | 3.6 | 3.6 |
| T47G6 側面 | 3.7 | 6.9 | 4.1 | 6.6 |
| T47G6 底面 | 2.4 | 0.0 | 3.3 | 2.1 |

【老朽構造物評価への適用性】

- ・塩分量と、中性化深さ、鋼材の断面欠損や、浮き・剥離量との関連性の評価が課題である。
- ・2回目の測定は強風下で測定環境が悪かったとは言え、精度的に信頼できるとは言いがたい。
- ・検査方法は手軽で、高度の技術も要しないが、検査に当たっては細心の注意が必要であると思われる。今回は、自然電位計測の準備作業としての計測であったため、時間的制約から削孔ごとのドリルの清掃が不十分であった等の問題があったかもしれない。

2) 含有塩分量

コンクリート中に含まれる塩化物イオンは鉄筋の発錆・腐食促進を引き起こす因子である。また、塩化物中のアルカリ金属イオンがアルカリ骨材反応に進展に寄与することも考えられるため、鉄筋コンクリート構造物の寿命を考える際に、含有塩分量を調べることは重要である。

塩化物はもともとコンクリートに含まれていたものと、飛来塩化物が浸透したものがあるが、塩化物イオン量の深さ方向の分布を調べることにより、塩分の供給源や対策方法の選定に当たっての有力な手掛かりを得ることができる。

本検査法は、電動ドリルにより採取した試料を用いて、吸光光度法により塩分量を推定するもので、確立された方法である。

【目的】

- ・コンクリート中の含有塩分量と深さ方向分布を知る。

【利点】

- ・コア採取による方法に比べ、破壊程度、作業量、補修量が大幅に削減されるため、試験箇所を多くすることが可能で、塩分量の面的な分布把握にも有効である。また、現場での作業が迅速に行える。

【問題点】

- ・コア採取による方法に比べ、精度的にはやや劣る。
- ・小規模ではあるが、破壊試験である。

【留意事項】

- ・骨材の影響で測定が不正確となる可能性があるため、中性化試験と同様に 3 箇所の削孔を行うなどの配慮が必要である。

【測定結果】

- ・表面では極めて高い濃度で、鉄筋位置（約 5cm）でも腐食限界とされる $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 程度の塩分量となっており、概ね劣化状況に見合った結果が得られている。
- ・4 箇所の計測のうち、1 箇所（T47 山側）で深さ方向の分布が他と異なる傾向となっている。何かの原因で不正確な測定値になったと推測される。

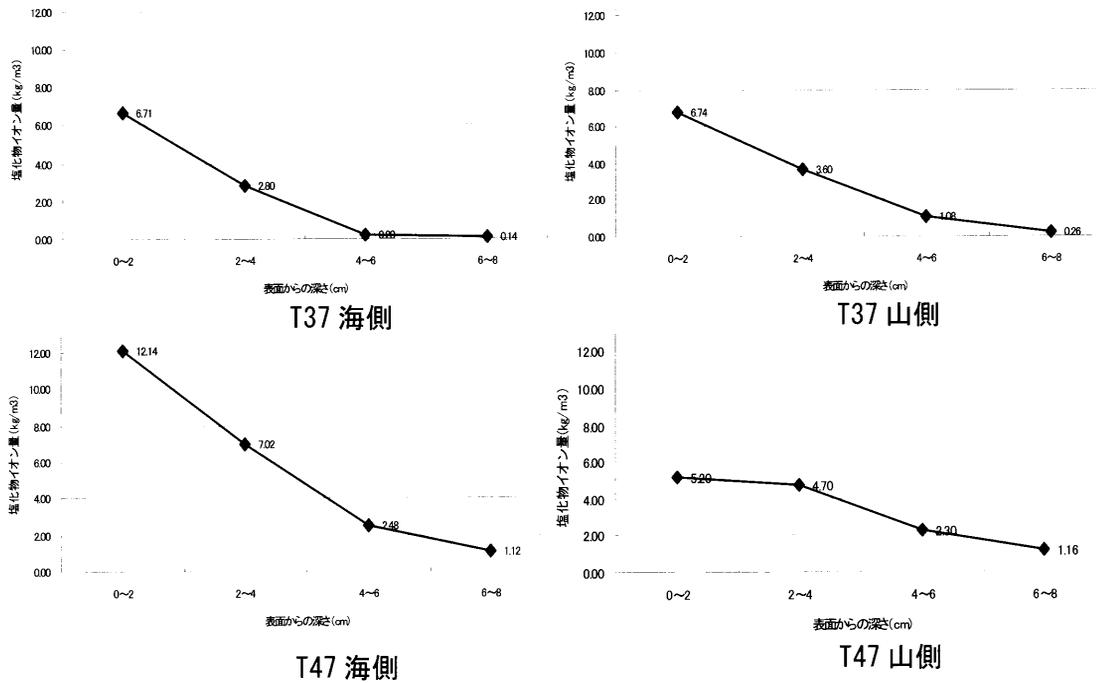


図-2.4.26 測定結果

【老朽構造物評価への適用性】

- ・鉄筋の腐食要因を定量的に計測する手法として、手軽であるにも関わらず比較的信頼性が高く、有効な検査であると言える。
- ・T47 山側の 0~2cm は骨材に当たって小さ目の値となった可能性がある。したがって、削孔は 1 箇所ではなく 3 箇所行って平均するなどの改善が望まれる。

2.4.10 AE法

AEとはAcoustic Emissionの略で、固体材料が破壊や変形に伴って弾性エネルギーが解放され音波を生ずる現象である。AE法は、破壊や変形に伴って解放され音波を固体材料の表面に取り付けた振動子により受信し、破壊や変形を検出する方法である。コンクリート材料では、ひび割れの発生、進展および開閉により発生し伝播する弾性波（音波）を検出する。今回、橋梁の主桁としてPC構造およびRC構造、床版としてRC構造を検討対象とした。

PC桁およびRC桁に用いたAEシステムは、基板上に音波を検出する部分、検出したデータを処理する部分、およびデータを転送する部分を搭載したAEセンサ（スマートAEセンサ）を用いており、センサ上で受信した信号を処理することが従来のAEセンサとは異なっている。

コンクリートが損傷などにより発した音波（AE波）を振動子で受信し、予め設定した4段階の閾値によって、単位時間当りにこの値を越えた回数（AEカウント）に変換して記録し、ディスプレイ上にその発生状況を常時表示することができる。

一方、RC床版には、DiSP 8チャンネルAE計測システムを用いている。このシステムではプリアンプ内臓AEセンサで検出したAE信号は、同軸ケーブルを介してDiSPシステムに入力され、直ちにデジタル信号処理が行われる。取得されたデータにはヒット数、カウント数、エネルギー、振幅値など、通常のAEパラメーター解析を行い、また必要に応じて、波形解析及び周波数解析を並列的に実施することも可能である。

本システムにおける構造物の損傷程度の指標はAEカウントである。精度については計測機器の分解能に依存するがコンクリート材料で数mmの位置誤差とされている。

【目的】

- ・ひび割れの発生、進展を知る。

【利点】

- ・比較的簡易な装置類で測定が可能である。
- ・ひび割れ診断への連続監視への適用性が高い。

【問題点】

- ・ひび割れ部分以外から発生した音波を区別することが難しい。
- ・センサの耐久性、測定範囲に関する情報が少ない。

【留意事項】

- ・信号検出にあたって、発生する雑音に対するAE計測システムの応答感度。

【測定結果】

1) PC構造（主桁）

PC桁（下ウェブ上面）にスマートAEセンサを張り付け、試験車の走行に伴うAE波の発生状況を測定した。試験車（20tf、38tf）が走行した前後6時間に観察したAEカウント発生回数は、2度の測定でそれぞれ0回、9回であり、試験車走行時にはAE波の発生はな

かったため、発生した AE カウントは試験車より重い一般通行車両によるものと考えられる。

したがって、PC 桁にはひび割れがほとんどなく、重量車両の走行に伴うひび割れの開閉などで発生する AE 波が少なかったものと判断されるが、長期間の継続した計測による判定、他の試験方法との比較検討が必要と考えられる。

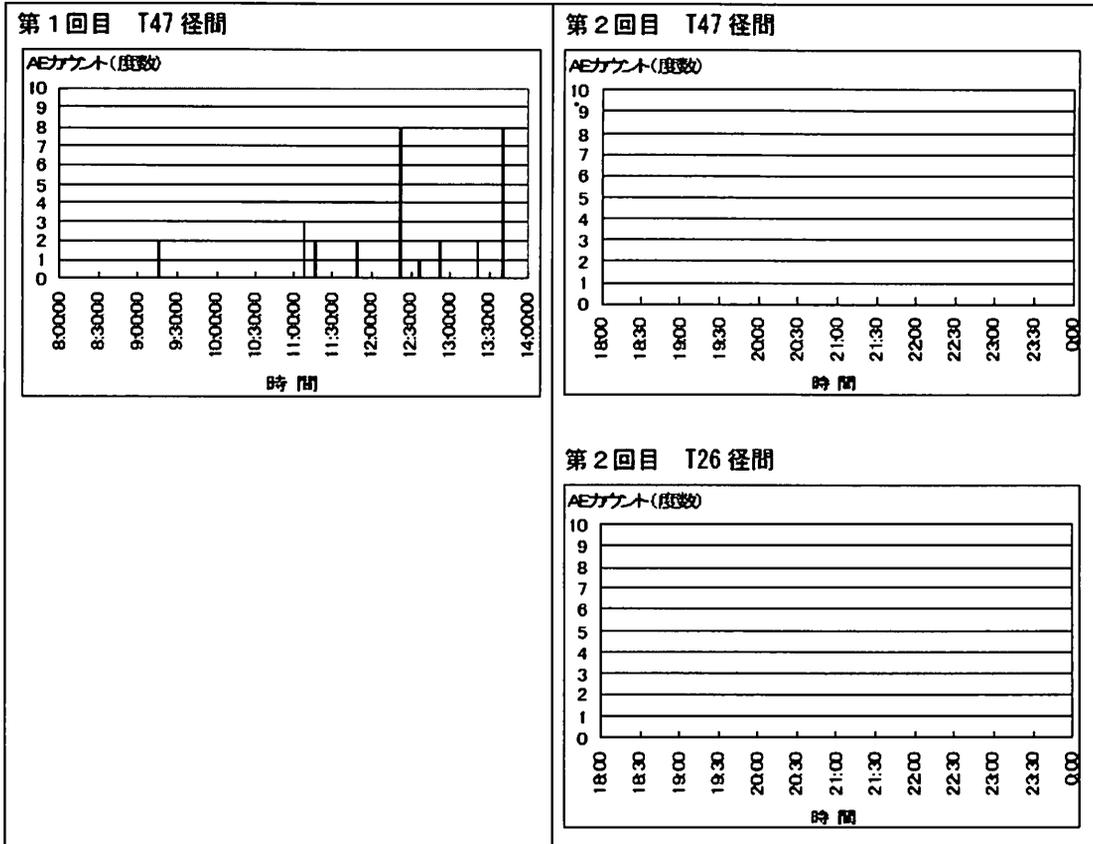


図 4.2-42 AE カウントの推移

図-2.4.27 AE カウント測定結果 (PC 桁)

2) RC 構造 (主桁)

RC 桁では、上り・下り車線直下の桁のほぼスパン中央側面にスマート AE センサを設置した。測定は、試験車 (38tf) を通過させた時間帯の 2 度で行っている。

計測の結果、上り車線直下の桁から試験車の走行に伴う AE 波を計測できたが、下り車線直下の桁については計測できなかった。2 回の計測値は顕著に異なる結果となったが、これはセンサの貼付け状況などによって感度が低下したためと考えられ、センサの設置状態の変化がないように長期間の継続した計測を行う必要があると考えられた。

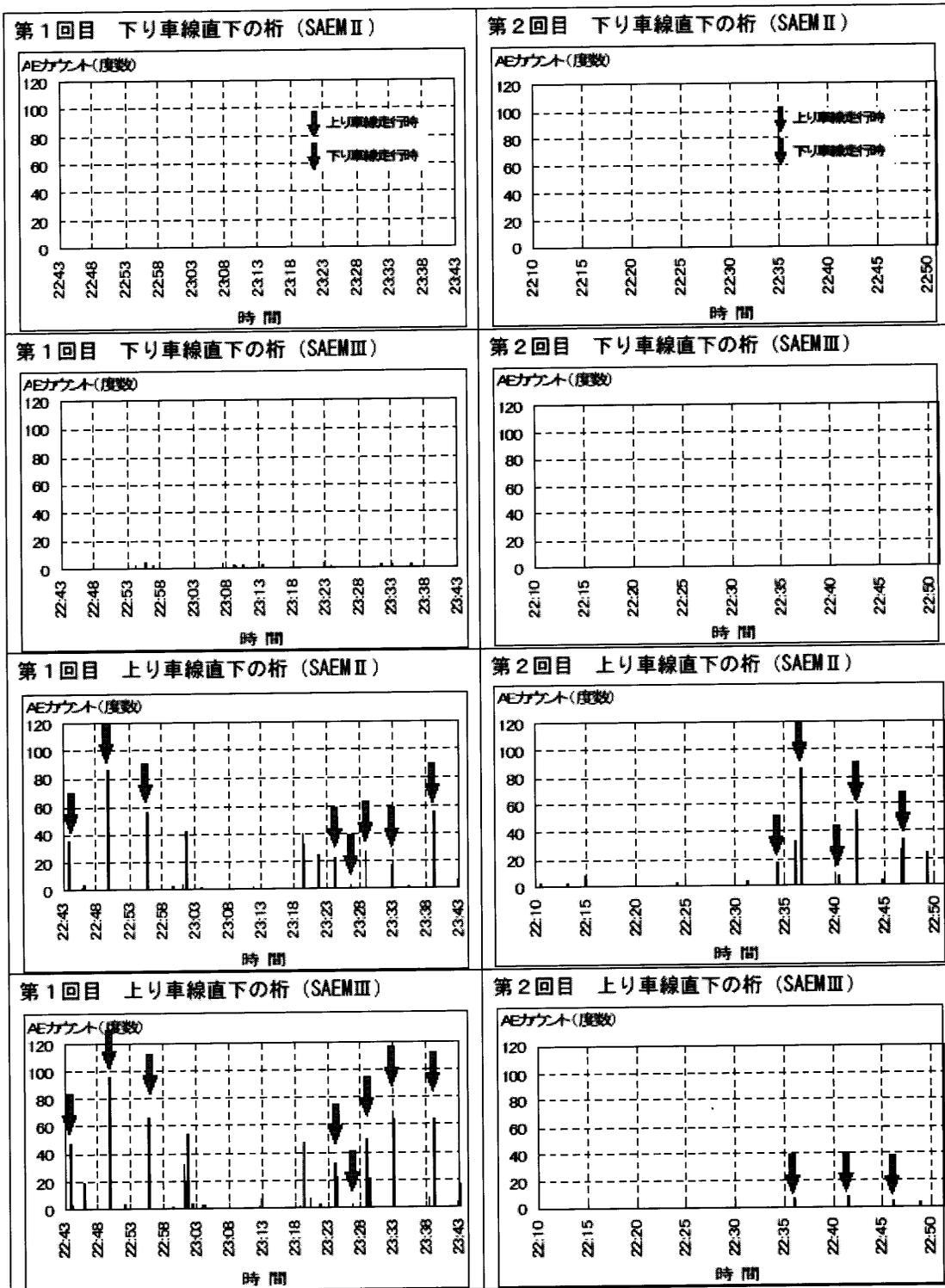


図-2.4.28 AE カウント測定結果 (RC 桁)

3) RC構造 (床版)

RC 床版では、2 回の計測を行っている。いずれも同じ場所にセンサーが取付けられた。8 個の AE センサーは、目視でひび割れの見える区域 (損傷区域)、およびほとんど見えない区域 (健全区域) の 2 グループに分けて取り付けられた。

試験車重量、速度等を変えた 2 度にわたる検査の結果、損傷区域からは健全区域に比べて 2 倍以上の AE ヒット数と 10 倍以上の AE エネルギー数を検出するという結果が得られた。これによって AE 法によるひび割れの状況把握に一定の可能性が見出されたが、一方で健全区域と損傷区域から検出された AE ヒット数が逆転する結果もでており、コンクリート床版の疲労劣化診断に対して未知なことも少なくないことが認識された。

| 荷重 | 計測条件と計測時間長さ | AEヒット総数 | | | AEエネルギー総数 | | |
|-------|---------------------------|---------|-------|-----------|-----------|---------|-----------|
| | | 健全区域 | 損傷区域 | 損傷区域/健全区域 | 健全区域 | 損傷区域 | 損傷区域/健全区域 |
| 20トン車 | 自然活重を含む連続計測、計5157秒 | 19745 | 50229 | 2.5 | 701498 | 7551922 | 10.8 |
| 20トン車 | 30km/h 上り、Time Markから20秒間 | 93 | 250 | 2.7 | 1627 | 30530 | 18.8 |
| | 30km/h 下り、Time Markから20秒間 | 172 | 406 | 2.4 | 4061 | 46048 | 11.3 |
| | 40km/h 上り、Time Markから20秒間 | 103 | 326 | 3.2 | 3855 | 42298 | 11.0 |
| | 40km/h 下り、Time Markから20秒間 | 228 | 443 | 1.9 | 9520 | 64957 | 6.8 |
| | 50km/h 上り、Time Markから20秒間 | 41 | 87 | 2.1 | 856 | 11652 | 13.6 |
| | 50km/h 下り、Time Markから20秒間 | 111 | 34 | 0.3 | 5502 | 1360 | 0.2 |
| 38トン車 | 38t車通行時前後連続計測、計649秒 | 729 | 2300 | 3.2 | 36645 | 676717 | 18.5 |
| 38トン車 | 30km/h 上り、Time Markから20秒間 | 7 | 54 | 7.7 | 3467 | 4913 | 1.4 |
| | 30km/h 下り、Time Markから20秒間 | 18 | 140 | 7.8 | 365 | 45082 | 123.5 |
| | 40km/h 上り、Time Markから20秒間 | 2 | 18 | 9.0 | 0 | 99 | ∞ |
| | 40km/h 下り、Time Markから20秒間 | 1 | 44 | 44.0 | 0 | 6575 | ∞ |
| | 50km/h 上り、Time Markから20秒間 | 16 | 48 | 3.0 | 964 | 2387 | 3.0 |
| | 50km/h 下り、Time Markから20秒間 | 67 | 98 | 1.5 | 2816 | 11738 | 6.3 |

図-2.4.28 AE カウント測定結果 (RC 床版)

【老朽構造物評価への適用性】

- ・ PC 構造では、AE アカウントと車両重量計測など、上載荷重との関係の評価が課題である。これにより設計荷重と耐荷力の関係の評価できる可能性がある。
- ・ RC 構造では、AE アカウントが多すぎ、評価方法が課題である。
- ・ 今回の測定のみでは、判断は出来ない。
- ・ PC 桁では、AE アカウントが少ないが、主桁に曲げひび割れが生じている桁へ設置し測定を試みたらよいのではないか。
- ・ 損傷の進行を評価するためには新設時から、測定を行う必要があるのではないか。その場合さらに、センサーの寿命や、他のノイズとの関係を明確にする必要がある。
- ・ センサーの測定範囲 (発生源と計測範囲の位置関係) を明確にする必要がある。

2.4.11 加速度計測法

加速度計測法とは、加速度計によって桁の加速度を計測し、計測された加速度を高速フーリエ (FFT) 変換することにより得られる固有振動数の低下率から桁の健全性を評価しようとするものである。固有振動数の低下率は、建設当初の桁あるいは健全な桁の固有振動数に対する損傷した桁の固有振動数の割合で評価する場合と、設計図から求めた理論上の固有振動数に対する損傷した桁の固有振動数の割合で評価する場合とが考えられる。

桁の下面に設置または接着された加速度計を入出力ケーブルによって動ひずみ計に接続し、荷重開放後（例えば、自動車走行後）の自由振動時に生じる桁の加速度を計測する。計測された加速度を高速フーリエ変換し桁の固有振動を求め、その低下率から桁の健全性を評価する。健全性評価の対象となる指標は、使用性能評価のための構造性能指標として挙げられるひび割れ幅や桁の剛性等である。

【目的】

- ・継続的なモニタリングおよび検査時点における構造物の健全性の評価

【利点】

- ・架設時（新設時）からのデータがあれば、比較的簡単に桁の健全性を評価できる可能性が高い。

【問題点】

- ・固有振動数の低下率から桁の健全性を評価しようとするため、架設時（新設時）のデータがない場合には復元設計による理論上の固有振動数の算出など

【留意事項】

- ・桁の剛性低下と耐荷力低下との関係を定量的に評価するためには、データの蓄積が必要である。

【測定結果】

1) PC 構造

5回計測した自動車通過後の自由振動における加速度波形から求めた固有振動数は、計測時間が異なるにもかかわらずほぼ同様な固有振動数を示し、計測結果の再現性が高いことが示された。

表中の固有振動数の低下率（計測固有振動数／理論固有振動数）は全ての計測で理論固有振動数を下回らず、桁の剛性低下は生じていないとする結果が示された。しかし、これは理論固有振動数が実際の構造物を正確にモデル化したものではないこと（プレストレスの影響や横締めの影響等）、また計測した固有振動数が加速度計を設置した桁1本の固有振動数を評価した値であるか、それとも6本の桁全体の固有振動数を評価している値なのかを確認できなかったことが影響しているとも考えられ、桁全ての固有振動数を調査しその低下率を再評価する必要があると考えられる。

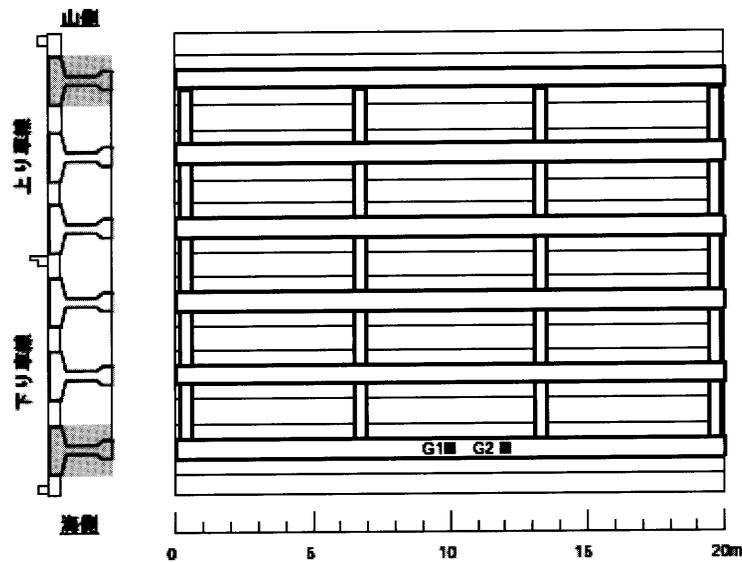


図-2.4.29 加速度測定位置 (PC 桁)

表-2.4.9 固有振動数算定結果 (PC 桁)

| 計測 | G1 | | G2 | |
|-----|------------|-------------|------------|-------------|
| | 固有振動数 (Hz) | 低下率 (計測/理論) | 固有振動数 (Hz) | 低下率 (計測/理論) |
| 1回目 | 7.32 | 1.10 | 7.32 | 1.10 |
| 2回目 | 7.23 | 1.09 | 7.81 | 1.18 |
| 3回目 | 7.32 | 1.10 | 7.32 | 1.10 |
| 4回目 | 7.03 | 1.06 | 7.03 | 1.06 |
| 5回目 | 7.81 | 1.18 | 7.28 | 1.10 |

2) RC 構造

加速度計測 7 回において得られた桁の固有振動数はほぼ同様な値となり、計測結果の再現性は非常に高かった。桁の固有振動数の低下率は、全ての計測において理論固有振動数を下回る結果となり、固有振動数の低下が確認された。

また、室内実験で得られた固有振動数の低下率と最大ひび割れ幅 (実測=0.225mm) の関係から得られる桁の固有振動数低下率と加速度計測によって評価された固有振動数の低下率は、ほぼ同様の値となった。

したがって、加速度計測により最大ひび割れ幅を検出し、桁の健全性を評価できる可能性が認められたが、理論固有振動数を求める際の構造物のモデル化や計測された桁の固有振動数の評価についての検証が必要である。

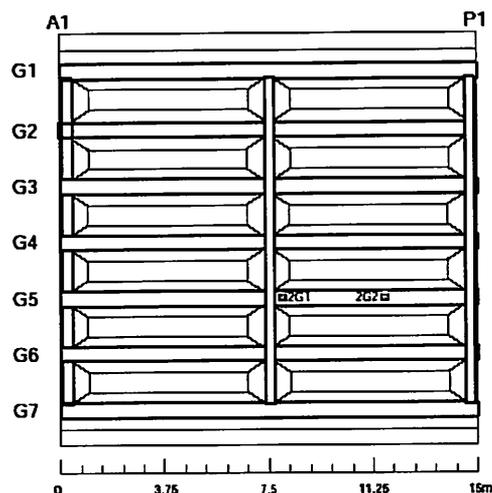


図-2.4.30 加速度測定位置 (RC 桁)

表-2.4.10 固有振動数算定結果 (RC 桁)

表 4.3-10 各計測における固有振動数

| 計測 | 2G1 | | 2G2 | |
|------|------------|-------------|------------|-------------|
| | 固有振動数 (Hz) | 低下率 (計測/理論) | 固有振動数 (Hz) | 低下率 (計測/理論) |
| 1 回目 | 8.30 | 0.93 | 7.75 | 0.87 |
| 2 回目 | 7.14 | 0.80 | 8.30 | 0.93 |
| 3 回目 | 8.30 | 0.93 | 7.45 | 0.83 |
| 4 回目 | 7.45 | 0.83 | 7.45 | 0.83 |
| 5 回目 | 7.45 | 0.83 | 7.63 | 0.85 |
| 6 回目 | 7.63 | 0.85 | 7.81 | 0.87 |
| 7 回目 | 7.81 | 0.87 | 7.75 | 0.87 |

【老朽構造物評価への適用性】

- ・ 架設時 (新設時) のデータが取得されている場合、健全度を評価する上で有効となる可能性が高い。剛性低下と、耐荷力低下の関係の評価が課題である。
- ・ PC 桁では、測定値が理論値より大きく、剛性が設計時より高い事が考えられ、反発硬度法との整合性が取れていない。
- ・ RC 桁では、連続桁の理論値との比較が必要。
- ・ 健全度を評価する上で、架設時 (新設時) のデータがあった方がよい。
- ・ 理論値と比較しているが、実物は、舗装のオーバーレイ等、構造的な条件が変化していることが多い。

2.4.12 速度計法

速度計法は、非接触かつ高精度で計測を行うことができるレーザ・ドップラ速度計を用いて、主桁のたわみ速度計測を行う方法である。計測した速度時刻歴を時間に関して積分することで得られる変位、すなわち主桁のたわみを、計測時による違い、あるいは損傷度による違いについて検討を行う。

レーザ・ドップラ速度計は、レーザの干渉作用を用いた計測機である。本計測に用いた機器は、ヘリウム・ネオン・レーザを用いて、振動対象物からのレーザの反射を検出している。対象物で反射したレーザは、ドップラ振動数 f_D だけ振動数がシフトする。ドップラ振動数は、レーザの速度の関するとして、次式となる。

$$f_D = 2 \cdot \frac{|v|}{\lambda}$$

ここに、 λ ：レーザの波長である。対象物の振動数は振動数のシフト量と一致するが、対象物がレーザと方向を持つ場合、振動数のシフト量 Δf はビームと対象物との方向による振動数のシフト f_B を用いて次式となる。

$$\Delta f = f_B + 2 \cdot \frac{v}{\lambda}$$

この振動がコントローラに伝達され、それに比例した電圧として出力される。

【目的】

- ・主桁のたわみの違いによる損傷度、剛性低下の把握

【利点】

- ・比較的簡単に計測が可能。架設時（新設時）のデータが取得されている場合、健全度を評価する上で有効となる可能性が高い。

【問題点】

- ・データが膨大になりやすい。
- ・たわみと、耐力低下の関係の評価が課題である。

【留意事項】

- ・速度計測よりたわみを算出しているが、たわみの実測値や理論値との比較考察が必要である。また、健全度の異なる他の径間での測定による評価も必要である

【測定結果】

1) PC構造（主桁）

2 回の計測によるたわみは、異なっている。後述する RC 橋の計測では、計測時期によらずほぼ同じ計測結果が得られていることを考えると、PC 橋では誤差が生じる何らかの原因があると考えられ、試験車の走行方法の影響がでている可能性もある。

速度計測では、変位時刻歴を得るため、計測から得られた速度時刻歴を時間に関して 1 回積分を行うが、変位の時刻歴を見ると評価時間内において変位がシフトする、すなわち長

周期成分が卓越する現象が見られない。このことは、変位時刻歴を得るために2回積分を必要とする加速度計測よりも精度が良いことを示しているものと考えられる。

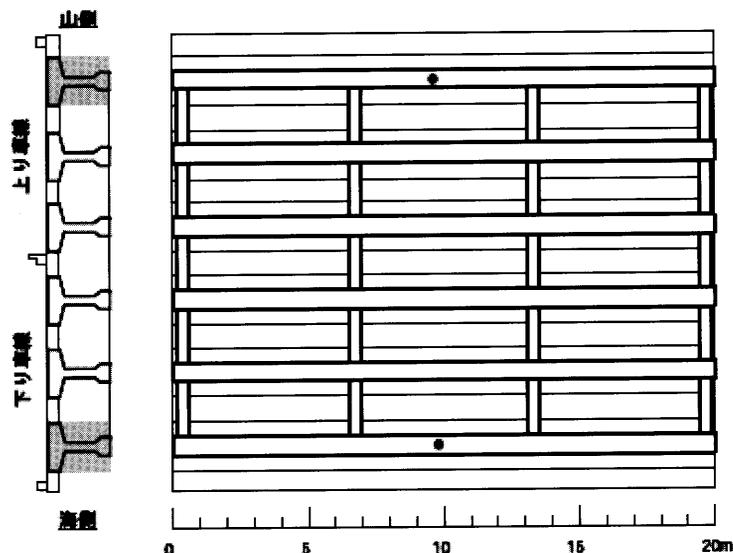


図-2.4.31 速度測定位置 (PC 桁)

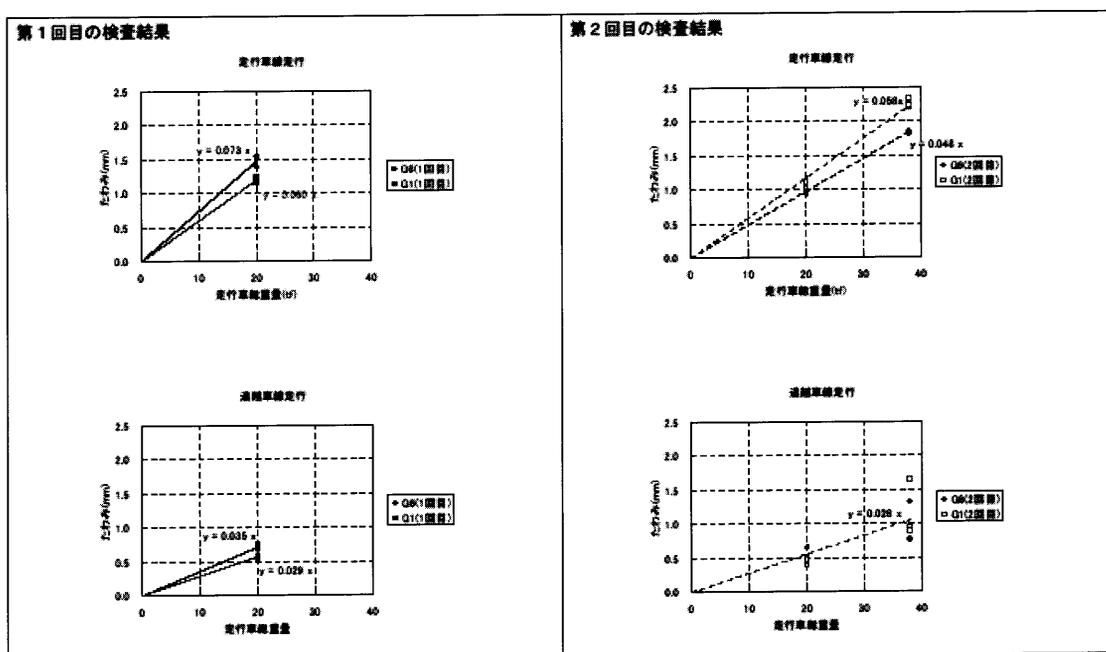


図-2.4.32 速度測定結果 (PC 桁)

2) RC構造 (主桁)

2回の計測ともほぼ同じ変位の計測結果が得られており、計測時期による差は小さく、計測の再現性を確認することができたと考えられる。

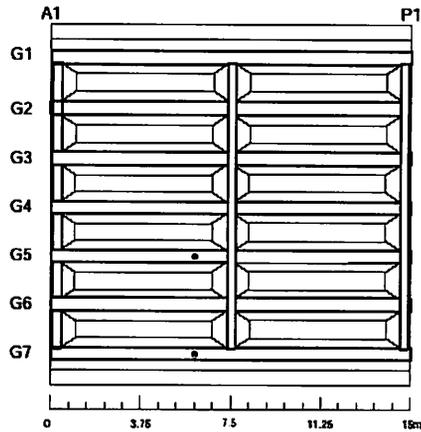


図-2.4.33 速度測定位置 (RC 桁)

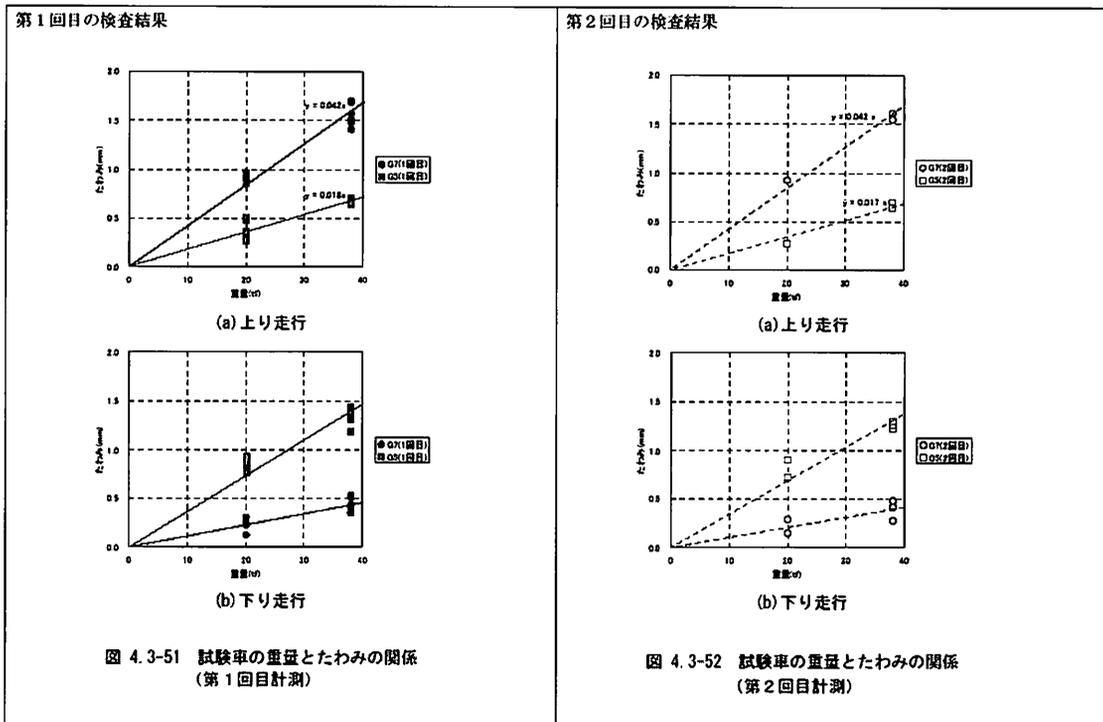


図-2.4.34 速度測定結果 (RC 桁)

【老朽構造物評価への適用性】

- ・ 架設時 (新設時) のデータが取得されている場合、健全度を評価する上で有効となる可能性が高い。たわみと、耐荷力低下の関係の評価が課題である。
- ・ 速度計測よりたわみを算出しているが、たわみの実測値や理論値との比較考察が必要である。また、健全度の異なる他の径間での測定による評価も必要である。

2.4.13 光ファイバー計測

構造物のひずみを計測するためには、ひずみゲージを貼付ける方法が一般的であるが、ゲージ自体の耐久性には限界があり、屋外環境での長期モニタリングに向いているとは言いがたい。また、連続的に広範囲のデータを得るためには、相当数の貼付け枚数とリード線の配置など、その設置作業は煩雑なものとなる。

光ファイバー計測は、以下に示す利点により、長期モニタリングへの適用に最も期待される測定手法である。

光ファイバー計測には、現在、BOTDR、OSMOS、SOFO、FBGの4つの種類が提案されており、それぞれ長所、短所がある。

【目的】

- ・ 構造物のひずみ変化の長期モニタリング
- ・ ひび割れ等の損傷を有するコンクリート構造物の平均的なひずみ変化の測定

【利点】

- ・ 光ファイバー自体が長寿命である
- ・ 遠隔モニタリングが可能
- ・ 電磁波等、外環境の影響を受けにくい
- ・ 線的に連続したひずみを計測できる
- ・ センサーが容易に設置できる
- ・ 電気信号を使用しないため、欠測しにくい
- ・ 数 Hz 程度の動的モニタリングが可能 (OSMOS、FGB)

【問題点】

- ・ 局所的な挙動を検知できない
- ・ 100 μ 以下の測定に精度が劣る (BOTDR)

【留意事項】

- ・ 長期モニタリングによりひずみ測定を行う場合、線膨張、収縮、クリープなど、応力に関係のないひずみ成分を分離する必要がある。
機器により、温度依存性が異なるので、特に注意が必要である。
- ・ 計測およびデータ処理に専門技術者が必要となる。

【測定結果】

- ・ 検測車両 (20 t) による動的ひずみの測定の結果、最大ひずみ量の順位は、損傷度に比例する結果となった。
- ・ 中立軸には明確な差は認められない。

【老朽構造物評価への適用性】

- ・ ひびわれが確認された場合、コンクリートのひずみ計測を行う上で、有効な手段となる。PC 構造では、ひずみゲージなどと組み合わせ、ひびわれを検知出来る可能性があり、耐荷力を評価する上で、有望な手法である。

- ・本橋において、検測車両を用いて、ひずみを測定した目的は、PC 鋼線の破断の有無（ひび割れの発生要因を PC 鋼線破断と断定するため）を検証するためと推察され、その見地から考察を行う。
- ・本橋のひずみ測定に、光ファイバーを用いた理由は、ひび割れが確認されたために、ひずみゲージの使用が有効でないと判断されたものと推察する。
（鉄筋のはつり出しが可能であれば、鉄筋ゲージで代用できる。）
- ・発生ひずみが最も小さい T-26 の測定値が、全断面有効として計算したひずみ値に等しいものと仮定して、以下の考察を行う。
（本仮定を検証するためには、車両の通行位置に伴う多主桁の荷重分配、橋面工の剛性寄与、曲線の影響等を照査する必要があります）
- ・ひび割れによる損傷が激しい T-37、T-47 には、約 2 倍のひずみ(20 μ 程度の差)が発生したことになり、本機器の精度が正確だとすると、かなり有意な差である。
- ・ヤング係数のばらつきとしては、2 倍の相違は考えにくい。
- ・ひび割れ開口に伴う剛性低下が、最初に想像されるが、図心軸（報告書では、中立軸と書かれているが、おそらく図心軸の勘違いだと思う）は、特に大きく変化していないことから、荷重载荷によって、ひび割れが開口したものとは考えにくい。
- ・PC 鋼線が破断しても、付着定着により周辺 $\pm 1\text{m}$ 程度外では、その影響を検知できないため、ちょうど支間中央で破断していない限り、本測定では検知できない。
- ・したがって支間中央 1 断面だけのデータで、桁全体の損傷度を判断するには限界があり、光ファイバー計測の特徴を有効に活用するためには、支間中央のみではなく、桁長全体のひずみ分布データを採取することが必要と考えられる。
- ・いずれにしても、構造諸元、車両の走行位置を基にした、ひずみ計算値との比較による評価が必要である。

2.4.14 鉄筋切断法、スロットストレス法

現在、供用中のコンクリート構造物に作用している応力を直接測定する方法として、オーソライズされた計測器具は存在しないと言える。特に PC 構造物では、プレストレス導入時の管理は緊張材の張力や伸び管理で代用しており、また、クリープや乾燥収縮などによる経時的なコンクリート応力の変化は計算上の仮定だけで検証しているのが実状であり、コンクリート応力を直接測定する測定技術は、最重要かつ急務な課題であると考えられる。

近年、コンクリート構造物の応力測定法として、局所的な削孔(コア抜き)を行い、部分的に応力を解放し、その周辺の変形挙動から応力を推定する、応力解放法が注目されている。さらに、この応力解放法を改良したスロットストレス法(フランス Advitam 社開発)では、削孔形状をスリットとし、ここにフラットジャッキを挿入し、解放前の形状に戻るためのジャッキ圧力を測定することにより、コンクリートのヤング係数の測定を不要にしていることに特徴がある。

【目的】

- ・コンクリート構造物に作用しているコンクリート応力を測定する

【利点】

- ・基本的に、他の手段は存在しないと言える。
- ・応力解放法を改良したスロットストレス法では、ヤング係数の測定も不要である。

【問題点】

- ・非破壊ではなく、微破壊であるため、構造的に重要な箇所には適用しにくい。
- ・同一箇所を、定期的に測定することは原理的に不可能である。
- ・応力を解放したコアやスリットの後埋め作業が生じる

【留意事項】

- ・鉄筋探査を十分に行わないと、鉄筋破断の可能性がある。
- ・スロットストレス法の場合、換算係数の設定が重要であり、その根拠を明確にする必要がある。(実験ならば実験条件、FEM による解析など)
- ・鉄筋切断法の場合、乾燥収縮やクリープによるひずみを補正する必要がある。

【測定結果】

- ・スロットストレスは、配筋が比較的少ない桁高の中心位置のみとし、鉄筋切断法により応力勾配を測定する方法は、良いアイデアであると思われる。

【老朽構造物評価への適用性】

- ・プレストレス量の設計値との差違を検証することにより、耐荷力の評価が可能である。
- ・他の手法と組み合わせプレストレス低下の原因推定や、低下の進行性の評価を実現することが課題である。
- ・精度および考察については、計算値と比較する以外、検証する術がない。

2.4.15 透気法

コンクリートの耐久性評価にとって、水密性（または密実性）は重要な性能指標である。コンクリートの透気試験は、基本的に透水試験の水を気体に置き換えたものであり、コンクリートの水密性（または密実性）を評価しようとする試験である。一般にはアウトプット法の水の代わりに気体を用いる方法と、所定の圧力を作用させた後その圧力の経時変化を測定して評価する方法がある。

ここで示す透気法は、透気試験装置（Torrent Permeability Tester）を用いて、コンクリートの透気性と電気抵抗を測定し、実構造物のコンクリートの密実性を判定し、劣化に対する耐久性を評価しようとするシステムである。完全非破壊で表面コンクリートの透気性能を短時間で測定できるとされている。

| 試験項目 | 試験機器名 | 仕様 |
|-------|--|--|
| 透気試験 | Torrent Permeability Tester スイス Proceq 社製 | 測定面積 $\Phi 50$ mm (外側 $\Phi 100$ mm) 測定時間 90~720 秒 (コンクリート品質により変化) 吸引式透気性測定器、真空ポンプ (1.5m ³ /h) 温度範囲 -10℃~60℃ |
| 含水率試験 | 電気抵抗測定計 (Wenner 法) スイス Proceq 社製 | 四電極法による電気比抵抗測定、電圧 9 VDC 温度範囲 -10℃~60℃ |

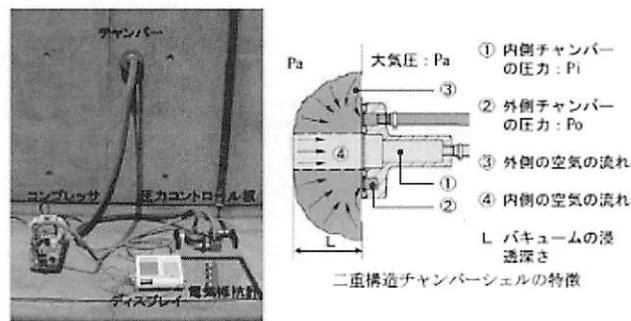


図-2.4.34 透水試験機

【目的】

- ・コンクリートの耐久性評価
- ・水密性、密実性の評価

【利点】

- ・比較的簡易に、実構造物のかぶりコンクリートの水密性、密実性を評価できる。

【問題点】

- ・透気試験による評価可能範囲は試験位置表層に留まる。
- ・透気試験はコンクリートの含水率の影響を勘案するため、比抵抗試験との組合せを考慮しても、調査時期、場所の違いによって評価が困難な場合がある。

【留意事項】

- ・「ドリル削孔を用いた構造体コンクリートの簡易透気試験法」では、コンクリートの含水率が影響して精度向上が難しい。
- ・透気試験に比抵抗試験を組み合わせ、コンクリートの含水率の影響を考慮して精度向上を図る「ドリルPR法」がある。

【測定結果】

2回(10月、2月)の測定の結果、T26 および T37 の全体評価としては、乾燥した影響で若干測定値が大きくなった傾向があり、コンクリート中の水分が抜けた分だけ空気が通りやすくなり測定値が大きくなったと言えるが、コンクリートの水密性または密実性の評価としてはほぼ同じであると言える結果となった。

T47 では乾燥して、空気が通りやすくなっているにも関わらず、測定値が小さくなってきている。特に山側の測定値は明らかに小さくなっていった。T47 は他と比較して損傷度が高く、部分的な断面修復も施されており、コンクリート表面に凹凸や既設コンクリートとは異なる材料補修がされているため、測定位置が少し異なっただけで測定値に大きく影響したと考えられる。

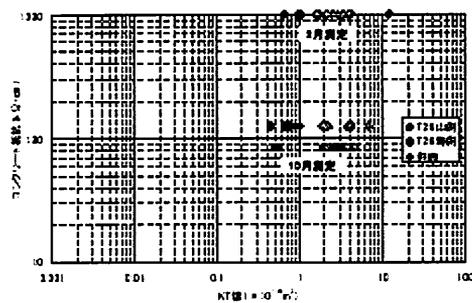


図 4.2-52 T26 測定結果

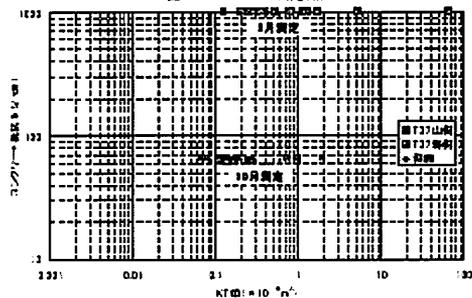


図 4.2-53 T37 測定結果

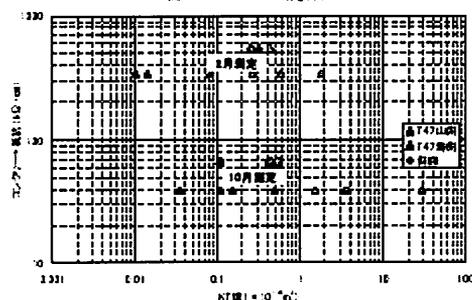


図 4.2-54 T47 測定結果

図-2.4.35 測定結果

【老朽構造物評価への適用性】

- ・反発硬度法を含め、他の手法との組み合わせにより、水密性と耐久性の関係を評価することが課題である。
- ・スパンの全体的な測定値としては 2 回の測定とも同様な範囲の結果を示しており、測定時の湿潤状態などを考慮する事で、コンクリートの密実性について一定の評価が可能

能と考えられる。

- ・ K T 値の大小でコンクリートの密実度を評価するが判断基準となる標準値の設定が必要である。
- ・ 損傷度の異なる 3 径間を比較して透気法と反発硬度法に相関があることから、強度が低いのはコンクリートの問題であることが疑われるが、一概に結論付けるべきではなく、コア採取などに基づく評価を進めるべきである。

2.4.16 打撃応答法

打撃応答法は、打撃応答ハンマーを用いて、対象物の表面を打撃する非破壊検査である。打撃現象のモデル化によって導出された打撃応答量（推定弾性係数および推定圧縮強度）を求めて評価しようとするものである。

結果の評価は、下式で求められている打撃応答量を、室内試験結果をもとにした回帰式により、弾性係数に換算し、コンクリートの強度を評価するものである。

$$R = \frac{P_{\max}}{W \cdot V_0} = \frac{k}{\pi \cdot m}$$

ただし、 R ：打撃応答量 P_{\max} 打撃時の最大加速度（単位：GPa）

W ：打撃面との接触時間 $(t_3 - t_1) \approx 2(t_2 - t_1)$

V_0 ：初速度

ここで、時刻 t_1 ：ハンマーが壁面に接触する（初速度 V_0 ）

時刻 t_2 ：ハンマーの動きが停止する（速度 0）

時刻 t_3 ：ハンマーが壁面から離れる

k ：対象物のバネ定数 m ：ハンマーの質量

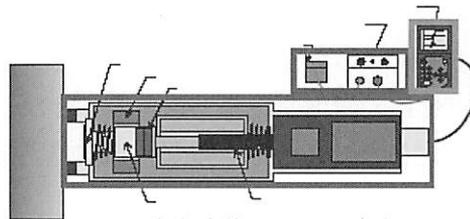


図-2.4.36 打撃応答ハンマー装置

【目的】

- ・ コンクリートの弾性係数、圧縮強度の評価

【利点】

- ・ 簡易な装置で、

【問題点】

- ・ データのバラツキ

【留意事項】

- ・ データにバラツキが多く、コア評価との併用等による評価することが望ましいと考え

られる。

【測定結果】

- ・各計測面に関して、2回の計測を比較すると、打撃応答量は全般的に増加している傾向があった。
- ・この原因としては、①気温の変化、②乾湿の状況の変化、③試験繰り返しによる試験位置の締固め効果が考えられた。

【老朽構造物評価への適用性】

- ・初期値や定期的な測定データがあると尚良い。コンクリート強度の変化と耐荷力低下の関連性の評価が課題である。
- ・本試験では、RC桁における打撃応答量から換算した推定弾性係数を算出しており、桁の耐荷力評価に用いることができるものと考えられるが、①気温の変化、②乾湿の状況の変化、③締固め効果によって測定結果に影響があるため、評価には注意が必要である。
- ・弾性係数を把握できる意味で有効と考えられるが、データのバラツキも多く、その蓄積、評価や他の手法との比較評価が望まれる。

2.4.17 超音波法（直接回折波法）

超音波直角回折波法は、ひび割れ深さ測定に用いることができる非破壊試験方法である。

ここでは、RC橋主桁に生じたひび割れについて、輪荷重の異なる2箇所それぞれ桁側面および下面を測定した。

本方法は、波長の長い縦波超音波でひび割れ先端に発生する2次的な超音波を利用している。その2つの波は、直接波がひび割れ先端で①ひび割れの影の部分へ回り込む下向きの戻り波と、②直接波と直角に進む上向きの回折波になったものである。

ひび割れ深さの測定は、この2つの波（受振波）について、ひび割れをはさんで等間隔に配置した超音波探触子を移動しながら観測し、受振波形が下向きから上向きに変化した位置（装置ではランプの点灯色の変化で確認）を求めて行う。

ここでひび割れ深さの測定値は、超音波探触子が上向きの回折波を受振した位置からひび割れまでの距離になる。

$$d = \sqrt{ab}$$

ただし、d：ひび割れ深さ(mm)

a, b：ひび割れから受振および発振探触子までの距離(mm)

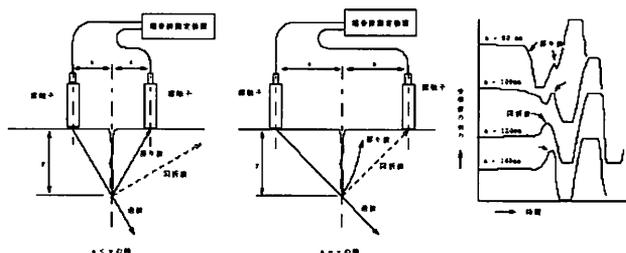


図-2.4.37 ひび割れ深さ測定のご概念図

表-2.4.11 測定装置仕様

| 項目 | 仕様 |
|-------|---|
| 名称・形式 | エルソニック (E S I / P - 1 0) |
| 探触子 | ひび割れ標準センサ (28 k Hz) 測定範囲: 90mm ~ 500mm ひび割れ小型センサ (200 k Hz) 測定範囲: 5mm ~ 90mm |
| 測定精度 | ± 1 0 % |

【目的】

- ・ ひび割れ深さの調査

【利点】

- ・ 比較的簡単な装置にて、理論的にはどのような構造物にも適用可能。

【問題点】

- ・ 実構造物への適用にあたって測定条件によっては精度が大幅に低下する恐れがある。
例えば、ひび割れが斜めに伸長している場合や途中で接触している場合には正確な測定は難しい。

【留意事項】

- ・ 測定条件を考慮して、必要に応じて確認試験を行うことが望ましい。
- ・ コンクリート品質の局部的バラツキ、表面劣化、含水状態、ひび割れ深さ、空洞が一樣でない、鉄筋・鉄骨の影響、ノイズに留意する。

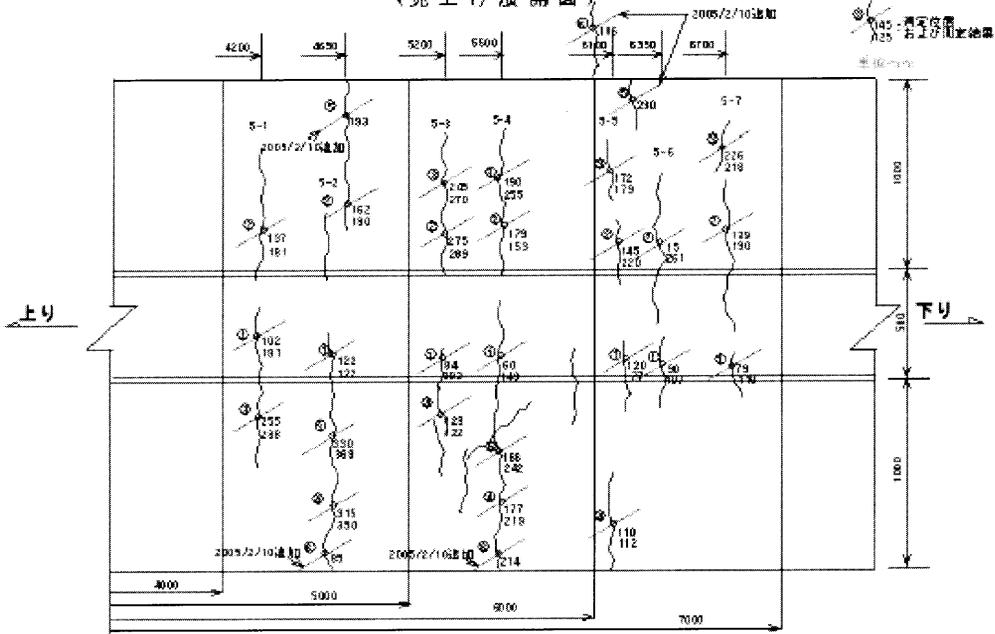
【測定結果】

- ・ G5, G7 と輪荷重の異なる桁のひび割れ深さは、2 回(11 月、2 月)の測定でそれぞれ結果に差を生じている。原因としては、測定した時期による気温の差などが考えられるが明確な説明はできない。
- ・ G5 桁と G7 桁とを比較すると G5 桁のひび割れが深く測定されたが、これは桁に加わる荷重の差によるものと考えられた。

G5 桁ひび割れ深さ測定結果

測定日
 上段：2004/11/5
 下段：2005/2/10

(見上げ展開図)

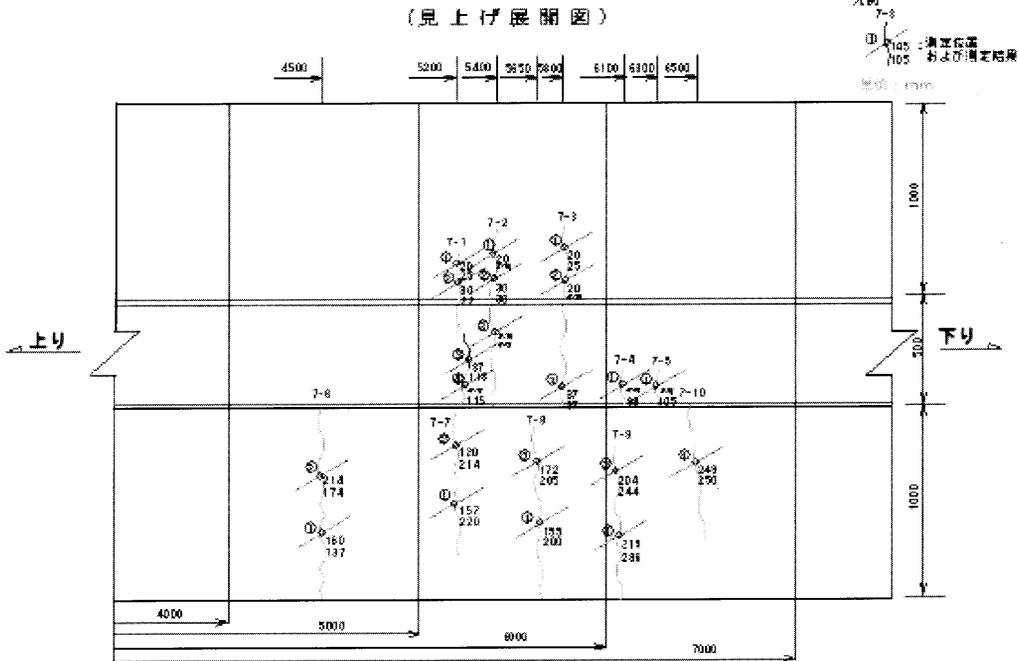


G5 桁測定位置および測定結果

G7 桁ひび割れ深さ測定結果

測定日
 上段：2004/11/5
 下段：2005/2/10

(見上げ展開図)



G7 桁測定結果および測定位置

図-2.4.38 測定結果

【老朽構造物評価への適用性】

- ・ ひびわれの種類や、ひびわれ幅・長さ・深さと、耐荷力低下の関連性の評価が課題である。
- ・ 超音波法（直接回折波法）では、表 2.1.1 検査項目と測定手法に示すとおり、最も事例の多い、反射法、縦波を用いて伝播速度と伝播時間からひび割れ深さを求める手法を用いている。
- ・ 測定結果は、測定時期によって気温や輪荷重等の影響によって変化しているが、ひび割れが鉄筋位置まで達しているかどうかの判断は可能で、耐荷力評価につながる評価と考えられる。
- ・ 鉄筋の多段配筋等の影響を受けるため注意を要する。他手法との重ねあわせが有効と考えられる。

2.4.18 地中レーダー（マルチパスアレイレーダ）法

地中レーダー法は、コンクリート構造物の内部に向け放射した電磁波を、走査するアンテナで捕らえることで内部の鉄筋や空隙などにおける位置や大きさを計測する電磁波探査法の一つである。

従来の単一経路方式と違いは、複数対の並列に配置された送信・受信アンテナから多重経路（マルチパス）によって計測結果を得る構造にある。これにより、3次元画像や物標裏の探知、高いS/N（反射波レベルとノイズ波レベルとの比率）比が得られる点の特徴である。

鉄道トンネルの調査においては、東日本旅客鉄道株式会社にて打音検査に代わる検測手法として、マルチパスアレイレーダーを搭載したトンネル覆工内部検査車による調査手法が用いられている。

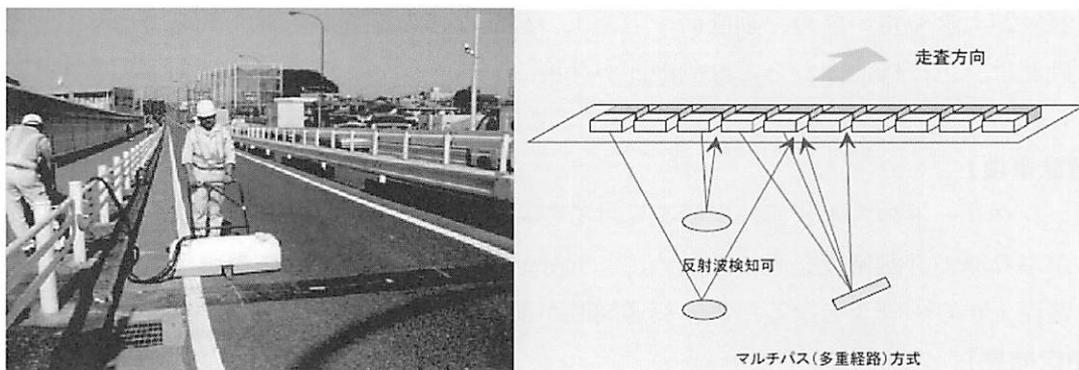


図-2.4.39 探査状況と概念図

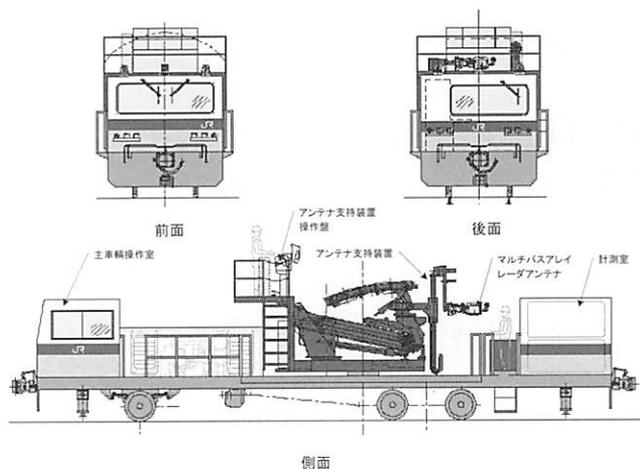


図-2.4.40 トンネル覆工コンクリート探査車の機器構成と探査状況

三井造船（株）提供

【目的】

- ・ 配筋状態の調査。
- ・ かぶり厚さの調査。
- ・ 空隙の調査。

【利点】

- ・ 3次元画像で表示されるため、照査者によるばらつきがない。
- ・ 面状からの反射を面状で表現できる。(ジャンカ、空隙など)
- ・ 広い幅(約 60cm)で連続した調査ができるため、広い範囲の調査が容易。
- ・ 多経路の反射が得られるため、鉄筋の背面における空隙や鉄筋も検知可能。

【問題点】

- ・ 装置が大きく重いため、垂直面や上部工の裏面などの探査が困難。
- ・ 計測は、主に橋面上からで計測範囲が深度 20cm までなので、調査対象はほぼ床版に限られる。

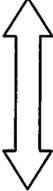
【留意事項】

- ・ コンクリートの含水状態に影響を受けるため、誘電率のキャリブレーションが重要。
- ・ かぶり厚の計測精度を高めるために、部分的なはつり調査との併用が望ましい。
- ・ 路面上からの調査となるため、交通規制が前提となる。

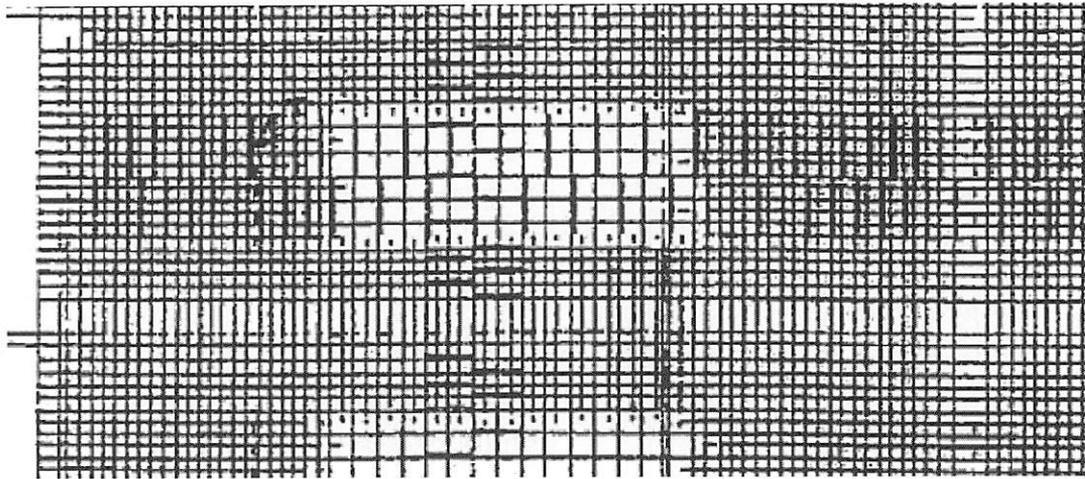
【測定結果】

- ・ 今回の床版厚 18cm の範囲においては、鉄筋の有無とピッチをほぼ確認できた。
- ・ 床版の下面鉄筋については、平面画像の表示は困難だが断面図からは鉄筋の有無とピッチが判読できた。
- ・ 鉄筋径は、確認できなかった。
- ・ 断面図から、床版上面のかぶりは橋軸方向に一定厚であることが判読できた。

表-2.4.12 調査結果

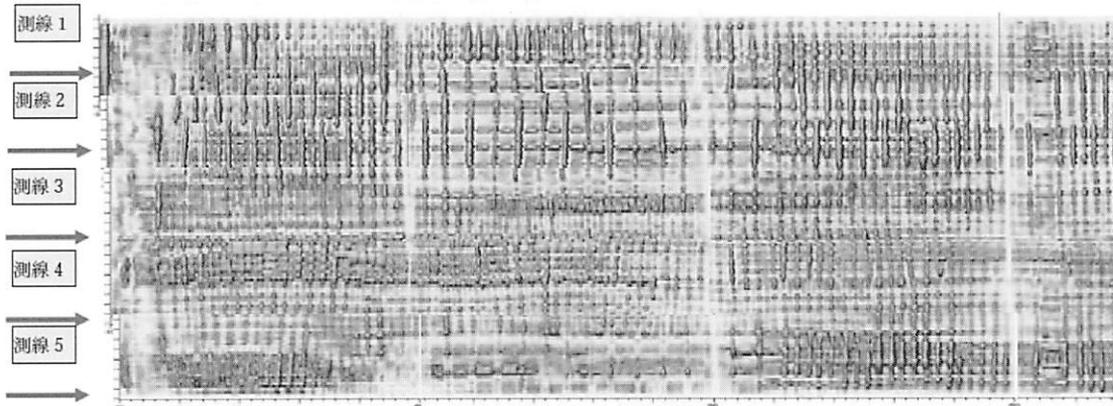
| レーダ からの 深度 | 鉄筋種別 | | 結果 精度 | 地中レーダー調査結果 | 設計図書 |
|---|------|------|----------|---|----------------------|
| 浅い  深い | 上面鉄筋 | 主鉄筋 | ◎ | 平面図でピッチが確認できる。 | 10cm ピッチ 20cm ピッチ |
| | | 配力鉄筋 | ○ | 平面図でピッチが確認できる。 主鉄筋と比べて画像が薄く判読しにくい。 | 10cm ピッチ 20cm ピッチ |
| | 下面鉄筋 | 主鉄筋 | △ | 平面図を表示できない。 側面図から鉄筋の有無とピッチが判読できる。 (上面鉄筋との距離が 8cm 程度と近いため) | 20cm ピッチ |

設計図書による配筋



調査結果（平面図）

※表面から18cmまでのみを表示(上筋のみ抽出)



調査結果（側面図）

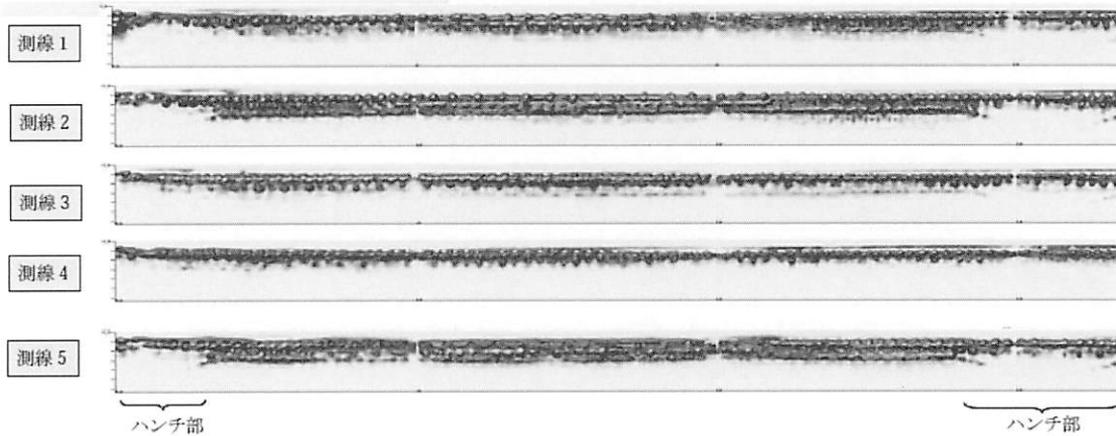


図-2.4.41 調査結果

【老朽構造物評価への適用性】

- ・鉄筋配置、鋼材本数を特定する必要がある場合に有効。鋼材の破断が確認できる可能性がある。耐荷力を評価する上で、基本情報の入手という点で有効である。
- ・調査結果から、床版厚 20cm 程度では上面鉄筋とその裏面にある下面鉄筋の有無とピッチも確認できたため、床版の配筋状態を確認する手法として、有効であるといえる。
- ・調査精度は、3mm～6mm とされているため、コンクリートひび割れ計測等の構造物における耐荷力照査手法としては、現時点では精度不足である。
- ・今回、着目されていなかったが、広範囲を比較的容易に調査でき、面的な変状を 3mm～6mm の精度で確認できるため、ジャンカや空隙の調査に有効であると思われる。

2.5 まとめ（非破壊検査に基づく老朽構造物評価の方向性）

今回検討対象とした橋梁を例にとると、主に材料劣化として鋼橋の腐食と、コンクリート橋の疲労を除く劣化が考えられる。表-2.5.1に各非破壊検査の老朽構造物評価への適用性について示す。

ここで、老朽化とは材料の劣化による耐荷力の低下とすると、耐荷力が使用性や安全性に要求される性能を満足するかどうか判断基準の1つとなる。寿命は、使用性や安全性を満足する維持修繕に関わる費用や頻度により判断できると考えた。

橋梁の物理的な寿命は、耐久性、安全性、使用性の側面について、主に妥当な経費で補修できる繰り返し回数（ライフサイクルコスト；LCC）により定まると考えられる。老朽構造物の評価を行う上で、必要となる情報を入手する上で、非破壊検査は引き続き、その性能の向上や適用性の検証、利用方法の開発が求められる。

そのため、本研究会では、第3章 根岸橋の調査診断に示すように、架け替えが進められている老朽橋梁を対象に、非破壊検査と、撤去後の実構造物の部材を用いた破壊検査等を計画し、比較検証を行うことで、評価手法の検討を進めている。

表-2.5.1 非破壊検査の老朽構造物評価への適用性

| 検査・測定項目 | 検査・測定内容 | 老朽構造物評価への適用性 | | | 考察 |
|--------------------|-----------------------------|--------------|------|--------|--|
| | | 耐荷力低下の検知 | | 第三者影響度 | |
| | | RC構造 | PC構造 | | |
| 赤外線法 | かぶりコンクリートの浮き・剥離の検出 | ○ | △ | ○ | 浮き剥離の検知を効率よく行える。浮き・剥離の量と耐荷力低下の関連性の評価が課題。 |
| デジタルカメラ法 | ひび割れ分布(本数・幅)・断面欠損の評価 | ○ | ○ | | ひびわれの種類や、ひびわれ幅・長さなど耐荷力低下の関連性の評価が課題。 |
| 打音法 | コンクリート強度の評価・浮き・剥離の検出 | —※ | ○ | ○ | 浮き剥離の検知を効率よく行える。浮き・剥離の量と耐荷力低下の関連性の評価が課題。 |
| X線法 | PCグラウト充填状況・鋼材配置の評価 | — | ○ | | 鋼材本数を特定する必要がある場合に有効。PC鋼材の破断が確認できる可能性がある。 |
| 超音波(トモグラフィ)法 | PCグラウト充填状況の評価 | — | ○ | | グラウト不良ではないことを検証する場合には、有効である。グラウト不良が疑わしい場合は、鋼材破断の調査実施についての判断材料として有効である。 |
| インパクトエコー(衝撃弾性波)法 | 空隙の検出(PCグラウト充填状況の評価)・床版厚の測定 | △ | ○ | | グラウト不良ではないことを検証する場合は、有効である。内部空洞・グラウト不良が疑わしい場合は、他の調査方法のと組み合わせで検出する必要がある。床版厚などコンクリート部材の寸法測定では高い精度が期待でき、耐荷力を評価する上で、基本情報の入手という点で有効である。 |
| 反発硬度法 | コンクリート強度の評価 | — | ○ | | 健全部と劣化部の相対的な評価は可能。初期値や定期的な測定データがあると尚良い。コンクリート強度の変化と耐荷力低下の関連性の評価が課題。 |
| 自然電位法 | 鋼材(鉄筋)腐食可能性の評価 | — | △ | ○ | 自然電位と、PC鋼材の腐食の関連性は現時点では不明確。RC構造では、主筋の断面欠損との関連性の評価が課題。 |
| ドリル法 | 中性化深さ | — | △ | | 中性化深さと鋼材腐食による断面欠損との関連性の評価が課題。また中性化が進行した場合に、影響度が大きくなることが予測される他の劣化要因についての評価が課題。 |
| ドリル法 | 塩分量測定 | — | △ | | 塩分量と中性化深さ、鋼材の断面欠損や、浮き・剥離量との関連性の評価が課題。 |
| AE法 | ひび割れ発生・進展の検出 | △ | ○ | | RC構造では、AEアカウン트가多すぎ、評価方法が課題。PC構造では、AEアカウンと車両重量計測など、上載荷重との関係の評価が課題。これにより設計荷重と耐荷力の関係の評価できる可能性がある。 |
| 加速度計測 | 固有振動数・減衰定数・たわみの評価 | △ | △ | | 架設時(新設時)のデータが取得されている場合、健全度を評価する上で有効となる可能性が高い。剛性低下と、耐荷力低下の関係の評価が課題。 |
| レーザ速度計測 | 固有振動数・減衰定数・たわみの評価 | △ | △ | | 架設時(新設時)のデータが取得されている場合、健全度を評価する上で有効となる可能性が高い。たわみと、耐荷力低下の関係の評価が課題。 |
| 光ファイバ計測 | 断面内ひずみ分布の評価 | ○ | ○ | | ひびわれが確認された場合、コンクリートのひずみ計測を行う上で、有効な手段となる。PC構造では、ひずみゲージなどと組み合わせ、ひびわれを検知出来る可能性があり、耐荷力を評価する上で、有望な手法である。 |
| 鉄筋切断法、スロットストレス法 | プレストレスの推定 | — | ○ | | プレストレス量の設計値との差を検証することにより、耐荷力の評価が可能。他の手法と組み合わせプレストレス低下の原因推定や、低下の進行性の評価を実現することが課題。 |
| 透気法 | コンクリートの密実度の評価 | — | △ | | 反発硬度法を含め、他の手法との組み合わせにより、水密性と耐久性の関係の評価することが課題である。 |
| 打撃応答法 | コンクリートの弾性係数、圧縮強度 | — | △ | | 初期値や定期的な測定データがあると尚良い。コンクリート強度の変化と耐荷力低下の関連性の評価が課題。 |
| 超音波(直接回折波)法 | ひび割れ深さの測定 | ○ | ○ | | ひびわれの種類や、ひびわれ幅・長さ・深さと、耐荷力低下の関連性の評価が課題。 |
| 地中レーダー法(マルチパルスアレイ) | 床版鉄筋の測定手 | ○ | — | | 鉄筋配置、鋼材本数を特定する必要がある場合に有効。鋼材の破断が確認できる可能性がある。耐荷力を評価する上で、基本情報の入手という点で有効である。 |

※—は対象構造に対し今回試験を実施していないものである。

3. 根岸橋の調査診断

3.1 根岸橋の概要

今回検討対象とした根岸橋は、横浜市磯子区の東端部をほぼ南北に流れる二級河川・堀割川に架設された三径間連続鋼鈹桁 RC 床版橋である。根岸疎開道路¹⁾（JR 京浜東北線根岸駅方面から堀割川の右岸にある国道 16 号線に通じる街道）と国道 16 号線の交点、堀割川河口（根岸湾）から約 1.5km の位置に架設されている。

関東大震災(大正 12 年)によって大破した木橋の復興橋梁として完成²⁾し、築造後 79 年以上を経過している。関東大震災の震災復興事業では、復興橋梁が国執行（37 橋）および市執行（141 橋）に区分されていたが、根岸橋は市執行として施工された。

以下に、同橋の諸元等を、図-3.1.1 に位置図、図-3.1.2 に一般図、図-3.1.3 に周辺の航空写真、図-3.1.4 に現況写真を示す。

- ・ 諸 元：橋長 26.9m、幅員 10.0m（車道 6.0m、歩道 2.0m×2）
- ・ 構 造：三径間連続鋼鈹桁 RC 床版橋
- ・ 工 期：大正 15 年 3 月～大正 15 年 12 月
- ・ 工事費：42,959.27 円（大正 15 年 3 月時点）

現在、根岸橋は著しい老朽化のため、①現行基準に合わせた架け替えによる耐震性の向上、②歩道拡幅、道路勾配等改良によるバリアフリー化、③上町側橋詰め交差点改良及び道路線形見直しによる交通安全対策を目的として、架替および歩道拡幅等の改良工事が進められている。図-3.1.5 に架替工事の完成予想図を示す。



図-3.1.1 根岸橋位置図

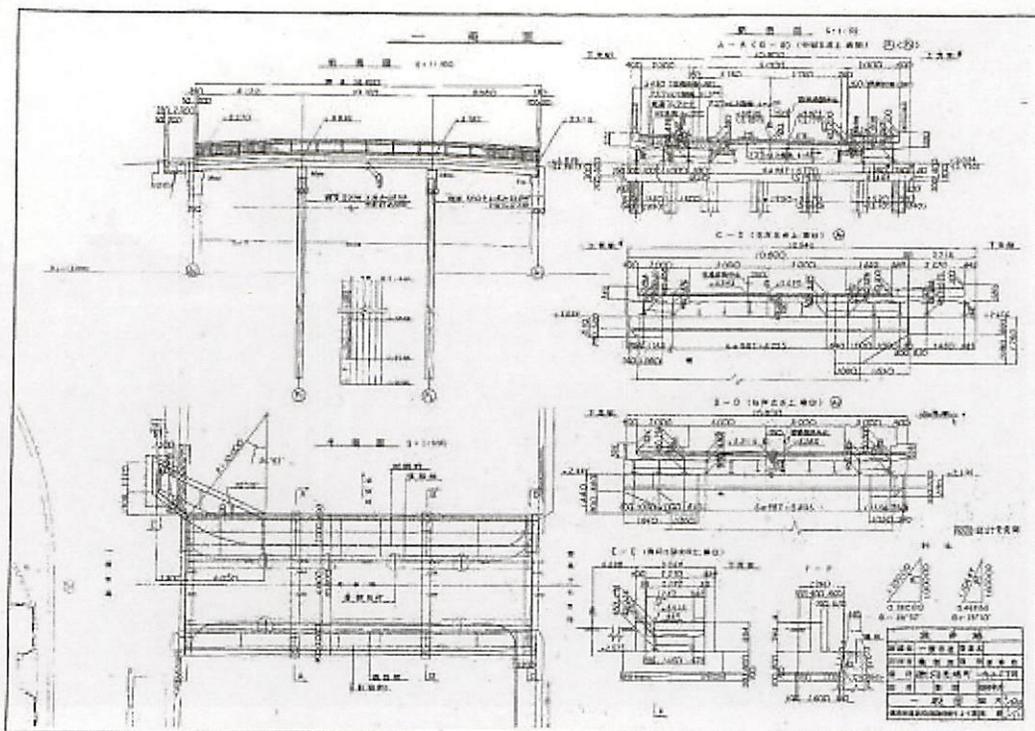


図-3.1.2 根岸橋一般図

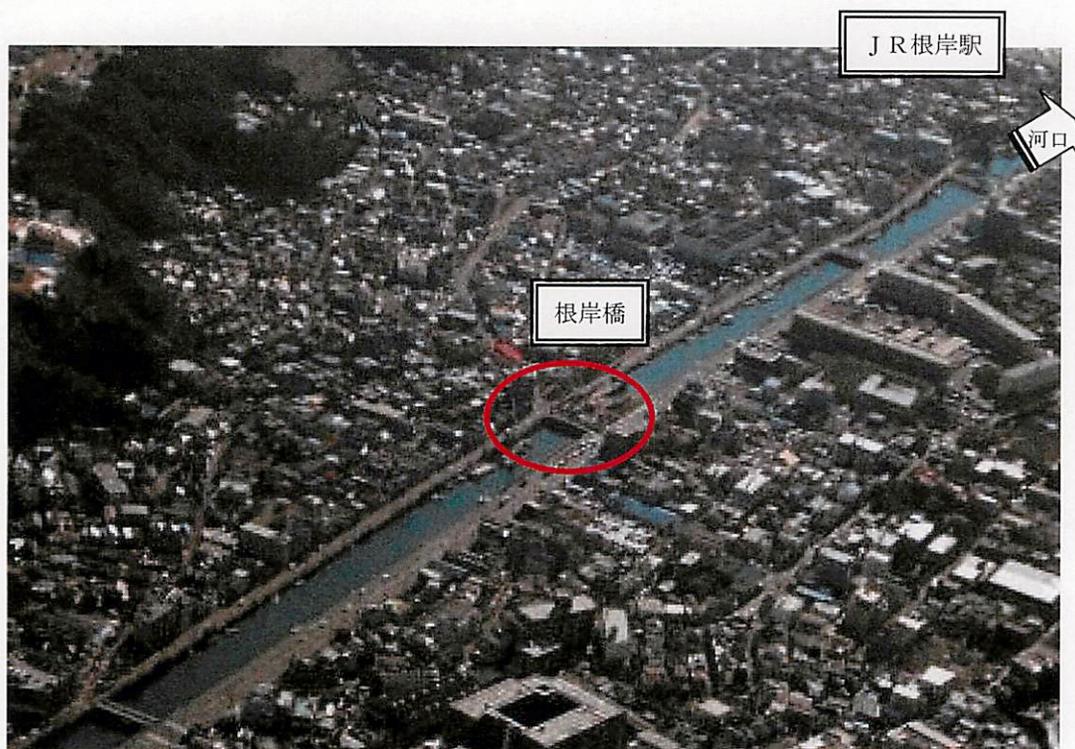


図-3.1.3 根岸橋周辺の航空写真 (2006年1月)



図-3.1.4 根岸橋現況写真（上流側：2005年6月）

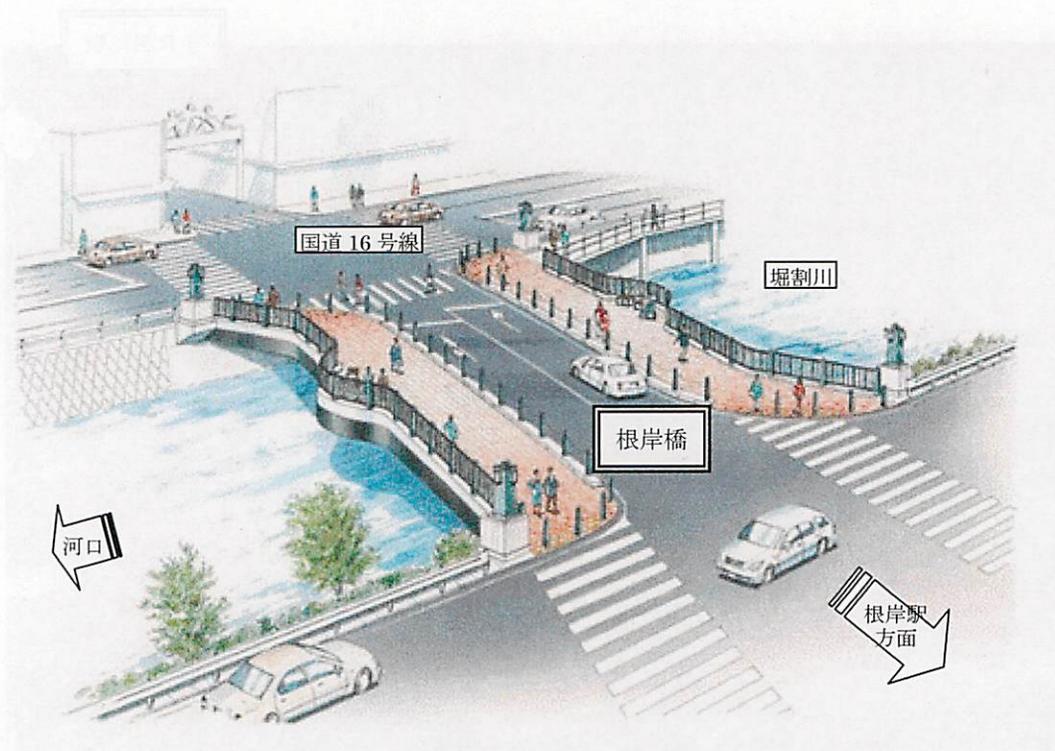


図-3.1.5 根岸橋架替工事完成予想図（2007年3月竣工予定）

参考文献

- 1) 横浜市道路局：愛称道路，昭和59年4月
- 2) 横浜市役所：横浜復興誌第二編，昭和7年3月

3.1.1 現橋梁の設計標準

根岸橋が施工された大正 15 年 3 月には、表-3.1.1 に示すとおり、「道路法（大正 8 年 4 月公布）」および同法第 31 条の規定による「道路構造令及び街路構造令（大正 8 年 12 月公布）」が公布済みであった。道路交通の主体は馬車や荷車とされていたが、道路の種類による規格・構造が規定されていた。また震災後の大正 15 年 6 月には、急速に増加する自動車交通に対応して「道路構造に関する細則」が規定されている。

一方、根岸橋（現橋梁）は市執行として復興され、「横浜市橋梁設計標準（横浜市土木局）」を設計標準として用いたことが「横浜市復興誌²⁾」に示されている。同誌には同設計標準の制定時期が示されておらず、根岸橋の着工時点(大正 15 年 3 月)での「横浜市橋梁設計標準（横浜市土木局）」と「道路構造に関する細則」との正確な関係は不明であるが、この時点で「道路構造に関する細則」は公布されていない。

したがって、根岸橋の施工にあたって「横浜市橋梁設計標準（横浜市土木局）」が適用されたものと考えられるが、両者を比較すると、表-3.1.2 に示すとおり単位系や道路線形に関する規定の細かさなどで異なる点が見られるものの、同様の規定も多く、細則が公布間近であったことを考慮すると、両者には何らかの関連性が推察される。

表-3.1.1 道路橋示方書の改定年譜

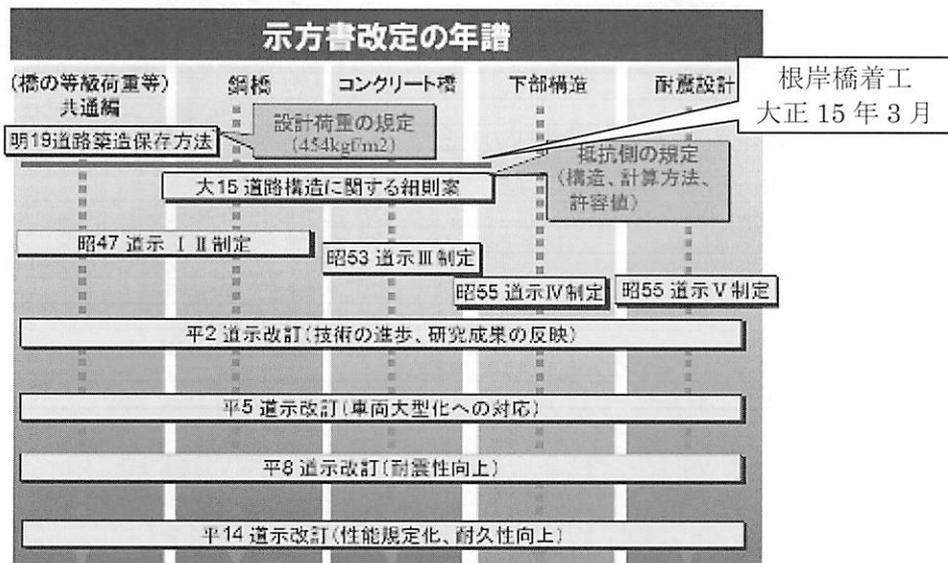


表-3.1.2 「横浜市橋梁設計標準」と「道路構造に関する細則」との比較

| 横浜市橋梁設計標準(大正15年3月使用、制定時期不明) | 道路構造に関する細則(大正15年6月公布) |
|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 1. 車道、歩道の幅員 | 1. 道路の有効幅員、路肩 |
| 2. 橋面上の最小有効幅 | 2. 道路の建築限界 |
| 3. 橋面下の最小有効幅、高 | 3. 待避所 |
| 4. 死荷重 | 4. 最小縦断勾配 |
| 5. 活荷重 | 5. 勾配1/25を超える坂路の制限長 |
| A等分布荷重 | 6. 勾配と縦断曲線 |
| B集中荷重 | 7. 道路屈曲部制限 |
| C活荷重の衝撃 | 8. 坂道曲線降線形 |
| D風荷重 | 9. 安全視距 |
| E制動荷重 | 10. 屈曲半径と幅員拡張 |
| F欄干における推力 | 11. 横断勾配 |
| G地震荷重 | 12. 屈曲部の横断勾配 |
| 6. 橋上の活荷重の配置 | 13. 踏切前後の勾配、有効幅員 |
| A等分布荷重 | 14. 橋梁取付け区間の勾配 |
| B集中荷重 | 15. 危険箇所の駒止め |
| 7. 橋面上の輪荷重分布 | 16. 本則は鋼橋、コンクリート橋の設計への適用 |
| A自動車荷重 | 17. 一等橋: 街路、二等橋: 国道、三等橋: 府県道 |
| B電車荷重 | 18. 鋼材、セメントの規定 |
| 8. 輪荷重に対するコンクリート版の支承桁上の有効幅 | 19. 死荷重 |
| A縦桁 | 20. 活荷重 |
| B横桁 | 21. 活荷重の衝撃係数 |
| 9. 四辺支持鉄筋コンクリート版の荷重分配率 | 22. 風荷重 |
| 鋼橋 | 23. 制動荷重 |
| 10. 温度変化および増生係数 | 24. 欄干作用推力 |
| 11. 材料 | 25. 温度変化許容範囲 |
| 12. 死荷重、活荷重および衝撃に対する許容応力度 | 26. 地震荷重 |
| 13. 部材の長さとその断面の環道半径との比 | 27. 活荷重負載方法 |
| 14. 交番応力 | 28. 活荷重分布 |
| 15. 死荷重および活荷重の合成 | 29. コンクリート床版の有効幅 |
| 16. 交番応力を受ける部材の応力 | 30. 四辺支持床版の荷重分配 |
| 17. 混交応力 | 31. 鋼材の許容応力度 |
| 18. 活荷重、死荷重、風荷重(制動荷重)による発生応力の割増し | 32. 死荷重、活荷重、衝撃に対するコンクリート(1:2.4)の許容応力度 |
| 19. 死荷重、活荷重、衝撃、地震力による発生応力の割増し | 33. 鋼橋部材の長さとその断面の環道半径との比 |
| 20. 引張材の純断面積の算出(リベット孔低減) | 34. コンクリート圧縮部材の長さとその断面の環道半径との比 |
| 21. リベット孔のある引張材の純断面積の規定 | 35. 交番応力 |
| 22. 鋼桁ウェブの断面積の取り扱い | 36. 曲げ圧縮部材の合成応力 |
| 23. 鋼桁の圧縮フランジについて | 37. 活荷重、死荷重、風荷重(制動荷重)による発生応力の割増し |
| コンクリート橋 | 38. 死荷重、地震力による発生応力の割増し |
| 24. コンクリート用セメント | 39. 本則未規定事項について |
| 25. 死荷重、活荷重、衝撃に対するコンクリート(1:2.4)の許容応力度 | 40. 例外規定について |
| 26. 圧縮部材の長さ規定 | |

3.1.2 現橋梁の設計方針

現橋梁の設計に当たっては、「横浜市橋梁設計標準（横浜市土木局）」が用いられたと考えられるが、同設計標準には 1)震災復興であること、ならびに 2)河川での船舶交通が当時重要な交通手段であったことから、以下の方針が示されている²⁾。

- ①「耐震的橋梁設計上の要領」としての基礎の不同沈下対策、および橋台・橋脚等の継手部分への鉄筋配置。
- ②地震に伴う火災による橋梁の焼失に鑑み、鋼橋またはコンクリート橋による「不燃質構造」を選択。
- ③船舶交通を妨げない最小航路空間（幅 9.1m）、橋桁下高（東京湾中等潮位より最小 3.07m）の確保

一方、震災復興当時の横浜市内に流れる河川の幅は、最大で 55m（大岡川：弁天橋付近）、一般には 18～27m であり、また河川兩岸にある側道の河岸高は一般に低く、基準面水位（東京湾中等潮位）+1.5～1.8m が一般的で、最大でも +5.5m（唯掘川）であった。

このため、市内の橋梁の多くで、橋桁下端高は河岸天端高+1.3～1.5m 以上となり、橋桁高や床版厚を考慮すると、河岸側道と橋面天端には 2.5m に及ぶ高低差が発生することになった。この高低差が大きいと、橋梁と河岸の側道との取付けは困難となり、橋桁高をできる限り抑えることが必要となった。

頻繁な船舶交通を確保しながら橋桁高を抑えるには、その径間を最小航路空間の制限範囲で狭くすることになるが、市内の河川幅は先述のとおり一般に 18～27m であり、川幅に応じて三径間を中心に一径間の橋梁が計画されたものと考えられる。

以上、震災復興橋梁として市内に架設された中小橋梁は、上記の理由から桁高が小さく、桁数が多い鋼桁橋の形式になったものと推察される。根岸橋はその結果として、大正 15 年建設当時から交通量や荷重の条件が大きく変わっても、80 年近くを経るまで供用可能であったものと考えられる。

3.1.3 工事費

根岸橋の大正 15 年 3 月当時の工事費は 42,959.27 円である¹⁾。これを再調達するものとして建設デフレーターによって現在価値に置き換えを行った。

使用した建設デフレーターは、大正 15 年から平成 18 年に至るまでの全期間を網羅する統計数値がないため、昭和 26 年度から平成 16 年度までは国土交通省公表の「建設工事費デフレーター(H12 年度基準)」を用い、大正 15 年度から昭和 26 年度までの統計数値がない期間については、「長期経済統計 8 物価 (大川一司編)」中の「投資財個別価格指数建設工事費指数」を用いて算出を試みた。表-3.1.3 は検討結果を示す。

現在の再調達価格として求めた工費は、約 6,000 万円程度と算出された。基礎部分の構造やその算入の有無は確認できないが、概ね妥当な結果が得られたものと考えられる。

表-3.1.3 根岸橋の現在価値

(単位:円)

| | S1=100とした際の指数 | 評価年 | 工費① |
|--------|---------------|------|------------|
| 竣工時 | 100.00 | 1926 | 42,959.27 |
| 2005年度 | 135202.70 | 2005 | 58,082,093 |

異なる時点の経済活動を比較する時、物価の変動による名目値の変動を取り除いて、実質的な数値を算出する必要がある。実質値は名目値を価格変化を表す物価指数で除することによって求められ、この際に使う物価指数をデフレーターと呼ぶ。
 今回の試算においては、土木構造物であることから国交省公表の「建設工事費デフレーター」を基本に、統計数値がない過去については、「長期経済統計8物価」中の「投資財個別価格指数建設工事費指数」を使用して算出した。

3.2 根岸橋調査概要

3.2.1 概要

調査対象は、撤去解体が行われている「根岸橋」である。一般に、調査は、健全度評価及び寿命の判定などを目的として行われる。

2002～2003年度の研究では、機能的、物理的、経済的側面からみた寿命の構成要素として下表の項目を示した。

表-3.2.1 寿命の構成要素

| 大項目 | 中項目 | | | |
|-------|---------|---------|-----------|------|
| 機能的側面 | アクセス機能 | 利用者の安全性 | 使用性 | 機能向上 |
| 物理的側面 | 安全性・安定性 | 使用性 | 周辺環境への影響性 | 耐久性 |
| 経済的側面 | 収益 | 直接的収益性 | 間接的収益性 | |
| | 損益 | 建設費 | 維持管理費 | 撤去費用 |
| | | | | 改良費 |

国土交通省では「土木・建築にかかる設計の基本（平成14年10月21日）」において、構造物の基本的要求性能として、「安全性」、「使用性」及び「修復性」の確保を挙げ、その限界状態を終局限界(安全性)、使用限界(使用性)、修復限界(修復性)としている（図-3.2.1参照）。

- ・安全性：想定した作用に対して構造物内外の人命の安全性等を確保する。
- ・使用性：想定した作用に対して構造物の機能を適切に確保する。
- ・修復性：想定した作用に対して適用可能な技術でかつ妥当な経費および期間の範囲で修復を行うことで継続的な使用を可能とする。

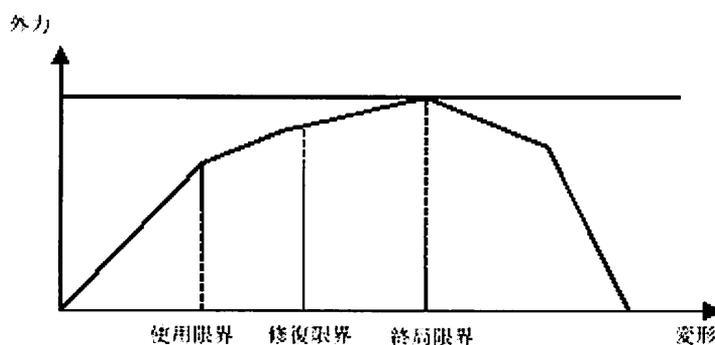


図-3.2.1 各限界状態のイメージ¹⁾

本WGでは、上記をふまえ、取り扱う寿命の定義付けに関する検討を行ってきた。ここで、健全度及び寿命等を評価するにあたっての必要な調査項目と評価される項目を整理した根岸橋のカルテを表-3.2.2～4に示す。

表-3.2.2 上部工橋梁カルテ

| | | | | | | | | | | | |
|----------|----------------------------|------|-------|-----------|------------------|------|------|----|------|------|--|
| 橋梁名: | 根岸橋(着色部:今回調査,赤字:撤去部材による調査) | | | | | | | | | | |
| 形式 | 3径間連続鋼版桁橋RC床版 | | | | | | | | | | |
| 径間 | | | | | | | | | | | |
| 部材部位 | 上部工 | | | | | | | | | | |
| 目視調査 | | | 調査 | | | | | | | | |
| 変状の種類 | 程度 | 項目 | 調査位置 | 調査項目 | 調査方法 | 調査結果 | 劣化予測 | 現状 | 10年後 | 20年後 | |
| 亀裂 | | 亀裂調査 | 上部工全般 | 塗膜割れ | 目視調査 | | | | | | |
| 塗膜 | | | | 亀裂 | 磁粉探傷 | | | | | | |
| ボルト/リベット | | | | | | | | | | | |
| 鋼材腐食 | | | | | | | | | | | |
| | | 応力振動 | 上部工全般 | 頻度計測,載荷試験 | たわみ 応力頻度 | | | | | | |
| | | | | 死荷重応力度 | | | | | | | |
| その他 | | | | 振動計測 | ①固有振動数 ②振動モード | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |

表-3.2.3 床版橋梁カルテ

| | | | | | | | | | | | |
|---------------|----------------------------|-------|------|---------------------|---------------------|---------|------|----|------|------|--|
| 橋梁名: | 根岸橋(着色部:今回調査,赤字:撤去部材による調査) | | | | | | | | | | |
| 形式 | 3径間連続鋼版桁橋RC床版 | | | | | | | | | | |
| 径間 | | | | | | | | | | | |
| 部材部位 | 床版 | | | | | | | | | | |
| 目視調査(デジタルカメラ) | | | 調査 | | | | | | | | |
| 変状の種類 | 程度 | 項目 | 調査位置 | 調査項目 | 調査方法 | 調査結果 | 劣化予測 | 現状 | 10年後 | 20年後 | |
| ひび割れ | 不規則な二方向 | 圧縮強度 | | ①圧縮強度 | コア-強度試験 | | | | | | |
| | 規則的な二方向 | | | | 反撥硬度法 | | | | | | |
| | 一方向 | | | | | | | | | | |
| 遊離石灰 | | 中性化深さ | | ①中性化深さ調査 ②鉄筋位置調査 | フェノールフタレイン法 鉄筋探査 | | | | | | |
| 錆び汁 | | 塩分含有量 | | ①塩分量調査 | コア-による塩分量分析 | | | | | | |
| 剝離、剝落 | | | | ②鉄筋位置調査 | 鉄筋探査 | | | | | | |
| 鉄筋露出 | | 鉄筋腐食 | | ①鋼材腐食調査 | はつり目視調査 | | | | | | |
| 浮き | | | | | 自然電位調査 | | | | | | |
| 漏水 | | 内部欠陥 | 床版全般 | 浮き,内部欠陥 | 赤外線法 | | | | | | |
| 変色 | | 反応性塩物 | | ①アルカリ骨材反応試験 | 偏光顕微鏡 X線回折 | | | | | | |
| | | | | | ②膨張量 | 残存膨張量試験 | | | | | |
| その他 | | 応力振動 | | 頻度計測,載荷試験 | たわみ 応力頻度 | | | | | | |
| | | | | 死荷重応力度 | | | | | | | |
| | | | | 振動計測 | ①固有振動数 ②振動モード | | | | | | |

表-3.2.4 下部工橋梁カルテ

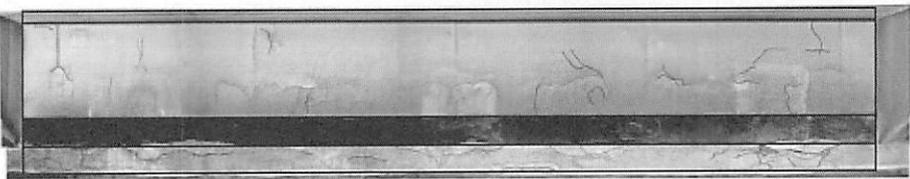
| | | | | | | | | | | |
|---------------|----------------------------|-------|---------|-------------|------------|------|------|----|------|------|
| 橋梁名: | 根岸橋(着色部:今回調査,赤字:撤去部材による調査) | | | | | | | | | |
| 形式 | RCバイルベント橋脚,重力式橋脚 | | | | | | | | | |
| 径間 | | | | | | | | | | |
| 部材部位 | P1,P2橋脚 | | | | | | | | | |
| 目視調査(デジタルカメラ) | | | 調査 | | | | | | | |
| 変状の種類 | 程度 | 項目 | 調査位置 | 調査項目 | 調査方法 | 調査結果 | 劣化予測 | 現状 | 10年後 | 20年後 |
| 鋼材腐食 | | 中性化深さ | | ①中性化深さ調査 | フェノールフレイン法 | | | | | |
| 塗膜 | | | | ②鉄筋位置調査 | 鉄筋探査 | | | | | |
| 浮き | | 塩分含有量 | | ①塩分量調査 | 表面塩分調査 | | | | | |
| 漏水 | | | | ②鋼材腐食調査 | 目視調査 | | | | | |
| 変色 | | 反応性鈍物 | | ①アルカリ骨材反応試験 | 偏光顕微鏡 | | | | | |
| | | | | | X線回折 | | | | | |
| | | | | ②膨張量 | 残存膨張量試験 | | | | | |
| | | 内部欠陥 | P1,P2橋脚 | 浮き,内部欠陥 | 赤外線法 | | | | | |
| | | 応力振動 | P1,P2橋脚 | 頻度計測,載荷試験 | たわみ | | | | | |
| | | | | | 死荷重応力度 | | | | | |
| その他 | | | | 振動計測 | ①固有振動数 | | | | | |
| | | | | | ②振動モード | | | | | |

表-3.2.2～4 に示す根岸橋のカルテより、以下のような調査項目が考えられる。

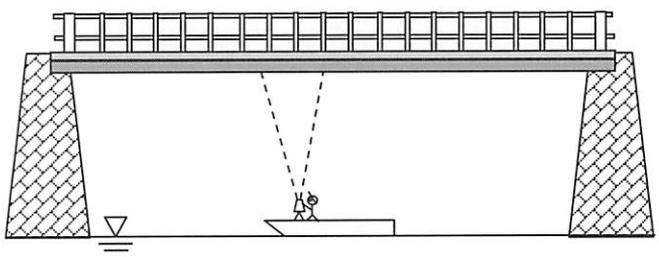
- ① 床版ひび割れ調査 (デジタルカメラ)
- ② 赤外線サーモグラフィー法による内部欠陥調査
- ③ 振動調査

以下、各調査項目について示す。

3.2.2 床版ひび割れ調査（デジタルカメラ）

| 項目 | 内容 | 備考 |
|--------|--|--------------|
| 概要 | 高解像度デジタルカメラで撮影した画像を解析することで、客観的かつ精度良くひび割れを抽出し、ひび割れの進展度合いを評価する。 | |
| 対象橋梁 | 根岸橋 | |
| 対象部材 | R C床版 | |
| 計測箇所 | 各スパンで損傷の進展している数パネル | 河川内の足場の確保が課題 |
| 計測原理 | 撮影したデジタル画像を、レンズ歪みや幾何学的な補正、および濃淡補正により改善させ、ひび割れ部に生じる濃度変化を検出することにより、ひび割れを抽出する。 | |
| 計測期間 | 1日程度 | |
| 計測イメージ |  <p>青 : 0.25mm 未満 橙 : 0.25mm 以上~0.5mm 未満 赤 : 0.5mm 以上</p> <p>[計測対象 PC 桁]</p> | |

3.2.3 赤外線サーモグラフィー法

| 項目 | 内容 | 備考 |
|--------|--|-------------|
| 概要 | 床版コンクリートの損傷因子の内、かぶりコンクリートの浮きおよび耐荷力上問題とされる。床版内部欠陥の有無を検出することを目的として実施する。 また、橋脚についても鉄筋腐食による浮きおよび内部欠陥の有無を検出することを目的として実施する。 | |
| 対象橋梁 | 根岸橋 | |
| 対象部材 | R C床版, 橋脚 | |
| 計測箇所 | 各スパンで損傷の進展している数パネル | 船上からの調査となる。 |
| 計測原理 | 赤外線サーモグラフィー法により、床版下面及び橋脚の温度分布状況から内部欠陥を検出する。 | |
| 計測期間 | 1日程度 | |
| 計測イメージ | 橋下に配置した船舶上から、床版下面及び橋脚の撮影を行う。  | |

3.2.4 振動計測

| 項目 | 内容 | 備考 |
|--------|--|---|
| 概要 | 橋梁部材の振動特性を計測することにより、剛性の低下度合いを評価する。 | |
| 対象部材 | 上部構造 | 橋脚は評価が難しい |
| 計測箇所 | 地覆上面（スパン中央の左岸側，右岸側） （または鋼鈹桁の下フランジ上面に設置） | 計測箇所：2箇所程度 |
| 計測原理 | 加速度計を用いて、自動車走行時の橋梁部材の加速度を計測し、フーリエスペクトル解析により部材の固有振動数を算出する。一般的に剛性が低下する程、固有振動数は小さくなる。 | 竣工時の振動特性を簡易なモデルにより計算し、計測結果と比較して、剛性の低下を評価する。 |
| 計測期間 | 準備および計測を含めて1日程度 | |
| 計測イメージ | <p>○主桁の振動</p> | |

3.3 調査結果

3.3.1 デジタルカメラによる調査結果

(1)検査方法

デジタルカメラで根岸橋床板の撮影をして、展開画像を作成し、判読を行った。

・位置：

- ・根岸橋床板の G4～G9 間

・測定日、時間：

- ・平成 17 年 11 月 14 日 15～16 時 天候：晴

・測定回数：

- ・デジタルカメラで、G4～G9 間の各床板を対象に 1 回撮影を行った。

・撮影機材：

- ・Nikon D2X(1100 万画素)+24mm レンズとストロボ、三脚を使用した。

・撮影方法：

- ・船上に三脚を設置し、カメラを垂直に設置して、ストロボ撮影を行った。
- ・対象までの距離は、約 2m で撮影範囲は 2m×1m、画像分解能は約 0.5mm である。

(2)処理方法

対象面を数枚に分けて撮影した画像データに色調整やレンズ歪み補正の画像処理を行い、画像接合により展開画像を作成した。

(3)まとめ

- ・床板表面の影響で、顕著な保守状況は判読できなかった。
- ・船上からの撮影のため、揺れの影響があり、撮影が困難であった。



図-3.3.1 G4~G5間



図-3.3.2 G5~G6間



図-3.3.3 G6~G7間

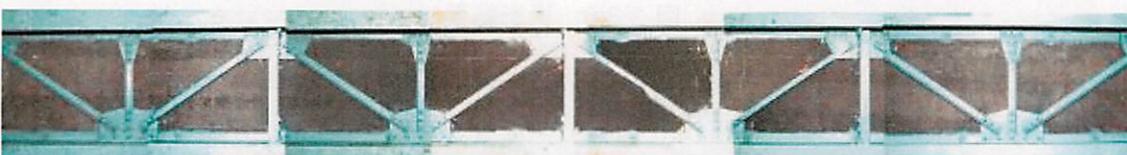


図-3.3.4 G7~G8間

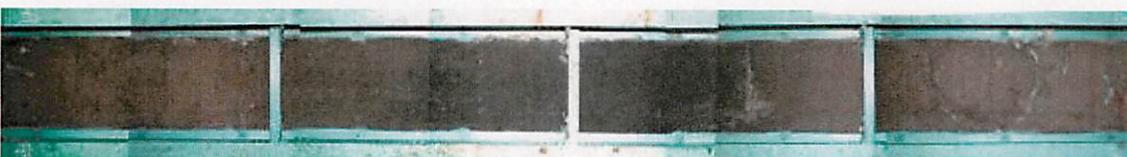


図-3.3.5 G8~G9間

3.3.2 赤外線サーモグラフィ法による調査結果

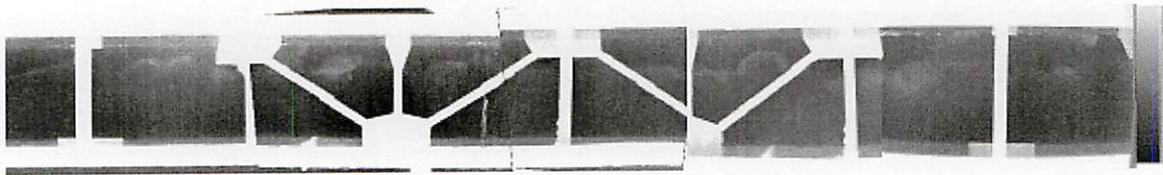
今回の測定では、耐久性に影響を与える床版深部に発生した欠陥の検出を試みたが、赤外線画像からは表層の局所的な浮きが検出されたに止まった。

一部の格子間の赤外線画像には温度ムラが見られるが、全てが補修跡など、既設床版コンクリートとは材料が異なり、色合いの差で生じる放射率の差によるものである。

調査結果からは、第三者に影響する表層の浮きや床版内部の水平ひびわれの発生は認められず、経過年数を考慮するとRC床版そのものは比較的健全な状態が保たれていると思われる。



可視画像



赤外線画像

図-3.3.6 撮影結果

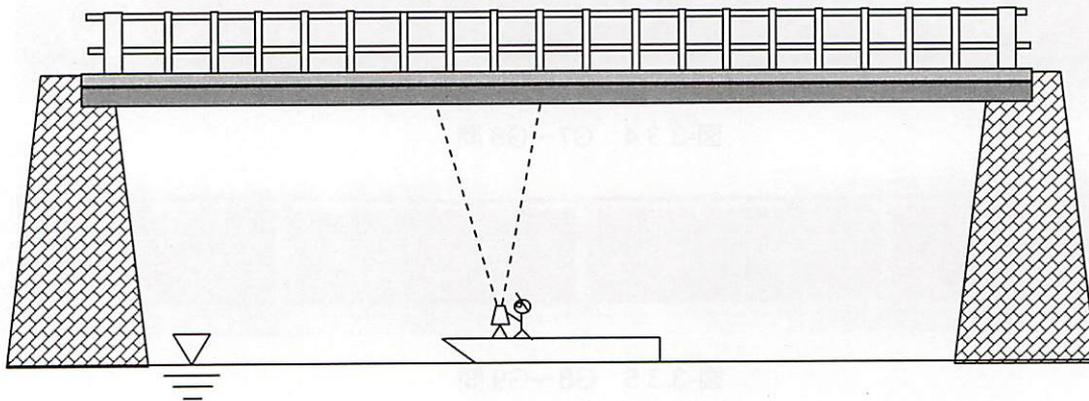


図-3.3.7 撮影状況

3.3.3 振動計測による調査結果

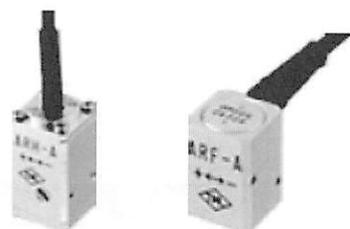
本調査では、加速度計を用い車輛通過後の自由振動時における加速度を計測し、根岸橋梁の振動特性を評価することを目的とした。

(1)計測方法

1) 使用計測器具

表-3.3.1 小型低容量加速度計 AFR-20A・AFR-50A(東京測器製)

| 型名 | AFR-20A | AFR-50A |
|-----------|-------------------------------------|--------------------|
| 容量 | 20m/s ² | 50m/s ² |
| 重力系参考値 | 2.04G | 5.1G |
| 定格出力 | 約0.5mV/V(1000×10 ⁻⁶ ひずみ) | |
| 非直線性 | 1%RO | |
| 応答周波数(Hz) | 80 | 130 |
| 固有振動数(Hz) | 150 | 240 |
| 許容温度範囲 | -10+50°C | |
| 許容過負荷 | 300% | |
| 入出力抵抗 | 120Ω | |
| 推奨印加電圧 | 2V以下 | |
| 許容印加電圧 | 5V | |
| 入出力ケーブル | φ3mm0.5mm24心シールドケーブル5m | |
| 質量 | 13g | |



デジタル動ひずみ測定器 (東京測器製)

| 製品名 | DRA-107A | |
|------------|-----------|-----------------|
| 測定点数 | 10点 | |
| 応答周波数範囲 | DC~2.5kHz | |
| サンプリング速度 | 低速 | 1~32767ms |
| | 中速 | 0.2~0.9ms |
| | 高速 | 0.05~0.1ms |
| 入力ローパスフィルタ | 遮断周波数 | 10、30、100、300Hz |

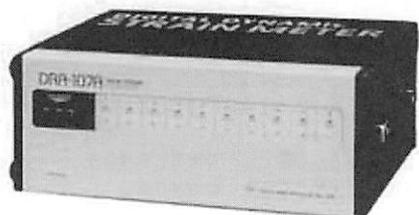


図-3.3.8 デジタル動ひずみ測定器(東京測器製)

2) 計測方法

【上部構造】

上部構造における加速度計の設置位置を図-3.3.9、加速度計の設置状況を図-3.3.10、および通過重量車両の例を図-3.3.11に示す。

上部構造の加速度計測にあたっては、床板上面における加速度を橋軸方向にA列、B列、C列を設定し、それぞれ右岸側からNo1、2、3として、上流側高欄下部に測点A-1,2,3、下流側歩道縁石に測点B-1,2,3、下流側高欄下にC-1,2,3を設けた。

計測方法は、大型トラックの通過後の自由振動を9点同時に計測するものとした。

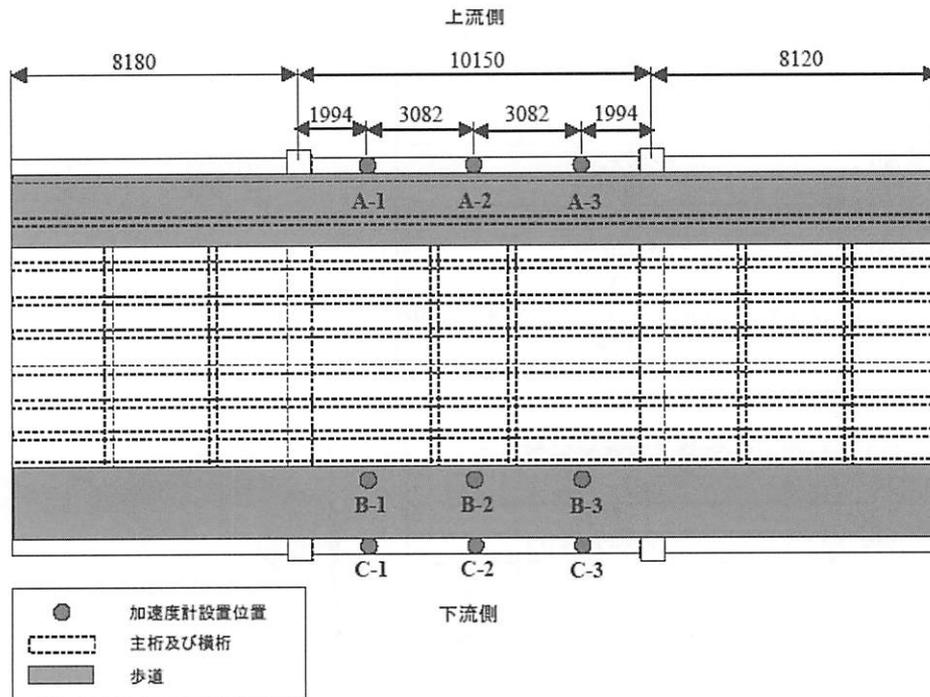


図-3.3.9 計測器具設置位置（上部工）



図-3.3.10 加速度計設置状況



図-3.3.11 通過重量車両の例

【下部構造】

下部構造における加速度計の設置位置を図-3.3.12、加速度計の設置状況を図-3.3.13に示す。下部構造の加速度計測にあたっては、三径間のうち中央径間左岸側橋脚横梁のX、Y、Z方向に加速度計を設置して行った。

測点は、上流側(①-X,Y,Z)および下流側(②-X,Y,Z)の2点、各三軸方向である。計測方法は上部工と同様、大型トラックの通過後の自由振動を6点同時に計測するものとした。

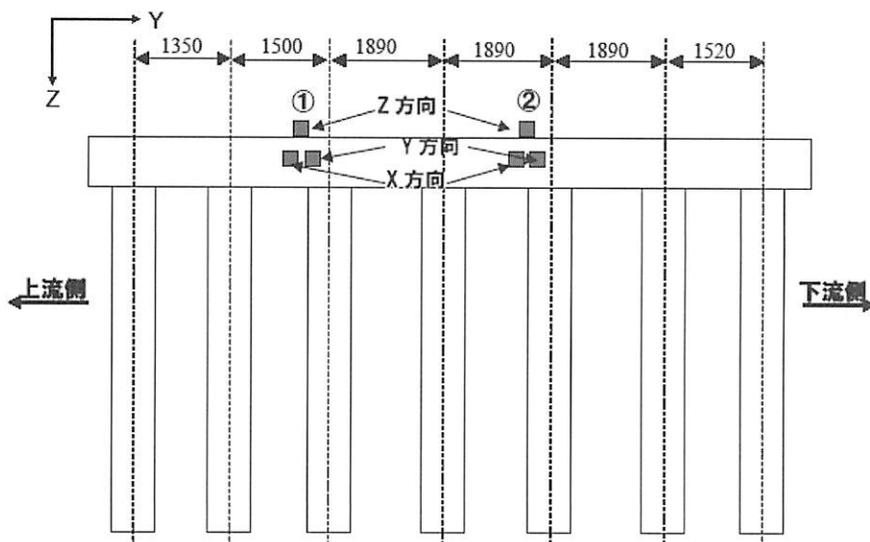


図-3.3.12 加速度計設置位置 (下部構造)

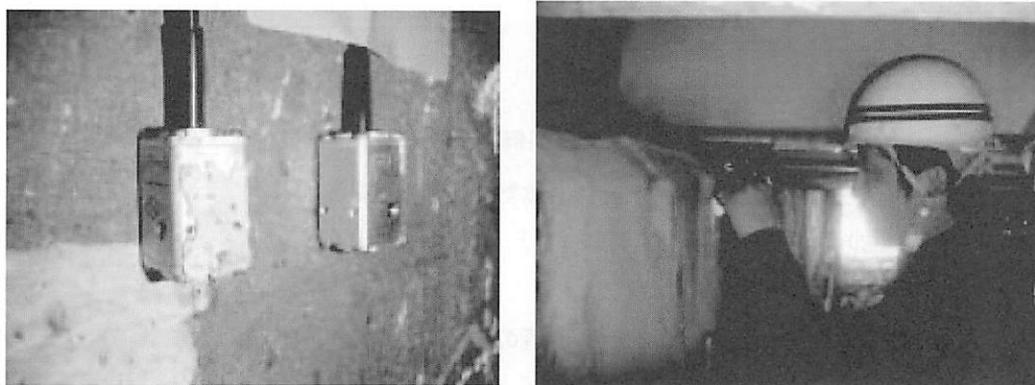


図-3.3.13 下部構造：加速度計設置状況

(2)計測結果

1) 上部工計測結果

計測結果を図-3.3.14、表-3.3.2 に示す。上部工の計測結果は、これまでの計測経験上、同じ径間であればどの測点でも同じ固有振動数を得られると予想されたが、今回は9点ともに同等な値を得ることができず、同一橋軸方向での計測(それぞれ A,B,C 列)においてほぼ同等の値を示すという結果であった。計測結果から求めた固有振動数は13.67~19.04Hz となった。

しかし、今回の計測は一般通行車による計測であるため自由振動における加速度が小さく、計測不能の測点が見られ、計測回数も少ない結果、得られたデータも少なく固有振動数を断定するまでにはいたらなかった。

今回の問題点として以下のことを付記しておく。

- ・一般通行荷重による振動が小さい
- ・3径間連続構造でしかも1スパンが短く振動が小さい
- ・橋梁の出口に信号があり、車輛が滞留するので振動しにくい
- ・近隣における工事現場からの振動の影響

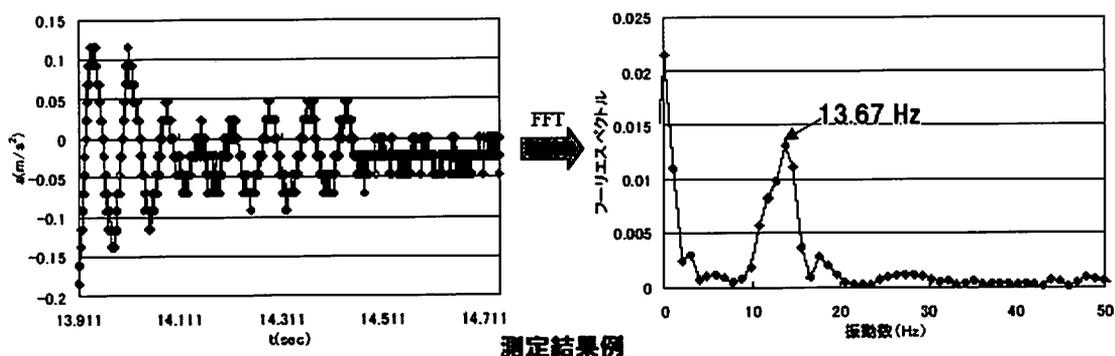


図-3.3.14 固有振動数の測定結果例

(上部工加速度の経時変化からフーリエ変換後に固有振動数を算定)

表-3.3.2 上部構造の固有振動数

上部構造の加速度から得られた固有振動数(Hz)

| | A | | | B | | | C | | |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 1回目 | 19.04 | 19.04 | 18.55 | 計測不可 | | | 計測不可 | 14.48 | 計測不可 |
| 2回目 | 未計測 | | | 13.67 | 13.67 | 13.67 | 18.07 | 18.07 | 18.07 |

また、上部構造について設計図を基に FEM 解析ソフトにてモデル化を行い固有値解析を行った。その結果、上部構造の固有振動数は 13.88Hz となることがわかった。コメントを追加する。張り出しによる影響が出ている可能性について示す。

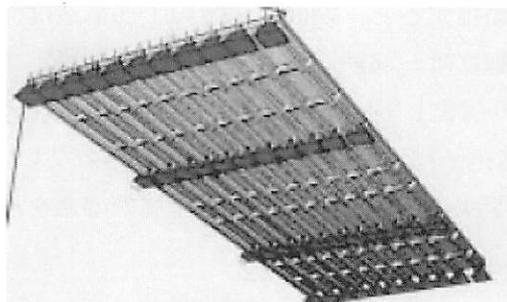
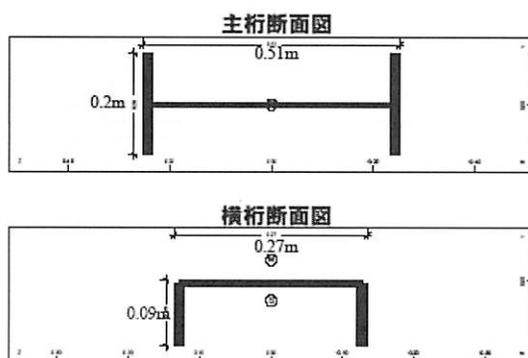


図-3.3.15 解析結果

表-3.3.3 解析条件

| | | |
|--------|------------|---|
| コンクリート | 圧縮強度 | 24 N/mm ² |
| | 静弾性係数 | 2.5×10 ⁵ kgf/cm ² |
| 鋼材 | JIS G 3101 | |
| 支点条件 | 片側固定 | |



2) 下部工計測結果

橋脚部では 3 軸方向における加速度を計測したが、Y 方向(橋軸水平方向)においては自由振動における加速度データが得られなかった。

X 軸方向(橋軸方向)に関しては測点 1 においては 12.7~13.67Hz、測点 2 において 11.72Hz という結果が得られた。

Z 軸方向(橋軸鉛直方向)に関しては測点 1 において 11.72~13.67Hz、測点 2 においては 12.7~13.67Hz という結果が得られた。

今後これらのデータをもとに FEM 解析を行い評価していく必要があると考えられる。

表-3.3.4 下部工固有振動数計測結果

| | ①-X | ②-X | ①-Z | ②-Z |
|-----|-------|-------|-------|-------|
| 1回目 | 13.67 | 11.72 | 11.72 | 13.67 |
| 2回目 | 12.70 | 11.72 | 13.67 | 12.70 |

3.4 根岸橋の診断結果

根岸橋の調査結果の診断カルテを表 3.4.1 に示す。今年度に実施した調査は、主に、デジタルカメラ及び目視調査と内部欠陥調査（赤外法）及び振動計測であった。

限られた調査結果から類推すると、鋼橋と床版の上部構造は、健全性が保たれている可能性が高い。しかし、橋脚には一部鉄筋腐食膨張によると推定される剥離、浮きが発生していることから塩害により劣化している可能性がある。

表 3.4.1 から根岸橋の劣化予測に関するデータが入手されていない。このため、根岸橋の撤去部材より劣化予測に関するデータを入手し根岸橋の寿命を推定及び推定方法ならびに診断カルテを今後検討行う。

表 3.4.1 根岸橋診断カルテ

| 橋梁名 | | 根岸橋(着色部:今回調査,赤字:撤去部材による調査) | | | | | | | | | | |
|---------|----|----------------------------|-------|-----------------------------|---------------------------------|---------------------|---------------|----|------|------|--|--|
| 形式 | | 3径間連続鋼桁橋RC床版 | | | | | | | | | | |
| 径間 | | | | | | | | | | | | |
| 部材部位 | | 上部工 | | | | | | | | | | |
| 目視調査 | | | 調査 | | | | | | | | | |
| 変状の種類 | 程度 | 項目 | 調査位置 | 調査項目 | 調査方法 | 調査結果 | 劣化予測 | 現状 | 10年後 | 20年後 | | |
| 亀裂 | | 亀裂調査 | 上部工全般 | 塗膜剥れ 亀裂 | 目視調査 磁粉探傷 | | | | | | | |
| 塗膜 | | | | | | | | | | | | |
| ボルトリベット | | | | | | | | | | | | |
| 鋼材腐食 | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| その他 | | 応力振動 | 上部工全般 | 弾度計測,載荷試験 死荷重応力度 振動計測 | たわみ 応力振度 ①固有振動数 ②振動モード | 1次卓越振動数14Hz 今後検討 | 経析値と一致し健全である。 | | | | | |

| 橋梁名 | | 根岸橋(着色部:今回調査,赤字:撤去部材による調査) | | | | | | | | | | |
|---------------|---------------------------|----------------------------|------|-----------------------------|---------------------------------|-----------------|--------------|----|------|------|--|--|
| 形式 | | 3径間連続鋼桁橋RC床版 | | | | | | | | | | |
| 径間 | | | | | | | | | | | | |
| 部材部位 | | 床版 | | | | | | | | | | |
| 目視調査(デジタルカメラ) | | | 調査 | | | | | | | | | |
| 変状の種類 | 程度 | 項目 | 調査位置 | 調査項目 | 調査方法 | 調査結果 | 劣化予測 | 現状 | 10年後 | 20年後 | | |
| ひび割れ | 不規則な二方向 規則的な二方向 一方向 | 圧縮強度 | | ①圧縮強度 ②中性化深さ調査 | コア強度試験 反検硬度法 コア-フェルフレイン法 | | | | | | | |
| 遊離石灰 | | 中性化深さ | | ②鉄筋位置調査 | 鉄筋探査 | | | | | | | |
| 錆び汁 | | 塩分含有量 | | ①塩分含有量調査 | コアによる塩分含有量調査 | | | | | | | |
| 剥離,剥落 | | 塩分含有量 | | ②鉄筋位置調査 | 鉄筋探査 | | | | | | | |
| 鉄筋露出 | | 鉄筋腐食 | | ①鋼材腐食調査 | 自然露出調査 | | | | | | | |
| 浮き | | 内部欠陥 | 床版全般 | 浮き,内部欠陥 | 赤外線法 | 内部の欠陥は発見されなかった。 | 健全である可能性は高い。 | | | | | |
| 漏水 | | 内部欠陥 | 床版全般 | 浮き,内部欠陥 | 赤外線法 | 内部の欠陥は発見されなかった。 | 健全である可能性は高い。 | | | | | |
| 変色 | | 反応性塩物 | | ①アルカリ骨材反応試験 ②膨張量 | 偏光顕微鏡 X線回折 殊存膨張量試験 | | | | | | | |
| その他 | | 応力振動 | | 弾度計測,載荷試験 死荷重応力度 振動計測 | たわみ 応力振度 ①固有振動数 ②振動モード | | | | | | | |

| 橋梁名 | | 根岸橋(着色部:今回調査,赤字:撤去部材による調査) | | | | | | | | | | |
|---------------|----|----------------------------|---------|-----------------------------|---------------------------------|-------------------------|------|----|------|------|--|--|
| 形式 | | RCバイルベント橋脚,重力式橋脚 | | | | | | | | | | |
| 径間 | | | | | | | | | | | | |
| 部材部位 | | P1,P2橋脚 | | | | | | | | | | |
| 目視調査(デジタルカメラ) | | | 調査 | | | | | | | | | |
| 変状の種類 | 程度 | 項目 | 調査位置 | 調査項目 | 調査方法 | 調査結果 | 劣化予測 | 現状 | 10年後 | 20年後 | | |
| 鋼材腐食 | | 中性化深さ | | ①中性化深さ調査 | コア-フェルフレイン法 | | | | | | | |
| 塗膜 | | | | ②鉄筋位置調査 | 鉄筋探査 | | | | | | | |
| 浮き | | 塩分含有量 | | ①塩分含有量調査 | 表面塩分調査 | | | | | | | |
| 漏水 | | | | ②鋼材腐食調査 | 目視調査 | | | | | | | |
| 変色 | | 反応性塩物 | | ①アルカリ骨材反応試験 ②膨張量 | 偏光顕微鏡 X線回折 殊存膨張量試験 | | | | | | | |
| | | 内部欠陥 | P1,P2橋脚 | 浮き,内部欠陥 | 目視調査 | 鉄筋腐食膨張によるはくり,浮きが発生している。 | | | | | | |
| | | 応力振動 | P1,P2橋脚 | 弾度計測,載荷試験 死荷重応力度 振動計測 | たわみ 応力振度 ①固有振動数 ②振動モード | 1次卓越振動数12Hz 今後検討 | | | | | | |
| その他 | | | | | | | | | | | | |

4. まとめ

(寿命を計るものさしに関する一考察)

2002～2003年度の研究では、機能的、物理的、経済的側面からみた寿命の構成要素として、万国橋の検討を行った。万国橋は、物理的な寿命はあり、時代の要請から荷役運搬用の社会資本（道路）の機能は喪失したが、機能の形態を変え現在も使用されている。

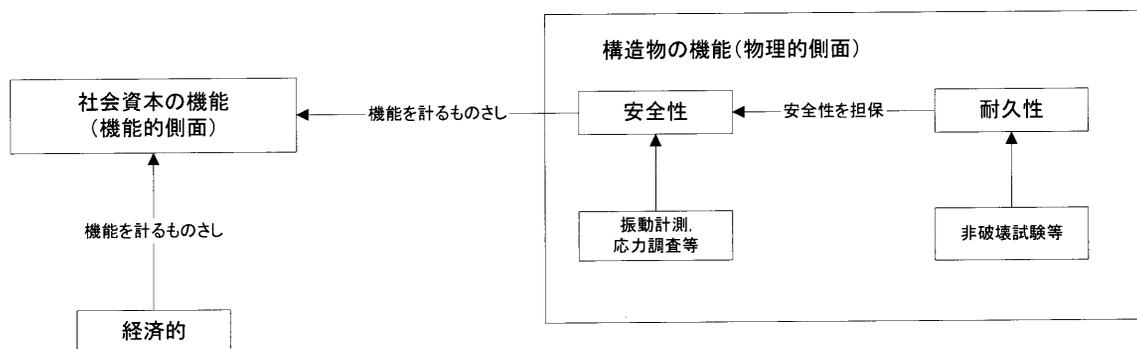
一方、万国橋と同様な時代に建設された根岸橋は、社会資本の道路としての機能が、幅員の不足等から果たすことができないため、根岸橋は撤去解体され架け替え工事が行われている。

現時点では、断定できないが、根岸橋の上部工は、健全性が維持されている可能性は高く、橋脚は、塩害の可能性が高く、耐震性の問題はあるが補修と補強で安全性を維持できる可能性も否定できない。

根岸橋の架け替えは、社会資本の寿命のものさしは、機能と安全性（物理的側面）それぞれ独立したものさしがあることを示唆している。

このため、今後根岸橋の寿命を検討するデータを収集し、万国橋と根岸橋の機能的、経済的、物理的側面の比較検討を行い、寿命を計るものさしの検討を進め、簡便な診断カルテの検討を進めることとする。

図 4.1.1 社会資本の機能的、経済的、物理的側面の構成



5. 活動経過

- ・第1回 2005/04/19：2005年度WG運営方針の検討
- ・出席者：魚本先生、加藤先生、藤田、菊池、寺田、佐藤、石田、山根、肥田、栗田、安藤

・内容：

- ・以下に示す2つのSWGに区分し、活動を進めることを決定。
 - ・SWG2：肥田リーダー（テーマ：簡易なカルテ作成についての検討）
 - ・SWG1：石田リーダー（テーマ：寿命の考え方についての検討）

| SWG名 | リーダー | メンバー | | |
|------|------|----------|----------|---------|
| SWG2 | 肥田 | 佐藤 和田 | 柴 安藤 | 山根 |
| SWG1 | 石田 | 菊池 玉置 | 藤田 山本 | 滝川 羅 |

（魚本先生、加藤先生にはオブザーバとしてご参加頂く。）

- ・また具体的検討を進める趣旨で、横浜市の橋梁を対象とした調査から検討を進めることとし、横浜市から得た資料を基にWGにて、新田間川、大岡川、堀川にかかる道路橋：○一之橋、○霜下橋、○藤江橋、○磯子橋、○天神橋、平岡橋、井土ヶ谷橋、蒔田橋、鶴巻橋を選定（○印を中心）。
- ・第2回 2005/05/13：横浜市橋梁予備調査。
 - ・出席者：肥田、石田、佐藤、羅、柴、藤田、山根、和田、安藤(9名)
 - ・内容：上記橋梁に加え、大岡川：宮川橋、堀川：根岸橋について概略調査。
- ・第3回 2005/05/17：RC-39 老朽化幹事会
 - ・出席者：魚本先生、RC39：加藤先生、肥田、石田、安藤、RC-7：全体メンバー
 - ・内容：RC-7と協調し、首記のテーマ検討（SWG1、SWG2）を進めること了承。
- ・第4回 2005/06/09：RC-7、39 合同幹事会
 - ・出席者：魚本先生、RC-7（勝木先生、恒國、伴、岸村）、RC-39（肥田、石田、安藤）
 - ・内容：
 - ・当RC-39WGのねらいについて説明し、両WGの協調について再確認。
 - ・具体的内容として（合同幹事会議事録参照）、小余綾橋の評価について協力していくこととする。
 - ・横浜市橋梁については、調査項目についてRC7へ提示する。

- ・第5回 2005/06/14：合同幹事会の結果を踏まえた方針検討
- ・出席者：菊池、藤田、佐藤、山根、石田、玉置、安藤
- ・内容：06/09 合同幹事会の結果について報告し、今後の進め方について検討。横浜市の橋梁調査に加え、小余綾橋に関する検討も行うものとした。
 - ・SWG1：小余綾橋の調査結果に対する RC-39 の評価検討を加え、RC-7 へ返答
 - ・SWG2：根岸橋、宮川橋調査計画の策定から開始

- ・第6回 2005/06/27：RC-7、39 合同 WG
- ・出席者：恒國、肥田、石田、佐藤、藤田、玉置、安藤
- ・内容：
 - (1)SWG1 の方向性について
 - (2)RC-7 のメンバーによる、PCポステン桁橋の調査結果についての概要説明
 - (3)老朽化構造物の寿命の考え方についての方向性の討議

- ・第7回 2005/07/15：SWG1、SWG2 同時実施
- ・出席者：恒國、肥田、石田、藤田、玉置、山根、安藤
- ・内容：
 - ・SWG1：
 - ・既設PC橋の緊張材に破断があるかどうかの検証
→試験方法 slot-stress 法以外について、技術紹介（佐藤委員担当）
 - ・同橋の今後の調査に有効な方法の検討
 - ・SWG2：
 - ・カルテに何が必要かの再検討
 - ・横浜市：宮川橋、根岸橋の情報検討

- ・第8回 2005/08/30
- ・出席者：肥田、藤田、玉置、滝川、安藤、和田、山根、石田
- ・内容：
 - ・SWG1：小余綾橋に関する RC7 調査結果の検討
(サーモグラフィー・デジタル写真・打音)

- ・第9回 2005/09/29
- ・出席者：肥田、藤田、玉置、滝川、安藤、菊池、山根、石田
- ・内容：
 - ・SWG1：小余綾橋に関する RC7 調査結果の検討
(トモグラフィー・インパクトエコー)
 - ・SWG2：

- ・第10回 2005/11/14
 - ・出席者：肥田、滝川、永井、佐藤、玉置、石田、安藤
 - ・内 容：SWG2 根岸橋調査
 - デジタルカメラ・サーモカメラ

- ・第11回 2005/12/09
 - ・出席者：勝木、肥田、佐藤、石田、安藤、柳瀬、恒国、芝浦工大3名
 - ・内 容：SWG2 根岸橋調査
 - 振動計測、サーモカメラ

- ・第12回 2005/12/19
 - ・出席者：加藤、金田、藤田、滝川、佐藤、石田
 - ・内 容：
 - ・SWG1：小余綾橋に関するRC7 調査結果の検討
 - (反発硬度法・透気法・打撃応答法・ドリル法（中性化深さ・含有塩分量）・自然電位法・AE法・加速度計・速度計)

- ・第13回 2006/01/19
 - ・出席者：肥田、藤田、石田、玉置、滝川、永井、安藤、田中
 - ・内 容：
 - ・SWG1：既設橋調査結果検討
 - ・SWG2：根岸橋調査結果概要
 - ・デジカメ、サーモ、振動、AE
 - ・17年度報告書目次案検討、作業分担

- ・第14回 2006/02/17
 - ・出席者：肥田、藤田、石田、滝川、安藤、佐藤、田中
 - ・内 容：17年度報告書第1次案検討

- ・第15回 2006/03/17
 - ・出席者：肥田、藤田、石田、滝川、安藤、田中
 - ・内 容：17年度報告書第2次案検討

謝辞

本研究にあたって、横浜市道路局建設部橋梁課；新倉課長、山口課長補佐、玉置主任、馬場担当をはじめ、根岸橋架替工事：西武JV作業所の皆様、(財)生産技術研究奨励会の特別研究会RC-7委員会の皆様には大変お世話になりました。ここに記して深謝申し上げます。

参考資料・文献

- 1)横浜市道路局：愛称道路，昭和59年4月
- 2)横浜市役所：横浜復興誌第二編，昭和7年3月

以下、資料2)より抜粋

関東大震災による復興、復旧橋梁分類総括表

| 構造別 総数 | | 復興 | | 復旧 | |
|-----------|-------|--------|------|-------|-------|
| 土橋 | 木橋 | 鋼筋混泥土橋 | 鐵橋 | 復舊 | 復舊 |
| 六橋 | 三二橋 | 一一橋 | 一三〇橋 | 二七橋 | 二七橋 |
| 全部市執行 | 全部市執行 | 市執行 | 市執行 | 全部市執行 | 全部市執行 |
| | | 市執行 | 市執行 | 復舊土木費 | 復舊土木費 |
| | | 四橋 | 七橋 | 一一橋 | 一一橋 |
| | | | | | 一六橋 |

| 橋梁總數 | | 復興 | | 復旧 | |
|------|-----|-------|-------|-------|-------|
| 市施行 | 國施行 | 市施行 | 國施行 | 市施行 | 國施行 |
| 一四一橋 | 三七橋 | 一一四橋 | 一二四橋 | 一四橋 | 二五橋 |
| | | 河川事業費 | 橋梁事業費 | 街路事業費 | 運河事業費 |
| | | 四四橋 | 五二橋 | 一四橋 | 一二橋 |
| | | 電氣事業費 | 四橋 | | |

○復興及復舊事業橋梁總括表 其の二

市施工橋梁の分類 (根岸橋：復興橋梁⇒その他鉄橋)

49 45 41 37 33 29 25
 計 平山 厨道 柳八 翁
 戸下 橋(修繕) 橋 橋 橋 橋 橋

50 46 42 38 34 30 26
 五 東松 天南 長 中
 十 泉影 神 島 田 村
 二 橋 橋 橋 橋 橋 橋

51 47 43 39 35 31 27
 探星 共 申 櫻 鈴 權
 天野 進
 橋 橋 橋 橋 橋 橋

52 48 44 40 36 32 28
 月武 大 黄 日 三 豊
 見 坂 井 吉 岡
 出
 橋 橋 橋 橋 橋 橋

31 17 13 9 5 1
 山 彦 八 紅 扇 日
 吹 家 橋 扇 田 枝
 橋 (修繕) 橋 橋 橋 橋

29 18 14 10 6 2
 渡 花 見 崎 音 戸
 橋 橋 橋 橋 橋 橋

28 19 15 11 7 3
 前 花 池 鶴 鶴 根
 田 吹 下 / 之 岸
 橋 橋 橋 橋 橋 橋

24 20 16 12 8 4
 東 高 日 久 坂 瓦
 治 本 良 下 脚
 橋 橋 橋 橋 橋 橋

(一) 補助線街路ニ架設
 9 8 1
 灣 一 小
 山 本 港
 橋 橋 橋

10 8 3
 高 清 草
 里 水
 橋 橋 橋

11 7 3
 官 鶴 打
 前 巻 越
 橋 橋 橋

8 4
 四 陸
 平 酒
 橋 橋

(二) 在來道路ニ架設
 復興橋梁

五 十 二 橋
 其 他 鐵 橋
 ○ 印 錫 鑄 造 混 凝 土 橋

○ 市 旅 行
 内 部

百 四 十 一 橋
 土 木 鐵 橋
 筋 泥 混 凝 土
 橋 橋 橋

六 三 四 百 十 一 橋
 橋 橋 橋

「横浜市橋梁設計標準」(横浜市土木局)

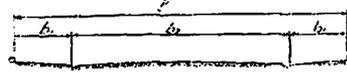
八 橋梁設計標準

今回の復興事業に際し用ひたる本市施行橋梁の設計標準は左の如し。

○横濱市橋梁設計標準 (横浜市土木局)

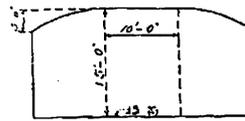
一、車道及歩道ノ幅員

橋幅一六メートル以上車道及歩道ヲ區別シ其ノ幅員次ノ如シ

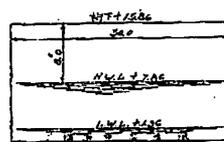


| 總幅 B メートル | 歩道 b ¹ メートル | 車道 b ² メートル |
|--------------|---------------------------|---------------------------|
| 16 | 3.0+3.0 | 10.0 |
| 18 | 3.5+3.5 | 11.0 |
| 20 | 2.8+2.6 | 14.8 |
| 22 | 2.7+2.7 | 16.6 |

二、橋面上ノ最小有効幅



三、橋面下ノ最小有効幅及高



四、死荷重

死荷重計算ニ用フル各種材料一立方呎ノ假定重量ハ次ノ如シ

| 材料 | 重量(封度) | 材料 | 重量(封度) |
|-------|--------|--------|----------|
| 鋼 | 四九〇 | 砂、砂利 | 一〇〇—一二〇 |
| 鑄鐵 | 四五〇 | 土 | 一〇〇 |
| 鐵筋混凝土 | 一五〇 | 木 | 二五—六〇—四〇 |
| モルタル | 一〇〇 | 木塊鋪裝 | 六〇 |
| 混凝土工 | 一四〇 | 瀝青鋪裝 | 一三〇 |
| 研石工 | 一六〇 | アスファルト | 八一 |
| 煉瓦工 | 一二〇 | 水 | 六二四 |

五、活荷重

活荷重ハ等布荷重及集中荷重トシ此中最大應力ヲ生スル方ヲ用フルモノトス

A 等布荷重

徑 間

○呎—一〇〇呎迄

荷重橋面一平方呎ニ付封度

車 道 步 道

— 二二五 — 一〇〇

徑間一〇〇呎以上ノ荷重ハ次式ニ依リ算出スヘシ

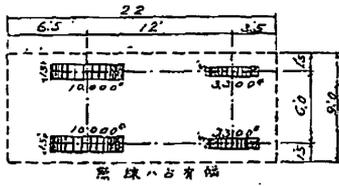
$$\text{歩道 } w_1 = \frac{36,000}{560+l}$$

$$\text{車道 } w_2 = \frac{82,500}{560+l}$$

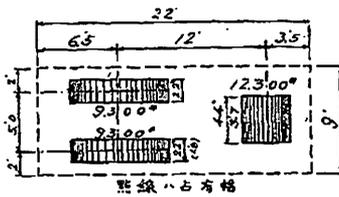
等布荷重橋面一平方呎ニ付封度
 徑間(呎)

B 集中荷重

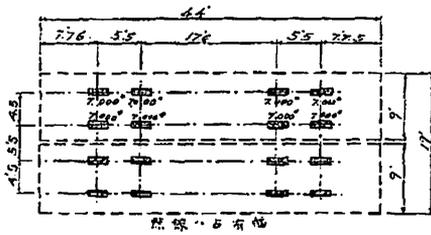
12噸(12000キログラム)自動車



14噸(14000キログラム)輾壓機



25英噸電車



C 活荷重ノ衝擊

等布荷重及輾壓機荷重ハ衝擊ヲ生セサルモノトス

自動車及電車ノ荷重ハ衝擊ヲ生スルモノトシ載荷長二〇呎迄ハ衝擊係數百分ノ三十(30/100)トシ

同二〇呎以上ハ次式ニ係リ計算スヘシ

$$I = \frac{69}{200+L}$$

二、衝擊係數

一、載荷長

載荷長ハ活荷重ノ外等布荷重アル場合ハ其ノ長ヲ含ム

D 風荷重

一、構桁橋

載荷弦 橋長一呎ニ付
不載荷弦 橋長一呎ニ付

三〇〇_{封度}
一〇〇

二、單桁橋其ノ他

橋上ニ活荷重ナキトキ風壓面一平方呎ニ付
橋上ニ活荷重アルトキ風壓面一平方呎ニ付

五〇
三〇

風壓面ハ風上風下ノ桁其ノ他ノ總豎面積トス

風壓應力ハ動荷重トシテ計算ス

E 制動荷重

制動荷重ハ電車荷重ノ十分ノ一トシ軌條面ニ於テ軌條ノ方向ニ作用スルモノトス

F 欄干ニ於ケル推力

欄干長一呎ニ付其ノ上端ニ五十封度ノ横推力ヲ支フヘキモノトス

G 地震荷重

主要街路ノ橋臺又ハ擁壁ノ土壓計算ニハ本市地方ニ於ケル最強地震力ノ四分ノ三ヲ用フルモノトス
 耐震計算ニ就テハ内務省規準ニ據ルモノトス
 六、橋上ニ於ケル活荷重ノ配置ハ次ノ如ク定ム

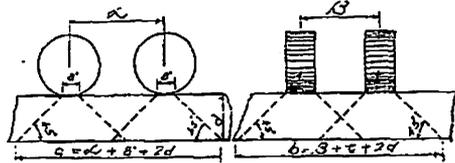
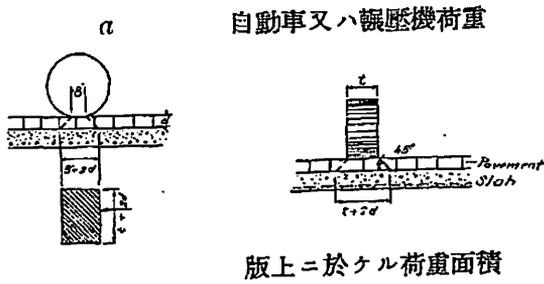
一、等布荷重

等布荷重ハ單獨又ハ自動車、輾壓機及電車ノ周圍ニアルモノトス

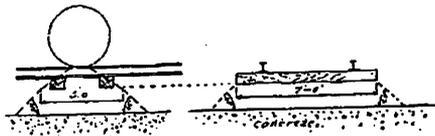
二、集中荷重

自動車ハ橋梁ノ縦ノ方向ニ登臺トシ横ノ方向ニハ四輛ヲ超過セサルモノトス
 輾壓機ハ一橋梁ニ付登臺トシ同時ニ他ノ車輛ハ存在セサルモノトス

電車ハ並行且連續シ得ルモノトス
 七、橋面ニ於ケル輪荷重ノ分布

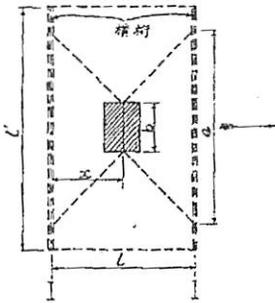
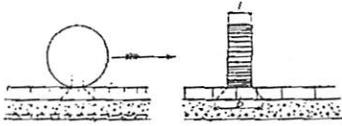


b 電車荷重



2. 横桁 (車輛進行方向=直角)

ノ 場 合

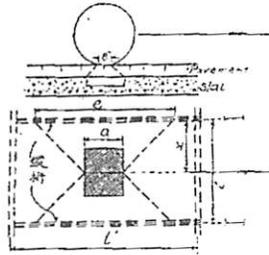


$$e = b + \frac{4}{3}x \quad \overline{b' < l}$$

$$e = b + \frac{2}{3}l \quad \overline{b' < l}$$

$$x = \frac{1}{2}l \text{ノトキ}$$

1. 縦桁 (車輛進行方向ト並行)ノ場合

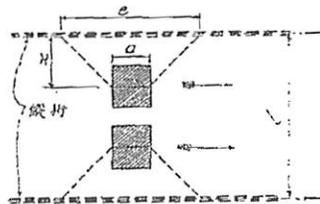


單荷重ノ場合

$$e = a + \frac{4}{3}x \quad \overline{b' < l}$$

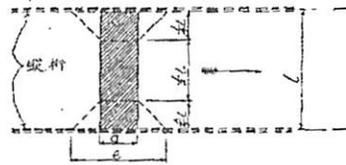
$$e = a + \frac{2}{3}l \quad \overline{b' < l}$$

$$x = \frac{1}{2}l \text{ノトキ}$$



複荷重ノ場合

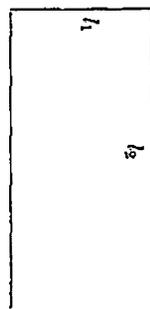
$$e = a + \frac{4}{3}x \quad \overline{b' < l}$$



等布荷重ノ場合

$$e = a + \frac{1}{3}l \quad \overline{b' < l}$$

九、四邊ニテ支承セラル、鐵筋混凝土版ノ荷重分配率



長徑間カ短徑間ノ二倍以上ナルトキ

全荷重ハ短徑間ノミニ働クモノトス

長徑間カ短徑間ノ二倍以內ナルトキ

全荷重ハ兩徑間ニ分配スル割合ハ次ノ如シ

$$w_1 = \left(1.5 - \frac{l_1}{l_2}\right) \quad l_1 = \text{働ク場合}$$

$$w_2 = \left(\frac{l_1}{l_2} - 0.5\right) \quad l_2 = \text{働ク場合}$$

○鋼橋

一〇、溫度ノ變化及彈性係數

溫度ノ變化 (t) 30°C

彈性係數 一平方吋ニ付 89,000,000 封度

一一、材料

鋼材ハ特種ノモノヲ除クノ外軟鋼トス

一二、死荷重、活荷重及衝擊ニ對シ許容單位應力 (一平方吋ニ付封度)

○純斷面上軸應張力……………17,000

○總斷面上軸應壓力

$$p = 13,000 \quad \frac{l}{r} \text{ が } 0 \text{ より } 50 \text{ まで}$$

$$p = 17,000 - 80 \frac{l}{r} \quad \frac{l}{r} \text{ が } 50 \text{ 以上}$$

〔部材ノ長(吋)〕

〔使用断面ノ最小環動半徑(吋)〕

○彎曲應力

純断面上桁ノ抗張縁維..... 17,000

總断面上桁ノ抗壓縁維..... 17,000—300

〔固定點間ノ距離〕 〔突縁幅〕

但シ抗壓突縁ノ總断面積ハ抗張突縁ノ總断面積ヨリ小ナルヘカラス

〔ピン〕ノ縁維..... 24,000

○應剪力

工場鉄..... 12,000

現場鉄..... 10,000

鈹..... 13,000

鈹桁及I桁ノ腹板總断面..... 10,000

ボルト..... 9,000

○支應力

工場鉄及〔ピン〕..... 24,000

現場鉄..... 20,000

ボルト..... 18,000

伸縮ローラー長一吋ニ付..... 6000

〔ローラー〕ノ直徑(吋)

砕石及混凝土..... 500

○部材ノ寸法

一三、部材ノ長ト其ノ断面ノ環動半徑トノ比

抗壓材 $\frac{l(\text{尺})}{r(\text{環小環動半徑})} = \frac{120}{140} \frac{\text{主梁材}}{\text{環風機材}}$

抗張材 $\frac{l(\text{水平長} = \text{シテ斜材トシテ水平投影線長})}{r(\text{水平環} = \text{就テノ環動半徑})} \leq 200$ 主梁材

一四、交番應力

應張力ト應壓力ト交番スル部材ノ斷面積ハ各應力ニ依リ之ヲ定ムルモノトス

一五、死荷重及活荷重ヨリ生スル應力ノ性質相反スル場合ハ死荷重ノ三分ノ二ヲ取り活荷重ト合成セシムルモノトス

一六、交番應力ヲ受クル部材ノ各應力

部材ノ斷面積ヲ定ムル場合 $S_1 + \frac{50}{100} S_2 \text{ 及 } S_1 + \frac{50}{100} S_2$

部材ノ取附用鉄數又ハ「ピン」ノ支承面積ヲ定ムル場合の「 S_1 」ハ大ナル應力、「 S_2 」ハ小ナル應力

一七、混交應力

直應力及彎曲應力ヲ受クル部材ノ斷面積ハ各十二條規定ノ單位應力ヲ用ヒテ得タル斷面積ノ和トス

一八、活荷重及死荷重ト風荷重又ハ制動荷重ト混合シテ生スル應力ニ對シテハ第十二條規定ノ許容應力ノ百分ノ二十五マデヲ増スコトヲ得

但シ其ノ使用斷面ハ活荷重及死荷重ニ對シテ得タルモノヨリ小ナルヘカラス

一九、橋梁及擁壁ノ各部カ死荷重、活荷重、衝擊及地震力ニ因リ生スル應力ヲ受クル場合ニ於テハ第十二條規定ノ許容應力ノ百分ノ八十マテヲ増スコトヲ得

二〇、抗張材ノ純斷面積ヲ算出スル場合減スヘキ鉄孔徑ハ鉄打前ノ鉄徑ニ八分ノ一吋ヲ加ヘタルモノトス

二一、〔ピン〕孔ヲ有スル鉄附抗張材ノピン孔周圍ニ於ケル純斷面積ハ部材ノ軸ニ直角ノ方向ニ於テハ幹部ノ純斷面積ヨリ大ナルコト百分ノ二十五以上トシ、部材ノ軸ニ平行即チ孔ノ後部ニ於テハ幹部ノ純斷面積ヨリ小ナルヘカラス

二二、 鋼桁ハ其ノ腹鋼ノ總斷面積ノ八分ノ一ヲ其ノ突縁ノ斷面積トシテ使用スルモノトス

二三、 鋼桁ノ抗壓突縁ノ固定點間ノ距離ハ突縁幅ノ十五倍ヲ超ユヘカラス

○ 鐵筋混凝土橋

二四、 鐵筋混凝土用セメントハ「ボートランド、セメント」トス

溫度ノ變化 (±) 15°C

彈性係數 一平方吋ニ付 3,000,000 封度

二五、 死荷重、活荷重及衝擊ニ對シ調合モルモノノ混凝土ノ許容單位應力 (一平方吋ニ付封度)

直壓應力 650

彎曲ニ依ル應壓力 650

彎曲ト直壓力トノ合成ニ依ル應壓力

抗壓材 500

拱 650

壓穿應剪力 120

鐵筋混凝土桁及版ニ於テハ次ノ許容應剪力ヲ用フルモノトス

(1) 水平鐵筋ノミニテ腹鐵筋ナキ場合 40

(2) 縱鐵筋ノ半分以上ヲ折曲ケ腹鐵筋ト爲シタルモノ 60

| | |
|---------------------------------|-----|
| (3) 腹鐵筋ヲ完全ニ用ヒタルモノ | 120 |
| 剪力計算ニ用フル高ハ壓力中心ヨリ鋼ノ中心迄トス | |
| 支應力 | 650 |
| 附著力 | |
| 並形棒 | 80 |
| 異形棒 | 120 |
| 二六、抗壓材ノ長ハ其ノ斷面ノ最小環動半徑ノ五十倍以下ト爲スヘシ | |

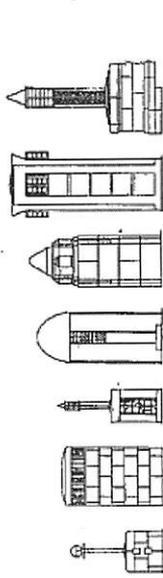
以上

橋梁被害箇所一覽 (根岸橋：木橋⇒大破、被害金額 5,000 円)

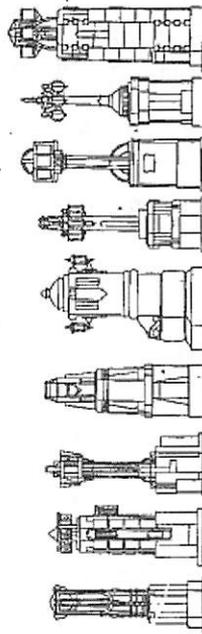
| 番 | 位 | 地勢別 | 街道 | 橋造、橋長、幅員 | 用途地況 | 被害別 | 積 | 害 |
|----|-----------|-----|----|----------|------|-----|------|--------|
| 三〇 | 戸部町七丁目 | 不 | 街 | 巾長 | 裏土質 | 燒 | 三 | 八、四四八圓 |
| 四八 | 南宮田町及南大田町 | 例 | 例 | 巾長 一、一、五 | 例 | 燒 | 三六・八 | 四、〇〇〇 |
| 四九 | 南宮田町及南大田町 | 例 | 例 | 巾長 一、〇、七 | 例 | 燒 | 一八 | 一、五〇〇 |
| 五〇 | 南宮田町及南大田町 | 例 | 例 | 巾長 七、五 | 例 | 燒 | 一五 | 一、五〇〇 |
| 五一 | 南宮田町及南大田町 | 例 | 例 | 巾長 一、一、五 | 例 | 燒 | 一八 | 一、五〇〇 |
| 五二 | 南宮田町及南大田町 | 例 | 例 | 巾長 二、五、八 | 例 | 燒 | 二〇 | 三、〇〇〇 |
| 五三 | 南宮田町 | 例 | 例 | 巾長 一、七、五 | 例 | 燒 | 五二・五 | 二、〇〇〇 |
| 五四 | 南宮田町 | 例 | 例 | 巾長 三、五 | 例 | 燒 | 四五 | 一、〇〇〇 |
| 五五 | 南宮田町 | 例 | 例 | 巾長 三、五 | 例 | 燒 | 五二・五 | 五、〇〇〇 |
| 五六 | 南宮田町 | 例 | 例 | 巾長 一、一、二 | 例 | 燒 | 三三・六 | 七、五〇〇 |
| 五七 | 南宮田町 | 例 | 例 | 巾長 一、一、二 | 例 | 燒 | 三三・六 | 八、〇〇〇 |
| 五八 | 南宮田町 | 例 | 例 | 巾長 一、一、二 | 例 | 燒 | 三三・六 | 八、〇〇〇 |
| 五九 | 南宮田町 | 例 | 例 | 巾長 一、一、二 | 例 | 燒 | 三三・六 | 八、〇〇〇 |
| 六〇 | 南宮田町 | 例 | 例 | 巾長 一、一、二 | 例 | 燒 | 三三・六 | 八、〇〇〇 |
| 六一 | 南宮田町 | 例 | 例 | 巾長 一、一、二 | 例 | 燒 | 三三・六 | 八、〇〇〇 |
| 六二 | 南宮田町 | 例 | 例 | 巾長 一、一、二 | 例 | 燒 | 三三・六 | 八、〇〇〇 |
| 六三 | 南宮田町 | 例 | 例 | 巾長 一、一、二 | 例 | 燒 | 三三・六 | 八、〇〇〇 |
| 六四 | 南宮田町 | 例 | 例 | 巾長 一、一、二 | 例 | 燒 | 三三・六 | 八、〇〇〇 |

橋梁被害箇所表 (本市中部)

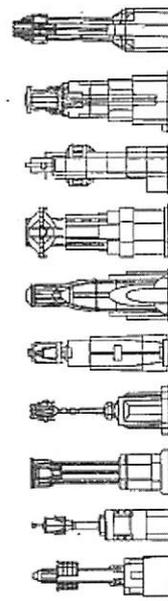
市內橋梁親



飯橋
金澤橋
宮川橋
緑衣橋
羽衣橋
高島橋
戸部橋

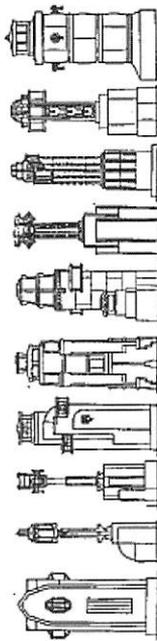


道場橋
萬代橋
五島橋
群天橋
久良岐橋
草橋
權三橋
鶴ノ橋
花園橋

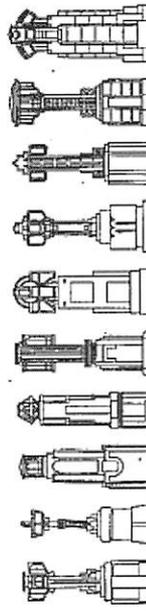


一本橋
石荷橋
花咲橋
天神橋
苗橋
八幡橋
淡山橋
式親橋
打越橋
幸橋

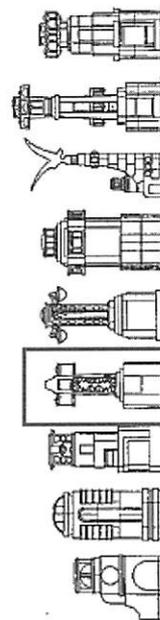
柱意匠棗



中村橋
大井橋
藤田橋
西平沼橋
谷戸橋
萬里橋
三宮橋
豊國橋
日本橋
錦橋



宮前橋
萬治橋
翁橋
共通橋
瓦新橋
鶴巻橋
月見橋
日出橋
陸橋
扇橋



蓬萊橋
青宮田橋
清水橋
坂片橋
前田橋
龜之橋
大江橋
高橋(高橋)
吉田橋

橋梁親柱意匠狀況 (根岸橋)

橋梁修繕工事 (視察誌：左岸橋台崩壊→修理：大正12年9月20日完成)

○橋梁修繕工事

(大正十二年九月二十四日調査)

| 橋梁名 | 破損程度 | 修理方法 | 完成月日 | 工事施工者 | 備 |
|------|--------|------|------------|-------|---------|
| 西の橋 | 橋桁一部破損 | 修繕 | 大正十二年九月十九日 | 交本 | 橋桁(トラス) |
| 草橋 | 橋桁一部破損 | 修繕 | 九月二十一日 | 同 | 橋桁(長有橋) |
| 道場橋 | 橋桁一部破損 | 修繕 | 九月二十二日 | 同 | 本橋 |
| 久良岐橋 | 橋桁一部破損 | 修繕 | 九月二十日 | 同 | 同 |
| 日柱橋 | 橋桁一部破損 | 修繕 | 九月十四日 | 工兵隊 | 同 |
| 共進橋 | 橋桁一部破損 | 修繕 | 九月十三日 | 交本 | 同 |
| 南宮田橋 | 橋桁一部破損 | 修繕 | 九月三日 | 同 | 同 |
| 平戸橋 | 橋桁一部破損 | 修繕 | 九月十一日 | 交本 | 同 |
| 平沼橋 | 橋桁一部破損 | 修繕 | 九月十六日 | 同 | 同 |
| 平岡橋 | 橋桁一部破損 | 修繕 | 九月十五日 | 同 | 同 |
| 沼野橋 | 橋桁一部破損 | 修繕 | 九月十五日 | 同 | 同 |
| 選座橋 | 橋桁一部破損 | 修繕 | 九月十八日 | 同 | 同 |
| 一本橋 | 橋桁一部破損 | 修繕 | 未定 | 同 | 同 |
| 島ノ橋 | 橋桁一部破損 | 修繕 | 九月十日 | 交本 | 同 |
| 山吹橋 | 橋桁一部破損 | 修繕 | 九月十日 | 同 | 同 |
| 横須賀橋 | 橋桁一部破損 | 修繕 | 九月十一日 | 同 | 同 |
| 日本橋 | 橋桁一部破損 | 修繕 | 九月十三日 | 同 | 同 |
| 千歳橋 | 橋桁一部破損 | 修繕 | 九月十一日 | 同 | 同 |
| 阿波橋 | 橋桁一部破損 | 修繕 | 九月十五日 | 工兵隊 | 同 |
| 八幡橋 | 橋桁一部破損 | 修繕 | 九月二十日 | 交本 | 同 |
| 錦橋 | 橋桁一部破損 | 修繕 | 九月十一日 | 同 | 同 |
| 戸部橋 | 橋桁一部破損 | 修繕 | 九月十五日 | 工兵隊 | 橋桁(トラス) |
| 榮橋 | 橋桁一部破損 | 修繕 | 九月十二日 | 交本 | 同(工トラス) |
| 河橋 | 橋桁一部破損 | 修繕 | 九月十四日 | 同 | 同 |
| 瀧橋 | 橋桁一部破損 | 修繕 | 九月十四日 | 工兵隊 | 同 |
| 吉原橋 | 橋桁一部破損 | 修繕 | 九月十六日 | 同 | 本橋 |
| 新橋 | 橋桁一部破損 | 修繕 | 九月十二日 | 同 | 橋桁(トラス) |

防災 WG

報告書

防災 WG 名簿

| 氏名 | 会社名 | 所属 |
|--------|-------------|-------------------------------------|
| 目黒 公郎 | 東京大学生産技術研究所 | ICUS 教授 |
| 天野 玲子 | 東京大学生産技術研究所 | ICUS 客員教授 |
| 吉村 美保 | 東京大学生産技術研究所 | ICUS 助手 |
| 二木 重博 | アジア航測(株) | 防災地質部 |
| 今村 遼平 | アジア航測(株) | 技術統括部 |
| 三冨 創 | アジア航測(株) | 防災地質部 防災地質課 |
| 加藤 康広 | アジア航測(株) | 防災地質部 防災地質課 |
| 野田 浩二 | アジア航測(株) | 新規事業部 システムインテグレートプロジェクト |
| 深沢 哲也 | 鹿島建設(株) | 土木管理本部土木技術部 |
| 山崎 淳 | 国際航業(株) | 防災部 |
| 高橋 郁夫 | 清水建設(株) | 技術研究所 特別プロジェクト(災害情報) |
| 平間 敏彦 | 清水建設(株) | エンジニアリング事業本部 |
| 志波 由紀夫 | 大成建設(株) | 技術センター 土木技術研究所 土木構工法研究室 防災・耐震チーム |
| 田中 芳行 | (株)竹中土木 | 技術本部 企画グループ |
| 松本 由美子 | (株)竹中土木 | 技術本部 技術グループ |
| 高田 励 | 東京電力(株) | 建設部 海外事業グループ |
| 貫井 泰 | 東京電力(株) | 建設部 土木・建築技術センター 建築構造技術グループ |
| 福島 誠一郎 | 東電設計(株) | 技術開発本部 防災プロジェクト部 防災技術グループ |
| 山田 哲也 | 三井住友建設(株) | 技術研究所 研究開発管理部 知的財産室 |

1. 研究概要

1.1 研究目的

平成 14 年度および 15 年度にわたり、「RC-39 サステナブル構造システム研究委員会」防災 WG では、「テロなどをはじめとする人為災害」および「地震防災上の最重要課題である既存不適格建物の耐震補強を推進させる制度」の 2 つの課題に対して Sub WG を設置し検討を行ってきた。以上の 2 つのテーマで検討してきた内容は、現在のわが国を取り巻く状況(巨大地震の連発、危機管理体制の不備、治安の悪化)を考えると、今後ますます重要となってくると考えられる。

本 WG では、以上のような背景を踏まえ、都市における地震や台風などの自然災害に対する被害を低減させるための建物の耐震化促進と、被災後の災害情報の流れに着目した対応策の効率化について検討を行う。

1.2 研究内容

平成 14 年度および 15 年度にわたり、「RC-39 サステナブル構造システム研究委員会」防災 WG では、「テロなどをはじめとする人為災害」および「地震防災上の最重要課題である既存不適格建物の耐震補強を推進させる制度」の 2 つの課題に対して Sub WG を設置し検討を行ってきた。以上の 2 つのテーマで検討してきた内容は、現在のわが国を取り巻く状況(巨大地震の連発、危機管理体制の不備、治安の悪化)を考えると、今後ますます重要となってくると考えられる。

そこで平成 16 年度から新たに始まった「RC-39 サステナブル都市システム研究委員会」では、防災に関する WG を継続し、大規模災害に対する防災対策の研究を行うこととなった。これまでの検討内容を見直し、都市基盤の安全性を脅かす地震や台風などの自然災害に対して、以下の 2 つのテーマに絞って検討を行うことにした。

①災害情報データベースの構築法

自然災害が発生した場合には、どのような事象が時系列的に発生し、それに対して我々はどうに対応していったらよいのかを、シミュレーション等によって明らかにする場合、必要となる災害情報データベースの構築法に関して検討を行う。

②耐震補強推進のための地震リスクファイナンス金融商品の開発

地震災害における減災の基本は都市における住宅の耐震性を高めことである。現状ではなかなか進まない住宅の耐震補強を促進するためのビジネスモデルを作成し、その効果や妥当性に関して検証を行う。

1.2.1 SWG-1 の活動概要(災害情報データベースの構築法)

我が国は地震や風水害といった自然災害に脅かされる環境にあり、また近年では国際的な関係の悪化から人為災害(テロリズム)とも決して無縁ではなくなってきた。このような背景から、今後は、危機管理を如何に行うかというテーマがますます重要となる。

危機管理を行う場合、自治体や企業のような組織では、緊急時の行動を予め規定し、防災マニュアル等にまとめて常備する方法が採られる。この場合に、そのマニュアルがいざとなった時に機

能するか否かは、想定される事象の可能な限りの洗い出しと、それに対する適切な対応に尽きる。これまでの有史の中で発生した災害は限られたパターンに過ぎず、今後とも発生すると考えられる大災害は、発生する季節や時刻、気象条件、場所などによってその状況は一変するが、これまでの災害の中で得られた記録は我々に多くの教訓や対応のヒントを与えてくれる。この活用によって、今後の災害の発生時にどのような事象が時間の経過と共に発生しうるのか、そしてそれに対してどのように対応すべきなのかを考えることが容易になる。

そこで本テーマでは、大災害時に発生する様々な事象を、リアルにシミュレーションするための災害情報のデータベースを構築する。

(1) 研究目的

大災害発生時の現実的なシミュレーションを可能にするために、過去の災害において時間経過とともに刻々と変化する発生事象とその対応に関するデータベースのあり方と構築法に関する検討を行う。

(2) 研究内容

①危機管理に関する情報収集

現在進行中の関連研究テーマ(科学技術振興調整費の研究テーマなど)について、有識者を招いて研究概要について講義を受け、国や研究機関の研究動向を把握し、データベース構築の位置付けや方向性を明確にする。

②災害イメージネーションに関する体験的学習

目黒メソッドを用いて、各委員が地震発生時に時間経過と共に発生する事象を体験的に学習する。これによりイメージネーション能力や時間経過とともに変化する事象に関して分析する。

③災害データベースの構築に関する検討

過去の災害で発生した事象やそれへの対応に関するデータを収集し、データベースの構築に関する検討を行う。また、構築したデータベースの評価ならびに課題の抽出を行う。

④報告書の作成

以上の活動内容を整理し、報告書としてまとめる。

(3) 研究工程

| | 平成16年度 | | | | | | | | | 平成17年度 | | | | | | | | | | |
|-----------------------|--------|---|----|----|----|---|---|---|---|--------|---|---|---|---|----|----|----|---|---|---|
| | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1 | 2 | 3 |
| ①危機管理に関する情報収集 | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ②災害イメージネーションに関する体験的学習 | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | | |
| ③災害データベースの構築に関する検討 | | | | | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | | |
| ④報告書の作成 | | | | | | | | | | | | | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ |

(4) 研究成果

成果報告書とは別に、本テーマの成果を論文としてまとめ、発表する。

1.2.2 SWG-2 の活動概要(耐震補強推進のための地震リスクファイナンス金融商品の開発)

兵庫県南部地震から10年を経た今日においても、地震に対する備えの必要性は唱えられるものの、未だに既存不適格建物は存在し、具体的かつ有効な地震リスクマネジメントが行われている状況にない。地震リスクマネジメントには、耐震補強を推進するリスクコントロールと保険などで被害を補填するリスクファイナンスに大別される。それぞれにおいて様々な取り組みがなされているが、耐震補強・保険制度の普及の程度を見ると十分な成果が得られているとはいえない。本研究は、リスクコントロールとリスクファイナンスを組み合わせ、より効果的な新たな地震リスクマネジメント手法の提案を意図するものである。

(1) 研究目的

本テーマは、リスクファイナンス技術を用いて耐震補強を推進することを意図したものである。一般的にリスクファイナンス技術は地震リスクによる損失を転嫁する方法として適用されるものであり、耐震補強などにみられるような地震リスクを直接的に回避するものではない。本テーマでは、従来異なる地震リスクマネジメント手法と考えられていたリスクファイナンスと耐震補強を融合させ、結果的に、耐震補強を推進する制度を設計することを最終目標とする。

既存不適格建物の耐震補強が十分に進まない理由として以下ものが考えられる。

- ① 地震リスクを実感できない。
- ② 耐震補強の効果を実感できないため、費用対効果を考えた場合、優先順位が低くなる。

これらより、耐震補強は、建物オーナーにとって、地震が発生した場合のリスクは低減できるが、逆に地震が発生しなかった場合の経済的負担のリスクが発生していると考えられる。すなわち、耐震補強のために投じる費用は、建物の供用期間中に地震が発生しなかった場合には、無駄な投資になる可能性がある。これは一種の投資リスクと考えられ、この耐震補強投資リスクと地震リスクを比較した場合、前者のリスクが大きいと考えるオーナーは耐震補強を実施しないことになる。

本テーマは、オーナーが持つこの耐震補強投資リスクを、リスクファイナンス技術により、他の投資家に分散させることにより耐震補強を推進できる制度を模索するものである。

(2) 研究内容

本テーマを推進するに当たり、実施した検討手順および研究内容を以下に挙げる。

- ① 地震リスクマネジメントの現状
- ② 耐震補強(リスクコントロール)推進制度の現状と課題
- ③ 耐震補強推進のための新ファイナンスモデルの提案
- ④ 他のファイナンスモデルとの比較
- ⑤ フィージビリティスタディの実施(パラメトリックスタディ)
- ⑥ 提案モデルの考察
- ⑦ 有識者を迎えての検討会

(3) 研究工程

| 研究項目 | H16 年度 | H17 年度 | | | |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 第1 四半期 | 第2 四半期 | 第3 四半期 | 第4 四半期 |
| リスクファイナンスを用いた耐震補強普及ビジネスモデルの提案 | | | | | |
| リスクファイナンス技術に基づいた金融商品の設計法の検討 | | | | | |
| フィージビリティスタディの実施(パラメトリックスタディ) | | | | | |
| 具体化のための情報収集およびデータベースの構築 | | | | | |
| 報告書の作成 | | | | | |

(4) 研究成果

平成 17 年度の本委員会報告書に掲載する。

2. 災害情報データベースの構築法

2.1.1 危機管理に関する情報収集

筑波大学の村尾先生を招いて、科学技術振興調整費プロジェクト「日本社会に適した危機管理システム基盤構築」について講義を受けた。

要点を以下に記す(詳細は付録を参照)。

- ①プロジェクトの柱は、危機管理、コンテンツ、組織が3つ。
- ②WEB での情報発信を考える際に、以下の7つの視点は重要。
 - ・危機管理の理念の明確化
 - ・情報フロー
 - ・組織内の危機管理体制の明確化
 - ・コンテンツの分類
 - ・組織内の危機管理すべき対象
 - ・運営と管理
 - ・受信者(対象者)

2.1.2 災害イメージネーションに関する体験的学習

本 SWG の活動では、災害情報データベースの構築法を検討する前に、災害のイメージネーション能力を高めるために、目黒メソッド(*)による地震災害時の発生事象の洗い出しと分析を行った。ここでは、メンバーが任意の地震体験の条件を設定し、地震発生直後から10年後までの行動や心理を記入して提出し、分析を行った。その上で、SWGミーティングで3名の事例に関して議論し、補足や追加などを行って作成した表の完成度を高めた。

(*)目黒メソッド

自分の典型的な日常生活を縦軸(24 時間)に、横軸には地震の発生からの時間経過(3 秒から10 年程度)をとり、それぞれの場面で、「自分の周りで何が起こり」「自分自身は何をしなくてはいけないか、何をしたいか」を整理するとともに、一連の作業を通して得られた感想を入力する(図-2.1.1 参照)。

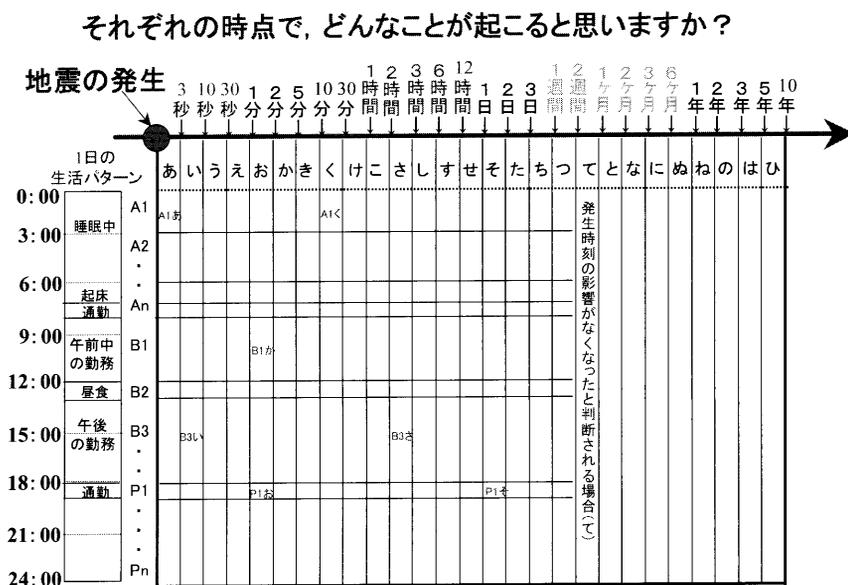


図-2.1.1 目黒メソッドのプロタイプ

表-2.1.1 に目黒メソッドを使った回答例を示す。また、図-2.1.2 に目黒メソッドを使った回答データの分析例を示す。写真-2.1.1 には、メンバーによる議論の様子を示す。

表-2.1.1 目黒メソッドによる回答例

| | 地震発生 3 秒後 |
|--------|---|
| 発生時刻 | 18:00 |
| 生活パターン | 就労中 |
| 被災場所 | 自分の席 |
| 自己状態 | 突き上げるような衝撃に続いて激しい横揺れを受け、立ち上がることもできずに混乱して一瞬うずくまる。 |
| 周辺状況 | 薄暮の頃、地震発生。震源は東京駅付近の地下 20km。直下型で東京付近は震度7。通勤ラッシュがピークを迎え、花金のため繁華街も混雑している。建物(鉄筋コンクリート製)がギンギン音をたて、瞬間的な停電の後に非常灯が灯る。地鳴りのような音に混じって、ガラスの割れる音、ものが落ちる音が聞こえる。 |
| 心理状態 | ついに来たか、と思いつつ、落ち着くように自分に言い聞かせる。 |
| 行動 | 図上からの落下物に注意しながら、周囲の状況を見つめる。 |
| 家族の状況 | 家族の住む地区は遠方であるが、震源がはっきりしないので多少気になる。(実際は影響なし。) |
| 記述欄 | |
| | 地震発生 10 秒後 |
| 自己状態 | 揺れは収束に向かっている。椅子に座って半ば放心状態。 |
| 周辺状況 | 非常灯の薄明かりの中で目を嚙らすと、本立ては固定されているので転倒しなかったが、中の本は崩れ落ち、机上のパソコンのディスプレイや書類も床に散乱した。机上のコーヒーがこぼれてモモが熱い。 |
| 心理状態 | 揺れがほぼ収まりつつあり、取りあえず一安心。 |
| 行動 | 自分のオフィス内の被害状況を確認しようとあたりを見渡すが、薄暗いため目が慣れるのを待つ。 |
| 家族の状況 | 前項と同じ。 |
| 記述欄 | |
| | 地震発生 30 秒後 |
| 自己状態 | 揺れが収まったので、身の回りの状況を確認し始める。 |
| 周辺状況 | 電話は回線がパンクして不通となり、携帯も通じない。 |
| 心理状態 | 震源の確認と被害状況等の情報収集を行いたいが、停電によりパソコン、テレビも使えず、電話回線もパンクしており、何か手立てはないものかと試行錯誤を繰り返す。ラジオを常備すべきだった。 |
| 行動 | とにかく情報収集に躍起となる。 |
| 家族の状況 | 前項と同じ |
| 記述欄 | |
| | 地震発生 1 分後 |
| 自己状態 | 身の回りを確認中。 |
| 周辺状況 | ビルの火災報知器が鳴り響き始めた。階下で火災が発生したようだ。 |
| 心理状態 | 落ち着き掛けていた心理状態が、再びパニック状態に引き戻された。 |

| | |
|------------------|--|
| 行動 | 火元はどこだ、消火器はどこだ、と探し回るが、普段から意識していなかったもので、すんなり見つからない。 |
| 家族の状況 | 前項に同じ |
| 記述欄 | |
| 地震発生 2 分後 | |
| 自己状態 | 火災の危機にさらされている。 |
| 周辺状況 | エレベーターは停電で当然停止している。階下の確認をしたいが、セキュリティの関係で階段を使って出入りできるのは1階と屋上のみである。他の階には階段からは入れないし、一旦階段に出るともとの階にはエレベーターでしか戻れないシステムになっている。 エレベーターに閉じこめられている人がいるらしく、エレベーター付近ではドアを叩くようなかすかな音が聞こえる。エレベーター内の人でも火事に気付いているようだ。 |
| 心理状態 | 火災への対応やエレベーター内の人への救出など、精神的な緊張が高まっている。 |
| 行動 | 取りあえず、消火器を探す。火災をくい止めれば、エレベーターの人も助かる。 |
| 家族の状況 | 前項に同じ |
| 記述欄 | |

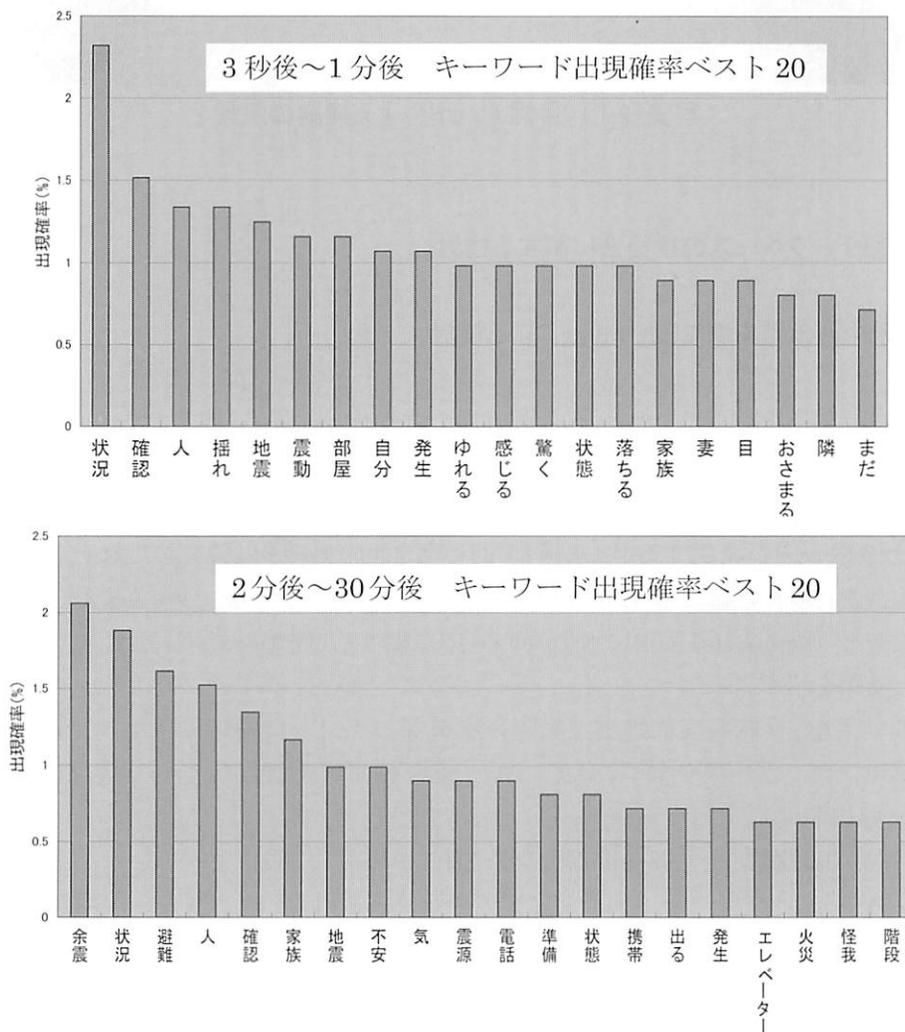


図-2.1.2 目黒メソッドによる回答データの分析例

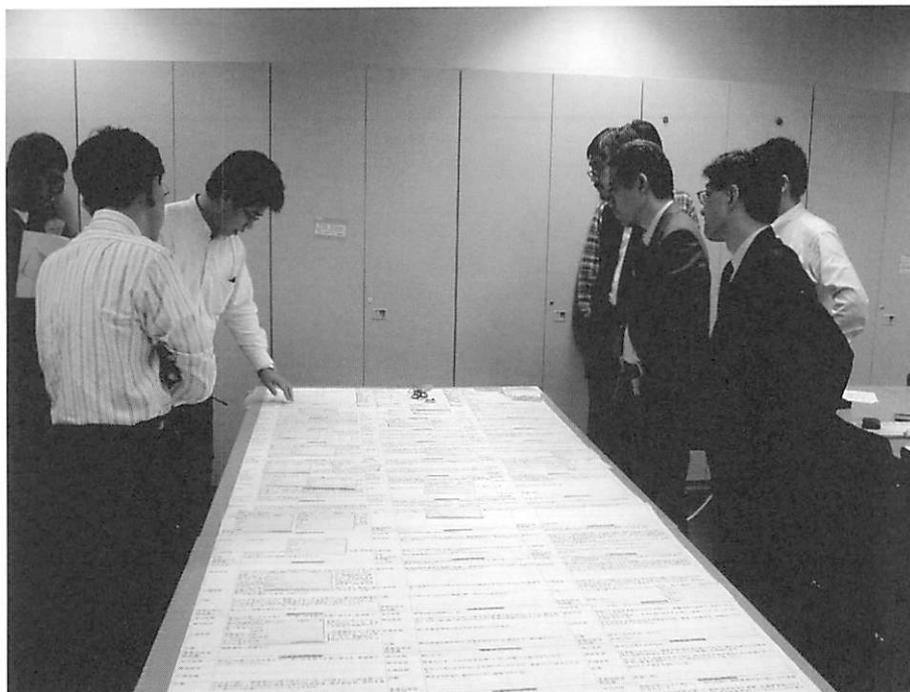


写真-2.1.1 目黒メソッドによる議論の風景

2.2 災害情報データベースの構築法に関する検討

2.2.1 新潟県中越地震を例にした KJ 法による検討

新潟県中越地震の長岡市を例にとり、水道局の主な仕事である「被害状況の把握」、「応急給水」、「応急復旧」に関して、理想的な対応と行動に必要な情報を3班に分かれて KJ 法(*)により検討した。水道局の対応を本 SWG の検討の対象とした理由は、地震災害時には様々な関連部署や外部機関とのやりとりが発生するが、水道局は比較的他の組織とは独立した対応が多いと考えられ、基本検討を行う上で適切だったこと、我々の生活の身近なテーマであり、考えやすいと思われた点などにある。図-2.2.1(a)～(c)に水道局の対応に関する「理想の対応」と「必要な情報」について検討した結果を示す。

この整理結果を、兵庫県南部地震で実際に水道局といっしょに対応に当たった平山修久氏(人と防災未来センター専任研究員)に見てもらい、実際の対応や課題について議論を行った(議論の詳細は付録に示す)。

(*) KJ 法 ～生涯職業能力開発促進センターHP より～

ブレインストーミングなどで出されたアイデアや意見、または各種の調査の現場から収集された雑多な情報を1枚ずつ小さなカード(紙キレ)に書き込み、それらのカードの中から近い感じのするもの同士を2、3枚ずつ集めてグループ化していき、それらを小グループから中グループ、大グループへと組み立てて図解していく。こうした作業の中から、テーマの解決に役立つヒントやひらめきを生み出していこうとするもの。

| 理想の対応(被害状況の把握) | |
|----------------|--|
| 0h~ | <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div>震度情報の収集 (テレビ・ラジオ)</div> <div>役所に徒歩 参集</div> <div>インターネット 受信(参集後)</div> <div>参集途上での 被害の確認</div> </div> |
| 1h~ | <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div>水源の 水質確認</div> <div>出勤者同士 での途上の 情報確認</div> <div>電話・FAX の確認</div> <div>情報の整理(電 話・ロコミ)</div> <div>役所の 安否確認</div> <div>工事業者に 対応依頼 (打診)</div> </div> |
| 2h~ | <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div>給水車の運 転手の安否 を確認する</div> <div>浄水場の パトロール</div> <div>常に使える対策 本部で準備 非常発電装置有</div> <div>道路の被災 状況の把握</div> <div>取水施設の 状況確認</div> </div> |
| 3h~ | <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div>現地調査 に行く</div> <div>各種情報の マッピング</div> <div>浄水場の状況確認 (本部への連絡)</div> <div>設備の被害 状況の把握</div> </div> |
| 4h~ | <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div>給水車の健全 性の確認人 員・燃料</div> <div>被害状況 調査結果の 発信・広報</div> <div>配水管の パトロール</div> <div>被害区域の 弁の遮断</div> <div>情報をHPIに アップロード</div> </div> |
| 5h~ | <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div>広報車による 広報を要請</div> </div> |
| 6h~ | <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div>県・近隣市に 応援を要請</div> <div>避難所の確認 (場所・状況)</div> </div> |

| 必要情報(被害状況の把握) | |
|---------------|--|
| 0h~ | <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div>給水車に渡す 水源はどこに あるのか</div> <div>管路の被害は どう測るのか (調査方法)</div> <div>テレメータによる 断水情報</div> </div> |
| 1h~ | <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div>安否</div> </div> |
| 2h~ | |
| 3h~ | <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div>下水道の 状況の把握</div> </div> |
| 4h~ | |
| 5h~ | |
| 6h~ | |

(a) 被害状況の把握

図-2.2.1 水道局の対応に関する「理想の対応」と「必要な情報」

| 理想の対応(応急給水) | |
|-------------|---|
| 0h~ | <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">役所に向かいながら水道施設の被災状況を確認する</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">役所に向かいながら周辺状況を把握する(徒歩)(目視)</div> </div> |
| 1h~ | <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">自分の周りの通信施設電気等が使えるかを確認する</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">上司に確認できた範囲での被災状況を報告する(様式に記入する)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">水道局内で収集している被災情報を知る</div> </div> |
| 2h~ | <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">備蓄している応急復旧資機材の実数を確認し各班間の在庫調整を行う</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">余震による浄水場配水施設及び道路などの被災状況を知る(口頭・電話聞き取り)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">浄水場・配水施設の機能に支障が無いか確認する</div> </div> |
| 3h~ | <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">医療・福祉・老人施設等の被災状況から運搬給水の必要性を確認する(拠点給水)</div> |
| 4h~ | <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">地震による水道の断水水の状況及び配水池等の緊急遮断弁の作動状況について消防本部に連絡する</div> |
| 5h~ | <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">周辺の自治体に給水車・人の応援要請を行う</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">給水車・人の準備をする</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">「給水を開始する」という連絡を行う(防災行政無線)(給水車)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"><拠点給水>浄水器を稼働し給水基地を設営し給水する</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">水をくみに行く</div> </div> |
| 6h~ | <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">医療・福祉・老人施設・避難場所などに給水する※第1局面</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">飲料水・生活用水等の給水を行う※第2局面</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">飲料水が適切に消毒されているかを確認する</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"><拠点給水>配水池・避難所等に給水施設を設けて給水する</div> </div> |

| 必要情報(応急給水) | |
|------------|---|
| 0h~ | <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">水道施設の被害状況(近くにある配水場など)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">断水の状況 家族の被災状況</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">テレビ・ラジオで地震の規模(震度)を知る</div> </div> |
| 1h~ | <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">配水場の被害状況</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">役所での通信手段の状況(電気・電話)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">職員の被災状況(対応できる人の確保)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">断水戸数 断水地域</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">余震後の被災状況(水道施設)</div> </div> |
| 2h~ | |
| 3h~ | <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">給水車を必要としている場所(地域・避難所)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">給水車の必要台数</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">給水車の応援が可能な自治体</div> </div> |
| 4h~ | <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">どこで飲料水が確保できるか(浄水場・配水施設)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">飲料水の水質(給水可能か)</div> </div> |
| 5h~ | <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">給水にあたる人がいるか(運転手)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">給水車の給水ルートの道路状況(通行止など)</div> </div> |
| 6h~ | |

(b) 応急給水

図-2.2.1 水道局の対応に関する「理想の対応」と「必要な情報」

| 理想の対応(応急復旧) | |
|-------------|---|
| 0h~ | <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">TV・ラジオで 地震の情報収集</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">担当者や家族 自宅の安全の確認</div> </div> |
| 1h~ | <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">役所に行く</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">応急処置が必要な 箇所への対応</div> </div> |
| 2h~ | |
| 3h~ | |
| 4h~ | |
| 5h~ | |
| 6h~ | <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">被害復旧 能力の把握</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">シナリオマッチング の作業</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">水道関連の協会に業者の 復旧への参加可能性の 調査を依頼する</div> </div> |

| 必要情報(応急復旧) | |
|------------|---|
| 0h~ | <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">地震の規模 震源位置</div> |
| 1h~ | <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">停電の状況 (停電に依存した 断水が否か)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">水道管の破損状況 (箇所・規模)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">浄水場の 被害状況</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">緊急対応が必要な 箇所の情報</div> </div> |
| 2h~ | |
| 3h~ | |
| 4h~ | |
| 5h~ | |
| 6h~ | <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">事前の被害 (復旧シナリオ (被害復旧の優先度)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">被害復旧能力 の把握</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">復旧資源の在庫 (人・機械)</div> </div> |

(c) 応急復旧

図-2.2.1 水道局の対応に関する「理想の対応」と「必要な情報」

2.2.2 災害情報の流れと対応

本 SWG では、災害情報データについて検討を行っているが、検討では地震災害発生時の水道局の対応を「(災害)情報」の流れとそれによる「対応」に着目している。

2.2.1 では、新潟県中越地震を例にし、「被害状況の把握」「応急給水」「応急復旧」の3つの長岡市の水道局の役割を想定してKJ法を用いて自由に討議してその結果を整理した。さらに、次の段階として、この結果を踏まえた上で、兵庫県南部地震の際の神戸市の水道局の対応を既往の報告書の記述を追いながら時間軸に沿って整理を行った。兵庫県南部地震の対応となったのは、新潟県中越地震の水道局の対応に関してはまだまとまった資料を作成されていないことによる。

兵庫県南部地震時の神戸市水道局の対応に関しては、様々な「情報」をどこ(どの組織)からどのように収集し、それに基づいてどのような行動をしているのかに着目して整理を行う。地震発生時の水道局の仕事を「被害把握」「応援要請」「応急給水」「応急復旧」の4つ(「応援要請」を追加)に大別し、それぞれの段階で(ある時間フェーズで)情報の流れに着目して整理を行う。この整理結果のチャートを「被害状況の把握」「応急給水」について各々図-2.2.2、2.2.3に示す。また、写真-2.2.1には検討の様子を示す。

既往の被害対応に関する報告書に記載された内容だけでは実際の対応を詳細に追うことは不可能であるため、神戸市水道局に出向き、実際の対応について再度ヒアリングを実施し、今度はより時間を追ってどのような情報がどのような経路で流れ、その結果としてどのような対応が取られたかを再整理した。「被害把握」「応急給水」「応急復旧」に関して整理した結果の一例を各々図-2.2.4~2.2.6に示す。それぞれの対応は、資料やヒアリングの結果に基づくものであるが、十分な記録が残っていない部分があるため、推察による整理も含まれている。

兵庫県南部地震における神戸市水道局の特徴は以下ようになる。

①地理的特徴

- ・自己水源に乏しいため、企業からの送水に頼っているため主体的に水源確保(浄水場の復旧)ができなかった。
- ・土地の高低差が激しいため、自然流下、管路被害により配水池の水量を維持できなかった。

②対応の特徴

- ・運搬給水から仮設給水への移行に一考すべき点があった(運搬給水だと一度に給水できる量に限りがある点を考慮すべきであったとの反省がある)。
- ・管路復旧の優先順位決定に一考すべき点があった(まず被害の小さいエリアから復旧すべきだったとの反省がある)。

③時代の特徴

- ・テレメータシステムが当時は十分に発達していなかった(データを直接入手できるのは、浄水管理事務所のみ)。

兵庫県南部地震における水道局の対応については、情報の流れとそれによる対応が時間経過とともに整理できたと考えられる。

●被害状況の把握

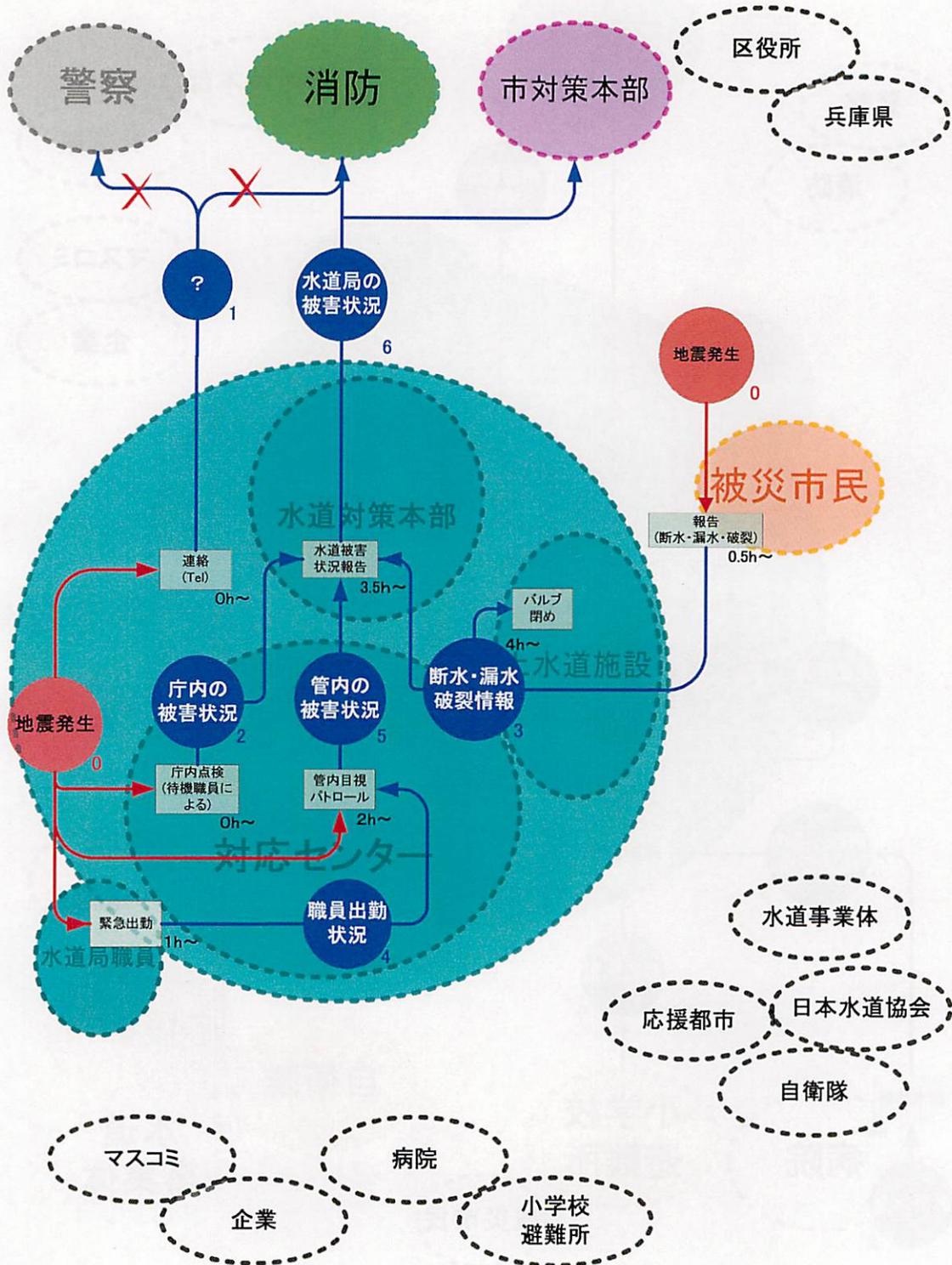


図-2.2.2 「被害状況の把握」に関する水道局と他の組織との情報の流れと対応

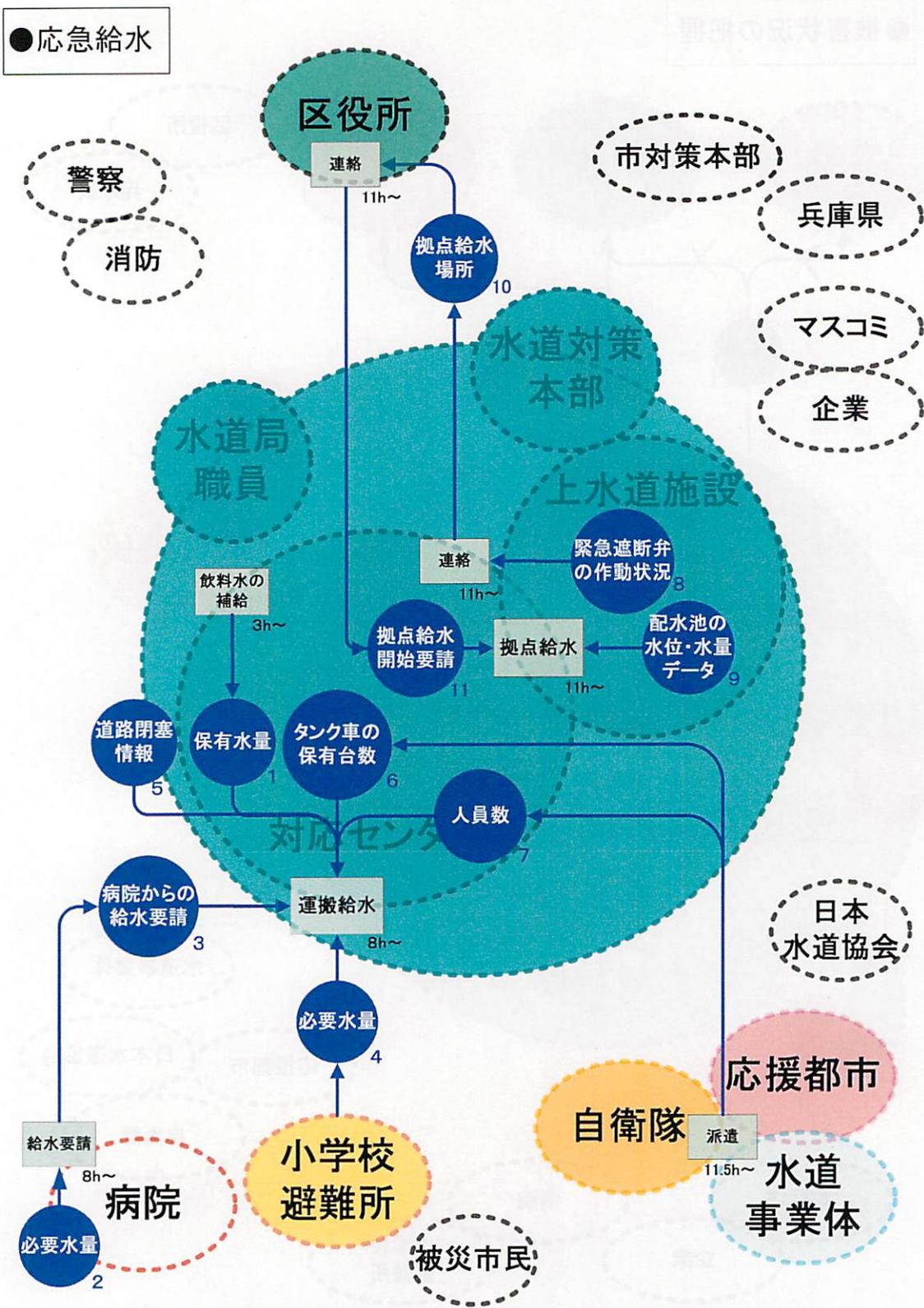


図-2.2.3 「応急給水」に関する水道局と他の組織との情報の流れと対応



写真-2.2.1 水道局の対応に関する討議の様子

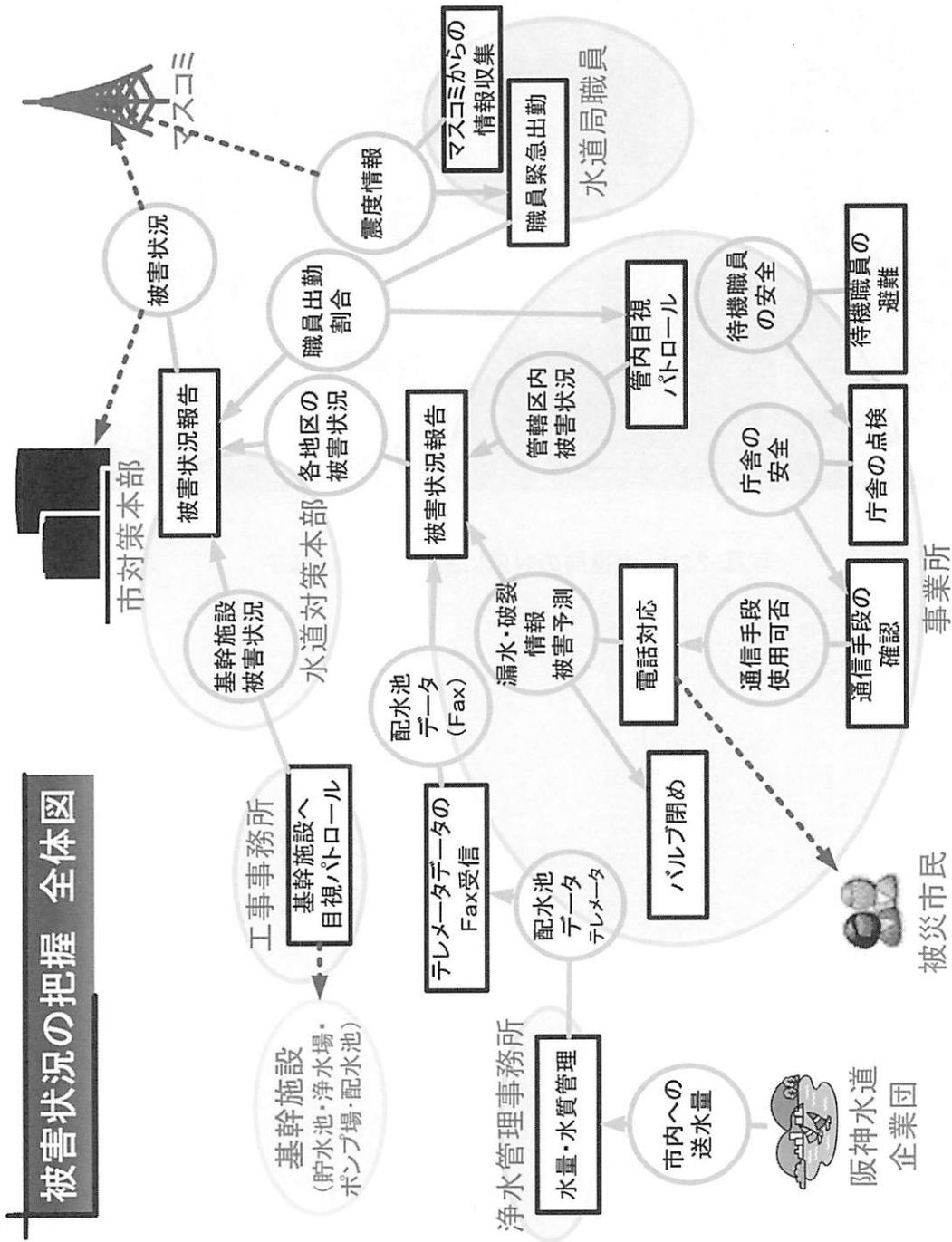


図-2.2.4(a) 「被害状況の把握」に関する情報と対応(全体概要)

応急給水 全体図

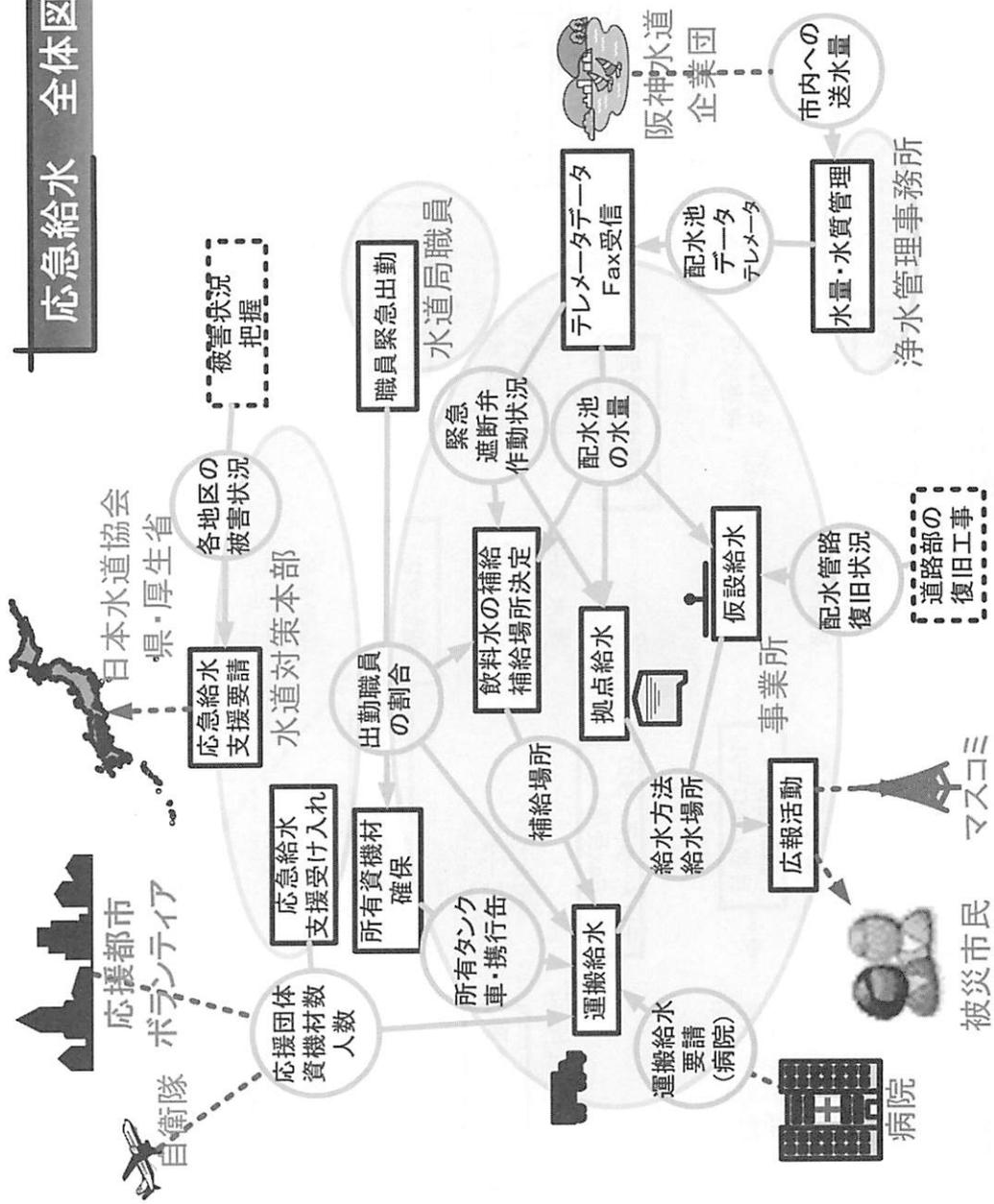


図-2.2.5(a) 「応急給水」に関する情報と対応(全体概要)

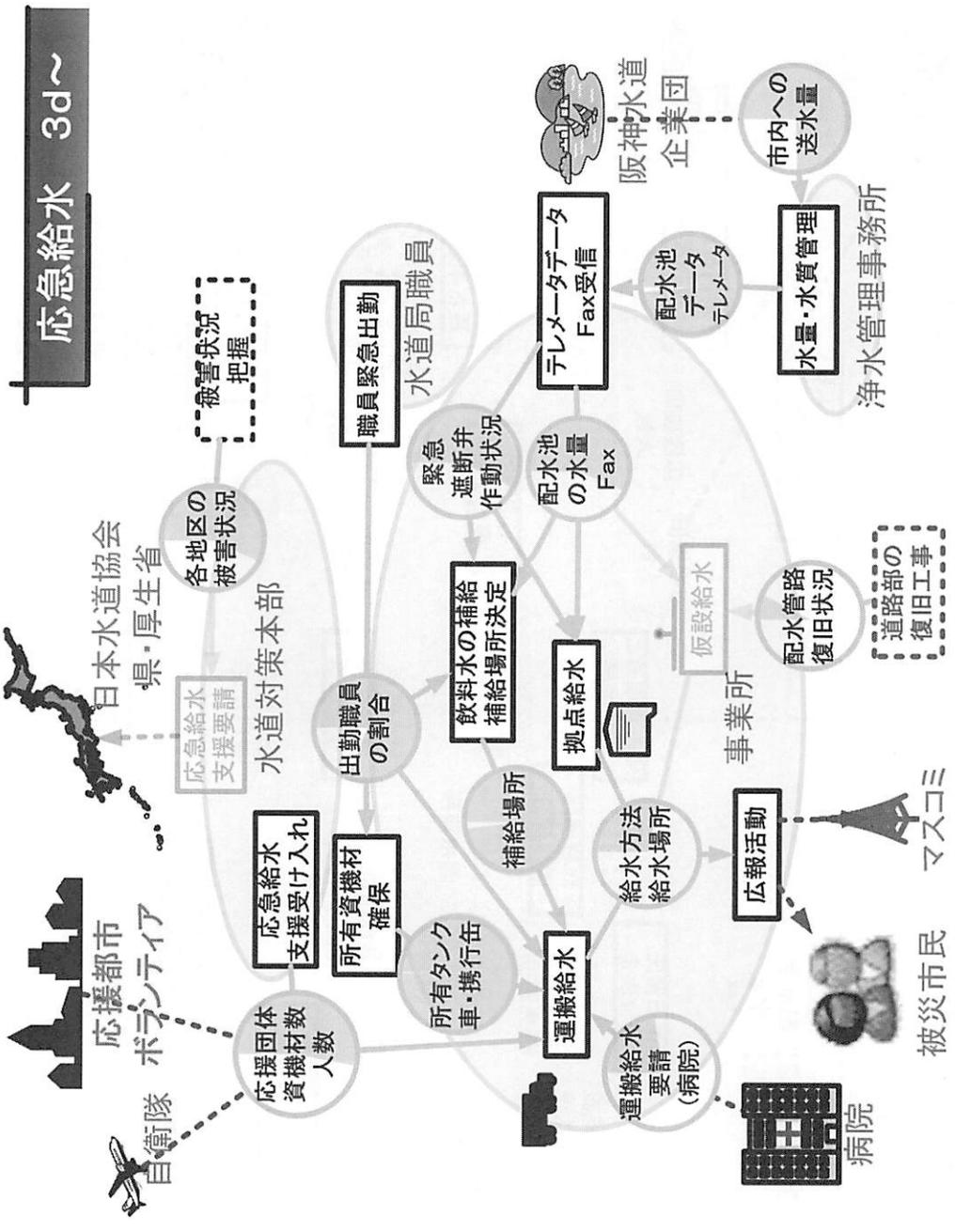


図-2.2.5(b) 「応急給水」に関する情報と対応(3日後)

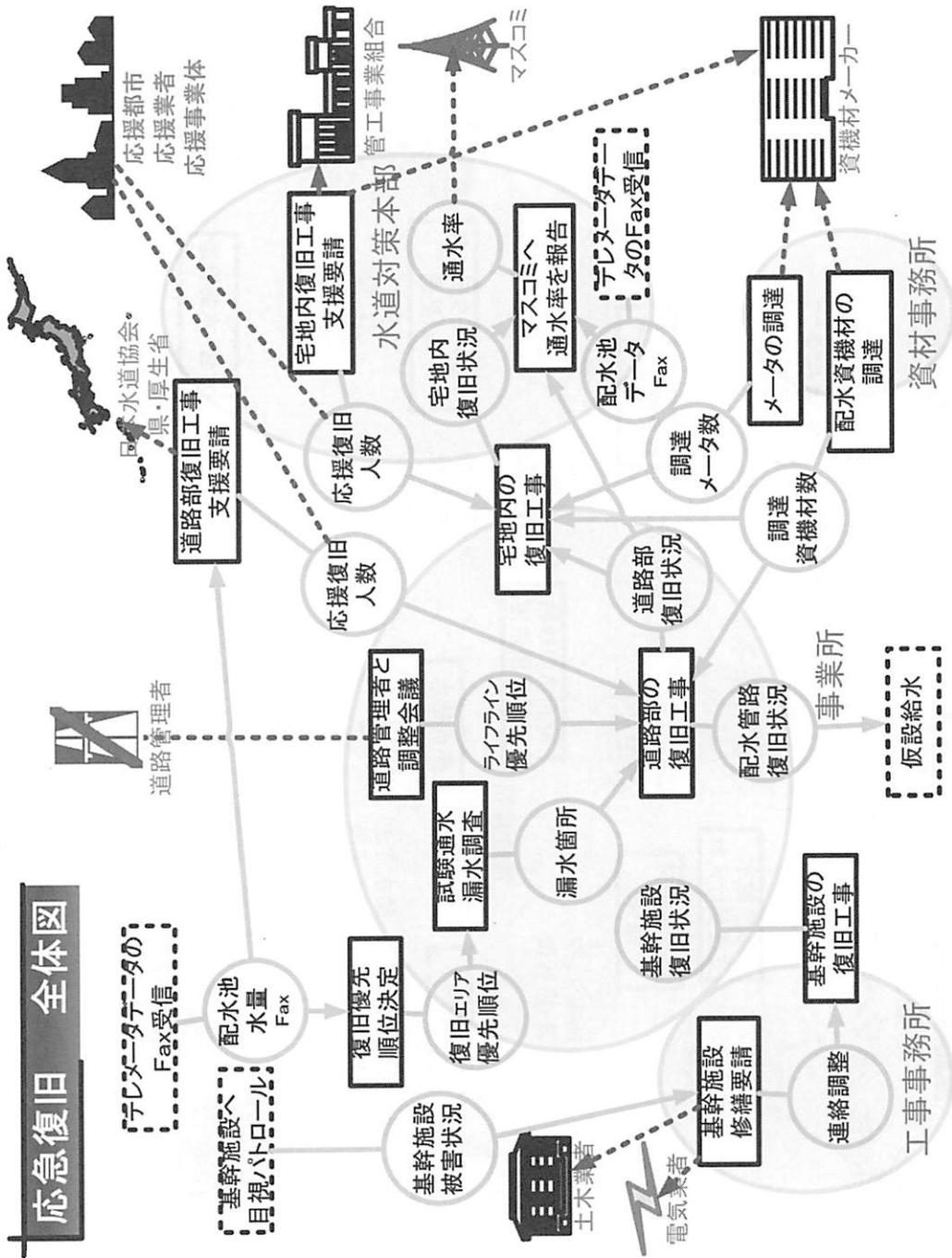


図-2.2.6(a) 「応急復旧」に関する情報と対応(全体概要)

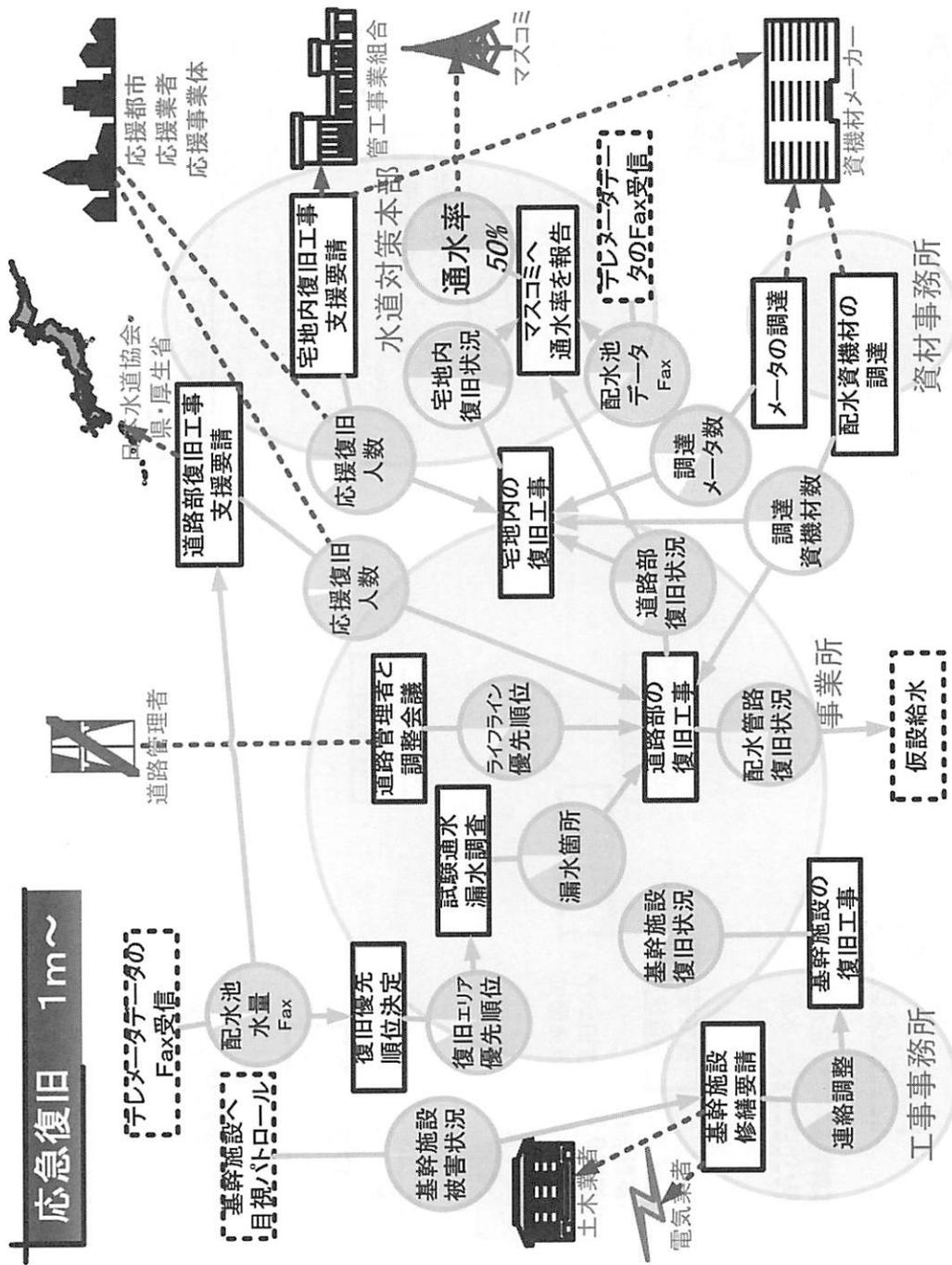


図-2.2.6(c) 「応急復旧」に関する情報と対応(1ヶ月後)

2.3 まとめと課題

SWG-1 では、災害情報データベースの構築法をテーマとして検討を行ってきた。

まず、メンバーの災害に対するイメージング能力を高めるため、目黒メソッドを用いて、地震発生に身の回りに起こるであろう様々な事象を時間軸に沿って整理し、メンバーによる討議を行った。このこと自体が本テーマの成果ではないが、メンバー各自が今後の地震への対応を考える上での共通意識を持つ上で有効であった。

次に、地震災害時の情報と対応という観点から、水道局の対応を一つ事例として取り上げ、水道局を中心とした組織間の情報の流れと水道局としての対応を整理した。まずは、新潟県中越地震の長岡市水道局の対応を想定して、情報と対応の関係を「被害状況の把握」「応急給水」「応急復旧」の3つのフェーズで整理した。また、この結果を基に、災害時の水道力の対応に関しての専門家である平山修久氏(人と防災未来センター専任研究員)を招き、兵庫県南部地震時の神戸市水道局の対応の実際と課題等について討議を行った。以上の検討によって、水道局の地震時対応や課題の概要をつかむことができた。

次にステップとして、これまでの地震時の水道局の情報の流れと対応を時間軸に沿って再整理した。その際には平山氏にヒアリングを行って既存の資料にない情報を補った。時間軸に沿った整理は、今後の災害情報データベースの構築法に関する検討を進める上で貴重なデータとなった。

本研究の最終的な目標は災害データベースのあり方や構築法を検討することにあるが現状ではまだそこまでの検討には達していない。今後の研究を進めるためには、まずはこれまでに整理した情報に基づき、以下のような検討を進めていくことが考えられる。

- ① 新潟県中越地震における水道局の対応の整理(検討事例の追加)
- ② 都市による対応の共通点や相違点の整理(都市による特徴の把握)
- ③ 現状の災害情報の流れと対応の標準的なモデルの作成
- ④ 理想的な災害情報データベースの構築法の提案

これまでの検討では、希にしか発生しない大地震の自治体の対応に関する記録は少ないため、データ整理に非常に苦勞した経緯がある。今後、災害情報データベースの標準化モデルや理想モデルを構築した場合でも、モデルの妥当性の検証が非常に難しいことは大きな課題として残されている。

【謝辞】

本 SWG での検討に際しては、東京大学生産技術研究所・目黒研究室の近藤伸也氏(現 人と防災未来センター)、大山宗則氏、鈴木僚氏には、地震被害に関するデータの収集と整理を担当していただいた。また、目黒研究室の阿部真理子氏には、いっしょに議論に加わっていただき、議論を盛り上げていただいた。皆さんの熱意と協力に感謝いたします。

3. 耐震補強推進のための地震リスクファイナンス金融商品の開発

3.1 耐震補強推進策の現状と課題

リスクの制御を図るリスクマネジメントとして、リスクを回避・軽減・移転・保有するなどの手段が検討されている。地震リスクマネジメントにおいて、リスクを回避・軽減する方法は、リスクコントロールに分類され、耐震性能が高い構造(免震・制震など)を採用したり、耐震補強の実施、そして構造技術以外では、窓ガラス対策・昇降機の安全対策・室内家具の固定などの検討が考えられる。また、リスクを移転・保有する方法は、リスクファイナンスに分類され、地震保険・再保険制度を始めとし、高度な金融工学を用いた金融オプションや証券化の手法を用いたり、金融機関と被災時の融資に関する特別な契約を締結する方法などがある。さらにリスクコントロールとリスクファイナンスの組み合わせと考えられる、自治体による各種補助金制度・減税制度・TIF(Tax Increment Financing)などが知られている。

阪神淡路大震災後、建造物の耐震性についての関心は高まり、上記の各種手法の活用が展開されているものの、広く普及している状況ではない。日本の地震リスクを考える場合、既存不適格建造物の存在、地域による防災意識の格差等により、いまだ有効に地震リスクマネジメントが行われていない部分が存在していると言える。阪神淡路大震災の建造物被害を年代別に分析した結果、1981年以前に建築された新耐震設計基準以前の建造物の被害が大きいことが報告されている。これら既存不適格建造物の存在は、今後発生する地震の被害を考えた場合、大きな社会問題として捉えられている。

阪神淡路大震災後、耐震補強を推進する目的で、1995年12月に「建造物の耐震改修の促進に関する法律(耐震改修促進法)」が施行された。しかしながら、既存不適格建造物の耐震改修は未だ十分に進んでおらず、2006年1月には建造物の耐震改修の促進に関する法律の一部を改正する法律が施行されることになった。本改正は、平成17年に国土交通省で開催された「住宅・建造物の地震防災推進会議」の提言の1つである、既存建造物の耐震化率を現状の75%から10年後には90%に引き上げる推進力になることを期待されている。更に本会議の提言では、自治体による促進事業としてローン、税制、助成制度など各種支援策の必要性を示しており、上で述べた各種地震リスクマネジメント手法の有機的活用が期待されている。

「住宅・建造物の地震防災推進会議」資料によると、耐震改修促進法の対象となる特定建造物(3階以上かつ1,000m²以上で多数の者が利用する用途のもの)で耐震改修が必要なものは9万棟(平成15年時点推定値)存在し、住宅に関しては1150万戸(平成15年時点推定値)の既存不適格建造物が存在すると示されている。平成15年度までに、住宅に関して、地方公共団体が自ら実施又は補助等を行った耐震診断は約17万戸あるのに対し、耐震改修に至ったものは約3500戸と少ない。補助によらないものを含めると平成10年から平成15年までの5年間で約32万戸の耐震改修を実施していると推計されている。上記「住宅・建造物の地震防災推進会議」の提言では、今後10年間で、約100万戸の住宅の耐震改修を目標においており、従来の2~3倍のペースが要求されるとしている。

過去に、耐震改修が十分に進んでこなかった理由として、建造物所有者の地震リスクの相対的優先度の低さや資金調達の経済的困難性があると推定される。今回の促進法改正は、特定建造物の耐震化に対して行政側が指導・助言に努め、指導に従わない場合は公表するなどの規定が盛り込

まれている。また、これらの規定の強化に合わせて、政府は、耐震改修に対する税の優遇措置などを行い、耐震改修を今後促進することを図っている。

これらの制度変更により耐震改修が促進されることを期待するものであるが、資金的問題に関しては、税の優遇制度のみで解決するかは検討の余地があると思われる。建物所有者にとっては、耐震補強に資金を投じることが、過大な負担にならないような仕組みを更に提案していくことが必要と考えられる。

3.2 リスクファイナンス技術

地震リスクマネジメントの1つの方法として、リスクを移転・保有する方法としてリスクファイナンス手法がある。これは、主に地震後の復旧のための資金を調達する手段として位置付けられている。

その代表的なものが、地震保険である。「住宅・建築物の地震防災推進会議」においても、地震保険の活用推進策を提言している。しかし、その加入率は、損害保険料率算定機構の調査の結果、平成14年度末で16.39%に留まっている。加入率の増加のため、耐震診断結果に基づく耐震等級割引制度や地震保険料の所得控除制度などが提案されている。しかし、地震リスクは、巨大被害の可能性、発生時期・頻度の予測の困難性、広域災害の可能性などの特性を持つため、民間の力だけでは保険として成立しない面があり、政府の力や再保険などによる更なるリスクの分散が必要になると言われている。経済の仕組みが複雑かつ高度化している今日において、住宅のみならず産業施設に被害が生じると、経済に与える影響は更に拡大し、保険制度だけでは金銭的にも時間的にも満足のいく復旧資金を調達できないことが推測される。

これらの問題を解決するために生まれたものが、金融工学を活用した代替的リスク移転(ART)である。その代表的なものとして、リスクの証券化(キャットボンド)・デリバティブ取引などが挙げられる(文献1)。金融工学の発達により、契約に基づき機動的に巨額の資金を確保することが可能になってきている。

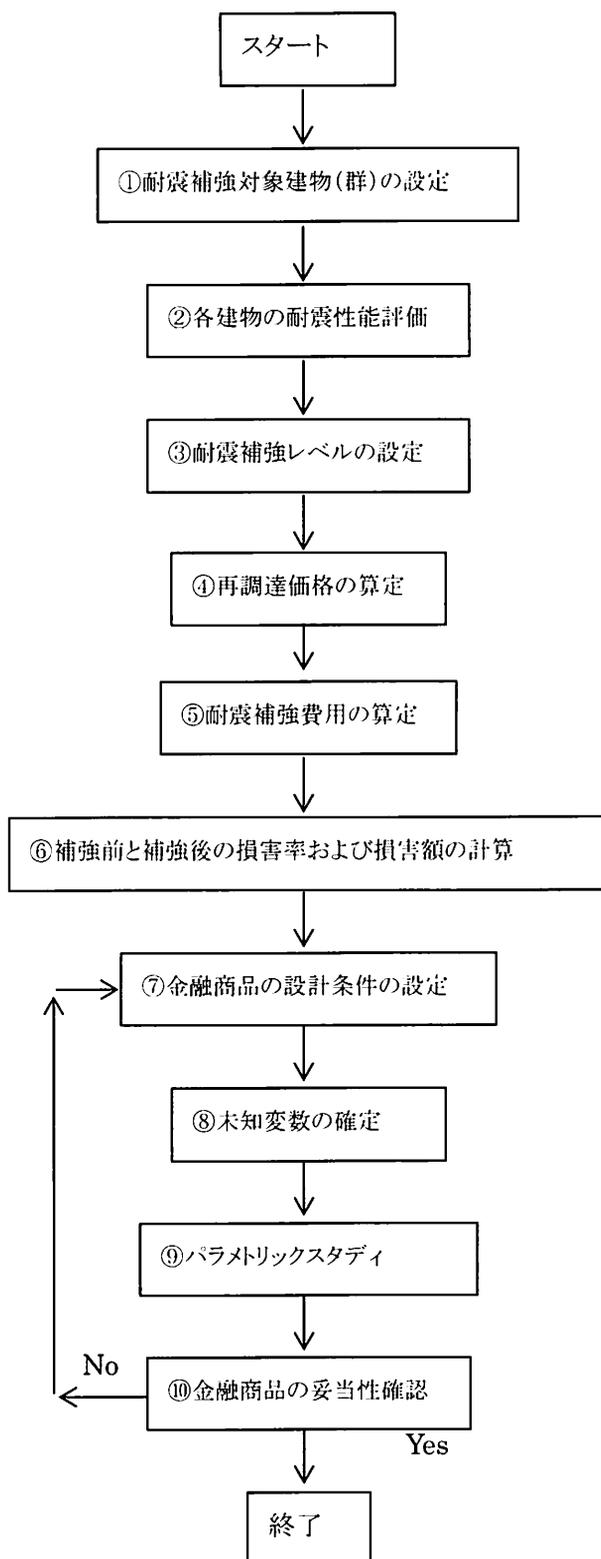
リスクの証券化とは、地震発生時に事業の復旧継続に必要な資金調達額を設定し、その資金の原資を証券化により多数の投資家に分散する方法である。災害が発生しない場合は債権の額面と利息分を償還し、発生した場合には償還されずに復旧費用として没収される仕組みであり、投資家にとってはハイリスクハイリターンの商品に位置付けられる。

デリバティブを活用した金融技術として、よく知られている例は、株価や為替のオプション取引、そして最近では天候デリバティブが良く聞かれる。これらは、ある将来時点での価格や気温・降水量・積雪量などを指標として、想定した価格や物理値を基準として売側と買側の間で取引契約を結ぶものである。金融工学を駆使することにより、各種のデリバティブ商品の開発が可能になってきている。

リスクファイナンス技術は、今日のような高度な経済社会においてのみ活用可能なものであり、また開発可能なものといえる。このような技術を、耐震補強という従来からのリスクコントロール技術と組み合わせることにより、新しいリスクマネジメントモデルの構築の可能性があると思われる。

3.3 耐震補強推進のための新ファイナンスモデルの提案

3.3.1 検討項目フローチャート



3.3.2 フローチャート各ステップの説明

① 耐震補強対象建物(群)の設定

- ・ 全国にある既存構造物のうち、耐震補強が必要と考えられる構造物の候補リストを蓄積したデータベースを作成する。
- ・ データベースの中から、用途・築年・地域・(必要な補強レベル)・オーナーが希望する耐震補強レベルなどを考慮していくつかの耐震補強対象構造物を選択する。

例

耐震補強建物群の設定(n件)

(立地条件、築年数、構造形式、階数、…)

建物1(東京都〇〇区〇〇、1972、RC、10、…)

建物2(大阪府〇〇区〇〇、1981、SRC、15、…)

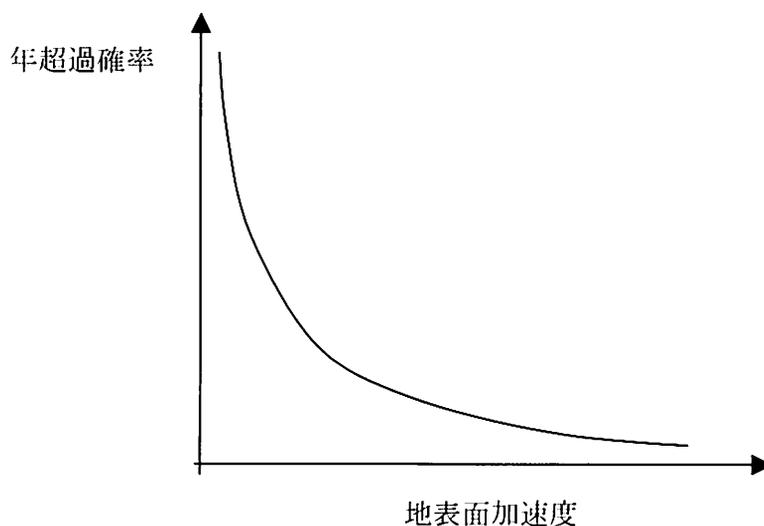
建物3(愛知県〇〇市〇〇、1970、RC、6、…)

・

・

建物n(福岡県〇〇市〇〇、1976、SRC、10、…)

各立地のハザード曲線



② 各建物の耐震性能評価

- ・ 既存建物の耐震性能は、一般に財団法人日本建築防災協会出版の耐震診断基準によって評価される。
- ・ 一般に耐震補強をするためには、まず耐震診断を行い、その結果に基づいて耐震補強の設計を行う。診断の結果、「要補強」と判定された建物が、本リスクファイナンス技術の対象となる。

- ・ 耐震性能は、先の耐震診断基準に基づき、耐震構造指標(Is 値)で評価されることが多い。Is 値は、想定される地震に対して必要な耐力・エネルギー吸収量に対する、現建物の耐力・エネルギー吸収量の比を表すものである。この数値が、0.6 以上であれば、現行の設計基準に対して安全であると判断されるが、それ以下の場合は、不適合と判断される。
- ・ Is 値が 0.6 以下の建物は、0.6 以上になるように何らかの補強をすることになる。

例

各耐震性能評価

Is値 (耐震性能指標)

建物1 (0.4)

建物2 (0.5)

建物3 (0.45)

・

・

建物n (0.3)

③ 耐震補強レベルの設定

- ・ ②で述べたように、Is 値が 0.6 以下の建物は何らかの補強をする必要があるが、その補強のレベルをどの程度にするかを判断する必要がある。
- ・ 耐震診断基準によれば、0.6 になるような補強を実施すれば良いことになるが、最近では、必要に応じて任意の耐震レベルを設定する方法(性能設計)をとる場合がある。
- ・ 建物の補強レベルは、必要な耐震性能を設定し、加えて補強方法による費用・使い勝手の変化・施工方法・施工期間などをオーナーが勘案して決定されるものである。

例

耐震補強レベル

Is, req (目標耐震性能指標) 一般的には、0.6 以上

建物1 (0.65)

建物2 (0.7)

建物3 (0.8)

・

・

建物n (0.6)

④ 再調達価格の算定

- ・ 再調達価格とは、現在同じ効用の建物を建設しようとした場合の要する費用の総額のことである。
- ・ 本技術の中で再調達価格は、耐震補強費や被害額を相対的に表すための基準として使うものである。例えば、再調達価格が 1 億の建物に対し、ある地震に対して被害が 3000 万円であれば、再調達価格の 30%、必要な耐震補強費が 1000 万円で済

むとすれば、それは再調達価格の 10%と表現することができる。これにより複数の異なる建物を同じ指標で判断することができる。

- ・ 再調達価格の求め方は、詳細な方法から簡略な方法までさまざまある。最も正確な方法は、対象建物の見積書から算定する方法である。見積書が無い場合は、再度見積もりを取るか、一般的な同規模の建物から類推して算出する。
- ・ 地震リスク評価を行う場合の再調達価格は、部位別に分けて考える方法がある。例えば、躯体・設備・内装・外装・基礎などである。それぞれに要する費用を算出して、総和を取ることで再調達価格を求める。
- ・ 例えば、集合住宅であれば、再調達価格を 1 とした場合、基礎の価格は 0.1、躯体の価格は 0.3、設備の価格は 0.2、内装の価格は 0.2、外装の価格は 0.2 などと振り分けて考える。建物用途によって、この比率が変化する。外装にお金を使っている建物はその比率が高くなる。

例

再調達価格および内訳

(再調達価格、躯体費、設備費、内装費、外装費、……)

建物1 (10 億円、3 億円、3 億円、2 億円、2 億円、……)

建物2 (15 億円、4 億円、4 億円、3 億円、3 億円、……)

建物3 (7 億円、2 億円、2 億円、2 億円、1 億円、……)

・
・

建物n (10 億円、4 億円、2 億円、2 億円、2 億円、……)

⑤ 耐震補強費用の算定

- ・ 各補強レベルの施工費がどのように変化するかを把握する。補強レベルが上がれば、取り付ける補強部材も多くなるため、一般に工事費も高くなる。
- ・ 但し、建物によって、費用と性能の関係は、比例する場合とそうでない場合などさまざまなケースが考えられる。
- ・ 耐震補強費用の算定も詳細な場合と簡略な場合が考えられる。個別に設計図書を見て見積もりを出す場合と過去の実績データを基に推定する方法が考えられる。

例

耐震補強費用の算定

C、req (耐震補強費用、再調達価格に対する比)

建物1 (3000 万円、3%)

建物2 (7000 万円、4.7%)

建物3 (1 億円、14.2%)

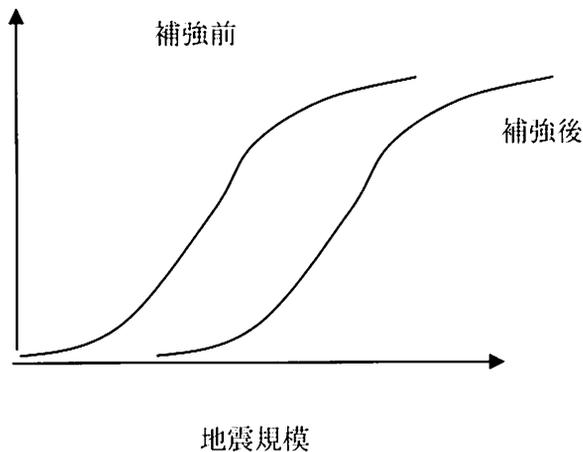
・
・

建物n (8000 万円、8%)

⑥ 補強前と補強後の被害額率および損害額の計算

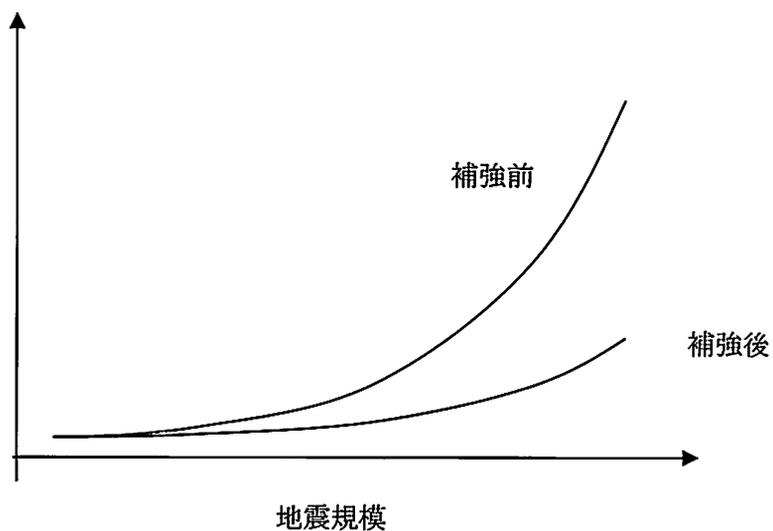
- ・ 補強によってどの程度被害額率および被害額が減少するかを計算する。
- ・ 被害額率とは、縦軸が確率で、横軸が地震規模のグラフで表される。

被害額率(再調達価格比)



- ・ 被害額率は、大破・中破・小破などに対して与えることもできる。また、再調達価格で述べたように部位別に設定する必要がある場合もある。例えば、基礎・躯体・設備・内装・外装材ごとにその被害率を定めることも可能である。但し、過去の被害調査結果がこれら分類ごとにまとめられている必要がある。金融商品ごとの必要性に応じてデータを作成する。
- ・ 被害額率は被害率を基に、その単価をかけて算定する。但し、その単価は、被害率のよって一定の場合もあるが変動する場合もある。つまり、被害率がある値を超えると、その被害額が急に増加する場合もあるということである。これは、対象となる建築物の特性によって異なる。
- ・ 被害率は、過去の地震被害調査結果を基に作成したデータから推定する。補強前、後ともそれらデータから推定する。
- ・ その他に、被害率を解析などのシミュレーションで求める方法もある。また、これらシミュレーションの結果をデータベースとして保有し、それをを用いて個別の建物の被害率を算定する方法もある。

被害額



⑦ 金融商品の設計条件の設定

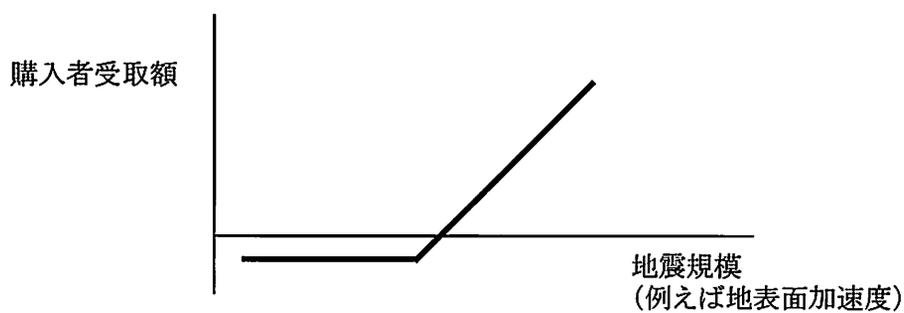
- ・ 想定される入力項目

オプション価格=⑤の耐震補強費用

償還年数=権利行使日

オプション取引パターン(下記曲線形状)

例



⑧ 未知変数の確定

⑦の設計条件の中の1つを選択

主には、オプション取引パターンが未知数になる。

⑨ パラメトリックスタディ

⑧で確定した未知変数に対するパラメトリックスタディを実施する。

主に、取引パターンを変化させることにより、

オプション価格 = 必要耐震補強費

になるような取引パターンを見つける。

⑩ 金融商品の妥当性の確認

- ・ 本技術に基づいた金融商品を単独で売り出す場合と、他の金融商品と組み合わせる場合を想定することができる。
- ・ 妥当性の中には、単独商品としての妥当性と複数商品の1つとして組み合わせた場合の妥当性の2種類を含む。つまり、単独では成り立たないが、ポートフォリオという枠で複数の金融商品(ハイリスクハイリターン型とローリスクローリターン型の組み合わせなど)のうちの1つと位置付ければ成り立つ可能性があることを想定している。

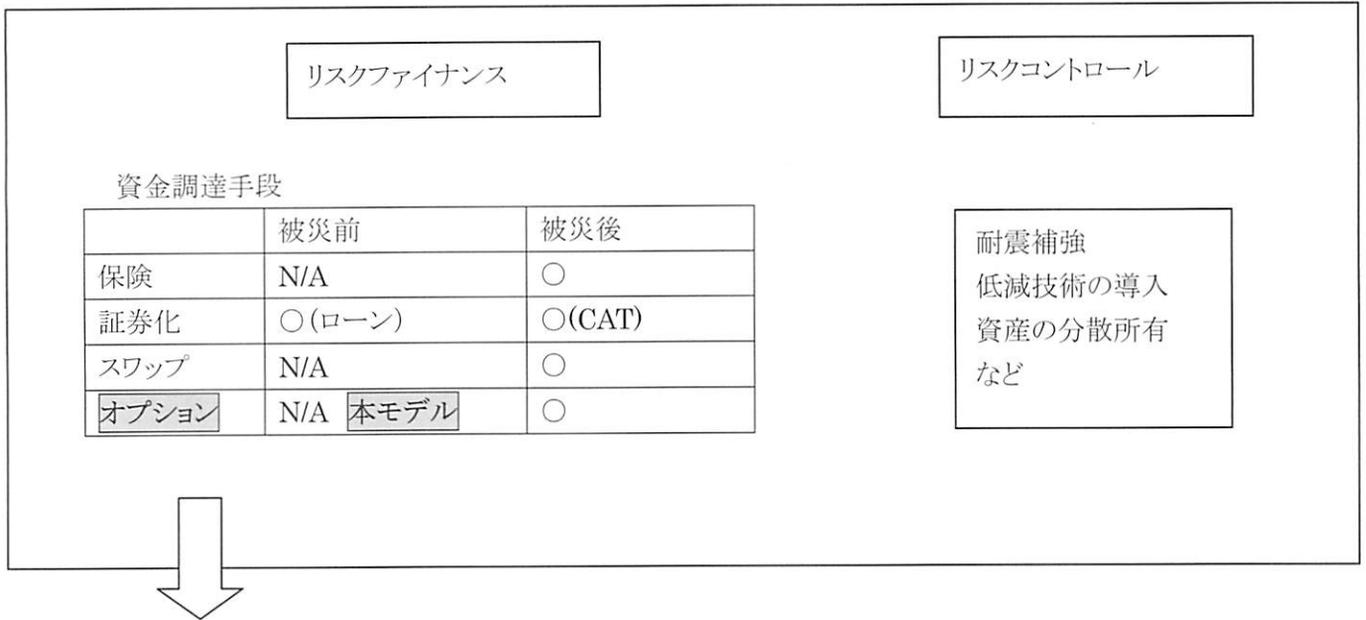
3.4 他のファイナンスモデルとの特性の比較

本節では、本モデル(耐震補強費用調達手段)の基礎となる金融工学上の技術(通貨オプション)および従来の地震リスクファイナンス技術(復旧資金調達手段¹⁾)を比較して、本技術の特徴を示す。

表-3.4.1 各種ファイナンスモデルとの特性の比較

| 比較項目 | 通貨オプション | 復旧資金調達手段 ¹⁾ | 耐震補強費用調達手段 (本モデル) |
|----------------------|--|------------------------|-------------------------|
| インデックス | 為替レート | マグニチュード | マグニチュード 地表面加速度 |
| 確率分布 | 正規分布 | 地震発生過程モデル | 地震発生過程モデル |
| 取引形態 | コールオプション買 コールオプション売 プットオプション買 プットオプション売 | 売買 | 売買 |
| 想定購入者(買) 想定売却者(売) | 個人・法人 個人・法人 | 行政 金融機関 | 投資家・行政 個人・法人・行政 |
| オプション価格 | 利益の期待値 | 復旧費の期待値 | 耐震補強費 |
| 期間(通常) | 比較的短期(数ヶ月) オプション行使時まで | 比較的長期(数年) | 比較的長期(数年) オプション行使時まで |
| 金利の影響 | 比較的小さい | 比較的大きい | 比較的大きい |
| 買側 権利 義務 | 為替変動リスク回避 オプション料支払 | 復旧費の受取 オプション料支払 | 償還金の受取 耐震補強費の支払 |
| 売側 権利 義務 | オプション料受取 為替変動リスク受入 | オプション料受取 復旧費の支払 | 補強建物の取得 償還金の支払 |

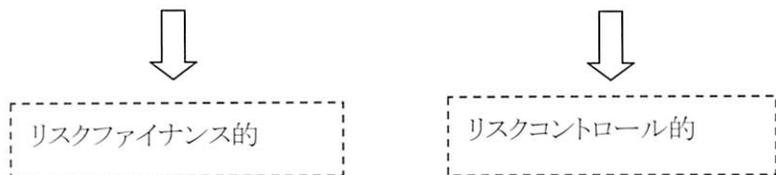
A リスクマネジメント(地震)の分類 (本提案モデルの位置付け)



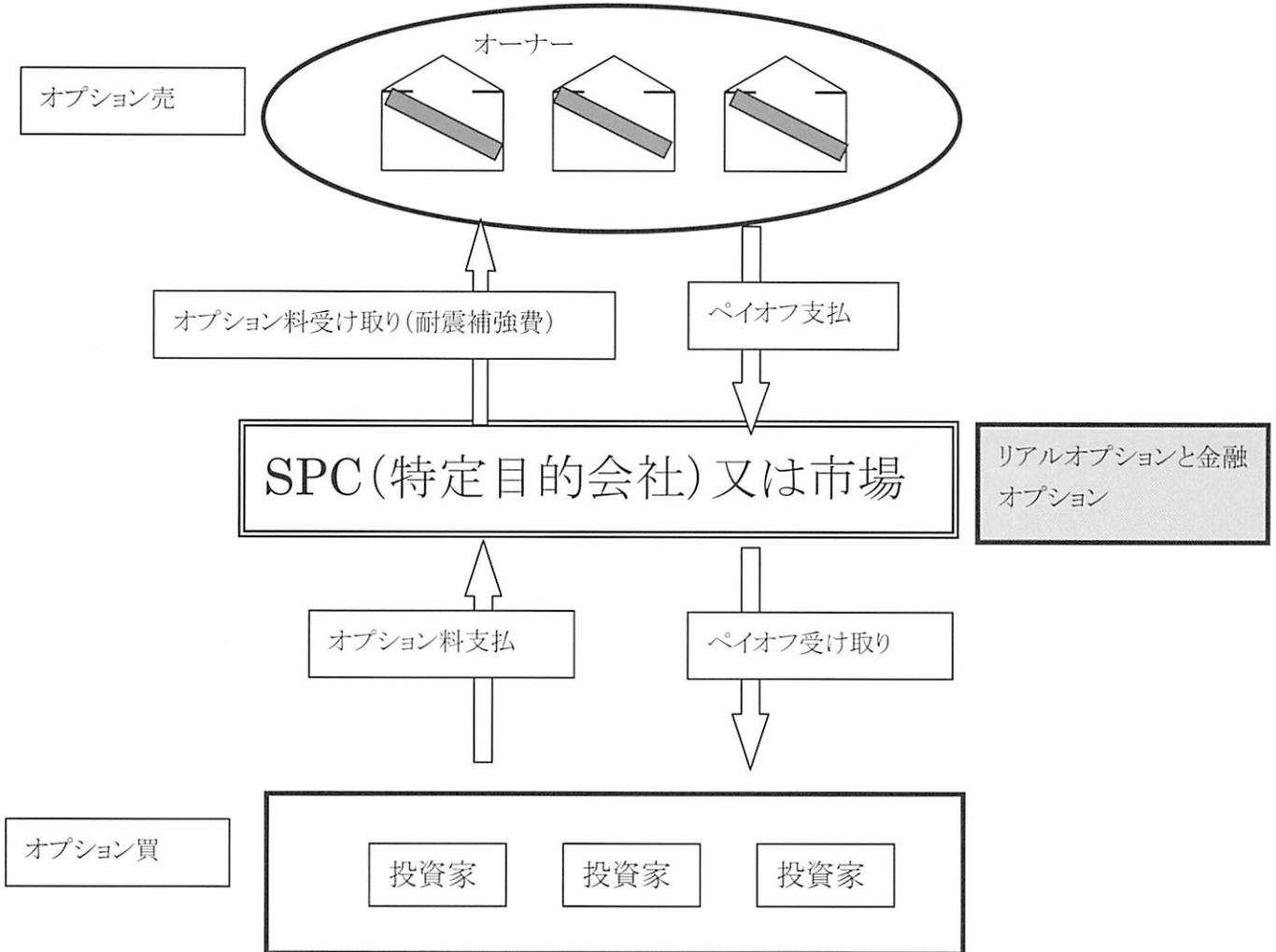
オプションの分類

| | 金融オプション 株式・先物・金利・債券 | リアルオプション |
|------------|------------------------|----------------|
| 確率変数 | 価格など | 何らかの効用関数 |
| 確率分布 | 正規分布 | ポアソン分布等 |
| 市場性 | 有 | 少ない |
| 譲渡性 | 有 | 少ない |
| リスク中立的価値評価 | 可 | 不可 |
| 競争 | 競争独立的 | 他の資産との競争にさらされる |

参考文献2: 刈谷武昭著「不動産金融工学とは何か」



B 本モデルのビジネスモデル



C 本モデル検討のための必要な知識・情報

- ① 市場
 - ・ 耐震補強を必要としている建物の属性(用途、構造、地域、オーナー)
 - ・ 耐震補強に必要な総費用の推定
- ② ビジネスモデルのプレイヤー
 - ・ 投資家の種類
 - ・ 政府・自治体(役割、財政状況)
 - ・ 証券会社
 - ・ 損害保険会社
- ③ 金融オプション
 - ・ オプション価格の算定方法(商品の設計方法)
 - ・ ペイオフのパターンのバリエーション
 - ・ 他の ART 商品との相対的關係
 - ・ 他の金融商品との相対的關係
- ④ リアルオプション
 - ・ 地震ハザード曲線の設定方法
 - ・ 被害額の推定方法
 - ・ 補強費用と補強効果の關係
- ⑤ 考慮すべきリスク
 - ・ ベーシスリスク
 - ・ モラルハザードに対するリスク
 - ・ ペイオフ支払に対する信用リスク
 - ・
- ⑥ その他
 - ・ 証券化のためのキャッシュフローの考え方
 - ・ 耐震補強に対する諸制度との競争力(補助金・税優遇措置など)

3.5 提案モデルのケーススタディ1

本金融商品は、デリバティブ金融商品の設計法を活用して、商品のオプション価格を耐震補強費用の一部または全部に当て、市場の原理により耐震補強を実際に推進することを意図したものである。

ここでは、この金融商品が、建物オーナー側及び投資家側双方にとって、成り立得るものであるか否か、下記のパラメータについて検討する。

- ① ハザード曲線
- ② 補強レベルと被害率改善度
- ③ オプション取引曲線(精算金の支払条件)
- ④ 償還年数
- ⑤ 割引率の影響
- ⑥ 建物オーナー側の選好性
- ⑦ 投資家側の選好性
- ⑧ 金融商品としての可能性

3.5.1 ハザード曲線

(1) 検討条件

ハザード曲線は、建築構造性能評価(<http://ssweb.k.u-tokyo.ac.jp/>)で提供されている地震リスク評価で用いられているものを参考に使用した。ここでは、475年再現速度が約2倍異なるA地区(60kine)とB地区(120kine)を対象とした。

- ① ケース 2-1(A地区)
- ② ケース 2-2(B地区)

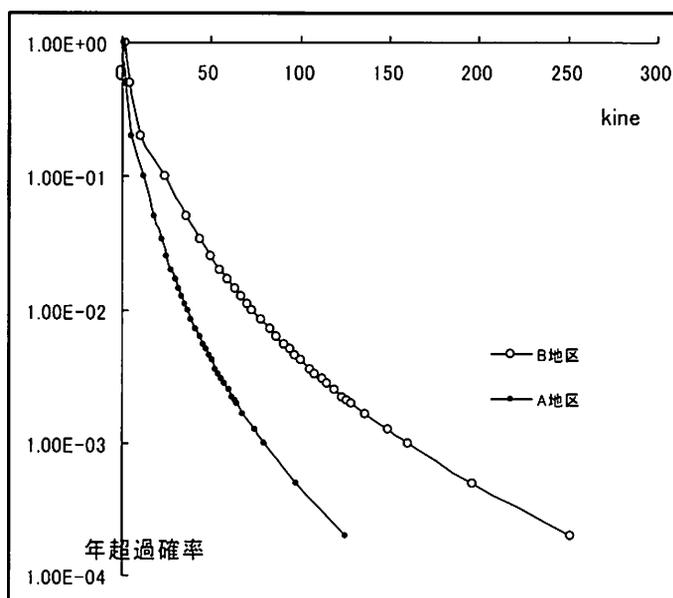


図-3.5.1 ハザード曲線の比較

検討上の共通項目

i 対象建物(被害率)(図-3.5.2)

1971年以前に建設されたRC造(全壊)

被害率曲線は文献3による

ii 補強レベル(図-3.5.2)

1982-1994年に建設されたRC造のレベルに補強するものとする。従って、被害率は、同年代に建設されたRC造の被害率曲線(全壊)(文献3)を用いる。

iii 償還年数(30年)

iv オプション取引曲線(図-3.5.2)

30年間に対象建物が存する特定した地域に地表面加速度40kine以上地震が発生しない場合は、オーナーは支払不要。30年間に40kine以上の地震が発生した場合には、その規模に応じた額(精算金)を投資家に支払う。

本例では、以下のようにオプション取引曲線を設定した。

表-3.5.1 オプション取引曲線の関係

| 最大地表面速度 kine | 0-40 | 50 | 100 | 150 | 200 |
|--------------|------|------|------|-----|------|
| 精算金比(再調達価格比) | 0 | 0.01 | 0.06 | 0.1 | 0.16 |

(2) 検討結果

①ケース2-1

オプション価格(耐震補強費)の再調達価格に対する比(以下、PRという。)は、0.00386となる。これは、投資家が30年間に受け取ることができる期待値である。したがって投資家は、PRに相当する価格でこの金融商品を購入して、発生した地震の規模に応じた精算金を受け取ることになる。表-1の場合、もし30年間に100kineの地震が発生した場合には、オーナーから精算金比0.06に相当する精算金を受け取り、投資額(0.00386)の $0.06/0.00386=15.5$ 倍の金額を受け取ることになる。

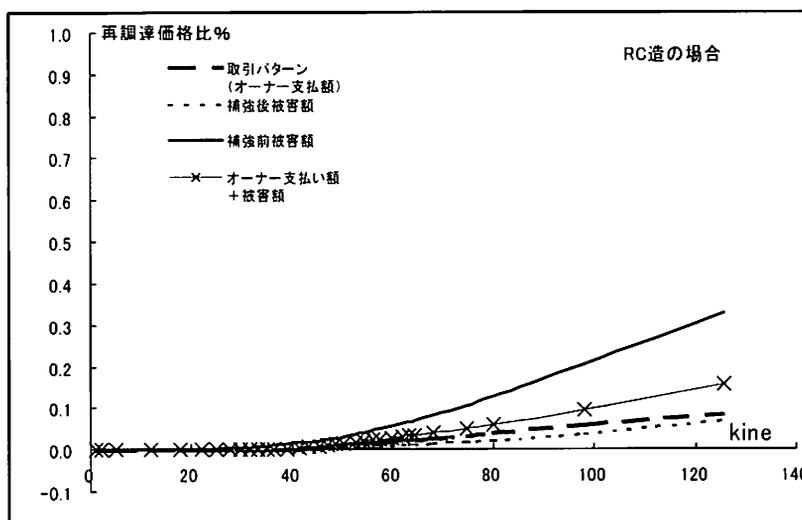


図-3.5.2 地震規模と被害額及び精算金の関係(ケース2-1)

②ケース 2-2

地震危険度がケース 1 より大きい場合には、オプション価格(耐震補強費)の再調達価格に対する比(PR)は、0.028となる。この場合、もし 30 年間に 100kine の地震が発生した場合には、オーナーから精算金比 0.06 に相当する精算金を受け取り、投資額(0.028)の $0.06/0.028=2.14$ 倍の金額を受け取ることになる。

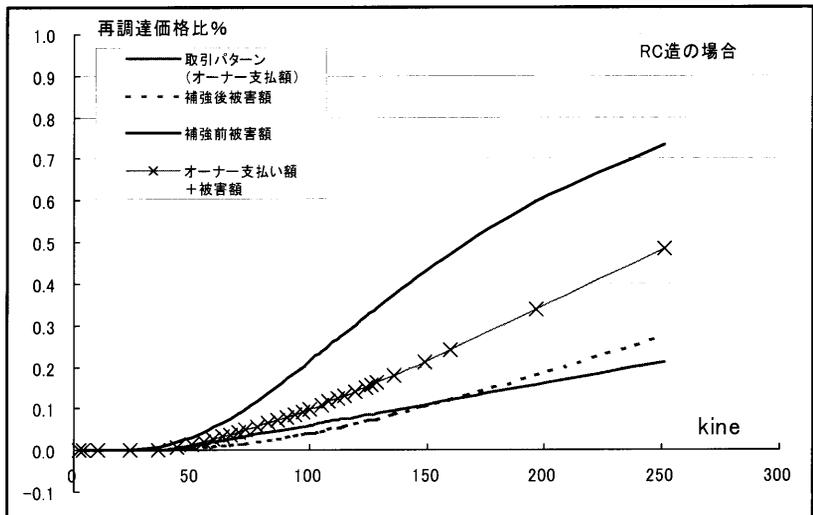


図-3.5.3 地震規模と被害額及び精算金の関係(ケース 2-2)

3.5.2 補強レベルと被害率改善度

(1) 検討条件

一般に、既存の建物の再調達価格に対する耐震補強費の割合が高くなると、被害率の改善の度合いは大きくなると考えられる。この関係を把握するためには、既存の耐震補強工事およびその設計を分析して、耐震補強レベルと工事費およびその想定被害率のデータを構築する必要がある。

ここでは、上記のデータが不明であるため、補強レベルを、新耐震基準以降の RC 造建物の被害率(文献1)と更に被害率が 1/2 になるものを想定し、比較することとする。この場合のそれぞれに必要な補強費はどの程度になるか不明であるが、この検討では、2 ケースのオーナーが支払う精算金と補強後の被害額の和をほぼ一致させるためのオプション価格を求め比較することとする。

① ケース 3-1

補強レベル(新耐震レベル)

② ケース 3-2

補強レベル(新耐震より高いレベル)

検討上の共通項目

i ハザード曲線

2節のケース 2-2(B 区)

ii 対象建物(被害率)(図-3.5.4)

1971 年以前に建設された RC 造(全壊)文献 3

iii 償還年数(30 年)

(2) 検討結果

① ケース 3-1

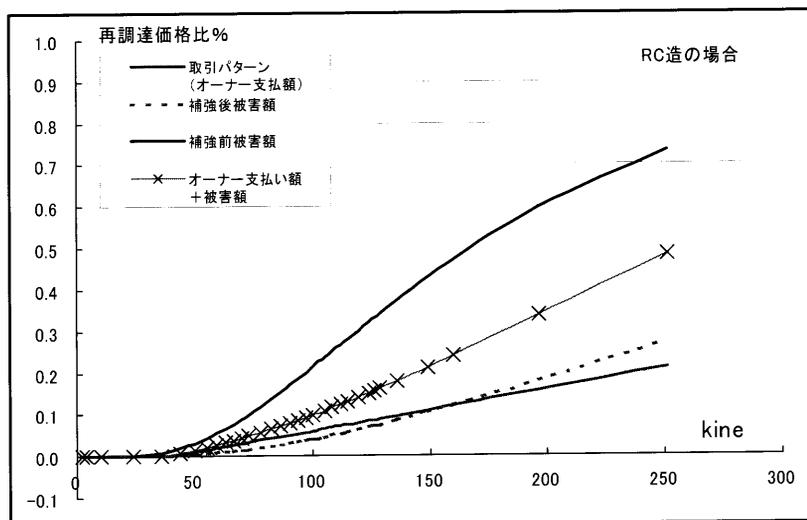


図-3.5.4 地震規模と被害額及び精算金の関係(ケース 3-1)

② ケース 3-2

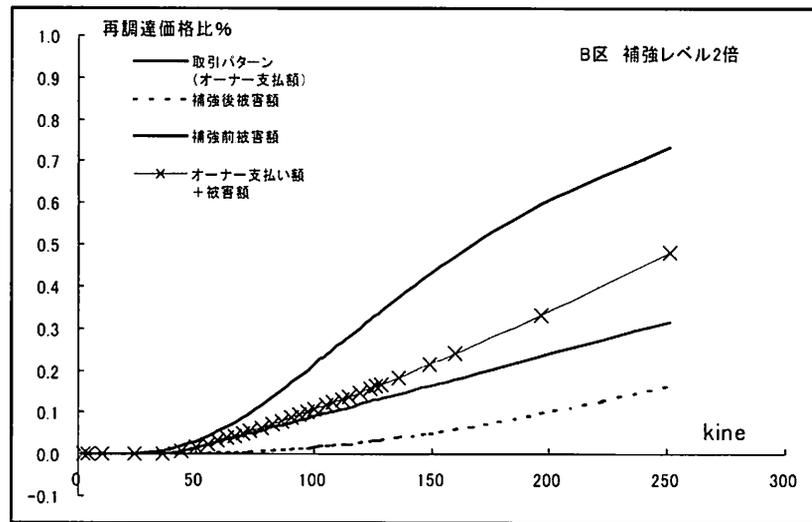


図-3.5.5 地震規模と被害額及び精算金の関係(ケース 3-2)

表-3.5.2 精算金比およびオプション価格比

| 最大地表面速度 kine | 0-40 | 50 | 100 | 150 | 200 | オプション価格比 |
|---------------|------|-------|-------|-------|-------|----------|
| 精算金比(ケース 3-1) | 0 | 0.01 | 0.06 | 0.1 | 0.16 | 0.028 |
| 精算金比(ケース 3-2) | 0 | 0.015 | 0.091 | 0.164 | 0.234 | 0.042 |

(3) 課題

上記検討で算定された各オプション価格比 (PR) がそれぞれの補強効果を得るための補強工事費 (Cr) に一致するか否かの検討が必要になる。

オプション価格比 $PR = \text{補強工事費 } Cr$ が成り立つ場合、この商品は成立する。

オプション価格比 $PR < \text{補強工事費 } Cr$ の場合、この商品はこのままでは成立しないため、オーナーが補強費の一部を負担するなどの方法が考えられる。

3.5.3 オプション取引曲線(精算金の支払条件)

(1) 検討条件

オプション取引曲線は、償還期間内における最大地震規模とオーナーが投資家に支払う精算金の条件を定義するものである。オプション取引曲線を変更することによって、オプション価格を調整することが可能になる。本金融商品では、オプション価格は耐震補強費の一部又は全部を構成するものであるため、必要な耐震補強費を満足するようにオプション取引曲線を設定することになる。一般的なオプション取引曲線の形状は、下記のような直線で表される。

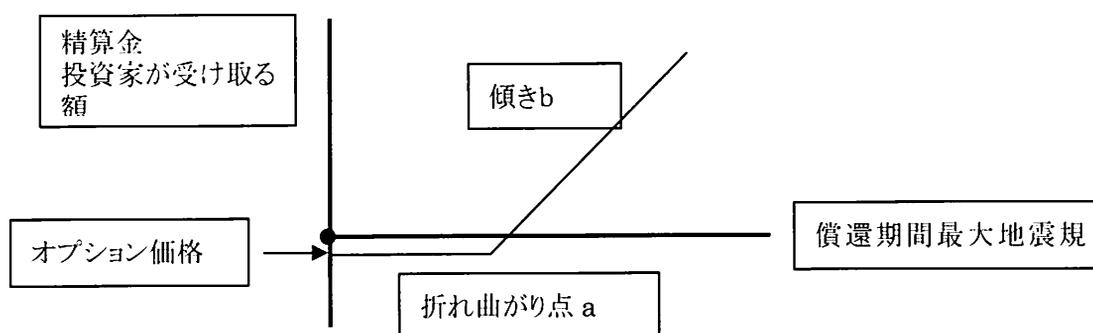


図-3.5.6 オプション取引曲線

オプション取引曲線の変動パラメータとして折れ曲がり点 a の地震規模とその後の傾き b が考えられる。本検討では、以下の 3 ケースについて検討する。

表-3.5.3 精算金比およびオプション価格比

| ケース | 折れ曲がり点 a(kine) | 傾き b | 100kine 時精算金 (再調達価格比) | オプション価格比 |
|---------|----------------|------|--------------------------|----------|
| ケース 4-1 | 40 | 1 倍 | 0.060 | 0.028 |
| ケース 4-2 | 20 | 1 倍 | 0.080 | 0.062 |
| ケース 4-3 | 40 | 2 倍 | 0.121 | 0.056 |

検討上の共通項目

- i ハザード曲線
2節のケース 2-2(B 区)
- ii 対象建物(被害率) (図-3.5.7~9)
1971 年以前に建設された RC 造(全壊)文献 3
- iii 償還年数(30 年)

ii 補強レベル(図-3.5.7~9)

1982-1994年に建設されたRC造のレベルに補強するものとする。従って、被害率は、同年代に建設されたRC造の被害率曲線(全壊)(文献3)を用いる。

(2) 検討結果

各ケースのオプション取引曲線で計算した結果得られるオプション価格を表-3.5.3に示す。この結果、折れ曲がり点 a の地震規模を小さくする、すなわち、小規模地震でも精算金の支払が発生する場合(ケース4-2)、オプション価格は大きくなり、折れ曲がり後の直線の傾き b が大きくなると、精算金が多くなるため、オプション価格も大きくなる。

以上、オプション取引曲線を変動させることにより、必要な耐震補強費に見合うオプション価格の設定が可能になることが分かる。

① ケース 4-1

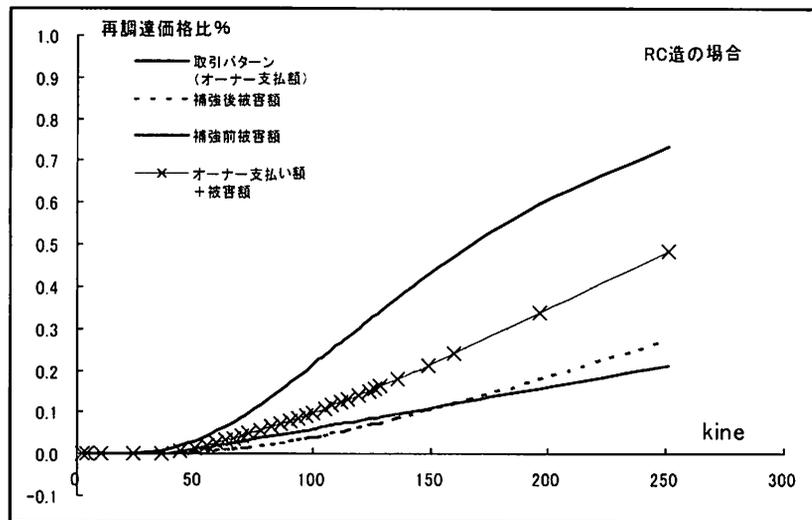


図-3.5.7 地震規模と被害額及び精算金の関係(ケース4-1)

② ケース 4-2

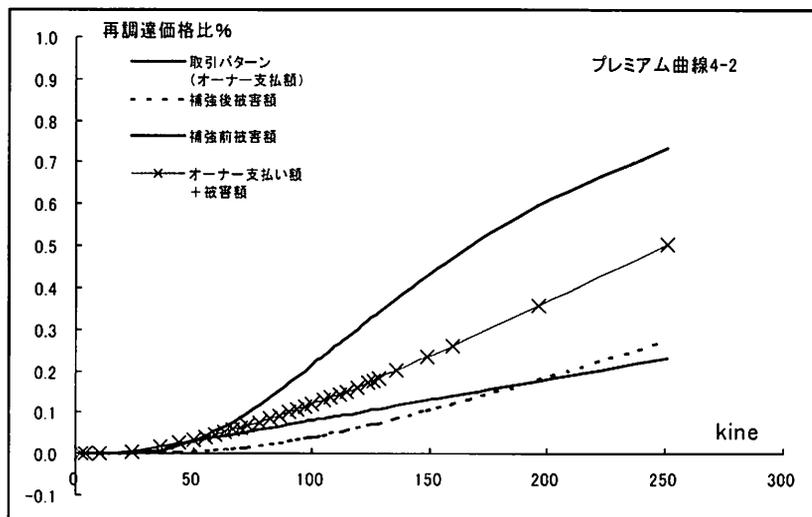


図-3.5.8 地震規模と被害額及び精算金の関係(ケース4-2)

③ケース 4-3

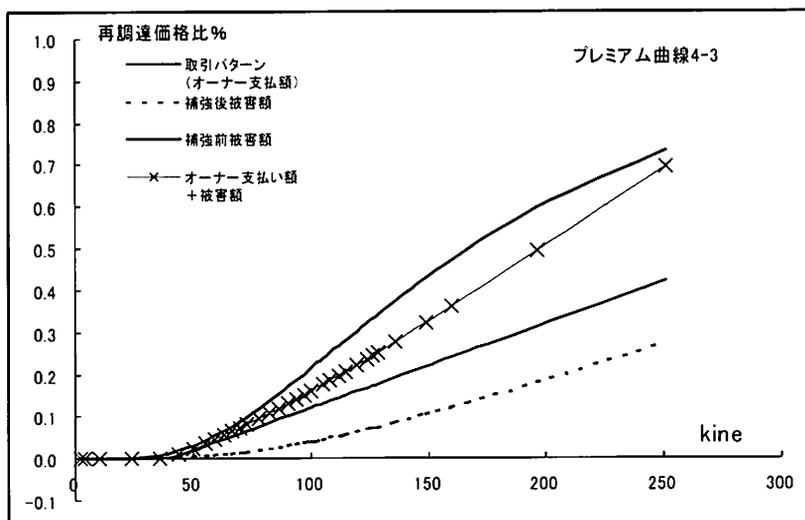


図-3.5.9 地震規模と被害額及び精算金の関係(ケース 4-3)

3.5.4 償還年数

本金融商品は、償還年数を定め、その期間内に発生する最大規模の地震に対して精算金が確定する仕組みになっている。

償還期間中の精算金の支払方法の基本的な考え方を以下に示す。

地震が発生した場合、契約期間中過去最大である場合、契約条件に沿ってその地震規模に対応する精算金を支払う。その後、最大規模を更新した場合は、当該地震規模に対応した精算金を追加で支払うものとする。この際、以前に支払った金額分は控除する。精算金は一時金として支払うか分割して支払うかは、契約条件に拠るものとする。

また、一般的には、償還年数が長い方が、地震発生確率は高くなるため、同じオプション取引曲線を用いた場合、オプション価格は大きくなる。つまり、必要な耐震補強費を捻出し易くなるといえる。

(1) 検討条件

- ① ケース 5-1 償還期間 10 年
- ② ケース 5-2 償還期間 30 年
- ③ ケース 5-3 償還期間 60 年

検討上の共通項目

- i ハザード曲線
 - 2節のケース 2-2(B 区)
- ii 対象建物(被害率)(図-3.5.3)
 - 1971 年以前に建設された RC 造(全壊)
 - 被害率曲線は文献 3 による

iii 補強レベル((図-3.5.3))

1982-1994年に建設されたRC造のレベルに補強するものとする。従って、被害率は、同年代に建設されたRC造の被害率曲線(全壊)(文献3)を用いる。

iv オプション取引曲線((図-3.5.3))

3.5.1節の共通項目ivと同じ

(2) 検討結果

検討の結果、表-3.5.4に示すように償還期間が長くなるとオプション価格比は大きくなる。この例では、償還期間を10年とした場合は、耐震補強費用として再調達価格の0.9%しか投じることができないが、30年、60年とした場合は、2.8%、5.6%と投じることが出来る費用が大きくなる。

投資家の購入価格(オプション価格)が耐震補強費として使われるため、耐震補強比が十分でない場合は、償還期間を長くすることも考えられる。

表-3.5.4 償還期間の違い

| ケース | オプション価格比(再調達価格比) |
|----------------|------------------|
| ケース5-1 償還期間10年 | 0.009 |
| ケース5-2 償還期間30年 | 0.028 |
| ケース5-3 償還期間60年 | 0.056 |

3.5.5 割引率の影響

金融商品としてその価値を判断するためには、償還期間にわたる将来の精算金を現在時点に割引き、現在価値を算出する必要がある。しかしながら本金融商品の場合、地震発生時期に応じて精算金の支払が決まるため、時期と金額を確定することが困難であり、現在価値を算定することが困難という問題点がある。

3.5.6 耐震補強ローンとの比較

建物オーナーの立場では、いくつかの耐震対策のオプションと本金融商品を比較して、その優位性の高いものを選択するものと考えられる。

本商品と比較対照となり得る対策として、耐震補強ローンを組んで行う方法がある。この場合、耐震補強費は確定し、返済条件によって、支払総額も確定する。一方、本金融商品は、地震発生確率や被害確率に依存するため、最終的な支払額は確定していない。そのため、この2者を比較するのは、確定論と確率論で決定されたものを比較する必要があり、判断が難しいといえる。

3.5.7 他の金融商品との比較

投資家の立場では、多数の他の金融商品との比較のなかで、本商品の位置づけを判断するものと考えられる。例えば、投資家のポートフォリオの中で、本商品の存在が価値を高めると判断される場合に本商品が成立すると考えられる。

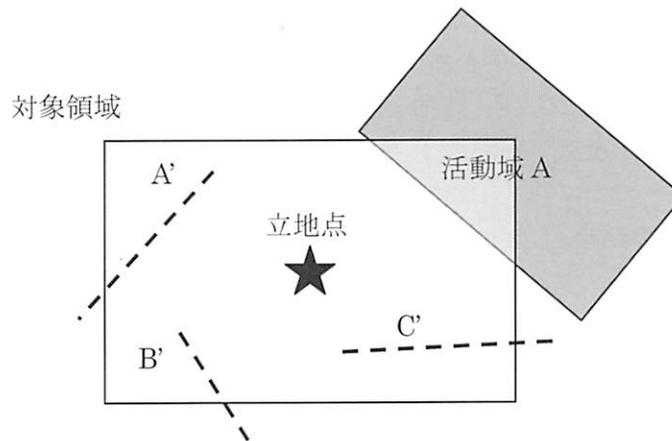
多数の金融商品の中には、投資効果が確定的でリスクが少ないものから、リスクの大きいものまで存在する。それらの中で、本商品の位置づけを明解にしていく必要がある。

3.6 提案モデルのケーススタディ 2(ハザード指標をマグニチュードにした場合)

ケーススタディ 2 では、ハザード指標としてマグニチュードを用いた場合の提案モデル検討の流れを示す。提案モデルに基づくリスクファイナンス商品は、ハザード指標によってその償還金変動する。従って、モラルハザードなどのリスクを低減するためには、より客観性の高い指標を用いることが要求される。ケーススタディ1では、ハザード指標として地表面加速度を想定した場合の流れを示したが、地震発生時に地表面加速度の情報を収集し特定位置に置ける値を客観的に評価することには困難が予想される。そこで、より信頼性が高く、特定する際の客観性・容易性を考慮してマグニチュードを用いて評価することを試みた。

3.6.1 地震ハザード(マグニチュードと発生確率の関係)

- ① 対象領域内に存在する評価すべき活動域を特定する。(文献 4)
 - 1) 活断層に基づいて設定した大地震発生活動域
 - 2) 太平洋プレートに沿って設定した中小地震発生活動域(上面)
 - 3) 太平洋プレートに沿って設定した中小地震発生活動域(下面)
 - 4) フィリピン海プレートに沿って設定した中小地震発生活動域
 - 5) 陸側プレートに沿って設定した中小地震発生活動域



- ② 対象領域内の各活動域の地震規模(マグニチュード)の頻度分布を算定する。(文献 5)

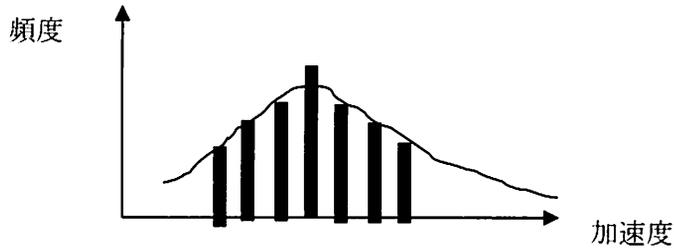
3.6.2 マグニチュードと被害額の関係

- ① 各地震のマグニチュードと対象構造物立地点での地表面加速度(又は速度)の関係を求める。

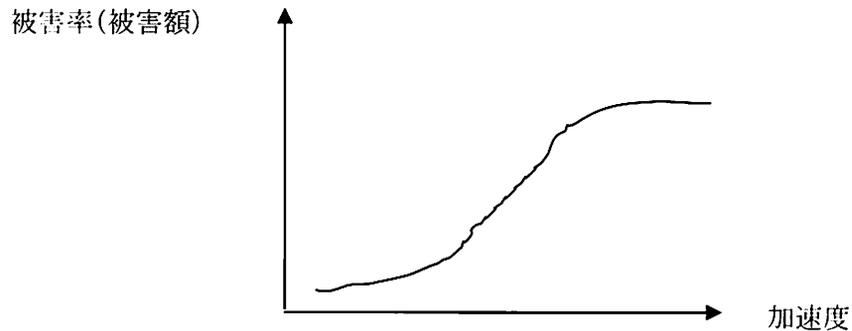
距離減衰式から推定(例: Annaka&Yashiro 式)(文献 4、文献 7)

- ② 各マグニチュード毎(例えば 0.1 毎)に、対象領域内の全ての活動域を考慮した対象構造物立地点での地表面加速度(又は速度)の確率分布形を特定する。(文献4、文献 6)

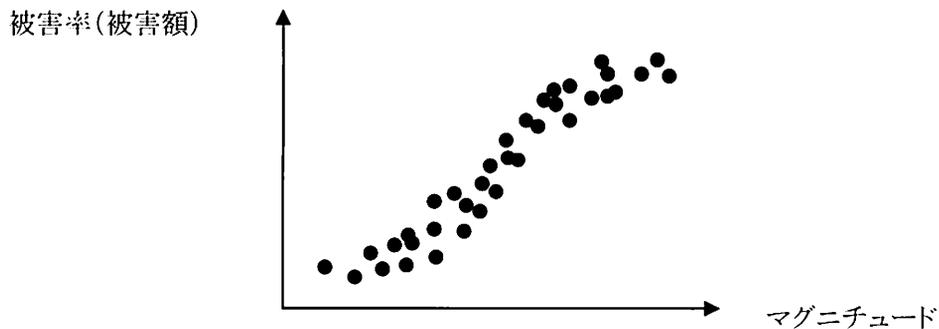
例 任意のマグニチュードに対して



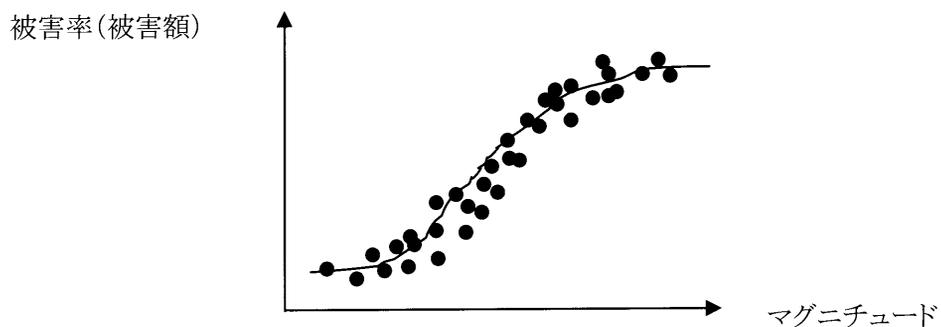
- ③ 対象構造物の地表面加速度(又は速度)と被害率及び被害額の関係(被害率曲線)を決定(過去の被害調査等を参考にする。)



- ④ ②で特定した分布形を想定したモンテカルロ法により、任意マグニチュード毎に地表面加速度(又は速度)を発生させ、③で設定した関係をもとに、マグニチュードと被害額の関係を求める。



⑤ ④で求めた分布状況から、非超過確率を考慮した被害率曲線を求める。



3.6.3 パラメトリックスタディ

本節では、具体的に対象建物の立地場所を特定し、ハザード指標としてマグニチュードを用いた場合の地震発生対象領域を2種類仮定して、提案モデルへの適用を検討した。

対象構造物立地点: 都庁(東京都新宿区新宿区西新宿2丁目)

地震発生対象領域:

ケース1 40km 四方

ケース2 100km 四方

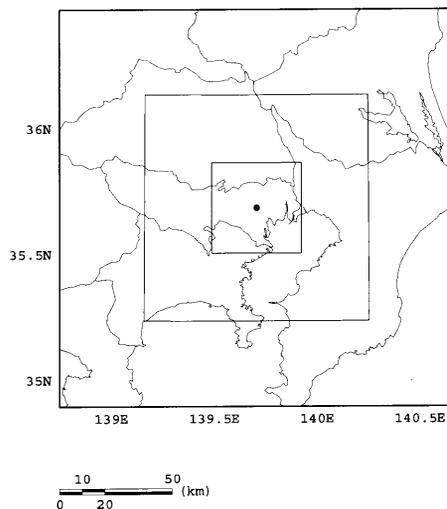


図-3.6.1 地震発生対象領域(40km 四方及び 100km 四方)

対象活動域:(文献4)

- 1) 活断層に基づいて設定した大地震発生活動域 図-3.6.2
- 2) 太平洋プレートに沿って設定した中小地震発生活動域(上面)図-3.6.3
- 3) 太平洋プレートに沿って設定した中小地震発生活動域(下面)図-3.6.4
- 4) フィリピン海プレートに沿って設定した中小地震発生活動域 図-3.6.5
- 5) 陸側プレートに沿って設定した中小地震発生活動域 図-3.6.6

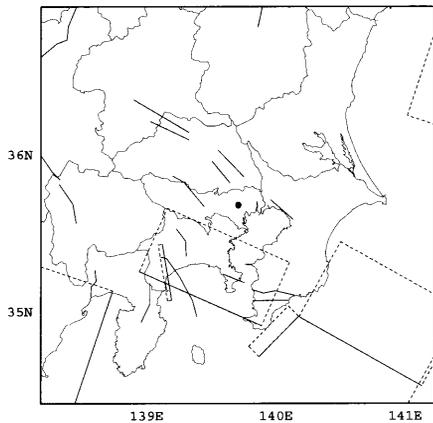


図-3.6.2 活断層に基づいて設定した
大地震発生活動域

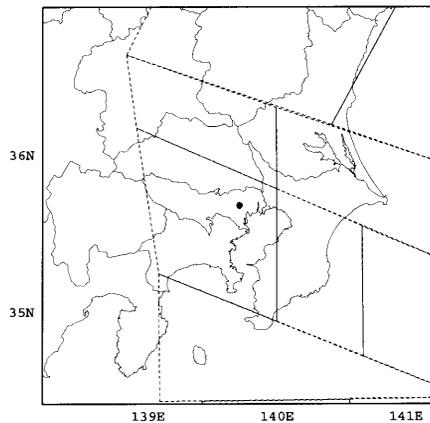


図-3.6.3 太平洋プレートに沿って設定した中
小地震発生活動域(上面)

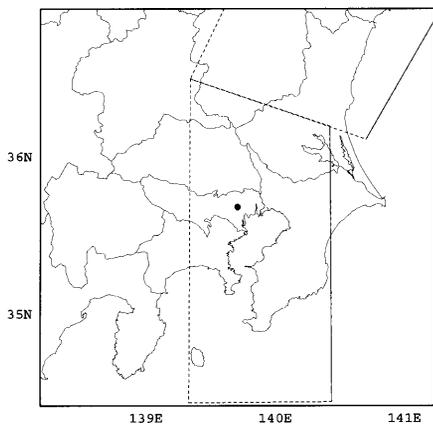


図-3.6.4 太平洋プレートに沿って設定した中
小地震発生活動域(下面)

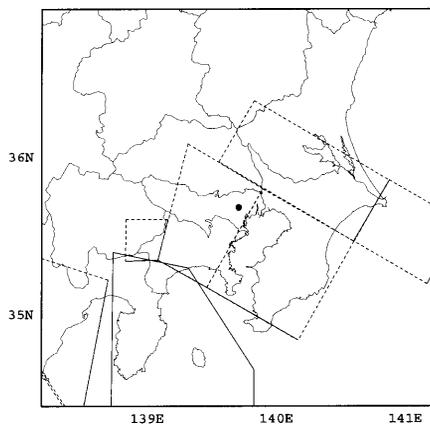


図-3.6.5 フィリピン海プレートに沿って設定し
た中小地震発生活動域

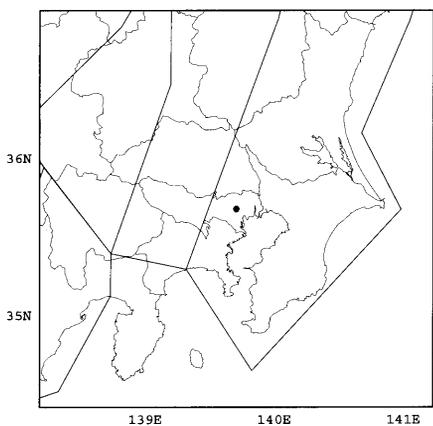


図-3.6.6 陸側プレートに沿って設定した中小
地震発生活動域

① 対象地域内地震発生活動域による発生マグニチュード頻度(震源毎)の算定

対象地域内に存する各地震発生活動域の諸元(断層長さ・最大マグニチュード・再現期間・活動域深さ・G-R式の定数Aおよび係数bなど)に基づき、マグニチュード5から各活動域上限マグニチュードまでを0.1ずつ変動させ、各マグニチュードの発生頻度を算定した。その結果を図-3.6.7に示す。図-3.6.7a)、b)は、それぞれ対象領域を40km、100kmとした場合である。各ポイントは、対象地域内に存する各地震発生活動域の活断層面積を、検討するマグニチュードに比例して設定し、対象活動域内を網羅するようにずらしながら発生源とし頻度を算定したものである。いずれも、マグニチュードが大きくなると年発生頻度は低下していくのが分かる。また、同じマグニチュードの場合を対象領域の違いで比較すると、領域が大きいほど年発生頻度が大きくなっていることが分かる。(文献4、5)

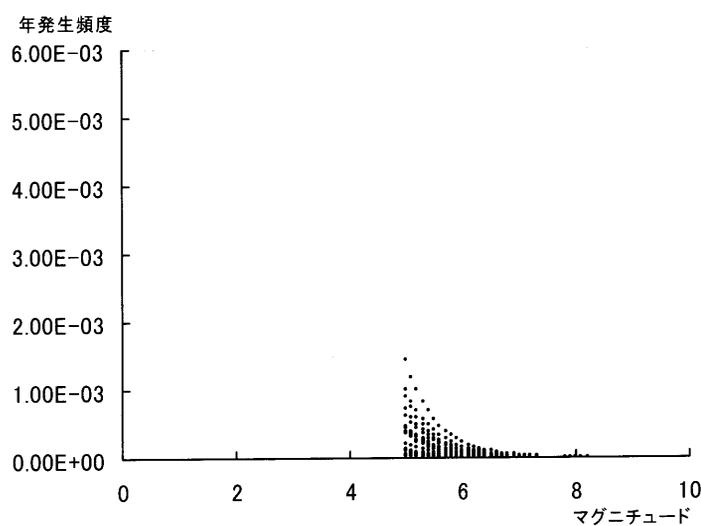


図-3.6.7a) 40km 四方領域の発生マグニチュード頻度

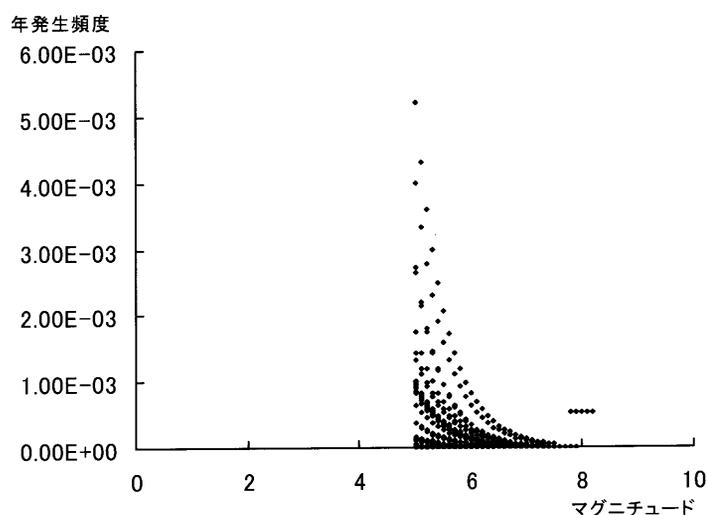


図-3.6.7b) 100km 四方領域の発生マグニチュード頻度

② 対象地域内発生地震のマグニチュードと加速度の関係

①で検討した対象地域内発生地震に対し、距離減衰式により、対象建物立地場所における加速度を算定する。ここでは、距離減衰式として、文献4に基づき、文献7のAnnaka&Yashiroの式を用いている。

$$\log A = 0.606M + 0.00459hc - 2.136 \log d - 0.270$$

$$d = R + 0.334 \exp[0.653M]$$

A:工学基盤位置での最大加速度 M:気象庁マグニチュード

R:最短距離 hc=破壊面の中心深さ

算定の結果を図-3.6.8に示す。図-3.6.8a)、b)は、それぞれ対象領域を40km、100kmとした場合である。これより、マグニチュード毎に算定される加速度は、一定の分布になることが分かる。領域が40km 四方と100km 四方を比較した場合、40km 四方の場合は、マグニチュード毎の分布の範囲はほぼ一定といえるのに対し、100km 四方の場合は、マグニチュードが大きくなると分散の程度が大きくなっているのが分かる。

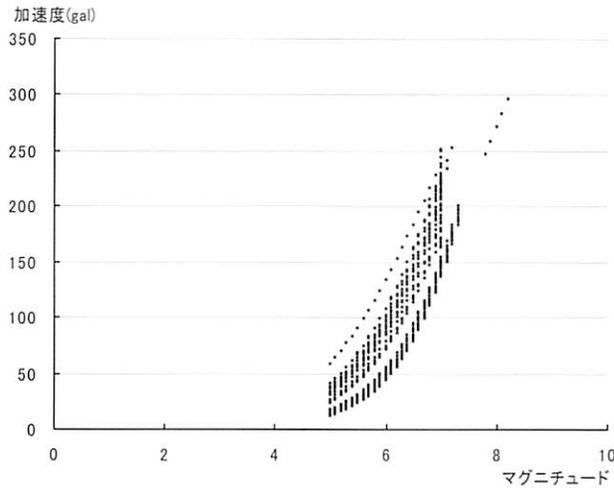


図-3.6.8a) 対象地域内発生地震のマグニチュードと加速度の関係(40km 四方)

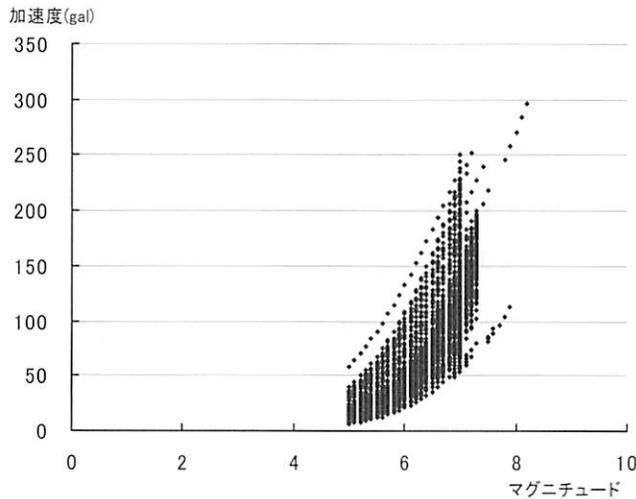


図-3.6.8b) 対象地域内発生地震のマグニチュードと加速度の関係(100km 四方)

各マグニチュードにおける加速度の分布の例として、領域 100km のケースに付いてマグニチュード 6 と 7 の場合を図-3.6.9 に示す。それぞれ対数正規分布で確率分布をモデル化した。マグニチュード 6 の場合、平均 46.38gal、標準偏差 13.92 で、マグニチュード 7 の場合、平均 132.12gal、標準偏差 33.39 と仮定した。それぞれ、25、50、75 パーセントイル時の加速度を示している。中央値(50 パーセントイル)は、マグニチュード 6 の時 44.42gal、マグニチュード 7 の時 128.09gal になる。

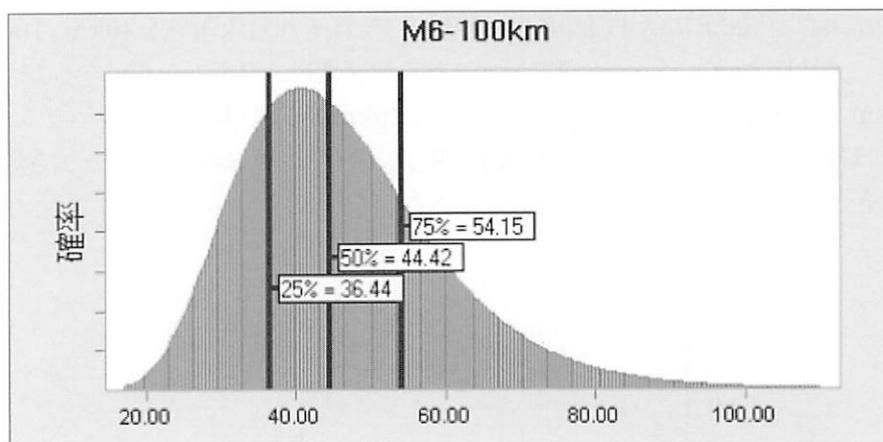


図-3.6.9a) 加速度分布仮定(マグニチュード 6 の場合(100km 四方))

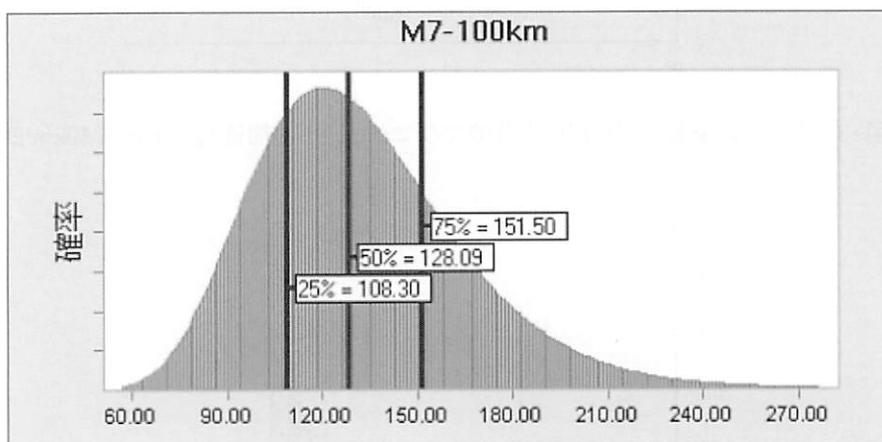


図-3.6.9b) 加速度分布仮定(マグニチュード 7 の場合(100km 四方))

③ 対象地域内における発生マグニチュード年発生確率の算定

①で得られた、領域内の活動域で発生する地震の年発生確率を累加することにより、対象地域内における発生マグニチュード年発生確率を算定する。図-3.6.10 に領域 40km と 100km の場合

の年発生確率を示す。領域が大きくなると、同じマグニチュードが発生する確率は 5~6 倍程度になる。2 ケースの面積比が 6.25 倍であり、ほぼ面積比に比例して発生確率が増加している。

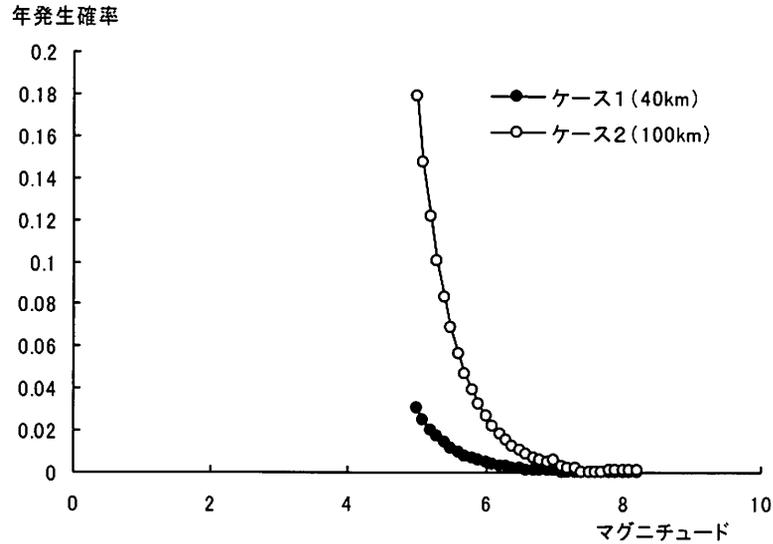


図 3.6.10 活動領域内の発生マグニチュード年発生確率

④ 被害率曲線の仮定

構造物の被害の特性は、対象構造物が立地する点における加速度(又は速度)と被害率を関連つけて示されることが多い(例 文献3)。過去の震災の被害調査結果から、建設年代毎に、構造種別や高さ別に被害の確率が統計的に示されている。ここでは、パラメトリックスタディということで、特定の対象物を想定せずに、耐震補強をする前と後の被害率を、それぞれ破壊レベル毎に(軽微・小破・中破・大破・倒壊)仮定して検討することとした。それぞれの被害率を図-3.6.11 に示すように仮定した。図-3.6.11a)は補強前を想定したものであり、図-3.6.11b)は補強後を想定したものである。いずれの被害率曲線も対数正規分布で仮定している。

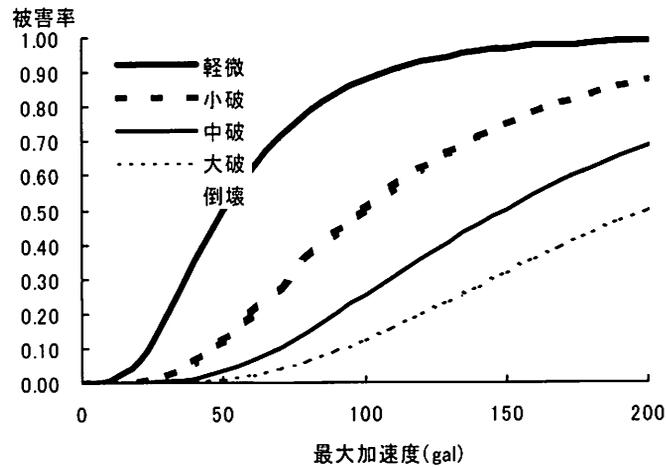


図-3.6.11a) 補強前建物被害率仮定曲線

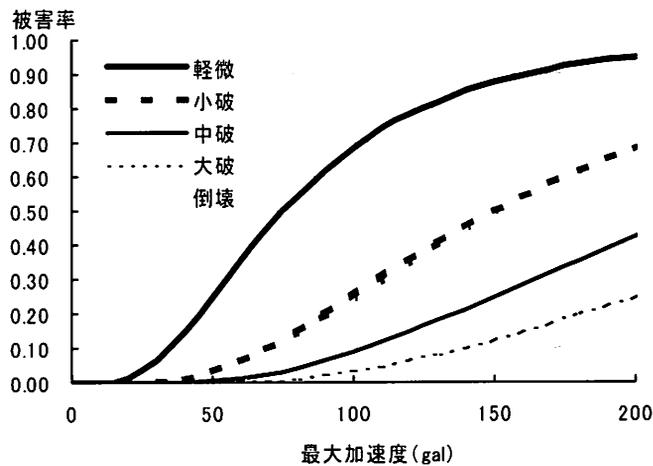


図-3.6.11b) 補強後建物被害率仮定曲線

⑤ 被害額の仮定

提案モデルを適用したリスクファイナンス商品は、リスクの尺度を貨幣額で評価することになる。従って、震災後の被害の程度を被害率ではなく被害額で評価する必要がある。ここでは、被害額を客観的に評価できるように、再調達価格との比率(以下、再調達価格比という。)で評価することとする。また再調達価格比は、被害のレベルに応じて変わるため、ここでは(軽微:小破:中破:大破:倒壊=0.1:0.2:0.4:0.6:0.8)と仮定することとした。

⑥ 耐震レベル毎の被害額率(再調達価格比)の計算および算定曲線の仮定

③で仮定した任意のマグニチュード時の加速度の確率分布と④で仮定した被害率曲線及び⑤の被害額を考慮して、加速度を確率変数と扱い、モンテカルロシミュレーションを行う。その結果、任意マグニチュードに対し被害額率(再調達価格比)が確率分布として得ることができる。対象構

造物の耐震レベルを想定し、対象領域 100km 四方の場合の解析の結果の例を図-3.6.12a)、b) に示す。それぞれマグニチュード6と7の時の被害額率(再調達価格比)の分布を示す。図中の縦線は、0、25、50、75 パーセンタイルの非超過となる被害額率を示す。従って、図-3.6.12b)の場合、マグニチュード7のとき、75%の確率で被害額率 0.28 を超えることはないと評価できる。

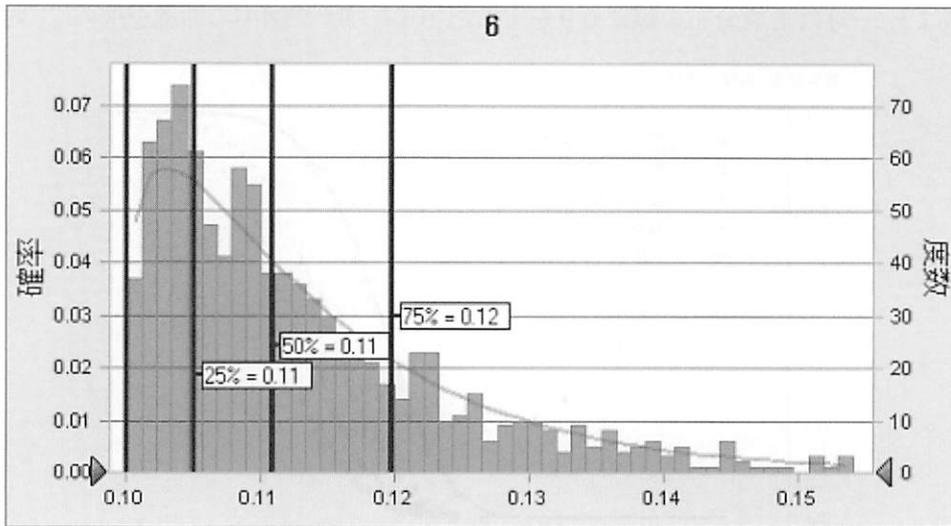


図-3.6.12a) 被害額率分布(マグニチュード6の場合(100km 四方))

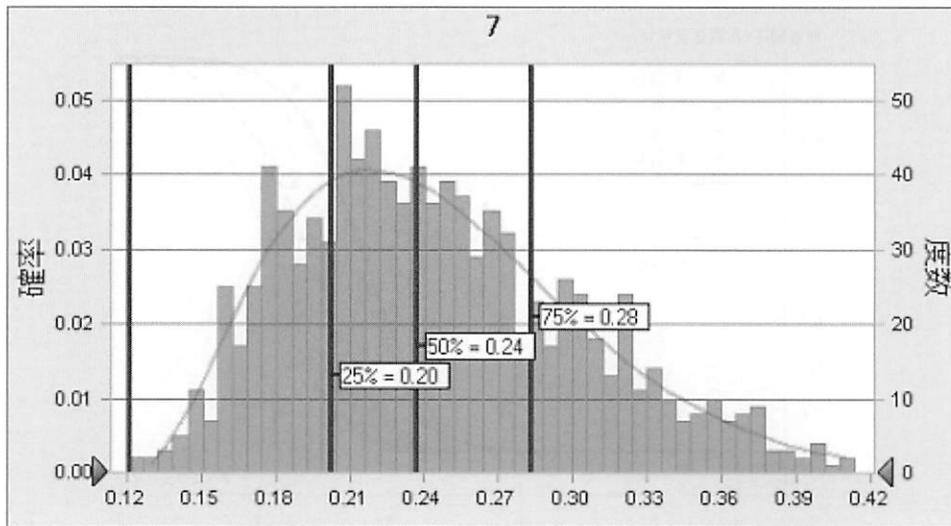


図-3.6.12b) 被害額率分布(マグニチュード7の場合(100km 四方))

各マグニチュードにおける被害額率分布から算定した 50 パーセンタイル非超過確率となる被害額率を図-3.6.13 に示す。耐震レベルを A、B、C、D の 4 段階を想定し、耐震レベルが最も低い D

に対し、耐震レベルを C、B、A と改善していくに従い被害額率は低下していくのが分かる。図-3.6.13a)と b)は対象領域を 40km、100km としたものである。今回の場合は、領域の違いによる被害額率の違いはあまり明確でないことが分かる。

また、各図の曲線は、解析で得られた被害額率を対数正規分布を応用して回帰したものである。解析の結果、マグニチュード5で各耐震レベルとも、被害額率が0、1に収束するような状況が見られた。対数正規分布で回帰した場合、通常0に収束するが、本解析結果に合わせるため、0.1に収束するように、対数正規分布の値に0.9を乗じて、0.1を加えて図中の曲線を求めている。

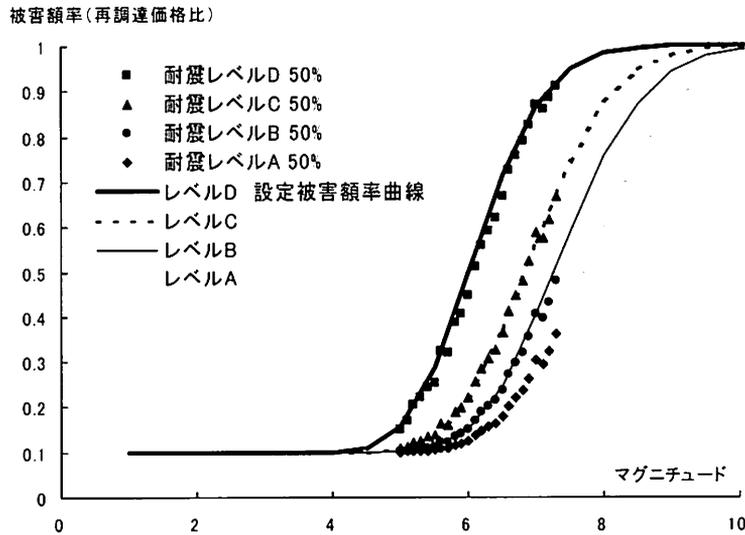


図-3.6.13a) 耐震レベル毎の被害額率曲線(40km 四方)

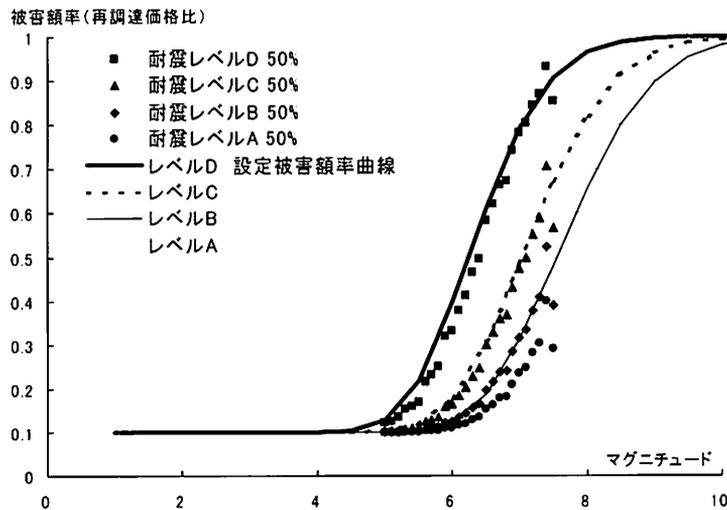


図-3.6.13b) 耐震レベル毎の被害額率曲線(100km 四方)

⑦ オプション価格の算定

⑥で求めた各耐震レベルの被害額率曲線を用い、耐震補強前・後における被害額率の低減の程度および本モデルにおいて耐震補強費用の原資となるオプション価格に影響を与えるオプショ

ン取引曲線を図-3.6.14に示す。表-3.6.1に対象領域・償還期間によるオプション価格を再調達価格の比で表現したものを示す。図-3.6.14a)は対象領域 40km 四方の場合であり、オプション取引曲線のトリガーマグニチュードを5としている。また、図-3.6.14b)は対象領域 100km 四方の場合であり、オプション取引曲線のトリガーマグニチュードを5.5としている。その結果、オプション価格は、償還期間 10 年の場合、40km の時 4.06%、100km の時 10.1%となり、償還期間が 20 年になるとそれぞれ 2 倍になる。これらオプション価格は、再調達価格に対する比で示しているため、耐震補強費用がそれぞれのオプション価格比より低い場合、本リスクファイナンスモデルは成立するといえる。

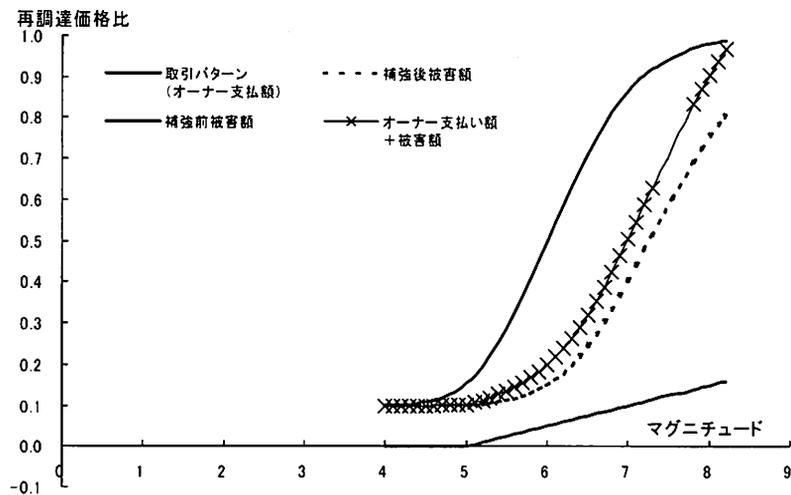


図-3.6.14a) オプション取引曲線と被害額率の関連(40km 四方)

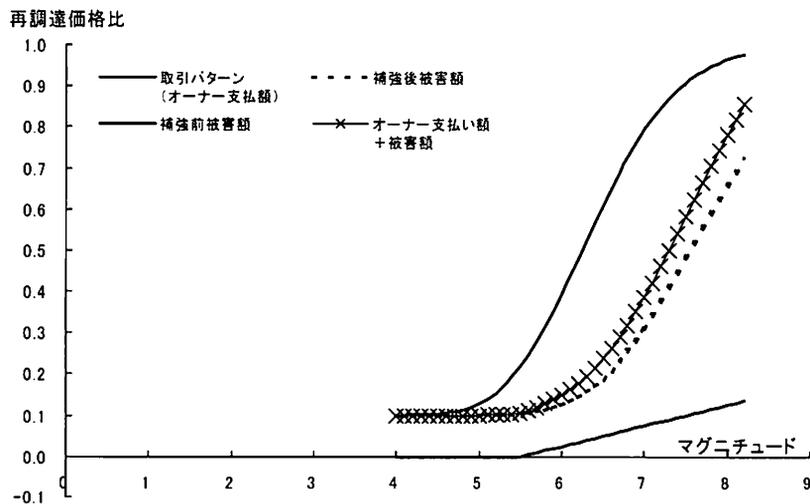


図-3.6.14b) オプション取引曲線と被害額率の関連(100km 四方)

表-3.6.1 オプション価格

| 領域 | 償還期間 | オプション取引曲線 | | | | オプション価格 (再調達価格比) |
|-------|------|-------------|-------|-------|-------|---------------------|
| | | トリガーマグニチュード | 6 | 7 | 8 | |
| 40km | 10年 | 5 | 0.05 | 0.10 | 0.15 | 4.06% |
| | 20年 | 5 | 0.05 | 0.10 | 0.15 | 8.12% |
| 100km | 10年 | 5.5 | 0.025 | 0.075 | 0.125 | 10.1% |
| | 20年 | 5.5 | 0.025 | 0.075 | 0.125 | 20.2% |

3.7 提案モデルの考察

3.7.1 WG 内意見

- ① 本モデルを設計するに当たり、ローリスクローリターンの商品やハイリスクハイリターンの商品を設計する場合どのようにするのか。

本モデルを構成する主要要素は、ハザード・建物被害確率・耐震改修後の被害確率・耐震改修費用である。これらの信頼度が商品間で同一であれば、オプション取引曲線を変えることにより、種々の特性の商品を作成することができる。すなわち、オプション取引曲線の折れ曲がり点を小さくすると、比較的小さな地震でも投資家は精算金を得ることができるが、投資額(オプション価格)に対する精算金の額は少なくなる。しかし、折れ曲がり点を大きくすると、比較的大きな地震が発生しないと精算金を得ることができないため、その確率は低くなるが、精算金は大きくなるといえる。

従って、折れ曲がり点を左から右に動かすことにより、ローリスクローリターンからハイリスクハイリターンの商品に変化していく。

- ② 耐震補強した後に、新たに活断層が見つかった場合などハザードが変わった場合にはどうなるのか。

本モデルにおいては、将来において元設計時より地震危険度が高まった場合、投資家に有利になる。本モデルでは、地震が発生すると、建物オーナーが投資家に精算金を支払う仕組みになっている。そのため地震発生確率が、当初設計時より大きくなると、投資家が精算金を受け取る確率が高くなる。逆にオーナーにとっては、危険度が高まると不利になる。

- ③ ハザード指標として地表面速度などを用いる場合、それを正確に計測する装置も必要になるのではないか。

ハザード指標としては、できるだけ客観的で透明性の高い情報を用いる必要がある。

これによってモラルハザードを小さくすることができる。従って現時点では、気象庁が発表するマグニチュードが適切といえる。

将来、建物ごとに加速度計が設置され、データが確実に得られるようになれば、加速度をハザード指標とすることもできる。

- ④ 建物の被害率は建物のいろいろな特性によって決まると思われる。1 つのハザード指標だけで判断することができるのか。

本モデルの精度を高めるためには、ハザード指標と被害確率および耐震改修費用を正確に評価する必要がある。このために掛けられるコストと実現性を考慮して現実的な判断をする必要がある。

現在用いられている被害率は、過去の震害調査結果に基づいている。その調査結果の分析方法により、活用できる被害率の種類が決まる。従って調査の範囲外の要因による違いなどを考慮する場合は、別に方法で検討する必要がある。

現時点で得ることができる範囲で、ハザード指標と被害率の相関性が高いものを選択する必要がある。

- ⑤ 投資家とオーナーの関係は、1対1なのか多対多になるのか。

本モデルは確率的な要素を多く含んでいるため、「大数の法則」に基づき対象となる耐震改修建物が多いほどリスクは分散される。投資家は、建物群に対し投資することが可能であり、リスクを分散することができる。また、オーナーは個別の建物の所在地で発生した地震規模によって支払額が影響を受けるため、大数の法則を適用することができない。しかし、制度の工夫により、オーナー同士の共済会のようなものを結成し、オーナー側もリスクを分散することが可能になると思われる。

- ⑥ 被害率関数は、実際の被害調査結果と合う部分と合わない部分があるので取り扱いに注意する必要がある。

被害率曲線の信頼性は、本モデルをオーナーに説明するうえで重要になる。従って、使用している被害率曲線の特徴がどのようなものであるかを説明する必要がある。例えば、被害額が想定を超える可能性がどの程度のあるかを把握しておく必要がある。

- ⑦ 耐震改修の費用が技術開発によって安くなった場合、どのようなことがおきるのか。

同じ耐震性能を持った補強方法が安くできる場合でも、その価格に見合ったオプション取引曲線が設定されるため、商品のリスクは変わらない。しかし、一棟当りの補強費が安くなると、投資家から集めた資金を多数の建物に当てることができるため、改修率を上げることになる。

- ⑧ 現時点で耐震補強する場合と10年後に耐震補強する場合の違いは何か。

10年間地震が無く、10年後に耐震改修を実施した場合、地震発生確率が高くなっているとすると、同じオプション取引曲線を用いている場合、オプション価格は大きくなる。10年間で耐震補強費用(必要なオプション価格が不変)が変わらないと仮定した場合、オプション取引曲線を調整して10年前と同じオプション価格にすることになる。オプション取引曲線の調整の仕方にもよるが、折れ点を変えないで曲線の傾きを変えるだけの場合は、商品のリスクは変わらないといえる。

従って、投資家の立場では、何時投資するかはあまり関係がない。一方、オーナーにとっては、10年経過して地震危険度が高まるほど、耐震補強する必要性が高くなるため、精算金は小さくて済むことになる。しかしながら、先の10年間にも耐震補強せずに被災した場合のことを考えると、早めに耐震補強をしたほうが良いと考えることもできる。

- ⑨ 被災した場合に想定以上の被害を受けて、建物を取り壊すことになった場合どうなるのか。

本事象は、本モデル設計上、想定外の状況である。建物がなくなっても、投資家とオーナー間の契約は継続すると考えられるので、オーナーにとっては非常に不利な状況になる。耐震補強方法が適切でなかった場合に上記のようなことが想定されるため、適切な設計施工が行われていることを保証する機関が必要になると共に、一定の条件下に置ける政府による救済措置も必要になるかもしれない。

3.7.2 有識者との意見交換会

耐震補強を促進させる金融商品に関する意見交換会を実施し、損害保険料率算出機構で勤務されていた保険の専門家の立場から、本WGで検討中の制度について意見交換を行った。

ゲスト:坪川博彰氏 現 防災科学技術研究所 客員研究員

元 損害保険料率算出機構

年月日:平成17年12月1日(木)

時間 :13:30~15:30

場所 :生産技術研究所 プレハブ食堂棟 2階 第7会議室

詳細は付録に示す。

3.8 今後の課題および展開

リスクファイナンスモデルを用いて、地震リスクマネジメントの1つの手法を提案した。いくつかのパラメトリックスタディを通して、本モデルの定性的な特徴を把握することができた。これにより、基本的な手法はほぼ確立することができたといえる。今後、本モデルを適用した金融商品が市場で受け入れられるためには、各変動要因について説得力をもつデータを収集し、適切にモデルに反映していく必要がある。

今後検討すべき主な項目は、地震発生確率を算定する基礎となる地震ハザードをどのように捉えるかという点と補強した前後の建造物の被害額率(再調達価格比)と補強費用の関係である。地震ハザードに付いてはより公共性が高い機関が発表しているものを用いることが必要と考えるが、異なる地震ハザードの提案に付いても検討し、確率的な判断を加えて金融商品を開発する必要があると考えている。また、建造物の被害額率と補強費用の関係も資料を多く収集すると共に、それらの信頼性を吟味し、これに付いても確率的な判断を加えていくことが必要になる。

参考文献

1. 新井伸夫、矢代晴実、福島誠一郎: 都市の防災・復興における市場原理を活用した資金調達
の提案、日本建築学会、総合論文誌 第2号、pp. 100-105.
2. 刈谷武昭: 不動産金融工学とは何か、東洋経済新報社、pp. 289.
3. 村尾修、山崎文雄: 自治体の被害調査結果に基づく兵庫県南部地震の建物被害関数、日本
建築学会構造系論文集、527、pp. 189-196、2000.
4. 建築物荷重指針・同解説 2004、日本建築学会、pp. 651.
5. 福島誠一郎、矢代晴美: 地震リスクの証券化における条件設定に関する解析、日本建築学会
計画系論文集、第555号、pp. 295-302、2002年5月.
6. 安中正、山崎文雄、片平冬樹: 気象庁87型強震記録を用いた最大地動及び応答スペクトル推
定式の提案、第24回地震工学研究発表会講演論文集、pp. 161-164、1997.
7. Annaka, T. and Yashiro, H.: Uncertainties in a probabilistic model for seismic hazard analysis in
Japan, Second International Conference on Computer Simulation in Risk Analysis and Hazard
Mitigation, Risk Analysis II, pp.369-378, 2000.10.

4. まとめ

国内の地震環境は切迫性を帯び、いつ何時大きな地震が襲来するかわからない状況となってきたが、それに対する準備が整っているとは言い難い。また、地震災害だけでなく、風水害や雪害なども近年では大きな被害を出しており、今後の自然災害との戦いは長く続いていく。

都市のサステナビリティを考える場合に地震災害は大きな問題である。特に、建造物の耐震性の確保は非常に重要な問題であり、地震によって建物が倒壊を免れることは、人命保全や都市インフラの機能維持などから真っ先に取り組む課題である。本 WG では、そのような観点から、「耐震補強推進のための地震リスクファイナンス金融商品の開発」を一つのテーマとして採り上げた。また、地震災害が起こった後の効率的な対応により、この後の2次災害を減らし、復旧を早めることが可能である。そのためには災害情報の有効な活用が不可欠であり、如何に災害情報を早く収集し、関係者で共有できるかが対応の鍵を握る。そのような観点から、もう一つのテーマとして「災害情報データベースの構築法」を採り上げた。

2つのテーマに関しては、まだ検討の途上であり、各 SWG の活動報告で示したような課題が多く残されている。「災害情報データベースの構築法」に関しては、少ない過去の対応記録の中から情報の流れと対応を把握して、災害情報という観点からその理想的なあり方を検討していく必要がある。また、「耐震補強推進のための地震リスクファイナンス金融商品の開発」は、骨格モデルは固まってきたものの、商品としての魅力や普及に関するスタディを行って行く必要がある。研究委員会として残された時間はそう多くないが、少しでも有効な研究成果が残せるようメンバーで力を合わせていきたい。

5. 活動経過

【平成16年度】

第1回 WG

- ・日 時:2004年6月2日(火) 14:00～16:30
- ・場 所:東京大学生産技術研究所 ICUS レクチャールーム
- ・出席者:今村・二木・三富(アジア航測)、中園(鹿島建設)、山崎(国際興業)、高橋(清水建設)、田中(竹中工務店)、目黒教授・天野教授(東京大)、高田(東京電力)、福島(東電設計)、山田(三井住友建設)
- ・議 題:今年度の防災WGに関する活動テーマ
- ・議事内容
 - ・目黒先生からの研究テーマの候補に関する提案があり、これに関してメンバー間での意見交換を行った。

第2回 WG

- ・日 時:2004年7月28日(水) 16:00～18:00
- ・場 所:東京大学生産技術研究所 ICUS レクチャールーム
- ・出席者:二木・三富(アジア航測)、中園(鹿島建設)、山崎(国際興業)、高橋(清水建設)、田中(竹中工務店)、目黒教授・天野教授・吉村助手(東京大)、貫井(東京電力)、福島(東電設計)
- ・議 題:WGの研究テーマとそれに関する情報収集
- ・議事内容
 - ・目黒先生から災害のデータベース構築やマニュアルに関する研究テーマの具体的なイメージが示された。また、筑波大学・村尾先生から「日本社会に適した危機管理システム基盤構築 (H15年度科学技術振興調整費研究)」の講義を受けた。

第3回 WG

- ・日 時:2004年11月1日(月) 14:00～17:00
- ・場 所:東京大学生産技術研究所 ICUS レクチャールーム
- ・出席者:三富・加藤(アジア航測)、深澤(鹿島建設)、山崎(国際興業)、高橋(清水建設)、松本(竹中工務店)、目黒教授・吉村助手・高島・近藤・大山・阿部(東京大)、高田(東京電力)、福島(東電設計)、山田(三井住友建設)
- ・議 題:目黒メソッドによる地震時の発生事象、耐震補強の推進制度(提案)
- ・議事内容
 - ・目黒先生より、目黒メソッドの背景として情報共有標準化WGの活動等の紹介があった。また、メンバー各自が地震発生時に時系列で発生する事象をWGの開催前に書き出したものについて、目黒研の大山氏から分析結果が示された。
 - ・山田委員から、既存不適格建築物の耐震補強の推進制度に関する提案があった。

第4回 WG

- ・日 時:2004年11月16日(火) 10:00~12:00
- ・場 所:東京大学生産技術研究所 ICUS レクチャールーム
- ・出席者:加藤(アジア航測)、高橋・平間(清水建設)、松本(竹中工務店)、目黒教授・吉村助手・近藤・大山(東京大)、福島(東電設計)、山田(三井住友建設)
- ・議 題:耐震補強の推進制度、災害データベース
- ・議事内容
 - ・前回に提案のあった耐震補強の推進制度に関して継続的な審議を行った。
 - ・目黒先生から、新潟県中越地震で得られた情報を整理し、メンバーで様々な意見を出し合ってデータベースをよいものに構築していくことを行う提案があった。

第5回 WG

- ・日 時:2005年3月2日(水) 15:00~18:00
- ・場 所:東京大学生産技術研究所 プレハブ棟2階 第五会議室
- ・出席者:高橋(清水建設)、松本(竹中工務店)、目黒教授・吉村助手・近藤・大山・阿部(東京大)、福島(東電設計)、山田(三井住友建設)
- ・議 題:防災WG中間報告書、来年度の活動計画、その他
- ・議事内容
 - ・中間報告書の報告内容の確認を行い、報告事項の修正・追加を行った。
 - ・2つのSWGに関して来年度の実施内容を議論した。
 - ・目黒研究室の学生から、防災に関する研究成果の発表があった。

【平成17年度】

第1回 WG

- ・日 時:2005年4月19日(火) 12:30～13:00
- ・場 所:東京大学生産技術研究所 プレハブ棟2階
- ・議 題:新年度メンバーの顔合わせ

第2回 WG

- ・日 時:2005年5月17日(火) 10:00～12:30
- ・場 所:東京大学生産技術研究所 ICU センター長室
- ・出席者:高橋(清水建設)、志波(大成建設)、田中・松本(竹中工務店)、目黒教授・吉村助手・近藤・阿部(東京大)、貫井(東京電力)、山田(三井住友建設)
- ・議 題:災害情報 SWG に関連した情報提供、今後の活動
- ・議事内容

(1) 災害情報データベースの構築

- ①危機管理対応情報データベースに関する話題提供 (目黒研究室・近藤)
- ②今後の方針に関する討議

- ・適切な災害対応するには、どんな情報がいつのタイミングで必要なのを知り、そこから理想とする対応を検討する必要がある。そのための第一段階として、新潟県中越地震での自治体(長岡市)の行動を例にとり、KJ法を使って対応のあり方を討議することにした。

第3回 WG

- ・日 時:2005年7月5日(火) 15:00～17:30
- ・場 所:東京大学生産技術研究所 ICUS レクチャールーム
- ・出席者:三富(アジア航測)、山崎(国際興業)、高橋(清水建設)、田中・松本(竹中工務店)、目黒教授・吉村助手・高島・阿部(東京大)、貫井(東京電力)、福島(東電設計)、山田(三井住友建設)
- ・議 題:新潟県中越地震の水道局の対応、制度設計の進捗状況(説明)
- ・議事内容

(1) 災害情報データベースの構築

- ・長岡市の水道局の仕事を例に取り、理想的な対応と行動に必要な情報を KJ 法により検討した。

(2) 耐震補強推進のための地震リスクファイナンス金融商品

- ・提案する金融商品が、建物オーナー側及び投資家側双方にとって、成り立得るものであるか否か、幾つかのパラメータについて検討した結果に関する報告を山田幹事より受けた。

第4回 WG

- ・日 時:2005年8月31日(水) 14:00～17:15
- ・場 所:東京大学生産技術研究所 ICUS レクチャールーム
- ・出席者:三富・加藤・野田(アジア航測)、高橋(清水建設)、志波(大成建設)、田中・松本(竹中工務店)、目黒教授・吉村助手・近藤・阿部(東京大)、貫井(東京電力)、山田(三井住友建設)、平山(人と防災未来センター)
- ・議 題:KJ法の結果説明、水道事業や兵庫県南部地震の水道局の対応(レクチャー)
- ・議事内容
 - (1) 制度設計SWG:
 - ・本防災WGの活動の趣旨説明(高橋)
 - ・前回KJ法によりまとめた結果の説明(目黒研・近藤)
 - ・平山修久氏(人と防災未来センター専任研究員)によるコメント
 - ・全体討議

第5回 WG

- ・日 時:2005年10月6日(木) 10:00～12:30
- ・場 所:東京大学生産技術研究所 ICUS レクチャールーム
- ・出席者:三富・加藤・野田(アジア航測)、高橋(清水建設)、志波(大成建設)、松本(竹中工務店)、目黒教授・阿部(東京大)、山田(三井住友建設)
- ・議 題:SWGの進捗状況(説明)と今後の活動方針
- ・議事内容
 - (1) 制度設計SWG:耐震補強推進のための地震リスクファイナンス金融商品の開進捗状況の説明(山田)、今後の方針に関する討議、フォーラム(意見交換会)の開催案について
 - (2) 災害情報SWG:今後の方針に関する討議

第6回 WG

- ・日 時:2005年11月1日(火) 9:30～12:00
- ・場 所:東京大学生産技術研究所 ICUS センター長室
- ・出席者:野田(アジア航測)、高橋(清水建設)、志波(大成建設)、松本(竹中工務店)、吉村助手・阿部・鈴木(東京大)、山田(三井住友建設)
- ・議 題:兵庫県南部地震における水道局の対応、制度設計の活動方針
- ・議事内容
 - (1) 災害情報SWG:兵庫県南部地震における水道局の対応
 - ・水道局と他の機関との情報伝達に関する報告(目黒研・鈴木さん)
 - ・水道局、自衛隊、日本水道協会、消防、電力などの各機関の対応に関する討議や疑問点の洗い出し
 - ・SWGにおける検討モデルとの比較
 - (2) 制度設計SWG:前回の質疑への回答と今後の検討について

第7回 WG

- ・日 時:2005年12月1日(木) 13:00～15:00
- ・場 所:東京大学生産技術研究所 プレハブ食堂棟2F 第7会議室
- ・出席者:野田(アジア航測)、高橋(清水建設)、志波(大成建設)、松本(竹中工務店)、目黒教授・吉村助手・阿部・鈴木(東京大)、山田(三井住友建設)
- ・議 題:地震リスクファイナンスに関する現状、今後の活動方針
- ・議事内容
 - (1) 制度設計SWG:耐震補強推進のための地震リスクファイナンス金融商品に関する専門家との意見交換
 - ・防災科学技術研究所の坪川博彰氏を招き、本SWGで検討している金融商品に関するコメントとメンバーとの意見交換を実施。
(討議の内容に関しては、議事録およびSWGの中間報告を参照。)
 - ・現在の保険業界の動向についての話題提供
 - (2) 災害情報SWG:今後の方針に関する討議

第8回 WG

- ・日 時:2005年12月13日(火) 15:30～17:30
- ・場 所:東京大学生産技術研究所 ICUSレクチャールーム
- ・出席者:野田(アジア航測)、高橋(清水建設)、志波(大成建設)、松本(竹中工務店)、目黒教授・吉村助手・阿部・鈴木(東京大)、山田(三井住友建設)
- ・議 題:地震時の水道局の対応
- ・議事内容
 - (1) 災害情報SWG:兵庫県南部地震における水道局の対応の情報の流れを中心とした整理
 - ・水道局と他の機関との情報伝達に関する整理結果の報告(目黒研・鈴木さん)
 - ・被害把握、応援要請、応急給水、応急復旧の各活動での情報の流れと対応に関して討議
 - ・討議結果の対応シートへの反映(KJ法的な整理法)

第9回 WG

- ・日 時:2006年3月14日(火) 10:00～12:00
- ・場 所:東京大学生産技術研究所 ICUSレクチャールーム
- ・出席者:野田(アジア航測)、高橋・平間(清水建設)、志波(大成建設)、松本(竹中工務店)、吉村・鈴木・高原・養安・藤枝・蛭間(東大)、山田(三井住友建設)
- ・議 題:地震時の水道局の対応に関するまとめ、WGのまとめと報告書作成について
- ・議事内容
 - (1) 災害情報SWG:兵庫県南部地震における水道局の対応
 - ・これまでの兵庫県南部地震における水道局の対応のまとめの報告(東大・鈴木)
 - ・水道局の対応のまとめ方と今後の活動の方向に関する審議
 - (2) 制度設計SWG:今年度報告書案の説明

付録 専門家による講義

本WGでは、検討がある程度進んだ段階で専門家を招き、専門領域の最新の情報やWGでの活動に関する意見を提供してもらい、また質疑応答を行って知識の獲得と検討の方向性の妥当性の確認を行ってきた。以下のその概要を示す。

1. 村尾修氏(筑波大学)の講義

- ・日時：平成16年7月28日（水）（平成16年度第2回WG開催時）
- ・場所：東京大学生産技術研究所 ICUS レクチャールーム
- ・内容：日本社会に適した危機管理システム基盤構築
 - 東大在籍時に生産技術研究所における防災マニュアル作成を行った際に得られた知見等について説明があった。
 - ・防災マニュアル作成では、具体的に記述すれば情報量がどんどん増えてしまうため、どこで終わらせるかの判断が難しい。
 - ・危機管理体制がしっかりしていないと防災マニュアルは作成できない。
 - ・行動基準の設定：人命第一、被害拡大の抑止、状況把握、安否確認、報告義務、災害復旧、避難者対応
 - ・防災マニュアルは一つの側面であって、危機管理体制の確立が重要である。
 - インターネットによる情報発信システムについて
 - ・危機管理、コンテンツ、組織の3つのテーマ（柱）で研究を推進する。
 - ・これまでに、諸外国の危機管理WEBの整理や、FEMAと日本の内閣府のWEBの比較、自治体のWEBや防災組織の現状把握、危機管理WEBデザイン設計手法の検討を行った。
 - ・WEBでの情報発信を考える際に、以下の7つの視点は重要である。
 - ① 危機管理の理念の明確化
 - ② 組織内の危機管理体制の明確化
 - ③ 組織内の危機管理すべき対象
 - ④ 受信者（対象者）
 - ⑤ 情報フロー
 - ⑥ コンテンツの分類
 - ⑦ 運営と管理

2. 平山修久氏(人と防災未来センター)の講義

- ・日時:平成 17 年 8 月 31 日(水)(平成 17 年度第 4 回 WG 開催時)
- ・場所:東京大学生産技術研究所 ICUS レクチャールーム
- ・内容:兵庫県南部における神戸市水道局の対応
 - 水道事業は、地方自治体の水道事業者によって、独立採算制で運営されている。
 - ・災害対応も、水道事業者の規模に依存する。
 - ・長岡市のような人口 20 万人規模となれば、対応マニュアルをもっている。
 - 水道法では、水道事業者は平時には給水義務を課せられているが、災害時には免除される。
 - 震災時に応急給水業務に当たらなくても法的には問題ない。但し、地域防災計画には盛り込まれることが多い。
 - ・発災から6時間程度までは、「応急復旧班」の活動としては多くは無く、被害上場把握が中心となる。
 - 水道の被害情報は、水道の本局に設置される災害対策本部(自治体全体の災害対策本部が設置される場所でもある)に集められる。
 - ・重要施設である浄水場には、常駐職員が1~2名はいて、そこから情報が入ってくる。
 - ・配水池には常駐職員がいないことが多い。→状況調査に職員を派遣するか、流量・水質データのテレメータシステム*を通して状況を知る。
 - *規模の小さな事業者であっても、少なくとも浄水場と配水地には設置されている。“設計上は”、停電対策がなされている。
 - 断水エリアが見えてくるのは、配水池の流量を調べて、そこから下流の管網での断水がわかってくる。
 - ・配水管は、法律で地下埋設されることになっており、直ぐには被害(漏水)がわからない。
 - ・市民からの通報も、被害把握に取り入れられる。
 - ・配水管網の正確な被害状況を6時間以内で把握するのは非常に困難。
 - ・重要施設の状況把握については、6時間以内でないと、次の手を打てなくなる。
 - SWG のKJ法の結果に、「火災情報の収集」が入っていない。
 - ・消防の用水は、一般には水道に頼っている(東京都は例外)。→水道被害が消火活動に影響する。
 - ・火災情報は、全市の災害対策本部に入ってくる。→水道の災害対策本部にも伝わる。
 - ・消防局と水道局のコミュニケーションが有事には大切。
 - 配水池では、発災直後に、完全には配水を遮断しない。
 - ・遮断弁で止める部分と、流れるに任せる部分の両方となる。
 - ・復旧作業の過程で水を使う(通水性確認)し、消防でも水を使うため。
 - ・水道は、上流側から復旧していく(ガス管と異なり、ネットワークの最適化手法がうまく適用できない)。
 - 「協会への応援要請」は、日本水道協会の支部へ。
 - ・被害状況の連絡と支援要請を、一般には発災から数時間以内に行っている。
 - ・自分達の事業者でどれだけ対応できるのかを判断するために、被害状況を把握することが重要である。

- ・日本水道協会が、広域応援の手配をしてくれる。
- 応急給水の必要数量(被災者数)は、避難所の開設時から徐々にわかってくる。
 - ・避難所生活が解消するのは、各戸の水道とガスの復旧が終わってから。
 - ・給水の目標は、発災から3日後で3L/人日、1週間後で20L/人日、2週間後で50L/人日、1ヶ月後で100L/人(これで復旧)。
 - ・自治体で復旧の方針を事前に決めておくことが大切。
- 被害状況・復旧状況の情報共有化は、今後も重要なテーマ。
 - ・上水道と下水道とは、所管官庁の違いが有り、一体化は難しい(横浜市が上下水道局をつくったのは画期的)。しかしながら、関連性を考えなくてはいけない時代に来ている。
 - ・下水の復旧前に上水を流した事例もある。
 - ・ガス管への「さし水」は復旧を遅らす。
 - ・普段の業務で情報共有にメリットがなければ相互の乗入れは実現しないので、平常時と災害時の両方につかえる情報共有システムが必要。
- 個々の対応業務は平時でも行っているが、震災時にはそれらがいっぺんに大量に生じる。
- 災害対策本部が解散した時点で災害状況は終了したと考える。
- 水道施設の耐震化を進めるにしても、水道メーターから先の部分については、建物の所有者の問題になる。
- 震災対応する上で最悪と考えられるケース：
 - ・職員が被災すること。
 - ・水道部局の庁舎が潰れるような被害を受けること。→マッピングの情報が取り出せなくなる。
- 新潟県中越地震の被害報告を水道局も残すと思われる。



写真-付1 平山氏による講義の様子

3. 坪川博彰氏(防災科学技術研究所)による講義に関する意見交換会

- ・日時:平成 17 年 12 月 1 日(木)(平成 17 年度第 7 回 WG 開催時)
- ・場所:東京大学生産技術研究所 ICUS 食堂棟 2F 第 7 会議室
- ・内容:耐震補強を促進させる金融商品
 - 損害保険料率算出機構で勤務されていた保険の専門家の立場から、本WGで検討中の制度について意見交換を行った。
 - 討議内容
 - ・最近の地震リスクマネジメントはリスクファイナンス(保険による控除)とリスクコントロール(耐震補強による控除)の制度的融合を図る方向にある。
 - ・リスクファイナンスモデルを考える場合、その対象物を何にする(住宅か事業所かなど)かで適切な仕組みが変わる。
 - ・日本の地震リスクを対象にした金融商品を海外で売る場合には、高利回りを要求される。
 - ・賃貸住宅を先行して補強を進めていくことが必要ではないか。自用の建物に対し、事業用不動産のほうが、耐震補強の動機付けは大きい。
 - ・耐震リスクを国民がイメージできる環境作りが必要である。
 - ・地域内の地震リスクを低減することを目的として、地域の企業が耐震補強の受け皿になるようなシステムは考えられないか。
 - ・保険対象を限定し耐震性レベルごとグルーピングして保険を販売する方法もある。(自動車・医療などの分野では進んでいる。)
 - 坪川氏からの希望
 - ・地震リスク検討用ハザードを統一して欲しい。
 - ・被害を貨幣価値で表現できるようにして欲しい。



写真-付 2 坪川氏による講義の様子

環境 WG

報告書

環境 WG 名簿

| 氏名 | 会社名 | 所属 |
|--------|-------------|-------------------------------|
| 安岡 善文 | 東京大学生産技術研究所 | 教授 |
| 大岡 龍三 | 東京大学生産技術研究所 | 助教授 |
| 須崎 純一 | 東京大学生産技術研究所 | 講師 |
| 遠藤 貴宏 | 東京大学生産技術研究所 | 助手 |
| 瀬戸島 政博 | 国際航業(株) | 技術センター |
| 船橋 学 | 国際航業(株) | デジタルセンシングセンター 地球環境グループ |
| 河合 雅己 | 国際航業(株) | デジタルセンシングセンター 地球環境グループ |
| 岡田 敬一 | 清水建設(株) | 技術研究所 インキュベートセンター |
| 中井 秀信 | 東京電力(株) | 建設部 土木・建築技術センター 都市土木技術グループ |
| 高田 励 | 東京電力(株) | 建設部 海外事業グループ |
| 中嶋 まどか | 東京電力(株) | 建設部 土木・建築技術センター 建築設備技術グループ |

1. 研究目的

アジア地域においては、都市に人口や機能が集中する傾向が強く、多くの国々においてその経済発展に伴う急激な都市化の問題（メガシティ化問題）が生じている。これらの大都市では、都市基盤整備や安全対策、また、環境対策、教育対策などの遅れのために、住民サービスの低下、環境汚染などが常態化し、一部地域の地域ではスラム化などの問題も発生している。また、一極に人口や機能が集中することから災害による負の影響も大きく、地震や洪水などによる被害が甚大化する傾向が強い。一方で、大都市化は、その周辺地域において過疎化、荒廃地化などの問題を引き起こしている。

さらに、都市機能の急激な拡大は、大都市圏から大気や海洋への廃棄物（硫黄酸化物や二酸化炭素も含む）の放出を通じてグローバル大気汚染や沿岸における海洋汚染を引き起こしており、今後、地球規模での重大な環境問題を引き起こす可能性が高いことも指摘されている。

アジアにおける大都市問題を評価するためには、環境、安全、健康など様々な側面からのデータを収集し、その持続性、健全性を指標化し、さらに、対策を講ずることが必要となる。しかしながら、多くのアジアの国々では、どのような視点から都市を評価するかの基準が定まっておらず、また、信頼性の高い都市関連データを収集することも容易ではない。RC39 環境ワーキンググループでは、アジアの大都市圏を対象として、都市のサステナビリティを総合的に評価するための指標を作成することを目的とする。

2. 研究内容

今後急速に進むと考えられるアジアの大都市化（メガシティ化）問題を対象として、

- ・ 大都市における問題の抽出
- ・ 都市の持続性の評価手法、指標化手法
- ・ データの収集手法、観測手法

について検討することとした。

平成 16 年度は、これまで試行されている都市に関する指標の調査を行うとともに、日本の都市圏を対象として具体的な指標作りとそのためのデータ収集を行った。

平成 17 年度は、前年度の調査結果を基に新たな都市環境評価指標 (EIUS: **Environmental Indices for Urban Sustainability**)を開発した。東京を含む日本の 12 の大都市圏を対象として、この指標作成のための様々なデータの収集し、都市の比較、調査を行った。EIUS では、都市指標を、都市内で快適な生活を送るための生活の質 (Quality of Life) と、都市を維持していく上での負荷 (Environmental Load)、の 2 つの視点から評価することとし、前者では、(1) 環境と健康、(2) 機能とサービス、(3) 安全と安心、3 項目を、また後者では、(1) エネルギー消費、(2) 資源、(3) 広域環境、の 3 項目を挙げ、関連データの収集、指標の算出を行うこととした。

さらに、様々なデータが蓄積されている日本の都市を対象としたケーススタディから、その指標化やデータ収集の手法をそのままアジアに適用することは難しいため、必ずしも十分なデータが整備されていないアジアの大都市圏を対象として、衛星リモートセンシングなどを利用したデータ収集手法、指標化手法について検討を行い、指標を試算した。都市としては、アジアでも有数のメガシティであるバンコクを対象とした。

今後は、これらの試行をアジアの都市圏に拡大するために、より効率的なデータ収集手法の検討を行うとともに、それぞれに固有な問題を有するアジアの都市に対して共通の環境指標を適用するための方法論、問題点について検討することが必要である。

3. 研究成果

3-1 都市環境指標の調査

3-1-1 従来の環境指標の調査

都市指標

本章では各機関もしくは国により提案されている既存の環境指標の調査を行った。はじめに、分析対象とした環境指標を示し、それぞれの概要を述べる。次に、各枠組みにおいて実際に使用されている指標から、使用頻度の高い指標を抽出する。最後に、提案した指標をどのように評価するかについての事例を報告する。

3-1-1-1 調査対象とした環境指標

以下の5機関で用いられている環境指標を対象として調査を行った。

- ・ Organization for Economic-Co-operation and Development (OECD)
- ・ United Nations Commission on Sustainable Development (UNCSD)
- ・ United Kingdom (UK)
- ・ Europe Commission (EC)
- ・ United Nations Environmental Programme (UNEP)/GRID

各機関の指標の概要について以下に報告する。

OECD

Environmental Indicators Development, Measurement and Use (OECD, 2003)では、環境指標はCore Environmental Indicators (CEI)、Key Environmental Indicators (KEI)、Sectoral Environment Indicators (SEI)、Decoupling Environmental Indicators (DEI)の4つに分類され、特定の目的や枠組みと関連づけて用いられる。CEIは環境の向上とそれに含まれる要素を追跡し、環境政策を分析するための指標として用いられ、全部で52の指標がある。KEIは一般の人々や政策決定者に与えられるCEIの中から抽出された指標であり、コミュニケーションに用いられることを目的としている。SEIは特定の部門(交通、エネルギー、家計消費、旅行、農業)の政策と環境問題を統合するための指標であり、Pressure-State-Response (PSR)モデルによって指標が分類されている。DEIは持続可能な社会にどの程度近づいてきているかを示す指標であり、経済活動の中から環境負荷を分離して計測する。中心となる指標であるCEIの大項目を以下に示す。

気候変動・オゾン層破壊・富栄養化・酸性雨・有害物質・都市環境質・生物多様性・文化的景観・廃棄物・水資源・森林資源・水産資源・土壌劣化(砂漠化、浸食)・物質資源・社会経済

UNCSD

Indicators of Sustainable Development : Framework and methodologies background paper No.3 (UNCSD, 2001)では、社会、経済、環境、制度の4つの観点から持続可能性を評価する指標が用いられている。これら4つの項目は階層構造となっており、その下に

さらに、theme、sub-theme、indicatorがある。以下に大項目、中項目と指標数を示す。

社会指標：平等・健康・教育・住環境・安全・人口（18指標）

環境指標：大気・土地・海洋および海岸・淡水・生物多様性（19指標）

経済指標：経済構造・消費および生産形態（16指標）

制度指標：制度体制・制度能力（4指標）

UK

Quality of Life Counts Indicators for a strategy for sustainable development for the United Kingdom (Department for environment, food and rural affairs, 2004) では21の大項目、151の環境指標から構成され、それぞれの大項目から抽出された指標がHeadline Indicatorとしてまとめられている

15項目のHeadline Indicatorは下記の通りである。

持続可能な経済・経済の安定度および競争・スキル向上と仕事へのやりがい・持続可能な生産と消費・経済の活性化と雇用の促進・健康・旅行・利用可能性・周囲環境・参加と強力な制度・統合的アプローチ・気候変動とエネルギー供給・空気と大気・淡水海洋と海岸・ランドスケープと野生生物・適切な対応・国際協力と開発

EC

The Urban Audit, Towards the benchmarking of quality of life in 58 European cities (EC, 2000) では環境指標が5つの大項目から構成されている。それぞれ、社会経済、住民参加、訓練、教育レベル、環境、文化・レクリエーションである。そして、大項目の下層に21の中項目があり、その下に33の指標がある。

UNEP/GRID

Cities Environmental Reports on the Internet (<http://www.cerol.net/>) (UNEP/GRID, accessed 9 Mar. 2005) では、都市環境指標は、DPSIR (Driving Forces, Pressures, State, Impact, Response) のいずれかに分類される。また、外部からの影響、経済部門、物理的環境、社会環境、施設の5つの観点からも分類され、29の指標から構成されている。

3-1-1-2 使用頻度の高い環境指標の抽出

前項で述べた5つの機関の枠組みに含まれる全ての環境指標について分析を行った。同一の対象物を測定している指標を調べ、3つ以上の機関で用いられている指標を使用頻度の高い指標として抽出した。以下に項目ごとにまとめた使用頻度の高い環境指標を示す。

経済：GDP・投資割合

森林：緑地面積・森林保護面積

生物多様性：重要地域の指定・重要な種の存在度

安全性：犯罪発生率

健康：平均寿命・死亡率・医療へのアクセス

平等性：女性の地位向上

地球環境問題：温室効果ガス排出量・オゾン破壊物質排出量・大気汚染物質濃度

人口：人口増加率・人口密度

エネルギー：年間エネルギー消費量・エネルギー供給構造・交通モード別の移動量

廃棄物：排出量・有害廃棄物排出量・放射性廃棄物の排出量・リユース/リサイクル量

農業：農薬使用量

騒音：騒音暴露人口割合

水：年間使用量・飲料水の水質

3-1-1-3 指標の評価事例

Indicators for the integration of environmental concerns into transport policies (OECD, 1999) による指標の評価事例を報告する。この報告書では OECD の SEI の交通部門の指標について述べられている。そしてこの中で指標の評価も行われている。指標の評価は、3つの評価項目から構成されている。それぞれ、1) 有用性、2) 理論的な健全性、3) 測定可能性、である。1) は、環境の状態や環境負荷、社会への影響を測定できているか、解釈が容易か、国際間で比較が可能であるか等を評価する。2) については、理論的な裏付けがあるか、国際的に重要であると認識されているか、経済モデルや予測、情報システムと関連づけられるかで評価を行う。3) はさらに2つの項目に分類され、データの入手可能性とデータの品質で評価が行われる。

3-1-1-4 本章のまとめ

本章では5つの機関の環境指標について調査し、使用頻度の高い指標の抽出を行った。各機関が提案している環境指標は、指標の特徴により項目を階層化し、項目ごとに重み付けすることによって、全体としてバランスの良い都市環境指標を作成しようという考え方に基づいて設計されている。その際に、重要視されている大項目は、生活の質に関する項目と環境に対する負荷に関する項目である。

これら既存の都市環境指標をアジア域の都市に適用をする場合、評価項目の統計データが存在しない、統計データの時間的・空間的な尺度が一致しないなどの問題がある。そのため、アジア域の都市へ共通して適用可能な環境指標考える場合、上記の問題を踏まえ、統計データを直接利用できない項目をどのように補完するのかを考える必要があると結論する。

3-1-2 建築物総合環境性能評価システム(CASBEE)

地球環境問題に高い関心が集まる中、サステナビリティの推進は社会的にも大きな課題である。都市レベルの環境指標には様々なものがあるが(3-1-1)、都市の重要な構成要素であり、大量の資源・エネルギーを消費している建築物を対象として環境性能を評価するシステムが、近年、開発・整備されてきている。ここでは日本の建築物総合環境性能評価システム(CASBEE: Comprehensive Assessment System for Building Environmental Efficiency)について、その概要を紹介する。

(1)CASBEE の特徴

CASBEE の大きな特徴の一つは、「環境への負荷」というネガティブな側面だけでなく、サステナビリティに必要な「良好な居住環境の確保」という両方の側面を区別して捉え、評価する点にある(図3-1-1)。これは、それぞれ環境負荷(Load)、建築物の環境品質・性能(Quality)と表現される。更に、ワイツゼッカーらの“ファクター4”の理念に沿い、環境性能効率(BEE: Building Environmental Efficiency)という指標($BEE=Q/L$)を定義している。これは、分子の環境品質・性能(Q)が大きいくほど、また分母の環境負荷が小さいほど、BEEが大きくなることを意味する。つまり、「負荷あたりの品質」の高いものが高く評価される仕組みである。

(2)CASBEE の評価システム

QとLの評価項目を表3-1-1に示す。結果は、各項目の棒グラフならびにレーダーチャートによる分布特性、更にBEE値がランキング図に示される(図3-1-2, -3)。

(3)CASBEE の活用

CASBEE は、建築物のライフサイクルの各段階(新築・既存・改修等)に応じたツールが準備され、計画・設計の支援ツールとして、あるいは評価・ラベリングツールとして、更には教育支援ツールとしての活用が期待されている。既に、建築物の申請手続き時にCASBEEでの評価の提出を義務付ける自治体や第三者機関による認証を自主的に受ける建物も出てきており、建築物の環境性能の向上・負荷低減に向けた流れを推進する重要な役割を担っている。

※本ページの図は「CASBEE-新築」(建築環境・省エネルギー機構)による

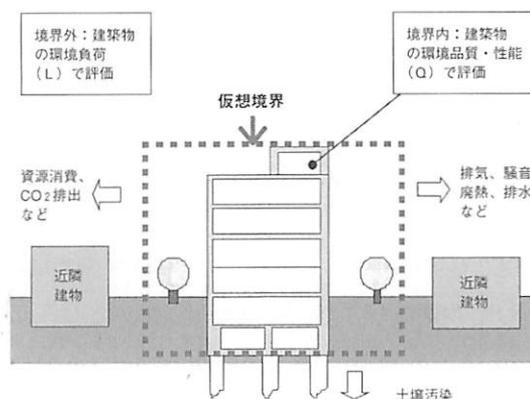


図 3-1-1 CASBEE の基本コンセプト

表 3-1-1 評価項目(QとL)

| Q | | L | |
|-----|-----------|------|----------|
| Q-1 | 室内環境 | LR-1 | エネルギー |
| Q-2 | サービス性能 | LR-2 | 資源・マテリアル |
| Q-3 | 室外環境(敷地内) | LR-3 | 敷地外環境 |

※LR(LoadReduction): 評価のし易さを考慮し、LではなくLRで評価

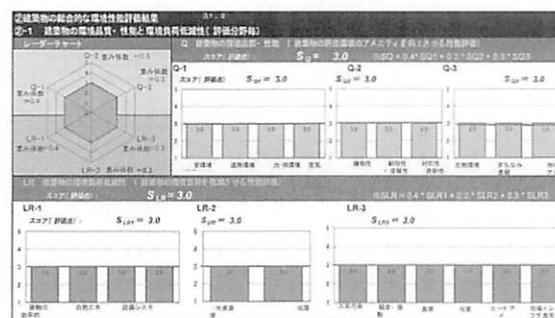


図 3-1-2 評価結果(項目)

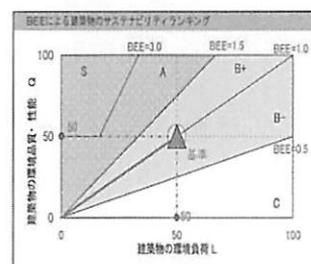


図 3-1-3 評価結果(BEE)

3-2 持続可能な都市形成のための環境総合評価指標(EIUS)

3-2-1 はじめに

アジア地域においては都市に人口や機能が集中する傾向が強く、多くの国々において急激な都市化の問題（メガシティ化問題）が生じている。これら大都市では住民サービスの低下、環境汚染等が常態化している。さらに、都市機能の急激な拡大は、大気や海洋への廃棄物の放出を通じてグローバル大気汚染や沿岸におこる海洋汚染を引き起こし、重大な地球規模での環境問題を引き起こす可能性が高いことも指摘されている。

本研究では、持続可能な都市づくりの計画の指針となる、都市環境を総合的に評価する指標（Environmental Indices for Urban Sustainability, 以下 EIUS と略称）を開発する。本論文では、都市内の環境品質と都市外への環境負荷を規定する項目の抽出を行い、これら双方を考慮した都市環境指標の再構築を行う。また、日本国内の東京並びに政令 12 都市を対象に本指標の適用を行い、評価項目の妥当性の検討を行うとともに各都市の持続可能性についての比較と考察を行う。

3-2-2 都市環境総合評価指標の基本的コンセプト

都市に集住するという行為は、利便性を獲得するために行われるものである。この点を無視して都市環境を評価すると、都市がない方が環境にとってよいという極論になりかねない。そこで、都市による利点と欠点についてそれぞれ評価できる指標を構築する。それらを都市内環境品質(Quality of Life Inside City)と都市外環境負荷(Environmental Load Outside City)と定義、整理を行う。なお、自治体が管轄する行政単位を都市と定義する。何故なら多くの環境対策は自治体単位で行われ、評価も同様に行うことが合理的であるからである。

また本評価指標を作成するに当たり以下の点に留意した。

(1) 総合性 都市環境評価をする場合に、個別の詳細なデータを収集することは非常に重要である。しかしながら、データが多くなればなるほど、取り扱いが煩雑となり、評価が困難となる。従って、ある程度のデータを集約して総合的な指標を作成することは重要である。

(2) 汎用性 一言で市部といえども非常に大きな差異が見られる。例えば、日本においても人口 800 万人を超える東京都（23 区）から、5 万人以下のものにいたるまでその規模も様々であることながら、人口構成、産業構造や気象条件、経済条件など大いに異なることから、すべての都市に対して汎用的かつ公正な指標を作成することが必要となる。そのためには、人口当たりの数値で表すなど、何らかの基準化が必要である。

(3) 包括性 環境影響評価におけるチェック・システムにみられるように、各種施策の影響や効果をチェックするためには、非常に広い領域の事象を包括的に取り扱う必要がある。具体的には(1)で挙げた総合化を構成する各個別要素が十分かつバランスよく用意されていることが必要である。

(4) 代表性 環境モニタリング等の場合は、代表性が求められる。すなわちある地域の環境要素を測定する場合に、測定する時間やその地域内の場所によって値が変化するものは代表性があるといえない。例えば、大気汚染質や騒音を計測する場合にはどこで測定したかということが結果に大きな影響を及ぼす。そのような場合には、計測のルールを明確にするとともに、地理的・時間的的代表性が検討されなければならない。

(5) 直観性 都市環境指標は、研究者や行政担当者等の専門家のみが利用するだけでなく、都市居住者との議論のためにも役立てられるべきである。そのため、住民の生活実感や経験になじむような直観性、すなわち直観的な理解がしやすいという要件があげられる。

(6) 計測容易性 精緻な都市環境指標を作成しても、それを構成するデータが入手困難では、利用することができない。指標算定のためのデータが得やすく、かつ指標算定の方法が平易であることが必要である。

3-2-3 評価項目

持続可能な都市を目指すために都市内の環境品質と都市外の環境負荷の双方から都市を比較する必要がある。図1においてこれらの概要を図示する。都市環境についてはQ1：公共の環境・衛生、Q2：公共の機能・サービス、Q3：安全・安心。都市外環境負荷についてはLR1：エネルギー消費、LR2：資源・マテリアルの消費、LR3：都市外の環境汚染の計6項目で評価する。これらは建築物総合環境性能表示システムであるCASBEEを参考に選んだ。さらにQ1：自然度・大気環境・衛生環境、Q2：行政機能・居住機能・教育機能・商業機能・交通機能・福祉機能、Q3：地震・火災・風水害・犯罪・事故、LR1：電気・ガス・灯油、LR2：水資源・物質、LR3：大気的项目を選び評価を行なう。ここで環境負荷の採点に関しては、CASBEEに倣い負荷量ではなく負荷削減量(LR：Load Reduction)として表示する。即ちLRの得点が高いほど環境負荷が小さくなることを示している。これらの項目を選んだ理由は代表制の高いものであり、さらにデータの収集が容易に行なえらると思われるものとした。

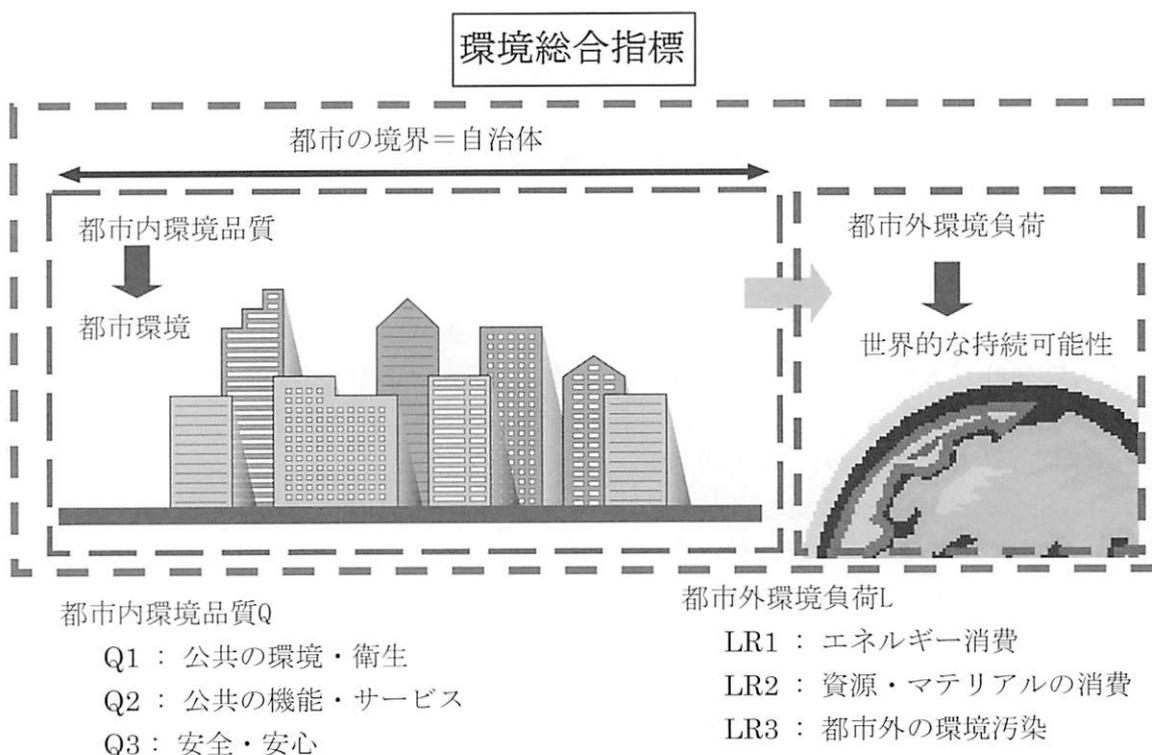


図 3-2-1 持続可能な都市のための環境総合指標

(1) 都市内環境品質(Quality of Life Inside City)

表1に都市内環境品質を構成している各要素を示す。

Q1の環境・衛生については、自然度・大気環境・衛生環境の3項目を対象に評価を行った。これらの項目は都市居住者が衛生的かつ自然豊かな状況で生活できるかという指標である。自然環境の豊かさを示す緑被率は、比較的計測も容易で代表性の高い指標であると考えられる。緑被率が高いほど、大気環境に関しては、直観的に思いつく指標は大気汚染濃度である。SO₂とNO_x濃度で評価を行い、これらの数値が低いほど評価は高い。衛生環境の項目は人口100人に対する感染症患者数と下水道普及率を代表させて評価を行なう。感染症患者率は数値が高いほど評価は高く、下水道普及率は逆に数値が高いほど評価は低い。

Q2の機機能・サービスについては、行政機能・居住機能・教育機能・商業機能・交通機能・福祉機能の6項目を対象に評価を行なった。これらの項目は都市居住者の得られる文化的、社会的利便性を指標化したものである。行政機能の項目では、人口増加率の高い都市は、それだけ魅力的であるということの意味している。また財政力指数の高い都市は、都市の経済状況がそれだけ健全であることを示し、評価は高くなる。居住機能については、豊かな住環境を示している。住宅面積・電化率・情報化率で評価を行い、これらの数値が高いほど評価は高い。教育機能の項目については、図書館蔵書数・人口1000人に対する小学校教員数と幼稚園数で評価を行なった。小学校教員数と幼稚園数に関してはそれぞれの都市ごとに1000人あたりの小学校教員数と幼稚園数を計算し、比較をおこなった。この項目における小学校教員数は、日本の自治体間において大きな差異は存在しないが、本指標をアジア諸国の各都市に拡張した場合には、社会的成熟度を示す指標として活用できることが期待される。商業機能の項目では小売店舗数で、交通機能の項目では道路総延と長公共交通利用率で評価を行なう。このうち、公共交通利用率は需要に即して、どの程度公共交通が整備されているかの目安になる。また道路利用利便性については、本来、道路面積と通過交通量の比で評価されるべきであるが、通過交通量の算定は詳細に全国で行われているわけではない。これに代わる指標の確立が求められる。福祉機能の項目では、福祉施設数・都市公園面積で評価を行い、これらの数値が高いほど評価は高い。

Q3の安全・安心は、文字通り安全で安心して居住できる都市を示す指標である。地震の項目では、公共建築物の耐震化率を用いて表した。ただしこのデータは市町村ごとには整備されておらず、それぞれの都市が存在する都道府県のデータで代用した。火災の項目では、火災発生件数・消防署員数で評価を行い、これらに関してはそれぞれの都市ごとに1000人あたりの火災発生件数と消防署員数を計算した。犯罪・事故の項目では、犯罪発生件数・交通事故発生件数・交番、派出所・病床数で評価を行い、これらに関してはそれぞれの都市ごとに1000人あたりの犯罪発生件数・交通事故発生件数・交番、派出所の数、10000人あたりの病床数を計算しそれぞれの都市ごとに比較をおこなった。地震と火災安全性に対する不適格建築件数は、現在日本において市町村単位では集計されていない。地震時の倒壊危険建物、火災時の延焼危険性建物の簡易な測定・推定法並びにデータベースの収集が求められる。洪水危険性についてもその評価は難しい。都市内氾濫による洪水の場合は、下水処理能力に大きく依存するが、それ以外の要因も大きい。この点でもハザードマップの整理が求められる。

(2) 都市外環境負荷(Environmental Load Outside City)

表 2 に都市外環境負荷を構成している各要素指標の例を示す。

LR1 のエネルギー消費については、電気・ガス・灯油の 3 項目を対象に評価を行なった。これらの項目はすべてのエネルギーに対して 1 次エネルギー（熱量）評価により総エネルギー消費量を検討する。地球温暖化を引き起こす温室効果ガス排出の大きな要因の一つに、エネルギーの大量消費がある。また、そのことは、エネルギーを生み出すための化石燃料などの大量消費につながり、地球規模の資源枯渇問題にも大きく影響する。それぞれの都市が消費したエネルギー量を都市の人口数で割り、1 人あたりどれほどのエネルギー消費をしたかを比較する。この値が低いほどエネルギーの消費が少なく、評価は高くなる。未利用エネルギー等の利用は化石燃料の消費削減に繋がるため、総量としてエネルギー消費量が小さければ、サステナブルであると判定されるので、個々の省エネルギーの取り組みについては、ここでは検討しない。

LR2 資源・マテリアルについては、水資源・物質の 2 項目を対象に評価を行なった。これらの項目は水資源使用量と、廃棄物量で代表させて評価する。ここでは、それぞれの都市が使用した上水やごみ・廃棄物の排出量を都市の人口で割り、1 人あたりの資源の使用量を比較した。この値が低いほど資源の使用量が少ないことを示し、評価は高くなる。廃棄物量が少なければ、サステナブルであると判定されるので、個々の省資源化の取り組みについては、ここでは検討しない。また、リサイクル率が高ければ結果として廃棄物量が削減されるのでリサイクル量についてもここでは検討しない。

LR3 広域環境は、大気の 1 項目を対象に評価を行なった。ここでは、それぞれの都市が排出した CO₂ の量を都市の人口数で割り、1 人あたりどれほどの CO₂ を排出したかを比較する。この値が低いほど CO₂ の排出量が低く、評価は高い。この項目は前節で挙げた都市内環境品質内の環境・衛生と異なり、都市外の環境汚染や地球環境にどの程度寄与しているかを表している。都市内の汚染排出量とそれが都市へ輸送される量とは大きな相関があると考えられるため、都市内の汚染排出量で代表させることが可能である。汚染排出量の算定に関しては、都市空間内のみの排出だけではなく、都市活動が惹起する排出まですべて含めることとする。例えば、電力消費に関する都市から遠く離れた地区における火力発電所からの大気汚染物発生量等が含まれる。また廃棄物に関しても、当該都市外に輸送されて処理される分に関しては、都市外への環境負荷という観点から広域環境に含める。

表 3-2-1 都市内環境評価指標(Quality of Life Inside City)

| 大分類 | 中分類 | 細分評価指標 | 重み[%] | | 配点 | | | | | |
|-----------------|---------|-------------------------|-------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| | | | 中 | 細 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| Q1 環境・衛生 | 自然環境 | 緑被率[%] | 30 | 100 | ≤10 | ≤20 | ≤30 | ≤45 | 45< | |
| | 大気環境 | SO ₂ 濃度[ppm] | 30 | 50 | >0.007 | 0.007≥ | 0.005≥ | 0.003≥ | 0.001≥ | |
| | | NO _x 濃度[ppm] | | | >0.07 | 0.07≥ | 0.05≥ | 0.03≥ | 0.01≥ | |
| | 衛生環境 | 感染症患者数/1000人 | 40 | 50 | >1.0 | 1.0≥ | 0.8≥ | 0.5≥ | 0.3≥ | |
| 下水道普及率[%] | | ≤60 | | | ≤70 | ≤80 | ≤90 | 90< | | |
| Q2 機能・サービス | 行政 | 人口増加率[%] | 20 | 50 | ≤-0.3 | ≤-0.1 | ≤0.1 | ≤0.3 | 0.3< | |
| | | 財政力指数 | | | ≤0.6 | ≤0.7 | ≤0.8 | ≤0.9 | 0.9< | |
| | 居住機能 | 住宅延床面積/人口 | 20 | 40 | ≤27 | ≤32 | ≤36 | ≤40 | 40< | |
| | | 電化率 | | | ≤30 | ≤80 | ≤85 | ≤90 | ≤95 | 95< |
| | | 情報化率 | | | ≤30 | ≤60 | ≤70 | ≤80 | ≤90 | 90< |
| | 文化・教育 | 図書館蔵書数/人口 | 10 | 40 | ≤1.2 | ≤1.6 | ≤2 | ≤2.4 | 2.4< | |
| | | 小学校教員数/1000人 | | | ≤30 | ≤2.4 | ≤2.5 | ≤2.6 | ≤2.7 | 2.7< |
| | | 幼稚園数/1000人 | | | ≤30 | ≤0.08 | ≤0.09 | ≤0.10 | ≤0.11 | 0.11< |
| | 商業 | 小売店舗数/1000人 | 10 | 100 | ≤6 | ≤8 | ≤10 | ≤12 | 12< | |
| | 交通 | 道路総延長/人口 | 20 | 50 | ≤2 | ≤2.5 | ≤3 | ≤3.5 | 3.5< | |
| | | 公共交通分担率[%] | | | ≤50 | ≤10 | ≤20 | ≤30 | ≤40 | 40< |
| | 保健・福祉機能 | 福祉施設数/1000人 | 20 | 50 | ≤0.25 | ≤0.3 | ≤0.35 | ≤0.4 | 0.4< | |
| 都市公園面積/人口 | | ≤50 | | | ≤4 | ≤7 | ≤10 | ≤14 | 14< | |
| Q3 安全・安心 | 地震 | 公共建築物耐震化率 | 0 | 100 | - | - | - | - | - | |
| | 防火 | 火災発生件数/1000人・年 | 40 | 50 | >0.56 | 0.56≥ | 0.48≥ | 0.4≥ | 0.32≥ | |
| | | 消防署員数/1000人 | | | ≤50 | ≤0.7 | ≤0.9 | ≤1.1 | ≤1.3 | 1.3< |
| | 風水害 | 被害件数/被害時総雨量・年 | 0 | 100 | - | - | - | - | - | |
| | 防犯・事故 | 犯罪発生件数/1000人 | 60 | 30 | >40- | 40≥ | 35≥ | 30≥ | 25≥ | |
| | | 交通事故発生件数/1000人 | | | >9- | 9≥ | 8≥ | 7≥ | 6≥ | |
| 交番・派出所数/100000人 | | ≤20 | | | ≤4 | ≤5 | ≤6 | ≤7 | 7< | |
| 病床数/10000人 | | ≤30 | | | ≤10 | ≤13 | ≤16 | ≤19 | 19< | |

表 3-2-2 都市外環境負荷指標(Environmental Load)

| 大分類 | 中分類 | 細分評価指標 | 重み[%] | | 配点 | | | | |
|----------------|-----|-------------------------------|-------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | | 中 | 細 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| L1 エネルギー | 電気 | 電気使用量[MJ/人・年] | 40 | 100 | >30000 | 30000≥ | 25000≥ | 20000≥ | 15000≥ |
| | ガス | 都市ガス使用量[MJ/人・年] | 30 | 80 | >25000 | 25000≥ | 20000≥ | 15000≥ | 10000≥ |
| | | プロパンガス使用量[MJ/人・年] | | | 20 | >240 | 240≥ | 180≥ | 120≥ |
| | 他 | 灯油使用量[MJ/人・年] | 30 | 100 | >350 | 350≥ | 180≥ | 120≥ | 60≥ |
| L2 資源・マテリアル | 水資源 | 上水使用量[ton/人・年] | 40 | 100 | >135 | 135≥ | 125≥ | 115≥ | 105≥ |
| | 廃棄物 | 家庭廃棄物重量[ton/人・年] | 60 | 50 | >0.5 | 0.5≥ | 0.4≥ | 0.35≥ | 0.3≥ |
| | | 産業廃棄物重量[ton/人・年] | | | 50 | >5 | 5≥ | 4≥ | 3.5≥ |
| L3 広域環境 | 大気 | CO ₂ 総排出量[ton/人・年] | 100 | 100 | >15 | 15≥ | 10≥ | 7≥ | 3≥ |
| | | NO _x 総排出量[ton/人・年] | | | 100 | - | - | - | - |
| | | SO _x 総排出量[ton/人・年] | | | 100 | - | - | - | - |
| | その他 | 廃棄物量系内未処理量/人口 | 0 | 100 | - | - | - | - | - |

ここれらの評価項目を総合化するため、描く評価指標に重みづけで採点を行う。重みづけは、それぞれの都市のおかれた状況に対して臨機応変に変化させるべきである。表3-2-1、表3-2-2において本報で用いた重み付け配点例を示す。配点の考え方は、各評価指標に対し、5点満点とし標準的な環境品質レベル、環境負荷レベルを3点とした。環境品質レベル、環境負荷レベルとも改善に向かうものを高得点、改悪になるものを低得点とした。環境負荷レベルが高得点であるということは環境負荷レベルが低いということに注意されたい。更にこれらの数値を表3-2-1、表3-2-2に示す重み付けに従い、それぞれの大分類の項目(Q1～Q3, LR1～LR3)について5点満点で表す。なお表中ーに関しては、各自治体において

データ整備がなされておらず、データ取得ができなかったものである。従って、これらの項目に対しては、今回は採点対象から除外している。これらのデータの収集も今後の課題である。

3-2-4 計算結果

上記の都市環境指標を用いて、東京都並びに政令 12 都市の採点した結果を表 3-2-3 と図 3-2-1 に示す。政令指定都市のうち埼玉市と静岡市に関しては、最近合併を行い市域が変化したためデータが整理されておらず除外した。

札幌市は Q1（環境・衛生）、Q3（安全・安心）、LR1（エネルギー）、LR3（広域環境）で点数が高く高評価である。Q2（機能・サービス）の項目の点数が低い。これは、教育機能や商業機能の点数が低いためである。特に機能・サービスの教育機能に着目してみると、東京都並びに、政令 12 都市平均が 2.93 なのに対し札幌市の点数が 1.6 と平均を大きく下回っている。LR1（エネルギー）については電気・ガス使用量の項目では点数は高いが灯油使用量の項目で評価を下げることになっている。また、LR2（資源）の点数も低くなっている。これは、水資源の項目の上水使用量は少なく点数は高いが、物質の項目の家庭ごみ排出量・産業廃棄物量が多く、点数が低いためである。

仙台市は Q1（環境・衛生）の点数が高い。これは、衛生環境の項目である人口 100 人に対する感染症患者数が多く点数は低いが、他の自然度・大気環境の項目と衛生環境の項目である下水道普及率の点数がどれも高いからである。また環境負荷でいえば、LR2（資源）の点数も高い。これは、家庭ごみ排出量・産業廃棄物量が少なく、点数が高いためである。LR2 の値に着目してみると、13 都市の平均が 2.93 なのに対し、仙台市は 4.1 と 13 都市の中で一番高い値を示している。この結果から仙台市が資源の消費が少なく、資源・マテリアルなどの面でサステナブルな都市であるということが出来る。

千葉市は Q1（環境・衛生）の点数が高いこれは都市内の環境品質・衛生度が高いことを示している。また、Q3（安全・安心）の点数が低くなっている。これは犯罪発生件数が比較的多く、人口当たりの病床数が低いためである。さらに、LR3（広域環境）の点数が 1 と最低の数値を示している。これは都市外の広域環境に負荷がかかっていることなので、千葉市はサステナブルでない都市であると言える。千葉市は CO₂排出量が川崎市に次いで非常に多い。これは千葉市、川崎市それに北九州市が工業都市であることが理由の 1 つに考えられる。

東京都（23 区）は LR1（エネルギー）の点数が低い。エネルギー使用量に関しては、電気の項目の住民一人当たりの電気使用量、ガスの項目では都市ガス使用量、灯油使用量が多く点数が低くなっている。これは、東京に経済活動が集中しているためであると考えられる。東京は 13 都市の中で LR1 の値が最も低くなっている。また、LR3（広域環境）の点数が非常に高い。これは、東京都（23 区）の CO₂排出量が多いのだが人口当たりの排出量に直して評価したので東京都（23 区）の人口が他の都市に比べて圧倒的に多いことが高評価につながったと思われる。

川崎市は LR1（エネルギー）と LR3（広域環境）の点数が低い。これは、千葉市と同様、川崎市が工業都市であるという性格を有しているからである。また東京都区部と川崎市を総合指標の各項目に分布図でまとめてみると Q1（環境・衛生）から LR2（資源）までがほとんど同じ数値なのに対して、LR3（広域環境）の値だけに大きな開きが出るのが解った。

これは川崎市に、東京に電力を供給する発電所があることが主な要因だと考えられる。また、Q2（機能・サービス）についても平均を下回る結果となった。これは教育機能・商業機能・交通機能・福祉機能の悪さが点数を下げていることが分かった。

横浜市は Q2（機能・サービス）の点数が低い。これは教育機能の項目の図書館蔵書数と人口 1000 人に対する幼稚園数の少なさと商業機能と福祉機能の低さ、交通機能の項目では道路総延長の点数が低いためである。横浜は 13 都市の中で人口に対する福祉施設数が一番少ない。横浜市は、これと同じように機能・サービスの面で他の都市に劣る部分が多く Q2（機能・サービス）の項目の点数が低いことが明らかになった。Q3 についても高得点であるが、小項目に目を向けてみると病床数が少なく評価を少し下げることになっている。この点を改善できればさらに評価を上げることが出来るであろう。また環境負荷に関しては総じて高得点である。

名古屋市は Q1（環境・衛生）に関しては自然度・大気環境・衛生環境のどの項目でも平均を下回ることなく点数は高い。Q3（安全・安心）と LR1（エネルギー）の評価が低い。Q3（安全・安心）に関しては犯罪・事故の項目の犯罪、派出所の項目の高得点を除いては、火災発生件数、交通事故発生件数、犯罪発生件数の数が多く点数が低くなっている。LR1（エネルギー）の値が低いのは工業都市の特徴で特に名古屋市では、電力消費が他の都市に比べて高い値を示している。さらにプロパンガスの使用量の多さも点数を下げる要因となっている。

京都は上水道使用量と家庭ごみ排出量が多いため LR2（資源）の値が低くなっている。しかし Q1（環境・衛生）、Q3（安全・安心）、LR3（広域環境）の点数が高いので、総合評価が東京並びに政令 12 都市の中で一番高い値を示している。特に Q1（環境・衛生）、LR3（広域環境）が高いのは自然が豊かなため空気がきれいに保たれなおかつ CO₂ 排出量が少ないので空気の面で環境への負荷が少ない都市であることを示している。Q3（安全・安心）では交通事故発生件数の点数を除いてはどの項目も点数が 4 以上となっており、点数は高い。

大阪は全体的に評価が低く、平均点が 2.8 点と低い。特に Q3（安全・安心）、LR1（エネルギー）、LR2（資源）の値が低いこれは、家庭ごみ排出量、上水使用量、都市ガス使用量、犯罪発生件数、火災発生件数都市公園面積、幼稚園数、緑被率など多くの項目に 1 の評価がついていることが要因になっている。特に家庭ごみ排出量は 13 都市の中で一番多くなっている。この結果により、関西の中心都市として発展する反面そのしわ寄せが色々なところに現れていることが明らかになった。Q2 では平均点を超える点数となったが、これは多くの項目で評価の悪いものがあるが、行政機能・居住機能・商業機能の項目で点数が高かったことが上げられる。

神戸市は Q1（環境・衛生）、Q2（機能・サービス）の値が高く Q3（安全・安心）、LR2（資源）の値が低い。Q1（環境・衛生）、Q2（機能・サービス）の値が高いのは、緑被率、下水道普及率、人口増加率、財政力指数、電化率、小学校教員の数、道路総延長（通過交通量）、福祉施設数、都市公園面積など 5 点の評価の項目が多いことが要因である。これらの項目は環境に優れ高い機能やサービスが得られる都市であることを示している。その反面で都市外環境負荷の LR2（資源）の項目の値が低いのが残念である。

広島市は LR2（資源）の値が低いこれは、この主要因は水道使用量が多いことが原因と

考えられる。また、家庭ごみ排出量は評価が高いのに対して産業廃棄物排出量が多く点数が低くなっているためである。広島市のその他の分野は 3 から 4 におさまっており平均点も 3.45 と高評価となっている。Q1（環境・衛生）では人口 100 人に対する感染症患者率の項目以外では点数が高い。Q2（機能・サービス）でも小売店舗数の項目以外では点数が高い。LR1（エネルギー）については電気・ガスの項目では点数が 4、灯油の項目で点数は 3 となっており点数が高くなっている。

北九州市は平均点が 2.6 点と東京並びに政令 12 都市の中で一番低い値を示している。これは全 6 項目中 4 項目が評価 3 を下回っているからである。特に LR1（エネルギー）と LR3（広域環境）が低いのは工業都市の特徴で同じ工業都市の川崎市や名古屋市も同じような値を示している。Q2 では人口増加率・図書館蔵書数・公共交通分担率の項目以外では高評価であり、点数も高い。また LR2（資源）では上水使用量・家庭ごみ排出量・産業廃棄物排出量のすべての項目の評価が 1 となっており、これらに関してはサステイナブルな都市でないとは判定できる。

福岡市は Q3（安全・安心）と LR1（エネルギー）の値が低いのが特徴である。Q3（安全・安心）が低いのは犯罪率が高いためである。大阪市、神戸市、広島市、北九州市も同じような数値を示している。また LR1（エネルギー）が低いのは主に荷電力消費が高いのが要因である。福岡市を神戸市のように都市内環境品質 Q と都市外環境負 LR に分けて棒グラフにしてみると、LRの方がQより大きく神戸とは反対の値を示す結果になった。これは環境の面ではよい都市であるが、都市内の環境があまりよくないことを示している。

3-2-5

持続可能な都市形成をめざし、環境総合評価指標の開発を行った。そのためには、都市の品質の点と都市の環境負荷の点を両方評価する必要がある。また本指標を、東京都と政令 12 都市に適応した。その結果、それぞれの都市の環境性能とともに、それぞれの特徴も併せて明らかとなった。今後は、より一層のデータの充実を図ると共に、日本国内の中小都市やアジアの諸都市に対して展開を図っていきたい。

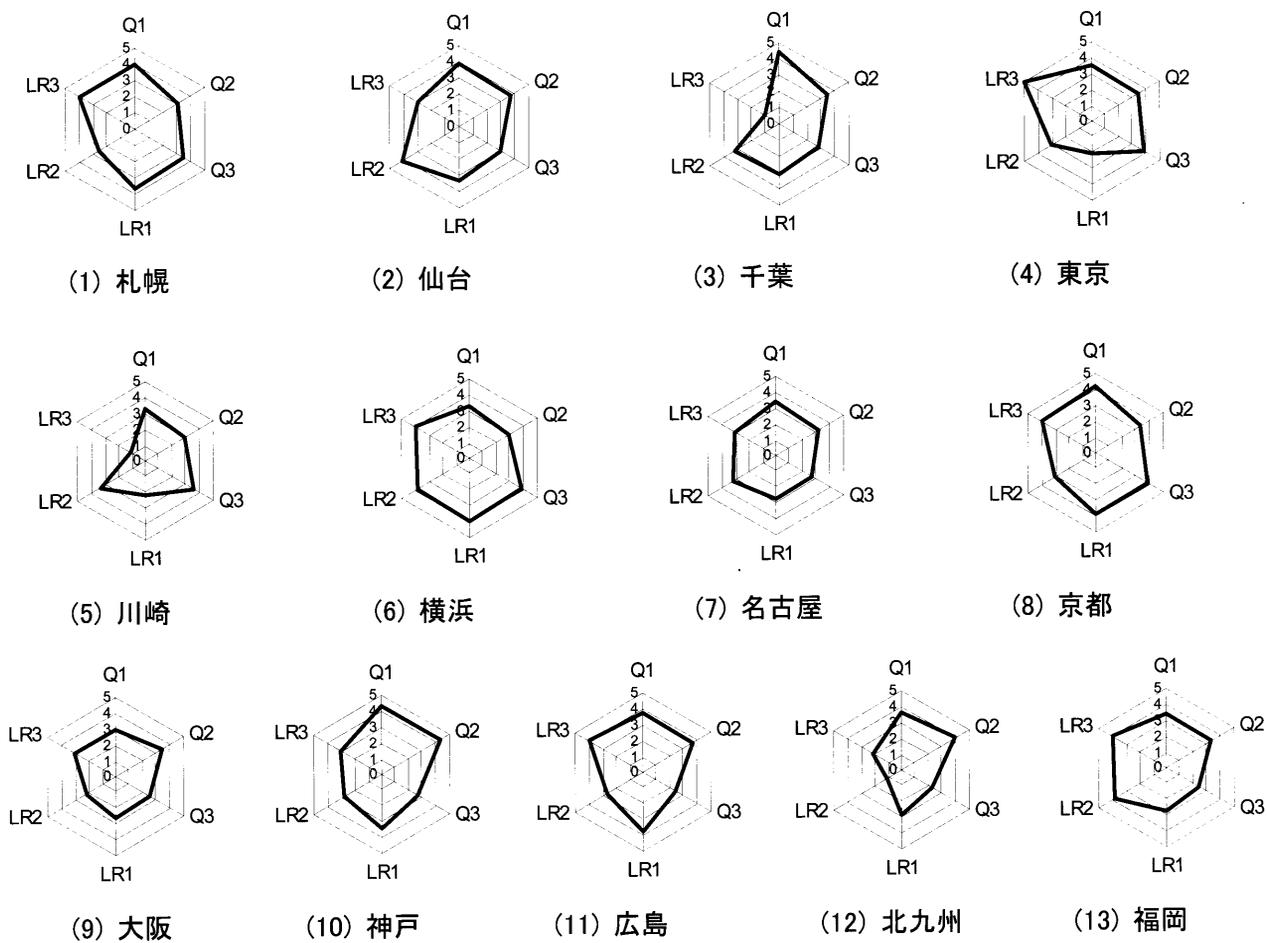


図 3-2-2 東京都並びに政令 12 都市の環境総合評価指標のレーダーチャート

3-3 EIUS のための衛星リモートセンシングによるパラメータ抽出

3-3-1 はじめに

EIUS による環境効率・負荷の観点に基づく都市の評価は、分かりやすくかつ現実に即した評価を可能とする。一方、実際の適用に着目すると、何よりもまず EIUS で必要とされる環境関連の統計データを入手する作業から始まる。筆者らは、最も成長が著しい地域であるアジアのメガシティ間の評価に EIUS を適用する場合を念頭に置いて、まずバンコクにおいて EIUS で必要とされる統計データの入手を試みた。その結果、入手にかかる直接経費は発生しなかったものの、担当者とのやり取りに手間暇を要しながら、約 8 割の項目のデータを入手できた。入手できた結果は表 3-3-1 に示されている。タイにおいては、日本の国際協力機構 (Japanese International Cooperation Agency: JICA) の支援も受けながら、環境・農業などの統計データの整備が進められてきた。そのように東南アジア地域で比較的入手の条件が整っているバンコクにおいても、EIUS で必要とされるデータを入手することは極めて困難を伴うことを実感した。他のアジアのメガシティにおいて、データの存在そのもの、また入手の容易さを考慮すると、利用するデータの枠組みを検討する余地があると考えられる。

また仮に対象とするメガシティで統計データを入手できたと仮定しても、EIUS への適用の際にいくつかの問題が生じると予想される。まず、統計データ作成の基準や方法が各メガシティで統一されていない。また、統計データの元となるサンプリングの方法も不明確である場合が多く、時空間的な代表性およびその信頼性を議論できない。例えば、窒素酸化物や硫黄酸化物などの大気汚染関連のデータにおいては、交通量の多い幹線道路沿いで収集されている場合が多く、そのような集計データを単純に都市全体の代表値として適用することには問題が生じる。したがって、特定の国に固有な基準に影響されにくい、データの入手方法が望まれる。

リモートセンシングは、高空から広域の環境データを短時間内に収集できる技術である。一般的に、衛星に搭載されたセンサを利用した衛星リモートセンシングが、大気、地表面、海洋の環境データ取得手法として定着しつつある。リモートセンシングデータの特長は、空間的に等質なデータを瞬時に取得できることである。また周期的に計測し、同じ設計のセンサが継続的に打ち上げられる事も多く、現時点では数年~20 年程度の期間にわたり環境の変化を解析できる。つまり、時間的に比較的等質なデータを利用することができると言える。さらに、リモートセンシングデータは放射輝度や反射率、地表面温度などの物理量に変換したり、また単純化された指標へ変換したりすることで、定量的な解析が可能である。しかしながら、リモートセンシングデータの欠点としては、上空から検知できるデータに限られ、上空からは感知できない地表面での詳細なデータを取得することは難しい。また、空間分解能が向上してきたとはいえ、1m 以下の超高空間分解能衛星データは高価で、広範囲や複数のメガシティを網羅するには費用がかかりすぎる。したがって、空間分解能は落ちるものの、15~30m の空間分解能を有する衛星データを活用するのが現実的である。さらに、光学センサの場合には、雲を代表とする大気の影響を強く受けるために、雲が存在せず撮影条件の良い時期のデータしか利用できない。

このような欠点も持ち合わせているものの、リモートセンシングによる環境データ取得

可能性は十分に検討に値する。今回は、バンコクを対象にして、リモートセンシングによるEIUSのための環境データ抽出の可能性を検討した。

3-3-2 リモートセンシングによる環境データ収集の可能性

リモートセンシングでは、大気、地表面、海洋から反射、放射された電磁波を検知することが基本であり、各センサは目的に応じて、空間分解能、時間分解能、放射量分解能、観測波長帯などが規定されている。先述のように、IKONOS（空間分解能 1m）や QUICKBIRD（0.6m）といった超高空間分解能データも利用できるが、費用だけでなく入手可能なデータ数を考慮すると、困難が伴う。一方で、Landsat Thematic Mapper (TM) / Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)（空間分解能 30m）や、Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER: 15m) といった高空間分解能データは入手が比較的容易である。中でも、Landsat TM/ETM+データは 1990 年代からの蓄積があり、これまでも種々の環境解析に使用されてきた。メリーランド大学の Web サイトでは、ほぼ全陸域の 1990 年代と 2000 年代の 2 時期において、正射投影された TM/ETM+データが無料で公開されている [1]。

このようなデータの入手可能性や容易性を考慮して、今回は Landsat TM/ETM+で可能な解析に着目する。Landsat TM は可視・近赤外の領域に 6 バンド（空間分解能 30m）、熱赤外に 1 バンド（60m）、ETM+ではこれに加えてパンクロマチックバンドが 1 バンド（15m）設計されている。今回、EIUS への応用を考えて、環境評価に深く関係する下記の 3 つのパラメータを選択した。(1) 植生指数 (Normalized Difference Vegetation Index: NDVI)、(2) アルベド（太陽光の入射に対する反射率の全方向の総和）、(3) 地表面温度 (land surface temperature: LST) である。以下、Landsat TM/ETM+を用いた 3 つのパラメータの推定方法を述べる。

1) NDVI

NDVI は地域スケールから全球スケールまで、陸域の植生に関する様々な解析に用いられている。NDVI は植生のクロロフィルに鋭敏に反応し、一方で、正規化されることで大気中の水蒸気量の変動の影響を受けにくいという特長を有する。式(1)に示されるように、NDVI は赤と近赤外領域の反射率を用いて計算される。

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (1)$$

ρ_{RED} は ρ_{NIR} それぞれ赤と近赤外の反射率を表す。Landsat TM/ETM+の場合、band 3 と 4 が赤と近赤外の波長帯に相当する。

2) アルベド

地表面のアルベドは光学的な反射を記述する物理的なパラメータである。アルベドは波長（通常、0.3~3.0 μm ）と角度（半球上の全てのセンサ天頂角）の両面で積分した反射率と一般的に定義される[2]。ブロードバンドアルベドは、（短波長）太陽放射の全方向の地表面反射成分の和と入射される太陽放射との比で表現される[3]。アルベドの応用事例としては、熱収支に基づく全球・地域スケールでの気候変動モデルの適用[4]や、生態学モデルへの適用[5]が挙げられる。

Liang は種々のセンサ（ASTER, AVHRR, ETM+/TM, GOES, MODIS, MISR, POLDER, VEGETATION）に対して、ナローバンドアルベドからブロードバンドアルベドへの変換式を開発した[6]。変換式は放射伝達シミュレーションに基づいて推定された。これらの変換式を用いて、様々な大気や地表面の状態の下で、短波長、可視、近赤外のブロードバンドアルベドを推定できる。同時に、ブロードバンドアルベド全体だけでなく、直達成分や拡散成分だけを推定することも出来る。これらのアルベドの検証結果によると、推定精度はほとんどのセンサで0.02と高く、陸域モデリングに要求される水準を満たすと判明した[7]。

本研究では、Liang の変換式を用いてアルベドを推定した。衛星データの配布媒体に記録されている Digital Number (DN) 値を分光放射輝度に変換し、その後反射率に変換する。その反射率に対して、Liang の変換式を適用して、ブロードバンドアルベドを推定した。Landsat TM/ETM+に対する変換式は式(2)で表される。

$$\begin{aligned}\alpha_{VIS} &= 0.443\rho_1 + 0.317\rho_2 + 0.240\rho_3 \\ \alpha_{NIR} &= 0.693\rho_4 + 0.212\rho_5 + 0.116\rho_7 - 0.003 \\ \alpha_{SW} &= 0.356\rho_1 + 0.130\rho_3 + 0.373\rho_4 + 0.085\rho_5 + 0.072\rho_7 - 0.0018\end{aligned}\quad (2)$$

ここで、 α_{VIS} 、 α_{NIR} 、 α_{SW} は全可視アルベド(0.4 – 0.7 μm)、全近赤外アルベド(0.7 – 2.5 μm)、全短波長赤外アルベド (0.25 – 2.5 μm) を意味する。 ρ_n はバンド n での分光反射率を意味する。分光放射輝度は上空での放射輝度を意味し、通常は、放射伝達コードを用いて大気補正された地上での反射率を求める。3種類のアルベド（短波長、可視、近赤外アルベド）を推定して検討した結果、短波長アルベドが選定された。

3) LST

熱赤外バンドデータ（バンド6）は、式(2)のように衛星での温度に変換できる[8]。

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (2)$$

T : 衛星レベルでの有効温度 (Kelvin) ;

- K_1 : 校正定数 1 ($W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$) ;
- K_2 : 校正定数 2 (Kelvin) ;
- L_λ : センサでの分光放射輝度

衛星レベルでの有効温度 T は黒体の温度として計算されているため、放射率を考慮した補正が必要になる。式(3)により放射率 ϵ を考慮した地表面温度 S_i が推定される。

$$S_i = \frac{T}{1 + (\lambda \times T / \rho) \ln \epsilon} \quad (3)$$

ここで、 λ は波長、 $\rho = h \times c / \sigma$ (1.438×10^{-2} mK), σ =ボルツマン定数 (1.38×10^{-23} J/K), h =プランク定数 (6.626×10^{-34} J s), c =光速 $light$ (2.998×10^8 m/s) [9]を表す。放射率 ϵ の推定には 様々な方法が提案されているが、ここでは[10]で提案されている方法を採用した。放射率 ϵ は式(4)で表現される。

$$\epsilon = f_v \epsilon_v + (1 - f_v) \epsilon_s \quad (4)$$

ここで、 ϵ_v と ϵ_s は植生と土の放射率を意味する。 f_v は植生の被覆率(0-1)を表す。文献[11]にしたがい、 $\epsilon_v = 0.985$ 、 $\epsilon_s = 0.978$ を採用した。植生の被覆率 f_v は式(5)で計算される[12]。

$$f_v = 1 - \left(\frac{NDVI_{max} - NDVI}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^a \quad (5)$$

ここで、 $NDVI_{max}$ は完全な植生被覆地域における NDVI、 $NDVI_{min}$ は裸地の NDVI を表し、ここでは各々0.94 と 0.0 を仮定する。式(5)中の係数 a は葉の方向分布をパラメータとする関数で表され、ここでは文献にしたがい0.6を採用した。

3-3-3 異なる年代での都市域の抽出

3-3-2 で述べたように、3つのパラメータは比較的容易に抽出することができる。このパラメータを用いて EIUS に組み込むことも出来る。一方で、都市域の拡大をは最終的に、3つのパラメータごとに議論せず、統一的に処理して 1990 年代と 2000 年代で都市域が拡大した様子を抽出した。都市域の定義は目的に応じて異なり、今回は人工構造物を想定し、アルベドが高く、LST も高い領域を都市域として抽出した。

通常、リモートセンシング画像から主題図を作成する場合には、画素単位で分類を行う。しかしながら、画素単位の分類結果は細かすぎて事後処理を行い、意味のあるより空間的に大きな単位にまとめることが多い。その一方で、画像処理技術に基づく領域分割による分類も従来より研究されている。近年、eCognition というソフトウェアが広く普及しつつ

ある。eCognition では、空間スケールや、抽出する空間オブジェクトの形状など、複数のパラメータを指定することで、異なる空間スケールの元での領域分割を実行する[13]。比較的使いやすく、また安定した結果が得やすいことから、本研究では eCognition を用いて都市域の抽出を試みた。

EIUS への適用のためにバンコクで統計データを収集したことから、本研究でのリモートセンシングデータからのデータ抽出可能性を検討するために、バンコクを対象地域と選定した。Landsat TM/ETM+のシーン番号としては、パス 129 ロウ 50 とパス 129 ロウ 51 の 2 シーンが該当した。2 シーンは先述のパラメータを推定した後に、モザイク処理して 1 枚の画像に接続された。1990 年代のデータとして Landsat TM データ（パス 129 ロウ 50、パス 129 ロウ 51 共に 1994 年 10 月 25 日撮影）、2000 年代のデータとして Landsat ETM+（パス 129 ロウ 50 は 2000 年 11 月 2 日、パス 129 ロウ 51 は 2002 年 1 月 8 日撮影）を使用した。特に ETM+データに置いては取得時期が異なるため、厳密にはモザイク処理すると両画像の境界線が明瞭に残る。しかし、都市域の抽出という目的に限ると相対的に他の土地被覆よりアルベドや LST の差が検知できれば十分であるため、特に撮影日の違いには対処しなかった。

図 3-3-1 は Landsat TM/ETM+から都市域を抽出する流れを明示している。1990 年代のバンド 1~5 と 7 の DN 値から NDVI とアルベドが推定された。さらに、バンド 6 のデータと NDVI から LST が推定された。これらのデータを用いて、eCognition で領域分割、分類を行うことで、1990 年代の都市域が特定された。この結果をマスク処理し、1990 年代で非都市域であった地域に対して、同様の処理を繰り返し、2000 年代で都市域と推定される領域が抽出された。図 3-3-2 に 1990 年代の都市域とそれ以降に発生した都市域の抽出結果が示されている。

3-3-4 考察

図 3-3-2 の結果は、リモートセンシングデータが都市化に関する 2 次元のデータを定時可能であることを示している。2 次元の面的なデータは、空間的な偏りから都市化の様子が理解しやすく、都市化を表現する効果的なデータといえる。最終的には、何らかの処理を通じて統計データとしての代表値を決めるのであるが、面的データの抽出はリモートセンシングの特長を十分に利用しているといえる。今回得られた結果は初期的な段階に過ぎず、また検証されていない。今回、3 種類のパラメータが抽出されて様々な組合せが検討された結果、可視アルベドと LST の組合せが都市域の抽出には最も有効であることが判明した。しかしながら、本研究で対象とした NDVI、アルベド（可視、近赤外、短波長）、LST という 3 種類のパラメータ、またバンコクという対象地域に依存する可能性も高い。したがって、対象とするメガシティごとに有効なパラメータの組合せを確認する必要があると考えられる。

また、図 3-3-1 で示された、1990 年代の都市域をマスク化する手法についても考察が必要である。当初は、1990 年代と 2000 年代と独立して都市域の分類を試みたが、2000 年代の都市域面積が小さくなるという、現実的に矛盾する結果に至った。この要因を考えると、1990 年代と 2000 年代のデータの取得時期の違いによる、大気状態および地表面状態の違いが大きく影響していると思われる。大気補正に限っても、正確な大気補正を実現する

ためには、水蒸気とエアロゾルの空間分布を精度良く把握しておく必要がある。実際にはこのようなデータを入手することは困難であるので、本研究のように方法論で矛盾をなくすよう対処した。当然、この方法論自体も改善を含めた検討を要する。

3-3-5 結論

筆者らはEIUSの構築、アジアのメガシティでの適用を検討しているものの、EIUSで必要とされる統計データの取得の困難さ、統一基準の欠如が重要な問題として考えられる。その対策として、本研究ではリモートセンシングデータからの環境データの抽出を試みた。リモートセンシングと通じて、時空間的に比較的等質なデータを利用できるため、リモートセンシングデータの利用を検討した。リモートセンシングデータの中でも、Landsat TM/ETM+データはインターネット上で無料で入手できるだけでなく、1990年と2000年代の異なる年代のデータが利用できる。したがって、Landsat TM/ETM+データから推定可能なパラメータに着目した結果、植生指数、アルベド、地表面温度を対象とした。これらの3つのパラメータを抽出しただけでなく、面的データを抽出できるというリモートセンシングデータの特長を活かして、1990年代と2000年代における都市域の拡大の様子を抽出した。その結果、得られる環境データの種類には制約が伴うものの、リモートセンシングは面的なデータを抽出し、同一基準で異なるメガシティ間を比較するには有用であると判明した。しかしながら、EIUSにうまく組み込めるようにパラメータの設定などの問題があり、どのようにリモートセンシングデータを活用するかは更なる検討を要するといえる。

参考文献

- [1] Global Land Cover Facility. Earth Science Data Interface, available at <http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>
- [2] Barnsley, M. J., Strahler, A. H., Morris, K. P., and Muller, J. P., Sampling the surface bidirectional reflectance distribution function (BRDF): 1. Evaluation of current and future satellite sensors, *Remote Sensing Reviews*, vol. 8, pp. 271-311, 1994
- [3] Pinty, B. and Verstraete M., 1992. On the design and validation of surface bidirectional reflectance and albedo model, *Remote Sensing of Environment*, vol. 41, pp. 155-167
- [4] Liang, S., 2003. A direct algorithm for estimating land surface broadband albedos from MODIS imagery, *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 41, pp. 136-145
- [5] Asner, G. P., Braswell, B. H., Schimel, D. S., and Wessman, C. A., Ecological research needs from multiangle remote sensing data, *Remote Sensing of Environment*, vol. 63, pp. 155-165, 1998
- [6] Liang, S., 2000. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I

- Algorithms, *Remote Sensing of Environment*, vol. 76, pp. 213-238
- [7] Liang, S., Shuey, C. J., Russ, A. L., Fang, H., Chen M., Walthall C. L., Daughtry, C. S. T. and Hunt, R., 2002. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo: II. Validation, *Remote Sensing of Environment*, vol. 84, pp. 25-41
- [8] Chander, G. and Markham, B., 2003. Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Postcalibration Dynamic Ranges, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 41, No. 11, pp. 2674-2677
- [9] Weng, Qihao., Lu, D. and Schubring, J., 2004. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies, *Remote Sensing of Environment*, vol. 89, pp. 467-483
- [10] Li, F. Jackson, T. J., Kustas, W. P., Schmugge, J., French, A. N., Cosh, M. H. and Bindlish, R., 2004 Deriving land surface temperature from Landsat 5 and 7 during SMEX02/SMACEX, *Remote Sensing of Environment*, vol. 92, pp. 521-534
- [11] Sobrino, J. A., Raissouni, N., and Li, Z., 2001. A comparative study of land surface emissivity retrieval from NOAA data, *Remote Sensing of Environment*, vol. 75, pp. 256-266
- [12] Choudhury, B. J., Ahmed, N. U., Idso, S. B., Reginato, R. J., and Daughtry, C. S. T., 1994. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulation, *Remote Sensing of Environment*, vol. 50 pp. 1-17
- [13] eCognition, available at <http://www.definiens-imaging.com/>

表 3-3-1 バンコクにおける EIUS で必要とされる統計データの収集結果(灰色で表示されたデータが入手できなかったデータを意味する)

| Quality of Life Inside City | | | | |
|-------------------------------------|--|---|---|-------------------|
| First Classification | Second Classification | Third Classification | Source | |
| Environment/ Public Health | Degree of nature | Ratio of vegetation coverage | | |
| | Sanitary conditions | Cases of grievances against pollution | | PCD |
| | | Distribution ratio of sewerage (%) | | BMA |
| | | Air pollution concentration along main roads | | PCD |
| | | Cases of oxidase smog | | --- |
| | | Ratio of patients of breathing diseases | | MPH/BMA(DMS) |
| | | Ratio of patients of infectious diseases | | MPH/BMA(DMS) |
| | | SO ₂ Density (ppm) | | PCD |
| | | NO _x Density (ppm) | | PCD |
| | | | SPM Density (mg/m ³) | PCD |
| Public Function/ Public Services | Administration | Growth rate of population (%) | NSO | |
| | | Financial capability index | NSO | |
| | Habitation | Floor space of houses (m ² /one person) | | --- |
| | | Ratio of electrified areas | | |
| | | Ratio of persons equipped with information devices | | |
| | Education | Ratio of graduates studying in elementary schools | | BMA/NSO |
| | | the number of teacher at primary school (the number/1,000persons) | | BMA/NSO |
| | | the number of the library volumes (the number/one persons) | | BMA/NSO |
| | | the number of Infant school (the number/1,000persons) | | BMA/NSO |
| | Commerce | Retail stores(the number/1,000persons) | | |
| | Traffic | Length of roads/Passing transport | | PWD |
| | | Modal share of public transport(%) | | OTP |
| | Welfare | Areas of urban parks(m ² /person) | | BMA |
| | | Medical welfare facilities (the number/one person) | | DLP/SSO |
| | | | | |
| Safty/ Security | Earthquake | Ratio of non-earthquake-proof houses (%) | | |
| | | Fire occurrences (the number/1,000perons/one year) | | |
| | Fire | Ratio of non-fire-proof houses (%) | | --- |
| | | Rescue operation persons of fire station (the number/1000persons) | | |
| | | the number of disasters /the volume of rainfalls (the ratio/one year) | | DDPM |
| | Storm and flood damage | | | |
| | | Crime/Accident | Criminal offenses (the number/1000persons/one year) | Royal Thai Police |
| | | Traffic accidents (the number/one person/one year) | Royal Thai Police | |
| | | Field policemen (the number/1,000persons) | Royal Thai Police | |
| | Beds of sickness (the number/1,000persons) | MPH/BMA(DMS) | | |

| Environmental Load | | | |
|-------------------------------|-----------------------|---|----------|
| First Classification | Second Classification | Third Classification | Source |
| Energy | Electricity | Consumption of electricity (kWh/one person/one year) | MEA |
| | | Consumption of city gas (MJ/one person/one year) | --- |
| | Gas | Consumption of propane gas (kg/one person/one year) | PTT/PTIT |
| | | Consumption of kerosene (ℓone person/one year) | EPPQ |
| Resources | Water Resources | Water use (m ³ /one person/one year) | MWA |
| | Waste | Household refuse (kg/one person/one year) | BMA |
| | | Industrial wastes (ton/one person/one year) | DIW |
| Environment over wide area | Atmosphere | CO ₂ Emission Volume (ton/one person/one year) | DAEDE |
| | | SO ₂ Emission Volume (ton/one person/one year) | DAEDE |
| | | NO _x Emission Volume (ton/one person/one year) | DAEDE |
| | | SPM Emission Volume (ton/one person/one year) | DAEDE |

Remarks:

BMA: Bangkok Metropolitan Administration

DAEDE: Department of Alternative Energy Development and Efficiency

DDPM: Department of Disaster Prevention and Mitigation

DDS: Department of Drainage and Sewerage

DEQP: Department of Environmental Quality Promotion

DIW: Department of Industrial Works

DLP: Department of Labour Protection and Welfare

DMS: Department of Medical Services

DPS: Disaster Prevention Subdivision

DPT: Department of Public Works, Town and Country Pla

EPPQ: Energy Policy and Planning Office

MEA: Metropolitan Electricity Authority

MPH: Ministry of Public Health

MWA: Metropolitan Waterworks Authority

NSO: National Statistical Office

OTP: Office of Transport and Traffic Policy and Planning

PCD: Pollution Control Department

PTIT: Petroleum Institute of Thailand

PTT: PTT Public Company Limited

PWD: Public Works Department

SSO: Social Security Office

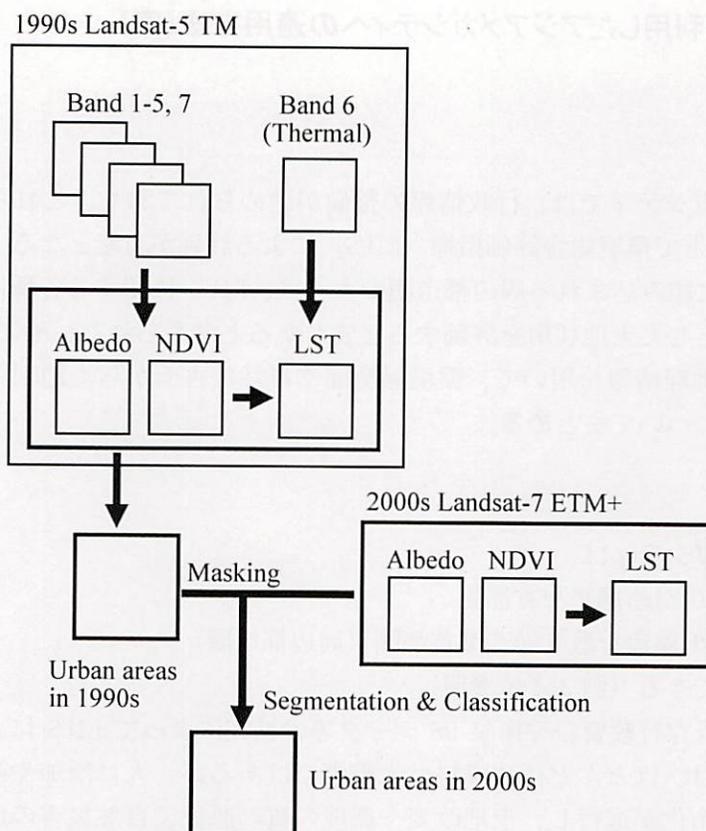


図 3-3-1: Landsat TM/ETM+データを用いた 1990 年代と 2000 年代の都市域抽出の枠組み

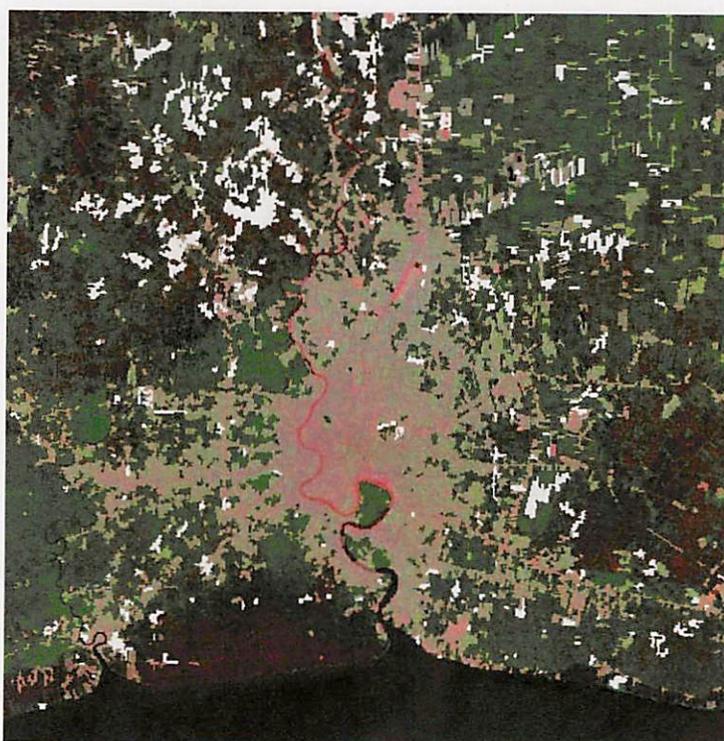


図 3-3-2: Landsat TM/ETM+データを用いた 1990 年代と 2000 年代の都市域抽出の結果 (灰色の領域は 1990 年代からの都市域、白色の領域はそれ以後の新しい都市域)

3-4 衛星 RS を利用したアジアメガシティへの適用方法(案)

3-4-1 概要

(1)ねらい

アジア諸国のメガシティでは、行政情報の整備が進められており、これらの情報や衛星 RS 情報を用いることで環境総合評価指標 (EIUS) による評価が可能となる。そして将来的には、メガシティに組み込まれる周辺都市圏のように、EIUS に関する各種情報が未整備な広範な地域を対象として土地利用を評価する必要もあると考えられる。そこで、衛星 RS データと入手可能な地理情報を用いて、環境保全面や自然災害面から土地利用適性を評価するための適用方法についてまとめる。

(2)考え方

アジア諸国のメガシティは、

- ① 人口が超過密な首都圏
- ② その周辺を取り巻く準首都圏 (周辺都市圏)

に大別することができる (図 3-4-1 参照)。

①については、既存行政資料や衛星 RS データ等の補完によって EIUS による評価がなされる。②については、ほとんど行政資料は未整備ではあるが、人口増加や産業経済の発展により、急速に都市化が進行し、土地改変や環境の質の悪化、自然災害の危険性などを伴っている。今後、メガシティに取り込まれるこのような周辺都市を対象にして、衛星 RS データや利用可能な既往資料を併用し、環境保全や自然災害の側面から土地利用の適性評価を行い、EIUS を実施していくために整備すべき情報や整備地域の優先度などを検討していく際の基礎資料として活用する。

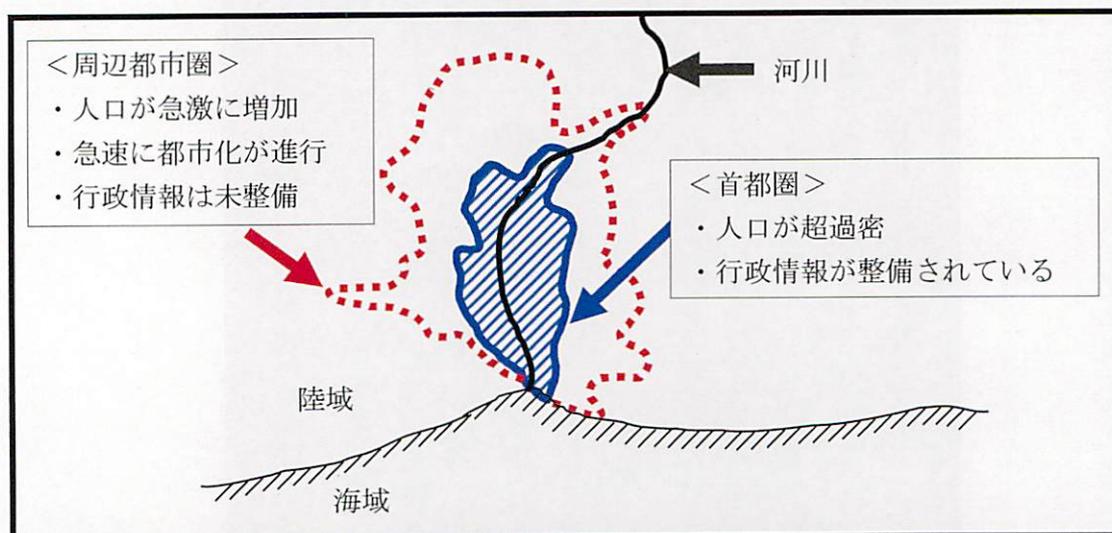


図 3-4-1 首都圏と周辺を取り巻く準首都圏のイメージ

3-4-2 解析の手順

土地利用適性評価を実施する際の解析手順を図 3-4-2 に示す。

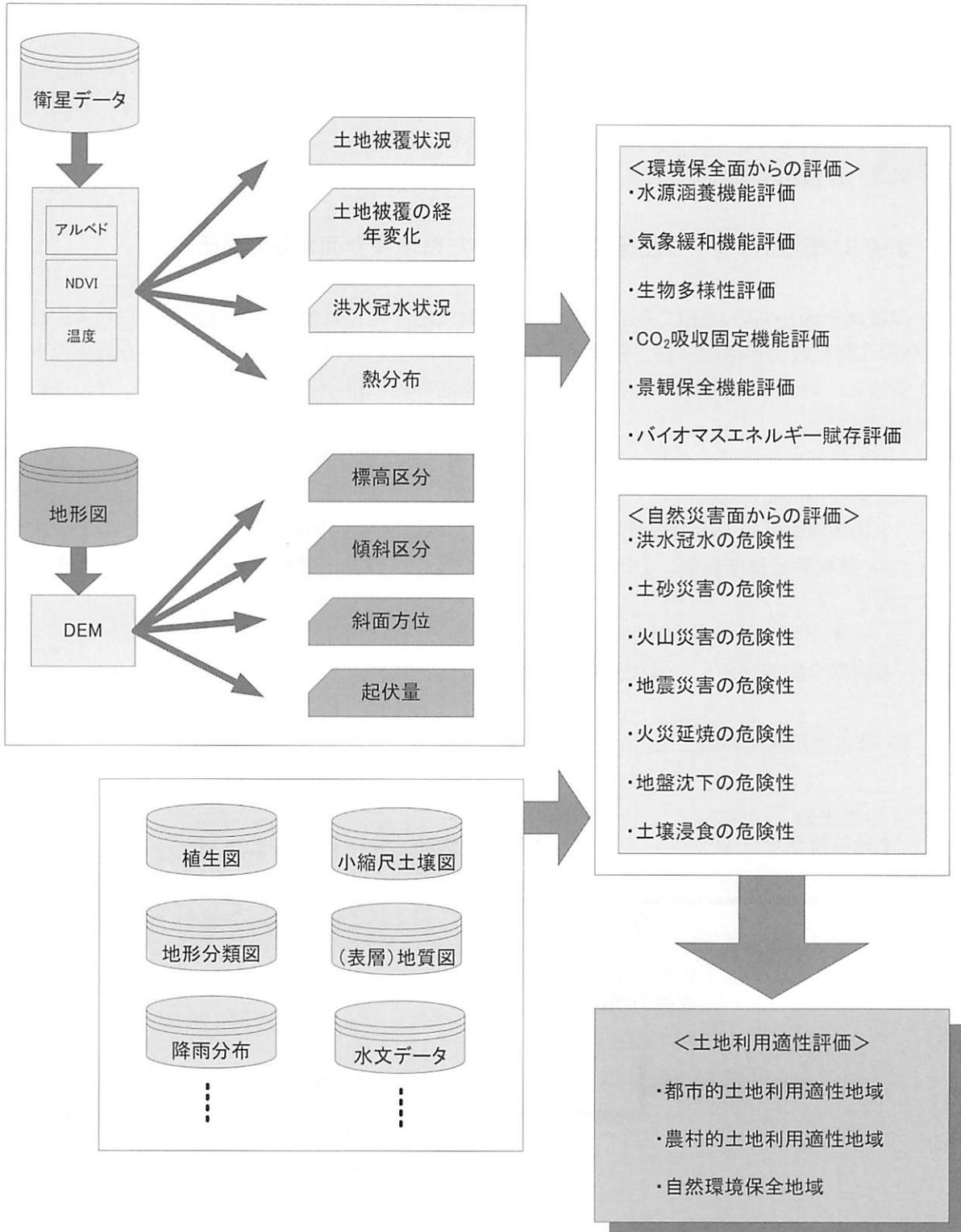


図 3-4-2 解析手順

土地利用適性評価は、以下の観点を踏まえて行う。

- ① 環境保全面からの評価
- ② 自然災害面からの評価

これらの評価を実施するためには、図 3-4-2 に示したように様々な既存情報を収集しなければならない。また、収集した情報から必要な情報を抽出する必要もある。例えば、衛星データからは、土地被覆状況、土地被覆の経年変化、洪水冠水状況および熱分布などの情報抽出が必要になると考えられる。また、地形図からは、標高区分、傾斜区分、斜面方位および起伏量などの情報抽出が必要になると考えられる。

以降、環境保全面および自然災害面からの評価について記載する。

3-4-3 衛星 RS データと既存情報を用いた環境保全面からの評価

環境保全面からの評価に関しては、水源涵養機能評価、気象緩和機能評価、生物多様性評価、CO₂吸収固定機能評価、景観保全機能評価およびバイオマスエネルギー賦存評価などを実施し、総合的に判断する必要がある。各機能評価に用いる代表的なパラメータについて例示する。

- ・ 水源涵養機能評価：森林・緑地の分布や面積、また熱分布など。
- ・ 気象緩和機能評価：森林・緑地の分布や面積、また熱分布など。
- ・ 生物多様性評価：土地被覆の複雑さ、森林、緑地面積、市街地との距離など。
- ・ CO₂吸収固定機能評価：土地被覆の経年的な変化、森林・緑地の分布や面積、植生情報など。
- ・ バイオマスエネルギー賦存評価：森林・緑地の分布や面積、植生情報など。
- ・ 景観保全機能評価：土地被覆の経年的な変化情報など。

CO₂吸収固定機能評価を例にして、機能評価のイメージを図 3-4-3 に示す。

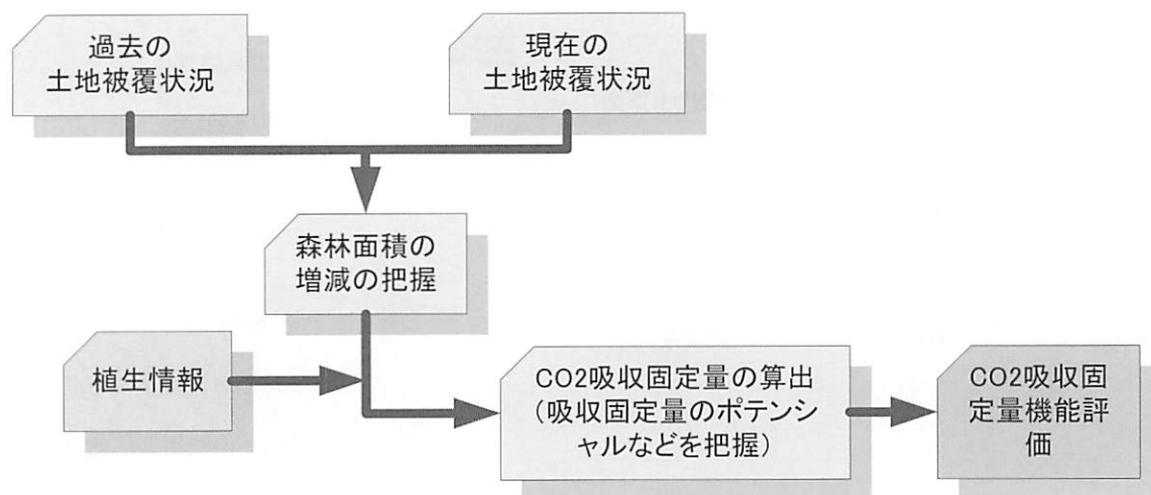


図 3-4-3 CO₂吸収固定機能評価のイメージ

3-4-4 衛星 RS データと既存情報を用いた自然災害面からの危険性評価

自然災害面からの評価に関しては、洪水冠水の危険性、土砂災害の危険性、火山災害の危険性、地震災害の危険性、火災延焼の危険性、地盤沈下の危険性および土壌浸食の危険性などを評価し、総合的に判断する必要がある。各機能評価に用いる代表的なパラメータについて例示する。

- ・ 洪水冠水の危険性：洪水による冠水エリア、標高データ、降雨分布など。
- ・ 土砂災害の危険性：標高区分、傾斜区分、斜面方位、起伏量、土地被覆情報、土地被覆、降雨分布など。
- ・ 火山災害の危険性：標高区分、傾斜区分、斜面方位、起伏量、土地被覆、熱分布など。
- ・ 地震災害の危険性：土地被覆など。
- ・ 火災延焼の危険性：土地被覆（特に森林、緑地）など。
- ・ 地盤沈下の危険性：地質図、地形分類図、水文データなど。
- ・ 土壌浸食の危険性：土壌図、地質図、降雨分布、水文データなど。

土砂災害の危険性を例にして、評価のイメージを図 3-4-4 に示す。

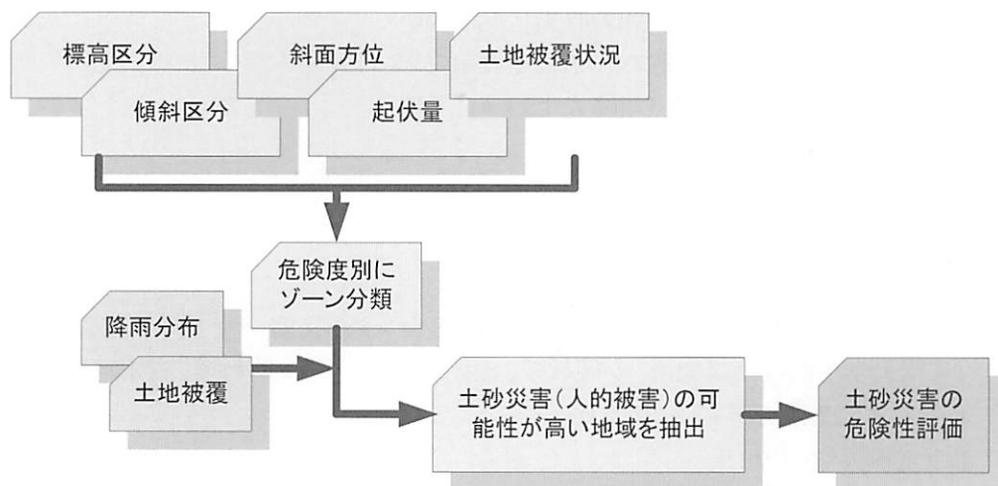


図 3-4-4 土砂災害の危険性評価

3-4-5 周辺都市圏を対象とした土地利用適正評価について

環境保全および自然災害の両面からの評価を受けて総合的に判断し、その土地の利用適正評価を行う。評価は、都市的な土地利用の適正地域、農村的な土地利用の適正地域および自然環境保全地域に分類することで行う。このように、土地利用の適正を評価することは、EIUS を首都圏からその周辺を取り巻く準首都圏（周辺都市圏）へ拡大させる際の、検討の基礎資料として有効であり、これによって今後整備すべき行政情報の選択が容易になると考えられる。

4. 活動経過

第1回WG

日時:平成17年5月16日(月)16:00~18:00

場所:東京大学生産技術研究所 Cw601号室 ICUSセンター長室

出席者:東京大学生産技術研究所 安岡教授、大岡助教授、遠藤助手

東京電力(株)建設部 中井氏、中嶋氏

国際航業(株)技術センター 瀬戸島、デジタルセンシングセンター 船橋

議題:・第42回環境工学研究フォーラム発表論文について

・今後の研究スケジュールについて

第2回WG

日時:平成17年6月20日(月)16:00~18:00

場所:東京大学生産技術研究所 Cw601号室 ICUSセンター長室

出席者:東京大学生産技術研究所 安岡教授、大岡助教授、遠藤助手

東京電力(株)建設部 中井氏、中嶋氏

国際航業(株)技術センター 瀬戸島、デジタルセンシングセンター 船橋

議題:・国内政令指定都市統計情報の収集状況について

・第42回環境工学研究フォーラム発表論文「タイトル、アブスト」について

・バンコクでの作業報告(須崎先生よりのご報告)

・今後の研究スケジュールについて

第3回WG

日時:平成17年7月11日(月)16:00~18:00

場所:東京大学生産技術研究所 Cw601号室 ICUSセンター長室

出席者:東京大学生産技術研究所 安岡教授、大岡助教授、ダッタ助教授、吉本秘書

東京大学生産技術研究所 川本氏

東京電機大学 柴田氏

東京電力(株)建設部 中井氏、中嶋氏

国際航業(株)技術センター 瀬戸島

国際航業(株)デジタルセンシングセンター 船橋、河合

議題:・各発表論文のアブストラクトについて

・衛星リモートセンシングデータによるメガシティの解析について

・国内政令指定都市統計情報の収集状況について

第4回WG

日時:平成17年10月4日(火)15:10~16:50

場所:東京大学生産技術研究所 Cw601号室 ICUSセンター長室

出席者:東京大学生産技術研究所 安岡教授、大岡助教授、遠藤助手

東京大学生産技術研究所 川本氏

東京電機大学 柴田氏、栗原氏
東京電力(株)建設部 中井氏
清水建設(株)技術研究所 岡田氏
国際航業(株)技術センター 瀬戸島
国際航業(株)デジタルセンシングセンター 船橋、河合

議 題:・各発表論文について
・今後の取り組みについて

第5回WG

日 時:平成17年11月17日(木)15:00~17:30
場 所:東京大学生産技術研究所 Cw601号室 ICUSセンター長室
出席者:東京大学生産技術研究所 安岡教授、大岡助教授、遠藤助手
東京電力(株)建設部 中井氏
国際航業(株)技術センター 瀬戸島
国際航業(株)デジタルセンシングセンター 船橋

議 題:・ASEAN 諸国の民生施設における省エネルギーへの取組状況
・第42回環境工学研究フォーラム発表論文について
・今後の取り組みについて

第6回WG

日 時:平成17年12月14日(水)17:30~19:00
場 所:東京大学生産技術研究所 Cw601号室 ICUSセンター長室
出席者:東京大学生産技術研究所 安岡教授、大岡助教授、遠藤助手
東京電力(株)建設部 中井氏、中嶋氏
国際航業(株)技術センター 瀬戸島
国際航業(株)デジタルセンシングセンター 船橋

議 題:・本年度WGの方向性について
・次年度のWG活動について
・次年度WG活動に関する情報提供

第7回WG

日 時:平成18年2月9日(木)15:00~17:00
場 所:東京大学生産技術研究所 Cw601号室 ICUSセンター長室
出席者:東京大学生産技術研究所 安岡教授、大岡助教授、遠藤助手
東京電力(株)建設部 中井氏、中嶋氏
国際航業(株)技術センター 瀬戸島
国際航業(株)デジタルセンシングセンター 船橋 河合

議 題:・AGSシンポジウムへの参加について
・本年度報告書の執筆分担
・次年度WG活動内容の検討

資-1

DEVELOPMENT OF NEW ENVIRONMENTAL INDICES FOR URBAN
SUSTAINABILITY

DEVELOPMENT OF NEW ENVIRONMENTAL INDICES FOR URBAN SUSTAINABILITY

RYOZO OOKA, YOSHIHUMI YASUOKA, JUNICHI SUSAKI,
TAKAHIRO ENDO, YOICHI KAWAMOTO
Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Tokyo, Japan
HIDENOBU NAKAI, MADOKA NAKASHIMA, REI TAKADA
Tokyo Electric Power Company
MASAHIRO SETOJIMA, MANABU FUNAHASHI
Kokusai Kogyo Co. LTD.
KEIICHI OKADA
Shimizu Corporation
ooka@iis.u-tokyo.ac.jp

ABSTRACT

In this research, the comprehensive assessment indices that becomes the indicator of the plan for a sustainable city is developed (Environmental Indices for Urban Sustainability: EIUS). Various indices that evaluated urban environment have been developed in order to solve the urban problem including a so-called environmental pollution issue since 1970's in many countries of the world, especially by OECD. These are the indices that evaluate mainly the environmental qualities such urban air quality or various services supported by the administration inside the city. However, the environmental load such as CO₂ emissions that the city activity exerts on the larger area or the global environment cannot be neglected with the rise of the consideration of global environmental problems in recent years. In this paper, at first stage, the several items which represent the environmental quality inside the city (Health, Services, Safety, etc.) and the environmental load outside the city (Energy consumption, Resources consumption, Environmental pollution, etc.) are selected. Then, these items are combined in order to construct the comprehensive assessment indices (EIUS) which consider both the environmental quality and the environmental load in and outside the city. Furthermore, these indices are applied for 11 government ordinance specification cities in Japan. The applicability of these indices is estimated and the sustainability of these 11 cities is examined.

1. Introduction

In Asia, there is a strong tendency for population and functionality to converge in cities. The economic development in many countries is creating a problem of runaway urbanization (the megacity problem). These megacities lag in the creation of urban infrastructure and safety measures, as well as environmental, educational, and other measures. This is causing services for city residents to decline, making environmental pollution and other issues an everyday occurrence, and causing the appearance of slums and other problems in some areas. Meanwhile, however, the over-

concentration of functions in the cities is causing its own problems; the areas around cities are becoming depopulated wastelands.

In addition, the rapid expansion of urban functions is increasing the flow of pollutants (such as sulfur oxides and carbon dioxide) into the air and seas, which is polluting the global atmosphere and coastal seas. It is highly likely that this situation will create critical environmental issues on a global scale in the future.

The present research is developing an index to comprehensively assess urban environments, to serve as a guideline for planning sustainable cities. Many indices have been created in many countries to assess urban environments, starting with the OECD in the 1970s. These indices were used to assess the environment inside the city, in order to resolve such urban issues as urban pollution. But as awareness of global environmental issues has increased over the past few years, it has become impossible to ignore the impact that urban activities themselves have on the global environment. The present paper identifies measures that specify the quality of life inside the city and environmental impact (load) outside the city at the municipal-government level, and reconstructs an urban-environment index taking both aspects into account. It also applies this index to Tokyo and 11 government ordinance specification cities, considers the appropriateness of the measures used within the index, and compares the sustainability of Tokyo and the 11 government ordinance specification cities.

2. Basic Concept of Creating an Index to Assist Urban Environments

The present research is developing an index to comprehensively assess urban environments, to serve as a guideline for planning sustainable cities. This is thus an assessment of cities; but in order to assess an urban environment, it is first necessary to define just what we mean by "city." While the definition of "city" is argued by a great many scholars and people in the field, here the authors define a city as a region under the jurisdiction of a municipal government. The reason the authors define it thusly is because most environmental measures for cities are carried out at the municipal level, and so assessing at the municipal level simplifies our work. The areas inside and outside the city for the urban environmental index mentioned above are defined as follows: the region within the municipality is inside the city, and other areas are outside it.

The following points were also taken into account in the creation of this assessment index.

- (1) **Consistency** When assessing urban environments, it is vital to collect detailed data for each city. But the more data one has, the more complex it becomes to handle, and the more difficult to assess. Consequently, it is important to summarize data to a certain extent, and create a comprehensive index.
- (2) **Generality** There is great disparity among the set of urban areas called "cities." For example, in Japan we have cities ranging in population from more than 8 million in Tokyo (in its 23 wards), to cities with fewer than 50,000 people. There are also major differences in their

population makeup, industrial structure, climatic conditions, and economic conditions, among others. It is thus necessary to create an index that is general and fair for all cities; this requires some sort of standardization, such as showing figures in per-capita units.

- (3) **Comprehensiveness** As can be seen in check systems used for environmental impact assessment, checks of the impacts and effects of policies must encompass an extremely broad range of phenomena. Put simply, it is necessary to prepare a set of individual elements that are well balanced, and put together with the consistency mentioned in item (1).
- (4) **Representativeness** Environmental monitoring and the like must be representative. In other words, measurements of environmental elements are not representative if they change depending on when or where in an area they are taken. For example, the location that air pollution or noise is measured has a great impact on the results. In such cases, it is necessary to create clear rules for measurement, and investigate geographical and temporal representativeness.
- (5) **Intuitiveness** An index of urban environments should not be used solely by researchers, government officials, and other experts; it should also facilitate dialog with city residents. Consequently, the index must be intuitiveness understandable by residents; it should jibe with their live experiences and sensibilities.
- (6) **Ease of Measurement** No matter how elaborate of an index of urban environments one creates, it is unusable if one cannot obtain the data making it up. The data used to calculate the index must be easy to obtain, and the method to calculate it must be simple.

3. Overview of a Comprehensive Assessment Index for Urban Environments

In order to assess the environment of a city, it is necessary to assess both its good and bad aspects. The reason people live concentrated in a city in the first place is to reap some sort of benefit. If urban environments are assessed in ignorance of this aspect, one is led to the extreme argument that not having cities is best for the environment. We have thus built an index that assesses both the pros and cons of cities. To put this another way, the authors evaluate both the benefits gained by residents living inside the city, and the impact on the environment surrounding it. The authors call these aspects as Quality of Life inside City and Environmental Load Outside City, and define them as follows.

(1) Quality of Life inside City

Table 1 shows examples of each of the elements making up the Quality of Life inside City aspect. The environment inside the city can be divided into three major categories: (1) environment and public health; (2) functions and services; and (3) safety and security.

(1) Environment and public health: This is an index of level of public health, hygiene, and natural richness available to city residents. The percentage of greenery is used as a measure of the richness of the natural environment. The authors believe this is both relatively easy to measure, and representative. Concentration of air pollutants is an intuitive index of the air environment. It is difficult to create indices for soil and water quality, because the conditions of soil and water pollution are highly localized, and the measurements taken will depend greatly on where they are made. Consequently, the authors represent these by numbers of patients of communicable diseases. The authors use sewerage connection rate to represent public health.

Table 1. Index of Quality of Life Inside City

| Major Category | Minor Category | Assessment Index | Weight [%] | | Score | | | | |
|---------------------------------------|---------------------|---|------------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | | Minor | AI | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Q1 Environment/ public health | Natural environment | Greenery [%] | 30 | 100 | -10 | -20 | -30 | -45 | 45- |
| | Air | SO ₂ concentration [ppm] | 30 | 50 | 0.007- | -0.007 | -0.005 | -0.003 | -0.001 |
| | | NOX concentration [ppm] | | 50 | 0.07- | -0.07 | -0.05 | -0.03 | -0.01 |
| | Public health | Number of communicable disease infections/1,000 people | 40 | 50 | 1.0- | -1.0 | -0.7 | -0.5 | -0.3 |
| Sewerage connection [%] | | 50 | | -60 | -70 | -80 | -90 | 90- | |
| Q2 Public Functions / Services | Administration | Population growth [%] | 20 | 50 | -0.3 | -0.1 | -0.1 | -0.3 | 0.3- |
| | | Fiscal index | | 50 | -0.6 | -0.7 | -0.8 | -0.9 | 0.9- |
| | Habitation | Total housing floor space per capita | 20 | 40 | -27 | -32 | -36 | -40 | 40- |
| | | Electrification | | 30 | -80 | -85 | -90 | -95 | 95- |
| | | Internet access | | 30 | -60 | -70 | -80 | -90 | 90- |
| | Education | Library books per capita | 10 | 40 | -1.2 | -1.6 | -2.0 | -2.4 | 2.4- |
| | | Elementary-school teachers/1,000 people | | 30 | -2.4 | -2.5 | -2.6 | -2.7 | 2.7- |
| | | Preschools/kindergardens /1,000 people | | 30 | -0.08 | -0.09 | -0.1 | -0.11 | 0.11- |
| | Commerce | Retail stores/1,000 people | 10 | 100 | -6 | -8 | -10 | -12 | 12- |
| | Traffic | Total road length per capita | 20 | 50 | -2 | -2.5 | -3 | -3.5 | 3.5- |
| | | Public transport burden | | 50 | -10 | -20 | -30 | -40 | 40- |
| | Welfare | Welfare facilities/1,000 people | 20 | 50 | -0.25 | -0.3 | -0.35 | -0.4 | 0.4- |
| City park area per capita | | 50 | | -4 | -7 | -10 | -14 | 14- | |
| Q3 Safety/ Security | Earthquakes | Existing buildings without adequate earthquake-proofing | 20 | 100 | - | - | - | - | - |
| | Fire | Fires/1,000 people/year | 20 | 50 | 0.56- | -0.56 | -0.48 | -0.40 | -0.32 |
| | | Fire fighters/1,000 people | | 50 | -0.7 | -0.9 | -1.1 | -1.3 | 1.3- |
| | Storm /Flood | Victims/total rainfall upon damage per year | 20 | 100 | - | - | - | - | - |
| | Crime/ accidents | Crimes/1,000 people | 40 | 30 | 40- | -40 | -35 | -30 | -25 |
| | | Traffic accidents/1,000 people | | 20 | 9- | -9 | -8 | -7 | -6 |
| Police boxes/stations/ 100,000 people | | 20 | | -4 | -5 | -6 | -7 | 7- | |
| Hospital beds/10,000 people | | 30 | | -10 | -13 | -16 | -19 | 19- | |

(2) Functions and services: This is an index of the cultural and social benefits reaped by city residents. It indicates that the higher the population growth rate, the greater the attraction of this aspect. Additionally, the higher a city's fiscal index, the sounder the state of its economy. Sub-category "housing functions" indicates the richness of the living environment. An

element of culture and education is number of elementary-school teachers. Although there are no great differences in this area between municipalities in Japan, it should serve as an index of social maturity when expanded to cities throughout Asia. Another minor category is transportation. In this minor category, public-transportation utilization responds directly to supply, and is a measure of the degree to which public transportation has been created. Meanwhile, road area and traffic volumes should be used to express convenience of road utilization, but detailed calculations of traffic volumes are not conducted on a nationwide scale. It has thus been substituted for another index here.

(3) Safety and security: As the name suggests, this is an index of the safety and security with which residents can live in the city. The number of out-of-code buildings is used as a measure of earthquake and fire safety, but figures on this are not currently kept in Japan. A simple measurement and estimation method and database are needed for buildings at risk of collapsing in an earthquake, or in the event of a fire, spreading a fire. It is also difficult to evaluate flood danger. The level of flooding in urban areas greatly depends on the sewerage treatment capacity, and other factors are also large. Hazard maps are needed for this aspect.

Environmental Load Outside City

Table 1 shows examples of each of the elements making up the Environmental Load Outside City aspect. The major categories are: (1) energy consumption; (2) resources and materials; and (3) the greater-area environment.

(1) Energy consumption: This is an investigation of total energy consumption through the evaluation of primary energy (heat) in relation to total energy. The lower the total energy consumption, the more sustainable the city is deemed to be. Thus, the authors do not example individual efforts to conserve energy here.

(2) Resources and materials: This index is represented by water usage and the amount of waste. The lower the level of waste, the more sustainable the city is deemed to be. Thus, the authors do not example individual efforts to conserve resources here.

(3) Greater-area environment: Unlike the environmental and public health used in the previous section (Quality of Life inside City), this is a measure of the degree to which the city contributes to environmental pollution outside the city, and to the global environment. Since there will probably be a large difference between the amount of pollution imported by the city and the amount exported out of the city, this can be represented by the amount of pollution produced inside the city. The calculation of pollution generation includes all pollution produced by urban activities, rather than just pollution produced inside the city. For example, with regard to electric power consumption, air pollution produced by a thermal power plant located far from the city is included. Additionally, waste that is sent outside the city for treatment is included in the greater-area environment, as it contributes to the environmental impact (load) outside the city.

Each item was also weighted in order to create a comprehensive index. Weighting should be changed according to the circumstances of each city.

Tables 1 and 2 show sample weighting and scores used for the present report. The scores were assigned as follows: for each evaluation index, quality of life and environmental load were each given three points, and the total was normalized to a maximum of 5 points. If the levels of both quality of life and environmental load were improving, the score would be high; if they were worsening, the score would be low. It should be noted here that a high score for environmental load indicates a low level of environmental impact. Furthermore, the items for the major categories (Q 1–3 and L 1–3) have a maximum score of 5 points, in accordance with the weighting shown in Tables 1 and 2. In the table a dash (–) indicates all municipalities do not keep such data, and the data could not be obtained. Consequently, these items were eliminated from the present scoring. The collection of this data will be a future task.

Table 2. Index of Environmental Load Outside City

| Major Category | Minor Category | Assessment Indices | Weight [%] | | Score | | | | |
|----------------------------------|-----------------|--|------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | Minor | AI | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| L1 Energy | Electricity | Electricity usage [MJ/person/year] | 50 | 100 | 8000- | -8000 | -7000 | -6000 | -5000 |
| | Gas | City gas usage [MJ/person/year] | 50 | 100 | 30- | -30 | -20 | -15 | -10 |
| | | Propane gas usage [MJ/person/year] | | | - | - | - | - | - |
| | Others | Kerosene usage [MJ/person/year] | - | - | - | - | - | - | - |
| L2 Resources/ | Water Resources | Tap-water usage [tons/person/year] | 40 | 100 | 135- | -135 | -125 | -115 | -105 |
| | Waste | Household waste [tons/person/year] | 60 | 50 | 600- | -600 | -500 | -400 | -300 |
| | | Industrial waste [tons/person/year] | | | 50 | 5- | -5 | -4 | -3.5 |
| L3 Environment over wide area | Air | CO ₂ emissions [tons/person/year] | 100 | 100 | 15- | -15 | -10 | -7 | -3 |
| | | NOX emissions per capita | | | - | - | - | - | - |
| | | SOX emissions per capita | | | - | - | - | - | - |
| | Others | Waste within system not treated per capita | - | - | - | - | - | - | - |

4. Results of Calculation

Fig. 1 shows the index of urban environments scoring results for Tokyo and the 11 government ordinance specification cities in radar charts. Two designated major cities – Saitama and Shizuoka – recently merged, and the area of the city changed; for this reason, they do not yet have prepared data, and thus were excluded from the scoring. The larger the area occupied by the city inside the hexagonal radar chart, the higher its level of environmental performance.

Sapporo's score was high for Q1 (environment and public health). This is due to the high proportion of the city area covered by greenery. The score for L1 (energy) is also high. The present estimate excludes kerosene usage; Sapporo is located in a frigid area, and kerosene usage (for heating) is high. Thus, it is believed that if kerosene usage were added to the estimate, Sapporo's score in this area would fall.

As with Sapporo, Sendai scored highly in Q1 (environment and public health). In terms of load, it also scored highly for L1 (energy). As with Sapporo, this is likely due to the fact that kerosene usage is not counted in the estimate. The score for L2 (resources) is also high. This is due to the lower generation of household and industrial waste than other cities.

Chiba's score for Q3 (safety) is low. This is due to the relatively high crime rate there, and the low number of hospital beds per capita. In terms of load, the scores for L1 and L2 were low. This is probably due to the fact that Chiba consumes a large amount of energy and produces large quantities of CO₂, because it is an industrial city.

Tokyo (the 23 wards) had low scores for Q3 (safety) and L1 (energy). In terms of energy usage, the electricity consumption per capita is high. This is probably due to the concentration of economic activity in Tokyo.

Kawasaki had low scores for Q3 (safety), L1 (energy), and L3 (greater-area environment). This is because, like Chiba, Kawasaki has the characteristics of an industrial city.

Yokohama's score for Q1 (environment and public health) is low. The reason for the low score for Q1 (environment and public health) in particular is due to the poor state of air pollution. Overall, environmental-load scores were high.

Nagoya had low scores for Q3 (safety) and L1 (energy). This is also due to its characteristics as an industrial city.

Kyoto had low scores for Q3 (safety) and L2 (resources and materials).

As with other industrial cities, Osaka had overall low scores for environmental load. Its score for L1 (energy), however, was high in comparison with other industrial cities. This indicates that Osaka's industrial structure is moving from heavy industries to information-intensive industries.

Kobe's scores for Q1 (environment and public health) and Q2 (functions) were high.

Hiroshima's characteristics are similar to those of Kobe, but its scores were low for L2 (resources and materials) and L3 (greater-area environment), resembling an industrial city.

Fukuoka also has characteristics of an industrial city.

Kitakyushu also has characteristics of an industrial city. In this case, however, it had relatively high scores for Q1 (environment and public health) and Q2 (functions) for an industrial city.

5. Conclusions

The authors have developed a comprehensive environmental assessment index for sustainable cities. This has required assessments from the perspectives of both quality of life in the city and the environmental load of the city. This index was also applied to Tokyo and the 11 government ordinance specification cities. This has shown the environmental performance and features of each city. In the future, the authors will work to obtain a fuller set of data, and expand the assessments to smaller cities in Japan and to cities in Asia.

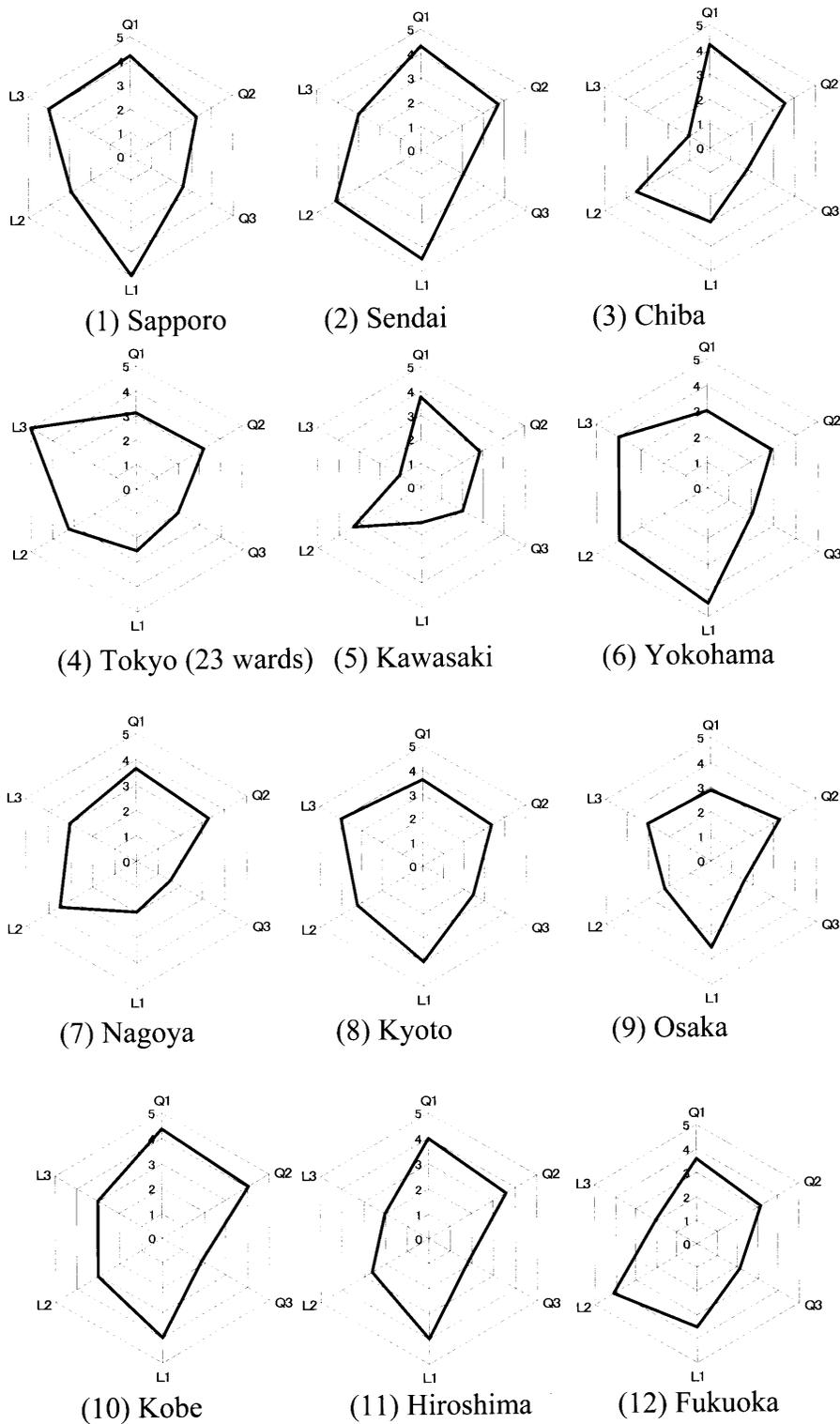


Figure 1. Comprehensive Assessment Indices for Environments of Tokyo and 11 government ordinance specification cities

資-2

Extraction of Parameters from Remote Sensing Data for Environmental
Indices for Urban Sustainability

Extraction of Parameters from Remote Sensing Data for Environmental Indices for Urban Sustainability

Junichi Susaki, Supannika Pothitthep, Ryoza Ooka, Yoshihumi Yasuoka, Takahiro Endo, Yo-ichi Kawamoto

Institute Industrial Science, University of Tokyo, Tokyo, Japan
susaki@iis.u-tokyo.ac.jp

Hide Nobu Nakai, Madoka Nakashima, Rei Takada
Tokyo Electric Power Company

Masahiro Setojima, Manabu Funahashi
Kokusai Kogyo Co. LTD.

Keiichi Okada
Shimizu Corporation

Abstract: Asian mega cities have continued to expand, and accordingly, various problems, e.g. social, economical and environmental problems, have been widely recognized in Asia. Especially, environmental issues caused by Asian mega cities will affect not only the areas within mega cities but also the whole area of Asian countries because the effects will be widely propagated by atmospheric or marine transportation. Authors have conducted researches related to comprehensive assessment indices for urban sustainability, named as Environmental Indices for Urban Sustainability (EIUS). In the framework of EIUS, both the environmental quality and the environmental load are focused on. An urban sustainability will be evaluated based on the scores for all categories of EIUS [1]. Most of the environmental data used in EIUS are collected from statistical data and those are restricted to point-based data. If area-based data such as vegetation distribution or urban area distribution are required, remotely sensed technique is quite useful. Remote sensing data also has an advantage to compare the parameters of different cities by the same criteria. In the present research, the applicability of remote sensing data to extract area-based environmental data for EIUS was examined. Landsat Thematic Mapper (TM) and Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) images, observed in 1990s and 2000s, were used to extract vegetation index, albedo and land surface temperature. Urban areas of Bangkok in 1990s and 2000s were extracted from such parameters. Based on the acquired results, the methodology will be improved and applied to extract urban areas in other Asian mega cities.

Keywords: Environmental Indices for Urban Sustainability, EIUS, Remote Sensing Data.

1. Introduction

Environmental issues caused by Asian mega cities have been recognized to be monitored and assessed in an effective manner. While some statistics of mega cities have been reported to date, a systematic assessment is still lacking. Authors have developed comprehensive assessment indices for urban sustainability, named as Environmental Indices for Urban Sustainability (EIUS). The EIUS is based on the framework of comprehensive assessment system for building environmental efficiency (CASBEE). The CASBEE was developed for assessment of the efficiency surrounding a building. In Section 2, EIUS as well as CASBEE are described. Considering implementation of EIUS, data accessibility is quite a difficult issue. Therefore, we examined the feasibility of application of satellite remote sensing data.

2. Framework of EIUS

1) CASBEE

In the field of architecture where mass resources and energy are consumed, “sustainability” has been one of the most important keywords. Development of techniques and policies for sustainability is quite inevitable. CASBEE aims to promote proactive decisions in terms of environmental effects caused by construction and management of buildings. And, it assesses based on the items which should be pursued proactively in future. Therefore, CASBEE focuses on environmental functions of buildings, not on all of the functions of qualities of buildings [2].

A basic concept of CASBEE is shown in Fig. 1. In CASBEE, “Virtual boundary” is assumed to discriminate a space inside boundary from a space outside boundary. The space inside boundary refers to the quality of the space mainly provided by the building. This is called as “Environmental quality”. On the other hand, the flow from the

inside to the outside of boundary can be regarded as a negative load to the environment. This is called as “Environmental load”. In Fig. 1, BEE (Building Environment Efficiency) can be defined as the ratio of “Environmental quality” to “Environmental load”. Such a simple index can represent both quality and environmental load of a building [2].

Fig. 2 shows an example of assessment of environmental quality and load based on BEE. In CASBEE, there are five scores such as S, A, B+, B- and C. In the space of “Environmental load – Environmental quality”, each score has its own domain. If BEE is higher, a better score will be given. Such an assessment based on BEE value enables the comparison between different buildings. This framework of CASBEE can be applied for environmental indices for urban sustainability, or EIUS. The details on EIUS are described in the following subsection.

2) Concept of EIUS

EIUS was created as an index to enable the assessment and comparison of urban sustainability. EIUS is based on the concept of CASBEE. Tab. 1 shows EIUS framework. In the EIUS, there are two types of categories such as “Quality life of inside city” and “Environmental load”. Each category has hierarchical structure consisted of the first classification and the second classification items. In the category “Quality life of inside city”, there are three first classification items; “Environment / Public Health”, “Public Function / Public Services” and “Safety / Security”. On the other hand, the category “Environmental load” has three first classification items such as “Energy”, “Resources” and “Environment over wide area”.

Tab. 1 also represents the examination results of data availability in Bangkok. Authors have contacted ministries and departments of Thailand, and examined data availability. The “Source” in Tab. 1 means ministries and departments of Thailand which can provide the data. Regarding the data accessibility, most of the data were obtained a few to several weeks after official documents were sent to them. Gray column shows the data were not available. In the case of Bangkok, it was found that most of data required in the current framework are available.

3) Difficulties in Data Collection for EIUS

Even though data collection was successfully conducted in Bangkok, it is not expected to obtain as much data as in other mega cities. Therefore, the data items should be flexibly changed in accordance with the real data accessibility. Simultaneously, we have to consider the data source independent of statistical data collected by organization in different countries. Another reason for the necessity of another data source is to apply the same criteria for data collection. While the statistics are useful for the national analysis, non-unified criteria for the statistics will cause confusion for the international analysis. Our final goal is to assess and compare the environmental sustainability in many mega cities. Therefore, we have to compare the statistics collected in different countries.

Remote sensing has a strong advantage for such problems. The remote sensing, especially satellite remote sensing, can observe land, ocean and atmosphere from the space. In most of applications, remote sensing data are converted into physical parameters or indices. The quantitative and qualitative analysis based on the same criteria can be implemented by using remote sensing data. Moreover, most of remote sensing data are processed as images, and then area-based information can be derived. Area-based information is quite effective to grasp urbanization.

Another advantage of remote sensing data is periodical observation. We have different types of earth observation satellite and sensors. High resolution data such as Landsat Thematic Mapper (TM), Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), or Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) has 16-day periods. This means every 16-day, at least one image is periodically obtained. Optical sensor data are easily contaminated by atmospheric effects, e.g. clouds or aerosols. Therefore, we cannot expect too many images with good quality through a year. However, such periodical observation enables the analysis of temporal environmental change.

3. Feasibility of Data Collection by Remote Sensing

First of all, it should be clarified while EIUS mainly deals with various statistics, remote sensing has a potential to be one of the most effective data sources for EIUS. In the framework of EIUS, authors examined the feasibility of data collection by remote sensing.

In principle, remote sensing can detect the electromagnetic wave radiated or reflected from atmosphere, land or ocean. In terms of spatial resolution, recently very high resolution data such as IKONOS (1m) or QUICKBIRD (0.6m) data are available, and those data can provide the detailed spatial data. However, because of the expensive data cost, we focus on the usage of high resolution data such as TM, ETM+ and ASTER. Those costs are relatively cheap. Moreover, many Landsat TM/ETM+ images are available free of charge through the Internet [3]. Those images are geometrically corrected, and two images observed in 1990s and 2000s are available in most of scenes.

Such services are quite useful for the analysis conducted in the present research, i.e. quantitative analysis of temporal change of urban area.

As a result, Landsat TM/ETM+ images were used for the analysis in the present research. Especially, those images were used for the extraction of urban areas. Two images observed at different times enabled the comparison of the change of urban areas. As parameters describing such urbanization, three parameters were selected, i.e. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), albedo and land surface temperature (LST). In the following subsection, methods to derive parameters are described.

1) NDVI

NDVI has been widely recognized as useful for the studies of the land biosphere characteristics and dynamics at regional to global scales. NDVI has more sensitivity to chlorophyll and less contamination by atmospheric water vapor. NDVI is obtained through calculation of reflectances of the red and near infrared (NIR), expressed as Eq. (1).

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (1)$$

where ρ_{RED} and ρ_{NIR} denote reflectances at red band and NIR band, respectively. For Landsat TM/ETM+, band 3 and 4 are used.

2) Albedo

Land surface albedo is a physical parameter that describes the optical reflectance of the land surface. Albedo is commonly defined as the reflectance of a surface integrated with respect to both wavelength (usually between 0.3 μm and 3.0 μm) and angle (i.e. for all directions within the hemisphere above the surface) [4]. Land surface broadband albedo is the fraction of incident (shortwave) solar radiation reflected in all directions by the land surface [5]. Examples of the albedo applications include global and regional climatic models for computing the surface energy balance [6], and ecological models [7].

Liang developed conversion formulae from narrowband to broadband albedos for a series of sensors, including ASTER, AVHRR, ETM+/TM, GOES, MODIS, MISR, POLDER, and VEGETATION. The conversion formulae are based on extensive radiative transfer simulations. These formulae are used to calculate the total shortwave albedo and the total-, direct-, diffuse-visible, and near-infrared broadband albedos under various atmospheric and surface conditions [8]. The validation results for three broadband albedos (total-shortwave, total-visible and total-near-infrared albedos) using ground measurement of several cover types are presented in the paper. These results show that the conversion formulae are very accurate and that the average residual standard errors of the resulting broadband albedos for most sensors are approximately 0.02, which meets the required accuracy for land surface modeling [9].

In the present research, Liang conversion model was used to estimate albedo. Three types of albedos, i.e. total-shortwave, total-visible and total-near-infrared albedos, are available. As a result, total-shortwave albedo was selected for the analysis. Hereafter it is mentioned as “shortwave albedo” or simply “albedo”. The procedure to estimate albedo from DN value is described in the below [10].

Firstly, DN value was converted into radiance L by applying Eq. (2).

$$L_{\lambda} = (L_{max,\lambda} - L_{min,\lambda})/255 * DN + L_{min,\lambda} \quad (2)$$

where $L_{min,\lambda}$ and $L_{max,\lambda}$ are the spectral radiances for band λ at digital numbers 0 and 255. Tab. 2 shows L_{min} and L_{max} for all bands of Landsat TM and ETM+.

In the present research, Liang conversion model was used to estimate albedo. Three types of albedos, i.e. total-shortwave, total-visible and total-near-infrared albedos, are available. As a result, total-shortwave albedo was selected for the analysis. Hereafter it is mentioned as “shortwave albedo” or simply “albedo”. The procedure to estimate albedo from DN value is described in the below [10].

Then, radiance was converted into reflectance by applying Eq. (3).

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda} \cdot d^2}{E_{\lambda} \cdot \cos \theta} \quad (3)$$

where

- ρ_i unitless planetary reflectance;
- L_i spectral radiance at the sensor's aperture;
- d earth-sun distance in astronomical units;
- E_i mean solar exoatmospheric irradiances;
- θ solar zenith angle in degrees.

Tab. 3 shows Landsat TM and ETM+solar exoatmospheric spectral irradiances.

Finally, broadband albedo was estimated by applying Liang model for Landsat ETM+, expressed as Eq. (4) [8].

$$\begin{aligned}\alpha_{VIS} &= 0.443\rho_1 + 0.317\rho_2 + 0.240\rho_3 \\ \alpha_{NIR} &= 0.693\rho_4 + 0.212\rho_5 + 0.116\rho_7 - 0.003 \\ \alpha_{SW} &= 0.356\rho_1 + 0.130\rho_3 + 0.373\rho_4 + 0.085\rho_5 + 0.072\rho_7 - 0.0018\end{aligned}\quad (4)$$

where α_{VIS} , α_{NIR} and α_{SW} denote total visible albedo (0.4 – 0.7 μm), total near-infrared albedo (0.7 – 2.5 μm) and shortwave albedo (0.25 – 2.5 μm) for ETM+, respectively. ρ_n denotes reflectance of band n . In Liang, 2000, there is no model for Landsat TM. Therefore, Eq. (4) was also applied for the estimation of albedo of Landsat TM.

3) LST

Thermal band data (band 6) from Landsat TM/ETM+ can also be converted from spectral radiance to effective at-satellite temperature [10]. The conversion formula is described as Eq. (5).

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_i} + 1\right)} \quad (5)$$

where

- T effective at-satellite temperature in Kelvin;
- K_1 calibration constant 1 in $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu\text{m})$;
- K_2 calibration constant 2 in kelvin;
- L_i spectral radiance at the sensor's aperture.

Tab. 4 shows calibration constants K_1 and K_2 for Landsat TM and ETM+. The effective at-satellite temperature values T are referenced to a black body. Therefore, corrections for spectral emissivity ε are necessary. Eq. (6) represents the emissivity correction to derive land surface temperature S_i .

$$S_i = \frac{T}{1 + (\lambda \times T / \rho) \ln \varepsilon} \quad (6)$$

where λ is wavelength of emitted radiance ($\lambda = 11.5 \mu\text{m}$), $\rho = h \times c / \sigma (1.438 \times 10^{-2} \text{ m K})$, $\sigma =$ Boltzman constant ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$), $h =$ Planck's constant ($6.626 \times 10^{-34} \text{ J s}$), and $c =$ velocity of light ($2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$) [11].

Emissivity ε can be estimated in many ways. In the present research, a methodology reported in [12] is selected. Emissivity ε is expressed as Eq. (7).

$$\varepsilon = f_v \varepsilon_v + (1 - f_v) \varepsilon_s \quad (7)$$

where ε_v and ε_s denote emissivity of vegetation and soil, respectively. f_v denotes fractional cover of vegetation (0 – 1). ε_v and ε_s were assumed as 0.985 and 0.978 [13]. Fractional cover f_v can be expressed as Eq. (8) [14]

$$f_v = 1 - \left(\frac{NDVI_{max} - NDVI}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^a \quad (8)$$

where $NDVI_{max}$ is the NDVI for complete vegetation cover, and $NDVI_{min}$ is the NDVI for bare soil. In the present paper, $NDVI_{max}$ and $NDVI_{min}$ were assigned as 0.94 and 0.0, respectively. The coefficient a is a function of leaf orientation distribution with the canopy. In the present research, a was assumed as 0.6 for the application.

4) Extraction of Urban Areas

In most of applications of remote sensing data, parameters extracted from remote sensing data or original DN data are used for the classification to produce thematic map. Our purpose is to extract urban areas from remote sensing images. In usual classification, statistical classifiers have been applied. Such classifiers have severe shortcoming that they classify on pixel-basis, which tend to produce patch-like classification results. Therefore, classifiers based on image processing techniques have been examined. Recently, a software eCognition has been popular as an effective classification tool [15]. It classifies based on segmentation technique, and eCognition was used to extract urban areas in this research.

5) Case Study: Bangkok

In the present research, Bangkok was selected as a case study because we completed data collection of Bangkok regarding EIUS. The purpose is to examine the possibility to extract effective parameters related to environmental assessment in EIUS. As an effective parameter, urban area was selected. Both Landsat TM images in 1990s and ETM+ images in 2000s were obtained from Web site [3]. Two images of path 129, row 50 and path 129, row 51 were merged as a mosaic image. The observed dates are listed in Tab. 5.

Fig. 3 shows a flow of extraction of urban areas from Landsat TM/ETM images. From original DN values of band 1 to 5 and band 7, NDVI and albedos were estimated. And, LST was estimated from a thermal band data, i.e. band 6 data. These sets of parameters were calculated for TM images in 1990s and ETM+ images in 2000s. Firstly, urban areas in 1990s were extracted. eCognition was used for the segmentation and classification of urban areas. After urban areas in 1990s were estimated, the areas were used as a mask layer for ETM+ images. And then, urban areas since 2000s were extracted. Fig. 4 represents the results of urban areas extracted from Landsat TM/ETM+.

4. Discussions

Fig. 4 represents remote sensing can produce area-based information about urbanization. However, the methodology described in Fig. 3 and the results shown in Fig. 4 are preliminary. The results obtained in the present research should be examined from various viewpoints, and some improvements are required. Authors examined combinations of several parameters, i.e. NDVI, albedo (VIS, NIR and SW) and LST. Among those combinations, the combination of VIS albedo and LST was found to be effective for the extraction of urban areas. However, these combinations should be examined more.

The methodology to mask urban areas in 1990s needs discussions. In the beginning, authors extracted urban areas in 1990s from parameters in 1990s and urban areas in 2000s from parameters in 2000s, separately. However, the urban areas in 2000s were smaller than the urban areas in 1990s. The shrink of the extracted urban areas may be caused by different atmospheric conditions and different observation seasons. It is quite difficult that a perfect atmospheric correction is implemented because of lack of sufficient data related to atmospheric. On the other hand, authors assumed that the urban areas in 1990s will be urban areas even in 2000s. The methodology to use the masking is based on such an assumption. However, such assumption should be examined by referring to the existing thematic map. Validation of extracted urban areas and application of the methodology for other Asian mega cities will be examined in future.

5. Conclusions

In the present paper, authors report the framework of EIUS and feasibility of application of remote sensing data for EIUS. EIUS has a potential to enable the comparison of sustainability of Asian mega cities. However, implementation of EIUS may have difficulty to collect data, mainly statistics. Even though statistics are collected

from mega cities, non-unified criteria make the comparison between mega cities difficult. Therefore, a feasibility to apply remote sensing data was examined. Remote sensing enables the acquisition of area-based data, which is effective for understanding urbanization, and the comparison between many mega cities under the same criteria. In the present research, NDVI, albedo and LST were derived from Landsat TM/ ETM+ images obtained in 1990s and 2000s. Finally, urban areas in 1990s and 2000s were extracted, and it was found that remote sensing has a potential to be used for EIUS. The methodology utilized in the framework of EIUS should be examined.

References

- [1] Ooka, R., Yasuoka, Y., Susaki, J., Endo, T., Kawamoto, Y., Nakai, H., Nakashima, M., Takada, R., Setojima, M., Funahashi, M. and Okada, K., 2005. Development of new environmental indices for urban sustainability, *Proceeding of the Fourth International Symposium on New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia*
- [2] CASBEE Manual 1, 2003. *Institute for Building Environment and Energy Conservation (IBEC)* (in Japanese)
- [3] Global Land Cover Facility. Earth Science Data Interface, available at <http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>
- [4] Barnsley, M. J., Strahler, A. H., Morris, K. P., and Muller, J. P., Sampling the surface bidirectional reflectance distribution function (BRDF): 1. Evaluation of current and future satellite sensors, *Remote Sensing Reviews*, vol. 8, pp. 271-311, 1994
- [5] Pinty, B. and Verstraete M., 1992. On the design and validation of surface bidirectional reflectance and albedo model, *Remote Sensing of Environment*, vol. 41, pp. 155-167
- [6] Liang, S., 2003. A direct algorithm for estimating land surface broadband albedos from MODIS imagery, *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 41, pp. 136-145
- [7] Asner, G. P., Braswell, B. H., Schimel, D. S., and Wessman, C. A., Ecological research needs from multiangle remote sensing data, *Remote Sensing of Environment*, vol. 63, pp. 155-165, 1998
- [8] Liang, S., 2000. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I - Algorithms, *Remote Sensing of Environment*, vol. 76, pp. 213-238
- [9] Liang, S., Shuey, C. J., Russ, A. L., Fang, H., Chen M., Walthall C. L., Daughtry, C. S. T. and Hunt, R., 2002. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo: II. Validation, *Remote Sensing of Environment*, vol. 84, pp. 25-41
- [10] Chander, G. and Markham, B., 2003. Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Postcalibration Dynamic Ranges, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 41, No. 11, pp. 2674-2677
- [11] Weng, Qihao., Lu, D. and Schubring, J., 2004. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies, *Remote Sensing of Environment*, vol. 89, pp. 467-483
- [12] Li, F. Jackson, T. J., Kustas, W. P., Schmugge, J., French, A. N., Cosh, M. H. and Bindlish, R., 2004 Deriving land surface temperature from Landsat 5 and 7 during SMEX02/SMACEX, *Remote Sensing of Environment*, vol. 92, pp. 521-534
- [13] Sobrino, J. A., Raissouni, N., and Li, Z., 2001. A comparative study of land surface emissivity retrieval from NOAA data, *Remote Sensing of Environment*, vol. 75, pp. 256-266
- [14] Choudhury, B. J., Ahmed, N. U., Idso, S. B., Reginato, R. J., and Daughtry, C. S. T., 1994. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulation, *Remote Sensing of Environment*, vol. 50 pp. 1-17
- [15] eCognition, available at <http://www.definiens-imaging.com/>
- [16] Landsat 7 Science Data Users Handbook, available at http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook_htmls/chapter11/chapter11.html

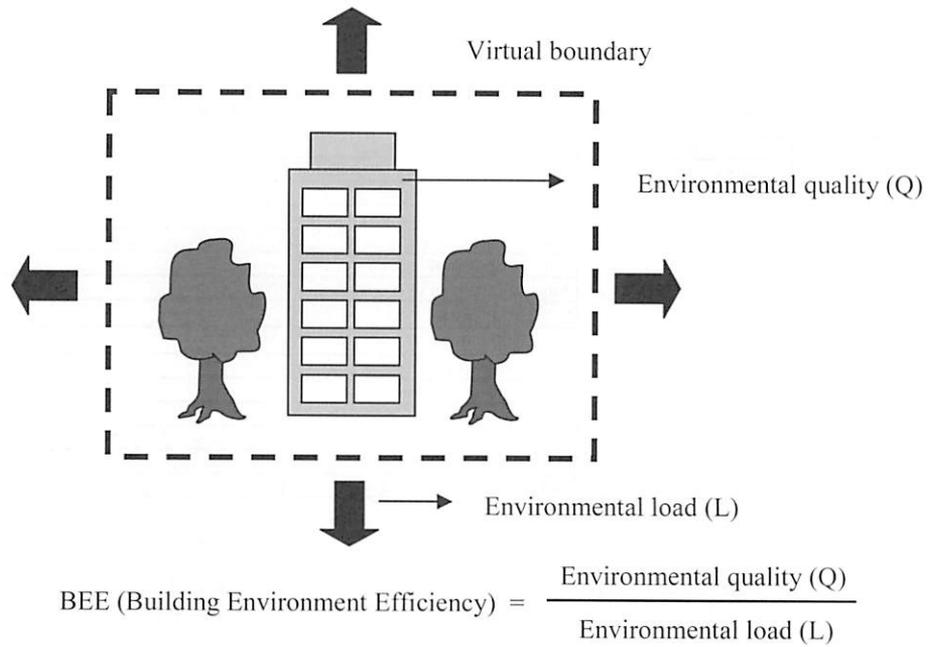


Figure 1: Basic concept of CASBEE. BEE (Building Environment Efficiency) can be defined as the ratio of “Environmental quality” to “Environmental load” [2].

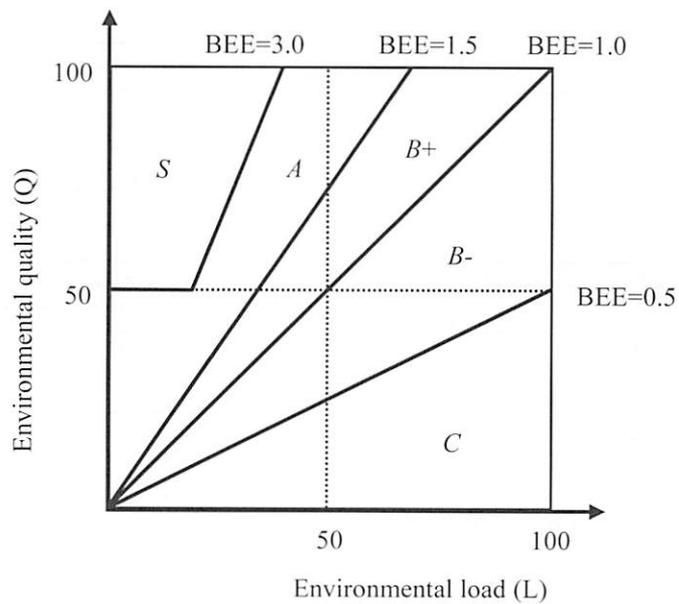


Figure 2: Example of assessment of environmental quality and load based on BEE. BEE value enables the comparison between different buildings. This framework of CASBEE can be applied for environmental indices for urban sustainability, or EIUS [2].

Table 1: Framework of EUIS and results of data collection in Bangkok. Gray column represents data were not available in Bangkok.

| Quality of Life Inside City | | | | |
|-------------------------------------|----------------------------------|---|--------|-------------------|
| First Classification | Second Classification | Third Classification | Source | |
| Environment/ Public Health | Degree of nature | Ratio of vegetation coverage | | |
| | Sanitary conditions | Cases of grievances against pollution | | PCD |
| | | Distribution ratio of sewerage (%) | | BMA |
| | | Air pollution concentration along main roads | | PCD |
| | | Cases of oxidase smog | | --- |
| | | Ratio of patients of breathing diseases | | MPH/BMA(DMS) |
| | | Ratio of patients of infectious diseases | | MPH/BMA(DMS) |
| | | SO ₂ Density (ppm) | | PCD |
| | | NO _x Density (ppm) | | PCD |
| | SPM Density (mg/m ³) | | PCD | |
| Public Function/ Public Services | Administration | Growth rate of population (%) | | NSO |
| | | Financial capability index | | NSO |
| | Habitation | Floor space of houses (m ² /one person) | | --- |
| | | Ratio of electrified areas | | --- |
| | | Ratio of persons equipped with information devices | | --- |
| | Education | Ratio of graduates studying in elementary schools | | BMA/NSO |
| | | the number of teacher at primary school (the number/1,000persons) | | BMA/NSO |
| | | the number of the library volumes (the number/one persons) | | BMA/NSO |
| | | the number of Infant school (the number/1,000persons) | | BMA/NSO |
| | Commerce | Retail stores(the number/1,000persons) | | --- |
| | Traffic | Length of roads/Passing transport | | PWD |
| | | Modal share of public transport(%) | | OTP |
| | Welfare | Areas of urban parks(m ² /person) | | BMA |
| | | Medical welfare facilities (the number/one person) | | DLP/SSO |
| Safty/ Security | Earthquake | Ratio of non-earthquake-proof houses (%) | | --- |
| | Fire | Fire occurrences (the number/1,000perons/one year) | | BMA (DPS) |
| | | Ratio of non-fire-proof houses (%) | | --- |
| | | Rescue operation persons of fire station (the number/1000persons) | | --- |
| | Storm and flood damage | the number of disasters /the volume of rainfalls (the ratio/one year) | | DDPM |
| | Crime/Accident | Criminal offenses (the number/1000persons/one year) | | Royal Thai Police |
| | | Traffic accidents (the number/one person/one year) | | Royal Thai Police |
| | | Field policemen (the number/1,000persons) | | Royal Thai Police |
| | | Beds of sickness (the number/1,000persons) | | MPH/BMA(DMS) |

| Environmental Load | | | | |
|-------------------------------|-----------------------|---|--------|----------|
| First Classification | Second Classification | Third Classification | Source | |
| Energy | Electricity | Consumption of electricity (kWh/one person/one year) | | MEA |
| | Gas | Consumption of city gas (MJ/one person/one year) | | --- |
| | | Consumption of propane gas (kg/one person/one year) | | PTT/PTIT |
| | | Consumption of kerosene (l/one person/one year) | | EPPO |
| Resources | Water Resources | Water use (m ³ /one person/one year) | | MWA |
| | Waste | Household refuse (kg/one person/one year) | | BMA |
| | | Industrial wastes (ton/one person/one year) | | DIW |
| Environment over wide area | Atmosphere | CO ₂ Emission Volume (ton/one person/one year) | | DAEDE |
| | | SO ₂ Emission Volume (ton/one person/one year) | | DAEDE |
| | | NO _x Emission Volume (ton/one person/one year) | | DAEDE |
| | | SPM Emission Volume (ton/one person/one year) | | DAEDE |

Remarks:

BMA: Bangkok Metropolitan Administration

DAEDE: Department of Alternative Energy Development and Efficiency

DDPM: Department of Disaster Prevention and Mitigation

DDS: Department of Drainage and Sewerage

DEQP: Department of Environmental Quality Promotion

DIW: Department of Industrial Works

DLP: Department of Labour Protection and Welfare

DMS: Department of Medical Services

DPS: Disaster Prevention Subdivision

DPT: Department of Public Works, Town and Country Planning

EPPO: Energy Policy and Planning Office

MEA: Metropolitan Electricity Authority

MPH: Ministry of Public Health

MWA: Metropolitan Waterworks Authority

NSO: National Statistical Office

OTP: Office of Transport and Traffic Policy and Planning

PCD: Pollution Control Department

PTIT: Petroleum Institute of Thailand

PTT: PTT Public Company Limited

PWD: Public Works Department

SSO: Social Security Office

Table 2: Landsat-5 TM and Landsat-7 ETM+ postcalibration dynamic ranges. Units of Lmin and Lmax are $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ [10] [16]

| Band | Landsat 5 TM (from March 1, 1984 to May 4, 2003) | | Landsat 7 ETM+ (from July 1, 2000) | | |
|------|--|--------|------------------------------------|----------|-----------|
| | Lmin | Lmax | Low/High | Low gain | High gain |
| 1 | -1.52 | 152.10 | Lmin | Lmax | Lmax |
| 1 | -1.52 | 152.10 | -6.2 | 293.7 | 191.6 |
| 2 | -2.84 | 296.81 | -6.4 | 300.9 | 196.5 |
| 3 | -1.17 | 204.30 | -5.0 | 234.4 | 152.9 |
| 4 | -1.51 | 206.20 | -5.1 | 241.1 | 157.4 |
| 5 | -0.37 | 27.19 | -1.0 | 47.57 | 31.06 |
| 6 | 1.2378 | 15.303 | 0.0 | 17.04 | 12.65 |
| 7 | -0.15 | 14.38 | -0.35 | 16.54 | 10.80 |
| 8 | --- | --- | -4.7 | 243.1 | 158.3 |

Table 3: TM solar exoatmospheric spectral irradiances. Units is $W/(m^2 \cdot \mu m)$ [10] [16]

| Band | Landsat 5 TM | Landsat 7 ETM+ |
|------|--------------|----------------|
| 1 | 1957.000 | 1970.000 |
| 2 | 1826.000 | 1843.000 |
| 3 | 1554.000 | 1555.000 |
| 4 | 1036.000 | 1047.000 |
| 5 | 215.000 | 227.100 |
| 7 | 80.720 | 80.530 |
| 8 | --- | 1368.000 |

Table 4: TM thermal band calibration constants [10] [16]

| Units | $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ | Kelvin |
|----------------|--------------------------------|---------|
| Constant | K_1 | K_2 |
| Landsat 5 TM | 607.76 | 1260.56 |
| Landsat 7 ETM+ | 666.09 | 1282.71 |

Table 5: TM images used for the analysis. These images were obtained from Web site [10] [16]

| Path/Row | 129/50 | 129/51 |
|----------|-------------|-------------|
| TM | 1994/Oct/25 | 1994/Oct/25 |
| ETM+ | 2000/Nov/02 | 2002/Jan/08 |

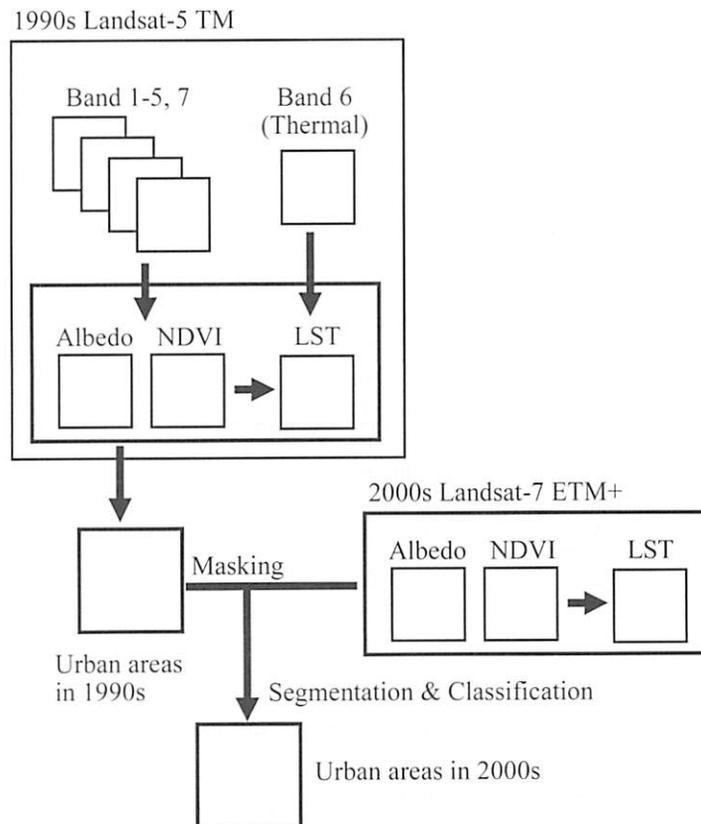


Figure 3: Flow of extraction of urban areas from Landsat TM and ETM+ images

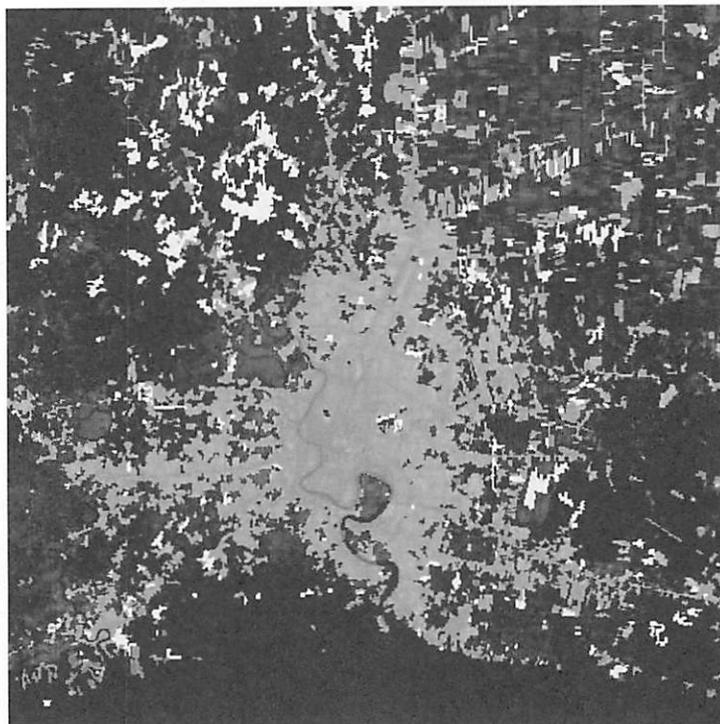


Figure 4: Urban areas of Bangkok, Thailand in 1990s and 2000s extracted from Landsat TM/ETM+ images. A base map is a composite of VIS albedo (red), NDVI (green) and LST (blue) of Landsat ETM+ in 2000s. Gray and white areas represent urban areas since 1990s and urban areas since 2000s, respectively.

資-3

ASEAN 諸国の民生施設における省エネルギーへの取組状況

ASEAN諸国の民生施設における 省エネルギーへの取組状況

～NEDO「アセアン4カ国におけるビル等
民生施設を対象としたエネルギー
有効利用技術導入基礎調査」より～

17 Nov. 2005

東京電力株式会社 建設部
土木・建築技術センター



TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY

調査概要

- NEDOの調査
 - 「タイ、インドネシア、マレーシア、及びフィリピンにおけるビル等民生施設を対象としたエネルギー有効利用技術導入基礎調査」
- 期間：
 - 2004. 12月～2005. 3月
- 内容：
 - 対象ASEAN4ヶ国の民生施設において日本の技術導入による省エネルギーの可能性に関する基礎調査



Key Words

- 民生施設(事務所、ホテル、デパート等)
 - 工場、家庭、輸送部門は除く
- 省エネを後押しする政策は？
- 省エネの技術的な余地はどこに？
 - どんな技術が普及？そのレベルは？
 - 運用管理の状況は？
- 省エネ改修投資／モデル事業の可能性は？
 - 経済性、オーナーの考え方 etc



調査・検討内容

- エネルギー基本情報
- 省エネルギー政策・施策
- エネルギー消費状況・ESCO関連情報
- 建物での省エネ技術採用動向
- 日本の技術の適用可能性の検討
- 現地建物でのケーススタディー
- モデル事業実施可能性検討



調査・検討内容

- エネルギー基本情報
- 省エネルギー政策・施策
- エネルギー消費状況・ESCO関連情報
- 建物での省エネ技術採用動向
- 日本の技術の適用可能性の検討
- 現地建物でのケーススタディー
- モデル事業実施可能性検討

調査・検討方法

【文献調査】

【ヒアリング】

政府関係者、省エネセンター、設計事務所、ゼネコン・サブコン、ESCO事業者

【建物調査】

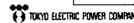
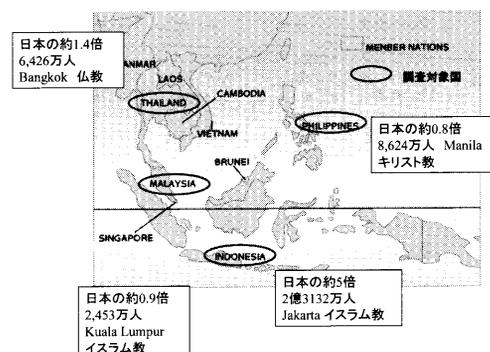
マレーシア、タイにて

計9箇所

(事務所、ホテル、商業、病院)



各国概要紹介



省エネルギー政策・施策(4)

| | マレーシア | タイ | フィリピン | インドネシア |
|---------------------|--|--|---------------------------------|---------------------------------|
| ・省エネ支援機関 | ・PTM(マレーシアエネルギーセンター) 精力的、データ収集や技術支援等 | ・省エネルギーセンター | ・ENMAPなど | ・KONEBA(国の省エネコンサル) |
| ・ベストプラクティス、省エネモデルビル | ・EEOB, Eco Energy Office ・ASEAN Energy Award 受賞多数 | ・省エネビル表彰制度あり ・ASEAN Energy Award 受賞多数 | ・省エネビル表彰制度あり (Don Emilio Award) | ・ASEAN Energy Award にもあまり受賞経験なし |

TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY

省エネルギー政策・施策(5)

| | マレーシア | タイ | フィリピン | インドネシア |
|-----|--|---|---|--|
| まとめ | ・自国資源が豊富で、省エネルギーに関心もある。 ・実効性のある制度を整備している段階。 ・個別の活動は、熱心(例: PTM) | ・自国資源が豊富でなく、省エネルギーに関心がある。 ・一応の制度は既に整備されている。4ヶ国中一番整っている。実効性に多少課題残る。 | ・自国資源が乏しく、省エネルギーには高い関心がある。 ・実効性のある制度はまだ整っていない。 | ・自国資源が豊富で、省エネルギーには実態としてはあまり関心があるように見えない。 |

TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY

エネルギー(1)

| | マレーシア | タイ | フィリピン | インドネシア |
|---------|--|--|--------------------------------------|---------------------------|
| インフラ | ・都市部は電化している。 ・都市ガスネットワークはあるが、小売価格が高い。 | ・都市部は電化している。 ・都市ガスはバンコク内にはない。郊外の工業団地まで。 | ・都市部は電化している。 ・都市ガスは、マニラ市内に到達していない | ・国として未電化地域多い。 |
| エネルギー価格 | ・高くない | ・高くない | ・高い! | ・安かったのが高くなってきた。(補助金撤廃の動き) |

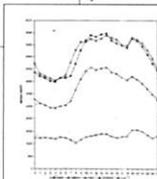
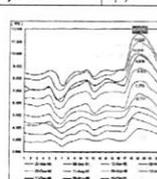
TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY

エネルギー(2)

| | マレーシア | タイ | フィリピン | インドネシア |
|-------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| 電力カーブ | ・先進国型 ・ピーク/オフピーク料金あり | ・先進国型 ・ピーク/オフピーク料金あり | ・先進国型 ・時間帯別料金なし(検討中) | ・電灯ピーク型(家庭部門需要による) ・ピーク/オフピーク料金あり |

TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY

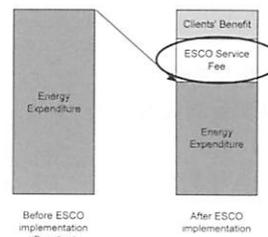
エネルギー(2)

| | マレーシア | タイ | フィリピン | インドネシア |
|--|---|-------------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| 電力カーブ | ・先進国型 ・ピーク/オフピーク料金あり | ・先進国型 ・ピーク/オフピーク料金あり | ・先進国型 ・時間帯別料金なし(検討中) | ・電灯ピーク型(家庭部門需要による) ・ピーク/オフピーク料金あり |
|  フィリピンの電力カーブ |  インドネシアの電力カーブ | | | |

TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY

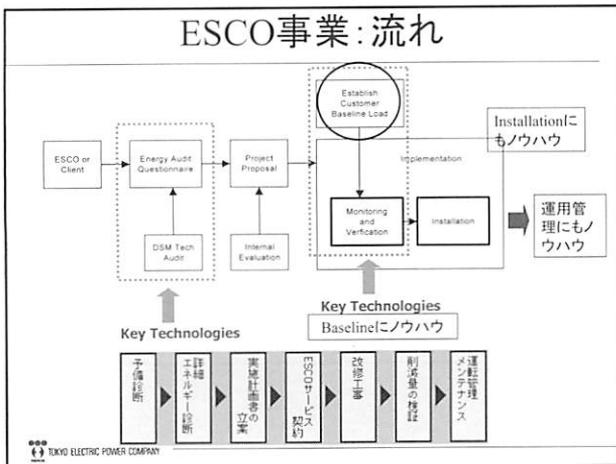
ESCO事業: 概念

Energy Service Companies



- ・削減されるエネルギー量を保証
- ・削減されるエネルギー費の中からフィーを貰う。数年契約。
- ・資金調達も役割のひとつ。技術的なノウハウ+ファイナンスのノウハウも必要
- ・エネルギー価格がある程度高くないと。

TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY



ESCO事業: 現地の状況

| | マレーシア | タイ | フィリピン | インドネシア |
|--------------|--|--|--|--|
| 事業者 事業タイプ | <ul style="list-style-type: none"> ESCO存在 70社も? 省エネコンサルが主 まずは産業分野 PTMが支援 MAESCOあり(活動なし) | <ul style="list-style-type: none"> ESCO多数存在 パフォーマンス契約少ない 省エネ機器販売業者多し まずは産業分野 MIEA、EGATも興味 | <ul style="list-style-type: none"> ESCO誕生し始め ESCO協会 昨年誕生 ENMAPも支援 | <ul style="list-style-type: none"> KONEBAのみ(国営) |

- ### ESCO事業
- バリア
 - エネルギー価格が安い
 - 投資余力の欠如/リースの仕組みの欠如
 - ESCOの仕組みのオーナーによる理解不足
 - 効果保証へのESCO側の自信不足
 - オーナーの投資回収年数への期待(2~3年)、省エネへの優先順位の低さ
 - ESCOとオーナー双方の信頼度

- ### 導入技術動向・設備保守状況
- 導入技術・設備
 - シンプルな設備構成(暖房不要・中間期なし)
 - 給湯需要なし
 - 高効率照明(Hf)は、まだ一般的でない
 - メンテ状況はよくない(マレーシア以外)
 - タイは大規模でもビルマルのケースあり

- ### 適用可能な省エネ技術
- 4ヶ国ほぼ共通
 - 多少インフラ、水質等により違いあり。
 - 空調
 - 高効率な熱源(ターボ冷凍機)
 - 二次側での風量・外気量制御等
 - 照明
 - 高効率照明(Hf) + 各種制御技術
 - BEMS

- ### 現地建物でのケーススタディー(1)
- 目的
 - 現地の技術、その運用状況
 - ケーススタディーおよび
 - モデル事業としての可能性を検討
 - 実施内容
 - 建物選定(用途、経過年数考慮)
 - 現地でウォークスルー調査
 - ヒアリング、目視確認、エネルギー量、コストデータ等入手
 - 省エネ量、省エネ額等の試算

ケーススタディー(2)

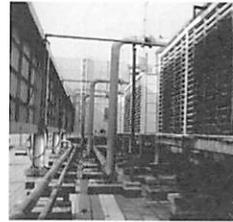


バンコクの風景
(超高層タワーの
屋上から)



TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY

ケーススタディー(3)



冷却塔

TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY

建物・設備概要

ケーススタディー(4)

| | 建物用途 | 延床面積 | 竣工年 | 空調方式 |
|-------|----------|--------|------------|----------------------------|
| マレーシア | 1 商業施設 | 11,000 | 1989 | セ: ターボ冷凍機300RT×8台 |
| | 2 事務所 | 27,300 | 1994 | セ: ターボ冷凍機450RT×3台 他 |
| | 3 ホテル | 75,000 | 1985 | セ: ターボ冷凍機800RT×3台 |
| | 4 ホテル | 40,000 | 1995 | セ: ターボ冷凍機500RT×3台 |
| タイ | 5 事務所 | 29,396 | 1991 | セ: ターボ冷凍機300RT×2台 200RT×2台 |
| | 6 事務所+SC | 92,024 | 1997 | セ: ターボ冷凍機300RT×3台 |
| | 7 事務所 | 56,000 | 1992~1996 | 個別方式 バックジェリアコン 187台 |
| | 8 ホテル | 55,000 | 1981 | セ: ターボ冷凍機534RT×1台 525RT×2台 |
| | 9 病院 | 93,130 | 1987, 1992 | セ: ターボ冷凍機400RT×3台 |

セ: センทรัล方式 SC: サービスセンター

殆ど似たような構成(7以外)

出典: p90, p157 『NEDO平成16年度調査報告書 タイ、インドネシア、マレーシア及びフィリピンにおけるビル等民生施設を対象としたエネルギー有効利用技術導入基礎調査』

TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY

結果概要(1)

ケーススタディー(5)

・マレーシア

| 用途 | 省エネ率 (%) | 省エネ額 (千円/年) | 省エネ量 | | | 年間エネルギー消費 (千円/年) | 【参考】一次エネルギー単位 (MJ/m ² /年) |
|--------|----------|-------------|------------|-----------------------|-----------------------|------------------|--------------------------------------|
| | | | 電気 (kWh/年) | 上水量 (m ³) | 下水量 (m ³) | | |
| 1 商業施設 | 17.3 | 7,309 | 941,644 | 2,482 | 1,269 | 41,870 | 5,941 |
| 2 事務所 | 17.2 | 5,038 | 380,997 | 2,825 | 1,734 | 31,860 | 1,741 |
| 3 ホテル | 22.8 | 22,380 | 1,295,321 | 8,457 | 4,791 | 109,130 | 2,313 |
| 4 ホテル | 12.5 | 9,729 | 1,414,941 | 5,762 | 3,506 | 76,740 | 3,390 |

一次エネルギー換算に当たっては、平均発電効率を30%として算出している。

省エネ率: 12~23%

省エネ額: 500~2200万円/年

出典: p92 『NEDO平成16年度調査報告書 タイ、インドネシア、マレーシア及びフィリピンにおけるビル等民生施設を対象としたエネルギー有効利用技術導入基礎調査』

TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY

結果概要(2)

ケーススタディー(6)

・タイ

| 用途 | 省エネ率 (%) | 省エネ額 (千円/年) | 省エネ量 | | | 年間エネルギー消費 (千円/年) | 【参考】一次エネルギー単位 (MJ/m ² /年) |
|-------|----------|-------------|------------|-----------------------|-----------------------|------------------|--------------------------------------|
| | | | 電気 (kWh/年) | 上水量 (m ³) | 下水量 (m ³) | | |
| 1 事務所 | 25.8 | 7,118 | 747,471 | 2,873 | 1,510 | 25,353 | 1,388 |
| 2 事務所 | 25.7 | 4,478 | 840,074 | 2,012 | 980 | - | 997 |
| ホテル | 9.1 | 1,683 | 322,625 | - | - | - | 805 |
| 合計 | 17.1 | 6,161 | 1,162,699 | - | - | - | 887 |
| 3 事務所 | 18.8 | 14,097 | 1,463,370 | - | - | 80,529 | 1,664 |
| 4 ホテル | 15.4 | 16,569 | 2,159,057 | 6,205 | 3,072 | 88,654 | 3,265 |
| 5 病院 | 17.4 | 9,622 | 1,591,108 | 3,420 | 1,709 | 76,230 | 1,336 |

一次エネルギー換算に当たっては、平均発電効率を30%として算出している。

出典: p159 『NEDO平成16年度調査報告書 タイ、インドネシア、マレーシア及びフィリピンにおけるビル等民生施設を対象としたエネルギー有効利用技術導入基礎調査』

TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY

モデル事業としての可能性(1)

ケーススタディー(7)

- 可能性のあるものについて経済性評価
- 可能性のあるものの選定要件
 - 改修が近い
 - オーナーの理解が得られそうな感触
 - 省エネ量・省エネ額
 - 複数の用途で
 - 複数の技術で
 - 改修のしやすさ
 - 広告性

TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY

モデル事業としての可能性(2) ケーススタディー(8)

- 改修に関する経済性評価: 計4件

| | 省エネ率 (%) | 省エネ額 (千円) | 投資額(差分) (全額) (千円) | 回収年数 (年) | |
|-------|----------|-----------|-------------------|-------------------|-----|
| マレーシア | 商業施設 | 17.3 | 7,309 | 42,421 (156,843) | 5.8 |
| | ホテル | 22.8 | 22,380 | 104,467 (352,370) | 4.7 |
| タイ | 事務所 | 25.7 | 4,478 | 21,425 (119,469) | 4.8 |
| | 病院 | 15.4 | 9,622 | 22,977 (135,507) | 2.4 |

省エネ率: 15~23%

省エネ額: 700~2200万円/年

回収年数: 2.4~5.8年

出典: ePR, ePP, e165, e166 『NEDO平成16年度調査報告書 タイ、インドネシア、マレーシア及びフィリピンにおけるビル等民生施設を対象としたエネルギー有効利用技術導入基礎調査』

ケーススタディーのまとめ

- 省エネの余地はある。
 - 省エネ率 最低でも15%程度
- 採用の可能性のある技術
 - ほぼ共通
 - 高効率熱源、空調二次側制御、高効率照明、各種照明制御
- モデル事業の可能性
 - 財政的支援がないと難しい
 - オーナーの理解が必要

全体のまとめ

- 省エネのポテンシャルはどの国にも有り
- 省エネ政策・施策はタイが優秀。次いでマレーシア
- 省エネに必要な技術は日本よりシンプルだが、日本の技術は適用可能
- 省エネビジネス環境としては、マレーシア、タイが有望

END

資-4

EIUS 評価シート

表 サステナブル都市実現のための評価シート

| 大項目 | 中項目 | 小項目 | 水準の目安 | | | | | 小項目重み | 大項目重み | 備考 | | |
|---|-----------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------|-------------------|------------------------|-------------|--------|---|---|----------------------------------|--|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | | | | |
| 都市内環境評価指標 (Quality of Life Inside City) | 環境・衛生 | 自然度 | ~30 | 30~60 | 60~90 | 90~120 | 120~ | 0.3 | 全国=100 全国平均0.20 | | | |
| | | 衛生環境 | ~0.15 ~50 | 0.15~0.2 50~60 | 0.2~0.25 60~70 | 0.25~0.3 70~80 | 0.3~ 90~ | | | | | |
| | 機能・サービス | 行政機能 | (緑被率) | ~0.004~ | | ~0.004 | | | 0.4 | 環境基準値:0.004ppm(1時間値の1日平均値)以下 環境基準値:0.004~0.006ppm(1時間値の1日平均値)またはそれ以下 環境基準値:0.10mg/m ³ (1時間値の1日平均値)か つ0.20mg/m ³ (1時間値)以下 全国平均0.11 全国平均0.41 全国平均33.4 | | |
| | | | (NO_x 濃度[ppm]) | 0.006~ | | 0.006~0.004 | | | | | | |
| | | | (SPM[ppm]濃度) | 0.10~ | | ~0.10mg/m ³ | | | | | | |
| | | | (人口増加率[%]) | ~0.4 | -0.4~+0.2 | -0.2~+0.2 | +0.2~+0.4 | +0.4~ | | | | |
| | | 居住機能 | (財政力指数) | ~0.25 | 0.25~0.35 | 0.35~0.45 | 0.45~0.55 | 0.55~ | 0.3 | 全国平均0.11 全国平均0.41 全国平均33.4 | | |
| | | | (住宅面積[m ² /人]) | ~25 | 25~30 | 30~35 | 35~40 | 40~ | | | | |
| | | 教育機能 | 情報化率 | (高校進学率(小学校進学率)) | ~96 | 96~97 | 97~98 | 98~99 | 99~ | 0.4 | 全国平均0.11 全国平均0.41 全国平均33.4 | |
| | | | | (人口1000人に対する小学校教員数) | ~9 | 9~10 | 10~12 | 12~13 | 13~ | | | |
| 商業機能 | 人口1000人に対する幼稚園数 | (小売店舗数[店/1000人]) | ~15 | 15~25 | 25~35 | 35~45 | 45~ | 0.3 | 全国平均11.0 全国平均2.4(=整備済都市計画道路延長/自動車保有台数) 全国平均29.5 全国平均7.69 | | | |
| | | (道路総延長/(通過交通量)) | ~3 | 3~6 | 6~9 | 9~12 | 12~ | | | | | |
| 安全・安心 | 福祉機能 | (公共交通分担率[%]) | ~50 | 50~40 | 40~30 | 30~20 | 20~ | 0.3 | 全国平均11.0 全国平均2.4(=整備済都市計画道路延長/自動車保有台数) 全国平均29.5 全国平均7.69 | | | |
| | | (都市公園面積[m ² /人]) | ~0.8 | 0.8~0.6 | 0.6~0.4 | 0.4~0.2 | 0.2~ | | | | | |
| 都市外環境負荷指標 (Environmental Load) | エネルギー | 電気 | (電気使用量[kWh/人・年]) | ~8 | 8~12 | 12~16 | 16~20 | 20~ | 0.4 | 全国平均108.9 | | |
| | | | (都市ガス使用量[MJ/人・年]) | 8000以上 | 8000~7000 | 7000~6000 | 6000~5000 | 5000以下 | | | | |
| | 資源 | 灯油 | (都市ガス使用量[kg/人・年]) | 10000以上 | 10000~9000 | 9000~8000 | 8000~7000 | 7000以下 | 0.3 | 全国平均108.9 | | |
| | | | (灯油使用量[l/人・年]) | 240以上 | 240~180 | 180~120 | 120~60 | 60以下 | | | | |
| | 広域環境 | 水資源 | (家庭ごみ排出量[kg/人・年]) | 400以上 | 400~300 | 300~200 | 200~100 | 100以下 | 0.3 | 全国平均108.9 | | |
| | | | (産業廃棄物排出量[ton/人・年]) | 110以上 | 110~100 | 100~90 | 90~80 | 80以下 | | | | |
| | 広域環境 | 物質 | (家庭ごみ排出量[kg/人・年]) | 440以上 | 440~420 | 420~400 | 400~380 | 380以下 | 0.3 | 全国平均108.9 | | |
| | | | (CO_2 排出量[ton/人・年]) | 4.0以上 | 4.0~3.5 | 3.5~3.0 | 3.0~2.5 | 2.5以下 | | | | |
| | 広域環境 | 大気 | (SO_2 排出量[kg/人・年]) | 1300以上 | 1300~1250 | 1250~1200 | 1200~1150 | 1150以下 | 0.3 | 全国平均108.9 | | |
| | | | (NO_x 排出量[kg/人・年]) | | | | | | | | | |
| 広域環境 | 大気 | (浮遊粒子状物質排出量[kg/人・年]) | | | | | | 0.3 | 全国平均108.9 | | | |
| | | | | | | | | | | | | |

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