



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

サステナブル構造のための モニタリング方法

サステナブル構造システム研究委員会

平成15年度報告書

RC-39 サステナブル構造システム研究委員会
モニタリング WG 活動報告書

サステナブル構造のためのモニタリング方法

平成 16 年 3 月

まえがき

20 世紀の我が国は欧米諸国に追いつくことを最大目標に、産業の育成、設備の拡充、新製品の製造等に全力を尽くしてきた。その結果、経済は高度に成長し我が国は世界的に見ても裕福な国に変貌した。しかし、この代償として膨大な社会資本ストックの存在、地球温暖化に代表される環境破壊が問題視されており、循環型社会形成が急務であるとされている。一方、経済に目を向けると 21 世紀を迎えた現在、我が国経済はバブル崩壊後 10 年間以上もの長きにわたる低迷を続けているという現実がある。このように経済が低迷している状況の中で環境問題という制約が生じるのは、「泣き面に蜂」な状況にあると考えられるが、これは、過去に我々が経験してきた社会活動を継続する場合に想定される状況である。このような既成概念のもとでは、今後も負の遺産を子孫に残すことになる。つまり、これまでとは全く異なる視点からの検討が必要となり、膨大な社会資本ストックの管理に携わる我々の使命は極めて高いといえる。

このような現状を鑑み、都市基盤安全工学国際研究センターでは（財）生産技術研究奨励会の特別研究会として、サステナブル構造システム研究委員会を発足し民間企業 18 社とともに、平成 14 年度から 2 年間の活動を実施した。本研究委員会では、前述した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、持続的な生存が可能となるために必要となる事項を、以下の 5 つの観点から検討を行った。①老朽化構造物のサステナビリティに関する研究、②多様化する都市型災害の低減に関する研究、③リモートセンシングデータを用いた阪神地区の都市気候数値シミュレーション、④環境低負荷型都市のあり方に関する研究、⑤サステナブル構造のためのモニタリング手法。都市基盤に携わる技術者・研究者の視点から検討し、これまでに無い視点から検討を行ったものであり、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 16 年 3 月

サステナブル構造システム研究委員会
委員長 魚本健人

サステナブル構造システム研究委員会(平成 15 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 義文	東京大学生産技術研究所	教授
	Misra Sudhir	東京大学生産技術研究所	客員教授
	高橋 健文	東京大学生産技術研究所	客員教授
	瀬戸島 正博	東京大学生産技術研究所	客員教授
	目黒 公郎	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
	Dutta Dushumanta	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	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
	藤田 久和	(株)建設企画コンサルタント	東京事業本部 技術センターセンター長
	菊池 禎二	営業本部	専務取締役
*	柴 慶治	清水建設(株)	技術研究所企画部開発企画グループ長
	栗田 守朗	清水建設(株)	技術研究所社会基盤技術センター主任研究員
	高橋 郁夫	清水建設(株)	技術研究所先端技術開発センター主任研究員
	岡田 敬一	清水建設(株)	技術研究所先端技術開発センター主任研究員
	平間 敏彦	清水建設(株)	エンジニアリング事業本部 主査
	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	企画開発室
	菅野 安男	基礎地盤コンサルタンツ(株)	保全部 部長
	野田 典広	基礎地盤コンサルタンツ(株)	環境部
	丸茂 文夫	(株)東横エルメス	ソリューション事業部
	山本 郁夫	(株)東横エルメス	特機・事業部
*	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
	佐藤 登	三協(株)	代表取締役
*	天野 玲子	鹿島建設(株)	土木管理本部土木技術部 次長
	椿 治彦	鹿島建設(株)	土木管理本部土木技術部 課長
	高木 賢二	鹿島建設(株)	技術研究所 LCEM プロジェクトチーム 主任研究員
	北田 健介	鹿島建設(株)	技術研究所 地球環境・バイオ Gr. 研究員
	上田 純広	鹿島建設(株)	IT ソリューション部 エンジニアリングシステム Gr.

*赤松 幸生	国際航業(株) 技術センター 赤松研究室 室長
虫明 成生	国際航業(株) 技術センター
船橋 学	国際航業(株) ミレニアム事業本部
山内 大祐	国際航業(株) 地盤環境エンジニアリング事業部
古市 眞	中日本航空(株) 事業開発部 部長
渡辺 仁	中日本航空(株) 事業開発部
宮坂 聡	中日本航空(株) 事業開発部リモートセンシング担当 課長
吉田 夏樹	中日本航空(株) 事業開発部
赤池 勝明	中日本航空(株) 事業開発部
川村 哲也	東京電力(株) 国際部海外コンサルティンググループ課長
*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
清水 隆史	(株)建設技術研究所 構造部 課長
山根 立行	(株)建設技術研究所 構造部
石田 辰英	(株)建設技術研究所 情報部
関谷 成人	西武建設(株) 業務推進部 研究員
二木 重博	アジア航測(株) コアテクノロジー事業部 防災グループ技術部長
今村 遼平	アジア航測(株) 関東防災地質部 顧問
小林 公一	アジア航測(株) 関東防災地質部 防災地質課 係長
佐藤 幸孝	アジア航測(株) 関東防災地質部 防災地質課
滝川 正則	アジア航測(株) コアテクノロジー事業部 応用計測グループ
水谷 信之	アジア航測(株) 業務企画室 室長
肥田 研一	(株)千代田コンサルタント 事業本部 構造・保全部長
田中 芳行	(株)竹中土木 技術本部 企画グループリーダー
安藤慎一郎	(株)竹中土木 技術本部技術本部 技術グループ
和田 直也	(株)竹中土木 技術本部技術研究所 建設技術開発本部構造材料グループ
松本 由美子	(株)竹中土木,技術本部技術本部 技術グループ
山田 哲也	三井住友建設(株) 技術研究所 建築研究開発部 建築構造研究室
岡田 昌澄	首都高速道路公団 保全施設部保全技術課

(*印：幹事)

WGメンバー一覧表

氏名	会社名	所属
赤松 幸生*	国際航業(株)	技術センター
虫明 成生	国際航業(株)	技術センター
船橋 学	国際航業(株)	ミレニアム事業本部
滝川 正則	アジア航測(株)	ジオマティクス部
水谷 信之	アジア航測(株)	ジオマティクス部
二木 重博	アジア航測(株)	地質部
古市 真	中日本航空(株)	事業開発部
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
山本 郁夫	(株)東横エルメス	情報・技術管理部
菅野 安男	基礎地盤コンサルタント(株)	保全部
野田 典広	基礎地盤コンサルタント(株)	環境部
岡田 敬一	清水建設(株)	技術研究所
安岡 善文	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
瀬戸島 政博	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
遠藤 貴宏	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

(*印：幹事)

サステナブル構造のためのモニタリング方法

目 次

まえがき

委員会の構成

1. 研究概要	1
1.1 研究目的	1
1.2 モニタリングWGの位置づけ	1
1.3 研究体制	2
2. 研究内容	2
2.1 平成14年度	2
2.2 平成15年度	3
3. 研究経過	4
3.1 全体スケジュール	4
3.2 WG会議実施状況	4
3.3 その他関連活動の実施状況	6
4. 研究成果の概要	7
4.1 モニタリング方法ガイドライン	7
4.2 モニタリング方法リストアップ表	11
5. 参考文献	11
添付資料A モニタリング方法ガイドライン	13
添付資料B モニタリング方法リストアップ表	19

1. 研究概要

1.1 研究目的

サステナブルな都市基盤を構築し維持していくには、先ず、都市基盤に関する情報を収集し、その実態および変化をモニタリングしていくことが不可欠である。とくに近年、都市において特異な現象や、都市設備の現況把握に対する要望が高まってきており、その要望に応えられるモニタリング方法の確立が重要なテーマとなりつつある。

一方、この分野に関わるモニタリングは、分野自体が新しく未成熟であるため、これまで断片的に行われてきており、体系的な方法論を提示するに至っていない。また、応用分野のニーズに根ざしたモニタリング方法の検討が十分行われていないため、モニタリング方法を扱うシーズサイドと、実際に利用するニーズサイドの間に乖離があり、実用化が十分進んでいないことも否めない。両者をつなぐ検討が必要となっている。

そこで、モニタリング WG では、「都市のサステナブル」を達成する上で、ニーズ（応用）の観点から有効性の高いモニタリング技術を見出し、技術の内容、利用方法、将来展開等を整理・検討することを目的とした。そして、最終的には「モニタリング手法ガイドライン」としてとりまとめることを目指した。

1.2 モニタリング WG の位置づけ

モニタリング WG の位置づけを図-1.1 に示す。RC-39 全体としては、4つの応用分野（老朽化構造物、防災、都市環境、地球環境）を取り上げ、それぞれ WG を設置して検討することにした。この各応用 WG は、各分野におけるモニタリング、モデリング、評価、できればデザイン、マネジメントまでの一貫した流れをニーズの観点から検討する、いわば「縦軸機能」を担うものと位置づけられる。

一方、モニタリング WG では、その入り口であるモニタリング技術の専門家を集約し、シーズの観点から各分野への適用可能性を探る、いわば「横軸機能」を担う WG と位置づけられる。この位置づけのもと、両者の接点にある有用なモニタリング方法を見出すため、モニタリング WG から各応用 WG に積極的にシーズ情報を発信し、意見、要望等のニーズをフィードバック頂くような、双方向の流れを築きながら検討を進めることを狙った。

応用 WG	老朽化構造物	防災	都市環境	地球環境
モニタリング	→			
モデリング				
評価				
デザイン				
マネジメント	↓	↓	↓	↓

図-1.1 モニタリング WG の位置づけ

1.3 研究体制

モニタリング WG では、冒頭の表に示すように、計測・調査に従事するモニタリングの専門家を中心にメンバを構成した。衛星リモートセンシング、航空測量から、地上での物理計測、環境調査、計測技術開発など、広くモニタリング分野をカバーするメンバが参加した。14、15年度で多少の入れ替えはあったが、ほぼ同じメンバで活動を行った。

また、多くのメンバは応用 WG と重複して参加していることもあり、前記のニーズに根ざした方法検討を進めるという観点から、各応用 WG とリンクした活動を指向した。具体的には、次のような運営を行った。

- ・ モニタリング WG 会議では、重複参加メンバより各応用 WG における議論の進展や、会議で出たモニタリングに対する要望などを報告頂き、応用ニーズの把握に努めた。
- ・ 必要に応じて、他の応用 WG 会議に参加し、各分野でのニーズをヒアリングにより直接吸い上げ、検討テーマの抽出に生かした。
- ・ モニタリング WG における検討結果を、重複参加メンバにより応用 WG 会議で報告し意見を伺うなど、検討の方向性が応用ニーズに整合しているかチェックしながら検討を進めるようにした

一方、平成 15 年度には、応用 WG と対応した個別テーマの方法検討に移行したため、5 つの SWG を設け、SWG 単位で具体的な方法検討を進める体制を取った。SWG 別のテーマとメンバ構成の詳細は、添付資料 A のモニタリング方法ガイドラインを参照のこと。

2. 研究内容

2.1 平成 14 年度

2.1.1 全体活動計画立案

平成 14 年度は初年度であり、検討開始にあたり、先ず WG 全体としての活動方針および内容を定めるための、討議と検討、計画立案を行った。

2.1.2 モニタリング方法のリストアップ

モニタリング WG で利用可能な技術資源を把握し、後の方法検討の材料とするため、「都市のサステナブル」に関する情報のモニタリングに利用可能な、あるいは可能性のある技術（シーズ）を収集整理した。参加メンバの得意（および近傍）技術に着目し、通常用いている、あるいは十分な知見を有するモニタリング方法を全てとりあげ、一覧表に整理した。

プラットフォーム（上空、地上、接触）、対象物（森林、構造物、災害など）などで分別し、各方法の概説、対象スケール、コスト、精度、利用実績、所要時間、適用可能分野等の情報を加えて整理した。

2.1.3 検討テーマ選定

モニタリング方法のリストアップ表を検討材料に、応用分野において要望が高くモニタリングが実現可能と思われる対象を抽出し、具体的な検討テーマを設定した。テーマ選定に際しては、RC-39 全体との連携を図るため、4つの応用 WG（老朽化構造物、防災、都市環境、地球環境）毎に 1 テーマずつ選定することとし、さらに新たなモニタリング手法の開拓等、将来に向けた展望もテーマに加えた。なお、モニタリング WG 内で議論すると同時に、前述のとおり応用 WG の意見等（ニーズ）も伺いながら、ニーズに根ざした有効性の高いテーマを見出すよう努めた。

2.2 平成 15 年度

2.2.1 検討テーマ選定

平成 14 年度に引き続き討議、検討を行い、検討する 6 テーマを選定した。選定された検討テーマは次のとおりである。括弧内は関連する応用 WG 名である。

- ・ 老朽化構造物の内部劣化診断のためのモニタリング（老朽化構造物）
- ・ 人為災害防止（軽減）のためのモニタリング（防災）
- ・ 耐震性能評価のためのモニタリング（防災）
- ・ ヒートアイランド関連情報のモニタリング（都市環境）
- ・ CO₂ 排出量を削減するための都市構造の立体的な把握（地球環境）
- ・ 夢のある将来技術（モニタリング）

2.2.2 テーマ別検討計画立案

選定されたテーマについて、具体的な検討計画を立案した。また、前述のとおり、この段階より SWG を設けて、テーマ別に具体的な検討作業を行う体制に移行した。

2.2.3 テーマ別方法検討

検討計画に則り、テーマ別の方法検討を実施した。文献調査結果や前述のモニタリング方法リストアップ表の情報を用いて、各テーマに適切な方法を選定・整理し、可能なテーマについては、モニタリングを実施する手順等を具体的に組み立てた。また、可能なテーマについてはサンプル事例作成（ケーススタディ）等を交え、具体的な利用イメージが理解しやすいように、方法検討を進めた。

2.2.4 ガイドラインまとめ

ここまでで得られた一連の方法を、「モニタリング方法ガイドライン」としてまとめた。背景、目的と対象、方法、留意点、利用イメージ、今後の発展性、参考文献等の章立てで、提案方法をコンパクトにまとめるよう配慮した。

3. 研究経過

3.1 全体スケジュール

研究の全体スケジュールを図-3.1に示す。前述の研究内容を、下記スケジュールに従い実施した。

項目	平成 14 年度					平成 15 年度											
	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
活動計画立案	←→																
方法リストアップ		←→															
テーマ選定			←→														
テーマ別計画立案						←→											
テーマ別方法検討								←→									
ガイドラインまとめ														←→			
WG 会議	○		○	○		○		○	○		○		○		○		

図-3.1 研究の全体スケジュール

3.2 WG 会議実施状況

WG 会議は、平成 14 年度に 3 回、平成 15 年度に 6 回の、合計 9 回実施した。平均 2 ヶ月に 1 回のペースであった。各回の検討内容は次のとおりである。

第 1 回 WG 会議

日時：平成 14 年 11 月 19 日 15:00～17:30

場所：東京大学生産技術研究所 C 棟 2 階 Cw205 号室 ICUS レクチャールーム

出席者（所属、敬称略）：越智、赤松、船橋、滝川、水谷、二木、赤池、吉田、羅、山本

議題：1. メンバー一覧の確認、2. 委員の自己紹介、3. 活動内容（案）の説明、4. 各応用

WG に関する情報交換、5. 活動内容に関する討議

第 2 回 WG 会議

日時：平成 15 年 1 月 23 日 15:00～17:20

場所：東京大学生産技術研究所 C 棟 2 階 Cw205 号室 ICUS レクチャールーム

出席者（所属、敬称略）：安岡、越智、瀬戸島、赤松、船橋、滝川、赤池、吉田、山本、菅野、野田

議題：1. 資料確認、2. 新規参加委員の自己紹介、3. 各応用 WG に関する情報交換、4.

モニタリング技術の整理検討

第3回 WG 会議

日時：平成 15 年 2 月 28 日 10:00～12:00

場所：東京大学生産技術研究所 C 棟 2 階 Cw205 号室 ICUS レクチャールーム

出席者（所属、敬称略）：安岡、瀬戸島、赤松、船橋、二木、吉田、山本、野田、菅野、
羅

議題：1. 資料確認、2. 各応用 WG に関する情報交換、3. モニタリング方法リストアップ表の整理検討、4. 対象テーマの絞込みについて、5. 次年度活動について、6. 本年度報告書について

第4回 WG 会議

日時：平成 15 年 4 月 25 日 10:00～12:00

場所：東京大学生産技術研究所 C 棟 2 階 Cw205 号室 ICUS レクチャールーム

出席者（所属、敬称略）：安岡、遠藤、赤松、船橋、虫明、二木、水谷、山本、野田、菅野、羅、岡田

議題：1. 資料確認、2. 新メンバの紹介、3. 幹事会報告、4. 各応用 WG に関する情報交換（意見交換の結果報告）、5. 対象テーマの確定とメンバアサイン、6. WG 予算の使い道

第5回 WG 会議

日時：平成 15 年 6 月 9 日 15:30～17:30

場所：東京大学生産技術研究所 C 棟 2 階 Cw205 号室 ICUS レクチャールーム

出席者（所属、敬称略）：安岡、瀬戸島、遠藤、赤松、船橋、虫明、二木、滝川、吉田、山本、野田、菅野、羅、岡田

議題：1. 資料確認、2. 各応用 WG に関する情報交換、3. SWG 別の活動報告と討議、4. 新しいモニタリング技術の紹介

第6回 WG 会議

日時：平成 15 年 7 月 28 日 13:30～15:00

場所：東京大学生産技術研究所 B 棟 6 階 Bw601 号室 ICUS レクチャールーム

出席者（所属、敬称略）：遠藤、赤松、船橋、二木、滝川、山本、羅、古市

議題：1. 資料確認、2. 各応用 WG に関する情報交換、3. 都市環境 SWG の今後の活動について、4. SWG 別の活動報告と討議、5. 本年度成果のとりまとめイメージ他について

第7回 WG 会議

日時：平成 15 年 9 月 29 日 12:00～14:00

場所：東京大学生産技術研究所 B棟6階 Bw601号室 ICUS レクチャールーム

出席者（所属、敬称略）：安岡、瀬戸島、赤松、船橋、二木、滝川、山本（郁）、羅、野田、岡田、山本（正）

議題：1. 資料確認、2. 各応用 WG に関する情報交換、3. SWG 別の活動報告と討議、4. 本年度成果のとりまとめイメージ他の確認

第8回 WG 会議

日時：平成 15 年 11 月 17 日 15:00～18:00

場所：東京大学生産技術研究所 B棟6階 Bw601号室 ICUS レクチャールーム

出席者（所属、敬称略）：遠藤、赤松、二木、滝川、山本、羅、岡田、古市

議題：1. 資料確認、2. 各応用 WG に関する情報交換、3. SWG 別の活動報告と討議、4. 報告書目次案と構成の討議

第9回 WG 会議

日時：平成 16 年 1 月 27 日 10:00～12:40

場所：東京大学生産技術研究所 B棟6階 Bw601号室 ICUS レクチャールーム

出席者（所属、敬称略）：瀬戸島、遠藤、赤松、船橋、水谷、山本、羅、岡田、古市、菅野、野田

議題：1. 資料確認、2. 各応用 WG に関する情報交換、3. SWG 別のガイドライン原案の確認と討議、4. 2003 年国際画像機器展の報告

3.3 その他関連活動の実施状況

その他の関連活動として、検討テーマ発掘のための他 WG との意見交換、最新モニタリング方法のデモ等を実施した。実施内容の一覧は次のとおりである。

項目：防災 WG との意見交換

年月日：平成 15 年 3 月 20 日

モニタリング WG からの出席者（所属、敬称略）：赤松、二木

成果：具体的な検討テーマとして「鉄道テロ防止のためのモニタリング方法」が提案された

項目：老朽化構造物 WG との意見交換

年月日：平成 15 年 4 月 16 日

モニタリング WG からの出席者（所属、敬称略）：赤松、二木、菅野、羅、虫明

成果：具体的な検討テーマとして「内部劣化を対象にしたモニタリング方法」が提案された

項目：地球環境 WG との意見交換

年月日：平成 15 年 4 月 23 日

モニタリング WG からの出席者（所属、敬称略）：船橋、瀬戸島

成果：交通量、大気汚染、海浜地形と水質、地下水脈など、いくつかのモニタリング対象が提案された

項目：都市環境 WG との意見交換

年月日：平成 15 年 6 月 2 日

モニタリング WG からの出席者（所属、敬称略）：古市

成果：高さの情報、交通量、地表風の分布、土壌水分等、ヒートアイランドに関するいくつかのモニタリング対象が提案された

項目：新しいモニタリング技術の紹介

年月日：平成 15 年 6 月 9 日（第 5 回 WG 会議時）

紹介者：Thomas Le Diuron 氏 (Advitam 社)、稲垣健一・海江田守啓氏 (住商鉄鋼販売(株))

内容：構造物の劣化や異常行動のモニタリングを遠隔地から行える、PureLink and SoundPrint という名称の最新システムが紹介された。

項目：都市環境 WG との協議

年月日：平成 16 年 1 月 15 日

モニタリング WG からの出席者（所属、敬称略）：赤松、瀬戸島、古市

成果：報告書のまとめに向けて、内容および役割分担について調整協議を行った。

4. 研究成果の概要

4.1 モニタリング方法ガイドライン

前述のテーマ単位に、文献調査等により適切な方法を選定・整理し、モニタリングを実施する手順等、サンプル事例等を交え、「モニタリング方法ガイドライン」としてまとめた。なお、テーマにより現時点での方法としての成熟度、実用度が異なるため、実用的なものについては利用手順等をできるだけ具体的に記述し、発展途上のものについては技術の現状と今後の発展性を記述した。時間の関係もあり、必ずしも十分なりまとめに至ってはいるが、各分野において有益となるモニタリング方法をいくつか見出し、その利用方法等について現時点で考えられる一つの姿を提示できたと考えている。

モニタリング方法ガイドライン本文は、添付資料 A を参照されたい。各テーマのガイドラインの概要は次のとおりである。

4.1.1 老朽化構造物の内部劣化診断のためのモニタリング（老朽化構造物）

老朽化構造物の健全性の診断に際し、とくに重要な項目として鉄筋腐食と内部欠陥（空隙やひび割れ等）があげられる。ここでは、これらの診断に対応できる、実用性の高い技術を中心にとりあげ、測定原理や方法、利用上の留意点等についてとりまとめた。鉄筋腐食については、コンクリートと鉄筋の電気的性質に影響することに着目し、モニタリング方法として電気的測定法（自然電位法、分極抵抗法）をとりあげた。また、内部欠陥については、図-4.1 に例示する振動測定法（打音、超音波など）¹⁾をとりあげた。

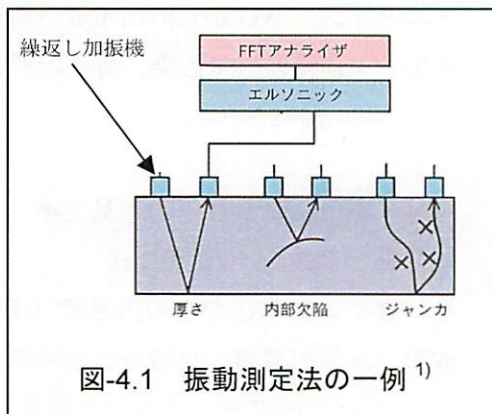


図-4.1 振動測定法の一例¹⁾

4.1.2 人為災害防止（軽減）のためのモニタリング（防災）

近年、危険性が高まってきている、テロ行為等による人為災害に対応するためのモニタリング方法について整理した。この分野のモニタリング技術は発展途上にあるため、ここでは、将来利用できる可能性のある技術の整理を中心にした。また、関連する分野も広範にわたるので、ある程度絞り込むため、対象物を高速鉄道、対象行為を爆破テロとバイオテロに限定した。さらに、テロは列車走行中に起こることを想定し、事前検知、被災状況、被害拡大状況の3段階のシナリオを想定して、それぞれの段階で利用可能性のあるモニタリング方法（遠隔画像監視、人間の特徴による識別、爆発物検知、生物剤検知等）を整理した。また、実用イメージとして、個別センサをネットワークとGISを組み合わせて統合、管理するPureLinkシステム（図-4.2）²⁾等を紹介した。

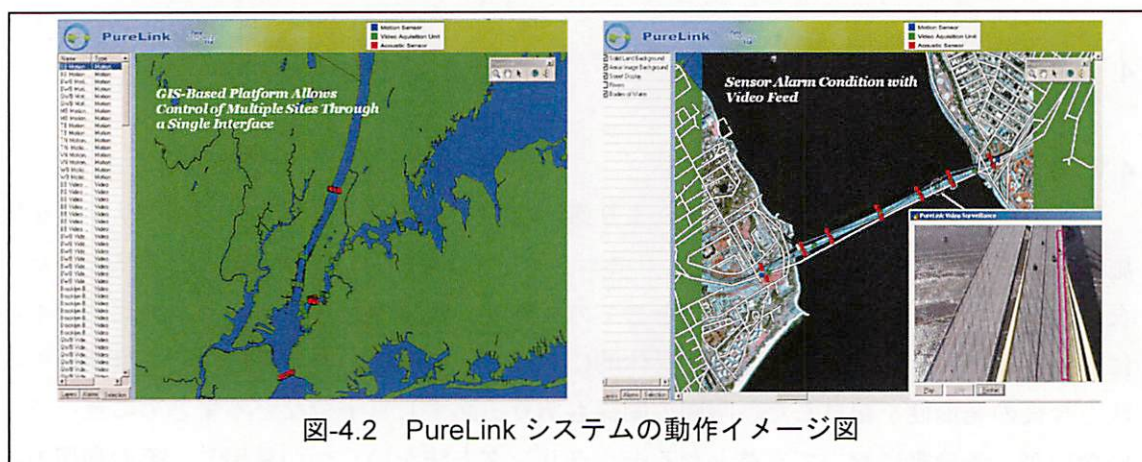


図-4.2 PureLink システムの動作イメージ図

4.1.3 耐震性能評価のためのモニタリング（防災）

震災時の死傷者数を低減させる上で必須な、耐震補強対策の推進に寄与するため、耐震性能を定量的、客観的に評価できる方法が求められている。そこで、ここでは、とくに対

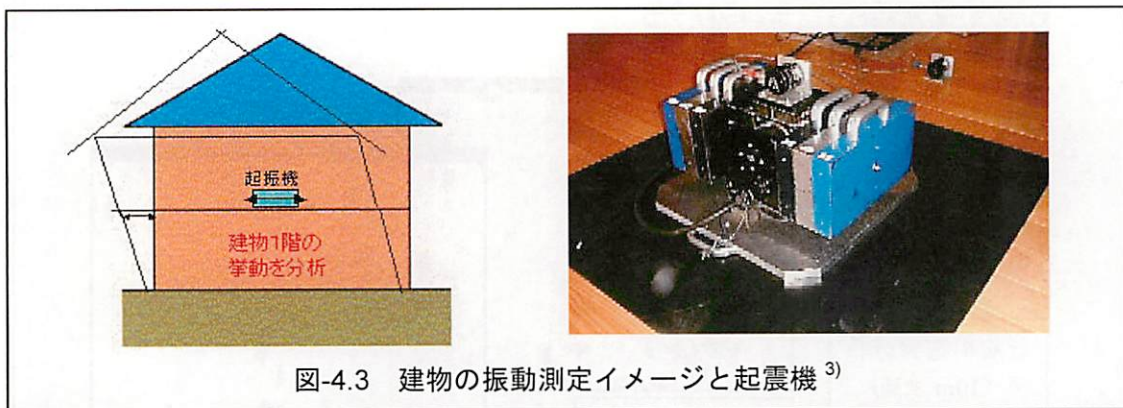


図-4.3 建物の振動測定イメージと起震機³⁾

策が必要となる中古住宅を対象に、比較の実用性が高い方法を取りあげ、その原理と測定手順等についてとりまとめた。方法として、強制振動による方法（図-4.3 参照）³⁾と、常時微振動測定による方法の2種類を取りあげた。それぞれ現時点では比較の実用性が高いが、利点と欠点があり単独での運用には限界があること、今後、データの蓄積が必要であることなど、利用上の留意点も指摘した。

4.1.4 ヒートアイランド関連情報のモニタリング（都市環境）

わが国の都市ではヒートアイランド現象が顕著となってきており、その現象把握と効果的な対策実施は、都市の熱環境改善や、地球温暖化の抑制などに対して、大変重要となってきている。そこで、都市のヒートアイランド現象を効率的に把握する方法として、現時点で実用性が高いリモートセンシングを取り上げ、その利用方法を調査マニュアルに近いレベルで、かなり具体的に記述した。都市環境 WG で実際にケーススタディを行っているため、観測条件や得られるデータの諸元など、具体的な数値や性能の記載も行った。さらに、ケーススタディにより実際に得られたデータ（図-4.4～4.5 参照）や、今後の発展性についてもまとめた。

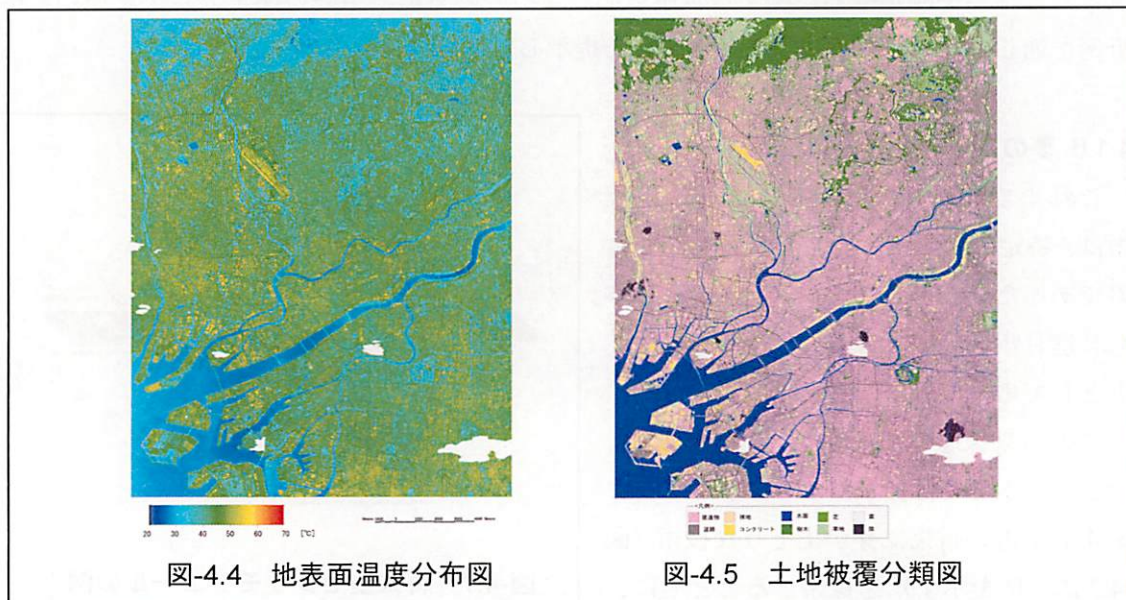
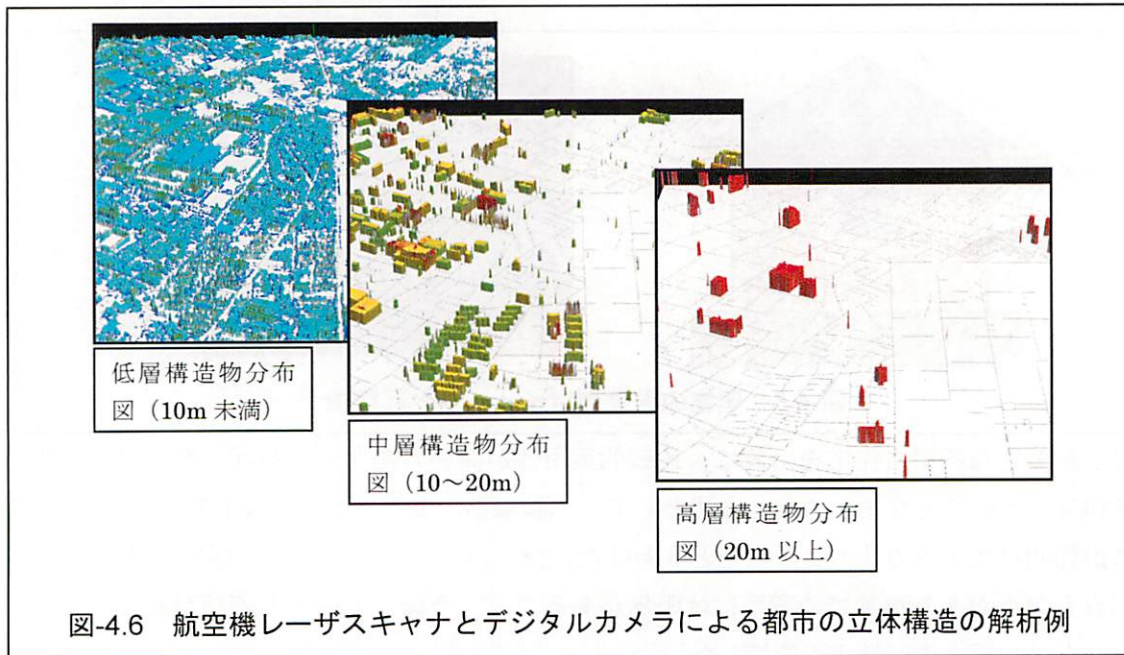


図-4.4 地表面温度分布図

図-4.5 土地被覆分類図

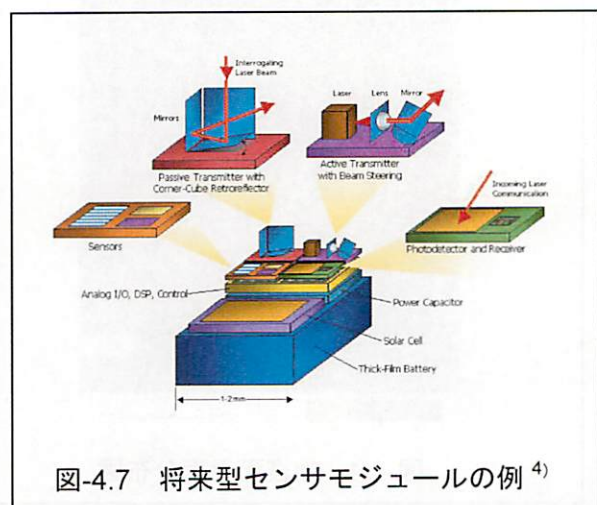


4.1.5 CO₂ 排出量を削減するための都市構造の立体的な把握（地球環境）

地球温暖化対策のため、CO₂ 排出量の少ないエネルギー消費効率の高い都市のあり方について、さまざまな検討が進められている。しかし、都市の立体構造を視点に入れた解析等は十分行われていないため、今後、立体構造に関するデータを整備し研究を深めていくことが必要と思われる。把握すべき都市の立体構造は多数あるが、ここでは当面の利用性が高い緑化可能地と建物の集積度の把握を対象に、リモートセンシングによる効率的なモニタリング方法を組み立てた。リモートセンシングの方法としては、航空機に搭載されたレーザスキャナおよびデジタルカメラを選定した。測定データに基づき、前述の情報を得るための土地利用の区分、建物の階層区分など、具体的な処理方法を記述した。また、留意点として性能や測定限界に関する数値を記述するとともに、実際の測定データを用いた解析例を通して、得られる成果のイメージを提示した（図-4.6 参照）。

4.1.6 夢のある将来技術（モニタリング）

これまでに述べてきたモニタリング技術は、特定の対象への利用を目的としたものであった。一方、モニタリング技術自体も日進月歩を続けており、そのシーズサイドとしての方向性をみることで、モニタリングの将来像を示すことも可能と考えた。そこで、ここでは、センサやネットワークを中心に近い将来に芽が出そうな技術（図-4.7 に一例を示す）⁴⁾を探索するとともに、



その利用イメージからモニタリング技術の将来像を描くとともに、モニタリング WG メンバ自身が考えた「夢のある将来技術」をまとめて紹介した。これらの技術には、近い将来に実用化可能なもの、当面実用化は不可能なものが混在しており、整理はされていないが、モニタリング技術およびそれを活用した社会の将来像について、一つのイメージを示せたのではないかと考えられる。

4.2 モニタリング方法リストアップ表

前述のとおり、モニタリング WG の活動開始時に、「都市のサステナブル」に関する情報のモニタリングに利用可能な技術（シーズ）を収集整理したものである。参加メンバの得意（および近傍）技術に着目し、通常用いている、あるいは十分な知見を有するモニタリング方法を全てとりあげ、一覧表に整理してある。わかりやすいように、プラットフォーム（上空、地上、接触）、対象物（森林、構造物、災害など）などで分別し、各方法の概説、対象スケール、コスト、精度、利用実績、所要時間、適用可能分野等の情報を加えて整理されている。重複する技術もあったが、担当機関による差異も重要な情報なので、類似方法として括るのみとし、削除や統合は行っていない。

当初はあくまで WG での資源把握のために作成したが、出来上がってみるとかなり広範囲で多様なモニタリング方法がカバーされていた。また、精度やコストなど実用上有用な情報も加わっていることから、モニタリング方法の利用者に対しても有益な成果になったのではないと思われる。多様な分野のメンバが集まった、RC-39 サステナブル都市構造システム研究会ならではの成果であるとも考えられる。

モニタリング方法リストアップ表は、添付資料 B を参照されたい。

5. 参考文献

- 1) 株式会社東横エルメス（2004）：超音波測定器「エルソニック」パンフレット
- 2) Sumitro, S., Hida, K. and LE Diouron, T. (2003): Structural Health Monitoring Paradigm for Concrete Structures, The Proc of 28th Our World in Concrete and Structures, Singapore, Vol.1, pp.525-532
- 3) ビック株式会社 HP（2004年2月アクセス）：木造住宅の動的耐震診断システム
<http://www.vic-ltd.co.jp/deri/001.html>
- 4) Brett Warneke 氏の HP（2004年1月アクセス）：Mote の構成（UCB）
<http://www-bsac.eecs.berkeley.edu/~warneke/SmartDust/>

添付資料 A

モニタリング方法ガイドライン

サステナブル構造のためのモニタリング方法

目次

1. 概要	17
1.1 はじめに	17
1.2 ガイドラインの構成	17
1.3 メンバ構成	18
2. 老朽化構造物の内部劣化診断のためのモニタリング	21
2.1 背景	21
2.2 目的・対象	21
2.3 方法	22
2.4 留意点	26
2.5 実用イメージ	27
2.6 今後の展望	28
2.7 参考文献	29
3. 人為災害防止（軽減）のためのモニタリング	31
3.1 背景	31
3.2 目的・対象	31
3.3 方法	31
3.4 留意点	36
3.5 実用イメージ	37
3.6 今後の展望	39
3.7 参考文献	40
4. 耐震性能評価のためのモニタリング	41
4.1 背景	41
4.2 目的・対象	41
4.3 方法	41
4.4 留意点	44
4.5 実用イメージ	45
4.6 今後の展望	45
4.7 参考文献	45

5.	ヒートアイランド関連情報のモニタリング	46
5.1	背景	46
5.2	目的・対象	46
5.3	方法	47
5.4	留意点	50
5.5	実用イメージ	60
5.6	今後の展望	52
5.7	参考文献	54
6.	CO ₂ 排出量を削減するための都市構造の立体的な把握	55
6.1	背景	55
6.2	目的・対象	55
6.3	方法	56
6.4	留意点	59
6.5	実用イメージ	60
6.6	今後の展望	62
6.7	参考文献	62
7.	夢のある将来技術	63
7.1	はじめに	63
7.2	モニタリング技術の将来像	63
7.3	将来技術の探索	65
7.4	夢のある将来技術「メンバ編」	73
7.5	まとめ	85
7.6	参考文献	85

1. 概要

1.1 はじめに

サステナブルな都市基盤を構築し維持していくには、まず、都市基盤に関する情報を収集し、その実態および変化をモニタリングしていくことが不可欠である。モニタリング WG では、2 年間にわたり、RC-39 サステナブル構造システム研究委員会のもとで、サステナブルな都市を構築していく上で有用となるモニタリング方法について検討してきた。とくに、RC-39 委員会で取り上げ WG を設置した 4 つのテーマである、「老朽化構造物」、「防災」、「都市環境」、「地球環境」について、各応用分野のニーズに対応できるモニタリング方法を提案することを目的に、検討を進めてきた。また、検討の途中で、モニタリング方法というシーズサイド自体からの利用開拓の可能性を探るため、「夢のある将来技術」と題して、モニタリング方法の近い将来の発展可能性についても検討した。

その結果、必ずしも十分なりまとめに至ってはいないが、各分野において有益となる方法をいくつか見出し、その利用方法等について整理することができた。一方、モニタリングという分野は、比較的専門性が高く、その内容や有効性が利用者の方々に十分認識されていない面もあると思われる。そこで、今回の検討により得られたモニタリング方法を、今後、サステナブルな都市形成に関わる政策立案者や実務者の方々に認知頂き、有用な場面で活用頂くために、ガイドラインとしてまとめ、提言することを試みたものである。

サステナブルな都市構築に関係する方々にとって、このガイドラインが多少なりとも役立つものとなれば幸いである。

1.2 ガイドラインの構成

前述のように、モニタリング WG では、「老朽化構造物」、「防災」、「都市環境」、「地球環境」、「夢のある将来技術」に関して、有用なモニタリング方法を検討してきた。しかし、例えば老朽化構造物一つをとっても、その対象となる構造物やモニタリングのポイントは無数にあり、限られた時間の WG 活動でそれを網羅して検討することは不可能である。そこで、応用分野別に重要性の高いモニタリング対象を、各応用 WG の意見も伺いながら抽出し、その対象に集中してモニタリング方法を検討することにした。

応用分野別に設定されたモニタリングテーマは次のとおりである。

- ・ 老朽化構造物の内部劣化診断のためのモニタリング（老朽化構造物）
- ・ 人為災害防止（軽減）のためのモニタリング（防災）
- ・ 耐震性能評価のためのモニタリング（防災）
- ・ ヒートアイランド関連情報のモニタリング（都市環境）
- ・ CO₂ 排出量を削減するための都市構造の立体的な把握（地球環境）
- ・ 夢のある将来技術（モニタリング）

これらのテーマ別に検討を進め、得られた方法をガイドラインとしてまとめた。各ガイ

ドラインの内容は、テーマによって多少異なるが、基本的に次のような構成でまとめることとした。

- ・ 背景：ニーズ、現状の課題 → テーマへの導入部、位置付け（文献調査結果等）
- ・ 目的と対象：モニタリングの利用目的、対象物体、スケール等の明示
- ・ 方法：全体フローや方法諸元（性能表）等の整理、出来るだけシンプルなものに
- ・ 留意点：適用条件の注意、適用限界の明示等
- ・ 実用イメージ：ケーススタディによる実例提示、得られる成果データの提示
- ・ 今後の発展性：将来実用可能性のある関連技術の提示等
- ・ 参考文献：引用した文献リストを記載

1.3 メンバ構成

上記テーマ別の検討を進めるにあたり、モニタリング WG 内に SWG を設け、SWG 主体で具体的な検討とまとめを行うこととした。また、前述のとおり、各テーマは RC-39 の応用 WG の対象分野と関係しているため、必要に応じて応用 WG と連携し、利用サイドからの意見も伺いながら、検討を深めることにした。

テーマ（SWG）別のメンバ構成は、次のとおりである（所属・敬称略、*は SWG 幹事）。

- ・ 老朽化構造物の内部劣化診断のためのモニタリング（老朽化構造物）
山本郁夫*、遠藤貴宏、虫明成生、水谷信之、羅黄順、菅野安男
- ・ 人為災害防止（軽減）のためのモニタリング（防災）
二木重博*、滝川正則、山本郁夫、赤松幸生
- ・ 耐震性能評価のためのモニタリング（防災）
二木重博*、滝川正則、山本郁夫、赤松幸生
- ・ ヒートアイランド関連情報のモニタリング（都市環境）
船橋学*、野田典広、遠藤貴宏、瀬戸島政博、赤松幸生
- ・ CO₂ 排出量を削減するための都市構造の立体的な把握（地球環境）
古市真*、安岡善文、瀬戸島政博、赤松幸生
- ・ 夢のある将来技術（モニタリング）
岡田敬一*、モニタリング WG メンバ全員

2. 老朽化構造物の内部劣化診断のためのモニタリング

2.1 背景

これまで、コンクリート構造物は半永久的なものでメンテナンスが不要と考えられ、建設後の点検調査が行われることはほとんどなかった。しかし、近年、コンクリート構造物の早期劣化や耐久性低下の事例が顕在化して、社会問題となっている。加えて、経済の低成長期に入るとともに、既存の構築物を維持管理していくことが重要な課題となってきている。

維持管理を適切に行うためには、その対象の健全性を正確に把握する必要がある。コンクリートの健全性に影響を与えるものとして

- ① 施工不良等の豆板、ジャンカ、コールドジョイント等の内部構造的な不良
- ② 塩害、中性化、アル骨反応等の化学的原因による劣化
- ③ 地震や地盤の変状等による物理的原因による劣化

が考えられる。この中で、③は現象を外部からも把握しやすく、また原因も特定しやすい。しかし、①、②はその障害がコンクリート内部にあり、特に②はその程度が時間とともに進行していくので、そのためにも継続的なモニタリングが必要である。

2.2 目的・対象

ここでは、前節に述べた劣化の原因の内、把握の難しい①、②を対象に取り上げて述べていくことにする。

一般的に、コンクリートは次のようにして劣化していくと考えられている。

健全な鉄筋コンクリートではコンクリートは強アルカリ性を示し、鉄筋は不動態皮膜と呼ばれる薄い物質で覆われていて腐食原因となる物質と直接接触することがないので、鉄筋は腐食しない。しかし、何らかの原因で鉄筋に腐食が生じると、発生した錆によって鉄筋の体積が膨張し、周囲のコンクリートに引張応力が生じ、さらに進行すると鉄筋軸に沿ったひび割れが確認されるようになる。ひび割れを通して鉄筋の錆がコンクリート表面に現れると、変色状況などから鉄筋の腐食を判断することが可能となる。しかし、ひび割れをとまわず徐々に内部で腐食が進行していることもあり、表面のひび割れから確認された時点では、すでにかなり腐食が進行している段階にあることが多い¹⁾。

コンクリート構造物は、大気中のCO₂等と反応し、次第にpH値が下がり鉄筋表面の不動態膜が消失することで鉄筋腐食が生じる。このようにして進行する中性化による腐食は、コンクリートの表面から比較的一様に進行するため、腐食の形態としては均一なものが卓越すると考えられている²⁾。

一方、塩化物イオンによるもの（塩害）は、中性化腐食に対し不均一な腐食進行が認められる。除塩の不十分な海砂を細骨材に用いた場合や、飛来塩あるいは凍結防止剤の散布等によりコンクリート中に塩化物イオンが導入されると、不動態膜は破壊されて腐食を生

じる³⁾。

鉄筋の腐食の程度を調べるには、かぶりははつり取り直接目視することがもっとも確実である。しかし破壊検査であり現実的でないため、いくつかの非破壊による（または非破壊に近い）電気化学的なモニタリング手法が使われている。その代表的なものとして自然電位法と分極法がある。

また、コンクリート中を振動が伝わる時、内部構造により伝播状況が変化する。これを利用して、コンクリートの劣化を予知しようという試みは多くなされている。この方法は、基本的に非破壊検査である。媒体となる振動も超音波や強制振動、常時微動を利用するなどいくつか提案されている。

ここでは、これらの非破壊検査方法を活用し、鉄筋腐食や内部構造の不良など、構造物の劣化状況を診断する上で重要度の高い情報を得ることを目的とする。

2.3 方法

2.3.1 電気化学的モニタリング手法

(1) 自然電位法

1) 原理

コンクリート中の鉄筋は腐食部分では鉄電子をコンクリート中に放出しており、この電荷を測定することにより腐食の状況を推定する。この方法は腐食状況や腐食量を推定するものではなく、腐食が進行しつつあるか否かを判断するためのものである。

2) 方法

図-2.1 に概念図を示す。

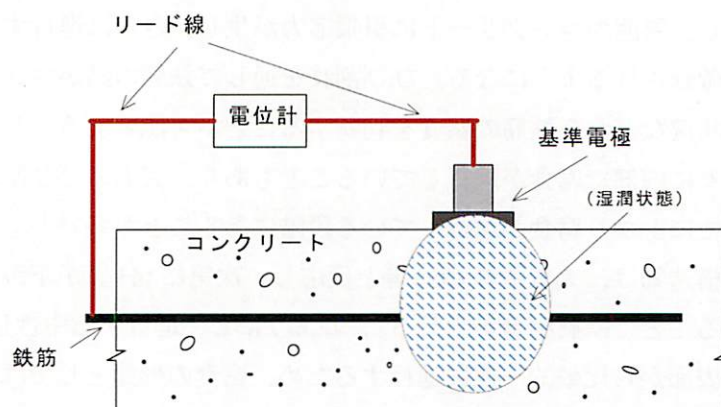


図-2.1 自然電位測定概念図

ASTM(American Society for Testing and Materials) C786 の方法に基づき説明する⁴⁾。
 コンクリート表面に基準電極を当て、鉄筋と基準電極との間に発生する電位差(電圧)を精密な電圧計で測定する。

ASTM C786 では基準電極として銅/硫酸銅電極を用いている。これは飽和硫酸銅溶液中に銅の電極をセットしており、コンクリート表面に接する側はごくわずかな硫酸銅溶液がにじみ出るようになっている。

同基準では、この方法で測定した結果に対し表-2.1 のような判断基準を示している。

表-2.1 自然電位測定による腐食状況の判断基準

自然電位	腐食状況
～ -200mV	90%以上の確率で錆びていない
-200mV～ -350mV	判定できない
-350mV～	90%以上の確率で錆びている

自然電位測定法に対し、かぶりコンクリートに起因する電位変動分の影響を補正する自然電位補正法が提案されている⁵⁾。変動分に影響する因子としては、含水率、中性化深さ、塩分量があり、特に含水率の影響が大きいとされている。補正して求められた結果と鉄筋腐食との関連は表-2.2 に示す通りで、こちらの方がより細かく分類されている。

表-2.2 補正自然電位による腐食状況の判断基準

補正自然電位	鉄筋腐食度	
$-250\text{mV} < E$	I	腐食がない状態
$-350\text{mV} < E < -250\text{mV}$	II	点錆
$-450\text{mV} < E < -350\text{mV}$	III	面錆
$E < -450\text{mV}$	IV以上	一部断面欠損

(2) 分極抵抗法

1) 原理

前述した自然電位法に対し、分極抵抗法では腐食速度の推定を行うことが出来ると言われている。以前は、装置が大がかりになることから一般的ではないとされていたが、最近小型化された装置が製品化されている。

基本的なシステム構成は自然電位法と同じであるが、鉄筋と電極の間に微弱な交流電圧を加え、その部分の抵抗を測定する方法である。

2) 方法

今回の調査ではかなり具体的な事例を得ることが出来たので、詳細は2.5 実用イメージで述べることにする。

(3) その他

前記した以外に、破壊検査となるが、鉄筋腐食の測定に関連する手法として、次のものがあげられる。

- ① 発生面積率測定
- ② 腐食減量の測定
- ③ 中性化試験

2.3.2 振動によるモニタリング手法

構造物の健全性を判断するための振動を利用した方法は、多くの分野で利用されており、原則として非破壊である。セメント・砂・骨材の混合物であるコンクリート構造物を対象とした場合、時によって得られる結果に対する判断が難しい面もある。

対象とする振動には超音波、強制振動、常時微動などがあり、測定項目も振動レベル、波長（スペクトル）等を単独または組み合わせて使用する事例が報告されている。

(1) 超音波方式

1) 原理

超音波を用いた非破壊試験には

- ① 反射または透過波によるひび割れ深さや内部欠陥等を調べる探傷法
- ② レベルや伝播速度、周波数特性からコンクリート強度や弾性係数などの物性を調べる方法

がある。コンクリートにおいては、通常その性質から、数 10kHz から数 100kHz の範囲で使用される。

2) 方法

図-2.2 に概念図を示す。基本的には、発信素子、受信素子及び測定部から構成される。測定部には発信部、受信部及び解析部から構成されるのが一般的である。左図は透過による測定、右図は反射による測定を示す。

発受信素子を構造物に押しつけて測定されるが、素子の表面にはグリース等接触媒体を使用し、振動が構造物にスムーズに出入りするようにする。

また内部の伝播速度だけでなく、表面波や周波数分布を利用してマイクロラックをより正確に評価しようと言う研究もなされている⁶⁾。

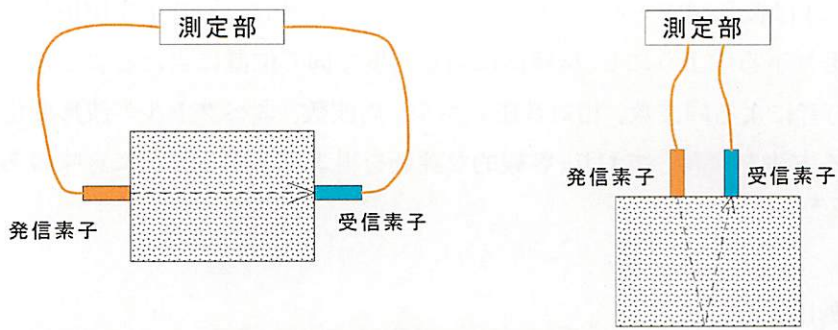


図-2.2 超音波測定概念図

(2) 強制振動による方法

コールドジョイントによるトンネル内部のトンネル覆工コンクリートの落下事故に対し、その健全性診断に打音が使用されたことはまだ記憶に新しい。強制振動にはハンマー以外に、質量 30kg 程度の球形のおもりを構造物に打ち当てその衝撃を振動源としたり、大型の加振器を利用したり、橋の場合には実車両を走行させて測定する場合もある。

1) 原理

基本的な原理は超音波法と同じであるが、超音波法に対し次の特徴を持つ。

- ① 振動のレベルが超音波に比べ格段に大きい
- ② 周波数範囲が低い領域まで広がっている
- ③ コンクリート部材そのものよりも主として構造面での評価を目的とする場合が多い

2) 方法

測定素子には主に加速度計が使用されるが、マイクや AE センサを使用したという報告もある。

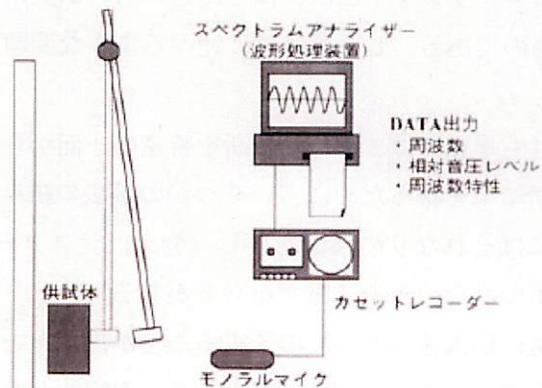


図-2.3 強制振動測定概念図⁷⁾

図-2.3 は概念図である。衝撃力を一定にするために、振り子を使用して一定の角度から振り下ろすようにし、試験体と同じ角度で同じ位置に当たるように工夫がなされる。打音による周波数、相対音圧レベル、周波数、スペクトルの波形変化等を組み合わせる方法を検討しており、客観的な評価を得ようとすることに意味のあるものと考えられる⁷⁾⁸⁾。

(3) 常時微動による方法

この方法も他の振動を利用したものと原理的には同じであるが、人為的な振動源を持たないため以下のような特徴を持つ。

- ① 振動源のレベル、周波数領域ともに広範囲である
- ② いつ発生するか特定できない
- ③ ノイズ成分が含まれる

そのため基本的には他の方法と異なり、長期的に連続した測定と、計画的なデータの前処理を必要とする。また、主として周波数成分の分析により評価が行われる。

2.3.3 その他

振動によるモニタリングについて、振動そのものを測定する以外にも次のような方法も考えられる。

- ① ひずみ：構造物の一部に埋め込まれた、または表面に取り付けられた素子からひずみを測定する。
- ② 変位：基準点を構造物以外に置くことにより構造物自体の変位を測定する。レーザードップラー計のように、非接触で測定できるものは有用である⁹⁾。
- ③ 継ぎ目：接続部やひび割れ部などに変位計を取り付けておき、その開き等を測定する。

2.4 留意点

今までに述べたモニタリング手法は、ほとんどのものが実用化されたか、ほぼその段階に近いと思われるものである。しかし、次に述べるような問題点も含んでいることを理解すべきである。

- ① いずれも単独では、構造物診断を特定の一面から行うものである。より正しい診断結果を得るために、いくつかの手法の組み合わせが必要となる。
- ② 測定にはそれなりの技術を要し（例えばテスターで電圧を測るのに比べ）、測定値のばらつきを考慮する必要がある。
- ③ 測定値に個人差のないものを得ることが出来たとしても、その値から判断する時点ではまだまだ個人差が大きく、客観的な診断結果を得ることが難しくまだその手法は確立されていない。

- ④ 供用されているコンクリート構造物は様々な要素を持っており、それらを考えた上で、調査・測定・診断・対策の計画を立てなければならない。
- ⑤ 1回のみでの測定では、正しく評価することは出来ない。継続的に測定を行い、状況をモニターすることが重要である。

2.5 実用イメージ

2.5.1 電気化学的モニタリング手法

電気化学的モニタリングは、研究分野でも、実際の調査分野でも、比較的多く行われており、装置も専用のものが準備されている。図-2.4はその1例で交流インピーダンス法を基本としている。左図はシステム概念図、右図は調査の様子である¹⁰⁾。

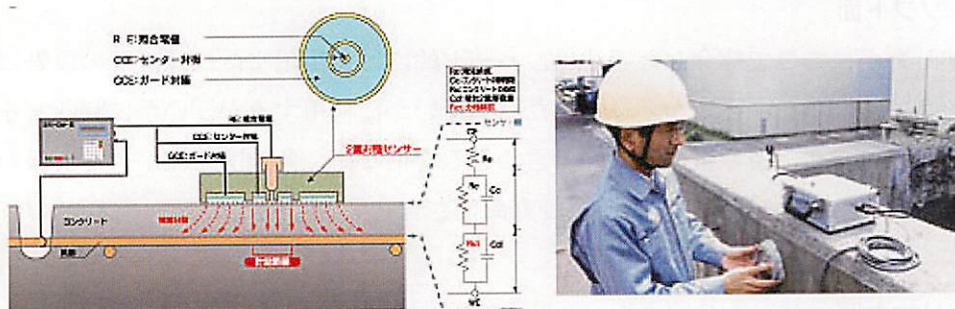


図-2.4 電気化学的モニタリング手法の実用イメージ¹⁰⁾

他にも同様のものが提供されているが、いずれも

- ① 独特の電極構造
- ② 測定周波数を可変
- ③ 自然電位の同時測定

等の工夫をして、より正確に鉄筋腐食を測定できるようにしている。

2.5.2 振動によるモニタリング手法

振動による内部診断は、素材や部品の健全性を調べるためによく利用されている。コンクリート構造物に対しては、均一性の問題などから実用化が他分野に比べ遅れていたが、近年になりひび割れ深さや内部診断などを目的とした製品化がなされてきている。これらの装置では、ひび割れ深さやコンクリート厚さ、内部欠陥等の測定も出来るとしている。

図-2.5 にその一例の概念図を示す。特に左図にあるように、ひび割れ深さの測定には音波の到達時間ではなく幾何学的手法で求めているため、音速の違いによる誤差なども除かれるように工夫されている¹¹⁾。

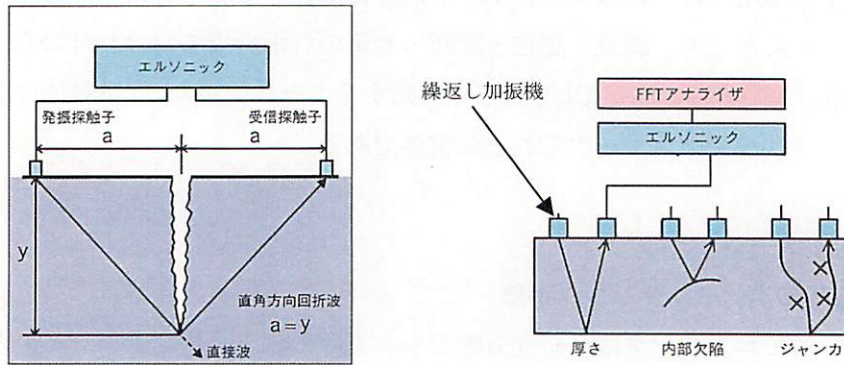


図-2.5 振動によるモニタリング方法の実用イメージ¹¹⁾

2.6 今後の展望

2.6.1 ソフト面

前述したが、ここで紹介した手法は、ハード的には実用化またはほぼその段階にあるといつて良い。しかし、そこから得られた結果をいかに利用するか、いかに判断するかというレベルでは、まだ情報量が少ないと言わざるを得ない。各機関組織が得た情報の共通化と共有化を図ることが、今ある資源を長寿命化させる一つの鍵になるのではないだろうか。

2.6.2 ハード面

現在の電気化学モニタリングは少なからず破壊をともなう場合が多く、また電極を接触させる必要がある。しかし、構築物によっては近寄ることの困難な状況も考えられる。非接触でしかも離れた位置から測定が可能となれば、よりその応用範囲が広がることが期待できる。

その面から、現在研究中であるが、興味ある手法について紹介する¹²⁾。これは、ハイパースペクトル計測を利用して劣化コンクリート診断を行うもので、特徴は非接触、しかも非破壊でコンクリートの塩害の程度を測定するものである。物質は構成する成分とその量に関する情報を含んだ電磁波を反射・放射しており、それをハイパースペクトルセンサで計測し、そのスペクトル情報から物質の成分や量が推定出来ることを原理とするものである。図-2.6 にその測定結果を示す。左図に示すように、劣化が進行すると、スペクトル形状が変化している。また右図は劣化深さとの関係を示したもので、スペクトル測定値の処理結果との間に1次相関が認められ、測定値から劣化深さを推定できる可能性があることがわかる。

同じようにスペクトル情報を利用し、非破壊・非接触で面的に表層内部の劣化診断を行う手法として、赤外線画像(熱映像)を用いた構築物の点検・モニタリングが行われつつある。赤外線画像では、物体から放射される赤外線エネルギー量(主に波長 $3\sim 5\mu\text{m}$, $8\sim 14\mu\text{m}$ の電磁波を利用)に基づいて、表面温度分布を画像として表示する。背後に空隙を

有する剥離などの劣化部は、健全部と比較して熱容量が小さいために、健全部と異なった温度変化特性を示す事を利用して劣化部を判別する。図-2.7 に赤外線画像による剥離抽出の一例を示す。現在、高架橋に代表される屋外環境下でのコンクリート構造物に対しては太陽光を利用したパッシブ法、その利用が困難なトンネルなどでは人工熱源を利用したアクティブ法が用いられ、実用化されつつある。また、これまでは劣化有無の判別が主体であったが、赤外線画像を利用して劣化深さやひび割れ伸延方向を推定する研究¹³⁾¹⁴⁾も進められており、今後の利用可能性が期待される。

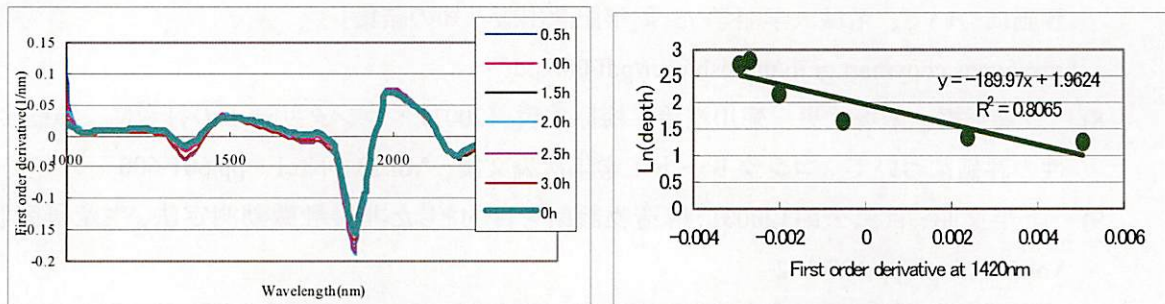


図-2.6 ハイパースペクトル計測による劣化深さの分析例

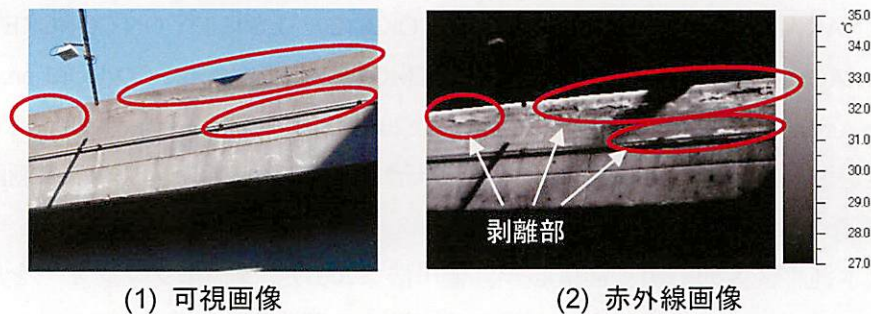


図-2.7 赤外線画像による剥離抽出事例

2.7 参考文献

- 1) 財) 日本非破壊検査協会 HP (2004年3月アクセス) : 自然電位法による鉄筋の腐食診断 (渡辺寛、渡辺博志、井川一弘)
http://wwwsoc.nii.ac.jp/jsndi/bulletin/J_04_Jan.html
- 2) 岩田亮、関博 (2000) : 中性化したコンクリート中における鉄筋腐食機構の電気的化学的考察、コンクリート工学年次論文集、Vol.22、No.1、pp.181-186
- 3) 財) 鉄道総合技術研究所 HP (2004年3月アクセス) : 鉄筋腐食に関するコンクリートの診断と補修工事 (佐々木孝彦)、鉄道総研月例発表会講演要旨
http://www.rtri.or.jp/infoce/getsurei/2003/Getstu02/g157_8.html

- 4) コンプロネット HP (2004 年 3 月アクセス) : 私のコンクリート補修物語 (堀孝廣)
<http://www.con-pro.net/readings/mystory/>
- 5) 財) 鉄道総合技術研究所 HP (2004 年 3 月アクセス) : コンクリート中の鉄筋腐食調査
http://www.rtri.or.jp/rd/openpublic/rd49/concrete_m/shindan1.html
- 6) 岩槻晃右、鎌田敏郎、国枝 稔、六郷恵哲 (2001) : 曲げひび割れ先端部分の超音波伝播特性に着目したコンクリートのひび割れ評価、コンクリート工学年次論文集、Vol.23、No.1、pp.559-564
- 7) 飯坂武男、菊川浩治、石川靖晃、杉山秋博 (2001) : 打音によるコンクリートの品質評価について、名城大学開学 75 周年記念出版「知の結集」
<http://www.copymart.gr.jp/publish/user/pdf/086.pdf>
- 8) 金森正樹、飯坂武男、菊川浩治、梅原秀哲 (2001) : コンクリートの打音による健全性の評価について、コンクリート工学年次論文集、Vol.23、No.1、pp.601-606
- 9) 上半文昭、目黒公朗 (2003) : 構造物診断を目的とした非接触微動測定法、生産研究、Vol.55、No.6、pp.127-132
- 10) 株式会社四国総合研究所 HP (2004 年 3 月アクセス) : 携帯型鉄筋腐食診断器
<http://www.sskn.co.jp/products/tekkin.htm>
- 11) 株式会社東横エルメス (2004) : 超音波測定器「エルソニック」パンフレット
- 12) T. NAKAJIMA, T. ENDO AND Y. YASUOKA (2003): STUDY ON CONCRETE SURFACE DAMAGE USING HYPERSPECTRAL REMOTE SENSING, the CD-ROM proceeding of the 24th Asian Conference on Remote Sensing & 2003 International Symposium on Remote Sensing
- 13) 渡辺博志、河野広隆、阪上隆英、小原治之 (2002) : コンクリートの剝離検査、非破壊検査、Vol.51、No.3、pp.129-132
- 14) 浜本純平、大即信明、宮里心一、皆川浩 (2001) : サーモグラフィーを用いたトンネルコンクリート表層部崩落可能性評価に関する基礎研究、第 55 回セメント技術大会講演要旨、pp.92-93

3. 人為災害防止（軽減）のためのモニタリング

3.1 背景

政治・経済的あるいは民族・宗教的な緊張の高まりから、世界的に有事やテロの勃発が危惧されている。また、科学の進歩により兵器が多様化し、その威力が増大しているとともに、社会資本や様々な機器の機能も高度化しており、人的被害に至るような弱点を備えたものが多くなってきている。一方、日本国内でも、古くは日本赤軍等の過激派、最近ではオウム等の異常な宗教団体によるテロ的な行為が断続的に発生した例がある。また、人口増加と不況によって国民の感情が不安定になっており、このような異常分子が多発する可能性も高まっている状況である。平和主義で治安の安定している日本でも、テロは他人事ではなくなっている。

このような状況の中、日本でも発生が懸念されるテロ行為に対する防衛が、緊急なテーマとなってきている。我が国において大量被害が想定されるテロ対象の一つとして、鉄道、とくに近年、世界的にも整備が進んでおり、甚大な被害が懸念される高速鉄道が考えられる。しかし、不特定多数が日常的に利用する高速鉄道では、テロの完全な防御は困難との専門家の意見もあり、モニタリングによる状況検知を活用し、被害を最小限に留めるための方策を検討する方向も必要と考えられる。したがって、ここではテロの被害軽減のために有効と考えられるモニタリング手法をピックアップして、その利用可能性について検討するものとした。

3.2 目的・対象

人為災害防止（軽減）のためのモニタリングの目的は、大きく分けて次の 3 項目に整理できる。すなわち、テロ行為による被害の進展に従い、①テロ行為の事前察知による被害の未然防止、②テロ発生時の被災状況の把握、③被害範囲の拡大の把握による二次的被害の防止・軽減等に大別できる。

また、テロの対象、すなわちモニタリングの対象は、テロリストがターゲットとするものにより異なる。たとえば、戦争にほぼ等しい場合にはライフライン等の生活基盤を狙い、思想のアピールであれば国家や時代の象徴的なものを狙うであろう。一方、無差別殺人であれば、人の集まる場所や高速で移動するものなどがターゲットとなる。ここでは、両者の可能性がある対象の一つとして、前述のとおり高速鉄道をとりあげ、検討することにした。

3.3 方法

3.3.1 想定シナリオ

高速鉄道を対象としたテロと言っても、さまざまな行為の種類と、発生時の条件が考えられる。したがって、方法の検討に先立ち、テロ行為のシナリオを想定し、条件を限定し

て検討を進めることにした。設定した条件は次のとおりである。なお、今回の設定はあくまで一つの想定であり、この行為の発生危険性の高低を評価した、あるいはテロ行為に関する専門的見地から吟味された結果ではないことを明記しておく。

(1) 被害の推移（モニタリングの時間ステージ）

前述のとおり、テロ行為による被害の進展を考えると、モニタリングの時間ステージを図-3.1 および次の3段階に区分できる。

- ① テロ行為の事前検知
- ② テロ行為による直接的な被災状況の把握
- ③ 被害範囲の拡大状況の把握（2次被害の防止）

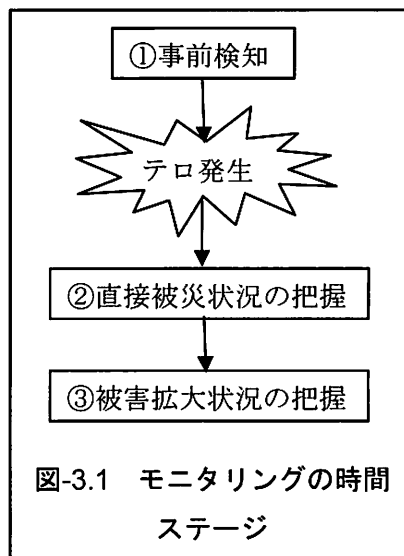


図-3.1 モニタリングの時間ステージ

(2) テロ行為の種類

高速鉄道を対象にしたテロ行為として、先ず想定されるのは「爆破テロ」であろう。爆破行為として、線路や橋梁等の構造物を破壊する行為と、車両自体を直接破壊する行為の2通りが設定できる。一方、爆破テロより現実性があるのは、むしろ「バイオテロ」との専門家の意見も得られたため、車内での細菌散布というバイオテロにも焦点を当て、シナリオに加えるものとした。

(3) 発生場所

発生場所も種々考えられるが、今回は、とくに重篤な人的被害が懸念される走行中を対象に設定した。条件を限定するため、走行中の車両および車両内に直接、あるいは間接的に被害を及ぼす場所をテロの対象に設定した。

3.3.2 利用可能なモニタリング方法の一覧

前述のシナリオに対し、利用可能と思われる方法の一覧を表-3.1に示す。テロ行為の種類別に、モニタリングの時間ステージを追って整理した。

表-3.1 利用可能なモニタリング方法の一覧

テロ行為の種類	モニタリングの時間ステージ		
	事前検知	直接被災状況の把握	被害拡大状況の把握
爆破テロ	高分解能画像解析 遠隔画像監視 爆発物検知 人間の特徴による識別	遠隔画像監視 赤外線画像監視 振動検知	遠隔画像監視 赤外線画像監視
バイオテロ	遠隔画像監視 人間の特徴による識別	遠隔画像監視 生物剤検知	遠隔画像監視 生物剤検知

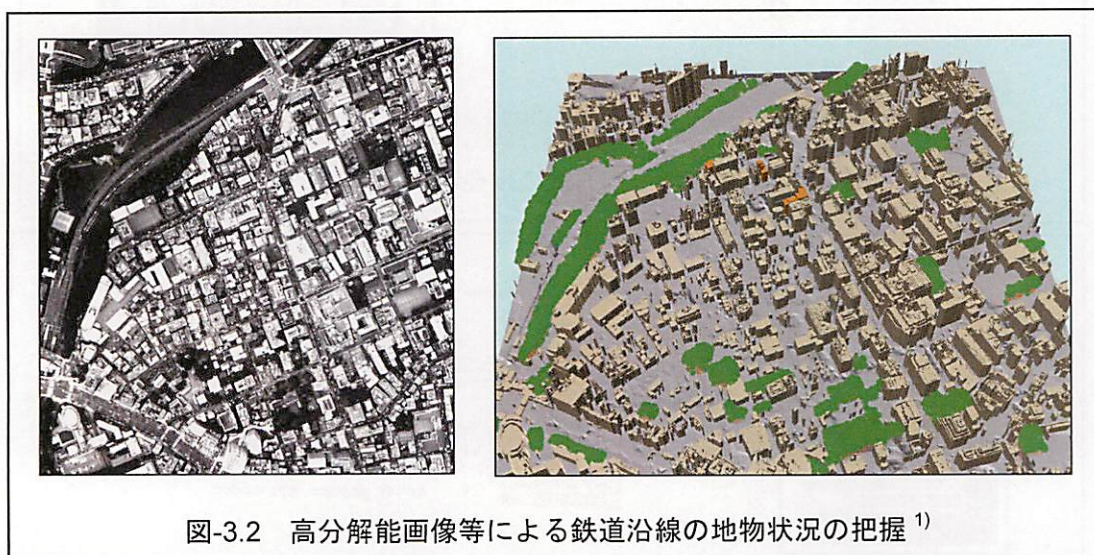
爆破テロに利用可能な技術は比較的多いが、バイオテロに適用可能な技術は少ない。テロ行為としてクローズアップされたのが比較的最近であり、モニタリング技術も開発途上にあること、軍事機密であることから情報が公開されていないためと思われる。

また、事前検知の技術は比較的多いが、被災状況およびその拡大状況把握に適用できる技術は少ない。モニタリング技術の対策とリンクした活用は、まだ十分確立されていないと考えられる。一方、遠隔画像監視技術はテロ以前に長期にわたり「監視」という用途に利用されてきたので、爆破テロ、バイオテロを問わず、全ての時間ステージで利用可能な汎用性の高い技術となっていることがわかる。

3.3.3 各モニタリング方法の解説

(1) 高分解能画像解析

爆破テロの事前検知に適用する技術である。人工衛星や航空機から撮像した、高分解能のデジタル画像等を用い、鉄道沿線の地形や道路、建物などの地物状況を定期的に把握する(図-3.2)¹⁾。この情報に基づき、沿線から線路や橋梁などの構造物に対するアクセス(構造物爆破行為の実施)容易性の評価等を行い、対策立案、強化ポイントの選定等に結びつける。



(2) 遠隔画像監視

線路沿いの重要ポイントまたは一定間隔に設置した、あるいは各車内に設置したビデオ画像等により、遠隔地の監視センターから構造物または車内の状況を監視する方法である。爆破テロ、バイオテロの何れにも適用でき、事前検知から被害拡大の把握まで、広く利用可能な技術である。線路沿いの画像からは、爆発物設置等の不審者検知、車両外見による直接被害および被害拡大状況の概況把握などが行える。また、車内の画像からは、車内の破壊状況や乗客の状態から、直接被害および被害拡大状況の詳細把握などを行う。

(3) 爆発物検知

爆発物の存在を乗車時に駅の改札等で近距離から検知する、爆破テロの事前検知専用の方法である。爆発物検知法には、X線等を用いて物体の形状を判別することで不審物を識別するバルク検出法と、空気中から爆薬成分の蒸気を検出し化学分析から爆薬の有無や種類を識別するトレース検出法がある。これらの方法の延長線上で、最近では、CT スキャナ方式で3次元の形状を検知する方法(図-3.3)²⁾や、従来のX線のかわりにきわめて波長の短い電磁波(ミリ波)を利用して所持品を透視検査する方法³⁾も開発されている。また、中性子の照射で微量の爆発物を検知する方法(図-3.4)⁴⁾も開発されている。

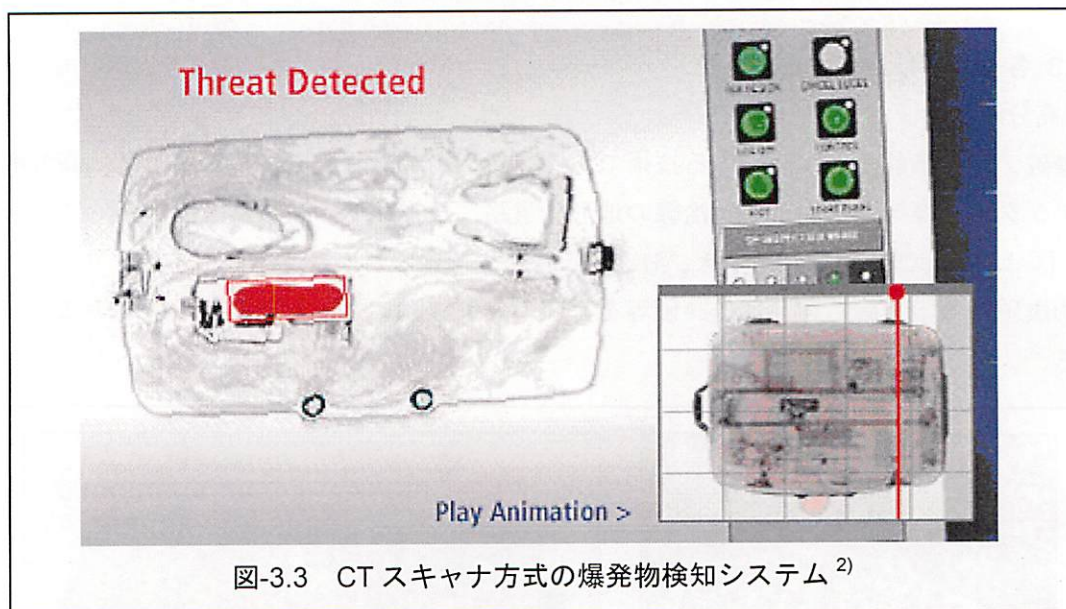


図-3.3 CT スキャナ方式の爆発物検知システム²⁾

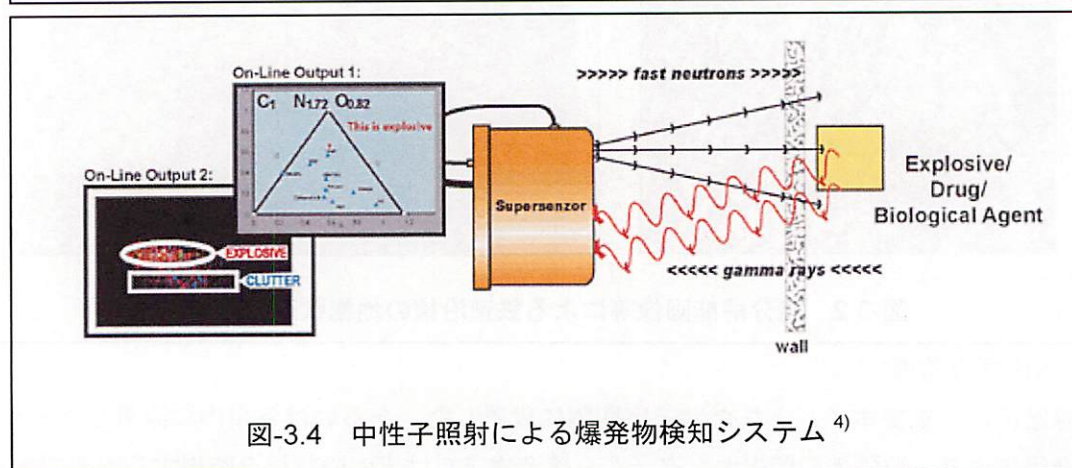
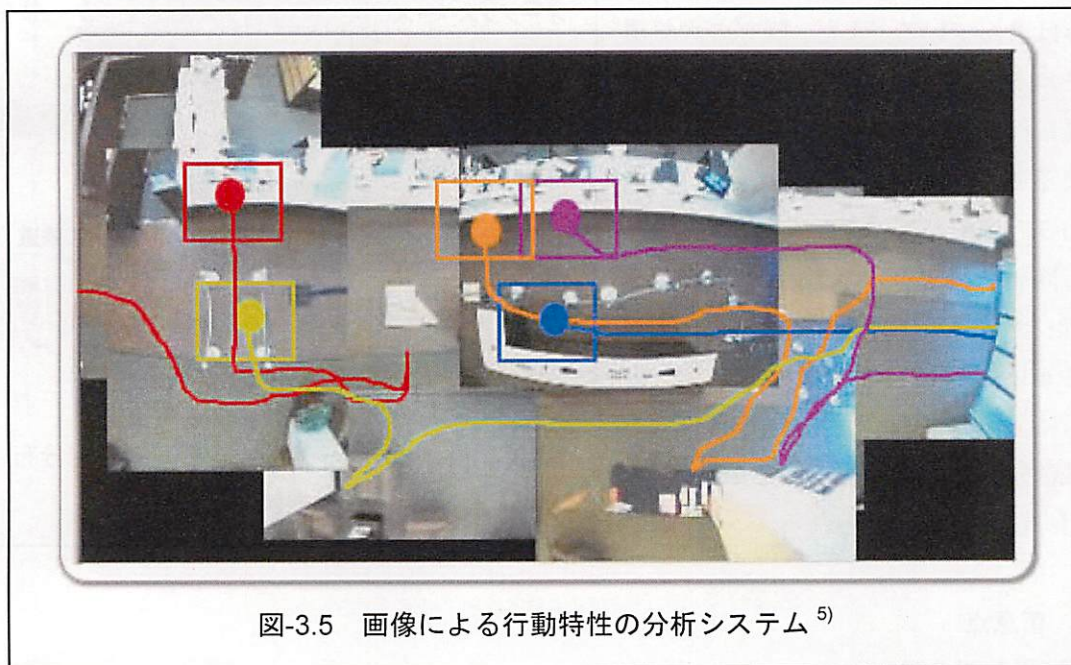


図-3.4 中性子照射による爆発物検知システム⁴⁾

(4) 人間の特徴による識別

前述の遠隔画像監視の拡張で、監視画像の解析により不審者を特定する方法である。爆破テロ、バイオテロの両者に適用可能で、事前検知として、乗車時の駅などで不審人物を抽出する上で利用可能である。例えば、駅の改札などで人相をスキャンして犯罪者の顔写真データベースと照合し不審人物を抽出する。また、「歩き方」などの行動特性を分析する

(図-3.5)⁵⁾ことで、人物を特定する、あるいは不審人物を抽出することも可能となるので、駅の改札だけでなく車内での不審者識別にも利用可能である。



(5) 赤外線画像監視

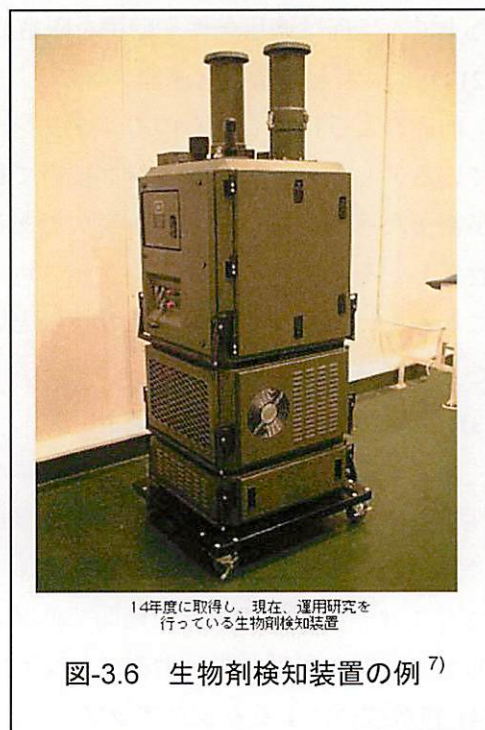
爆破テロが発生した際に、車両を対象に、温度計測により爆発による直接被害がどの程度か、延焼などによる被害拡大の状況はどうかなどを把握する。遠隔画像監視と同様に、車内に設置したセンサでは詳細な被害状況を把握し、線路沿いに設置したセンサでは車両全体の状況を把握する。

(6) 振動検知

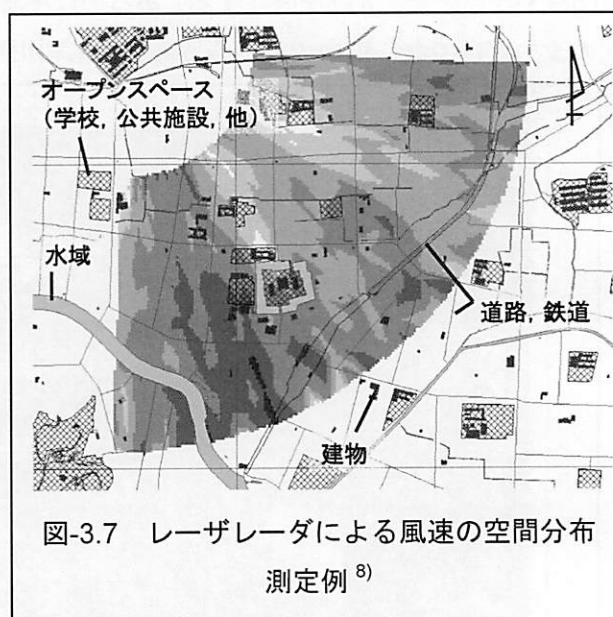
爆破テロの発生と爆発の継続状況を、車両に設置した振動センサにより検知する。爆破テロの発生を瞬時に検知し、事後対策（例えば列車を緊急停止させるなど）に迅速に着手する上で有効と思われる。

(7) 生物剤検知

バイオテロで散布される細菌の検知を対象とした技術で、さまざまな方法が検討、研究されている（図-3.6）⁶⁾⁷⁾。基本は対象となるサンプルを採取し分析するもので、サンプルに接触する危険があること、分析に長時間を要しリアルタイム性に欠けることなど、現時点では課題も多い。一方、DNA 分析により細菌の種類と感染源をわずか 15 分で特定できる DNA スキャン技術や、血液サ



ンプルから炭疽菌の有無を10分で調べるバイオチップなど、時間短縮への取り組みは進んでいる。また、既存の大気環境モニタリングシステムを活用し広域の異常検知を行う技術や、レーザーレーダによる風やエアロゾルの遠隔探知技術(図-3.7)⁸⁾など、広域モニタリングの技術も開発されてきている。これらの高速分析システムを車内に設置して直接被害や車内での被害拡大の把握を図るとともに、車外に漏れた場合の被害拡大を広域監視手法で把握することが、一つの利用方法として考えられる。



3.4 留意点

(1) 適用範囲の限定

高速鉄道テロ対策に利用可能なモニタリング技術は、前述したようにさまざまなものがあるが、一方でその完成度や利用の容易性、技術相互の連携(トータルなシステムとしての運用)、実際のテロ対策、被害軽減対策との連携において、未成熟な部分が多々残されている。現時点では発展途上の技術であり、得られる情報精度にも限界があることを認識した上で、当面は適用条件や効用を限定して利用を図ることが肝要である。

(2) テロ対策との緊密な連携

前述のように、これらのモニタリング技術は個々の検知技術として、独立して開発されている。しかし、モニタリング技術で得た情報が実際のテロ対策で効果を生むには、両者が密接な連携を持つことは不可欠である。例えば、今回の高速鉄道のように対象と条件を設定し、それぞれのテロ行為ケースへの対策シナリオを固めた上で、その一部として必要になるモニタリング技術を組み込むという視点を持つこと(要求ベースの技術選定を行うこと)が必要である。

(3) 汎用性のある技術の積極利用

高速鉄道テロ対策に利用可能なモニタリング技術の中には、遠隔画像監視のように汎用性があり、実績も豊富であるなど成熟度が高い技術も存在している。遠隔画像監視でテロに完全に対応することはできないが、これらの実用度が高い技術を利用することで、人為災害に対する脆弱性を、短期間で低減させることは可能となろう。実用的な技術から積極的かつ早期に利用を開始することはテロ対策に有効と考えられる。

(4) 複数技術によるバックアップ

紹介されたモニタリング技術の多くは現時点で発展途上である。したがって、一つの技

術のみに依存し判断することは、誤判断を生む可能性もある。そこで、複数のモニタリング技術を組み合わせ、複合的、多重的に判断することも、当面は必要と考えられる。

3.5 実用イメージ

前述のとおり、高速鉄道テロ対策のためのモニタリング技術（およびシステム）は発展途上にあり、テロ対策自体が軍事機密に属する面もあることから、公開された実用例は少ない。ここでは、公開されている情報の中から、爆破テロ、バイオテロに関連するものとして、防衛庁の構想および民間のモニタリングシステムを取り上げ、実用イメージの一端を示すことにする。

図-3.8 に防衛庁による将来の生物兵器対処のイメージ図⁷⁾を示す。イメージ図から、テロ対策のモニタリングシステムには、これまでも述べてきた、以下のような特徴があることがわかる。

- ・ モニタリング方法を用いた生物兵器による汚染状況把握と、除染、患者後送、医療活動などの汚染対策が一体となって連携している。
- ・ 固定型生物剤警報装置（図-3.6：前掲参照）⁷⁾、移動式生物剤検知装置（レーザによる遠隔検知か？）、サンプル採取・微生物同定設備、屋外展開用高度検査設備など、複数の検知システムが複合的、多重的に用いられている。
- ・ モニタリングシステムは、人手を介するアナログ方式も含めて、ネットワークで結ばれており、相互が連携したトータルシステムとなっている。

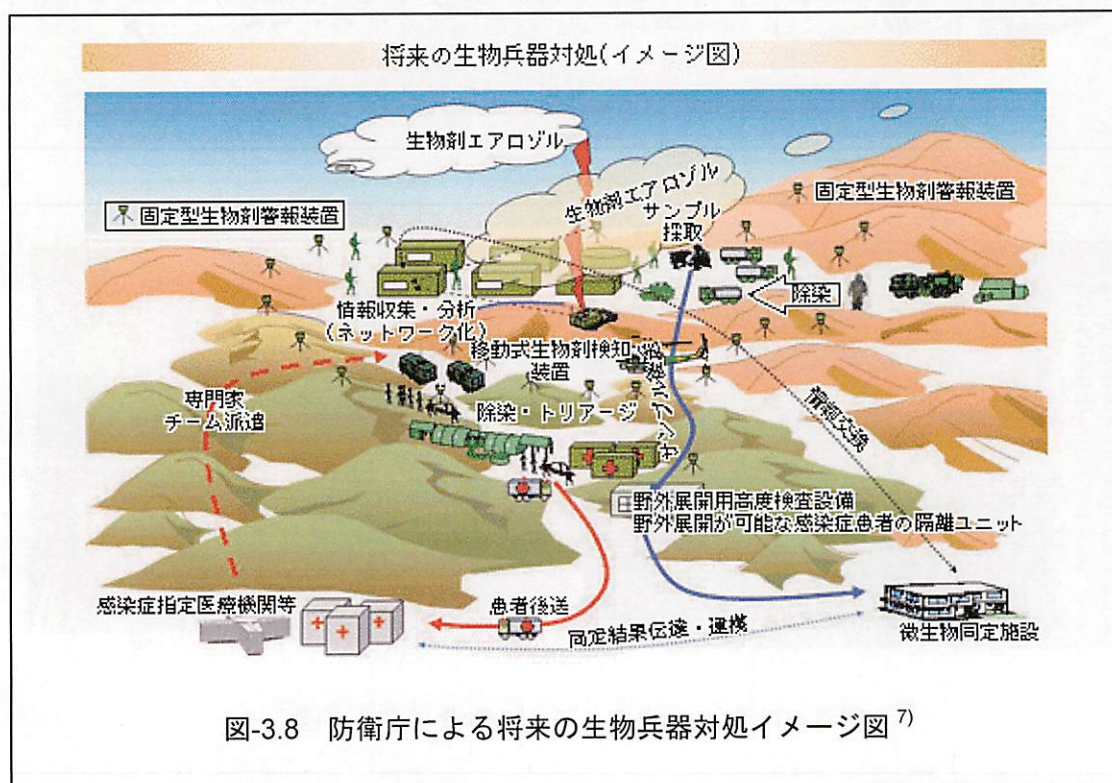
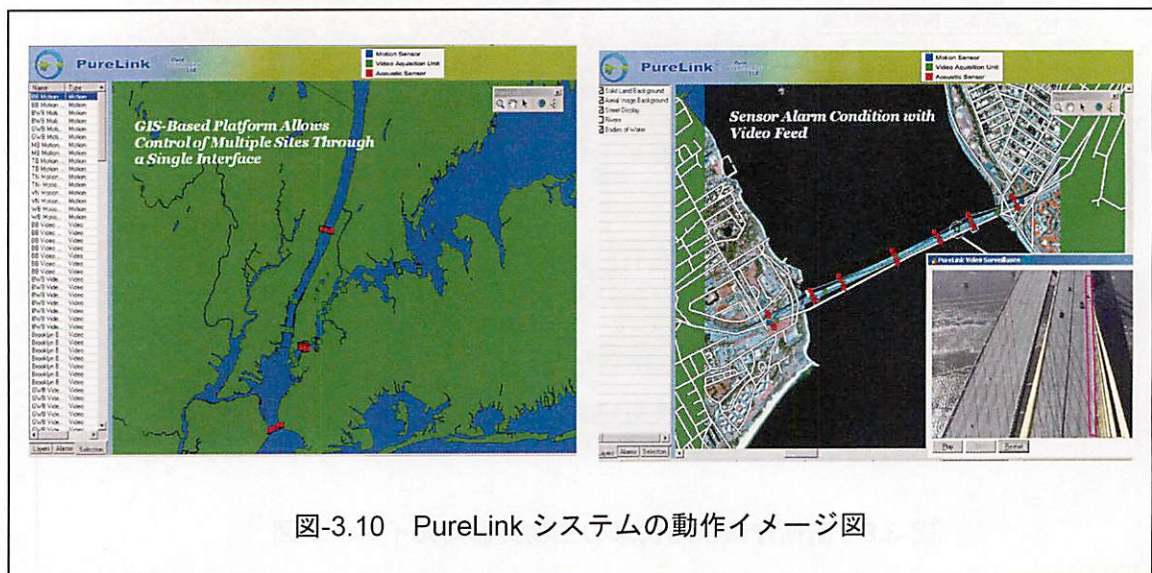
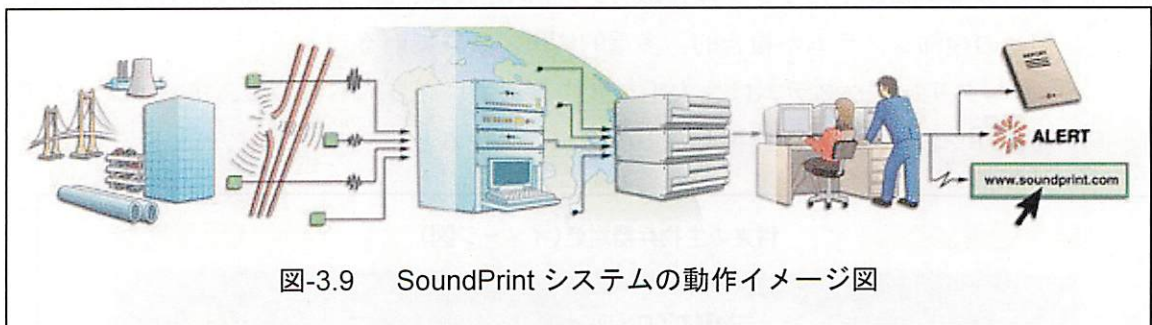


図-3.8 防衛庁による将来の生物兵器対処イメージ図⁷⁾

一方、民生品のモニタリングシステムとして、Pure Technologies 社が開発した SoundPrint と PureLink を紹介する⁹⁾。

SoundPrint は、センサを構造物の外側に貼り付けて異常な音や振動を検知し、その発生場所を特定するシステムである。記録された情報は、Internet でセンターに送られ、その構造物の所有者には Internet で異常発生の都度並びに定期的に報告される (図-3.9)。このシステムは、もともと構造物の健全度管理のために作られたものであるが、人為災害 (テロや悪質な行為) 発生の遠隔地からの検知などにも実用可能なシステムであると思われる。

一方、PureLink は、上述の SoundPrint に動揺センサ、ビデオ画像監視などの個別モニタリングセンサを、ネットワークと GIS (地理情報システム) を用いて統合、管理するシステムである (図-3.10)。個々のセンサによりとらえられた情報に基づき、異常検知や自動警告を行い、地図 (位置) 情報とあわせて情報表示、管理を行う。図-3.10 右側に示すように、ビデオ画像監視システムでは、不審行動の自動検知機能もあり、人為災害対策のためのモニタリングとして実用可能であると思われる。従って、上記の例からは、爆破テロに対応するモニタリングでも、ネットワークを用いた複数センサの統合管理システムが実用イメージとなることが伺える。



3.6 今後の展望

冒頭で述べたとおり、世界的にはすでにテロが多発しており、その災害防止（軽減）技術のニーズは高く、早急な開発や対応システムの確立が望まれている。また、日本もかつてはテロとはほとんど無縁な国であったが、国際間の緊張増大や不況の進行、異常な宗教活動などにより、近年はテロの危険性が増している。とくに、今回取り上げた高速鉄道ではテロ対策が十分検討されていないため、大きな被害が発生する前に、対応方針やマニュアル策定、被災軽減のための技術開発等を進めるべきである。その一環として、テロ対策に不可欠な情報掌握の手段であるモニタリング技術の実用化、高度化を進めることは、今後益々重要なポイントになると考えられる。

一方で、前述のとおり、高速鉄道テロ対策のためのモニタリング技術は発展途上にあり、テロ対策全体の活動との連携、システムの統合化など、実用性を高めていく取り組みが必要になる。また、とくに「テロ防止」という意味で重要性の高い、事前検知モニタリング技術の開発については、①不審人物を識別・追跡する、②危険物を察知する、③異常操作を検出する、という視点別に、次のような展開が考えられる。

①では、現時点では画像や音による監視がメインであるが、不審人物の識別には、これに加えて人間行動学や感情モニタリングのようなことが関連してくる。したがって、この視点での開発では、センサ技術と人間の行動や感情との複合研究が、今後必要になってくるであろう。

②では、爆発物を検索したり生物剤を検出したりということになる。現在主流の金属探知器やX線のような媒体による識別に加え、最近取り組まれつつあるCTスキャナ、電磁波や中性子利用の爆発物検知、DNAスキャンやバイオチップによる細菌識別など、新しいより高性能な手法の実用化が鍵になる。

③については、今回は対象としなかったが、列車転覆テロなどへの対策となる。例えば車や列車のブレーキ系統に細工を加えたとか、電子制御に影響を与えるように操作したなどの異常を検知する方法が必要で、媒体としては、歪みや加速度のセンサ類から画像・レーザ、光ファイバー等々、対象の状況によって様々なものが考えられるであろう。また、この検討に関しては、①、②以上にターゲットとされる対象物の原理や弱点を把握しておくことも重要である。

3.7 参考文献

- 1) 日本写真測量学会編 (2002) : 空間情報技術の実際、pp.23-29
- 2) InVision Technologies 社 HP (2004 年 2 月アクセス) : CT スキャナ方式の爆弾検知
<http://www.invision-tech.com/index2.htm>
- 3) Pacific Northwest National Laboratory HP (2004 年 2 月アクセス) : 電磁波利用の武器検知
<http://availabletechnologies.pnl.gov/securityelectronics/scanner.stm>
- 4) High Energy Technologies 社 HP (2004 年 2 月アクセス) : 中性子照射による爆薬等の検知
<http://www.hienergyinc.com/products/SuperSenzor.htm>
- 5) Brickstream 社 HP (2004 年 2 月アクセス) : 買物客の行動の画像解析
<http://www.brickstream.com/index.asp> (solutions-demo を参照)
- 6) (財) DRC HP (2004 年 2 月アクセス) : 生物剤検知機材の開発方向
<http://www.drc-jpn.org/AR-5J/oshima-j.htm>
- 7) 防衛庁 HP (2004 年 2 月アクセス) : 平成 15 年度防衛白書
<http://www.jda.go.jp/j/library/wp/15/2003/html/15324000.html>
- 8) 赤松幸生、廣瀬葉子、瀬戸島政博、小林番郎、今城勝治 (2003) : ドップラーライダーによる 2 次元風速データと地理条件の関係分析、日本写真測量学会平成 15 年度秋季学術講演会発表論文集、pp.21-24
- 9) Sumitro, S., Hida, K. and LE Diouron, T. (2003): Structural Health Monitoring Paradigm for Concrete Structures, The Proc of 28th Our World in Concrete and Structures, Singapore, Vol.1, pp.525-532

4. 耐震性能評価のためのモニタリング

4.1 背景

阪神淡路大地震時の多数の死者は、その大半が一般住宅の倒壊や家具の転倒による圧死、窒息死あるいは身動きが取れない状態での焼死であった。したがって、家屋が倒壊しなければ、あるいは家具が転倒しなければ、死者は大幅に減らせたはずであった。このことは、一般家屋に対する耐震補強対策の重要性を示している。

日本の耐震補強促進の制度は、平成7年12月に「建築物の耐震改修の促進に関する法律」が施行され、自治体によっては耐震診断や耐震補強費用の補助等の施策が取られてはいるが、その制度の活用についてはなかなか円滑には進んでいないのが現状である。新築住宅の耐震性能は建築中にチェックされており、比較的耐震性は確保されていると思われる。しかし、中古木造住宅の場合、耐震性確保のための改修があまり促進されていないのは、耐震性能そのものの評価が難しいことが大きな原因の一つと考えられる。

4.2 目的・対象

以上のような現状を踏まえ、ここでは、一般家屋の中でも特に中古住宅の耐震性能を判断する手法の調査・検討を行った。特に中古住宅に焦点を絞ったのは、一般住宅の大半が耐震性に対する関心が深くなる前にたてられたものであるからである。

また、耐震性の判断は通常定められたいくつかの項目ごとに評点を付け、その総合評価点で改修の必要性の有無を判断する方法である。しかし、中古住宅は耐震判断をするための設計図書がそろっていない場合がほとんどであり、そのような状況下で作業を行う診断員には比較的高度な知識や経験が要求される。このため、定量的な判断は難しいと言わざるを得ない。

このような現状から見ても、中古住宅を対象に、比較的簡便でありながら、定量的、客観的な判断を下す手法の開発が要望されており、ここで取り上げることにした。

4.3 方法

現在広く行われている方法では、図面を基に診断員が主に目視で壁や柱の状態を調査するが、ここで紹介する方法は建物の振動に着目して、それを測定分析することにより建物自身の耐震性の評価をしようとするものである。

構造物の振動の状態を測定することによりその劣化や安全性を診断する方法は比較的多く実施されており、特にプラント等には重要な手法といえる。

4.3.1 強制振動による方法

ここではビイック（株）が「動的耐震診断システム」として提案している方法を採用¹⁾。

(1) 原理

この方法は、建物の内及び外に水平方向の起震機を置き、その振動の伝達状況を加速度計で測定することにより、建物自身の耐震性と、地盤の建物への影響を把握する。

(2) 手法

1) 建物の測定

- ① 建物の2階に起震機を設置する。
- ② 建物の四隅（例えば東西南北）に地震計を設置する。
- ③ 起震機を作動させ、建物を震度1程度で振動させる。
- ④ 地震計で建物の振動を測定する。

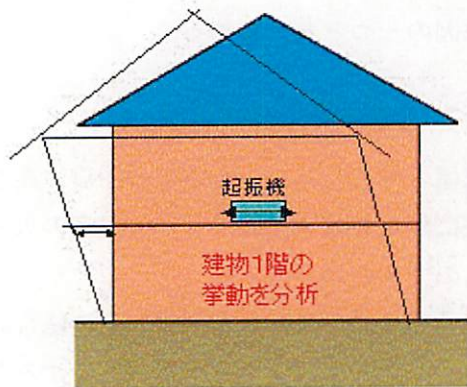


図-4.1 建物の振動測定イメージと起震機¹⁾

2) 地盤の測定

起震機を使い建物とほぼ同様の手順で地盤の挙動を調べる。

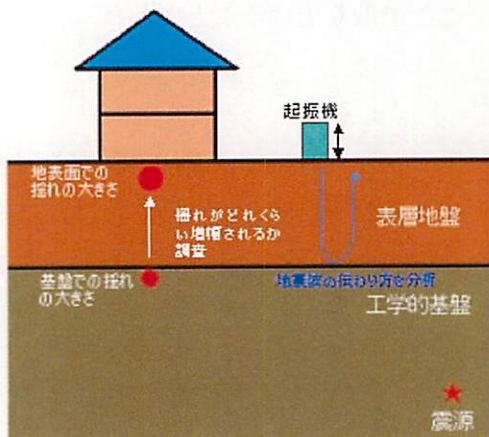


図-4.2 地盤の振動測定イメージと測定の様子¹⁾

3) 測定結果を分析する。

測定結果を基に、以下のような点を中心に分析及び判断を行う。

- ① 建物の振動が他の点より大きな測定結果である場合、その周辺は他より弱いであろうと判断できる。
- ② 軟弱地盤の場合ほど地震時の揺れが大きくなる。
- ③ 想定される地震が起きた場合にどれくらい揺れるかを算出する。
- ④ 地盤と建物の関係から共振の可能性を判断する。

4) 改修および再調査

分析結果を基に建物の耐震改修を行い、再度調査測定を行い改修の結果を確認する。

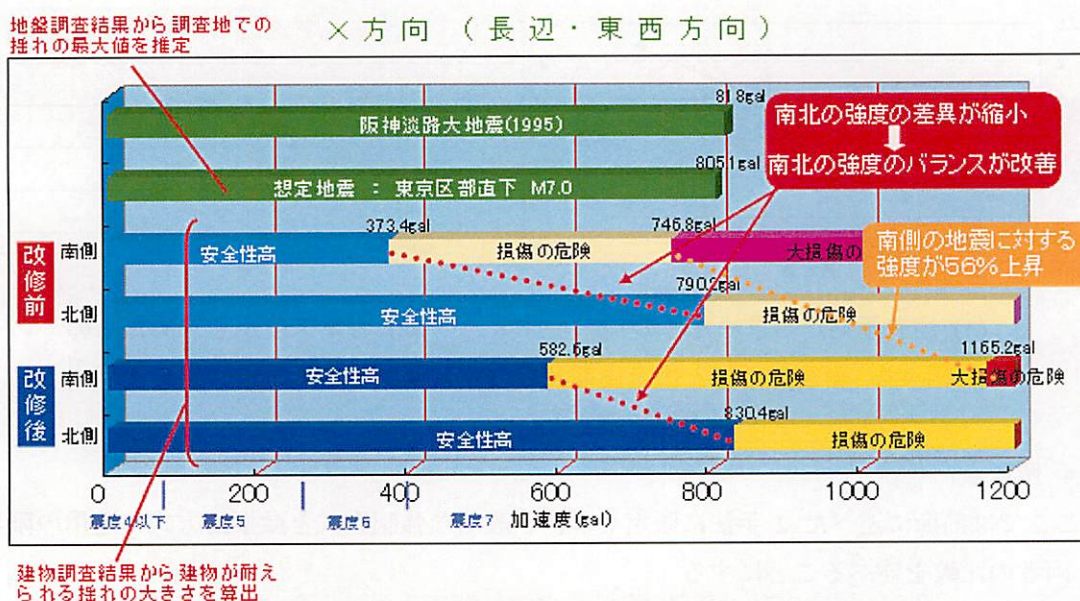


図-4.3 改修前後の振動の変化¹⁾

図-4.3 はこの方法で改修前後の振動の様子を示したもので、建物の南側を中心に改修を行うことで、全体のバランスが良くなったことが表されている。

4.3.2 常時微振動測定による方法

常時微振動を測定し、主にその周波数分布を調べることによりその耐震性の判断材料の一つとすることはよく行われている。ここで紹介する手法は現時点では開発段階であるが得られたデータを処理することにより、通常の耐震精密診断の結果に近づけようとするものである²⁾。

方法の原理及び概略手順は次のとおりである。

- ① 建物内の目的の場所に水平 2 方向の加速度計を設置する。
- ② 得られた信号から交通ノイズ等の少ない部分を切り出す。
- ③ データに前処理を施す。
- ④ データ処理を行い各信号のカオス度を求める。
- ⑤ 求められたカオス度を、あらかじめ得ておいた計算式に代入し耐震性を判断する。

現在発表されている計算式と、評価に使用した建物の耐震精密診断値との関係を図-4.4に示す。(1)は建物の固有周期から推定した値と耐震診断値との関係を示すもので、(2)はこの手法により求めた推定値と診断値との関係を示すものである。なお(2)の相関係数は 0.76 である。

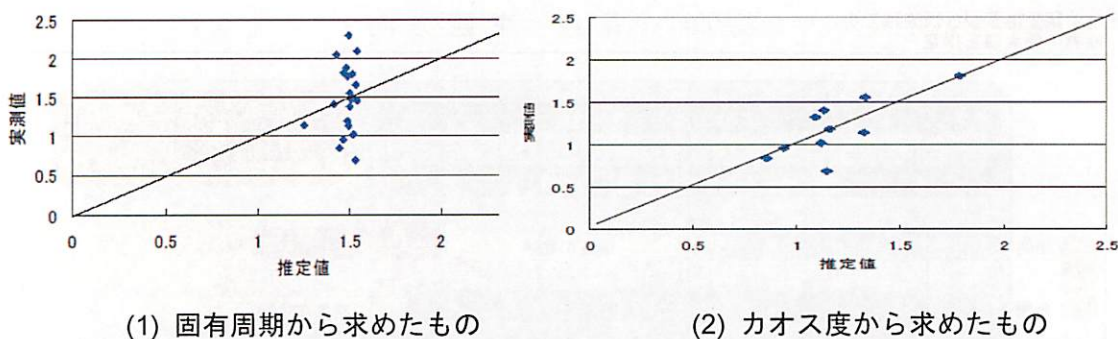


図-4.4 耐震診断値と固有周期及びカオス度から求めた推定値の関係²⁾

4.4 留意点

ここでは前節に述べた 2 手法に限定せず、一般的な強制方式と微振動方式の運用の限界と両者の比較を述べることにする。

(1) 運用の限界

- ① 局所的なデータであるので建物全体の評価へ結びつけるのは危険である。
- ② 測定対象の振動が、耐震機能上要求される振動レベルとは異なっており、この結果がリニアに延長できるとは限らない。
- ③ あくまでも他の方法と併用することにより、客観的で精度の高い判断をするデータのの一つと考えるべきであって、得られた結果単独での判断をすることはできない。

(2) 方法の比較

- ① 強制方式の方が信号レベルが高く、耐ノイズ性では有利といえる。
- ② 強制方式は、起震機の位置により結果にばらつきが発生する可能性があり、測定及び分析に対する注意が必要であると考えられる。

- ③ 常時微振動方式は振動環境によっては測定できない可能性がある。
- ④ ここで紹介した常時微振動方式は得られた結果からは一義的に値が求まり、強制方式より診断員によるばらつきは生じにくい。
- ⑤ 同常時微振動方式は建物の構造が変わると推定のための計算式が変わると考えられ、どのような計算式（の係数）を用いるかが結果を左右する。

4.5 実用イメージ

強制方式は現在ビジネスとして運用されており、最近1年間で約100件の実績があるということである。ただし、他の手法との併用により、この手法でより正確な判断を行うためのデータの一つを得ることを目的として運用されている。

常時微振動方式は現段階では開発段階であるといえるが、診断結果を数値で表すことは意義のあることである。

4.6 今後の展望

現在の振動測定技術を考えると、ハード面ではほぼ要求を満足できるレベルにある。しかしレーザードップラー計等を利用して非接触で振動を測定するなどの研究³⁾もされており、より広範囲な展開が期待される。

重要なのはソフト面での発展である。その意味ではカオス的な考え方を導入した方式はそれなりに意味がある。また振動の要素である周波数・振幅・位相を独立して考えるのではなく、それらを組み合わせることによって、より正確な評価のできる手法の提案が増えるものと思われる。

ただ、一般家屋の場合、その構造は千差万別であるため、あるところで得られた結果を直ちに他の件に当てはめることは難しい。そのためには構造、材質、壁や柱の配置等によるパターン化を行う必要があり、そのためのデータを蓄積することが重要である。

4.7 参考文献

- 1) ビック株式会社 HP (2004年2月アクセス)：木造住宅の動的耐震診断システム
<http://www.vic-ltd.co.jp/deri/001.html>
- 2) 岡田成幸、高井伸雄、太田洋芳 (2002)：木造住宅の簡易な耐震精密診断法の提案－微動のカオス的解釈による－、第11回日本地震工学シンポジウム講演論文集、pp.2087-2090
- 3) 上半文昭、目黒公朗 (2003)：構造物診断を目的とした非接触微動測定法、生産研究、Vol.55、No.6、pp.127-132

5. ヒートアイランド関連情報のモニタリング

5.1 背景

近年、わが国の都市域においては、過去の傾向に比べて著しい温度上昇が観測されており、夏期には熱帯夜の発生とその長期化が顕著になってきている。こうした現象は、地球温暖化現象の影響であることも懸念される場所であるが、郊外地に比較して都市域に特徴的に発生していることから、ビル・建物や自動車などからの排熱の増加に加え、水面・森林・草地・農地の減少と舗装面・ビルの増加による太陽熱吸収の増加や蒸発効率の悪化、また高層ビルの増加に伴う通風効率の悪化など、都市特有の問題が関係していると考えられる。

たとえば、熱帯夜の発生または長期化は、エアコンを使用することで建物の中を過ごしやすくすることはできるが、それはまた都市のエネルギー消費の増加をもたらすものであり、都市の熱環境の悪化と温暖化ガスの増加という悪循環を招くこととなる。

このようなことから、ヒートアイランド現象発生の把握と効果的な対策の実施は、サステナブルな都市の熱環境の改善という面と、大きくは地球温暖化の抑止の面で、たいへん重要なものとなっている。

このガイドラインでは、都市のヒートアイランド現象を効率的に把握するモニタリング手法として、リモートセンシングを利用する方法をとりあげ、その実施についての解説を示す。

5.2 目的・対象

ヒートアイランド現象のモニタリングには、地上観測による方法とリモートセンシングを利用する方法がある。前者は、多数の地点に観測機材と要員を配置して気温等の観測データを収集するもので、多数の機材・要員確保が必要な点で実施に困難をとまることが多い。観測要員を減少させるには、自記式またはテレメトリ式観測機材を配置する方法があるが、配置・撤去のための要員確保、配置中の観測機材の盗難・悪戯防止等への配慮、公共空間への設置についての一般への安全対策等が必要になること、などの難点がある。一方、後者のリモートセンシングを利用する方法は、航空機を利用して短時間に広域の地表面温度と土地被覆に関するデータを収集するとともに、比較的少数の校正点の地表面温度・地上気温等を実測するもので、必要とする要員・機材が前者に比べて圧倒的に少なく済むことが特長である。

そこで、今後ますます必要性が増大すると考えられるヒートアイランド現象のモニタリングを効率的に実施する手法として、リモートセンシングを利用する方法を示す。

リモートセンシングによるヒートアイランド現象のモニタリングでは、盛夏の最も暑い条件下で航空機から地表面温度を計測するとともに、それと同期して地上の校正点の地表面温度・気温等を実測する。なお、土地被覆状況のデータは熱拡散係数、定積熱容量、蒸発散効率等のパラメータを与えるものであるが、リモートセンシングではこれに関するデータも、地表面温度計測と同時に取得できるのがひとつの特長にもなっている。

5.3 方法

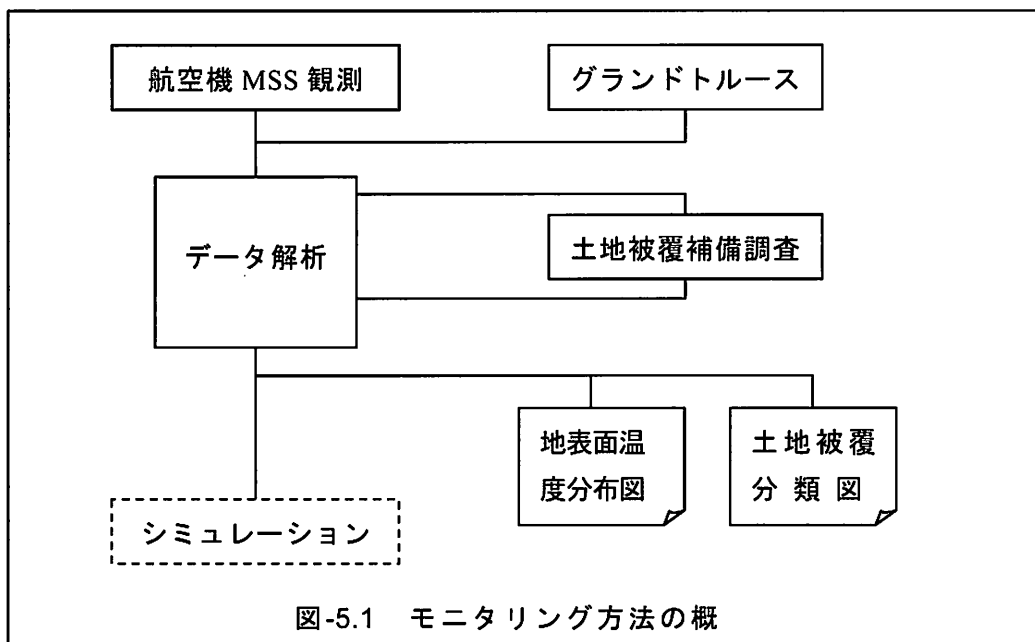
5.3.1 ヒートアイランド関連情報モニタリングの概要

ヒートアイランド関連情報のモニタリングは、盛夏の快晴の日の、午前11時～午後2時ごろの時間帯に行う。この条件下での航空機搭載MSS観測によって、地温・気温とも最も高温になる状況でのデータが取得できる。また、航空機観測と同期して、地上の校正点における地温・気温のデータを取得する（グラントルース）。これは航空機観測の時間帯の前1時間から終了後1時間程度の間で行う。なお、MSSデータ解析によって土地被覆分類を行うための、地上における現地調査も同時に行うことができる。

航空機MSS観測データのうち、熱バンドと呼ばれる波長8～14 μ m帯域のデータを地上校正点のデータを使って解析することにより、地表面温度分布データを得ることができる。またMSSデータの可視光・近赤外線データを解析することにより、土地被覆分類を行うことができる。土地被覆分類の工程中では分類カテゴリの確認のため、土地被覆についての現地補備調査を行う。以上で得られたデータにより、最高温時の地表温度分布と都市の冷却・加熱効果に影響する、土地被覆分類を把握することができる。

なお、上記で得られたモニタリング結果を入力情報として、数値シミュレーションにより都市の熱環境の予測等を行うこともできる。これによってヒートアイランド現象の時間的な移動や夜間における熱帯夜発生の推定、また都市緑化推進等の施策によるヒートアイランド現象緩和のシミュレーション等が可能になる。

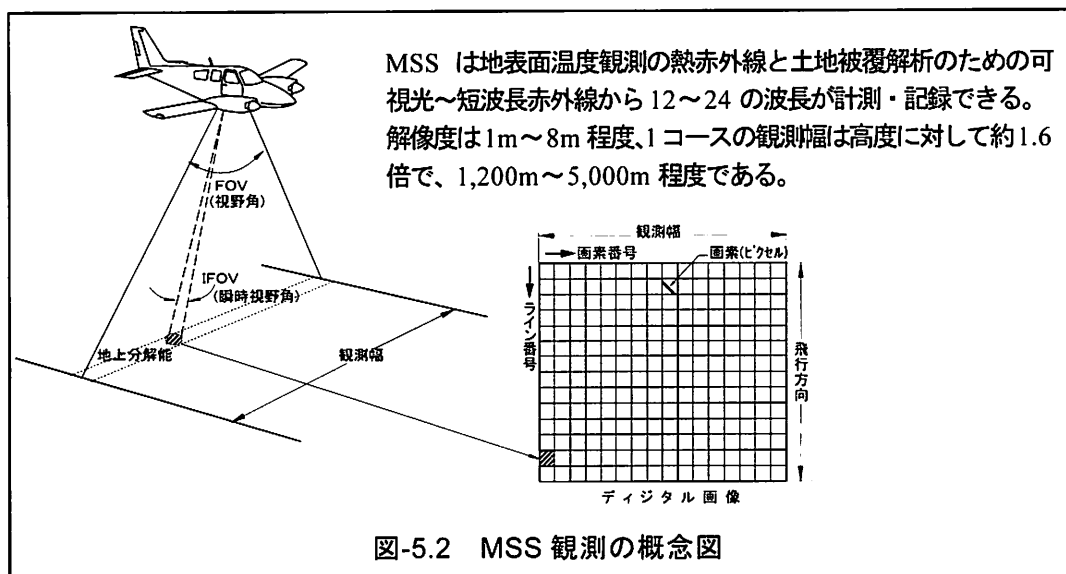
モニタリング方法の概要を図-5.1に示す。



5.3.2 航空機MSS観測

MSSは可視光から赤外線帯域を10～数十の帯域に分けて地表観測をおこなう装置で、ヒートアイランドのモニタリングでは、温度計として使用する熱赤外線帯域(波長帯域：8～14 μ m)と、土地被覆分類で使用する可視光～近赤外線帯域による観測を行う。

MSS 観測の概念は図-5.2 に示すが、観測幅は観測高度に対して約 1.6 倍となる。また解像度は飛行高度の 1,000m に対して 1.25m または 2.5m と切り替えることができる。



観測諸元は主として希望する地上解像度をもとに決定する。調査対象範囲が広いと 1 コースで収まらないことがある。その場合は平行する複数のコースで調査対象をカバーするよう計画する。ただし、航空機は計画した測線からずれることがあるので、隣り合うコース間で、計画コース幅の 30%の重複（サイドラップという）を持つようにする。

計測諸元の一例を示す表-5.1 の場合では、高度 3,200m の観測飛行で地上解像度 4m、1 つのコースの観測幅は 5.12km であるが、必要な調査範囲はコースの中央部 3.584km（観測幅の 70%）の範囲に収まるものとする。必要な調査範囲がこれに収まらない場合は、3.584km 間隔の複数の平行コースでカバーするようにする。

表-5.1 リモートセンシングデータ取得諸元例

観測諸元		収録波長帯域			
観測高度	3,200m	収録	中心波長帯	収録	中心波長帯
地上解像度	4m	ch	[nm]	ch	[nm]
観測幅	5.12km	1	473.5	7	848.3
(コース間隔)	(3.584km)	2	552.5	8	1,037
視野角	80°	3	599.5	9	1,494
飛行速度	250km/h	4	666.9	10	1,590
温度精度	0.2°C	5	698.3	11	9,245
収録帯域数	12 バンド	6	753.2	12	11,815

観測時期は、盛夏の快晴の日の午前 11 時～午後 2 時ごろまでの間で行うよう計画する。雲は観測の障害になるので、極力入らないようあらかじめ気象情報を取得して実施日と期間を設定する必要がある。通常観測期間には数日程度の天候スタンバイを見込む必要がある。

5.3.3 グラントルース

MSS データに校正データを与えるグラントルースは、MSS 観測時間帯を中心に、その前後各 1 時間以内程度で行うようにする。観測する項目は、地表面温度、気温である。

グラントルース点は、高温のデータ、低温のデータのリファレンスを得られるように選定する。高温のデータのためには標高が低くて日当たりがよい駐車場・アスファルト路面などが適している。低温のデータのためにはある程度の標高のある地表面、一様な芝・草地など大きな蒸散が期待される地表面、池・河・海などの水面などがある。特に調査範囲に水面があるなら、ぜひその水面温度を計測しておくべきである。

なお、グラントルース点は航空観測データと対照させるものであるため、①航空機からの見通しがあること、②解像度の 3 倍程度以上の辺長を持つ広がりがあり、その範囲の状態がなるべく一様であること、などの基本的な要件が必要である。

地表面温度のグラントルースには、放射温度計を使用する。水温の測定は採水バケツで表面水を汲み取り、水銀温度計で計測するのがよい。気温測定にはアスマン通風温度計、白金抵抗温度計などが利用できる。

グラントルースの結果は、観測時刻とともに野帳に記録すると同時に、1/25,000 地形図等に計測位置を明示する。

5.3.4 データ処理・解析

MSS データには必要な前処理を行ったあと、赤外線帯域データをグラントルースデータで校正して、地表面温度解析を行う。また既知の資料を基に可視光～近赤外線帯域のデータを使って、最尤法またはクラスタリングによる土地被覆の分類処理を行う。MSS データ解析による土地被覆分類カテゴリの例を表-5.2 に示す。

表-5.2 土地被覆分類カテゴリ例

No.	カテゴリ	カテゴリの定義	特記事項
1	草地	草地、ゴルフ場、河川敷草本群落	
2	樹木	森林、街路樹等	
3	田	水田	作物のない耕作地は裸地
4	畑	畑	作物のない耕作地は裸地
5	裸地	裸地、グラウンド（土）等	
6	建造物	住宅、工場、その他建造物	
7	アスファルト	道路、駐車場等	街路樹は樹木
8	コンクリート	コンクリート舗装、埋め立て地	
9	水面	海面、河川河道、池等	河川敷は草地・裸地等
10	雲	雲	土地被覆分類上の障害物
11	雲影	雲による地表の影	同上

なお、土地被覆分類の途中で分類カテゴリの確認のために、現地補備調査を行う。

5.4 留意点

5.4.1 観測時期と時間帯

航空機 MSS 観測は連続観測ではないため、計測する地表面温度データは、ある瞬間の温度であることに留意する必要がある。夜間など、観測時刻以外の温度を求めるには、シミュレーションの結果を待たなければならない。しかし、盛夏の正午付近の時間帯における地表面温度・気温のいわば最大値を計測することは、ヒートアイランド現象を把握する上で最も重要なことであるほか、シミュレーションの精度を上げるためにも重要なことである。

なお、夜間における地表面温度の航空機 MSS 観測も可能である。その利用可能性は 5.6 項を参照されたい。

5.4.2 天候条件

盛夏の快晴の日であれば、地表面温度は日出とともに上昇し、正午ないし午後 2 時ごろの間で最高温度に達するが、それまでの間で雲が太陽光を遮ることがあると、地表面温度は徐々に低下するか、停滞する。その後、雲が移動して再度直射日光があたるようになると地表面温度は急速に上昇するが、地物には熱慣性があるため、雲が太陽光を遮ることがなかった場合とは異なる温度上昇曲線を示す。したがって、ヒートアイランドのモニタリングでは、快晴の日を選んで観測する配慮が必要である。ただし、地表面温度の上昇とともに雲が発生することも多いので、あまりに天候待機に日数を費やすと盛夏の時期を逸するおそれもある。したがって、地域の気象特性によっては、少数の散雲程度なら観測を実施しなければならないこともあり得る。なお、航空機より下方の雲は地物からの熱放射や光の反射を遮るので、観測の支障物となる（MSS は雲の温度や色を計測してしまう）。しかし、航空機より上方の雲は太陽光が地物に到達することは妨げるが、地物の熱放射を航空機で観測する妨げにはならない（地表面温度を計測できる）。たとえば、雲影となる範囲では、やや温度が低下または停滞した地表面温度を計測することができる。しかし、そこでは可視光・近赤外線の光量が十分でないので土地被覆分類はできない。

5.4.3 グラントルース

航空機観測は、たとえば 5km×10km の観測なら 2 分間程度で観測してしまうが、20 点程度であっても、グラントルースはそう簡単には終わらない。しかし、データの同期性確保の観点から、グラントルースは航空機観測の時間帯を中心に前後 2 時間程度の間で実施することが必要であり、場合によっては、複数のグラントルース班を投入する検討も必要となる。

5.4.4 土地被覆分類

従来、ヒートアイランドのシミュレーションに使用する熱拡散係数、定積熱容量、蒸発散効率等のパラメータは、国土数値情報または細密数値情報における、土地利用区分

データから得てきた。リモートセンシングで得られる土地被覆分類は、これとは少し異なる。その理由は、利用区分と被覆状態区分の違いともいうことができる。例えば（利用区分）道路は、（被覆区分）アスファルト・コンクリート・草地・樹木等に細分されることがあり得る。また（利用区分）田は、イネを育成中であれば（被覆区分）草地となるが、イネを刈り取ったあとでは（被覆区分）裸地となる。それらの例を表-5.3に示す。

表-5.3 土地利用と土地被覆の異同

土地利用区分	土地被覆分類							
	アスファルト	コンクリート	建物	草地	樹木	裸地	・・・	水面
道路	◎	△		あり	街路樹			
建物用地	駐車場等		◎	庭	屋敷林			
田				(育成中)		(刈取後)		
河川	通路	護岸		河川敷	河畔林	河川敷		◎
・・・								

5.5 実用イメージ

リモートセンシングによるヒートアイランドのモニタリング例として、地表面温度分布図を図-5.3に、土地被覆分類図を図-5.4に示す。



図-5.3 地表面温度分布図



図-5.4 土地被覆分類図

このデータは、2002年8月26日に取得された大阪市、尼崎市、豊中市、吹田市にわたる

地域で、5コース分を接合したMSS解析データの一部である。航空機MSS観測時間帯は11:43～12:32までの49分間であった。航空機の飛行高度：3,200m、地上分解能：4mである。

地表面温度と気温のグラントルースは27点で行った。地表面温度の最高値は工場のスレート屋根で59.2°Cであった。アスファルト路面では58.6°C～49.1°C、草地で39°C程度であった。一方、河川の水面で28.0°C～29.3°Cと他に比べて低かった。また、気温は32.4°C～34.9°Cであった。図-5.3の地表面温度分布図中で白色部分は雲である。

土地被覆は、樹木、草地、裸地、焼け跡、アスファルト、コンクリート、建造物、水面、雲、影の10のカテゴリに分類した。農地はこの調査範囲では該当するものが少なかったため、分類カテゴリを作らなかった。草地または裸地に分類されている。また、焼け跡は特別に設けたカテゴリである。なお、図-5.4の土地被覆分類図で白色は雲、黒色は土地被覆分類ができなかった雲影である。雲影よりも雲そのものの方が大きく表示されているのは、高度があるので航空機により近いためである。

航空機MSS観測とグラントルースの実施例を表-5.4に示す。

表-5.4 航空機MSS観測とグラントルースの実施例

航空機MSS観測		グラントルース	
観測日時	2002年8月26日	観測点数	27点
観測時間帯	11:43～12:32	観測時間帯	11:21～13:58
観測高度	3,200m	地表面温度	28.0°C(水面)～59.2°C(スレート)
地上解像度	4m	気温	32.4°C～34.9°C
使用機器	JSCAN-AT-AZM	使用機器	地表面温度：放射温度計
観測波長帯数	12バンド		気温：アスマン温度計

5.6 今後の展望

リモートセンシングを利用したヒートアイランド関連情報のモニタリングでは、盛夏・快晴の日の正午付近という条件下で、地表面温度・気温のほぼ最大値といえるデータが得られるほか、都市熱のシミュレーションに有用なデータを提供できることをすでに述べたが、今後、シミュレーションは更に緻密なものに発展する動向であり、そこに求められるモニタリングデータも多様化する方向にある。またMSSデータ解析等、リモートセンシング技術そのものの高度化も求められているところである。

5.6.1 将来に期待されるヒートアイランド関連情報

個々のモニタリング技術に先立ち、特にシミュレーションの目的で将来に期待されるヒートアイランド関連情報について、表-5.5にとりまとめた。地形形状については細密化が求められ、気象要素では従来の点測定に代わり空間分布計測が求められている。また、交通量、地表・土壌水分量、植生情報など、新たな情報も求められている。以降では、これらの情報取得に関係するモニタリング技術を中心に、その今後について展望する。

表-5.5 将来に期待されるヒートアイランド関連情報

計測項目	利用目的	現 状	対象物	計 測 要 求 条 件			
				対象スケール (範囲)	計測密度 (メッシュサイズ)	計測時間 (積算)	計測頻度
地表形状	気流シミュレーションにおいて下部境界条件として使用	50m メッシュ等の粗いデータ	地表面および建物	10 ⁵ m~10 ³ m 【~100m】*	10m 以下 【~1m 以下】*	瞬時	年1~2回
交通量	自動車からの排熱量の面的実態評価	統計量より補間	面的な走行車両分布	10 ⁵ m~10 ³ m	10m 以下	1時間以上	毎時~ 毎月
気象の空間分布 (風、気温、湿度)	ヒートアイランドの実態把握	地上特定点による測定、シミュレーション	接地境界層付近の下層大気	10 ⁵ m~10 ³ m	10m以上	10分程度	毎時~ 毎季節
地表・土壌水分量	気温低減に寄与する蒸発散能の評価	ボーリング調査	土壌および人工被覆	10 ⁵ m~10 ³ m	100m 以上	瞬時	毎季節
植生情報 (LAI)	植生が気温低減に寄与する程度の数量化	地上特定点による測定	樹木分布域	10 ⁵ m~100m 【~10m】*	10m 【~1m 以下】*	瞬時	毎週~ 毎月

*【 】書きは将来、都市環境シミュレーションが詳細になった場合。

5.6.2 航空レーザ測量の利用

今後の進展で、まず求められるのは、地表の粗度に関するデータであろう。地表の粗度は、都市キャノピー内の風のシミュレーションのために重要な要素である。これまでは田・畑・森林・建物用地などの、区分ごとに設定した粗度長を与える方法がとられてきたが、建物一棟ごとの大きさ・高さが特定できれば、シミュレーションは更に緻密なものとなって、精度が向上する。これを実現する方法として、現在すでに航空レーザ測量が利用可能である（第6章を参照）。

航空機に走査型のレーザ測距装置（レーザスキャナという）を搭載し、この装置の位置・姿勢を GPS/IMU で正確に計測すると、航空機の進行にともなって、地表の高度データが面的に得られる。通常、得られたデータから樹木・人工構造物等をフィルタで除去して、5m 等にメッシュ化した数値標高モデル（DEM）を得ている（これを航空レーザ測量という）が、ここで除去した樹木・人工構造物のデータをモデル化することにより、ヒートアイランドのシミュレーション上で有益な、地表粗度のデータを得ることができると考えられる。

5.6.3 交通量データの収集

自動車からの排熱は、ヒートアイランドの要因のひとつであるが、現在は統計量によってシミュレーションのためのデータを得ている。衛星や航空機による高分解能画像の解析等を活用した、走行車両数の自動計測などの、面的分布データ収集の技術開発が待たれる。

5.6.4 気象要素の計測

シミュレーションの初期条件として、設定高度での温度・湿度・風向風速データや大気の温度勾配が必要である。これらは、現在利用可能な特定点の気象データを使うなど

によって設定しているが、気象観測の分野では、航空機による大気気象要素の直接測定⁵⁾や、ドップラーライダーによる風分布のリモートセンシング計測技術⁶⁾があり、これらの利用が有効であると考えられる。

5.6.5 MSS 観測と解析の高度化

前節 5.5 で紹介した実用例では、都市気候シミュレーションのためにアルベド (albedo 全天方向への反射量/全天方向からの入射量) や NDVI (Normalized Difference Vegetation Index 正規化植生指数) 分布の算出も行われた。今後は、LAI (Leaf Area Index 葉面積指数) や地表 (土壌) 水分量分布の算出についての、リモートセンシングデータ解析技術の進展が期待される。既に研究としては取り組まれているので、今後はその実用化が課題となろう。

一方、地表面温度の測定について、夜間の MSS 観測は、昼間からの温度降下の地域的な大小分布を把握することができ、熱帯夜の把握に役立つものと期待される。この夜間計測は現在でも可能であるが、空港ごとに運用時間帯が異なるので、夜間の離発着が可能な空港を観測基地とする必要がある。

また、グラントルースも長時間連続観測を加えることにより、地域的な蓄積熱量、熱慣性に関するデータを取得できる。5.5 に示した実用例でも 27 点中の 3 点については 24 時間の連続観測を行っている。これらの連続観測点は、高層建造物等が稠密な地域、緑被が多い地域、河川・海浜等水辺に近い地域など、特徴ある地域を選定することが望ましい。

5.7 参考文献

- 1) 日本リモートセンシング研究会編 (2001) : 図解リモートセンシング、財団法人日本測量協会
- 2) 土屋清 (1990) : リモートセンシング概論、朝倉書店、
- 3) 財団法人資源環境解析センター (1996) : リモートセンシング用語辞典
- 4) 財団法人日本測量調査技術協会 (2004) : 航空レーザ測量ハンドブック
- 5) 浅野正二 他 (2001) : 雲が地球温暖化に及ぼす影響解明に関する観測研究 最終報告書、文部科学省研究開発局
- 6) 赤松幸生、廣瀬葉子、瀬戸島政博、小林喬郎、今城勝治 (2003) : ドップラーライダーによる 2 次元風速データと地理条件の関係分析、日本写真測量学会平成 15 年度秋季学術講演会発表論文集、pp.21-24

6. CO₂ 排出量を削減するための都市構造の立体的な把握

6.1 背景

地球温暖化が深刻な問題となっている現在、「CO₂ 排出量の少ない都市」は持続可能な都市のあり方の1つとして重要な考え方であると言える。CO₂ 排出量の少ない都市を目指すために、エネルギー消費効率の高い都市のあり方など、様々な研究が進められている。研究の一例としてしては、TOKYO HALF PROJECT¹⁾、環境負荷の少ない都市・国土構造に関する研究（環境負荷の少ない都市・国土構造に関する研究会）²⁾などが挙げられる。

これらの研究では、統計資料に基づいた解析がなされているが、効率的なエネルギー消費に着目した都市構造のあり方、特に都市の立体構造に関しての詳細な解析については言及されていない。しかし、都市のエネルギー効率を向上させ、CO₂ 排出抑制につなげるためには、例えば建物の集積度を上げて冷暖房効率を向上させたり、街路樹、屋上緑化や壁面緑化などの立体的な緑化により都市熱環境の緩和を図ることも必要となる。したがって、今後、環境負荷の少ない都市構造のあり方を提言するためには、建物や緑地の分布など都市の立体構造の現状把握は重要な検討項目なると考えられる。

6.2 目的・対象

6.2.1 目的

CO₂ 排出量の少ない都市のあり方を提言するために、統計情報の解析による都市の CO₂ 排出量の現状や、施策を講じた場合の将来予測に関して、様々な研究機関で研究が進められている。しかし、環境負荷の少ない都市構造のあり方、特に都市の立体構造を把握し、エネルギー効率の高い都市構造や緑地の配置について研究された事例は少ない。そこで、リモートセンシングデータを活用して広域的な立体構造を得て、CO₂ 排出に係る都市構造の現況把握や都市計画に関する研究に活用することを目的とする。

6.2.2 モニタリングの対象

<エネルギー消費効率を向上させるための対策例>

ヒートアイランドの緩和：都市緑化の推進、水面の確保、屋上緑化の推進、通風の確保、蓄熱材料の低減、打ち水効果

コジェネレーションの適正利用：効果的な地域への適用

送電ロスの減少：都市部での小型発電（風力発電他）、燃料電池

冷暖房効率等の向上：建物（居住者）の集積度向上（高層化、大規模化）、良好な気象条件の確保

交通渋滞の緩和：交通量集中地区における通行台数の制限、ハイブリッドカーの普及、電車・バスなど公共サービスの向上、P&R

その他：昼夜人口比を小さく、一世帯あたりの人数を多く

注) アンダーラインは主に都市構造に関連する項目

エネルギー消費効率の高い都市のあり方を検討する場合、前記したヒートアイランド、コジェネレーション、送電ロス、冷暖房効率および交通渋滞などの問題について検討を深める必要がある。これらの問題を緩和させるためには、それぞれの問題に関して以下の内容を検討する必要がある。以下のリストは、前記リストから都市の立体構造に関する項目を抽出したものである。

<把握すべき都市の立体構造の例>

- 都市緑化の推進、水面の確保 → 土地利用（平面）緑化可能地の分布状況等（多
い少ないか、集積・分散しているか）
- 屋上緑化の推進 → 屋上緑化可能地の分布状況等
- 通風の確保 → 都市建物の立体構造と並び方（風の通り道が確保されているか）
- 建物（居住者）の集積度向上 → 建物の立体構造と分布状況
- 良好な気象条件の確保 → 日照条件

特にここでは、当面実用的なモニタリングが可能と思われる、地物の高さ、緑地・水域部分、構造物の階層区分を対象とする。

6.3 方法

6.3.1 利用するリモートセンシングデータ

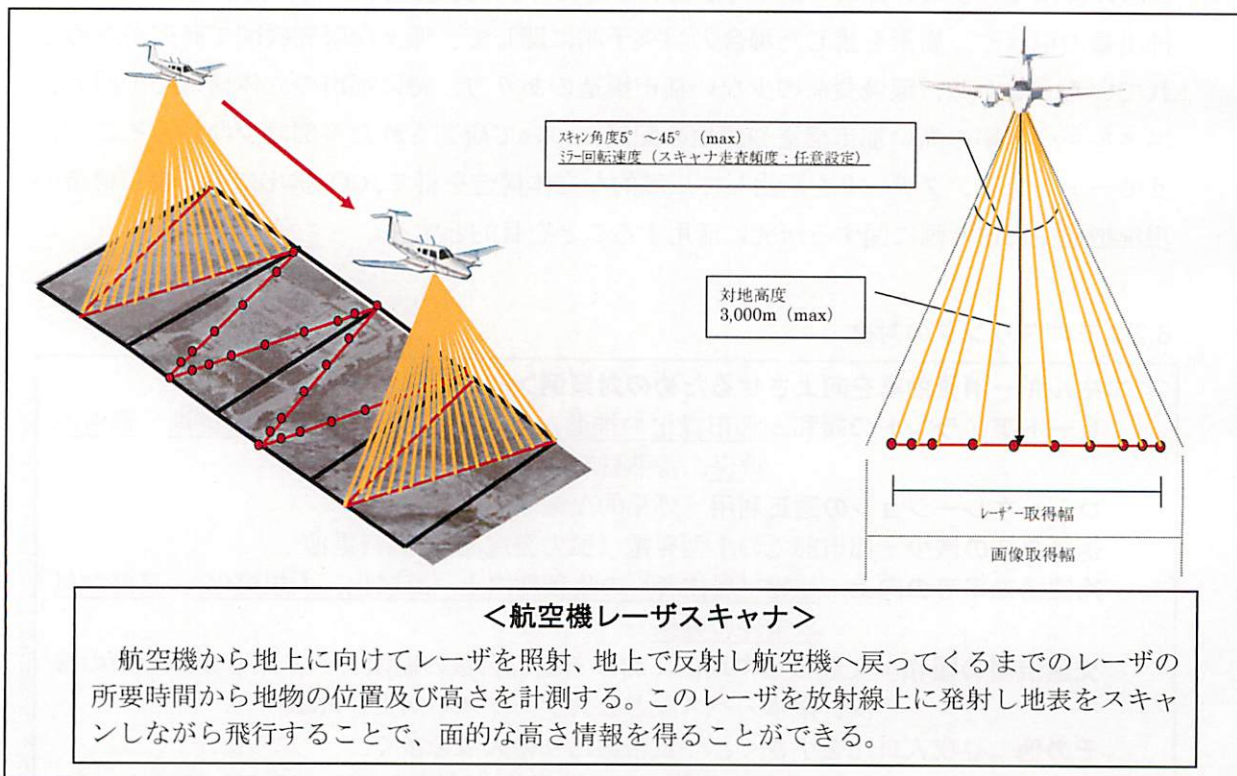


図-6.1 航空機レーザスキャナデータ

利用するリモートセンシングデータを次に示す。

- ・航空機搭載型レーザスキャナ³⁾ (以下、LS) : 上空から、近赤外レーザを使用して、地形、地物 (構造物、樹木など) の位置および高さ情報を取得するシステム。データ取得のイメージ図およびデータ取得諸元の例を図-6.1 および表-6.1 に示す。

表-6.1 データ取得諸元の例

条件	設定値
データ取得高度(m)	2500
飛行速度(kt)	110
スキャン角度(°)	15
スキャン幅(m)	650

- ・DMC : 地上分解能十数 cm (撮影高度によって変化) の航空機デジタルカメラで、近赤外域データの取得も可能である。DMC の概要を図-6.2 に示す。

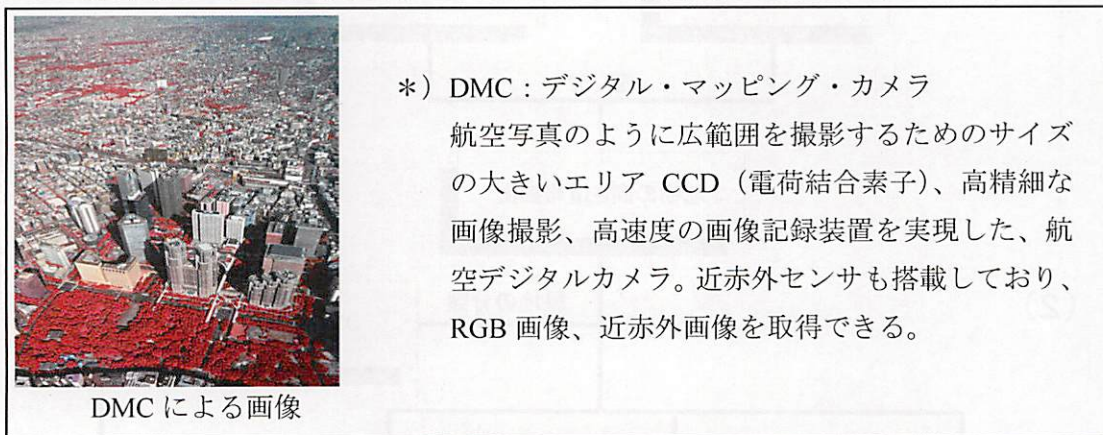


図-6.2 DMC の概要

6.3.2 処理手順

処理手順を以下に、また、検討フローを図-6.3 に示す。

- (1) LS データによる地物の高さ情報抽出

図-6.4 に、DSM と DEM の概念⁴⁾を示す。

- ①LS データ (ランダム点群) を基に、2m メッシュサイズの DSM を作成する。
- ②LS データ (ランダム点群) を基に、2m メッシュサイズの DEM を作成する。
- ③DSM と DEM の差分を算出し、地物 (構造物、樹木) の高さ情報を抽出する。

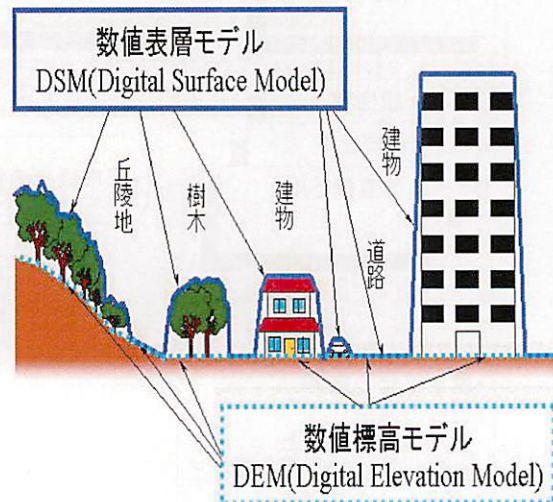


図-6.4 DSM と DEM の概念⁴⁾

(2) 緑地・水域部分の抽出

LS データから抽出した地物の高さ情報は、構造物と樹木の高さ情報が混在しているので、DMC 等の近赤外データを利用して緑地とそれ以外（構造物、アスファルト、草地、裸地、水域など）に分類する。

(3) 構造物の高さ別分類

LS データから抽出した地物の高さ情報と DMC 等の近赤外データを利用して抽出した構造物のデータを基に、構造物の高さを、低層構造物（一般住宅など：10m 未満）、中層構造物（3～5F 程度の構造物：10～20m）、高層構造物（20m 以上の構造物）に分類する。

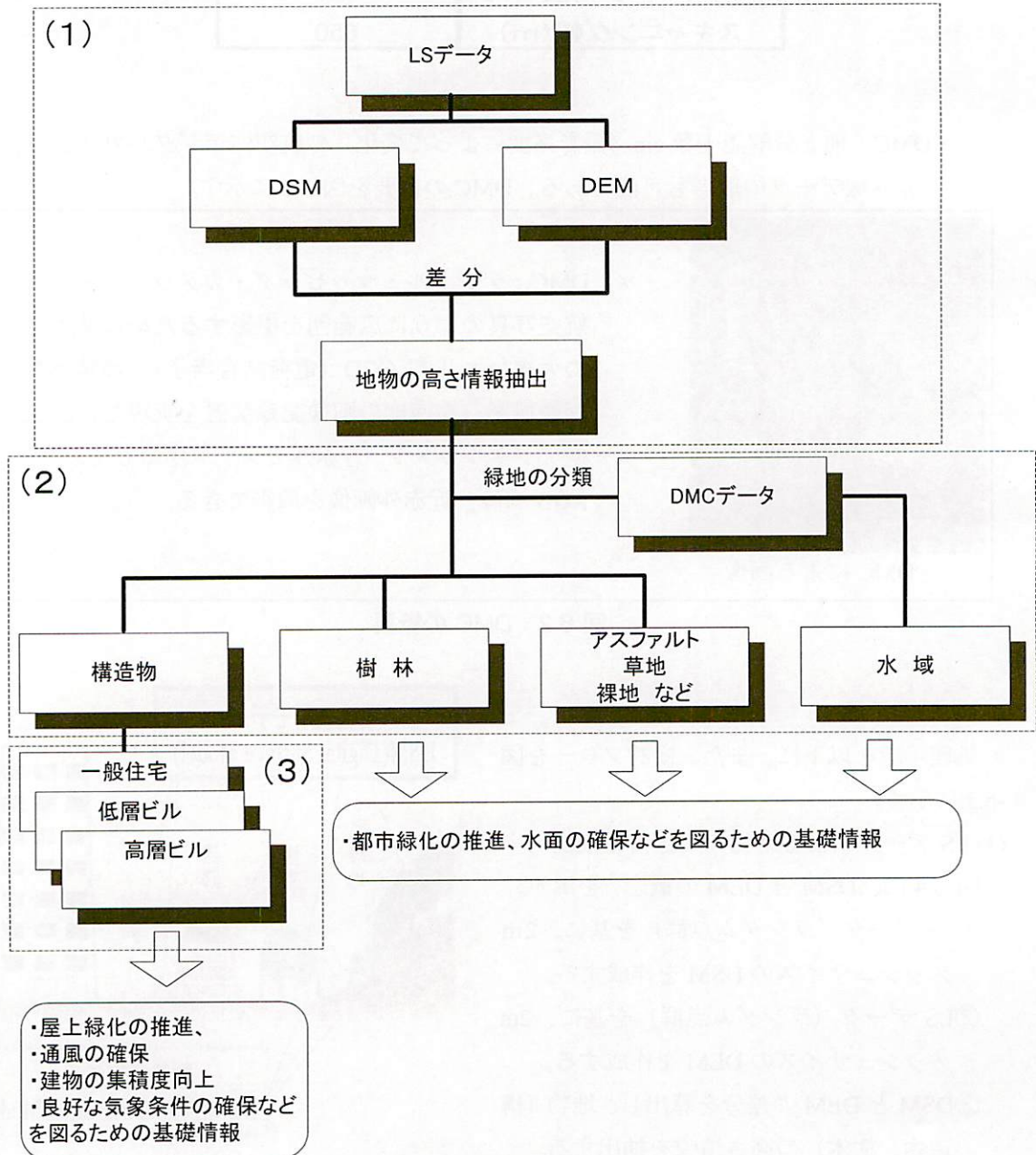


図-6.3 検討フロー

6.4 留意点

6.4.1 LS データによる地物の高さ情報抽出について

- ・LS の計測精度は、水平方向±30cm、高さ方向±15cm である。
- ・近赤外レーザによる計測のため、夜間でも計測は可能である。
- ・計測データはすべて、デジタルデータであるため、取得後の処理は容易である。
- ・都市全体のデータを取得する場合、新規データ取得は高コストとなる。
- ・政令指定都市は、航測各社が既にデータ整備を進めているので、ライブラリ画像⁵⁾を活用すれば、コストは低く抑えることができる。ただし、データ密度が、約 2m 四方に 1 点の割合なので、解析スケールとの兼ね合いから検討を要する。
- ・DEM の作成は、フィルタリング処理 (LS データのランダム点群から地表面に達していると考えられる点だけを残す処理) によって残ったデータをもとに行う。このフィルタリング処理が十分に行われないと、完全に地物を除去することができない可能性がある。
- ・LS データの取得密度が低い場合、樹冠の小さい樹木 (街路樹などの単木) を抽出できない可能性がある。データ密度は、2m 四方に 1 点以上が必要と考えられる。

6.4.2 DMC による緑地部分、水域の抽出について

- ・計測データはすべて、デジタルデータであるため、取得後の処理は容易である。
- ・地上分解能はデータ取得高度によって変化するが、概ね撮影高度 1,000m で約 10cm である。
- ・水域を抽出する場合、水質汚濁の進んだ水域は (植物プランクトンが大量に発生しているような水域)、草地として誤判別する場合が考えられるので、目視による確認が必要である。
- ・低層構造物の屋上緑化は、樹木として誤判別される可能性があるので注意を要する。

6.4.3 構造物の高さ別分類およびその他について

- ・構造物の屋上部分には、冷暖房用の室外機などが設置されているケースが多いが、これら小さな構造物の抽出に関して、LS データの取得密度が 2m 四方に 1 点の割合では検出できない可能性がある。
- ・構造物を高さ別に分類する場合、対象とする都市の規模や形態によって、事前に高層構造物の数などを考慮して階層区分を行う必要がある。
- ・デジタルデータによる処理であるため、面積集計や階層別の割合の算出が容易である。また、平面的な分布を視覚的に捉えることができる。

6.5 実用イメージ

図-6.3 のフローを参考に、構造物の分類（低層構造物、中層構造物および高層構造物）を試行した。以下に、その手順と抽出結果（画像）を示す。

6.5.1 LS データによる地物の高さ情報抽出

LS データより DSM と DEM を作成し、その差分により地物（構造物、樹木）の高さ情報を抽出した（図-6.5～6.7）。

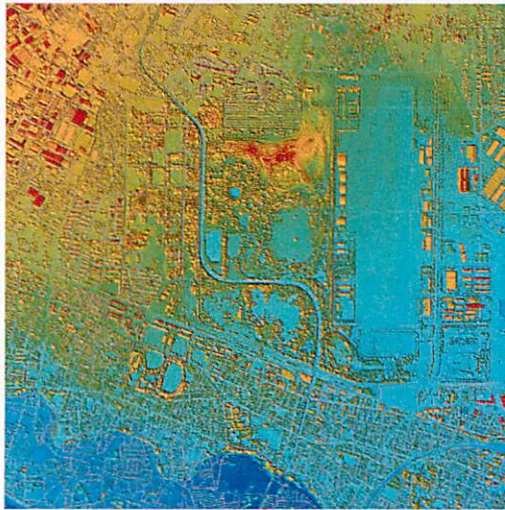


図-6.5 LS データ(ランダム点群)を基に2mメッシュサイズのDSMを作成

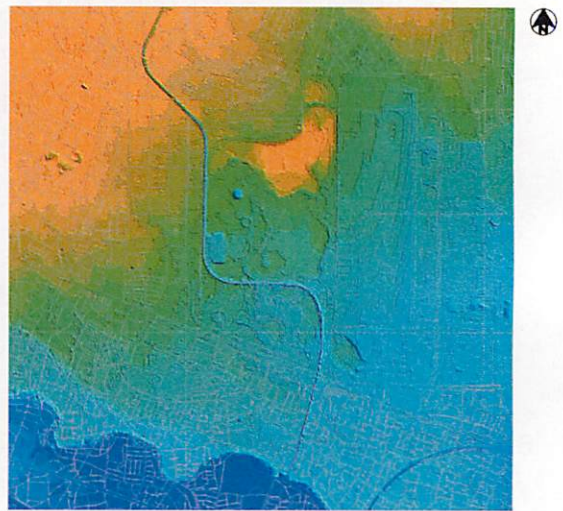


図-6.6 LS データ(ランダム点群)を基に2mメッシュサイズのDEMを作成

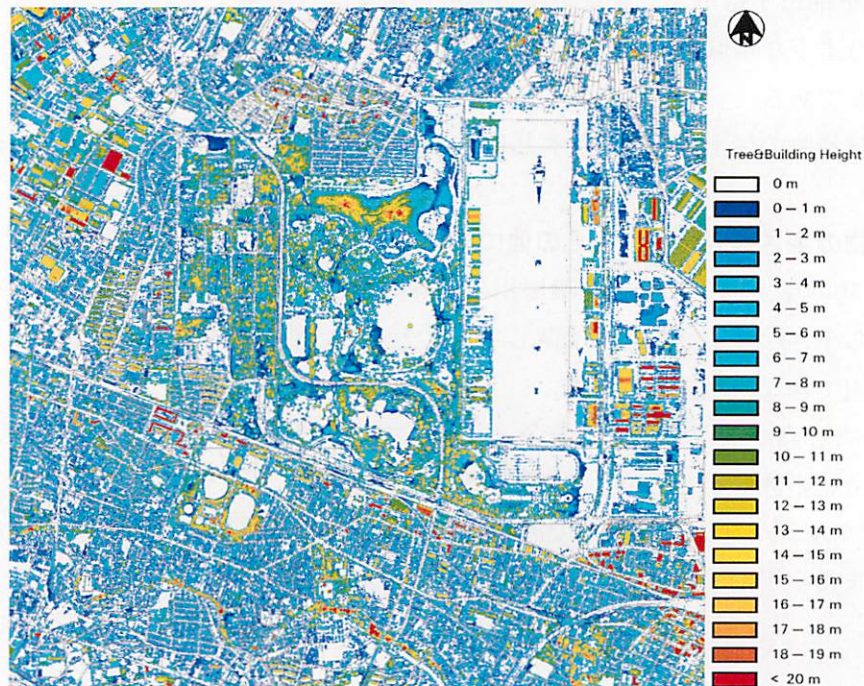


図-6.7 DSM と DEM の差分を算出し地物（構造物、樹木）の高さ情報を抽出

6.5.2 緑地の抽出

LS データから抽出した地物の高さ情報は、構造物と樹木の高さ情報が混在しているので、近赤外画像データによって緑地と構造物に分類した（図-6.8～6.9）。

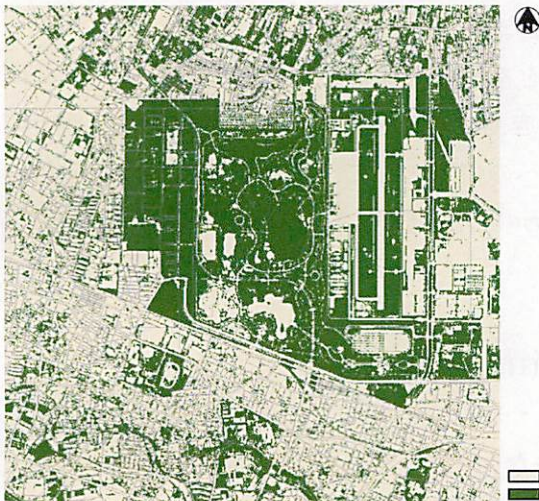


図-6.8 近赤外画像から抽出した緑地分布

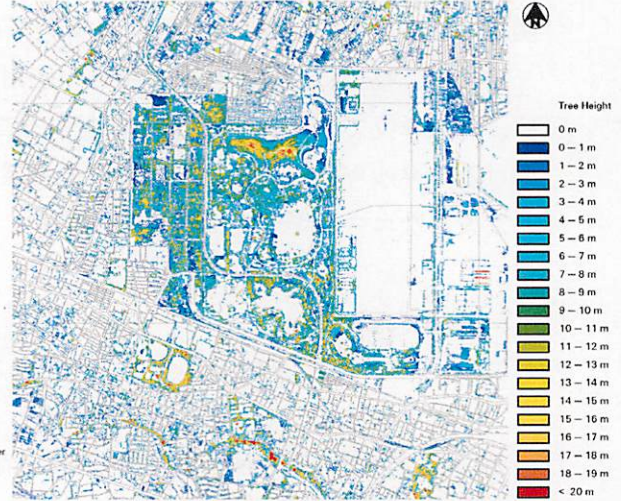


図-6.9 地物情報(図-6.7)と近赤外画像(図-6.8)から抽出した緑地分布図

6.5.3 構造物の分類

抽出した構造物を、低層構造物（一般住宅など：10m 未満）、中層構造物（3～5F 程度の構造物：10～20m）、高層構造物（20m 以上の構造物）に分類した（図-6.10）。

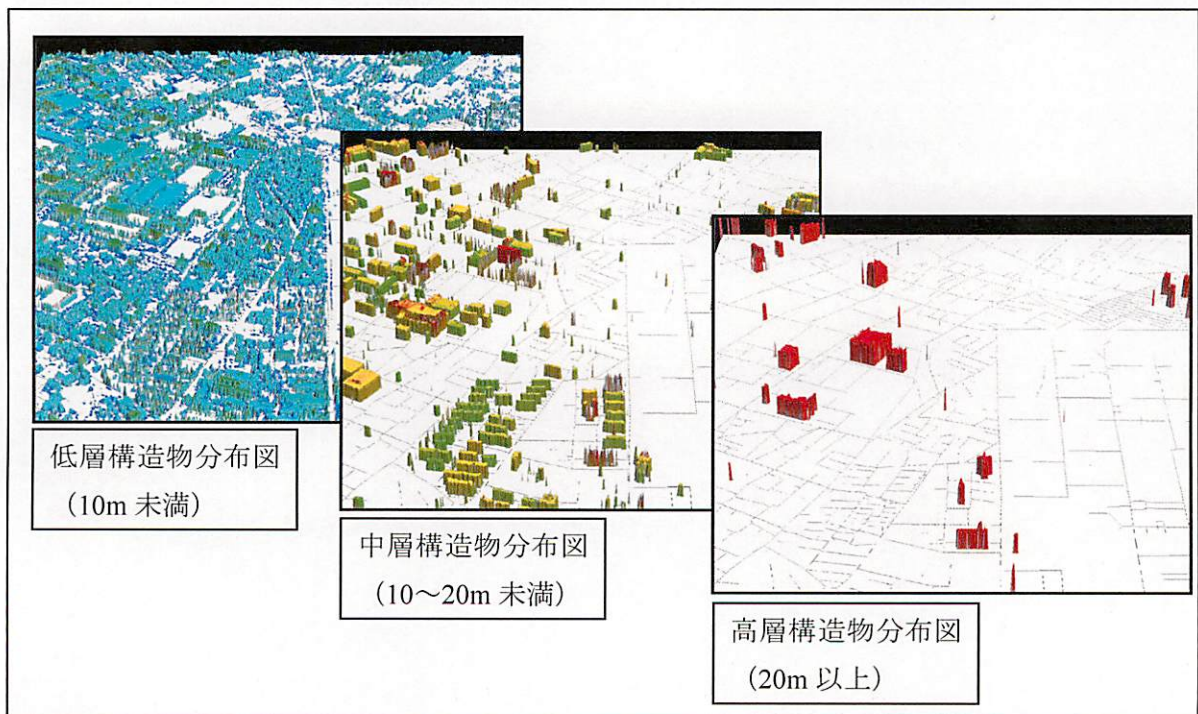


図-6.10 地物情報（図-6.7）と近赤外画像（図-6.8）を基に抽出した低層・中層・高層構造物分布図

6.6 今後の展望

現在、都市から排出される CO₂ 量と都市構造の関係は、公表されている統計資料をもとに検討が進められているが、すべてのデータが公開されてはいない。また、継続的に推計を行う場合には、常に統計資料を収集する必要がある。さらに、構造物の用途別床面積に関しては、一元的に把握できる統計資料が存在しないという現状がある。

そこで、都市におけるエネルギーの使用状況と都市の立体構造との関係が明らかになれば、行政単位での CO₂ 排出量を把握することが容易になると考えられる。今後は、都市におけるエネルギー効率の高い構造物の配置計画への情報として、また都市の立体構造からおおまかなエネルギーの使用状況を推測するための手法開発などへの発展が期待できる。

6.7 参考文献

- 1) Tokyo Half Project HP(2004年2月アクセス): THP の概要
<http://www.thp.t.u-tokyo.ac.jp/index.php>
- 2) 国土交通省国土交通政策研究所:環境負荷の少ない都市・国土構造に関する研究～都市・国土構造と CO₂ 排出量の関係について～、国土交通政策研究、第12号、210p
- 3) 日本写真測量学会編(2002): 空間情報技術の実際、pp.3-10
- 4) 日本写真測量学会編(2002): 空間情報技術の実際、pp.23-29
- 5) RAMS-e HP(2002年2月アクセス): LS ライブラリデータ整備エリア
<http://www.ramse3d.com/index1.html>

7. 夢のある将来技術

7.1 はじめに

近い将来われわれの身の回りには無数のセンサが散らばっている。人やモノそして環境などに対しあらゆるデータが収集でき、さまざまな利用方法が考えられる。快適で便利、安全・安心なサステナブル社会へとつなげる技術が想像される。いままで分からなかったことを知る（センシングする）、または多くの情報を集める（モニタリングする）ことが、将来において重要な役割を果たしているだろう。ここでは、RC-39 サステナブル構造システム研究委員会のモニタリング WG の活動として、近い将来において芽が出てきそうな技術を探索するとともに、WG メンバ自身が考える「夢のある将来技術」をまとめ紹介する。紹介する技術については、あらゆる分野を網羅することはメンバの関係から難しく一部の内容に偏ったものであるが、将来のモニタリング技術の一端として報告する。

7.2 モニタリング技術の将来像

将来においてあらゆる機器が自立的に情報を収集・管理し、協調的にネットワークを形成することで安全で快適な社会・生活空間が実現することを目指している。モニタリング技術は、周囲の環境や現象を適切に検出し、意味のある情報に変換することで、さまざまな応用分野への展開が考えられる。モニタリングにおいて重要となるセンサとネットワークの関係は、これまでは例えば生産現場など限られたエリアで限られた用途に使われていたのが一般的で、我々の社会や生活の中にはそれほど馴染みは少なかったといえよう。しかし、ユビキタス・ネットワーク社会へと向かう今日においてはセンサがネットワークにつながることで新たな価値を生み出し、今後ますます色々な分野での要求が高まりつつある。

将来の社会においてこうしたセンサがネットワーク化されたモニタリング技術の未来像を見てみることにする。ここでは、近未来を想像するストーリーとして紹介するものである。

社会インフラを管理する A 君

2015 年の 3 月のある日、首都高速道の管理を任されている A 君は、パソコンから構造物の異状を調べるシステムを見ていた。画面には GIS（地理情報システム）ソフト上において首都幹線の高架橋やトンネルなど土木構造物の状態が表示されている。おや A 区間の高架橋の状態表示が黄色を示していることに気がついた。さっそくどのような状態であるか画面をクリックしてから詳細な情報を確認することにした。どうやらコンクリートのひび割れが発生しているらしい。過去の状態とメンテナンスの記録データベースから、そのような状況が発生するか分析してみることにした。だがその発生の確率は非常に低いことがわかった。どうしたものかと考えながら交通管理システムに対してアクセスをしてみたところ、A 地点では現在事故が発生し大型のタンクローリーが横たわる状況が、遠隔監視モニタから確認でき、センサの損傷による影響であることがわかった。

鉄道軌道のメンテナンスを管理する B 子さん

入社 5 年目の B 子さん、鉄道の軌道の管理とメンテナンスを任されている。上司の F 氏から昨日の飲み会で、以前のレールの管理は予防保全が主体であったことを聞かされた。計画的に点検

検査し試験と再調整を行い使用中の故障を予防していた。しかし現在はセンサ技術が発達して、非接触センサを搭載した一般の営業列車が逐次線路の状態を報告してくる。そのため最適なメンテナンスを行うことが可能となり、弱点を集中的にかつ短期に補修していく管理が可能となっている。もうわれわれのような世代の人は、必要としないまでに技術が進歩した。そんな言葉を思い出しながら画面に向かっていたところ、港区のA線B区間において、乗り心地レベルが3ヶ月後において管理値を超えることを事前に知らせてきた。早速、B子さんは、補修管理システムに向かい軌道の整備のスケジュールを立てていた。

大都市に住むCさんが経験したある出来事

銀座のデパートで買い物をした帰りに、地下鉄を利用しようと地下街通路を歩いていた。その時、足元がぐらつき倒れこんでしまった。大きな地震が発生した。あたりは暗闇であり、周りの人の騒々しい声が一瞬鳴り響いた。Cさんの携帯電話には非常モードを知らせる通知があり、自分のいる場所は安全であることを表示していた。自分の位置と周囲の状況をセンサが把握し情報を提供する防災システムが稼動したのだ。初めての経験であった。足元には避難誘導の方向を示す光が発光している。どうやら位置情報を正確に知らせるためにRFIDの技術が応用されているらしい。その頃地下街を管理する防災センターでは、どれほどの人数がいるかをすでに把握し避難の状態を知っていた。その中には目の悪い障害者が2名いることを知っていた。

モノや動物たち

証券会社に勤めるD氏。彼の趣味は自動車である。最近の自動車はほとんど故障がなくなった。自動車の至る所に米粒ほどの小型「スマート・ダスト」センサが搭載するようになっており、故障する前に最適な部品交換を教えてくれるようになってきている。そのため、いちいち定期点検に出さなくても済むようになった。どうやら、こうした技術は動物たちの生態系の調査にも応用されているようだ。色々なセンサがマイクロ化され、データの蓄積とワイヤレス技術により、いままで不可能であったモノまで利用できる環境ができていく。

研究者E氏の願い

ナノテクノロジーを最先端に研究するE氏。今日、ついにナノテクを駆使した繊維が出来上がり、機能材料としてあらゆる構造体への適用が可能なものが開発できた。彼の父は、今から30年前に飛行機の事故で亡くなっている。その時、機体の異状が分かっていたら…。従来、構造体などの状態を知るためにはセンサを埋め込まなければならなかったが、この開発により構造体自身がセンサ機能を有したものになった。人間で言えば、神経が生まれたままに備わった生命体のようなものだ。人間のように傷を負っても治癒するように、材料自身が修復する機能をもたせることが次の開発課題として発想され、夢は膨らんだ。

以上までに示した未来像の紹介されている内容の一部は

- ・「鉄道とメンテナンス」 山之内秀一郎 編 2000年6月 交通新聞社
- ・「特集●土木技術の10年後 維持管理」

2004年1月9日号 日経コンストラクション BP社

からヒントを得て書き下し追加している。内容については、未来技術を語る上でそれは実現不可能とか、あり得ないと思われているかもしれない。しかし夢を語ることの楽しさが 10 年後・20 年後の技術の実現につながっていくであろう。

ここまで示した将来像の内容は、モニタリング技術における将来の重要なキーワードを入れて書いている。

- ・非接触
- ・マイクロセンサ技術 (MEMS センサ)
- ・無線通信 (RF)
- ・ネットワーク
- ・データベース
- ・自己診断

「夢のある将来技術」として、これらをキーワードとしたものが発展していくものとして考えられる。

7.3 将来技術の探索

本項では、モニタリングに関連した将来技術として、近年進められている開発プロジェクトなどを紹介する。これまでに紹介した未来像のキーワードを主に、センサやネットワークに関する技術開発は、実際に進められているものが数多くある。

センサが小型化していったらどのような世界ができるだろうか。米 University of California Berkeley 校では、安く小さく無線付きユビキタス・センサを目指し、あたかもチリのような微細な素子に、高度な機能を埋め込むという意味から「Smart Dust」と呼ばれるプロジェクトがある。「Mote」と呼ぶ数ミリ角の光度や温度などをモニタするワイヤレスインターフェース付センサを広域に散布し、ネットワークさせる技術の研究開発を実施している。この「Mote」と名づけたセンサモジュールは、各種センサ機能を内蔵し、光信号による無線通信機能と太陽電池による発電機能を併せ持っており、複数の Mote 間での情報のやり取りができる (図-7.1¹⁾・図-7.2²⁾)。研究開発課題としては、MEMS 技術、アドホック通信などがある。Mote は最終的に 1mm 程度まで小型化し、建物や物品などの壁面に塗布するなどして建物の消費エネルギー管理、製品の品質管理、流通管理などに利用することを考えている。このプロジェクトに関連して現状でも利用可能な無線通信機能を備えた研究開発用の製品が既に出ており、米インテルが本プロジェクト関連で米クロスボーに出資して開発された「Mote」のキッドがある。隣接する複数の小型無線センサ端末がそれぞれ自動中継機能も持ち、電波環境を常時自動的に察知して自発的にアドホック・マルチホップ・ネットワークを構成することが可能である。このキッドは、電池で駆動し、単三電池を利用した MICA、ボタン電池を利用した DOT があり、これを利用し研究機関や企業においてアプリケーションの展開への取り組みが盛んに行われている (図-7-3)³⁾。米インテルは独自に無線センサ・ネットワークによる新しいコンピューティングへの取り組みを公表し、機能別のモジュールが開発されつつある (図-7.4)⁴⁾。

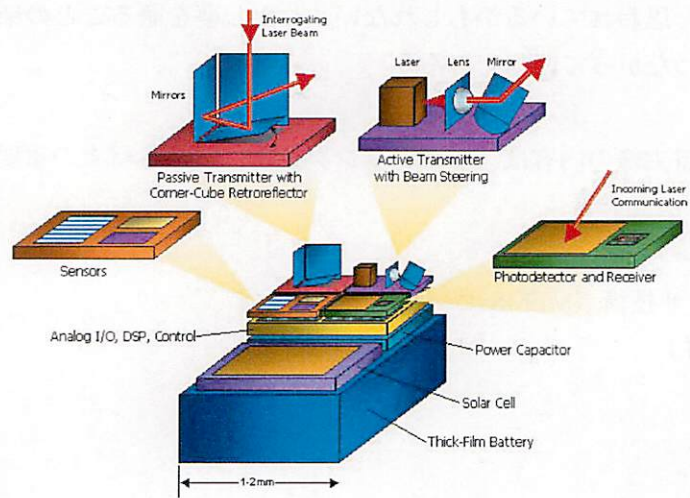


図-7.1 Mote の構成 (UCB) ¹⁾

MEMS 技術を応用した超小型センサ・ネットワークモジュール。光通信、ソーラバッテリー、アナログ IO、DSPなどを備える。

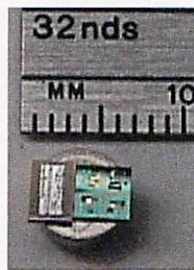


図-7.2 プロトタイプとして製作された Smart Dust の「Daft Dust」²⁾

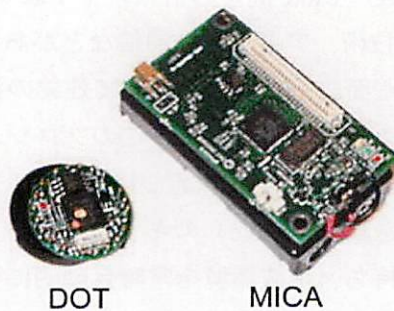


図-7.3 Mote のキット ³⁾

左：MICA 無線基板（無線 315MHz） 右：DOT 無線基板（無線 315MHz）

DOT 型はおよそ 500 円玉大 MICA 型は名刺箱サイズ

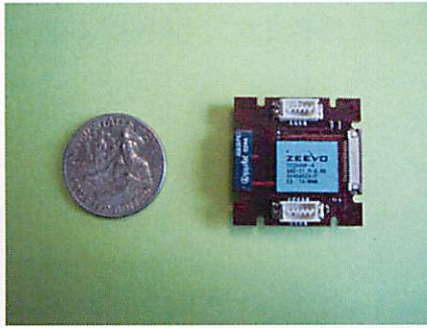


図-7.4 米インテルでの開発中の無線通信ネットワークモジュール⁴⁾

米インテルは基盤にセンサモジュールを追加することで、様々なセンシングに対応する予定である。またネットワーク通信のセキュリティ機能を強化したものになりそうである。

センサ・ネットワーク技術の展開として土木・建築構造物への適用が考えられている。多くのセンサを用いて構造物の健全性 (SHM : Structural Health Monitoring) を診断するために利用する。従来の有線システムでは、数多くのセンサを建物内に設置するのが難しいため、無線システムによる実現が必要と考えられていたからだ。こうしたセンサとネットワークを利用したものをスマート・センシングと呼んでいる (図-7.5)⁵⁾。先に紹介した米インテルでの開発中の無線通信ネットワークモジュールなどが利用されていくものと思われる。

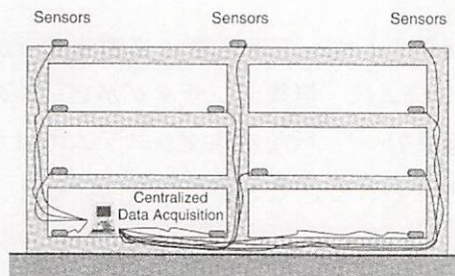


Figure 1. Traditional SHM system using centralized data acquisition.

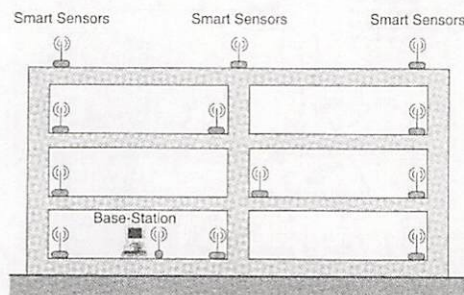


Figure 2. SHM system with smart sensors.

図-7.5 構造物に適用したスマートセンサ技術⁵⁾

ユビキタス社会を想定し、あらゆるものがネットワークに接続する将来を想定し、製品一つ一つに取り付けた無線タグ (RFID : radio frequency identification ; 無線を用いた自動識別) から自動

的に読み取った情報をネットワークと連携させ、工場の工程から流通、消費者サービス、リサイクルに至る製品のライフサイクル全体をカバーできるようにすることが考えられている。無線タグの小型化も進んできている（図-7.6）⁶⁾。この技術は現在、様々な分野での応用が既にはじまっており、生産地から店舗まで、IC タグを使った野菜のトレーサビリティ実験が開始されている。将来こうした無線タグにセンサ機能を組み込んだ、非接触での無電源のモジュールが考えられている。

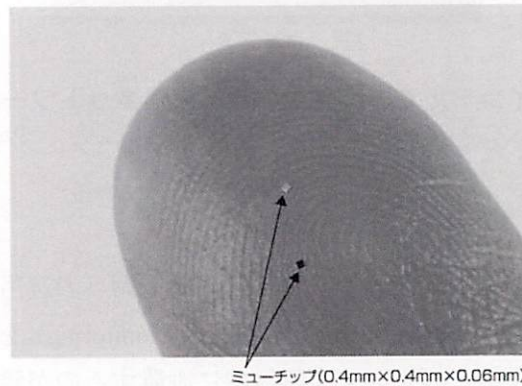


図-7.6 無線タグのミューチップ（ μ -chip）⁶⁾

日立製作所が開発した砂粒サイズの RFID チップ。0.4mm 角と非常に小さい。回路、アンテナ、実装、セキュリティ技術を組み合わせている。

将来の無線センサタグの応用例として、三菱電機の米国研究所が開発アイデアを出している「iGlassware」がある。このシステムは、無線センサタグがビールの残量を把握して、店の販売システムに自動的に告知する（図-7.7）⁷⁾。単なる注文システムではなく、消費動向をとらえる情報収集システムとしての利用も考えられる。センサが自由になると、新しい応用分野が生まれてくるようになる。

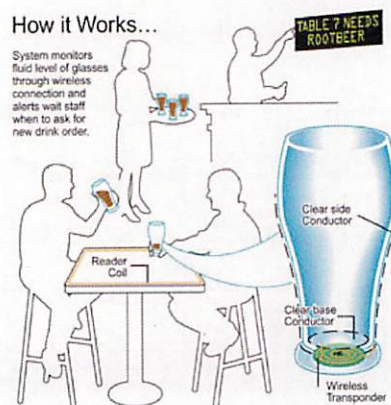


図-7.7 iGlassware の概念図⁷⁾

技術は、①ビールの残量を感知するセンサと無線タグを底面に組み込んだビールグラス、②無線タグのデータを読み出すアンテナを内蔵したテーブル、③グラスの情報を元に注文するシステムなどからなる。

センサと無線を利用したシステムでは、ケーブルを敷設せずに測定できなかった場所、モノの

状態を測れる状況が生まれてくる。その場合、なんらかの電源をどのように供給するかが、今後の課題として考えられる。たくさんのセンサが空間にばらまかれる状況においては、なおさらのことであろう。このような状況において対応する非接点の給電技術については、実際に水まわりで使うシェーバーや電動ハブラシ、家庭用電話機の子機や PHS などの充電器ですでに一般的な技術としてある。しかし、機器などに限定したもので、今将来考えられるセンサ・ネットワークの適用には、電源供給の効率の高めることが必要である。この非接触給電技術について、セイコーエプソンでは、電源供給効率を従来のものより高めたものを出してきている（図-7.8）⁸⁾。この非接触給電の原理としては一次コイル（充電器）と二次コイル（本体）とを磁氣的に結合し、一次コイルから発生する交流磁場で二次コイルに電圧を発生させる。「電磁誘導方式」によって、非接触で二次コイル側に電力が伝送される。この技術は先に紹介した「iGlassware」のシステムにおいてテーブルに仕込んでおくような技術として考えられよう。

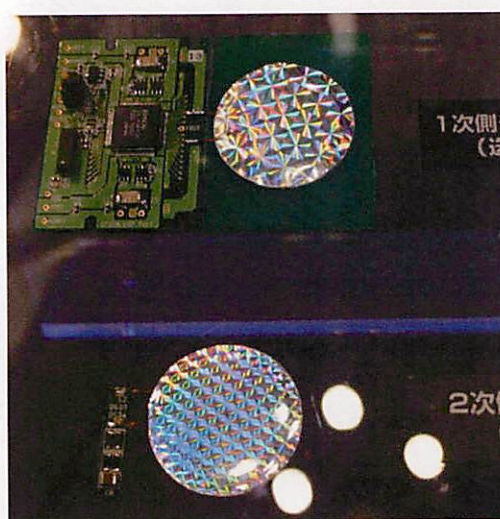


図-7.8 セイコーエプソンの無接点電力伝送モジュール⁸⁾

上が一次コイル（充電器側）のモジュールで、下が二次コイル（本体側）のモジュール

現在、ナノテクノロジーを利用した技術として社会インフラへの適用を目指した研究がスタートしている。国土交通省近畿整備局と立命館大学が中心になり、ナノテクノロジーを応用した各種センサの開発し、法（のり）面崩壊やトンネル覆工コンクリートなどの落下などの検知に活用することで、道路の様々な維持管理を効率よく進めることを目指している。この技術には、MEMS技術を利用したナノセンサチップを利用し、無線でのデータ収集、インターネットの活用したシステムである。無線センサタグが構造体の中に無数埋め込まれ、将来の道路維持管理のモニタリング像として考えられている（図-7.9）⁹⁾。

ナノテクノロジー導入のイメージ

(無線) ナノセンサ+インターネット
=ハイパーリンク、ユビキタス環境

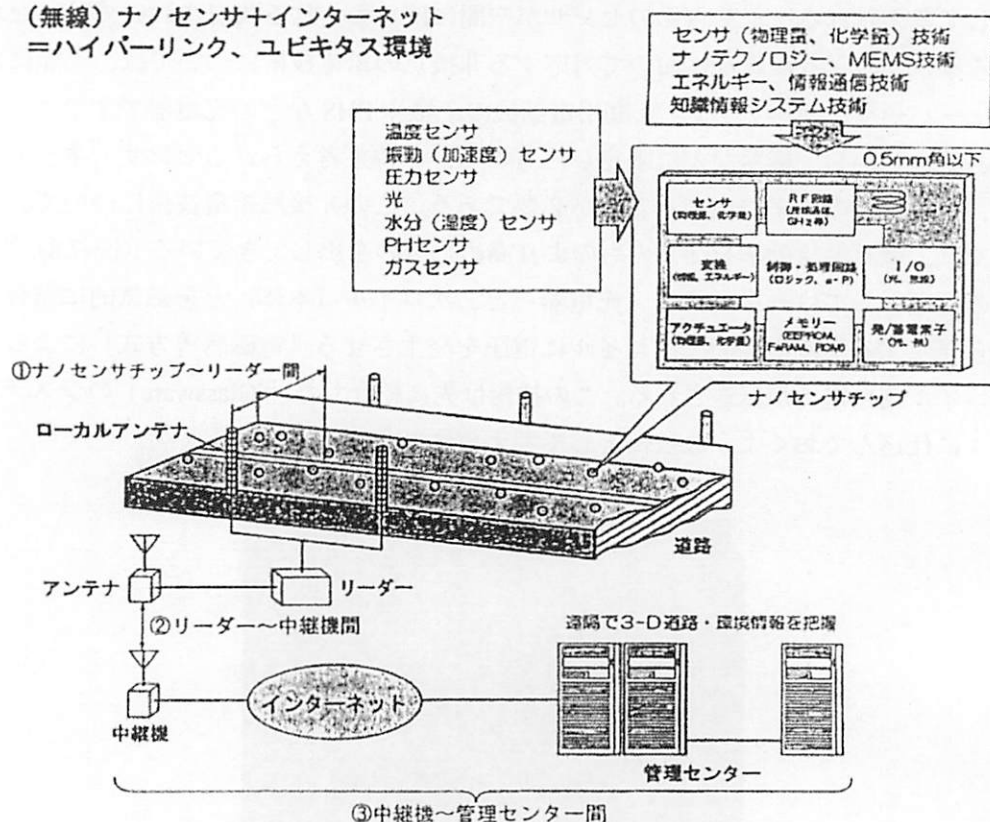


図-7.9 新たな発想での道路の維持管理システム⁹⁾

夢のある将来技術としてセンサ・ネットワークに関しての技術を紹介してきたが、この考えは特別な技術分野に適用されるだけではなく、一般の身の回りで利用されていく技術であるとも考えられる。この考えは「ユビキタス・ネットワーク」で考えられるような、通信機能を持った端末と高速通信ネットワークとが結びついて「いつでも、どこでも」必要な情報が取り出せ、また端末自身が収集した情報についてネットワークを介して発信できるような、コンピュータ・ネットワークにセンサが入り込んだものであると考えられる(図-7.10)¹⁰⁾。身の回りに、多くの通信機能を持った小型センサ(センサタグ)が配置され、しかも、それらのセンサ群が連携すると、今までできなかったようなサービスが実現できる。それぞれのセンサが発信するのは、位置、温度などの簡単な情報のみであるが、多くのセンサが発信したさまざまな情報を収集し、環境情報や位置情報などを高度に組み合わせた新しいサービスの実現が期待されると、NTT 環境エネルギー研究所のホームページでは紹介している。現在、考えられている小型センサや無線タグのユビキタス・コンピューティングの実施例として、ワイヤレス給電技術を応用し人にセンサを装着することで、位置、脈拍、体温、血圧などの情報をリアルタイムで収集、こうした情報をもとに離れた場所での健康状態をモニタすることや家族の安否確認ができるようになる(図-7.11)¹¹⁾。

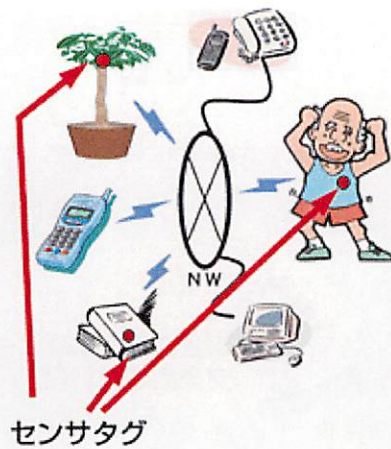


図-7.10 ユビキタス社会の概念図¹⁰⁾

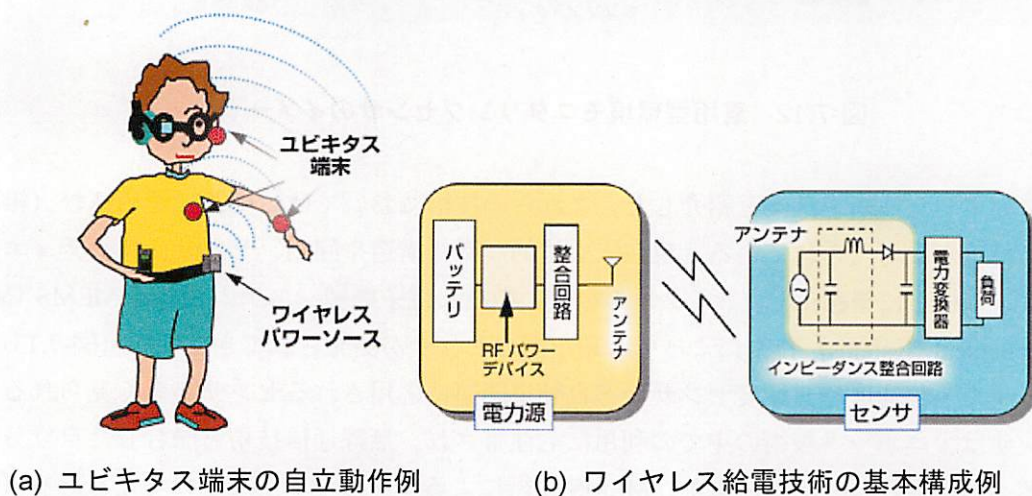


図-7.11 ユビキタス・コンピューティングの実施例¹¹⁾

独立行政法人産業技術研究所では、着用型環境モニタリングセンサについて将来技術として紹介している。例としてセンサが小型化すれば、腕時計のように常に身に付けて、行く先々で有毒ガスをモニタリング出来るようになるとしており、このような「ウェアラブル・センサ」が普及すると考えている（図-7.12）¹²⁾。たとえば看護師が腕時計型のセンサを身に付けていれば、病室ごとに VOC を測定して、きめ細かな対応、管理をすることができる。あるいは、ガソリンスタンド、タンクの清掃などの仕事をする人たちが一人ずつセンサを持っていれば、危険が迫ったときに素早く対応でき、生命の安全を守ることができる。大気の汚れなどを調査する環境モニタリングも、たとえば全国にいる人が携帯電話に組み込んだセンサでいっせいに調査し、そのデータを自動的に一カ所に送って集計できれば、国全体のきめ細かな汚染状況を一瞬のうちに把握することが可能である。将来、社会全体がセンサ・ネットワーク化すれば、将来の暮らしはさらに安全で快適になることを描いている。



図-7.12 着用型環境モニタリングセンサのイメージ¹²⁾

センサを利用した技術を色々で紹介した。これらの技術においては、機器に埋め込む（組み込む）ことが最重点に考えられている。現在、立体的な微細構造や回路、センサ、アクチュエータ等をシリコン基板上に集積化した、ミクロの単位の微小な電子機械システムである MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術によって、超小型のセンサが開発されてきている（図-7.13）¹³⁾。主に温度・圧力・加速度や角速度センサなど自動車関連に応用されるセンサが多く見られる。こうしたセンサは、ロボット技術の中での利用にも注目され、無線通信技術と融合した自立分散型の制御などへ適用されつつある。また、MEMS 技術によるバイオセンサなどの考えもあり（バイオ MEMS）、遺伝子検査デバイスなどへの適用が急速に進みつつある。

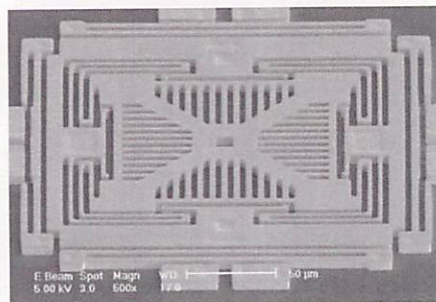


図-7.13 MEMS 技術による 3 軸加速度センサの例¹³⁾

IC Mechanics が開発した 3 軸加速度センサ

以上までに調べた技術について、センサや RFID タグそしてネットワークの融合などによって、将来的に便利な社会となっていることに間違いはないと思われる。しかし、物に潜ませて見えないようにして、公共の場や私的な場所にセンサや送信装置をいくつも仕込むという方法が考

えられていることから、情報が独り歩きし個人のプライバシーの侵害の問題などに発展する恐れがある。最近になって技術者たちも、こういったテクノロジーが悪意を持った人に使われれば、濫用されることもあり得ると認めるようになってきており、技術先行の裏返しとして情報漏洩やプライバシーの侵害に対して十分考慮した技術展開を考えておく必要がある。

本研究委員会のモニタリング WG においては、将来的にセンサとネットワークは重要な技術として位置づけられると考えており、他 WG（老朽化構造物、防災、都市環境、地球環境）と深く関係し接続的な社会への様々な場面での応用展開がされていくことと思われる。

7.4 夢のある将来技術「メンバ編」

夢のある技術として前項では、芽のある技術を取り上げて紹介してきた。ここでは、モニタリング WG のメンバが考えたものについて紹介する。内容については、専門外の分野について夢として考えてきたものもあり、近未来においても実現不可能なものを含んでいるものと思われる。しかしながら、夢を持ったことで将来すべての技術が実現されていることを願うとともに、集められた「夢のある将来技術」として 11 編を紹介する。

紹介する技術のタイトルは以下のようになっている。

- 1) 現象の 3 次元分布把握（構造物の非破壊内部診断）
- 2) 履歴の把握（構造物の微小素材から履歴を検出）
- 3) プライマー入りコンクリートによる劣化診断技術（自己診断機能内蔵コンクリート）
- 4) ユビキタス・センサ・ネットワーク（無線通信によるセンシングシステムの応用）
- 5) 音のモニタリング（人間の視覚機能センサと通信技術の融合）
- 6) 上空からの音波マッピング（空間的な音環境から環境情報の把握と異状検知）
- 7) 「面的」な風のモニタリング（上空からの風環境調査）
- 8) 食糧供給に関するバランス管理モニタリング（人と自然環境の関係把握モニタリング）
- 9) リサイクルと有害物質モニタリング（地下地盤の有害物質非破壊探知）
- 10) ユビキタス対応の新型変位計（構造物のヘルスマニタリングセンサ）
- 11) 地下測量システム（地下空間における精度の高い位置情報検出）

以上の 11 編である。() 内は、タイトルを補足する内容として示した。各技術の詳細は、本項の末尾にまとめて紹介する。

メンバが考え対象としているモニタリング技術を分類すると ①非破壊でのモニタリング、②面的な状態を把握するモニタリング、③環境情報のモニタリング を考えた将来技術となっている。これらのモニタリング技術が活用される場面として、サステナブルな都市空間における様々な環境・建設構造物の情報などを含んで、人々の生活での「安全・安心」を中心とした大きなモニタリングのテーマとして考えられている。

————— 【 No.1 夢のある将来技術 】 —————

1. 技術名称

現象の3次元分布把握

2. 担当者

山本郁夫 （所属： （株）東横エルメス）

3. 技術概要

構造物の表面から内部の状況を3次元の分布として把握する手法。測定項目として考えられるのは、応力、温度、水分、強度、pH、etc。

指向性を持った波長の異なる超音波の利用。

4. 技術キーワード

3次元、非破壊

5. 実現可能時期

不明

6. サステナブル構造への適用範囲

非破壊で内部状況の把握が出来、必要箇所のみでの補修補強を行うことが可能か。

————— 【 No.2 夢のある将来技術 】 —————

1. 技術名称

履歴の把握

2. 担当者

山本郁夫 （所属： （株）東横エルメス）

3. 技術概要

構築物を構成している素材の微少をサンプリングすることにより（出来れば非破壊が良いのだが）、その素材の履歴を知ることが可能とする技術。測定項目として考えられるのは、応力、温度、水分、強度、pH、etc。

素材とは別の素子等を埋め込むのではなく、素材を構成する成分自信に履歴を記憶する機能を持たせる。故に調査が必要になった時点で必要な部位を選定可能。

自分としてはナノテク利用より、化学技術の応用の方が好み。

4. 技術キーワード

履歴、非破壊、素材

5. 実現可能時期

不明

6. サステナブル構造への適用範囲

履歴を知ることにより、将来の推測をより正確に行えるのではないか。

————— 【 No. 3 夢のある将来技術 】 —————

1. 技術名称

プライマー入りコンクリートによる劣化診断技術

2. 担当者

遠藤 貴宏 （所属：東京大学生産技術研究所 安岡研究室）

3. 技術概要

本技術は、コンクリートの劣化診断を容易にするコンクリートを開発し、劣化診断を非接触にて診断する技術である。製造されたコンクリートは、少なからず時間とともに劣化する。そこで、劣化診断を容易にするコンクリートとして、プライマー入りコンクリートを提案する。原理は、遺伝子分析における蛍光アッセイ法と同じである。本技術は、表層または構造内部で起こる化学反応生成物質を直にそれ自身を計測するのではなく、化学反応によって変化したプライマー(ラベル物質)から放射される電磁波の強度によって劣化した生成物質量を推定し、劣化診断を行う手法である。そのため、破壊検査を伴わずに電磁波計測センサによって劣化診断を行えるため、作業時間の効率化が期待される。Fig.1 に計測対象の性質による計測方法の違いと作業時間との関係を示す。

コンクリートの製造過程において、劣化に伴って生成する副産物や pH 変化に特異的に反応するラベル物質を混ぜておき、劣化が進行した場合、副産物がラベル物質と結合する、もしくは、ラベル物質の構造を変化させる。その副産物+ラベル物質は、化学構造的に長波長域の電磁波により励起し、特異的な波長域に特異的なエネルギーを放射する。そこで、この放射エネルギーを計測し、その強度から劣化評価を行う。

本技術を達成するためには、副産物+ラベル物質は、外部からのエネルギーにより励起される化学組成構造であること、無色であること、コンクリートの物理的強度に影響を与えないことなどの条件を満たす必要がある。さらに、骨材以外のセメント空間に均一にラベル物質を混ぜ合わせる技術開発も必要である。Fig.2 に化学変化を伴う劣化によるラベル物質の変化の概念図を示す。Fig.3 に副産物+ラベル物質から放射されるエネルギー量を計測する方法の概念図を示す。

本技術が開発された場合、劣化診断の効率化、新規機能を有するコンクリートの製造および計測に関する特許の取得が期待される。さらに、既存コンクリートに対して、ハイパースペクトル計測による化学物質量に基づいた劣化診断手法の高度化も期待される。

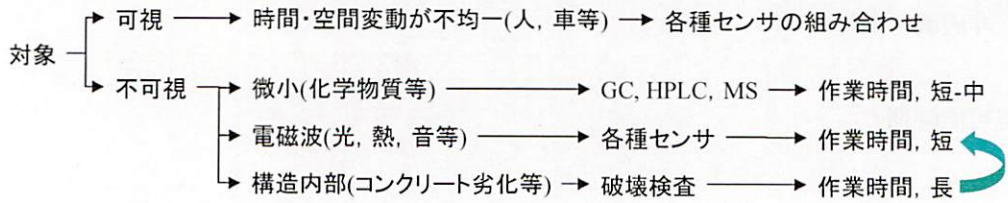


Fig.1 計測対象の性質による計測方法の違いと作業時間との関係.

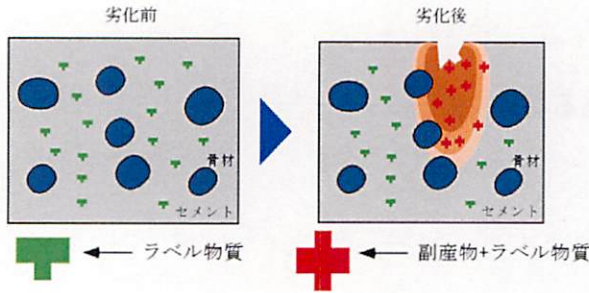


Fig.2 劣化に伴うラベル物質の変化.

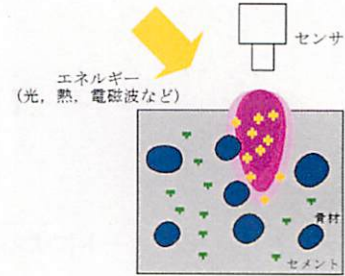


Fig.3 副産物+ラベル物質からの放射量計測に基づいた劣化診断手法.

4. 技術キーワード

プライマー、ラベル物質、非接触計測

5. 実現可能時期

5-10 年後

6. サステナブル構造への適用範囲

本技術は、劣化診断に適したコンクリートおよび診断システムの開発である。本技術が開発されたならば、コンクリート構造物の劣化診断手法の効率化が期待される。

————— 【 No. 4 夢のある将来技術 】 —————

1. 技術名称

ユビキタス・センサ・ネットワーク

2. 担当者

岡田 敬一 (所属: 清水建設(株) 技術研究所)

3. 技術概要

インターネットのブロードバンドが浸透し「いつでも、どこでも、だれとでも」かつ「安心に」と

いわれる情報化社会が進展しつつある。こうしたユビキタス概念の中に、センサを組み込んだ技術が知らない間に入り込み、人々の生活の向上、利便性に貢献するなど社会に役に立つシステムが構築される。

センサ・ネットワークでは、膨大な数のセンサが空間にばらまかれる事を想定しているため、センサ間を無線リンクで接続する事が必須でアドホックな通信技術が望まれている。いかに小型で省電力なセンサモジュールを構築し、かつセンサ間を結ぶ通信を行うかが技術的な課題となっている。また、センサから得られる情報をアクティブに取得するか、パッシブに取得するかを選択も考えられ、必要な場所に情報を持つことも考えられている。

センサ・ネットワークで考えられる空間は、ローカルな状態を密に把握することが主な目的で構築される。たとえば、町の大気環境や騒音などを密に計測することなどが考えられる。また、外部の環境と建物などの消費エネルギーをセンサ・ネットワークで把握し消費エネルギー管理など、従来のセンサでは実現できなかった密な情報取得が社会環境を変えていく。

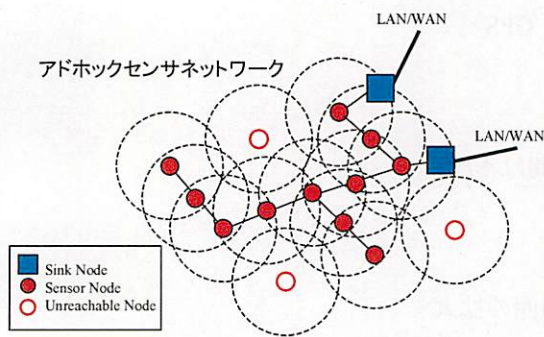


図-1 センサ・ネットワーク構成

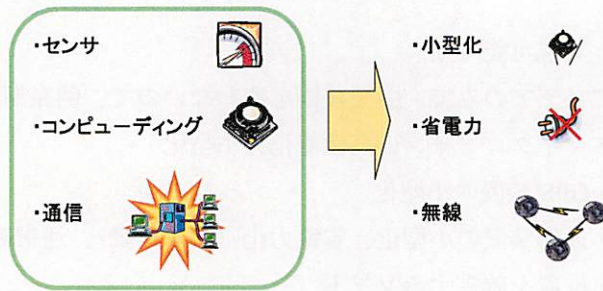


図-2 センサ・ネットワークに必要な技術

4. 技術キーワード

RF 通信、RFID、MEMS センサ、アドホックネットワーク

5. 実現可能時期

第1の波 2010年、第2の波 2020年

6. サステナブル構造への適用範囲

センサ・ネットワークにより、「点」として捕らえていたものが「面」としての広がりを見せた情報空間として提供される。サステナブル構造への「安心・安全」技術として寄与していくと考えられる。

【 No. 5 夢のある将来技術 】

1. 技術名称

音のモニタリング

2. 担当者

菅野 安男 (所属: 基礎地盤コンサルタンツ(株)保全部)

3. 技術概要

音は人間にとって、重要な間隔であり、危険や異常を察知している。

具体的には、方向、大きさ、音色を聞き分け、過去の経験と照合して判断している。

人間の聴覚に相当する機能を3点以上のセンサでの検知で、精度の向上を図り、加えて、通信機能を持たせることにより、遠隔での高度な状況把握が可能となる。

また、GPSなどと組み合わせれば、設置に関しても大幅な簡略化が図れる。

例えば、小型の落下傘にマイクロフォン、GPS、送信機をつけて、航空機からばら撒くことも可能となり、災害などの緊急時への対応ができる。

4. 技術キーワード

マイクロフォン、3次元位置確認、音の分析、通信、GPS

5. 実現可能時期

アイデアのみで、開発技術を伴わないので、開発期間は不明

- ・マイクロフォンの高性能化、小型化
- ・GPS装置の小型化
- ・通信装置の小型化、省電力化(永久作動)、通信範囲の拡大
- ・位置を確定するソフト
- ・音を分析するソフト、データベース
- ・表示するソフト
- ・装置の多目的、協同利用のためのシステム化

6. サステナブル構造への適用範囲

構造物へ設置し、地震時の音を収集、分析し、損傷箇所、程度などを即時に分析し、応急措置の計画の参考とする。

【 No. 6 夢のある将来技術 】

1. 技術名称

上空からの音波マッピング

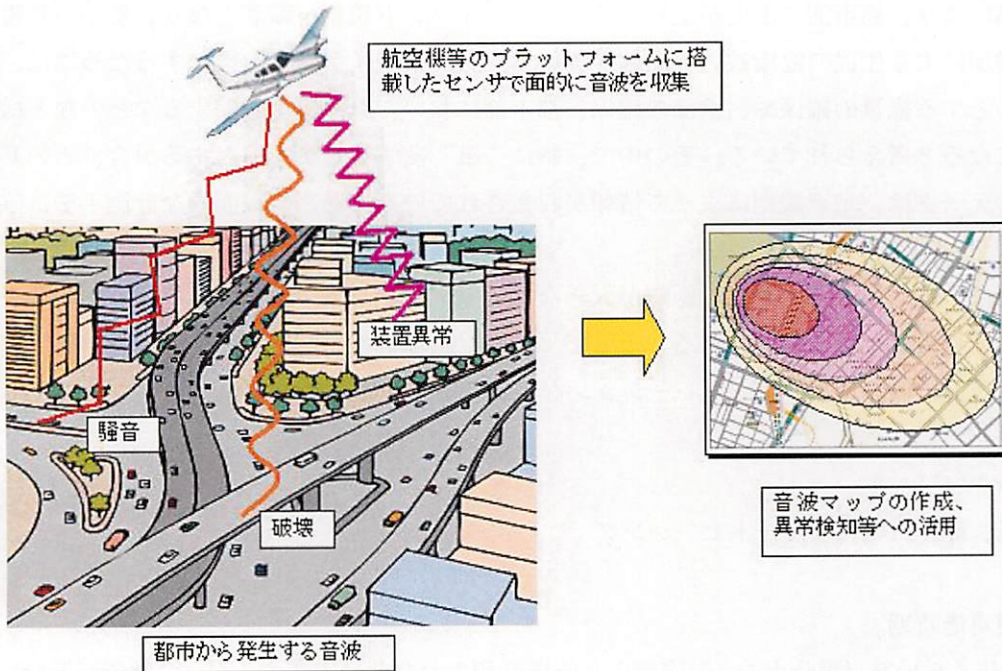
2. 担当者

赤松 幸生 (所属: 国際航業(株))

3. 技術概要

都市にはさまざまな音が溢れているが、これを上空から面的、広域的に計測することにより、空間

的な音環境を把握する。さらに、周波数分析等を用いて、特定の音の分布を抽出することにより、原因別の騒音分布等の環境情報把握や、不可視の異常（装置の異常、人為的な破壊活動、構造物の破壊等）を、広域的に検知することを狙うものである（下図参照）。



4. 技術キーワード

音波、周波数、広域、空間分布、リモートセンシング

5. 実現可能時期

10年後くらい？（低騒音の飛行体（飛行船等？）と、高指向性、高感度、高周波数分解能の音波センサの実現が鍵）

6. サステナブル構造への適用範囲

都市には音が溢れているが、その中には都市の安全、環境に関わる情報も含まれていると考えられる。一方で、都市における音を情報ととらえて、計測、分析している例は少なく、とくに広域にわたる空間分布の情報を計測、分析している例は皆無である。この技術を確認することで、従来、表面情報が中心であった都市データに新たな視点と安全、環境に関わる情報を加えることができ、サステナブル構造の推進に寄与できると考えられる。

【 No.7 夢のある将来技術 】

1. 技術名称

「面的」な風のモニタリング

2. 担当者

船橋 学（所属：国際航業（株））

3. 技術概要

近年、建物や道路などがコンクリート等で被覆され、緑地部分の減少や、冷暖房機器の普及による人工排熱により、都市部の温度が上昇するヒートアイランド現象が顕著となり、夏季の熱帯夜、熱中症等の増加による住民の健康被害等が起きている。ヒートアイランドを緩和するためには、屋上緑化をはじめとする緑量の確保や、水面の確保、都市部において風の道を確保するなどのなど様々な対策が必要になると考えられている。その中で、特に“風”に関する対策を検討する場合、その基礎情報となる風のデータは、定点観測によって情報が収集されているに過ぎず、面的な計測手法は確立されていない。

本技術は、航空機など空間移動距離が大きなプラットフォームに風を計測できるセンサを搭載し、面的な風情報を収集するものである。そして、取得した風情報を解析し、風の道を解析する。この情報は、都市部における風のシミュレーションなどの基礎情報になる。

4. 技術キーワード

風の道、面、広域、リモートセンシング

5. 実現可能時期

5～10年くらい？（現時点で、航空機による風計測のセンサは実在するが、分解能が低い。都市部での活用を考えた場合、十数メートル程度の分解能が必要か？）。

6. サステナブル構造への適用範囲

航空機などで上空から計測した「面的」な風の情報と定点観測による「点」の風データを組み合わせ、都市部を流れる風の道を明確にすれば、ヒートアイランドに配慮したサステナブルな都市構造を検討する場合の有用な情報になると考えられる。

————— 【 No. 8 夢のある将来技術 】 —————

1. 技術名称

食糧供給に関するバランス管理モニタリング

2. 担当者

二木 重博 （所属： アジア航測（株））

3. 技術概要

地球規模で考えた場合、人口分布・各地域の人口増減と食料生産との関係が非常にアンバランスである。また、短期的には異常気象や自然災害の影響、中・長期的には砂漠化の進行等、気候変動や土地条件の変化に伴う農耕可能地域の変動が生じており、これと人口分布とがバランスすることが理想と考える。

このテーマは、農耕可能地域と人口分布のそれぞれの変化をモニタリングし、相互関係の分析結果から効率的な食糧供給を目指すものである。

モニタリング項目は、気候変動・異常気象・自然災害の発生状況・植生分布（砂漠化状況）・人口分布・人口移動・人口増減状況（出産率・平均寿命）など。

4. 技術キーワード

共存共栄、地球平和

5. 実現可能時期

近未来

6. サステナブル構造への適用範囲

社会資本の維持管理に対するサステナブル構造に対してはやや視点がずれるテーマであるが、安全・安心のキーワードや人類自体のサステナブルという観点からは十分意味があると考ええる。

————— 【 No.9 夢のある将来技術 】 —————

1. 技術名称

リサイクルと有害物質モニタリング

2. 担当者

野田典広（所属： 基礎地盤コンサルタンツ(株)）

3. 技術概要

土壌汚染調査では、公定法による化学分析が主体となるため、現地調査・サンプリング・分析に係る時間と費用が膨大なものとなる。地質や地下構造を把握する物理探査で用いられているような非破壊な手法を開発し、表層から主に重金属類を深部方向までおよその分布を把握する。現実的には、X線による元素同定が応用できると思われる。

有害物質はやっかいものではあるが同時に資源であり、汚染土壌は、鉱山資源の精錬技術あるいは、電気・電子製品のリサイクル技術を応用し、濃集しリサイクルする。

4. 技術キーワード

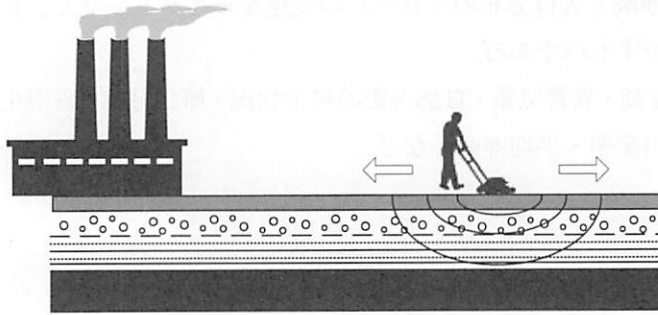
リサイクル 有害物質 資源 選鉱 精錬

5. 実施可能時期

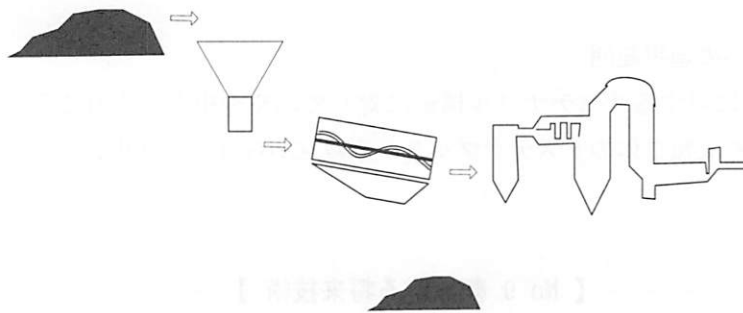
需要があるとすれば現在から数年以内であり、早期に実現させたい。

6. サステナブル構造への適用範囲

土地の資産価値を高めたり保障したりする社会的安心への寄与が大きい。



非破壊での土壌汚染調査のイメージ



汚染土壌の浄化イメージ

————— 【 No. 10 夢のある将来技術 】 —————

1. 技術名称

新型変位計（ユビキタス対応）

2. 担当者

羅 黄順 （所属： （株）計測リサーチコンサルタント）

3. 技術概要

次ページ参照

4. 技術キーワード

ユビキタス、MEMS、モニタリング、健全度

5. 実現可能時期

2005～

6. サステナブル構造への適用範囲

LCC用モニタリングセンサ・地震時挙動センサ

新型変位計（ユビキタス対応）の開発イメージ

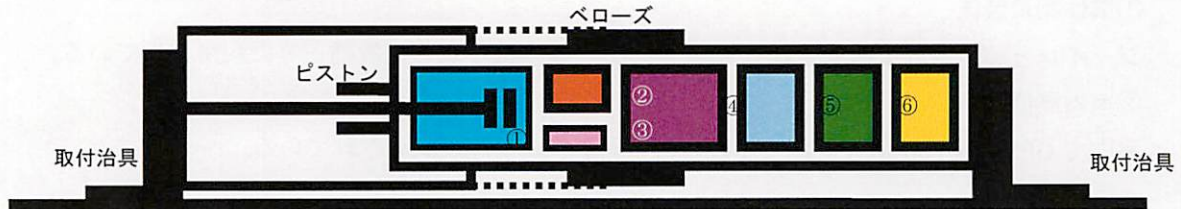
1. 目的

建設現場や構造物の維持管理のために用いられる構造材の機械的ひずみや変位を測定するための、次世代型のセンサを開発する。

2. 開発のコンセプト

- ① 既存の電気抵抗式ひずみ計の計測システムを高度に集積化する
- ② 直接パソコンに入力可能なデジタル値を無線で発信する（ユビキタス型）
- ③ 十分な耐久性を有する（電源・構造劣化・対過負荷など）
- ④ 低廉な価格で供給可能（従来センサ以下）

3. 想定される形状・構造



プローブ形状：L=100～200mm φ/□=25～30mm ピストン伸縮量=±10mm

- ① 変位センサ：（非接触ポテンショ／静電容量型 1～20000μm）
- ② 3成分加速度計：（10～1000gal、DC～200Hz）
- ③ 温度計：（熱電対／サーミスタ -60～+100℃）
- ④ 測定、制御部・クロック部
- ⑤ 記録部（2～8MB）
- ⑥ 送・受信部（ユビキタス対応）
- ⑦ 電源部（リチウム電池／燃料電池／太陽電池／外部補助電池）

4. 目標とする機能

- ① 測定、制御部・クロック部
 - ・ 計測制御パラメータ（リモート制御）：定時計測インターバル、トリガーレベル、トリガーチャネル、サンプリング周波数、サンプリング時間、任意時計測リクエスト、送信リクエスト、送信モード等）
 - ・ 計測制御パラメータに従った測定、演算
 - ・ 標準時刻修正
 - ・ その他
- ② 記録部
 - ・ 測定時刻、測定モード、測定値、測定状態量（電源残存量など）
 - ・ 16ビットAD変換
 - ・ その他
- ③ 送・受信部
 - ・ 送信モード設定：全データ送信／部分データ送信…
 - ・ 外部アンテナ接続
- ④ 電源部
 - ・ 最長無充電寿命 10年以上
 - ・ 外部補助電源接続機能

【 No. 11 夢のある将来技術 】

1. 技術名称

地下測量システム

2. 担当者

滝川 正則（所属： アジア航測（株） 応用計測／位置計測グループ）

3. 技術概要

現在、地上測量に関しては、GPS（VRS）で比較的手軽に高精度な計測が可能になっている。しかし地下・トンネル等では、現在も手軽に位置情報を精度良く計測できるシステムは存在しない。

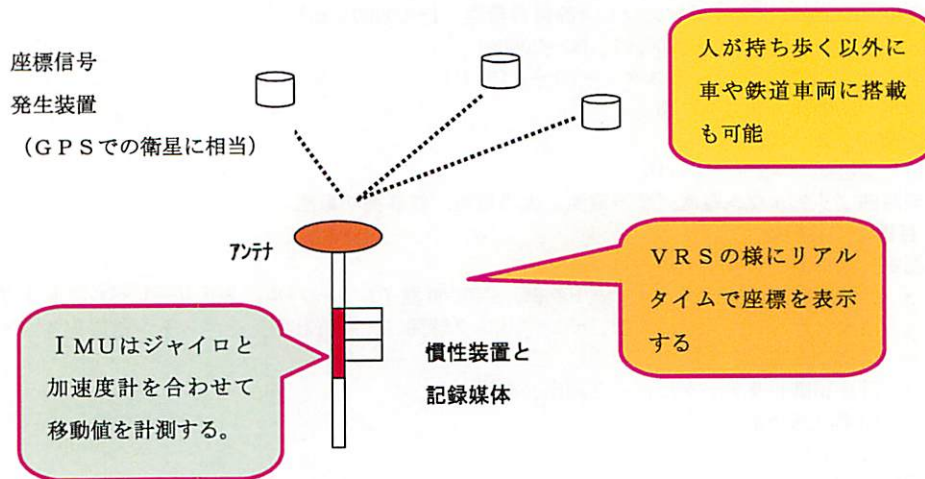
そこで、慣性測量技術や疑似衛星技術等を組み合わせた複合測量システムをまとめ、防災や都市環境及び一般生活での調査での活用を目指す。イメージはVRSの様に、その場で位置座標を計測できることである。複合測量システムは以下のセンサを組み合わせる構成される。これにより、精度の向上を目指す。

①慣性測量装置

ジャイロと加速度計で構成される装置（IMU）。航空機や車の位置補正等に利用されている。

②室内測位技術

室内でGPSの様に位置を計測する技術。スードライト等が試験されている。



4. 技術キーワード

IMU、ジャイロ、スードライト技術、VRS技術、各種センサ技術、マルチパス

5. 実現可能時期

簡易精度型（精度0.5～1m）：2010～2015年、高精度型（精度10cm）：2020～2030年

6. サステナブル構造への適用範囲

地下での構造物の位置情報を計測することでサステナブル構造への「安心・安全」技術に寄与すると思われる。

7.5 まとめ

10年後の将来においては新たな技術が開発され、いままで得られなかった情報を知ることができる社会が形成されていると思われる。モニタリング技術の根幹をなすセンサの革新的な改良が進み、さらに小型化され、ネットワークの一部として、われわれの身近なところのあちこちで存在するものとなっているであろう。「センサ」と「無線ネットワーク」は、将来の情報化社会における「ユビキタス・ネットワーク」の一部として、様々な応用分野への適用がなされる夢のある将来技術であろう。こうした技術は、サステナブルな社会の構造に与えるインパクトが大きく、快適で便利、安全・安心な空間が一般の人々や技術者の中で広がっていることを想像する。

7.6 参考文献

- 1) Brett Warneke氏のHP (2004年1月アクセス) : Moteの構成 (UCB)
<http://www-bsac.eecs.berkeley.edu/~warneke/SmartDust/>
- 2) SMART DUST の紹介 HP (2004年1月アクセス) : Smart Dust の「Daft Dust」
<http://www-bsac.eecs.berkeley.edu/~pister/SmartDust/>
- 3) Silicon Sensing Systems Japan Ltd.のHP (2004年1月アクセス) : Mote のキット
<http://www.spp.co.jp/sss/motemica.html>
- 4) 米インテルのHP (2004年1月アクセス) : 開発中の無線通信ネットワークモジュール
<http://www.intel.com/research/exploratory/motes.htm>
- 5) B.F.Spencer, Jr. (2003): “Opportunities and challenge for smarty sensing technology”, Proceedings of the first international conference on Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure, Vol.1, pp.65-71
- 6) 組み込みネットのHP (2004年1月アクセス): 日立製作所の無線タグのミューチップ(μ -chip)
<http://www.kumikomi.net/article/explanation/2003/12rfid/01.html>
- 7) Mitsubishi Electric Research Laboratories のHP (2004年1月アクセス) : iGlassware
<http://www.merl.com/projects/iGlassware/>
- 8) ITmediaNews のHP (2004年1月アクセス): 紹介記事「ケータイ同士で非接触充電も——エプソンが新モジュール」
http://www.itmedia.co.jp/news/0311/13/nj00_epson_device.html
- 9) 建設工業新聞 2003.4.19 「国土交通省近畿整備局と立命館大学の研究開発がスタート」
- 10) NTT 環境エネルギー研究所のHP (2004年1月アクセス) : ユビキタス社会の概念図
http://kankyo.lclab.ecl.ntt.co.jp/taisei_ene_con.htm
- 11) NTT 環境エネルギー研究所のHP (2004年1月アクセス) : ユビキタス・コンピューティングの実施例
- 12) 独立行政法人産業技術研究所のHP (2004年1月アクセス): 着用型環境モニタリングセンサのイメージ
http://www.aist.go.jp/aist_j/dream_lab/kankyo/e/e_4.html
- 13) IC Mechanics 社のHP (2004年1月アクセス) : MEMS 3軸加速度センサ
<http://www.icmechanics.com/>

添付資料 B

モニタリング方法リストアップ表

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