

アドホックタイプのセンサネットワークを導入した
空間データの新しい収集・管理・提供方法の開発
報告書

平成17年9月

助成研究者：大林 成行

香川大学工学部客員教授（工学博士）

目次

1 . 研究の背景	1
2 . 本研究開発の目的と範囲	3
2 . 1 本研究開発の目的	3
2 . 2 本研究開発の範囲	4
(1) 無線センサネットワーク技術を取り巻く研究開発分野	4
(2) 既往の研究開発分野における本研究開発の範囲	5
3 . 無線センサネットワーク技術に関する動向調査	7
3 . 1 無線センサネットワークシステムの概要	7
3 . 1 . 1 無線センサネットワークシステムの発展経緯	7
3 . 1 . 2 無線センサネットワークシステムの基本構成	7
(1) センサ端末の構成	8
(2) 無線センサネットワーク制御方式	11
3 . 2 無線センサネットワーク技術の研究・開発動向	14
3 . 2 . 1 センサ端末の開発状況	14
3 . 2 . 2 無線センサネットワーク技術の研究動向	18
(1) センサ	18
(2) センサ端末・OS	19
(3) 無線通信ネットワーク	19
(4) 応用システム	20
3 . 3 無線センサネットワーク技術の適用状況	20
3 . 4 無線センサネットワーク技術適用上の課題と問題点	25
(1) センサ端末を構成する各種機能の向上	25
(2) ネットワーク制御技術の向上	26
(3) システム運用に関する課題	26
(4) アプリケーション連携・統合	26
(5) セキュリティ・プライバシー	27
(6) 対人間、対環境の安全性	27
4 . 実験用システムによる初期検証	28
4 . 1 実験用システムの概要	28
(1) 実験用システムの仕様	28
(2) 実験用システムの特徴	30
4 . 2 実験用システムによる初期検討	31
(1) 実験項目 1 : ネットワーク構築機能	31
(2) 実験項目 2 : センシング機能	32
(3) 実験項目 3 : 通信機能(センサ端末間の通信最大距離)	35
4 . 3 無線センサネットワーク技術の 実利用を図る際の留意事項の整理	36
(1) センサ観測技術	37
(2) 無線通信技術	37
(3) センサ端末の位置測定技術	38
(4) 最適配置決定技術	38
(5) 時間同期技術	39
(6) 電源技術	39

5 .無線センサネットワークの活用イメージ	40
5 .1 検討対象とする分野	40
5 .2 斜面の挙動監視・落石の検知システム	42
(1) 既往の技術と無線センサネットワークを活用することの利点 ..	42
(2) 無線センサネットワークを利用した場合の処理手順	43
(3) 期待される効果	43
(4) 実用化に向けての検討課題	46
(5) 活用イメージ	46
5 .3 道路照明灯(道路灯)を利用した道路施設の維持・管理システム .	47
(1) 既往の技術と無線センサネットワークを活用することの利点 ..	47
(2) 無線センサネットワークを利用した場合の処理手順	50
(3) 期待される効果	50
(4) 実用化に向けての検討課題	51
(5) 活用イメージ	51
5 .4 道路交通調査システム(交通量把握、駐車車両検知等)	52
(1) 既往の技術と無線センサネットワークを活用することの利点 ..	52
(2) 無線センサネットワークを利用した場合の処理手順	55
(3) 期待される効果	55
(4) 実用化に向けての検討課題	55
(5) 活用イメージ	56
5 .5 道路構造物の損傷・変状の検知システム	57
(1) 既往の技術と無線センサネットワークを活用することの利点 ..	57
(2) 無線センサネットワークを利用した場合の処理手順	60
(3) 期待される効果	60
(4) 実用化に向けての検討課題	60
(5) 活用イメージ	61
5 .6 災害時等における早期モニタリングシステム	62
(1) 既往の技術と無線センサネットワークを活用することの利点 ..	62
(2) 無線センサネットワークを利用した場合の処理手順	65
(3) 期待される効果	65
(4) 実用化に向けての検討課題	65
(5) 活用イメージ	65
6 .「斜面挙動監視・落石の検知」を対象とした	
無線センサネットワークシステムの検討	67
6 .1 プロトタイプシステムの概念構成	67
6 .2 プロトタイプシステムの仕様	68
(1) センサ端末	68
(2) センサ端末の管理・制御方法に関する検討	68
(3) 収集したデータを一元的に管理するデータベースの検討	70
(4) 情報提供システムの検討	71
6 .3 プロトタイプシステム仕様の整理と実現可能性の評価	72
6 .5 まとめ	75
7 .おわりに	76
参考文献	78

1 . 研究の背景

高速で大容量の移動通信ネットワークの整備と丈夫で安価な小型情報端末の普及に伴い、情報通信環境とその利用形態は「一人が一台のコンピュータを利用する」といったパーソナルコンピュータの時代から「複数人が何時でも何処でも複数のコンピュータを利用する」時代へと変化し始めている。

このような背景には、「ありとあらゆる場所に情報通信機能を搭載したコンピュータが存在し、ユーザはそれらを意識することなく利用できる」といった「ユビキタスコンピューティング」の概念に従う多様なアプリケーションの開発が大きく影響している。未だ、ユビキタス関連技術は実験的な範疇を超えていないものも多いが、防犯、防災、物流、施設管理、医療・福祉などの多分野において基礎的・先導的な研究開発と産業化を視野に入れた研究開発が積極的に進められており、一部では実用化が始まっているものも少なくない。

その中で、無線 IC タグ技術は実用化が進んでいるユビキタス関連技術の一つであり、流通・服飾・外食産業を中心に、近年、急激に導入され始めている。無線 IC タグ産業は近い将来、数十兆円の市場規模が見込まれるといった予測結果もあり、ユビキタス関連技術の進歩が経済的にも社会的にも大きなインパクトを与え始めていることが伺える。

一方、ユビキタス関連技術の中でも実世界の広域データ収集を主な目的として研究開発が進められているのが無線センサネットワーク技術である。無線センサネットワーク技術とは、通信機能、演算処理機能、センシング機能を併せ持つ小型端末を環境内に複数配置して、温度、光、音、加速度、磁気などの物理量データを広域にわたり時系列で収集する技術である。ここで用いられるコインサイズの小型端末は OS (Operating System) により稼働するれっきとしたコンピュータであり、この端末は周辺の他の端末と無線で送受信することにより自立的に通信ネットワークを構築することが可能である。このネットワークのことを「アドホック・ネットワーク」と呼ぶことが多い。端末で収集されたデータは複数の端末を経由することで基地局に集められることになる。このように任意の端末間で通信ネットワークを構築できる技術 (マルチホップ通信技術) を持つアドホックタイプの無線センサネットワークシステム (1) は人の立ち入りが困難な場所や膨大な量の観測ターゲットが存在する場所、また、観測対象が移動を伴う場合などにおいての活用が効果的であると言われている。

- (1) 無線センサネットワークシステム：本研究では、通信機能、演算処理機能、センシング機能を合わせ持つ小型端末を環境内に複数配置し、端末間で自立的に構築される無線通信ネットワークを介して各種センサデータを時系列で観測・収集する技術のことを「無線センサネットワーク技術」と定義している。また、種々の課題解決へ「無線センサネットワーク技術」を適用していくために構成されるハードウェアとソフトウェアの集合のことを「無線センサネットワークシステム」と呼ぶ。

現在、防犯・防災、耕作地管理、自然環境モニタリング、移動体監視、軍事、宇宙開発などの多分野において注目されている。

建設分野においても、国土防災、国土管理、情報化施工等の効率化、広域化とコスト低減に関わる施策と相まって近年、過酷な作業環境での作業の簡素化や簡易なセンシング機能による作業の効率化、安全確保の面において無線センサネットワーク技術の適用が期待されている。複雑な配線を敷設する必要が無くセンサ端末を比較的容易に設置できる特徴を生かし、斜面や河川周辺に多数のセンサ端末を設置して土砂崩れや洪水、火山噴火などの予兆を事前に検知する手段として、あるいは、地震や台風、洪水などの災害発生時の正確な被災状況を迅速に把握する手段として期待できる。

また、生体反応を感知するセンサを利用して人命救助、ガス爆発や火事、建物倒壊といった二次災害を防止する手段としての応用も期待できる。その他にも、橋梁・道路・トンネル・ダム・鉄塔等の構造物の管理・メンテナンスの効率化、工事車両等の移動体の自動運転、都市熱環境モニタリングなど今後の発展が期待できる項目が数多く挙げられている。

しかしながら現段階ではセンサ端末や無線センサネットワークシステム独自の通信プロトコル、センシングされたデータの処理技術に関する研究開発が多方面で進められているものの、他の多くのユビキタス関連技術と同様に実用化に向けて克服しなければならない共通の課題が多い。特に「センサ端末の電源管理」は無線センサネットワークシステムのスペックと寿命を決定する最優先事項であり、ハードウェア、ソフトウェアともに省電力化をキーワードとした研究開発が多数進められている。通信プロトコルの標準化といった観点からは「端末の測位」、「各端末間の時刻同期」が無線センサネットワーク技術を適用する上で無視できない問題となっている。

また、センサ端末を配置する環境によっても新たな問題が発生する。例えば、建設分野で無線センサネットワークシステムを活用していこうとする場合には以下の点を考慮する必要がある。

気象条件など、劣悪な環境でシステムを維持していかなければならない。

既存の通信ネットワークが殆ど利用されていない環境でシステムを構築しなければならない。

システムの適用範囲が物理的、用途的に広く、広域を賄うために新たな技術の開発が必要になる。

このような点は建設分野においてユビキタス関連技術の適用を阻害している要因の一つとも考えられ、今後、独自の技術の確立が求められている点であると言える。本研究開発の発想もここにある。

2 . 本研究開発の目的と範囲

2 . 1 本研究開発の目的

建設分野における広域でかつ簡易なデータ収集システムとして無線センサネットワークシステムの活用が期待されているのは前述の通りである。しかしながら、現段階ではニーズが先行した状況にあり、具体的なシステム開発に向けて無線センサネットワーク技術を適用した実験事例は多くない。

このような背景には、センサ端末の電源管理の問題や端末の測位、時刻同期、通信プロトコルの開発といった無線センサネットワーク技術の基礎的な課題が解決されていないことが挙げられるとともに、無線センサネットワーク技術の適用方法を考慮してハードウェア、ソフトウェアに要求される仕様を整理することや既存のシステムとの融合利用方法に関する検討が実施されていないことも原因の一つと考えられる。無線センサネットワーク技術の現状を分析・把握するとともに、実現したいシステムの仕様とその利用形態を明確にして、現状の無線センサネットワーク技術でどこまで実現可能であるか、また、ボトルネックとなっている箇所（問題点）は何かを明確にすることが不可欠であると言える。

そこで本研究開発では、建設分野における利用目的別に見た無線センサネットワークシステムによるデータの収集・管理・提供のあり方を検討するために、以下の3点の目的を設定して研究開発を進めた。

無線センサネットワーク技術を取り巻く現状についてセンサ端末や関連システムの研究・開発動向を調査する。また、野外での無線センサネットワークシステムの利用を想定して市販の無線センサネットワークシステムの稼働試験を実施し、センシング機能、通信機能の現状を把握する。さらに上述の2点の調査・検討結果を考慮して、無線センサネットワークシステムの実利用を進める上での課題をハードウェア、ソフトウェア両面から整理する。

の結果を考慮して、建設分野をターゲットとした無線センサネットワークシステムの具体的な活用イメージを提案し、無線センサネットワーク技術を適用することの意義を整理する。また、現状の無線センサネットワーク技術でも実現可能な範囲と課題解決が必要になる範囲を区分してシステムの要求仕様を整理する。

さらに、活用イメージとして提案した項目の一つである「斜面の挙動監視・落石検知システム」に着目して、センサ端末の管理方法、収集したデータの蓄積・管理方法、データの表示・提供方法を検討して、システム化する際のデータ収集・管理に求められる仕様を明確にする。

2.2 本研究開発の範囲

(1) 無線センサネットワーク技術を取り巻く研究開発分野

図-2.1で示すように、無線センサネットワーク技術に関する研究開発は「センサ端末に関する研究開発」、「通信プロトコルに関する研究開発」、「センサデータ情報処理に関する研究開発」、「応用システムに関する研究開発」の4つセクションに大きく分類することができる。各セクションが独立した研究開発分野として成り立つものではなく、分野横断的な研究開発が不可欠であることは言うまでもない。此处では既往の研究開発動向を整理する意味で、各研究開発の傾向から4つセクションに分類した。

a) センサ端末に関する研究開発

主にセンシング機能の強化や通信距離・容量の拡大、センサ端末の省電力化に向けたハードウェアの開発が中心となっている。利用目的を明確にしてセンサ端末の仕様を限定している研究開発と様々なアプリケーション開発に応用できるように汎用的なセンサ端末の開発を目指しているものに二分されている傾向がある。

b) 通信プロトコルに関する研究開発

ネットワークの省電力化を目的に、インターネットなどで利用されている既存の通信プロトコルとは異なる無線センサネットワークシステム独自のプロトコルの構築を目指す傾向にある。現段階では通信プロトコルの標準化までには至っていない。

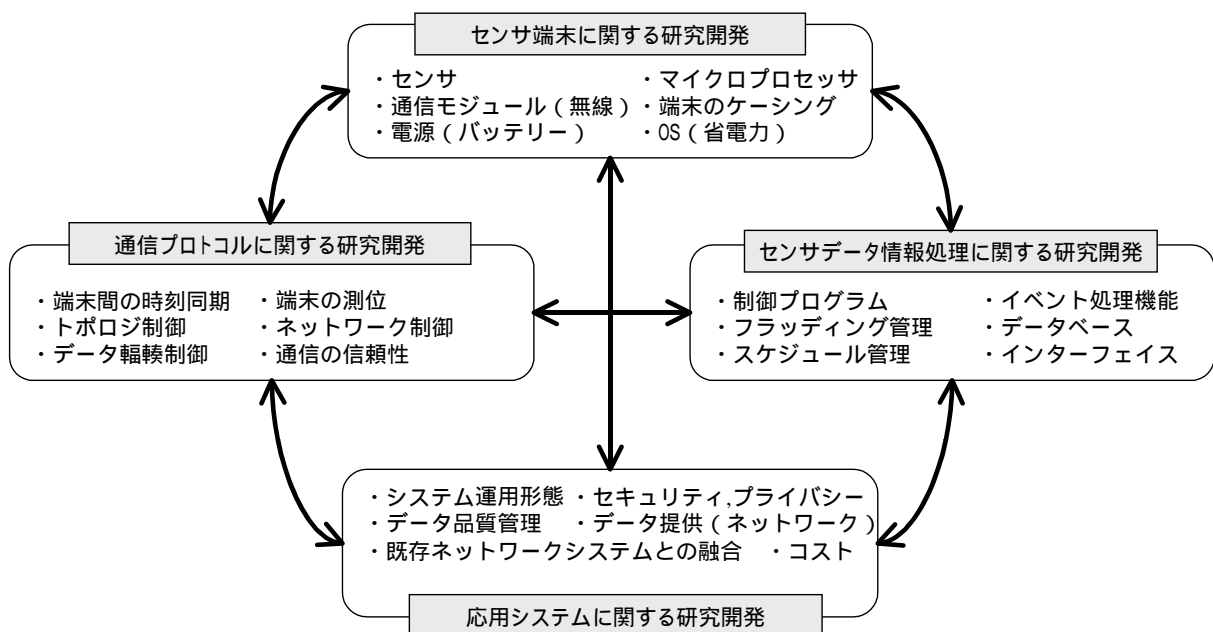


図-2.1 無線センサネットワーク技術を取り巻く研究開発分野

マルチ・ホップ通信技術を基準にトポロジー制御、ネットワーク制御の効率化を目指したプロトコル（主にネットワーク層、トランスポート層）に関する概念が多数提案されてきている。センサ端末の電源管理を第一に考えているため、ネットワークの利用形態によって提案されるプロトコルの仕様が異なっている。ネットワークの省電力化を目指すのがゆえに汎用的な通信プロトコルの構築が進まない傾向にあると言える。

c) センサデータ情報処理に関する研究開発

センサ端末のイベント処理、スケジュール管理などといった端末制御とプログラミングに関する研究が進められている。無線センサネットワークシステムの管理・制御に関する基本ソフトウェアの開発が含まれており、「センサ端末に関する研究開発」や「通信プロトコルに関する研究開発」と連携した研究事例が多い。

d) 応用システムに関する研究開発

防犯・防災、耕作地管理、自然環境モニタリング、移動体監視、軍事、宇宙開発など多様な分野における無線センサネットワーク技術の適用方法やシステムの利用形態を提案している事例が多い。利用形態を明確にして、独自のセンサ端末の開発や通信プロトコルの開発を進めている事例も目立つ。無線 IC タグのように、ある程度規格化されたハードウェアをどのように活用していくかといった実利用を想定した研究アプローチは比較的少なく、独自のハードウェア、ソフトウェアを開発しているアプローチが多い傾向にある。これは、現状においてセンサ端末が開発段階であり一般ユーザが購入することが困難であることや、電源管理の問題によりハードウェアの汎用化を抑制していることなどが原因と考えられる。今までの無線センサネットワーク技術の応用システムに関する研究開発はセンサ端末の開発までを含めた研究アプローチが求められてきたと言える。しかしながら、近年では「MOTE/MICA(2)」シリーズに代表されるように基本的なセンシング機能やマルチ・ホップ通信機能を装備した汎用的な無線センサネットワークシステムが市販され始めており、応用システムに関する研究開発を進める際の垣根が低くなってきたと言える。

(2) 既往の研究開発分野における本研究開発の範囲

図-2.2 に本研究開発の範囲を示す。本研究開発は建設分野における無線センサネットワークシステムの利用形態の提案とセンサデータの蓄積・管理・提供方法に関して検討するものである。

(2) MOTЕ/MICA : U. C. Berkeleyで行われている無線センサネットワーク技術に関する研究のプロジェクトである SMART DUST の成果を実用化した無線センサネットワークシステムである。無線通信環境を常時自動的に察知して自律的にネットワークを構成するようなアドホック無線ネットワーク機能を持っているため、端末を適当に配置するだけで自動的に通信ネットワークを構成することが可能である。

上述の研究開発分野から見ると、「応用システムに関する研究開発」に比重を置いたものになる。具体的には、「斜面の挙動監視・落石検知システム」や「道路交通調査システム」、「災害時における早期モニタリングシステム」などといった具体的な無線センサネットワークシステムの活用イメージを作成して、これらを実現させるための課題を明確にすることを第一の目的としている。

このため、既往の研究事例や国内外の大学・研究機関・企業におけるハードウェア、ソフトウェア開発状況を調査するとともに、現在、最も研究開発が進んでいると言われている市販の無線センサネットワークシステムである「MOTE/MOCA」シリーズを稼働試験用に利用して、センサ感度や無線通信距離、データサンプリング周期などを実測し、無線センサネットワーク技術の現状を把握するものである。なお、独自のセンサ端末の開発や通信プロトコルの提案は本研究開発の範囲に含めず次年度以降の課題とする。

また、GIS (Geographical Information System) におけるセンサデータの活用も含め、以下の点に着目してセンサ端末で収集したデータの管理・提供方法についての検討を進める。

ネットワーク端末の管理・制御方法

収集したセンシングデータを一元的に管理するデータベース

収集したセンシングデータを属性情報と連携させて表示する情報提供方法

上記の検討内容を考慮して、「斜面の挙動監視・落石検知」を目的に無線センサネットワークシステムの実利用を図る際のシステム仕様を明確にする。なお、本年度の研究開発では、システムの全体構成を取りまとめて、その実現可能性とシステムの妥当性を評価するまでに留め、具体的なシステムの構築および稼働試験については次年度に対応することとする。

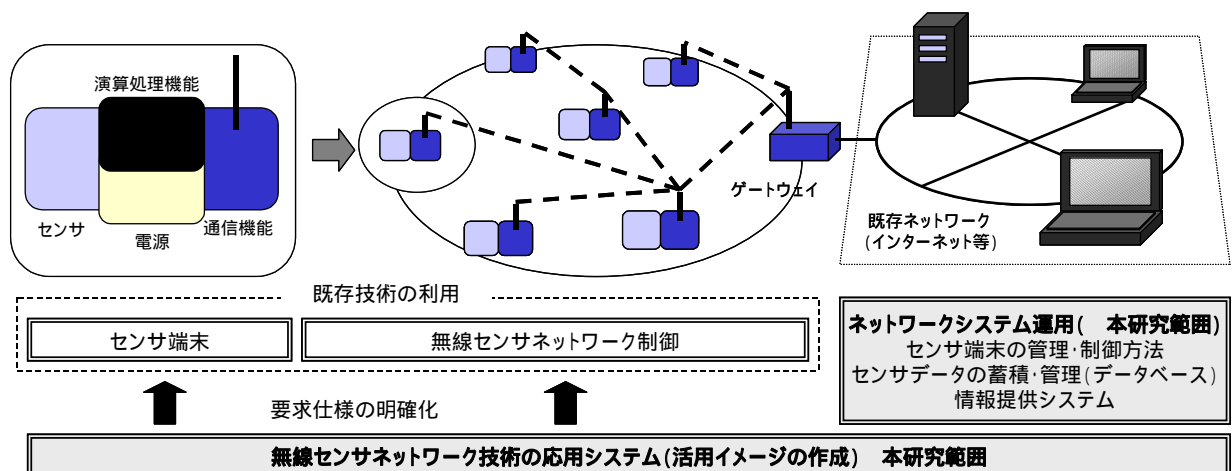


図-2.2 本研究開発の範囲

3 . 無線センサネットワーク技術に関する動向調査

3 . 1 無線センサネットワークシステムの概要

3 . 1 . 1 無線センサネットワークシステムの発展経緯

無線センサネットワーク端末（以下、センサ端末）の開発は米国国防省高等研究計画局（DARRA：Defense Advanced Research Project Agency）のマイクロ電子機械システム（MEMS：Micro Electro Mechanical System）関連の研究プロジェクトで提案された「スマートダスト（Smart Dust）」が最初の取り組みだと言われている。当初、スマートダストのアプリケーションは戦場における状況把握などの軍事的な利用の趣向が強いものだった。スマートダストは体積 1.5mm^3 以下のサイズで、演算処理機能、センシング機能、通信機能および電源を搭載した超小型センサ端末を開発しようとするものであったが、このような条件をクリアーできるデバイスの完成までには至らなかった。しかしながら、このプロジェクトにおいて、膨大な数のセンサ端末を空間に分散配置して利用するといった無線センサネットワークシステムの基本スタイルが確立された。

スマートダストの研究チームはより実現的な観点から既存の部品を活用する「COTS ダスト（COTS Dust）」の開発を開始した。COTSとはCommercial Off-the-Shelfの略で「市販されている部品を組み上げられたもの」といった意味を持つ。COTSダストの研究では、コイン大の大きさでバッテリー駆動するデバイスの開発が進められた。スマートダストと同様にCOTSダストにおいても、超小型無人機（MAV：Micro Air Vehicle）に搭載して戦場の状況を調査するなどといった軍事的な利用を対象として研究が進められた背景がある。

その後、COTSダストはDARPAのNEST（Network Embedded Software Technology）プロジェクトとして採択され、ハードウェアの改良やハードウェア上で動作する各種のソフトウェアの開発が進められ「MOTE/MICA」として一般に市販されるまでに至っている。

今日では、複数の大学や民間企業においてタイプの異なる様々なセンサ端末が開発されてきている。センサ端末のバッテリーの寿命を延長させる方法や各端末におけるセンシングの同期をとる方法、無線センサネットワークシステム自体の信頼性、堅牢性、リアルタイム性を確保する方法など、無線センサネットワーク技術を適用したアプリケーションの利用目的や適用範囲を考慮する形で独自の商品化が進む傾向にある。なお、3.2節では、欧米や我が国における代表的なセンサ端末について整理している。

3 . 1 . 2 無線センサネットワークシステムの基本構成

無線センサネットワークシステムとは、マイクロプロセッサを搭載した小型

のセンサ端末を空間内に配置して、各デバイスで観測されたセンサデータをデバイス間で無線中継することにより一元的に収集できるネットワークである。特に「アドホックタイプ」の無線センサネットワークシステムは、各デバイスがその設置環境や他のデバイスとの位置関係から適時、データを経由させるデバイスを自動的に選択し通信経路を構築する「自己編成機能」を持つ特徴がある。アドホック無線センサネットワークシステムはデータの中継に基地局やアクセスポイントを必要としないため、ネットワーク構成を吟味する必要が無く野外でも迅速に情報収集ネットワークを構築することができる。なお、これらセンサや小型通信デバイス、マイクロプロセッサの製造には MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) に代表される高集積度の電子工学技術が不可欠となる。

収集されたセンサデータはゲートウェイを介して一元化され、既存のネットワーク (インターネットや衛星通信など) を介してサーバもしくはパーソナルコンピュータに蓄積され利用目的に応じて計算処理を実施して重要な決定を下すための情報を作成することになる。

図-3.1 は無線センサネットワークシステムの基本構成と一般的なデータの流れを示している。以下、このデータの流れに従い、「センサ端末の構成」、「無線センサネットワーク制御方式」について取りまとめる。

(1) センサ端末の構成

一般にセンサ端末は「無線通信部(アンテナを含む)」、「制御部(プロセッサ)」、「センサ部」および「電源部」の 4 つの要素で構成される。センサネットワークは多くの場合、多数の端末を自然環境など比較的広範囲な環境に分散配置して利用することが想定されるため、端末の電源を頻繁に交換することは困難である。このため、低消費電力なセンサ、無線通信モジュール、プロセッサが好まれる。また、端末の設置を容易にすることや端末の設置に伴う観測対象環境への影響を低減するために、端末の小型化、軽量化が必須と言える。

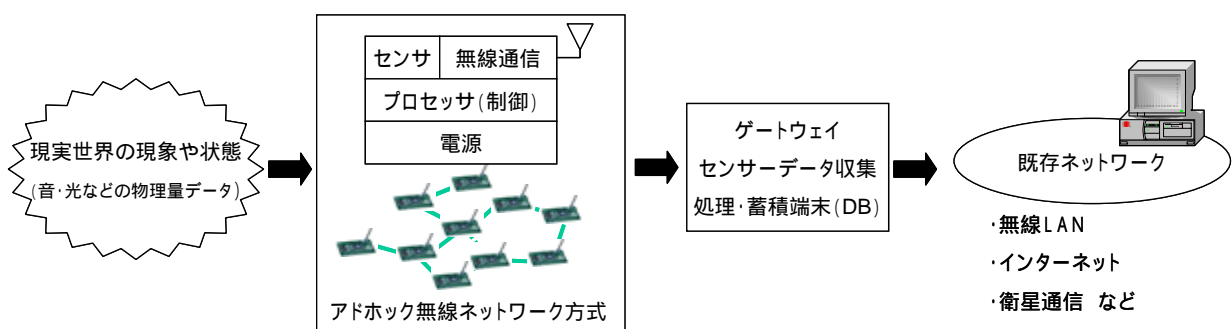


図-3.1 無線センサネットワークシステムの基本構成とデータの流れ

a) 無線通信部

無線センサネットワークシステムで利用される代表的な低消費電力型 WPAN (Wireless Personal Area Network) を表-3.1 に整理する。現在のセンサネットワーク用端末に用いられている、WPAN の多くは、通信速度が数十 kbps ~ 百数十 kbps 程度で、数 m ~ 数百 m 程度の通信距離が確保できる微弱あるいは特定省電力無線で構成される。また、ほとんどの無線モジュールにはスリープモード(待機モード)を持っており、システムの消費電力を抑える用途に使用される。以下、表 3.1 に整理されている WPAN の特徴を列挙する。

微弱無線

微弱無線とは電波法に規定されている許容値を守れば、いつでも、どこでも、誰が使っても構わない無線である。国内で使用できる微弱無線は 322MHz を境に厳しく制限されている。市販の微弱無線は 300MHz 付近に集中している。

特定小電力無線

チャンネルの選択が 20 チャンネル、トーン信号やデジタル・コード・スケルチなどで細かくグループ別けができる特徴がある。同時通話タイプ、トランシーバタイプ、中継機兼用型など用途によってさまざまなタイプがある。免許・資格が不要である。

Zigbee

データ転送速度は最高 250kbps で、最大伝送距離は 30m、一つのネットワークに最大で 255 台の機器を接続できる。アルカリ単 3 乾電池 2 本で約 2 年駆動するという低消費電力が最大の特徴で、転送速度が遅くてもかまわない家電等の遠隔制御などに応用される見通しとなっている。

表-3.1 低消費電力型 WPAN (Wireless Personal Area Network) の比較

方式名称	微弱無線	特定小電力無線	ZigBee	Bluetooth	UWB
規格	独自	独自	IEEE802.15.4	IEEE802.15.1	IEEE802.15.3a
伝送速度 (bps)	2K	2.4K	250K	1M	480M
利用周波数帯域	307.74MHz 316.74MHz	429MHz	2.4GHz 868MHz 915MHz	2.4GHz	3.1GHz ~ 10.6GHz
伝送距離	30m	30m ~ 300m	10m ~ 75m	10m ~ 100m	10m (110Mbps) 4m (200Mbps)
消費電力 (通信/待機)	66mW/3.3mW	50mW/0.3mW	< 60mW (通信)	120mW/4.2mW	< 100mW (通信)
製品化	済	済	サンプル	済	未

物理層のインターフェースには IEEE802.15.4 が使われ、無線 LAN 規格の IEEE802.11b と同じ 2.4GHz 帯の周波数帯域を 16 のチャンネルに分割して利用する。アメリカでは 915MHz 帯が、ヨーロッパでは 868MHz が利用可能である。かつて家電向けの無線通信規格として推進されていた「HomeRF」の技術を転用し、「HomeRF Lite」として知られていたプロトコルで通信する。

Bluetooth

携帯情報機器向けの無線通信技術である。ノートパソコンや PDA、携帯電話などをケーブルを使わずに接続し、音声やデータをやりとりすることができる。Bluetooth は免許なしで自由に使うことのできる 2.45GHz 帯の電波を利用し、1Mbps の速度で通信を行うことができる。Bluetooth は機器間の距離が 10m 以内であれば障害物があっても利用することができる。

UWB (Ultra Wide Band)

データを 1GHz 程度の極めて広い周波数帯に拡散して送受信が可能である。それぞれの周波数帯に送信されるデータはノイズ程度の強さしかないため、同じ周波数帯を使う無線機器と混信することがなく、消費電力も少ない。位置測定、レーダー、無線通信の 3 つの機能を合わせ持っており、極めて独特な無線応用技術と言える。

b) 制御部 (プロセッサ)

無線センサネットワークシステムに用いられるマイクロプロセッサは、パソコン用の汎用マイクロプロセッサに比べて処理能力が低く、処理機能も限定的である。一般的に、8ビットあるいは 16ビット程度の処理能力で、数 MHz ~ 数十 MHz 程度の動作周波数の組み込み用マイコンが利用される。無線センサネットワークシステム用のマイクロプロセッサの特徴を以下に列挙する。

プロセッサはセンサからデータを取得することと、そのデータを目的地に送り届けるための通信制御が主な仕事であり、高い処理能力を必要としない。無線センサネットワークシステムでは、多くのセンサ端末を使用してシステムを構築するため、プロセッサの開発・製造を低コストにする必要がある。消費電力を抑えるためスリープモードを搭載していることが好ましい。

OS を含めたシステム独自のソフトウェア開発が容易になるようプロセッサと愛称の良いシステム開発環境が整備されていることが好ましい。

c) センサ部

端末に搭載するセンサは基本的にどのような種類のセンサでも構わない。一般的には、磁気 (磁界)、加速度 (2 軸、3 軸)、傾斜 (2 軸、3 軸)、音声、光、温度などのセンサが利用される。単一のセンシング項目のみに対応するのではなく、複数種類のセンシング項目に同時に対応できるように複数のセンサを搭

載したセンサ端末が一般的である。前述の通り、無線センサネットワークシステムでは、端末における省電力化が課題であることから、利用目的に合わせて搭載するセンサの種類・個数・要求仕様を吟味することが不可欠である。

d) 電源部

無線センサネットワークシステムにおける様々な技術的課題の多くが電源の問題に関連している。仮に電源を気にする必要が無ければ、無線センサネットワークシステムを構成する各デバイスには強力な通信機能と強力なプロセッサを搭載することが出来るだろうし、制約の多い OS をわざわざ使う必要も無くなると言える。無線センサネットワークシステムでは、有限の電源を如何に効率良く利用していくかが課題となっている。

センサネットワークを配置する環境（室内、屋外）や端末の予定稼働時間、環境配慮といった観点から電源に関する様々な研究アプローチが存在する。単純にバッテリーを高機能化させるアプローチばかりではなく、「いかにしてセンサネットワークに電源を供給するか」といった研究や、光、熱、風力あるいは振動などのエネルギーを使って自己発電することでバッテリーを使わず動作する無線センサネットワークシステムの研究なども行われつつある。

(2) 無線センサネットワーク制御方式

ネットワーク化されたセンサ端末が相互に通信し合うために共通の通信手順（プロトコル）が必要である。インターネットにおいては OSI (Open System Interconnection) 参照モデルとして 7 階層のプロトコル階層化モデルが標準化されており、長年の洗練化により高い信頼性を獲得している。既存のネットワークプロトコルはスループットや延滞対策といった通信の品質向上を最優先事項として開発されてきた経緯がある。

一方で、無線センサネットワークシステムでは、如何に省電力化を図るかがシステムそのものの性能を左右することになるため、通信の品質向上が最重要課題とはならない。また、無線センサネットワークシステムで取り扱うデータはインターネット等で取り扱われる画像や音声、動画像データに比べて格段に容量が小さいことから既存のネットワークプロトコルをそのまま無線センサネットワークシステムに適用することは最善とはならず、独自の新たな通信プロトコルの設計が望まれており、現在活発な研究開発が進められている最中である。

a) アドホックネットワークと無線センサネットワークシステム

アドホックネットワークとは、一般的に移動する端末間で適宜、動的にネットワークを構築して端末間でデータ配送を行うネットワーク形態を指す。無線電波の届かない端末同士では、中間に居る他の端末がデータを中継して（この

技術をマルチホップ通信技術と呼ぶ)通信を行う。アドホックネットワークはネットワーク構築の容易性、迅速性に優れており、インフラへの依存を少なくし、ユーザの柔軟性が向上するなどの利点がある。一方で、アドホックネットワークの構築時には、複数の端末の協力が必須であり、協力者への報償やセキュリティ問題などその実現に置いては多くの研究課題がある。

無線センサネットワークシステムは位置が特性されていない端末間の経路を動的に構築するという点でアドホックネットワークの概念が適用されていると言える。しかし、厳密にはアドホックネットワークと異なる部分がある。それは、アドホックネットワークの概念では、端末の立場がすべて同等となるのに対して、無線センサネットワークシステムでは「観測者」と「センサ」という異なる立場の端末がネットワークを構築する点である。センサ端末間では情報の中継はあるものの、お互いが終端端末となって情報交換するといったことは稀である。そのため、無線センサネットワークシステムでは、アドホックネットワークの概念を前提に、「観測者」から「センサ」に対する通信と、「センサ」から「観測者」への通信に着目した経路制御方法の開発が重要になる。

b) 無線センサネットワークシステムの経路制御プロトコル

上述の通り、無線センサネットワークシステムはアドホックネットワークの概念に立脚している。アドホックネットワークでは、これまで膨大な数の経路制御プロトコルが提案されてきているが、標準化までには至っていないのが現状である。その理由は、端末の移動モデルや密度、トラフィックの特徴、ネットワーク規模などの想定環境によって、経路制御プロトコルの性能が大きく左右されるためである。アドホックネットワークの経路制御方法には大きく以下の2通りが提案されている。

リアクティブ型プロトコル

通信を始める際に経路を検索する。通信の要求が少ないネットワークでは冗長な制御メッセージを減らすことができる。しかし、通信を開始するまでに延滞が起こるため、通信開始の延滞を重視するようなアプリケーションには向いていない。

プロアクティブ型プロトコル

定期的な情報交換により経路を決定しておくことから、通信開始の延滞が殆ど発生しない。しかし、データ通信量がほとんど無いネットワークやトポロジーの変動が頻繁に起こるようなネットワークでは、不必要な経路情報が増加して効率が悪くなる。

c) センサ端末間における時刻同期

高密度でセンサ端末が設置された無線センサネットワークシステムでは、同

じ現象を複数の端末が感知する可能性が高い。そのため、同期のとれた時刻情報を利用して、ネットワーク内部でデータを融合、削除することにより、トラフィックの冗長性を取り除くことが必要になる。

時刻同期の事実上の標準となっている NTP (Network Time Protocol) は、高精度の時刻同期を実現することが可能である。しかし無線センサネットワークシステムでは、位置測位のためにマイクロ秒のオーダーで正確な同期が必要とされる場合や、あるイベントを検知した特定のノード間でのみ時刻を同期させたい場合など、インターネットとはその要求が異なる。高密度のノードで構成されたネットワーク環境で、省電力かつスケーラビリティの高い仕組みが要求されている。

無線センサネットワークシステムを想定した時刻同期の仕組みとして、RBS (Reference Broadcast Synchronization) が提案されている。

d) センサ端末の位置測定

センサ端末の位置情報は、物理現象が感知された位置を特定するだけでなく、経路制御やデータ集約などのプロトコル処理を効率化し、センシング領域や位置に依存したサービスを提供するなど利用価値が高い。

無線センサネットワークシステムを構成する各センサ端末の位置情報を提供する手段として GPS (Global Positioning System) の利用が挙げられる。しかしながら、コストや電源事情の問題から、すべてのセンサ端末に GPS 受信モジュールを搭載することは現実的ではない。GPS の利用可能な場所は主として屋外に限られるとともに、ビルの谷間など電波伝搬環境が悪い場所では常に高精度の測位結果が得られるとは限らない。加えて、GPS 単独測位では測位精度が 10m 程度、搬送波位相情報を利用した RTK (Real Time Kinematic) 測位で数十 cm 程度の精度であり、この測位精度が利用目的に対して十分であるとは言い切れない。このため、各センサ端末にどのようにして位置情報を与えるかといった問題は重要な技術課題になっている。

センサネットワークにおける位置測定の手法は、主としてレンジベース (Range-based) の手法とレンジフリー (Range-free) の手法の 2 種類に分類される。

レンジベース

各センサ端末間の距離レンジを測定し、距離に基づいてデバイスの位置を決定する手法である。距離測定に用いる信号 (電波、音波) の時間的なパラメータを利用する TOA (Time of Arrival) や TDOA (Time Difference of Arrival) の手法と、信号の受信強度に基づく手法がある。一般的には、距離測定に用いる信号の受信強度は周辺環境により大きく変動するため、時間を利用す

る手法の方が高精度に距離を測定できると言われている。センサ端末間の距離からある端末の位置を決定する手法は、GPSの測位原理と同一の原理に基づいている。

レンジフリー

あらかじめ位置情報が既知である代表のセンサ端末（ランドマーク）を仮定する。各センサ端末は複数のランドマークとの位置関係やホップ数などから距離を計算し、三角測量や多角測量で自らの位置を測定する方法である。

3.2 無線センサネットワーク技術の研究・開発動向

3.2.1 センサ端末の開発状況

現在開発が進められている代表的なセンサ端末について、開発目的と機能の特徴を表-3.2に整理する。以下、各センサ端末の利用目的や開発状況を取りまとめる。

MOTE（開発元：UC Berkeley）

U.C.Berkeleyで行われた無線センサネットワーク技術の研究プロジェクトである「SMART DUST」の成果を実用化した無線センサネットワークシステム用の汎用デバイスである。MOTE/MICAは、メイン基板とセンサ基板から構成されており、メイン基板は、プロセッサ、無線通信機能、電源を搭載している。センサ基板は、音、光、温度、加速度、磁気のセンサとブザーを搭載している。無線センサネットワークシステムの端末向け動作環境であるTinyOS上で動作し、プログラムはNesC言語で記述されている。アプリケーション用のライブラリやツールが用意されており、無線通信環境を常時自動的に察知して自律的にネットワークを構成するようなアドホック無線通信機能を持っているため、端末を適当に配置するだけで自動的に無線通信ネットワークを構築することが可能である。

μAMPS（開発元：MIT）

MITで行われている「μAMPSプロジェクト」の最大の目的は、個々の端末とネットワーク全体におけるエネルギーを効率的に利用して稼働時間を最大限に長くすること、および、制御の難しい環境条件の中でも、ネットワークを構築する知能（条件下に合わせて柔軟に再構築や自律配置する事）を持つことである。開発されている端末には、μAMPS-1、μAMPS-2、μAMPS-2の3タイプがあり、省電力設計で自律的に通信ネットワークを形成するセンサ端末である。

表 3.2 現在開発が進められている代表的なセンサ端末

国	名称	特長	開発元	通信方式	RF 周波数	マイクロプロセッサ	変調方式	A/D 変換	RF 伝送速度	寸法	消費電力 (電流)
米国	MOTE	バッテリーの必要無しで省電力設計, 自立的に無線通信ネットワークの構築が可能	UC Berkeley	無線	868,916, 433,315MHz	Atmega128	FSK	10bit	38.4kbps	25mm 直径	40mA
米国	μ AMP	μ AMPS-1, μ AMPS-2, μ AMPS-2 の 3 タイプがあり、省電力設計, 自立的に無線通信ネットワークの構築が可能	MIT	無線	2.45GHz	StrongARM1100	-	-	1Mbps	55mm × 55mm	330mW-1W
米国	MK - 2	916MHz 帯の無線通信ネットワークを構築	UCLA	無線	916MHz	Atmega103L	ASK / OOK	10bit	2.4-115kbps	-	83mW
米国	WINS	誤差数十 cm 程度、低コスト、屋内外問わず、インフラ不要な無線通信ネットワークの構築が可能	RSC	無線	900MHz	StrongARM1100	FSK	-	100kbps	57mm × 57mm	300mA
米国	OMNI MARKER	設置する用途 (水道管やガス管など) に合わせて、周波数帯を変えて色分けされている。直径 1.5m の範囲で検知可能	Tempo	無線	169.8,145.7,121.6,101.4,83,77,66.35KHz	-	-	-	-	114mm 直径	-
米国	IP-Link1000	ZigBee を採用した超省電力無線モジュールを使用	Helicomm	無線	902-928MHz,915MHz	-	FSK	10bit	-	30 × 22 × 9mm	27mA-32mA
米国	i-Bean	20m 以上離れたゲートウェイに通信可能, 端末の省電力設計, 周波数帯は、916MHz と、2.4GHz の 2 つの帯域	Millennial Net	無線	916MHz,2.4GHz	-	-	8bit	250kbps	25 × 15mm	8mA
日本	Ni3	センシング機能, アナログ・デジタル信号処理機能, 双方向無線通信機能を一体に実装したセンサ端末の開発	早稲田大学	無線	2.4GHz,303MHz	PIC16LF877A(プログラマブル)	ASK / OOK	10bit	19.2kbps	24mm × 34mm	30-65mA
日本	省電力無線センサ端末	小型・軽量設計の無線センサ端末は、太陽電池で動作, 電力メンテナンスフリーで、どこにでも設置可能	NEC	無線	429MHz	-	-	-	-	100mm × 65mm × 20mm	-
日本	低消費電力無線センサ端末	通信頻度を抑えたリタイ制御技術の開発, 通信の低消費電力化の実現, 縦 4cm × 幅 3cm の小型化設計, 端末自身でデータ処理や認証処理が可能	三菱電機	無線	429MHz	-	-	16bit	-	40mm × 30mm × 30mm	ボタン電池で 1 年以上
日本	U-Cube(U ³)	市販の部品やソフトウェアを用いてできるだけ簡単に無線センサネットワークシステムのテストベッドを構築できることを目標に、ハードウェア/ソフトウェアのデザインを行っている	東京大学	無線	315MHz	Pic18F452	ASK	-	100kbps	50mm × 50mm × 50mm	ボタン電池で 3 年以上

MK-2 (開発元: UCLA)

「AHLoS (The Ad-Hoc Localization System)」プロジェクトの中で、GPS等を使わずに出来るだけセンサ端末間の位置を推定する研究開発を行っている。端末間の位置(距離)を推定するための手段として、近接センサを用いて、無線信号の強さで推定する方法と電波と超音波を伝送してその到達時間の差から距離を推定する方法を研究している。916MHz帯の周波数帯を用いた無線センサネットワークシステムを構築する。

WINS (開発元: RSC)

RSC (Rockwell Scientific Company LLC)により開発されたWINSは小型・軽量設計となっており、低コストで、屋内外問わず、インフラ不要な無線センサネットワークシステムの構築が可能である。また、研究として、誤差数十cm程度、低コスト、屋内外問わず位置特定機構を提案している。少数の正確に位置が特定されたセンサ(ビーコン)を利用して、センサ全体に対して、2段階の位置特定プロセス、Ranging及びEstimationによりセンサの位置測定を行う。Rangingは隣接センサ端末との距離を測定し、EstimationはRangingにより得たデータと隣接端末中のビーコンの位置情報から自身の位置を測定する。ビーコンではないが、位置特定が終了した端末はビーコンとして他の端末の位置特定プロセスをサポートする。これまでの流れをネットワーク内の全センサの位置を特定するまで繰り返す手法である。

OMNI MARKER (開発元: Tempo)

OMNI MARKER(以下、マーカー)を地下に埋設して位置を特定することが可能である。マーカーは、周波数毎に色分けされており、用途(送電線、水道管、土管、ケーブル)毎に使い分けるようになっている。直径約1.5mの領域を無線周波数により、容易に位置を把握することができる。あらゆる地形で信頼性が実証されており、端末を埋める際の特別なレベル設定を行う必要はない。また、長い年月が経過しても劣化がなく有害化学物質も含まず耐久性が高い。また、軽量であるため、保管するときのコストが少なくすむ。規格が統一された周波数を用いているため、全てのマーカーは共存して使用することができる。

IP-Link1000 (開発元: Helicomm)

Helicommは超省電力無線センサ端末を開発している。超省電力の短距離無線通信の世界規格で仕様が定められているZigBeeを採用することにより、省電力、低コストかつ安全性と信頼性が高い大規模な無線パーソナルエリアネットワークが構築可能となっている。利用する周波数帯は、2.4GHz帯または915MHz帯である。

i-Bean (開発元 : Millennium Net)

Millennium Net が開発する i-Bean Endpoint (端末) は、アナログインターフェースとデジタルインターフェースおよびワイヤレス通信リンクを備えた超小型マイクロコンピュータの 3 つから構成されている。電源を入れると同時に、無線通信範囲内にある他の Millennium Net デバイスを自動的に検知して接続し、自立的に無線通信ネットワークを構築する。端末の内蔵アンテナは、20m 以上離れているゲートウェイに通信することが可能である。また、端末の電力消費量は非常に少ない。周波数帯は、916MHz と、2.4GHz の 2 つの帯域が用意されている。

Ni3 (開発元 : 早稲田大学)

早稲田大学大学院情報生産システム研究科は、NPO(非営利組織) の WIN(ウェアラブル環境情報ネット推進機構)、情報通信ベンチャー企業のアーズ(横浜市) と、測定データを無線通信する超小型のモジュール「Ni3」を共同開発し、その試作品の販売を始めている。超小型モジュール「Ni3」の開発プロジェクトは、文部科学省の知的クラスター創成事業の一環とされている。Ni3 は、CPU などを実装したベースボードと RF(無線) ボードのプリント基板 2 枚を重ねたもので、アーキテクチャーをシンプルにすることなどによって寸法が 24mm × 24.5mm と超小型となっている。用途に応じてプログラムを組み込むこともでき、起動時間を短くするため、OS(基本ソフト) は使っていない。この結果、消費電力を大幅に下げることになり、10 分に 1 回測定して通信する使用モードの場合、ボタン型の小型リチウムイオン 2 次電池 (CR2032) 1 個で約 3 年の耐用年数がある。

省電力無線センサ端末 (開発元 : NEC)

NEC が提案する「アドホック・センサネットワーク」を用いた環境モニタリングシステムは、独自に開発した超省電力技術とアドホック・マルチホップ通信技術を搭載している。手のひらサイズにまで小さくした無線センサ端末を、数百 m 間隔にメッシュ状に多数配置する構成で運用可能である。使用するセンサ端末は、太陽電池を搭載しているため、電力に関するメンテナンスの必要がなく悪天候の場合も動作可能である。さらに、小型、軽量設計となっており、人が立ち入れない場所からでもデータの収集が可能である。最大の特徴は、センサ端末を複数台設置すれば、その場で端末同士がネットワークを構築し自律的に通信を行うことが可能である。

低消費電力無線センサ端末 (開発元 : 三菱電機)

三菱電機 (株) では、アドホックネットワーク機能を持った無線センサネットワークプロトコルの研究試作品を完成させ、低消費電力型のセンサ端末の

技術開発を行っている。具体的には、通信頻度を抑えたリトライ制御技術を開発し、通信の低消費電力化を実現し、縦 4cm×幅 3cm と、429MHz 帯の特定小電力無線の通信機では国内トップクラスの小型化を達成し、端末自身でデータ処理や認証処理が可能なインテリジェンスを持たせている。

U-Cube「U3」(開発元：東京大学)

東京大学は無線センサネットワークシステムのアプリケーションの効率性を目的に、開発用モジュール U3 (UCube) を開発した。U3 は既存の開発用モジュールである MOTE (開発元：UC Berkeley) との互換性を意識しつつ、市販の部品やソフトウェアを用いてできるだけ簡単にセンサネットワークのテストベッドを構築できることを目標に、ハードウェアとソフトウェアのデザインを行っている。1 辺が 5cm の立方体に電源、CPU、無線通信、センサの 4 枚のボードを搭載し、各ボードはバスコネクタで接続されている。センサボードには多様なセンサ接続のための拡張バスが提供されて、アプリケーションに応じた機能の拡張が可能になっている。U-Cube の動作はアプリケーション開発用の API を用いて C 言語で記述している。

3.2.2 無線センサネットワーク技術の研究動向

無線センサネットワーク技術は近年米国を中心に急速に研究が盛んになりつつある。初期の研究はマルチキャストデータ配信の延長にあったためルーティング技術の開発が中心であったが、最近では、センサ、ネットワークの各々の特化されたテーマに広がっている。

以下、無線センサネットワーク技術に関わる研究開発の最近の動向を整理する。研究事例の中には、データルーティング機能のないシングルホップの通信技術を適用した無線センサネットワーク技術もあるが、本項では同時に取りまとめることとした。なお便宜上、「センサ」、「センサ端末・OS」、「無線通信ネットワーク」、「応用システム」に分類して研究動向を整理した。

(1) センサ

センサ自体の開発は古くから実施されてきているが、微細加工技術を用いたセンサそのものの超小型化への取り組みが研究・開発の中心に成って来ている。

無線センサネットワーク技術のコンセプトの一つには、単独のセンサによる検知ではなく、複数のセンサデータを収集・解析することにより、精密なセンシングを行うことにある。このため、センサ単体の飛躍的な精度や機能の向上が無線センサネットワーク技術の視点から強く要求されてはいない。むしろ、センサ端末の寿命を伸ばす観点から、センサ自体の電気消費量の削減が一つのテーマとなっている。これは、より小さな消費電力で駆動できる能力だけでなく、頻繁な ON、OFF を繰り返し行っても瞬時に正確にセンシングできる能力

をも含む。

また、キャリブレーションの重要性を主張する研究者もいるものの、センサ端末を環境に設置した後ではキャリブレーションに限界があることから、生産時から精度の高いセンサを求める研究者もいる。

(2) センサ端末・OS

センサ端末・OS については、処理のリアルタイム化(高速化)や端末間における時刻同期、省電力化が研究開発のキーワードに成っている。3.2.1 項で整理したように、大学・民間企業において様々な研究開発が進められている。特に MOTE や CENS に代表されるプロジェクトがすでに成果をあげてきている。MOTE については、基本コンセプトの実現は完了しており、省電力性の向上やコンパクトな実装について改良を行っている段階にある。

また、近年、多く研究が行われている技術の一つに位置測定が挙げられる。任意に配置されたセンサ端末が自律的に位置を測定するための手法が多く提案されている。また無線センサネットワーク技術の重要な要件として同期のメカニズムが研究されている。複数センサからのデータを集約する際、センサ同士で時間同期が取れている必要がある。また、自律的に補正を行うキャリブレーションのメカニズムやセンサの最適配置に関する研究がある。無線通信ネットワーク上で自律的にアクティブかパッシブ状態になるかを決定するメカニズム、停止したセンサ端末を発見するメカニズムが提案されている。さらにセンサネットワークに特徴的な研究としては、各センサの電源管理や Exposure という概念を扱うものがある。

(3) 無線通信ネットワーク

ネットワークに関する研究はルーティングやデータ配送およびデータ集約・圧縮などがある。データ配送は、データを要求する利用者がクエリーを発行する際に効率の良い方法を扱っている。無線通信ネットワーク上を流れるデータの冗長性を排除するためにデータ集約・圧縮が効率をあげるために必要となる。また、各センサ端末が利用できる通信帯域を確保するためにレート制御に関する研究がある。ネットワーク上の通信の保護および秘匿性のためのセキュリティについても扱われている。

また、無線通信によりセンサ端末間を接続するための研究も多数進められている。アドホック通信の信頼性や効率性を向上させる研究やデータを蓄積・処理してから通信するなど通信の方式を工夫することで省電力化を図る研究が注目されている。

無線通信プロトコルの標準化を目指す IEEE802.15.4 (ZigBee) といった標準化活動への取り組みも積極的に行われている。

(4) 応用システム

現在のところ応用システムに関する研究事例はセンサ端末・OS や無線通信ネットワークに関する研究開発に比べて少ない状況である。マルチホップ通信技術を適用してルーティングを実施させるネットワークに重点をおいた無線センサネットワーク応用システムに関する研究事例は特に少ない傾向にある。提案レベルではあるが医療分野において人工網膜や健康状態のモニタリング、日用品にセンサ端末をつけた MediaCup、スマートタグを備えた人を利用した情報伝達システム、動物の生態観測への応用、ビルメンテナンスシステム等が挙げられる。

3.3 無線センサネットワーク技術の適用状況

無線センサネットワーク技術を適用することにより、人やモノの状況、その周辺環境等を認識し、利用者の状況に即した様々なサービスを提供することが可能となる。その応用分野は、医療・健康、防犯・セキュリティ、防災、農産物等の各種生産過程、環境問題など幅広く、社会の安全・安心、生活における快適性・ゆとりの向上、生産・業務の効率化等に広く資するものである。ここでは国内外における無線センサネットワーク技術を適用したアプリケーションの開発動向について取りまとめた。また、無線センサネットワークシステムにより管理する対象について「人」、「物」、「動物」、「環境」といった4つの区分を設けて、国内外における無線センサネットワークシステムの利用状況について整理した。

米国

高齢化社会の進展にともない、高齢者向けの見守り系サービスは有望であると多くの研究者が考えている。インテルでは、高齢者の位置や動き、日用品の利用の有無から生存確認や発作などの検知を行うシステムを構築、テストを実施している。

また、オフィスユースでは、人の有無から会議室の利用状況を検知するシステムなどが考えられているが、テスト段階に留まっている。

構造物規模でのアプリケーション開発としては施設の老朽化を監視するために、実在のゴールデンゲートブリッジを対象とした橋梁の振動調査が計画されている。

危機管理では、発電施設の異常振動検知や船舶のエンジン監視などで実験的に利用が行われている。船舶は省力化が進み監視員が少なくなったが、不慮のトラブルによる運行停止は大きな経済的損失となるため有望と考える研究者もいる。

環境観測としては、土壌汚染、水質汚染の調査、赤潮発生メカニズム解明のための調査（計画中）など、学術機関の調査用に利用されている。また、鳥の生態研究のための観測用に利用し、生態に関するデータを 24 時間収集し成果を上げている。これらは、無線センサネットワークシステムのフィールドテストを兼ねており、厳しい戸外環境での信頼性向上のためのノウハウの備蓄につながっている。

軍事面では、走行車両の検知、地雷の検知、兵士の生存確認などのアプリケーションが考えられている。また、パイプライン破壊を防ぐための監視網としての利用も考えられている。

欧州

欧州では、建物内の人や物の位置検出に関連するアプリケーションが提供されている。位置情報だけでなく、状況に応じて異なる情報を提供することや不正検出など、米国に比べ、より上位なアプリケーション開発の報告例が多い。

日本や米国に比べ、ビル規模や広域でのアプリケーション事例が少ない。自動車の渋滞検知などのアプリケーションは実稼働している。

日本

我が国では、比較的狭い範囲を対象とするアプリケーションとして、住宅向けに防犯や省エネ対策、在宅ヘルスケア等を目的としたサービスが実際に提供されている。

住宅よりも比較的規模の大きな施設を対象とするアプリケーションはビルオートメーションとして比較的早い段階からシステムの導入が行われた分野である。近年は、ビルオートメーションの高度化を目指した IPv6 化や人の位置情報などを活用した環境制御、ビルの老朽化や損傷など構造体そのものの管理を行うヘルスマonitoringなどの新しい取り組みがなされている。

既に導入後 20 数年を迎えた気象観測システム「アメダス」に代表される広域のセンサネットワークでもリアルタイム性の向上やメンテナンスの効率化、インターネットの活用などの取り組みがなされている。また、不測の事態に備えた地震防災システムや社会的な現象となっている花粉症対策向けの情報収集・提供サービスなどの研究も行われている。

表 3.3

国内外における無線センサネットワーク技術を利用したアプリケーション (1/3)

管理対象	国	事例	開発元	研究 / 実用	アプリケーション、研究の概要	センシングによって取得される情報	(センサとなる)センシング媒体	通信	
人	米国	IntelliBadge	Illinois 大学 NCSA	実用	無線タグを追跡対象に装着。所在や移動距離を測定し、トラッキングやロケーションウェアサービスを提供	位置情報(所有者),タグ ID	タグ (所有者)	アクティブ RFID	
	欧州	Metro Future Store Initiative	独, METRO Group	実用	店舗内に設置された Wi-Fi のアクセスポイントがショッピングカートに搭載された端末の位置を測定 Wi-Fi 店舗マーケティング	位置情報	専用端末 (PSA)	無線 LAN Wi-Fi	
		Ubisense	英, Ubisense 社	研究	UWB を用い、少数のアンテナにより多数のセンサを検知する低コストなシステムを構築 Ubitag Ubisensor	位置情報,タグ ID	タグ (Ubitag)	UWB	
		MediaCup	独, Karlsruhe 大学 TecO	実用	通信機能,センサ付きのコピーカップ。カップ底部に取り付けられたセンサにより、温度、使用状況を検知 MediaCup 身近な製品への利用	タグ ID	コピーカップ	赤外線	
		2WEAR	ギリシャコンピュータサイエンス研究所	研究	PDA、ウェアラブルデバイスが Bluetooth 等で通信し、ロケーションウェアサービスを提供	位置情報(所有者)	-	狭域通信 (Bluetooth 等)	
	日本	OS を使用しないハード構成が容易な無線センサ	早稲田大学 /NPO 法人 WIN/アース(株)	研究	センシング機能,アナログ・デジタル信号処理機能,双方向無線通信機能を一体に実装したセンサノード Ni3 を開発ウェアラブルセンサノード	取り付けるセンサ依存	専用端末 (Ni3)	無線 (2.4GHz, 303MHz)	
		在宅ヘルスケアシステム	松下電器	研究	電子健康モジュールで取得した血圧、体温状況をセンターで管理。遠隔からの健康診断に利用。	血圧、体温、体重、血糖など	電子健康モジュール	ADSL や FTTH など家庭用アクセス	
		携帯電話を核とした無線通信サービス提供	(株)NTTドコモ	実用	携帯電話を中心とした無線通信サービスを提供。様々な事業者との提携による無線センサネットワークサービスを行うマシンコミュニケーションによる遠隔監視。	-	-	無線	
		みまもりホットライン	象印マホービン(株)	実用	無線通信機能がついたホット「I-POT」を使用し、高齢者等の生活状況を遠隔地から把握	給湯回数,機器の ID	給湯ホット	DoPa	
		ココセコム	セコム	実用	GPS 機能付きの携帯電話、専用端末を保有し、迷子の際に管理センターが搜索。	位置情報、機器の ID	専用端末、携帯電話	GPS、CDMA	
	動物	世界各国	生態調査	大学研究機関	研究	希少動物や移動性の動物の行動把握など学術研究としての生態調査に利用。	存在情報、位置情報など	専用端末	アクティブ RFID、GPS 機器など
			ペット管理	-	実用	ペットの皮下に RFID を埋め込み、血統管理や迷子、盗難防止に利用。	ID	RFID	RFID

表 3.3

国内外における無線センサネットワーク技術を利用したアプリケーション (2/3)

管理対象	国	事例	開発元	研究 / 実用	アプリケーション、研究の概要	センシングによって取得される情報	(センサとなる)センシング媒体	通信
モノ	日本	社会環境計測システムの提供	横河電機㈱	実用	無線タグを追跡対象に装着し、所在や移動距離を測定。トラッキングやアプリケーションウェアサービスを提供。	位置情報, ID	専用端末	無線 (IPv6)
		HELPNET	日本緊急通報サービス	実用	店舗内に設置された Wi-Fi のアクセスポイントが、ショッピングカートに搭載された端末の位置を測定。「Wi-Fi 店舗マーケティング」	位置情報, ID	専用端末	GPS, その他
		TRACE	NEC	実用	UWB を用い、少数のアンテナにより多数のセンサを検知する低コストなシステムを構築 Ubitag Ubisensor	位置情報, ID	タグ (コンテナ + RFID)	GPS, RFID
		ココセコム	セコム	実用	専用車載端末を搭載し、万が一の盗難の際に、センサにて車両を捜索。	位置情報, ID	専用端末	GPS, CDMA
環境	米国	SmartDust	UC Berkeley	研究	超小型(数 mm 角)の基板の上にセンサを取り付け、環境情報を取得。省電力・無線ネットワークシステムの構築を実現。	温度・明度・加速度・振動・磁気	専用端末 (MOTE)	無線
		Sensimesh Software	Sensicast 社	研究	無線センサネットワークシステムを構築するソフトウェア及び通信ノードを構築するためのプラットフォームの提供	取り付けるセンサ依存	センサ端末 (Star, Mesh, BridgeNode)	902 ~ 928MHz アドホック
		Sensor Webs	NASA JPL	研究	センサ付き機器「pod」が相互通信し、独立したネットワーク [Sensor Web] を形成。	温度・湿度・照度等	専用端末 (pod)	無線
		μ AMPS	MIT(マサチューセッツ工科大学)	研究	-	-	専用端末 (μ AMP)	
		SmartMesh	Dust Networks	実用	ビルや工場の内部から中央のコンピュータシステムにセンサをリンクさせる低電力無線ネットワークシステム	取り付けるセンサ依存	専用端末 (M1010 MOTE)	無線
	欧州	ActiveBat	英, 旧 AT&T ケンブリッジ研究所	研究	超音波センサを利用した高精度 (3cm) な測位情報に基づく、コンテキストウェアなオフィス環境を実現。	位置情報	専用端末 (ActiveBat)	無線
	日本 (アジア)	プローブカー	ITS 協議会 ROTIS 社 など	研究	乗用車、タクシー、バスの走行状況から詳細地域毎の渋滞情報、気象情報を把握。	速度, ブレーキ動作, ワheel-動作 その他	自動車	DoPa, 無線 LAN
		ASIC	ア化 - スカイ	実用	汎用のセンサ端末を ASIC で実現し、省エネ環境管理を目的としたノココンピュータ, スタンドアロン機器の IP ネットワーク化の構築。	-	-	LAN
		ワイレスセンサネットワークのトータルソリューション	沖電気工業	研究	IEEE802.15.4 (ZigBee) を中心に、無線 LSI の開発, 実証実験プラットフォームの開発, 各種要素技術の開発。	温度, 湿度, 照度, 加速度, 人感, 紫外線, 音圧等	専用端末 (ZigBee TM 対応無線センサ端末)	無線 (ZigBee)
		ワイレスセンサネットワークシステム	三菱電機	研究	アドホックネットワーク機能を持った無線センサネットワークプロトコルの研究試作品を完成させ、技術評価。	赤外線, 磁気, 加速度	専用端末	無線 (特定省電力無線)

表 3.3

国内外における無線センサネットワーク技術を利用したアプリケーション (3/3)

管理対象	国	事例	開発元	研究 / 実用	アプリケーション、研究の概要	センシングによって取得される情報	(センサとなる)センシング媒体	通信
環境	日本	住宅向けアプリケーション	積水ハウス	研究	住宅分野における無線センサネットワーク利用アプリケーションの研究開発。「みどり坂 e-Town」	-	-	無線 (IPv6)
		ビルオートメーションの IPv6 化サービス	東芝	研究	ビルオートメーションの IPv6 化と安全な自律設定についての研究開発。	-	-	-
		構造物等の管理システム	慶應義塾大学	研究	光ファイバセンサ、損傷インデックスセンサ等を利用したインフラ管理システムの研究。	ビル管理情報、位置情報(人)など	各種センサ、カメラ	無線 (IPv6)
		ビル環境制御とビル構造のヘルスマニタリング	清水建設	研究	人の位置情報と小型無線センサ端末を利用し、最適な室内環境と省エネルギー制御、最適保守計画リアルタイム管理の実現。	地震動	専用端末(新 SI センサ)	無線 (IPv6)
		自動検針	東京ガス	実用	各住宅のガス検針器にネットワーク接続機器を付け、センターや遠隔地から自動検針。	液量、圧力	計量メータ	電話回線、特定省電力無線、PHS など
		花粉予報サービス	NTT	実用	センサで収集した花粉情報を携帯電話や PC 等に提供。	-	-	-
		新世代運行診断システム	いすゞ自動車(株)	実用	運行計画に応じた車両情報をリアルタイムに通信。	-	-	-
		セコム・ホームセキュリティ	セコム	実用	異常を感知するセンサによるサービスの提供。防犯、火災監視、ガス漏監視、非常通報、救急通報など	位置情報、機器の ID	専用端末、携帯電話	GPS, CD MA
		栽培支援システム	山武	実用	栽培環境と収穫量の関係を定量的に把握。	-	-	-
		アドホック・マルチホップ・センサネットワークシステム	NEC	研究	小型・軽量設計の無線センサ端末は、太陽電池で動作。電力メンテナンスフリーで、どこにでも設置可能 省電力無線センサ端末 省電力無線センサ端末、アドホック・マルチホップ通信技術	温度・湿度・日照など	専用端末(省電力無線センサ端末)	無線
EMIT ホームシステム	松下電工	実用	家庭内に設置し各センサで異常を検知、携帯電話によるモニタ、玄関施錠等を実現。	画像、熱、煙など	カメラ、煙センサなど	携帯電話など		

3.4 無線センサネットワーク技術適用上の課題と問題点

無線センサネットワーク技術を適用して行く際には、小型化、アドホック無線技術、省電力、センシングデータ処理、システムの開発・保守などについて、具体的には技術レベルの向上が必要である。ここでは、既往の研究・開発事例において今後の課題として整理されている内容や将来動向を整理した報告内容を参考にして、現状におけるセンサネットワーク技術の課題と問題点を取りまとめる。

(1) センサ端末を構成する各種機能の向上

無線センサネットワークにおいては多数のセンサが多目的に使われる。センサ端末の良し悪しが無線センサネットワークシステムそのもの信頼性に大きく影響する。したがって、新しい種類のセンサの開発が重要な課題となる。また、センサ個々のメンテナンスに労力をかけることができないことから、メンテナンスの負担を軽減する技術が必要となる。また、どこにでも置けるようにするため更なる小型化や省電力化が必要となる。

センサ

無線センサネットワークシステムにおいては各々のセンサ端末が多目的に使用されるため多種の成分をセンシング出来るよう高度化や高精度化が求められる。このため、無線センサネットワークシステムに適したセンサが求められ、NO_x濃度などの計測精度向上やテラヘルツ波の実用化など新しい種類の計測用センサの開発、人などを認識する認識用センサの認識率向上が必要となると同時に、計測用センサと認識用センサのデータを融合して使用することが必要となる。また、野外だけでなく地球観測で極地に置かれるなど、特異な場所に設置されることも考慮し、耐環境性が求められる。さらに、ユビキタス環境においてはセンサが多数存在するため、メンテナンスフリーでセンサが長持ちするように、計測値のずれを自動で補正するキャリブレーション技術や省電力化が必要となる。また、場所を選ばず多数のセンサを置くために小型化、相互干渉の防止、センサ同士の連携などが求められる。

プロセッサ

センサそのものが小型化、省電力化を必要とするのと同様に、センサに用いるプロセッサにも小型化、低電力化、電力制御の技術が必要となる。

電源

センサを置くだけで使えるようにするには電源を自前で持つセンサが必要となる。その際には前項でも触れたようにメンテナンスの負担を軽減するため、電源の寿命が使用期間に耐えうるだけのものではなくてはならない。そのためには効率の良い燃料電池、環境エネルギー（太陽光など）の利用が必要とな

る。また外部よりワイヤレス供給にて電源を確保することも考えられる。

無線通信

設定不要としてセンサを置くだけで使えるようにするためには、個々のセンサ端末が無線により自動でネットワークを構築することが必要である。そのため、無線方式の高度化や電波相互干渉回避の技術が必要となる。また、電源を効率良く使うため、通信タイミングを制御するなどした低電力化も必要とされる。

(2) ネットワーク制御技術の向上

センサ端末の制御（センサ端末の位置検出技術）

無線センサネットワークシステムにおいてはセンサ端末を置くだけでセンシングが行えることが必要となる。そこでは、センサ自身が自分の置かれている位置を正確に検出することで、何処の環境情報を送っているかを明確にする必要がある。さらに、多数のセンサを用いるため、それぞれのセンサが位置情報を連携して活用したり、センサ同士の時間を同期させたりすることで、センサの持つ情報精度を飛躍的に上げることが出来る。これらの実現とセンサを無駄なく配置する最適なセンサ端末の配置や多数のセンサを識別し大規模に管理することでセンサを置く場所を一つ一つ考える必要がなくなる。

ネットワーク

センサ端末の問題点としても述べたように、特別に装置を使って固定するといった作業が無く、センサ端末を置くだけで使えるようにするためには、個々のセンサ端末が無線により自動でネットワークを構築する必要がある。ただし、センサを適当に置いた場合、全てのセンサが基地局と無線で通信出来る距離にいるとは限らない、そこで、センサ同士が無線ネットワークを自動で構築しバケツリレーのように次々と情報を隣へ伝えてゆくアドホックのルーティング技術が必要となる。

(3) システム運用に関する課題

ミドルウェアの開発

無線センサネットワークシステムにおいては、センサ端末からの信号が常時発生するため、信号をフィルタリングして必要なセンサデータのみを活用できるようにする必要がある。この際にセンサ端末より上位の層での処理やアプリケーションとの統合を実現するミドルウェアが必要となる。

システム運用

無線センサネットワークシステムでは、多数のセンサの品質や寿命の不均一性や空間的に分散して配置されるなど保守・運用管理の困難性があるため、センサ端末に ID などを個別に割当て、遠隔故障診断や電源残量、ネットワ

ーク負荷等のモニタリングを実施できることが要求される。

(4) アプリケーション連携・統合

複数のセンサ端末から得られる信号を複合的に処理することで今までになかったような多様なアプリケーションが実現されることが期待されている。この実現のためには、種類の異なるセンサ端末間、さらには異なるアプリケーション間など、様々なセンサ端末の相互接続性、相互運用性の確保が求められる。無線センサネットワーク独自のプロトコルの標準化やオープンスタンダードなプラットフォームの提供が課題となる。

(5) セキュリティ・プライバシー

無線センサネットワークシステムでは、人やモノの状況、その周辺環境などをセンシングし、その多様かつ多量のデータが収集される。このようなデータの中には、映像やバイオメトリクスのように直接個人のプライバシーに関わる情報もあれば、体温や血圧等の微細なデータを組み合わせて健康状態が分かるように、統合・分析することによって意味のある情報となるものもあり、サービスの普及によって、個人のプライバシーに関わる情報がセンサ端末やネットワーク上でやり取りされることになる。また、センシングした（もしくはされた）データの所有者は誰か、そのデータの処理・加工・流通・削除の権利は誰がどの程度まで有しているのかなどについて考え方を整理する必要である。

無線センサネットワークシステムの普及にあたっては、実証実験等を通じて、どのようなデータを誰がどのように扱うかについての基本的な考え方を利用者を含む関係者間で十分に検討し、技術面、運用面での不安を払拭できるよう対策の確立に取り組む必要がある。また、利用者からの問い合わせや苦情に対する対応については、明確な責任体制を確立することが求められる。

(6) 対人間、対環境の安全性

無線センサネットワーク技術を適用したアプリケーションとしては、ウェアラブルコンピュータなどで人間をセンシングするものがある。また、センサ端末を環境に埋め込むことや散布することも想定でき、多量なセンサ端末を使う場合は紛失することも考えられる。このため、無線センサネットワーク技術が人体に与える影響や環境に与える影響を考慮し、安全性を確保することが求められる。

4 . 実験用システムによる初期検証

本章では、市販されている無線センサネットワークシステム（本研究開発では「MOTE/MICA」シリーズを利用する。「MOTE/MICA」シリーズの詳細は4.1節で述べる。）を利用してセンサ端末の稼働試験を実施し、「センシング機能」、「通信機能」、「ネットワーク構築機能」の現状を把握するとともに、その限界を明らかにする。そして、無線センサネットワーク技術の実利用を図る際の留意点を整理する。

4 . 1 実験用システムの概要

(1) 実験用システムの仕様

本研究開発で利用する「MOTE/MICA」シリーズは、U.C.Berkeley（米国）におけるセンサネットワークシステムの研究プロジェクト「SmartDust」の成果を基に、Crossbow Technology 社が研究開発用ハードウェアとして商品化したものである。「MOTE/MICA」シリーズの初期バージョンである「MOTE/MICA」は最も早く市販された無線センサネットワークシステムの一つであり、現在、無線通信機能の改良に伴い 2 段階のバージョンアップが図れている。「MOTE/MICA」の後継機として無線通信機能に改良が加えられたのが「MOTE/MICA2」である。無線周波数 315kHz の微弱無線を使用している。さらに、「MOTE/MICA2」のデータ転送量の増大と通信距離の向上を目的に改良が加えられたのが「MOTE/MICAz」である。無線周波数 2,400kHz の Zigbee を使用している。

「MOTE/MICA」シリーズはプロセッサ機能と無線通信機能、電源機能を搭載したボードと磁気、振動（加速度）、温度、光、音声を感知する各種のセンサ群が搭載されているセンサボードが一体となって稼働する構造と成っている。以下、本研究開発では、これら 2 つのボードが一体になった状態をセンサ端末と呼ぶこととする。

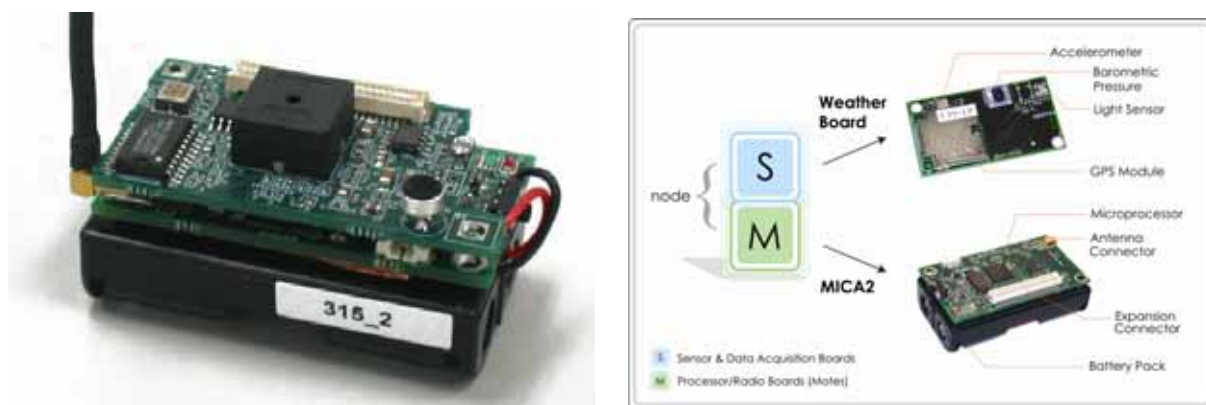


図-4.1 「MOTE/MICA2」の外観

「MOTE/MICA」シリーズは研究用のセンサネットワークシステムとして色合いが強いものであり、特定のアプリケーションにターゲットを絞ったデザインとはなっていない。無線センサネットワーク技術の実験を行うための必要最小限の機能だけを装備したものになっている。本研究では、この、「MOTE/MICA2」と「MOTE/MICAz」を用いてセンサ端末の稼動試験を実施することとした。本研究開発で利用した「MOTE/MICA2」の外観を図-4.1に示す。また、「MOTE/MICA2」と「MOTE/MICAz」のハードウェアの仕様を表-4.1に、搭載されている各種センサの仕様を表-4.2に整理する。

表-4.1 MOTE/MICA2,MICAzの仕様

		MICA2	MICAz
プロセッサ	CPU Speed	7.4MHz (省電力型)	
	メモリ (プログラム領域)	128KB (Flash)	
	メモリ (データ領域)	512KB (Flash)	
	AD Converter	10 bit	
無線	無線モジュール	Chipcon CC1000	Chipcon CC2420
	無線周波数	315MHz FSK、微弱無線	2400MHz Zigbee
	データレート	38.4Kbaud	250 Kbaud
電流消費	電流消費 (受信時)	15mA (3Vdcの場合)	40mA (3Vdcの場合)
	電流消費 (Sleep時)	<15 μ A (3Vdcの場合)	<30 μ A (3Vdcの場合)
外形寸法		55 × 32 × 25mm	64 × 35 × 27mm
ソフトウェア		TinyOS (言語: nes-C) オープンソース開発プラットフォーム	
外部電源		2.7 3.3V (DC): 単3乾電池2本相当	

表-4.2 MOTE センサ基盤に搭載されたセンサの仕様

種類	精度	分解能	名称
磁気	-2 ~ +2 (Gauss) 2軸	27 μ (Gauss)	Honeywell HMC/1002
振動 (加速度)	-2 ~ +2 (g) 2軸	312mV/g 入力電圧: 5V時	AnalogDevices ADXL202
温度	-40 ~ 125 ()	0.01 ()	Panasonic ERT-J1VR103J
光	観測波長帯 ~ 690nm	0.01 (lx)	Clairex CL94L
音声	観測周波数 100 ~ 10kHz	35 ~ 70 (dB)	Ario

(2) 実験用システムの特長

「MOTE/MICA」シリーズのセンサ端末はそれぞれがデータ中継機能を装備している。各センサ端末は電波環境(「MOTE/MICA2」の場合は無線周波数 315kHz 帯域、「MOTE/MICAz」の場合は無線周波数 2,400kHz 帯域)を常時、自動的に察知して、データの送受信先を決定している。データの伝達経路は各センサ端末が自立的に再構築を繰り返しながら最適な経路を選択している。このような伝達経路を自動的に再構築する技術、所謂、マルチホップ通信技術により無線ネットワークシステムを構築できる点が「MOTE/MICA」シリーズの特徴の一つである。

「MOTE/MICA2」、「MOTE/MICAz」の外形寸法は大よそ名刺サイズであり、単三乾電池 2 本を電源として稼働する。消費電力は端末数 20 個、3 分毎にセンサデータを送信するケースで約 1.2 年間稼働するといった調査結果が報告されている(Crossbow Technology 社調査)。センシングのサンプリング間隔やデータ送信を遅らせることにより、更に長期間に渡りセンサ端末を稼働させることも可能であるが、乾電池式であるがため定期的な交換などのメンテナンスが必要になる。また、センサ端末を使い捨てにすることに対しても環境配慮の点から問題があり、使用済みのセンサ端末の処理方法が実利用を進める際に課題の一つとなる。

センサ端末はフリーソフトウェアである TinyOS で稼働する。TinyOS は低消費電力下での効率的なシステム制御の実現を目的、無線センサネットワークシステム用に開発された OS である。Tiny OS により、センシングのサンプリング間隔やデータ伝達経路の選定、電源管理(Sleep モード、Active モードの切り替え)が制御されることになる。

無線センサネットワークシステムでは、センサ端末のからのセンサデータをゲートウェイを介して既存のネットワーク(インターネットなど)と接続することができる(シリアルポートなどを介してゲートウェイとパソコンを接続することもできる)。このサーバやパソコンを基地局として無線センサネットワークシステム上に存在する全てのセンサ端末で観測されたセンサデータを一元的に収集することができる。また、受信ばかりでなく、基地局から全てのセンサ端末の OS へ端末制御の変更指示を出すことも可能であり、センサのサンプリング間隔の制御、センサの稼働・停止制御など、遠隔からの集中管理が可能となる特徴がある。

4.2 実験用システムによる初期検討

活用イメージの検討に当たり、本研究開発で採用した無線センサネットワークシステム（「MOTE/MICA2」、「MOTE/MICAz」）が装備する機能を明確にするために、屋外における無線センサネットワークシステムの基本的な実験を行った。具体的な実験項目は以下の3点である。

ネットワーク構築機能

センシング機能

通信機能（センサ端末間の通信最大距離）

（1）実験項目1：ネットワーク構築機能

a) 実験内容

現状の無線センサネットワーク技術では、センサ端末におけるデータ処理能力の限界から、1つのセンサ端末に接続できる端末数と各端末におけるセンシングのサンプリング間隔（1秒間にセンシングする回数（Hz））に制約がある。これは、ネットワークの終端に近づくに連れて、多くのセンサ端末からのセンシングデータが僅かなセンサ端末に集中するために起こる現象である。ネットワーク終端付近のセンサ端末では、データ処理能力の限界を超えてしまい、パケット送信エラー（データ欠損）を頻発するようになる。

多数のセンサ端末により無線センサネットワークシステムを構築したい場合には、各端末におけるサンプリング間隔を長くする必要がある。また、サンプリング間隔を短くして細やかな変動までセンシングしたい場合には、ネットワークに接続する端末数を減らす必要があると言える。

本実験では、「MOTE/MICA2」におけるネットワーク構築機能の限界を調査することを目的に以下の2点について実験を行った。

センサ端末を6個準備し、各センサ端末におけるサンプリング周期を段階的に上げてゲートウェイ（終端装置）においてパケット送信エラー（データ欠損）が発生しない最大のサンプリング周期を把握する。

無線センサネットワークシステムを構築する最低端末数（2個）で上記の同様の方法で最大のサンプリング周期を把握する。

なお、本実験では、ゲートウェイと各センサ端末を1m間隔で一直線上に配置した。また、各センサ端末の電源は新品の単三電池（約3.0V）を利用した。

b) 実験結果

、の実験の結果、終端装置においてパケット送信エラー（データ欠損）が無く、安定的に各センサ端末においてセンサデータを収集するためには、表-4.3で示すような限界があることが分かった。

表-4.3 「MOTE/MICA2」を用いたネットワーク構築機能の試験結果
安定したデータ収集が可能なセンサ端末数と計測頻度の関係

	センサ端末数 (個)	計測頻度 (Hz)
ケース	6	2
ケース	2	6

(2) 実験項目2：センシング機能

a) 実験内容

「MOTE/MICA」シリーズに搭載されているセンサの理論上の精度は表-4.2に示す通りであるが、無線通信やセンサ端末のA/D(アナログ/デジタル)変換機能により精度の低下が発生するものと想定できる。

そこで、本実験では屋外における移動体(車両：全長4,800mm、全幅1,755mm)を検出ターゲットとして、センシング機能について試験した。実験内容は走行路上にセンサ端末を1つ設置し、その真上を移動体が速度10km/h、40km/h、60km/h、100km/hで通過した場合における磁気センサと光度センサの観測精度を計測するものである。

センサ端末は図-4.2で示すように路面から5cm下に設置した。磁気センサの軸の向きは車両進行方向の磁界がy軸(B_y)、車両幅員方向の磁界がx軸(B_x)となるように設定した。センシングのサンプリング間隔は「実験項目1」の結果を考慮して6Hzとした。また、各センサ端末の電源は新品の単三電池(約3.0V)を利用した。

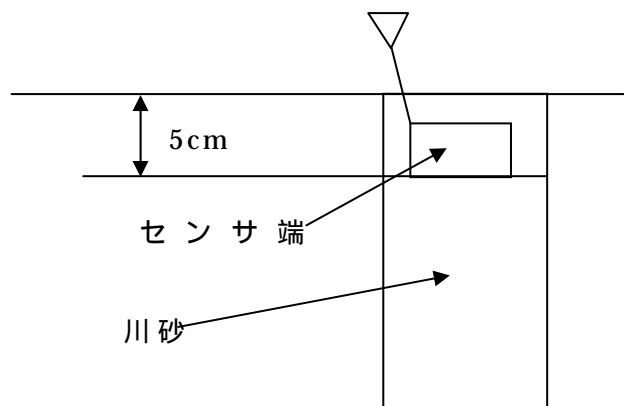


図-4.2 センサ端末の設置状況

b) 実験結果

図-4.3 ~ 4.6 に移動体の速度別におけるセンサデータの時間変化のグラフを示す。なお、各センサデータは正規化してグラフに整理している。

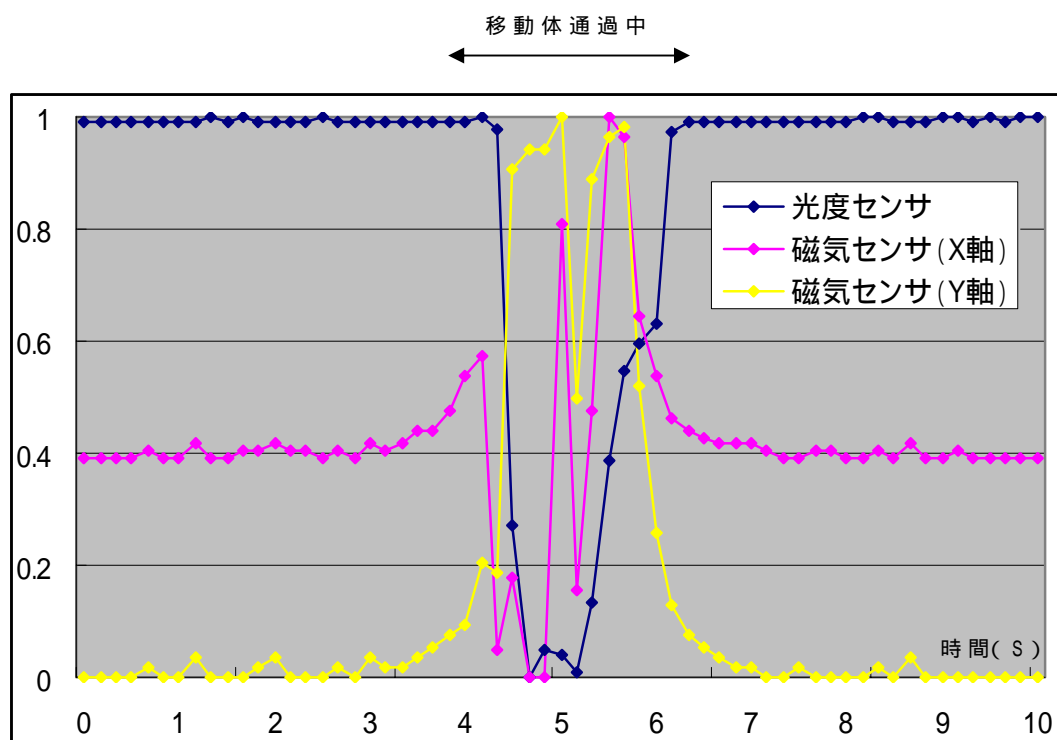


図-4.3 移動体の通過に伴うセンサデータの時系列変化 (移動体速度 10km/h)

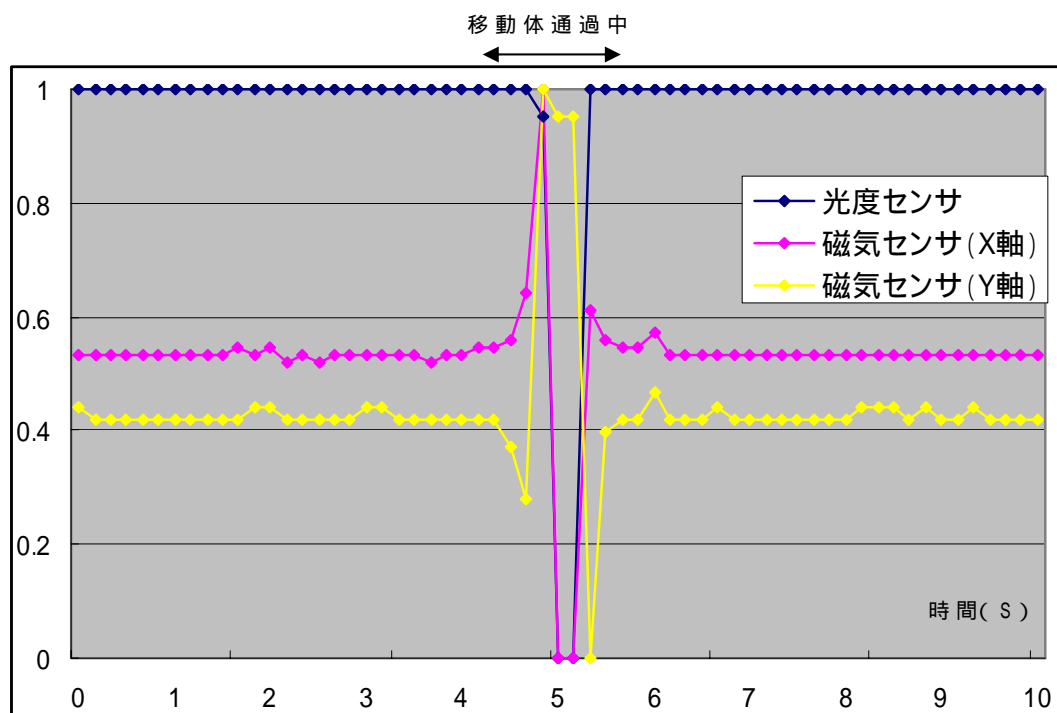


図-4.4 移動体の通過に伴うセンサデータの時系列変化 (移動体速度 40km/h)

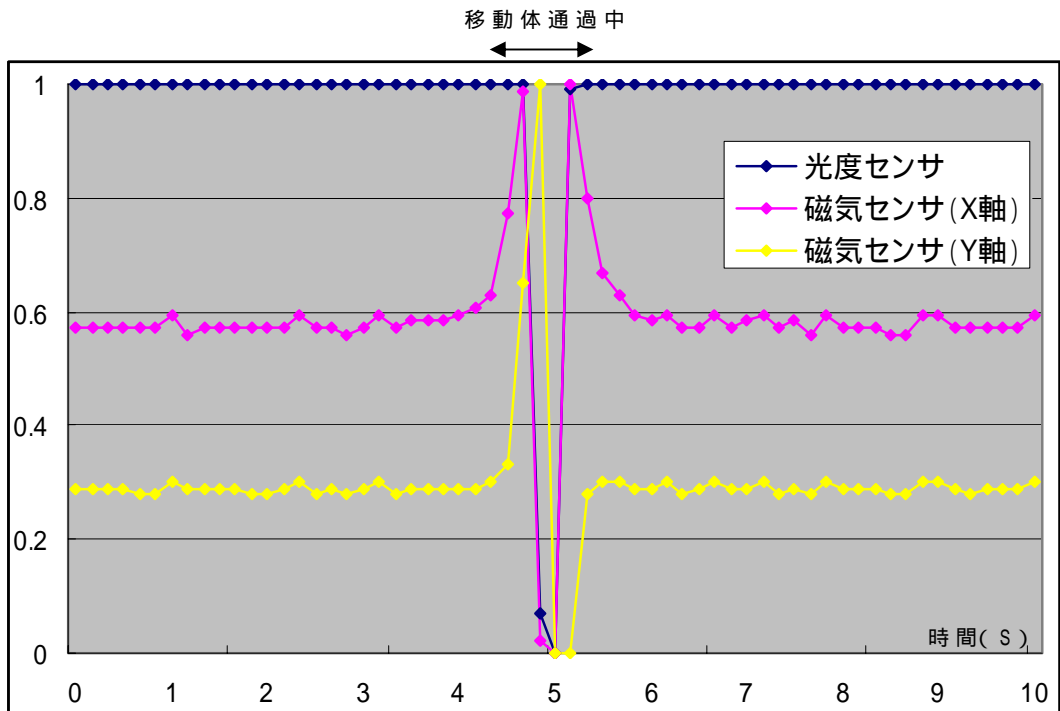


図-4.5 移動体の通過に伴うセンサデータの時系列変化 (移動体速度 60km/h)

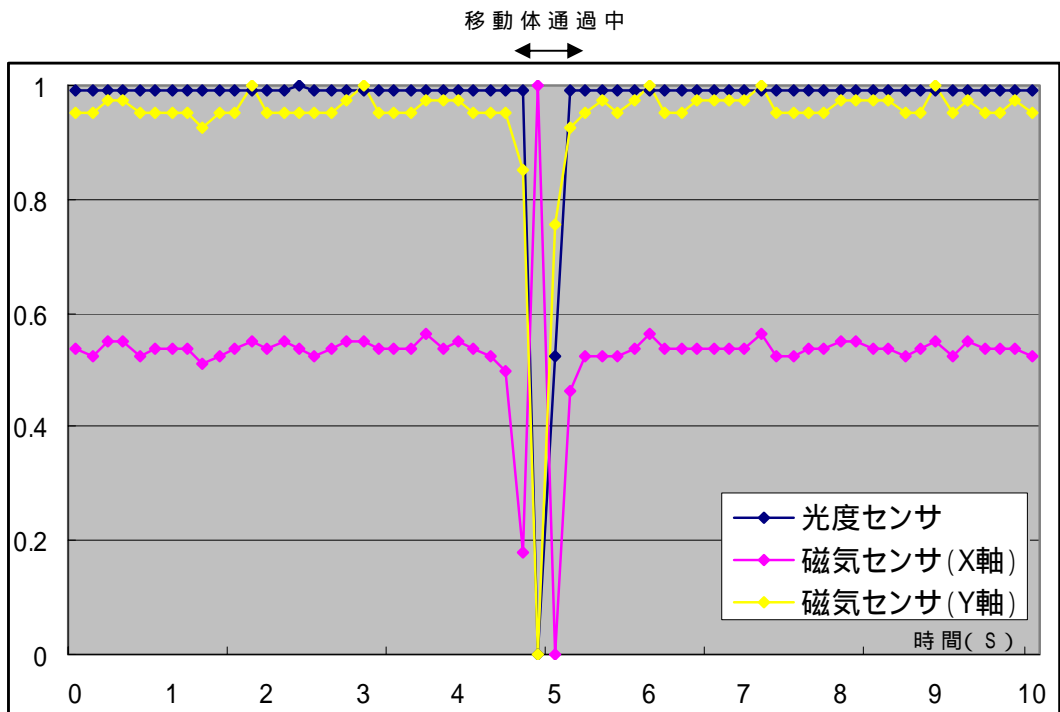


図-4.6 移動体の通過に伴うセンサデータの時系列変化 (移動体速度 100km/h)

磁気（X、Y軸）、光度ともに、端末の真上を通過する移動体をセンサデータの時系列変化から確認することができた。センサ端末のサンプリング周期（6Hz）の場合、移動体速度 10km/h では移動体が約 460mm 進む毎に計測をしていることになる。同様に移動体速度 100km/h では移動体が約 4,600mm 進む毎に計測されることになり全長 4,800mm の移動体であれば通過したか否かは「MOTE/MICA2」でも検知できるものと言える。

（3）実験項目3：通信機能（センサ端末間の通信最大距離）

a）実験内容

センサ端末間における通信距離を長く確保できれば、無駄にセンサ端末を設置する必要がなくなるとともに、一つの端末が故障した場合においても通信経路の選択肢を確保しやすいといったネットワークの安定性に繋がると言える。

本実験では、「MOTE/MICA2」、「MOTE/MICAz」におけるセンサ端末間における通信距離の限界を調査することを目的に以下の2点について実験を行った。

センサ端末を埋設した状態(図-4.2)における、最大通信距離を調査する。

センサ端末を高さ1m程度に浮かした状態における、最大通信距離を調査する。

b）実験結果

埋設した「MOTE/MICA2」のセンサ端末間の最大通信距離は、約9.3mであった。なお、ゲートウェイとセンサ端末間の距離が約8.3m程度まではシングルホップによりデータ通信が行われ、それ以上の距離になった場合は、走行路上のセンサ端末を経由したマルチホップで通信が行われた。

走行路上にセンサ端末を約1m浮かした場合の通信距離は「MOTE/MICA2」の場合32.8mであった。それに対し、「MOTE/MICAz」の場合は59.8mであった。「MOTE/MICAz」は、「MOTE/MICA2」に比べて、およそ1.8倍程度通信距離が伸びることがわかった。

表-4.4 通信距離の試験結果

実験回数 実験項目	第1回	第2回	第3回	第4回	第5回
埋設したセンサ端末間の最大通信距離(m) (MOTE/MICA2)	9m	10m	9m	-	-
高さ1mに浮かした状態での最大通信距離(m) (MOTE/MICA2)	41.6m	30.6m	30.2m	29.1m	32.4m
高さ1mに浮かした状態での最大通信距離(m) (MOTE/MICAz)	77m	48m	61.5m	66m	46.5m

4.3 無線センサネットワーク技術の実利用を図る際の留意事項の整理

「MOTE/MICA」シリーズを用いた初期検証の結果をおよび無線センサネットワーク技術に関する動向調査の結果を考慮して、無線センサネットワーク技術の実利用を図る際の留意事項を取りまとめる。なお、本節で取りまとめた内容は、第5章における無線センサネットワーク技術の活用イメージを検討する際の基礎的な情報になるとともに、第6章で「斜面挙動監視・落石検知システム」のシステム仕様を検討する際の技術的な課題の抽出において利用する。

今日、建設分野では複数のセンサを利用したデータ収集・管理システムが様々な場面で利用されてきている。例えばダムや橋梁といった大規模構造物の挙動監視システムや湖沼における水質モニタリング、また、産業廃棄物のトレーサビリティの管理など、主にリアルタイムでデータを観測・収集して、住民の安全確保、災害の早期発見および2次災害低減のための迅速な処置への判断支援として広く利用されてきている。これはでは、振動や温度、水質指標(SS、pH等)の定点観測はセンサを設置した1点を観測している場合が殆どである。1個のセンサが検知できるデータは設置場所周辺に限られることから、広い範囲を監視・管理するために、複数のセンサを設置する必要がある。

複数箇所にセンサを設置して、観測したデータをネットワークを介して遠隔地で収集する場合、配線の敷設が必要となり、システムの設置および維持管理に関わるコストと労力は多大なものになる。

一方で、無線センサネットワーク技術はその名に示す通り、無線によるネットワークの構築が可能である。また、以下のような特徴がある。

複数のセンサ端末が互いに連携して自立的なネットワークを構成できる。

センサで計測されたデータは端末自体に装備された演算処理機能(CPU)によって自動的に行われる。

センサ端末の設置時もしくはメンテナンス時にセンシング機能や電源管理機能に制限(稼働限界)を定義することによって端末自体が外部からの命令無く、自動的に状況を判断して自身の制御を行うことができる(例えば、センサ端末の動作電源が、ある一定の値を下回った場合は、自動的にセンサの計測回数を減らして、消費電力を低減させることなど)。

屋外の広範囲を対象に複数のセンサによるデータ収集システムを構築しようとする場合において、センサ端末同士を無線によって自立的に接続し、大規模なネットワークを構築できる点は魅力的な特徴であると言える。また、複数のセンサ端末の中には、不慮の事故で稼働しなくなるものや電源の減少傾向が速いものもあるため、逐次、データの伝達経路を再構築できる技術(ルーティン

グ技術)がデータ収集システムの信頼性、頑健性の向上に役立つものと言える。

しかしながら、現状の無線センサネットワーク技術は万能ではなく、むしろ解決しなければならない技術的課題が多々有るのが現状である。このため、無線センサネットワーク技術の実利用を図る際には、現状における無線センサネットワークの限界を想定した対応が不可欠となる。

本節では、上述した無線センサネットワーク独自の特徴を情報収集システムとして利用していく際の留意事項と課題を「センサ観測技術」、「無線通信技術」、「センサ端末の位置測定技術」、「センサ端末の最適配置決定技術」、「時間同期技術」、「電源技術」の6点から整理した。

(1) センサ観測技術

アナログ式センサの場合、センサへの入力電圧はセンサの観測精度に大きく影響する。このため、センサに安定した電源を供給するための仕組みが必要である。

アナログ式センサによる計測時には、各端末で A/D (アナログ/デジタル) 変換が行われる。現在、建設現場で一般的に使用されているデータロガーの A/D 変換の bit 幅は 13bit ~ 24bit であることに對し、無線センサネットワークの端末における A/D 変換能力は 8bit ~ 10bit 程度である。このため、振動センサによって微小振動を観測しようとする場合などにおいて、bit 幅が粗い故にデータロガーに比べてデータ欠損が発生する可能性が高い。

複数のセンサ端末を利用する場合には、各端末におけるサンプリング周期の低下が余儀なくされる点を考慮しておく必要がある(4.2(1)ネットワーク構築機能の試験結果より)。

(2) 無線通信技術

我が国では、使用可能な周波数帯や送信出力に制限がある。このため、センサ端末の設置位置や使用する環境により通信距離が大きく異なる。屋外で無線センサネットワークを用いる際には、最適な周波数帯の選定と、設置位置や設置環境からセンサ端末の設置間隔を決定する必要がある。

無線通信に使用する周波数帯により、使用するアンテナの長さや通信利得が異なる。アンテナの長さも含めた設置位置の検討が必要となる。

現在、無線センサネットワーク技術で用いられている通信プロトコルの主流は、データ通信の際の誤り検出や訂正などの取り決めがない通信手順である。このことは、データ欠損の発生を検知できないことや端末間の同期がとれない原因となる。

現状では、無線センサネットワークシステムが確実に機能しはじめるまでに要する時間(複数のセンサ端末のデータがゲートウェイ装置から受信できる

までの時間)が数秒～数十秒必要としている。このため、固定対固定、もしくは固定対歩く程度の早さの移動物体との間でしか安定した通信ができない。(10～20km/hといった速度を有した移動中については、センサ端末のデータを読み取ることは、現段階では難しい。)

省電力無線を用いたセンサ端末では、大よそ9m程度の通信距離が確保できる。また、地上からセンサ端末を放すことによって通信距離が3倍以上伸びる結果が得られている。センサ端末間の通信距離を確保するために、支柱や杭などを利用するなどの工夫が必要となる(4.2(3)通信機能の試験結果より)。

(3) センサ端末の位置測定技術

現在、センサ端末の位置を特定するための研究が多数行われている。しかし、現時点では、センサ端末の位置関係を正しく認識することはできない。現状では、センサ端末の位置測定方法として、音波による2点間の距離を測定する方法やGPSによる位置測位方法が研究・開発されている。しかしながら、正確な位置を計測するためには多大な消費電力を伴うことやセンサ端末の開発費用が高くなることから、位置精度および設置場所に制約がある。斜面変状検知などにおいては、センサ端末の正確な位置情報が重要となる。センサ端末の位置関係が分かることにより、その後の変状の予測をたてる際に有効となるため、センサ端末の設置時に位置を正確に測位しておくなどの対応が必要になる。

(4) 最適配置決定技術

無線センサネットワークシステムでは、センサ端末の配置位置のちがいにより、データ欠損率や消費電力、ネットワークの混雑度(輻輳の発生度)が異なる。これは、センサ端末の設置環境により、マルチパスの発生頻度やセンサ端末のスリープ時間(省電力モード)が変化することなどが原因とある。センサ端末の配置によっては、ゲートウェイの近くに設置されたセンサ端末に複数のセンサ端末で観測されたセンサデータが集中するため負担が高くなる。このため、ネットワーク全体におけるデータ欠損率が高くなる。必要に応じて、センサを搭載しない端末(センサデータの中継機能のみを担う端末)を設置するといった工夫が必要となる。

無線センサネットワークシステムの終端装置となるゲートウェイでは、ネットワークのデータ処理能力に限界があるため、データ受信可能なセンサ端末の数が限定される。このため、多くのセンサ端末を設置したい場合には、ゲートウェイ装置を複数設ける(例:ハイブリットスター型)といった形態にすることが必要である。

(5) 時間同期技術

現状の無線センサネットワーク技術では、端末自身の処理能力が低いことやデータ通信の際の誤り検出や訂正などの取り決めがない通信手順（通信プロトコル）を用いているため、センサ端末間の時間同期を図る機能が備わっていないものが多い。

時間同期が実現されることにより、各センサ端末が同じタイミングで計測できるようになるため、面的な変化を推定する精度が向上できると言える。

(6) 電源技術

電源はセンサ端末における計測精度やデータ欠損、端末間の通信距離などに影響を及ぼす。このため、センサ端末の電源管理方法として定期的に電圧や残りの電力量（mah）などを計測できる機能が必要になる。

屋外で使用する場合、外気温の低下に伴い、センサ端末の電源電圧も低下する。このため、電圧の低下時を考慮し、あらかじめ、通常時の電圧を高く設定しておくなどの工夫が必要となる。

電源を効率的に利用するシステム制御方法が開発されているものの、バッテリー式の電源は有限であるため、ネットワークシステムの連続稼働において問題となる。また、回収が困難な環境に配置する場合には、鉛を用いた電源が環境に与える付加が大きい。現在では、太陽電池を用いたセンサ端末の開発も進められているが、常に太陽光が確保できる箇所での利用に限定されるなど、バッテリー式とは異なる問題がある。

充電時間の短縮といった面からは、短時間で充電が可能なキャパシタの利用が注目されている。キャパシタの小型化が進むことにより、電源技術の選択肢がさらに広がるものと言える。

5 . 無線センサネットワークシステムの活用イメージ

5 . 1 検討対象とする分野

前述したように、無線センサネットワークシステムの実用化技術は多くの問題解決のために大きな期待がかけられている。具体的には、無線センサネットワーク技術を適用することにより、配線敷設に必要であった時間・コストの削減、作業の危険性が低減できるとともに、アドホックネットワークの形成による面的・遠隔なセンサモニターを実現が期待できる。また、ネットワークを通じた様々な情報との連携が期待できることから多様なアプリケーションの実現する可能性がある。

本研究開発では、第3章と第4章において調査した無線センサネットワーク技術の動向と現在試験モジュールとして利用可能な無線センサネットワークシステムの機能（本研究開発では「MCA/MOTE2」を対象に検討した。）を考慮して、建設分野を対象に無線センサネットワークシステムの具体的な活用方法を提案し、無線センサネットワーク技術を適用することの意義を整理する。検討対象システムとして選定した内容を表-5.1に整理する。

選定した5つの検討対象システム別に以下に列記する7つの項目について情報を取りまとめるとともに、現状の無線センサネットワーク技術を応用した場合でも実現可能な範囲と課題解決が必要になる範囲を区分してシステム要件を整理する。

検討システム別に既往の技術

無線センサネットワーク技術を適用することの目的・用途

実際に無線センサネットワーク技術を適用していく場合の処理手順

無線センサネットワーク技術を適用した場合の効果（利点）

無線センサネットワーク技術を適用する際の課題

活用イメージ

なお、本章で対象とした5つのシステムの中から、本年度の研究では、「斜面の挙動監視・落石検知システム」について、さらに詳細なシステム仕様について検討を行うこととした。それらの内容については第6章で詳述する。

表-5.1 活用イメージ作成一覧

No.	検討システム	利活用項目・用途・特長	使用センサ
1	斜面の挙動監視・落石の検知システム	<p>利活用項目： 斜面上にセンサ端末を設置し、遠隔地から斜面の挙動を監視する 落石防護柵にセンサ端末を設置し、落石衝突時の振動を検知する</p> <p>用途： 斜面の挙動監視 落石の発生検知</p> <p>特長： パトロール車両からもセンサデータを受信可能（パトロール業務の効率化にも寄与する）</p>	振動 傾斜
2	道路照明灯（道路灯）を利用した道路施設の維持・管理システム	<p>利活用項目： 等間隔に設置された道路照明に無線センサ端末を設置し、道路維持管理情報を遠隔地からモニタリングする。</p> <p>用途： 照明灯の点灯確認、交通量把握、駐車車両検知、路面温度把握 等</p> <p>特長： 巡回業務の効率化、通信コストが安い、既存インフラの有効活用</p>	照度 振動 磁気
3	道路交通調査システム（交通量把握、駐車車両検知等）	<p>利活用項目： 道路路面上にセンサ端末を等間隔に設置し、車両検知などの自動計測を行う</p> <p>用途： 交通量の把握、駐車車両の検知、路面温度検知</p> <p>特長： 設置が容易、交通量調査の効率化</p>	磁気 温度
4	道路構造物の損傷・変状の検知システム	<p>利活用項目： 道路路面や構造物、トンネル内部に無線センサ端末を設置し、遠隔地から損傷や変状などの状態を把握する。</p> <p>用途： 災害発生時における構造物の破壊・亀裂・損傷・埋没検知と通行可能性の判定等</p> <p>特長： ほぼリアルタイムにセンサ端末のデータをモニタリング可能</p>	振動 傾斜 変位
5	災害時等における早期モニタリングシステム	<p>利活用項目： 大規模災害発生後の被害状況把握や2次災害を防止するために、小型ヘリ等を用いて、無線センサ端末を散布する。</p> <p>用途： 被災地における情報収集（生存者検知、建物の崩壊検知など）</p> <p>特長： 電源工事や通信線工事不要、自立的にネットワークを形成する</p>	音 振動 温度

5.2 斜面の挙動監視・落石の検知システム

(1) 既往の技術と無線センサネットワークを活用することの利点

国土の4分の3を山地で覆われている我が国は、全国に約9万の斜面崩壊危険箇所をはじめ、地すべり危険箇所、土石流危険箇所、落石危険箇所が存在すると言われている。このうち、高規格幹線道路や一般国道等に隣接した斜面では、5年ごとに「落石等の恐れのある箇所の全国総点検」(防災点検)が実施され、緊急度の高い箇所を中心に対策が施されている。

このような積極的な防災対策により、道路斜面災害は年々減少しているものの、豪雨や震災発生時などには、依然として多くの斜面災害が発生しているのが現状である。このため、崩壊危険性の高い箇所から斜面防災対策を効率的に実施するとともに、災害の発生やその予兆を捉えるためのモニタリングを実施し、危険度に応じて道路利用者に情報提供することが必要となる。

現在、落石検知と地山変動検知については、おおよそ以下のような方法で検知が行われている。

落石検知

斜面から転動または落下してくる落石を斜面下部で阻止、もしくは防護する目的で設置される施設(落石防止網、落石防止柵、落石防止壁など)に、加速度(振動)センサを搭載したセンサ端末を等間隔で設置する。落石衝突時の加速度を感知して、落石発生の有無を検知するものである。

地山変動検知

崩壊の危険性が高い斜面に対して、傾斜センサなどを搭載したセンサ端末を等間隔に設置する。地すべりなどの地山変動時に発生する、斜面の変位を検知するものである。なお、センサ端末は、平常時の移動量を最小限にするため、杭(境界杭のようなもの)に入れて設置する。

現状の斜面災害の検知は、落石災害については、「衝撃加速度感知式」や「断線感知式」、「受圧式」などが利用されており、地すべりや斜面崩壊など、地山変動による災害検知には「伸縮計」、「ひずみ計」、「傾斜計」による方式が使われている。なお、近年では、光ファイバに加わる変状を遠隔地からモニタリングする「光ファイバーセンサ」も、連続する斜面の挙動をモニタリングできる手法として着目されている。

しかしながら、これらの検知手法は、「設置工事に多くの作業員と作業時間を必要とするため、安全確保が難しい」、「設置コストが高い(例:光ファイバーセンサ(BOTDR方式)の設置コストが、現状では1,000万円程度)」などの問題点も挙げられている。

このような問題点に対し、センサネットワークは、第4章で取りまとめたよ

うな解決が必要な技術的課題も多く残されているが、「センサ端末間の通信線不要(例：アドホック無線通信方式)」、「低消費電力」、「センサ端末が低コスト」などの利点があり、崩壊危険性の高い斜面に対して、低予算で多くのセンサ端末を短時間で設置できるメリットが利用できる。また、通常のセンサデータ収集には、センサ端末間の無線通信と既存インフラ(光ファイバー通信網)を活用することにより、通信コストの削減が実現できるほか、パトロール時や災害発生時などには、道路管理者が持参するセンサデータ受信機(もしくは、パトロール車両に設置されたセンサデータ受信機)を用いることにより、現場でのデータ収集も可能である。表-5.2に斜面の挙動監視・落石の検知に関わる現状の技術と無線センサネットワークを適用した場合の利点と問題点を整理する。

以下、「落石検知」と「地山変動検知」別に無線センサネットワークを利用した検知方法を整理する。

(2) 無線センサネットワークを利用した場合の処理手順

既往の技術と本研究開発で提案する無線センサネットワークシステムを利用した場合の手順を列挙すると以下のイメージになる。システム全体のイメージは図-5.1に示す。

センサ端末が一定間隔ごとに観測したデータを、ゲートウェイに対して無線通信する。なお、センサ端末の消費電力を最小限にするため、センサ観測や無線通信が行われていない時には、必要な機能のみ動作するスリープモードに設定する。

ゲートウェイ装置は、情報コンセントなどを用いて、光ファイバー通信網と相互接続されている。これにより、ゲートウェイ装置が受信したデータは、光ファイバー通信網で利用できるデータに変換された後、転送される。

管理所では、送信されてくるセンサデータをモニタリングするとともに、設定した加速度(振動)や変位を超える状況になった場合には、道路管理者や関係組織に対して、警告や危険度情報を送信する。

通常の巡回パトロール時には、パトロール車両に搭載されたセンサデータ受信機(ゲートウェイ装置)を用いてセンサデータの受信を行う。

(3) 期待される効果

従来よりも多くのセンサ端末を設置する結果となり、地山の変動位置や変動範囲の計測精度が大幅に向上する。

センサ端末には、自立型の電源(太陽電池、キャパシタ蓄電池)を利用する。これにより、設置時間が大幅に短縮され、設置作業員の安全性が向上する。センサ端末は、端末ごとに装備されているソフトウェア(TinyOSなど)により、計測間隔や通信間隔などが自動的に制御される。このため、微動の検知後に、

自動的に計測回数を増やすなどの柔軟な計測設定が可能である。

災害発生時など、光ファイバー通信網を利用したモニタリングが不可能になった場合にも、センサデータ受信機（ゲートウェイ装置）を搭載した無人ヘリなどを用いてセンサデータを受信することが可能であり、迅速な災害状況の把握に寄与する。

（４）実用化に向けての検討課題点

観測されたセンサデータをどのように利用し、警戒・避難に結びつけるかなど、ソフト面での判断基準や手順が一般化されていない。センサデータの精度検証とともにソフト面での開発が急がれる。

（５）活用イメージ

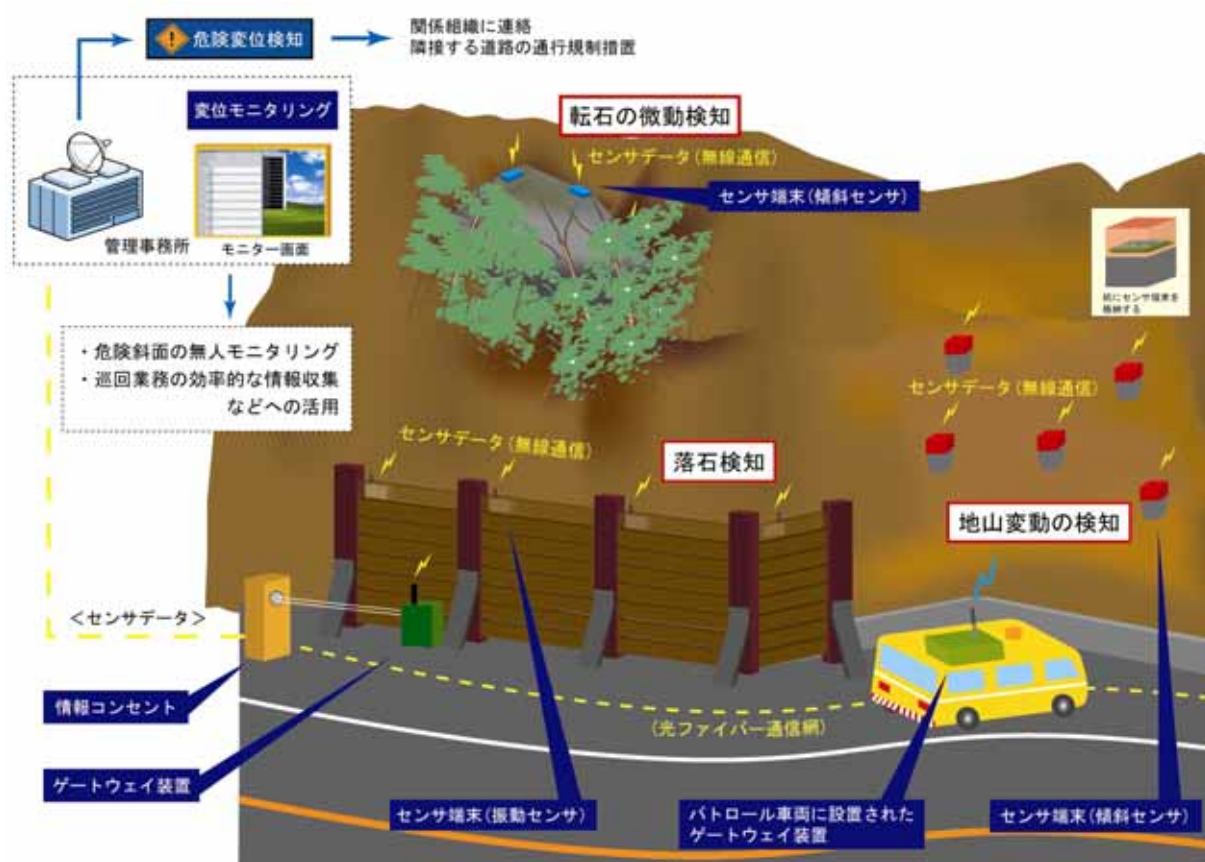


図-5.1 落石検知・地山変動検知に無線センサネットワークシステムを導入した場合のイメージ

5.3 道路照明灯（道路灯）を利用した道路施設の維持・管理システム

（1）既往の技術と無線センサネットワークを活用することの利点

安全で円滑な交通の確保と道路施設の損傷が原因となる事故発生、いわゆる第三者影響を防止することなどを目的として、現在、綿密な作業計画の下に道路施設の維持・管理が行われている。その主な業務は、道路管理者によって毎日実施されている道路巡回業務などの点検業務や道路路面清掃・街路樹剪定などの道路機能を保持するために行う保全業務などが挙げられる。

一方では、急速な車社会の進展や道路利用者のニーズの多様化（例：リアルタイムな道路情報提供、24時間対応など）、財政事情の悪化による維持管理コスト削減の必要性などの理由から、効率的かつ効果の高い道路維持・管理が課題となっている。さらに、1つの管理事務所が管轄する国道の延長（例：近畿地方整備局管内の道路延長：20路線、約1,700km）が長いため、日々の巡回業務では、比較的大きな落下物やポットホールが確認できる程度であり、問題や事故につながる異常が発見できないことが多いことも課題となっている。このことから、既設の道路管理施設の状態（異常など）をリアルタイムかつ確実に把握するためのシステムが必要となっている。

維持・管理項目の1つとして道路照明灯の不点灯調査がある。道路灯の不点灯は、ドライバーの快適な走行を阻害するだけでなく、歩行者と車両との接触や防犯上の危険性が高まる恐れがあることから、現状では、1ヶ月に1回、夜間パトロールにおいて目視による点検が行われている。しかし、上でも述べたとおり、管内の国道延長が長く、設置箇所も膨大であるため、調査には多くの人手と時間を費やしている。

センサネットワークは繰り返し述べてきたように、「センサデータの無線通信機能」や「端末自体が小型・軽量」などの特徴がある。このことから、既存の道路灯の内部に、照度センサなどを搭載したセンサ端末を組み込むことにより、離れた場所からリアルタイムに不点灯を検知することが可能となる。また、センサネットワークの欠点である「電源」が既に確保されていることから、長時間にわたり、安定したセンサデータの通信を行うことができる。表-5.3に道路維持管理に関わる現状の技術と無線センサネットワークを適用した場合の利点と問題点を整理する。

道路灯は、概ね走行車線上の一定の高さに、支柱を使って設置されている特性がある。本利用システムでは、この特性を利用したセンサネットワークの活用項目を3点に整理する。以下にその概要を説明する。

無線センサネットワークによる道路灯の不点検知

道路灯の不点検知の可否を、各道路灯の電球の近くに設置された照度センサによ

り検知する。センサ端末は、通常時は道路灯に供給されている電力を用い、非常時（停電時）には、端末が持つ非常用バッテリーを用いて稼働する。

無線センサネットワークによる道路灯支柱の損傷検知

道路灯などが設置されている支柱に、支柱の挙動を常時監視するための振動センサを設置する。平常時の支柱の挙動を予め調査し、異常時の挙動（最大振幅）を決定する。調査開始後に、異常時の挙動（最大振幅）以上の値が検知された場合に警告を促す設定を行う。

無線センサネットワークによる通行規制路線に進入した車両の検知

積雪や豪雨などが既定値以上の値を示した場合、付近の道路は通行規制される。また、主に山間部の道路の一部では、ある一定期間、閉鎖される道路もある。本利用内容は、このような通行規制路線に進入した車両を、道路灯に設置された磁気センサによって検知し、センサネットワークと光ファイバー網などを通じ、遠隔地でモニタリングするものである。

（２）無線センサネットワークを利用した場合の処理手順

既往の技術と本研究開発で提案する無線センサネットワークシステムを利用した場合の手順を列挙すると以下のイメージになる。システム全体のイメージは図-5.2に示す。

収集するセンサデータが、どこに設置された道路灯のデータであるかを明確にするために、あらかじめセンサ端末のID番号と道路灯の位置（設置番号）を記録する。

各道路灯で観測されたセンサデータは、無線通信を用いて、付近の道路灯、もしくはゲートウェイ装置に対してデータを転送する。なお、ゲートウェイ装置は、光ファイバー通信網との接続点（情報コンセント）付近に設置する。ゲートウェイ装置が受信したセンサデータは、光ファイバー通信網で転送可能なデータ形式に変換された後、転送する。

管理所に転送されたデータは、常時モニター可能な状態にするとともに、ある規定値以上のセンサデータが検知された場合は、直ちに道路管理者や関係機関に対して危険度情報を送信する。

（３）期待される効果

センサ端末は、道路灯の内部に設置するため、道路空間上に新たに機器の設置空間を必要としない。このため、従来のセンサ設置に比べて、大幅にコストが縮減される。

道路灯の不点検知や支柱の損傷調査は、現在、人手により調査が行われている。センサネットワークを適用することにより、これらの調査が不要になり、かつ常時観測されることから、維持管理の効率化と精度向上が期待される。

通行規制路線を対象とした進入車両が、無人で検知することができる。また、道路灯ごとに磁気センサを設置することにより、おおまかな車両の位置も把握することが可能である。

(4) 実用化に向けての検討課題点

支柱の異常振動検知では、平常時の健全な振動と異常な振動、風などによる振動など様々な振動を事前に調査する必要がある。また、警戒やパトロールに結びつけるための、判断基準や手順を決定する必要がある。

(5) 活用イメージ



図-5.2 道路施設の維持・管理に無線センサネットワークシステムを導入した場合のイメージ

5.4 道路交通調査システム（交通量把握、駐車車両検知等）

（1）既往の技術と無線センサネットワークを活用することの利点

効果的な道路の計画や管理を行うため、交通量データが大きな役割を果たしていることは言うまでもない。中でも、膨大な労力と多大な調査費を使って約5年ごとに行われる全国規模での道路交通情勢調査（以下道路交通センサス）は、交通量の基礎データを収集する調査であり、道路の状況と断面交通量を調査する一般交通量調査と自動車の運行内容を調査する自動車起終点調査から構成されている。

また、国土交通省では、最近、道路交通の円滑性を計測する指標として「交通渋滞による損失時間」を重要視するようになり、そのためにも交通量データの重要性は益々大きくなっている。

しかしながら、これまでの交通量調査は、超音波センサや磁気センサを用いた高価な交通量観測機器（トラフィックカウンタや簡易型トラフィックカウンタ等）を設置する方法や人手による観測に頼っているため、調査コストやデータ精度が問題となっている。例えば、平成11年度に実施した道路交通センサスでは、概ね2万区間の交通量観測区間が設定されており、往復2車線、12時間交通量6,000台という平均的な道路区間を対象として、平日と休日の2日間の交通量計測を行うことを想定している。この場合、交通量の計測から集計、業務管理費までを含めると、人手による観測では、おおよそ16万円/箇所（全体で約32兆円）の経費がかかると言われており、財政事情が厳しくなる中、これらの交通量調査のコスト縮減は、きわめて重要な課題となっている。

既存の交通量観測機器にも使われていた手法である磁気センサを搭載することが可能である。また、端末自体の消費電力が小さいことやセンサデータを無線通信により転送することから、これまでの交通量観測機器の設置時に必要とされた通信線や電力線工事がなくなる。さらに、複数のセンサデータを遠隔地で入手できることから、無人による計測も可能である。このことから、これまでの交通量調査に必要とされた費用を大幅に軽減することが可能である。表-5.4に道路交通調査に関わる現状の技術と無線センサネットワークを適用した場合の利点と問題点を整理する。

無線センサネットワークを利用した場合の検知内容と検知手法としては以下の3点が考えられる。

走行車両の検知（車両台数の計測、車長、車速など）

現在、車両の通過に伴う磁界の変化を利用した簡易型のトラフィックカウンタ（簡易トラカン）が開発されている。所謂、簡易トラカンは既に地方整備局などで数多く使われており、車種区分を行わない総交通量では人手観測

と同程度の精度があることが確認されている。

本利用イメージでは、簡易トラカンに用いられている車両検出手法と同じ手法である磁気センサを搭載した端末を、走行車線の中央に埋設して走行車両の検知を行う。この際、「複数箇所に設置したセンサデータを1箇所で収集可能」や「端末が小型・軽量」などのセンサネットワークの特徴を活かすことにより、「調査地点を通過する車両台数の計測」、「車長の計測」、「車両速度の計測」、「渋滞長の計測」などの自動化が可能になる。

駐車車両の検知

本研究開発で導入を提案している磁気センサは、真上を通過する車両だけでなく、隣接した車道（対向車線など）を通過する車両も同様に検知できることが分かっている。このため、ガードレールの下に端末を設置することにより、駐車車両の検知に使用することが可能となる。

路面温度の計測

センサネットワークに使われる端末は、処理装置(CPU)を搭載しているため、複数のセンサを同時に計測することが可能である。このことから、走行車両の検知で利用されている端末に温度センサを追加で搭載することにより、路面温度の計測が可能である。

(2) 無線センサネットワークを利用した場合の処理手順

既往の技術と本研究開発で提案する無線センサネットワークシステムを利用した場合の手順を列挙すると以下のイメージになる。システム全体のイメージは図-5.3に示す。

センサ端末で観測されたデータは、ゲートウェイ装置と光ファイバー通信網などを通して遠隔地に設置されたデータサーバに収集する。

データサーバに収集されたデータは、端末毎のセンサデータに整理した上で、通過車両の検知、車長、車速、渋滞長などを後処理により算出する。

(3) 期待される効果

複数箇所に設置された端末のデータを1箇所で収集できる。このことから、これまでは人手による交通量計測しか方法が無かった交差点の右左折状況の調査や渋滞長の計測などに使用することも可能である。

センサネットワークに使われる端末は、通信線や電源ケーブルの設置工事が不要である。また、調査内容によっては、側道やガードレールなどに設置することも可能であることから、端末の設置時に交通規制を行わなくても良い利点がある。

(4) 実用化に向けての検討課題点

現在では、複数のセンサ端末が同時に計測を行う場合に端末間の時間同期を

行う手段がない。解決が急がれる技術の一つである。

車長や車両速度を計測する場合は、センサ端末の計測間隔を短くする必要がある。現状のセンサ端末計測精度では、厳密な車長や車両速度を計測することが難しい。実用化が期待されるシステムだけに是非解決が必要な技術である。

(5) 活用イメージ



図-5.3 道路交通調査に無線センサネットワークシステムを導入した場合のイメージ

5.5 道路構造物の損傷・変状の検知システム

(1) 既往の技術と無線センサネットワークを活用することの利点

わが国には、約67万ヶ所の道路橋があると言われており、全国に張り巡らされた道路網が完全に機能するうえで、これらの橋の果たす役割はきわめて大きい。道路橋は常に自動車交通の繰り返し荷重にさらされており、車両の大型化もあって、疲労による損傷や倒壊が懸念されており、損傷の程度を自動的に検知することの出来る技術が待たれている。近年、JRトンネルのコンクリート塊の落下事故など、第三者に影響を及ぼすような事例が発生しており、構造物の保全問題が広く社会的関心事となっている。さらに、1961年以降の15年間に、集中して道路橋が整備されていることから、供用年数が既に30年を超えているものが多い。このことから、平成11年度版の建設白書では、「道路ストックを効率的に、確実に維持管理するためには、老朽化に対応した構造物の定期点検や健全度評価、これに基づく計画的維持管理を実施する仕組みを構築する必要がある。」と記されている。

道路橋の維持管理では、日々の道路巡回業務において路面性状や伸縮装置部の段差、高欄の通り、そして道路標識や道路照明の異常などが点検されている。また、数年の頻度で行われる定期点検では、橋のすべての部位を点検して、その損傷程度を詳細に記録している。その他、災害の発生直後には異常時点検が必要に応じて行われる。なお、点検実施や点検結果から損傷状況を把握して橋の健全度を評価するためには、橋に関する専門の知識と豊富な実務経験が必要となる。このため、道路橋の調査には、多くの要因と時間を必要としている。

このような状況の中で、橋の部材にセンサを取り付け、電話回線などを用い、遠隔地から橋の常時挙動をモニタリングし、維持管理に用いる事例も出ている。

本研究開発で提案するセンサネットワークは、複数のセンサ端末のデータを1箇所で受信できることから、橋梁の主桁の応力点や伸縮装置、支承部などにセンサを設置し、常時挙動をモニタリングすることが可能である。また、既存の光ファイバー通信網と組み合わせることにより、商用通信網が必要なくなるため、維持管理に必要なコストが縮減可能である。表-5.5に道路構造物の損傷・変状検知に関わる現状の技術と無線センサネットワークを適用した場合の利点と問題点を整理する。無線センサネットワークを利用した検知内容としては、以下の点が考えられる。

主桁の挙動監視

主桁は、輪荷重の繰り返し載荷により常に変位挙動が存在している。この変位量が、ある限度を超えて長時間続いた場合、舗装下面とデッキプレートとの接着不足や剥離、舗装面のひび割れ破壊などが発生する恐れが高いことが

分かっている。

主桁の挙動監視では、上述した損傷の原因を事前に検知するため、振動センサを搭載したセンサ端末を主桁に設置し、変位挙動を遠隔地からモニタリングする。

伸縮装置の変位量調査

伸縮装置は、輪荷重や橋端変位を受け入れており、破損や摩耗が著しい部材である。伸縮装置の変位量（伸縮量）が何らかの原因により大きくなると、据付け誤差や回転沈下によって、その根本から疲労破断する恐れがある。また、伸縮装置が設置されている舗装面に設置されたフィンガープレートの浮き上がりにより、第三者事故が発生する可能性も高くなる。

このため伸縮装置の変位量調査では、伸縮装置の両端に傾斜センサと変位センサを搭載したセンサ端末を設置し、伸縮装置の伸縮量と傾きをモニタリングする。

(2) 無線センサネットワークを利用した場合の処理手順

既往の技術と本研究開発で提案する無線センサネットワークシステムを利用した場合の手順を列挙すると以下のイメージになる。システム全体のイメージは図-5.4に示す。

まず、主桁や伸縮装置にセンサ端末を設置する。この時、橋梁の延長が長く、センサ端末間の通信ができない場合は、センサを搭載しないデータ中継用の端末を中間に設置する。

収集されたセンサデータは、センサネットワークと光ファイバー通信網などを通じて、管理事務所等でモニタリングを行う。また、規定値以上の変位量が検知された場合は必要な機関に対して危険を知らせる。

センサデータを受信するためのゲートウェイ装置を搭載したパトロール車両により、現場でセンサデータを収集することも可能である。

(3) 期待される効果

従来型のセンサに比べて、設置費用や通信費用の面で大幅な経費縮減を図ることが可能である。

平常時は、維持管理業務（日常巡回業務）などの高度化や効率化に寄与できる。巡回検査作業の大幅な縮減になる。また、地震などの災害発生時には、橋梁の倒壊の危険性を判断するための補助データや通行規制を行うか否かを判断するためのデータとして利用可能である。

(4) 実用化に向けての検討課題点

主桁全体の挙動を測定する場合は、センサ端末の時間同期を行う必要がある。観測されたセンサデータをどのように利用し、警戒や通行規制措置に結びつ

けるかなどの判断基準や手順が一般化されていない。

(5) 活用イメージ

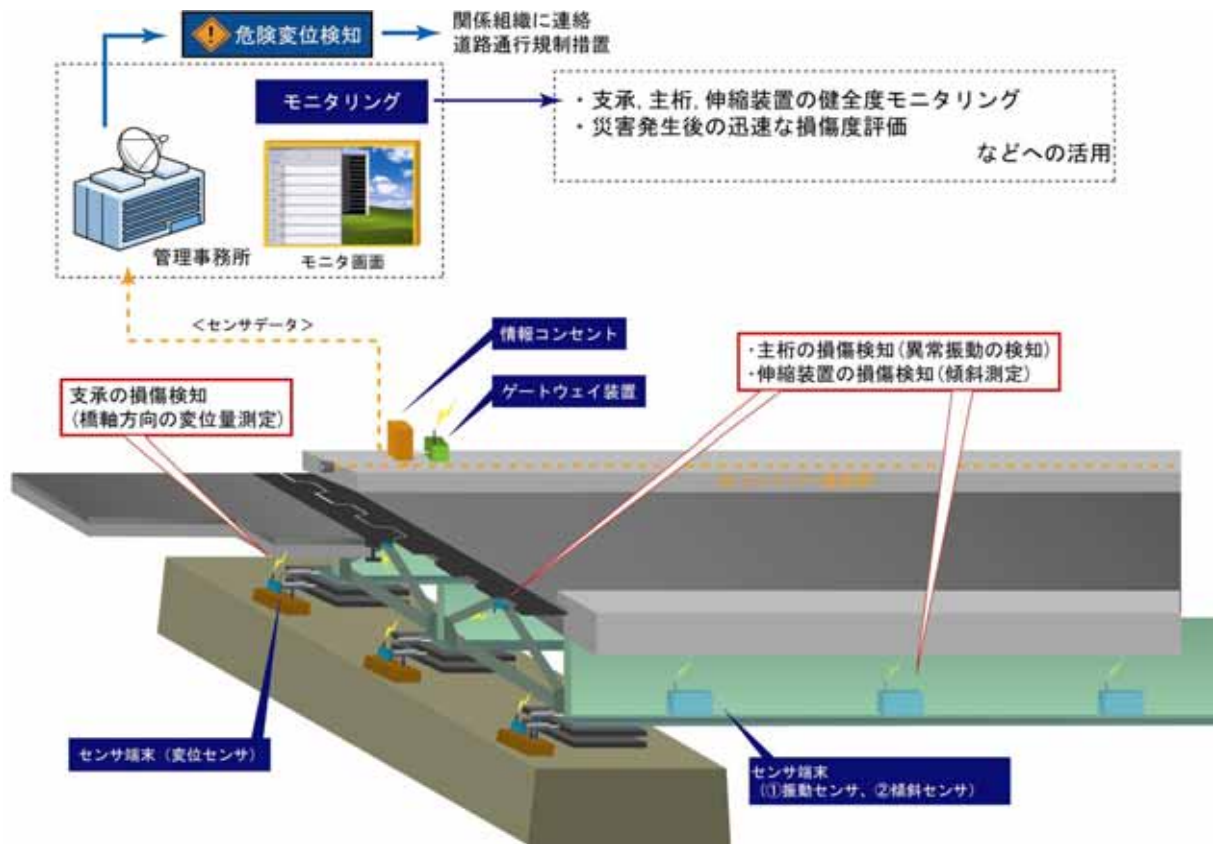


図-5.4 道路構造物の損傷・変状検知へ無線センサネットワークシステムを導入した場合のイメージ

5.6 災害時等における早期モニタリングシステム

(1) 既往の技術と無線センサネットワークを活用することの利点

大規模な地震災害や火山災害、風水害の発生時には、早急に被害状況を把握して対策をする必要がある。また、2次災害を防止するため、道路や家屋に隣接した崩壊危険斜面や倒壊の恐れのある施設などでは、センサや監視カメラなどを用いたモニタリングを即座に実施する必要がある。

現在、災害発生後の被害状況の把握は、災害対策用ヘリコプターの整備や地球観測衛星の観測精度の向上、GISの整備などにより迅速化が図られているものの、崩壊した斜面の被害状況の把握やモニタリング施設の設置は人手により行われている。このため、被害状況を確認する現場作業員の安全確保や被害状況を確認するまでの時間短縮などを実現するためのシステムの構築が望まれている。

一方、プログラム内蔵型の無人飛翔体（ヘリコプター、カイトなど）が既に実現されており、近年では、無人飛翔体（自立型飛翔体）に地形の起伏を読み取る機能（レーザープロファイラー）を搭載したのもも実用化されつつある。さらに、無人飛翔体にはGPSが搭載されており、あらかじめ飛行した経路を再現し、自立飛行することも可能である。今後、人間の立ち入ることのできない災害現場の状況把握には威力を発揮するはずである。

被害現場の状況を収集する装置として、本研究開発で提案するセンサネットワークの導入も効果的である。センサネットワークは、センサ端末同士が自立的にネットワークを形成することが可能である特徴を有していることから、災害現場に散布することにより、現場の状況を安全かつ正確に収集することが可能になる。

上述した2つの技術を組み合わせることにより、これまで得られなかった災害現場の迅速かつ安全な状況把握を行うシステムの構築が可能となる。本節では、災害現場へのセンサ端末の散布とセンサデータの収集に自立型無人ヘリコプターを使用し、さらに、センサ端末により災害現場の状況を収集することのできるシステムを提案する。表-5.6に災害時等における早期モニタリングシステムに関わる現状の技術と無線センサネットワークを適用した場合の利点と問題点を整理する。ここで提案するシステムの検知内容としては以下の点が考えられる。

無線センサネットワークによる倒壊道路の被害状況把握、崩壊斜面のモニタリング

地震や風水害により発生した土石流や斜面崩壊により道路が倒壊・閉塞した場合、生き埋めになっている車両や生存者の有無、2次災害の危険性などの

調査が緊急の課題となる。このような現場にセンサ技術を適用する場合、以下のような用途が考えられる。

音センサ：生存者の有無、斜面の崩壊や予兆の検知

温度センサ：閉塞した空間内の温度把握

磁気センサ：生き埋めになっている車両の検知

振動センサ：災害現場における地震発生状況の把握

(2) 無線センサネットワークを利用した場合の処理手順

既往の技術と本研究開発で提案する無線センサネットワークシステムを利用した場合の手順を列挙すると以下のイメージになる。システム全体のイメージは図-5.5に示す。

自立型の無人ヘリコプターによるセンサ端末の散布

自立型の無人ヘリコプターに前述のセンサ端末を搭載し、災害現場上空から、予め決められた地域にセンサ端末を散布する。同時にゲートウェイ装置と衛星電話（基幹系インフラ）を搭載した端末を端末付近に散布する。このような構成により、ゲートウェイ装置がセンサデータを常時モニタリングしてデータ蓄積を行う。また、蓄積されたデータは、衛星電話などを通じて、30分間隔に1度程度、災害対策本部に送信される。

自立型の無人ヘリコプターによるセンサデータの受信・蓄積

センサデータのモニタリングが、1日に1回～2回程度の場合は、センサ端末に搭載されているデータメモリにセンサデータを蓄積する。その後、ゲートウェイ装置を搭載した自立型の無人ヘリコプターにより、各センサ端末に蓄積されたセンサデータの収集を行う。

(3) 期待される効果

人間が近づくことの不可能な災害現場にモニタリング装置を安全かつ迅速に設置することが可能

災害現場の復旧対策（優先度）を立てる際に有効なデータとなる

2次災害が懸念される領域で復旧作業を行う場合、作業員に警告を促すためのモニタリング装置としても利用可能（現場でのセンサデータの収集も可能）

(4) 実用化に向けての検討課題点

散布するセンサ端末の衝撃吸収方法

散布したセンサ端末のおおまかな位置把握方法

(5) 活用イメージ

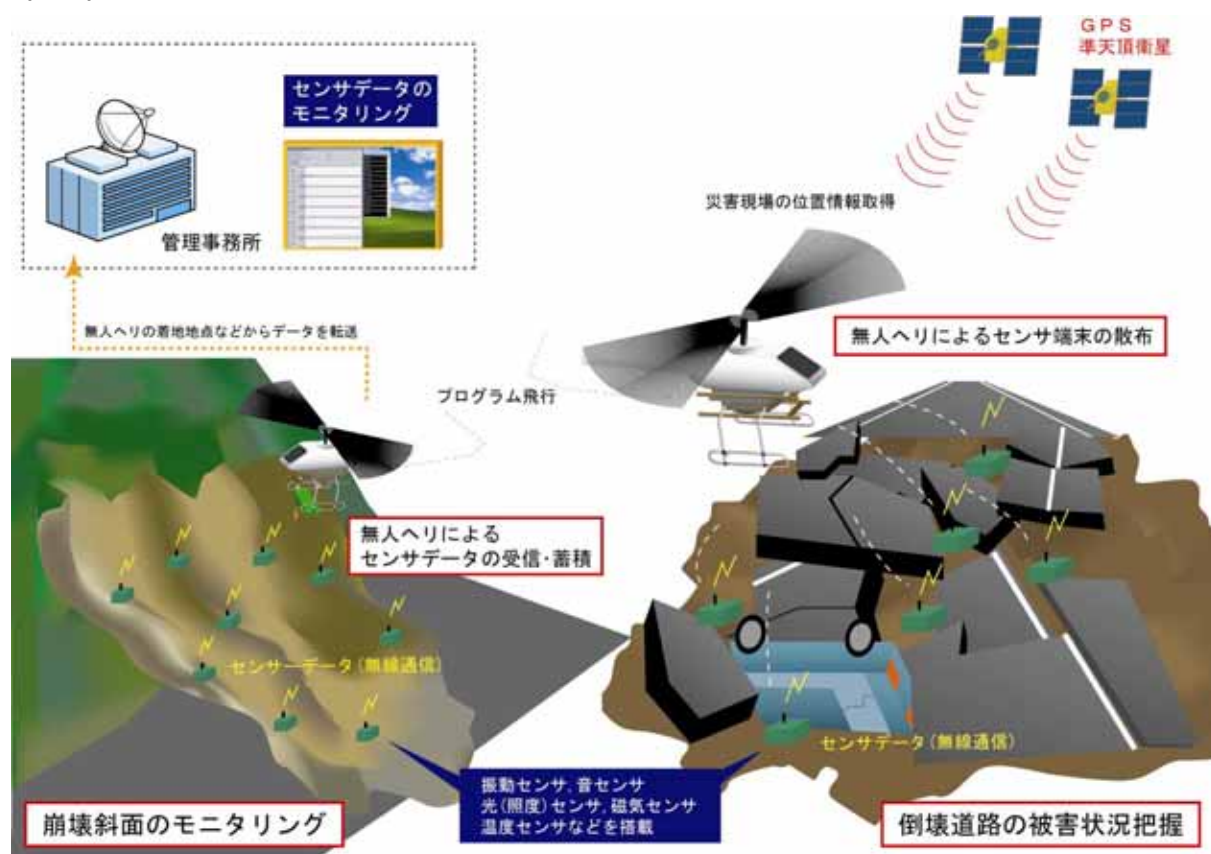


図-5.5 災害時における早期モニタリングシステムへ無線センサネットワークシステムを導入した場合のイメージ

表-5.2 「落石検知」「地山変動の検知」における無線センサネットワークシステムの活用上の利点と課題（1 / 2）

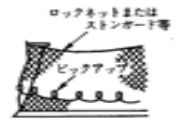

項目	現状					
	災害の実態		災害の発生原因		予知・検知・管理手法の例 (予知・検知内容、センサ精度など)	課題点
	種類と特徴	主な被害内容	素因	誘因		
落石検知	<p>・抜け落ち型(転石型)</p> <p>・侵食や風化によって岩塊などが表面に浮出し、バランスを失って抜け落ちて落石となる</p> 	<p>・道路閉塞</p> <p>・通行車両への損傷(埋没被害を含む)</p> <p>・道路付帯構造物(落石防護柵、信号、標識等)への損傷</p> <p>落石の衝突位置の高さは、概ね2m以内である</p>	<p>・地質条件</p> <p>・転石型の場合 崖錘、段丘礫層、火山性堆積物、風化花崗岩類</p> <p>・浮石型の場合 岩目が発達かつ密着度が低い</p>	<p>連続雨量、時間雨量強度、風向、最大風速、平均風速、積雪、凍結融解、地震、人為的誘因</p>	<p>・衝撃加速度感知式</p> <p>・加速度センサをロックネットやストンガードに設置し、落石衝突時の加速度を感知して落石を検知する方式</p> <p><センサ機能例></p> <p>・測定範囲：±50G (±500m/s²)</p> <p>・計測間隔：100m/sec</p> <p>・センサ設置間隔：8m</p> 	<p>・雷害・腐食の対策が必要である、</p> <p>・電力ケーブルやデータケーブルの敷設が必要のため、多くの作業時間を要する</p>
	<p>・はく離型(浮石型)</p> <p>・岩同士の間隙の弱まりや、凍結によって割目が拡大され、岩が剥離して落石となる</p> 	<p>落石重量の分布は0.5t~1tの石が最も多く、最大150tである</p> <p>・周辺家屋への損傷、</p> <p>・落石予防工事(落石防護柵の設置時など)における作業員への傷害</p>	<p>・地形条件</p> <p>斜面方位、集水面積、斜面横断形、斜面縦断形、斜面縦断平均勾配、斜面の高さ、表土層の厚さ、湧水の有無、裸地の割合、落石の発生率</p>	<p>等</p> <p>・断線式</p> <p>・落石の衝突による金属線の断線を感じて落石を検知する方式(センサなし)</p> <p>・光ファイバーセンサ式</p> <p>・落石防護柵に取り付けられた“検知板”に衝突した落石の衝撃を、光ファイバーセンサにより検知する方式</p> <p>光ファイバーセンサは、実用化されてからの歴史が浅いため、実証データの蓄積が少なく、明確な機能を示すことができない</p> 	<p>・装置や設置費用が高額である</p> <p>・実用化されてからの歴史が浅いため、実証データの蓄積が少ない</p>	
地山変動の検知	<p>・地すべり</p> <p>・主に5°~20°の緩傾斜面で発生する</p> <p>・発生規模が大きい</p> <p>・発生前に亀裂の発生、陥没、隆起、地下水の変動等が生じる</p> <p>・斜面崩壊</p> <p>・主に20°以上の急傾斜地で発生する</p> <p>・比較的発生規模が小さい</p> <p>・発生前の徴候が少なく、突発的に滑落する</p>	<p>・道路埋没</p> <p>・通行車両の埋没</p> <p>・周辺家屋への損傷</p>	<p>・地被物の種類</p> <p>裸地、草地、林地等</p> <p>・斜面の傾斜</p> <p>30-44.9°、45-59.9°、60°-</p> <p>・斜面の高さ</p> <p>-19.9m、20-49.9m、50m-</p> <p>・湧水の有無</p> <p>・近辺の崩壊有無</p> <p>・表土の厚さ</p> <p>0.5m未満、0.5m以上</p> <p>・地質</p> <p>噴出岩類、深成岩類、水成岩類、変成岩類</p>	<p>短期降雨強度、連続雨量、融雪量、地下水位、頭部盛土による過剰間隙水圧、地震、人為的誘因(切土等)</p>	<p>・伸縮計による検知</p> <p>・危険斜面の2点に杭を設置し、その間に張ったワイヤの長さにより斜面の変動を計測する方式</p> <p><センサ機能例></p> <p>・測定範囲：200mm</p> <p>・測定精度(表示分解能)：0.001mm</p> <p>・計測間隔：1分~24時間(データロガーの性能)</p> <p>・傾斜計による検知</p> <p><センサ機能例></p> <p>・測定範囲：0~±7°</p> <p>・測定精度：0.001°</p> <p>・計測間隔：1分~24時間(データロガーの性能)</p> <p>・雨量計による検知</p> <p>・斜面の変動検知のための伸縮計・傾斜計と共に設置される場合がある。主に転倒マス型センサが用いられる</p> <p><センサ機能例></p> <p>・測定分解能：0.5mm</p>	<p>・センサによる点的な計測であるため、設置位置の決定が難しい</p> <p>・センサデータの転送に、Dopa回線などを用いる場合、計測間隔を狭めると、通信コストが増加する</p>

表-5.2 「落石検知」「地山変動の検知」における無線センサネットワークシステムの活用上の利点と課題（2 / 2）

項目	無線センサネットワークシステムを活用した維持管理		
	予知・検知・管理手法の例 (予知・検知内容、使用する要素/基盤技術)	従来手法に対する メリット	実用化に向けた 課題、限界
45 落石検知	<p>無線センサネットワークによる衝撃加速度感知</p> <ul style="list-style-type: none"> 加速度センサを搭載した端末を、現状の衝撃加速度感知式と同様の手法により設置する <p>無線センサネットワークの機能</p> <p><センサ機能例></p> <ul style="list-style-type: none"> 計測項目：ロックネット(落石防護柵)に衝突した落石の衝撃検知 使用センサ：加速度センサ 測定範囲：±10G(±100m/s²) 計測間隔：100ms～500ms(センサ端末の個数により異なる) 無線センサの設置間隔：～40m(315Mhz帯)、～70m(2.4Ghz帯) <p><その他の機能例></p> <ul style="list-style-type: none"> センサデータのアナログ/デジタル変換機能 センサデータの無線通信機能、中継機能 アドホック通信機能(広範囲な自動通信ネットワークの構築機能) その他の要素/基盤技術(：主な機能) 太陽光発電、キャパシタ等の電源技術 キャパシタ充電のための発電機能(太陽光発電) センサ端末を連続稼働させるための電源(キャパシタ) 光ファイバー通信網 ゲートウェイ装置から関係組織までのセンサデータ転送機能 	<p>モニタリングシステムの設置期間短縮</p> <ul style="list-style-type: none"> 通信線や電源ケーブルの敷設が不要なため、設置工事期間が短縮される <p>特徴</p> <ul style="list-style-type: none"> 作業員の安全性向上 設置コスト削減 <p>センサ端末の連続稼働が可能</p> <ul style="list-style-type: none"> 充電時間が短いキャパシタを用いることにより、昼夜を問わず連続稼働が可能 <p>特徴</p> <ul style="list-style-type: none"> メンテナンス不要 連続稼働が可能 <p>遠隔モニタリングが可能</p> <ul style="list-style-type: none"> 商用通信網(NTT回線等)を用いないでセンサデータの転送・モニタリングが可能 <p>特徴</p> <ul style="list-style-type: none"> 通信コスト削減 	<p>システムの稼働対象</p> <p>平時：利用する 災害発生時：利用する</p> <p>センサの性能により、微少な振動は検知できない(小石等の小規模な落石は検知できない)</p> <p>大型車両の通行や風に伴う揺れを感知する場合がある</p> <p>山岳地では、光ファイバー通信網が敷設されていない場合がある。</p>
	地山変動の検知	<p>無線センサネットワークによる杭の振動検知</p> <ul style="list-style-type: none"> 加速度センサを搭載した端末を杭の中に固定し、杭本体を危険斜面に埋設する。 <p>無線センサネットワークの機能</p> <p><センサ機能例></p> <ul style="list-style-type: none"> 計測項目：杭の振動(2軸方向) 使用センサ：加速度センサ 測定範囲：±10G(±100m/s²) 計測間隔：100ms～500ms 無線センサの設置間隔：～40m(315Mhz帯)、～70m(2.4Ghz帯) <p>その他の機能例や要素/基盤技術は落石検知と同じ</p> <p>無線センサネットワークによる杭の傾斜検知</p> <ul style="list-style-type: none"> 傾斜センサを搭載した端末を杭の中に固定し、杭本体を危険斜面に埋設する。 <p>無線センサネットワークの機能</p> <p><センサ機能例></p> <ul style="list-style-type: none"> 計測項目：杭の傾斜 使用センサ：傾斜センサ 測定範囲：0～±20° 測定精度：0.01° <p>計測間隔、無線センサの設置間隔：杭の振動検知と同じ</p> <p>その他の機能例や要素/基盤技術は落石検知と同じ</p>	<p>現場でのセンサデータの受信も可能</p> <ul style="list-style-type: none"> パトロール車両などに搭載したゲートウェイ装置からのデータ受信も可能 <p>特徴</p> <ul style="list-style-type: none"> 日常巡回業務の効率化

表-5.3 「道路照明灯(道路灯)を利用した道路施設の維持管理」における無線センサネットワークシステムの活用上の利点と課題(1/2)

項目	現状			
	主な維持管理業務の実態		維持管理手法の例	
	業務の種類と目的	調査内容	管理手法とその内容	課題点
道路照明等(道路灯)を利用した道路施設の維持管理	<p>点検業務</p> <ul style="list-style-type: none"> 安全で円滑な交通の確保と道路施設管理物による被害の発生を未然に防止するために行われる。 主な点検の種類には、初期点検、日常点検、定期点検、詳細点検、臨時点検などがある。 主な保全作業 <ul style="list-style-type: none"> 土木構造物(道路、橋梁、トンネルなど)の点検 植栽の点検 	<p>点検業務</p> <ul style="list-style-type: none"> 道路路面の損傷、亀裂、陥没の状況調査 コンクリート構造物の剥落の有無 落石等の斜面災害発生の有無 鋼橋塗膜の劣化度診断 トンネル壁面のクラック発生点検 道路照明灯の不点状況の点検 道路照明灯等の支柱の損傷状況調査 橋梁の伸縮装置や土工物の取付部に発生した段差や遊間の調査 <p>等</p>	<p>道路巡回業務や点検業務による管理</p> <ul style="list-style-type: none"> 日常点検では、道路本線内からの車上目視による点検と本線外における構造物の異常や損傷を把握するための点検がある 道路照明灯については、夜間点灯の状況を把握するため、1回/月程度行われる、夜間パトロール時に目視点検を行う 	<ul style="list-style-type: none"> 天候により、目視点検の精度が変わる恐れがある 道路灯の不点灯検知は夜間巡回による調査が必要となる 構造物の調査には、多くの時間を要する
	<p>保全作業</p> <ul style="list-style-type: none"> 路面上の塵埃等から道路機能を保持するため、道路施設管理物の清掃や除雪などを行う。 主な保全作業 <ul style="list-style-type: none"> 清掃作業 植栽の剪定作業 交通事故等の復旧作業 雪氷対策作業 <p>等</p>	<p>保全作業</p> <ul style="list-style-type: none"> 路面凍結状況(路面温度、水分量、降雪量) 除雪作業、凍結防止剤の散布作業 ガードレールや標識などの道路施設管理物の損傷状況調査 植栽の剪定作業 道路清掃作業 	<p>道路利用者による通報</p> <ul style="list-style-type: none"> 道路利用者からの道路施設管理物の損傷や危険物等の通報を受けて作業員が現場確認を行う 道路照明灯については、支柱等に記された管理番号と不点情報を通報される場合が多い 	<ul style="list-style-type: none"> 通報連絡後から現地確認までに多くの時間を要する 通報された現場が、正しく伝わらない場合がある 不点灯による通報の確認作業は、夜間に実施する必要がある

表-5.3 「道路照明灯(道路灯)を利用した道路施設の維持管理」における無線センサネットワークシステムの活用上の利点と課題(2/2)

項目	無線センサネットワークシステムを利活用した維持管理		
	維持管理手法の例 (維持管理の内容、使用する要素/基盤技術)	従来手法に対する メリット	実用化に向けた 課題、限界
道路照明灯(道路灯)を利用した道路施設の維持管理	<p>無線センサネットワークによる道路灯の点検</p> <ul style="list-style-type: none"> 道路灯内に設置されたセンサ端末(光センサを搭載)を用いて、道路灯の点灯・不点灯を感知する。 無線センサネットワークの機能 <センサ機能例> <ul style="list-style-type: none"> 計測項目：道路灯の点灯感知 使用センサ：光センサ 測定範囲：～690m(観測波長帯) 無線センサの設置間隔：～40m(315MHz帯)、～70m(2.4GHz帯) <その他の機能例> <ul style="list-style-type: none"> センサデータのアナログ/デジタル変換機能 センサデータの無線通信機能、中継機能 アドホック通信機能(広範囲な自動通信ネットワークの構築機能) その他の要素/基盤技術 (：主な機能) MEMS <ul style="list-style-type: none"> センサの小型化(道路灯にセンサ端末を組込むために必要な技術) 太陽光発電、キャパシタ等の電源技術 <ul style="list-style-type: none"> 災害や停電時にセンサ端末を稼働させるための電源 光ファイバー通信網 <ul style="list-style-type: none"> ゲートウェイ装置から関係組織までのセンサデータ転送機能 	<ul style="list-style-type: none"> センサを用いた道路維持・管理情報の収集 道路灯が、自己の故障・損傷状況などを収集可能な情報塔(情報端末)として利用できる 新たに電源や通信ケーブル、設置場所等を準備しなくても良い 検知可能な情報の例(イメージ図に含まれない利用項目) <ul style="list-style-type: none"> ピンポイント気象情報(センサ：気象センサ) 支柱の傾き(センサ：傾斜センサ) <p>等</p> <p>道路巡回業務の効率化</p> <ul style="list-style-type: none"> 現場でのセンサデータの受信も可能なため巡回業務の効率化が向上する。 特長 <ul style="list-style-type: none"> 日常巡回業務の効率化 <p>道路規制路線の無人監視が可能</p> <ul style="list-style-type: none"> 危険路線へ監視員を派遣する必要がない(無人監視が可能) 道路灯毎に磁気センサを設置することにより、車両の位置を特定可能 <p>遠隔地からのモニタリングが可能</p> <ul style="list-style-type: none"> 商用通信網(NIT回線等)を用いないでセンサデータの転送・モニタリングが可能 特長 <ul style="list-style-type: none"> 通信コスト削減 	<p>システムの稼働対象</p> <p>調査時：利用する 平時：利用する</p> <p>不点を検知した場合、電球の故障か道路灯本体の故障かの区別ができない</p>
	<p>無線センサネットワークによる道路灯支柱の損傷検知</p> <ul style="list-style-type: none"> 加速度センサを搭載した端末を道路灯の支柱に設置し、老朽化や交通事故に伴う、支柱の損傷を検知する。 無線センサネットワークの機能 <センサ機能例> <ul style="list-style-type: none"> 計測項目：支柱の振動加減(2軸方向) 使用センサ：加速度センサ 測定範囲：±10G(±100m/s²) ・計測間隔：100ms～500ms 無線センサの設置間隔、その他の機能例、要素/基盤技術は” . “と同じ 	<p>遠隔地からのモニタリングが可能</p> <ul style="list-style-type: none"> 商用通信網(NIT回線等)を用いないでセンサデータの転送・モニタリングが可能 特長 <ul style="list-style-type: none"> 通信コスト削減 	<p>システムの稼働対象</p> <p>調査時：利用する 平時：利用する</p> <p>支柱の異常振動検知では、平時の健全な振動と異常な振動、風による振動などを事前に調査する必要がある。</p>
	<p>無線センサネットワークによる通行規制路線へ進入した車両の検知</p> <ul style="list-style-type: none"> 磁気センサを搭載した端末を道路灯に設置し、積雪等による通行規制路線に進入した車両を検知する。また、車両の位置を把握する。 無線センサネットワークの機能 <センサ機能例> <ul style="list-style-type: none"> 計測項目：車両の検知 使用センサ：磁気センサ 測定範囲：±2Gauss ・計測間隔：100ms～500ms 無線センサの設置間隔、その他の機能例、要素/基盤技術は” . “と同じ 		<p>システム稼働状況</p> <p>調査時：利用する 平時：利用しない</p> <p>車両以外の物体(例：風等で飛散したトタン屋根など)も検知する。</p>

表-5.4 「道路交通調査（交通量把握、駐車車両検出等）」における無線センサネットワークシステムの活用上の利点と課題（1 / 2）

項目	現状			
	主な道路調査業務の実態		道路調査手法の例	
	業務の種類と目的	調査内容	手段・手法	課題点
道路調査業務（交通量把握、駐車車両検出等）	<p>・交通量調査 道路交通の実態把握（渋滞状況の把握等）や道路の計画、建設、管理などについての基礎資料を得ることを目的とする。主な調査としては、昭和3年から概ね3～5年間隔で実施されている道路交通センサスなどがある。</p>	<p>・交通状況 歩行者、二輪車、自動車（4車種）の交通量 道路交通センサスの調査基準</p>	<p>・交通量調査員による目視計測 ・交通量の調査地点に調査員を配置し、通過する交通量を、方向別、時間帯別（概ね1時間ごと）、車種別（乗用車/バス/小型貨物車/普通貨物車）に目視判読により計測する</p>	<p>・人手観測による調査費の増大 ・調査日が重複することにより、調査員の確保が困難</p>
	<p>・駐車車両調査 主に都市域を対象に、駐車場の整備状況、利用実態、路上駐車等の基礎データを取得する。平成6年度以降は、道路交通センサスの実施に併せて駐車場調査も行われている。</p>	<p>・駐車車両状況 駐車場整備箇所数、駐車台数（利用実態）、路上駐車台数</p>	<p>・センサ（磁気センサ、振動センサ、マイクロフォン、CO2濃度等の大気センサ）による計測 ・調査目的（騒音・振動調査、大気汚染調査など）に合わせて、道路の沿道などにセンサを設置し、計測を行う ・大気汚染調査に関しては、車両に必要なセンサを搭載した大気測定車を用いた計測も行われている ・交通量調査の機械計測を目的として、磁気センサを用いた[簡易型トラフィックカウンター]による自動計測も試みられている</p>	<p>・計測には、電源を必要とする ・リアルタイム計測には、通信回線を必要とする。現在では、通信機能を持った携帯電話などが使われている ・通信をDoPaなどの携帯通信を利用するため運用費がかさむ</p>
	<p>・騒音・振動調査 主に都内の幹線道路の沿道における、環境基準の達成状況把握を目的として調査される。</p>	<p>・騒音・振動状況 騒音（例：道路端の地上1.2mに設置されたマイクロホンにより観測されたデータ、単位：db） 振動（例：振動規制法施行規則の測定方法に定められた調査データ）</p>	<p>・ブローブ機器による交通調査 ・主に交通センサスの調査項目である[旅客速度調査、道路状況調査]に用いられている ・ブローブ機器の種類には、カーナビゲーション、PD A+GPS、GPS内蔵携帯電話、ハンディ型GPS、バスロケーションシステムなどがある</p>	<p>・交通量の調査には利用できない ・トンネルや高層ビル街等GPS電波の遮蔽物がある場合は使用できない</p>
	<p>・自動車排出ガス等環境調査 沿道の大気汚染状況の把握を目的として調査される。主な調査基準には、環境基本法により定められた9つの有害物質、およびその環境基準を用いて行われる。</p>	<p>・大気汚染状況 二酸化窒素、浮遊粒子状物質、光化学オキシダント、二酸化硫黄、一酸化炭素、ベンゼン、トリクロロエチレン、テトラクロロエチレン、ジクロロメタン</p>	<p>・車種分類車両感知器等による計測 ・超音波車両検知器とループ式車両検知器を組み合わせ、測定地点の車両の通過台数（車種別）や車両速度を計測する ・主に交通量常時観測調査用（渋滞状況等調査）として全国の主な幹線道路に設置されている</p>	<p>・設置コストが高い ・期間が限られた計測に用いることは難しい</p>

表-5.4 「道路交通調査（交通量把握、駐車車両検出等）」における無線センサネットワークシステムの活用上の利点と課題（2 / 2）

項目	無線センサネットワークシステムを利活用した維持管理		
	道路調査手法の例 (手段・手法、使用する要素/基盤技術)	従来手法に対する メリット	実用化に向けた 課題、限界
道路調査業務（交通量把握、 駐車車両検出等）	<p>・センサネットワークによる走行車両検知</p> <ul style="list-style-type: none"> ・磁気センサを搭載した端末を走行車線の中央に埋設し、車両の通過を感知する。 ・等間隔に端末を埋設することにより、車速、車種(車長)、渋滞長の計測も可能である。 <p>無線センサネットワークの機能</p> <p><センサ機能例></p> <ul style="list-style-type: none"> ・計測項目：車両の感知 ・使用センサ：磁気センサ ・測定範囲：±2Gauss ・計測間隔：100ms～500ms ・無線センサの設置間隔：～9m(315Mhz帯) <p><その他の機能例></p> <ul style="list-style-type: none"> ・センサデータの無線通信機能、中継機能 ・アドホック通信機能(広範囲な自動通信ネットワークの構築機能) その他の要素/基盤技術（：主な機能） ・太陽光発電、キャパシタ等の電源技術 災害や停電時におけるセンサ端末の電源 ・光ファイバー通信網 ゲートウェイ装置から関係組織までデータ転送 	<p>・複数のセンサを用いた道路状況の同時観測</p> <ul style="list-style-type: none"> ・複数のセンサ端末の同時に得られるため、車両検知のほかにも、車種、渋滞長などの付加価値の高い情報も得ることができる ・ゲートウェイ装置を搭載した車両からのデータ受信も可能(現場計測可能) <p>検知可能な情報</p> <ul style="list-style-type: none"> ・走行車両検知(車長、車種(4車種)、車速) ・大気汚染状況、振動状況 ・駐車車両検知 ・路面温度状況 <p>・センサ端末の連続稼働が可能</p> <ul style="list-style-type: none"> ・充電時間が短いキャパシタを用いることにより、昼夜を問わず連続した稼働が可能 <p>特徴</p> <ul style="list-style-type: none"> ・メンテナンス不要 ・連続稼働が可能 	<p>システムの稼働対象</p> <p>調査時：利用する 平時：利用しない</p> <p>渋滞時など、センサ上を車両が低速で通過する場合、全端末のデータが収集できない場合がある</p> <p>道路上に配置する際には、走行車両の安全に配慮する必要がある</p> <p>車速等を計測する場合は、受信するセンサ端末の時間同期をとる必要がある</p>
	<p>・センサネットワークによる駐車車両検知</p> <ul style="list-style-type: none"> ・磁気センサを搭載した端末を路肩もしくはガードレールの下に配置し、駐車車両を感知する。 「無線ネットワークの機能」「その他の要素/基盤技術」は走行車両検知と同じ 		<p>システムの稼働対象</p> <p>調査時：利用する 平時：利用しない</p> <p>金属によりデータ通信に影響がある</p>
	<p>・センサネットワークによる路面温度・振動の計測</p> <ul style="list-style-type: none"> ・温度センサ(路面温度)、加速度センサ(路面振動)を搭載した端末を走行車両の中央に埋設、もしくはガードレールの下に配置する。 <p><センサ機能例></p> <ul style="list-style-type: none"> ・計測項目：路面温度の計測、路面振動の計測 ・使用センサ：温度センサ、加速度センサ ・測定範囲：-40～125(温度)、±10G(加速度) ・計測間隔：100ms～500ms 「その他の要素/基盤技術」は走行車両検知と同じ 	<p>・無人計測、および遠隔地からの計測が可能</p> <ul style="list-style-type: none"> ・商用通信網(NIT 回線など)を必要とせず、センサデータのモニタリングが可能 ・交通量調査の無人計測が可能 <p>特徴</p> <ul style="list-style-type: none"> ・交通量調査のコスト削減 ・通信費用が不必要 	<p>システムの稼働対象</p> <p>調査時：利用する 平時：利用しない</p> <p>センサのキャリブレーションが必要となる</p>
	<p>・センサネットワークによる騒音・大気汚染状況の計測</p> <ul style="list-style-type: none"> ・音センサ(騒音)、大気汚染状況(大気センサ)を搭載した端末を路面上約1.2mの場所に設置、計測を行う。 ・計測項目：騒音、大気汚染状況 		<p>センサに供給するための外部電源が必要となる</p>

表-5.5 「構造物の損傷・変状の検知」における無線センサネットワークシステムの活用上の利点と課題（1/2）

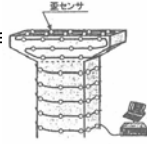
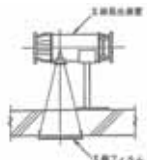
項目	現状				
	損傷・変状・災害の実態			予知・検知・管理手法の例	
	主な種類	主な被害内容	発生原因	使用する装置、診断方法など 課題点	
道路橋の損傷・変状の検知	<ul style="list-style-type: none"> ・支承部への損傷 ・橋面からの漏水や地震により損傷を受けやすい ・支承の損傷により、橋梁の上部工・下部工に影響する 	<ul style="list-style-type: none"> ・支承本体の腐食、亀裂、破断 ・ボルトのゆるみ、変形 ・沓座モルタルの破壊 	<ul style="list-style-type: none"> ・地震などの災害 ・繰り返し応力による疲労(応力集中箇所で発生する) ・ボルトの腐食、ゆるみ 	<ul style="list-style-type: none"> ・技術者による点検作業 ・本線内外で行われる日常巡回点検により、路面や防護柵等の点検が行われる ・定期点検や詳細点検などにより、橋脚や主桁、支承等の近接目視や打音による損傷点検が行われる 	<ul style="list-style-type: none"> ・日常巡回業務では、主桁や支承の点検は難しい ・定期点検、詳細点検には、多くの人員と時間が必要
	<ul style="list-style-type: none"> ・伸縮装置への損傷 ・車両通過に伴う疲労損傷や漏水、震災などの突発的な衝撃力により、主桁や路面に損傷を与える 	<ul style="list-style-type: none"> ・伸縮装置間(フェイスプレート間)の段差 ・腐食 ・遊間の異常 	<ul style="list-style-type: none"> ・施工時のボルトの締付け不足 ・部材間の空隙等の接合不良 ・塗装の劣化 ・海塩粒子・亜硫酸ガスの影響(工業地帯や海岸近くの構造物に多い) 	<ul style="list-style-type: none"> ・光ファイバーを用いた橋脚等のひずみ検知 ・橋脚などに光ファイバーセンサを設置し、パルス信号を送信し受信波から検証を検知する  <p><センサ機能例></p> <ul style="list-style-type: none"> ・測定範囲：±5,000μ ・測定精度：5μ 	<ul style="list-style-type: none"> ・コストが高い ・損傷の度合いを、直接検知することはできない
	<ul style="list-style-type: none"> ・主桁への損傷 ・車両の繰り返し荷重により、溶接部等に金属疲労によるひびわれが発生する ・支承など、別部材の損傷が影響した損傷が多い 	<ul style="list-style-type: none"> ・腐食、亀裂変形 ・ボルトのゆるみ、抜け落ち ・塗装の劣化 	<ul style="list-style-type: none"> ・X線発生装置による内部損傷の検知 ・橋梁の各部材にX線を照射し、撮影された透過画像から損傷状況を判断する手法 ・橋脚の鉄筋位置や鋼梁溶接部の欠陥、PCグラウト部の空隙等が検知可能  <p><計測機能例></p> <ul style="list-style-type: none"> ・X線装置撮影回数：最大33kHz ・X線時間幅：10~1,000μS 	<ul style="list-style-type: none"> ・有資格者でなければ作業できない ・安全管理区域を設ける必要がある ・コストが高い 	
	<ul style="list-style-type: none"> ・下部工(橋脚)への損傷 ・疲労や地震等による、ひびわれ(水平方向・垂直方向)や剥離などの損傷が発生する 	<ul style="list-style-type: none"> ・剥離、鉄筋露出 ・ひびわれ 	<ul style="list-style-type: none"> ・打撃音法 ・構造物を打撃して得られる打撃音から構造物の欠陥の有無を検知する手法 <p><計測機能例></p> <ul style="list-style-type: none"> ・打撃周期：2回/秒 ・打撃力：1500N(ピーク) ・マイクロ波周波数：40Hz~16,000Hz 	<ul style="list-style-type: none"> ・作業を高速化する ・コストが高い ・データを電子化する 	
				<ul style="list-style-type: none"> ・電磁波法(RCレーダー法) ・インパルス誘導原理で作動する電磁誘導法を用いてコンクリート内部の鉄筋状況を探索する手法 <p><計測機能例></p> <ul style="list-style-type: none"> ・測定方式：インパルスレーダ方式 ・測定対象：鉄筋、金属パイプ、空洞等 ・測定深度：15cmまたは40cm 	<ul style="list-style-type: none"> ・検出精度を向上 ・測定速度を高速化する

表-5.5 「構造物の損傷・変状の検知」における無線センサネットワークシステムの活用上の利点と課題（2 / 2）

項目	無線センサネットワークシステムを利活用した維持管理		
	予知・検知・管理手法の例 (使用する装置,使用する要素/基盤技術)	従来手法に対する メリット	実用化に向けた 課題, 限界
道路橋の損傷・変状の検知	<p>・センサネットワークによる支承の損傷検知</p> <p>・変位センサを搭載した端末を橋脚に固定し、変位センサの伸縮部を支承部と接するように取り付け、橋軸方向の変位量の測定を行う。</p> <p>・変位センサを全ての支承に設置することにより、伸縮装置の遊間も計測することが可能である。</p> <p>無線センサネットワークの機能</p> <p><センサ機能例></p> <p>・計測項目：橋軸方向の支承の変位量測定、伸縮装置の遊間測定</p> <p>・使用センサ：変位センサ</p> <p>・測定範囲(ストローク)：330mm</p> <p><その他の機能例></p> <p>・センサデータの無線通信機能, 中継機能</p> <p>・アドホック通信機能(広範囲な自動通信ネットワークの構築機能)</p> <p>その他の要素/基盤技術 (: 主な機能)</p> <p>・太陽光発電, キャパシタ等の電源技術 災害や停電時におけるセンサ端末の電源</p> <p>・光ファイバー通信網 ゲートウェイ装置から関係組織までデータ転送</p>	<p>・複数のセンサを用いた鋼橋の変位計測</p> <p>・複数のセンサ端末のデータ同時に得られる利点を生かした、客観的な損傷検知が遠隔地から可能</p> <p>・ゲートウェイ装置を搭載した車両による、現場からのデータ受信も可能</p> <p>検知可能な情報の例</p> <p>・主桁の挙動(振動), 傾き</p> <p>・支承の移動量</p> <p>・伸縮装置間の遊間, 段差(複数のセンサ端末から得られたデータから検知)</p> <p>・主桁の異常振動</p> <p>等</p> <p>・センサ端末の連続稼働が可能(災害の発生後を含む)</p> <p>・充電時間が短いキャパシタを用いることにより、昼夜を問わず連続稼働可能となる</p> <p>・自己電力と無線通信を用いるため、災害の発生後もデータが得られる(センサ端末の一部が故障しても、自動的にネットワークを再構成する)</p> <p>・遠隔地からのモニタリングが可能</p> <p>・無線通信+光ファイバー通信網を用いることにより、通信コストが削減できる</p>	<p>システムの稼働対象</p> <p>調査時：利用する</p> <p>平時：利用する</p> <p>変位センサの設置の際には、別途外部電源が必要である</p> <p>端末のアナログ/デジタル変換の精度は、通常のデータロガーに比べて劣るため、微少な変位量の計測は難しい</p> <p>変位センサの使用に際し、キャリブレーションが必要である</p> <p>測定している構造物を危険とみなすセンサ値が明確ではない</p>
	<p>・センサネットワークによる主桁の損傷検知</p> <p>・振動センサを搭載した端末を、主桁に対して一定間隔に設置し、主桁の損傷や老朽化に伴う異常振動を検知する。</p> <p>無線センサネットワークの機能</p> <p><センサ機能例></p> <p>・計測項目：支柱の振動振幅(2軸方向)</p> <p>・使用センサ：加速度センサ</p> <p>・測定範囲：±10G(±100m/s²)</p> <p>・計測間隔：100ms~500ms</p> <p>・無線センサの設置間隔：~40m(315MHz帯)、~70m(2.4GHz帯)</p>	<p>・自己電力と無線通信を用いるため、災害の発生後もデータが得られる(センサ端末の一部が故障しても、自動的にネットワークを再構成する)</p> <p>・遠隔地からのモニタリングが可能</p> <p>・無線通信+光ファイバー通信網を用いることにより、通信コストが削減できる</p>	<p>システムの稼働対象</p> <p>調査時：利用する</p> <p>平時：利用する</p> <p>主桁全体の正しい振動を計測する場合は、受信するセンサ端末の時間同期をとる必要がある</p> <p>コンクリート壁の剥離に関しては、検知することができない</p>

表-5.6 「災害時における早期モニタリングシステム」における無線センサネットワークシステムの活用上の利点と課題（1/2）

項目	現状				
	災害の実態		災害発生後に行う情報収集		
	種類と特徴	主な被害内容	収集する情報の種類	主な情報収集手段・手法	主な課題点
災害時における早期モニタリングシステム	<p>・地震災害</p> <p>・海溝型地震</p> <p>地震の規模が大きく、津波の被害を含めて被害が広範囲にわたる</p> <p>・内陸直下型地震</p> <p>被害は相対的に狭い地域に限られるものの、建物の倒壊率が高く被害が極めて甚大になる可能性がある</p>	<p>・道路損壊(崩壊)</p> <p>・路面陥没/隆起</p> <p>・道路閉塞</p> <p>・道路浸水</p> <p>・埋立地における液状化現象</p> <p>・橋桁の一部損壊</p> <p>・高架橋倒壊/損壊</p> <p>・トンネル崩落</p> <p>・トンネル壁面の剥落</p>	<p>・道路損壊状況</p> <p>損壊位置、損壊内容、規模、損壊の要因、車両通行の可否、復旧工事の必要性の可否</p> <p>・高架橋被害状況</p> <p>橋脚の位置/名称、路面の被害状況、橋脚のコンクリート剥落の有無、車両通行の可否</p> <p>・斜面崩壊状況</p> <p>斜面の崩壊位置、被害内容、規模、車両通行の可否、モニタリングの必要性の可否</p> <p>・道路浸水状況</p> <p>浸水範囲、道路冠水状況、冠水位置</p> <p>・道路施設管理物の被害状況</p> <p>街路樹、信号、標識、光ファイバー通信網など</p>	<p>・人手による被害状況調査</p> <p>・地方団体職員、消防団、専門家、自主防災組織等により被害状況の調査、情報収集活動、被害状況の取りまとめが行われる</p> <p>・概ね、規模の大きな地震(例：震度5弱以上)の後に繰り返し実施される。</p> <p>・ヘリコプター、高所カメラ、可搬画像伝送装置などを用いた被害状況の把握も行われる</p>	<p>・初動体制の確立に時間がかかる</p> <p>・被害状況の確認までに時間がかかる</p> <p>・被害情報の整理に時間がかかる</p> <p>・情報が紙ベースであり再利用し難い</p> <p>・常時モニタリングが不可能</p>
	<p>・風水害(気象災害)</p> <p>河川流域内の開発の進展に伴う、流域の保水・遊水機能の低下により、洪水や土砂流出などの被害が増大している</p>	<p>・道路浸水</p> <p>・河川堤防道路の崩壊</p> <p>・街路樹等、道路施設管理物の損壊</p> <p>・道路に隣接する斜面の崩壊、落石被害</p>	<p>・道路浸水状況</p> <p>浸水範囲、道路冠水状況、冠水位置</p>	<p>・土木構造物のリアルタイム損傷評価システム(例：橋梁)</p> <p>・大規模な災害の発生前に、基盤や基礎下部、地表の3地点に加速度計、橋脚と桁の間に相対変位計、主桁、主塔に加速度計を設置し、電話回線を介してリアルタイムに変位を監視するシステムである</p>	<p>・システムのリアルタイム性は、通信回線の速度に支配される</p> <p>・回線距離により、運用費用が増大する</p>
	<p>・火山災害</p> <p>噴火口、水蒸気爆発、火山ガス等の発生、溶岩流/火砕流、土石流/泥石流等の流下、噴出岩塊等については、過去の災害実績や噴出物分布等から影響範囲が事前に予測可能</p>	<p>・火山泥流や土石流に伴う、道路閉塞</p> <p>・噴石等に伴う道路倒壊</p>		<p>・衛星データを用いた被害状況調査</p> <p>・広い範囲を一定時間毎に観測する衛星データを利用して、斜面崩壊箇所等の把握や災害範囲、河川等の氾濫状況の把握する。</p> <p>・災害前後の衛星データを用いた、災害発生箇所の自動抽出も試みられている</p>	<p>・天候により地表面の観測ができない場合がある</p>

表-5.6 「災害時等における早期モニタリングシステム」における無線センサネットワークシステムの活用上の利点と課題（2 / 2）

項目	無線センサネットワークシステムを利活用した維持管理		
	災害発生後に行う情報収集 (情報収集手段, 使用する要素/基盤技術)	従来手法に対する メリット	実用化に向けた 課題, 限界
災害時等における早期モニタリングシステム	<p>・無人ヘリによる無線センサネットワーク端末の散布</p> <p>・危険斜面など、容易に近づくことができない被災現場に、無線センサ端末を搭載した無人ヘリを誘導し端末を散布する。</p> <p>・あらかじめ、無線センサ端末に搭載されている、振動センサ, 音センサ, 光センサ, 磁気センサ, 温度センサにより、被災箇所での生存者確認や2次被害の発生予測、ガス漏れ検知などの情報を得ることができる。</p> <p>無線センサネットワークの機能</p> <p><センサ機能例></p> <p>・計測項目：斜面の振動加測定, 音測定, 光(照度)測定, 磁気測定, 温度測定など</p> <p>・使用センサ：加速度センサ, 音センサ, 光(照度)センサ, 磁気センサ, 温度センサ</p> <p><その他の機能例></p> <p>・センサデータの無線通信機能, 中継機能</p> <p>・アドホック通信機能(広範囲な自動通信ネットワークの構築機能)</p> <p>その他の要素/基盤技術 (: 主な機能)</p> <p>・自立型無人ヘリコプタ</p> <p>センサ端末の散布機能</p> <p>遠隔操作による、被災現場上空への飛行</p> <p>センサを散布した箇所の位置記録</p> <p>記録した散布位置を基に、プログラム飛行によって、センサデータを収集する(飛行制御の精度は、~ 1m程度)</p> <p>・太陽光発電, キャパシタ等の電源技術</p> <p>災害や停電時におけるセンサ端末の電源</p> <p>・光ファイバー通信網</p> <p>ゲートウェイ装置から関係組織までデータ転送</p>	<p>・あらかじめ、道路構造物(橋梁、高架道路、トンネルなど)に加速度センサなどの端末を設置しておくことにより、震災後の被害状況が遠隔モニタリングできる</p> <p>・センサ端末~関係組織間が通信不能になった場合、無人ヘリにセンサ端末の受信装置(ゲートウェイ装置)を設置して、飛行することにより、データを収集可能</p> <p>・被災地にセンサ端末を散布することにより、崩壊危険斜面等のモニタリングシステムが安全かつ早期に実現できる</p> <p>・各種のセンサデータを同時に受信することにより、火災の発生や被災者の発見、ガス漏れの検知、などにも活用できる</p> <p>・センサ端末は、消費電力が少ないため、数週間以上、連続してデータを取得することが可能</p>	<p>システムの稼働対象</p> <p>災害時：利用する</p> <p>平時：利用しない</p> <p>計測間隔を狭くした場合、連続稼働時間も短くなる</p> <p>上空から、センサ端末を散布する際に用いるシールド方法を考える必要がある</p> <p>災害時に、無人ヘリで受信したセンサデータを、遠隔地からリアルタイムに受信することは難しい</p>

6 . 「斜面挙動監視・落石の検知システム」を対象とした

無線センサネットワークシステムの検討

本章では、無線センサネットワークシステムを斜面挙動および落石検知に利用していく際の、所謂、「斜面挙動監視・落石の検知システム」の全体構成を検討する。具体的には、センサ端末を設置した点のセンサデータからその地点に動きが生じたか否かを検知するためのセンサ端末の管理・制御方法、データ蓄積・管理方法、データ提供方法の仕様を定め、無線センサネットワーク技術を活用する際の「斜面挙動監視・落石の検知システム」の具体的な仕様を検討することとする。

6 . 1 プロトタイプシステムの概念構成

図-6.1 に本研究開発で検討する「斜面挙動監視・落石検知システム」の概念構成を示す。斜面変動や落石の危険地帯に配置したセンサ端末で地山・岩石の傾斜・加速度（振動）に関するセンサデータの観測・収集を行い、センサデータをゲートウェイを介して蓄積・管理・提供しようとするものである。ゲートウェイからのデータ転送方法としては光ファイバー通信網や既存ネットワーク（インターネットなど）を通して管理所へ転送する方法を想定している。なお、道路沿線などの斜面において、パトロール用の車両などにゲートウェイ（センサデータ受信機）を搭載して、センサデータを収集することもシステム運用形態として考えられるが、移動体からの無線センサの送受信に関しては技術的な面で解決が必要な課題があることが分かっていることから、今後の検討課題として本検討の範囲には含めないこととした。6.2 節において、斜面挙動監視・落石検知のためのプロトタイプシステムに要求される仕様を「センサ端末」、「センサ端末の管理・制御方法」、「データの蓄積・管理」、「データ提供」の4点に分けて詳細に検討する。

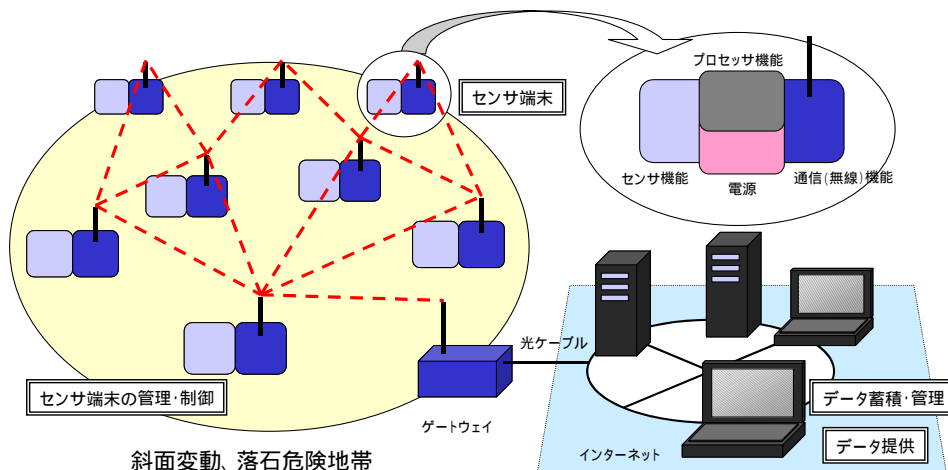


図-6.1 プロトタイプシステムの全体概念

6.2 プロトタイプシステムの仕様

(1) センサ端末

斜面の挙動監視と落石検知においては、要求されるセンサ端末仕様が異なることから、別々に仕様の検討を実施した。

a) 斜面の挙動監視

斜面の挙動監視においては、定点で斜面の動きを観測することと面的な挙動の監視の両方が必要とされている。中でも、地すべり検知では、検知する変動量は数 mm 以下と非常に高い精度での変動監視が不可欠とされている。現状では、主に、2点間に設置したワイヤーの伸縮を 1/100mm 程度の精度で計測する伸縮計が利用されている。

一方、斜面挙動監視に際しても、センサ仕様は数 mm 以下の「動き」を計測する精度が要求されている。このため、センサ端末に装備する加速度（振動）センサに高い信頼性と高い分解能（僅かな加速度を検知できる）が要求されることになる。しかしながら、加速度を如何に詳細に計測しても地すべりのような緩やかな挙動の大きさや向きを正確に把握することには技術的に限界がある。従って、センサ端末を用いた斜面の挙動監視の対象としては、急傾斜地における斜面崩壊の兆候把握および崩壊領域の検知が適当であると言える。

b) 落石検知

落石の検知では検知対象とする岩塊や岩石を特定して定点による観測が実施される。現状では、落石防護柵やロックネット、ストーンガードに設置された加速度センサや光ファイバーセンサによって落石の発生を検知する方法が一般的である。落石検知は何処で落石が発生したかを落石発生後に特定することが主な目的となっており、道路施設管理などにおいて豪雨や地震後において迅速に落石の被害状況を把握したいといった現場のニーズが多いことが伺える。一方で、落石発生前の兆候を正確に監視あるいは検知できる物理的な手法は比較的少ないと言える。本研究開発で対象とするプロトタイプシステムでは、落石の発生を検知することは言うまでもなく、落石の兆候把握への対応を考慮して検討を進める。

落石の検知では、上述したように、高い精度で検知対象の「動き」を計測する必要がある。センシング対象としては「傾斜」や「振動（加速度）」が挙げられる。斜面の挙動監視と異なり、センサ端末を設置した箇所の「動き」を観測することに主眼が置かれる。すなわち、変動の向きや変動領域の規模の把握よりは、定点における変動量を観測することが落石の検知に繋がると言える。

(2) センサ端末の管理・制御方法に関する検討

センサ端末と同様に斜面の挙動監視と落石検知においては、要求されるセン

サ端末の管理・制御方法が異なることから、ここでも別々に仕様の検討を実施した。

a) 斜面の挙動監視

斜面挙動の監視においては、複数のセンサ端末を広域に配置できる点において無線センサネットワーク技術の特徴を活用することが本研究開発で対象とするプロトタイプシステムの特徴になるものと言える。斜面崩壊の発生が懸念される領域は比較的広域に及ぶことが想定できるため、その周辺領域までを含めて無線センサネットワークシステムを構築するために多量のセンサ端末を配置する必要がある。このため、センシング精度の高いセンサ端末を如何に多量に開発するかといったハードウェア開発に関わる問題が斜面挙動観測における大きな課題の一つであると言える。

センサ端末の管理・制御において問題となるのは、各センサ端末におけるサンプリング周期とデータ伝達経路の確保である。平常時観測においては数分～1時間程度のサンプリング周期で良いものの、地震や豪雨時などといった緊急時においてはリアルタイムでの変動検知が必要になる。このため、オペレーターが観測状況に合わせてサンプリング周期を変動できるような仕組みを組み込むことが不可欠となる。

データの通信経路確保については、センサ端末の無線通信として **Zigbee** を採用した場合においても最大数 **10m**しか通信距離を確保できず、樹木や起伏の激しい斜面地帯においてはさらに通信可能な距離が短くなる。このため、図-6.2のケース1で示すように、通信機能のみを搭載してセンシング機能を搭載しな

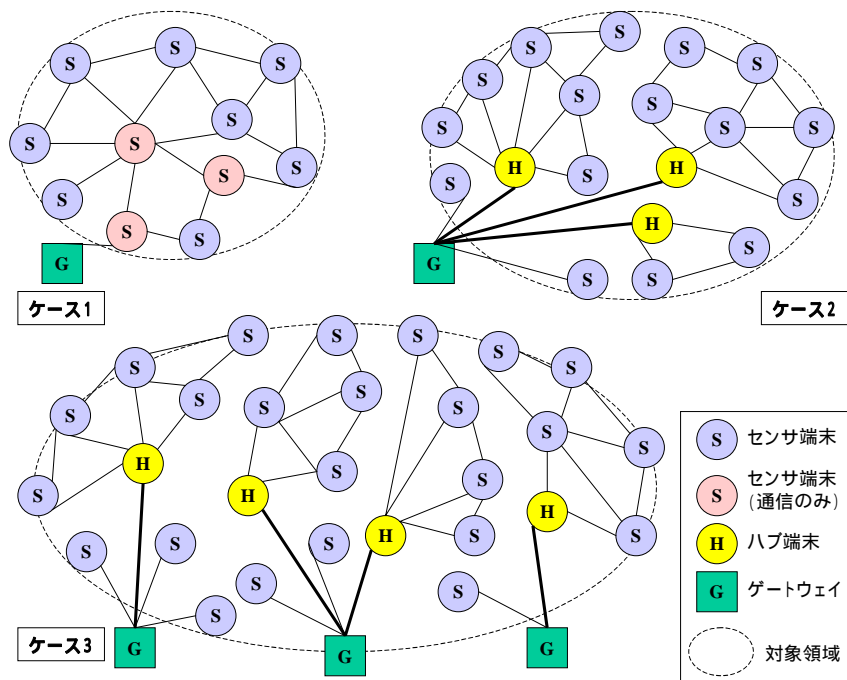


図-6.2 無線センサネットワークシステムにおけるデータ通信方法

比較的安価なセンサ端末を開発することが重要な課題となる。ここでは、通信機能のみを搭載したセンサ端末を通信装置の補間として配置することや、ケース2で示すように、通信距離の長い特定省電力無線などを搭載したハブとなる無線中継装置を一定間隔で設置して広域に対応できるようにセンサ端末間のデータ通信経路を確保することを考えた。また、対象領域が広域にわたる場合や複数の領域をカバーしようとする場合には、ケース3で示すような、複数のゲートウェイを配置することも1つの選択肢と考えられる。

b) 落石検知

落石検知においては、落石の危険がある岩塊や岩石に対して直接センサ端末を設置する必要がある。

検知の対象領域が広い場合、斜面変動検知と同様に図-6.2で示すようなデータ通信経路の確保が必要になる。しかしながら、落石検知の場合には、斜面変動検知ほど密にセンサ端末を配置する必要がないことから、データ通信経路が少数のセンサ端末に集中するような現象は殆ど発生しないと言える。

センシングのサンプリング間隔は定常時と災害発生時において可変であることが大切である。例えば、あらかじめ設定した傾斜角以上の値が検知された場合のみ、収集モジュールにデータを送信する仕組みにすることが考えられる。ただし、センサモジュールの動作確認（生存確認）のためにも、1時間に1回は通信を実施することが基本となる。

(3) 収集したデータを一元的に管理するデータベースの検討

無線センサネットワークシステムの各センサ端末で収集したセンサデータを活用するためには、何処で、何時、どのセンサで収集されたデータであるかを管理しなければならない。また、ネットワークを安定して維持していくためには、各センサ端末の状態を逐次、確認することが必要になる。センサ端末の現時点での電力量やセンサ端末からゲートウェイまでの通信経路（マルチホップ通信により経由してきたセンサ端末）、通信速度などがこれに該当する。各センサ端末から送信されるデータに含まれるべき最低限のデータとしては表-6.1に示すデータを考えている。

表-6.1 データベース管理が必要となる最低限のデータ

	センサデータを活用するために必要なデータ	ネットワークを維持するために必要なデータ
データの種類	①センシングした端末の番号 ②センシングした時間 ③センシングしたデータ ・傾斜角度 ・加速度 など	①センシングした端末の電力量に関するデータ ②経由したセンサ端末に関するデータ ③データの伝送速度

従って、収集したセンサデータのデータベースでは、表-6.1 に示すデータ群をセンサ端末別に時系列で蓄積・管理する仕組みが必要になる。

本研究開発の実験システム（プロトタイプシステム）に採用した「MOTE/MICA」シリーズでは、表-6.1 のデータを取り扱うことができることが確認されている。なお、「センシングした時間」はセンサ端末別での時間を管理しているのではなく、センサデータがゲートウェイへ到着した時間となる。センサ端末別に高い時刻同期を必要とする利用形態では、「センサ端末毎に時計機能を持たせること」や「一定間隔でゲートウェイから時刻補正データを送信すること」など様々な検討が必要になる。

センサ端末で計測されたデータがゲートウェイまで到達するまでの延滞時間が数秒以内であることが経験的に分かっている状況では、数十秒間、数分間に収集した複数のデータを平均化処理することにより、センシングデータとしての価値を高めることもできる。斜面変動監視や落石検知では、平常時は数分に1 回程度のサンプリング周期で十分対応できるため、このような方法を適用することが可能になる。緊急時観測においては数秒サイクルでのサンプリングが要求される場合もあるが、センサ端末で収集したデータが数十秒も遅れてゲートウェイに到達することは殆ど無いことから数秒程度の延滞時間は誤差の範囲と考えてよい。

データ蓄積・管理の効率化の面では、複数のセンサ端末から定期的に送信されてくるデータを全て蓄積することが物理的に可能であるが、サーバの記憶容量を多量に必要とするとともに、以後殆ど利用しないと考えられるデータを全て蓄積しておくことはシステム運用上得策ではない。特に斜面変動監視や落石検知の目的はセンサ端末でセンシングしたデータの変化を検知することに目的があることから、観測後の不要なデータを除去していく処理が必要になる。観測履歴を残すといった観点からは数時間単位でセンサデータを平均処理して蓄積していくことが効果的になると言える。なお、センサ端末自体にある基準値よりも低い場合などはセンサデータを送信させず、待機させるといったセンサ端末の管理も可能である。

（４）情報提供システムの検討

斜面挙動監視や落石検知システムにおいて最も重要となる情報は変動の発生時期と位置である。「変動量」が上昇し始めたタイミングや危険値として設定した値を上回る変動量を検知したタイミングにおいて何処が危険か（もしくは、何処で災害が発生したか）を警告する情報提供システムが求められる。このため、情報提供システムに要求される仕様としては、各センサ端末での時系列変化を表示できること、指定した変化量に近づいていることや指定した変動量に

達したことをオペレーターに認識させるアクションを起こすこと（例えば警告ブザーを鳴らすなど）が必要になる。

また、斜面挙動の検知においては、複数のセンサデータを統合して、クリッキング処理（不規則に配置されている空間データを用いて等間隔の格子上の値を推定する補間処理）を施すことにより、面的な変動として表示させることが視覚的に効果が得られる。この際、センサ端末を設置した位置に関するデータを併用することが不可欠となることは言うまでもない。このため、センサ端末を設置する際には、端末を設置する位置とセンサ端末間の位置関係を高い精度で保障できるような状況にしておかなければならない。

センサデータの中には、通信過程で発生するデータの欠損やノイズが含まれることも多い。このような欠損やノイズを含むデータと真の変動に関するデータを区別する判別システムも情報提供システムに装備されていなければならない。また、ネットワーク管理の観点からは、各端末の稼働の可否や電力残量、アドホック通信経路の変化を逐次、確認できることも求められる。

6.3 プロトタイプシステム仕様の整理と実現可能性の評価

6.2 節における検討結果を考慮して、無線センサネットワーク技術を利用した斜面の挙動監視と落石検知システムの要求仕様を表-6.2「斜面挙動監視システムの場合」、表-6.3「落石検知システム」にそれぞれ整理した。また、第4章の初期検討において取りまとめ、本研究開発のプロトタイプシステムに導入・応用することとした。「MOTE/MICA」シリーズを無線センサネットワークシステムとして利用する場合の実現可能性の評価を実施し、「MOTE/MICA」シリーズでも対応可能な点と新たに開発が必要となる事項を整理した。

表-6.2 「斜面の挙動監視システム」のプロトタイプシステム仕様と実現可能性の評価結果

項目	要求機能	要求仕様	「MOTE/MICA」シリーズによる実現適用可能性評価	要求仕様実現に向けた課題
センサ 端末	センサ機能	振動（加速度）センサ 精度：-10～+10（G） 分解能 100（mV/G） ※外付けセンサの利用	×：微少な振動検知には向かない ○：3V程度の安定電源供給が可能 △：外付けセンサ取付け時の安定稼働が保障されていない	A/D変換により欠損するデータ量を精密に計測しておく必要がある
	無線機能	無線通信距離 10～100（m）	△：端末の設置環境によるが Zigbee対応の「MICAz」で対応可能	広域で多量の端末を利用する場合には、無線中継端末の併用が不可欠
	電源	電圧域の測定（2V～4.5V） 1年の連続稼働時間	×：専用の中継端末の利用が不可欠	サンプリング間隔、稼働時間を延ばすためには外部電源が不可欠
	ケーシング	耐水性、耐衝撃性、 耐熱性、防塵性の確保	×：耐水性ケースの開発が必要 ×：衝撃に対応したケースの開発	独自のケーシングの開発が不可欠
ネット ワーク 制御	センサ個数	計測頻度（2Hz）で同時計測 15個程度	△：観測頻度2Hz時には端末数6機以上 では安定稼働が保証できない	1つの端末にセンサデータが集中しないようなトポロジーの構築が必要
	時間管理	数秒以内にゲートウェイへ データが到達する信頼性	×：端末間の時刻同期を厳密に行う必要 がある	ゲートウェイからセンサ端末の時刻同期を取れるような仕組みが必要
	基幹系インフラとの接続	ゲートウェイ装置と既存ネットワークとの接続	○：現状の技術レベルで対応可能	「光ファイバ通信」、「携帯電話通信」への接続試験が必要
デー タ ベース	データの種 類	端末番号、センサの値 観測時刻、端末の残電力 データ通信経路	○：デフォルトのセンサデータに全ての 項目が含まれている	「MOTE/MICA」シリーズでの観測時刻はゲートウェイにデータが到達した際の時間であることに注意
	データの容量	長期システム運用における サーバ容量の確保	定常時の不要なセンサデータは消去するか、センサ端末制御によって取得しないことでサーバの容量は確保できる。単位時間当たりの平均値などを観測履歴として蓄積していくことも考えられる。	
情報 提供	計測データの 利用方法	観測データのリアルタイム 表示、クリック処理による 表示の工夫	独自のビューシステムを開発する必要がある。 斜面の挙動監視には、センサ端末の位置測定技術が不可欠である	
	計測データの 判断基準	基準値以上の振動センサの 値で危険度判定	現時点では判断基準が決まっていない。危険を知らせる基準値の選定が急務となる。	

表-6.3 「落石検知システム」のプロトタイプシステム仕様と実現可能性の評価結果

項目	要求機能	要求仕様	「MOTE/MICA」シリーズによる実現適用可能性評価	要求仕様実現に向けた課題
センサ 端末	センサ機能	振動（加速度）センサ 精度：-2～+2（G） 分解能 300（mV/G） 傾斜センサ 精度：-15～+15（度） 分解能 0.01（度）	○：3V程度の安定電源供給が可能 ×：傾斜センサについては外付けセンサが必要	A/D変換により欠損するデータ量を精密に計測しておく必要がある。
	無線機能	無線通信距離 10～100（m）	△：端末の設置環境によるが Zigbee対応の「MICAz」で対応可能	広域で多量の端末を利用する場合には、無線中継端末の開発が必要。
	電源	電圧域の測定(2V～4.5V) 1年の連続稼働時間	○：現状の技術レベルで可能	サンプリング間隔、稼働時間を延ばすためには外部電源が不可欠。
	ケーシング	耐水性、耐衝撃性、 耐熱性、防塵性	×：耐水性ケースの開発が必要 ×：衝撃に対応したケースの開発	独自のケーシングの開発が不可欠
センサ 端末の 管理・ 制御	センサ個数	計測頻度（2Hz）で同時計測 2～5個程度	○：観測頻度2Hz時に安定稼働が可能	1つの端末にセンサデータが集中しないようなトポロジーの構築が必要
	時間管理	数秒以内にゲートウェイへ データが到達する信頼性	△：長期連続稼働に伴う時刻延滞が発生 する恐れがある	ゲートウェイからセンサ端末の時刻同期を取れるような仕組みが必要
	基幹系インフラとの接続	ゲートウェイ装置と既存ネットワークの接続	×：専用の中継端末の利用が不可欠	「光ファイバ通信」、「衛星通信」への接続試験が必要
デー タ ベ ース	データの種 類	端末番号、センサの値 観測時刻、端末の残電力 データ通信経路	○：デフォルトのセンサデータに全ての 項目が含まれている	「MOTE/MICA」シリーズでの観測時刻はゲートウェイにデータが到達した際の時間であることに注意
	データの容量	長期システム運用における サーバ容量の確保	定常時の不要なセンサデータは消去するか、センサ端末制御によって取得しないことでサーバの容量は確保できる。単位時間当たりの平均値などを観測履歴として蓄積していくことも考えられる。	
情報 提供	計測データの 利用方法	観測データのリアルタイム 表示	独自のビューワーシステムを開発する必要がある。	
	計測データの 判断基準	基準値以上の振動センサの 値で危険度判定	現時点では判断基準が決まっていない。危険を知らせる基準値の選定が急務となる。	

6.4 まとめ

表-6.2、6.3 に示すようなセンサ機能の精度や無線通信距離、センサ端末におけるサンプリング周期、システムの耐用年数にある程度の制約や前提条件を設けることで、最も基本的な無線センサネットワークシステムと言われている「MOTE/MICA」シリーズを利用しても、落石検知システムを実現できることが分かった。しかしながら、斜面の挙動監視システムでは、システム構成するセンサ数やセンサ精度の信頼性の確保など「MOTE/MICA」シリーズでは対応できない項目も多々あることが判明した。また、当然のことながら、上述の両システムは本来現場での試験を実施してみなければ、要求仕様が斜面の挙動監視や落石検知に適しているか否か判断できない。

無線センサネットワーク技術を用いた斜面の挙動監視・落石検知システムの仕様の検討を通して、プロトタイプシステムの開発においては以下の点に課題解決が必要で有ることが明らかになった。

① センサ端末の設置場所の選定

無線通信距離やデータ通信経路はセンサ端末の設置場所に依存する部分が多い。樹木などの遮蔽物がある地点においてもデータ欠損（送信エラー）が発生しない状況が確保できるか否か検討が必要になる。また、岩塊や斜面にセンサ端末を固定する方法についても具体的な技術開発が不可欠である。

② センサ端末のケーシング方法

屋外での長期利用において防水性、耐衝撃性、耐熱性、防塵性を確保することが必要である。センサ端末のセンシング対象への設置技術と合わせて、端末のケーシング方法の技術開発が不可欠である。

③ ゲートウェイ（収録端末）の設置方法と電源設備

光ファイバー通信や衛星通信などの既存の通信ネットワークシステムを利用できる場合にはゲートウェイに専用のハードウェアを搭載することでデータをサーバへ送信することが可能である。しかしながら、既存の通信ネットワークが利用できない環境では、一時的にセンサデータを蓄えておき、定期的にデータをダウンロードするなどといった対応が必要である。このため、ゲートウェイに収録端末としての機能を搭載する必要がある。

また、ゲートウェイそのものを稼働させるために必要となる電力を確保するために、専用の電源を確保することも不可欠である。

本研究開発を通じて実施してきたプロトタイプシステムの仕様を基にして、次年度には無線センサネットワーク技術を利用した実用化を前提とした斜面の挙動監視・落石検知システムの開発を行い、システム稼働試験を実施することを考えている。

7. おわりに

本研究開発では、建設分野における既存の各種調査・監視システムの設置・維持・管理に関わるコストと労力の低減、時間的、空間的に欠損の少ないデータ収集方法の実現を最終目的として、最近、多くの分野で注目を浴びている先端技術の一つである無線センサネットワーク技術の適用可能性について検討した。具体的な検討結果は以下の4点に要約できる。

現状の無線センサネットワーク技術の動向を既往の研究開発事例から調査・整理するとともに、複数のセンサ端末の中から汎用的な機能を標準装備している「MICA/MOTE」シリーズ（「MICA/MOTE2」、「MICA/MOTEz」）を実験システムとして採用することにより、無線センサネットワークシステムの実利用を図る際の留意事項を検討した。検討の結果、各センサ端末で観測されたセンサデータをゲートウェイまで無線通信する際に、データの欠損や延滞を出来るだけ低減するためには、各センサ端末におけるセンシングのサンプリング周期と無線通信ネットワークを構築する端末数の間に制限があることが分かった。特に、センシングに際して、サンプリング周期を速めることによりデータ欠損が頻発する傾向にあることが分かった。また、見通しの良いテストサイトにおいても各センサ端末間の通信距離は数10mが限界であることが分かった。この結果から、自然界での広域を対象としたセンシングに際しては、センサ端末の数を増やすことが要求されることになる。しかし、無線センサネットワークシステムの端末数を無尽蔵に増やすことには、観測対象の規模や地形特性を考慮して、データ通信経路を確保するために、通信距離の長いデータ中継端末を利用することや終端装置となるゲートウェイを複数利用するといった工夫をしなければならないといったハードウェア構成を検討する際の問題点が明らかになった。

建設分野における無線センサネットワーク技術の適用を想定して、5種類の活用イメージを作成した。活用イメージの作成においては、現状で実施されている調査・監視方法の実態を詳述し、無線センサネットワークシステムを導入することの意義を明確にした。また、データ収集システムを有線から無線に変えることにより生じるメリットや従来方式では人の力に頼っていた部分をセンサ端末で代用することにより生じるメリット、新たに無線通信ネットワークを構築することによる計測時間の短縮により生じるメリットを活用イメージごとに整理した。

代表的な5つの応用事例の中から、現場からのニーズが最も大きいものの1つである。「斜面の挙動監視・落石検知システム」を対象に、無線センサネッ

トワークシステムを利用していく際のシステム要求仕様を検討した。また、「MICA/MOTE」シリーズを無線センサネットワークシステムとして採用した場合における斜面の挙動監視・落石検知システムの実現可能性について評価を実施した。

「斜面の挙動監視システム」では、変動量を面的に観測すること、数 mm 以下の斜面の動きを検知する必要があることから、各センサ端末の観測時刻の同期を取る技術を導入しなければならず、また、微小な斜面の動きを検知できる高性能のセンサを搭載する必要があることから、「MICA/MOTE」シリーズでは実現が困難であることが分かった。

「落石検知システム」では、センサ端末とゲートウェイの通信距離に数 10m といった制限があるものの、センサ端末のケーシングに関する課題をクリアできれば、「MICA/MOTE」シリーズにおいても実現可能性が高いことが分かった。

斜面の挙動監視・落石検知システムを利用して現象把握を行う場合、斜面災害の低減に資する支援情報を提供するという視点から、センサデータの管理・提供のあり方についても検討した。センサデータから危険性を判断するために設定する基準値の検討やどのタイミングで災害発生兆候をアナウンスするかといったデータの解析・加工のプロセスに課題が残された。

今後の課題としては、第 6 章で整理した「MOTE/MICA」シリーズをベースとする「斜面の挙動監視・落石検知システム」を構築し、自然環境の仮名で観測条件が絶えず変化する現場において、無線通信ネットワークが減衰なく安定して通信距離・通信速度が確保できるか否かについて現地実験を通して検証することである。また、天候条件が過酷な屋外においても正常に動作できるようにセンサ端末のケーシング技術の検討も繰り返し実施することによって信頼性を確認する。

【参考文献】

- 1) 安藤繁、田村陽介、戸辺義人、南正輝：センサネットワーク技術 コピキタス情報環境の構築に向けて - 、東京電気大学出版局、2005 年
- 2) Hans Wackernagel 原著、地球統計学研究委員会訳編、青木謙治監訳：地球統計学、森北出版、2003 年
- 3) J. Suh and M. Horton: Current Hardware and Software Technology for Sensor Networks
- 4) Crossbow Technology, Inc.: MOTE-Wireless Sensor Networks Getting Started Guide 日本語ガイド Rev. B August 2004 Doc7430-0022-05JP For TinyOS ver1.1.7
- 5) Crossbow Technology, Inc.: MOTE-VIEW 1.0 User's Manual Revision A, March 2005 7430-0008-02
- 6) Crossbow Technology, Inc.: Wireless Sensor Networks
- 7) T. Nagayama, M. Ruiz-Sandoval, B. F. Spencer Jr., K. A. Mechitov, G. Agha: Wireless Strain Sensor Development for Civil Infrastructure
- 8) K. Mechitov, W. Kim, G. Agha and T. Nagayama: High-Frequency Distributed Sensing for Structure Monitoring
- 9) RUIZ-SANDOVAL Manuel, SPENCER Billie F., KURATA Narito: Development of a high sensitivity accelerometer for the Mica platform
- 10) Narito KURATA, Billie F. SPENCER, Jr., Manuel RUIZ-SANDOVAL: Building risk monitoring using wireless sensor network, 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, 2004, Paper No.1406
- 11) 太田義和、菅野正嗣、村田正幸：センサネットワークにおける位置測定のためのデータ収集方法の提案、(社)電子情報通信学会信学技報、pp.1-6
- 12) 榎原俊太郎、若宮直紀、村田正幸：センサネットワークのための同期型センサ情報収集機構の実装と評価、情報処理学会研究報告 2004-UBI-5、pp.1-8、2004 年
- 13) 豊田新、川崎大輔、保木本武宏、大熊孝裕、岡山高明、新井正伸：無線センサネットワークシステムの開発と環境モニタリングへの応用展開、NEC 技報、Vol.57、No.1、pp.54-58、2004 年
- 14) D.E.カラー、H.マンダー：世界を見守る賢いセンサー網、日経サイエンス 2004 年 9 月号、pp.66-75
- 15) G. J. Pottie, W. J. Kaiser：無線を用いたネットワークセンサの統合、pp.14-23
- 16) 戸辺義人：センサネットワーク研究の動向、SSR「Pervasive Computing のための基盤ソフトウェアに関する調査研究」報告書、pp.1-18、2003 年
- 17) Scalable and Robust Scheme for Data Gathering in Sensor Networks, In Proceedings The First International Workshop on Biologically Inspired Approaches to Advanced Information Technology (Bio-ADIT 2004), January 2004
- 18) 東京大学情報理工学系研究科電子情報学専攻新領域創成科学研究科基盤情報学専攻青山・森川研究室：センサネットワーク開発用モジュール U3 におけるソフトウェアデザイン及びプロトタイプアプリケーションの実装
- 19) センサネットワークのための同期型センサ情報収集機構の実装と評価
- 20) 高感度磁気センサを使った車両検知機の試作、山武グループ各社 Savemation Review

- 21) フリースケール・セミコンダクタ・ジャパン株式会社：近距離無線「ZigBee」の標準化が大詰に対応チップの受注開始、応用製品の開発が加速
- 22) 次世代近距離無線ネットワークを実現する ZigBeeTMSI、沖テクニカルレビュー2004年、第200号、Vol.71、No.4
- 23) アドホック無線センサネットワークによる人間の行動・環境把握システムの構築、大阪大学基礎工学部情報科学部平成14年度特別研究報告
- 24) 大規模なユビキタスセンサネットワークにおける情報収集・管理システム、大阪大学基礎工学部電子情報エネルギー工学科情報システム工学科目特別研究報告

助成研究者紹介

おおばやし しげゆき
大林 成行

現職：香川大学工学部客員教授（工学博士）

主な著書

- ・地盤技術者を対象とした衛星リモートセンシング入門、地盤工学実務シリーズ（(社)地盤工学会、2002年）
- ・新版実務者のためのリモートセンシング（(株)アジ・テカシステム、2002年）
- ・地盤工学への物理探査技術の適用と事例、地盤工学実務シリーズ（(社)地盤工学会、2001年）
- ・地球環境科学（朝倉書店、1995年）
- ・建設工事における自動化・ロボット化への展望（(社)土木学会、1992年）
- ・リモートセンシング概論（(株)朝倉書店、1990年）
- ・土木工学ハンドブック（(社)土木学会、1989年）