

社会基盤施設マネジメントのためのモニタリング技術とセンサーネットワーク*

Monitoring Technique and Sensor Network for Infrastructure Asset Management*

金川昌弘**・貝戸清之***・小林潔司****

by Masahiro KANAGAWA**, Kiyoyuki KAITO*** and Kiyoshi KOBAYASHI****

1. はじめに

現在のアセットマネジメントは、目視点検データを中心とした方法論（Visual Inspection Data Based Asset Management）によって構築されている。すでに、マルコフ連鎖モデルによる劣化予測や、マルコフ意志決定モデルを援用したLCC最小化に基づく補修戦略の決定など、各要素技術の有機的な体系化がなされており、アセットマネジメントの実用化に大きく貢献している¹⁾。実際に複数の構造物管理者において、この方法論に基づいて独自のアセットマネジメントシステムが構築されている。しかしながら、一方で、1) 常時監視による損傷・劣化の早期検知、2) 力学的性能の定量的評価に基づく安全・安心の確保といった実務的要請の極めて高いニーズに対しては、目視点検の限界が指摘されている。目視点検データに基づくアセットマネジメントを第一世代と定義するならば、第二世代ではこれらの課題（特に課題1)）の解決が可能なモニタリングデータに基づくアセットマネジメント（Monitoring Data Based Asset Management）の開発を視野に入れなければならない。

以上の問題意識のもと、本研究ではまず1) アセットマネジメントにおいてモニタリングが期待される役割、2) モニタリングデータの蓄積と通信を担うセンサーネットワークについて述べる。特に後者2) に関しては、ICタグ（RFIDタグ）や無線通信の活用を想定したセンサーネットワーク構想を提案するとともに、実用化を図る上での現状の課題を整理する。以下、2. においてモニタリングが期待される役割をまとめるとともに、RFIDタグや無線通信の活用を想定したセンサーネットワーク構想を提案する。3. で、今後実用化を図る上での現状の課題を整理する。

2. モニタリングとセンサーネットワーク

(1) モニタリングに期待される役割

目視点検データには、点検の実施頻度が低いことや、判断が主観的であることに起因して、不確実性や観測誤差が介在する。しかしながら、管理対象となる社会基盤施設全数の適切な維持管理を目的としたアセットマネジメントにおいては、全数から画一的に健全度情報を獲得することが極めて重要であり、現状では目視点検が唯一の手段である。また、すでに、複数の管理者では膨大な目視点検データが蓄積され、目視点検データに基づくアセットマネジメントが稼働している。したがって、例えば目視点検に代わる点検方法が開発されたとしても、その導入は段階的にならざるを得ないと考えられる。各種センサーを用いたモニタリング技術は、古くから目視の代替技術として、学術面のみならず、実用面からも検討がなされている。センサーから定量的データを常時計測することが可能なモニタリング技術は、先述した目視点検の欠点を克服し、アセットマネジメントの根幹となる基礎データの質的・量的な向上を図ることができるものと考えられる。

現状のアセットマネジメントにおいてモニタリングに期待される役割は、1) 常時監視による損傷・劣化進行の早期検知、2) 力学的機能の定量的評価に基づく安全・安心の確保である。これらのうち、2) は、1) よりもさらに深度化された計測技術や性能評価技術を要することから、本研究では1) に焦点を当てることとする。このとき、まず、どの構造物、部材をモニタリング対象とするのか、計測したデータをいかに効率的に集計するか、が当面の課題となる。前者の計測対象の絞り込みに関しては、目視点検データを用いた統計的劣化予測手法の最新成果を利用することができる。小濱ら²⁾は劣化速度を表すハザード率に構造物個々の異質性を考慮した混合ハザードモデルを開発し、各構造物の混合ハザード率を相対評価することで、要監視構造物の抽出が可能であることを実証的に示している。一方で、後者に関して、分散的に配置されたモニタリングシステムからデータをいかに効率的に集計するかは重要な課題である。分散化されたデータを技術者や点検員が現地まで収集に行くので

*キーワード: モニタリング, センサーネットワーク, 無線センサー, アセットマネジメント

**正会員 パナソニックコミュニケーションズ株式会社
(〒812-8531 福岡市博多区美野島4-1-62
e-mail: masahiro.k@ay2.ecs.kyoto-u.ac.jp)

***正会員 大阪大学大学院工学研究科 特任講師
(〒565-0871 吹田市山田丘2-1
e-mail: kaito@ga.eng.osaka-u.ac.jp)

****フェロー 京都大学経営管理大学院 教授
(〒606-8501 京都市左京区吉田本町
e-mail: kkoba@psa.mbox.media.kyoto-u.ac.jp)

は、その場で目視点検を実施した方がよい。あるいは、光ファイバ等の通信網を張り巡らせることで情報集計は可能となるが、費用面で現実性は乏しい。したがって、この課題を具体的に解決することが、次世代アセットマネジメントの具現化につながる。さらに、この課題を克服することで、通常のアセットマネジメントのみならず、事故・災害時対応に係わる意志決定の迅速化も実現することが可能になると期待できる。

なお、本研究では、これ以降、社会基盤施設から効率よくモニタリング情報を集計する手段として、無線センサーネットワークに着目する。しかし、後述するように現状の技術ではフィールド側で処理・保存できる情報量はそれほど大きくない。したがって、計測データ（無線センサーのアウトプット）は、社会基盤施設の物理的性能といった高度な情報を提供することは難しい。しかし、本研究で着目する無線センサーネットワークの特徴は、日々の継続的なモニタリングが実現できる可能性を有している点にある。すなわち、計測データそのものはある物理量の期待値や最大値といった1回の計測では何の工学的意味を持たない簡易な情報ではあるが、それらを蓄積し、過去のデータと相対評価を行うことで損傷・劣化の早期検知を目指す。したがって、長期間に亘る時系列データの変化を統計的に検定する手法³⁾の開発も重要な課題であると著者らは考えている。

(2) センサーネットワーク

センサーネットワークは、前節で述べたモニタリングを具現化する基盤技術である。近年の半導体技術などの進歩により、小型で安価、かつ高性能なセンサーが開発されるようになった。それに伴って、例えば、構造ヘルスマニタリングでは低コスト化が進み、地震モニタリングでは従来の技術では非常に困難であった点情報から面情報の獲得が可能になった。特にこれらの中でも、無線センサーネットワーク（WSN: Wireless Sensor Network）の研究が盛んに進められている。本研究でも、無線センサーネットワークに着目する。

a) 無線センサーネットワークの構成

無線センサーネットワークは基本的に、「センサーノード」「ネットワーク」「上位システム」という三つの要素から構成される。センサーノードとは、センサー機能、無線通信機能、電源機能、計算機能（CPU）を持った小型のデバイスのことである。ネットワークとは、センサーノードと上位システムを繋ぐものであり、センサーノード間のネットワークと、センサーサーバ（ゲートウェイ）から先の上位のネットワークがある。そして、上位システムとは、ミドルウェアとアプリケーションを指す。ミドルウェアは、センサーノードでセンシングされ、送信されてきたデータのうち必要なデータだけを

抽出するフィルタリング等の信号処理や、センシングされたデータの保管・管理、データマイニング、センシングデータの位置や時間の精度向上などの品質制御を行うために必要となるものである。アプリケーションは、そのセンサーネットワークの用途に関わるもので、通常、データの分析・評価・自動通報などのソフトウェアやシステムのことである。

b) RFID タグ

RFID タグ⁴⁾は、記憶機能と演算機能を有する最小の無線ノードである。対象物に付着してデータを運ぶ媒体という意味で、データキャリアとも呼ばれる。データの書き換えは当然可能である。また、RFID タグはユニークなIDを持っており、このIDを検索キーとして活用することで、RFID無線ノードの位置情報やその他の計測対象に関連する全ての情報を間接的に把握できる。さらに用途に応じたセンサー付きのRFIDタグは、計測対象に対する計測データを取得することもできる。センサー付きRFIDタグのハードウェアの一般的な構成は、通信モジュール、マイクロプロセッサ、メモリ、センサー、および電源の5つの要素からなる。

ここで、メモリには、通常1) ユニークIDを格納する領域（上書き禁止）と2) データを格納する領域（上書き可能）が存在する。また、通常RFIDタグが格納できる最大情報量は8,000bit程度である。RFIDタグを内部構造で分類すると、内部に電池を持たないパッシブタグと内部に電池を持つアクティブタグの2種類になる。アクティブタグの電池寿命は、代表的な製品では、1.0秒周期の発信では1.2年であり、7.0秒周期では4.5年にまで延長することが可能となる。

アクティブタグは、パッシブタグに比べ、通信距離が長いという特徴を持つ。日本国内では電波法の規制があり、300MHz帯で微弱無線の出力範囲で発信する場合、10m程度の通信距離しか出せないが、米国では100m程度の距離でモニタリングデータの通信を行ったという実例もある。本研究では、300MHz帯を使用するアクティブタグを活用する。また、今後アクティブタグへの太陽電池の活用も視野に入れる。

RFIDタグをさらに進化させて、自律的な無線センサーネットワークを実現することもできる。本研究では、この自律的な無線センサーネットワークを実現するために、RFIDタグにZigBee無線通信機能も持たせることを検討している。ZigBeeは、自律的な無線通信機能を持ち、かつ省電力性に優れた次世代無線通信標準として期待されており、IEEE 802.15.4bとして検討されている。ZigBeeのデータ転送速度は最高250kbpsで、最大通信距離は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本での稼働時間は数ヶ月から2年間となる。

c) モニタリングデータの蓄積

モニタリングの計測データとして、構造ヘルスマニタリングでは、たわみ、ひずみ、変位等、地震モニタリングでは加速度等が一般的である。それらに加え、RFID タグの ID 情報や計測データの取得時刻などの付加情報も収録可能である。それ以外の関連情報（センサーノードの位置情報やモニタリング対象構造物の施工業者情報や補修・補強等の履歴情報など）は、遠隔地の管理センター等に設置されたサーバ側で管理する仕組みであっても、その情報をアプリケーションなどの端末から ID を照合させることで、サーバから情報を取得できる。現在、RFID が 2 つの国際的な標準化団体（EPCglobal とユビキタス ID センター）によって標準化され、それぞれ EPC (Electronic Product Code) と ucode (Ubiquitous Code) と名付けられている。EPC コード体系には 64bit と 96bit の仕様がある。一方、ucode は 128bit を基本長としているが、必要に応じて 128bit 単位での拡張も可能である。本研究では、まず EPC に着目する。その概要は、ID および取得時刻付き計測データをセンサーサーバーが取得・集約後、上位システムに転送してデータベースに蓄積し、蓄積したデータ情報を上位アプリケーションが取得・利用するシステムとなっている。

d) 無線センサーネットワーク構想

モニタリングシステムの現場での適用を踏まえて、2 つの無線センサーネットワーク・プロトタイプ（単独方式とリレー方式）を提案する。

単独方式とは、センサーサーバーは移動可能、かつ移動経路は全てのセンサーノードの通信可能な範囲内に所在するようなケースを想定している。データのやり取りは基本的にセンサーサーバーとセンサーノードの間で行い、センサーサーバーは各センサーノードから収集したデータ情報を上位システム（監視センター）へ通知するまでの間に、それらのデータを一時的に収録する役割を果たす。なお、監視センターへの通知は、センサーネットワークを広域網に展開した常時通知や、点検員や監視パトロール車が巡回することによって、点検員が所持、またはパトロール車に搭載したセンサーサーバー（情報収集端末）経由で監視センターへ通知するなど、構造物の監視レベルに合わせて最適な方法がとられる。特にパトロール車を活用する場合、センサーサーバーを搭載したパトロール車が高速道路上を走行しながら各センサーノードの情報を収集することができれば、モニタリングの実用性が飛躍的に向上し、第二世代のアセットマネジメントに大きく貢献する基幹技術になるものと期待される。この方式を実用化するためには、パトロール車がほぼ通常走行状態でのデータの受け渡しが重要で、無線距離を 100m 程度確保することが必要となる。

つぎに、リレー方式とは、センサーサーバーは移動

表-1 無線センサーネットワークの技術的課題

課題	
1	センサーの小型化
2	センサーの低コスト化
3	センサーの長寿命化（電源問題）
4	センサーの耐久性
5	センサー校正
6	センサー設置
7	通信周波数と規制緩和
8	通信条件・環境
9	RFID 電波干渉
10	RFID の標準化
11	環境問題

不可な場合や移動経路とセンサーノード間の距離がセンサーノードの通信可能な範囲をオーバーするようなケースを想定している。センサーノードは収集したデータを近隣のセンサーノードに送信し、最終的にセンサーサーバーまでデータを届ける自律的なネットワーク通信のことである。リレー方式を採用することで、単独方式のように移動しながらの情報収集は困難となるが、より膨大な情報を収集できるという利点がある。具体的には、センサーサーバーを非常時の駐車帯等に設置すれば、データ収集の効率性が低下することを防止できるものと考えられる。

3. 実用化を図る上での現状の課題

(1) 技術的課題

無線センサーネットワークを実用化するに際しては、様々な技術的課題が存在する。それらを表-1 に整理するとともに、以下にまとめる。

はじめに、センサーに関する技術的課題に着目する。センサーネットワークの規模を拡大するためには、膨大な数のセンサーを配置しなければならない。そのためには、センサーの小型化や低コスト化は必要不可欠である。また、大型の社会基盤施設を対象とする場合にはセンサー設置箇所へのアクセスが容易でないことが少なくない。さらに、センサー設置箇所は屋外であることから、振動、気温、湿度などに対する耐久性が求められる。また、分散的に配置されたセンサーの電源を効率的に確保することも重要である。一度設置したセンサーを再充電することは現実的に難しく、低い消費電力で、長時間使用可能とするためには、自己発電や低消費電力回路といった技術が要求される。小型のままで供給能力を増大させるためには、太陽電池の活用も一つの手段である。これらに加えて、センサーの設置箇所と数を効率的に決定する手法が必要となる。また、センサー校正も重要な課題である。つまり、センサーと計測対象、あるいは計測対象間で、計測時刻、温度、湿度等のデータに矛盾がないことが不可欠である。センサー同士が自律的に

時間やメモリを校正し、同期の取れた時刻情報や位置情報を利用できること、およびプロトコルの標準化が必要である。

つぎに、通信に関する技術的課題がある。第一に、通信周波数と規制が挙げられる。各国で利用できる RFID タグの UHF 周波数が異なるために、ある国でチューニングされた RFID タグは、他国でその能力を十分発揮することはできない。したがって、利用する複数の地域で平均的な能力を発揮できる RFID タグの開発が必要となる。日本国内では電波法の規制があり、300MHz 帯で微弱無線の出力範囲で発信する場合、10m 程度の通信距離しか確保できない。前述したように、社会基盤施設を対象として、通常走行状態のパトロール車でデータを集計する仕組みを構築するためには、100m 程度の通信距離が望ましい。また、現在日本では 433MHz の電波使用はアマチュア無線に割り当てられているために、RFID としての利用は制限されている。今後望ましい電波出力を実現するには、規制緩和も必要と考えられる。第二に、通信条件・環境上の課題がある。欠損のないデータ集計 (RFID タグが多数存在する場合であっても)、通信距離の確保、他の電波出力システムとの共有などが挙げられる。また、RFID の特性は電波の持つ物理的性質に強く依存する。例えば、IC タグを金属類に付与した場合、全体として通信性能は低下する。また、マイクロ波のように水などに吸収されやすい周波数帯を使用する IC タグを水気が多く存在するような環境下で使用した場合にも性能低下が確認できる。この点を改善するために、現在金属対応タグなどの開発も進められている。第三に、RFID 電波干渉の問題がある。無線伝送の際に相互干渉が発生するという課題もあり、サーバと多くのセンサーノードとの間の通信を効率的に行う仕組みが必要となる。

最後に、それ以外の課題として、RFID 標準化と環境問題がある。RFID 標準化に関して、RFID がアセットマネジメントのインフラ技術として機能するためには、技術や運用の標準化が不可欠である。しかし、現時点では、IC チップの種類、通信プロトコル、IC チップに収録するデータ体系、さらにはその利用方法等について十分な標準化が行われているとは言い難い。RFID は導入した管理者や企業にとって利益をもたらす反面、導入時には少なからぬコスト負担を強いる。導入したシステムが将来にわたって使用できない、あるいは業界標準に適合しないものになる可能性がある状況では、企業は RFID に対して大規模な投資を行うことはできない。RFID 普及のためにも、早急な標準化が必要とされている。一方で、環境問題に関しては、大量の IC タグが付与されることになれば、廃棄処分となる IC タグの量も膨大なものになることが予想される。IC タグの場合、IC チップやアンテナは基本的に金属であるために、環境に与える

影響を考慮する必要がある。このような問題を解決するには、リサイクルタグの開発などの技術的アプローチが重要となる。

(2) 社会的課題

RFID タグは非接触の状態では電波を読み取ることが可能であるために、プライバシー侵害につながる恐れが指摘されている。万が一、個人のプライバシー (構造物固有の特記事項) に関する情報が、センサーノード、あるいはセンサーネットワーク上でやり取りされてしまうと、大きな社会問題になる場合があり得る。また、センシングされた情報は誰のものかという、データの所有権の問題もある。センサーネットワークの実用化を検討する上で、利用者のプライバシー (計測対象構造物のモニタリングデータ) 保護の問題は、最も重要な課題の一つと言える。そのため、伝送経路で個人データが漏洩しないようにする暗号化、個人データの保管場所のアクセス制御といった技術的な対策が非常に重要である。

4. おわりに

アセットマネジメントとは、社会基盤施設から獲得した「情報」を、劣化予測やライフサイクル費用評価を通して「知識」に変換し、その知識に基づいて「意志決定」を行うことである。本研究では、「情報」を切り口に、目視点検データを主体とした第一世代のアセットマネジメント研究を踏まえた上で、第二世代のアセットマネジメント研究の在り方について言及を行った。第二世代の「情報」およびその獲得手段として、モニタリングに着目し、アセットマネジメントにおいて期待される役割、さらにはモニタリングデータの蓄積と通信を担うセンサーネットワークについて概要を説明した。また、RFID タグや無線通信の活用を想定したセンサーネットワーク構想 (単独方式、リレー方式) を提案し、その実用化を図る上での現状の課題を整理した。

なお、本研究の一部は文部科学省「若手研究者の自立的研究環境整備促進」事業によって大阪大学グローバル若手研究者フロンティア研究拠点にて実施された。

参考文献

- 1) 小林潔司：分権的ライフサイクル費用評価と集計的効率性，土木学会論文集，No.793/IV-68，pp.59-71，2005.
- 2) 小濱健吾，岡田貢一，貝戸清之，小林潔司：劣化ハザード率評価とベンチマーキング，土木学会論文集 A，Vol.64，No.4，pp.857-874，2008.
- 3) 小林潔司，M.N.B. JAAR，尾形誠一郎，塚井誠人：越境へイザ災害のための危険予測情報：レジーム変化と長期記憶性，土木学会論文集 D，Vol.63，No.4，pp.478-497，2007.
- 4) 加瀬一朗 監修：RFID の現状と今後の動向，電気通信協会，2005.