

鉄道構造物の常時・異常時モニタリングシステムの開発

野末 道子* 土屋 隆司** 篠田 昌弘***
 渡辺 義大* 佐藤 紀生*

The Development of the Monitoring System for Railway Infrastructures with the Aim to Assist the Inspection in the Ordinary Time and after the Event of Disasters

Michiko NOZUE Ryuji TSUCHIYA Masahiro SHINODA
 Yoshihiro WATANABE Norio SATO

Recent progress in information and sensing technologies accelerated the emergence of various types of monitoring systems for use in the maintenance of social infrastructures. This paper covers the sensor network system which we are currently developing for monitoring railway facilities including various types of civil-engineering structures and tracks. Some sensors are developed for assisting the ordinary inspection and the others are particularly used for the inspection after some event of disasters. The particular focus is on the practical methodologies for integrating a variety of sensors and several communication media into a unified network system while satisfying the requirements from typical monitoring applications.

キーワード：鉄道構造物，モニタリング，センサネットワーク，伝送ネットワーク

1. はじめに

近年の情報通信技術，センサ技術の急速な進展を背景に，社会の様々な環境に多数のセンサを配置し，それら無線通信技術で結び付けるユビキタスセンサネットワークが注目されている。特に，医療看護分野における在宅患者のヘルスチェックや，工場や家庭の電力使用量監視に基づくエネルギーコントロール，農業分野における作物の栽培管理等の分野において導入事例や先行的な研究がある。鉄道分野においても，構造物を始めとする様々な沿線設備の状態をモニタリングするためのセンサが開発され，携帯電話網などを用いて遠隔モニタリングを行うなど，設備の維持管理を効率化する研究が行なわれている。

本稿では，鉄道総研で開発してきた鉄道構造物を対象としたモニタリングシステムのセンサ，および管理箇所等までデータを伝送するネットワークの構築・評価試験について報告する。

* 輸送情報技術研究部（設備システム）
 ** 輸送情報技術研究部
 *** 構造物技術研究部（基礎・土構造）

2. 鉄道構造物を対象とした常時・異常時用センサの開発

鉄道構造物分野における設備状態のモニタリング研究の背景には，長大な沿線を対象とする巡回コストの低減や迅速なデータ入手に加え，定量化データ提供の必要性がある。鉄道構造物は建設場所，使用条件によって構造物の形状も様々であり，維持管理に関わる検査担当者には，構造物が保有する性能を正確に捉える能力が求められる。検査担当者の経験や知識が非常に重要であるが，それとともに判断を支援する上では定量化されたデータの提供が有効である。

筆者らは，鉄道設備の常時および異常時の様々な挙動を検知する新しい検査，監視技術の確立を目指した研究を行ってきた。表1に常時・異常時を対象として開発し

表1 開発した常時・異常時用モニタリングセンサの例

対象設備	使用場面	監視目的	使用センサ
トンネル	常時	トンネル覆工のクラック監視	導電性塗料／εゲージセンサ
鋼橋	常時	鋼桁の疲労亀裂の有無及び進展の把握	導電性塗料
駅舎	常時	建築部材の損傷度の把握	ピエゾ素子／加速度センサ
基礎	異常時	基礎構造物の健全度診断	パッシブ式損傷検知センサ
橋梁	異常時	河川増水時における橋梁基礎の健全度評価	速度センサ／水位計
高架橋	異常時	地震発生後の高架橋柱の損傷度の把握	ピークセンサ

特集：輸送情報技術

たセンサの例を示す。なお、常時とは通常の定期点検などを言い、異常時とは自然災害などが発生したときを言うこととする。

以下、開発したセンサの概要を述べる。

2.1 常時用センサ

(1) 導電性塗料によるき裂検知

鋼橋の部材やトンネルの覆工の表面に導電性の塗料を線状に塗布し、覆工や鋼桁のき裂によって導電性塗料が断線すると電氣的に開放状態になることを利用して、き裂発生を検知する（図1と図2）。

鋼桁については、ある程度面状に塗布することで、疲労き裂の進展長さについても検知することが可能である¹⁾。またトンネルの覆工については、図2に示すようにトーナメント状に塗布することで、ひび割れの発生有無に加え、その発生位置を同定することが可能である²⁾。

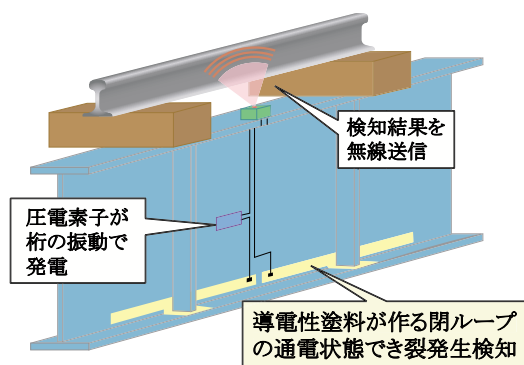


図1 導電性塗料による鋼桁部材のき裂検知

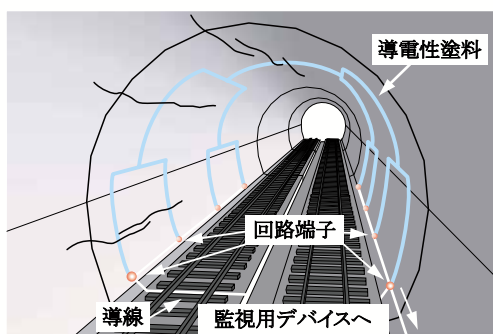


図2 導電性塗料によるトンネルのひび割れ検知

(2) π ゲージによるひび割れ進行性検知

要監視状態にあるひび割れに、ひび割れ幅を計測する π ゲージを設置することで、ひび割れ幅のモニタリングが可能となる³⁾。トンネルに発生した監視状態にあるひび割れに π ゲージを設置し、ひび割れ幅の計測を実施し、ひび割れの進行性から損傷を検知する（図3）。

(3) ピエゾ素子による損傷検知

ひずみがかかることで電圧を生じるピエゾ素子の特性を用いて、センサに対する電源を供給することなく被測定物のひずみ等のモニタリングを行う（図4）⁴⁾。ここ

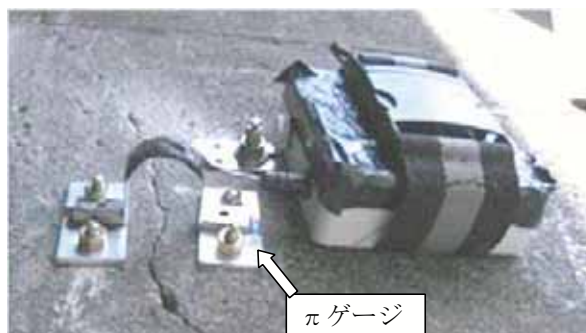


図3 π ゲージによるトンネルのひび割れ進行性検知

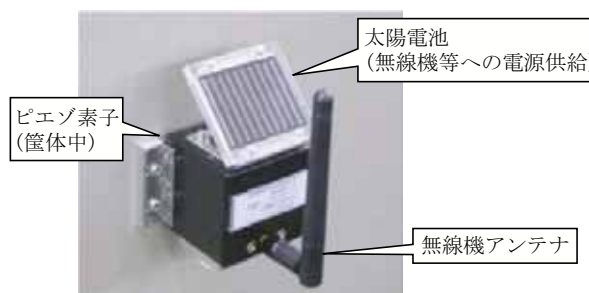


図4 ピエゾセンサ

では、駅などの屋根材や化粧板等の列車風圧による振動をピエゾ素子により測定し、その振動特性の変化からそれら材料に生ずる損傷を検知する。

2.2 異常時用センサ

(1) RC ラーメン高架橋柱の損傷レベル検知

RC ラーメン高架橋柱の損傷レベルを応答部材角を測

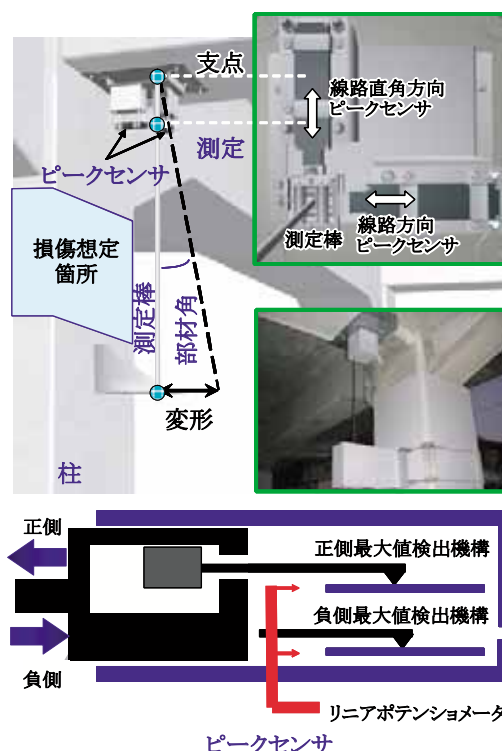


図5 ピークセンサによる応答部材角測定装置

定することにより検知するものである。地震時に柱端部に発生する最大応答部材角をセンサ自身が記憶することにより、柱の損傷レベルを地震後でも把握することができる。目視では損傷レベルを判断することが困難な鋼板巻き補強された箇所などに有効なセンサである。また、最大応答部材角は機械的に記憶されるため、常時電力が不要という特徴もある⁵⁾。

(2) 損傷検知センサによる基礎の損傷検知

通電カプセルやひずみゲージを鉄筋に設置し、地震時に橋台躯体基部・杭基礎の上端に生じる大変形を検知する。通電カプセルはカプセル内の管に電解質溶液を充填したもので、大きな変形が生じた場合にこの内管が破損して電解質溶液が漏れ出す仕組みになっている(図6)。この通電信号から構造物の大変形の有無を検知する。一方ひずみセンサを用いたシステムでは、パッシブ型RFIDと組み合わせることで常時電力が不要という特徴がある(図7)⁵⁾。

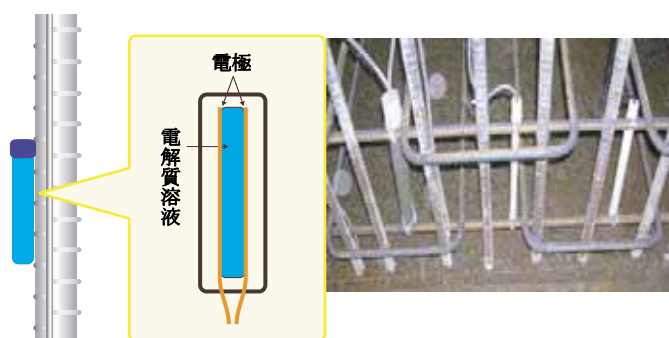


図6 通電カプセルとその設置状況

3. センサネットワークの鉄道への適用にあたっての要件

2章において述べたように、鉄道構造物に対してセンシングデバイスを埋め込み、継続的にモニタリングするシステムの研究開発が進められている。今後センサネットワークが活用されることで、既存システムの高度化、導入・運用コストの低減に加えて、新たな監視ニーズに対応可能となることが期待される。本章では鉄道環境におけるセンシング・モニタリングシステムの基盤として適用されるセンサネットワークの要件を、「省電力性」、「信頼性・可用性」、「柔軟性」の観点から整理する(表2)。

(1) 省電力性要件

利用可能な外部電源が期待できないケースも想定される沿線環境において、「省電力性」は重要な要件となる。高い省電力性による中長期の継続運用を実現するためには、センサノードや中継ノードのスリープ/アウェイク制御(必要な時以外は休止状態とし低消費電力モードに切り替わる)が必須となる。また電力消費を低減する上



図7 損傷検知センサとその設置状況

で、センサノードや中継ノードの配置によって個々のノードの電力消費量は大きく左右されることから、最適配置計画は重要である。またノード配置後においても電力消費状況に応じてデータの配信経路を制御することで、ネットワーク全体としての電力消費を抑制することも重要な要件となる。

(2) 信頼性・可用性要件

各設備や構造物の状態を継続的に把握していくためには、個々のセンサの信頼性はもとより、センシングデータを伝送するネットワークシステムの「信頼性」や「可用性」を示すことが重要である。そのためにネットワークの信頼性を保証する専用の監視システムを別途構築するのではなく、データの到着周期やヘルスチェック信号を監視してネットワークの異常を検出するなど、センサネットワーク自身を用いた方法が望ましい。また、ネットワークには列車を用いてデータを収集する経路が一部に含まれたり、経路の一時的な遮断により、中継ノードで保持されていたデータが遅れて到着する運用方式も考えられる。ネットワークの動的な状態変化に応じたシステムの信頼性や可用性の提示はセンサネットワークシステム運用場面における開発重点項目の一つである。

(3) 柔軟性要件

鉄道構造物のモニタリングでは、取り扱うセンサやセンシングの目的が多岐に渡り、伝送頻度やデータ量も大きく異なってくることからシステム構築の「柔軟性」が

表2 センサネットワークの鉄道への適用における要件

省電力性	<ul style="list-style-type: none"> ● 長期継続運用 ● スリープ/アウェイク制御 ● センサノード、中継ノードの最適配置 ● 経路制御の最適化
信頼性・可用性	<ul style="list-style-type: none"> ● 系全体としての信頼性 ● センサネットの稼働状況把握 ● 遅延耐性 ● 耐候性
柔軟性	<ul style="list-style-type: none"> ● 多様なセンサ群との多様な形態での接続 ● 状況に応じた臨機応変な動作(自律制御) ● 通信(伝送)と蓄積(ストレージ)の最適機能分担

特集：輸送情報技術

求められる。そのため、個々の適用場面に合わせたデータ通信機能の提供が必要となる。たとえば、一方的にデータをセンタに収集するだけでよい場合とセンタ側からのデータ要求にセンサが応答する必要がある場合とでは、センサネットワークの要求仕様は大きく異なる。また、センシング周期や伝送周期の変更等のセンサ自体の設定変更を含む遠隔制御が必要な場合にはより複雑な手順が必要となる。

このほかセンサネットワークでは、センサが異常（あるいはその予兆）を検知した段階でただちにセンタに通知するとともに、センシング頻度やセンタへのデータ伝送頻度を上げるといった自律的な制御が必要な場面も想定される。

一方モニタリングデータに変化が少ない監視対象物については、モニタリングにより獲得されるデータを、ネットワークを介してただちに送らなければならないとは限らない。たとえば、センサが計測したデータを各センサ機器内の記憶装置等に蓄積しつつ、リアルタイム通知の必要なデータのみを伝送したり、センサ機器内で統計処理を行い（平均、分散、カウント値等）、所定の閾値を超えたデータのみセンタサーバに送信するといった伝送にかかる負荷を軽減する方法もある。これにより日々のモニタリングニーズ（異常あるいはその予兆の早期検知等）に対応しつつ、後日、保守担当者等により回収される生データを用いた詳細な分析が可能となる。

センサデータ伝送システムの設計にあたっては、以上で述べたような要件を検討することが重要である。

4. 鉄道構造物モニタリングシステムの基本構成

前章に挙げた各種要件を充足するため、本研究で検討した鉄道構造物向け常時・異常時モニタリングシステムのネットワーク部分の基本構成を図8に示す。このネットワークでは、「センサ側ゲートウェイ」と「サーバ側ゲートウェイ」が中心的な役割を果たしている。

「センサ側ゲートウェイ」は沿線の各設備に付帯して設置される様々なセンサからの情報を集約して、センタのサーバに向け伝送する。一方「サーバ側ゲートウェイ」は、各拠点から受信したセンサデータを、イントラネットなどのIPネットワーク上のセンサデータ管理システム（センサデータDB）に伝送する。「サーバ側ゲートウェイ」へのデータ送信は、「センサ側ゲートウェイ」を介した携帯電話網や私設の無線通信網（アドホック無線ネットワークを含む）による接続に加え、走行列車上に搭載

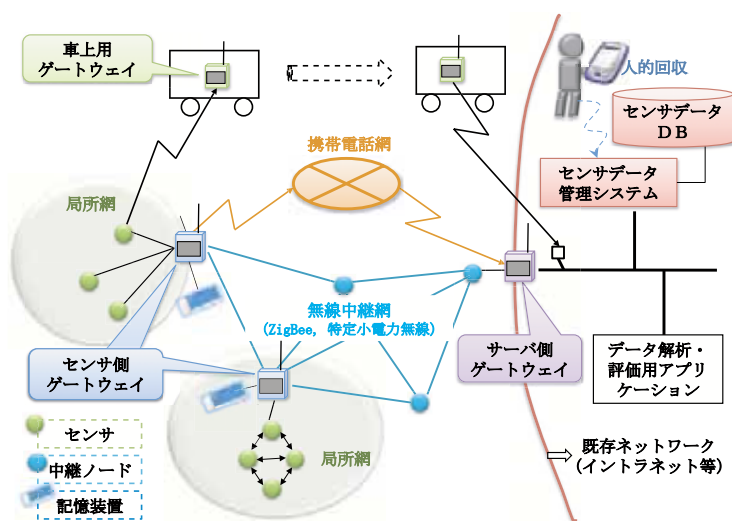


図8 鉄道設備モニタリングシステムの基本構成

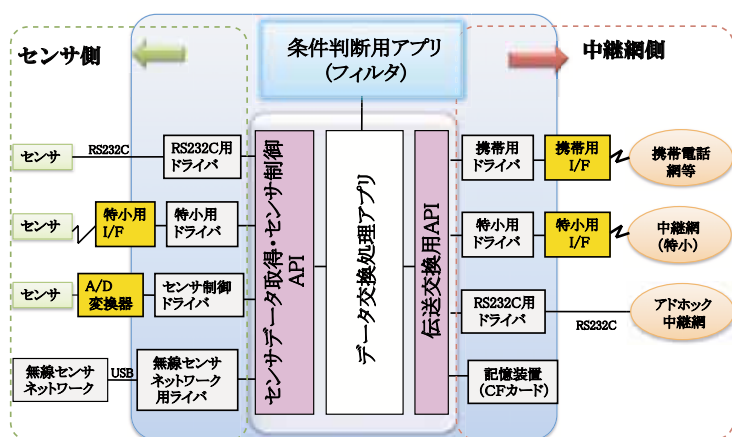


図9 センサ側ゲートウェイのソフトウェア構成

した「車上用ゲートウェイ」を介したデータ取得・運搬も可能としている。次章ではサーバ側、及びセンサ側ゲートウェイの仕様をより詳細に説明する。

5. モニタリングシステム用ゲートウェイの設計・実装とセンサデータ管理システム

5.1 センサ側ゲートウェイ

「センサ側ゲートウェイ」のソフトウェア構成を図9に示す。以下、図中のセンサ側インタフェース、中継側インタフェース、条件判断用機能について説明する。

(1) センサ側インタフェース

センサ側のインタフェースとしては、RS232Cによるシリアル接続を基本としており、所定の通信手順に従うことにより、いかなるセンサでもゲートウェイとの間でデータ/命令の転送を行うことができる。センサの能力や通信状況に応じて、お互いの接続確認を行って通信を行う方式と、接続確認を行わずセンサから直接データ送信を開始する方式のいずれかを選択できる。また通信手

順の内部でネットワーク時刻同期を行うために、ゲートウェイ側から各センサに対し時刻情報を配信している。時刻情報を受取ったセンサは、この情報をもとに自らの時刻情報を補正することが可能である。

このRS232Cによる接続のほか、特定小電力無線による無線接続(図9の特小用I/F)や、アナログインタフェースを介したセンサ直結(図9のA/D変換器、センサ仕様に合わせてドライバが個々に必要)、市販の無線センサネットワーク(図9の無線センサネットワーク)をゲートウェイに收容することも可能である。無線センサネットワークの收容により、特定のエリア内のセンサデータを無線で一括して収集するといったことも容易になると考えられる。

センサからのデータ取得、センサへの命令送信に関しては、センサIDをキーにした共通のアクセス方法を提供するセンサデータ取得・センサ制御API(Application Program Interface)を構築した。これにより、各センサのゲートウェイ装置への接続形態の違いを吸収することが可能となり、データ交換処理の実装を容易化することができた。

(2) 中継網側インタフェース

中継網側については、携帯電話網、特定小電力無線網(429MHz帯)、無線アドホック網(2.4GHz帯)等とのインタフェースをサポートしている。無線アドホック網を用いることにより、センサを一時的に設置して比較的短期間のデータ収集を行うような場面で簡易にネットワークを構築できるというメリットもある。

多様な通信手段をゲートウェイがサポートすることにより、ゲートウェイ装置の設置環境に応じて適切な通信路を構成し、効率的なセンサデータ収集システムを構築することが可能となる。また、複数の通信手段が利用可能な環境下では、通信手段間の優先順位付けに基づいた通信路の動的な選択や、異常時の経路自動切替を行うこともサーバが行うのではなく、ゲートウェイのレベルで判断し実施することが可能である。

ここでもセンサ側のインタフェースと同様に、通信手段の違いを吸収するためのAPI(伝送交換用API)を構築している。

(3) 記憶装置への書込み

3章に示した通り取得したセンサデータは必ずしも「すべて」「瞬時」にサーバに伝送されなければならないわけではない。

そこで本ゲートウェイでは、「記憶装置への書込み」を通信手段の代替案のひとつとして選択できるようにした。記憶装置への書込みを最も優先順位の低い通信代替案とした場合には、センサデータのサーバへの送目がすべて失敗した場合などに、当該データが記憶装置に記録されることになる。

(4) 条件判断機能

モニタリングシステムでは、発生した事象(および発生時の条件)に応じてシステムが適切な処理を実行することが必要となる。

たとえば、「〇〇センサの計測値が△△を超えたらアラームで知らせる」「〇〇センサからのデータが到着したら、ただちに、近接エリアのすべての××センサによる計測を開始する」「選択した中継網に送信したデータがエラーとなった場合は、所定の優先順位に従って代替通信路で再送する」等といった処理をネットワークの末端レベルで円滑に実行することで、効率的な伝送を実現できる可能性が高まる。

このような状態の変化に応じて駆動される処理を定義することが可能な「条件判断用アプリ(フィルタ)」の機能を「データ交換処理アプリ」の枠組み上に設計した。

5.2 サーバ側ゲートウェイ

「サーバ側ゲートウェイ」では、「センサ側ゲートウェイ」と同様に、携帯電話網(FOMA網)、特定小電力無線網、無線アドホック網(ZigBee等)等とのインタフェースをサポートしている。サーバ側では、IPネットワーク上にセンサデータ管理システム(センサデータDB)や各種のデータ解析・評価用アプリケーションを搭載した計算機が接続されるため、本ゲートウェイ装置では、上記中継網とIPネットワークとの間のプロトコル変換を行う機能を提供している(図10)。

センサ側ゲートウェイと同様に、サーバ側ゲートウェイにおいても、各センサはあらかじめ定められたセンサIDを用いて同定可能である。したがって、サーバ上のアプリケーションプログラムは、センサがどのネットワークを介してどのように接続されているか(ネットワークの構成)を一切意識する必要がない。これは、各ゲートウェイ上に、センサIDと当該センサへのアクセス方法(アクセスI/F)の対応表を保持することによって実現している。

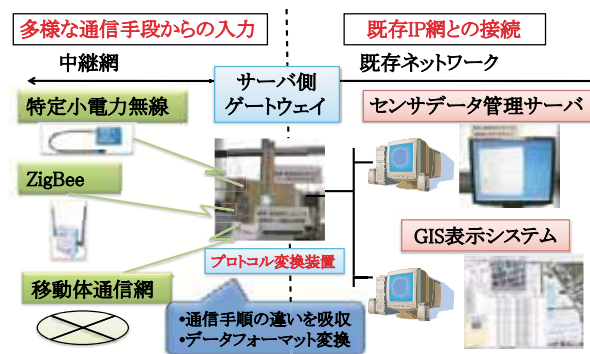


図10 サーバ側ゲートウェイの構成

特集：輸送情報技術

6. モニタリングシステム用伝送ネットワーク
評価試験

6.1 評価試験実施環境

本研究で開発したゲートウェイ装置、各種センサ、サーバ側システム等を統合化したセンサネットワークのテストベッドを鉄道総研構内に構築しモニタリング試験を2009年12月以降実施している。評価環境を図11に示す。



図11 評価試験実施環境（総研構内）

6.2 試験結果

現状のモニタリング状況の一例を図12に示す。携帯電話網に繋がるセンサが10分間隔、特定小電力網に繋がるセンサが2分間隔でデータを送っている（データ伝送成功率＝サーバが受信したデータ数／センサが送信したデータ数）。センサ～サーバ間において到達確認や再送などのソフトウェアによる保証機能を持たせていない。携帯電話網によるデータ伝送では平均して85%以上のデータ伝送率を有しているが、特定小電力網によるデータ送信のケースでは75%前後であり、しばしばデータ伝送経路の途絶が見られる。理由としてはセンサの不具合、停電、バッテリー電源の不具合、機器設置不良にともなう機器間の接続ケーブル等の接触不良やアンテナ方

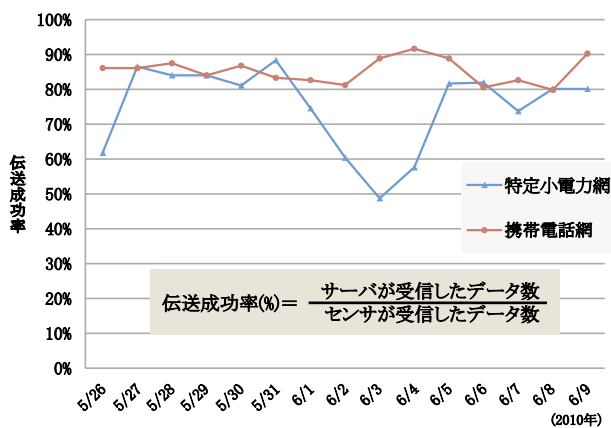


図12 携帯電話網及び特定小電力ネットワークによるデータ伝送状況（2010・05・26～2010・06・09）

向のずれなど、主に初期故障に見られるハードウェア的要素が多かった。これらの初期故障への対応が収束した後では、安定的に動作することが確認されているが、このようなハードウェア的障害に対応するためにはセンサの動作状態が確認できる機能が必要である。

一方無線伝送ネットワークでは、トラフィック衝突に伴うパケットロス、電波環境の変化等も生じている。こうした現象に対しては、データ再送や送達確認処理の仕組みの構築などにより信頼性要求に応じたソフトウェア的な機能向上対策を検討する必要がある。

7. まとめ

鉄道構造物を効率的、かつ効果的に維持管理することを目的とした常時・異常時対応モニタリングシステムを開発した。本システムの特徴は、検査に困難が伴う部位の監視や地震等による異常発生早期検知等、監視目的に応じて、構造物の変状を適切に計測できるセンサを取捨選択できることにある。また、センサから指令・本部までのデータ伝送として、列車による回収、携帯電話網や特定小電力無線等によるリアルタイム回収、微小な無線チップ (RFID) による回収手法を統合化した。本稿では、開発したセンサの概要について紹介するとともに、所内の模擬環境（構造物等）へ設置し継続的に行っている伝送試験の結果を報告した。これまでの実験結果による知見から、さらにネットワーク監視機能の高度化を含め、鉄道総研構内での耐用試験を継続して行う予定である。

なお、本研究の一部は国土交通省からの補助金を受けて実施したものである。

文献

- 1) 小林裕介：鋼鉄道橋におけるモニタリングの試み、非破壊検査、Vol.56, No.3, pp.129-133, 2007
- 2) 小西真治ほか：導電塗料を用いたひび割れ検知システムの研究、トンネル工学研究論文・報告集第12巻, pp.437-440, 2002
- 3) 津野究ほか：トンネル変状計測への無線センサの適用、日本鉄道施設協会誌、Vol.47, No.10, pp.49-51, 2009
- 4) 山田聖治ほか：鉄道構造物における損傷モニタリングシステムの開発その3 環境要因を考慮した損傷検知、日本建築学会大会（東北）学術講演梗概集、B-2, pp.691-692, 2009
- 5) 松本光矢ほか：応答部材角測定による高架橋群の地震被害評価法、鉄道総研報告、Vol.23, No.12, pp.11-16, 2009
- 6) 佐藤紀生ほか：土木構造物センサデータ収集システムの開発、鉄道総研報告、Vol.22, No.6, pp.35-40, 2008