

道路インフラ状態モニタリング用センサシステムの研究開発

武田 宗久* 中嶋 正臣 今仲 行一（NMEMS 技術研究機構）
下山 勲（東京大学／NMEMS 技術研究機構）

Research and Development of Sensing System for Road Infrastructure Monitoring System
Munehisa Takeda*, Masaomi Nakajima, Koichi Imanaka, (NMEMS Technology Research Organization)
Isao Shimoyama, (The University of Tokyo / NMEMS Technology Research Organization)

This paper addresses outline of Road Infrastructure Monitoring Systems (RIMS), features of developed technologies, and demonstrations in the real expressways and large-scale infrastructure such as dam and power plant. The system enables 24 hours monitoring of total road infrastructure.

キーワード：道路インフラ，モニタリング，センサ，自立電源，無線通信ネットワーク，高耐久性パッケージ，大規模インフラ，MEMS

(Road infrastructure, Monitoring, Sensor, Energy harvester, Wireless communication network, Highly durable package, Large-scale infrastructure, MEMS)

1. はじめに

道路インフラは陸上貨物輸送量の 90%以上を占め⁽¹⁾、国民の豊かな生活を支える重要な社会インフラであるが、高度成長期以降に整備され、今後 20 年で建設後 50 年以上経過するインフラが増加して老朽化が進展する。また、過積載車等の過酷な使用状況による損傷の増加や異常気象等による大規模災害の増加等の建設当初には予想していなかった環境変化が道路インフラの老朽化をより進展させている。さらに、2012 年の笹子トンネル事故や 2011 年の東日本大震災のような災害により、道路インフラが分断されることによって国民の生活が大きく脅かされることが再認識され、道路インフラのモニタリングシステム導入による予防保全やインフラの長寿命化が重要な社会課題となっている。また、長大橋や発電所等の大規模インフラも高度経済成長期などに整備されたものが多く、老朽化への対応が大きな社会課題となっている。

これらの課題を解決し、道路インフラの効果的かつ効率的な維持管理・更新を行うために、従来の点検を補完する ICT を活用した新たなモニタリング技術の開発が望まれているが、現状は常時・継続的なモニタリングを適用した事例は少ない。また、橋梁等の個別フィールドだけのシステムとなっており、道路インフラ全体を統合的にモニタリングするシステムとはなっていない。

技術研究組合 NMEMS 技術研究機構ではこのような社会要請をうけ、2014 年度から高速道路の橋梁、道路付帯物、法面を対象にして、環境エネルギーを利用した自立電源を

有し、各フィールドのモニタリングに適した新規の小型、安価、高性能、高耐久性の無線センサ端末並びに各フィールドのセンシングシステムを統合して道路インフラのトータルな維持管理が可能な道路インフラモニタリングシステム (RIMS) の開発を進めてきた。ネットワーク技術、高耐久性のパッケージング技術に関しては共通化を図り、効率的な開発を行っている。また、2015 年度からは将来技術としてセンサ端末同期用原子時計の開発を、2017 年度からはこれらモニタリング技術の長大橋や発電所等の大規模インフラへの展開も検討してきた。本プロジェクトで開発しているモニタリングシステムのイメージを図 1 に示す。本報告では、この RIMS プロジェクト⁽²⁾の概要に関して説明する。

2. RIMS プロジェクトの概要

〈2.1〉 開発概要

本プロジェクトの開発内容をまとめたものを図 2 に示す。本プロジェクトの特徴は既存のセンサを用いたモニタリングシステムを開発するのではなく、道路インフラモニタリングに適した新規のセンサシステムを開発していることにある。新規のセンサ端末として、橋梁用に超広帯域の振動を 1 つのセンサで検出可能な SA(Super Acoustic)センサと 2 次元の歪状態を視覚的に検出可能な面パターン歪センサの 2 種類、道路付帯物用に振動と傾斜を同時に検出することで道路付帯物の劣化状態が判別できる傾斜マルチセンサ、及び法面用に電波位相差を用いて法面の 3 次元変位を悪天候下でもミリメートルオーダーで高精度に検出可能な電

波位相差変位センサの計 4 種類のセンサ端末を開発している。面パターン歪センサを除く 3 つのセンサは自立電源及び内蔵アンテナを有し、10 年間の寿命を保証する共通の耐環境性セラミックパッケージを用いるとともに、全てのセンサ端末は対象物に強固にかつ簡易に接着可能な共通の粘接着シートを用いて対象物に固定している。さらに、ことなるセンサ情報を統一的に扱える共通無線通信ネットワーク技術を用いて道路インフラの統合的なモニタリングを可能とし、実際の高速道路での実証を行っている。これらのモニタリング技術は道路インフラだけでなく、発電所等の大規模インフラにも適用可能な技術であるので、実際の発電所等の大規模インフラでの実証試験も実施している。さらに、多数のセンサ端末によるモニタリングで必要となるセンサ端末の同期を容易にする原子時計の開発も将来技術として実施している。

〈2・2〉 研究体制

図 3 に研究開発体制を示す。役割を明確にしたこの分野のリーディング 17 機関（センサデバイス/システム/実装メーカ、産総研、大学、高速道路会社等）が技術研究組合



図 1 道路インフラモニタリングシステム (RIMS)
Fig.1. RIMS (Road Infrastructure Monitoring System).

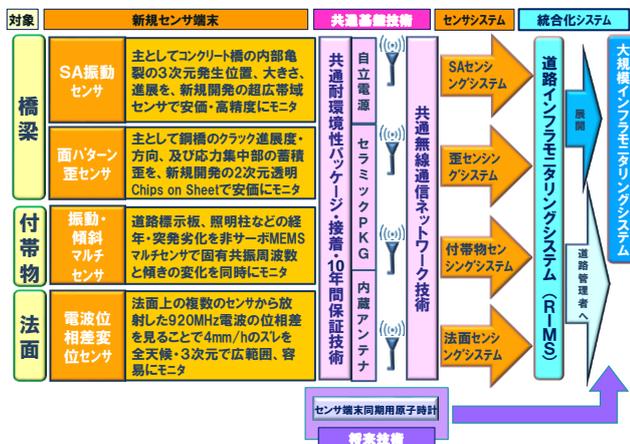


図 2 RIMS の開発内容
Fig.2. Development contents of RIMS.

NMEMS 技術研究機構に結集し、産学官連携でユーザー参加型の研究体制を構築して研究開発を実施している。図 3 に示すように、「(1) センサ端末及びモニタリングシステムの研究開発」、「(2) センサシステム共通基盤技術の研究開発」「(3) 共通実証・評価研究」「(4)先導研究」の 4 つの階層に分かれて研究開発を進めている。「(1) センサ端末及びモニタリングシステムの研究開発」の階層では、橋梁用のスーパーアコースティック（振動）センサを東芝、東大、京大が、フレキシブル面パターンセンサ（歪）を産総研と大日本印刷が、道路付帯物用の傾き・振動センサを富士電機が、法面用の変位センサを三菱電機が担当している。「(2) センサシステム共通基盤技術の研究開発」の階層では、無線通信ネットワーク共通プラットフォーム (PF) を NTT データが、高耐久性パッケージング共通 PF を MMC、日本ガイシ、大日本印刷、産総研が担当している。「(3) 共通実証・評価研究」の階層では、このプロジェクトに参画している高速道路会社 4 社 (NEXCO 東日本、NEXCO 中日本、NEXCO 西日本、阪神高速道路) を含む全機関が担当して実施している。「(4)先導研究」の階層では、センサ端末同期用原子時計の開発を産総研、リコー、MMC、京大、東工大と首都大東京が担当している。ネットワーク技術、パッケージング技術、信頼性保証技術に関しては共通化を図って高い開発効率を目指すとともに、主要高速道路会社の参画でニーズに沿った速い PDCA サイクルを回して実用化を加速している。

〈2・3〉 スケジュール

図 4 に本研究開発のスケジュールを示す。本プロジェクトは 5 年プロジェクトであるが、前半 3 年で基本的なセンサシステム及び共通基盤技術の開発を終え、後半 2 年は実際の高速道路や大規模インフラの実フィールドでの実証試験を実施している。今年度は最終年度で、道路インフラの本格実証実験を完了するとともに、大規模インフラへの適用可能性検証を完了する予定である。

3. 開発テーマの特長

〈3・1〉 スーパーアコースティックセンサによる橋梁センシングシステムの開発

本センシングシステムは主としてコンクリート橋の内部



図 3 RIMS の研究開発体制
Fig. 3. R & D scheme of RIMS.

亀裂の3次元発生位置、大きさ、進展を、新規開発の超広帯域センサで安価・高精度にモニタリングするものである。このシステムの特長は以下である。

(1) 超広帯域(数Hz~1MHz) 振動センサ(SA:スーパーアコースティックセンサ)の開発

(2) 橋梁の健全状態から限界劣化までを1つのセンサでカバー

(3) 手のひらサイズの無線センサ端末により遠隔監視

〈3・2〉フレキシブル面パターンセンサによる橋梁センシングシステムの開発

本センシングシステムは主として鋼橋のクラック進展度・方向、及び応力集中部の蓄積歪を、新規開発の2次元透明 Chips on Sheet で安価にモニタリングするものである。このシステムの特長は以下である。

(1) 高感度極薄シリコン歪センサアレイ及び低コスト印刷歪センサアレイの開発

(2) 歪分布の面パターンから橋梁の亀裂を経過観察、発見、予測

(3) UV・水蒸気バリア層による長期耐久性及び粘接着シートによる簡易施工

〈3・3〉傾斜マルチセンサによる道路付帯物センシングシステムの開発

本センシングシステムは道路標示板、照明柱などの経年・突発劣化を非サーボMEMSマルチセンサで固有共振周波数と傾きの変化を同時にモニタリングすることで検出するものである。このシステムの特長は以下である。

(1) MEMSセンサによる傾斜マルチセンサ端末の開発(傾斜・振動・温度を同時計測)

(2) 低消費電力化(自立電源)と高速無線通信

(3) 高速道路(実フィールド)での実証, 大規模インフラ(発電施設)への展開

〈3・4〉電波変位センサによる法面変位センシングシステムの開発

本センシングシステムは法面上の複数のセンサから放射

した920MHz電波の位相差を見ることで4mm/hのズレを全天候・3次元で広範囲, 容易にモニタリングするものである。このシステムの特長は以下である。

(1) 電波位相差により高計測頻度・全天候・3次元で法面変位を高精度計測

(2) 端末間の無線メッシュネットワークによる広範囲計測

(3) 天候・昼夜を問わず長期間動作する多機能型センサ端末の開発

〈3・5〉無線通信ネットワーク共通プラットフォームの開発

本技術は多種多様なセンサからデータを受信・分解し, サーバへ送信できるコンセントレータのモジュールを開発するとともに, コンセントレータから送信されるデータを受信・蓄積及び活用が可能な共通プラットフォームを構築するものである。このシステムの特長は以下である。

(1) 様々なデータフォーマットやインターフェースの差異を吸収する通信仕様

(2) 設置容易性とコスト対策を目的としたコンセントレータ間の連携通信

(3) セキュアな情報収集への対応

〈3・6〉高耐久性パッケージング技術の開発

本技術は暴風雨, 強振動, 高濃度腐食ガス, 塩害等の悪環境下でも長期に耐久性を確保できるパッケージング技術及び簡易施工を可能にするシート実装技術を開発するものである。このシステムの特長は以下である。

(1) 常時モニタリングを長期に保証するセンサ端末パッケージング技術

(2) 自立電源, 無線モジュール, 環境センサをオールインワンパッケージング

(3) パッケージングやセンサを構造物に強固に接着/接合するシート実装技術

〈3・7〉センサ端末同期用原子時計の開発

本テーマは将来技術として, 多数配置されたセンサ端末間の時刻同期を容易に行うために, 端末に組み込み可能な小型・低消費電力の原子時計を開発するものである。このシステムの特長は以下である。

(1) モニタリングシステムの時刻同期を不要とし, 設置・運用労力を革新的に低減

(2) センサ端末に組み込み可能な小型で低消費電力な原子時計

(3) 高い時刻精度の長期間維持を可能とするガスセル内環境維持・計測技術

4. 実証試験

〈4・1〉実高速道路での実証試験

本プロジェクトのもう一つの特長は NEXCO3 社と阪神高速道路の高速道路会社 4 社がプロジェクトに参画しており, 新しく開発したモニタリングシステムに適した実高速道路で実証試験を実施するとともに, 実際に高速道路を管



図4 RIMSの研究開発スケジュール

Fig.4. R & D schedule of RIMS.

理・運用するユーザー企業の意見を反映した研究開発を実施していることである。図5に実高速道路でのRIMSの実証試験の様子を示す。スーパーアコースティックセンサによる橋梁センシングに関しては、NEXCO西日本が、フレキシブル面パターンセンサによる橋梁センシングに関しては阪神高速道路が、傾斜マルチセンサによる道路付帯構造物センシングに関しては、NEXCO中日本が、電波変位センサによる法面変位センシングに関してはNEXCO東日本が、それぞれ分担して実証場所を提供して実証試験を実施

している。各実証場所で高耐久性パッケージング技術を用いて作られたセンサ端末から得られたセンサデータは無線通信ネットワーク共通プラットフォームを介して、インフラ管理センターに収集され、一元的な道路インフラの管理が可能になっている。

また、図6に示すように、RIMSセンサ間の連携及び外部情報や道路管理者情報との連携を模擬するエミュレータ（Pilot-RIMS）を開発し、道路インフラの一元管理が可能なることを明らかにした。

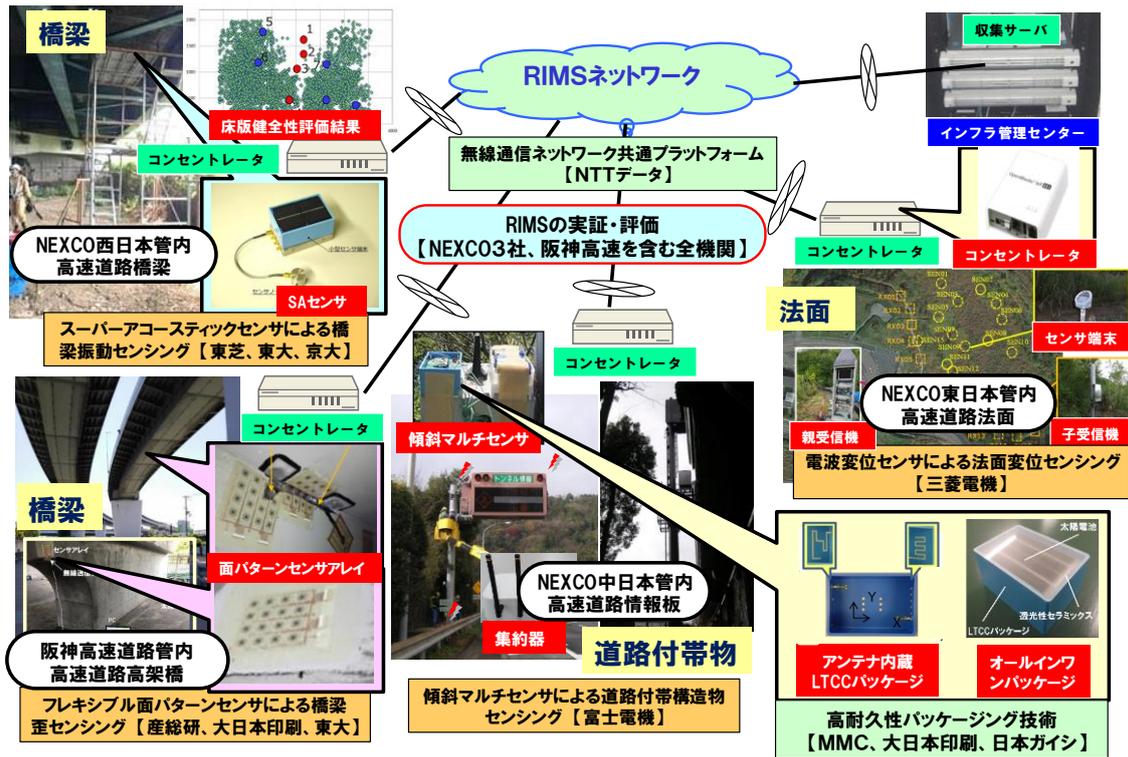


図5 実高速道路でのRIMSの実証実験

Fig.5. Demonstration of RIMS in real expressways.

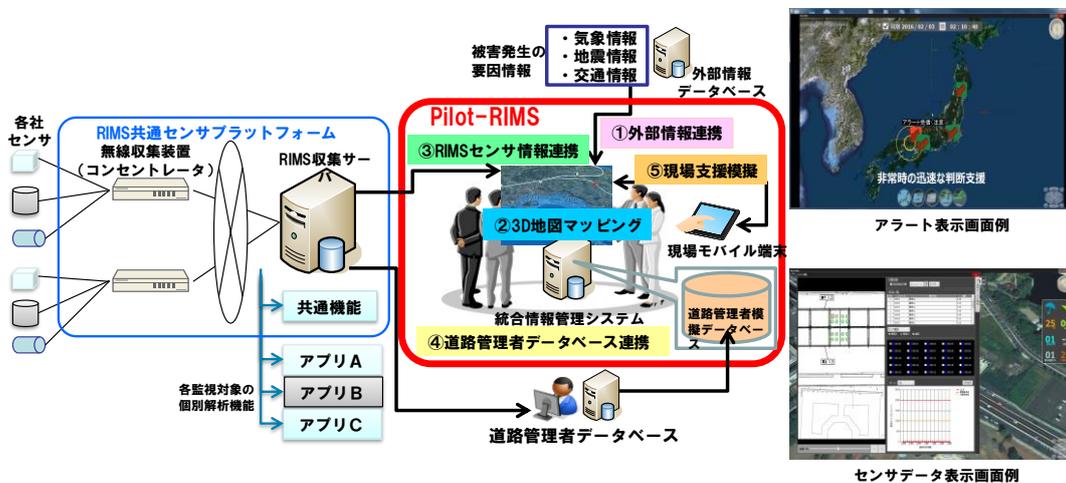


図6 Pilot-RIMSのイメージ

Fig.6. Image of Pilot-RIMS.



図 7 実証長大橋

Fig. 7. Long bridge for demonstration.



図 8 監査廊内の亀裂上に設置した面パターンセンサ

Fig. 8. 2D strain pattern sensors installed on the crack in reconnaissance gallery.

〈4・2〉 大規模インフラへの展開及び実証試験

道路インフラ用に開発したセンサシステムを、長大橋、発電所等の大規模インフラに適用し、大規模インフラの状態を的確に把握できる省エネ型センサネットワークシステムの社会実装研究を実施し、その有用性の確認、改善を行うことを目的として、以下の大規模インフラの実証試験を実施している。

(1) スーパーアコースティックセンサによる橋梁センシングシステムの大規模インフラへの展開

大規模インフラの倒壊などの大規模災害に伴う社会課題の解決として、長大橋で用いられているプレストレスト・コンクリート橋（PC 橋）のスーパーアコースティックセンサによる健全性モニタリングシステムの研究開発を実施している。実証長大橋として、供用開始後約 17 年、橋長 372.3m の 5 径間連続箱桁橋（PC 片持ち施工）を選定し、実証試験を実施している。実証長大橋を図 7 に示す。

(2) フレキシブル面パターンセンサによる橋梁センシングシステムの大規模インフラへの展開

フレキシブル面パターンセンサの大規模インフラへの展開・実証場所としては電力会社が管理するダムの監査廊内におけるコンクリート壁面の亀裂を選定した。電力会社では定期的にクラックゲージを用いて、目視で亀裂の状態を監視しており、アーチ状の壁面にフレキシブル面パターンセンサを貼り付けることで、亀裂の進展状況が常時監視で



図 9 水力発電所に設置した傾斜センシングシステム

Fig. 9. Tilt sensing system installed in a hydroelectric power plant.

き、亀裂進展の詳細を把握することを目指している。図 8 にダム監査廊内の亀裂上に設置した面パターンセンサを示す。

(3) 道路付帯構造物傾斜センシングシステムの大規模インフラへの展開

傾斜マルチセンサの大規模インフラへの展開・実証場所としては電力会社が管理する水力発電所を選定した。斜面崩壊等による水力発電設備への被害を未然に防ぐための 1 つの試みとして常時モニタリングの検討を開始した。水力発電所に設置した傾斜センシングシステムを図 9 に示す。

5. おわりに

高速道路の橋梁、道路付帯物、法面を対象にして、環境エネルギーを利用した自立電源を有し、各フィールドのモニタリングに適した新規の小型、安価、高性能、高耐久性の無線センサ端末並びに各フィールドのセンシングシステムを無線通信ネットワーク共通プラットフォームで統合して道路インフラのトータルな維持管理が可能な道路インフラモニタリングシステム（RIMS）の全体概要、各開発テーマの特長及び高速道路での実証試験と大規模インフラへの展開の概略について紹介した。本技術により、従来の点検技術を補完し、道路インフラの状態を常時・継続的・網羅的に把握することが可能となる。個別テーマの詳細に関しては、技術資料として別途掲載しているの、そちらを参照されたい。

謝辞

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託研究業務の結果得られた成果である。

文 献

- (1) 高速道路資産の長期保全及び更新の在り方に関する技術検討委員会報告書、平成 26 年 1 月 22 日
- (2) 下山：「道路インフラの統合的な常時監視を実現するモニタリングシステムの研究開発」、MEMS センシング&ネットワークシステム展 2017 研究開発プロジェクト成果報告会（2017）