

スマートなインフラ維持管理に向けたICT基盤の確立 Establishment of the ICT foundation for smart maintenance of infrastructure

研究代表者

中村 好孝 (株式会社エヌ・ティ・ティ・データ)
Yoshitaka Nakamura NTT DATA Corporation

研究分担者

石川 裕治[†] 津川 拓哉[†] 近藤 孟[†] 竹内 敬治^{††} 榎田屋 秀樹^{†††}
Yuji Ishikawa[†] Takuya Tsugawa[†] Takeshi Kondo[†] Keiji Takeuchi^{††} Hideki Masudaya^{†††}
[†]株式会社エヌ・ティ・ティ・データ ^{††}株式会社エヌ・ティ・ティ・データ経営研究所 ^{†††}アルプス電気株式会社

[†]NTT DATA Corporation ^{††}NTT DATA INSTITUTE OF MANAGEMENT CONSULTING, Incorporated ^{†††}ALPS ELECTRIC Company Limited

研究期間 平成 26 年度～平成 28 年度

概要

近年、築 50 年を超えた社会インフラ数や老朽化による破損は増加傾向にあり、15 年後を目途にその数は約 6 割に至るため、破損防止に向けた長寿命化施策を早々に実施する必要がある。長寿命化には欠陥が発生する前に適切に対処する予防保全マネジメントが重要であり、その一つとしてセンサを用いたインフラ状態監視が国策として掲げられている。

本研究開発では、社会インフラの内、橋梁を対象とした電池駆動の無線センサによる低消費電力のモニタリングシステムを構築し、当該システムに必要な技術要素の研究開発を行い国内 95%の橋梁に対応可能な仕組みを実現した。加えて、フィールド実証実験等を通じて、運用面の検討や費用対効果の試算等を併せて実施した。

1. まえがき

センサを活用した社会インフラの維持管理は、社会インフラの供用期間が一般に数十年の長期間にわたり、維持管理を目的として設置するセンサ (送受信機含む) 等についても長期の稼働が求められることから、現在、データの送受信、電源供給等は、通信ケーブル、電源ケーブル等を接続するなど有線方式により実現している。しかし、有線方式は、ケーブルの敷設箇所を確保する必要があるなど既存の社会インフラへ適用することは困難であり、また、ケーブルの敷設コスト及びケーブル自体の維持管理費用、災害時等の断線等の課題がある。

本研究開発では、平成 26 年度から平成 28 年度の 3 年間で、センサで計測した振動等のデータを無線方式により高信頼かつ低消費電力で収集・伝送する通信技術等を確立するとともに、国際標準化を推進し、ICT を活用して社会インフラの効果的・効率的な維持管理を可能とする橋梁モニタリングシステムの実現を目指した。

2. 研究開発内容及び成果

本研究開発では、社会インフラの橋梁を対象に、以下 2 点の通信技術の開発を行った。2 つのモニタリング方式を組み合わせ、必要十分なセンサで健全性の管理を実現した。

- 広範囲型 低消費電力無線通信技術
 - 構造物全体における健全性の評価
 - センサの設置間隔が疎であり、低い頻度のデータ収集で十分な計測箇所・事象を対象
- 局所集中型 低消費電力無線通信技術
 - 部材レベルの健全性の評価
 - センサの設置間隔が密であり、高い頻度でデータの収集が求められる計測箇所・事象を対象

「広範囲型」及び「局所集中型」のモニタリング方式を組み合わせ、橋梁モニタリングシステムの全体像を下図に示す。広範囲型で橋梁全体の挙動を監視し、局所集中型

により主要部材の結合部を監視する。

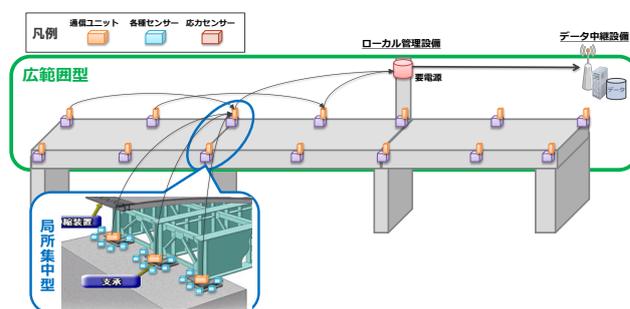


図 1 広範囲型と局所集中型の関係性

上図に示す通り、「広範囲型」においては、各種センサに通信機能を有した通信ユニットを併設し、センサデータを収集するローカル管理設備には、1 橋梁当たり 1 つ程度の目安で設置する。ローカル管理設備は、データの管理・分析等を行うデータ中継設備へデータを送信する役割を担う。データ中継設備は 1 地域あたり 1 つ程度の目安で設置し、複数橋梁のデータをまとめて管理・分析する。

「局所集中型」においては、部材と部材の結合部 (支承等) に複数個の応力センサと 1 つの結合部に対して 1 つ程度の目安で通信ユニットを設置する。

2.1. 広範囲型 低消費電力無線通信技術

広範囲型は、低消費電力無線通信制御技術及び低消費電力時刻同期技術の研究開発を行う。当該技術課題に対する対応策は以下の通りである。

- 低消費電力無線通信制御技術
 - 通信電文の優先度制御
 - 異常検知
 - マルチホップネットワーク

- 低消費電力時刻同期技術
 - マルチホップネットワーク
 - 時刻同期

上記課題に対して、以下の計画に従いフィールド実証を実施した。本計画に従い、年度毎に機能・精度ともに高度化することで、平成28年度には国内95%の橋梁に対応可能となった。

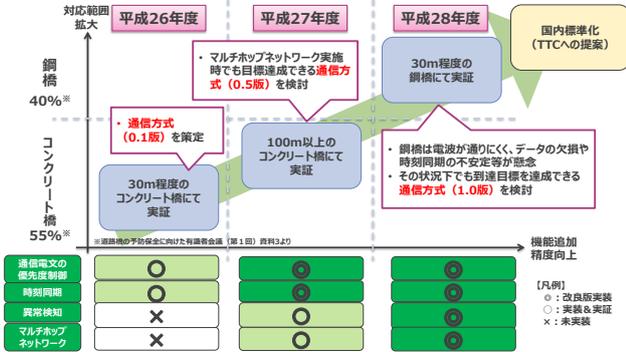


図2 「広範囲型」における3年間の取組計画

フィールド実証は、福井県鯖江市に協力いただき、各年度で以下の橋梁を対象に実施した。

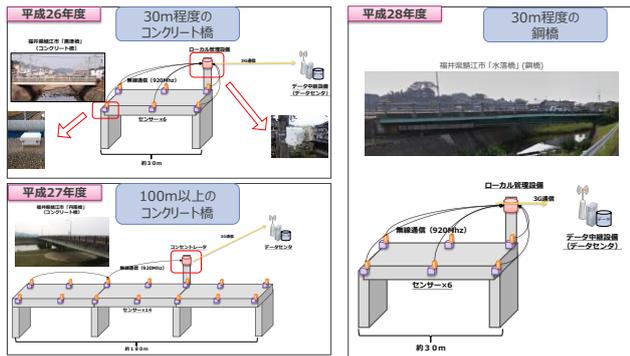


図3 フィールド実証で使用した橋梁

2.1.1. 低消費電力無線通信制御技術

低消費電力無線通信制御技術では、以下の到達目標の達成に向けて、研究開発を実施し、全て達成した。

- 設置したセンサから、毎秒100回程度で振動データを一定時間収集し、1日あたり数百キロバイトとなるデータの伝送を、乾電池等の電源で5年以上の長期間にわたり実現する
- 地震等の災害発生時に、社会インフラの異常を適切に把握するため、通常時と異なるデータが計測された場合には、迅速にデータの収集・伝送を行うこととする
- 本技術の研究開発に当たっては、実際の社会インフラにおいてフィールド実証を行う

上記到達目標の達成に向けて、1日のうち車両交通量の多い時間（例：AM7:00～AM8:00）にて閾値越えのデータのみを通信する機能（通信電文の優先度制御）や、地震等の異常発生の検知と計測データの伝送（異常検知）、長距離通信への対応（マルチホップネットワーク）を実現する研究開発を行った。

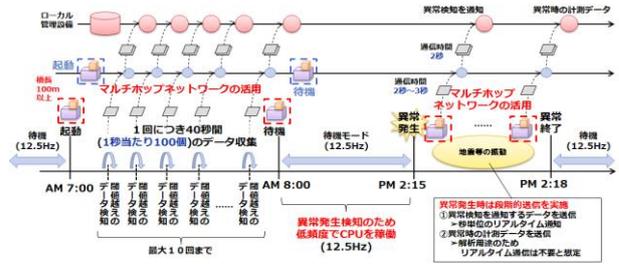


図4 低消費電力無線通信制御技術の概要

2.1.2. 低消費電力時刻同期技術

低消費電力時刻同期技術では、以下の到達目標の達成に向けて、研究開発を実施し、全て達成した。

- 3つ以上の橋桁で構成される100メートル以上の橋りょうにおいて、乾電池等の電源で5年以上の長期間にわたり、15分の1秒以下の誤差で6個以上のセンサ間の時刻同期を実現する。
- 本技術の研究開発に当たっては、実際の社会インフラにおいてフィールド実証を行う

上記到達目標の達成に向けて、1時間に1回の時刻同期と、カウンタパケットによる時刻同期の2方式を組み合わせ、時刻同期の精度向上に取り組んだ。

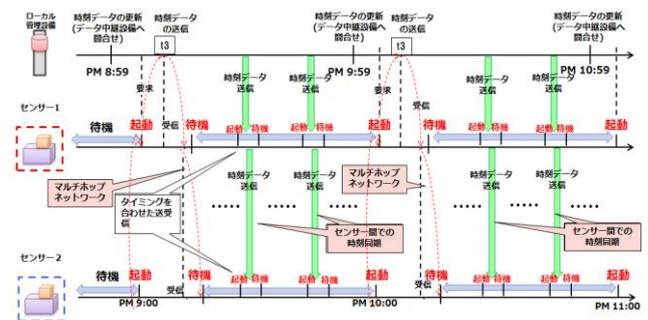


図5 低消費電力時刻同期技術の概要

2.2. 局所集中型 低消費電力無線通信技術

局所集中型は、超低消費電力無線送受信技術及び効率的無線通信制御技術の研究開発を行う。当該技術課題に対する対応策は以下の通りである。

- 超低消費電力無線送受信技術
 - 新たなLSIの開発
 - セミパッシブルRFID方式の採用
 - 効率的通信プロトコル
 - 情報セキュリティの考慮
- 効率的無線通信制御技術
 - 効率的通信プロトコル
 - 情報セキュリティの考慮

無線通信の大幅な低消費電力化を図るため、センサ側では無線を発せず、親機からの電波をアンテナで反射するときに変調をかけるバックスキャッタ方式を採用することとし、専用の通信LSIを、3回の試作により開発した。



図 6 3回の施策による通信 LSI の開発

30 個程度のセンサから高速にデータ収集を行うため、通信 LSI には、あらかじめ決められた順序でセンサから順次データ送信を行う効率的な通信制御プロトコルを実装した。

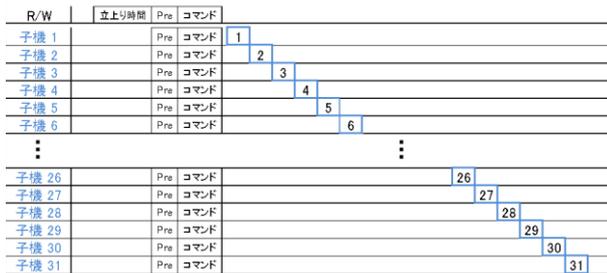


図 7 親機と子機の通信のタイミング

送受信に際しては、軽量暗号 Present80 とローリングコードを組み合わせて、通信の都度、親機・子機の相互認証と暗号化を行い、セキュリティを確保するプロトコルとした。試作した通信 LSI を用いて、国立研究開発法人 土木研究所 構造物メンテナンス研究センターの臨床研究用撤去部材保管施設において、橋梁構造物である鉄やコンクリートの近傍で通信試験を実施した。

下図に臨床研究用撤去部材保管施設の写真を示す。実証実験を行った日（平成 28 年 11 月 30 日）に撮影したものである。第 3 回試作の通信 LSI に、パッチアンテナ及びダイポールアンテナをとりつけて、通信試験を行った。



図 8 パッチアンテナを取り付けた通信 LSI



図 9 ダイポールアンテナを取り付けた通信 LSI

親機がないため、交信距離を変えながら、子機側での受信波形、返信波形を確認した。試験の結果、コンクリート橋、鉄橋ともに、7m の距離まで返信波形が確認できた。



図 10 通信確認試験の状況

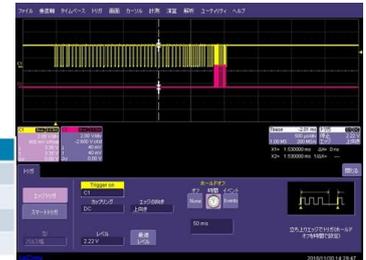


図 11 通信確認試験結果

距離	コンクリート	鉄橋
5m	○	○
6m	○	○
7m	○	○
8m	×	×

基本計画書の到達目標は、全て達成した。消費電力は従来技術の 1300 分の 1 以下【到達目標の 1.3 倍】、通信距離は 7m 以上【到達目標の 1.4 倍、平成 28 年度目標の 3.5 倍】を達成した（200cm² の面状アンテナを使用）。31 個のセンサから 2 バイトのデータを順次送信し、全データの送信完了を、従来技術の数十分の 1 以下の時間（10 ミリ秒）で可能とした【到達目標の数倍】。2.5 メガバイトのデータ送信に必要な時間は 14 分【到達目標の 100 倍】、コイン型リチウム電池 BR3032（公称容量 500mAh）で 26 年以上稼働（自己放電等を考慮しない場合）と試算された【到達目標の 5 倍】。

平成 28 年度は、通信距離の到達目標を 2~5m とし、ロジック回路の改修を見送ることで、費用を大幅に削減したが、前倒しで最終目標（5~10m）を達成した。

2.3. 政策目標（アウトカム目標）の達成に向けた取組みの実施状況

アウトカム目標達成に向けた取組計画を以下に示す。

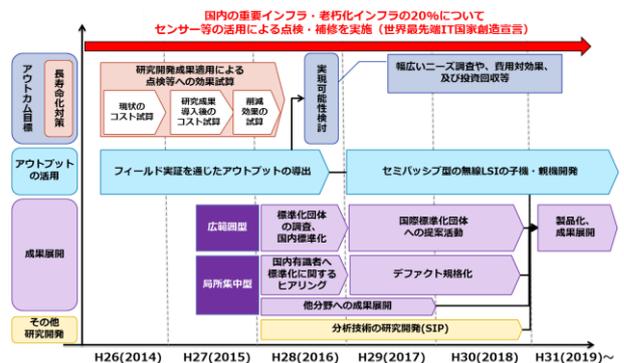


図 12 アウトカム目標達成に向けた取組計画

2.3.1. 研究開発成果適用による点検等への効果試算

研究成果導入による費用対効果について、現状の橋梁維持管理業務と研究成果導入後の橋梁維持管理業務を比較することで試算した。

以下に、研究成果導入後の橋梁維持管理コスト案を示す。

表は導入前コストと導入後コスト、導入による削減コストを並べている。また、1橋を5年に1度の頻度で点検するため、1橋当り5年間におけるコストとしている。情報機密保持のため具体的な数値は記載しないが、導入前コストの合計（5年間）を100とし、それに対する各項目の割合比を記載している。

表1 研究成果導入前・導入後の点検費用

項目	導入前コスト	導入後コスト	削減コスト	備考
1 日常点検 3 観察点検	1	1	0	
2 定期点検	57	42	15	一部の点検項目をセンサーにより代替することで削減
4 重要度評価の設定～ 7 対策優先度の評価	1	1	0	
8 補修対策の実施	41	34	7	早期発見により補修費用を約2/3に抑える
通信費	3G	0	3	-3
	クラウド	0	0	-0
ソフトウェア保守	0	1	-1	
合計(5年間)	100	82	18	
【参考】1年間コスト	20	16	4	

上記試算結果では、研究開発成果導入により、導入前のおよそ18%のコストを削減できている。上記試算は、前述した「定期点検費用の削減」と「補修費用の削減」の効果を反映している。

通信費（クラウド）のコストは最も低い数値となっているが、本研究開発成果のモニタリングシステムが送受信するデータ量は比較的小さいため、複数の橋梁（100橋等）をまとめて集約する利用方法とすれば、製品にもよるが、1橋当りは小さいコストで利用できると思われる。

表2 研究成果導入時の初期費用

導入初期費用(1橋梁)			
項目	費用	備考	
初期費用	センサー	4	1橋当り2個のセンサーを設置
	ローカル管理設備	16	1橋当り1個のローカル管理設備でデータを収集
	工事	11	
	閾値設定等	1	
合計	32		

本コストは導入時のみに発生するものであるが、センサーやローカル管理設備の経年劣化も考慮し、定期的な機器交換が必要であり、交換時にも同様のコストが発生する。10年に1回の機器交換が必要である場合、10年間におけるコスト削減効果は、 $18 \text{ (橋梁時事管理業務における1橋当り5年間の削減コスト(割合比))} \times 2 = 32 \text{ (10年に1回発生する導入時コスト)} = 4$

となり、10年間で4の削減効果が得られることがわかる。

2.3.2. 標準化団体の調査、国内標準化

本研究開発にて策定した広範囲型における低消費電力無線通信制御技術及び低消費電力時刻同期技術の通信仕様を“標準仕様”とすべく、一般社団法人 情報通信技術委員会（以下、TTC とする）への提案活動を行い、TTC 標準としての採用を図った。TTC 標準は国内標準と同等であり、本研究開発の研究開発目標（アウトプット目標）における“国際標準化の推進”を達成する前段階として、重

要であると考えられる。

今回の通信規格を提案するにあたり、通信規格の内容を以下2つのドキュメントに整備し、提案を行った。

①橋梁モニタリングガイドライン

橋梁モニタリングにおける振動情報収集に求められる要求条件やアプリケーション層に関する動作条件を、国の指針と本実証実験結果と併せて記録したもの。類似の研究開発や、今後の実運用上での指針としての参照先とし、同分野の発展の一助とすることを目的とする。

②橋梁モニタリング情報モデル仕様書

通信規格1.0版において、センサとローカル管理設備間でやり取りしているデータ項目（計測データ、計測時間、計測タイミング等）を記録したもの。異なる方式で収集したデータが、橋梁モニタリングの要求条件に沿ったデータとして、均一に扱えるようにすることを目的とする。

上記2つのドキュメントを整備し、2017年3月7日をもって、TTCのWG3600にて承認を頂き、2017年3月8日にTTC標準案として提案を行うことができた。

また、本研究開発にて策定した局所集中型における超低消費電力無線送受信技術、及び効率的無線通信制御技術については、RFIDに関する国際標準化の状況を調査し、国内有識者へのヒアリングを行った。その結果、本技術については、標準化のメリットが必ずしも明らかでなく、平成28年度までに技術開発が完結しないために国際標準化提案しても成立する可能性が低いことが判明した。よって、本事業においては、デジュールではなく、デファクトでの標準を目指すこととした。平成29年度以降にエネルギーハーベスティングコンソーシアム独自の規格として公表することを目指し、特許出願の準備を行った。

2.3.3. その他分野への適用に向けた活動

局所集中型における超低消費電力無線送受信技術、及び効率的無線通信制御技術を中心に、国立研究開発法人物質・材料研究機構で開発が進められている腐食環境センサとの接続可能性を検討した。インフラ維持管理分野、その他の分野（自動車、セキュリティ事業、電力インフラなど）への事業展開を目指し、ポテンシャルユーザとの意見交換を行い、一部の要件についてはLSI仕様で反映した。

3. 今後の研究開発成果の展開及び波及効果創出への取り組み

無線センサを用いたインフラ維持管理に関する実現可能性検討の結果、今後の課題として以下が挙げられる。

①【広範囲型】情報モデルの統一

情報モデルの標準化と実装が進めば、データの一元管理や比較利用が可能となる。総務省実証にて、様々な通信プロトコルに適用可能な加速度センサの情報モデルを標準化した。それ以外のセンサデータ（ひずみ、腐食等）及び加工データ（固有振動数等）の標準化も進めていく必要がある。また、実装に向けたリファレンスモデルを共有することが有効となる。

②【広範囲型】分析技術の確立

センシングデータの分析のみで、目視での点検項目を満たすことができれば、インフラ状態監視システムでの維持

管理が可能となる。そのため、センシングデータをもとにした分析手法の研究開発を進める必要がある。

③【広範囲型】ビジネスモデルの構築

社会に普及展開するためには、各ステークホルダにどのようなメリットがあるのかを明確にする必要がある。そのため、費用対効果の算出やニーズ調査、法制度の整備(センサによるモニタリングの許容)を行う必要がある。

④【広範囲型】国際標準化に向けた活動

国内にて標準化した標準仕様について、国際標準化をすべく、ISO や民間標準化団体の Building Smart International を対象に国際標準化活動に向けた活動を実施する。

⑤【局所集中型】親機の開発及び標準化に向けた活動

開発技術の事業化を進めるにあたっては、LSI のロジック部改修及び親機の研究開発が必要である。開発予算を確保して平成 30 年度以降に開発を継続することを目指している。研究開発の進捗を待って、橋梁でのセンサ設置義務の動きなどもにらみ、ARIB (国内標準) や IEEE (国際標準) など、標準化団体への提案可能性を探る。

⑥【局所集中型】その他分野への適用検討

局所集中型については、橋梁以外にも活用用途が考えられることから、これまでの活動を継続して行い、その他の分野(自動車、セキュリティ事業、電力インフラなど)におけるユースケース検討を実施する。

4. むすび

本研究開発は、下図に示す通りの成果を得ることができた。

	広範囲型	局所集中型
① 研究開発の目的・政策的位置付けおよび目標	本事業は、「インフラ寿命化基本計画」(平成25年11月29日インフラ老朽化対策の推進に関する関係省庁連絡会議決定)に基づき、行動計画の策定が進められている。平成29年3月23日には、内閣官房のインフラ老朽化対策の推進に関する関係省庁連絡会議(第4回)が開催され、 事業開始後にもインフラ維持管理の検討が進んでいる。	
② 研究開発マネジメント	研究開発費を大幅に削減した(H28年度は前年度比半減、3年間の総額で当初計画の3割減)が、 マネジメントの改善など効率化に努め、基本計画の到達目標を大きく超える成果を得た。 そのため、費用対効果の観点で、有効かつ効率的に執行されたと認められる。	
③ 研究開発目標の達成状況	全ての到達目標を大きく上回る成果を得た。 消費電力8.7mAh(目標:10.9mAh)や時刻同期精度21.77ms(目標:66ms以下)、データ欠損率0%(目標:0.5%以下)等	全ての到達目標を大きく上回る成果を得た。 消費電力1300分の1(目標:1000分の1)、通信距離7m(目標:2m)、2.5Mbyte伝送に16分(目標:1日、目標比100倍の性能)コイン型リチウム電池換算で26年以上(目標:5年以上)等
④ 政策目標の達成状況	費用対効果の算出 に関して、適切な検討を行った(1橋梁あたり43,242円)。また、TTCにて 通信規格の標準化 を行うことにより、研究開発成果の普及に寄与した。	国際標準化に関して、適切な検討を行い、 妥当な結論を得た (現時点ではデファクト化を目指し、 将来の状況変化に応じてデジュール化を検討)。また、 インフラ以外の分野への社会展開 をエネルギー・ヘルスケアコンソーシアム会員中心に検討した。
⑤ 今後の計画	国際標準化に向けて、成果を発展させる後続プロジェクトの計画、成果展開に関する計画を今年度検討した。	

図4 本研究開発事業におけるまとめ

また、本研究開発において実証フィールドに協力いただいた福井県鯖江市、通信仕様の検討に協力いただいた有識者の皆様、各種センサメーカーの皆様に感謝致します。

【国内標準提案・獲得リスト】

[1] 一般社団法人 情報通信技術委員会・WG3600、JJ-300.30、橋梁モニタリング用加速度センサの情報モデル及び低消費電力無線通信における動作、2017年3月8日、2017年5月25日

【本研究開発課題を掲載したホームページ】

http://www.soumu.go.jp/menu_seisaku/ictseisaku/ictR-D/fichiran26.html