

無線・電池駆動の省電力構造物モニタリングシステムと光ファイバーセンシングの長期安定動作フィールド実証実験

山道 昇 羽田 匡彦

OKIは、愛知県の橋梁で無線技術と光ファイバーセンシングの実証試験を行った。無線・電池駆動の「省電力構造物モニタリングシステム」を用いた橋梁支承部の健全性評価の実証実験を2019年2月から2021年2月までの約2年にわたり実施した。また、2020年1月には同橋梁に光ファイバーを敷設し、光ファイバーセンサーによる歪み測定をコンクリート床版で計測を開始した。その結果、従来の健全性評価で必要だった現地での電源工事や配線工事を行うことなく、遠隔からの橋梁支承部、橋桁のデータ取得、及び光ファイバーセンサーによる歪データなど、実用に供するデータ取得が可能なることを実証した。本稿では、本実橋梁で実施したフィールド実験結果を報告する。

モニタリングシステムの課題

高度成長期以降に建設された社会インフラ構造物は老朽化が進み、橋梁の定期点検が義務化されたものの、事故や災害に備えた常時監視やモニタリングによるリスク分析などが義務化されたものではない。また、近年、多発する記録的な大雨により、日本各地で大規模な土砂災害や洪水が増加傾向にあり、道路・鉄道事業者は、センサー・IoT技術を活用した自然災害リスクへの予測や予防保全が重要で、これらの対策として新技術導入による構造物モニタリングシステムが注目されている。しかし、現状は、モニタリングシステムの設置や導入コスト、新技術で収集したデータの有効性と運用実績の面で有効な実例が少ないという課題がある。

モニタリングに必要な要素技術と関連機器

省電力構造物モニタリングシステムを構成する要素技術は、以下の三つの技術領域に分類される¹⁾。

(1) センサー技術と関連機器

主要センサーとして、電池駆動タイプの無線加速度センサー（傾斜センサー）²⁾、無線たわみ/変位計、無線カメラセンサー（写真1）、無線腐食センサー、及び光ファイバーセンサー（写真2）³⁾がある。電池駆動タイプのセンサーでは、

センサー側に分析処理を搭載することで、送信データ・消費電力の削減技術を検証した。

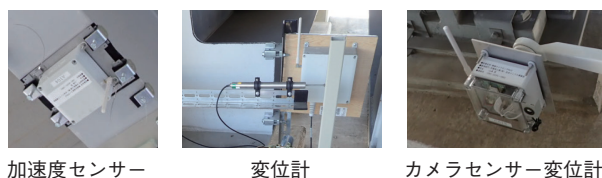


写真1 無線・電池駆動センサー



写真2 光ファイバーセンサー

(2) 伝送技術と関連機器

無線通信（920Mマルチホップ通信⁴⁾、LTEなど）により、サーバー側に情報を送信するゼロエナジーゲートウェイ（ZE-GW）、及びそれらに超音波水位計などのセンサーを搭載した製品群（写真3）⁵⁾、有線通信（光ファイバー、Ethernet、RS485、など）がある。電池駆動による省電力無線技術、及び太陽光発電を利用し電源レスかつ連続不日照を考慮した実証試験を実施した。



写真3 ゼロエナジーゲートウェイ (ZE-GW)

(3) 監視制御技術

傾斜や変位情報を継続的に蓄積することで温度との因果関係の確認、取得データ異常時の警報発出、橋梁の設計図面との連携や外部システム連携をインフラモニタリン

グシステムとして考慮した。これら機能により、無線加速度センサーで収集した加速度、支承部に設置した変位計で取得した変位と温度の関係、橋桁の固有振動数、及び取得データが設定される監視閾(しきい)値内にあることが図1に示す画面にて確認可能となっている。

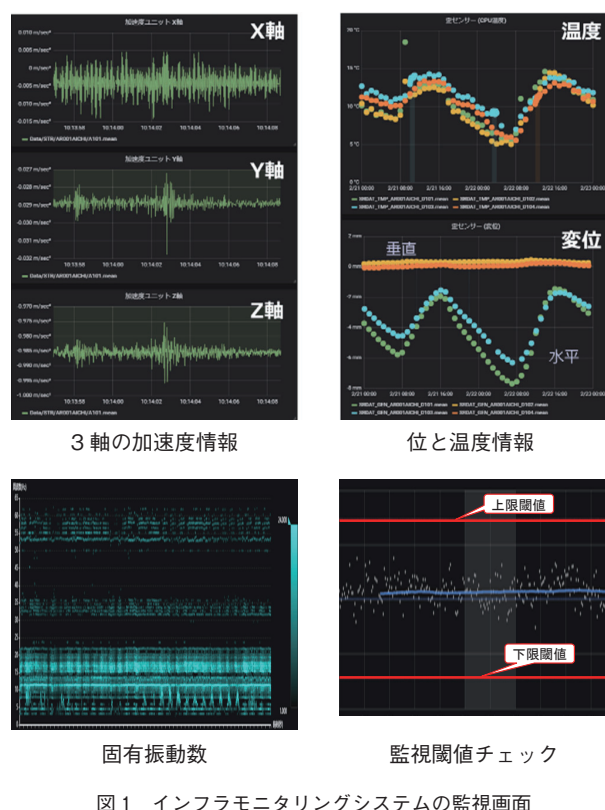


図1 インフラモニタリングシステムの監視画面

インフラモニタリングシステムの概要

省電力無線モニタリングシステムは、センサーで収集した加速度、変位、画像情報を920MHz帯の無線周波数を利用し、ゲートウェイ装置から上位サーバーシステムに送信する。また、センサーで取得したデータは、センサー内で平均周波数のスペクトル分析を行うことで送信データ量を削減し、電力の多くを使用するデータ送信回数を削減することでセンサー部の省電力化を行うとともに、サーバー側での分析処理の軽減が可能になる。ゲートウェイ装置は、太陽光と二次電池の組み合わせによる充放電する仕組みを持ったZE-GWにより、920MHz帯でセンサーから受信したデータをLTEなどの無線通信網を経由して、サーバー側に送信し、データベースとして蓄積・分析の処理を行う。今回、支承部への変位計・カメラセンサーの設置により支承部伸縮装置の変位計測、及び橋桁への加速度センサー設置により、主桁のたわみ量・周波数スペクトルの測定を行った。

また、コンクリート床版背面に橋軸方向に光ファイバーを接着剤で固定、ひび割れ発生と進展を調査するため、光ファイバーセンサーによる計測を実施した。

実証結果(電池駆動タイプのセンサー)

無線加速度センサーでは、指定した920M帯域で設定した間欠周期でデータ転送が行われ、サーバー側での解析に必要なデータが連続送信されること、またセンサー側のエッジ処理として、周波数スペクトル分析とたわみ量分析を行った。取得した周波数スペクトルを図2に、たわみ量のヒストグラムを図3に示す。図2は、センサー内でエッジ処理を行わない方法と、センサー内でエッジ処理による周波数分析を行う方法を比較した。ピーク周波数の一致(赤線箇所)を確認することで、センサー内でエッジ処理を行っても精度が維持できることが確認できた。橋桁の劣化により、ピーク周波数の変化やたわみ量が変化することから橋梁の健全度評価のため長期のモニタリングを行う際には、本エッジ処理は有効な技術である。

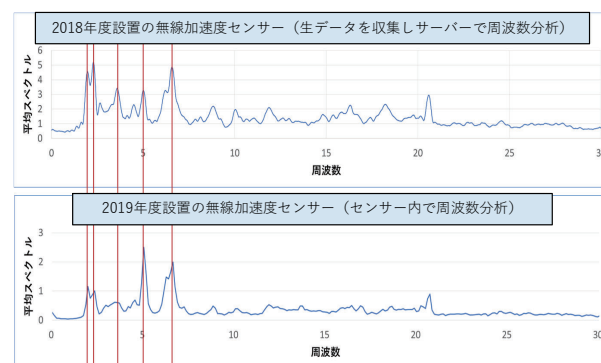


図2 周波数スペクトルの分布

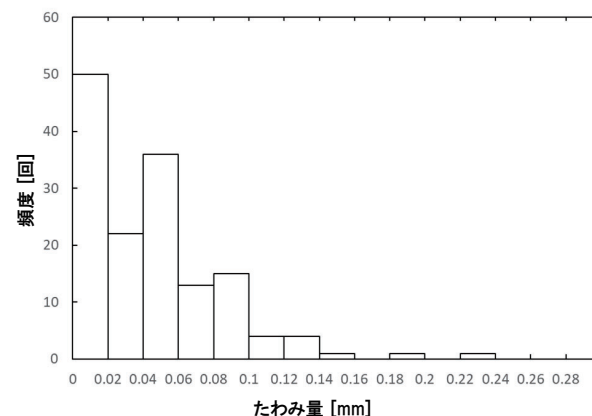


図3 たわみ量の分布

無線変位計と無線カメラセンサーでは、支承部や主桁の変位量の計測、及び季節や温度条件による変位量との関係が必要となるため、温度のデータも収集した。その結果、車両通行などによる鉛直（垂直）方向の変位は少ない変位量が取得でき、主桁は日々の温度変化に応じて橋軸（水平）方向に伸縮していることが確認できた。また、これら伸縮傾向は、構造物の一般的な温度変化により通常の動作範囲であることが確認できた。図4のように水平方向の変位が温度変化に対応するように変化していることが分かる。

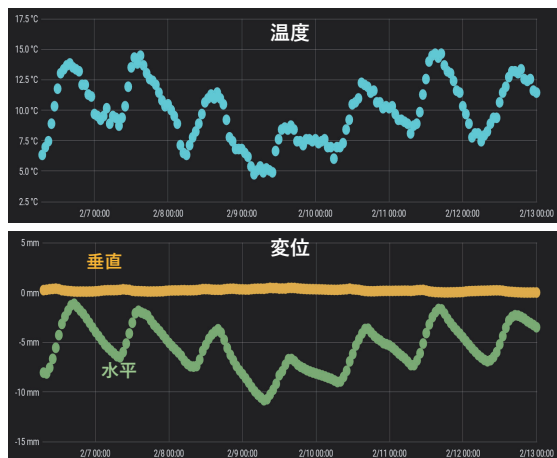


図4 無線変位計による変位測定

無線カメラセンサーでは、撮影する格子状の対象マーカの変量を分析すると共に、無線変位計との計測誤差を確認した。図5に水平方向と垂直方向で、無線変位計と無線カメラセンサーの変位量の差分を示す。

無線変位計との平均誤差

絶対誤差平均 (マーカまでの距離)	X(水平) [mm]	Y(垂直) [mm]
橋脚接写(25cm)	0.421	0.764
橋台接写(20cm)	0.136	0.192
橋台望遠(120cm)	2.063	1.035

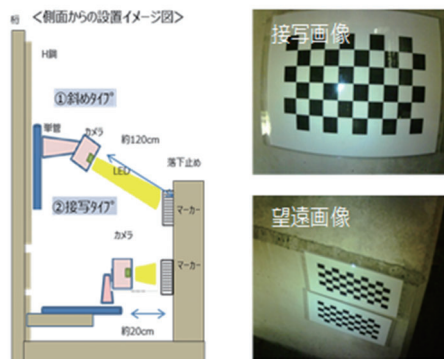


図5 無線カメラセンサーによる変位分析

無線カメラセンサーは、無線変位計との計測誤差を水平／垂直方向でそれぞれ比較した。対象物から約1.2m程度離れた箇所測定し、平均測定誤差は約2mmであった。誤差は、無線変位計と比較し精度は良くないものの、多少離れた位置からの計測が可能のため設置の容易性というメリットがあり、求められる精度に応じて、無線変位計との使い分けが可能と考えられる。

ZE-GWは、2台の無線加速度センサーと3台の無線カメラセンサーを収容し、日々の発電量と消費電力量を計測した。冬季の比較的光照量が少ない条件でも、1日の発電量で必要な消費電力が賄えていること、梅雨時などの連続不日照日が連続する条件でも運用可能であることが確認できた。図6は冬季の1週間の日々の発電量と蓄電池の電圧を示している。日中に発電した電力を使用し夜間や曇天時に蓄電した電力で運用を継続できる様子が確認できる。

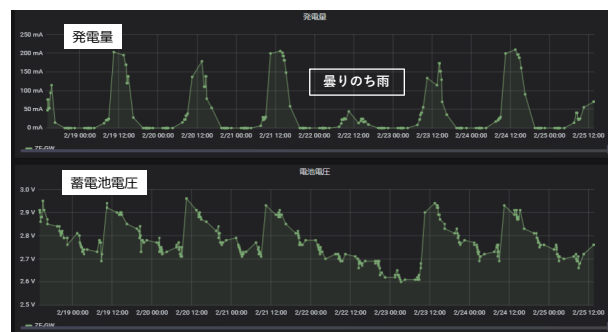


図6 ZE-GWの発電量と蓄電池電圧

実証結果（光ファイバーセンサー）

光ファイバーセンサーは、定期点検を想定し、劣化が少ない段階で予防保全的に補修することで、維持管理費の最適化を狙っている。実証実験では、光ファイバーを中央分離帯に挟んで、上り/下り両方向のコンクリート床版にファイバーを敷設し、床版の歪みを計測した。図7に光ファイバーの敷設レイアウトを示す。

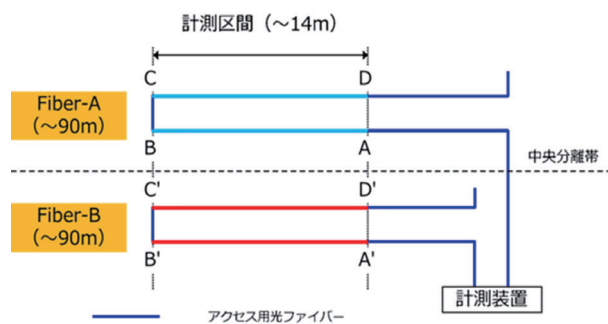


図7 光ファイバーの敷設

実施期間中、3回(2020年1月30日、2020年11月11日、2021年2月17日)の計測を実施した。各距離の光ファイバーFiber-Aでの引張歪み量、及び2020年1月30日の計測結果を基準とする引張歪み差分量を図8に示す。横軸は計測装置からの距離を示し、縦軸は計測装置からの距離に対応する引張歪み量を示し、下段は2020年1月30日の測定を起点とした歪み差分量を記載している。今回の測定結果から、光ファイバー固定時の初期歪み量(図8の点線部①～⑥は、光ファイバー固定時の初期歪み量の影響による変更領域として除外)を除き大きな歪変化がないことから計測期間中に新たなびび割れ発生が無いと考えられ、実際に目視点検でも異常がないことが確認でき、目視点検結果との一致を確認した。今後、光ファイバーセンサーによる歪み計測を2024年まで継続計測し経年劣化による経過をモニタリングする予定である。

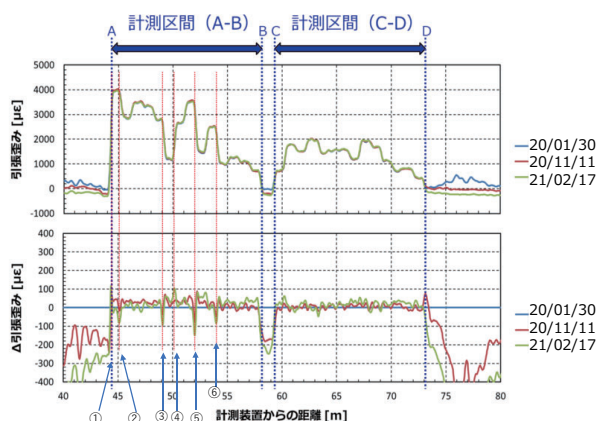


図8 Fiber-Aの歪み分布及び差分分布

今後の展開

OKIは、これまで設置や導入を削減するインフラモニタリング関連製品を開発・提供している⁶⁾。今後さらにセンサー種別やインフラモニタリングの分析機能を拡充するとともに、さまざまなフィールド(図9)に適用することで順次商品・サービスを拡充する。

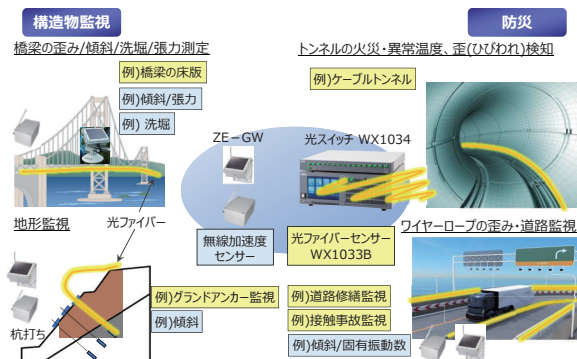


図9 モニタリングシステムの適用例

本実証実験の一部は、沖電気工業が総務省SCOP(国際標準獲得型)JPJ000595の委託を受けて実施したものです。

参考文献

- 1) 野崎正典、柳原健太郎、福井潔:無線加速度センサーを用いた橋梁モニタリングシステムの実証実験、OKIテクニカルレビュー 第229号、Vol.84 No.1、p12、2017年5月
- 2) 無線加速度センサーユニット
https://www.oki.com/jp/920M/sensor_unit/
- 3) 光ファイバーセンサー
https://www.oki.com/jp/sensing/optical_fiber/
- 4) OKI SmartHop SRシリーズ
<http://www.oki.com/jp/920M/sr/>
- 5) ゼロエネルギーゲートウェイ
https://www.oki.com/jp/920M/zeroenergy_gw/
- 6) OKIインフラモニタリングソリューション
https://www.oki.com/jp/infra_monitoring/

筆者紹介

山道昇:Noboru Yamamichi. ソリューションシステム事業本部 社会インフラソリューション事業部 ビジネス開発部
羽田匡彦:Tadahiko Haneda. ソリューションシステム事業本部 社会インフラソリューション事業部 ビジネス開発部

TiPo 【基本用語解説】

920MHz帯

日本では915.9～929.7MHzを使用する周波数帯で、2012年7月から利用可能。無線LANなどで主に使われている2.4GHz帯と比較して電波到達性が高く、障害物があっても回り込んで届くため、ビルや工場など障害物の多い場所や、屋外での利用にも向いている。海外ではサブギガ帯と呼ばれる。同様の周波数帯がスマートメーターなどに広く利用されている。

マルチホップ無線

複数の無線装置を経由して、バケツリレーのようにデータを伝送する通信方式。親機から直接電波が届かなくても近隣の子機を経由してネットワークに接続できるため、広いエリアの無線ネットワークを低コストで構築できる。また、電波状態の良い経路を自動的に選択して通信するため、一時的な電波障害に強く信頼性に優れている。

無線傾斜センサー

OKIの無線加速度センサーを傾斜センサーとして利用したもので、3軸加速度センサーに与えられる重力成分を合成し、傾斜角と傾斜方向を算出する。橋梁部材、斜面、支柱などの傾きの変化を監視が可能。