

無線センサネットワークを活用した トンネルの変状監視手法の開発

津野 究* 平田 亮*

Development of a Tunnel Monitoring Method Based on a Wireless Sensor Network

Kiwamu TSUNO Ryo HIRATA

A monitoring method with a wireless sensor network was developed to lighten the workload of data acquisition and reduce the monitoring cost in railway tunnels. A relay method was proposed to transmit the data for long distance in the tunnels with fewer sensors. The performance of the monitoring system was verified by means of field tests at actual railway tunnels. This paper also describes the data processing method which eliminates the short-term change caused by daily temperature change in order to utilize the real-time monitoring data for the maintenance of distorted tunnels. It is found that the low-pass filter is an effective tool for eliminating the short-term change.

キーワード：トンネル，変状監視，無線センサ，データ処理，周波数分析

1. はじめに

鉄道トンネルの変状監視においては、内空変位の手動計測など人手による計測方法が主に用いられてきた。しかし、延長方向に長いトンネル覆工に対して、深夜等の限られた時間で作業を行わなければならない、計測頻度の制約があった。一方、光波やレーザー等の計測機器を用いた自動計測技術もあるが、延長方向に長いというトンネルの特性もあり、配線が大がかりなものになり、これらのメンテナンスも必要であった。そこで、鉄道トンネルの変状監視において、計測機器で得られたデータを無線センサで転送することにより、データ収集にかかる手間やコストを大幅に低下させることを検討した。

一方、無線センサを活用して自動計測を行った場合、膨大な計測データが蓄積されるが、温度の日変化等に起因する変動の影響を受けて十分活用できないという課題もある。トンネルは、高架橋などの明かりの構造物と比べて、温度変化が小さいが、偏圧や地すべりの影響を受ける場合など土被りが比較的小さい坑口付近で変状が見られる例も多く、このような場合には気温の日変化の影響も小さくないと推測される。そこで、計測データにローパスフィルタをかけることにより、温度の日変化等に起因する変動を除去するデータ処理方法を開発した。

2. 無線センサを活用した変状監視手法

2.1 無線センサ

無線センサネットワークを活用したトンネル変状監視手法の概要を図1に示す。まず、ひび割れ幅計などの変状の進行性を計測するセンサを覆工に設置し、これにデータを送信する子機を接続する。次に、坑口付近などにデータを受信する親機を設置し、子機から親機まで計測データを無線で伝送する。伝送されたデータは、親機と接続したパソコンなどに収録する。

無線技術としては、日常生活に浸透している携帯電話や無線LANなどがあるが、これらは通信距離やデータ伝送速度の面で優れている反面、ある程度の電力が必要となる。一方、トンネルの変状監視においては、無線センサ用に発電設備を設けることは現実的ではなく、また

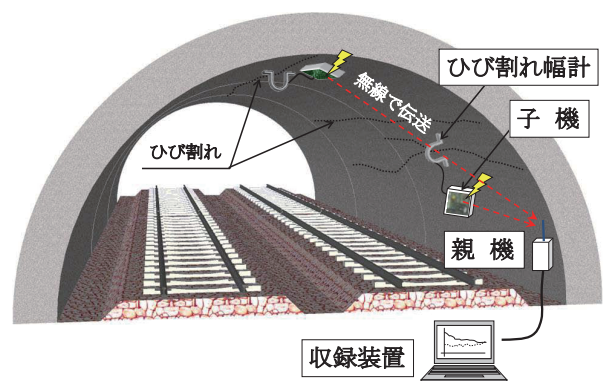


図1 無線センサを用いた変状監視手法の概要

* 構造物技術研究部 トンネル研究室

特集：構造物技術



図2 無線センサ(子機)

給電用に配線を設けることは無線センサの利点を失うことになるので、消費電力を低く抑えて小さな電力で稼働させることが重要となる。そこで、通信距離とデータ伝送速度をある程度犠牲にしても、低消費電力を確保することが重要であると判断し、ワイヤレス PAN (近距離無線) 規格の一種である ZigBee 規格の無線を用いた手法を開発した^{1), 2)}。今回、パイ型のひび割れ幅計などのひずみ式のセンサを対象としたが、ひずみ式のセンサは微弱な電圧を扱うことから、小型で省電力のシグナルコンディショナーを開発した。また、スリープモードにより省電力化を図るようにし、単三形のリチウム一次電池で長期間動作が可能となった。

鉄道トンネルで用いる場合、内空余裕に収まる必要があり、取扱いが容易であることが望ましいことから、無線センサ(特に子機)を軽量かつ薄型にする必要がある。そこで、子機は、温度計を内蔵した上でアンパや電池も含めて縦 10cm、横 10cm、高さ 3.5cm の防水容器に格納し、小型かつ軽量なものに仕上げた(図2)。なお、開発した無線センサは、1~10分間隔でデータを伝送することができ、ひび割れ幅計のほか、変位計、水位計、ロックボルト軸力計などにも対応可能である。過去に実施した性能確認試験では、廃線トンネル内で通信距離 140m まで伝送可能である結果が得られている¹⁾。

2.2 現地試験

無線センサネットワークを活用したトンネル変状監視手法の実現場への適用性を確認するために、現地計測を実施した^{3), 4)}。ここでは、図3のように供用中の鉄道トンネル A (単線、非電化) の坑口付近、坑口から 15m および 87m の側壁にパイ型のひび割れ幅計および子機(温度センサ内蔵)を取り付け、坑口付近の側壁に設置した親機まで、ひび割れ幅、温度および電池電圧のデータをおおむね 8 分 30 秒間隔で伝送した。ここでは、単三形のリチウム一次電池を 4 本用いている。親機は、坑外の小屋に設置したパソコンと USB ケーブルで接続し

て、パソコンに計測データを収録した。

電池電圧の経時変化を図4に示す。これより、計測開始から1年以上電池電圧は安定しているが、概ね15~18ヶ月経過した段階で電池電圧が急激に低下し、計測データが取れなくなる傾向が確認できる。また、温度変化が大きい坑口部では、その他の測点と比べて早く電池電圧が低下して計測データが取れなくなった。

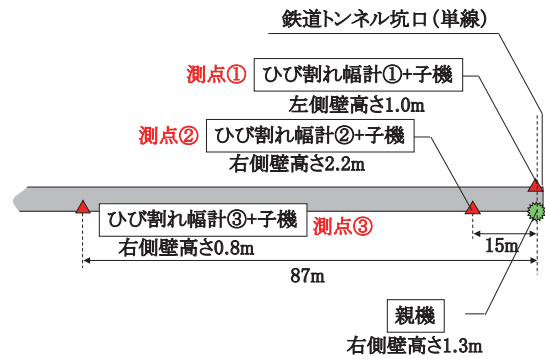


図3 現地計測の概要³⁾

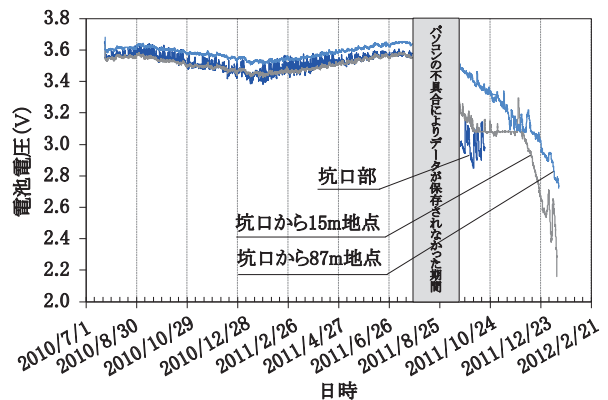


図4 電池電圧の経時変化

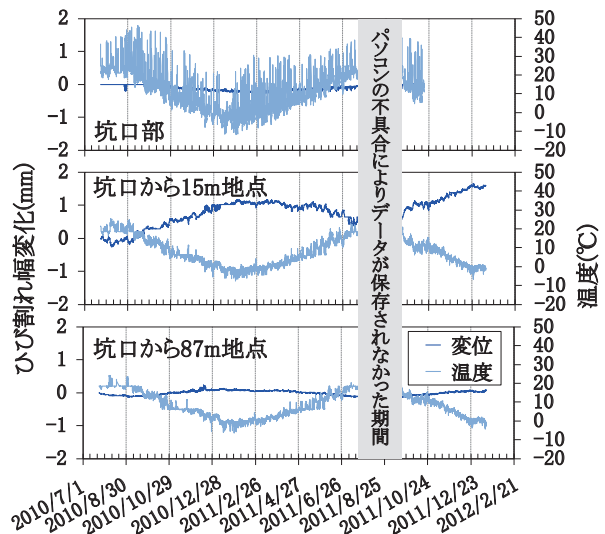


図5 ひび割れ幅および温度の経時変化

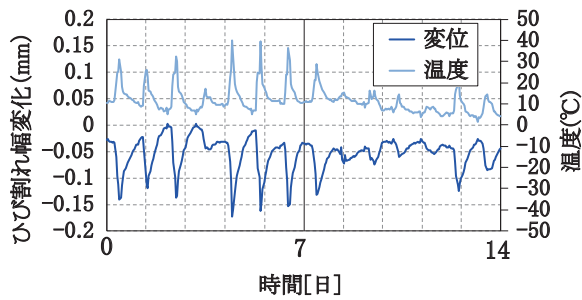


図6 坑口部の計測結果

次に、ひび割れ幅および温度の経時変化を図5に示す。これより、温度、ひび割れ幅ともに、問題なくデータが得られていることが確認できる。また、坑口部について、14日分のデータを抽出した結果を図6に示す。これより、温度の日変化に合わせて±0.15mm程度のオーダーでひび割れ幅が変化し、温度上昇とともにひび割れ幅が小さくなる傾向が確認できる。

以上のように、ひび割れ幅および温度の計測データは、電池電圧が低下して計測データが取れなくなる直前まで問題なく取得できることが確認できた。

2.3 中継用無線センサを用いた長距離伝送

(1) 中継用無線センサ

鉄道トンネルは一般的に延長方向に長い構造物であり、計測データを伝送する距離が長くなる傾向にあるが、子機から親機までの送信でデータ伝送可能な距離は限られている。そこで、計測データを中継して長距離伝送する方法について検討した⁵⁾。

本研究で用いた Zigbee 規格の無線は、図7 (a) のように無線センサがデータの中継を行い、ネットワークを築くことができる。一方、このようなネットワークを構築した場合、ネットワークを保持するためにセンサの電源を常時 ON しておく必要があり、中継しない場合より電池交換の頻度が多くなる。また、データを長距離伝送するためには、計測不要な箇所にも莫大な数のセンサを設置する必要がある。そこで、図7 (b) のように、中継用無線センサを用いてデータを長距離伝送する方式を提案した。

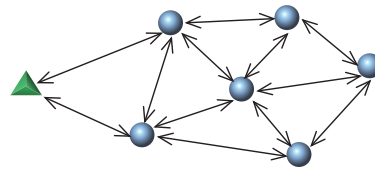
中継用無線センサも、子機と同様に幅 10cm、奥行き 10cm、高さ 3.5cm の防水・防塵容器に格納した。なお、中継用無線センサはデータの中継に主眼を置いたものであるが、温度計を内蔵させて温度および電池電圧のデータも併せて送信するようにした。

(2) 現地中継試験

中継用無線センサの実現場への適用性を確認するために、供用中の鉄道トンネル B (単線、非電化) において現地試験を行った⁵⁾。試験では、図8のように5台の中継用無線センサをトンネル内の側壁 (FL から高さ 1.6m)

におおむね 80m 間隔で設置し、親機をトンネル外の坑口から 137m の位置に設置して、USB ケーブルを用いてデータ収録用のパソコンと接続した。親機から中継機⑤までの距離は 442m である。また、パイ型のひび割れ幅計と子機をトンネル内の4箇所を設置した。なお、中継用無線センサは、単一形アルカリ電池を 44 本用いて駆動させた。子機および中継用無線センサの設置状況を図9に示す。

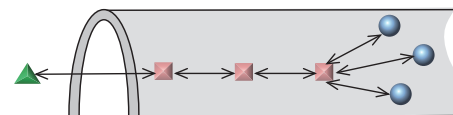
本試験では、子機からは、ひび割れ幅、温度および電池電圧のデータを、中継用無線センサからは温度および電池電圧のデータを、おおむね 5 分間隔で親機まで伝送した。計測結果のうち、子機③および中継用無線センサ⑤のデータを図10に示す。計測期間中に顕著なひび割れ幅の変化は確認されなかったが、温度が低下するのに合わせてひび割れ幅が若干拡大する傾向が確認された。計測期間中は問題なくデータが取得できており、供用中の鉄道トンネルにおいて、中継用無線センサを用いて計測データを長距離伝送できることが確認できた。



● : 子機 (計測, データの送受信・中継)

▲ : 親機 (データの受信)

(a) 一般的なセンサネットワーク



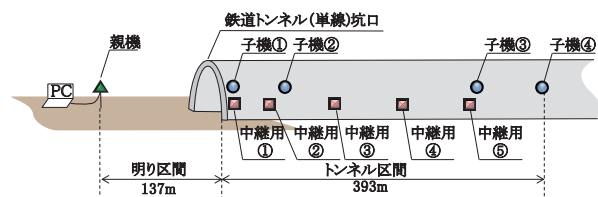
● : 子機 (計測, データの送信)

▲ : 親機 (データの受信)

■ : 中継用無線センサ (データの中継)

(b) 中継用無線センサを用いたネットワーク

図7 無線センサのデータ送信の概念図

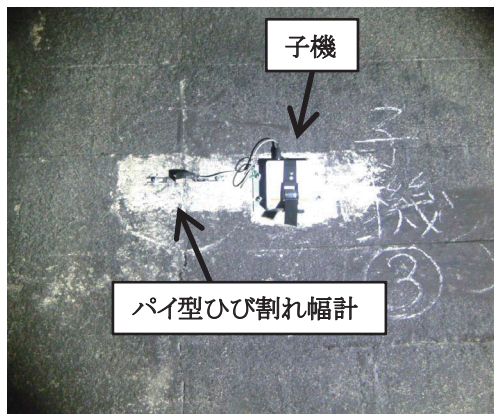


● : 子機 (トンネル内に4台設置)

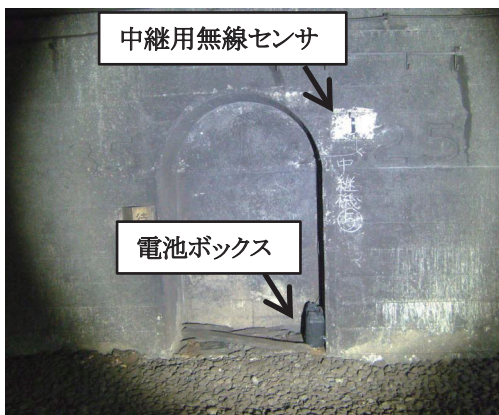
▲ : 親機 (明り部に設置)

■ : 中継用無線センサ (トンネル内に5台設置)

図8 現地中継試験⁵⁾

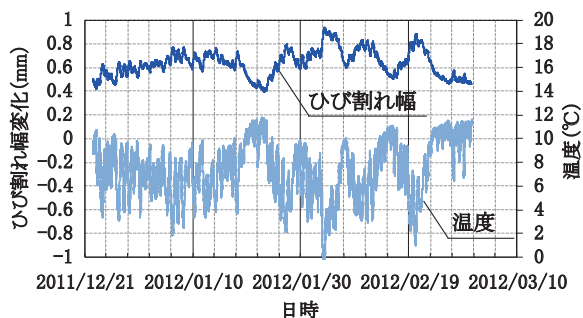


(a) 子機

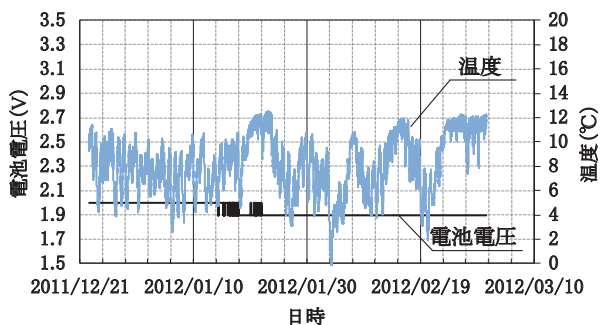


(b) 中継用無線センサ

図9 無線センサの設置状況



(a) 子機③ (坑口から324m) のデータ



(b) 中継用無線センサ⑤ (坑口から305m) のデータ

図10 計測データの例 (子機③)

2.4 省電力化に関する検討

現地試験結果を踏まえて、ファームウェアを改良することで、さらなる省電力化を試みた⁴⁾。まず、計測データの収録・送信回路やAD変換回路等の電源制御の効率化を図り、消費電力を抑えた。また、子機がスリープから起動した時に確実にデータの送受信をするようにし、同一データを3回送信していたのを1回にしたことで、消費電力を抑えた。このほか、測定精度の向上も図っている。

新ファームウェアと2.2で用いた従来ファームウェアを組み込んだ子機を用いて、室内で同時に模擬計測を行い、経時に伴う電池電圧の低下を比較した。ここでは、アルカリボタン電池LR44を2個使用し、データを5秒間隔で収録することにより、短期間で電池が消耗するようにした。試験より得られた時間と電池電圧の関係を図11に示すが、新ファームウェアを用いることにより、電池消耗までの時間が大幅に伸びる結果が得られた。

試験で用いたアルカリボタン電池は150mAの容量であり、1データ(28Byte)送信当たり従来ファームウェアでは0.022mW、新ファームウェアでは0.005mWを消費している。また、同一データの送信を3回から1回にしたことから、図12のように、消費電力がおおむね1/13となる。

一般的に無線センサの部品や電池の耐久年数は数年程度と考えられ、実トンネルの過酷な状況を考慮すると電池が消耗する前に計測ができなくなる可能性が高いが、新ファームウェアの開発により大幅な省電力化が図れる可能性があることが確認できた。

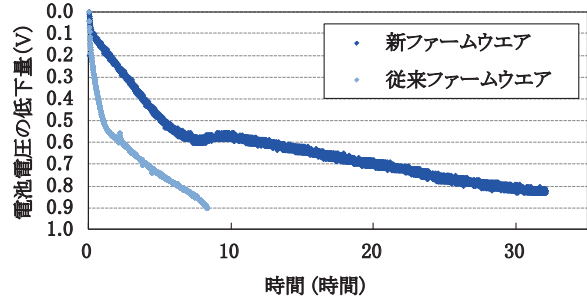


図11 動作時間と電池電圧の関係

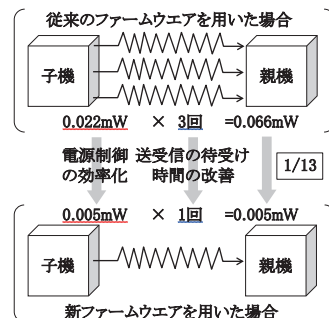


図12 消費電力に関する比較

3. 計測データの処理方法

3.1 計測データの周波数分析

図5に示すひび割れ幅の計測データを時刻歴の波形とみなし、周波数分析を行った。ここでは、フーリエ変換（フーリエ級数展開）を行ってフーリエ係数を算出し、横軸を周波数から周期に変換して、周期とフーリエ級数の関係を図示した(図13)。なお、ここでは180日分のデータを抽出して用いている。検討に用いたデータの概要を表1に示す。全測点とも、列車通過等によるデータの欠落発生率は0.1%以下であることを確認していることから、表中のサンプリング間隔は、取得期間をデータ数で割ることにより算出している。

これより、いずれの測点についても、周期24時間に明瞭なピークが見られ、坑口に近いほどこのピークの成分が大きい傾向が確認できた。温度についても、同様に、周波数分析した結果を図14に示すが、ひび割れ幅と同傾向を示している。これより、ひび割れ幅のスペクトルで見られたピークは、温度の日変化に関連するものであり、日変化の影響を受けやすい坑口に近いほど顕著になったと考えられる。

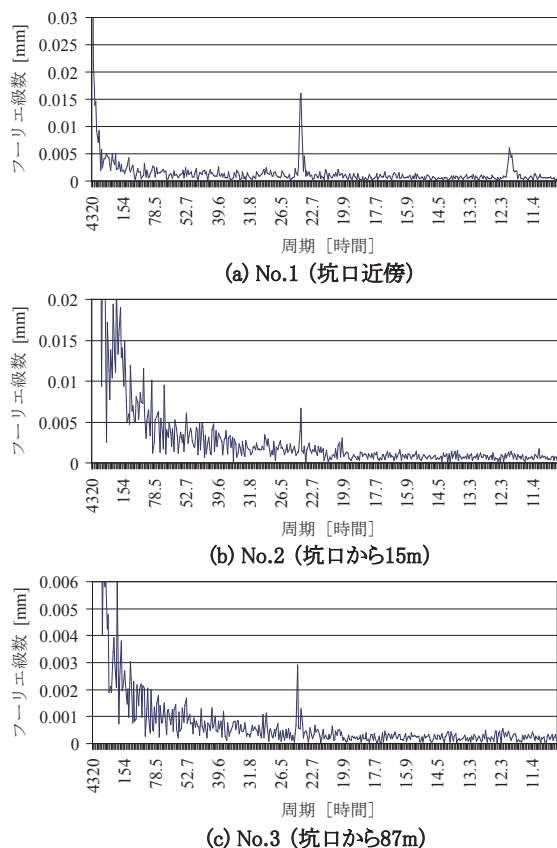


図13 周期とフーリエ級数の関係（ひび割れ幅）

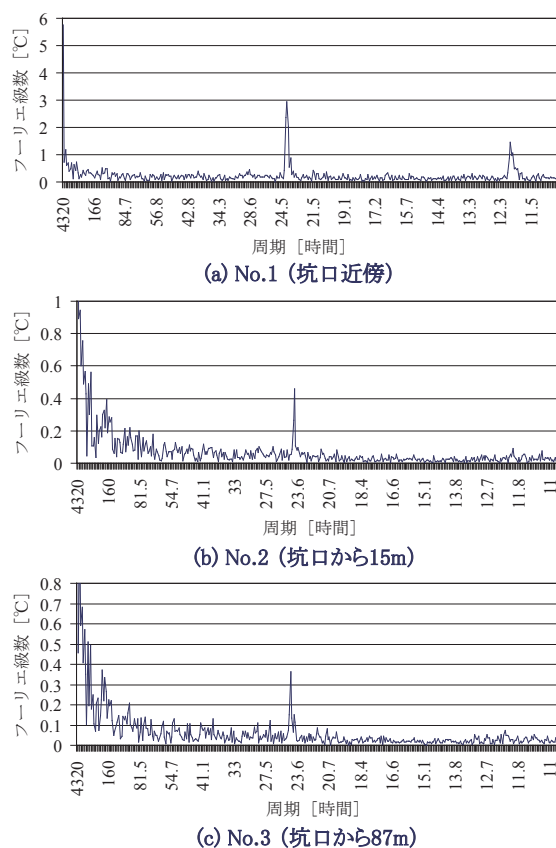


図14 周期とフーリエ級数の関係（温度）

表1 使用したデータの概要

No.	坑口からの距離	データ取得期間	データ数	平均サンプリング間隔
1	坑口近傍	180日	30,695	8分27秒
2	15m	180日	30,786	8分25秒
3	87m	180日	30,206	8分35秒

3.2 周波数分析を活用したデータ処理

(1) 処理方法の概要

自動計測により得られたリアルタイム計測データには、温度の日変化等に起因する短期的な変動が含まれている。一方、計測データを周波数分析して得たスペクトルのうち、周期が短い成分については、長期的な変動に影響しない成分だと考えられる。特に、周期24時間に明瞭なピークが見られることから、これより周期の大きい成分を残すようなローパスフィルタをかけることによって短期的な成分を除去することを試みた⁶⁾。

ここでは、まず、3.1節と同様の手法でフーリエ変換を行い、周期7日より短い成分を除去するようなフィルタをかけた後、フーリエ逆変換をすることにより処理後の波形を算出した。

(2) データ処理結果

ひび割れ幅の計測データについて、データ処理を行っ

特集：構造物技術

た結果を図15に示す。また、No.1 および No.2 のひび割れ幅の計測データについて、20日分のデータを取り出して処理前後のデータを比較したものを図16に示す。これより、処理前のデータには温度の日変化等に起因する短期的な変動が含まれているが、処理後のデータにはこれが除去されていることが確認できる。

以上のように、自動計測により得られたリアルタイム計測データにローパスフィルタをかけることにより、温度の日変化等に起因する変動や誤差が除去できることが確認できた。

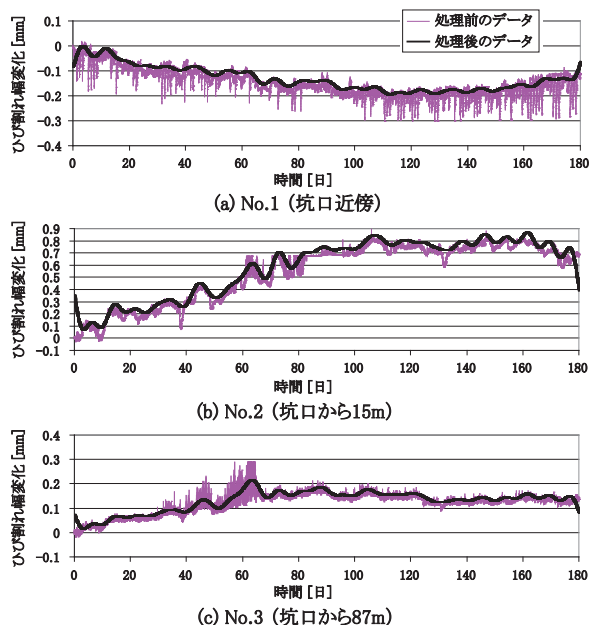


図15 データ処理結果（ひび割れ幅）

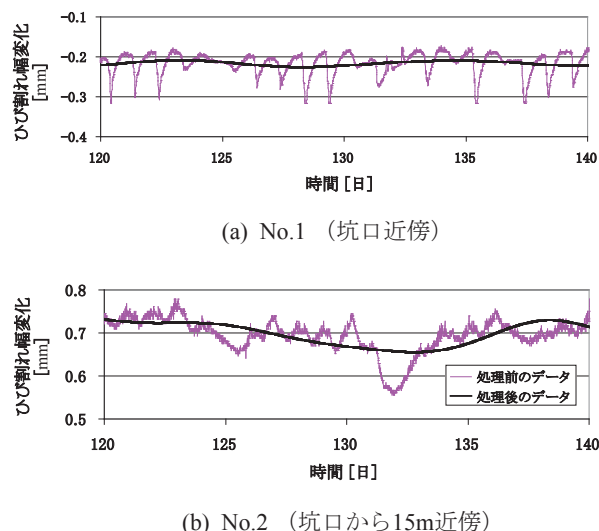


図16 データ処理結果の拡大図（ひび割れ幅）

4. まとめ

本研究では、無線センサネットワークを活用したトンネルの変状監視手法について検討した。得られた結果は

以下の通りである。

- 1) 無線センサネットワークを活用したトンネルの変状監視手法を開発した。供用中の鉄道トンネルで現地試験を行い、実現場で問題なくデータが取得できることが確認できた。
- 2) 中継用無線センサを開発し、これを用いてトンネル内で計測データを長距離伝送する手法を開発した。供用中の鉄道トンネルで現地試験を行い、実現場に適用できることが確認できた。
- 3) ファームウェアの更新により、大幅に省電力化を図れる可能性があることが確認できた。
- 4) 鉄道トンネルで得られたひび割れ幅の計測データを周波数分析することにより、周期24時間に温度の日変化に関連すると想定されるピークがあることが確認できた。
- 5) 計測データにローパスフィルタをかけることにより、温度の日変化等に起因する変動を除去できることが確認できた。

謝辞

現地試験の実施にあたり、北海道旅客鉄道(株)および九州旅客鉄道(株)に多大なるご協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

文献

- 1) 津野究, 蒲地秀矢, 中西祐介, 仲山貴司: 無線センサを活用したトンネル変状監視システムの開発, トンネル工学報告集, Vol.19, pp.245-249, 2009
- 2) 津野究, 舟橋孝仁: 鉄道トンネルの変状監視におけるセンサと無線通信の活用, 電気学会誌, No.131, No.2, pp.92-95, 2011
- 3) 舟橋孝仁, 津野究, 蒲地秀矢, 伊藤富英, 福司淳一, 中西祐介: 無線センサを活用したトンネル変状監視システムの実トンネルへの適用, 第65回土木学会年次学術講演会講演概要集, 第VI部門, pp.87-88, 2010
- 4) 津野究, 平田亮, 福司淳一, 松本光矢, 蒲地秀矢: トンネル変状監視システムの省電力化に関する検討, 第67回土木学会年次学術講演会講演概要集, CS8, pp.33-34, 2012
- 5) 平田亮, 津野究, 角雄一郎, 水落勝美, 蒲地秀矢: 中継用無線センサを用いた長距離計測データ伝送に関する検討, 第67回土木学会年次学術講演会講演概要集, CS8, pp.35-36, 2012
- 6) 津野究, 蒲地秀矢, 舟橋孝仁: トンネル変状監視におけるリアルタイム計測データの処理に関する研究, トンネル工学報告集, Vol.21, pp.189-194, 2011