

特集：浮上式鉄道技術と関連技術の在来方式鉄道への応用

低消費電力の長距離無線技術を用いた 地上設備状態監視システムの構築

田中 実* 池田 遼平** 高橋 紀之**

Development of Condition Monitoring System for Railway Facilities
Using Low Power Wide Area Wireless Communication Network

Minoru TANAKA Ryohei IKEDA Noriyuki TAKAHASHI

A condition monitoring system consisting of wireless sensors and a receiver was developed for condition-based maintenance of railway facilities. Lora, one of a low power wide area (LPWA) was used for wireless communications. To avoid communication interference, we controlled the transmission timing of each wireless sensor. Also, we introduced space diversity, time diversity, frequency diversity, and spreading factor diversity. Four wireless sensors were installed outdoors for 32 days and we succeeded in collecting all monitoring data.

キーワード：無線通信，状態基準保全，状態監視システム，LoRa，ダイバーシティ

1. はじめに

鉄道の安全・安定運行の実現には、電力設備、電車線設備、信号通信設備、軌道、構造物など地上設備の保守管理を適切に行い、高い品質を維持することが求められる。また、労働人口の減少や新型コロナウイルスの感染拡大に伴い、省力化や効率化が求められている。

地上設備の保守管理手法について、従来は設備の劣化状態に関わらず、定期的に点検や交換を行う時間基準保全（Time Based Maintenance：TBM）が行われてきた。しかし、近年ではセンサにより設備の状態を監視し、劣化状態に合わせて点検や補修を行う状態基準保全（Condition Based Maintenance：CBM）が注目されている。CBMでは高頻度に状態監視を行うことにより、故障の早期発見や故障に至る予兆の検知が期待できる。また、TBMと比較して点検や交換回数を減らすことができ、省力化や効率化が期待できる。一方、CBM実現の課題の一つとして、監視対象の地上設備に設置した複数センサのデータ収集方法が挙げられる。例えば有線方式のデータ収集では、配線に手間やコストがかかる。また、無線方式の移動体通信による場合は、センサ数の増加に伴い通信費が高くなる。また、消費電力が大きいため外部電源が利用できない場所での長期間の監視が困難である。さらに、移動体通信は災害時に通信が集中して、利用が制限される懸念がある。

筆者らは、保守用車や営業列車が地上設備の近くを走行することに着目し、監視対象に無線とセンサを組み合わせた無線センサを設置して、車両に搭載した受信機に

より、設備と車両がすれ違う際にセンサデータを収集する手法を提案した^{1) 2) 3)}。車両が低速走行で、かつ、設備と車両が接近する場合は、無線センサに通信用電源が不要のRFIDを適用し、実際に保守用車を模擬した車両を使い、時速約55kmでセンサデータが収集できることを確認した¹⁾。なお、2019年の電波法改正により、RFIDに陸上移動局の区分が新設され、車載可能な無線機の最大空中線電力が250mWから1Wに引き上げられたため、さらなる性能向上が期待できる。一方、車両が高速走行で、かつ、設備と車両の距離が離れている場合は、通信距離が最大100m程度のBluetooth Low Energy（BLE）や920MHz帯特定小電力無線局の利用を提案した。実際に九州新幹線の通過駅に無線センサを設置し、時速約250kmで走行する通過列車に搭載した受信機によりセンサデータが収集可能なことを確認した^{2) 3)}。本システムは通信費不要で、効率的なデータ収集が可能であったが、通信を行うのは設備と車両がすれ違う短い時間に限られ、任意のタイミングでデータ収集ができない課題があった。

そこで、近年IoT用として普及が進む低消費電力の長距離無線技術（Low Power Wide Area：LPWA）を状態監視システムに適用する研究を行なった。日本ではLPWAとしてLoRa⁴⁾、Sigfox、Zeta、ELTRES等が普及している。いずれも通信距離は10km程度と長い。また、低消費電力であるため、無線センサを電池駆動させた場合でも長期間の稼働が期待できる。1回に送信可能なデータ量が少ない欠点はあるが、想定するセンサデータ程度であれば問題無いと考えられる。

本研究では、LPWAの中でも普及が進むLoRaを対象として通信性能を調べた。また、LoRaを用いた信頼性の高いデータ収集方法を提案し、状態監視システムを構

* 浮上式鉄道技術研究部 低温システム研究室

** 浮上式鉄道技術研究部 電磁システム研究室

築した。さらに、屋外で約1ヶ月間の動作確認を行ない、実際のデータ収集性能を確認したので報告する。

2. 低消費電力長距離無線 LoRa の通信特性

2.1 低消費電力長距離無線 LoRa の概要

LoRaはLong Rangeの略で、低消費電力、かつ、長距離の無線通信技術である⁴⁾。電波法令で定められた技術基準に適合した無線機であれば、免許不要で利用できる。公衆網のLoRaWANについては、非営利のLoRaアライアンス⁵⁾によりオープンな標準化と普及が進められている。本報告では、公衆網のLoRaWANではなく、自前のLoRa通信設備を自営網として利用し、通信費無しで効率的に地上設備を状態監視する手法について述べる。

図1にスペクトラムアナライザで測定したLoRa信号の波形例を示す。変調方式はチャープスペクトラム拡散方式で、振幅一定で周波数が連続的に増加するアップチャープと減少するダウンチャープの2種類の信号を使って通信が行われる。まず、図1の①プリアンプルではアップチャープにより同期を行い、次に、②シンクでダウンチャープによりデータの先頭を認識する。その後、③ペイロード部分でデータを伝送する仕組みとなっている。

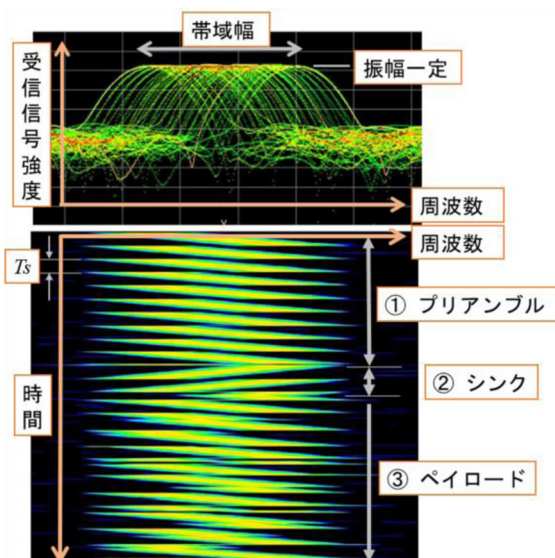


図1 スペクトラムアナライザによるLoRa信号波形例

スイープ1回分の時間であるシンボル時間 T_s [秒]と、帯域幅 BW [Hz]の関係は、式(1)で表すことができる。

$$T_s = 2^{SF} / BW \quad (1)$$

ここで、 SF は拡散率(Spreading Factor)と呼ばれ、小さくすると通信速度が向上し、大きくすると受信感度が向上して通信距離が伸びる。

2.2 通信試験

LoRaを状態監視システムに用いるためには、事前に通信距離や受信確率等の通信性能を調べておく必要がある。そこで、約7kmの無線通信が可能な宮崎実験線にて通信試験を行った。

2.2.1 通信試験方法

通信試験用として、無線モジュール(SLR-429M⁶⁾：株式会社サーキットデザイン製)とホイップアンテナを2組用いて送信機と受信機とした。図2に写真、表1に通信試験条件を示す。無線規格はARIB STD-T67に準拠し、周波数は429.5MHz(27ch)、拡散率は7とした。図3に通信試験構成を示す。受信機は高さ約16.6mの指令室内に設置し、送信機は宮崎実験線ガイドウェイを含む任意の場所に設置した。そして、送信機から5バイトのデータを4秒間隔で20回送信し、受信機にて2バイトのデータを受信信号強度に置き換えて返信するループバック試験を行なった。

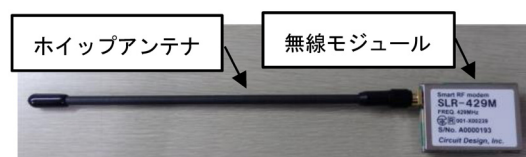


図2 LoRa無線モジュールとホイップアンテナ

表1 通信試験条件

項目	内容
規格	ARIB STD-T67
送信電力	10mW以下
周波数	429.5MHz(27ch)
拡散率	7
データ量	5バイト
送信間隔	4秒

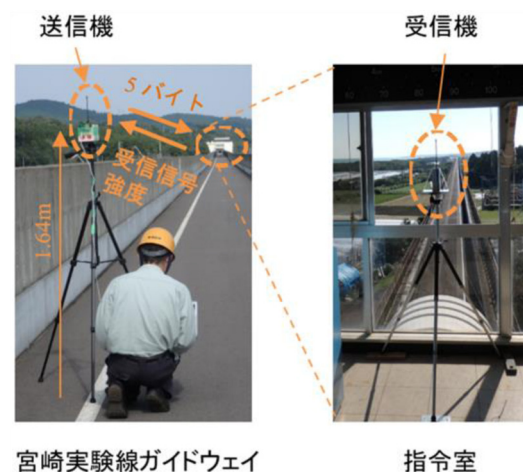


図3 通信試験構成

2.2.2 通信試験結果

図4に受信信号強度，図5に受信確率の距離特性を示す。受信機と送信機を離すほど受信信号強度が低下したが，宮崎実験線終端の7km先でも通信が可能であった。ガイドウェイ内の429MHz帯のフロアノイズレベルは，-110dBm程度であったが，ノイズに埋もれるような弱い信号であっても復調が可能なのことがわかった。さらに，宮崎実験線の外でも通信試験を行い，見通しが良ければ16km先でも通信が可能なのことを確認した。

無線周波数の比較のため，920MHz帯LoRa無線モジュール（TPWM092MLR：株式会社テレパワー製）を用いた通信試験も併せて行った。最大送信電力が20mWのため単純な比較はできないが16km先でも通信が可能であり，429MHz帯と同等の通信性能を持つことがわかった。日本国内で公衆網のLoRaWANを使用する場合，920MHz帯を使用する必要があるが，自営網の場合はこちらの周波数帯も選択可能である。本研究では，周波数（チャンネル）の空きが多いと考えられる429MHz帯を選択した。

受信確率について，通信距離が短い場合であっても受信エラーが発生することがあり，常に100%とはならなかった。LoRaは通信範囲が広く，同じ周波数と拡散率を用いる他の無線システムとの電波干渉が懸念されるので，状態監視システムを構築するには，受信確率の向上が必要になると考えられる。

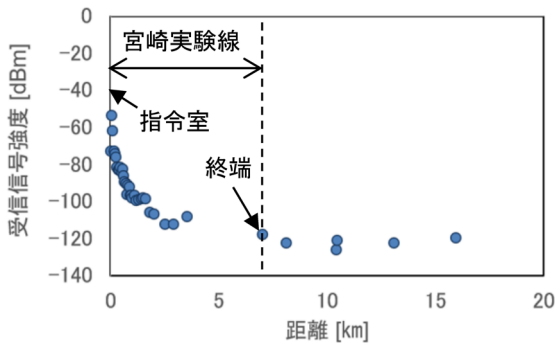


図4 受信信号強度の距離特性

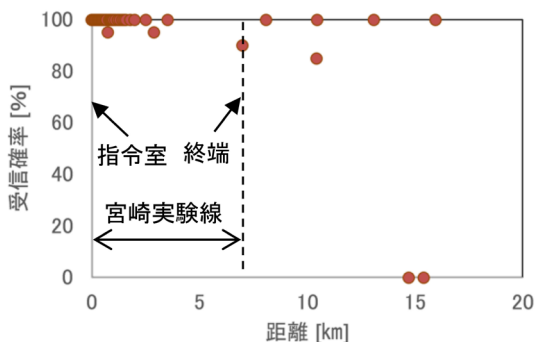


図5 受信確率の距離特性

3. LoRaを用いた状態監視システムの構築

LoRaを用いた信頼性の高いデータ収集方法を検討し，状態監視システムを構築した。詳細を以下に述べる。

3.1 LoRaを用いた状態監視システムの検討

LoRaを用いた状態監視用のセンサネットワークを組む場合，図6に示すように受信機1台と無線センサN台によるスター型トポロジーが構成できる。例えば，指令室内に受信機を設置すれば，広範囲にある複数の地上設備のセンサデータを中継器無しで監視できるようになると期待される。しかし，LoRaを国内で使用する場合，データを送信する前に，周囲の搬送波（キャリア）を受信し，使用する周波数（チャンネル）が空いていることを確認するキャリアセンスが義務づけられている。そこで，複数の無線センサの送信タイミングが重なった場合，キャリアセンスにより必要なデータが送信できなくなるという課題がある。この対策として，図7に示すように，センサデータの取得を同一タイミングで実施し，無線センサ毎に異なる待機時間を設けて，送信タイミングが重ならないようにする送信時間制御を導入した。

さらに，LoRaを用いたデータ収集の信頼性向上のため，(1) 空間ダイバーシティ (2) 時間ダイバーシティ (3)

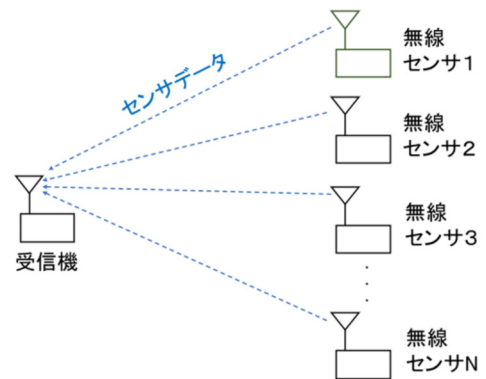


図6 スター型トポロジー

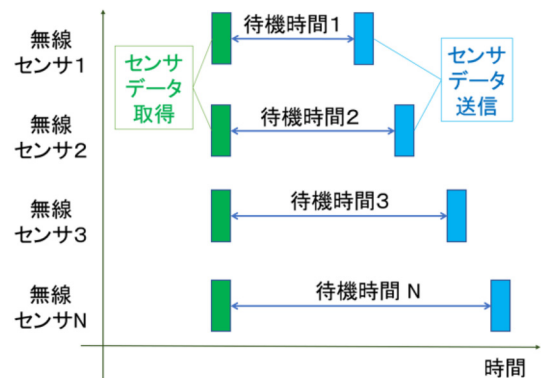


図7 送信時間制御

周波数ダイバーシティ (4) 拡散率ダイバーシティを導入した。詳細を以下に示す。

(1) 空間ダイバーシティ

無線センサから受信機までの伝搬経路が複数ある場合、各伝搬経路の長さが異なるため、受信機における位相がずれて、受信レベルが変動するフェージング現象が発生する。安定した通信の実現には、アンテナを適切に配置する必要があるが、無線センサが複数ある場合、全てのアンテナを適切に配置するのは容易ではない。そこで、受信機側で2本のアンテナを相関が小さくなる位置に離して設置することで、無線センサのアンテナ配置の制約を緩和する方法(空間ダイバーシティ)を用いた。

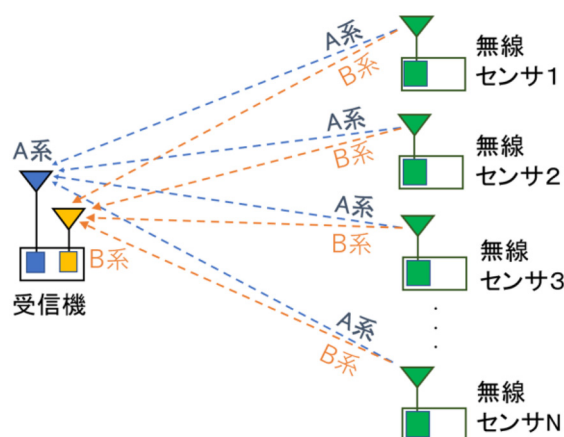


図8 ダイバーシティ実現のためのトポロジー

(2) 時間ダイバーシティ

2.2節で示した通信試験において、データを20回送信した際、タイミングによっては受信ができない場合があった。そこで、同一データを異なるタイミングで2回通信することにより、受信確率を向上させる方法(時間ダイバーシティ)を用いた。

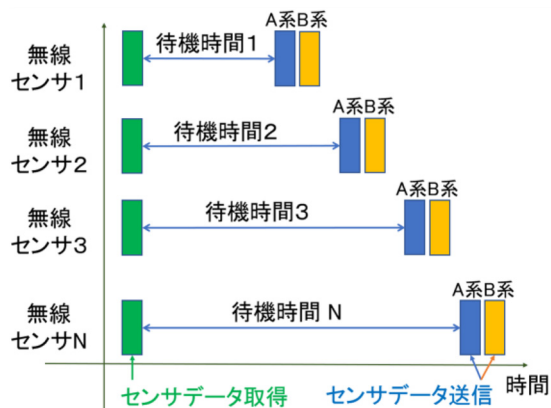


図9 2重系に拡張した送信時間制御

(3) 周波数ダイバーシティ

無線センサを設置する際、事前に現場で通信環境を調査して、空いている周波数(チャンネル)を選択する必要があるが、設置後に他の無線システムが同一周波数を使用した場合、干渉回避が困難となる。そこで、同一データを2種類の周波数で通信する方法(周波数ダイバーシティ)を用いた。

(4) 拡散率ダイバーシティ

無線の通信時間や受信感度は拡散率に依存する。そこで、2種類の拡散率で通信することで受信確率を向上させる方法(拡散率ダイバーシティ)を用いた。

図8に上記4種類のダイバーシティを同時に実現するためのトポロジーを示す。無線センサは低コスト化のため、アンテナと無線モジュール1組の最小構成とした。一方、受信機はアンテナと無線モジュールを2組使用して2重系で受信ができるようにした。本報告では、2重系の各系をA系、B系と呼ぶ。図9に2重系に拡張した送信時間制御を示す。無線センサは同一タイミングでデータを取得後、1回目はA系、2回目はB系にデータを送信する。ここで、受信機の両アンテナの位置を離して設置し、かつ、タイミングを変えて2回通信することで、空間と時間ダイバーシティを同時に実現した。また、A系とB系で異なる周波数と拡散率で通信することにより、周波数と拡散率ダイバーシティも同時に実現した。

3.2 LoRaを用いた状態監視システムの構築

3.1節の検討を基に、LoRaを用いた無線センサ4台と受信装置1台の状態監視システムを構築した。図10と図11に無線センサと受信装置の写真を示す。

無線センサはアンテナと無線モジュール1組の他、制御用マイコン、状態監視用センサ、時間管理用リアルタイムクロック、電源等で構成した。状態監視用センサには熱電対付き熱流センサ⁷⁾(D0005TC:デンソー製)を用いた。熱流とは、単位時間、単位面積あたりを通過するエネルギーで、熱の移動量や方向を示す⁷⁾。例えば、熱流センサを監視対象設備の表面に設置すると放熱量を測定できるため、稼働状態が監視できる。長期間外部電源無しで利用することを想定し、電源として単3電池を6本(3直列×2並列)使用した。センサデータはマイコンでデジタル値に変換し、データ取得時刻や電池電圧等と共に無線モジュールを用いて送信した。同一データを2回送信したが、各回の周波数(チャンネル)と拡散率は、それぞれスイッチで設定ができるようにした。

受信装置には、アンテナと無線モジュール2組、制御用マイコン、時間管理用リアルタイムクロック等で構成される受信機と制御用PCを用いた。受信機の2本のア

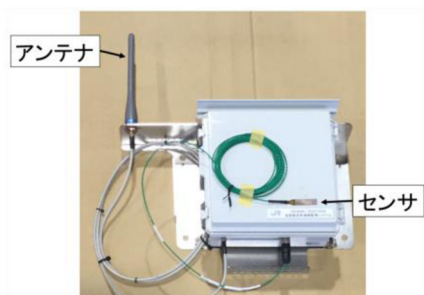


図 10 無線センサ

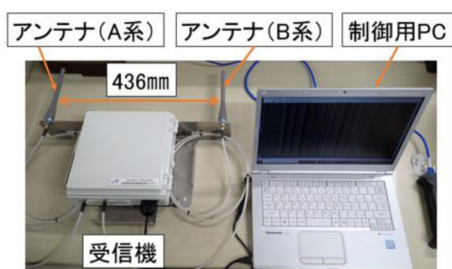


図 11 受信装置

アンテナは 436 mm 離して設置した。2 個の無線モジュールの周波数と拡散率は、それぞれスイッチで設定ができるようにした。受信機の電源は制御用 PC から供給し、受信データは受信時刻や受信信号強度と共に制御用 PC に画面表示し、記録するようにした。

4. 状態監視システム連続通信試験

送信時間制御と 4 種類のダイバーシティを用いた状態監視システムのデータ収集性能を確認するため、屋外で 32 日間の通信試験を実施した。詳細を以下に示す。

4.1 連続通信試験方法

本試験の目的は、屋外にて状態監視システムのデータ収集性能を確認することである。通信距離はアンテナの設置高さに依存するが、試験の都合により、図 12 に示すように受信機のアンテナ高さをガイドウェイ床面から 1.88m と低くして、最大通信距離を 1000m 程度と短くした。無線センサ 4 台のうち、無線センサ 1 は動作確認のため受信機の真下に設置し、無線センサ 2 は 475.6m 先のガイドウェイ壁面に設置した。また、無線センサ 3 と無線センサ 4 は 1000m 先の壁面に向い合うように設置した。表 2 に示すように、A 系と B 系で異なる周波数と拡散率を設定することにより、周波数と拡散率ダイバーシティを同時に実現した。

状態監視スケジュールについて、6 時に 4 台の無線センサを起動させて、5 分間隔で温度と熱流束のデータを

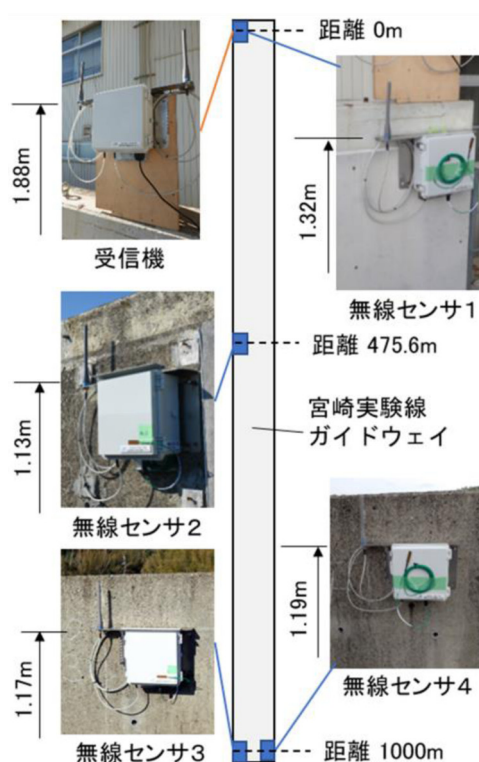


図 12 通信試験構成

表 2 周波数と拡散率

項目	周波数 (チャンネル)	拡散率
A 系	429.5625MHz (32ch)	7
B 系	429.3625MHz (16ch)	8

取得した。無線センサ毎に定めた待機時間 (30 秒 × N : N は無線センサ毎に割り当て) 経過後、1 回目は A 系で通信を行い、2 回目は B 系で通信した。6 時から 23 時 55 分までセンサデータ取得と 2 重系の通信を 216 回行った。また、各日 0 時に受信装置から時刻合わせ信号を送信して、4 台の無線センサの時刻補正後にスリープさせた。試験期間は 32 日間で、無線センサ 1 台あたりのセンサデータ取得と 2 重系の通信の合計は 6912 回であった。

4.2 連続通信試験結果

表 3 に状態監視システムの無線通信によるデータ取得エラー数とデータ取得率を示す。ダイバーシティを用いずに A 系のみ、または、B 系のみで通信したと仮定した場合のデータ取得エラー数とデータ取得率も併せて示す。ダイバーシティを行わなかった場合、全ての無線センサでデータ取得エラーが発生していたと考えられるが、送信時間制御と 4 種類のダイバーシティの導入によって、全てのデータ取得に成功した。

図13に4台の無線センサのA系とB系の受信信号強度を示す。無線センサの設置場所が受信機から離れるほど受信信号強度は低下した。また、同じ無線センサであっても、受信信号強度に時間変動がみられた。無線センサ1と無線センサ2は、受信信号強度が高くてデータ取得エラーが発生したが、これはキャリアセンスにおいて送信エラーが発生したためと考えられる。しかし、同一データを異なるチャンネルと拡散率で2回送信した場合は、少なくとも1回は送信が成功していたと考えられる。

無線センサ3と無線センサ4でも、上記と同様の送信エラーが発生していたと考えられるが、加えて、受信信号強度の時間変動が大きく、受信感度よりも低くなった際に受信エラーが発生していたと考えられる。しかし、ダイバーシティの導入によって、A系とB系の通信の相関が小さいため、同一データを2回受信した際に、少なくとも1回は受信が成功していたと考えられる。

なお、無線センサは現地から取外した後も稼働を継続中であり、8ヶ月後の電池電圧は初期の約80%であった。

表3 状態監視システムのデータ取得エラー数とデータ取得率

項目	システム	A系のみ	B系のみ
無線センサ1	0回	6回	1回
	100%	99.91%	99.99%
無線センサ2	0回	9回	1回
	100%	99.87%	99.99%
無線センサ3	0回	223回	35回
	100%	96.77%	99.49%
無線センサ4	0回	17回	2回
	100%	99.75%	99.97%

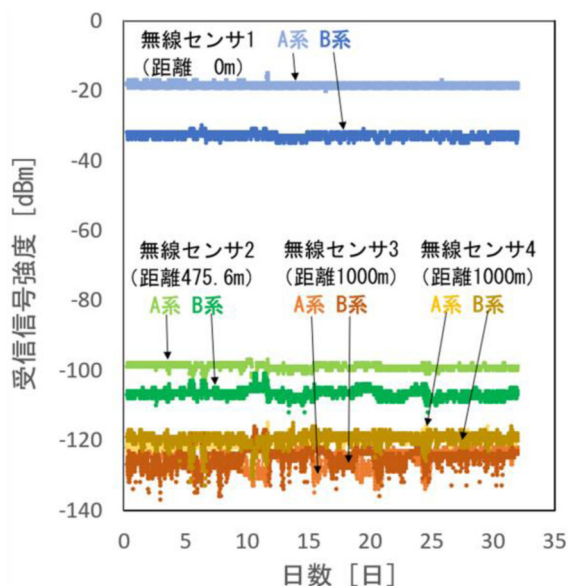


図13 4台の無線センサの受信信号強度

5. まとめ

低消費電力の長距離無線 LoRa を用いて、無線センサ4台と受信装置1台の状態監視システムを構築した。データ取得率を向上させるため、送信時間制御に加えて、空間ダイバーシティ、時間ダイバーシティ、周波数ダイバーシティ、拡散率ダイバーシティを導入した。屋外で32日間の通信試験により、1台の無線センサあたり6912回のデータ取得と2重系の無線通信を行ったが、受信装置にて全てのデータを取得することに成功した。

本報告で紹介したシステムが、状態基準保全の導入に役立てば幸いである。

謝辞

LoRaの通信試験や状態監視システムの構築では、明光電子株式会社と株式会社サーキットデザインの関係者の皆様に多大な御協力をいただいた。この場を借りて厚くお礼申し上げる。

文献

- 1) 田中 実, 高橋紀之, 池田遼平, 依田裕史, 鈴木正夫: センサタグと保守用車間の路車間通信による地上コイル状態監視, 鉄道総研報告, Vol.31, No.1, pp.23-28, 2017
- 2) Tanaka, M, Ikeda, R, Yoda, H, and Aiba, M, "Development of condition monitoring system for railway facilities using opportunistic communication," IEEE RFID-TA, 2018 IEEE International Conference on RFID Technology & Application (RFID-TA), Macau, 2018.
- 3) 田中 実, 高橋紀之, 池田遼平, 依田裕史, 岩井優仁, 稲本賢司: 浮上式鉄道用地上コイルのセンサデータ収集システムの開発, 鉄道総研報告, Vol.32, No.3, pp.17-22, 2018
- 4) 低消費電力長距離無線 LoRa
<https://www.semtech.com/lora>
(参照日: 2020年7月27日)
- 5) LoRa アライアンス
<https://lora-alliance.org/about-lora-alliance>
(参照日: 2020年7月27日)
- 6) SLR-429M 特定小電力超長距離LoRa無線モデム
<https://www.circuitdesign.jp/item/products/slr-429m/>
(参照日: 2020年7月27日)
- 7) 熱流センサ「Energy Eye」
<https://www.denso.com/jp/ja/products-and-services/industrial-products/energyeye/>
(参照日: 2020年7月27日)