

バラスト軌道の道床加速度計測の無線化

栗田 いずみ* 流王 智子* 岩澤 永照** 河野 昭子***

Examination of Wireless Acceleration Measurement for Ballasted Track

Izumi KURITA Satoko RYUO Nagateru IWASAWA Akiko KONO

Railway operators examine dynamic characteristics of ballast vibration using wired sensors. To improve the efficiency of maintenance works in track. In terms of prevent disconnection of sensor cables during tamping works, wireless measurement of the vibration is required. In this research we discussed specifications of wireless sensors such as an operation pattern and a radio system. We evaluated the wireless characteristics of some buried wireless devices in a ballasted track and confirmed that RSSI which is a wireless indicator exceeds the minimum received sensitivity. Furthermore, we confirmed the behavior of the buried sensors during a road railer run over them.

キーワード：無線化, 加速度センサ, バラスト軌道, モニタリング, Wi-SUN, レイトレース

1. はじめに

鉄道線路では、レール、まくらぎ、砕石層、路盤で構成されるバラスト軌道が広く一般的に採用されている。バラスト軌道は、敷設コストが安価で、まくらぎからの圧力を効率良く分散させ、軌道に適度な弾性を持たせる一方、列車荷重の繰り返し作用などの影響で、特にレール継目部で局所的な道床沈下により浮きまくらぎを発生させる場合がある。バラスト軌道において保守作業の発生頻度が高い箇所や新規の軌道材料を導入する箇所では、保守作業効率向上を目的として、道床沈下特性の影響要因の把握が必要となる場合がある。そのための検討手法として、バラスト軌道の離散体モデルを用いたDEMシミュレーション¹⁾の他、道床振動の加速度計測による動特性評価がある。

バラスト軌道の動特性評価においては、レール継目部の道床沈下急進箇所での衝撃荷重下の道床振動と道床沈下の関連性を検証するために、バラスト砕石サイズの加速度計を用いて、列車通過時の道床振動加速度の計測が行われている²⁾³⁾。実軌道における道床振動加速度計測では、まずバラスト砕石を一時的に撤去し、まくらぎ下にセンサを埋設した後、バラスト砕石を埋め戻しながらセンサのケーブルをバラスト層内に這わせ、線路脇のデータロガーに接続する。そのためケーブル類が保守通路を支障するだけでなく、道床埋め戻し後のタンピング作業中にケーブルが断線してしまうこともありうる。更に、ケーブルが加速度センサの動きを拘束するため、実

際のバラスト砕石とは異なる挙動が発生する可能性もあり、加速度計測システムの無線化が望まれている。

加速度計測システムの無線化を行うためには、センサをバッテリー駆動に対応させるほか、バラスト内のセンサから建築限界外のデータ集約装置までの無線伝送路を確保する必要がある。そのため、バラスト軌道においては、バラストやレールを始めとする、路盤上の地物による電波の減衰を考慮する必要がある。そこで本研究では、特に影響が大きいと想定される、バラスト、レールおよびバラストの側方への流動を防止するためのバラスト止め等の存在する環境を対象として、無線による道床振動加速度データの伝送可能性を検証した。

本報告では、道床振動を計測するための無線センサの仕様に関する検討結果について述べたのち、実軌道への導入に向けて、所内試験線においてバラスト止めを設置したバラスト軌道での伝送試験の結果を報告する。

2. 無線センサ・データ集約装置の仕様検討

前述のように、道床内に埋設したセンサによる道床振動加速度計測において、有線ケーブルを用いたセンサデータの伝送が一般的であったが、近年、加速度センサの無線化、小型化が進み、欧米では道床表面の振動計測⁴⁾や室内における模擬線路による試験⁵⁾⁶⁾で無線加速度センサ（以下、無線センサ）を用いた事例がある。しかし、実軌道のまくらぎ直下にセンサを埋設して、列車通過時の道床振動加速度を計測した事例はほとんどない。

また、無線センサはバッテリー駆動であり、再利用する場合には、まくらぎ下に埋設した無線センサを掘り起こして回収・バッテリー交換を行う必要がある。よって、無線センサのバッテリーの効率的な利用のためスリープ時間

* 情報通信技術研究部 通信ネットワーク研究室

** 元 情報通信技術研究部 通信ネットワーク研究室

*** 鉄道力学研究部 軌道力学研究室

や計測間隔を制御することが必要となるが、無線センサに関する既存研究ではこれらの制御に関する検討が行われていない⁵⁾⁶⁾。そこで、本研究では、道床振動加速度データの伝送のための無線仕様を検討した上で、バッテリーの効率的な制御を行う無線センサの仕様を提案し、その一部を実装した。

2.1 無線方式の選定

今回の仕様検討にあたって前提とした加速度計測システムは、下記の要求を満たすものとした。

- まくらぎ下のセンサ埋設地点から幅 1.0~2.0m の保守用通路の線路外側に設置したデータ集約装置へ伝送可能
- センサのサンプリング間隔を 1500Hz、データサイズを 1 データ 2byte × 3 軸とした場合、約 72kbps の伝送容量を確保

無線センサに使用される各種の無線方式のうち、免許不要で利用できる方式の例を表 1 に示す。表 1 に示す無線方式のうち、所望の伝送容量を満たすことができるものとしては、920MHz 帯の Wi-SUN もしくは 2.4GHz 帯の Wi-Fi が候補として挙げられる。さらに、実軌道で無線センサを使用する際には、アンテナが地表近くに位

表 1 無線通信方式の比較⁷⁾

周波数帯	429MHz 帯	920MHz 帯 (日本国内 Wi-SUN)	2.4GHz 帯 (Wi-Fi)
最大到達距離	1.5km 程度	1km 程度	100m 程度
最大通信速度	4.8kbps	400kbps	22Mbps
電波の回り込みやすさ	○	○	△
低消費電力性	○	○	△

表 2 加速度計測設定および無線諸元⁹⁾

加速度計測設定	
加速度レンジ (分解能)	±2,000mG (1mG)
サンプリング間隔	12.5, 25, 50, 100, 200, 400Hz
連続計測可能データ数	90
スリープ時間	30s (30-86,400s)
計測間隔 (定期モード)	30s (30-60s)
閾値 (振動検知モード)	300mG
無線センサ・データ集約装置共通無線諸元	
準拠規格	IEEE 802.15.4g (Wi-SUN)
周波数	920MHz 帯
帯域	400kHz
最低受信感度	-105 dBm

置する場合があります、工具箱や線路に付随する諸設備が伝搬に与える影響を考慮する必要があるなどの問題がある。これに対して、920MHz 帯は 2.4GHz 帯域と比較すると通信距離が長く、障害物に対して電波が回り込みやすいといった特徴を持つ。鉄道総研における先行研究では、920MHz 帯を利用した国際規格に準拠した特定小電力の無線通信規格である Wi-SUN を使用して、鉄道沿線斜面の状態監視用途やバラスト軌道を敷設した試験場での加速度データの伝送を行った実績がある⁷⁾⁸⁾。

これらを踏まえて、本研究では 920MHz 帯の周波数を選定し、鉄道総研で過去に開発した 920MHz 帯を使用する 3 軸無線加速度センサ⁸⁾を改良して使用することとした。

2.2 無線センサ・データ集約装置の仕様

今回用いた無線センサとそれに対応するデータ集約装置 (ISB 製無線ルータ) を図 1 に、加速度計測に関する設定および無線諸元を表 2 に示す。

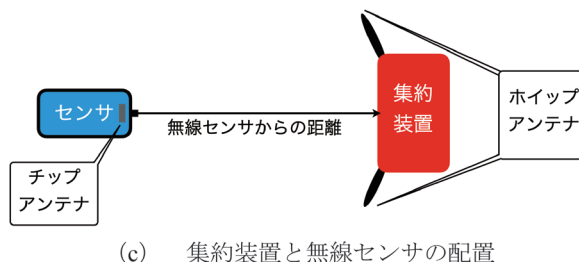
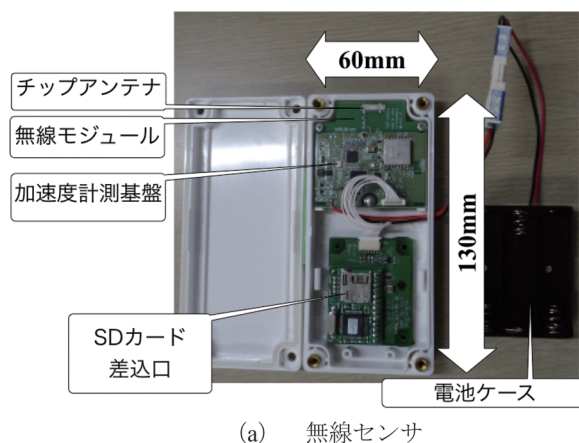


図 1 無線センサおよびデータ集約装置⁹⁾

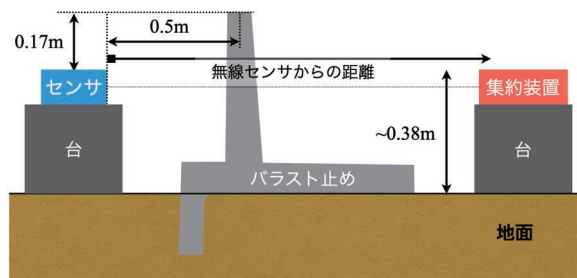
図1 (a) に示すように、無線センサは、振動を計測する3軸加速度計、計測データを伝送する無線モジュール、計測データを記録するSDカードから構成され、バッテリー（単3電池3本）で駆動される。なお、SDカードは、試験環境の変化や干渉等によってデータ集約装置に加速度データを伝送できない場合に備えて、加速度データを内部に保存するためのものである。

無線センサのサイズについては、将来実用化の段階ではバラストの挙動に影響を与える恐れがあるため小型化される必要があるが、今回の試験では伝送の可能性を把握することが目的であるため、バラスト径に対して大型（約60mm×130mm）ではあるが、一般的なサイズの製品を用いた。また、データ集約装置（図1 (b)）は、実軌道においては線路脇の保守用通路等に設置することを想定している。

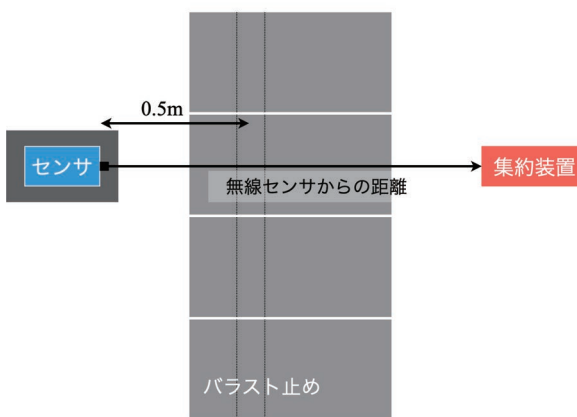
先述したように、バラスト軌道における道床振動の加速度計測では、バッテリーの消費量を節約するため、スリープ時間や計測間隔の制御が必要となる。そこで、無線センサの動作モードとして以下に示す3つのモードを実装した。

- (1) スリープモード（動作開始前）：まず、無線センサの動作については、所望の計測時刻までのバッテリーの消耗対策として、あらかじめ初期起動までの時間をスリープ時間として設け、電源投入後であっても計測・データ送信を行わないスリープ状態を維持する。
- (2) 定期モード（動作開始後）：スリープ時間を経過すると無線センサが起動し、事前に定めた計測間隔に従って加速度の計測・データ送信を行う。
- (3) 振動検知モード（動作開始後）：スリープ時間経過後、無線センサが起動し待機状態となる。事前に定めた閾値を上回る衝撃が無線センサに加わった場合に計測・データ送信を行い、再び待機状態に戻る。

動作開始後、無線センサは予め設定した定期モードか振動検知モードのいずれかに従って動作する。データ集約装置は無線センサからの信号を受信し、受信データを保存すると同時に、無線センサからの受信信号強度（RSSI）を記録する。ここで、RSSIはデータ集約装置で計測された受信機入力電力[dBm]である。表2に示したとおり、データ集約装置の最低受信感度-105dBmを上回る強度の信号が入力された場合に、データ集約装置はデータを正常に受信する。また、無線センサおよびデータ集約装置（以下、無線機）のアンテナは、アンテナ素子と直交する平面上では無指向であり、本報告ではいずれの場合においても、偏波面が一致する向き（図1 (c)）に固定して試験を行った。



(a) 断面図



(b) 俯瞰図

図2 無線機の設置位置

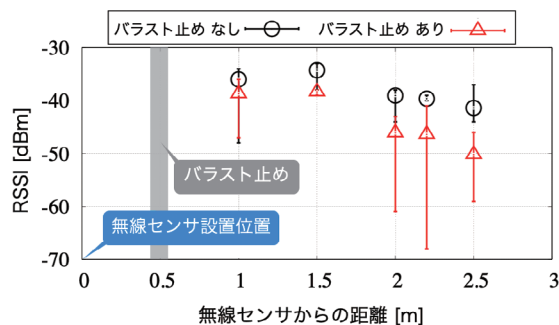


図3 バラスト止め単体試験でのRSSI

3. バラスト止め単体の影響確認

2章で提案した無線機により、道床内部での加速度計測データを線路脇で無線伝送可能であることを確認するため、当該無線機を用いて所内試験線での検証を行った。

実軌道において振動計測を行う場合、データロガー等の機器類は建築限界外の保守用通路等に設置され、保守用通路の諸設備の配置状況によっては、軌道から遠方に設置される場合が考えられる。他方、計測データを無線により伝送する場合、道床内に埋設した無線センサと線路脇に設置したデータ集約装置との距離が離れるほどRSSIが減衰するだけでなく、電波の伝搬路に影響を与える鉄柵等の障害物が存在する可能性も高くなる。また、バラスト軌道での道床振動計測を想定した場合、軌道の

保守通路側に鉄筋コンクリート製のバラスト止めが設置されることがあるため、電波が遮蔽されることが懸念される。

そこで、本伝送試験では安全側の検証を行うため、バラスト止め敷設区間を想定した。本章では、まずバラスト止めによる電波伝搬への影響を切り分けるため、バラスト止め単体を用いた無線伝送試験を行う。さらに伝搬パスの推定のため、試験環境を模擬した電波伝搬シミュレーションを行った結果を報告する。

3.1 試験構成

試験にはバラスト止め4台、無線センサ・データ集約装置各1台を用い、バラスト止めはレールに平行となるよう4台並べて敷設した(図2(a),(b))。なお、施工精度の限界から、バラスト止め同士は3mm～10mm程度の隙間が存在していた。また、使用したバラスト止めはコンクリートの内部に約100mm×100mmの格子状に直径6mmの鉄筋が配筋されており、バラスト止め壁の中央下部には直径40mm程度の排水孔が存在する。無線センサの設置箇所は、バラスト止めに対して近傍側レールのまくらぎ下を想定し、バラスト止めからバラスト側に水平方向0.5mの距離に無線センサ端部が位置するように設置した。データ集約装置は保守用通路への設置を想定し、バラスト止めを挟むように無線センサから1～2.5mの距離に設置した。このとき、データ集約装置と無線センサの高さは、まくらぎ下を想定しバラスト止めの上端から0.17m下方の位置とした。なお、無線伝送データ数を極力多く取得するため、無線センサは定期モードとし、計測間隔は設定可能な最小間隔の30秒に設定した。

試験では、まず、無線センサとデータ集約装置間にバラスト止めが存在する図2の状態において、無線センサの位置は固定とし、データ集約装置を移動させながら、データ集約装置側でRSSI計測を行った。さらに、バラスト止めの存在が通信環境に与える影響を調査するため、無線センサとデータ集約装置間にバラスト止めが存在しない状態で計測した結果との比較も行なった。

3.2 試験結果

3.1節に示した構成において計測したRSSIの測定結果を図3に示す。図3の記号は平均値、エラーバーは最大値と最小値のレンジを表しており、結果よりRSSIは距離に対して一様に減少せず、地点によりRSSIが増減している。また、バラスト止めが存在しない場合に比べて、バラスト止めを挟んで通信する場合には、RSSIの平均値が約3～10dB減少し、計測したRSSIのばらつきが大きく増大することを確認した。これは、試行数を増やすため、データ集約装置を何度か設置し直しながら

表3 シミュレーションに用いた無線機の設定

	Tx	Rx
周波数帯	920MHz	
帯域幅	400kHz	
アンテナ	水平面内無指向性 垂直面内半値幅 90 [deg]	
最大ゲイン [dBi]	1.64	0
VSWR	3	2
送信出力 [dBm]	13	-

表4 シミュレーションの各種パラメータ

パラメータ	設定内容
Ray Spacing	0.2°
最大反射回数	15
最大透過回数	1
最大回折回数	1
素材	バラスト止めコンクリ部分： コンクリート (比誘電率 7, 導電率 0.015 S/m)
	バラスト止め鉄筋部分： 金属

ら繰り返し同じ試番を測定した影響と考えられる。伝搬路にバラスト止めが存在する場合、バラスト止めで反射・回折・透過することで多数の伝搬パスが生じる。そのマルチパスの干渉があるため、送受信点間の微小な距離のずれにより、受信レベルが大きく変動することが想定される。そのため、データ集約装置を設置した際の位置の誤差により、RSSIの変動が生じたものと推測される。

3.3 電波伝搬シミュレーション

試験結果よりマルチパスによる干渉が推測されるため、バラスト止めによるパスの変化を確認することを目的として、実験環境を模擬したレイトレースシミュレーションを行った。計算には Wireless InSite v3.3.5 を用いた。シミュレーションでは、試験で使用したバラスト止めの配筋図に基づいた3Dモデルを作成した。なお、前述したように所内試験で敷設したバラスト止め同士に隙間が存在していたことから、シミュレーション上のバラスト止め同士の離隔を5mmとした。また、無線機の設定は、仕様に基づき表3の通りとした。さらに、送信点Tx(無線センサ側)の位置は図2(a)の通りとした。受信点Rx(データ集約装置側)は、図2(a)の無線センサとデータ集約装置を結ぶ軸に沿って、無線センサの位置を始点としてデータ集約装置に向かって0.016m間隔に配置した。

シミュレーションにおける伝搬に関する主なパラメータを表4に示す。パラメータ“Ray Spacing”はレイトレー

ス計算におけるレイの発射間隔を意味する。これらのパラメータについては、“Ray Spacing”が十分小さく、“最大反射回数”、“最大透過回数”等は十分大きい場合に精度の高い結果が得られる。今回の計算では、事前に試計算を行い、十分な精度を満たしつつ有限時間内に計算が終了するパラメータを設定した。

レイトレースシミュレーションで得られた受信信号強度と図3で示した実測値の比較結果を図4に示す。図中の0.5m付近の斜線部分はバラスト止め壁が位置する領域である。無線センサからの距離が0.5m未満では自由空間および二波モデルとはほぼ一致しており、バラスト止めで遮蔽された0.5mを超えると大きく減衰している。また、バラスト止め壁で遠くでは実測値と概ね一致していること、Rxの位置が数十mm変わるとRSSIが10～20dB変動することを確認した。

また、伝搬経路の一例として、TxとRxの距離が1.0mの場合の電波の経路を描画した結果を図5に示す。送信点からバラスト止めの反対側に到達する経路として、①バラスト止めのコンクリート部分を透過し内部の鉄筋部分とコンクリート面などで反射する経路、②隣り合うバラスト止め同士の間隙部分で数回反射する経路、さらに、③バラスト止め壁に存在する排水用の穴を経由する経路の3パターンが存在することを確認した。

これらのシミュレーション結果から、伝搬路にバラスト止めが存在することにより、コンクリート面や鉄筋部分での反射や回折等によって受信点に到来するパスが多数存在するためマルチパスによる干渉が発生し、数十mmの位置の変化で受信レベルが大きく変動することを確認した。

4. 所内試験線での計測結果

実際に無線センサを使用する環境への適用性を確認するためには、前章で述べたバラスト止め単体の電波伝搬への影響に加えて、バラストやまくらぎ、レール等の影響も併せて検証する必要がある。そこで鉄道総研の所内試験線において実際のバラスト止め区間を想定した試験環境を構築し、無線センサの性能確認試験を行った⁹⁾。

4.1 無線伝送試験

無線センサと線路脇に設置したデータ集約装置の間の無線通信品質に対する、道床とバラスト止め等の影響を評価するため、図6に示す試験環境を構築した。無線センサの高さは、まくらぎから100mm程度下方とし、データ集約装置の高さは無線センサに合わせた。またレール方向に対しては、レールに対して無線センサとデータ集約装置の通信経路が直交となるよう配置した。試験条件としては、無線センサとデータ集約装置の間の距離を3

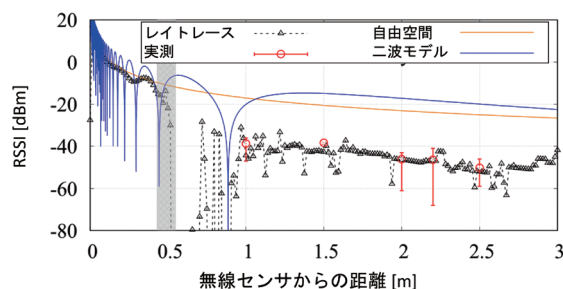
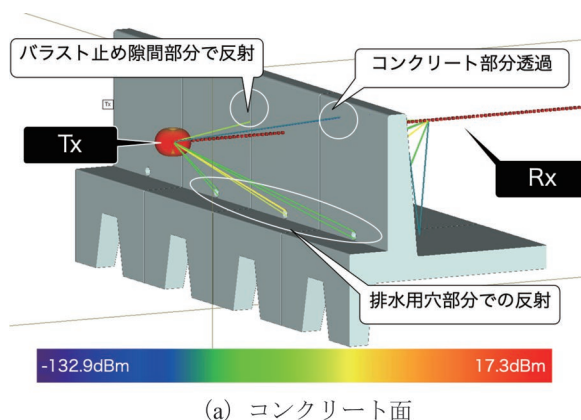
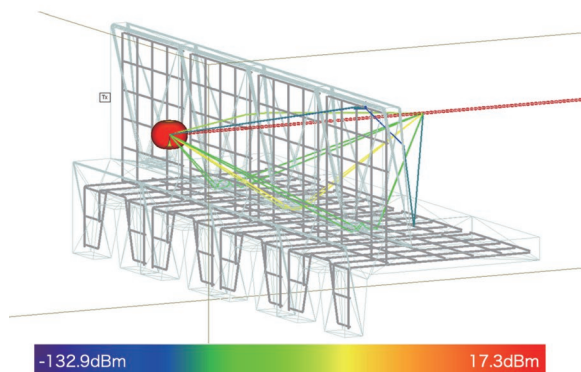


図4 シミュレーション結果と実測値の比較



(a) コンクリート面



(b) 鉄筋部分での反射 (約 1.0m 地点)

図5 伝搬経路の例 (1.0m 地点)

パターン (1m, 1.5m, 2.0m)、無線センサ埋設前 (バラスト止めなし、バラスト充填前)と埋設後 (バラスト止めあり、バラスト充填後)の2パターンとし (図7)、計6通りとした。

なお、従来の有線センサの場合は、埋設時に列車通過荷重に耐えるために鋼製筐体で加速度センサを保護して強度を確保していた。しかし、無線センサを鋼製筐体に格納する場合には、電波が遮蔽されてしまい、無線によるセンサデータの伝送に支障をきたす。そこで、電波を透過させる樹脂製の筐体 (図8)を製作し、筐体の有無によりRSSIの変動がないことを確認した上で、無線センサを当該筐体に収容して試験を実施した。

無線センサ埋設前後のRSSIを計測した結果を図9に示す。まず、今回設定した無線センサ・データ集約装置

間の距離では、いずれの条件においても RSSI が表 2 に示したデータ集約装置の最低受信感度 -105dBm を上回ることを確認した。また、埋設前と比較すると、埋設後の RSSI の平均値が全体的に小さくなっており、いずれの地点においても埋設の影響により平均で約 10dB 以内の減衰が発生することを確認した。また、埋設後には RSSI のばらつきが最大 20dB 程度と増大している。これは、3 章の単体試験で確認したバラスト止めで生じるマルチパスの影響および、無線センサとデータ集約装置の間のバラスト層での反射・散乱の影響により、微小な位置の違いによる受信レベルの変動が発生したものと考えられる。よって、バラスト止め区間では受信レベルの大きな変動を想定して、無線機の仕様検討や配置を行う必要があると推察される。

また、データ集約装置で受信した加速度データと無線センサ内部の SD カードに記録されたデータを照合した結果、全ての加速度データがデータ集約装置に到達していることを確認した。なお、次節の列車通過時の振動計測においても同様の照合を行い、軌陸車走行時にも抜け落ちなくデータ伝送が行われていることを確認した。

4.2 列車通過時の振動検知機能の確認

前節の試験環境において、バラスト止めの敷設及びバラスト投入・タンピング完了後に、無線センサ埋設地点を含む区間で軌陸車を走行させ、走行時の伝送可能性および無線センサの振動検知機能の検証を行った。なお、軌陸車の走行速度は、最大 40km/h 程度であるため、振動検知の閾値は 0.3G で固定とした。

無線センサの埋設位置を図 10 に示す。センサ①～⑤が今回開発した無線センサ、「有線」が従来の有線加速度センサを表す。なお、ケーブルが接続されていることで、加速度センサの動きが拘束されてしまう可能性を検証するため、センサ③は無線センサではあるがダミーのケーブルを付加している。

図 10 の通り埋設した無線センサの設定値と軌陸車走行時の振動検知回数を表 5 に示す。走行試験の結果、軌陸車走行に伴い振動検知機能が作動し、加速度データの SD カードへの記録とデータ集約装置へのデータ送信が行われることを確認した。

また、前述の通りいずれの無線センサにおいても振動検知の閾値は共通であるが、表 5 より、無線センサの位置により振動を検知できた回数に 0 回～8 回の差が生じている。その原因として、検知した振動は、軌陸車が図中のレール継目上を通過することによるものであるためであると考えられる。そのため、継目部に最も近いセンサ⑤での検知回数が最も多く、継目から遠い無線センサの位置では、振動加速度が 0.3G に満たなかったものと考えられる。また、ダミーケーブルを取り付けたセン

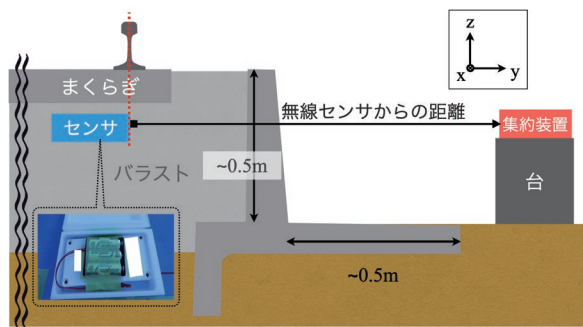


図 6 無線センサ・データ集約装置設置位置

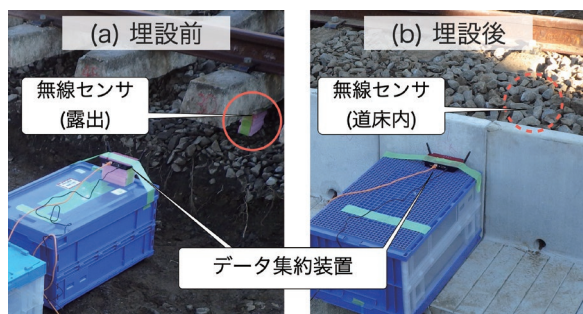


図 7 埋設前後の様子⁹⁾

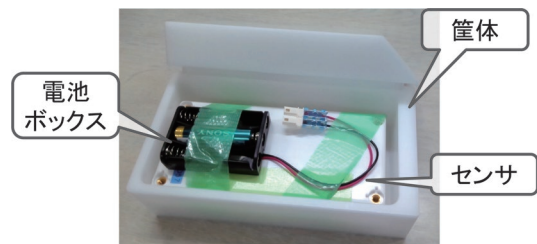


図 8 樹脂製筐体

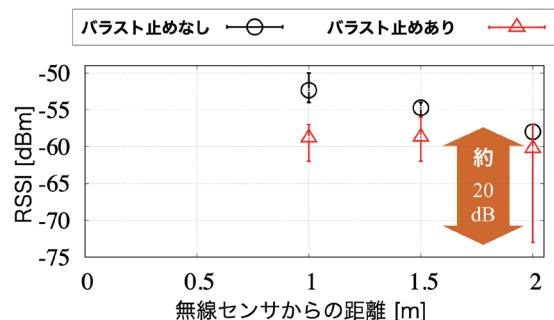


図 9 埋設前後の RSSI の変化⁹⁾

(点は平均値、塗り潰しは最大値-最小値のレンジ)

サ③では振動は検知されず、有線ケーブルの存在がセンサに与える振動に影響した可能性があると考えられる。

以上より、振動検知機能は確認できたが、事前に設定する閾値や設置箇所については、車両種別や走行速度、軌道状態を考慮して決定する必要があるといえる。

5. 今後の課題

前章で所内試験線における道床振動加速度計測時の無線伝送の可否等を確認した。その際、センサ②で取得した道床振動加速度の計測結果を、従来の有線センサ（有線加速度計）の計測結果と合わせて図 11 に示す。なお従来センサについては、1500 データ/秒で AD 変換した結果である。

図 11 より、従来センサおよび無線センサのいずれにおいても、レール継目部通過時のものと推測される振動成分の波形が得られている。ただしセンサ②はサンプリング周波数が 200Hz であるため波形が粗く、従来センサで計測された波形の最大値・最小値が取得できていない。ただし、今回無線方式の候補として取り上げた Wi-SUN の伝送速度は 400kbps まで対応できるため、従来の有線センサと同等の時間分解能で計測したデータを伝

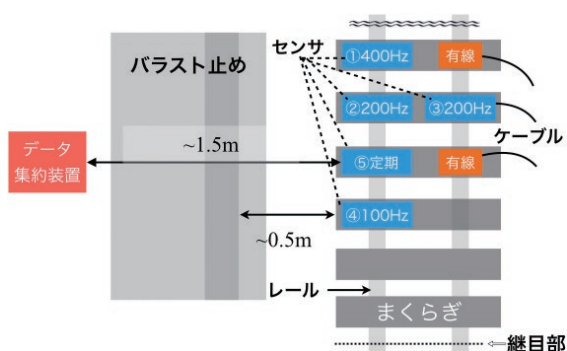


図 10 無線センサ埋設箇所

表 5 埋設した各無線センサのデータ取得条件

センサ	モード	サンプリング周波数 (計測時間)	検知回数
センサ①	振動検知	400Hz (0.225s)	1
センサ②	振動検知	200Hz (0.45s)	5
センサ③	振動検知	200Hz (0.45s)	0
センサ④	振動検知	100Hz (0.9s)	8
センサ⑤	定期		

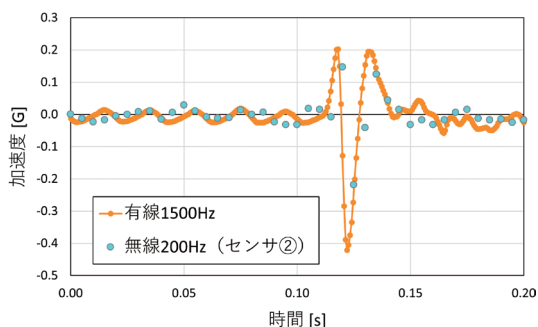


図 11 計測データの比較

送可能である。今後、無線機のパラメータ調整などを行なった上で検証を進めたい。

また、無線センサ保護のための樹脂製筐体により、バラスト振動の高周波成分が抜け落ちないかを検証する必要がある。加えて、バラスト径に対して同程度の大きさとなるよう無線センサの小型化が重要となる。

6. まとめ

道床振動加速度計測の無線化に向けて、無線機の仕様提案を行うとともに、鉄道総研所内試験線において提案した無線機を用いて、バラスト止めの影響も考慮した無線伝送試験を行い、その伝送特性と加速度データの計測可否を確認した。その結果、今回検証した 2m の範囲においては、データ集約装置の最低受信感度を上回る RSSI で加速度データの受信が可能であり、道床加速度計測を無線化できる可能性が高いことを確認した。

なお、本検討では既存の無線センサを用いたが、実軌道での計測を想定した場合、無線センサのサイズや計測データ量（サンプリング間隔や計測時間）を目的に合わせて最適化する必要がある、今後検証を進める予定である。

謝 辞

本研究の実施にあたり、センサ開発や度重なる情報提供などにご協力いただいた株式会社アイ・エス・ビーの関係者の皆様にこの場を借りて厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) 河野昭子：バラスト軌道のマイクロメカニクスに着目した解析手法の改良，鉄道総研報告，Vol.36, No.7, pp.69-78, 2021
- 2) 石田誠，名村明，鈴木貴洋：軌道沈下の実態と予測モデル，鉄道力学シンポジウム論文集，Vol.6, pp.61-66, 2002
- 3) Aikawa, A., et al.: Development of a measuring instrument of the triaxial acceleration on a ballast particle, Railway Engineering 2007.
- 4) D. Milne, et. al: Measuring Acceleration of Ballast Particles at Track Level, Proceeding of the 3rd Intl. Conf. on Railway Technology, Research Development and Maintenance, 2016.
- 5) Liu, S., et al.: Laboratory development and testing of "SmartRock" for railroad ballast using discrete element modeling. Joint Rail Conference, 2015.
- 6) Liu, S., et al.: Study on ballast particle movement at different locations beneath cross-tie using "SmartRock". Joint Rail Conference, 2016.
- 7) 野末道子，流王智子，岩澤永照，岩城詞也，川村智輝，川

- 崎邦弘：鉄道環境における Wi-SUN センサーネットワークの活用，鉄道総研報告，Vol.32，No.5，pp.17-22，2018
- 8) Iwasawa, N., et al.: Basic Concepts of Buried Wireless Sensor under Ballasted Layer, ICSNC 2019, 4346, 2019.
- 9) 栗田いずみ，岩本功貴，流王智子，河野昭子，羽田明生，中村一城：バラスト軌道における道床加速度計測の無線化の検討，鉄道工学シンポジウム論文集，Vol.25，CD-ROM，2021