

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

田中 実* 高橋 紀之** 池田 遼平**
依田 裕史** 岩井 優仁*** 稲本 賢司***

Development of a Sensor Data Collecting System for the Ground Coils of the Superconducting Maglev

Minoru TANAKA Noriyuki TAKAHASHI Ryohei IKEDA
Hiroshi YODA Masahito IWAI Kenji INAMOTO

In order to manage the ground coils of the superconducting maglev more effectively, we developed a sensor data collecting system. In this system, wireless sensors were mounted on the ground coils to monitor conditions, and monitoring results were collected by a running maintenance vehicle. We incorporated a wake-up receiver which controls the sleep mode using wireless wake-up signals, into the wireless sensor so as to reduce power consumption and radio wave interference. In the sleep mode, the power consumption of the wireless sensor when waiting the wake-up signal was 1.24mW. The system was evaluated in Kyusyu Shinkansen. When the wake-up signal was sent at 0.5-second intervals from a Shinkansen vehicle running at 248km/h, wireless sensor data was received 5 times. Based on this result, we can expect to introduce the data collecting system to the superconducting maglev vehicle running at 500km/h.

キーワード：浮上式鉄道，地上コイル，状態監視，無線センサ，ウェイクアップレシーバ

1. はじめに

超電導磁気浮上式鉄道は，車両が走行するガイドウェイの側壁に設置された地上コイルと台車に搭載された超電導磁石の電磁氣的相互作用で車両を推進・浮上・案内させるしくみを持つ。地上コイルは設置数が多いため，効率的な保守管理が求められる^{1) 2)}。

近年，センサを用いた状態監視が注目されている。データに基づく故障の早期発見や，劣化の予兆検知により安全性の向上や保守の効率化が期待できる。しかし，多くの地上コイルにセンサを設置して監視する場合，データの収集方法が課題となる。そこで，監視対象に無線センサを設置して，保守作業員の携帯端末等でデータ収集するだけでなく，保守用車に無線装置を搭載して，移動しながら効率的にデータ収集するシステムの開発を進めてきた³⁾。本システムは，有線方式と比較すると配線が削減でき，センサ間を無線で接続して順送りにデータを運ぶ一般的な無線センサネットワークと比較すると，リアルタイム性は劣るものの，センサ間を離すことができるため，ガイドウェイ上の自由な位置に無線センサを配置できる。

* 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

*** 日本電気通信システム株式会社

これまでの研究では，無線モジュールに RFID (Radio Frequency Identification) の適用を検討してきた^{3) 4)}。無線センサ側に通信用電源が不要となる利点があるが，従来の装置では，通信エリアは 1m 程度で，データ収集可能な車両速度は 55km/h 程度であった³⁾。さらに速度を向上できれば，浮上式鉄道用地上コイルの状態監視だけでなく，在来線や新幹線車両を使って沿線センサのデータ収集が可能となる。

データ収集車両の速度向上には，通信時間確保のため通信範囲の広い無線が必要となるが，無線センサの数を増やした場合に，消費電力の総和の増大や，同時送信による電波干渉が懸念される。対策として，センサデータの送信頻度を減らすことが考えられるが，高速車両を使ってデータ収集する場合，送信休止中に通信範囲を通過してしまい，センサデータが収集できなくなる懸念がある。タイマにより車両通過時だけ高頻度に通信する方法も考えられるが，予定時刻に車両が通過しないとデータは収集できない。

そこで，必要時以外は無線センサをスリープ状態に保ち，車載装置からの無線による起動信号で，必要なタイミングで必要な無線センサだけを起動させて通信することにより，低消費電力，かつ，電波干渉を抑えながら，効率的にセンサデータを収集するシステムを開発した。システム構成と性能確認結果を以下に報告する。

2. 無線センサへのウェイクアップレシーバの導入検討

無線センサの低消費電力化と電波干渉回避を目的として、車両からの電波により機器の起動状態を制御できるウェイクアップレシーバ^{5) 6)}の導入を検討した。図1に本研究で用いたウェイクアップレシーバ(NEC通信システム製)のブロック図を示す。データの受信時間(データ長)により起動要求を判別するしくみで、電波をアンテナで受信後、アンプで増幅してバンドパスフィルタを通し、包絡線検波してローパスフィルタを通し、ADコンバータでデジタル値に変換する。その後、マイコンで1をカウントしてデータ長を計測し、事前にウェイクアップレシーバに割り当てたデータ長と一致したら、対象機器を起動させるしくみである。

ウェイクアップレシーバの特徴として、回路構成が簡素で部品点数が少なく、受信待機時は極めて低消費電力で、かつ、高い応答性を持つ^{5) 6)}。また、起動信号はデータ長で制御するため、車載装置に新たな無線機の追加は不要で、センサデータ受信用の無線機と兼用できる。さらに、無線センサ毎に複数のデータの長短による識別番号(ウェイクアップID)を割り当てることで、必要な無線センサだけを起動でき、複数の無線センサが同時に通信することによる電波干渉を抑制できる。

図2にウェイクアップレシーバを内蔵した無線センサ

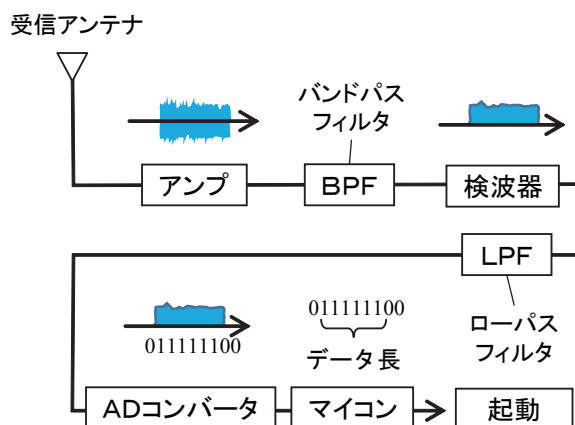


図1 ウェイクアップレシーバのブロック図

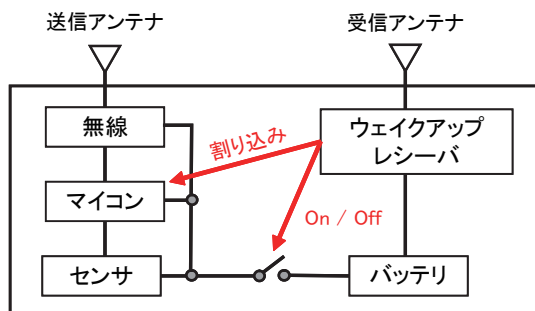


図2 ウェイクアップレシーバ内蔵無線センサの構成例

の構成例を示す。無線センサのマイコンはセンサデータ取得時以外スリープ状態にしておき、ウェイクアップレシーバは車載装置からの起動信号を受信待機させておく。データ収集用の車両が近づいて起動信号を受信したら、マイコンに割り込みをかけてスリープ状態から復帰させ、車載装置にセンサデータを送信する。無線通信後、再びマイコンをスリープ状態にして起動信号の受信待機を行う。これら手順を繰り返すことにより、無線センサの送信回数を必要最小限に抑えて、マイコンのスリープ状態を長く保つことができ、消費電力を低減できる。

なお、今回の無線センサには実装しなかったが、夜間等長時間使用しない場合、電源ラインにスイッチを準備して、ウェイクアップレシーバで制御することにより、無線センサの消費電力をウェイクアップレシーバの待機電力のみに抑えることができる。

3. センサデータ収集システムの構成

3.1 無線センサ

図3に開発した無線センサの写真を、表1に仕様を示す。無線にはIEEE 802.15.4gに準拠した920MHz帯を用いた。Wi-Fi等で利用される2.4GHz帯と比較して電波が回り込みやすく長距離通信が可能である。ただし、ARIB STD-T108⁷⁾に準拠する必要があるため、空きチャンネルを確認するキャリアセンスや送信時間制限が定められている。センサには放熱量を監視する熱流センサ⁸⁾を用いた。タイマにより1分間隔でセンサデータを取得し、取得時以外はマイコンをスリープ状態にした。起動信号受信時は、マイコンを起動させて最新データを送信するようにした。

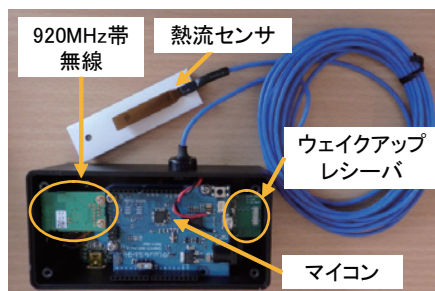


図3 無線センサ

表1 無線センサ仕様

無線	IEEE802.15.4g ARIB STD-T108 準拠
周波数	920MHz 帯
送信速度	100kbps
送信出力	20mW
使用センサ	熱流センサ

3.2 車載装置

図4に開発した車載装置の写真を示す。920MHz帯無線装置には、起動信号の送信とセンサデータの受信を兼用させた。4個のデータ長の組合せでウェイクアップIDを構成し、タブレットに設定した周期と繰り返し回数で送信した。無線センサから受信したセンサデータは、受信時刻と共にタブレット内のメモリに保存した。



図4 車載装置

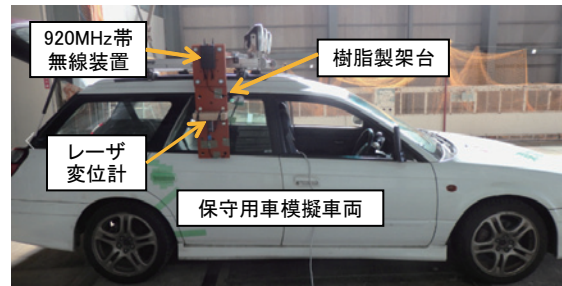


図6 車載装置設置状況

4. 宮崎実験線を用いた性能確認試験

宮崎実験線のガイドウェイを用いて、50km/h未満の低速域でセンサデータ収集システムの性能確認を行った。

4.1 試験方法

図5、図6に無線センサと車載装置の設置状況を示す。ガイドウェイの側壁に地上コイルを0.9mピッチで3個設置して、上端にウェイクアップIDの異なる3個の無線センサを設置した。一方、車載装置の920MHz帯無線は、保守用車を模擬した車両の側面に樹脂製架台を介して設置し、高さを無線センサと合わせた。無線センサと車載装置の離隔距離は車載のレーザー変位計で測定し、約0.5mであった。車両速度はGPSを使って測定した。

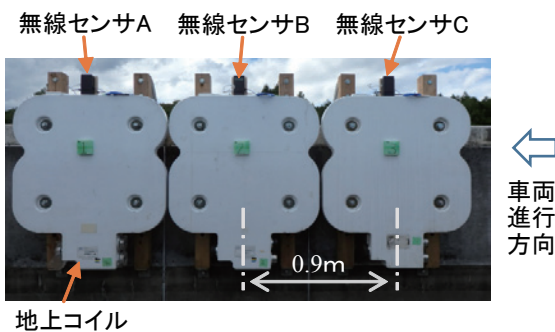


図5 無線センサ設置状況

4.2 通信範囲測定結果

図7に地上コイル3個のうち中心1個に無線センサBを設置し、車載装置を10mずつ移動させた際のセンサデータの受信信号強度を示す。通信範囲は無線センサ設置箇所を中心に前後100m程度であった。

図8に無線センサを3個設置した場合の各無線センサの受信信号強度を示す。1個の場合と同様に通信範囲は無線センサの前後100m程度であったが、無線センサA、Bは-60m地点でデータを受信できなかった。原因として、ガイドウェイ内で送信波と受信波が重なり信号を弱め合うフェージング現象が発生していたと考えられる。ただし、開発したセンサデータ収集システムは、移動しながら送受信するしくみのため、部分的に通信できない地点があっても実用上問題ない。

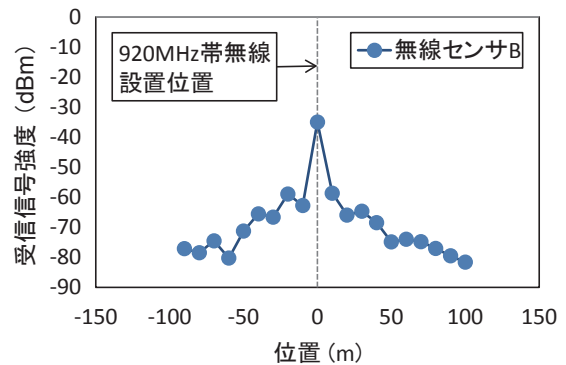


図7 受信信号強度（無線センサ1個）

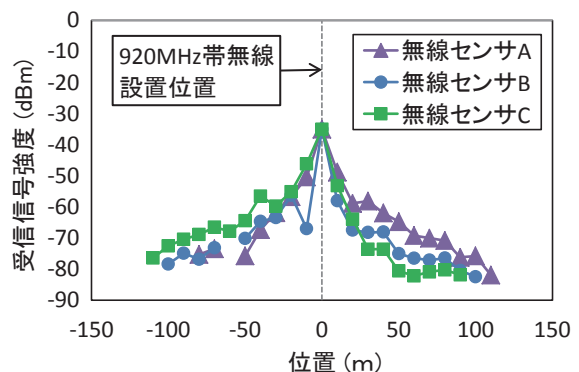


図8 受信信号強度（無線センサ3個）

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

4.3 走行試験結果

走行試験では、無線センサの通信範囲内を等速走行させて、車載装置から1秒毎に起動信号を送信し、以下の2通りの方法でセンサデータの受信回数を調べた。

① 個別受信

無線センサBのみ受信待機させて、車載装置から起動信号を送信し、センサデータを受信する。

② 選択受信

無線センサ3個を受信待機させて、車載装置から選択した1個のみ起動させて、センサデータを受信する。

表2に43km/hにおける個別受信試験結果を示す。通信範囲内で車載装置から起動信号を17回送信した際、16回センサデータを受信できた。起動信号送信からセンサデータ受信までの平均時間は168ミリ秒で、ウェイクアップレシーバを内蔵した無線センサは、短時間で起動してセンサデータを送信できたことがわかる。なお、No.12で熱流束のデータに読み飛ばしが見られた。センサデータの取得と起動信号受信のタイミングが重なった際、データ取得を優先したためである。なお、同一データを複数回取得するため、読み飛ばしがあっても実用上支障はない。

図9に10km/hから40km/hまで約10km/h刻みで速度を上げる試験を2セット行った時の受信回数を示す。また、通信範囲を無線センサ設置箇所から前後100mとした時の計算値も併せて示す。実測値と計算値はほぼ一致し、読み飛ばしはほとんど見られなかった。

図10に選択受信試験の受信回数を計算値と併せて示す。実測値と計算値はほぼ一致し、3個の無線センサを0.9mピッチで並べた条件で、任意の1個を起動してセンサデータを収集できることを確認した。

表2 個別受信試験結果(43km/h)

No.	起動信号 送信時刻	センサデータ 受信時刻	熱流束 (W/m ²)
1	15:34:26.176	15:34:26.326	5.30
2	15:34:27.179	15:34:27.375	5.30
3	15:34:28.183	15:34:28.334	5.30
4	15:34:29.183	15:34:29.300	5.30
5	15:34:30.186	15:34:30.364	5.30
6	15:34:31.187	15:34:31.329	5.30
7	15:34:32.190	15:34:32.383	5.30
8	15:34:33.193	15:34:33.345	5.30
9	15:34:34.195	15:34:34.397	5.30
10	15:34:35.199	15:34:35.360	5.30
11	15:34:36.201	15:34:36.418	5.30
12	15:34:37.203	-	-
13	15:34:38.206	15:34:38.419	10.61
14	15:34:39.208	15:34:39.378	10.61
15	15:34:40.212	15:34:40.339	10.61
16	15:34:41.212	15:34:41.394	10.61
17	15:34:42.214	15:34:42.353	10.61

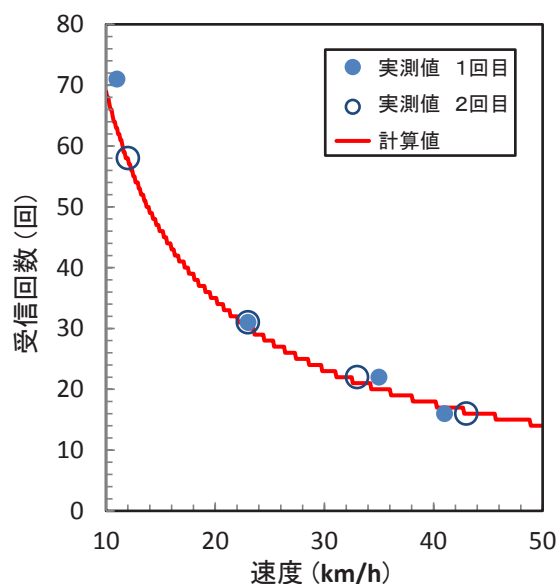


図9 個別受信試験結果

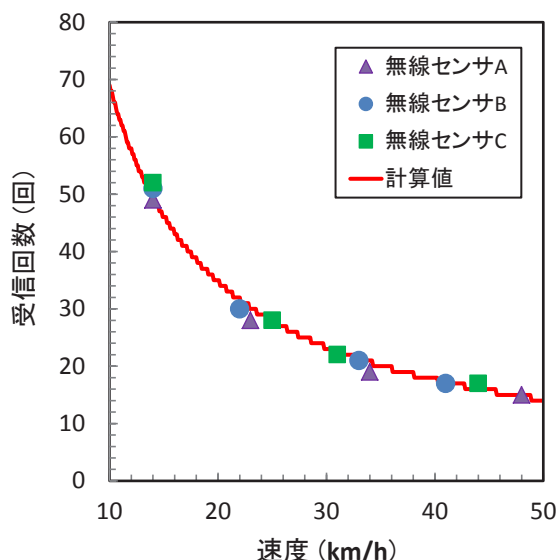


図10 選択受信試験結果

宮崎実験線における50km/h未満の走行試験では、車載装置から1秒毎に起動信号を送信した際、データ受信回数は計算値とほぼ一致した。試験結果に基づくと、保守用車への搭載は十分可能で、200km/h以上の車両への搭載も期待できることがわかった。なお、浮上式用のセンサとしては、今後小型化を目指していく予定である。

5. 新幹線を用いた性能確認試験

センサデータ収集用車両の速度向上ができれば、地上コイルの状態監視だけでなく、在来線や新幹線を使った沿線センサのデータ収集が可能となる。そこで、システムの改良を行うと共に、高速走行時の性能確認のため、

九州新幹線での性能確認試験を行った。

5.1 センサデータ収集システムの改良

車両を使ってセンサデータを収集する際、起動信号の送信間隔が短いほど通信範囲内の受信機会が増え、速度向上には有利となる。そこで、送信間隔を1秒から0.5秒に短縮した。センサは傾斜を監視する三軸加速度センサと温度センサの2種類とした。任意のタイミングでセンサデータが取得できることを確認するため、1分間隔で計測して、最新のデータを送信する方式から、起動信号受信後、直ちにセンサデータを計測して送信する方式に変更した。改良後の無線センサの消費電力は、受信待機時で1.24mWであった。バッテリーによる長時間駆動が可能である。

5.2 試験方法

図11に九州新幹線を用いた性能確認試験の構成を示す。久留米駅と新玉名駅の上りホームに無線センサを設置し、列車が下り線を高速で通過する際、センサデータを収集する試験を行った。図12に無線センサ、図13に車載装置の設置状況を示す。ホーム柵の金属が通信の妨げにならないように、無線センサは三脚を使ってホーム柵より高い位置に設置した。一方、車載装置はUSB dongleタイプの920MHz帯無線モジュールとタブレットで構成し、車内の窓に設置した。起動信号は通過駅が接近する前から0.5秒間隔で送信し、駅を通過してから停止した。車両速度はGPSで測定した。

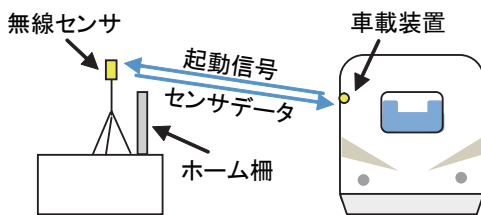


図11 九州新幹線を用いた性能確認試験構成



図12 無線センサ設置状況（久留米駅）



図13 車載装置設置状況

5.3 試験結果

表3に新玉名駅を248km/hで通過した時の結果を示す。新幹線車両から0.5秒毎に起動信号を送信した際、三軸加速度と温度を5回受信できた。途中の読み飛ばしは見られず、高速走行する新幹線車両から、ホームに設置した無線センサを起動させて、2種類のセンサデータを収集できることを確認した。

図14に久留米駅と新玉名駅におけるセンサデータ受信回数を示す。また、通信範囲を無線センサ設置箇所前後100mとした場合の計算値も併せて示す。久留米駅の受信回数は計算値よりも多かったが、通信範囲が想定より広がったためと考えられる。一方、新玉名駅

表3 新玉名駅通過試験（248km/h）

No	起動信号 送信時刻	加速度 (m/s ²)			温度 (°C)
		X軸	Y軸	Z軸	
1	10:27:26.154	-0.02	0.93	-0.03	14.5
2	10:27:26.657	-0.06	0.89	0.04	14.75
3	10:27:27.163	-0.06	1.06	-0.02	14.5
4	10:27:27.668	0.04	1.07	0.03	14.75
5	10:27:28.171	0.02	1.06	0.02	14.5

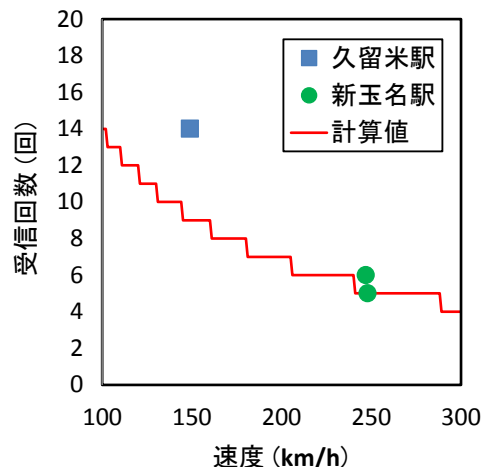


図14 センサデータ受信回数

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

は実測値と計算値がほぼ一致した。本結果に基づくと、300km/hの受信回数は4回程度となり、新幹線を使って沿線センサのデータを収集することは十分可能と考えられる。また、500km/hの受信回数は2回程度と推定され、浮上式鉄道車両に搭載してセンサデータを収集することも期待できる。

6. おわりに

浮上式鉄道用地上コイルに無線センサを設置して状態監視を行い、保守用車を使ってセンサデータを収集するシステムにおいて、車両の高速化のために通信範囲の広い無線センサを数多く設置した場合、消費電力の増大や電波干渉が懸念された。そこで、無線による起動信号で無線センサの起動状態を制御できるウェイクアップレーバを導入し、必要時に必要な無線センサだけを起動して通信することで、低消費電力、かつ、電波干渉を抑えながら、効率的にセンサデータを収集するシステムを開発した。

宮崎実験線のガイドウェイで、車載装置から起動信号を1秒間隔で送信しながら、43km/hで等速走行させる試験では、熱流センサのデータを16回受信できた。また、無線センサを0.9mピッチで3個並べた場合、任意の1個を起動してデータ収集できることを確認した。

さらに高速走行に向けて無線センサの改良を行い、起動信号の送信間隔を1秒から0.5秒に短縮した。新幹線車両を使った性能確認試験では、248km/hで走行する車両から、起動信号を0.5秒間隔で送信すると、駅に設置した無線センサを起動させて、三軸加速度と温度データを5回受信できることを確認した。なお、受信待機時の消費電力は1.24mWで、バッテリーを使った長時間駆動が可能である。本システムは浮上式鉄道用地上コイルの状態監視用に開発したが、新幹線を使った沿線センサのデータ収集にも活用でき、監視作業の省力化や自動化への応用が期待できる。

謝辞

新幹線車両を使ったセンサデータ収集システムの性能確認試験では、九州旅客鉄道株式会社 鉄道事業本部 新幹線部に多大なる御協力をいただきました。深く謝意を表します。

文献

- 1) 鈴木正夫：超電導磁気浮上式鉄道用地上コイルの高機能化および耐久性検証・絶縁診断技術に関する研究，博士学位論文，2014
- 2) 太田 聡：浮上式鉄道の地上コイル，RRR，Vol.74，No.1，pp28-31，2017
- 3) 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，pp23-28，2017
- 4) 田中 実，高橋紀之，鈴木正夫，池田遼平，長坂 整：RFIDを利用した車載型地上コイル保守支援装置の開発，鉄道総研報告，Vol.25，No.3，pp.29-34，2011
- 5) 阿部憲一，長谷川晃朗，阪田史郎，池永全志，四方博之：オンデマンド型無線センサーアクチュエーターネットワーク（ROD-SAN）の提案，信学総大，B-6-126，2014
- 6) YOMO, H., KAWAMOTO, T., ABE, K., EZURE, Y., ITO, T., HASEGAWA, A., Takeshi IKENAGA, T., "ROD-SAN: Energy-Efficient and High-Response Wireless Sensor and Actuator Networks Employing Wake up Receiver", IEICE TRANS. COMMUN., Vol. E99-B, No.9, pp.1998-2008, 2016.
- 7) 920MHz-BAND TELEMETER, TELECONTROL AND DATA TRANSMISSION RADIO EQUIPMENT ARIB STD-T108 Version 1.0 https://www.arib.or.jp/english/html/overview/doc/5-STD-T108v1_0-E2.pdf (参照日：2017年12月19日)
- 8) 熱流センサ「Energy Eye」<https://energyeye.com/> (参照日：2017年12月19日)