

## 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

田中 実\* 高橋 紀之\*\* 池田 遼平\*\*\*  
依田 裕史\*\* 鈴木 正夫#

Condition Monitoring of Maglev Ground Coils by Using Radio Communication  
between Sensor Tag and the Maintenance Vehicle

Minoru TANAKA Noriyuki TAKAHASHI Ryohei IKEDA  
Hiroshi YODA Masao SUZUKI

Ground coil is one of the most important equipments for high speed superconducting maglev system. However, because of an enormous number of ground coils along the guideway, maintenance work needs much time and effort. To execute the maintenance work efficiently, we have developed a condition monitoring system by using radio communication between the sensor tag and the maintenance vehicle. To monitor the ground coil condition, two types of the sensor tags have been developed. One type is a passive sensor tag without battery and another type is a semi-passive sensor tag with battery which is used only for sensing. Radio communication tests between the running vehicle and the sensor tag were executed on the Miyazaki Maglev Test Line. Identification number and monitoring results were collected when the vehicle equipped with the reader passed by the sensor tag. We succeeded in collecting the passive sensor tag data up to 40km/h and the semi-passive sensor tag data up to 55km/h. These results indicate that the system can monitor an enormous number of ground coils efficiently.

キーワード：浮上式鉄道，地上コイル，センサタグ，保守用車，状態監視

### 1. はじめに

超電導磁気浮上式鉄道は、ガイドウェイの両側側壁に敷設された地上コイルと台車に搭載された超電導磁石との相互作用で、車両を推進・浮上・案内させる仕組みである。全線にわたり敷設された地上コイルは数が膨大なため、保守管理には多大な労力が必要となる。筆者らは、これまで、保守の効率化のため、RFID (Radio Frequency Identification) の研究を行ってきた<sup>1) 2)</sup>。

RFID とは、JIS では「誘導電磁界または電波によって、非接触で半導体メモリのデータを読み出し、書き込みのために近距離通信を行うものの総称」と定義される。また、RFID で使用するデータキャリアを RF タグと呼ぶ<sup>3)</sup>。個別の地上コイルに RF タグを設置して、メモリに識別番号や位置情報を記録しておけば、保守作業員は携帯型リーダ・ライタをかざすだけで、保守対象地上コイルを識別できる。さらに、点検や補修毎に結果を RF タグのメモリに記録すると共に、ガイドウェイ内を移動する保守用車に

リーダ・ライタを搭載して、RF タグと保守用車間で路車間通信を行えば、最新の保守データを効率良く収集でき、保守管理データベースの自動更新や、保守対象地上コイルを地図上に表示して、案内することも可能となる<sup>1) 2)</sup>。

最近では、保守の効率化のため、鉄道設備の保守管理に状態監視システムの導入が検討され、既に電力設備では、き電線の接続金具の温度監視に無線センサを導入した事例<sup>4)</sup>も報告されている。地上コイルにおいても、無線センサによる状態監視によって、故障に至る予兆が検出できれば、適切なタイミングで補修や交換ができ、一層の効率化が期待できる。

しかし、これまでに開発された無線センサの多くは、定期的に電波を発信するしくみで消費電力が大きく、また、高価なため数多く設置するのは困難であった。一方、RF タグにセンサ機能を付加したセンサタグは、送受信の電源が不要であり、識別用に設置した RF タグの一部をセンサタグに置き換えるだけで安価に状態監視システムが構築できる可能性がある。

そこで、電池が不要なパッシブタグと、任意のタイミングでセンシングが可能なセミパッシブタグの2種類のセンサタグを対象として、地上コイルの状態監視への適用を検討した。また、監視結果を効率よく収集するため、

\* 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

\*\*\* 前 浮上式鉄道技術研究部 電磁システム研究室

# 浮上式鉄道技術研究部 山梨実験センター

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

センサタグとの通信に適した車載装置を開発して、宮崎リニア実験線のガイドウェイにて路車間通信試験を実施したので結果を報告する。

2. センサタグの導入検討

外観だけでは確認が困難な地上コイルの状態をセンサにより効率的に監視するため、表1に示す2種類のセンサタグの導入を検討した。詳細を以下に示す。

2.1 センサ

地上コイルは巻線を樹脂でモールドした構成であり、リニア車両通過毎に繰り返し荷重や高電圧が加わる<sup>5)</sup>。そこで、樹脂の機械強度や絶縁性能を把握し、故障の予兆を検知するため、使用環境や稼働状態の監視は重要である。これまで、加速度センサ<sup>6)</sup>や熱流センサ<sup>7)</sup>の導入を検討してきたが、本報告ではセンサの詳細には言及せず、1種類のセンサによる監視手法、および、3種類のセンサを組み合わせた監視手法を説明する。

2.2 無線周波数

RFIDの無線周波数は、入手性を考慮して、現在広く普及しているHF帯(13.56MHz)とUHF帯(920MHz)の導入を検討した。

2.3 電力供給

センサタグは電池を内蔵しないパッシブタグと電池を内蔵するアクティブタグに大別され、さらに、送受信に電池を使用しないが、内蔵メモリのデータ保持やセンサ回路用に電池を内蔵するセミパッシブタグもある<sup>3)</sup>。長期使用を考慮すると、電池を無くすか、もしくは、極めて低消費電力にする必要があり、パッシブタグとセミパッシブタグの導入を検討した。

2.4 監視タイミング

パッシブタグは電池が不要となる反面、センシングはリーダー・ライタから電力供給されるタイミングに限られる。一方、セミパッシブタグは電池が必要となるが、任意のタイミングでセンシングが可能である。監視タイミングが異なる2種類のセンサタグを使った状態監視手法を検討した。

表1 センサタグ仕様

	パッシブタグ (Type A)	セミパッシブタグ (Type B)
1. センサ	サーミスタ (1種類)	温湿度、照度 加速度(3種類)
2. 無線周波数	HF帯	UHF帯
3. 電力供給	電池不要	電池内蔵
4. 監視 タイミング	リーダー・ライタ 電力供給時	任意設定可能

3. 車載装置の導入検討

一般的な携帯型リーダー・ライタは、1個ずつセンサタグにかざしてデータを読み取るが、数が多くなると読み取りに手間がかかる。そこで、保守用車にリーダー・ライタを搭載し、走行中に路車間通信で効率良く監視結果を収集する手法を検討した。ただし、保守用車を高速走行させた場合、センサタグの読取範囲を短時間で通過してしまうため、大量データの送受信は困難である。そこで、車載リーダー・ライタで収集するデータは、識別番号と異常判定結果のみとした。なお、異常が発見された場合は、識別番号により保守対象地上コイルを特定し、携帯型リーダー・ライタでセンサデータを収集して、原因究明に活用することを想定している。

4. センサタグによる状態監視

4.1 パッシブタグ (Type A) の開発

図1にパッシブタグ (Type A) の外観を示す。RFID用LSI (ML7216:ラピスセミコンダクタ製)、HF帯アンテナ、温度監視用サーミスタ (103AT:セミテック製)で構成され、電池は内蔵していない。なお、地上コイルに設置する際は、雨や紫外線に対する保護も行った。

HF帯アンテナについて、一般的なRFタグで使用される印刷技術を用いたアンテナ(印刷アンテナ)を、鉄道総研が開発した推進・浮上・案内兼用地上コイル<sup>5)</sup>の表面に設置したところ通信ができなかった。一方、図1に示した被覆電線を用いたアンテナ(電線アンテナ)では、通信が可能であった。設置前は両アンテナとも通信が可能なることから、2種類のアンテナにおける通信性能差の原因として設置対象の材質の影響が考えられる。そこで、図2に示す推進・浮上・案内兼用地上コイル特有の半導電層<sup>5)</sup>の有無が各アンテナの共振周波数に及ぼす影響を調べた。図3に結果を示す。印刷アンテナの場合、線路間の結合容量をアンテナの容量成分として利用しており、半導電層の影響で容量が変化して、共振周波数が大きくシフトしたと考えられる。一方、電線アン

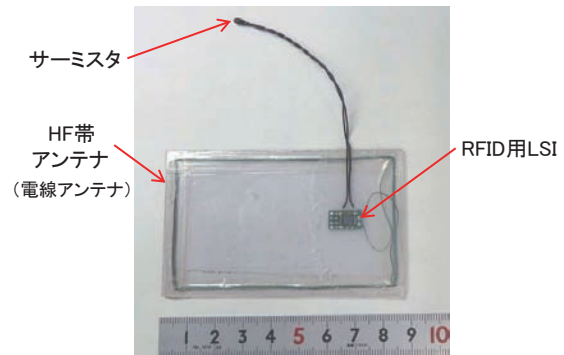


図1 パッシブタグ外観

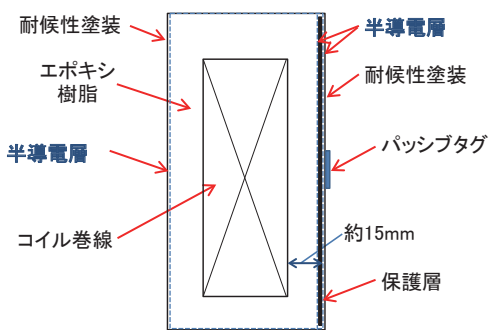


図2 推進・浮上・案内兼用地上コイル断面

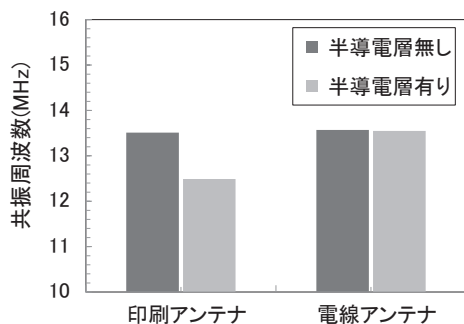


図3 半導電層による共振周波数の変化

テナは、線径が0.26mmと細く線間も狭いため、容量成分への影響は小さい。従って、共振周波数がほとんど変化せず、通信が可能であったと考えられる。そこで、推進・浮上・案内兼用地上コイル表面にHF帯タグを密着させる場合、電線アンテナを用いることとした。

地上コイルの温度判定には、サーミスタとコンパレータを用いた。図4に温度判定用ブロック図を示す。同じ回路構成でAD変換が可能であり、直接温度を読み取ることもできるが、高速走行時は路車間通信の処理時間が短いため、車載リーダ・ライタからパッシブタグに給電後、温度しきい値を送信し、サーミスタと比較を行い、温度判定結果(“H”または“L”)を受信するようにした。

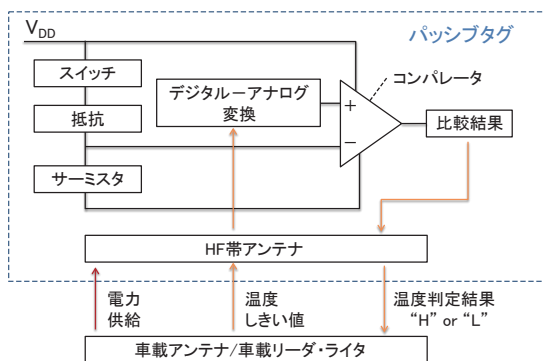


図4 温度判定用ブロック図

#### 4.2 パッシブタグ用車載装置の開発

図5にガイドウェイを上から見た時のパッシブタグ用車載装置の構成図を示す。出力1Wのリーダ・ライタと車載アンテナを2セット準備し、前方を識別番号取得用、

後方を温度判定結果取得用とした。16バイトの識別番号と温度判定結果の平均読取時間は、それぞれ26msと31msであった。

1個のアンテナで複数のセンサタグのデータを一括で読み取るには、アンチコリジョン<sup>3)</sup>が必要となるが、処理に時間がかかる。そこで、複数のセンサタグが同時に読取範囲に入らないようなアンテナサイズとした。また、読取時間を考慮して、温度判定結果取得用アンテナを識別番号取得用アンテナよりも大きくした。別々のリーダ・ライタで取得した識別番号と温度判定結果のデータは、アンテナ配置に基づき、自動的に結合される。

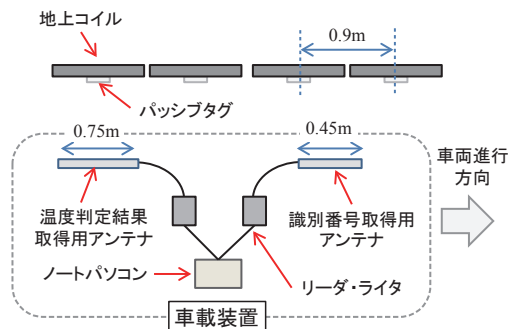


図5 パッシブタグ用車載装置構成

#### 4.3 セミパッシブタグ (Type B) の開発

図6にセミパッシブタグ (Type B : MB9BF506RA-EVA-RF-01:富士通セミコンダクター製)の外観を示す。3種類のセンサ(温湿度、照度、三軸加速度)、マイコン、液晶が搭載されたマイコン基板と、RFID用LSIやUHF帯アンテナが搭載されたアンテナ基板がSPIインターフェースで接続された構成となっている。背面には電池が内蔵されているが、既に、推進コイルの発生磁場を利用した給電装置を開発しており<sup>8)</sup>、置き換えにより電池を不要にできる可能性がある。

表2にRFID用LSIの仕様を示す。特徴は、メモリにFRAM (Ferroelectric Random Access Memory) を用いていることである。FRAMとは、強誘電体薄膜をデータ保持用のキャパシタに利用した不揮発性メモリで、 $10^{10}$ 回の書き換え耐性を持ち、センサデータの高頻度な書き込みが可能である。また、メモリの書き込みに昇圧が不要で、読み込みと同じ速度で書き込みが可能である。従って、FRAMは高頻度に状態監視結果が書き込まれるセミパッシブタグに適したメモリといえる。

実際の運用について、状態監視を行う前に、携帯型リーダ・ライタを使ってFRAMにセンサの種類、測定間隔、しきい値等の監視条件を記録した。状態監視中は、センサデータを取得して、しきい値と比較を行い、結果をFRAMに記録した。なお、FRAMのユーザメモリサイズには限りがあるため、リングバッファを用いて古いデータから順次上書きする。また、過去の異常の有無を確認

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

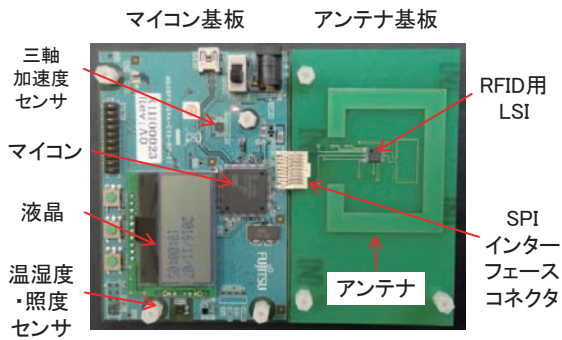


図6 セミパッシブタグ 外観

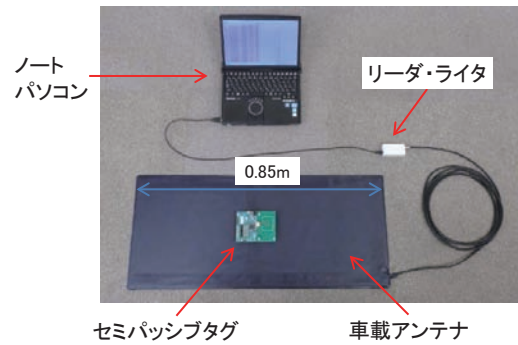


図7 セミパッシブタグ用車載装置外観

表2 RFID用 LSI の主な仕様

項目	仕様
無線周波数	UHF 帯 (860 ~ 960MHz)
無線インターフェース	EPC global Class1Gen2
有線インターフェース	SPI
メモリ	FRAM 4K バイト (ユーザメモリ 3434 バイト)
書き換え耐性	10 <sup>10</sup> 回

表3 異常判定フラグ

ビット	センサ	正常	異常
0	温度上限値	0	1
1	温度下限値	0	1
2	湿度上限値	0	1
3	湿度下限値	0	1
4	温湿度センサ自己診断	0	1
5	照度上限値	0	1
6	照度下限値	0	1
7	照度センサ自己診断	0	1
8	X 軸加速度上限値	0	1
9	X 軸加速度下限値	0	1
10	Y 軸加速度上限値	0	1
11	Y 軸加速度下限値	0	1
12	Z 軸加速度上限値	0	1
13	Z 軸加速度下限値	0	1
14	三軸加速度センサ自己診断	0	1
15	予備	0	1

するため、表3に示す異常判定フラグを用いて、一度異常が発生したら、復帰をしてもクリア操作がされるまで“1”を保持するようにした。

4.4 セミパッシブタグ用車載装置の開発

図7にセミパッシブタグ用車載装置の外観を示す。車載アンテナと出力32mWのUHF帯リーダ・ライタとノートパソコンで装置を構成した。路車間通信で取得するデータは、識別番号24バイトと異常判定フラグ2バイ

ト(16ビット)のみとした。

車載装置に搭載するUHF帯リーダ・ライタは、特定小電力無線局920MHz帯移動体識別用無線設備の標準規格(ARIB STD-T107)に準拠する必要がある。HF帯とは異なり、リーダ・ライタが電波を発信する前に、他に電波が発信されていないか調べるキャリアセンスを5ms以上実施することが定められている。もし、他の無線によるチャンネルの占有があると、路車間通信中に読み落としが頻発する懸念がある。そこで、キャリアセンスをして読取処理後、すぐにチャンネルを変更する周波数推移制御を行った。表4にホッピングパターン(周波数変更のパターン)を示す。現場で使用するチャンネルが変えられるように3つのパターンを準備して、5つのチャンネルを推移させるようにした。

表4 ホッピングパターン

チャンネル	周波数 [MHz]	パターン1	パターン2	パターン3
24	920.6	○		
25	920.8	○		
26	921.0	○		
27	921.2	○		
28	921.4	○		
29	921.6		○	
30	921.8		○	
31	922.0		○	
32	922.2		○	
33	922.4		○	
34	922.6			○
35	922.8			○
36	923.0			○
37	923.2			○
38	923.4			○

5. 路車間通信試験

宮崎実験線のガイドウェイで、地上コイルに設置したセンサタグと模擬台車上の車載装置間で路車間通信試験を行った。結果を以下に示す。

### 5.1 パッシブタグ路車間通信試験構成

図8にパッシブタグを用いた路車間通信試験の構成を示す。ガイドウェイ上に地上コイルを4個設置し、各地上コイル表面の同一位置にパッシブタグを設置して、進行方向ピッチを地上コイルと同じ0.9mとした。サーミスタは1個おきに加温し、あらかじめ“L”と“H”の温度判定結果が交互に出力されるようにした。また、識別番号と温度判定結果の自動結合試験のため、同一高さで同一ピッチとなるように、2個の発泡スチロールブロック上にもパッシブタグを設置した。

車載アンテナは、模擬台車上に木製アンテナ架台を介して設置した。また、2個の車載アンテナ間の干渉を避けるため、距離を2.05m離れた。高さはパッシブタグと合わせ、離隔距離は0.2mとした。識別番号取得用アンテナと温度判定結果取得用アンテナの車両進行方向長さは、それぞれ0.45mと0.75mとしたが、地上コイル上の4個のパッシブタグの進行方向の平均読取範囲は、それぞれ0.41mと0.66mであった。

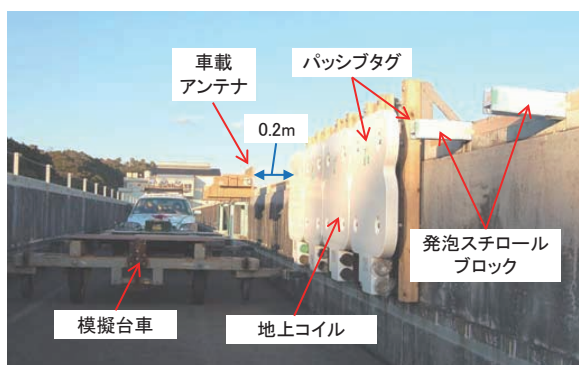


図8 パッシブタグ路車間通信試験構成

### 5.2 パッシブタグ路車間通信試験結果

ガイドウェイ内で模擬台車を加速後、地上コイル前を等速走行させて路車間通信を行い、各パッシブタグの識別番号と温度判定結果の読取回数を測定した。図9に地上コイル上の4個のパッシブタグの平均読取回数とエラーバーを示す。また、パッシブタグの平均読取時間と平均読取範囲から求めた読取回数の推定値も併せて示す。速度向上と共に読取回数は減少したが、時速40kmまで全てのタグの識別番号と温度判定結果を取得でき、推定値とはほぼ一致することが確認できた。読取回数にバラツキがみられたが、パッシブタグ毎の読取範囲のバラツキや、パッシブタグの読取範囲内を通過する際の読取開始時間のバラツキが原因と考えられる。

図10に時速40km時の温度判定結果と識別番号(UID)の結合例を示す。温度判定結果を受信した際、同じタイミングで受信した識別番号より、温度判定したセンサタグを特定する仕組みとした。最初に温度判定結果“L”が2回続いているが、これは、同一タグの判定結果を

2回繰り返し読み取ったためである。車載アンテナ間に2.05mの離隔距離をとったため、地上コイル上以外にも前方に2個のタグを設置する必要があったが、この方法により、温度判定結果と識別番号を正しく結合できることを確認した。

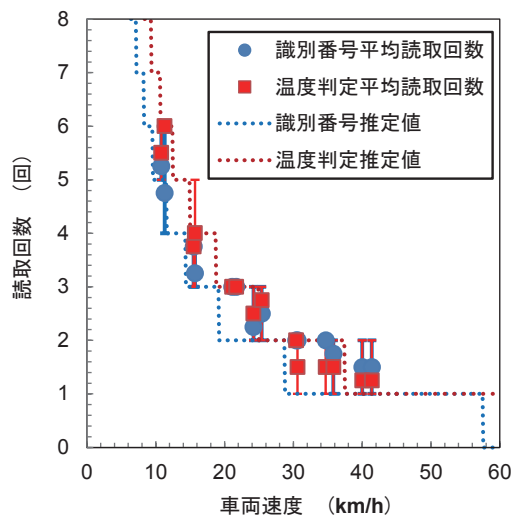


図9 パッシブタグ路車間通信試験結果  
(速度と平均読取回数の関係)

データ結合結果				保存
No.	判定結果	時刻	UID	
1	L	154108.984	E00BCFFFFFF10131E	
2	L	154109.031	E00BCFFFFFF10131E	
3	H	154109.093	E00BCFFFFFF1011F3	
4	L	154109.171	E00BCFFFFFF1011FE	
5	H	154109.250	E00BCFFFFFF10128D	

図10 データ結合結果表示画面例 (時速40km)

### 5.3 セミパッシブタグ路車間通信試験構成

図11にセミパッシブタグを用いた路車間通信試験の構成を示す。ガイドウェイ上に地上コイルを4個設置し、中央2個の表面にはセミパッシブタグを設置した。干渉を確認するため、両端2個にはセンサを持たないUHF帯RFタグも設置した。4個のタグは同一高さで、進行方向ピッチは地上コイルと同じ0.9mとした。

車載アンテナは、模擬台車上に木製アンテナ架台を介して設置した。セミパッシブタグとの離隔距離は通信範囲を考慮して、HF帯の2倍の0.4mとした。車載アンテナの進行方向長さは0.85mとしたが、セミパッシブタグの進行方向読取範囲は0.65m(No.1)と0.61m(No.2)であった。

表5にセミパッシブタグを500回読み取った時の平均読取時間を示す。両方のセンサタグでホッピングパターン3の場合が最短となった。読取時間のばらつきは電波環境に依存しており、同一チャンネルで他の無線の電波が発信されたことが原因と考えられる。今後、UHF帯の無線機器は増加すると考えられ、適切なチャンネルの選定や周波数推移制御が必要になると考えられる。

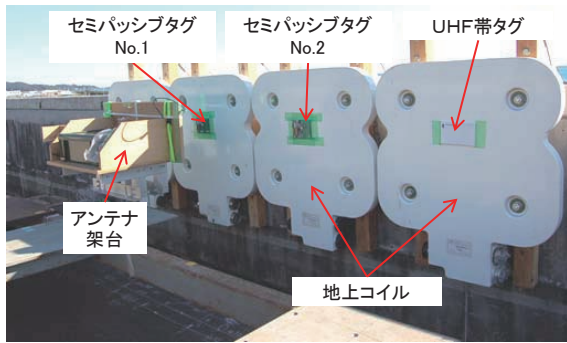


図 11 セミパッシブタグ路車間通信試験構成

表 5 セミパッシブタグ読取時間（500 回平均値）

セミパッシブタグ	No.1	No.2
ホッピングパターン 1	53 ms	60 ms
ホッピングパターン 2	49 ms	51 ms
ホッピングパターン 3	39 ms	40 ms

#### 5.4 セミパッシブタグ路車間通信試験結果

ガイドウェイ内で模擬台車を加速後、地上コイル前を等速走行させて路車間通信を行い、2 個のセミパッシブタグの識別番号と異常判定フラグの読取回数を測定した。図 12 にホッピングパターン 3 の結果を示す。他のパターンでは読み落としが発生したが、ホッピングパターン 3 では、時速 55km まで識別番号と異常判定フラグを取得でき、セミパッシブタグの平均読取時間と読取範囲から求めた読取回数の推定値とほぼ一致することを確認した。

以上より、セミパッシブタグは複数のセンサによる状態監視が可能で、保守用車を使った路車間通信により、地上コイルの状態監視結果を効率良く収集できることが明らかとなった。

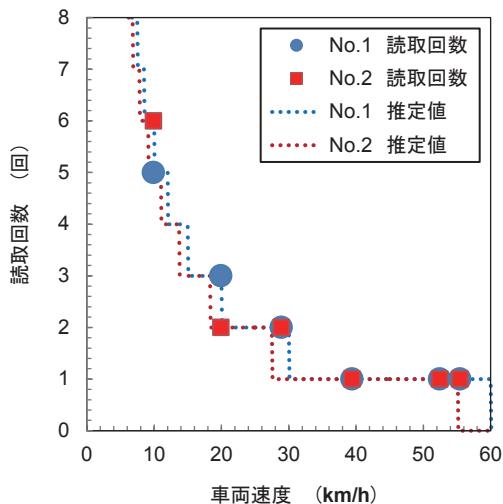


図 12 セミパッシブタグ路車間通信試験結果  
(速度と読取回数の関係)

## 6. まとめ

センサタグと保守用車間の路車間通信を用いた状態監視システムを構築して、宮崎実験線のガイドウェイにて動作確認を行った。その結果、電池不要の HF 帯パッシブタグを用いたシステムでは、識別番号と温度判定結果を時速 40km まで収集できた。また、任意のタイミングでセンシングができる UHF 帯セミパッシブタグを用いたシステムでは、識別番号と 3 種類のセンサによる異常判定フラグを時速 55km まで収集できることを確認した。本システムは、地上コイルの状態監視用として開発したが、鉄道設備の保守管理に広く適用が可能である。

## 謝 辞

本報告のパッシブタグのシステムは、株式会社バレルと永田通研の協力を得て開発した。また、セミパッシブタグのシステムは、富士通セミコンダクター株式会社、株式会社ユービックシステム、センターボード、ソーバル株式会社（現 株式会社アートファイネックス）の協力を得て開発した。

## 文 献

- 1) 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
- 2) 田中 実: 鉄道設備の保守管理システムへの RFID 技術の活用, 月刊自動認識, Vol.27, No.14, pp.39-45, 2014
- 3) 一般社団法人 日本自動認識システム協会編: よくわかる RFID 電子タグのすべて (改訂 2 版), オーム社, pp.3, pp.47, pp.52, 2014
- 4) 菅間陽二, 貴志俊英, 山本浩志: 電車線路設備モニタリングシステムの実用化, JR East Technical Review, No.48, pp.29-32, 2014
- 5) 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, pp.9-22, pp.49, 博士学位論文, 2014
- 6) 田中 実, 鈴木正夫: 地上コイル異状検知への加速度センサの適用検討, 電気学会産業応用部門大会講演論文集, pp.375-376, 2012
- 7) 田中 実, 松井啓仁: 熱流センサによる地上コイル樹脂内部温度推定, 電気学会全国大会講演論文集, pp.194, 2016
- 8) 田中 実, 鈴木正夫: 地上コイル異状検知センサ用給電装置の開発, 鉄道総研報告, Vol.27, No.7, pp.17-22, 2013