

# 地上コイル異常検知センサ用給電装置の開発

田中 実\* 鈴木 正夫\*\*

## Development of Power Supply Unit for Anomaly Detection Sensors in Ground Coils of Superconducting Maglev

Minoru TANAKA Masao SUZUKI

In the Magnetically levitated transportation (Maglev) system, a huge number of ground coils will be required for outdoor use over an extended period. To detect the precursor of ground coils failure, we developed anomaly detection sensors. When the sensor is built into the ground coil, the use of commercial power supply is difficult. Therefore, we have developed a power supply unit using a variable magnetic field generated by the propulsion current. In order to realize quick charge from the variable magnetic field, and to operate the sensor for a long period of time, we have tested the combination of a polyacenic semiconductor (PAS) capacitor and a lithium polymer battery. We confirmed by the bench test that the combination of the electric storage media is suitable for the power supply unit for anomaly detection sensors.

キーワード：浮上式鉄道，地上コイル，センサ，給電装置

### 1. はじめに

超電導磁気浮上式鉄道用地上コイルは、車両が走行するガイドウェイの両側側壁に連続的に設置され、数が膨大で長期間にわたって使用される。そのため、時速約500kmで高速走行する浮上式鉄道車両の安全確保には、適正で効率的な地上コイルの保守管理手法の確立が重要である<sup>1) 2)</sup>。地上コイルの主な検査方法として、徒歩巡回や保守用車を用いた外観検査が考えられる。これら検査により、強度や絶縁を担う地上コイルモールド樹脂の表面状態、側壁設置のための締結部の回転緩み、コイル間を接続するケーブルやコネクタの状態などが確認できる。しかし、浮上案内コイルと推進コイルが2層または3層構造となる場合、浮上案内コイルの側壁側や推進コイルの外観検査は困難である。また、地上コイルは車両通過時に超電導磁石との相互作用で加振され<sup>3)</sup>、高電圧が加わり、通電によって温度上昇する。できるだけ早く異常を検知して、高速走行時の安全を確保するには、外観検査と状態監視の併用が重要と考えられる。

そこで、地上コイルの状態監視を容易に実現するため、コイルに設置するだけで、複雑な電源線や信号線の配線無しで状態監視ができ、外観検査を補完できる地上コイル異常検知センサを開発したので報告する。

### 2. 地上コイル異常検知センサの構成

#### 2.1 地上コイル異常検知センサの内蔵箇所

図1に鉄道総研が開発した推進浮上案内兼用コイル<sup>4)</sup>(PLGコイル)の側壁側の外観を示し、表1に主な仕様を示す。PLGコイルは、3種類の機能の兼用によりガイドウェイへの設置を1層構造にできるため、建設費が削減できるだけでなく、外観検査も容易となる。PLGコイルの車両通過側は平滑にしてあるが、側壁側は樹脂量削減のために肉盗みが設けられており、上コイル肉盗み部に異常検知センサを内蔵することとした。ただし、スペースさえあれば、PLGコイルだけでなく、他の種類の地上コイルにも内蔵可能である。

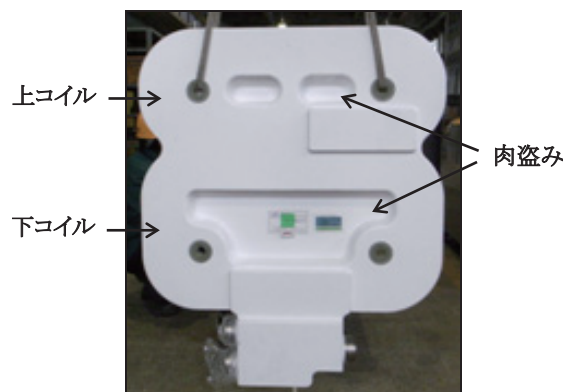


図1 PLGコイル外観(側壁側)

\* 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 山梨実験センター

表1 PLG コイルの主な仕様

名称	推進浮上案内兼用コイル
外形寸法	880 mm × 1052 mm
導体	電気用アルミニウム
単位コイル数	2 (上/下コイル)
ターン数	36 ターン
成形方法	エポキシ樹脂注型

## 2.2 地上コイル異常検知センサの構成

図2に地上コイル異常検知センサの概略構成を示す。状態監視用センサ、無線装置、制御用マイコン、給電装置を信号線と電源線で接続する構成とした。

状態監視用センサには、三軸加速度センサと温度センサを選定した。加速度センサは、列車通過時に動作させることで、超電導磁石との相互作用による振動が監視できる。通常は大きな振動は発生しないが、モールド樹脂にクラックが発生した場合や、締結部に緩みが発生した場合は振動が増大する<sup>5)</sup>。また、飛来物の衝突検知や、地震時の振動監視、地震後の傾き検出にも利用できる。一方、温度センサは車両通過後に動作させ、コイル通電後の温度上昇を監視した。

無線装置にはパソコンとの接続が容易な Bluetooth Ver2.0 + EDR Class2 を選定した。図3に示すように、地上コイルに設置した異常検知センサと側壁上のデータ収集装置間で無線通信を行なうことを想定した。通信距離は約10mで、1台のデータ収集装置に7個のセンサを同時接続でき、切り替えを行えば、さらにセンサ数を増やすことができる。

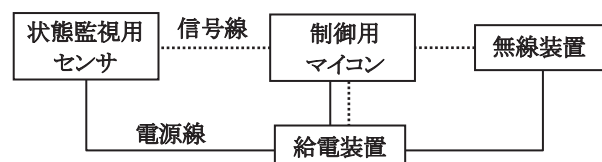


図2 地上コイル異常検知センサ概略構成

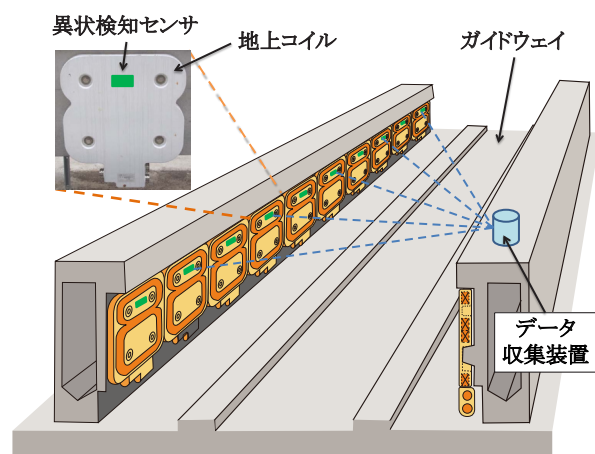


図3 無線を用いた状態監視例

異常検知センサは地上コイルに内蔵するため、商用電源の利用は困難である。一次電池を用いる方法が考えられるが、数が多くなると電池交換が問題となる。対策として、近年では、太陽光や廃熱などから電力を得る環境発電（エナジーハーベスティング）が注目されている。異常検知センサの場合、浮上式鉄道特有の変動磁場が加わるため、その一部を給電に利用することとした。

変動磁場には、列車がセクションと呼ばれる電氣的に区切られた領域に入った際、推進電流により PLG コイルから発生する変動磁場と、超電導磁石の通過により発生する変動磁場の2種類がある。両者とも給電に利用できるが、列車の走行性能に影響しないように、超電導磁石と PLG コイルが相対しない時のみ、コイルから発生する変動磁場を利用することとした。変動磁場の周波数  $f$  [Hz] は、超電導磁石の極ピッチ  $\tau$  [m]、速度  $v$  [m/s] とすると、以下の式で表される。

$$f = v / 2\tau \quad (1)$$

ここで、 $v=500$  km/h (138.9m/s)、 $\tau=1.35$  m とすると、 $f=51.4$ Hz となる。本報告では、高速走行区間に給電装置を設置することを想定して、設計時の周波数を 50Hz とした。変動磁場の発生時間は、列車速度、列車長、セクション長に依存するが、設計では 10 秒間と仮定した。

異常検知センサには超電導磁石の強力な磁場が加わるため、電子部品への影響を調べた。その結果、高効率な電源装置の電圧調整には欠かせないスイッチングレギュレータが、チョークコイルの磁気飽和のために利用できないことが分かった。そこで、電圧調整には三端子レギュレータを用いることとした。

図4に上記検討を踏まえて開発した地上コイル異常検知センサの外観を示す。鉄道総研が開発した給電装置と三軸加速度センサ、マイコン、Bluetooth、リチウムポリマバッテリーからなる小型無線加速度センサ（ワイヤレステクノロジー製）と半導体温度センサ（マイクロチップ・テクノロジー製）により装置を構成した。

図2の概略構成に基づいて装置を説明する。状態監視用センサには、小型無線加速度センサの三軸加速度センサと半導体温度センサを使用し、PLG コイル側壁側の監視箇所を設置した。無線装置には小型無線加速度センサの Bluetooth を使用した。制御用マイコンは給電装置に設置して電源制御と計測制御を行った。計測制御信号は、小型無線加速度センサのマイコンに送信し、三軸加速度を測定して、外部に設置したデータ収集装置（パソコン）に無線送信した。給電装置は、PLG コイル肉盗みに内蔵して、変動磁場の磁気エネルギーを電気エネルギーに変換し、小型無線加速度センサのリチウムポリマバッテリー（150mAh）に給電した。次節で給電装置の詳細を述べる。

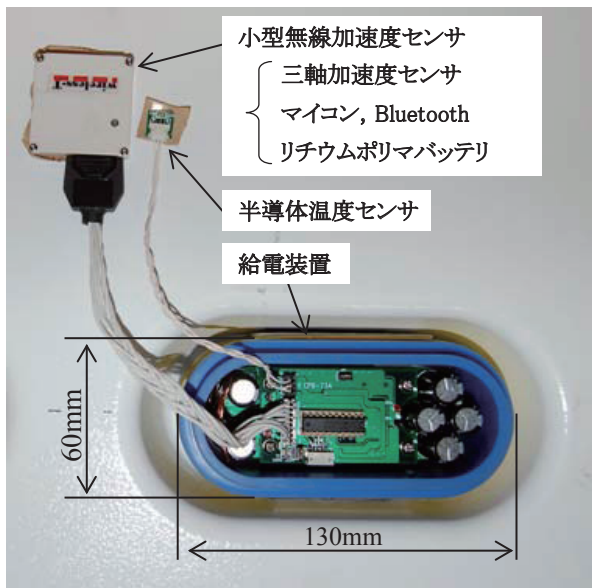


図4 地上コイル異常検知センサ外観

### 3. 変動磁場を利用した給電装置

#### 3.1 給電装置の構成

図5に給電装置の巻棒形状、図6に集電コイルの巻線、図7に回路の外観を示す。肉盗み形状に合わせて樹脂製巻棒を製作し、外側にエナメル線を500ターン巻線し、内側に3枚の基板を上下に組み合わせた回路を内蔵した。

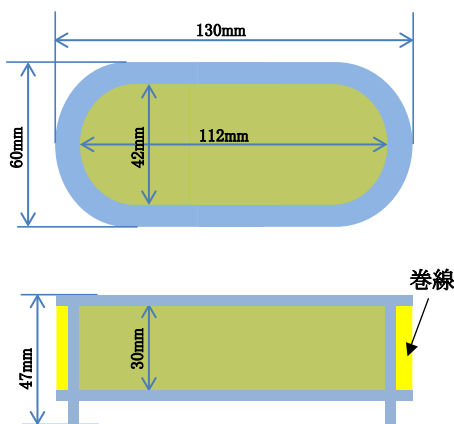


図5 巻棒形状

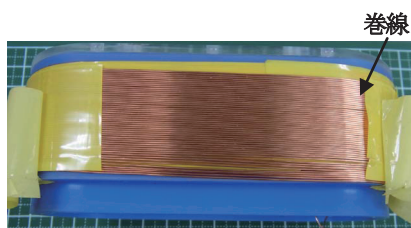


図6 集電コイル巻線外観

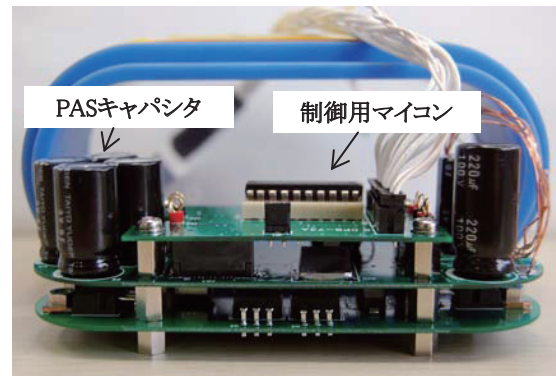


図7 給電装置回路外観

#### 3.2 給電装置の蓄電素子

変動磁場の発生時間は、列車がセクションを通過する短時間に限られ、常時センサや Bluetooth 無線を稼働させる場合や、センサデータに時刻情報を付加する場合は蓄電が必要となる。小型無線加速度センサにはエネルギー密度が高いリチウムポリマバッテリーが内蔵され、センサの長時間稼働が可能であるが、急速充電が困難で、放電深度が深いとサイクル寿命が短くなる問題もある。そこで、ポリアセン系半導体 (PAS : Polyacenic Semiconductor) キャパシタの併用を検討した。表2に2種類の蓄電素子の比較を示す。PAS キャパシタはフェノール樹脂を熱縮合して得られた PAS を正負極に用いており、電解液中のイオンの PAS へのドーピング、アンドーピングを利用して充放電を行うため、従来の電気二重層キャパシタに比べてエネルギー密度が高く、内部抵抗が小さくできるのが特徴である<sup>6)</sup>。また、リチウムポリマバッテリーよりもパワー密度が高く、急速充放電に適しており、サイクル寿命も長い。そこで、リチウムポリマバッテリーの弱点を PAS キャパシタで補うことにより、短い変動磁場の発生時間で急速充電を行い、異常検知センサを長時間稼働させることを目指した。

表2 蓄電素子の比較

	リチウムポリマ バッテリー	PAS キャパシタ
長所	エネルギー密度が高い。	パワー密度が高い。 サイクル寿命が長い。
短所	急速充放電ができない。 放電深度が深いと、サイクル寿命が短くなる。	サイズが大きい。 自己放電がある。

#### 3.3 給電装置の回路

図8に給電装置のブロック図を示す。推進電流により PLG コイルから発生した変動磁場を集電コイルで電気エネルギーに変換し、整流/平滑した後、超電導磁石通過時に給電を停止するためのパワー MOSFET による過電圧保護回路を介して、最大使用電圧 3V、容

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

量 9F で 5 直列の PAS キャパシタ（太陽誘電製：PAS-1220LA3R0905）に蓄電した。PAS キャパシタ間の充電電圧のバラツキを抑えるため、並列モニタ回路<sup>7)</sup>を用いて最大使用電圧に近づいた PAS キャパシタの充電電流をバイパスし、各キャパシタ電圧をバランスさせた。図 9 に並列モニタ回路の動作確認の様子を示す。LED の点灯より充電電流のバイパスを確認し、分担電圧が均一になることを確認した。

5 直列の PAS キャパシタ電圧は、制御用マイコンで監視して、急速充電後に蓄電電圧が 6V 以上であれば、出力電圧 5V の三端子レギュレータから小型無線加速度センサに給電した。また、PAS キャパシタ電圧がリチウムポリマバッテリー電圧より低くなると、充電ができなくなるため、4V 以下で給電を停止した。

小型無線加速度センサでは、充電制御 IC を介してリチウムポリマバッテリーが充電され、センサ自体だけでなく、制御用マイコンや温度センサにも給電するようにして、異常検知センサを連続稼働させた。

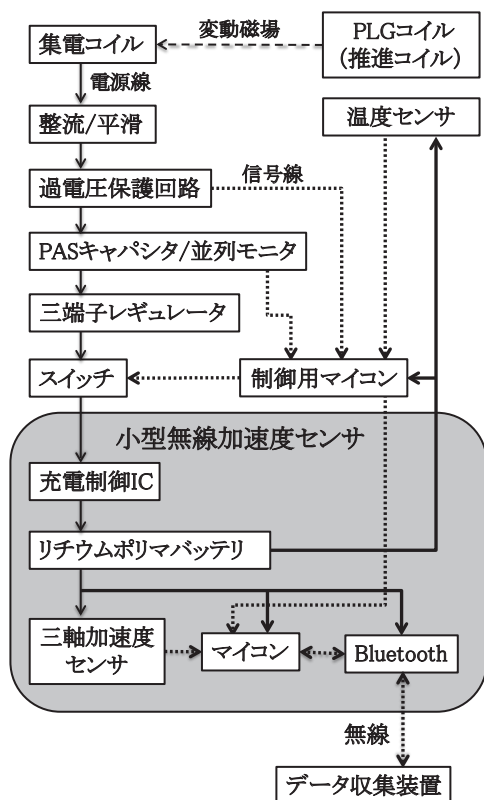


図 8 給電装置ブロック図

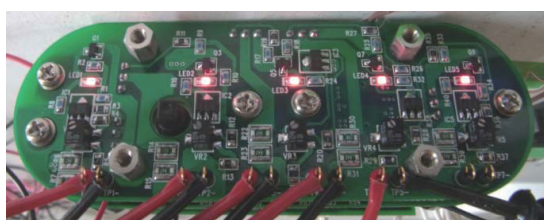


図 9 並列モニタ回路の動作確認

### 3.4 計測制御

給電装置は小型無線加速度センサへの給電機能だけでなく、計測制御機能も付加した。図 8 に示した過電圧保護回路の電圧監視部で変動磁場の発生を検知すると、制御用マイコンから計測トリガとしてサンプリング間隔と出力回数のコマンドを小型無線加速度センサに送信し、加速度センサを動作させ、Bluetooth により時刻情報と三軸加速度データを無線送信した。また、小型無線加速度センサへの給電停止後、温度センサと制御用マイコンを用いて地上コイルの温度監視を行い、閾値を超えた場合は、小型無線加速度センサを介して、温度データを無線送信した。

## 4. 地上コイル異常検知センサの動作確認

### 4.1 ベンチテスト

異常検知センサの動作確認を行うため、ベンチテストを行った。図 10 に試験の様子を示す。PLG コイル肉盗みに集電コイルを設置し、インバータ電源から PLG コイル上コイルに 5 分間あたり 10 秒通電 290 秒休止のサイクル通電を行った。給電特性を調べるため、集電コイル内部から回路を取り出して、PAS キャパシタ電圧や給電電圧を測定した。小型無線加速度センサから無線送信したデータは、0.8m 離れた Bluetooth USB アダプタで受信して、パソコン (Tera Term) で内容を確認した。

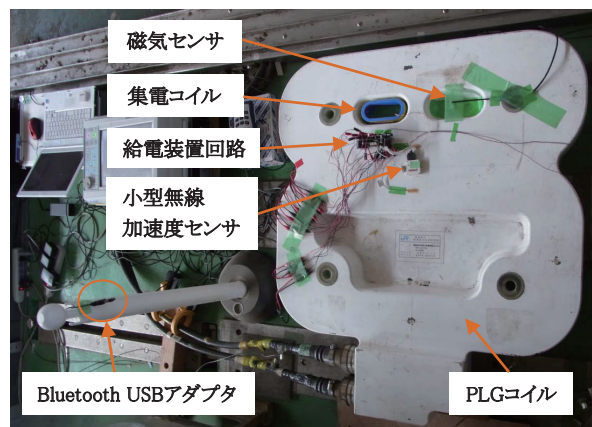
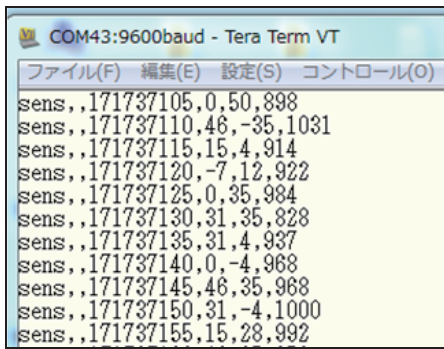


図 10 ベンチテストの様子

### 4.2 センサデータの受信確認

図 11 に加速度データの確認画面を示す。PLG コイルにインターバル通電を行うと、通電毎に時刻情報 (時：分：秒：ミリ秒) と三軸加速度データが受信できることを確認した。また、地上コイル温度が閾値を超えると、温度データが受信できることも確認した。なお、図 3 に示した構成を模擬して、通信距離を 10m にした場合でも、同様にデータが受信できることも確認した。



時刻情報 三軸加速度

図 11 加速度データの確認画面

### 4.3 給電装置の動作確認

図 12 に PLG コイルの通電電流を 50,100,150,200Arms (50Hz) として、サイクル通電をした時の 5 直列の PAS キャパシタの充放電特性を示す。なお、各電流値における変動磁場の最大値は 9,18,27,35mT であった。50Arms では通電毎に PAS キャパシタ電圧が上昇し、10 セット目で 6V を超えて放電し、4V で放電が停止した。一方、100Arms は 2 セット目から PAS キャパシタの充放電が繰り返され、150Arms 以上では 1 セット目から充放電が繰り返された。

図 13 に 10 セット目の PAS キャパシタ電圧を示し、図 14 に三端子レギュレータから小型無線加速度センサへの給電電圧を示し、図 15 にリチウムポリマバッテリー電圧を示す。PAS キャパシタが放電する間、三端子レギュレータから小型無線加速度センサに給電され、リチウムポリマバッテリーが充電されることが確認できた。ただし、変動磁場発生中にリチウムポリマバッテリー電圧に脈動がみられ、ノイズ対策が必要なこともわかった。

給電装置の蓄電素子にリチウムポリマバッテリーのみを利用した場合、充電制御 IC により定電流充電 (150mA) され、充電時間は変動磁場の発生時間と同じ 10 秒間となるが、PAS キャパシタを併用することにより、100Arms では 21 秒間、150Arms では 40 秒間、200Arms では 60 秒間まで充電時間を伸ばせることがわかった。本開発では電圧調整に三端子レギュレータを用いたが、超電導磁石磁場中で利用できる効率の良いスイッチングレギュレータが開発できれば、さらに給電時間を伸ばせると考えられる。

図 16 に通電電流を 100,150,200Arms (50Hz) として、サイクル通電を 96 セット (8 時間) とした時のリチウムポリマバッテリー電圧を示し、給電装置が無い場合の結果も併せて示す。リチウムポリマバッテリーの初期電圧を 3.8V とすると、給電装置が無い場合の稼働時間は約 4 時間であったが、給電装置を接続して PLG コイルの通電電流を 100Arms 以上にすると、8 時間以上連続して異常検知センサが稼働でき、振動加速度と温度を自律し

て監視できることを確認した。

本開発では、給電装置の集電コイル巻数を 500 ターンとしたが、通電電流 200Arms では給電電力が消費電力を上回り、約 7 時間で満充電となった。異常検知センサを設置するコイルの推進電流、セクション長、列車速度、列車長に合わせて、巻数を調整する必要がある。給電装置はリチウムポリマバッテリーを継ぎ足し充電しているが、メモリ効果は無いことが知られており、放電深度と温度を適切に管理すれば、容量劣化は抑えられ、長期にわたって異常検知センサを稼働できると考えている。

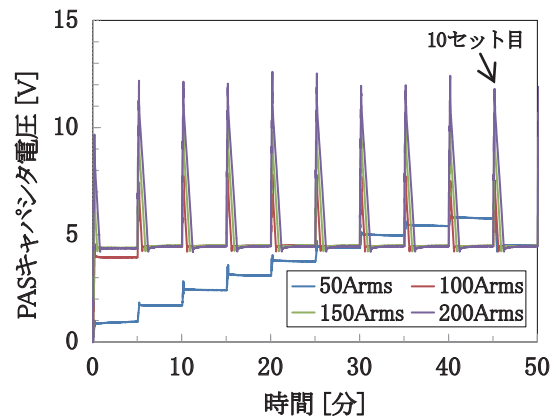


図 12 PAS キャパシタ充放電特性

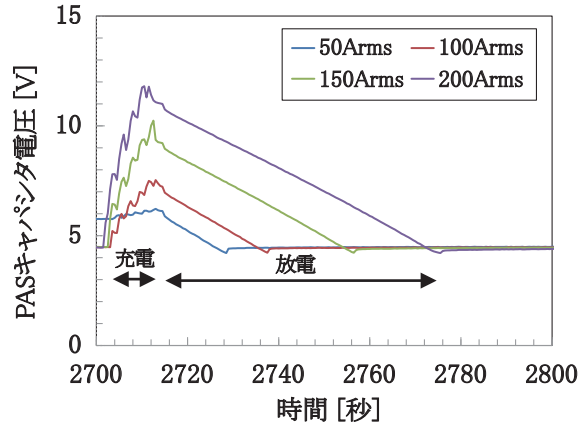


図 13 PAS キャパシタ電圧 (10 セット目)

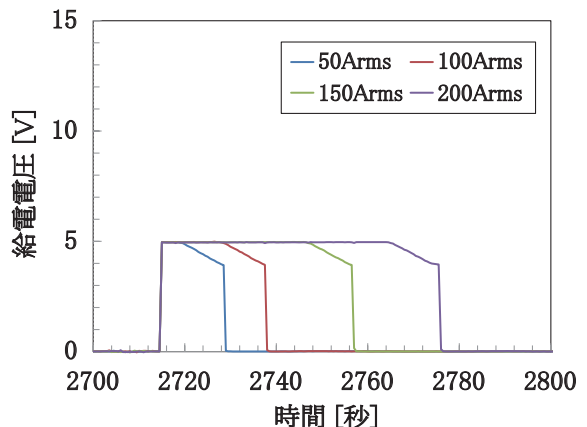


図 14 給電電圧 (10 セット目)

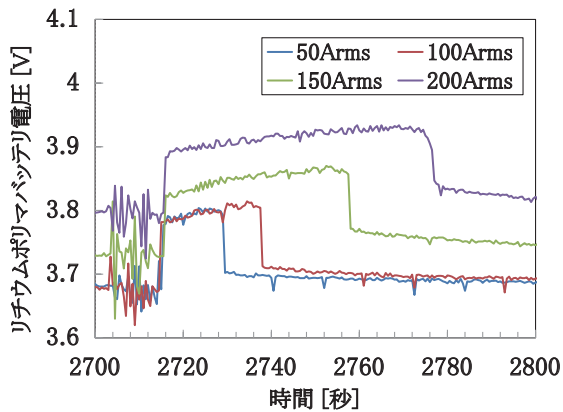


図 15 リチウムポリマバッテリー電圧（10 セット目）

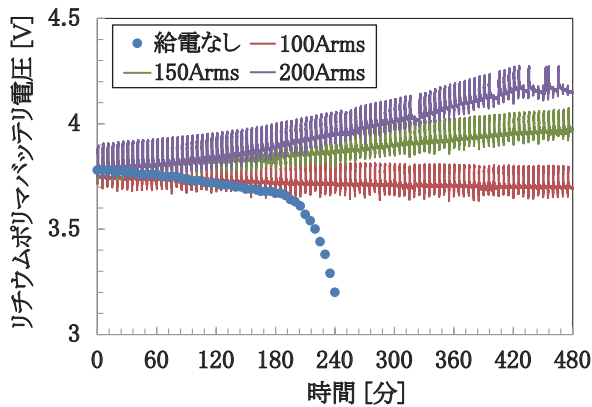


図 16 リチウムポリマバッテリー充放電特性

## 5. まとめ

超電導磁気浮上式鉄道の高速度走行時の安全を確保するため、地上コイルに設置するだけで、複雑な電源線や信号線の配線なしで状態監視ができ、外観検査を補完できる地上コイル異常検知センサを開発した。

異常検知センサの蓄電素子として、PAS キャパシタとリチウムポリマバッテリーを併用することにより、列車がセクションを通過する短時間に変動磁場を利用して急速充電を行い、センサを長時間稼働して、振動加速度と温度を自律して監視できることをベンチテストで確認した。

## 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、(株)テス、(株)コプト、ワイヤレステクノロジー(株)から技術協力を受けました。なお、本研究の一部は、国土交通省からの国庫補助を受けて実施しました。

## 文 献

- 1) 鈴木正夫, 饗庭雅之, 田中 実, 太田 聡: IT を利用した地上コイル保守管理手法の開発, 鉄道総研報告, Vol.24, No.1, pp.17-22, 2010
- 2) 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
- 3) 田中 実, 饗庭雅之, 鈴木正夫: 地上コイル耐久性評価用電磁加振装置の開発, 鉄道総研報告, Vol.20, No.8, pp.17-22, 2006
- 4) 饗庭雅之, 鈴木正夫, 田中 実, 松江 仁, 鈴木裕之: 浮上式鉄道用高機能化推進・浮上・案内兼用地上コイルの開発, 平成 19 年電気学会産業応用部門大会講演論文集, pp. III -167- III -168, 2007
- 5) 田中 実, 鈴木正夫: 地上コイル異常検知への加速度センサの適用検討, 平成 24 年電気学会産業応用部門大会講演論文集, pp. III -375- III -376, 2012
- 6) エネルギー供給の多様化に対応する PAS キャパシタ / リチウムイオンキャパシタの適用, Taiyo Yuden Navigator, Vol.4, pp.2-9, 2010
- 7) 岡村迪夫: 電気二重層キャパシタと蓄電システム 第二版, pp. 144-158, 2001