

ITを活用した地上コイル保守管理手法の開発

鈴木 正夫* 饗庭 雅之*
田中 実* 太田 聡*

Development of the Maintenance Management Method for Ground Coil Applied Information Technology

Masao SUZUKI Masayuki AIBA
Minoru TANAKA Satoru OTA

In Magnetically Levitated transportation (MAGLEV) system, a huge number of ground coils will be required for outdoor use over an extended period. Therefore, periodical maintenance work is inevitable to secure the performance in stable operation of the ground coils. Therefore, an establishment of maintenance management method which is reasonable and simple is extremely important when we secure maintenance cost reduction and the reliability of the system. In this paper, we examined an individual information management method applied IC tag for ground coil and self-diagnose method for ground coil aimed at advanced prevention of trouble.

キーワード：浮上式鉄道，地上コイル，ICタグ，保守管理，自己診断

1. はじめに

超電導磁気浮上式鉄道において、軌道の全線に亘って敷設される地上コイルは、長期間の屋外使用が前提となるばかりでなく、膨大な数が対象となる。そのため、地上コイルの安定運用に際しては、定期的な保守作業により安全性を確保する必要がある。従って、適正かつ簡易な保守管理手法の確立が、保守コスト低減やシステムの信頼性を確保する上で、極めて重要であると考えられる。本研究では、地上コイルの製造から保管、敷設、保守運用に至る個別情報を個々のコイルに内蔵させたICタグに記録、更新することを前提に、データベースの一元管理を目指し、地上コイルの新たな個別情報管理手法を開発した。また、運行トラブルの未然防止を目的とし、車両通過時の挙動を地上コイル自身に自動計測させることにより、人手を介さずに電磁路としての健全性が評価できる地上コイル自己診断手法を検討した。以下に、これらの検討・開発状況について紹介する。

2. 開発の背景

2.1 ICタグを利用した個別情報管理手法の検討

現地に敷設される地上コイルは長期間の屋外使用が強いられるため、製造時から現地敷設、実運用に至るまで高度な品質管理が必要となる。ところが、製造メーカーや

取付仕様、施工業者等が異なる種々のコイルを軌道の全線に亘って適正に管理することは容易ではない。また、作業記録に基づく定期的な保守データの更新は、多大な労力を要するばかりでなく、現物照合の困難さからデータベースの信頼性そのものを低下させかねない。そこで、地上コイルの製造から保管、敷設、保守運用に至る個別情報を個々のコイルに内蔵させたICタグに記録、更新することを前提に、最新かつ正確なデータベースの一元管理を目指し、地上コイルの新たな保守用途として個別情報管理手法を検討した。

2.2 地上コイル自己診断手法の検討

これまで、地上コイルの保守作業の一つとして徒歩巡回による目視点検を行っているが、点検箇所や異状判定など専門知識、経験が必要である。また、コイルを外さないと点検できない箇所も多々ある上、対象個数が多く相当な労力を要している。そのため、コイルの状態把握に関しては、一部のコイルで定期的の実施している経時変化調査に頼らざるを得ず、トラブルの未然防止という観点で課題となっている。一方、営業線を想定した場合、保守作業に充てる走行休止日の設定は許容されず、深夜の営業休止時間帯のみで全ての対応が求められる。従って、膨大な数を対象とした地上コイルの保守管理においては、定置での耐久性試験等により得られた知見を基にトラブルに至る前兆を予測し、効率的に対応する手段を構築する必要がある。そこで、トラブルに繋がる可能性のある異状状態をコイル自身で検知・発信させることに

* 浮上式鉄道技術研究部（電磁路技術）

特集：浮上式鉄道技術とその応用

より、極力人手に頼らず信頼性の高い地上コイル自己診断手法を検討した。

3. IC タグを利用した個別情報管理手法の開発

3.1 IC タグの選定

IC タグは、情報を記憶しておく小さな IC チップと無線通信用のアンテナを組み合わせた小型装置であり、「無線タグ」、「RFID タグ (Radio Frequency Identification)」とも呼ばれる。バーコードや QR コードと異なり比較的大量のデータが扱えるばかりでなく、必要に応じてタグ内の情報を書き換えられる利点から、広範囲な用途に急速な普及展開が図られている。また、情報の読み書きが電磁誘導や電波により非接触で行えるため、屋外使用が前提となる地上コイルにおいては、樹脂内への埋込使用が可能となり、耐候性を気にせず高度な情報管理が期待できる。

3.1.1 IC タグの使用条件

地上コイルへの適用に際しては、特有の使用環境 (長期屋外使用、振動、磁場、高電圧、低コスト等) を考慮する必要がある。耐熱性樹脂で成形したコイン型 IC タグを選定した。表1に地上コイル用 IC タグの使用条件を示す。

表1 地上コイル用 IC タグの使用条件

項目	条件
1. 製造時最高温度	120°C
2. 環境温度	-30 ~ 50°C
3. IC タグ表面電位	数十 V
4. 磁場環境	最大 1T (直流及び交流)
5. 振動加速度	最大 300m / sec ²
6. 目標使用年数	35 年間

3.1.2 基本性能の確認

地上コイルへの適用に際し最も懸念される環境は、車上の超電導磁石が高速通過する際の変動磁場に対する影響である。ここでは、超電導磁石通過時の磁場変化を模擬した定置試験により、IC タグの基本性能を確認した。

(1) 変動磁場に対する影響

磁束密度: 1T の直流磁場を発生する電磁石を組み込んだ高速回転試験装置 (図1) を使用し、IC タグを固定した回転円板を高速で回転させることにより、磁石通過時の磁場変化を模擬した。その結果、1200T / 秒 (実走行時の約 1.5 倍の磁場変化率) において、IC タグ内の読み込みデータに異状が生じないことを確認した。

(2) IC チップの耐電圧特性

超電導磁石通過時の磁場変化により無線通信用アンテナに誘起される電圧が、IC チップに及ぼす影響を検証し

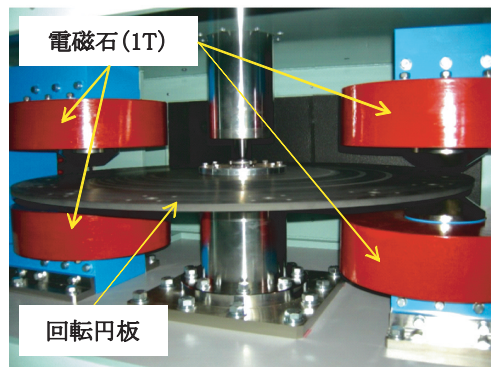
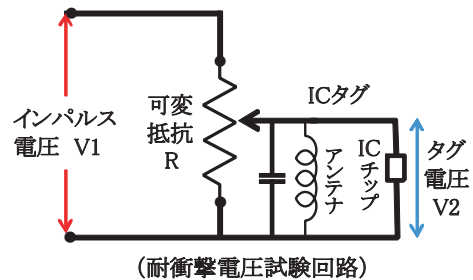
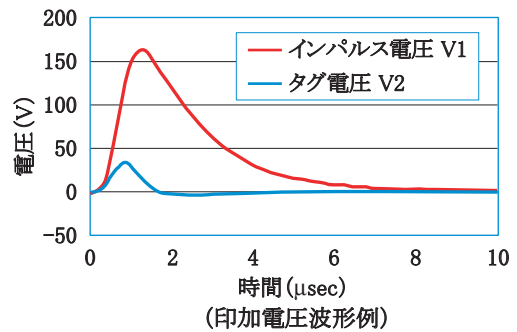


図1 高速回転試験装置による検証



(耐衝撃電圧試験回路)



(印加電圧波形例)

図2 IC チップの耐電圧特性

た。検証方法は、IC チップに電圧印加が可能となるようアンテナの一部を切り、IC チップの両端に設けた端子から可変抵抗器を介して任意の衝撃電圧を段階的に印加し、タグ内データが読み取り不能になる直前の値を求めた。その結果、磁石が 500km/h で通過する際に想定される誘起電圧 (最大 14V) の約 2.5 倍の耐電圧を有していることを確認した。図2に試験等価回路および印加電圧波形例を示す。

3.2 IC タグ埋込型地上コイルの試作

IC タグの地上コイルへの適用に際しては、現地使用時の環境劣化や振動による脱落を避けるため、樹脂による一体成形時に一緒に埋め込む方法を選択した。対象コイルは、鉄道総研にて開発中の PLG と呼ばれる推進・浮上・案内兼用型とした。特別高圧機器である同コイルには、現地に設置した際の車両面側に厚さ約 3mm の保護層が設けられている¹⁾。本試作では、この保護層のスペースを利用して IC タグを埋め込んだ。図3に IC タグの設置位置を

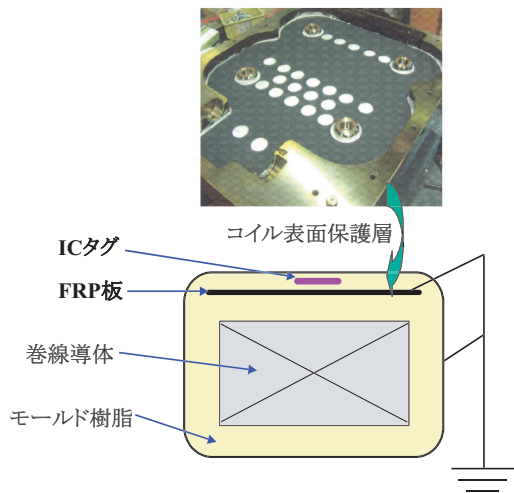


図3 試作コイルへのICタグ埋込位置

示す。因みに、保護層の両面には電氣的接地処理が施されているため、ICタグが高電圧に曝される恐れはない。

3.3 試作コイルによるICタグの性能評価

試作コイルに埋め込んだICタグを対象にデータ読み取り試験を行い、製造時の温度環境(120℃)や出荷時の耐電圧試験(AC70kV / 1分間)に対しタグ情報に影響がないことを確認した(図4)。また、励磁下の超電導磁石に当該コイルを対向させ、運用35年間相当の電磁加振による耐久性試験(図5)においても、ICタグの読み取り機能に問題がなく、直流高磁場や耐振動性においてタグの耐久性を確認した。

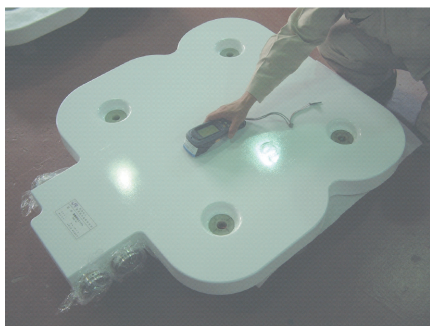


図4 ICタグ読み取り試験状況



図5 ICタグ埋込コイル耐久性試験状況

3.4 地上コイル個別情報とデータ形式

個々のICタグに記録できる情報量には限りがあるため、地上コイルの製造、保管、敷設、保守運用等の各段階における個別情報を可能な限りコード化し、実使用時のより多品種な情報に対応できるようユーザ領域を確保した。また、各情報をブロック単位で区切ると共にヘッダーを設けることにより、情報の検索や読み書きが瞬時に行えるよう工夫を加えた。表2に実使用時を想定した地上コイル個別情報管理項目例を示す。

表2 地上コイル個別情報管理項目例

地上コイル個別情報管理項目例	
製造	製品情報(コイル種別, メーカー, 製造履歴, 条件) 出荷検査記録(検査年月日, 検査責任者, 電気定数, 部分放電特性, 寸法検査, 耐電圧, その他)
保管	保管責任者, 梱包条件, 保管場所, 保管年月日
敷設	施工情報(施工責任者, 敷設年月日, 周囲温度, ボルト締結トルク, その他) 状態位置情報(敷設場所, 取付面調整量)
保守	点検情報(点検責任者, 点検年月日, 外観, ボルト締結トルク, 電気配線) 補修情報(補修責任者, 補修年月日, 耐候性塗装)
運用	コイル移設(作業責任者, 移設年月日, 移設理由) コイル取替(作業責任者, 取替年月日, 取替理由) コイル取付情報(取付場所, ボルト締結トルク)

3.5 個別情報管理装置の構成

個別情報管理装置は、地上コイルに内蔵された「ICタグ」、無線LANを介したデータ転送機能を有する「地上コイル個別情報読み書き装置」、取得データに基づくデータベースの自動作成や任意のデータ検索が可能な「転送データ管理装置」から構成される(図6参照)。なお、本個別情報管理装置では、運用上の工夫により情報管理のみに止まらず、現地保守点検作業時の「作業指示



図6 地上コイル個別情報管理手法の構成

特集：浮上式鉄道技術とその応用

装置」²⁾として活用することも可能である²⁾。

4. 地上コイル自己診断手法の検討

4.1 地上コイル自己診断の概念

地上コイルに関するこれまでの各種加速劣化試験から、不具合発生時の前兆として、モールド樹脂の歪み変化、振動増加、温度上昇異状等が認められている。そこで、センサと情報処理部を一つのチップに集積した小型センサを開発し、コイル成形時に内蔵することにより、コイル自身が発する多種多様な情報を外部から収集することが可能となる。

これにより、作業者が徒歩巡回による目視点検で判断していたコイル異状の有無を、地上コイル自らが情報を発信できれば、トラブルを未然に防ぐことが可能となる。但し、地上コイルの自己診断手法においては、構造物等で検討されているヘルスマonitoringシステム等とは次の点において監視条件が異なる。

- (1) 構造物等のヘルスマonitoringが一般的に静的状態監視であるのに対し、地上コイルの自己診断は、車両通過時の動的挙動を監視する必要がある。
- (2) 異常検知センサの設置対象が特別高圧機器である。
- (3) ICタグと同様に、異常検知センサが超電導磁石通過時の変動磁場に曝される。

図7に車両通過時の動的挙動監視を概念的に示し、以下にデータ取得手順を概説する。

例えば、①地上コイルに内蔵した異常検知センサが、車両通過時の電磁加振による振動加速度を測定し、ピーク値をメモリに保存する。②列車通過後、ガイドウェイ上の一定間隔に設けられたデータ収録ポストにデータを転送する。③深夜の運行休止時間帯に、地上コイルデータの集録・解析装置を搭載した保守用車両を走行させ、取得データを元に異状の有無を即座に確認する。これにより地上コイルの点検時間を大幅に短縮できるばかりで

なく、作業者による技量の差や見落としがなくなり、飛躍的な信頼性改善を図ることが可能となる。

なお、地上コイル自己診断の実現には小型かつ高機能な異常検知センサの開発が鍵となる。

4.2 地上コイル自己診断の対象

超電導磁気浮上システムに適用される地上コイルは鉄心のない空芯コイルであるため、車上の超電導磁石との間に働く繰り返し電磁力は巻線コイルに分布荷重として加えられる。そのため、巻線コイルを保持するモールド樹脂には、屋外使用による環境負荷に加え、機械的ストレスと電氣的ストレスが同時に加わり、安定運用に向けた動的挙動を監視する必要がある。

特に高速車両通過時の電磁加振環境は地上コイル特有であり、締結部近傍を主体とする地上コイル各部の固有振動数が加振周波数レベルまで低下し、想定外の共振現象を起こすことがないように管理する必要がある。

ここでは、診断すべき各種挙動の中から、最もトラブルに繋がる可能性の高いボルト締結部近傍の振動加速度を優先し、地上コイル自己診断の対象とした。

4.3 電源装置の基礎検討

地上コイルは長期間の屋外使用が前提となるため、異常検知に必要な構成部材は可能な限り小型化し、巻線コイルの樹脂成形時に埋め込むことにより、環境劣化の影響が最小限となるよう工夫する必要がある。

センシングやデータ伝送に必要な電源部も同様であるが、電池ではせいぜい数ヶ月～1年程度しか寿命が見込めず、埋込を前提とした長期運用には適さない。そこで、地上コイルに通電されるLSM電流（車両に推進力を与えるために通電される三相交流）により発生する交流磁場を利用した電磁誘導発電及び振動発電を対象に電源装置を検討した³⁾。

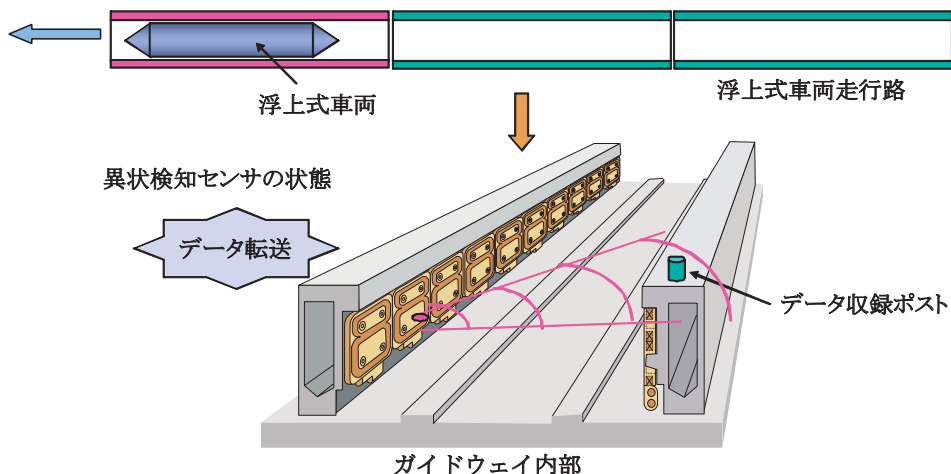


図7 車両通過直後のデータ転送イメージ

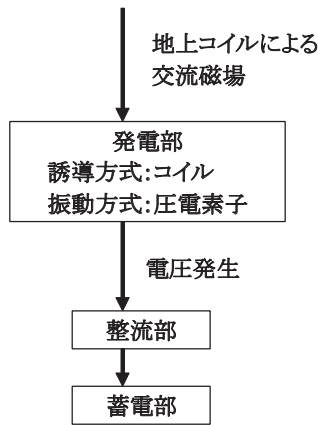
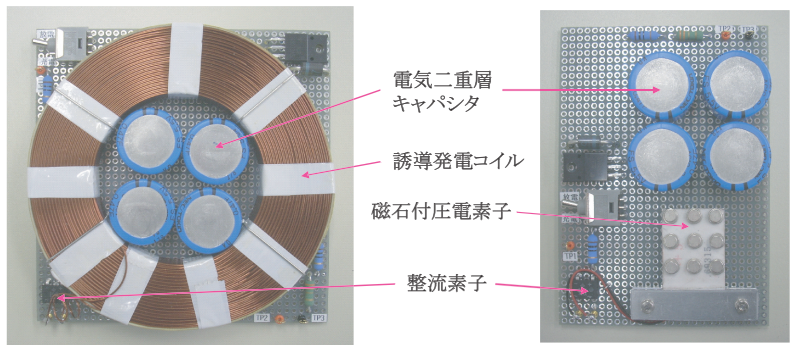


図8 電源装置の構成概念



(a) 電磁誘導発電方式

(b) 振動発電方式

図9 試作電源装置の外観

4.3.1 電源装置の試作

開発の第一ステップとして、PLGコイルの上側単位コイル窓部への組み込みを想定した各発電方式の電源装置を試作した。電源装置は発電部、整流部、蓄電部から構成され、個々の地上コイル内での単独運用を前提とした。図8に電源装置の構成概念、図9に試作機の外観を示す。

4.3.2 電源装置の性能

試作機の性能評価により所期の特性が得られた電磁誘導発電方式について、電源装置の充放電特性を確認した。

(1) 充電特性

電源装置を地上コイルの上コイル窓部中心に取り付け、地上コイルに定格および定格の1/2の交流電流（周波数40Hz）を5分につき10秒間通電（実走行を想定）し、蓄電部の充電電圧を測定した。なお、所要充電電圧は蓄電媒体である電気二重層キャパシタの耐電圧を考慮して10Vとした。充電特性から、定格電流による磁場条件では2回、定格電流の1/2では7回の通電で充電電圧が所定の10Vに達した（図10参照）。

(2) 放電特性

蓄電部の初期電圧を10Vとし、出力電圧3.3Vの固定電圧レギュレータによる出力電流が約250mAとなるような抵抗を接続した回路構成にて放電を行い、出力電圧が3.3Vを下回るまでの時間を測定した。蓄電部の放電特性を図11に示す。3.3V（約250mA）の放電が10.3秒間持続し、蓄電容量が約2500mAsであることを確認した。

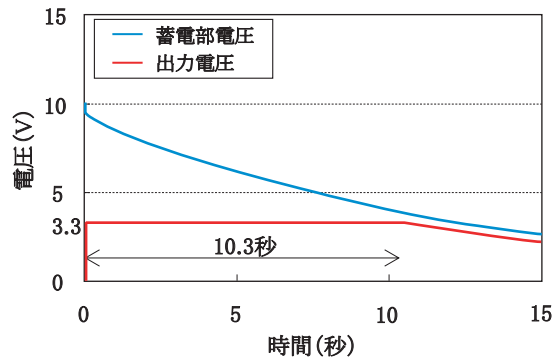


図11 蓄電部の放電特性

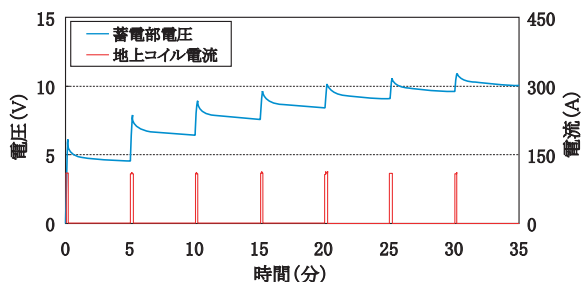


図10 蓄電部の充電特性

4.4 異常検知センサの開発

地上コイルの動的挙動監視にスマートセンシングの概念を適用しようとした場合、前述のように小型かつ高機能な異常検知センサの開発が不可欠となる。また、長期屋外環境で機能させるためには、構成要素である電源部、センサ部、信号処理部、データ記憶部、データ伝送部等を小型化し、異常検知センサとして集約、モールド樹脂内への埋込使用を検討する必要がある。本開発では、MEMS（微小電気機械素子）センサを活用し、地上コイル埋込時の単独運用を想定した評価用異常検知センサを試作した⁴⁾（図12）。

また、当該センサをPLGコイル口出し部に固定し、電磁加振試験による動作確認を行った。その結果、構成要

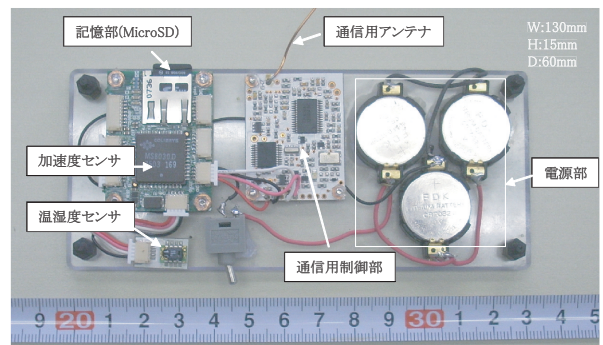


図12 評価用異常検知センサ外観

特集：浮上式鉄道技術とその応用

素である電源部、センサ部、データ記憶部、データ伝送部が高磁場中でも問題なく、組合せ状態で異常検知センサとして機能することを確認した。

5. 今後の進め方

5.1 ICタグを利用した個別情報管理手法の開発

これまで、地上コイル個別情報管理手法の開発に関し、最新かつ正確なデータベースの一元管理による現地保守作業の簡素化を目指し、実用化への見通しを得た。

今後は、保守用車両に搭載可能な地上コイル個別情報読み取り装置(図13参照)を開発し、保守用車両走行中に任意のタグ内情報を読み取り、表示させる機能を付加する予定である。これにより、地上コイルの位置検索や保守作業後の点検確認支援が可能となる。

一方、地上コイルの保守管理をより効率的に進める上では、地上コイル自己診断技術との連携を図ることが重要であると考えられる。例えば、異常検知センサから発信されたデータを基に特定地上コイルを探索する場合、上記の位置検索機能を活用することにより、対象コイルを迅速に特定でき、タグ内コイル情報の詳細表示から、過去の保守履歴を基に的確な対応が可能となる。

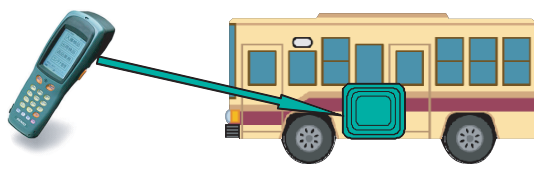


図13 保守用車両への搭載イメージ

5.2 地上コイル自己診断手法の開発

地上コイルの自己診断に適用する異常検知センサは、屋外での長期使用を考慮すると、前述のように成形時にモールド樹脂内への埋込が不可欠である。従って、センサの構成要素である電源部、センサ部、信号処理部、データ記憶部、データ送信部等は極力小型かつパッケージ化し、単独運用が可能となるよう工夫が必要である。図14は電源装置の小型化例であり、誘導発電用コイルの巻枠に磁性材料を適用することにより、機能低下なく面積比で従来の約1/3に縮小させた開発例である。

一方、地上コイルに埋込可能な異常検知センサには運用、コスト面で制約があり、仮に全コイルを対象とした場合は、コイル当たり1個程度に限定せざるを得ないものと想定される。そのため、センサを内蔵する代表点においては可能な限りコイル各部の挙動を把握する必要があり、定置試験による事前検証が不可欠である。また、コイル種別や使用環境に適したセンサおよび設置条件の選定が重要であり、地上コイル自己診断の監視精度に関わる今後の課題でもある。

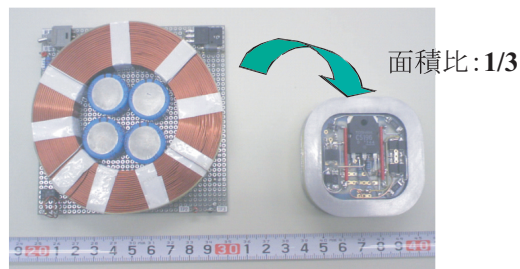


図14 センサ用電源装置の小型化例

6. まとめ

現地に敷設された膨大な数の地上コイルを適正かつ安定的に保守・運用するためには、これまでにない新たな管理手法を導入する必要がある。そこで、ITを活用した地上コイルの保守管理手法に関する基礎開発を行った。

まず、地上コイル個別情報の一元管理を目指し、ICタグを利用した個別情報管理手法を検討した。ICタグの各種検証や個別情報管理装置の開発から、情報管理の高信頼化、簡素化において有効性を確認し、実用化への見通しを得ることができた。

次に、トラブルの未然防止に向け、コイル自身で異常を検知・発信させる究極の挙動監視システムを目指し、地上コイル自己診断手法を検討した。概念設計に基づく要素開発により、センシング用電源装置の小型化を図り、地上コイルへの埋込を前提とした異常検知センサの単独運用に向け、機能上の見通しが得られた。但し、本診断手法の開発はまだ緒に就いた段階であり、センサ自体の小型汎用化が進む中、異常検知センサとしての信頼性確保が何より重要であると考えられる。

7. 謝辞

本開発を進めるに当たり、ご協力頂いた(株)ジェイアール総研情報システム、フェニックス電子(株)、(株)ユービックシステム、(株)テスの関係各位に感謝の意を表します。なお本研究は、国土交通省からの国庫補助を受け実施した。

文献

- 1) 饗庭雅之 他：表面保護層付き浮上式鉄道用推進・浮上・案内兼用地上コイルの開発，鉄道技術連合シンポジウム講演論文集，pp.319-320，2007
- 2) 鈴木正夫 他：ICタグを利用した地上コイル個別情報管理装置の開発，鉄道技術連合シンポジウム講演論文集，pp.605-606，2007
- 3) 饗庭雅之 他：地上コイルの異常検知に向けたセンシング用電源装置の検討，鉄道技術連合シンポジウム講演論文集，pp.159-160，2008
- 4) 鈴木正夫：ITを活用した地上コイルの保守管理手法に関する検討，第223回 鉄道総研月例発表会講演要旨，pp.19-22，2009.5