

# 地上コイル電磁加振試験による動的耐久性評価

鈴木 正夫

浮上式鉄道技術研究部(電磁路技術 研究室長)



すずき まさお

## はじめに

超電導磁気浮上式車両には鉄車輪やパンタグラフが無く、地上とは完全非接触の状態を超高速走行を実現しています。これを可能にしているのが「地上コイル」と呼ばれる電磁石です。地上コイルは、走行中の車両を支持案内する浮上案内用コイルと車両に動力を与える推進用コイルに分類できます(図1)。強いて在来鉄道に例えると、前者は鉄レールに、後者は架線や車両用モータの電機子コイルに相当します。軌道の全線に亘って敷設されるこれらの地上コイルは、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ります。従って、地上コイルの開発においては、コスト低減に加え安定した性能と高い信頼性の確保が重要なポイントとなっています。<sup>1)</sup>

また、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を保持するために巻線コイルを樹脂で一体成形(モールドとも呼びます)する必要があります。当然ながら、成形材料にはコイルの機械的強度に加え電気絶縁機能も要求されるわ

けです。そのため、地上コイルの実用化に際しては、図2に示す劣化プロセスを踏まえ材料レベルから実機に至るまで、営業線運用を想定した種々の耐久性試験により、機械的・電氣的観点での信頼性を検証する必要があります。

## 地上コイルの耐久性検証への取組

膨大な数が対象となる地上コイルは、コスト低減のため限界設計が求められている点は言うまでもありませんが、空芯コイルでありながら機械的・電氣的・環境的負荷が長期間に亘って複合的に加わる使用条件は、モールド機器として極めて異例であると言えます。そのため、これら地上コイルの信頼性を如何にして検証すべきかがシステムの実

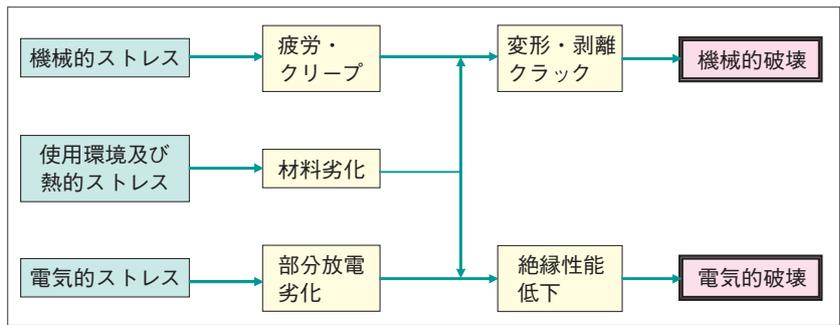


図2 地上コイルの劣化プロセス

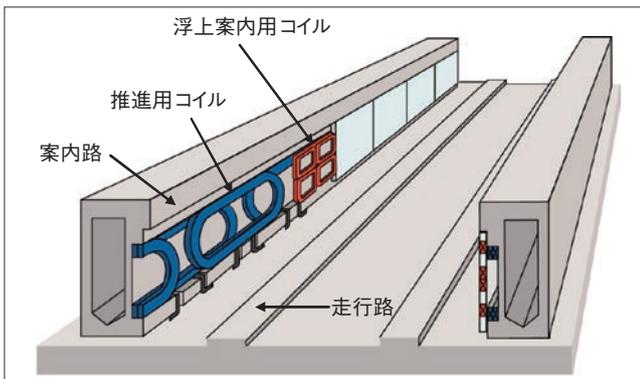


図1 地上コイル及びガイドウェイ構成

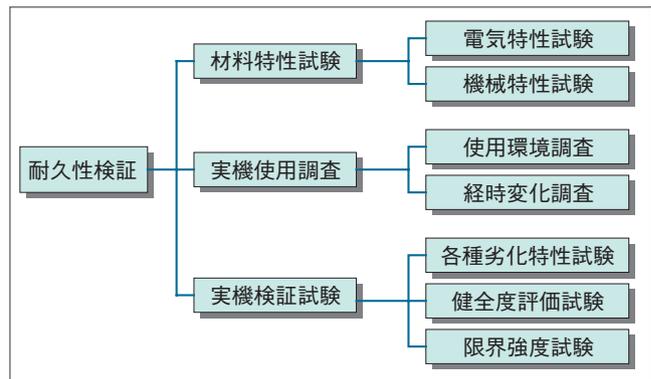


図3 耐久性検証の基本構成

用化に向けた重要な課題であり、独自の検証手法を体系化する必要があります。

地上コイルの耐久性検証では、これまで図3の基本構成に示すように、走行試験に基づく実機使用調査結果をベースに材料特性試験、実機検証試験を並行実施しています。<sup>2)</sup> これらの試験、調査では、互いに評価の妥当性を考慮し、得られた結果を相互に反映し合いながら進めることが肝要となります。特に、地上コイルは車両通過時の電磁力により加振されるため、振動に対する耐久性を検証することは、システム全体の信頼性を確保する上で極めて重要です。ところが、これまでの定置試験では高速走行を模擬した高周波での加振が困難で、低周波での機械加振に頼らざるを得ませんでした。

### 地上コイル電磁加振試験装置

そこで私たちは、超電導磁石に地上コイルを対向設置

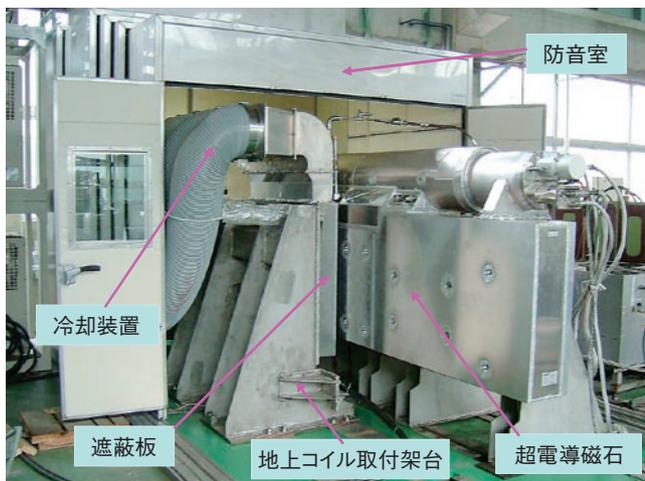


図4 電磁加振試験装置の外観

し、インバータ電源から任意の電流を通電することにより、定置にて実走行が模擬できる「地上コイル電磁加振試験装置」(図4)を開発しました。この試験装置は従来の機械的載荷と異なり、コイルの巻線導体に直接電磁力を加えられる点が大きな特徴で、荷重分布や加振周波数において実走行とほぼ等価な加振が可能となりました。要素機器としては図5に示すように、実車と等価な磁場分布を発生させるための超電導磁石、地上コイルに加振用電流を供給するインバータ電源、地上コイル取付架台、アルミ遮蔽板等で構成されています。また長期運転を考慮し、連続試験中の騒音抑制と試験準備の作業性を両立させた伸縮可動式防音室、加速試験時の電流密度増大に伴う地上コイルの温度上昇抑制用地上コイル冷却装置等についても装備しています。<sup>3)</sup>

また、この試験装置にはもう一つ重要な工夫が盛り込まれています。それは、走行中の車両は波に乗ったサーファーと同じように、地上コイルの作る移動磁場と同期して移動するため、車上からは地上コイルの移動磁場は止まっているかのように見え、超電導磁石に生ずる振動は極わずかで済みます。ところが、定置試験では車上の超電導磁石も固定されるため、地上コイルが作る変動磁場は超電導磁石にとって設計想定外の過大な加振源となります。これを回避する役割を担っているのが、構成図中で地上コイルを覆っている電気アルミ製の遮蔽板です。これは、図6に示すように、超電導磁石からの強力な直流磁場は地上コイル側に通過しますが、地上コイルの作る変動磁場は板に生ずる渦電流により遮蔽され超電導磁石側には到達しません。つまり、遮蔽板という画期的なフィルターにより超電導磁石への過大な振動を与えることが無く、長期に亘る試験が可能となるわけです。

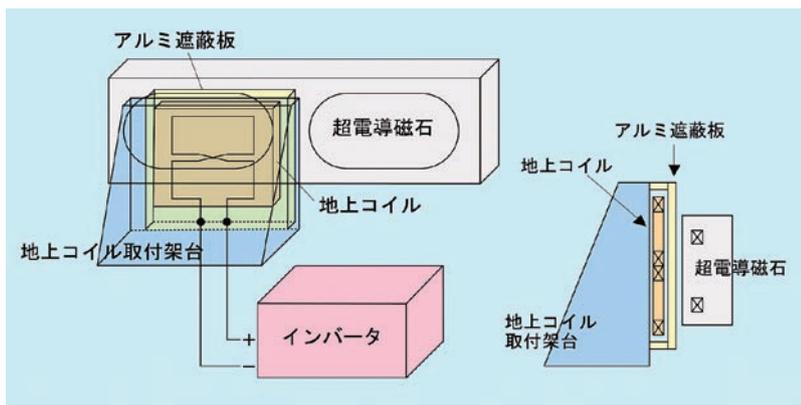


図5 電磁加振試験装置の構成構成

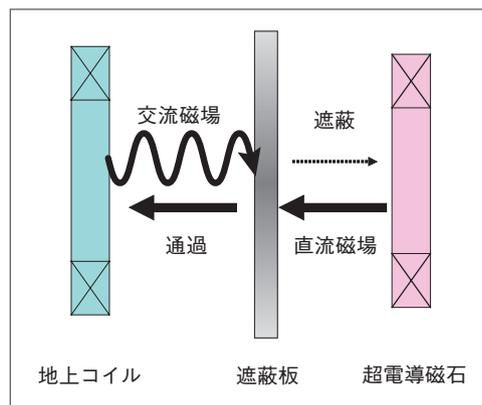
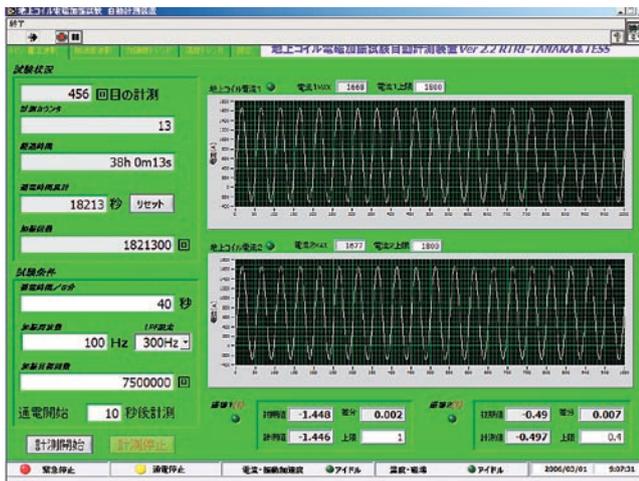
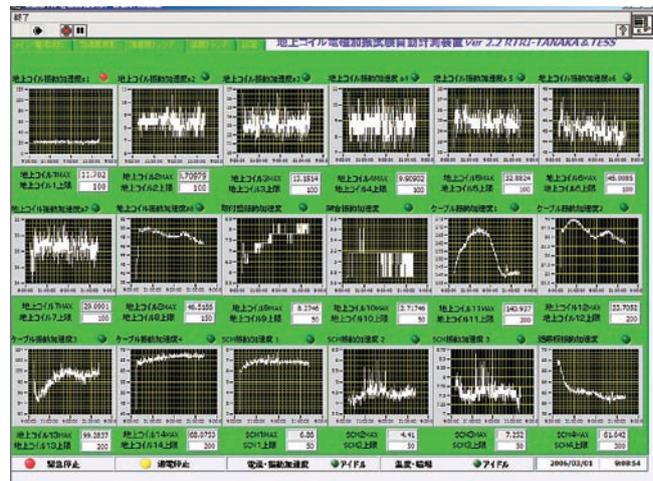


図6 遮蔽板の効果



(状態監視画面例)



(データ収録画面例)

図7 自動計測監視システム制御画面例

さらに本試験装置では、供試体各部に配置したセンサからのデータを基本に、インバータ電源の通電制御機能、計測データ収録機能、状態監視機能から構成される自動計測監視システム(図7)を開発しました。もちろん、冷媒用冷凍機が搭載された超電導磁石についても同様な状態監視機能が構築され、併せて無人運転による長期耐久性試験が可能となっています。

### 電磁加振試験装置による耐久性評価手順

高速域までの実走行が模擬できる本試験装置では、これまで定置では難しかった地上コイルの締結部やケーブル接続部の動的特性が把握でき、長期運用を想定した耐久性評価手段としても有効に活用できます。図8に地上コイルの動的耐久性試験に関する評価手順の一例を示します。

手順(2)の各種特性測定では、長期試験時の加振条件を

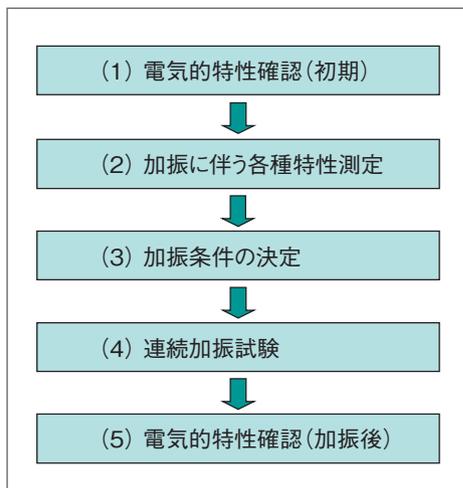


図8 動的耐久性評価手順

決定するためのデータとして、荷重変換器を用いた3分力(前後、左右、上下)、振動加速度の周波数特性、通電条件による地上コイルの温度上昇特性、加振時の振動加速度、発生応力等を測定し、予め設計の妥当性を確認しておきます。図9は本試験装置を用いた特性例で、推進用コイル下部の振動加速度の周波数特性を示すもので、インバータ電源からの加振周波数を連続的に変化させることにより得られる特性です。これにより、使用速度域での共振点の有無や振動の程度が推定でき、改良設計へのフィードバックが可能となります。

### 地上コイル締結部の動的耐久性評価

ここで、本試験装置を用いた評価例として、地上コイル締結部の耐振動性について紹介します。樹脂で一体成形された空芯コイルを屋外の振動環境下で長期間に亘って使用する

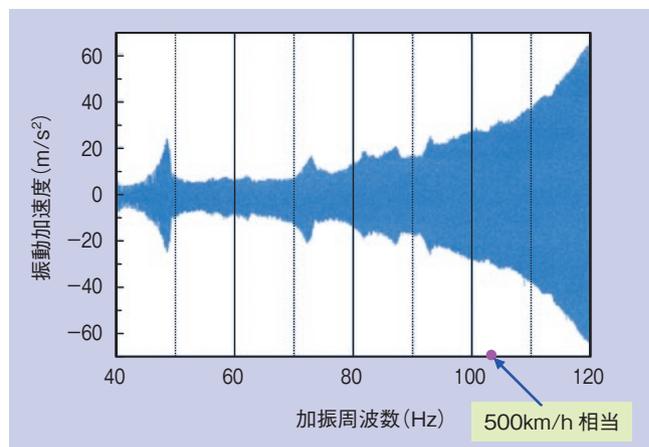


図9 推進用コイル振動加速度の周波数特性

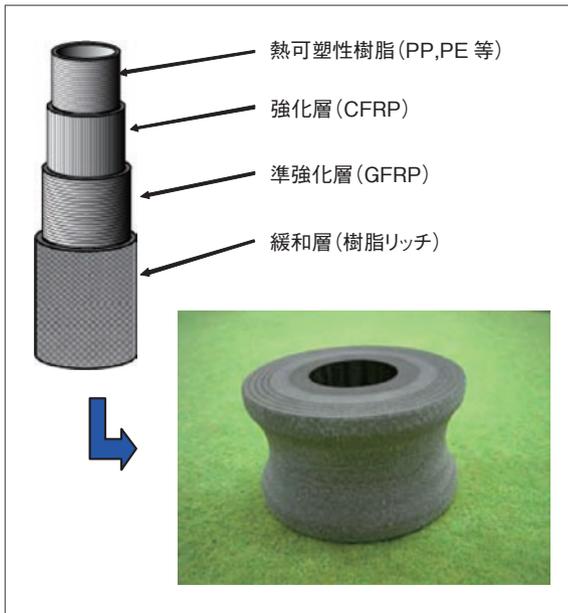


図10 積層型FRPブッシュの構成

るわけですから、締結構成の良否が営業時の保守管理コストやシステムの信頼性そのものを左右する重要な要素であるのは当然です。鉄道総研では、これまでの締結部には無かった全く新しい概念の積層型FRP (Fiber Reinforced Plastic) ブッシュと呼ばれる締結部を開発しました(図10)。<sup>4)</sup>

適材適所なる言葉がありますが、正にその通り必要な強度部材を必要な特性に応じて積層配置した当締結部を地上コイルの一部に適用し、電磁加振試験により従来の締結構成との比較評価を行いました。なお、試験条件は次の通りです。

- ①電磁力：位相ズレを考慮した設計最大左右力
- ②加振回数：山梨実験線にて5年間走行相当
- ③加振周波数：113Hz (550km/h相当)

電磁加振による連続試験の結果、従来の締結部構成では、締結部材と成形樹脂との界面に加振に起因するものと考えられる緩みが発生しました。一方、開発品であるFRPブッシュにおいては、緩みやき裂、ボルト締結トルクの低下もなく、開発品の優位性が確認できました。

図11は、電磁加振試験後の供試コイル外観を示すもので、地上コイル取付架台から遮蔽板を外した状況です。

### おわりに

以上、地上コイルの新たな耐久性試験装置として、超電導磁石の磁場分布を利用した「地上コイル電磁加振試験装置」並びに「動的耐久性評価」について紹介しました。今後、営業線に向けた各種低廉・高機能コイルの開発が進む中、



図11 地上コイル締結部の動的耐久性検証例

耐久性確認の必要性は益々高まり、検証方法の確立が急務となっています。そのためには、地上コイルの劣化形態や限界強度を正確に捉えることが耐久性検証のポイントであり、データの蓄積が重要であると考えています。

なお、本研究の一部は国土交通省からの国庫補助を受け、実施したものです。[RRR]

### 文献

- 1) 鈴木正夫：「地上コイルのコスト低減」, RRR, pp.11-14, 2001.9
- 2) 藤本健：「地上コイルの耐久性を検証する」, RRR, pp.4-7, 2001.9
- 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試験装置の開発」, 鉄道総研報告, Vol.20, No.8, 2006.8
- 4) 鈴木正夫, 鈴木裕之, 饗庭雅之, 松江仁, 田中実, 岡田重紀：「地上コイル耐振性締結部の開発」, J-Rail'2006講演論文集, pp.265-266, 2006.12