

推進浮上案内兼用コイル保護層の耐衝撃強度評価

高橋 紀之* 鈴木 正夫* 饗庭 雅之*

Shock Assessment-resistant of a Surface Protection Layer for the Maglev System Ground Coils

Noriyuki TAKAHASHI Masao SUZUKI Masayuki AIBA

With respect to the superconducting maglev system, there is a ground coil (a PLG coil) to perform three functions of propulsion, levitation and guidance which the R.T.R.I has developed for construction cost reduction by way of reduction of the numbering coils. The coil has a protective layer on surfacing the vehicle side, aiming for the protection of its surface and prevention of electric shock.

We performed an impact resistance test to evaluate this surface protective layer. As a result, we confirm that the coil covered by the protective surface layer has about 2 times strength in comparison with the coil which is not covered by a protective layer. In this report, we explain the necessity of the protective surface layer, its development process, and its effectiveness too.

キーワード：浮上式鉄道，地上コイル，保護層，衝撃強度

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、長期間の屋外での使用が前提となるばかりでなく、膨大な数が対象となる。したがって、地上コイルの開発においては、コスト低減に加えて安定した性能と高い信頼性の確保が重要であり、材料レベルから実機に至るまで、現地使用を想定した種々の耐久性試験によりこれらの信頼性を検証する必要がある¹⁾。

一方、コスト低減を狙いとした将来向けシステムとして、1つの地上コイルで推進、浮上、案内の3機能を兼用する方式²⁾ (combined Propulsion, Levitation and Guidance system, 以下、PLG方式) が検討されている。PLGコイル外形図を図1に示す。

PLGコイルは図2に示すように、現状のガイドウェイ構成においては、特別高圧機器である推進用地上コイルの外側(車両側)に低圧の浮上案内用地上コイルが設置されている。しかし、本方式では地上コイルが単層配置となるため、特別高圧機器であるPLGコイルが車両面に露出することになり、何らかの保護対策が求められている。

本稿では、PLGコイルを前提とした表面保護層の開発経緯、ならびに保護層付PLGコイルにおける耐衝撃強度評価について述べる。



図1 PLGコイル外形

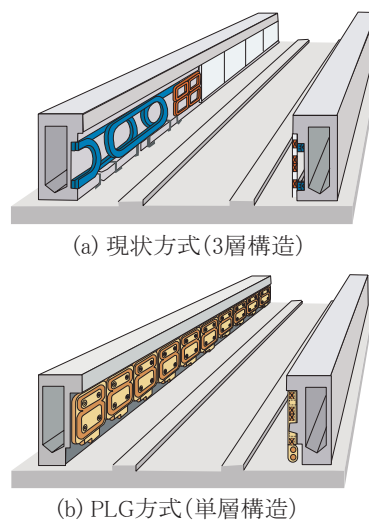


図2 ガイドウェイ構成の比較

* 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

2. 保護層付 PLG コイルの開発

2.1 表面保護の狙い

特別高圧機器であるPLGコイルに表面保護を施し、充電部分を露出しないよう遮断する狙いは、以下の理由による。

(1) ガイドウェイ内の安全確保

推進用地上コイルは、公称電圧22～33kVの特別高圧機器であり、電力変換所からの電力供給時には高電圧が印加される。このためコイルの最外層には、電界緩和用のシールド処理が施される。但し、磁気浮上式鉄道の地上コイルでは、車両の超電導磁石が高速で通過する際の渦電流損失を極力低減させるため、表面のシールド層を高抵抗で構成している。そのため、シールド層を接地しているにも拘わらず、コイル表面電位が上昇することになり、ガイドウェイ内での保守・点検作業に際しての感電防止対策が必要である。

(2) コイル本体の保護

ガイドウェイに設置された地上コイルは、500km/hの超高速列車の繰り返し走行により、走行側表面は絶えず飛来物による危険に曝されている。そのため、ガイドウェイ内の微小ゴミの巻き上げや、車両からの微小部品落下などにより、コイル表面が損傷を受ける可能性は極めて高い。特に車両側に露出した部分では、その成型樹脂（一般的にはエポキシ樹脂モールド）に亀裂発生や絶縁破壊を引き起こす可能性がある。

2.2 表面保護構成方法

表面保護の方法としては、厚さ5～7mmの保護板を準備し、後付によりコイル表面に接着あるいはボルト締結する方法がまず考えられるが、この方法では保守を含めた施工コストが増大するばかりでなく、信頼性においても課題が残る。そこで、本開発においては保護層をコイル成型時に一体化させることとした。

その構成図を図3に示す。車両側表面の接地層～FRP

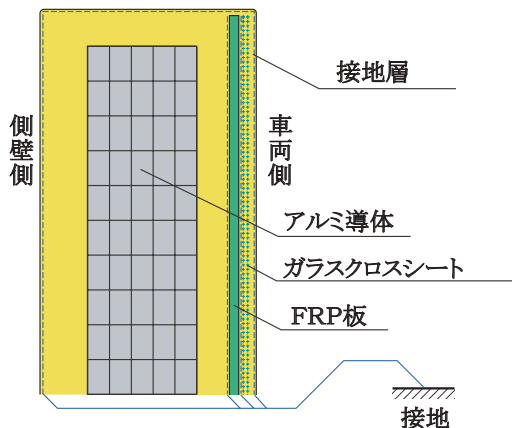


図3 保護層の構成

板までが保護層となる。導電性塗装を施したFRP板と衝撃緩衝材として車両側面に配置するガラスクロスシートとを組み合わせ、コイル成型時に一体化させた。また、FRP板の両面に接地層を設けた。これによりコイル表面を機械的に保護するとともに、内部の高電圧充電部と車両側保護層とを電氣的に絶縁させる機能も持たせている。

3. 地上コイルの耐久性検証

3.1 基本構成

これまで実施してきた地上コイル耐久性検証の基本構成を図4に示す。これまで、材料特性試験、実機使用調査、実機検証試験を軸に、主としてモールド樹脂の耐久性に着目し評価を進めてきた^{3)～5)}。これらの試験、調査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べきであるが、高分子材料そのものの評価の難しさ、等価的試験方法の難しさ等から、データ収集が未だ十分でないものもある。特に複合負荷に対する検証試験では、加速試験の考え方をはじめ、負荷の条件設定や試験構成において、更なる検討が必要であると考えている。

今回、PLGコイルを対象とした実機耐久性検証試験として、図中の「実機検証試験」の「限界強度試験」を実施した。

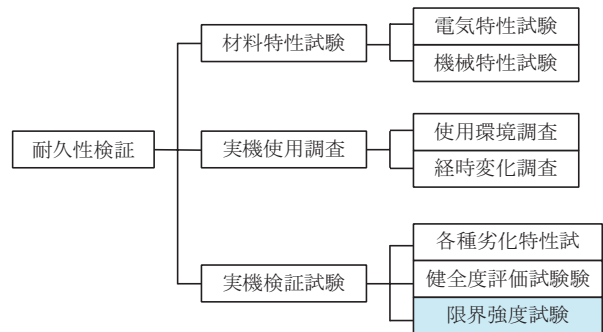


図4 地上コイル耐久性検証の基本構成

3.2 限界強度試験

限界強度試験は、地上コイルに加わる各種負荷に対し、実使用時との等価性を考慮しつつ、所定の各種負荷を加えた後、コイルが所定の機能を保持しているかどうかを確認し、その限界となる強度を評価する試験である。

本試験では、PLGコイルへの負荷として衝撃力を、機能保持として電氣的特性（耐電圧）を評価する試験を行った。

4. 衝撃強度試験内容

4.1 これまでの試験方法

コイル表面の機械的保護機能を確認するため、これまでは図5に示すような試験で落錘による機械的衝撃を与え、試験後の外観・ならびに絶縁破壊強度を調査していた。この試験は、自動車部品に用いられるプラスチック製品の耐衝撃性を検証する試験方法である日本自動車規格のJASO-M312-85：落錘衝撃試験とほぼ同様の試験方法である。しかし、この試験では、質量16kg、高さ1mからの自由落下であり、衝撃エネルギーに制約があったため、限界強度の特定までには至らなかった⁶⁾。



図5 落錘試験の様子

4.2 空気砲による衝撃強度試験

そこで、実負荷との等価性や衝撃エネルギーの強化を考慮し、今回は空気砲を使用した衝撃試験を行った。試験装置の外観を図6に、構成を図7に示す。この装置は、発射物を所定速度で発射させるための空気砲本体、地上コイルを固定するための架台、ならびに発射物・衝突時の破片飛散防止のための防護カバーから構成されている。

空気砲本体は、コンプレッサーを介して圧込めを行い、所定圧力に達すると、空気砲内の針が動作し圧力保持膜

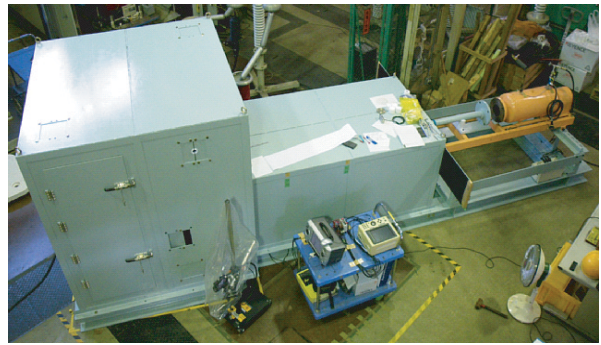
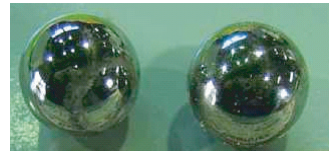


図6 空気砲外観

を突き破り、砲筒内にセットされた発射物が瞬間的に押し出される。これにより、400km/h超の発射速度まで試験を行うことができる。

発射物の選定にあたっては、衝突時の接触条件を統一するために球形とし、その質量については、試験装置の設定最高速度を基に、落錘試験時の最大エネルギーの2倍を超えること、球径については、落錘試験時の先端形状の球径(図8(b)に示すような直径15mmの球形に加工した面を落下面とした形状)となるべく同じにすることを勘案し、図8(a)に示すような直径22.2mm、質量44.66gのベアリング鋼球(以下、鋼球とする)として、



(a) ベアリング鋼球



(b) 錘：球形加工

図8 発射物の先端形状

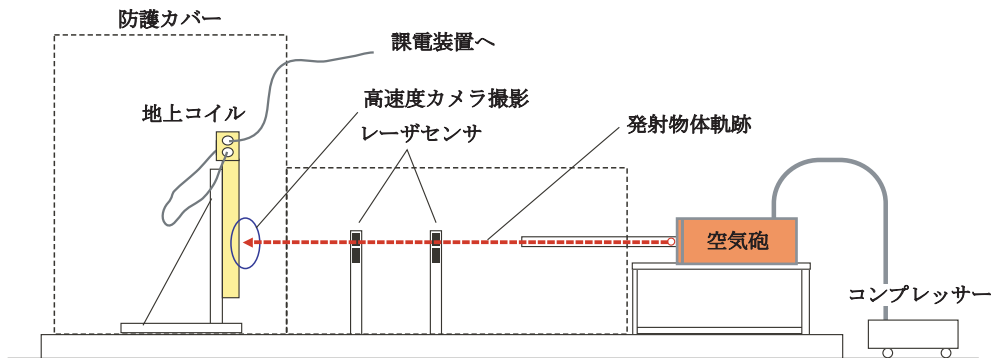


図7 衝撃試験装置の構成

特集：浮上式鉄道技術とその応用

試験・評価を行った。

試験時の発射速度については、圧力保持膜厚（セロハン枚数）と圧縮空気圧を予め設定して予備試験を行い、その関係を求めた。膜厚一定の場合、圧縮空気圧と発射速度との関係は図9のように概ね比例することがわかったため、このグラフから膜厚と圧力を設定した。また、地上コイルを固定する架台は回転可能な構造となっており、発射物をコイル表面に斜めに当てることも出来るようにした。

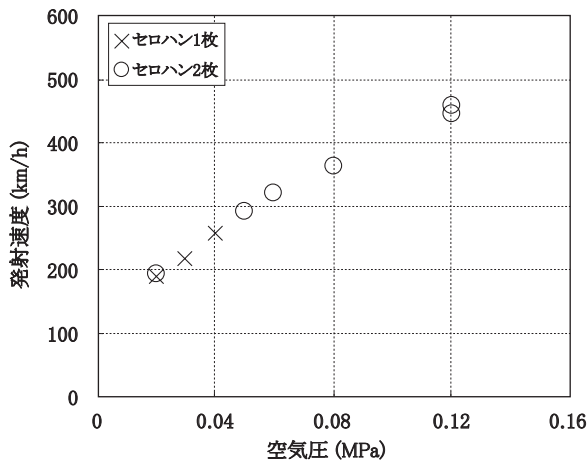


図9 発射速度と空気圧との関係

4.3 測定内容

今回の試験では、保護層ありのコイルと保護層なしのコイルを供試体として選定した。

鋼球が通過する箇所にはレーザーセンサを前後2箇所設置し、その通過時間から鋼球の速度を測定した。また、防護カバーの一部に確認窓を設け、その箇所に高速度カメラをセットし、鋼球が地上コイルに衝突する際の状況を動画で記録できるようにした。

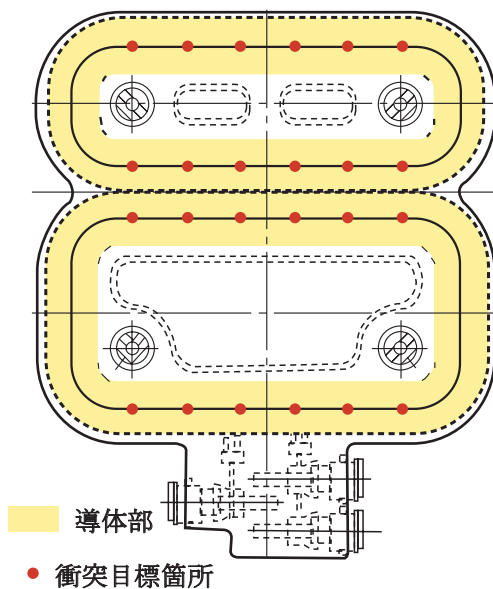


図10 衝突目標箇所

鋼球の衝突目標地点は、図10に示すような導体が横方向に通過する各辺の導体中央付近とし、発射毎に約100mmずつ位置変更を行った。

なお、衝撃負荷に対するコイルの健全性を判定するため、衝撃試験毎に、アルミ導体～アース間にAC33kV／1分間を印加し、絶縁破壊の有無を確認した。これら主要な試験条件を表1に示す。

表1 試験条件表

発射物	ベアリング鋼球
	質量 44.66g 直径 22.2mm
発射目標速度	高密度発泡スチロール
	長さ 50mm 直径 65mm
対象物	100～450km/h (約50km/h刻み)
	PLGコイル (保護層あり)
	PLGコイル (保護層なし)

5. 試験結果および考察

5.1 コイル表面の破壊状況

コイル表面の破壊状況は、図11に示すとおりである。保護層あり、なしコイル共に、概ね速度が高くなるとともに、破壊の度合いも大きくなっている。

保護層なしコイルは、速度が高くなると、その損傷部位の面積が大きくなり、かつ損傷深さも大きくなる傾向がある。また、衝突点を起点に、クラック（ひび割れ）が長く進展する傾向が認められる。保護層ありのコイルについては、FRP板の手前に設置されているガラスクロスシートが、大きな損傷を防いでいるとともに、衝撃エネルギーを吸収するものと考えられ、クラックの発生が認められなかった。

5.2 高速度カメラによる撮影結果

試験における、高速度カメラによる衝突時の状況を図12に示す。

実際には、動画としての撮影であるが、ここでは主要な試番における静止画を掲載する。ただし、撮影順序は行毎に左から右へ、一部撮影コマ数を飛ばしているため、均等な時間配列とはなっていない。

撮影フレーム数は1秒間に4000コマあるいは8000コマである。

写真に見える白い円筒状の物体は、鋼球とともに発射される発泡スチロールである。発射後の空気抵抗により、鋼球と分離され、鋼球よりも後から衝突し、その衝突ではコイル自体に損傷を与えないことが、衝突直後の写真から判断できる。

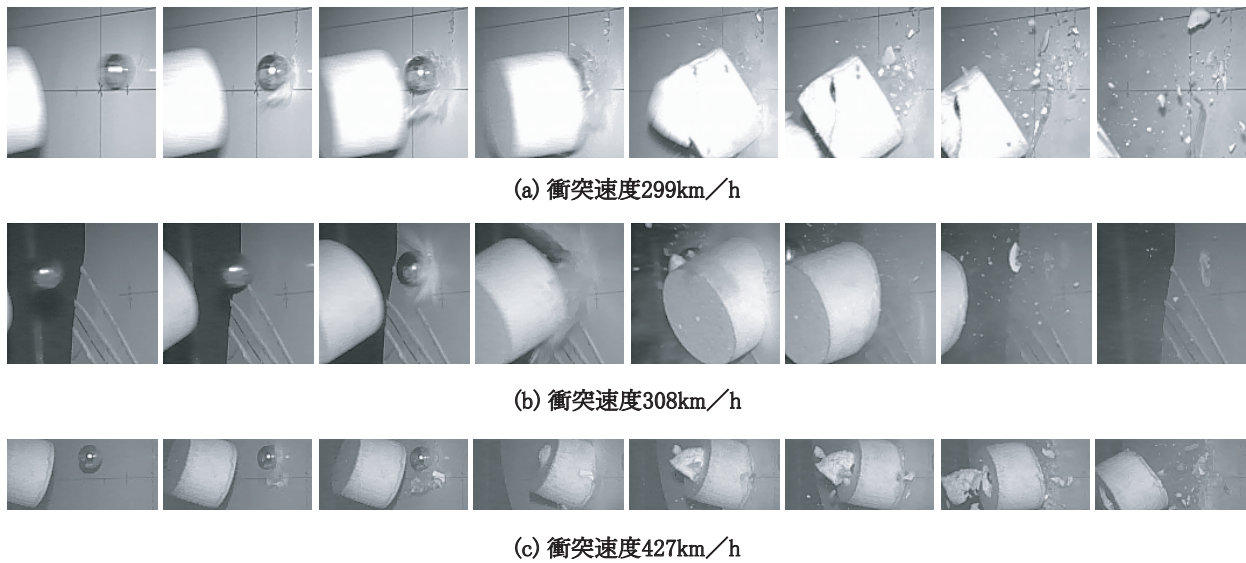


図 12 高速度カメラによる撮影結果

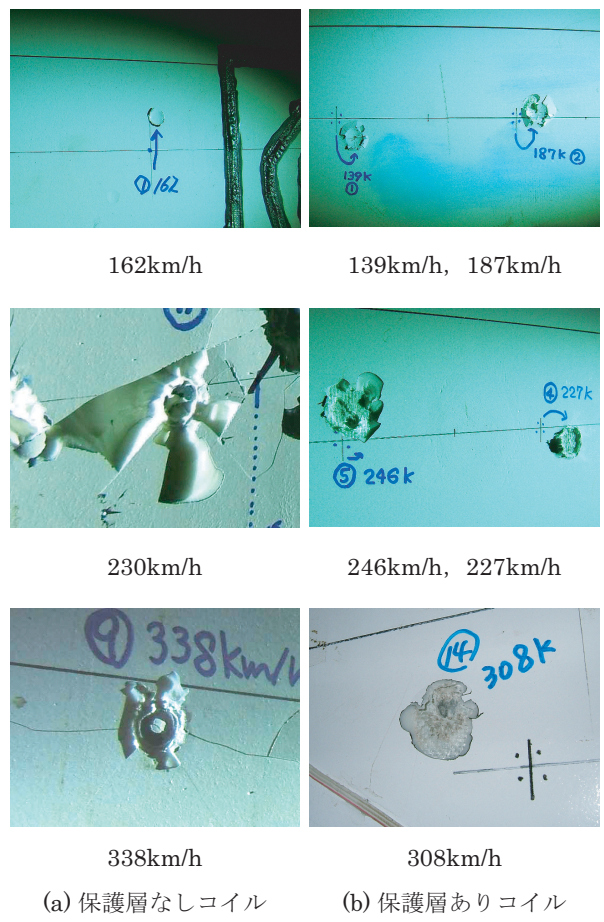


図 11 コイル表面の破壊状況

衝突の瞬間を撮影できるとともに、その直後にコイル表面が衝突の衝撃により、かなり細かく破片が飛散する様子が確認された。

5.3 限界強度試験結果

限界強度試験については、保護層の有無合わせて4コイルについて行った。

その結果は表2のとおりである。保護層なしのコイルは227km/hで絶縁破壊しているが、保護層ありのコイルについては、概ね300km/h前後で絶縁破壊しており、明らかな優位性が認められた。衝撃エネルギーに換算すると、おおよそ2倍の耐衝撃強度を有する結果となった。

取付部材等で多用されるM10サイズのナットが、仮に車両通過時の巻き上げなどで地上コイルに衝突した場合を想定すると、その衝撃エネルギーは速度500km/hの場合で109.3Jとなる。本結果はその衝撃エネルギーを1.39倍以上上回っており、実使用上においてもその効果が期待できる。

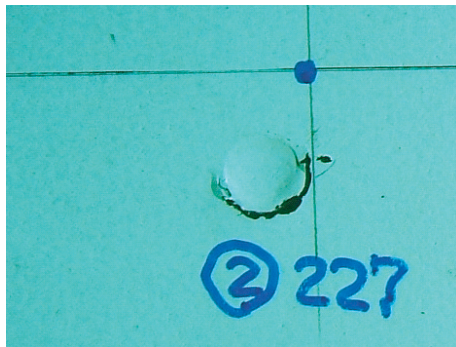
絶縁破壊時の電圧印加前後の地絡発生箇所の状況を図13に示す。衝撃を与えた箇所において地絡が発生していることがこれにより確認できた。

今回使用した鋼球と表2に示す衝撃エネルギーの結果によって、想定される飛来物の影響を概ね予測できるようになったと考える。

表 2 限界強度試験結果

コイル番号	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
保護層の有無	なし	あり		
最終速度 (km/h)	227	332	312	298
衝撃エネルギー	88.8J	189.9J	167.7J	153.0J

特集：浮上式鉄道技術とその応用



(a) 地絡発生前(試験前)



(b) 地絡発生後(試験後)

図 13 地絡発生箇所の様子

6. まとめ

高機能地上コイルを対象に、表面保護層の耐衝撃強度を評価するための耐衝撃強度試験を行った。その結果をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 本試験により、これまでに行ってきた試験に対し、およそ2.2倍までの衝撃エネルギーによる測定が可

能で、保護層付PLGコイルの衝撃負荷に対する限界強度を把握することができた。

- (2) 保護層の有無により、破壊の形状に違いが認められた。
- (3) 保護層ありのコイルは、保護層なしのコイルに比べ、概ね2倍以上の耐衝撃強度を有し、表面保護層の衝撃緩衝効果が確認できた。

この研究は、国庫補助金を受けて実施した。

文献

- 1) 鈴木正夫：「地上コイルモールド樹脂の環境劣化特性」鉄道総研報告，Vol20，No.8，2006.8
- 2) 村井敏昭：推進・浮上・案内を兼用するリニア同期モータの特性，電気学会論文誌，Vol.114-D，No.7/8，pp.746～747，1994.7/8
- 3) 鈴木正夫，鈴木裕之：実使用地上コイルの絶縁特性変化，平成11年電気学会全国大会講演論文集，No.395，pp.2-164，1999.3
- 4) 鈴木正夫，藤本健：RIM方式地上コイルの耐久性検証，第8回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集，S4-1-7，pp.169～170，2001.12
- 5) 鈴木裕之，吉川恵三：超電導磁気浮上式鉄道用地上コイル樹脂の機械的疲労強度評価，第27回疲労シンポジウム講演論文集，No.101，pp.1～3，2004.11
- 6) 鈴木正夫，饗庭雅之，田中実，岡田重紀：表面保護層付PLGコイルの基礎開発，鉄道技術連合シンポジウム（J-RAIL2005），S4-1-7，pp.21～22，2005/12