

電磁波検出による推進系地上コイルの新たな絶縁診断手法

浮上式鉄道技術研究部 山梨実験センター

所長 鈴木 正夫

1. はじめに

浮上式鉄道用地上コイルは、長期間の屋外使用に加え膨大な数が対象となるため、安価で信頼性の高いものが要求される。特に推進系コイルでは、特別高圧機器としての絶縁安定性が重要となる。ところが、リニアモータの構成要素である当該コイルへは、車両走行に伴うモータとしての負荷（逆起電力）が存在しないと変電所から所定の加圧ができず、現地での絶縁診断が困難な状況となっている。ここでは、現地の地上コイルを在姿状態で評価可能な新たな絶縁診断手法について紹介する。

2. 電磁波検出による地上コイルの絶縁診断

2.1 推進系地上コイルにおいて考慮すべき絶縁異状

推進系地上コイルの運用において考慮すべき絶縁異状は、モールド内部に存在する内部欠陥とそれ以外の外部欠陥に分類できる。前者は、ボイドや異物片混入、導体と樹脂界面の剥離等が考えられ、後者はコイル表面シールド層の剥離やケーブル接続部の施工不良等が考えられる。

2.2 欠陥模擬コイルの部分放電特性

PLG (Combined Propulsion Levitation and Guidance) 方式と呼ぶ3機能兼用コイルを対象に内部欠陥を模擬した地上コイルを製作し、絶縁特性評価のための供試コイルとした。人工欠陥にはボイドを選択し、高電圧印加時の電界集中により当該部位からの部分放電発生を意図した。欠陥部の設定は、予め巻線コイルの位置決め用スペーサ内に直径約0.5mmのボイドを有する樹脂片を埋込成形し、これを巻線コイルの一体成形時に金型内の特定部位にセットすることにより、内部欠陥模擬コイルとした。図1に供試コイルの部分放電特性を示す。

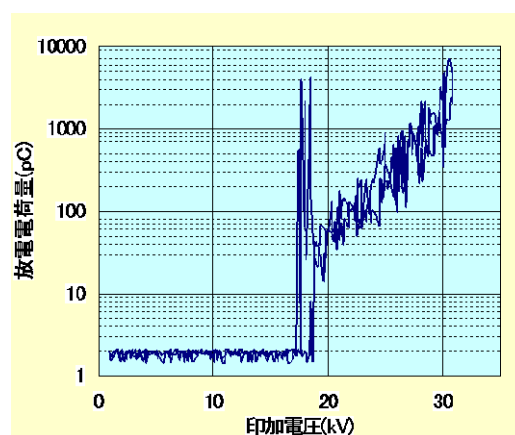


図1 欠陥模擬コイルの部分放電特性

2.3 部分放電検出による欠陥位置標定

高電圧機器を構成する絶縁材料の欠陥や劣化に伴って生ずる部分放電は、広帯域の電磁波を放射することが知られている^{1),2)}。そこで、地上コイルの内部欠陥から発せられる部分放電の発生源の位置を複数のダイポールアンテナを用いた電波干渉計システムにより標定した。

部分放電発生源の標定概念(図2)に示すように、部分放電発生源の近傍に2本のダイポールアンテナを設置し、部分放電に伴う電磁波の信号強度を測定する。また、アンテナで受信した電磁波はデジタルオシロスコープに記録し、2本のアンテナ間の到達時間差(遅延)を上記のデジタルデータから計算する。アンテナ1への電磁波の到達時刻を T_1 、アンテナ2への電磁波の到達時刻を T_2 として到達時間差を $\tau_d = (T_1 - T_2)$ とする。一方、各アンテナの部分放電発生源からの距離差 X_d は、到達時間差 τ_d と電磁波の伝搬速度 c を用いて、式(1)のように求められる。

$$X_d = \tau_d \cdot c \quad (1)$$

各アンテナからの距離差が X_d となる集合は、アンテナ中心部を有する 2 次元平面上において双曲線となることから、地上コイルの設置位置と距離差 X_d より得られた双曲線の交差する断面において部分放電発生源を標定できる³⁾。

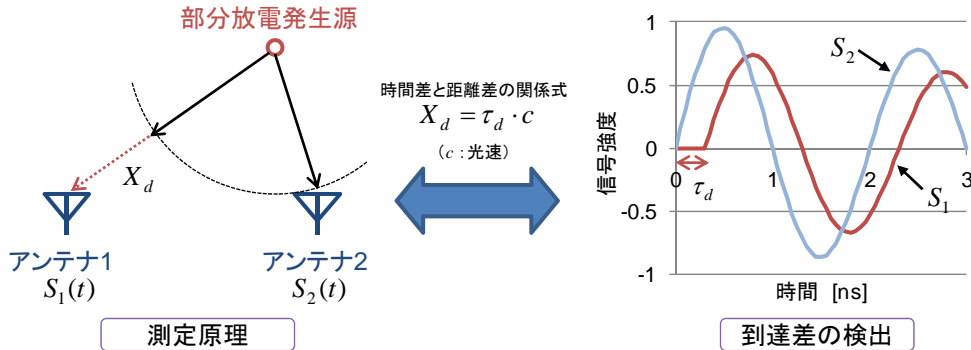


図 2 部分放電発生源の標定概念

3. 宮崎実験線における走行試験

事前に行った屋外環境での予備試験結果を踏まえ、宮崎リニア実験線の走行路を利用し、走行中の試験用車両から地上コイルの発する部分放電を検出する基礎試験を実施した⁴⁾。

3.1 試験構成

本走行試験では、供試コイル、課電設備、電磁波測定機器等の基本となる試験構成は、鉄道総研構内での予備試験と同様とした。供試コイルは、木製の架台を介して等ピッチで設置し、側壁の外側から個別に課電する必要があるため、ケーブル接続部を正規とは天地逆の上向きとした。課電構成は、発動発電機～ノイズ除去変圧器までをガイドウェイ直下に配置し、ノーコロナ試験用変圧器から供試体までの構成は桁上配置とした。また、電磁波測定用車両には、図 3 に示すように平台車と駆動用車両を連結して試験用車両とした。平台車にはダイポールアンテナを取り付けた FRP 架台 2 組、車上計測用電源、バランスウェイト、コイル位置及び速度検知用レーザ式変位計等を設置し、駆動用車両には計測用機器を搭載して走行試験に臨んだ。

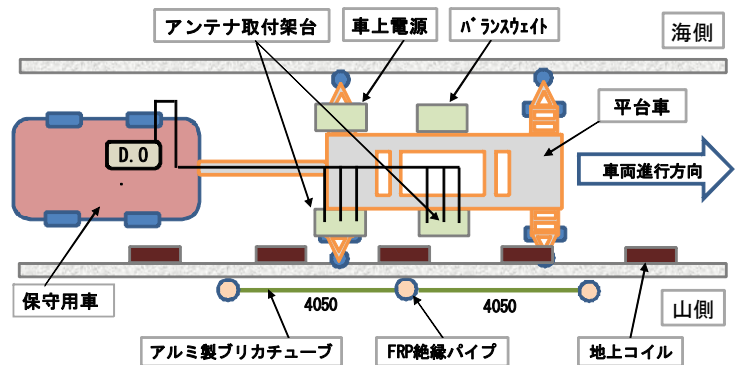


図 3 試験用車両の機器配置

3.2 試験方法

予備試験時と同様に、共振周波数 500MHz に設定したダイポールアンテナを使用し、各試験条件での電磁波信号を 2 台のデジタルオシロに収録した。アンテナは、専用の FRP 製取付架台に 0.5m ピッチで 3 本固定したものを 1 組のアンテナアレイとし、進行方向に 2 組のアンテナアレイを供試コイル表面から 0.15m の直線上に配置した。また、アンテナ架台にレーザ式変位計を設置し、中心位置に突起部を設けたコイル表面を走査することにより、トリガ信号検出時のアンテナ～地上コイル間の相対位置検知と速度演算が行えるようにした。

3.3 試験結果

(1) 定置試験

走行試験に先立ち、アンテナを搭載した試験用車両を供試コイル設置区間に停車し、定置にて鉄道総研構内で実施した予備試験時と同様な電磁波検出が可能であることを確認した。また、定置にて部分放電による電磁波検出が容易であったボイド B、ボイド C を走行試験の対象コイルとした。

(2) 走行試験

まず、試験車両の走行のみによる測定環境の変化を調査し、次に高圧母線までの課電設備を加圧した状態で測定環境を調査した。その結果、走行に伴う台車振動による測定環境の変化や課電設備の加圧による電磁波の影響は認められなかった。これらの測定環境を踏まえ、定置試験にて部分放電検出が容易であった供試コイルを対象に個々に電圧を印加し、車両走行による電磁波検出を試みた。その結果、走行速度に依らず部分放電に伴う電磁波を比較的容易に検出できることを確認した。走行試験時の部分放電検出波形例を図4に示す。

(3) 異状コイルの標定

ボイド B コイルを対象とした定置時の受信電磁波波形により、一例として部分放電の発生位置の標定を行った。図5に受信電磁波波形を示し、丸で囲んだ部分が到達時間差を求める際に利用した波形で時間幅を 6.4ns とした。また、当該時間幅のデジタルデータを元に相互相関解析を行い、各アンテナ間の電磁波の到達時間差はそれぞれ-0.2ns, -1.2ns, -1.6ns となった。これらの到達時間差から求めた到達時間差曲線を図6に示す。同図より、各時間差曲線が対象コイルの直上または直近を通過していることが分かり、本診断手法が異状コイルの標定に有効であることが判明した。

4. 実運用を想定した絶縁診断構成

実運用時を想定し、高速走行中の営業車両や総合試験車両から異状コイルを検出できる絶縁診断構成について、検討を加えた。

4.1 アンテナ配置と絶縁診断構成

高電圧印加時の推進系地上コイルが部分放電を生ずる場合、印加電圧波形のゼロクロス直後の位相において放電確率が高い点は公知の事実である。一方、超電導 Maglev においては、駆動源として地上一次のリニア同期モータを採用しているため、車上から見た地上コイルの電流位相は一定である。つまり、超電導磁石との進行方向の位置関係を調整することにより、電磁波検知用ダイポールアンテナ

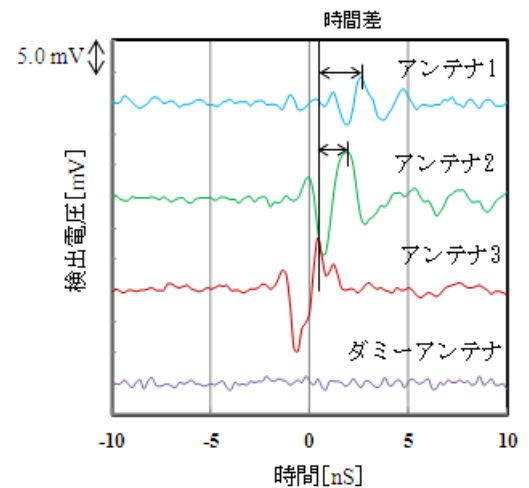


図4 走行試験時の部分放電検出波形例

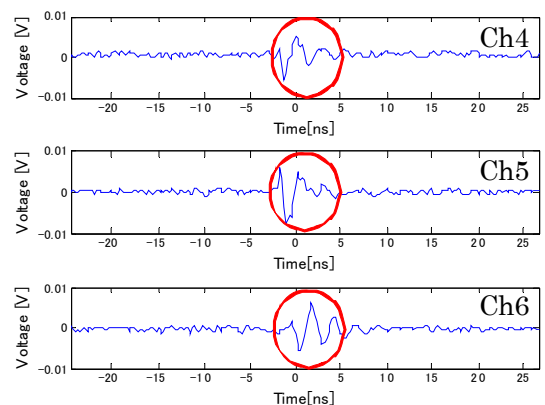


図5 電磁波による部分放電検出波形例

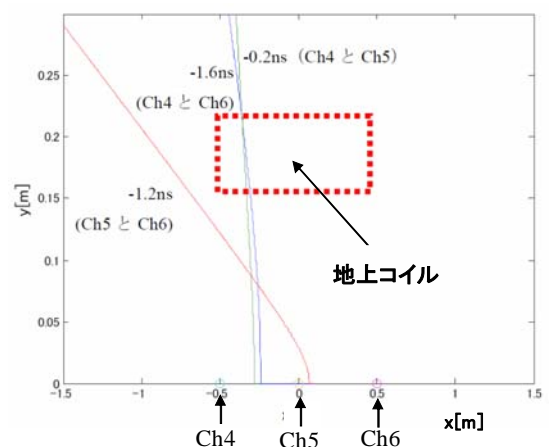


図6 部分放電発生コイルと到達時間差曲線

を地上コイルの任意の位相位置に対向させることができる。また、図7に示すように3本のアンテナを所定の間隔で配置することにより、検出波形の時間差やその減衰から、異状コイルの特定や放電の強度を推定できる。

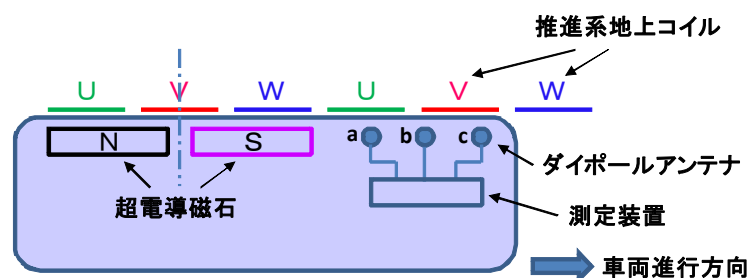


図7 実運用を想定した絶縁診断構成案

4.2 ノイズ除去の検討

部分放電に伴う放電電荷量は pC (10^{-12} C) オーダーと小さく、ノイズの影響を受け易いため、効果的なノイズ除去方法の検討が重要となる。以下に、ノイズ除去の検討例を示す。

(1) 電磁波遮蔽材の適用

リニア車体を模擬したモックアップを製作し、屋外のノイズ環境下で部分放電測定を行った。その結果、車体を模擬したアルミ遮蔽板と電磁波吸収材との組合せにより、アンテナ背面及び側面からのノイズを効果的に除去できることを確認した。

(2) デジタル信号処理の適用

サンプリングされたデジタルデータに対し、数学的処理を加えることにより、得たい周波数成分を抽出することができる。ここでは、デジタルフィルタとして FIR (Finite-duration impulse response) filter を適用することにより、ノイズの主成分であった通信周波数 867.2MHz の信号を除去できることを確認した。

5. まとめ

地上コイルの新たな絶縁診断手法として、走行中車両に搭載した電波干渉計システムにより、敷設された推進系コイルの絶縁異状の有無の判別や異状コイルの位置標定に関する検討を行った。人工的欠陥を設けた供試コイルを用いた一連の検証試験から、推進系地上コイルが発する部分放電による微弱な UHF 帯電磁波を受信できることを確認した。これは、地上一次のリニアシステムにとり、敷設状態の地上コイルを在姿にて効率的に絶縁診断ができる可能性を有するもので、貴重な成果であると考えている。なお本研究は国土交通省からの国庫補助を受け、徳島大学との共同研究により実施した。

参考文献

- 1) 川田昌武, 黒木悟, 河崎善一郎, 大澤輝也, 松浦虔士, 田中宏毅「GHz 帯電磁波空間位相差法を用いた火力タービン発電機の運転中における部分放電検出」電気学会論文誌B, 118 巻, 11 号, pp. 1243-1248, 1998
- 2) 川田昌武, 黒木悟, 河崎善一郎, 大澤輝也, 松浦虔士, 田中宏毅, 武蔵谷敏男「発電機固定子コイルの絶縁破壊現象に伴う GHz 帯放射電磁波測定による絶縁劣化診断法」電気学会論文誌B, 118 巻, 3 号, pp. 274-281, 1998
- 3) Masao Suzuki, Satoru Ota, Ryohei Ikeda, and Masatake Kawada: "Internal Defect Position Evaluation of Ground Coil by Detecting Electromagnetic Waves from Partial Discharge," IE EJ Trans. on Fundamentals and Materials, Vol.133, No.5, pp.307-312, May, 2013
- 4) 鈴木正夫, 池田遼平, 高橋紀之, 田中実, 川田昌武「部分放電検出による浮上式鉄道用地上コイルの絶縁診断に関する検討」電気学会 基礎・材料・共通部門大会論文集, pp.389-394, 2012