

アンテナによる超電導磁気浮上式鉄道用地上コイルの部分放電検出

太田 聡* 池田 遼平 (鉄道総合技術研究所)

Detection of Partial Discharge in Ground Coils for Superconducting Maglev Train Using Antenna

Satoru Ota*, Ryohei Ikeda, (Railway Technical Research Institute)

In superconducting maglev trains, ground coils are installed along the entire line where the train runs, and the number of coils to be assessed is huge. Propulsion coils, which are a type of ground coil, require high insulation reliability for use in high-voltage environments and the application of appropriate insulation diagnosis methods. In this paper, we present a method for detecting partial discharge using antennas as an insulation diagnosis method for propulsion coils and describe the results of various characteristic tests conducted on actual coils and mock-up specimens with defects.

キーワード：超電導磁気浮上式鉄道，地上コイル，高電圧，絶縁診断，部分放電，電磁波
(Superconducting Maglev, Ground Coils, High-voltage, Insulation Diagnosis, Partial Discharge, Electromagnetic Waves)

1. はじめに

超電導磁気浮上式鉄道において地上コイルは車両の走行する全線に敷設され、対象となる個数は膨大となる。地上コイルの一種である推進コイルは高電圧環境下での使用に対応する高い絶縁信頼性と、適切な絶縁診断手法の適用が求められる。本稿においては推進コイルの絶縁診断手法としてアンテナを用いた部分放電検出について示し、実機の推進コイル(実機コイル)や欠陥を有する模擬試験体を対象とした各種特性試験を実施したのでその結果を述べる。

2. 地上コイルと絶縁性能

〈2・1〉 地上コイルに求められる性能 地上コイルは車両の走行に関わり様々な負荷(機械的、電氣的、環境的)を想定する必要があるが、特に地上コイルの一種である推進コイルの場合は車両の超電導磁石の通過に伴う変動磁場によるものと、自身への通電電流によるものが合わさった高電圧が発生するため電氣的負荷を想定する必要がある。このため、推進コイルは発生する高電圧に耐えうる絶縁耐力を有することが求められ、また長期の運用が前提となることから、必要な絶縁性能を有していることを定期的な絶縁診断により確認していくことも求められる。

〈2・2〉 推進コイルの絶縁診断 推進コイルが必要な絶縁耐力を有しているかの確認については、初期には工場内出荷試験、敷設時には電気設備技術基準などの法令に基づいた試験を行うことを行うことができると考えられる。一方で敷設後に運用中の推進コイルの絶縁診断を行う方法としては、一般的な高電圧機器の検査手法からいくつかの試験が選択肢として挙げられる。その試験の例として電気


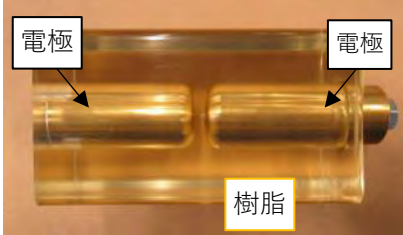
定数測定、誘電正接測定、非破壊偏肉測定、絶縁抵抗測定、部分放電測定、耐電圧試験(商用周波、衝撃)などが挙げられる。これら試験は実施箇所が限られるものや、必要な結果を十分に得られないものもあり、推進コイルの運用に即した試験方法が求められている。そこで筆者らは部分放電測定のうち部分放電の発生時に試験対象から放射される電磁波に着目し、効率的な絶縁診断を行う手法について検討や試験を行っている⁽¹⁾。

〈2・3〉 アンテナを用いた絶縁診断 推進コイルが絶縁上の欠陥を有している場合、高電圧の印加時に欠陥箇所において局所的な電界集中により部分放電が発生する場合がある。この部分放電は種々の併発する物理現象で観測することが可能であり、当研究グループが行っているアンテナによる放射電磁波の検出もその一つである。本方式による推進コイルの絶縁診断を行うために、絶縁上の欠陥を模擬して検証試験を効率的に進めるための模擬試験体を考案し製作を行っている⁽²⁾。模擬試験体を用いた検証試験によって、欠陥を有する試験体が放射する電磁波の特徴や、その電磁波が絶縁破壊の前段階において周波数成分などが変化することを確認している⁽³⁾⁽⁴⁾。

〈2・4〉 実機コイルによる評価の必要性 放射電磁波の観測による絶縁診断手法の開発はこれまで模擬試験体を用いたものを中心として行ってきた。これは試験データのサンプル数を増やすための多数個の製作が必要という面や、模擬欠陥の付与の容易性から用いられたものである。Table 1 に実際に現地で用いられることとなる推進コイル(実機コイル)と、模擬試験体の特徴を示す。表中に示す通り様々な面で異なる点があることから、模擬試験体の試験で得られた知見の実機コイルへの活用が可能かどうかにつ

表 1 実機コイルと模擬試験体の比較

Table 1. Comparison of actual coil and simulated test body.

品名	実機コイル (推進コイル)	模擬試験体
樹脂, 配合	エポキシ樹脂, 充填剤あり (シリカ等)	エポキシ樹脂, 充填剤なし
導体	金属巻線	金属塊 (巻線ではない)
成形プロセス	一次硬化, 二次硬化	一次硬化のみ
製造設備	大規模な設備が必要	小型の成型炉で製作可能
欠陥	量産時は生じない	模擬的に付与可能
内部構造	不可視	可視
電気的負荷	課電, 通電の負荷が可能	課電のみ
表面処理	半導電塗料を塗布	塗布無し
外観	 (幅 900mm)	 (幅 110mm)

いて実機コイル 1 体をサンプルとして試験を実施することとした。

3. 実機コイル試験の方法と結果, 考察

〈3・1〉 試験の方法 試験は周波数特性試験と連続課電試験の二種類の試験を実施した。これら試験において実機コイルに高電圧を印加し, その際に放射される電磁波を計測した。基本的な試験構成は共通であり, Table 2 に使用した機器類を, Fig. 1 に試験回路を, Fig. 2 に試験時の外観を示す。なお, 図中に示されるように放射電磁波の測定と同時に既存の部分放電測定器による計測を行った。

今回の試験に用いた実機コイルは過去の試験⁽¹⁾の際に部分放電の発生があったコイルである。比較を行う模擬試験体のデータとしては, 空隙板, ボイド欠陥, 導体剥離の三種類の欠陥を付与して製作した試験体のデータとした。三種類の欠陥の簡単な説明を以下に示す⁽²⁾。

①空隙板: 事前に樹脂板に切削加工で穴を開けた空隙板を

表 2 使用した機器類

Table 2. Testing equipment.

機器	メーカー・仕様
実機コイル	単層推進コイル 公称電圧 11kV クラス
高電圧発生装置	東京変圧器 商用周波課電装置 50kV 400mA
アンテナ	アンリツ ダイポールアンテナ MP534B 20-520MHz (200-520MHz 可変)
電磁波測定器	テクトロニクス デジタルオシロスコープ DPO4104B / -1GHz, 5GS/s, 4ch
部分放電測定器	総研電気 デジタル部分放電アナライザ DAC-PD-9 / 30kV, 1-100000pC

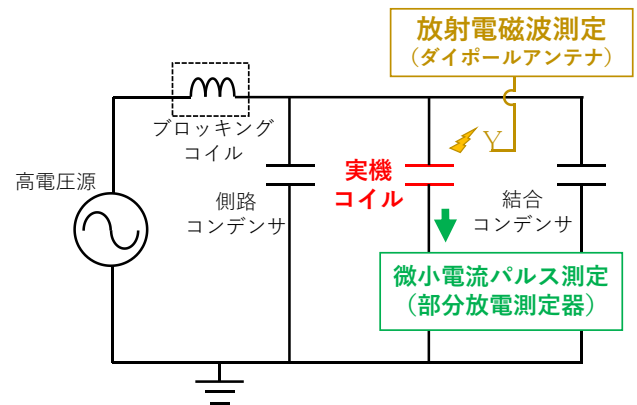


図 1 試験回路

Fig. 1. Test circuit.



図 2 試験外観

Fig. 2. Test appearance.

金属製の電極間に配置し、樹脂を充填し成型した。

②ボイド: 事前にボイドを有する樹脂ブロックを製作し、電極間に配置して樹脂を充填し成型した。

③剥離: 成型後に片側の電極を一定距離引き抜き、電極と樹脂の界面に一定距離分の剥離を生じさせた。

〈3・2〉 試験結果 (周波数特性) Fig. 2 の構成において実機コイルに高電圧 (20kV) を印加し、印加後に発生した放射電磁波を測定した。測定においては計測用アンテナのエレメント周波数を 200MHz から 500MHz まで 100MHz 刻みで変化させながら測定を行った。得られた波形を FFT 処理し、各周波数成分の大きさを色の濃淡で示した周波数特性の図を Fig. 3 に示す。実機コイルの分布と各欠陥を有する模擬試験体の分布を比較すると、実機コイルの周波数成分はエレメントの周波数設定に応じて変化するピークをもつ分布となっているのに対し、模擬試験体では周波数設定に対応する部分はあるものの三種いずれも低周波側 (200MHz 以下) の成分が大きめに出る傾向になっている。これら類似性を評価するために周波数成分を関数として相関係数を計算したものを Table 3 に示す。Fig. 3 の結果で論じた通り相関がそこまで強くないものの、三種の模擬試験体の中では空隙板が最も強い相関を示す結果となった。放射電磁波の周波数成分はエレメントの設定周波数とともに内部の欠陥の形状にも関係があるものと考えられており、この結果から実機コイル内部の欠陥を当てはめるとするのであれば空隙板に近いものであると推定される。

表 3 実機コイルの周波数成分との相関係数の比較

Table 3. Comparison of correlation coefficient of frequency characteristics with actual coil.

欠陥種別/ 周波数	空隙板	ボイド	剥離
200MHz	0.623	0.478	0.506
300MHz	0.557	0.327	0.254
400MHz	0.483	0.372	0.097
500MHz	0.471	0.418	0.236

〈3・3〉 試験結果 (連続課電) 前節で述べた周波数特性試験が短期的な特性試験だったのに対し、長期的な特性試験として連続課電試験を実施した。課電電圧は 20kV とし、168 時間の課電を実施した。課電中においては 1 分間に 3 回のサンプリングで放射電磁波を測定した。

168 時間の課電試験の結果、実機コイルは絶縁破壊しなかった。試験結果について、アンテナ 1 の出力電圧のピーク値を時系列にプロットしたものを Fig. 4(a) に示す。図中においては、以前実施している空隙板欠陥模擬試験体の同様のデータ (課電開始 62 時間後に絶縁破壊) を比較として Fig. 4(b) に示す。Fig. 4(a) からは、試験開始 60 時間後まで値が安定していたものがその後不安定となり、Fig. 4 (b) における絶縁破壊時の出力電圧ピーク値と同程度の値に近づく時間帯もあった。それにも関わらず試験期間を絶縁破壊せずに終えた結果について、Fig. 5 に示すような評価指標による結果表示で追加の評価を行うこととした。

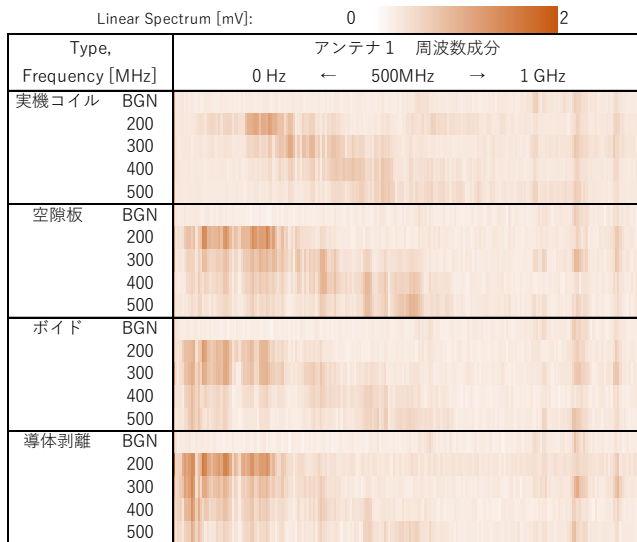
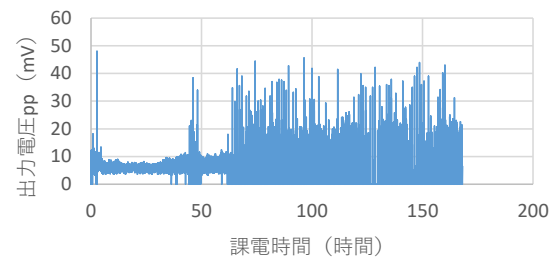
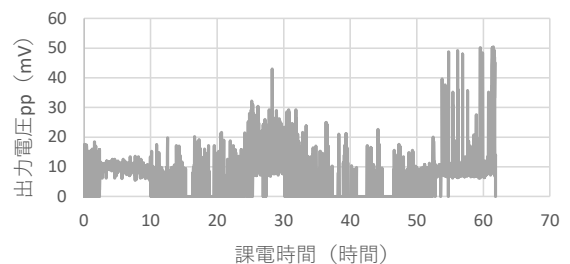


図 3 周波数特性試験結果

Fig. 3. Frequency characteristic test result.



(a) 実機コイル



(b) 空隙板欠陥模擬試験体

図 4 連続課電試験結果

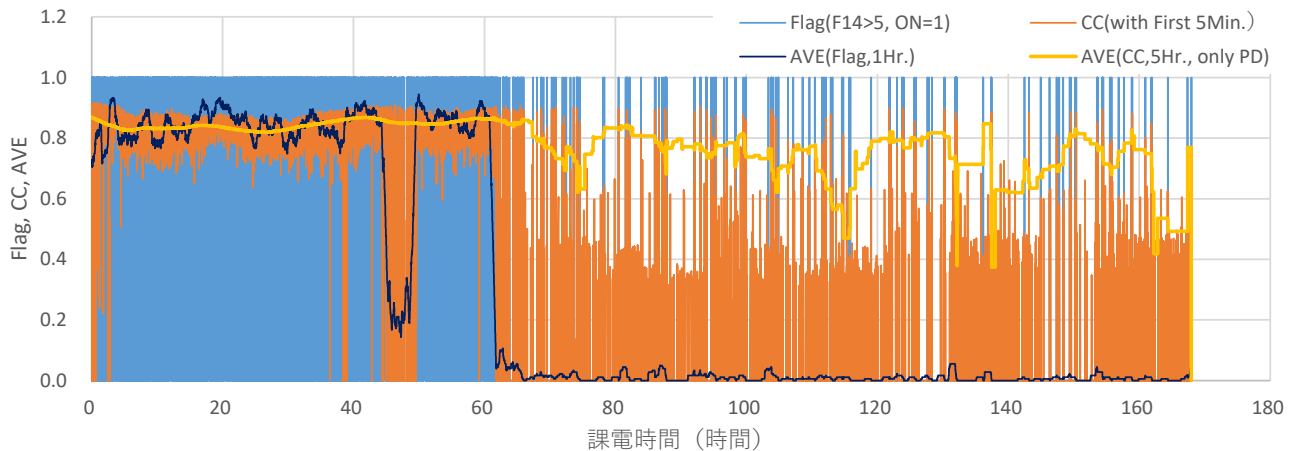


図 5 連続課電試験中の各評価指標の変化

Fig. 5. Changes in each evaluation index during continuous charging test.

Fig. 5 中に示される各評価指標の定義と試験中の指標の変化から得られた考察は以下である。

①Flag, AVE (Flag) : 実機コイルと比較的近いアンテナ 1 と遠いアンテナ 4 のピーク値の比をとり、一定値 (今回は 5) を超えると部分放電によるものと判定 (Flag=1) した。この値の 1 時間平均値 AVE (Flag) の値を見ると 60 時間経過直後に急減しており、部分放電と考えられる電磁波の発生頻度が急減したことを示している。

②CC, AVE (CC) : 放射電磁波の周波数成分の自己相関 (当該時刻の周波数成分と、試験開始 5 分後の周波数成分の相関係数) をとったものである。この値の 5 時間平均値 AVE(CC)は減少しているものの大きく変化しておらず、試験初期に発生していた電磁波の周波数成分が大きく変化せずに発生し続けていたことを示している。

これら値のうち放射電磁波の発生頻度を Fig. 6 に示す空隙板欠陥模擬試験体のものと比較すると、初期の安定発生からの頻度の急減は類似しているものの、その後の複数回の頻度の増加については実機コイルでは現れなかった。もしこの後継続して実機コイルの連続課電試験を行う場合、再度の放射電磁波の発生頻度増は絶縁破壊へ至る予兆であると考えer必要があるという知見が得られた。

4. まとめ

推進コイルの絶縁診断のためにこれまで模擬供試体において試験を行ってきた実施項目のうち、周波数特性試験と連続課電試験を実機コイルにも実施した。試験の結果、周波数特性試験においては部分放電時に放射する電磁波が欠陥模擬の種別のうち空隙板欠陥に類似していることを電磁波の周波数特性により確認した。連続課電試験においては電磁波の発生頻度や周波数成分の変化などを評価し、発生頻度においては初期の安定発生から頻度の急減に至る挙動が

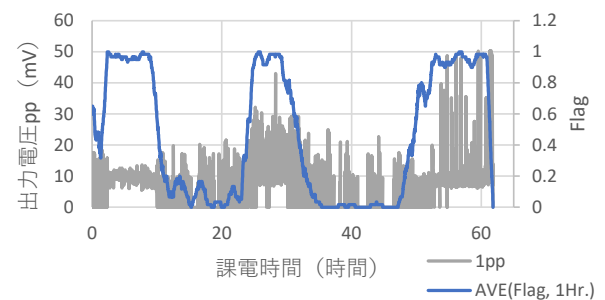


図 6 空隙模擬欠陥試験体の Flag 値の推移

Fig. 6. Transition of flag value of void simulated defect test specimen.

模擬試験体の結果と類似していることを確認した。また、絶縁破壊に至った試験結果では出現した電磁波の放射頻度増が実機コイルでは現れなかったため、継続して試験を実施する場合に再度の放射電磁波の発生頻度増は絶縁破壊へ至る予兆であると考えer必要があるという知見が得られた。

今後もこれら実機コイル、模擬供試体共に試験サンプル数を増やし、試験評価方法の深度化とともにアンテナを用いた絶縁診断手法の開発を継続していく予定である。

文 献

- (1) 太田聡, 依田裕史, 池田遼平 : 多数個の推進系地上コイルを対象とした効率的な非接触絶縁診断手法の開発, 鉄道総研報告, Vol. 29, No. 11, pp. 23-28(2015)
- (2) R. Ikeda, S. Ota, M. Aiba, K. Watanabe: "Partial Discharge Test Specimen for Insulation Diagnosis Using Radio Interferometer System", Proceedings of Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena 2020 (DEIDP '20), 5B-1(2020)
- (3) 太田聡, 池田遼平 : 高電圧下で使用される超電導リニア用地上コイルの絶縁劣化兆候把握手法の検討, 電気学会交通・電気鉄道/リニアドライブ合同研究会, TER-22-005/LD-22-005, pp. 25-30(2022)
- (4) 太田聡, 池田遼平 : 部分放電発生モールド試験体が放射する電磁波の時間および周波数領域特性を用いた絶縁劣化診断, 令和 4 年電気学会全国大会論文集, 5-105, pp. 180-181(2022)