

部分放電検出によるリニア用地上コイルの
絶縁診断用車載装置の構成案

太田 聡* 池田 遼平* 中嶋 稔*

Configuration Proposal of an On-vehicle Insulation Diagnostic Device
for Superconducting Maglev Propulsion Coils Using Partial Discharge Detection

Satoru OTA Ryohei IKEDA Minoru NAKASHIMA

Ground coils are essential components of superconducting maglev systems. Propulsion coils, a category of ground coils, require rigorous insulation diagnostics to withstand mechanical, electrical, and environmental stresses, strong dynamic electromagnetic interactions, and high voltages. This paper reviews the requirements for insulation diagnostics of propulsion coils, emphasizing previously developed efficient methodologies. One such methodology is an advanced diagnostic system that analyzes electromagnetic waves from partial discharges to evaluate coil deterioration and identify discharge locations. Following the discussion, we propose a device design that enables real-time diagnostics to be carried out directly from the vehicle, enhancing operational efficiency and reducing the size of necessary installations.

キーワード：超電導磁気浮上式鉄道，地上コイル，部分放電，電磁波，絶縁劣化診断

1. はじめに

超電導磁気浮上式鉄道用車両は、走行するために台車に超電導磁石を搭載し、地上側に設置された地上コイルとの間の相互作用（電磁力）によって必要な力を得ている。そのため、地上コイルは車両の走行する全線に必要となり、膨大な数が設置される。地上コイルは用途（発生させる力や設置箇所）によって異なる複合的な負荷（機械的振動、電氣的負荷、環境劣化など）を考慮する必要がある。とりわけ地上コイルのうち車両に前後方向の力を与える推進コイルでは、推進力の反力を受けるとともに超電導磁石の変動磁場と自身への大電流の通電により高電圧が印加される。大量に設置される推進コイルには、高電圧に対する絶縁性能を維持する必要があり、効率的な検査手法の適用が求められている。

これまで筆者らは、推進コイルの絶縁性能を効率的に評価する方法として、車上からの絶縁診断の有効性を検討し、単一アンテナによる推進コイルの部分放電検出性能を評価してきた¹⁾。また、500km/h 走行時の位置分解能に関する検証も行っている。しかし、検出後の測定・記録手法の具体的な構築や、取得データを解析して地上コイルの劣化状態を診断し、放電箇所を特定する手法については十分に検討されていなかった。本稿では、車両に搭載した部分放電検出による絶縁診断装置（以下、車載装置）に必要な機能を整理し、その性能検証結果を報告する。

なお、本検証は車載装置の各機能について個別に実施しており、装置全体の統合的な動作確認や、実際の超電導磁気浮上式車両に搭載しての走行中の絶縁診断試験を実施した結果ではないことに留意されたい。

2. 推進コイルの絶縁診断に求められる要件

推進コイルの絶縁診断を効率的に実施するための車載装置について以降で述べる。まず絶縁診断が必要

* 浮上式鉄道技術研究部 磁気浮上研究室

となる要因である絶縁上の欠陥と部分放電の発生について説明し、その後部分放電検出を効率的に行うための車載装置の構成案について述べる。

2.1 部分放電を用いた推進コイルの絶縁診断

推進コイルは一般的に金属導体と電気絶縁用のコイル樹脂で構成されており、コイル樹脂は大地との絶縁を担う。しかし、内部に空隙などの絶縁上の欠陥が生じると、図 1 に示すように、その部分は周囲の樹脂と比べて誘電率が小さく、絶縁破壊強度も低いいため、電界が集中しやすくなる。これにより、局所的な絶縁破壊現象である部分放電が発生する。

部分放電は図 2 のように繰り返し発生することで進展し、大地との電氣的絶縁が保てなくなり、最終的には絶縁破壊に至る。車載装置により、初期段階で部分放電を発見することができれば、絶縁破壊に至る前に交換などの処置を行うことが期待できる。

部分放電は機器の絶縁物内部で発生する微小な絶縁破壊現象であり、表 1 に示す通り様々な物理・化学現象として検出できることが知られている²⁾。これらの現象のうち、一つ又は複数を選択して車載装置を構成することとなる。

表 1 の現象と検出方法について地上コイルの絶縁診断への適用を検討した場合、まず絶縁物変質に関して推進コイルは樹脂絶縁であるため、この方法は不適と考えられる。また、発光・発熱についても推進コイルが浮上案内コイルに覆われていることを考慮すると、この方法も不適である。超音波に関しても推進コイルの材料構成(高分子材料とシリカ等の充填剤)を考慮すると、散乱により検出が困難であると考えられる。

対して、パルス電流・電圧を検出する手法は、製造工場内での部分放電測定器による測定手法³⁾として有効である。しかし、推進コイルの設置現場で適用する場合、地上側への追加設備(試験用の課電装置、CTであれば必要数のCT設置等)が必要となり、機器構成が大規模となるため、運用面での制約が大きい。

一方、電磁波や磁界を検出する手法を適切に構築できれば、車上からの絶縁診断が可能となり、500km/hで移動する車両からの検査が実現できる。また、電磁波による測定は、浮上案内コイルに覆われた状態でも実施可能であることを既に検証済み¹⁾であり、装置の規模を抑えつつ、検査効率の面でも優れていると考えられる。

これらの利点を踏まえ、本研究では電磁波・磁界を検出する検査方式を採用した。

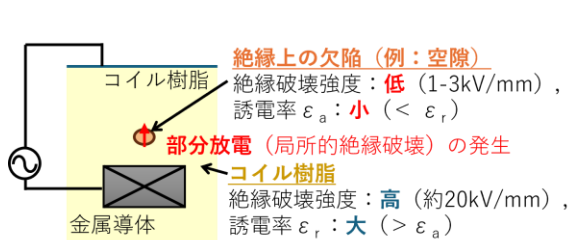


図1 コイル樹脂内部での部分放電の発生

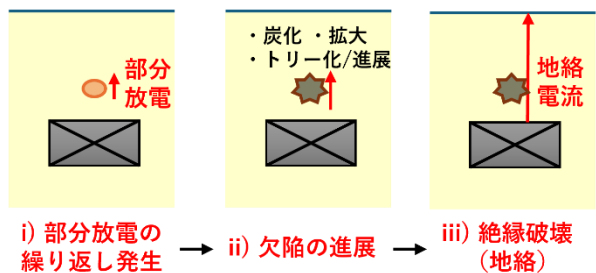


図2 部分放電の繰り返し、損傷の進展と絶縁破壊

表1 部分放電によってもたらされる物理・化学現象とその検出方法および推進コイル絶縁診断への適用可否

| 現象 | 検出方法 | 検出方法の概要 | 適用可否 |
|--------|----------------|-----------------------------------|-----------|
| 絶縁物変質 | ガスセンサ, 化学分析 | 絶縁物(ガス, 絶縁油)の化学的な変化を, 成分分析などにより検出 | 不適 |
| 発光・発熱 | 光センサ, 紫外線モニタ | 部分放電が発生する際の発光や発熱を, センサやカメラ等で検出 | 不適 |
| 超音波 | 音響センサ, AEセンサ | 部分放電が発生する際の音や超音波をセンサで検出 | 不適 |
| 電流・電圧 | 結合コンデンサ, 高周波CT | 部分放電のパルス電流や, 経路上の電圧変化を測定器で検出 | 適用可(制約あり) |
| 電磁波・磁界 | 磁気センサ, アンテナ | 部分放電が発生する際の電磁波や磁界をセンサやアンテナで検出 | 適用可(制約なし) |

2.2 電磁波による推進コイル絶縁診断の位置付け

推進コイルの絶縁診断には、様々な試験手法が用いられる。従来の手法として、回路定数測定、絶縁抵抗測定、耐電圧試験、 $\tan \delta$ 試験、部分放電試験が挙げられる。これらの手法にはそれぞれ特徴があり、適用条件や制約が存在する。

回路定数測定や絶縁抵抗測定は、機器全体の状態を把握する手法として利用されるが、詳細な診断を行うことは難しい。一方、耐電圧試験（商用周波数・雷インパルス）や $\tan \delta$ 試験は、絶縁性能の評価には有効であるが、本線内の試験では個別コイルの診断が困難である。また、これらの試験を現場で実施するには、多数のコイルが接続された回路に高電圧を印加する必要があるため、大規模な試験用変圧器を必要とするため、設備面での制約が大きい。

部分放電試験は、工場内で行うような一般的な検査方法の場合、本線内では個別のコイルの診断は困難である。一方、2.1 節で述べた電磁波・磁界を検出する検査方式を適用することで効率的な診断が可能となる。ただし、本手法では試験電圧として推進コイルの使用中の電圧を利用するため、従来の部分放電試験のように使用時の電圧を超える試験電圧を印加することはできない。このため、評価できる部分放電の種類や強度には一定の制約がある。

以降では、この電磁波測定手法を用いた推進コイルの絶縁診断について、装置構成と各機能の要件を検討する。

2.3 車載装置に求められる要件

高速で移動する車両において推進コイルの絶縁診断を行う車載装置の構成案を検討した。車載装置の構成と、走行中に検査を行う概念図を図 3 に示す。車両が検査を実施する区間を走行する際には、推進コイルの回路には通電により電圧が発生する。併せて、超電導磁石を搭載した車両が走行することで、変動する強磁場により電圧が発生する。これら二つの作用によって推進コイルには高電圧が印加される。もし当該の区間内の推進コイルに絶縁劣化を起しているものがあった場合は、先述の部分放電が発生すると考えられ、これら部分放電の電磁波を高速で連続的に計測する構成となっている。

この車載装置に必要な機能を列挙すると、電磁波を物理的現象として捉える検出機能、捉えた電磁波を定量的に表す計測機能、電磁波のデータを蓄積する記録機能、記録されたデータから推進コイルの絶縁劣化を判定する解析機能の四つの機能から構成される。表 2 に各機能で留意すべき前提条件を示す。

各機能の目標を以下の通り設定し、機能検証を進めた。

- (1) 検出機能においては、部分放電により推進コイルから放射される UHF 帯の電磁波を検出すること。
- (2) 計測機能においては計測器構成を列挙し、電磁波を定量化する方法の選定を行うこと。
- (3) 記録機能においては、70 分間以上（東京-大阪間 67 分の片道想定時間であることから、これを上回る

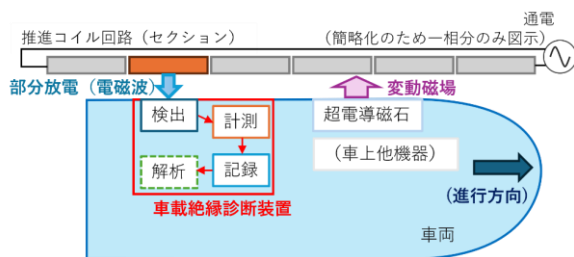


図 3 車載装置の構成と検査の概念図

表 2 車載装置の前提条件

| 項目 | 考慮する要素 (機能) | 前提条件 |
|---------------|------------------------------|-------------------------------------|
| 検知対象 | 検出器の周波数特性 (検出) | 電磁波 (UHF 帯*) *300MHz-3GHz |
| コイル印加電圧 | 特に考慮不要 (非接触のため) | 最大 20kV 程度 |
| コイル設置間隔と通過時速度 | 測定可能時間 (計測) 位置推定の分解能 (解析) | 0.9m, 最大 500km/h (6.5ms 通過/個) |
| 計測時間 | 記録媒体容量 (記録) | 最大 70 分間 |

時間) の記録を可能とすること。

- (4) 解析機能においては、電磁波の計測結果から推進コイルの絶縁劣化兆候を把握することと、推進コイル単位またはそれより細かい分解能での電磁波の放射源位置推定を行うこと。

これらの目標を踏まえ、車載装置の構成案を決定し、その性能検証を行った。

3. 絶縁診断用車載装置の構成案と機能検証

3.1 検出機能

検出機能を検討するにあたり、まず部分放電とそれに起因して発生する電磁波の特徴について述べる。部分放電により推進コイル内部に発生する微小な電流を ns オーダの継続時間のパルス波であると仮定すると、その周波数成分は sinc 関数となり ($\text{sinc}(x) = \sin(x)/x$)、このことから部分放電による電磁波は広帯域の周波数成分の分布を有する。この特性に併せて検出機能の諸元を検討することとなるが、周波数の高低に合わせて電磁波の周波数成分の大きさのみならず、検出用アンテナの大きさなども考慮する必要がある。図 4 に部分放電の微小電流の継続時間を適当な時間に仮定した際の周波数成分の大きさと、電磁波検出用のアンテナに半波長ダイポールアンテナを用いた際のアンテナ寸法を併記したものを示す。

絶縁診断における S/N 比向上のためには部分放電の電磁波の周波数成分は大きい方がよいが、車載装置として機装することを考えるとアンテナは大きさの面で制約を受ける。従って両者を考慮して電磁波を検知できる周波数でかつ小さい方が望ましい。図 5 に例を示す部分放電の電磁波を測定した結果より、アンテナ周波数が 1GHz では電磁波の検出が不十分で、500MHz では検出が可能である見込みが得られたことから、アンテナ周波数は 500MHz を選定した。

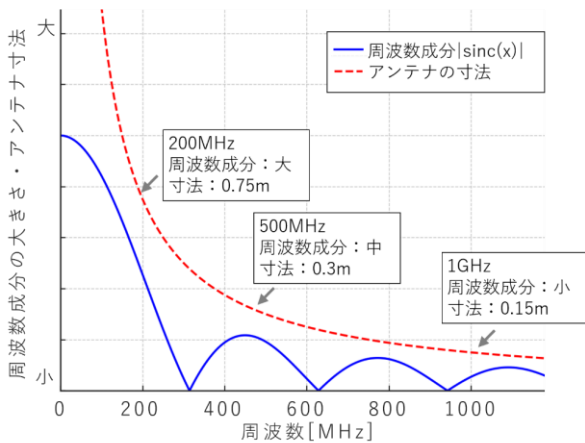


図 4 部分放電の周波数成分分布とアンテナ寸法

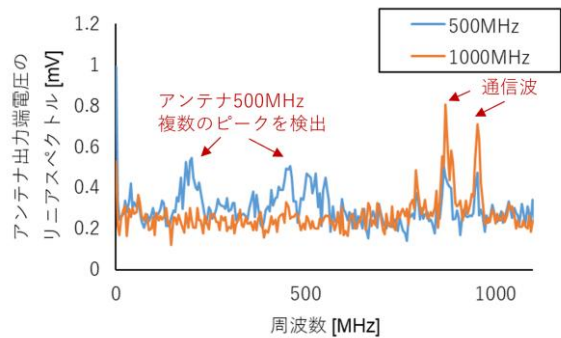


図 5 アンテナ周波数選定のための電磁波測定結果

3.2 計測機能

計測機能の構成としては、基本的に市販の計測器をベースとしたものをいくつか候補として選定した。前節で述べたアンテナの電磁波を測定して収録する計測器の種類としては、表 3 に挙げる 3 種類の計測器を挙げ、性能検証の試験を実施した。

本研究では、部分放電の電磁波を UHF 帯 (300MHz~3GHz) で検出することを前提としている。しかし、計測機能を構成するにあたり、解析機能で部分放電を正しく識別するためには、計測機能に求められる性

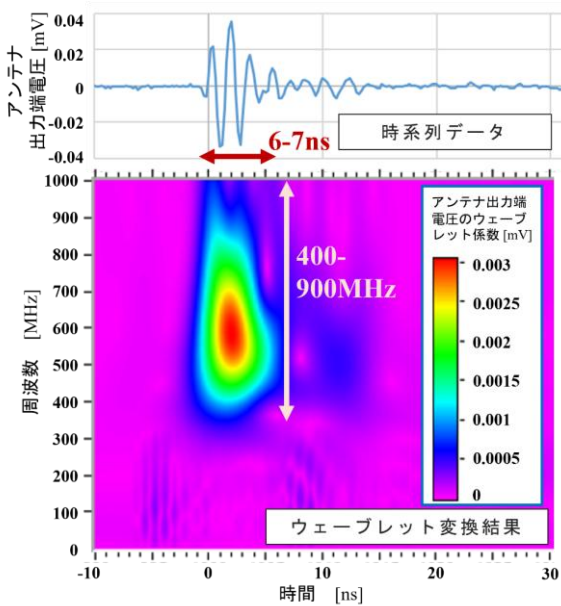
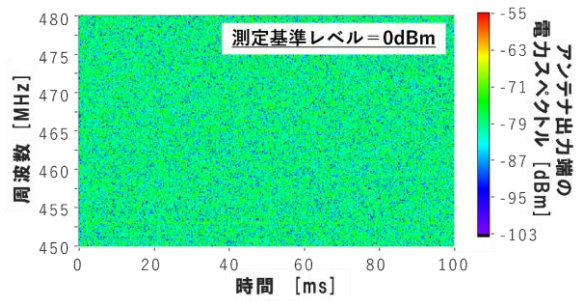


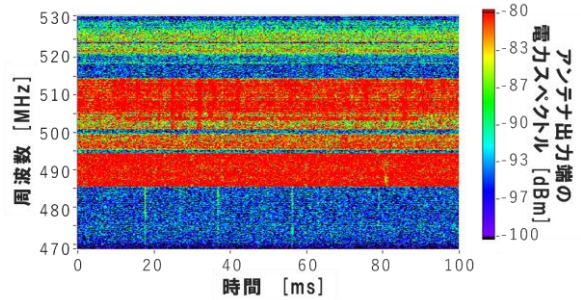
図6 取得した電磁波波形の一例

表3 計測機能の種類と概要

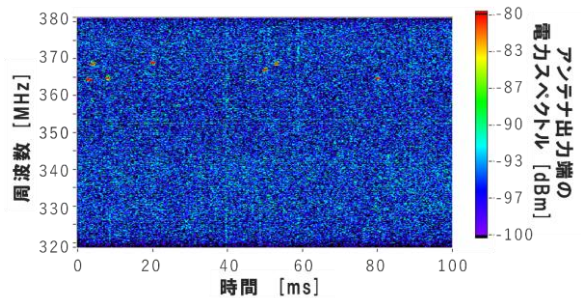
| 計測器 | 概要 |
|---------------|--|
| デジタルオシロスコープ | 時間領域での信号波形を取得、電圧変動をリアルタイムで捉えられ波形の形状・振幅・周波数などを直接観察するのに適する |
| スペクトラムアナライザ | 周波数領域での信号分析を行い、電磁波の周波数スペクトル分析やノイズや干渉の分析などに役立つ |
| ベクトルシグナルアナライザ | 上記に加え位相情報などを扱い、より高度でカスタマイズ性の高い信号分析が可能 |



(a) 測定基準レベルが不適切 (0dBm)



(b) 中心周波数付近に他の空中伝搬波がある



(c) 中心周波数付近の部分放電の電磁波が微弱な場合

図7 測定パラメータの影響による計測結果の違い

能を適切に設定する必要がある。特に、時間領域および周波数領域の分解能が重要となる。

(1) 時間領域の要件

部分放電の電流パルスは ns オーダの持続時間を持つため、計測機能の時間分解能もこれに対応する必要がある。記録機能には GHz オーダのサンプリングレート (例: 2~5GS/s) を持つ機器を選定し、時間分解能を確保した。これにより、部分放電の発生タイミングを高精度で捉えることが可能となる (図6)。

(2) 周波数領域の要件

計測機能の実装にあたり、測定パラメータの設定が部分放電の電磁波検出性能に大きく影響することが確認された。特に、測定基準レベル、中心周波数、測定周波数幅 の設定が重要となる。

・測定基準レベル

測定基準レベルはダイナミックレンジに寄与し、適切な設定が求められる。基準レベルが高すぎる場合、部分放電の微弱な電磁波を取得できない可能性がある。一方、低すぎる場合はオーバーレンジが発生し、測定の実行に支障をきたす。例えば、図7(a)のように測定基準レベルが不適 (高すぎ) であると、ダイナミックレンジが不足し、部分放電の信号が背景雑音に埋もれることが確認された。

・中心周波数

部分放電に伴う電磁波の周波数成分は sinc 関数に従う広帯域分布を持つが、試験環境におけるノイズ影

響やアンテナの受信特性を考慮すると 500MHz 帯での測定が適当であると考えた。しかし、試験結果より、500MHz 帯には他の空中伝搬波が存在することが確認された (図 7(b))。このため、以後の測定試験では、中心周波数を 465MHz に微修正し、測定を実施した (図 8)。また、一部の周波数帯では他の無線信号が混在し、データ取得後の解析に影響を与えることがある場合や、図 7(c)のように部分放電の発生が微弱な周波数帯では、適切な信号が取得できないことが確認されており、外部ノイズの影響と部分放電の特性を考慮した周波数選定が必要である。

・測定周波数幅

測定周波数幅が適切でない場合、記録機能に影響を及ぼす。特に、周波数幅が過大であると、メモリフローが発生し、測定の遂行確率が低下することが確認された。このため、本研究では記録時のメモリ使用量とのバランスを考慮し、3.3 で述べる記録機能に関する試験では測定周波数幅を 30MHz に設定した (図 8)。次節では、この設定によって安定した測定が可能となることを示す。

以上に挙げた測定パラメータを適切に設定することで、部分放電の電磁波を安定して検出可能であることが分かった。

しかし、安定した検出を実現するだけでなく、実際の走行環境下で長時間のデータ記録を行うためには、記録機能の適切な設計が不可欠である。次節では、記録機能の構成とその性能検証について述べる。

3.3 記録機能

記録機能においては、品川～大阪間 1 走行に相当する時間内のデータを保持できる長時間記録が求められる。これは、車載装置の冗長化が物理的制約や費用の面で難しいことを勘案し、単一の装置で計測を遂行するために決定したものである。表 4 に代表的な機器の記録時間を示す。

表 4 に示した通り、記録機能において要件を満たす構成を検討した結果、デジタルオシロスコープは測定原理上、長時間の記録が困難であることが分かった。また、スペクトラムアナライザは長時間記録が可能ではあるものの、単一周波数成分のみを対象とするため、部分放電に伴う広帯域の周波数成分を捉えるには適していなかった。一方、ベクトルシグナルアナライザを用いた場合は、広帯域の信号を長時間にわたって記録可能であり、適切なハードウェアおよびソフトウェアのカスタマイズを行うことで、記録機能の要件を満たせることが確認された。このため、記録機能の検証として、表 5 に示す構成を構築し、模擬部分放電発生源を用いた長時間記録試験を実施した⁴⁾。試験の結果を図 8 に示す。

図 8 の通り、適切なハード構成と記録ソフト設定を行うことで、目標とする 70 分間の記録と、部分放電

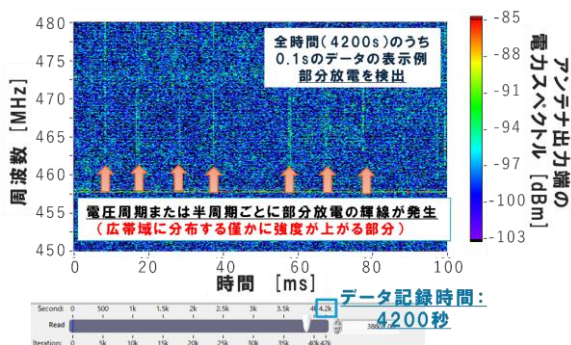


図 8 記録機能の設定による部分放電の電磁波検出結果

表 4 記録機能選定のための機器の計測時間

| 種類 | 機種例 | 計測時間 |
|---------------|-------------------------|-------------------------------------|
| デジタルオシロスコープ | Tektronix DPO7000X シリーズ | 0.5 秒 |
| スペクトラムアナライザ | Tektronix RSA5000B シリーズ | 5 秒～6 時間 ^{※1} ※1 周波数幅極狭 |
| ベクトルシグナルアナライザ | NI PXIe-5663 | 70 分以上 ^{※2} ※2 カスタマイズ要 |

表 5 記録機能の検証用構成

| 区分 | 部位/パラメータ | 構成/設定 |
|------------|----------|------------------------------|
| ハード | 計測器/検出器 | NI PXIe-5663/アンリツ MP534B |
| | 記録媒体 | SUMSUNG Portable SSD T7(2TB) |
| ソフト の設定 | 測定周波数幅 | 30MHz |
| | 中心周波数 | 465MHz |
| | 測定基準レベル | -70dBm |
| | 設定記録時間 | 4200 秒 (70 分) |

の電磁波の検出の双方を達成した。

3.4 解析機能

ここまで挙げた車載装置構成の計測データを用いて、推進コイルの絶縁劣化診断を行う。本節では電磁波のデータから絶縁劣化の兆候を把握する手法と、電磁波の放射源を位置推定する手法について述べる。解析機能は必ずしも車載装置に組み込む必要はないが、車載装置内で解析を行い、その結果をリアルタイムに返すことで、異常発生時の迅速な対応が可能となる。このため、本研究では車載装置の一部として解析機能を検討し、装置全体の運用性向上を図った。

3.4.1 絶縁劣化診断

部分放電を放射する推進コイルと類似した構造のモールド品が絶縁破壊に至るまでどのような挙動を示すかについて、図 9 に示す構成で劣化診断試験を実施した⁵⁾。電磁波は 1 分毎 3 回の頻度で収集し、時刻 t の波形 $f(t)$ の周波数成分について離散フーリエ変換を行い $F(t)$ とし、周波数バンド毎に成分の総和を求めた式(1)による指標 $G_i(t)$ の変化を評価した。本研究では、3 回分のデータを平均化や最大値処理することなく、各回の測定データを独立した解析対象とし、それぞれの周波数成分を評価した。

$$G_i(t) = \sum_{j=1}^{n_i} F_{ij} \tag{1}$$

F_{0j} : 0[MHz]以上 50[MHz]未満の周波数成分

F_{ij} : $100i-50$ [MHz]以上 $100i+50$ [MHz]未満の周波数成分($1 \leq i \leq 10$)

n_i : 同一周波数バンド内の周波数成分の個数

(1)式において特定の周波数成分をピンポイントで追跡するのではなく、周波数バンドの総和として評価するのは、部分放電に伴う電磁波の周波数成分が広帯域であるためである。

図 10 に模擬放電源が絶縁破壊に至るまでの G_i を追ったものを示す。絶縁破壊に至る 2.7 時間より前の 1.7 時間経過後より 400MHz を中心とする指標 G_4 と 500MHz を中心とする指標 G_5 が大きく変化しており、これら指標を追跡することで絶縁破壊へ至る劣化兆候を把握できる可能性があることがわかった。

なお、本試験は加速劣化試験の条件下で行っており、課電時間が連続している点が実走行環境とは異なる。例えば、実走行では 1 回の電圧印加時間が 20 秒と仮定すると、単純な比較では 1 時間が約 180 回分の走行相当に該当する。しかし、実際の運用では連続した電圧印加の条件は異なるため、複数回の測定結果を蓄積し、指標 G_4 や G_5 の変化傾向を監視することで、長期的な劣化兆候を把握する運用が可能であると考えられる。

特に、指標の変化が一定の閾値を超えた場合に早期交換を推奨する運用や、指標の推移を長期的に監視しながら適切なメンテナンスタイミングを判断する手法が有効と考えられる。

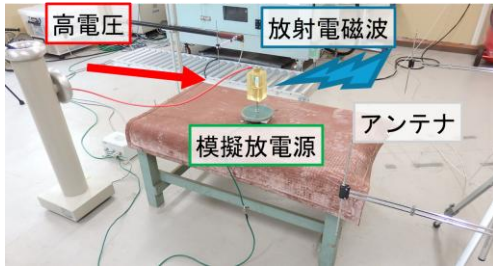


図9 模擬電磁波源を用いた絶縁劣化診断試験構成

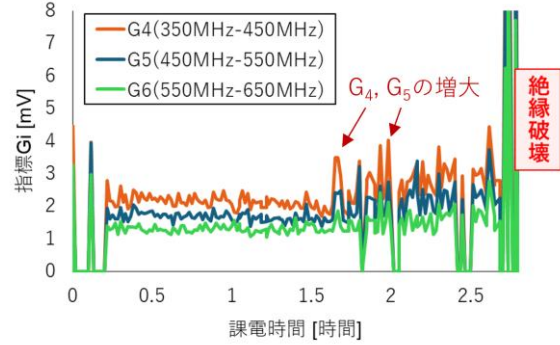


図10 絶縁劣化診断試験結果

3.4.2 電磁波放射源の位置推定

実際の検査環境において推進コイルは図3に示したように連続的に配置されているため、部分放電と考えられる電磁波が検出された際に、その放射源となっている推進コイルの位置特定が必要である。位置推定にあたっては2本のアンテナの受信信号 $f(x)$, $f(x)$ より式(2)を用いて相互相関関数を最大とする時間差 t_{ij} を求め、これら時間差を距離差に換算した。さらに、複数のアンテナの組み合わせを用いて位置推定精度向上を目指した⁶⁾。

$$t_{ij} = \arg \max_t \left| \int_{t_s}^{t_e} f_i(T) f_j(T+t) dT \right| \quad (2)$$

アンテナ2本の位置 \mathbf{P}_i , \mathbf{P}_j と式(2)で得られた時間差 t_{ij} から得られる位置推定曲線 \mathbf{S} は式(3)で与えられる。曲線 \mathbf{S} は二次元では双曲線、三次元では双曲面となる。

$$|\mathbf{P}_i - \mathbf{S}| - |\mathbf{P}_j - \mathbf{S}| = ct_{ij} \quad (3)$$

c : 光速

複数のアンテナの組み合わせから得られた複数の時間差より、空間内の点 \mathbf{S}_e について、式(4)によって単一の組み合わせからの推定結果の確からしさの指標 E_{ij} を、式(5)でそれを積算し複数の組み合わせの評価値を総合した確からしさの指標 E を算出した。

$$E_{ij}(\mathbf{S}_e) = 1 - w_d \left| |\mathbf{P}_i - \mathbf{S}_e| - |\mathbf{P}_j - \mathbf{S}_e| - ct_{ij} \right| \quad (4)$$

w_d : 減点係数

$$E(\mathbf{S}_e) = \prod_{i=1}^n E_i(\mathbf{S}_e) \quad (5)$$

n : 評価に用いるアンテナの組み合わせの総数

実機の推進コイル1個とアンテナ4本を用いて電磁波到達の時間差を算出し、放射源推定を行う試験を行った。放射源推定試験の構成を図11に示す。実車載時は4本のアンテナはアンテナ1から見てX軸方向の延長線上に配置することが望ましいが、今回の試験時は機器配置の都合で必ずしもそのような配置とならなかった。位置推定の結果を図12に示す。指標が高評価である白色の分布は推進コイル右サイドを通過しており、推進コイル半分程度の分解能での位置推定が可能であることを確認した。

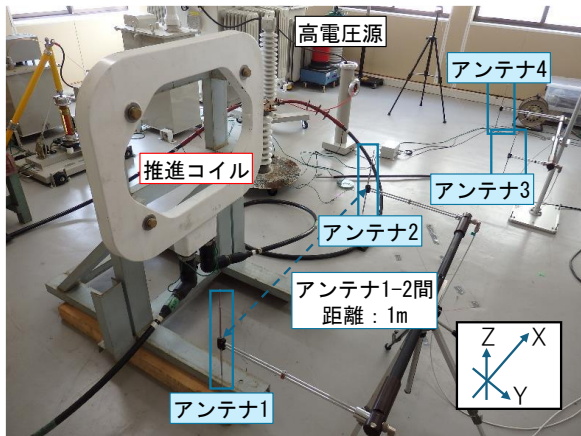


図 11 推進コイルを用いた放射源推定試験構成

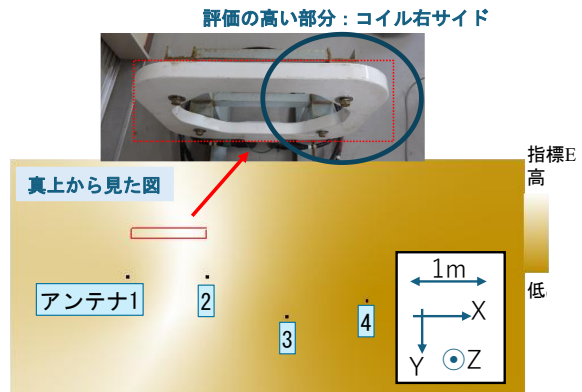


図 12 放射源推定試験結果
(推進コイル付近の真上から見た図)

4. 車載装置の機能確認結果と課題

ここまで車載装置の各機能の要素検証を行い、要件を満たす構成案を示した。以降では、今後検証が必要となる項目について列挙する。

4.1 課題 1 (印加電圧の位相と振幅)

推進コイルの部分放電により発生する電磁波は、図 8 に示したように周期的に発生すると考えられ、同期モータとしての推進コイルの電位分布を考慮して、適切なアンテナ配置（周期的に発生する位相に合わせた車両内での適切な位置）を考慮する必要がある。また、推進コイルに加わる電圧は、セクション（直列回路）での推進コイルの位置で異なるため、2.2 で示した通り通常の耐压試験と比較して低い電圧の印加となる可能性がある。これら電圧位相や電圧負荷に合わせた適切な試験体系の構築が必要である。

4.2 課題 2 (超電導磁石他機器の影響の精査)

車載装置は車両に搭載することを前提として議論を行ってきたが、車両には走行のために必要な多数の機器が配置されている。特に、超電導磁石は他の鉄道車両にはない機器であり、磁場の影響の評価は必須事項である。図 13 に実機の超電導磁石の近傍で放射電磁波を測定し、磁場の影響を評価した事例⁷⁾について示す。本事例では超電導磁石の強磁場と運用のための機器類による測定への影響は軽微であると判断されたが、引き続き精査が必要な項目である。

4.3 課題 3 (統合的な装置の動作検証と運用課題)

本稿における要件提示と機器の構築においては、各機能個別の検証に留まり、車載装置全体としての統合的な動作確認については、現時点で十分に検証されていない。提示した装置の要件を満たす形で、データの検出、計測、記録、解析が統合的に機能することを確認するためのデータフォーマットの決定や動作検証が今後の課題となる。

また、装置化に向けた試験体系の構築、運用時の装置の使い方、位置推定の方策の具体化についても更なる検討が必要である。車両走行時の振動や外部環境ノイズの影響など、車載時に想定される実環境下での耐久性や計測精度の維持についても課題として挙げられる。

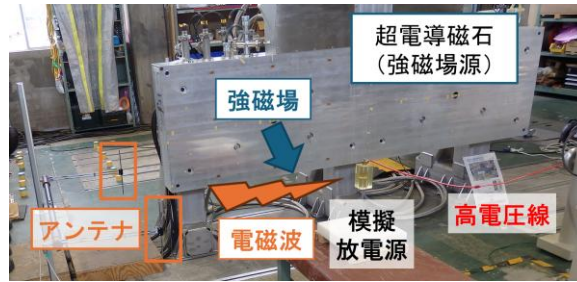


図 13 車載他機器の影響評価試験の実施例

加えて、本研究では車上における解析機能の必要性を示したが、現場での即時診断を目的とする場合と、長期的な経過監視を目的とする場合で、装置の運用方法が異なる点にも留意する必要がある。これらを踏まえ、実環境下での長期試験を通じて、車載装置の運用プロセスを確立することが求められる。

5. まとめ

多数個が地上に配置され特に絶縁性能が重要である超電導磁気浮上式鉄道の推進コイルについて、車載を前提とした絶縁診断装置の各機能の要件を挙げるとともに、機能確認のための各種試験を実施した結果を述べた。検出、計測、記録、解析の各機能においては、必要な要件や機能が検証できた。ただし、未検証項目の確認や全体構成の統合的な動作検証等、引き続き残る課題も散見された。今後は装置構成や解析面でのブラッシュアップを行うとともに、提示した課題の解決に向けて検討を進める予定である。

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) 野田和宏, 永井美徳: 部分放電測定装置, 明電技報, Vol. 337, No. 4, p.13, 2012
- 3) International Electrotechnical Commission, IEC60270-High-voltage test techniques - Partial discharge measurements, 2000
- 4) 太田聡: 地上コイル絶縁診断用車載検査装置における電磁波の長時間記録方法の検討, 令和 6 年電気学会全国大会講演論文集(5-193), p. 326, 2024
- 5) 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, pp. 180-182, 2022
- 6) 太田聡: 放射電磁波の検出による地上コイルの部分放電発生位置推定, 交通・電気鉄道/リニアドライブ合同研究会資料, TER-23-002/LD-23-002, pp.7-12, 2023
- 7) 太田聡, 中嶋稔: 超電導リニア用 SCM の強磁場が電磁波センシングに与える影響の評価, 2023 年電気学会産業応用部門大会予稿集, pp. III-241-242, 2023