

推進コイルの部分放電現象に着目した絶縁診断手法

池田 遼平* 太田 聡* 饗庭 雅之*
依田 裕史* 渡邊 健*

**Insulation Diagnosis with a Focus on Partial Discharge
of the Propulsion Coils of the Superconducting Maglev**

Ryohei IKEDA Satoru OTA Masayuki AIBA
Hiroshi YODA Ken WATANABE

A huge number of ground coils will be required for outdoor use over an extended period. Therefore, it is necessary to secure efficient maintenance during the operation of ground coils. When the maglev vehicle runs, a high voltage is applied to the propulsion coils. We have verified efficient insulation diagnosis methods with a focus on the on partial discharge, which is a predictor of the insulation failure of the propulsion coils. In this paper, we developed a partial discharge model to evaluate insulation performance, and examined electromagnetic wave propagation involved in partial discharge.

キーワード：浮上式鉄道，推進コイル，絶縁診断，部分放電，電磁波

1. はじめに

地上コイルは、リニアモータを構成する要素の一つであり、超電導磁気浮上式鉄道（以下超電導リニア）の固有の機器である。超電導リニアにおいて、軌道の全線にわたって敷設される地上コイルは、磁界を発生させる機能を持ち、車両の台車に搭載される超電導磁石との相互作用により、車両に浮上力、推進力、および案内力を発生させる重要機器である。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、莫大な個数が必要となるため、運用時の効率的な保守が求められる。これまで鉄道総研では、車両の通過時に高電圧が印加される推進系地上コイル（以下推進コイル）において、絶縁異常の兆候である部分放電現象に着目し、多数個を効率的に絶縁診断する手法の検討および検証を行ってきた^{1) 2)}。

絶縁性能の変化を定量的に評価するための道具として部分放電発生試験体を製作し、また部分放電発生に伴う電磁波の検出アンテナへの伝搬に関して検討を行ったので、本論文において、概要を述べる。

2. 地上コイルの絶縁異常

2.1 地上コイルの構造

地上コイルは、基本的に鉄心のない空芯コイルであり、車上の超電導磁石との間に繰り返し働く電磁力を負担するために、コイル巻線をモールド樹脂で一体成形し剛性を高めている。地上コイルの種類は、外部からの電

* 浮上式鉄道技術研究部 電磁システム研究室

力供給が前提となる推進コイル、電力供給のない浮上案内系地上コイル（以下、浮上案内コイル）に分類できる。高電圧環境下で使用される推進コイルのモールド樹脂には、絶縁強度に優れたエポキシ樹脂等が適用されている。機械的強度や耐久性が要求される浮上案内コイルのモールド樹脂には、ガラス繊維で強化した樹脂等が適用されている。

2.2 推進コイルの役割

推進コイルは超電導リニアのガイドウェイ内で多数個が連続的に接続され、き電セクションを構成する。これは、ガイドウェイ両側の2個のコイルで結線が完結する浮上案内コイルとは異なる。したがって、浮上案内コイル1個と比較して推進コイルは、1個の不具合による影響が大きい。車両走行時、推進電流および超電導磁石の走行に伴う磁場変化による逆起電力により、き電セクション上流側の推進コイルほど高い電圧が印加される。そのため、推進コイルを運用する際には、一般的な高電圧機器と同様の配慮をする必要がある。

2.3 推進コイルの絶縁異常

推進コイルモールド樹脂内部の空隙部において発生する微小な絶縁破壊現象である部分放電は、初期の段階では軽微であっても、繰り返して発生することにより絶縁破壊箇所が進展、拡大し、最終的には推進コイルモールド樹脂の絶縁破壊に至る原因となる。この部分放電測定を推進コイルの絶縁性能評価の一つの方法としている。以下に、推進コイルに想定される絶縁異常を示す。

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

(1) 内在するボイド（気泡）

巻線コイルを樹脂で一体成形する際、各種配合材を混合したモールド樹脂内にボイドが残存する可能性が考えられる。内在するボイドは、モールド樹脂材料と比誘電率が異なるため、電圧印加時に当該部分に電界が集中し、部分放電を引き起こす可能性がある。

(2) 導体剥離

推進コイルでは、巻線コイルとモールド樹脂との界面は接着することが前提となっている。電磁的な加振や、通電による温度変化が繰り返される環境での長期屋外使用により、両者の界面に剥離を生ずる可能性がある。両者の界面に空間が生じると、前項と同様の電界集中による部分放電を引き起こす可能性がある。

(3) 不適切な現地施工

現地で推進コイルとコイル間ケーブルとの接続が不適切に施工された場合、絶縁異状に繋がる可能性がある。

2.4 推進コイルの絶縁診断

鉄道総研では、車両通過時に高電圧が印加される推進コイルを対象に、絶縁異状の兆候である部分放電現象に着目し、多数個の推進コイルを効率的に絶縁診断する手法の検討および検証を行ってきた。以下に、推進コイルの部分放電に着目した絶縁診断手法について述べる。

(1) 試験電圧

部分放電現象の検出には、高電圧を印加する必要があるが、これには大きな電気設備を要するため、車両走行時に実際に発生する高電圧により試験を行うものとする。

(2) 検査手法

部分放電が発生すると広帯域の電磁波を放出することが知られている。鉄道総研では、絶縁欠陥を有する推進コイルに高電圧を印加した際に発生する UHF 帯 (300MHz ~ 3GHz) の電磁波に着目し、推進コイルの絶縁性能評価を行う研究を進めてきた。電磁波の検出には、半波長ダイポールアンテナを用いる。本診断手法により、多数個の推進コイルの検査を連続的に行うことが可能である。

3. 絶縁異状レベルの定量的評価のための部分放電発生試験体の製作

本診断手法において評価の指標としているのは、特定の発生頻度（1秒間における発生回数）で発生している最大の部分放電電荷量である。ただし、本指標と推進コイルの長期絶縁性能の関係については、長期課電試験の実績実績はあるものの、未解明の部分があり、完全には確立されていない。本研究では、推進コイル絶縁劣化の定量的評価指標に、最大部分放電電荷量を適用することを目標の1つとしている。本論文では、この定量的評価

に必要なパラメータについて検討し、部分放電発生試験体を製作したので、その結果を示す。

3.1 製作パラメータの検討

以下に、部分放電発生試験体を製作する際の課題について述べる。

(1) 放電電荷量のコントロール

これまでの検証では、どのような絶縁欠陥をどのように推進コイルへ仕込むかについては検討されているが、放電電荷量をコントロールして製作した実績は少ない。

(2) 欠陥部の可視化

推進コイルモールド樹脂には、巻線コイルと線膨張係数を合わせるために充填材が混合されている。そのため、モールド樹脂内部の成型後の様子は見るができない。

(3) 部分放電発生電圧の低電圧化

これまでの検証における部分放電発生電圧は、実機推進コイルの使用電圧やスケールを意識して比較的高電圧であったが、部分放電発生電圧をより低くすることで、試験設備の必要容量の低減や、より狭いスペースでも試験実施が可能となる。

(4) 試験体数の確保

より精度よく部分放電電荷量と絶縁性能の評価指標の相関性を得るためには、ある程度の試験体数を確保する必要がある。

3.2 放電電荷量のコントロール

部分放電電荷量 Q は、静電容量 C_B 、電圧降下分 ΔV_B 、放電開始電圧 V_S 、放電消滅電圧 V_E （ただし、 $V_S > V_E$ ）とすると、式(1)で与えられる。

$$Q = C_B (V_S - V_E) = C_B \Delta V_B \quad (1)$$

式(1)において、一般的に V_S は放電部の絶縁破壊電圧 V_B より高く、 V_E は V_B よりも低いと考えられる。ここで、 Q を計算により求める際にいくつか問題がある。まず、放電部に印加されている電圧が V_B を超えた段階で直ちに部分放電が発生する訳ではないこと、または逆に、 V_B を超えない印加電圧であっても部分放電が発生し得ること、放電部に蓄えられている電荷全てが放電される訳ではないことが挙げられる。これは、部分放電現象が確率的に発生すること、放電部の微小な形状の違いにより絶縁破壊電圧が異なることが原因である。次に、推進コイル製作段階では欠陥の大きさを推定できないことが挙げられる。そのため、式(1)中における ΔV_B に加え、 C_B までも未知数となり、部分放電測定の結果は2個の未知数の積となる。従って、放電部の形状が既知でない限りは、部分放電電荷量による欠陥部の評価は困難である。しかしながら、欠陥部が単純化されたモールド品を製作

できれば、欠陥部の形状が既知のパラメータとなり、部分放電電荷量のコントロールがある程度可能になると考えられる。

3.3 欠陥部の形状

部分放電電荷量のコントロールを目指し、単純な形状の欠陥部を有する部分放電発生試験体を製作した。部分放電試験体の全体形状を図1に、諸元を以下に示す。なお、試験体の電極間には予め準備した2種類の欠陥を埋め込み、電極間距離Aは5mmとなるように設定した。欠陥については、100pC程度の部分放電電荷量を想定した平板状空隙と、それよりも低い電荷量のボイドとした。

(1) 樹脂モールド部

形状：四角柱状 寸法：60mm × 60mm × 110mm
材質：エポキシ樹脂

(2) 電極部（電圧印加側）

形状：円筒状 寸法：φ 25mm × 70mm
材質：真鍮

(3) 電極部（接地側）

形状：円筒状 寸法：φ 25mm × 52.5mm
材質：真鍮

(4) 欠陥の種類

(a) ボイド貼付

予め製作したφ 2mm程度のボイドを含む樹脂ブロックを電極間に埋め込み、試験体を製作した。

(b) 加工穴（平板状空隙）

加工穴の形状を図2に示す。予め製作した厚さCが2mmの板に、φ Bが2mmの穴を開けブロック状に切り出した板を電極間に固定した。この板を固定後、同形状の板で穴に蓋をし、試験体を製作した

(c) 標準試験体（比較用）

比較のため欠陥を設けない標準試験体を製作した。

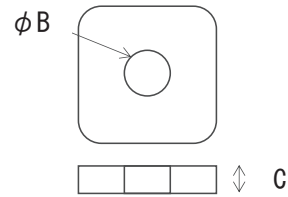


図2 加工穴の形状

3.4 試験結果

製作した部分放電発生試験体の種別と製作数量を表1に示す。また、欠陥部の外観を図3、図4に示す。これまでの検証ではモールド樹脂に混合する充填材の影響で、欠陥部がモールドの中でどのような状況となっているか確認は困難であった。今回製作した部分放電発生試験体では、充填材を混合せずモールドを行うことで、欠陥部の可視化が可能となった。

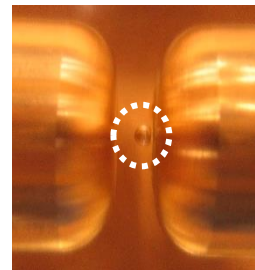


図3 ボイド貼付の外観

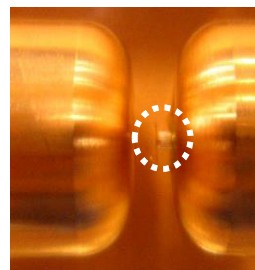


図4 加工穴（空隙平板）の外観

表1 製作した部分放電発生試験体

試験体番号	種別	数量
1, 2	ボイド貼付	2
3, 4	加工穴（平板状空隙）	2
5, 6	標準試験体（比較用）	2

(1) 部分放電測定条件

製作した部分放電発生試験体に対し、表2の条件で部分放電測定を行った。

表2 部分放電測定条件

項目	測定条件
電圧印加周波数 [Hz]	50
最大印加電圧 [kV]	12.5

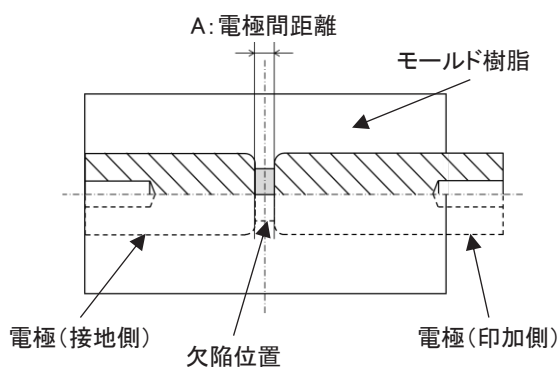


図1 部分放電発生試験体の全体形状

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

(2) 部分放電測定結果

部分放電の測定結果を表3に示す。ボイドを貼付した試験体1, 試験体2に関しては, 部分放電発生電圧が10kV以下となり, その際の放電電荷量も小さい値とすることができた。平板状空隙を埋め込んだ試験体3に関しては, 想定に近い部分放電電荷量の試験体を製作することができた。しかし, 試験体4の放電電荷量は, ボイド貼付を行った試験体1, 試験体2と近い値となった。これは, 平板状空隙の貼付時やモールド時に空隙部にモールド樹脂が流入し, 欠陥部形状がボイドのようになっていた可能性が考えられる。欠陥を設けなかった試験体5, 試験体6に関しては, 12.5kVの最大印加電圧でも沿面放電や気中放電は発生しなかった。

表3 部分放電測定結果

試験体番号	種別	部分放電発生電圧 [kV]	放電電荷量 [pC]
1	ボイド貼付	7.0	10.9
2		10.0	8.4
3	加工穴 (平板状空隙)	7.8	79.6
4		6.7	11.2
5	標準試験体	12.5	発生なし
6	(比較用)	12.5	発生なし

3.5 部分放電発生試験体のまとめ

部分放電電荷量と絶縁性能の関係を定量的に評価するため, 部分放電発生試験体を製作した。部分放電測定結果より, 放電電荷量のコントロールに関しては未達成の部分があるものの, 発生電圧の低電圧化, 欠陥部の可視化については満足する結果が得られた。

4. 推進コイルの部分放電に伴い発生する電磁波の伝搬に関する検討

推進コイルのモールド樹脂内部で発生する部分放電の定量的把握の一環として, モールド樹脂内部での部分放電によって発生する電磁波の強度を検討した。

4.1 放電電流

推進コイルのモールド樹脂内部に平板状空隙があると仮定し, この空隙で発生する放電電流を計算した³⁾。

平板状空隙の静電容量 C は式(2)で与えられる。

$$C = \epsilon_0 \epsilon_{rg} S_g / D_g \quad (2)$$

ϵ_0 : 真空の誘電率 (= 8.854×10^{-12} [F/m]),
 ϵ_{rg} : 空隙部 (空気) の比誘電率 (= 1.001),
 S_g : 空隙部面積, D_g : 空隙部長さ

ここで, t : 時間, $r(t)$: 放電抵抗, $i(t)$: 電流, $v(t)$: 電圧, $q(t)$: 電荷量, Q_0 : 初期放電電荷量, k : 火花定数, C : 静電容量とすると, それぞれの関係は式(3)~式(6)で示される。

$$r(t) = k D_g / q(t) \quad (3)$$

$$i(t) = v(t) / r(t) \quad (4)$$

$$v(t + \Delta t) = v(t) - i(t) \times \Delta t / C \quad (5)$$

$$q(t + \Delta t) = q(t) + i(t) \times \Delta t \quad (6)$$

式(3)~式(6)について, 電圧と電荷量の初期値を $v(0) = V_s$, $q(0) = Q_0$ として, 電圧 $v(t)$ が放電消滅電圧 V_E になるまで繰り返し計算し, 放電電流 $i(t)$ を求めた。ここでは, 表4に示す条件について, 放電電流を計算した結果を図5に示す。放電はおおむね3nsまでの間で発生しており, 空隙部長さが短いほど放電時間は短く, 放電電流の最大値は大きくなっていることが分かる。これは, 空隙部長さが短いほど放電抵抗が低いためと考えられる。

表4 放電電流計算条件

項目	条件
空隙部温度 [°C]	80
空隙部長さ D_g [mm]	0.6, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0
放電開始電圧 V_s [kV]	2.9, 4.2, 5.7, 7.2, 8.5, 9.8
放電消滅電圧 V_E [kV]	0
放電電荷量 Q [pC]	100
初期放電電荷量 Q_0 [pC]	0.5
火花定数 k [$\Omega \cdot C/m$]	1×10^{-3}
Δt [s]	1×10^{-12}

4.2 電界強度の周波数特性

前項で計算した放電電流波形について, 0 から 10ns 間の 10000 点で離散フーリエ変換を行い, 電流のフーリエ振幅を用いて部分放電発生箇所から 1m 離れた場所における電界強度 E を式(7)により計算した⁴⁾。

$$E = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0} I \cdot l / 2\lambda r = 60\pi I \cdot \lambda r \quad (7)$$

μ_0 : 真空の透磁率, I : 電流, l : 長さ,
 λ : 波長 (= cf , c : 光速, f : 周波数),
 r : 距離 (= 1 [m])

式(7)により得られた電界強度の周波数特性を図6に示す。同図より, 電界強度が最大となる周波数は 300 ~ 500MHz であり, 空隙部長さ D_g が長いほど最大値が大きく, その発生周波数が低くなっていることが分かる。

4.3 距離とアンテナ受信誘起電圧の関係

まず, 4.1 項で計算した放電電流波形について, 最大値

を中心とした前後 1ns 間の 2000 点で離散フーリエ変換を行い、部分放電に伴う電磁波の検出周波数を 500MHz とし、その周波数での電界強度を計算した。計算では、式 (9) に $f = 5 \times 10^8$ [Hz] を代入した。次に、算出した電界強度の電磁波を半波長ダイポールアンテナで受信する場合について、式 (8) を用いて誘起電圧 V を計算した。

$$V = E l_e = 60 I \cdot l / r \quad (8)$$

l_e : アンテナの実効長 ($= \lambda / \pi$)

部分放電発生箇所からアンテナまでの距離と誘起電圧との関係を図 7 に示す。同図より、空隙部長さ D_g が長いほど誘起電圧が大きくなること分かる。これは、誘起電圧は放電電流と空隙部長さに比例するためである。

4.4 電磁波伝搬のまとめ

モールド樹脂内部での部分放電発生時の放電電流を計算し、これに基づき部分放電に伴い発生する電磁波のアンテナ受信誘起電圧を計算した。その結果から、部分放電に伴う電磁波のアンテナ受信特性を確認した。なお、本章では電磁波強度の定性的な把握を目的としたため、伝搬損失や指向性については考慮していない。

5. 高速走行での電磁波検出試験に向けた検討

鉄道総研では、絶縁劣化時に推進系コイルが発する部分放電による電磁波を走行中の浮上式車両（営業車または保守用車）で検出し、効率的に診断する手法を研究している。本手法は、これまでに定置および低速での検出性能は確認している^{1) 5)}が、高速での性能確認はできていなかった。そのため、鉄道総研国立研究所構内の集電試験装置⁶⁾を用いて、走行台車に電磁波受信部を搭載して、高速走行しながら地上放電源からの電磁波を検出する試験を計画している。この試験に先立ち、集電試験装置の走行環境における電磁波を測定したので、結果を紹介する。

5.1 走行台車および牽引車通過時の電磁波地上測定

集電試験装置の走行路端部から約 1m 離れ、高さ約 1m の位置に半波長ダイポールアンテナ（500MHz 計測用）を設置し、その前を走行台車および牽引車が通過する際の電磁波を測定した。結果を図 8 に示す。同図より、走行台車および牽引車通過による電磁波は、走行台車搭載の車上データ送信用無線テレメータからのもの（169MHz）以外は発生していないことを確認した。

5.2 低速走行時の電磁波車上測定

走行台車に半波長ダイポールアンテナ（500MHz 計測

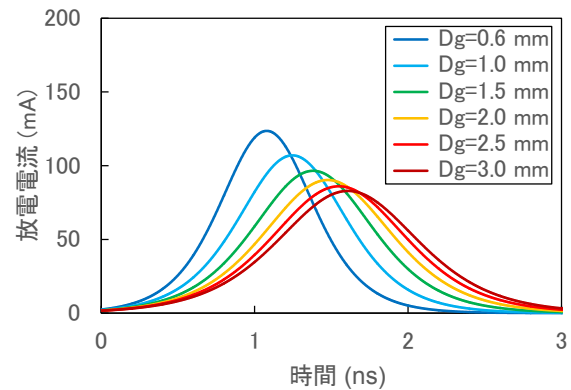


図5 部分放電発生時の放電電流

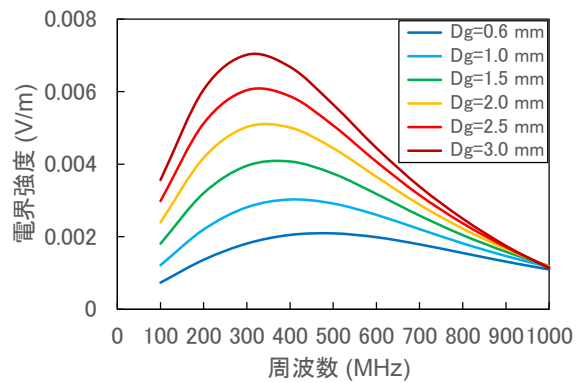


図6 電界強度の周波数特性

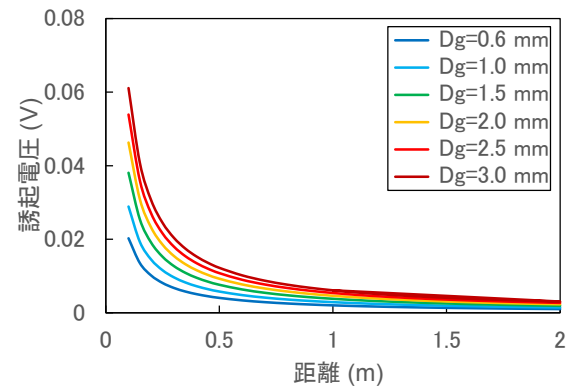


図7 距離と誘起電圧の関係

用)を仮設し、牽引車により低速牽引走行した際の環境電磁波、および走行路脇の気中放電源により火花を発生させた時の電磁波を測定した。試験状況を図 9 に、結果を図 10 に示す。図 10 より、地上放電源からの電磁波の強度が環境電磁波の強度と比較して十分大きいレベルであり、計測器のトリガーレベルを適切に設定することで、地上の模擬放電源からの電磁波を車上で自動計測できる見通しを得た。

6. まとめ

超電導リニア用推進コイルの絶縁異状レベルの定量的

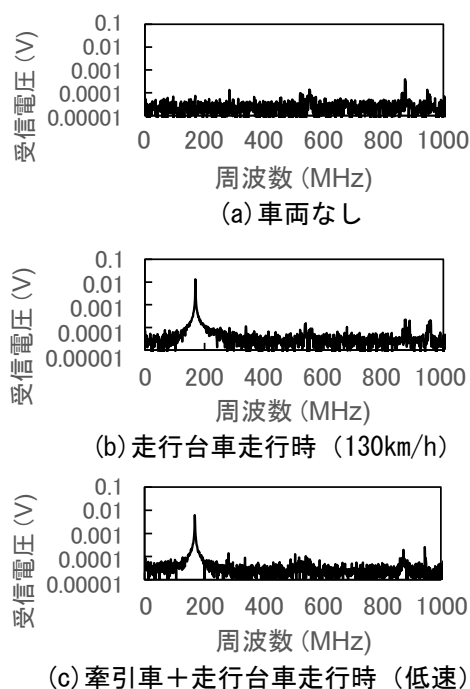


図8 電磁波測定結果



図9 低速牽引走行時の測定状況

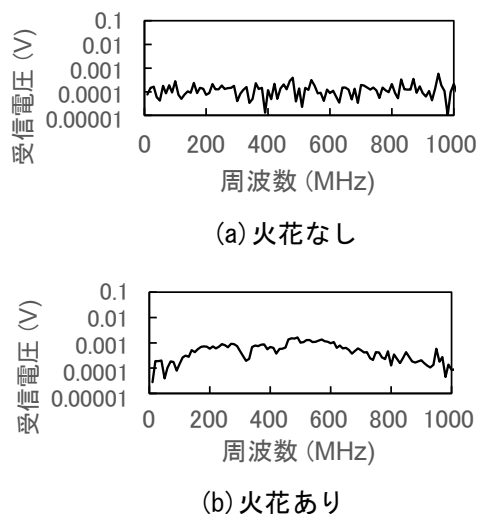


図10 牽引走行時電磁波測定結果

評価のための部分放電発生試験体を製作した。また、推進コイルの部分放電に伴い発生する電磁波の伝搬に関する検討を行った。それらの結果を以下にまとめる。

- (1) 製作した部分放電試験体の部分放電測定結果より、発生電圧の低電圧化、欠陥部の可視化が可能な試験体を製作できることを確認した。
- (2) モールド樹脂内部での部分放電発生時の放電電流を計算し、計算結果に基づいて部分放電に伴い発生する電磁波のアンテナ受信誘起電圧を求めた。
- (3) 集電試験装置を用いて、高速走行しながら地上放電源からの電磁波を車上で検出する試験に先立ち、集電試験装置の走行環境における電磁波を測定した。その結果、地上の模擬放電源からの電磁波を車上で自動計測できる見通しを得た。

今後は、より高精度な絶縁性能評価用の部分放電試験体製作および試験、部分放電発生時の放電電流の計算結果を参考にした詳細な電磁波伝搬の解析、集電試験装置による高速走行時の車上で電磁波検出試験等を実施する予定である。

文献

- 1) 鈴木正夫, 太田聡, 池田遼平, 川田昌武: 電磁波検出による地上コイル内部欠陥位置標定に関する検討, 鉄道総研報告, Vol.27, No.7, pp.11-16, 2013
- 2) 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
- 3) 堤泰行, 草野善照, 小野訓, 藤井寛一, 檜垣勝: 火花放電の電波雑音スペクトルに及ぼす放電開始電圧の影響, 電気学会論文誌 A, Vol.111, No.11, pp.984-985, 1991
- 4) 電子情報通信学会編: 電磁妨害波の基本と対策, 電気情報通信学会, pp.43-44, 1995
- 5) 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, 平成 24 年電気学会基礎・材料・共通部門大会論文集, pp.389-394, 2012
- 6) 鉄道総合技術研究所: 集電試験装置,
<https://www.rtri.or.jp/rd/division/rd44/rd4430/rd44300201.html> (2019年3月15日参照)