

# 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

太田 聡\* 依田 裕史\* 池田 遼平\*

Development of Efficient Non-contact Insulation Diagnosis  
for the Propulsion Coil of the Superconducting Maglev

Satoru OTA Hiroshi YODA Ryohei IKEDA

Superconducting maglev systems require ground coils along the entire track. The performance stability of the ground coils has a large effect on the stability of the system. When a vehicle runs, a high voltage is applied to the propulsion coils (a type of ground coil). The propulsion coils should be inspected periodically to evaluate insulation performance in the same way as the general high voltage equipment. In this paper, the authors focus on the electromagnetic waves of the UHF band that is emitted from the propulsion coil with insulation failure. For efficient diagnosis, the authors have verified the possibility of high-speed measurement.

キーワード：浮上式鉄道，推進系地上コイル，絶縁診断，部分放電，電磁波

## 1. はじめに

超電導磁気浮上式鉄道（以下、浮上式鉄道）において、地上コイルは路線の全線にわたって敷設されるため、莫大な個数が必要となる。加えて、地上コイルは屋外環境、振動環境、高電圧環境の複合した環境下での長期間の使用が前提となる他に類を見ない機器である。地上コイルの開発においては、コストの低減や各種環境に対する高い耐久性が求められると共に、運用時の効率的な保守管理手法の確立が求められる。本論文においては、多数個が対象となる推進系地上コイルにおいて、非接触で検査をすることができ、かつ効率的な絶縁診断手法について検討し、構成要素について検証試験を行ったのでその結果を述べる。

### 1.1 地上コイルの種類

地上コイルには複数の種類の負荷に対する高い性能が求められるため、一般的には役割と負荷に応じて性能を特化した複数の種類の地上コイルを併用する。図1に、浮上式鉄道における地上コイル配置の一例を示す。同図中、超電導磁石と対向する面に配置され、車両に対して上下力および左右力を与える浮上案内系地上コイル（以下、浮上案内コイル）には、主に機械強度および表面の強度が求められるため、繊維強化プラスチックを材料として更に耐候性塗料を施したものが用いられる。車両に対して前後力を与える推進系地上コイル（以下、推進コ

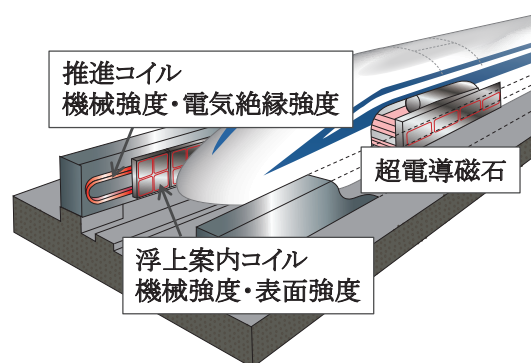


図1 地上コイルの配置例

イル)には、機械強度に加えて、多数個のコイルが直列接続され、また高電圧が印加されるため、所定の電気絶縁強度が求められる。そのため、エポキシ樹脂等の絶縁材料で導体をモールドしたものが用いられる。その他、鉄道総研では、過去に製造個数と敷設工数を減らし、コスト低減を目的とした推進・浮上・案内兼用地上コイル(PLGコイル)の開発を行っている<sup>1)</sup>。

### 1.2 推進コイルの特徴

推進コイルは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異なる。従って、推進コイル1個の故障による影響が、浮上案内コイル1個の故障による影響と比較して大きくなる。推進系回路の構成例を図2に示す。浮上式鉄道車両の走行時、推進電流および超電導磁石の移動に伴う磁場変化による

\* 浮上式鉄道技術研究部 電磁システム研究室

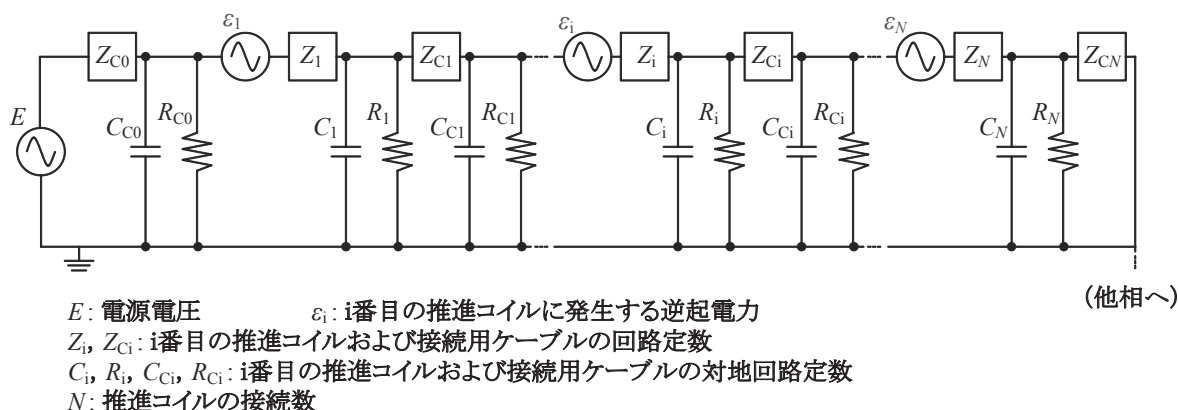


図2 推進系回路の構成例（1相のみ）

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。従って、推進コイルを運用する際には、一般的な高電圧機器の運用時と同様の配慮をする必要がある。

## 2. 推進コイルの保守

推進コイルの一種である PLG コイルの主要諸元を表1に示す。推進コイルはこれらの使用条件を考慮して、性能を安定して発揮できるよう運用する必要がある。

推進コイルの絶縁性能の検査方法の例として、以下が挙げられる<sup>2)</sup>。

- 電気定数測定（抵抗・インダクタンス）
- 非破壊偏肉測定
- 絶縁抵抗測定
- 耐電圧試験（商用周波耐電圧・衝撃耐電圧）
- 部分放電測定（IEC60270<sup>3)</sup>）
- 誘電正接測定

これらの検査方法は、推進コイルの成型不良や内部絶縁欠陥の評価手法として有効である。しかし、手法の大

半が製造メーカにおける出荷前検査を前提とした検査方法であり、推進コイルを使用する現地での検査方法としては、以下の要因から必ずしも適当ではないと考えられる。

- 専用で大型の検査設備が必要（耐電圧試験など）
- 環境ノイズとの切り分けが困難（部分放電測定など）
- 推進コイル単体を検査対象とした場合、そのままでは検査が困難で、多数の接続箇所の脱着が必要（全般）

また、これらの評価手法は全て時間基準保全（TBM）によるものであるため、多数個にわたる推進コイルの経時的な絶縁性能を効率的に検査することが不可能である。そこで、推進コイルを経時的に検査できる状態基準保全（CBM）に基づいた効率的な検査手法を検討した。

### 2.1 部分放電の他の物理現象による検出

部分放電は、推進コイル内部において発生する微小な絶縁破壊現象である。初期は軽微な放電であっても、繰り返しの発生により絶縁不良箇所が進展・拡大し、最終的には推進コイル本体の絶縁破壊の原因となる。部分放電は同一材料内では電界強度が不均衡であり電界集中が起こる箇所、または異種材料の組み合わせでは絶縁破壊強度が小さい材料が混在する場合に発生することが多い。例えば、モールド樹脂の構造不良（突起部の存在、同電位処理の不良）による部分放電の発生は前者が原因であり、モールド樹脂内における空隙（ボイド）の存在による部分放電の発生は後者が原因である。部分放電は多岐にわたる物理現象を伴って発生するため、電磁波・音・パルス電流・熱・分解ガスなどの物理化学現象によって検知することが可能である<sup>4)</sup>。表2に、一般的な高電圧機器で部分放電が発生した際に伴って発生する物理化学現象と、検知方法を示す。

これらの検知方法は、既存の部分放電測定法（IEC60270に準拠した試験方法）と比較して専用の大型設備を必要としない等の利点から、新しい高電圧機器の

表1 PLG コイルの主要諸元

コイル本体	外観寸法	0.88 × 1.052m
	絶縁方式	樹脂モールド (エポキシ樹脂)
	導体	アルミニウム
	導体形状	矩形
	導体断面	0.04 × 0.11m
	接続部数	3
接続ケーブル	絶縁方式	絶縁被覆 (架橋ポリエチレン)
	導体断面積	60mm <sup>2</sup>
使用条件 (共通)	環境温度	-30 ~ 50℃
	環境湿度	最高 100% (結露あり)
	天候	全天候
	公称電圧	33kV

表2 部分放電に伴って発生する物理化学現象と検知方法の例

物理化学現象	検知方法の例
発光	光センサ, カメラ, 画像処理
音波・超音波	AEセンサ, 音響センサ
電磁気的变化	高周波電流計測, 浮遊容量測定 電磁波
ガスの発生	ガスセンサ, ガス分析
発熱	温度センサ

検査手法として、一部の手法については国際規格として制定が検討される段階まで来ている<sup>5)</sup>。高電圧機器のオンラインモニタリング（現地での絶縁性能の検査）を行う事例として、6.6kV電力ケーブル・真空遮断器・変圧器<sup>6)</sup>や、22～33kVキュービクル内の高圧機器<sup>7)</sup>等を対象とした部分放電検出手法の提案が行われている。

表2の各手法を樹脂モールド機器である推進コイルへ適用することを検討した場合、発光現象やガスの発生を検知する検査手法は不相当であると考えられる。残りの手法のうち、発熱現象の検知も推進コイルの使用条件（高電圧印加下において大電流が通電される）を鑑みると困難である。筆者らは、残りの音波・超音波を検出する方法および電磁気的变化を検知する方法について、検出可能性の検証を行っている<sup>4) 8)</sup>。音波・超音波を検出する手法では、AEセンサを用いて部分放電現象を検知可能<sup>8)</sup>、電磁気的变化を検出する手法では、アンテナやUHF帯の電磁波センサにより部分放電現象を検知可能であった<sup>4) 8)</sup>。

### 3. 効率的な推進コイル検査手法

#### 3.1 検査用電圧の印加方法

部分放電は高電圧の印加下で発生するため、使用する現地で推進コイルの検査を行う場合、検査用に電圧を印加する必要がある。専用の耐圧試験機を用いて電圧を印加する場合、印加電圧はき電セクション内の地上コイルで共通となり、必要な電気設備容量 $P$ は式(1)で与えられる。

$$P = 2\pi f \left( \sum_{i=1}^N C_i + \sum_{i=0}^N C_{Ci} \right) V \quad (1)$$

ここで、 $V$ は試験電圧、 $f$ は試験電圧の周波数である。その他の変数は図1に示した通りである。多数個の地上コイルが直列に接続される推進コイルでは、電圧印加に必要な電気設備は大きくなり、数百kVAオーダの大規模な試験用設備が必要となる。一方、浮上式鉄道車両の走行中においても高電圧が発生し、き電セクション最上流において推進コイルに印加される電圧は最も高くなり、その電圧 $V$ の絶対値は式(2)で与えられる。

$$|V| = \sqrt{(NXI + NX_C I)^2 + (NRI + NR_C I + E)^2} \\ E \propto vN_S \\ I \propto F_P \quad (2)$$

ここで、 $X$ ,  $X_C$ ,  $R$ ,  $R_C$ は推進コイルおよび接続ケーブルの電気定数、 $I$ は推進コイルへの通電電流、 $E$ は逆起電力、 $v$ は車両の走行速度、 $N_S$ は通過する超電導磁石の個数、 $F_P$ は車両に与える推進力である。式(2)より、推進コイルに印加される電圧は、高速走行時、長大編成走行時、上り勾配等の推進力が必要となる時のいずれかにおいて大きくなる。もし車両の走行時に推進コイルに発生する電圧を試験電圧として検査を行うことができれば、製品寿命を縮める要因となる不要な電圧印加を避けることができ、また、実負荷そのものによる検査が可能となると考えられる。

#### 3.2 部分放電検知方法の選定

前章において推進コイルの部分放電検出手法として、AEセンサによる超音波の検知およびアンテナ等により電磁波を検出する手法を挙げた。現地での検査実施を考慮すると、AEセンサは検査対象の推進コイルへの貼付が前提となるため、多数個を検査する際には、多数のセンサを貼付するか、貼付用の可動式着脱装置が必要となり、現実的ではない。一方、電磁波を検出する手法は、空中伝播する地上コイルの部分放電に起因する電磁的ノイズを検出するため、離隔をもって検査可能であり、多数個の推進コイルの検査に対応可能であると考えられる。このため、これ以降は電磁波を検出する手法について、より詳細な検査手法を検討する。

#### 3.3 部分放電に伴う電磁波ノイズの検出方法

筆者らは、絶縁不良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、電磁波の検出により、推進コイルの絶縁性能評価を行う研究を進めてきた。この研究において電磁波の検出に、半波長ダイポールアンテナを用い、複数のアンテナに到達する時間差を算出する電波干渉計の原理により、推進コイルにおいて部分放電の発生している位置を推定した<sup>9) 10)</sup>。また、空中を伝播する他の信号(放送波など)の影響を最小限とするために、ソフトウェア面の方策としては、有限インパルス応答(FIR)フィルタによる周波数帯域制限を適用し<sup>11)</sup>、また、ハードウェア面の方策としては、電磁波シールド材が<sup>12)</sup>、部分放電に起因するノイズ以外の空中伝播信号に有効であることを確認した。これらの検出方法を総括し、走行試験によって、保守用車の走行速度程度の低速移動中であれば、推進コイルの部分放電による電磁波の検出および位置推定が可能であることを確認した<sup>13)</sup>。また、実使用時を模

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

擬した浮上コイルと車体が存在する構成においても、同様に測定可能であることを確認した<sup>14)</sup>。図3に、実使用時を模擬した試験構成と、試験で得られた部分放電ノイズのウェーブレット変換結果の例を示す。

3.4 効率的な絶縁診断構成

これまでの検討を総括すると、推進コイルの絶縁検査手法としては、電圧の印加方法などの面から、浮上式鉄道車両に検査用アンテナを搭載し、部分放電に起因する電磁波を検知する方法が効率的であると考えられる。しかしながら、これまでの検証では、位置推定のために0.1ns オーダの時間差演算を行わなければならない、連続計測を行うことができない欠点があった。そこで、部分放電に起因する電磁波が図3 (b) のように周波数的に広い分布をもつ特徴を利用して、時間領域ではなく、周波数領域で連続的に計測を行い、部分放電に伴う電磁波を検出することとした。その場合、必要な検出用アンテナは1本でよく、アンテナの指向性を鋭くすることで、位置推定精度を上げることができる。図4にこれまでの複数の検出用アンテナによる位置推定方法<sup>8)</sup>と、今回提案する単一アンテナによる位置推定方法の違いを示す。単一アンテナを用いた場合、複数アンテナを用いた場合と比較すると位置推定精度は劣るが、指向性を鋭くすることで推進コイル単体を特定することは可能で、かつ時間差を計算する必要がないため、連続計測に適していると考えられる。

4. 検証試験・試験結果

4.1 検証試験の目的

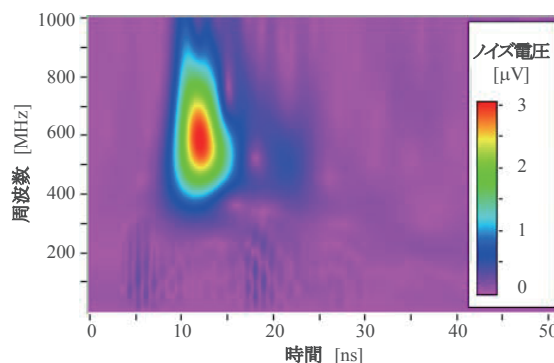
単一アンテナを用いて連続的に推進コイルの絶縁診断を行うためには、UHF帯の周波数領域での測定を高速で行う必要がある。絶縁診断時における推進コイル単体の位置推定分割数を  $D$ 、推進コイルの前後方向寸法を  $0.9\text{m}$ 、車両走行速度を  $v$  [km/h] とすると、1秒間に周波数領域で必要な測定回数  $N_p$  は式(3)で与えられる。

$$N_p = \frac{v \left( \frac{1.0 \times 10^3}{3.6 \times 10^3} \right)}{0.9} D = vD / 3.24 \quad (3)$$

例えば、車両が時速 500km/h で走行中に検査を行い、推進コイルの位置分解能として 0.09m (推進コイルの進行方向寸法 10 分割相当) が必要な場合、 $N_p$  は 1500 程度となる。また、図3(b)で示した通り、部分放電は ns オーダの現象であるため、今回は単一アンテナによる部分放電の取得において、推進コイルの位置推定分解能を十分に保った上で、ns オーダの短時間の現象を連続的に検出可能であるかを試験の目的とした。

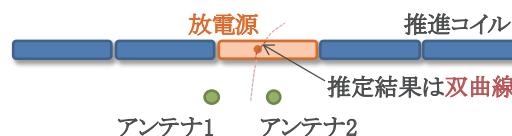


(a) 実使用時を模擬した試験構成

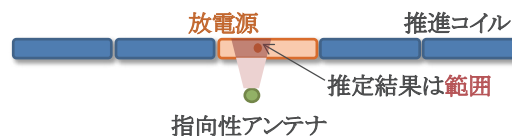


(b) 部分放電ノイズの計測結果

図3 実使用時を模擬した構成及び試験結果



(a) 複数アンテナによる位置推定



(b) 単一アンテナによる位置推定

図4 複数アンテナと単一アンテナの位置推定方法の違い

4.2 検証試験の構成

検証試験では、ボイド欠陥を有する推進コイルを供試体として用い、高電圧印加下における部分放電ノイズの検出を行った。試験条件を表3に、試験状況を図5に示す。今回は検証用のため、既存の計測装置を用いた。

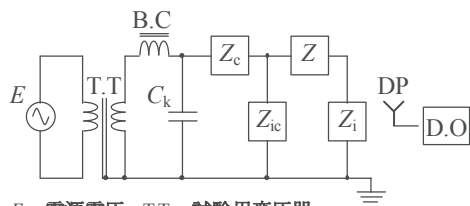
4.3 検証試験の結果

検証試験で得られた波形の一部を図6に示す。同図では、印加中に部分放電が発生していない状況を図(a)に、部分放電が発生している状況を図(b)に示す。図

表3 検証試験の試験条件

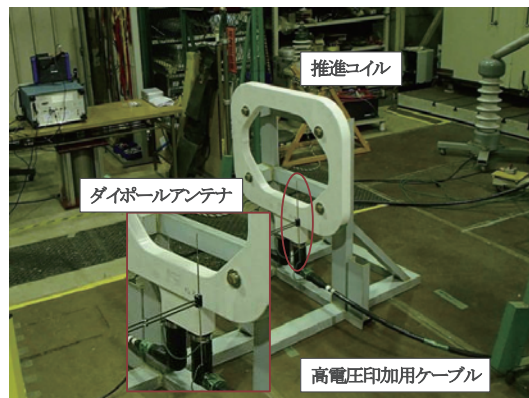
供試体	種類	推進コイル (ボイド模擬)
	電源周波数	50Hz
	印加電圧	25.1kV
	部分放電電荷量	100pC (既存手法 <sup>3)</sup> による測定)
検出用アンテナ	種類	半波長ダイポール (アンリツ製 MP534B)
	エレメント長	$\lambda/2 = 349\text{mm}$ (430MHz 相当)
計測系	離隔	29.5mm (供試体表面～エレメント)
	種類	リアルタイムスペクトラム アナライザ (Tektronix® 製 RSA6114A)
	処理回数	$2.9 \times 10^5$ 回 / 秒
	中心周波数	430MHz
	周波数幅	100MHz
	周波数分解能	100kHz

6 (b) の時系列強度表示において、10ms、30ms 付近に広い周波数帯域で発生している2本の輝線が部分放電と考えられる。実際の検査時においては、輝線のように部分放電が観測された時間情報と、車両の位置情報を組み合わせ、部分放電発生源となっている推進コイルを特定することが可能である。今回の試験においては、定置試験であるため放電源の推進コイルは同一であるが、輝線の発生間隔が約20ms (印加電圧の1周期相当)であった。部分放電は、絶縁不良の種類や印加電圧が同一であれば、類似した電圧位相で生じるため、観測された波形は供試体が発している部分放電に起因する電磁波ノイズであることを示していると考えられる。また、図6 (b) の瞬時頻度表示でも、中頻度で部分放電に起因すると考えられる周波数帯域の広い波形が観測されている。このことから、本構成において、ns オーダの部分放電に起因する電磁波を検出可能であるといえる。また、本装置の計測周期による、500km/h 走行時の走行位置分解能は



E: 電源電圧 T.T: 試験用変圧器  
 B.C: ブロッキングコイル C<sub>k</sub>: 結合コンデンサ  
 Z<sub>c</sub>, Z: ケーブルと供試体コイルの回路定数  
 Z<sub>ic</sub>, Z<sub>i</sub>: ケーブルと供試体コイルの対地回路定数  
 DP: ダイポールアンテナ D.O.: デジタルオシロスコープ

(a) 検証試験回路



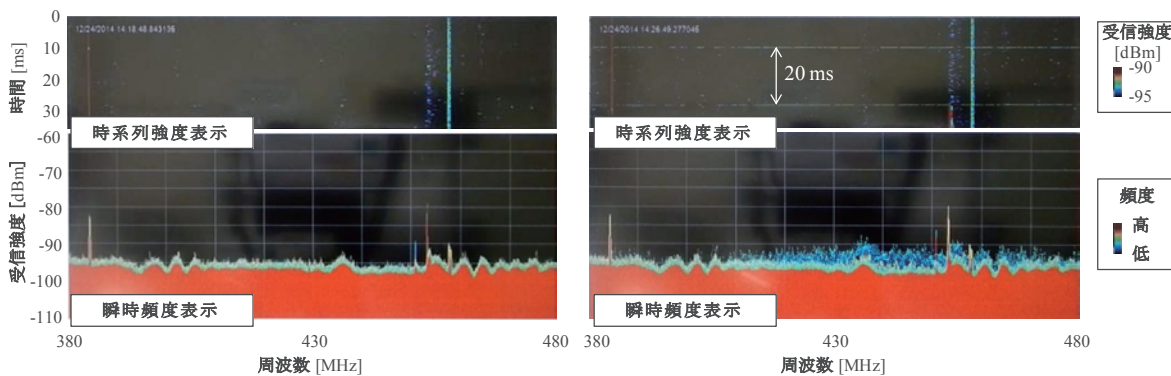
(b) 検証試験外観

図5 検証試験の状況

約0.47mm (推進コイル約  $1.9 \times 10^3$  分割に相当) であり、地上コイル単体の位置推定の用途に対して、十分高速に測定できているといえる。

### 5. おわりに

運用時に高電圧が印加され、一般的な高電圧機器と同様の保守管理が必要とされる推進コイルについて、多数個を効率的に絶縁診断するための手法を検討した。従来の複数アンテナによる位置推定ではなく、単一アンテナによる連続測定構成を提案し、ごく短時間の発生現象で



(a) 部分放電が発生していない状況

(b) 部分放電が発生している状況

図6 検証試験結果

## 特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

ある部分放電の高速検出について検証試験を行い、部分放電に起因する電磁波ノイズを検出可能なことを確認した。

今後は、絶縁性能が低下している場合の部分放電ノイズ検出波形についてデータを蓄積すると共に、長時間の検査に適した部分放電自動判別・記録機構付きの絶縁診断システムを構築する予定である。

## 文 献

- 1) Fujimoto, T., Murai, T. and Suzuki, M., "Development of combined Propulsion, Levitation and Guidance coil in EDS Maglev," Proceedings of the MAGLEV '2000, pp. 275-280, 2000.
- 2) 太田聡, 鈴木正夫: 超電導磁気浮上式鉄道用地上コイルの欠陥箇所推定に関する基礎検討, 第19回 MAGDA カンファレンス講演論文集, p. 554, 2010
- 3) International Electrotechnical Commission, IEC 60270 - High-voltage Test Techniques - Partial Discharge Measurements, 2000.
- 4) 野田和宏, 永井美徳: 部分放電測定装置, 明電時報, No. 337, p. 13, 2012
- 5) Muhr, M., "IEC 62478 - A Prospective Standard for Acoustic and Electromagnetic Partial Discharge Measurements," presented at the HIGHVOLT KOLLOQUIUM '07, pp. 73-78, 2007.
- 6) 田井裕己, 小迫雅裕, 匹田政幸, 山村尚広, 水津明日香: 高圧受変電設備における部分放電モニタリングシステム構築を目指した実地検出信号特性, 平成25年電気学会全国大会予稿集, p. 398, 2013
- 7) 牟田神東達也, 川崎誠, 羽柴靖人: エポキシ絶縁用部分放電検出装置の開発, 電気学会論文誌 B, Vol. 138, No. 8, p. 690, 2011
- 8) 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評定に関する検討, 鉄道総研報告, Vol. 27, No. 7, pp. 13-16, 2013
- 9) Ota, S., Suzuki, M., Ikeda, R., Yoda, H., and Kawada, M., "Insulation Failure Detection in Propulsion Coil for Superconducting Maglev Using Radio Interferometer System," presented at the MAGLEV 2014, D2PM-3b, 2014.
- 10) Kawada, M., Suzuki, M., Ota, S., and Ikeda, R., "Locating Partial Discharge Generated in PLG Type-Ground Coil for Superconducting Maglev Using Radio Interferometer System," Conference Record of the 2012 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp.99-103, 2012.
- 11) Kawada, M., Suzuki, M., and Ikeda, R., "Location of Partial Discharge Occurring in Ground Coil of Superconducting Maglev System Under Noise Environment Using Radio Interferometer System," presented at the 31<sup>st</sup> IEEE Electrical Insulation Conference, pp.142-146, 2013.
- 12) Kawada, M., Suzuki, M., and Ikeda, R., "Location of Partial Discharge Occurring in Propulsion Coil of Superconducting Maglev System Under Using Radio Interferometer System with EM Shield," presented at the 31<sup>st</sup> IEEE Electrical Insulation Conference, pp.142-146, 2014.
- 13) 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, pp. 389-394, 2012
- 14) Kawada, M., Suzuki, M., and Ikeda, R., and Ota, S., "Locating Partial Discharge Sources in Propulsion Coils of Superconducting Maglev Systems Using an On-Board Radio Interferometer System," presented at the 32<sup>nd</sup> IEEE Electrical Insulation Conference, pp. 424-429, 2015.