

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

鈴木 正夫* 太田 聡**
池田 遼平** 川田 昌武***

Study on Locating Internal Defect of Ground Coil
by Detecting Electromagnetic Waves

Masao SUZUKI Satoru OTA
Ryohei IKEDA Masatake KAWADA

Because a huge number of ground coils are used outdoors for an extended period of time in the Maglev system, a reduction in ground coil cost while keeping high reliability is required. The propulsion coil especially needs the high insulation stability as high-voltage equipment. Because the ground coil, which is made with the resin-molded winding, does not have a core in the structure, the ground coil must be exposed to the electromagnetic force directly. Therefore, there is a possibility that minute defects in the molded resin of the ground coil may develop. In this paper, we studied the insulation diagnosis to assess the existence/nonexistence of the inside defect of the ground coil and locate the defect by detecting the electromagnetic waves that are emitted from a partial discharge at the defect point.

キーワード：浮上式鉄道，地上コイル，電磁波検出，内部欠陥，位置標定，部分放電

1. はじめに

超電導磁気浮上式鉄道用地上コイルは、車両の一部でありながら電力設備と構造物の両面的性格を有する他に例を見ない機器である。一方、膨大な数が前提となる地上コイルの開発では、各種負荷に対する信頼性の確保に加えコスト低減が重要な課題であり、これらの命題を如何にして両立させるかが、磁気浮上式鉄道の実用化に向けた重要なポイントとなっている。

これまで筆者らは、所要コイル数の削減によるコスト低減が期待できる PLG (Combined Propulsion Levitation and Guidance System) 方式と呼ぶ 3 機能兼用コイル (以下、PLG コイルと称す) の開発を行ってきた¹⁾。また、PLG コイルの信頼性向上策として、ボルト締結部に積層型 FRP ブッシュ^{2) 3)}、ケーブル接続部にバネ圧縮型直線接続部⁴⁾ をそれぞれ開発し、電磁力による加振環境に対する高い耐久性を検証してきた。更に、車両に対向するコイル表面にコイル自体の機械的、電気的保護を目的とする表面保護層^{5) 6)} を設け、各種耐久性

試験により有効性を検証した。

ここでは、推進系地上コイルにおいて考慮すべき絶縁異状^{7) 8) 9)} を整理し、その代表例として特別高圧機器である PLG コイルのモールド内部に人工的模擬欠陥 (ボイド) を設け、高電圧印加時の部分放電を主回路の外部から検出する手法を種々検討し、欠陥箇所の位置標定に関する検証試験を実施したので、以下に概要を述べる。

2. 推進系地上コイルにおいて考慮すべき絶縁異状

推進系地上コイルには特別高圧機器としての絶縁機能が要求されるため、コイルメーカーには全数を対象とした出荷検査や試験を義務付け、絶縁性能における異状の無いことを確認している。そのため、製品出荷時点でのコイルやケーブル単体における異状は認められず、安定した運用が期待されている。ところが、実際には現地でのコイルやケーブルの敷設作業に加え、運用時の通電による温度上昇、車両通過時の電磁加振、長期屋外使用に伴う材料劣化等を考慮する必要がある、必ずしも安定した運用環境とは言えない。極端に言えば、出荷検査において正常であったはずの製品でも、内部に潜在的欠陥因子が存在すれば運用中の負荷により顕在化する可能性が

* 浮上式鉄道技術研究部 山梨実験センター

** 浮上式鉄道技術研究部 電磁システム研究室

*** 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部 (エネルギーシステム部門)

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

十分に考えられる。以下に、推進系地上コイルの運用において考慮すべき絶縁異状について整理する。

(1) 内在するボイド・異物混入

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（気泡）の残存や異物片の混入が考えられる。これらは通常、モールド樹脂材料とは比誘電率が異なるため、電圧印加時に当該部位に電界が集中し、部分的な放電を引き起こす。通常は出荷時の部分放電特性試験にて異状の有無を判別できるが、内在する欠陥の大きさや気圧、樹脂との界面の状況によっては所定の条件下でも部分放電が発生せず、良品と見なされる可能性がある。

(2) 導体剥離

推進系地上コイルでは、巻線コイルとモールド樹脂との界面は接着が前提となっている。ところが実使用に際しては、樹脂成形時の硬化収縮に起因する残留応力、通電や環境温度変化に起因する熱応力、車両通過時の繰り返し電磁力等が複雑に影響し合い、両者の界面に剥離を生ずる可能性がある。そのため、両者の界面が一度剥離を起こすと空間が生じ、前項と同様な電界集中による部分放電を引き起こす。

(3) シールド塗膜の剥離

樹脂モールドされた特別高圧機器では通常、最外層に感電防止と対地絶縁層の電界緩和を兼ねたシールド層が設けられ、接地されている。ところが、推進系地上コイルに本目的のために設けられる導電性シールド塗膜は、前述の電磁加振環境にて長期に亘る屋外使用が強いられるため、局所的な剥離を生ずる可能性がある。このケースも同様に、剥離箇所での電界集中により部分放電を引き起こす⁹⁾。

(4) 現地施工不良

製品出荷時の検査や試験において正常であっても、現地におけるコイル締結やケーブル接続作業に施工不良が存在した場合、電磁加振環境での長期屋外使用により潜在的異状が顕在化し、トラブルに繋がる可能性がある。図1は推進系地上コイルとそれらに駆動用電力を供給する高電圧ケーブル⁷⁾との現地接続作業において想定される施工不良の一例を示すもので、両者

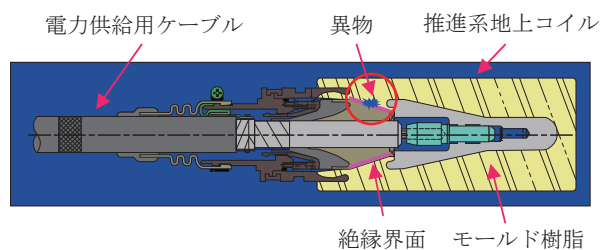


図1 ケーブル接続部における施工不良の例

の絶縁界面への異物混入により同様な電界集中から部分放電を引き起こす。

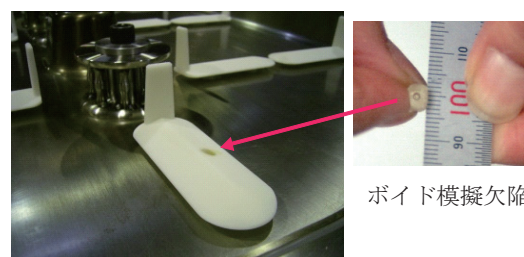
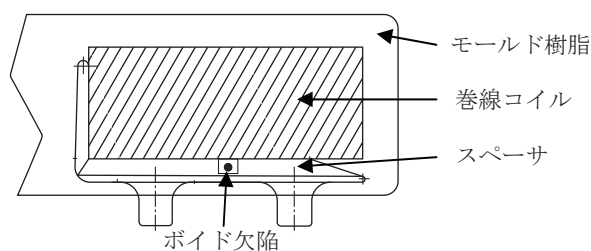
3. 欠陥模擬地上コイル及び欠陥部位の電界分布

PLGコイルを対象に内部欠陥を模擬した地上コイル⁸⁾を製作し、欠陥位置標定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。表1にPLGコイルの諸元を、図2に欠陥設定部の外観をそれぞれ示す。

また、モールド内部にボイド欠陥を有する地上コイルをモデルとした電界解析を行った。その結果、コイル導体～外部シールド層間の樹脂部には電界が等に分布すると仮定すると、欠陥部近傍には健全部位の約2倍の電界集中が生ずることを推定した。図3にコイル断面の等電位分布の解析例⁸⁾を示す。

表1 PLGコイルの仕様

環境温度	-30～50℃
耐候性	全天候
公称電圧	交流 33 kVrms
導体材質	アルミニウム
モールド材料	エポキシ樹脂
導体断面	0.04 m × 0.1 m
ケーブル接続部の数	3



巻線コイル位置決め用スペーサ

図2 欠陥設定部の外観

4. 供試コイルの部分放電特性

供試コイルに試験用ケーブルを接続し、コイル導体～シールド層間に商用周波電圧を印加し、部分放電特性を測定した。通常の測定では図4に示す試験回路を用い、供試体と結合コンデンサとの差動回路にて供試体から発生する部分放電パルスを測定し、その放電パルスを部分放電として評価している。従って、地上コイルをこの専用試験回路に組み込むことにより、製造時の成形品質や一定期間使用後の経時的な絶縁劣化をコイル単体として定量的に評価することができる。図5のQ-V特性例に示すように、本供試コイルでは20kV前後から部分放電が開始し、印加電圧の上昇と共に放電電荷量の増大が確認された。

しかし、供試体の接地線に流れるパルス電流を測定する上記の試験方法では、試験用ケーブルを含む供試体全体が評価の対象となり、部分放電の発生の有無や放電電

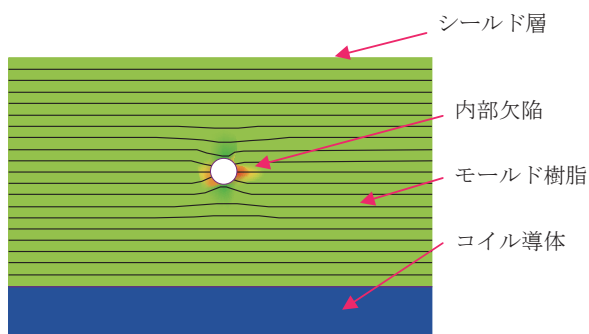
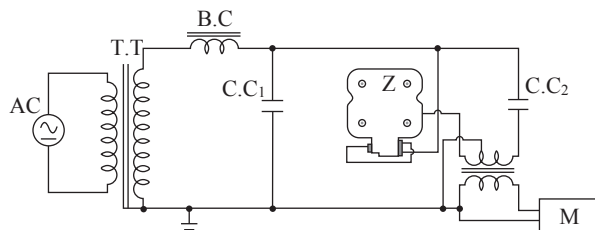


図3 コイル断面の等電位分布解析例



AC: 商用周波電源 C.C: 結合コンデンサ
T.T: 試験用変圧器 Z: 供試コイル
B.C: ブロッキングコイル M: 計測装置

図4 部分放電特性試験回路

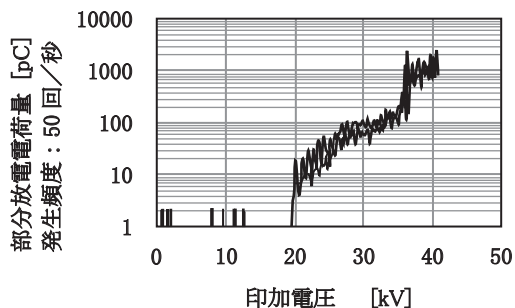


図5 供試コイルの部分放電特性

荷量が検出できても発生源や発生原因を特定することは困難である。そこで、何らかの方法により放電発生源やその原因となる欠陥の推定が可能となれば、製造過程や現地運用におけるトラブルが未然に防止でき、絶縁機能の信頼性を高めることができる。

5. 部分放電検出による欠陥位置標定

5.1 AE センサによる部分放電検出

AE (Acoustic Emission: 音響の放出) とは、材料が変形あるいは破壊する際に発生する音を弾性波として放出する現象であり、この弾性波をAEセンサにより検出し、非破壊的に評価する手法をAE法と呼ぶ。ここでは、欠陥模擬コイル内の部分放電から発生する弾性波がモールド樹脂中を伝搬する現象を複数のAEセンサにて検出可能かどうかについて検証した。その結果、検出感度から最大放電電荷量が1000pC程度以上でない場合と検出が難しく、モールド樹脂内での減衰が大きい場合、ある程度欠陥箇所が限定されている場合を除き、欠陥位置の標定には適さない手法であることが判明した。図6に供試コイルへのAEセンサの貼付状況を示し、図7に欠陥部位近傍で測定した部分放電発生時のAE波形例を示す。

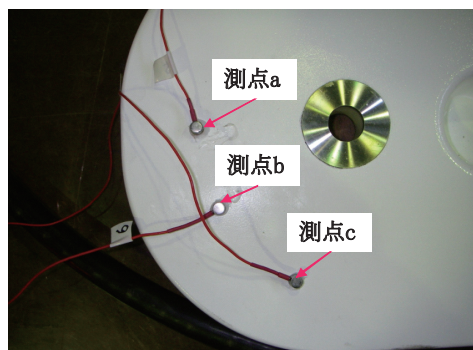


図6 供試コイルへのAEセンサ貼付状況

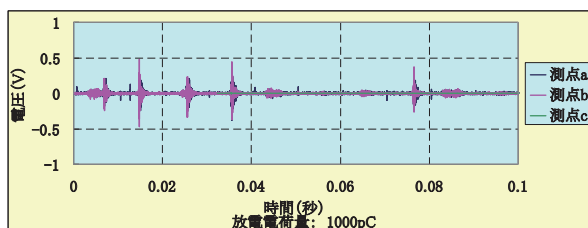
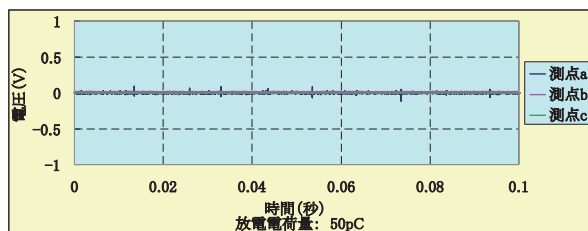


図7 部分放電発生部位のAE波形例

5.2 UHF センサによる電磁波検出

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^{10)~13)}。これまでの測定では、15kHz～150kHzの低周波域で放電パルスを検出することにより部分放電特性を評価してきたが、部分放電の発生源を特定するために、観測周波数帯域をUHF帯(300MHz～3GHz)とし、電圧印加時の部分放電を電磁波として検出する手法について検討を行った。

(1) 検出概念

部分放電に伴い発生する放射電磁波をUHFセンサにて検出することにより、部分放電の発生源である欠陥部位を推定する手法^{8) 14)}の概念を図8に示す。部分放電による放射電磁波は微弱であり、波の伝搬により減衰するため、部分放電の発生源近傍では最大出力の電磁波が検出されると考えられる。つまり、放射電磁波の強度が大きい箇所を特定できれば、部分放電の原因となる欠陥箇所の推定が可能となる。図9に供試コイルおよび部分放電検出用UHFセンサを示す。

(2) 測定結果

図10に欠陥箇所の推定に用いた試験回路を示す。供試コイルの近傍にUHFセンサを設置し、検出器の出力を確認しながら順次センサ位置を移動させ、電磁波の発生源を推定した。また、従来の部分放電測定器からの出力を記録し、部分放電の発生の有無を同時に確認した。図11にUHFセンサによる電磁波検出結果を示す。検出結果から、模擬欠陥を設けた箇所において1周期当たり数個のパルス波が検出され、検出パルスの印加電圧に対する位相と部分放電測定器からの

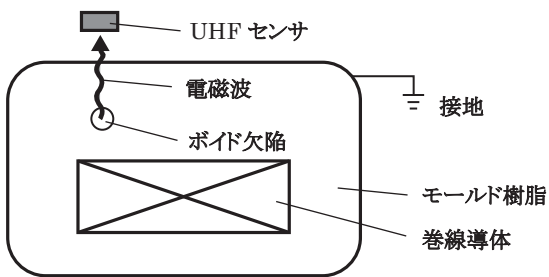


図8 UHF センサによる検出概念

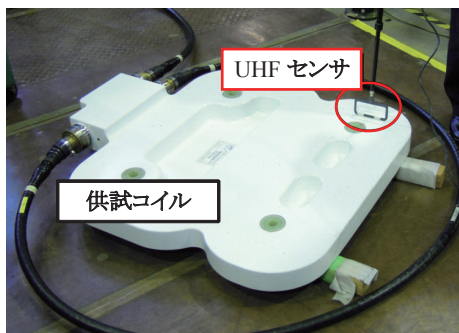
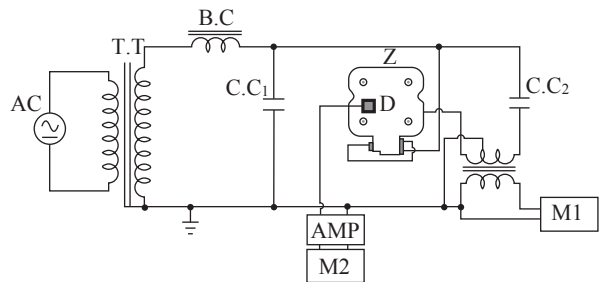


図9 UHF センサによる部分放電検出状況



M1：従来法に基づく部分放電測定器
AMP：増幅器，D：UHF センサ
M2：UHF センサによる部分放電測定器

図10 UHF センサによる電磁波検出回路

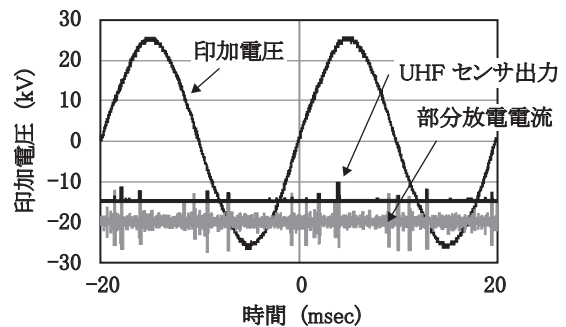


図11 従来法による部分放電とUHFセンサによる電磁波検出波形例

放電出力の印加電圧に対する位相に一致が見られることから、検出されたパルス波は部分放電による電磁波であると推定された。しかしながら、本測定法では、部分放電の発生源と推定される直近では20～30pC程度の比較的小さな放電電荷量でも±10mm以内の精度で位置標定が可能であるのに対し、放電源から10cm程度離れると100pC前後の放電電荷量でも検出が困難であることが判明した。

5.3 電波干渉計システムを用いた欠陥部の位置標定

各種電力機器の絶縁劣化に伴い発生する部分放電をVHF～SHF帯の電磁波により検知する手法が開発され、絶縁診断手法としての有効性が報告されている^{10)~13)}。ここでは、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。

(1) 部分放電発生源の標定概念

図12に本手法の測定概念を示す。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。本実験では、アンテナの共振周波数を500MHzに設定し、2本のアンテナ間の基線長を1mとした。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よりデジタルデータとして記録した。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コンピュータ

を用いて計算した。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（エレメントの付け根）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。また、電磁波検出用のアンテナ数を増やすと、より正確な部分放電発生源の標定が可能になると考えられる。

(2) 測定結果

供試体には前項と同様に模擬欠陥を内蔵したPLGコイルを用いた。本コイルは、高電圧印加時に部分放電が発生することがわかっている。試験時のコイルおよびアンテナ配置を図13に示す。地上コイルに高電圧を印加し、2本のダイポールアンテナによる電磁波の検出波形を、デジタルオシロスコープ（最大周波数1GHz、最高サンプリングレート5Gs/s）を用いて取得した。

図14に部分放電により放射された電磁波の波形例

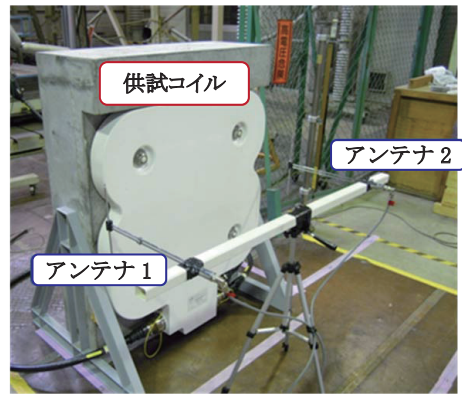


図13 ダイポールアンテナによる部分放電に伴う電磁波検出状況

を示す。2本のアンテナで受信した電磁波の最初のピーク時刻の差を用いて到達時間差を計算すると $\tau_d = 0.8\text{ns}$ となった。この結果より、部分放電発生源からの距離差 $X_d = 240\text{mm}$ となり、2本のアンテナ設置箇所から部分放電発生源が位置標定できた（図15）。また、アンテナ設置位置を移動させた場合でも、数cm程度の誤差で同じ箇所が標定できることがわかった。

また、得られた波形の周波数分析結果から、部分放電を検出した電磁波においては、広帯域の周波数成分を有することを確認した¹⁵⁾（図16）。さらに、本手法を用いた欠陥部の位置標定では、発生源からの部分放電電荷量が100pC程度以上であれば、アンテナによ

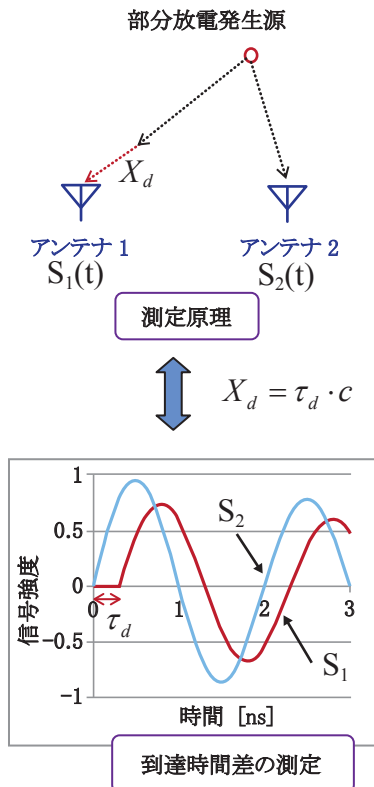


図12 部分放電発生源の標定概念

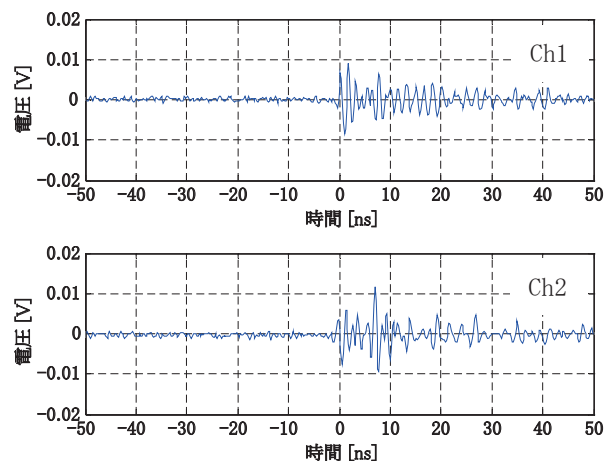


図14 部分放電に伴う電磁波の波形例

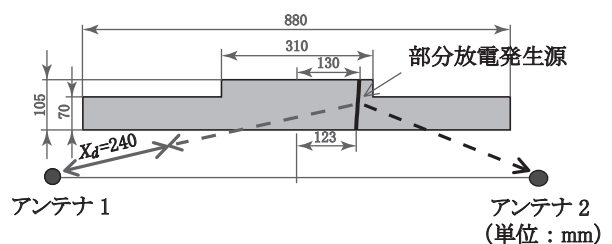


図15 部分放電発生源の標定例

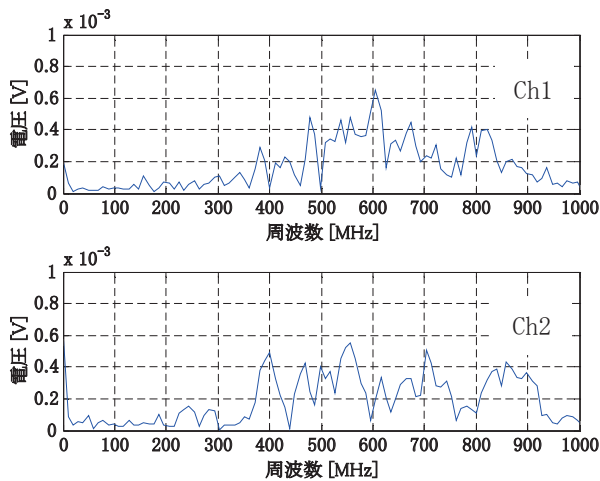


図 16 部分放電に伴う電磁波の周波数成分

る電磁波検出が発生源からの離隔が 1m 程度であっても十分に可能であることを確認した。

6. まとめ

モールド内部にボイド欠陥を設定した地上コイルを用い、高電圧印加時に当該箇所から発生する部分放電を放出される弾性波や電磁波により検出することで、欠陥位置を標定する診断手法を検討した。検討した 3 種類の手法から、発生源の放電電荷量やセンサまでの離隔距離により検出感度にそれぞれの特徴を有するが、欠陥部位の特定が可能であることを検証した。特に、ダイポールアンテナを用いた電波干渉計システムによる電磁波検出においては、発生源である地上コイルとセンサであるアンテナとの離隔距離を大きく確保できるため、浮上式鉄道の現地運用における絶縁診断手法として、大きな可能性を有していると考えられる。

なお、本論文は電気学会論文誌 A、2013 年 5 月号掲載の「Internal Defect Position Evaluation of Ground Coil by Detecting Electromagnetic Waves from Partial Discharge」を加筆したものである。また、本研究の一部は、国土交通省からの国庫補助を受け実施した。

文 献

- 1) T. Fujimoto, T. Murai, and M. Suzuki : “Development of Propulsion, Levitation and Guidance Coil in EDS Maglev,” Proceedings of the Maglev '2000, pp.275-279 (2000).
- 2) 鈴木正夫, 鈴木裕之, 饗庭雅之, 松江仁, 田中実, 岡田重紀 : 地上コイル耐振性締結部の開発, 第 13 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, pp.265-266, 2006

- 3) M. Suzuki, H. Suzuki, M. Aiba, H. Matsue, and S. Okada : “Development of the Vibration-proof Fixing Part for Ground Coil,” Proc. of the 15th Annual International Conference on Composites or Nano Engineering pp.920-921, Haikou, Hainan Island, China, (2007-7).
- 4) 饗庭雅之, 田中実, 鈴木正夫, 高橋紀之 : 超電導磁気浮上式鉄道実用型 PLG コイルの開発, 第 10 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, pp.313-316, 2003
- 5) 饗庭雅之, 鈴木正夫, 田中実, 岡田重紀 : 表面保護層付き浮上式鉄道用推進・浮上・案内兼用地上コイルの開発, 第 14 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, pp.319-320, 2007
- 6) 高橋紀之, 鈴木正夫, 饗庭雅之 : 推進浮上案内兼用コイル保護層の耐衝撃強度評価, 鉄道総研報告, vol.24, No.1, pp.11-16, 2010
- 7) 鈴木正夫, 饗庭雅之, 太田聡 : 界面の異状を模擬した地上コイル/ケーブル接続部の部分放電特性, 電気学会全国大会論文集, 5-059, 2009
- 8) 鈴木正夫, 松江仁, 饗庭雅之 : 内部欠陥模擬地上コイルの部分放電特性, 電気学会全国大会論文集, 5-281, 2007
- 9) 鈴木正夫 : 欠陥模擬地上コイルの長期絶縁検証, 電気学会産業応用部門全国大会論文集, 3-266, 1998
- 10) 川田昌武, 河崎善一郎, 松浦虔士, 川崎誠 : 電磁波空間位相差法を用いた非接触部分放電検出法, 電気学会論文誌 B, 115 巻, 10 号, pp.1168-1173, 1995
- 11) 川田昌武 : VHF-UHF 帯電波干渉計システムによる部分放電源特定のための基礎研究, 電気学会論文誌 B, 122 巻, 5 号, pp.629-636, 2002
- 12) 川田昌武, 河崎善一郎, 松浦虔士, 黒木悟, 大澤輝也, 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
- 13) 川田昌武, 河崎善一郎, 松浦虔士, 武蔵谷敏男, 黒木悟, 大澤輝也, 田中宏毅 : 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
- 14) M. Suzuki, S. Ota, R. Ikeda, and M. Kawada : “Internal Defect Position Evaluation of the Ground Coil by Detecting the Electromagnetic Waves from the Partial Discharge,” Proc. of 2011 International Symposium on Electrical Insulating Materials, pp.181-184, Kyoto, Japan, (2011-9).
- 15) M. Kawada, M. Suzuki, and S. Ota : “Measurement of Electromagnetic Waves Emitted from Partial Discharge Generated in PLG Type-Ground Coil for Superconducting Maglev,” Proc. of the 30th Electrical Insulation Conference, pp.412-416, Annapolis, MD, USA, (2011-6).