

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 4 日現在

機関番号：16101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560335

研究課題名(和文) 超電導磁気浮上式鉄道の地上コイル絶縁劣化診断のための電磁波センシング技術の開発

研究課題名(英文) Developing Radio Sensing Techniques for Insulation Degradation Diagnosis of Ground Coils of Superconducting Maglev Systems

研究代表者

川田 昌武 (KAWADA, MASATAKE)

徳島大学・ソシオテクノサイエンス研究部・准教授

研究者番号：00303686

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：超電導磁気浮上式鉄道では、車両側面に超電導磁石を配置し、ガイドウェイ側壁に地上コイルが設置されており、その電磁力により車両をガイドウェイ上で浮上、案内、推進させている。地上コイルの絶縁樹脂の劣化予兆現象の一つとして部分放電が上げられ、部分放電は広帯域電磁波を放射することから、本研究では地上コイル内で発生する部分放電の位置を特定するための電磁波センシングシステムの開発を進めた。実験結果から、欠陥地上コイル内で発生する部分放電の位置を本システムにより特定できることを示した。

研究成果の概要(英文)：In superconducting magnetic levitation (Maglev) systems, superconducting magnets are located on both sides of the vehicles and ground coils are attached to sidewalls of the guideway; the vehicles are levitated, guided, and propelled over the guideway by the electromagnetic force between them. Because a partial discharge (PD), which is a degradation symptom of insulating resin of the ground coils, emits wideband electromagnetic (EM) waves, a radio sensing system for locating the PD by receiving the EM waves was developed in this study. The experimental results showed that the PD occurring in a ground coil with defects could be located by using the radio sensing system.

研究分野：電気・電磁環境

キーワード：超電導磁気浮上式鉄道 地上コイル 絶縁診断 部分放電 放射電磁波 電磁波センシング技術

## 1. 研究開始当初の背景

超電導磁気浮上式鉄道は、車両側の超電導磁石と地上側のガイドウェイに設置した地上コイルによる電磁力を利用して車両を浮上、案内、推進させている[1, 2]。

地上コイルは車両の浮上、案内、推進のためには不可欠な設備であり、超電導磁気浮上式鉄道の実運用には膨大な数の地上コイルが設置される[3]。

地上コイルは巻線コイルを絶縁樹脂で成形した構造となっており、長期にわたり機械的、電気的、環境的負荷が複合的に加わる。なお、地上コイルにはその役割から大きく分けて推進コイルと浮上・案内コイルの2種類がある。推進コイルには高電圧が印加されることから、その絶縁樹脂の状態を把握するための絶縁劣化診断技術の開発が急務となっている。本分野の研究動向として、公益財団法人鉄道総合技術研究所が地上コイルの健全度評価、耐久性評価、絶縁劣化診断技術等に関する基礎研究を進めている[4-10]。

代表者は、これまでに電磁波センシング技術を用いた電力機器設備の絶縁劣化診断技術に関する研究に従事しており、絶縁劣化の予兆現象である部分放電を電磁波センシング技術により検出し、かつ、その発生位置を特定できることを国内外学会論文誌、国際会議等で多数発表してきた。また、2010年6月より公益財団法人 鉄道総合技術研究所との共同研究を開始しており、基礎研究成果を国際会議で発表している[11,12]。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、地上コイルの絶縁樹脂の劣化予兆現象の一つである部分放電を非接触で検出する電磁波センシング技術の開発を実施することである。なお、部分放電は広帯域電磁波を放射することから、この電磁波を複数のアンテナで受信し、デジタル信号処理手法により部分放電の位置を特定する電磁波センシングシステムの開発を進めた。

## 3. 研究の方法

下記を本研究の方法とした。

- (1) 絶縁樹脂内欠陥による部分放電実験  
高電圧を絶縁樹脂に印加し、絶縁樹脂中で部分放電を発生させる。
- (2) 絶縁樹脂内欠陥による部分放電放射電磁波の測定、解析  
部分放電からの放射電磁波を測定し、その電磁波強度、周波数を把握する。
- (3) 電磁波センシング技術による部分放電の位置特定技術の開発  
背景電磁雑音の除去方法、及び、得られた電磁波から部分放電位置を特定するための信号処理手法を開発する。

なお、上記(1)～(3)において、公益財団法人鉄道総合技術研究所との共同研究により、実際の地上コイルを利用することができたことから、開発した電磁波センシングシステムの有効性を上記の地上コイルを用いて検証した。

電磁波センシングシステムを実運用に供する場合、背景電磁雑音が部分放電放射電磁波の測定及び部分放電の位置特定において課題となる。そこで、雑音除去法として電磁波吸収材[13]及びデジタル信号処理手法の適用を検討した。なお、デジタル信号処理手法として、FIR フィルター (Finite-duration Impulse Response Filter) [14]を設計、適用した。また、部分放電の位置を特定する際に、電磁波の複数アンテナ間への到達時間差を算出する必要があり、短・長区間平均比率法 (STA/LTA: the Short-term-average to Long-term-average Ratio Method) [15-17]及び平滑化コヒーレンス変換 (SCOT: the Smoothed Coherence Transform) [18-20]を適用した。

## 4. 研究成果

図1に本実験で利用した模擬ガイドウェイ (公益財団法人 鉄道総合技術研究所 設

備)を示す。なお、この模擬ガイドウェイは屋外に設置されており、その側壁に推進コイル、浮上・案内コイルの2種類のコイルを実運用と同様に複数組(本実験では3組)配置した。この推進コイル中のコイルBのみに交流電圧 25kVrms (50Hz) を印加し、本研究で開発した電磁波センシングシステムにより電磁波を測定、および、部分放電の位置を特定した。なお参考までではあるが、このコイルBの放電電荷量は部分放電測定装置(一般的に利用されている市販の装置)により測定した結果、約 250pC (19.1kVrms 印加時)であった。

図2に部分放電放射電磁波測定時の状況を示す。本システムの複数のアンテナ(アレイアンテナ、共振周波数を 500MHz と設定したダイポールアンテナを利用)は模擬車体に搭載されている。電磁波吸収材はアンテナエレメントの側面、背面側(アンテナエレメントとは非接触)に貼付しており、側面及び背面側からの背景電磁雑音、反射波を抑制している。

図3にアンテナで受信した電磁波波形を示す。本測定では、アンテナ2での測定値が最も大きい値を示している。この受信波形に設計した FIR フィルター(バンドパスフィルター、低周波及び高周波遮断周波数: 100MHz、700MHz)を適用し、高速フーリエ変換により求めた周波数スペクトラムを図4に示す。同図(アンテナ2)から、約 400MHz から 700MHz までの広帯域電磁波が受信されていることが分かる。このアンテナ1と2での受信信号の到達時間差を SCOT 法により求めた結果、到達時間差が 0ns となった。この到達時間差 0ns により部分放電の位置を特定した場合を図5に示す。同図より、この到達時間差から算出した直線がコイルBの中心を通過していることが分かる。すなわち、このコイルB内に放射電磁波源があり、同コイル内で部分放電が発生したと推定できる。な

お、本成果では部分放電の発生位置を点として特定するのではなく、地上コイル断面の到達時間差直線あるいは曲線上に存在すると特定している。

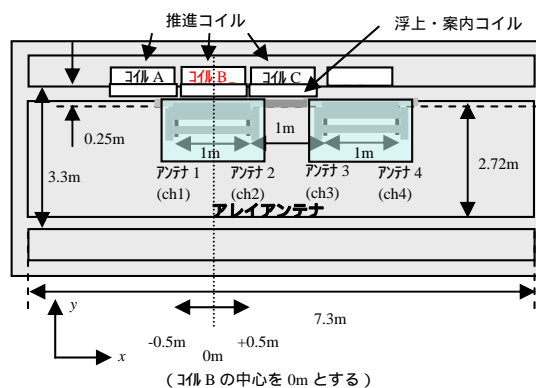
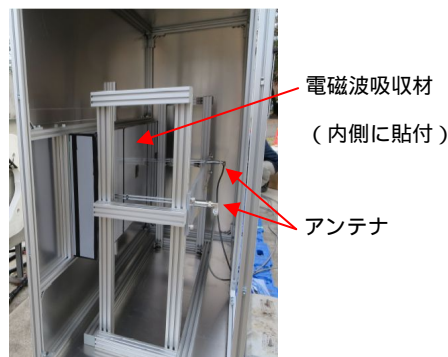
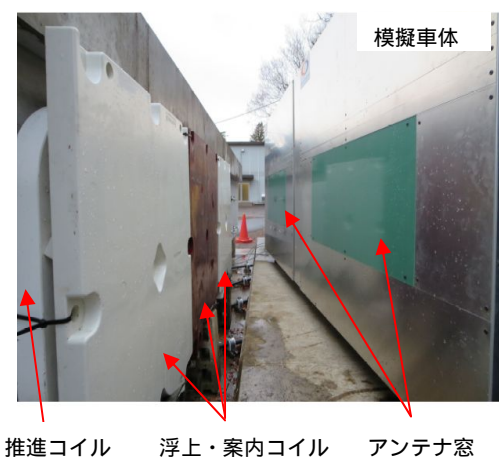


図1 部分放電放射電磁波測定実験



(a) アレイアンテナ (2本)



(b) 地上コイルと車両搭載型電磁波センシングシステム

図2 部分放電放射電磁波測定時の状況

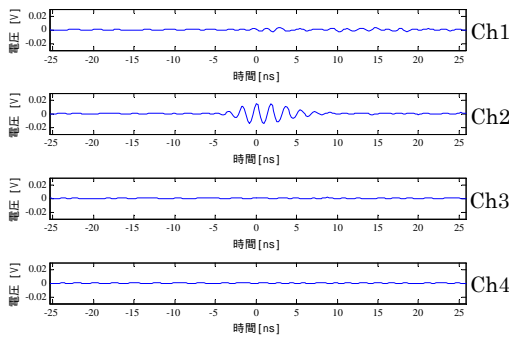


図3 アンテナで受信した電磁波波形

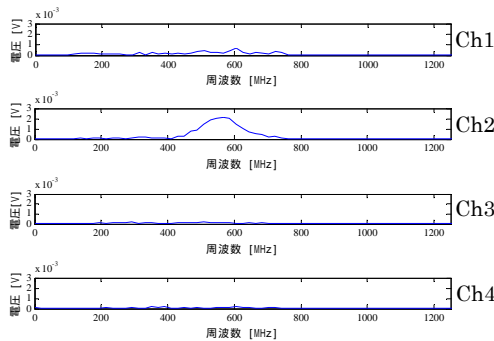


図4 受信電磁波の周波数スペクトラム

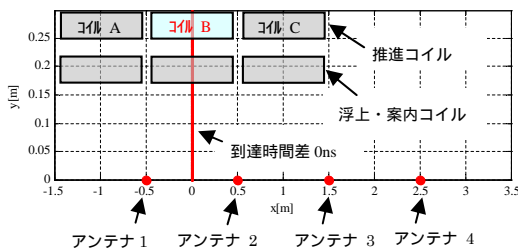


図5 部分放電の発生位置特定結果

以上から、本研究で開発した電磁波センシングシステムにより、地上コイル（推進コイル）中で発生する部分放電を非接触で検出でき、また、その発生位置が特定できる（時間差直線あるいは曲線上に存在する）ことを示した。

また、本研究期間において得られた成果を「電気絶縁に関する国際会議（米国電気電子工学会（IEEE）誘電絶縁部門）」及び「磁気浮上システムとリニアドライブに関する

国際会議（国際磁気浮上委員会）」で発表した。

<引用文献>

- [1] 国土交通省 超電導磁気浮上式鉄道実用技術評価委員会、超電導鉄道磁気浮上式鉄道実用技術評価、2009年7月
- [2] 財団法人 鉄道総合技術研究所編、ここまで来た！超電導リニアモーターカー、交通新聞社、2006年12月
- [3] 澤田、藤本、都、夏原、山梨実験線用地上コイルの開発、平成7年鉄道技術連合シンポジウム、pp.337-338、1995年12月
- [4] 饗庭、鈴木、浮上式鉄道用推進・浮上・案内兼用地上コイルの健全度評価試験、平成17年電気学会産業応用部門大会、第3分冊 pp.277-278、2005年8月
- [5] 鈴木、地上コイル用モールド樹脂の環境劣化特性、RTRI REPORT Vol.20、NO.8、pp.23-28、2006年6月
- [6] 鈴木、地上コイル電磁加振試験による動的耐久性評価、pp.28-31、RRR2007、2007年12月
- [7] 鈴木、松江、饗庭、内部欠陥模擬地上コイルの部分放電特性、平成19年電気学会全国大会、第5分冊 p281、2007年3月
- [8] 鈴木、松江、地上コイル部分放電加速劣化試験結果、平成20年電気学会全国大会、第5分冊 p.98、2008年3月
- [9] 鈴木、饗庭、太田、界面の異常を模擬した地上コイル/ケーブル接続部の部分放電特性、平成21年電気学会全国大会、第5分冊 p.99、2009年3月
- [10] 饗庭、鈴木、地上コイルのセンシング用電源装置の試作、平成21年電気学会全国大会、第5分冊 p.97、2009年3月
- [11] 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, June 2011.
- [12] 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 Int. Symposium on Electrical Insulating Materials, pp.181-184, Sep. 2011.
- [13] IEC62333-1, 2, and 3, Noise suppression sheet for digital devices and equipment, part 1 (May 2006), part 2 (May 2006), and part 3 (Jan. 2010).
- [14] The MathWorks, "User's guide, Signal

processing toolbox for use with matlab, ver.6,” pp. (2-18) - (2-44), 2002.

- [15] B.P.Amuter and S.C.Solomon, “An event-recording system for monitoring small earthquakes,” Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.64, No.4, pp.1181-1188, Aug. 1974.
- [16] X.Shao, Y.Tian, M.Kawada, and G. Zhang, “Simulation on locating partial discharge in straight GIS model by applying STA/LTA ratio method to EM waves leaked from spacers,” Proc. of Int. Conference on Electrical Engineering, 4pages, July 2011.
- [17] X.Shao, Y.Tian, M.Kawada, and G. Zhang, “Simulation on locating partial discharge in T-shaped branch of GIS by applying the STA/LTA ratio method to EM waves leaked from insulating spacers,” Conf. Proc. of 2011 Int. Symposium on Electrical Insulating Materials, pp.193-196, Sep. 2011.
- [18] G.C.Carter, A.H.Nuttall, and P.G.Cable, “The smoothed coherence transform,” Proc. of the IEEE, pp.1497-1498, Oct. 1973.
- [19] C.H.Knapp and G.C.Carter, “The generalized correlation method for estimation of time delay,” IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol.ASSP-24, no.4, pp.320-327, Aug. 1976.
- [20] K.Scarbrough, N.Ahmed, and G.C.Carter, “On the simulation of a class of time delay estimation,” IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol.ASSP-29, no.3, pp.534-540, June 1981.

## 5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計 4件)

Masatake Kawada, Masao Suzuki, Ryohei Ikeda, and Satoru Ota, Locating Partial Discharge Sources in Propulsion Coils of Superconducting Maglev Systems Using an On-Board Radio Interferometer System, Proceedings of the 33<sup>rd</sup> IEEE Electrical Insulation Conference, Seattle (USA), 6 pages, June 9<sup>th</sup> 2015 (Accepted).

Satoru Ota, Masao Suzuki, Ryohei Ikeda, Hiroshi Yoda, and Masatake Kawada, Insulation Failure Detection in Propulsion Coil for Superconducting Maglev Using Radio Interferometer System, Proceedings of the 22<sup>nd</sup> International Conference on

Magnetically Levitated Systems and Linear Drives, Rio de Janeiro (Brazil), 8 pages, September 30<sup>th</sup> 2014.

Masatake Kawada, Masao Suzuki, and Ryohei Ikeda, Location of Partial Discharge Occurring in Propulsion Coil of Superconducting Maglev System using Radio Interferometer System with EM Shield, Proceedings of the 32<sup>nd</sup> IEEE Electrical Insulation Conference, Philadelphia (USA), pp.254-259, June 9<sup>th</sup> 2014.

Masatake Kawada, Masao Suzuki, and Ryohei Ikeda, Location of Partial Discharge Occurring in Ground Coil of Superconducting Maglev System under Noise Environment using Radio Interferometer System, Proceedings of the 31<sup>st</sup> IEEE Electrical Insulation Conference, Ottawa (Canada), pp.142-146, June 2<sup>nd</sup> 2013.

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

川田 昌武 (KAWADA, Masatake)

徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス  
研究部・准教授

研究者番号： 00303686