

特集：浮上式鉄道技術と関連技術の在来方式鉄道への応用

車上からの地上コイルの部分放電検出手法

高橋 紀之* 池田 遼平* 渡邊 健*
太田 聡* 川田 昌武**

Method for Detecting Partial Discharge of Ground Coil from the Vehicle

Noriyuki TAKAHASHI Ryohei IKEDA Ken WATANABE
Satoru OTA Masatake KAWADA

In the superconducting maglev systems, an enormous number of ground coils: propulsion coils and levitation-guidance coils are installed over the whole lines in a guide way. High voltage is applied to the propulsion coils during the passage of maglev trains. Partial discharge (PD) is a symptom of insulation degradation of the propulsion coils; PD detection from the maglev vehicle that is traveling leads to effective maintenance and management of the propulsion coils. This paper describes the configurations of an antenna-array of a radio interferometer system for PD detection mounted on the maglev vehicle, simulation results for propagation of electromagnetic waves from a PD source, and experimental results by setting the antenna-array on the side of and in the maglev vehicle. It was confirmed that PD sources can be detected by the antenna-array of radio interferometer system set in the maglev vehicle.

キーワード：浮上式鉄道，地上コイル，絶縁診断，部分放電

1. はじめに

超電導磁気浮上式鉄道（以下，浮上式鉄道）の地上コイルはリアモータを構成する要素の一つであり，一般の鉄道の軌道に相当するガイドウェイ側壁に敷設されている（図1）。これは車載の超電導磁石との相互作用で車両に推進力，浮上力，案内力を発生させる重要かつ浮上式鉄道に固有の機器である。また，地上コイルは，長期間の屋外使用が前提であり，ガイドウェイ全線にわたって敷設され，その数は膨大なものとなるため，運用時の効率的な保守が求められる。

鉄道総研及び徳島大学では，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）を対象に，絶縁異状の兆候である部分放電現象に着目し，効率的に絶縁診断する手法の検討及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，部分放電発生

試験体の製作，部分放電発生に伴う放電信号の検出アンテナへの伝搬についての検討，アンテナのコンパクト化，走行中における部分放電検出試験を行ってきた。

近年，軌道や沿線電気設備の検測については，専用の検測車両を用意せずに，営業用車両に必要な検測設備を搭載し，営業ダイヤに合わせて走行して必要なデータを取得する方法が実用化されつつある。地上コイルの検測においても，専用の車両を準備して搭載するのではなく，営業用車両に搭載して検測を行う方が，運行ダイヤ等の制約を受けず，コスト低減の効果も大きいと考えられる。そこで，部分放電検出システムの実車両への搭載を想定し，車内での部分放電信号検出のモデル解析，および同システムを実車両に搭載し，定置にて部分放電検出試験を行った結果について報告する。

2. 地上コイルの絶縁異状

2.1 地上コイルの構造

浮上式鉄道に使用される地上コイルは，図2に示すような鉄芯の無い空芯コイルであり，車両に搭載された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，コイル巻線をモールド樹脂で一体成型し，剛性を高めている。地上コイルは，外部からの電力供給を受けて車両に推進力を加える推進コイルと，電力供給を伴わずに浮上力と案内力を発生させる浮上案内コイルから構成される。推進コイルには高電圧が印加されるため，耐絶縁性能が高く，機械的強度にも優れたエポキシ樹脂が使用される。一方，浮上案内コイルでは高電圧が印加されない

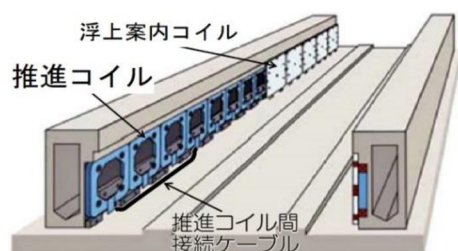


図1 地上コイルの構成

* 浮上式鉄道技術研究部 電磁システム研究室

** 徳島大学

ことから、機械的強度と耐環境性能に優れたガラス繊維で強化した不飽和ポリエステル樹脂等が用いられる。

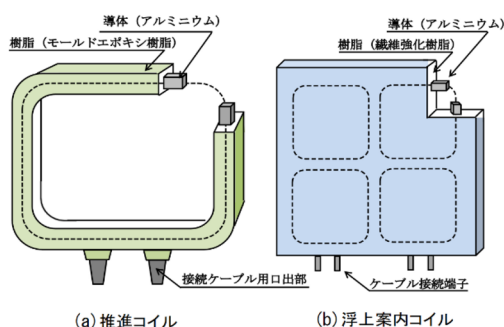


図2 地上コイルの構造

2.2 推進コイルの絶縁異状³⁾

浮上案内コイルは、ガイドウェイ両側に敷設したコイル同士がヌルフラックス接続され、結線が完結している。一方、推進コイルはガイドウェイ内で各相が複数個直列接続され、一定長の電セクションを構成している。このため、浮上案内コイルでは1個の不具合による影響がそのコイル単体に留まるのに対し、推進コイルは1個の不具合がセクション全体に影響することが懸念される。加えて、推進コイルには高電圧が印加されるため、使用の際には、一般的な高電圧機器と同様に絶縁に対する配慮が必要となる。

推進コイルの絶縁異状は、モールド樹脂内部の微小な空隙から発生する部分放電が端緒となり、その発生の繰り返しにより絶縁劣化箇所が進展、拡大するもので、最終的にはモールド樹脂の絶縁破壊に至る可能性がある。この部分放電の有無を、推進コイルの絶縁性能評価指標の一つと捉えている。部分放電の発生原因として、以下が考えられる。

(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、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。ボイドは、周囲のモールド樹脂と比誘電率が異なるため、電圧印加時に電界が集中し、部分放電の発生原因になる。

(2) 導体剥離

地上コイルでは、巻線コイルとモールド樹脂との境界面は接着されている。しかし、車両通過時の応力変動や電磁的な加振、通電による温度変化が繰り返されることにより、境界面に剥離が生じる可能性がある。その結果、ボイドと同様の空隙が生じ、同様に電界集中による部分放電を引き起こす原因となる。

(3) 微小なクラックの進展

推進コイルは、車両が通過する時に推進力に対する反力をコイル全体で受ける。この反力を繰り返し受

けることで、モールド樹脂部に生じた微小なクラックが進展し、部分放電を引き起こす可能性がある。

3. 走行状態における部分放電試験

3.1 模擬ガイドウェイ内における部分放電試験⁴⁾

基礎的な検討として、空中を伝搬する各種電磁波が地上コイルの部分放電により発生する信号の検出に与える影響や、ガイドウェイ構造物の影響等を調査するため、鉄道総研構内の実物大模擬ガイドウェイを使用し、屋外環境での部分放電検出試験を行った。ガイドウェイに欠陥を模擬した地上コイルを敷設し、部分放電信号検出用ダイポールアンテナ（1対2本×2組＝4本）を地上コイル表面から0.1m離れた面に直線状に配置し、デジタルオシロスコープを用いて部分放電に伴う部分放電信号を検出した。その結果、放電電荷量で100pC前後から部分放電を検出可能であること、ガイドウェイ構造物（特に内部の鉄筋）による影響が認められないことを確認した。

3.2 宮崎実験線における走行確認試験⁵⁾

前節では定置で試験を実施したが、その成果を踏まえ、部分放電に伴い発生する信号を走行中の車両から効果的に検出し、異状コイルを特定するための試験を宮崎実験線で実施した。宮崎実験線には概ね2kmの走行可能なガイドウェイが残っており、その区間を使用して走行確認試験を行った。地上コイルとして、前節の定置試験で使用した模擬欠陥コイルを使用した。試験車両は、駆動用車両（乗用車）を平台車（トレーラー）と連結し、けん引あるいは平台車を押し出す形で走行させる構成とした。駆動用車両には計測機器類を搭載し、平台車にはアンテナや変位計、加速度計などを搭載した。この構成で時速60kmまでの走行確認試験を行った。試験構成を図3に、試験状況を図4に示す。

この試験の結果、走行中の上下振動加速度は時速60kmで最大10m/s²程度であったが、測定環境の変化は認められず、走行速度に依らず部分放電に伴い発生する信号を比較的容易に検出できることを確認した。一方、ガイドウェイ周辺で行われていた工事作業により、部分放電の検出レベルを大幅に上回るノイズが検出され、測定環境が影響を及ぼすことが判明した。

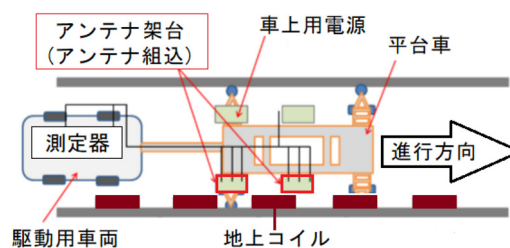


図3 宮崎実験線試験構成（上面図）



図4 宮崎実験線試験状況

4. 車上検出に向けた解析モデルによる検討

アンテナを車載する場合には、アンテナを車体側面部あるいは車内に搭載することが想定される。車内への部分放電信号の伝播状況やアンテナの適切な配置を検証するため、解析モデルを用いた検討を行った。

解析には富士通(株)製電磁波解析ソフト Poyinting を用いた。部分放電信号伝播解析モデルを図5(a)に示す。本モデルはガイドウェイと地上コイル、実車同様の窓部を有する車体から構成される。放電源を地上コイル導体部に設定し、窓のある断面と窓のない断面での部分放電信号発生後、微小時間経過するまでの部分放電信号伝播状況を解析した。

図5(b)に解析結果を示す。放電源で発生した部分放電信号は10ns後に車体近傍まで達し、15ns後には窓部から侵入する様子が確認できた。15ns後の解析結果から、窓のある断面部分と窓のない断面部分では伝播の状況が異なり、かつ電界強度にも差が生じている。このこ

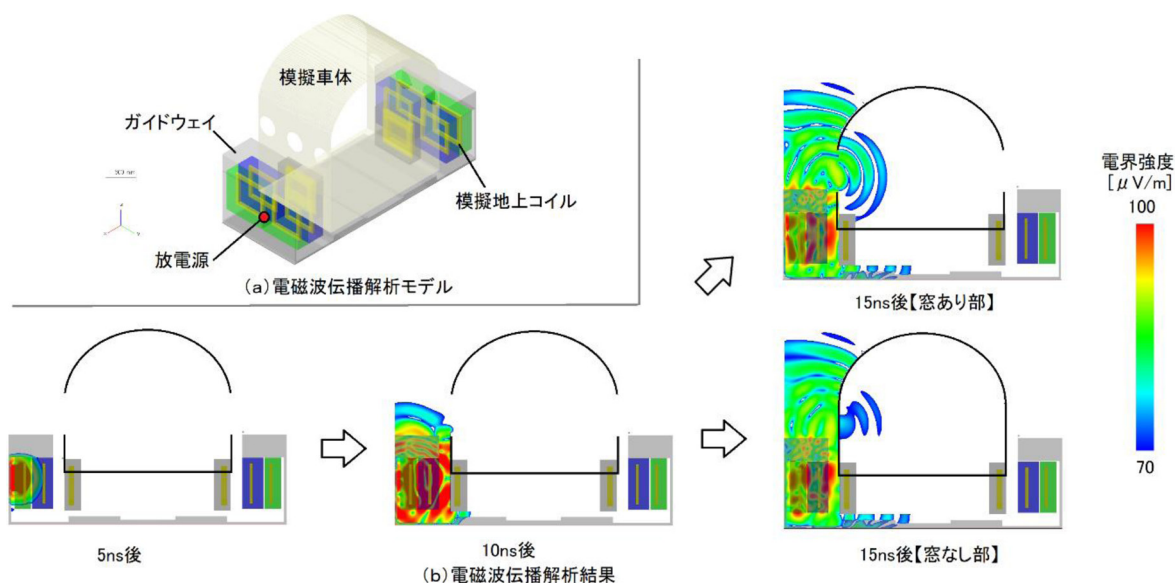


図5 部分放電信号伝播状況解析

とから、窓部近傍にアンテナを設置することにより、車内で部分放電に起因する部分放電信号を受信可能であることがわかった。

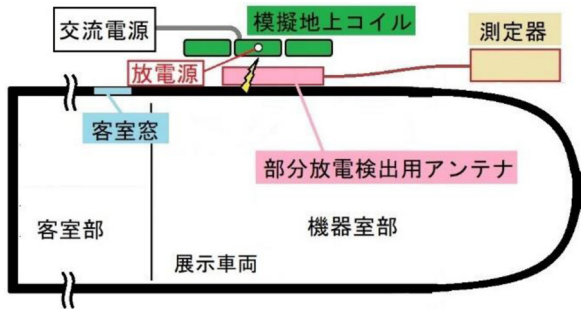
5. 展示車両を用いた検出試験

5.1 試験構成

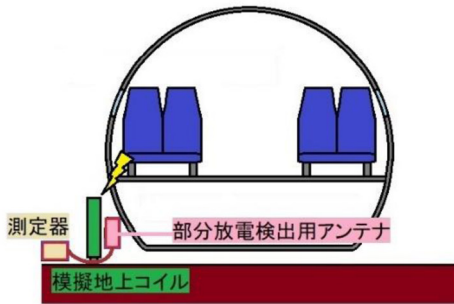
前章の結果を受け、鉄道総研が所有する屋外展示車両を用いた位置による部分放電検出試験を行った。ガイドウェイ側壁に相当する位置に模擬地上コイル⁶⁾を仮設し、車内に部分放電検出用アンテナと測定器を仮設した。部分放電検出用アンテナの設置箇所は、先頭車両等の機器室に設置することを想定した箇所（以下、車上アンテナ【A】と表記）と、客室内への設置を想定した箇所（以下、客室内アンテナ【B】と表記）の2箇所で行った。車上アンテナ【A】については、展示車両機器室内にアンテナを設置するスペースがなかったため、地上コイルに対向する高さで機器室部分の車体外部に部分放電検出用アンテナを設置した。このため、放電源とアンテナとの間は相対面で近接している。客室内アンテナ【B】については、客室窓部から侵入する部分放電信号を検出できるように、窓部に可能な限り近接して部分放電検出用アンテナを設置した。この試験における放電源とアンテナとの距離は約1mである。図6に車上アンテナ【A】、図7に客室内アンテナ【B】の試験構成を、図8に客室内のアンテナ設置状況を、図9に模擬地上コイルの設置状況を示す。

5.2 アンテナ構成

今回用いた部分放電検出用アンテナ⁷⁾は、展示車両に持ち込んで設置できる可搬式とした。図10に示すよ



(a) 上面図



(b) 断面図

図6 試験構成（車上アンテナ【A】試験）

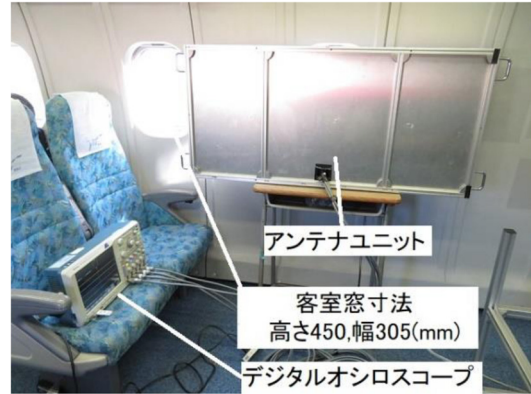
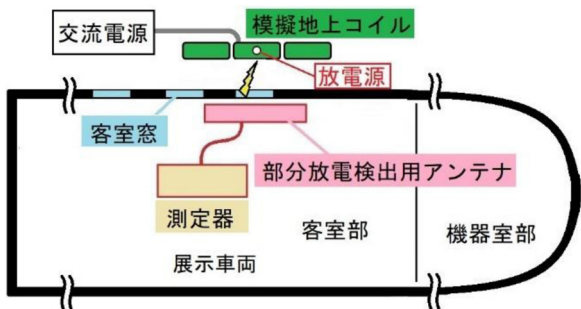
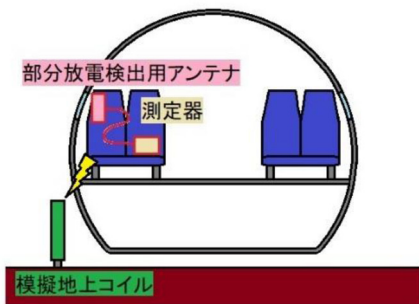


図8 客室内アンテナ設置状況



(a) 上面図



(b) 断面図

図7 試験構成（客室内アンテナ【B】試験）

うに 500MHz 帯用のダイポールアンテナ 4 本を用い、その内 1 本は中央部に水平方向に設置して部分放電信号の水平方向成分を受信し、残り 3 本は垂直方向のアンテナを 500mm の等間隔に並べて部分放電信号の垂直方向

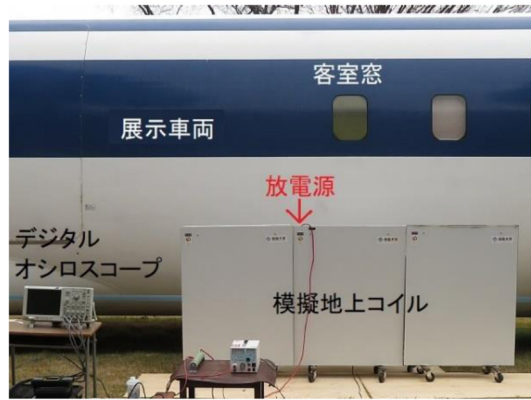


図9 模擬地上コイル設置状況

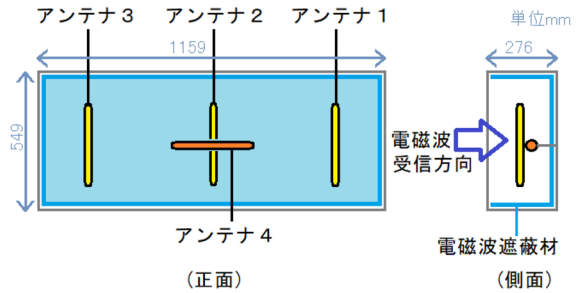


図10 アンテナ構成

成分を受信している。これらのアンテナを収納するケースの内面には、外部からのノイズおよびケース内の電磁波の反射を緩和できるように、シート状の遮蔽材を貼付した。

5.3 模擬地上コイル⁶⁾

推進コイルを模擬した模擬地上コイルでは、針電極を用いて部分放電を複数箇所が発生する構造で、電極針と内部導体間の空隙も任意に設定できる。今回は空隙を 1 mm に設定した。模擬地上コイル裏側には電磁波遮蔽材を配置して、後方の構造物による反射を軽減し、後方からの雑音を遮蔽するようにしている。模擬地上コイルは

部分放電検出用アンテナの対向部（車上アンテナ【A】）、または直下部（客室内アンテナ【B】）に、実際のガイドウェイの地上コイル敷設高さに合わせて設置した。模擬地上コイルの針電極に交流電源を接続して部分放電を発生させ、車上アンテナ【A】、客室内アンテナ【B】で部分放電信号を測定した。

5.4 試験結果

5.4.1 背景雑音試験

今回の試験で受信する部分放電信号は、出力的にも微小であり、周囲に雑音を発出する環境があると、その雑音に埋もれてしまい、部分放電の信号を検出できない可能性がある。そのため、初めに部分放電を発生させない状態で背景雑音（background noise）を測定した。測定結果を図11に示す。同図より、微小な雑音に反応するようトリガを極めて小さく設定して受信したため、アンテナ2,3にはわずかな出力が認められるが、部分放電の信号を受信・測定する上では影響しない環境であることを確認した。

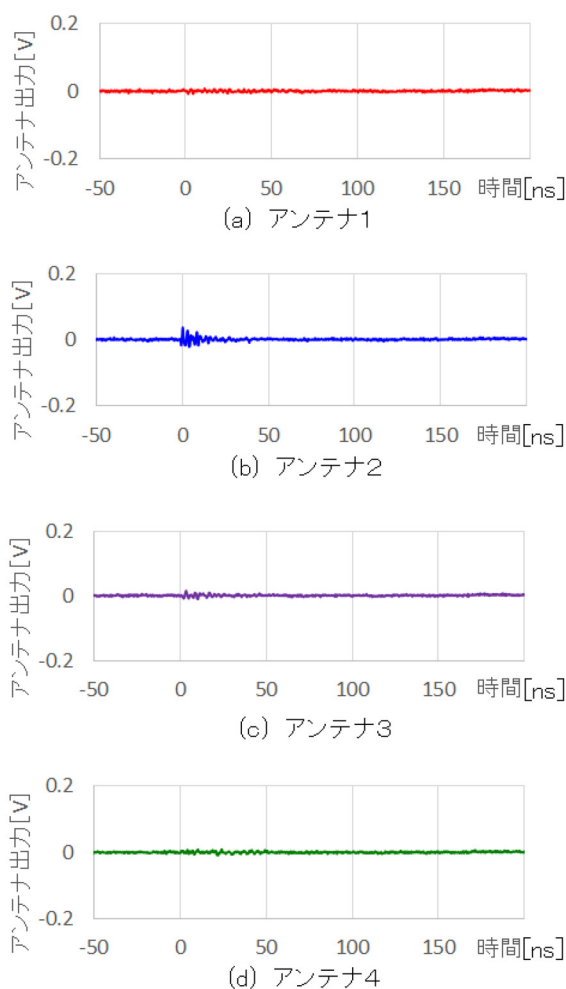


図11 背景雑音試験結果

5.4.2 車上アンテナ【A】試験

この試験では、印加電圧を0.85から1.5kVとし、模擬地上コイル上の放電位置を変えた。放電位置による変化は特に認められず、アンテナ1から4のいずれにおいても部分放電信号を検出することができた。試験結果の一例を図12に示す。

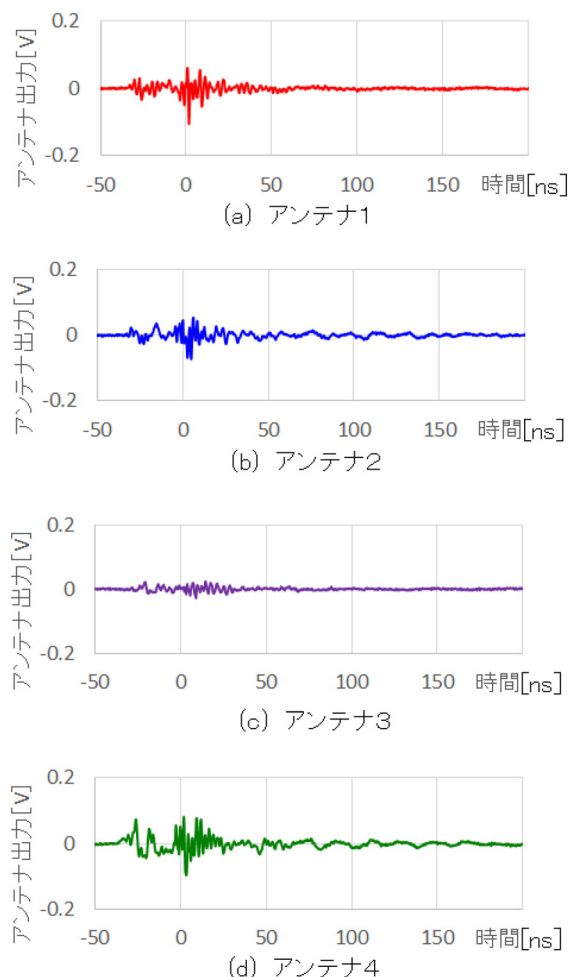


図12 車上アンテナ【A】試験結果

5.4.3 客室内アンテナ【B】試験

この試験でも印加電圧を0.85から1.5kVとし、放電位置を変えた。図13に測定結果の一例を示す。同図より、4本のアンテナ（アンテナ1から4）のうち、アンテナ2の正面は窓部のため感度が高く、アンテナ1と3の正面は車体のアルミ製構体の影響のため感度が低くなることが確認できる。なお、アンテナ4の正面は窓部にもかかわらず感度が低かった。これはアンテナ4のみ図10に示す通り水平方向に設置されているため、アンテナの先端部が窓部分からはみ出し、車体構体部により遮蔽されることで受信感度に影響しているものと推定される。また、車上アンテナ【A】試験に比べ、客室内アンテナ【B】試験ではアンテナ設置場所と部分放電発生箇

所が上下方向に離れているものの、十分な感度で部分放電信号が受信できていることも確認できた。今回の結果より、窓部近傍にアンテナを設置できれば、直線距離で1m程度推進コイルから離れた場所でも、部分放電が検出可能であることが分かった。なお、時速200km走行中において、部分放電（あるいは絶縁破壊）を距離1.26mで検出できることも確認している⁷⁾。

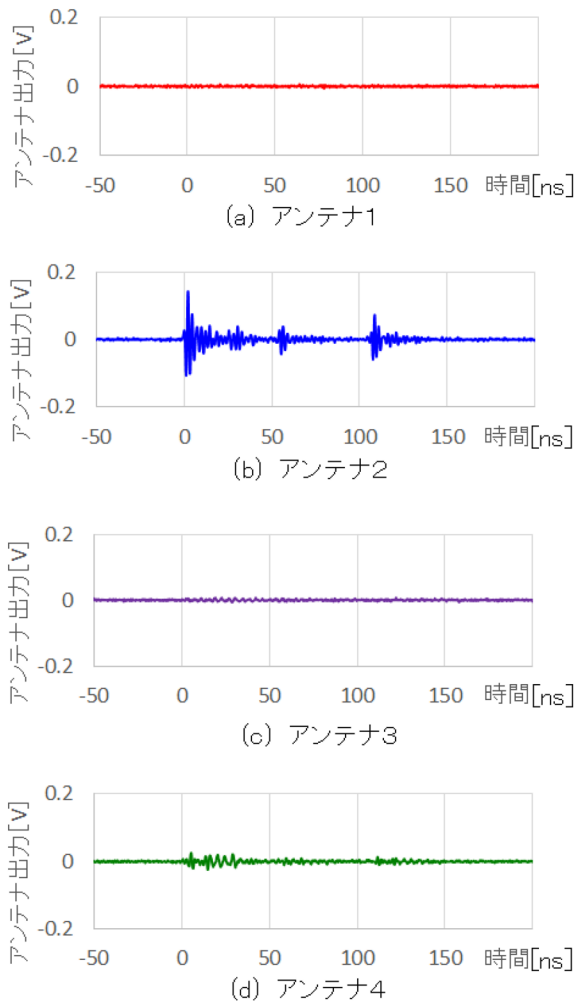


図13 客室内アンテナ【B】試験結果

6. まとめ

地上コイルの部分放電検出システムを実車両に搭載することを想定し、車内での部分放電検出のモデル解析および同システムを展示車両に搭載し部分放電試験を行った。その結果を以下にまとめる。

- (1) 車体を模擬したモデル解析を行い、車内においても窓部から部分放電信号が伝播することを確認した。
- (2) 展示車両を用いた部分放電信号検出試験において、アンテナを機器室に相当する箇所に設置したとこ

ろ、部分放電信号が検出可能であることを確認した。

- (3) 同様の部分放電信号検出試験において、車内にアンテナを設置して測定したところ、(2)に比べ受信レベルが低下するアンテナがあるものの、部分放電信号が検出可能であることを確認した。また、アンテナが車体窓部からずれた場合、受信レベルが低下することを確認した。

今後は、実際に超電導磁石と冷凍機を稼働した状態での部分放電検出試験を行い、更なる深度化を進める予定である。

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP17K06302 の助成を受けたものである。

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) 池田遼平, 太田聡, 饗庭雅之, 依田裕史, 渡邊健: 推進コイルの部分放電現象に着目した絶縁診断手法, 鉄道総研報告, Vol.33, No.5, pp.11-16, 2019
- 4) 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," Proc. of the 31st IEEE Electrical Insulation Conference, pp.142-146, Jun. 2013, Ottawa, Canada.
- 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年度電気学会基礎・材料・共通部門大会論文集, pp.389-394, 2012
- 6) Masatake Kawada, "Detection of Partial Discharges Occurring in Propulsion Coils of Superconducting Maglev Systems Using an On-Board Radio Interferometer System with a Vector-Antenna," Proc. of the 36th IEEE Electrical Insulation Conference, pp.499-503, Jun. 2018, San Antonio, USA.
- 7) Masatake Kawada, Ryohei Ikeda, Masayuki Aiba, Ken Watanabe, and Masao Suzuki, "Detection of Partial Discharges Occurring in Propulsion Coils of Superconducting Maglev Systems from a Test Bogie Running at High Speed Using a Radio Interferometer System with a Vector-Antenna," Proc. of the 38th IEEE Electrical Insulation Conference, pp.194-198, Jun. 2020, Virtual Conference.