

部分放電検出による 地上コイルの絶縁診断用車載装置の提案

浮上式鉄道技術研究部 磁気浮上研究室

副主任研究員 太田 聡

目次

- 1, はじめに
- 2, 地上コイルの絶縁診断の必要性
- 3, 絶縁診断用車載装置の概要・効果
- 4, 絶縁診断用車載装置の機能・要件
- 5, 装置の各構成要素の機能確認
- 6, まとめ・成果の活用

1, はじめに

- ◆ 超電導リニア用地上コイル - 構成要素として不可欠
 - ◆ 車両に3種類の力を与え走行させる
(推進力、浮上力、案内力)
 - ◆ 大荷重の振動負荷、高電圧の印加
 - ◆ 膨大な個数、長期間の屋外使用
 - ◆ 効率的で確度の高い保守が要求
 - ◆ 高速走行に用いる推進コイルに
高電圧が印加
- ⇒ 高電圧に対する絶縁診断が必須
(本日の発表の主たる目的)



超電導リニアの構成要素

1, はじめに

◆ 推進コイル

◆ 車両の高速走行に必要な

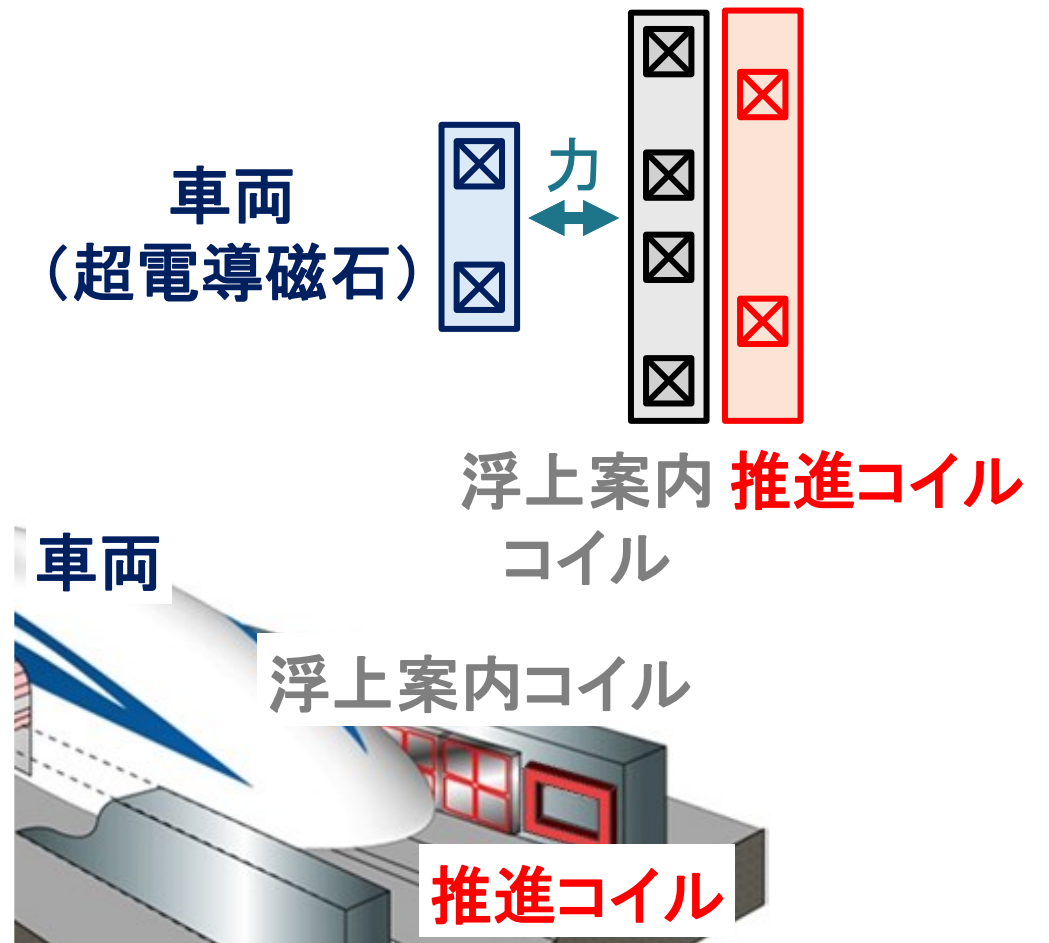
◆ 高電圧が印加(公称電圧33kV)

➤ 逆起電力: 超電導磁石の移動磁界が地上コイルを鎖交することによる誘導起電力

➤ 通電電流: 超電導磁石に推進力を与えるために、自身に流れる大電流

【提案手法】 絶縁診断の一手法

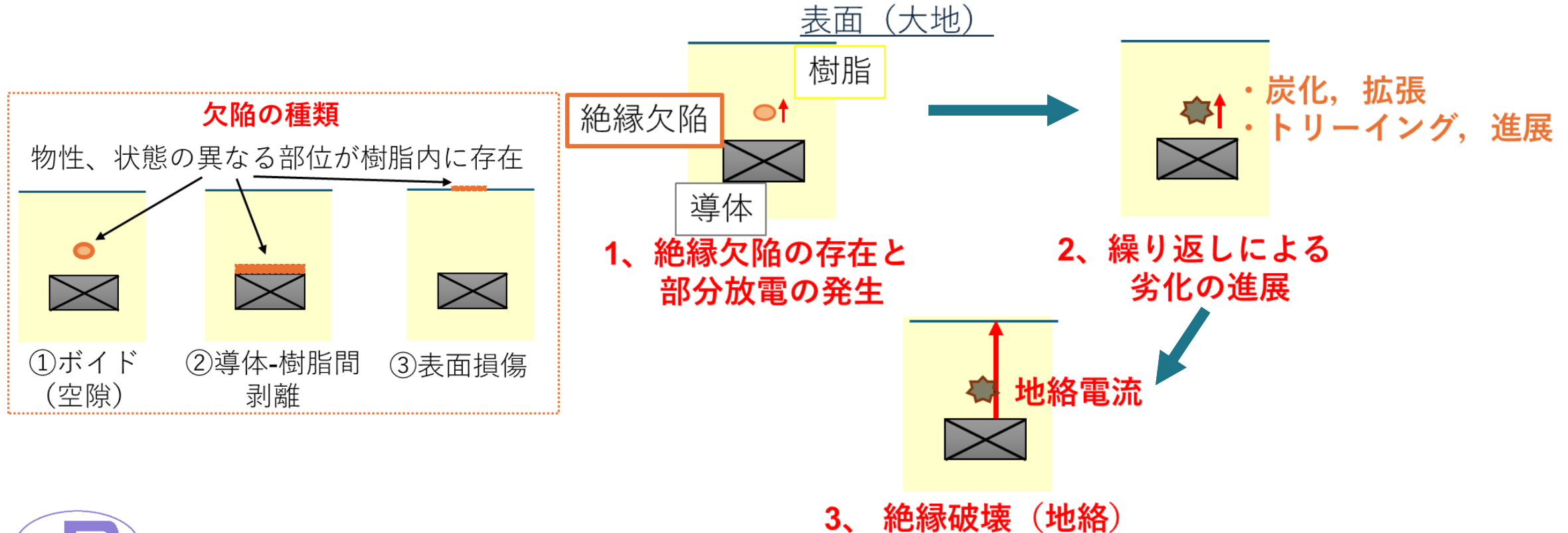
◆ 絶縁劣化を「部分放電」により検知し、
高速、効率的に検査できる手法



2, 地上コイルの絶縁診断の必要性

◆ 地上コイル内部の絶縁劣化のメカニズム

- 絶縁欠陥箇所が存在 ⇒ その部位で**部分放電が発生**
- 部分放電の繰り返し発生 ⇒ **地上コイルの絶縁破壊**の原因、早期発見が肝要



2, 地上コイルの絶縁診断の必要性

- ◆ 地上コイル内部の部分放電の検出法
- ◆ 部分放電による様々な物理現象 – 部分放電の電磁波に着目

分類	現象	検出方法	適用可否
化学的	絶縁物変質	ガスセンサ, 化学分析	× - 樹脂モールド機器に不適
光学的	発光・発熱	光センサ, 紫外線モニタ	× - 設置位置が裏側
音響的	超音波	音響センサ, AEセンサ	× - 材質不適、感度微弱
電氣的	パルス電流・電圧	高周波CT, 結合コンデンサ検出	△ - CT嵌合や配線等, コイル側に追加機器要
電磁氣的	電磁波・電界	磁気センサ, <u>アンテナ</u>	○ - ただし、周波数帯と感度に関して、確認試験が必要

2, 地上コイルの絶縁診断の必要性

◆ 地上コイルの絶縁に関する試験方法

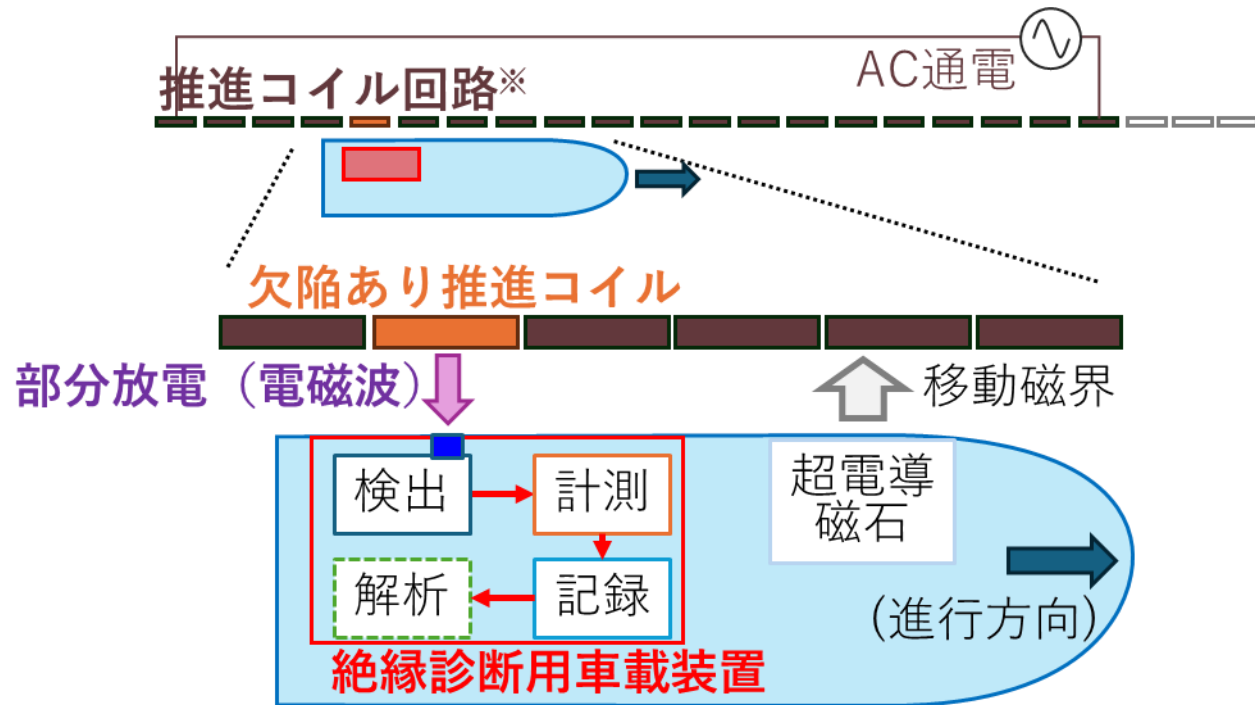
項目	診断の精度	高電圧印加の追加機器
回路定数測定	詳細な診断が困難	—
絶縁抵抗測定		必要
耐電圧試験(商用周波、雷Imp)	本線内の試験では、個別コイルの診断が困難	多数個が接続された回路に高電圧を印加するため、大規模な試験用変圧器が必要
$\tan \delta$ 試験		
部分放電試験		
今回の提案手法 (部分放電の電磁波による測定)	個別コイルの診断 (スクリーニング)が可能	不要 車両走行で生じる電圧を使用

目次

- 1, はじめに
- 2, 地上コイルの絶縁診断の必要性
- 3, 絶縁診断用車載装置の概要・効果
- 4, 絶縁診断用車載装置の機能・要件
- 5, 装置の各構成要素の機能確認
- 6, まとめ・成果の活用

3, 絶縁診断用車載装置の概要・効果

- ◆ 走行車両に絶縁診断装置を搭載、推進コイルを走行中に検査
- ◆ 検査に必要な**高電圧**を走行から得る(**逆起電力、通電電流**)



➤ 診断結果から欠陥コイルを特定

【特徴】

- ◆ 試験電圧は走行時発生電圧
 - ◆ 推進コイル側の追加工不要
 - ◆ 高速(最高500km/h)で試験
- ⇒ 効率的な絶縁診断の実現

※一般的には三相回路であるが、簡略化のため1相分のみ図示

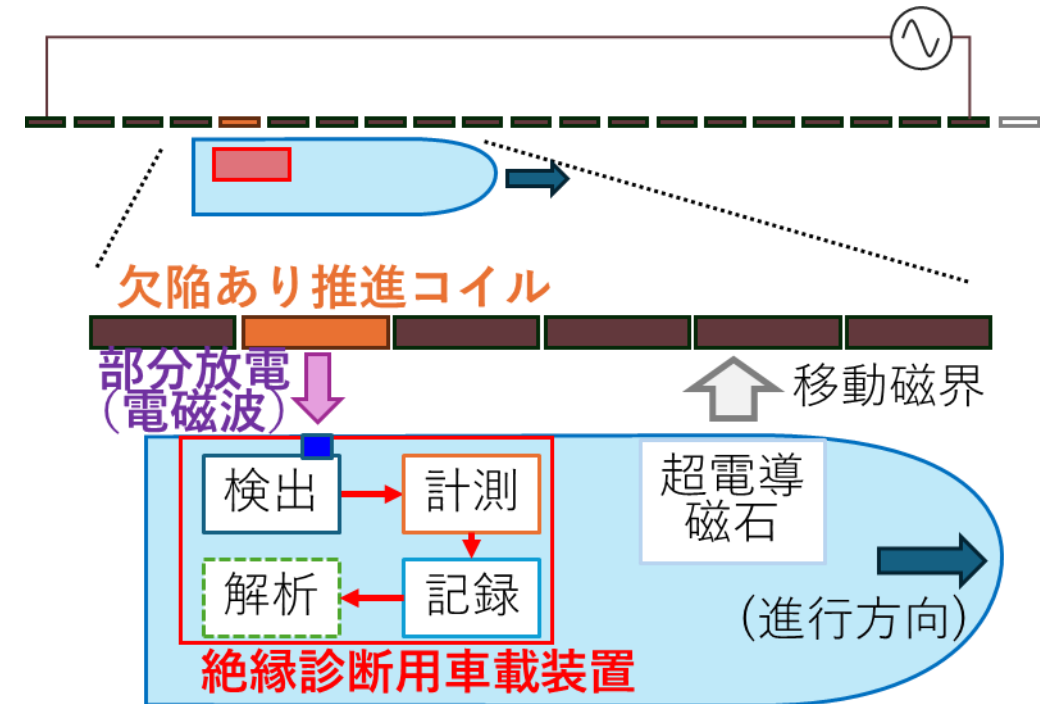
4, 絶縁診断用車載装置の機能・要件

◆ 絶縁診断用車載装置の要件

◆ 診断時の条件を勘案し設定

項目	条件	影響	機能
検知対象	電磁波	感度 周波数帯	検出
通過速度	最高500km/h	時間分解能	計測
計測時間	最大70分	記録部仕様	記録
コイル設置 間隔	0.9m	位置推定の 分解能	解析

※四つの要素とともに、**車上他機器の影響**も確認



4, 絶縁診断用車載装置の機能・要件

◆ 絶縁診断用車載装置の要件

◆ 各機能の要件充足の確認

項目	条件	影響	機能
検知対象	電磁波	感度 周波数帯	検出
通過速度	最高500km/h	時間分解能	計測
計測時間	最大70分	記録部仕様	記録
コイル設置 間隔	0.9m	位置推定の 分解能	解析

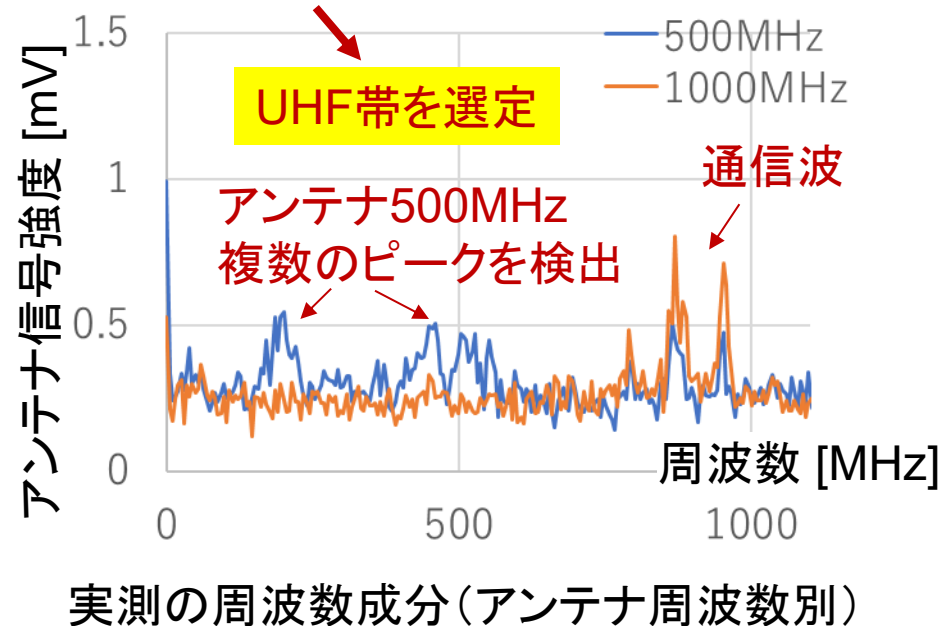
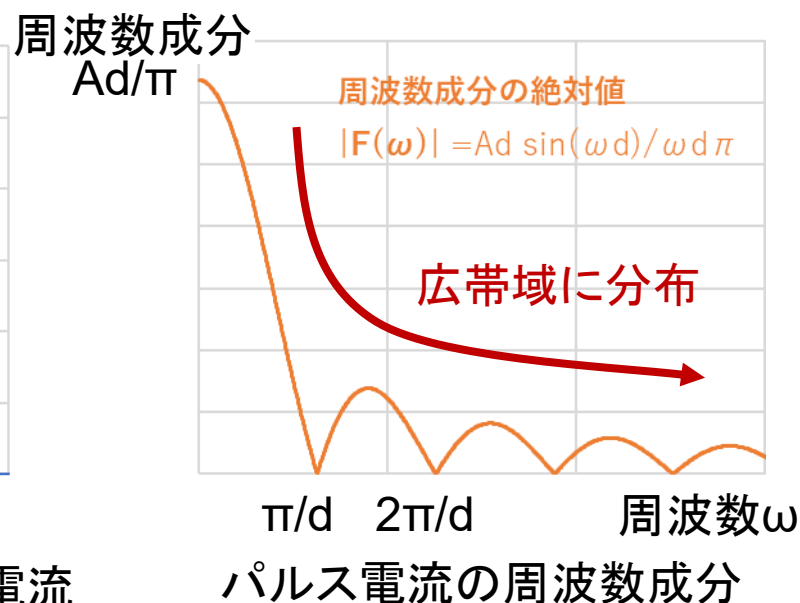
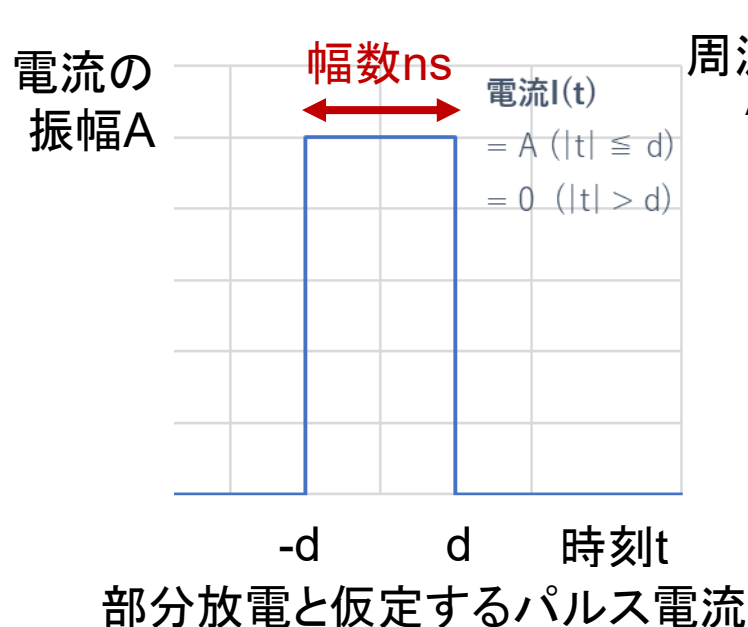
※各部の要素の確認であり、車載しての
走行中の絶縁診断試験を行った結果ではない

機能	要件
検出	部分放電の電磁波を検出
計測	電磁波を定量化できる測定構成の選定
記録	70分以上の記録を可能にする
解析	・計測結果から劣化兆候の把握 ・コイル単位での放電源位置推定
その他 機器の 影響	・機器の診断に及ぼす影響を確認 ・診断に影響がある場合、影響を軽減にする対策の適用

5, 装置の各構成要素の機能確認

(1) 検出

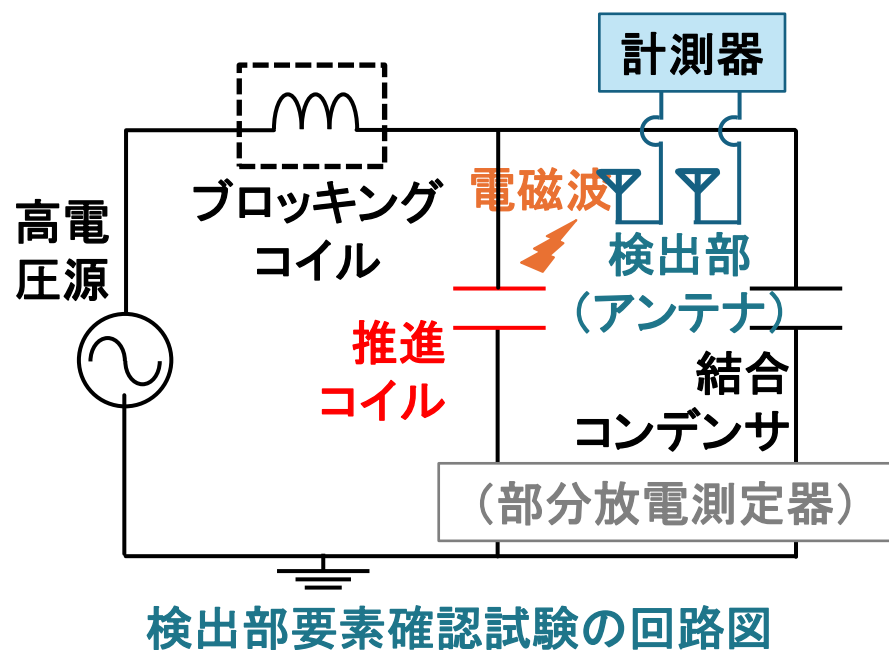
- ◆ 部分放電の電磁波に関する基本特性 - 周波数成分が広帯域に分布
- ◆ アンテナ諸元を検討 - 周波数 (アンテナ寸法と感度に寄与)
- ◆ 部分放電を検出できる範囲内で、アンテナ寸法が小さい方が適切



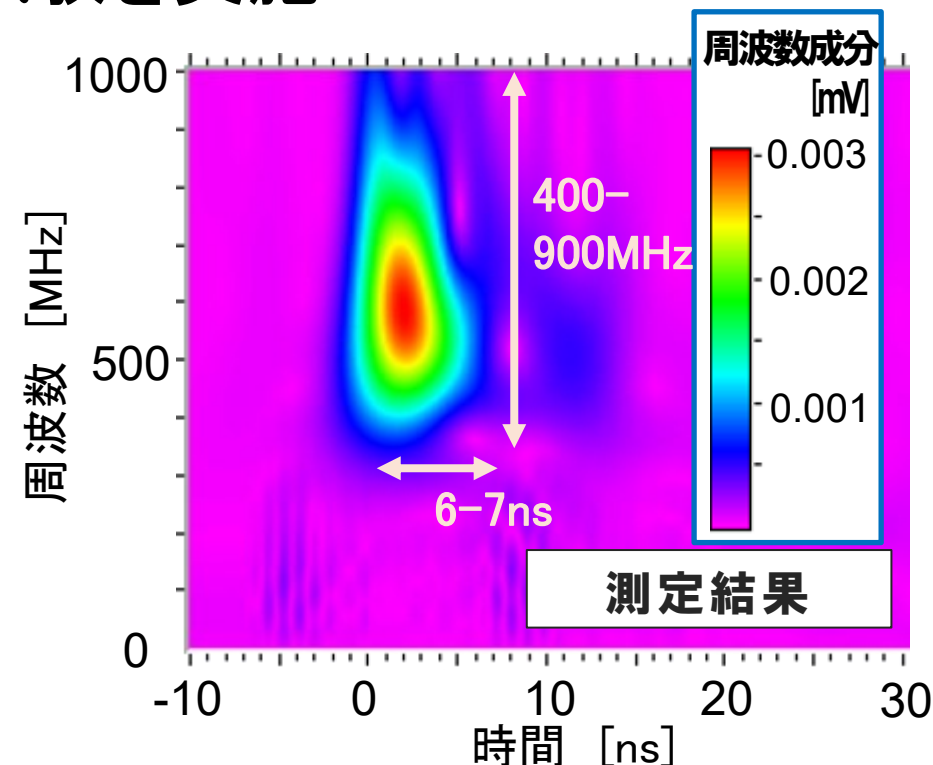
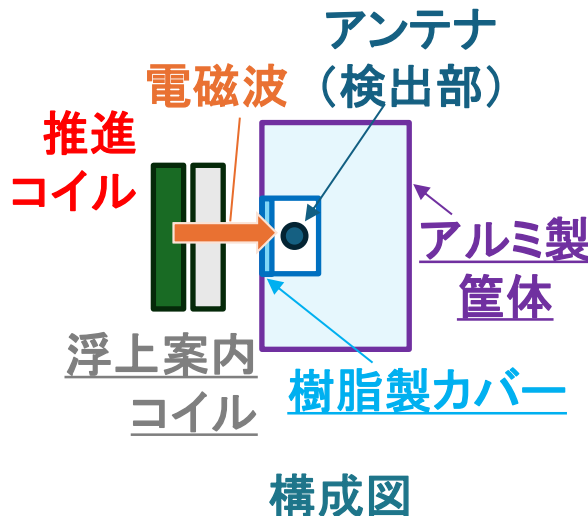
5, 装置の各構成要素の機能確認

(1) 検出

- ◆ 500MHzの半波長ダイポールアンテナ(エレメント長30cm)を選定
- ◆ 実配置を静的に模擬した配置で検出部確認試験を実施



介在物(三種)の影響も評価



5, 装置の各構成要素の機能確認

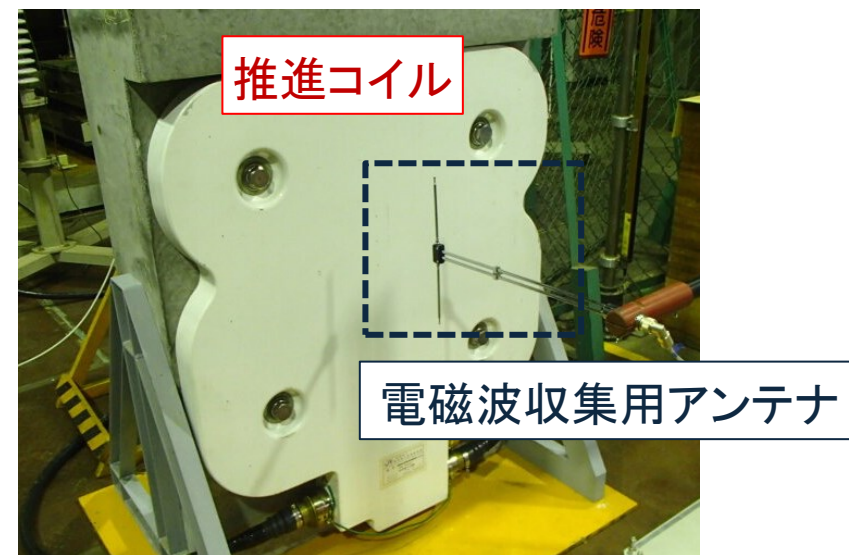
(2) 計測

◆ 3種類の計測器を選定、測定試験を実施

計測器の種類と特徴・確認結果

計測器	機種例	分解能	周波数	周波数幅	計測時間
デジタル オシロスコープ	Tektronix DPO4104B	◎	○ 5GHz	○	△ 数十ms程度
スペクトラム アナライザ	Tektronix RSA6114A	○	○ 14GHz	○	△ 数十s程度
ベクトルシグナル アナライザ	NI PXIe-5663	○	○ 6.6GHz	○	◎ 70分以上※

※ 外部記録媒体と計測設定を適切に選択することで
任意に設定可能(記録部で後述)



計測部要素確認試験の外観

5, 装置の各構成要素の機能確認

(2) 計測 例1 スペクトラムアナライザ型

◆ 3種類の計測器を選定、測定試験を実施 - 3種類とも計測可能

表 計測器の種類と特徴・確認結果

計測器	機種例	分解能	周波数	周波数幅	計測時間
デジタル オシロスコープ	Tektronix DPO4104B	◎	○ 5GHz	○	△ 数十ms程度
スペクトラム アナライザ	Tektronix RSA6114A	○	○ 14GHz	○	△ 数十s程度
ベクトルシグナル アナライザ	NI PXIe-5663	○	○ 6.6GHz	○	◎ 70分以上※

※ 外部記録媒体と計測設定を適切に選択することで
任意に設定可能(記録部で後述)

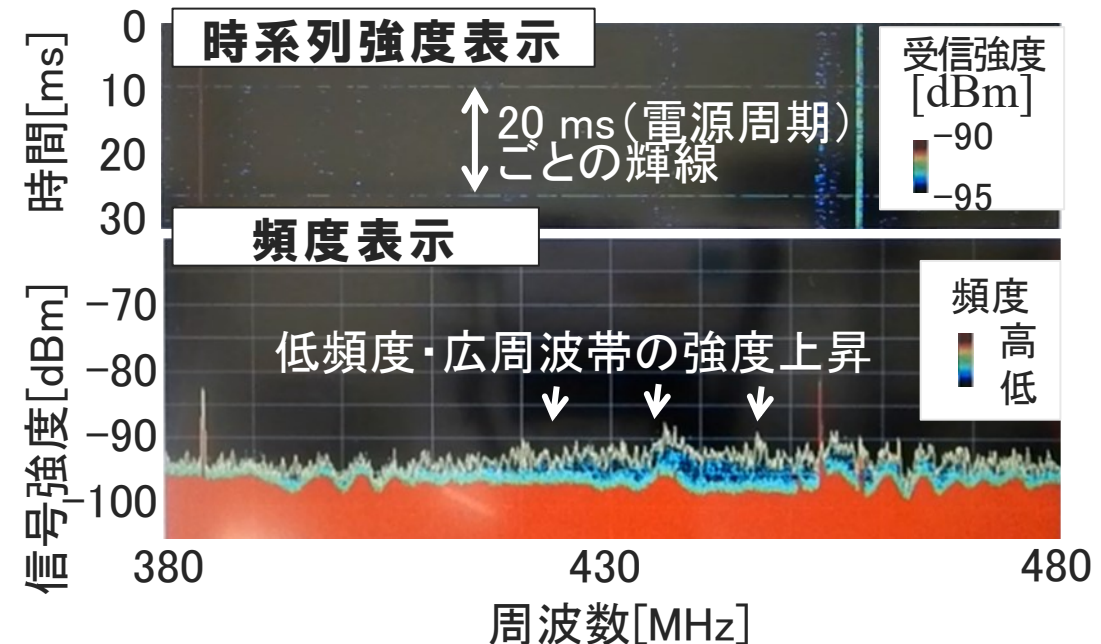


図 計測部要素確認試験の結果
(スペクトラムアナライザによる)

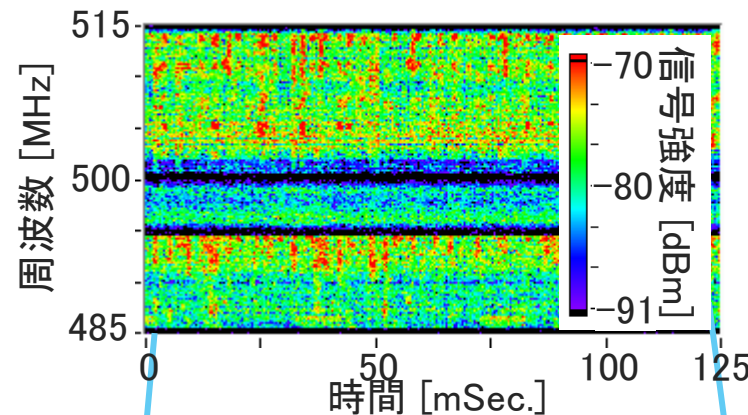
5, 装置の各構成要素の機能確認

(2) 計測 例2 ベクトルシグナルアナライザ型

- ◆ 部分放電の検出と測定確度向上にはパラメータ設定が寄与
- ◆ パラメータ: 中心周波数、周波数幅、基準レベル、(記録時間)

ベクトルシグナルアナライザ型の構成と測定条件

	条件
検出部/ 計測部	Anritsu MP534B/ NI PXIe-5663
中心周波数/ 周波数幅	500MHzまたは465MHz/ 30MHz
基準レベル	-80~-70dBm



部分放電非検出

- ◆ 測定エリア付近に他の電磁波が介在、部分放電と区別困難

総データ記録時間: 4200秒
短時間データの個数: 33600個

記録部要素確認試験の結果①(中心周波数500MHz)

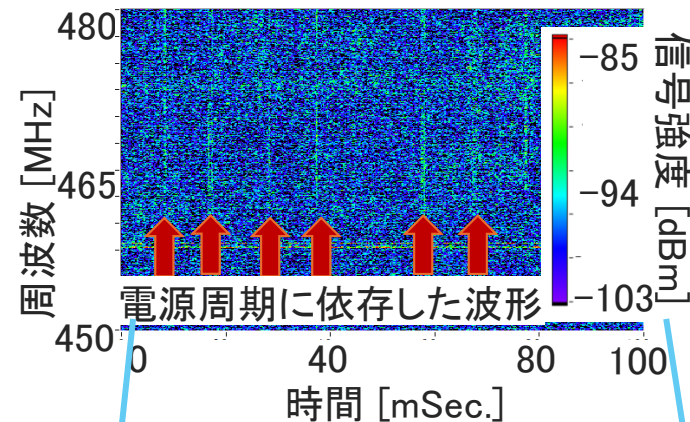
5, 装置の各構成要素の機能確認

(2) 計測 例2 ベクトルシグナルアナライザ型

- ◆ 部分放電の検出と測定確度向上にはパラメータ設定が寄与
- ◆ パラメータ: 中心周波数、周波数幅、基準レベル、(記録時間)

ベクトルシグナルアナライザ型の構成と測定条件

	条件
検出部/ 計測部	Anritsu MP534B/ NI PXIe-5663
中心周波数/ 周波数幅	500MHzまたは 465MHz / 30MHz
基準レベル	-80~-70dBm



部分放電検出、
放電頻度解析可能

- ◆ 他の影響が軽微、
電源周期(10,20ms)
に依存した波形の出現

総データ記録時間: 4200秒
短時間データの個数: 42000個

記録部要素確認試験の結果②(中心周波数465MHz)

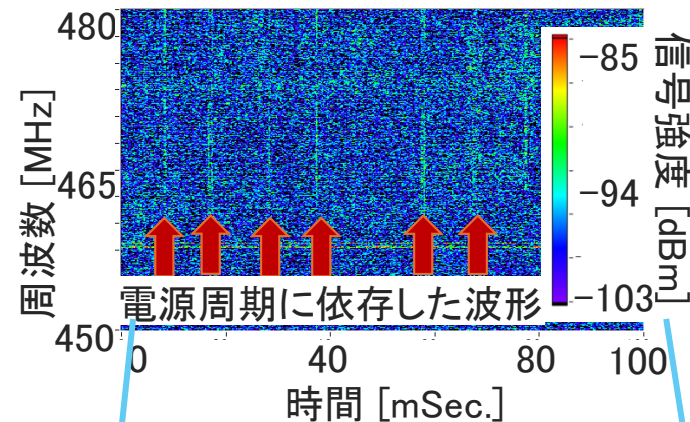
5, 装置の各構成要素の機能確認

(3) 記録

- ◆ 計測部と密接に関連、記録容量を適切に選択し要件達成を確認
- ◆ 生成データ容量574GB程度

長時間記録のための構成と測定条件(例)

	条件
検出部/ 計測部	Anritsu MP534B/ NI PXIe-5663
記録部	SUMSUNG Portable SSD T7(2TB)
中心周波数/ 周波数幅	500MHzまたは465MHz/ 30MHz
基準レベル	-80~-70dBm
記録時間	4200秒(70分)



総データ記録時間: 4200秒
短時間データの個数: 42000個

部分放電検出、
放電頻度解析可能

- ◆ 他の影響が軽微、
電源周期(10,20ms)
に依存した波形の出現

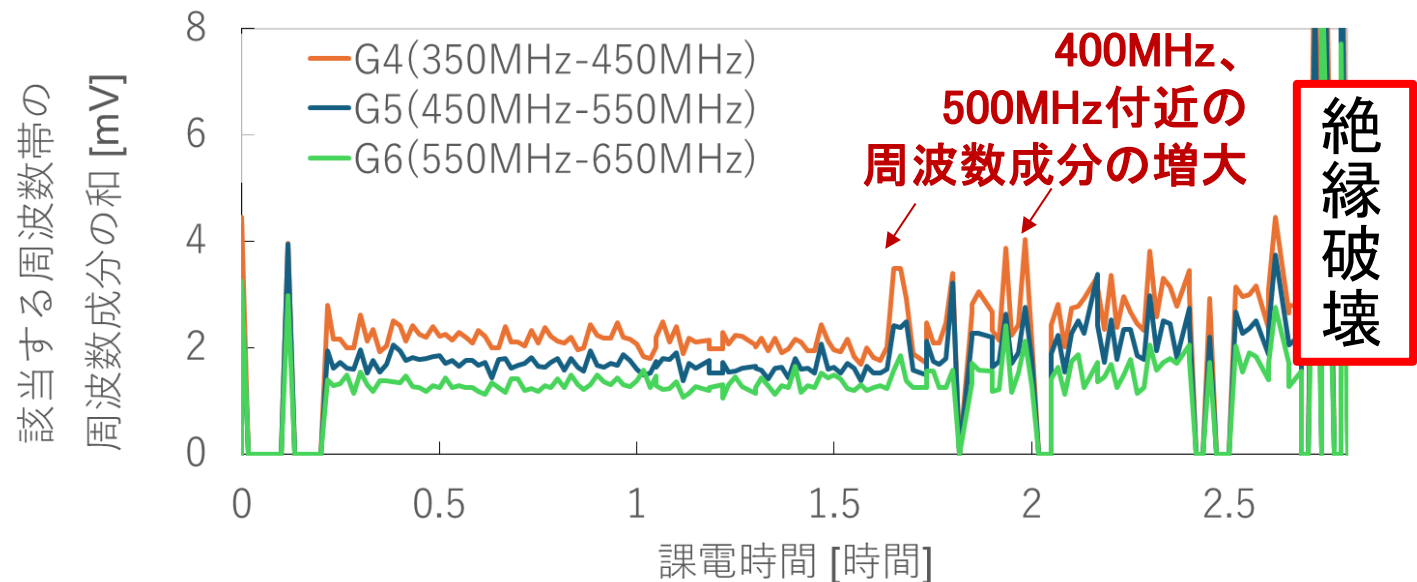
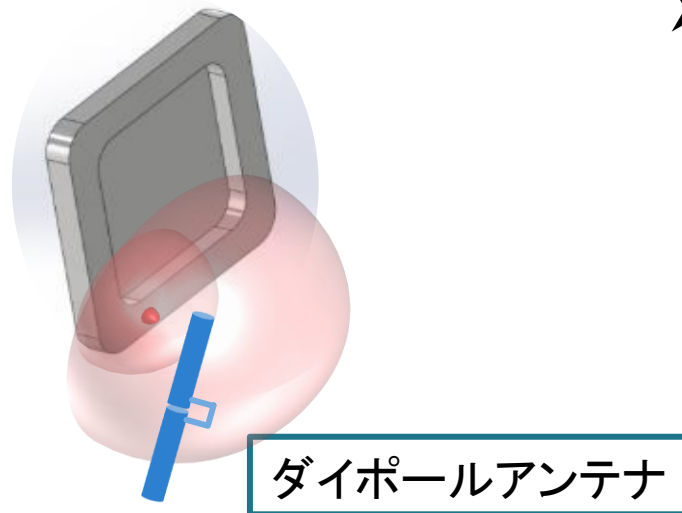
記録部要素確認試験の結果②(中心周波数465MHz)

5, 装置の各構成要素の機能確認

(4) 解析

電磁波の検出 ⇒ 劣化度合いの評価(統計的な処理)、位置推定^[2]

- ◆ アンテナ周波数周りの周波数帯に注目
 - 絶縁破壊の前駆として、周波数成分が増大



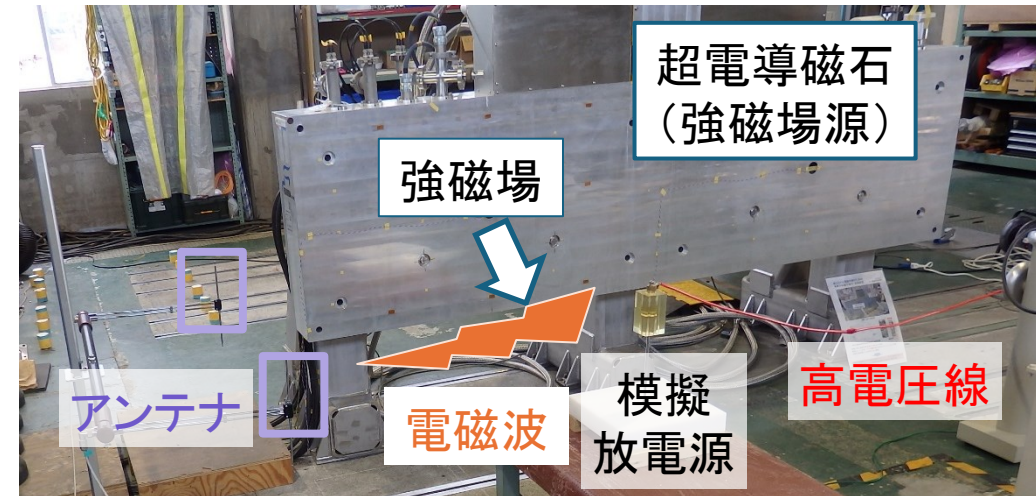
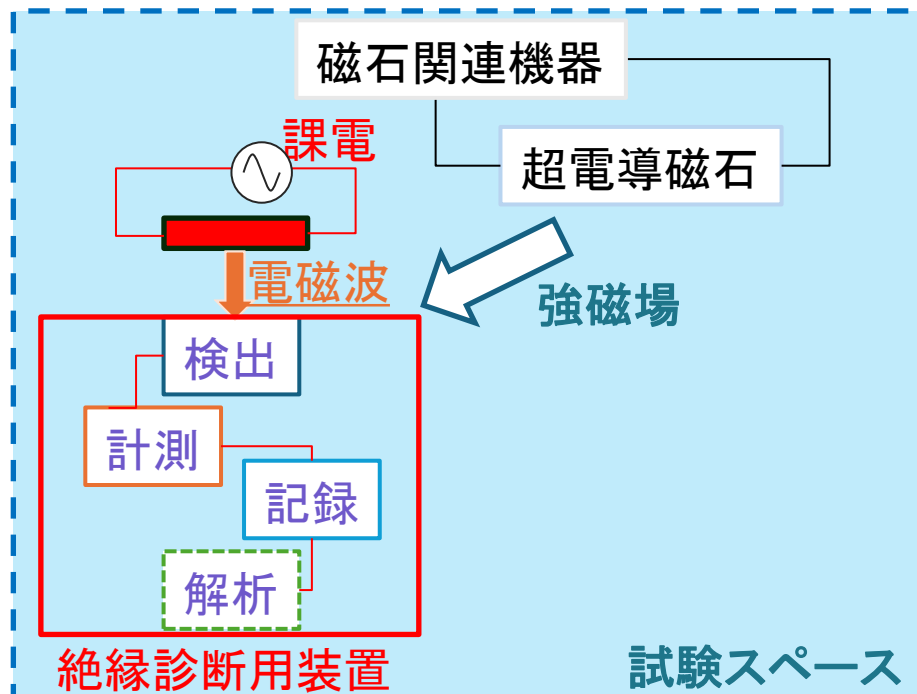
5, 装置の各構成要素の機能確認

(5) その他機器の影響

車載装置のうち検出部分は超電導磁石の近傍：影響評価を実施

超電導磁石の強磁場：検出に影響なし 関連機器の動作：影響あり

⇒対策を実施、切り分け可能^[3]



影響確認試験の外観

6, まとめ・成果の活用

【機能の評価】

機能	要件	確認結果
検出	部分放電の UHF帯の電磁波を検出	○ 微弱な電磁波を検出可能 で、かつ特徴的な波形を捉えることができた。
計測	電磁波を定量化できる 測定構成の選定	○ 三つの方式 で定量化する測定構成が組めることを確認した。
記録	70分以上の記録 を可能にする	○ ベクトルシグナルアナライザ型 において、 70分以上の記録 を確認した。
解析	・計測結果から 劣化兆候の把握 ・コイル単位での 放電源位置推定	○ 特定の周波数成分 から劣化兆候を、 到達時間差算出 によりコイル1/2個程度の位置推定を確認した。
その他 機器の 影響	・機器の診断に及ぼす影響を確認 ・診断に影響がある場合、影響を軽微にする対策の適用	○ 超電導磁石関連機器動作時に影響があることを確認したが、周波数成分により分離できることを確認した。

6, まとめ・成果の活用

【まとめ】

- ◆ 地上コイルの絶縁劣化を早期にかつ効率的に検知するために、部分放電検出による絶縁診断用車載装置を提案し、機能の要件充足を確認

【今度の課題と実施項目】

- ◆ 実際の装置構成や走行での試験に供するための、**各機能間での連携や車載時の課題などの解決**
- ◆ 従来の地上コイルの**絶縁診断体系の中での位置付けの整理**
- ◆ 更なる試験データ(電磁波測定や絶縁破壊を含む課電試験)の蓄積による、**絶縁診断の精度と確度の向上**

6, まとめ・成果の活用

【成果の活用】

- ◆ 効率的に検査でき車載可能な、電磁波検出による絶縁診断装置の開発
- ◆ 絶縁劣化により部分放電を発生する鉄道車両用電気機器の、絶縁診断の手法を提供
- ◆ 電気機器の使用環境を踏まえた、絶縁診断の試験体系づくり

参考文献

- [1] 太田聡: 電磁波を用いた車載走査型地上コイル絶縁診断装置の構成と要素確認, 電気学会リニアドライブ/電気鉄道合同研究会, TER24008,LD24008, pp. 29-32, 2024
- [2] 太田聡: 放射電磁波の検出による地上コイルの部分放電発生位置推定, 電気学会リニアドライブ/電気鉄道合同研究会, TER23002,LD23002, pp. 7-11, 2023
- [3] 太田聡,中嶋稔:超電導リニア用SCMの強磁場が電磁波センシングに与える影響の評価, 2023年電気学会産業応用部門大会講演論文集, 3-33, 2023