

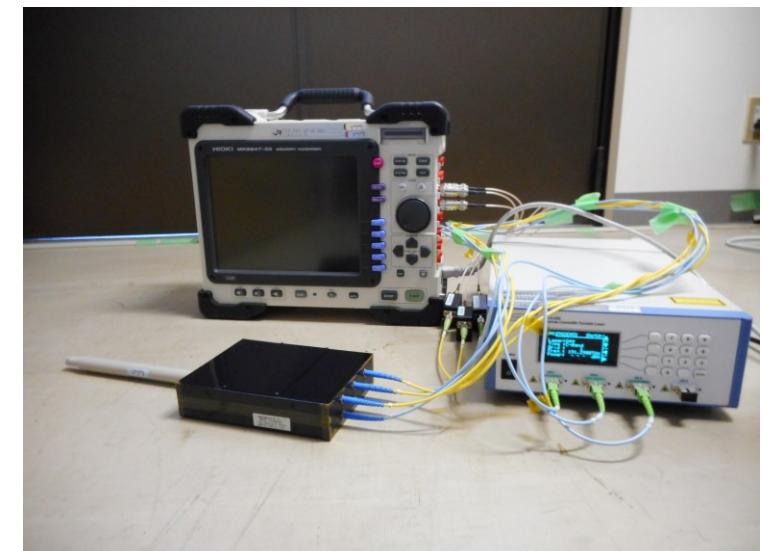
低周波磁界測定用3軸型磁気光学プローブ の開発および性能確認試験

浮上式鉄道技術研究部 電磁気研究室
主任研究員 加藤 佳仁

本研究の背景

Railway Technical Research Institute

- 低周波数帯(直流～100kHz)の磁界を利用する機器類の開発が進展
- 当該周波数帯の磁界に対する規制・規格(IEC 62597, JIS E 0201)の策定
- 鉄道車両設計の際に仕様を定めることが多い直流磁界だけでなく**低周波の交流磁界**を測定・評価する必要性



- 鉄道環境の低周波磁界測定には周波数帯域や強度範囲に応じて
複数種のセンサが必要であるという課題あり

主な磁界測定用プローブ

方式	特徴
ホール素子	<ul style="list-style-type: none">・大きな直流磁界の測定が可能・温度ドリフトの影響大
サーチコイル	<ul style="list-style-type: none">・交流磁界の精密測定が可能・直流磁界の測定は不可
フラックスゲート	<ul style="list-style-type: none">・交直流磁界とも測定可能・測定強度は最大でも数mT



現状では鉄道環境の磁界測定にはプローブの使い分けが必要

本研究の目的

Railway Technical Research Institute

- 国内外の規格が定める測定周波数帯等を1台でカバーできる
3軸型測定プローブの開発

<周波数帯域>

直流～20kHz(規格IEC 62597およびJIS E 0201より)

<強度範囲>

・直流:1μT～5mT

・交流:1μT～300μT(上記規格が参照する国際ガイドラインをカバー)

⇒ ファラデー効果を利用する磁気光学プローブにて実現

1. 磁気光学プローブの原理・特徴

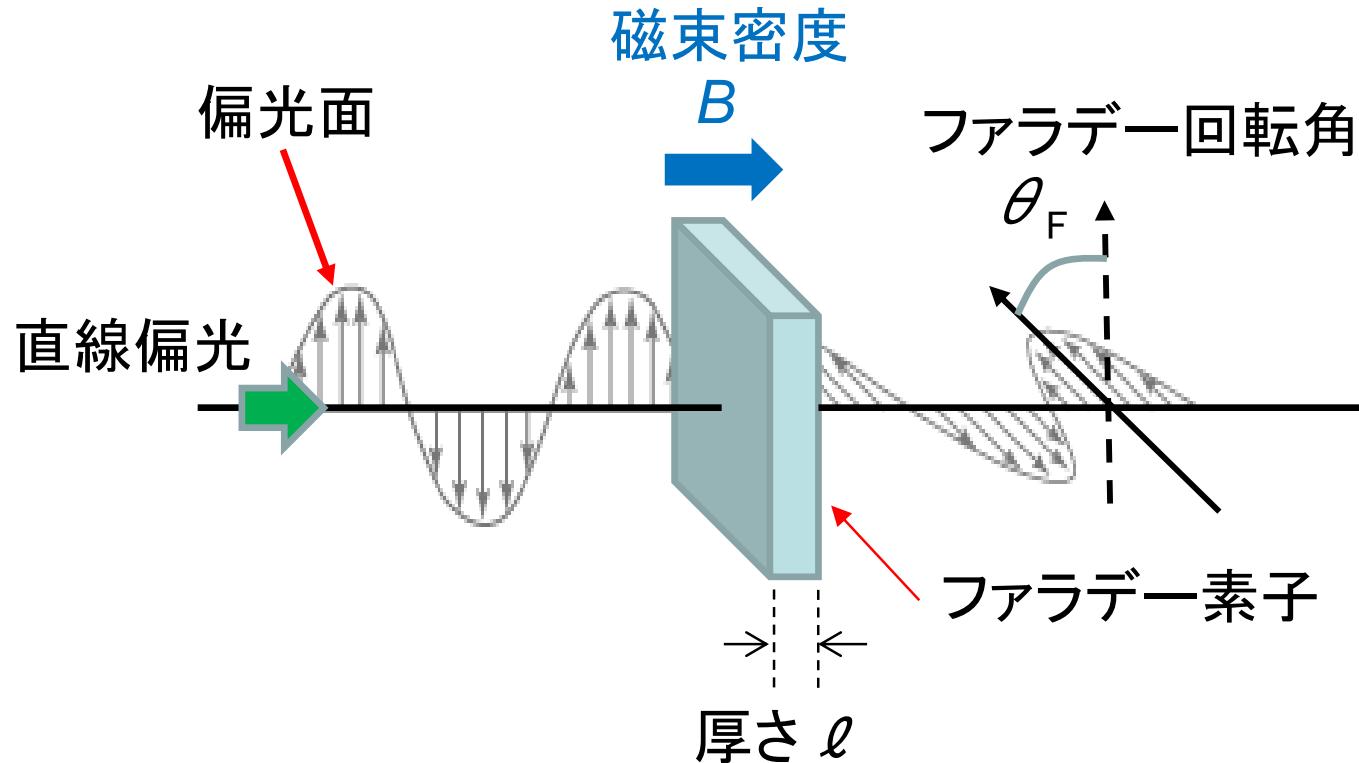
2. 3軸型磁気光学プローブの開発

3. 性能評価試験

4. まとめ

ファラデー効果

Railway Technical Research Institute



$$\theta_F = VB\ell$$

θ_F [rad]: ファラデー回転角

V [rad/(T·m)]: 物質固有の定数
(ヴエルデ定数)

B [T]: 磁束密度

ℓ [m]: ファラデー素子の厚さ

⇒ 偏光面が磁界により回転する性質を利用して磁界を検出するのが磁気光学プローブ

ファラデー効果を利用する磁気光学プローブの特徴

Railway Technical Research Institute

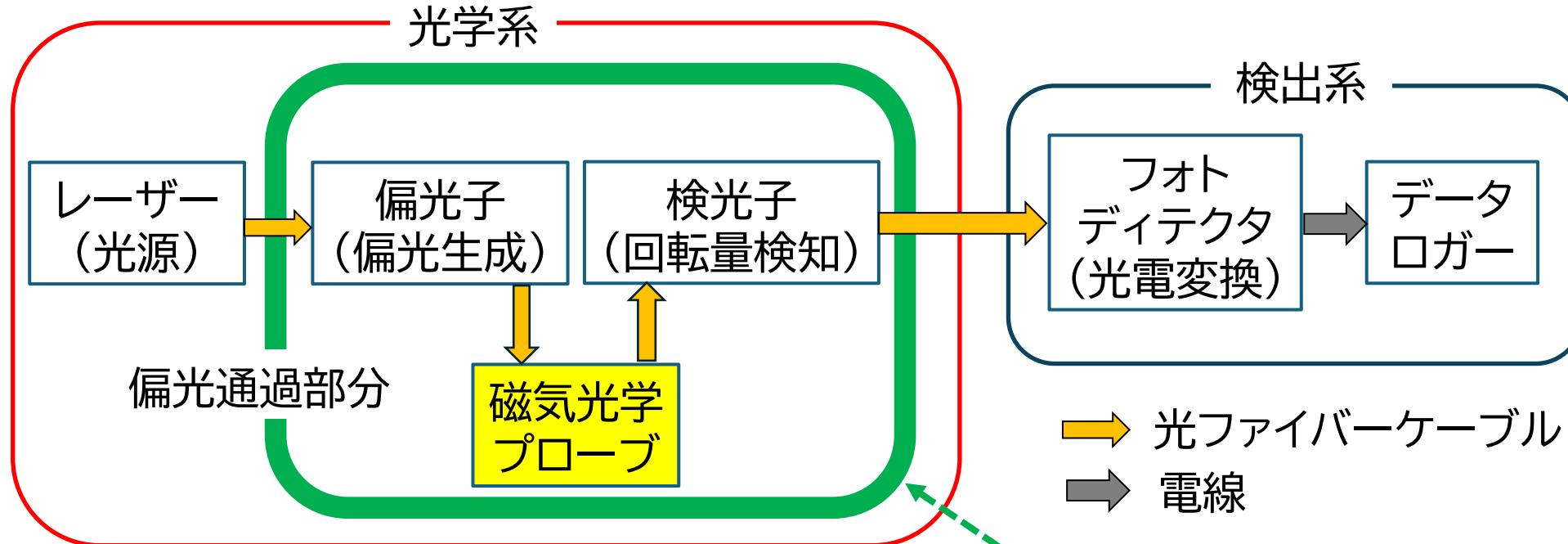
- 原理的に**広帯域**(周波数・ダイナミックレンジとともに)で活用できる可能性
- センササイズが**小さい**ので狭所での測定が可能
- センサは光ファイバーの先端に取り付けられているため**非侵襲性**が高い
- 基本的に**メタルフリー**のため強磁界の測定が可能

⇒鉄道環境・現場で使用可能な可搬型プローブの開発を目指す

磁気光学プローブ

Railway Technical Research Institute

磁気光学プローブの測定系統図



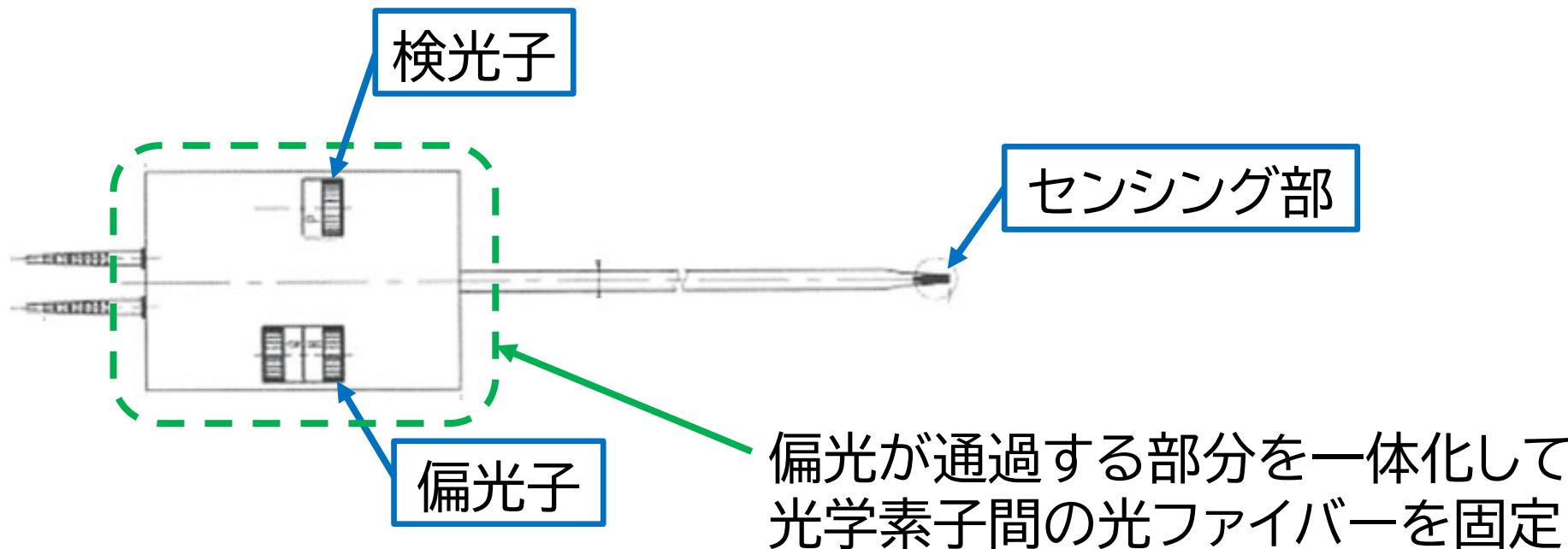
- 偏光が通過する光ファイバー部の曲げにより
出力が変動するという課題あり
⇒ 可搬性が必要となる環境測定を用途とすると
光ファイバーの固定等が必要

光ファイバーを固定できるよう
この部分を**一体化**したプローブ
を検討

1軸型磁気光学プローブの試作

Railway Technical Research Institute

偏光子～検光子間を一体化した磁気光学プローブの試作



所望する周波数帯 (DC-20kHz) での測定が可能なことを確認

ただし測定最小磁束密度は約 $10\mu T$

⇒3軸化およびノイズ低減を目指す

磁気光学プローブの3軸化に向けた検討

1軸型磁気光学プローブの構成

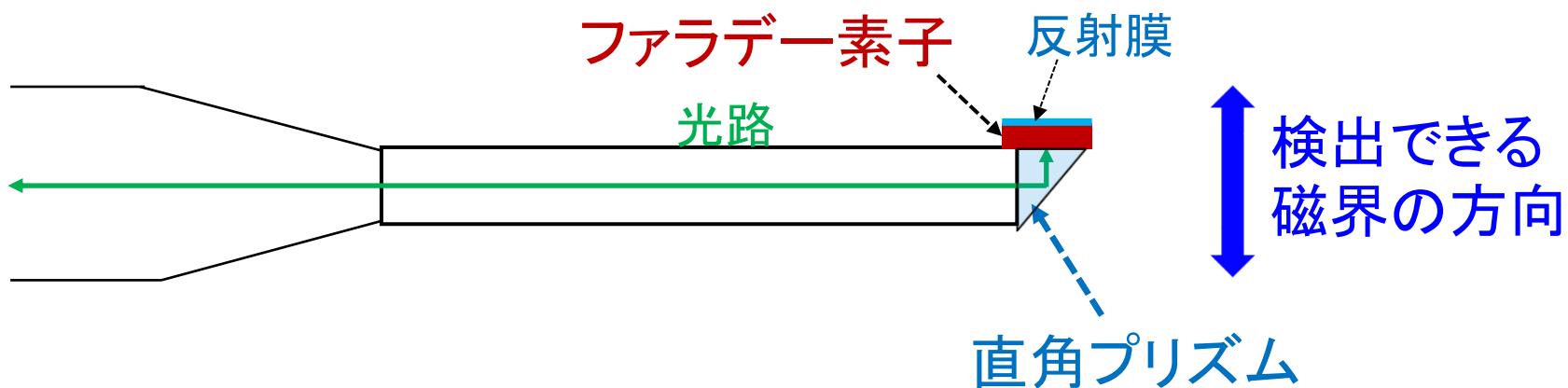


→ センシング部を極大化することなく3軸化するためには
これと90度異なる方向の磁界の検出が必要

3軸型磁気光学プローブの開発

Railway Technical Research Institute

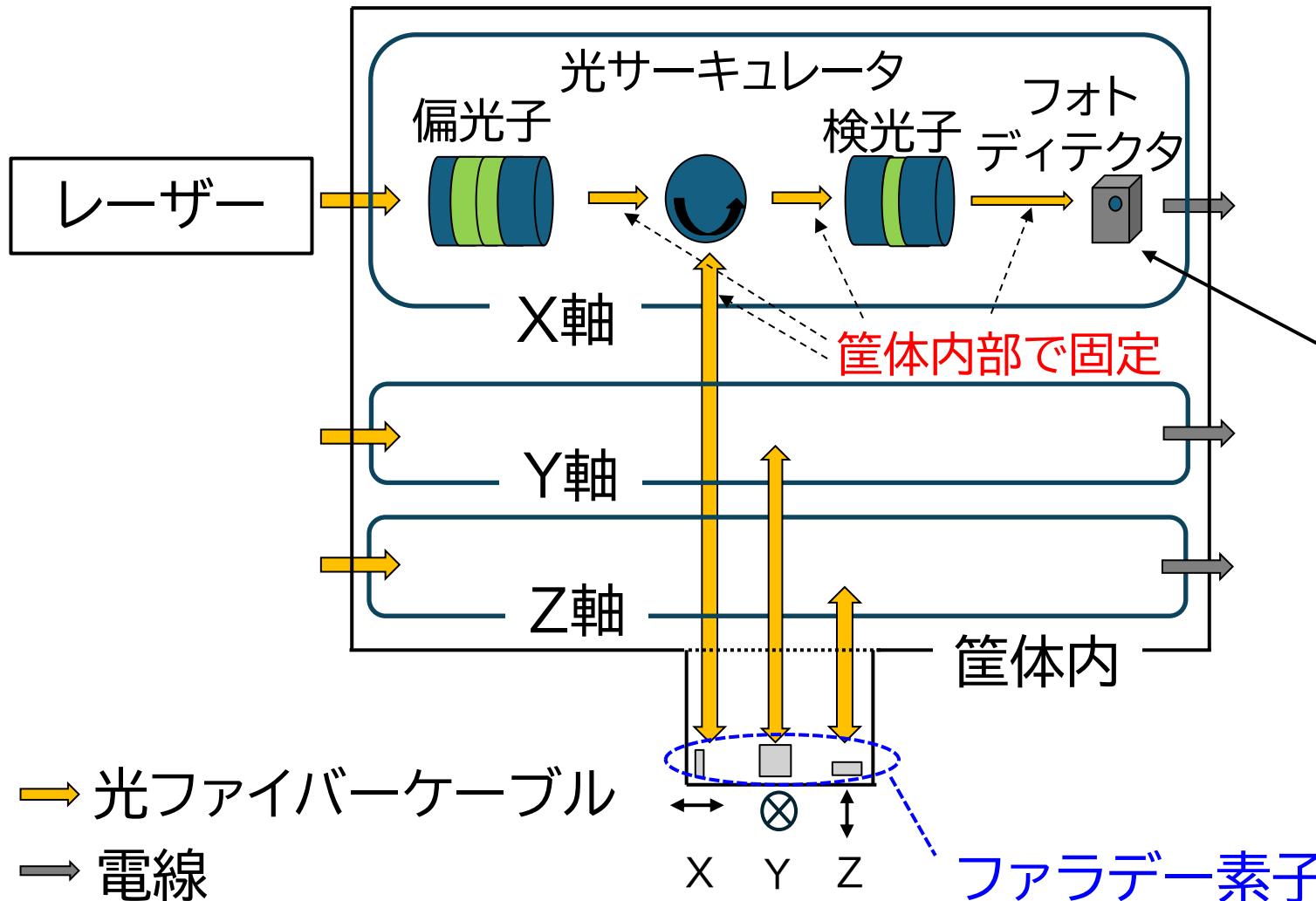
従来の磁気光学プローブと90度異なる方向の
磁界を検出する構成



直角プリズムにより光路を90度変えて従来と90度異なる方向の磁界を検知

→ このタイプ2本と従来のタイプ1本を組み合わせることにより3軸化を実現

3軸型磁気光学プローブの構成



フォトディテクタも筐体内に
納めることにより
検光子-フォトディテクタ間
の光ファイバーも固定

測定システムとしてのノイズ低減

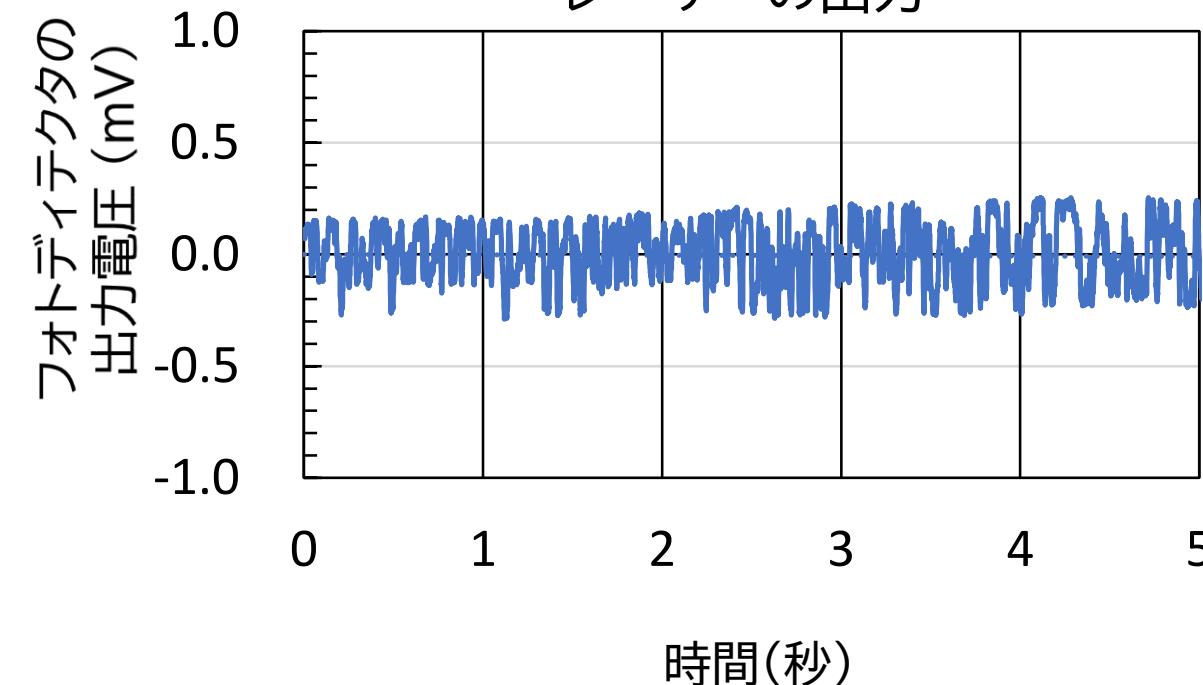
Railway Technical Research Institute

▶ レーザーの再選定

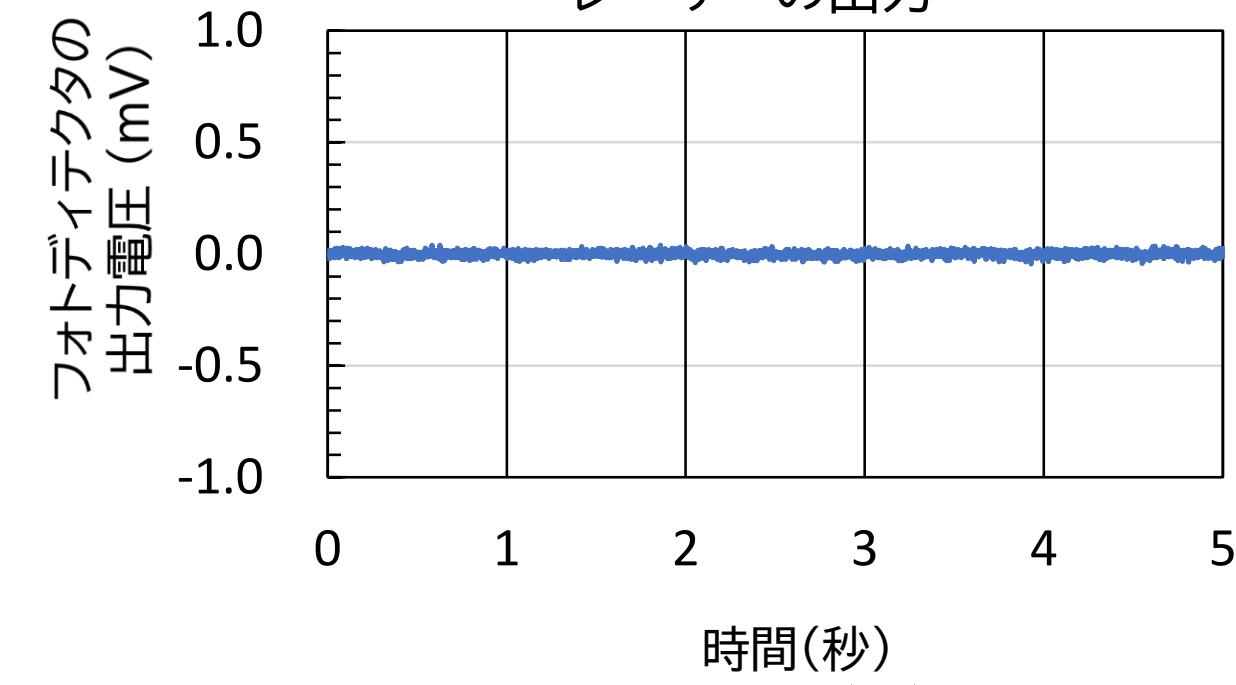
・従来採用していたレーザーには極低周波数帯にノイズが重畳

→高速光通信等では通常重視されない低周波域の特性によって選定

1軸型プローブ試作時に使用した
レーザーの出力



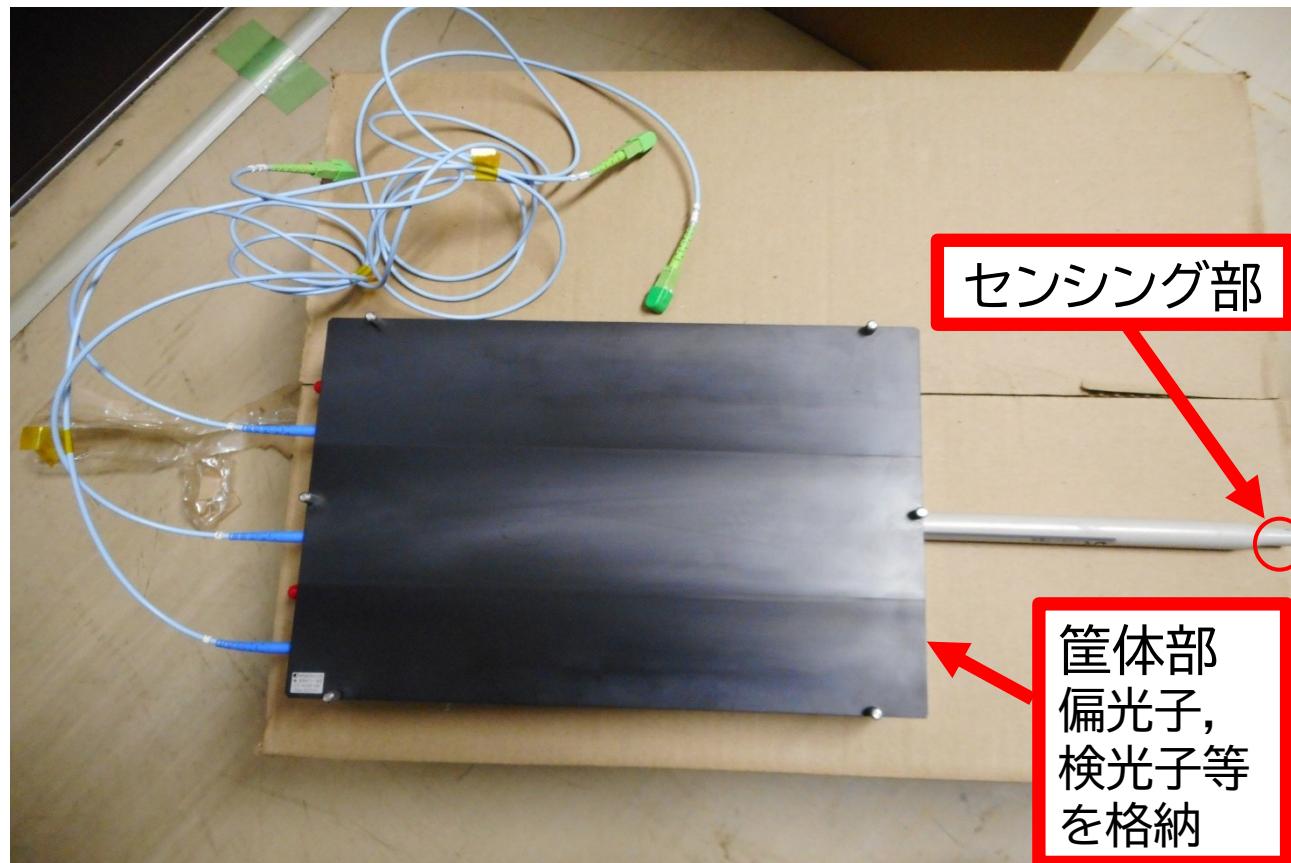
今回採用した低周波域の特性に優れた
レーザーの出力



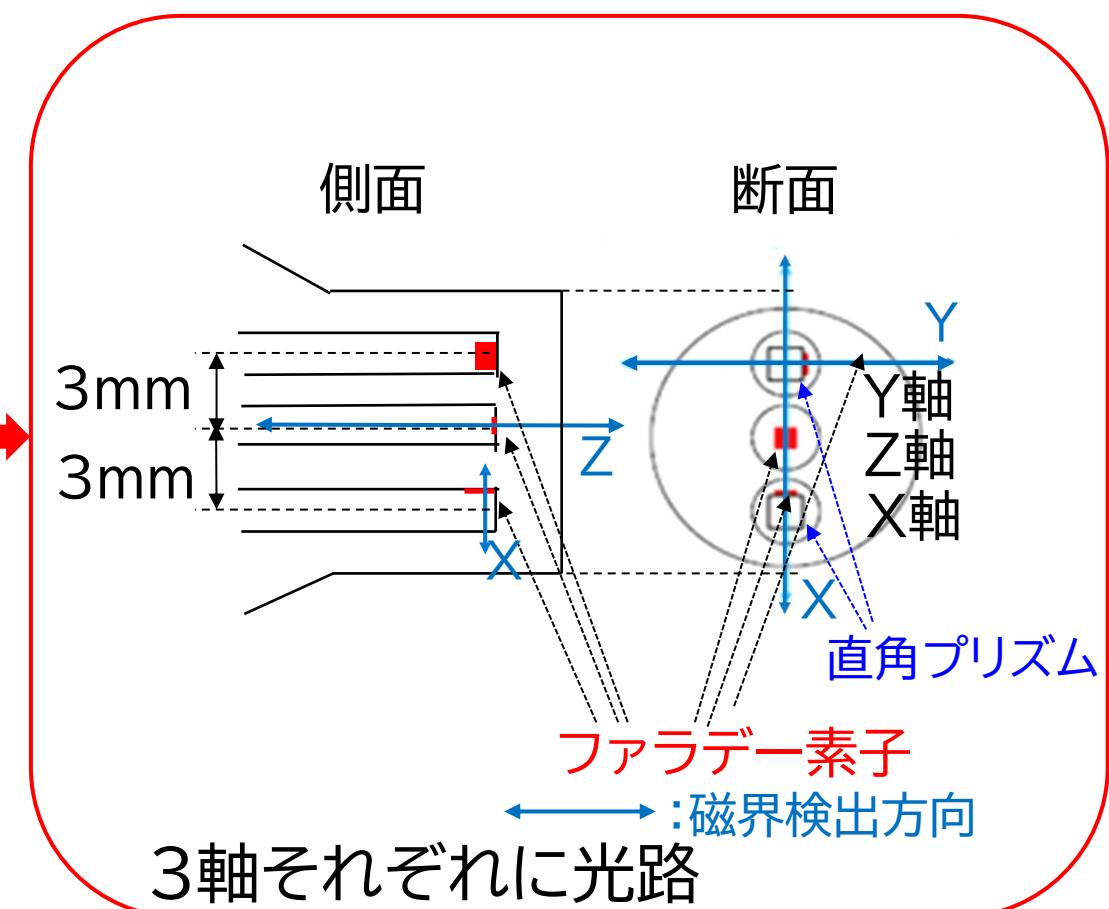
3軸型磁気光学プローブの開発

Railway Technical Research Institute

開発した3軸型磁気光学プローブ



センシング部の構造

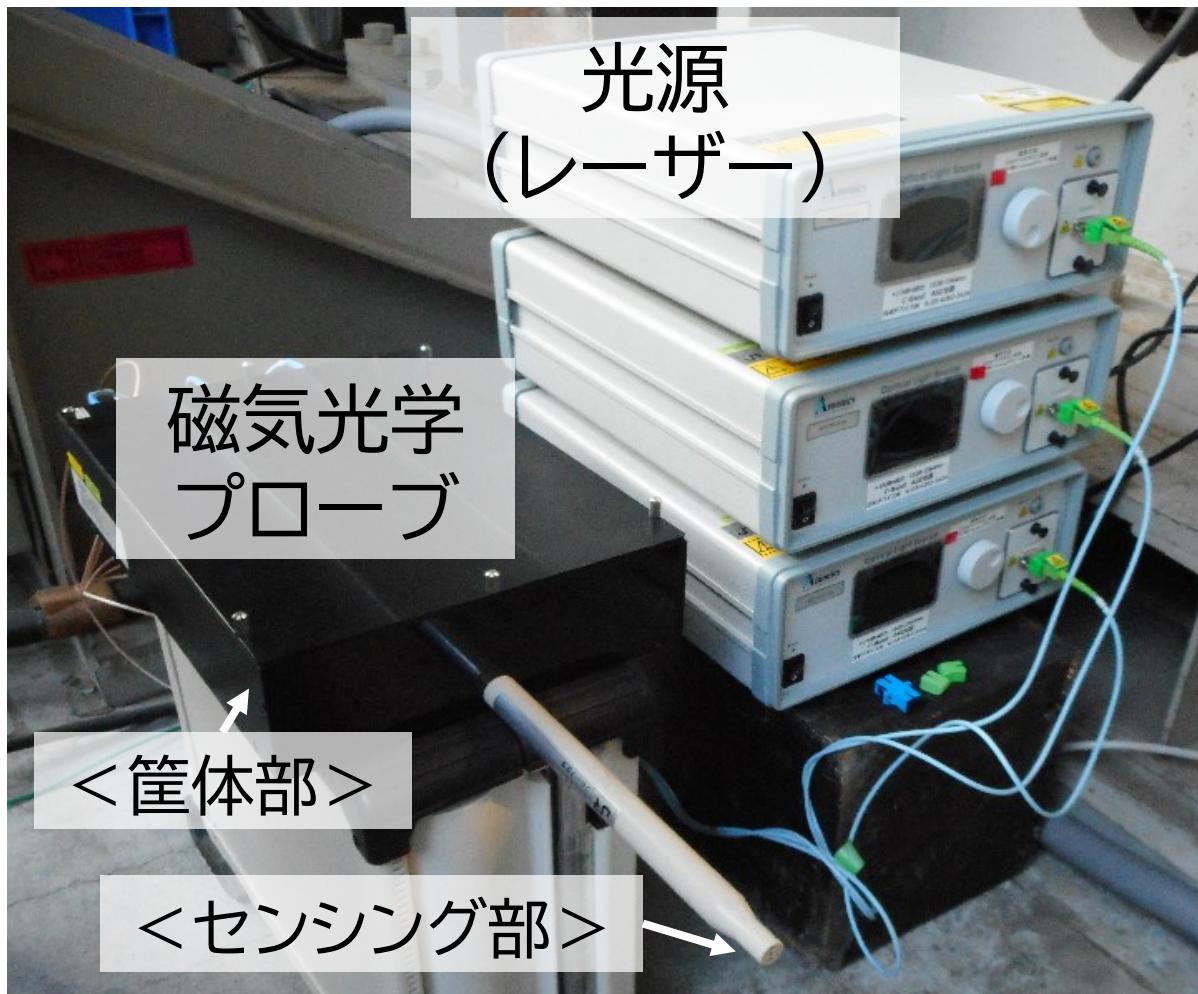


ファラデー素子3個を狭所に集約して3軸化を実現

性能評価試験の実施

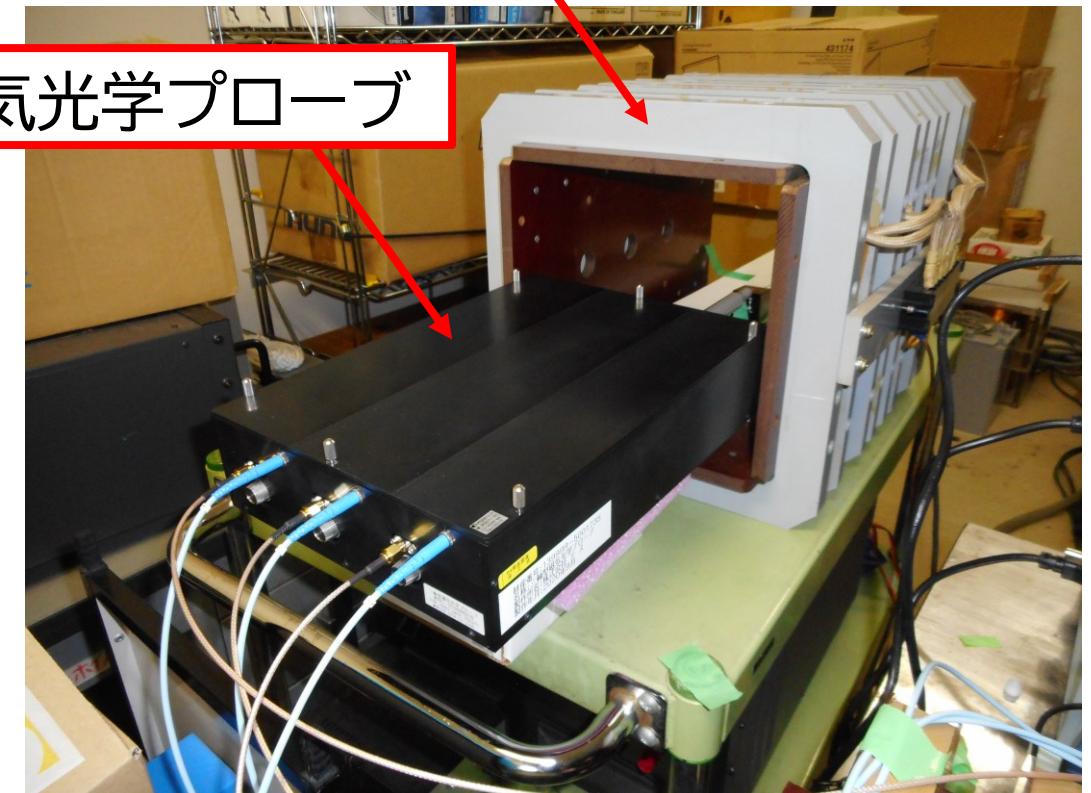
Railway Technical Research Institute

3軸型磁気光学プローブによる
低周波磁界測定システム



磁界生成による性能評価試験

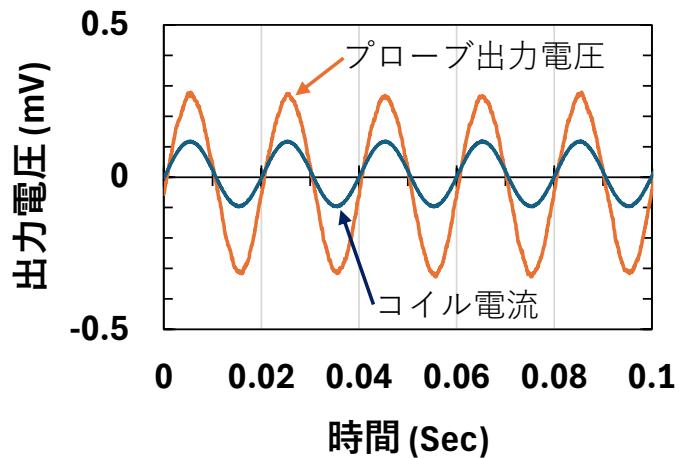
磁界発生用メリットコイル



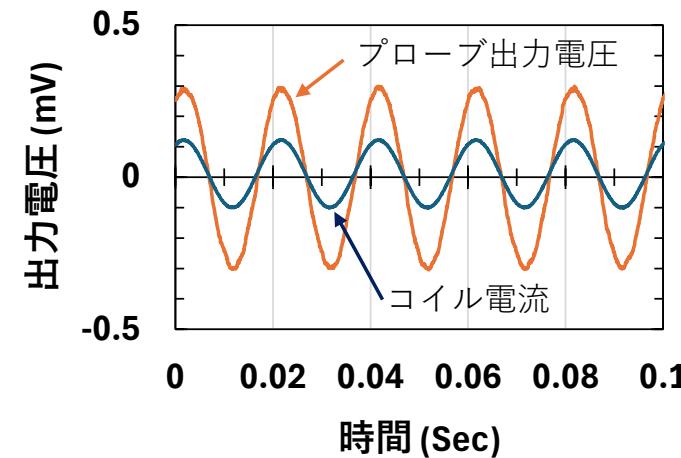
正弦波磁界の測定試験

Railway Technical Research Institute

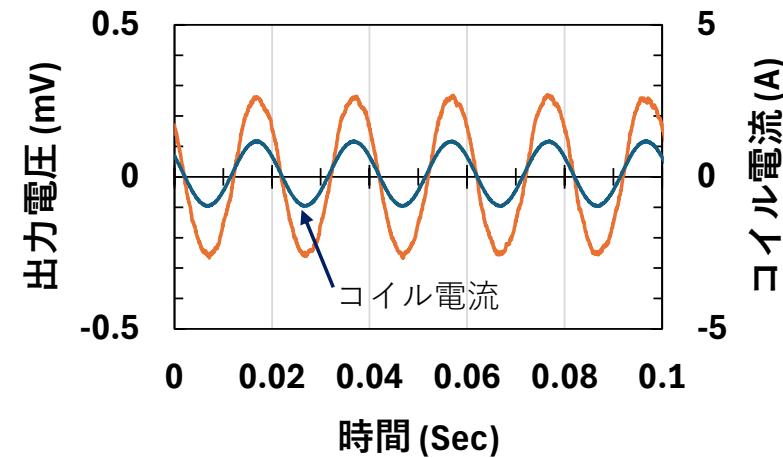
それぞれ50Hzの正弦波磁界を印加



X軸出力



Y軸出力



Z軸出力

印加磁界に応じたプローブからの出力を確認

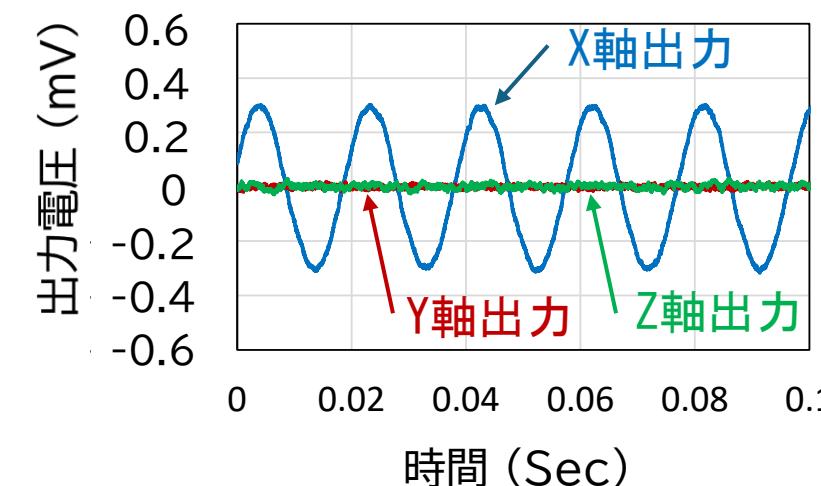
3軸間の干渉確認

Railway Technical Research Institute

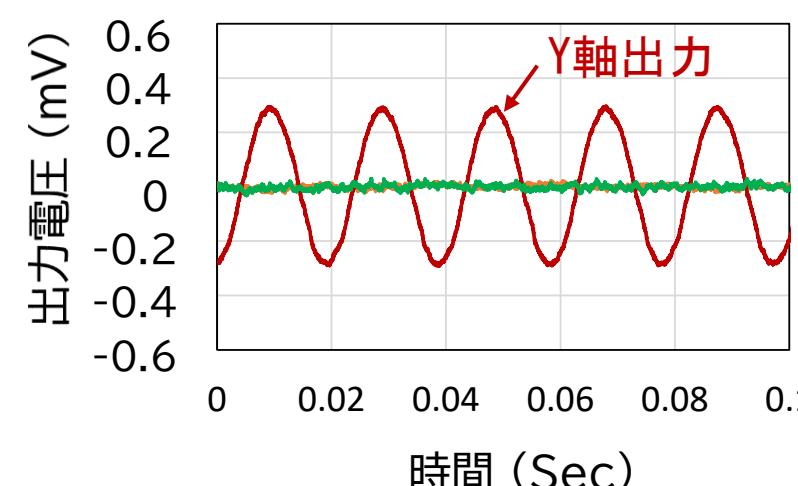
センサーが密接して配置されているため干渉の懸念

50Hzの正弦波磁界を各方向に印加

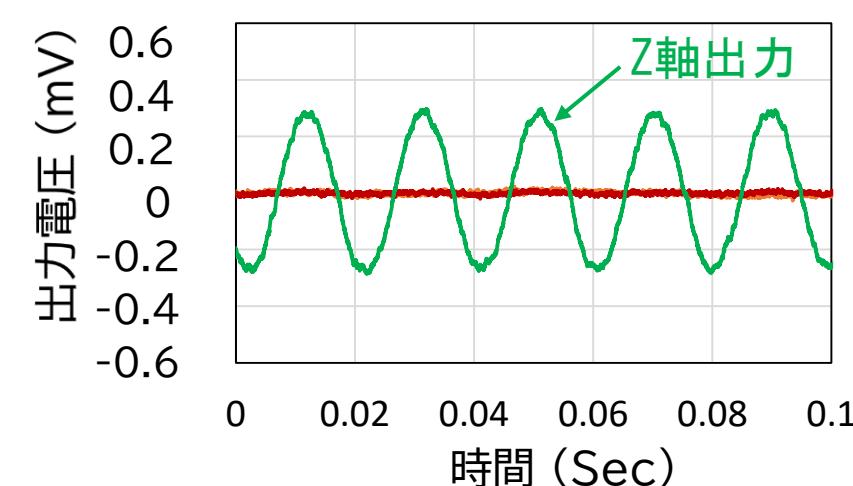
X軸方向に印加



Y軸方向に印加



Z軸方向に印加

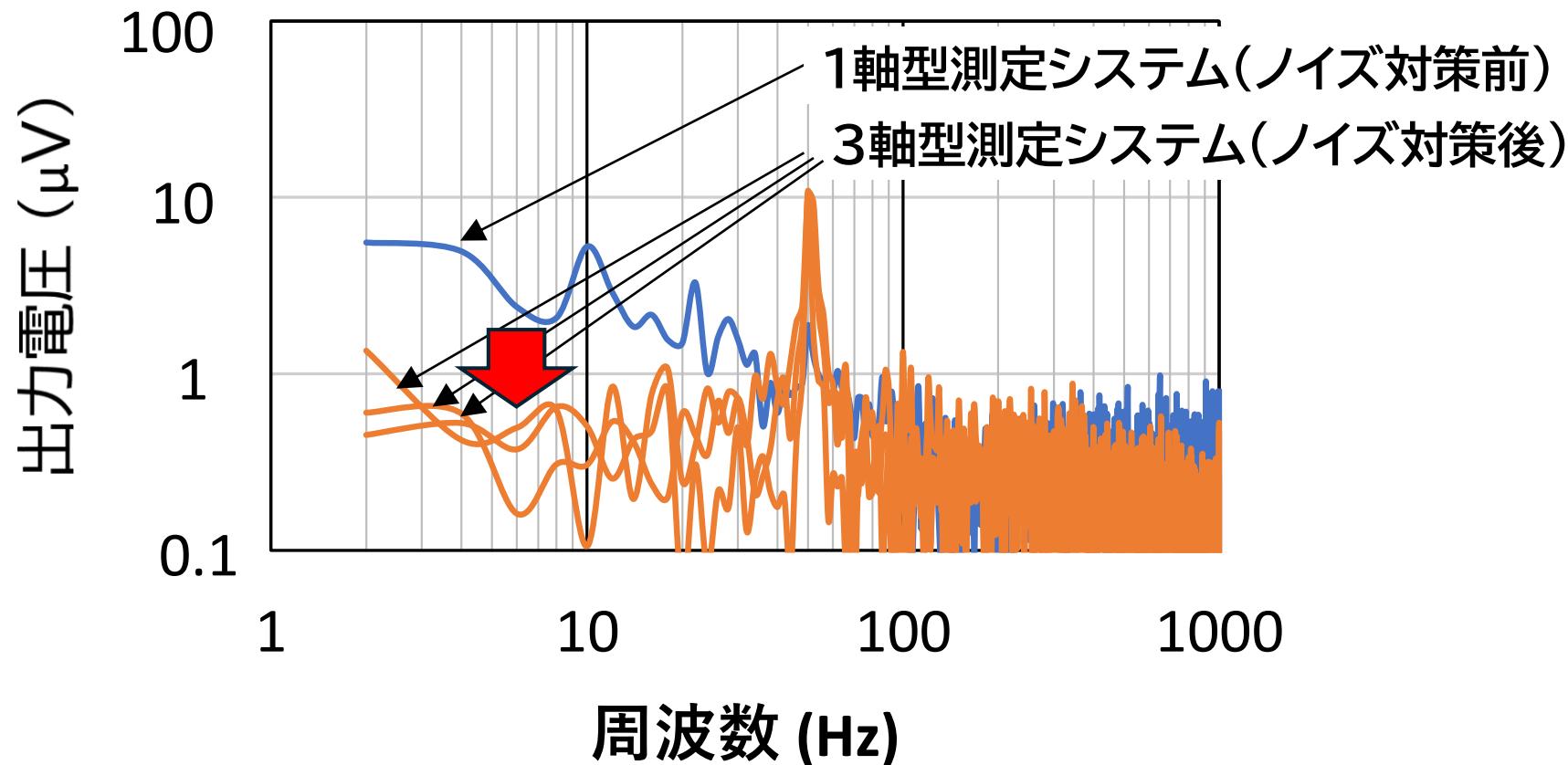


各軸間の干渉は確認されない

測定システムとしてのノイズ低減

Railway Technical Research Institute

50Hzの正弦波磁界測定時の周波数特性



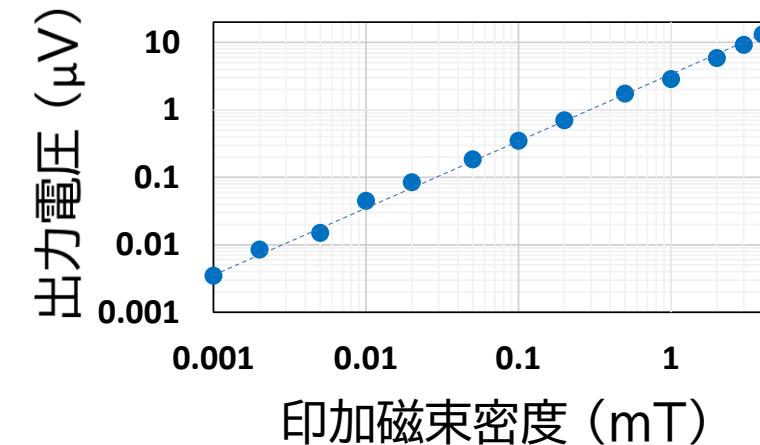
対策により主に100Hz以下のノイズが大きく低減

周波数帯域および強度範囲の確認

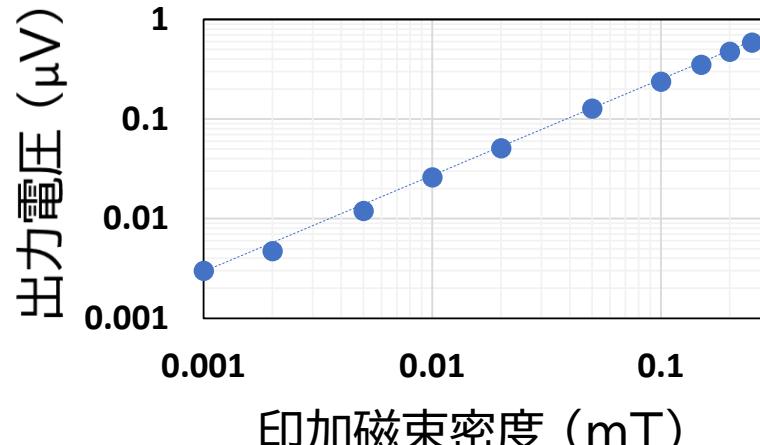
Railway Technical Research Institute

各周波数における印加磁界とプローブ出力の関係 (X軸出力)

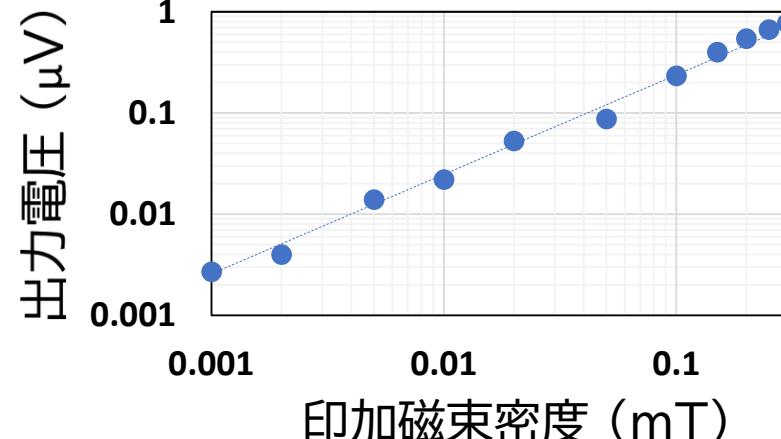
直流



50Hz



20kHz



比例関係がみられ容易に校正可

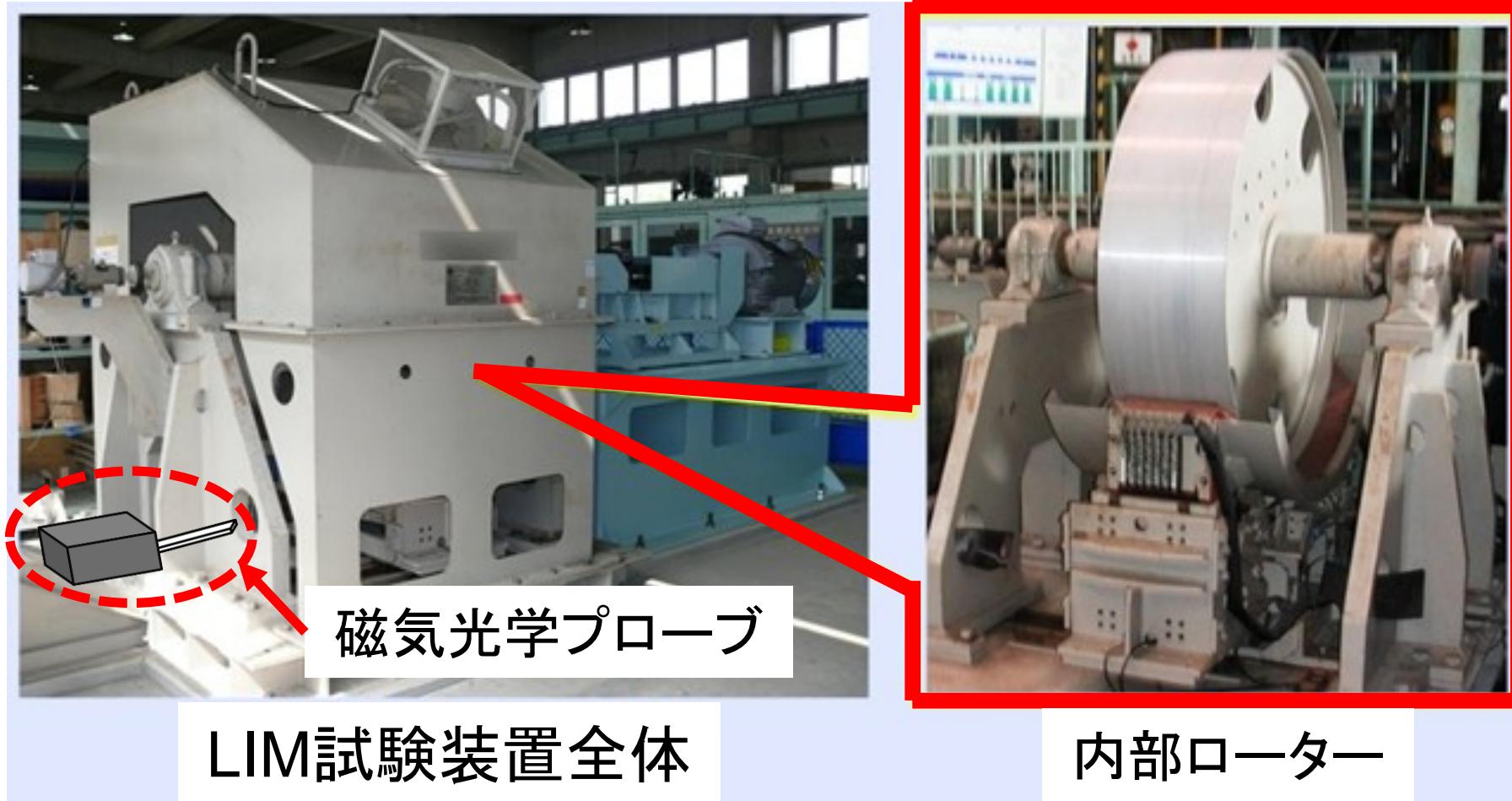
ノイズ対策により1 μ T(0.001mT)まで測定できることを確認

→規格が定める帯域で測定可能なことを確認

所内試験装置近傍での測定試験

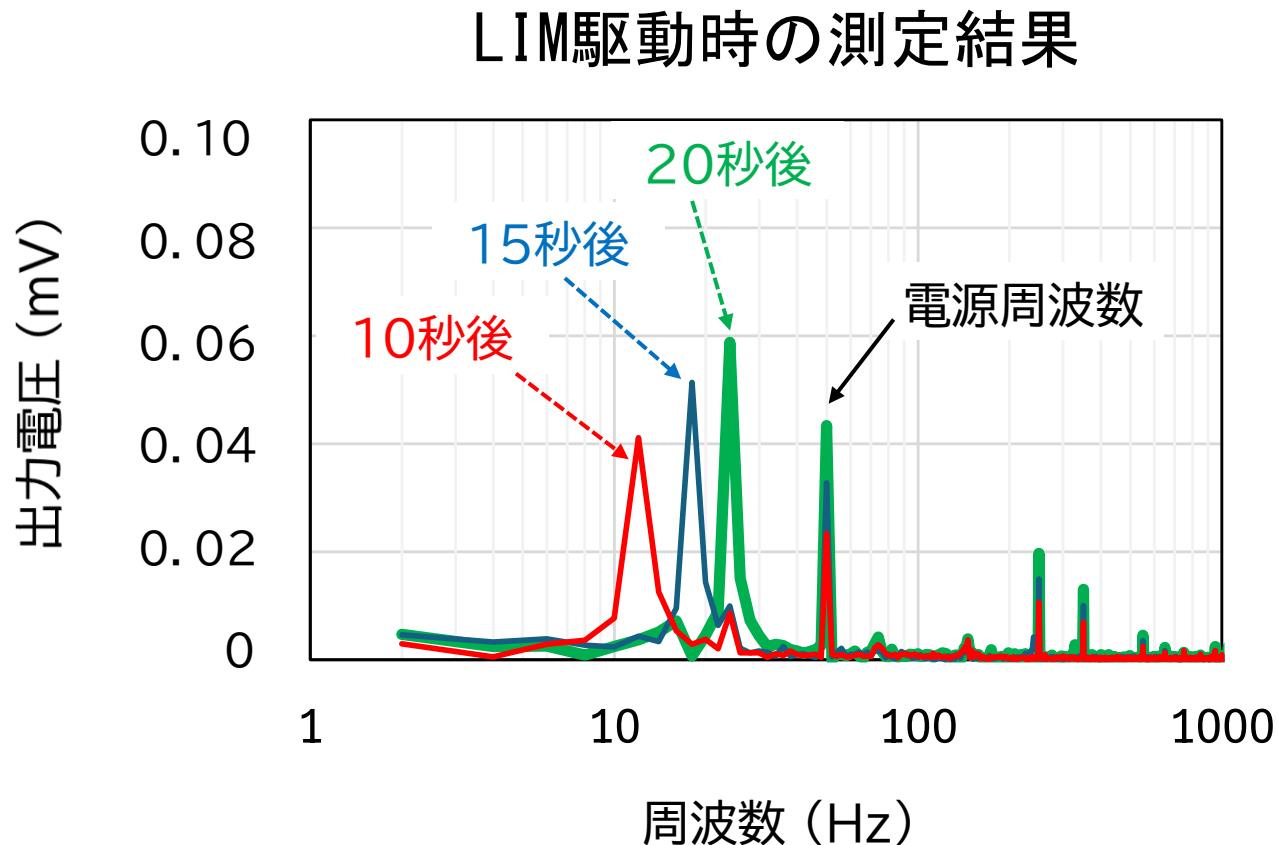
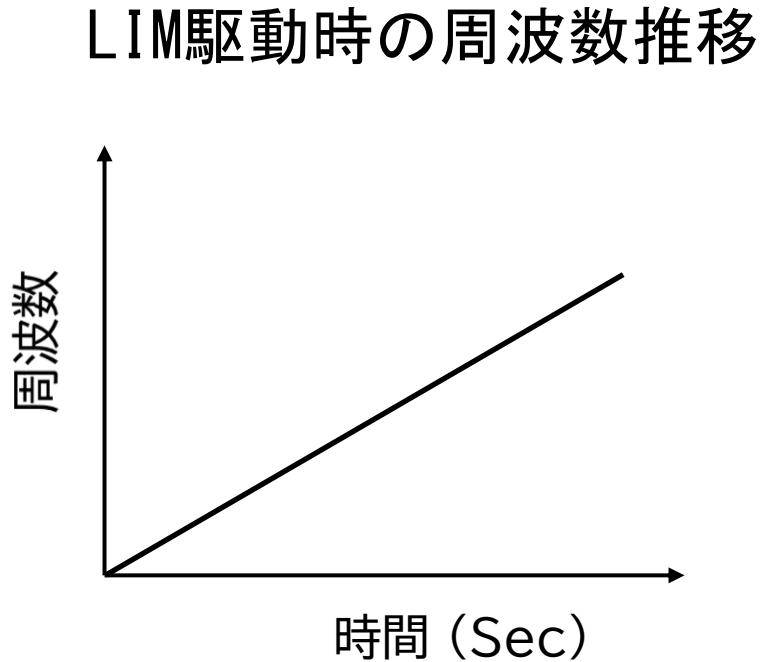
Railway Technical Research Institute

所内の車両駆動用リニアインダクションモーター（LIM）試験装置近傍での測定を実施



所内試験装置近傍での測定試験

Railway Technical Research Institute



- 11Hz（10秒）→22Hz（20秒）と周波数が遷移する鉄道車両加速時特有の磁界
- 近傍の電力供給ケーブルから発生する50Hzで大きさが変化する磁界

⇒周波数・強度が変化する磁界にも追随して測定可能であることを確認

- 鉄道環境の低周波磁界測定における複数種のセンサが必要であるという課題を解決するためにファラデー効果を利用する**3軸型の磁気光学プローブ**を開発した。
- 印加した磁界に応じたプローブ出力が得られていることを確認
- 密接して配置されている3軸間の**干渉は確認されず**
- レーザーの選定等により、ノイズが低減されていることを確認
- **直流～20kHz**の周波数範囲において、**1μT**から**測定可能**であることを確認
- 所内試験装置近傍での測定より、鉄道環境特有である**周波数および強度が変化する複雑な磁界**も**測定可能**であることを確認

成果の活用

Railway Technical Research Institute

- 規格への適合確認、磁気シールド等による磁界の低減確認等の測定依頼に対応して、当測定システム等を活用し、測定・評価を実施する。



参考文献

加藤佳仁, 池畠政輝:3軸型磁気光学プローブを利用する鉄道用低周波磁界測定システムの開発および性能確認試験, 鉄道総研報告, Vol.39, No.9, pp.9-15, 2025