

# 浮上式鉄道における電磁力を利用した地上コイルの耐久性評価



**中嶋 稔**  
Minoru Nakashima  
浮上式鉄道技術研究部  
磁気浮上研究室  
副主任研究員



**池田 遼平**  
Ryohei Ikeda  
浮上式鉄道技術研究部  
磁気浮上研究室  
主任研究員

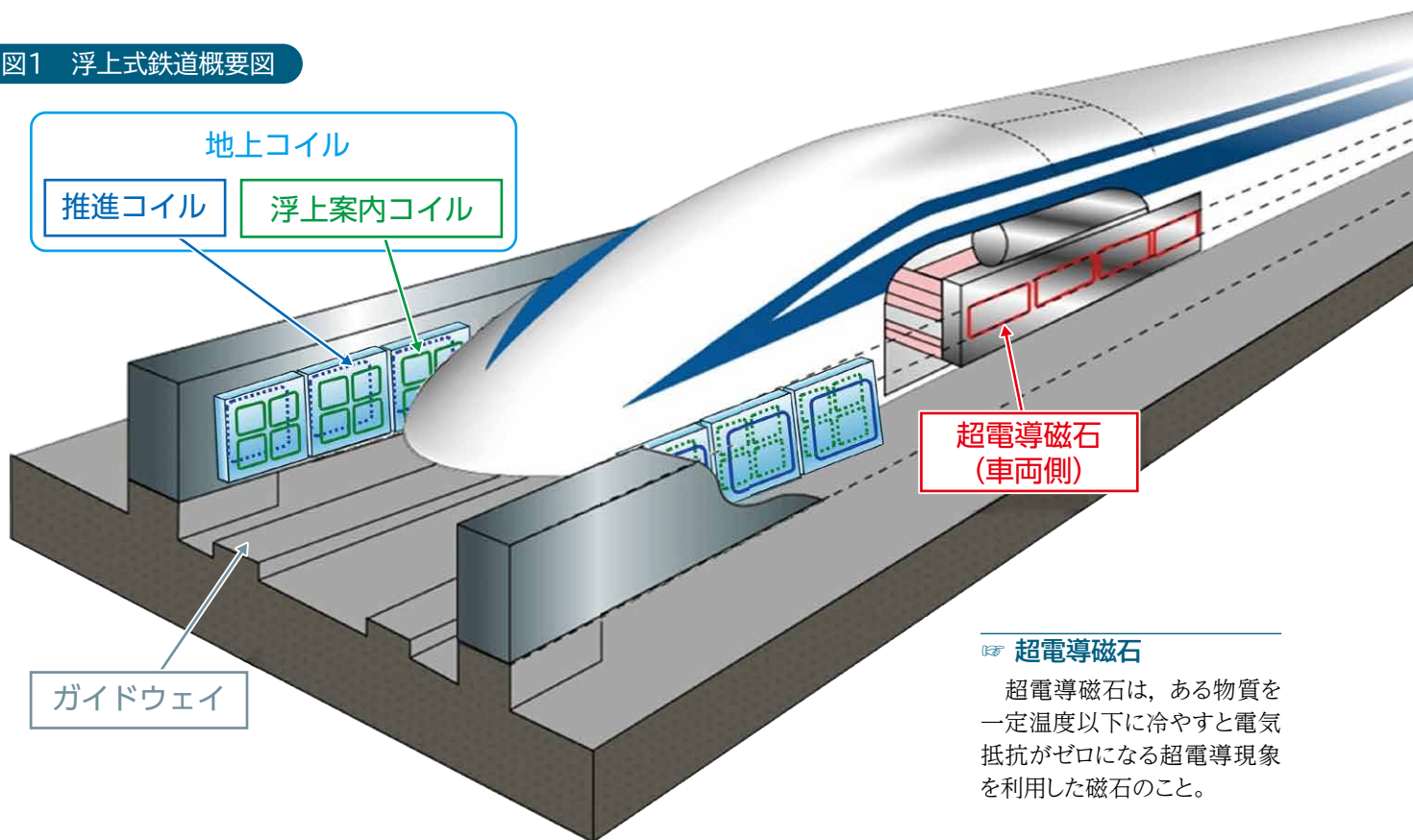
## はじめに

浮上式鉄道は一般の鉄道で使用する車輪とレールが接触した際の摩擦を利用せず、車両を浮上させて非接触にすることで、時速約500kmの高速走行を実現しています。車両を非接触で走行させるため、台車には**超電導磁石**を搭載し、ガイドウェイと呼ばれる列車が走行する構造物の両側側壁には地上コイルを設置して、相互作用により発生する電磁力で車両

を推進、浮上、案内させる仕組みです(図1)。

超電導磁石は冷却すると電気抵抗がゼロになる超電導線を巻いた4個のコイルにより、N極、S極、N極、S極の4つの極を構成しています。列車を浮上走行させるような大きな電磁力を発生させるには、コイルに大きな電流を流して強い磁界を発生させる必要があります。冷却した超電導線は抵抗がゼロとなって損失がないため、長時間大電流を通電することができます。

図1 浮上式鉄道概要図



## 超電導磁石

超電導磁石は、ある物質を一定温度以下に冷やすと電気抵抗がゼロになる超電導現象を利用した磁石のこと。

一方、地上コイルは導体を樹脂などで固めた電磁石ですが、設置数が多いため、高価な超電導線は使用していません。特に、地上コイルは機械的、電氣的、熱的な負荷が加わる環境下で長期間使用されるため、高い信頼性の評価が難しく、実環境を考慮した信頼性評価手法が必要となりました。

本記事では、地上コイルを用いて車両を非接触で走行させる際に発生する地上コイルにかかる力を説明した後に、地上コイルの形に成型された樹脂の耐久性を評価する方法の一つとして電磁加振試験があるので紹介します。

### 浮上式鉄道の推進と浮上と案内の仕組み

地上コイルは機能別に推進コイルと浮上案内コイルに分類されます。推進コイルは車両が移動する前後方向に直列に接続され、時間とともに電流の向きが変わる交流により、N極とS極を切り替えて使用します。車両の在線位置に基づいて、地上側のコイルの極をまるで移動しているように制御することで、台車に搭載した超電導磁石との間で電磁力を発生させ、車両を走行させます(図2)。N極とS極の切替を速くすると速度が向上し、電流を大きくすると推力を向上できます。なお、推進コイルはセクションと呼ばれる区間ごとにスイッチが設けられており、列車が在線しているセクション内の推進コイルにのみ交流を通电することで、消費電力を抑えています。

一方、浮上案内コイルは、列車を浮上させるとともに、列車がガイドウェイに沿って走行できるように案内するためのコイルです。浮上案

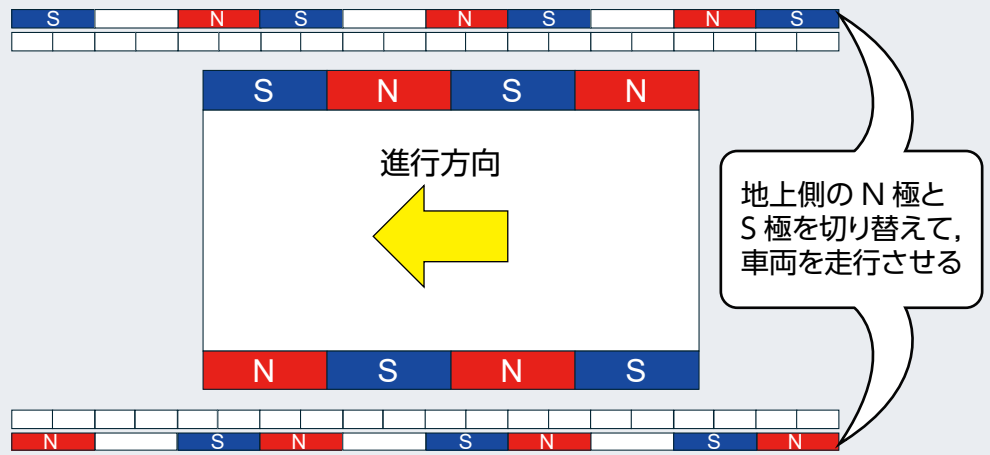
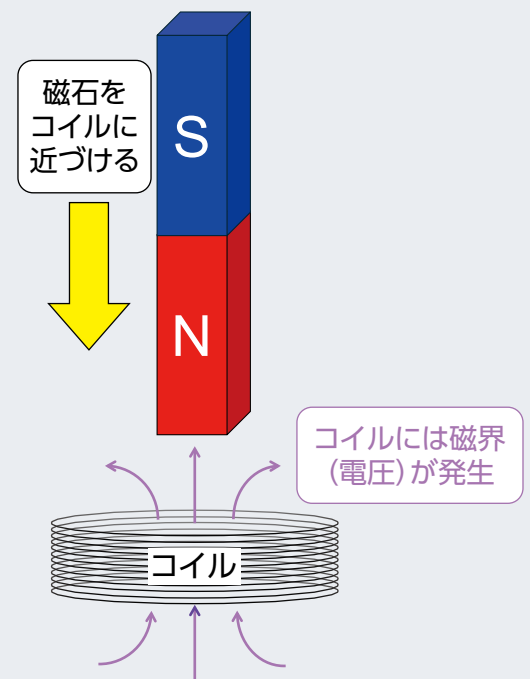


図2 浮上式鉄道の走行の仕組み

内コイルは両端が接続されているため、外部から直接通電することはできません。しかし、両端を接続したコイルの近くで磁石を動かすと、コイル内の磁界が変化して電圧が発生します。この現象を電磁誘導と呼びます(図3)。この現象により、コイルには電流が流れ、コイルに急激に磁石を近づけると反発力が発生し、遠ざけると吸引力が発生します。

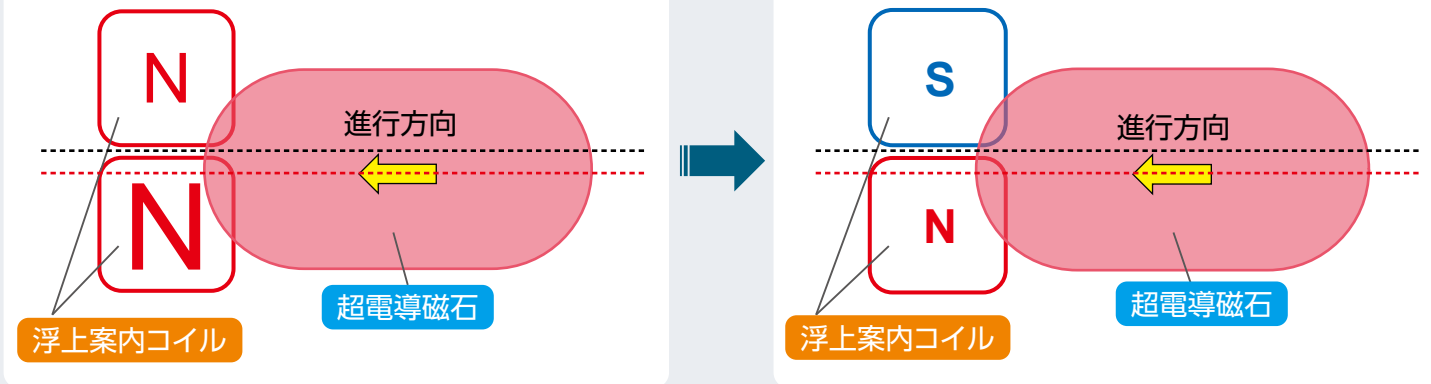
図3 電磁誘導の仕組み



浮上案内コイルの上下コイルとも反発側の電流が流れようとする

### 最終的な電流の流れ

浮上案内コイルの上下コイルは逆向きに電線が巻かれているため、電流が打ち消し合って残った電流が流れる



※ガイドウェイを側面から見た図です。  
※ここでの超電導磁石はN極としています。

図4 超電導磁石が近づいた時の超電導磁石が浮上するメカニズム

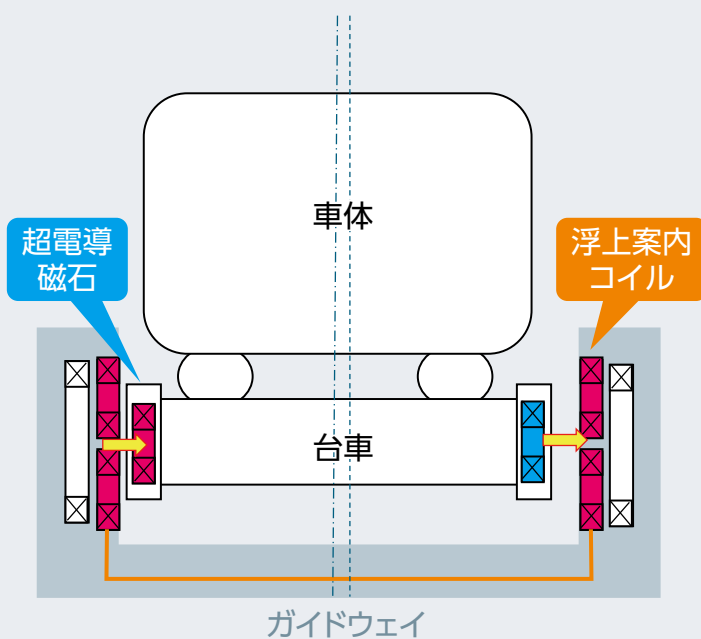
浮上の仕組みについて説明します。浮上案内コイルは「8の字」形状に電線が巻かれています。例えば、超電導磁石のN極が浮上案内コイルの上下の中心位置より下側を高速通過する際、接近時に磁界の変化により電流が誘導され、「8の字」形状の上側コイルはS極、下側コイルは

N極となります(図4)。したがって、走行中に超電導磁石と上側コイルの間には吸引力、下側コイルの間には反発力が発生し、結果として台車に浮上力が発生します。

案内の仕組みについて説明します。浮上案内コイルは向かい合うコイルがケーブルで接続されています。このケーブルを「ヌルフラックスケーブル」と呼びます。案内の仕組みも浮上の仕組みと同じように浮上案内コイルに近づいた側の超電導磁石は反発力が発生し、離れた側の超電導磁石には吸引力が発生し、結果として、台車がガイドウェイの中心を走行するように案内力が発生します(図5)。

浮上と案内の仕組みを別々に説明しましたが、実際にはガイドウェイ内を走行する際の列車位置に応じて浮上力と案内力が重ね合わされます(図6)。高速になるほど超電

図5 案内の仕組み



※ガイドウェイを前後方向(長手方向)からみた断面図です。

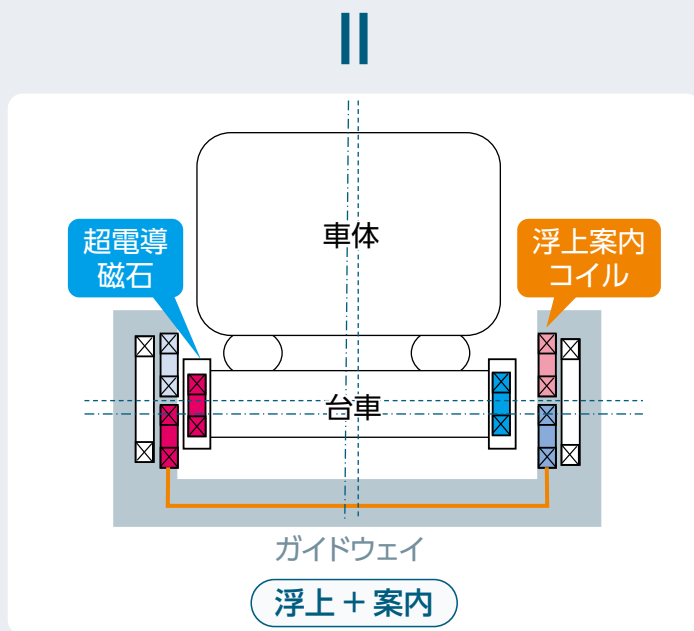
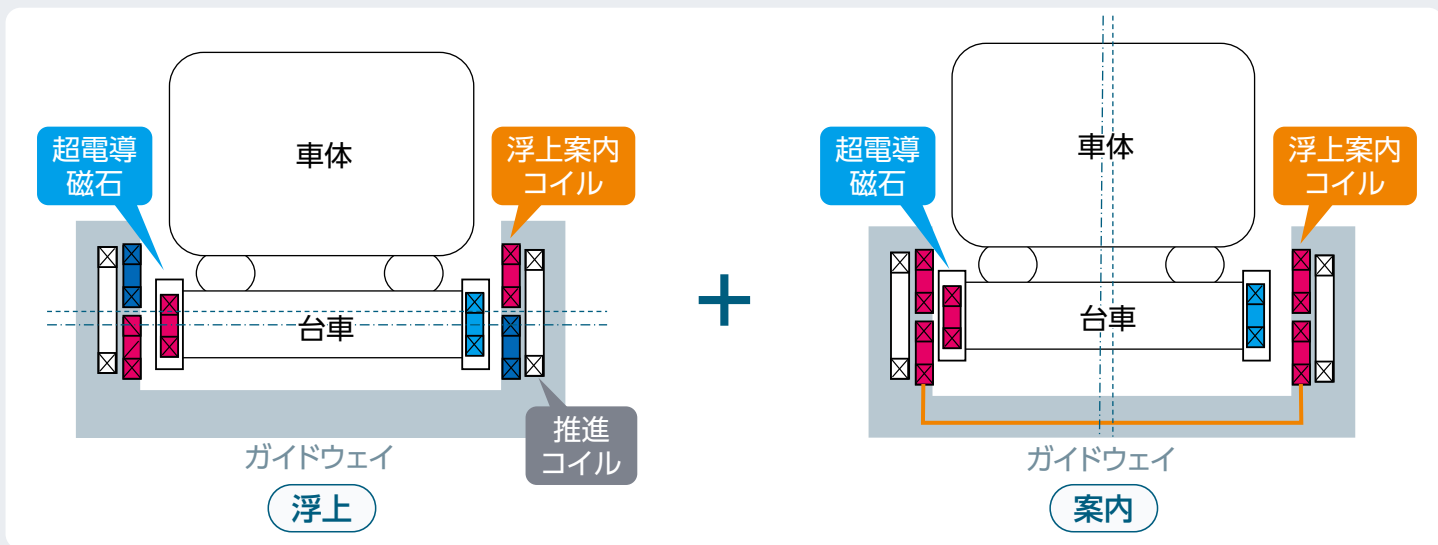
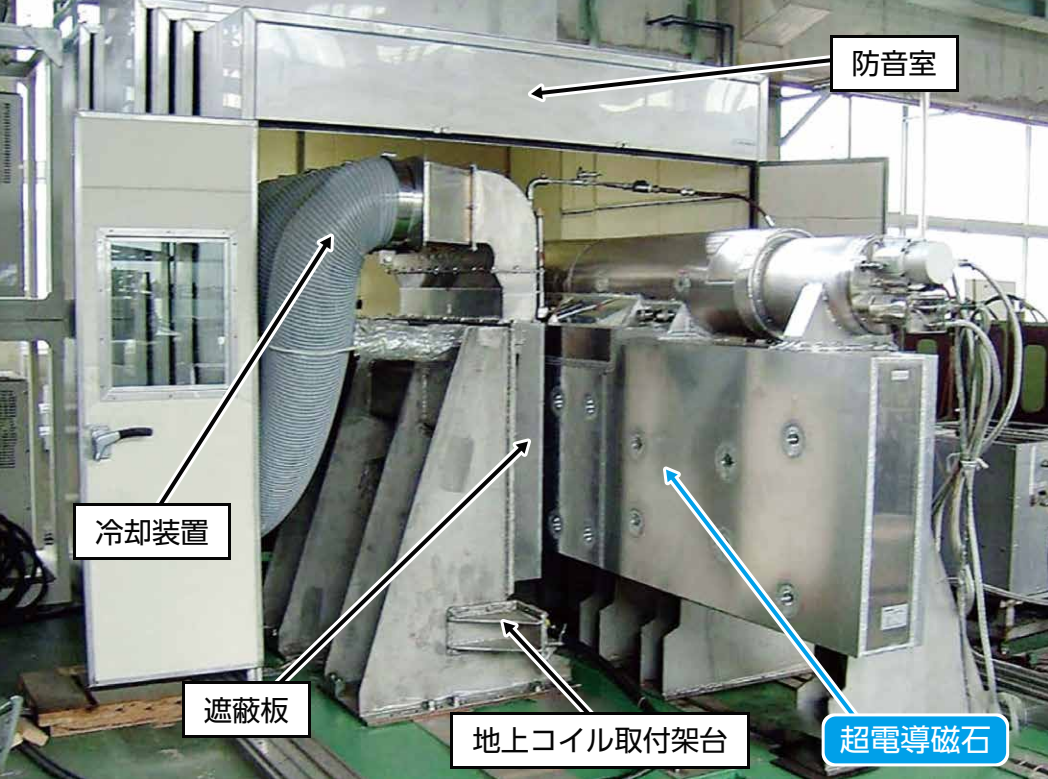


図6 浮上・案内の仕組み

導磁石の移動による磁界の変化が大きく、安定した浮上力や案内力が得られます。しかし、さまざまな走行速度、線路の形状などによって、地上コイルに発生する負荷が異なります。地上コイルは、使用される走行速度や線路の形状によって形状を変えることは、地上コイルの開発上非効率であることから、できるだけ統一した形状で設計されることが望まれます。なお、浮上案内の仕組みは浮上力や案内力を外部から制御していないため、地上側が停電になったとしても直ちに電磁力が失われることはなく、安全

に停車させることができます。

地上コイルは非接触のため摩擦はありませんが、台車を浮上走行させた際の反力を受けます。複数の地上コイルで台車を支えるため、1個あたりの負荷は大きくありません。しかし、超電導磁石が通過するごとに電磁力が加わり加振されることになります。そこで、長期にわたって地上コイルを使用する場合は、実際に樹脂に加わる負荷に対する耐久性などを確認しておく必要があります。



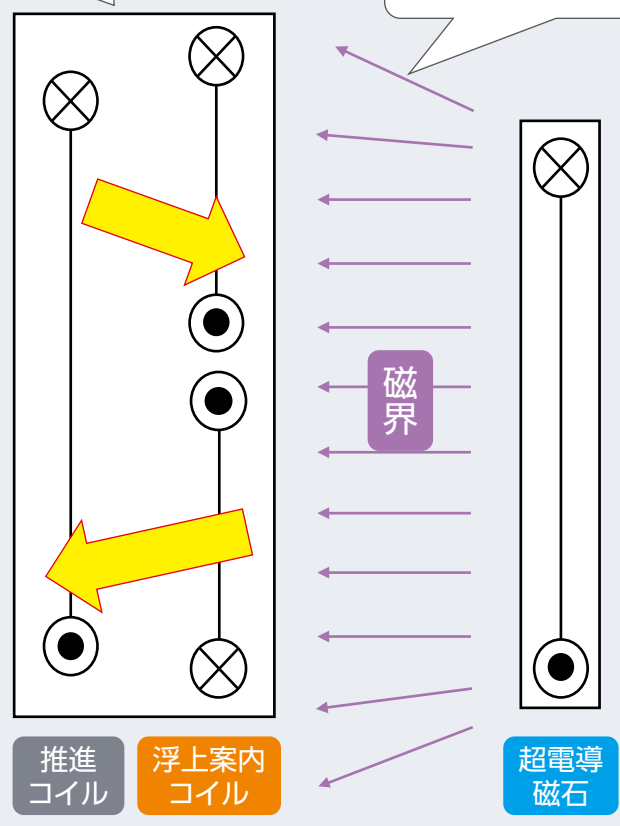
装置外観

## 地上コイルの信頼性評価

地上コイルが浮上走行で設計どおりに機能を発揮しているかは走行試験で確認しています。事前に超電導磁石と地上コイルをモデル化し解析により地上コイルに発生する電磁力などから地上コイルの樹脂に発生する力を求め、走行時の結果と比較します。しかし、営業線と比べて走行頻度が低いため、長期の耐久性を評価することができていません。このため老朽取換までの耐久性を短い期間で確認する方法が必要となりました。地上コイルの評価方法として、外部から荷重を加える方法や、高温と低温を繰り返すヒートサイクル試験などがあります。これらの方法は、地上コイルの評価方法として有用ですが、実際に発生する負荷を再現することが困難です。一方で、地上コイルに発生する電磁力は樹脂内部の導体で発生するため、導体から直接力を発生させる方法を用いれば、実現象を再現でき、実態に近い評価が可能になります。そこで、電磁力を利用した電磁加振試験法<sup>1)</sup>

地上コイルに通電することで電磁力を発生させ、実使用条件に近い状態を再現可能

超電導磁石による強力な一定の磁界を常時発生



電磁加振試験で地上コイルに発生する電磁力(例)

図7 電磁加振試験の様子

を開発することにしました。

電磁加振試験は、[図7](#) (上図) に示すように営業線と同様に超電導磁石と地上コイルを対向させて設置し実施します。実際に使用される環境においては超電導磁石が通過することで浮上案内コイルに電流が誘導されます。しかし、実験室ではその状況を作り出すことが困難であるため、超電導磁石と地上コイルの双方に電流を流すことで電磁力を発生させ、非接触による地上コイルの耐久性試験を実施することとしました。超電導磁石は、抵抗がないため大きな電流を流し続けることができ、強い磁界を発生し続ける電磁石にできます。

また、実際に営業線で使われる超電導磁石を用いることで、営業線で使われる地上コイルにかかる磁界を再現でき、電流の大きさや周波数、配置を調整することによって、実際の電磁力を再現することが可能です ([図7](#)下図)。地上コイルに発生する電磁力は樹脂内部の導体から発生することから地上コイルの形に成型した樹脂が実際に営業線で使われる条件で耐久性を確認できるようになります。なお、地上コイルに発生する電磁力は、超電導磁石と地上コイルをモデル化した解析によって求めます。走行速度や通過する線形などあらゆる条件の中から何度も解析を繰り返し、地上コイルの各部位(締結部など)にとって最も厳しい条件を抽出し、それらの条件で地上コイルの耐久性が十分にあるかを確認しています。

また、地上コイルは列車が走行中に電流が流れますが、走行頻度が高まると電流が流れる時間が長くなり、温度が上昇します。地上コイルの樹脂は高温になるほど強度が低下します。そこで、許容温度を定めています。実験室では冷却装置を使用し、冷却中に通電と休止のサイクルを繰り返し、通電時間の割合を調整することで、地上コイルを許容温度の上限に近い状態に保ちながら試験を実施することが可能です。こ

のように通電サイクルを短縮し、耐久性試験を短期間で効率的に実施することができます。この方法を利用して、さまざまな走行条件の中から、地上コイルが営業線で使われる最も厳しい負荷を再現した試験を行い、地上コイルの設計・製造に役立てることができました。

## おわりに

ここでは、浮上式鉄道に使用される設備のうち地上コイルの評価方法の例として電磁加振試験について紹介しました。

今後は電磁加振試験を地上コイルの耐久性評価だけでなく、地上コイルの状態監視技術の深度化やメンテナンスの省力化にも活用していくことを考えています。

このように、鉄道総研では浮上式鉄道の信頼性向上に向けて、地上コイルの研究開発を日々続けています。 [RRR](#)

---

## 文 献

- 1) 水野克俊, 田中実, 小方正文: 希土類系高温超電導磁石を用いた地上コイル電磁加振試験, 鉄道総研報告, Vol.34, No.11, pp.5-10, 2020