

鉄道一般

車両

施設

電気

運転・輸送

防災

環境

人間科学

浮上式鉄道

地上コイルの状態を電波で検知する

超電導磁気浮上式鉄道のリニア車両には鉄車輪やパンタグラフがなく、地上とは完全非接触の状態です。これを可能にしているのが地上コイルになります。中でも車両に推進力を与えるための推進コイルは、加振、高電圧といった環境のもとで長期間にわたって使用されるため、効率的に保守管理する必要があります。絶縁性能が低下した推進コイルの当該部分に高電圧が加わると部分放電が発生し、広帯域の電波を放出することが知られています。ここでは、リニア用地上コイルの異常を電波で検知する手法について紹介します。



池田 遼平
Ryohei Ikeda
浮上式鉄道技術研究部
電磁システム研究室
副主任研究員



太田 聡
Satoru Ota
浮上式鉄道技術研究部
電磁システム研究室
副主任研究員

はじめに

リニア車両には鉄車輪やパンタグラフがなく、地上とは完全非接触の状態です。これを可能にしているのが地上コイルになります。地上コイルがなければ、車両は走行することができません。浮上式鉄道の基本構成を図1に示します。地上コイルは、リニア車両に推進力、浮上力、案内力を与えるためにガイドウェイ側壁（☞参照）に取り付けられた電磁石です。車両に搭載した超電導磁石（☞参照）と同様に、なくてはな

らない存在です。そのため、地上コイルは、車両が走行する全線にわたって敷設する必要があります。地上コイルには、推進コイルと浮上案内コイルの2種類があります。中でも特別高圧機器である推進コイルは、屋外で大きな電磁力による加振、高電圧といった環境のもとで長期間にわたって使用されることが前提となります。ここでは、地上コイルの構造と役割、部分放電と絶縁劣化について解説します。さらに地上コイルの状態を電波で検知する手法について紹介します。

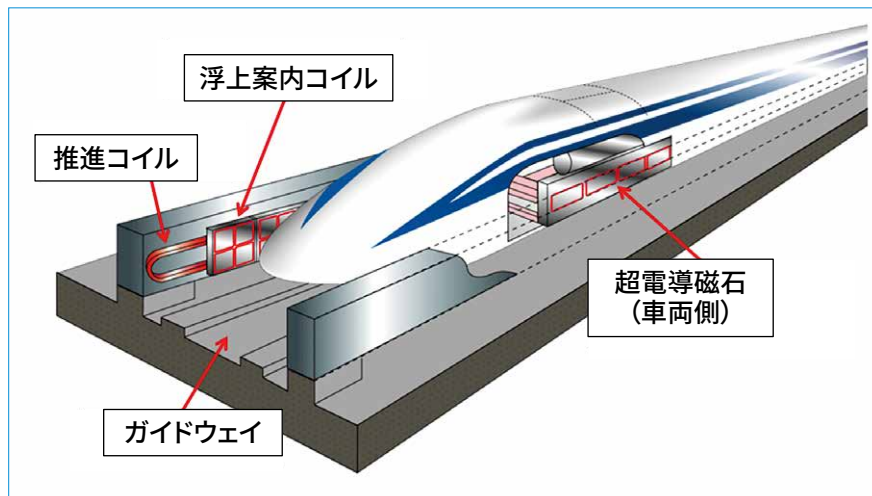


図1 浮上式鉄道の基本構成

地上コイルの構造¹⁾

地上コイルの構造を図2に示します。地上コイルは、鉄心のない空芯コイルです。車上の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に、アルミ導体の巻線コイルをモールド樹脂で一体成形することで剛性を高めています。

推進コイルは、車両を500km/hで走行させるための力を発生させなければいけません。車両走行時の推進コイルには、交流電流が通電され、リニア車両の台車に搭載されている超電導磁石との間の電磁作用により車両に推進力を与えます。

浮上案内コイルは、数10トンの車両を地上側から支え、浮上させる役割を担いつつ、曲線においても車両を安定的に走行させる必要があります。浮上案内コイルには、車両の台車に搭載されている超電導磁石の通過にともなう電磁誘導によって電流が流れ、超電導磁石との間の電磁作用により車両に浮上力と案内力を与えています。機械的強度や耐久性が要求される浮上案内コイルのモールド樹脂には、ガラス繊維で強化した樹脂などが適用されています。

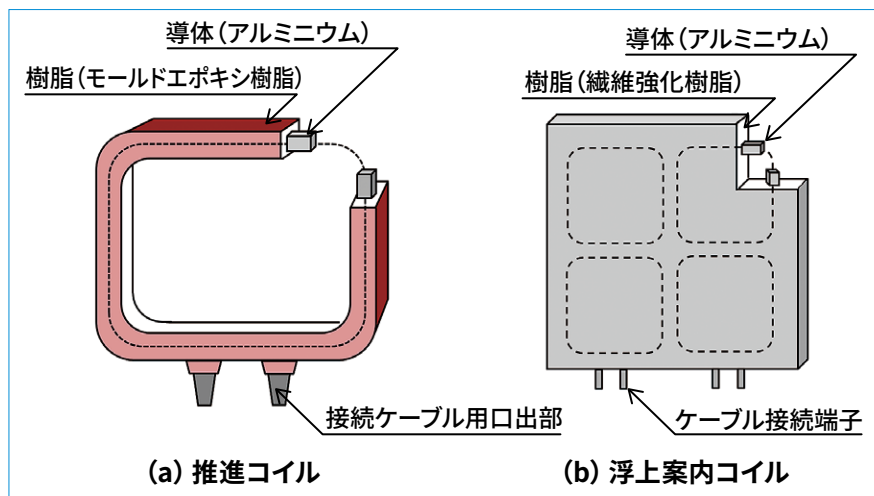


図2 地上コイルの構造

推進コイルに加わる負荷²⁾

推進コイルは車両走行区間の全線にわたって敷設されます。リニア車両が存在する場所だけに通電できるように、一定の長さの電セクションに分割されています。電セクション内では多数個の推進コイルがコイル間接続ケーブルを介して直列に接続されています。車両走行時の推進コイルには、リニア車両に推進力を与えるために電流を通電することで高電圧が加わります。さらには、同じタイミングで車上の超電導磁石の移動にともなう磁場変化による逆起電力(☞参照)が加わります。このことから、推進コイルの運用にあたっては、屋外での使用、車両

に与える力の反作用力に対する配慮に加え、高電圧に対する配慮が必要です。そのため、推進コイルは、コイル巻線をモールド樹脂などで一体成形することで絶縁性能(☞参照)を担保しています。推進コイルのモールド樹脂には、絶縁強度に優れたエポキシ樹脂などが適用されています。モールド樹脂の配合は、エポキシ樹脂のほか、硬化剤、充てん材などにより構成されます。したがって、エポキシ樹脂と硬化剤の組み合わせが地上コイルの基本性能を決定することになります。充てん材は、各種特性の向上や材料費の低減を目的として重量比で約6割以上の無機質の粉末が添加されています。

☞ ガイドウェイ

地上コイルは、一般的にはコンクリート製のガイドウェイとよばれる構造物に締結ボルトを介して固定されています。ガイドウェイの方式にはさまざまな形状があります。浮上式鉄道では、U型断面の側壁浮上方式が採用されています。

☞ 超電導磁石

超電導磁石は、浮上式鉄道やMRI(磁気共鳴画像法)に使われており、通常の電磁石では実現不可能な強磁場を作ることができます。ただし、超電導を運用するにはきわめて低い温度を維持しなければなりません。そのため、冷却システムや断熱構造も必要です。

☞ 逆起電力

逆起電力は、推進コイルに発生するリニア車両の移動速度に比例して大きくなる電圧になります。そのため、推進コイルには、逆起電力を上回る所要の電流を流さなければなりません。したがって、推進コイルには移動速度が上がるほど高い電圧が加わります。

☞ 絶縁性能

電力機器に使用される絶縁材料の種類や特性はその用途によってさまざまです。絶縁材料には、電気絶縁性があります。しかしながら、一定の電気強度を超えると、絶縁体の中を電気が流れて絶縁破壊(短絡など)が起こります。

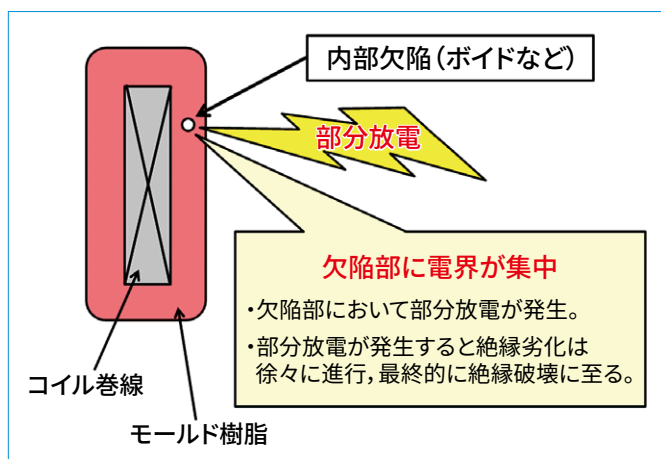


図3 推進コイルの絶縁不良

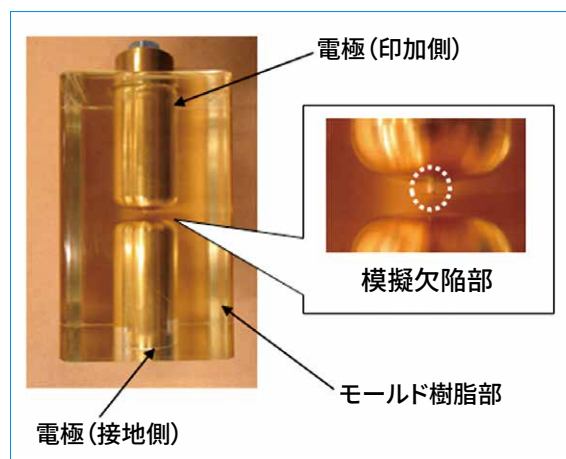


図4 部分放電発生試験体

部分放電と絶縁劣化³⁾

推進コイルには、特別高圧機器としての絶縁性能が要求されます。全数を対象とした出荷検査や試験を行い、絶縁性能における異常がないことを確認しています。ところが、屋外で大きな電磁力による加振、高電圧といった環境のもとで長期間にわたって使用されるため、かならずしも安定した運用環境とはいえません。極端に言えば、出荷検査において正常であったはずの推進コイルでも内部に潜在的な不良が存在すれば、運用中の負荷により顕在化する可能性が考えられます。たとえば、モールド樹脂内部に絶縁不良箇所が存在した場合、ある電圧で部分放電が発生します。部分放電が発生すると絶縁劣化は徐々に進行し、最終的には、絶縁破壊に至ります。以下に、推進コイルに想定される絶縁不良(図3)を示します。

(a) 内在するボイド

コイル巻線を樹脂で一体成形する際、樹脂内部にボイド(空隙)が残存する可能性が考えられます。内在するボイドは、モールド樹脂の誘電率(物質の電気を蓄えられる大きさの指標)より低い場合電圧印加時に当該部分に電界が集中し、部分放電を引き起こす可能性があります。誘電率は、物質によ

て決まった値をとり、物質固有の値をもちます。部分放電による劣化は、モールド樹脂の分解から始まり、徐々に進展し、ボイドの拡大、ボイド同士のつながりから、より大きな放電に発展していきます。絶縁性能を維持できなくなった場合、絶縁破壊が起こり使用不可能になります。

(b) 導体はく離

コイル巻線とモールド樹脂との界面は接着することが前提となっています。電磁的な加振や、通電による温度変化が繰り返されることで、両者の界面にはく離を生ずる可能性があります。導体はく離が生じることで、電圧印加時に当該部分に電界が集中し、部分放電を引き起こす可能性があります。導体はく離においても絶縁性能を維持できなくなった場合、絶縁破壊が起こり使用不可能になります。

部分放電発生試験体の開発³⁾

推進コイルに絶縁不良が生じると、微弱な放電現象である部分放電が発生します。部分放電の発生にともなって、さまざまな現象(電流、電波など)が生じます。放電にともなう現象を検出して測定・評価する方法が部分放電測定になります。部分放電測定では、絶縁破壊に至る前の状態を検出できるの

で、ボイドなどの潜在的な不良を検出できます。そのため、部分放電測定において重要なのは、放電発生の原因となる絶縁不良の有無を調べることにあります。そこで、絶縁不良の有無を評価するための指標として、部分放電発生試験体(図4)を製作しました。試験体の電極間に単純な形状の欠陥部を設けることで絶縁不良を模擬しました。なお、充填剤を混合せずにモールドを行うことで、欠陥部の可視化が可能です。絶縁不良の種類を図5に示します。樹脂平板にあらかじめ穴加工を施し、電極間に固定することで内在するボイドを模擬しました。また、加工する穴の半径、厚みを変えることで任意の空隙を模擬することが可能です。この板を固定後、同形状の樹脂板で穴に蓋をし、空隙部に樹脂が流れ込まないように対策しています。一方、導体はく離については、片側の電極を引き抜くことで、樹脂と導体のはく離を模擬しました。電極の引き抜き量を変えることで任意の空隙を模擬することが可能です。製作した部分放電発生試験体を対象に、部分放電測定を実施しました。その結果、絶縁不良箇所からと思われる部分放電を測定することができました。

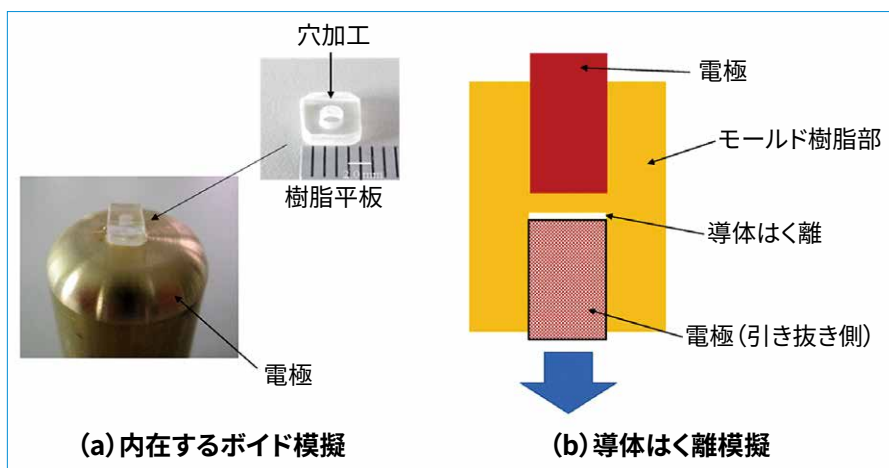


図5 絶縁不良の種類

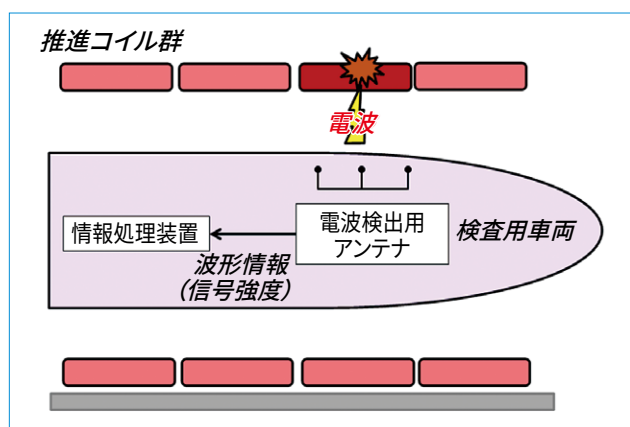


図6 地上コイルの絶縁診断手法



図7 電波検出試験(定置試験)

地上コイルの絶縁診断手法

500km/hで高速走行するリニア車両の安全確保には、地上コイルの状態監視手法の確立が重要になります。推進コイルにおいては、高速走行時の効率的な状態監視が重要になります。鉄道総研では、放電発生の原因となる絶縁不良の有無を電波で検知する手法⁴⁾を考案しました。この検査手法の概念を図6に示します。絶縁不良を有する推進コイルに高電圧が加わると部分放電が発生し、広帯域の電波を放出することが知られています。現地で推進コイルに高電圧が加わるのは、リニア車両が走行するタイミングになります。そこで、検査車両に電波検出用アンテナを搭載して、部分放電により発生した電波を非接触で検知します。検知

した電波は、情報処理装置で波形情報としてデータを蓄積していきます。定期的な測定により、電波検出の経時変化から推進コイルの絶縁不良の有無を評価することが可能です。本検査手法では、これまで定置および200km/hまでの検出性能⁴⁾を鉄道総研構内の集電試験装置(図7)などを用いて確認しています。部分放電による電波を車両の走行状態で検知できれば、膨大な数の地上コイルを効率よく状態監視できるため、保守コストの大幅低減やシステムの信頼性向上に寄与できると考えています。

おわりに

地上コイルの構造と役割、部分放電と絶縁劣化について解説しました。さ

らには、地上コイルの状態を電波で検知する手法についても紹介しました。今後も考案した電波の検知による地上コイルの絶縁診断手法の開発を進めていきます。[RRR]

文献

- 1) 太田聡：浮上式鉄道の地上コイル, RRR, Vol.74, No.1, pp.28-31, 2017
- 2) 饗庭雅之, 太田聡, 鈴木正夫：浮上式鉄道用推進コイルの絶縁性能を評価する, RRR, Vol.74, No.8, pp.24-27, 2017
- 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) 高橋紀之, 池田遼平, 渡邊健, 太田聡, 川田昌武：車上からの地上コイルの部分放電検出手法, 鉄道総研報告, Vol.34, No.11, pp.11-16, 2020