

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

水野 克俊* 田中 実* 小方 正文*

Electromagnetic Vibration Test of a Ground Coil Using a REBCO Magnet

Katsutoshi MIZUNO Minoru TANAKA Masafumi OGATA

In the electromagnetic vibration test, a ground coil is excited under the strong magnetic field of a superconducting magnet. Since the vibration mechanism is same as that in the actual running condition of the maglev, the electromagnetic vibration test is one of the important durability tests of the ground coils. Until now, the electromagnetic vibration tests have been used a low temperature superconducting magnet. However, a global shortage of helium has been reported, and the importance of the high temperature superconducting magnet has been increasing. We carried out the electromagnetic vibration test with a superconducting magnet with REBCO wire, which is one of high temperature materials. In this paper, we also propose a novel monitoring and protection method for the REBCO magnet.

キーワード：電磁加振，希土類系高温超電導，高温超電導磁石，地上コイル，保護

1. はじめに

磁気浮上式鉄道における地上コイルはガイドウェイ（軌道）の全線に沿って敷設されるため、その数は膨大であり高い信頼性が求められる。地上コイルの耐久性試験の一つとして電磁加振試験が挙げられ、これは超電導磁石が発生する高磁場中で地上コイルに通電することにより、走行を模擬した加振力を電磁的に発生させるものである。鉄道総研では以前から地上コイルの電磁加振試験を行ってきたが¹⁾、近年では世界的なヘリウム不足のため²⁾同試験に用いる低温超電導磁石の運用が困難になりつつある。その一方で、鉄道総研では浮上式鉄道応用やフライホイール蓄電装置用超電導磁気軸受のために希土類系高温超電導線材を用いた超電導磁石の開発を行ってきた。そこで、これまで蓄積してきた技術を用いて電磁加振用の希土類系高温超電導磁石を製作した。本超電導磁石を使用することにより、液体ヘリウムが不要になるだけでなく、磁石冷却に必要な時間が大幅に短縮されるため、低コストかつ短時間で電磁加振試験が実施できるようになる。

電磁加振試験において最も考慮すべき点は試験期間の長さである。地上コイルの耐用年数相当の電磁加振を行うには、加振力を上げた加速試験でも10日以上を要する¹⁾。そのため、超電導磁石には高い安定性が求められるとともに、異常時を想定した監視・保護システムが不可欠である。運用温度や冷却構造の違いのため、高温超電導磁石は常電導転移時の挙動が従来の低温超電導磁石

とは大きく異なり、監視・保護手法も新たに検証する必要がある。

なお、本研究での高温超電導磁石開発は電磁加振試験を対象としたものであるが、磁石製作技術や監視・保護システムは高温超電導磁石全般に有用なものであり、他の高温超電導機器への応用も期待できる。本論文では、希土類系高温超電導磁石による地上コイルの電磁加振試験について述べるとともに、高温超電導磁石の監視・保護に有効であると考えられる電圧監視手法について述べる。

2. 電磁加振試験

実機大の希土類系高温超電導磁石は既に製作済みであり³⁾、本章では同磁石の基本構成と電磁加振試験に影響が大きい外槽容器の特徴について紹介する。さらに、希土類系高温超電導磁石による電磁加振試験は前例がないため、磁石の安定励磁の確認および、地上コイルに走行時相当の加振力が与えられることの実証を目的として短時間ながらも電磁加振試験を実施した。

2.1 電磁加振用高温超電導磁石の特徴

電磁加振用の超電導磁石では、超電導コイルの形状や起磁力に加え、外槽容器の材質・形状も極めて重要である。電磁加振試験においては、地上コイル—超電導コイル間の距離を走行時相当にする必要があるだけでなく、超電導磁石は地上コイルの変動磁場にさらされるため、外槽容器のシールド効果（変動磁場中に置かれた導体に渦電流が発生することにより磁場を打ち消す効果）も実

* 浮上式鉄道技術研究部 低温システム研究室

機並みでなければならない。言い換えれば、コイル単体ではなく、超電導磁石として実機に近い形に仕上げる必要がある。ただし、極数(超電導コイル数)だけは実機と同じである必要はない。実機では4極構成であるのに対し、電磁加振試験用としては1極、もしくは2極でよい。地上コイルには種類があり、浮上案内コイルならば1極でよく、推進コイルならば2極必要になる。そのため、本研究では電磁加振試験用高温超電導磁石を2極設計としており、製作済みの実機大希土類系高温超電導コイル³⁾(以下、実機大コイル)を組み込んで1極での電磁加振試験を実施しつつ、並行して2極目のコイル製作に着手した。本磁石において特筆すべきは外槽容器であり、従



図1 イットリウム系高温超電導磁石用外槽容器

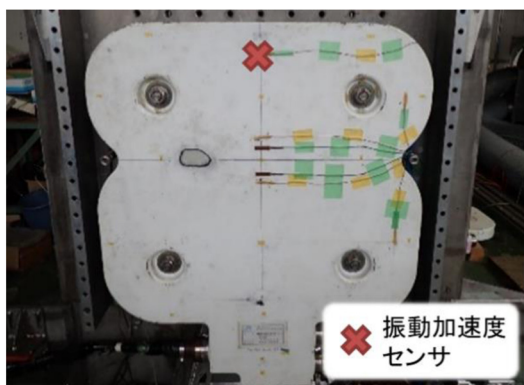


図2 PLG コイル



図3 電磁加振試験構成

来の低温超電導磁石では地上コイル側の面が純アルミ、残りの面がアルミ合金であったのに対し⁴⁾、本外槽容器はすべてアルミ合金(A6061)となっている。シールド効果が若干低下するものの、トータル熱負荷(ふく射や熱伝導、電流リードにおけるジュール発熱等)に占める渦電流による発熱の割合は十分に小さく、冷却に影響を与えないことが実験及び解析で確認されている⁵⁾。また、外槽容器は削り出しで製作しており(図1)、部品点数を大幅に削減している。

なお、高温超電導磁石は低温超電導磁石よりも線材コストが高くなるため、実用化を目指すにはそれ以外の磁石構成部品でコスト低減、付加価値を高めていく必要がある。高温超電導磁石では液体ヘリウムや液体窒素の冷却構造(タンク、配管等)が不要になるものの、それだけでは不十分であり、2極目のコイル製作では使用線材量を減らすとともに構造の簡素化に重点を置いた設計となっている。

2.2 電磁加振試験条件

今回の電磁加振試験の供試体には鉄道総研が試作したPLG(推進・浮上・案内兼用)コイル⁶⁾を用いることとした(図2)。PLGコイルの浮上・案内系の電磁加振試験は超電導磁石が1極構成でよいことに加え、比較となる低温超電導磁石を用いた電磁加振試験のデータがあるためである。なお、PLGコイルは上下非対称の8の字型のコイルであり、通電パターンによって浮上力、案内力、推進力を再現できるため、多様な条件での試験が可能である利点がある。

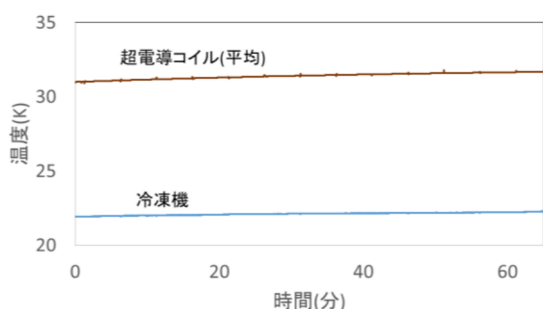
電磁加振試験方法としては、超電導磁石とPLGコイルを走行時と同程度の電磁力となる位置関係で配置し(図3)、超電導磁石は起磁力700kAの直流励磁、PLGコイルは走行時相当の浮上力条件(上ループコイル:直流成分500A,交流成分500A,下ループコイル:直流成分555A,交流成分555A,ともに100Hz)での通電とした。ただし、PLGコイルのみ間欠通電であり、5秒間通電、300秒間待機の繰り返しである。浮上式鉄道における地上コイルは、車両通過時のみ通電されるため、連続通電しない仕様となっている。これはジュール発熱による地上コイル温度の上昇を抑制するためであり、電磁加振試験時には図3の地上コイル架台上部に送風機を取り付けることでPLGコイルの冷却時間の短縮を図っている。この励磁・消磁サイクルを13セットおこない、超電導磁石と地上コイルの温度変化、およびPLGコイル振動波形を取得した。

2.3 試験結果

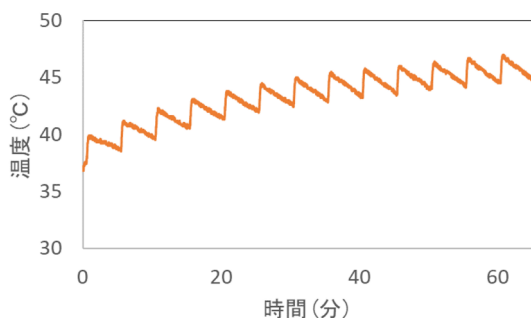
図4(a)に電磁加振試験時の超電導磁石の温度変化を示す。なお、超電導コイルは伝導冷却構造のため温度が

完全に均一ではなく勾配を持っているが、温度センサはコイル全体に複数個配置されており、ここではその平均値と冷凍機温度を示す。温度上昇はわずかながら確認できるものの、これは超電導磁石の励磁に伴う電流リードにおけるジュール発熱の影響であり、地上コイルを励磁しなくとも同様の温度上昇を示すことを確認している。本高温超電導コイルの励磁上限温度は39Kであるため、十分な温度マージンが存在し、長期的な運用も問題ない見通しが得られた。

PLG コイル温度については、コイル導体近傍(図2の加速度センサの隣)に熱電対を埋め込んでいる。図4(b)に示すように、PLG コイルは通電の度に温度が上昇し

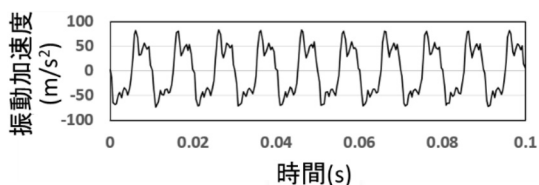


(a) 超電導磁石(絶対温度)

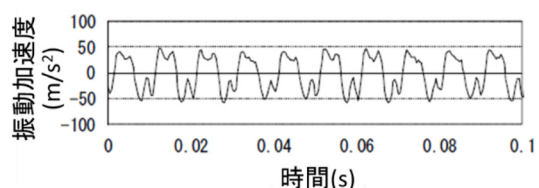


(b) PLG コイル(導体近傍, 摂氏温度)

図4 電磁加振試験時の温度変化



(a) 高温超電導磁石使用時



(b) 低温超電導磁石使用時

図5 電磁加振試験時のPLG コイル振動波形

ており、はじめは冷却が追いつかないため上昇傾向にある。ただし、サイクル数が増えるにつれて温度上昇は緩やかになり、通電サイクルの後半では概ね44～47°Cの範囲で安定している。なお、超電導コイル温度には定期的なノイズが確認されるものの、これはPLG コイルが発生する変動磁場(交流成分)に由来するものであり、PLG コイル通電のタイミングと同期している。ノイズ振幅は十分に小さく、実用上の問題はない。

次に、電磁加振時のPLG コイル上部(図2参照)の振動波形を図5(a)に示す。以前に行った低温超電導磁石を用いた際のPLG コイル電磁加振時の波形(図5(b))と同様に概ね50m/s²程度の振幅を示しており、高温超電導磁石でも適切な加振力が地上コイルに与えられていることが確認できた。なお、高温超電導磁石の場合は、100m/s²程度の鋭いピークが存在しているものの、これは磁石側の要因ではなく試験時のPLG コイルの固定条件(特にケーブルの固定)の違いのためと推定される。

3. 地上コイル変動磁場によるノイズ

本研究で製作した希土類系高温超電導磁石で地上コイル電磁加振が可能なることを上記で確認したが、実際の電磁加振試験は数週間におよぶこともあり、停電や冷却系故障等の異常時まで考慮する必要がある。最も対策が求められるのは超電導磁石であり、冷却系に発生した異常を検知できずに励磁を継続した場合、常電導転移に伴う発熱により超電導コイルが焼損する可能性が高い。そのため、異常を早期に検知して安全に超電導磁石を消磁する監視・保護システムが不可欠になる。電圧監視に基づく常電導転移検知に関しては、実機大コイルを構成するパンケーキコイル間の電圧差をとることで、電源由来のノイズを低減できる⁷⁾。しかしながら、電磁加振試験中には地上コイル変動磁場に伴うノイズも加わるため、追加の検証を実施した。

3.1 実機大高温超電導コイルのノイズ測定

電磁加振試験時と同様に、高温超電導磁石の前にPLG コイルを配置して交流通電した際に超電導コイルに発生する電圧の評価を行った。なお、ここでは地上コイル変動磁場の影響に着目するため、超電導磁石は冷却状態としたが励磁は行っていない。PLG コイルからの変動磁場の大部分は外槽容器で遮蔽されるが、一部の磁束が透過して超電導コイル端子間で電磁誘導による電圧が発生することが分かった。実機大コイルは図6に示すように8個のパンケーキコイル(#1～#8)から構成され、この時の各パンケーキコイル電圧を図7に示す。なお、ノイズの周期が20秒程度と長周期であるものの、これは測定に用いたデータロガーのサンプリングレートが低

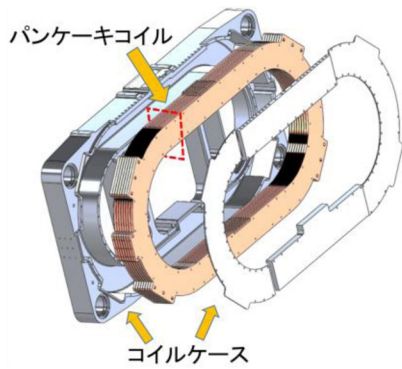
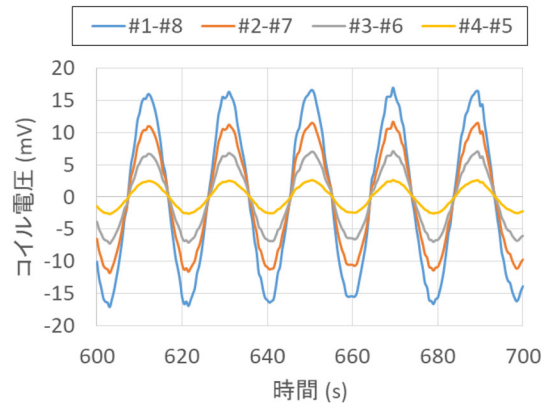


図6 実機大コイル基本構造



(a) PLG コイル通電条件：200A, 40Hz, 浮上モード

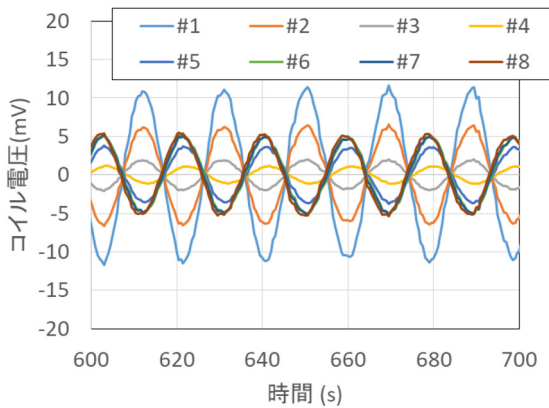
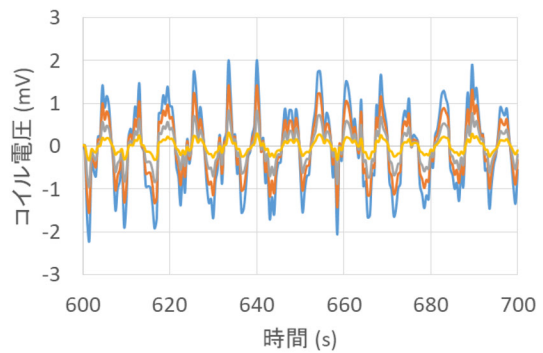


図7 PLG コイル励磁時の実機大コイル電圧ノイズ (200A, 40Hz, 浮上モード)



(b) PLG コイル通電条件：200A, 120Hz, 浮上モード

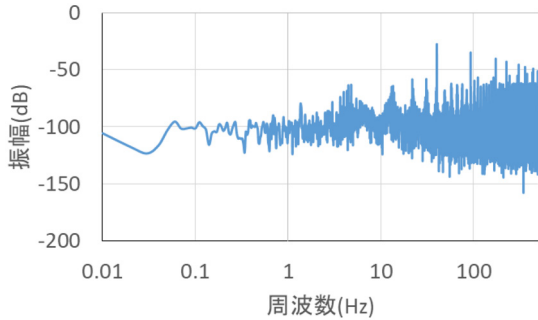
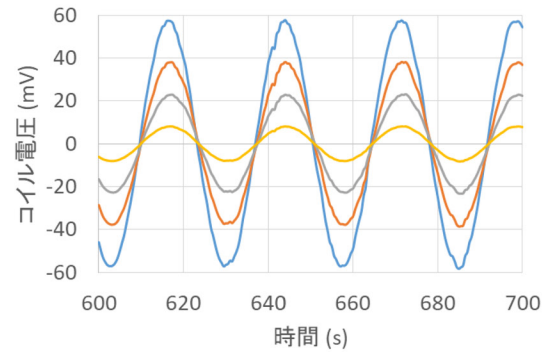


図8 PLG コイル励磁時の実機大コイル電圧ノイズ周波数成分(#1 パンケーキコイル)



(c) PLG コイル通電条件：200A, 40Hz, 推進モード

図9 PLG コイル通電時の実機大コイル電圧ノイズ (PLG コイル由来のノイズキャンセル前)

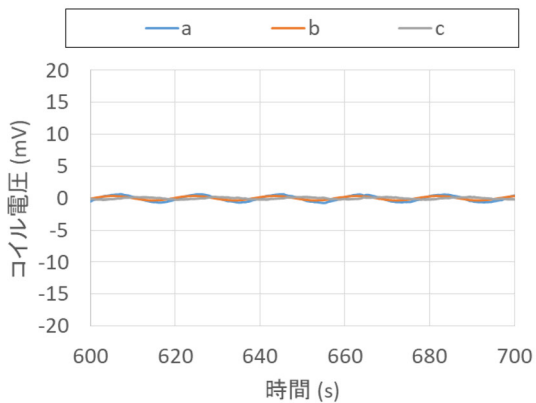
速であったことによるエイリアスであり、別途高速データロガーでFFTを行ったところ、図8に示すように地上コイル通電周波数である40Hzおよびその倍数にピークを有することが確認できた。

図9(a)に示すように、パンケーキコイル間の電圧差を求めてもノイズは完全には除去できておらず、むしろ増幅されるパンケーキコイルの組み合わせも存在し、ノイズ電圧は最大で±16mVにも到達している。以前に行った小型検証用コイルを用いた熱暴走試験では、異常検知のためには常電導検知電圧として0.5mV程度の電

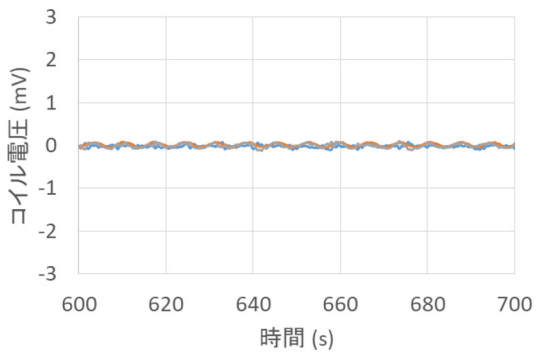
圧検知が求められることが明らかになっており⁷⁾、ノイズ電圧が16mVの状態では、常電導転移電圧の検知は実質的に不可能である。しかしながら、地上コイル周波数や通電モードを変更した場合についても評価した結果(図9(b),(c))、いずれも各パンケーキコイル間(#1-#8, #2-#7, #3-#6, #4-#5)の電圧差波形は相似であることが確認された。さらに、相似比を求めていくと、地上コイル通電条件に寄らず一定の値となっていることが分かった。そのため、式(1)のように各電圧差に相似比を乗じて差をとることでノイズを除去できることがわかった。

$$\begin{aligned}
 a &= V_{\#1-\#8} - 1.47V_{\#2-\#7} \\
 b &= V_{\#2-\#7} - 1.67V_{\#3-\#6} \\
 c &= V_{\#3-\#6} - 2.63V_{\#4-\#5}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

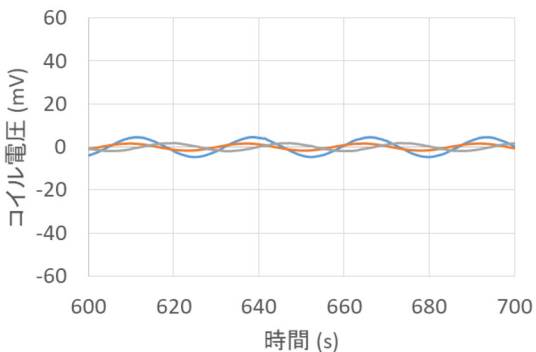
図 10 には式 (1) による地上コイル由来のノイズ除去後の電圧波形を示す。図 9 と比較すると、すべての地上コイル通電条件でノイズ電圧が 1/20 程度に低減されていることがわかる。ノイズの振幅は条件によっては 3mV 程度であるものの、高速での検知は不要であるため、さらにローパスフィルタを用いることで測定精度を高めることができると考えられる。



(a) PLG コイル通電条件：200A, 40Hz, 浮上モード



(b) PLG コイル通電条件：200A, 120Hz, 浮上モード



(c) PLG コイル通電条件：200A, 40Hz, 推進モード

図 10 PLG コイル通電時の実機大コイル電圧ノイズ (PLG コイル由来のノイズキャンセル後)

なお、今回の試験は装置の制約のため、通電電流や周波数が実際の電磁加振試験や走行時の条件とは異なっているが、本試験はより厳しい条件となっている。電磁加振試験においては、第 2 章で示したように地上コイル通電電流の交流成分は 500A 程度と大きい。地上コイルと超電導磁石間にはアルミニウム板からなる遮蔽板が置かれるため、超電導コイルに到達する変動磁場は極めて小さくなる。また、走行時 (500km/h) の地上コイル変動磁場基本波は 309Hz となり、周波数の増加に伴い外槽容器でのシールド効果が高くなるので、地上コイル由来の電圧ノイズは小さくなるのが妥当である。

3.2 ノイズキャンセルのメカニズム

地上コイルの通電条件によらず、各ノイズ波形が一定の相似比を持つ理由については以下のように考察される。まず、本研究で対象としている実機大コイルは図 6 に示したように 8 個のパンケーキコイルを積層して直列に接続しコイルケースに収められている。ここで、8 パンケーキコイルの断面 (図 6 の赤破線) における磁束の模式図を図 11 に示す。実機大コイル励磁時の磁束分布 (図 11(a)) は左右対称となるため、対称位置にあるパンケーキコイル (例えば #1 と #8) は相互インダクタンスだけでなく経路磁場も等しくなる。そのため、電圧差をとることで励磁電源や遮蔽電流 (変動磁場に伴う超電導線材内のルー

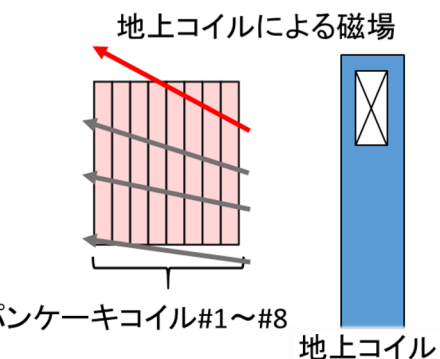
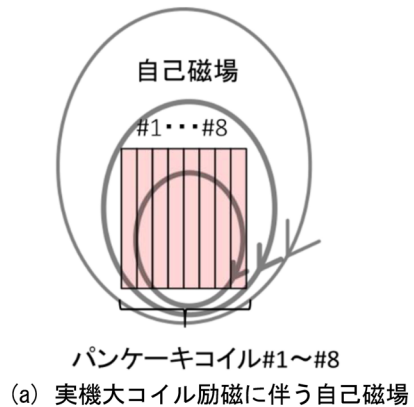


図 11 実機大コイル断面での磁束模式図

ブ電流)由来のノイズを除去できる⁷⁾。

これに対し、地上コイル由来の磁束は図11(b)に示すように左右対称にはならない。この時、パンケーキコイル#1と#8の電圧差をとると、両パンケーキコイルを通過する磁束はキャンセルされ、片方のパンケーキコイルのみを通過する磁束による誘導電圧が残る。図11(b)においては、赤矢印で示した両パンケーキコイルの間から抜けていく磁束がこれに該当し、この領域での磁束密度が一定であると仮定すると、誘導電圧はパンケーキコイル中心間距離Lに比例する。実機大コイルにおける各パンケーキコイル中心間距離の比は式(2)のようになっている。

$$\frac{L_{\#1-\#8}}{L_{\#2-\#7}} = 1.4, \quad \frac{L_{\#2-\#7}}{L_{\#3-\#6}} = 1.67, \quad \frac{L_{\#3-\#6}}{L_{\#4-\#5}} = 3 \quad (2)$$

この比は式(1)で示した相似比と近い値となっていることがわかる。ノイズ相似比とパンケーキコイル間距離の比の若干の違いの要因としては、コイルケースやパンケーキコイル間に配置された伝熱部材のシールド効果の影響と考えられる。

4. まとめ

地上コイルの電磁加振試験を短時間かつ低コストで、液体ヘリウム、液体窒素を使わない「寒剤フリー」で実現するために、同試験用の希土類系高温超電導磁石の開発を行った。現状で1コイル内蔵の1極構成ではあるが、PLGコイルの電磁加振試験を実際に行い、超電導磁石に異常がないこと、PLGコイルに加振力が与えられることを確認した。

また、長期間の電磁加振試験に対応できるように、超電導磁石の監視・保護手法の検証を行った。電圧監視に基づく常電導転移検知に関しては、コイル電圧のノイズ低減が不可欠であり、下記の手法を組み合わせること

で、高精度の常電導転移電圧の測定が可能になる見通しを得た。

- (1) パンケーキコイル間電圧差による励磁電源ノイズ、遮蔽電流(変動磁場に伴う超電導線材内のループ電流)に伴う電圧の除去
- (2) ノイズ波形相似性に基づく地上コイル由来ノイズの除去
- (3) ローパスフィルタによる測定精度向上

今後は2極目の実機大コイル製作を進めるとともに、長期間の地上コイルの電磁加振試験を行う予定である。

文 献

- 1) 田中実, 饗庭雅之, 鈴木 正夫: 地上コイル耐久性評価用電磁加振試験装置の開発, 鉄道総研報告, Vol.20, No.8, pp.17-22, 2006
- 2) 日本物理学会ほか: 緊急共同声明「ヘリウムリサイクル社会を目指して」, https://www.jps.or.jp/information/docs/press_20191220.pdf (参照日:2020年8月25日)
- 3) 水野克俊, 杉野元彦, 田中実, 小方正文: 希土類系高温超電導線材を用いた起磁力700 kA 実機大コイルの開発, 鉄道総研報告, Vol.31, No.1, pp.5-10, 2017
- 4) 鈴木 栄司: 浮上式鉄道に要求される材料特性, あたりあ, Vol. 35, No.1, pp. 18-25, 1996
- 5) Mizuno, K., Tanaka, M., Ogata, M. "Evaluation of Eddy Current Heating in a REBCO Magnet Due to the Magnetic Field of Ground Coils for the Maglev," Superconductor Science and Technology, Vol.33, No.7, 074009, 2020.
- 6) 村井敏照: 推進・浮上・案内を兼用するリニア同期モータの特性, 電学論, Vol. 114, No. 7/8, pp. 746-752, 1994
- 7) 水野克俊, 田中実, 小方正文: 電磁加振試験に用いる希土類系高温超電導磁石の監視・保護手法の検証, 鉄道総研報告, Vol. 33, No. 5, pp. 5-10, 2019