

実機大希土類系高温超電導コイルの機械加振試験

水野 克俊* 田中 実* 小方 正文*

Mechanical Vibration Tests of a Real-scale REBCO Coil

Katsutoshi MIZUNO Minoru TANAKA Masafumi OGATA

We have been developing REBCO (Rare-Earth Barium Copper Oxide) magnets with the purpose of reducing the operation cost of the superconducting magnets. Because of its higher critical temperature, liquid helium is unnecessary for the cooling down of REBCO coils. Moreover, the cryocoolers are downsized. That is also effective in the weight reduction of the magnet. However, in a case where they are used in the maglev, the on-board superconducting magnets are exposed to severe vibration due to the varying magnetic field. This paper describes mechanical vibration tests of the actual REBCO coil. The coil was vibrated at 10 G (98 m/s^2) under the excited condition. The heat load due to the vibration was less than 2 W, which has little effect on the cooling of the magnet. In addition, eddy current heating was evaluated with numerical electromagnetic analysis.

キーワード：REBCO，希土類系高温超電導線材，振動，機械加振，渦電流

1. はじめに

現在実用化されている超電導磁石の大多数には、低温超電導材料であるニオブチタン（Nb-Ti）線材が用いられている。ニオブチタンは1961年に発見された超電導体であり、技術的にも成熟している半面、超電導磁石として利用するには4 K程度まで冷却しなければならない。そのため、液体ヘリウム温度あるいは同等の温度まで冷却できる極低温冷凍機を用いる必要がある。

鉄道総研では超電導磁石の性能向上のために、希土類系高温超電導線材（Rare-Earth Barium Copper Oxide：以下REBCO線材）を用いた高温超電導磁石の研究開発を行っている。REBCO線材は高温超電導線材の中でも超電導磁石応用に適した線材であり、中程度の磁場（5 T程度）ならば、ニオブチタン線材と同等の電流密度を40 K程度で実現できる¹⁾。言い換えれば、ニオブチタン線材製のコイルと同じ重量を維持したまま、運用温度を4 Kから40 Kへ引き上げることができる。超電導機器においては、運用温度が高くなれば冷却や断熱が容易になり、冷凍機消費電力の低減や磁石の小型軽量化といった利点がある。

しかしながら、超電導磁石製作に使えるようなREBCO線材が実現されたのは近年であり、具体的な機器応用を想定した大型の磁石製作は前例が少ないのが現状である。著者らは、実機大のREBCOレーストラックコイルを既に製作し、目標とする磁場性能（起磁力700 kA）を実証している^{2) 3)}。ただし、浮上式鉄道のよう

な振動環境でREBCO線材が運用された実績はこれまでになく、振動環境中で安定励磁が可能か、あるいは振動に伴う発熱が許容範囲に収まるかを検証する必要がある。本論文では、実機大のREBCOレーストラックコイルを実際に励磁した状態での機械加振試験結果について報告する。これに加え、機械加振試験では評価できない電磁気的な発熱についても数値解析で検証を行ったので併せて報告する。

2. 変動磁場に伴う発熱

2.1 発熱のメカニズム

低温超電導磁石においても、振動に関する研究は行われており、REBCO線材を用いた高温超電導磁石に対しても低温超電導磁石の知見は有用である。

超電導磁石が変動磁場中に置かれた場合、大きく分けて三通りの発熱現象が存在する⁴⁾。まず一つ目は、変動磁場によって超電導磁石に加振力が働き、超電導コイルとふく射シールド（あるいは外槽容器）に相対変位が発生する場合である。このとき、相対変位によってふく射シールドの磁場が変動して渦電流が発生し、その渦電流によって超電導コイルにも渦電流が誘起されてジュール発熱が発生する（図1a）。ただし、著者らが開発しているREBCO磁石においては、40 K程度の高い運用温度を目指しており⁵⁾、ふく射シールドを持たない構造となっている。そのため、超電導コイルの支持構造が極端に弱くない限り、外槽容器との相対変位は微小であり、発熱も問題にならないと考えるのが妥当である。

* 浮上式鉄道技術研究部 低温システム研究室

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

次に挙げられるのは、変動磁場が外槽容器を貫通して超電導コイルに到達する場合である。このときも超電導コイルに渦電流が誘起されてジュール熱が発生する（図1b）。外槽容器にアルミニウムを用いることにより変動磁場の遮へい効果は高まるものの、変動磁場が低周波のときは磁場が透過しやすく発熱も顕著となる。

三つ目は、超電導コイルが振動で変形することにより、超電導コイル本体とそれを収める内槽容器間で摩擦熱が発生するものである（図1c）。なお、内槽容器とは低温超電導磁石において、超電導コイルを冷却するための液体ヘリウムを満たす気密容器である。高温超電導磁石においては、液体ヘリウム冷却は行わないものの、励磁した際の電磁力を支えるための補強構造が不可欠である（※本論文では、高温超電導コイルのための補強構造をコイルケースと呼ぶこととし、低温超電導磁石にお

ける内槽容器とは区別する）。そのため、高温超電導磁石においても、コイルケースにおいて同様の摩擦発熱は十分に考えられる。

2.2 発熱の評価法について

これらの振動に伴う発熱の評価、あるいは超電導磁石の耐振動性を検証する手法には、電磁加振試験と機械加振試験がある。電磁加振試験とは、超電導磁石に対向して加振用常電導コイルを並べ、変動磁場を与えるものである。実運用に近い条件を再現できるものの、超電導コイル単体ではなく超電導磁石として完成されたものが必要であり、試験装置が大規模になる。また、渦電流発熱と摩擦発熱の切り分けができない等の制約がある。

これに対し、機械加振では真空容器内に吊下げられた超電導コイルに加振機から直接加振力を与える仕組みとなっている。渦電流発熱は発生しないため、超電導コイルの摩擦発熱を明らかにすることができ、電磁加振に比べて小規模な試験装置で行うことができる。

本研究開発においては、機械加振による REBCO コイルの発熱と耐振動性の評価を行い、渦電流発熱に関しては重要度が高いと考えられる変動磁場の透過によるものを電磁界解析で評価することとした。

3. 数値解析による渦電流発熱予測

高温超電導磁石の渦電流発熱を考える上で重要なのがコイルケース（内槽容器）の材質である。低温超電導磁石における内槽容器は液体ヘリウム槽としての役割があるため気密性が必要であり、ステンレスの溶接構造であった。これに対し、高温超電導磁石では気密性は不要で補強構造としての役割だけになる。そのため、ステンレス以外の材料を用いることができ、材料の電気特性の違いが渦電流発熱にどのような影響を与えるかを評価した。

3.1 解析モデル

本研究で開発した REBCO コイルは軽量化を目指した設計となっており、コイルケースには比強度に優れた超々ジュラルミン（A7075）を用いている。コイル本体形状はレーストラック形状（長手方向：1070 mm、高さ方向 500 mm）であり、これを覆うようにコイルケースがある。外槽容器は従来通りアルミニウム製としている。実機は4コイルを一つの外槽容器に収める構造であるが、計算の簡略化のため、図2に示すようにコイルは1極だけとしている。変動磁場に関しては図3に示すように、超電導コイルに向かい合う形で連続して変動磁場発生コイルが配置されており、超電導磁石が移動する際の電磁誘導によって磁場が発生する。なお、解析には市販の電磁界解析ソフト EMSolution を用いた。

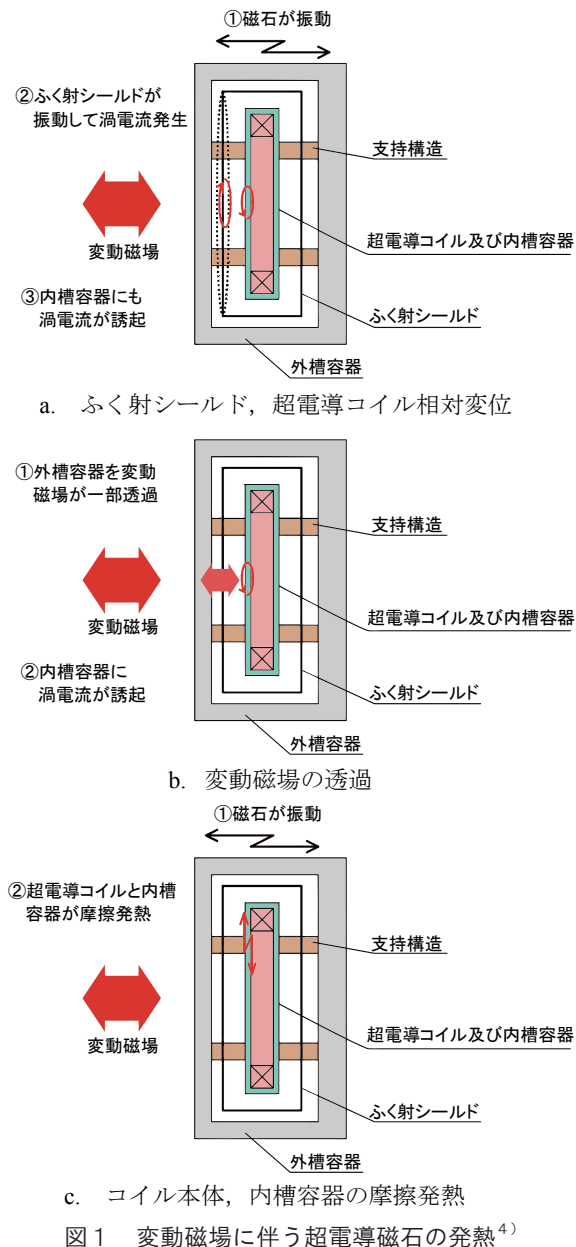


図1 変動磁場に伴う超電導磁石の発熱⁴⁾

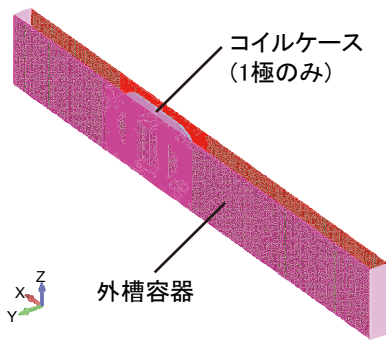


図2 変動磁場による渦電流発熱評価のための超電導磁石モデル

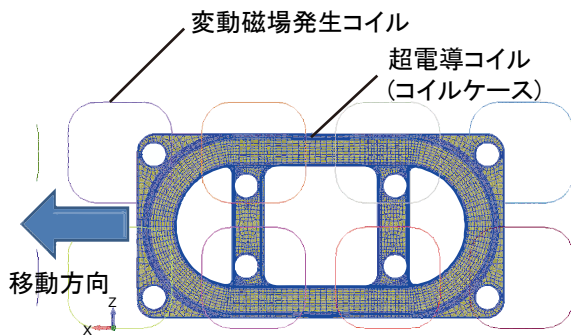


図3 コイルケースおよび変動磁場発生コイルの位置関係

3.2 解析結果

変動磁場周波数が 309 Hz の条件で、コイルケース材質を A7075 (50 K における抵抗率: $2 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$) とした場合と、SUS304 (50 K における抵抗率: $4 \times 10^{-7} \Omega\text{m}$) の場合の渦電流発熱の比較を表 1 に示す。外槽容器における発熱はコイルケース材料によらず同じであり、外槽容器での発熱は外部の変動磁場による渦電流が支配的である。また、コイルケースの発熱は外槽容器の発熱に対して 4 桁小さく、外槽容器で大部分の変動磁場が遮へいされていることが分かる。ただし、コイルケースは極低温に置かれており、微量な発熱でも注意が必要である。静置時の超電導磁石への熱侵入は、電流リードからの熱侵入、荷重支持体等構造物からの熱伝導、およびふく射が挙げられる。今回研究対象としている高温超電導コイルは、電流リードが 13 W 程度 (1 極あたり)⁵⁾、熱伝導とふく射は合わせて 15 W 程度の熱侵入になると概算され、合計は 30 W 弱となる。これと比較すれば、発熱の大きい SUS304 のコイルケースの場合 (0.7 W) においても、渦電流は冷却にはほぼ影響を与えないと言える。

コイルケースの材料による渦電流発熱の違いについては、以下のように説明できる。基本的に、コイルケースが低抵抗であるほど渦電流は増加する傾向にある。言い換えれば、仮にコイルケースが絶縁体でできていれば、渦電流は発生せず発熱しないことになる (ただしこの場

表 1 コイルケース材質による渦電流発熱解析結果

コイルケース 材質	抵抗率 @ 50 K	発熱量	
		外槽容器	コイルケース (1 極当たり)
A7075	$2 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$	7470 W	0.31 W
SUS304	$4 \times 10^{-7} \Omega\text{m}$	7470 W	0.66 W

合、変動磁場を遮へいしないため、コイルを形成する超電導線材に直接渦電流が発生してしまう)。しかしながら、コイルケースの周回抵抗 (渦電流通過経路の電気抵抗) よりもリアクタンス (交流回路のコイル成分やコンデンサ成分に由来する電圧と電流の比) が圧倒的に高くなる周波数帯域では、コイルケースの抵抗によらず渦電流の総和が頭打ちになる。電流が一定ならば、当然ながら低抵抗の方がジュール発熱は小さくなる。本解析の条件はリアクタンスの影響が顕著になりつつある領域であったため、SUS304 よりも A7075 の場合の発熱が小さくなったと考えられる。

4. 機械加振による発熱評価と励磁安定性検証

超電導コイルが振動した際に発生する摩擦発熱に関しては、解析的に評価することが困難であり、実際にコイルを加振する必要がある。低温超電導磁石においては、内槽容器と超電導コイルの接触面での摩擦発熱が報告されており、その対策が進められてきた経緯がある⁶⁾。高温超電導コイルにおいても、超電導コイル本体とコイルケース間での摩擦発熱は十分に考えられるため、摩擦対策を行いつつ加振試験を実施した。

4.1 樹脂充填

本研究で用いている高温超電導コイルは、パンケーキコイルと呼ばれる扁平なコイルを複数積層した構造となっており、さらにフープ応力を支えるためにコイルケースに収められている (図 4)。組立作業や各 부품の精度の都合でコイルケースとパンケーキコイル、あるいはパンケーキコイル間には微小な隙間が残るため、振動した際に部品どうしが相対運動して摩擦発熱の要因となる可能性が高い。そこで、摩擦発熱対策として、コイルケース内を樹脂充填することにした。充填に用いる樹脂の選定にあたっては、低粘度で細部まで浸透すること、極低温での強度に優れていること、の 2 点を重視してジシクロペンタジエン (RIMTEC 社製、PENTAM[®]) を選定した。

硬化前の粘度が $10 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 以下と極めて低く、これはエポキシ樹脂では実現困難な粘度である。また、極低温における強度に関しても優れた特性が報告されている⁷⁾。

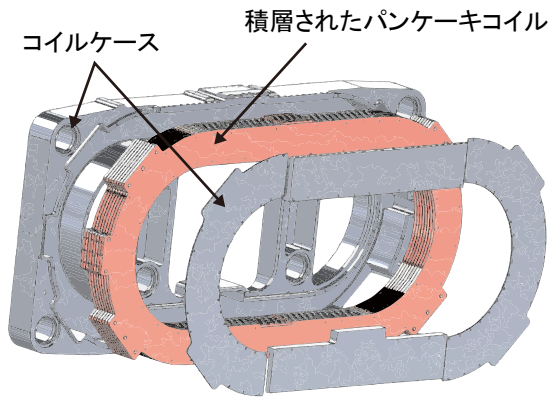


図4 高温超電導コイル内部構成

4.2 機械加振試験装置構成

高温超電導コイルは 140 kg 程度あるため、加振機でそのまま加振しても大きな振動加速度を得ることは困難である。そこで、コイルをワイヤーで吊下げて自由振動できる状態とし、コイルの固有周波数を同定したうえで共振を利用して 10 G(98 m/s²) 超える振動加速度を与えることとした。

さらに、より実運用条件に近付けるため、コイルを 40 K 以下に冷却でき、起磁力 700 kA で励磁した状態で加振可能な装置を製作した。冷却には単段 GM 冷凍機を用い、振動分離のためコイルとの接続は可とう性のある高純度アルミ積層板を用いている。加振機は加振ロッドを介して高温超電導コイルに接続されている。加振ロッドにはペローズ（蛇腹）が取り付けられており、高温超電導コイルが収められている真空容器内の真空を保持したまま加振力をコイルに与えることができる。外観写真を図5に示す。なお、写真で示すように1台だけでなく、2台の加振機を用いての加振試験も可能な構成となっている。この様な構成としたのは、加振ロッドの質量によるコイル変形のアンバランスを解消するためである。加えて、接近した固有周波数を持った場合でも、加振点と加振の位相を制御することにより固有モードを分離しての加振試験が可能になる利点もある。

高温超電導コイル表面には加速度センサが複数取り付けられており（図6）、振動加速度だけでなく変形状（モードシェイプ）も明らかにすることができる。温度センサも同様に複数個設置されており、コイルの発熱源をある程度絞り込むことができる。

加振試験の手順としては、初めに加振周波数を連続的に変化させる加振試験を行い（周波数応答試験）、固有振動数および固有モードを明らかにした。次に、固有振動数で加振することによりコイルを共振させ、10 G(98 m/s²) の振動加速度を与えて発熱と耐振動性の評価を行った（連続加振試験）。本論文では特に、同装置の特徴である2点加振での結果について報告する。また、こ

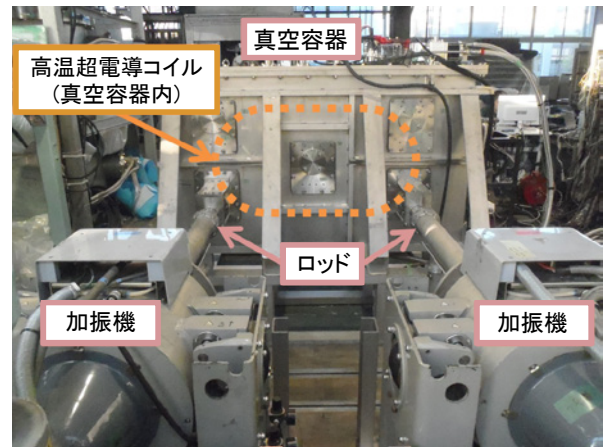


図5 機械加振装置外観

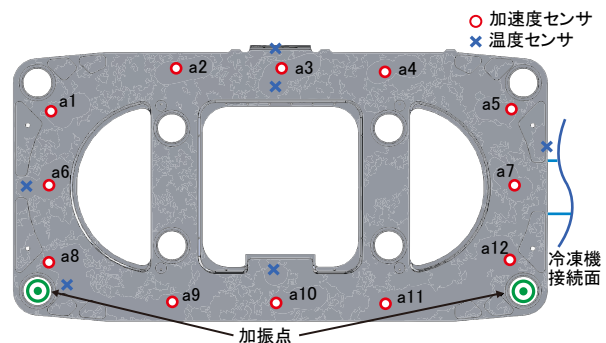


図6 加速度センサ配置

これらの加振試験においては、コイルを励磁・無励磁の2条件で行っており、励磁が振動に与える影響についても検証を行った。

4.3 周波数応答試験

35 K に冷却した高温超電導コイルに対し、無励磁の状態でも周波数を連続的に変化させながら加振を行った。なお、加振機はコイル下部の両角部に接続されており、2台の加振力の位相を同相・逆相に調整してそれぞれ実施した。得られた加振力あたりの振動加速度の周波数依存性（周波数応答関数）を図7に示す。ピークになっている箇所は固有振動数を示しており、同相加振では 170 Hz と 295 Hz に、逆相では 119 Hz に確認できる。固有振動数でのピークの強度はセンサ（a1～12）ごとに異なり、ピークが小さいものは振動の節に近い位置の加速度センサ出力となる。これに加えて、振動の位相情報からモードシェイプを同定できる。その結果、119 Hz はねじり 1 次モード、170 Hz は曲げ 1 次モード、295 Hz はねじり 2 次モードであることが明らかになった（表2）。図8に各モードシェイプのイメージを示す。曲げ 1 次とねじり 2 次においては、コイル下部の両角部が同相で変形しており、ねじり 1 次では逆相で変形している。加振力の位相とも整合性がとれており、本試験装置の特徴で

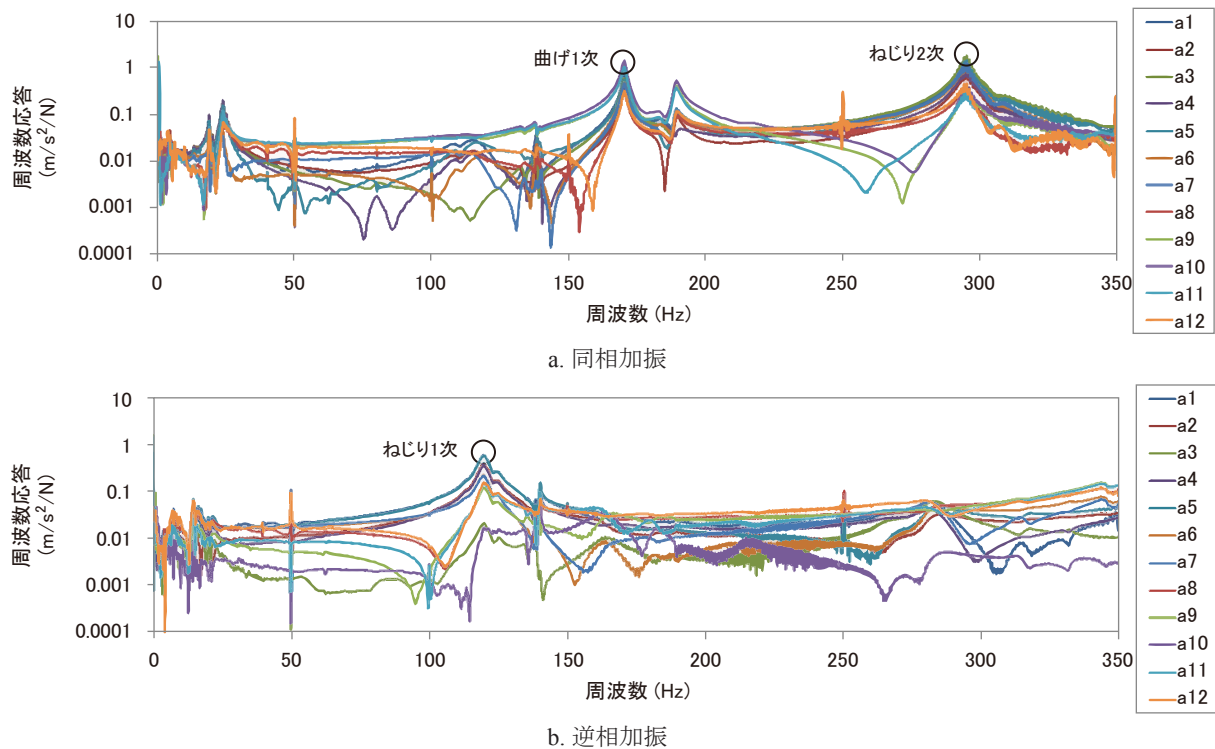


図7 周波数応答関数（コイル温度 35 K，無励磁）

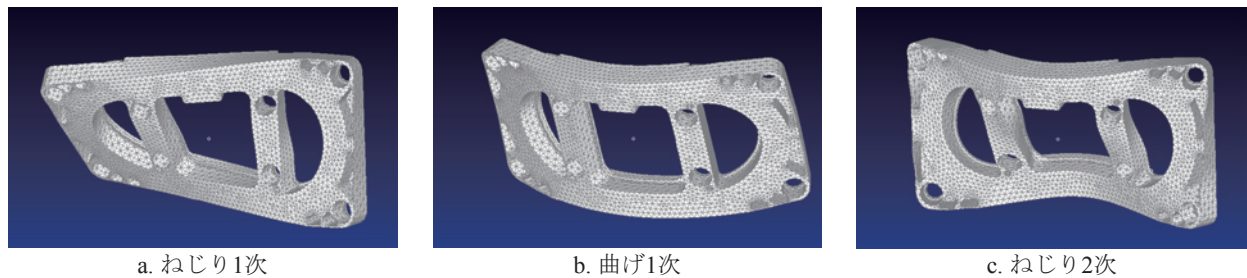


図8 各モードシェイプのイメージ

表2 高温超電導コイル冷却時の固有振動数

	ねじり1次 (逆相)	曲げ1次 (同相)	ねじり2次 (同相)
無励磁	119 Hz	170 Hz	295 Hz
励磁 (起磁力 700 kA)	124 Hz	172 Hz	298 Hz

ある2点加振によるモードの分離ができていると言える。

次に、コイルを起磁力 700 kA で励磁した状態で再度周波数応答試験を行ったところ、同相・逆相共に極めてよく似た波形が得られたものの、表2に示す通り固有周波数が若干上昇していた。励磁した際には各パンケーキコイルに吸引力が働き、コイルケースにもフープ応力が働くことになる。これらの応力によってパンケーキコイル間、あるいはコイルケースとパンケーキコイルの接触面に拘束力が発生して、これらの要素部品が一体として変形することにより、剛性が向上したため固有周波数が

上昇したと推測される。

4.4 連続加振試験

次に、得られた固有振動数での連続加振試験を実施した。ここでは、連続加振試験の例として、曲げ1次モード（同相）、最大振動加速度 10 G (98 m/s²) で連続加振を行った際の発熱量について述べる。無励磁状態での結果と励磁状態での試験結果を図9に示す。いずれも計測開始から5分間は加振を行わず定常状態を確認し、その後、最大振動加速度が 10 G (98 m/s²) になるよう加振力を調整して20分間加振を続けた。励磁加振においては、加振中のコイル両端電圧も合わせて示す。なお、コイルの初期温度の違いは、励磁する際に発生する電流リードでのジュール発熱によるものである。コイル温度は本来複数点で測定しているが（図6）、ここではその平均値で代表している。励磁の有無にかかわらず、加振中の温度上昇は緩やかである。コイルの熱容量と冷凍機

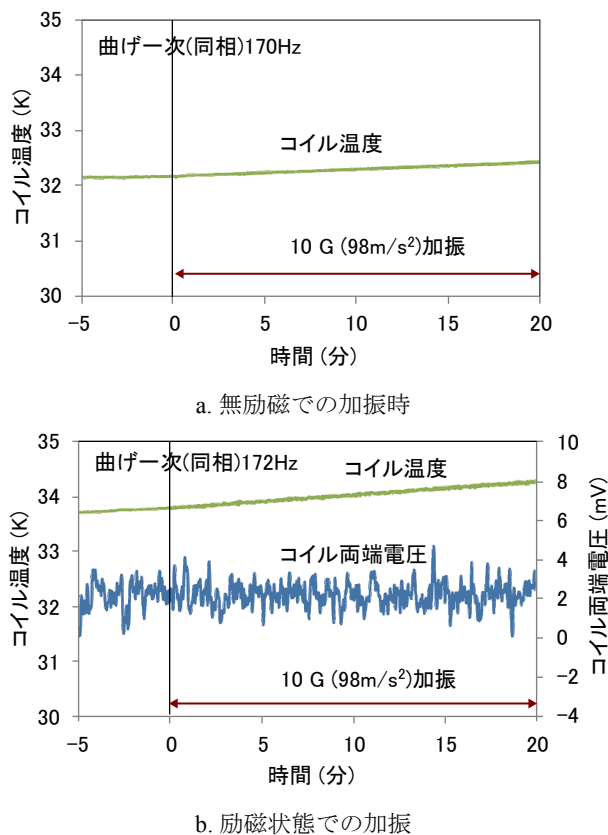


図9 高温超電導コイル連続加振時のコイル温度

冷凍能力の温度依存性のデータを用いて、温度上昇から発熱量を概算することが可能であり、それぞれ約 1.3 W、約 1.7 W となり、概ね近い値を示している。そのため、励磁が振動時の発熱に全く影響を与えないと断言はできないものの、その影響は大きくないと考えられる。振動時の摩擦による発熱量自体も、磁石全体への熱侵入（30 W 弱）に比べれば十分に小さいと言える。また、加振中のコイル両端電圧も有意な変化は確認できず、振動環境下でも安定して励磁状態を保持できることが確認できた。

5. まとめ

REBCO 線材が超電導磁石に使用できれば、超電導磁石の運用温度を大幅に引き上げられる見込みがあり、消費電力の低減、運用コストの低減、磁石軽量化などの利点がある。実用化に向けては、振動環境での安定運用が可能なることを実証することが不可欠であり、起磁力 700 kA の実機大 REBCO レーストラックコイルの機械加振試験を実施した。

振動時の摩擦発熱を低減するため、REBCO コイル内部はジシクロペンタジエン樹脂で充填しており、共振を

利用して 10 G (98 m/s²) の機械加振を実施しても発熱は 2 W 以下であった。また、励磁の有無によらず発熱量はほぼ同じであり、振動時のコイル発熱に対する励磁の影響は小さいと考えられる。さらに、加振中もコイル両端電圧は安定しており、振動環境での安定励磁が実証された。

機械加振試験では評価できない渦電流発熱に関しては、数値解析による評価を実施した。コイルケースの材質をステンレス (SUS304) とアルミニウム合金 (A7075) で比較したが、いずれも発熱は 1 W 以下であり冷却に与える影響は少ないことが明らかになった。なお、アルミニウム合金の方がステンレスと比較して渦電流発熱が小さく、さらなる低発熱化にはコイルケースの低抵抗化が有効であることが分かった。

謝 辞

本研究は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

また、コイルの樹脂充填においては、RIMTEC 株式会社の竹内正基氏、岸直哉氏に多大なご協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

文 献

- 1) 長嶋賢, 小方正文, 水野克俊, 荒井有気, 長谷川均, 笹川卓: 希土類系高温超電導線材を用いた浮上式鉄道用超電導磁石の構成, 鉄道総研報告, Vol.25, No.3, pp.17-22, 2011
- 2) Mizuno K., Sugino M., Tanaka M. and Ogata M., "Experimental Production of a Real-Scale REBCO Magnet Aimed at Its Application to Maglev." IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 27, 3600205, 2017.
- 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) 土島秀雄, 鈴木栄司, 寺井元昭: 山梨実験線超電導磁石の開発, 鉄道総研報告, Vol. 8, No. 10, pp.17-22, 1994
- 5) 水野克俊, 杉野元彦, 小方正文: 希土類系高温超電導磁石のための要素コイル製作と評価, 鉄道総研報告, Vol. 29, No. 11, pp. 11-16, 2015
- 6) 清野寛: 超電導コイルの摩擦発熱の現象解明とその制御, 鉄道総研報告, Vol. 20, No. 8, pp. 5-11, 2006
- 7) V. J. Toplosky and R. P. Walsh, "Thermal and Mechanical Properties of Poly - Dicyclopentadiene (DCPD) at Cryogenic Temperatures." Adv. Cryo. Eng., Vol. 52, pp. 219-224, 2006.