

# 冷凍機冷却型超電導フライホイール用試験装置の開発

荒井 有気\* 清野 寛\* 長嶋 賢\*

## Development of Flywheel Test Equipment for Flywheel Energy Storage System with Cryo-cooled Superconducting Magnetic Bearings

Yuuki ARAI Hiroshi SEINO Ken NAGASHIMA

We have been developing flywheel energy storage system for railways equipped with superconducting magnetic bearings. The bearings consist of cryo-cooled superconducting coils and bulk superconductors completely inside a cryostat. A rotor is suspended and driven by electromagnetic force without mechanical contact. We have designed and prepared flywheel test equipment with the bearings. Using the equipment, we have successfully rotated the rotor without any mechanical contact and demonstrated feasibility of these superconducting magnetic bearings. In this paper, we report the levitation properties of the equipment.

キーワード：エネルギー貯蔵，フライホイール，磁気軸受，超電導磁石，超電導バルク体，極低温

### 1. はじめに

鉄道はエネルギー効率が非常に高い交通機関であることが知られている。電気鉄道車両では、回生ブレーキにより、走行時の運動エネルギーを電気エネルギーとして取り出し、他列車の力行などに再利用できることが高効率の一因である。しかしながら、回生している列車の近くに力行中の列車などの負荷がない場合、回生は絞込まれるか失効してしまい、回生中の列車の運動エネルギーは機械ブレーキでの熱エネルギーとして消費されてしまう。このエネルギーを蓄積できれば、さらなるエネルギー効率向上や、機械ブレーキのメンテナンス低減に資する。

そのため、鉄道総合技術研究所ではフライホイール蓄電装置（以下、フライホイールと言う）の開発を行っている。フライホイールは、電気エネルギーをフライホイールの回転エネルギーとして蓄えておき、必要な時（例えば、列車の力行時）に再び電気エネルギーとして取り出す装置である。従来のフライホイールは、主に機械軸受や制御型磁気軸受で回転体を支持している。このため、機械軸受ではメンテナンスが必要なこと、制御型磁気軸受では荷重容量が小さいことがデメリットであった。そこで本研究では、超電導コイルと超電導バルク体を組合せた超電導磁気軸受をフライホイールに適用し、非接触で大荷重を支持する構造を適用し、開発している。この超電導磁気軸受を用いた冷凍機冷却型フライホイールのイメージ図を図1に示す。この構造では、軸受を非接触で構成できるため、軸受のメンテナンスが不要

で、ステータ・ロータ両側に超電導体を用いることで、大きな荷重容量が実現できると期待される。目標とする蓄積エネルギーは、回生絞込みの実態調査<sup>1)</sup>から、36 MJ (10 kWh) と見積もった。

超電導磁気軸受は、ステータ側の超電導コイルと、ロータ側の超電導バルク体から構成される。超電導コイルおよび超電導バルク体はクライオスタット内に収められる。超電導コイルは冷凍機による伝導冷却で臨界温度以下に冷却される。超電導バルク体はクライオスタット内に封入した希薄ヘリウムガスを介して、分子伝導により冷却される。超電導バルク体にはフライホイールが接続される。この荷重は超電導磁気軸受により、非接触で安定に支持される。クライオスタット内外のエネルギー授受は、クライオスタット内のロータと、クライオスタット外の電動発電機に接続された1組のトルク伝達装置により、非接触で行われる<sup>2)</sup>。フライホイールの質量は2000 kg程度、ロータの回転数は3000 rpm程度<sup>3)</sup>で必要な蓄電容量（36 MJ）を貯蔵することができる。

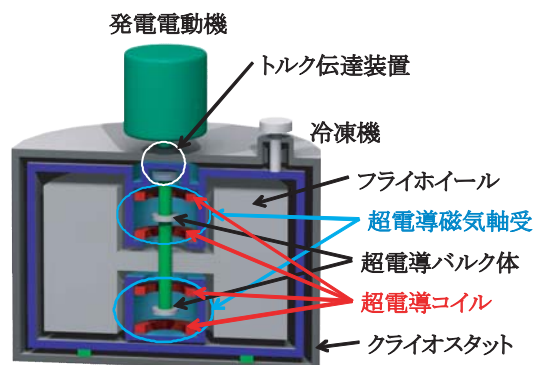


図1 フライホイール蓄電装置概念図

\* 浮上式鉄道技術研究部（低温システム）

特集：浮上式鉄道技術と在来鉄道への応用

このような冷凍機冷却超電導フライホイールの研究のため、2種類の試験装置を製作した。一方は荷重・回転数を検証する試験装置であり、他方は装置構成を検証する試験装置である。本報告では、これらの試験装置の概要および試験結果について報告する。

2. 荷重・回転数を検証するフライホイール試験装置

これまでに筆者らは、5 kNのスラスト荷重を支持し、3000 rpmまでの回転試験に成功している。また、この装置を20 kNのスラスト荷重に対応できるように改良し、静荷重試験で20 kNのスラスト荷重が発生することを確認している<sup>4)</sup>。この荷重・回転数を検証するフライホイール試験装置の概略を図2に示す。この試験装置では、Nb-Ti巻線の超電導コイル（ステータ側）とGdBCO超電導バルク体（ロータ側）で超電導磁気軸受を構成している。超電導コイルはクライオスタットに収められ、冷凍機による伝導冷却で臨界温度以下に冷却される。超電導バルク体は、デュワー内に収められ、液体窒素浸漬冷却により、臨界温度以下に冷却される。このデュワーは回転可能であり、2000 kgのフライホイールおよび電動発電機に機械的に接続される。回転可能なデュワーは超電導コイルクライオスタットの室温ボアに配置される。超電導磁気軸受はスラスト荷重を非接触浮上支持する。一方、ラジアル荷重は機械軸受で支持される。

回転試験は、超電導コイルに電流を通電し、超電導磁気軸受が2000 kgのフライホイールを非接触浮上支持した状態で行った。3600 rpmまでの回転試験結果を、図3に示す。

3600 rpmに到達するまで、浮上力に顕著な低下は見られなかった。また、浮上位置の変化もわずかであった。

次に、フライホイールへの蓄電・放電を模擬して、2000 rpmと1000 rpmとの間の加減速を6回繰り返したときの

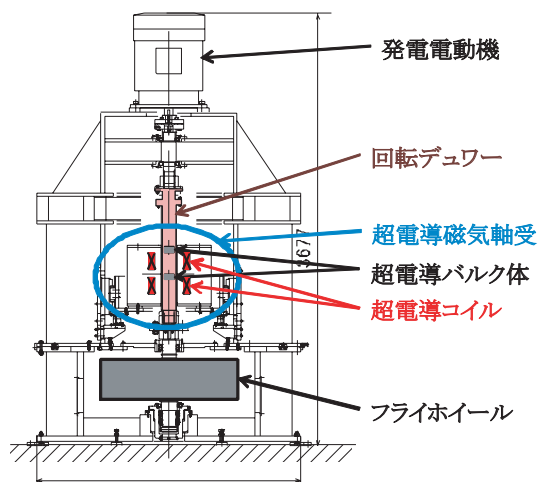


図2 荷重・回転数を検証するフライホイール試験装置概略図

回転試験結果を図4に示す。約50分間の回転中、浮上力の顕著な低下は見られなかった。また、浮上位置の変化もわずかであった。

なお、浮上位置のわずかな降下は、磁束クリープによるものと考えられる。液体窒素冷却の超電導バルク体を使用した磁気軸受においては、すでに磁束クリープによる軸降下の効果的な対策が提案されている<sup>5)</sup>。

以上により、36 MJを蓄電するのに必要となる、2000 kgのフライホイールを支持し、3600 rpmで回転できる能力が超電導磁気軸受にあることを確認した。また、蓄電・放電に必要な、回転数の加減速を繰り返しても安定して回転可能であることを確認した。

3. 冷凍機冷却検証試験装置

第2章で、図2に示す超電導磁気軸受が36 MJを蓄電する能力を有することを示したが、下記の課題があった。

- (1) 機械軸受の使用
- (2) 超電導バルク体の冷却時間・温度の制約

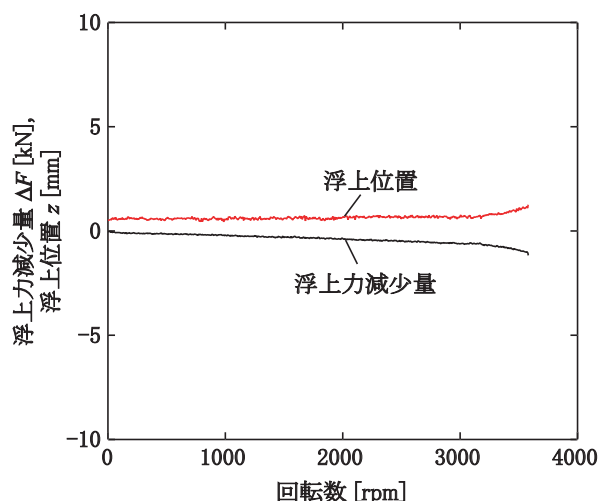


図3 3600 rpm までの回転試験結果

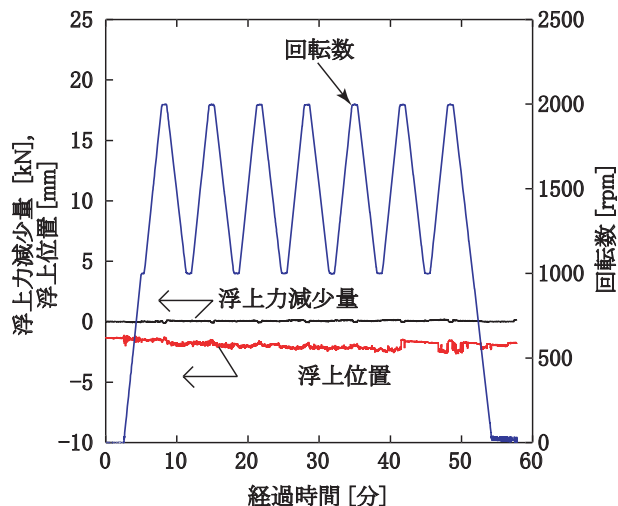


図4 加減速繰り返し試験結果

(3) ロータ風損

(4) 超電導コイルと超電導バルク体のギャップが大

しかし、図1に示した構成では、後述する理由により、これらの問題点を解決することができる。そこで、小型ではあるが、図1と同様の構成を持つフライホイール試験装置を製作し、ロータの非接触安定浮上および回転特性を検証したので、以下に報告する。

### 3.1 試験装置の概要

筆者らは、文献4)で本装置の設計を報告している。本装置は、図1に示す装置構成を実証するためのフライホイール試験装置である。装置の概略を図5に、写真を図6に示す。超電導コイルに対する超電導バルク体の配置は、文献4)から若干変更し、図7に示す通りとした。

BSCCO巻線の超電導コイル(ステータ側)1つと、GdBCO超電導バルク体(ロータ側)3つを組合せて1組の超電導磁気軸受を構成している。両者とも同一のクライオスタット内に構成するため、ギャップを小さくすることができる。超電導コイルは冷凍機の伝導冷却により、超電導バルク体は希薄ヘリウムによるガス伝導冷却により、超電導転移温度以下まで冷却される。冷却を液体窒素によらないため、冷却時間・温度の制約を受けない。また、ヘリウムが希薄であるため、ロータ風損はほとんど発生しない<sup>3)</sup>。この超電導磁気軸受を2組、上下に配置し、ロータ側の超電導バルク体の間に質量約52kgのフライホイールを接続する。ロータの全質量は約60kgである。この荷重は、超電導磁気軸受により非接触安定浮上支持される。ロータの上方には、トルク伝達装置を接続し、クライオスタットを介して、エネルギー授受を行う。超電導バルク体、これを保持する超電導バルク体ホルダ、フライホイール、トルク伝達装置およびこ

れらを接続する軸から成るロータの重量は、約600Nである。また、トルク伝達装置同士の吸引力は約90Nである。

この試験装置により、図1に示した超電導磁気軸受の装置構成が構成可能であることを確認した。

### 3.2 電磁力解析

装置を設計するにあたり、超電導コイルと超電導バルク体の間にはたらく電磁力は、汎用FEM連成ソフトANSYSを用いて線形磁場解析により求めた。超電導コイルと超電導バルク体の主要諸元をそれぞれ表1、表2に示す。超電導バルク体はゼロ磁場冷却による完全反磁性とし、解析では透磁率を0.001として模擬した。

また、上部、下部それぞれの超電導軸受は互いに磁気的な相互作用が十分小さくなるだけの隔離を取るため、解析は別個に行い、発生する力を足し合わせて浮上力および案内力を求めた。なお、小さい2枚の超電導バルク体の中心と超電導コイル中心が径方向、軸方向とも一致する位置(図7に示す位置)を基準位置とする。

まず、基準位置から、軸方向に-10~5mm変位させたときに超電導バルク体にはたらく電磁力を、2次元軸

表1 超電導コイル主要諸元

材質	高温超電導線材 (BSCCO)
起磁力	314 kA
コイル断面積	108 mm × 30 mm
形状、数量	内径 55.5 mm, 外径 271 mm, 厚さ 30 mm, 2個

表2 超電導バルク体主要諸元

材質	高温超電導体 (GdBCO)
透磁率	0.001 (完全反磁性模擬)
形状、数量	直径 46 mm, 厚さ 15 mm, 4枚 直径 60 mm, 厚さ 20 mm, 2枚

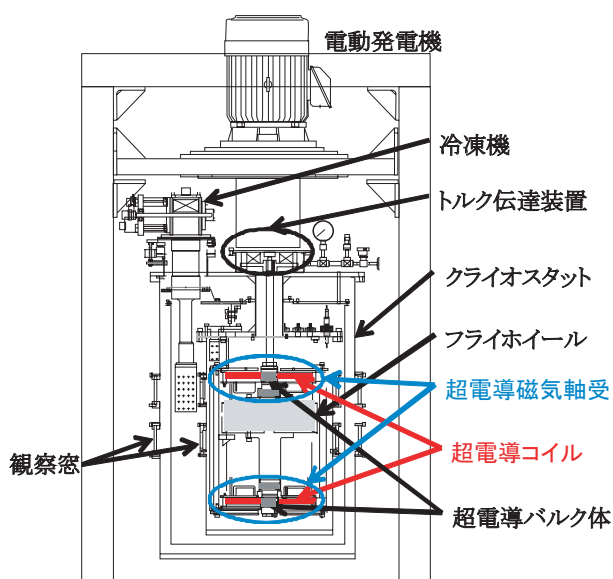


図5 冷凍機冷却検証試験装置概略図

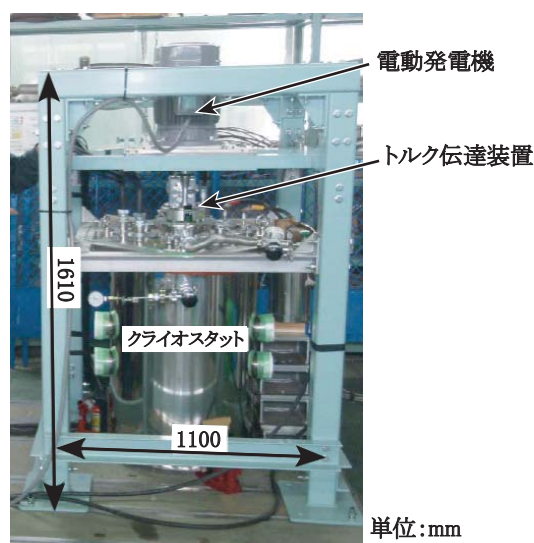
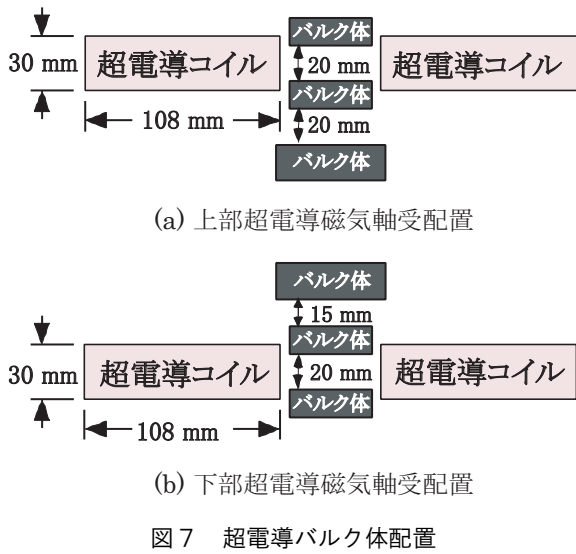


図6 冷凍機冷却検証試験装置写真

特集：浮上式鉄道技術と在来鉄道への応用



対称モデルを用いて求めた。解析モデルの一例を図8に示す。要素数はおよそ32000であった。定格通電(200 A)時の軸方向の発生電磁力,すなわち浮上力について,図9に示す。

基準位置から-5 mm変位した位置で,およそ1000 N,約100 kgまでのロータが浮上可能なことがわかった。本装置のロータは約60 kgであるので,定格通電の約77%で浮上する。また,-9~5 mmの範囲で浮上力の傾きは負である。これは,ロータが下がると浮上力が増加し,逆にロータが上がると浮上力が減少し,均衡位置に戻す力がはたらくことを意味する。よって,安定浮上することがわかる。

次に,軸方向に-5 mm変位した位置で,径方向に-4~0 mm変位させたときに超電導バルク体にはたらく電磁力を,3次元2分の1モデルを用いて求めた。解析モデルの一例を図10に示す。要素数はおよそ30万であった。定格通電時の径方向の発生電磁力,すなわち案内力につ

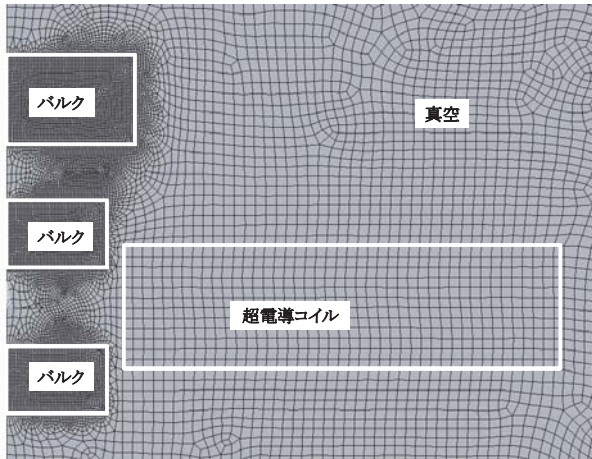


図8 浮上力解析のための2次元軸対称モデルメッシュの例

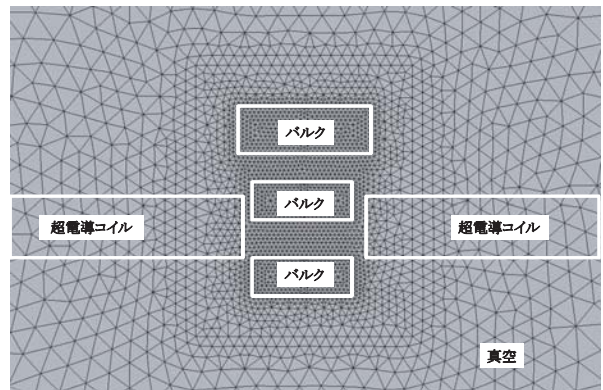


図10 案内力解析のための3次元2分の1モデルメッシュの例

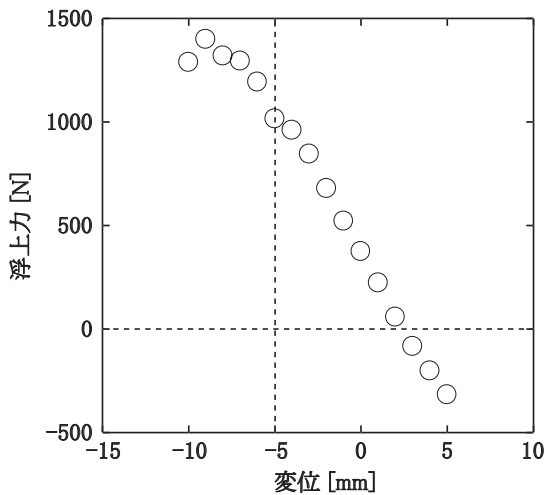


図9 発生浮上力解析結果

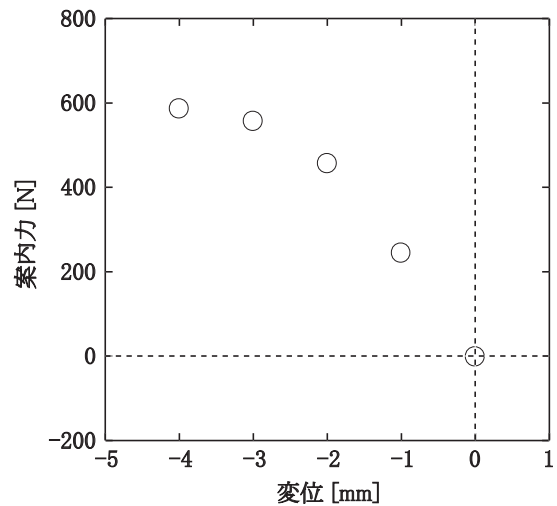


図11 発生案内力解析結果

いて、図11に示す。径方向に-1 mm変位させたときに、およそ250 N、すなわち、約250 N/mmの復元力がはたらくことがわかった。また、解析を行った全領域で、変位と逆向きに力がはたらくことから、常に復元力がはたらくこともわかった。

これらより、図7の超電導バルク体配置とすれば、軸方向、径方向ともに、変位に対して元の位置に戻す力がはたらき、安定浮上可能であることがわかった。

### 3.3 冷却試験

冷却試験では、まず超電導磁気軸受を内包するクライオスタットを組立てた。次に、クライオスタットの内槽、外槽を真空排気した。外槽の真空は真空断熱槽である。冷凍機を起動すると、熱的に接続された超電導コイルの温度が下がり始めた。一方、ロータ側である超電導バルク体は、冷凍機と熱的に接続されていない。これを冷却するために、内槽内に10～100 Pa程度<sup>3)</sup>の希薄ヘリウムガスを導入した。希薄ヘリウムガスは、冷凍機コールドヘッドや超電導コイルにより冷却され、冷熱がガス分子伝導で伝わることにより、超電導バルク体も冷却された。超電導コイルおよび超電導バルク体が十分に冷却された後、超電導コイルに通電すると、ゼロ磁場冷却された超電導バルク体には、完全反磁性により浮上力および案内力が発生した。浮上を確認後、クライオスタット外のトルク伝達装置および電動発電機を取付け、回転試験を実施した。なお、希薄ヘリウムガスによる冷却の効果を確かめるため、冷却中にヘリウム圧力の調整を数度行っている。

冷却時の温度変化の様子を、内槽内のヘリウム圧力とともに図12に示す。ステータ温度、ロータ温度はそれぞれ上部超電導磁気軸受の超電導コイル冷却板、超電導バ

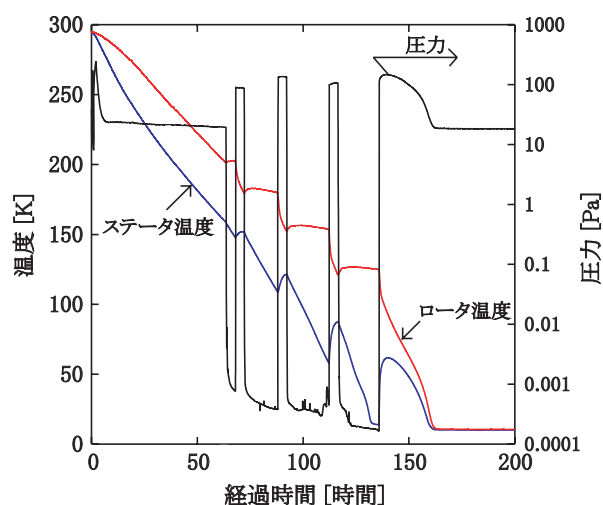


図12 冷凍機冷却検証試験装置の冷却試験結果

ルク体ホルダで測定した。内槽を $10^4$  Pa程度の高真空にするとステータとロータの温度は拡大し、10～100 Pa程度の圧力とすると両者の温度差は縮まった。このことから、希薄ヘリウムガス分子伝導によりロータ側を冷却可能であることが確かめられた。本装置では、超電導コイルは約10 K、超電導バルク体は約12 Kまで冷却可能であった。

なお、本装置では、超電導コイルおよび超電導バルク体が超電導転移温度以下になるのに長時間要している。これは、室温(約300 K)から極低温まで、冷凍機のみにより冷却しているためである。内槽に予冷配管を取付ければ、液体窒素を流すことで、77 K程度まで速やかに冷却できる。その後に冷凍機による冷却とすれば、短時間で冷却可能になると考えられる。

### 3.4 静荷重試験

静荷重試験は、超電導コイルと超電導バルク体間の電磁力のみを測定するため、電動発電機およびクライオスタット外のトルク伝達装置を取り外した状態で行った。浮上力はロータを支えるロードセルの出力の減少値により測定した。超電導コイルに通電した励磁電流と、浮上力の関係を図13に示す。150 A以下の範囲では、励磁電流のほぼ2乗に比例して浮上力が増加している。150 Aで約600 N、すなわちロータの重量と同じ力が発生し、150 A以上では浮上力が一定となっている。これは、ロータが浮上したためである。この浮上力の実験値は、軸方向の変位が-5 mmとして行った解析結果と非常によく一致した。ロータが浮上したことは、図5に示すクライオスタット内部を観察できるように設置した観察窓からも視覚的に確認した。

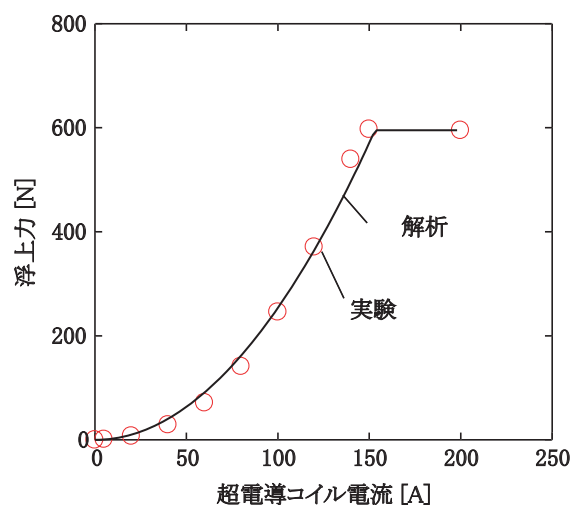


図13 冷凍機冷却検証試験装置における浮上力の実験および解析結果

特集：浮上式鉄道技術と在来鉄道への応用

3.5 回転試験

回転試験は、ロータを回転させるトルクを伝えるため、トルク伝達装置を設置して実験を行った。トルク伝達装置間の吸引力が約90 Nあるため、浮上力が約510 Nで浮上することになる。このため、ロータは約130 Aで浮上した。回転試験は余裕を見込み、通電電流135 Aで行った。500 rpm以上まで回転したときの試験結果を図14に示す。分解調査の結果、超電導コイルと超電導バルク体ホルダが接触することなく、回転していたことを確認した。

4. 結論

電気鉄道車両の回生絞込み対策用として、容量36 MJを一つの目標に冷凍機冷却型フライホイールの開発を行っている。ステータ側の超電導コイルとロータ側の超電導バルク体をともにクライオスタット内に配置した超電導磁気軸受でフライホイールを支持することを目指し、荷重・回転数検証試験装置および冷凍機冷却検証試験装置の2種類の試験装置で検証を行った。

荷重・回転数検証試験装置では、超電導磁気軸受で、36

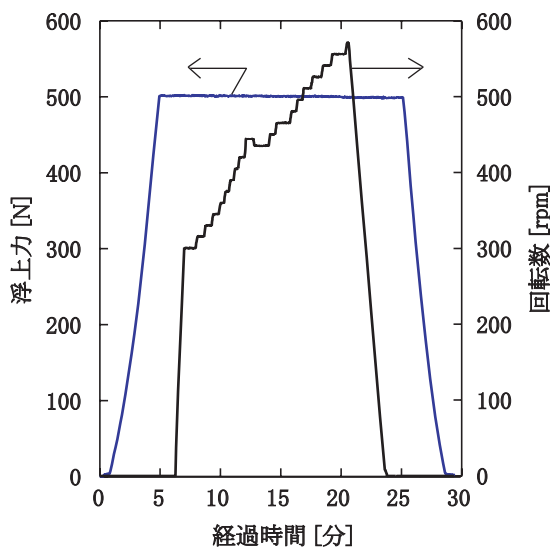


図14 冷凍機冷却検証試験装置における回転試験結果

MJの蓄積に必要な、20 kNの荷重を支持し、3000 rpmで回転可能であることを確認した。

冷凍機冷却検証試験装置については、数値解析により、超電導磁気軸受を設計し、装置を試作した。超電導磁気軸受は、高温超電導コイルと高温超電導バルク体を組合せて、これらをクライオスタット内に構成した。これを用い、浮上力・案内力が計算通りに発生し、安定浮上・回転することを確認した。結果として、高温超電導磁気軸受によって、フライホイールを完全非接触安定浮上が可能であることを実証した。

これら2つの装置で実証した知見を組合せることで、36 MJを蓄積できる、超電導磁気軸受を用いた冷凍機冷却型超電導フライホイール蓄電装置を構成できると考えられる。

今後は、極低温下にあるロータの変位・振動の定量評価、ロータダイナミクス解析などを行うことで、冷凍機冷却検証試験装置での回転速度向上ならびに大型化を実施していく予定である。

本研究の一部は国庫補助を受けて実施した。

文献

- 1) 玉置誠一, 飯島宏康, 真野辰哉, 小笠正道, 秦広: 営業電車における回生絞込みの実態把握, 日本機械学会第10回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, No.03-51, pp.299-300, 2003
- 2) 清野寛, 長嶋賢: 超電導技術を適用して磁気軸受を創る, Railway Research Review, Vol.64, No.12, pp.24-27, 2007
- 3) 清野寛, 長嶋賢, 田中芳親, 中内正彦: フライホイール用高温超電導バルク体の磁気軸受の基礎検討, 鉄道総研報告, Vol.22, No.11, pp.35-40, 2008
- 4) 清野寛, 長谷川均, 池田雅史, 長嶋賢, 村上雅人: 超電導磁気軸受と永久磁石磁気クラッチの電磁力解析と評価, 鉄道総研報告, Vol.24, No.1, pp.29-34, 2010
- 5) 広瀬誠, 磯野正幸, 小西弘恭, 那須秀俊: ラジアル型超電導磁気軸受におけるロータ降下の抑制, 低温工学, Vol.37, No.11, pp.712-717, 2002