

鉄道用フライホイールに適用する超電導磁気軸受の開発

浮上式鉄道技術研究部 低温システム研究室

研究員 荒井 有気

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、減速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、回生は絞り込まれるか失効してしまい、減速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）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、超電導の特性を活用して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¹⁾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²⁾。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³⁾に必要な蓄電容量 (36 MJ) を貯蔵することができる。

このような冷凍機冷却超電導フライホイールの実現のため、2 種類の試験装置を製作し、検証した。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

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、支持荷重に顕著な抜けは見られなかった。また、浮上位置の低下もわずかであった。

3. 冷凍機冷却検証試験装置

第 2 章により、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が確認されたため、次のステップとして、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に成功したので、以下に報告する。

3. 1 試験装置の概要

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 4 に、写真を図 5 に示す。

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

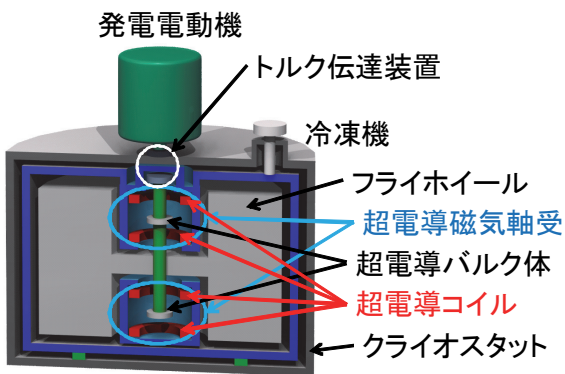


図 1 フライホイール蓄電装置概念図

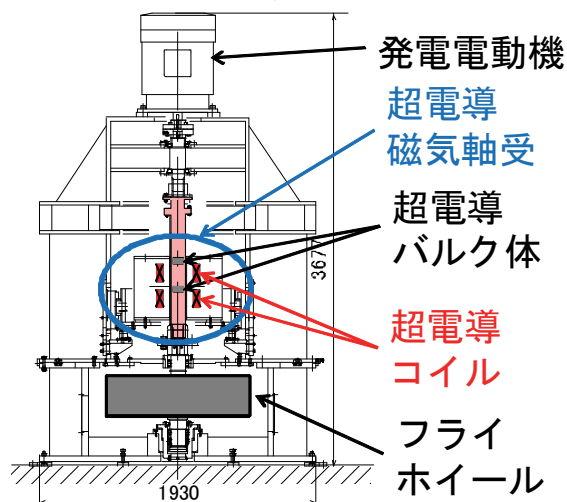


図 2 荷重・回転数を検証するフライホイール試験装置概略図

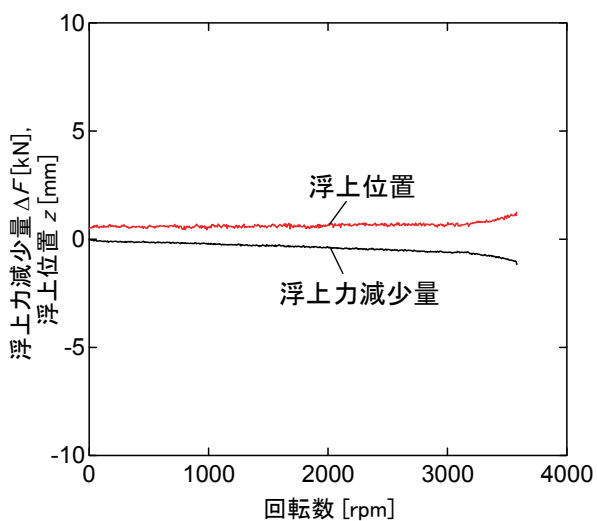


図 3 3600 rpm までの回転試験

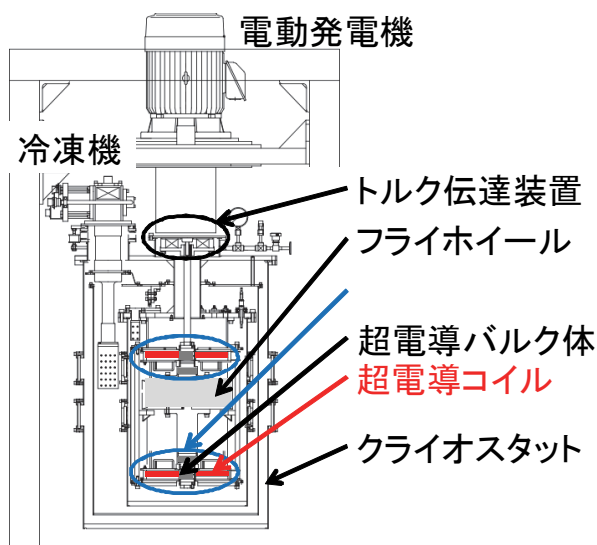


図 4 冷凍機冷却型超電導フライホイール試験装置概略図

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³⁾。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 52 kg のフライホイールを接続する。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 600 N である。また、トルク伝達装置同士の吸引力は約 90 N 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。その結果、図 6 の超電導コイルおよび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く、安定浮上可能であることがわかった。

3. 3 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結果、ロータの浮上を確認した。また、この浮上力の実験値は、解析結果と非常によく一致した。ロータが浮上している状態は、クライオスタット内部を観察できるように設置した窓からも視覚的に確認した。

3. 4 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 7 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触れ合うことなく、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と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、2 種類の試験装置で検証を行った。

一方の荷重・回転数検証試験装置では、超電導磁気軸受で、36 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。

他方の冷凍機冷却検証試験装置は、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

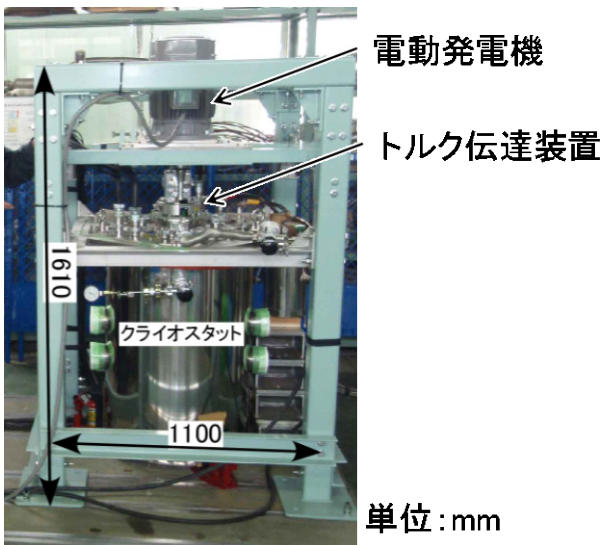
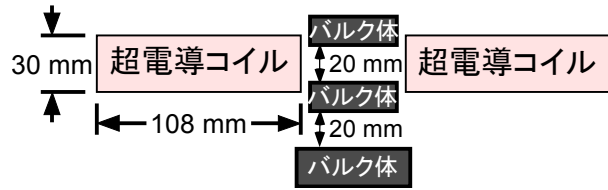
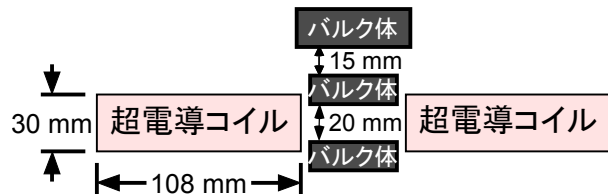


図5 冷凍機冷却型超電導フライホイール試験装置写真



(a) 上部超電導磁気軸受



(b) 下部超電導磁気軸受

図6 超電導コイルと超電導バルク体配置

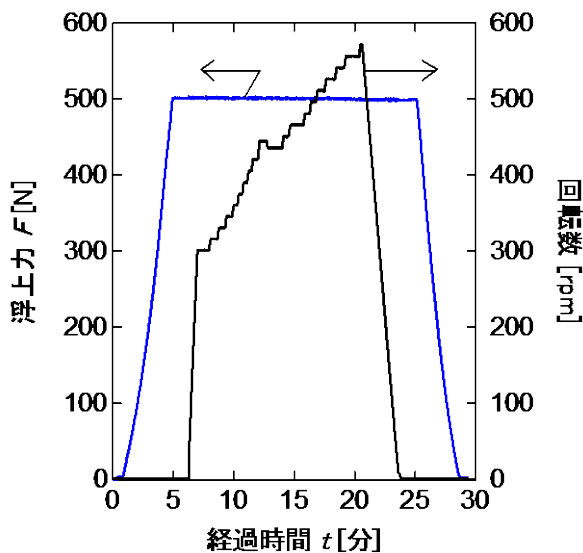


図7 冷凍機冷却型超電導フライホイール試験装置における回転試験結果