

## フライホイール蓄電装置用の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

副主任研究員 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、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の開発を行っている。余剰の電気エネルギーによりモータを駆動し、フライホイールの回転数を上昇させることで、回転エネルギーとして蓄えておく。一方、付近の列車の力行時など電力が必要な時には、モータを発電機として用い、フライホイールの回転から電力エネルギーを取り出す。これを連続して行うのがフライホイール蓄電装置である。このため、蓄電できる容量は、フライホイールの慣性質量（イナーシャ）に比例し、最高回転数の2乗に比例する。

従来のフライホイール蓄電装置では、主に機械軸受や制御型磁気軸受でフライホイールを含む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蓄電装置に適用し、非接触で大荷重を支持する構造を提案し、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<sup>1)</sup>から、最低でも36 MJ (10 kWh) 以上と見積もった。

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同一の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

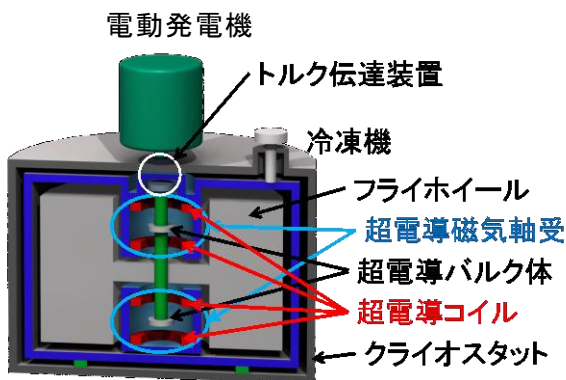


図1 フライホイール蓄電装置概念図

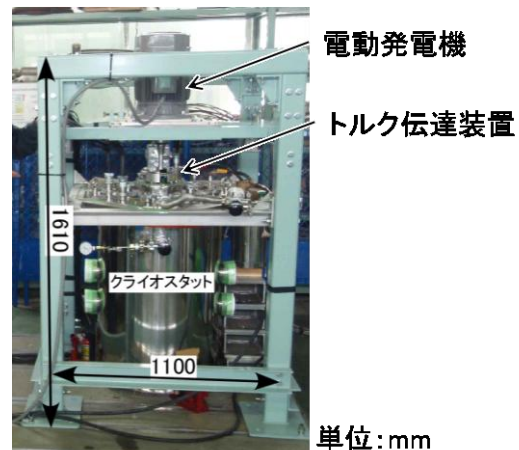


図2 小型試験装置外観写真

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>。

なお、フライホイールの質量は2000 kg程度、ロータの回転数は3000 min<sup>-1</sup>程度<sup>3)</sup>で電鉄に必要な蓄電容量規模(36 MJ)を貯蔵することができる。

これまでに、超電導磁気軸受の要素試験による2000 kgフライホイールの浮上・3600 min<sup>-1</sup>までの回転および上記構成を有する小型試験装置による約500 min<sup>-1</sup>までの完全非接触浮上・回転を確認してきている<sup>4)</sup>。今回、小型試験装置では、速度向上を行い、3000 min<sup>-1</sup>までの回転を行った。また、2000 kgに相当する荷重である20 kN以上の電磁力を発生させる高温超電導磁気軸受を製作し、この発生電磁力下での完全非接触浮上・回転を確認したので報告する。

## 2. 試験

### 2. 1 小型試験装置の概要

これまでに製作した小型試験装置は、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であり、超電導磁気軸受による完全非接触浮上およびトルク伝達装置による非接触駆動ならびに非接触超電導部分のガス伝導冷却などを検証した<sup>4)</sup>。外観および内部の写真をそれぞれ図2, 3に示す。本報告では、フライホイールはSUS製、約5.2 kgのものを用いている。ロータを浮上させていないときは、フライホイールをロードセルで支持している。

### 2. 2 小型試験装置での3000 min<sup>-1</sup>回転試験

クライオスタット内部を冷却後、超電導コイルに通電し、浮上を確認した後、3000 min<sup>-1</sup>までの回転を実施した。3000 min<sup>-1</sup>到達後は、回転を停止し、超電導コイルを消磁し、ロータが着地することを確認した。ロータが浮上していないときに支えるロードセル出力の減少分を浮上力として測定した。浮上回転試験時の超電導コイル電流、浮上力、回転数の時間変化を図4に示す。まず上下の超電導コイルに通電すると、ロードセル出力が減少し、浮上力が発生した。電流を上げていくと浮上力も増加し、ロータ荷重からトルク伝達装置の吸引力を引いた値と一致すると、それ以上増加しなくなった。これはロータが浮上したことを示す。浮上した直後に電流を一定に

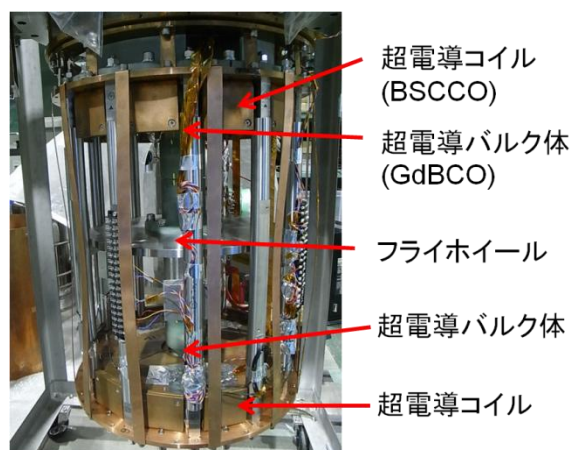


図3 小型試験装置内部写真

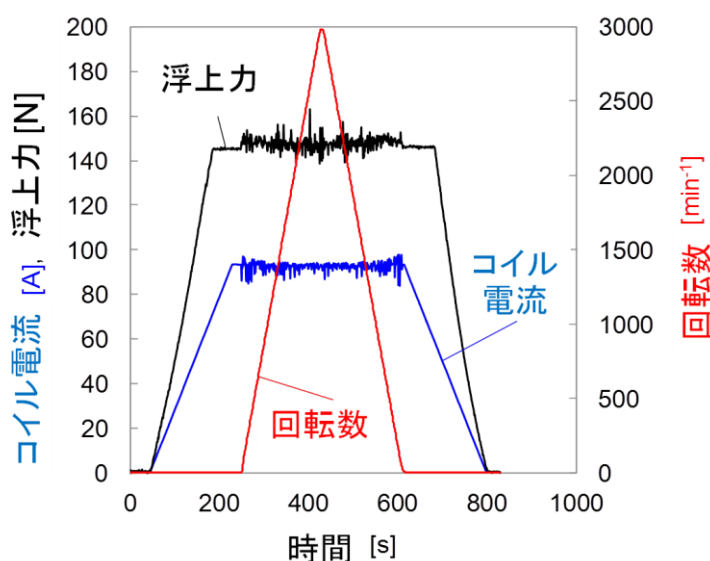


図4 小型試験装置回転試験結果

保持し、回転試験を行った。回転試験は、クライオスタット外にあるトルク伝達装置を誘導電動発電機で駆動することで、クライオスタット内のロータを非接触で回転させた。回転数はクライオスタット外のトルク伝達装置を、レーザ式回転計で測定した。クライオスタット内のロータが同期して回転していることは、観測窓を通してレーザ変位計でロータ変位を計測し、変位の変化する周期が回転数による周期と一致することで確認した。この結果、ロータが低次の共振点を越え、最終的な目標回転数である  $3000 \text{ min}^{-1}$  で回転することに成功した。

## 2. 3 実規模試験装置の概要

今回製作した実規模試験装置は、電鉄向けに必要なと試算された  $20 \text{ kN}$  以上の電磁力を発生させるように超電導磁気軸受を大型化したものである。構成はほぼ図 1 に基づくが、回転試験を容易にするため、フライホイールは省略した。装置概略図および外観写真をそれぞれ図 5, 6 に示す。本試験装置の構成では超電導磁気軸受を上下に 1 組ずつ、向かい合わせて配置する。このため、大質量のフライホイールが無くとも、大きな電磁力を発生しつつ、浮上・回転試験を実施可能である。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、 $20 \text{ kN}$  以上の電磁力を発生できるように製作した。また、発生電磁力を超電導コイルにはたらく力として測定するため、ロードセルを配置した。

いずれの装置も、ステータ側はビスマス系 (BSCCO) 線材による超電導コイル、ロータ側は希土類系 (GdBCO) 超電導バルク体を用いている。

## 2. 4 実規模試験装置での静荷重試験・回転試験

クライオスタット内を冷却した後、超電導コイルに通電し、静荷重試験を行った。発生電磁力は超電導コイルが受ける超電導バルク体からの反力をロードセルで測定した。図 7 に静荷重試験での超電導コイル電流と発生電磁力の関係を示す。最大  $60 \text{ kN}$  を発生し、鉄道規模以上の荷重を確認した。また、この状態では完全非接触浮上しており、トルク伝達装置を用いた完全非接触での回転試験を行った。 $2000 \text{ min}^{-1}$  での回転試験結果を図 8 に示す。レーザ変位計で測定した浮上高さに大きな変化が無く、安定して非接触浮上・駆動が可能であることを確認した。

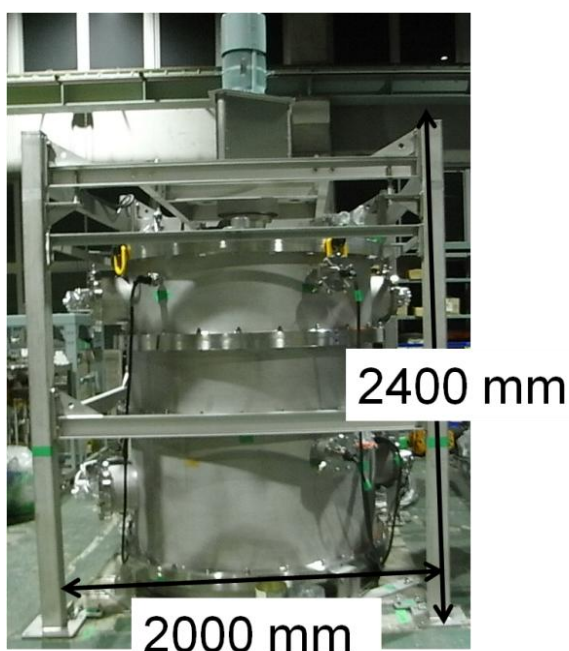


図 5 実規模試験装置外観写真

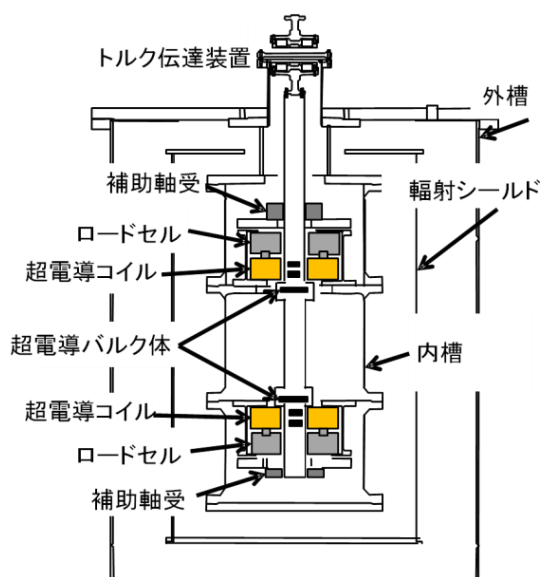


図 6 実規模試験装置概念図

### 3. 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蓄電装置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。

一方の小型試験装置では、小規模ながら、フライホイールを完全非接触安定浮上が可能であり、目標となる  $3000 \text{ min}^{-1}$  の完全非接触駆動を実証した。他方、実規模試験装置では、電鉄向けに必要なと試算される 20 kN を大きく超える 60 kN 以上の電磁力を発生可能なことを実証するとともに、完全非接触安定浮上・駆動についても成功している。

これら 2 つの装置で実証した知見を組み合わせることで、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。

本研究の一部は国土交通省の技術開発費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) 荒井有気: 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, 第253回鉄道総研月例発表会講演要旨, 2012

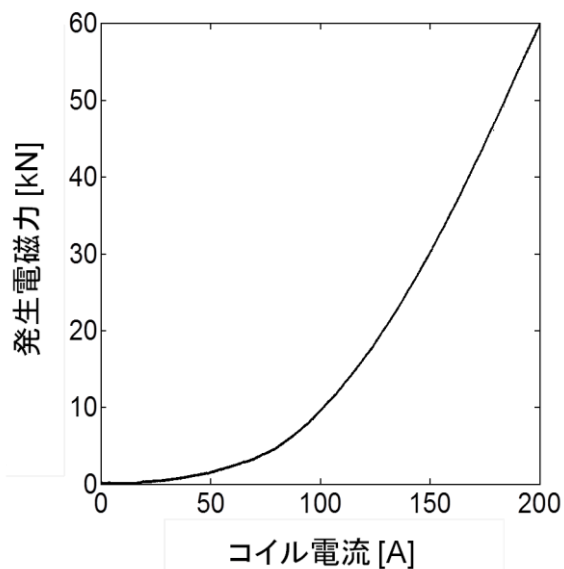


図 7 実規模試験装置静荷重試験結果

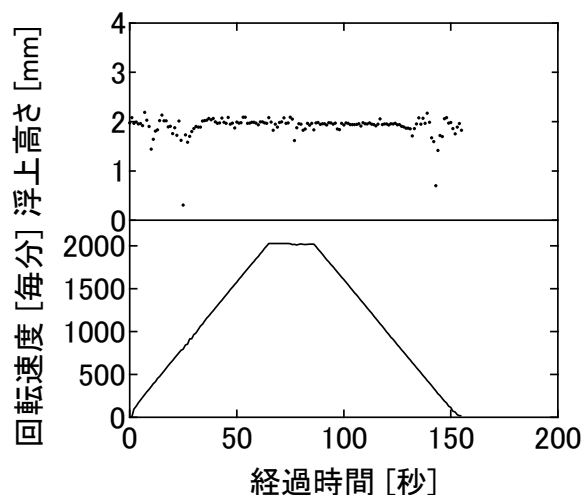


図 8 実規模試験装置回転試験結果