

超電導技術を適用して 磁気軸受を創る

清野 寛

浮上式鉄道技術研究部(低温システム 主任研究員)

長嶋 賢

同(同 主任研究員)



せいの ひろし



ながしま けん

はじめに

鉄道は他の輸送機関と比べてエネルギー効率がよく、省エネルギーに優れていることから、地球温暖化につながる指標としてのCO₂排出量に関しては優等生として評価されています。しかしながら、地球温暖化対策の必要性が常識化されつつある近年、更なるCO₂排出量の削減を目指す動きがあります。電力、駆動関連機器の高効率化はもちろんのこと、燃料電池をエネルギー源とした電車の開発等がその代表例です。また、電力貯蔵技術を導入して、電車が制動する際の運動エネルギーを電力として架線に戻す回生ブレーキを効率良く利用することも検討されています。この電力貯蔵媒体のひとつに、フライホイール蓄電装置があります。これは、回転する弾み車(フライホイール)の運動エネルギーとして電力を蓄積する装置です。このフライホイールの回転体支持に超電導技術を適用する開発を進めています。以下にさまざまな超電導磁気軸受の開発について概説し、鉄道総研が進めている超電導磁気軸受の開発を紹介します。

さまざまな超電導磁気軸受の開発

磁気軸受とは、従来のすべり軸受や、転がり軸受などのように機械的に回転体を支持するのではなく、電磁石や永

久磁石、磁性材間に働く電磁気力によって回転体を支持するものです。この磁気軸受の磁場発生源に超電導線材の巻線で作ったコイル(超電導コイル)を適用したり、液体窒素で冷却することで超電導特性を発揮する超電導バルク体(単結晶と同等の超電導特性を有する高温超電導材料の固まり)と永久磁石を組み合わせ、磁気支持したりする方法が試みられています。これらを総称して超電導磁気軸受と呼んでいます。

超電導磁気軸受は、おもにフライホイール蓄電装置の回転体支持軸受として開発されています。適用の目的は、運転時のベアリング部分での摩擦損失を無くして高効率化を図ることと、ベアリングの省メンテナンスにあります。表1に主な超電導磁気軸受の開発実績と、適用フライホイールの諸元を示します。日本では、NEDO(独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構)の委託を受けて、企業や研究機関が開発を実施しています。

2000年から2004年までの5カ年間では、蓄積エネルギー5kWh、最大出力15kWのフライホイール蓄電装置の開発が行われました¹⁾。質量425kgのフライホイールを最高回転速度11250rpmで回転させることで、所定のエネルギー量を蓄積しています。この開発では、超電導バルク体と永久

表1 さまざまな超電導磁気軸受の開発実績

		四国総研, IHI, ISTECH他*		JR東海*		Boeing		Adelwitz Technologiezentrum, Magnet-Motor	
		ロータ	ステータ	ロータ	ステータ	ロータ	ステータ	ロータ	ステータ
超電導 磁気 軸受	構成	永久磁石	超電導バルク体	磁性材	超電導コイル	永久磁石	超電導バルク体	永久磁石	超電導バルク体
	適用形態	スラスト+ラジアル		スラスト軸受		ラジアル軸受		スラスト+ラジアル	
	補助軸受	制御型ラジアル磁気軸受							
	備考	超電導バルク体は液体窒素で冷却		冷凍機冷却型超電導コイル		超電導バルク体は液体窒素で冷却		超電導バルク体は冷凍機で50-60Kに冷却	
フライ ホイール	質量(kg)	425		25000		164		500	
	最高回転速度(rpm)	11250		2000		15000		10000	
	エネルギー容量(kWh)	5		50		5		5	
	最大出力(kW)	15		1000		100		250	

(スラスト軸受：軸方向の荷重を支持する軸受, ラジアル軸受：径方向の荷重を支持する軸受)

*: NEDOの委託で実施。

磁石を組み合わせた超電導磁気軸受をスラスト軸受として使用しています。通常の磁気軸受では、それだけでは安定した支持ができないため、磁気軸受の支持方向以外の自由度を拘束する補助的な軸受が必要になります。しかしながら、超電導バルク体を使用した超電導磁気軸受では、超電導バルク体によるピン止め効果でラジアル方向の安定性も確保することができます。なお、超電導バルク体は液体窒素で冷却されています。この超電導磁気軸受でのラジアル方向支持に加えて、永久磁石と組み合わせた電磁石を制御する制御型のラジアル方向磁気軸受を採用することで回転体を高速で回転させることができました。

また、2005年度からの3年計画では、NEDOの委託を受けたJR東海が、蓄積エネルギー50kWh、最大出力1000kWの仕様で超電導磁気軸受を適用したフライホイール蓄電装置の開発を進めています²⁾。質量25tのフライホイールを最高回転速度2000rpmで回転させることで所定のエネルギーを蓄積する計画です。ステータに超電導コイルを用い、ロータ側の磁性材との吸引力で回転体を浮上させる超電導軸受をスラスト軸受として適用し、電磁石と永久磁石を組み合わせた制御型の磁気軸受でラジアル方向を安定化させる支持方法が採用されています。この超電導磁気軸受は、磁性材との吸引力を利用するシンプルな構造を採用している反面、通常の磁気軸受と同様にこれだけでは安定しないことから、ラジアル方向に制御型磁気軸受を併用する構成となっています。

一方、海外では米国とドイツで超電導磁気軸受を適用したフライホイール蓄電装置の開発が進められています。米国のBoeing社では、質量164kgのフライホイールを15000rpmで回転させて蓄積エネルギー5kWh、最大出力100kWを発揮する装置を開発しています³⁾。永久磁石の吸引力で回転体を浮上させて、超電導バルク体と永久磁石を組み合わせた超電導磁気軸受で浮上力の安定性を確保するとともに、ラジアル方向の支持を行っています。超電導バルク体は液体窒素で冷却しています。ドイツではAdelwitz Technologiezentrum社とMagnet-Motor社が協同で開発を行っています。この開発では、超電導バルク体と永久磁石を組み合わせた超電導磁気軸受で、フライホイールのスラスト方向とラジアル方向の双方向の支持を行い、回転軸の周上に二重に配置した永久磁石同士の反発力で回転軸のラジアル方向を支持しています⁴⁾。超電導バルク体は冷凍機で50～60Kに冷却されています。およそ500kgのフライホイールを最高回転速度10000rpmで回転

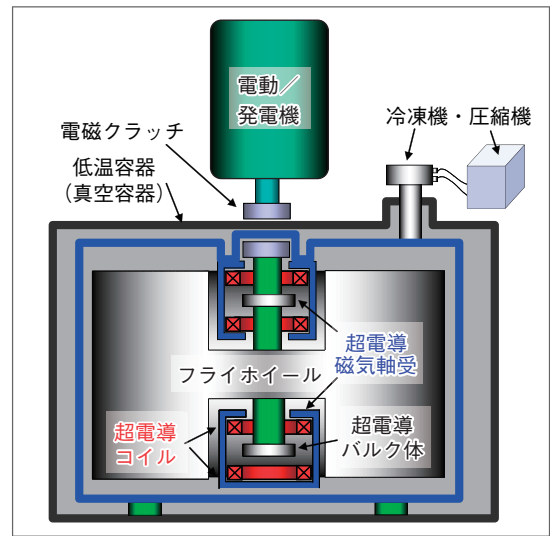


図1 超電導磁気軸受を使用したフライホイール (イメージ図)

させて、蓄積エネルギー5kWh、最大出力250kWを目指しています。

鉄道総研における超電導磁気軸受の開発

さきに紹介したように従来の超電導磁気軸受の開発では、永久磁石と超電導バルク体との組み合わせや、超電導コイルと磁性材の組み合わせが採用されています。しかしながら、これらの組み合わせでは永久磁石の磁化限界や、磁性材の飽和磁束のために、超電導バルク体に印加する磁場が限定されてしまいます。このため、永久磁石の数倍の磁場を発生できる超電導コイルや、高磁場においても高い磁気作用を発揮できる高温超電導バルク体を使用しても、永久磁石の磁化や鉄の飽和磁界までの能力で装置を使用することになります。この限界を超えるために、超電導バルク体と超電導コイルを組み合わせた磁気軸受を開発することにしました。鉄道用の電力貯蔵用フライホイールの支持軸受に適用することを目標としています。鉄道用フライホイールとしては、回生ブレーキの高効率利用、高度に情報化する列車運行・駅間情報伝達システムへ高品質、高信頼度の電源供給などの用途が挙げられます。

図1に超電導バルク体と超電導コイルを組み合わせた磁気軸受を適用した電力貯蔵用フライホイールのイメージを示します。フライホイールは低温容器の真空中に配置し、冷凍機によって極低温に冷却された超電導磁気軸受で支持されます。フライホイールへのエネルギー授受は低温容器を介して、非接触で伝達することを検討しています。

超電導同士で構成する超電導磁気軸受の特性

磁場中に置いた超電導バルク体が発生する電磁力は、超電導バルク体の形状と、バルク体の置かれた空間の磁場の

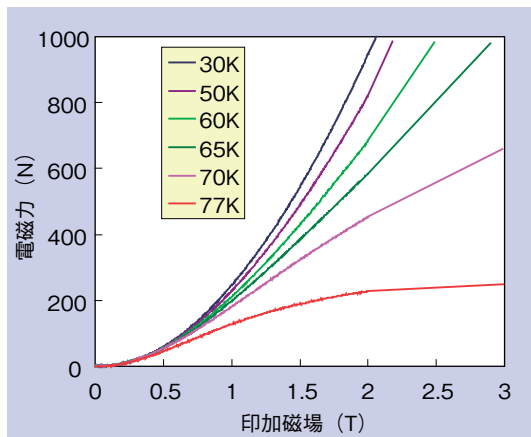


図2 超電導同士で構成した磁気軸受の基本特性

表2 試作した超電導磁気軸受

ロータ		ステータ	
超電導バルク体		超電導コイル	
材質	Gd-Ba-Cu-O系	材質	Nb-Ti
形状	直径(φ) 60mm × 厚さ(t) 20mm	形状	カスプ磁場, 室温ボア径 φ 120mm
冷却	液体窒素 (77K)	冷却	冷凍機 (4K)
数量	2	磁場	5T (Max)

大きさ、その磁場の変化率の関数として表されます⁵⁾。従って、磁場が大きくなるほど、また、位置が変化したときに磁場の変化が大きいのほど電磁力が大きくなります。超電導バルク体の形状によって決定される因子には、バルク体に流れる超電導シールド電流も関係していることから、超電導材料の臨界電流密度に影響を受けます。このため、バルク体の温度を低くすればするほど、臨界電流が大きくなり、磁場を変更しなくとも大きな電磁力を得ることができます。

図2に超電導コイルの発生する磁場中にY-Ba-Cu-O系超電導バルク体を置いた時の電磁力測定試験の結果を示します。この図は、超電導コイルの発生する磁場(=印加磁場)と超電導バルク体が発生する電磁力をバルク体の冷却温度別にプロットしたものです。

温度を一定とすれば、印加磁場を大きくすることで、発生電磁力が大きくなります。また、印加磁場を一定とすれば、温度を下げるほど電磁力が大きくなるのがわかります。ちなみに、77Kにおいて、2T以上の磁場で電磁力にほとんど変化が見られないのは先述の臨界電流密度の影響です。

超電導同士で構成する超電導磁気軸受の開発

超電導バルク体と超電導コイルを組み合わせて磁気軸受を構成する場合、回転体側にも冷却が必要になるため、回転体をどうやって冷却するかといった課題が発生します。このため、開発の第一段階では、液体窒素で冷却した超電導バルク体を回転体側に配置し、固定側に超電導コイルを

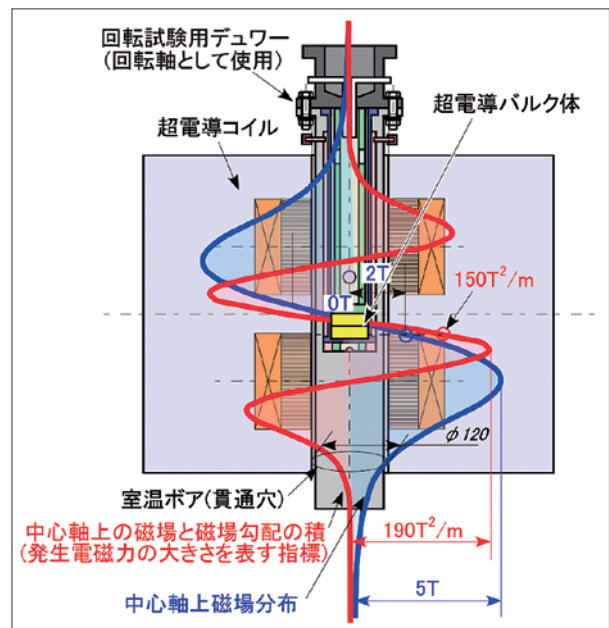


図3 超電導磁気軸受の構成

配置する構成を採用し、これをスラスト軸受に適用しました。試作した磁気軸受の形状、材質などを表2に示します。また、超電導磁気軸受の構成を図3に示します。

超電導バルク体はGd-Ba-Cu-O系材料で、直径60mm、厚さ20mmの研究用として比較的容易に入手できるもの(新日本製鐵製QMG®)を使用しています。この超電導バルク体をロータ側に配置するため、回転可能な液体窒素用真空断熱容器(=回転試験用デューワ)を開発しました。これは、回転軸を中グリして、その中に真空層を挟んで、液体窒素槽を取り付けたものです。この液体窒素槽の中に超電導バルク体を入れます。超電導バルク体が発生するスラスト荷重(=浮上力)は荷重支持材、回転軸のフランジ部分を介して最外殻の回転軸強度部材に伝達され、軸全体を持ち上げる構造になっています。

さて、次に超電導コイルについて説明します。超電導バルク体の冷却手段を液体窒素による冷却として、形状を固定したことから、残るパラメータは磁場および磁場勾配ということになります。さらに、液体窒素温度(77K)では臨界電流密度が限定されるため、バルク体に印加する磁場を極端に大きくできないといった制約が加わります。従って、軸受の荷重容量を大きくするために最終的に残ったパラメータは磁場勾配ということになります。そこで、巻線コイルの形状および配置を工夫して、液体窒素冷却の超電導バルク体に理想的な磁場勾配を提供する超電導コイルを開発しました。超電導コイルは、高い磁場勾配を有する磁場空間を提供するとともに、そこに超電導バルク体を置いて大きな電磁力を発生させることができるように10kNの上下方向耐荷重を有しています。

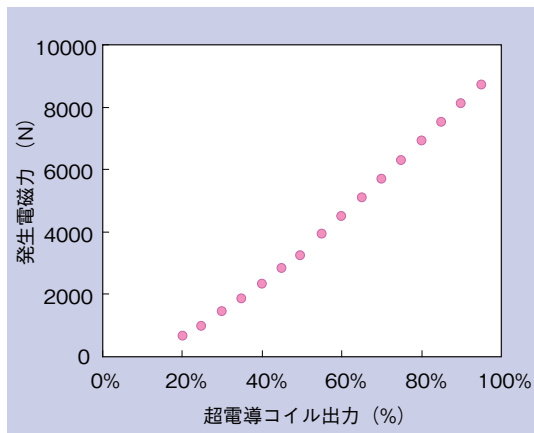


図4 超電導磁気軸受の静荷重試験結果

内部には2個の巻線コイルが上下に直列に配置されており、それぞれを異極励磁するカスプ配置となっています。これによって、2つのコイルの中央部にゼロ磁場空間が発生し、2個の巻線コイルの中央部より上下に少し距離をおいたところで、磁場勾配が最大となる部分ができます。この部分に超電導バルク体を配置することで、大きな電磁力が発生します。また、この超電導コイルは、外部への漏洩磁束が小さいという特徴もあります⁶⁾。従って、超電導コイルの周囲に磁性材の部品を配置することが可能になり、応用展開を考えた場合のコスト低減を図ることができます。

超電導コイルの中央部には直径120mmの貫通穴(=室温ポア)が空いています。上下方向の長さはおおよそ500mmで、この間に磁場の大きさが0~5T、また発生する電磁力の指標となる磁場と磁場勾配の積は0~190T²/mまで変化します。この室温空間にロータとなる回転試験用デューワーを挿入して、超電導磁気軸受を構成します。

超電導同士で構成する超電導磁気軸受の静荷重容量

次に、超電導バルク体と超電導コイルを組み合わせた超電導磁気軸受の性能について紹介します。図4は、超電導磁気軸受の静荷重試験の結果です。試験では、おおよそ8900Nの浮上力が発生することを確認できました。

従来の液体窒素冷却の超電導バルク体と永久磁石で構成されるスラスト型超電導磁気軸受の単位面積あたりの荷重容量は100kN/m²程度⁷⁾でした。これに対して、今回開発した超電導磁気軸受の荷重容量を、超電導バルク体のシールド電流の流れる側面の面積(=188.5mm×40mm)で考えると、従来の10倍以上となります。先に紹介したように、超電導バルク体の温度を下げると、特性は飛躍的に向上するので、超電導同士で磁気軸受を構成した場合の能力向上には大いに期待できます。

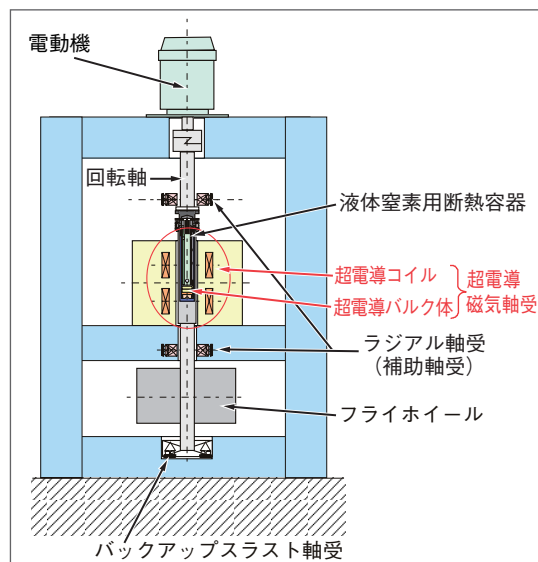


図5 超電導磁気軸受回転試験のイメージ

おわりに

鉄道総研では、2005年度から超電導同士で構成する新しい超電導磁気軸受の研究・開発を進めてきました。現在は基本的な性能評価や、静荷重試験を終えた段階です。それでも、従来の超電導磁気軸受を越える大きな荷重容量を確認することができました。

次のステップでは500kgの回転体を支持して、軸受の回転特性を確認する試験を予定しています。試験装置では図5に示すように、補助的な軸受を併用していますが、超電導磁気軸受のみで回転体を支持することを目指して、研究開発を進めています。また、軸受の特性を向上するために、冷凍機を使って超電導バルク体を液体窒素温度(77K)以下に冷却するための研究開発も平行して進めています。図1で紹介したフライホイールのイメージにどれだけ近づけられるか、今後の研究・開発成果にご期待下さい。

本研究の一部は、国土交通省の国庫補助金を受けて実施しています。RRR

文献

- 1) 腰塚直巳, 電気評論, 第91巻第12号, pp.32-35, 2006
- 2) 内山順仁, 電気評論, 第91巻第12号, pp.36-39, 2006
- 3) Strasik, M. et al., IEE transaction on Applied Superconductivity, Vol.17 Issue:2 Part2, p.2133-2137
- 4) Frank Werfel et al., Proceedings of 8th European Conference on Applied Superconductivity, under printing, Brussels, Belgium, Sep. 2007
- 5) 長嶋賢 他, 鉄道総研報告, Vol. 21, No.9, pp.29-34, 2007
- 6) 荒井有気 他, 第19回「電磁力関連ダイナミクス」シンポジウム講演論文集, pp.372-373, 東京, 2007年5月
- 7) N, Koshizuka et al., Physica C, Vol. 412-414, pp.756-760