

## 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

清野 寛\* 長谷川 均\* 池田 雅史\*\*  
長嶋 賢\* 村上 雅人\*\*\*

**Numerical Analysis and Evaluation of Electromagnetic Forces in Superconducting  
Magnetic Bearings and Non-contact Permanent Magnetic Clutch**

Hiroshi SEINO Hitoshi HASEGAWA Masashi IKEDA  
Ken NAGASHIMA Masato MURAKAMI

The RTRI is developing a superconducting magnetic bearing and a non-contact permanent magnetic clutch applicable to the flywheel energy storage system for railways. In this paper, the electromagnetic force analyses method concerning the superconducting magnetic bearings and the permanent magnetic clutch under development are reported. In the electromagnetic force analysis, the electromagnetic force that is generated in the superconducting magnetic bearings and the non-contact permanent magnetic clutches were estimated based on the magnetic field distribution obtained by the numerical analysis. Then, the validity of the analysis was evaluated by comparing them with the outcome of an experiment. The analytical results well correspond to the outcome of the experiment. It was confirmed that this analysis method is effective for estimation of electromagnetic force of electromagnetic equipment containing the bulk superconductor, and is applicable to the designing.

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

(財)鉄道総合技術研究所ではフライホイール蓄電装置に適用する超電導磁気軸受の研究開発を行っている<sup>1)</sup>。超電導技術を適用した軸受で、軸受部分のメンテナンス性を向上するとともに、運転効率の向上を図ることを目指している。

本報告では、この研究開発における超電導磁気軸受と、要素技術として開発している永久磁石磁気クラッチに関する電磁力解析について報告する。

超電導磁気軸受はロータに超電導バルク体、ステータに超電導コイルを適用したもので、両者を超電導化することで荷重容量の大きな超電導磁気軸受ができる<sup>2)</sup>。また、永久磁石磁気クラッチは、クライオスタット内に配置したフライホイールと外部の電動・発電機とのエネルギー授受を行う要素部品であり、クライオスタット容器を介して非接触でトルクを伝達するものである<sup>3)</sup>。

電磁力解析では、磁界分布を解析から求めて、発生電磁力を予測した。また、それらを実験結果と比較することで、解析の妥当性を評価した。そのうえで、磁気軸受およびクラッチの応用形態を解析により検討し、その電磁力特性を予測した。

\* 浮上式鉄道技術研究部（低温システム）

\*\* 芝浦工業大学大学院

\*\*\* 芝浦工業大学

## 2. 電磁力解析の手法

電磁力解析には、3次元非線形動磁場解析ソフトウェアELF/MAGICを用いた。ELF/MAGICは、マックスウェル方程式の積分形を解く積分要素法を用いており、磁気モーメント法、表面磁荷法、表面電流法、ネットワーク法を組み合わせ精度を向上している。メッシュ分割は物質のみで空間メッシュが不要であること、磁性体のメッシュを粗く分割できること、境界条件が不要であるといった利点がある。

## 3. 超電導磁気軸受の電磁力解析と評価

### 3.1 試験用超電導磁気軸受

本研究では、超電導磁気軸受の実用性を確認するために、実用に供す規模の荷重支持能力を有する試験用超電導軸受を開発した。研究開発の第一段階では、液体窒素冷却した超電導バルク体を回転体側に配置し、固定側に超電導磁石を配置する構成を採用し、これをスラスト軸受に適用した。超電導磁石のコイル巻線には、臨界温度10KのNb-Ti超電導体を使用している。静荷重で10kNの荷重容量を確認した後、5kNのスラスト荷重負荷で3000rpmまでの回転試験を実施している。引き続き、スラスト荷重を実用的なレベルである20kNまで引き上げること为目标として、開発を継続している。この試験用

特集：浮上式鉄道技術とその応用

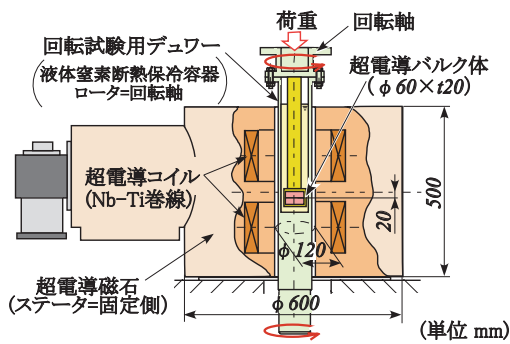


図1 試験用超電導磁気軸受

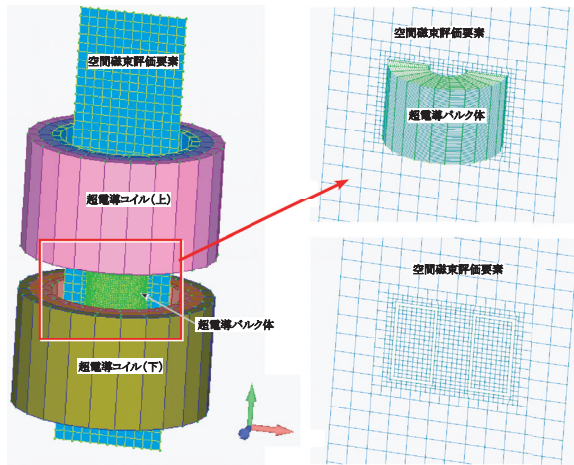


図2 解析モデル例

表1 モデル要素一覧

モデリング対象	要素種別
超電導コイル	電流要素
超電導バルク体	ループ電流要素
応力評価面	マクスウェル応力評価要素
空間磁場評価	空間磁場評価要素

超電導磁気軸受に関する電磁力解析について報告する。

図1に試験用超電導磁気軸受の模式図を示す。超電導バルク体は、上下に配置した超電導コイルの中心位置より20mm下がった位置に配置している。超電導磁石は、直列に配置した2個のコイルを有しており、これらを異極に励磁することで、カスプ磁場を発生させる。定格起磁力は1032Aである。図2、表1に解析モデルと使用したモデル要素種別をそれぞれ示す。図2の右側には、バルク体周囲および内側の磁束評価面部分を拡大して示す。ディスク形状とリング形状の2種類の超電導バルク体で計算を実施した。また、表2、図3に今回の解析でモデル化したバルク体の形状一覧と超電導バルク体のモデル例(ディスク形状)を示す。

超電導バルク体には、4本の線分電流によって構成されるループ電流で要素の中心位置の磁場をゼロまたは指定した値に定義できる要素を適用した。超電導バルク体要素の外側を応力評価面で囲って、バルク体の遮蔽電流によって生じる電磁力を計算した。図4に磁界分布の計算例を示す。コイルのみで通電した時(同図左)、リング

表2 超電導バルク体形状一覧

対象モデル	超電導バルク体			応力評価面		
	外直径 (mm)	内直径 (mm)	厚み (mm)	外直径 (mm)	内直径 (mm)	厚み (mm)
ディスク形状	60	-	40	66	-	44
リング形状	60	20	40	66	18	44
高荷重化対応 (ディスク&リング)	80	(30)	40	88	(18)	44

※高荷重化対応 ( ) 内数字はリング形状のもの

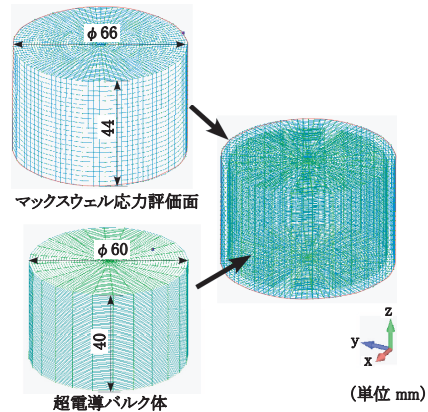


図3 解析モデル例 (ディスク形状)

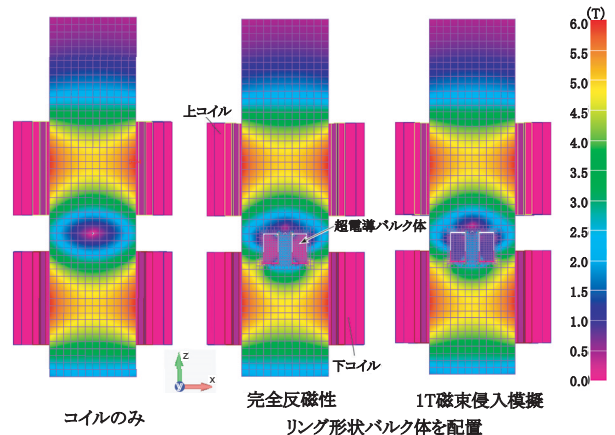


図4 磁界分布計算例

形状バルク体モデルをコイル内に挿入した時を比較したもので、バルク体は完全反磁性(中央)と1Tの磁束侵入を模擬している(右)。

バルク体上下面の内径エッジ部の一部に磁束変化が見られるが、これはミクロンレベルピンホールの影響である。ループ電流要素で閉空間を作ると計算が収束しないため、ピンホールを設けている。磁界分布から、バルク体モデルの表面で反磁性もしくは設定した磁束(1T)が保持できていることが確認できる。

図5に解析結果と静荷重測定実験結果の比較<sup>4)</sup>を示す。横軸は超電導磁石の定格起磁力を100%として表示している。リング形状のバルク体ではコイル出力が70%を超えたところで実験値と解析結果に乖離が見られるものの、ディスク形状バルク体では、実験結果と解析結果がよく一致している。リング形状バルク体では、バルク体の置かれた磁場が大きくなるに連れて磁束の侵入が大

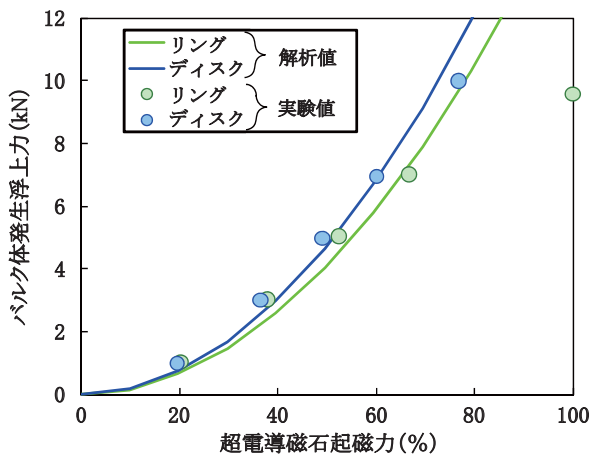


図5 バルク体の発生電磁力（解析と実験値比較）

きくなり、印加磁場の上昇に伴う浮上力の上昇率が低下したことが推測できる。また、ディスク形状の場合は、超電導コイル出力が60%を超えない、つまりバルク位置の最大磁場が2Tを超えない領域でほぼ完全な反磁性状態が保持できているものと推測できる。

リング形状バルク体の磁束侵入量について、実験結果の発生浮上力に見合うだけの侵入量を解析で同定してプロットした結果を図6に示す。コイル出力70%程度より徐々に磁束侵入が始まり、定格磁界（100%）下では0.3～0.5T程度の磁束が侵入していたものと推測できる。

次に、実用荷重までの特性向上を目的とした高荷重化改良の効果を見積もった。表2に示した“高荷重化対応バルク体”を4個使用する。z=-20mmの位置にディスク形状のバルク体を、またz=190mmの位置にリング形状バルク体を配置した(z=0は超電導コイル間の上下中心位置)。

直径60mmバルク体を適用した超電導磁気軸受（改良前）と、直径80mmのバルク体を2箇所配置した磁気軸受（改良後）の発生電磁力解析結果の比較と、改良後の実験結果<sup>5)</sup>を図7に示す。解析では改良を実施することで、57%起磁力で目標とする20kNが得られる見込みであった。しかしな

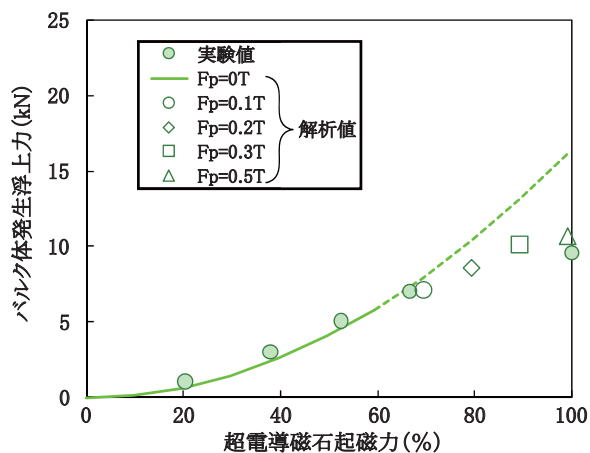


図6 バルク体への磁束侵入模擬（実験値との比較）

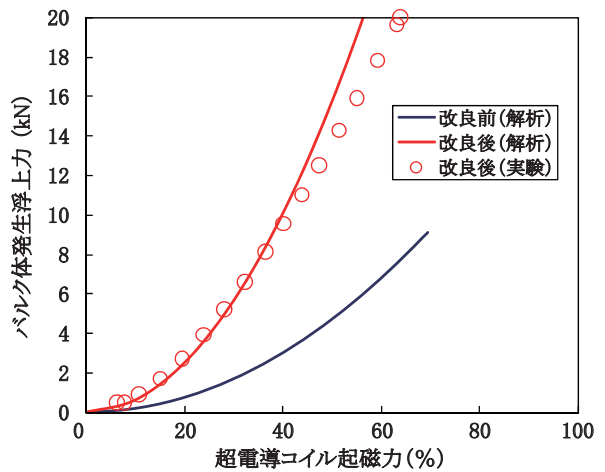


図7 改良磁気軸受の能力試算と実験値との比較

がら、実験では、コイル磁気力40%を超えたあたりから発生電磁力が解析より低めに推移し、起磁力64%で20kNが発生した。65K冷却の実験結果では解析と実験値がほぼ一致していることから、これは、磁束侵入の影響であると考えられる。

解析結果は、実験結果とよく一致しており、磁束侵入の影響を考慮することで、より正確な電磁力予測が可能となることが確認できた。

### 3.2 高温超電導磁気軸受の設計

研究開発の第二段階では、スラスト、ラジアル双方の荷重を一組の超電導磁気軸受で支持し、回転体を非接触で磁気支持することを目指している。図8に実験装置の構想図を示す。クライオスタット（低温容器）に、フライホイールとそれを磁気支持する2組の小型超電導磁気軸受を配置し、外部とのエネルギー授受を永久磁石磁気クラッチで行う計画である。回転体質量は100kg程度である。この装置に適用する超電導磁気軸受を電磁力解析で設計した。

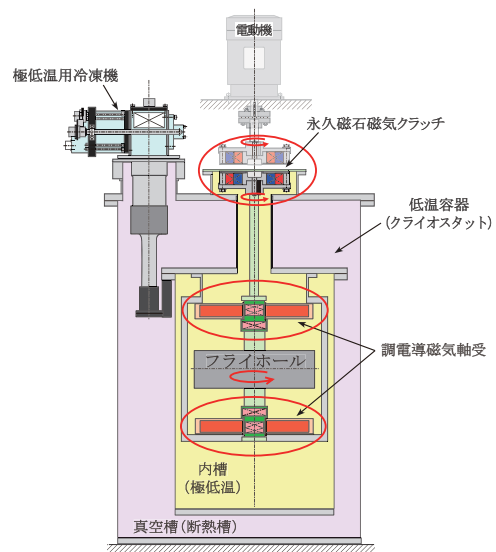


図8 高温超電導磁気軸受実験装置構想図

特集：浮上式鉄道技術とその応用

超電導コイル、バルク体とも高温超電導体とし、コイル、バルク体形状をパラメータとして検討した<sup>6)</sup>。

シングルコイルでは、通常、浮上力と径方向案内の復元力の両立ができない。安定した磁気浮上を実現させるためには、試験用超電導磁気軸受のようなカスプ磁場が有効であるが、この場合、コイル巻線が2倍でも、浮上力は2/3程度となる。したがって、カスプ磁場を採用するとステータ側の磁石のコストが高くなる欠点がある。超電導バルク体と超電導コイルの製作コストを比較すると、コイルの方が大きい。このため、バルク体の形状をパラメータとして、シングルコイルにおいても安定した浮上・案内ができる軸受を設計した。

バルク体は直径46mm、厚さ15mmのディスク形状とし、コイル内径は53.5mm、起磁力は98kAとした。解析の基本モデルを図9に示す。また、図10にコイル内にバルク体を配置し、それを上下方向に移動させた時の両者の相対位置と発生電磁力の関係を示す。なお本解析では、バルク体は完全反磁性とし、径方向復元力を評価するために1mmの径方向変位を付与している。

図10の横軸は、超電導バルク体と超電導コイルとの軸方向相対変位を表している。z=0で両者の高さ中心が一致しており、zが負でバルク体がコイルより下方、正で上方に位置する。z>0で上下方向電磁力(Fz)は浮上力となるが、このうちz<18の領域では、バルク体の高さが下がるほど、浮上力が小さくなるので、下方に変位したときの復元力は発生せず安定しない。一方、z>18の領域では、バルク体の高さが下がるほど、浮上力は大きくなるので、復元力が発生して安定浮上ができる。

径方向電磁力(Fr)については、コイル中心高さ(z=0)付近で大きく、コイル中心高さより遠ざかる(z>20, z<-20)と、径方向電磁力(Fr)が変位を増長させる方向

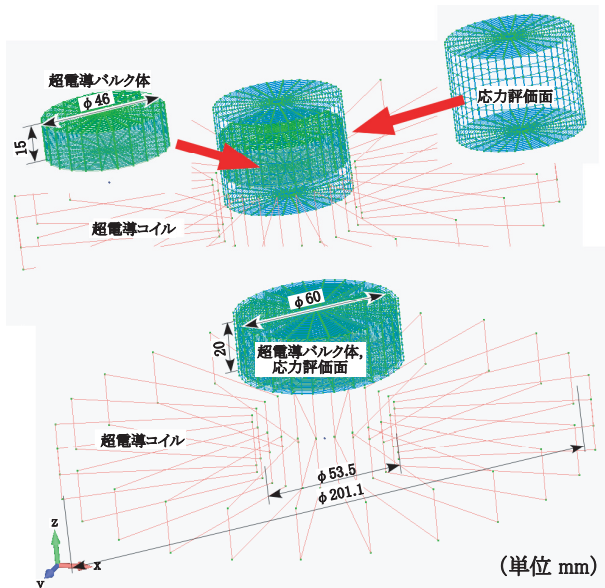


図9 高温超電導磁気軸受解析モデル例

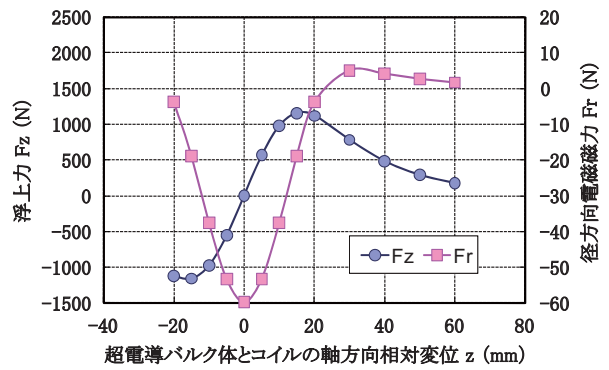
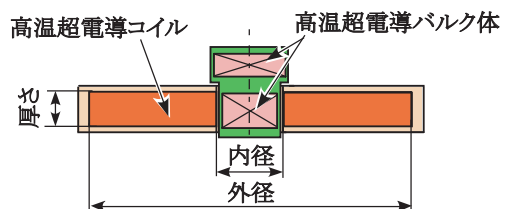


図10 高温超電導磁気軸受解析結果例

に働くか、ほぼ0となり不安定となる。

径方向電磁力(Fr)が復元力として発揮される -20 < z < 20 の領域では、上下方向電磁力(Fz)に復元力が発生しないために、安定浮上はできない。また、上下方向に安定浮上できる z > 18 の領域では、径方向の電磁力(Fr)が不安定となる。従って、シングルコイルを磁場発生源とした場合は、超電導バルク体を安定して浮上支持することができない。一方で見方を変えれば、コイル中心部付近の径方向復元力が大きい領域に径方向案内用のバルク体を、浮上力の安定するコイル上部に浮上用バルク体を配置することにより、安定した浮上支持ができる可能性がある。これを解析によって確認した。

図11に設計した高温超電導磁気軸受の基本形状を示す。また、図12にロータ側バルク体とコイルとの相対変位と浮上力・径方向電磁力の解析結果を示す。上向き変位(正変位)で浮上力が低下し、下向き変位(負変位)で浮上力が増加するので、一定質量の浮上体を磁気支持した場合は復元力となる。径方向変位についても、変位方向に対して逆向きの電磁力が発生するので復元力となる。よって、安定浮上できることが確認できる。図8の構想図のように、この軸受をフライホイール上下に配置することで、回転体質量と均衡する位置において回転体が浮上し、2倍の軸支持剛性が期待できる。



回転体(ロータ)側				固定(ステータ)側			
高温超電導バルク				高温超電導コイル			
形状	直径(mm)	厚さ(mm)	使用数(個)	内径(mm)	外径(mm)	厚さ(mm)	起磁力(kA)
円板状	60	20	1	56	270	30	314
	46	30	1				

図11 設計した高温超電導磁気軸受の基本形状

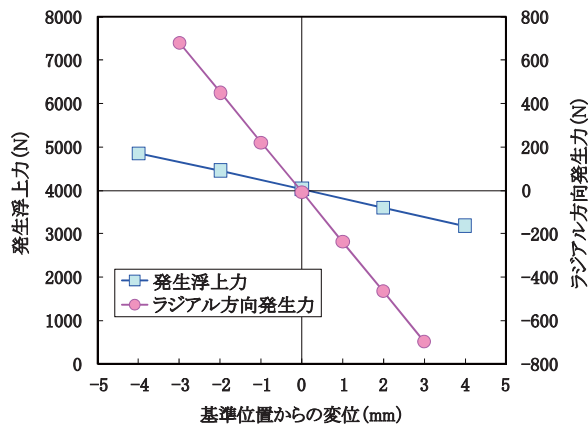


図 12 高温超電導磁気軸受の電磁力解析結果

#### 4. 永久磁石磁気クラッチの電磁力解析と評価

次に、永久磁石磁気クラッチの電磁力解析と、試作装置による実験結果の評価を示す。

超電導磁気軸受を適用したフライホイール蓄電装置の研究開発において、永久磁石磁気クラッチは、クライオスタット内に配置したフライホイールと、外部の電動・発電機とのエネルギー授受を行う要素部品として位置付けている<sup>3)</sup>。クライオスタット容器を介して非接触でトルクを伝達するために、永久磁石を利用している。この磁気クラッチの特性を電磁力解析で予測するとともに、試作装置での実験結果と比較して、解析の妥当性を評価した。

図13に試作クラッチを示す。また、図14に解析モデルを示す。解析は、試作モデルに加え、磁束をカップリング面に集中させるハルバツハ配列にしたモデルで実施した<sup>7)</sup>。各モデルは、8極で構成されている。ハルバツハ配列は、試作モデルで空間となっていた部分に紙面垂直方向に着磁した磁石を埋め込んだような形状で、着磁方向

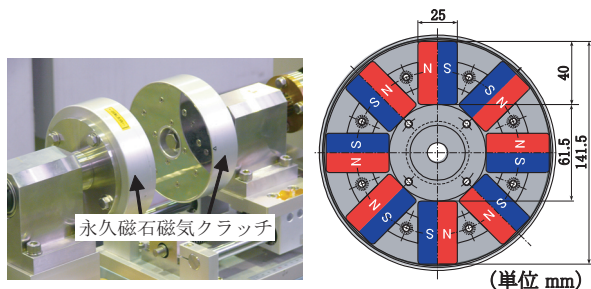


図 13 永久磁石磁気クラッチ (試作品)

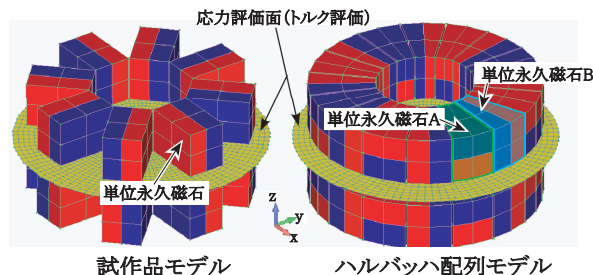


図 14 解析モデル

の異なる2種類の単位永久磁石で構成されている。なお、試作品モデルの磁石配置内径、外径を同一にしている。

永久磁石は、残留磁束密度を 12.85kG、保持力を 12.2170e、最大エネルギー積を 39.34MGOe とした。

図15に磁界分布の解析結果の一例を示す。図中の凡例は色分けした  $B_z$  の範囲である。また、図16に伝達トルクの解析結果と実験結果の比較<sup>8)</sup>を示す。

解析は理想的な位置関係での最大トルクとして算出したもので、実験値は、極低回転で脱調トルクを測定したものである。横軸は、クラッチ間のギャップである。

試作品形状の解析値と実験値は良く一致しており、解析の妥当性が確認できる。また、解析で試作品モデルとハルバツハ配列を比較すると、ハルバツハ配列にするこ

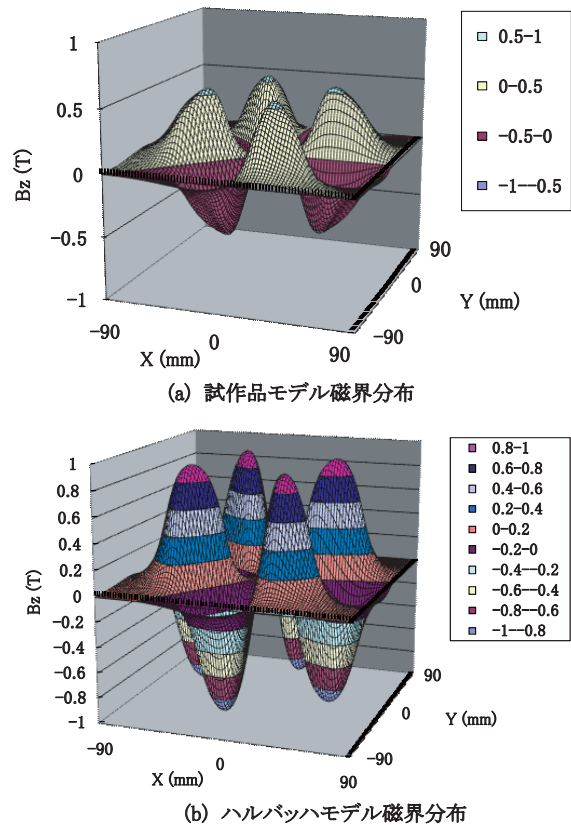


図 15 クラッチにおける磁界分布計算例

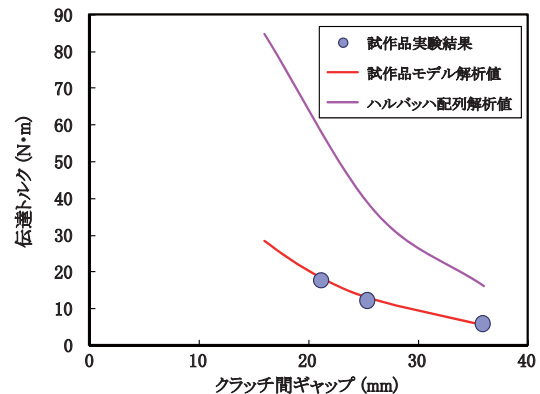


図 16 解析結果と実験結果の比較

特集：浮上式鉄道技術とその応用

とで伝達トルクがおよそ3倍となることが分かる。

各モデルの極数を16極、24極と拡大した時の最大伝達トルクの解析値を図17に示す。ギャップは16mmとした。個々の永久磁石の形状は、図14に示す基本形状とし、配置位置(径)を拡大することで極数を増加している。また、図17には、トルク伝達能力を具体的に評価するために、本開発で製作した試験用超電導磁気軸受の回転試験装置の定格トルク、一例としてIHIが開発している低消費電力フライホイール<sup>9,10)</sup>の定格トルク推測値を明示してある。

解析結果から、多極化することで、実用的なトルク伝達ができることが確認できた。また、同心円状に配置してもこの配置半径であれば、相互の磁界干渉はほとんどないことから、さらに大きなトルク伝達が可能であり、実用性は十分あると考えている。

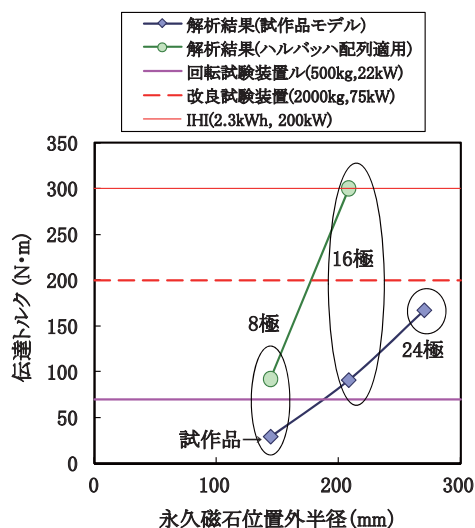


図17 クラッチの実用性検討結果(解析値)

5. まとめ

ロータ/ステータともに超電導体で構成する磁気軸受を適用したフライホイール蓄電装置の研究開発を行っている。この研究開発において、超電導磁気軸受と、要素技術として開発している永久磁石磁気クラッチに関する電磁力解析を実施し、実験結果と比較することで、解析結果の妥当性を評価した。そのうえで、磁気軸受およびクラッチの応用形態を解析により検討し、その電磁力特性を予測した。

解析には、ELF/MAGICを適用し、ロータ側に配置する超電導バルク体には、4本の線分電流で構成されるループ電流で要素の中心位置の磁界をゼロまたは任意に設定できる要素を適用した。

以下に結果をまとめる。

- (1) 解析結果と実験結果の比較において両者は良く一致し、超電導バルク体、コイルおよび永久磁石要素から

構成される部品の電磁力特性がほぼ正確に把握できることが確認できた。

- (2) 高温超電導磁気軸受を解析により検討した結果、従来は安定した浮上のために2つのコイルでつくるカスプ磁場が必要であったが、バルク体側の形状を最適化することで、シングルコイルにおいても安定した浮上・案内力を有する超電導磁気軸受ができる見通しを得た。

- (3) 永久磁石磁気クラッチにおいては、極数を増加させることで、実用的な負荷レベルのトルク伝達ができる見通しを得た。

なお、高温超電導磁気軸受、永久磁石軸クラッチについては、本解析結果をもとに、現在、試作品を製作中である。

以上より、本解析が、超電導バルク体を含んだ電磁力利用機器の電磁力予測に有効であり、設計に適用できることを確認した。

本研究の一部は国庫補助を受けて実施した。

文献

- 1) 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磁気軸受の基礎検討, 鉄道総研報告, Vol. 22, No. 11, pp. 35-40, 2008
- 2) 長嶋賢, 清野寛, 宮崎佳樹, 荒井有気, 坂井直道, 村上雅人: 超電導バルク体と超電導コイルを用いた磁気軸受の載荷力密度, 鉄道総研報告, Vol. 21, No. 9, pp. 29-34, 2007
- 3) 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
- 4) 清野寛, 長嶋賢: 超電導コイル磁場中に配置した超電導バルク体に働く電磁力, 秋季低温工学・超電導学会講演概要集, p. 40, 2008
- 5) 清野寛, 長嶋賢: 20kN 対応超電導磁気軸受の開発, 2009年度春季低温工学・超電導学会講演概要集, p. 47, 2009
- 6) 清野寛, 長嶋賢: 高温超電導ロータ・ステータで構成される磁気軸受の電磁力解析, 2009年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集, p. 202 (11月中旬確定), 2009
- 7) 池田雅史, 竹田圭吾, 村上雅人, 長谷川均, 清野寛, 長嶋賢: 永久磁石型非接触磁気クラッチの特性解析, 平成21年電気学会全国大会講演論文集, p. 23, 2009
- 8) 長谷川均, 清野寛, 長嶋賢, 池田雅史, 竹田圭吾, 村上雅人: 永久磁石型非接触磁気クラッチの特性試験結果, 平成21年電気学会全国大会講演論文集, p. 298, 2009
- 9) Kuwata, Sugitani, Saito: "Development of Low Loss Active Magnetic Bearing for Flywheel UPS", Aug. 2006, Proceedings of The 10th international Symposium on Magnetic Bearings (ISBM 10).
- 10) 斉藤藤, 桑田巖, 温見寿範, 岩崎郁夫, 真島隆司: 機械式2次電池の開発, IHI 技報, Vol. 49, No. 1, pp. 54-59, 2009