

超電導フライホイール蓄電装置の電磁界 および構造解析

吉澤 佳祐* 小方 正文*
荒井 有気* 山下 知久**

Electromagnetic Field and Structural Analyses for Superconducting Flywheel Energy Storage System

Keisuke YOSHIZAWA Masafumi OGATA
Yuuki ARAI Tomohisa YAMASHITA

We have been developing a flywheel energy storage system with superconducting magnetic bearings. Unique point of our superconducting magnetic bearing (SMB) is that it consists of a superconducting magnet and superconducting bulks. We have demonstrated the stable levitation and enough force generation to levitate flywheel rotor of several tons by flywheel test equipment with these SMBs. We are currently developing the demonstration equipment for power stabilization using this SMB technology with financial support from New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO). In this paper, we report the electromagnetic field analyses of SMB and the rotor dynamics analyses of a rotating body for NEDO demonstration equipment design.

キーワード：超電導，フライホイール，エネルギー貯蔵，電磁界解析，構造解析，ロータダイナミクス

1. はじめに

近年，化石燃料の使用の抑制や CO₂ 排出量の低減が求められていることに加え，原子力発電所の状況の影響により，省エネルギー性は研究開発の上で非常に重要なテーマの一つとなっている。鉄道は，他の輸送機関に比べて省エネルギー性が高いことはよく知られている。特に電車においては，車両の減速時に回生ブレーキをかけることで車両の運動エネルギーを回生電力として有効活用できることが，省エネルギー性を高める一つの要因となっている。しかし，回生ブレーキの使用時にその電力を消費できる負荷が無い場合，回生ブレーキは十全に使用できず，車両の運動エネルギーは摩擦ブレーキまたは発電ブレーキによって熱エネルギーとして放散されてしまう。このように無駄になってしまうエネルギーの有効活用を目的として，近年，鉄道のき電システムへの電力貯蔵装置の導入が進められている¹⁾。筆者らはこれまで，この目的に向けて，電力貯蔵装置として超電導フライホイール蓄電装置の開発を継続してきている^{2) 3) 4)}。

また，筆者らは現在，NEDO プロジェクトにより再生可能エネルギー発電所の電力安定化のための使用を視野

に入れた，超電導フライホイール蓄電装置の開発を行っている⁵⁾。プロジェクトでは平成 26 年度に実証機を製作し，27 年度から山梨県米倉山にて太陽光発電に連系して実証試験を行う予定である。

本報告では，NEDO プロジェクトにおける超電導フライホイール蓄電装置の開発に際して行ってきた，超電導磁気軸受 (Superconducting Magnetic Bearing: SMB) の電磁界解析と，回転体のロータダイナミクス解析について報告する。

2. NEDO プロジェクト超電導フライホイール蓄電装置

筆者らは NEDO プロジェクトの助成を受け，再生可能エネルギー発電所における系統電力安定化を目的に超電導フライホイール蓄電装置の開発を行っている。開発中の実証機の概略図を図 1 に示す。

今回開発を進めている実証機の特徴について述べる。まず軸受について，SMB はこれまで鉄道総研で開発を進めてきたものと同様に，超電導バルク体と超電導マグネットを組み合わせ，完全反磁性を利用して非接触で浮上力を得るものである。実証機ではこれをロータ下部に設置し，主に鉛直方向に浮上させるために用いる。径方

* 浮上式鉄道技術研究部 低温システム研究室

** 浮上式鉄道技術研究部

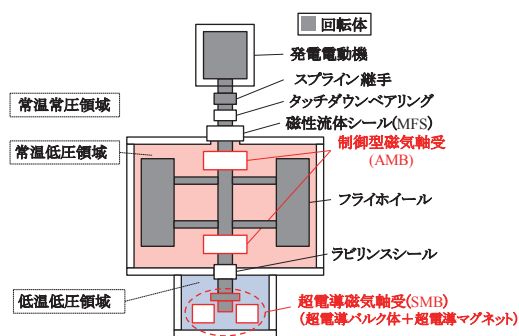


図1 NEDO プロジェクト実証機概略図

向の支持には、同じく非接触である制御型磁気軸受 (Active Magnetic Bearing: AMB) を用いる。トルクの伝達は、磁性流体シール (Magnetic Fluid vacuum Seal: MFS) を用いることで、真空容器の内外を通じてシャフトを直結して行う構造としている。NEDO プロジェクトでは、筆者らの提案する SMB が、その大きさに比して非常に強い力を発生可能であることを生かして、最大で 10000 kg のフライホイールを浮上させることを目標としている。これを毎分 3000 回転から毎分 6000 回転の間で運転することで、最大 300 kWh の電力の充放電が可能となる。

米倉山にて系統連系試験を行う実証機は、フライホイールの質量を 4000 kg 程度とすることで、実証試験での必要分である 100 kWh 級の容量とした構成で開発を進めている。

3. SMB の電磁界解析

開発を進めている SMB は、前述の通り超電導コイルにて発生させた磁界に対する超電導バルク体の完全反磁性による反力を利用する構成である。

筆者らはこれまでの試験装置の開発において、SMB の浮上力および安定性を確認するために超電導バルク体と超電導コイルをモデル化して電磁界解析を行ってきた。この際、超電導コイルを電流源、超電導バルク体を透磁率が非常に低い物性 (0.001 程度) と設定することで、解析結果は試験結果とおおむね一致する傾向が得られている。本報告でも、同様の手法にて解析を行った。

NEDO プロジェクトの装置には、前節で述べたように最大 10000 kg のフライホイールを浮上可能である SMB が求められる。これに関しては、これまでに条件を満たす構造を検討し、目標の仕様を満たす設計が得られている⁶⁾。

ここでは、まず、実証機として製作を進めている、4000 kg のフライホイールによる 100 kWh 蓄電容量機に対する SMB の電磁力解析結果について述べる。その後、最大の蓄電容量である 10000 kg のフライホイールによる 300 kWh 蓄電容量機に対する SMB として、100 kWh

蓄電容量機の SMB を元に修正した構成での解析結果について述べる。なお、解析は有限要素法ソフト ANSYS EMAG 13.0 を用いて行った。

3.1 100 kWh 機電磁力解析

超電導磁気軸受の解析モデルは、電磁力の解析のため超電導コイルの線材部分と超電導バルク体のみとしており、その他の構成部材等は検討に含めていない。製作を進めている実証機では目標仕様を満たすために、超電導コイルは 6 mm 幅の RE 系高温超電導線材を用いたダブルパンケーキコイル (Double Pancake shape coil: DP) を 5 つスタックして構成した。また超電導バルク体は大直径のものを 1 つ、小直径のものを 2 つ組み合わせた構成としている。これらの構成図を図 2 に、諸元を表 1 にそれぞれ示す。

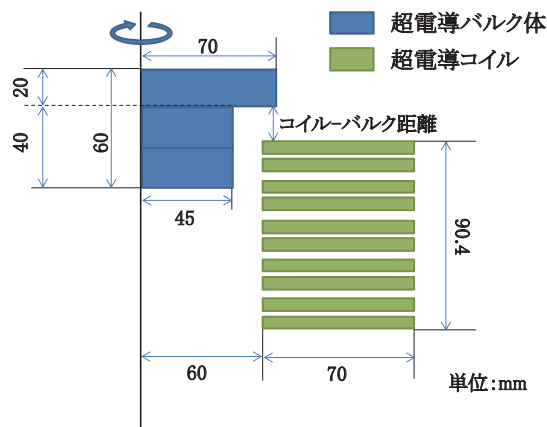


図2 100 kWh 機超電導磁気軸受 概略図

表1 超電導磁気軸受諸元

超電導コイル	内径 (mm)	120
	外径 (mm)	260
	高さ (mm)	90.4
	巻数 (1DP)	583 × 2
	DP 数	5
	定格電流 (A)	110
	線材	RE 系高温超電導線材
	線材幅 (mm)	6
	冷却方式	伝導冷却
	超電導バルク体	直径 (mm)
厚さ (mm)		20
材料		GdBCO
冷却方式		ガス分子伝導冷却

完全反磁性によって超電導バルク体にはたらく反力は、磁場勾配が大きい位置であるほど大きいことが分かっている。ここでは、超電導バルク体の大直径のものを超電導コイルの上部に配置している。この位置は鉛直方向への磁場勾配が非常に大きい領域であるため、鉛直

方向に大きな電磁力が得られる。小さい超電導バルク体は超電導コイルの巻枠内上部に配置される。巻枠内径方向では、線材に近い位置の磁束密度が高く、中心に近づくにつれ低くなるため、小さい超電導バルク体には、中心に向かう電磁力が発生し、径方向変位に対して安定となる。また、巻枠内軸方向においても、中心から端に行くほど磁束密度が低くなる磁界分布となっており、コイル中心より上部に配置した小さい超電導バルク体でも鉛直方向に浮上に寄与する電磁力が発生する構成としている。

このときの浮上力および径方向復元力の解析結果を図3、4にそれぞれ示す。プロットの数値は、それぞれの方向に対して超電導バルク体に加わる電磁力の合計である。結果より、フライホイール4000 kg相当である、約39.2 kNの浮上力に対しては十分な力が発生可能であり、余裕度をみても本構成による超電導磁気軸受で100 kWh機が成り立つことが示された。また、超電導バルク体が超電導コイルから離れるほど発生する浮上力は小さくなっていることから、浮上体の重さと浮上力が釣り合った位置で安定に浮上可能であると言える。

復元力は、超電導バルク体の位置を鉛直方向に変化させながら、径方向に1 mmまたは3 mmの変位を与えた際の径方向への電磁力をプロットした。ここでは、径方向変位に対して負の力が発生している領域が、復元力がはたらくことで安定な領域である。この結果では、コイル-バルク距離に対して安定領域と不安定領域双方とも現れることが分かった。この不安定領域は、超電導コイルの巻枠内に入る超電導バルク体の体積が小さいために、超電導バルク体全体に加わる径方向力のうち復元力が小さくなる部分であると考えられる。実用的には、コイル-バルク距離15～35 mmの範囲内に位置すれば復元力がはたらく、安定に浮上可能であることが分かった。

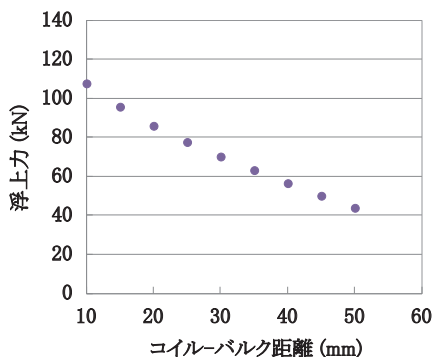


図3 100 kWh 機 SMB 浮上力解析値

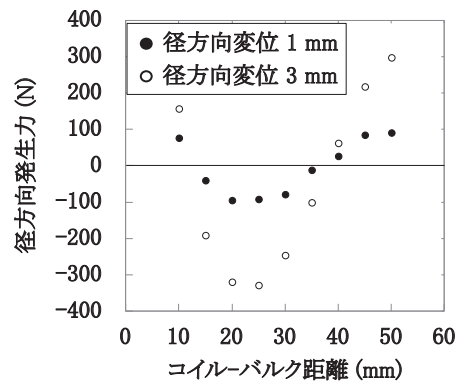


図4 100 kWh 機 SMB 径方向発生力解析値

3.2 300 kWh 機電磁力解析

この NEDO プロジェクトにおいて目標としている最大の蓄電容量は300 kWhである。これは、10000 kgのフライホイールを毎分3000回転から6000回転で運用することで達成可能であることが分かっている。そこで、前節で解析を行った100 kWh蓄電容量機に対するSMBよりも、更に大きな浮上力が求められる。そこで、超電導バルク体、超電導コイルともに前節のSMBから基本的な部品設計を変えることなく、部品数を増やすことによって目的を達成可能な構成について検討した。具体的には、超電導コイルのスタック数を5つから7つに、小直径超電導バルク体を2つから3つに増やした構成として電磁力解析を行った。構成の概略を図5に示す。

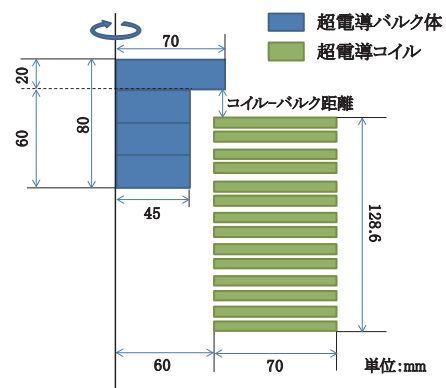


図5 300 kWh 機超電導磁気軸受概略図

発生電磁力の解析結果として、超電導バルク体にはたらく浮上力を図6に、径方向変位に対する復元力を図7にそれぞれ示す。浮上力は、コイル-バルク距離が30 mm以下であれば目的の仕様である98 kN (10000 kg相当)以上の力が発生する結果が得られた。安定性に関しても前節と同様である。復元力については、解析を行った条件においては、変位に対してすべて負の電磁力となっており、どの位置でも中心への復元力がはたらくことが確認できた。これは、超電導コイルの巻枠内の超電

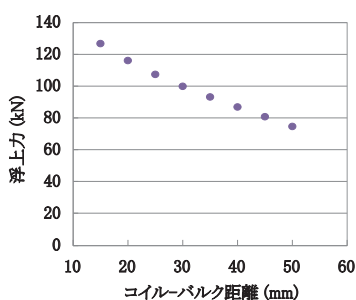


図6 300 kWh 機 SMB 浮上力解析値

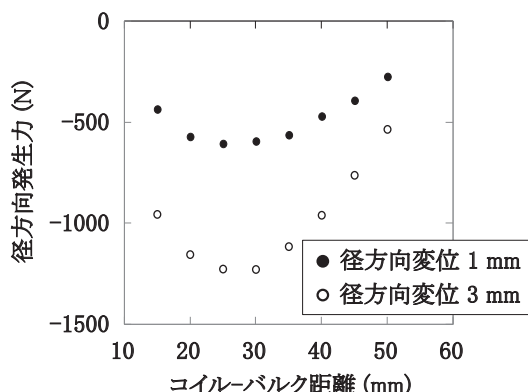


図7 300 kWh 機 SMB 径方向発生力解析値

導バルク体体積が大きくなり、径方向変位に対する復元力が増大したためであると考えられる。

4. ロータダイナミクス解析

フライホイール蓄電装置は、フライホイールの回転によって運動エネルギーとしてエネルギーを蓄積する装置である。回転体にはその形状と材質による固有振動数が存在し、回転速度とこの振動数が一致する危険速度付近においては激しい振動が発生することが知られている。したがって、運転速度である毎分 3000 回転から毎分 6000 回転の範囲付近に危険速度が存在しないように装置設計する必要がある。これまで文献⁷⁾にて本装置を想定した単純な回転体モデルによるロータダイナミクス解析を行い、パラメータ変更に対する傾向を確認した。ここでは NEDO プロジェクトの実証機について行ったロータダイナミクス解析について述べる。

NEDO プロジェクトの実証機における回転体は、図 8 に示すように、駆動用の発電電動機、フライホイールと超電導バルク体およびそれらを取り付けるシャフト、これらをつなぐスプライン継手で構成される。また、磁性流体シールはペローズ等によりシャフトに追随するような形で真空容器側に設置されることとなる。

これまでの解析では、単純化のために発電電動機およびスプライン継手を省略したモデル化を行ってきた。このようなモデルでは、中心部に比べてシャフト端部が

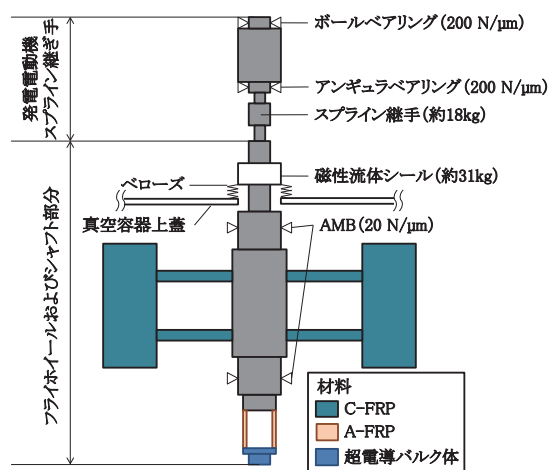


図8 NEDO 実証機回転体周辺概略図

細かい場合、シャフト端部が振れ回り変形を起こすようなモードが確認されており、対策が必要と考えられる。しかし、実際の装置構成では、スプライン継手によって、シャフト端部は完全に自由にはなっておらず、発電電動機側の機械式ベアリングに大きく影響を受けることが予想される。以上を検討するため更に、発電電動機までを含めた回転体モデルを作成して解析を行った。ここではこの2つのモデルにおける解析結果を示し、考察を述べる。なお、解析は有限要素法ソフト ANSYS Structural 13.0 を用いて行った。モデルは3次元で制作し、その形状に合わせたメッシュを作成して解析を行っている。

4.1 フライホイール部分解析

まず、従来の通りフライホイールおよびシャフト部分のみについて制作したモデルについて述べる。解析モデルメッシュ図を図 9 に示す。

ハーフモデルで描かれているが、実際にはフルモデルで作成している。構成は図 8 のフライホイール部分の通りである。ただし、スプライン継手の重量のみモデル上端に質点として設定した。また、部品同士の接続は、単

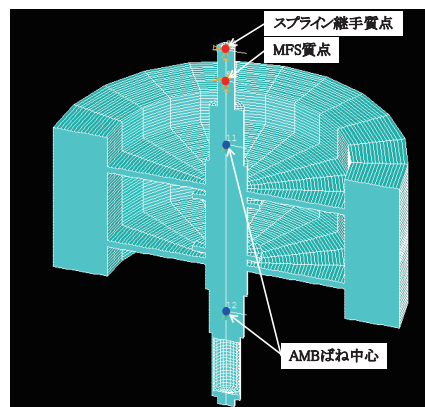


図9 解析モデルメッシュ図

純化のためすべて一体に接着されていることとした。

このモデルに対して回転速度を変化させてモーダル解析を行い、各回転速度での固有振動数からキャンベル線図を作成した。結果を図 10 に示す。キャンベル線図では前回り振動モードと後ろ回り振動モードが出現するが、危険速度は原点を通る傾き 1 (1 Hz/60 min⁻¹) の直線と前回りとして計算された線の交点である。後ろ回りとの交点では不安定な振動は発生しない。

運転速度範囲の近くにおいて、計算された危険速度は、1095 min⁻¹ と 7464 min⁻¹ である。前者は平行の剛体モードであり、後者はシャフト上端部が振れ回るモードである。結果としてどちらも運転速度範囲には入っていないが、シャフト上端部振れ回りモードは 6000 min⁻¹ における余裕(セパレーションマージン)が約 20% 程度であった。ここでセパレーションマージンとは、ある回転数における 1 Hz/60 min⁻¹ 直線の周波数と前回り振動モード曲線の周波数の値の差を指す。今回の計算結果による 20% という値は、十分なマージンではないが、装置が成立する可能性があるといえる。

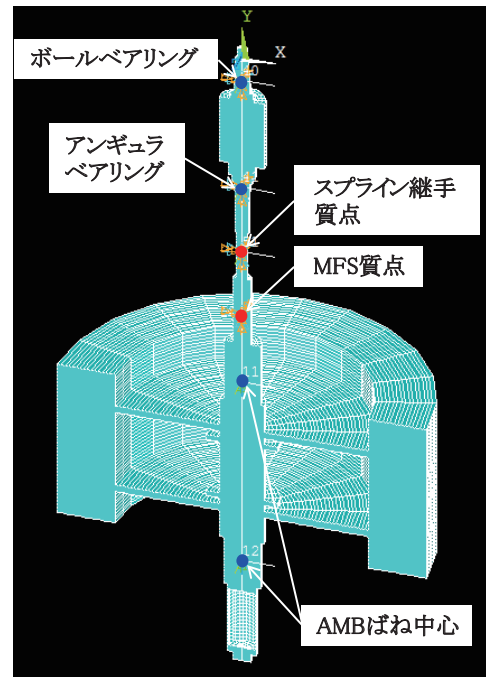


図 11 解析モデル概略図

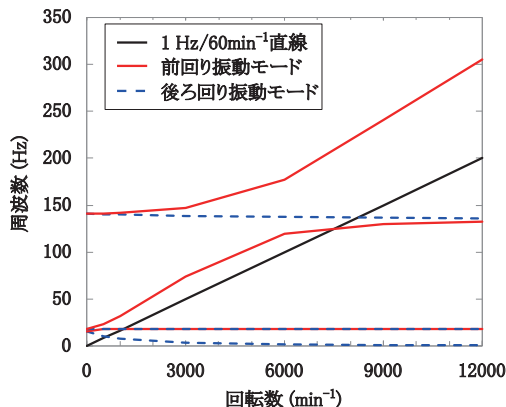


図 10 非接触浮上ロータ部分キャンベル線図

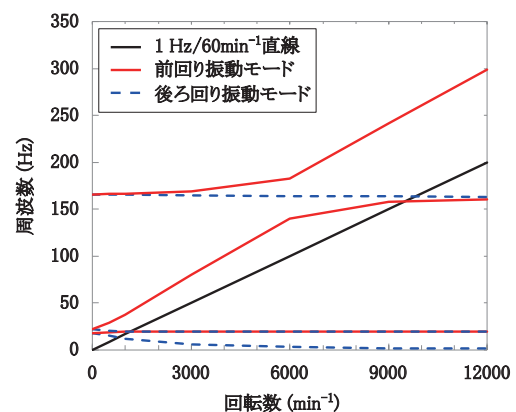


図 12 回転体全体キャンベル線図

4.2 回転体全体解析

次に、発電電動機とスプライン継手を含めた回転体モデルによる解析結果について述べる。

上下スライド可能であり若干の偏芯を板ばねで許容可能であるスプライン継手について、本解析ではこれらを一本の丸棒として単純化して模擬し、不足する質量を質点として与えるようにモデル化した。モデルのメッシュ図を図 11 に、解析により得られたキャンベル線図を図 12 に示す。

このモデルではそれぞれ、1145 min⁻¹ と 9483 min⁻¹ に危険速度が現れる。前者は発電電動機部分がほとんど動かずに、フライホイールおよびシャフト部分が前節の平行剛体モードに近い動きをする変形が起こる。後者は、スプライン継手部分が振れ回るようなモードである。どちらの結果も発電電動機の振れ回るようなモードはみられず、機械式ベアリングによる固定の効果が大い

と言える。また、高回転領域の危険速度については、6000 min⁻¹ に対して約 40 % のセパレーションマージンがあり、この条件での解析結果であればロータダイナミクスからみて実現可能性が高いことがいえる。

4.3 ロータダイナミクス解析まとめ

ロータダイナミクスの結果より、想定した条件では運転速度範囲の高回転側、低回転側にそれぞれ危険速度が現れることが分かった。低回転側の危険速度はフライホイール部分が剛体モードで平行に振れ回り、高回転側では磁性流体シールを取り付けるシャフトおよびスプライン継手の部分が振れ回ることが読み取れる。下部の危険速度は AMB の制御によって運転開始、終了時に抜けてしまえば、運転中には影響はないと言える。一方、後者の危険速度はどちらのモデルでも運転速度範囲外と

なる結果が得られたことから、実現可能性のめどが立ったと言える。

5. 結論

筆者らは、NEDO プロジェクトによって系統電力安定化を目的とした超電導フライホイール蓄電装置の実証機の開発を進めている。本報告では、本実証機の超電導磁気軸受に対して行った電磁力解析および、回転体に対して行ったロータダイナミクス解析の結果について述べた。

100 kWh 級の蓄電容量を実現するために必要となる SMB と、300 kWh 級の蓄電容量となる SMB について、それぞれ電磁力解析を実施した結果、どちらもフライホイールを浮上させるために十分な力が発生可能であることが確認できた。また、超電導磁気軸受自体の径方向についても、超電導コイルと超電導バルク体を適正な位置関係とすることで安定となることが確認できた。

ロータダイナミクス解析は実証機のモデルを制作して実施した。この際、発電電動機およびスプライン継手を含むモデルと含まないモデルの 2 種類に対して解析を行った。結果、どちらも運転範囲内には危険速度は存在せず、現構造での実現可能性が示された。

今後、超電導磁気軸受は詳細な設計および製作、試験を進めていく予定である。

本研究の一部は NEDO プロジェクトの助成を受けて実施した。

文 献

- 1) 小笠正道：鉄道車両と技術，第 118 巻，pp. 9-26, 2006
- 2) 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
- 3) 荒井有気，清野寛，長嶋賢：冷凍機冷却型超電導フライホイール用試験装置の開発，鉄道総研報告，Vol.25, No.3, pp.41-46, 2011
- 4) 吉澤佳祐，荒井有気，長嶋賢，坂本泰明：フライホイール駆動用永久磁石同期電動機の開発，鉄道総研報告，Vol.27, No.7, pp.35-40, 2013
- 5) 長谷川均 他：系統安定化用超電導フライホイール蓄電装置の検討，低温工学・超電導学会講演概要集，Vol.88, p.202, 2013
- 6) 吉澤佳祐，荒井有気，山下知久，小方正文，長谷川均，長嶋賢：大型超電導フライホイール蓄電装置の開発，低温工学・超電導学会講演概要集，Vol.88, p.95, 2013
- 7) 吉澤佳祐，荒井有気，小方正文，山下知久，長谷川均：ロータダイナミクス解析によるフライホイールロータの検討，電気学会研究会資料，MD-13-042~064 LD-13-104~126, pp.59-64, 2013