鉄 道 総 研 報 告
特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

フライホイール駆動用永久磁石同期電動機の開発

吉澤　佳祐*　　荒井　有気*
長嶋　　賢**　　坂本　泰明***

Development of Permanent Magnet Synchronous Motor Driving for Superconducting Flywheel Energy Storage System

Keisuke YOSHIZAWA　　Yuuki ARAI
Ken NAGASHIMA　　Yasuaki SAKAMOTO

We have been developing a flywheel energy storage system with superconducting magnetic bearings. The superconducting magnetic bearings consist of a superconducting magnet and superconducting bulks which are refrigerated in the same cryostat to generate stronger magnetic force. We demonstrated stable levitation of this system using flywheel test equipment with the superconducting magnetic bearings. A generator motor for driving the flywheel under ambient pressure is connected to the flywheel with a magnetic coupling to transfer the torque in a contactless manner. Therefore, the generator motor generates windage loss at all time. In this paper, we propose a large gap permanent magnet synchronous motor whose rotor is put into cryostat to reduce the windage loss.
キーワード：超電導，フライホイール，エネルギー貯蔵，永久磁石同期電動機，電動機，発電機

1．はじめに

鉄道は他の輸送機関に比べてエネルギー効率が高いことはよく知られている。この一因として，車両が減速する際に発生する回生電力の有効活用が挙げられる。近年，この回生電力のさらなる有効活用を目的として，き電系統への電力貯蔵装置の導入が進められている[1)]。筆者らは，このような電力貯蔵装置として，超電導磁気軸受を用いたフライホイール蓄電装置の開発を行ってきている。

この超電導磁気軸受は，ステータ側に超電導コイルを，ロータ側に超電導バルク体を用いる構造としている。フライホイールロータは風損低減と冷却のために密封した低圧の低温容器内に納めている。したがって，エネルギー授受のための発電電動機を容器外に配置する場合には非接触でトルクをフライホイールロータに伝達する必要がある。これまで製作した試験装置では，永久磁石を組合せた非接触トルク伝達装置[2)]を用いていたが，この構造では大気圧中の回転部分において風損が発生する。これに対する一方策として，大気圧中の発電電動機および非接触トルク伝達装置を固定子コイルと置き換え，永久磁石を用いた回転子を低圧の低温容器内に納めることで風損を低減することを可能とする，永久磁石同期電動機（PMSM：Permanent Magnet Synchronous Motor）を提案した。

本報告では，まず，研究開発を進めてきた超電導磁気軸受を用いたフライホイール蓄電装置について紹介する。その後，本システムのために提案した発電電動機について，その概要と原理，試作機を用いた試験結果を報告する。

2．超電導フライホイール蓄電装置

2.1　構成

フライホイール蓄電装置とは，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貯蔵する装置である。通常のフライホイール蓄電装置は他の蓄電装置に比べて長寿命であり，廃棄時に有害物質が出ない，回転数からエネルギー残量が明確にわかるといった利点があるが，機械式軸受ではメンテナンスが必要となるといったデメリットも存在する。筆者らはこの軸受部分に超電導磁気軸受を採用することで，メンテナンスの低減が可能な非接触浮上によるフライホイール蓄電装置の研究開発を進めている。

開発を行っている超電導磁気軸受は，図1に示すように超電導コイルと超電導バルク体をそれぞれステータ，ロータに配置し，超電導バルク体の完全反磁性によって発生する力を利用する構造を採っている。この構造には

＊　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
＊＊＊　浮上式鉄道技術研究部　電磁システム研究室

単位面積当たりの荷重容量を大きくすることが期待できる。また，この超電導磁気軸受では，構成する超電導コイルと超電導バルク体を同一の低温容器内で冷却する構造を提案している。こうすることで，超電導コイルと超電導バルク体間のギャップを縮小し，より強い電磁力を得ることが期待される。このシステムでは，超電導コイルは冷凍機によって伝導冷却で冷却される。フライホイールロータは非接触で浮上するため，冷却も非接触で行う必要があり，この冷却は希薄ヘリウムガスによるガス分子伝導冷却によって行われる。このため，低温容器内には希薄ヘリウムガスを封じ込めて密封する構造としており，フライホイールロータは発電電動機から切り離され，この低温容器内に納められる構造とされている。

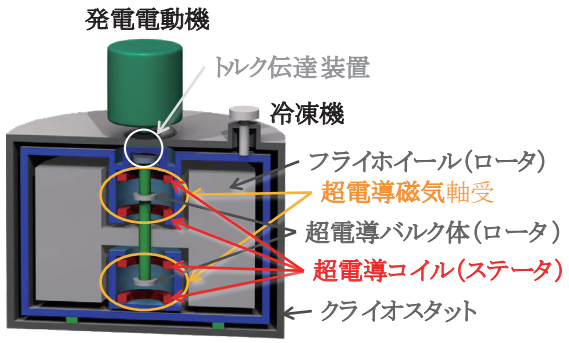


図１　超電導フライホイール蓄電装置概略図

2.2　試験装置による検証経緯

筆者らはこれまで，提案する超電導フライホイール蓄電装置の実現のために試験装置を製作し，評価を行ってきた。最初に，荷重・回転数検証のための試験装置を製作した。これは超電導磁気軸受の発生力の検証のための試験装置で，超電導コイルと超電導バルク体を別個に冷却し、スラスト方向の荷重のみ受け持つという構造としていた[3)]。この装置より，超電導磁気軸受によって約20kN の浮上力が発生可能であることと，浮上状態で安定して回転が可能であることが確認できた。次に，超電導磁気軸受のステータ側，ロータ側を同一低温容器内で冷却するシステムを実証するための小型試験装置を製作した。この装置からは，ガス分子伝導冷却による冷却が可能であること，ロータをラジアル，スラストについて完全非接触で浮上可能であることが確認できた。さらに，非接触トルク伝達装置によって最大毎分 570 回転でのフライホイールロータの回転を達成した[4)]。この試験装置ではさらに回転数の向上試験を行い，図 2 に示すように，最大で毎分 3000 回転で非接触浮上したフライホイールロータを回転させることに成功した。

提案する超電導フライホイール蓄電装置は，実際にエネルギーの入出力を行う際には，一定以上の回転数での運転が想定されている。この，停止時から運転に供する回転数へ加速するときに，フライホイールロータが共振する，低次の共振回転数を通過することが想定されている。通常の機械式軸受による支持の場合は，ロータの変位は強く抑えられる。これに対して超電導磁気軸受はロータとステータ間に比較的広いギャップがあり，さらにダンピングが小さいという特性もあるため，この共振点において振動によるロータ変動が比較的大きくなると予想される。毎分 3000 回転を達成した際にも，回転数加速時に低次の共振回転数付近でロータの振動が大きくなり，それを超えると安定するといった挙動を示した。

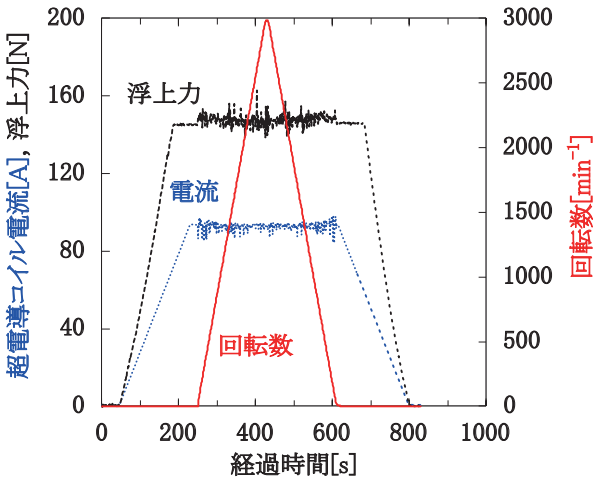


図２　小型試験装置における毎分 3000 回転

3．提案する発電電動機

3.1　構成

超電導フライホイール蓄電装置は，前述の通り低次の共振回転数を超える際にフライホイールロータの変動が大きくなることが予想される。提案する発電電動機についても，永久磁石回転子がフライホイールロータに直結される構造を想定しており，この振動に対応する必要がある。ここで，提案する発電電動機の概略図を図 3 に示す。発電電動機は，大きく二つの特長を持つ構造としている。一つは，永久磁石回転子にデュアルハルバッハ配列を採用することで振動を許容できるような大きな

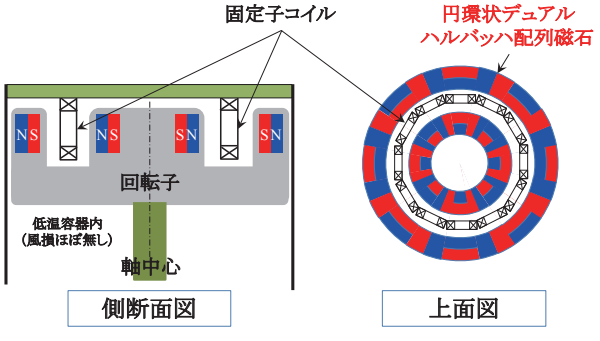


図３　提案する発電電動機概略図

ギャップを実現するという特徴である。もう一つは，発生するトルクを非対称とすることで回転子に力を発生し，これをダンピングとして利用することによる振動の抑制機能である。

3.2 原理と特長

ここでは提案する発電電動機の原理と特長について説明する。まず，振動に対応するために，回転子と固定子との間のギャップを広くとる構造について述べる。これは，回転子に円環状のデュアルハルバッハ配列磁石[5]を採用していることによる。ハルバッハ配列とは，着磁方向を90°ずつ変えた磁石を並べることで磁気回路を作り，一方向への磁界を強くする配列である。これを2列並べて配列間に比較的強い磁界を形成するものをデュアルハルバッハ配列と呼ぶ。直線状のデュアルハルバッハ配列について図4に示す。提案する発電電動機ではこれを円環状として回転子に採用している。この配列間の強い磁界のため，磁石表面から距離を空けて固定子コイルを配置しても，比較的に鎖交磁束が多く，大きいトルクを発生することが可能である。

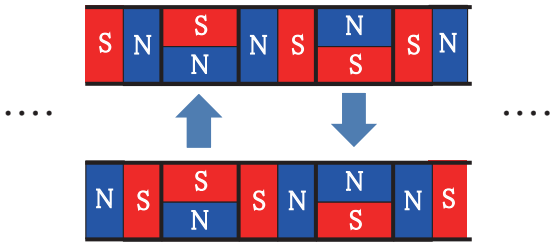


図4　直線デュアルハルバッハ配列

また，デュアルハルバッハ配列磁石間の磁界は，ギャップ方向の成分（径方向成分）が主体となるため，回転子が径方向に変位した場合でも，電動機としての特性への影響が少ないという利点が期待できる。さらに，デュアルハルバッハ配列磁石間の中心での磁束密度は正弦波に非常に近い空間分布となるため，電動機としてトルク脈動が少ないという利点も期待できる。

次に，振動に対応するために回転子に対して径方向に力を発生可能とする構造について述べる。この発生力を用いてフライホイールの径方向振動の抑制を試みるものである。力の発生原理については，図5に示すようにトルクを非対称とすることによっている。このような非対称のトルクの発生のために，ここでは固定子コイルを周方向にいくつかの区画に分けて，それぞれの区画に対して別個のインバータで給電する構造としている。この原理によって任意の径方向に力を発生するためには，最低限3つの区画に固定子コイルを分ける必要がある。コイルを4等分した例について図6に示す。

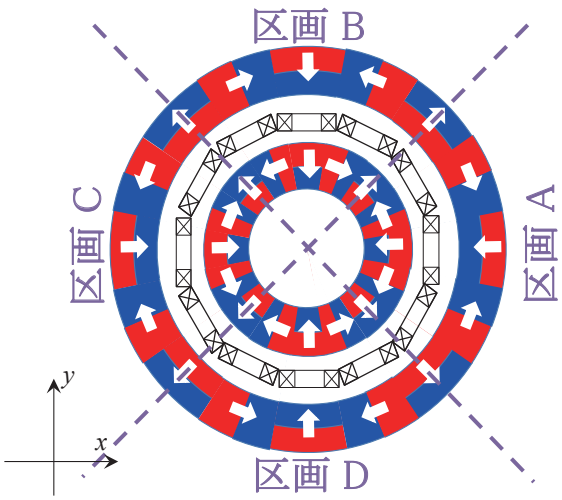


図6　コイル区画分割例（4等分）

また，固定子コイルを3等分，4等分した場合について，全体の回転トルクと径方向力の指令に対する，それぞれの区画でのベクトル制御におけるトルク電流の計算式を文献[6]にて定義した。4等分した際の計算式について以下に示す。

$$\begin{pmatrix} i_{qa} \\ i_{qb} \\ i_{qc} \\ i_{qd} \end{pmatrix} = \mathbf{A} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ i_x \\ i_y \end{pmatrix} = \mathbf{A} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/k_T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/k_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/k_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ T \\ f_x \\ f_y \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$k_T = \sqrt{6} NBhrk_w \quad (2)$$

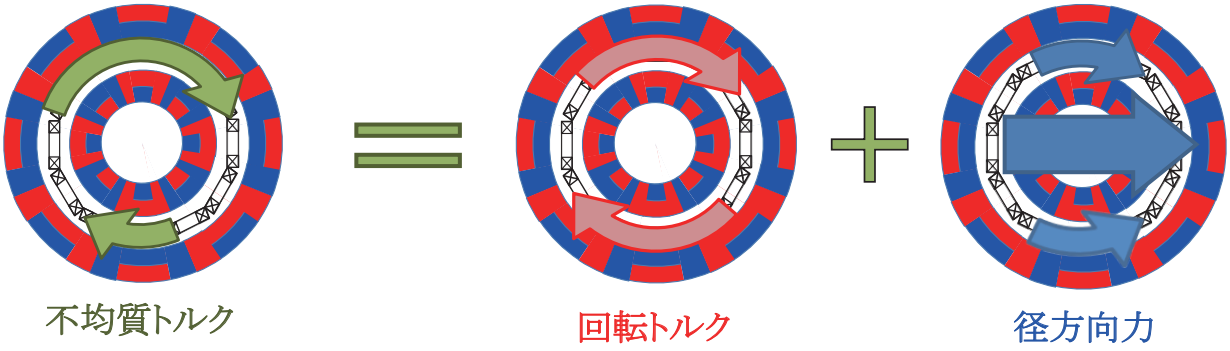


図5　不均質トルクによる径方向力発生原理

$$k_x = k_y = \frac{2\sqrt{2}}{\pi r} k_T \tag{3}$$

$$k_w = \frac{\sin\left(\frac{\pi w_s}{2\tau}\right)}{\frac{\pi w_s}{2\tau}} \sin\left(\frac{\pi t_s}{2\tau}\right) \tag{4}$$

ここで，i_{qa}，i_{qb}，i_{qc}，i_{qd} はそれぞれの区画のトルク電流指令値である。i_d は電動機全体での励磁電流，i_q は電動機全体でのトルク T を発生するトルク電流，i_x は x 方向力 f_x を発生する電流，i_y は y 方向力 f_y を発生する電流である。また，k_T はトルク係数であり，N は単コイルの巻数，B はコイルに鎖交する最大磁束密度，h はコイルの長さ，r は固定子の半径，k_w は巻線係数，w_s はコイルの断面幅，t_s はコイル平均幅，τ は固定子周上の磁極ピッチをそれぞれ表す。形状について定義した変数を図 7 に示す。**A** はここでは一意に決定することはできないが，i_q，i_x，i_y を各区画で均等に配分する場合は式 (5) のようになる。

$$\mathbf{A} = \frac{1}{4}\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & -2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -2 \\ 0 & 1 & 2 & 0 \end{pmatrix} \tag{5}$$

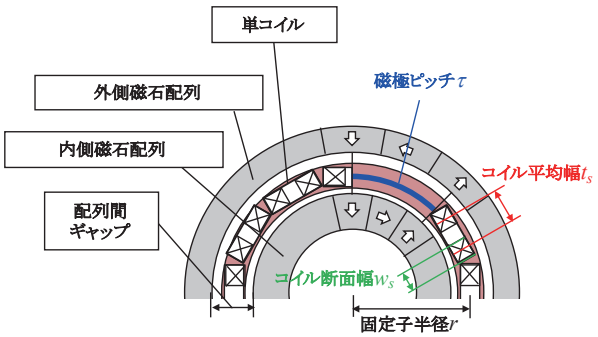
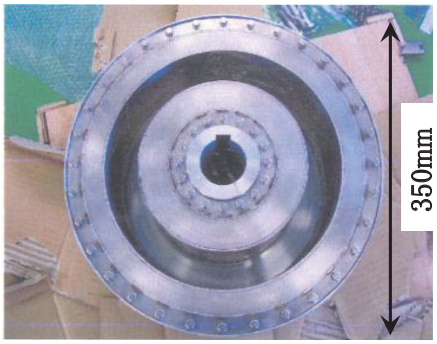


図 7　提案する発電電動機の変数定義

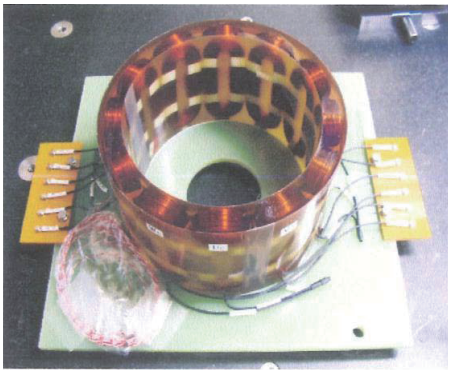
4．試作機による検証

4.1　試作機

大ギャップでのトルクの伝達，径方向力の発生といった原理検証のため，試作機を製作し，評価試験を行った。回生エネルギー吸収のためには MW 級の出力の発電電動機が想定されるが，試作機は原理検証を目的としているため 10kW 程度の出力となるように設計した。試作機の諸元を表 1 に示す。コイルはそれぞれの区画でのトルクの利用率を考え，4 等分する設計としており，1 区画は全体の 4 分の 1 の出力を受け持つ。固定子コイルと永久磁石回転子間のメカニカルギャップは内外どちらも 5mm 以上としており，通常の電動機と比較して大きい値を取っている。永久磁石回転子と固定子コイルの写真を図 8 に示す。



(a) 永久磁石回転子



(b) 固定子コイル

図 8　試作機の回転子と固定子

また，製作した試作機を評価するための，試験装置の概略図について図 9 に示す。この試験装置では，固定子コイルはリニアスライダによって架台に設置されており，図における上下方向のみ自由に動くことが可能となっている。想定しているフライホイール蓄電装置では，本来は回転子側が変位するが，ここでは固定子側が変位することでこの振動の模擬としている。固定子の変位はレーザ変位計によって計測することができる。また，加振アクチュエータを使用することで一定の振幅，振動数での試験が可能である。ロードセルを接続した場合はリニアスライダが固定され，発生する径方向力の測定が可能となる。回転子側はベアリングで回転する軸に設置されており，軸の先には誘導機が接続されている。この誘導機を使うことで，試作機で発生する誘起電圧を測定すること，駆動する試作機に対して負荷を与えることが可能である。

4.2　試験結果

試作機を用いた試験の結果について述べる。まず，径方向への振動に対する安定性の確認のために，駆動中に加振アクチュエータを用いて固定子コイルを振動させる試験を行った。PMSM は 4 等分されたコイル区画の一つに通電することで駆動し，このとき発生するトルクを

表１　試作機設計仕様

永久磁石回転子寸法 [mm]		
	内側磁石配列	外側磁石配列
内径	φ 114	φ 261
外径	φ 186	φ 315
磁石長さ	83	
配列間ギャップ	36.5	
回転子外径	φ 350	
回転子長さ	150	
ギャップ部分の深さ	119	
磁石仕様		
内側ハルバッハ配列磁石数	16	
外側ハルバッハ配列磁石数	16	
回転子極数	8	
マグネット材料	Nd-Fe-B	
残留磁束密度 [T]	1.41	
保持力 [kA/m]	1047.23	
コイル特性		
誘起電圧（各相）[V/Hz]	0.73	
1 コイル巻数	110	
コイル数	12	
定格仕様		
定格電流 [A]	10	
定格回転数 [min^{-1}]	2300	
線間電圧 [V]	200	
	コイル 1 区画駆動	コイル全区画駆動
定格出力 [kW]	3.3	13.2
定格トルク [N・m]	14	56

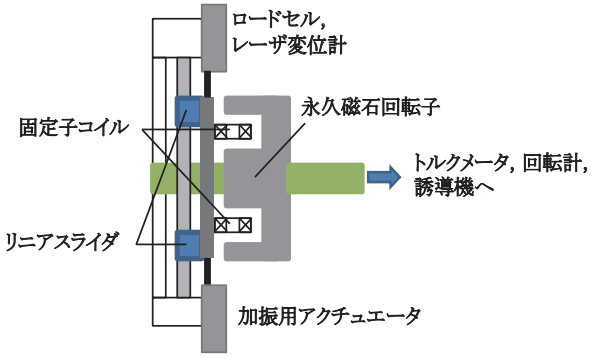
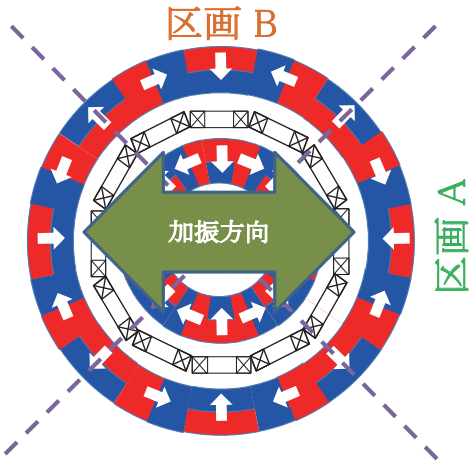


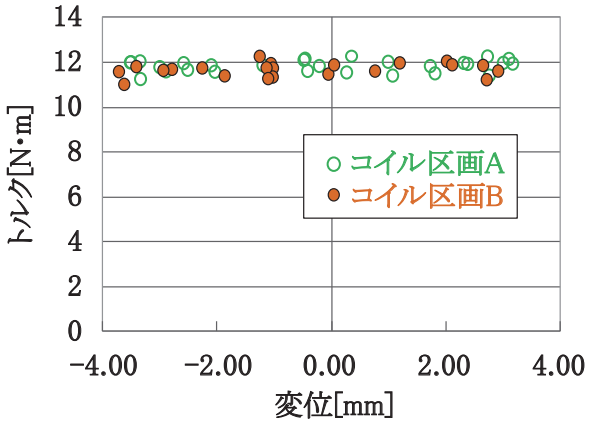
図９　試験装置概略図

確認することで安定して回転可能かどうかを確認した。加振アクチュエータによって，固定子コイルをリニアスライダ上で周波数約 0.368 Hz，変位± 3 mm 程度で加振した。結果について図 10 に示す。

図に示す通り，加振方向に対する位置の違いの影響を確認するため，区画 A，区画 B それぞれに通電して試験を行った。結果，どちらの場合でも発生するトルクに対して変位による影響はほとんど見られず，提案する発電電動機が振動によるトルク変化が少ないことが確認できた。



(a) 加振方向と通電コイル区画



(b) それぞれの区画における計測トルク

図 10　加振試験における発生トルク

振動に対するもう一つの特徴である，径方向力発生による振動抑制について，原理の確認のために実際に力を発生させる試験を行った。駆動は固定子コイルの対向する 2 区画に通電している。こうすることで，この 2 区画のトルク電流に差分を設けた際にロードセルに垂直に力が発生するように試験を行った。試験におけるトルクと径方向力の測定結果と計算結果を図 11 に示す。ここでは回転トルクを一定として，トルク電流の差分である径方向力発生電流を変化させている。結果から，回転トルクとは独立に，径方向力発生電流に応じて任意の値の力が発生していることがわかる。また，これらの測定値は計算値と良く一致していることも確認できた。したがって，回転子と固定子の相対変位や変位速度といったデータを測定することで，それに応じた発生力制御による振動抑制の実現可能性を確認できた。

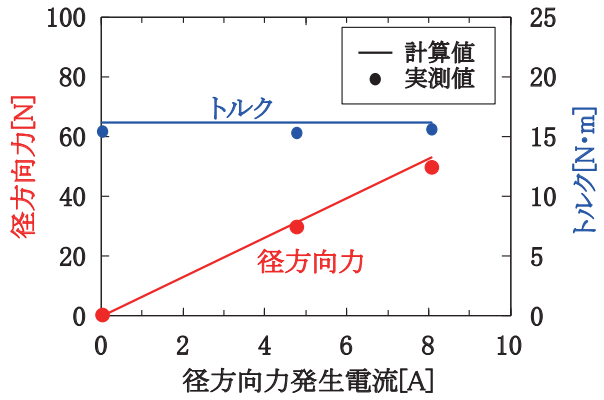


図 11　径方向力の発生試験における測定値と計算値

5．結論

筆者らはこれまで，回生電力の有効利用等を目的とした蓄電装置として超電導フライホイール蓄電装置の研究開発を行ってきた。この超電導フライホイール蓄電装置の実証のために，超電導磁気軸受による浮上力・回転安定性の確認，超電導磁気軸受を同一の低温容器に納めて冷却を行うシステムの検証といった，段階を踏んだ実証試験を行ってきた。これらの試験より，まず超電導磁気軸受によって 2000kg のロータを浮上可能であり，安定して回転が可能であることを確認した。また，小型の試験装置において完全非接触での浮上と，この状態で低次の共振周波数を超えて毎分 3000 回転まで回転数を向上することが可能であることを確認した。

今回の検討では，提案する超電導フライホイール蓄電装置における，フライホイールロータへの動力の伝達のために，大きなギャップかつ振動抑制機能を持った発電電動機を提案した。この原理確認のため，10kW 級の小型試作機を製作して実証試験を行った。結果，電動機としては比較的大きい 5mm 以上のギャップでも問題無くトルクが発生可能であることを確認した。同時に，固定子と回転子位置が相対的に変化しても発生トルクにほとんど影響が無いことを確認し，提案する発電電動機の大きなギャップによる振動への安定性が確認できた。振動抑制機能については，コイルを周方向に区画分けすることで，回転子において径方向への力を発生することが可能であることを確認した。

今後，二次元での加振による径方向力の振動制御の検討を進める。さらに，実用化上の課題として，大規模化に伴う，サイズの検討や部材に加わる応力の許容値の把握の検討を続けていく予定である。

本研究の一部は国土交通省による国庫補助を受けて実施した。

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，長谷川 均，池田 雅史，長嶋 賢，村上 雅人：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，鉄道総研報告，Vol.24，No.1，pp.29-34，2010
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，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
5）森下 明平，横山 修一，奥山 涼太：デュアルハルバッハ配列界磁の磁束密度分布簡易計算法，電気学会論文誌 D（産業応用部門誌），Vol.132，No.5，pp.596-597，2012
6）吉澤佳祐，荒井有気，坂本泰明：デュアルハルバッハ配列磁石を用いた超電導フライホイール用ラージギャップ永久磁石同期発電電動機の検討，電気学会研究会資料，MD-12-69 LD-12-89, 2012