The Japan Society Applied Electromagnetics and Mechanics

学術論文

磁束集束ローレンツ型磁気浮上モータの研究

Development of Flux Concentrated type Self-Bearing Motor

岡田 養二[*1](正員), 北郷 将史[*1], 伊佐川 晃平[*1],
増澤 徹[*1](正員), 榎園 正人[*2](正員)

Yohji OKADA (Mem.), Masashi KITAGOU, Kohei ISAGAWA
Toru MASUZAWA (Mem.), Masato ENOKIZONO (Mem.)

Self-bearing motor has combined function of AC motor and magnetic bearing. Usually levitation force is produced by Maxwell force while the motor torque is produced by Lorentz force. The authors have proposed Lorentz type self-bearing motor where strong magnetic flux is the key technology for good characteristics. In this paper three types of rotor are designed and compared: a flux concentrated PM rotor, Halbach rotors with iron backyoke and aluminum backyoke. The high density flat coils are designed and used for the stator. The experimental setup is fabricated and the results obtained are compared and discussed in details.

Keywords: self-bearing motor, levitation control, flux concentrated PM rotor, digital control, high density flat coil.

1 緒言

磁気軸受とモータを一体化した通常の浮上モータは，浮上力は磁気吸引力を使い，回転をローレンツ力で発生させた。浮上力を大きくするためには薄い磁石しか使えず，磁石の製作や強度に問題があった。そのため浮上力もローレンツ力を使うモータを提案してきた[1]-[6]。本報では，強力な磁界を発生させるために磁束集束配列磁石(CSPM)やハルバッハ磁石配列を使うことを提案し，解析・設計した装置で実験を行った。また薄型でスロットレスステータを設計するため，平角線で線密度の高い巻き線技術を持っているセルコ社製のステータを設計する[7]。その結果，鉄バックヨークを使ったハルバッハ浮上モータが最も強力であった。これらの実験結果を比較・検討し，報告する。

2 浮上・回転理論

ローレンツモータの浮上原理を，Fig. 1 に示す。Fig. 1 は表面着磁ロータと左右一組のコイルによるステータを示している。コイルに紙面を突き抜ける電流を流すと，ローレンツ力で下向きの力が発生し，ロータにはその反作用で上向きの浮上力が発生する。これを 60 度ずつ配置した三組のコイルに三相電流を流すことで，任意方向に浮上力を制御できる [1]-[3]。

次にトルク発生原理を，Fig. 2 に示す。Fig. 2 では，

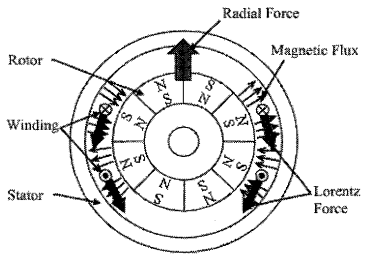

Fig. 1 Principle of Levitation

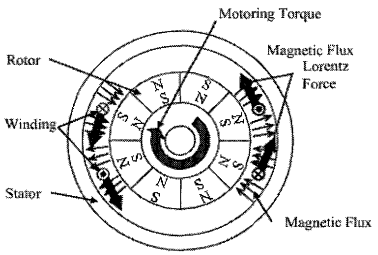

Fig. 2 Principle of Rotation

Fig. 1 の右側の巻き線の電流方向が逆転している。これでステータには反時計方向のトルクが発生し，ロータには反作用で時計回りの回転トルクが発生する。ロータの回転に同期して三相交流を流すことにより，常に一定回転のトルクを発生できる。

3 浮上モータの解析と設計

今までの経験から，ロータ磁極数を 8 とし，ステータの巻き数は 6 個で浮上と回転を任意に制御出来る[1]-[3]。今回は，別の研究で製作した磁気軸受のロータとステータを共有するため，シャフト径を ϕ 40，ステータ外径を ϕ 128 とし，PM ロータ径を ϕ 93 とした。

連絡先：岡田 養二，〒316-8511 日立市中成沢町 4-12-1,
茨城大学工学部機械工学科近藤研究室,
e-mail: y.okada@mx.ibaraki.ac.jp
[*1]茨城大学 [*2]大分大学

NII-Electronic Library Service

The Japan Society Applied Electromagnetics and Mechanics

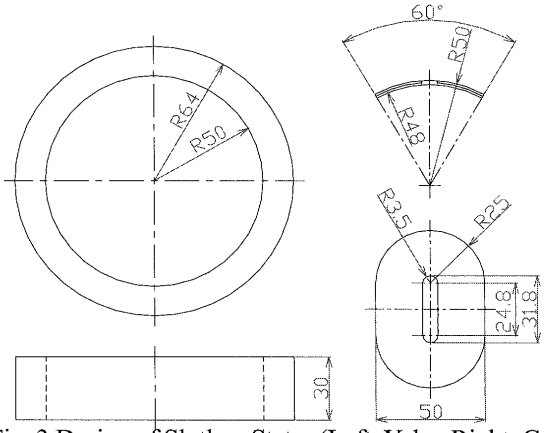

Fig. 3 Design of Slotless Stator (Left: Yoke, Right: Coil)

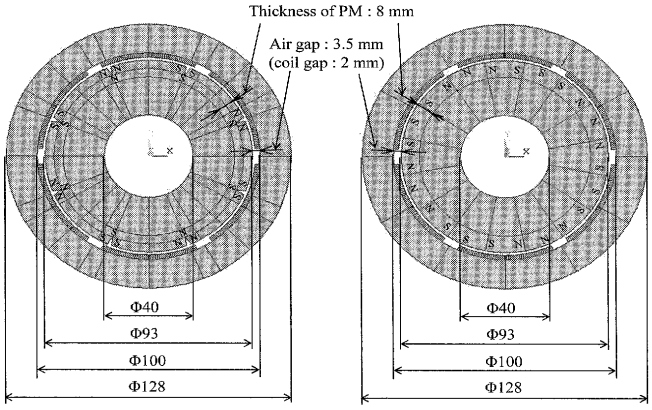

Fig. 4 Analytical Models (Left; CSPM, Right; Halbach)

3.1 ステータとロータの設計

ステータはスロットレス構造とし，バックヨークの内側に空芯コイルを張り付ける構造とする。線密度を高くするため（株）セルコの平角線 0.25×0.95 mm をプレス成形する技術を採用する[7]。ステータの設計図を Fig. 3 に示す。コイルは 2 段で 142 巻に，π/3 間隔で 6 個を配置した。巻き線抵抗は 1.446Ω，インダクタンスはコイル単独で 0.783mH であった。巻き線部分の厚みは，ほぼ 2 mm である。実験の容易さを考慮して空隙を 1.5 mm と従来のものより広めに取ることとした[1]-[3]。また大分大学で開発された磁束集束ロータは，面着磁 PM の上に周方向着磁 PM を乗せる構造である。強度を考え，1 枚の磁石厚みを 4 mm とし，2 枚の CSPM ロータは 8 mm の磁石厚みと決定した。これに合わせて，ハルバッハ磁石の厚みを決め，Fig. 4 の解析モデルを得る。永久磁石にはネオジウム系磁石で保磁力を 1000 kA/m とし，ステータ側バックヨークは積層珪素鋼板 35A300，ロータ側バックヨークはアルミ(比透磁率 1.0)と電磁軟鉄 SUY1 とする。

3.2 磁界解析

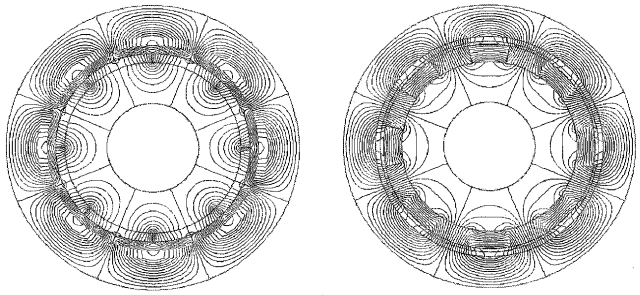

Fig. 5 Flux Lines of CSPM and Halbach_S

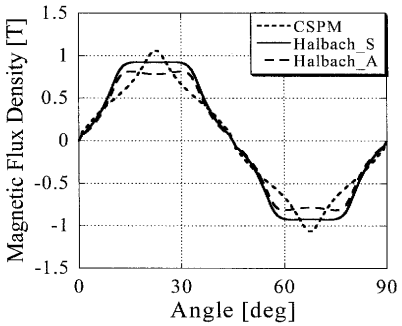

Fig. 6 Comparison of Flux Densities in Airgap

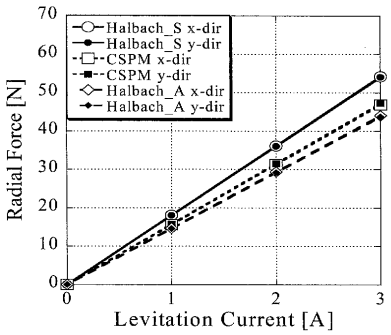

Fig. 7 Comparison of Radial Forces

モータの構造がほぼ決定したので，二次元近似磁界解析を行った。磁束集束ロータでは，周方向着磁磁石の先端角を変更し決定した。磁束密度はほぼ三角形に変化し，角度が狭いほど最大磁束は大きいが，最大磁束値と製作の容易さを考慮して 10 deg と決定した。次にハルバッハ磁石の径方向着磁と周方向着磁の長さの比を変え，最適値を探す。周方向着磁の長さが長いほど最大磁束は大きいが，磁束密度の積分値は大きな変化が無かったので，磁石長さを同じ(1:1)と決定する。形状が決定されたので，最終的な磁束線図を Fig. 5 に示す。

次に設計した 3 種類のロータの磁束密度を比較する。Fig. 6 に示すように，磁束集束型が最大磁束は最も高いが，平均的には鉄バックヨークのハルバッハロータが最も強い。

NII-Electronic Library Service

The Japan Society Applied Electromagnetics and Mechanics

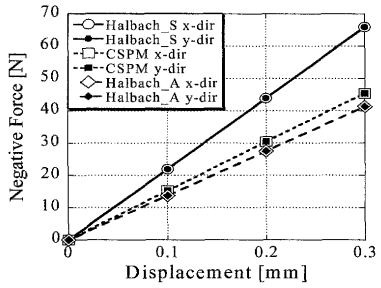

Fig. 8 Comparison of Negative Forces

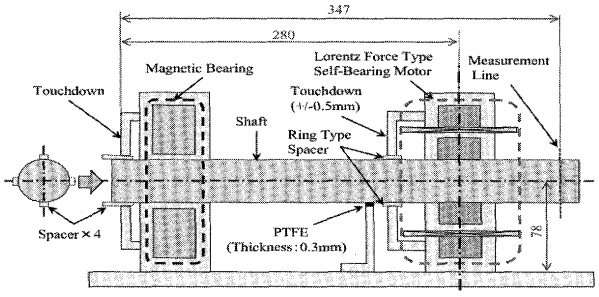

Fig. 10 Schematic of Static Measurement System

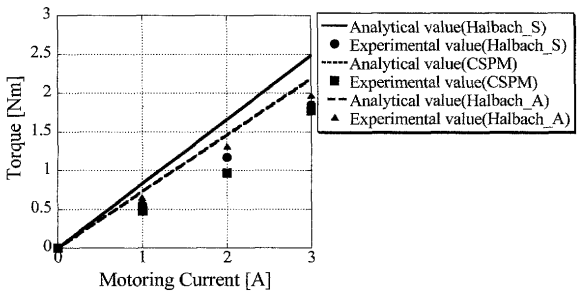

Fig. 9 Comparison of Torque versus Current

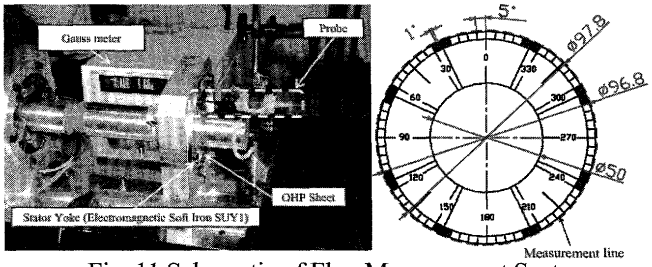

Fig. 11 Schematic of Flux Measurement System
(Left; Photo, Right; Gauge)

浮上力とトルクを計算する。浮上力はロータを中心に置き，三相の浮上制御電流を流して計算した。結果を Fig. 7 に示す。三種類のロータの中では，Halbach_S (鉄バックヨーク)が最も強く，次に CSPM，それより少し弱く Halbach_A (アルミバックヨーク)であった。また図には x 方向と y 方向の制御力を比較している。計算では 10 deg ずつ方向を変えても，浮上力の変動はほとんど見られなかった。これは Fig.6 の磁束分布で基本波成分が大きいことと，コイルが分布巻き線であるため高調波の影響が少なかったためと思われる。

さらに負バネ力を計算した。これはコイル電流を流さずに，ロータを径方向に変位させたときにロータに働く力を計算した。結果を Fig. 8 に示す。界磁を強くしたために浮上力は強くなったが，それ以上に負バネ力が大きく，浮上制御しにくいことが想像できる。ロータの設計で注意すべきことは，ロータの重量の割に界磁を強くする(軽量化をはかる)ことが重要である。

最後にモータのトルク特性を計算した。ロータを中心に置き，各コイルに最大トルクが発生する電流分布に設定し，モータ電流を変化させてトルクの計算を行った。結果を Fig. 9 に示す。従来と比較すると 3 A で 2 Nm の強力なトルクを発生することを示している。モータ電流の位相を変化させたときのトルクを計算したところ，予想通りに正弦波状に変化した。

4 実験装置と静特性

解析設計したモータの基本特性を確かめるため，実験装置を製作した。ここでは実験装置と，その浮上力特性を示す。

4.1 ロータの形状

ステータは Fig. 3 に設計図を示したので，ロータの構造を示す。Fig. 4 に示した解析によって，試行錯誤的に磁束集束ロータとハルバッハ磁石ロータを設計した。Fig. 4 のロータは最終的に決定したロータ形状を示している。永久磁石には NEOMAX-44H を使用し，バックヨークは CSPM が積層珪素鋼板 35A300 を，ハルバッハロータは電磁軟鉄 SUY1 とアルミニウムの二種類を製作した。

4.2 測定方法と結果

今回は磁束密度，浮上力と負バネ力の測定を行った。実験は別の磁気軸受研究の実験装置と兼用したため，Fig. 10 の構成とした。左端は磁気軸受で，そのタッチダウンにシリコンゴムを 4 個挟み，ほぼ片持支持とした。右側が開発した浮上モータで，PTFE 板を接着した L 字材で水平に案内し，その外側で力を測定した。

4.2.1 磁束密度分布

最初に磁束密度の測定を行った。この場合には Fig.10 に示すモータのタッチダウンにリングスペーサを挟み，ロータを中心に固定する。またガウスメータ (Lake Shore 421)のホール素子部分が厚み 2 mm なの

NII-Electronic Library Service

The Japan Society Applied Electromagnetics and Mechanics

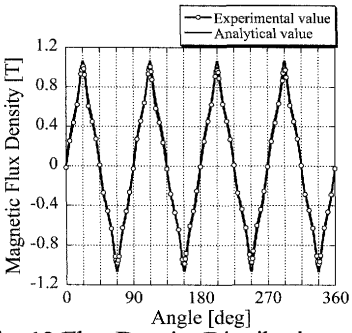

Fig. 12 Flux Density Distribution of CSPM

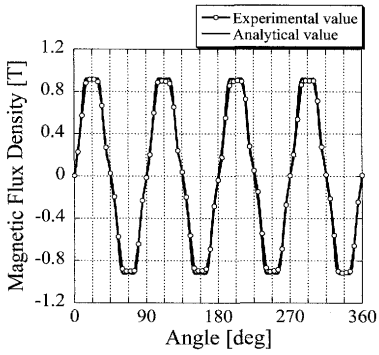

Fig. 13 Flux Density Distribution of Halbach_S

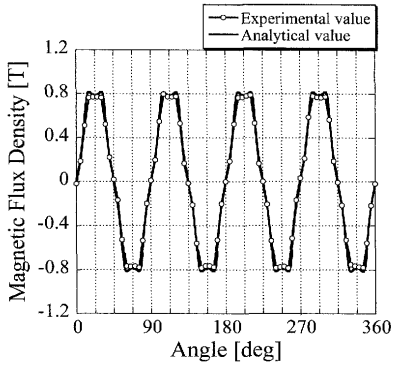

Fig. 14 Flux Density Distribution of Halbach_A

で，ステータを外してバックヨークと同じ大きさの電磁軟鉄を入れ，コイルのない状態で測定した。測定の様子を，Fig. 11 の左の写真に，角度指定に作製したゲージを図の右に示す。この方法での測定結果を Fig. 12 から Fig. 14 に示す。解析に非常に近い磁束密度が得られた。通常は実験値は小さくなるが，使用した永久磁石の起磁力が計算より少し大きかったためと思う。

4.2.2 浮上力・負バネ力特性

次に径方向の浮上力を測定した。この場合には，ロータ位置で力と変位を測ることは出来ないので，支持点から測定位置までの距離 347 mm とし，支持点から浮上モータ中心までの距離 280 mm として測定を行った。電流を変化させた後に，ダイアルゲージの読みを中心位置に合わせ，そのときのフォースゲージ(FUSO

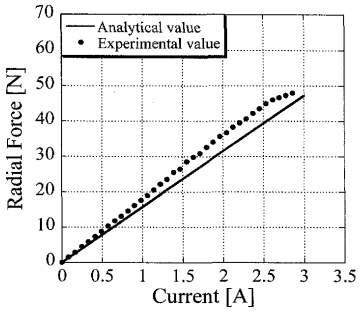

Fig. 15 Radial Force of CSPM

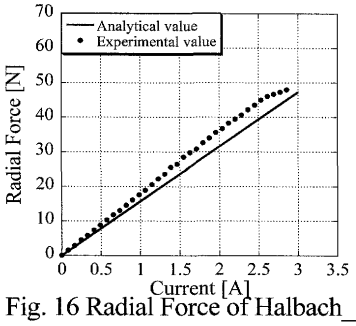

Fig. 16 Radial Force of Halbach_S

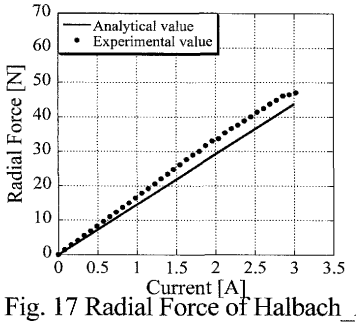

Fig. 17 Radial Force of Halbach_A

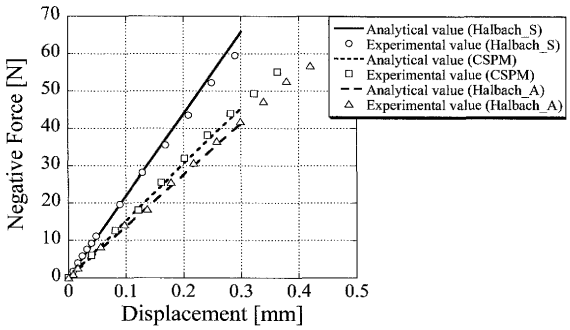

Fig. 18 Comparison of Negative Forces

FG5000A)の値をロータ位置に換算し浮上力とした。x 方向と y 方向を測定したがほとんど変化が無かったので，x 方向の結果を Fig. 15 から Fig. 17 に示す。解析に沿った傾向になっているが，実験の方が浮上力が大きい。これは解析では磁石の保持力を 1000 kA/m としたが，実際に使用した磁石の保持力が少し大きかったことと，測定を換算しているために誤差が入ったためと思われる。前回のハルバッハ磁石を使った研究[2]では，外径 ϕ 60.6 に対して磁気ギャップが 5 mm あったために浮上力に変動が生じた。今回はフラット巻

NII-Electronic Library Service

The Japan Society Applied Electromagnetics and Mechanics

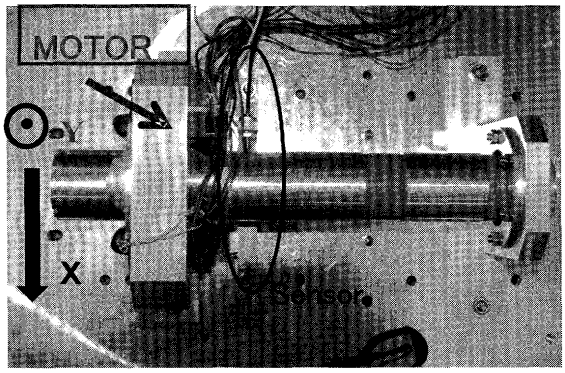

Fig. 19 Photo of Levitated Rotation Experiment

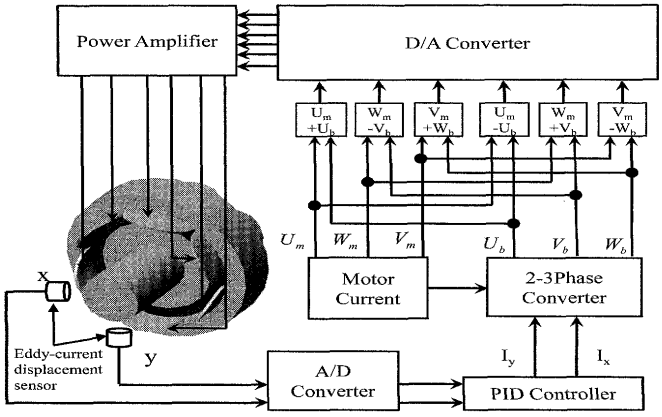

Fig. 20 Schematic of Control System

き線を使ったので，ギャップが 3.5 mm と狭く，そのようなトラブルは発生していない。

最後に負バネ力の測定を行った。これはコイルには電流を流さず，ロータを中心位置から変位させ，変位方向の吸引力と変位を測った。力はフォースゲージの読みを 347/280=1.24 倍し，変位はダイアルゲージの読みを 280/347=0.81 倍してプロットした。結果を Fig. 18 に示す。磁束密度が強かったので，ほぼ解析に近い強い負バネ力を得ている。

5 浮上・回転特性

製作した浮上モータの浮上・回転特性を測定した。しかし浮上力・負バネ力とも非常に大きいので，Fig. 19 に示すように右端を玉軸受で片持ち状態とし，左端に浮上モータを付けて制御し，測定を行った。制御系の構成を Fig. 20 に示す。ローカル PD 制御で安定浮上し，制御条件を Table 1 に示す。ここで，Kp, Kd は比例と微分ゲイン，τ はサンプリング周期である。浮上回転には成功したが，200r/min 程度の回転数から不安定化してしまった。今回は同期モータ制御を行っており，回転角を検出したモータ制御を行っていない。検出回転角によるサーボモータ制御を行えば，浮上回転の安定性は格段に向上すると考えられる。

Table 1 Feedback Gains (Local PD Control)

	CSPM	Halbach_S	Unit
Mass	2.27	2.30	Kg
Kp	60	70	A/mm
Kd	0.16	0.16	A s/mm
τ	0.1	0.1	ms

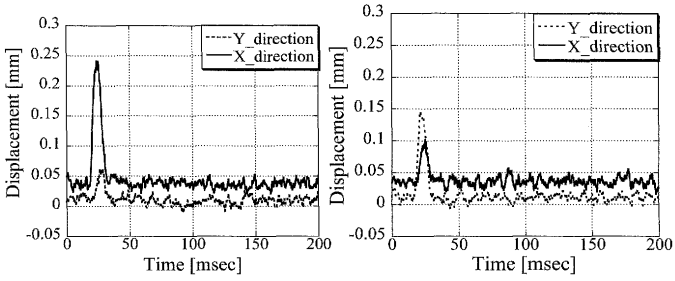

Fig. 21 Impulse Responses of CSPM (Left: X, Right: Y)

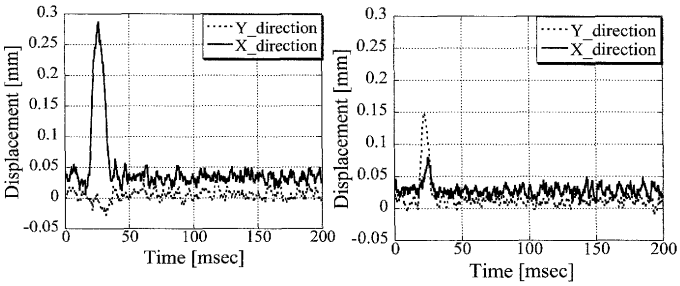

Fig. 22 Impulse Responses of Halbach_S (Left: X, Right: Y)

5.1 インパルス応答実験

最初に安定浮上状態でのインパルス応答を測定した。これはフィードバックしている変位信号に，幅 2ms，高さ CSPM では 0.3mm，Halbach_S では 0.1mm に相当するパルスを加え，擬似的にインパルスを入力して応答を測定した。CSPM モータの応答を Fig. 21 に，Halbach_S モータの応答を Fig. 22 に示す。Halbach_A は CSPM と似た応答なので，次項と共に省略する。負バネ力が強いために，測定は安定せず，x 入力で y にも変位が現れるなど，相互干渉も見られた。干渉が起きたのは，ロータ回転角を正確に 0 度に保持できなかったためと思われる。これが浮上回転の範囲が狭い原因と考えられる。

5.2 周波数応答実験

同様に安定浮上状態の周波数応答を測定した。測定は周波数応答測定器(NF FRA5095)から 0.1mm 相当の正弦波信号を加え，そのときの応答を測定している。

NII-Electronic Library Service

The Japan Society Applied Electromagnetics and Mechanics

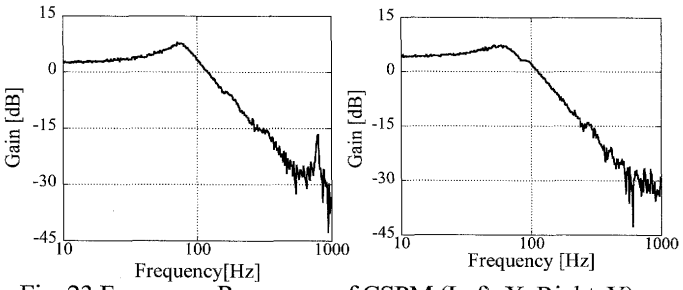

Fig. 23 Frequency Responses of CSPM (Left: X, Right: Y)

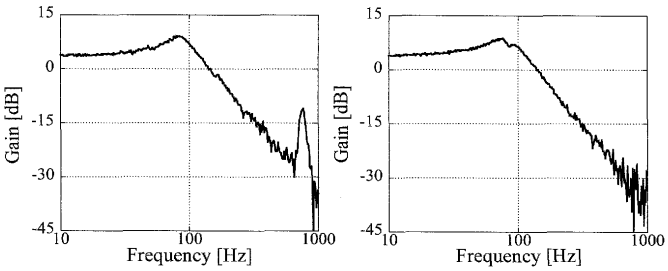

Fig. 24 Frequency Responses of Halbach_S (Left: X, Right: Y)

CSPM のゲインを Fig. 23 に，Halbach_S のゲインを Fig.24 に示す。ロータが重いために，共振周波数は 60-80Hz といくぶん低いが，良く制振されていることがわかる。

5.3 モータ駆動特性実験

最後にモータ特性の測定を行った。この場合は Fig. 19 のモータをシャフトの中央に移動し，両端を玉軸受で支持した。通常のモータと同じような状態で，まず電流と静止トルクとの関係を測定した。電流とトルクの関係は，Fig. 9 に示すように，Halbach_S で解析結果の 74%, CSPM で 80%, Halbach_A で 88%であった。

次にモータアナライザー(菅原研究所 PC-SAA2, TB-2KS)でトルク・回転特性を測定した，CSPM と Halbach_A の回転数に対するトルク特性と効率を Fig. 25 に示す。本トルクメータは人工心臓用モータに合わせて最大トルク 200mNm のものを購入したので，最大電流を 0.5A で測定した。最後に Halbach_S も測定したが，途中で玉軸受の抵抗が増えてしまい，良好な結果が得られなかったので，図示していない。測定できる最大トルクが，本モータの発生トルクの 15%程度であるため，最大効率も 50%程度と悪くなってしまった。適切な測定方式であれば，良い効率と回転特性を示すと思われる。最大回転数が低いのは，強力な界磁を持つ高トルク・低速モータの特徴で，500 rpm 程度からアンプの電源電圧±36V を越える逆起電力が観測された。

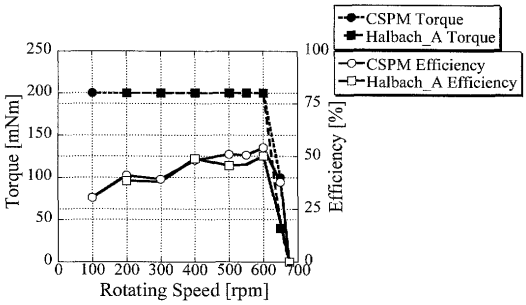

Fig. 25 Torque and Efficiency of Motor

6 結言

強力な界磁を発生できるローレンツ浮上モータを３種類提案し，試作実験を行った。浮上モータの場合，必然的にエアギャップが広くなる。そのため CSPM ロータは通常のモータほど界磁が強くなく，鉄バックヨークを持つハルバッハロータが最も強力な浮上モータとなり得る。しかし負バネ力も強くなり，これらを兼ね合わせた設計が重要である。今後本方式を発展させ，ロータを軽量化させつつ強力な人工心臓用やロボット用モータを開発する予定である。

謝辞

この研究は，科学研究補助金　基盤研究(B)　課題番号: 20360106 によって実施している。関係各位に感謝申し上げます。

(2010 年 3 月 13 日受付)

参考文献

[1] 徳元隆人，金箱秀樹，上野哲，岡田　養二，"ローレンツ型セルフベアリングモータのスロット有無による特性，機論，Ser. C, Vol. 68, No. 674, pp. 2992-2998, 2002.

[2] 神部拓郎，岡田養二，"ハルバッハ磁石を用いたローレンツ型磁気浮上モータの研究",機論，Ser. C, Vol. 70, No. 698, pp. 2791-2796, 2004.

[3] Okada, Y., Konishi, H., Kanebako, H. and Lee, C. W., "Lorentz Force type Self Bearing Motor", *Proc. of 7th Int. Symp. on Magnetic Bearings*, Zurich, pp. 353-358, 2000.

[4] Stephens, L. S. and Kim, D. G., "Force and Torque Characteristics for a Slotless, Lorentz Self Bearing Motor", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 38, pp. 1764-1773, 2002.

[5] Park, S.-H., Lee C.-W. and Okada, Y., "Design of Lorentz Force type Integrated Motor-Bearing System Using Permanent Magnets and Concentrated Windings", *Proc. of 11th World Congress in Mechanism and Machine Science*, Tianjin, China, pp. 1-5, 2003.

[6] 岡田養二，北郷将史，増澤　徹，榎園正人，"磁束集束ローレンツ浮上モータの提案"，日本機械学会Ｄ＆Ｄコンファレンス 2009, CD-ROM Proceedings, pp. 1-6, 2009.

[7] http://www.selco-coil.com/.

NII-Electronic Library Service