薄型高トルク密度 1 軸制御シングルドライブベアリングレスモータの解析及び設計

Analysis and Design of a Disk Shaped One-Axis Actively Positioned Single-Drive Bearingless Motor with High Torque Density

横山 正太郎^{*1}, 杉元 紘也^{*1}(正員), 千葉 明^{*1}(正員)

Shotaro YOKOYAMA, Hiroya SUGIMOTO (Mem.), Akira CHIBA (Mem.)

This paper presents a novel disk-shaped single-drive bearingless motor. The rotor is actively positioned only in the axial direction whereas it is passively stabilized in the radial and tilting directions. Generally, the rotor shaft length should be larger than the outer diameter for the passive stabilization in the tilting direction. On the other hand, the proposed bearingless motor has a large outer diameter and a short axial length with positive tilting stiffness. In this paper, the novel concept of the new machine structure is presented. In addition, the magnetic suspension force and rotational torque are calculated in three-dimensional finite-element-method analysis.

Keywords: bearingless motor, single-drive, one-axis active positioning, repulsive passive magnetic bearing, disk-shaped.

(2017 年 3 月 21 日受付, 2017 年 12 月 13 日再受付)

1 緒言

ベアリングレスモータは、磁気軸受と電動機を磁氣的に一体化し、非接触で回転軸を支持しながらトルクを発生させることができる。機械的接触がないため、無摩擦、無摩擦で粉塵が発生せず、メンテナンスフリーで長寿命、高効率で省エネルギー効果があるという利点がある。そのため、半導体製造用ポンプや人工心臓用ポンプ、高純度攪拌機、コンプレッサ、回転ステージ、フライホイール、冷却ファン等への応用が研究されている[1-5]。

回転子の磁気浮上を実現させるには、回転軸である θ_z 以外の、半径方向 x, y , 傾き方向 θ_x, θ_y , 軸方向 z の 5 自由度を能動的もしくは受動的に支持する必要がある。ベアリングレスモータは、能動的に制御する軸数により 1~5 軸制御に分類される。5 軸制御型は、高い安定性と信頼性が得られるが、必要なインバータとセンサの台数が多いため、高コストである。近年、システムの簡単化、低コスト化のために、制御軸数を削減した 1 軸制御ベアリングレスモータの研究が盛んに行われている[9-22]。

1 軸制御ベアリングレスモータは、軸方向のみを能動的に制御し、半径方向及び傾き変位を受動型磁気軸受によって受動安定させる。通常、1 軸制御型は回転子の z 方向変位を検出するセンサが 1 台、電動機用インバータ及び磁気支持用インバータがそれぞれ 1 台ずつ必要である。一方、1 軸制御シングルドライブベアリングレスモータは、 q 軸電流によってトルクを発生させ、 d 軸電流によって磁気支持力を発生させるため、必要な三相インバータと変位センサはそれぞれ 1 台のみであるため、システムの簡単化及び低コスト化に有利である。

著者らの先行研究[12]では、これまでに受動安定方向の剛性が高いラジアルギャップ型シングルドライブベアリングレスモータが提案され、実験的に基本原理が確認されている。しかし、回転トルクを能動的な軸方向力を発生させる固定子鉄心と回転子永久磁石がそれぞれ 3 段構造となっており、構成が複雑である。

本稿では、固定子鉄心及び回転子永久磁石が共に 1 段構造で、文献[12]のトルク密度のおよそ 3 倍、かつ 2 軸制御機である文献[6]を超える 1.5 Nm/l に向上させる。また、従来円筒構造が多い 1 軸制御機において、従来の 2 倍以上となるアスペクト比 $D/L = 5$ の扁平な構造を持つ高トルク密度な 1 軸制御シングルドライブベアリングレスモータの設計を行う。

2 設計概要

連絡先: 横山 正太郎, 〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1, 東京工業大学工学院電気電子系,
e-mail: yokoyama.s@belm.ee.titech.ac.jp

^{*1} 東京工業大学

2.1 研究の位置付け

Fig. 1 に 1 軸制御, 2 軸制御ベアリングレスモータのアスペクト比 D/L とトルク密度を示す。固定子直径及びコイルエンドを含む軸長をそれぞれ D 及び L とする。これまでに提案されている 1 軸制御型ベアリングレスモータは, アスペクトが 3 未満であり, 一方, 2 軸制御型はアスペクト比が 6 以上で設計される傾向にある。1 軸制御型は, 半径方向と傾き方向を受動安定させる必要があり, 2 軸制御型は, 軸方向と傾き方向を受動安定させる必要があるためである。著者らが提案した従来構造[12]は, 定格トルク 0.046 Nm, トルク密度 0.54 Nm/l, アスペクト比 1.8 であった。本稿では, 回転子直径をおよそ 3 倍にすることにより, 定格トルクを 10 倍の 0.51 Nm に向上する。トルク密度をおよそ 3 倍に向上する。即ち, 提案構造はアスペクト比 5, トルク密度 1.5 Nm/l を目標とする。本研究の電流密度は文献[7][8][12]と同様 8 A/mm² であり, 同[9][10]は 10 A/mm², 同[11]は 12 A/mm² である。

2.2 提案構造

Fig. 2 に提案構造を示す。図中の破線で囲われている部分はモータ部で, 36 スロットの固定子鉄心と三相巻線, 24 極永久磁石回転子から構成される。モータ部の内側にある点線で囲われた部分は, 反発受動型磁気軸受であり, 軸方向に着磁されたリング型永久磁石が同心円状に配置され, 同極同士が対向するように 8 段積層されている。軸方向変位は中心部に配置された渦電流型変位センサによって検出する。回転子の回転角度は回転子 24 極永久磁石の下部に配置されたホールセンサによって検出する。半径方向の剛性目標値は 100 N/mm であり, 回転子質量の 0.125 kg に対し十分

Fig. 1 Torque density versus aspect ratio.

Fig. 2 Structure of new model.

Fig. 3 Parameters of rotor permanent magnet.

高い剛性である。従って, 回転軸を横向きにした場合でも自重による沈み込みはおよそ 12 μ m であり, 機械ギャップ 500 μ m に対して十分小さい。

Fig. 3 に回転子 SPM の x - y 平面図を示す。ただし,

Fig. 4 Mechanical parameters of single-drive bearingless motor.

ここでは反発受動型磁気軸受は図示していない。永久磁石は樹脂製ホルダに固定されている。回転子外径は $\phi 90$ mm, 半径方向の磁石厚は 6 mm である。ここで、磁石の角度を θ_{PM} とする。

Fig. 4 にモータ全体の x - z 平面図を示す。固定子鉄心は、外径 $\phi 129$ mm であり、0.35 mm の積層鋼板によって構成される。24 極回転子永久磁石の軸方向の高さは 5.3 mm であり、固定子鉄心と回転子永久磁石は 1.8 mm のみ対向している。半径方向の磁気ギャップは 0.8 mm である。ここで、固定子の積厚を l_z と定義する。

2.2 d 軸電流による能動的な軸方向支持力の発生原理

Fig. 5 に、軸方向能動支持力の原理を示す。図中の実線矢印は回転子永久磁石による磁束を表しており、破線矢印は d 軸電流による磁束を表している。固定子鉄心と回転子永久磁石は、鉄心の下部 1.8 mm のみが対向しているため、磁石の吸引力により z 軸正方向の力が常時発生する。さらに、正の d 軸電流を流すことによって磁石による磁束と同方向の d 軸磁束を重畳させることで、 z 軸正方向の力が増加する。反対に、負の d 軸電流を流したときは、磁石による磁束を打ち消す方向に d 軸磁束が発生するため、 z 軸正方向の力が弱められる。この電流によって発生する z 軸方向の力の強弱によって、軸方向を能動的に制御する。

3 三次元有限要素法による磁界解析

JMAG-designer15.0.02k@を用いて、三次元有限要素法(3D-FEM)による磁界解析を行う。

3.1 回転子永久磁石の磁石角度 θ_{PM} の検討

Fig. 6 に、磁石角度に対する平均トルク及びトルクリプルを示す。電流密度は 8 A/mm^2 とする。初期値として、固定子鉄心の積厚 $l_z = 4.9 \text{ mm}$ と定め、磁石角度を 1 deg 毎に変更し、 11 deg 、 12 deg 、 13 deg の 3 種類で比較した。解析の結果、平均トルクは磁石角度の増加に伴って増加したが、トルクリプルに関しては、磁石角度 12 deg において、最小値 1.54% となった。そのため、磁石角度 $\theta_{PM} = 12 \text{ deg}$ を採用する。しかし、このときの平均トルクは 0.50 Nm であるため、トルクを向上させる必要がある。

3.2 固定子鉄心の積厚増加によるトルクの向上

Fig. 7 に固定子鉄心積厚 l_z に対する平均トルクを示す。固定子鉄心の積厚を 4.9 mm から 5.95 mm の範囲

Fig. 5 Principle of axial suspension force generation.

Fig. 6 Torque ripple reduction.

Fig. 7 Average torque with respect to stator stack length.

Table 1 Stiffness and axial force.

Parameter	Symbol	Value	Unit
Radial stiffness of motor	k_{rc}	-48	N/mm
Axial stiffness of motor	k_{zc}	20	N/mm
Target radial stiffness	k_r	100	N/mm
Required radial stiffness of passive magnetic bearing	k_{rp}	148	N/mm
Estimated axial stiffness of passive magnetic bearing	k_{zp}	-296	N/mm
Total axial stiffness	k_z	-276	N/mm
Axial touch down length	l_{zmax}	0.1	mm
Required axial force to start-up	F_{zmax}	28	N

で変化させた。積厚を増加させると、トルクも増加する傾向が見られ、 $l_z = 5.95 \text{ mm}$ を固定子積厚として採用する。これにより、平均トルクは 0.515 Nm となった。

3.3 モータ部の剛性

Table 1 に、提案構造について、剛性、不平衡吸引力、タッチダウン幅及び始動時に要求される軸方向力を示す。半径方向剛性は負剛性であり、 -48 N/mm であ

る。軸方向剛性は、正剛性となり 20 N/mm である。全体の半径方向剛性は、モータ部の半径方向剛性 k_{rc} と反発受動型磁気軸受による半径方向剛性 k_{rp} を用いて式(1)に表せられる。

$$k_r = k_{rc} + k_{rp} \quad (1)$$

半径方向剛性が 0 以下であると半径方向に関して受動安定とならないため、半径方向剛性は式(2)に示すよう正である必要がある。

$$k_r > 0 \quad (2)$$

全体の半径方向剛性目標を $k_r = 100$ N/mm としたため、反発受動型磁気軸受に要求される半径方向剛性 $k_{rp} = 148$ N/mm となる。

また、反発受動型磁気軸受は永久磁石によって構成されるため、理論上半径方向剛性 k_{rp} と軸方向の剛性 k_{zp} の間に、式(3) が成り立つ[23]。

$$2k_{rp} + k_{zp} = 0 \quad (3)$$

そのため、 $k_{zp} = -296$ N/mm が予期され、モータ部による軸方向剛性 $k_{zc} = 20$ N/mm と足し合わせると全体の軸方向剛性は $k_z = -276$ N/mm となる。タッチダウン幅は上下に 0.1 mm 設けるため、スタートアップ時には d 軸電流によっておよそ 28 N の力が要求される。

Fig. 8 に d 軸電流に対する軸方向能動支持力を示す。定格 d 軸電流 $i_d = 2.7$ A に対して、弱め磁束領域では 5 倍($i_d = -13.5$ A)、強め磁束領域では 6 倍($i_d = 16.2$ A)の d 軸電流でスタートアップのために必要な力を発生させることが可能である。また、 $i_d = 0$ のとき、65 N の力が発生している。これは、反発受動型磁気軸受の z 軸方向に負剛性であることを用いて、反発受動型磁気軸受の回転子を負方向に 0.22 mm オフセットすることで負方向に 65 N の力を発生させ、相殺している。なお、Table 1 での k_{rp} 、 k_{zp} は、オフセット後の値である。

3.4 干渉トルクと半径方向干渉力

反発受動型磁気軸受は半径方向だけでなく傾き方向も受動的に安定とするために、式(4)に示すよう傾き剛性 k_θ は正である必要がある。

$$k_\theta > 0 \quad (4)$$

反発受動型磁気軸受により半径方向と傾き方向を受動的に安定させる 1 軸制御シングルドライブベアリングレスモータでは、半径方向変位と傾き変位が互いに干渉し合う問題がある。このときの半径方向及び傾き方向の伝達関数は、半径方向に対する外乱入力 f_d 、半

Fig. 8 Active axial force with respect to d -axis current.

径方向の位置 r 、傾き方向に対する外乱入力 τ_θ 、傾き方向の位置 θ 、及び回転子質量 m 、慣性モーメント J 、傾き変位によって発生する半径方向干渉係数 $k_{r\theta}$ N/rad、半径方向変位による干渉トルク係数 $k_{\theta r}$ Nm/mm を用いて、それぞれ式(5)(6)に表せられる[21]。

$$\frac{r}{f_d} = \frac{Js^2 + k_\theta}{(ms^2 + k_r)(Js^2 + k_\theta) - k_{r\theta}k_{\theta r}} \quad (5)$$

$$\frac{\theta}{\tau_\theta} = \frac{ms^2 + k_r}{(ms^2 + k_r)(Js^2 + k_\theta) - k_{r\theta}k_{\theta r}} \quad (6)$$

式(5)(6)の分母が同じであるため、分母多項式の特性方程式は式(7)に表せられる[21,22]。

$$mJs^4 + (mk_\theta + Jk_r)s^2 + k_rk_\theta - k_{r\theta}k_{\theta r} = 0 \quad (7)$$

式(7)を s について解くと、式(8)となる。

$$s = \pm \sqrt{\frac{-(mk_\theta + Jk_r) \pm \sqrt{(mk_\theta + Jk_r)^2 - 4mJ(k_rk_\theta - k_{r\theta}k_{\theta r})}}{2mJ}} \quad (8)$$

システムが安定となるには、式(8)の根号内が負でなければならない。このことから、式(9)が導き出される。

$$4mJ(k_rk_\theta - k_{r\theta}k_{\theta r}) > 0 \quad (9)$$

ここで、式(2)(4)及び $m > 0$ 、 $J > 0$ であることから、条件は式(10)となる。

$$k_rk_\theta - k_{r\theta}k_{\theta r} > 0 \quad (10)$$

各条件を満たすと式(7)の解は純虚数となり不減衰振動系となるが、実際には空気抵抗や渦電流などでわずかにダンピングが発生し減衰振動系となるため安定性を確保できる。式(10)を満たすため、及び回転子の重心位置 z_G を適切な位置に調節することで干渉問題を低減できるため[21,22]、干渉項である $k_{r\theta} \cdot k_{\theta r}$ を最小化させる。

Fig. 9(a)(b)に重心位置 z_G に対する干渉トルク係数と半径方向干渉係数を示す。Fig. 9(a) に半径方向変位による干渉トルク係数 $k_{\theta r}$ を示す。固定子鉄心下面を $z =$

0 として, $z_G = -23 \text{ mm}$ のとき, $k_{\theta r}$ が 0 となるため, 半径方向に変位した際傾きトルクが発生しない。Fig. 9(b) に傾き変位によって発生する半径方向干渉係数 $k_{r\theta}$ を示す。 z_G が -23.1 mm のとき, $k_{r\theta}$ が 0 となるため, 傾き方向に変位した際半径方向力が発生しない。

また, Fig. 9(a)において $k_{\theta r}$ の単位を N とすると, Fig. 9(b)の値とほぼ同値となることが読み取れる。このとき, 2 つのグラフの相関係数は 0.998 と非常に強い相関があり, 2 値中央値に対する差の割合は平均 8.4% であるため, $k_{\theta r} \approx k_{r\theta}$ といえ, 実際には相反定理が成り立つといえる。

Fig. 10 に重心位置 z_G に対する干渉項 $k_{r\theta} \cdot k_{\theta r}$ を示す。提案構造では, 干渉が低減される重心位置 $z_G = -23 \text{ mm}$ となる。

4 反発受動型磁気軸受の設計

Table 1 に示したように, 全体の半径方向剛性 $k_r = 100 \text{ N/mm}$ を達成するためには反発受動型磁気軸受の半径方向剛性には $k_{rp} = 148 \text{ N/mm}$ が要求される。本節では, $k_{rp} = 148 \text{ N/mm}$ を達成する 2 種類の反発受動型磁気軸受について, それぞれ 2 種類の設置場所を考え, 計 4 種類の構造について比較する。

Fig. 11(a)-(d) にモータ部と反発受動型磁気軸受を統合したモデルの x - z 断面図を示す。左側に変位したときを表しており, $z = -23 \text{ mm}$ は干渉トルクが発生しない為, ここにモータ部による不平衡吸引力を表す左向きの二重線矢印を描いた。右向きが反発受動型磁気軸受による半径方向復元力を表している。また, 赤点は磁気回路とは関係ない構造材すべてを合わせた回転子の重心を表している。各モデルにおいて, 軸長 L はコイルエンドと反発受動型磁気軸受の下端とする。Fig. 11(a) に構造 A を示す。構造 A は, 固定子の反発受動型磁気軸受の直径が 37.6 mm , 磁石の断面寸法は $2 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ である。Fig. 10 より, 半径方向変位で傾きトルクが発生せず, k_{rc} のみはたらく位置が $z_G = -23 \text{ mm}$ であるため, 文献[22]と同様に, $z_G = -23 \text{ mm}$ に反発受動型磁気軸受の中心を一致させている。

Fig. 11(b) に構造 B を示す。構造 B は, Fig. 11(a)と同じ反発受動型磁気軸受を用いて, 軸長を短縮する新方法を適用した。新しい配置法では, 不平衡吸引力と復元力のモーメントが釣り合う位置に回転子重心を設定することで, 軸長の短縮を図った。回転子が半径方向に $r \text{ mm}$ 変位したときを考えると, 干渉トルクが発生せず, 半径方向の力のみがはたらく点 $z = -23 \text{ mm}$ に不

(a) Interference torque at radial displacement.

(b) Interference radial force at tilting displacement.

Fig. 9 Calculated interference torque and radial force in 3D-FEM analysis.

Fig. 10 Axial position of the center of gravity of the rotor for minimize the interference.

平衡吸引力 $F_{rc} = -47.4r \text{ N}$ を表す矢印を描いた。また, 反発受動型磁気軸受による半径方向復元力は $F_{rp} = 148r \text{ N}$ である。軸方向の重心位置を z_G とするとき, 反発受動型磁気軸受の中心位置を z_{RPMB} と定義すると, モーメント M は式(11)に表せられる。

$$M = -47.4r \times (-23 - z_G) + 148r \times (z_{RPMB} - z_G) \quad (11)$$

$M = 0$ となるよう z_{RPMB} と z_G を定める。重心位置 z_G が回転子永久磁石の厚みの範囲内に位置するよう, $z_{RPMB} = -8 \text{ mm}$, $z_G = -1 \text{ mm}$ とした。

Fig. 11(c) に構造 C を示す。構造 C は, 同心円状に 3 層のリング磁石を用いた反発受動型磁気軸受を用い, 反発受動型磁気軸受の中心を $z_G = -23 \text{ mm}$ としたものである。

Fig. 11(d) に構造 D を示す。構造 D も, 3 層構造の反発受動型磁気軸受を用いて, 構造 B の軸長を短縮する

配置法を適用させた。

Table 2 に、構造 A から D について傾き剛性と軸長を示す。モータ部の傾き剛性 $k_{\theta c}$ は、重心位置 z_G によって異なるため、 $z_G = -23$ mm である構造 A, C では $k_{\theta c} = 39.3$ Nm/rad となり、 $z_G = -1$ mm である構造 B, D では $k_{\theta c} = 15.3$ Nm/rad となる。反発受動型磁気軸受の傾き剛性 $k_{\theta p}$ は、直径の大きい反発受動型磁気軸受を用いた構造 A, B は大きな負の剛性となり、それぞれ $k_{\theta p} = -32.0$, -47.0 Nm/rad となった。3 層構造の反発受動型磁気軸受を用いた構造 C, D は、構造 C では $k_{\theta p} = -11.2$ Nm/rad と負剛性となったが、構造 D では $k_{\theta p} = 0.2$ Nm/rad と反発受動型磁気軸受でもわずかに正剛性である。全体の剛性 k_{θ} は、式(1)と同様にモータ部と反発受動型磁気軸受部の和であるので、構造 A から D までそれぞれ、 $k_{\theta} = 7.3$, -31.7 , 28.1 , 15.5 Nm/rad となる。全体の傾き剛性が負である構造 B は、不安定である。傾き方向に安定な構造 A, C, D の軸長を比較すると、それぞれ $L = 39.5$, 40.7 , 25.7 mm となるので、一番短い $L = 25.7$ mm となる構造 D を、提案構造として採用する。半径方向剛性が $k_r = 100$ N と高いので回転軸が横向きでも動作できる設計となった。

5 結言

1 軸制御シングルドライブベアリングレスモータについて、定格トルク 0.51 Nm を達成するモータ部構造を明らかにした。また、3 層構造の新しい反発受動型磁気軸受を提案し、軸長を短縮させる、新しい反発受動型磁気軸受の配置法を提案した。シングルドライブベアリングレスモータとして、アスペクト比 5 でトルク密度 1.5 Nm/l を電磁界解析で達成する扁平で薄型な構造を設計した。今後は試作機を製作し、トルクの確認と、浮上、回転等の実験を行う。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 16H02324 の助成を受けて行われた。

参考文献

- [1] M. T. Barholet, T. Nussbaumer, S. Silber, and J. W. Kolar "Comparative Evaluation of Polyphase Bearingless Slice Motors for Fluid-Handling Applications" *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 45, no. 5, pp. 1821-1830, 2009.
- [2] 宮本和弥, 竹本真紹, 小笠原悟司, 平櫛真男, "受動磁気軸受を活用する 5 軸能動制御型ベアリング

Fig. 11 x-z view of motor and repulsive passive magnetic bearing.

Table 2 Tilting stiffness and axial length.

Symbol	A	B	C	D
$k_{\theta c}$ (Nm/rad.)	39.3	15.3	39.3	15.3
$k_{\theta p}$ (Nm/rad.)	-32.0	-47.0	-11.2	0.2
k_{θ} (Nm/rad.)	7.3	-31.7	28.1	15.5
L (mm)	39.5	24.5	40.7	25.7

レスキャンドモータポンプの小型・低損失化の検討”, 日本 AEM 学会誌, vol 23, no. 2, pp. 250-257, 2015.

- [3] 湯本 敦史, 上田 学, 進士 忠彦「小型遠心ポンプ用 1 自由度制御型磁気軸受モータの研究」日本機械学会論文 C 編 Vol. 77, No. 779, pp. 2822-2813, 2011.
- [4] 湯本 敦史, 進士 忠彦「軸方向制御型磁気軸受モータを搭載した小型遠心血液ポンプ」日本機械学会論文 C 編 Vol. 78, No. 792, pp. 3064-3072, 2012.

- [5] H. Hoshi, T. Shinshi, and S. Takatani, "Third-generation Blood Pumps With Mechanical Noncontact Magnetic Bearings", *Artificial Organs*, vol. 30, no. 5, pp. 324-338, 2006.
- [6] W. Gruber, W. Amrhein and Michael Haslmayr, "Bearingless Segment Motor With Five Stator Elements—Design and Optimization", *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 45., no. 4, pp.1301-1308, Jul./Aug. 2009.
- [7] J. Asama, A. Chiba, T. Oiwa, T. Fukao and A. Rahman, "A Design Consideration of a Novel Bearingless Disk Motor for Artificial Hearts", *IEEE* pp.1693-1699, 2009.
- [8] F. Zürcher, T. Nussbaumer and J. W. Kolar, "Motor Torque and Magnetic Levitation Force Generation in Bearingless Brushless Multipole Motors", *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, vol. 17, no. 6, Dec. 2012.
- [9] W. Bauer and W. Amrhein, "Electrical Design Considerations for a Bearingless Axial-Force/Torque Motor", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 50, no. 4, Jul./Aug. 2014.
- [10] W. Bauer, P. Freudenhaler, and W. Amrhein, "Experimental Characterization of a Bearingless Rotating Field Axial-Force/Torque Motor", *ISMB14, 14th International Symposium on Magnetic Bearings*, pp.132-137, Linz, Austria, Aug. 11-14, 2014.
- [11] J. Asama, D. Watanabe, T. Oiwa and A. Chiba, "Development of a One-Axis Actively Regulated Bearingless Motor with a Repulsive Type Passive Magnetic Bearing" *IEEE The 2014 International Power Electronics Conference*, pp.988-993, 2014.
- [12] H. Sugimoto, I. Shimura and A. Chiba, "Design of SPM and IPM Rotors in Novel One-Axis Actively Positioned Single-Drive Bearingless Motor", *IEEE* pp.5858-5863, 2014.
- [13] Toshihiko Okuma, Satoshi Ueno, Masaaki Sakagami and Shigeo Tanaka, "Efficiency of Small Regenerative Pump Using Axial Self-Bearing Motor", *The Japan Society of Mechanical Engineers*.
- [14] Jiro Kuroi, Tadahiro Shinshi, Lichuan Li and Akira Shimobe, "Micro-Magnetic Bearing Motor", *The Japan Society for Precision Engineering*.
- [15] Junichi Asama, Yuki Hamasaki, Takaaki Oiwa and Akira Chiba, "Proposal and Analysis of a Novel Single-Drive Bearingless Motor", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 60, No. 1, Jan. 2013.
- [16] Hiroya Sugimoto, Seiyu Tanaka, Akira Chiba and Junichi Asama, "Principle of a Novel Single-Drive Bearingless Motor With Cylindrical Radial Gap". *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 51, No. 5, Sep./Oct. 2015.
- [17] 杉元紘也, 田中誠祐, 千葉明, 「小型 1 軸制御シングルドライブベアリングレスモータの構造と原理」, 日本 AEM 学会誌, vol. 23, No. 1, pp.48-54, 2015
- [18] Asama, J., Amada, M., Tanabe, N., Miyamoto, N., Chiba, A., Iwasaki, S., Takemoto, M., Fukao, T. and Rahman, M.A. "Evaluation of a Bearingless PM Motor With Wide Magnetic Gaps", *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Vol. 25, Issue: 4, pp.957-964, 2010.
- [19] G. Jungmayra, H.J. Berrothb, M. Panholzer, E. Marth, W. Amrhaina, F. Jeskeb and M. Reisingerc, "Design of a Highly Reliable Fan with magnetic bearing", in *Proc. International Symposium on Magnetic Bearings (ISMB2014)*, pp. 42-47, 2014.
- [20] T. Ohji, Y. Katsuda, K. Amei and M. Sakui, "Structure of One-Axis Controlled Repulsive Type Rotation Tests", *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 47, No. 12, Dec. 2011.
- [21] 渡邊大祐, 浅間淳一, 大岩孝彰, 鳥居孝夫, 千葉明 「1 自由度ベアリングレスモータの運動連成と安定性に関する考察」精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.437-438. 2013.
- [22] Hiroya Sugimoto, Itsuki Shimura and Akira Chiba, "A Novel Simplified Structure for Single-Drive Bearingless Motor", in *Proc. Energy Convers. Conger. and Expo. (ECCE2016)* 7 pages.
- [23] J. P. Yonnet, "Passive magnetic bearings", in *Proc. Third Int. Workshop on Rare Earth-Cobalt Permanent Magnets and their Applications*, pp.241-251, 1978.