

平成 21 年 3 月 27 日現在

研究種目：若手研究 (B)  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19760194  
 研究課題名 (和文) 人工心臓用小型・高剛性・低消費電力ベアリングレスモータの研究  
 研究課題名 (英文) Bearingless motor with small size, high stiffness and low power consumption for artificial hearts  
 研究代表者  
 朝間 淳一 (ASAMA JUNICHI)  
 東京理科大学・理工学部・助教  
 研究者番号：70447522

研究成果の概要：本研究では、小型（特に極薄型）・高剛性・低消費電力のベアリングレスモータの実現を目的とし、以下の成果を得た。新しい極薄型のベアリングレスモータを提案・試作した。モータ外径は 70mm、センサを含めた高さは 16mm である。また、支持巻線の起磁力分布が正弦波状となるような巻線構造を用いることで、試作ベアリングレスモータの安定な磁気浮上を実現した。さらに、非制御方向剛性等の支持性能を評価した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	900,000	0	900,000
2008年度	2,300,000	690,000	2,990,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	690,000	3,890,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電気機器工学

キーワード：電気機器, 人工心臓

## 1. 研究開始当初の背景

(1) モータと磁気軸受の機能を一体化し、軸を非接触で支持・回転させるベアリングレスモータは、非接触磁気浮上駆動という長所を活かし、近年、遠心ポンプ式人工心臓、キャンドポンプ、半導体プロセス用ポンプなどへの応用が提案されている。中でも、磁気浮上式人工心臓は、高耐久性、低血液ダメージという特徴を有し、心臓病患者の血液循環補助という本来の使用目的のみならず、再生医療と組み合わせた治療法への応用として脚光を浴びている。

(2) 国内・国外の他研究期間では、半径方向

2 自由度制御型ベアリングレスモータを使用した人工心臓が研究開発されているが、(a) 非制御（軸・傾き）方向の剛性が弱く、体内埋込時、患者の運動や流体力により羽根車がハウジングに接触する可能性が大きい、(b) 消費電力・発熱が大きいため、体内埋込時のバッテリーサイズが大きく、発熱に起因する赤血球の破壊（溶血）と血液凝固（血栓）の可能性が大きい、という問題がある。

(3) 申請者らは、上記問題を解決するため、モータ系と磁気軸受系がそれぞれ分離した構造を有する人工心臓用アクチュエータを実現したが、(a)血液接触面積が多く、血栓形

成の可能性が大きい、(b)構造が複雑、などの問題点があり、構造的にはインナーロータ型のベアリングレスモータの方が有利である。

## 2. 研究の目的

本研究では、人工心臓用小型・高剛性・低消費電力のインナーロータ型ベアリングレスモータの実現を目的とする。特に、サイズに関して、人工心臓は、基本的に、患者の体内に縦向きに埋め込まれるため、なるべく薄い形状が望ましい。

## 3. 研究の方法

- (1) 新しい極薄形ベアリングレスモータのアイデア考案。
- (2) 3次元有限要素法による磁場解析を用いて、提案するベアリングレスモータの構造・寸法の決定。
- (3) ベアリングレスモータの試作、および性能評価。

## 4. 研究成果

### (1) 提案するベアリングレスモータ

#### ①構造

図1に、提案する極薄形ベアリングレスモータの分解図を示す。固定子は、等間隔で円周上に配列された12個のC形磁性コアを有する電磁石から構成される。C形コアの中央部に、軸支持巻線と電動機巻線を巻回することで、コイルエンドが軸方向ではなく半径方向に広がる。電流を流すことで、C形コアの上下の歯には、それぞれ異なる磁極が形成される。

回転子は、スラスト永久磁石を挟み込んだ二層構造である。各層の回転子鉄心間には、半径方向に着磁されたラジアル永久磁石が挿入されており、各層の着磁方向は同一方向で、上下の層では反対方向である。ラジアル永久磁石のバイアス磁束は、同一平面で磁路を形成するため、各層の磁石間鉄心部は永久磁石と逆向きの着磁と見なすことができる。スラスト磁石のバイアス磁束は、回転子鉄心部と固定子コア間で磁路を形成する。このバイアス磁束は、磁石間鉄心部の磁束を強める効果がある。したがって、回転子は8極を形成し、その着磁方向は上下層で逆向きである。

このように、提案するベアリングレスモータは、コイルエンドが半径方向に広がるため、モータ全体の軸方向の長さが短縮可能である。また、回転子が2層構造で、閉磁気回路が3次元的に形成されているため、非制御方向である軸・傾き方向の剛性が強くなるという特徴を持つ。さらに、永久磁石を用いているため、バイアス電流が不要であり、低消費電力化が期待できる。

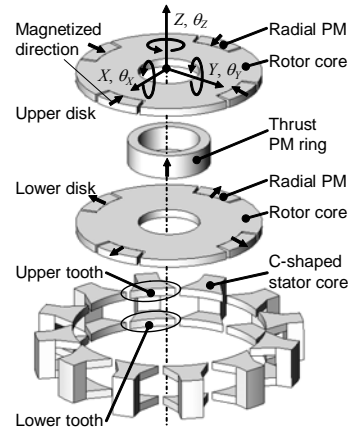


図1 提案するベアリングレスモータ

#### ②トルク・軸支持力発生原理

図2に、提案するベアリングレスモータの磁束の流れを描画した断面図を示す。まず、トルク発生原理を説明する。ラジアル・スラスト永久磁石のバイアス磁束により、回転子には8極の磁極が形成される（上下の層で逆向き）。一方、固定子コアは、C形状のため巻線に電流を流すと固定子上下では異なる極が形成される。つまり、提案するベアリングレスモータは、極が異なるモータを連結した構造であり、固定子コアに8極の電動機巻線を施すと一般的な同期機と同様の原理で回転を実現する。

次に軸支持力発生原理を説明する。永久磁石のバイアス磁束は点線と2点鎖線、軸支持巻線に流れる電流により発生する磁束（軸支持磁束）は破線で示されている。軸支持磁束は、固定子コア、エアギャップ、および上下の回転子鉄心部を3次元的に通る。このときエアギャップ部では、永久磁石のバイアス磁束と軸支持磁束が重畳し、磁束の疎密が形成される。このため磁気吸引力がアンバランスになり半径方向の力（軸支持力 $F_s$ ）が発生する。軸支持力の大きさと方向は、固定子の電流の大きさと方向により調整する。これより回転子のラジアル方向の変位をセンサで検出し、変位に応じた軸支持電流を流すことで、回転子の磁気浮上、すなわち非接触支持が可能となる。また、回転子が軸・傾き方向に運動した場合は、固定子と回転子間の磁気カップリングにより、復元力・復元トルクが回転子に作用するため、受動的に安定となる。

#### (2) 有限要素法による磁場解析

図3に解析モデルを示す。回転子直径は45mm、磁気ギャップは0.85mm、モータ高さは10mmとした。 $\theta_m$ および $t_m$ は、それぞれラジアル永久磁石の弧角と厚さである。また、 $\theta_z$ は回転子の回転角度である。軸支持巻線は3相である。コア2個にコイルを巻回した電磁石を2組対向して配置することで1相を形

成する（軸支持巻線 1）.

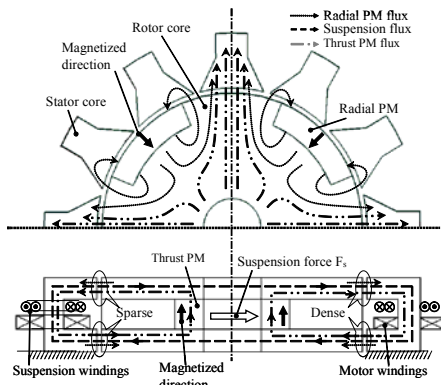


図 2 トルク・軸支持力発生原理

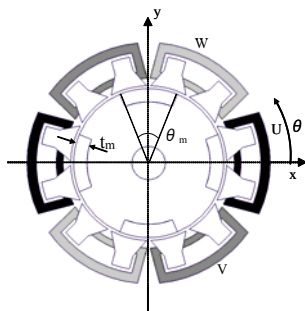


図 3 解析モデル（軸支持巻線 1）

固定子コアの歯幅、 $\theta_m$ 、 $t_m$ 、スラスト永久磁石の大きさ等を変更して磁場解析を行った。図 4 に、最終的に決定した構造での、回転角度に対する回転子の X 軸に作用する力を示す。縦軸は、回転子が X 軸方向に 0.25mm 変位した時に、変位と逆向きに軸支持力を発生させるように定格電流を流した時の回転子に作用する力である。図より、 $\theta_m$  が 45 度では、回転角度が 25 度以下で力が負となっていることから、磁気浮上のスタートは不可能であるが、 $\theta_m$  が 30 度では、どの回転角度からでも磁気浮上が可能であることが明らかとなった。

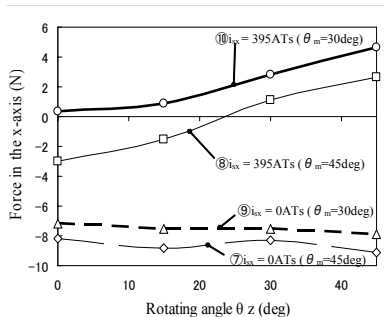


図 4 0.25mm 変位時の X 軸方向に作用する力

ベアリングレスモータでは X 軸支持電流を流した場合、Y 軸方向にも支持力が発生し、実際の支持力の方向と X 軸の間に差異が生じることがある（角度誤差）。この角度誤差はできるだけ小さい方が望ましい。

図 5 に、回転子中心時の回転角度による角度誤差を示す。図 3 では提案したモデルの回転子は全ての回転角度において X 軸正方向へ力を受けているが、図 5 に示すように角度誤差が最大で 16deg 発生しているため浮上しない恐れがある

角度誤差を低減するには軸支持巻線の高調波成分が小さくなる巻線構造にする必要がある。そのためには軸支持巻線を広範囲に渡り巻くこと、各相の軸から遠ざかるほど巻数を段階的に減らすことが有効である。巻線を簡易的に巻くため図 6 に示す巻線構造（軸支持巻線 2）を提案する。巻数の比率は a:b=2:1 とした。図 5 に巻線構造 2 の角度誤差を解析した結果を示す。角度誤差の最大が 16deg から 4deg 以下に減少した。巻線構造 2 を施し回転角度と回転子に働く力を解析したところ全ての回転角度で X 軸正方向の力を発生した。これにより提案モデルは浮上すると考えられる。

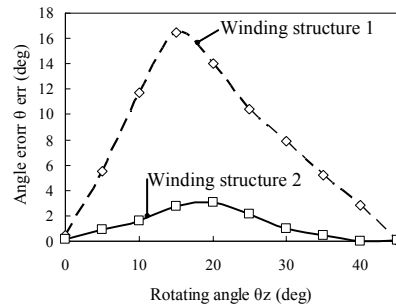


図 5 角度誤差比較

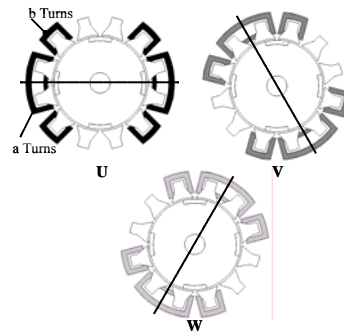


図 6 新たに提案する軸支持巻線 2 の構造

### (3) 試作と性能評価

図 7 に試作したベアリングレスモータを示す。固定子コア、および回転子鉄心は電磁軟鉄を用いた。使用した永久磁石は全てネオジ

ム永久磁石である。磁石厚 $t_m$ は 2mmとした。固定子には、3相2極の軸支持巻線と3相8極のモータ巻線を施した。固定子の下側に変位センサを組み込み、回転子の下側にセンサターゲットを取り付けた。コイルエンドを含めた外径は約 70mm、センサターゲットを含めた回転子の高さは 16mmである。

図 8 に、磁気浮上スタート時の変位と支持電流波形を示す。回転子は X 軸方向にタッチダウンしている状態から、中心に移動していることから、回転子が磁気浮上していることが確認できる。また、どの回転角度からも安定な磁気浮上を実現した。静止浮上時の振動振幅は 0.01mm 以下と、磁気ギャップと比較して十分小さいということが明らかとなった。また、スタート時に必要な最大電流は約 4.5A であったが、静止浮上時は数百 mA 程度と十分小さい。

非制御方向である軸・傾き方向の剛性を測定した。その結果、軸・傾き方向剛性は、目標解析値がそれぞれ 10N/mm, 2.5Nm/rad に対して、実測はそれぞれ 7.8N/mm, 2.0Nm/rad であった。解析と実測で約 20%程度の誤差が生じた。誤差原因としては、回転子表面の磁束密度の差異、組立誤差によるギャップの差異等が挙げられる。非制御方向の剛性は、人工心臓用ベアリングレスモータとしては、実用上十分である。

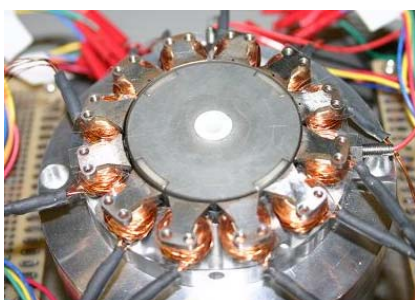


図 7 試作したベアリングレスモータ

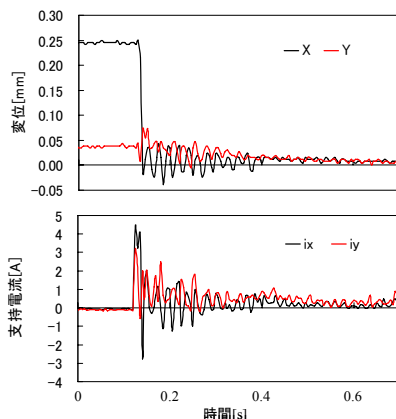


図 8 磁気浮上スタート波形

#### (4) 成果のまとめ

- ①コイルエンドが半径方向に広がる新しい極薄形ベアリングレスモータを提案した。
- ②3次元有限要素法による磁場解析を行い、どの回転角度からでも磁気浮上可能な構造を提案した。また、巻線構造を工夫することで、角度誤差が低減可能にした。
- ③外径 70mm、高さ 16mm のベアリングレスモータの試作を行い、磁気浮上を実現することで、提案するベアリングレスモータの有効性を示した。
- ④非制御方向である軸・傾き方向の剛性は、それぞれ 7.8N/mm, 2.0Nm/rad であり、人工心臓としては十分な剛性を得た。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 2 件)

- ① J. Asama, Y. Kishi, A. Chiba, and T. Fukao, "A Novel Design of a Disk-Shaped Bearingless PM Motor for Artificial Hearts", IEEE International Magnetics Conference, May 4-8, Madrid, Spain, 2008.
- ② 岸裕二, 石井貴久, 朝間淳一, 千葉明, "薄型遠心式人工心臓用ベアリングレスモータの設計", 電気学会研究会資料 回転機リニアドライブ合同研究会, RM-08-40 LD-08-35, 8月7日, 東京, 2008, pp. 43-48.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称: ベアリングレスモータ及び該ベアリングレスモータを搭載した人工心臓, 血液ポンプ, 人工心臓, 血液ポンプ, ファン, ブロア, コンプレッサ, アクチュエータ, リアクションホイール, フライホイール, 揺動ステージ

発明者: 朝間淳一, 千葉明, 岸裕二

権利者: 東京理科大学

種類: 特許

番号: 特願 2008-120798

出願年月日: 2008年5月

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

朝間 淳一 (ASAMA JUNICHI)

研究者番号：70447522

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：