

令和 2 年 7 月 13 日現在

機関番号：52101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K18044

研究課題名(和文)磁氣的・力学的特性に基づき高効率安定浮上を実現する超小型磁気浮上人工心臓の開発

研究課題名(英文) Development of ultra-compact magnetic levitation artificial heart with highly efficient and stable magnetic levitation ability based on magnetic and mechanical characteristics

研究代表者

小沼 弘幸 (ONUMA, Hiroyuki)

茨城工業高等専門学校・国際創造工学科・准教授

研究者番号：90520841

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：小児用埋込型補助人工心臓を実現するため、小型な磁気浮上モータ(セルフベアリングモータ)とそれを用いた磁気浮上ポンプの開発に関する研究を行った。小型化するためには、磁気浮上モータの磁氣的特性とポンプの力学的特性を利用することが必要である。そこで、最小極数としたときの最適なステータの最小スロット数の検討、回転用コイルと浮上用コイルの統合、ポンプの軸方向流体力と磁気浮上モータの制御に起因する干渉力を利用した磁気支持制御の検討を行った。そして、小型な磁気浮上モータの空気中での磁気浮上回転に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

小型な磁気浮上モータが開発できたことから小児用埋込型補助人工心臓の実現に近づいたと考える。この研究を通して、干渉力を利用した磁気支持制御の成果は、他自由度アクチュエータにも応用できると考えられる。また、小型な磁気浮上モータを開発できた成果は、磁気浮上モータ以外にも一般的なアクチュエータの小型化にも応用できると考えられる。このことから学術的にも社会的にも広く応用が期待され意義があると考えられる。

研究成果の概要(英文)：In order to achieve the development of an implantable pediatric ventricular assist device, studies on develop a small magnetic levitated motor (self-bearing motor) and a magnetic levitated pump using the self-bearing motor were performed. In order to reduce the size of the self-bearing motor, it is necessary to utilize the magnetic characteristics of the self-bearing motor and the mechanical characteristics of the pump. Therefore, studies on the optimum number of stator slots in the minimum number of magnetic poles, integrated the rotating coil and the levitation coil, and magnetic levitation control using axial fluid force generated in pump and interference force caused by control of magnetic levitation motor were performed. Then, it was confirmed that the developed small self-bearing motor can levitate and rotate in air.

研究分野：工学

キーワード：セルフベアリングモータ 磁気浮上モータ 磁気浮上ポンプ 補助人工心臓 ターボポンプ

## 1. 研究開始当初の背景

ターボポンプは、産業分野の製造装置や医療分野の補助人工心臓などにおいて、超純水、スラリー液、血液などを送液する主要な機器として使用されている。体内埋込型補助人工心臓は小型であること、年オーダーの機械的寿命を持つこと、発熱でタンパク質変性を起こさないよう高効率であること、溶血や血栓が生じない血液適合性を持つことが望まれるため、非接触でインペラを支えることが出来る磁気浮上技術に応用した人工心臓が研究開発されている。より小型で信頼性の高い磁気浮上型補助人工心臓が開発できれば、血液適合性の高い超小型な小児用埋込型補助人工心臓が実現できると考える。

## 2. 研究の目的

小児への体内への埋め込みとするためには補助人工心臓の大きさとして外径 40 mm、厚み 15 mm 程度にする必要があり、そのため、磁気浮上モータは非常に薄く小径な外径 30 mm、厚み 5 mm 程度に開発する必要がある。磁気浮上回転を実現するには回転制御以外に 5 軸の磁気支持が必要だが、超小型化には制御軸数を削減する必要がある。申請者は、これまで、1 つのステータで回転と磁気支持を分離して制御できる径方向支持回転型の磁気浮上モータ (セルフベアリングモータ) の開発とそれを用いた成人用の連続流型補助人工心臓の開発を行ってきた。本磁気浮上モータは径方向 2 軸を能動的に制御し回転させ、軸方向と傾きはロータとステータ間の高い磁束密度により静的に磁気支持している。開発してきた磁気浮上モータは外径 48 mm、厚み 8 mm 程度であり、これを更に小型化できれば小児用に必要な小ささを実現できる可能性がある。超小型な小児用磁気浮上型補助人工心臓を実現するためには、磁気浮上モータの磁気的特性とポンプの力学的特性を利用することが必要である。

## 3. 研究の方法

### (1) セルフベアリングモータの概要

本セルフベアリングモータは、アウターロータ構造で内壁面に等角度に分割され互い違いに着磁されたセグメント型永久磁石が配置されたロータとロータの内側に配置したスロット型ステータにより構成される。各セグメント型永久磁石は、異方性磁石として磁石の中央を基準として平行に着磁されている。ロータの回転と径方向の磁気支持を独立に制御するため、 $P \pm 2$  極理論を採用し回転制御と磁気支持制御を別々に行っている。また、ロータとステータの軸方向厚みを薄型にすることで、ロータとステータ間の強い磁気結合によりロータの軸方向の変位および傾きを静的に磁気支持している。これにより、デバイスの小型化、薄型化、制御系の簡略化を図っている。

### (2) 最小極数としたときの最適なステータの最小スロット数

これまでに開発している成人用磁気浮上補助人工心臓の径方向支持回転型セルフベアリングモータにおいて、12 スロットのまま小径化するとコイルを巻く領域を確保することは難しいためスロット数を減少させる必要がある。本セルフベアリングモータの場合、最適な磁極の極数の組み合わせは、回転磁界 4 極、浮上磁界 2 極が最小極数となる。ステータのスロット数の検討を行うため 2 次元静磁場解析を用いて径方向の磁気支持性能と回転トルク特性を推定する。セルフベアリングモータの小径化のためステータ外径を 20 mm とする。ステータで回転制御用の 4 極磁界と磁気支持制御用の 2 極磁界を発生させられることとロータ永久磁石の極数 4 極のモータを回転させられることからステータのスロット数は 5 スロット以上とする。小径化のためには、ステータのスロット数は少ない方が良い。そこで、ステータスロット数の検討のため、5 スロット、6 スロット、7 スロットの検討を行うこととした。

### (3) 回転用コイルと浮上用コイルの統合

回転用コイルと浮上用コイルの統合を評価するために 6 スロットの小型セルフベアリングモータを製作した (図 1)。6 スロットステータにおいて、コイルを統合して構成したもの (図 1 右側) と、回転用コイルと浮上用コイルを別々に構成したもの (図 1 右から 2 番目) を試作した。また、最適極数の 5 スロットステータにおいてはコイルを統合して構成したもの (図 1 右から 3 番目) を試作した。また、ロータは、ヨーク内面に 4 つ永久磁石を接着し 4 極ロータを試作した (図 1 左側)。



図 1 開発した小型セルフベアリングモータ

### a) 磁気支持力測定

これまで実機実験で 1 軸方向の力やトルクの測定を行っている。しかし、他軸へ力の干渉があることが分かっており、本研究では干渉力を利用することとしている。そこで、フォーストルクセンサを用いれば 6 軸に作用する力・トルクを同時に測定することができるため干渉力の

測定も行えると考えた。フォーストルクセンサを用いた磁気支持力測定システムを新たに開発した。ステータをフォーストルクセンサに固定し、ロータは xyz ステージと傾きステージからなる治具に固定されている。

#### b) モータトルク測定

実機での評価を行うために測定方法の検討を行った。モータトルクの測定において、これまで用いてきた測定方法には大きな測定誤差を含んでいることが、これまでに開発している成人用磁気浮上補助人工心臓のセルフベアリングモータの実験結果から分かった。そのため新たな測定方法を検討する必要があると判明した。これまでの測定システムは、浮上ロータを玉軸受で支えた軸に固定し回転自由にして、回転式トルクメータにカップリングを介して接続していたが、玉軸受の損失により測定誤差が生じていることが分かった。そこで、ステータを非回転式トルクメータに接続し、浮上ロータに作用するトルクの反作用トルクを測定する新たな測定システムを開発した。

#### (4) 干渉力を利用した磁気支持制御

これまで径方向 2 軸のみ能動制御としてきたが、軸方向 1 軸と傾き 2 軸も能動的に制御する 5 軸磁気支持制御を検討する。そのために、ポンプのスラスト力により軸方向に浮上位置が変位していることを利用する。軸方向制御は、回転制御用コイルによる d 軸成分を利用する。傾き制御は、浮上制御用コイルを利用する。これらにより 5 軸磁気支持制御が可能であると考えられる。これまでに開発してきた成人用磁気浮上補助人工心臓を用いて実機実験を行った。

#### (5) 試作機の改良

##### a) セルフベアリングモータの改良

小型化を図るためにロータヨークの径方向肉厚の薄型化を検討する。あまり薄くしてしまうとロータヨーク部で磁気飽和が起こり磁気支持と回転性能の低下を招く。開発してきた成人用磁気浮上補助人工心臓のセルフベアリングモータを用いて、ロータヨーク内面の永久磁石配列を工夫することで磁束密度を抑えロータヨークを薄くすることができること、エアギャップ中の磁束密度の向上を図れることを検討した。

また、試作した小型セルフベアリングモータにおいて、ロータ回転位置毎に発生する磁気支持力に変動があることが判明した。この変動は磁気浮上の安定性に悪影響を与えると考える。設計方針の検討として、磁束密度分布の振幅スペクトルと位相スペクトルを求め、これらスペクトルから得られた高調波成分を加えた磁気支持力推定の理論式を導出した。

試作した小型セルフベアリングモータのロータは、磁束密度が高くなることを考慮し、永久磁石間にすき間を設けている。そのため、十分な磁気支持力を発生させる磁束密度を得られない可能性がある。小型セルフベアリングモータのステータの試作には、小型なために手先の器用さが求められることから製作に時間を要する。そこで、上記の改良方針を基に磁気支持力の向上を図るため小型セルフベアリングモータのロータのみでの改良を行った。

##### b) ポンプの設計

試作した小型セルフベアリングモータの軸方向磁気支持力は、流体解析で推定した軸方向流体力に比べて小さいことが分かった。そこで、流体解析でインペラのシュラウド形状を検討することで、発生する軸方向流体力の低減を図ることとした。

#### (6) 浮上回転実験

改良した小型セルフベアリングモータの空気中での磁気浮上回転実験を行った。ロータは改良型ロータで永久磁石の配置はハルバツハ配列としている。

## 4. 研究成果

### (1) 最小極数としたときの最適なステータの最小スロット数

磁気支持磁界を加えているときの平均の磁気支持力は 5 スロット、6 スロット、7 スロットともほぼ同じ大きさであった。磁気支持力の振幅は 5 スロットが一番小さかった。また、干渉と形状から発生する回転トルクも 5 スロットが一番小さかった。回転制御磁界を加えているときの平均の回転トルクは 7 スロットが一番大きく発生していた。スロット数が多いほど大きくなっていった。5 スロットと 7 スロットは回転トルクの振幅が小さかった。また、5 スロットと 7 スロットは干渉から大きな振幅を持つ径方向磁気吸引力が発生していた。

5 スロットが本ラジアル型セルフベアリングモータの小径化に適していると考えられる。径方向位置制御によりロータの径方向変位が小さければ径方向に使用する電力も少なく、磁気支持磁界による回転トルクへの干渉トルクも小さいと考える。また、スロット数が増えるとそれぞれのスロットのコイルへの励磁を制御する駆動アンプの数も増加することと 5 スロット、6 スロット、7 スロットの各スロット間に巻くコイル巻き数を同じとすればコイル全抵抗も大きくなる。そのため、スロット数がより少ない方が良いと考える。

### (2) 回転用コイルと浮上用コイルの統合

#### a) 磁気支持力測定

##### < 磁気支持力測定システムの確認 >

5 スロットステータを用いて、磁気支持力測定システムの確認を行った。磁気支持力を一回転させたとき磁気吸引力の大きさは回転角度位置によって 13%程度の変動があった。これはロータに張り付けた永久磁石と突極が合わる面積の各突極での違いやスロットの影響、奇数ス

ロット数による非対称な構造の影響によると考える。ロータ変位 0.3 mm で発生する負ばね力 -0.4 N に対して、0.8 A 以上の磁気支持電流を印加すれば変位を戻すことができることが分かった。また、磁気支持力を x 方向に発生させたときに x 方向の 17% 程度の磁気吸引力が y 方向にも発生した。z 方向に 1 mm 変位すると x 方向の磁気支持力は 9% 程度減少した。ステータとロータの対向面積が減少するためと考える。また、磁気支持力に比例するように傾きトルクが発生した。これは磁気支持磁界により左右の磁束密度が異なることにより発生する。これらの結果より、フォーストルクセンサを用いることによって、磁気支持力の測定と同時に干渉力や干渉トルクも測定することができた。径方向磁気支持力が角度により発生する大きさに変動があること、軸方向変位時に径方向磁気支持力により干渉傾きトルクが発生することを確認することができた。

#### < 磁気支持力測定：異なるステータ・ロータでの比較 >

x 方向に制御力が発生するよう浮上電流を印加して評価した。6 スロットに比べ 5 スロットステータの方が制御力は発生した。また、改良ロータを用いたほうがさらに制御力は発生した。5 スロットに比べ 6 スロットの方が軸方向復元力は強く発生した。この結果は検討中である。5 スロットは軸方向復元力が弱く、軸方向流体力に負けてしまう恐れがあることが分かった。改良ロータとすることで、変位 1mm 次において復元力を 3 倍に増加させることができた。

#### b) モータトルク測定

回転用コイルと浮上用コイルを別々に構成した 6 スロットステータを用いて、浮上用コイルにホワイトノイズを印加した時の回転消費電力への影響を回転数 2000 rpm で確認した。ホワイトノイズのピーク電流値を 0 ~ 0.5 A に変更して行ったところ、回転トルク性能にはほとんど影響しないことが分かった。この結果より、浮上制御は回転性能に影響しないと考える。

5 スロットステータで試作ロータと改良ロータのモータ性能の比較を行った。回転電流の実効値は、改良ロータとすることで 27% 低下した。回転消費電力は、2 mNm のときに改良ロータとすることで 22% 低下した。改良ロータとすることで、モータの性能向上が図れたと考える。

#### (3) 干渉力を利用した磁気支持制御

ロータの径方向位置の 2 軸のみを制御した場合、径方向位置と軸方向位置の 3 軸を制御した場合、径方向位置と径方向の傾きの 4 軸を制御した場合、径方向位置と軸方向位置と径方向の傾きの 5 軸を制御した場合で比較した。

径方向 2 軸のみを制御 ( ) に対して、3 軸制御 ( )、4 軸制御 ( )、5 軸制御 ( ) とともにほぼ同じ平均位置・角度となった。これは、ロータの振動抑制のみの制御を実装したため軸方向制御と傾き制御を加えても平均位置は変化しなかったと考える。傾きながら回転しているのは、流体力が原因だと思われる。軸方向位置にも同様のことが言える。

振動振幅の結果から、3 軸制御 ( ) の場合では、2 軸制御 ( ) に対し径方向 (x, y) と傾き ( $\theta_x, \theta_y$ ) の振動振幅は変わらず、軸方向 (z) の振動振幅は減少している。このことから、軸方向制御を加えることで軸方向の振動振幅を減少させることができ、磁気浮上安定性を向上させられることを確認した。しかし消費電力の結果から、2 軸制御 ( ) に対し回転消費電力が増加しており全体の効率は低下していることが分かる。これは軸方向制御分の電力が増加したためである。一方 4 軸制御 ( ) の場合では、2 軸制御 ( ) に対し径方向 (x, y) の振動振幅は増大し、傾き ( $\theta_x$ ) の振動振幅は減少したが、傾き ( $\theta_y$ ) は増大し、軸方向 (z) の振動振幅はほぼ変化しなかった。このことから、傾き制御は、径方向の振動振幅が大きくなるに加え、傾きの振動振幅も減少できたとは言えないため、逆に磁気浮上の安定性が悪化するという結果になることが分かった。さらに消費電力の結果から全体の効率も低下している。5 軸制御 ( ) の場合も、軸方向の振動振幅は減らせたが、全体的に安定性が悪化してしまっている。また一番多くの軸を制御しているため全体の効率も一番低い。

傾き制御がうまくいかなかった理由としては、傾き制御に径方向位置制御用コイルを使用するため、傾き制御を実行する際に径方向位置制御に干渉してしまうためである。対案としては、傾き制御は振動抑制の制御ではなく、流体力により発生する定常な傾きをなくす制御とすれば、さらなる安定性の向上は可能であると考えられる。

#### (4) 試作機の改良

##### a) セルフベアリングモータの改良

#### < 永久磁石配列の検討 >

開発してきた成人用磁気浮上補助人工心臓のセルフベアリングモータを用いて、ステータとロータ間のエアギャップ、ロータ外径を変えずにステータ外径を変更した解析モデルで磁場解析を行った。接線方向着磁永久磁石を設けていないとき、ステータ外形 35 mm における平均の径方向磁気支持力は 4.27 N であった。接線方向着磁永久磁石を設けないとき、ステータ外形が大きくなると平均の径方向磁気支持力はステータ外形 36 mm で多少増加するが、ステータ外形 37 mm 以上では大きく減少していった。そこに接線方向着磁永久磁石を設けることで平均の径方向磁気支持力は増加した。ステータ外形 35 mm と 36 mm では、角度  $\theta_t$  が 4° までは増加し、5° で減少に転じた。増加量はステータ外形 35 mm で 1% 以下、36 mm で 2% 程度であり、十分なロータヨーク厚みがあるときはハルバツハ配列とする利点はあまりない。ステータ外形 37 mm で  $\theta_t = 8^\circ$  のとき 3% 増の最大値 4.39 N となった。ステータ外形 38 mm 以上では、ハルバツハ配列としてもロータヨーク厚みが十分ではなく磁気飽和が生じ平均の径方向磁気支持力は低くなったと考える。また、接線方向着磁磁石の角度  $\theta_t$  を大きくしすぎると接線方向着磁磁石近傍の磁



束密度が低下するため、径方向磁気吸引力も低下すると考える。以上よりハルバツハ配列とすることでロータヨーク厚みを減らし、エアギャップ中の磁束密度の向上が図れることが確認され、結果として径方向磁気吸引力の向上が図れることが分かった。

#### <高調波成分を加えた磁気支持力推定の理論式>

磁場解析を用いてエアギャップ中の磁束密度分布と径方向の磁気支持力の推定を行った。磁束密度分布の主要な成分を確認するために、磁場解析で推定した磁束密度分布をロータ回転1度毎に周波数解析し振幅スペクトルと位相スペクトルを求めた。振幅スペクトルにおいて1次はステータの磁気浮上制御コイルによる磁束密度分布の基本波成分で、2次は永久磁石による磁束密度分布の基本波成分である。それ以外で6次、10次、14次の高調波成分の値が大きいことが分かった。位相スペクトルでは磁気浮上制御コイルと永久磁石において位相が変化する方向や速さ、初期位相が異なることが分かった。

そして、これらスペクトルから得られた高調波成分を加えた磁気支持力推定の理論式を導出し検証を行った。初期位相は永久磁石の磁界を基準として次数2からの位相差とし、数式処理の簡略化のため初期位相の値を丸めた。回転係数はロータの回転角度位置 $\omega t$ （機械角）との関係である。高調波成分を加えた磁束密度分布 $B_{RS}$ は、高調波成分の次数を $M_n$ 、各次数による振幅を $A_n$ 、初期位相を $\alpha_n$ 、回転係数を $\beta_n$ とし、以下の推定式を得た。この式より次数の差が1の積のみが磁気支持力発生に関係することが分かる。また、1次2次積、8次9次積以外の項はロータの回転に依存することが分かる。

$$B_{RS} = \sum A_n \cos(M_n \theta - \beta_n \omega t - \alpha_n) \quad (1)$$

$$F_y = \frac{\pi z R}{2\mu_0} \{A_1 A_2 - A_2 A_3 \cos(4\omega t) + A_3 A_4 \cos(\omega t) + A_6 A_7 \cos(4\omega t) + A_7 A_8 \cos(4\omega t) + A_8 A_9 - A_9 A_{10} \cos(12\omega t) + A_{12} A_{13} \cos(4\omega t) + A_{13} A_{14} \cos(16\omega t) - A_{17} A_{18} \cos(16\omega t)\} \quad (2)$$

高調波を加えたことにより磁気支持力に90度毎に周期性を持った変動が現れた。磁場解析で得られた細かな変動は現れなかったが、高調波成分により磁気支持力の変動が起こることを確認することができた。

#### <ロータの改良>

磁場解析を用いてハルバツハ配列を用いた改良ロータを検討した。中間永久磁石角度23度を採用することで試作ロータに比べ平均径方向磁気吸引力は約1.5倍となることが分かった。また、改良ロータとすることで復元力を約1.9倍に増加させることができることが分かった。ハルバツハ配列を用いることにより永久磁石の厚みを増加させることができエアギャップ中の磁束密度も増加したことが要因であると考えられる。

#### b) ポンプの設計

インペラのシュラウドの外径を縮小することで、発生する軸推力を緩和調整できることが分かった。トップシュラウド外径27mmにおいて、発生する軸方向流体力が抑えられていることが分かった。また、この設計の過程で同心円ケーシングにおいてシュラウド外径の縮小がポンプ性能を向上できることが示唆された。製作した磁気浮上ポンプを図2に示す。磁気浮上ポンプの寸法は、ポンプ室内径31.6mm、ポンプ室高さ17mmである。ロータインペラは外径31mm、高さ14mmである。

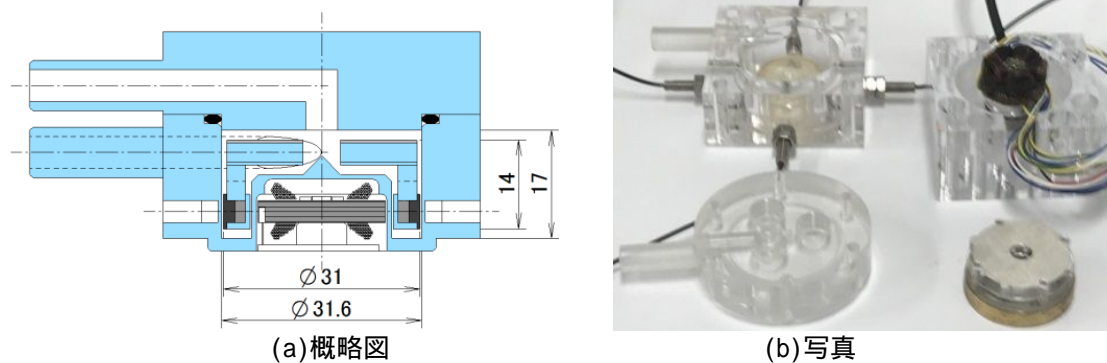


図2 製作した磁気浮上ポンプ

#### (5) 浮上回転実験

小型セルフベアリングモータの空気中での磁気浮上回転に成功した。径方向の最小の流路幅は0.3mmであり振動振幅は0.07mmである。また、ポンプとして駆動させれば流体のダンパによりさらに振動は抑えられると考える。このことから十分な磁気浮上性能を有していると考えられる。しかし、空気中で浮上回転調整時において装置が故障してしまったため磁気浮上ポンプとしての評価はできなかった。今後も研究を続け世界最小のセルフベアリングモータ用いた人工心臓を実現する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 小沼 弘幸、吉村 優人	4. 巻 25
2. 論文標題 小径ラジアル型セルフベアリングモータの開発のためのステータのスロット数の検討	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本AEM学会誌	6. 最初と最後の頁 205 ~ 211
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.14243/jsaem.25.205">https://doi.org/10.14243/jsaem.25.205</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 下田晃平, 小沼弘幸, 村上倫子
2. 発表標題 ラジアル型セルフベアリングモータの径方向磁気支持力特性に関する研究
3. 学会等名 第27回電気学会東京支部茨城支所研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 真鍋圭佑, 小沼弘幸, 村上倫子
2. 発表標題 ラジアルセルフベアリングモータの5軸磁気支持制御方法に関する研究
3. 学会等名 第26回電気学会東京支部茨城支所研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小沼弘幸, 大森康瑛, 真鍋圭佑
2. 発表標題 アウトロータ型径方向磁気支持セルフベアリングモータの性能向上に関する検討
3. 学会等名 第29回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム（SEAD29）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小沼弘幸, 吉村優人
2. 発表標題 小径ラジアル型セルフベアリングモータの開発のためのステータのロット数の検討
3. 学会等名 第25回MAGDAコンファレンス in Kiryu
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 吉村優人, 小沼弘幸
2. 発表標題 小径ラジアル型セルフベアリングモータを用いた遠心血液ポンプの開発
3. 学会等名 第24回 電気学会東京支部茨城支所 研究発表会
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----