自走型磁気アクチュエータ用回転素子の試作

正員 榎園 正人 (大分大学)

正員 戸高 孝 (大分大学)

学生員 後藤 広生 (大分大学)

Fabrication of A Rotary device for Self-Running Magnetic Actuator

Masato Enokizono, Member, Takashi Todaka, Member,
and Kosei Goto, Student Member (Oita University)

This paper presents a hard-magnetic-material-type rotary device whose axis of rotation is parallel to the direction of the exciting magnetic field. Permanent magnets and some silicon steel sheets were used to obtain the radial components of the field strength. Because the principle of movement is similar to that of synchronous motors, the starting torque was still small and the moving direction was also unstable. To solve these problems, the permanent magnets distributed on the rotor surface were inclined to the fixed rotation direction. In addition, triangular silicon steel sheets were used instead of the previous rectangular ones. And still more, we gave the other two permanent magnets to the axis of rotation. Measurement results show that the improved device has a starting torque in the fixed direction of motion and its starting torque is larger than the previous one.

キーワード： 磁極対、回転軸、永久磁石、けい素鋼板

1. はじめに

核融合炉や原子力施設などの構造物は、ほとんどが複雑に張り巡らされた配管によって構成されており、人間やロボットが入り込めないような場所が多数存在する。そのような配管の保守、点検のためには、配管の内部を通り目標の所まで行き、配管内部を自由に動作することができるアクチュエータの開発が必要と思われる。複雑に湾曲した配管内部を移動するためには、小型であることはもちろん、高出力であり、動作の安定した駆動装置が必要となる。そのためには、動作の妨げとなる電源コードを用いず、エネルギーを外部からワイヤレスで供給する方法が望まれる。そこで、外部からの磁場のエネルギーを用いる方法が考えられている^{(1)～(5)}。

配管内部は普通、液体などで満たされているので、スクリューのように回転運動を利用して、移動するのが効率的であると考えられる。ただし、その構造はできるだけ単純化されなければならない。通常の回転運動は、図1のようにトルクが効率的に得られるように回転軸が外部磁界方向と垂直である。一方、実際の配管は多くの湾曲部を持ち、励磁器の配置スペースは限られており、図2のように配管表面にソレノイドコイルを設置せざるを得ない。よって磁界は配管の長さ方向に誘起されることになる。回転力を推進力へ変換する場合に問題になるのが、一般的な回転方向ではスクリューを用いた場合、磁界と垂直方向への動作に限

られてしまい、外部磁界におけるアクチュエータの動作をコントロールすることが困難なことである。

我々は、これまでにこの問題を解決すべく外部磁界方向

図1 通常の回転方向

Fig. 1. Ordinary direction of the rotation.

図2 励磁コイルと湾曲した配管

Fig. 2. Exciting coil and bending pipe.

の回転軸を持つ回転素子を試作し、改良を行ってきた⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾。その回転素子を図3と図4に示す。

今回、我々は図4の回転素子にさらに改良を加え、始動トルクの増加と動作の安定化を図った。本報告では、これまでの改良の経過と、新しく改良した素子の紹介をし、各々を比較、検討する。

図3 初めに試作した従来型回転素子の写真
Fig. 3. Photograph of an ordinary rotary device.

図4 改良した回転素子の写真
Fig. 4. Photograph of an improved rotary device.

2. 動作原理とこれまでの改良の経過

<2.1> 素子の基本的構造と動作原理 永久磁石とけい素鋼板を用いた回転素子の概略を図5に示す。図6はステータ部で、アクリル性の円筒の側面にけい素鋼板を等間隔で円状に、長さ方向に対しては互いに交差するように装着している。そして、円筒の内部には図7のように、アクリル性のロータがある。ロータの表面には半径方向に着磁された永久磁石が装着されている。外部交流磁界が印加されると、図8に示すようにけい素鋼板の両端には磁極（表面磁荷）が同期で発生する。けい素鋼板どうしが交差している円筒の長さ方向の中央では、隣り合うけい素鋼板の端は互いに逆の極性になり、また同期で変化している。そこでは移動磁界が発生していることになり、ロータに装着された永久磁石には、けい素鋼板の先端部との間で磁気力が発生する。このとき、力の作用反作用により外側の円筒が回転しないようにステータ部が固定されているならば、回転軸が外部磁界と平行な回転運動が得られる。

図5 従来型素子の概略図
Fig. 5. Ordinary type of rotary device.

図6 従来型素子のステータ部
Fig. 6. Schematic view of the stator.

図7 従来型素子のロータ部
Fig. 7. Schematic view of the rotor.

図8 外部磁界と板端部に発生する磁極
Fig. 8. Appearance of the magnetic poles and exciting magnetic field.

<2.2> これまでの改良の経過 表1に従来型素子と以前改良した素子のサイズの比較を示す。ロータ上の磁石は6極から2極に、ステータの磁極対である厚さ0.5 mmのけい素鋼板は6枚から4枚にし、形状も長方形から三角形に変更した。また、ステータ、ロータの大きさはそれぞ

れ約30%に小型化し、改良を加えた。以下にその改良点を述べる。

表1 従来型と以前改良した型の比較

Table 1. Comparison of the ordinary type and improved type.

	従来型	以前改良した型
ロータの半径	30.0	9.0
ステータの半径	42.0	11.0
ステータの長さ	70.0	38.0
磁石の数	6	2
磁石の大きさ	$\phi 3.6 \times 1.0$	7.2×1.0
けい素鋼板の数	6	4
けい素鋼板の大きさ	$40.0 \times 20.0 \times 0.5$	$25.0 \times 18.0 \times 0.5$
けい素鋼板の形状	長方形	三角形

(単位: mm)

<2.2.1> ロータ部の改良 図9はロータ部の断面の略図である。従来型は比較しやすいように2極にしている。図9(a)のように従来型素子は、ロータ部の表面に装着された永久磁石の磁化方向が半径方向であった。そのため図10(a)に示すように永久磁石からの磁束線は左右対称に流れてしまい、周りのけい素鋼板に生じる磁極との間には左右対称な力が働き、始動トルクが互いに打ち消されていた。そこで我々は、図9(b)のように永久磁石を半径方向から回転方向へ傾けて装着し、図10(b)のような非対称の磁束線の流れを作った。従って、周りのけい素鋼板に生じる磁極との間には非対称な力が働き、磁石を傾けた方向の始動トルクを発現させた。

図9 ロータ上の永久磁石の位置

Fig. 9. Positions of the magnets distributed on the rotor.

図10 磁石による磁束線

Fig. 10. Magnetic flux density of the magnets.

<2.2.2> ステータ部の改良 図9のようにロータ上の磁石を傾斜させることで、始動トルクを発現することはできた。しかし、素子自体の動作は、手で直流磁界の向きを変える程度の、非常に低い励磁周波数(約1Hz)でないとステップアウトしてしまい、始動トルクが得られても安定した回転が得られなかった。そこで、我々はさらにステータ側の磁極対であるけい素鋼板に改良を加えた。

図11に素子のステータ部側面の展開図の概略を示す。斜線部はロータとステータが重なる部分である。従来型の長方形から、三角形へとけい素鋼板の形状を変えることによって、以前より容易に安定した始動トルクが得られるようにした。以下にその理由を示す。

励磁していない場合、すなわちけい素鋼板の長さ方向に磁界が印加されていない場合、ロータ上の磁石とステータ部のけい素鋼板との間で吸引力が働き、ロータは安定したところで静止する。図12に示すように、静止したロータ上の磁石の位置は長方形の場合、板中心部のところ(点A)であり、三角形の場合では、長さ方向の面積が最も大きく、吸引力も大きくなる直角部分(点B)である。

次に励磁した場合、すなわち図13のように鋼板の長さ方向に励磁されているとき、1枚の鋼板を見てみると、従来型の長方形の場合、ロータと重なる部分で磁束線は左右対称に分かれるが、三角形の場合、その部分では非対称に流れる。

図14は図12のけい素鋼板のロータと重なる部分の位置と、ロータの回転方向成分である板幅方向の磁束密度の関係である。紙面右方向を正、左方向を負として表している。長方形の場合、板中心部で零となり左右対称に分かれている。しかし、三角形の場合、左側すなわち直角部分へと

図11 従来型と以前改良した型のけい素鋼板の形状

Fig. 11. Ordinary and improved shapes of the silicon steel sheets.

シフトしていることがわかる。

従って、静止した状態から外部磁界を印加すると、長方形の場合、板中心部は回転方向成分の磁束密度はほとんど存在しないため、始動トルクは安定して得られないと考えられる。しかしながら三角形の場合は、静止位置の直角部分には回転方向成分の磁束密度が存在するので、始動トルクが以前より容易に得られることになる。

図12 励磁されていないときロータ上の磁石が止まる位置
Fig. 12. Positions at which the magnets distributed on the rotor would stop without an exciting magnetic field.

図13 けい素鋼板内の磁束線の流れ
Fig. 13. Magnetic flux in the silicon steel.

図14 けい素鋼板内の板幅方向の磁束密度分布
Fig. 14. Magnetic flux density in the width direction of the silicon steel sheet.

< 2.3 > 動作特性の比較

< 2.3.1 > 始動トルク特性 図15と図16に励磁周波数10Hzと20Hzのときの始動トルクの測定結果を示す。10Hz時をみると、従来型では始動トルクは発生していないが、ロータとステータを改良することで始動トルクが得られている。特に磁界強度が50Oe以下では、ロータとステータ両方を改良したものが、ロータのみを改良したものよりも始動トルクが増加していることがわかる。

また20Hzになると改良型のどのタイプも100Oe近傍で始動トルクが同じように急に上昇し、飽和時のトルクは10Hzのときよりも大きいことがわかる。

図15 励磁周波数10Hz時の磁界強度と始動トルク
の関係
Fig. 15. Relationship between the field strength and the starting torque at 10Hz.

図16 励磁周波数20Hz時の磁界強度と始動トルク
の関係
Fig. 16. Relationship between the field strength and the starting torque at 20Hz.

＜2.3.2＞ 始動可能な周波数と磁界強度の関係 図17に以前改良した型の始動できる最も低い磁界強度と、励磁周波数の関係を示す。前述したが、従来型では始動トルクが発生していないため、始動領域は存在しない。ここでは発振器の性能上、励磁周波数は10Hz以上で測定を行った。10Hzから20Hzの間では、ロータとステータの両方を改良したほうが、ロータのみやステータのみを改良したものよりも始動可能な磁界強度が低く、始動領域が広いことがわかる。よって、両方を改良したほうが安定した始動トルクが得られ、他のタイプよりも容易に始動できるといえる。

図17 始動可能な最小磁界強度と周波数の関係

Fig. 17. The minimum field strength when this device started to rotate.

3. 新しく改良した型について

第2章で紹介したように、これまでに永久磁石とけい素鋼板を用いた回転素子を試作し、さらにロータ部とステータ部に改良を加え、始動トルクの発現と始動可能な周波数と磁界強度領域の拡大を行なった。しかしながら、実用化するにはまだトルクが不十分であり、安定性にも問題が多い。そこで、第2章で改良した回転素子にさらに改良を加え、トルクや安定性の向上を図った。まず改良点を説明し、始動トルクと始動可能な周波数領域の測定結果を示し、二つの回転素子の比較、検討を行なう。

＜3.1＞ 構造の改良点と動作原理 説明のために第2章で、ステータ部とロータ部の両方を改良したタイプをタイプA、本章で新しくロータ部を改良したタイプをタイプBとする。図18に改良したBタイプの断面の概略を示す。ステータ部は図11と同様に、4枚のけい素鋼板を三角形の構造にしている。そしてロータ部は、タイプAでは永久磁石の数は2個であったが、タイプBでは全部で4個使用している。そのうち2個はタイプAと同様に、回転子上に軸中心部から半径方向へ4.2mmの位置に装着され、図9のように磁化の向きが半径方向から回転方向へ約30°傾いて

いる。また残りの2個は回転板からそれぞれ軸方向に15.1mm離れた軸に直接1個ずつ装着されている。そして後者の2個の磁石は、前者の2個の磁石に対して、磁化の向きが垂直である。ただし、いずれの磁石も磁化方向は外向き（半径方向）である。さらに、前者の2個の磁石はステータ部中央の三角形けい素鋼板の底辺部分とオーバーラップしており、後者の2個の磁石はステータ部端部の三角形板の頂点部分とオーバーラップすることになる。

動作原理は、タイプAと同様にシンクロナスモータに類似した原理であるが、新たに軸上に2個の磁石が装着されたことにより、ロータに作用する磁気力の総和はこれまでよりも増加し、トルクも向上すると考えられる。

図18 新しく改良したロータ部の概略

Fig.18. Schematic view of the improved rotor of the New-type.

＜3.2＞ 始動トルク特性 図19から図21にタイプAとタイプBの始動トルクの測定結果を示す。励磁周波数10Hzのとき（図19）をみると、磁界強度が40Oeを超えたあたりからBタイプの方が、始動トルクが向上していることがわかる。例えば100Oeのときは約66%向上している。また、励磁周波数16Hzのとき（図20）は、100Oe以下でタイプBの方が始動トルクが大きくなっている。さらに、励磁周波数20Hz（図21）になると、タイプBの方が全体的に向上がみられ、特に100Oeでは約6倍も始動トルクが増加している。

図 19 励磁周波数 10Hz 時の磁界強度と始動トルク
の関係

Fig. 19. Relationship between the field strength and the starting torque at 10Hz.

図 20 励磁周波数 16Hz 時の磁界強度と始動トルク
の関係

Fig. 20. Relationship between the field strength and the starting torque at 16Hz.

図 21 励磁周波数 20Hz 時の磁界強度と始動トルク
の関係

Fig. 21. Relationship between the field strength and the starting torque at 20Hz.

<3.3> 始動可能な周波数と磁界強度の関係 図22

に本章で改良したタイプ B と、第 3 章で記述したタイプ A の始動可能な最小磁界強度と励磁周波数の関係を示す。10Hz から 15Hz 付近まではタイプ A の方が始動可能な磁界強度が低く、タイプ A の方が始動領域が広いといえる。しかし、15Hz を超えるとタイプ B の方がタイプ A よりも低い磁界強度で始動が可能になっている。そして、周波数が上昇するにしたがって、その磁界強度の差は拡大している。

よって、タイプ B の方がタイプ A よりも始動領域が広く、高い周波数ほどその違いは顕著に現われている。つまり、タイプ B の方が容易に始動できるといえる。

図 22 始動可能な最小磁界強度と周波数の関係

Fig. 22. The minimum field strength when these device started to rotate.

4. まとめ

配管内を移動する自走型アクチュエータの移動機構として、以前改良した回転素子をさらに改良した。前回までの改良で、始動トルクを得ることはできていたが、その大きさは十分ではなかった。そこで、ロータ部の永久磁石の数を 2 個から 4 個へと増やすことにより、ステータ部のけい素鋼板に生じる磁極と、永久磁石との間に働く磁気力を増大させた。よって、始動トルクの増加と始動領域の拡大が得られた。

今回のロータ部の改良によって、60%以上のトルク増加が得られた。これにより、自走型アクチュエータの始動時の安定性がより向上するものと考えられる。

アクチュエータの構造は、単純でかつ強固であり、動作の安定性が要求される。本報告では試行錯誤的実験により、アクチュエータを改良した。しかし、外部エネルギーの効率的な利用や動作の安定化のためには、気体や流体中でのアクチュエータの運動シミュレーションが必要である。

(平成 11 年 3 月 26 日受付, 平成 11 年 9 月 24 日再受付)

文献

- (1) 荒井賢一, 本田 崇, "走る・飛ぶ・泳ぐマイクロ磁気アクチュエータ," 日本応用磁気学会誌, Vol.21, No.1, 1997, p35-40
- (2) 荒井賢一, 本田 崇, 林 嘉高, "磁歪を駆動力とした薄膜アクチュエータ," 日本応用磁気学会誌, Vol.18, No.2, 1994, p477-480
- (3) 荒井賢一, 本田 崇, 山口正洋, 菅原 渉, 石山和志, "磁性薄膜を用いたマイクロアクチュエータの試作," 日本応用磁気学会誌, Vol.19, No.2, 1995, p501-504
- (4) 荒井賢一, 本田 崇, "磁性薄膜を用いた微小走行機構の動作特性," 日本応用磁気学会誌, Vol.20, No.2, 1996, p541-544
- (5) 荒井賢一, 本田 崇, 島崎克彦, "永久磁石を用いた微小泳動機構の試作," 日本応用磁気学会誌, Vol.20, No.2, 1996, p541-544
- (6) 榎園正人, 戸高 孝, 後藤広生, "磁界方向への自走型アクチュエータ," 日本応用磁気学会誌, Vol.22, No.4-2, 1998, p949-952
- (7) M. Enokizono, T. Todaka, K. Goto, "Fabrication of a Magnetic Drive Unit for that Moves in the Same Direction of the Exciting Magnetic Field," IEEE Trans. Magn., 34, 2087-2089
- (8) 榎園正人, 戸高 孝, 後藤広生, "磁性材料を用いた回転素子のトルク増加についての検討," 日本応用磁気学会誌, Vol.23, No.4-2, 1999, p1677-1680

榎園 正人

(正員) 1949年2月19日生。1979年1月九州大学大学院工学研究科博士課程修了。同年工学部研究生を経て、1980年2月大分大学工学部助手、1981年4月講師、1982年4月同大学工学部助教授、1995年4月教授となり、現在に至る。工学博士。この間、1986年9月より1987年12月までアレクサンダー・フォン・フンボルト財団招聘研究員として国立物理工学総合研究所 (Braunschweig) に滞在、磁性材料、磁気計測、電気機器、磁界解析を中心とする磁気工学の研究に従事。日本応用磁気学会、日本AEM学会、日本シミュレーション学会、日本計算工学会、米国IEEEの各会員。

戸高 孝

(正員) 1960年9月3日生。1983年3月大分大学工学部電気工学科卒業。同年4月大分大学工学部助手、1996年3月大分大学工学部講師、1998年4月同助教授となり、現在に至る。工学博士。主として電磁現象応用並びに電磁界解析技術の研究に従事。日本応用磁気学会、日本AEM学会、米国IEEEの各会員。

後藤 広生

(学生員) 1974年8月19日生。1997年3月大分大学工学部電気電子工学科卒業。1999年3月大分大学大学院工学研究科電気電子工学専攻修士課程修了。同年4月(株)日立製作所入社。