Prototype of the Turbo-Type Mini-Pump with an Impeller Driven Directly by Electro-Magnets and its Fundamental Pumping Characteristics

M. Yokoyama and T. Tsukiai*

Interdisciplinary Graduate School, Tokyo Institute of Technology, 4259, Nagatsuta-cho, Midori-ku, Yokohama 226-8502, Japan

*Yokogawa Electric Works Ltd., 2-9-32, Nakamachi, Musashino, Tokyo 180-8750, Japan

Normal fluid-carrying pumps are classified into three types: turbo-type, volume-type, and others. This study deals with a newly developed turbo-type axial flow mini-pump, whose impeller is driven directly by electro-magnets with U-shaped cores located outside of the pipe. At the first step of this study, a prototype pump was produced, where a commercially available flat circular disc-type ferrite or neodymium permanent magnet is bonded adhesively to the top of each of the blades of the impeller, and this circular disc-type magnet is driven directly by eight electro-magnets. In the case of ferrite magnet, the magnet and the cores of electro-magnets are overlapped 10 mm in radial direction, but in the case of neodymium magnet, both are separated 2 mm. At the second step of this study, the fundamental pumping characteristics of this turbo-type mini-pump, such as maximum rotation speed in air and in water, pump head and flow rate as a function of the rotation speed of the impeller, were measured and discussed.

Key words : pump, mini-pump, turbo-type pump, pumping system, directly driven pump, electro-magnet, impeller

管路外からインペラが直接電磁駆動されるターボ型小形ポンプの試作とその基礎特性

横山正明・突合利哉*

東京工業大学大学院総合理工学研究科, 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259 (〒226-8502)

*横河電機株式会社, 東京都武蔵野市中町 2-9-32 (〒180-8750)

1. はじめに

通常の流体輸送用ポンプは大別すると, (1)ターボ型ポンプ, (2)容積型ポンプ, (3)その他ポンプ, に分けられる. いずれのポンプにおいても, 流体に直接触れてその流体に運動を与えるインペラ (羽根車), ピストン, などのポンプ要素は回転軸, 往復動軸, などの軸要素を介して外付けの電動機と結合され, 駆動される形式が最も普通である. このとき, 流体もれを防ぐためにポンプ本体と軸要素の間にシーリングを施す.

ポンプ本体と軸要素の間のシーリングが不必要なポンプとして, 非接触磁石駆動方式によるポンプが「マグネットポンプ」の名称ですでに多くの会社から市販されている. しかし, このタイプのポンプにおいては駆動用に外付けの電動機を使用しているので, ポンプの小形化を図ることができない.

本研究は, MEMS 技術によってその要素が製作されるような, 非常に小さい, いわゆる「マイクロポンプ」と総称されるポンプを対象とするものではなく, 駆動用に外付けの電動機を使用しない方式の, 小形ポンプを対象とする. 前者のマイクロポンプに関しては, 文献1)あるいは2)において数多くの最近の研究成果, 開発事例がまとめて紹介されている.

外付けの電動機を使用しない小形ポンプの駆動源としては, 流体の気液相変化^{3),4)}, 気泡⁵⁾を活用するもの, 形状記憶合金⁶⁾, 磁歪素子⁷⁾, 積層圧電素子^{8)~16)}を活用するもの, 管路慣性を活用するもの^{17), 18)}, 磁性流体^{19)~21)}, 機能性流体^{22), 23)}を活用するもの, 電磁力を活用するポンプとして, インペラを電磁駆動するもの^{24)~30)}, ピストンを電磁駆動するもの^{31)~36)}, 帯板を電磁駆動するもの^{37)~39)}, などのポンプが研究, 開発されている.

本研究は, 外付けの電動機を使用せず, 駆動源として電磁力

を活用する, 新しいタイプのターボ型の軸流小形シールレスポンプを開発しようとするものである. すなわち, 穴あき円板状永久磁石が外周上に取り付けられたインペラを流体輸送用の管路 (パイプ) の外周上に配置された電磁石により非接触に直接電磁駆動する方式のターボ型軸流小形シールレスポンプを開発しようとするものである. 外付けの電動機を使用しないので, ポンプの小形化を図ることができる.

2. 試作ポンプとその基礎特性

本研究の初期の段階において, 直交する2枚の平板状永久磁石間に働く磁気力の作用原理を活用し, 4枚の正方形平板状永久磁石のブレードが回転軸に対して45°ねじれた状態に取り付けられたインペラを, パイプ外周上に配置された3組6個の, ブレードに合わせてねじれた形のコアを有する電磁石によって非接触に直接電磁駆動する方式のターボ型小形シールレスポンプを試作した. しかし, このポンプには, 作用する磁気力に関して次のような問題点があった:

- (1) 永久磁石面とコア面が直交しているために, 永久磁石および電磁石の固有の磁気力が有効に活用されていない,
- (2) 3組の電磁石のうち常時1組しか励磁されておらず, 電磁石が有効に活用されていない,
- (3) コアがI字形であるため, コアの外周から外側に向けて磁束漏洩が発生するので, 電磁石の磁気力がその分だけ弱くなる.

この問題点のために, この初期のポンプでは期待するほどの回転トルクが得られず, したがって良好なポンピング特性は得られなかった. そこで, そのポンピング特性を改善するために, これらの問題点に配慮した, 新しいタイプのターボ型小形シールレス

ポンプ（以後、試作ポンプと呼称する）を考えた。

本章においてはこの新しいタイプのポンプ，すなわち分割着磁された，穴あき円板状のフェライト磁石あるいはNdFeB系磁石が外周上に取り付けられたインペラを，パイプ外周上に配置された電磁石によって非接触に直接電磁駆動するポンプを試作し，そのポンピング特性を評価する。

2.1 試作ポンプの駆動原理

試作ポンプの構造の概略模式図をFig. 1に示す。インペラ，円周方向4等分に分割着磁された平らな穴あき円板状永久磁石，およびその永久磁石をはさみこむようなU字形コアを有する8つの電磁石から構成される。永久磁石はインペラと接着結合されており，電磁石を繰り返し励磁することにより永久磁石を回転させ，この結果結合されたインペラも回転し，ポンピングを行う。

Fig. 1においては，図の煩雑さを少なくするために，永久磁石とコアは重ならないように図示しているが，実際には永久磁石がフェライト磁石の場合には両者は重なって配置され，永久磁石がNdFeB系磁石の場合には両者は重ならずに離れて配置されている。Fig. 1において図示されている電磁石の極性は，円板状永久磁石の磁極面に対面しているコア面，すなわちU字形コアの内側面の極性を表している。

試作ポンプの回転原理をFig. 2に示す。円板状永久磁石とそれをはさみこむように周囲に等間隔に配置されている8つの電磁石との極性関係が図(a)の状態にあるとき，図(b)のようにブレードは時計回り方向に力を受ける。電磁石を駆動側，永久磁石を従動側とすると，永久磁石は 45° 回転し，図(c)の状態で止まる。そののち，図(d)のように電磁石Bおよび電磁石Dの極性を反転すると，図(a)の状態が再現されることになり，永久磁石は再び同じ方向に回転運動を行う。このように8つの電磁石を向かい合う2つの電磁石の極性が等しくなるように励磁し，4組の電磁石を瞬時に逐次切りかえて励磁することにより，永久磁石，したがってインペラを励磁変化に同期して一方向に回転させることができる。

このときの制御電流は4相の矩形波電流である。インペラの回転と電磁石の励磁の切りかえは同期しているので，停止状態からインペラを始動させるためには，励磁切りかえ速度をインペラの回転に合わせて0から徐々に大きくする必要がある。この励磁切りかえ速度の増大はパソコン制御により実行している。回転速度を大きくしすぎると，ブレード，したがってインペラにかかる負荷の増大などの理由によって，インペラの回転は脱調し，停止する。

2.2 試作ポンプの概略構造

2.2.1 フェライト磁石を使用したポンプ

穴あき円板状永久磁石として市販のフェライト磁石を使用した。このフェライト磁石は，外径48mm，内径25mm，厚さ3.5mm，表面の平均的な磁束密度はおよそ90mTである。このフェライトタイプの試作ポンプの概略模式図をFig. 3に示す。U字形コアの内側面と永久磁石面の半径方向の重なりは10mm，両者の表面の近接距離は2.25mmに設計されている。

Fig. 4にフェライトタイプの試作ポンプの全体写真を示す。見やすくするために手前側の電磁石固定用溝付き円板が取り去

Fig. 1 Schematic structure of prototype pump.

Fig. 2 Driving process of prototype pump.

Fig. 3 Schematic structure of ferrite-type pump.

られている。外径28mm，内径24mmのパイプ径減少部分の外周上にコアとコイルから構成される8つの電磁石が等間隔に取り付けられている。パイプ内にはFig. 5に示される永久磁石とインペラが両側すべり軸受され，収納されている。コアは厚さ1mmのパーマロイを10枚貼り合わせて製作されており，コアのまわりに直径0.5mmの銅線を50巻して電磁石を形成している。

Fig. 5に接着結合された永久磁石とインペラの写真を示す。平板状のブレードは回転軸に対して 45° ねじれた状態で取り付けられ

Fig. 4 Photograph of ferrite-type pump.

Fig. 5 Photograph of an adhesively bonded permanent magnet and impeller.

ており、半径方向にはパイプ内壁とのすきまが一樣になるように円形状に作成されているのが分かる。

2.2.2 NdFeB 系磁石を使用したポンプ 永久磁石が強力であればポンプも強力になるだろうとの予測から、穴あき円板状永久磁石として市販の NdFeB 系磁石を使用した NdFeB 系-タイプのポンプも同時に試作した。NdFeB 系磁石の幾何学的寸法はフェライト磁石と同一であり、表面の平均的な磁束密度はおよそ 400mT である。

この NdFeB 系-タイプポンプの場合、フェライト-タイプポンプのようなコアと永久磁石の半径方向の重なりはゆるさず、コアの先端と永久磁石の外周は 2mm 離れて配置されている。

2.3 試作ポンプのポンピング特性

電磁石のコイルに最大値 3.1A の 4 相の矩形波状の制御電流を流して、試作ポンプのポンピング特性を測定した。

2.3.1 回転特性 フェライト-タイプと NdFeB 系-タイプの 2 タイプのポンプについて、空気中および水中において脱調せずにインペラが回転する最大回転速度を求めた結果を Table 1 に示す。この Table 1 を見るに、U 字形コアの内側面と永久磁石面に半径方向に 10mm の重なりがあるフェライト-タイプポンプと両者が半径方向に 2mm 離れている NdFeB 系-タイプポンプの回転特性に大きな差異がないことが分かる。

2.3.2 揚程特性 試作ポンプの吸入側、吐出側に外形 30mm、内

Table 1 Maximum rotation speed of the impeller in air and in water.

	Ferrite-type	NdFeB-type
Maximum rotation speed in air [min^{-1}]	3662	3662
Maximum rotation speed in water [min^{-1}]	3052	2930

Fig. 6 Pump head as a function of the rotation speed of the impeller.

Fig. 7 Flow rate as a function of the rotation speed of the impeller.

径 26mm のパイプを鉛直に立て、その中に水を満たして両者の水面を同じ高さにする。そののちポンプを始動し、水面の動きが定常状態になったときに両者の水面の高さの差を読み取る方式によって揚程を測定した。

インペラの回転速度を変化させ、フェライト-タイプと NdFeB 系-タイプの 2 タイプのポンプについて測定した結果を Fig. 6 に示す。最大揚程はフェライト-タイプポンプの場合の 257mm であるが、両タイプのポンプの揚程特性に大きな差異はない。

2.3.3 流量特性 ポンプの吸入側には大きなタンクを設け、吐出側に外形 30mm、内径 26mm のパイプをつないで、両者の水面を同

じ高さにする方式の装置を用い、インペラを回転させたとき単位時間あたりパイプ内を流れる水の流量を測定した。インペラの回転速度を変化させ、フェライトタイプとNdFeB系タイプの2タイプのポンプについて測定した結果をFig. 7に示す。最大流量はフェライトタイプポンプの場合の11.12L/minであるが、両タイプのポンプの流量特性に大きな差異はない。

2.4 考察

本研究の初期に試作した、4枚の正方形平板状永久磁石のブレードを有するインペラを、パイプ外周上に配置された電磁石によって非接触に直接電磁駆動する方式の小形ポンプの有した問題点に配慮して、本研究では穴あき円板状の永久磁石が外周上に取り付けられたインペラを、U字形コアを有する電磁石によりパイプ外から非接触に直接電磁駆動する、新しいタイプの小型ポンプを試作し、円板状磁石がフェライト磁石の場合には、ポンプは期待どおりに動作することを確認した。

しかし、円板状磁石がNdFeB系磁石の場合には、円板状磁石とU字形コアの間に半径方向の重なりがあるとき、プラスチックケーシングおよびすべり軸受の軸方向剛性が小さいため、コアと円板状磁石の強い相互引力によって円板状磁石が軸方向に移動し、隔壁と接触してインペラは回転できなかった。ケーシングを非磁性的の金属構造にし、軸受をころがり軸受にして軸方向剛性を大きくすれば、円板状磁石がNdFeB系磁石の場合でも、その軸方向移動、したがって隔壁との接触はなくなり、インペラは回転できるようになると考える。

本研究以降の試作ポンプにおいては、ポンプケーシングの構造剛性の増大、内輪の軸方向移動が拘束されている形式のころがり軸受の採用、および流線形ブレードの採用、等々構造面への配慮、改善を実施したいと考えている。

3. まとめ

外付けの電動機を使用せず、パイプ外周上に配置された電磁石によってインペラを非接触に直接電磁駆動する、新しいタイプのターボ型の軸流小形シールレスポンプに関する基礎的な実験研究を行った。得られた成果は、以下のようまとめられる：

(1) 4分割着磁された、平らな穴あき円板状のフェライト磁石あるいはNdFeB系磁石が外周上に取り付けられたインペラを、パイプ外周上に配置された、U字形コアを有する電磁石によって直接電磁駆動する方式の、新しいタイプの軸流小形ポンプを試作し、円板状磁石がフェライト磁石の場合には、この円板状磁石と電磁石コアに半径方向に10mmの重なりがあるときにも、期待どおりにポンピング動作することを確認した。

(2) しかし、穴あき円板状磁石がNdFeB系磁石の場合、この円板状磁石と電磁石コアに半径方向の重なりがあるときには、プラスチックケーシングおよびすべり軸受の軸方向剛性が小さいため、円板状磁石とコアの強い相互引力によって円板状磁石が軸方向に移動し、隔壁と接触してインペラが回転できないことが分かった。

(3) この場合、円板状磁石の外周と電磁石コアの先端の間に半径方向に2mm程度のすきまを与えるとインペラは回転でき、円板状磁石がフェライト磁石の場合のポンプとほぼ同程度の回転特性、ポンピング特性が得られることが分かった。

References

- 1) T. Higuchi (ed.) : *Micromachine Gijutsu Sohan* (in Japanese), 663(2003).
- 2) P. Woias : *Sensors and Actuators* (B), 10, 28(2005).
- 3) K. Ozaki : *Proc. 8th IEEE Work-Shop on Micro Electro Mechanical Systems* (MEMS' 95), 31(1995).
- 4) H. Takagi, et al. : *Proc. 5th Int. Symp. on Micro Machine and Human Science*, 199(1994).
- 5) K. Miyazaki, et al. : *Turbo-machinery* (in Japanese), 29, 48(2001).
- 6) E. Makino, et al. : *Sensors and Actuators* (A), 88, 256(2002).
- 7) K. Kaneda, et al. : *Kokai Tokkyo Koho JP1994-197573*(1994).
- 8) H.T.G. VanLintel : *Sensors and Actuators*, 15, 153(1988).
- 9) J.H. Park, et al. : *J. Robotics and Mechatronics*, 9, 687(1999).
- 10) J.H. Park, et al. : *JSME Int. J.*, 45C, 502(2002).
- 11) J.H. Park, et al. : *Proc. Actuator 2002*, 240(2002).
- 12) M. Kimoto, et al. : *Turbo-machinery* (in Japanese), 31, 435(2003).
- 13) J.H. Park, et al. : *Proc. Actuator 2004*, 557(2004).
- 14) J.H. Park, et al. : *J. Robotics and Mechatronics*, 16, 171(2004).
- 15) Hagitec Co. : <http://www.hagitec.co.jp/>.
- 16) Star Micronics Co. : <http://www.star-micronics.co.jp/>.
- 17) T. Seto, et al. : *J. Robotics and Mechatronics*, 15, 128(2003).
- 18) K. Yoshida, et al. : *Proc. Int. Conf. on Fluid Power*, 394(2005).
- 19) A. Hatch : *J. MEMS*, 10, 215(2001).
- 20) Y. Takasaki : *Kokai Tokkyo Koho JP2003-074462*(2003).
- 21) K. Ozaki, et al. : <http://www.aist.go.jp/>.
- 22) W.S. Seo, et al. : *Proc. First Joint Int. Conf. on Manufacturing, Machine Design and Tribology*, CD-Rom MAA-204, (2005).
- 23) S. Yokota, et al. : *Proc. Int. Conf. on Fluid Power*, 234(2005).
- 24) T. Akamatsu, et al. : *Artificial Organs*, 16, 305(1992).
- 25) I. Nishimura, et al. : *J. American Society for Artificial Internal Organs*, 49, 744(2003).
- 26) T. Yano, et al. : *Artificial Organs*, 27, 920(2003).
- 27) J. Asama, et al. : *J. American Society for Artificial Internal Organs*, 50, 550(2004).
- 28) H. Hoshi, et al. : *J. American Society for Artificial Internal Organs*, 51, 60 (2005).
- 29) S. Nagano : *Kokai Tokkyo Koho JP1998-077996*(1998).
- 30) MicroMed Technology, Inc. : <http://www.micromedtech.com/>
- 31) M. Noguchi, et al. : *Kokai Tokkyo Koho JP1994-159232*(1994).
- 32) M. Iwami : *Kokai Tokkyo Koho JP1995-004875*(1995).
- 33) Y. Murata : *Kokai Tokkyo Koho JP1998-077961*(1998).
- 34) S. Masuda : *Kokai Tokkyo Koho JP2000-045934*(2000).
- 35) Y. Ogawa : *Kokai Tokkyo Koho JP2001-027175*(2001).
- 36) A. Kaneko : *Kokai Tokkyo Koho JP2003-328929*(2003).
- 37) T. Honda, et al. : *IEEE Trans. on Magnetism*, 34, 2102(1998).
- 38) K. Kondo, et al. : *J. Magn. Soc. Jpn.*, 26, 612(2002).
- 39) K. Kondo, et al. : *J. Magn. Soc. Jpn.*, 27, 499(2003).

2005年9月8日受理, 2005年11月15日採録