研究論文

円筒形２段磁極式電磁比例アクチュエータの研究*

近藤 尚生**, 竹内 綾太***, 若澤 靖記**

A Study of a Cylindrical Two-Step Pole Type Electro-Magnetic Proportional Actuator

Hisao KONDO, Ryota TAKEUCHI, Yasunori WAKASAWA

In this study, a newly designed electro-magnetic proportional actuator composed of an armature and a stator with a cylindrical two-step pole to control oil hydraulic valves was constructed and examined. In the actuator, two traction forces generated by the magnetic flux flow in the radial air gap and the axial air gap between the armature and the stator are added and become thrust force on the actuator. Furthermore, these air gaps are arranged at two places in the magnetic circuit of the actuator so the total of the traction forces in their air gaps becomes a large thrust force on the actuator. The dimensions of this actuator are 60 mm diameter, by 83 mm length. As a result of measurements of the characteristics of this actuator, it became clear that its thrust force was constant within 2mm of the armature stroke, producing about 290N at an electronic power consumption of 15W. The thrust of this actuator is nearly 2.5 times larger than that of conventional proportional solenoids and linear motors of the same size and power consumption.

The principle of producing thrust force in the newly designed actuator is based on the above mentioned addition of the traction forces in the air gaps. Therefore, the actuators for producing the traction forces in the axial and radial air gaps separately were designed and made. Then, the two traction force curves were measured and a thrust force curve was made up by adding these traction force curves. This thrust force curve agrees well with the experimental curve of this actuator. As a result, a simple design method of this actuator can be shown in this study.

Key words : Fluid power, Electro-magnetic proportional valve, Valve actuator, Two-step pole, High force density

1. 緒 言

油圧アクチュエータの動作速度や力、トルクをコントローラからの電気信号に比例して制御できる電磁比例制御弁を駆動するアクチュエータとして、従来可動コイル式フォースモータ、トルクモータ、リニアモータや比例ソレノイドなどが用いられてきた^{1),2)}。これらのアクチュエータのうち比例ソレノイド以外は永久磁石を用いており、構造がやや複雑で高価である。また、比例ソレノイドは大きさの割に力が出ない。比例ソレノイド以外で簡便な段付磁極形状を持ち、ステータとアーマチャが対向する空気ギャップで軸方向と半径方向の二方向の磁束流れにより推力が発生する電磁比例アクチュエータの研究があるが^{3),4)}、従来の比例ソレノイドに比較して推力は大きくはなく、また動作ストロークが短かった。そこで、既報において圧力制御弁や流量制御弁、サーボ弁などを直動で操作するため

に、大きな推力を発生できる多段磁極式電磁比例アクチュエータを考案し、試作研究を行ってきた結果を報告している⁵⁾⁻⁹⁾。このアクチュエータは、推力が発生する軸方向に互いに対向する多数の突歯を持つステータとアーマチャの多数の突歯が磁極になり、それぞれの突歯が同時に吸引力を発生して引き合い、大きな推力を発生できる。このアクチュエータについて、実験と解析から特性を詳しく調べた結果、多段磁極式電磁比例アクチュエータの性能は高く、設計方法も明確になっているが、多数の磁極を対向させ三次元的に磁束を流す構造のため構造がやや複雑になり、また特性解析は三次元的に行う必要があり、製造および特性解析上やや難点があった。

そこで、著者の一人らは永久磁石を用いないで、基本構造は製作容易な軸対称の円筒形で、アクチュエータの磁気回路内に通常では１箇所である空気ギャップを２箇所に増やして磁極を２段にした円筒形２段磁極式電磁比例アクチュエータを新しく考案して試作し、その性能を調べた¹⁰⁾。このアクチュエータは、ステータとアーマチャが対向する２箇所の空気ギャップそれぞれで、しかも軸方向と半径方向の二方向の磁束流れにより発生する２つの吸引力の全ての合力が推力になるため、従来の比例ソレノイドやリニアモータよりも大きな推力を発生させられる可能性があるこ

*平成27年3月30日 原稿受付

**豊田工業高等専門学校機械工学科

(所在地：愛知県豊田市栄生町2-1)

(E-mail: hkondo@toyota-ct.ac.jp)

***豊田工業高等専門学校専攻科電子機械工学専攻

とがわかった。しかし、詳しい推力特性や設計法などが明らかではなかった。そのため、本研究では、従来の比例ソレノイドと比較して、同じ外形寸法と消費電力で推力がどの程度大きくなり、動作ストロークがどの程度得られるかを実験と解析の両面から明らかにした。さらに、アクチュエータ内の磁束流れや磁束量を調べ、空気隙間内の軸方向と半径方向の磁束流れによるそれぞれの吸引力曲線から、それらを合成して本アクチュエータの推力曲線が得られることを明らかにした。

2. アクチュエータの構造および電磁特性

Fig. 1に試作した円筒形2段磁極式電磁比例アクチュエータの構造図を示す。このアクチュエータは、全て円筒形状のステータ、アーマチャ、巻棒、コイル、ピンで構成されており、Fig. 1は軸方向の断面図である。

ステータはFig. 1のA部、B部でそれぞれ段付形状にしており、アーマチャ角部に対向する角部を持っている。コイルは巻棒に円筒状に巻かれ、巻棒とともにステータ内周部に納められる。アーマチャは巻棒内周面をガイドにして軸方向に自由に動ける。A部、B部の2箇所に対向するステータとアーマチャの角部の間の空気隙間は半径方向に0.05mmになるようにアクチュエータを製作した。また、Fig. 1に示すアクチュエータ各部のしゅう動部および半径方向の空気隙間に関係する部品の寸法公差および同軸度は全て0.01mm以下で製作した。ステータとアーマチャの材料は、入手の容易さからSS400を用いた。また、アクチュエータの外形寸法は直径60mmとした。

Fig. 1に示すアクチュエータは、コイルに電流を流すと磁束がコイルを取り囲むように流れ、AとBの角部ではそれぞれステータ・アーマチャ端面間の空気隙間と半径方向の空気隙間に磁束 ϕ_{a1} 、 ϕ_{a2} 、 ϕ_{r1} 、 ϕ_{r2} が流れる。端面方向の磁束 ϕ_{a1} 、 ϕ_{a2} によりそれぞれ端面吸引力 F_{a1} 、 F_{a2} が発生し、アーマチャ側面の半径方向の磁束 ϕ_{r1} 、 ϕ_{r2} により側面吸引力 F_{r1} 、 F_{r2} が発生する。これら4つの合力が本アクチュエータの推力 F となる。そのため、Fig. 1のアクチュエータについて、

Fig. 1 Structure of the proportional actuator in this work

端面と側面方向の磁束流れの大きさに最も影響すると思われる s 寸法を1, 2, 3, 4mmに変えた4種類のものを試作した。Fig. 1において、アーマチャ端面がステータ端面に接触した位置をアーマチャ位置 $x=0$ として、アーマチャがそこから右へ移動する方向を正とした。

Fig. 2に比例ソレノイドの推力特性曲線を示す^{1),2)}。

Fig. 2 Force characteristic curves of the proportional solenoid

ステータとアーマチャの対向する端面間の空気隙間を流れる磁束により発生する端面吸引力 F_a と、アーマチャ側面の半径方向の空気隙間に発生する側面吸引力 F_r の合力が推力 F になる^{1),2)}。そして、端面吸引力曲線と側面吸引力曲線の合力曲線が推力特性になり、アーマチャ位置 x が変化しても推力 F が一定になる範囲が比例ソレノイドの動作ストローク範囲になる。本研究の電磁比例アクチュエータも比例ソレノイドと同様に2つの吸引力曲線 F_a 、 F_r を足し合わせたものが推力 F の曲線になる。

本研究の電磁比例アクチュエータの特徴は、Fig. 1に示すように比例ソレノイドと比較して、コイルを扁平にしてステータおよびアーマチャの磁路断面積を大きくしていることである。また、ステータとアーマチャが対向する磁極部を磁気回路的に2段直列にして、アーマチャ変位に対する磁束量の変化を大きくして、大きな推力を発生させられるようにした。このアクチュエータは、コイル断面積が減りコイル巻数が減少するが、磁路断面積を大きくできることと磁極部を2段にすることにより、推力を大きく取り出せるようにした。また、本アクチュエータの構成部品は全て単純な円筒形状であり、製作が容易で安価にできる可能性が大きい。一方、コイルを扁平にしているため、コイル部を縦断する漏れ磁束が比較的大きくなり、推力に対する影響を検討する必要がある。

本研究では、実際にFig. 1に示すアクチュエータを試作して性能評価するとともに、有限要素法解析ソフト¹¹⁾を用いて磁場解析を行い、アクチュエータの推力特性や磁束流れを検討した。Fig. 1に示すアクチュエータは円筒軸対称構造であるため、円周方向の磁束流れは無く、磁場解析は軸方向断面のみの軸対称二次元流れで行うことができる。そのため、比較的容易に磁場解析が行える。

Fig. 3に、試作したアクチュエータのステータおよびアー

マチャと同じ材料のSS400材からリング試料を削り出し、 B - H 曲線を測定した結果を示す。磁場解析では、ステータとアーマチャの磁気特性として、Fig. 3に示すヒステリシス曲線の平均値（図中の丸印）を与えた。また、磁界の強さ H が $16,000 \text{ A/m}$ を超えた領域ではほぼ磁気飽和していると考え、図中の破線で示すように H の増加とともに真空透磁率 $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ の勾配で磁束密度 B が増加するとしている。

Fig. 3 B - H curve of SS400 in this analysis

Fig. 4およびFig. 5に、試作したアクチュエータ内の磁束線図と磁束密度分布図を解析により求めた結果の一例をそれぞれ示す。これらの図は、Fig. 1に示す断面の軸中心から上半分を示す。Fig. 4に示すように、A部とB部の対向する角形磁極部でそれぞれ磁束はステータとアーマチャの端面

Fig. 4 Magnetic flux diagram
($s = 3.0 \text{ mm}$, $x = 2.0 \text{ mm}$, $NI = 1,106 \text{ AT}$)

Fig. 5 Contour graph of magnetic flux density (Unit [T])
($s = 3.0 \text{ mm}$, $x = 2.0 \text{ mm}$, $NI = 1,106 \text{ AT}$)

方向と半径方向に流れていることがわかる。また、Fig. 5に示すように、角形磁極部の角部で磁束密度が高くなっており、ステータとアーマチャが対向する端面間の空気隙間内も他の空気領域に比べ磁束密度が高くなっている。これらのことから、本研究で考案したアクチュエータは、2段磁極部でそれぞれ2方向に磁束が流れ、これらの磁束流れにより大きな推力を発生できると予測された。

3. 推力特性の実験および解析結果

Fig. 6(a)~(d)に、Fig. 1に示すアクチュエータの s 寸法を $1 \sim 4 \text{ mm}$ に変えたときのアーマチャ位置 x と推力 F の変化について実験値と解析値を比較した結果を示す。Fig. 1に示す本試作アクチュエータの場合、コイル巻棒寸法から計算すると、同程度の外形寸法の比例ソレノイドの消費電力 15 W の時のコイル起磁力 NI (N : コイル巻数, I : コイル電流) は $1,106 \text{ AT}$ (アンペア・ターン) である。この起磁力で推力特性を調べた。

Fig. 6(a), (b)に示すように、 s 寸法が比較的小さいと端面方向の空気隙間の磁束流れが支配的で端面吸引力 F_a が側面吸引力 F_r よりも大きく、2つの力を合成した推力 F はアーマチャ位置 x の変化に対して一定になる範囲が得られない。Fig. 6(c)に示す $s = 3 \text{ mm}$ の場合、端面方向と半径方向の空気隙間の磁束量がほぼ適切な状態であり、推力 F が一定になる x の範囲が得られる。さらに、Fig. 6(d)に示すように s 寸法が 4 mm と大きくなると、今度は半径方向の空気隙間の磁束流れが支配的で側面吸引力 F_r が端面吸引力 F_a よりもやや大きくなり、推力 F の曲線を見ると $x = 2 \text{ mm}$ 付近で落ち込みがある。Fig. 6(a)~(d)より、Fig. 1に示す構造・寸法のアクチュエータは、 s 寸法を 3 mm 程度にすれば推力 F が一定になる特性が得られ、 F が一定になる x の範囲は約 2 mm で、そのときの推力 F は 290 N 程度得られることがわかる。また、 s 寸

Fig. 6 Comparison of thrust force curves in the case of varying s

法を1～4mmに変化させても、推力 F の実験値と解析値は良好に一致しており、本研究で用いた有限要素法解析の有用性が確かめられた。

次に、Fig. 7に s 寸法が3mmのアクチュエータでアーマチャを $x=2$ mmの位置に固定して、起磁力 NI を変化させたときの推力 F の変化を調べた結果を示す。Fig. 7によれば、250～1800ATの間で起磁力 NI と推力 F は比例している。この比例特性は、Fig. 5に示したように、ステータとアーマチャが対向する2段磁極部の角部先端では磁束が集中して部分的に磁気飽和しており、起磁力 NI が大きくなるにつれて部分的な磁気飽和の範囲が角部先端から順次広がることにより得られている。この現象は、比例ソレノイドの非磁性リングに隣接する三角形の磁性体部分で磁束が集中して、起磁力が大きくなるにつれて三角形の先端から順次部分的に飽和する範囲が広がることにより比例特性が得られる¹⁾のと同様である。

また、消費電力15Wの $NI=1,106$ ATでは、推力 F は比例範囲に入っていることがわかる。このことから、さらに起磁力を大きくすればさらに大きな推力が得られることがわかる。

Fig. 7 Relationship between NI and F
($s = 3.0$ mm, $x = 2.0$ mm)

4. 磁束と推力の関係

Fig. 8(a)～(d)に s 寸法を1～4mmに変えたときの、アーマチャ位置 x に対するアクチュエータ内の磁束の変化の関係を示す。アクチュエータ内の磁束は、ステータ・アーマチャ端面間の空気隙間に流れる磁束 ϕ_a 、半径方向の空気隙間に流れる磁束 ϕ_r 、コイルを縦断する漏れ磁束 ϕ_{coil} 、アーマチャ軸断面を通る磁束 ϕ_{arm} を有限要素法解析で求めた。また、アーマチャ軸断面を通る磁束はさぐりコイルで実測しており、その値を ϕ_{arm_ex} とした。また、Fig. 6に示した推力 F の実験値も共に示している。

Fig. 4の磁束線図より、アーマチャ軸断面を通る磁束 ϕ_{arm} は、上述の磁束 ϕ_a 、 ϕ_r 、 ϕ_{coil} の合計磁束 ϕ_{all} と等しくなるはずである。Fig. 8(a)に示す $s = 1$ mmの場合について見ると、

ϕ_{arm} と ϕ_{all} は一致しており、また、さぐりコイルで実験的に測定した ϕ_{arm_ex} ともほぼ一致していることが分かる。これにより、端面方向と半径方向の空気隙間およびコイルを縦

(a) $s = 1.0$ mm

(b) $s = 2.0$ mm

(c) $s = 3.0$ mm

(d) $s = 4.0$ mm

Fig. 8 Relationship between F and ϕ in the case of varying s

断する各磁束 ϕ_a , ϕ_r , ϕ_{coil} はほぼ妥当に解析されていると考えられる。

s 寸法が1mmと小さいFig. 8(a)の場合、端面方向の空気隙間の磁束 ϕ_a が総磁束 ϕ_{in} に対して占める割合が大きく、推力 F の曲線に対して端面吸引力 F_a が支配的になっていることが F の曲線形状からわかる。逆に s 寸法が4mmと大きいFig. 8(d)の場合、半径方向の空気隙間を流れる磁束 ϕ_r が ϕ_{in} に対して占める割合が大きく、推力 F に対して側面吸引力 F_r が支配的になっていることが F の曲線形状からわかる。Fig. 8(b)の $s = 2$ mmの場合は、アーマチャ位置 $x = 1 \sim 3$ mmの範囲で ϕ_a と ϕ_r がほぼ等しいが、推力 F の曲線形状から見ると、端面吸引力 F_a の方が側面吸引力 F_r よりもやや影響が大きいと考えられる。Fig. 8(c)の $s = 3$ mmの場合は、アーマチャ位置 $x = 1 \sim 3$ mmの範囲で ϕ_r の方が ϕ_a よりも30～60%程度大きい、2つの吸引力 F_a と F_r を足した推力 F の曲線はほぼ一定となっており、電磁比例アクチュエータとしての動作ストロークが得られ、本研究のアクチュエータの場合、 s 寸法は3mmが適切であることがわかる。また、Fig. 8(a)～(d)に示すように、コイルを縦断する漏れ磁束が総磁束に対して約10～40%ある。ただしFig. 8(c)の $s = 3$ mmのアクチュエータで電磁比例アクチュエータとしての動作ストローク範囲 $x = 1 \sim 3$ mm内ではこの割合は16～32%程度であるが、この漏れ磁束がアクチュエータの性能に対する影響は今後検討予定である。

5. 端面吸引力と側面吸引力が各々単独で発生するアクチュエータ

本研究のアクチュエータで、アーマチャ位置 x の変化に対して推力 F を一定の大きさにできるアクチュエータ寸法を設計するためには、第3章～4章で述べたようにいくつかの寸法のアクチュエータを試作・評価したり、いくつかの寸法のアクチュエータでそれぞれアーマチャの位置を変えるごとに解析モデルを作成して解析しなくてはならない。このように、良好な特性のアクチュエータを設計するには多くの費用や時間、手間がかかってしまう。本研究のアクチュエータの推力特性は、原理的に前述のように端面吸引力と側面吸引力を合成することにより求められることが明らかになった。そこで、これら2つの吸引力をそれぞれ単独で発生できるアクチュエータを製作し、これらのアクチュエータで得られた吸引力曲線を合成して推力特性曲線を求める試みを行った。この方法の妥当性が明らかになれば、アクチュエータの外形寸法などを変えた場合でも簡便に本研究のアクチュエータの設計が可能になる。

Fig. 9およびFig. 10に、端面吸引力と側面吸引力をそれぞれ単独で発生できるアクチュエータの構造図を示す。Fig. 9に示すアクチュエータは、Fig. 1のアクチュエータと比べるとステータA部とB部に段付が無く、またステータ対

向するアーマチャ2箇所の間角形磁極部で半径方向の空気隙間が無く、Fig. 9に示すように端面方向のみにしか磁束が流れない。そのため、Fig. 9に示すアクチュエータは端面吸引力のみしか発生しない。一方、Fig. 10に示すアクチュエータは、アーマチャ端面に対向する2箇所のステータ端面には非磁性材料部品がはめ込んであり、ステータとアーマチャの対向する空気隙間は半径方向しか無い。そのため、ステータとアーマチャ間の磁束流れは半径方向しか存在しないため、Fig. 10に示すアクチュエータは側面吸引力しか発生しない。

Fig. 11とFig. 12に、Fig. 9とFig. 10に示したアクチュエータのそれぞれのアーマチャ位置 x に対する吸引力 F_a および F_r を示す。Fig. 11はいわゆるブランジャ形のソレノイドで、端面吸引力 F_a しか発生しないアクチュエータの吸引力特性を示している。また、Fig. 12はいわゆる漏えい形のソレノイド¹²⁾で、側面吸引力 F_r しか発生しないアクチュエータの吸引力特性を示していることがわかる。また、Fig. 11とFig. 12の各吸引力特性の実験値と解析値を比較すると共に良好に一致しており、Fig. 9およびFig. 10のアクチュエータの磁場解析も有用であることがわかる。

Fig. 9 Structure of the experimental actuator acting on the armature in the axial air gap

Fig. 10 Structure of the experimental actuator acting on the armature in the radial air gap

Fig. 11 Relationship between x and F_a Fig. 12 Relationship between x and F_r

6. 端面吸引力と側面吸引力の合成

Fig. 13(a)~(d)に第5章で述べた端面吸引力と側面吸引力が各々単独で発生するアクチュエータを使って測定した各々の吸引力曲線を合成して、Fig. 1に示した本研究のアクチュエータの推力曲線を求めて示した。

Fig. 13(a)は、 s 寸法が1 mmの場合について、Fig. 11およびFig. 12に示した端面吸引力 F_a と側面吸引力 F_r の両曲線を合成して推力曲線 F_{add} を求めた結果を示す。また、 F_{add} と $s = 1$ mmのアクチュエータの推力 F を測定した推力曲線との比較を示す。Fig. 13(a)によれば、両者の推力曲線は良く一致していることがわかる。 s 寸法が1 mmの場合と同様に s 寸法を2, 3, 4 mmにして推力曲線を求めた図をそれぞれFig. 13(b)~(d)に示す。Fig. 13(b)~(d)によれば、2つの吸引力 F_a と F_r を合成した推力曲線 F_{add} とFig. 1に示す各 s 寸法のアクチュエータの推力曲線 F を比較すると、アーマチャ位置 x が1 mm以下で両曲線の差が大きくなるが、 x が1 mm以上では両曲線は良く一致している。 x が1 mm以下では、Fig. 1に示した本研究で考案したアクチュエータにおいて、ステータとアーマチャの半径方向に対向する角形磁極どうしの重なり量が大きくなる。そのため、Fig. 8(b)~(d)に示したように磁極間の空気隙間に流れる磁束は、端面方向の流れに対して側面方向の流れが多くなる。その結果、Fig. 9に示した端面のみしか磁束が流れないアクチュエータで求めた端面吸引力 F_a に対して、 x が1 mm以下では本研究のアクチュエータの端面吸引力が小さくなり、Fig. 13(b)~(d)に示した

(a) $s = 1.0$ mm (b) $s = 2.0$ mm (c) $s = 3.0$ mm (d) $s = 4.0$ mmFig. 13 Relationship between forces F_a , F_r and F

ように実験値 F の方が F_a と F_r を足した F_{add} よりも小さくなったと考えられる。しかし、Fig. 13(b)~(d)に示すように、推力 F が一定になる動作ストローク範囲では推力曲線 F_{add} と F は良く一致している。以上のことから、端面吸引力と側面吸引力が単独で発生するアクチュエータの2つの吸引力曲線を合成して、本研究のアクチュエータの推力曲線を求めることにより、アーマチャ位置 x の変化に対して推力 F を一定にするための s 寸法を簡便に求めることができることがわかった。このことにより、本電磁比例アクチュエータを簡便に設計できることを明らかにできた。

7. 他の電磁比例アクチュエータとの特性比較

Fig. 14にアクチュエータに加える電力と推力の大きさの関係について、リニアモータおよび比例ソレノイドと本研究のアクチュエータで比較した結果を示す。また、Fig. 14に示したアクチュエータの諸元をTable 1に示す。

Fig. 14に示したアクチュエータは、Table 1に示すように外形寸法はほぼ同じである。Fig. 14のリニアモータは、A社のカタログ値の消費電力90Wでの推力をもとに計算で求めたものであり、比例ソレノイド(1)はB社のカタログ値を表し、比例ソレノイド(2)は実測値である⁵⁾。また、本研究

Table 1 Dimension of electro-magnetic proportional actuators shown in Fig. 14

Actuator	Size	Working stroke
Cylindrical two-step type ($s = 3\text{ mm}$)	60mm diameter × 83mm length	2 mm
Linear motor	60mm square × 87mm length	± 1 mm
Proportional solenoid (1)	60mm square × 123mm length	6 mm
Proportional solenoid (2)	60mm square × 117mm length	37mm

Fig. 14 Comparison of thrust force characteristics with electro-magnetic proportional actuators

の円筒形2段磁極式電磁比例アクチュエータは、 s 寸法が3mmの試作品の実測値から求めたものである。本研究の試作アクチュエータについて、室温23℃で消費電力15Wに相当する電流を連続でコイルに流し続けたところ温度上昇を続け、約136℃で温度は飽和した。一般的に用いられる絶縁軟銅線の許容温度は、エナメル線で105～155℃である¹³⁾。このことから、消費電力15Wで各アクチュエータの推力を比較すると、2段磁極式アクチュエータはリニアモータや比例ソレノイドと比較して25倍近い推力が得られる。さらにアクチュエータの放熱性を向上させて15Wよりも大きな電力をかけられれば、さらに大きな推力を得ることができる。また、Table 1より本アクチュエータは動作ストローク範囲が比例ソレノイドと比較すると短い、前述したように構成部品が全て単純な円筒形状で製作が容易であり、ストロークがやや短くても大きな推力が必要な用途に適している。なお、本研究のアクチュエータはアーマチャ直径を大きくすると、ステータと対向する端面の面積はほぼ直径の2乗に比例して大きくなる。一方、半径方向のステータとアーマチャ磁極間の重なり部分の対向面積は、アーマチャ直径と同じ比率でしか大きくならない。そのため、端面吸引力は側面吸引力よりも大きくなる割合が高く、推力が一定になる動作ストローク範囲を得るためにはFig. 13(a)~(d)の関係から s 寸法を大きくする必要がある。その結果、アーマチャ直径を大きくするとアクチュエータの推力が大きくなると共に動作ストロークも大きくなると考えられる。このことは比例ソレノイドでも同様で、比例ソレノイドの推力を大きくするためには外形寸法が大きくなり、動作ストロークもさらに大きくなる。逆に、動作ストロークを小さくすると小形化できるが、推力も小さくなってしまふと考えられる。

今後、本研究のアクチュエータがさらに大きな推力を発生できるように、コイルの銅部分とステータおよびアーマチャの鉄部分の比率や放熱性の検討を行う予定である。また、アクチュエータの外形寸法を変えた場合、推力や動作ストローク範囲が外形寸法に対してどのように変化するのか詳しく調べる予定である。

8. 結 言

油圧比例制御弁を駆動する電磁比例アクチュエータとして、円筒形2段磁極を持ち、ステータとアーマチャが対向する軸方向と半径方向の二方向の空気隙間に流れる磁束により発生する2つの吸引力の合力が推力になるアクチュエータを考案し、試作した。外形寸法が直径60mmで長さ83mmの試作アクチュエータについて推力特性を測定した結果、動作ストローク2mmの範囲で推力がほぼ一定になり、動作ストローク範囲内の推力は約290N得られた。本電磁比例アクチュエータは、外形寸法がほぼ同じリニアモータや比例ソレノイドと比較すると、室温時の消費電力15Wで25倍近

くの推力が得られることがわかった。

また、アクチュエータ内に流れる磁束を調べ、これらの磁束流れにより発生する端面吸引力と側面吸引力の合力が本アクチュエータの推力になることを明らかにした。そして、二つの吸引力をそれぞれ単独で発生できるアクチュエータを試作し、このアクチュエータで得られた2つの吸引力曲線を合成することにより、本研究のアクチュエータの推力曲線が求まり、本研究のアクチュエータを簡便に設計できる方法を明らかにした。

参 考 文 献

- 1) 田中裕久：油空圧機器のための電気—機械インターフェイス，油圧と空気圧，Vol. 22, No. 1, p. 49-56 (1991)
- 2) Backe, W. : Grundlagen und Entwicklungstendenzen in der Ventiltechnik, O+P, Vol. 34, No. 7, p. 496-505 (1990)
- 3) 田中裕久，増田健二：二段形電気油圧圧力比例弁に関する研究，日本機械学会論文集（C編），Vol. 55, No. 510, p. 503-507 (1989)
- 4) 久保忠正，田中裕久：比例ソレノイドの吸引特性に関する研究，昭和62年秋季油空圧講演会講演論文集，p. 89-92 (1987)
- 5) 近藤尚生，日比昭：多段磁極式電磁比例アクチュエータの試作研究，日本フルードパワーシステム学会論文集，Vol. 36, No. 4, p. 96-101 (2005)
- 6) 近藤尚生，日比昭：多段磁極式電磁比例アクチュエータの試作研究（第2報：アーマチャの磁路断面積と突歯断面形状の影響），日本フルードパワーシステム学会論文集，Vol. 38, No. 1, p. 7-12 (2007)
- 7) 近藤尚生，日比昭：多段磁極式電磁比例アクチュエータの試作研究（第3報，アーマチャの寸法諸元が性能に及ぼす影響），日本フルードパワーシステム学会論文集，Vol. 39, No. 6, p. 110-115 (2008)
- 8) Kondo, H., Hibi, A. : A Study of a Multi-step Pole Type Electro-magnetic Actuator for Controlling Proportional Hydraulic Valve, JFPS International Journal of Fluid Power System, Vol. 2, No. 2, p. 9-14 (2009)
- 9) Kondo, H., Kurata, Y. : A Study of a Multi-step Pole Type Electro-magnetic Actuator for Controlling Proportional Hydraulic Valve (Magnetic Flux Flow in the Actuator), Proceedings of 9th JFPS International Symposium on Fluid Power, p. 415-422 (2014)
- 10) 近藤尚生，加藤新，山口健二：複数の角形磁極部を有する油圧比例弁用電磁比例アクチュエータの試作研究，日本機械学会東海支部第57期総会講演会講演論文集，No. 083-1, p. 77-78 (2008)
- 11) サイバネットシステム(株)：ANSYS磁場解析セミナーノート（2011）
- 12) 山口惇，田中裕久：油空圧工学，コロナ社，p. 87 (1986)
- 13) 中田高義，伊藤昭吉，河瀬順平：有限要素法による交直電磁石の設計と応用，森北出版，p. 11 (1991)