研究論文

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)

近 藤 尚 生**, 日 比 昭***

A Study of a Multi-step Pole Type Electro-magnetic Proportional Actuator
(3rd Report: Influences of Dimensions of an Armature on Performance)

Hisao KONDO, Akira HIBI

This study deals with a newly proposed electro-magnetic proportional actuator for hydraulic control valves, in which multi poles are arranged in a row. The force produced by this actuator is more than 2.5 times as large as that of conventional proportional electro-magnetic actuators of solenoid type. Performances of this actuator have been reported in previous papers. In this paper, influences of dimensions such as clearance between stator and armature, thickness of the armature and length of the top land of the armature are investigated experimentally. It becomes clear that the produced force increases with reduction in the clearance between stator and armature. Moreover, influences of the thickness of the armature are not so large as long as the length of the top land is smaller than 40% of the thickness of the armature. The results in this paper will be profitable for designing the actuator.

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

1. 緒 言

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。これまでに, 8個の矩形形状の突歯磁極を有するアーマチャとステータを用いたアクチュエータを試作した結果, 弁本体への取付面寸法および長さ寸法が同等の比例ソレノイドやリニアモータと比較すると, 同じ消費電力で約2.5倍の推力が得られた¹⁾。この一次試作品の特性をさらに改善するために, アーマチャの磁路を改善すると共に, 突歯形状を工夫して, 長さ寸法の小形化を計った。その結果, 一次試作品に比較して, 推力が一定になるアーマチャストローク範囲が2倍近く増加し, 長さ寸法をより小形化することに成功した²⁾。

これらの試作研究から, 多段磁極式電磁比例アクチュエータの推力特性や, 設計方法に関する有用な知見が得られたが, アーマチャ・ステータ間の半径方向の隙間寸法や, 個々の突歯の根元寸法, 歯先平坦幅寸法などが, 推力特性

にどのように影響するのか明らかではなかった。本報は, これらの影響を実験的に調べたものであり, 多段磁極式電磁比例アクチュエータの設計に利用できる有用な結果が得られたので報告する。

なお, 寸法諸元の異なる多数の多段式アクチュエータを製作するには, 多大な費用と時間を要するので, 本報では1段形のアーマチャを用いた簡便な方法で寸法諸元の影響を調査した。

2. 実験方法

Fig. 1に, 突歯5段のステータと1段形のアーマチャを用いた本報の実験装置を示す。この実験装置は, ステータ, アーマチャ, コイルおよび段付シャフトとスリーブで構成されている。コイルは, Fig. 1の上図(A-A断面図)に示されるように, アーマチャの四面を囲む巻棒に巻かれている。この巻棒は, 右左両端の軸受ブロックによりステータ側に固定されている。1段形のアーマチャは, 左方向に推力を取り出す段付シャフトに取付けられ, スリーブおよびナットにより固定されている。アーマチャは, 巻棒の内面を回り止めガイドとして, 左右方向に動く。アーマチャとシャフトおよびスリーブは, 各軸心が合うように精度良く製作している。ステータの左右両端には, 軸受ブロック(非磁性材)が取付けられており, 4本のボルトで固定されている。アーマチャの取付けられた段付シャフトとスリーブは, 軸受ブロックで支持されている。巻棒は, 組立が容易なように上下2個別々になっており, 2個のコイル

*平成20年2月18日 原稿受付

**豊田工業高等専門学校機械工学科

(所在地 〒471-8525 豊田市栄生町2-1)

(E-mail: hkondo@toyota-ctac.jp)

***豊橋技術科学大学機械システム工学系

(所在地 〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

Fig. 1 Structure of experimental actuator

Fig. 2 Left view of the experimental actuator (Bearing blocks are removed)

Fig. 3 Experimental stator and armature

を合計した巻数 N は240回である。コイルに電流 I を流すと、Fig. 1に点線で示すように、磁束はアーマチャとステータの対向している突歯の角部を通して流れる。

Fig. 2は、Fig. 1下図を左側面から見たものであるが、磁束はアーマチャからステータの左右両側を回ってアーマチャに戻る。油圧弁への取付寸法は、高さ52mm、幅68mmの長方形である。また、実験に使ったFig. 1のステータは、前報²⁾の実験装置に使用した5段のものをを用い、1段形のアーマチャだけを組替えて実験を行った。

実験では、コイル電流 I を0～10A（起磁力 NI で0～2400AT）まで変化させた。その時、Fig. 1の1段形アーマチャが受ける前方向（左方向）の吸引力と、アーマチャが左方に移動して背面にステータの突歯が存在する時に、アーマチャ背面に作用する逆方向の吸引力を、シャフトの先端に置いたロードセルで測定した。アーマチャ・ステータの相対位置は、ステータを固定し、アーマチャが取り付けられた段付シャフトとロードセルの位置をマイクロメータヘッドで正確に移動させることにより変化させた。また、吸引力には、コイル電流が増加する方向と減少する方向でヒステリシスが現れた。このヒステリシスは、起磁力1000ATの時の吸引力の大きさに対して数%程度であり、吸引力の実験値は電流が増加する方向で測定した値とした。

Fig. 3に、実験用ステータと1段形のアーマチャを示す。本報では、多段磁極式電磁比例アクチュエータの設計指針を得るために、特にアクチュエータの推力特性に大きく影響すると予測されるアーマチャの厚さ t 、歯先平坦幅 E 、アーマチャ・ステータ間の半径隙間 δ を変えた、いくつかの1段形のアーマチャを製作した。本報では、Fig. 3に示されるステータと、アーマチャ・ステータ間の半径隙間 δ 、アーマチャの厚さ t 、歯先平坦幅 E が、それぞれ4～5種類異なるアーマチャを用いて実験した。

以上の本報の実験装置を用いれば、製作が容易な1段形のアーマチャを組替えるだけで、突歯の寸法諸元と推力特性の関係を容易に測定することができる。

3. 1段の吸引力と多段の推力の比較検討

Fig. 4は、突歯の重なり量 X_1' と前方向の吸引力 F_a の関係を測定した結果である。アーマチャの寸法諸元は、 $t=5$ mm、 $E=2.5$ mm、 $\delta=0.05$ mmであり、前報²⁾の突歯5個の1段分と同じである。コイルの起磁力 NI は、コイル2個合計で400AT（アンペア・ターン）～2000ATまで、400AT毎に変えて測定を行った。Fig. 4によれば、 X_1' が2mm以下では、コイル起磁力1200ATまでは起磁力 NI と吸引力 F_a はほぼ比例している。また、前方向の吸引力 F_a がほぼ平坦になる X_1' の範囲は、コイル起磁力を大きくするほど小さくなる。起磁力800AT以下で、 F_a がほぼ平坦になる X_1' の範囲が比較的大きい。

Fig. 5は、Fig. 4と同じアーマチャについて、アーマ

チャとステータ歯先平坦部の後縁端の離れ量 Y_1' と後縁間に作用する F_a と逆方向の吸引力 F_b の関係を測定した結果である。Fig. 5によれば、 $Y_1' = 0$ mmのときの F_b の値は、Fig. 4の $X_1' = 0$ mmのときの F_a の値とほとんど同じである。起磁力が800AT以下であれば、 F_b は Y_1' の増加と共に急速に減少するが、起磁力が大きい2000ATの場合には、 Y_1' が例えば2 mm程度になっても、 F_b の値がかなり大きい。

Fig. 4 Relations between X_1' and F_a

Fig. 5 Relations between Y_1' and F_b

Fig. 6 Comparison of measured value and calculated value of F_n

Fig. 6は、突歯5個のアーマチャとステータを組込んだアクチュエータで、突歯が重なる段数 n を1から5段まで変えた場合の推力 F_n と突歯重なり量 X_n の関係を測定した前報²⁾の実験結果と、Fig. 4とFig. 5に示した1段の吸引力 F_a と F_b から次式を用いて計算した結果を比較した図である。この実験に使用したステータとアーマチャは、5個の歯の E , t 寸法にばらつきがあり、5個平均すると、 $X_n = 0$ mmにおける Y_1' は -0.4 mmである。

$$F_n = nF_a - (n-1)F_b \quad (1)$$

Fig. 6から分かるように、 X_n 全域で実験値と計算値はかなり良く一致している。このことから、本報の実験装置で、吸引力 F_a と F_b を測定することにより、式(1)を用いて多段の場合の推力 F_n が求められることが明らかになった。

4. アーマチャ・ステータ間の半径隙間の影響

アーマチャ・ステータ間の半径隙間の大きさは、アクチュエータの性能に大きく影響する。したがって、アーマチャ・ステータ間の半径隙間の大きさを決定するための設計基準を明確にすることは、実際の設計に対して非常に有用である。アーマチャ・ステータ間の半径隙間 δ が、多段磁極式アクチュエータの推力特性に与える影響を調査するために、1段形のアーマチャの厚さ t が5 mm、歯先平坦幅 E が2.5 mm (寸法誤差 ± 0.1 mm) の場合について、 δ 寸法を変えて実験を行った。

Fig. 7に、アーマチャ・ステータ間の半径隙間 δ を変えて、コイル起磁力 NI と前方向の吸引力 F_a の関係を測定した結果を示す。ただし、突歯の重なり量 X_1' が0.5 mmの場合について示す。Fig. 7に示されるように、起磁力 NI が500 AT以上では、半径隙間 δ を31 ~ 207 μ mの範囲で変化させても、起磁力 NI と吸引力 F_a はほぼ比例している。また、800 AT以上における曲線の形は、 δ によらずほとんど同じであり、縦軸方向に平行移動したものになっている。つまり、0 ~ 800 ATの間に生成された F_a の差異が、そのまま加算されて推移している。

Fig. 8に、突歯の重なり量 X_1' が0.5 mmの時の半径隙間 δ

Fig. 7 Relations between NI and F_a in the case of varying δ

Fig. 8 Relations between δ and F_a

と吸引力 F_a の関係を示す。Fig. 8は、Fig. 7の実験結果を整理し直したものである。Fig. 8に示されるように、本報で実験した δ の範囲内では、 δ の減少と共に F_a が直線的に上昇している。鉄心が磁気飽和しないで透磁率が極めて大きいと仮定した電磁気学理論³⁾によると、 δ の減少と共に F_a が双曲線状に急上昇するが、実際には、鉄心角部において局部的な磁気飽和が発生するので、急上昇しないものと思われる。しかし、 δ を $50\mu\text{m}$ よりも小さくすると、アーマチャ・ステータ間の半径隙間のわずかな偏心誤差で、大きな横力（サイドフォース）を発生する⁴⁾。そのために、アーマチャ案内軸受の加工や組立精度を厳しくする必要がある。逆に δ を $100\mu\text{m}$ 以上にすると、加工・組立精度が楽になるが、吸引力 F_a の低下が大きくなり、アクチュエータは高い推力を得ることができない。本報では、当該実験室で可能な加工・組立精度を勘案して、 $\delta = 50\mu\text{m}$ を目標にして t と E の影響を調べるための試験片を作成した。

Fig. 9は、Fig. 7で使用したものと同一アーマチャについて、 NI を 1050AT として F_a と X_1' の関係を測定した結果である。この図から、 $X_1' = 0.5\text{mm}$ 以外でも、 X_1' が 0mm よりも大きい範囲であれば、 δ の減少と共に F_a がほぼ直線的に上昇するといえる。Fig. 10は、Fig. 9に示した半径隙間 δ が異なる各々の曲線について、前方向の吸引力 F_a の最大値 $F_{a\text{max}}$ と歯先平坦幅 E で無次元化した図である。Fig. 10に示されるように、 X_1'/E が零よりも大きい範囲では、半径隙間 δ が異なっているにもかかわらず、 X_1'/E に対する $F_a/F_{a\text{max}}$ の変化はほとんど同じである。

Fig. 11に、半径隙間 δ を $31 \sim 207\mu\text{m}$ の範囲で変化させた場合の、逆方向の吸引力 F_b を、歯先平坦部の後縁端の離れ量 Y_1' に対して測定した結果を示す。Fig. 11によれば、離れ量 Y_1' が $-0.5 \sim 1\text{mm}$ の範囲では、 δ が大きいと逆方向の吸引力 F_b は小さくなるが、 Y_1' が 1mm 以上になると、 δ を変えても F_b はほとんど変わらなくなる。

5. アーマチャの厚さの影響

多段磁極式アクチュエータの推力に対するアーマチャの

Fig. 9 Relations between X_1' and F_a in the case of varying δ

Fig. 10 Dimensionless graph of fig. 9

Fig. 11 Relations between Y_1' and F_b in the case of varying δ

厚さ t の影響を調べるために、アーマチャ・ステータ間の半径隙間 δ は約 $50\mu\text{m}$ 、歯先平坦幅 E は約 2.5mm 一定で、 t を変化させて実験を行った。

Fig. 12に、1段形のアーマチャの厚さ t を変えて、突歯の重なり量 X_1' と前方向の吸引力 F_a の関係を測定した結果を示す。Fig. 12に示されるように、 F_a に及ぼす t の影響は小さい。なお、Fig. 12の $t = 5\text{mm}$ の実験値が、 $X_1' = 2\text{mm}$ 付近で他の実験値と離れているのは、 $t = 5\text{mm}$ の試験片の

E 寸法が他のものより0.1mm小さいことによるものである。

Fig. 13に、アーマチャの厚さ t を変えたときの、歯先平坦部の後縁端の離れ量 Y_1' と、逆方向の吸引力 F_b の関係を示す。Fig. 13に示されるように、 t を変えても F_b は変化しない。 E を一定のまま t を大きくするほど、 $X_1' = 0$ mmの位置における Y_1' が大きくなり、 F_b が小さくなるので、 $X_1' = 0$ mmの位置の合計推力が大きくなる。

Fig. 12 Relations between X_1' and F_a in the case of varying t

Fig. 13 Relations between Y_1' and F_b in the case of varying t

Fig. 14 Relations between X_{10}' and F_{10} in the case of varying t

Fig. 14は、 $E=2.5$ mm一定のまま、 t を種々変えた10段階形アクチュエータの推力 F_{10} を計算したものである。ステータ側もアーマチャに応じて同時に変更している。推力 F_{10} は式(1)における n を10とした次式に、Fig. 12およびFig. 13に示した F_a と F_b の測定値を代入して計算した。

$$F_{10} = 10 \times F_a - 9 \times F_b \quad (2)$$

Fig. 14によれば、アーマチャの厚さ t が5 mmの場合、 F_{10} が比較的平坦になる X_{10}' の範囲は小さく、また平坦な部分の推力 F_{10} も小さい。歯先平坦幅 E が2.5mm一定なので、 t を5 mmよりも厚くするほど隣接歯どうしの間隔が広がる。そのため、 t を厚くするほど $X_{10}' = 0$ の時の離れ量 Y_1' が大きくなって F_b が小さくなるため、推力 F_{10} は上昇し、 F_{10} が平坦になる X_{10}' の範囲も大きくなる。しかし、 t が7 mmと8 mmの場合を比較すると、 t を8 mmに大きくしても F_b はすでに十分小さくなっているため、 F_{10} が平坦になる X_{10}' の範囲や推力 F_{10} の大きさは t が7 mmの場合と大差がなく、アクチュエータの全長が長くなるだけで損失が大きい。したがって、Fig. 2に示した、弁本体への取付面寸法52×68mmの多段磁極式アクチュエータの場合、突歯の歯先平坦幅 E を2.5mmとすると、突歯根元の厚さ(突歯間ピッチ) t が7 mmの時、 $X_{10}' = 0$ で歯先平坦部の後縁端の離れ量 Y_1' は2 mmとなり、良好な推力特性を得ることが期待できる。このときの歯先平坦幅 E とアーマチャの厚さ t の比 E/t は0.36である。

6. 突歯の歯先平坦幅の影響

突歯の歯先平坦幅 E が、多段磁極式アクチュエータの推力特性に与える影響を調査するために、 δ は約50 μ m、 t は約5 mm一定で、 E 寸法を変えて実験を行った。

Fig. 15に、歯先平坦幅 E を変えた場合の、突歯の重なり量 X_1' と前方向の吸引力 F_a の関係を測定した結果を示す。Fig. 15に示されるように、 E を小さくしても、 F_a の最大値はほとんど変化しない。また、 F_a が比較的平坦になる X_1' の範囲、すなわち、アクチュエータとして有効利用できるストローク長さは、 E 寸法と同程度である。したがって、本アク

Fig. 15 Relations between X_1' and F_a in the case of varying E

Fig. 16 Relations between Y_1' and F_b in the case of varying E

Fig. 17 Relations between X_{10}' and F_{10} in the case of varying E

チュエータの設計に当たっては、目的の用途に必要なストローク長さから、 E 寸法を選定すれば良いことがわかる。

Fig. 16に、歯先平坦幅 E を変えた時の、隣接する歯先平坦部の後縁端の離れ量 Y_1' と逆方向の吸引力 F_b の関係を示す。Fig. 16に示されるように、 Y_1' が正の範囲では、 E を変えても F_b はほとんど変わらない。Fig. 13に示したように、 F_b は t の影響もほとんどないので、アクチュエータの合計推力特性に及ぼす F_b の影響を予測することが極めて単純である。例えば、 $X_1' = 0$ mmのとき、 Y_1' が2 mmになるように E を選定すると、30 Nくらい発生した F_a のうち、5 Nくらいが F_b によって減少することがわかる。

Fig. 15およびFig. 16に示した吸引力 F_a と F_b の測定値を使い、アーマチャとステータの突歯が10段の場合のアクチュエータ推力 F_{10} を、式(2)で計算した結果をFig. 17に示す。Fig. 17に示されるように、 E が2.4 mmの場合、 F_{10} が比較的平坦になる X_{10}' の範囲は小さく、また、平坦な部分の推力 F_{10} も小さい。 E を2 mmにすると、推力 F_{10} は上昇し、 F_{10} が比較的平坦になる X_{10}' の範囲も大きくなる。さらに E を1 ~ 1.5 mmに小さくすると、推力 F_{10} はさらに上昇するが、 F_{10} が平坦になる X_{10}' の範囲は小さくなる。これらのことから、 t が5 mmの場合には、 E が2 mm程度の時、推力 F_{10} が平

坦にとれる X_{10}' の範囲が比較的大きく、その範囲の推力 F_{10} も比較的大きくとれる。したがって、推力の大きさと推力が平坦になるアーマチャストローク範囲について総合的に判断すると、 E は2 mmが良い。このときの歯先平坦幅 E と突歯の厚み t の比 E/t は0.4である。

7. 結 言

多段磁極式電磁比例アクチュエータの推力特性に対するアーマチャ寸法諸元の影響について、突歯5段のステータに突歯1段形のアーマチャを組込んだ実験装置で調べた。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) アーマチャ・ステータ間の半径隙間 δ が吸引力に及ぼす影響を $\delta = 31 \mu\text{m}$ から $207 \mu\text{m}$ の範囲で調べた結果、 δ の減少に伴う吸引力の変化は直線的であり、 δ の減少に伴って吸引力が急上昇することはなかった。
- (2) 歯先平坦幅 E を1 mmから2.4 mmまで変えて調べた結果、 E を変えても最大吸引力は変わらないことがわかった。また、吸引力が比較的平坦になる有効ストローク長さが E 寸法と同程度であることも明らかとなった。
- (3) アーマチャの背面と次の段のステータの突歯との間に、有効推力とは逆方向の吸引力が作用するが、この力は、歯先平坦幅 E とアーマチャの厚さ t の影響を受けず、アーマチャ背面から次の段のステータの突歯までの間隔のみで決まることがわかった。
- (4) $E = 2$ mmと2.5 mmの2例について10段形アクチュエータの推力特性を検討した結果、 $E = 2$ mmのときには $t = 5$ mm、 $E = 2.5$ mmのときには $t = 7$ mm程度にすると良好な推力特性が得られることがわかった。

以上の結果は、本報の突歯形状を持つ電磁比例アクチュエータを設計する際の、突歯厚さ t と歯先平坦幅 E を適切に選ぶための資料として有用であると考えるが、今後、さらに本研究の電磁比例アクチュエータの設計法を確立するためには、ステータ側の寸法諸元の影響や相似則などについて、詳しい検討を行う必要がある。

参 考 文 献

- 1) 近藤、日比：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、36-4, 96/101 (2005)
- 2) 近藤、日比：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、38-1, 7/12 (2007)
- 3) 見城、菅原：ステッピングモータとマイコン制御、総合電子出版、78/81 (2000)
- 4) Y.H.Lu : Statisches und Dynamisches Verhalten von Proportionalmagneten, o+p, 25-5, 403/407 (1981)