

解 説

多段磁極式電磁比例アクチュエータの試作研究*

近藤 尚生**, 日比 昭***

* 平成 20 年 6 月 16 日原稿受付

** 豊田工業高等専門学校機械工学科, 〒471-8525 豊田市栄生町 2-1

*** 豊橋技術科学大学機械システム工学系, 〒471-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1

1. はじめに

多段磁極式電磁比例アクチュエータは、直動で油圧比例制御弁を制御するために考案したアクチュエータであり、アーマチャとステータそれぞれに対向する多数の突歯を持ち、その多段の突歯が磁極になって同時引き合う力により高推力を発生するアクチュエータである。このアクチュエータは、従来から油圧比例制御弁用直動形電磁比例アクチュエータとして用いられている比例ソレノイド、フォースモータ、トルクモータ、リニアモータ¹⁾と比較して、同じ外形寸法、消費電力でより大きな推力が得られる。また、構造が簡単で永久磁石を使わないので比較的安価に製作できる可能性がある。

本稿では、多段磁極式電磁比例アクチュエータの構造や大きな推力を発生できる原理、推力特性について解説する。

2. アクチュエータの構造および動作原理

多段磁極式電磁比例アクチュエータは、図 1 に示す VR (可変リラクタンス) 形ステップモータの力発生原理を用いて推力を発生させる²⁾。図 1 は VR 形ステップモータのステータとロータを示したものである。図 1(a), (b) にそれぞれ正面と側面から見た図を示す。この図の例では、ステータは 6 個、ロータは 4 個の突歯を持っている。ステータには対向する突歯同士で 1 組のコイルが図のように巻かれる。(図 1(a) では、他の 2 組のコイルは省略してある。) コイルに電流を流すと磁束が発生し、上側の突歯を流れる磁束はステータの外側を回って下側の突歯からロータに入り、そしてステータの上側の突歯にもどってくる。これにより磁束が流れているステータとロータの突歯が磁極になって磁気吸引力が働く。図 1(a) では、磁束が流れているステータとロータの突歯が対向位置からずれているので、ステータとロータの突歯どうしが対向する位置まで戻そうとする吸引力が発生する。この力により図 1(a) の矢印で示した回転トルクが発生し、ロータは図 1(b) に示した軸を回転させ、トルクを伝える。この回転トルクの発生原理は、磁路中にあるロータの突歯の位置が変化することにより磁気回路のリラクタンスが変化し、主に空気ギャップに蓄えられている磁気エネルギーが機械的エネルギーに変換されてステータとロータの突歯間に力が発生するものである。

VR 形ステップモータの構造およびトルク発生原理を使った油圧ポンプ駆動用モータとして、SR (スイッチト・リラクタンス) モータが開発されている³⁾。SR モータは、ロータとステータの突歯の数が 4~12 個程度と少なく、突歯の幅を比較的大きくとれる。そのため、ロータの突歯の位置変化に対してリラクタンスの変化が大きくとれ、低速時において大トルクが得られる。このように、VR 形アクチュエータは比較的構造が簡単で永久磁石を使わずに大きな力が得られるため、多段磁極式電磁比例アクチュエータとして考えた原理図を図 2 に示す。

図 2 に示すアクチュエータで、図 2(a) に示すアーマチャは円周方向には図の位置から回転しないように回り止めしてある。そして、このアーマチャは図 2(b) に示す軸とはめあいになっており、軸方向には動ける。ステータとアーマチャは、図 2(b) に示されるように、軸方向に対向する多数の突歯を持っている。いま、アーマチャとステータの対向する突歯は軸方向に重なり始める位置にあるとする。この状態でコイルに電流を流すと、図 2(a) では図 1(a) と同様に磁束はステータの外周を回ってアーマチャとステータの間に流れる。一方、図 2(b) では、下側のステータに巻かれたコイルで発生した磁束はアーマチャに流れ込み、そしてアーマ

チャから上側のステータへ流れる。そして、図 2(a)に示されるようにステータ外周を通過して再び下側のステータにもどってくる。多段磁極式電磁比例アクチュエータは、この磁束流れによりステータとアーマチャの多数の突歯が磁極になってそれぞれ同時に軸方向に引き合い、図 2(b)の矢印の方向に大きな推力を発生する。

つぎに、電磁比例アクチュエータの推力特性を得るために必要な、理想的な磁化曲線を図 3 に示す⁴⁾。アーマチャ位置 $x=0$ (対向するアーマチャとステータの突歯が重なり始める位置) では、アーマチャ・ステータ間に流れる磁束は、突歯側面を通過する。そのため、空気中の磁路における磁気抵抗は比較的大きい。その結果、コイル電流 i を増加させると磁束鎖交数 ϕ は図 3 のように直線的に変化する。図 3 において、コイル電流 $i=i_1$ を一定に保ったまま、アーマチャ位置を $3x_1$ から $4x_1$ に $\Delta x=x_1$ だけ変化させたとする。この時、アクチュエータに発生する推力を f とすると、磁気エネルギーが機械的エネルギーに変換されて

$$f \cdot \Delta x = \text{面積} oa_1b_1o \quad (1)$$

となる⁵⁾。したがって、コイル電流 i_1 を一定に保ってアーマチャ位置 x を 0 から x_1 ずつ変化させたとき、原点 o と変化する前後の磁化曲線と $i=i_1$ の直線で囲われた面積が常に面積 oa_1b_1o と等しくなれば、 x によらず f は一定になる。

一方、コイル電流を $i=2i_1$ としてアーマチャ位置 x を $3x_1$ から $4x_1$ に変化させると、

$$f \cdot \Delta x = \text{面積} oc_1d_1o \quad (2)$$

となる。このとき、面積 oc_1d_1o が面積 oa_1b_1o の 2 倍にするには、 $x=3x_1$ と $x=4x_1$ の磁化曲線は平行になる必要がある。このため、電流 i が大きくなるにつれて突歯先端の部分飽和の範囲が広がり、磁束の増加を抑えられれば図 3 に示したように磁化曲線を平行にできる。この結果

$$f \propto i \quad (3)$$

となり、理想的な電磁比例アクチュエータの特性が得られる。このような理想的な電磁比例アクチュエータにおいて、推力 f を大きくするには、アーマチャ位置 x を変化させたとき、原点 o と変化する前後の磁化曲線とコイル電流 i =一定 の直線で囲われた面積を大きくする必要がある。そのために、図 2 に示した構造のように、アーマチャとステータの突歯を多数にして、アーマチャ・ステータ間の空気隙間を流れる磁束を通りやすくして、あるアーマチャ位置変化量に対して磁束の変化量が大きくなるようにすればよい。

図 4 は、永久磁石を使わない電磁比例アクチュエータである比例ソレノイドと多段磁極式電磁比例アクチュエータの磁路断面面積の比較を示す。図 4 では 2 つのアクチュエータの外形寸法が同じとして、2 方向から見た図を描いている。比例ソレノイドの磁束は、図 4(a)に示されるようにアーマチャの軸方向に流れる。したがって、アーマチャの磁路断面面積は軸と直角方向の切断面の S_1 になる。一方、多段磁極式電磁比例アクチュエータの磁束は、図 4(b)に示されるようにアーマチャ長手方向 (軸方向) と垂直の方向に流れる。したがって、アーマチャの磁路断面面積はアーマチャ長手方向の水平切断面の S_2 になる。 S_1 と S_2 を比較すると、 S_2 は S_1 より数倍大きい。この理由から、同じ外形寸法するとき多段磁極式電磁比例アクチュエータは、比例ソレノイドに比較して吸引力を発生する空気ギャップ部へ磁束を運ぶ磁路断面面積が大きい。図 3 で説明したように、電磁比例アクチュエータが大きな推力を発生させるためには、アーマチャ位置変化量に対して磁束の変化量を大きくする必要がある。そのために、大きな磁路断面面積を持つ多段磁極式電磁比例アクチュエータは高推力を発生させるために適した構造をしている。また、多段磁極式アクチュエータは比例ソレノイドに比較してコイルスペースは減るが、磁路断面面積が大きくなるので、これを補って余りあり、結果的に比例ソレノイドに比較して約 3 倍の力が出せる⁴⁾。

3. 実験用アクチュエータの構造および推力特性の実験結果

図 5 に、突歯を 5 段にした実験用アクチュエータの構造図を示す⁶⁾。このアクチュエータは、ステータ、アーマチャ、コイルで構成される。コイルは、図 5 上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る。この巻棒は、左右両端の軸受けブロックによりステータ側に固定される。アーマチャは、固定された巻棒の内面を回り止めガイドとして左右方向に動く。また、突歯は 5 個であり、歯の形状はアクチュエータの長手方向寸法の小形化のため、矩形の突歯の後縁角部を斜めに削り、突歯間のピッチを小さくできるように試みた。アーマチャには、左右に移動するときの案内面を構成すると共に、推力を取り出すための軸が付いている。ステータの左右両端には、このアーマチャと軸心を合わせ、アーマチャの軸のガイドをする軸

受けブロック（非磁性材）が 1 個ずつ取り付けられ、4 本のボルトで固定されている。巻枠は、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、図 5 右下図に示されるように、磁束はアーマチャとステータのお互いに対向している突歯の角部を通って流れる。また、図 5 左下図に示されるように、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ってくる。

図 6 は、突歯 5 個すべて重なった場合の推力 F と起磁力 NI の関係の実験結果を示す。アーマチャ・ステータの突歯の重なり量は、5 個の突歯の重なり量の平均値が 0.5mm になる実験値を示した。図 6 に示されるように、コイル起磁力 100AT 以下の範囲を除外すると、コイル起磁力が 1000AT までは推力と起磁力の間は比例関係にある。また、1000AT を超えると、推力は起磁力が増えるにしたがって、飽和傾向になる。この飽和傾向は、磁気飽和によるものではなく、アクチュエータの多段の突歯には、アーマチャ移動方向に対して、前方向の吸引力と逆方向の吸引力が働き、この 2 つの力の差引合計がこのアクチュエータの推力になることによるものである。

図 7 は、多段磁極式電磁比例アクチュエータにおいて、5 個のアーマチャおのおのの突歯に発生する前方向の吸引力 $F_{a1} \sim F_{a5}$ と逆方向の吸引力 $F_{b1} \sim F_{b4}$ を示したものである。図 7 に示されるように、5 個の前方向の吸引力と 4 個の逆方向の吸引力が作用し、それらの合計がアーマチャ推力 F になる。突歯の段数 n の場合の推力 F_n は次式で計算される。

$$F_n = nF_a - (n-1)F_b \quad (4)$$

図 8 は、アーマチャとステータの突歯が 1 個だけ重なった場合の、歯の重なり量 X_1 と吸引力 F_a の関係を測定した結果を示す。図 8 に示されるように、 F_a が一定になる X_1 の範囲は起磁力が大きくなるほど狭くなるが、約 1.5~2.0mm である。また、 F_a が一定になる X_1 の範囲内では、起磁力 NI と F_a は比例している。

図 9 は、隣接する突歯後縁間に作用する F_a とは逆方向の吸引力 F_b を、後縁間の離れ量 Y_1 に対して測定した結果である。図 9 に示されるように、逆方向の吸引力 F_b は、隣接する突歯の後縁間の離れ量 Y_1 が 1mm 離れていてもかなり発生しており、影響は少なくない。また、 $Y_1=1\text{mm}$ のとき、起磁力 NI を大きくすると、 F_b はほぼ NI の 2 乗に比例して大きくなる。図 6 において、突歯 5 個すべてが重なった場合、起磁力 NI が 1000AT を超えると推力 F が飽和傾向になるのは、この理由による。図 8 と図 9 に示されるように測定した F_a と F_b を用いて、式(4)における n を 5 として推力 F を計算した結果を図 6 の点線で示す。図 6 に示されるように、突歯の重なり量が 0.5mm の場合は、実験値と計算値がよく一致し、式(4)により F_a と F_b を差引合計した値がアクチュエータの推力 F になることがわかる。

4. おわりに

本稿では、多段磁極式電磁比例アクチュエータの構造や、このアクチュエータが高推力を発生できるしくみについて述べた。今後、本研究の電磁比例アクチュエータの設計法を明確にするために、さらにアーマチャ・ステータ寸法諸元の推力特性への影響や相似則などについて、詳しい検討を行ってゆく予定である。

参考文献

- 1) W.Backé : Grundlagen und Entwicklungstendenzen in der Ventiltechnik, Ö+P, 34-7, pp. 496/505(1990).
- 2) 近藤：小型で高推力な電磁比例アクチュエータ，油空圧技術，43-13, pp.31/37(2004).
- 3) 近岡：SR モータ，油圧ポンプで本領発揮，日経メカニカル，546, pp. 24/27(2000).
- 4) 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, pp. 96/101(2005).
- 5) 宮入：電気・機械エネルギー変換工学，丸善，pp. 3/9(1976).
- 6) 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, pp.7/12(2007).

著者紹介



こんどう ひさお
近藤 高生 君

豊田工業高等専門学校准教授。油圧比例制御弁用電磁比例アクチュエータの研究に従事。日本フルードパワーシステム学会，日本機械学会などの会員。

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

ひび あきら
日比 昭 君

豊橋技術科学大学教授。油圧式自由ピストン内燃機関の開発，油圧ポンプ・モータの研究，油圧制御弁の研究などに従事。日本フルードパワーシステム学会の会員。工学博士。

E-mail : hibi@mech.tut.ac.jp

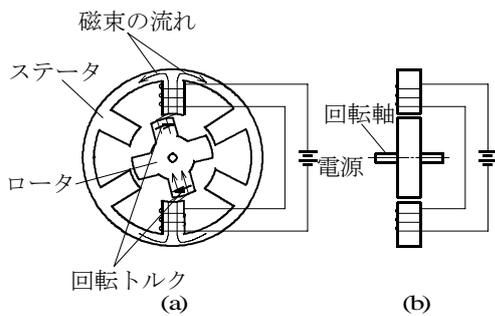


図1 VR形ステッピングモータ原理図

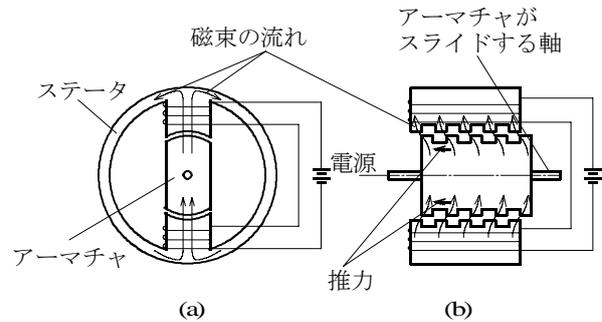


図2 多段磁極式電磁比例アクチュエータ原理図

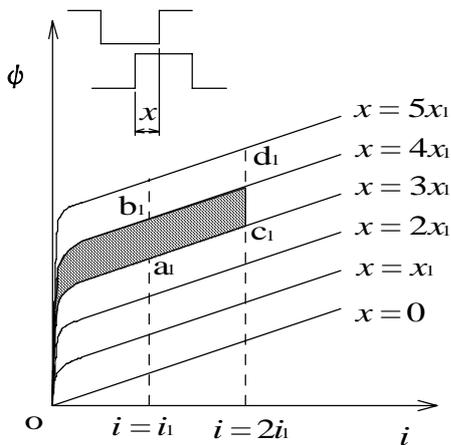


図3 理想的な電磁比例アクチュエータの磁化曲線

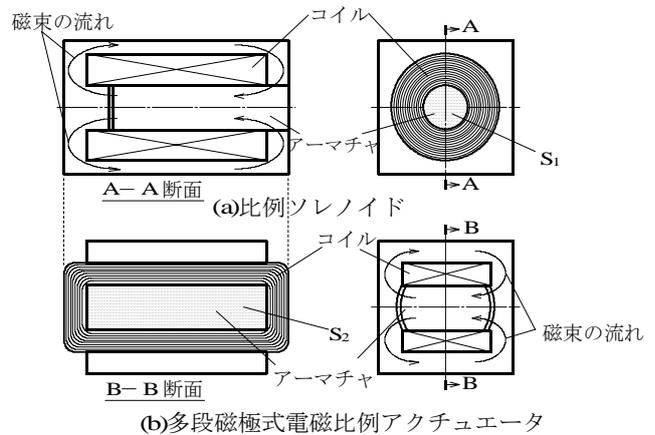


図4 磁路断面積比較

