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*

(第2報, アクチュエータ外形寸法を変えた場合の放熱特性と推力特性の検討)

近 藤 尚 生**, 菱 田 智 博***, 若 澤 靖 記**

A Study of a Cylindrical Two-Step Pole Type Electro-Magnetic Proportional Actuator (2nd Report : Examination of Characteristics of Heat Transfer and Thrust Force in the Case of Varying Outer Size of the Actuator)

Hisao KONDO, Tomohiro HISHIDA, Yasunori WAKASAWA

In the previous report, a newly designed electro-magnetic proportional actuator composed of an armature and a stator with a cylindrical two-step pole to control oil hydraulic valve was suggested. This actuator generates a large thrust force. The principal of generating the force was explained in detail in the report, however, the characteristics of heat transfer and thrust force of the actuator, in the case of varying the outer size, have not been examined. In this study, when the size of the actuator is varied, the characteristics of heat transfer in the case of continuous energization and the thrust force are examined. As a result, the characteristic length of the actuator's relationship with the electric power consumption, thrust force and working stroke became clear. A method in making diagrams on the relationship between the outer size and performances of the actuator is suggested. In conclusion, based on the request of performance values of the actuator, the outline of designs may be carried out easily using the above-mentioned relationships.

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

1. 緒 言

油圧回路内の圧力や流量をコントローラからの指令信号に比例して制御できる電磁比例制御弁を駆動するために、従来の電磁比例アクチュエータよりも大きな推力を発生できる円筒形2段磁極式電磁比例アクチュエータを考案して試作し、その推力が発生するしくみや性能について前報¹⁾で報告している。従来の電磁比例制御弁駆動用電磁比例アクチュエータについては、文献2)～3)で述べられているが、あまり大きな推力を発生できていない。また、著者の一人らは、推力が発生する軸方向に互いに対向するステータとアーマチャのそれぞれが多数の突歯を持ち、その多段の突歯が磁極になり、同時に吸引力を発生して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、試作してその性能を既報⁴⁻⁸⁾で報告している。しかし、円筒形2段磁極式や多段磁極式電磁比例アクチュエータの

外形寸法を変えた場合の放熱特性と推力特性については詳しく検討されていなかった。また、従来の電磁比例アクチュエータで、同じ構造のままで外形寸法を変えてアクチュエータの放熱特性と推力特性を詳しく検討された報告はほとんど見あたらない。実際に電磁比例アクチュエータを設計検討する場合、予めアクチュエータの外形寸法を変えた場合のこれらの特性がわかっているならば、要求される諸条件に対して比較的容易にアクチュエータ諸元を概算で求めることができる。また、電磁比例アクチュエータの外形寸法と性能の関係が明らかになっていれば、このアクチュエータの応用範囲を、たとえば建設機械などの大型油圧システムから自動車などの小型油圧システムまで幅広く考えることができる。そこで、円筒形2段磁極式電磁比例アクチュエータについて、外形寸法を変えて放熱特性と推力特性を実験的に詳しく調べ、自然放熱の場合について外形寸法の違いによりアクチュエータのコイル許容温度に対し許容される消費電力から最大推力、動作ストロークなどのアクチュエータ性能がどのように変化するかを明らかにした。

2. アクチュエータの構造および寸法諸元

Fig. 1に外形寸法を変えた円筒形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、

*平成29年3月27日 原稿受付

**国立高専機構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)

***国立高専機構豊田工業高等専門学校専攻科電子機械工学専攻

Fig.1に示すように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。コイルに電流を流すと、磁束はコイルを取り囲むように軸対象に流れる。空隙をはさんで対向するステータとアーマチャの2つの角形磁極部Ⅰ、Ⅱでは、それぞれ磁束 ϕ_{r1} 、 ϕ_{a1} 、と ϕ_{r2} 、 ϕ_{a2} が流れる。端面方向に流れる磁束 ϕ_{a1} と ϕ_{a2} が端面吸引力 F_{a1} 、 F_{a2} を発生し、半径方向に流れる磁束 ϕ_{r1} と ϕ_{r2} が側面吸引力 F_{r1} 、 F_{r2} を発生する。これら4つの吸引力を発生させる空隙は、本アクチュエータの2箇所の磁極部Ⅰ、Ⅱで直列に配置されている。そして、本アクチュエータは4つの吸引力の軸方向の合力が推力 F になるため、大きな力が得られる。また、前報¹⁾で報告したように、本アクチュエータはFig. 1のステータとアーマチャの角形磁極部が重なり始めた時の軸方向の空隙 s 寸法を適切に選ぶことにより、コイル電流が変化しなければ推力が一定になるアーマチャ位置 x の範囲が得られる。この範囲が、電磁比例アクチュエータの動作ストロークになる。

本研究では、Fig. 1に示す外形寸法および寸法諸元をTable 1のように変化させて、本アクチュエータの放熱特性および推力特性を実験的に調べた。Table 1に示すアクチュエータ各部寸法は、外径寸法 ϕd の比率にほぼ比例して変化させた。また、ステータとアーマチャの角形磁極部が対向する半径方向の空気隙間は、0.05mmになるように各アクチュエータを製作した。ステータとアーマチャの材料は、入手の容易なSS400を用いた。

Table 2は、Table 1に示した各外径寸法 ϕd のアクチュエータに対して、巻棒の寸法から巻き得るコイル巻数とそ

Fig. 1 Structure of the proportional actuator in this work

Table 1 Dimension of the proportional actuator in Fig. 1

d	B	C	D	E	G	H	I	J	s
30	41.5	37.5	28.5	32.5	18	20	24	28	1.5
45	62.3	56.3	44.5	48.5	27	29	36	42	2.25
60	83	75	61	65	36	38	48	56	3
90	124.5	112.5	91.5	97.5	54	58	72	84	4.5

Table 2 Winding number and resistance of the coil

d (mm)	Winding number (turn)	Coil Resistance* (Ω)
30	477	8.097
45	772	10.89
60	968	11.48
90	1355	16.88

*at 20°C

のときのコイル抵抗を求めたものである。ただし、コイルはF種絶縁コイル（コイル許容温度155°C）を用いた。

放熱特性を調べるための実験装置をFig. 2に示す。放熱特性は、アクチュエータを実際の使用状態として多いと考えられる横置きとして実験を行った。実験では、定電流電源からアクチュエータのコイルに一定電流 I を流し、電流を流し始めてからの時間経過と共に変化するコイル両端の電圧 V を電圧プローブにより測定した。そして、経過時間 t に対するコイル抵抗 R を V/I で算出し、この R の値を使い以下に示すコイル抵抗 R とコイル温度 θ の関係式により経過時間 t に対するコイル温度 θ の変化を求めた⁹⁾。

$$R = \frac{234.5 + \theta}{234.5 + \theta_0} R_0 \quad (1)$$

ここで、 θ_0 ：室温、 R_0 ：室温でのコイル抵抗である。

次に推力特性は、Fig. 3に示すようにアクチュエータをL字形の部材に固定し、電源からコイルに電流を流した時にアクチュエータが発生する推力をロードセルにより検出して測定した。アーマチャ位置 x は、スライドテーブルに取り付けられたマイクロメータヘッドを動かし、ロードセルの位置を移動させることにより変化させた。電源からアクチュエータのコイルに流す電流の大きさは、パーソナルコンピュータ（PC）からDA変換器への指令信号により電源を操作して変化させた。コイルに流された電流は電流プローブで測定し、推力とともに出力電圧データをAD変換器を介してPCに取り込んだ。

Fig. 2 Experimental setup of the thermal characteristics

Fig. 3 Experimental setup of the thrust force characteristics

3. 放熱特性の検討

電磁比例アクチュエータのコイルに連続通電したとき、コイルはジュール熱により発熱して、その熱がアクチュエータ表面に伝わり、アクチュエータ表面に接する外部へ放熱される。本研究では、アクチュエータ表面に接する空气中に自然放熱される場合の放熱特性について、Fig. 2に示した実験装置で実験的に検討した。

いま、コイルに連続通電したときの微小経過時間 Δt での電磁比例アクチュエータの熱平衡式は、 Δt 時間後の温度上昇を $\Delta\theta$ とすると、次の式で表される⁹⁾。

$$mc\Delta\theta + hA(\theta - \theta_0)\Delta t = W\Delta t \quad (2)$$

ただし、 m : 質量 (ステータ、アーマチャ、コイル、巻棒すべてを含む)、 c : 比熱、 h : アクチュエータの熱伝達率、 A : アクチュエータの表面積、 W : アクチュエータ内部での熱損失、 θ : アクチュエータ温度、 θ_0 : 室温 (周囲温度) である。式(2)において、左辺第1項はアクチュエータの蓄熱量、第2項は放熱量、右辺は発熱量を表している。式(2)を微分方程式に書き換え、温度 θ について解くと、次に示す温度上昇の式が得られる^{9), 10)}。

$$\theta = \theta_0 + \frac{W}{hA} (1 - e^{-\frac{hA}{mc}t}) = \theta_0 + \theta_f (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (3)$$

ここで、

θ_f : 室温 θ_0 を基準とした温度上昇後の最終温度上昇値
 $= W/hA$,

τ : 温度上昇時の熱時定数 $= mc/hA$
 である。

なお、放熱に関するアクチュエータ表面積 A は、Fig. 1に示すステータ円筒外周面、アーマチャ外周面、アーマチャ右端の円板面、およびステータ左端の円板面を含んで

いる。また、本研究のアクチュエータはコイル外周面にテフロン製の絶縁テープを巻いており、コイルはこのテープを間にはさんでステータと接触している。そして、コイルはステンレス製の巻棒に直接巻いており、巻棒左端面および外周面はステータ内面と金属接触している。さらに、巻棒内周面とアーマチャ外周面は直径隙間 $10\mu\text{m}$ 程度のはめあいにしており、Fig. 2に示すように横置き状態では、少なくともアーマチャ外周下面と巻棒内周面は金属接触している。また、式(2)および式(3)の熱伝達率 h は、アクチュエータを構成する複数の部品の物性値およびアクチュエータ表面と周囲の空気間での熱伝達の状態により複雑に異なり、理論的には容易に求められない。そのため、コイル温度上昇実験により温度上昇曲線を求め、フィッティング近似により式(3)の最終温度 θ_f や τ を求める。そして、式(3)で τ を無限大においてそのときの飽和温度を θ_{sat} とすると、 θ_{sat} は $\theta_0 + \theta_f$ で求められる。今回の実験では、アクチュエータ表面と周囲空気間の熱伝達は、後述するように自然対流で行っている。

Fig. 4は、Fig. 1に示す外形 $\phi d=60\text{mm}$ のアクチュエータについて、コイルに連続通電したときの温度上昇をコイル抵抗の変化の測定値をもとに、室温 20°C でのいくつかのコイル消費電力 W_{20} (ジュール熱) に対して求めた結果である。Fig. 4からわかるように、連続通電中のコイル温度変化は、経過時間 t に対して緩やかに変化している。このような場合、コイルのジュール熱がアクチュエータ表面に到達する時間は、アクチュエータが温度変化する時間に対して十分短いと考えられる。したがって、式(3)で示されるアクチュエータ温度 θ はコイル温度とほぼ同じと考えてよい。そのため、実線で示すコイル温度上昇測定曲線にフィッティング近似を行い、破線で示す近似曲線が測定曲線とよく一致したため、この近似曲線から式(3)により飽和温度 θ_{sat} を求めた。したがって、Fig. 4に示すように、コイルの温度上昇曲線を求めることにより、各々のコイル消費電力 (ジュール熱) W に対するアクチュエータ温度上昇後の飽和温度 θ_{sat} を求めることができる。

Fig. 4 Coil temperature raising curves

次に、Fig. 5に市販の有限要素法ソフトウェアによる熱流体解析¹¹⁾を行い、温度飽和時の温度分布およびアクチュエータ周囲流体の速度ベクトルを求めた一例を示す。解析モデルの簡化のため、巻棒に収まるコイルは銅の塊とし、巻棒およびステータ内面に接触しているとした。Fig. 4で述べたように、コイルで発生するジュール熱がアクチュエータ表面に到達する時間はアクチュエータの温度変化時間に対して十分短いと考えられるので、このような簡易化したモデルでも十分解析近似できると考えた。Fig. 5の解析結果から、飽和温度は139.0℃と求められ、Fig. 4に示す $W_{20}=15\text{W}$ の実験結果に近い値が得られた。Fig. 5によれば、コイルの発熱によりアクチュエータ周囲の空気温度が上昇し、速度ベクトルが上向きであることから、今回の温度上昇実験の熱伝達は自然対流によるものと考えられる。

Fig. 5 Analyzed diagram

次に、室温20℃でのコイル消費電力 W_{20} で電磁比例アクチュエータに一定電流 I で連続通電した場合、温度上昇とともにコイル抵抗は式(1)に示されるように大きくなるため、飽和温度 θ_{sat} のときの消費電力 W_{sat} を実使用上知っておく必要がある。室温20℃でのコイル消費電力 W_{20} と飽和温度 θ_{sat} のときの消費電力 W_{sat} の関係を、式(1)、(3)およびジュール熱の式 $W=RI^2$ より求めた式を以下に示す。

$$W_{\text{sat}} = \frac{254.5hAW_{20}}{254.5hA - W_{20}} \quad (4)$$

Fig. 6に、 $\phi d=60\text{mm}$ の円筒形アクチュエータについて、式(4)で計算した W_{20} と W_{sat} の関係曲線と実験結果を示すが、両者はよく一致していることがわかる。

本研究では、円筒形2段磁極式電磁比例アクチュエータについてさらに伝熱促進させたとき、推力特性にどのような影響を及ぼすかについても、ステータ形状を実験的に変えて放熱特性を調べた。Fig. 7に円筒形ステータ形状と、伝熱促進のために実験的に変えた角形フィン付きのステータ形状を示す。Fig. 7(a)は、Fig. 1に示した円筒形ステータ形状の立体図であり、Fig. 7(b)は(a)の円筒形状の外周にフィン10枚を付け加えたステータの立体図である。Fig. 7(b)のステータは、(a)のステータに比較して表面積 A が増加し、

Fig. 6 Relationship between W_{20} and W_{sat}

伝熱促進が期待される。ここで、Fig. 7(a)に示す円筒形ステータの直径 d を代表長さとし、Fig. 7(b)に示す角形フィン付きステータの代表長さ d を正方形のフィンの1辺の長さとする。実験で用いたFig. 7(b)に示すステータのフィン寸法をTable 3に示す。また、Fig. 7(a)、(b)に示すそれぞれのステータを組み込んだ時のアクチュエータの表面積 A と代表長さ d の関係をFig. 8に示す。Fig. 8によれば、代表長さ d 、すなわちアクチュエータの外形寸法が大きくなるほど、表面積 A はほぼ二次関数的に大きくなり、また2つのステータ形状に対するアクチュエータ表面積 A の差が大きくなることをわかる。

Fig. 7 Stator shapes in this work

Table 3 Fin dimension in Fig. 7(b)

D (mm)	Fin pitch (mm)	Fin thickness (mm)
30	4	1.5
45	6	1.5
60	8	2
90	12	3

Fig. 8 Relationship between d and A

4. 推力特性の実験結果

Fig. 9(a)~(d)に、本研究の電磁比例アクチュエータで外径寸法 d を30, 45, 60, 90mmに変えた場合のアーマチャ位置 x と推力 F の関係を示した実験結果を示す。図中の各曲線は、コイルの起磁力 NI (N : コイル巻数, I : コイル電流) および室温時消費電力 W_{20} をパラメータとして示されている。

Fig. 9(a)~(d)によれば、各外径寸法 d のアクチュエータは、コイル起磁力 NI (室温時消費電力 W_{20}) が変化しても、推力が一定になるアーマチャ位置 x の範囲、すなわち動作ストローク範囲が得られていることがわかる。また、起磁力 (消費電力) を大きくすれば推力 F も大きくなることがわかる。さらに、Fig. 9(a)~(d)をそれぞれ同じ室温時消費電力 W_{20} (たとえば10W) での動作ストローク範囲内の推力 F を比較すると、外径寸法 d が大きくなるほど推力が大きくなり、動作ストローク範囲も広くとれることがわかる。

Fig. 10に、外径寸法 d を30 ~ 90mmに変化させた場合の起磁力 NI と推力 F の関係を示す。Fig. 10によれば、各 d 寸法のアクチュエータ共に、起磁力 NI が小さい範囲を除けば起磁力 NI と推力 F が比例する範囲が得られる。

Fig. 9およびFig. 10に示す推力特性の実験結果から、本研究のアクチュエータは外形寸法を大きくするほどアクチュエータ内の磁路断面積が大きくなり、同じ起磁力でも推力は大きくできることがわかる。また、外形寸法を大きくするほどコイル巻棒の断面積を大きくとれ、Table 2からもわかるようにコイル抵抗の変化の割には巻数が多く巻ける。したがって、外形寸法を大きくするほどコイル消費電力 W_{20} を大きくでき、同じ消費電力でも推力 F を大きくできることがわかる。しかし、コイルに連続通電した場合、コイルに過大な消費電力を加えると温度上昇によりコイル許容温度を超えてコイルの絶縁劣化を引き起こす恐れがある。そのため、各外形寸法のアクチュエータについて放熱特性を調べ、使用可能な限界の消費電力を明らかにする必要がある。

(a) $d = 30\text{mm}$ (b) $d = 45\text{mm}$ (c) $d = 60\text{mm}$ (d) $d = 90\text{mm}$ Fig. 9 Relationship between x and F

 Fig. 10 Relationship between NI and F

5. 放熱特性の実験結果

Fig. 11に室温時消費電力 W_{20} を変えて、それぞれの消費電力でコイル電流を一定にして連続通電したときのコイル温度上昇実験結果の一例を示す。また、Fig. 11はFig. 7に示すステータ形状を変えた場合の温度上昇曲線の比較も示す。Fig. 11によれば、ステータ形状が円筒形、角形フィン付き共に消費電力 W_{20} の大きさにしたがって飽和温度 θ_{sat} が変化している。次に、同じ消費電力でステータ形状の違いによる温度上昇曲線を比較すると、角形フィン付きの方が円筒形よりも温度飽和するまでの時間が短く、また飽和温度も低い。これは、式(3)で示されるように、温度上昇曲線の熱時定数は $\tau = mc/hA$ であり、飽和温度は $\theta_{\text{sat}} = \theta_0 + W/hA$ である。そのため、表面積 A が大きい角形フィン付き形状のステータを組み込んだアクチュエータ (Fig. 8参照)の方が円筒形ステータを組み込んだアクチュエータよりも温度飽和するまでの時間が短く、飽和温度も低いことがわかる。Fig. 11の温度上昇曲線と同様に、他の外形寸法のアクチュエータの温度上昇曲線を実験で求めた。その結果をまとめた図を以下に示す。

Fig. 12は、温度飽和時の消費電力 W_{sat} と飽和温度 θ_{sat} の関

 Fig. 11 Coil temperature raising curves
(Comparison between different shape stators)

 Fig. 12 Relationship between W_{sat} and θ_{sat}

係を表すものである。式(3)で示されるように、飽和温度は $\theta_{\text{sat}} = \theta_0 + W_{\text{sat}}/hA$ であるので、Fig. 12の実験結果から各ステータ形状で各外形寸法のアクチュエータ全てについて飽和温度 θ_{sat} と飽和時消費電力 W_{sat} はよく比例していることがわかる。したがって、この図を用いてコイルの許容温度155℃と各々の比例直線が交わった交点の消費電力 W_{sat} を読み取れば、このコイルの許容温度限界での消費電力 W_{sat} からコイルに流せる最大の電流の大きさが求められる。また、式(4)を使えば、この W_{sat} の値からコイルに加えられる限界の室温時消費電力 W_{20} が求められる。なお、Fig. 6には前述のように $\phi d = 60\text{mm}$ のときの W_{20} と W_{sat} の関係図を示している。ここで求めたこれらの許容限界での消費電力の値を使用して、4章で述べた推力特性より本アクチュエータの各外形寸法に対して、コイル温度上昇を考慮した最大の推力 F が求められる。

Fig. 13は、アクチュエータの表面積 A とFig. 12で求めたコイル温度が許容値の155℃になる飽和時消費電力 W_{155} との関係を示す。Fig. 13によれば、アクチュエータ表面積 A にほぼ比例して消費電力 W_{155} を大きくすることができる。また、ステータ形状が円筒形と角形フィン付き

 Fig. 13 Relationship between A and W_{155}

の A と W_{155} の関係を比較すると、両者の関係直線の勾配はほぼ同じで直線の距離も近く、したがって、本研究のアクチュエータの放熱性はステータ形状によらず表面積 A に大きく依存していることがわかった。

6. アクチュエータ外形寸法と性能の関係

アクチュエータ外形寸法を変えた場合に対して、前述の放熱特性と推力特性の実験結果からアクチュエータの性能の変化を求めた結果を以下に示す。

Fig. 14は、アクチュエータの代表長さ d とコイル許容温度 155°C になるときのコイル消費電力 W_{155} の関係を示す。Fig. 14の特性曲線は、Fig. 8およびFig. 13から得られ、代表長さ d を大きくすると、アクチュエータの表面積 A に依存して W_{155} は二次関数的に大きくなることがわかる。また、ステータ形状が円筒形と角形フィン付きの場合について2つの曲線を比較すると、Fig. 8と同様に d 寸法が大きくなるほど両者の差は大きくなるがわかる。

Fig. 15は、Fig. 14で求めた d と W_{155} の関係から、代表長さ d と消費電力 W_{155} のときの推力 F の関係をFig. 9を用いて求めた結果である。Fig. 15によれば、 d と F の関係は二次曲線と一次曲線の間の関係のようにみられる。これは、本研究の

Fig. 14 Relationship between d and W_{155}

Fig. 15 Relationship between d and F

電磁比例アクチュエータは、代表長さ d が大きくなると磁路断面積やステータとアーマチャ磁極間の端面方向の対向面積は2乗に比例して大きくなるが、磁極間の円周方向の対向面積は d に比例して大きくなる。本アクチュエータの推力 F は、ステータ・アーマチャ磁極間の端面方向吸引力と円周方向の吸引力が合わさって発生するため、Fig. 15に示された関係が得られたと考えられる。

Fig. 16は、代表長さ d と推力 F が一定になるアーマチャ位置 x の範囲、すなわち動作ストローク範囲の関係を示す。Fig. 9でも述べたように、代表長さ d が大きくなるほど動作ストロークは大きくなるがわかる。このことは、前報¹⁾でも述べているが、アクチュエータの代表長さ d を変化させたとき、推力 F が一定になる動作ストローク範囲を得るためには、Fig. 1に示すステータ・アーマチャ磁極間の端面寸法 s を適切に変化させる必要がある。そのため、 d を大きくすると s もそれに従って大きくする必要があり、その結果として動作ストローク範囲も大きくなる。

以上述べた方法で求めたFig. 14～Fig. 16は、本研究の電磁比例アクチュエータの外形寸法を変えた場合において、アクチュエータを大気中で自然放熱状態で使用するときのアクチュエータの性能をよく表す図である。これらの図を用いれば、本研究のアクチュエータについて、たとえば推力 $F=200\text{N}$ が要求されたとき、この要求を満たすためのアクチュエータの外形寸法、動作ストローク、最大消費電力などの主要な設計性能の概算値が簡便に求まる。Fig. 15により、推力 $F=200\text{N}$ を満たすためには、ステータが円筒形状であれば代表長さ $d=52\text{mm}$ 、角形フィン付き形状であれば $d=48\text{mm}$ と求まる。これらの d 寸法からFig. 16を用いれば、動作ストロークはそれぞれ 1.7mm と 1.6mm になる。さらに、コイル許容温度を 155°C とした場合、連続通電でこの温度まで上昇して飽和したときの消費電力 W_{155} は、Fig. 14を用いればそれぞれ 182W と 244W と求まる。さらに、これらの W_{155} の室温 20°C での消費電力 W_{20} は、前述の式(4)を用いれば、それぞれ 132W と 183W になる。このように、本研究で検討した電磁比例アクチュエータの放熱特性および推力特性が

Fig. 16 Relationship between d and working stroke

らアクチュエータの外形寸法と性能の関係図を求めれば、アクチュエータに要求される性能に対して簡便に主要な設計の概算値を求めることができる。また、アクチュエータの雰囲気や放熱状態が異なる場合でも、本研究で検討した手法により電磁比例アクチュエータの外形寸法と性能の関係が一般的に求められることが期待できる。

7. 結 言

前報で大きな推力が発生でき、その推力が発生するしくみを報告した円筒形2段磁極式電磁比例アクチュエータについて、その外形寸法を変えた場合に連続通電で自然放熱での放熱特性と推力特性を実験的に詳しく調べた。その結果、本研究のアクチュエータの外形寸法を表す代表長さと消費電力、推力および動作ストロークの関係を明らかにすることができた。また、このアクチュエータの外形寸法と性能の関係を表す図を求める手法を明らかにした。さらにこれらの関係図を用いれば、アクチュエータに要求される性能値に対して簡便に主要な設計の概算値が求められることを明らかにできた。

参 考 文 献

- 1) 近藤尚生, 竹内綾汰, 若澤靖記: 円筒形2段磁極式電磁比例アクチュエータの研究, 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol. 46, No. 5, p. 33-40 (2015)
- 2) 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)
- 3) Backe, W.: Grundlagen und Entwicklungstendenzen in der Ventiltechnik, O+P, Vol. 34, No. 7, p. 496-505 (1990)
- 4) 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)
- 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 (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)
- 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)
- 7) 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)
- 8) 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), JFPS International Journal of Fluid Power System, Vol. 8, No. 2, p. 82-89 (2015)
- 9) 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. 63-65 (1991)
- 10) 北村健三, 大竹一友: 基礎伝熱工学, 共立出版, p. 5 (1991)
- 11) サイバネットシステム(株): ANSYS CFX ベーシックセミナーノート (2011)