

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	流路に直交方向の加振を利用した油圧微粒子励振型制御弁の試作と評価
Title(English)	Fabrication and Evaluation of Hydraulic Particle Excitation Valve Vibrated Perpendicularly to Direction of Flow Path
著者(和文)	浮田貴宏, 鈴森康一, 難波江裕之, 神田岳文
Authors(English)	Takahiro UKIDA, Koichi SUZUMORI, Hiroyuki NABAE, Takefumi KANDA
出典(和文)	日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol. 49, No. 1, p. 10-17
Citation(English)	TRANSACTIONS OF THE JAPAN FLUID POWER SYSTEM SOCIETY, Vol. 49, No. 1, p. 10-17
発行日 / Pub. date	2018, 1

研究論文

流路に直交方向の加振を利用した油圧微粒子励振型制御弁の試作と評価*

浮田 貴宏**, 鈴木 康一**, 難波江 裕之**, 神田 岳文***

Fabrication and Evaluation of Hydraulic Particle Excitation Valve
Vibrated Perpendicularly to Direction of Flow Path

Takahiro UKIDA, Koichi SUZUMORI, Hiroyuki NABAE, Takefumi KANDA

We introduce a new particle excitation control valve that is driven by a vibration of a different direction from the previous particle excitation control valve. Conventional small hydraulic servo valves have some disadvantages such as a complex structure and waste of hydraulic energy. As a way to solve these disadvantages, we study a hydraulic small control valve using a piezoelectric vibrator. We confirmed that the proposed control valve was operated with low viscosity fluid in our previous research. However, the control valve was not operated with high viscosity fluid, because a force required to open the valve is increased due to rising of the viscosity. In this paper, we fabricate a new prototype valve driven by the perpendicular vibration to the flow direction in order to achieve the operation of the valve with the common hydraulic oil, and evaluate the characteristics of the valve due to changing the valve seat shapes. As a result, we found that the taper angle of the valve seat has an optimum value. When the taper angle of the valve seat is 100° , the prototype valve was opened by the lower voltage than the other taper angles. In addition, when the silicone oil was used as the working fluid, with kinematic viscosity values of $30\text{mm}^2/\text{s}$, which is nearly equal to the kinematic viscosity of the common hydraulic oil, we have succeeded in opening the valve at 0.8MPa . Since the previous particle excitation valve cannot be opened in the high viscosity working fluid, these results indicate the possibility for operating the proposed valve with the common hydraulic oil.

Key Words : Control Valve, Hydraulics, Piezoelectric Element, Micro-Mechanism

1. 緒 言

災害現場などの悪環境で作業を行うロボットのアクチュエータには、高い出力や外部環境からの衝撃に対する耐性の高さが要求される。このため、これらに優れた油圧アクチュエータを用いたロボットが研究されている^{1)~3)}。

これらのロボットは多くの自由度を有し、その制御のために自由度と同数の油圧サーボ弁を搭載している。油圧サーボ弁は、スプールを直接電磁アクチュエータで駆動する直動形と、電磁アクチュエータで制御されたパイロット圧によってスプールを駆動する2段形の2つに大別される。ロボットの駆動には小型化に適した2段形サーボ弁が用いられることが多いが、2段形サーボ弁では、製造時に厳しい公差が要求されるとともに、常時流体のエネルギーを消

費するという欠点がある。軽量化や構造の簡素化を目的として、電磁アクチュエータの代わりに圧電素子を用いた2段形サーボ弁もある^{4),5)}。これらは、圧電素子の微小変位を拡大するため、積層した圧電素子をたわみ方向に直流駆動し、パイロット圧を調整する。しかし、直流駆動させた圧電素子の変位は、位置センサを用いた制御による補償を必要とし、制御弁の大型化や複雑化を招く。

直流駆動では十分な変位が取れないという圧電素子の欠点を解消するため、空気圧の分野では、圧電素子の共振を利用した空気圧流量制御弁が開発されている^{6),7)}。これらの制御弁は弁体と弁座を圧電素子で共振させることで大きな変位量を得るとともに、球状の弁体を用いることで弁体と弁座の精密な加工精度が不要となり、簡便な機構による小型化を達成している。

筆者らは、これらの特徴を持った制御弁を微粒子励振型制御弁と呼び、この原理を油圧へ適用するべく研究を進め、既に低粘度作動流体での動作特性を明らかにし、低圧の水圧アクチュエータを対象とした速度制御に成功している^{8),9)}。しかし、その動作は現時点では、動粘度が $5\text{mm}^2/\text{s}$ 以下の水やシリコンオイル、動作圧力 0.5MPa 以下という条件に限定されている。これは、動作圧力の上昇と作動流体

*平成29年3月29日 原稿受付

**東京工業大学

(所在地：東京都目黒区大岡山2-12-1)

(E-mail: ukidatab@m.titech.ac.jp)

***岡山大学大学院自然科学研究科

(所在地：岡山県岡山市北区津島中3-1-1)

の粘度の増加により、制御弁の開口に必要な力が増加するためである。

そこで本研究では、流体が弁体を弁座に押し付ける力に対して直交する方向に弁体ならびに弁座を加振する構造^{10), 11)}を採用することにより、開口に必要な力を低減し、高粘性流体の制御を実現することを目的とする。本論文では、提案する構造を油圧制御弁に用いた場合について、動作モデルによる理論特性と実験結果の比較を行う。また、一般に用いられる作動油と同等の動粘度である30mm²/sの作動流体を用いて、提案する試作機の動作特性を評価する。

2. 主な記号

- F_{DH} : 作動流体による微粒子への水平方向の抗力
- F_{DV} : 作動流体による微粒子への垂直方向の抗力
- F_{IH} : 水平方向への微粒子の慣性力
- F_{IV} : 垂直方向への微粒子の慣性力
- F_N : 弁座から微粒子への垂直抗力
- F_P : 圧力による微粒子の弁座への押付力
- F_{TH} : テーパー面に沿って移動する微粒子に作用する移動方向の合力
- H_L : 微粒子と弁座の接触箇所から弁座の下端までの高さ
- H_U : 微粒子と弁座の接触箇所から弁座の上端までの高さ
- J_P : 弁座から微粒子への力積
- m : 微粒子の質量
- A_o : 微粒子の受圧面積
- t_{oc} : 開口後に微粒子がテーパー面と接触する時間
- v : 微粒子の速度
- θ_c : 微粒子と弁座との接触角度
- θ_l : 弁座のテーパー角度

3. 微粒子励振型制御弁の構造と設計

3.1 オリフィスの開閉原理と開口条件

微粒子励振型制御弁は、圧電素子によって小さな球状の弁体（微粒子）とオリフィス板を共振させ、微粒子とオリフィスの開閉を制御する。圧電素子を振動させると、その振動はオリフィスを塞ぐ微粒子に伝わる。この振動を伝達された微粒子はその慣性で弁座から離れた後、作動流体により再び弁座まで運ばれる。このとき、弁座が振動していると微粒子は跳ね返され、オリフィスは開口を維持する。また、圧電素子の駆動を止めると、微粒子はオリフィスを塞ぐ。これにより、制御弁の開閉を実現する^{7), 8)}。

前報⁸⁾で報告した制御弁の動作原理をFig. 1に示す。この制御弁では、液体の圧力が微粒子を弁座に押し付ける力と同方向にオリフィス板を振動させた。非加振時には微粒子は流体圧力によりオリフィスへ押し付けられ流路を塞ぎ、オリフィス板が振動すると、上記の押付力に加えて、微粒子の慣性と作動流体からの抗力が加わる。このとき、Eq. (1)の関係を満たす振動を与えると、微粒子は弁座から

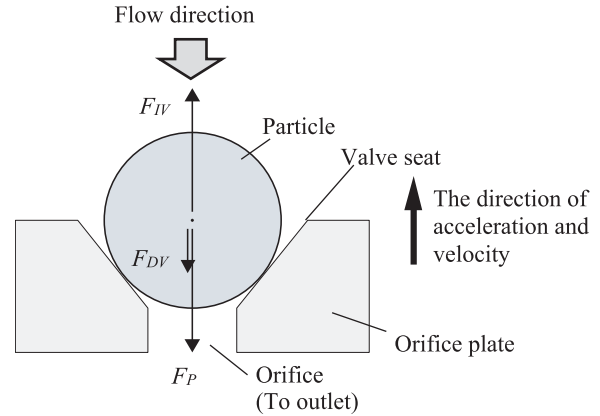
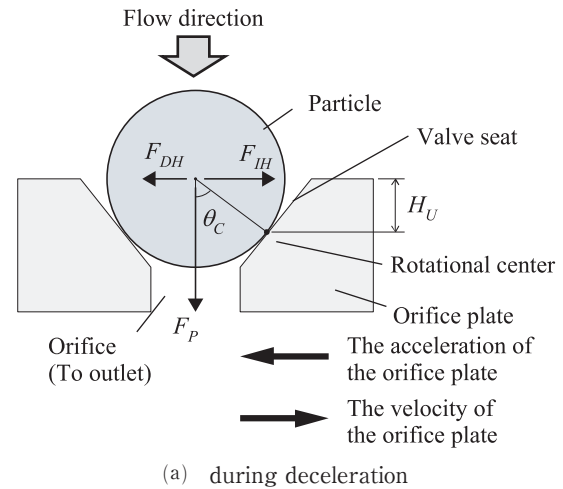
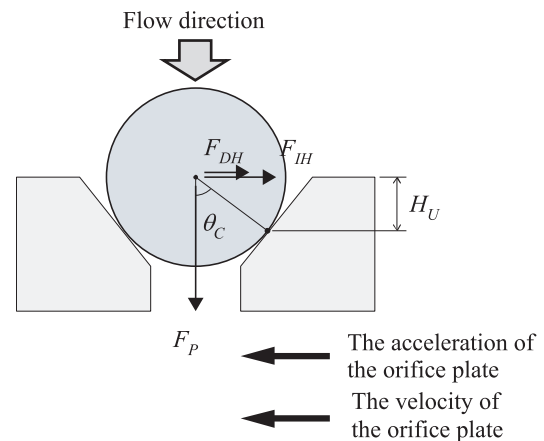


Fig. 1 Principle of the previous model



(a) during deceleration



(b) during acceleration

Fig. 2 Principle of the proposed models

離れる。

$$F_{IV} > F_P + F_{DV} \quad (1)$$

ここで、 F_{IV} は垂直方向への微粒子の慣性力、 F_P は圧力が微粒子を弁座へ押し付ける力、 F_{DV} は作動流体から微粒子が受ける垂直方向の抗力を示す。

次に、本論文で採用した制御弁の動作原理をFig. 2に示す。この制御弁では、流体の圧力によって微粒子を弁座に押し付ける力の方向と直交方向に弁座を振動させる。開口

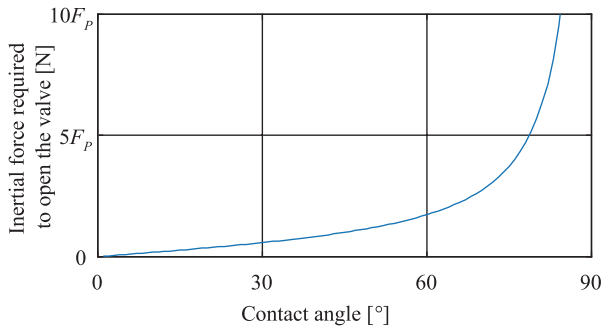


Fig. 3 Relationship between the contact angle and the inertial force required to open the valve

する条件は、微粒子と弁座の接点を回転中心としたモーメントの釣り合いにより決定される。このとき、振動速度と振動加速度の関係で、作動流体から微粒子への抗力の符号が変わり、開口の条件は、Eq. (2)のように表される。

$$F_{IH} > F_p + \tan\theta_c + F_{DH} \operatorname{sgn}(v) \quad (2)$$

ここで、 F_{IH} は水平方向への微粒子の慣性力、 θ_c は微粒子の重心を通る鉛直方向の軸と微粒子と弁座が接触している箇所との角度、 F_{DH} は作動流体から微粒子が受ける水平方向の抗力、 v はオリフィス板とともに振動する微粒子の速度を示す。

F_{DH} は小さく無視できると仮定した場合について、弁座と微粒子の接触する角度 θ_c と印加圧力 F_p で表した開口に必要な慣性力 F_{IH} の関係をFig. 3に示す。Fig. 3より、弁座と微粒子の接触する角度 θ_c が小さいほど、開口に必要な慣性力 F_{IH} は小さくなる。振動方向による開口条件Eq. (1)およびEq. (2)を F_{DH} および F_{DH} が小さいとして比較すると、 θ_c が45°未満のとき、水平方向への振動は、垂直方向への振動より低い慣性力で開口できることが分かる。

3.2 開口後に微粒子へ作用する力

ここで、本論文で提案する制御弁について、開口後の微粒子に作用する力を検討する。作動流体の粘性が高い場合、微粒子と弁座の隙間が小さいと粘性抵抗の増大により流量は低下する。開口と判定される流量の発生には微粒子と弁座の間に十分な隙間が必要となる。そのため、制御弁の開口条件は、Eq. (2)の成立および微粒子を十分弁座の上方へ移動させることである。

Eq. (2)のモーメントの釣り合いを満たした後、微粒子は弁座との接触点を回転中心として回転する。弁座にテーパ加工が施されていると、開口後もテーパ面から微粒子に外力を与えることが可能となる。そのため、テーパ面から運動量を得た微粒子は弁座から離れやすくなる。Eq. (2)が成立した後の微粒子に作用する力をFig. 4に示す。微粒子がテーパ面に沿って移動すると仮定すると、その間、弁座から微粒子に作用する垂直抗力 F_N は、Eq. (3)で表される。

$$F_N = -F_{IH} \sin\theta_c - F_p \cos\theta_c - F_{DH} \sin\theta_c \operatorname{sgn}(v) \quad (3)$$

また、微粒子がオリフィスを塞ぐ状態からテーパ面の上端まで、面に沿って移動する場合、その時間 t_{oc} はEq. (4)お

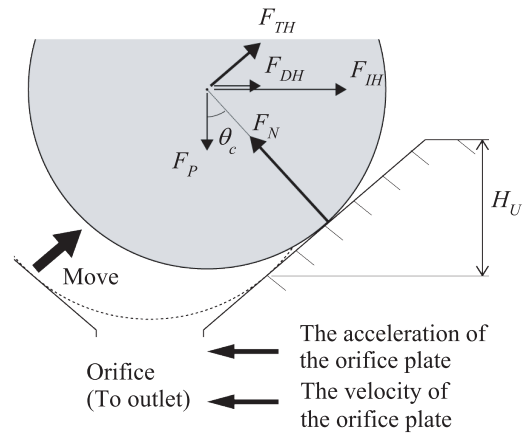


Fig. 4 Forces around the moving particle over the surface of the taper. The dashed line indicates the position of the particle to seal the orifice

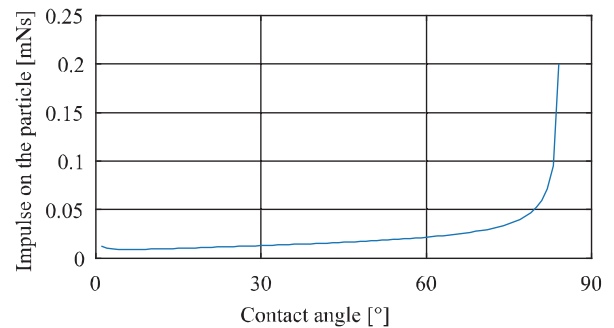


Fig. 5 Relationship between the contact angle and the impulse on the particle

Table 1 Parameters for Fig. 5

Item	Value
F_{IH} [N]	1
F_p [N]	0.1
H_U [mm]	0.1
m [mg]	1

よびEq. (5)から計算できる。

$$F_{TH} = F_{IH} \cos\theta_c - F_p \sin\theta_c + F_{DH} \cos\theta_c \operatorname{sgn}(v) \quad (4)$$

$$t_{oc} = \sqrt{\frac{2mH_U}{F_{TH} \sin\theta_c}} \quad (5)$$

ここで、 F_{TH} は微粒子に作用するテーパ面に対して水平方向の合力、 m は微粒子の質量、 H_U は微粒子と弁座の接触箇所から弁座の上端までの高さを示す。

微粒子に与えられる力積 J_p は F_N と t_{oc} の積で表される。Fig. 5はTable 1に示す条件について、横軸に接触角度 θ_c 、縦軸に微粒子に与えられる力積 J_p をとった計算結果である。Fig. 5より接触角度の増加とともに力積は増加する。なお、微粒子に働くそれぞれの力は時間とともに変化するが、 t_{oc} が短時間であることから、一定とした。Fig. 3およびFig. 5に示される特性および以上の議論から、弁座のテーパ角に対して慣性力 F_{IH} と力積 J_p の間にはトレードオフの関係があ

ることがわかる。すなわち、Fig. 3から接触角度が小さいほど開口に必要な慣性力は小さくなるが、これに対しFig. 5から接触角度が大きいほど微粒子に与えられる力積は高くなり、開口に有利になる。これらより、開口に必要な加振力を最小化する最適な弁座のテーパ角が存在することが予測される。

3.3 設 計

流路に対して弁座を水平方向に振動させるため、本研究では、円筒状の流路を片持ち梁のようにたわみ振動させる方法を用いる。振動子となる円筒および微粒子の振動の様子をFig. 6に示す。弁座は振動子の自由端に位置し、円筒のたわみ振動により、流路に対して、直交方向に微粒子を加振する。円筒の固定端は、制御弁本体に固定する。加振に用いる圧電素子の動作には、伸縮による振動を利用する。圧電素子の伸縮動作によって、円筒をたわみ振動させるため、円筒のたわみ振動と圧電素子の伸縮を同方向とする。圧電素子は、作動流体の含浸を避けて管路外部に配置し、振動子への振動の伝達は制御弁本体を経由させる。入力ポートに対して出力ポート及び弁座は垂直に配置される。直線上に入力ポートと出力ポートが配置された場合、弁座とその流路も同一直線上に配置される。このとき、弁座は制御弁の径方向に振動させる必要があり、制御弁の両端面に径方向の振動を誘起しやすい。そこで、入力ポートに対して出力ポート及び弁座を垂直に配置し、弁座を制御弁の軸方向に振動させた。これにより、制御弁の両端面による振動の境界条件への影響を避けることが出来る。

試作した制御弁の形状と主な仕様をそれぞれFig. 7とTable 2に示す。制御弁の寸法は外径10mm、長さ49.7mm、質量25.1gである。構造部の材質には、入力ポートの継ぎ手に黄銅、その他の箇所にSUS303を使用する。駆動に用いる圧電素子には、直径6.8mm、厚さ0.2mmのチタン酸ジルコン酸鉛(PZT)を使用する。PZTは直径6.8mm、厚さ0.1mmのリン青銅の電極と共に管路外部に8枚ずつ積層される。積層されたPZTと電極は適切な予圧になるよう固定ねじで締め付けられる。本制御弁では、微粒子と制御弁の挙動を単純化させるため、出力ポートに繋がるオリフィスを1箇所、微粒子を1個とする。微粒子には直径1.5mmの鋼球(SUS440C)を用いる。

Fig. 8にモデル解析による解析結果を示す。解析には微粒子と弁座が一体になって振動するモデルを用い、共振周波数を求めた。制御弁は、共振点において微粒子の加速度が大きくなり、開口する。解析結果より、共振周波数は126.9kHzであることがわかった。このとき、微粒子に最大加速度が発生する。なお、1次モードと2次モードの共振点は十分に離れていることが確認された。

弁座と微粒子の接触角度 θ_c は、微粒子の直径によって変えることもできるが、微粒子直径の変更に伴い慣性や共振状態が変わり比較が難しい。今回はテーパ角度が異なる5

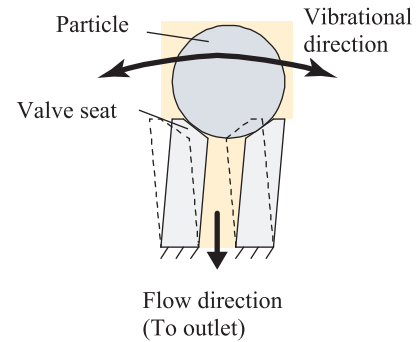


Fig. 6 Conceptual model of realizing lateral vibration by flexural motion

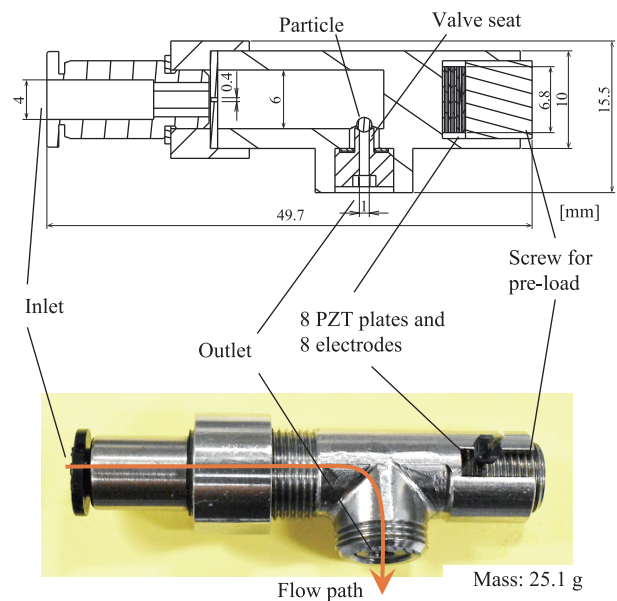


Fig. 7 Schematics and photo of the proposed valve

Table 2 Specification of the prototype valve

Item	Value
Diameter [mm]	10.0
Length [mm]	49.7
Mass [g]	25.1
Orifice diameter [mm]	1.0
Particle diameter [mm]	1.5

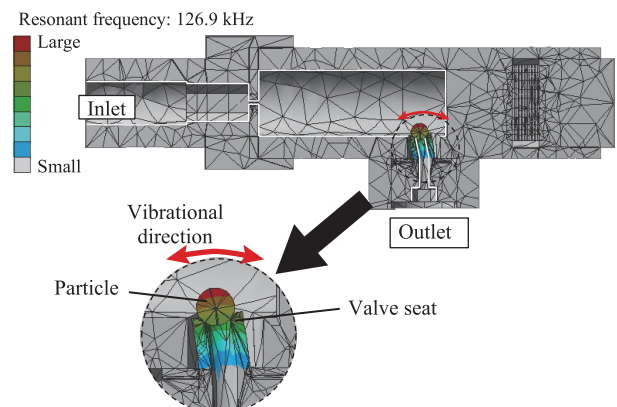


Fig. 8 Analytical result of the vibrational mode

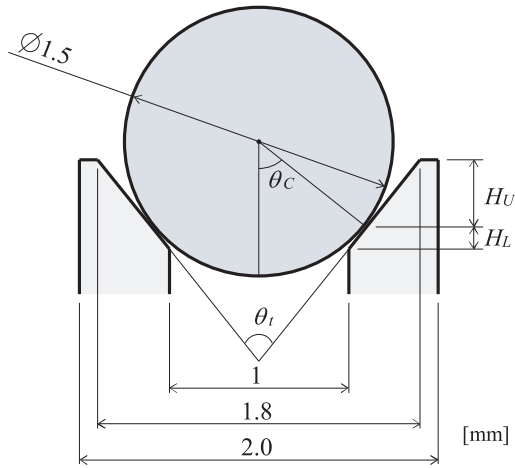


Fig. 9 State of the contact between the particle and the valve seat

Table 3 Dimension of the particle and the valve seats

θ_t [°]	60	90	100	120	180
θ_c [°]	60	45	41.8	41.8	41.8
H_L [mm]	0.26	0.03	0	0	0
H_U [mm]	0.43	0.37	0.34	0.23	0
A_o [mm ²]	1.04	0.88	0.79	0.79	0.79

種類の弁座を製作して実験を行った。製作した弁座をFig. 9とTable 3に示す。弁座のテーパ角度が60°, 90°, 100°のときは、微粒子は弁座のテーパ面で接触し、接触角度と受圧面積はテーパ角度の減少と共に増加する。Eq.(2)より接触角度 θ_c および圧力による押付力 F_p が増加するため、制御弁の開口に必要な微粒子の慣性力 F_{in} は増加する。一方、弁座のテーパ角度が100°, 120°, 180°（テーパなし）のときは、微粒子はテーパの下端で接触する。このため、接触角度は41.8°, 受圧面積は0.79mm²と一定になり、Eq.(2)が成立する微粒子の慣性力 F_{in} はすべて等しい。ただし、Eq.(2)の条件が成立後、弁座のテーパ面から微粒子に力が作用する場合、制御弁の開口条件の変化が予想される。

4. 弁座形状の影響

弁座のテーパ角度が異なると、開口直後の微粒子と弁座との接触状態が変化する。そのため、微粒子の挙動が変化し、制御弁の特性は変化する。そこで、弁座のテーパ角度と制御弁が開口する最低動作電圧および最大流量の関係を実験で明らかにした。

4.1 実験方法

実験に使用した油圧回路をFig. 10に示す。実験は、試作制御弁の出力ポートを下方に向けて開放した状態で行った。作動流体には、動粘度が1mm²/sのシリコンオイル（信越化学工業製KF-96L-1cs）を用い、作動流体の温度は動粘度が規定された25℃に対して±1℃となるよう調整した。制御弁への入力電圧には、関数発生器（NF回路製WF1946B）

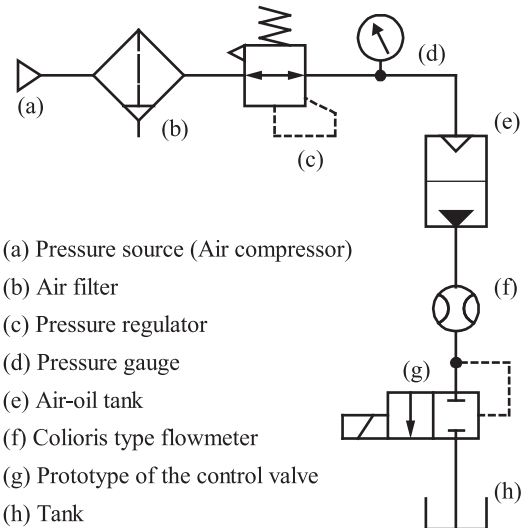


Fig. 10 Schematics of the experimental setup

Table 4 Appropriate driving frequency of the each valve seat obtained by experiment

θ_t [°]	60	90	100	120	180
Frequency [kHz]	125.4	125.2	126.0	125.1	125.4

と電力増幅器（NF回路製HSA4011）で生成した波形を使用した。制御弁の開口状態および最大流量は、流量計（KEYENCE製FD-SS2A）より取得し、開口の判定は、流量が5ml/minを超えたときとした。各条件では5回以上試行し、その平均値と標準偏差を求める。なお、流量計の出力は1kHzでサンプリングしたが、ノイズ除去のため、カットオフ周波数10Hz以下のローパスフィルタでフィルタリングした。なお、共振周波数は弁座の形状、組付けの影響を受ける。そのため、それぞれの弁座について、モーダル解析で得られた共振周波数126.9kHzを中心に100Hz単位で周波数を調整した測定を行い、実際に開口動作が確認された周波数を最適な駆動周波数として用いた。それぞれの駆動周波数をTable 4に示す。

4.2 各弁座形状の最低動作電圧

電圧の振幅を0V_{0p}から75V_{0p}まで掃引した際の印加圧力と制御弁が開口する最低動作電圧との関係について、弁座のテーパ角度が60°, 90°, 100°の測定結果および100°, 120°, 180°の測定結果をそれぞれFig. 11およびFig. 12に示す。

Fig. 11に示す弁座ではテーパ角度の増加に伴い、接触角度と受圧面積が減少する。テーパ角度が90°および100°の弁座の最低動作電圧を比較すると、テーパ角度の減少に伴い、最低動作電圧は平均して23%増加しており、接触角度と受圧面積の違いによる開口に必要な慣性力増加の影響が認められる。また、テーパ角度が100°の弁座では、標準偏差は26V_{0p}以下だが、テーパ角度が60°と90°の弁座では、標準偏差は最大7.9V_{0p}、10.6V_{0p}と大きくなった。加えて、テー

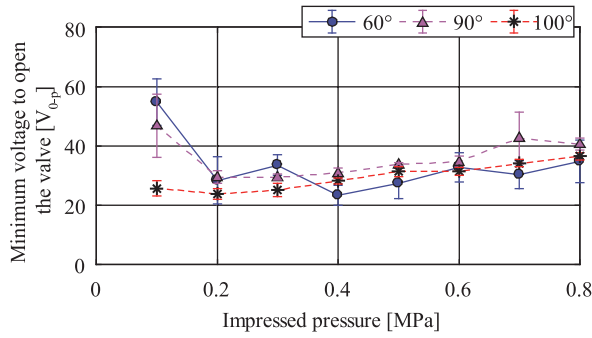


Fig. 11 Relationship between minimum voltage required to open the valve, impressed pressure and the taper angle of the valve seats

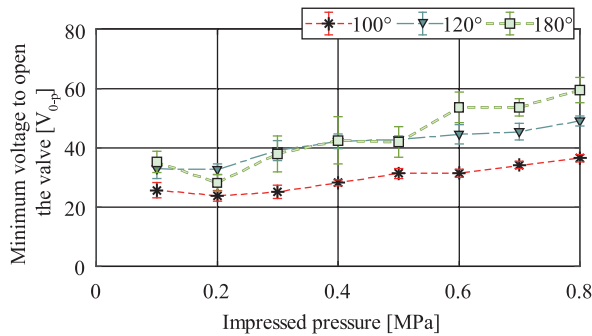


Fig. 12 Comparison of the minimum voltage required to open the valve respect to the same contact angle

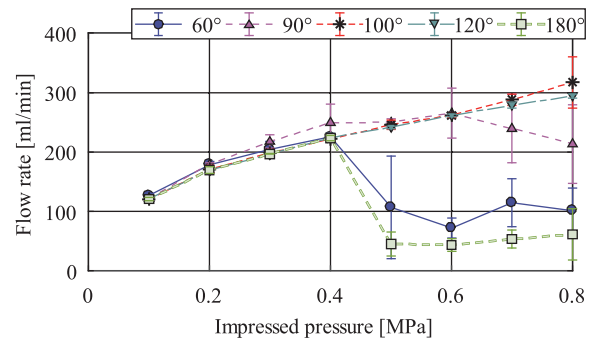


Fig. 13 Maximum flow rate of the each valve seat, when the applied voltage is $75V_{0p}$

パ角度が 60° と 90° の弁座では、 0.1MPa を印加した際の最低動作電圧が最も高かった。

テーパ角度が 100° 以上の場合、微粒子は弁座の下端と接触する。Fig. 12に示す測定結果より、テーパ角度が 100° のとき、全ての印加圧力で最低動作電圧がテーパ角度 120° 、 180° の場合に比べて低かった。テーパ角度が 100° および 120° の弁座の最低動作電圧を比較すると、テーパ角度の増加に伴い、最低動作電圧は平均して40%増加した。また、印加圧力の増加に伴い、テーパ角度が 100° と 120° の弁座では、最低動作電圧は50%増加したが、テーパ角度が 180° の弁座では、110%増加した。

4.3 各弁座形状の最大流量

次に、印加圧力と最大流量の関係をFig. 13に示す。測定

は引き続き電圧の振幅を $0V_{0p}$ から $75V_{0p}$ まで掃引して行った。印加電圧が $75V_{0p}$ のとき、流量は最大となり、テーパ角度が 100° と 120° の弁座は、印加圧力の増加に対して、最大流量が単調増加する傾向を示した。これに対して、テーパ角度が 90° の弁座では、 0.7MPa 以上、テーパ角度が 60° と 180° の弁座では 0.5MPa 以上で、最大流量が低下した。また、印加圧力の増加により、流量が減少した条件では、標準偏差が大きくなった。特に減少直後の印加圧力による誤差は大きく、テーパ角度が 60° 、印加圧力 0.5MPa のとき、最大 86.4ml/min だった。

4.4 弁座形状の影響

これらの結果について、まず印加圧力と最大流量の関係に注目すると、印加圧力の上昇に対して、最大流量が低下する弁座とそれ以外の弁座に分ける事が出来る。最大流量が低下する弁座では最大流量および最低動作電圧の誤差が大きく、動作が不安定である。動作が不安定になる原因は、動作中に微粒子がオリフィスを塞ぐ期間が発生するためである。したがって、微粒子を弁座から跳ね飛ばす十分な力を発生できなかったと考えられる。このことは、印加圧力の上昇による最大流量の低下からも予想される。

次にEq. (2)と最低動作電圧の関係を検討する。テーパ角度 90° と 100° の弁座では、Eq. (2)より接触角度と受圧面積の増加に伴い、開口に必要な微粒子の慣性力 F_H は増加する。この時のテーパ角度 100° の弁座に対する 90° の弁座の開口に必要な微粒子の慣性力 F_H の増加率は24%である。これに対して、実験から得た最低動作電圧の増加率は23%であった。実験から得た最低動作電圧の比率は、各印加圧力におけるテーパ角度が 100° と 90° の弁座の最低動作電圧の比率を平均して求めた。両者の増加率が近いことから、印加電圧と弁座の加速度の関係が比例と仮定すれば、Eq. (2)より最低動作電圧を推測することが出来る。これに対して、テーパ角度が 120° および 100° の弁座では、接触角度および受圧面積が等しく、Eq. (2)より得られる開口に必要な慣性力は等しい。しかし、実験から得たテーパ角度が 120° の弁座に対する 100° の弁座の最低動作電圧の比率は、72%であった。Table 3より、テーパ角度が 100° の弁座は 120° の弁座より H_0 の値が大きく、作動流体に対する弁座の上面から露出した微粒子の投影面積は小さい。そのため、Eq. (2)に示した作動流体から微粒子へ働く抗力の項による水平方向のモーメントの加算は少なく、テーパ面から微粒子に力が働いた結果と考えられる。

印加圧力 0.4MPa 以上で、テーパ角度 60° の弁座がテーパ角度 100° の弁座の最低動作電圧を下回っている理由を説明する。テーパ角度が 60° の弁座は、弁座の先端が薄く長い。ため、弁座が振動により真円状態から変形し、弁座から離れる前の微粒子と弁座の間に 5ml/min 以上の流量を発生させたと推測される。

また、テーパ角度が 60° および 90° の弁座では、印加圧力

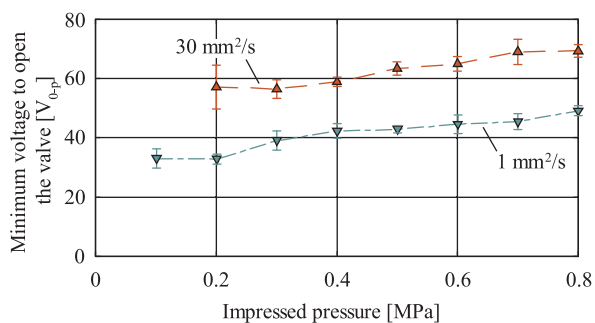


Fig. 14 Relationship between minimum voltages required to open the valve, impressed pressure, and kinematic viscosity of the working fluid

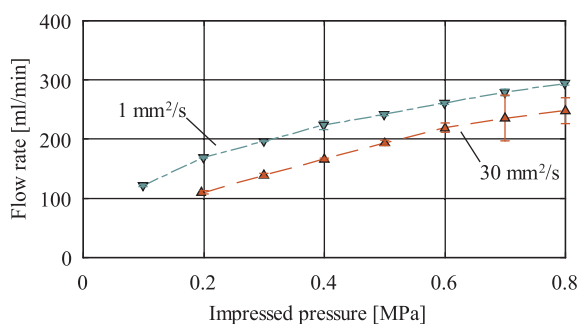


Fig. 15 Relationship between maximum flow rate, impressed pressure, and kinematic viscosity of the working fluid

が0.1MPaおよび0.7MPaのとき、他の最低動作電圧と較べて、誤差が大きかった。印加圧力0.1MPaでは、微粒子の弁座への押付力が小さく、弁座の振動に対する微粒子の動きが、不安定となったためと考えられる。これに対して、印加圧力0.7MPa以上の高圧領域において、実験中に制御弁が開かない時間が長く、このため、圧電素子の温度が不安定になりがちで、測定に誤差が生じたと推測される。これは、Fig. 11からFig. 13に示す他のデータにおいても、比較的開口しやすく流量が安定して得られる領域では誤差が少ないことから推測できる。

5. 高粘度流体での駆動実験

4章では、低粘度のシリコンオイルにおける特性を示したが、油圧機器としての使用には、より高粘度での動作が必要とされる。そこで、より高粘度の作動流体における制御弁の動作実験を行った。本実験では、前節の実験において全印加圧力で最も安定して動作した120°の弁座を用いた。

実験には作動流体として、動粘度30mm²/sのシリコンオイル（信越シリコン製KF-96-30cs）を使用した。この動粘度は一般的な作動油（ISO VG32）と同等である。測定は4章と同じ方法で行った。動粘度1mm²/sの測定結果と比較した、印加圧力と最低動作電圧および最大流量の関係をFig. 14およびFig. 15にそれぞれ示す。

Fig. 14より、最低動作電圧は印加圧力の増加と共に上昇した。動粘度1mm²/sの流体を用いたときの測定結果と比較

するとその差は約40%から50%だが、印加圧力の低い0.2MPaでは74%、0.1MPaでは開口しなかった。開口した0.2MPa以降について最大流量を動粘度1mm²/sの流体を用いたときの結果と比較すると、その差は35%から16%まで徐々に小さくなった。

6. 結 言

本論文では、作動流体として動粘度30mm²/sのシリコンオイルを用いた微粒子励振型流量制御弁による油圧制御の実現を目指し、試作機の製作、評価を行った。試作した制御弁には流路に対して直交方向にオリフィス板が振動する構造を採用し、動粘度30mm²/sの作動流体を用いた実験において、弁の開口を達成できた。動粘度が1mm²/sの作動流体を用いた実験と比較すると、最低動作電圧は約40%から50%上昇し、最大流量は約16%から35%低下した。

また、弁座形状の変化による試作機の特性を評価した。実験では、テーパ角度が60°から180°（テーパなし）の弁座形状にて測定を行った。その結果、流路に対して直交方向に弁座が振動する場合、モーメントの釣り合いに影響を与える弁座と微粒子の接触角度だけでなく、弁座のテーパ角度が重要となる事が分かった。作動流体として動粘度が1mm²/sのシリコンオイルを用いた実験より、弁座の最適なテーパ角度は100°であった。そのとき、印加圧力0.8MPaにおける最低動作電圧は36.5V_{op}であった。

これらの結果から、流路に直交方向の加振を利用した油圧微粒子励振方式を採用することで、流路と同方向の加振を利用した従来の微粒子励振型制御弁に比べて高粘度の流体を制御できることを示した。

今後はさらに高い圧力での動作を目指す。圧電素子の発熱を抑えつつ、強い振動を起こす振動系の設計がその実現のポイントの一つとなると考えている。

謝 辞

本研究は、総合科学技術・イノベーション会議により制度設計された革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）「タフ・ロボティクス・チャレンジ」により、科学技術振興機構を通して委託されたものです。

参 考 文 献

- 1) Raibert, M, et al : Bigdog, the Rough-Terrain Quadruped Robot, Proceedings of the 17th World Congress. Vol. 17, No. 1 (2008)
- 2) Semini, C, et al : Design of HyQ-a Hydraulically and Electrically Actuated Quadruped Robot, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I : Journal of Systems and Control Engineering, Vol. 225, No. 6, p. 831-849 (2011)
- 3) Jiaqi, Z, et al : Trot Gait Design and CPG Method for a

- Quadruped Robot, Journal of Bionic Engineering, Vol. 11, No. 1, p. 18-25 (2014)
- 4) Sangiah, D.K, et al. : A novel piezohydraulic aerospace servovalve. Part 1 : design and modeling, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I : Journal of Systems and Control Engineering, Vol. 227, No. 4, p. 371-389 (2013)
- 5) Persson, L.J, et al. : Design and Modelling of a Novel Servovalve Actuated by a Piezoelectric Ring Bender, ASME/BATH 2015 Symposium on Fluid Power and Motion Control (2015)
- 6) Jien, S, et al. : Miniaturized Unconstrained ON-OFF Pneumatic Poppet Valve-Experiment and Simulation, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 14, No. 5, p. 626-635 (2009)
- 7) Hirooka, D, et al. : Flow control valve for pneumatic actuators using particle excitation by PZT vibrator, Sensors and Actuators A : Physical, vol. 155, No. 2, p. 285-289 (2009)
- 8) 浮田貴宏, 鈴森康一, 難波江裕之他：微粒子励振型流量制御弁による油圧制御, 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol. 47, No. 6, p. 1-8 (2016)
- 9) 神田岳文, 大藤翔輝, 尾崎隼人他：圧電振動子駆動微粒子励振型制御弁による水圧アクチュエータの駆動, 第34回日本ロボット学会学術講演会 (2016)
- 10) Akagi, T, et al. : Development of Small-sized Flexible Control Valve Using Vibration Motor, JFPS International Journal of Fluid Power System, Vol. 2, No. 2, p. 45-50 (2009)
- 11) 廣岡大祐, 山口智実, 古城直道他：ねじり振動を用いた微粒子励振型空気流量制御弁, Proceedings of the 2014 JSME Conference on Robotics and Mechatronics (2014)