

Characteristics of Flow Rate Control by Using Magneto-Rheological Elastomers

Kazuhiko MATSUMURA^{*}, Masashi KAWAGUCHI^{**}, Yuki SASATANI^{**}, Hiroshi YAMAGUCHI^{**}

(Received July 9, 2009)

The purpose of this study is to verify the characteristics of a flow control device when the structure is actually installed in a section of pipe. In the present a magneto-rheological elastomers is prepared by mixing ferromagnetism fine particles and the silicone gel. The magneto-rheological elastomers with a tiny hole inherited from the manufacturing process is then installed in a section of a pipe. The flow rate, especially water in the present study, is controlled by applying magnetic field. The flow of water, represented with flow coefficient through the whole of elastomers, is effectively controlled by imposing magnetic field. In this flow control structure, the shape of the magneto-rheological elastomers becomes an especially important factor. The influence on the flow of the working fluid when the length of the magneto-rheological elastomers passed the throttle is also investigated in the present research. It is found, with an assistance of CFD, that the elastomer is deformed to the down stream in the controlling section, resulting in strong effect on the flow coefficient.

Key Words : flow rate control, magneto-rheological elastomers, ferromagnetism fine particles, magnetic field

キーワード : 流量制御, 磁気粘弾性体, 強磁性微粒子, 磁場

磁気粘弾性体による流量制御特性

松村 和彦^{*}, 川口 正嗣^{**}, 笹谷 雄基^{**}, 山口 博司^{**}

1. 緒言

現在, 多くの熱, 流体システムで使用されている機械式流量制御弁は, 一般的に構造あるいは制御機構が複雑であり, 更に流体による騒音が発生する¹⁻⁴⁾等の問題を抱えている. また, 過去の研究で新しい試みとして磁性流体膜⁵⁾を用いた流量制御⁶⁾への応用が可能であることが知られている. しかしこの機構では磁性流体の磁場保持力が小さいため, 流量が多くなると, 磁性流体膜の一部が飛散し, これにより絞り効果が減少する問題点がある. そこで本研究ではこれらの問題点を解決するために, 磁性流体膜の代わりに, 強磁性微粒子と分散媒であるシリコーンゲルを混合した磁気粘弾性体を用いた新たな流量

制御機構を提案し, 印加磁場が流れの特性, 特に流量制御弁としての流量制御特性に及ぼす影響について検討を行った.

本研究では, この流量制御機構を量産仕様の流量制御弁へ適用するための重要な検討項目の一つとして, 磁気粘弾性体の形状を取り上げ, その中でも絞り機構部を構成する磁気粘弾性体の長さが, 絞り機構部の形状変化及び絞り機構部を通過する際の作動流体の流れに及ぼす影響について調査した.

そこで, 最初に無負荷時において, 印加磁場強さを変化させた場合の軸方向から見た絞り機後部の形状の可視化を行い, 印加磁場強さと開口断面積との関係について調査した. 次に, 実験及び数値解析より得られた作動流体流動時におけるレイノルズ数

^{*} Pacific Industrial Co., Ltd, Godo-cho, Anpachi, Gifu

Telephone: +81-584-28-0144, Fax: +81-584-28-0130, E-mail: kzmatsum@pacific-ind.co.jp

^{**} Department of Mechanical and Systems Engineering, Doshisha University, Kyoto

Telephone: +81-774-65-6462, Fax: +81-774-65-6831, E-mail: hyamaguc@mail.doshisha.ac.jp

Re と流量係数 C_v との関係を比較することにより半径方向から見た絞り機構部の形状が作動流体の流れの挙動に及ぼす影響について調査した。最後に、これらの結果から磁気粘弾性体の流量制御弁への応用の可能性について検討した。

2. 流量制御機構の原理

Fig.1 に本研究における流量制御機構の原理図を示す。これは流量制御実験において Fig.2 のテストセクションを形成するものであり、主にパイプ、磁気粘弾性体、電磁石から構成される。このテストセクションの作製にあたっては、あらかじめ軸方向に絞り機構部となる小穴のあいた磁気粘弾性体を作製し、それをパイプの中に入れ固定した。磁気粘弾性体の絞り機構部は、電磁石により磁場を印加することで、強磁性微粒子に半径方向の磁気体積力が作用し、それにより磁気粘弾性体が電磁石側に引き寄せられることで開口する。ここで磁気粘弾性体に作用する単位体積当たりの磁気体積力ベクトル f は、磁化ベクトル M と磁場勾配 ∇H との内積⁷⁾で以下の式で表される。

$$f = M \cdot \nabla H \quad (1)$$

またテストセクションでの磁気粘弾性体に作用する力は、開弁時には印加電流を上げることで、平均磁化ベクトル M の強さが増加し、磁気体積力が増すことにより発生する。すなわち磁気粘弾性体には半径方向の平均磁場勾配 ∇H が作用し、磁気粘弾性体に働く半径方向の平均磁気体積力 f により開口断面積が増加する。逆に閉弁時には印加磁場を減少させることにより、シリコーンゲルの復元力を利用し、絞り機構部の開口断面積は減少する。その結果、流れ場に設置されたテストセクションでは絞り機構部の上流側と下流側に差圧が生じ、流量制御⁸⁾が可能となる。

本実験では Fig.1 に示す様に、磁気粘弾性体の長さをそれぞれ 5[mm]、10[mm]、15[mm] の 3 種類に設定した。

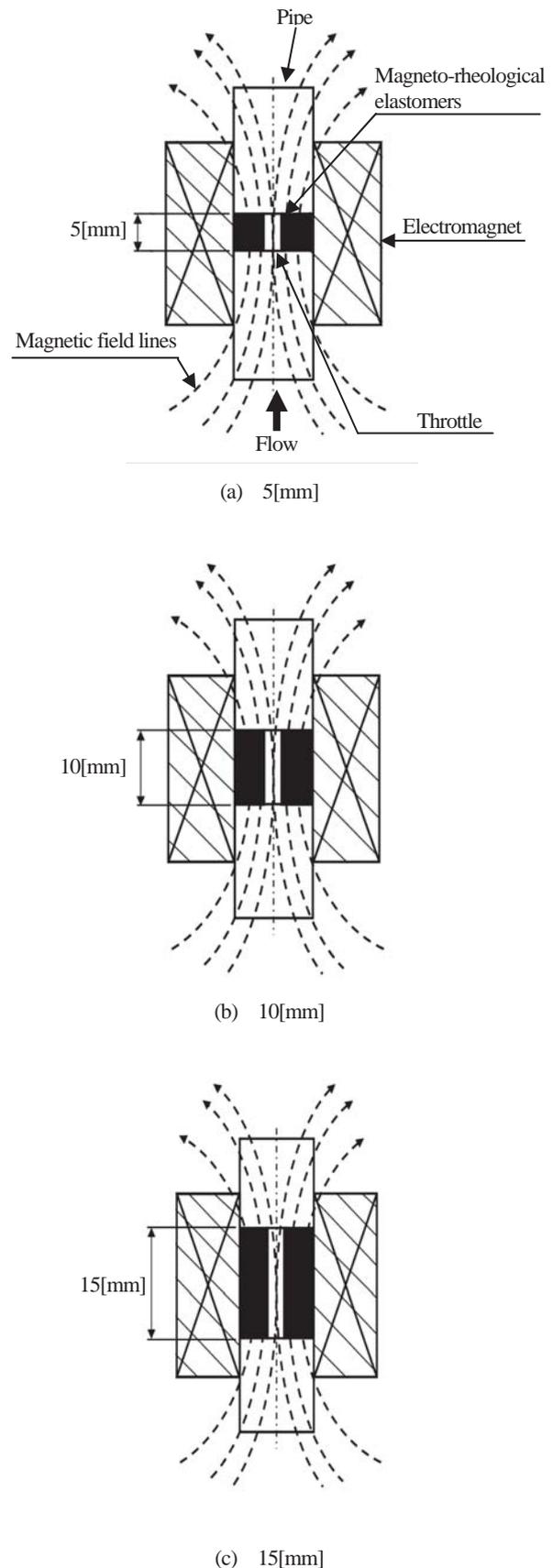


Fig. 1. Principle of flow rate control structure

3. 実験装置

Fig.2 に実験装置の概略図を示す。作動流体には水を用い、設定温度は 20[°C]とした。特に絞り機構部上流側では、テストセクション入口において発達した流れとなるように、ブジネの理論⁸⁾に基づいて助走区間を設けた。ポンプにより作動流体を駆動させ、フロート流量計付属の弁により所定の流量に設定した。また、電磁石により磁気粘弾性体に磁場を印加し流量制御が行われる。なお電磁石は通電時の発熱による絶縁破壊あるいは起磁力の低下を防止するため、冷却装置により常時強制冷却を行った。また、絞り機構部前後に圧力トランスデューサーを取り付け、対象とする絞り機構部の差圧を、更に電磁式精密流量計を絞り機構部下流側に設置し、流量の精密測定を行った。

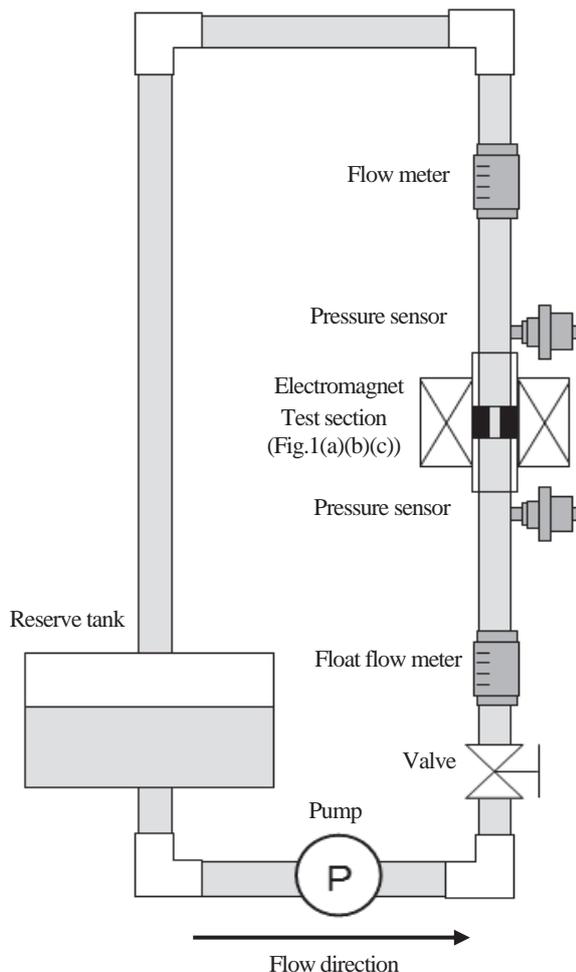


Fig. 2. Experimental apparatus

4. 磁気粘弾性体とテストセクション

4.1 強磁性微粒子とシリコーンゲルによる絞り機構部

磁気粘弾性体を構成する材料として強磁性微粒子を含むシリコーンゲルを採用した。本研究で用いた分散強磁性微粒子は Carbonyl SQ(BASF 社製) である。粒子形状は球状で、平均粒径は今回用いたサンプルを測定した結果 5.4[μm]である。また分散媒体は磁気体積力による大変形を得るために、シリコーンゲルには TSE3062 (MOMENTIVE 社製) を用いた。なお針入度は 55 である。磁気粘弾性体の作製方法は、容器に強磁性微粒子とシリコーンゲルを規定の体積比率、本研究では代表値として 5:5 となる様に投入し、真空脱泡攪拌装置を用いて真空脱泡しながら攪拌する。それをパイプに流し込んだ後、恒温槽で加熱硬化させる。

ここで、実験に使用する前に磁気粘弾性体の均一性を検証するため、超深度 3D 形状測定顕微鏡を用いて、加熱硬化後の内部状態を確認した。その結果、粒子は等方に均一分散し、凝集も見られず、気泡も確認されなかった。よって強磁性微粒子の分散状態は良好であることが確認された。また本研究における絞り機構部の初期開口断面積は $S=4.9[\text{mm}^2]$ ($\phi 2.5[\text{mm}]$) を採用した。

4.2 無負荷時における印加磁場に対する絞り機構部の形状変化の可視化と開口断面積

無負荷時における絞り機構部の開口断面積を評価するため、絞り機構部が印加磁場に対して開閉する際の開口断面積の測定を行った。測定方法は、磁気粘弾性体の絞り機構部下流側から、高品位デジタルビデオカメラにより絞り機構部上流側から開口部の状態を撮影した後、開口断面積の算出を行った。

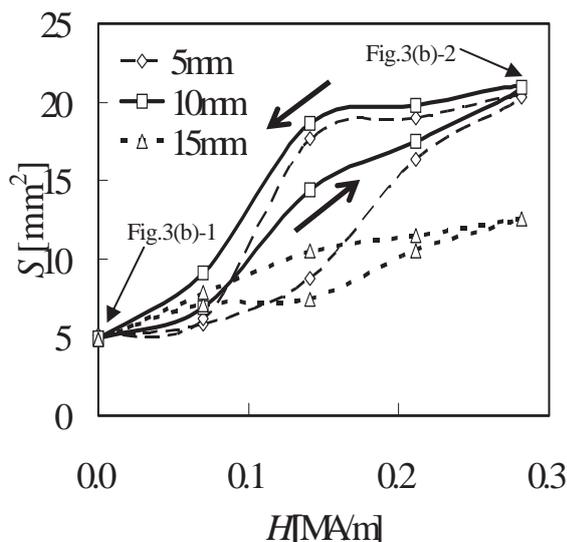
5. 実験結果及び考察

5.1 無負荷時における印加磁場に対する絞り機構部の形状変化の可視化と開口断面積

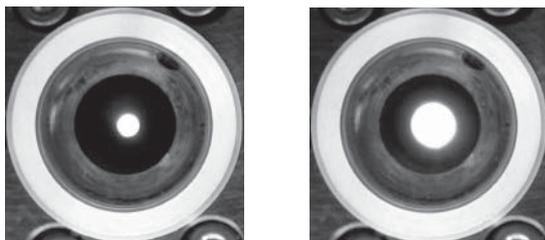
Fig.3(a)に磁気粘弾性体の各長さにおける印加磁場強さ H と開口断面積 S の関係を示す。ここで印加磁場強さ H は軸方向磁場の最大値とした。また Fig.3(b)に代表例として磁気粘弾性体の長さが 10[mm] で、印加磁場が $H=0[\text{MA/m}]$ と $H=0.282$

[MA/m] の時の、無負荷時における軸方向から見た絞り機構部の可視化写真を示す。

Fig.3(a)から、長さが 10[mm]の磁気粘弾性体が最も開口断面積が大きく、その最大開口面積比は、印加磁場 $0 \leq H \leq 0.282$ [MA/m] の範囲において、 $21/4.9=4.3$ となった。また Fig.3(b)の結果から、絞り機構部の形状は印加磁場の増加に伴い同心円状に開口していることが分かった。



(a) Opening area due to applied magnetic field



(b)-1 0[MA/m]

(b)-2 0.282[MA/m]

Fig. 3. Visualization of throttle control section

5.2 レイノルズ数 Re と流量係数 C_v との関係

作動流体流動時における、絞り機構部の流量制御特性を評価するため、レイノルズ数 Re と流量係数 C_v との関係について調査した。なおレイノルズ数と流量係数は各々、式(2)と式(3)⁹⁻¹¹⁾で定義される。

$$Re = \rho U D / \mu \quad (2)$$

$$C_v = Q / \left[\frac{d}{\sqrt{1 - (d/D)^2}} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \right] \quad (3)$$

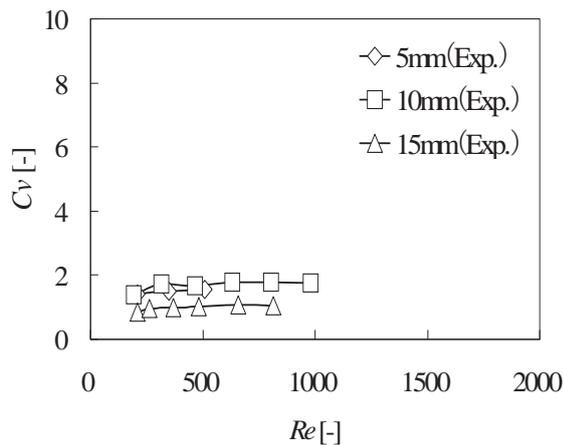
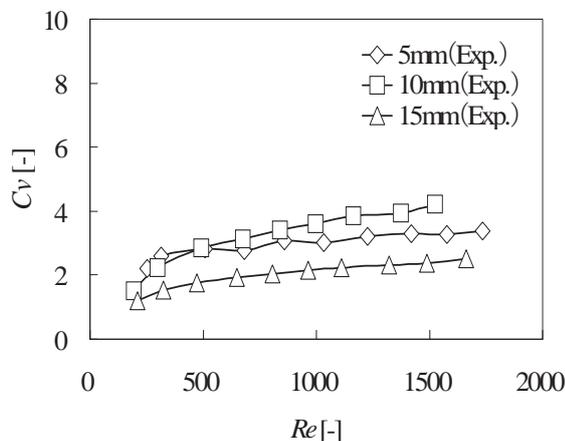
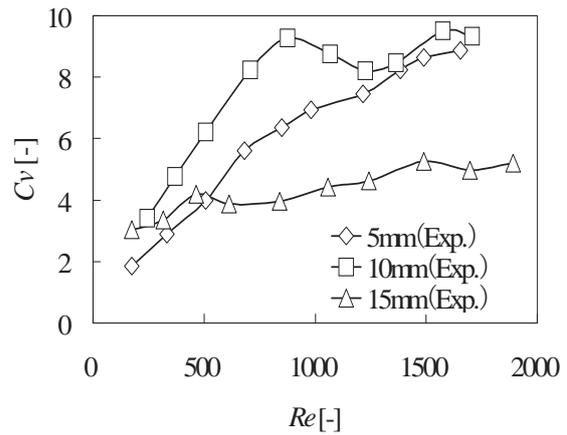
ここで ρ は作動流体 (水) の密度, U は作動流体 (水) の代表速度, D はアクリルパイプの内径, μ は作動流体 (水) の粘度, Q は絞り機構部通過後の流量, d は絞り機構部の内径, ΔP はテストセクション前後の差圧である。

Fig.4 に絞り機構部の流量制御特性の実験結果を示す。ここで横軸がレイノルズ数 Re , 縦軸は流量係数 C_v である。この結果から磁気粘弾性体の長さの如何に関わらず印加磁場の増加に伴い流量係数が大きくなっていることが分かる。また印加磁場の増加に伴い、3種類の磁気粘弾性体の流量係数の値の差が大きくなることが分かる。これは印加磁場の増加に伴い、磁気粘弾性体の開口断面積の変形量が増加し、更には作動流体の水圧による変形の影響をより受けやすいことを示しているものと思われる。更に磁気粘弾性体の長さが 10[mm], 5[mm], 15[mm] の順に流量係数が高いことが分かった。これは長さ 10[mm]の磁気粘弾性体が3種類の中では最も高い流量制御特性を有しており、Fig.3(a)で示した傾向と一致している。このことから無負荷時における印加磁場と開口断面積との関係は、作動流体に水を用いた場合のレイノルズ数と流量係数との関係と相関関係があることが分かった。

ここで Fig.4 における各印加磁場について考察をすると Fig.4(a)において、印加磁場 $H=0.070$ [MA/m] では、5[mm]の磁気粘弾性体がレイノルズ数 $Re > 500$ の領域では流量を測定することができなかった。これは磁気粘弾性体の絞り機構部上流側端面が水圧によって変形し、絞り機構部の穴が塞がってしまったためと思われる。Fig.4(b)において、印加磁場 $H=0.141$ [MA/m]では、3種類の磁気粘弾性体ともレイノルズ数の増加に伴い、流量係数はほぼ安定した増加傾向を示している。

Fig.4(c)において、印加磁場 $H=0.282$ [MA/m]では、15[mm]の磁気粘弾性体は、レイノルズ数の増加に伴い流量係数は緩やかに増加しているものの、10[mm]の磁気粘弾性体については、低レイノルズ数領域 ($Re \leq 800$) において流量係数が急激な増加傾向に

あるのに対し、高レイノルズ数領域において流量係数は緩やかな増加傾向にあることが分かる。これは、印加磁場 $H=0.282[\text{MA/m}]$ の様な高い印加磁場下においては、絞り機構部の開口断面積が大きく、一般にオリフィスを用いた流量制御弁に見られるように、レイノルズ数が低い領域では、層流が支配的となり絞り機構部における渦の影響を強く受けるためであると思われる。また流量係数の急激な変化の傾向は、磁気粘弾性体の絞り機構部前後で生じる圧力差 ΔP による変形が原因と考えられる。また $5[\text{mm}]$ の磁気粘弾性体においてはレイノルズ数の増加に伴い一貫して流量係数が増加している。これはレイノルズ数の増加に伴い、絞り機構部上流側の端面が水圧によって後方側へ押しやられ、絞り機構部の開口断面積がレイノルズ数の増加に伴い、徐々に大きくなりこのような結果になったものと考えられる。

(a) $H=0.070[\text{MA/m}]$ (b) $H=0.141[\text{MA/m}]$ (c) $H=0.282[\text{MA/m}]$ Fig.. 4. Flow coefficient C_v

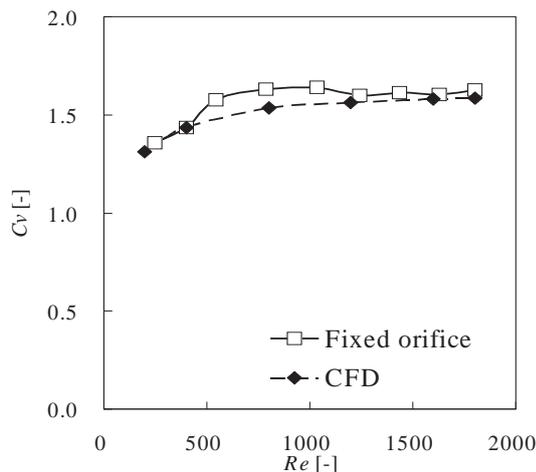
6. 数値流体解析

6.1 解析方法

本研究において、数値流体解析に用いたソフトウェアは SCRYU/Tetra (株式会社ソフテック製) ある。作動流体である水の物性値は、水温 $20[^\circ\text{C}]$ において、密度は $\rho=998.07[\text{kg/m}^3]$ 、粘度は $\mu=1.016 \times 10^{-3}[\text{Pa} \cdot \text{s}]$ とした。ここで、絞り機構部を通過する流れは、入口でのレイノルズ数は低いものの、絞り機構部の直径を基準とした場合のレイノルズ数は高くなり、乱流に遷移する⁹⁾と考えられる。従って本計算においては、絞り機構部での流れは乱流と仮定し、乱流モデルには標準 $k-\epsilon^2$ 法を用いた。また圧力補正式の解法には修正 SIMPLEC 法を用いた。

6.2 解析方法の検証結果

解析方法の妥当性を検証するため、開口断面積 $S=4.9[\text{mm}^2]$ の固定オリフィスを用い、実験によりレイノルズ数 Re と流量係数 C_v との関係を求め、前記 6.1 の解析方法を用いてレイノルズ数 $Re=200, 400, 800, 1200, 1600, 1800$ の合計 6 点で数値流体解析を行った。Fig.5 にその結果を示す。この結果から実験値と解析値はほぼ一致していることが確認された。よって今回設定した数値流体解析方法の妥当性が検証された。

Fig.5 Flow coefficient C_v for fixed orifice

6.3 簡易解析モデルの設定

数値流体解析における解析条件として、印加磁場が $H=0.070$ [MA/m]の時には、レイノルズ数 $Re=300$ と $Re=800$ 、印加磁場が $H=0.141$ [MA/m] と $H=0.282$ [MA/m]の場合にはレイノルズ数 $Re=300$ と $Re=1200$ とした。

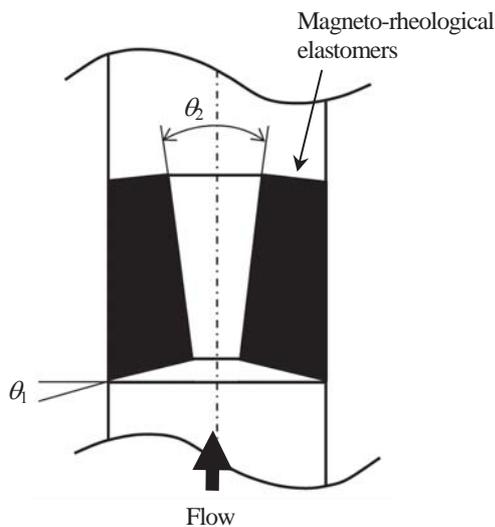


Fig. 6. Computational model

磁気粘弾性体が絞り機構部前後に作用する圧力差を受けた際に変形する形状を、簡易的にモデル化するため、簡易確認実験を行った。具体的にはFig.2で示すテストセクションから流量制御弁を取り出し、無磁場状態にて絞り機構部上流側から水を通させることにより磁気粘弾性体の形状を目視にて簡易的に確認した。その結果、磁気粘弾性体の絞り機構部上流側端面が水圧を受けて後方へと変形し、かつ絞り機構部上流側の開口断面積が小さくなり、絞り機構部下流側へ行くに従って開口断面積が

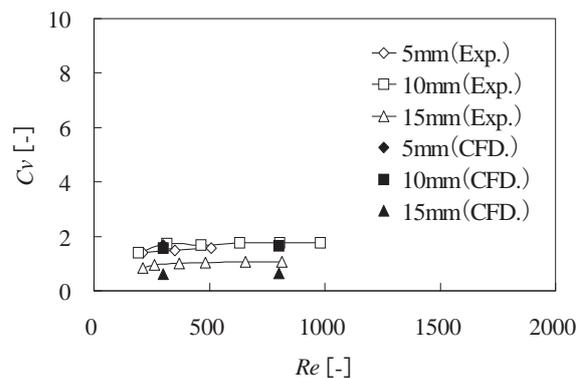
大きくなることが確認された。よって簡易解析モデルの作成においては、これらの事象を考慮し、無負荷時における軸方向から見た開口断面積を基準とし、磁気粘弾性体の体積が一定となるよう考慮しながら、ひずみ角度 θ_1 とテーパ角度 θ_2 を 5° 、 10° 、 15° の3種類に設定した。

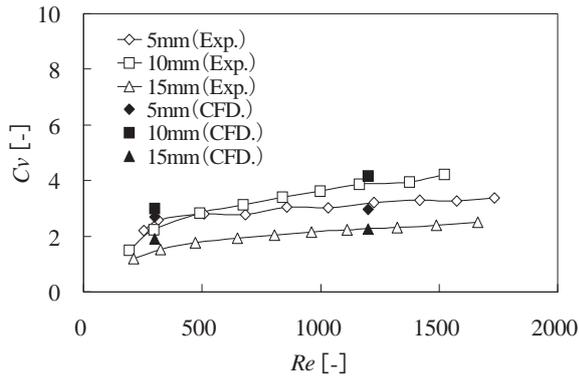
7. 結果及び考察

7.1 実験値と解析値との比較

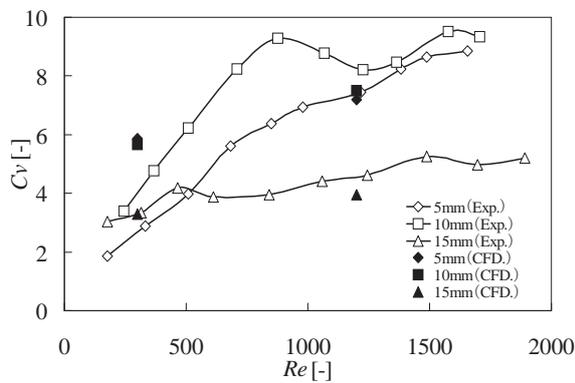
Fig.7にレイノルズ数 Re と流量係数 C_v との関係について、実験値と解析値の比較を行った結果を示す。(a)が $H=0.070$ [MA/m]、(b)が $H=0.141$ [MA/m]、(c)が $H=0.282$ [MA/m]である。またFig.4と同様に、横軸はレイノルズ数 Re 、縦軸は流量係数 C_v である。

この結果、印加磁場 $H=0.141$ [MA/m]の場合においてレイノルズ数 $Re=300$ と 1200 の場合、いずれの長さにおいても、実験値と解析値はほぼ一致している。また $H=0.282$ [MA/m]の場合、磁気粘弾性体の長さが 15 [mm]の場合においては、実験値と解析値はほぼ一致している。また 5 [mm]と 10 [mm]の場合、レイノルズ数 $Re=1200$ においては、実験値とCFDの値はほぼ一致しているが、レイノルズ数 $Re=300$ では解析値の方が実験値よりも高い値となっていることが確認できた。これらの印加磁場及びレイノルズ数の範囲において現れる実験値と解析値の不一致について考察すると、本研究で用いた磁気粘弾性体が長尺の絞り機構部であることと、磁気粘弾性体の変形による相乗効果に伴い、非常に複雑な流れになっていると考えられる。例えば絞り機構部前後で、磁気粘弾性体の変形による渦が発生していることが考えられるが、今後更に詳しい検討が必要と考える。

(a) $H=0.070$ [MA/m]



(b) $H=0.141$ [MA/m]



(c) $H=0.282$ [MA/m]

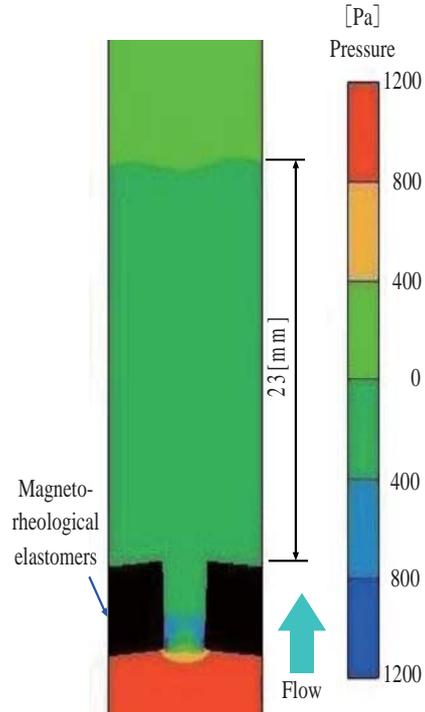
Fig. 7. Comparison between experimental results and Computational Fluid Dynamics results

8. 数値流体解析による圧力分布

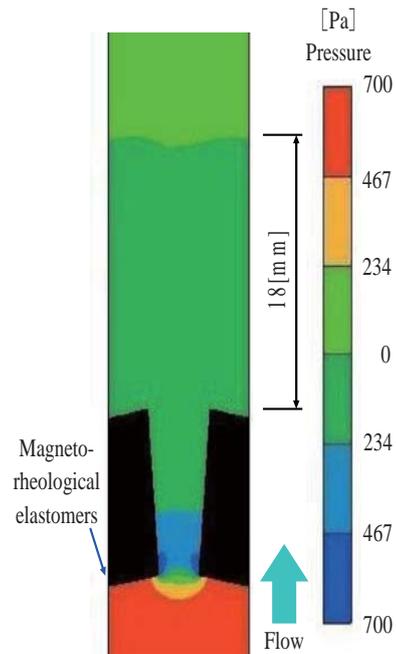
絞り機構部内部及びその前後での圧力分布解析結果の代表例として、Fig.8(a)に印加磁場 $H=0.141$ [MA/m], 磁気粘弾性体の長さが 5[mm], レイノルズ数 $Re=1200$, 流量係数 $Cv=2.96$ の場合の結果を、Fig.8(b)に印加磁場 $H=0.141$ [MA/m], 磁気粘弾性体の長さが 10[mm], レイノルズ数 $Re=1200$, 流量係数 $Cv=4.17$ の場合の結果を、Fig.8(c)に印加磁場 $H=0.282$ [MA/m], 磁気粘弾性体の長さが 15[mm], レイノルズ数 $Re=1200$, 流量係数 $Cv=2.25$ の場合の結果をそれぞれ示す。

この結果から、磁気粘弾性体がいずれの長さにおいても絞り機構部入口付近で、圧力が低い箇所が見られる。これは磁気粘弾性体の入口部の形状がシャープエッジとなっているためであると考えられる。また 3 種類の磁気粘弾性体の中では、長さが 10[mm]

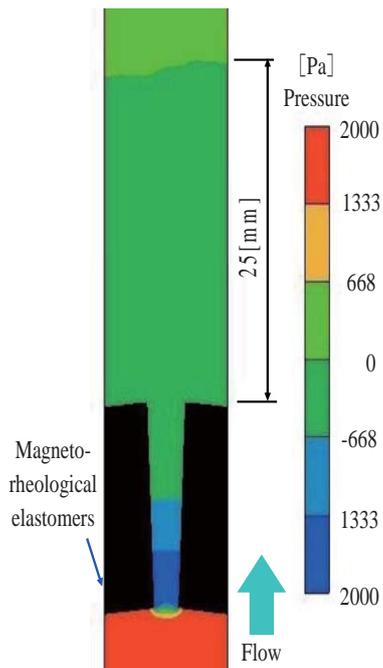
の場合が、絞り機構部入口部と出口部での差圧が低く、絞り機構部通過後、正圧に回復する距離が 18 [mm] と最も短いことが分かった。



(a) $H=0.141$ [MA/m], $Re=1200$, sample length=5[mm], $Cv=2.96$



(b) $H=0.141$ [MA/m], $Re=1200$, sample length=10[mm], $Cv=4.17$



(c) $H=0.141$ [MA/m], $Re=1200$, sample length=15 [mm], $Cv=2.25$

Fig. 8. Pressure distribution

9. 結論

磁気粘弾性体を用いた流量制御弁の流量制御機構について新たに提案することを目的とし、作動流体流動時において絞り機構部の全長が絞り機構部の形状変化及び流れの挙動に及ぼす影響について調査し、考察した結果、以下の知見を得た。

- (1) 印加磁場 H を変化させることにより、磁気粘弾性体絞り機構部の初期開口断面積の開口制御が可能であり、磁気粘弾性体の長さによって開口制御範囲が異なることが確認できた。
- (2) 3種類の磁気粘弾性体の中では、長さが 10 [mm] のものが最も開口断面積が大きく、その最大開口面積比は、印加磁場 $0 \leq H \leq 0.282$ [MA/m] の範囲において、 $21/4.9=4.3$ であった。また、ヒステリシスが最も小さいことが分かった。
- (3) レイノルズ数 Re と流量係数 Cv との関係から得られた実験結果は、無負荷時における印加磁場と初期開口断面積との関係と相関関係にあることが分かった。
- (4) 実験値及びCFDによる解析値の結果から3種類の磁気粘弾性体の中では全長が 10 [mm] が最も流量制御特性が良いことが分かった。

参考文献

- 1) 観音立三, 富増和宏, 佐藤和弘, “管内気液二相冷媒流の発生の予測と低減”, 三菱重工技報, **28**, No.2, 135-142 (1991).
- 2) 梅田知巳, 中村昭三, 小国研作, 福島敏彦, 下出新一, 長井誠, 功刀能文, “膨張弁に起因する冷媒気液二相流の流動低減”, 日本機械学会論文集(B編), **59**-557, 243-248 (1993).
- 3) 梅田知巳, 福島敏彦, 中村昭三, 佐藤良次, 深野徹, 伊藤正明, “単一大気砲が絞りを通過するときの気液二相流の流動音”, 日本機械学会論文集(B編), **60**-574, 56-63 (1994).
- 4) 藤井康彦, 木村繁男, 齋藤隆之, 木綿隆弘, 松村和彦, “膨張弁を通過した冷媒の気液二相流動現象の可視化, 一第2報 膨張弁絞り機構部の低騒音化”, 日本冷凍空調学会論文集, **23**-4, 67-78 (2006).
- 5) H. Yamaguchi, Y. Suzuki and S. Shuchi, “Membrane Formation Process in Magnetic Fluid and Application for Aperture Control”, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, **17**-1, 82-88 (2002).
- 6) H. Yamaguchi, Y. Suzuki and S. Shuchi, “Application of Magnetic Fluid Membrane for Flow Control”, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, **17**-1, 89-94 (2002).
- 7) R. E. Rosensweig, “Ferrohydrodynamics”, University Press, Cambridge, 13 (1985).
- 8) 中山泰喜, 流体の力学, (養賢堂, 東京, 2005), p.101.
- 9) Miki, M., Yamaguchi, H. and Honda, N., Flow Characteristics of a Spool Valve (1st Report, Evaluation of Flow Behavior by Experimentation with an Aid of Three Dimensional Numerical Analysis) (in Japanese), *Transactions of Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, **69**-679, 561-567 (2003).
- 10) Miki, M., Yamaguchi, H., Tokunaga, H. and Ueno, D., Flow Characteristics of a Spool Valve (2nd Report, Modeling Method by Three-Dimensional Numerical Analysis and Evaluation of Flow Characteristics) (in Japanese), *Transactions of Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, **71**-701, 38-39 (2005).
- 11) 市川常雄, 水力学・流体力学, (朝倉書店, 東京, 2004), p.29.
- 12) *SCRYU/Tetra User's Guide Basic Edition* (in Japanese), (2007), p.3-10.