

日本機械学会 若手優秀講演フェロー賞

坂間 清子 君

Dynamics and Design Conference 2013

／第12回「運動と振動の制御」シンポジウム
『気泡除去装置の高性能化』

あなたの上記講演は、内容が有益で新規性があり、また発表の態度に優れ、若手研究者として将来の発展が期待されますので、ここに日本機械学会若手優秀講演フェロー賞を贈り、これを表彰します。

2014年3月4日

日本機械学会
会長 矢部





日本機械学会・MOVIC2013（福岡）

2013年8月26日～30日



気泡除去装置の高性能化*

坂間 清子^{*1}, 田中 豊^{*2}, 鈴木 隆司^{*3}

High Performance of Bubble Eliminator

Sayako SAKAMA^{*1}, Yutaka TANAKA, Ryushi SUZUKI

^{*1} Graduate School of Engineering and Design, Hosei University
2-17-1 Fujimi, Chiyoda-ku, Tokyo, 102-8160 Japan

Air bubbles in hydraulic oil lower the efficiency of hydraulic systems and contribute to instrument malfunctions. To mitigate these problems, it is possible to use an active “bubble eliminator” that uses swirl flow to remove air bubbles. The device shape affects the efficiency of bubble removal; hence, the selection of geometry is the most important parameter for optimizing the device performance. This study investigates the effect of the shape parameters of the device on bubble behavior in the oil, using experimental flow visualization and numerical simulations of the device. In this paper, we conducted the experimental flow visualization and numerical simulation involving various diameters of an outlet port and vent port. The simulation results are analyzed using considering the relationship between axial flow and swirl flow in the bubble eliminator. We conclude that the diameters of the outlet port and vent port, and the length of the tapered tube of the bubble eliminator can be determined.

Key Words : Bubble Eliminator, CFD, Flow Visualization, Hydraulic system, Spiral Number

1. 緒 言

油圧システムの作動油中の気泡は、システムの動特性の低下や機器の故障等の問題を引き起こす。これらの問題を解決するには、旋回流を利用して油中気泡を積極的に分離除去する気泡除去装置の利用が有用である。著者らは、この気泡除去装置を用いて油圧システムの性能を向上させることを目的とし、この装置が油中気泡に起因する問題の解決に有用であることを明らかにしてきた⁽¹⁾。また、従来の研究で気泡除去装置内の流れの可視化実験や数値解析を実施し、装置の形状パラメータが気泡の除去性能に大きく影響をおよぼすこと⁽²⁾、さらに、装置内部の旋回方向と中心軸方向の流れの関係を表すスパイラル係数という指標を用いることで、装置内部の気泡の集合の様子を評価できることを明らかにした⁽³⁾。本報では、気泡除去装置内の流れの可視化実験と数値解析を実施し、装置内部の旋回方向と中心軸方向の流れの関心に注目して気泡の除去性能を評価する。

2. 気泡除去装置の構造と原理

図1は気泡除去装置の構造と原理図である。気泡除去装置は、油の流入側から接線方向に設置してある流入口、流入管路部、一定傾斜を持つテーパ管路部、流出口、放気口の5つの部位により構成されている。この装置は、接線方向からの油の流入により旋回流を作り出し、油より比重の小さい気泡（空気）が中心に集まることを利用している。中心に集まった気泡は、合体して気泡柱を形成し、背圧により放気口から外部へ排出される。この気

* 原稿受付 2013年7月1日

^{*1} 学生員, 法政大学大学院デザイン工学研究科 (〒102-8160 東京都千代田区富士見 2-17-1)

^{*2} 正会員, 法政大学デザイン工学部

^{*3} 非会員, (株)オーパスシステム

E-mail: sayako.sakama.9k@stu.hosei.ac.jp

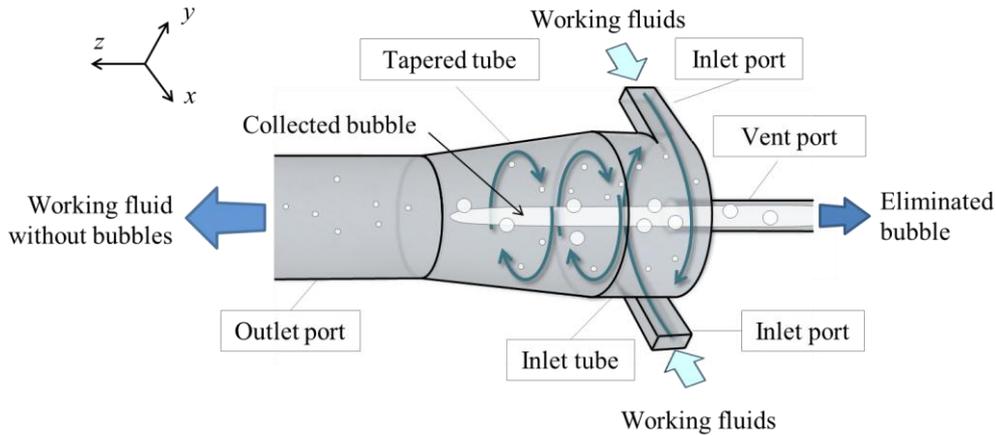


Fig.1 Design and principle of bubble eliminator

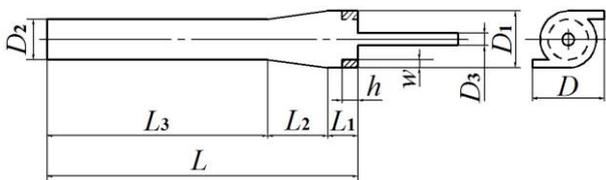


Fig.2 Geometry of bubble eliminator

Table 1 Dimensions of bubble eliminator

| D | D_1 | D_2 | D_3 | L | L_1 | L_2 | L_3 | w | h | mm |
|-----|-------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|-----|-----|----|
| 36 | 28 | 20 | 6 | 265 | 15 | 30 | 220 | 3 | 6 | |

Table 2 Condition of experiments and numerical simulations

| No. | Model | D_2 [mm] | D_3 [mm] |
|-----|----------------------|------------|------------|
| 1 | D_2 -20_ D_3 -6 | 20 | 6 |
| 2 | D_2 -15_ D_3 -6 | 15 | 6 |
| 3 | D_2 -10_ D_3 -6 | 10 | 6 |
| 4 | D_2 -20_ D_3 -10 | 20 | 10 |
| 5 | D_2 -15_ D_3 -10 | 15 | 10 |
| 6 | D_2 -10_ D_3 -10 | 10 | 10 |
| 7 | D_2 -20_ D_3 -8 | 20 | 8 |
| 8 | D_2 -15_ D_3 -8 | 15 | 8 |
| 9 | D_2 -10_ D_3 -10 | 10 | 8 |

泡除去装置の性能を向上させるには、装置の中心軸上に十分に気泡を集合させ、集めた気泡を放気口から効率よく流出させる必要がある。

図2と表1に気泡除去装置の基準の形状パラメータ、表2に可視化実験と数値解析に用いた気泡除去装置の形状パラメータを示す。本報では、流出口径 D_2 と放気口径 D_3 を変更して数値解析を実施し、各パラメータが気泡除去装置の性能にあたる影響を分析する。

3. 可視化実験

流出口径 D_2 と放気口径 D_3 の違いが気泡の除去性能にあたる影響を分析するために、透明アクリルで作成した気泡除去装置内の流れの可視化実験を実施した。図3に実験装置の回路図を示す。可変モータによりポンプを動作させ、容量30Lのタンクから作動油を気泡除去装置に流入させる。ポンプの吸い込み側には、作動油に一定量の空気を混入させるために、空気混入用のバルブとコンプレッサが設けられている。また、気泡除去装置の上流側と下流側のそれぞれにコリオリ式の流量計が取り付けられており、各ポートの流量データが得られる。実験では、全て透明アクリルで作成した気泡除去装置を使用しており、この気泡除去装置内の流れを6000fpsで撮影している。装置の形状パラメータは、流出口径 D_2 と放気口径 D_3 のみを変更し、表2中のNo.1~6の条件で実験を行った。流体の条件は、油温を40°C、流体の動粘度は31.3mm²/s、流入流量は20L/min、コンプレッサにより混入させる気泡量は全体の1%となるように設定している。図4に可視化実験で撮影された気泡除去装置内の気泡の集合の様子を示す。 D_2 が小さく、 D_3 が大きいほど、装置の中心軸上に気泡が集合しやすいが、集合した気泡は流出口方向に流れやすく、 $D_2 = 10$ mm、 $D_3 = 10$ mmの条件では集合した気泡は全て流出口から流出していること

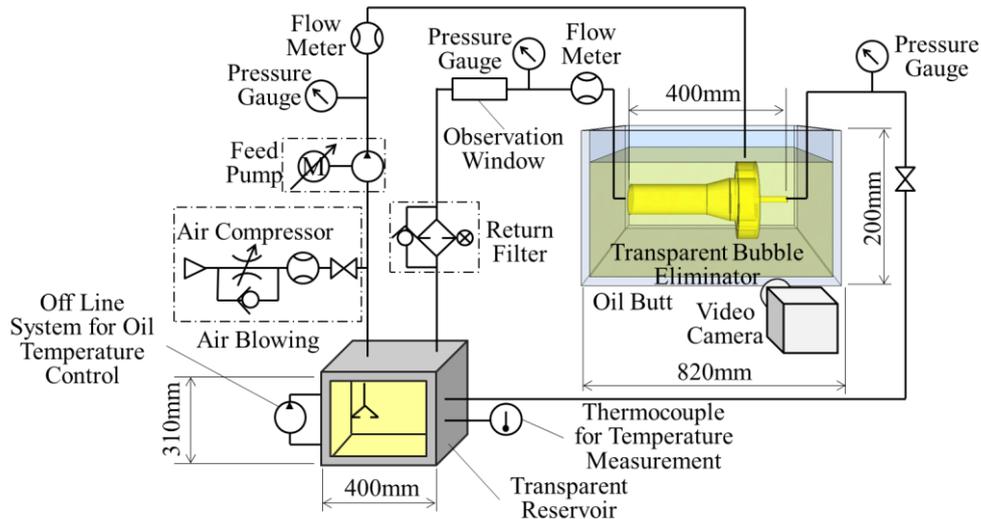


Fig.3 Experimental fluid circuit for flow visualization

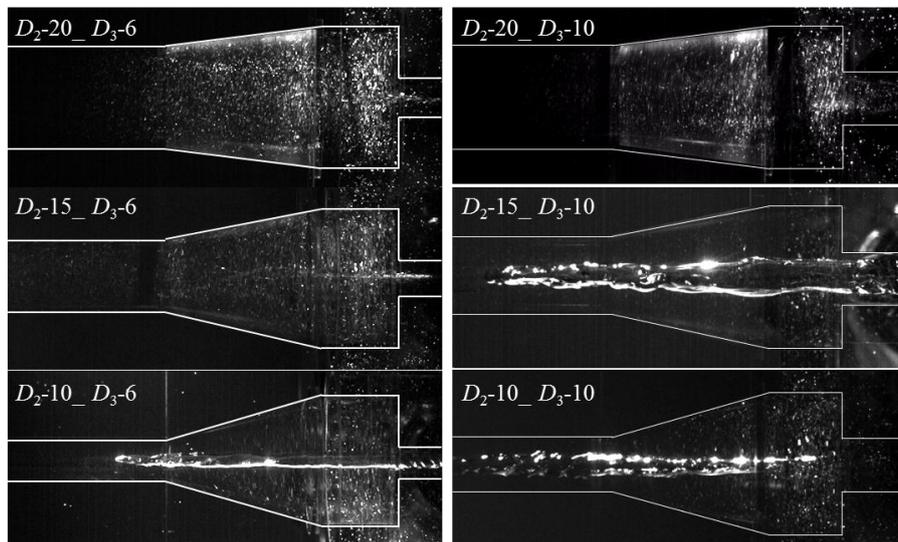


Fig.4 Results of experimental flow visualization

がわかる。したがって、気泡を十分に集合させるには、 D_2 を小さく、あるいは D_3 を大きく設定する必要があり、一方、集合させた気泡を放気口から効率よく除去するには、 D_2 を大きく、あるいは D_3 を小さく設定する必要がある。

4. 数値解析

流出口径 D_2 と放気口径 D_3 の違いが装置内部の流れにあたる影響を詳細に分析するために、流れの数値解析を実施した。解析ソフトウェアには STAR-CCM+ を使用し、乱流モデルはレイノルズ応力乱流モデル、作動流体は油のみの単層流としている。座標系は、装置の中心軸方向を z 軸に取り、放気口の入口部を原点とした。装置の形状パラメータは、表 2 中の No.1~9 で実施しており、可視化実験の条件に放気口径 $D_3 = 8\text{mm}$ の条件を追加して解析を実施している。油の温度、動粘度、流入流量の条件は全て可視化実験の条件と同じとした。

図 5 は、気泡除去装置の中心軸上の中心軸方向の流速 V_z の変化を表しており、流出口方向を正、放気口方向を負としている。 D_2 が大きく、 D_3 が小さいほど、放気口へ向かう流速が全体に速いことがわかる。可視化実験の結果から、この条件では装置の中心軸上に気泡が集合しづらいことが確認されているが、これは気泡が十分に集合

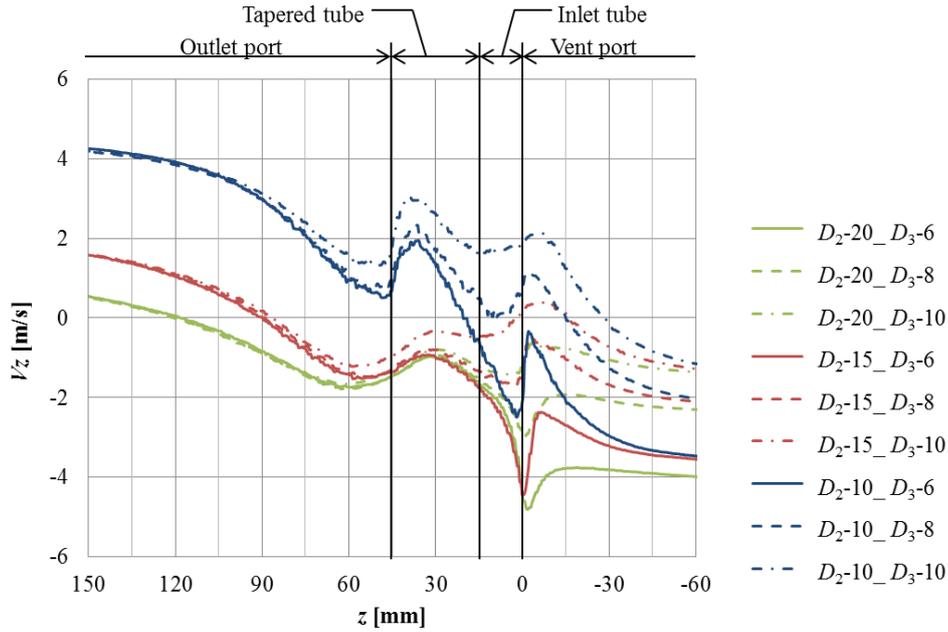


Fig.5 Velocity component z on the z -axis in various diameters of the outlet port and vent port

する前に放気口から気泡が流出してしまっているためだと考えられる。一方、 D_2 が小さく、 D_3 が大きい条件では、流出口へ向かう流速が速くなることわかる。特に $D_2 = 10\text{mm}$ 、 $D_3 = 10\text{mm}$ の条件では、放気口内で V_z は正の値を示しており、可視化実験の結果からもわかるように集合した気泡がすべて流出口方向に流出しやすい条件であることがわかる。

以上のことから、中心軸上の中心軸方向流速 V_z を比較することで、気泡の集合の様子を予測することができる。しかし、この評価方法では、装置の旋回方向の流れの影響を考慮していない。気泡の集合には、装置内部の旋回流の挙動も大きく影響していると考えられ、中心軸方向の流速のみに注目しても気泡の集合の様子を正確に評価することはできない。そこで、旋回方向と中心軸方向の流れの関係を考慮したスパイラル係数という指標を導入し、旋回方向の流れの影響を考慮して気泡の集合の様子を評価する。スパイラル係数 S は、以下の式(1)により定義される。

$$S = \frac{U_z}{U_s} \quad (1)$$

ここで、 U_z は装置の中心軸方向の流速、 U_s は装置の旋回方向の流速を表している。本報では、装置の x - z 断面のスパイラル係数の分布を比較することで、装置内部の流れを分析する。旋回方向の流速 U_s は、接線方向の流速を意味し、装置断面のスパイラル係数を算出する際は、断面に垂直な流速となる。したがって、ここでは y 軸方向の流速 V_y を旋回方向の流速としている。また、本報では、中心軸方向の流速 U_z の方向のみを考慮し、旋回方向の流速 U_s の方向は考慮しない。したがって、本報で用いるスパイラル係数 S は、以下の式(2)で表せる。

$$S = \frac{V_z}{|V_y|} \quad (2)$$

図 6 に装置断面のスパイラル係数 S の分布を示す。赤く塗りつぶされている範囲 ($S \geq 1$) と青く塗りつぶされている範囲 ($S \leq -1$) は、それぞれ流出口に向かう流れと放気口に向かう流れの影響が大きいことを表している。また、その他の範囲 ($-1 < S < 1$) は、旋回方向の流れの影響が大きいことを表しており、 $S = 0$ に近づくほど、中心軸方向の影響が小さくなり、旋回方向の影響が大きくなる。 D_2 が小さく、 D_3 が大きいほど、装置の中心軸上の流出口へ向かう流れの影響が大きくなること、また、放気口内での旋回方向の流れの影響が大きくなり、流出口

内での旋回方向の影響が小さくなることがわかる。さらに、流入管路部とテーパ管路部内の旋回方向の流れの影響が大きい範囲 ($-1 < S < 1$) に注目すると、各条件で旋回の挙動が異なることがわかる。この違いを明確にするために、 $z = 7.5\text{mm}$ の断面の中心軸方向の流速 V_z の分布を比較する。この流速の分布を、図 6 右側にスパイラル係数の分布と合わせて示す。ここで、 $z = 7.5\text{mm}$ の断面の中心軸方向の流速の変化を明確にするために、流出口に向かう流れを赤く、放気口に向かう流れを青く塗りつぶしている。また、色の濃淡は、流速が 0 に近づくほど濃く、流速が大きくなるほど薄くなる。 D_2 と D_3 が変化すると、装置の中心軸上だけでなく、旋回方向の流れの影響が大きい範囲 ($-1 < S < 1$) でも V_z が変化することがわかる。基本的に、気泡除去装置内部の流れは、装置内部の壁面に近い範囲で流出口方向に向かう流れ ($V_z > 0$) を示し、中心軸に近い範囲で放気口に向かう流れ ($V_z < 0$) を示す。しかし、 $z = 7.5\text{mm}$ の断面の V_z の分布に注目すると、装置内部では、旋回流の進む方向が複雑に変化することがわかる。 D_2, D_3 が共に小さいほど、その傾向は顕著になり、装置内部の壁面から中心軸までの範囲で、旋回流の進む方向が複数回変化することがわかる。また、 $D_2 = 20\text{mm}$ の条件では、その傾向が比較的小さく、全体に放気口に向かう流れが大きい。 $D_2 = 10\text{mm}, D_3 = 10\text{mm}$ の場合は、中心軸上では流出口へ向かう流れが速い

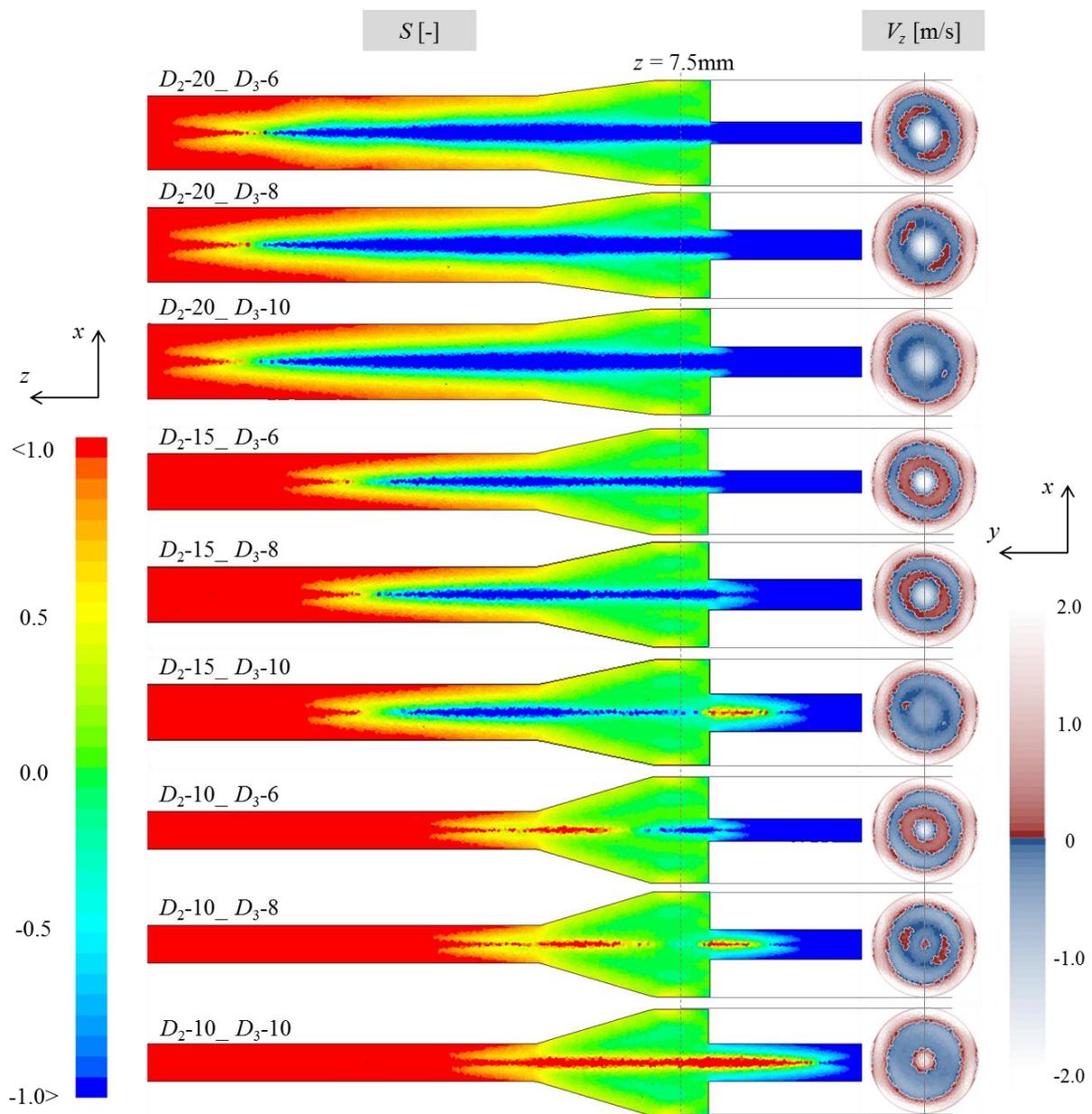


Fig.6 Spiral number and velocity component z on $z = 7.5\text{ mm}$ in various diameters of the outlet port and vent port

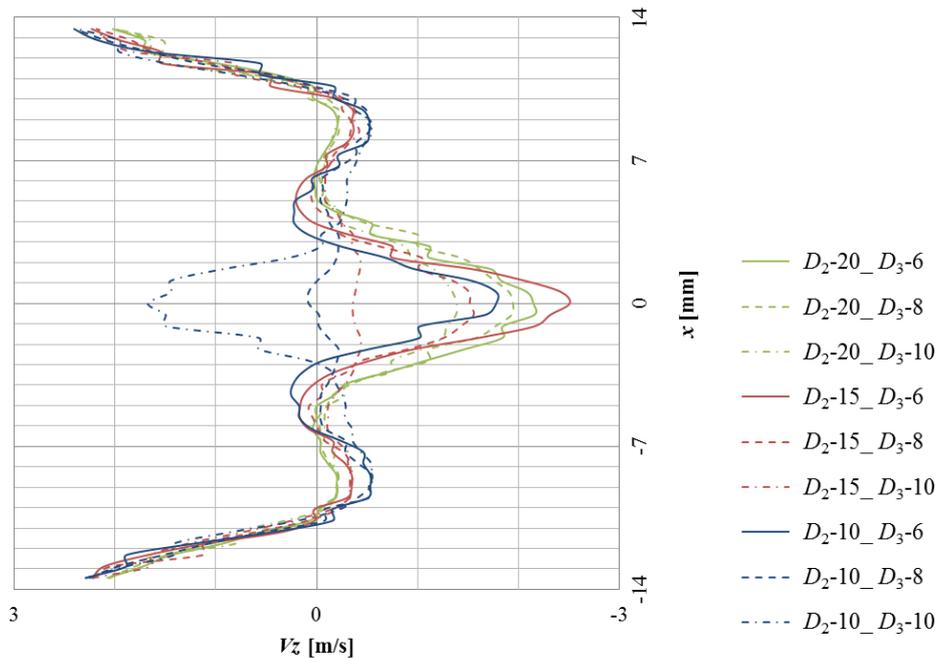


Fig. 7 Velocity component z on the $z = 7.5$ mm in various lengths of the tapered tube

が、その周りの範囲では V_z は負の値を示しており、放気口へ向かう流れを示すことがわかる。 $D_2 = 20$ mm の条件は、気泡が十分に集合しない条件、 $D_2 = 10$ mm, $D_3 = 10$ mm の条件は、集合した気泡が流出口方向に流れやすい条件である。以上のことから、装置内部で旋回流の進む方向が複雑に変化する条件が、気泡を装置の中心軸上に十分に集合させ、集めた気泡を放気口から効率よく除去する条件だと考えられる。図 7 は、 x 軸に沿う $z = 7.5$ mm 上の V_z の分布である。可視化実験の結果と比較すると、装置の中心軸上に気泡が集合しやすく、集合した気泡が放気口から除去されやすい条件では、 $x = 0$ で V_z が 0 に近いこと、また、 $x = -5$, $x = 5$ 付近で V_z が正の方向に値が大きく、 $x = -9$, $x = 9$ の付近で V_z が負の方向に大きくなることから、気泡除去装置の高性能化には、装置の中心軸上の流速変化だけでなく、旋回流の影響が大きい範囲の流れの挙動を考慮する必要があると言える。

4. 結 言

本報では、気泡除去装置内部の流れの可視化実験を実施し、流出口径 D_2 と放気口径 D_3 の違いが装置内部の気泡の挙動にあたる影響を確認した。さらに数値解析を実施して装置内部の流れを詳細に分析し、装置の中心軸方向の流れだけでなく、旋回方向の流れを考慮することで装置の性能が向上することを明らかにした。

本研究は、戦略的基盤技術高度化支援事業「油圧動力伝達システムに使用する油中気泡除去技術の開発」の一部として実施されたことを付記して、関係者に謝意を表す。なお、本研究の数値解析は法政大学情報メディア教育研究センターのソフトウェアを用いて実施された。

文 献

- (1) Tanaka, Y., et al., "Bubble Elimination from Working Oils for Environmentally Friendly Hydraulic System Design", *International Journal of Automation Technology*, Vol. 6, No. 4 (2012), pp. 488-493
- (2) 田中豊, 坂間清子, 鈴木隆司, "数値解析による気泡除去装置の設計指針の確立", 日本機械学会山梨講演会講演論文集, Vol. 100, No. 3(2010), pp. 46-47
- (3) 坂間清子, 田中豊, 鈴木隆司, "気泡除去装置の性能評価 (スパイラル係数による評価)", 平成 25 年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集, (2013), pp.22-24