

## 気泡除去装置の形状パラメータの最適化

### —放気口径と下流管路部径の関係—

## Shape Optimization of Bubble Eliminator

### - Relation between Diameter of Vent Port and Outlet Port -

坂間 清子<sup>1)</sup> 田中 豊<sup>1)</sup> 鈴木 隆司<sup>2)</sup>  
Sayako Sakama, Yutaka Tanaka, Ryushi Suzuki

<sup>1)</sup> 法政大学デザイン工学部システムデザイン学科

<sup>2)</sup> 株式会社オーパスシステム

Air bubbles in working oil influence stiffness and efficiency of hydraulic systems, thus it is important for technical issues to eliminate the air bubbles actively from the hydraulic oil. Bubble eliminator is a device that removes air bubbles by using a swirling flow. The purpose of this study is to design optimal shape of the bubble eliminator. Flow and pressure distributions in the bubble eliminator have been studied by numerical analysis. In this paper, it is numerically evaluated to confirm effects of some parameters: diameter of outlet port and diameter of vent port. The optimal dimensions of the bubble eliminator are proposed and the performance of bubble eliminator is evaluated by numerical simulation.

**Keywords** : Bubble, Bubble eliminator, CFD, Hydraulic system, Oil degradation

#### 1. はじめに

動力伝達システムとして用いられる油圧システムは、小形ながら大きな出力が得られるという特徴から、建設機械や鉄道、航空機等の大きな力を必要とする分野で広く利用されており、技術の発展が進んでいる。建設機械分野では高圧化、高出力化が進んでおり、油圧ショベルについては40年で17MPaから約2倍の35~38MPa程度に高圧化されている[1]。また、航空機分野でも、燃料消費を抑えペイロード（乗客、貨物）を増やすために油圧システムの小形軽量化が求められており、高圧化が進んでいる[2]。しかし、高圧化は、油圧作動油に対する熱的負荷の増大やキャビテーションの発生等を引き起こす原因となる。このキャビテーションにより析出した溶解空気は、作動油内に滞留し、作動油の見かけの剛性を低下させ、システムの効率を低下させる。ま

た、油中の気泡は、断熱圧縮による油温上昇のために作動油の劣化を促進し、油膜強度を低下させるために、機器の故障の原因ともなる。Fig. 1は内部を観察するためにアクリルで作成したタンクの様子を示している。タンク内に気泡が混入している様子が確認できる。この気泡を取り除く方法として、一般的にはタンク内で気泡を自然浮上させて消泡する方法が用いられる。しかし、この方法はタンクの容積を大きくする必要があり、システムの小形化のためにも積極的に気泡を除去することが求められている。

作動油中の気泡を積極的に除去する方法として、著者らの一人である鈴木により開発された気泡除去装置の利用が有効である。従来の研究で、実験や数値解析から、この気泡除去装置が効率よく気泡を除去することは明らかにされている[3]。また、空気の混入による空冷効果や、気泡除去装置の温度上昇抑制効果についても明らかにされており[4]、この

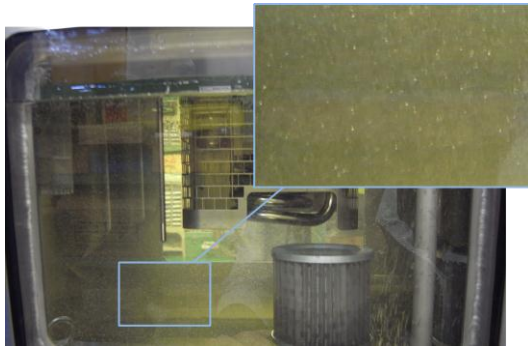


Fig.1 Bubbles in Reservoir

装置が油圧システム内の様々な問題の解決に役立つことが確認されている。さらに、装置の各部の形状パラメータを種々変更して流れの数値解析を行うことで、各形状パラメータが気泡の除去性能におよぼす影響についても検証してきた [5] [6]。しかしながら、現段階でこの装置の最適な形状を見出すには至っておらず、装置の形状は経験的な値に基づき決定されている。本研究では、従来の研究に引き続き、流れの数値解析を用いて気泡除去装置の最適設計を行うことを目的とする。

2. 気泡除去装置の構造と原理

Fig. 2 に気泡除去装置の構造と原理を示す。気泡除去装置は、リング状管路部からの作動油の流れを二つに分岐させる流入口と、その流れを接線方向から受ける流入管路部、それに続く一定傾斜をもつテーパ管路部および下流管路部より構成されている。所要の流入流量で流入管路部に接線方向から気泡を含んだ作動油が流入すると、内部で旋回流が生じ、それによって発生した遠心力により、比重の軽い油中気泡が中心軸付近に集まる。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。Fig. 3 は内部を可視化するために、アクリルで作成した装置で実験した際の画像である。気泡が中央に集合している様子が確認できる。この気泡除去装置は簡易な構造であり、回路内に組み込むだけで使用することができ、他の動力源を必要とせず、管路内を流れる流体のエネルギーのみを利用するため、省エネルギーであるという特徴もある。

3. 流れの数値解析

本研究では、数値解析ソフトウェアに STAR-CD を用い、気液二相流体の流れの解析を行っている。

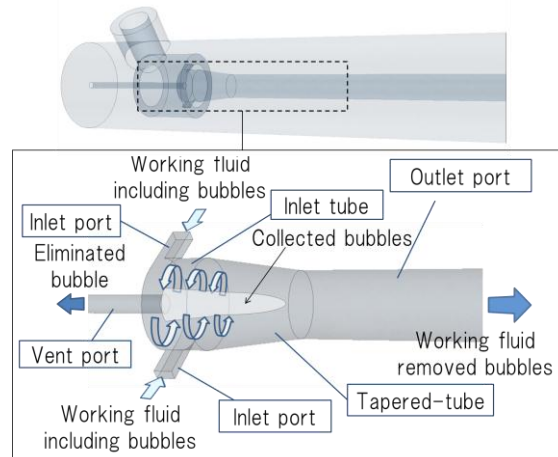


Fig. 2 Design and Principle of Bubble Eliminator

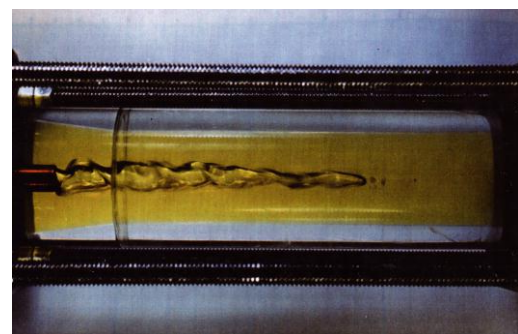


Fig. 3 Photograph of Collected Bubble

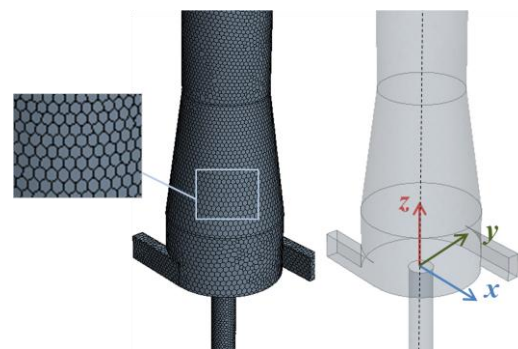


Fig. 4 Mesh and Coordinate Definition for CFD

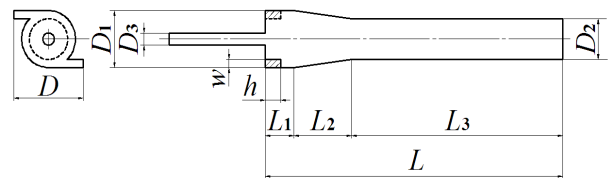


Fig. 5 Geometry of Bubble Eliminator

Table 1 Dimensions of Standard Model

D	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	w	h	L	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	[mm]
36	28	20	6	3	6	265	15	30	220	

熱計算, 物質の融合, 化学変化は考慮しないため, 支配方程式は質量保存式と運動量保存式のみを用いる. 格子系には収束性に優れたポリヘドラルメッシュを使用している. Fig. 4 に格子系の設定と座標系の定義を示す. 装置の中心軸方向を  $z$  軸にとり, 放気口の入り口部を原点とした. Fig. 5 と Table 1 に解析に用いた装置の基準の形状パラメータを示す. 本報では放気口径と下流管路部径の最適な関係を求めることを目的とし, Table 1 の基準の形状パラメータ中の放気口径  $D_3$  と下流管路部径  $D_2$  を変更して解析を行う. 作動流体の基準条件は全て同一とし, 流入流量  $Q$ : 20[L/min], 混入気泡の割合  $A_r$ : 5[%], 混入気泡径  $d$ : 0.3[mm], 流体の動粘度  $\nu$ : 31.3[mm<sup>2</sup>/s] とした. また, 気泡は完全な球体粒子として扱い, 気泡の変形や結合, 拡大縮小は考慮していない.

気泡の除去性能を示す指標として気泡除去率  $E_b$  と作動油流出率  $E_o$  を定義する. ここで気泡除去率は, 流入口から流入する油中気泡の容積流量に対する放気口から流出する油中気泡の容積流量の比と定義し, 作動油流出率は, 流入口から流入した作動油の容積流量に対する流出口から流出した作動油の容積流量の比と定義している. したがって  $E_b$  と  $E_o$  が共に大きい方が装置の性能は高いと評価できる.

#### 4. 下流管路部径と放気口径の違いによる比較

Table 2 に下流管路部径  $D_2$  と放気口径  $D_3$  をそれぞれ変更した場合の気泡除去率と作動油流出率を示す. 下流管路部径が小さいほど, 気泡除去率は向上するが作動油流出率は低下し, 放気口径が大きいほど, 気泡除去率は向上するが作動油流出率は低下することがわかる. また, 下流管路部径に対する放気口径の比  $D_3/D_2$  が等しい場合は, 気泡除去率と作動油流出率は同程度の値を示している. ここで, 気泡除去率の高い下流管路部径が 10mm の場合と放気口径が 10mm の場合, また気泡除去率の低い放気口径が 2mm の場合の装置内部の流れを分析する. Fig. 6 に装置の中心軸を通る断面の空気含有率分布と気泡の速度を示す. 気泡除去率の高い下流管路部径が 10mm の場合と放気口径が 10mm の場合は, 気泡の放気口へ向かう流れが大きいことがわかる. この流れにより集めた気泡を効率よく流しだすことが可能となるが, 同時に作動油が放気口から流れ出てしまうために, 作動油流出率が低下すると考えられる. また, 気泡除去率の低い放気口径が 2mm の場合は, 放気口入り口付近に気泡が多く集合するが, 放気口への流れが非常に小さいために気泡除去率が低下す

ると考えられる.

次に, 従来の研究結果[3]と比較する. Table 3 に従来の研究で使用していた基準の形状パラメータを示す. 作動流体の条件は, 流入流量  $Q$ : 6[L/min], 混入気泡の割合  $A_r$ : 3[%], 混入気泡径  $d$ : 0.3[mm], 流体の動粘度  $\nu$ : 30[mm<sup>2</sup>/s] としている. また, 格子系にはヘキサメッシュを用いている. Table 4 に放気口径  $D_3$  を変更した場合の気泡除去率と作動油流出率を示す. 本報で行った解析結果同様, 放気口径が大きいほど, 気泡除去率は向上するが, 作動油流出率は低下することがわかる. また, 今回行った解析結果に比べ, 気泡除去率が全体的に非常に高い値を示

Table 2 Comparison with Diameter of Outlet and Vent Port in the Present Study

$D_2$ [mm]	$D_3$ [mm]	$D_3/D_2$ [-]	$E_b$ [%]	$E_o$ [%]
5	6	1.20	90.5	42.6
10	6	0.60	70.1	75.8
15	6	0.40	52.5	88.2
20	6	0.30	34.5	93.1
20	2	0.10	6.6	99.3
20	4	0.20	20.2	97.0
20	6	0.30	34.5	93.1
20	8	0.40	47.4	88.0
20	10	0.50	57.5	82.0
20	14	0.70	70.7	69.1
10	3	0.30	35.0	93.1

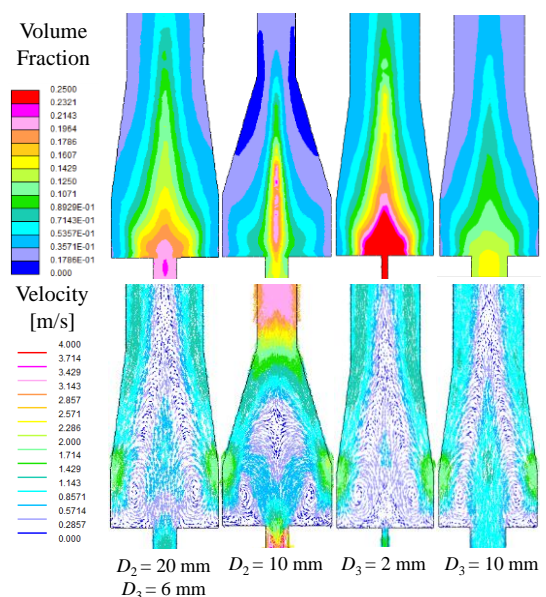


Fig. 6 Volume Fraction and Velocity of Bubbles

していることがわかる。

今回行った解析と、従来の研究で行われた解析の結果を比較する。Fig. 7 に下流管路部径と放気口径を変更した場合の気泡除去率と作動油流出率の関係を示す。本報で改めて行った解析の結果は St1-D<sub>2</sub>-E<sub>b</sub> と St1-D<sub>2</sub>-E<sub>o</sub>, St1-D<sub>3</sub>-E<sub>b</sub> と St1-D<sub>3</sub>-E<sub>o</sub> であり、それぞれ下流管路部径を変更した場合の気泡除去率と作動油流出率、放気口径を変更した場合の気泡除去率と作動油流出率を表している。また、従来の研究で行われた解析結果は St2-D<sub>3</sub>-E<sub>b</sub> と St2-D<sub>3</sub>-E<sub>o</sub> であり、それぞれ放気口径を変更した場合の気泡除去率と作動油流出率を表している。また、横軸は下流管路部径に対する放気口径の比  $D_3/D_2$  としている。下流管路部径と放気口径の最適な比を、気泡除去率と作動油流出率を示す双方の曲線の交わる点とすると、本報で行った解析では下流管路部径に対する放気口径の

Table 3 Dimensions of Standard Model in the Previous Study

D	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	w	h	L	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	[mm]
24	16	9	3	2	4	240	4	9	227	

Table 4 Comparison with Diameter of Vent Port in the Previous Study

D <sub>2</sub> [mm]	D <sub>3</sub> [mm]	D <sub>3</sub> /D <sub>2</sub> [-]	E <sub>b</sub> [%]	E <sub>o</sub> [%]
9	2	0.22	52.4	96.8
9	2.5	0.28	70.8	94.8
9	3	0.33	98.2	92.7
9	3.5	0.39	98.9	89.5
9	4	0.44	99.3	86.1
9	4.5	0.50	99.5	82.5

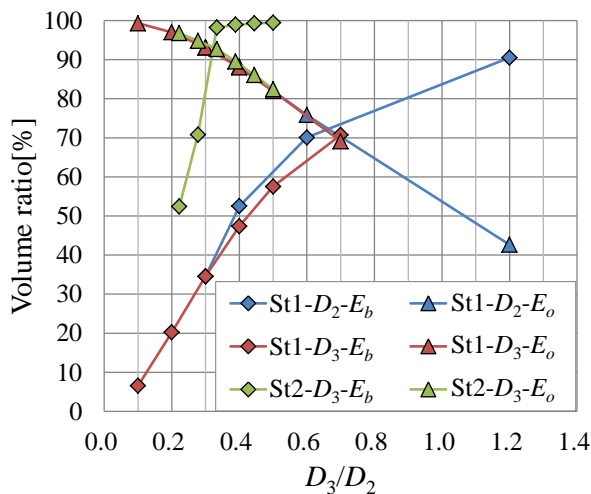


Fig. 7 Volume Ratio in Various Diameters of Outlet

比が 0.6 から 0.7 程度の値が適切である。しかし、従来の研究では、下流管路部径に対して放気口径は 0.3 程度が適切であると評価することができ、気泡除去率と作動油流出率の双方の曲線の交点は 90% を超える値を示している。このように大きく異なる値を示した原因として、今回行われた解析の形状では、気泡除去率曲線が全体的に低い位置にあることが挙げられる。気泡除去率曲線が全体的に高い値を示すように、下流管路部径と放気口径だけでなく、他の形状パラメータについても最適な形状を見つける必要がある。

### 5. おわりに

下流管路部径と放気口径の比を種々変更して解析を行い、過去の研究結果と比較することで、下流管路部径と放気口径の最適な関係は、作動流体の条件や他の形状パラメータの影響を大きく受けることを確認した。

本研究は、平成 22 年度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。

### 参考文献

- [1]杉山玄六, "油圧シヨベルと油圧技術 (油圧シヨベルの発達と油圧システムの技術開発)", 油空圧技術 49 巻 11 号, pp.1-7、2010 年
- [2]古賀和矢, "航空機と油圧 (高信頼機器とシステムの冗長性で安全な飛行を保証します)", 油空圧技術 49 巻 11 号, pp.25-30、2010 年
- [3]田中豊,鈴木隆司,小林俊史, "気泡除去装置内の流れ解析 (放気口モデルによる検討)", 日本機械学会山梨講演会講演論文集, pp.193-194、2006 年
- [4]田中豊,石田祐樹,鈴木隆司, "気泡除去装置による油圧タンクの小型化 (熱収支モデルによる検討)", 日本機械学会山梨講演会講演論文集, pp.231-232、2004 年
- [5]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, pp.46-47、2010 年
- [6]坂間清子,鈴木隆司,田中豊, "数値解析による気泡除去装置の設計指針の確立 (形状パラメータによる比較)", 秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集, pp.172-174、2010 年