

# 環境に配慮したフルードパワーシステムの限界設計に関する研究

## -気泡除去装置の流れ解析-

### Critical Design of Hydraulic Systems for Environmental Compatibility

#### - Numerical Analysis of Flow in Bubble Eliminator -

永石 晃一<sup>1)</sup> 田中 豊<sup>2)</sup> 鈴木 隆司<sup>3)</sup>

Koichi Nagaishi, Yutaka Tanaka, Ryushi Suzuki

<sup>1)</sup> 法政大学大学院システムデザイン研究科システムデザイン専攻

<sup>2)</sup> 法政大学デザイン工学部システムデザイン学科

<sup>3)</sup> 株式会社オーパスシステム

Liquid containing air bubbles dissolves into liquid caused by a dynamic factor and a thermal factor. Thus, it is important to actively eliminate the air bubbles to avoid bulk modulus change and the damage to the hydraulic machinery toward the development of more environmental friendly and endurable hydraulic systems. This study is designed to remove bubbles in liquid at high flow rate to an extremely small one. At present, we have conducted numerical analysis of liquid flow, offering the optimal equipment design.

*Keywords: Swirl flow, Bubble elimination, Numerical analysis*

## 1. はじめに

### 1.1 緒論

フルードパワーシステムの作動油はパワー伝達媒体として不可欠である。作動油には気泡が混入しており、気泡が原因となってキャビテーションやエロージョンを引き起こし、アクチュエータの動特性の低下に繋がる。気泡はポンプしゅう動部において断熱圧縮されることにより高温化し、作動油に熱伝達することによって作動油の油温度上昇や劣化促進の影響をおよぼす。

近年では環境エネルギーの配慮から建築機械などを中心に限られた空間でタンク形状が規定され、かつ使用する作動流体の量を極力減らすため、タンクの容量を抑えた設計や、機器の使用圧力の高圧化や効率化に伴いシリンダなどのアクチュエータにおいて気泡が与える影響を大きく受けるため、限界設計の必要に迫られている<sup>1)</sup>。そのためフルードパワー

システムにおいて機器の安定性や省エネルギーの観点からも気泡は積極的に取り除く必要がある。

気泡問題を解決するため、簡易な円筒型構造の旋回流方式気泡除去装置が鈴木<sup>2)</sup>によって開発された。

本報では気泡除去装置内の流体の挙動を数値解析によって明らかにし、流体の条件の違いによって異なる流れの特徴を評価し、装置の設計指針を確立する。

### 1.2 気泡除去装置

気泡除去装置は主に、流入口部の円筒体とそれに続くテーパ管路部および下流の管路部より構成されている。所要の流入流量で流入部円筒体内部に接続方向から気泡を含んだ作動油が混入されると、円筒体内部に旋回流が形成され、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。中心軸付近に形成された気泡柱を、流出口

と反対に設置した放気口より排出する。Fig.1 に気泡除装置概念図と気泡柱の可視化の様子を示す。

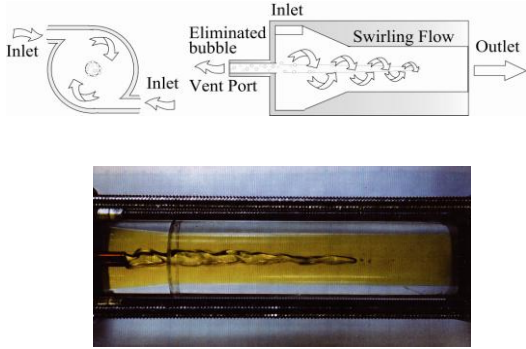


Fig.1 Principle of Bubble Eliminator and collected bubble

### 1.3 研究の概要

気泡除去性能を向上させるためには、流量を増加し回転速度を上げることが考えられる。しかし結果として圧損が増加する。気泡除去装置の設計は、これまで試作や実験で得られた知見をもとに行われており、与えられる流体の条件に対する最適装置設計法は研究されていない。また、液体の物性や流量など条件の組合せは無数にあり、新たに装置を設計する場合、試作や実験の手法で網羅できない。今後装置の標準化を図るためにも、まず数値解析により設計パラメータにつき検討を行い、設計規範を構築する必要がある。

そこで、本研究では気泡除去装置内の流体の挙動について、数値解析を通して作動流体の条件による違いを動圧回復率、気泡除去割合を使って評価する。

## 2. 流れ解析

### 2.1 流れ解析手法

油圧システムのパワー伝達体である作動油には気泡が混入するため、液相と気相が存在する。そのため数値解析で気液二相流体を扱える CFD コード STAR-CD を用いた。支配方程式を有限体積法(FVM: Finite Volume Method)を用いて離散化し、離散化された方程式を解くための代数マトリックスについては分離解法の SIMPLE 法を用いた。また、定常計算で解析を行うため、コントロールボリュームの取り方は、細分化されたセルの重心位置に物理量をもつコロケート (セル中心ベース) を用いている。対流項の評価には二次精度の風上差分法 (LUD) を、運

動量保存式として連続の式、ナビエ・ストークス方程式 (Navier-Stokes equations) をオイラー法で解いている。乱流の場合、乱流モデルとして  $k-\epsilon$  モデルを用い、壁面境界条件には壁法則を用いた。気泡の取り扱いについては、気泡を完全球体とし、変形や集合をしないものとした。これは気泡の密度が作動油と比べ極めて小さいためである<sup>3)</sup>。

### 2.2 解析モデル

解析に用いた格子は、非構造型のポリヘドラルメッシュを用いている。ポリヘドラルメッシュは、モデルの再現性の高いテトラメッシュを高精度かつ収束性のよい解析をするために格子を重ね合わせ約 14 面体から構成されるメッシュである。また、メッシュの品質に大きな影響を与えるメッシュのアスペクト比は平均化している。座標系は直交座標系を用いた。Fig.2 の座標系が表記されている点を原点座標 (0,0,0) とし、モデルの中心軸を (0,0,Z) とする。解析モデルの断面図を Fig.3 に示す。Table 1 に寸法を示す。

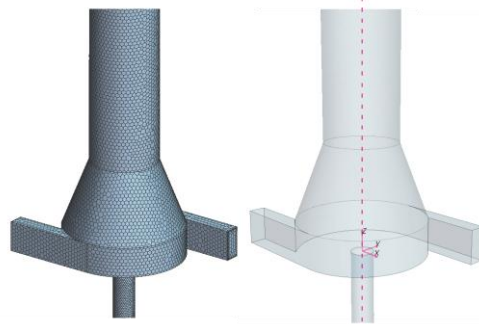


Fig.2 Mesh definition for the Numerical Analysis

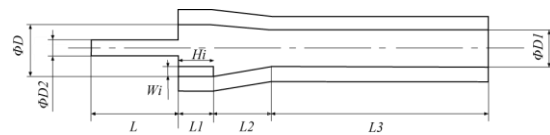


Fig.3 Geometry of Bubble Eliminator

Table 1 Dimensions of Bubble Eliminator

D	D1	T	X	Y	L	L1	L2	L3	D2
16	9	4	2	4	48	4	9	160	2

[mm]

### 3. 評価方法

#### 3.1 動圧回復率

旋回流による圧力勾配を検討するために中心軸上の動圧回復率をもって判断する。圧力勾配の回復を評価する際、下記の方法で中心軸圧力を無次元化した無次元中心軸圧力と装置の流入部と接続している円筒管径(上流の管径)で長さを無次元化した値を用いて評価する。入り口壁面からの距離を  $z$  とし、管路直径  $D$  で割った無次元距離と中心軸上の全圧  $P_\infty$  から静圧  $P_s$  の差をとり求めた動圧、流出部の平均流速  $v$  から求めた動圧で割った無次元化した以下の式で定義した圧力回復率 ( $P^*$ ) を用いる。

$$P^* = \frac{(P_\infty - P_s)}{\frac{1}{2} \rho v^2} \quad (1)$$

#### 3.2 気泡除去率

気泡除去率  $E$  は、流入部から流入した気泡の容積流量  $Q_{IN}$  [L/min] と放気口から流出した容積流量  $Q_{VENT}$  [L/min] の比として以下の式 (2) で定義した。

$$E = \frac{Q_{VENT}}{Q_{IN}} \quad (2)$$

## 4. 流体の条件の違いによる影響

### 4.1 解析パラメータ

旋回流を伴う流体の挙動を明らかとするために、同一モデルを用いて異なる流体の条件・物性下で数値解析を行う。気泡は完全球体として扱うため、気泡の物性値は密度  $1.184[\text{kg}/\text{m}^3]$ 、動粘度  $15\text{-}27[\text{mm}^2/\text{s}]$ 、粘性係数  $1.885 \times 10^{-5} [\text{kg}/\text{ms}]$  とした。液相は密度  $846.5 [\text{kg}/\text{m}^3]$ 、動粘度  $31.13 [\text{mm}^2/\text{s}]$ 、粘性係数  $0.0264 [\text{kg}/\text{ms}]$  とし、変更しない場合は、流入流量  $6[\text{L}/\text{min}]$ 、気泡混入割合  $5[\%]$ 、気泡径  $0.3[\text{mm}]$  とした。

流体の物性・条件を変化させる項目は、Table 2 に示す流入流量 [L/min] と、粘性 (密度  $[\text{kg}/\text{m}^3]$ 、動粘度  $[\text{mm}^2/\text{s}]$ 、粘性係数  $[\text{kg}/\text{ms}]$ ) である。

解析の対象に用いた流体は、出光興産スーパーハイドロ HO32 で、 $40^\circ\text{C}$ 、 $60^\circ\text{C}$ 、 $100^\circ\text{C}$  における物性値の違いを Table 3 に示す<sup>4)</sup>。

### 4.2 流入流量

Case4-1 から Case4-4 の流入量の違いについて検討した。

Table 2 Physical parameters of numerical analysis

Case	Inlet flow rate [L/min]	Reynolds Number
Case 4-2	3	227
Case 4-1	6	454
Case 4-3	9	682
Case-4-4	12	909

Table 3 Change of Physical parameters of oil in numerical analysis

		Temperature [°C]	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Kinetic Viscosity [mm <sup>2</sup> /s]	Coefficient of Viscosity [kg/ms]	Reynolds Number
Case	Case4-1	40	846.5	31.13	0.0264	454
	Case4-5	60	833.3	14.94	0.0124	947
	Case4-6	100	806.9	5.382	0.0043	2628

#### 4.2.1 動圧回復率

Fig.4 は流入流量の違いによる動圧回復率の変化である。テーパ部の無次元距離は  $0.4$  から  $0.81$  の区間である。すべての条件で急激に圧力が低下している。その後、下流円筒部で流入流量が多い条件の方が動圧の回復が遅い。これは、放気口でも同様の傾向がみられる。流入流量の大きい条件において、放気部の圧力回復率をみる、と流入部円筒管と放気口の接続部で動圧が増加している。その後、放気口に向かうに従い、減少し極小値を迎えその後、一定値まで増加する。Case 4-1, Case 4-2 の流入流量の少ない条件の放気部での圧力回復率は流入部円筒管と放気部の接続部 ( $Z^*=0$ ) において動圧の極大値を迎えるような上昇はなく、徐々に上昇し一定の値まで増加している。

このことから流入流量の多い条件ほど、流入部円筒管と放気部の動圧勾配は急峻であり、テーパ部、下流円筒管では緩やかであるといえ、気泡除去に望ましい勾配は、流入流量の多い条件の勾配といえる。

#### 4.2.2 気泡除去性能

Fig.5 に流入流量と気泡除去性能の関係を示した。気泡除去率は、圧力回復区間が長く、周方向速度が速く、旋回軸方向 ( $Z$  軸) 速度の逆流が長い区間で確認できた条件ほど高い気泡除去性能を示している。このことから流入流量を増加させた場合、同一モデルにおいて流入流量の増減が気泡除去性能に大きな

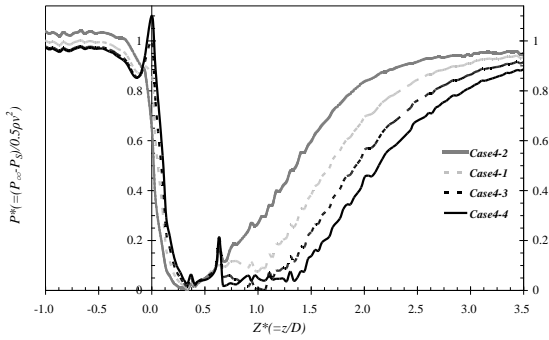


Fig.4 Characteristic of kinematic pressure by inlet volumetric flow

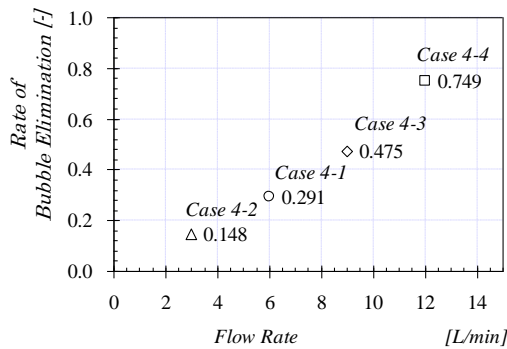


Fig.5 Bubble elimination ability by inlet volumetric flow

影響を与える流速分布や動圧分布がわかった。

### 4.3 粘性

#### 4.3.1 動圧回復率

Fig.6 は粘性を Case4-1 では作動油が 40℃相当, Case4-5 では作動油が 60℃相当, Case4-6 では作動油が 100℃相当の密度, 動粘度, 粘性係数の流体の圧力回復率である。Case4-6 はテーパ部区間 (0.4 から 0.81) において動圧の高低差が高い。これは粘性が低いと強い旋回流が形成されているが, 旋回軸 (Z 軸) 方向速度  $V_z$  が速いので旋回流が乱れていると考えられる。その後下流管路において動圧が低下し, 無次元化距離 1.8 以降回復傾向がみられる。下流円筒管の圧力回復率は, 粘性が低い条件の方が緩やかで, 粘性が高い流体の方が早い。これは, 粘性が低い条件は旋回軸 (Z 軸) 方向速度が速く, 流れが安定するまでの助走区間が長いと考えられる。流入部円筒管と放気口の接合部では粘性の低い条件の動圧が高く勾配も急峻である。Case4-1 の動圧回復率は 0.8, Case4-5 は 1.15, Case4-6 は 1.7 と急激に増加

している。

#### 4.3.2 気泡除去率

Fig.7 に粘性の違いによる気泡除去率を示す。気泡除去率は粘性が低い条件ほど気泡除去率が高い。これは圧力回復率から同一モデルにおいて粘性の違いが旋回流の形成と気泡除去性能に支配的な影響を与えるからだと考えられる。ただし, 本稿では, 100℃の場合の気泡の溶解を考慮していないが, 実際には気泡は液体に溶解していると考えられる

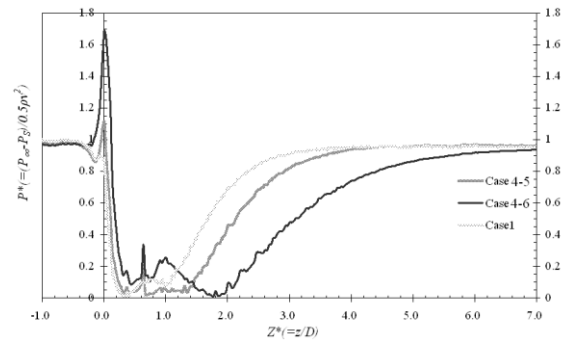


Fig.6 Characteristic of kinematics pressure by viscosity

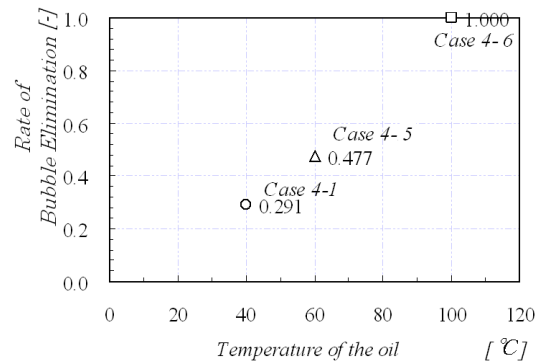


Fig.7 Bubble elimination ability by viscosity

作動流体の影響から気泡除去性能を向上させるためには下記の条件が必要といえる。

テーパ部において低い動圧が継続する形状が望ましい。流入部円筒管と放気口の断面において動圧が高くなる形状が望ましい。

### 5. おわりに

本研究で明らかとなったことは, 気泡除去装置内

の数値解析によって、流体の条件の違いにより気泡除去性能を向上させるための流体の挙動の特徴がわかった。

- (1) テーパ部において動圧の低下区間がある程度の距離がある方が気泡除去に適している。これは無次元距離では現在のモデルのテーパ部の長さの3倍にあたる。
- (2) 流入口円筒管と放気口との接続部の中心点では下流に比べ1.3倍から2.0倍程度の動圧を得られる場合気泡除去性能が向上する。

これらの流体の特徴を把握することによって、気泡問題を抱えるフルードパワーシステムの作動流体に応じて、気泡除去効果を高めることができる。

## 参考文献

- [1]松山雄一, "油圧作動油からのランニングコスト低減", 出光トライボレビューNo.27, 2004年
- [2]鈴木, 横田, "旋回流利用による気泡除去(第二報 テーパ形による性能向上)", 油圧と空気圧, 25巻, 4号, 543/548, 1994年
- [3]大西徹典, "潤滑油の粘度(その1)", 出光トライボレビュー12-13, 2003年
- [4]"改訂気液二相流技術ハンドブック", 日本機械学会編, コロナ社, 25-180, 1998年