

気泡除去装置内旋回流の数值解析 (気泡除去性能の評価)

山本 彦文, 田中 豊, 新井 和吉
法政大学工学部機械工学科

鈴木 隆司
オーパスシステム(株)

油圧システムにおけるパワーの伝達媒体である作動油中に含まれる気泡は、システムの動作特性に影響をおよぼし、多くの場合、油圧機器のトラブルの原因となる。本研究は、油圧システムの特性を改善するために開発された気泡除去装置について、装置内旋回流の数值解析を通して、最適な装置設計に関する指針を得ることを目的としている。本報では、二相流の数值解析を通して、時間の経過とともに気泡粒子の挙動を検討するとともに、気泡除去装置の流入口やテーパ管路部の形状が、旋回流れにおよぼす影響を明らかにし、装置の気泡除去性能を評価する。

1. はじめに

航空機、土木建設機械、船舶、工作機械、自動車などで幅広く利用されている油圧制御システムには、パワーの伝達媒体として油(作動油)を欠かすことはできない。この作動油には、油中に溶解している溶解空気と混和している混和空気 以後両者を総称して油中気泡と記す が存在している。こうした油中気泡は、油の体積弾性係数や油中音速(圧力が伝播する速度)を低下させるだけでなく、キャビテーションやエアレーション発生の原因となり、油圧システムの特性に大きく影響を与える。さらにこうした油中気泡は、油膜強度を低下させ、油圧機器内部での金属接触が引き起こされ、機器摺動部の摩擦摩耗を促進させたり^[1]、高圧下で断熱圧縮された気泡が油の燃焼を誘発し、油自身の酸化劣化の原因ともなる^{[2][3]}。したがって、油圧システムの特性を改善したり、環境問題に配慮して油自身の劣化を抑制するためには、この油中気泡を積極的に除去することが重要な課題となっている。

最近、鈴木ら^{[4][5]}は、旋回流を利用した気泡除去装置を提案し、この装置を用いた詳細な実験を通して、効率よく油中気泡を除去できることを報告している。またこの装置を用いた積極的な油中気泡の除去が、システムの特性改善、特に油温上昇の抑制に効果があることも報告している^{[6][7]}。しかしこの気泡除去装置内の旋回流の挙動を明らかにし、効率の良い油中気泡の除去を実現するための最適な形状を求めるには至っていない。

本報では、前報^[9]に引き続き、流れの数值解析を通して、この気泡除去装置の気泡除去性能を改善するための流入口や管路形状のパラメータについて検討する。

2. 気泡除去の原理

Fig.1は気泡除去装置の構造と原理図である。気泡除去装置はおもに、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小口径管路部より構成されている。所要の流入速度で流入部円筒体内に接線方向から気泡を含んだ油を流入させると、円筒体内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。さらに下流に向かってテーパ管路部で巡回半径を小さくすることにより、気泡は中心

軸付近に移動しやすくなる。また中心軸付近の圧力は、テーパ管路部の終わる付近で最も低くなり、下流に向かっていったん回復し、その後降下する。したがって、気泡はテーパ管路部の上流の流入部中心軸付近に集合し、集合気柱を形成する。この集合気柱を、流出側と反対に設置した放気弁を適当に調整して、少量の油と共に外部へと抜くことにより、油中気泡を効率よく除去できる。上述の気泡除去の基本原理は、実機および数值解析によりすでに確かめられている^[8]。

Fig.2は透明アクリルで製作された気泡除去装置による内部旋回流の可視化結果の一例である。油と共に流入した気泡が、旋回流により中心軸付近に集合して気柱を形成している様子がわかる。

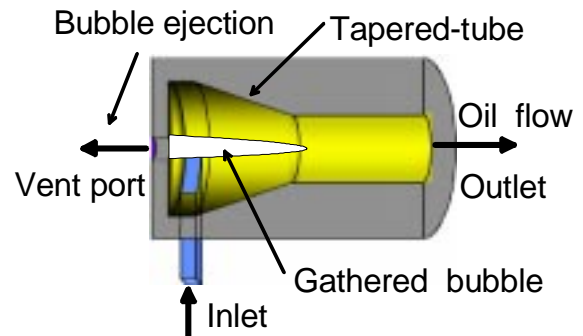


Fig.1 Principle of Bubble Eliminator

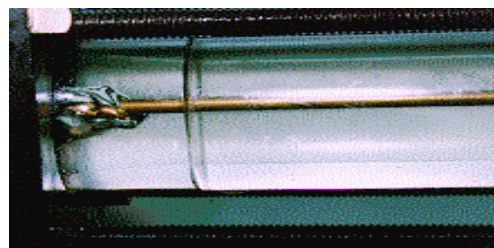


Fig.2 Flow visualization of trapped bubble

3. 数値解析手法

本研究の数値解析では、連続の式、ナビエ・ストークス方程式およびエネルギーの保存則を有限体積法により離散化したアルゴリズムを用い、逐次反復法により非定常計算を行って解いた。実際の計算には、汎用流体解析

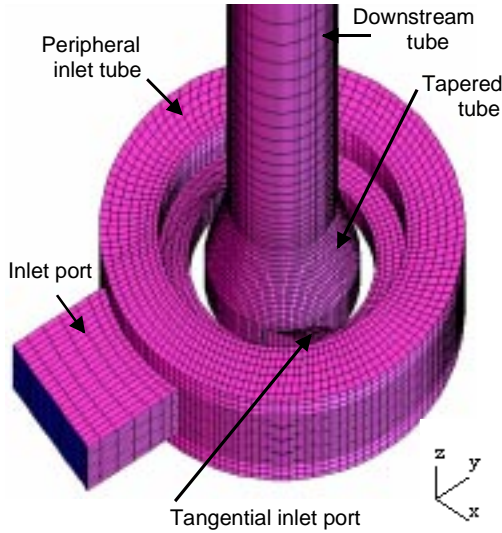


Fig.3 Definition of Blocks for Numerical Analysis

ソフトウェア RFLOW を使用している。座標系は、管路部分の横断面を x - y 平面、管中心軸を z 軸にとった三次元直交座標系で表した。有限体積要素を定義するための格子点の分割は、実際の気泡除去装置の形状に合わせ、マルチブロック法を用いた^{[8][9]}。

Fig.3 は計算に用いた気泡除去装置の格子点分割の様子である。装置全体を、(1)装置流入口部、(2)外周部、(3)テーパ管路流入口部、(4)テーパ管路部、(5)下流小口径管路部の5つのブロックに区切り、全体をおよそ 81000 個の格子点で分割した。

数値解析に用いた流体の密度 と動粘度 は、実際の作動油の条件にあわせてそれぞれ $\rho = 857 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ 、 $\nu = 0.3 \text{ [cm}^2\text{/s]}$ とし、流量 Q は通常使う気泡除去装置の稼働条件に合わせて $Q = 20 \text{ [l/min]}$ の条件で計算した。流量 Q が 20 [l/min] の場合、内径 $d (=20\text{mm})$ の下流小口径管路部における平均流速 u_0 は $u_0 = 1 \text{ [m/s]}$ 、管路部内径 d を代表長さにとれば、レイノルズ数 $Re = (u_0 d) / \nu$ は 700 となり、流れは層流である。

二相流の解析では、収束した单相流の解析結果を用いて、ある時刻 $t = 0$ で装置内部の全ての油に対して、体積比で 3%に相当する空気と同じ密度で一定半径の粒子（気泡粒子）の混入を仮定し、その後は常時同じ体積比の気泡粒子を流入口部より混入させ、気泡粒子の挙動を時間の経過とともに計算した。ただし、本報での数値解析において、気泡は表面張力や浮力を無視した粒子としている。

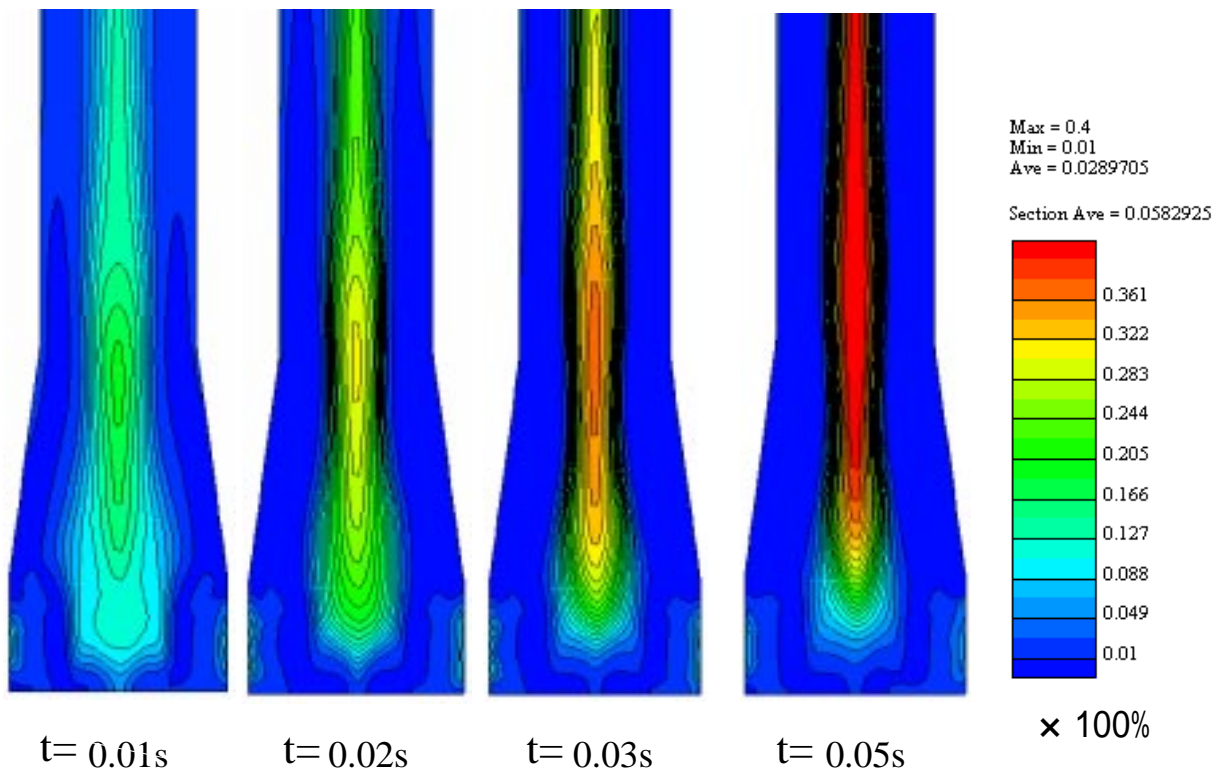


Fig.4 Air Particle Content as a Function of Time

4. 数値解析結果

4.1 二相流解析

Fig.4は流量 $Q = 20[l/min]$ 、気泡粒子の直径を $1[mm]$ とし、ある時刻 $t = 0$ で装置内部の全ての油に対して体積比で3%の気泡粒子を混入させ、その後の経過時間 $t = 0.01, 0.02, 0.03, 0.05[s]$ における気泡粒子含有率の分布である。気泡粒子含有率は、中心軸上の濃く表示されている部分がより気泡粒子が多く集合している部分である。時間の経過にともない中心軸付近に気泡粒子の集合した柱が形成される様子がわかる。これはFig.2に示した実機での可視化結果とも定性的によく一致する。

Fig.5は、経過時間 $t = 0.01, 0.02, 0.03, 0.05[s]$ のとき、それぞれの中心軸を通る断面における、流入管路部から下流に向かって示した中心軸上の気泡含有率分布である。前報の解析結果から明らかとなっている圧力の極小値となるテーパ部終わり付近^[6]に、最も多くの気泡粒子が集合することが確認できる。

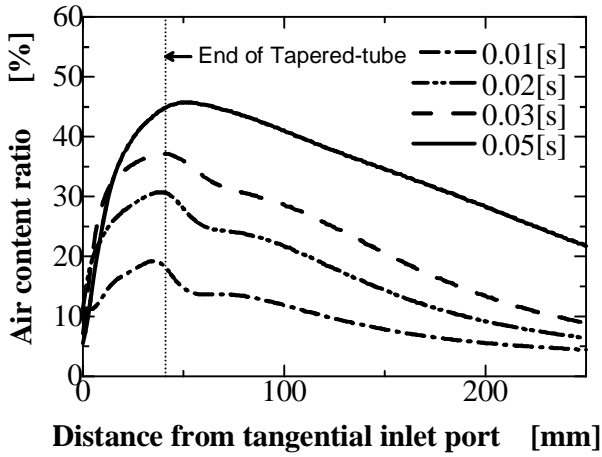


Fig.5 Air Particle Content along Central Axis

4.2 流入口部の改良

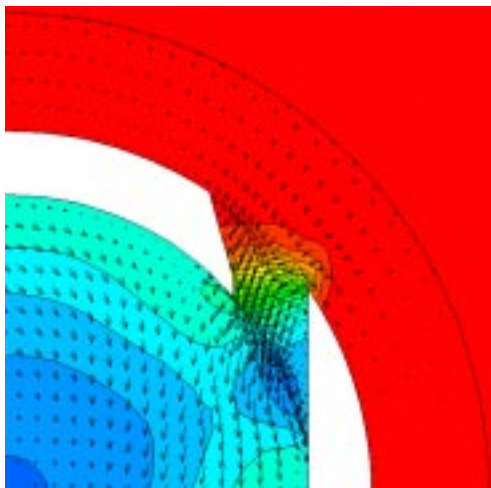
テーパ管路流入口部の形状は、テーパ管路内の旋回流れの挙動に影響があり、気泡除去効率にも影響をおよぼす。ここでは従来型の流入口部形状と流入口部の長さを延長した改良型形状により、流速と圧力分布を比較した。

Fig.6(a)は従来型の流入口を含む $x-y$ 平面内の解析結果である。各格子点における流速値の x, y 成分から求めた流入口部の中心を含む流入円筒部 $x-y$ 平面の流速ベクトルと圧力の等高線表示で示してある。圧力は濃く表示されている部分がより圧力の低い部分である。外周から流入口部を通してほぼ接線方向で流入する流れにより、強い旋回流が形成され、また中心付近の圧力が周りに比べ低くなっている様子がわかる。しかし、この従来型では流入口長さが短いため、外周部からの影響により小さな渦が形成され油の接線方向からの流入をさまたげている。

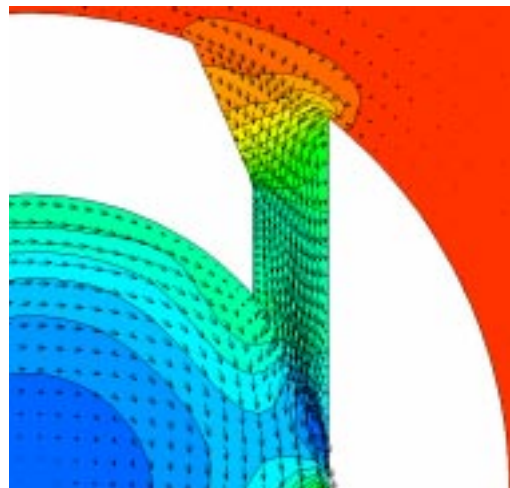
Fig.6(b)は、この点を改善するために流入口を延長した改良型の解析結果である。流入口部の最大流速は、従来型の $6[m/s]$ に比べて $8[m/s]$ に増大し、また、流入口に存在した渦の影響がほぼなくなったことによって、より接線方向に近い流入が確保され、従来型に比べより強い旋回流が形成されることが確認された。

Fig.7は従来型と改良型の中心軸圧力分布の比較である。圧力は流入口から $250mm$ 下流の小口径管路部出口中心軸上の圧力を基準にとり、流入口部から下流に向かって差圧で示した。圧力の極小となる点がテーパ管路部の終わり付近に存在し、その後、圧力が回復して、上流側より下流側の方が圧力の高い領域が現れている。この圧力の逆勾配により、中心軸付近に集まった気泡が、下流へと押し流されることなく、上流側の放気弁へ効果的に抜けるものと考えられる。

従来型と比較して改良型では、流入口からの流速が速くなったことと、流入口部付近の渦の影響が小さくなったことにより、圧力の極小値も下がり、圧力の逆勾配も大きくなってきている。したがって、より効果的に気泡の集合と除去が行われると考えられる。

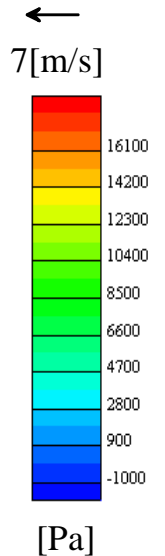


(a) Conventional Type



(b) Improved Type

Fig.6 Magnified Detail Drawing of Velocity Profile around Tangential Inlet Ports



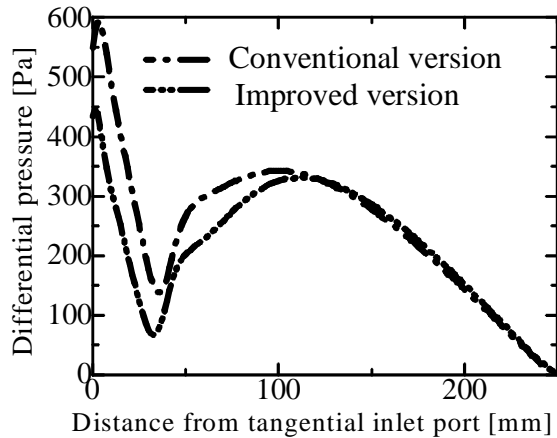


Fig.7 Pressure Distributions along Central Axis

5. おわりに

本報では、気泡粒子を含む二相流の数値解析により気泡除去装置内の気泡粒子の挙動を明らかにした。また、流入口部の形状の違いによる旋回流れの挙動を明らかにし、流入口部の形状を工夫することにより、旋回流れとテーパ管路部を組み合わせた簡易な仕組みで、より効率のよい油中気泡の除去が可能であることを定量的に説明することができた。今後は、形状パラメータの最適化を行う必要がある。また、表面張力を考慮した気泡の数値解析や油以外の異なる粘度の流体や非ニュートン流体を

対象にした数値解析により、気泡除去装置の有効性を検証する予定である。

参考文献

- [1] 矢野：発展が期待される液体中気泡除去装置の開発，三菱石油技術資料，No.76,117/126, 1991
- [2] 鈴木：気泡除去装置，油圧と空気圧，25-3，340/345, 1995
- [3] Backe, Lipphardt: Influence of the Dispersed Air on the Pressure, CI Mech. Eng., C97/76, 77/84, 1976
- [4] 鈴木，松井，持丸：旋回流利用による気泡除去，油圧と空気圧，19-6，499/502, 1988
- [5] 鈴木，横田：旋回流による気泡除去（第2報 テーパー形による性能向上），油圧と空気圧，25-4，543/548, 1995
- [6] 鈴木，田中，他：気泡除去装置を用いた油圧システムの特長改善，秋季油空圧講演論文集，37/40，1996
- [7] Suzuki,S., Tanaka,Y., Yokota,S.: Bubble Elimination Device in Hydraulic Systems, ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, FPST-Vol.4/DSC-Vol.63, 131/135, 1997
- [8] 山本，田中，他：気泡除去装置内の流れ解析，春季油空圧講演論文集，1/3，1998
- [9] 田中，山本，新井，鈴木：気泡除去装置内旋回流れの数値解析，法政大学計算科学研究センター研究報告，第11号，5/9，1998.

キーワード.

数値解析、油圧、旋回流れ、気泡、二相流

Summary.

**Numerical Analysis of Swirl Flow in Bubble Elimination Device
(Performance Evaluation of Bubble Elimination)**

Hikofumi Yamamoto, Yutaka Tanaka, Kazuyoshi Arai
Department of Mechanical Engineering, Hosei University, Tokyo Japan
Ryushi Suzuki
Opus System Inc., Tokyo Japan

Bubbles in working fluids greatly influence the performance of fluid power systems. Recently, one of the authors has developed a novel device for bubble elimination capable of eliminating bubbles and decreasing dissolved gases using swirl flow. This device is called the "Bubble Eliminator". Using the bubble eliminator will enable the fluid power system to perform better. In this paper performance evaluation of a bubble eliminator is investigated through numerical analysis of the swirling flow in the device. The swirl flow pattern and pressure distribution in the bubble eliminator are calculated by a three-dimensional numerical analysis for both single-phase and multi-phase flow.

Keywords.

Numerical Analysis, Hydraulics, Swirling Flow, Bubble Elimination, Two-Phase Flow