

CFD解析を用いた気泡分離除去装置の性能評価

高見澤, 諒 / TANAKA, Yutaka / TAKAMIZAWA, Ryo / SAKAMA, Sayako / 田中, 豊 / 坂間, 清子

(出版者 / Publisher)

法政大学情報メディア教育研究センター

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学情報メディア教育研究センター研究報告

(巻 / Volume)

34

(開始ページ / Start Page)

82

(終了ページ / End Page)

86

(発行年 / Year)

2019-07-18

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00022808>

CFD 解析を用いた気泡分離除去装置の性能評価

Performance Evaluation for Bubble Eliminator with CFD

坂間 清子¹⁾ 高見澤 諒²⁾ 田中 豊³⁾

Sayako Sakama, Ryo Takamizawa, and Yutaka Tanaka

¹⁾ 産業技術総合研究所 情報・人間工学領域 知能システム研究部門

²⁾ 法政大学大学院デザイン工学研究科システムデザイン専攻

³⁾ 法政大学デザイン工学部

Air bubbles in working fluids greatly influence the performance of hydraulic systems. The bubble in working hydraulic fluids may cause major problems because of bulk modulus change, cavitation and aeration inception, degradation of lubrication, noise generation, oil temperature rise, and deterioration of oil quality. An active “bubble eliminator” that uses swirl flow to remove air bubbles can be used to mitigate these problems. The purpose of this paper is to evaluate an adequate computational model and mesh with CFD analysis according to the numerical simulation of the bubble eliminator. It has been numerically verified that the performance of the bubble removal for the bubble eliminator depends on particle sizes of bubbles by Euler multiphase model. It is also confirmed that the numerical results have good agreement with experimental results.

Keywords : Bubble eliminator, CFD, Computational model, Performance of bubble removal

1. はじめに

建設機械や自動車などの油圧システムの動力伝達媒体として用いられる作動油中には気泡が混入しており、油の体積弾性係数の低下にともなう応答遅れや油の劣化促進、振動騒音の原因などシステムの特性に大きな影響をおよぼすことが知られている。

著者ら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分離除去装置 [1, 2] を用いて、これらの課題を解決できることを示した。この装置の気泡除去性能は圧力や流量、粘度や気泡径などの条件により大きく影響を受けるため、条件にあわせた最適な形状パラメータに調整する必要がある、性能の良い装置の設計に流れの数値解析 (CFD) を用いることは有効である。

本報では CFD 解析にオイラー混相流モデルを用いて、複数種類の気泡径に対する気泡分離除去装置の性能を評価する。また装置流出側の気泡含有率の CFD 解析結果と実験結果を気泡径の違いで比較し、

CFD 解析の妥当性を評価する。さらに乱流モデルや計算メッシュが CFD 解析の収束性に与える影響を検討する。

2. 気泡分離除去装置と性能評価指標

図 1 に気泡分離除去装置の原理を示す。気泡の混入した油を 2 つの流入部から流入管路部へ接線方向で流入させることで、強い旋回流を発生させ、油と気泡をその比重の違いから分離する。作動油から分離した気泡は装置の中心軸上に集合し、流出口側からわずかな背圧をかけることで、集まった気泡は少量の油と一緒に放気口から排出され、気泡をほとんど含まない油が流出口より流れ出る。

気泡分離除去装置の性能を定量的に評価する指標として、気泡含有率 E_B を以下の式 (1) で定義する。

$$E_B = \frac{Q_{B_o}}{Q_{B_o} + Q_{B_v}} \quad (1)$$

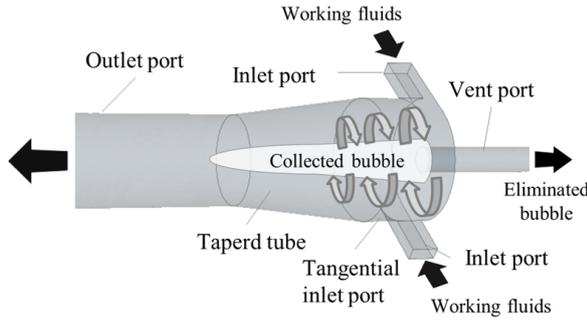


図1 気泡分離除去装置の原理
Figure 1 Principle of bubble eliminator

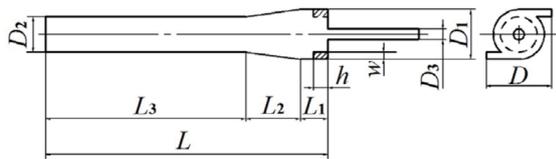


図2 気泡分離除去装置の形状
Figure 2 Geometry of bubble eliminator

表1 気泡分離除去装置の形状パラメータ
Table 1 Dimensions of bubble eliminator

	D	D_1	D_2	D_3	L	L_1	L_2	L_3	w	h
[mm]	20	15	10	1.5	90	10	15	65	1	2

ここで Q_{B_o} は流出口から流出する気泡の体積流量、 Q_{B_v} は放気口から流出する気泡の体積流量である。この気泡含有率 E_B は、装置へ流入した作動油に含まれる気泡に対して流出口側へ流れ出た気泡の割合を表す指標で、気泡分離除去装置の性能評価における重要な指標である。

3. 気泡径の違いによる性能評価

3.1 オイラー混相流による解析

本研究ではCFD解析ソフトウェアSTAR-CCM+を使用して気泡除去装置内の流れを解析した。解析に用いた装置の形状を図2に、形状パラメータを表1に示す。ここで解析の対象とした装置は比較的小形のものである。

流体の条件は、流入流量5 L/min、密度0.792 g/cm³、油温40℃の時の動粘度7.07 mm²/sである。装置に流入する気泡を空気の密度と同等の単一径の粒子と見立て、空気の体積混合率は5%とした。また計算モデルは気液二相のオイラー混相流モデル、乱流モデルには $k-\epsilon$ 乱流モデルを使用した。

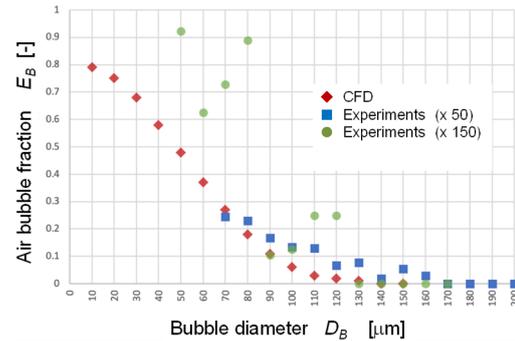


図3 気泡径に対する気泡含有率
Figure 3 Bubble entrained ratio according to bubble size

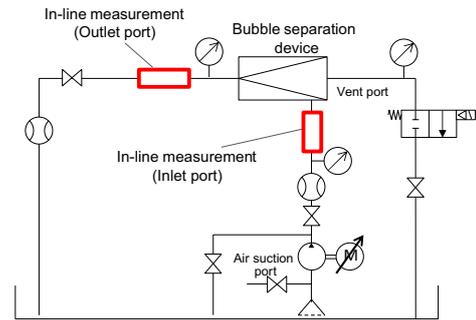


図4 実験用油圧循環回路
Figure 4 Experimental hydraulic circuit

オイラー混相流モデルでは単一粒子径を分散相とした解析ができる。混入する気泡径 D_B を0.01 mmから0.15 mmまで0.01 mm刻みで変化させて流れ解析を行い、性能を評価した。

図3に気泡径 D_B に対する気泡含有率 E_B の数値解析結果を◆で示す。 D_B が0.1 mm以上の大きな気泡は装置の中心軸付近に集合して放気側へ分離除去されるため、流出側の気泡含有率は低い。しかし本条件では、小さい気泡はテーパ管路部付近の中心に集合できず、流出側に流れ出てしまい、流出側の気泡含有率 E_B は気泡径が小さくなるにしたがって上昇した。なお、図3中には次節で説明する実験結果についても合わせてプロットしている。

3.2 気泡径分布の測定実験

実際の作動油中の気泡は単一径ということは無く、ある分布を持った複数種類の気泡径が混在している。

CFD解析に用いたものと同じ形状の気泡分離除去装置を用いて実際の油圧循環回路を構成し、流入側の気泡径分布と流出側の気泡径分布を測定した。装置を通過する流量は3.14 L/minである。

図4に実験用油圧回路の構成を示す。ポンプ吸い

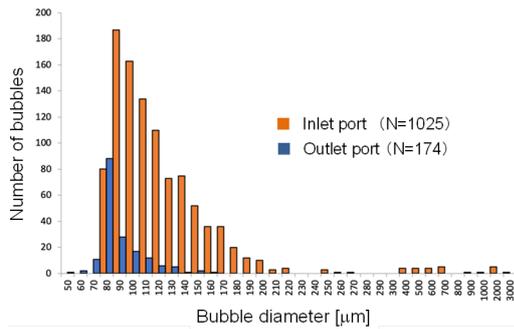


図5 気泡径分布の比較 (倍率 50 倍)

Figure 5 Comparison of distribution for bubble diameter (50 magnifications)

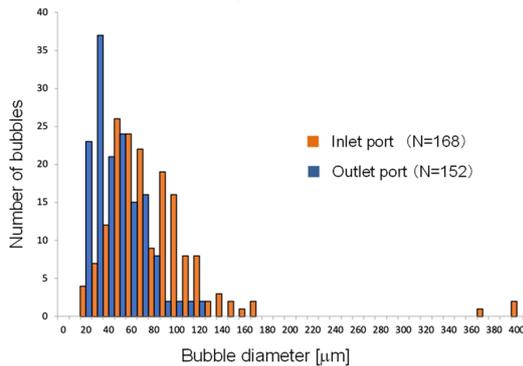


図6 気泡径分布の比較 (倍率 150 倍)

Figure 6 Comparison of distribution for bubble diameter (150 magnifications)

込み側から空気を混入させた後、気泡分離除去装置を通過させることで装置の選択性能に応じた気泡径の気泡を分離する。また気泡分離装置の流入側と流出側にインラインで気泡径を測定する測定部を設ける。この測定部は透明なアクリル円管と油槽で構成されている。アクリル円管は内部を流れる油と同じ油で満たされた油槽に浸され、油とアクリル円管の屈折率の違いによる画像の歪が補正される。デジタルマイクロスコープを用いて、測定部管路内径 19 mm に対して測定範囲 (画角) 5.31×7.14 mm の範囲を径方向に撮影深度を変化させ 1 回に 3 ~ 5 枚を撮影し、合計 100 枚の画像から気泡径ごとの気泡数を集計した。

図5は測定した油中気泡径分布の結果である。流入測定部で観察測定された気泡が1025個に対して、流出部で観察測定された気泡は174個と大幅に気泡量が減少している。また装置流入部の気泡径は主に $\phi 50 \mu\text{m} \sim 3 \text{ mm}$ までの広範囲に分布しているのに対し、流出部の気泡径の分布範囲は $\phi 50 \mu\text{m} \sim 160 \mu\text{m}$ に絞られている。なお本実験の測定倍率は50倍で、 $\phi 50 \mu\text{m}$ より小さな気泡は測定できていない。

図6に測定倍率 150 倍の測定結果を示す。測定倍率 150 倍では、流速が速いため測定精度は悪いが、

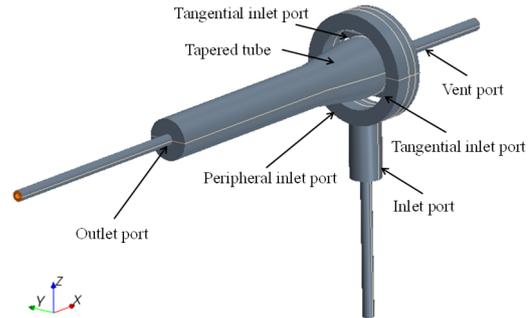


図7 気泡分離除去装置の原理

Figure 7 Overall bubble eliminating device

気泡径分布は 50 倍の時と同様に、小さな気泡径に絞られた狭い分布となっている。

3.3 数値解析と実験結果の比較

前出の図3のCFD解析結果の図中に、前節の実験結果から装置流出側の気泡含有率を気泡径毎に計算し、その割合を50倍の測定結果を \bullet で、150倍を \circ でそれぞれプロットして示した。■実験結果では測●倍率が150倍の結果で径の小さな気泡についてばらつきがみられるものの、気泡径に対する含有率の変化の様子は同様の傾向を示していることがわかり、CFD解析結果の妥当性を確認することができた。

4. モデルやメッシュが解析におよぼす影響

4.1 乱流モデルによる影響

図7に外周リング部を加えた全体の装置形状を示す。実際の気泡分離除去装置は、旋回流を発生させ気泡を分離するテーパ管路部と、流入管路部に油を流し入れるための外周リング部の大きく2つの部分に分けられる。気泡の混入した油を外周リング部の2つの流入口からテーパ管路部へ接線方向で流入させることで強い旋回流を発生させ、油と気泡をその比重の違いから分離する。作動油から分離された気泡は装置の中心軸上に集合し、流出口側に背圧をかけることで放気口から除去される。

気泡分離除去装置の設計にあたり、装置全体の圧力損失を定量的に把握することは重要である。その際、装置のリング外周部を付け加えたCFD解析を実施する必要がある。しかし外周部を追加したCFD解析では、メッシュ数が膨大になり、より流れが複雑となるため計算の収束性も悪く、条件によっては収束しない。ここでは計算に適した乱流モデルの選定について検討する。

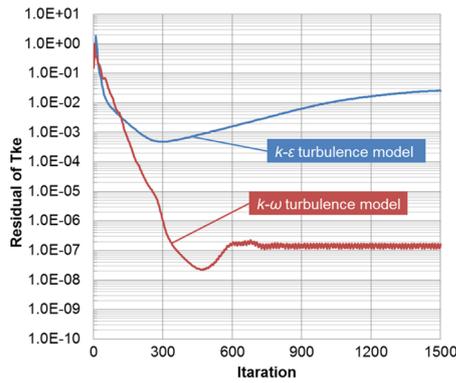


図8 乱流モデルの違いによる収束性の比較

Figure 8 Relationship between iteration and residual for $k-\epsilon$ and $k-\omega$ turbulence models

流体の条件は、流入流量 5 L/min、密度 0.85 g/cm³、油温 40 °C の時の動粘度 32 mm²/s である。また装置の形状は表 1 と同じで、直径 30 mm の外周部を追加接続して解析した。乱流モデルには、これまでの解析で使用してきた $k-\epsilon$ 乱流モデルと新たに $k-\omega$ 乱流モデルを用いた。なおここでは、計算の収束性のみに着目するため、油のみの単相流解析を行った。

図 8 に二つの乱流モデルによる計算の収束性を示す。図の横軸は繰り返し計算の回数、縦軸は乱流運動エネルギー方程式の残差である。この残差が小さいほど、繰り返し計算は収束していると評価できる。 $k-\epsilon$ 乱流モデルでは、繰り返し計算で残差が少しずつ大きくなり、発散傾向にある。一方、 $k-\omega$ 乱流モデルを用いると繰り返し計算が 600 回を過ぎると残差が変化せず、計算が収束していることがわかる。

4.2 計算メッシュによる影響

CFD 解析を実施するにあたり、解析結果の精度に加え、収束性の時間対効果が求められる。特に外周リング部が付属した気泡分離除去装置の流れ解析を実行すると、計算結果を得るまでに長い時間を必要とする。ここでは計算メッシュが計算の収束時間に与える影響について検討する。

これまでの CFD 解析では、一般に、優れた収束性を持つポリヘドラルメッシュと呼ばれる多面体状の格子系を用いてきた。しかし管路内流れのような場合、一部に等間隔格子状の押し出しメッシュを用いることで収束時間が改善した事例も有る。本研究では、図 9 に示すような装置の流出口側と放気口側の出口境界に等間隔格子の押し出しメッシュを用いることで、計算の収束時間を評価した。

流体や装置の形状は前節 4.1 の条件と同じとし、乱流モデルには $k-\omega$ 乱流モデルを用いた。図 10 に

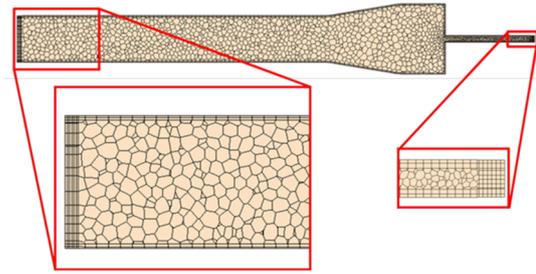


図9 押し出しメッシュによる計算格子

Figure 9 Computational mesh with extrusion model

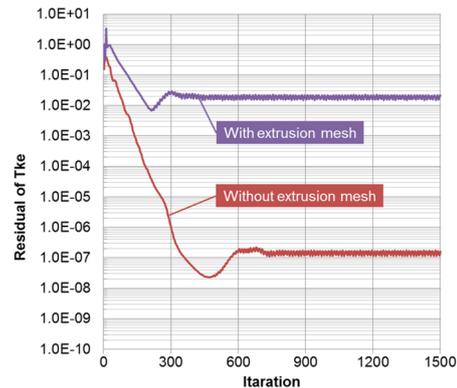


図10 計算格子の違いによる収束性の比較

Figure 10 Relationship between iteration and residual for extrusion mesh model

計算の収束性の比較結果を示す。押し出しメッシュを用いた計算格子モデルによる解析は、残差は大きいものの、繰り返し計算回数が 400 回程度で収束していることがわかる。一方、押し出しメッシュを用いないモデルでは、十分な収束までに 2 倍以上の時間を要し、押し出しメッシュの有効性が確認された。

5. おわりに

本報では CFD 解析にオイラー混相流モデルを用いて、複数種類の気泡径に対する気泡分離除去装置の性能を評価した。また実験結果と CFD 解析結果の比較から、解析結果の妥当性を確認した。さらに気泡除去装置の CFD 解析における計算モデルや計算メッシュの影響を検討した。性能の良い装置の設計に CFD 解析を用いることは有効であり、条件に応じた適切な計算モデルやメッシュの選定が重要である。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 26420086, 25・9669, 18K03916 の助成を受けて実施された。また本研究

の CFD 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。

参考文献

- [1] 坂間清子, 田中豊, 鈴木隆司, “気泡除去装置の設計と評価に関する研究 (第 1 報 放気口径の選定)”, 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol.44, No.2, pp.43-48, 2013.
- [2] 坂間清子, 田中豊, 鈴木隆司, “気泡除去装置の設計と評価に関する研究 (第 2 報 スパイラル係数を用いた放気口径と流出口径の選定)”, 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol.45, No.5, pp.79-84, 2014.