

作動油に含有する気泡量の高精度制御に関する研究

田中, 豊 / TANAKA, Yutaka

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

科学研究費助成事業 研究成果報告書

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

9

(発行年 / Year)

2021-05-21

令和 3 年 5 月 21 日現在

機関番号：32675

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03916

研究課題名（和文）作動油に含有する気泡量の高精度制御に関する研究

研究課題名（英文）High Precision Control of Air Bubble Content in Working Oil

研究代表者

田中 豊（Tanaka, Yutaka）

法政大学・デザイン工学部・教授

研究者番号：70179795

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：油圧動力伝達システムの作動油に気泡が混入すると、システムの動的特性の劣化、要素機器の壊食、作動油劣化の促進、放熱の減少、騒音振動の発生等、悪影響をおよぼす。本研究では、作動油の旋回流による気泡含有量の高精度制御方法を提案・開発した。旋回流を用いた気泡分離装置から流出する作動油中の気泡の量は、装置の放気側の弁の開閉を制御することによって調整される。気泡分離装置の出力ポートからの気泡含有量は、放気弁の開放時間によって正確に制御された。提案手法の妥当性は実験的および数値的に検証された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

油圧動力伝達システムの作動油に気泡が混入すると油の剛性を低下させ、振動・騒音や機器破損の原因となる。しかし作動油中にどの程度の気泡量が含有すると機器の性能を損ない故障に至るかの定量的な指標は明らかとなっていない。これは現状では、作動油中の気泡含有量を実時間で精度よく測定したり、調整したりすることが極めて難しいためである。申請者が本研究で独自に開発した作動油中の気泡含有量を高精度で任意に調整できる手法を用いて、気泡を含む作動油が原因となる機器の劣化や故障に至る定量的な評価が可能となり、その社会的意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：Mixing of air bubbles in the hydraulic oil in hydraulic power transmission systems causes deterioration of the dynamic characteristics of the system, erosion of component, accelerated deterioration of the hydraulic oil, reduction of heat dissipation, and vibration noise. In this research, we proposed and developed a method for high precision control of air bubble content by a swirling flow of working oil. The amount of air bubbles in the oil flowing out of a bubble separation device is adjusted by controlling the opening and closing of the valve on a vent port of the device. The air bubble content from an output port of the bubble separation device was precisely controlled by the opening time of the vent valve. The validity of the proposed method was experimentally and numerically verified.

研究分野：機械要素設計

キーワード：気泡 作動油 油圧動力伝達システム 油の剛性 気泡分離装置 旋回流

作動油に含有する気泡量の高精度制御に関する研究
High Precision Control of Air Bubble Content in Working Oil

1. 研究開始当初の背景

油圧作動油には、大気圧下で数%の空気が溶解しており、油圧回路内で局所的に圧力が低下すると、溶解していた空気が析出する、いわゆるキャビテーションが発生する。キャビテーションにより析出した小さな気泡は作動油中に一定時間停留し、再び溶解したり、浮上して消泡したりするには時間を要する。また油圧回路やタンク自体が振動することによる巻き込み（スロッシング）によっても空気は作動油表面から混入する。したがって空気の混入機会が多い自動車の CVT 用油圧回路内の作動油などでは、10%から多いときでは 40%以上の気泡が混入しているといわれており、こうした作動油中の気泡（空気）は、機器のトラブルの原因となる油中の固形微粒子や水分に継ぐ「第3のコンタミネーション（汚染物）」とも呼ばれている。

作動油中に含まれる気泡は作動油やシステムの特性に悪影響をおよぼす。例えば、動力伝達を行う作動油の寿命を左右する主原因は、作動油中に存在する空気による酸化と熱的な劣化である。作動油には、摩耗防止と酸化防止の役目を担うジアルキルジチオリン酸亜鉛(Zn-DTP)という添加剤が使用されることが多い。しかしこうした添加剤を含む作動油は、熱的安定性に劣ることが指摘されており、Zn-DTP の熱分解によるスラッジが生成しやすくなる。実機の運転パターンを想定して作動油に空気を吹き込みながら実施したポンプ試験では、400 時間の連続稼働により 100 ml 中に 35 mg のスラッジの生成を確認したことが報告されている（松山、出光トライボレビュー、No.22, pp.1345 (1996)）。

また大気圧下の室温で作動油中に存在する気泡が油圧動力を発生させるためのポンプ内で加圧されると、気泡の温度は急激に上昇し、45 MPa の高圧下では気泡（空気）の温度は 1400°Cにも達する。この熱はすべて周囲の油に伝わり作動油の熱的劣化が進む。気泡を含む作動油の劣化の様子を、酸化防止剤等の添加剤を用いないベース油を用いて測定した実験では、稼働時間が増えるに従って全酸価数（劣化度合いの指標）が上昇し、作動油の劣化が促進されること、また空気の混入比が大きいほど、酸化劣化の進み方が速いことが報告されている（Backe, Lipphardt, CI Mech. Eng. C97/76, 77/84 (1976)）。

さらに作動油中の気泡は、いわゆるスポンジ効果により油の剛性を低下させ、システムの応答性を損ない、振動・騒音や機器破損の原因ともなる。過去の研究では、積極的に油中の気泡含有量を低下させると、結果として作動油中への溶解空気の量を減らすことができるため、キャビテーションの発生量を抑制できることが確かめられている。油圧要素機器の故障の主原因の一つはキャビテーションによる壊食であることから、作動油中の気泡含有量を低下させることは機器の故障を防ぐことにもつながる。

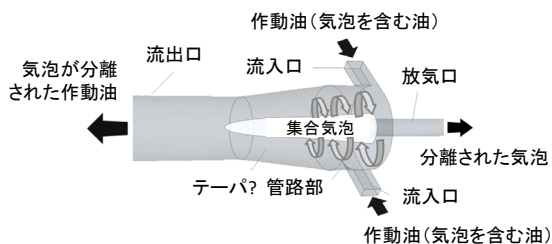
しかしながら、作動油中にどの程度の気泡量が含有していると機器の性能を損ない故障に至るかの定量的な指標は明らかとなっていない。これは現状では、作動油中の気泡含有量を実時間で精度よく測定したり、調整したりすることが極めて難しいためである。

一方、従来までの油中気泡の除去は油タンクからの自然放気や作動油への消泡剤の添加など消極的な方策が主な技術であった。しかし最近の自動車では、燃費向上のためエンジンを停止も含めた間欠運転させる頻度が増大し、エンジンに接続される CVT 用油圧ポンプにも頻繁な起動停止が要求されるため、作動油中の気泡が油圧回路の各所で停留・合体し、起動初期の騒音や油圧システムの動作の不安定性の原因ともなり、油中の気泡含有量による影響の解明やその対策が急務となっている。

2. 研究の目的

本研究課題では、これまでに申請者らが独自に開発した気泡分離除去装置による油中気泡の分離除去技術と作動油中の含有気泡量の測定技術を組み合わせ、作動油中の気泡含有量を体積含有率 1 ~ 40 %の範囲で任意に調整できる「高精度な気泡量制御システム」を実現することを目的とした。

図 1 は旋回流を用いて作動油中に分散している気泡を集積合体させ、簡易な機構で分離除去する「気泡分離除去装置」の構造原理図である。この装置は、作動油中に分散する気泡を旋回流により、およそ 10 ms の極めて短い時間で中心軸上に集合・合体させ、わずかな圧力差により放気口より分離することができる。作動油から分離された気泡が集合した空気は、放気口を通して油タンク



接線方向で流入した気泡を含む油は管路内で旋回流を形成し、中心軸付近に気泡が油より分離して集合する。集合した気泡は背圧により自然に右側放気口より、気泡の除去された油は左側流出口より流出する。

図 1 気泡分離除去装置の構造原理図

クなどに戻されるため、この放気口の下流に高速のオンオフ電磁弁を組み込み、その開閉時間を制御することにより、油から分離除去する気泡量を任意に精度よく調整することができる。この原理を利用すれば、装置の流出側における作動油中の気泡含有量を任意に高精度で制御できるシステムが実現できる。

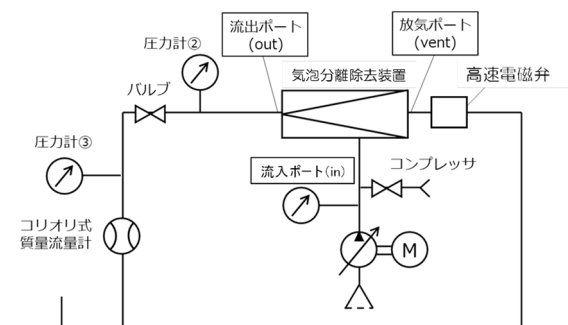
この作動油中の気泡含有量の高精度制御システムが実現されれば、これまで不明確であった作動油の気泡含有量と油圧要素機器の故障頻度の関係や、キャビテーション壊食と機器の故障との因果関係を定量的に明らかにできる。またポンプや制御弁などの各種油圧要素に対する作動油の気泡含有量のベンチ試験条件の精密な設定が行えるため、油中の気泡含有量とトラブルとの因果関係の詳細を定量的に明らかにすることができる。また油中気泡が油圧動力伝達システムに与える影響を定量的に把握することが可能となり、要素機器の開発やシステムの安定性の向上にもつながる。

3. 研究の方法

これまでの流れの数値解析の研究成果を踏まえ、気泡分離除去装置による流れの数値解析モデルを構築し、作動油や気泡に見立てた粒径や気泡量の異なる粒子流れの数値解析を実施して、装置の物理パラメータや流動条件が油中気泡の調整制御性能に与える影響を数値解析的に明らかにした。また対象となる流量範囲と気泡含有率範囲に最適な気泡分離除去装置の物理パラメータを決定した。

図2に示す油中気泡含有量の調整制御実験用油圧回路を設計し、放気口の開閉に高速電磁弁を設置した構造を持つシースルーの気泡分離除去装置および油圧回路配管系を透明アクリルで製作した。可視化用油圧回路および気泡分離除去回路から成る作動油循環システムを対象に、作動油中に分散した気泡が流入する気泡分離除去回路の流入側ラインと、わずかな作動油を含む分離除去された気泡が流出する放気側ラインや流出側の流れの様子、油流量や気泡量などを測定することで、油中気泡の含有量の調整制御性能を実験的に明らかにした。

システム内の油中気泡の含有量についての調整精度を評価する。特に重要となるのは放気口に新たに設ける高速電磁弁の開閉時間と流出側の気泡含有量の関係である。これらを定量的に明らかにし、種々の条件による装置の精度検証を行い、高精度な気泡量制御装置の設計手法の確立を目指した。



流入側からコンプレッサで強制的に油中に空気を混入させ、気泡分離除去装置により混入気泡の分離量を放気側の電磁弁の開閉で制御し、流出側の油中気泡量を調整する。

図2 油中気泡量の調整制御実験用油圧回路

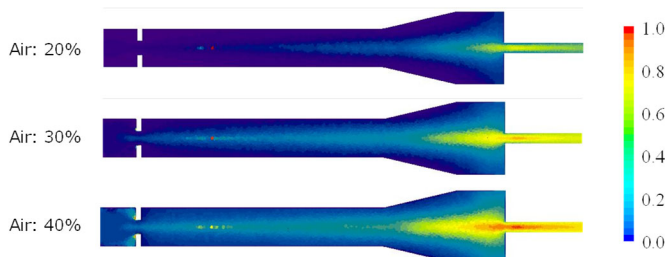
4. 研究成果

4-1 流れの数値解析

本研究で開発する手法の目標である気泡含有量が体積含有率で1～40%の範囲で気泡含有量を調整するためには、気泡分離除去装置の気泡分離性能が、この気泡含有率の範囲で十分に確保されている必要がある。対象とした実験条件である、流量30 L/min、気泡粒子径0.1 mm、油の密度0.85 g/cm³、油の動粘度9.19 mm²/s、気泡含有率が20%、30%、40%の条件で流れの数値解析を実施し、気泡分離除去装置の最適な物理パラメータを選定した。

図3に流れの数値解析結果の一例を示す。気泡含有率が20%、30%、40%の条件における気泡分離除去装置内の気泡の体積分率をカラーコードで示している。いずれの条件でも気泡が放気側から分離除去されていることが確認された。

こうした流れの数値解析の結果、実験に用いる気泡分離除去装置形状の最適な物理パラメータは、流入口の幅と高さがそれぞれ4.35 mm × 2.18 mm、放気口径が4.4 mmの時に、気泡含有率が20%、30%、40%で分離除去率がそれぞれ99.8%、94.8%、90.2%の高い性能を確保できることが明らかとなった。この結果を実験用気泡分離除去装置の設計パラメータとして採用した。

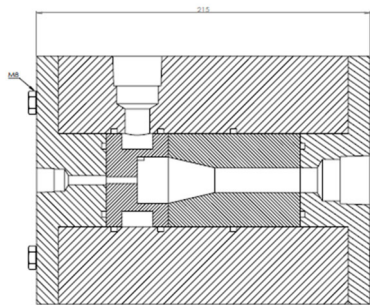


気泡含有率が20%、30%、40%の条件における流れの数値解析結果で、放気側の赤や橙、黄色の範囲の気泡が集中して分布していることがわかる。

図3 気泡分離除去装置内の気泡分布の数値解析結果

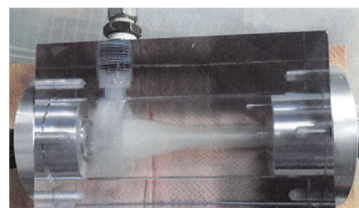
4-2 実験用気泡分離除去装置

図4に実験に用いるために設計製作した気泡分離除去装置を示す。流入口径や流出口径、放気口径などの形状パラメータを実験条件に応じて調整できるように、装置を分割して設計し、筐体内に挿入して両側から固定することで一体化する構造とした。また流れの様子を可視化できるようにするため、外周筐体と挿入部品は透明アクリルで製作した。



装置を分割して設計し、筐体内に挿入して両側から固定することで一体化する構造とした。

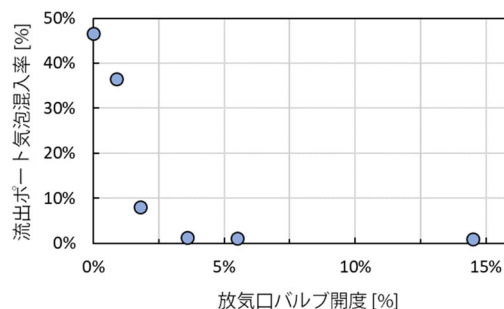
(a) 装置断面図



流れの様子を可視化できるようにするため、外周筐体と挿入部品は透明アクリルで製作した。

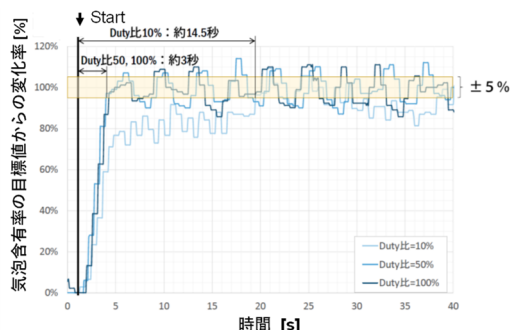
(b) 装置写真

図4 設計製作した気泡分離除去装置



放気側に手で開閉を調整するニードル弁を設置し、手動によるバルブ開度に対する流出側の気泡混入率を下流に設置したコリオリ式流量計の密度から推定した。

図5 放気バルブの手動調整結果



流入側の気泡含有率をおよそ28%、流出側の気泡含有率の目標値を18%に設定し、放気側オンオフ電磁弁の開閉周期を1sとしてフィードバック制御を行った。

図6 気泡含有率の自動調整結果

4-3 実験結果

図5は電磁弁による放気側の調整実験に先立ち、放気側に手で開閉を調整するニードル弁を設置し、バルブ開度に対する流出側下流に設置したコリオリ式流量計で密度から気泡混入率を推定した結果である。使用したバルブ仕様の都合で、バルブの開度による放気口の流量の精密な調整が難しく、放気口のバルブをわずかに開くだけで気泡分離装置の気泡除去率が大きく向上してしまい、結果として流出側の気泡含有率が低下した。しかし、放気側に設置したバルブの開度を調整することで、流出側の気泡量を調整できることが確認された。

次に油中の気泡含有量の精密な制御を実現するため、気泡分離除去装置の放気側にオンオフ電磁弁を設置し、気泡含有率の目標値に対して、その開閉時間を制御することで装置の流出側下流における気泡含有率の応答性を測定した。装置の流入側にはコリオリ流量計を設置して流入気泡量を密度から推定し、装置の流出側には気泡含有率センサを設置し、センサの応答性に遅れはあるもののオンラインで装置流出側の気泡含有率を測定し、目標値に対するフィードバック制御によりオンオフ電磁弁の開閉をPWM制御した。

図6に気泡含有率の調整結果の一例を示す。流入側の気泡含有率はおよそ28%、流出側の気泡含有率の目標値を18%に設定し、オンオフ電磁弁を開閉する周期は1s、デューティー比を10%、50%、100%に設定し、その調整の様子を測定した結果である。縦軸は目標値との相対誤差、横軸は時間である。波形が階段状になっているのは、下流側の気泡含有率センサの応答遅れによるものである。デューティー比が小さい条件では調整の応答性は低下する。一方、デューティー比が大きい条件では調整の安定性が低下する傾向にある。また調整の結果は±5%程度の範囲内に収まっていることが確かめられた。

4-4 研究成果のまとめ

油中気泡の分離除去技術を使って、作動油中の含有気泡量を当初の目標である体積含有率1~40%の範囲を±1%の精度で調整できる高精度な気泡量制御システム実現への目途がついた。なお本手法は研究協力者の企業との共同出願により「気泡含有量調整システム」として2019年に特許出願(特願2019-239249)を行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Sayako Sakama, Yuki Kitazawa, Yoshiki Sugawara, Yutaka Tanaka	4. 巻 3
2. 論文標題 Estimating the Air Volume Fraction in Hydraulic Oil by Measuring the Effective Bulk Modulus	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 11th IFK International Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 79-85
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18154/RWTH-2018-224357	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 2件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Yutaka TANAKA
2. 発表標題 Bubble elimination technology toward high performance of hydraulic systems
3. 学会等名 The 8th International Conference on Fluid Power and Mechatronics (FPM2019)（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryo Takamizawa, Ryosuke Funachi, Sayako Sakama, Yutaka Tanaka
2. 発表標題 Performance Evaluation for Bubble Eliminator with CFD -Effect of Computational Model and Mesh-
3. 学会等名 The 8th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology (ICMDT2019)（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上西幸雄, 田中豊
2. 発表標題 油圧装置の気泡や水などの異物循環除去システム
3. 学会等名 2019年春季フルードパワーシステム講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 塩田秀人, 北澤勇氣, 坂間清子, 菅原佳城, 田中豊
2. 発表標題 作動油と空気を動力伝達媒体とするアクチュエータの制御に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会2019年度年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高見澤 諒, 坂間 清子, 田中 豊
2. 発表標題 気泡分離装置による油中気泡径の選択的分離に関する研究
3. 学会等名 2019年秋季フルードパワーシステム講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坂間 清子, 田中 豊, 菅原 佳城
2. 発表標題 油の等価体積弾性係数の測定による気泡含有率の推定
3. 学会等名 第16回「運動と振動の制御」シンポジウム (MoViC2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yutaka Tanaka
2. 発表標題 Air Bubble Separation from Hydraulic Oils for Performance Improvement of Fluid Power Systems
3. 学会等名 第10回中国全国流体制御学会(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高見澤 諒, 舟知 亮祐, 坂間 清子, 田中 豊
2. 発表標題 CFDを用いた気泡除去装置の性能評価(計算モデルと計算格子の影響)
3. 学会等名 平成30年秋季フルードパワーシステム講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 塩田秀人, 坂間清子, 菅原佳城, 田中 豊
2. 発表標題 気泡の混入による作動油の体積弾性係数の変化の実験的評価
3. 学会等名 平成30年秋季フルードパワーシステム講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 北澤勇氣, 坂間清子, 菅原佳城, 田中 豊
2. 発表標題 気泡の混入による油圧システムにおける応答性低下とサージ抑制に関する研究
3. 学会等名 平成30年秋季フルードパワーシステム講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田中豊, 岸優介, 駒屋耕大, 坂間清子
2. 発表標題 気泡を含む油の加圧減圧過程における挙動
3. 学会等名 2020年秋季フルードパワーシステム講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yutaka Tanaka, Yusuke Kishi, Sayako Sakama
2. 発表標題 Selective Separation of Air Bubbles from Working Oil by Bubble Elimination Device
3. 学会等名 The 10th International Conference on Fluid Power Transmission and Control (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 気泡含有量調整システム	発明者 北村佳彬, 伊藤隆, 小寺康大, 田中豊, 坂間清子	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-239249	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

法政大学大学院先端モーションシミュレータ技術研究所 (HAMS) http://hams.ws.hosei.ac.jp/index.html

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	坂間 清子 (Sakama Sayako) (70773539)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・研究員 (82626)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------