

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 5 日現在

機関番号：32675

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420086

研究課題名(和文) 作動油中の気泡の分離除去による油圧動力伝達システムの高強度化

研究課題名(英文) Elimination of Bubble from Working Oil for Powerful Fluid Power System

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) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、建設機械や自動車、重作業機械等に用いられる油圧による動力伝達システムを高強度化、長寿命化するため、旋回流れを利用した無動力の油中気泡分離除去技術を高性能化し、油圧駆動システムへの気泡混入による動力伝達ロスやキャビテーション騒音、作動油の劣化等を低減出来ることを示した。また流れの数値解析を用いた気泡分離除去装置を中心としたシステムの最適設計により、油圧動力伝達システムの小形化、高圧・高性能化と、トータルメンテナンスコストの極小化を同時に実現した。さらに気泡分離除去装置は油圧システムにおける作動油中の気泡量を制御できることを見出すとともに、新たな油中気泡量の計測手法を提案した。

研究成果の概要(英文)：In hydraulic systems, air bubbles are typically mixed into the oil during system operation because of excitation of the oil reservoir, the occurrence of cavitation, and other factors. In recent years especially, the operating conditions of hydraulic systems have become more severe because of the demands for further downsizing and increased output power; thus, air bubbles are easily mixed into the oil. These air bubbles cause many problems to hydraulic systems, such as the acceleration of oil degradation, a decrease in lubricity, a reduction in thermal conductivity, cavitation erosion, and higher noise emissions. In this research project, we solve these problems by removing air bubbles from the oil using an active bubble elimination device that uses a swirl flow to eliminate air bubbles from hydraulic oils. We can control the air content in the oil by bubble elimination device. We also propose the inexpensive and high-precision sensor determining the bubble content in oil.

研究分野：フルードパワー工学

キーワード：油圧 気泡 キャビテーション 流れの可視化 CFD 旋回流 気泡量計測 体積弾性係数

## 1. 研究開始当初の背景

建設機械や航空機，自動車，重作業機械の動力伝達を担う油圧駆動システムにおいて，高強度化（パワーアップ）および小形化のためには，システムの高圧化が有効である．例えば，建設機械や航空機の動作圧力は，35 MPa から 45 MPa へ高圧化される傾向にある（引用文献）．しかし，通常油圧駆動システムの作動油には，数%～10 数%の空気（気泡）が存在しており，作動油の見かけの剛性が低下し，大幅なエネルギー伝達ロスが発生する．

高圧化に対応して合成油の組成を改良し，作動油自身の剛性を五割以上強化した高剛性作動油の研究開発も進められている（引用文献）．しかし，大気圧下で作動油中には 10 数%の空気が溶解しており，高圧から低圧への圧力の急激な低下にともない，この溶解空気が作動油中に析出してくる．

また，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．しかしこうした作動油は，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 100ml 中 35mg のスラッジの生成を確認したことが報告されている（引用文献）．

さらに，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 にも達する．この熱はすべて周囲の油に伝わり作動油の劣化が進む．Backe ら（引用文献）は，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実験的に測定し，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を報告している．

しかし現在の油圧駆動システムの作動油からの気泡除去方法は，作動油が停留するタンク内で気泡を浮上させて自然放気除去する消極的な方法であり，そのため，油圧動力伝達システムの作動油タンクは，必要以上に大きな容量を必要としている．一方，システムの小型化・高圧化と省エネルギー化の要求にともない，システムのスペースや重量・ランニングコストは制限され，タンク容量と使用作動油量は減少傾向にある．したがって，

次世代の建設機械等に用いられる油圧動力伝達システムでは，積極的な作動油中の気泡の分離除去技術を確立し，システムに搭載することが急務となっている．

研究代表者らは，油圧動力伝達システムの環境負荷を低減することを目的として，旋回流を用いて作動油中に分散している気泡を集積し，簡易な機構で分離除去する「気泡除去装置」の原理を提案・開発し，装置の形状の最適化に取り組んできた．また作動油の物理的パラメータ（温度や粘度、流速や流量、圧力など）に着目して，流れの可視化実験や数値解析を行い，装置単体の性能の向上を図ってきた（引用文献）．平成 22 年度からは，この気泡除去装置を建設機械などの実機に搭載することを想定して，油タンクと気泡除去装置からなる高圧に対応した作動油循環模擬システムを製作し，作動油中の気泡分離除去性能を実験的に検討してきた．

この一連の検討の過程で，気泡除去装置により作動油から分離された，わずかな油を含む気泡を油タンクに戻すために必要な放気ラインの構造が，油圧動力伝達システムの作動油からの気泡の除去性能に大きく影響をおよぼし，装置形状や放気ラインの流れを工夫することで，作動油中の気泡混入率を常時，極めて低く抑えた，小形で高性能な油圧動力伝達システムを実現できる可能性があることを見出し，従来の設計を変える革新的研究成果と評価された．

## 2. 研究の目的

本研究では，旋回流により気泡を集積し，作動油中から効率的に分離・除去・放出する気泡分離除去技術を高度化し，作動油中の気泡混入率を 1 桁改善して常に 1% 以下とすることにより，油圧動力伝達システムのエネルギー伝達ロスを大幅に軽減することを目的とする．この気泡混入率の低減により，小形・高圧化したことで顕著になる，作動油タンクの油面からの空気の巻き込みの増加や溶存空気の析出（キャビテーション）による騒音や要素機器の表面壊食が大幅に低減できる．これにより，システムの騒音を現状より 5dB 程度低減することが目標である．また自然放気の必要をなくし，油タンクの容量を 1/2 程度まで小形化する．またタンク内の作動油中の気泡を効率よく分離除去することにより，作動油の酸化と熱劣化を防止し，これまで両立が難しかった，動力伝達を行う油圧駆動システムの高強度化（パワーアップ）と動力伝達媒体である作動油の長寿命化の両立を可能にすることにより，高強度化した動力伝達用油のライフタイムを 2 倍に延長する．

### 3. 研究の方法

高圧（45 MPa）の油圧駆動システムを模擬した負荷回路と油タンク，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，現有の実験システムを改良して，気泡除去装置の放気ラインを種々変えられる構造とした，放気ラインやタンク内の流れの様子が詳細に検証できる実験装置を製作した．図1に実験回路図を示す．

この実験装置を用いて，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油タンク内の油量や気泡量を正確に測定することで，気泡分離除去回路の性能を定量的に把握した．また気泡分離除去回路内流れの数値解析を行い，気泡除去装置の放気ラインの構造や流れの様子が油タンク内の作動油中の気泡分離除去性能におよぼす影響を明らかにする．

さらに実験結果と数値解析の結果を比較することにより，流れの数値解析の妥当性を定量的に評価検証し，条件に合った最適な作動油中の気泡分離除去回路を実現するための設計手法を確立する．

また高性能な気泡分離除去装置の設計指針を用いて，実回路に適用可能な高性能な気泡分離除去装置を試作し，高精度な測定が可能なコリオリ式流量計を用いて，油中気泡の分離除去性能を詳細に測定し，装置の性能を定量的に示した．さらに油中気泡の除去がキャピテーションの発生に与える影響を把握するため，可視化用高圧容器を試作し，キャピテーション噴流の様子を可視化して，高速カメラを用いて撮影解析することにより，装置の分離除去性能を定量的に測定する．

### 4. 研究成果

測定実験と数値解析の結果を定量的に比較分析し，流れの無次元指標であるレイノルズ数の他に，新たに提案した無次元気泡径とスパイラル係数を装置の設計に導入することで，高い分離除去性能を有する気泡除去装置の基準形状の設計が可能であることを示した．さらにレイノルズ数と無次元気泡径を考慮して，この基準形状から装置の寸法を修正することで，流体の条件が異なる場合でも高い気泡除去性能が得られる装置を設計できることを示し，高性能な気泡除去装置の設計手順が具体的に示された．図2に設計手順により試作した気泡分離除去装置の効果を示す．装置を用いることによりタンク内の油中気泡が分離除去され，気泡で白濁した油の透明度が5分程度で改善していることがわか

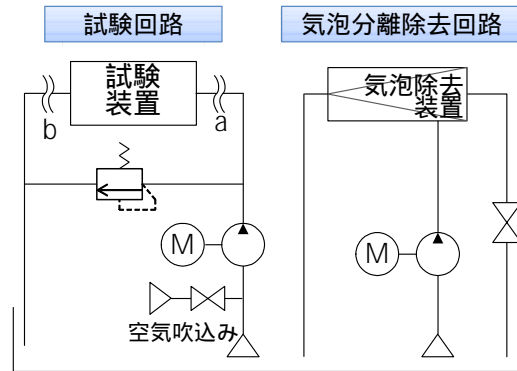


図1 実験回路

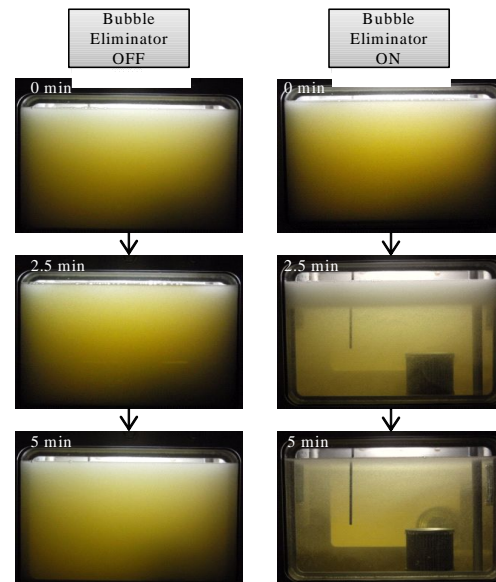


図2 気泡分離除去装置による効果

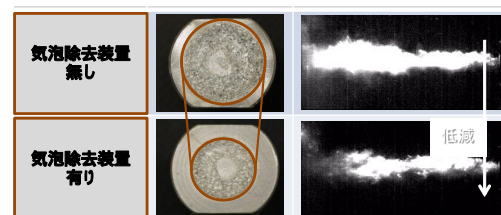


図3 キャピテーションの低減効果

る．

測定実験や数値解析の結果を定量的に比較分析し，提案した評価指標や設計手順を用いて製作した気泡の分離除去装置は，非常に高性能な油中気泡の分離除去効果を発揮し，キャピテーションの発生を大幅に抑えることができることが定量的に確認された．図3にキャピテーション低減効果を示す．気泡分離除去装置を用いるとキャピテーション噴流と供試材料表面の壊食が大幅に低減した様子を示す．

装置の設計指針に基づく実回路に適用可能な気泡分離除去装置を製作し、自動車の動力伝達システムのテストベンチに適用した。また実験室において、高精度な測定が可能なコリオリ式流量計を用いて油中気泡の分離除去性能を詳細に測定し、油の等価体積弾性係数を求めることで装置の性能を定量的に示した。

測定実験や数値解析の結果を定量的に比較分析し、自動車のベンチ実験の結果なども踏まえ、製作した気泡の分離除去装置は、非常に高性能な油中気泡の分離除去効果を発揮し、キャピテーションの発生を大幅に抑え、騒音を抑制できることが定量的に確認された。また気泡除去装置は油圧システムにおける作動油中の気泡量を制御できることを見出し、新たなアクチュエータや気泡量計測手法に関する研究テーマへの発展を検討した。

#### <引用文献>

Brendan Casey, Mobile Hydraulic Equipment: Increasing the Pressure, Machinery Lubrication Magazine. January 2008.

Tsubouchi T, Kamimura H., Shinoda J., Development of Oily High Bulk Modulus Fluid, Proceedings of the 7th JFPS International Symposium on Fluid Power, TOYAMA, pp.329-334, 2008.

松山、出光トライボレビュー, No.22, pp.1345, 1996.

Backe, Lipphardt, CI Mech. Eng. C97/76, 77/84, 1976.

Sayako Sakama, Yutaka Tanaka, Ryushi Suzuki, Optimization of Bubble Eliminator by Numerical and Experimental Investigation, International Journal of Automation Technology, Vol.6, No.4, pp.418-425, 2012.

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, 44 巻, 2 号, pp.43-48, 2013.

#### 5. 主な発表論文等

##### [雑誌論文](計4件)

- (1) 田中 豊, 坂間清子, 油中気泡による故障の原因と対策, 油空圧技術, 56巻, 4号, pp.26-32, 2017-04.(査読無)
- (2) 坂間清子, 田中 豊, 油圧作動油と気泡, フルードパワーシステム(日本フルードパワーシステム学会誌), 47巻, 第4号, pp.174-177, 2016-07.(査読有)
- (3) Sayako Sakama, Yutaka Tanaka, Hiroyuki Goto, Mathematical model for bulk modulus of hydraulic oil containing air bubbles,

Bulletin of the JSME, Mechanical Engineering Journal, Vol.2, No.6, 2015-12. (査読有)

- (4) 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出口口径の選定), 日本フルードパワーシステム学会論文集, 45 巻, 5 号, pp.79-84 2014-09.(査読有)

##### [学会発表](計25件)

- (1) 増原伊織, 坂間清子, 田中 豊, 気泡除去装置の形状パラメータの最適化(気泡含有率の高い条件における設計と評価), 平成29年春季フルードパワーシステム講演会, 2017年5月25日, 機械振興会館(東京都・港区).
- (2) 坂間清子, 北澤勇氣, 菅原佳城, 田中 豊, 油圧システムの油中気泡量測定技術の開発(作動流体の圧縮性評価による基本混入量測定方法の提案), 平成29年春季フルードパワーシステム講演会, 2017年5月25日, 機械振興会館(東京都・港区).
- (3) Ryosuke Funachi, Sayako Sakama, Yutaka Tanaka, Optimal Design of Shape Parameters for Bubble Eliminator with CFD, The 7th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology (ICMDT2017), 2017年4月20日, 済州市(大韓民国).
- (4) 坂間清子, 五嶋裕之, 田中 豊, 油中気泡が油圧アクチュエータの特性におよぼす影響, 日本機械学会山梨講演会, 2016年10月26日, 山梨大学(山梨県・甲府市).
- (5) 坂間清子, 田中 豊, 油圧動力伝達システムにおける微細気泡の除去方法の提案, 平成28年秋季フルードパワーシステム講演会, 2016年10月19日, ねぶたの家ワラッセ(青森県・青森市).
- (6) 舟知亮介, 坂間清子, 田中 豊, 気泡除去装置の形状パラメータの最適化(流入部長さの影響), 平成28年秋季フルードパワーシステム講演会, 2016年10月19日, ねぶたの家ワラッセ(青森県・青森市).
- (7) 坂間清子, 増原伊織, 田中 豊, 油圧ロボットのための油中気泡の分離除去装置とその効果, ロボティクス・メカトロニクス講演会2016, 2016年6月9日, パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市).
- (8) 坂間清子, 鈴木隆司, 田中 豊, 混入気泡径の違いを考慮した気泡除去装置の設計法, 平成27年秋季フルードパワーシステム講演会, 2015年11月26日, ジェイドガーデンパレス(鹿児島県・鹿児島)

- 島市).
- (9) 五嶋裕之, 舟知亮介, 坂間清子, 田中 豊, ハイスピードカメラによるキャビテーション噴流の可視化, 平成 27 年秋季フルードパワーシステム講演会, 2015 年 11 月 26 日, ジェイドガーデンパレス(鹿児島県・鹿児島市).
  - (10) Sayako Sakama, Hiroyuki Goto, Yutaka Tanaka, Influence of Entrained Air on Effective Bulk Modulus of Hydraulic Fluid, Proceedings of 2015 Autumn Conference on Drive and Control, International Session, 2015 年 10 月 22 日, 釜山(大韓民国).
  - (11) 五嶋裕之, 坂間清子, 舟知亮介, 田中 豊, 油中気泡量の測定によるキャビテーションの評価, 日本機械学会山梨講演会, 2015 年 10 月 17 日, 山梨大学(山梨県・甲府市).
  - (12) 五嶋裕之, 坂間清子, 田中 豊, コリオリ流量計を用いた油中気泡量の測定, 日本機械学会 2015 年度年次大会, 2015 年 9 月 14 日, 北海道大学(北海道・札幌市).
  - (13) 坂間清子, 鈴木隆司, 田中 豊, 気泡除去装置の流れ解析(気泡径の違いによる比較), 平成 27 年春季フルードパワーシステム講演会, 2015 年 5 月 29 日, 機械振興会館(東京都・港区).
  - (14) 朴重濠, 尹蘇南, 咸永福, 田中 豊, 遠心分離を用いた水中溶存空気の捕集器に関する研究, 平成 27 年春季フルードパワーシステム講演会, 2015 年 5 月 29 日, 機械振興会館(東京都・港区).
  - (15) Sayako Sakama, Yutaka Tanaka, Hiroyuki Goto, Proposal on Mathematical Model for Bulk Modulus of Hydraulic Oil Containing Air Bubbles, The 6th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology (ICMDT2015), 2015 年 4 月 22 日, 沖縄コンベンションセンター(沖縄県・宜野湾市).
  - (16) 田中 豊, 油圧動力伝達システムの高強度化, 第 68 回精研シンポジウム・高機能流体アクチュエータ, 2015 年 3 月 6 日, 東工大精密工学研究所(神奈川県・横浜市).
  - (17) 渡辺修平, 坂間清子, 五嶋裕之, 田中 豊, 気泡を含む油の体積弾性係数モデルの比較, 日本機械学会山梨講演会, 2014 年 10 月 17 日, 山梨大学(山梨県・甲府市).
  - (18) 服部美月, 坂間清子, 田中 豊, 鈴木隆司, 気泡除去装置の流れ解析(気泡混入量の違いによる比較), 日本機械学会山梨講演会, 2014 年 10 月 17 日, 山梨大学(山梨県・甲府市).
  - (19) Sayako Sakama, Yutaka Tanaka, Rhushi Suzuki, High Efficiency Bubble Eliminator for Hydraulic Systems, The 9th JFPS

International Symposium on Fluid Power Matsue, 2014 年 10 月 29 日, くにびきメッセ(島根県・松江市).

- (20) 坂間清子, 田中 豊, 鈴木隆司, 油中気泡の分離除去システム, IFPEX2014 カレッジ研究発表展示会, 2014 年 9 月 17~19 日, 東京ビッグサイト(東京都・江東区).
- (21) 田中 豊, 坂間清子, 五嶋裕之, 鈴木隆司, 油中気泡の分離除去による油圧システムの性能向上, IFPEX2014 カレッジ研究発表展示会, 2014 年 9 月 17~19 日, 東京ビッグサイト(東京都・江東区).
- (22) 五嶋裕之, 坂間清子, 田中 豊, 気泡を含む油の体積弾性係数の測定, IFPEX2014 カレッジ研究発表展示会, 2014 年 9 月 17~19 日, 東京ビッグサイト(東京都・江東区).
- (23) Yutaka Tanaka, Sayako Sakama, Hiroyuki Goto, Experimental investigation of effective bulk modulus of oil with entrained air bubbles, The 12th International Conference on Motion and Vibration (MoVic2014), 2014 年 8 月 4 日, 札幌コンベンションセンター(北海道・札幌市).
- (24) 坂間清子, 田中 豊, 鈴木隆司, 気泡除去装置の形状パラメータの最適化(気泡径の違いによる比較), 平成 26 年春季フルードパワーシステム講演会, 2014 年 5 月 29 日, 機械振興会館(東京都・港区).
- (25) 坂間清子, 田中 豊, 東春那, 五嶋裕之, 油中気泡の除去が油の体積弾性係数におよぼす影響, 平成 26 年春季フルードパワーシステム講演会, 2014 年 5 月 29 日, 機械振興会館(東京都・港区).

【その他】

ホームページ等  
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ホームページ  
[http://hams.ws.hosei.ac.jp/03\\_01.html](http://hams.ws.hosei.ac.jp/03_01.html)

## 6. 研究組織

### (1) 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

### (4) 研究協力者

坂間 清子 (SAKAMA, Sayako)  
五嶋 裕之 (GOTO, Hiroyuki)  
鈴木 隆司 (SUZUKI, Ryushi)