

油中気泡の分離除去システム

坂間清子*, 田中 豊*, 鈴木隆司**

Separation and Elimination of Air Bubbles from Hydraulic Fluids

Sayako SAKAMA*, Yutaka TANAKA*, Ryushi SUZUKI**

Hydraulic fluids typically become aerated during use. Air bubbles entrained in hydraulic fluids cause numerous problems in hydraulic systems. Active bubble elimination devices that use swirl flow capable of separating and eliminating air bubble from the hydraulic fluid have been proposed and developed by researchers in our Smart & Clean Hydraulic Project. In this paper, we provide a brief description of the air bubble separation and elimination system and describe its principle of operation when installed in a hydraulic circuit to physically remove air bubbles from the hydraulic working fluid. This study investigates the high performance of the air bubble separation and elimination system, using experimental flow visualizations and numerical simulations of the device. The bubble removal system can be used to mechanically remove air bubbles from hydraulic fluids; this offers advantages such as the possibility of smaller reservoir sizes and lower overall system cost.

Key Words: Bubble eliminator, CFD, Entrained air, Flow visualization, Hydraulic systems

1. はじめに

油圧システムの作動油中の気泡は、作動油の酸化劣化、機器部材の壊食、機器の動特性の低下等の原因となる。したがって、これらの問題を解決するには気泡の取り除かれた作動油を使用することが望ましいが、一度作動油に気泡が混入すると、自然に浮上させて取り除くには長い時間を要する。本研究では、旋回流を利用して油中気泡を分離除去する気泡分離除去システムで作動油中の気泡を取り除き、油圧システムの性能を向上させることを目的としている。本稿では、気泡分離除去システムを用いた気泡除去法を示し、気泡分離除去システムの性能を向上させるために実施した流れの可視化実験と数値解析の結果を報告する。

2. 気泡分離除去システム

気泡分離除去システムは、気泡を作動油から分離させる気泡分離セクションと、作動油から気泡を除去する気泡除去セクションにわかれる。Fig.1は気泡分離除去システムの概略図である。気泡分離セクションには、旋回流を利用して作動油と気泡を分離する気泡除去装置が取り付けられている。気泡除去装置内で発生する旋回流により、比重の小さい気泡は圧力の低い装置の中心軸上に集合し、合体・拡大する。気泡分離セクションは、2つの流出ポートを有

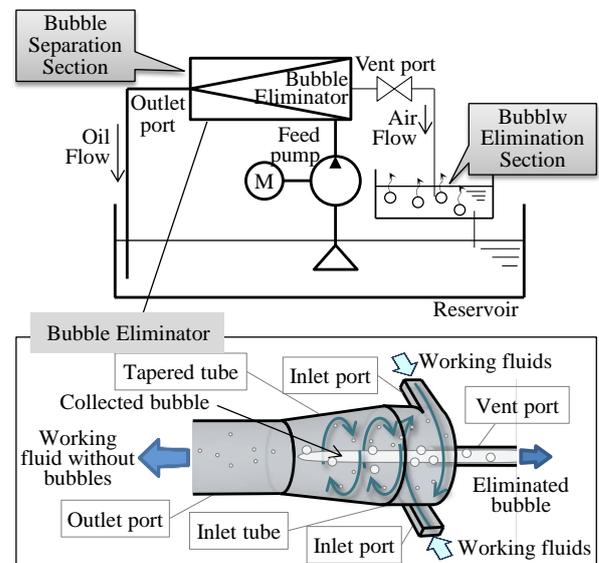


Fig.1 Air bubble separation and elimination system

し、気泡の取り除かれた作動油はタンクに、気泡除去装置内で集合した気泡は、放気口から気泡除去セクションに流出する。放気口から流出する気泡は気泡除去装置内で大きく成長しているため、気泡除去セクションでは短時間で浮上し、消泡する。

3. 可視化実験

本研究では、気泡分離セクションに取り付けられた気泡除去装置の性能を向上させるために、装置内の流れの可視化実験と数値解析を実施している。可視化実験は、すべて透明なアクリルで作成された気泡除去装置を用いて実施されている¹⁾。本節では、実験結果の一例として、気泡除去装置の流出口の径

* 法政大学大学院デザイン工学研究科
(〒102 - 8160 東京都千代田区富士見 2-17-1)
(E-mail: y_tanaka@hosei.ac.jp)

** オープスシステム
(〒153 - 0061 東京都目黒区中目黒 3-18-1)

* Hosei University
** Opus System Inc.

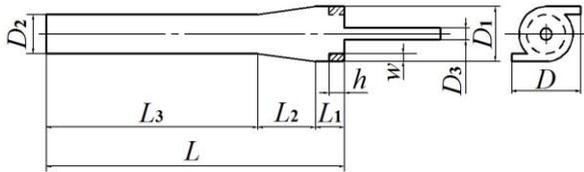


Fig.2 Geometry of bubble eliminator

Table 1 Dimensions of bubble eliminator

No.	D	D ₁	D ₂	D ₃	L	L ₁	L ₂	L ₃	w	h	mm
1	36	28	20	10	265	15	30	220	3	6	
2	36	28	15	10	265	15	30	220	3	6	
3	36	28	10	10	265	15	30	220	3	6	

D_2 を変更して実施した可視化実験の結果を示す。Fig.2 と Table 1 に実験で使用した装置の形状パラメータを示す。装置に流入する流体の体積流量は 20 L/min, コンプレッサで混入させる気泡の体積流量は 0.2 L/min, 作動油の動粘度は $31 \text{ mm}^2/\text{s}$ としている。Fig.3 に 6000fps で撮影した可視化実験の結果を示す。流出口径 D_2 が小さくなるほど, 気泡が集合しやすく, 集合した気泡は流出口方向に移動することがわかる。

4. 数値解析

気泡除去装置内部の流れを詳細に分析するために, 本研究では数値解析ソフトウェア STAR-CCM+を用いて流れの数値解析を実施している。本稿では, 装置の形状パラメータ, 作動油と気泡の流入流量, 作動油の物性, 流出口と放気口からの流体の流出比を可視化実験の条件に合わせて実施した解析の結果を示す。なお, 混相流モデルはオイラー混相流モデル, 乱流モデルはk- ϵ 乱流モデルを使用している。また, 混入気泡の径は全て 0.3mm とし, 気泡の変形, 合体, 拡大・縮小は考慮していない。

Fig.4 に D_2 を変更したときの装置横断面の気泡の含有率分布と気泡除去率 E_B を示す。気泡除去率 E_B は, 装置に流入した気泡の体積流量に対する放気口から除去された気泡の体積流量の比で表され, E_B が大きいほど, 装置の気泡除去性能が高いと評価できる。気泡の含有率分布は可視化実験と同様の結果を示しており, D_2 が小さい条件の方が気泡は装置の中心軸上に集合しやすく, 流出口方向に流れる傾向がある。 E_B は D_2 が大きいほど高い値を示しており, 気泡の除去性能が最も高いのは D_2 が 20mm の条件である。しかし, D_2 が 20mm の条件では気泡は装置の中心軸上で十分に集合しておらず, 気泡除去セクション内での消泡性は最も低いと推察される。以上のことから, 気泡の集合・合体のしやすさと気泡除去率の高さの両方を考慮することで, D_2 の選定が可能になることがわかる。

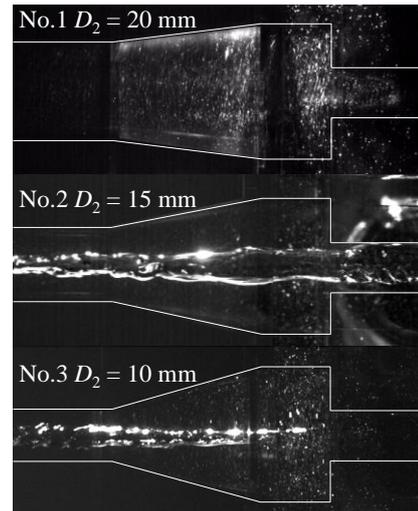


Fig.3 Experimental flow visualization

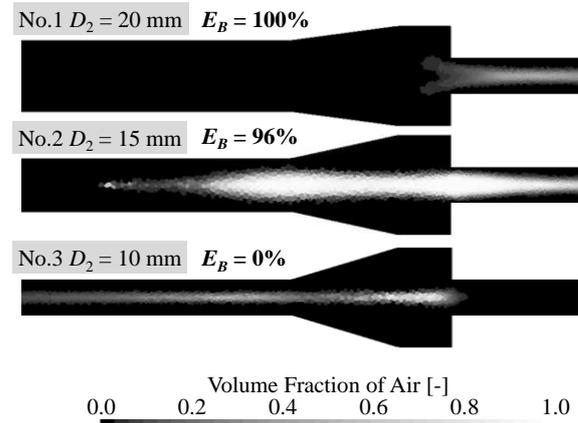


Fig. 4 Volume fraction of air

5. おわりに

本稿では, 油圧システムの油中気泡に起因する問題の解決のために, 気泡分離除去システムを用いた気泡除去法を提案した。また, 気泡を作動油から分離する気泡除去装置の流れ解析の結果を示し, 気泡除去性能を向上させる上で装置の形状パラメータの選定が重要であることを示した。

本研究は, 戦略的基盤技術高度化支援事業「油圧動力伝達システムに使用する油中気泡除去技術の開発」と JSPS 科研費 25・9669, 26420086 の助成を受けて実施されたことを付記して, 関係者に謝意を表す。なお, 本研究の数値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) Sakama, S., Mishina, K., Tanaka, Y., Suzuki, R. : Flow Visualization for Bubble Elimination of Hydraulic Systems, Proc. 12th International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization, OS1-03-1 (2013)

油中気泡の分離除去による油圧システムの性能向上

田中 豊*, 坂間清子*, 五嶋裕之**, 鈴木隆司***

Performance Improvement of Hydraulic Systems with Bubble Elimination

Yutaka TANAKA*, Sayako SAKAMA*, Hiroyuki GOTO**, Ryushi SUZUKI***

A certain amount of air bubble is always present in a hydraulic fluid. Air bubbles entrained in hydraulic fluids cause numerous problems, such as the acceleration of oil degradation, decrease in lubricity, reduction in thermal conductivity, cavitation erosion, and higher noise emissions. Air bubbles in working hydraulic fluids must be actively separated and eliminated to realize performance improvement of hydraulic systems. Active bubble elimination devices that use swirl flow capable of separating and eliminating air bubble from the hydraulic fluid have been proposed and developed by researchers in our Smart & Clean Hydraulic Project. In this paper, the improvement of oil aging, oil temperature rise, effective bulk modulus and cavitation erosion are experimentally investigated in our laboratory's test. The bubble removal in the oil is essential to the prevention of oil deterioration, temperature rise, cavitation erosion and reduced oil rigidity.

Key Words: Air bubble, Bubble elimination, Cavitation erosion, Hydraulic systems, Oil degradation

1. はじめに

油圧動力伝達システムに用いられる作動油には、通常、数パーセントの空気が混入しており、この混入空気はシステムの特性に大きな影響をおよぼす。

本稿では、研究プロジェクトで開発した油中気泡の分離除去システム¹⁾を用いて、作動油中に混入した気泡を積極的に分離除去することで油の特性やシステムの性能が向上することを実験的に示す。

2. 油の酸化劣化試験

油中の気泡を積極的に分離除去することで油の酸化劣化を大幅に抑制できる。摩耗防止の添加剤のみを加えた鉱物油を作動油として用い、60℃に保たれた6.85 Lの作動油を圧力7 MPa、流量23 L/minでアキシシャルピストンポンプを使って456時間の循環試験を実施した。ポンプの吸い込み側からは、常時690 cm³/minで空気を強制的に混入させ、タンク戻り側に取り付けた気泡分離除去システムにより混入空気を除去した場合と、除去しない場合とで油の劣化の度合いを測定した。

Fig.1は連続運転に対して24時間か48時間ごとにサンプリングした60 cm³の油の全酸価値の変化である。気泡分離除去システムを動作させた場合の全酸価値は半分以下で酸化劣化の度合いが大きく抑制さ

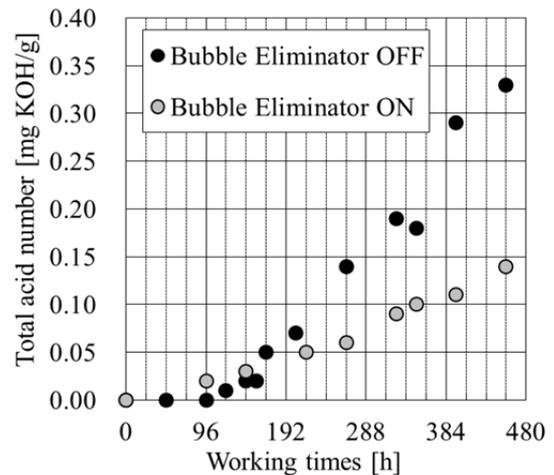


Fig. 1 Change of total acid number in pump test.

れ、結果として作動油の寿命を2倍以上に伸ばせる。

3. キャビテーション壊食試験

油中の気泡を積極的に分離除去することでキャビテーションの発生が抑制され、壊食量を大幅に低減できる。

Fig.2に示す噴流実験装置を用いてキャビテーション壊食実験を実施した。作動油タンク内には、別回路で気泡分離除去システムが組み込まれ、油中気泡を積極的に分離除去できる。ポンプの吐出圧力を40 MPa、吐出流量を5.7 L/minに設定し、円筒形絞り部を通過させることでキャビテーション噴流を発生させ、試験片に衝突させる。試験片材料はA1070アルミ合金を使用した。

Fig.3は気泡分離除去システムを動作させたときと動作させない時のキャビテーション噴流の様子を

* 法政大学大学院デザイン工学研究科
(〒102-8160 東京都千代田区富士見 2-17-1)
(E-mail: y_tanaka@hosei.ac.jp)
** 機械振興協会技術研究所
(〒203-0042 東京都東久留米市八幡町 1-1-12)
*** オーパスシステム

* Hosei University
** Japan Society for the Promotion of Machine Industry
*** Opus System Inc.

高速ビデオカメラで撮影した結果である。気泡分離除去システムを動作させるとキャビテーション噴流の大きさが小さくなっていることがわかる。

Fig.4 は試験片の壊食の様子と壊食量の比較である。気泡分離除去システムを動作させない場合、10分間の噴流衝突実験で試験片は120 mg ほど減少し、表面では大きく壊食が進行する。一方、気泡分離除去システムを動作させると、壊食量は大きく減少し、試験片表面の壊食も少ないことがわかる。

以上のように、油中の気泡を積極的に分離除去し、タンク内の油の性状を保つことでキャビテーションの発生が抑制され、壊食量を大幅に低減できる。

4. おわりに

作動油中に混入した気泡を積極的に分離除去することで、油の酸化劣化やキャビテーション壊食が抑制できることを実験的に示した。この他に、油中気泡の分離除去システムを用いることで、油の温度上昇の抑制効果¹⁾や低圧領域における油の体積弾性係数の向上²⁾も確認されている。この油中気泡の分離除去システムが多く油圧動力伝達システムに搭載され、システムの性能向上に寄与することを期待したい。

本研究は、戦略的基盤技術高度化支援事業「油圧動力伝達システムに使用する油中気泡除去技術の開発」とJSPS 科研費 25・9669, 26420086 の助成を受けて実施されたことを付記して関係者に謝意を表す。

参考文献

- 1) Y. Tanaka, S. Sakama, R. Suzuki, Bubble Elimination from Working Oils for Environmentally Friendly Hydraulic System Design, Int. J. Automation Technology, Vol.6, No.4, pp.488-493, 2012.
- 2) Y. Tanaka, S. Sakama, H. Goto, Experimental Investigation of Effective Bulk Modulus of Oil with Entrained Air Bubbles, Proc. 12th MoVic2014, 2D22, 2014.

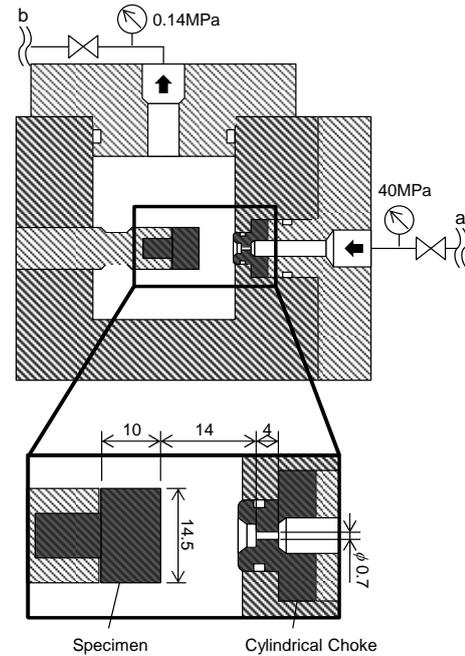


Fig. 2 Schematic of the test chamber for cavitation erosion test

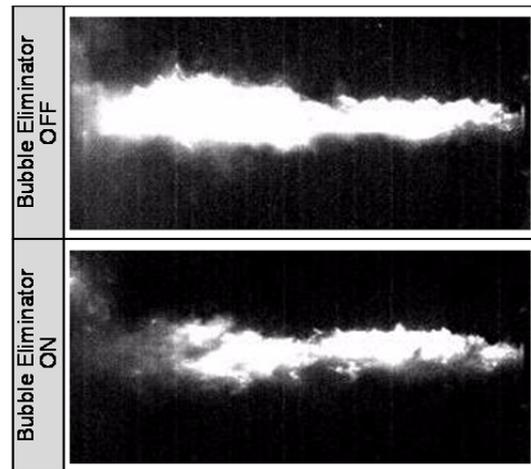


Fig. 3 High-speed digital images of cavitation jets with and without the bubble eliminator

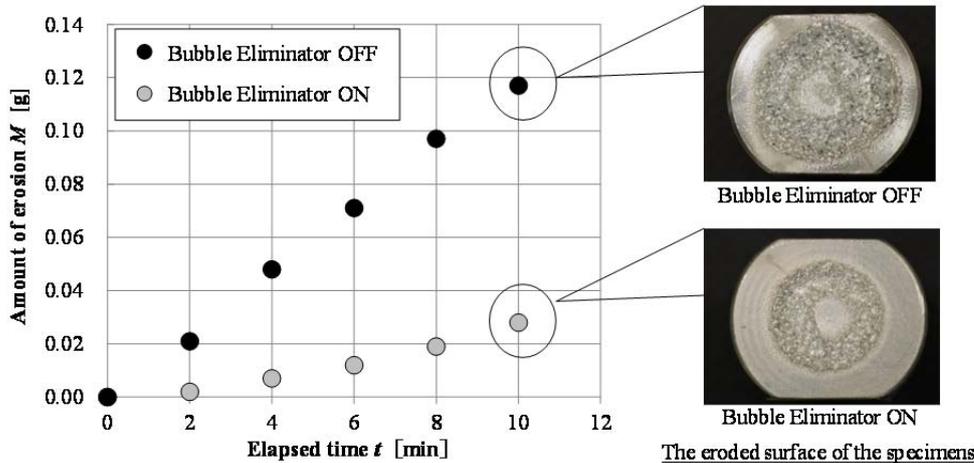


Fig. 4 Experimental results of cavitation erosion test with and without the bubble eliminator

気泡を含む油の体積弾性係数の測定

五嶋裕之*, 坂間清子**, 田中 豊**

Measurement of Effective Bulk Modulus for Hydraulic Fluid with Entrained Air

Hiroyuki GOTO*, Sayako SAKAMA**, Yutaka TANAKA**

Hydraulic fluids typically become aerated during use. Aeration strongly influences the bulk modulus of hydraulic fluid because air is significantly more compressible than oil. Entrained air in the form of bubbles reduces the effective bulk modulus. Air bubbles in working fluids must be actively separated and eliminated to realize performance improvement of hydraulic systems. Active bubble elimination devices that use swirl flow capable of separating and eliminating air bubble from the hydraulic fluid have been proposed and developed by researchers in our Smart & Clean Hydraulic Project. In this paper, we focus on the relation between the change in bulk modulus and the elimination of bubbles from hydraulic fluid. We conclude that the change in bulk modulus of the bubble-eliminated oil influences system performance with respect to positioning, power loss, response time, and stability in the hydraulic system.

Key Words: Air bubble, Bubble elimination, Effective bulk modulus, Hydraulic systems, Tangent bulk modulus

1. はじめに

油圧動力伝達システムのパワーの伝達媒体である作動油中の気泡は、作動油の見かけの剛性を低下させ、システムの動特性を低下させる。最近、気泡を含む油の等価体積弾性係数の数学モデルがいくつか提案され、CFD のプログラムコードに組み込まれたり、体積弾性係数の実験的な同定値との比較により、モデルの妥当性の検証が行われたりしている¹⁾⁴⁾。

本稿では油の体積弾性係数を測定する実験装置を紹介し、気泡をわずかに含む油と、プロジェクトで開発された気泡の分離除去システムにより油中気泡を除去した油の等価正接体積弾性係数を実験的に同定し、油中の気泡が等価体積弾性係数におよぼす影響を検討する。

2. 実験装置

Fig. 1 は油の等価体積弾性係数の測定に用いる実験装置である。この実験装置は、圧力容器と油圧サーボシリンダで構成されている。圧力容器の体積 V_0 は 1132 cm^3 で、その変形は無視できる程度に小さく設計されている。圧力容器には、油を流量 6 L/min で循環させた後、容器内に油を充填する油圧回路が接続されている。循環時の油温はタンク内で一定に保たれ、実験では油温 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ で測定が行われた。

作動油タンク内には別回路で気泡の分離除去シス

テムが組み込まれている。このシステムを動作させると、5 分ほどでタンク内の油中気泡は目視では気泡が観察できない程度まで減少する。Fig. 2 に透明な油タンクで行った気泡の分離除去システムの効果の確認実験の結果を示す。気泡で白濁した油に対して気泡の分離除去システムを動作させると、5 分ほどでタンク内の油の透明度が向上していることがわかる。

圧力容器内に油を充填した後、一定速度 1 mm/s の油圧サーボシリンダで 45 MPa まで容器内の油を加圧して戻し、その時のシリンダ変位から換算した体積変化と容器内の測定圧力変化から、等価体積弾性係数を求める。

3. 測定実験とその結果

測定実験では、ポンプ吸い込み側から 120 mL/min

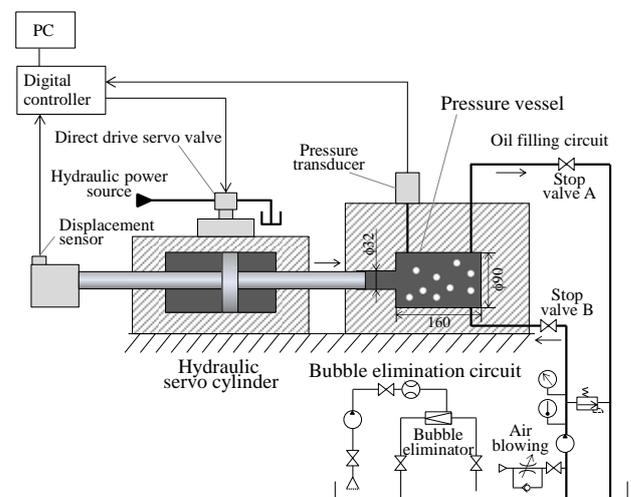


Fig. 1 Experimental setup for measurement of effective bulk modulus

* 機械振興協会技術研究所
(〒203-0042 東京都東久留米市八幡町 1-1-12)

** 法政大学大学院デザイン工学研究科
(〒102 - 8160 東京都千代田区富士見 2-17-1)
(E-mail: y_tanaka@hosei.ac.jp)

* Japan Society for the Promotion of Machine Industry
** Hosei University

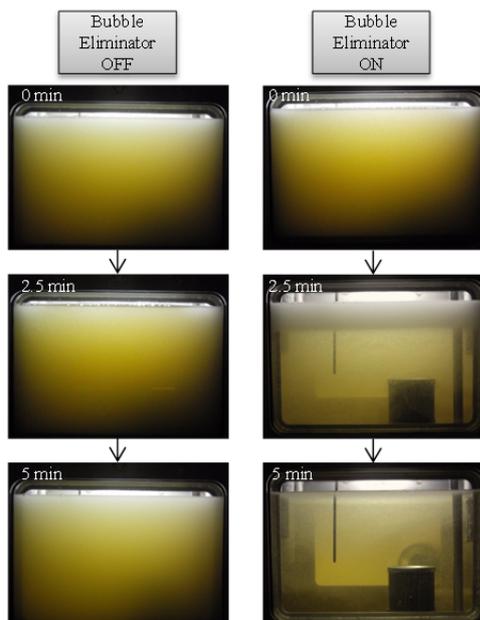


Fig. 2 Typical results of the experiments to eliminate air bubbles from the oil

で強制的に気泡を吹き込みながら、しばらく油を循環させた後、油を容器内に閉じ込めて、直ちにサーボシリンダで油を加圧・減圧した。次に油中の気泡分離除去システムを動作させ、タンク内の油を気泡の見えない状態に保った後、同様に容器内に油を循環させて閉じ込め、直ちに加圧・減圧して、シリンダ変位と容器内圧力変化を測定した。

Fig. 3 に体積変化と圧力変化の関係を示す。45 MPa の加圧工程に対して 2.5 % ほどの体積変化が生じる。また昇圧工程と降圧行程では曲線の経路が異なり、わずかなヒステリシスを持つ。これらの曲線の傾きは等価正接体積弾性係数を表し、圧力が高い範囲では気泡はすべて油中に溶解しているから、点線の接線と大気圧との交点は大気圧下における空気の含有率と見なせる。空気を混入した場合の含有率は 0.5 % 程度と見積もることができる。

Fig. 4 には、Fig. 3 の結果から計算で求めた等価正接体積弾性係数の値と数学モデル⁵⁾の値を示す。5 MPa 以下の低圧領域では、油中気泡を除去しない場合と除去した場合とでは、等価正接体積弾性係数の値に違いがみられ、除去しない場合はその値は小さく、油の見かけの剛性が低下している。しかし高圧領域では、両者の等価正接体積弾性係数の値はほぼ等しく見積もられている。また昇圧行程と降圧行程では、降圧行程の方が等価正接体積弾性係数はわずかに大きく見積もられる。これは高圧で油中に溶解した気泡が、降圧過程で析出するには時間がかかり、この時間的遅れが原因である。

4. おわりに

油の体積弾性係数を測定する実験装置により、気

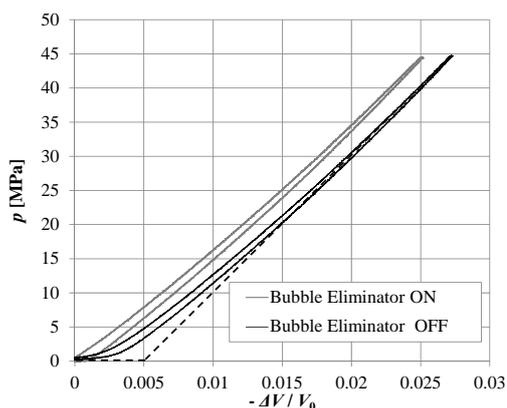


Fig.3 Pressure-volume characteristics depending on air contents

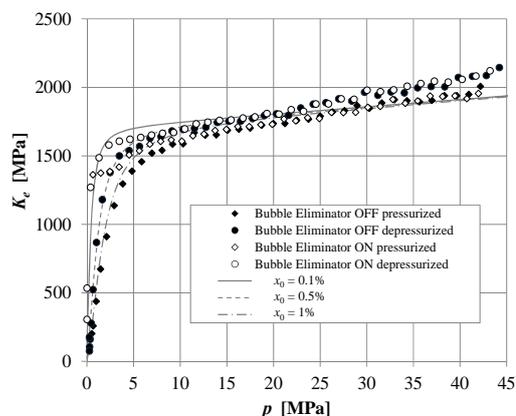


Fig.4 Effective bulk modulus as a function of pressure with initial entrained air contents

泡をわずかに含む油と油中気泡を除去した油の等価正接体積弾性係数を実験的に同定した。本研究は、戦略的基盤技術高度化支援事業と JSPS 科研費 25・9669, 26420086 の助成を受けて実施されたことを付記して関係者に謝意を表す。

参考文献

- 1) Kim S., Murrenhoff H., Measurement of Effective Bulk Modulus for Hydraulic Oil at Low Pressure, ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 134 (2012), 021201-1-10.
- 2) Yang H., Feng B., Gong G., Measurement of Effective Fluid Bulk Modulus in Hydraulic System, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, NOVEMBER 2011, Vol. 133 (2011), DIO: 061021-1-6.
- 3) Hossein Gholizadeh, Doug Bitner, Richard Burton, Greg Schoenau, Modeling and Experimental Validation of the Effective Bulk Modulus of a Mixture of Hydraulic Oil and Air, Proc. ASME/BATH 2013 Symposium on Fluid Power & Motion Control, FPMC2013-4493 (2013).
- 4) Junjie Zhou, Andrea Vacca, Bernhard Manhartgruber, A Novel Approach for the Prediction of Dynamic Features of Air Release and Absorption in Hydraulic Oils, ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 135 (2013), 091305-7.
- 5) 坂間, 田中, 東, 五嶋, 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講演論文集 (2014), pp.40-42.

機能性流体による高機能メカトロシステムのデザイン

田中 豊*, 神戸晴夏*, 林田直之*, 横田眞一**, 枝村一弥***

Design of Advanced Mechatronics by Functional Fluid Power

Yutaka TANAKA*, Haruka KANBE*, Naoyuki HAYASHIDA*
Shinichi YOKOTA**, Kazuya EDAMURA***

A fluid power actuation has a great potential to realize simple, miniaturized and high-powered actuation system. Our research aims at the establishment of design and fabrication to perform miniaturization, high accumulation and high densification by integrating micro fluid power actuation system using high-powered micro robots. A pumping function generating fluid power is considered to be one of the most important elements in the fluid power actuation system. Electro-Conjugate Fluid, ECF can directly convert electric energy into kinetic energy of the fluid without mechanical moving parts. Prototype models of high-powered and miniaturized micro pump module using the ECF for micro fluid power actuation systems are fabricated and experimentally investigated. New shape and arrangement of electrodes is proposed and fabricated to miniaturize the high-powered micro ECF micro pump.

Key Words: ECF, Electrodes, Functional Fluid, Fluid Power Actuation, Micro Pump

1. はじめに

流体パワーの駆動原理は、既存の油圧・空気圧・水圧アクチュエータで広く使われている。特に流体に液体（油や水など）を用いた液圧駆動の場合、封じ込めにもなう自身の体積変化はほとんど無視できるため、剛性が高く、圧力を上げるほど高出力密度のアクチュエータとして機能する。またこの液圧パワーの駆動原理はマイクロ環境下でも高出力密度を発揮することが明らかとなっている¹⁾。

法政大学高機能メカトロデザイン研究室では、東京工業大学精密工学研究所や法政大学マイクロナノテクノロジー研究センターなどと共同で、機能性流体を用いたマイクロメカトロデバイスの研究開発を行っている。

本稿では各種アクチュエータをパワー密度の観点で比較した後、研究室で取り組んでいる機能性流体 ECF を用いたマイクロポンプについて紹介する。

2. アクチュエータの比較⁴⁾

Table 1 に示す AC サーボモータ、DC モータ、油圧・水圧ピストンモータ、空気圧モータ、ECF モータについて、パワー密度を計算し自重に対してプロットすると Fig.1 のようになる。液圧モータは電動モータに比べ桁程度、パワー密度が大きいことがわかる。またマイクロ領域で ECF は市販のアク

チュエータが存在しない際立った位置にプロットされていることがわかる。

Table 1 List of plotted symbols in figures

Symbol	Type	Number
▼	AC	739
▽	AC-Direct	17
▼	DC	259
●	Oil Swash plate piston	116
■	Oil Bent axial piston	118
◆	Oil Radial piston	240
▲	Air Vane	461
◇	Air Radial piston	14
●	Water Swash plate piston	5
+	ECF	4

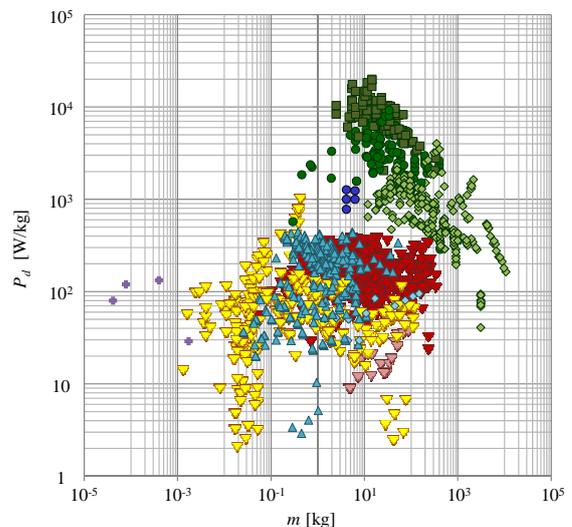


Fig. 1 Correlation between power density and actuator mass

* 法政大学デザイン工学部システムデザイン学科
(〒102 - 8160 東京都千代田区富士見 2-17-1)

(E-mail: y_tanaka@hosei.ac.jp)

** 東京工業大学精密工学研究所

***新技術マネジメント

* Hosei University

** Tokyo Institute of Technology

*** New Technology Management Co.,Ltd,

3. 電界共役流体(ECF)

電界共役流体 ECF は、大坪・枝村により開発された絶縁性のある誘電性流体の一種である²⁾。ECFの特徴は正負の電極対を配置し、この電極間に直流電圧を印加すると、ECF 中の不均一な電界により電極間に強いジェット流 (ECF 効果) が生じることである。流体中に電極を配置して高電圧を印加するだけで流動が生じることから、機械的可動部を必要としない簡易な構造で電気-流体パワー変換素子が実現できる。

4. 試作したマイクロポンプ

強い ECF ジェットにより大きな出力圧力が得られる針状の正電極とリング状の負電極の組み合わせによる円筒形 ECF ポンプを設計試作した。外径 3.8mm、全長 7mm の円筒容器内に、針状の正電極と対向させてリング状負電極を電極間距離 200 μm 程度まで近づけて配置する。電極間に直流高電圧を印加すると、針状正電極からリング状負電極に向けて ECF ジェットが生じ、出力ポートから流体パワーが取り出せる。この円筒形 ECF ポンプの出力は、ECF 効果の原理と構造から、電極の寸法や形状、配置がポンプ出力に大きな影響をおよぼす

Fig.2 に試作した円筒形 ECF マイクロポンプと平面形 ECF マイクロポンプ³⁾を示す。また Fig.3 に両者の吐出圧力の比較を示す。円筒形 ECF マイクロポンプは、印加電圧 5kV で吐出圧力 6.1kPa、無負荷吐出流量 172mm³/s の出力を実現した。また以前に試作した平面形 ECF マイクロポンプと比較して、吐出流量では劣るものの、吐出圧力で2倍の高出力と体積比率で 12 分の 1 程度の小形化を実現した。

5. 小形高出力化

一体化構造に適した小形高出力液圧源の実現には、正負電極対をどこまで小形化して近接配置できるかが課題である。高出力を維持しながら、より小形化を目指し、正負の電極を板状の加工電極によるポンプ構造を提案した。Fig.4 に従来のポンプと提案するポンプ構造の比較を示す。この提案した電極対の実装による小形液圧源を試作すれば、従来の円筒形マイクロポンプモジュールの全長を約 12 分の 1、外径を約 3 分の 1 まで小形化できる。これは自重に換算すると約 90 分の 1 に相当する。

6. おわりに

パワー密度の観点から各種アクチュエータの性能を比較し、試作した ECF マイクロポンプについて紹介した。本研究は JSPS 科研費(22560256)、JST・A-Step (AS251Z00941K)、私立大学戦略的研究基盤形成支援事業「グリーンテクノロジーを支える次世代エネルギー変換システム」(2013~2017 年度)の支援

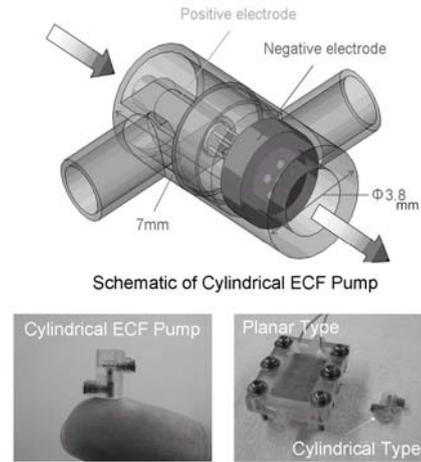


Fig.2 ECF Micro Pump Module

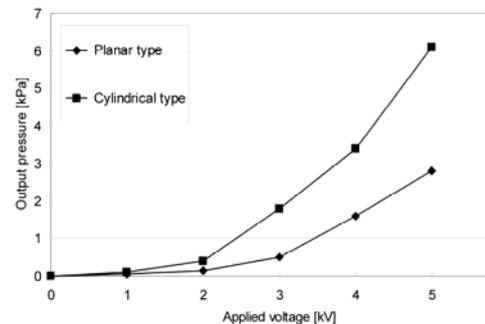


Fig.3 Output pressure for planar type and cylindrical type of ECF pump modules

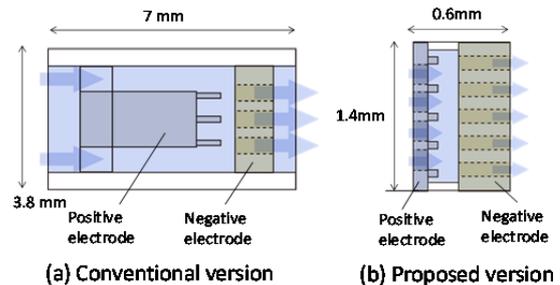


Fig.4 Comparison of structure for ECF pump

を受けて実施された。

参考文献

- 1) 吉田, 横田, 流体パワーを用いたマイクロアクチュエータに関する研究 (第 1 報), 油圧と空気圧, 25 巻, 2 号 (1994), pp.281-288.
- 2) Y. Ohtsubo, K. Edamura, Dielectric Fluid Motors, Applied Physics Letters 71(3), 318 (1997), pp. 318-320.
- 3) Y. Tanaka, S. Yokota, Design and Fabrication of Micro Pump for Functional Fluid Power Actuation System, Next-Generation Actuators Leading Breakthroughs Part III Micro Actuators (2010), pp.153-164, Springer.
- 4) Y. Tanaka, S. Sakama, S. Yokota, K. Nakano, Comparative Study on Performance of Fluid Power and Electric Actuators, Proc. 3rd China-Japan Joint Workshop on Fluid Power (2014).

パラレルメカニズムの産業応用に関する研究

田中 豊*, 渡邊幸平**, 丸山諒人**, 瀬戸口小織**, 五嶋裕之***

Research on Industrial Applications of Parallel Kinematics Mechanism

Yutaka TANAKA*, Kohei WATANABE*, Ryoto MARUYAMA*
Saori SETOGUCHI*, Hiroyuki GOTO**

Spatial parallel mechanism has been widely used to realize rigidity, high accuracy, multi-degrees-of-freedom and complicated motion in application of industrial fields such as machine tools, coordinate measuring systems, robot manipulators and motion simulators. In our project team innovative machine tools based on the parallel mechanism have been proposed and developed to fabricate flexible shape of tubes or evaluate anisotropic materials. Motion simulators based on tripod parallel mechanisms has been also proposed and developed to realize six-degrees-of-freedom for compact motion platforms. In this paper we introduce to apply the parallel kinematics mechanism to concept design of the innovative machine.

Key Words: Material testing machine, Motion simulator, Parallel kinematics mechanism, Tube bending machine

1. はじめに

パラレルメカニズム(PKM)は、複数の駆動アクチュエータをすべて並列に配置することで必要な自由度を得るリンク機構である。この運動機構は、エンドエフェクタを複数のアクチュエータで間接的に支持していることから、リンクの連結部の角度・変位誤差がそれぞれの平均の値となるため、シリアル機構に比べて可動領域は狭くなるものの、リンク機構全体がコンパクトで高精度な姿勢制御を実現できる利点を持っている。こうした特長を活かし、ロボットや各種機械装置に利用されている。

法政大学高機能メカトロデザイン研究室では、(一財)機械振興協会技術研究所殿や(株)菊池製作所ものづくりメカトロ研究所殿、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などと共同で、PKMを応用した様々な産業機械装置の研究開発を行っている。本稿ではPKMを用いたパイプ曲げ加工機と多自由度材料試験機、小形フライトシミュレータ装置について紹介する。

2. パイプ曲げ加工機

Fig.1 に開発したパイプ曲げ加工機¹⁾を示す。油圧式6自由度PKMの台座部に可動ダイスが設置され、固定ダイスとの相対運動により、押し出されたパイプの任意の曲げ加工を実現している。パイプの

曲げ形状は、パイプが押し出される速度に応じて、固定・可動ダイス間の距離と角度をPKMで制御することにより得られる。

3. 多自由度材料試験機

Fig.2 は開発した多自由度材料試験機である。通常の一方向引張材料試験機のヘッド部に6自由度PKMを設置し、多自由度の複合荷重を与えることができる。位置と力のハイブリッド制御手法を導入し、様々な負荷条件に対応した材料試験が実現できる。

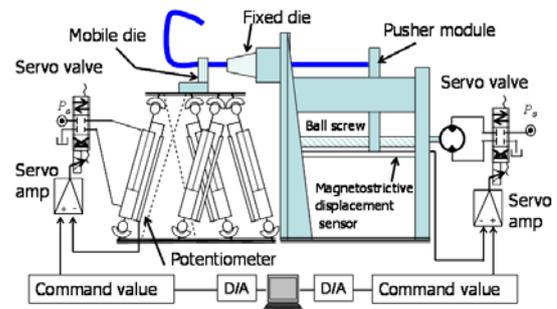


Fig.1 Versatile bending machine

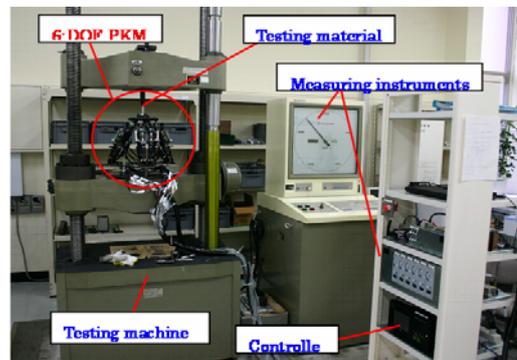


Fig.2 Schematic structure of the proposed material testing system

* 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
** 法政大学デザイン工学部システムデザイン学科
(〒102 - 8160 東京都千代田区富士見 2-17-1)
(E-mail: y_tanaka@hosei.ac.jp)
*** 機械振興協会技術研究所
(〒203-0042 東京都東久留米市八幡町 1-1-12)
*, ** Hosei University
** Japan Society for the Promotion of Machine Industry

4. 小形フライトシミュレータ装置

従来のフライトシミュレータシステムの体感用可動ステージには、Stewart-Gough 形 PKM が広く用いられている。しかしこの PKM は大形で設置面積が広く、アクチュエータ自身がステージを支える構造で、可動角度範囲が小さく、中・小形機の持続的な加減速運動を模擬するには工夫が必要であった。

研究室では従来の PKM に代わり、アクチュエータをすべて土台面に配置した 3 脚 PKM を開発し、これをフライトシミュレータの可動ステージに適用することを提案している²⁾。Fig.3 と Fig.4 に 2 つのタイプの 3 脚 PKM の構成図を示す。いずれも可動ステージが回転ジョイントで固定長の脚の一端で接続され、他端は球面ジョイントを介して平面上を運動するアクチュエータと接続されている。Fig.3 の回転形は脚先端の平面運動がそれぞれ独立した回転方向と半径方向の運動で、Fig.4 の平面形は独立した XY 方向の平面運動である。この 3 脚 PKM は設置面積が小さく、大きな可動角度が得られる特長がある。

航空機の運動特性を評価するために、仮想動作シミュレータを用いてサイズ別の航空機の運動を計測した。航空機の数学モデルは座席数 8 席の King Air, 180 席の Boeing737, 480 席の Boeing747 を用い、パイロット訓練生に仮想動作シミュレータを操作してもらい飛行データを収集した。Fig.5 は仮想動作シミュレータによる飛行データ収集の様子である。航空機モデルに対する収集された加速度と角速度から、飛行運動の体感を模擬する可動ステージの 6 自由度姿勢を算出した。Table 1 に運動を模擬するステージの変位と角度の最大・最小の値を示す。この結果から、小形航空機ほどステージの変位と角度が大きくなるのがわかる。またステージの角度においては、特に角度 θ の範囲が大きく、従来の Stewart-Gough 形 PKM の可動角度範囲では、小形航空機の挙動を十分に模擬できない。

5. おわりに

PKM を用いたパイプ曲げ加工機と多自由度材料試験機、小形フライトシミュレータ装置について紹介した。3 脚 PKM は 3D プリンタのステージやヘッド可動部への適用など様々な応用が期待される。

参考文献

- 1) 五嶋, 田中, 一柳, パラレルメカニズムを用いた曲げ加工機による管材の三次元加工, 日本フルードパワーシステム学会論文集, 第 41 巻, 第 4 号(2010), pp.74-79.
- 2) Y. Shiga, Y. Tanaka, H. Goto, H. Takeda, Design of Six Degree-of-freedom Tripod Parallel Mechanism for Flight Simulator, International Journal of Automation Technology, Vol.5, No.5 (2011), pp. 715-721.

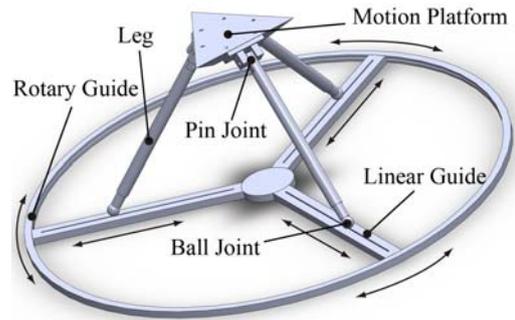


Fig. 3 Rotational type of tripod parallel mechanism

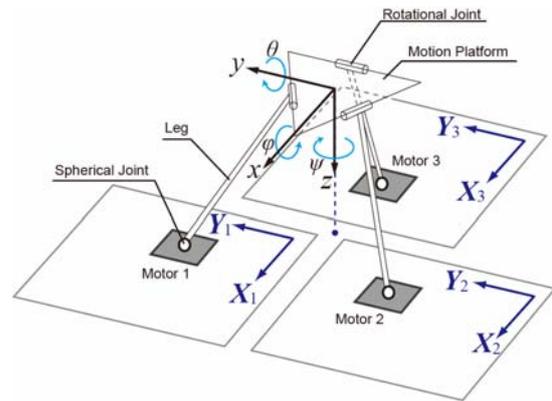


Fig.4 Planar type of tripod parallel mechanism



Fig. 5 Analysis of motion by pilot through visual system

Table 1 Maximum displacements and angles of motion platform simulating the aircraft motions

	King Air	Boeing 737	Boeing 747
x	-1.40 ~ 1.82 m	-0.17 ~ 1.84 m	-0.06 ~ 1.25 m
y	-0.25 ~ 0.48 m	-0.14 ~ 0.08 m	-0.04 ~ 0.04 m
z	-1.03 ~ 0.67 m	-4.59 ~ 1.58 m	-0.64 ~ 1.23 m
φ	-6.3 ~ 10.9 deg	-5.6 ~ 2.8 deg	-2.1 ~ 2.3 deg
θ	-36.3 ~ 26.7 deg	-36.2 ~ 3.5 deg	-23.7 ~ 1.8 deg
ψ	-1.5 ~ 1.7 deg	-0.9 ~ 1.3 deg	-1.0 ~ 0.9 deg