

令和 2 年 6 月 25 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K18076

研究課題名（和文）油と空気の混合作動流体を動力伝達媒介とするアクチュエータの研究開発

研究課題名（英文）Research of Hydraulic Actuator using Oil mixed with Air as a Power Transmission Medium

研究代表者

坂間 清子（SAKAMA, Sayako）

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・産総研特別研究員

研究者番号：70773539

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）：本研究では、大きな発生力と衝撃吸収効果を併せ持つアクチュエータを開発することを目的とし、気泡の混入した作動油を動力伝達媒体に利用した新たな油圧シリンダを開発した。

開発したシリンダの特性を評価するために、本研究では、気泡の混入した作動油の圧力変化と等価体積弾性係数の関係をモデル化し、気泡の混入がシリンダの動作特性にあたる影響を数値解析により評価した。さらに、製作したシリンダを用いた実験的評価も実施し、作動油に混入した気泡の圧縮性がシリンダの応答性低下におよぼす影響はわずかであること、一方、衝撃吸収効果については高い効果が得られることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発したシリンダは、力の発生だけでなく、衝撃を吸収する役割も担うことから、別途衝撃を吸収する機器を取り付ける必要がなく、アクチュエータ部をコンパクトに設計することが可能となる。

また、空気の圧縮性は力の伝達効率を低下させるため、一般的には作動油中の気泡は積極的に除去することが望まれるが、油圧システム中の気泡を完全に除去することは困難であり、気泡は常に油中に混入していると仮定して機器を利用する必要がある。本研究で得られた成果は、作動油中に気泡が混入した油圧システムの解析、制御等にも役立つ有用な知見が多く得られており、あらゆる油圧機器の性能向上への貢献が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, to develop an actuator that has both a large generated force and a shock absorbing effect, we have developed a new hydraulic cylinder that uses oil containing air bubbles as a power transmission medium.

To evaluate the characteristics of this cylinder, we modeled the relationship between the pressure and the effective bulk modulus of hydraulic oil containing bubbles, and evaluated the effect of entrained air on the characteristics of the cylinder by numerical analysis. Moreover, we also conducted some experiments using a prototype for its characteristic evaluations. As a result, it was clarified that the effect of the compressibility of entrained air in oil on the decrease in responsiveness is slight, while it is effective for shock absorption.

研究分野：油圧制御

キーワード：油圧動力伝達システム 作動油 気泡 体積弾性係数 アクチュエータ 衝撃吸収

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

油圧アクチュエータは、他のアクチュエータと比較して発生力や応答性、耐衝撃性に優れ、建設機械や航空機、船舶等の大きな力を必要とする機械システムにおいて必要不可欠なアクチュエータである。最近では、油圧アクチュエータはロボット用のアクチュエータとしても再度注目され始め、身体能力に優れる油圧ロボットが数多く開発されている<sup>①②</sup>。油圧システムでは、応答性に優れるバルブを用いて高剛性状態から弛緩状態に高速に切り替えることで衝撃の吸収が可能になり、脚部に油圧が利用されているロボットでは、大きな衝撃が加えられても転倒せずに即座に姿勢を復元することができる。ただし、高い精度でこの切り替えを実現するには高価な servo バルブが必要となる。衝撃吸収をより容易に実現可能なアクチュエータの一つに空気圧アクチュエータがある。空気圧アクチュエータは、圧縮性の高い空気を動力伝達媒体としているため、アクチュエータ自体に弾性があり、衝撃吸収を容易に実現することができる。ただし、空気圧アクチュエータには油圧アクチュエータほどの発生力はなく、油圧アクチュエータを空気圧アクチュエータに置き換えることは困難である。そこで、本研究では、油圧の大きな発生力と空気圧の衝撃吸収性を兼ね備えた新たなアクチュエータを開発するために、気泡の混入した作動油を動力伝達媒体とする新たなアクチュエータを提案した。

### 2. 研究の目的

本研究では、小形ながら大きな発生力を有し、さらに衝撃吸収性を併せ持つ新たなアクチュエータを開発することを目指し、油と空気の混合作動流体を動力伝達媒体とする新たなアクチュエータの研究開発を行った。本アクチュエータの開発に向け、以下の3つを明らかにすることを具体的な目的としている。

- 1) 所望の性能を実現するための適したアクチュエータ構造
- 2) 気泡の混入した作動油の圧力変化と剛性（体積弾性係数）変化の関係
- 3) 気泡の混入がアクチュエータの動作特性、制御性におよぼす影響

### 3. 研究の方法

本研究では、前項で示した課題を解決するために以下の項目について取り組んだ。

- 油と空気の混合作動流体を封入する部屋を有するシリンダの構造の検討、試作
- 混合作動流体の圧力変化と体積弾性係数の変化の関係のモデル化
- 数値解析および実験によるシリンダの特性評価

### 4. 研究成果

#### 1) 油と空気の混合作動流体を動力伝達媒体とするアクチュエータの構造の検討、試作<sup>③</sup>

図1に動力伝達媒体に混合作動流体を利用するシリンダの概略図と製作したシリンダの写真を示す。本シリンダは、二つのピストンを有し、内部が三つの部屋に分かれている。気泡を含む作動油は、二つのピストンに挟まれた混合作動流体室に封入され、図中の作動油室1、作動油室2にはサーボ弁を介して作動油が流入する。混合作動流体室は、シリンダを制御するためのメイン回路とは別に設けられた混合作動流体循環回路に接続されている。実験では、気泡の混入量を種々変更して混合作動流体を封入し、気泡の混入による効果を実験的に評価する。

#### 2) 気泡の混入した作動油の等価体積弾性係数のモデル化<sup>③~⑤</sup>

気泡の混入した作動油をアクチュエータの動力伝達媒体として利用する場合、気泡の圧縮性がアクチュエータの動作におよぼす影響を考慮する必要がある。本研究では、気泡の混入した作動油の等価体積弾性係数をモデル化し、実験的に測定した等価体積弾性係数の値と理論モデルから算出された値を比較することでモデルの妥当性を検証した。その結果、理論モデルでは、気泡の圧縮・膨張だけでなく、空気の作動油への溶解、作動油からの分離を考慮することで実験結果に近い傾向が示されることが確認された。また、本結果から理論モデルの妥当性が確認され、気泡の混入量を事前に把握することで混合作動流体の剛性の変化を推定できることが示された。さらに、気泡の混入量が未知の条件では、作動油にかかる圧力とそのときの作動油の体積変化から気泡の混入量を推定することが可能となり、本アクチュエータに限らず、作動油中の気泡がアクチュエータの動作特性に及ぼす影響を推定できることが示された。

#### 3) 混合作動流体を動力伝達媒体とするシリンダの特性評価<sup>⑥~⑨</sup>

##### i) 数値解析による評価

提案したアクチュエータをモデル化し、数値解析によって特性を評価した。図2に結果の一例を示す。本解析では、気泡の体積混合比が0%、3.5%、100%の3条件について、ピストン1に一定速度

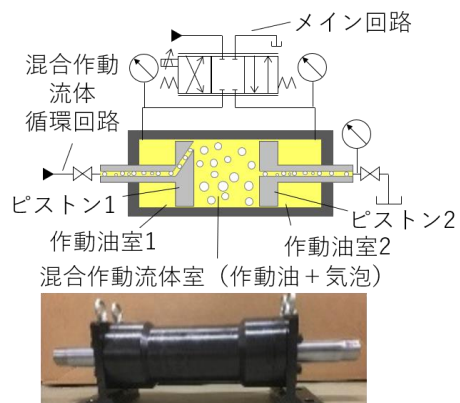


図1 油と空気の混合作動流体を動力伝達媒体に利用した油圧シリンダ

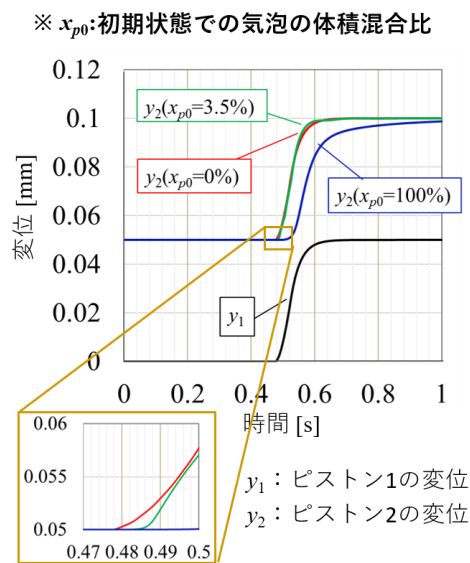
で右方向へ移動させたときのピストン 2 の変位と混合作動流体室内の圧力変化をもとめ、結果を比較した。気泡の体積混合比が 100% の条件では変位応答が大幅に遅れるが、3.5% の条件では応答の遅れはわずかであること、また、応答の遅れがわずかであっても、気泡混入率 3.5% の条件ではピストン移動開始時の圧力の急激な上昇が大幅に低下しており、気泡の混入による緩衝効果が確認された。

ii) 試作シリンダを用いた実験的評価

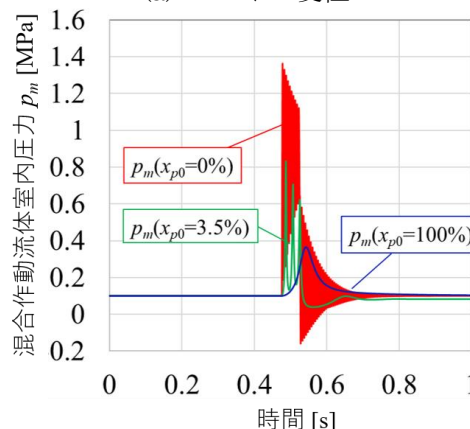
製作したシリンダを用いて気泡の混入の有無によるシリンダの緩衝効果の比較を行った。図 3 に実験結果の一例を示す。本実験では、ピストンの方向を切り替えたときの混合作動流体室内の圧力変化を気泡の混入の有無で比較した。気泡の体積混合比 0% の条件では、方向切り替え時に圧力の急激な上昇・降下が生じているが、気泡の体積混合比が 5% の条件では、圧力の急激な変化が抑えられていることがわかる。なお、数値解析の結果と同様に、実験結果においても応答性に大きな違いは見られなかった。以上のことから、数パーセントの気泡が混入する条件では、混入気泡のアクチュエータの応答性への影響は小さいにも関わらず、高い衝撃吸収効果が得られることが明らかになった。

<参考文献>

- ① Marc Raibert et al., BigDog, the Rough-Terrain Quadpuped Robot, Proc. 17th World Congress the International Federation of Automatic Control, 2008, pp.10822-10825
- ② 鈴森康一, タフロボット用油圧アクチュエータ(「強さ」と「優しさ」をあわせ持つロボットを目指して), 油空圧技術, Vol.55, No.3, 2016, pp.10-13
- ③ 北澤勇氣, 坂間清子, 菅原佳城, 田中豊, 気泡の混入した作動油を動力伝達媒体とする油圧アクチュエータの特性評価, MoViC2017 講演論文集, No.17-13, 2017, B08
- ④ Sayako SAKAMA, Yuki KITAZAWA, Yoshiki SUGAWARA, Yutaka TANAKA, Estimating the Air Volume Fraction in Hydraulic Oil by Measuring the Effective Bulk Modulus, Proceedings of the 11th International Fluid Power Conference, 2018, pp.79-85
- ⑤ 塩田秀人, 坂間清子, 菅原佳城, 田中豊, 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, 平成 30 年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集, 2018, pp.120-122
- ⑥ 北澤勇氣, 坂間清子, 菅原佳城, 田中豊, 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, 平成 30 年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集, 2018, pp.123-125
- ⑦ 北澤勇氣, 坂間清子, 菅原佳城, 作動油と空気を動力伝達媒体とするアクチュエータに関する研究, 第 19 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2018) 講演論文集, 2018, 1D406
- ⑧ 塩田秀人, 坂間清子, 北澤勇氣, 菅原佳城, 田中豊, 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, 日本機械学会 2019 年度年次大会論文集, 19-1, 2019, J11116P14
- ⑨ 坂間清子, 塩田秀人, 菅原佳城, 大きな発生力と衝撃吸収性を併せ持つ新たな油圧シリンダの開発, SAT テクノロジー・ショーケース 2020 アブストラクト集, 2020, p.72



(a) ピストン変位



(b) 混合作動流体室内圧力

図 2 解析結果

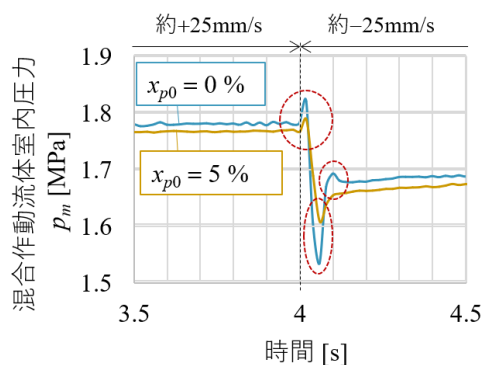


図 3 実験結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>坂間清子, 塩田秀人, 菅原佳城              |
| 2. 発表標題<br>大きな発生力と衝撃吸収性を併せ持つ新たな油圧シリンダの開発 |
| 3. 学会等名<br>SATテクノロジー・ショーケース2020          |
| 4. 発表年<br>2020年                          |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>塩田秀人, 坂間清子, 北澤勇気, 菅原佳城, 田中豊      |
| 2. 発表標題<br>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<br>日本機械学会2019年度年次大会                 |
| 4. 発表年<br>2019年                             |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>塩田秀人, 坂間清子, 菅原佳城, 田中豊       |
| 2. 発表標題<br>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<br>平成30年秋季フルードパワーシステム講演会       |
| 4. 発表年<br>2018年                        |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>北澤勇気, 坂間清子, 菅原佳城, 田中豊               |
| 2. 発表標題<br>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<br>平成30年秋季フルードパワーシステム講演会               |
| 4. 発表年<br>2018年                                |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Sayako SAKAMA, Yuki KITAZAWA, Yoshiki SUGAWARA, Yutaka TANAKA                               |
| 2. 発表標題<br>Estimating the Air Volume Fraction in Hydraulic Oil by Measuring the Effective Bulk Modulus |
| 3. 学会等名<br>The 11th International Fluid Power Conference (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Iori MASUHARA, Sayako SAKAMA, Yutaka TANAKA                       |
| 2. 発表標題<br>Pressure Response of Hydraulic Vessel with Removing Entrained Air |
| 3. 学会等名<br>The 10th JFPS International Symposium on Fluid Power (国際学会)       |
| 4. 発表年<br>2017年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>坂間清子                            |
| 2. 発表標題<br>フルードパワーアクチュエータの特性比較調査           |
| 3. 学会等名<br>第25回フルードパワー国際見本市 カレッジ研究発表展示コーナー |
| 4. 発表年<br>2017年                            |

|                                   |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名<br>坂間清子, 田中豊              |
| 2. 発表標題<br>駆動原理の異なるアクチュエータの性能比較調査 |
| 3. 学会等名<br>日本機械学会2017年度年次大会       |
| 4. 発表年<br>2017年                   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>北澤勇気, 坂間清子, 菅原佳城, 田中豊                |
| 2. 発表標題<br>気泡の混入した作動油を動力伝達媒体とする油圧アクチュエータの特性評価   |
| 3. 学会等名<br>第15回「運動と振動の制御」シンポジウム(MoViC2017)講演論文集 |
| 4. 発表年<br>2017年                                 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|  | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|--|---------------------------|-----------------------|----|