

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：32201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04152

研究課題名(和文)油圧システム用新型圧力脈動抑制素子の数学モデルの確立

研究課題名(英文) Establishment of mathematical model of new component for oil-hydraulic system to reduce pressure pulsation

研究代表者

桜井 康雄 (Sakurai, Yasuo)

足利大学・工学部・教授

研究者番号：70205813

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：成熟した油圧産業のブレイクスルーを達成するため本研究室で開発している油圧システム用圧力脈動抑制素子は油圧システムの脈動を約43%にすることが可能であることが実験的に明らかにされている。この素子は構造が簡単で油圧配管にインラインで取り付け可能である。しかしながら、この素子のどのような特性が圧力脈動の抑制に寄与しているか明らかにされていない。そこで、本研究では、本素子の実験結果とシミュレーション結果を比較しつつ、この素子の設計段階での性能が予測可能な数学モデルを確立した。また、周波数応答試験から、相乗積の2倍の周波数の振幅を本素子は大幅に抑制することで圧力脈動を小さくしていることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究室で開発している油圧システム用圧力脈動抑制素子の数学モデルの検討を行った。この素子は内部の弾性体が金属の隙間を介して大気と接しており、検討事例のない特殊な構造を有する素子の1D数学モデルを導出したことは学術的に大いに興味深い点であると考えられる。さらに、この研究を通して、素子の改良を行い、工作機械でよく利用される3.5MPaという圧力下で圧力脈動を約43% (約3.5MPa±0.07MPa)まで、圧力脈動を低減できるようになった。これにより、実装自由度に富む新たな油圧システム用圧力脈動抑制素子の開発が可能となり、成熟した油圧産業のブレイクスルーに貢献できるものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：In order to achieve a breakthrough in the mature oil-hydraulic industry, the pressure pulsation suppression element for oil-hydraulic systems has been developed in our laboratory. It has been shown experimentally that the element can reduce pressure pulsation in oil-hydraulic systems by about 43%. In addition to it, it is simple in structure and can be installed in-line in oil-hydraulic piping. However, it has not been clarified what characteristics of this element contribute to the suppression of pressure pulsation. Therefore, this study established a mathematical model that can predict the performance of this element at the design stage by comparing the experimental and simulated results of this element. In addition, frequency response tests revealed that this element significantly suppresses the amplitude of the frequency twice the integral multiplication and reduces pressure pulsation.

研究分野：油圧・空気圧

キーワード：油圧 圧力脈動 圧力脈動抑制素子 数学モデル シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

建設機械、乗用車、工作機械等で幅広く利用されている成熟した油圧システムのブレークスルーを実現するためには、その技術が確立されている油圧素子を新たな観点から見直し、新しい素子を提案することが一つの方策である。

油圧システムに発生する圧力脈動を抑制する素子を見直しはそのうちの一つである。油圧システムで発生する圧力脈動を抑制するためには、一般的に図1に示したアキュムレータが用いられる。しかしながら、アキュムレータにはガスが封入されているため、定期的なガス圧力の点検が必要となる。さらに、取り付けスペースの確保、質量の面からは移動用機器に採用した場合にはその重量が燃費に影響する。

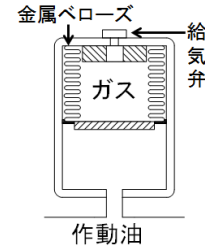


図1 アキュムレータ

この圧力脈動を抑制する試みは音響系で利用される消音器と同様の原理を有する油圧サイレンサを利用することでも行われている。その一種であるヘルムホルツ型油圧サイレンサは構造が単純で脈動の減衰効果が高く建設機械や産業機械に利用されている。さらに、圧力脈動の複数の調和成分に対し減衰効果のある多段ヘルムホルツ型油圧サイレンサが提案され、それを適用することを目標とした研究成果が2001年頃から公表され始めている。しかしながら、この種の機器は狭帯域でしか減衰効果を得られないため精緻な設計が要求され、アキュムレータと同様、取り付けスペースおよび重量に関する問題は解決されておらず、このような視点から圧力脈動抑制素子を研究した事例は無い。

申請者は、このような問題を解決するため、シリコンゴムの弾性を利用し配管にインラインで取り付け可能でアキュムレータやヘルムホルツ型油圧サイレンサのように配管上部に取り付けスペースを必要としない単純な構造を有する圧力脈動抑制素子を提案・試作し、実験的にその性能を明らかにした。その構造を図2に示す。この装置は2本の金属管、シリコンゴムチューブおよび素子本体から構成される。

図3にこの圧力脈動抑制素子で圧力脈動を抑制する原理を示す。作動油がシリコンゴムチューブの内部を流れ内部の圧力が上昇し、金属管のすきままでシリコンゴムチューブの大気に接している部分が膨らみ、金属管のすきまから飛び出す。この部分が微小振動することでシリコンゴムチューブの内部容積が変化し、圧力脈動を抑制する。

代表的な実験結果を図4に示す。この図は素子上流側と下流側の圧力を示している。上流側の圧力脈動の平均的な変動幅は $\pm 0.159\text{MPa}$ であり、下流側の圧力脈動の平均的な変動幅は $\pm 0.084\text{MPa}$ となり、上流側の圧力脈動の平均的な変動幅の約53%となっており、本研究室で提案・試作した素子の有効性が明らかとなった。

しかしながら、良好な性能を得られた理論的な理由付けが今後の課題である。これを実現するための第一段階として、この素子の1Dの数学モデルの導出が必要である。3次元の影響が考えられる素子の1Dモデルに必要とされる因子とそのモデル構造を明確にすることは学術的に意義がある。一方、工学的に意義のあることは、実装自由度に富む新たな油圧システム用圧力脈動抑制素子の開発が可能となり、これを使うことで油圧システムのコンパクト化、軽量化が期待でき、成熟した油圧産業の活性化につながると期待されることである。

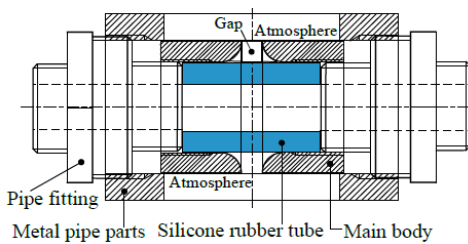


図2 圧力脈動抑制素子

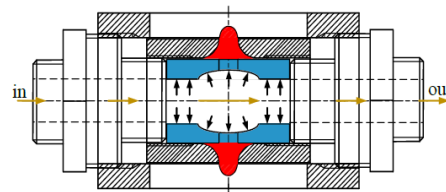
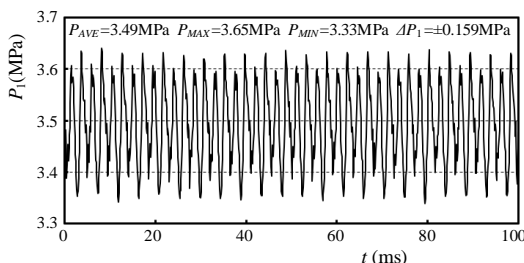
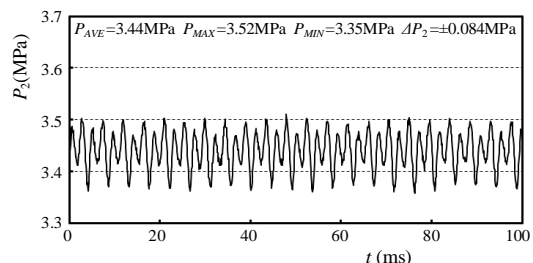


図3 圧力脈動抑制原理



(a) 圧力脈動抑制素子上流側圧力



(b) 圧力脈動抑制素子下流側圧力

図4 実験結果の一例

2. 研究の目的

上述した圧力脈動抑制素子の系統的・効率的な開発・設計にはモデルベースデザインソフトを用いたコンピュータ・シミュレーションが有効な手段となり得る。そこで、本研究では、この圧力脈動抑制素子の1Dの非線形の数学モデルの確立を目的とする。まず、その数学モデルの導出を行い、シミュレーション結果と実験結果を比較検討し、その精度を検討しつつ数学モデルの改良を行う。これにより、圧力脈動抑制素子の数学モデル作成に際して考慮すべき因子が明らかとなる。次いで、この数学モデルを用いて設計パラメータを変更したシミュレーションを行い、設計パラメータと圧力脈動抑制素子の性能との関係を調べ、これを実験で確認する。これにより、この数学モデルの適用範囲が明らかとなる。なお、本研究では、モデルベースデザインソフトとして多くの実績があるAmesimを利用する。

3. 研究の方法

本研究の目的は圧力脈動抑制素子の1Dの非線形の数学モデルの確立である。まず、数学モデルの作成に有効とされるボンドグラフ法の長所を取り出したパワーフローモデリングの考え方に基づき、数学モデルを作成する。その数学モデルによるシミュレーション結果と図5に示した実験装置による実験結果を比較検討し数学モデルの精度について検討する。次いで、圧力脈動抑制素子の重要な設計パラメータである金属管の隙間間隔およびシリコンゴムチューブの硬度を変更し、実験とシミュレーションを行い、本数学モデルの適用範囲を明らかにする。これらの過程で必要であれば圧力脈動抑制素子の構造、使用する弾性体の素材について検討する。

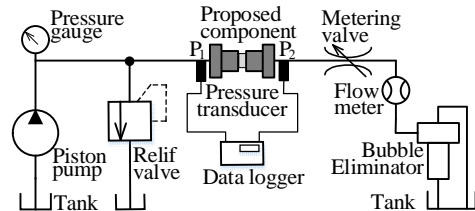
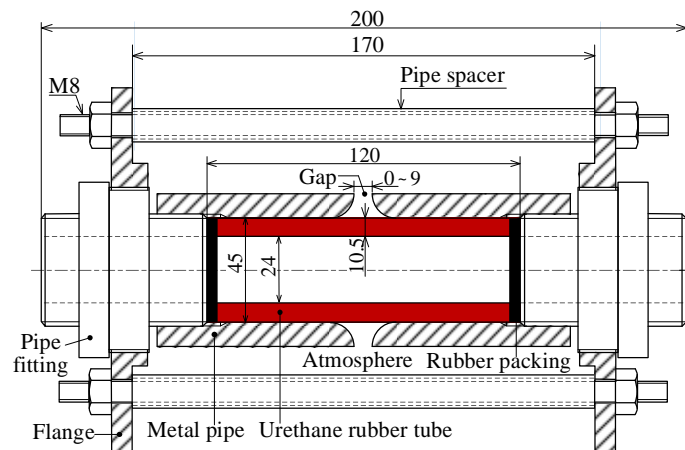


図5 実験装置

4. 研究成果

(1) 圧力脈動抑制素子の構造変更と使用する弾性体の変更

構造に改良を加えた圧力脈動抑制素子を図6に示す。図2に示した圧力脈動素子と基本的な構造は同じであるが、素子本体をフランジの間にパイプスペーサを挟む構造としたこと、ゴムパッキンを素子本体内部に追加したことが改良点である。これらの改良により、金属管のすきま間隔の調整にかかる時間が短くなり、金属管とゴムチューブの隙間からの作動油の漏れが防止できた。また、弾性体の耐久性を向上させるため、シリコンゴムチューブの代わりにウレタンゴムチューブを使用することとした。



(a)改良した圧力脈動抑制素子



(b)全体写真



(c)部品

図6 圧力脈動素子写真

(2) 数学モデルの確立

提案した圧力脈動低減素子の数学モデルの概要を図7に示す。この数学モデルは、流量源、圧力脈動低減素子、絞り弁、およびタンクで構成されている。流量源から供給された流体動力はパイプ1に入る。このパイプを通過した流体動力はウレタンゴムに伝わるかパイプ2に伝わる。ウ

レタンゴムは図7(a)の点線で囲んだ部分のみを考慮に入れた。このウレタンゴムに伝わった流体動力はウレタンゴムの受圧面により機械動力に変換される。実験時ウレタンゴムは微小振動しているため、ばねと質量でモデル化した。パイプ2を通過した流体動力は絞り弁で消費されタンクへ戻る。なお、パイプ1およびパイプ2は容積、慣性および抵抗でモデル化した。

第1段階の数学モデルでは、実験より求めた絞り弁上流側圧力から流量入力値を推定しシミュレーションに使用した。また、ウレタンゴムの弾性はウレタンゴムの内圧を変化させその変位を計測することにより求めた。しかしながら、このような数学モデルでは、設計段階でのシミュレーションが可能であることが望まれる。そのため、これらの値を設計段階で求めることが可能となるようにした。

ポンプ吐出量は油圧ピストンポンプ理論式である式(1)で求めることとした。

$$Q_t = \frac{V_{th} \omega \sin \frac{z_0 \pi}{z} \sin(\theta + \frac{z_0 - 1}{z} \pi)}{\sin \frac{\pi}{z}} \quad \dots (1)$$

ここで、 V_{Th} はピストンポンプの理論吐出量、 z はピストン本数、 z_0 は吐出し工程中のピストン数、 ω はポンプ回転速度である。

ウレタンゴムチューブをモデルに使用したばねのばね定数は薄肉円筒を仮定することにより求めた内圧 p と半径増加量 ΔR の関係式(2)を使い、ウレタンゴムチューブにかかる力と変形量の間を計算することにより別途計算するものとした。

$$\Delta R = \frac{R^2}{tE} p \quad \dots (2)$$

ここで、 E はウレタンゴムチューブのヤング率、 R と t はウレタンゴムチューブの半径と肉厚である。

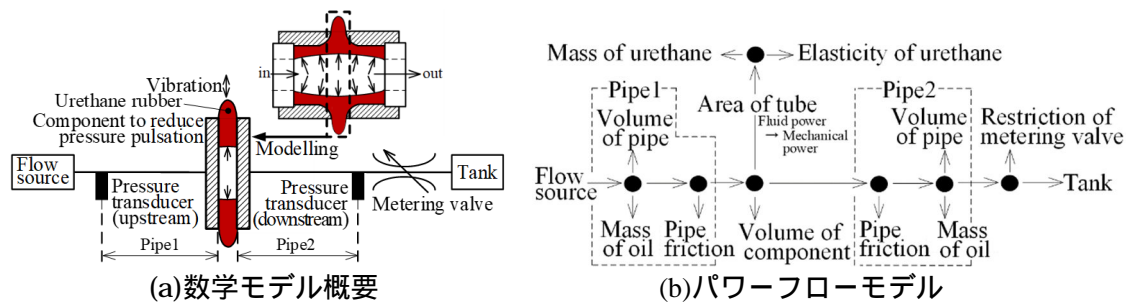


図7 数学モデル

図8に示した Amesim 上のシミュレーションモデルと表1に示したパラメータを用いシミュレーションを行い実験結果と比較検討した。図9に圧力脈動抑制素子上流側圧力 P_1 および下流側圧力 P_2 のシミュレーション結果と実験結果を比較した結果の一例を示す。ここでは、ポンプ吐出し圧力の平均値を約 3.5MPa、管内を流れる油圧作動油の流量を約 $2.50 \times 10^{-4} \text{m}^3/\text{s}$ (15L/min) とした。図9からシミュレーション結果は実験結果を概ねシミュレートできていることがわかる。ただし、実験では下流側の圧力変動幅 ΔP_2 は上流側の圧力変動幅 ΔP_1 の約 44%、シミュレーションでは約 33%となった。よって、上流側と比較して下流側の変動幅が小さくなったという点においては実験結果とシミュレーション結果は一致していることがわかる。

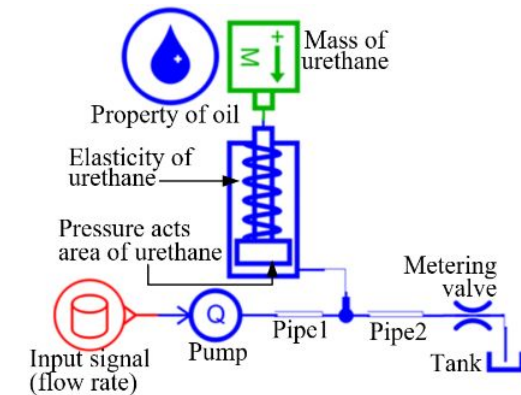
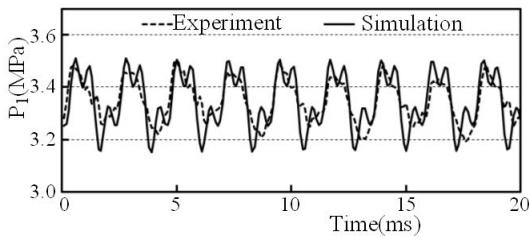


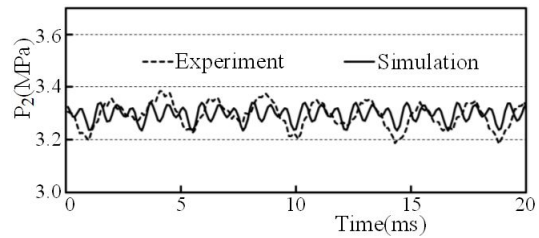
図8 Amesim 上のシミュレーションモデル

表1 シミュレーションに用いたパラメータ

Displacement volume of pump	$4.0 \times 10^{-5} \text{m}^3/\text{rev}$
Number of pistons	9
Pump rotational speed	157rad/s
Density of oil	850kg/m ³
Bulk modulus	1700MPa
Mass of urethane tube	1.75g
Pressure acting area of piston	37.7mm ²
Wall thickness of urethane tube	7.0mm
Modulus of elasticity of	2.53MPa
Spring constant	18.5N/mm
Hardness of urethane rubber	50°
Flow coefficient of metering valve	0.7
Orifice diameter of metering valve	2.33mm
Diameter of pipe 1,2	10.0mm
Length of pipe 1,2	470mm



(a)素子上流側圧力



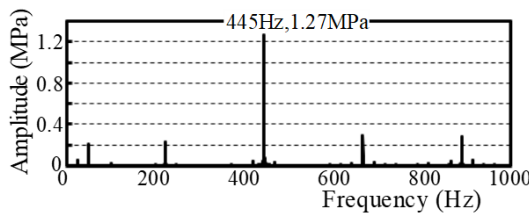
(b)素子下流側圧力

図9 シミュレーション結果と実験結果の比較

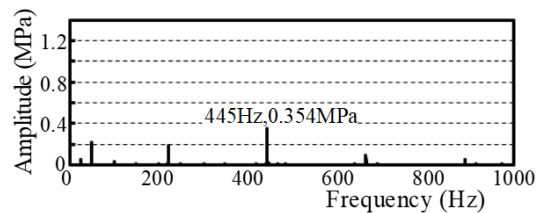
図10に、図9のシミュレーション結果と実験結果を周波数分析した結果を示す。図10(a)に示した実験値の周波数解析の実験結果から上流側圧力 P_1 の振幅が最大の 1.27MPa となっているのはポンプ回転速度とピストン本数で決まる相乗積の約 2 倍の 445Hz であり、下流側圧力 P_2 のこの周波数の振幅が P_1 の約 30% となり圧力脈動を抑制している。また、シミュレーション結果の周波数解析結果からは P_1 の振幅が最大の 1.04MPa となっているのは相乗積の約 2 倍の 449Hz であり、 P_2 のこの周波数の圧力振幅が P_1 の約 10% となり圧力脈動を抑制している。よって、本研究で対象とした圧力脈動に大きく影響している周波数においては、その傾向をシミュレートできていることがわかる。

本研究で提案した数学モデルを用いて、圧力脈動素子の性能に大きく影響を与えると考えられる設計パラメータであるウレタンゴムチューブの硬度 H と金属管の隙間幅 L とを変化させてシミュレーションを行い実験結果と比較した。その結果を表2に示す。この結果より、圧力脈動抑制素子の金属管の間の隙間を大きくする、あるいは、ウレタンゴムチューブの硬度を小さくすると圧力脈動抑制効果が大きくなるという傾向は十分シミュレートできていることがわかる。

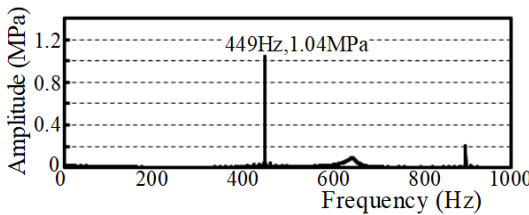
よって、図7に示した簡単な数学モデルでも本研究で対象とした圧力脈動素子の設計段階での設計パラメータと性能の関係を予測可能であり、実機のパラメータ選定に利用可能な数学モデルを導出できたものと考えられる。また、本素子は、ポンプ回転速度とピストン本数で決まる相乗積の約 2 倍の周波数の振幅を抑えることで圧力脈動を抑制していることがわかる。



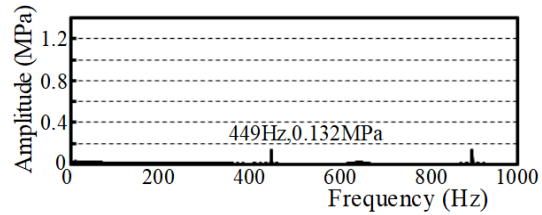
(a)実験（上流側）



(b)実験（下流側）



(c)シミュレーション（上流側）



(d)シミュレーション（下流側）

図10 周波数分析結果

表2 シミュレーション結果と実験結果の比較

H	L mm	$\Delta P_2 / \Delta P_1 \times 100 \%$	
		Simulation	Experiment
A70	2	49	55
A70	4	30	53
A50	2	30	53
A50	4	21	43

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yasuo SAKURAI, Misaki HASHIMOTO, Moritaka MAEHARA, Norikazu HYODO	4. 巻 -
2. 論文標題 Research on an Oil-hydraulic Component to Reduce Pressure Pulsation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 JFPS International Journal of Fluid Power System	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Misaki HASHIMOTO, Yasuo SAKURAI, Norikazu HYODO, Kenichi AIBA
2. 発表標題 Proposal of Innovative Oil-hydraulic Component to Reduce Pressure Pulsation
3. 学会等名 The 8th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 橋本岬, 桜井康雄, 兵藤訓一, 饗庭健一
2. 発表標題 油圧システム用圧力脈動低減素子の改良と数学モデルの提案
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 桜井康雄, 前原護喬, 兵藤訓一
2. 発表標題 シミュレーションによる油圧システム用圧力脈動低減素子の性能の検討
3. 学会等名 2021年春季フルードパワーシステム講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasuo SAKURAI, Misaki Hashimoto, Moritaka MAEHARA, Norikazu HYODO
2. 発表標題 Research on an Oil-hydraulic Component to Reduce Pressure Pulsation
3. 学会等名 The 11th JFPS International Symposium on Fluid Power HAKODATE 2020 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 油圧システム用圧力脈動低減素子の性能
2. 発表標題 桜井康雄, 兵藤訓一
3. 学会等名 2022年春季フルードパワーシステム講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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

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