

報告日 2013 年（平成 25 年）1 月 15 日
報告者 東京工業大学 大学院理工学研究科
機械制御システム専攻 芦 金石

1. 研究概要

(和文)

(1)課題名（日本語）

高応答高効率油圧サーボシステムのためのアクティブチャージアキュムレータの開発

(2)研究者氏名

芦 金石 東京工業大学 理工学研究科 機械制御システム 博士

(3)研究概要（日本文）

高効率な油圧サーボシステムの実現を目指してこれまでの研究において N 圧ハイブリッド油圧源を提案し、例として 2 圧ハイブリッド油圧源を用いた弁制御サーボシステムの実験を行い、その弁制御サーボシステムの高効率と応答性を確認した。一方、この N 圧ハイブリッド油圧源では、複数のアキュムレータを使用するため、アキュムレータの切替、充填は煩雑になる。そこで本研究では、複数のアキュムレータの役割を一つで担える新形のアキュムレータとして、アクティブチャージアキュムレータ（Active Charge Accumulator：略称 ACA）を提案し、例として 2 圧 ACA を用いた弁制御サーボシステムの実験を行い、その高効率と応答性を明らかにした。

(4)キーワード

高効率、ハイブリッド油圧源、アキュムレータ、ACA

(英文)

(1) Research title

Development of Active Charge Accumulator for High Response and High Efficiency Hydraulic Servo System

(2) Name of researcher with title of position

Jinshi Lu, Doctor, Tokyo Institute of Technology

(3)Summary

To achieve efficient hydraulic servo system, N-level pressure hybrid power supply has been proposed in a previous study. As an example, experiments of 2-level pressure valve-controlled hydraulic servo system have been performed. The experimental results showed the high efficiency and response of the system. On the other hand switching supplied pressures from accumulators and charging oil to accumulators are cumbersome for using multiple accumulators in the N-level pressure hybrid power supply. In this study, in order to replace N accumulators of N-level pressure hybrid power supply, a new “Active Charge Accumulator” (ACA) is proposed. As an example, experiments of valve-controlled hydraulic servo system using 2-level pressure ACA have been performed. The experimental results showed the high efficiency and response of the system.

(4)Key Words

High efficiency, Hybrid power supply, Accumulator, ACA

2. 本研究の意義・特色

油圧サーボシステムの高効率化を目指した研究として現在主に研究されているポンプ制御システムはシステムの効率は良いが応答性が必ずしも十分ではないという欠点があり、これに対して、従来の弁制御サーボシステムはシステムの応答性は良いが効率が悪いという欠点がある。そこで本研究に先立つ研究において N 圧ハイブリッド油圧源を提案した。そして、例として 2 圧ハイブリッド油圧源を用いた弁制御サーボシステムの実験を行い、その弁制御サーボシステムの高効率と応答性を確認した。この N 圧ハイブリッド油圧源は、高応答ではあるが出力圧力の異なるアキュムレータを複数個使用するため、アキュムレータの切替、充填が煩雑になる。そのため本研究では、出力圧力の異なる複数個のアキュムレータの役割を一つで担える、すなわち出力圧力が N 段階に瞬時に変更可能な新形のアキュムレータとして、アクティブチャージャキュムレータ (ACA) を提案し、2 圧 ACA を用いた弁制御サーボシステムの高効率と応答性を検証した。ACA を用いた弁制御サーボシステムは、通常の N 圧ハイブリッド油圧源を用いた弁制御サーボシステムに比べて、N 圧ハイブリッド油圧源をコンパクトに実現できるという利点がある。

3. 実施した研究の具体的内容、結果 (本文)

3.1 アクティブチャージャキュムレータ (ACA)

N 圧ハイブリッド油圧源は N 個のアキュムレータとポンプを交代させながら N 段階の圧力の圧油を供給する。Fig.1 の破線枠内はその基本概念を示している。必要とする N 段階の出力圧力となるよう窒素ガスを充填した N 個のアキュムレータとその各々の出入口を開閉する切換弁、およびポンプとそれをアンロードするアンロード弁から構成される。運転時は、各アキュムレータ出入口の切換弁を適宜開閉して必要とする出力圧力のアキュムレータを選択し、そのアキュムレータへの油の充填およびアキュムレータからの放出を行う。さらに N 圧ハイブリッド油圧源ではリリーフ弁は用いないので無駄流量は生じない。またポンプはアキュムレータに圧油を充填したのちアンロード弁によってアンロードされるため、ポンプ駆動の無駄エネルギーも少ない。以上のように、このシステムでは高応答な制御に必要な圧力に応じて回路圧力を N 段階に瞬時に変化させると同時に、アキュムレータに無駄なく油を蓄積させるため、省エネルギーとなる。

本研究では、ピストン形のアキュムレータの油室側の有効面積を変えることにより、出力する油圧を瞬間に変更することが可能なアキュムレータを考案し、これをアクティブチャージャキュムレータ (ACA) と呼ぶこととした。この ACA があれば複数本のアキュムレータを 1 本に集約することができる。Fig.1 の破線枠内部分に示した N 個のアキュムレータの代わりとなる N 圧 ACA を Fig.2 の破線枠内部分に示す。ACA には N 個の油室がある。油室の受圧面積をそれぞれ $A_1, A_2, \dots, A_N$ とする。Fig.2 に示した出入口に設置された 3 方向切換弁 $V_2, \dots, V_N$ により、各油室は OFF では回路に、ON ではタンクに接続される。

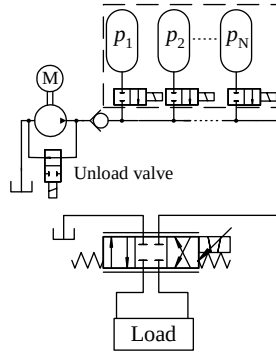


Fig.1 N-level pressure valve-controlled hydraulic servo system

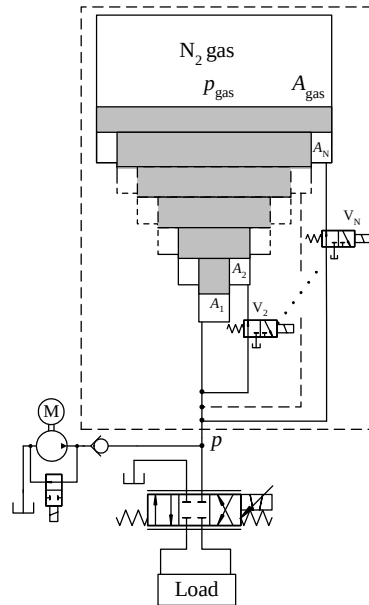


Fig.2 N-level pressure ACA valve-controlled hydraulic servo system

ピストンに作用する力のバランスから，ACA の出力圧力 p の表示式として式(1)を得る．すなわち少なくとも N 段階（組合せによってそれ以上）の出力圧力を得ることができる．

$$p = \frac{A_{\text{gas}}}{\sum_{\text{(valve off)}} A_i} p_{\text{gas}} \quad (1)$$

なお， A_{gas} は N_2 ガス側の受圧面積であり， p_{gas} は N_2 ガスの圧力である．また式(1)の分母は，入口の切換弁が OFF となっていて回路に接続された状態の油室の受圧面積の総和である．特に，全ての切換弁が OFF の場合は油室の受圧面積の総和は A_{gas} に等しくなり， $p=p_{\text{gas}}$ となる．

3.2 2圧 ACA の設計

ACA の特性を検証するために，2 圧ハイブリッド油圧源の 2 つのアクチュエータの代わりとなる 2 圧 ACA を開発製作した．

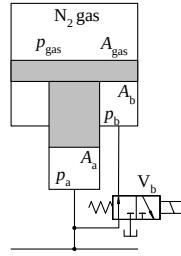


Fig.3 Schematic diagram of 2-level pressure ACA

低圧モードと高圧モードを持つ 2 圧 ACA を Fig.3 に示す. ACA の低圧モードの圧力範囲を 2.7~2.87MPa に, 高圧モードの圧力範囲を 8.4~8.7MPa に設定した. これを実現するため, 受圧面積比は式(2)のように設定した.

$$A_a : A_b : A_{gas} = 0.32 : 0.68 : 1 \quad (2)$$

開発製作した 2 圧 ACA のピストンの各受圧面積 A_a , A_b , A_{gas} はそれぞれ 121.6cm^2 , 258.4cm^2 , 380cm^2 である. なお ACA のピストンのストロークは 45mm である.

3.3 2 圧 ACA を用いた弁制御サーボシステム

3.3.1 高効率の検証

2 圧 ACA を用いた弁制御サーボシステム (略称: 2 圧 ACA システム) を Fig.4 に示す. 油室 b の出入口に設置する高速の切換弁として高速リニアサーボ弁 (周波数応答 $330\text{Hz}@-3\text{dB}/410\text{Hz}@-90^\circ$) S_2 を使用する. またシリンダの位置及び力を制御するサーボ弁として高速リニアサーボ弁 (周波数応答 $350\text{Hz}@-3\text{dB}/450\text{Hz}@-90^\circ$) S_1 を用いる. ポンプの

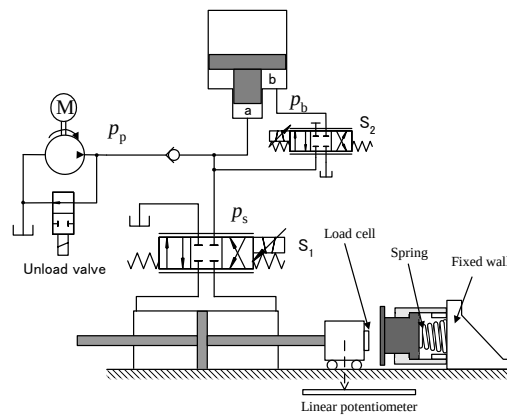


Fig.4 2-Pressure ACA valve-controlled servo system

Table1 Specification of the experimental setup I

Press force	5700N, max
Cylinder	Piston diameter: 22mm Head diameter: 40mm Stroke: 150mm
Spring	26.1N/mm
Pump	6L/min, 1500rpm

アンロード弁として電磁操作式ストップバルブを用いる．ほかのシステムの仕様を Table1 に示す． N_2 ガスの充填圧力は 2.38MPa に設定した．

2 圧 ACA では, 油室側の受圧面積の変化により, ACA からの供給圧力が変化できるので, ポンプから 2 圧 ACA に油を充填する方法として三つの方法がある．第 1 の方法は, 低圧モード時にだけ ACA に圧油を充填する方法である．第 2 の方法は, 高圧モード時にだけ ACA に圧油を充填する方法である．その時, ACA の油室 a を回路に, 油室 b をタンクに接続するので, 油室はポンプからの圧油で充填され, 油室 b はタンクから油を吸い込んで充填される．第 1 の方法あるいは第 2 の方法での充填では不十分となる場合は, 低圧モード時と高圧モード時の両方で充填することが考えられる．これを第 3 の方法という．高効率の検証実験では, 第 1 の方法で実験を行う．

(1) 検証実験その I

ピストンの位置と力の目標値を Fig.5 に示す．ピストンは位置制御で途中からばねを押して進み, 壁に到達したあと力制御となり, その後は位置制御で壁を離れる．

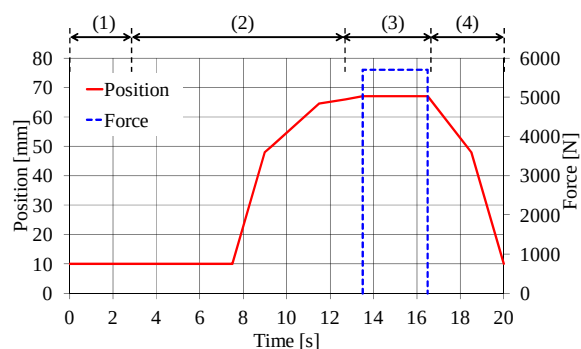
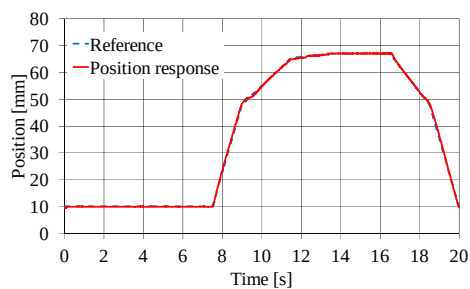
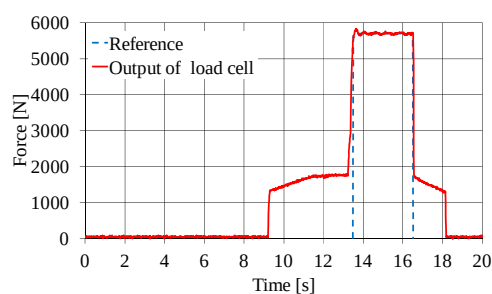


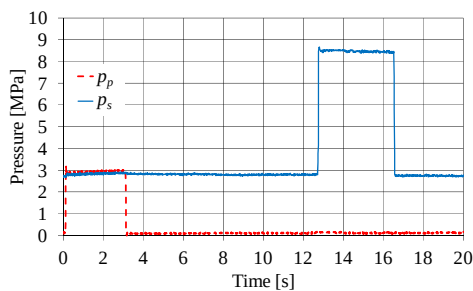
Fig.5 Target (Reference) position and force



(a) Position



(b) Force



(c) Pump pressure and supplied pressure to the servo valve

Fig.6 Experimental results

実験結果を Fig.6 に示す. Fig.6(a),(b)から, 位置決め制御及び力制御は目標によく追従していることが確認できた. Fig.6(c)に示したサーボ弁への供給圧力 p_s から, サーボ弁への供給圧力は負荷に応じて 2 段階に制御されていることが確認できた. Fig.6(c)に示すポンプの圧力 p_p により, 2 圧 ACA システムは従来の弁制御サーボシステムに比べて, ポンプが発生した流体動力の削減率は約 92%であり, 2 圧 ACA は 2 圧ハイブリッド油圧源と同程度の流体動力の削減性能を有することがわかった.

(2) 検証実験そのⅡ

周期 2 秒の正弦状の変位目標値を与えた場合の実験を行った. その結果を Fig.7 に示す. 位置決め制御, 力制御ともに目標値によく追従している. この実験の流体動力削減率は 80%であった. これより 2 圧 ACA は 2 圧ハイブリッド油圧源と同程度の流体動力の削減性能を有することがわかった.

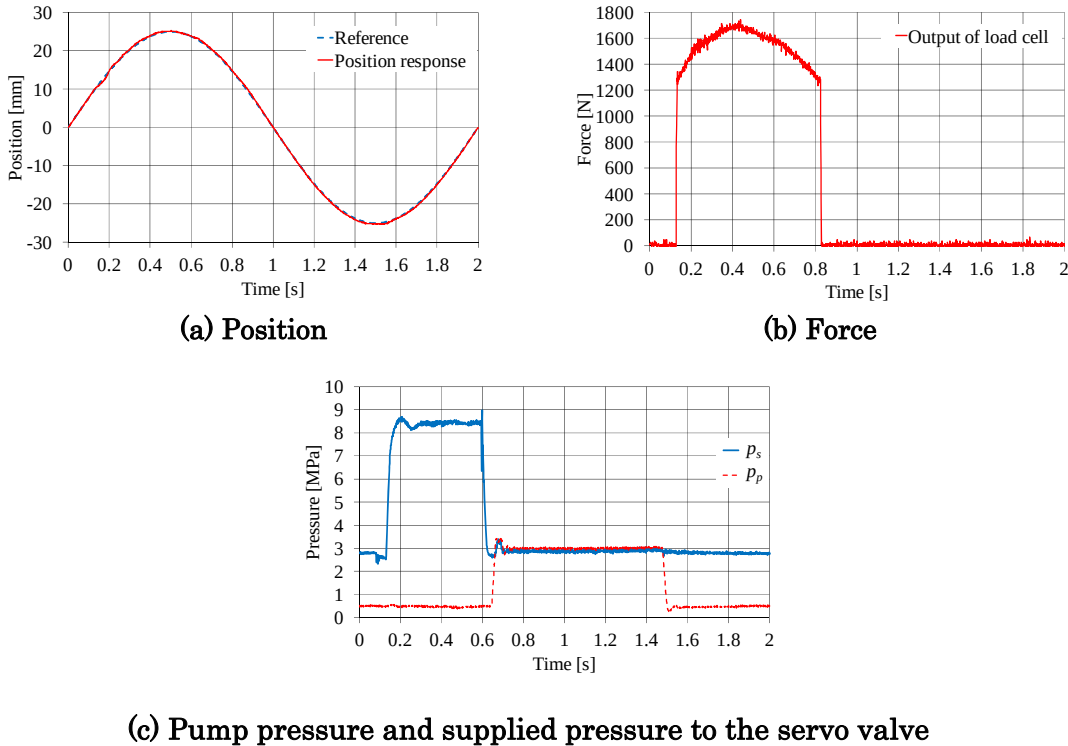


Fig.7 Experimental results

3.3.2 応答性の検証

ACA の応答特性の検証を行うために, Fig.8 に示した実験装置を用いる. 低圧モードから高圧モードへ変える際, 圧力変化を高速にするには油室 b からタンクへの流量を大きくする必要があるため, 油室 b の出入口に高速リニアサーボ弁を 2 台用いた. システムの仕様を Table2 に示す. 大型のスプール弁のスプールを駆動シリンダのピストンとして用いた.

Table 2 Specification of the experimental setup

cylinder	piston diameter: 14mm stroke: 10mm piston mass: 5kg
Pump	15L/min, 1500rpm

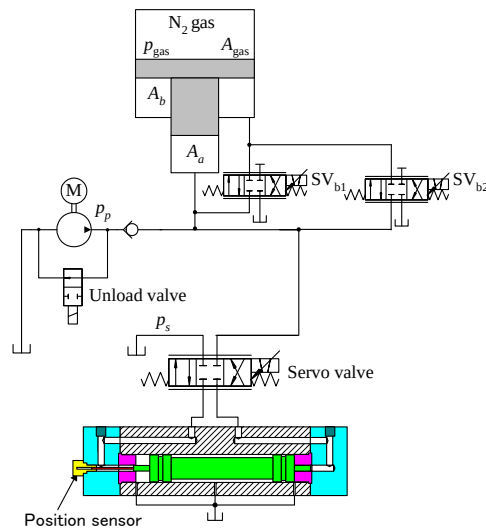


Fig.8 2-Pressure ACA valve-controlled servo system

Fig.9 のような正弦状入力による実験を行う．横軸の T が入力信号の周期，振幅は 5mm である．負荷がピストンだけであるため，高圧モードの区間はピストンロッドの慣性力が最大となるところとする．これは変位が最大となるところであり，Fig.9 の区間 2，区間 4 であり，1 周期中に 2 度の高圧モードが必要となる．その他は低圧モードである．

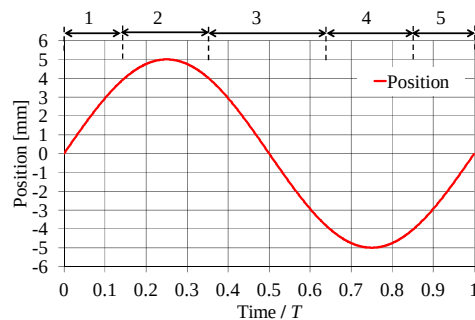
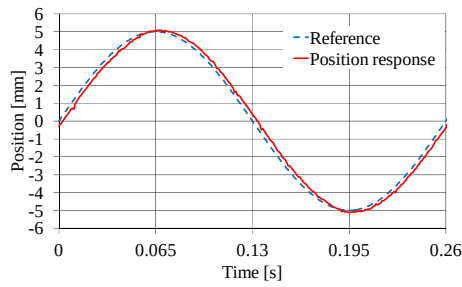


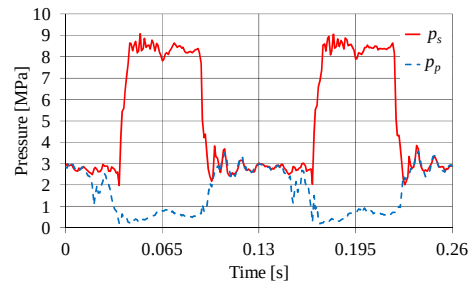
Fig.9 Target of cylinder position

1)実験その I

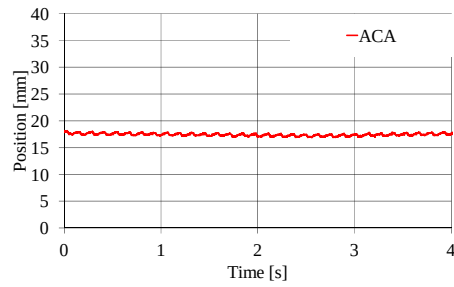
低圧モード時のみ ACA に充填する方法で，応答特性実験を行った．入力は周期 0.26s(約 3.85Hz)の正弦状の信号である．実験結果を Fig.10 に示す．Fig.10(a)から，位置決め制御は目標によく追従していることが確認できる．Fig.10(b)から高圧モード時はポンプがアンロードされ，低圧モード時に ACA が充填されていることが分かる．Fig.10(c)(d)から，ポンプは低圧モード時にずっとロードされているものの，ACA への油の充填が十分には進んでいないことが分かる．すなわち低圧モード時のみ充填する方法では，周期 0.26s(約 3.85Hz)までが限度で，それより短周期の入力信号では ACA の充填が不十分となることが分かる．また Fig.10(d)から，このシステムは従来の弁制御サーボシステムに比べて，ポンプが発生した流体動力が約 79%削減されているのが算出された．



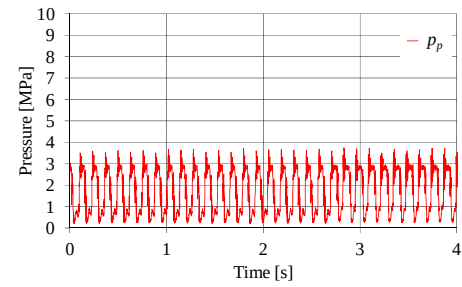
(a) Position



(b) Pump pressure and supplied pressure to servo valve



(c) Position of ACA in 4[s]

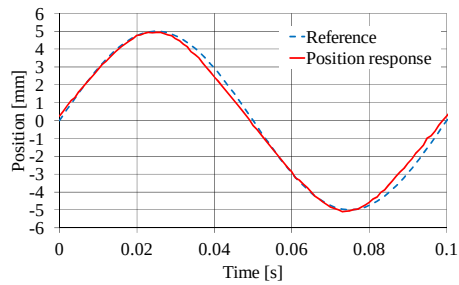


(d) Pump pressure in 4[s]

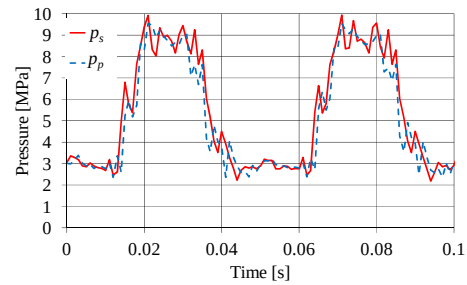
Fig.10 Experimental results (0.26[s](3.85[Hz]))

2) 実験そのⅡ

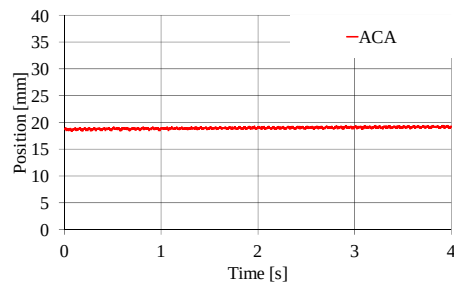
ここでは低圧モードと高圧モードの両方で充填する方法を用い，入力の周期を前節より短くして応答実験を行う．入力は周期 0.1s(10Hz)の正弦状の信号である．



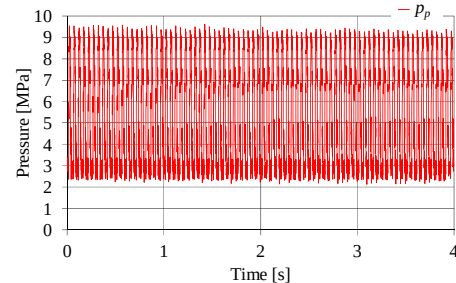
(a) Position



(b) Pump pressure and supplied pressure to servo valve



(c) Position of ACA in 4[s]



(d) Pump pressure in 4[s]

Fig.11 Experimental results (0.1[s](10[Hz]))

Fig.11(a)から、位置決め制御は目標によく追従していることが確認できる。Fig.11(b)(c)(d)から、ポンプはずっとロード状態にあるものの、ACA への油の充填が十分には進んでいないことが分かる。すなわち低圧モード時ならびに高圧モードを充填する方法でも、周期 0.1s(10Hz)までが限度で、それより短周期の入力信号では ACA の充填が不十分となることが分かる。また Fig.11(d)から、このシステムは従来の弁制御サーボシステムに比べて、ポンプが発生した流体動力が約 38%削減されているのが算出された。

なお 2 圧ハイブリッド油圧源を用いた同様の実験では、この限度が 0.05s(20Hz)と更に短周期まで可能で、その際の流体動力の削減率は 56%であった。

3.4 結言

高応答な弁制御油圧サーボシステムのエネルギー効率を大幅に向上させることが可能な N 圧ハイブリッド油圧源をもとに、さらにそれをコンパクトに実現できるアクティブチャージャキュムレータを提案し、開発した 2 圧 ACA を用いた弁制御サーボシステムの実験によってその有効性を確認した。2 圧 ACA は、応答特性やポンプが発生する流体動力の削減率では 2 圧ハイブリッド油圧源に劣るもののシステム構成が簡単になるという利点がある。

4. 本研究を実施したグループに属するおもな研究者の氏名・役職名

芦 金石 東京工業大学機械制御システム専攻 博士
留 滄海 東京工業大学機械制御システム専攻 助教
北川 能 東京工業大学機械制御システム専攻 教授

5. 研究実施時期

2010 年（平成 22 年）10 月から 2012 年（平成 24 年）12 月まで

6. 本研究に関連して発表した主な論文等

- [1] LU, J., LIU, C., KITAGAWA, A., SAITO, M., OSAKA, K., OBA, K., Study on N-level Pressure Hybrid Power Supply Hydraulic Servo System with High Efficiency and High Response, 8th JFPS International Symposium on Fluid Power, 1A3-1, pp.79-84, Okinawa, Japan (2011)
- [2] 芦金石, 留滄海, 北川能, 光畑彰人, 吉澤雄太, アクティブチャージャキュムレータの開発, 第 23 回フルードパワーシステム国際見本市, IFPEX2011 カレッジ研究発表・展示コーナー, pp. 23-24, 東京 (2011)
- [3] 北川能, 高効率な油圧サーボシステムを実現する新型アキュムレーター・アクティブ・チャージ・アキュムレーター, 2011 年度産業応用部門大会, 第 12 回流体計測シンポジウム, pp. 30-35, 東京 (2011)
- [4] 芦金石, 留滄海, 北川能, ACA を利用した高効率 N 圧ハイブリッド油圧源に関する研究, 平成 24 年春季フルードパワーシステム講演会, pp. 70-72, 東京 (2012)
- [5] Jinshi LU, Canghai LIU, Ato KITAGAWA, Study on Highly Efficient Valve-controlled Hydraulic Servo System Using Active Charge Accumulator(ACA), The 4th TIT-BIT Joint Workshop on Mechanical Engineering, 121-127(2012)
- [6] 吉澤雄太, 芦金石, 留滄海, 北川能, Active Charge Accumulator を圧力変換装置として用いる事による弁制御油圧サーボシステムの効率向上, 2012 年度産業応用部門大会,

第 13 回流体計測シンポジウム, pp. 87-90, 東京 (2012)

特願 2009-267095 : アキュムレータおよびそれを用いた油圧源 (平 21.11.11)

7. 内外における関連研究の状況

近年, 効率と応答性を両立するため, ポンプの回転数を制御する方法が主に研究されている. そして, 省エネルギーを目指したポンプの回転数制御の製品が多いことが挙げられる. しかし, ポンプ回転数制御では, 応答性の課題が残っている. 例えば, 小物精密成形では樹脂充填開始時の加速時間が重視されるなどシステムの高速度動作の要求が強い. しかし, サーボモータを用いた射出成形機では, 加速時間が 40~60ms になる. 一方, 現在要求されている加速時間は 10~20ms であり, サーボモータの応答性が改善されることが期待されている.

8. 今後の発展に対する希望

応答性の検証実験の結果により, 必要な流量が小さく圧力モードを頻繁に変更する場合, 2 圧 ACA の応答性や効率は, 2 圧ハイブリッド油圧源より劣ることが分かった. したがって, 必要な流量が大きく圧力モードの変化が比較的遅い場合に, ACA を用いた高効率な弁制御サーボシステムが使用されることが期待される. そして, ACA 油室の出入口の直径, 油室の出入口に接続される切換弁の検討などを行い, ACA の応答性と効率を更に向上させることが今後の研究課題である.