

高速電磁弁・比例弁・比例シート弁による電子油圧制御

Electro-hydraulic Control by Switching Valve, Proportional Valve and Wide-range Seat Valve.

横浜国立大学大学院工学研究科

教授 田中裕久

1. はじめに

作動の信頼性、制御性、コストパフォーマンスの良い電子油圧制御を望むとき、電磁ソレノイドで駆動される弁を用いたサーボ機構は油圧機械システムの電子制御化に大きな役割をもつ。圧力や流量を可変制御する方法には、弁の開口面積を変えることにより行う連続流体制御式（比例弁など）と、オンオフする弁の開口時間率で流体パルス列を形成し油圧の慣性と圧縮性を利用して低周波成分のみを通過させる機能により連続流体量に変換する手法がある^{(1),(2)}。特に後者は1984年に農業機械の位置サーボ機構に、また同時に自動車用自動変速機の変速ショックを低減するためのクラッチの締結圧力制御に適用された。1988年には3ボールからなるチェック弁機能を備えた3ポートの高速電磁弁ができ、トラッククレーンの遠隔制御に実用化され、1995年には建設機械の電子ジョイスティック化を可能としている。この流体パルス幅変調制御方式の課題は、パルス列の発生に伴う騒音があること、復調周波数が変調周波数の1/10程度となるため一般に10Hz程度の応答作業内容に留まることである。高速電磁弁の応答速度を200~300Hzの変調周波数で作動させることができれば、騒音となる基本周波数を油圧の絞りをういて除き易く、また復調周波数も20~30Hzと高くできる。一方、比例弁は騒音の問題はないが、比例ソレノイドの構造が電磁力の一部を捨てながら変位によらず電流に比例する電磁力を発生する磁気回路をもっているため、オンオフソレノイドに比べてサイズが大きな割りに電磁力が小さいという欠点がある。これを補うためにソレノイドのターン数を多くしたり、鉄心のサイズを大きくする方法がとられるが、インダクタンスや質量は増え、印加される電圧に対する電流の立ち上がりの遅れが大きくなり、応答時間も20~30msかかるという課題がある。このような課題に対して、高速電磁弁も比例弁も高速作動させる方法に、励磁電圧波形として、瞬間的に高い電圧を加え電流を速く立ち上げるとともに、オフ時の渦電流による磁束の流れを逆電圧をかけて強

制的に止めることが有効である⁽³⁾。ここでは、このような手法により高速電磁弁と比例弁を高速作動する方法と実際のソレノイドの鉄心を流れる磁束の過渡状態を測定した結果を紹介したい。さらに、新しい概念の高速制御弁として、高速電磁弁をパイロット弁とする、少流量から大流量まで比例制御できる主弁の位置をフィードバックする機構をもつ比例シート弁を取り上げる。この弁の応用例として、4ポート弁では困難な重慣性負荷の高速制御時に生じるキャビテーション問題を解決した例⁽⁴⁾を紹介する。

2. 高速電磁弁

図1はポペット形の2ポート弁で開口部の直径は6mm、ストローク0.3mm、コイルは5Ω、12V、2.6Aのもの

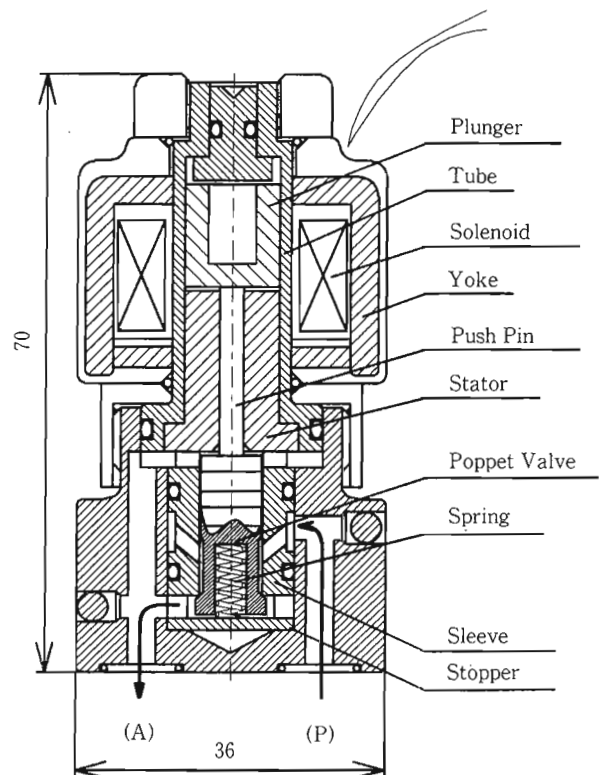


図1 パルス流体制御用高速電磁弁 (HYDIS)

(表1)では、通電後、弁が開くまでの時間は7.9ms、閉じるまで1.3msかかる(図2)。この弁を高速動作させるため、図3に示すようにオン時に0.4ms程140Vという高い電圧 E_1 をかけ電流の立ち上げを速くするとともに、オフ時にも0.3ms程度-140Vという逆電圧 E_3 をかけ磁束 Φ を消

表1 高速電磁弁の流量制御容量とソレノイド

| | |
|------------------|-------------------|
| <u>Valve</u> | |
| Diameter of seat | 6 mm |
| Valve stroke | 0.3 mm |
| Flow rate | 5 ℓ/min at 10 MPa |
| Max. pressure | 17 MPa |
| Valve position | Normally Closed |
| <u>Solenoid</u> | |
| Normal voltage | 12 V |
| Current (Max.) | 2.6 A |
| Resistance | 5Ω at 20°C |
| Number of turns | 300 |

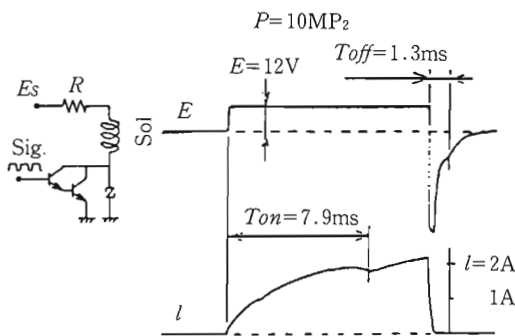


図2 ダーリントン回路による定電圧駆動時の電流波形 (オン時: 7.9ms, オフ時: 1.3ms)

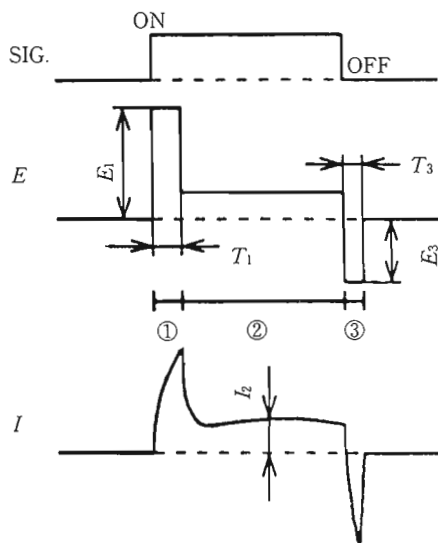
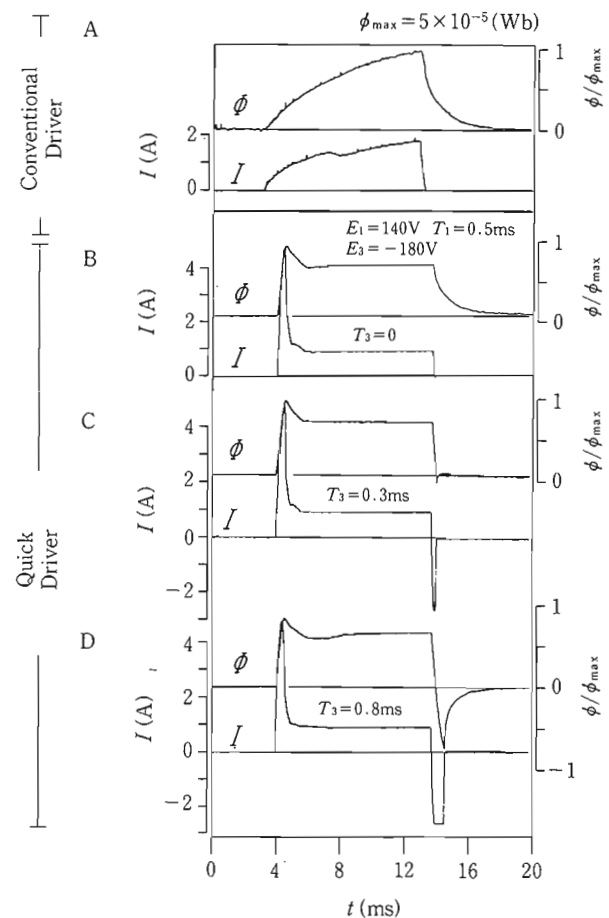


図3 ソレノイドの過励磁 (E_1) と消磁 (E_3) の模式図

すことを考えた。図4は電流と磁束の測定例で、磁束は100ターン程のサーチコイルをヨークに巻いて誘起電圧を積分して求めたものである。図4でAは電圧波形は通常のスティブ状とした時の例で、ソレノイドのインダクタンスと直流抵抗の比で決まる時定数に従って電流の立ち上がりは一時遅れの特性を示している。次に図4のBはオン時のみ高電圧をかけた例で、電流も瞬間的に大きくなり、磁束も速やかに立ち上がっていることが分る。しかし、電流を瞬時に止ても、渦電流のため磁束は消えていない。そこで、図4のCに見られるように逆電圧を短時間かけ、電流を逆に流すことにより磁束を瞬時に消すことができる例である。逆電圧の通電時間を長くしすぎると磁束が逆方向に流れ、ソレノイドには再度吸引力が働き、オフ時間は長くなる。この図からCの過励磁、消磁を行うと磁束をステップ状に流すことができ、電磁弁の作動は最高速で動作する。図5は、このような3電源を用いた励磁回路(クイックドライバと呼ぶ)で、200Hzの周波数でパルス幅変調制



A: 従来の励磁方法 (電流サチレード方式)
B: 3電源方式高速駆動回路 - 強制消磁なし
C: 3電源方式高速駆動回路 - 最適な駆動
D: 3電源方式高速駆動回路 - 過度な強制消磁

図4 ヨーク部の磁束の過渡特性 (測定値)

御した時の流量特性を示す。ちなみに、磁束の過渡状態をFEM磁場解析した結果を示す。この図から磁束は渦電流に遮られ直ちに鉄心の内部に浸透することができずコイルの周りを流れていく様子がわかる。この問題に対処するためには、電気抵抗の大きな磁性材料を用いると改善される。例えば18Cr-2Si-2Moは導電率が通常の低炭素鋼であるSUM材 ($\sigma_{sum}=0.7 \times 10^7$ (S/m)) に比べ1/6程度の $\sigma_{K-M38}=0.118 \times 10^7$ (S/m)である。

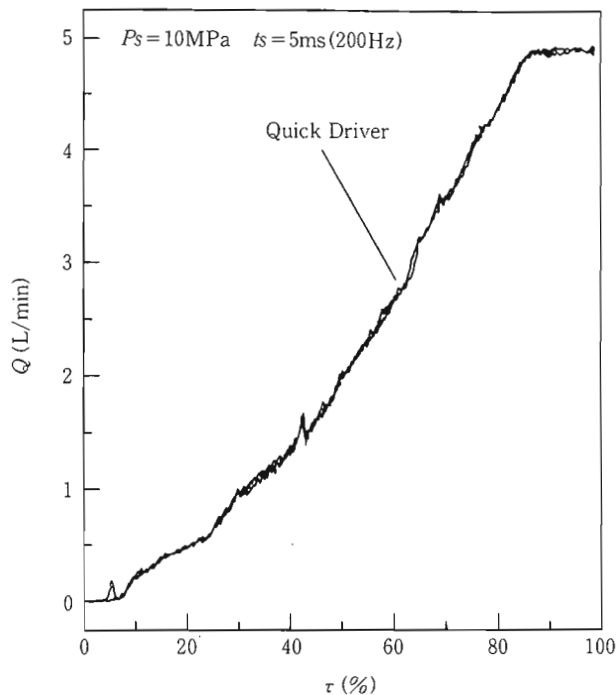


図5 3電源方式高速駆動回路による高速電磁弁のPWM制御流量特性 (PWM: 200Hz)

ルの周りを流れていく様子がわかる。この問題に対処するためには、電気抵抗の大きな磁性材料を用いると改善される。例えば18Cr-2Si-2Moは導電率が通常の低炭素鋼であるSUM材 ($\sigma_{sum}=0.7 \times 10^7$ (S/m)) に比べ1/6程度の $\sigma_{K-M38}=0.118 \times 10^7$ (S/m)である。

3. 比例弁

比例ソレノイドも過励磁法により電流の立ち上げを速くし高速化できる。図6は比例ソレノイドの外周の磁気誘導部の一部を切り開きサーチコイルを巻き、磁束の過渡状態を測定した模式図である。図7は通常のステップ状の電圧を測定した模式図である。

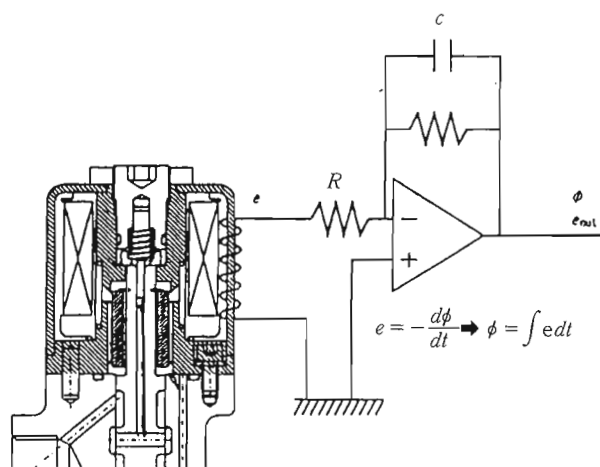


図6 比例ソレノイドの磁束測定法の模式図

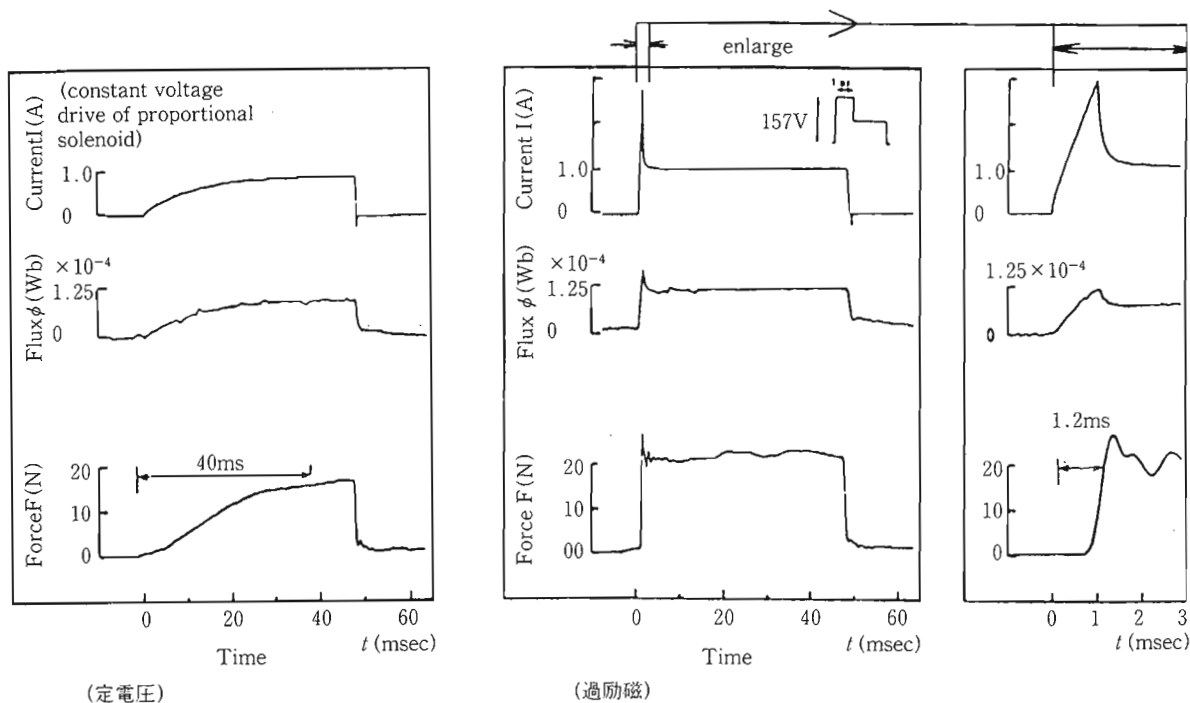


図7 比例ソレノイドの定電圧駆動と過励磁駆動の磁束の立ち上がりの比較 (実測例)

を比例ソレノイドにかけた場合と、過励磁した場合の磁束の立ち上がりを実測比較したもので、通常の励磁では1Aの電流の立ち上げ及び磁束の立ち上げが遅く、20Nの電磁力の発生に40ms近くかかっている。一方、過励磁を行うと、瞬間電流は2.5A程度流れるが、1.2msの速さで電磁力が発生している。ちなみに、比例ソレノイドの鉄心に流入する磁束の過渡状態を本研究室で開発したFEM非線形動磁場解析法により図示したものを図8に示す。図8は通常の磁性材料SUM22と電気伝導度の小さい電磁ステンレス鋼の違いによる過励磁時の磁束の鉄心部への流入の差を比較したもので、後者の方が渦電流が少ない分、磁束の流れ込みが速いことがわかる。一方、比例ソレノイドの静特性では、機械的な摩擦によるヒステリシスと磁気ヒステリシスがあり、前者の対策にはアーマチャ（可動子）の偏心率を60%以内となるように支持すると横力を大幅に下げられるので、両持ちの軸受（転がり、または滑り）をいれるか、半径隙間に対応する薄いステンレスチューブ（強磁性体ではない材料）で可動子を支持すると良い。一方、磁気ヒステリシスの低減には通電を止めた時の残留磁束密度の小さい材料を選ぶか、逆磁場を瞬間的にかけ強制的に消磁する方法が考えられる。

4. 比例シート弁

高圧化に対応するため漏れを無くすこと及び微小流量から大流量まで制御できることを目的に、著者らは比例シート弁を開発している。この弁は、図9に見られるように上部に面積差をもつパイロットピストン部を持ち、そこに位置を直接フィードバックするフィードバックスロットが

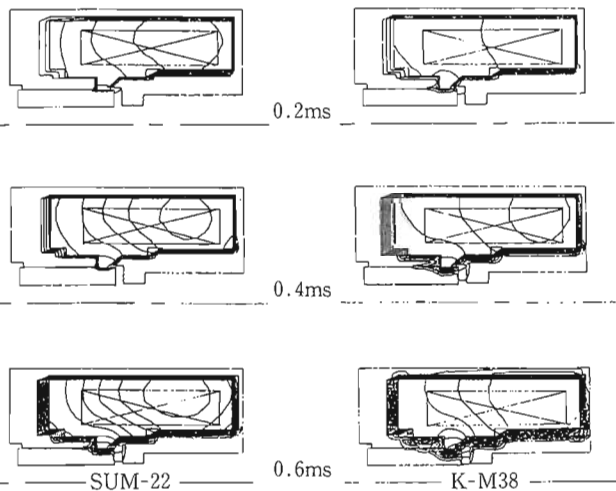


図8 比例ソレノイドの非常常磁場FEM解析、低炭素鋼(SUM-22)と電磁ステンレス鋼(K-M38)の磁束の浸透速さの比較

加工された2ポート型のシート弁である。出力側は負荷の影響を少なくするためバランスピストンが設けられている(図10)。パイロット流量は比例弁や高速電磁弁で制御するもので、パイロット弁の開口面積と主弁のフィードバックスロットの開口面積がほぼ比例的に制御されることにより、主弁の位置が制御される。パイロット弁が閉じていれば、主弁パイロット室はアンダーラップ加工されたフィードバックスロットより元圧が導かれ、主弁をシート部に押し付けるため主弁からの漏れは無い。このように主弁は油圧で支持されるので共振周波数を1.4kHzと高くでき、高圧高速制御に適する。図11はパイロット弁に高速電磁弁を用い、これを200HzのPWM(パルス幅変調)制御した時の流量特性例である。PWM信号のキャリア周波数成分はパイロット部に挿入される絞りと容積で取りさることができ、騒音を低減できる。なお、パイロット弁に比例弁を用いることもできるが比例弁のヒステリシスがそのまま増幅されるので、注意が必要である。この2ポート弁を4つ組み合わせるとサーボ弁と等価になり(図12)、ラップ

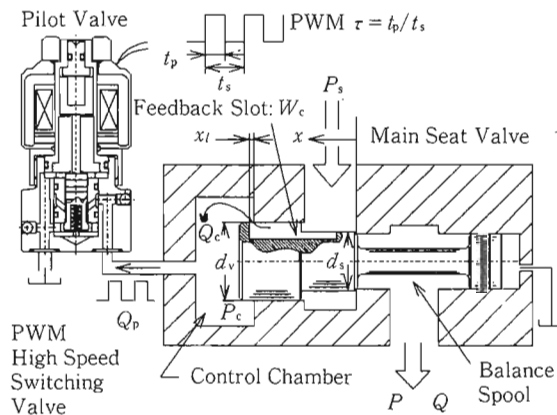


図9 PWM高速電磁制御比例シート弁 ($d_v=24\text{mm}$, $d_s=17\text{mm}$, $X_1=0.5\text{mm}$)

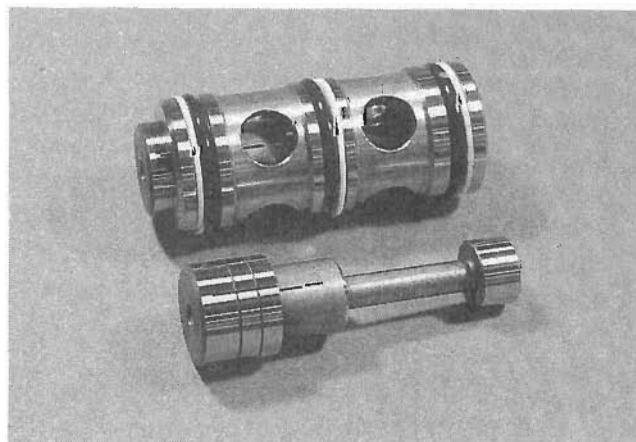


図10 フィードバックスロットをもった2ポート形比例シート弁

量の電氣的制御が可能となるだけでなく、重慣性負荷の切換え時のショックの低減やキャビテーション問題に対して開口タイミングを電氣的に制御できるので、調整が行える。このような適用例として、油圧パンチプレス的高速位置制御を行った例を図13に示す。低圧大流量油圧源と高圧少流量油圧源との組み合わせにより、通常のシングルポンプ方式に比べ消費電力を大幅に低減できるのも長所である。

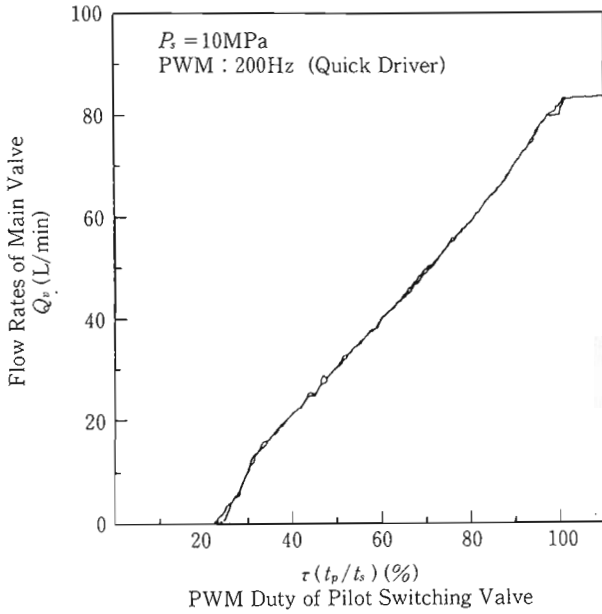


図11 高速電磁弁制御比例シート弁の流量特性 (PWM: 200Hz, 3電源過励磁・消磁・高速ドライバ使用)

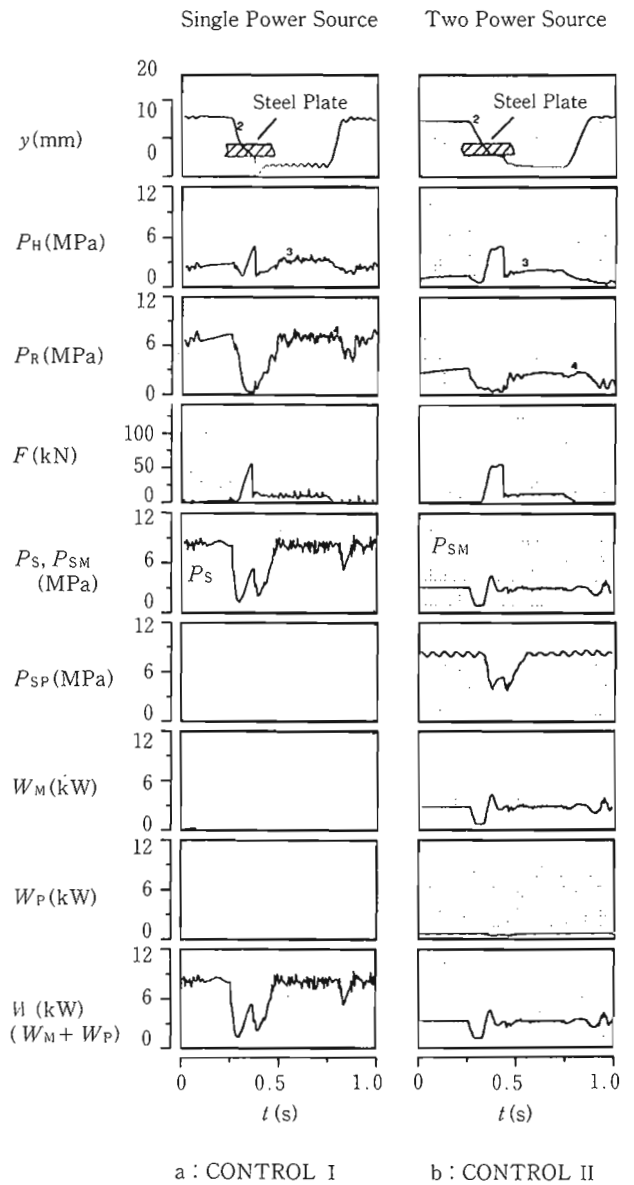


図13 1ポンプ定圧制御(a)と2ポンプ低高圧ポンプ制御(b)によるパンチプレス作業(板厚2mm)時の消費動力(W)の比較

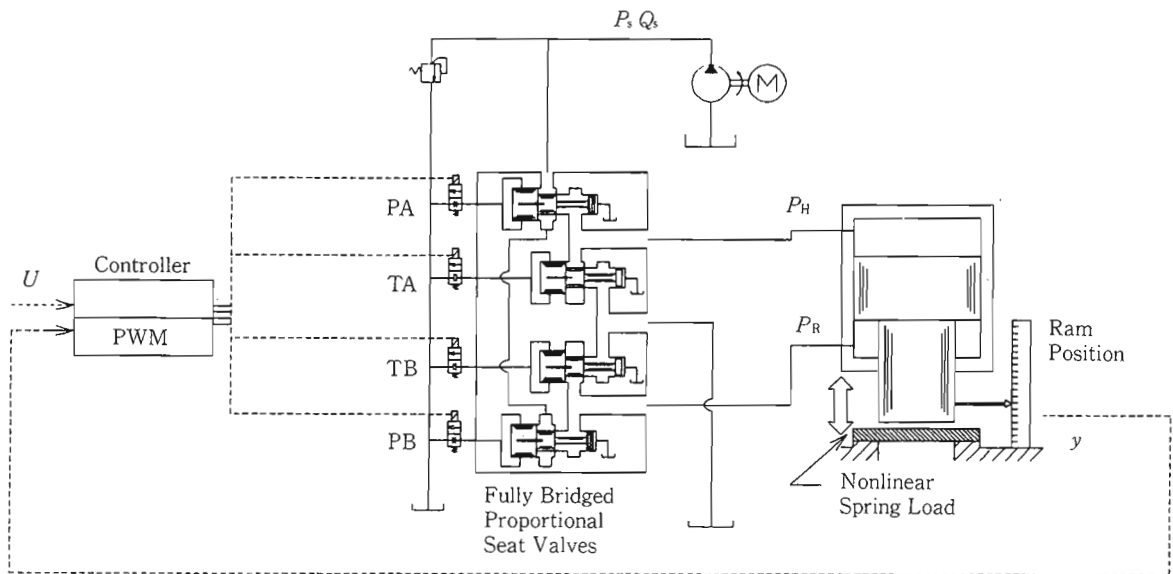


図12 パンチプレス制御用比例シート弁制御回路

5. あとがき

電気油圧制御を普及するためには、信頼性が高く、制御性の良い弁が必要である。高速制御を可能とするための流体制御法をハードウェアとソフトウェアの両面からさらに開発する必要がある。本報告では、高速電磁弁、比例弁、比例シート弁について、著者らが行っている研究例を紹介した。

文 献

- (1) 田中；高速電磁弁に関する研究，機論，50 (457)，p.1594-1601 (1984)
- (2) 田中，荒木；3方向形高速電磁弁の電子油圧デジタル制御，機論，50 (458)，p.2663-2666 (1984)
- (3) 佐藤，田中，矢内；高速電磁弁の切換え特性に及ぼす渦電流の影響，油圧と空気圧，24 (4)，p.504-510 (1993)
- (4) Y.Sato, Tanaka, H.Nagata；Fluid power control by fully-bridged electro-hydraulic proportional seat valves, 3rd, JHPS Symposium, p.313-318 (1996)



田中裕久