

空気圧サーボ弁と空気圧サーボ系の解析と設計〔6〕

番外編

技術資料の掲載が 1 年あまり滞っていた。その間、直動弁の高速化に関わっており、一応成果が出たので、他のサーボ弁についても応用がきくと考え、番外編として報告し、技術資料の一つとする。そのあと続けて技術資料の継続した作成を再開することとした。

VCM (Voice Coil Motor) を用いた直動型サーボ弁 (以降直動型サーボ弁) の高速化

直動型サーボ弁は、耐ごみ性 (作動油中のごみがある程度あっても壊れにくい) があり、かつ高い応答速度が必要とされる鉄鋼製造設備、例えばローリングミルによる板厚制御、ダウンコイラなどに長年使用されている。また、より高い応答速度が必要とされる試験機等に使用されている。油中のごみによる案内弁の摩耗の影響を小さくするためには、スプールのストロークを大きくし、スプールスリーブ間のクリアランスを大きくする必要がある。半面、高い応答速度を得るにはストロークを小さくする必要がある。大きな容量で高速応答を必要とする場合は直動型サーボ弁をパイロットとした 2 段型サーボ弁が構成される (例えば MTS 社シリーズ 257 サーボ弁)。

ある意味、特殊用途で用いられていた直動弁に汎用性を持たせるため、筆者らは前職で当時、住友特殊金属 (株) で開発されたネオジウムマグネットを用いてストロークの大きな直動型サーボ弁 (SH 型) を開発した。20 年以上前になるが、その当時のサーボ弁の置かれた状況が気分的によく出ている私的にまとめた文章があるので、末尾に参考として添付する。

その後、新しい直動弁がパーカー・ハネフィン社 (D3FP: 定格流量 100L/min、ステップ応答 6mS) 及びサンテスト社 (DA03S-6: 定格流量 60L/min、ステップ応答 2.3mS) で製品化されていた。当社も SH 型サーボ弁と同等のサーボ弁を製品化していた (HSD721: 定格流量 60L/min、ステップ応答 4mS) が、両社に比べ定格流量およびステップ応答の時間が劣るため、より流量の大きな、応答の早い直動サーボ弁の開発が必要であると判断した。前述したとおり、耐ごみ性に大きく関わると考える定格ストロークは従来のものと同様 1.5mm としている。他の 2 社の定格ストロークはいずれも 1mm である。耐ごみ性と定格ストロークとの関わりを定量的に評価することは、いろいろな使用条件の下で難しく、ほとんど経験によっている。よって、今回開発した弁の定格ストロークについても実績のある 1.5mm とした。

VCM の開発

今回の開発の目的は、ボイスコイルのインダクタンスを小さくし、電流の立ち上がり時間を短くすることを主とし、瞬時に流せる最大電流を大きくし、動的ないわゆるトルク慣性比 (F^2/M) を大きくすることによって応答速度を上げ、かつ、より大きな案内弁にすることによってより大きな流量の弁とすることであった。

設計上の了解事項は以下のとおりである。

1) 定常的に通電した場合の連続最大電流: コイルの許容温度上昇 (当社では 60°C に設定) によって決められる。

2) 可動部分の質量およびストローク：可動部分とは主にボイスコイルとスプールである。ストロークは案内弁の摩耗等による性能変化に対する耐久性にかかわる重要な仕様である。可動部分を軽くすること、スプールストロークを大きくすることが高速で、かつ、丈夫で長持ちする弁を作るうえでの要点である。

3) 瞬時に流せる電流とステップ応答速度：ボイスコイルは直流抵抗とインダクタンスを持ち、また、コイルが移動するとそれに比例した逆起電圧が発生する。このため、高速に大きな電流を流すには、コイルに高電圧を印加する必要がある。筆者らが前職で 2KHz の応答の弁を開発した時、印加電圧は 100V を超えていた。このようにボイスコイルに流れる電流が推力にほぼ比例するので、瞬時に流せる電流によってステップ応答が決まる。

本弁ではサーボアンプの電源として広く使用されている 24V 電源を用いることとして開発を進めた。

連続最大電流と瞬時電流との比をどのように選ぶかは、VDC の推力、目標とする応答時間、電源電圧、コイルのインピーダンス等によって必然的に決まる。

開発したサーボ弁の VCM 部分の構造を図 E-1-1 に示す。

各社の弁の仕様の概略を表 E-1-1 に示す。あわせて各社の VCM の構成の概略を図 E-1-2、E-1-3 に示す。

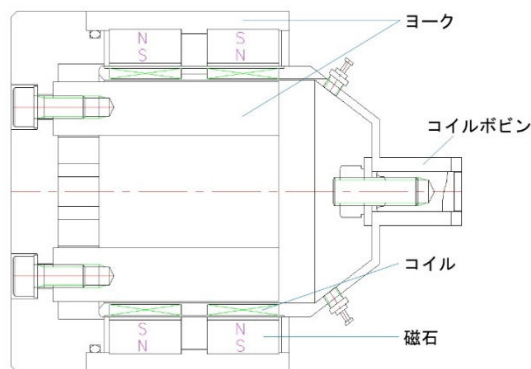


図 E-1-1 開発したサーボ弁の VCM 部分の構造

表 E-1-1 各社の弁の代表仕様

メーカー	型式	定格流量 (l/min)	スプール ストローク (mm)	ステップ応答 (mS)	VCM 部	ドレン圧力 (MPa)
		条件 Pv=7MPa 時		条件 0~フルストローク		
パーカー・ハネフィン	D3FPPE52Y	120	1	< 6	ドライ	3.5
サンテスト	DA035-6	60	1	< 2.3	ドライ	0~0.05
ピー・エス・シー	HS722	100	1.5	< 2.7	ウェット	1
	HS721	60	1.5	< 4	ウェット	1

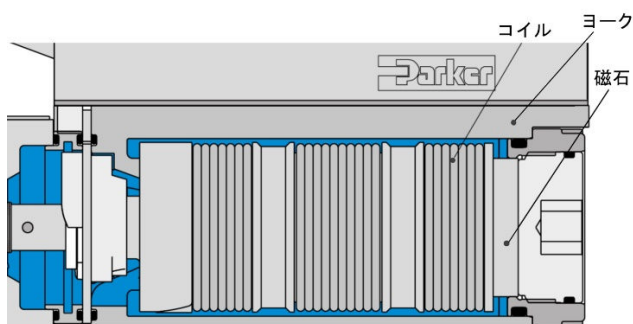


図 E-1-2 パーカー・ハネフィン社の VCM の構造
(パーカー・ハネフィン社資料
https://www.parker.com/Literature/Hydraulic%20Controls%20Europe/HCD%20Brochures/HY11-3280UK%20D_FP.pdf より転載・改変)

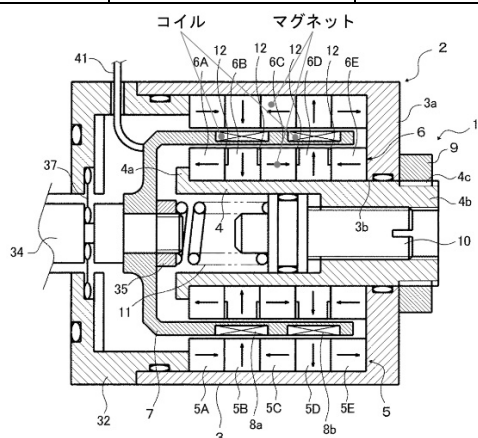


図 E-1-3 サンテスト社 VCM 構造
(サンテスト株式会社、京和泉宏三、ボイスコイルモータ、特開 2016-140229、2016-08-04、より転載・改変)

これらの構造上の特徴について、カタログ仕様から推察し以下に補足説明する。

1) パーカー・ハネフィン社：

- a) ムービングコイル内側にヨークと磁石が数組構成されていて、それに対応するコイルが数列配置されている。よってコイルの発熱は外側ヨークをとおして外部に放熱される。
- b) 正逆コイルが数組構成されているため、コイルのインダクタンスは比較的小さくできる。
- c) コイルボビンが長く、ボビンを支持する特別な構造が要求される。
- d) コイルが長く、推力が大きいと推測できる。

2) サンテスト社：

- a) いわゆるデュアルハルバツハ方式で、内側磁石の脱落防止のための磁石形状が特許になっている。
- b) コイルの内側、外側に磁石が構成されているため、コイルの発熱が外部に放熱されにくい。ネオジ磁石の熱伝導率はヨーク材料に比較し約 1/10 である。よって連続最大電流はあまり大きくできないと推測できる。
- c) コイルの内側、外側に磁石が構成されているため、インダクタンスに関わる磁路のパーミアンスが小さく、かつ、コイルが正逆巻きされているため、インダクタンスは非常に小さいと推測できる。

3) 当社 (HS722)：

- a) 磁石分割方式で空隙の磁束密度を上げる方式となっている。磁石間に新たに磁石を設けたシングルハルバツハ方式とすれば、多少空隙の磁束密度は上がるが、3つの磁石よりなるため構造上複雑になる。また、効果が限定的であるため採用を控えた。
- b) 正逆コイルが構成されているため、インダクタンスは比較的小さい。
- c) 外側と内側のヨークを磁気的につなぐ必要がないため、そのつなぎをアルミ合金で行い、内側ヨークからの放熱をよくしている。これによって連続最大電流を大きくすることができている。
- d) 定格ストロークが 1.5mm と大きく、案内弁を $\phi 8$ から $\phi 10$ に大きくすることによって、従来と同じ外形寸法で定格流量を 60L から 100L (at $P_v=7\text{MPa}$) のものが得られている。

特殊なコイルによって、コイルのインピーダンスを小さくすることができ、大きな電流を流し、より高速化を図ることもできる。駆動電圧を上げることによっても当然、高速化は可能である。ただ、前述した瞬時駆動電流と連続最大電流との比率は上がる。末尾にこれらの弁の応答例 (図 E-1-5、E-1-6) を示す (応答時間: 約 2.3mSec、流量: 100L/min at $P_v=7\text{MPa}$)。

表 E-1-1 に示した構造のものによってほぼ初期の目標が達成できたので開発を終了し、関連する特許、技術資料を調査した。その結果、主なものを末尾に参考文献として示す。

文献[2]の特許は基本構造が本開発品に類似しており、約 40 年前に米国で出願されていた。また、文献[3]に示される弁の構造は本弁と同様であり、米国電気学会 (IEEE/ASME) に約 5 年前に提出された論文である。文献[3]および[4]をみるかぎり、中国での研究が進んでいることがうかがえる。

サーボ弁のドレンの扱いについては、フォースモータ部分をドライにするかウェットにするかで構造上および取り扱い上に違いが出る。パーカー・ハネフィン社、サンテスト社ともにスプールの両端に隔壁を設け、隔壁の内側をドレンに導いてドライ化している。パーカー・ハネフィン社はドレンの圧力範囲 35MPa 以下、サンテスト社は 0~0.05MPa となっており、とくにドレン圧力が負圧での使用はできないとしている。

当社も隔壁についてはいろいろ検討したが、一般的なサーボ弁は様々な使用条件下で用いられるため、使用条件に制限を設けるドライ化の採用を断念した。また、とくに高速での応答が要求され、スプールストロークが長い弁では、隔壁部分に油が充満した場合、油をポンピング作用させながら隔壁が高速での繰り返しに耐える構造はむずかしいと判断したことも断念の 1つの要因である。

ウェットの場合は、フォースモータを下向きにして、ドレンポートをフォースモータの上部に設けた取り付けを採用すると、フォースモータ部分に油がたまる。とくに水グリコール系作動油の場合は、コイルの温度上昇によって水が蒸発すると作動油の特性が変わり、弁の動作不良の原因となる。よって、この場合は下面にドレン穴を設ける必要がある。

サーボ弁の応答のシミュレーションモデルを図 E-1-4 に示す。

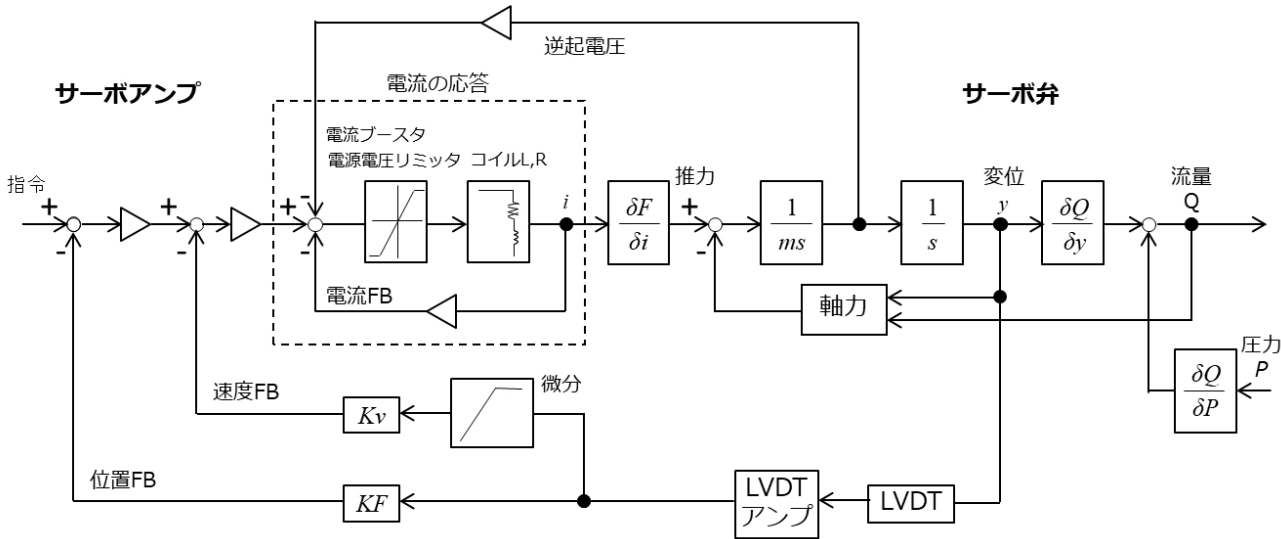


図 E-1-4 サーボ弁の応答のシミュレーションモデル

図中、枠で囲んだ電流の応答は、コイルのインピーダンスおよび電源電圧によって決まる。とくに弁の立ち上がり時では速度がほとんど出ていない状態であり、スプールからの位置および速度フィードバックがない動作範囲である。コイルに速度による逆起電力が発生しないことより、コイルにかかる電圧はほぼ電源電圧にラッチしている。よって、電流の立ち上がりは前述したコイルインピーダンスと電源電圧で決まる。

弁の mSec オーダの応答になると、この電流の応答速度が大きくなってくる。

弁の基本機能は、いわゆるバネマス系である系を安定動作させるため、LVDT によって検出された位置フィードバックおよび位置を微分することによって得られる速度をフィードバックしている。

サーボアンプおよび変位センサアンプについて

サーボ弁のコイルの電流駆動にはノイズの小さい PWM 方式を採用している。サーボアンプの応答速度はバンド幅で 2KHz であって、サーボ弁を高速駆動するために十分な応答速度を持っている。サーボ弁の立ち上がり時間は、前述したとおり、コイルのインピーダンスと駆動電圧によって決まる電流の立ち上がりに大きく依存する。

スプールの位置決めのための変位センサには LVDT を用いている。LVDT は構造がシンプルで、耐環境（温度、振動）性が高いため、広く用いられている。当社でも他のサーボ弁の位置センサとして主に LVDT を用いている。

高速サーボ弁の変位センサには高速性が必要とされ、かつ、変位信号を微分することによってスプールの速度を得ているため低ノイズ性が求められる。このように、LVDT およびサーボアンプには高速性と低ノイズ性という相反する性能が必要とされる。これらが満たされて、はじめて次に示すような安定したステップ応答を得ることができる。

開発した弁のステップ応答例を図 E-1-5、E-1-6 に示す。スプール変位の応答および VCM に流れる電流の応答である。

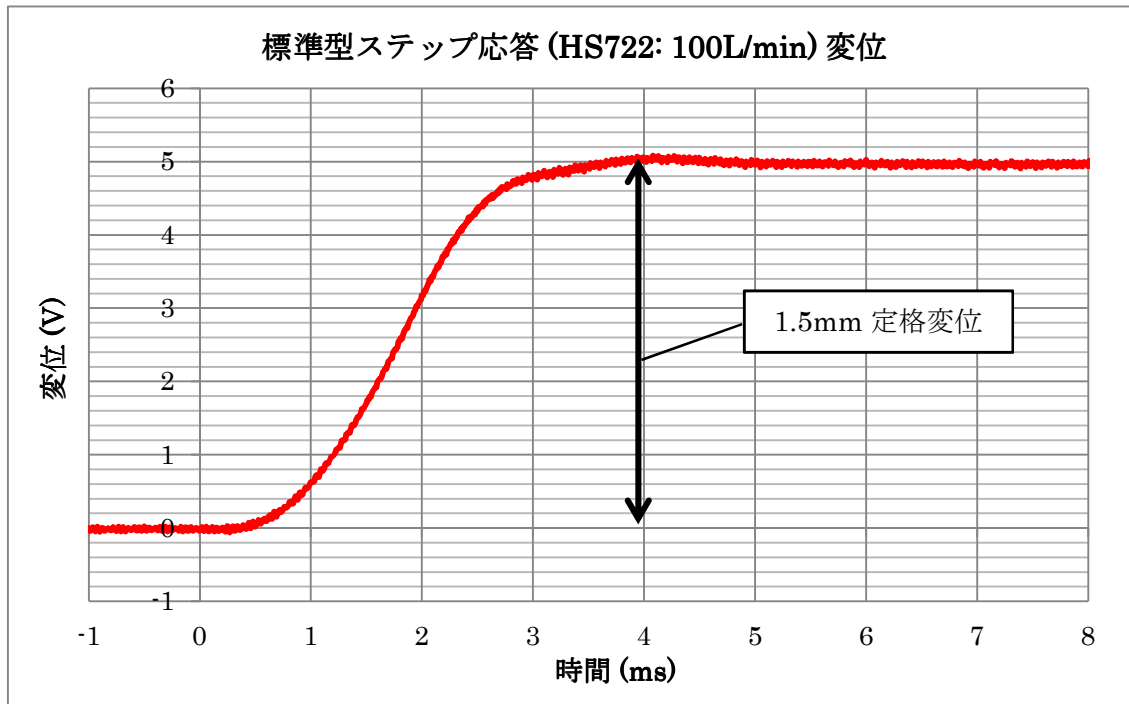


図 E-1-5 標準型ステップ応答 (HS722: 100L/min) 変位

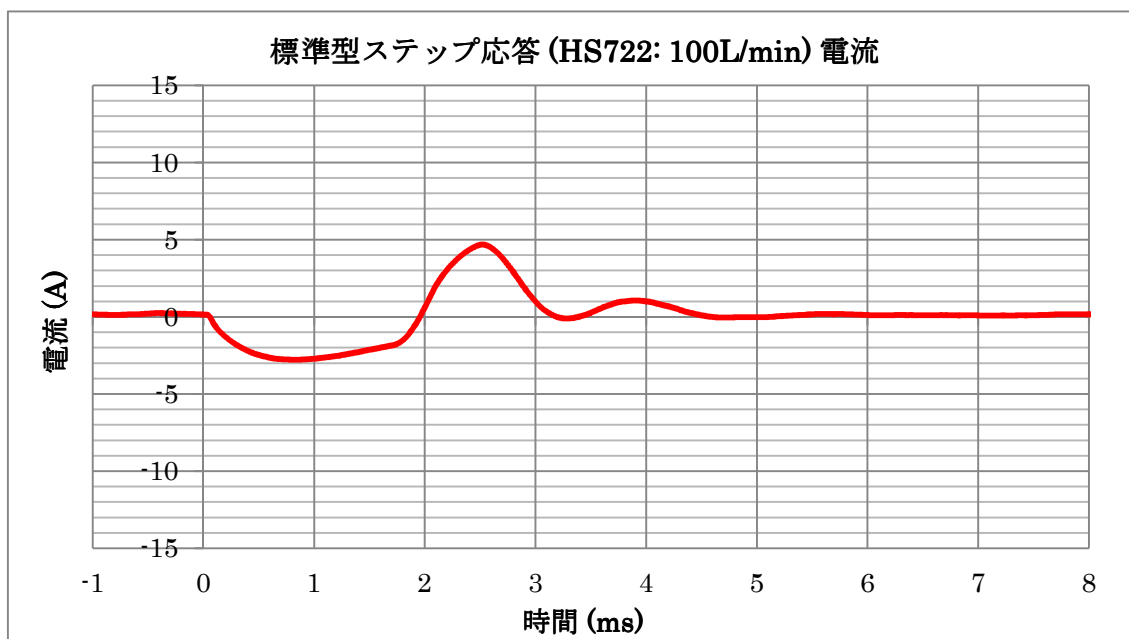


図 E-1-6 標準型ステップ応答 (HS722: 100L/min) 電流

文献

- [1] 松下俊郎. 圧延設備. 機械設計 30(12), 1986. (参考資料「電気油圧サーボ弁の歴史と現在」の中のスプールのダンピングのためにオブザーバを用いる方法は本資料を参照している)
- [2] Frandsen Jorgen to Burroughs Corporation. Dual coil/dual magnet actuator. Patent Number 4612592, Sep. 16 1986.
- [3] Wu Shuai, Jiao Zongxia, Yan Liang, Zhang Rui, Yu Juntao, Chen Chin-Yin. Development of a Direct-Drive Servo Valve With High-Frequency Voice Coil Motor and Advanced Digital Controller. IEEE/ASME

Transactions on Mechatronics 19(3), 932-942, 2014.

[4] Yan Liang, Zhang Lu, Peng Juanjuan, Zhang Lei, Jiao Zongxia. Electromagnetic Linear Machines with Dual Halbach Array: Design and Analysis. Springer, 2017.

[5] 佐々木勝美. 汎用直動型サーボ弁. 油空圧技術 31(9), 60-65, 1992.

より高速応答サーボ弁の応答例（追加データ）

VCM のコイルはアルミ線を用い、同じワット数で電流の応答速度を上げるため、コイルを並列巻きして、インダクタンスを小さくしている。

サーボアンプの電源電圧は 24V、供給圧力は 7Mpa で、電源電圧を 24V とした場合、当社での現時点で最速の応答である。VCM のコイル抵抗は 1Ω と小さいため、弁とサーボアンプ間のケーブル長さが長く、ケーブルの抵抗が VCM コイルの抵抗に近くなると、応答に影響する。図 E-1-7 に応答例を示す。

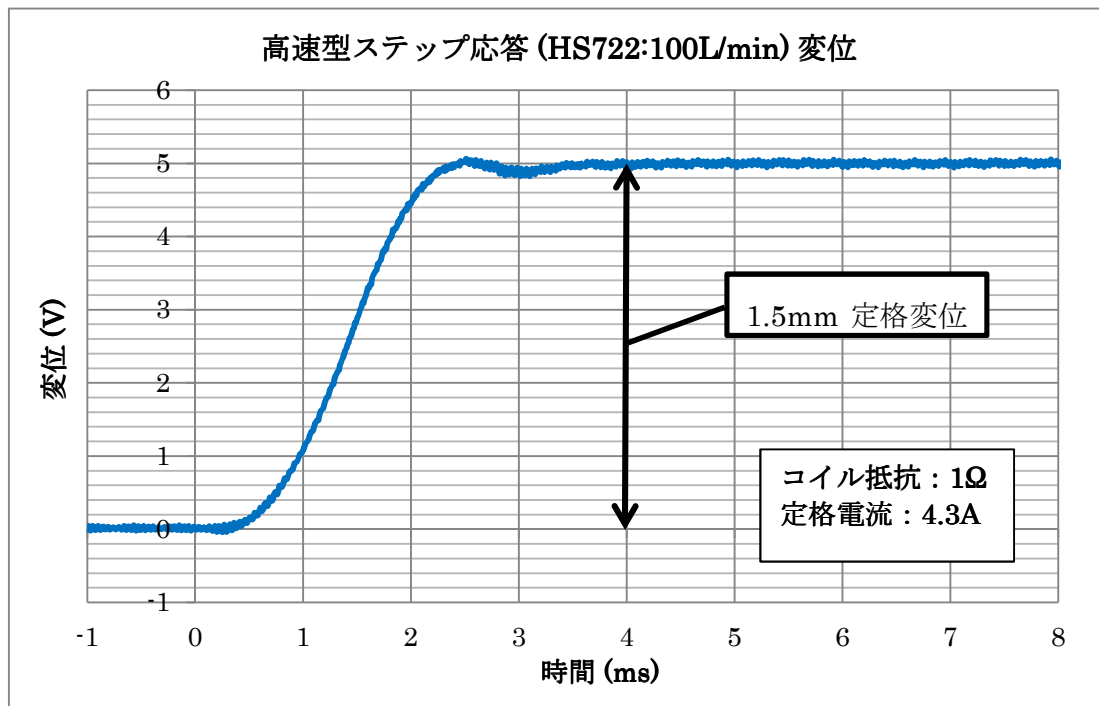
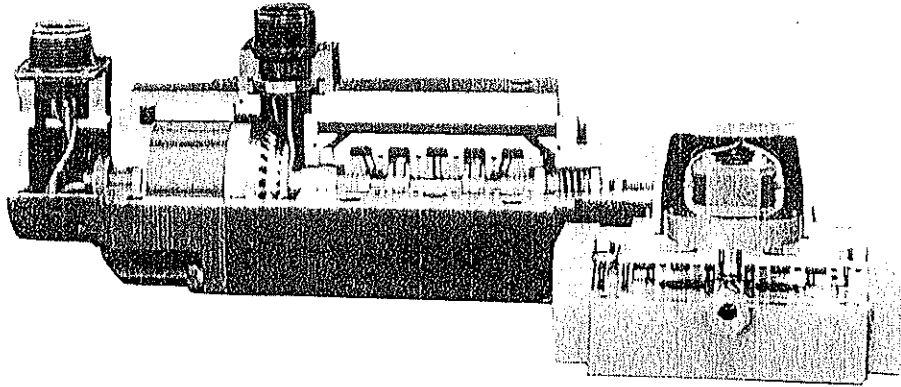


図 E-1-7 高速型ステップ応答 (HS722: 100L/min) 変位

この HS722 は、上述したとおり VCM のコイル抵抗値が小さいため、弁とサーボアンプ間のケーブル仕様により特性が変化する。そのため、とくにケーブルが長くなる場合は都度性能の確認を必要とする。ケーブルが数メートル以下であれば、高速で安定したサーボ弁となり得る。

電気油圧サーボ弁の歴史と現在



東京精密測器(株)
佐々木 勝美

はじめに

電気油圧サーボ弁(以降サーボ弁と称す)の代名詞とも言える2段型力フィードバック方式サーボ弁が発明されて以来約25年になる。その間多くの種類のサーボ弁が製品化されてきた。25年にもなればそれなりの年輪を積み重ねて来たことになり、ここにその歴史と現在として、主に当社製品を対象として整理してみることにした。また、サーボ弁の歴史は同時にサーボ弁が使用されている装置の変遷の歴史でもある。あわせて、サーボ弁が多く使用された装置の移り変わりについても整理してみた。

主に、軍需用として出現したサーボ弁は、それが民間一般産業機械に使用されるや、装置により適合した

合目的サーボ弁として、その機種の数を増し続けて来た。1段型(段とは油圧増幅段の意味)2段型、3段型、数l/minのものから数千l/minのものまで幅広く、現在、大分類される機種の数だけでも50種類近くになる。

また、現在では、サーボ弁が比例制御弁か、その境界がわからなくなるまでになって来た。今後もこの傾向はかわらず、新機種の開発がなされてゆくものと思われる。しかし、今後サーボ弁の機種構成がどのようなようになってゆくのか見定めることはむつかしく、いたずらに予測することの意味もない。現在の技術レベルすなわち、トルクモータ、可動線輪型フォースモータ、可動鉄片型電磁ソレノイドによる電機変換部、ノズルフラップ、噴射管、スプール弁によ

る前段増幅部には、画期的な技術革新はないと思われる。新素材を利用することや、装置に適合する様、よりバランスの良い構成とすることが、新しい弁の開発の主眼となると考える。この様な状況の中では、現在のサーボ弁に関わる技術水準がどの様であるかを、サーボ弁の機種の特徴の整理をとうして明らかにすることが大切なことではないかと思う。

初期のサーボ弁

2段型力フィードバック方式サーボ弁の出現する以前には、図1にある、負荷圧力、負荷の動的圧力フィードバック型サーボ弁や、図2のバネバランス式サーボ弁が制作されていた。*1図3が負荷圧力フィードバック型サーボ弁の出力特性例である。

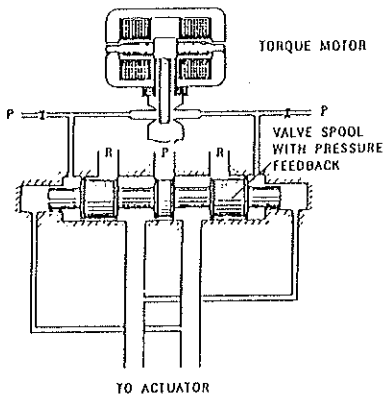


図1 圧力制御サーボ弁の構成 (H00G社)

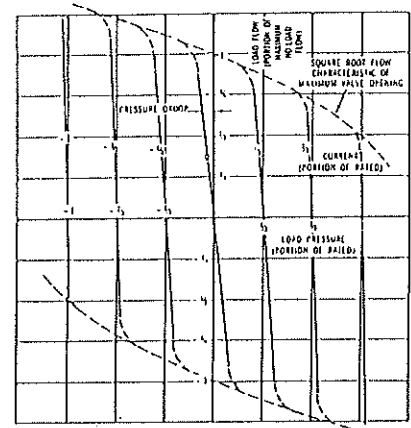
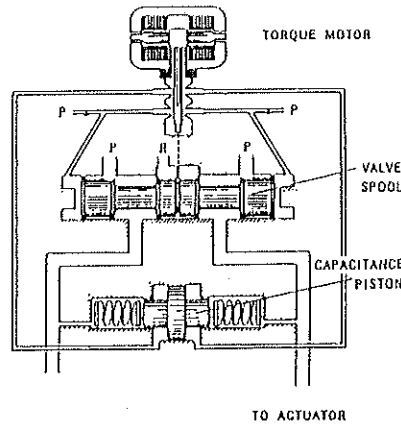


図3 圧力制御弁の特性

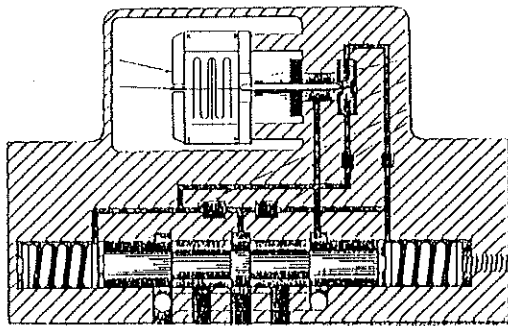


図2 バネバランス式サーボ弁

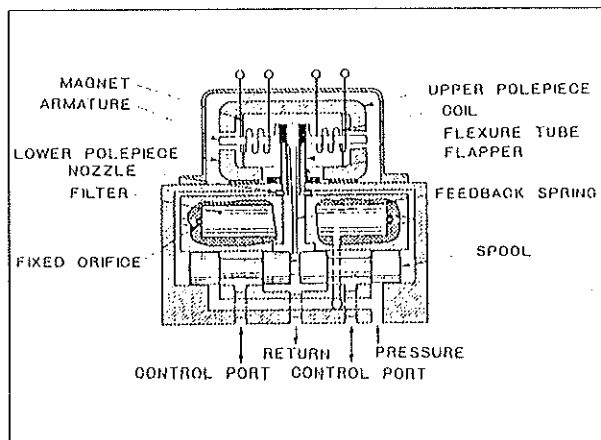


図4 カフィードバック方式サーボ弁

本弁は、現在でも負荷感応形アクチュエータなどの制御に使用されている。しかし、限られた分野で使用されていたにすぎない。バネバランス式サーボ弁は流量制御弁であり、使用上の汎用性はあったと考えられるが、使用条件に制限を受ける構造であり、性能も良くなく、より良いサーボ弁が求められていたはずである。国内ではS34年に、米国では1959年に、それぞれ、カフィードバック方式サーボ弁の特許が出願された。この方式によって、サーボ弁の特性は飛躍的に上がり、以降この方式の弁が、サーボ弁の中心的な弁として発達してゆくことになる。

NC工作機

国内で、最初の量的な対応が必要となった装置は、NC工作機である。図5に示されるとおり、テーブルや刃物台の位置決め制御を、油圧モ-

タとボールネジを組み合わせて行った。サーボ弁は、カフィードバック方式の標準型が使用された。本装置は、多くのNC工作機メーカーや電機メーカーで採用されたが、市場に広がる前に、ある時期、DCサーボモータが油圧に取って換わった。

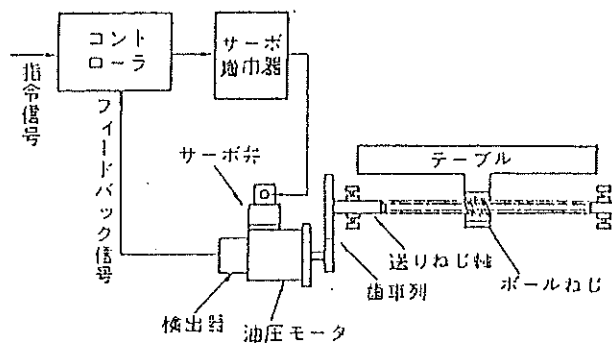


図5 NC工作機の油圧駆動

放電加工機

図6に放電加工機の油圧サーボ系の部分の構成を示す。放電電圧を制御する系で、系の構成は簡単である。サーボ弁は、流量特性が2段型や、非線形のもが使用されていた。ゲインの低い所で制御し、高い所は早送り時に用いられた。放電加工機には、およそS40年始めごろから、S50年代末ごろまでの間に1万台以上のサーボ弁が使用された。しかし、S50年代中ごろから電動モータに置き換えられた。

ロボット

自動車のシャーシのスポット溶接用ロボットに、サーボ弁が大量に使用され始めたのが、S40年代末ごろからである。その後、防爆型サーボ弁が塗装ロボットに使用され始めた。ロボットは、6軸～8軸の多軸であるため、サーボ弁の使用される台数もかなり大量であった。ワーク（溶接ガンは、数十kgfにもなる）が重いため、トルク慣性比の大きな油圧サーボが適していると言われ、かなりの間、サーボ弁の市場であった。ロボットのアクチュエータの仕様は、最大速度1m/sec、位置決め精度1mm以下が標準的なものであった。応答速度（ループゲイン約20 1/sec）はそう早くないため、静的精度の高いサーボ弁、いわゆるロボット用サーボ弁が開発された。合目的サーボ弁として機種を増してゆく最初となった。しかし、これらの装置も、S55年～H2年を界として、電動サーボに置き換わった。ただ、ロボットの場合は、その適用範囲が多方面にわたるため、現在でも深海マニピレータ、シールド掘削機に付属するセグメント組立ロボット、また、電線のメンテナンスのための活線ロボット等にサーボ弁が多く使用されている。

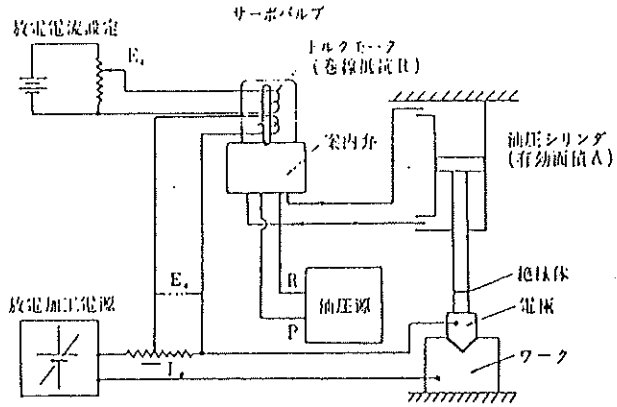


図6 放電加工機のサーボ系

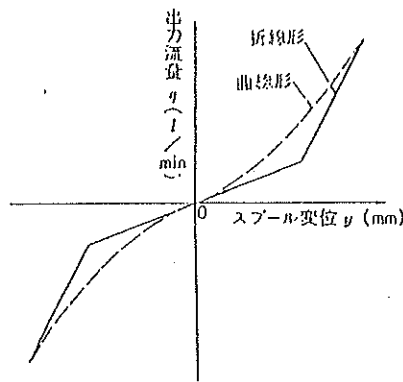


図7 放電加工機に使用された非線形サーボ弁

試験機

疲労試験機、振動試験機、加振機ロードシミュレータ、地震シミュレータ、万能試験機等に油圧サーボ弁が使用されている。試験機は、昭和40年以降一貫してサーボ弁の市場であり、現在でも同じ状況である。試験機用サーボ弁は、その種類が最も多くサーボ弁の構造、容量が種々異なるが、多くは2段型力フィードバック方式サーボ弁である。性能は最も高いものが要求される。この分野では、サーボ弁の市場として、今後、大きな変化はないと思われる。

その他

射出成形機、特殊車両、圧延機などは、いずれも油圧サーボ弁の安定した市場である。サーボ弁は、それぞれの装置に適合した合目的弁が使用されている。サーボ弁の分類は、図16を参照下さい。

現在の状況

以上のとおり、最初、油圧サーボが応用されていた大きな市場が、電動サーボに置き換わるという繰り返しを経てきた。一時は、油圧ばなれなどと言われたが、油圧サーボの市場は確実に広がってきており、特に、現在は多くの油圧機器メーカーが、サーボ弁を製作するようになって来ている。*1油圧サーボの特徴を生かし使い分けることによって、市場の住み分けが進んでいると思われる。油圧サーボの新しい市場として、次のものが代表的であろう。

- ・アミューズメント装置
(体感6軸モーション含む)
- ・舞台装置
- ・振動抗打機
- ・溶接機
- ・高速加振装置
- ・大型マニピレータ
- ・工作機
- ・プレス

現在の代表的な油圧サーボ弁

代表的なサーボ弁として、先にも述べた2段型力フィードバック方式サーボ弁とフォースモータ直動型サーボ弁について述べる。

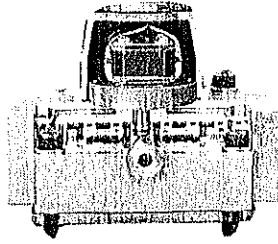
2段型力フィードバック方式サーボ弁は、現在でもなお中心的な弁で、製作台数も他に比べてびぬけて多い。その実績から言っても代表的な弁である。

フォースモータ直動型サーボ弁は、一般産機用の汎用型として開発されて日もあさく、実績に乏しく、製作台数も多くないので、代表的と言えるかどうかの判断もあるが、2段型サーボ弁の前段増幅部の油圧段が電動化されたという理由から、また、構造が簡単で高性能であることから、今後のサーボ弁の1つの方向を示していると判断し、代表例としてその特徴を述べることにした。

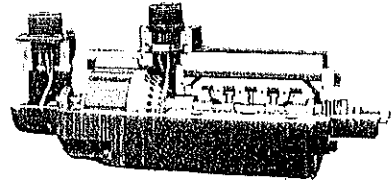
2段型力フィードバックサーボ弁

サーボ弁が製作され始めた当時、多くの種類の2段型力フィードバック方式サーボ弁が考案され、製作された。これらは、力フィードバックという機能は同じでも、その機構はそれぞれ異なり、メカ設計のセンスの違いが製品に反映されていたと思われる。当時は、10種類にあまるほどあったが、しかし、その後写真にみられる構造のサーボ弁が主流となった。

この1つの理由は、電気-機械変換部であるトルクモータと、前段増幅部であるノズルフラップ部と、案内弁の変位をフィードバックするフィードバックばね部の機構的な、また、機能的なバランスが非常に良く、(各部の大きさや、相互の配置のバランス、トルクモータ出力とノズルフラップ部入力とのパワーマッチングがとれていること、トルクモータの可動部とフィードバックばね定数



力フィードバック方式サーボ弁



直動型サーボ弁

のバランスが良いことなど)結果として高性能が得られたことと、構造がシンプルであることによるものと考えている。また、サーボ弁の持つ特性が、アクチュエータに必要な性能に、過不足なく適応していたと判断できる。

図2のばねバランス式の弁から、片持ちハリのフィードバックばねを取り付けたことによる、機構そのもののバランスの良さと、性能の向上に結果した技術革新は、油圧制御弁の歴史の中でも特筆に値するものと思われる。

入力電流に対する案内弁スプールの周波数特性は、次の3次系によって表わすことができる。

$$\frac{Y}{L} = \frac{1}{a_3 S^3 + a_2 S^2 + a_1 S + a_0}$$

また、3次系は1次と2次に分割できるため、1式は次のようとなる。

$$\frac{Y}{L} = \frac{K_M / K_F}{(T_1 S + 1) \left(\frac{1}{\omega_n^2} S^2 + \frac{2\zeta}{\omega_n} S + 1 \right)}$$

1次遅れの部分は、前段増幅部の流量が積分され、スプール変位となる1次の系を表わしており、2次系は、ほぼトルクモータのばねマス系によるものと考えて良い。

サーボ弁は、一般に図9の周波数特性を持っている。

油圧の増幅段は、それぞれ図10に示される出力特性を持っている。

試験機に使用される弁の、標準的な仕様について、表1に示す。

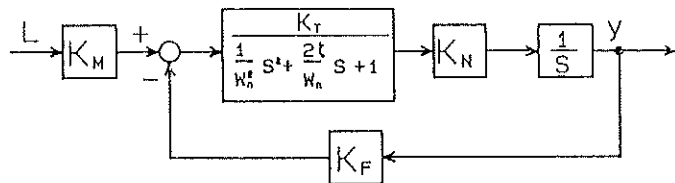


図8 2段型力フィードバック方式サーボ弁のブロック線図

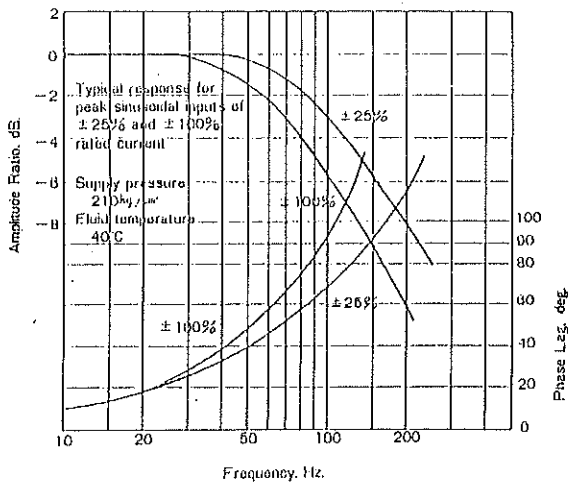
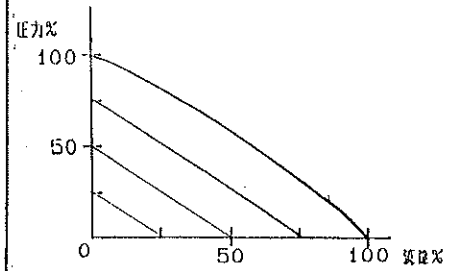


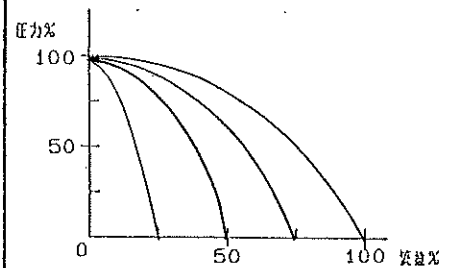
図9 周波数特性 (225F)

表1 225F型サーボ弁の仕様

項目	仕様
定格流量	$P_v=70\text{kgf/cm}^2$ MAX.56L/min
定格電流	30mA
定格圧力	210 (280) kgf/cm^2
内部リーク	2L/min $P_s=70\text{kgf/cm}^2$
スレシヨルド	<0.5%
中立点変動	<2%



NF弁



案内弁

図10 油圧増幅段の特性

フォースモータ直動型サーボ弁

図11に構造を示す。

2段型サーボ弁のトルクモータ部と前段増幅部を、電動モータ（フォースモータ）とした弁である。前段増幅部の出力パワーが、数10Wであるため、これくらいの出力を出せ、かつ、小型にするためには、高

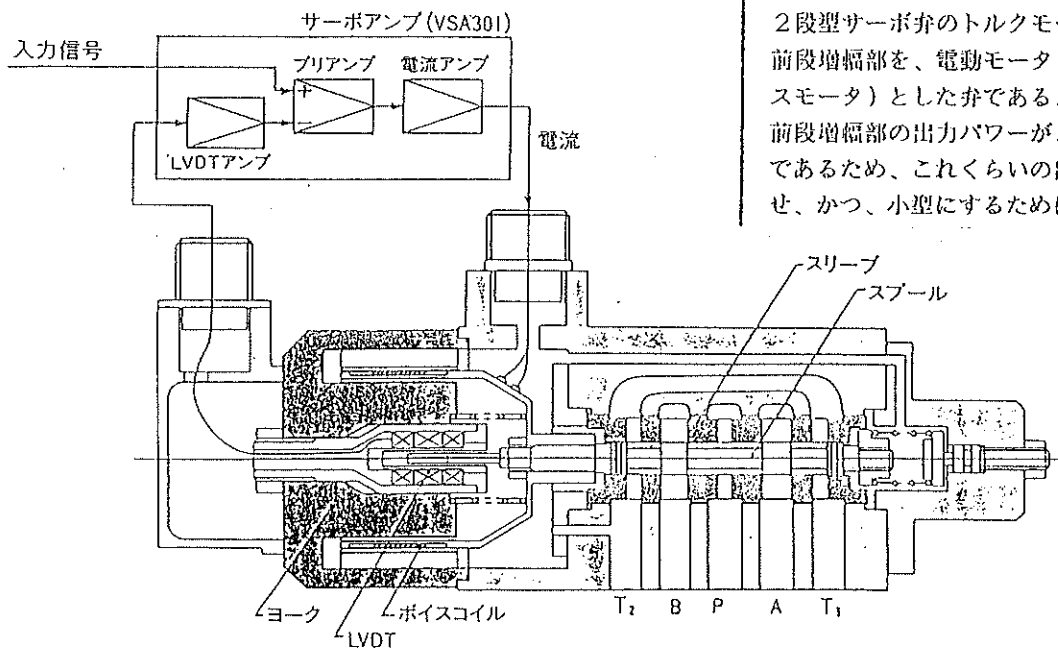


図11 フォースモータ直動型サーボ弁 (SH03)

いエネルギー積を持つ希工類磁石の登場を待ってはじめて可能となった。また、小型になることによって、より汎用性のある弁となった。本弁の技術的な検討のポイントは、次に示す4項目である。

- ①小型フォースモータとすること。
- ②案内弁を軸力補償とすること。
- ③案内弁の位置決めダンピングを大きくすること。
- ④小型の駆動アンプとすること。

図中のブロック線図は、案内弁の位置決め制御系を示している。本弁を対象に、前述のポイントについて簡単に述べてみたい。

小型フォースモータとすること、従来、電磁石を使用していたが、希工類磁石を用い磁石を効率良く使うと、電磁石の場合と比べ、重量比で1/10になる。また、希工類磁石は保持力が高いため、磁路の材料も一般の軟鉄で、高い飽和磁束密度まで使用できる。

案内弁を軸力補償とすること、案内弁の軸力補償は、案内弁に働く流体力を軽減させるためのもので、駆動力が小さい場合は必要となる。軸力は、案内弁内に流入、流出する油のモーメント変化によって発生するため、流体の流入、流出角度を案内弁の形状を適当に選び調整することにより低減する。流入流出角度は案内弁の形状に関する多くのパラメータに左右されるため、試行錯誤的な検討も必要となる。

例えば 210kgf/cm²の圧力で70l/min流せる案内弁には、約10kgfの軸力が働くが、適当な軸力補償で約1/5くらいになる。

案内弁の位置決めダンピングを大きくすること、弁は、慣性力の位置決め制御系となっているため、数

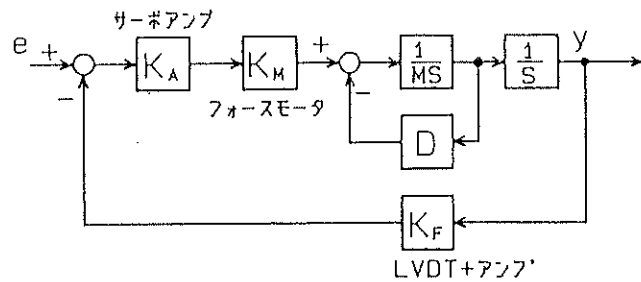


図12 直動型サーボ弁のブロック線図
(補償のない系)

100Hz までの周波数域では、2次系の挙動を示す。2次系の応答は、共振周波数と減衰係数によって表わされる。

共振周波数は次式で求められる

$$\omega_m = \sqrt{\frac{K_F \cdot K_A \cdot K_M}{M}}$$

ダンピング定数は次式で求められる

$$\zeta = \frac{D}{2\sqrt{M \cdot K_F \cdot K_A \cdot K_M}}$$

そしてこのとが、Dが小さいことにより非常に小さい値となる。系のゲインK_iを大きくすれば、軸力による等価的なばね定数に比べ、K_iによるばね定数が主導的になることにより、軸力の変動(供給圧力変化、負荷圧力変化による変動)の影響を受けにくくなる。また、弁の応答速度も上がる。しかし、ループゲインを大きくすれば、式により明らかとなり減衰係数は小さくなる。

Dすなわち弁の粘性抵抗は、強制的なダンパを付けないかぎり非常に小さい。粘性抵抗だけの場合、 ζ は0.1以下である。このため、案内弁の位置決めダンピングを大きくするため、種々の提案がなされてきた。代表的な案は、油ダンパを設ける。速度検出器を用い、速度のマイナフ

ードバックループを設ける。ダンピングのためのオブザーバを設ける。変位の微分信号をマイナフィードバックループに設ける。の4種である。本弁は、4番目の変位の微分をマイナーループに設けている。弁を高速(400Hz以上)で動作させないかぎり、本弁がベストであろうと考えている。各ダンピングについて少し詳しく述べてみる。

油ダンパを設ける。油ダンパは、案内弁の片側に小さなシリンダ部を設け、シリンダの動きを油の流体抵抗で抑制しようというものである。シリンダ部のすき間流れによる油の粘性抵抗を利用した場合は、シリンダの速度に比例した抵抗が得られるが、油温変化による粘性の変化によって抵抗が変化する。運転状態が安定である場合は有効な方法であるが、汎用性がない。高速応答の試験機用サーボ弁に用いられている。

速度検出器を用い、速度のマイナフィードバックループを設ける。DCモータの速度フィードバックと同じである。高速、特に400Hzから2kHzくらいの応答を要求される弁に用いられており、性能は良い。しかし、直線型の速度検出器に費用がかかるため、ある程度高級機でないとは採用はできない。

ダンピングのためのオブザーバを設ける。直接速度フィードバックするかわりに、オブザーバを用い、ダンピングを大きくする方法が提案されている。対象となる系に並列補償形のオブザーバを設けると、図13の系となる。

オブザーバ回路は、レギュレータを完全に模倣していれば有効である。この場合、伝達関数は次式となる。

$$G(s) = \frac{k_A \cdot k_M / M}{S(S + b/M + f_2 k_A k_M)} + \frac{f_1 k_A \cdot k_M / M}{S}$$

但し $f_1 = 0$ とする。

$f_2 k_M k_A / M$ が、オブザーバにより付加されたダンピング定数項となる。このオブザーバ回路はすべて積分器で組み合わせることができるため、信号のS/Nは良いが、レギュレータに合わせたオブザーバ部の調整が必要になることと、外乱、特に軸力の変動に対するロバスト性が低いと考えられ、使用条件に制限を受けると考えられる。

変位の微分信号をマイナフィードバックループに設ける。変位を微分すれば模倣的な速度信号が得られる。信号の微分は、高周波のノイズが増幅されることになり、信号のS/Nは悪くなる。そのため使用できる周波数域が限られる。バンド幅が200Hz程度までの弁には有効な方法である。図14に系の構成を示す。本弁に採用されている。

小型の駆動アンプとすること、フォースモータの駆動用電流は、1.6A~2A HAXである。サーボ弁の周波数域を200Hz程度と考えれば、

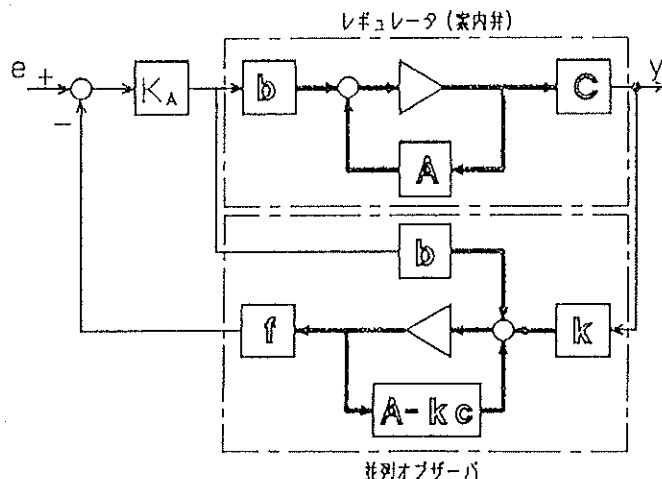


図13 ダンピング補償のオブザーバ

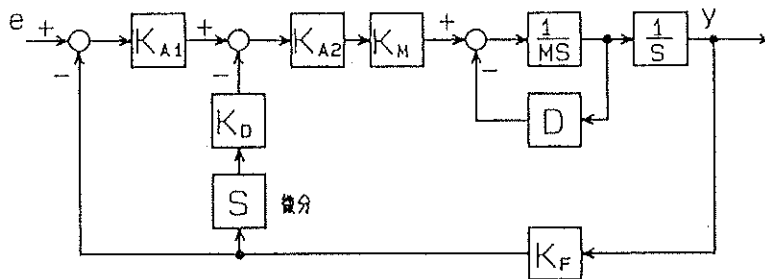
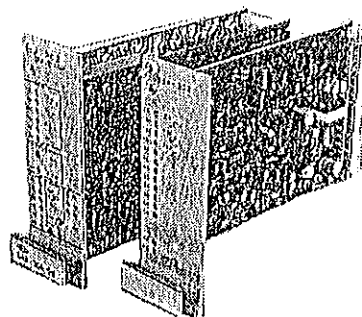


図14 速度演算によるダンピング (SH03)

24V HAX の駆動電圧で良い。ムービングコイル (ボイスコイル) の直流抵抗は8Ωと低いですが、コイルには、定磁束中を動作するための逆起電圧が発生する。高速駆動になるほどコイルのインピーダンスが上がる。1kHzや2kHzで駆動する必要がある場合は、数百ボルトの電源を必要とする。電流の駆動回路を小型化するために、スイッチングトランジスタを用いたパルス幅変調 (PWM) 回路を用いている。本方式は、DC電動モータの駆動方法と同一である。アナログ増幅器に比べ、数十倍効率が良い。そのため非常に小型となっている。パルス周波数は8kHzである。案内弁の位置決め用センサーであるL

VDTのキャリアも同じ周波数としている。写真にアンプの基板の例を示す。



サーボアンプ

静特性

弁の静的性能は、安定度、スレシヨルド、案内弁の位置決め剛性によって表わされる。静的安定性とは使用条件の変化、すなわち、供給圧力変化、油温変化、油の粘度変化などによって弁の中立点の変化が少ないことを意味している。直動型は構造上の特徴として安定度が高く、使用条件内での変動であれば、中立点の変動は 0.5%以下となっている。スレシヨルドとは、入力に対する出力の静的感度であって、小さいほど感度が高いことになる。

スレシヨルドは 0.1%以下である。案内弁の位置決め剛性は、位置決め制御系のゲインによって決められる。案内弁に外力が働いた場合、目標値より位置がずれると、位置の偏差信号としてフィードバックされ目標値に近づけるようフォースモータに力が発生する。この位置誤差と駆動力の変化量の比が、サーボ剛性、いわゆる案内弁の位置決め剛性である。前述したダンピングを適当にかけた系とすれば、ゲインを高くすることができ、サーボ剛性も高くなる。位置決め剛性は、約100kgf/mmである。この位置決め剛性は、2段型力フィードバック方式の弁と同程度である。

動特性

周波数応答例を図15に示す。波形精度、振幅の安定性も高い。全体の仕様を表2に示す。

おわりに

現在のサーボ弁の代表例について、その特徴の概要を述べた。これら弁の最終段は、スプールタイプの4方案内弁である。案内弁を位置決め制御する方法の違いにより構造も異なる。これらサーボ弁の性能は、ほぼ極限に達しており、今後大きな技術革新を期待することはできないと思う。より合目的なサーボ弁の開発と、サーボ弁を用いたシステム全体を対象とした検討がなされてゆくものと思われる。サーボ弁に要求される仕様は、入力に対し、より忠実に出力（静的にも動的にも）されることである。その1つの回答が、汎用性のある直動型サーボ弁であると確信している。そのために、かなり詳細な説明をした。サーボ弁を使用される上での参考にもなれば、著者の望外のよろこびである。

表2 SH03サーボ弁の仕様

項目	仕様
定格流量 $P_v=70\text{kgf/cm}^2$	MAX.60L/min
定格電流	1.6A
定格圧力	210 (350) kgf/cm ²
内部リーク	0.5L/min $P_s=70\text{kgf/cm}^2$
スレシヨルド	<0.2%
中立点変動	<1%

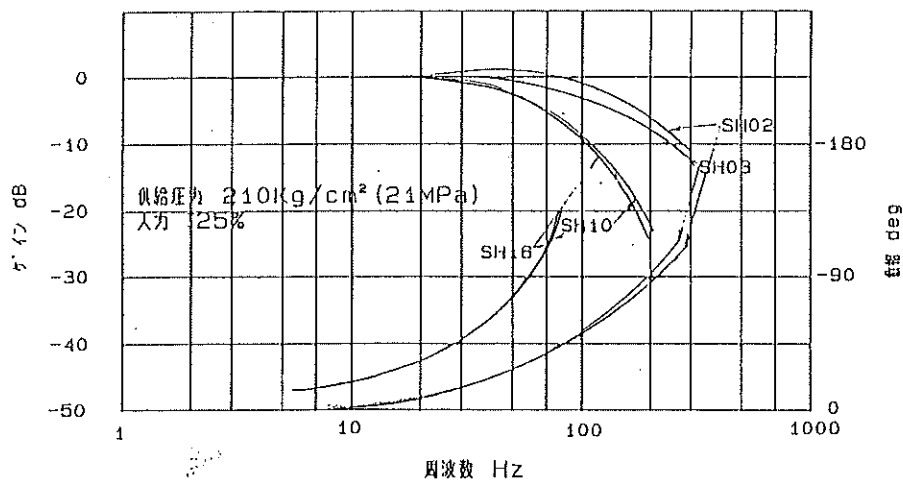


図15 周波数特性

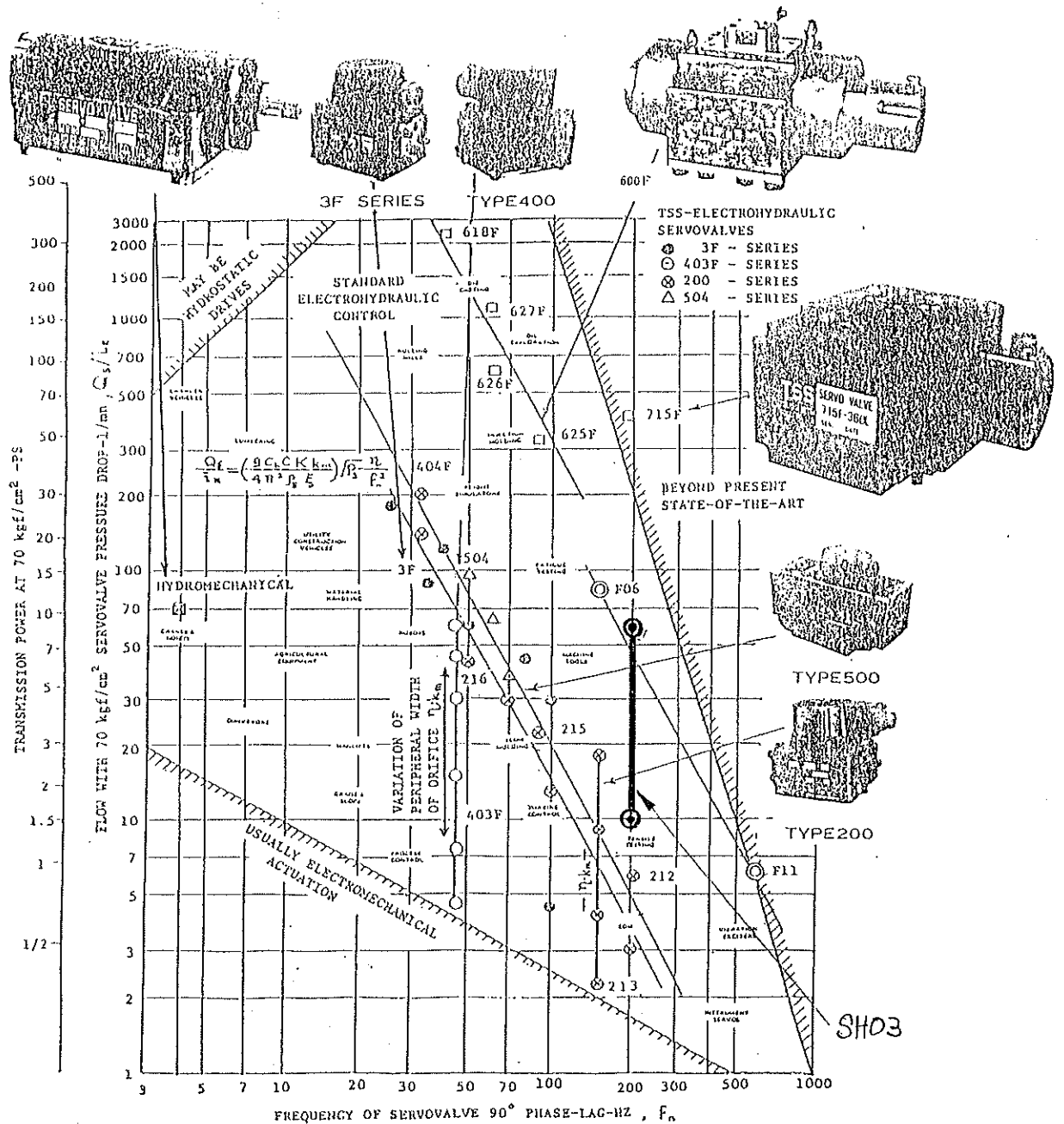


Fig. 4 RANGE OF CONTROL FOR ELECTROHYDRAULIC SERVOVALVE

TOKYO PRECISION INSTRUMENTS CO., LTD.

図16 サーボ弁の容量と応答速度 (TSS)