

——目 次——

緑陰特集「フルードパワー開発プロジェクト」

会長退任にあたって	河合 素直	266
平成14年度・15年度会長就任にあたって	佐藤 三緑	267

緑陰特集号「フルードパワー開発プロジェクト」の発刊にあたって	大内 英俊	268
--------------------------------	-------	-----

【解説】

フルードパワーの達人たち		
より省エネ・省資源の駆動システムを目指して	喜多 康雄	269
ポンプそして人生	小曾戸 博	275
デジタル弁開発プロジェクト	水戸 昭夫	282
小さなプロジェクト	米谷 栄二	287
建設機械用油圧システムの開発現場から	布谷 貞夫, 堀 秀司	292
プロジェクトVEX-シリンダを駆動するバルブ	小根山尚武	297
HMTと40年 過去から, そして未来へ	長友 邦泰	302
プロジェクト報告		
エコリッチ開発プロジェクト イカルスは再び翼を得たか	下尾 茂敏	307
技術の伝承: 超大型シリンダ—失われかけた技術を取り戻せ—	三橋 浩司	313
自動車用トラクションオイルの実用化開発	畑 一志	318
フライトシミュレータ用サーボバルブ開発秘話	田村 博久, 夙 繁春	324
空圧用小型電磁弁樹脂ブロックマニホールド開発小史	丹羽 庸夫	329

【FPS事典】	333
---------	-----

【会告】

学会賞候補者募集	249
30周年記念事業報告	250
特別教育講座のお知らせ	254
常設教育講座「トライボロジー講座」開催のお知らせ	255
オータムセミナー「ハイブリッドカーの現状と将来」	256
第5回油空圧国際シンポジウム開催のお知らせ	257
その他	261, 264, 265, 274, 306, 312, 323, 328

■ 表紙デザイン: 佐々木能成 ダイキン工業(株)

社団法人 日本フルードパワーシステム学会

〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8 機械振興会館内

TEL: 03-3433-8441 FAX: 03-3433-8442

E-Mail: info@jfps.jp

JOURNAL OF
THE JAPAN FLUID POWER SYSTEM SOCIETY

FLUID POWER SYSTEM

Vol. 33, No. 5

August 2002

——Contents——

Special Issue “Development Projects in the Fluid Power Technology”

Greeting of Resignation form the President of JFPS	Sunao Kawai	266
Greeting of Greeting of the President of JFPS	Sanroku Sato	267
On the Special Issue “Development Projects in the Fluid Power Technology”	Hidetoshi Ohuchi	268
【Explanation】		
Sustained Efforts for the Energy and Resources Saving Hydrostatic Drive	Yasuo Kita	269
Pumps and My Life	Hiroshi Kosodo	275
Coming: Digital Valves	Akio Mito	282
A Little Project	Eiji Kometani	287
The Development Field of Hydraulic System of the Construction Equipment	Sadao Nunotani, Shuji Hori	292
Project VEX—Valves Actuating Cylinder	Naotake Oneyama	297
40years with Hydro-mechanical Transmission	Kuniyasu Nagatomo	302
ECORICH Project	Shigetoshi Shimoo	307
Technical Traditional: A Very Large-Sized Cylinder		
—Regain the Technology which Likely to be Lost—	Koji Mihashi	313
Development and Its History of Traction Fluids for Vehicle Toroidal CVTs	Hitoshi Hata	318
Servovalve for Flight Simulator Development	Hirohisa Tamura, Shigeharu Kogarashi	324
Short History of Plastic Molding Block Manifold for Small Pneumatic Valve	Tsuneo Niwa	329

【News】 249, 250, 254, 255, 256, 257, 261, 264, 265, 274, 306, 312, 323, 328, 333

論 説



平成14年度・15年度会長就任にあたって*

佐 藤 三 禄**

新たな段階に入った本学会の役割

この度、私が会長に選任され、河合前会長はじめ歴代先輩会長の築かれた本学会のレベルを、さらに向上させる責任を強く感じております。幸い、副会長に池尾茂氏、高田芳行氏、井上淳氏の就任を得、新理事と共に万全の執行体制を組織することができました。

本学会は一昨年、学会創立30周年を迎え、また昨年学会名称を変更し、新たな段階に入ったところであります。学会名称の変更が意味するように、本学会の専門分野は、従来の油圧、空気圧に限らず、水圧技術の新展開をはじめ、システム技術を含めたより広い流体動力技術の展開が求められております。今や一段とレベルの高いフルードパワーシステム技術が真価を発揮できる状況が到来しており、本学会の役割は益々大きいと言えます。

今年度は30周年記念事業を実施する年であり、800万円余のご寄付を下さった個人会員、賛助会員の皆様のご期待に沿うべく活動を展開いたします。

本年は1999年以来3年目の第5回油空圧国際シンポジウム開催年に当たり、これまでに無い多数の海外参加者が予定されております。本学会の国際的評価をさらに一段と高める機会としたいと思っております。

本学会はフルードパワーシステムに関する専門学会であり、基礎的工学と共に実用に直接役立つ研究・技術情報の提供が特に求められます。この面で会誌の編集および講習会、研究会などの企画事業では、会員の要望に応えることに一層、意を払う必要があります。このために、理事会では企画事業担当として、賛助会員企業からの理事3名を配し、有用な企画の展開を図ることとしております。

学会の基本的機能は情報の交換にあります。各種の研究委員会や講習会など、学会の活動の具体的内容を、即時、全会員に知っていただくことは基本的に必要なことであります。と同時に学会を介しての

会員相互の情報交換は有益なことであります。これらの情報交換はIT技術の利用により、現実にも可能となっており、学会の新しい活動形態としたいと思っております。

基盤強化は現下の最優先課題

本学会の意義ある諸活動を支える財務基盤の確立は、現下の最優先課題であります。本学会の近年の財務状況は、学会創設以来20数年にわたり先輩会員諸氏が築かれた資金の蓄えを、少しずつ取り崩してバランスを取っているのが現実であります。すなわち予算の繰越金残高は、平成8年度から13年度までの6年間で1,300万円程の減少となっております。幸いにして毎年ご提供戴いている、賛助会員の特別ご寄付により、繰越金の減少はこの程度で抑えられておりますが、決して安定した状況ではありません。近年の経済全般の状況悪化、殊に、関連のフルードパワーシステム産業界の厳しい状況のために、個人会員の退会、賛助口数削減のお申し出、掲載広告数減などが学会財政を直撃しております。

理事会では基盤強化担当に、賛助会員企業からの理事3名を配し、個人・賛助会員(口)数、事業収入、広告収入の増強および寄付金の呼びかけなどによる収入源の確保を図る考えであります。この面では賛助会員企業のご理解、ご協力に負うところ大であります。

財務体質改善には、当然支出の見直しが第一であるべきであります。事務業務分析によるコストの再検討、各事業の運営係ポスターの再検討などが必要であります。そして収入構造の将来見通しに基づく健全予算の編成に近づけるきっかけを、この2年間で作り出す必要があると思っております。

製造業の空洞化が心配されておりますが、国内研究開発力の維持、発展は何としても死守しなければなりません。本学会もその一端を担う責任があります。本学会の維持、発展には、会員個人と同時に、賛助会員企業の見識とご協力は欠かす事の出来ないところであります。

会員各位のご理解、ご協力を御願ひする次第であります。

*平成14年7月23日 原稿受付

**武蔵工業大学工学部機械システム工学科

(所在地 〒158-8557 東京都世田谷区玉堤1-28)

巻頭言

緑陰特集「フルードパワー開発プロジェクト」発行にあたって*

大内 英 俊**

新しい機器やシステムを開発するという作業は未知の世界への挑戦であり、当事者にとっては苦しみと連続であるが、このエネルギーは企業の活力の源泉でもある。新製品に関する解説記事は本誌にも数多く掲載されているが、開発に携わった技術者の苦しみや喜びを読みとることはなかなか難しい。そこで本企画号がちょうど「緑陰特集号」に当たることから、「フルードパワー開発プロジェクト」をテーマとして、製品紹介という視点ではなく、やや読み物的な記事として、プロジェクトに参画した技術者が格闘した姿を再現して頂き、その心意気を後にくる人に伝えてもらってはどうかと考えた。

「開発プロジェクト」から連想されるものは、新技術への挑戦、強力なリーダー、技術者の心意気・個性、技術の壁、失敗の連続、成功の喜び、技術の伝承・変遷などであり、それらの体験談には人の心を打つものがある。

最新のプロジェクトを記事にすることはあるいは差し障りがあるかも知れないし、一方、あまりに時間が経過すると資料が散逸したり、書き残す機会を逸してしまうであろう。実際、記事を依頼したところ、当初は執筆に意欲的であったものの、関連プロジェクトが進行中のため諦めざるを得なかったり、逆にかなり以前のプロジェクトであったため、資料不足で執筆に至らなかったなど残念な例もあった。

「油空圧の進歩100人の証言」と題する書が当学会20周年記念事業の一環として発刊されている。これは当事者直筆による技術小史であり、貴重な歴史資料でもある。しかしこのような出版の機会は頻繁にあるわけではないので、書き残しておくべき財産が埋もれてしまう恐れがある。編集委員会における議論のなかで、資料執筆の機会を作ることにもまた重要であると痛感した。

本号はこのような趣旨で発刊したいと考え、次のような2部構成とした。

第一部「フルードパワーの達人たち」では、フルードパワーに長年携わって来られた方の個性、個人を前面に出して頂き、これまでのプロジェクトにおける経験談、次の世代に伝えたいこと、資料が散逸しないうちに記録として残しておきたいことなどを自由に書いて頂いた。

第二部「プロジェクト報告」では、比較的最近の開発プロジェクトの話題を中心に、新製品、新システム開発途中の苦労話、困難を乗り越えて成功に至った話などを披露して頂いた。

ご多忙のところをご協力賜った執筆者の方々に謝意を表するとともに、読者各位が技術者として共感を覚え、新たな挑戦意欲を感じて頂ければこれほどの幸いはない。

本特集号の企画は、編集委員会機器ワーキンググループの大内英俊、落合正巳、大橋彰、萩原克明、布谷貞夫、張護平、関根高司、湯下篤、築地徹浩の各委員によるものである。また同委員会の杉本文一、真田一志委員のご協力を得たことを付記する。

[著 者 紹 介]

おお うち ひで とし
大 内 英 俊 君

1949年5月12日生まれ。

1978年東京工業大学大学院博士課程修了。
1979年東京工業大学精密工学研究所助手。
1985年山梨大学工学部助教授。油圧制御、
空気圧制御、圧電アクチュエータの応用に
関する研究に従事。工学博士。

E-mail: ohuchi@ms.yamanashi.ac.jp

*平成14年5月15日 原稿受付

**山梨大学工学部機械システム工学科

(所在地 〒400-8511 甲府市武田4-3-11)

解 説

より省エネ・省資源の駆動システムを目指して*

喜 多 康 雄**

1. はじめに

数えて見れば43年間フルードパワーに携わってきたことになる。1979年“北風暖房”の謳い文句で風力ボイラーと称する油圧式直接熱変換ユニット（風車で駆動される低速大トルクポンプの吐出油がオリフィスで絞られて発熱した後、熱交換器を経由して再びポンプに吸い込まれる。過熱・過速防止付）を開発し、浜頓別の国民宿舎オホツク荘の浴場で使って貰った等、省エネにも深く係わってきた。

定圧力源システムがエネルギーの回収再利用可能という大きな特長から液圧駆動システムの次世代の担い手になると確信しConstant Pressure System研究会を始めてから早いもので15年目を迎えた。

風力の方は当時から20年経った1999年になって漸く2001年にかけての風力発電機の輸入が毎年倍々ゲームの急成長を示しているが、エネルギーリサイクル可能な液圧駆動システムの方も20年目頃には普及し始めているように今後も努力してゆきたい。

2. CPSの特色とその利点

従来の油圧システムは流量を加減して駆動速度を制御するという考え方に立つたもので、流量制御による速度制御である。これに対して、定圧力源システムは、駆動力（トルク又は推力）を加減して加速速度を制御するという考え方に立つた駆動力制御による加速度制御である。

油圧は大質量の物を駆動するのが得意であるが、物理学で力の定義は「質量×加速度」であり、質量に力が働いて先ず加速度が生じその結果の時間積分が駆動速度となる、というのが力学の順序である。

もしこの順序を無視して、いきなり流量を増やして急加速を試みても異常圧が立つだけであり、また逆に、急に流量を減らせばキャビテーションが発生してしまうが、CPSではこの様なことは有り得ない。

CPSの利点を列挙すれば下記の様になる。

●基本的には

- 1) 弁で絞る制御ではないので、弁抵抗によるエネルギーロスや騒音がない。
- 2) 運動・位置のエネルギーの回収ができるので、システム効率が大幅に向上する。

●ハード面では

- 3) 原動・被動側を問わず基本機器（正負両方向に可変なポンプ／モータ）が共通なので量産によるコストダウン高信頼性が期待でき保守性も向上する。
- 4) 原動側基本機器の増設・削減が容易で、大馬力システムも並列接続により容易に構築できる。
- 5) 被動側基本機器の増設・削減も容易で、システム変更にも迅速・容易に対応できる。
- 6) 圧力変動の幅・頻度が小なので、機器重量の大部分を占めるケース等の耐圧疲労強度面で有利、したがって軽金属の使用等により軽量化が図れる。
- 7) 圧力変動が小、配管の半分は低圧、したがって配管コストが低下し信頼性が高まる。
- 8) 配管の半分は低圧なので吸込み口径を大きくとることができブーストポンプの省略による低コスト化や、管路抵抗損失の低下によるシステム効率の向上も期待できる。
- 9) 配管の半分は常に高圧なので制御用補助ポンプが省略できシステムが簡素小型軽量低価格になる。
- 10) ブーストポンプや制御用補助ポンプの駆動動力は全てエネルギーロスになるがこれらを省略できる場合が多く、システムの総合効率が向上し、クーラーの省略やタンクの小型化による低価格化・保守性向上が可能。

●制御面では

- 11) 1本の共通高圧ラインに多数のアクチュエータを接続しても相互の干渉なくそれぞれの負荷を同時に独立に自在に加速／減速することができる。
- 12) トルク制御なので加減速度制御となり、速度の急変がないスムーズな運転となる。
- 13) トルク制御すなわち力制御なので意図した以上の力が加わる虞なく安全である。
- 14) 空気混入や長いホースの弾性などで配管内媒体

*平成14年4月22日 原稿受付

**CPS研究会

(所在地 〒610-1101 京都市西京区北沓掛町3-5-9)

の剛性が低下しても制御性能は悪影響を受けない。

- 15) 長期使用などで基本機器の容積効率が若干低下しても制御性能はほとんど悪影響を受けない。

●その他

- 16) 油圧回路の単純化（補助的制御弁類の廃止）

従来の油圧回路では、重量物が重力や慣性によって逸走するのを防ぐためにカウンターバランス弁やモータブレーキ弁が必要であるが、CPSでは正逆両方向連続的に自在に力を加えることができるので、この種の複雑な弁が不要になるだけでなく制動時に重量物の持つ位置・運動のエネルギーを回収できる。

3. Energy Re-usable System

3.1 エネルギーの回収と再利用

上記のようにエネルギー回収が可能ということは、減速時または下降時にブレーキを使用しないことを意味しており、制動機の磨耗・発熱・騒音対策が不要となる大きな利点もある。

一般に、技術レベルの向上に従って摩擦力による負荷は減少し、質量による負荷（慣性力・重力）が残ることになるので、回収可能なエネルギーの比率が年と共に向上する。

以上の観点から見て、下記システムに適している。

- A) 発進・停止を繰り返す車両（悪路は不適、レール上が最適）、例として

坑内ロコモティブ、コンテナヤード内運搬車、路線バス、宅送便配送車、通勤・買物用自家用車、フォークリフト、その他

- B) 重量部分を頻繁に上下させる作業機、例としてエレベータ、プレス、クレーン、井戸掘機等

- C) 慣性モーメントの大きい回転体の頻繁な回転・停止を繰り返す装置、例として

遠心分離機の群制御、鋳造機のターンテーブル

- D) 動力の回収が必要な装置、例として

トランスミッション試験装置

3.2 回収エネルギーを再利用する手法(電源あり)

電源が有る場合は至極簡単で、定圧力制御付基本機器が誘導電動機で駆動されていれば良い。(図1)回収時には高圧ラインに高圧油が戻って来るので定圧力制御が働き、基本機器の偏心が負となって戻り油を流入させ、基本機器が油圧モータとなって誘導電動機を駆動するので同期速度より少し速く回転し(図2)、誘導発電機となって電源に電力を返す。

回収された電力は同じ受電設備下で稼動中の電動機等があればその電力源として再利用され、なければ送電元の電力ネットワークに戻され再利用される。

前記の遠心分離機の群制御やトランスミッション試験装置などがこの手法の例である。

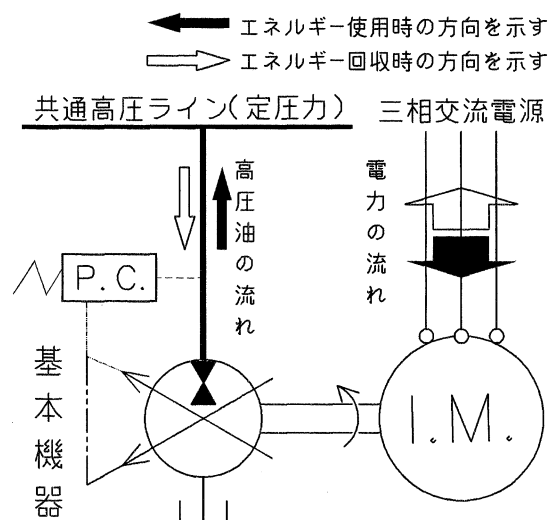


図1 エネルギー回収式定圧力源装置

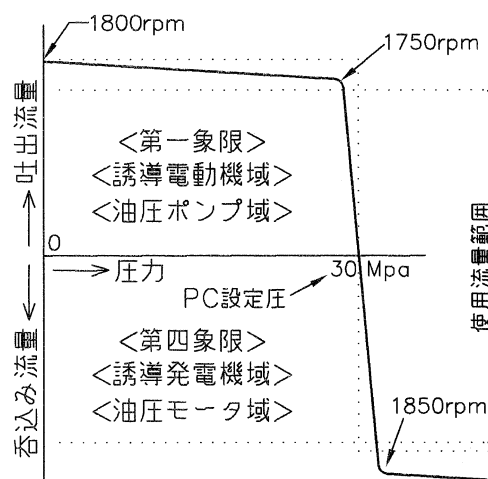


図2 正負流量に対してほぼ一定圧を保つ

3.3 回収エネルギーを再利用する手法(電源なし)

必要に応じて物を加速したり高所へ上げたりするが、何時までも加速のままとか、上げたままで放置しておくことは有り得ない。必ず減速させるか、下へ降ろすことになる。

従って減速時または下降時にエネルギーを回収してエネルギー蓄積機器に蓄えておき、次の加速時または上昇時に蓄積機器から取出し再利用するという手法が考えられ、この場合、何等かのエネルギー蓄積機器が必要になる。

3.3.1 エネルギー蓄積にアキュムレータを使用(図3)

海外で多くの成果を上げているREXROTH社のSecondary Control System（駆動側ポンプをPrimaryと考え、被動側モータ（斜板を正逆両方向に傾転可能）をSecondaryとし、モータ斜板傾転角を正逆両方向に制御する定圧力源システム）では、殆ど全てアキュムレータを使用している。

図は安全のためロジック弁がパイロット電磁弁を

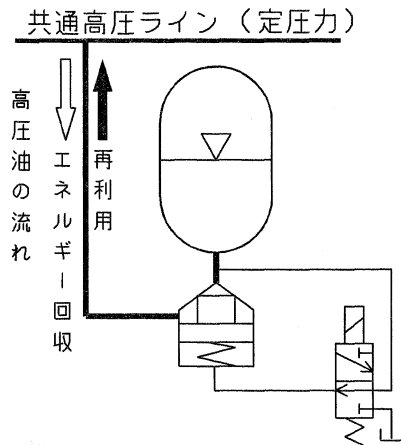


図3 蓄圧器によるエネルギー回収/再利用

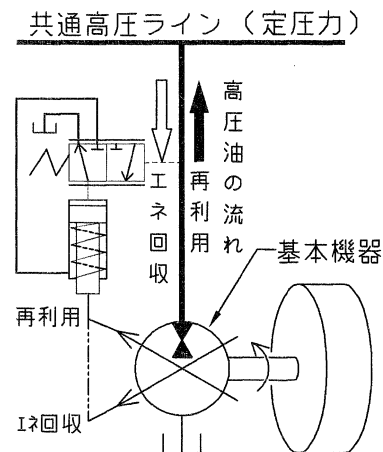


図4 はずみ車によるエネルギー回収/再利用

励磁しない限り開かないようにした例を示す。

負荷質量の減速/下降時には共通高圧ラインから高圧油が戻って来るので窒素ガスが圧縮されて圧力エネルギーとして回収蓄積される。その後、加速/上昇時に共通高圧ラインの高圧油が消費されて圧力が下がろうとするので、窒素ガスが膨張し高圧油が共通高圧ラインに放出されて再利用される。

大流量大馬力に対応でき、騒音・耐久性もすぐれているが、高圧ガスの法規制もあり、取扱い・保守に注意が必要で地震・火災・戦争等の災害時対策が難しいように思われる。

3.3.2 エネルギー蓄積にフライホイールを使用(図4)

図1の誘導電動機をフライホイールに取り替えたものに相当し、フライホイールと定圧力制御付基本機器を結合したフライホイールユニットを使用する。

回収時には高圧ラインに高圧油が戻って来るので定圧力制御が働き、基本機器の偏心が負となって戻り油を呑込み油圧モータとなってフライホイールを加速し、運動エネルギーの増加として蓄えられる。

再利用時には、高圧ラインの高圧油が消費され圧力が下がろうとするので定圧力制御が働いて偏心が正となり、フライホイールで駆動される油圧ポンプとなって油を吐出し、フライホイールの運動エネルギーが消費されて減速する。

アキュムレータと比較した長所としては

- 1) 高圧ガスの法規制なく、取扱い・保守が安全
- 2) 同じエネルギー量をより小型・軽量で蓄積できる
- 3) 蓄積量による圧力の変動幅が小さい。
- 4) 蓄積量は回転速度から簡単正確に測定できる。
- 5) 配管等の破断時にも最大流量はポンプ排除容積と回転速度の積以上にはならず、安全である。

アキュムレータと比較した短所としては

- 1) エネルギー回収時の最大流量は排除容積と回転

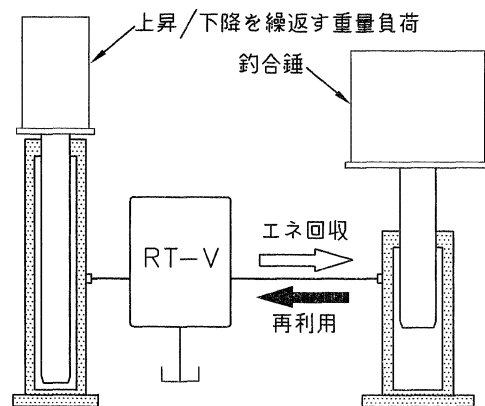


図5 エネルギー回収式昇降駆動装置

速度の積以下に制限される。

- 2) 蓄積量が時間と共に減少する。

- 3) 回収時のモータ効率と再利用時のポンプ効率の積が総合再利用効率になるので、実用効果を高めるには基本機器の内部損失等、システム内のあらゆるエネルギー損失を最小にする必要がある。

- 4) 基本機器は常に高速回転を続けるので軸受寿命が長く、高速域での効率も高く、高温低粘度時の効率低下も少ない可変ポンプ/モータが必須。

3.3.3 エネルギー蓄積に重錘を使用(図5)

図5はエレベータや立体駐車機などの様に重量物を上下させる装置で、重量物の下降過程で失う位置エネルギーを釣合錘の上昇で蓄えた状態を示し、その後の負荷上昇過程で釣合錘が下降して再利用される。

RT-Vは圧力比可変のRINT（回転型油圧トランス）を表し、負荷と釣合錘を支持する夫々のシリンダの圧力比を制御することにより、理論的には無動力で負荷を上下両方向にスムーズに加速・減速・停止させることを無限に繰返すことができる。

3. 4 Energy Re-usable System用の基本機器

図1の電動機をエンジンに変えたものと、図4と図4のフライホイールを減速歯車付タイヤに変えたもの一対を共通高圧ラインにつなげば、忽ち油圧式ハイブリッドカー駆動システムが出来上がり(図6)、プロペラシャフトやデフも不要で、バリアーフリーの低床バスなどに最適と思われる。

すなわち、(制御方法は違うが)同じ基本機器を4台使用するので、その効率などの諸性能がシステム総合性能を決定的に左右することになる。

現在普及している可変ポンプ／モータは斜軸式または斜板式のアキシャルピストンポンプであるが、斜軸式は起動トルク効率と全効率が良いが、転がり軸受寿命が危惧されるほか、正負両方向可変型は大型大重量となり応答性も悪くなるので適しない。

従ってセカンダリコントロールシステムでは全て斜板式を使用している様である。

しかし、斜板式は起動時に傾転角を大きくすると、ピストン先端のスリッパパッドと斜板間の静圧バランス力が不足する上にピストンのこじれ力による側圧も増えるため、摩擦力が増えて起動トルク効率が落ちるだけでなく、静止摩擦と動摩擦力との差によるスティックスリップを生じ易いので、車両発進時などで対策が必要になる場合もあり、特に作動油が高温・低粘度になりがちな車両駆動システム用としては理想的な可変ポンプ／モータとは言い難い。

また高圧・高速化に対応するために、シリンダーブロックのシリンダ内面や弁板に接する端面を銅合金の層で覆ったものも現れているが、リサイクル・再資源化の面では好ましくない。

3.4.1 E.R.S.用基本機器として望ましい性能

●CPSは流量制御でなく力・トルク制御なので

- ①起動・低速時の出力トルクの非線形性が少なく、起動・低速時のトルク効率が高いこと。

●CPSでは常に高圧で運転されるので

- ②軸受寿命が永いこと。

●ERSではエネルギーロスを最小にしなければ効果があがらないので

- ③部品間の摩擦損失が少ないこと。

- ④部品間隙間からの漏れが少ないこと。

- ⑤高速域まで効率が低下しないこと。

- ⑥高温・低粘度域まで効率が低下しないこと。

●車両用としては小型軽量が望ましいので

- ⑦高速・高圧・高温運転に耐えること。

●また、すべての用途にたいして

- ⑧騒音が低いこと。

3.4.2 FFC式可変ポンプ／モータ (図7)

FFCとはFluid-Force Coupleのことで、液(の圧)による力がカップル即ち偶力(強さ等しく方向反対で作用線がオフセットしている一対の力の組合せ、＝純粹の回転力)を構成しているという意味である。

出力軸はこのFFCで駆動されるので、軸を支持する転がり軸受荷重は極小となり小型軽量・長寿命・低騒音・低コストになる。

従来の油圧モータでは、シリンダ内の液圧の力をピストンで推力に変換し、推力を回転力に変換する機構を介して出力軸を廻していたがそのような機構が不要になったので、高効率で高圧・高速・低騒音運転が可能になった

もともとは高含水作動油用に開発した新構造で、全部品を鉄で作り表面をパーカライジング処理して組み立て、機振協技研での耐久試験後分解点検時に立会った時の所見で、各部品の表面処理は全くそのままであった。おまけに「輸入も含む他社ポンプに比べて非常に音が静かだった」と油圧ポンプ屋としては初めて聞く褒め言葉を戴いた経験がある。

これは下記に詳述するように、FFC式では内部部品がすべて互いに静圧バランスを保っているので、密に接触を保ちながらも決して強く押付け合うことが無い設計になっているためである。

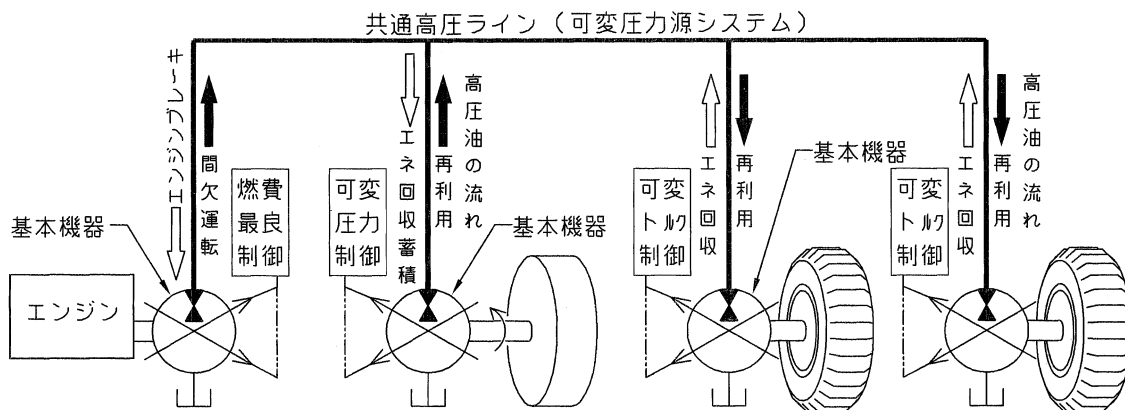
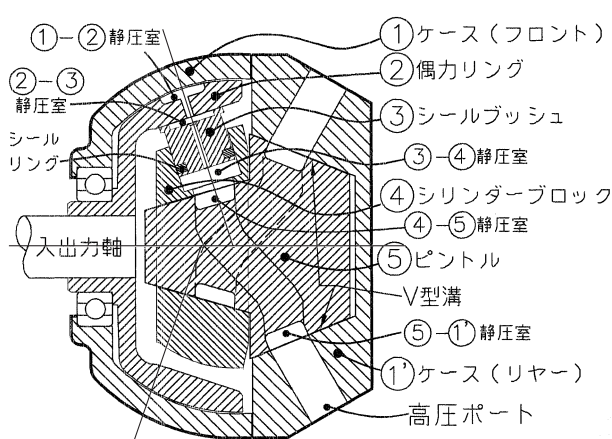


図6 フライホイールによるエネルギー回収／再利用する油圧駆動ハイブリッドカーシステム



- ◎出力軸は②が受ける偶力で回転
- ☆従って転がり軸受の荷重が極小
- ☆従って小型軽量・低価格・低騒音
- ◎③④⑤は完全圧力バランス
- ☆従って作動液の潤滑性が不要
- ☆従って高圧高速運転が可能
- ☆従って耐久性・信頼性が高い
- ◎③にシールリングの適用が可能
- ☆従って総ての漏れ隙間がゼロ
- ☆従って低粘度液の使用が可能
- ☆従って高温時の効率低下が小
- ◎シリンダの底の油路が広い
- ☆従って流路抵抗が少ない
- ☆従って高速運転域の効率低下が小

図7 FFC式可変ポンプ／モータの構造と、それによる特長

解説図を図7に示す。ピストンとは端面に受けた油圧を推力に変換する部品と云うならば、その意味でのピストンはないので、筆者はラジアルシリンダポンプ／モータと呼んでいる。

ただし、シリンダ中心線は回転軸に直交せず少し傾いている。その理由はシリンダーブロック④の中心で嵌合してそれを支持するピントル⑤をテーパにすることにより、嵌め合い部の漏れ隙間を無くすると同時に、ピントルの嵌め合い部が片持ち荷重により撓むのを防ぎ、組立も容易にするためである。

各シリンダに嵌合するピストンに相当する部品③は若干絞られてはいるが筒抜けなので、シールブッシュと呼んでいる。

シールブッシュ③の外側端面は静圧パッドを形成しシリンダ圧を導入して内側端面のシリンダ圧による外方向の力と完全バランスをとっている。

入出力軸と一体の偶力リング②はその内面が7個または9個の平面をもつポリゴンを形成しており、各面はシールブッシュの静圧パッドと接している。

また、偶力リング②外面の静圧パッドはフロントカバー①の内面に接しており、ここにも③の外端面の静圧パッドからシリンダ圧が導入されている。

従って偶力リング②の（高圧ポートの反対側、図では上側）半周は、内外両面の静圧室から同じ強さのFluid-Forceで押されることになる。

一方ピントル⑤は、それをリヤーケースのV型溝に沿って紙面に直角に移動させてシリンダーブロック④の回転中心を偏心させることにより、偏心量に比例する押除容積を正負無段階に設定できる。

従ってもし⑤が手前に偏心しているとすれば、③も手前に移動するので、②を内側から押すFluid-Forceの作用線は手前にオフセットする。

一方②を外側から押すFluid-Forceの作用線はそのままなので偶力が発生し軸端から見て軸を反時計

方向に純粋な回転力（Couple）が働くことになる。

なお、この構造では、シリンダの径とストロークの比（直径／行程）が従来のポンプ／モータよりも大きく、従ってシリンダ底面の油路が広く抵抗が小さいので高速域での効率低下が少ない。

4. Energy Re-usable Systemの展開

我が国ではマイコンコントロールシステム設計に必要な設計ツールや、電子制御器やセンサー類や、ボード類なども完備されているので、誘導電動機をトルクが逆転する誘導発電機域まで使うことが常識化すれば、電源がある場所ではエネルギー蓄積手段を必要としないのでCPSは普及し易いはずである。

フライホイールユニットはエネルギー蓄積手段であると同時に共通高圧ラインの圧力を（可変ポンプ／モータの定圧力制御機能によって）設定値に一定に保つ手段でもあるので、設定を変えることによってエネルギー損失なしに、直ちにシステム圧（共通高圧ラインの圧力）を自由に変更することができる。

このアキュムレータには無い自由度を有効に使って、常にシステム総合効率が最良になるようにシステム圧を随時変える方法も考えられ、C.P.S.からP.S.S. (Pressure Source System) への展開や、また回転速度低下による蓄積エネルギーの損耗を最小限に抑えるため、予測をとりいれ必要以上に回転を上げないように制御する方法も考えてゆきたい。

地球の引力を利用した重錘による方法（図5）は新しく思い付いたもので、圧力が重錘の上下方向の加速度分だけ増減してしまうが、かえって負荷速度の急激な変化を阻止する方向に働くので、スムーズな加減速が保証されるものと期待している。

原理的には無動力で重い物を高速で昇降させることができ、エネルギー蓄積手段も簡単・安全であり、複雑高価な加減速制御も不要になるので超省エネ・

低価格・高信頼性のシステムを実現したい。

GDS (Gravi-Drive System) と称することにして、今後の展開を計りたいと考えている。

3. おわりに

現在の世界のエネルギー消費量は約12兆Wで太陽エネルギーの入射量17兆Wと比較すると1万分の1にも満たない、というデータがあり自然エネルギー利用を進めれば経済性は兎も角としてあと数億年は何とかなる様である。

問題は資源の廃棄による環境汚染と枯渇である。

省エネと環境汚染の見地から車の運動エネルギーを回収・再利用するハイブリッドカーが注目を浴びており、大容量の蓄電池を使用するシステムが多いが蓄電池は再資源化が困難と思われるので、寿命後の大量廃棄による環境汚染や資源の枯渇が心配になる。

上記のエネルギーリサイクルシステムは何れも蓄電池を使用せず、資源リサイクルが容易な機器のみで構成されており、永い目で見ると、真に地球に優しいシステムではないかと考えている。

参 考 文 献

- 1) 喜多康雄：風力と油圧技術，油圧と空気圧，11巻7号（1980）pp 7/12
- 2) 喜多康雄：液圧技術のゆくえ，油圧と空気圧，12巻5号（1981）pp 6/10
- 3) 喜多康雄：油圧について，油圧と空気圧，20巻2

号（1988）pp 7/14

- 4) 喜多康雄：定圧力源システムのすすめ(1)，油圧と空気圧，25巻1号（1993）pp 46/53
- 5) 喜多康雄：定圧力源システムのすすめ(2)，油圧と空気圧，25巻2号（1993）pp 99/107
- 6) 喜多康雄：FFC方式の可変ポンプ／モータ 油空圧技術，32巻3号（1993）pp 19/27
- 7) 喜多康雄：フライホイールを利用した油圧エネルギーの回生法，フルードパワーシステム，30巻2号（1999）pp 17/23
- 8) 喜多康雄：セカンダリコントロールとCPS 油空圧技術，38巻13号（1999）pp 19/27
- 9) 山路憲治：21世紀の地球環境問題とエネルギー自動車技術，55巻1号（2001）pp 31/36

[著 者 紹 介]

喜 多 康 雄 君



1927年2月5日生まれ。

1953年東京大学機械工学科卒。1953年(株)島津製作所入社。1987年CPS研究会代表，現在に至る。油圧機器の開発，油圧システムの研究に従事。日本機械学会，日本油空圧学会，自動車技術会，風力エネルギー学会等の会員。

E-mail : yakita@mbox.kyoto-inet.or.jp.

解 説

ポ ン プ そ し て 人 生*

小曾戸 博**

1. はじめに

内田油圧機器工業の社長だった内田泰男氏と飲んでいた時に、「お前はポンチュウだ」と言われた。「アル中ならわからなくもないが、ヒロポンはやっていません」。「そうではない。ピストンポンプと言えばすぐ夢中になり、中毒にかかっているからだ。おまけに油圧バカだ」と笑われたことがある。

冒頭からふざけた話で申し訳ないが、上記は『私の歩んだ人生』を、“そのものずばり”と表現しているとしか言い様がない。そこで、その意味するところを明らかにするために、本企画の趣旨に合うような形で書いてみようと思う。

2. 出 会 い

私が静岡大学4年生の時、授業で市川常男先生が「東京オリンピック（1964年）の棒高飛び用の支柱は油圧を使って上げ下げした。油圧はパワーショベルを動かすだけでなく細かい制御も出来るのだ」と言われたことに感心して、翌年修士として先生の研究室に入った。そして、「油圧モータの低速特性」を研究テーマとしたのが、油圧との出会いである。当時は新制大学で修士課程ができたばかりで、先生はしばしば「修士課程の卒業評価は機械学会に論文を出せるかどうかだ。その気で頑張れ」と言われ、当時の先輩やごく近い後輩はこの教えを良く守っていた。

さて、低速時の回転むらとステックスリップ現象は実験的に出せるのだが、データのまとめ方とパラメータの振り方で1ヶ月程行き詰まっていた。そんな時、ある朝研究室に行ってみると、日立製作所松崎淳さんの工作機械のベッドの動きに関する直線形のステックスリップの研究を報告した機械学会講演論文集のコピー2枚が机にのっていた。私の目指す方向と違っていたが、『そうか、こうすれば上手く

行くかもしれない』と衝撃を感じ、それからは一気に進んだ記憶がある。そのコピーを置いてくれた人に、今でも感謝している。『研究でも、仕事でもそして人生でも、行き詰まってもあきらめるな。懸命にやっていたら、解決は必ずできるし、神（広い意味で）の助けもある』ということ初めて実感させてもらった。

ところで、その研究で流量制御用に日本製鋼所のサーボ弁を使ったが、何故かうまく動かなかったので、仕方なくサーボ弁を持って日鋼・横浜製作所を訪ねた。これがきっかけとなって、入社することになった。（高圧側にフィルタを入れたら解決）

3. 日本製鋼所時代

石原貞男氏、杉岡勲氏など油圧関係の歴史に名を残すメンバーが出た電子技術研究所があったが、1967年に私が入社した時はすでに解散していて、研究・開発の方向は提携していた図1に示すようなルーカス形及び図2に示すようなトーマ形ポンプ・モータの改良開発であった。（いきなりカタカナ名が出てきたが、当時日本全体ではピストンポンプ・モータだけでも、30品目の技術提携が行われており、いずれも高額の提携料を払っていた。）

両方とも導入時期の模倣技術主体の時期が過ぎ、国産化の自前製品の開発が要請されている時で、油圧研究室に配属されて製品全体を担当する機会に恵まれたことは、技術習得のためにラッキーなこと

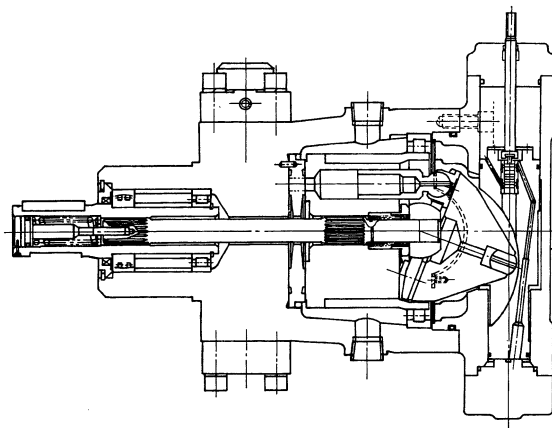


図1 ルーカス形斜板ポンプ・モータ

*平成14年4月26日 原稿受付

**内田油圧機器工業(株)

(所在地 〒300-8588 茨城県土浦市東中貫町5-1)

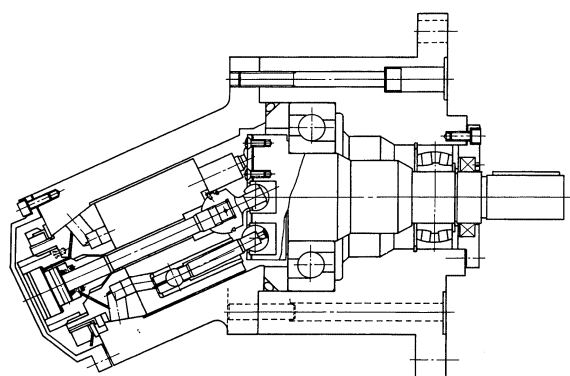


図2 トーマ形斜軸ポンプ・モータ

だった。

ルーカス形斜板ポンプでは、重負荷用ポンプの技術習得のために、リバプールにあるルーカス社に2ヶ月の長期出張となり、設計部長から斜板ポンプの設計技術をじっくりと教えてもらった。この間グラスゴーにあるイギリス国立研究所（NEL）を訪問し、ポンプ弁板の圧力分布の測定やキャロンのボールピストンモータを積んだホイールローダを見学した。石炭の露天掘りの現場見学もした。

このポンプは、閉回路のHST用であり、国内では販路が見つからず、東京製作所で生産していたショベル用の開回路用に転用することになったが、クレードル斜板の軸受にグレーシャ社製のDUメタルを使っていて、高温時の高頻度サイクルには耐えられなかった。3～4年後に再訪問し解決を要請したが、逆にイギリスではショベル用への需要がなく、責任者も前回とは変わっていて、開発に消極的であった。結局は互いに需要先が違うため成功した製品とはならなかった。

入社8年目位の時、従来から製作していた図1のような中負荷用のポンプの大形化を図れとの指示が出て、それまでは最大237cm³だったのを、一気に1,000cm³を新設計することになった。当時杉岡さんがトーマ形斜軸ポンプの設計資料を整備しつつあり、これを参考にしながら従来のルーカスポンプの設計資料、前記重負荷ポンプの資料そして市川研究室以来溜め込んできた新規事項を取り混ぜて、一つにまとめ上げた。全部品の設計をこの資料で仕上げた経験は自分にとって大きな財産になった。

同じ頃、井関農機が稲刈りコンバイン用一体形HSTトランスミッションを探しているとの情報が入った。イートンマーシャル社のボールピストン形HSTを使っているが、高温になると漏れが多くなり、田圃の中で走らなくなるため、アキシアルピストンタイプに変更したいとのことであった。たまたまルーカス社から参考用にもらった軽負荷用ポンプ

の組立図が1枚あり、これを使って、ポンプ・斜板可変／モータ・斜板固定の構成しようということになった。外観は当時ダイキン工業がサンドストランド社と提携していた外寸カタログが1枚あるだけで、ピストン・シリンダブロック周り、弁板、ハウジング、取付面等々寸法もわからず、アルミダイキャストのハウジングや部品の材質も適当にやろうとするのだから無茶な話である。だが、逆に言えば誰もわからないのだから、下らない失敗をしなければいいだろうと、生来の気質が出てくる。

設計チーム員にも恵まれ、かつ試作図面が出てからは毎朝製造部門の責任者と打合せをするという会社幹部の計らいで、大きな遅れや失敗はなかった。この過程で、7本と9本のピストン本数の違いと操作レバーの振動、操作性能、各部品の損失特性などを明らかにしたりして、改良を重ね、客先の担当者からは「競合他社に比べて格段に優秀なHST」との評価を得た。実機評価は高知の田圃で電源と電磁オシログラフをコンバインの上に乗せ、埃まみれの中這いつくばって記録を採った。そしてフィリピンから旭川まで、地下足袋を履いて機械と一緒に歩いたが、農業機械の実態を知るのに良い経験となった。このHSTの構成は図3に示すもので、1977年頃の雑誌「油圧技術」に報告したが、現在でも業界の標準的な形になっている。

次はトーマ形斜軸ポンプについてだが、当時のメインテーマは「100cm³ポンプの高速化・高圧化」と「780cm³ポンプの開発」だった。

前者はシリンダブロックの応力解析を担当することになり、室蘭製作所研究所の最新鋭のコンピュータを借りて有限要素法を適用することになった。シリンダブロックの拡大図を方眼紙に書き、各節点のX、Y座標を読み取り、カードに打ち込み、工場の作業が終わった夜10時頃から計算して、翌朝にやっと

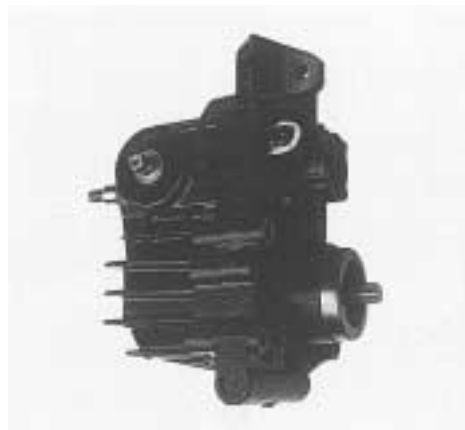


図3 1976年頃の一体形HST

膨大な紙データが出てくるような状態だった。それを自分でプロットして、良否を判定するのだが、何が正で、何が誤りか判らないまま判断するのだから、楽ではない。「どうもおかしいな」というようなデータが出てくると方眼紙からカードの数値まで見直し、全てをやり直すことになる。10日の間朦朧としながらまとめたデータを抱きしめて、帰りの青函連絡船で飲んだビールは美味かった。

また、各種材料の強度を、室蘭の研究所に依頼して行ってもらった疲労試験結果と独自に製作した模擬試験装置で比較検証して、「油圧技術」に報告したが、当時としてはポンプの材料関係の資料として先駆的なものだったと思っている。

後者は、トーマ博士の基本設計品が630mmまであり、それを類似設計により、タンカの舵取り機用及び室蘭製作所の8,000トンプレスの油圧源にしようとするものであった。機構的な部分は相似設計で可能だが、シリンダブロックと弁板の間に特殊な間欠潤滑機構があり、この部分の給油孔と溝形状を最適設計するのが課題だった。最適設計というからには理論的裏付けが必要なのだが、どこから手を着けて良いかわからない。

何とか数式を作っても、図4に示すモデル的な間欠給油の解析例からも明らかなようにラプラス変換や周波数応答は全く役に立たないので、アナログコンピュータが必要ということになったが、これも誰もわからない。参考書を買って勉強を始めたが、実機がないことには何も進展せず、僅かな伝を頼りに三菱電機、日立製作所、東芝を訪ね、実機見学と仕様検討をした。そして1千万円は下回らないということがわかったが、この金を0.5mm程度の放電加工による溝一つ決めるのに会社が認めるかというのが、難関だった。杉岡さん達の後押しもあって、時の製作所長は「必要なものだったら買いなさい」と快諾してくれた。これは嬉しかった。

自分のために買ってもらったようなアナコンを使って、間欠潤滑機構の設計を始めたが、やりだすと色々と興味深いことが出てきた。しかし余り深入りしていると、期限のある製品はまとまらないため、程々にして寸法を決めた。試作試験は上々で、先のプレス機ではリアクタの鏡板成形の実機試験、舵取り機では20万トンタンカの伊豆大島沖の海上公試を立会い、成功体験をした。

一方では、興味が出てくると止められない性分で、間欠潤滑機構を本格的に研究してみようと思うようになった。

① 静圧スラスト軸受け自体が間欠的に給油された場合、軸受け面の高さ、流量や負荷能力はどうか

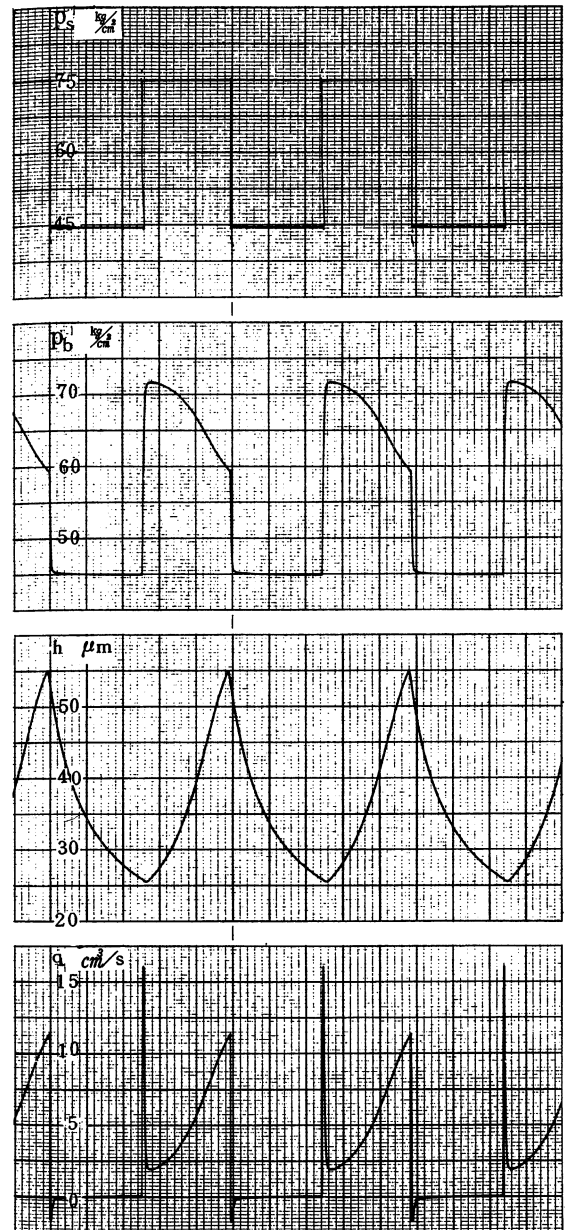


図4 間欠給油アナコン解析事例
(上段より給油圧力、ポケット圧力、油膜厚さ、絞り部流量)

るか。給油比率の影響は。

- ② 円筒形の絞り特性は市川研究室で明らかにされつつあったが、弁板に使われている四角形断面はどうなるのか。縦横比の影響はどうか。ついでに三角形断面になったらどうか。
- ③ 実際のポンプ・モータの弁板は複雑で、通常の軸受け部と間欠給油部があり、かつその連動作用がある。それらを一括できる理論体系がまとまるか。アナコンでシミュレーションできるか。
- ④ さらに、実機での圧力や油膜厚さの測定はどのような計器を使ったらいいのか。価格・納期は実現可能なのか。等々

「先が見えているものは単なる試験で、研究開発とは先が見えないもの」とは良く言われることだが、後で整理すれば以上のようになるが、その時は夢中で、順不同の手探りの連続だった。実験装置は自分で設計し、現場の班長さんに「こんな細かくて、難しいのは作れるか」と小言をいわれ、「でも、こうやった方がいいよ」と教えてもらいながら仕上げつつ、一方では試行錯誤しながら理論体系をまとめた。コンピュータも普及しておらず四則演算しか出来ない計算機の前で、対数表を引き、計算尺と雲形定規で図表を作る毎日だった。

ただ、このような研究も民間会社でやるには色々問題が出てくる。これを最小限に押えるため、実験は他の人に手伝ってもらい関係もあり勤務時間内でやるとしても、計算やアナコンその他は残業代なしの夜間や休日を使った。3年間の正月休みは二日間だけだった記憶しかない。学位論文の全体草稿を仕上げる時はまとまった時間が欲しかったため、1週間の有給休暇を取って保養所に泊り込み、その後の仕上げも全て時間外だった。

最終的には、入社5年後の1972年に東京大学・石原智男教授のところに論文を提出することができた。機械学会論文集にも掲載され、本学会の第1回学術論文賞もいただき、又親戚と小中学校の同級生は祝宴を開いてくれた。友達からの万年筆は嬉しかった。

会社はスエーデンのヘグランド社ともデッキクレーンで技術提携関係にあったため、これに使うマルチカムモータのカム転動面の強度解析や実験をして、高面圧部材の必要特性を明らかにしたり、デッキクレーン用のポンプを改良開発して、北緯63度より北にある本社に技術説明に行ったりもした。これに使用した油圧サーボ機構は、弁に作用する流体力を補償したスプールを考案し、アナコンで安定性と応答性を解析しつつ関係する諸元を決めた自信作だった。

この頃は、海外では先のトーマ博士の他、バック教授、シュレッサー教授、フィッチ教授、国内では市川常男教授、石原智男教授、辻 茂教授、竹中俊夫教授など油圧技術の発展に多大の貢献のあった方々が第一線で活躍されていた時期であり、研究所・室を訪問したり、あるいは来社していただき、親しく歓談させていただいたことは大変嬉しかったし、その後の励みになった。

特にトーマ博士から受けた影響は大きく、今でも付合いがあり、その詳細は文献1)を参照願いたい。トーマ博士とは協同で、3年ほどに亘って前述のポンプに替わる「新形トーマフレックスの開発」をして、数機種の製品化をしたが、その経過を書くとき長

くなるので割愛する。

ところが、一方では当時の日本製鋼所の油圧事業は業界の中位以下で、社内の売上高比率でも、5%以下でしかなかったため、応用品開発の名のもとに、射出成形機本体や石油送油管切替え弁の開発に油圧機器の設計者が引き抜かれた。そして製造部門もそれらの方向にシフトして行った。そのため、厳しさを増してきていた油圧製品の開発競争やコスト競争に付いて行けない悪循環に陥り、急速に油圧事業を縮小することになってしまった。会社には恩義もあったし、高度な引止めもあり、離れがたい気持ちはあったが、もっと油圧事業に力を入れているところに移ることにした。

4. ダイキン時代

ダイキン工業の油機事業部は淀川製作所の中にあり、ここには1983年から9年間勤務したが、大きく前後半に分けて、二つのポイントだけを触れる。

前半は図5に示す「開回路用斜板ポンプ」の開発である。これは当時ダイキン、サンドストランド、サウワの3社が提携関係にあり、共同で開発項目を定め、それらを分担し合う協力体制となっていた。この内ダイキンは前述のポンプを担当することになり、海外の2社からは建機用に合わせた軽量・低価格の仕様が、国内からは産機用、特に射出成形機用に、低騒音重視の仕様が出されてきた。しかも、両方とも当時としては世界トップクラスの値であり、後から考えれば当然だったとしても、担当の責任者としてすれば、「同じポンプで両方同時に満たすことはできません」と初めから言うわけにはいかず、“やるしかない”という思いでスタートした。

問題は騒音とクレードル軸受け部の耐久性と、そこに起因する騒音対策である。しかも、始めて2年目頃だったと思うが、実験棟で不具合が発生し、長期間試験設備が使えなくなった。騒音試験室もこの影響で改造となり、これの仕様から決める必要に迫られた。折角作るならということになり、取付ベ-

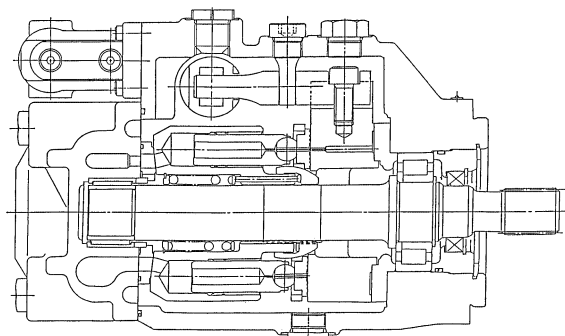


図5 開回路斜板ポンプ構造図

ス部分は絶縁形とし、部屋の大きさや壁の吸音条件は完全を期すようにした。

こんなことをしていれば、復旧に時間がかかり開発に大幅な遅れが出る。やっと完成して、いざ測定をはじめたら、どのレベルを目指せば良いかということが問題になった。他社のポンプはカタログ値しかなく、それを鵜呑みにしてよいのか、即ち測定条件、環境は同じなのかが問題になった。結局は、競合各社の該当製品を調べることになり、内接形ギアポンプも含めて計8機種ほど容量の近いものを購入し、比較した。

概略の実力はわかったとしても正確な評価尺度、及び低減化のアプローチはどうするのか、これまた何もない。途方にくれていた時、堺市にある金岡製作所で社内の空調関係の騒音研究会が開かれるのを知って、自分の車にポンプを抱えて運び、「何とかありませんか、力を貸して下さい」と頼み込んだ。その結果、優秀な技術者を派遣してもらうことになり、一緒になってモータル解析、音響インテンシティ解析、音像法解析などを行うなかで、当時としては最先端の技術を油機事業部の技術として取り込むことができた。途中から、産機用と建機用を一つハウジングで共用するのは無理があるということになり、各々の仕様・目的にあわせて区分することにした。それからは進度も上がった。騒音レベルはハウジングのリブ形状によっても変わるため、特に産機用は“切った貼った”をして最適化を図ってから、鋳物形状を決定した。

その成果は学会でも発表し、これらの技術もその後体系化され、多くの場面で活用されているし、他社も実用化しているのは周知の通りである。技術に限らず、進歩というものは、ダムの決壊と同じで、ある突破口ができれば一気に進むことがある。それまでは騒音を下げるには弁板のノッチを変えて、後方1mのところで騒音値を比較するというのが、大半であったと思うが、その手法では限界がある。構成物全体の振動の伝達過程や剛性を数値として評価するという方向に着目し、実際の油圧ポンプに導入したことは意義あることだと思う。もしあの時私が、車に積み込まなかったらその進捗はどうだったかと思うし、先の大学院の時に受けた感銘を再び味わった。

このポンプの開発でもう一つの特徴的な点はクレードル面の給油機構とその軸受部の表面処理である。可変斜板ポンプの最重要ポイントはこのトルク変換部であり、勝負が決まる重要な箇所である。間欠給油を採用し、軸受面の圧力波形を測定しようとしたが、豊田工機のピックアップを、狭いスペース

に組み入れ、かつセンサー背面に油の沁み込みを防ぐのは至難の技で、失敗を重ねた。1個20万円のピックアップを4個使って、記録できた波形は文献2)のものと、もう1条件だけである。さすがにこの時は私も“申し訳ない”という気持ちで一杯になったが、その後の設計に大いに役立った。

軸受部は各種の材料、熱処理の組合せをピンオンディスク試験機で調査した。これは先の騒音の解析と同じく機械研究所の力を借りてまとめたが、実際の使用条件をシミュレーションし、比較した貴重なデータである。最良のものは、行き詰まっていた時に、それまでに2～3回試作部品を依頼したことのある業者が、「まだ実績は殆どないのですが、使ってみてはどうでしょうか」と持ってきたものだった。その結果は実際のポンプでも実証されたが、耐久性のあるクレードル部を作るだけで2年近くかかってしまった。

話が出てから3年以上かかってしまったが、自前技術だけで基本設計から製造品質まで全てを仕上げたもので、サウア、サンドストランドやキャタピラ本社からも高く評価された建機用、射出成形機用電子制御式ポンプとしての産機用とも当時としては相応のレベルにあった。全体的には文献2)にまとめてあり、海外誌にも掲載され反響があった。

後半でのポイントは「ウォータージェット」である。



図6 300MPa, オリフィス径0.18mm, 噴出速度約550m/s
距離40～55mm時の噴流幅0.3～0.4mm

油圧の応用商品の一つとして、図6に示すような水の
の高圧噴流を使った切断装置で、アメリカのインガ
ソランド社と技術提携した。15MPa程度の油圧
を約20倍の水圧に増圧するが、1段目に上述の新規
ポンプを使うことになり、この開発グループに移っ
た。300MPaで、しかも水、そして往復動のシリン
ダといずれも初体験で未知の分野だが、イ社の製品
が今一つ頼りなく、改良開発をすることになった。

ステンレスの二重円筒シリンダの嵌合いと仕上精
度、配管・継手のオートフレッタージュ、高圧水の
のシール材とその形状及びロッドとの組合せ、ダイヤ
モンドノズルの形状と噴流形状、アプレシブノズル
材の開発、切削効率とその評価法、ポリマーの効果
等を調査検討し実用化した。機械研究所の他に、東
京工大の中原教授、東北大の小林陵二教授及び村井
等教授らの助力も得ながら、相応のレベルに到達し、
一部は本学会誌でも紹介した。

3年程して一区切り着いた頃、ドイツ・レックス
ロスの日本支社を介し、油圧ポンプの技術者として、
BHY (Brueninghaus Hydromatik GmbHの略称)
に就職しないかという話が入ってきた。ヒドロマ
チックの製品は、先のトーマ博士の父であるハン
ス・トーマ氏との技術提携をベースにしたものであ
り、自分の技術の原点に触れられる思いと、本場で
ポンプの開発が出来る喜びで、ドイツに行きたいの
は山々であった。しかし、一方では丁度息子が大学
に入ったばかりで、決断が着かなかった。暫くして、
BHYと提携関係にある内田油圧ではどうかとの誘
いがあり、先の思いは国内でも実現できるであろう
と考え、移ることになった。

5. 内田油圧時代

1992年筑波山を仰ぎながら入社したが、すでに
BHYからの主要製品の導入はほぼ終わり、ミニ
ショベル用の2ウエーポンプもほぼ完成しつつある
時期だった。何をしようかと思案した結果、農業機
械部門が比較的手薄なことがわかった。

以前に付合いのあった井関農機を10数年振りに訪
問して、この分野の情報を得ようとしたが、それ
にはお土産が、しかも内田油圧らしい特徴の出せる製
品が必要である。前の時の経験から、ポンプ・斜板
可変／モータ・斜軸固定の小形一体形HSTが最良
だと当たりをつけた。しかも、BHY製品をベース
にして、高圧・高性能／小形・軽量とするなら絶対
に話に乗ってくれるはずだし、かつ思いを込めた図
面なら手書きでも説得出来ると、製図板の前で定規
を動かした。必要なところを抑えた図面資料により、
早速採用の方向となり、打合せの初日から松山の街

に繰り出すことになった。内田社長も即座に訪問し、
コンバインやトラクタについての知識を得られると
同時に、製図板の前での姿を見ていたので、「本当
に売れる気があるなら、あの姿でなければいけない。
若い技術者にその熱気を伝えてくれ」と言われた。

この余勢をかって、シリーズ化を図り、北海道か
ら九州そして韓国・台湾にまで、それらのHSTや
通常のポンプ・モータを売り歩き、週の半分位は出
歩いている時期が3～4年続いた。技術説明をしな
がら新規の客先開発、用途開発を行ったが、その数
は延べ70～80社で、ファイルは10冊を超えた。また、
大久保歯車工業と協同で、油圧モータ、バルブと歯
車機構を組合せた新しい駆動方式を開発し、たまね
ぎ収穫機やさつまいも収穫機等に採用された。更に、
歯車ポンプと歯車の組合せで、トラクタの後ろにつ
けて田圃の代掻きを使うハローの駆動装置も開発し
た。会社としては井関農機が端緒となり農業機械部
門への手がかりがで、トラクタ等へのHSTも開
発・販売され、バルブにまで手を広げるようになり、
新しい一つの部門となった。

一方では、コンクリートミキサ車用に、レックス
ロス・スコットランド社のマルチカムモータと大久
保歯車の歯車を組合せた駆動装置を開発し、試作的
には完成し特許も取ったが、土木建築業界の急激な
市場の落込みにより日の目を見なかった。しかし、
他の応用例での経験も含めて、カムモータのメリッ
ト・デメリット、技術的ポイントを理解するのに役
立った。

自分が先頭に立って開発をリードした最後の製品
は、図7に示すように前述を進化させた、ポンプ・
斜板可変／モータ・斜軸可変の別の客先向け一体形
HSTである。BHY製品の応用編だが、仕様のにも
最高級で長年の念願が適ったと思った。“これで良
し、問題が出るはずが無い”と、少し高をくくって
いたのかも知れないが、実機試験での詰めが甘く、
量産に入ってから大クレームとなった。客先の製品
が工場出荷を出来ない状態になってしまい、辞職を
考えざるを得ない状況になり、悪性ではなかったが、
大腸のポリープもおかしくなって入院する羽目にな
った。自分に情けなくなり、眠れぬ日が続いたが、
全社あげての協力体制、関係者の日夜を分かたぬ努
力と客先の協力で急場は乗り切ることが出来た。

危機的状態を脱し、一段落してから改良開発した
結果、幸いにも次期生産品は客先の工場出荷段階及
びフィールドでも何一つのクレームもなく、期待通
りの性能を出して、北海道等で活躍している。後で
思えば大学院時代の感銘と同じであると共に、自分
への戒めと思っている。今度こそ“究極のHST”

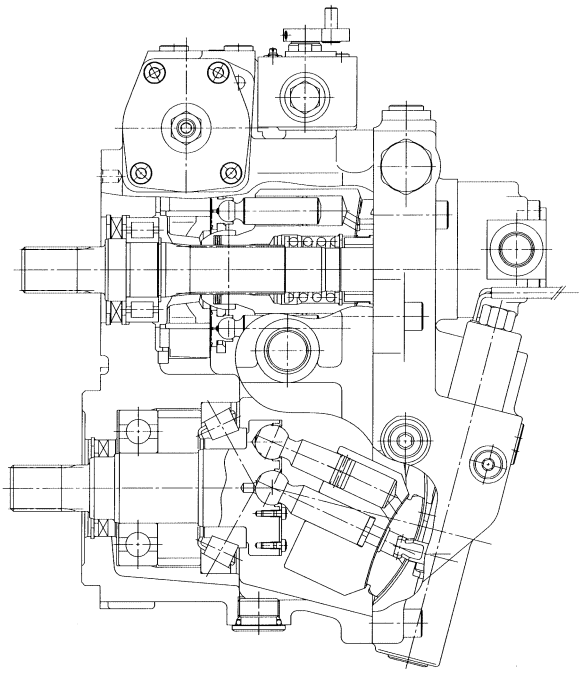


図7 ポンプ・斜板可変／モータ・斜軸可変
一体形HST

と言える製品が出来たところで、定年退職の花束が待っていた。

内田油圧は1971年ヒドロマチック社と技術提携してから、外国との関わりを持つようになり、今ではボッシュ・レックスロスグループの一員として、世界戦略の中での位置付けが求められている。そのため製品のグローバル化を図る取組みもしていて、一部携わったが、この4月より立場も変わったので引継ぐことにし、今後の発展を期待しているところである。

6. あとがき

企業にいと基礎的なことや公益的なことは本業の合間や休日にしか出来ないが、疎遠にならないように心掛けている。内田油圧に入ってから例では、ポンプ弁板のノッチ部の流量係数は、性能や脈動・騒音に重要な因子でもあるにもかかわらず、出所不明な値を“何となく”使っているのはおかしいと思い、早速シミュレーション装置を作って実験した。その結果は本学会の国際シンポジウムで発表し、論文集にも掲載された。この春のドイツ出張時に、BHYの設計部長や基礎試験担当者に説明したら注目され、突っ込んだ話合いとなった。公表論文は一味違い良いお土産となった。

工業会関係では、「2001年版実用油圧ポケットブック」のポンプ・モータの項を担当すると共に、執筆委員の協力をいただきながら編集委員長を務め

た。また規格部会の油圧ポンプ・モータ分科会の主査として、主にISO関係及びJIS規格の作成に携わり、担当委員各位の多大の協力のもとにほぼ20編をまとめた。その中で特に、騒音関係のJIS B 8350が大幅に変更される予定で、戸惑いが出るかも知れないが、解説の項で背景を説明してあるので参照願いたい。また、BHYもISO規格の作成・準拠には非常に積極的で、国際会議の場等で会うと、互いの技術が公益に役立っていることが確認できて嬉しい。

こうして振り返るならば、35年余りに亘ってポンプ・モータの製品開発の現場を歩いて来たわけだが、新婚の頃から「油臭い」と言われながらも、「俺の血液の半分は油だ」と言いつつ、常にポンプ・モータから軸足をはずすことがなく、少しでも技術的枠を広げようと、油圧の時代を歩んで来たのが私の人生である。とは言うものの、決して平坦な道ではなかったことを行間から感じていただき、少しでも参考になれば幸いである。そして、どの項目も自分一人だけでやったものではなく、協力会社を含めて、社の内外を問わず支え助けてくれた多くの人のおかげであり、この人達に感謝しつつ、今後とも油圧技術の発展・敷衍に微力を尽くしたいと思っている。

以上により、今度内田元社長と飲む機会には、自分が酒蔵に通って造った吟醸の銘酒“友楽”を注ぎ、「油圧バカのポンチュウで結構です。油圧の未来に思いを馳せて乾杯しましょう。」と、潔く言いながら、歌を詠もう。

『歳を積み油圧に生きし幸いを

盃に溢れる手造りの酒』

参考文献

- 1) 小曾戸：還流・メッセ紀行，油圧と空気圧，26-5，105/109，(1995)
- 2) 小曾戸，三木：CAEによる斜板ポンプ開発の実際，油圧と空気圧，21-1，69/76，(1990)

[著者紹介]

こそど
小曾戸

ひろし
博 君



1941年11月15日生まれ。

1967年静岡大学工学部修士課程終了。内田油圧機器工業常勤監査役。工学博士。

E-mail : kosodo@ucd.co.jp

解 説

デ ジ タ ル 弁 開 発 プ ロ ジ ェ ク ト

水 戸 昭 夫

1. 始 め に

この文章をまとめながら、現役時代を振り返ると、20代、30代そして40代と働き盛りを油圧に没頭できたのは、仲間、先輩、後輩の支え、励ましによるものと、今でも感謝の気持ちがあふれてくる。

この間、製品の開発では、競合メーカの技術屋さんとの競争をいつも意識していた。特許、文献などにより、お顔などは存じ上げなくても、A社のXさん、B社のYさん、C社のZさんというように仮想敵として、負けないよう努めた。

我々はこのような状況下、1979年春、「デジタル弁とその制御システムの開発」をスタートさせた。

2. 当時の油圧制御市場

当時、多くの産業機械ではマイクロコンピュータ搭載が当然となり、高性能化が進んでいた。

機械を動かす動力である油圧機器は、例えば、射出成形機では、高級機にはサーボ弁が使われ、普及機には比例弁の使用が拡大されつつある状態だった。

サーボ弁においては、文献1において、“電気油圧サーボ弁の起源は1950年代の初頭”であり、最初のサーボ弁は主として航空機への応用に使用されたこと、そして本論としてMoog社の、機械的フィードバックを採用した“2段型サーボ弁の各部の具体的寸法および作り方”まで含んだ詳細が紹介されており、サーボ弁は構造まで良く知られ、その使用は常識化していた。

また、比例弁においては、業界共通な事項として、概略下記のように評価されていた。

- 1) 制御可能な最小値は、最大値の5～10%であり、大きすぎる。
- 2) 制御弁の流量—電流特性、圧力—電流特性が制御弁間で一定しない。
- 3) ヒステリシスが大きすぎる。

そして文献2は、省エネルギーを背景に急速な普

及が始まっていること、しかし、比例制御弁が使い勝手の良さを保ちつつ、サーボ弁の領域に踏み込むには、まだ大きな難関が残されているとし、ヒステリシスをあげている。

このヒステリシスは比例制御弁の各タイプに共通するもので、各メーカによってバラツキはあるが、約3～8%と大きかった。

一方、油圧機器使用の産業機械装置は、例えば射出成形機、産業用ロボット・高速搬送装置、プレス装置などでは、比例弁・サーボ弁の使用により高性能を狙うという時代だった。それらの機械装置は、マイクロコンピュータの搭載により、機械本体の信号はデジタルとなったが、比例弁駆動のための信号はアナログであり、デジタル信号からアナログ信号への高価な変換器を必要とした。さらに、比例弁そのものの性能（ヒステリシスは3～8%）により、いくら高精度なデジタル信号で、演算・指令を出しても、実際に機械を駆動する比例弁部分で、精度は大幅にダウンしていた。

3. 当時のデジタル油圧の状況

当時、海外でもマイクロコンピュータによる油圧のデジタル制御の取り組みが開始され、University of Saskatchewan（カナダ）のYEHIA EL IBIARY助教授は、Coming: Smart Hydraulic Valves（スマート・バルブ登場!）

と言うタイトルのもとに、高速応答のポペットバルブとステッピングモータを用いた単段4ポートロータリバルブについて、記述している。ともに、実験室段階でのプロトタイプであるが、閉ループ系の偏差の処理部分にマイクロコンピュータを用い、全体としてのコスト低減、信頼性の向上に寄与すると報告している³⁾。

さらに、より具体的な油圧のデジタル製品としては、デジタル油圧アクチュエータ（電気油圧パルスシリンダ）があり、環境の悪い鉄鋼市場などを中心に使われていた。この製品は、デジタルというイメージ通りの高精度かつ頑丈な構造である²⁾。

このシリンダは、パルス列の周波数で速度が定まり、パルスの数でストロークが定まるので、非常に使い

*平成14年5月15日 原稿受付

**元(株)トキメック

(所在地 〒241-0817 神奈川県横浜市旭区今宿1-50-17)

たシール摩擦対策にも好都合だった。

- C) ステッピングモータはドライ使用としたので、回転シャフト部分で、シール部材を使用している。

シール材料の基本はテフロンだが、テフロンのみでは摩耗し、また磨耗しない材料を配合すれば軸に摺動痕がつき、背圧の高い場合には、摩擦力のアップとなり、リセット不良、また油漏れを起こす。そこで、数種の材料をテストし、軸を損傷せずかつ耐久性のある特殊材料を選定した。

- D) スプールはロータリーフラッパーの動きに追従するようにパイロット圧力により駆動され、流量制御絞りの面積を変えることにより、流量を制御する。スプールの追従は、ロータリーフラッパーと、スプールに設けたノズルとの間隔を、一定(約0.1mm)に保つように位置制御されるが、ここでのロータリーフラッパーの役割は、

- ① 偏心軸が回転することによる、スプール軸とのノズルの面がいつも同じ半径の円筒面である。
- ② ロータリーフラッパーにはノズルからの噴流が作用し、したがって常時回転し、この回転円筒の持つイナーシャにてノズル、フラッパー間でのゴミの引っ掛け、蓄積を防止する。
- ③ ロータリーフラッパーには、並級のボールベアリングを利用しており、基本的に回転振れがある。その振れの分、ノズル・フラッパー間における間隙の変化となり、それに追従する形で、スプールが微振動する。この現象を確認して、ディザー振動が無いステッピングモータの使用に自信を得た。ロータリーフラッパー追従方式の効果は、開発当初のプロトタイプ(写真1)において、スプールの動きを実際に計測して確かめた。一目1ミクロンのダイヤルゲージを取り付け、ヒステリシス、再現性を確認した。そしてスプールストローク約5mmに対し1～2ミクロンのデータを得た。これは、比例電磁弁の3～8%に対し、2桁少ない0.05%以下という値であり、非常に感動したのを

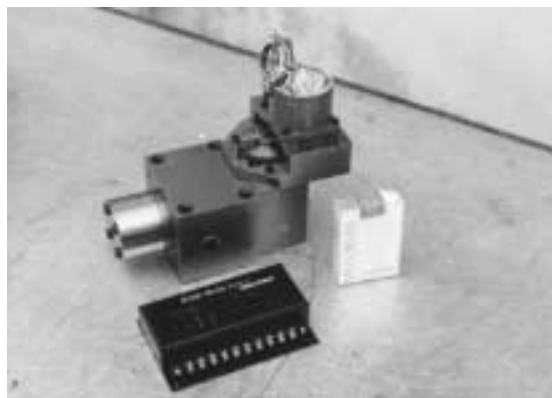


写真1 プロトタイプデジタル弁

思い起こす。

- E) ステッピングモータの選定

ステッピングモータには、コストと、リセット動作のとき確実に原点復帰させる必要性から、モータ励磁を切った時のデテントトルクに着目した。性能的には、ロータに磁石を用いたハイブリッドタイプがその種類も、メーカー数も多かったが、このデテントトルクのため、使用を断念した。

- F) 流量調整弁には、通常圧力補償弁が組み込まれており、負荷が変動しても、流量を一定に保つ働きをする。上記流量調整弁は、パイロット駆動であり、サイズは10まであり、1000L/minまで制御する。さらに、デジタル弁の使い良さが認識され、ICモールドプレスなどのため、0.01L/minの使用が可能なパルスモータ直接駆動タイプの弁サイズ01をシリーズに加えた。

これにより、0.01L/minから1000L/minまでの制御がデジタル弁で可能となった。

- 6.1.2 デジタル方向流量調整弁

方向流量制御弁では、同じ駆動方法を取り、流量と、同時に流れの方向も制御する弁である。ここでも、小サイズ化が要請され、サイズ3が加えられた。サイズ3からサイズ10までシリーズ化した。

- 6.1.3 原点復帰機構

デジタル弁にはすべて原点復帰機構が設けられており、ステッピングモータの励磁が切れると、弁を原点に戻す。

写真2は1981年の油圧・空気圧国際見本市に初めて出品したときのデジタル弁のデモ装置を示すが、



写真2 1981年油空圧国際見本市

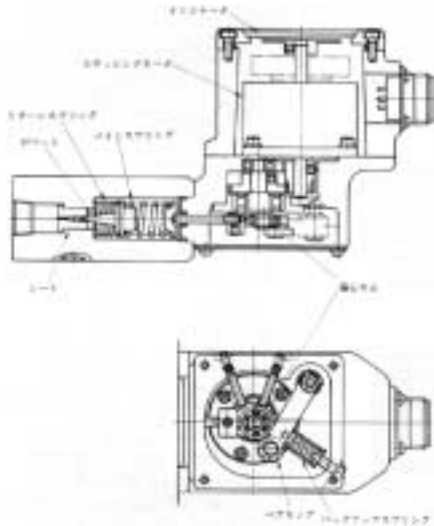


図3 デジタルリリーフ弁

実はこのときの弁のリセット機構には、妙案はまともならず、やむなく、輪ゴムでリセット力を作った。グッドアイデアだった。もちろん、実際の製品ではこの問題はクリアした。

6.1.4 リリーフ弁

図3に示すリリーフ弁は、やはりステッピングモータの回転を偏心カムにより、直線運動に変換し、メインスプリングを圧縮して圧力を制御する。

リセットは、リターンズプリングが原点に戻る。

また、ステッピングモータの出力は一定しており、圧力が高くなるとスプリングを押し切れなくなる。そのため、トルクバックアップ機構を開発した。以上のような構成により、ヒステリシス、再現性ともに0.1%以下という画期的な精度を実現した。

6.2 コントローラのイメージ作り

開発スタート当初、デジタル弁用コントローラは我々にとっては初めてのマイクロコンピュータの使用となり、イメージがなかなか定まらず、見切り発車後も、なかなか製品としてまとめ切れなかった。

当初開発のコントローラは、最初にマイクロコンピュータありきで、テンキー方式のコントローラ(写真3)であった。テンキー方式は、シーケンス制御的な考え方になり、顧客機械のコントローラ(シーケンス制御的)との分担の問題、やり取りの多様さなどに、困難さを悟り、進路変更した。

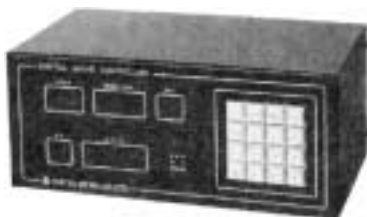


写真3 テンキー方式コントローラ

当時としては、コントローラは、機械装置のコントローラにおいても発展期で、その中に使われるデジタル弁用というイメージの固定ができなかった。

この経験を元に、基本に帰ってイメージから再設定を行った。

6.2.1 パルス信号の取り扱い

制御信号はパルス列信号である。ステッピングモータは、パルスを受けるごとに一定角度回転する。したがって、入力パルス数とその回転角度に対応し、かつ流量や圧力の値に対応する。パルス列信号のもうひとつの制御要素は単位時間あたりのパルスの数、つまり、パルスレートである。

このパルスレートを自由に選択することにより、弁が設定位置に達する時間を自由に制御できる。流量制御においては、結局パルスレートの制御が、アクチュエータの加速度・減速度を制御する。

いくつかのパルスレートを組み合わせることにより、全く自由な過渡波形を作ることもできる。

6.2.2 コントロールシステム(DC-AT他：写真4)

まず、過渡波形を作り出す装置を開発した。それは、16個のパルスレートを組み合わせて一つの過渡波形を形成するものである。この過渡波形を *Transient Shape* と名づけた。

Transient Shape の利用により、最高速を上げて、サイクルアップを図ることができるとともに、シリンダやメカ機構の寿命を延ばすことにも貢献している。

6.2.3 コントロールユニット(DC-A1他：写真5)

在来のシステムを簡単な変更により、デジタル弁を応用したいという要求があり、このコントロールユニットを開発した。

流量(または圧力)の設定は5点、パルスレートは2種類で、接点信号により制御される。昇降装置などの制御に応用され、簡潔な内容が評価され、多くのシステムの制御を担っている。

写真4 DC-AT2-10
コントローラ写真5 DC-A1-11
コントローラ

7. 実用上の効果

- 1) デジタル弁の再現性の良さにより、応用機械の精度を向上させた。
- 2) 操作性の向上：段取り時間の短縮
マニュアル操作が可能なこと、また再現性があるので数値入力のみで済み、調整が不要である。
- 3) 滑らかな動きを実現した。
*Transient Shape*の利用により、機械の動きを滑らかにするとともに、サイクルタイムを短縮し、機械の寿命を延ばした。
- 4) 昇降制御
昇降制御用の特別な油圧回路の開発とデジタル弁の応用により、従来難しいとされていた昇降装置において、滑らかで迅速な動作を実現した。
- 5) 制御システムの合理化
D/A変換器が不要になるなど、コンピュータの合理化に貢献した。
- 6) 保守管理の合理化
油中のゴミに強いので、油の管理が楽になる。

8. 開発経緯

下記に開発経緯をまとめたが、振り返って見ると、世に無い製品システムを開発し、規模は小さいながらも使っていただける状態に至るには、かなりの期間を要したというのが実感である。

1979年：開発開始。

1980年：プロトタイプによる性能の把握。

系列化の範囲は比例弁の範囲となった。

1981年：油圧・空気圧国際見本市に出展。

世界で始めてという扱いで、今後の展開への期待と不安から、非常に緊張した。

なおこの年のロボット展ではほとんどのロボットがDCモータ方式となり、パワーエレクトロニクスとソフトウェアの隆盛に戸惑いを感じた。

1982年：当初のテンキー方式コントローラは、現在こそ当たり前に使われている方式だが、結果として当時は時期尚早で、顧客機械内での位置付け、役割分担でマッチングを取るのが難しく、新デザインのコントローラを投入した。

1986年11月

第21回機械振興協会賞を受賞（社）日本油空圧工業会推薦）

受賞仲間には、デジタル弁を用いた「フローティングシステム・トランスファモールドプレス機の開発」でコータキ株式会社殿、さらにファナック株式会社殿が「純電気式プラスチック射出成型機の開発」が選ばれた。

射出成型機の電動化が始まった。

1987年以降：専用デジタル弁ユニットとコントローラDC-A1-11との組み合わせが、高慣性質量のアップダウン装置およびトラバース装置に採用された。

各種産業機械に採用され、現在に至る。

9. あとがき

「デジタル弁とその制御システムの開発」は、結局我々だけが世に送り出し、1979年の開発開始から23年経過した。

この開発プロジェクトは生みの苦勞、さらにそれ以上の育ての苦勞を味わわせてくれた。

開発、生産、販売、サービスの協力、そしてお客様の御理解のおかげで、ここまで到達できた。

デジタル弁とその制御システムは、なお生産が続けられている。新しい機械装置への採用もあるという。この開発プロジェクトに参画できた一員として非常な喜びである。

油圧制御の市場は小さくなりつつあるようだ。

しかし、電動、空圧との競争は永遠に続くのではないか。空圧の製品は、これは便利というものがそろっており、また安価である。油圧は何を目指すべきか。学会、工業会さらに多くの関係者に、方向付けと取りまとめを期待する。

参考文献

- 1) 「機械式フィードバックサーボ弁の設計製作手法」
油圧外国文献抄録集1970年1月号 1—1—1—7頁
- 2) 「電気—油圧制御特集・第一部および第二部」日経メカニカル1980. 8. 18 32—45頁
- 3) 「COMING SMART HYDRAULIC VALVES」日本版MACHINE DESIGN July1979 57—61頁
- 4) 「デジタル弁とその制御システム」機械振興 昭和61年12月号 56—61頁

[著者紹介]

水戸昭夫君



1941年5月28日生まれ。

1960年4月（株）東京計器製造所入社。主に油圧制御弁および油圧ロボットの開発に従事。2001年3月（株）キメック退職。2002年4月水戸M×H設計事務所開設。現在に至る。

解 説

小 さ な プ ロ ジ ェ ク ト*

米 谷 栄 二**

1. テレビ番組プロジェクトX

今、日本は大不況の中でほとんどの企業と人々が苦しんでいる。10年前、技術力・製品力・経済力は世界最強といわれ、自信に満ち溢れていた時には考えられない状況である。なぜそうなったか多くの理由が指摘され、どうやって不況を脱出するのか種々施策が議論されているが遅々として成果は出ていない。でも、狭い国土で資源も少ない日本が世界の経済大国となり得たのは、世界一品質が良くて安い製品を地道な知恵と努力で開発し、生産してきた賜物であることは間違いないであろう。

昔の人々が大きな困難に挑戦し必死の努力の末に立派な成果を出したプロジェクトの例がテレビで放映され人気を博しているのは、ただ昔を懐かしむだけではなく今の若者達にあのようなチャレンジを是非やって欲しいとの気持ちの表われだと思っている。私も36年前新入社員として入社し、純国産の途方もなく技術的に困難な油圧モータの開発という小さなプロジェクトに参加し、事業としての成果を得る経験をした。たまたま緑陰特集号への執筆依頼があり、しばらく学会とは疎遠になっていたし文章を書くのが苦手なのでよっぽどおことわりしようかと思ったが、私達の苦勞話が今の開発の責任者と若い技術者に少しでも世界の先に行く技術や製品の開発に挑戦してもらおう一助になればと思い、筆をとった次第である。

2. 油圧ショベルの黎明期

1966年日立に入社した私は建設機械を作る工場に配属となった。当時の人気の部署は原子力やコンピューター部門であり、建設機械についてはどんな機械か全然知らず、ましてや日立がそんなものを作っているとは思ってもいなかったが、事業部長が「日本はこれから国土開発が活発に行なわれる、新

しく出来た事業部であるが、ぜひ大きく伸ばしたい」と力説したのが印象に残ったので、3番目ぐらいの配属希望先と書いたが、他に希望する者がいなくてこの部署に配属になったと思う。

確かに1960年池田内閣が発足し、国民所得倍増計画が打出され、1962年首都高速開通・1963年黒四ダム完成・1964年名神高速道路、東海道新幹線開通、東京オリンピック開催等、続々国土開発が進んでいた。

その頃の建設機械の主力製品はブルドーザーや機械式の掘削機であったが、操作の難しい機械式よりはるかに操作しやすい全油圧式の掘削機（油圧ショベル）が日本に導入され市場に出廻り始めた時期であった。しかし、確かに機械式より操作は楽であったが信頼性や耐久性に欠け、特に油圧機器の破損や油洩れが多かった。

建設省の工場現場で多くの建設機械を使用され、その良さと問題点を熟知されていた安部克郎氏が外国からの技術導入の機械ではなく、独自の設計でより使い易く信頼性の高い油圧ショベルを作りたいと当社に入社され、純国産技術による油圧ショベルを開発し、1965年に発売されていた。

このショベルは外国からの技術導入による他社の機械より使いやすく、信頼性も格段に向上し現場での評判が良く、売上を伸ばし始めていた。

しかし安部氏は購入して使用していた油圧機器に満足出来ず、『建設機械に最適な小さな形状で大きなトルクが出せ、しかも建設や土木の過酷な現場でも充分耐える、世界に類のない油圧モータを作ろう』と決心され、油圧ショベルの発売と同時にその開発に着手されていた。

3. 欲張った油圧モータ

安部氏が開発に着手していたモータは、ロータに放射状に配列したピストンに油圧で推力を与えながら、ピストン先端に嵌合した鋼球をインターナルカムの面を転動させて回転力を得る構造のもので、出来るだけコンパクトで大きなトルクを出すために、11本のピストンを1回転に8ストロークさせる欲張った設計のモータであった。ボールそのものをピ

*平成14年5月23日 原稿受付

**日立建機(株)

(所在地 〒112-8563 東京都文京区後楽2-5-1)

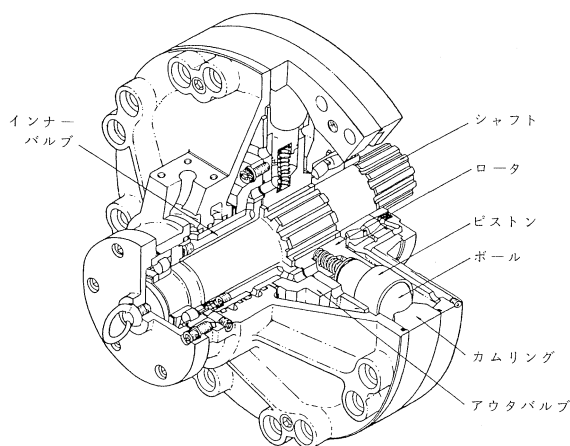


図1 ボールピストン式油圧モータ構造図

ストンとして使用するモータは海外で市販されているものがあつたが、シリンダ穴とボールとの隙間からの圧油の洩れが多く、カム転動面の寿命の限界があり、高圧で使用するのは困難であつた。

そこで、シール性能を確保することと受圧径を鋼球の径より小さくしてカム寿命を向上させるために段付形状のピストンを用いたのが特長であつた。構造を図1に示すが、車体重量13tの油圧ショベルを減速機もチェーンも使用せず直接駆動させる画期的なモータであつた。小さな寸法の中に納めるために無理をしているところが色々あり、心配な点は多々あつたが一番の心配点は、果たして受圧径50mmのピストン先端に嵌合した直径63.5mmの鋼球が5t以上の推力を受けながらカム上をうまく転動するかであつた。そこで安部氏は、私の2年先輩と二人で試作モータの設計・製作を進めながら、同時進行でピストンとボールの基礎実験を行い最適なピストンの球面軸受形状を決めようと準備中であつた。

4. 図面指定は1ミクロン以下、加工方法は？計測方法は？

ショベル設計課（当時の開発の主力は、建設機械の中で一番需要の多いブルドーザーであり、ショベル設計の主な製品は機械式で、油圧ショベルはほんの一部の設計者で行われていた。）に配属されて、上司に挨拶に行くと、「君は今から研究所へ行って油圧モータのピストンの研究をやってこい」と命ぜられた。何のことかわからぬまま研究所へ行ってみると、実験装置が出来上つたところであつた。指導者はMITで修士号を、ケンブリッジで博士号を取得されて帰国直後の今井正也博士であつた。

さて、実験装置は有り、立派な指導者にめぐまれてのスタートであつたが、肝心の実験用のピストンの球面の摺動面をいかに加工したらよいか決つては

いなかつた。

高負荷で低速での摺動なので油膜厚さはほとんど0になるだろうからと、図面では真球度 $1\mu\text{m}$ 以下と指定されていた。材質はエンジンのピストンに使用されていたシリコン系のアルミ合金で加工しやすくはあつたが、円筒部の奥にこれだけの精度で半球面を仕上げる加工方法は存在していなかつた。

重量構造物の製缶や加工が主体の工場の中で、一番精度の高い加工を行っていたのはエンジンの製作課であつた。その中で一番腕の良い加工者に実験用ピストンの加工を依頼したが、四苦八苦していた。

さらにもっと問題なのはどのように球面精度を計測するかであつた。半球面でしかも奥に加工された凹面は、直径法や真円度測定器では測定出来ない。しかたなく、真球度 $0.1\mu\text{m}$ 以下で絶対寸法も正確に仕上げられた鋼球の表面に薄く塗膜を塗り、加工面に当てて塗膜の付き具合を見て良否を判定することにした。初期の頃のピストンは出来が悪く、自分で当りを見ながら当たったところをエメリーペーパーで磨き、全体が均一の当りになるように仕上げて実験に使用した。

総形バイト方式、倣い旋盤方式、研削、研磨等、種々の加工法を試行した後で、原理的に粗さの範囲内の真球度が得られる創成加工法が確立され、ピストンの球面精度が格段に安定したのは4年後のモータの量産開始直前であつた。

しかし、計測方法は色々の高度な計測器や計測技術を検討し、試行してみたが遂に満足なものは得られず最後まで原始的な鋼球の塗膜方式であつた。

5. 論より経験

設計者が理論的に計算し、頭の中で考えて最適と思って図面で指定する精度と実際に使用して良い性能が得られる精度は、ミクロ的にはかなり違うものだと痛感するのは、その後の実験だけでなく生産開始から量産になってからも色々な場面で経験した。原則的には、加工者は図面に指定された精度に加工しなければならないが、図面通りに加工されたか否かは検査員が種々の計測器で測定して判定する。しかし同じ合格品でも、どのような加工方法で仕上げたかによって結果が大きく違ふことが多々あつた。

また、同じ物でも測定の方法によって、数値が異なる場合も有り、何が真実かわからなくなる時もしばしばあつた。

ある時、加工者と検査員が口論していた。検査員は「この部品は図面指定値をはずれているので不合格だ」と指摘しているのに対し加工者は、「図面指定通りよりこの方が良い結果が出るからこれで良い

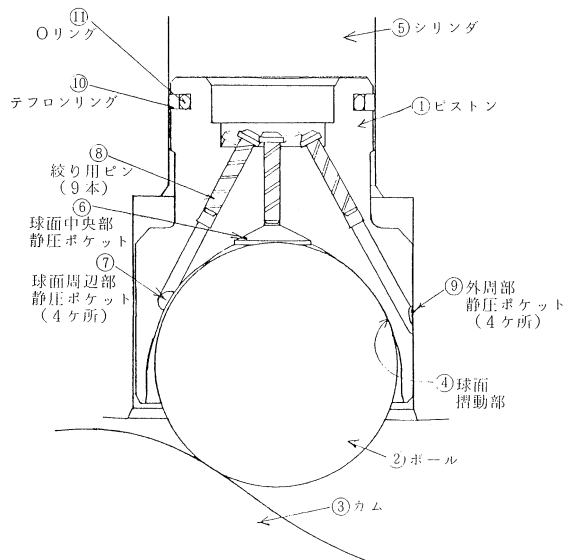


図2 ボールピストン機構

のだ」と反論していた。わずか2～3 μ m差であったが図面指定通りのものも加工し、実際に比較してみると加工者の主張通りの結果となった。毎日加工している加工者の方が理論ではわからない実際の性能への影響を良く知っている。もちろん図面は即時訂正した。

このことは、この後の私の色々な製品開発や生産に大いに参考となった。良い製品が生産出来るか否かはもちろん、基本的な設計が正しいことが必要だが、それ以上に重要なのは関係する人間の経験の積み重ねである。

6. あらゆる状況でも摩擦係数を最小に

高压でも低压でも、起動時でも高速時でも、高温でも低温でも、建機の駆動用としては、あらゆる条件でボールを滑らかに回転させなければならない。そこで、ピストンに加わる圧油を摺動面に導く静圧軸受を採用し、油膜を確保することとした。

しかし、ピストン受圧径より球面径の方が大きいので軸方面の負荷容量は100%以上確保出来るが回転方向の負荷能力は無い。そこで色々な軸受形状を試してみたが、球面の周辺部4ヶ所に静圧パッド部を付け、別々に絞りを介して圧油を導くのが一番良かった。

しかし、これでも時には油膜切れをおこす場合があり、動圧効果も取り入れるため、単一半径の球面でなく、入口部と中央部に数 μ m半径差を付けた三段球面形状としてだいぶ良くなった。

でもまだ完全ではなく、最後は材質をなじみ性の良いアルミ・スズ合金に変えてやっと常時滑らかな回転を得ることが出来るようになった。このピスト

ンは外周部も往復動に耐えられるよう別の往復動試験機を製作して実験をくり返し、外周部にも4ヶ所の静圧パッドを設け、圧油を導くことになった。結局このピストンには9ヶ所の静圧軸受部と9ヶ所の別々の絞りを付ける給油穴が加工されることになり、蜂の巣のようなピストンとなったが、この最終形状を決めるまでに3年以上かかってしまった。この間にモータ本体は、試作試験・設計変更を繰り返し、種々の問題を四苦八苦しながら逐次解決していた。単に設計だけの問題ではなく、材料・熱処理加工方法・検査方法・試験方法・試験条件、どれも手探り状態で、試行錯誤しながら量産へ向けての設備の検討、準備が行われた。

例えば、2 ton—m以上のトルクをかけて起動時や極低速から100rpmまで、正逆回転で性能が測定出来る設備はどこにも無く、新設計で作った装置を実際に使いこなすには随分時間がかかった。

7. 多難の船出 不良の山、事故の山、赤字の山

モータとしての性能や耐久性の目途がつき、生産設備の準備もほぼ出来た1970年、いよいよ量産が開始された。最初に搭載されたのは土砂や泥土に埋って作業する湿地用油圧ショベルの走行駆動用としてだった。とんでもなく苛酷なスタートであった。

毎月20台ほどの生産量であったが、最初からつまずきの連続であった。ベンチ試験での合格率は約7割、さらに車体試験での合格率は約5割であった。車体試験は車体の試験員が行っていたが、こんな不良の多いモータのための試験は出来ないかと拒絶され、仕方なくモータの設計、製造、試験のメンバーが交代で車体に取り、工場内を一周してきて油圧フィルターを点検し、アルミの粉（ピストンが異状磨耗するとアルミ粉が作動油に混入し、フィルターで見つかる）が見つければ、モータ交換し再度工場一周、見つからなければモータ合格として車体試験に引渡した。

内部リークを減らせ

ベンチ不良の大半は容積効率であった。坂道で車体を停車させても降下しないようにするにはモータの内部リーク量を抑えなければならない。しかし、摺動部の焼付や磨耗を防ぐための強制給油ヶ所が多く、内部リークを少なくするのは容易ではなかった。給油の量を最小にするには、0.3mmの直径で250mmの長さの絞りを確保しなければならなかったが、直接これだけの細い穴を精度良く加工するのは不可能であった。

そこで直径4 mm長さ20mmのピンの外周に0.3mmの

溝を螺旋状に正確に加工し、精度良く加工した給油穴に挿入して絞りとした。このアイデアで容積効率は格段に向上し、さらに給油穴内でピンが往復するためコンタミによる目づまりも自動的にクリーニング出来、一石二鳥の効果が得られた。

その他にリーク量が多いのは、円筒式の分配弁の摺動部であった。ロータ側に11ヶ、固定側に16ヶの油穴のある直径150mmの摺動部からの洩れを許容量以下にするには直径隙間 $15\mu\text{m}$ 以下にしなければならなかったが、わずかの温度差が付いても焼付いた。そこでなるべく温度差が付かないようにすると同時に、隙間が無くなっても焼付ないように外径部の剛性を下げたり、材質を種々に変えてなんとか洩れの抑制と焼付の防止を実現することが出来た。

鋼球に疵を付けるな

事故の大半はピストンの異状磨耗であった。とにかくちょっとしたことで鋼球に疵が付く、その疵がピストン摺動面を引掻き、ピストンの異状磨耗となっていた。まず鋼球メーカーにわずかの疵($0.1\mu\text{m}$ の疵でも鏡面に仕上げた面では、人間の眼や指で確認出来た)も付けないようお願いした。モータの組立室を防塵室にして外からのコンタミが入るのを防ぎ、車体の回路中のコンタミを減らすために $10\mu\text{m}$ のフィルターを装着し、徹底したフラッシングを行った。

また、作動油メーカーに新油に含まれるコンタミをNAS等級で2ランク以上良くすることをお願いし、さらに、油圧ポンプやバルブ、配管、ホースのメーカーに内部のコンタミを徹底して減らすよう依頼した。当時これらのメーカーからは日立建機の要求は非常識だと非難されたが、このコンタミを減らす効果は、車体で使われる機器やシステムの信頼性を向上させることが出来、その後の日本の油圧ショベルや油圧システムメーカーでの常識となっていった。今、日本の油圧ショベルの信頼性が他国のものより格段に優れているのは、我々のこのコンタミ排除の努力がその一因になっていると思っている。しかし、この時はモータの事故を減らすのに必死であった。

カムの粗さが真犯人

いろいろな努力により事故は減ってきたが、それでも時々多発することがあった。思いあぐねてボールペンのメーカーにどのようにしてボールペンのボールが滑らかに廻るようにしているのか聞きに行った。その答えは「うまくボールが廻るか否かはインクの性能と相手の紙の状況が重要で、つるつるの紙では上手に書けません」であった。そう言えば、鋼球に

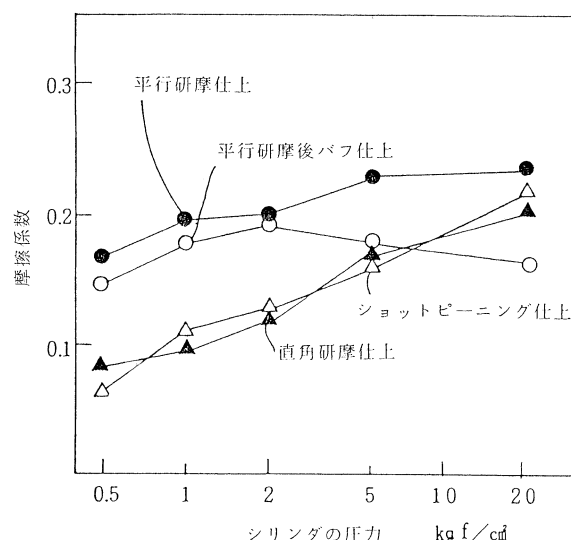


図3 滑動はじめるカムの摩擦係数

疵を付けないようにし、かつカム面の転がり寿命を長くするために、転動面をつるつるに磨かせるようにしたら事故が増えた気がしていた。最速つるつるに磨かせるのは中止したが、果たしてどのような粗さに仕上げるのが最適なのか見当もつかなかった。

そこで現場での試行錯誤と平行して、急遽実物の鋼球を使ってカム面との滑動摩擦力を測る装置と転動面の転がり寿命を確認する装置を製作し、いろいろな仕上方法による転動面の粗さや材質・硬度を変えて測定した。その結果6~9Sに仕上げるのが最適となった。そこですぐに図面に指定したが、現場から文句が出た。「指定値以上に良く仕上げることや、以下に悪くすることは出来るが、こんな中途半端な粗さで $3\mu\text{m}$ 以内の範囲に仕上げるのは困難だ。」そこで現場と一緒に自作の研削機を作り、安定してこの範囲の粗さに仕上げられるようにした。このカムの粗さを丁度良く仕上げられるようになってピストンの事故は激減した。

赤字は許されない

最後の難問は大幅赤字の解消であった。このモータは当初から、従来のチェーン駆動方式のコストと同等以下の売価で車体に売ることになっていた。どんなに性能が良く、車体としてのメリットがあっても高い価格は認められず、ましてや赤字は絶対に許されなかった。量産開始時は手作り状態で不良も多かったこともあり、売価の2倍以上のコストがかかっていた。不良や事故の撲滅と同時に、徹底したコストダウンが進められた。特に高度な加工、多くの穴加工が必要だったため、無人運転化や同時加工化を積極的に進めた。

しかし新たな設備投資は許されず、丁度生産中止

となったエンジンの専用加工機を改造し、多くのモータ専用加工機を造った。当時4～5人だったモータの設計者は大半現場の人と一緒に専用機や改造機の設計を行い、さらに製作図は作業や加工のやり易い図面に変更した。外注先へ出掛けては、外注先のコストダウンに協力した。検査装置や試験装置も極力省人化を進め、自動運転で性能がとれるようにした。それでもなかなか黒字にならず、最後は事務費や旅費等あらゆる経費、固定費の抑制を全員で実行していった。

8. 幾多の困難を乗り越えたのはエンジン撤退の辛酸を舐めたメンバーたち

多くの努力の結果、不良や事故は激減し、コストダウンも進み、生産量の急上昇（月産700台を越えた）と相俟って、1977年遂に黒字化が達成出来た。開発着手から12年、量産開始から7年後のことである。

この技術的に困難な油圧モータの開発が成功したのは、絶対に物まねでない独自のアイデアのこのモータの製品化に執念を燃やされた安部氏の功績が一番であるが、それにもまして重要だったのは、プロジェクト全員の不屈の努力であった。このプロジェクトのメンバーの大半は、それまで建機の将来を担う最重要機器と期待されていたディーゼルエンジンの内製化が不況に直面し、事業の将来性無しとして撤退を余儀無くされた人々だった。新しいモータの量産化に参加した彼らは二度と撤退の苦汁を味わいたくないとの決意で、設計・製造・試験のメンバー全員が一致協力して数々の問題を解決していった。いろいろのプロジェクトの成功の理由に、強いリーダーシップとプロジェクト全員の熱意と執念が挙げられるが、まさにこのプロジェクトにも当てはまることである。

ただ一つ心残りのことは、エンジンの撤退の残務処理をしながら、このモータの不良、事故の撲滅、赤字解消に心血を注がれ自ら先頭に立ち、メンバーを叱咤激励された鈴木修司部長が、黒字が達成された1977年に43歳の若さで急逝されたことである。さ

ぞかし心労が重なった為だろうと心が痛む思いである。今でも毎年墓参を続けている。

9. プロジェクトのその後

このモータはその後も生産量は増加し、利益も確実に増えていった。1979年には月産2,000台を越え、年間売上全額65億円、経常利益率20%にまでなった。しかしその後、油圧ショベルのシリーズの拡大や更なる高圧高速化に対し、各々専用のモータの開発には多大の費用が掛かることを勧告し、減速機の格段の進歩もあり、高速モータ方式に切換えることになった。1985年このモータの量産は中止となったが、開発着手から20年、量産開始から15年、累計生産台数は約10万台であった。しかしこのモータの開発で得られた多くの知識や経験と事業拡大への全員一致の情熱はその後受け継がれ、多くの油圧機器の開発や生産に寄与してきた。今では年間売上300億円を越え、利益も確実に確保する当社にとっての重要な事業部の一つとなっている。

今、この厳しい環境の中でこのような困難を伴う開発はなかなか実行しにくい状況であるが、それでも将来に向けての新しい技術や製品の開発に挑戦する努力を続けて行きたいと思っている。

[著 者 紹 介]

米 谷 栄 二 君



1942年9月30日生まれ。

1996年東京工業大学機械工学科卒業。同年日立製作所入社。建設機械用油圧モータの開発に従事。1970年分離独立により日立建機へ入社、1988年油機設計部長、1991年中型ショベル設計部長、1999年より常務取締役国内事業本部長。日本油空圧学会、トライボロジー学会会員。工学博士。

Eメールアドレス

kometani66@hitachi-kenki.co.jp

解 説

建設機械用油圧システムの開発現場から*

布 谷 貞 夫**, 堀 秀 司**

1. はじめに

コマツ・エンジン油機事業本部・油機開発センタは、自社内の建機に搭載する油圧システム、機器の開発を長年行っている。本稿はその歴史の中から、いくつかの事例をもとに、研究開発の現場での取り組み方、苦労などを紹介し、今後フルードパワーに携わっていかうとする若手技術者の方々に参考になればと思い執筆した。

建設機械において油圧機器は、動力の伝達配分という基本的な役割を担っているが、近來の油圧ショベルにおいては、数多くのアクチュエータ類をオペレータが如何に自在に操作可能か、というコントロール機能が、非常に重要な役割となってきた。従って、油圧システム、機器の研究開発は当然ながら、建機製品の開発の方向付けに密接に結びつき、その要求を常に、タイムリーにかつ確実に満たしていくことが要求される。

そのため我々の研究開発では建機の進化、発展に対応すべく、油圧システム全体をどうするか がまず第1の課題となってくる。

油圧システムの歴史から見ると、イノベーションとも呼ぶべき大きな変革点は、

- (1) 可変ピストンポンプの採用……高圧化
- (2) パイロット操作方式の拡大……操作の容易化
- (3) ロードセンシングシステムの発展……省エネ
- (4) 電子制御の導入と展開……制御の高度化

といった内容が挙げられる。

図1, 2からわかるように、建機における油圧システム・機器は、機械全体を統合する制御を行い、非常に重要な位置にあるため、当社では長年に渡って自社内において開発、生産を行ってきた。

その役割を担ってきた立場から、これまでの体験をもとに、『コンポーネント屋』の目指す考え、行動についてご紹介したい。

結果的に成功した、ヒットした開発プロジェクト

とは、市場、顧客の要求にタイムリーにマッチしたと同時に、製造面において技術、コスト面で目標を達成できたこと等、いくつもの条件が満たされていた。そこから開発に携わる技術者として常に心がけておくべきポイントは

- 『ニーズ先回り開発』
- 『作り易く、搭載し易い合理的デザインの追求』

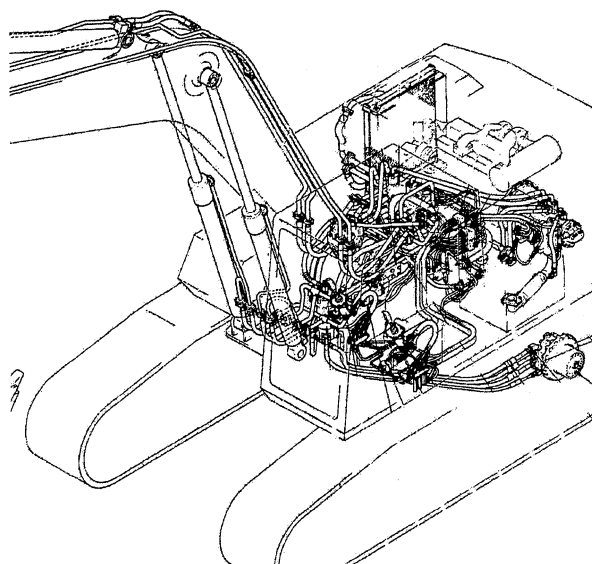


図1 油圧ショベルに搭載されている油圧機器

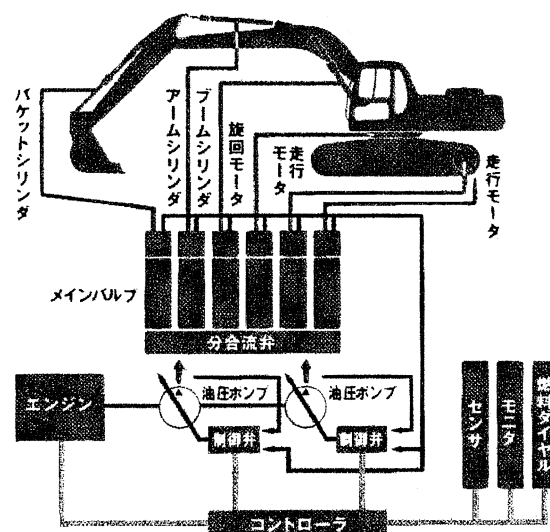


図2 油圧システム概要

*平成14年5月15日 原稿受付

** (株)コマツ エンジン油機事業本部油機開発センタ
(所在地 〒323-8558 栃木県小山市横倉新田400)

●『現場で最後まで作り込む』

であろうと考える。

上記について、本稿では先に記した項目の中から、比較的地味な存在と思われる、パイロット操作弁の開発を例にして説明してゆきたい。

2. パイロット操作弁とは

建設機械の操作レバー部は 今日大多数の機械においてパイロット油圧発生バルブをオペレータが操作する、油圧リモートコントロール方式が採用されている。レバーの操作ストロークに比例したパイロット油圧を発生するバルブで、当社ではPPC弁（Pressure Proportional Control）と呼んでいる。

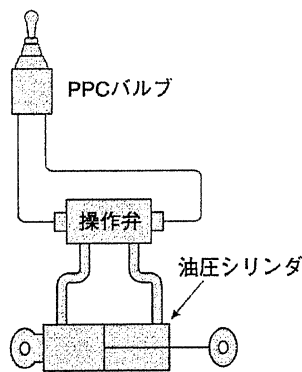


図3 パイロット操作弁

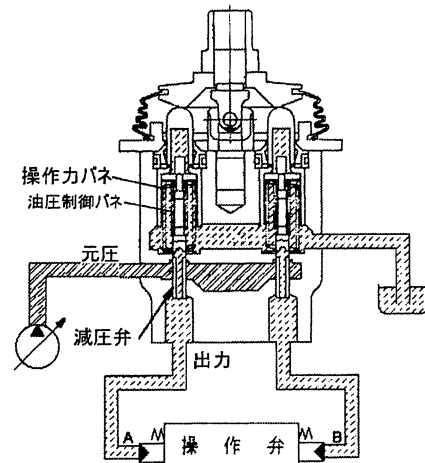
このバルブの登場によって、それまでの直引きタイプ（ワイヤ&リンケージを介して操作弁スプールを直接駆動する方式）の持っていた 操作力が重い、ガタ等経時劣化が生じる、油漏れを起こしやすい、車体レイアウト上の制約が多い 等の欠点が解消され油圧ショベルは一時代を画した。

既に登場してから歴史は長いものであるが、我々のねらいは、車両に応じ、操作環境に応じ、常に最適なものをその要求に先がけて開発し、提供し続けてゆくことであり、それはこの部分が運転操作性、しいては作業量にまで直接影響し、市場における商品力の評価に大きく結びついているからである。

このバルブの原理は、操作量＝変位に対し バネ荷重と釣り合うよう元圧を減圧して出力する減圧弁で構成されているものであるが 操作量に対する反力＝手応えは 別の操作力バネによって得られる。

基本形としては図5、6に示す2つのタイプ 1軸タイプと、2軸（ジョイスティックタイプ）があるが、今日に至るまで小型化、低コスト化が進められていく一方 用途ごとの様々なバリエーションが開発されてきた。

上記は、主に手元で操作する作業機用リストコントロールレバーとして広く普及している。



(第1図)

図4 PPC弁の作動原理

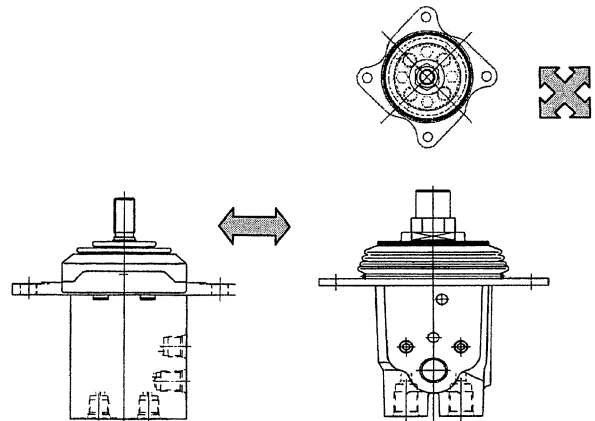


図5 1軸タイプ

図6 2軸タイプ

3. 走行用パイロット操作弁の開発

一方、走行系のコントロールは、足ペダルおよび床から突き出た長いレバーとの両方で操作できることが必要で、そのため少々重い操作力でも問題はなかったため 直引きタイプのままで、PPC化は遅れていた。

我々は、作業機用のPPC弁の開発体験を通し、走行系のPPC化も時間の問題と考え、いち早く走行系に最適な構造の開発に取りかかった。

結果的には、最近の車両の動向、ニーズに合致し非常にタイムリーな物となった。

それは、後方旋回半径を小さくする構造の採用が進み、バルブをはじめとする機器の配置に制約が強まり、従来のワイヤ、リンケージの取り回しが非常に困難になってきたこと、また他方 安全性の向上のため、レバーロック構造（＝ロック状態ではレバーを操作しても動かない）を採用する上で 簡便かつ確実なPPCによる全パイロット油圧制御方式が必要不可欠になってきたこと、等である。

開発時に最も苦労した点は、走行では、操作の際

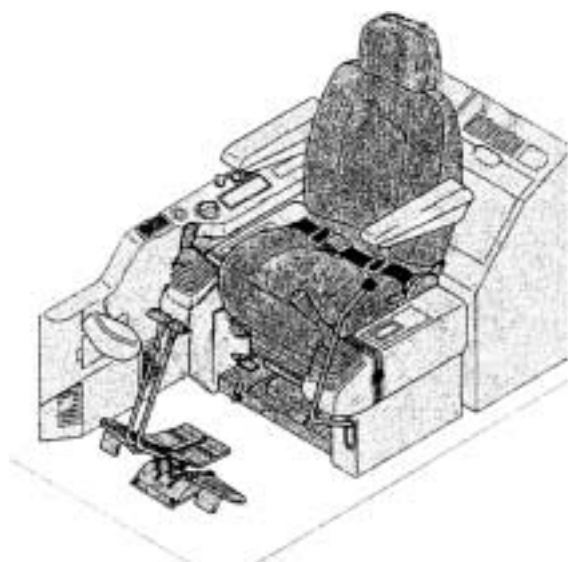


図7 操縦席内レバー配置

に車体の揺れ、振動が人間の手の揺れを起こし、大きな振動、ハンチング状態を起こしやすい点だった。

これにはそれまでの、バネによる操作反力の他に、摩擦力を付加することで、車体と人間の間で起こすマン+マシン系ハンチングの抑止が有効と考えた。摩擦力の発生構造としては、ショックアブソーバのようなものを並列に装着すれば良いのだが、装着構造、コストの面で不利になる。

そこで軸受け部分に粘性摺動抵抗を与えるで何とかならないものかと、試しに高粘度の油を軸受け隙間に封入してみたら、結構いけそうなフィーリングが得られた。長期間の稼働でも漏れることなく、変化しない操作フィーリングを保つために、幾種もの油を実験した結果、シリコン系の油で実用化できる目処が立った。次に、製品にこの高粘度油をどのようにして挿入し、封入するか製造部門と一体となった作り方の技術開発があった。

最後は、実車両に搭載し、幾人もの試乗員の意見を聞きつつ、一方で実際の量産の製造工程で管理可能な性能の幅について折り合いを付ける、という作業が苦労のポイントであった。特に、直接人の手に触れ、また1日中操作し続けるレバーの『操作フィーリング』は人の体力のばらつきや、好みの分かれから最終決定まではかなりの道のりを経なければならぬ。かくしてできあがったバルブが市場に出て、ユーザからの好評を聞くことができ、開発陣一同最上の達成感が得られることとなった。

4. 更なるPPC弁バリエーションの開発

さて新しいシステムを考える場合、概してユーザは保守的で、使い続けているそれまでの操作方式が

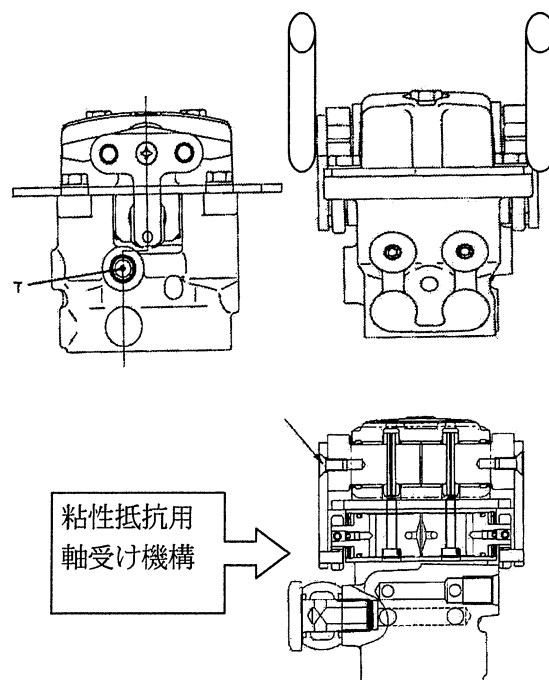


図8 走行用PPC弁 外観と主断面図

変わることを好まない。ただ操作力が軽減できればよい、というわけではない。微妙な速度コントロールを達成するためにはシステム全体で分解能がよいこと、ヒステリシスが少ないこと、応答性がよいこと、そして、先に述べたように振動の大きな操作環境では一定の抵抗力が必要とされる。

このPPC弁は、その後も多くのバリエーションが生み出されているが、あくまでも使われる現場環境の多様なニーズにきめ細かく対応してゆくことが使命であった。

まず、ストロークエンドまで押し切った状態では手を離してもそのまま保持する、デテント機構を付加したものがある。

ブルドーザやホイールローダなどで使用される機能で、油圧でロック機構を付与したものと、ソレノイドによる電磁力でロックする機構のものがある。これらは、元々メカリンクで操作弁を駆動していた時代には、操作弁のスプール部にかなり大きな場積を占める構造であった。

これも、PPC化の戦略を進めていく上では必要不可欠な機能であると判断し、車両が開発のスケジュールに乗せる以前から『先回り開発』を実施することで成功した例である。

同様なレバー位置保持の機能は、更に進んで、任意の位置で手を離してもそのまま操作位置を保つPPC弁の開発につながった。このPPC弁を用いた走行レバーは手元操作（リストコントロール）タイプで走行をコントロールする、ブルドーザなどの

HSTコントロール用に採用されている。

走行中に揺れ、振動のより激しい建設機械で、手元操作で车速のファインコントロールを達成するためには是非必要であろうと これも先行研究を重ねた物である。最終完成までには、フリクション力の重さ、ノッチ感の強さ、などのバランスを取るため多くの実機でのテストを経なければならなかった

またこのHSTブルドーザーでは、反対側の手元には作業機をコントロールするため、従来のメカリンク式に変わって、2軸式に回転ひねり軸を追加した3軸コントロール式PPC弁も開発した。

ブレード（土工機）のリフト（上下動）チルト（上下傾斜）アングル（左右傾斜）を一本レバー操作でコントロールできるメカニズムである。

一見誰でも思いつくアイデアともいえるが、操縦席内のコンソールボックスに収まるコンパクトな形状、中立ガタが少なく、かつ経時劣化の起きない

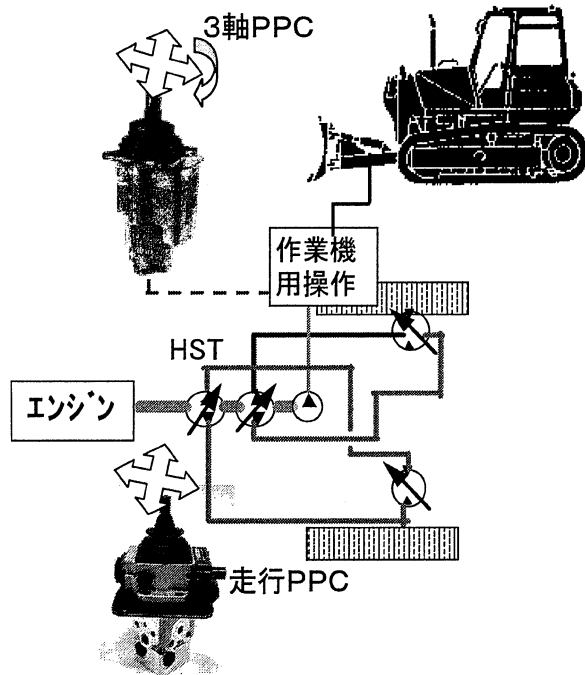


図9 ブルドーザ用システム

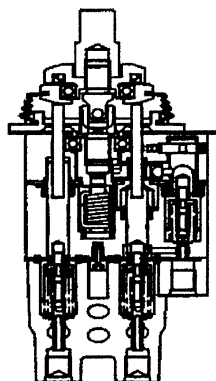


図10 3軸PPC弁

強度の確保など、バランスの取れた構造に至るまでは妥協することなく、構造アイデアを練り上げてゆく過程が不可欠であった。

5. 今後の展開について

以上のように、マン・マシンのインターフェイスの直接接点であるパイロット操作弁の開発は、当社の目指す『人に優しい』建設機械の構成上非常に重要な役割を果たしてきた。

さて今後の展開を見た場合、電子化は建機のコントロールにおいても必然の流れになってきている。建機の場合、上は100トンを越える大型＝高額の高額な機械から、1トンクラスのミニ建機まで、非常に幅広い商品レンジがあり、また使われる場所も世界中に亘るものであることから、電子＝油圧システムへの移行も単純な一本道ではない。

我々はこれに関して、油圧パイロット弁と共通設計思想で電気レバーシリーズの開発にも取り組んだ。電気レバーそのものは、ゲーム機などで既に市場に広く存在するものであるが、建機に使用できるという条件を満たすものを手に入れることは容易でないと判断したためである。

操作力フィーリングを作り出すメカリンク機構、過酷な環境のもとでの耐久性など、製品化する際の困難度はそれまでの油圧パイロット弁の技術を出来る限り応用し、かつ可能な部品を共通使用することでコスト面でも有利なものとした。

現時点では、この電気レバー採用機種はまだ少数にとどまるが、なにより市場において『電子化』による耐久品質面の懸念を生じさせることなく、今後の建機の電子化普及に道を開くことが出来たと考える。

6. 開発現場から〈若手に期待すること〉

最後に、以上の開発の事例の紹介を通して、今後この分野で活躍を志す若手技術者にメッセージを送りたい。

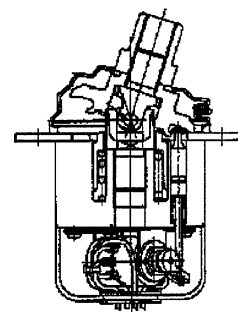


図11 建機用電気レバー

6.1 『ニーズ先回り開発』

油圧機器等のコンポーネントは、最終商品である車両の中の一システムでありある意味では『水か空気』のような存在でなければならない。ただしその役割は1日中長時間稼働する、過酷な環境現場において最大限の生産性を上げ、かつオペレータ側には安全で疲労を与えない操縦環境を保証しなければならない。

開発設計者は、どのような開発ニーズが存在するか開発の具体的なターゲットはどうあるべきか、についての確かな情報を得ることがまず第1であると考えている。

そのためには、開発現場体験を積み、ユーザサイドから見る視点を養うことが重要である。

次に、システム全体をどう構成するのか、その中の各機器にそれぞれどんな機能、役割を担わせるのかについて鳥瞰的に判断できる技術力を養って欲しい。そしてさらに、コンポーネントの立場は、常に母機に先立って開発が行われていなければならないということである。最終商品開発段階において、完成していないコンポーネントは非常に大きなリスクを背負うことになる。また一方、魅力あるコンポーネントは、車両の開発において強力な動機付けを行うものであり、以上の意味から、『先回り開発』を、技術者は常に頭の中にたたき込んでおくべきと考える。

6.2 『作り易く、搭載し易い合理的デザインの追求』

構造設計においては、何とんでも構想段階が成否の決める重要なポイントである。

数多くの車両で共通使用を可能にするためのコンパクト化設計、量産効果でコストを下げるため、焼結や、ダイキャストなど無加工化設計など、構想段階から目標を立て仕込んでおかないと成功は難しい。

さらに言うならこの段階では、アイデア出しが

[著者紹介]

ぬの たに さだ お
布 谷 貞 夫 君



1950年11月24日生まれ。

1974年(株)コマツ入社。現在、コマツエンジン油機事業本部油機開発センタ システム&バルブ開発グループGM。フルードパワーシステム学会誌編集委員。

E-mail sadao_nunotani@komatsu.co.jp

如何に充実しているか、ということが決め手になる。

如何に良いアイデアを出せるようになるかについては、世の中に数多くの『参考書』も出ているが、研究開発者たる者は24時間中頭の中をハイ＝活性状態に保ち、粘り強く考える姿勢が必要ではないかと考える。

6.3 『現場で最後まで作り込む』

これは技術に磨きをかけ、製品をトップレベルに引き上げるため不可避の条件である。

この中ではとりわけユーザーサイドの要求に限りなく応えてゆくことが重要である。初期の段階の要求あるいは目標仕様に無かった事項が作り込みを行うにつれ、開発の最終段階においてでも発生してくることは日常茶飯事である。また、使われ方条件の見落としから、商品化以後、市場において思っても見なかった不具合がおきることがある。

パイロット弁の例を取れば、オペレータが操縦席に乗り込む際、操作レバーにつかまって体重をかけて損傷させてしまった等の例が過去にあった。このような例はまだ、データを蓄積し設計の標準化を図ってゆけばよいのだが、操作フィーリングのような問題は人の好みや、習慣などが入りなかなか最終決定に至らない難しさがある。

とりわけ、量産のスケジュールが目前に控えた状態で見直しが必要になってきたばあい、開発設計者は大いに判断に悩まされるわけであるが、自ら図面をもって生産現場や、協力企業を飛び回り説得と調整の役を果たしきれるようになって欲しい。

終わりに

いささか お説教のような内容になってしまい、恐縮であるが、長年開発の現場に携わってきた立場からは是非伝えておきたいと考えた。

今後フルードパワー分野で活躍を志す若い方々に参考になれば幸いである。

[著者紹介]

ほり しゅう じ
堀 秀 司 君



1958年10月9日生まれ。

1981年(株)コマツ入社。現在、コマツエンジン油機事業本部油機開発センタ アプリケーション&研究開発グループ上級主任技師。

E-mail shuji_hori@komatsu.co.jp

解 説

プロジェクトVEX—シリンダを駆動するバルブ*

小根山 尚 武**

1. はじめに

木陰に寝ころがってぼんやりしていると、なにかが視界をさえぎった。焦点をあわせて追うと、ミズナラの幹にとまったのはコムラサキであった。先客のクワガタの脇で樹液を吸い始めたようだ。目を幹に沿って上へ這わせると、スミナガシやカブトムシのグループもいる。木洩れ日の差し込む梢や多くの枝先は葉にさえぎられて定かに見えない。……ところで、空気圧は進化樹のどこを登っているのだろうか。20年程前に挑戦した、プロジェクトVEX—シリンダを駆動するバルブ—を思い出した。

2. NEWMATIC SYSTEM

社内のミニコミ誌に掲載された当時の記事を抜粋すると、

2.1 自 問

“空気圧機器のカタログは「豊富なバリエーション」を謳い、図1の工業会の出荷統計を見るまでもなく、とくに電磁弁とシリンダは寄らば大樹の処世訓になっています。ユーザさんが生産活動ある限り求め続けてくれるのは、機械動力を体現するアクチュエータであり、その主役としてシリンダにお呼びがかかっているのでしょうか。一方、シリンダを押し引きするには電磁弁、力の加減には減圧弁、速度の調整には速度制御弁と、市場規模が2倍強の油圧バルブに匹敵するほどにバルブの賑わいも顕著です。

この基盤を、将来いつそうユーザさんに満足していただける進化態へつなげるために、いま何に挑戦すべきでしょうか。”

2.2 自 答

“シリンダへ向かう圧縮空気は、減圧弁、電磁弁、そして速度制御弁と、三つの弁機構を次々と通り抜けていかなければならない。シンプルイズベターの常識からは、図2にみるように、関門が増えるごと

空気圧 765億円	バルブ 39.7 方向制御弁 32.2	他	シリンダ等 27.4	その他 32.9
	バルブ 23.6	シリンダ・モータ 32.2	ポンプ 18.9	その他 25.3
油圧				

図1 1980年の出荷統計 (%)

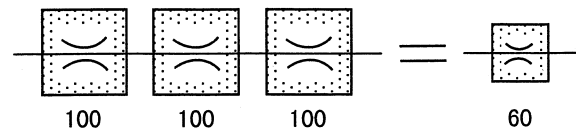


図2 シンプルイズベター

にエネルギーロスは増え、それぞれの弁を収納する容れ物がかさみ、故障率や諸管理費も増えます。

ソーシャル・ダーウィニズムの風が吹くと、省エネルギー、省資源、ローコストを主張する「シリンダを駆動するバルブ」が見えてきます。空気圧に新たな進化を促す新生PNEUMATICS、そうNEWMATIC SYSTEMの扉をたたこう。” というものであり、いろいろと議論はあろうが、アイデア醸成のためのひとつの動機づけではあった。

3. ガイドライン

構想を具現化する際に、技術オタクに陥らないよう、ある機能をもつある大きさのバルブは何エンであるべきか、NEWMATICS設計のガイドラインを設定しておくことが重要である。そこで、部品を積算してトータル価格を求める帰納法とはちがひ、演繹的に価格指標を推し量ることにした。

市場に流通している各種のバルブは、平均的な価格と接続サイズの関係が図3のようになっている。大形弁の律の乱れは生産量などによるので、PT1以下の律で補正してみた方がよからう。これらから、空気圧バルブの指標価格Yエン（注：円ではなく相対化した価格）を次式のようにとらえることにした。

$$Y = f \cdot y(S)$$

ここに、 f はバルブの種類による機能係数である。また、 $y(S)$ はバルブの大きさによる能力価格であり主として有効断面積 S の関数である。 f は3ポー

*平成14年4月2日 原稿受付

**SMC株式会社技術センター

(所在地 〒300-2493 茨城県筑波郡谷和原村絹の台4-2-2)

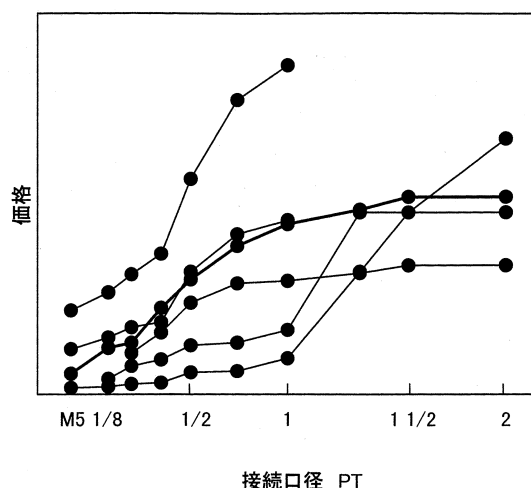


図3 各種バルブの価格律

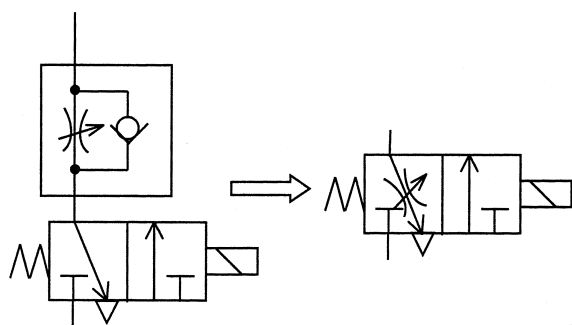


図4 Two valves in one.

ト2位置電磁弁を1とすると、速度制御弁は0.18、減圧弁は0.41、5ポート3位置電磁弁は2.0のようにみることができる。

例えば図4に示すように、現状の3ポート電磁弁と速度制御弁の直列接続は、 $f = 1 + 0.18 = 1.18$ であり、このサイズは $y(S) = 100$ エンとすると、トータルで $Y = 1.18 \times 100 = 118$ エンである。これを、一台の新規な速度制御機能付き3ポート電磁弁に置換しようとする、圧縮空気が通過する弁座は一ヶ所だけなので有効断面積は小さくて、 $y(S) = 70$ エンでよい。従って新バルブの指標価格は、現状の回路構成より30%安い $Y = 1.18 \times 70 = 83$ エンとみることができよう。

4. パワーバルブ

4.1 ユーザニーズ

営業サイドから、“プレス機械の空気圧制御部を席巻している製品があるが、出荷が始まったばかりの電空比例弁を利用して、これをコンピュータ制御に適應できるものに代替できないか。”という提案がもたらされた。それは、作業者がプレス機械にへばりついて、目と手と勘を働かせて長々と時間をかけてやっていたダイクッションやバランスのタンク

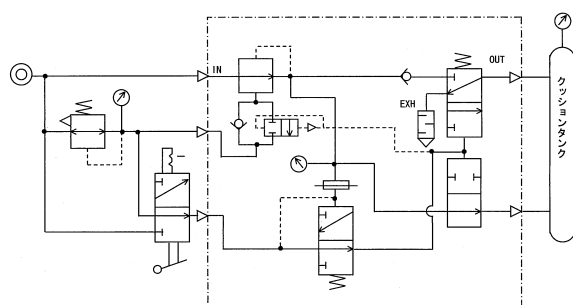


図5 プレス制御回路

内の圧力調整を、簡単にリモート操作で短時間に行えるようにしたもので、自動車メカなどのFMS化による頻繁な金型交換のニーズに、段取り時間を大幅に短縮して応えた画期的な製品であった。

この製品は、図5に示すように、パイロット式減圧弁、チェック弁、エアオペレート形3ポート切換弁を接続した大容量のメイン系を、数個の小形エアバルブ機構の巧妙な組み合わせで制御するもので、構造図と回路図を交互に見比べても容易に理解できない逸品である（注：以下も回路記号および単位などは当時に従う）。

4.2 NEWMATICS設計

いきなり技術屋が得意とするhow toに走らないで、まずwhatと鑑賞するところから核心に迫るのが、NEWMATICS設計の極意である。

まず、遠目にメイン系を眺めると、空気源からのIN、タンクへのOUT、そして大気へのEXHの3ポートが見える。次に、一歩寄ってどんな働きをするのか観察すると、段取り時は空気をタンクに供給あるいはタンクから排出して金型に見合う圧力に短時間に設定する働きをし、プレス運転に入ると、圧縮昇圧されるタンク内の空気を逃がさないでただ漏れ分を補給して設定下限圧力を維持する働きに移ることがわかる。スケッチすると、開発対象は図6のような3位置弁であることが判る。

4.3 指標価格

この機能図を、減圧供給（減圧弁 $f = 0.41$ ）＋給排切換（3/2エアオペレート切換弁 $= 0.71$ ）＋逆流阻止（チェック弁 $= 0.15$ ）、あるいは減圧＋リリーフ＋切換とみても、トータルして機能係数 $f = 1.5$ 程度の3ポート3位置弁である。

この弁の大きさは、30秒足らずで 2 m^3 のタンク内圧を 5 kgf/cm^2 から 1 kgf/cm^2 まで下げたいとのことなので、有効断面積が 300 mm^2 程度であり、能力価格は $y(S) = 20$ エンである。従って、この弁の指標価格は、 $Y = 1.5 \times 20 = 30$ エンであり、NEWMATICS設計のガイドラインが判明した。

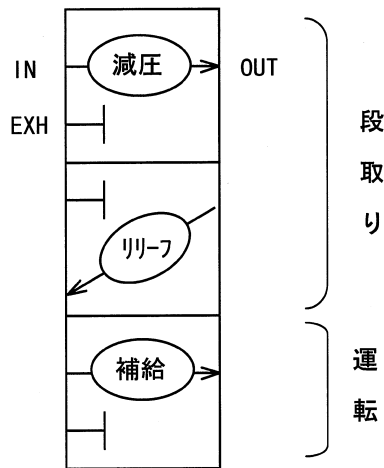


図6 NEWMATICS設計

4.4 母型の設計

当時、上記のイメージに近いものは、世界で唯一のリリーフ容量の大きな減圧弁や各社の2位置切換弁などが存在していた。これらは、ダイヤフラムの耐久性、弁シールの漏れ、構造が特殊化しすぎていて発展性に乏しいなどが懸念された。そこで、NEWMATICSのひらめきが結晶したのは、図7に示す構造である。

ピストンの下にAポート圧が、上にパイロット圧がかかるので、Aポート圧が低いとピストン棒が下がって下側の弁を開けてPからAポートへ空気を供給（減圧弁）し、Aポート圧が高いとピストン棒が上がって上側の弁を開けてAからRポートへ排出（リリーフ弁）し、釣り合うと図の中立位置（クローズドセンタ）に戻る。両弁ともAポート圧によるバランス構造なので、独立に寸法を決められる自由度

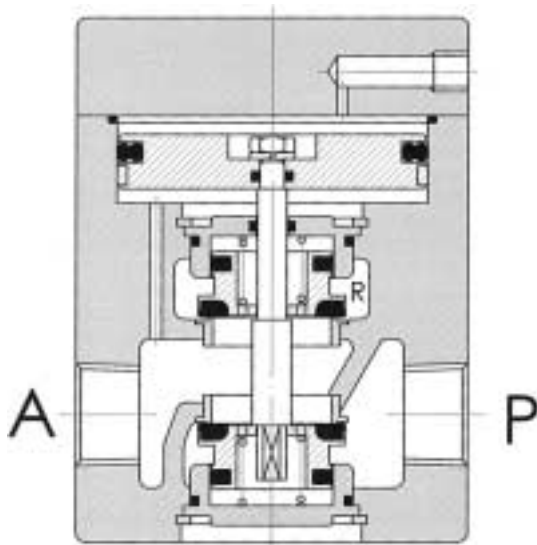


図7 VEXシリーズ「パワーバルブ」

があり、また単なる切換弁ならば、フィードバック流路をなくし、感度とか調圧特性とかは要らないからピストンをずっと小さくできる。

この弁機構は、非常に変態の自由度があり、圧力も方向も流量制御も何でもござれのエクセレントなPower制御弁といえるので、VEXシリーズ「パワーバルブ」とネーミングされた。

4.5 プレスレギュレータ

さて、当面のターゲットのプレス用バルブは、図6の段取り工程をすでに母型がクリアしている。3位置目の運転時における減圧補給は、頭にピストンを載せ、Aポート圧を回してリリーフストロークを抑止することにより、プレスレギュレータの本体が完成した。これに小形の3ポート電磁弁と電空比例弁のパイロット系を併せて、ユーザに採用されることとなった。

5. エコノミーバルブ

5.1 省エネルギー

その数年前に、自動車メーカの油圧駆動から空気圧化への要請に応じて、通常の複動に比べて25%程度の空気消費量で昇降とも途中加減速や終端の緩衝停止が行える「省エネルギー」が開発されていた。図8に示すように、シリンダのヘッド室の空気はタ

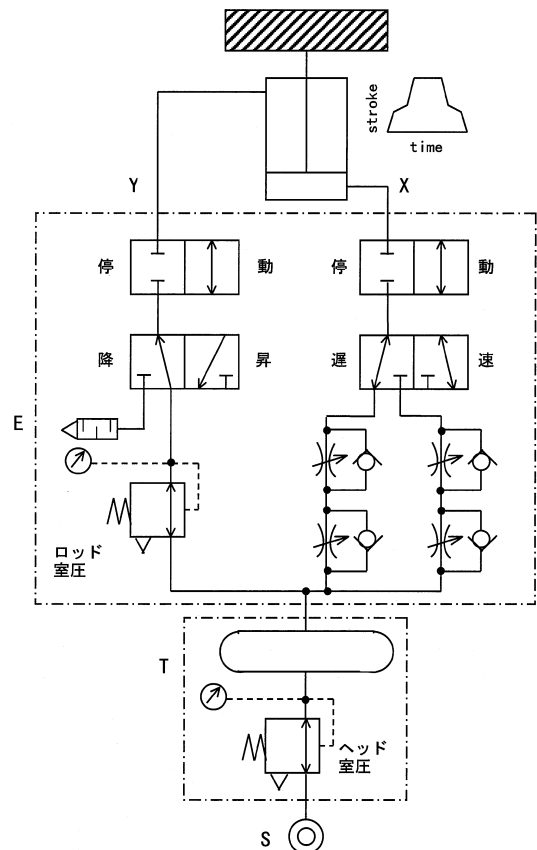


図8 省エネルギー

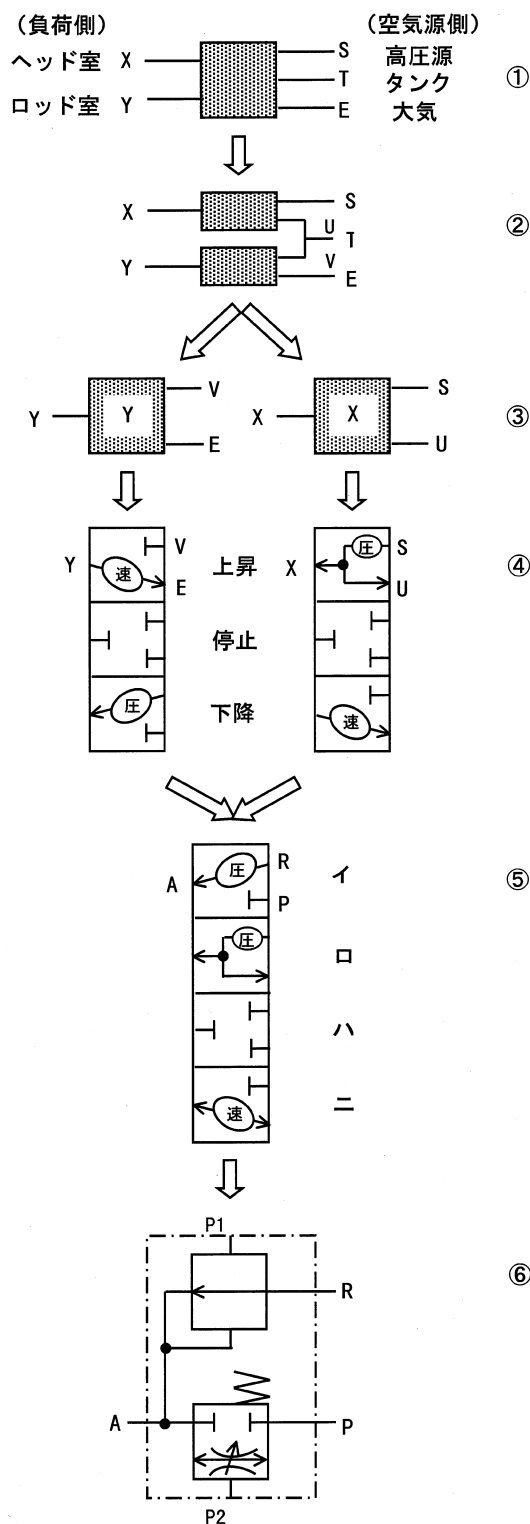


図9 NEWMATICS設計プロセス

ンクと往復するだけで消費されず、ロッド室に供給された低圧空気が1サイクルに1回排気されるだけである。多くの大形バルブで回路を構成するので、これを配管接続した幅500mm、高さ1,050mm、奥行き565mm（0.5t用の場合）のバルブスタンドに仕立ててユーザに納入されていた。

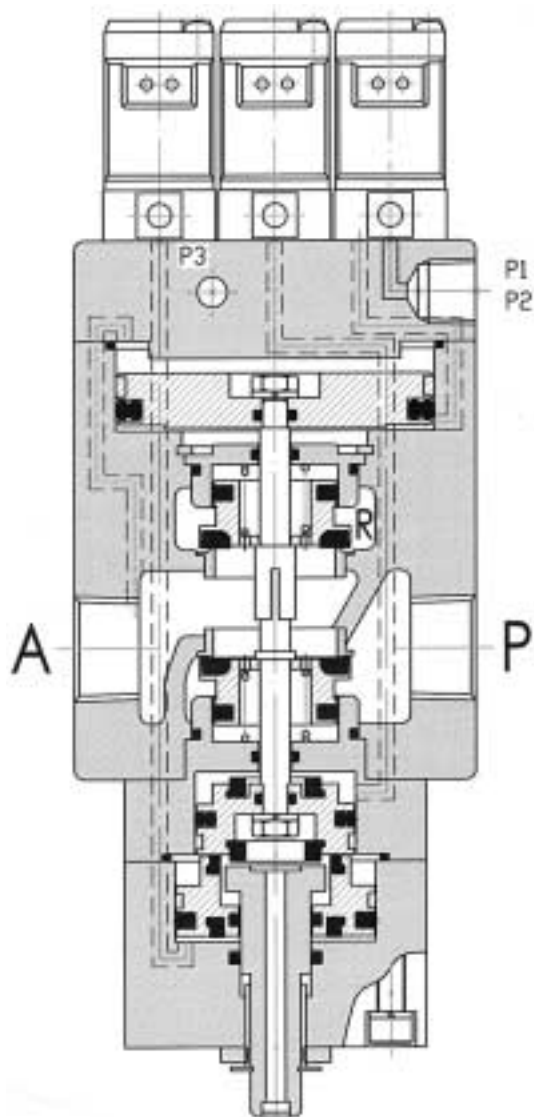


図10 エコノミーバルブ

5.2 NEWMATICS設計

この配管技能の結晶をNEWMATICS視すると、このシステムは空気源、タンク、大気および複動シリンダと接続されるS、T、E、X、Yの5ポートであることがわかる。ここからのNEWMATICS設計プロセスを図9に示す。①を $5 \div 2 = 3 \times 2$ の算術で、②の3ポート2つに分割する。中圧レベルのTポートをUとVに分離することがコツであり、③のX弁とY弁になる。ここでボックスの中の働きを覗くと、④のようにいずれも圧力と速度の調整機能をもつクロズドセンタ形3位置弁であり、X弁は全ポート連通位置のある点がちょっと変わっている。ここで、両弁の全切換位置を並べてみると、⑤の4位置弁となり、イハニでY弁、ロハニでX弁として使える。RからAポートへは減圧供給、AとPポート間は絞りを伴うオンオフなので、既存の回路記号でなんとか表すと⑥のようになる。

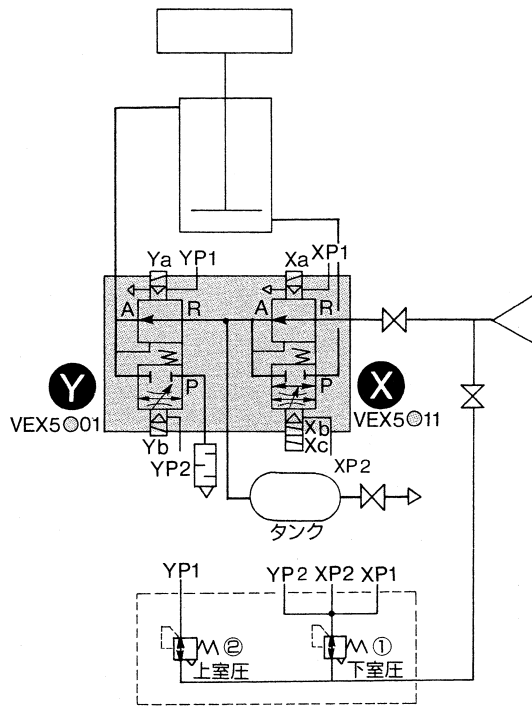


図11 エコノリフタ

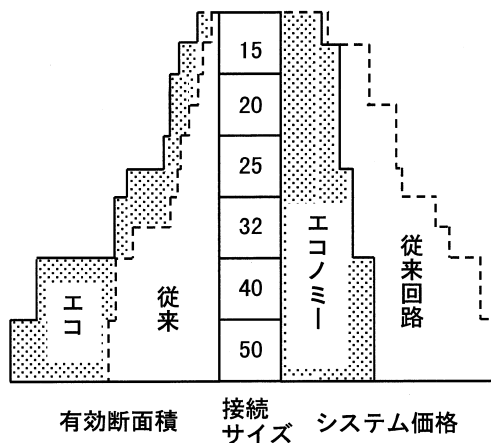


図12 エコノミーシステム（当社比）

そして、機能係数は $f=0.41(\text{減圧})+0.18(\text{絞り})+0.71(3\text{ポート}2\text{位置切換})\times1.5=2.0$ である。1mを3秒弱でストロークする1～2トン級のリフタならば、有効断面積が 300mm^2 もあれば十分なので、指標価格は $V=2.0\times20=40$ エンと見積もれる。

5.3 エコノミーバルブ

こうして前記のVEXシリーズの母型から誕生したのが図10に示すエコノミーバルブであり、省エネルギーリフタは図11のような2台のエコノミーバルブによる駆動に生まれ変わった。

このバルブは、圧力・流量・方向を制御する一般用途に適用し、図12に示すように、同じ接続サイズでも従来の回路より有効断面積が大きく、かつ安価なので、例えば32Aの回路は25Aないし20Aの



図13 コムラサキ

VEXに置換でき、価格は半分以下になる。

6. おわりに

パワーバルブの基本構造は、今では当社のみならず他社においても電空レギュレータなどに広く適用されるに至ったが、これはプロジェクトVEXの一進化枝にすぎない。近年のアクチュエータの進化態や出荷分布の動向に適應すべき、圧力・流量・方向制御を融合させた「シリンダを駆動するバルブ」の姿は、まだおぼろげである。ユーザが真に求めるNEWMATIC SYSTEMへの旅はこれからも続く。

コムラサキは高名な兄貴分のオオムラサキの陰に隠れているが、平地にも個体数が多く、オスはいささかもひけをとらない美形の蝶である（図13参照）。先年、ハルビン工業大学の柳並木に群れ翔んでいるのを見たが、かの地で柳紫閃蛺蝶と呼ばれるこの蝶は、他の北方系の一群とともにウルム氷期に南下し、日本列島に進入したものと考えられている。南方系とあわせていま日本には200種あまりの蝶が棲息するが、いわゆる蛾と呼ばれる鱗翅目（りんしもく）のなかのごく一部の進化形であり、蛾の1割に満たない。

[著者紹介]

おね やま なお たけ
小根山 尚 武 君



1968年早稲田大学大学院修了、SMC株式会社において空気圧機器およびシステムの開発と研究に従事、技術研究部。
E-mail: oneyama@pa.smcjpn.co.jp

解 説

HMTと40年 過去から、そして未来へ*

長 友 邦 泰**

1. HMTとの出会いに

私は昭和35年三菱重工の前身となる三菱造船に入社、昭和37年に研究部門から設計部門に方向変換して油圧の道に入ったもので、何の因縁か最初の油圧との出会いはこのHMTであった。

新幹線が東京―大阪間で開通したばかりであったが、同時に機関車で牽引する貨車を夜間運転する計画が推進されていた。当時は大容量半導体素子の信頼性が乏しく、実績のある誘導電動機と油圧変速機を使用して走行系を構成することが計画された。

これは夜間走行のため高速走行中は誘導電動機で直接駆動とし加速、減速区間で油機が加担するHMTが最適とされ計画されていた。既に“Hydiff Gear”計画と銘打って国鉄と東洋電機により小型の実証モデルによる基礎試験が完了しており、第2段階のフルスケールの実機試作に進もうとした時期であった。

機関車用としては500kWを超す大容量が必要となり、大型の油機開発、大馬力の遊星型差動ギア、また差動ギアを使用しない二重反転型の電動機も開発対象となり既に計画を開始していた。更に当時欧州で活発な研究が行なわれていた油機自体が差動動作を行う特殊な構造を持った油圧変速機の開発も視野に入れると言う多彩なもので、第1期の開発研究予算が認許され実用機関車を対象とした設計作業が始まりつつあった。このHMT搭載機関車計画は残念ながら、高速夜間走行が深夜の騒音規制に関連して難航し、ついにプロジェクトが解散されたのは昭和40年に入ってからだったと記憶しているが、私にとってこのプロジェクトがその後40年HMTの技術分野への強い関心を持ち続ける動機となった。

この当時はまた本田技研がイタリアから特殊な油圧変速機を技術導入し、昭和38年にはジュノーと言うスクータに搭載して市販を開始している。これは

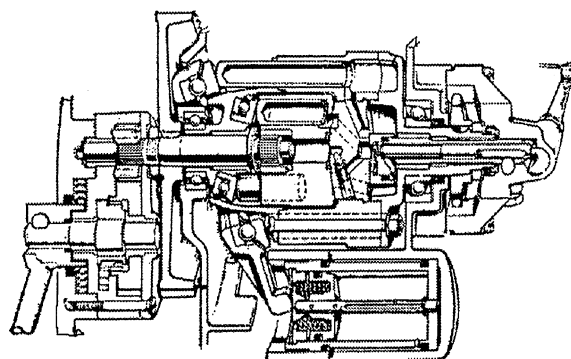


図1 本田技研のバダリーニ変速機

差動油機型のHMTで、早速試乗してみたが右手にアクセルレバーを左手に変速比可変レバーがあり、変速比を無段階に変えたと実に面白い走行を楽しむことができたのを憶えているが、惜しいことにその後1年程で生産中止となっている。

本田技研の技術者はよほど口惜しかったらしく、その後も営々と研究開発が続けられ、苦節40年ついに荒地走行車両用として実用化されたのはこの道を知るものとして敬服すると同時にこの変速機の持つ魅力と難しさを雄弁に物語っているとも言える。

2. HMTファミリー

HMTは意外とその実像は理解されていない。

多くの学術論文には数式が羅列されていたり、複雑な特性曲線が出現したりしているのも理解を妨げる一因ではなかろうか。動力伝達機械である内燃機、電動機、油圧モータなどは回転の絶対値で動力伝達を行っている。即ち高速回転時にはピストンはそれに比例した速度で往復運動を行っている訳である。

一方、入力と出力の差の速度で動力伝達している一群の機械が存在する。これらは摩擦板クラッチ、流体継手、渦電流継手、トルクコンバータなどで、入力と出力の速度が一致すると動力の循環はなくなり、非常に低い損失となるのは広く知られている。

HMTはこれと同じ分類に属するもので原理そのものは古くから知られており、最初のHMTは現在の可変ポンプの出現から遅れること2年の1907年に最初の機械が登場している。これはHSTが停止し

*平成14年4月18日 原稿受付

**(有)長友流体機械研究所

(所在地 〒818-0062 福岡県筑紫野市針摺603-94)

ケーシング回転出力

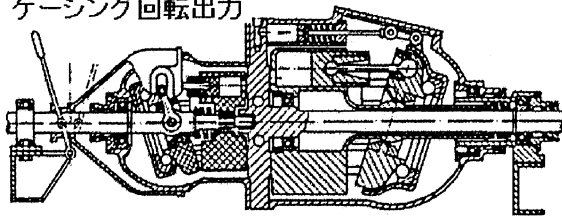


図2 最初に出現したHMT 1907年

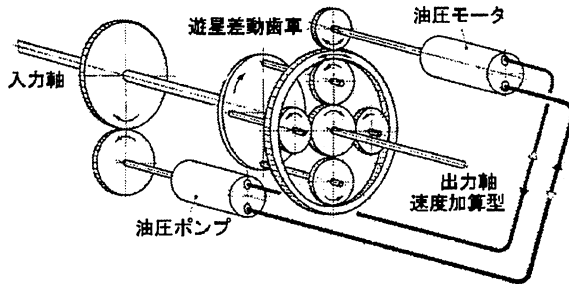


図3 差動歯車型HMTの構成

ている時は騒音もなく、温度も上がらないことからこの状態でケーシングごと回転させたら効率の良い機械ができるのではないかと素朴な発想から出てきたのではないかと考えられる。

即ち入出力同速の場合、ピストンは静止しており流体の出入りもなく極めて高い効率を発揮する。

変速の場合（出力ー入力）速度に比例してピストンが動くことになり入力と出力速度に近い領域では高い効率を得られるが、変速範囲は制限されるなど、魅力ある特徴とやや柔軟性を欠くものとなっている。

3. 発電機駆動装置

昭和47年のエネルギー危機に端を発し、従来船内発電機は推進用とは別的高速エンジンが使用されていたが高価なA重油を消費するため抜群の効率を誇る推進用主機関で直接発電機を駆動する軸発方式が脚光を浴び始めた。私達も既存のポンプ・モータを組み合わせたHSTに定速制御装置を搭載したものを先ず漁船用として販売を開始した。漁船の場合は主機の最低・最高回転の差が大きく低速回転の時に集魚灯により電力消費は最大となり、600cm³/revのポンプに150cm³/revのモータの組み合わせとなり効率の低下、価格の上昇のため大量普及には至らなかった。これを改善するには最大速度と最低速度の中間に直結回転を選んだHMTが最適であることは明瞭であり、鋭意開発を始めたものの差動歯車機構が高価となり、油圧はつけたしで歯車メーカーの製品であると言われざるを得ず、また船毎に仕様が異なり量産が困難なためHMTの有望な応用先の開拓は困難を極めた。国内では石川島播磨重工で自社標準

船に標準化されたHMTが搭載され100セットのオーダーを販売しているものの、事業は歯車製造部門の商品となっておりHSTは単なる購入品としてまとめられたものである。

海外でもエンジンメーカ、造船所等の装置メーカが製造を開始し一応の普及はしたものの大量普及には至らず、この時ほど差動歯車機構に頼らない直接差動型のHMTの必要性を痛感したことはなかった。

もし差動歯車を使用しない差動油機型HMTがその時点で開発されていたなら、十分な競争力を持ち、おそらく油圧メーカにより量産されて、船舶の必需品となり数十万台の生産実績を持つ航空機のCSD装置と同様にインバータ方式に伍して船舶用発電機駆動装置として定着していた可能性は大きい。

4. 送風機の省エネ装置

これもエネルギー危機に端を発したもので、送風機の回転制御の流行である。この分野で成功したのは流体継手と摩擦板クラッチで大容量の変速機を1万台のオーダーで販売している。クラッチとか流体継手のスリップ分は損失となる性質から省エネとは違和感があるが、ターボ機械の動力は回転数の三乗に比例し、流量は直接比例のため差し引き二乗分は省エネになると、変速幅が少なく世界一電力価格の高い日本では省エネのエースとして歓迎された。

残念ながらHSTはクラッチなどでは無損失となる定格負荷運転が主体となるため不向きなものと、なにより1000kW級が中心となるため、HSTは無縁のままで終わっている。基本的にはHMTが適している分野ながら差動歯車型が少数使用されているのみで昭和60年頃から始まる周波数可変インバータの価格低下に押され機械式は市場を追われている。

筆者らは三菱重工で図4に示す500kW級HMTを昭和60年に商品化している。これは差動歯車を使用しない最大級の大型HMTであるが、時期既に遅くこの市場で限定台数の販売後はインバータの価格低下

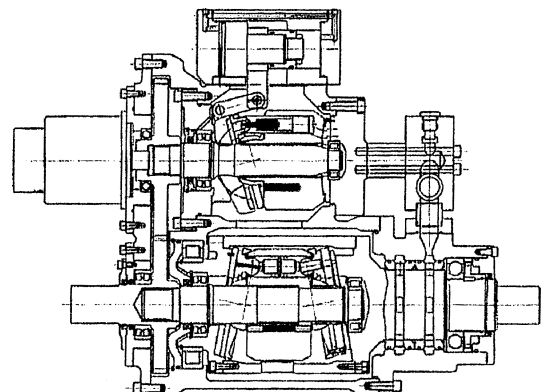


図4 三菱重工で開発した大型HMT

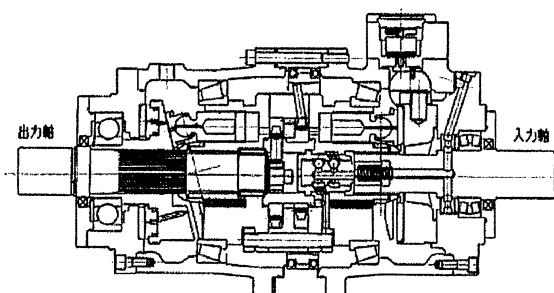


図5 開発した差動油機型HMT

に押されて大量生産に至らずに終わっている。

5. 構造を簡略化した差動油機型HMT

筆者は新機種の開発を目的とした会社を設立したのを機に平成2年に国の補助金を得て開発した差動歯車なしの差動油機型のHMTを図5に示す。本機は良好な特性を示したものの、発電機駆動市場はパワーエレクトロニクスの支配する市場となり、大量需要の商品市場の確信が得られずに商品化には至っていない。

6. HST/HMT2モードモータの開発

HMT単体の応用面として可能性が感じられるのは過去の推移からやはり独立した原動機を有する車両、建設機械に集約されてきた。しかし逆転、静止大トルクなどHMT単体では苦手な特性が要求されることから、逆転・低速領域に適したHSTモードと高効率高速回転に適したHMTモードを切換選択可能な2モード型モータの開発が必要となった。写真1は平成8年に日産自動車殿と共同開発したHSTモードとHMTモードが選択切換可能なモータで、これにより逆転から低速高トルク領域がHMT領域に加算されるため運転範囲が拡大され今後HMTの有力市場と予想される車両への応用を可能にするものである。自動車変速機にHMT系が採用可能となれば現状のトルコン、ベルト型CVTにはない、例えばエンジンのアイドルリングでも微速大ト



写真1 HST/HMT2モードモータ

ルクが出力可能となり、従来型にない無音発進などが可能となる筈であるがガソリンエンジン特有の6000rpmに達する高速回転に耐えうるポンプの開発と共に今後の研究開発が待たれる。

7. 電気動力と油圧動力の共存

パワーエレクトロニクスの発展は目を見張るものがあるが近年油圧ポンプをACサーボモータで駆動してアクチュエータにシリンダ等を使用した電気—油圧システムが多数開発されている。しかしこれらは電気の進出にあわてた油圧技術者が誇りを捨て去った付け焼刃の産物のように思えてならない。可変ポンプは本来優れた制御デバイスであり、直接ポンプ制御は高い応答性を持つ閉ループシステムを構成することが可能である。ただ残念ながらポンプ制御は従来比較的大型のポンプに採用され小型、小容量ポンプで速度、位置制御の閉ループ制御は実績が少なく経験した技術者の数が少ないのも安易な可変電動駆動に向かってしまう一因となっているように思えるが如何なものだろうか。

結局現状のACサーボ駆動型の（油圧ポンプ+シリンダ）システムは1個のボールねじの代用に使用されている訳であり効率低下を考えると長期的な安定製品とはならないのではないかと考えてくる。

同じシステムでも蓄積した油圧技術を生かして安価な定速電動機で可変ポンプ制御として効率、コスト上のメリットを実現するACサーボ駆動型を遥かに上回るシステムで対抗して頂きたいものである。

“動力”そのものを電気動力と油圧動力を混合したハイブリッド動力型の電気—油圧ハイブリッドモータなる両者の特色を生かしたサーボモータシステムを現在筆者らにより平成13年度の補助金事業として実施中であり簡単に報告しておきたいと思う。

油圧モータのトルク発生の原理は図6に示すように油圧に比例するが流量とは無関係で、速度×トルクの動力を消費するものの速度が小さい場合は小パワーでも大トルクを出すことが可能である。一方電動機は図7のようにトルクは電磁力即ち、電流に比例した値となり、基本的には速度には無関係である。

電動機で最大トルクは最大電流点で得られるため基本的には（トルク⇒電動機の高さ⇒価格）の関

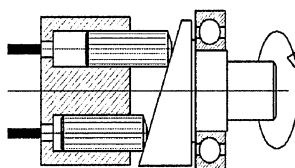


図6 油圧のトルク発生

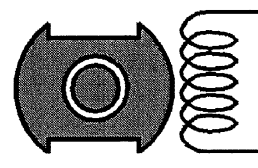


図7 電動機のトルク発生

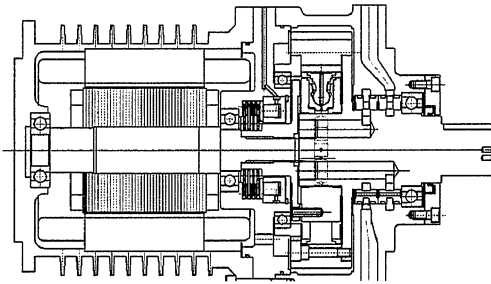


図8 電気-油圧ハイブリッドモータ

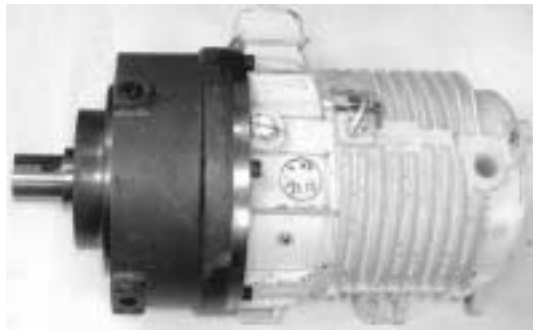


写真2 電気-油圧ハイブリッドモータの外観



写真3 内部構造の写真 左がHMT、右は電動機

係となる。油圧の場合トルクと動力は直接無関係となり、電力に対応する低速で大トルクを出力することができる。図8は電気-油圧ハイブリッドモータの構造図を示し、写真2、写真3に試作機の構成を示す。

このハイブリッドモータの電動機は4極3.7kWの油浸型誘導電動機であり、左側の油圧モータはラジアルピストン型のHST/HMT2モードモータで容量が65cm³/revである。

注目されるのはこのハイブリッドモータの出力パワーは5kWに過ぎないがトルクは実に60kWモータに相当する大トルクが得られることである。このため負荷が（低速・大トルク×高速・低トルク）特性のものであれば純電動方式では50キロワットの電動機が必要となるのに対しハイブリッド型ではその10%に満たない小型機で対応可能と言うことであり、力に強い油圧の良さと複合動力を処理可能なHMTの

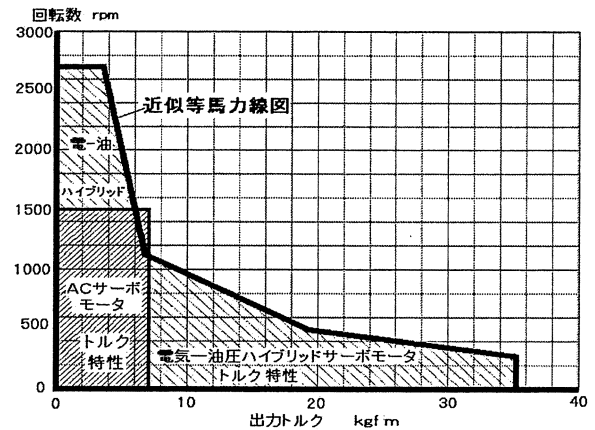


図9 電気-油圧ハイブリッドモータの特性線図

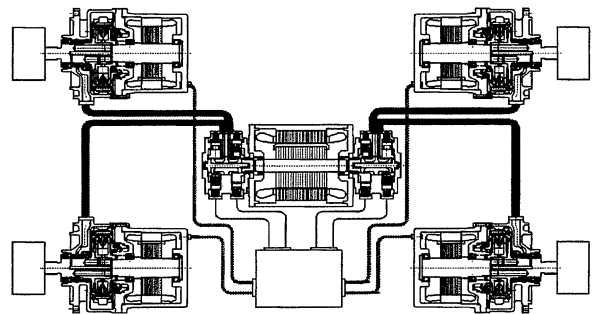


図10 電気-油圧ハイブリッドモータシステム図

特質をよく利用していると考えている。

図9に示すように（0～±900）rpmはHST、±（900～2700）rpmの範囲はHMTとして動作する。図10にシステム構成を示す。

8. HMTの将来

過去40年、HMTが大量普及するチャンスは存在していたが、何れの時も技術開発が間に合わず機会を逸してきたように思える。競争力を得る大量普及以前にパワーエレクトロニクスとの生存競争に敗れてその芽をつまれてしまった感があるが、過去を踏まえて今後確固たる地位を築きえるのは下記2分野で、何れも油圧が固有に持つ特性である“最高の動力伝達密度”を生かした面であり100年の歴史を持つ油圧技術の長所を総括した技術開発がこの分野の技術者の責務ではなかろうか。

第1は車両トランスミッションの分野である。小型で大トルクが可能、同時に高速領域まで高い効率が確保できる性能は現状のHSTを遥かに超えており効率評価の傾向が強くなるであろう今後はHMTが大量に定着する順風が吹くのではなかろうか。

他の一つはここで紹介した電動機との共存である。油圧の持つ抜群の出力トルクと電動機の高速度性は補完関係にあり共存共栄を図ることが可能である。

ACサーボモータが開拓したサーボ応用の自動化技術の面に小型で価格競争力を有する（低速×高トルク）＋（高速×低トルク）型のサーボモータは産業機械用として定着する可能性は大きいように感じている。

|||||

[著 者 紹 介]

なが とも くに やす
長 友 邦 泰 君



宮崎大学工学部機械工学科卒業
三菱重工業にて油圧ポンプ，モータの開発に従事1989年(有)長友流体機械研究所を設立主として油圧ポンプ，HMTの開発研究に従事．技術士として（機械部門）．
日本技術士会会員．
E-mail：nfl@pluto.dti.ne.jp

|||||

解 説

エコリッチ開発プロジェクト イカルスは再び翼を得たか*

下 尾 茂 敏**

1. 産機油圧を取り巻く環境

翼を失ったイカルス?? 四重苦の産業機械用油圧

油圧業界もかつては大きな翼を持った、暁の産業といわれた時代があった。ひたすら欧州メーカの後を追いかけて、品揃えと大流量化、高圧化を競った模倣時代、成形機を中心に比例制御の技術を競った改良開発の時代であった。

◆ 1つめの苦悩：技術の手詰まり（図2）

平成に入り欧州に追いついたとたん、開発も手詰まり状態、何をやってよいかわからない。制御を高度化すればするほど構造は複雑になりバルブの数が増え、コストが上がり、効率が下がる。技術者はジレンマに落ちいりあきらめの境地。ここ10年来、目新しい新製品は皆無といえる。

◆ 2つめの苦悩：価格競争の激化

一方標準化が進み互換性が高くなった。顧客は手間をかけずメーカを変更できる。バブルははじけ、生産能力は過剰。価格競争だけが進んだ。欧米では、ビッグネームがM&Aを繰り返して超巨大企業の寡占状態が出現し、低価格オペレーションを展開。中国を中心としたローカルメーカも人件費の安さを背景に同じ戦略を展開。価格競争はさらに激化した。

◆ 3つめの苦悩：代替技術の台頭

さらに時代は意外と早く電動化へ進んだ。大負荷のものはボールねじがもたない、油圧が優位、大容量は油圧が安い、まだまだ油圧は生き残れると思っていたが、ボールねじは耐久性を増し、中大型サーボモーターインバータ価格も急激に下がった。技術の進歩の速度が電動と油圧とでは違いすぎた。このインバータ価格ダウンは、業界に先んじて業務用エアコンをインバータ化しインバータ素子の生産量を一気に増加させた当社の存在も大きいと考えている。電動化による少々の価格アップも数年の電気代で償却できるのも大きな要因であった。油圧市場はますます



図1 エコリッチ

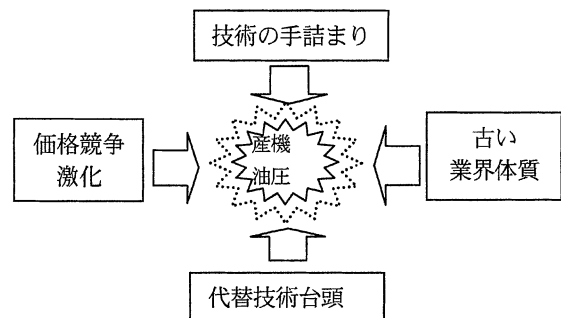


図2 産業油圧を取り巻く環境

ます小さくなった。

◆ 4つめの苦悩：古い業界体質

唯一の救いとなる国際調達による購入コストダウンも個々の企業の調達量では交渉力が弱く、連携提携による共同調達の可能性も、古い業界体質のために画期的手立てが講じられない状態。

産業用油圧はまさに翼を失ったイカルスのごとく落ちるしかない運命か。1つでも解決策があれば危機的状態を脱出できるのでは。

2. 油圧素人集団による新商品コンセプトの探索

ダイキンでは空調が主力。油圧の技術者ではアイデアが出ないのでは。1997年夏、空調出身の油機担当役員は油圧を知らない空調や研究所のメンバーだけの油圧商品探索プロジェクトを立ち上げた。探索

*平成14年4月11日 原稿受付

**ダイキン工業(株)油機事業部技術部

(所在地 〒566-8585 摂津市西一津屋1の1)

のため北京まで出向いたこともあった。1998年始め、ここで出てきたアイデアのひとつが従来の可変ポンプの代替として空調用インバータで固定油圧ポンプを可変回転数制御するコンセプトだった。この提案に油圧技術者はびっくりした。空調用モータが油圧制御に使えるのか。何しろエアコンといえばインバータモータとコンプレッサに熱交換器、ファンときれいな室外機、室内機の箱までついてご存知の低価格で売られている商品。このインバータモータが使えるとなると油圧商品のコンセプトが大きく変わる。日本発の油圧の新しい風となる。

3. 空調のインバータモータ

ルームエアコンのインバータ化の動きは1981年に始まり、当社も1988年までに主要機種のインバータ化を完了した。インバータ化の動きが始まった当初、業界ではインバータのコストアップが顧客に受け入れられるかどうか議論が沸騰した。誘導モータと熱交換器の高効率化で対抗できるのではないかと。しかし価格アップが電気代で短期償却できることから、あっという間に顧客にインバータが浸透。インバータ化の進行により電子部品の生産数量がアップし、これがコスト低下につながる。インバータ化にさらに拍車がかかった。

平成に入り、ルームエアコンの開発競争は、コンパクト・低騒音から高効率・省エネに移り、熱交換器周辺の高効率化も頭打ち傾向を示し始めたことから、モータインバータの高効率化に動きはじめた。これまでの誘導モータインバータに代わり、永久磁石をロータ表面に組み込み、コイルとの反発力（マグネットトルク）を利用した、いわゆる表面DCモータ（Surface Permanent Magnet Motor [SPM] 産業機械分野ではACサーボモータと呼ぶ）の採用が

始まった（図3）。

当社でも1995年、いったんSPMインバータを採用した小形エアコンを発売したが、翌6年、その後の空調用インバータの主流となるいわゆるリラクタンスDCモータ（Interior Permanent Magnet Motor [IPM] 埋込磁石構造シンクロナスマータ）搭載の超省エネエアコンシリーズを発売した。当社のIPMモータは、ロータ内部に深く埋め込まれた強力な希土類永久磁石とステータコイルの反発力（マグネットトルク）、ステータコイルが珪素鋼板で作られたロータを引きつける力（リラクタンストルク）の両方を有効に利用できる特許構造で、これらの力を効率的に制御する特許インバータと組み合わせることにより究極の省エネを実現した。1998年空調各社がIPMモータ採用のエアコンを発売するに至り、IPMモータは空調省エネモータのスタンダードの地位を獲得、社電気学会「電気学術振興賞（進歩賞）」を受賞した。

エアコン高効率化開発の動きの一方、急激な価格破壊と近年のグローバル化の動きに対応するため、インバータモータの小型、低価格化開発にも着手した。これが、エコリッチに採用されることになるスイッチトリラクタンスモータ（SRモータ）である。SRモータは、省エネ性は劣るものの、ロータに永久磁石を一切用いず、ステータコイルが珪素鋼板ロータを引き付けるリラクタンストルクのみで駆動するモータで、「シンプルで堅牢な構造」、「低速高トルク」、「低イナーシャ」の特長を持つ。

4. 商品化の可能性

油圧をインバータで駆動するとどのような動きをするのか。1998年春、摂津市の油機事業部の技術者が草津市の電子技術研究所へ出向き、研究所のメン

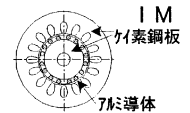
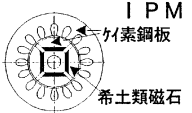
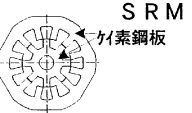
	誘導モータ	表面DCモータ	リラクタンスDCモータ	SRモータ
モータ構造				
駆動原理	電磁石（アルミ導体）で磁束を発生	磁石で磁束を発生（マグネットトルク）	磁力の強い磁石を埋込、鉄に働く電磁吸引力（リラクタンストルク）を新たに活用	鉄に働く電磁吸引力（リラクタンストルク）
用途例	産業用汎用モータ エアコン圧縮機 油循環ポンプ	FA用サーボモータ エアコン圧縮機	超省エネエアコン圧縮機 電気自動車	電気洗濯機 油圧ポンプ

図3 モータ比較

バーと共同で市販のインバータモータ、サーボモータを使った試作品により、固定ポンプの可変回転数制御の事前評価を開始した。

既にサーボモータで油圧ポンプを駆動する商品は存在した。事業部はこの商品には興味がなかった。高価なサーボモータで安いギヤポンプを駆動する商品は油圧メーカにとって何の利益も生み出さない。モータ屋さんが喜ぶだけ。ボールねじを油圧に置き換えただけの、1ポンプ1アクチュエータ構成ではいずれ電動に置き換わる。油圧は汚い。やはり嫌われ者。油圧は圧力、流量、シリンダ径などの自由度が多すぎるため顧客ごとの都度対応品ばかりになってしまい手間ばかりかかる。

電動化に対抗して油圧の生き残るのは複数のアクチュエータを持つシステムで比較的精度の unnecessary 分野に限られるだろう。やはり従来のユニットシステム構成にこだわりたい。

誘導モータをサーボモータに置き換えたシステムなら性能上問題はないが、コスト上テーブルに載らない。汎用インバータは安価だが、応答性が問題になる。可変ポンプの流量応答性は100ミリ秒程度。汎用インバータの実力では、シリンダの立ち上がり応答性が確保できず、シリンダが端部に到達した時の流量制御から圧力の制御への滑らかな移行もできない。立ち上がり応答の問題は、機械からシリンダが動く前に信号を入れ、ポンプ回転数を立ち上げておけばいいのだが、従来製品との互換性がなくなる。蓄圧器を追加しても解消するがコストがアップしてしまう。ベクトル制御などの高級な制御を加えたインバータなら可能性があるが、誘導モータをベースとする限りモータの内部イナーシャが大きくインバータ容量を大きくしないと応答性が確保できずやはりコスト上の問題が残る。

研究所での事前評価は続いていたが、事業部サイドではコスト上から空調用モータが使えるかどうか商品化可能性の最大の鍵と考えていた。空調用モータは効率最優先で開発してきた。空調の運転パターンでは応答性は数十秒単位で充分。応答性はまったく未評価だった。1998年秋、事業部からの申し入れで前述の高効率IPMモータの応答性評価が始まった。研究所での応答性評価は比較的短期に答えが出た。その答えは否。IPMモータの高応答化には相当の時間と技術者の投入が必要。発売までに時間がかかる。事業部のために多量の人材を投入すべきか否か？

事業部にとって幸運だったのは、ちょうど前述のSRモータの空調機への適用が見送りになったことだった。理由は2つ。省エネ法規制によって省エネ

の後戻りができないため、効率面ではIPMモータに劣るSRモータでは競合に勝てない。機能、構造上はSRモータのコストが安くなるはずだが、IPMモータとの部品の共通性が失われ部品購入コストが思ったほど安くない。数年来SRモータの開発を続けてきた研究所は、油圧への適用を提案してきた。「シンプルで堅牢な構造」のため、数量の少ない油圧用途でも低コスト生産が可能。「低速高トルク」、「低イナーシャ」で、制御上も比較的短期に高応答化実現の可能性がある。

残念ながら事業部では自力開発は不可能。早期商品化のため選択の余地はなかった。1999年1月、秋の商品化を目指し、エコリッチ開発のスタートを切った。

5. 商品開発

SRモータ高応答化は研究所、油圧部分は事業部と分担して開発がはじまった。

大きな問題として浮き上がったのがどんなモータ仕様が必要か定量的な目標がはっきりしないということだった。仕様がないと研究所はモータの開発ができない。これまで研究所で対応してきた空調用モータでは、コンプレッサ用途に必要な絞り込んだ仕様で開発する。そうしないと空調機の厳しい価格競争に勝ち残れない。一方事業部側としてはまったく初めての試み。どの程度の実力のモータができるのか実感がなかった。

インバータ化する場合、どうしてもインバータコントローラ分製品コストがアップしてしまう。顧客が認めるコストアップは空調の経験でせいぜい省エネによる電力削減額の2年分程度。したがってこれを吸収する手段として構造の複雑な可変ポンプを、構造のシンプルな固定吐出量のギヤポンプに変更するしかない。固定ポンプの圧力と1回転あたりの吐出量が決まるとモータの出力トルクが決まる。モータを小さくすればモータ自体のコストもインバータのコストも低く抑えられる。したがってポンプの吐出量は小さいほどよいわけだが、可変ポンプの広範囲な流量領域をカバーしようとするともモータ回転を高速にする必要があり、こんどは騒音の問題が出てくる。ポンプは一方回転で十分だが、負荷がかかった場合、瞬間反転することがある。反転すると当然コントローラに負荷がかかることになる。しばらく、研究所と事業部との間で激しいやり取りが続いた。

高速インバータ制御では、ポンプで直接、流量と圧力の制御ができる。油圧ユニットとしてどのような機能を盛り込むかも大きな課題だった。従来の可

変ポンプシステムでは斜板のメカニカルな圧力フィードバック制御で負荷に見合う吐出量を制御する。まずは、外部との信号のやり取りをなくし、モータの容量を最大限に生かし、負荷圧力を感知して負荷に見合う流量をモータの回転数制御で自動的に吐出する、従来システムとの互換性を重視した「自律制御」に限定して機能を盛り込み商品化を図ることにした。これにより、たとえば電磁弁がブロック状態では負荷が上がり最低回転数で省エネ運転するが、電磁弁が切り換わり負荷が下がると自動的に最高速度に切り換わる。

ポンプの選定はフルフロー時の騒音レベルを70 dB程度と仮定して最高回転数を定め、ここから諸元が決まった。

空調用でモータの基本開発が終わっていたこともあり、予定より遅れたものの翌年には商品開発が完了した。

5. エコリッチの商品コンセプト

改めてエコリッチの商品コンセプトを紹介する。当社機械加工ラインマシニングセンターの電力消費量推移を図4に示す。従来の油圧ポンプシステムは、非切削時（待機時）や、油圧シリンダーが移動後圧力を保持してワークをつかんでいる状態のように、

油圧アクチュエータが有効な仕事をしていない時も作動時と同じ回転数で運転する。このため、1加工工程の積算電力量の28%が油圧ポンプシステムで消費されている。1サイクルの拡大図を見ると、点線部が、クランプ機構が動き実際に仕事している時間で、ごく短時間である。点線部と点線部の間はクランプがワークを保持する保圧時間で、加工時間の大部分を占める。「エコリッチ」は待機時や保圧時に回転数を回路の漏れを補償する程度まで下げて省エネをはかるものである。油圧ポンプ駆動トルク T はWilsonの式から次のように表される。

$$T = \frac{V \Delta P}{2 \pi} + C_v \mu n V + \frac{C_r V \Delta P}{2 \pi} + T_c$$

第1項：理論駆動トルク（摩擦のない理想的な駆動トルク、言い換えれば、1回転あたり $V \Delta P$ の仕事を行なうために軸に加えるべきトルク）

第2項：ポンプ内の摺動部における回転速度に比例する粘性摩擦トルク

第3項：シールや軸受の圧力に比例する機械的摩擦トルク

第4項：回転速度や圧力に無関係な一定の摩擦トルク

V ：油圧ポンプ1回転あたりの押しのけ量

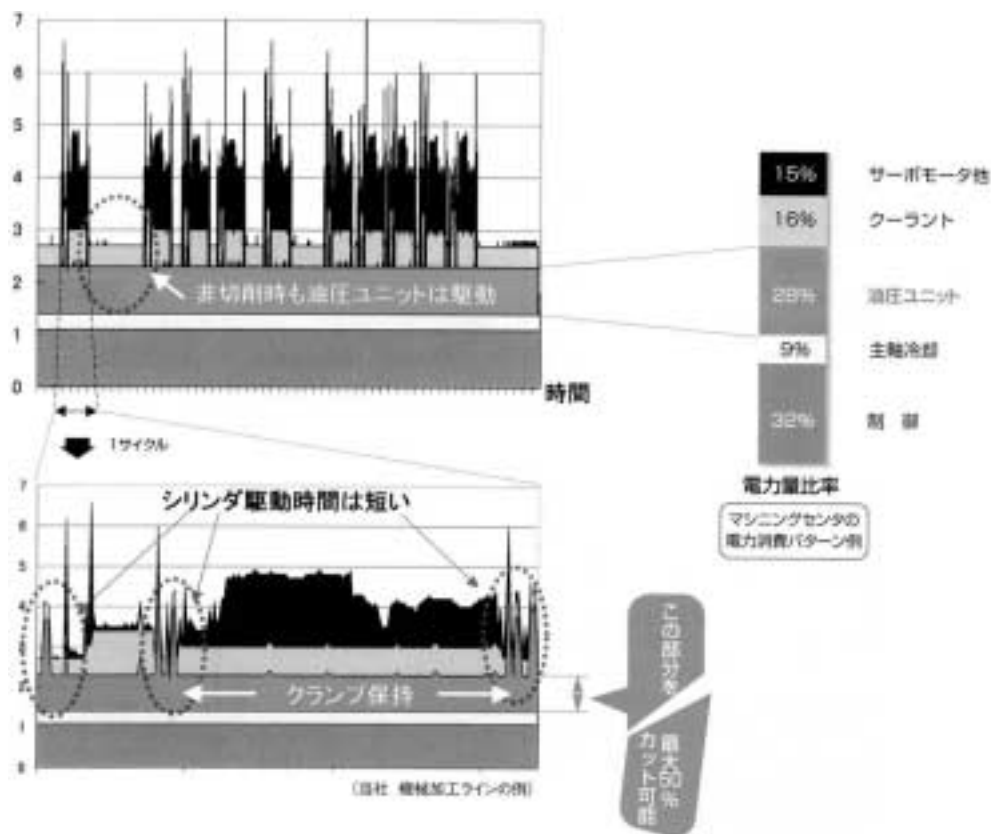


図4 工作機械の消費電力量

ΔP ：ポンプ出入り口の圧力差

C_v ：粘性摩擦トルク係数

μ ：作動油の粘度

n ：ポンプの回転速度

C_f ：圧力に関する機械的摩擦トルク係数

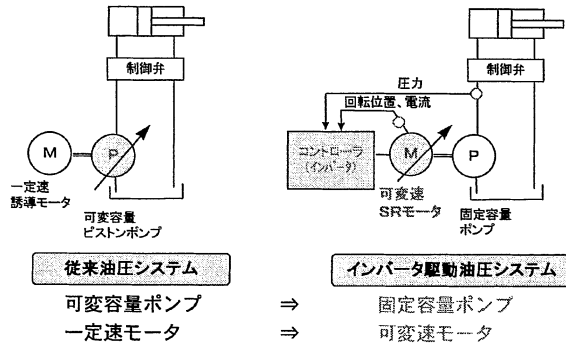


図5 エコリッチの作動原理

従来の可変油圧ポンプでは、押しのけ量 V をメカニカルな機構で可変化して、流量の不必要な時には第1項、第3項を極小化するが、電動機は一定回転 n で回り続けるため第2項は削減することができない。エコリッチの高速インバータ制御では n を可変化することで第2項を極小化する。

高応答性を実現するため V は慣性の小さい固定ポンプを使用しているが、 n を高速回転することにより、必要流量 Q を得るための V を小さくでき、第1、3項も削減できる（図5）。

回路圧力によって省エネ率は異なるが、旋盤、マシニングセンタで平均約40～50%の省エネが実現できる

6. 販売戦略

省エネのコンセプトは、機械のユーザにとって直接電気代の削減につながりわかりやすい。1999年に改正省エネ法が施工され、大規模工場では毎年1%の省エネが義務付けられた。最初のうちは、こまめに電気を消す等の仕組みづくりで目標がクリアできるが、3年目にはほぼやるべきことはやり尽くしてしまい手詰まり状態になる。油圧機器は朝、電源投入と同時に電気を消費するため、積算電力量の比率が高い。特に省エネ手詰まりの先進企業ではコンセプトが受け入れられた。しかし、一般的機械ユーザには省エネ意識が浸透していないこともあり、我々のこれまでの顧客、機械メーカーには、すぐには、省エネメリットを受け入れていただけなかった。

そこで、機械メーカーへのPRと平行して、空調エンジニアリング部門と共同で省エネ先進の自動車関連の部品メーカーを中心とした機械ユーザに対して省エネPR活動を行うことにした。既存機械の電力消

費量を機器別に計測、さらにエコリッチに置き換えて同じように電力測定を行い、差を比較する。図4のようにパソコン画面でその場でビジュアルに確認していただくと顧客は一樣に油圧機器の電力消費量の多さと省エネ効果にびっくりされた。幸いダイキンは工場で使われる業務用エアコンや冷熱機器のトップメーカーのひとつであり、フッ素化学メーカーでもある。油圧系省エネにより、加工ラインの熱発生を防ぐ。フッ素遮熱塗料により工場の屋根からの進入熱を防ぐ。春秋は外気温が下がると換気。さらにライン構成にフィットした気流制御で最適な空調環境を提案。エネルギー監視システム導入による、空調監視、電力契約料の削減と更なるむだの発見というトータル省エネ提案を行った。

エコリッチは大手工作機械メーカーに標準搭載され、省エネ機運の盛り上がりにつれ、大規模工場では、既存機械の油圧ユニットを積極的にエコリッチに置き換え、新規設備にはエコリッチを指名いただけるようになった。

電力計測の過程で新しく発見したことがある。切削液を運ぶクーラントポンプの電力消費量が予想以上に大きかったことである。急遽SRモータによるインバータクーラントポンプの商品化が実行された。クーラントポンプは一般に大きな容量が選ばれ、バルブで必要量まで絞って使用するが、バルブで絞っても電力量はほとんど変化しない。インバータクーラントポンプに取り替えて、バルブを取り除く。流量が増加するので、元の流量まで回転数を落とす。流量の3乗に比例して電力が変化するので、流量の少しの減少が大幅な電力削減になる。この操作で、70%から50%省エネが実現する。省エネを20%程度に留め流量を50%増加させると切粉詰まりが1/50に減少したという実績もある。

7. 次の手

機械メーカーで省エネ機運が一般化すると、まず想定される競合他社の対抗策は、誘導モータや可変ポンプの高効率化であるが、前述のごとく、空調でノンインバータ機の高効率化が直ぐに限界が来たように、油圧でもすぐに限界が来る。早晚インバータ油圧ユニット同士の省エネ競争が始まるだろう。エコリッチ商品化と同時に、研究所では、エコリッチの更なる省エネと高圧化高機能化を目指し、当社が空調で圧倒的省エネと日本一の生産量を誇るリラクスDCモータ（IPMモータ）の、高応答性高精度化開発と工場のトータル省エネ提案プロセス開発に着手した。

エコリッチのさらなる省エネのキーは、空調用



図6 スーパーユニット

IPMモータを、高効率を維持しながら100ミリ秒クラスの応答性が実現できるか、圧力制御時の回転数を如何に下げられるかの2点である。高機能化のキーは速度制御範囲を如何に広げられるかとユーザーインターフェースの充実である。

ようやく技術的目処がたった、今年早春、IPMモータ搭載スーパーユニット商品開発計画が承認された(図6)。スーパーユニットは、省エネを従来比20%向上、最高使用圧力21MPa、圧力・流量の多段切換え機能を持つ予定。クーラントポンプについても、IPMモータ搭載多段羽根車形中低圧用、ギヤポンプ形高圧用(7MPa)のシリーズ化を一気に行う。

翼を失ったイカルスはこれで再び翼を得たのだろ

うか。残念ながら今後ますます市場が狭まり、「滑空の翼を得たが再び一人で太陽を目指すことはないだろう」というのが正直な感想だ。IPMモータは、空調のほか送風機、水ポンプ、エアコンプレッサ用の省エネインバータモータとして、また中精度の高速、高トルクメカトロサーボモータとして用途展開が可能である。現状のサーボモータ、インバータモータがIPMモータに置き換わってゆくという予測もある。インバータ化によって油圧ユニットはユーザーインターフェースを電動と共通化できる。油圧がIPMモータをベースにサーボモータ、インバータモータと完全に手を携えた時安住の地を得るだろう。

[著者紹介]

しも お しげ とし
下 尾 茂 敏 君



1950年4月26日徳島市生まれ。

1973年京都大学工学部機械系工学科卒。コンピュータソフト開発業務(特種情報処理技術者)を経て、1980年から油圧バルブ開発、1999年から空調モータの産業用途開発に従事。現在ダイキン工業(株)油機事業部技術部長。

解 説

技術の伝承：超大型シリンダ*

—失われかけた技術をとりにどせ—

三 橋 浩 司**

これは油圧機器メーカーの限られた設備でその限界を超える製品を創り、技術伝承のために知恵と信念で挑戦した男達の物語である。

1.

カヤバ工業。国内最大規模の油圧機器総合メーカーである。昭和初期はゼロ戦の脚の製造を行い、現在では自動車、二輪車の緩衝器、油圧ショベル・産業機械などの油圧ポンプ・バルブ・シリンダ、これらを複合したシステムを製造している。

話の舞台は岐阜県可児市にある岐阜南油機工場（当時）、この工場は油圧シリンダの生産拠点である。炭鉱が活気のあった時代に「鉄柱」と呼ばれる坑道支柱の生産から始まり、その後、油圧シリンダを生産する工場に成長した。油圧シリンダの生産を始めた当初は、掘削機械、設備機械、船舶設備、港湾設備など、さまざまな用途の油圧シリンダを生産していた。しかし、時代の流れに乗り会社が成長するにつれ、生産する油圧シリンダは建設機械用と産業機械用に特化していった。かつて南工場で生産していた大型シリンダ、さらにシリンダ径 $\phi 500\text{mm}$ をこえる超大型シリンダは生産しなくなった。結果、製造に関わる技術がサビついていった。

平成8年、転機が訪れた。バブル崩壊とともに南油機工場の主力である建設機械用油圧シリンダの生産が減少し始めた。

2.

超大型シリンダ技術の再構築と伝承に執念を燃やした男達がいた。

油機技術部設計室長、石井政好。社内では独創的な製品を考案することで知られていた。

製造部大型シリンダ製造ライン係長、山口信雄。特殊・大型油圧シリンダの製造ライン係長である。製造上のトラブルを瞬時に処置してしまうことで知

られていた。

2人は定年退職を数年後にひかえていた。

石井は不思議な運に恵まれていた。自分が「やりたい」と興味を持ったものが仕事として舞い込んでくるのである。この運で過去にもいくつもの製品を生み出した。

今回もこの不思議な運に導かれるように、突然超大型試験機の話がとびこんできた。

試験機の仕様は、垂直発生荷重4000トン（58800 kn）、垂直加振ストローク750mm、水平発生荷重1000トン、水平加振ストローク1450mmであった。

垂直発生荷重4000トンを満足させるためには、油圧シリンダを2台用いてシリンダ推力2000トンとなる。常用圧力18MPaとするとシリンダ径が $\phi 1200\text{mm}$ となる。

さらに、水平発生荷重1000トンで加振させるサーボシリンダ。サーボバルブでSin波で加振するため面積差によるヒステリシスをなくすことが必要だった。そのため両ロッド型とし常用圧力を18MPa以下に設定してシリンダ径 $\phi 1000\text{mm}$ とした。

3.

超大型シリンダを復活させるチャンスであった。「やる」石井は心を決めた。

石井は山口に相談をした。山口は話をきき、過去に経験のない大きさに戸惑った。石井は山口に言った。「おれは卒業するまでに超大型シリンダをやってみせる。」山口はその言葉に感動した。そして協力することを誓った。

石井はこの2機種のシリンダの設計に取り掛かった。

2000トンの推力を発生する油圧シリンダ。簡単に聞こえるが設計を進めていくうち、いくつもの問題が壁となって立ちはだかった。

一つには、最大横荷重100トン許容できる軸受構造。二つには、サーボ制御に対応できる推力比0.03%以下の低フリクション（低い摩擦力）。

三つには、既存の設備で組立が可能なクリアランスを備える。

*平成14年4月5日 原稿受付

**カヤバ工業(株)

(所在地 〒509-0205 岐阜県可児市土田505)

四つには、高分解能の変位センサを内蔵する。

このうち、1つめ、二つめの問題は超大型シリンダの根幹に関わる問題であった。

4.

一つめ、垂直荷重2000トンを発生し、横荷重100トンを受けてもスムーズに作動し得る軸受。従来の軸受材は銅合金、または、ウエアリングと称するテフロン系材料。しかし、いずれも耐荷重容量が低く横荷重を満足できない。石井は悩んだ。そして軸受材を片っ端から調べ直した。そんなとき、新製品紹介の記事に目が留まった。「耐荷重容量30kgf/mm²」銅合金やウエアリングの10倍である。「これならイケる」石井は思った。実績はないが使うことを決めた。

二つめ、低フリクション。通常のゴム系シールでは低フリクションは達成できない。

一般的に油圧シリンダのフリクションの主な原因は軸受部材とシール部材である。特にシール部材は圧力が大きくなるに伴い、また、シリンダ径が大きくなるに伴いフリクションも大きくなる。それには、シール部材の材質と形状が大きな要因となっている。

シール材料は一般的にニトリルまたはウレタンに代表されるゴム材料である。ゴムは荷重が大きくなるに従い摩擦係数は増加する。そして、シール形状は「Uリング」と称されるようにU字型となっている。これは圧力が増加するに従いシール面に掛かる荷重が増加する。この相互作用によりフリクションは増加するのである。さらにこれはシリンダ径が大きくなるに従い顕著となる。

石井はテフロン材料の摩擦特性に目をつけていた。テフロン材料は荷重が増すにつれ摩擦係数 μ が低下するという特性をもっている。さらに、シール形状もUリングを止め、組合せ型シール（Oリングとテフロンリング）と称されるものを採用した。

5.

組合せ型シールの利点がもう一つある。それはシール背面のクリアランスを大きくとれることである。一般のゴム系シールは「はみ出し防止」のためシール背面となる部分のクリアランスが小さい。これに対して、組合せシールはテフロン材に高強度なものを添加しているためそれ自体で強度がある。そのため、シール背面のクリアランスを大きくすることが可能なのである。これは、超大型シリンダの製作を行う上で重要なポイントとなる。

一つめにヘッド部分の寸法管理が緩和できること。

二つめにピストンロッドの挿入が容易になり組立

性が向上すること。である。

これが設計上の問題の三つめの解決策となった。

石井は過去の実績のみにとらわれない最新の技術を導入した超大型シリンダ1号機の計画図を描きあげた。

石井の設計した超大型シリンダは、残念ながら南工場で製作できる部品がなかった。工場の生産が建設機械などに特化したことで、過去に設置されていた大型加工機のいくつかが売却されていたためであった。しかし、すべてを外で作っては技術の構築・伝承ができない。2人は未来を見据えて考えた。やむを得ない、構築する技術を「溶接」と「組立ノウハウ」に絞った。加工は協力工場に頼むことでハラを決めた。

最大の問題は製品質量にあった。製品質量は25t。南工場のクレーン能力は20tであった。山口は考えた。組立はどこでやるか。どうやるか。工場内を歩き回り工程を企画した。

山口はメンバーの招集にも頭を悩ました。製作期間は約3ヶ月であった。通常の生産体制では到底考えられない製作期間であった。製造の一係長では工場全体をまとめて動かすことは難しかった。総指揮を担う者が必要だった。

6.

この難題を、総指揮を引き受けた男がいた。南郁郎、品質保証部長を譲り、超大型シリンダ製作の総指揮をとることになった。南は九州男児だった。南九州人特有の不思議な人徳があった。

おもしろいエピソードがある。

今回の仕事は協力会社の力なしでは達成できないことは誰の目にも明らかだった。しかし、過去にやったことのない超大型のシリンダ、さらに短納期に協力会社も逃げ腰だった。特に最も重要な協力会社が良い返事をしてこなかった。製作は頓挫するかに思えた。

南はその協力会社に出かけた。協力会社も社長じきじき南を迎えた。協力会社は今回の仕事をどう断るか構えていた。

南はまるで昔からの友人とあったように、与太話を2時間ほどして帰ってきた。仕事の話は一切しなかった。南は終始上機嫌であった。

翌日、協力会社の社長から電話があった。「一緒にやらしてほしい」と言ってきた。

南は「心が通じた」と思った。

このあと、逃げ腰だった連中が協力的になった。歯車がゆっくりと回り始めた。



組立風景 ラフテレーンクレーンを使っでの組立作業

7.

超重量物の操作に長けた者が超大型シリンダの組立には必要だった。

石原常彦。十数年前に大型シリンダの組立を行っていた男である。

クレーン操作で重量物を操ること、上げ下げ、移動、回転、トンボ……。モノが自分の意思で動いているかのように動いた。そして、全く振られることなく狙った位置にピタリと止まる。妙技であった。

部品の製作が進む。山口は部品集結から組立までを岐阜南工場の南端にある第10工場で行うこととした。ここは、地上高11m、地下ピット10mを備えていた。しかし、この工場のクレーンは15tが1基であった。総質量25tのシリンダは動かせなかった。

山口は超大型シリンダの組立で生産工場では考えられない離れ技を考えていた。

「部品の横持ちには15tクレーンを使う。しかし、組立はラフテレーンを使う」納期が短すぎるため生産準備にかかる時間がなかった。考えられる方法はすべて考えた結論であった。

ラフテレーンクレーン（以下ラフター）は当然ながらクレーン業者から借りる。予約制で日程変更はペナルティを請求される。更に賃貸料は日当たりで約20万円。リスクは大きいが他に方法がなかった。部品の終結にタイミングのズレは許されなかった。

8.

先に「溶接技術を構築するという目的を置いた」と述べた。誤解の無いように補足しておくが、南工場では溶接は日常的に行われている。しかし、これら通常サイズの溶接は過去の技術の積み重ねから、あらかじめ溶接条件が設定された自動溶接が多い。

この超大型シリンダでは、ピストンロッドとピストンの結合をあえて溶接構造にして、この溶接技術を作り上げることに挑戦した。ピストンロッドの材

質はS45C調質、ピストンの材質はS35C調質であった。高カーボン炭素鋼の溶接では予熱、焼鈍がポイントである。通常扱うピストンロッドは小さいため、予熱、焼鈍が比較的容易である。しかし、超大型のピストンロッドではサイズが大きいため熱容量も大きくなる。思ったように予熱、焼鈍しが出来ない可能性がある。

そして、もう一つの課題は、溶接開先が大きいため溶接時間が長時間になること。そして、ビードの盛り上げ方である。

溶接するためにはピストンロッドを回転させなければならない。この回転速度はいくつが最適か。また、予熱のための加熱、補熱、溶接開始の温度、焼鈍の方法、時間などの条件。

条件を導き出すために生産技術部門はダミーピストンを製作してテスト溶接を行い、溶接面をカットしてその条件を調査した。予想した通り、予熱しても熱が他へ伝播し思ったように温度が上がらない。結果、溶込み不良が発見された。納期が極めて短い。溶接条件を見出すためのトライが繰り返された。条件が決まったのは、本溶接を行う前日であった。

9.

組立予定前日、部品集結でピストンロッドが遅れていた。溶接、ねじ加工、研磨、めっき、バフなど多工程に互ることが要因であった。組立スケジュールに間に合わない可能性が出てきた。生産管理部門は慌てた。

総指揮の南は動じなかった。「きっと間に合わせてくれる」と皆を信じていた。

しかして、翌朝ピストンロッドは出来あがった。協力会社が夜を徹して加工し、検査部門は協力会社でアガリを待って検査した。社内外が一丸となつてなし得たものだった。

部品が集結した。組立が開始された。組立から性能検査、塗装、出荷までで許される時間は10日間であった。ミスは許されなかった。

組立は工場内で大きな話題となった。昼休みなど見学に来るものが多いいた。

指揮をとる南は組立場にベンチを据え、いつもにこにこしていた。そして、得意のユーモアで皆をまとめた。細かい指示は一切言わなかった。

山口は組立作業一切の切り盛りを行った。初めての超大型シリンダの組立で考えられるトラブルに対して、あらかじめ手を打っていた。

石原は実際の組立作業、指示、クレーン操作をおこなった。石原は山口が期待する若手に手本をみせながら組立の指示を出していった。

10.

最初は2000トンの片ロッドシリンダだった。大きな横荷重を受け持つため、鐘を大きくしたような、どっしりとした外観であった。

シリンダチューブにボトムが挿入され、ボルトで締結された。シリンダチューブAssyとなり、ピストンロッドを挿入するためにトンボした。

ピストンロッド(ピストン一体型)には軸受とシールが装着された。そして、ピストンロッドを挿入に掛かった。

恐れていたトラブルが発生した。ピストンロッドが入らないのである。

シリンダチューブもピストンロッドも寸法公差を満足し合格となっていた。再度の寸法検査を行ったがやはり合格であった。

原因は軸受材であった。今回初めて採用した軸受であったが、規定寸法より0.1mm大きく出来ていた。理由は成形による製造誤差だった。納期は迫っている。躊躇している時間はなかった。

考えられる方策はシリンダチューブ、ピストンロッド、軸受材のいずれかの寸法を変更することだった。しかし、シリンダチューブとピストンへの追加工は不可能であった。すぐに軸受メーカーに連絡し立会いを求めた。対策方案を出してもらい工場内で追加工を行った。ピストンの軸受材と同じものがシリンダヘッド側にも採用されている。すぐさま、構成部品の寸法検査に掛かった。やはり、軸受材の追加工が必要と判断された。

片ロッドシリンダ2台は、このあとは大きなトラブルも無く組み上がった。

次は両ロッドシリンダだった。ピストンロッドがシリンダチューブの両方に突き出している構造である。例えるなら串の通った竹輪を大きくしたような外観であった。

山口はピットを改造して組立に当たりたかった。しかし、納期という時間がそれを許さなかった。やむを得ない。ピストンロッドの出代約1000mmをカバーできる高さの槽(やぐら)を組み、その上で組立を行うしかなかった。

あらためて言うが油圧シリンダは压力容器である。高压の油を封入してピストンロッドを伸縮させるためにはミクロン単位の寸法管理が必要である。これは手のひらに乗る小さなシリンダでも、この25tを超える超大型シリンダでも同様である。

槽の組立には水平のレベル出しを細かく行った。後で行うピストンロッドを挿入するためには、水平・垂直のレベル出しは絶対条件であった。



組立風景 シリンダヘッドの組立。(左端が山口)



完成写真 組立工場前にて カンバン中心の背の小さい人が南、その右が三橋(筆者)、その右が山口、南より左へ4人目が石原、石井は不在のため写真中にいない。

槽が出来あがった。そしてシリンダチューブAssyが据えられた。

両ロッドシリンダのピストンロッドの挿入のためにラフターが入場してきた。ラフターを使って、精密機械を組み立てる試みが開始された。しかし、そのピストンロッドの挿入は、釣竿の先に棒をつけて、小さい穴の中に入れ込むようなものであった。モノが見えないクレーンのオペレータに細かい指示を出し、シリンダの心臓部を組み立てることはまさに至難であった。

組立は細心の注意がはらわれ、極めて慎重に行われた。横置きに据えてあるピストンロッドを垂直に立ち上げた。この時、ピストンロッドが吊上げられて垂直になっているか、厳重に検査した。

いよいよ、ピストンロッド挿入であった。槽に据えられたシリンダチューブの底に空いた穴に挿入しなければならない。この時だけは山口が自分で指示をした。

山口の手が動いた。「少し南」「少し西」……。慎重に芯を出した。

ピストンロッドを下げ始める。「少し下げ」「少し下げ」……。場内は静まっていた。

ピストンロッドの先端がシリンダヘッドの軸受に掛かった。「止めよ！」

「武内い。底はどうだ。ちゃんと入っとるか！確認せよ。」「……OKです。」「……よし」

更にピストンロッドを下げる。「少し下げ」「少し下げ」……。

そのとき、「キュッ！」イヤな音がした。「止めよ！」山口が叫んだ。

「武内い。もう一回底を確認せよ。」「……たぶんOKです。」

「たぶんとは何だあ。……お～し。抜く。いっかい上げよ！」

ピストンロッドを抜いた。現物を細かく確認した。ピストンロッド、シリンダチューブ、に異常はなかった。音の原因は追加工した軸受材とのカン合部の摩擦音であった。

「最後まで軸受材には悩まされるなあ」石井は苦笑いしていた。

ピストンロッド、シリンダヘッド、軸受部に十分に油を塗布して再挑戦であった。

「少し下げ」「少し下げ」……。

ピストンロッドの先端がシリンダヘッドの軸受に掛かった。「ストップ！」

「武内い。底、確認せよ。」「OKです。」「よし」

更にピストンロッドを下げた。「少し下げ」「少し下げ」……。

ピストンロッドのピストン軸受がシリンダチューブに掛かった。「ストップ！」

確認を行い、更にピストンロッドを下げた。「少し下げ」「少し下げ」……。

「トン……」ピストンロッドが底まで挿入された音だった。挿入が完了した。

「よおし」南が手を打った。石井、山口、石原に笑顔が浮かんだ。

次は反対側のシリンダヘッドの挿入だった。この頃には皆が作業に慣れていた。誰に命じられるでも無く各位が機能的に動いていた。作業はスムーズに進んだ。そして超大型シリンダは組み上がった。組立のノウハウが得られた瞬間だった。

こののち、この超大型シリンダは性能検査を合格した。その日、工場では正月休み前の納会が行われていた。山口は納会にも出ず、組み上げたシリンダの仕上げ塗装を部下と一緒にに行っていた。

極めて短納期、初めての超大型、超重量物シリンダの製作はこの男達の力で達成された。

11.

話は前後するが、石井は計画図を描き上げた後、

実務の一切を部下の三橋に行わせた。

山口も工程計画を行った後、組立の検討・治具準備など部下の小木曾、武内に行わせた。技術の伝承を意識していた。

そして翌年の春、今回のものを上回る超大型シリンダの物件にめぐり合うことになる。

大阪市「夢洲・舞洲連絡橋」。オリンピックを目指していた大阪市が、その会場として埋め立て中の人口島に掛かる、可動式の浮体橋であった。

この可動式浮体橋用装置として、質量約50トンという超大型シリンダを17台を受注した。社内で超大型シリンダがちょっとしたブームになった。

そして生産のための体制整備プロジェクトが組織され、50t走行クレーンを始め機械加工・溶接・組立・性能検査などキーポイントとなる設備導入が行われた。

初回の生産で問題が洗い出されていたため、製作は比較的スムーズに進んだ。但し、シリンダの構造が複雑化していたため、新たな問題もあった。しかし、これらの問題は技術を受け継いだメンバーとプロジェクトの総力を挙げて迅速に対応できた。

「夢洲・舞洲連絡橋」用の超大型シリンダは平成11年納入され、平成13年春に竣工を迎えた。

12.

超大型シリンダの物件は、その後の公共工事の縮小など景気動向により少なくなった。

しかし、超大型シリンダで培われた技術は、高速加振サーボ試験機、超々高速バッファなどに引用されて広がっている。石井、山口が考えた技術の伝承は成功した。

最後に超大型シリンダに携わった方々にお礼を申し上げたい。

特に村上常務（当時）、舟津工場長（当時）の支えがあったことで、当初無謀とも思われた一連のプロジェクトは成功したものと考えている。

[著 者 紹 介]

三 橋 浩 司 君



1988年カヤバ工業株に入社。岐阜南工場油機技術部油機設計室特殊油圧シリンダ、油圧緩衝機の開発、設計に従事。

解 説

自動車用トラクションオイルの実用化開発*

畑 一 志**

1. はじめに—開発着手以前の関連技術の流れ—

1999年11月、新しい機構の変速機ハーフトロイダル形CVT（無段変速機）を搭載した大排気量乗用車ニッサンセドリック・グロリアが世界に先駆けて日本で発売された。この新機構変速機は、コア要素としてのCVT部を日本精工が、それと一体不可分要素としてのトラクションオイルを出光興産が担当し、そして自動車変速機ユニットとしての適合性、高信頼性を極めて高いレベルで成立させた日産自動車によって初めて実用化に至ったものである。

今、私の目の前に3通の文献と一冊の本がある。“大容量トラクションドライブ用合成油（(1970)¹⁾”，トラクションタイプ変速機用油の設計と開発（1971)²⁾”，そして開発トラクション油を用いたトラクションドライブCVT（T-CVT）がFORD Pintに搭載され、省燃費性、加速性、耐久性等の各種テストで優れた性能を示し、T-CVTに大きな可能性と期待を述べた“トラクションドライブ用潤滑油（1974)³⁾”と題する文献、そしてKlausが著した“Bearings and Rolling Traction Analysis and Design（初版1972，増補改訂版1984)⁴⁾”である。これらの内容は、出光興産がトラクション油開発に着手することになった1981年以降、その源流に位置することになったものである。

開発着手のきっかけは、1981年春、日本精工・町田尚氏（現、同社常務）が東大生産技術研究所・石原智男教授（後に所長）を介し、出光興産潤滑油部・青山昌二氏を通じて従来トラクション油では高温になると動力伝達ができなくなるので、高温でも動力伝達可能なオイルがないものかとの相談にいられたことであった。この頃を挟んで、日本精工が日本での先駆的な開発に取り組み、そして実用化に至った過程は、同社トライボロジー研究所の所長であった角田和雄氏（現、中央大学理工学部教授）がドラ

マチックに述べている⁵⁾。

変速機の無段化・自動化は19世紀末に既に試みられ、1930年頃までにはオイルを使わないフリクションドライブCVTが数多く開発されたが、耐久性に問題がありやがて姿を消していった。1920～30年代にかけて、欧米でT-CVT車の開発が行われたが実用化には至らなかった。しかしこの頃には、油膜を介した動力伝達および変速機構に関する基本的な考え方は既に出来あがっていたように思われる。その後、自動変速機（AT）の著しい進歩によりT-CVT車開発は忘れ去られたように思われたが、1960～70年には米国でガスタービン自動車への適用検討が、1970年以降英国ではトラックや乗用車への適用検討が広く行われてきた。しかし、T-CVT搭載車が世に出ることはなかった。

1973年10月の第1次石油危機を契機に省エネルギーへの取り組みが声高に叫ばれ、1977年アメリカ機械学会の潤滑に関する研究委員会は「トライボロジーによるエネルギー保存戦略」と題する報告をし、40の研究開発プロジェクトを提案した⁶⁾。その中で、優先度の高いプロジェクトとして自動車用T-CVTを挙げ、その開発により最も大きな省エネルギー効果が期待できるとして詳細な実行計画を示した。オイルについては、3年間60万ドルという開発年数・予想コストと、実用特性に優れたオイルの開発目標が示された。実際、米国では1960年代後半に先駆的なオイル開発がなされ、最初の合成トラクションオイルが世に送り出されものの、T-CVT車の実用化には結びつかなかった。

1980年代前半に、それまでの約20年間のT-CVT関連研究・開発を総括したものが米国で発表された^{7), 8), 9)}。その後、米国から新しい関連情報の発信



図1 ハーフトロイダルCVTとCVT搭載車

*平成14年4月11日 原稿受付

**出光興産(株)営業研究所

(所在地 〒299-0107 千葉県市原市姉崎海岸24-4)

は少なくなった。日本でも同時期の1982～85年にかけて、トラクションドライブ装置の発達と活用領域の拡大に資することを目的として、“トラクションドライブ調査研究分科会成果報告書”（日本機械学会）がまとめられた¹⁰⁾。

米国での研究・開発が下火になっていた頃、出光興産独自のトラクションオイル開発がスタートしたことになる。これとて最近分かったことである。それから約20年を経て上述のようにはじめて実用車に用いられた。

T-CVT車の実用化は、T-CVTユニットを構成する各種トライボロジー要素や部品の設計技術、加工技術、制御技術、材料開発などが時と共に進歩、発展、向上し、またトロイダル接触面等における弾性流体潤滑（EHL）理論や油膜のトラクション挙動解析など関連する理論解析も著しく進み、これらの総合的成果として可能になったものである。

本稿では、T-CVTユニットの重要構成要素であるトラクションオイル実用化までの開発過程を振り返ってみることにする。

2. トロイダルCVTの特長とトラクションオイルの役割

トロイダルCVTは転がり接触面に形成される油膜を介して動力伝達すると同時に変速を担っている。

トロイダル（Troidal）とは、ある曲線を一定の軸回りに回転してできる曲面で囲まれた立体すなわち円環体のことをいい、フル形（円環状形）とハーフ形（半円環状形）があるが、1999年実用化の扉を開いたのはハーフトロイダル形CVTである。図2にその模式図を示す。変速はパワーローラを傾けると軸に対する入・出力ディスクとパワーローラ接触点半径比が変わることにより行われ、エンジンからの動力は入力ディスク～パワーローラ～出力ディスクの順に伝達され、タイヤを駆動する。

トロイダルCVTは従来の手動変速機（MT）やATの変速比を無段階に切り替えることができ、滑らかにかつ自動的に変速できる。ATは変速時に駆動力の段差ができ、エンジンの持つ最大限の力を発揮できない部分ができるが、トロイダルCVTではエンジンの能力を最大限に引き出すことができる。また、ATは変速時にいわゆる変速ショックを感じることもあるが、トロイダルCVTは変速ショックとは無縁である。このように、トロイダルCVT車の魅力は「燃費が良い」「滑らかで快適な走り」「圧倒的な加速感」の3点を同時に満足させていることにある。

図3は、図2に示したパワーローラと入・出力

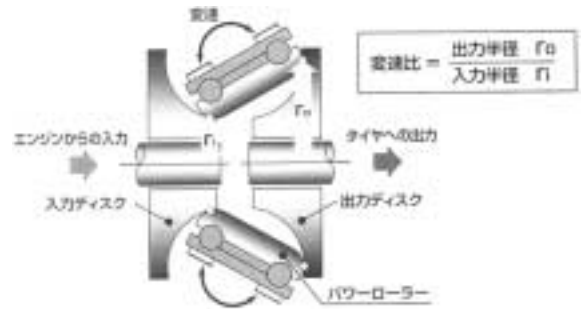


図2 ハーフトロイダルCVTの変速機構と変速比

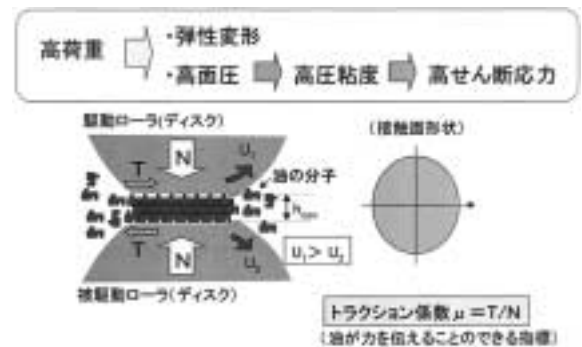


図3 T-CVT接触面状態の模式図

ディスク間の接触部の様子を、二つの円筒が接触する形で模式的に示したものである。接触部は弾性変形するほどの大きな力で押し付けられており、通常そこでの接触面圧（最大ヘルツ応力）は1～4 GPa（＝約1～4万気圧）の超高压状態にある。そのような超高压状態におかれたオイルの粘度は圧力により増大し、水飴のような超粘性／粘弾性状態ないしは非晶質ガラス状態／弾塑性状態に変化する。とはいえ、この変化は回転に伴う1/1,000～1/10,000秒というほんの一瞬での可逆変化である。このような高圧粘度が、極めて過酷な接触条件であるにもかかわらず、1μm程度の油膜の形成を可能とし、この油膜にせん断を与えるとすなわち駆動側ディスクを回転させると大きな力が発生する。このようにして、入力ディスクが油膜を介してパワーローラを牽引し、次いでパワーローラが出力ディスクを牽引することにより動力が伝達される。この時の押し付け力Nに対する接線力Tの比T/Nをトラクション係数と呼び、オイルの動力伝達能力の指標としている。

従って、トラクション係数の高いオイルほど同一押し付け力で大きな動力を伝えることができ、要求伝達動力が同じならば装置を小型化できる。自動車用T-CVTは搭載スペースが限られ、また産業用T-CVTに比べ大きな力を伝えなければならないことから、より高いトラクション係数のオイルが要求さ

れる。通常、一般の潤滑油に比べトラクション係数が高いオイルをトラクション油と呼び区別している。

3. トラクションオイルの開発

3.1 開発初期—目指す方向とさまざまな情報が得られた時期—

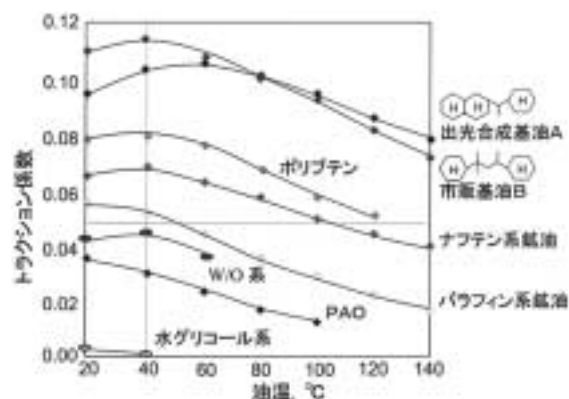
1973年10月の石油危機以降、それまでひたすら潤滑油の省エネルギー性向上のため、低摩擦係数油の開発を目指してきたものが、180度反対方向の特性油、高摩擦（トラクション）係数油を求められたのである。しかも、接触する転動体同士がスリップせずに動力を伝えることが使命のオイルを、である。スリップのイメージはすぐに浮んだ。筆者が田舎に住んでいた学生の頃、雨の日、蒸気機関車が勾配の少しいきつ所にさしかかると急にリズムが乱れ、動輪を空転させながら走っていたことや、そのような時は砂を撒きながら走っていたことである。

先ずオイルのトラクション特性試験・評価装置を作ることと、文献情報からオイルの絵姿を描くことから始めた。当時、産業用T-CVTには、1960年頃からナフテン系鉱油が使用されていて、その理由は振り子試験で他の潤滑油基油より高摩擦係数油であったからと先輩から聞いたことがあった。その真偽は定かでないが、振り子試験の接触条件は、滑り条件ではあるが十分なEHL潤滑が期待できる状態にあるようである。しかし、それまでの20年間の関連分野の研究・開発技術の進歩は著しく、専用のトラクション試験装置を必要とした。漸く1年後にコンパクトな試験機を作り上げ、少量のサンプルで評価可能となった。

いよいよオイルの特性評価と開発に取り掛かった。早速、1960年代後半に開発され、当時最も良く知られていたトラクションオイル（モンサント社／サントトラックシリーズ）を入手し、トラクション特性を試験するとともに数種のオイルを合成試作しそれらの特性と比較評価した。合成は、出光興産・中央研究所の坪内俊之氏ら有機合成を専門とするチームが担当した。図4はそれらの結果の例で、温度によるトラクション係数の変化傾向である。これらの結果から次の三つのことが示唆された。

- i) トラクション係数は油種、化合物により異なり、大小がある
- ii) トラクション係数は温度上昇とともに低下する
- iii) 温度上昇によるトラクション係数の低下傾向は油種、化合物に依存する

これらのうち前2項の特性傾向はそれ以前にも知られていたことであったが、3番目についてはほとんど言及されていなかった。図4において、試作合



(2円筒試験, $P_{max}=1.23\text{GPa}$, $u=5.7\text{m/s}$, $S.R=5\%$)

図4 トラクション係数の温度依存性

成基油Aは市販合成基油Bに比べ温度依存性が小さく、高温でも高いトラクション係数が保持されることが示されている。当初、トラクションオイルに対し“高トラクション係数であること”以外具体的な要求はなかった。一般に、潤滑油特性の多くは、温度による変化傾向の小さいことが要求されることが多い。その最たるものが粘度—温度特性である。トラクション係数も例外ではなかったが、この温度依存特性が最も重要であることが分かってきたのは大分後になってのことである。それまでこの温度依存特性が意識されていなかった理由は、恐らく、100℃以上でのトラクション実験は行われていなかったためと思われる。しかし、我々潤滑油屋は200℃程度までの各種特性評価は当たり前と思っていた。当初、潤滑油屋としてあまり意識せずに行っていた高温実験が新たな開発の方向性を示していたのである。

新規合成基油を用いたトラクションオイルの設計、組み立てに入った。T-CVTユニットはT-CVT部の他に軸受、歯車、発進クラッチなどの潤滑要素からなる。それぞれの要求潤滑性能を付与するための各種添加剤を配合したトラクション油を開発し、サンプル提供を開始した。しかし、一つの峰を越えるとまた別の峰が立ち塞がりT-CVT実用化への道は遠かったが、トラクションオイルの形・姿がそれとなく描けるようになっていた。

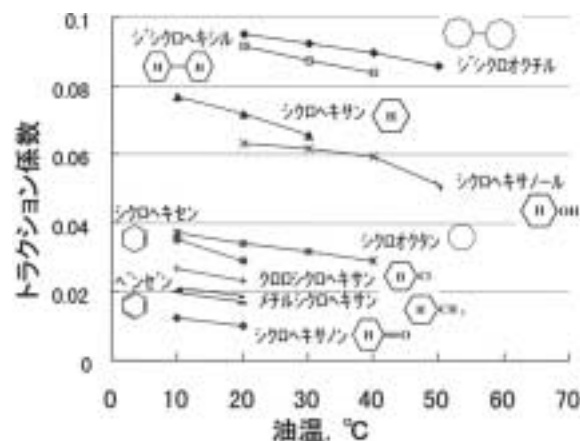
また、新規な基油の開発と同時に新たな糸口を探るため、鉱油をはじめとする各種潤滑油、および潤滑油として適用可能と思われた各種化合物約200種類を集め、トラクション特性評価を並行して進めた。それらの中から、図4に水系作動油（液）のトラクション特性を参考までに示した。水系作動油（液）が低トラクション係数であることは大変興味深い。

3.2 開発中期—トラクション特性と分子構造の関係を解きほぐし、分子設計指針を得た時期—

トラクション係数 (μ) と化学構造、物性との関係についての従来知見を基に、 μ —温度特性に優れた化合物を開発するため多くの試行を重ねたがなかなかうまくいかなかった。その理由の一つに、潤滑油としての役割をも担うトラクションオイルは適正な粘度を有していることという要件、すなわち自動車が極寒地でも始動・発進し、高負荷運転などの高油温時でも安定した動力伝達が可能ということが同時に満たされなかったことにある。

図3に示したように、トラクション挙動は高面圧、高せん断条件下での油膜の力学的特性によりもたらされる。そしてその特性はオイルという化合物に依存し、その化合物は個々の分子構造を持っている。潤滑油としての適度な粘度を考慮すると、オイルは複雑な分子構造となってしまう、考えられる化合物は極めて多くなる。例えば、炭素数15の炭化水素化合物には約4,350種の異性体があり、炭素数20になると約366,300種の膨大な数の異性体が存在する(ことになるという)。トラクションオイルとして可能性の高い化合物の多くはアルカン、ベンゼン、シクロヘキサン、デカリンあるいはそれらの誘導化合物などが有機的に化合しているものである。そこで、それらの素構造ともいべきこれら単純な分子構造化合物の特性を調べたらトラクションや粘度特性を担う分子構造が明らかになり、ひいてはトラクションオイル・潤滑油双方に適合する化合物の分子設計に何らかの手がかりを得るだろうことを期待して、基礎的検討にも着手した。

それらの結果の例を図5に示した。ベンゼン、シクロヘキサンおよびそれらに似て非なる化合物のトラクション係数—温度関係であるが、ここに目から鱗が落ちる思いの結果が示されていたのである。ベンゼンを核水添した形のシクロヘキサンはベンゼンに比べ劇的とも言えるほどトラクション係数が高く、このシクロヘキサンにメチル基や塩素を付加した形の化合物は逆に著しく低かったのである。また、 n -アルカン(直鎖状炭化水素)のトラクション係数と炭素数の関係を調べたら、トラクション係数は炭素数増加とともに偶数、奇数交互にジグザグに変化しながら大きくなる結果が得られた。このような炭素数偶数、奇数依存性は、よく化学の教科書に記されている融点の変化傾向と同じであり、この場合、その融点差はそのときのエンタルピー、エントロピー変化に対応し、さらには結晶状態の違いによりもたらされていることは良く知られている。このようなことからトラクション特性も化合物の基本的性



(2円筒試験, $P_{max}=1.23\text{GPa}$, $u=6.8\text{m/s}$, $S.R.=5\%$)

図5 単純な分子構造化合物のトラクション係数

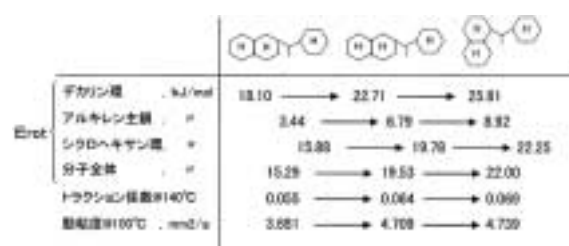
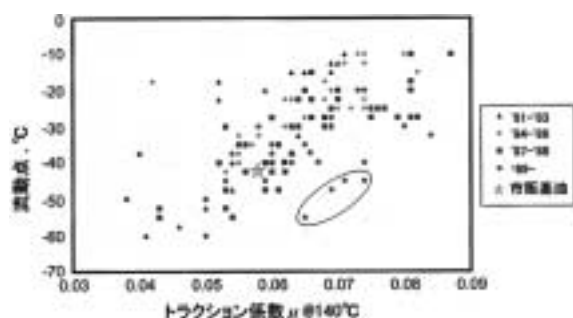


図6 デカリン環の立体構造・置換基位置による剛直さの変化

質や特性に関連していることが示唆された。約40種の単純な分子構造化合物のトラクション特性を調べ、トラクション係数が化合物間で劇的に相違する理由を他の化学分野で行われているQSPR(定量的構造物性相関)手法を用いて定量的に解析し、高トラクション係数化合物の分子設計指針を得た^{(11),(12)}。

さらに、実用上優れたトラクションオイル・潤滑油を開発するに当たって、化合物の立体構造や置換基位置等の分子各部の影響を個々に明らかにしていくことは、分子設計を行う上で不可欠である。そこで、幾つかの構造異性体を用いて、ナフテン系化合物の環構造も含めた分子各部の剛直さが、粘度や圧力-粘度係数、高温トラクション係数に与える影響について詳細に検討した。その解析結果の一例を図6に示す。デカリン環(図示した化学構造の左の部分)の立体構造や置換基位置が変化するのに伴って分子内が立体的に込み合ってくれば、その影響が分子全体に及んで分子全体が剛直になり(回転障壁エネルギー E_{rot} が大きくなり)、動粘度、トラクション係数、圧力-粘度係数が共に大きくなることや、トラクション係数-温度特性にも影響してくることが分かった⁽¹²⁾。

このように、“トラクション特性⇔物性・特性⇔化合物⇔分子構造”という一連の関係理解が進み、



(2円筒試験, Pmax 1.1GPa, U_{mean} 4.1m/s, S.R 5%)

図7 試作した各種化合物のトラクション係数と流動点の関係

粘度特性他の必要特性を付与するための最適化を図りながら所期分子構造化合物の開発を進め、400種を超える新規合成化合物の中から高特性トラクション基油を見出すまでに、10年余の年月を要した。

図7に実用トラクションオイル基油候補として合成した化合物の性能（高温トラクション係数－流動点（低温流動性の指標）関係）を示す。図7の右下方向が高性能化領域であり、開発年代と共に高性能化していることが分かる。右下の囲み線内に示した一群が新規開発トラクションオイル基油である。

3.3 開発後期

—実用トラクションオイル完成まで—

産みの苦しみはこれからである。自動車用トラクションオイルには図8に示した各種性能・特性が要求される。これらのうち、T-CVTユニット特有のものはトラクション特性およびトロイダルCVT部構成部品の潤滑特性であり、歯車、転がり軸受、油圧ポンプ、湿式摩擦材など他構成トライボロジー要素に対する摩擦特性、耐摩耗性、極圧性などは基本的にはMT, ATなど従来変速機の要求性能に準ずるものである。トラクション特性や基本的粘度特性を除いて、これらの要求性能は各種添加剤で付与することになるが（図9）、潤滑条件が過酷であること、ATF, MTF等従来変速機油の添加剤技術が鉱油を対象に構築されてきたこと等から、そのままの技術移転では所期性能を得ることができなかった。T-CVTユニットは、すべての要求性能・特性が基準以上でなければ成立しない。添加剤には、相互作用により他添加剤の性能を低下させるものがあり、思わぬ落とし穴を克服しなければならないことが多かった。添加剤配合仕様の構築はビーカーサイズのモデル試験からスタートし、各種単体試験、実機台上試験、実車試験と段階的にそれらの実用性能を確認しながら進められ、完成度を上げていった。このサイクルを幾度も繰り返し、最終製品が仕上げられた¹³⁾。この過程はまさにドラマチックであり、関係



図8 トラクションオイルに要求される性能



図9 トラクションオイルの組成

した各メーカー間の連携、相互信頼、複合された技術力、そして何にも増して“最初にやり遂げる”という信念を以ってして初めて成し遂げられたものといえる。

4. おわりに

トロイダルCVT車が世に出て2年余が過ぎ、新たな車種にも搭載された。省燃費性、走行性、加速性に期待通りの評価を得て、着実にその地位を築きつつある。

近年、地球温暖化対策としてCO₂排出削減対策が世界的に取り組みられつつあり、殊に自動車燃費向上策の一つとしてT-CVT搭載によるトータル燃費向上に期待が寄せられている。

トラクションオイルには今後、より高いトラクション係数とそれが温度、速度、面圧等運転条件の影響の受け難いこと、T-CVTユニット構成トライボロジー要素に対する潤滑特性のさらなる向上などが要求されるであろう。そして、それらが分子設計、合成技術、添加剤開発・配合技術などの進歩や関連工学分野の発展とともに着実に達成され、T-CVTが次代の変速機の中核になることを願うものである。

文 献

- 1) W.G. Hammann, R.M. Schisla, L.C.D. Groenweghe & V.W. Gash, ASLE Trans., 13 (1970) 105.
- 2) M.W. Haseltine, I.N. Duling, P.E. Hagstorm, R.J. Stenger, & D.S. Gates, SAE Paper 710837 (1971).
- 3) R.L. Green & F.L. Langenfeld, Machine Design May 2, 1974.
- 4) C.E. Klaus, Bearings and Rolling Traction Analysis and Design, Excelermatic, Inc. 1984.
- 5) 角田和雄, 月刊トライボロジ, 2 (2001) 51. 同誌 3 (2001) 49. 同誌 4 (2001) 71.
- 6) ASME Research Committee on Lubrication: Energy Conservation through Tribology, ASME (1977)
- 7) S.H. Loewenthal, D.A. Rohn & N.E. Anderson, SAE Paper 831304 (1983)
- 8) S.H. Loewenthal, NASA Conf. Publ., No. NASA-CP-2210 (1983) p 79-107.
- 9) S.H. Loewenthal, NASA Tech. Paper 2154 (1983)
- 10) 日本機械学会, P-SC62成果報告書 (1985)
- 11) 坪内俊之, 畑 一志, トライボロジスト, 42, 3 (1997) 193.
- 12) H. Hata & T. Tsubouchi, Tribology Letter, 5 (1998) 69.
- 13) Y. Murakami, Y. Arakawa, M. Maeda, H. Hata, T. Miyaji & Y. Tamoto, SAE Paper 1999-01-3613.

[著 者 紹 介]

はた
畑
ひと
一 志 君


1946年秋田県生まれ。

1968年秋田大学鉱山学部燃料化学科卒業。同年出光興産(株)入社。1977年同社営業研究所(潤滑油商品開発研究所), 現在同研究所主任研究員。工業設備用潤滑油, 自動車駆動系潤滑油等の開発に従事。日本機械学会, 日本トライボロジー学会等の会員。

e-mail: hitoshi.hata@si.idemitsu.co.jp

解 説

フライトシミュレーター用サーボバルブ開発秘話*

田 村 博 久**, 夙 繁 春**

1. はじめに

昨年アメリカに大きな不幸が起こり、全世界に衝撃が走った。旅客機がテロの媒体になるとは誰も予想しなかったことであろう。

当社ではフライトシミュレーター用サーボバルブを商品化しており、多少の関わりがあることと思いながらニュースに聞き入っていた覚えがある。

フライトシミュレータと油空圧サーボの関わりは深くさまざまな適用例がある¹⁾。本稿ではモーションベース駆動用のサーボバルブの開発に限定して述べる。

筆者らがフライトシミュレーター用サーボバルブの開発に取り組み、はや十年が過ぎようとしている。当サーボ弁は、プラットフォームに搭載されたコックピットを動揺させ、パイロットに擬似体感を与えなければならない、種々の性能が求められる。

一つには、低速駆動時での静粛性でありサーボバルブからのノイズを極力抑えなければならない。二つ目として、パイロットの体感につながる加速度の再現性が重要な項目となる。

以下、フライトシミュレーター用サーボバルブ写真1の開発経緯とその結果について、失敗談を交えながら述べていこうと思う。



2. フライトシミュレーター用サーボバルブの国産化

2.1 504F——はるかなる道のり

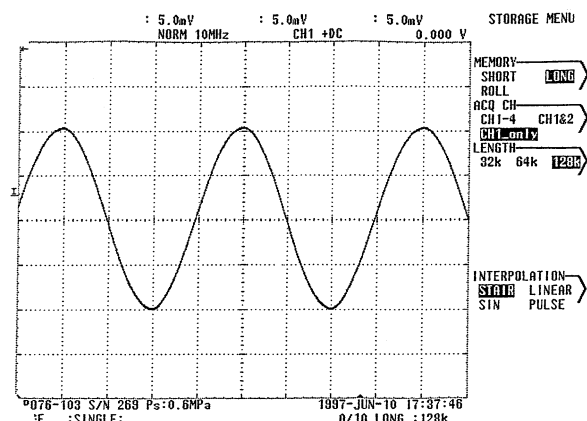
フライトシミュレーター用として最初に取り組んだサーボバルブは、各種試験機などに使用され当社において実績のある504Fであった。504Fは、試験機用のサーボバルブとして客先からも評価の高い、高性能サーボバルブである。構造は、ノズルフラップ系をパイロットとする、力フィードバック方式の二段型サーボ弁²⁾である。主な仕様は表1のとおりである。

制御波形例を図1に示すが、良好な結果を示している。

このサーボバルブを初めてシリンダに付けてモー

表1 504F仕様

定格流量 (QR)	226L/min (Valve drop : 7 MPa)
定格圧力 (Ps)	21MPa
ヒステリシス	< 2 % (without dither)
スレシヨルド	< 0.5%
周波数応答特性	- 3 dB ; > 37Hz ± 25% Input
	- 90° ; > 55Hz



Ps = 21MPa 指令 : 0.5Hz正弦波 入力 : 微小入力電流 (± 4 %) 振幅 : ± 12mm CH 1 : 変位波形

図1 504F変位制御例

*平成14年5月23日 原稿受付

**東京精密測器(株)

(所在地 〒470-0224 愛知県西加茂郡三好町油田24)

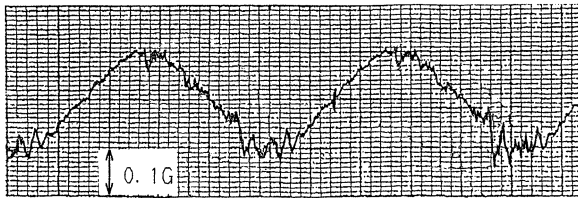


図2 504F スムースネス特性

ション試験を実施した時のデータは図2である。その当時まだシミュレータ用サーボバルブのポイントどこを捉めていなかった筆者は、まあまあかなと思ったが、客先の評価は“全くダメ”とのことで、愕然としたのを憶えている。これがはるかなる道のりの第一歩だった。どこが駄目なのかと聞くと、スタビリティとスムースネスが悪い、と耳慣れない言葉が返ってきた。

2.2 504F改良型

油を流すことによってスプールに作用する反力（流体力）に負けて、指令電流の通りスプールが動かないことが最大の問題ではないか、と思いサーボ剛性と呼ばれるスプールの位置決め剛性をあげてみることにした。

具体的にはスプール端の面積を2.5倍（つまり、スプール駆動力が2.5倍）にしたものを試作して、モーション試験に臨んだ。

結果はやや改善されたものの、まだ満足のいくものではなかった。

2.3 覚悟を決めた

もはやこれは既存品のマイナーチェンジなどの小手先の対策では駄目で、新たに開発することになった。新しい開発品575Fは504Fと比較すると次の特徴を持つ。

- ・案内弁直径の増加 1.33倍（＊1）
- ・サーボ剛性増加 3倍
- ・本体内部の流路面積増加 1.3倍
- ・スプールステム部のテーパ形状化

（＊1） 要求された定格流量は300（L/min）だが、504Fは226（L/min）だった。これをオーバードライブして300（L/min）流そうとしたこと自体、無理があった。

2.4 MIL仕様は満足した

575Fのモーションテストデータを図3に示す。なんとか次に示すモーションベースとしての仕様（MIL-STD-1558）をクリアすることができた。

- ・スムースネス（smoothness）；0.04G以下
- ・スタビリティ（stability）；0.015G以下

2.5 ビルトインアボート機構の開発

基本性能が達成されたので575F型サーボバルブ

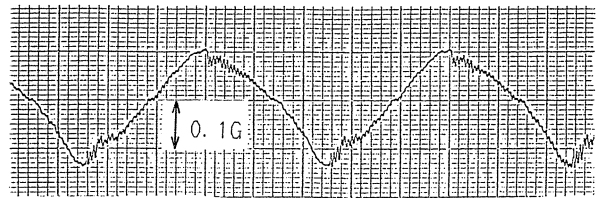


図3 575F スムースネス特性

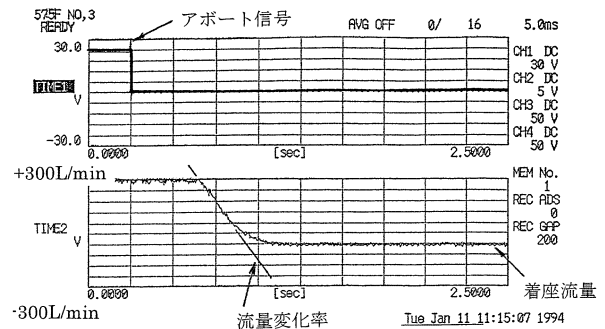


図4 575F ABORT TEST

のもう一つの要件である安全機能、つまりビルトインアボート機構³⁾の開発にとりかかった。指針は次のとおりとした。

- ・スプール開度を制限するためにシリンダをサーボバルブに内蔵し、それをストップとする。
- ・アボート動作時、一方のパイロット圧を逃がすことによって、必ずストップに当たるようにする。
- ・加速度つまりスプールの移動速度はオリフィス抵抗によって制限する。

図4にアボート機構を動作させた時のデータを示す。時間に対する流量変化の勾配が規定された仕様を満たしている。

できた！

それまで輸入に頼っていた主要パーツたるサーボバルブが国産化できて、品質、納期、価格の改善がなされ顧客に喜んでもらえた。この575Fはフライトシミュレータ限定とはいえ、すでに数百台の販売実績がある。

3. 流体音との苦闘

3.1 新たな要求

民間の航空会社に納入される超大型旅客機のフライトシミュレータを世界で一番多く生産しているカナダの会社から引合いがあり、サンプル品を試験していただくことになった。上記の575Fに対して大きく次の2点で異なるものだった。

- ・供給圧力が25%アップ

・流量が10%アップ（後に20%アップ）

これらの要求は画像やサウンドのリアリティーの追求によって、だんだんとペイロードが重くなってしまいうことに対応したものである。また取付面の形状も575Fとは異なるものだったので、型式を新規に585Fとした。

あわただしく、575Fの案内弁をベースに定格流量340（L/min）の試作品第1号を完成させ、カナダに向けて出荷した。結果は概ね良好だが意外なところでNGが出た。

1つは騒音、もう1つはアボート調整方法だった。アボート調整方法の方は、もっと微調整ができる様に、即ちシミュレータが退避する着座速度を、最大速度比1%の精度で調整できることだった。これはストッパの調整機構を改良することで対応できた。問題は騒音の方だった。

スプール弁を使って油を流すと次の3つに大別される音がすることがある。

- ・シュー
- ・キュー
- ・ギョルギョル

客先からの情報はただ“音がする”だけであった。この騒音解消のため、サーボバルブ周辺での騒音計測をして防音用カバーの装着など、改良を重ねて再度サンプル出荷した。しかし、コックピット内での騒音は低減してないとのことだった。常時でる音ではないとのことなので、太平洋を隔てて問題解決するのは難しく、客先（カナダ）に行って自分達の耳で聞くことにした。

コックピット内で実際に録音してみると、気になる騒音のスペクトルは約600から1 KHzであることが判明し、この周波数域に着目して改良を重ねることにした。音の質はギョルギョルに近いものだった。

3.2 非対称の案内弁

騒音の発生する条件を注意深く体験すると、あることに気がついた。それは、大きく加速度を発生させる時であった。つまり、圧力の変動が著しく大きい場合に発生することがわかった。片ロッドのシリンダを駆動する場合、最も圧力の変動を小さくできる条件がある³⁾。

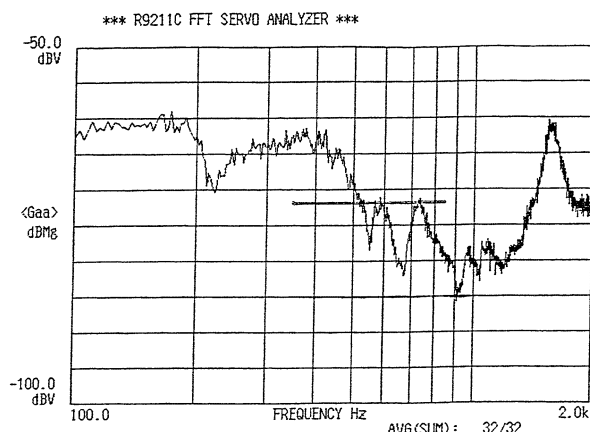
それは1式「力Fの作用している状態の片ロッドシリンダ内圧基礎式」に示すように、サーボバルブの制御オリフィスの面積をシリンダの面積比に一致させることである。この非対称型の案内弁を搭載した585F改良型を製作して試験に臨んだ。その結果、“相当良い”との評価をいただいたが、まだ少し残っているとのことだった。

実際にフライトシミュレータに乗って体験したと

$$P1_{EXT} = \frac{1}{a^3 + b^2} \left(a^3 P_s + \frac{b^2}{A_1} F \right) \dots\dots\dots (式1-1)$$

$$P1_{RET} = \frac{1}{a^3 + b^2} \left(a \cdot b^2 \cdot P_s + \frac{b^2}{A_1} F \right) \dots\dots\dots (式1-2)$$

（注）ヘッド側圧力P1が伸長において圧力の変化しない（ $P1_{EXT} = P1_{RET}$ ）条件は、 $a=b$ である。ここでaはシリンダ面積比、bはサーボ弁制御オリフィス比



Ps = 16MPa INPUT: -100%QR

図5 585F POWER SPECTRUM

ころ、滑走路を走行中に急ブレーキをかけると確かにギューと音がした。ブレーキの音ではないかと言ったが、サウンド系はOFFしているとのことだった。

考えあぐねた末に、これはたまたま発生する現象を対象にしているのは駄目で、なんとか連続的に計測できる方法を見つけることが先決と考えた。

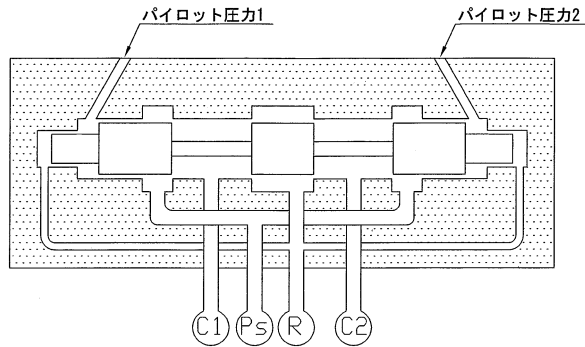
図5はサーボバルブに一定電流を与えて無負荷状態で流量を流した時の負荷ポートにおける圧力のパワースペクトルである。600Hzから1 KHzの範囲に小さなピークがあることがわかった。

3.3 逆向きに流してみた

いろいろと調査を進めると、シリンダが急上昇した時に音が発生していることがわかった。言いかえると、サーボバルブからシリンダのヘッド側に油を流している時である。

つまり、サーボバルブの取付面にある供給ポートから本体内部の管路を通して案内弁に導かれ、メータリングオリフィスを通して負荷ポートからシリンダのヘッド側に流れている状態である。

本体内部の流路は構造上、どうしても供給側か戻り側かどちらかの一方は、分岐または合流する為に直角に曲る箇所ができてしまう。この時点までの585Fは供給側が分岐する為に直角に曲った管路構



注) フィードバックバネは図記省略

図6 585F案内弁構造（開発初期）

造となっていた。

つまり、スプールの中央が戻りポートで両外側が供給ポートだった（図6参照）。これを逆にして、負荷ポートに流出するまでの管路をシンプルにした。結果はvery good! とのことだった。

4. 加速度波形への挑戦

4.1 まだ終わらない——加速度波形が良くない

正弦波入力時の加速度波形が三角波的になるとの問題が出た。上昇時と下降時の速度ゲインの違いによるものかと思いシミュレーションしてみた。図7のように指令電流対シリンダ速度は原点を境に折れ曲がる条件に設定しても、波形が三角波的になることはなかった。

次に、流量特性のリニアリティが良くない場合の影響を調べる為に、10%の非直線（流量飽和）をサーボバルブが有するとして、同様にシミュレーションしてみた。

確かに三角波的になってきた。図8に飽和の影響による加速度波形の違いをしめす。

585Fの流量特性データを分析すると、直線性は

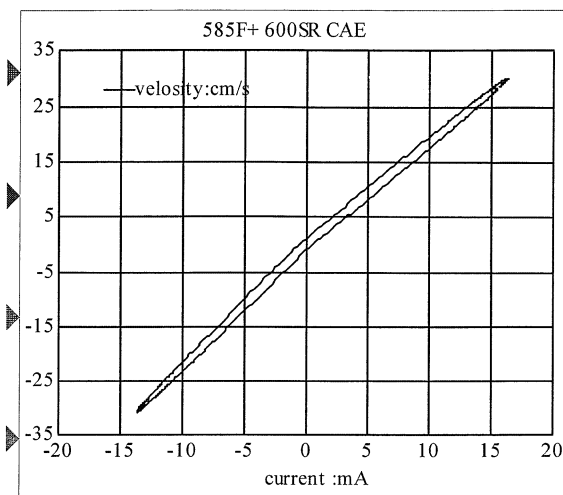


図7 指令電流対シリンダ速度

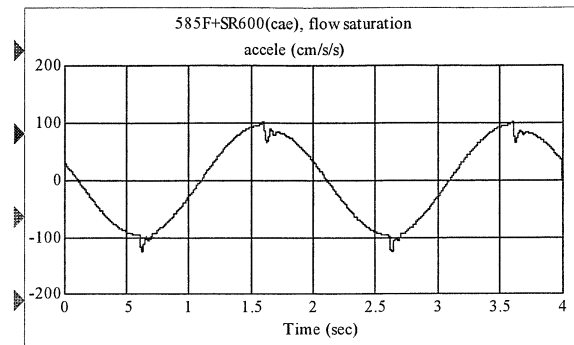


図8-a 飽和がない場合の加速度波形

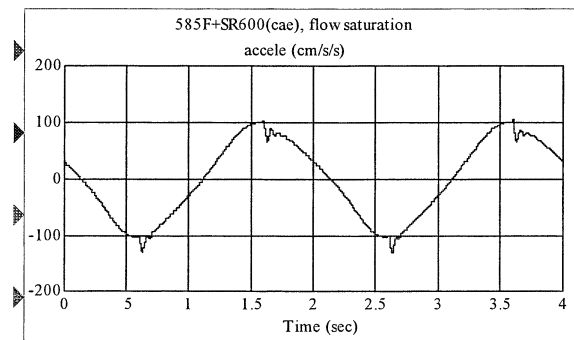


図8-b 飽和がある場合の加速度波形

10%程度であった。サーボバルブは一般的に10%の直線性を許容しているので、仕様上は問題なかったが、飽和の原因と思われる箇所を追加加工してサンプル品を提供し、良くなったとの連絡をいただいた。

5. ま と め

低騒音化対策として次の3点で改良を行った。

① 発生源を少なくする

流れの乱れができるだけ少なくなる様に、サーボバルブ内部管路を滑らかにした。

② シリンダに伝達しない様にする

流れの乱れが発生しても、シリンダから作動油が戻ってきた後になる様にサーボバルブ本体内部の管路配置を考慮した。つまり、シリンダへ流入する流れをできる限り乱れを生じない様にした。

③ 流速の低減

流量の多く流れる管路の面積を他に比して大きくした。つまり、片ロッドのシリンダのヘッド側につながるポートのサーボバルブ本体内の管路の面積を大きくした。

6. 若い技術者へ

筆者がこの開発から学んだことは

- ・注意深く現象を観察する（流体は一筋縄でいかない）
- ・常識で簡単に処理しない

- ・持続して考える
- ・古い論文をもう一度読み直す
- ・スパイラルアップ（進んでないようで前進している）
- ・他人（専門外の人も含む）の意見を素直に聞く
- ・現場に答えがある
- ・本物にするために用途を熟知する

7. 謝 辞

この拙文を開発に協力していただいた、次に代表される多くの方々にささげて話の終わりとします。

- ・575Fの開発に際して種々なヒントと便宜に加えて、あたたかく励ましていただいた三菱プレシジョン㈱の尾崎様はじめシミュレータ関係の方々。
- ・585Fの開発に際して上記と同様の援助をしていただいたカナダCAE社のモーションチームの方々。
- ・油圧サーボの現場で鍛えた鋭い直観力によって、壁を打ち破るヒントをいただいた米国SKI社の人々。
- ・筆者の無理難題にに応じて試作品を作りつづけてくれた東京精密測器㈱のものづくりの達人たち。

参 考 文 献

- 1) 田村, 尾崎: 油空圧サーボとフライトシミュレータ フルードパワーシステム Vol. 29-2
- 2) 東京精密測器㈱: 500F タイプサーボ弁カタログ
- 3) 田村, 夙: フライトシミュレータ用サーボ弁 平成13年春季フルードパワーシステム講演会論文集

[著 者 紹 介]

田 村 博 久 君

1950年2月1日生まれ

1972年早稲田大学理工学部機械工学科卒業, 同年東京精密測器株式会社入社. 現在同社技術部長, サーボ弁及びサーボシステムの設計, 開発研究に従事.

日本フルードパワーシステム学会, 日本機械学会等の会員.
E-mail, tamura@tss-nets.co.jp

夙 繁 春 君

1959年10月3日生まれ

1983年東京電機大学理工学部産業機械工学科卒業, 同年東京精密測器株式会社入社. 主に油圧サーボ弁の設計, 開発に従事. 日本フルードパワーシステム学会日本機械学会, 計測自動制御学会等の会員.

解 説

空圧用小型電磁弁樹脂ブロックマニホールド開発小史*

丹 羽 庸 夫**

1. はじめに

空圧用小型電磁弁の樹脂ブロックマニホールドが開発された当時の経済環境を振り返ってみる。時代は実に20年以上さかのぼる。

昭和60年代を迎えようとしていた日本経済の最大の課題は、膨らみ続ける一方の貿易黒字であり、それによる日米経済摩擦問題が連日マスコミを賑わせていた。

オイルショックによる停滞を、技術の革新と海外市場の開拓によって乗り切った日本経済は再び拡大基調に乗り始めており需要も活発になっていった。特に半導体および電子部品産業を中心とした設備投資の拡大、さらに技術革新による新しい産業分野の急成長などにより、景気は確実に上昇していった。需要の増加に伴い生産能力増強と生産性向上のため自動化、FA化など設備投資が次々に行われた。

こうした中で製造業にもとめられたのは、市場の変化に的確に対応し、かつユーザーニーズに合った製品をいち早く市場に送り出すことであった。

空気圧機器の隆盛はこのような時代背景から始まった。従来の空気圧機器の主要市場であった鉄鋼、造船等の重工業や化学プラント、工作機、食品機械等がこの時代になると家電、自動車等の製造業界ではより便利なもの、より早いものなどいっそうの多様化が増し省力化、量産化への変革が進んだ。そして電気から電子への変貌が始まりプログラマブルコントローラ制御が主体となり、メカトロ技術という言葉も生まれた。

FA化が進む中での空気圧機器は設備設計の簡便さ、納期短縮手段として非常に適したシステムであり急速に拡大していった。商品が次々と開発され、また高機能化モデルチェンジにより商品のライフサイクルも短縮化し、設備仕様も高集積、高速、高寿命、フレキシビリティ性がキーワードとなった。

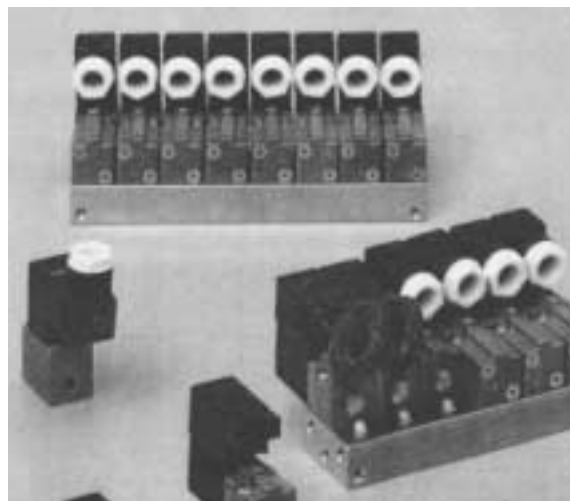


図1 小形直動電磁弁一体ベースマニホールド

2. 小型電磁弁黎明期

小型空圧用電磁弁の歴史は、昭和50年代前半に当社が国産化開発した小型直動3ポート電磁弁に始まる。

製品幅15mmの電磁コイル駆動直動形ポペット弁で当時世界最小の電磁弁として発売された。

現在ほど省エネ低電力の要求は高くなかったが、設備の小形化やプログラマブルコントローラの電源に適合する画期的な低消費電力1.8W仕様であった。電磁弁の小型化は必然的に発熱による性能低下を招き低ワット化は技術的にも要求された。

発売して数年後、市場拡大とともに使用環境は拡大し、エアータンク、周囲温度等の使用環境変化に対応した仕様へと見直しが余儀なくされ、市場要求に応えるべく技術部門では総力をあげて品質改善活動に取り組んだ。また並行して使用性を高めるためワンタッチタイプの電気接続コネクタオプションの開発も進められた。これは従来からあったグロメットや小型ボックスタイプでは電磁弁の配線作業に工数がかかり過ぎていたことから設備立ち上げ期間短縮に大いに貢献、ランプインジケータも付き配線の確認、作動チェックにも便利なオプションであった。

*平成14年4月15日 原稿受付

**CKD株式会社春日井事業所

(所在地 〒486-8530 愛知県春日井市堀ノ内町850番地)

3. 開発活動経緯

商品開発部門では同時期、小型4・5ポート電磁弁の商品開発が進められていた。小型直動3ポート弁を駆動用とした製品幅15mmのパイロット圧駆動方式の4・5ポート電磁弁である。小生はこのような時期、技術部門の改革によって設計部門の空圧用電磁弁の開発メンバーとして参加した。

入社して以来十数年間、製造技術部門で化学出身ということからゴムやプラスチック部品の成型、表面処理等の部品製造に関する製造技術、技術開発を担当業務としていた。移動によって商品設計の業務担当となったが、満足な部品設計すら出来ず、設計のための電気、機械工学の知識レベルは低く空圧用電磁弁の設計者としては新人の状況であった。

知識習得のため、この頃はじまった国家試験「空気圧装置組立」技能検定を受験しスキルアップを図った。しかし商品設計に関しては遺憾ともしがたく評価実験作業が主体の業務で始まった。

空圧用電磁弁の課題の中でマニホールドに関しては旧来のままで、まだ対応しきれていなかった。新規性を織り込んだ商品、そして特に樹脂化が望まれる商品開発テーマとして樹脂関連にスキルを持つことから小生が担当することになった。営業部門との繋がりから十分な情報はなく、商品設計手法も知らない暗中模索状態からの出発であった。

仕様拡大への品質改善活動も完了しており、商品拡販材料として市場がある程度判っていた小型直動電磁弁のマニホールドベースを商品開発テーマとして構想に取り掛かった。

検討作業は市場クレーム調査から始まった。

従来のマニホールドベースは黄銅やアルミ製の引抜材を使用し、電磁弁連数に応じたエアー流路穴や弁取付ねじ、配管接続ポートねじ等の加工がベースの様々な方向から行われており、交叉するキリ穴やねじ部には切削粉、かえりバリが十分注意してもなお残ったりしていた。一方設備組付け配管作業時にも異物混入がありシール機能を必要とするスプール弁やボペット弁部への付着によって作動ロックや漏洩などの問題を発生させていた。またユーザにて多連数ベースのねじの一箇所でも締付け過ぎ等によってねじ破損が発生するとベースごと交換しなければならず改善要望が出されていた。

一方納期面での対応のため、各種ある仕様毎に2～20連総ての連数の在庫を必要とし、製造部門からはベース品種の減少要求が強かった。しかしユーザへの納期対応からは採用できる内容ではなかった。

不具合情報やマニホールド連数、配管接続種、電

気接続等の使用性を考慮して構想に入った。営業部門とのつながりが少なくユーザの現場を直に見る機会がほとんどなかったため、以前の業務である製造技術部門での設備設計を想定したり、また社内にある機械部門に足を運び意見を聞いたりした。

当時の機械部門は高速化が課題で空圧機器の使用量は少なく活用する機構は限定されていた。機器からの配線はターミナルボックスを介して配線処理されており作業に苦勞していた。電装ボックス内にリレーやターミナル端子台が集積され集中管理されていた。それらは各機械の設備仕様に合わせ一品一様で総てアルミ製のDINレールに搭載されていた。空気圧用電磁弁マニホールドも今後は同様な場所に混載されていく可能性が想定された。

「これを利用すべきだ」と思った。DIN規格のアルミ製レールは電気部品の設置ベースとして一般化されつつあり電機メーカから市販されていた。

小型電磁弁のDINレールマウント方式の構想はここから始まった。フレキシブルに増減できること、アルミレールの軽量を生かすこと、低コストで量産性のあるプラスチック成形品で構成することを条件として構想設計に入った。方眼紙に幾通りも流路ポート位置、バルブブロックサイズ、給排気ブロック継手サイズや組換えを考え、さらに量産時の成型型構造、超音波溶着や圧入の二次加工も検討に入れた。継手は開発コスト、期間を考え協力継手メーカから内臓部品を調達することで対処することとした。

構想段階での最大の問題はブロックのシール連結方式であった。発想の元となった電気用機器の接続は確実な接触と電気絶縁が要求されるが空気圧機器の連結は固定シールと共に給気排気の集合流路断面積の確保が必要となる。

従来のブロックベースは貫通ロッドを利用して両端からの締め付けもしくは順次段組ロッドによって締付ける方式で、外部シールはブロック間の圧縮によるものであった。樹脂成形ブロックの歪みやそりは回避できずブロック連結構造として採用できる方法ではない。例えば0.1mmの平行度不良は20連で2mmの隙間となる。ガスキットの圧縮方式はトータルでゴム反力は連数と共に増大し、各ブロックの配管引張り力やねじ圧縮クリープと温度変化による経時変化に対してシール性の保障はない。

設置場所や配管接続によって生ずるブロック間の多少のずれやスキマが生じてシール可能な構造は、シリンダの軸シールに使用されているOリング径シール方式である。すぐさま各種締代で切削品を製作して確認した。結果は良好、連結し温度変化させてもシールはできた。

流量の制約はあるが理論的には何連でも連結可能、両端のブロックのDINレールへの固定力は流路の受圧力と配管引っ張りに耐えられればよい。市販のDINレール固定部品構造を参考とした。後は連結した各ブロック間同士のズレだ。

何種類ものブロックを何個も積み重ねてもしっかり勘合で感心させられていたプラスチック製おもちゃのログハウスを参考にして形状検討を行った。ここからは切削モデルを目の前にして設置作業者の立場で様々な設置、使用条件を想定して形状設定した。構成材料はソレノイドからの発熱やエアークオリティを考え耐熱剛性耐油性等を総合判断して決めた。製造技術時代に樹脂構造材として試験した材料である。当時排気ガス規制で自動車エンジンルーム内の構成機器や構造材として採用されつつあった。また少し

でも新規性を持たせるために、ワンタッチ継手のチューブ抜き用樹脂リングの材料色を給気排気で変えたり継手の奥に薄板のフィルタを設けたりした。成型型はブロック間の連結軸ピッチの収縮ズレを考慮してスライド入れ子交換方式として型費の低減と品質の安定を狙った、このようにして構想設計は完了した。

下図は当時出願した実用新案申請添付図である。

販売部門との会議にて商品化の可否評価を諮ったがあまりよい評価は得られなかった。樹脂製ブロックマニホールドが今までにないオプションであり従来と同等のサイズのままとまっていることも一因と思われた。一方技術内でもシール性に不安が有り消極的であった。なんとか型投資を抑えることを条件に承認を得て市場評価を受けるべく商品化に進んだ。後に市場では樹脂ブロックマニホールドはゴミに起因するトラブル減少として現れ評価された。

4. パイロット式小形電磁弁への展開

樹脂ブロックマニホールドの発売後、完成していた製品幅15mmの小型パイロット式4・5ポート電磁弁のオプションとして続けて開発を行った。小型シリンダ駆動用として流量は大幅に増加したが、小形電磁弁ブロックマニホールドの設計思想を水平展開して構想設計を行った。ただ流量の増加はブロック間の連結受圧面積増加によって両端のブロック固定構造検討に時間を要した。

発売後ブロックマニホールドのニーズは徐々に増

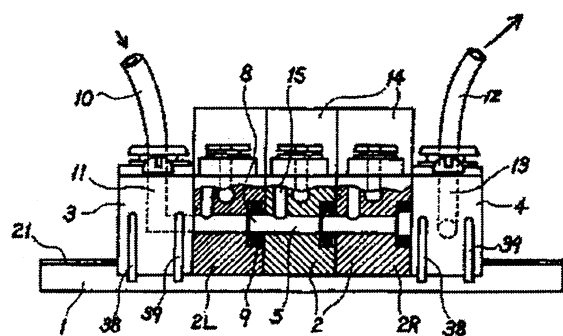


図2 開発時の実用新案添付図

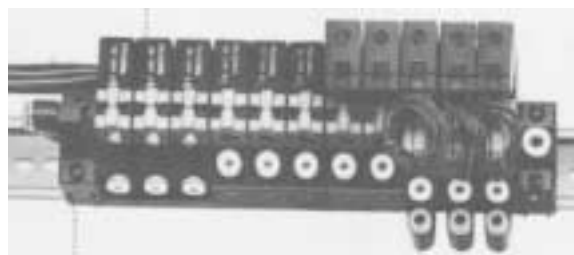


図3 小形直動電磁弁樹脂ブロックマニホールド

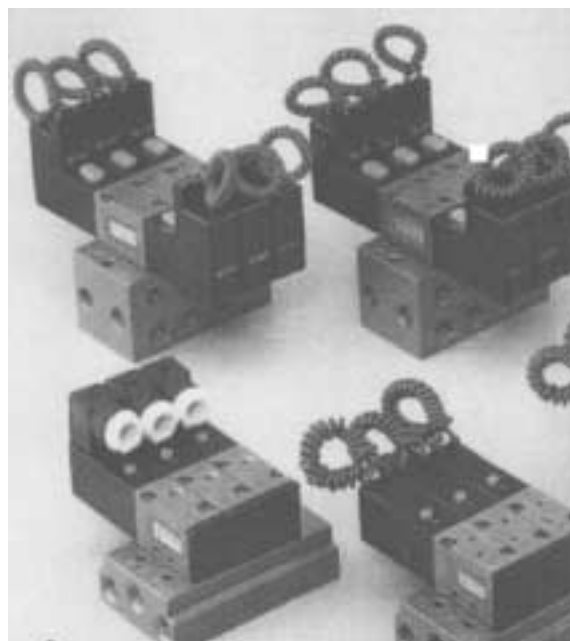


図4 パイロット式小形電磁弁一体ベースマニホールド

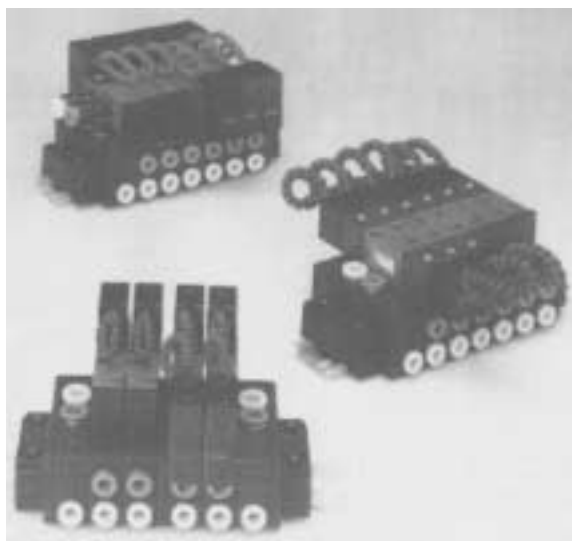


図5 小形パイロット式4・5ポート電磁弁樹脂ブロックマニホールド

加しマニホールドの半数近くが樹脂ブロックとなっていた。その後発売された上位機種シリーズにも同様にオプション化され、また電磁弁制御の配線ワンタッチ化ニーズの増加によって各種集合配線コネクタ類のオプションが複合化されていった。制御システムの変化は機器の安定高性能化が求められるとともにオプションによって多品種少量化が進みコスト面での課題が増大していった。

5. 超小形電磁弁への展開

市場ニーズからはさらにコンパクト高性能が求められた。樹脂ブロック開発6～7年後、平成になると共に15mm幅電磁弁に代わるパイロット式切換弁用アクチュエータとなる10mm幅超小型直動3ポート電磁弁とそれを搭載したパイロット式4・5ポート電磁弁を生産技術部門との連携活動のもと精密生産技術を確立しつつ開発した。

半導体製造装置や自動機械装置の省スペース高密度化が進められ設備機器の生産量も拡大していった。

この時期、装置の電子化に対応して配線工数低減をねらい、シリアル伝送子極を搭載したタイプがオプション化されだした。

樹脂ブロックマニホールド開発10年後、次世代マニホールドと位置付け、サイズは従来機種相当の流量を持ちながらその樹脂ブロックベースの高さに収め、さらにシンプルさを求め構想した。

樹脂ブロックマニホールドの当初設計コンセプトにシステムの安定駆動機能、排気の回りこみによる誤作動防止や耐久性能のアップを付加し、さらにコンパクトさを狙い樹脂ブロックベース内にパイロット式電磁弁を内蔵し、各種の集中配線コネクタオブ



図6 超小形パイロット式電磁弁一体ベースマニホールド

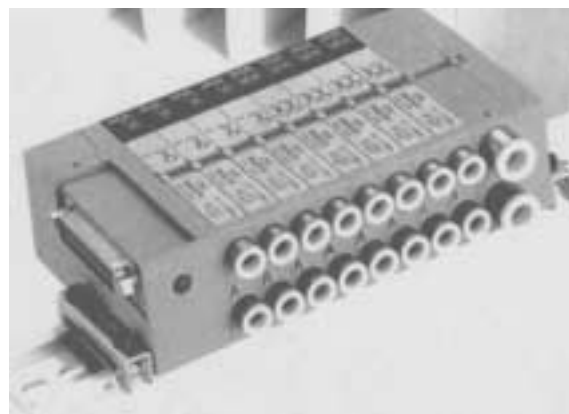


図7 超小形電磁弁ブロックマニホールド

ションはブロックの設置性を生かしつつ完成させた。

6. おわりに

小型空圧用电磁弁黎明期のオプション開発の一端そして小生の履歴の1つともなった事例を紹介した。ものづくりは現状に対する満足度の程度から始まる。

昨今製造業の空洞化が言われているが、今後ともものづくりはなくならないだろう。ユーザーズをつかみ問題を解決していくことで打破していけると思う。ここで取り上げた事例は商品開発や問題解決例として参考していただければ幸いである。

以上不慣れで学術的要素のない拙文お許し願いたい。

〔著者紹介〕

に お つね お 丹 羽 庸 夫 君



1948年11月23日生まれ。

1971年岐阜大学工学部工業化学科卒、同年CKD(株)に入社、現在にいたる。制御機器開発設計に従事。