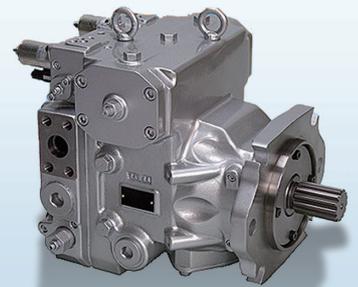
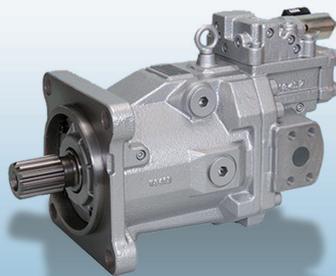
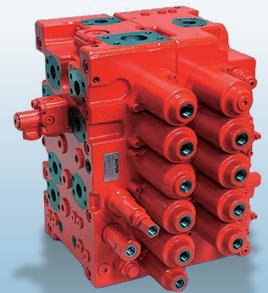
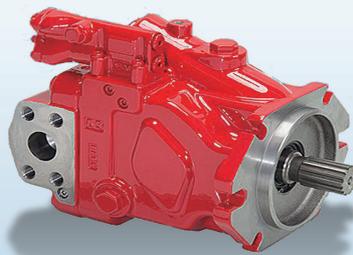
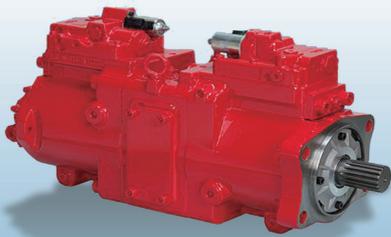


ISSN 0387-7906

川崎重工技報

精密機械特集号



TECHNICAL REVIEW

No.181

November 2019



「世界のトップブランド」から「世界標準」へ



■ 巻頭インタビュー	精密機械事業の近況と今後の展開	1
■ 総括説明	精密機械分野における市場環境と製品・技術展開	2

技術解説

■ 情報化施工を実現するICT油圧ショベル用システムの開発	Development of Systems for ICT Hydraulic Excavators That Enable the Realization of Computer-Aided Construction	6
■ 情報化施工を実現するICT油圧ショベル用コンポーネントの開発	Development of Components for ICT Hydraulic Excavators That Enable the Realization of Computer-Aided Construction	10
■ 大型プレス用油圧システムの開発	Development of a Hydraulic System for Large Press Machines	14
■ モバイル分野向け油圧ポンプ「K3VLSシリーズ」の開発	Development of K3VLS Series Hydraulic Pumps for Use in Construction and Agricultural Equipment	18
■ ロボット向け電油アクチュエータの開発	Development of Electro-hydraulic Actuators for Robots	22
■ 油圧機器製品の性能・信頼性向上を支える評価技術	Evaluation Technologies That Support Boosting the Performance and Reliability of Hydraulic Components	26
■ 生産のグローバル展開の深化に対応するICT/IoT技術	ICT and IoT Technology for Further Global Expansion of Production	30

新製品紹介

■ 斜板形アキシャルピストンポンプ「K7Vシリーズ」	K7V Series – Swash Plate type Axial Piston Pump	34
■ クローズ回路用斜板形アキシャルピストンポンプ「K8Vシリーズ」・斜板形アキシャルピストンモータ「M7Vシリーズ」	K8V Series – Closed loop Swash Plate type Axial Piston Pump, and M7V Series – Swash Plate type Axial Piston Motor	36
■ 燃料電池車用高圧水素減圧弁「KGPR65D」	KGPR65D – High-pressure Hydrogen Regulator for Fuel Cell Vehicles	38
■ ポンプ回転数制御システム用コントローラ「N-ECST」	N-ECST – Controller for Variable Speed Control Pump System	40

特許紹介

■ 油浸型ソレノイド	– 自動組立に適した新型ソレノイド	42
■ 減圧弁	– 高耐久性・高信頼性を実現する水素減圧弁	42

【精密機械・ロボットカンパニー
プレジデントに聞く】

精密機械事業の
近況と今後の展開

精密機械事業の近況はいかがでしょうか？

当社の精密機械事業の歴史は、1916年（大正5年）に英国から電動油圧舵取機の技術を導入したことから始まります。その後、着々と自社技術を蓄積し、現在、各種油圧機器製品を中心に、建設機械や産業機械および船舶などの分野へ、グローバルにソリューションを提供しています。

主な製品としては、油圧ポンプ・モータ・バルブなどの油圧機器、産業機械用油圧装置、甲板機・舵取機などの船用装置、コントローラなどの電気制御機器、さらに2018年から販売が開始された燃料電池自動車用の高圧水素減圧弁などがあり、幅広くラインナップしています。

現在は、建設機械向け製品が売上の大半を占めており、建設機械の中でも特にショベル分野において当社は大きな存在感を示しています。今後はショベル以外の建設機械や農業機械の分野でも存在感を示すべく開発を進めています。グローバルな視点で見ると、建設機械や農業機械の市場の成長率は世界経済の平均成長率を上回っており、将来も堅調に推移していくものと推定しています。

今後の事業展開についてお聞かせください

精密機械ビジネスセンターは、ロボットビジネスセンターと共に精密機械・ロボットカンパニーを構成しています。同じカンパニーとして、ロボットテクノロジーとの有機的な融合を積極的に進めていきます。たとえば、建設機械の動きはロボットの動きと共通点があり、ロボットの設計・制御技術を建設機械用機器やそれ以外の製品にも応用することで、まったく新しい発想の製品が生み出される可能性を秘めています。逆に、油圧技術による動力機構をロボットに適用する場面も出てくるでしょう。

また、建設機械や産業機械および船舶などの分野においても利用が始まっているICT/IoTなどの技術は、故障検知やオペレータの支援など、生産性や安全面に大きな恩恵を与えています。これらは、ロボットとも共通する技術で、



橋本 康彦 取締役常務執行役員
精密機械・ロボットカンパニー プレジデント

今後まだまだ適用が拡大していくと思われます。これら技術を発展させた製品の開発にも力を入れています。

さらに、環境保護の観点から、排ガスなどの環境規制が世界中でさらに厳しくなることが予想されます。建設機械などで使用されているディーゼルエンジンは、電動機に置き換えられることになるかもしれません。そのような場面においても、油圧は自由度の高い動力伝達システムであり、衝撃に対して耐性があるなど優れた特性を持っていますので、電気と油圧を組み合わせた新しい技術の開発や製品への展開が考えられます。

技術開発について一言お願いします

油圧機器などの性能向上を図るため流体解析・機構解析・構造解析・各種シミュレーションなどをフルに活用しながら、技術開発力の向上も図っています。

また、ICT/IoT技術をさらに深化させるため、当社ではAI技術も組み合わせて、より高度な技術開発を推進しています。将来、建設機械や農業機械および船舶などが、自律して無人で機能を果たす時代がやってきます。その自律化に対するソリューションをソフト面とハード面の両方から提供できるように、さらなる飛躍と挑戦を続けています。

最後に

自動車の自動運転技術がマスメディアでよく取り上げられていますが、担い手が減少する建設業や農業などの分野ではその減少よりも早く自動化／自律化が必要とされています。このニーズに素早く応えるため、将来を見据えた革新的な技術開発を推進していきます。

精密機械分野における 市場環境と製品・技術展開

嶋村 英彦

執行役員 精密機械・ロボットカンパニー 精密機械ビジネスセンター長



まえがき

当社が取り扱う精密機械分野の製品はさまざまな産業分野で活躍しており、同時に関連技術の発展に大いに寄与してきた。近年では、電子制御技術との融合がさらに深化しており、圧倒的な出力・高い応答性と信頼性・フレキシビリティの高さを生かしながら、ますます事業が拡大していくものと考えている。

ここでは、精密機械分野の現在の市場環境と主な取組みについて紹介する。

1 精密機械ビジネスセンターの特徴

精密機械ビジネスセンターの前身となる油圧機械事業部が1968年に発足し、2018年に50周年を迎えた。現在、建設機械・産業機械・船用装置の各分野へ、それぞれのニーズに対応した製品開発を継続的に展開し、事業のさらなる拡大を目指している。特に油圧シヨベル分野では、高いシェアを維持しており、カワサキブランドが浸透している。また、燃料電池車用水素ガス弁の開発や建設機械を対象としたモーションコントロールシステムの開発など新たな分野にも積極的に展開している。2025年の事業イメージとして「自動車・建設機械・電子機器などの産業界や医療分野において、競合他社を圧倒する性能・品質を実現した油圧機器やロボットを中核製品として、トータルソリューションを創造・提供する“世界標準”のモーションコントロールメーカー」というビジョンの下、さらなる事業発展に取り組んでいる。

2 精密機械分野の市場環境と製品展開

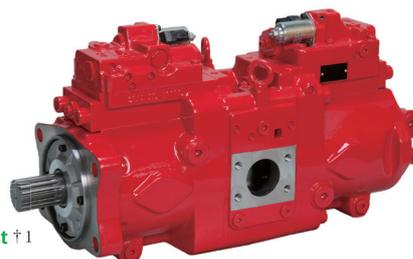
(1) シヨベル分野

中国やインドをはじめとしたグローバル市場が拡大して競争が一段と過熱し、各社が差別化にしのぎを削っている。省エネを追求したハイブリッドシステムなどの進化が目覚ましいが、最近では、自動化や無人化を志向してICT/IoT技術を活用した情報化施工に対応したモデルが各社で開発されている。また、将来のパワースourceの変化を見据えた電

動化に向けた取組みも各社で進められており、シヨベル分野は今まさに大きな変革期にある。

当社は高性能な製品と各社要求へのきめ細かな対応により、油圧ポンプ・モータ・バルブの各製品（図1）でシェアを伸ばしてきたが、現在は油圧機器の提供のみではなく、シヨベルの価値向上に貢献できる油圧システムを志向した対応が求められ、制御の高度化を図った油圧システムやそれらに適応した油圧機器の開発を進めている。

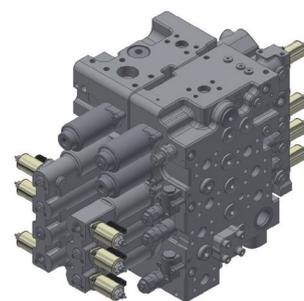
油圧機器としては、省エネに貢献する高い性能、新興国の環境や無人化に適応できる高い信頼性、高度なシステムに適応できる高い制御性が求められ、各製品において技術開発や製品化を進めてきた。シヨベルの省エネや信頼性に大きく影響する油圧ポンプについては、高効率・高出力密度を特長とする「K7Vシリーズ」の開発を推進してラインナップを揃えた。「K7Vシリーズ」のロータリーの設計には長年に渡る研究成果を注ぎ込み、世界最高水準の効率を実現している。コントロールバルブ「KMXシリーズ」については、流体解析を活用して大幅な圧損低減を図りながら、高度な制御が可能な電子制御化に対応した新シリーズ



(a) 「K7Vシリーズ」



(b) 「ERU2-7.0」



(c) 「KMXシリーズ」

図1 シヨベル分野用油圧機器

†1 油圧シヨベルを中心に建設機械に広く採用され、近年の市場要求である高効率・低騒音・コンパクト・高信頼性を実現した油圧ポンプ。

†2 大幅な消費電力低減と業界トップクラスの高い耐久性の両立を達成した、建設機械の操作用電気ジョイスティック。

を開発し、省エネと操作性向上を追求している。また、電子制御システムに欠かせない製品として、低ヒステリシスでコンパクトな電磁比例ソレノイドバルブや操作性に優れた電気ジョイスティックなども市場に投入している。今後は、電気駆動化に向けたポンプの低騒音化や高速回転化など将来に向けた技術開発に取り組んでいく。

(2) モバイル分野

モバイル分野とはショベル以外の分野の総称であるが、建設機械に留まらず、さまざまな分野で多種多様な機械が存在しており、メーカーも大手から特色のある小規模なメーカーまで裾野が広く、ショベルを凌ぐ市場が形成されている。この分野でのプレゼンスを高めることが世界標準と認められるためには重要であり、当社もグループ拠点を通じて、この分野への本格参入を図っている。

モバイル分野では機器仕様や負荷条件がショベルとは異なるため、ショベル向けの製品では適合しないケースがあり、ショベル向けで培った技術を基にモバイル分野の仕様や特性に適合する製品の開発を進めてきた(図2)。

ポンプについては中圧ポンプとして「K3VLSシリーズ」を開発して6サイズのラインナップを揃え、さまざまな分野の機械への採用が進んでいる。また、クレーンの巻上げ用途などの高速仕様向けとして斜板形モータ「M7Vシリーズ」を開発した。閉回路用ポンプ「K8Vシリーズ」とコントローラも並行して開発し、「M7Vシリーズ」との組合せにより、走行系に広く採用されている油圧式無段変速機HST (Hydro-Static Transmission) システムへの本格参

入も図っている。

バルブについても各種機械向けに開発を推進しており、モバイル分野で主流であるロードセンシングシステム用のコントロールバルブ「KLSVシリーズ」では多彩なラインナップを揃え、コンクリートポンプ車用バルブなども開発した。これらモバイル分野向け製品は、ショベルでの実績で得た大手メーカーからの信用により、モバイル製品の受注に発展する場合も多く、さらに拡販が期待されている。

現在は、モバイル分野向けの技術や製品を展開し、農業機械分野への本格参入を目指してトラクタ用のポンプやコントロールバルブの開発を推進している。

(3) 産業機械分野

従来から製鉄機械・鍛圧機械・その他の産業機械など幅広い分野に向けて、特に高圧かつ大型の機械向けに高圧対応の機器や高応答・高精度の制御技術などを特色にし、各種油圧機器や油圧システムを供給してきている。

環境・資源問題は変わらず注目されており、将来の地球環境を意識した技術が重要である。当社においても省エネルギーに貢献できる油圧機器やシステムを製品化してきた。特に産業機械向けとして、省エネルギー効果だけでなく、小型化・メンテナンス性向上・低騒音・高い制御性能などの特長を持つ電油ハイブリッドシステム「エコサーボ」(図3)を市場に投入した。さらに、高圧・大流量・高精度制御という鍛造プレス市場に対応するために、吐出圧力35MPa、押しのけ容積500cm³という高圧・大容量ポンプと組み合わせた製品もラインナップに追加している。

(4) 船用装置分野

船用装置製品は、船舶の船尾に設置され、船橋にある操舵スタンドからの指令信号に従って舵を動かす舵取機(図4)

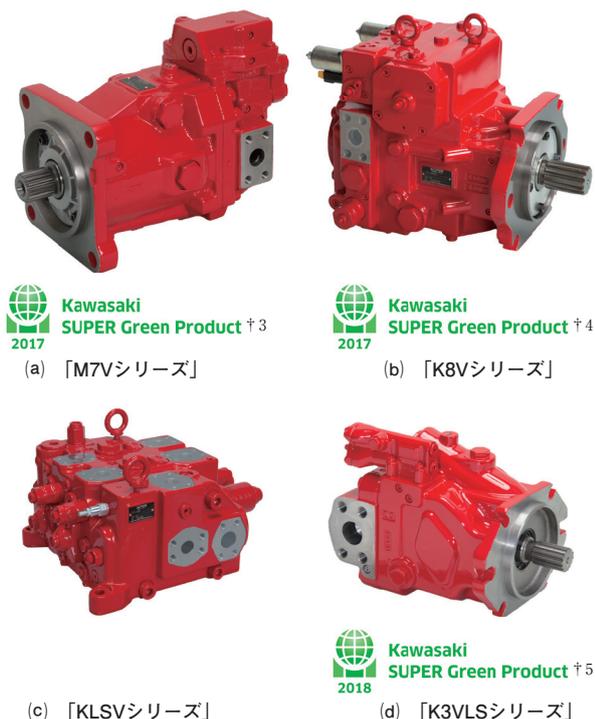


図2 モバイル分野用油圧機器



図3 「エコサーボ」

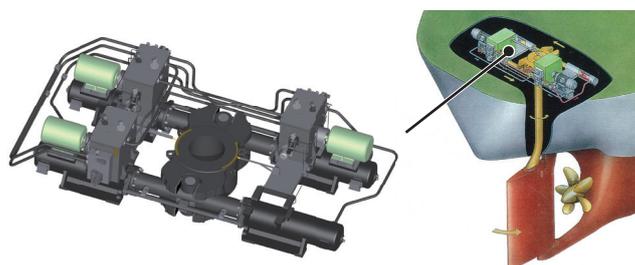


図4 舵取機

†3 各種産業車両のHST走行駆動やウインチ巻上用途などに適し、世界最高クラスの出力密度の高さで低騒音も実現した油圧モータ。

†4 各種産業車両のHST走行駆動などのクローズ回路システムに適し、世界最高クラスのポンプ効率と低騒音を実現した両傾転型油圧ポンプ。

と、船舶を海洋に停泊させる際などに使われる錨を巻上げ／巻下げるためのウインドラスや接岸作業および係留に使用される索の巻込み／巻出しに使用するムアリングウインチに代表される甲板機械を取り扱っている。

舵取機や甲板機の動力発生・伝達手段として油圧を利用しており、幾多の船舶に搭載され安全航行の一翼を担ってきた。その信頼性や出力特性などの特長から今後も電動油圧方式が主流であることに変わりはないと考える。

舵取機は船舶の操船において最も重要な機器の一つであるため、冗長化が確保されており、また従来から故障予防のための状態確認は船員による点検で行われていた。しかし、自動運行や船員の少人化が進んでいくと、センシングとデータ解析によって不具合の発生を予測して、未然に防ぐ故障予知技術が必要となる。舵取機に圧力・流量・作動油温度・電動機の消費電力などを監視するセンサを取り付けるとともに、船内に大容量ストレージを備えた高速データ収集装置を搭載することで、舵取機の状態に関するデータを詳細に収集することが可能になる。蓄積された舵取機のデータの解析により、各種パラメーターの異常を察知して、故障を予知することで船主に適切なメンテナンス時期を提供するとともに舵取機の信頼性向上につなげるものである。

現在、センシング技術を搭載した舵取機と高速データ収集装置を、当社が建造した大型原油タンカー VLCC に実装してデータの収集を行っている。これらのデータを解析しながら故障予知技術の開発を進め、2020年度中に開発完了することを目標としている。

(5) 新事業分野

CO₂の排出をゼロにする取組みなど地球環境問題に対する関心が高まる中、車載した水素と空気中の酸素を燃料電池で化学反応させて発電して、そのエネルギーでモータを駆動させて走る燃料電池車FCV (Fuel Cell Vehicle) が注目されている。FCVは、電気自動車に比べて充填時間が短い・航続距離が長いなどの特長を有しており、インフラ設備が整えば普及が拡大すると考えられている。2040年代にはガソリンを使わない電動車が世界中で普及して、両者が共存する世界になると考えられている。

防衛製品で培ってきた高圧ガス制御技術を基に、2001年には燃料電池車用水素ガス弁の開発を開始している。これまでに、複数の自動車メーカーや産業車両メーカーとともに試作品を開発して納入することで実績を積み、2014年頃からは量産化を見据えた開発を本格化している。現在では、タンクの開閉を行うタンクバルブや70MPaのタンク圧から1MPa程度まで減圧する高圧減圧弁を主力製品として各社へ量産供給している。ダイムラー社には、燃料電池車メルセデス・ベンツ GLC F-CELL用高圧水素減圧弁(図5)として量産採用され、2018年1月から出荷を開始している。

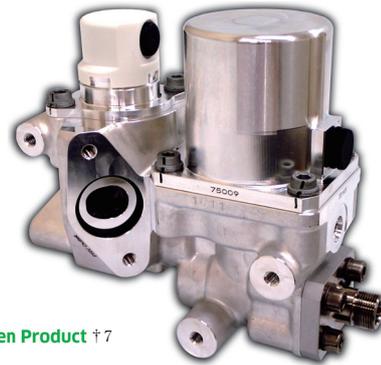


図5 F-CELL用高圧水素減圧弁「KGPR65D」

当社は地球環境に優しい水素エネルギーの活用を力を入れており、本製品は水素を「つかう」という点でこのHydrogen Roadの一翼を担うものである。これらの開発を通じて水素エネルギーがもたらす新しい未来を、世界の人々に届けたいと考えている。

3 将来に向けた技術開発への取組み

(1) マシンコントロール技術

建設機械の心臓である油圧ポンプをはじめとして建設機械の動きを直接担う各種油圧機器を設計・製造してきた。近年では、それらを統合するコントローラも開発して、建設機械のモーションコントロール全般を担っている。

建設工事は他産業に比べて効率向上や安全性向上また作業環境の改善が遅れており、その改善が望まれている。さらに、少子高齢化による労働人口の不足も大きな問題となっている。こうした中、電子制御技術とICT/IoT技術を利用した建設機械の自動化と建設作業の効率化が大きな流れとなっている。

建設機械のモーションコントロールで「世界標準」を目指す当社は、建設機械の自動化に対応するべく、自動化に対応できる油圧システムだけでなく、マシンコントロール技術の開発も行っている。油圧ショベルを例とすると、多種多様な作業が可能な機械であるが、その操作は熟練オペレータの技量に頼る部分が多い。このような機械を自動化する場合、油圧機器の特性を熟知するとともに優れた制御技術が必要である。当社は油圧機器や油圧制御技術を得意とする油圧のプロフェッショナルであり、さらにロボット事業分野で軌跡追従制御や制振制御など優れた制御ノウハウも有している。

油圧関連技術とICT/IoT/ロボット技術を融合して、まずは2Dマシンコントロールシステムを開発した(図6)。2Dマシンコントロールは、オペレータの作業をアシストすることで、非熟練オペレータでも熟練オペレータに近い作業を行うことができるようにするものである。全球測位衛星

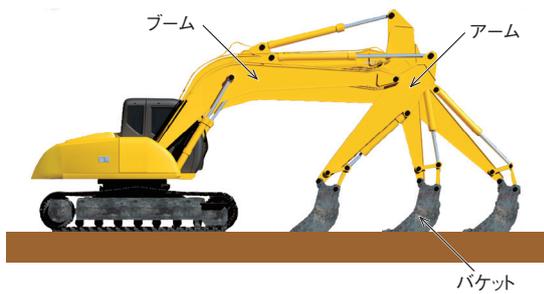


図6 2Dマシンコントロールのイメージ

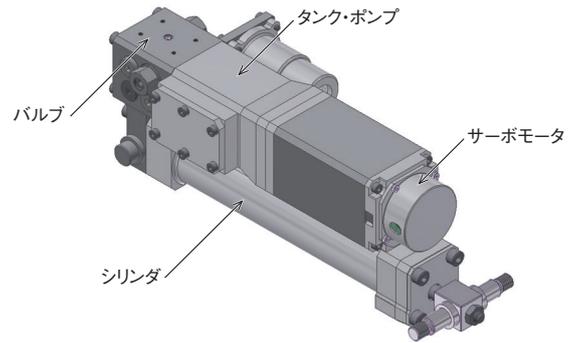


図7 「Hydro Servo Muscle」

システムを活用するなど、さらに進んだ3Dマシンコントロールシステムについても現在開発中である。

(2) 電油アクチュエータ関連技術

当社では災害現場などの人間には危険な場所あるいは高温・放射線などの過酷な環境において、人の代わりができるヒューマノイドロボットを開発している。このロボットでは電動のアクチュエータを使用しているが、将来的には油圧を利用した電油アクチュエータを採用して、耐衝撃性などのロバスト性をさらに高めることも考えている。

現在、産業機器用としてサーボモータで油圧ポンプを駆動する回転数制御方式の電油アクチュエータを商品化している。この電油アクチュエータの技術をベースとして可変容量ポンプを備え、ヒューマノイドロボットに搭載可能な超小型軽量電油アクチュエータ「Hydro Servo Muscle」を開発している（図7）。さらに、これを産業用に展開した小型電油アクチュエータの開発も進めている。

(3) ICT/IoT技術の活用

船用装置業界においてもICT/IoT化は進みつつあり、たとえば、船の状態監視や維持管理の最適化などのアドバイザリーサービスがある。船内のさまざまなデータをセンサで収集し、インターネットを介してデータを陸側に送信して、解析を行い状態監視やメンテナンス時期を船にフィードバックするものである（図8）。舵取機でも故障診断用のセンシングが行われ、状態監視・維持管理を舵取機に適用することで、船内でデータ解析して故障箇所を特定し、その診断結果をインターネット経由で船主に伝えることができるようになる。

これまで、ICT/IoT技術とは縁が遠かった産業装置業界でも同様にこれらへの対応が進みつつある。2015年に開発を開始した「エコサーボ」用コントローラ「N-ECST」は、インターネットを介しての遠隔操作・データ収集を可能としたシステムである。これらの技術を油圧ユニットで使用

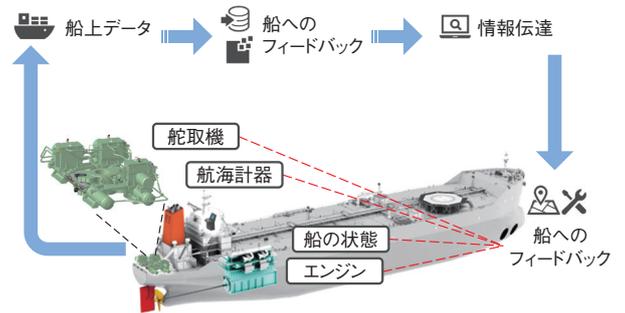


図8 アドバイザリーサービスのイメージ

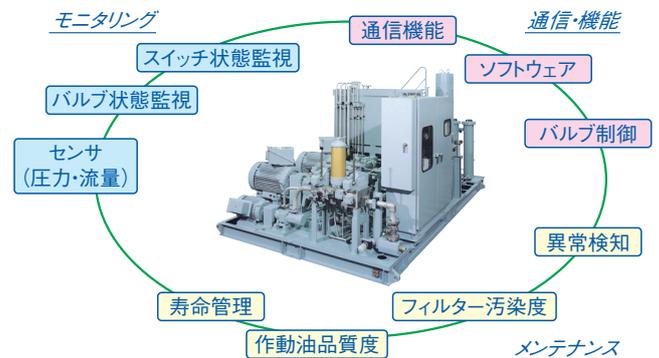


図9 油圧ユニットの状態監視イメージ

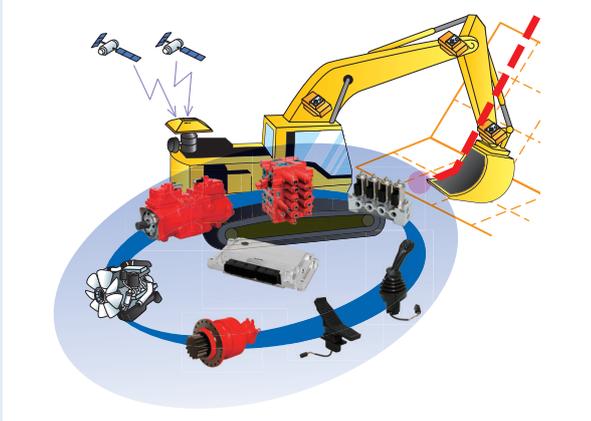
される機器に展開して、状態のモニタリング機能によりメンテナンスに必要な各種状態・通信・制御を監視できる（図9）。

あとがき

中計2019では、2030年度の精密機械ビジネスセンターの連結売上を2018年度実績の2倍以上とする目標を立てている。目標の実現のために、各製品の開発・拡販を確実に進めていくとともに、精密機械・ロボット両事業のシナジーにより新製品・新事業を創出していきたいと考えている。

情報化施工を実現するICT油圧ショベル用システムの開発

Development of Systems for ICT Hydraulic Excavators That Enable the Realization of Computer-Aided Construction



村岡英泰① Hideyasu Muraoka
 弓達陽治② Yoji Yudate
 中川仁③ Hitoshi Nakagawa
 陵城孝志④ Takashi Okashiro
 能勢知道⑤ Tomomichi Nose

建設現場の生産性向上を目的に、ICT/IoT技術を活用して高効率・高精度な情報化施工を実現するICT建機の需要が広がっている。当社は油圧機器メーカーならではの知見を活用しながら、ICT油圧ショベルシステムにおいて、その制御精度と動作速度の両立を実現する油圧システムおよびマシンコントロール技術を開発している。また、将来システムに向けた“革新油圧システムを核とした自動化／自律化への取組み”を進めている。

The demand for ICT construction machinery is increasing as it enables the realization of highly efficient and highly accurate computer-aided construction with ICT (Information Communication Technology) and IoT (Internet of Things) technology for enhanced productivity at construction sites. Leveraging its expertise as a hydraulic equipment manufacturer, Kawasaki is developing hydraulic systems and machine control technologies that can achieve a good balance between control accuracy and operating speed in ICT hydraulic excavator systems. For future systems, Kawasaki is also working toward automation and autonomy with the focus on innovative hydraulic systems.

まえがき

昨今の建設現場では、労働人口や熟練者の減少による労働力不足が深刻となっており、生産性の向上を目的とした情報化施工の導入が増えている。

日本においても建設現場の生産性向上を目指す新しい取り組みであるi-Constructionが国主導で2016年度より推進されており、情報化施工の機運がますます高まっている。

1 背景

情報化施工は、建設事業の調査、設計、施工、監督・検査、維持管理という建設プロセスのうち「施工」に着目して、ICT/IoT技術を活用することで、高効率・高精度な施工を実現するものである。また、施工で得られる電子情報を他のプロセスに活用し、建設プロセス全体の生産性向上や品質確保を図ることを目的としている。この情報化施工を実現するために用いられる建設機械がICT建機であり、近年急激に需要が高まっている。

2 ICT建機

ICT建機の機能としては、全球測位衛星システムや車体

センサから推定できる建機の現在の位置と施工の目標値との差分をモニターで表示するマシンガイダンス技術と、目標値と現在位置との差分を最小限とするために建機をリアルタイムに自動制御して施工を行うマシンコントロール技術があり、各社で開発が進められている。現在では、オペレータの整地作業の操作をアシストするマシンコントロール技術が市場に投入され、一般化されつつある。この技術は、整地作業を主とするブルドーザなどから始まり、最近では多様な作業を行う油圧ショベルにも導入されている。当社においても、強みを生かすことができ、マシンコントロール技術導入の難易度が高いICT油圧ショベルシステム

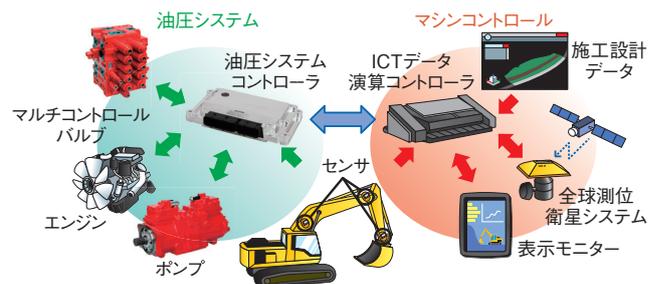


図1 ICT建機（油圧ショベル）のシステム構成
 Fig.1 System configuration of ICT construction machinery (hydraulic excavator)

に着目して、その研究を行っている。

ICT油圧ショベルシステムの主な役割は、油圧ショベルのアタッチメントを構成するブーム・アーム・バケット各軸の動きを制御して、バケット先端を所望の軌跡に追従させることである。主な構成要素としては、図1に示すように油圧シリンダを介して各軸の動作を制御する「油圧システム」と、アタッチメントに配置した角度センサから姿勢を推定してバケット先端位置を制御する「マシンコントロール技術」である。

3 開発目的および方針

他社との差別化を図るためには当社の強みである油圧機器および油圧制御を活用することが不可欠であり、高精度・高効率・低燃費をキーワードとして、ICT油圧ショベルシステムに最適な油圧機器とマシンコントロール技術の開発に取り組むこととした。この取り組みを通じて、顧客へのシステム提案力を強化するとともに付加価値を向上した製品を提供できるようにすることを目標の一つとした。

従来の油圧システムに使用する油圧機器については、主に低燃費と高効率を目的に製品開発を行ってきた。このため、油圧機器制御の核となるマルチコントロールバルブは、圧力損失の低減とアクチュエータ速度の向上を主眼においた製品となっている。これに対し、ICT油圧ショベルシステムでは、施工の目標値に対する誤差を最小限にすることが重要であるため高精度が求められており、従来の油圧機器特性・油圧回路構成では要求を満たすことが難しかった。

そこで、マルチコントロールバルブをはじめとする油圧機器について機器特性および回路構成を工夫することで、精度と速度を両立する油圧システムを開発することとした。また、マシンコントロール技術の開発においては、機器特性や構成を最適化するとともに、施工の目標値に軌跡を追従させることに優れたロボット制御技術を活用しつつ、油圧システムを制御する上での相違点を克服する独自のマシンコントロール技術を開発することとした。

4 技術課題

軌跡追従は産業用ロボットでは基本的な機能として実装され、自動車の組立ラインや半導体製造装置などの産業分野で広く利用されている。しかし、油圧で駆動する油圧ショベルのアタッチメントで同様のことを実現する場合、次の点を考慮する必要がある。

- 非線形性：作動油の圧縮性や漏れ流量などの影響がある
- 自重の影響：アタッチメントのサイズや重量が一般的な産業用ロボットと比較してはるかに大きい

- 応答遅れの影響：油圧ポンプから吐出した作動油を介してアクチュエータを駆動する

① 非線形性の補償

油圧シリンダを駆動する油圧システムは、圧縮性・漏れ流量・ヒステリシスなどの油圧特性に起因する強い非線形性を有する。目標とする軌跡への追従性を高めるためには、各軸の速度を高精度かつ高応答に制御する必要があるが、この非線形性が大きなネックとなる。

また、油圧ショベルは重量物であるアタッチメントを前方に伸ばす姿勢をとり、かつ足場が不安定であることが多いため、必ずしもバランスのとれた構成ではない。このためアタッチメントの急な加減速など、ささいな要因で容易に車体振動を誘発してしまう。

機体の大きさから、わずかな振動でもバケット先端位置に大きな変位を生じるため、精密な施工を実現するためには車体振動の抑制が不可欠である。しかしながら、非線形性により各軸の制御性が悪化すると、必然的に操作量が大きくなり車体振動を誘発してしまう。

このため、車体を安定化して高い追従性を実現するためには非線形性の補償が必要となる。

② 自重の影響の補償

産業用ロボットでは、軌跡追従性の向上のため、動力学計算を基に各軸のトルクを補正し、自重の影響を補償している。一方、油圧ショベルはアタッチメントの重量やサイズが大きく、産業用ロボット以上に自重の影響が大きい。また、油圧シリンダは油圧特有の非線形性を有しており、ロボットに使用される電動モータのような精密なトルク制御が困難である。さらに、共通の油圧源から複数のアクチュエータに作動油を供給する構成であるため、複数の軸が連動して動作する際に各軸を独立して補償するためには、作動油の配分を精密に制御する必要がある。したがって、産業用ロボットと同様の重力補償は適用できず、油圧システム独自の補償が必要となる。

③ 応答遅れの影響の補償

産業用ロボットでは各軸トルクを電動モータにより直接駆動するが、油圧ショベルでは油圧ポンプから吐出した作動油を介してアクチュエータを駆動するため比較的応答遅れが大きい。

通常の油圧ショベルの場合、この応答遅れはオペレータの経験により補間する。たとえば、整地作業ではアームの動作に合わせてブームを上げ下げするが、オペレータは動き始めではアーム動作を確認してからブーム操作をしても間に合わないことを経験から予測し、ブームをアームとほぼ同時に操作している。

マシンコントロール技術では、熟練したオペレータの操作のように、さまざまな軌跡に対する追従性や高い応答性が必要となるため、応答遅れの補償が必要となる。

5 これまでの取組み

(1) 油圧システムの開発

非線形性の補償：油圧システムでは、自重のエネルギーを利用して油圧シリンダの出口流量の一部を入口に戻すことで、高速動作と高エネルギー効率を両立している。このとき入口に戻る再生流量は姿勢や荷重によって変化するため、非線形性の大きな要因となっている。

そこで、シリンダの圧力センサを利用して再生流量を精度よく推定する技術を確立し、再生流量を考慮したシリンダの速度制御を行うことで、制御性の向上を実現した。再生部の油圧回路の構成を図2に、再生流量推定ロジックの概要を図3にそれぞれ示す。

シリンダの圧力センサ値と再生バルブおよび再生カットバルブの開口推定値から再生流量を推定している。この際、再生バルブの制御流量の推定精度が重要であるが、新たな算出方式の導入により推定精度を向上している。

シリンダを安定して効率良く動作させるためには、シリンダの入口流量と出口流量をバランスさせることが重要である。開発した方式では、推定した再生流量を基にシリンダ入口流量を補正することで、再生流量が変化する状況においてもこのバランスを維持することが可能である。

これにより再生流量を有効利用しつつ、線形性の高いシリンダ応答を実現した。

自重の補償：独立メータリングバルブIMV (Independent Metering Valve) と圧力センサを利用した流量制御による重力補償法を開発した。IMVによる制御方式は、シリ

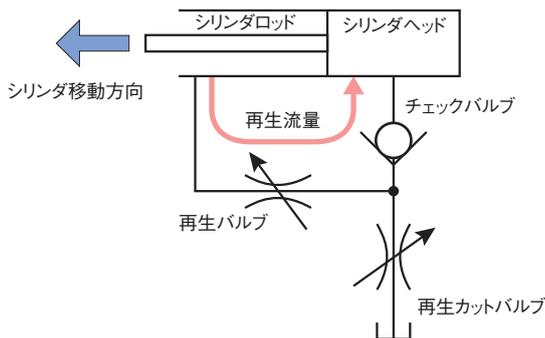


図2 油圧回路構成 (再生部)
Fig. 2 Hydraulic circuit configuration (regeneration section)

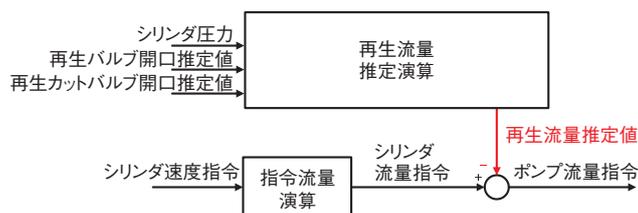


図3 再生流量推定ロジック
Fig. 3 Estimation logic for regeneration flow rate

ンダの入口通路メータインMIと出口通路メータアウトMOを独立に制御する方式であり、状況に応じて両者を最適に制御することでシリンダ速度の制御性を改善することが可能で、従来の制御方式と比較して高い自由度がある。

リンクにかかる重力の影響は主にMO側のシリンダ圧に現れるため、IMVの特性を生かしてシリンダ圧を考慮した精密なMO制御による重力補償を行っている。

各軸の目標速度をMOの目標流量に換算し、目標流量とシリンダ圧力センサから取得したMOバルブの差圧を基に必要な開口を演算して、その開口に追従するようにMOバルブを電子制御することで、シリンダ速度を目標に高精度に追従させる。その際に、バルブの電子制御にはバルブ動特性の考慮などの補正を導入して制御精度の向上と安定化を図った。このように、各軸のMOを精密に制御することで、重力の影響を補償すると同時に複合動作時の作動油の配分が適正化され、共通の油圧源をもつ油圧システムにおいても各軸を独立して制御することが可能となる。

これにより、油圧システムにおいて姿勢や荷重の影響を緩和可能な重力補償を実現した。

(2) マシンコントロール技術の開発

マシンコントロール技術の一つである自動整地アシスト制御では、図4に示すように、オペレータの操作によりバケット先端が目標の整地面を超えて掘り込みそうになると、アームの動きに対して自動的にブームを上昇させる。また、バケット先端が目標の整地面から離れそうになると、自動でブームを下降させる。このような動作を実現するために、コントローラでは各センサ情報から油圧ショベルの姿勢とアタッチメントの姿勢とを常時計算している。

油圧ショベルにおいて、高精度にアーム・ブーム・バケットを動かすために、油圧ポンプからの作動油を最適な流量で吐出するとともに、マルチコントロールバルブで各アクチュエータへの作動油を最適な流量に分配している。さらに、アタッチメントに設置されたセンサ信号から計算されるバケット先端位置を目標整地面に追従させる位置フィードバック制御を実施している。

応答遅れの補償：図5に示すように、アタッチメントが

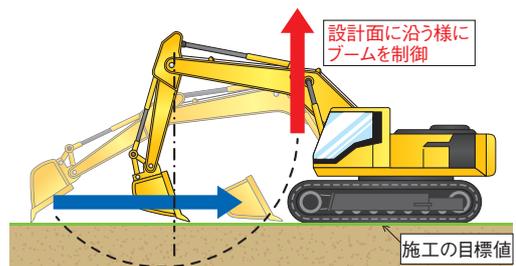


図4 マシンコントロール技術 (自動整地アシスト制御)
Fig. 4 Machine control technology automatic grading assist control

伸びている状態ではオペレータの操作に対して、ブームの上昇量が大きくなる。一方、アームが地面に対して垂直となる付近ではブームの上昇量が小さくなる。このときブームに対する制御ゲインが一定であると、アタッチメントが伸びている状態では応答遅れによりアームの動作にブームが追従できず掘り込みが発生する。また鉛直付近ではアームの動作に対するブーム動作の感度が高く、応答遅れによりハンチングが発生する。この課題を解決するため油圧シヨベルの姿勢に応じてブームの操作量を補正する制御を導入した。これらにより、アタッチメントの動作速度を維持しつつ、安定して滑らかな整地作業を実現している。

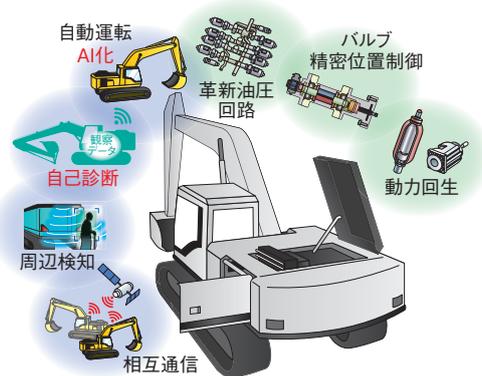


図6 将来システムの構想
Fig. 6 Concept of future system

6 将来油圧シヨベルシステムに向けた取り組み

さまざまな建機メーカーや測量機メーカーにおいて、オペレータの操作をマシンコントロールによりアシストする半自動化のシステムが市場投入されており、さらに、次のステップとして自動化／自律化の実現に向けた研究開発が進められている。

当社においても、マシンコントロールシステムの開発に取り組み、将来に向けて「革新油圧システムを核とした自動化／自律化に対応したシステム開発」に取り組んでいる。当社の強みである油圧技術を活用して、図6に示すような自動化／自律化に最適な革新油圧システムを開発することで、他社との差別化を実現する。

(i) 革新油圧システム

性能向上とコスト効率向上の両立を目指し、自動化／自律化に最適な油圧システムの研究開発に取り組んでいる。具体的には、さらなる圧損低減とエネルギー再生／回生による低燃費・動作効率向上、微操作性と高追従性を両立するとともに高精度でリニアなアタッチメント作動による操作性・制御性向上、機能統合および構成や構造の一新によるコスト効率の向上などを実現するための油圧機器および油圧システムの研究に取り組んでいる。

(ii) 自動化／自律化

建設現場全体としては、複数の建設機械を自動連携させた無人化施工の研究開発が進められている。まさに“建設現場における工場化”と言え、ここで動作する建設機械は

ロボット化すると言える。当社の産業用ロボットで培った技術を活用し、建設機械のロボット化の研究開発に取り組んでいる。具体的には、油圧シヨベル自身が自律学習して最適な動作計画を導き出し作業を行うシステム、周辺の人や障害物を検知して動作計画を補正するシステム、地面の土砂の状況を検知して適応する掘削手法・パターンを補正するシステムなど、熟練オペレータの作業効率や仕上がりの精度を上回るICT油圧シヨベルシステムの実現に向けた研究に取り組んでいる。

あとがき

ICT油圧シヨベル用システム開発として、オペレータの操作をアシストするマシンコントロール技術の開発に取り組んでいる。

今後、さらにこのシステム開発力に磨きをかけ、顧客へのシステム提案力を強化するとともに、そのシステムに最適化した機器開発を行い、油圧シヨベルをはじめとする産業車両の性能向上・機能向上に貢献していく。

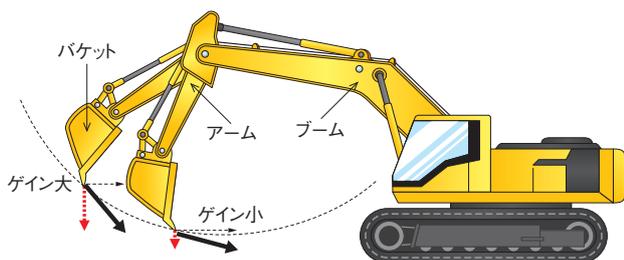


図5 油圧シヨベル姿勢に応じたブーム制御の補正
Fig. 5 Boom control correction based on hydraulic excavator posture



村岡 英泰



弓達 陽治



中川 仁



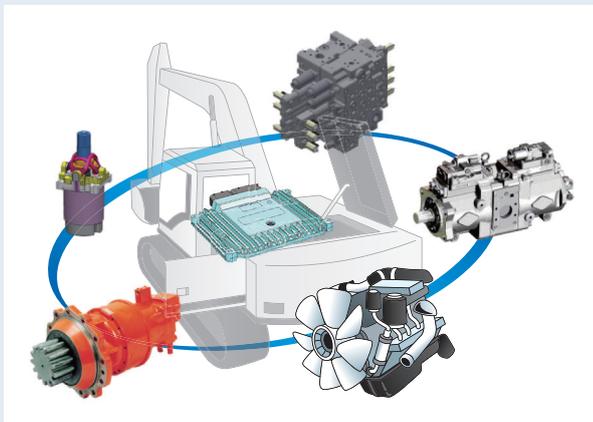
陵城 孝志



能勢 知道

情報化施工を実現するICT油圧ショベル用コンポーネントの開発

Development of Components for ICT Hydraulic Excavators That Enable the Realization of Computer-Aided Construction



松尾政浩① Masahiro Matsuo
 吉村勇② Isamu Yoshimura
 東出善之③ Yoshiyuki Toude
 清水博明④ Hiroaki Shimizu
 西嶋康人⑤ Yasuhiko Nishijima

近年、建設業就業者の高齢化や熟練者の離職などによる労働力不足が建設現場の深刻な課題となっており、ICT/IoT技術などを活用したi-Constructionによる建設産業の効率化の取組みが進められている。この情報化施工に対応するマシンコントロール（半自動/全自動）機能を備えたICT油圧ショベル用の油圧機器や制御機器の開発に取り組んでいる。

Recently, a shortage of labor mainly due to the aging of construction workers and resigning of skilled workers is becoming a serious issue at construction sites, and the construction industry is making efforts to boost its efficiency by utilizing i-Construction, which uses ICT (Information and Communication Technology) and IoT (Internet of Things) technology. Kawasaki is developing hydraulic components and control devices for ICT hydraulic excavators equipped with the machine control (semi-automatic and full-automatic) functions that support computer-aided construction.

まえがき

建設現場では建設業就業者の高齢化による労働力不足や熟練オペレータ不足が深刻な課題となっており、この対策としてICT/IoT技術などを活用したi-Constructionによる建設産業の効率化や施工品質確保の取組みが進められている。

1 背景

油圧ショベルは建設機械の主力機としてさまざまな建設現場で活躍している。近年では、建設機械メーカーは情報化施工に対応したマシンコントロール（半自動/全自動）機能を備えた油圧ショベルを開発しており、そのためには動作制御を電子化する必要がある。当社では、油圧機器の電子制御化やICT油圧ショベルに対応した電子制御機器などの製品を開発している。

2 製品開発コンセプト

(1) 油圧ショベルと情報化施工

油圧ショベルの掘削・旋回・走行などの動作を行う各アクチュエータは、コントロールバルブを介して油圧ポンプに接続されており、オペレータのジョイスティック操作に

応じて作動する。当社の油圧機器は多くのショベルに搭載され、制御性や信頼性において高い評価を得てきた¹⁾。

当社の顧客である建設機械メーカーでは、情報化施工に対応したICT油圧ショベルの市場投入を始めており、さらなる施工の効率改善や品質向上の実現に向けて開発を進めている。たとえば、掘削するバケットを直線的に動かすためには、バケット・アーム・ブームを同時に微妙に操作する必要があり、この操作には熟練した技量が要求される。しかし、ICT油圧ショベルを使用することで、経験年数の少ないオペレータでも熟練オペレータと同等の施工品質が確保できるようになる。また、安全性に関する機能も付加できるようになる。

(2) 要求性能

ICT油圧ショベルに搭載する油圧ポンプやコントロールバルブは電子制御化に対応する必要がある。これらの機器を電子制御化し、コントローラからの指令信号を油圧信号に変換して正確かつ応答良く各アクチュエータを作動させるだけでなく、さまざまな負荷条件において安定した性能を発揮させる必要がある。また、コントローラには、高機能かつ高性能な制御の実現に必要な大量の情報処理や制御演算に対応できるマイコンシステムが要求される。さらに、多数の電磁比例減圧弁を駆動させることで駆動回路からの発熱が増大するため、熱への対策も必要となる。

情報化施工に完全には対応していない建設現場では、オペレータによって操作された電気ジョイスティックによりショベルを稼働させることも必要であり、電気ジョイスティックには従来の油圧パイロット弁と同等以上の性能および信頼性が要求される。

3 開発内容

(1) 油圧ポンプ

油圧ポンプは、油圧システムにとって心臓の役割を担っているため、高効率・低騒音であることに加えて高い信頼性が求められる。当社では、最新の技術を結集して性能と信頼性を大幅に高めた図1に示す「K7Vシリーズ」ポンプを2015年より上市している。

ICT油圧ショベルにおいては、油圧ポンプも電子制御化が必要であり、吐出容量を制御するレギュレータに電磁比例減圧弁を搭載した。コントローラから出力される指令に対して、コントロールバルブと組み合わせて油圧ポンプの吐出流量を高精度に制御することで油圧シリンダや油圧モータの微細な動きを制御しており、また余剰な吐出流量を少なくすることで燃費低減にも効果を発揮している。

現在、建設機械メーカーでは複雑化するシステム開発に対して試作検討段階からモデルベース開発の取組みが進められている。当社が有する高いシミュレーション技術と豊富な実験データを基に開発したポンプシミュレーションモデルを提供することで、建設機械メーカーでのICT油圧ショベルなどのフロントローディング開発に貢献している。

今後マシンコントロールが高度化されICT油圧ショベルの導入が進展するにつれて、油圧機器の稼働状況をモニタリングする機能が求められる。当社では、建設機械特有の高温で劣悪な環境下においても、安定してポンプ稼働状態を高精度に検出できるセンサおよび稼働状況モニタリング技術の開発を進めており、将来考えられる故障検知などのさまざまなニーズへの対応を図っている。

(2) コントロールバルブ

ショベル用のコントロールバルブは、ショベルの動きを総合的に制御する図2に示すような複合弁である。油圧パ



図1 ショベル用油圧ポンプ「K7V125DTP」
Fig. 1 Pump for excavators K7V125DTP

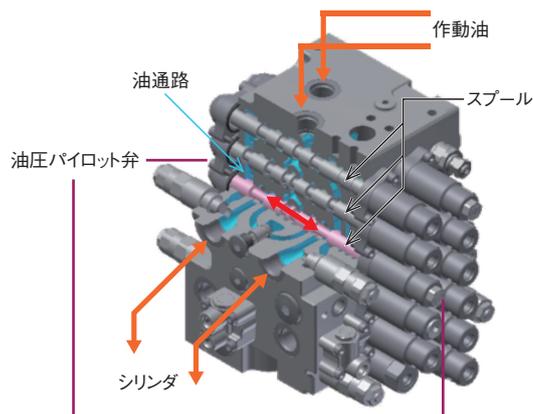
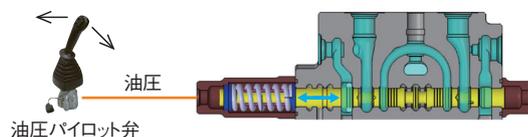


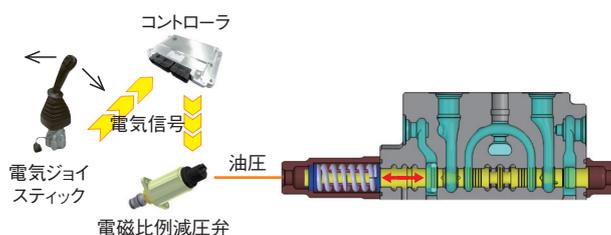
図2 ショベル用コントロールバルブ
Fig. 2 Control valve for excavators

イロット弁からの操作指令圧力に応じて内部のスプールが作動して内部の油通路を切り換え、ポンプが吐出した作動油を、走行や旋回などの油圧モータあるいはブーム・アーム・バケットなどを駆動する各シリンダに振り分ける。また、スプールの移動量によって油通路の開度を変化させて各アクチュエータの速度を調整する役割を持ち、微少動作や複数のアクチュエータの連動動作などショベルが意図したとおりに動くように高い制御性能が要求される。

ICT油圧ショベルは、自動化・操作性向上・燃費低減などを目的としている。それらを実現するためにコントロールバルブには電子制御化や制御性能向上が必要となり、後述する電磁比例減圧弁をコントロールバルブに搭載して、図3に示すように従来の油圧パイロット弁で駆動していたスプールなどの内部部品を電磁比例減圧弁で駆動することで対応した。ただし、技術課題が何点かあり、代表的なものとして、①従来と同等以上の応答性を確保すること、②コントロールバルブ1台あたり約20個必要となる電磁比例



(a) 油圧パイロット弁によるスプール制御



(b) 電磁比例減圧弁によるスプール制御

図3 スプールの制御方式
Fig. 3 Spool control types

† 油圧ショベルを中心に建設機械に広く採用され、近年の市場要求である高効率・低騒音・コンパクト・高信頼性を実現した油圧ポンプ。

減圧弁を搭載して、それらに一次圧を供給する通路とドレン通路を構成することがある。これらに対し、応答性が悪くならないように必要な通路面積を確保しつつ短い通路で電磁比例減圧弁前後の通路を構成して通路内部のエアを抜き易くするとともにコスト削減のためコンパクトに配置するよう設計した。

電磁比例減圧弁を搭載した各種コントロールバルブとして、中型ショベル向けの従来コントロールバルブに電磁比例減圧弁を搭載したモデルは開発を完了しており、大型ショベル向けなどについても開発中である。

現状開発中のモデルは、従来の油圧パイロット方式のモデルをベースとしているが、将来的には電子制御専用の最適バルブを開発していく。

(3) カートリッジ型電磁比例減圧弁²⁾

カートリッジ型電磁比例減圧弁の機能は指令値の電流に比例した制御圧力を出力するもので、コントロールバルブに直付けしてそのスプールのストロークを制御する。コントロールバルブの性能を左右するキーコンポーネントであり、優れた制御性が求められる。また、コントロールバルブ1台当たり複数の電磁比例減圧弁が搭載され、その内一つでも故障するとショベルが機能を果たせなくなるため、過酷な環境で長期間使用しても故障しない高い信頼性と耐久性が必要となる。

情報化施工ではショベルを自動制御するため、コントロールバルブを制御する電磁比例減圧弁の性能が特に重要となる。このため、ソレノイドの磁気回路設計の最適化や摺動部品の摩擦係数を低減する工夫を盛り込むことで、図4に示すようにヒステリシスの低減や出力特性のばらつき低減および再現性の向上を実現した。

電磁比例減圧弁で多く見られる故障原因は、水の侵入によるソレノイドのコイル断線と作動油中のコンタミによるスプールの固着である。コイル断線対策として、ソレノイドのコイルモールドの材料や防水シール構造を工夫し、高い防水性を確保した。コンタミ対策として、作動油中のコンタミがスプールの摺動部に到達するのを防ぐため、バル

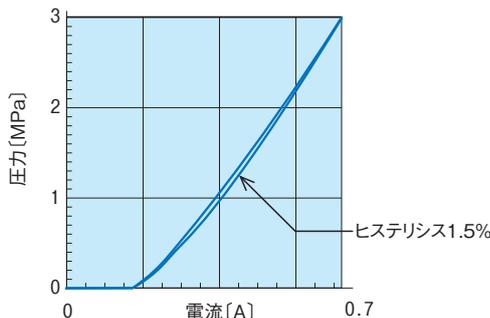


図4 ヒステリシスの低減(代表特性)
Fig.4 Reduction of hysteresis (representative characteristic)

ブの外側にフィルタを設置した。また、コントロールバルブ側の通路設計に影響を与えないようにするため、図5に示すような非常に薄型のフィルタを専用設計した。

(4) コントローラ

ICT油圧ショベルなどにおいて、ショベルを電子制御するマシンコントロールは、操作性と安全性が向上するとともに燃費も低減する。これを実現するために、コントローラは油圧機器の性能を最大限に引出すと同時にショベルを制御して複雑な動作を実現する必要がある。このため、コントローラに内蔵するマイコンには、センサやスイッチからの入力信号・電磁比例減圧弁や電磁切替弁への出力信号・制御・通信などの大量の情報やロジックを素早く処理する能力が要求される。そこで、図6に示すようなデュアルマイコンシステムを採用した。

このシステムは、従来1台のマイコンで対応していた入出力信号処理・ショベル制御処理・通信処理を2台のマイコンで分担し、制御プログラム作成を容易にするとともに処理量の増大によるマイコン能力超過を抑制している。また、マイコン同士で協調しながら動作するように双方を高速通信回路で接続している。

コントローラは多数の電磁比例減圧弁を駆動する。電磁比例減圧弁駆動に伴う電子回路の発熱は電子部品を劣化させるので、寿命を縮めたり故障の原因になったりする。このため、コントローラには、発熱を抑えた回路基板と基板から筐体へ効率よく伝熱する構造が必要となる。

そこで、低発熱回路を新規設計して発熱源を減らすとともに、図7に示すように発熱源となる基板実装部品から筐



図5 カートリッジ型電磁比例減圧弁の外観
Fig.5 Appearance of cartridge type proportional pressure-reducing valve

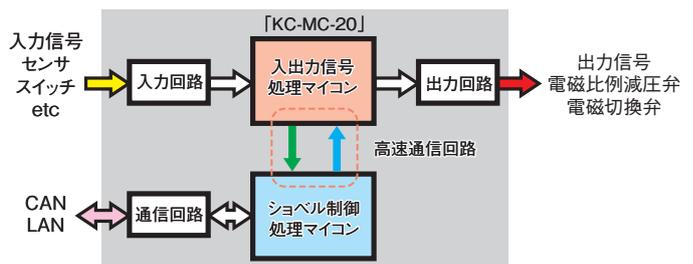


図6 デュアルマイコンシステム
Fig.6 Dual microcomputer system

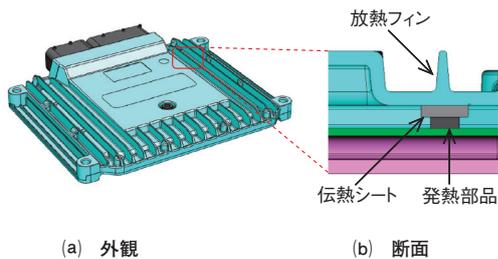


図7 筐体放熱構造
Fig. 7 Heat dissipation structure of case

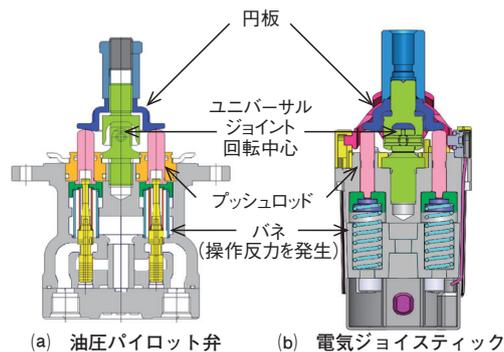


図9 レバー復帰構造の比較
Fig. 9 Comparing lever return mechanisms



図8 電気ジョイスティック「ERU2-7.0」の外観
Fig. 8 Appearance of electric joystick ERU2-7.0

体に伝熱させて筐体の放熱フィンから放熱する構造とした。

(5) 電気ジョイスティック

レバーと角度センサをスライドリングで連結してレバー傾倒角度を検出する構造を採用しており、オペレータが手を離すと内部のスプリングによって、図8のように中立位置へ復帰する構造となっている。その構造および各部品には、過酷な環境下での使用に十分に耐えられるように、さまざまな設計上のノウハウを盛り込んでいる。

(i) レバー復帰構造

従来のショベルで使用されている当社の油圧パイロット弁では、30年以上にわたってトップシェアを維持してきた。電気ジョイスティックは、図9に示すように同様のレバー復帰構造を採用しており、その優れた操作性と高い信頼性・耐久性を継承している。

(ii) 角度センサ

レバー操作角度を電気信号に変換する最重要部品である角度センサには高い信頼性が求められるため、ホールセンサを用いた非接触構造および密閉構造を採用することで高い耐久性と防水性を実現している。また、センサを含む電子回路の最適化により優れた耐ノイズ性も実現した。

(iii) 小型化

より小型の電気ジョイスティックが求められているが、

単に小型化しただけでは強度が下がり耐久性や信頼性が損なわれてしまう。そこで、設計諸元を最適化して従来の油圧リモコン弁と同等以上の耐久性や信頼性を確保しながら小型化を実現した。

あとがき

ショベルをはじめ多くの建設機械において情報化施工対応が進んでおり、建設現場の施工方法も変わりつつある。

油圧技術と電子制御技術を融合することで、今回開発したコンポーネント以外でも、将来進化したショベルに最適な製品の開発を行っていく。

参考文献

- 1) 吉川, 村岡, 赤松, 松尾, : “油圧ショベル用最新油圧機器”, 川崎重工技報, No.168, pp.14-19 (2009)
- 2) 特許 第6200695号, “油浸型ソレノイド”



松尾 政浩



吉村 勇



東出 善之



清水 博明



西嶋 康人

大型プレス用油圧システムの開発

Development of a Hydraulic System for Large Press Machines



三井 広明① Hiroaki Mitsui
 松田 憲英② Kazuhide Matsuda
 服部 智秀③ Tomohide Hattori
 正岡 孝一④ Kouichi Masaoka

航空機需要の増加が見込まれる中、航空機や電力プラント向けを中心とした大型鍛造部品の国産化を目的とした最新鋭大型プレスが開発・導入され、日本エアロフォージ社で2013年4月より稼働開始した。

当社は、その心臓部となる油圧システムの開発を担当し、過去に類を見ない高圧・大流量油圧システムの構築とその駆動源となる高圧大容量ポンプを開発した。

While the aircraft demand is expected to increase in the aircraft industry, and cutting-edge large press machines have been developed and deployed with the purpose of domestically producing large forged parts mainly for aircraft and power plants. Amid such a situation, Japan Aeroforge, Ltd. began operating a large press machine in April 2013.

Kawasaki was in charge of developing a hydraulic system, which constitutes the core part of the machine, and developed a hydraulic system having unprecedented high pressure and large flow rate and a high-pressure, large-capacity pump, which serves as a drive source for the hydraulic system.

まえがき

グローバル化が進展する中、民間航空機に関する市場予測によると、航空旅客需要は中東やアジア・太平洋地域などの牽引により今後20年間で約2.4倍に拡大し、それに伴いジェット旅客機の運行機数も倍増が見込まれている。

1 背景

国内鍛造メーカーの保有する大型鍛造プレスは、原子力発電用圧力容器や発電タービン部材およびクランクシャフトなどの製造用途として、加圧能力であるその出力は最大1～1.5万tであった。一方、チタンやニッケル材などの航空機用大型鍛造部品の製造にはさらなる高出力のプレスが必要とするため、その製造は海外鍛造メーカーの一部に全面的に依存していた。航空機需要の増加が見込まれる中、国内航空機産業の国際競争力強化のため、大型鍛造部品の国産化を目的として、素材メーカー、機体・エンジンメーカー、商社の出資により日本エアロフォージ社が2011年に設立され、世界最大級となる5万トン油圧鍛造プレス（5万トンプレス）を開発¹⁾することとなった。

この5万トンプレスの開発において、当社は高圧・大流量油圧システムの構築および駆動源となる高圧大容量ポンプの開発を担うこととなった。

2 開発概要

5万トンプレスは、チタンやニッケル材といった変形させるための荷重が大きい材料を、プレススライドに取り付けた金型に合わせて図1に示すような複雑な形状に鍛造する型鍛造プレスである。このため、最大出力を5万tとする以外にも以下の機能が必要である。

- ① 加圧速度は、微速から高速に至る幅広い速度域で任意に設定可能であり、材料のひずみ特性や金型内の流動性に応じた最適な加圧速度パターンを設定できる。
- ② プレススライドの平行度を精密かつ高応答に制御することで、スライド中心に対して偏心荷重が発生するような非対称な製品の鍛造もできる。

大型プレス用油圧システムの当社実績は1.5万トンプレ



図1 5万トンプレスによる大型鍛造品
 Fig.1 Large forged parts produced with 50,000-ton press

ス用が最大であり、5万トンプレス用油圧システムは圧力および制御流量範囲とも過去最大であった。さらに、大型プレスとしては過去最高の応答性と制御精度が求められた。これらを達成するため、システム全体の高圧化・最適油圧システムおよび制御ロジックの構築・油圧ポンプの高応答化などに取り組むこととした。

3 油圧システムの開発

(1) 高圧・大流量化

(i) 高圧化

油圧システムの圧力仕様は45MPaと、プレス用システムでの当社実績である35MPaを大きく超えた。このため、油圧ポンプをはじめとする各種油圧機器や油通路を形成するマニホールドや継手類の高圧化が必須となった。図2に示すような大型マニホールドは、最大重量8t超など数量・総重量とも従来にない物量となったが、FEM解析による最適油通路の設計により、圧力45MPaにおける強度を確保しつつコンパクト化を図った。

(ii) 大流量制御

油圧システムが大規模となり配管が長くなるため、プレス速度の加減速や動作反転に伴う急激な流量変化があると、タンクへの戻り管路にオイルハンマーと呼ばれる衝撃が発生することが予想される。オイルハンマーはプレス本体の振動や配管破損の原因となるため、オイルハンマー緩和を目的に、要所に緩衝器（窒素ガスを封入した小型油タンク）を配置した。図3に示すようにタンク戻り配管の流体解析により、圧力の挙動を確認し、緩衝器の最適な配置を検証した。

(2) 加圧速度制御

プレス加圧速度は微速から高速に至る幅広い速度域が要求されるため、油圧システムとしては最小1~2L/minから最大10,000L/minを超える幅広い範囲での流量制御を実現する必要があった。また、材料のひずみ特性や金型内の

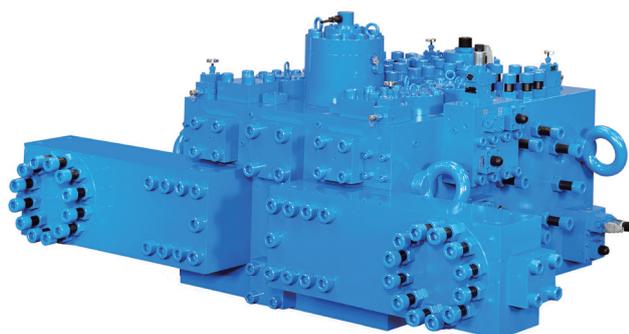


図2 大型マニホールド
Fig.2 Large manifold

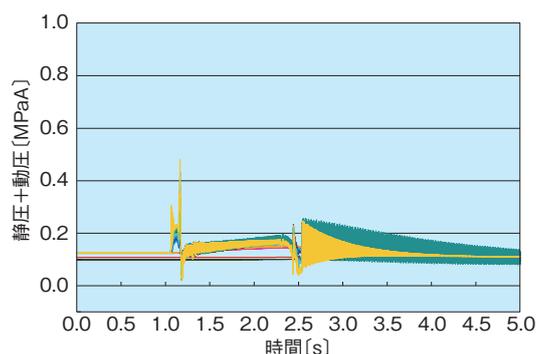


図3 緩衝タンク設置による戻り配管圧力解析例
Fig.3 Example of analyzing return piping pressure with buffer tank

流動性に応じた最適な加圧速度を実現するため、5万tという超大型プレスでありながら、中小型プレス並みの応答性と制御性が必要であった。そのため、プレス加圧速度を制御する油圧ポンプは、大容量かつ高応答・高精度な流量制御機能を有する必要がある。また、最小流量1~2L/minとなる加圧速度領域は、サーボモータを用いた回転数制御によるポンプ吐出量制御「エコサーボ」を採用し、微速領域専用とすることで実現した。

(3) 平行度制御

材料や金型の形状および型内の流動によってプレススライドは偏心荷重を受ける。そこで、鍛造品の形状確保・プレス本体の保護・加熱回数の低減のため、スライドテーブルの平行度確保が必要となる。

平行度制御は、プレス加圧シリンダに対抗して、プレススライドの4点に配置された引戻シリンダの圧力を個別に制御する方式を採用することとした。図4のように偏心荷重 F_m が作用するとスライドテーブルが傾こうとする。このとき、スライドテーブルの4点に配置された引戻シリンダ1~4によって、プレス成形方向に対抗する力 F_1 ~ F_4 を発生させ、偏心荷重をキャンセルすることで平行度を保つこととした²⁾。平行度の制御能力は、対抗力の総和

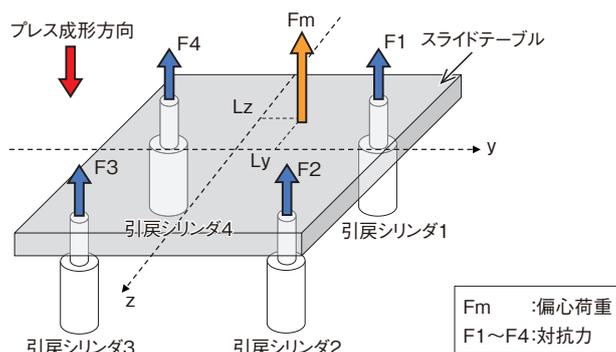


図4 対抗力と偏心荷重
Fig.4 Opposing force and eccentric load

で決まるが、最大加圧力5万tを確保するため、プレス可動部重量相当とした。

(4) 油圧システム評価試験

前述した対策・制御および後述する新規開発ポンプを搭載した油圧システムを開発した。個々の油圧機器については5万トンプレスでの使用条件を満足する仕様であり、当社設計思想に基づいて選定の上、油圧回路や油圧ユニットを設計している。

しかし、これまで適用実績のない高圧・大規模なシステムであり、想定できない不具合が発生した場合にはシステム停止による2次損害など影響が多くなる恐れがある。このため、油圧システム全体構成・作動油・負荷・サイクルなど5万トンプレスでの稼働と同じ条件・環境での長時間耐久評価を実施することとした。実際に5万トンプレスに搭載する油圧装置は、図5に示す大型ポンプユニットなどになるが、評価する装置は実機と同じ機器・回路構成で構成し、小型化した油圧ユニットを準備した。耐久性を確認した試験データを図6に示す。

これら油圧システム全体での実機稼働条件を模擬した評価試験を実施することで、機器単体での仕様・評価実績では確認できない問題点を納入前に抽出することができた。さらに、その問題点に対して油圧機器を改良することで、油圧システム全体の信頼性を確認することができ、完成度の高い状態で現地へ納入した。

4 高圧・大流量ポンプの開発

5万トンプレスの要求仕様を満足するためには、油圧ポンプも高圧・大流量に加えて高精度システムに対応する必要がある。当社では従来から大流量ポンプとして斜軸型ポンプを有しているが、その定格圧力は35MPaであり、今回の要求仕様である45MPaには対応できない。また、斜軸型ではその構造上の問題により、傾転変化のさらなる高応答の実現が困難であることなどから、油圧業界や当社でも主流である斜板型ポンプとして開発することとした。

開発したポンプの仕様を表1に、構造を図7にそれぞれ示す。前述のように高応答に対応するとともに、高圧・大流量・効率向上に対応するため次のような開発を行った。

(1) 高圧化

定格45MPaという高い圧力に耐えるには従来の定格35MPaに比べてより高い強度が必要であり、そのために材質および構造の両面に対応した。ポンプの主要部であるロータリー部においては、これまでの当社の標準的なポンプ主要部の材質はシリンダには炭素鋼またシューには銅合金を使用しているものが多いが、FEMなどの強度計算によりシリンダおよびシューに合金鋼を適用することとし

表1 ポンプの仕様
Table 1 Specifications of pump

型式		[K7VG500]
押しのけ容積 [cm ³]		500
回転数 [min ⁻¹]	定格	1,200
	自吸最高	1,350
吐出圧力 [MPa]	定格	45
	最高	50
制御方式		サーボ弁制御方式
ポンプ傾転ステップ応答		0.1sec以内 (0⇔100%)

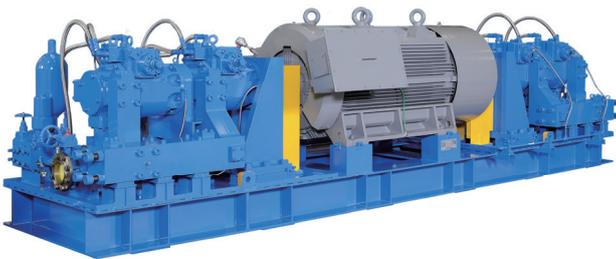


図5 納入した大型ポンプユニット
Fig. 5 Delivered large pump unit

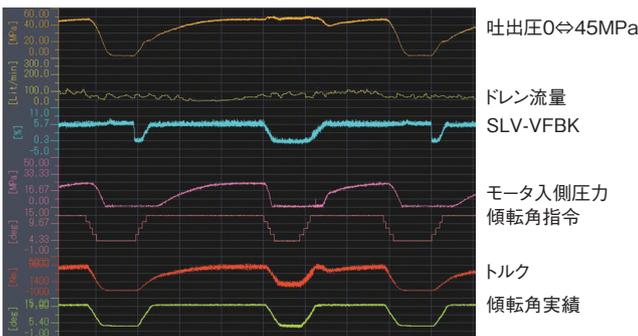


図6 実機模擬試験データ
Fig. 6 Simulation test data with actual machine

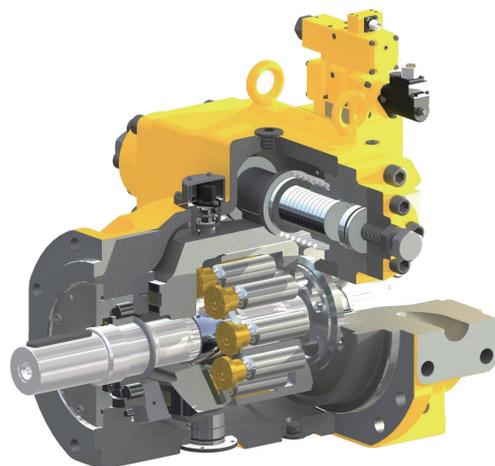


図7 ポンプの構造
Fig. 7 Construction of pump

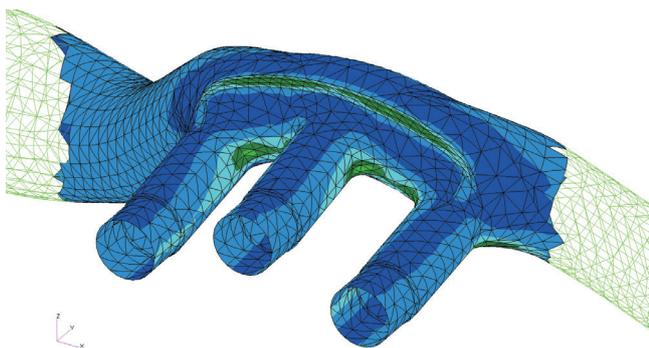


図8 FEM解析例 (バルブカバー油通路部の応力)
Fig. 8 Example of FEM analysis (stress in valve cover oil passage)

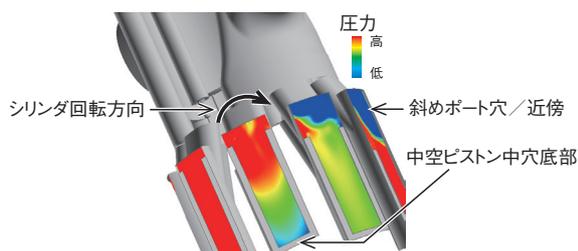


図9 CFD解析例 (ピストン・シリンダ部の圧力状態)
Fig. 9 Example of CFD analysis (pressure in piston and cylinder)

た。また、ポンプの吐出ポートがあるバルブカバーには、当初はその加工性も考慮した鋳物材料の適用を検討していたが、これも強度計算により高強度な球状黒鉛鋳鉄を適用することとした。さらに油通路部の形状については図8のFEM解析例に示すように形状を工夫することで、約30%の応力低減を実現した。

(2) 大流量化

大流量化に対応するため、ポンプの押しのけ容積を 500cm^3 また定格回転数を $1,200\text{min}^{-1}$ としたが、それを実現するためにはポンプの吸入能力を高くする必要がある。そのためCFD解析により大流量時においても圧力損失を最小にし、吸入部での油の流れを最適にして吸入能力を高めている。また、ポンプの内部においても、各部での圧力分布や流れを高圧・大流量を含む種々の運転条件で最適にするために、各部位ごとのCFD解析で形状を決めている。図9は稼働時のピストン・シリンダ部の圧力変化を示しており、圧力低下し負圧の発生する箇所を特定を行い、負圧発生を抑える形状に変更した。

(3) 効率向上

高圧・大流量であり、ポンプを動かすエネルギーも非常

に大きなものとなるため、ポンプはその効率が高い方が良い。このため、内部の通路での圧力損失を低減させることやポンプ内部の漏れを適正にするためのCFD解析、さらにはポンプ内部での圧力の上昇/下降を最適にし損失を極少にするためのシミュレーションなどを実施した。

さらにポンプ効率を開発段階で予測する技術も確立しており、今回も適用している。これは、内部部品の各諸元・作動油の特性値・しゅう動部での温度上昇値を基に運転時の効率を予測するものである。

あ と が き

5万トンプレスは2013年4月の稼働開始以来、安定操業を続けており、日本エアロフォージ社においては航空機部品製造の認証取得の後、順次2014年より機体部品・着陸装置部品・航空機エンジン部品の量産化を開始している。産業機械分野は、ますます高出力化や高応答化などの要求が高まることが予想され、今後も市場のニーズに応えるべく、製品開発に取り組んでいく。

「K7VG500」はNEDO助成事業において開発した成果であり、関係者に感謝の意を示す。

参 考 文 献

- 1) 服部：「鍛圧機械用高圧大容量油圧機器について」, 油空圧技術, Vol.57, No.1, pp.43-49 (2018)
- 2) 桑野：「超大型鍛造プレス油圧システムの概要」, 日本フルードパワーシステム学会ウィンタセミナー「大型機械と油圧技術」(2014)



三井 広明



松田 憲英



服部 智秀



正岡 孝一

モバイル分野向け油圧ポンプ「K3VLSシリーズ」の開発

Development of K3VLS Series Hydraulic Pumps for Use in Construction and Agricultural Equipment



三浦 秀俊① Hidetoshi Miura
 平野 靖典② Yasunori Hirano
 松久 幸司③ Koji Matsuhisa
 中井 大介④ Daisuke Nakai
 池澤 行雄⑤ Yukio Ikezawa
 今村 嘉秀⑥※ Yoshihide Imamura
 加野 大地⑦* Daichi Kano
 相部 徹⑧ Toru Aibe
 高橋 正憲⑨ Masanori Takahashi

ホイールローダやトラクタなどショベル以外の建設機械や農業機械が活躍するモバイル分野向けとして、顧客から求められる性能・信頼性とコスト低減を両立させた中圧仕様ポンプ「K3VLSシリーズ」を開発した。本ポンプは、顧客から高い評価を得てさまざまな機械への採用が進んでいる。

Kawasaki has developed the new K3VLS series of medium pressure pumps for use in construction and agricultural equipment, which are effectively deployed worldwide. These pumps have achieved customer requirements for both performance and reliability as well as cost reduction, and have been highly rated by customers and applied to various machines.

まえがき

地球温暖化や世界人口の増加などの社会的要因を背景に、社会インフラの構築や食料生産といった人々の生活に欠かせない建設機械や農業機械には、環境負荷低減や自動化・高機能化などさまざまな対応が求められている。

1 背景

当社では、これまで建設機械の中でもショベル用油圧ポンプを主力製品のひとつとして位置づけて、社会や顧客のニーズを盛り込みながら製品改良を重ね¹⁾、同分野でのシェアを伸ばしてきた。

さらなる事業規模拡大に向け“世界標準”のモーションコントロールメーカーを目指して、欧米市場を中心に形成されるショベル以外の建設機械や農業機械の分野であるモバイル分野への本格参入を図っている。

2 製品コンセプト

ショベルおよびモバイルの両分野で求められる油圧ポンプの仕様とニーズを表1に示す。

モバイル用油圧ポンプへの要求仕様は、ショベル用油圧ポンプと異なっており、当社のショベル用をベースとした

従来製品では競合製品に対し、たとえば、高速回転性能や価格の面で競争力が不足していた。

このため、ショベル用ポンプの開発で培ったさまざまな技術をベースとして、主にロードセンシングシステムを採用しているモバイル分野の機械の仕様に適合させた新型中圧仕様ポンプ「K3VLSシリーズ」を開発することとした。

3 「K3VLSシリーズ」の構造と技術課題

(1) 「K3VLSシリーズ」の構造と特徴

当社製ショベル用ポンプと比較してシンプルな構造に設計した「K3VLSシリーズ」ポンプの構造を図1に示す。本ポンプでは、大量生産技術の適用によるコスト低減を志

表1 油圧ポンプに要求される仕様とニーズ
 Table 1 Required specifications and demands for hydraulic pumps

項目	ショベル分野	モバイル分野 (LSシステム用)
効率・信頼性	◎	◎
システム圧力	◎	○
制御性	◎	○
低騒音	◎	◎
高速回転	○	◎
省スペース	○	◎
低コスト	◎	◎

(注) LS：ロードセンシング、要求の強さ：◎>○

18 ①② 精密機械・ロボットカンパニー 精密機械ビジネスセンター 技術総括部 機器第一技術部 ※博士（工学）

③ 精密機械・ロボットカンパニー 精密機械ビジネスセンター 技術総括部 原価企画部 *技術士（機械部門）

④ 精密機械・ロボットカンパニー 精密機械ビジネスセンター 技術総括部 技術企画部

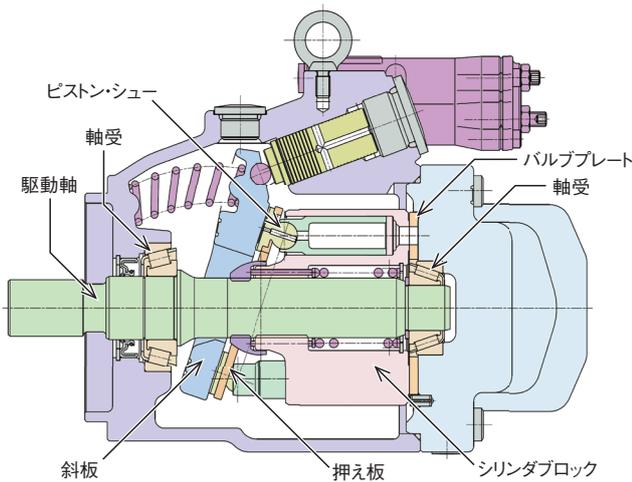


図1 「K3VLSシリーズ」ポンプの構造
Fig. 1 Structure of K3VLS series pump

向し、性能・信頼性も優れたピストン・シューなどを新たに適用することで、当社製モバイル用ポンプの従来機種である「K3VLシリーズ」と比較して部品点数で10%、質量で20%もの低減を実現した。

「K3VLSシリーズ」ポンプの作動原理は、シヨベル用ポンプと同じである。シリンダブロックと共に回転するピストン・シューがシリンダブロック穴に対して相対的に往復運動することで、ポンプは作動油の吸入・吐出を連続的に行っている。

(2) 「K3VLSシリーズ」開発における技術課題

モバイル分野は、一般に実機におけるポンプ搭載スペースが狭いため、コンパクトな小容量ポンプを高速回転条件で使用することが多いといった特徴がある。その中でも、モバイル用油圧ポンプの開発における最大の課題は、シヨベル用ポンプと同等の性能や信頼性を確保しつつ、低水準の価格で提供しなければならないことであった。競争が激しいモバイル分野でシェアを拡大するためには、この相反する2項目を解決する必要がある。

そこで、高速回転化への対応およびコスト低減のための生産性向上に取り組んだ。

4 技術課題への対応

(1) 高速回転化への対応

(i) 自吸能力向上

油圧ポンプを高速で回転させると、流速が増大し油圧ポンプの通路内にキャビテーションが発生しやすくなる。キャビテーションがシリンダブロック内部に生じると、ポンプの吐出流量が減少する、つまりポンプの自吸能力が低下する。さらにキャビテーションの発生・消滅が繰り返されると部品が壊食される場合があり、モバイル用油圧ポンプ

の性能・信頼性を確保するうえでキャビテーションの抑制は重要な課題の一つである。

そこで油圧ポンプにおけるキャビテーションの発生を予測するため、図2に示すようなポンプ内部流れのシミュレーション技術の高度化を図った。キャビテーション抑制に有効な内部通路形状を設計段階から検討し、自吸能力が優れたポンプを手戻りなく開発することができた。

(ii) ロータリ安定性向上

ポンプの内部部品を安定して高速回転させるためには、各部品に働くさまざまな力や潤滑状態を正確に理解する必要がある。しかし、部品間に存在する油膜の特性把握が容易ではなく、さまざまな設計パラメータの影響が複雑なために検討は簡単ではない。そこで、ポンプ内部部品の挙動に関わる接触・変形・油圧力などの力学的要素を考慮した図3に示す機構解析技術を「K3VLSシリーズ」の設計段階で適用した。

一例として、高速回転時におけるシューの挙動について述べる。シリンダブロックと共に回転するピストン・シューは、回転による慣性力や作動油の粘性力などによる斜板からの浮き上がり力を受けている。性能・信頼性に影響を及ぼすシューの浮き上がり現象を抑制するため、押え板によって機械的にシューを斜板へ押さえつけている。ここで、

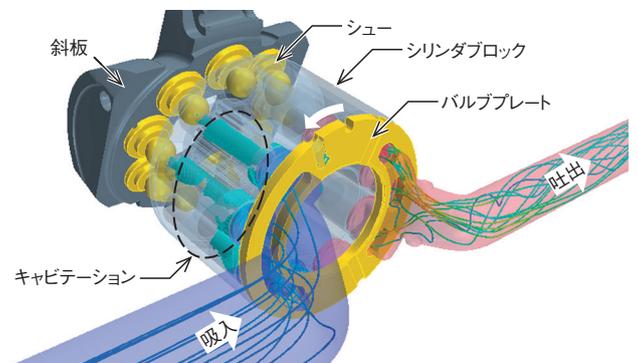


図2 ポンプ内流れの流体シミュレーション
Fig. 2 Fluid dynamics simulation inside the pump

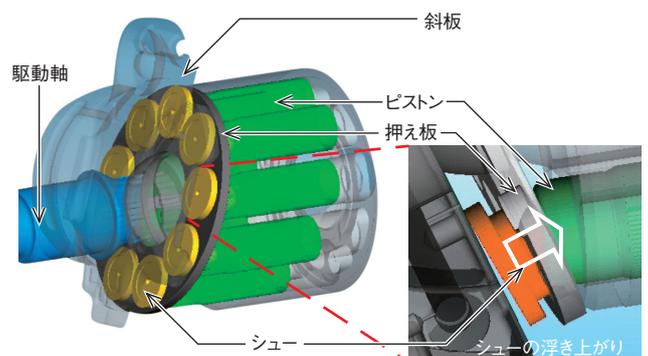


図3 機構解析
Fig. 3 Multibody dynamics simulation

回転数が高くなるにつれて増加するシューの浮き上がり力が押え板の力を上回ると、シューは斜板から浮き上がってしまうことになる。

機構解析を用いて、シューの斜板からの浮き上がり量を検討した結果、図4に示すようにポンプ実体での計測結果とよく一致していることを確認した²⁾。

本解析技術は、「K3VLSシリーズ」をはじめとした当社製油圧ポンプでのシュー押し付け機構の設計や押え板の形状適正化検討に適用している。

(2) ピストン・シューの生産性向上（コスト低減）

(i) 「K3VLSシリーズ」用ピストン・シューの構造

従来、当社製シヨベル用ポンプで使用するピストンとシューについては、図5(a)に示すようにピストンを凸球面、シューを凹球面とする構造を採用してきた。一方「K3VLSシリーズ」では、要求仕様の下でピストンに必要な性能・信頼性を維持しつつ、加工レスによる大幅な生産性向上を可能とする構造として、図5(b)に示すように凹凸を逆転させたピストン・シューの構造を採用した。

この構造変更により大量生産によるコストダウンを志向した新たな生産技術が適用可能となり、「K3VLSシリーズ」用ピストン・シューの生産性向上に大きく寄与している。

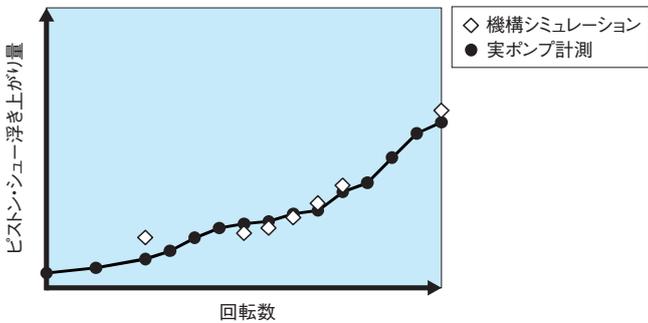


図4 シュー浮き上がりのシミュレーション結果
Fig. 4 Simulation results of shoe floating

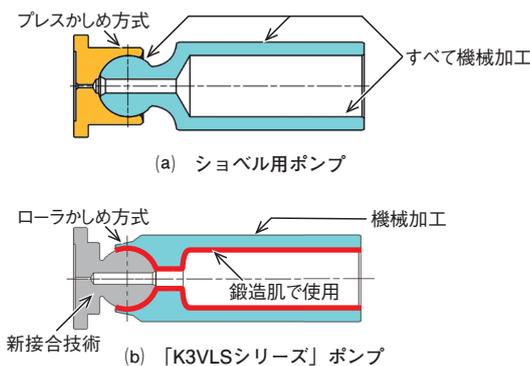


図5 ピストン・シューの構造
Fig. 5 Structure of assembled piston and shoe

(ii) ピストン素材の冷間鍛造化

「K3VLSシリーズ」ポンプのピストンでは、図6に示すように凹球面を含めピストン内面すべてを冷間鍛造による形状のまま使用しており、加工時間を大幅に短縮した。なお、シューとしゅう動するピストン凹球面に必要な形状・精度を確保するため、冷間鍛造におけるさまざまな鍛造パラメータを最適化している。

(iii) 鋼球と鋼板の新接合方法

シューの球部と板部の接合方法として、図7に示すように鋼球と鋼板を加圧接触下で接合させる新工法を開発した。これにより、市販されている安価で高精度な鋼球を凸球部に使用することが可能となり、高精度球面加工および仕上げの廃止による加工時間の大幅削減を実現した。

(iv) ローラかしめ

シヨベル用ポンプのピストン・シューでは、プレスを用いてピストン球部にシューをかしめていた。一方「K3VLSシリーズ」では、ローラを用いてシューにピストンをかしめる工法を採用した。

図8に示すように回転させたピストンの先端部を3つの



図6 鍛造ピストンの高精度内面
Fig. 6 High-precision inner surface of forged piston

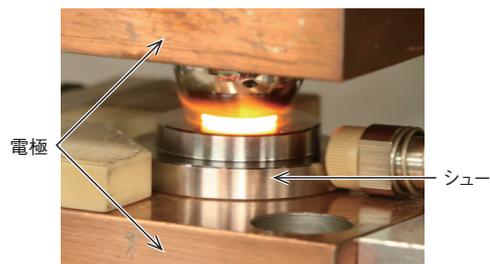


図7 鋼球と鋼板の新接合方法
Fig. 7 New method for bonding steel ball and steel plate



図8 ローラかしめによるピストンとシューの結合
Fig. 8 Joining of piston and shoe by roller caulking

表2 「K3VLSシリーズ」ポンプの仕様
Table 2 Specifications of K3VLS series pump

押しのけ容積 [cm ³]		50	65	85	105	125/150
吐出圧力 [MPa]	定格	28				
	ピーク	35				
自吸最高回転数 [min ⁻¹]		2,700	2,600	2,500	2,300	2,200

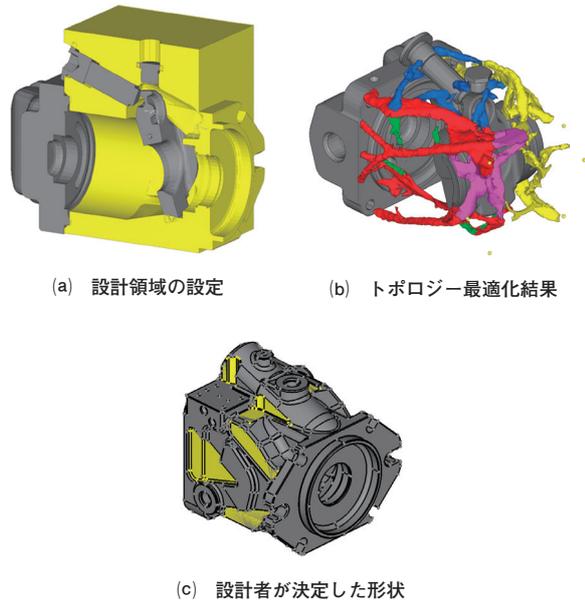


図9 構造最適化技術を用いたケーシング軽量化
Fig. 9 Weight reduction of casing using structural optimization technology

ローラで塑性変形させて、シューと球継手を形成させているが、このプロセスの精密な管理によって高精度なかしめが可能となり、ピストン・シューの信頼性向上にも大きく寄与している。

また、同一のローラを精密に位置制御することで、段取り替えすることなく「K3VLSシリーズ」用ピストン全種類のかしめが可能である。これにより、型式ごとにプレス型が必要だった従来のかしめ方法と比較して大幅な生産性向上を実現した。

2015年4月に「K3VLS85」の量産を開始し、表2に示す「K3VLSシリーズ」全6型式のラインナップ化を完了した。

5 今後の取組み

「K3VLSシリーズ」では、要求仕様に応じた軽量・コンパクト化を狙った設計を行ったが、軽量化が要求されるモバイル分野に対するさらなる取組みとして、ポンプケーシングに関して図9に示すような構造最適化技術の適用を検

討している。最適化手法としては、有限要素法FEMの要素密度を設計変数として最適密度分布を求めるトポロジー最適化を用いている。

本手法では部材配置可能な設計領域をFEMモデルで作成し、ケーシングに必要とされる各部の剛性を指定すると、全体質量が最小となる剛性の観点で最適なケーシング形状が求まる。さらに、最適化結果が示す力学的意味を分析した上で、その他のケーシングに必要な機能を加えた形状に落とし込むことで軽量かつコンパクトな高剛性ケーシングを目指している。

あ と が き

「K3VLSシリーズ」は、累計生産台数5万台を超えモバイル分野でのニーズに応えた油圧ポンプとして顧客から高い評価を得て、さまざまな機械への採用が進んでいる。

今後も市場や顧客の多岐に渡るニーズに適合した製品開発に注力して取り組んでいく。

参 考 文 献

- 1) 駒田, 嶋崎, 大西: “建設機械用油圧ポンプ「K7Vシリーズ」の開発”, 川崎重工技報, No.168, pp.6-9 (2009)
- 2) 吉田: “ピストンポンプ・モータの解析技術”, 油空圧技術, Vol.57, No.8, pp.27-31 (2018)



三浦 秀俊



平野 靖典



松久 幸司



中井 大介



池澤 行雄



今村 嘉秀



加野 大地



相部 徹



高橋 正憲

ロボット向け電油アクチュエータの開発

Development of Electro-hydraulic Actuators for Robots



田中英紀①*	Hideki Tanaka
依田聡②	Satoshi Yorita
尾形麻里子③	Mariko Ogata
吉村勇④	Isamu Yoshimura
服部智秀⑤	Tomohide Hattori
穴田忠⑥	Tadashi Anada
成田慎治⑦	Shinji Narita

日本で最初の産業用ロボット（川崎ユニメート）は油圧駆動であったが、1980年代後半より電動モータ駆動への置き換えが進んだ。しかし近年、災害現場などでの作業に期待が高まっているヒューマノイドロボットでは壊れにくさや力強さが求められており、油圧駆動が再評価されている。

当社にて開発中であるヒューマノイドロボット「Kaleido」においても、その脚部への適用を目的として、耐衝撃性・高出力密度という特長を有する電油アクチュエータ「Hydro Servo Muscle」の開発を行っている。

The first industrial robot in Japan (Kawasaki-Unimate) was hydraulically actuated, but since the late 1980s, electric motor actuation has been replacing hydraulic actuation. In recent years, however, humanoid robots, which are increasingly expected to be used mainly at disaster sites, need to be durable and powerful, and hydraulic actuation has been recognized once again.

Kawasaki is developing Hydro Servo Muscle, which is an electro-hydraulic actuator that is characterized by its high impact resistance and output density and is intended to be applied to the legs of Kaleido, which is a humanoid robot Kawasaki is developing.

まえがき

近年、災害現場や極限環境において、人間に代わって人間用のツールを使いながらさまざまな作業を行う、等身大のヒューマノイドロボットに対する期待が高まっている。

1 背景

大出力で耐環境性を必要とする建設機械などには油圧駆動技術が、高速高精度な動きを必要とするロボット分野では電動モータ駆動技術が活用されてきた。しかし近年、ヒューマノイドロボットなど過酷な環境下で力強い動きが必要なロボットに対しては、油圧駆動を適用する動向がある¹⁾。

2 ヒューマノイドロボット

このような背景の中、当社においてもヒューマノイドロボットの開発を進めている²⁾。現時点のヒューマノイドロボットは全長1.75m、重量84kgであり、脚部や腕部を含む合計32自由度の関節はすべて電動アクチュエータで駆動している。人と同じサイズを実現するためには、各部の小型

軽量化を追求するとともに、他部位との干渉を避けるために人の形状から逸脱する突起物などを無くす必要がある。また、起き上がり時には低速で高推力が、歩行時には低推力で高速動作が必要となる。

このため、アクチュエータには、小型軽量・高速低推力と低速高推力の両立・高信頼性・耐衝撃性が必要となる。

3 アクチュエータ概要

(1) 開発コンセプト

特に高速と高推力の両立が必要とされる図1に示す脚部に適用することを目的として、アクチュエータの開発を行うこととした。作業中の不意の衝撃などにより、電動アクチュエータは減速機構にダメージを受けるリスクがあるが、耐衝撃性のある油圧アクチュエータでは、油の圧縮性や高応答な圧力リリーフ機構によってダメージを回避する効果をヒューマノイドロボットに付加することができる。

(2) 機器構成および仕様

電油アクチュエータの機器構成と油圧回路を図2に、仕様を表1にそれぞれ示す。サーボモータ・油圧ポンプ・バ

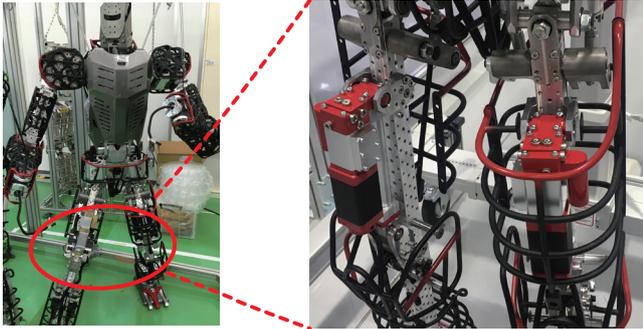


図1 ヒューマノイドロボット「Kaleido」の脚部への適用イメージ
Fig. 1 Applying this technology to the legs of humanoid robot Kaleido

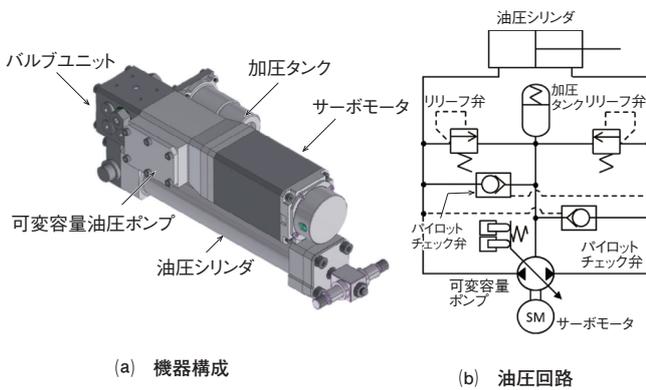


図2 電油アクチュエータ
Fig. 2 Configuration of electro-hydraulic actuator

表1 電油アクチュエータの仕様
Table 1 Specifications of electro-hydraulic actuator

最大推力 [N]	6,000
最大速度 [mm/s]	200
ヘッド径 [mm]	22
ロッド径 [mm]	8
ストローク [mm]	156
耐衝撃機能	あり

バルブユニット・油圧シリンダを一体構造とし、油圧機器間において配管を持たないコンパクトな構造とすることとした。また、サーボモータの回転に応じてシリンダに油を送出するクローズ回路構成としている。

本アクチュエータは他の電動アクチュエータと同様にロボットコントローラにて駆動することが可能である。脚部の関節角度を別途エンコーダで検出して、所望の角度を実現するシリンダ位置となるようサーボモータを制御する。

4 開発内容

耐衝撃性に加えて、アクチュエータの小型軽量化・高速低推力と低速高推力の両立・高信頼性化を達成するための開発を行った。

(1) 小型軽量化

(i) 小型バルブユニットの開発

バルブユニットを最小化するため、要求機能の実現に最低限必要なバルブ数として、専用バルブおよび油通路を含めたマニホールドを新規開発した。図3に示すバルブユニットを構成する各バルブには以下の開発が必要となる。

① リリーフ弁

アクチュエータが受けた過大な外力を油圧で即時かつ正確に逃がすため、高い応答性を実現するとともに流量の増加に伴ってリリーフ圧力が上がるオーバーライド特性を低減する。

② パイロットチェック弁

アクチュエータ後退時にシリンダ面積差によるヘッド側流量の余剰分を加圧タンクへ戻すため、低いポンプ吐出圧力で開弁する。また、アクチュエータ前進時にタンクから油を円滑に流入させるため、圧力損失を最小化する。

上記機能と性能を満足する小型カートリッジ型バルブを開発した。マニホールド内の油通路本数を最小化し、また油通路周囲の肉厚が必要最小となるようにバルブを配置することで、マニホールド外形はサーボモータ外形である40mm角以下のサイズを実現した。さらに、油通路は圧力損失が最小となるよう内径・長さ・交差形状を設計した。

(ii) バルブユニット・ヘッドカバー・タンクの一体化

一般的な油圧アクチュエータは、バルブ・シリンダ・ポンプ・タンクなどの各ブロックを連結して構成される。これらのブロックを一体化することで、各ブロックの接合面に設けていたシールを省略したり油通路配置の自由度を高めたりでき、さらなる小型化を見込める。

そこで、以下の2点を考慮しながら、バルブユニット・シリンダのヘッドカバー・ポンプのバルブカバー・タンク接続ブロックの4部品を図4に示すように一体化した。

① 各部品間の油通路の最適化

各部品をバルブ油室と直線的につなぐことで、油通路の無駄を無くした。

② タンク容積の見直し

一般産業機械の基準に従うと過大なタンク容積となるの

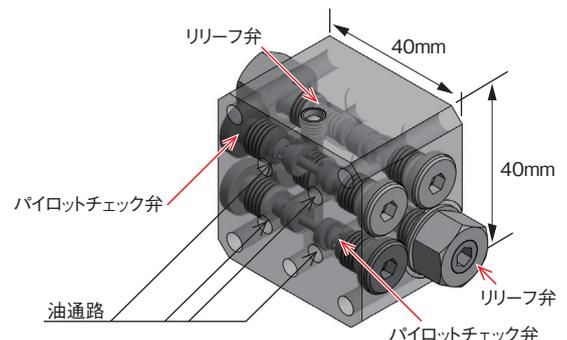


図3 バルブユニット
Fig. 3 Valve unit

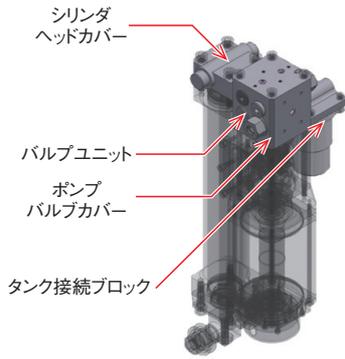


図4 各部品一体化
Fig. 4 Integration of components

で、ロボットへの適用を考慮し最低必要容積の4.2倍ではなく1.1倍とした。

これらの取組みにより、アクチュエータ取付部とポンプ取付部との間の寸法を大幅に低減することができた。

(iii) 油圧ポンプとサーボモータの一体化

当初は、油圧ポンプとそれを駆動するサーボモータを同一軸上にレイアウトして、軸同士をスプラインによって結合していた。ただし、ベルトや歯車を使用することによる大型化や駆動伝達ロスを防ぐ一方で、結合部の強度が不足するという問題があった。これを解決するため、図5に示すようにポンプとモータの駆動軸を一体化した構造とした。そのため、ポンプとモータを接続するフランジ形状・オイルシール・軸受などを最適化している。

また、ポンプとモータそれぞれに使用する軸受について、中間に位置する軸受を共用とすることで部品点数削減とさらなる小型化を実現した。さらに、軸に応力が発生するのを避けるため、ポンプ軸端側の軸受に滑り軸受を採用した。

(2) 高速低推力と低速高推力の両立

ヒューマノイドロボットに求められる高推力と高速度を両立するため、油圧ポンプは可変容量型である必要がある。建設機械および産業機械向けで培った斜板式ピストンポンプ

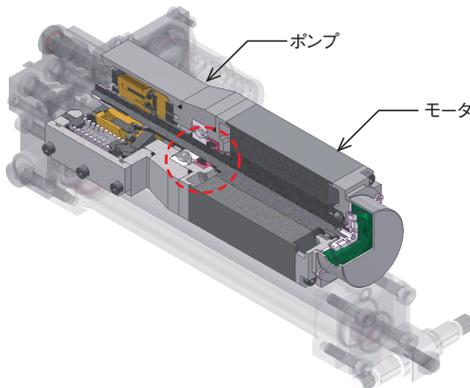


図5 軸の一体化
Fig. 5 Integration of shaft

の技術を基に、押しのけ容積 0.75cm^3 および 1.5cm^3 の図6に示す可変容量型斜板式ピストンポンプを開発した。

アクチュエータの負荷圧力に応じてポンプ容量を最適に制御することで、サーボモータを過負荷状態にさせることなく、アクチュエータに高圧の作動油を供給できる。また、ピストンに生じる油圧力と斜板角を保持するスプリング荷重を最適にバランスさせることで、負荷圧力に応じて無段階にポンプ容量を制御する機構を採用している。これにより、サーボモータからの出力を無駄なく油圧エネルギーに変換できるだけでなく、斜板駆動機構を簡略化して電磁切換弁を省略できたことで小型軽量化にも貢献している。

電磁切換弁による容量2段階切換方式である従来方式では、サーボモータを過負荷状態にさせずに連続使用する場合には、圧力が上昇した際に容量を大から小に切り換える必要があり、このとき動力の一部が無駄となっていた。今回開発したポンプでは、圧力の上昇に対して容量を無段階に変化させて制御することで、サーボモータの動力を無駄なく油圧エネルギーに変換でき、より小さい動力で全圧力域にわたり高速/高推力を実現することができている。

(3) 高信頼性化

(i) 油圧シリンダの振動抑制制御

本アクチュエータのサーボ制御システムにおける、位置制御のブロック図を図7に示す。エンコーダを用いて位置実績をフィードバックして、位置指令との偏差を基にモータに速度指令を与えている。高負荷や高速度時における追従性を損なわないように位置比例ゲインを調整しているため、逆に低負荷や低速時には大きい値となり、持続

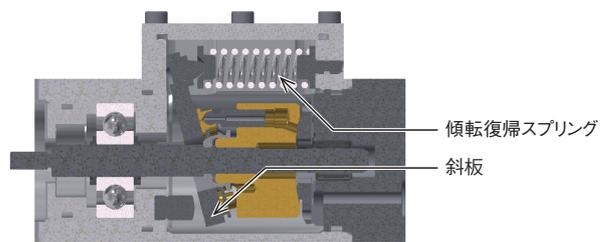


図6 可変容量型斜板式ピストンポンプ
Fig. 6 Swash plate type variable displacement axial piston pump

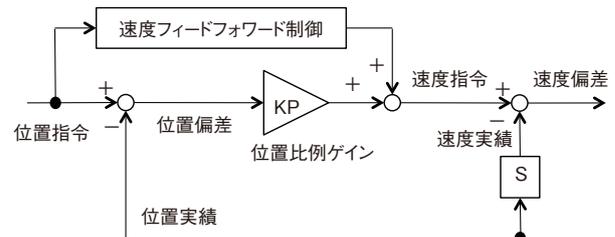


図7 位置制御ブロック図
Fig. 7 Block diagram of position control

振動やハンチングが発生してしまう。これはサーボモータが動作してから、油が吐出されて油圧シリンダが動作するまでに遅れがあることに起因している。

この対策として、低負荷あるいは低速度時であることをモータ電流とモータ速度から判断して、位置比例ゲインおよび速度フィードフォワード制御におけるゲインを適切に変化させる機能を開発した。低負荷／低速度時における、本制御適用前後の油圧シリンダ速度波形を図8に示す。このように、持続振動を大幅に低減できている。

(ii) シリンダ軸受の見直し

シリンダ軸受のロッド部とピストン部の見直しを行った。ロッド部は黄銅製ブッシュ・シール部品・ダスト侵入防止用パッキンを組み合わせた構造としていたが、ロッドの軸方向に外部から衝撃荷重が作用した場合に作動油が漏れるリスクがあった。また、黄銅製ブッシュの摩擦抵抗が大きいという課題もあった。そこで、図9に示すように耐圧性能を高めた専用ロッドシールを採用し、ブッシュ材質をPTFEに変更することで上記のリスクと課題を解決した。

また、ピストン部はピストン支持とシールの両方を2つのピストンシールが担う構造としていた。しかし、動作条件によっては2つのシール間に作動油が侵入して圧こもり

が生じ、シール性能が低下するリスクが生じる。これを解決するため、図10に示すようにPTFE製の軸受とピストンシール1つを並べて配置する構造とした。

あ と が き

電油アクチュエータのヒューマノイドロボットへの搭載は、当社が持つ油圧技術とロボット技術のシナジー実現に向けた挑戦である。本アクチュエータはロボットのみならず自律移動体や生産ラインおよび産業機械用途などでも活用可能な製品である。PRの一環として、IFPEX2017、IREX2017などに参考出展するとともに、「Hydro Servo Muscle」の名称で商標登録している。

油圧技術は成熟しているとの意見もあるが、小型軽量化および取扱いの容易さを追求することで、油圧技術と電動技術が併用可能なシステムを実現して、新たな「コト」の創造に寄与していく。

参 考 文 献

- 1) 田中 豊, “油圧駆動ロボットに役立つ油圧要素技術”, 日本フルードパワーシステム学会誌, Vol.50, No.2, pp.65-68 (2019)
- 2) 垣内, 掃部, 下村, 柚木崎, 野沢, 岡田, 稲葉, “転倒起立動作を可能とする耐荷重点点を備えた等身大人間型ロボットプラットフォームRHP2の開発”, 日本ロボット学会誌, Vol.36, No.10, pp.703-712 (2018)

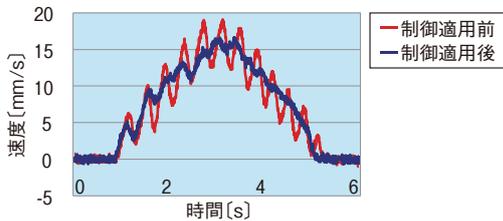


図8 振動抑制制御の効果
Fig.8 Effect of vibration suppression

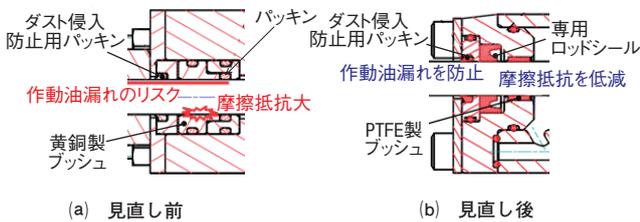


図9 シリンダ軸受のロッド部の見直し
Fig.9 Modification of cylinder bearing rod

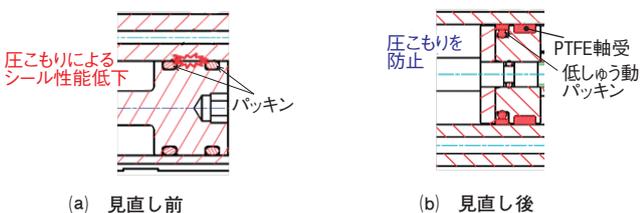


図10 シリンダ軸受のピストン部の見直し
Fig.10 Modification of cylinder bearing piston



田中英紀



依田 聡



尾形 麻里子



吉村 勇



服部 智秀



穴田 忠



成田 慎治

油圧機器製品の性能・信頼性向上を支える評価技術

Evaluation Technologies That Support Boosting the Performance and Reliability of Hydraulic Components



玉島 英樹① Hideki Tamashima
 吉村 勇② Isamu Yoshimura
 青木 誠司③ Seiji Aoki
 松原 守彦④ Morihiko Matsubara
 吉田 毅⑤ Takeshi Yoshida
 坂本 守行⑥ Moriyuki Sakamoto

建設機械業界のニーズに高度な次元で対応した油圧機器を開発し続けるには、研究開発を支える評価技術の高度化が不可欠である。当社は油圧機器の動作メカニズム解明を追求することで単体性能と信頼性の向上を追求するとともに、油圧機器を組み合わせた油圧システムの総合性能を向上させるための評価技術を構築し、製品開発に活用している。

Improving evaluation technologies which support research and development is vital to continuing to develop hydraulic components that satisfy the advanced requirements of the construction machinery industry. Kawasaki is boosting the unit performance and reliability of hydraulic components through elucidation of their operation mechanisms, and at the same time, developing evaluation technologies for boosting the overall performance of hydraulic systems that combine multiple hydraulic components and utilizing these technologies for product development.

まえがき

世界的なディーゼルエンジンの排ガス規制やCO₂排出規制により、油圧ショベルなどの建設機械においても低燃費化のニーズが高まっている。また、建設現場では熟練オペレータ不足が深刻化しており、ショベル操作の容易化が望まれている。さらに建設プロセス全体の効率や品質の向上を目指す動きが強まっており、建設機械メーカーや大手建設業者を中心に自動運転や情報化施工の研究が進められている。

1 背景

油圧ショベル業界の低燃費化のニーズに応じて、油圧機器メーカーは油圧機器単体の効率向上に取り組んできた。当社の油圧ポンプは最高効率90%以上と世界最高レベルに到達しているが、さらなる高効率を目指して研究開発を推進している¹⁾。また、油圧機器の信頼性は性能と合わせて重要であり、建設機械メーカーのニーズに対応できるよう改良を進めている。

近年は、油圧機器単体の性能追求だけでなく、それらを組み合わせた油圧システム全体としての燃費・作業効率・操作性などの総合的な性能も注目されており、当社においてもシステムとして運転した際の相互の影響を考慮した油圧機器開発に注力している。

2 評価方法のコンセプト

このような製品開発を目指すためには、現象把握や仮説検証の精度向上、つまり評価技術を高度化していくことが重要である。当社では、油圧機器の単体性能や動作メカニズムを計測・評価できる油圧機器評価ベンチ「HYPAM」を2005年より稼働し、評価技術を改良しながら製品開発に活用してきた。さらにショベル用油圧機器のシステム評価に対応するため、新たに油圧システム評価ベンチ「HILS」を開発し、2018年より稼働を開始した。

3 油圧機器評価ベンチ「HYPAM」

(1) 特長

2005年に油圧ポンプ用として稼働した油圧機器評価ベンチ「HYPAM」(図1)は、2006年からは油圧モータさらに2018年からはショベル用コントロールバルブの評価にも活用している。

油圧ポンプでは、高精度なセンサを使用するとともに、専用計測ソフトの開発など計測方法や試験方法の工夫により効率の微差を捉えることで、効率向上に貢献してきた。その後もポンプ内部へ各種センサを取り付けることで内部部品の挙動を把握し、得られた知見を高性能な油圧機器実現に向けた最適設計技術の高度化に活用している。近年では、さらなるコンパクト化・最高回転速度向上・制御性向



図1 油圧機器評価ベンチ「HYPAM」
Fig.1 Evaluation bench for hydraulic components HYPAM

上・長寿命化などのより厳しい要求事項に対応するため、シミュレーション技術との組合せにより油圧機器内部で生じている動的・過渡的な現象の解明に注力している。エネルギー関連製品や輸送機器製品をはじめとする各種開発で蓄積したシミュレーションのノウハウを生かしてシミュレーションモデルをより高精度にしつつ、「HYPAM」の計測結果でシミュレーションのパラメータを調整することで、実現象を精度よく予測できるよう改良を進めている。

(2) 取組事例

油圧機器評価ベンチ「HYPAM」の最近の取組事例として、ポンプ内キャビテーションを取り上げる。

油圧ポンプ内の作動油が急激に減圧されると、溶存空気が気泡となって現れるキャビテーション現象が発生する場合がある。発生した気泡は圧力上昇によって崩壊する際、周囲に高い衝撃を与えて機械表面を損傷させるため、船のスクリューやロケットポンプなどの流体機械においても損傷原因となる。ピストンポンプにおいては、周期的な圧力変動にさらされるバルブプレートやシリンダボア内面を中心に、急激な切換動作などによってキャビテーションによる図2に示すようなさまざまな形態の損傷が生じる可能性があり、その対策は極めて重要である。

このため、大規模な三次元非定常流体シミュレーションによりキャビテーション・リスクの評価を行い、設計段階



図2 バルブプレート上のキャビテーションによるエロージョンの例
Fig.2 Example of cavitation erosion on valve plate

で対策を検討している²⁾。この流体シミュレーションで気泡の発生・消滅の再現精度を確保するためには、使用する二相流モデル中の物性パラメータのチューニングが必要であり、「HYPAM」での長年にわたるポンプ内各部の圧力変化実測データの蓄積が役立っている。ここでは、本設備が有する運転条件の高い管理技術と圧力・温度・入力トルクなどの高精度計測技術とが力を発揮している。

また、局所的なキャビテーション気泡発生状況の直接観察にも取り組んでいる。レーザパルス光源と高速度カメラを使用して、図3に示すように耐圧窓からポンプのシリンダボア内部の気泡を観測できるようにした。

これにより、作動条件と気泡分布の関係を把握するとともに、流体シミュレーションにおける局所流れに至るまでの高い再現性が確認でき(図4)、製品開発におけるシミュレーションの積極活用に至っている。

以上の取組みはポンプ性能の改良に向けた「HYPAM」活用事例の一つであるが、油圧モータやコントロールバルブなどの油圧機器においても同様な取組みを実施しており、当社の油圧機器の開発力を支えている。

昨今では特に、油圧システム全体の操作性や応答性に関わる、コントロールバルブのスプール切換え動作を中心に、油圧機器単体の動特性評価に力を入れており、後述する「HILS」による評価と連携して、製品性能と信頼性の向上に向けたデータ取得を行っている。

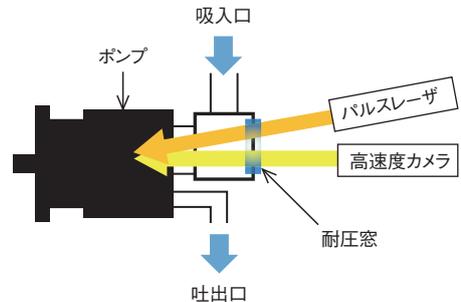


図3 油圧ポンプ内キャビテーションの観測系
Fig.3 System for observing cavitation bubbles in hydraulic pumps

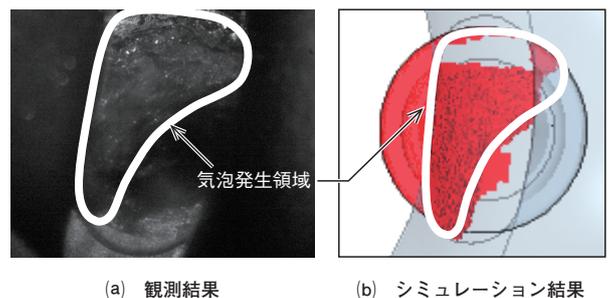


図4 シリンダ内キャビテーションの観測結果とシミュレーション結果との比較
Fig.4 Observation results of cavitation bubbles in cylinder and comparison with simulation results

4 油圧システム評価ベンチ「HILS」

(1) 特長

油圧システム全体の総合的な性能向上を追求していくには、システムを構成する油圧機器の相互作用を考慮する必要があり、油圧機器単体を評価する「HYPAM」のみでは限界になってきた。油圧機器のシステムの評価は、これまでは実車で試験せざるを得なかったが、実車では油圧機器周辺スペースが少なく計測条件に制約が生じることが問題であった。そこで、油圧機器のベンチでのシステム評価実現を目指して、図5に示す油圧システム評価ベンチ「HILS」を開発した。

「HILS」は実物と仮想を組み合わせてシステムを評価するシミュレータ³⁾であり、ポンプやモータなどの油圧機器を組み合わせた油圧システムの動作に合わせてシミュレーション上で仮想のショベルを動作させ、その動作に応じた負荷を油圧システムに与えるものである。

油圧システム評価ベンチ「HILS」は、図6に示すように、

実物の油圧機器と仮想のショベル本体および負荷装置で構成される。実物の油圧機器は、油圧システムを構成するメインポンプ・コントロールバルブ・パイロットバルブ・コントローラなどである。仮想のショベル本体は、ショベルのブーム・アーム・バケット・旋回などのアクチュエータの機構や土砂などの負荷を含むダイナミクスを再現した「HILS」計算機上のシミュレーションモデルである。ショベルのアクチュエータである油圧シリンダおよび油圧モータとコントロールバルブの間の圧力・流量などの油圧負荷は、負荷装置により制御される。油圧ポンプからコントロールバルブを通してアクチュエータに送られる油の負荷に基づいて、時々刻々のショベル挙動をシミュレーションするとともに負荷装置により油圧負荷を制御することで、ショベルの動的な挙動を再現している。本装置を用いることで、ショベルの油圧シリンダや油圧モータの速度・変位・圧力・流量などの油圧システムの評価に必要な状態量を再現できる。また、メインポンプやコントロールバルブの各ポートには圧力センサや流量センサなどを取り付け、各油圧機器の動作やシステム全体の燃費を評価・分析できる。なお、メインポンプは実際にはエンジンで駆動されるが、本ベンチではエンジン特性を模擬するように制御された電動モータで駆動している。

「HILS」の動作例としてブーム上げ操作の波形を図7に示す。「HILS」はポンプから吐出された作動油がコントロールバルブを通してブームシリンダに送られた時のポンプ圧力・シリンダヘッド圧力・シリンダロッド圧力の変動およびシミュレーション上のシリンダ変位を実機ショベルと同じように再現している。

(2) 取組事例

(i) ショベルの操作性評価

操作レバーによりブーム下げ操作中に止めたときに、コントロールバルブやポンプの特性によってはショックが大きくなり、オペレータの評価が悪くなる場合がある。この



図5 油圧システム評価ベンチ「HILS」
Fig.5 Evaluation bench for hydraulic systems HILS

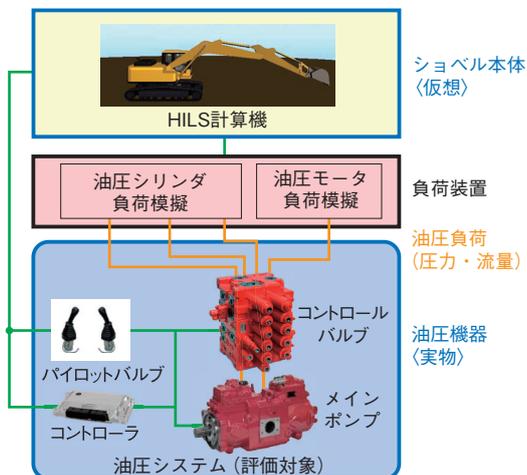


図6 「HILS」の構成
Fig.6 Configuration of HILS

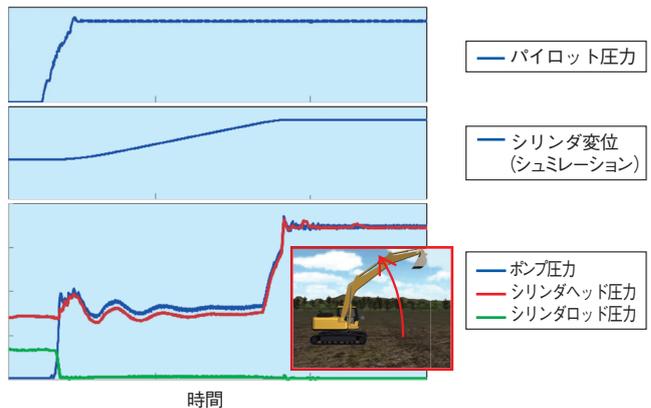


図7 「HILS」の動作例 (ブーム上げ操作の応答)
Fig.7 Example of HILS operation (response to boom-up operation)

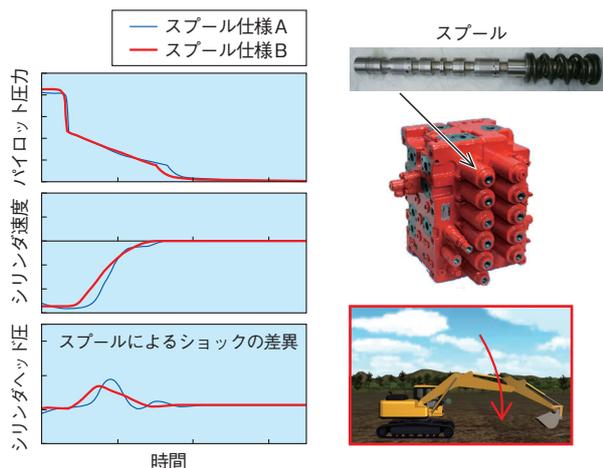


図8 「HILS」による操作性の評価（ブーム下げ止めショックの挙動）
Fig. 8 Evaluation of operability with HILS (shock behavior when the boom stops moving down)

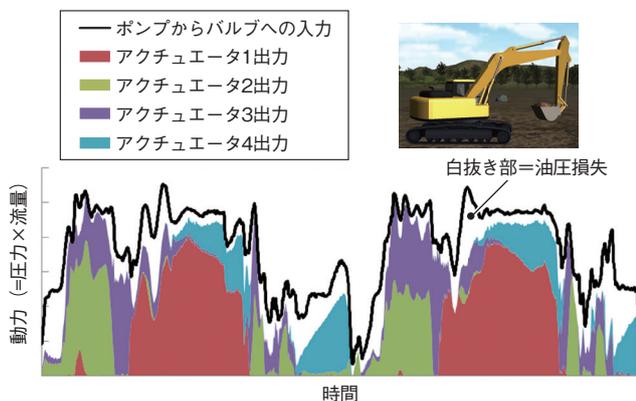


図9 「HILS」による効率の評価
（掘削積込操作でのコントロールバルブの動力収支）
Fig. 9 Evaluation of efficiency with HILS
（Power balance of control valve at digging and loading operation）

ブーム下げ止めショックを評価した例を図8に示す。本事例は、コントロールバルブのスプール仕様（ノッチ形状）を変更したときの評価である。シミュレーションでは作動油がノッチを通るときに発生する流体反力などの影響があるためスプールの動的な挙動を精度良く再現することは難しく、ショベル実車への搭載試験が必要であったが、「HILS」により実車同様の評価が可能であることが分かった。

(ii) 燃費評価

土砂の掘削積込操作が行われたときのコントロールバルブの効率（油圧エネルギー損失）を評価した例を図9に示す。同図は、ポンプからコントロールバルブへ入る動力と各アクチュエータへ出力される動力を示しており、その差分がコントロールバルブによる油圧の損失となる。どの動作で損失が大きいかを分析することで、油圧機器の改善に

活用している。なお、メインポンプには駆動軸にトルクセンサと回転数センサを取り付けており、メインポンプを含めた全体の効率を計測することも可能である。

以上のように、「HILS」により油圧機器をショベル実車で搭載試験する前に、社内で実車搭載相当の評価が可能になった。この評価でシステム動作において油圧機器に求められる性能を分析し、前述の「HYPAM」での性能試験と組み合わせて油圧機器の開発に取り組んでいる。このように「HYPAM」と「HILS」を組み合わせることで、油圧機器単体の性能や信頼性だけでなく、油圧システム全体としての総合的な性能を追求した油圧機器の開発を、従来より大幅に短い時間で行うことが可能となった。

あとがき

今後は「HYPAM」と「HILS」を連動させてさらに信頼性の高い油圧機器を実現していく。また、動的現象の詳細把握に向けた油圧機器単体の高速計測技術や、過渡的な作動状態の再現技術の高度化とともに、ショベル実車再現精度向上に取り組むことで、燃費・作業効率・操作性の客観的評価指標を構築して、油圧機器の開発力向上につなげていく。

参考文献

- 1) 大見：「建設機械用油圧ポンプの高出力密度化」, フルドパワーシステム, Vol.39, No.5, pp.261-265 (2008)
- 2) “特集 ここまで来ているフルードパワーの解析技術”, 油空圧技術, Vol.57, No.8, pp.1-46 (2018)
- 3) 自動車技術ハンドブック 設計 (パワートレイン) 編, 5-3-5 制御システム検証, 自動車技術会 (2016)



玉島 英樹



吉村 勇



青木 誠司



松原 守彦



吉田 毅



坂本 守行

生産のグローバル展開の深化に対応するICT/IoT技術

ICT and IoT Technology for Further Global Expansion of Production



竹内 隆①※ Takashi Takeuchi
 永田 徳彦② Norihiko Nagata
 中津 真大③ Masahiro Nakatsu
 中野 信一④* Shinichi Nakano
 本多 文博⑤* Fumihiro Honda

油圧機器のグローバル生産を進める中で、これまで西神戸工場をマザー工場として「ものづくり力」を向上させるための仕組みを構築し、油圧機器の分野でトップブランドを維持してきた。

近年、変化が激しいグローバルな顧客ニーズに対応するため、ICT/IoT技術を活用することで、原価や生産能力の見える化を推進し、地産地消型の生産体制実現に取り組んでいる。

Kawasaki is promoting the global production of hydraulic equipment and has established a system for boosting manufacturing capabilities with Nishi-Kobe Works and has continued to be a top brand in the field of hydraulic equipment.

In recent years, with the aim of catching up with rapidly changing global customer requirements, Kawasaki has been promoting the visualization of cost and production capabilities and working to realize a production system for local production and consumption through utilizing ICT (Information and Communication Technology) and IoT (Internet of Things) technology.

まえがき

建設機械や農業機械市場では、新興国市場の拡大への対応や為替リスクの低減のため生産・販売のグローバル化が進んでおり、各メーカーは地産地消型生産¹⁾を行うことで市場の変遷に対応している。

1 背景

当社が生産する油圧機器は、顧客メーカーのこのような生産・販売のグローバル化に伴い、地産地消に対応した生産体制が強く求められるようになっていく。

当社はこれまで、西神戸工場を世界各地の拠点に対するマザー工場として、コアパーツと呼ぶコア技術を必要とする部品である油圧モータやポンプで使用するロータリ部品を国内のみで生産することで、品質・納期管理面などで他社に対する優位性を発揮してきた。

近年の顧客ニーズの多様化および需要増加の中で、完成品やコアパーツについても世界各地の拠点において同じ管理レベルで生産するグローバル展開が必須となっている。

2 コアパーツ戦略／生産のグローバル展開の課題

当社では、これまでコアパーツ戦略²⁾を掲げて、西神戸

工場から世界の生産拠点にコアパーツを供給することで、コスト・品質を差別化してきた。また、生産現場では、KPS（Kawasaki Production System）を推進することで、徹底したムリ・ムダの排除と設備・人のフル活用を指向した活動を展開し、コスト低減と品質向上を目指してきた。

しかしながら、顧客ニーズの多様化により生産型式が増加してくると、作業者が行う標準作業を組み替えるだけでも膨大な工数がかかることとなり、標準作業を組み替えたころには要求される型式が変わってしまうこともある。また、需要増加に対応するためには、西神戸工場からのコアパーツの供給だけでは顧客要求を満たすリードタイムを実現できない状況となってきた。さらに、これまではコアパーツを重点的に管理することで品質や価格において優位性を確保してきたが、これを強固にするためにはその他の部品についても管理レベルを向上する必要がある。

これらの課題に対し、生産のグローバル展開を深化させていくことで対応することとした。ただし、品質および技術流出に関連する項目については、コストやリードタイムにメリットがある場合でも、海外拠点での懸念がある場合には海外生産を実施できないと考えており、これらを踏まえて次の2点の具体的な施策を検討することとした。

- ① 顧客ニーズの多様化に対応するためフレキシブルに生産型式を変更し、その変更迅速に追従して効率良く生産する。

- ② 生産および品質管理の難易度の比較的低いコアパーツについては、海外拠点においても生産する。

3 生産のグローバル展開におけるICT/IoT技術の重要性

フレキシブルに生産型式を変更することや、一部のコアパーツを西神戸工場以外で生産することは、顧客のグローバル展開に対応するためには必須である。同時に、品質優位性を維持することは、高いシェアの維持や製品の単純な価格競争に巻き込まれないようにするために必要である。

このような生産のグローバル展開の深化に関して、ICT/IoT技術は低コストで同一品質・同一生産性の実現を達成できるものであり、生産ラインの立ち上げ初期から生産ノウハウを十分に生かすことにより、各拠点から顧客に対して同等の価値を提供することが可能となる。

4 生産のグローバル展開に対応するICT/IoT技術

生産のグローバル展開のために、ICT/IoT技術を活用して、生産の各フェーズにおいてさまざまな見える化に取り組んだ。

(1) 機械加工工程における生産計画・実績の見える化

各拠点においてさまざまな部品の機械加工を行っており、その中でも西神戸工場の機械加工の規模は最大となっている。需要が増加する状況においては、設備の稼働率を最大限に維持することが、顧客の要求するリードタイムを満たすために重要となる。

また、各拠点で機械加工設備に投資を行うにあたり、設備を効率的に運用できる仕組みが必要となる。そのために、機械加工設備の稼働状態を見える化し、管理者と作業者が生産の状況を把握できるようにするとともに、効率の良い作業指示を行えるようにすることとした。

まず最初に、西神戸工場に多数導入されている図1に示すようなFMS(Flexible Manufacturing System)に対して、

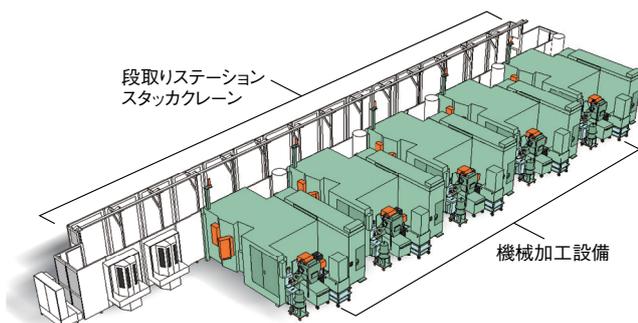


図1 FMS (Flexible Manufacturing System) の概要
Fig. 1 Overview of FMS (Flexible Manufacturing System)

効率の良い作業指示を行うとともに作業実績を把握するシステムを開発した。

FMSにおいては複数の型式を同時並行で加工可能である。型式に応じて取扱い可能な機械加工設備が限定されるため、型式が多い場合には作業順序によって出来高が変動する。また、FMSは組立ラインと同調・同期して稼働することが望まれるため、作業者は以下のようなことを考慮しながら作業を行う必要がある。

- ① 生産管理板の指示を達成する。
- ② 作業実績を記録する。
- ③ 担当設備の稼働ロスを最小化する。

さらに、管理者においては、設備をフル活用する計画は作成できるが、作業者の習熟度により達成率が変化するなど、計画と達成率の差異を効果的に分析するために多大な工数が必要である。

そこで、人の作業順序と設備稼働予定を生産計画から自動算出できる図2に示すような作業指示システムを導入し、誰でも同じ作業順序を計画・実行できるようにした。

本システムを使用することで、油圧ポンプの部品加工ラインでは設備稼働率が平均5~10%程度向上した。また、設備稼働率が向上しなかった場合には、問題点を見える化することができるようになった。

海外拠点では複数台の設備を1人の作業者が担当していることが一般的である。現在はFMSに対して作業指示を行う仕様となっているが、作業員への作業指示についても同様の考え方でシステムを活用することが可能である。

これにより、管理者の能力に依存せず、各拠点で新規に導入するラインに対しても、西神戸工場と同じレベルで改善活動を実現することが可能となる。

(2) 組立工程における作業の見える化

西神戸工場での油圧機器の生産においては、コスト低減のため組立ラインで混流生産を行っている。



図2 作業指示システムの概要
Fig. 2 Overview of operation instruction system

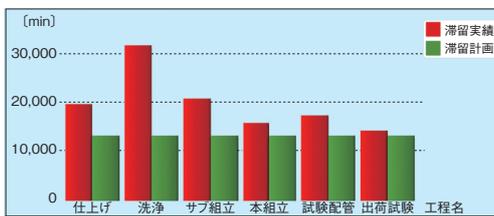
混流生産ラインでは、新人作業者とベテラン作業者が同じライン内で作業を行っており、作業や製品が変化していくことでネック工程が常に変わる。このようなラインでは、管理者は問題の発生箇所を迅速に判断して必要な改善処置を施すことが難しい。

この問題を解決するため、生産工程の詳細データの自動取得およびリアルタイムで生産状況分析が行えるシステムの開発、すなわち作業の見える化に取り組んだ。

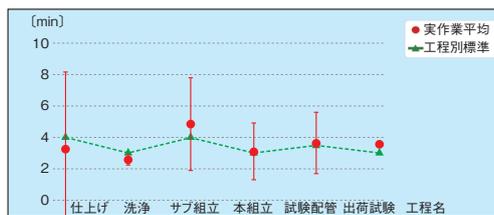
本システムにより取得された工程の情報を図3に示す。組立ラインに設置した各種センサから各工程の作業データを収集して、取得したデータをBI (Business Intelligence) ツールにより表示する。これによりライン状態の見える化を実現し、問題の早期把握を可能としている。また、組立工程への投入順序を最適化することで、標準時間のバラつきを最小限とすることもできる。

組立計画に対して発生した差異は、着手順序の影響・型式による影響・作業による影響などが相互に関係するため、その分析は困難である。また、現状では管理者の能力に頼った分析を行っている。新たに開発したシステムでは、作業を見える化することで差異を定量化することが可能であり、改善を実施した際の効果も同じように評価することができる。このシステムを利用することで、ラインでの問題が定量化でき、属人的な管理から脱却することが可能となる。

本システムを各生産拠点に導入することで、ライン管理の手法が統一され、生産量によらずに課題の迅速な発見が可能となる。また、コスト削減やリードタイム短縮の要求に対して、統一的な考え方でより効率的なライン改善が可能となる。



(a) 工程別の滞留時間合計



(b) 工程別の作業時間平均とばらつき

図3 取得された工程情報
Fig. 3 Collected process information

(3) 原価の見える化

現在西神戸工場で使用している原価管理システムは、1986年に導入したシステムが基準となっており、2006年から稼働している。

2011年に機械化・自動化をすすめたことで、自動化の程度が均一でなかったため原価を一律で評価することが難しくなった。また、原価集計は省力化すべきであり、生産実績の把握は自動的に行われることが望ましい。

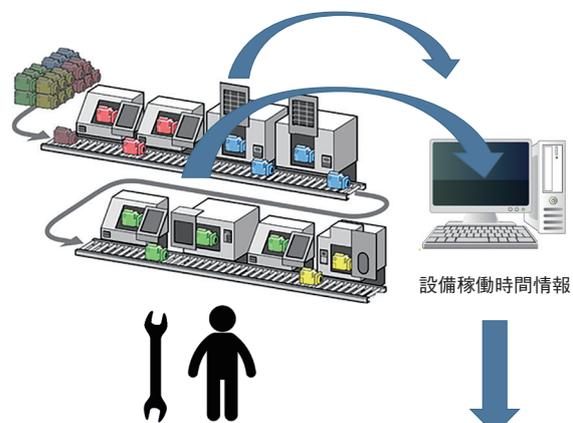
上記のような課題は、グローバル展開においても、それぞれの生産拠点で発生することが想定され、対策が必要である。この問題の解決策として、新原価計算方法を導入し、状況に応じて変化していく原価の数値化・見える化を行い、生産のグローバル展開に耐えうるようにすることとした。

新原価計算方法の概要を図4に示す。機械加工設備から得られる設備稼働時間を基に、設備が稼働した時間単価であるマシンレートを算出する。組立や運転など作業員の作業時間が支配的な工程では、ラインに設置したセンサにより自動測定された作業時間に応じて、作業員が作業した時間単価であるマンレートを各工程に設定することで、より詳細な原価を導出することを目標とした。

新原価計算方法の特長は、主に下記の項目が改善されることである。

- ① 製品型式別の原価内訳の見える化に伴い、コストダウンのターゲットがより明確になる。
- ② レート計算において、設備ごとに時間が自動測定・計算されることで、大幅な省力化が可能となる。

新原価計算方法は、原価を正確に管理するだけでなく、経営と現場改善の結びつきを強くすることができ、コストダウンのための着眼点を明確にすることが可能である。また、原価を詳細分析することで、要因別に責任部門が明確化され、改善活動を強力に推進することが可能である。



各工程ごとのマンレート + 各工程ごとのマシンレート

図4 新原価計算方法の概要
Fig. 4 Overview of new cost calculation method



図5 モデル化された生産管理手法
Fig.5 Modeled production control method

この新原価計算方法を各生産拠点に導入していくことで、グローバルな原価評価を行うことができるようになる。また、顧客ニーズの中でも特に重視されるコストについては、たとえば拠点ごとの原価比較を行うことで正確な意思決定が可能となる。この結果、経営計画に対して適切な事業戦略の策定が可能となると考えている。

(4) サプライチェーンの見える化

生産のグローバル展開においては、グローバル調達も重要な課題である。これまでの管理手法では、購入品の調達先が近距離であれば、連絡頻度を上げて納期の確認を十分に行えるなど、問題は発生しにくい状況にあった。一方、グローバル調達においては、調達先が全世界にまたがるため考慮すべき項目は複数存在する³⁾。

油圧ポンプを例として挙げると、比較的部品数の少ないものでも40種類以上の部品から構成されているため、工場内での生産活動が適正に管理された状態であっても、1つの購入品が納入遅延することで、顧客の要求納期を守れなくなるという事態を引き起こす。調達がグローバル化すると、購入品の納入管理はより複雑になる。

上記の問題を想定して、サプライチェーンの見える化に取り組むこととした。具体的には、マザー工場である西神戸工場で採用している生産管理手法の業務フローをモデル化し、生産管理システムとしてパッケージ化した状態で調達先において使用してもらう。これにより生産管理の基本的な考え方を調達先と共有できるようにする。

モデル化される生産管理手法の概要を図5に示す。現在

の業務フローでは、設備能力試算・生産計画・生産指示・在庫管理が主である。ここにICT/IoT技術を用いたピッキングと実績収集を加えることで、新たな生産管理システムを構築する。

本生産管理システムにより、グローバル展開された生産体制の下においても、納期および在庫の管理をボーダーレスで行えるようになる。

あとがき

グローバルな顧客ニーズに対応することを目的として、ICT/IoT技術を活用した見える化の推進により、西神戸工場と同じレベルの管理でグローバル展開する足掛かりができた。さらに、地産地消型生産体制を推進していくことも可能となった。

今後も、顧客ニーズの変動に対応できるフレキシブルな生産体制を構築するとともに、モーションコントロールのトップブランドとして技術革新を進めていく。

参考文献

- 1) 高谷, 小岩, 川崎, 佐々野: “日立建機のグローバル生産体制”, 日立評論, Vol.97 No.05, pp.45-51 (2015)
- 2) 松永, 酒井, 太田, 國延, 牛ノ濱, 王子, 菅谷, 川野: “油圧機器生産における「ものづくり力」強化”, 川崎重工技報, No.168, pp.24-29 (2009)
- 3) 美藤: “グローバルSCMにおける調達戦略に関する実証分析”, 大阪産業大学経営論集, 14-1, pp.75-90 (2012)



竹内 隆



永田 徳彦



中津 真大



中野 信一



本多 文博

斜板形アキシャルピストンポンプ「K7Vシリーズ」

K7V Series – Swash Plate type Axial Piston Pump



地球環境への配慮から、近年の油圧ショベル市場では省エネルギー化の推進とさらなる高性能化への関心が高まっており、これらの要求に応える次世代ポンプとして「K7Vシリーズ」を開発した。油圧システム全体の効率や作業スピードの向上要求に対応するべく、最新の高効率化技術の適用や高い入力トルクを想定した設計とすることで、クラス最高レベルの効率と出力密度および高い信頼性を実現した。

まえがき

中国やインドなどの国々が急速な成長を遂げ、建設機械の市場はグローバル化が急速に進んでいる。一方で建設機械においても地球環境に対する意識が高まっており、近年では自動車と同様に省エネルギー化の取組みが必須となってきた。

1 背景

近年の建設機械においては、環境規制強化・省エネ化・ハイブリッドシステム導入・電子制御化が進むなど、取り巻く環境や市場動向が大きく変化している。建設機械メーカーはその変化に対応しながら機種開発を進めており、ポンプなどの油圧機器に対しても高い性能や信頼性が要求されている。

油圧ショベル用ポンプとしてベストセラーとなった「K3V/K5Vシリーズ」は、開発・上市から30年以上が経過している。高い信頼性と汎用性を持つこれらのシリーズは油圧ショベルをはじめとするさまざまな建設機械に搭載されてきた。近年では環境保護や省エネルギー化への関心が高まり、より効率が高くコンパクトであるなど、油圧ポンプにも従来より多様化した市場動向や顧客指向にマッチした機能と性能を備えることが必要となってきた。これらの要求に応えるべく、「K3V/K5Vシリーズ」に置き換わる次世代ポンプとして「K7Vシリーズ」を開発した。

2 仕様

「K7Vシリーズ」はあらゆる面で従来シリーズや競合他社製品の性能を凌駕することを目標として開発している。

ポンプの主要部品であるロータリ部品については全面的に設計を見直すことで、従来シリーズよりも高い効率を得ながら信頼性も向上させている。「K7Vシリーズ」ポンプの断面および主要ロータリ部品を図1に、ラインナップおよび各仕様を表1にそれぞれ示す。

(1) 圧力仕様

定格圧力はショベルで一般的に使用される35MPaと従

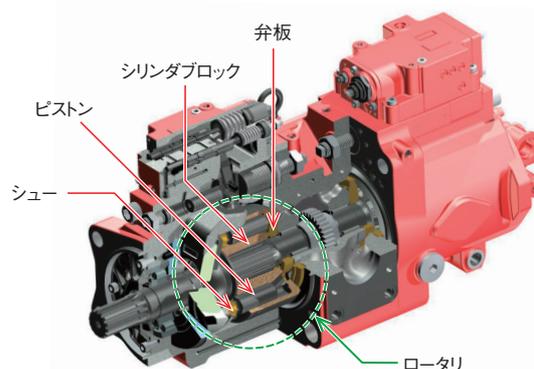


図1 「K7Vシリーズ」ポンプ断面および主要ロータリ部品
Fig. 1 Cross sectional view and major rotary parts of K7V series

表1 「K7Vシリーズ」ラインナップの仕様
Table 1 Specifications of K7V series

サイズ	125	140	160	180	280
最大容量 [cm ³]	130	140	160	180	280
定格圧力 [MPa]	35	35	35	35	37
ピーク圧力 [MPa]	40	40	40	40	42
自吸最高回転数 [min ⁻¹]	2,360	2,200	2,100	2,000	1,800
最高回転数 [min ⁻¹]	2,700	2,500	2,350	2,300	2,100
最大入力トルク [Nm]	931	931	1,500	1,500	2,500

来と同一にしなが、ロータリ部品についてはシヨベル以外の建設機械への適用や将来の高圧化を見据えた設計とした。なお、ロータリ部品を共用する閉回路用ポンプ「K8Vシリーズ」では定格圧力42MPaを達成している。

(2) 容量

油圧シヨベルの動力源であるディーゼルエンジンの省エネルギー化対応として、建設機械メーカーはエンジン回転数を低減する傾向にある。その中でシヨベルの作動スピードを確保するためにはポンプ容量を増加させる必要がある。これらの市場動向やニーズを捉え、十分な吐出流量が得られる容量設定とした。

3 特長

(1) 高効率

ポンプ効率は建設機械の燃費に直結することから、高効率化に対する顧客からの要求は非常に高い。世界最高水準の効率を達成するため、「K7Vシリーズ」はポンプ全体の形状やポンプ性能を決める主要諸元の最適化を図っている。主要諸元の最適化を図るにあたり、各設計因子の影響を正確に把握するため、高精度な効率計測の結果をもとに、ロータリ部品間の部位ごとの発生損失を数式化し、高精度なポンプ効率予測計算が可能となるプログラムを開発した。これを用いて、干渉や強度などの制約条件を与え、その中で発生損失が低くて高いポンプ効率を得られる最適な諸元の組合せを求め、図2に示すように主要諸元を決定した。

新規開発した「K7V125」と従来ポンプ「K3V112」の効率計測結果を図3に示す。最適化の効果を最大限生かすことによって、「K7Vシリーズ」は従来ポンプに対して常用域で3ポイント以上の効率向上を達成している。

(2) 高出力密度

エンジン回転数低減への対応として容量を増加させるために、内部部品の強度向上を図り、従来ポンプに比べて許容入力トルクの向上を実現している。

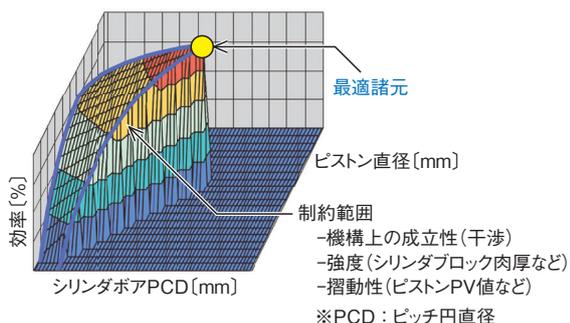


図2 シリンダボアPCDとピストン直径の最適化
Fig. 2 Optimization of cylinder bore PCD and piston diameter

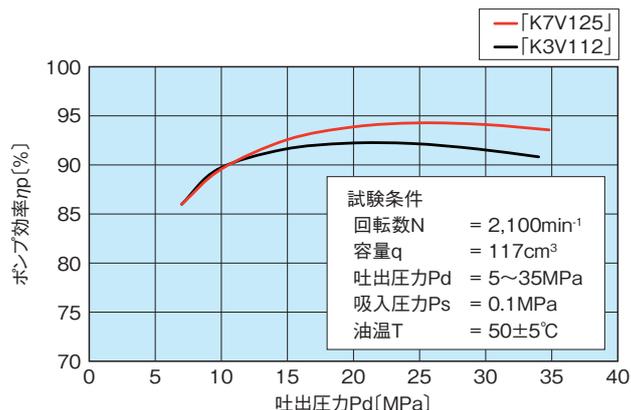


図3 「K7V125」と「K3V112」のポンプ効率計測結果
Fig. 3 Pump efficiency measurement results of K7V125 and K3V112

また、キャビテーションの発生を抑制するため、CFD解析を用いて通路圧損を可視化して、圧損が高い部分の流路形状を最適化した。これにより従来ポンプに対し自吸最高回転数向上を図っている。

(3) 高信頼性

市場のグローバル化によって過酷な状況で油圧シヨベルが稼働する機会が増え、ポンプにもより高い信頼性が求められる。一方で高圧高トルク化によってロータリ部品のしゅう動条件は厳しくなっており、焼付きなどによる破損リスクが高くなることから、しゅう動面の接触面圧低減が必要となる。「K7Vシリーズ」のしゅう動面においては、弾性流体潤滑解析を利用して最適形状を求め、局部面圧を低減することで焼付きを防止し、信頼性向上を図っている。

あとがき

現在、「K7Vシリーズ」は5サイズを上市しており、いずれも顧客から好評を得ている。引き続きラインナップ拡充を進め、市場のニーズに応じていく。

〔文責 精密機械・ロボットカンパニー
精密機械ビジネスセンター 技術総括部 機器第一技術部
赤松 透〕

〔問い合わせ先〕

精密機械・ロボットカンパニー
精密機械ビジネスセンター
営業総括部 機器第一営業部
Tel. (078) 360-8605, Fax. (078) 360-8612

クローズ回路用斜板形アキシャルピストンポンプ「K8Vシリーズ」・斜板形アキシャルピストンモータ「M7Vシリーズ」

K8V Series – Closed loop Swash Plate type Axial Piston Pump, and M7V Series – Swash Plate type Axial Piston Motor



世界的にインフラ整備が拡大している中、ホイールローダやクレーンなどの建設機械の需要が増加している。当社では、建設機械などで採用されているクローズ回路用途のポンプとして「K8Vシリーズ」を、ウインチなどのアクチュエータ用途のモータとして「M7Vシリーズ」を開発した。また、それらを組み合わせることで油圧無段変速装置HST（Hydro-Static Transmission）も最適に構成できる。

「K8Vシリーズ」は、長年蓄積してきた技術と最新主力ポンプで採用した効率予測シミュレーションなどの新技術を適用することで、高効率と低騒音を実現した。「M7Vシリーズ」は、当社が得意とする斜板形モータをベースに、11本ピストンを採用するなど新しい設計技術の適用により、最高回転数向上と低速での安定性向上の両立を実現した。

まえがき

昨今の新興国での目覚ましい経済発展などを背景に、世界的にインフラ整備が拡大している。それに伴い、インフラ整備に欠かせないホイールローダやクレーンなどの建設機械の需要が増加している。

1 背景

建設機械に多く採用されているクローズ回路は、ポンプとモータのみで油を循環させる回路であり、回路中にバルブを設けることなく油の流れの方向を変えることができる。そのため、当社製の「K7Vシリーズ」や「K3VLSシリーズ」などのオープン回路用と異なり、クローズ回路の油圧ポンプには両方向に油を吐出する機構が必須となる。また、クレーンなどのアクチュエータとなる油圧モータには、より高速で回転できる性能と、低速でも安定して回転できる性能の両立が求められる。

当社は、これらの分野に参入するために、クローズ回路の用途に適した斜板形アキシャルピストンポンプ「K8Vシリーズ」とクレーンの巻上用途などに適した斜板形アキシャルピストンモータ「M7Vシリーズ」を新たに開発した。また、これらを組み合わせることで、油圧無段変速装置HST（Hydro-Static Transmission）をも最適に構成することができる。HSTは、エンジンなどの原動機の動力を受けたポンプが油を吐出し、その油でモータを回転させる

ことにより、タイヤなどを駆動させるトランスミッションである（図1）。ポンプやモータの押しのけ容積（容量）を変えることで変速比を無段階に変えることができ、ポンプが出す油の方向を変えることでタイヤなどの回転方向を変えることができる。

2 仕様

一般的に油圧ポンプやモータのサイズはその容量により分類され、「K8Vシリーズ」は3サイズ、「M7Vシリーズ」は4サイズをラインナップしている。表1と表2にそれぞれ

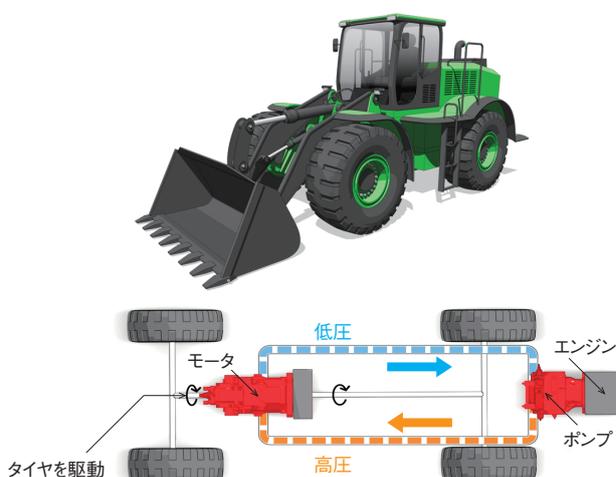


図1 HSTシステム
Fig.1 HST system

表1 「K8Vシリーズ」の仕様
Table 1 Specifications of K8V series

型式	「K8V71」	「K8V90」	「K8V125」
押しのけ容積 [cm ³]	71	90	130
圧力 [MPa]	定格	42	
	最高	50	
定格回転数 [min ⁻¹]	3,300	3,050	2,850

表2 「M7Vシリーズ」の仕様
Table 1 Specifications of M7V series

型式		「M7V85」	「M7V112」	「M7V160」	「M7V212」
押しのけ容積 [cm ³]	q max	68-88.5	90-112	128-160	172-215
	q min	0-68	0-90	0-128	0-172
圧力 [MPa]	定格	42			
	最高	50			
最高回転数 [rpm]	at q max	3,900	3,550	3,100	2,900
	at q ₁ < 0.6q _{max}	6,150	5,600	4,900	4,600 (0.4q _{max})

れの仕様を示す。両者ともHSTにも対応した高圧力仕様であり、さらに「M7Vシリーズ」は高速回転仕様としている。

3 特 長

(1) 「K8Vシリーズ」

(i) 高 効 率

先進的な計測技術やシミュレーションなどを活用して、内部の挙動・状態を正確に把握するなど事前検証を実施することで、最新主力ポンプの効率向上を実現している。「K8Vシリーズ」は、これにより世界最高クラスの効率を実現している。図2に示すように、「K8Vシリーズ」は特に高圧力領域において高い効率を有しており、競合他社製ポンプに対して最大で4ポイント高い。

(ii) 低 騒 音

シミュレーションや解析などを活用することで、最新主力ポンプの大幅な騒音低減を実現しており、「K8Vシリーズ」でも同様である。たとえば、「K8V125」において、容量125cm³・圧力15MPa・回転数2,100min⁻¹時の音響パワーレベルは89dB (A) と、競合他社製ポンプに対して2dB (A)

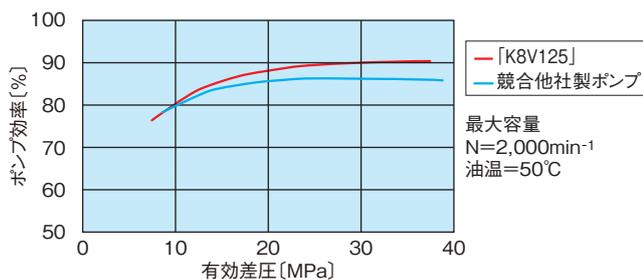


図2 ポンプ効率の比較
Fig. 2 Comparison of pump efficiency

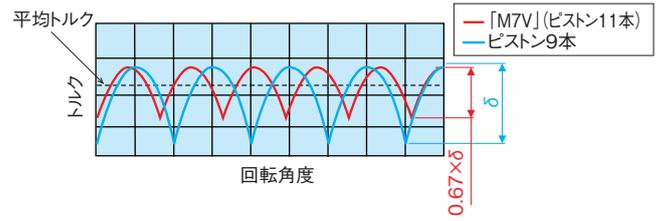


図3 モーターの回転におけるトルク変動
Fig. 3 Torque fluctuations with the motor rotation

の低騒音を実現した。

(2) 「M7Vシリーズ」

(i) 最高回転数向上と低速での安定性向上

最高回転数の向上においては、しゅう動部品の発熱に特に注意する必要がある。「M7Vシリーズ」では、伝熱・流体解析を活用し熱を抑制する機能と逃がす機能を持つ設計としており、これまでの2倍の最高回転数を実現している。

一方、低速での安定性は、回転中の高圧側ピストン本数の増減に起因するトルク変動に影響を受ける。ピストン本数をこれまでの9本から11本に増やすことで、図3に示すようにトルク変動を小さくして、低速時の安定した回転を実現している。

(ii) 低 騒 音

「M7Vシリーズ」は、騒音の原因となる振動を抑制する剛性の高い斜板形構造とすること、ポンプと同様に騒音低減技術を適用することで、低騒音を実現している。たとえば、「M7V85」において、容量51cm³・圧力10MPa・回転数6,150min⁻¹時の音響パワーレベルは89dB (A) と、競合他社製モータに対して、4 dB (A) の低騒音を実現した。

あ と が き

「K8Vシリーズ」と「M7Vシリーズ」は、当社の最新技術を結集して開発した製品である。その優れた特性により、さらに多くの顧客の役に立てるよう、引き続き拡販活動を進めていく。

〔文責 精密機械・ロボットカンパニー〕

精密機械ビジネスセンター 技術総括部 機器第一技術部
楠本 亮介

〔問い合わせ先〕

精密機械・ロボットカンパニー
精密機械ビジネスセンター
営業総括部
Tel. (078) 360-8606, Fax. (078) 360-8612

燃料電池車用高圧水素減圧弁「KGPR65D」

KGPR65D – High-pressure Hydrogen Regulator for Fuel Cell Vehicles



地球環境に優しい車として燃料電池車が注目されており、その動力源である燃料電池に安定して水素を供給するために、高性能な減圧弁が求められている。当社は、長年にわたる油圧機器の開発・製造から培ってきた流体制御技術をベースに、車両寿命期間である約20年にわたって水素ガスを確実に封止できる、小型・高精度で信頼性の高い減圧弁を開発した。また、それはダイムラー社に高く評価され、燃料電池車メルセデス・ベンツ GLC F-CELLに量産採用された。

まえがき

地球環境問題に対する関心が高まる中、将来に向け温室効果ガスの排出をゼロにする取組みが必要となっている。

1 背景

ガソリン車に代わる低公害車として、電気自動車と燃料電池車FCV (Fuel Cell Vehicle) が注目されている。これらは単なる移動手段としてだけでなく、災害時にはエネルギー源として威力を発揮する。FCVは車載した水素と空気中の酸素とを燃料電池で化学反応させて発電した電力でモータを動かして走る車である。ガソリン車に比べて地球環境に優しい車として知られており、電気自動車より充電時間が短い・航続距離が長いという特長を有している。

現在のFCVは、水素を70MPa (700気圧) (ただし、高温時は最大87.5MPa) という超高圧のガス (気体) の状態で車載し、そこから減圧した水素を燃料電池で酸素と反応させる方式が主流である。

当社は、長年にわたる油圧機器の開発・製造から培ってきた流体制御技術をベースに、その超高圧ガスを精度良く1 MPa程度にする減圧弁を開発した。

2 製品の概要および仕様

高圧水素減圧弁「KGPR65D」は、ガスを減圧する機能を有する減圧弁と、その制御圧力が異常となった際にガスを外部へ自動で逃がして下流の機器を保護するリリーフ弁が一体となっている。一般的なFCVのシステム構成を図1に、高圧水素減圧弁「KGPR65D」の外観を図2に、その

主要諸元を表1に、それぞれ示す。

3 特長

水素は、元素周期表の最初の元素であることが示すとおり、最も軽くて小さい物質である。そのため、金属材料に侵入して機械特性を低下 (水素脆化) させたり、ゴムの分

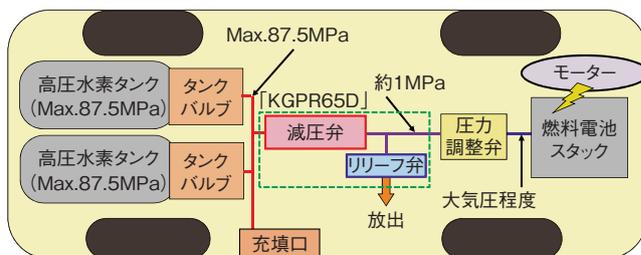


図1 FCVのシステム構成
Fig. 1 System configuration of fuel cell vehicle

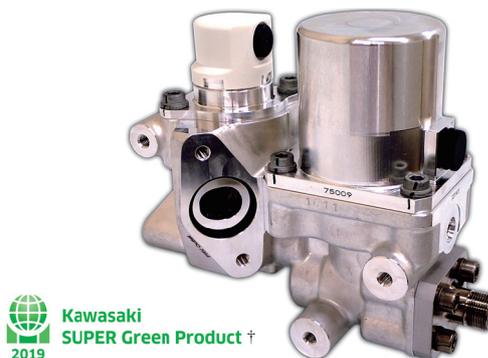


図2 高圧水素減圧弁「KGPR65D」
Fig. 2 High-pressure hydrogen regulator KGPR65D

表1 主要諸元
Table 1 Major specifications

一次圧力範囲 [MPaG]	2.0~87.5
減圧弁制御圧力 [MPaG]	0.9~1.4
定格使用流量 [g/s]	1.6
使用温度範囲 [°C]	-40~+85
リリーフ弁作動圧 [MPaG]	約2.0
質量 [kg]	約1.9

子も透過してしまうほど漏れやすいなどの性質を有する。

したがって、金属に関しては高強度材は水素脆化しやすく使用できないため、強度解析によって部品形状や通路形状を工夫することで必要な強度を確保している。

また、シール部については油圧機器製造で培った技術を生かして、金属部の寸法および面粗度を高精度で実現しているだけでなく、材質や形状を工夫することで超高压に耐えうるようにしている。

これらによって、-40~+85°Cの幅広い温度条件の下、車両寿命である20年の間ノーメンテナンスで高压の水素ガスを封止できる。

(1) 小型・高精度

超高压のガスを一気に約1 MPa (10気圧) まで減圧できるので、複数回に分けて徐々に減圧するものよりも小型である。この技術は、約40年前に防衛製品の開発で培った流体制御技術を基に改良・発展させたものである。

また、図3に示すように、減圧のためのオリフィス開度を調整する可動部品を水素ガス雰囲気とは隔離されたボールベアリングで支持することで、高精度な圧力調整と車両寿命に耐えうる耐久性を実現している。

(2) 高信頼性

FCVを公道で走らせるためには、原則、各国や地域ごとに認証を取得する必要がある。これは、超高压に圧縮された水素ガスを搭載した車両が、身近を走る際の安全性を担保するためである。

認証に必要な試験は、振動・衝撃、温湿度サイクル、圧

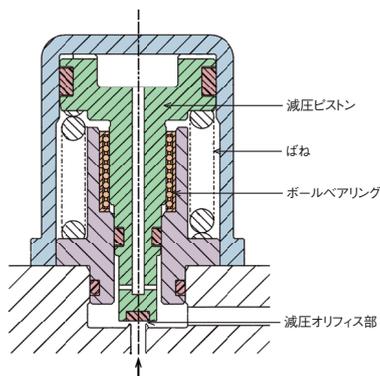


図3 減圧弁の構造
Fig. 3 Construction of regulator



図4 燃料電池車メルセデス・ベンツ GLC F-CELL
Fig. 4 Fuel cell vehicle Mercedes-Benz GLC F-CELL

力サイクル、作動耐久など多岐にわたっており、いずれも20年の車両寿命を想定した内容となっている。欧州認証は想定負荷の3倍のサイクル数が求められる液圧サイクル試験を含む14項目、北米認証は最大1次圧力の2.5倍以上の耐破壊性試験などを含む17項目の試験を、第三者認証機関の認証官立会の下で行う必要がある。

これに加えて、ドイツのダイムラー社が独自にサプライヤーに対して要求している約25項目の各種信頼性試験にもすべて合格している。

4 採用実績

高圧水素減圧弁「KGPR65D」は、図4に示す燃料電池車メルセデス・ベンツ GLC F-CELL用として量産採用され、2018年1月から出荷を開始している。この燃料電池車は現在は欧州市場のみでの販売だが、今後は日本市場にも展開される予定となっている。

あとがき

当減圧弁は、2018年にもものづくり日本会議/日刊工業新聞社主催の“超”モノづくり部品大賞モビリティ関連部門賞を受賞した。水素は環境に優しいエネルギー源であり、当社のグループミッションにある“地球環境の未来に貢献する”べく、引き続き新たな製品を開発して市場に送り出していく。

[文責 精密機械・ロボットカンパニー
精密機械ビジネスセンター 技術総括部 システム技術部
鈴木 豊]

[問い合わせ先]

精密機械・ロボットカンパニー
精密機械ビジネスセンター
営業総括部 産機営業部 産機営業課
Tel. (03) 3435-6893, Fax. (03) 3435-2023

ポンプ回転数制御システム用コントローラ「N-ECST」

N-ECST – Controller for Variable Speed Control Pump System



油圧市場において省エネルギー機器やシステムが製品化されて久しいが、さらなる使い勝手の向上や高機能化の需要が増加している。これに対応するため、省エネルギーを特長の一つとする油圧ポンプ回転数制御システム「エコサーボ」において、位置や圧力などをフィードバック制御するコントローラの性能・機能を刷新するべく、新型コントローラを開発した。

最新制御技術による制御ゲインのオートチューニング機能を実現すると同時に、多軸制御に有効な専用機能の追加、容易にメンテナンス可能なアプリケーションツールの製品化など、性能と操作性を大幅に改善した。

まえがき

世界的な地球温暖化に伴う環境・資源問題への注目から、油圧市場においても省エネルギーを考慮したさまざまな機器やシステムが製品化されて久しい。このような中、省エネルギー製品の幅広い分野への適用拡大に際して、さらなる使い勝手の向上や高機能化の需要が増加している。

1 背景

当社は油圧システムの省エネルギー製品として、「エコサーボ」を製品化している。これは、油圧ポンプをサーボモータなどで駆動してアクチュエータ動作に必要な流量を油圧ポンプの回転数で制御するシステムで、必要な動力のみを出力することが可能となり、大幅な省エネルギーを実現している。

「エコサーボ」で制御の要となるコントローラについては、調整作業の簡素化や複数アクチュエータの協調制御に加えて運転状態の可視化などの需要が増加しており、従来製品から性能・操作性を大幅に改善した新型コントローラ「N-ECST（ネクスト）」を開発した。

2 仕様

「N-ECST」はフィードバック制御機能を有しており、運転状態に応じた油圧ポンプの最適回転数を演算する。油圧ポンプの回転数制御においてアクチュエータの推力（圧力）や位置を高精度に制御するためには、図1に示すような制御対象のフィードバック制御が必要となる。点線内は「N-ECST」の制御範囲を示している。

「N-ECST」と従来製品の仕様を表1に示す。「N-ECST」では、最新制御技術による制御ゲインのオートチューニング機能や制御演算の高速化などにより制御性能を向上するとともに複数軸の制御を可能としている。また、通信機能や規格対応を実現することで、使い勝手も向上させている。

3 特長

(1) 自動適応制御

単純適応制御SAC（Simple Adaptive Control）をベー

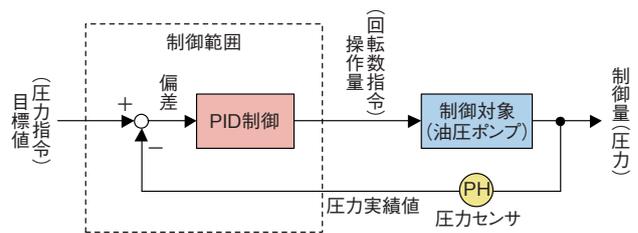


図1 フィードバック制御の構成例
Fig. 1 Configuration example of feedback control

表1 「N-ECST」と従来製品の仕様
Table 1 Specifications of N-ECST and conventional product

項目	「N-ECST」	従来製品
制御対象	1～4軸	1軸専用
制御機能	自動適応制御 PID制御他	PID制御
制御周期	2ms	5ms
電源	DC24V	DC24V, DC5V
通信機能	RS232C, Ethernet, CAN	—
規格対応	CEマーキング RoHS指令	—

スとして、当社独自の補償機能を組み込むことで、安定かつ高応答に適応できる自動適応制御を新しく実装した。

負荷に適した応答で制御ゲインが自動調整されるオートチューニング機能を有しており、機械の立上げ時間短縮が図れるとともに、作業者に依存しない安定した制御調整結果が得られる。位置制御におけるオートチューニング機能適用時の波形を図2に示す。制御ゲインが高い状態から開始して位置実績が収束していくことがわかる。

(2) 多軸制御機能

産業機械における作業効率や制御精度の向上に伴ない、アクチュエータの複数軸同時制御の需要が増加している。たとえば、多軸成形プレスの背圧制御や昇降設備・水平移動装置などのレベリング制御などがある。それらの需要に対して、「N-ECST」では1軸制御タイプと2軸制御タイプの2種類を製品ラインナップしている。

2軸制御タイプは、アクチュエータ2軸分のインターフェースを持ち、2軸を個別に独立制御することができる。また、2台接続すると最大4軸までの高精度な同調制御も可能となる。

多軸プレスへの2軸用コントローラ適用例を図3に示す。各軸の状態がプレス動作に相互干渉するが、コントローラ1台で各軸を同時制御することで高応答な補正制御が可能となる。上軸の位置制御速度で加圧下降しながら、下軸が高精度な背圧（クッション）制御を行うことで、安定した成形加工の実現に貢献している。

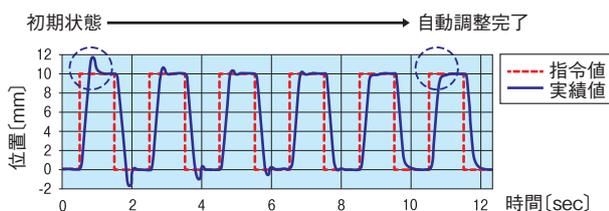


図2 オートチューニング機能適用時の波形
Fig. 2 Waveform with auto-tuning function

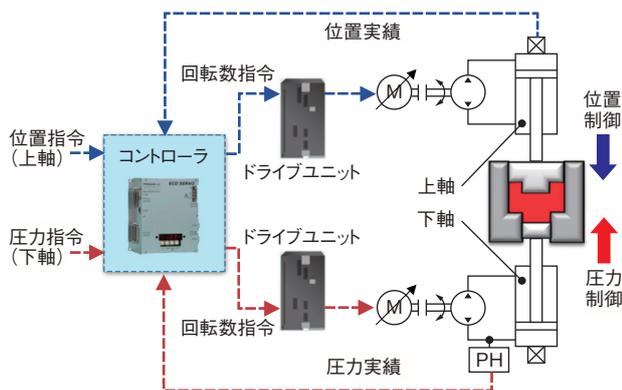


図3 2軸用コントローラの適用例
Fig. 3 Application example of two-axis controller

(3) メンテナンス機能の充実

高精度制御を実現するためには、定量的なデータ解析が必要である。「N-ECST」は、シリアル・LAN通信機能を標準実装するとともに、内部制御変数のデータ確認やリアルタイムグラフ表示が可能なアプリケーションソフトを備えている。リアルタイムにモニタリングできるデータとして、圧力・位置・回転数などの指令値および実績値、さらに制御演算データなどが選択可能である。

多機能化に伴って制御パラメータが増加するため、パラメータ値の変更などを容易にするパラメータ管理ツールも備えている。ユーザーのパソコンからの接続による簡単操作で、使い勝手向上や作業工数削減に貢献している。

海外に設置された機械についても、「N-ECST」に日本からインターネット経由で接続して、遠隔操作により現地機械の調整や状態監視が可能なシステム実績もある。

あとがき

「N-ECST」はプレス分野や自動車関連部品分野を中心に実績を積み重ねている。現在開発中の産業ネットワークに対応する通信オプション機能により、さらに利便性を高めて適用分野を拡大していく。

〔文責 精密機械・ロボットカンパニー
精密機械ビジネスセンター 技術総括部 システム技術部
豊田 敏久〕

〔問い合わせ先〕

精密機械・ロボットカンパニー
精密機械ビジネスセンター
技術総括部 システム技術部
Tel. (078) 991-1146, Fax. (078) 991-1217

特許 第6200695号

発明の名称：油浸型ソレノイド

発明者：清水 博明

—自動組立に適した新型ソレノイド—

油圧ショベルなどの建設機械の電気制御化が急速に進展する状況において、その駆動源として使用される油圧機器を制御する電磁比例カートリッジ弁の重要性がますます拡大している。

電磁比例カートリッジ弁は、油圧を制御するバルブと、電気信号でバルブを動かすソレノイドとで構成される。従来の電磁

比例カートリッジ弁においては、組立工数が多いため高コストであるという問題があった。

本発明は、自動組立に適した構造を実現することで、組立工数を大幅に低減して低コスト化を図るものである。

本発明のソレノイドは、図1に示すように、磁極一体ケースに可動鉄心やコイルモールドなどの部品を一方向から挿入し、最後にカシメを行うだけのシンプルな構造であり、TIG溶接・インサート成形・ナット固定などの手間のかかる工程をすべて排除した。このように自動組立に適した構造とすることで、低コスト化を実現した。



図1 新型ソレノイドの組立工程

特許 第5462764号

発明の名称：減圧弁

発明者：二宮 誠，野道 薫，鈴木 豊

—高耐久性・高信頼性を実現する水素減圧弁—

当社は、低炭素社会実現の一環として、図1に示すようなFCV用の高圧水素減圧弁（減圧弁）を自動車メーカーに提供している。FCVでは、タンクに貯留された高圧の水素ガスを低圧にして燃料電池に供給する。減圧弁はこの減圧を行う役割を担っており、安定した圧力で確実に水素を燃料電池に供給することが求められる。このため、減圧弁には高耐久性と高信頼性が要求とされる。

減圧弁は、主に弁体とシリンダ部のあるハウジングから構成

され、シリンダ部に対して弁体が往復動作することで、水素ガスの減圧を行う。弁体とシリンダ部との間の摩擦抵抗が大きいと、減圧弁の動作や耐久性に影響が及ぶことから、摩擦抵抗を抑えることが課題であった。

本発明は、図2に示すように、弁体とシリンダ部の間に転がり軸受を設けることで、両者の間の摩擦抵抗を極小化している。また、水素ガスが転がり軸受に触れると腐食などの問題が発生するが、転がり軸受とガス流路の間にシールを設けることで、転がり軸受を水素ガスから分離・保護している。このようにして、減圧弁の高耐久性と高信頼性を実現している。



図1 高圧水素減圧弁「KGPR65D」

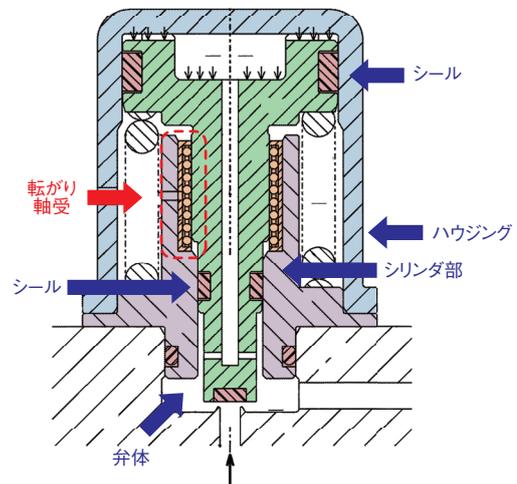


図2 高圧水素減圧弁の内部構造

事業セグメント別主要製品／生産拠点

事業セグメント	主要製品	主要製品拠点
船舶海洋	・LNG 運搬船, LPG 運搬船, 油槽船, ばら積み船, コンテナ船, 自動車運搬船, 超高速船, 艦艇, 官公庁船	神戸工場 坂出工場 Kawasaki Subsea (UK) Limited (イギリス) 南通中遠海運川崎船舶工程有限公司 (中国)* 大連中遠海運川崎船舶工程有限公司 (中国)*
車 両	・鉄道車両, 新交通システム, 貨車	兵庫工場 播磨工場 Kawasaki Motors Manufacturing Corp., U.S.A. (アメリカ) Kawasaki Rail Car, Inc. (アメリカ)
	・ロータリー除雪車, 凍結防止剤散布車 ・軌道モーターカー, 重量物運搬車	(株)NICHIGO・曙工場 (株)NICHIGO・稲穂工場
航空宇宙システム	・航空機 (固定翼機, ヘリコプター), 誘導機器, 電子機器, 宇宙関連機器, シミュレータ	岐阜工場 名古屋第一工場 名古屋第二工場 Kawasaki Motors Manufacturing Corp., U.S.A. (アメリカ)
	・航空機部分品, 標的システム, ロケット部分品, 宇宙機器, 航空機整備・改造	日本飛行機(株)・横浜工場 日本飛行機(株)・厚木工場
	・航空機用エンジン, 航空機ギアボックス	明石工場 西神工場
エネルギー・環境プラント	・各種産業用プラント (セメント, 化学, 搬送プラント) ・各種陸船用ボイラ (発電事業用ボイラ, 産業用ボイラなど) ・ごみ処理設備 ・各種低温貯蔵設備 (LNG タンク) ・シールド掘進機, トンネル掘削機	播磨工場 安徽海螺川崎節能設備製造有限公司 (中国)* 安徽海螺川崎裝備製造有限公司 (中国)* 上海海螺川崎節能環保工程有限公司 (中国)*
	・船用ガスタービンエンジン ・ガスタービン発電設備, コージェネレーションシステム	明石工場 西神工場
	・蒸気タービン, ディーゼル機関, ガスエンジン, 大型減速装置 ・船用推進装置 (サイドスラスト, 旋回式スラストなど) ・各種空力機械 (天然ガス圧送設備, 送風機など)	神戸工場 播磨工場 武漢川崎船用機械有限公司 (中国)
	・空調機器, 汎用ボイラ	川重冷熱工業(株)・滋賀工場
	・破砕機, 環境関連機器	(株)アーステクニカ・八千代工場
	・モーターサイクル, ATV (四輪バギー車), レクリエーションユティリティビークル, 多用途四輪車, パーソナルウォータークラフト「ジェットスキー®」 ・汎用ガソリンエンジン	明石工場 加古川工場 Kawasaki Motors Manufacturing Corp., U.S.A. (アメリカ) Kawasaki Motores do Brasil Ltda. (ブラジル) India Kawasaki Motors Pvt. Ltd. (インド) Kawasaki Motors Enterprise (Thailand) Co., Ltd. (タイ) P.T. Kawasaki Motor Indonesia (インドネシア) Kawasaki Motors (Phils.) Corporation (フィリピン) 常州川崎光陽発動機有限公司 (中国)
精密機械・ロボット	・建設機械用油圧機器, 産業機械用油圧機器・装置 ・船用舵取機, 船用各種甲板機械 ・産業用ロボット ・医薬・医療ロボット	明石工場 西神戸工場 Kawasaki Precision Machinery (U.K.) Ltd. (イギリス) Wipro Kawasaki Precision Machinery Private Limited (インド) 川崎精密機械(蘇州)有限公司 (中国) 川崎春暉精密機械(浙江)有限公司 (中国) 川崎(重慶)機器人工程有限公司 (中国) Flutek, Ltd. (韓国)
	・油圧プレス	川崎油工(株)

- [Kawasaki Precision Machinery] ロゴ, [ECO SERVO] ロゴ, [Hydro Servo Muscle] ロゴは, 川崎重工業株式会社の登録商標です。 [K3V]は, 商標登録出願中です。

Kawasaki Precision Machinery

ECO SERVO Hydro Servo Muscle

- 本誌に記載されている社名, 商品名, サービス名などは, それぞれ各社が商標として使用している場合があります。

-  **Kawasaki Green Product Promotion Activity**

Kawasakiグリーン製品は, 当社のグループミッション「世界の人々の豊かな生活と, 地球環境の未来に貢献する “Global Kawasaki”」の達成に向け, 製品の環境性能と生産過程での環境管理活動において当社が独自に定めた基準を満足する製品を, [Kawasakiグリーン製品], [Kawasakiスーパーグリーン製品]として適合性評価を行い, 社内外に推進しているものです。

川崎重工技報 第181号

2019年11月1日

編集・発行	兵庫県明石市川崎町1番1号 川崎重工業株式会社 技術開発本部
発行責任者	技術開発本部長 中谷 浩
発行人	技術開発本部 技術企画推進センター長 久保 貞夫
印刷	広島県広島市中区中島町9番6号 株式会社 秀巧堂

禁無断転載

事業所・生産拠点・研究開発拠点

東京本社

〒105-8315 東京都港区海岸1丁目14番5号
Tel. 03-3435-2111 / Fax. 03-3436-3037

神戸本社

〒650-8680 兵庫県神戸市中央区東川崎町1丁目1番3号
(神戸クリスタルタワー)
Tel. 078-371-9530 / Fax. 078-371-9568

技術開発本部

〒673-8666 兵庫県明石市川崎町1番1号(明石工場内)
Tel. 078-921-1611 / Fax. 078-921-1867

北海道支社

〒060-0005 北海道札幌市中央区北5条西2丁目5番
(JRタワーオフィスプラザさっぽろ14階)
Tel. 011-281-3500 / Fax. 011-281-3507

東北支社

〒980-0021 宮城県仙台市青葉区中央1丁目6番35号(東京建物仙台ビル16階)
Tel. 022-261-3611 / Fax. 022-265-2736

中部支社

〒450-6041 愛知県名古屋市中村区名駅1丁目1番4号
(JRセントラルタワーズ41階)
Tel. 052-388-2211 / Fax. 052-388-2210

関西支社

〒530-0057 大阪府大阪市北区曾根崎2丁目12番7号(清和梅田ビル16F)
Tel. 06-6484-9310 / Fax. 06-6484-9330

中国支社

〒730-0013 広島県広島市中区八丁堀14番4号(JEI広島八丁堀ビル6階)
Tel. 082-222-3668 / Fax. 082-222-2229

九州支社

〒812-0011 福岡県福岡市博多区博多駅前1丁目4番1号
(博多駅前第一生命ビル)
Tel. 092-432-9550 / Fax. 092-432-9566

沖縄支社

〒900-0015 沖縄県那覇市久茂地3丁目21番1号(國場ビル)
Tel. 098-867-0252 / Fax. 098-864-2606

岐阜工場

〒504-8710 岐阜県各務原市川崎町1番地
Tel. 058-382-5712 / Fax. 058-382-2981

名古屋第一工場

〒498-0066 愛知県弥富市楠3丁目20番地3
Tel. 0567-68-5117 / Fax. 0567-68-5161

名古屋第二工場

〒490-1445 愛知県海部郡飛鳥村金岡7番地4
Tel. 0567-68-5117 / Fax. 0567-68-5161

神戸工場

〒650-8670 兵庫県神戸市中央区東川崎町3丁目1番1号
Tel. 078-682-5001 / Fax. 078-682-5503

兵庫工場

〒652-0884 兵庫県神戸市兵庫区和田山通2丁目1番18号
Tel. 078-682-3111 / Fax. 078-671-5784

西神工場

〒651-2271 兵庫県神戸市西区高塚台2丁目8番1号
Tel. 078-992-1911 / Fax. 078-992-1910

西神戸工場

〒651-2239 兵庫県神戸市西区榎谷町松本234番地
Tel. 078-991-1133 / Fax. 078-991-3186

明石工場

〒673-8666 兵庫県明石市川崎町1番1号
Tel. 078-921-1301 / Fax. 078-924-8654

加古川工場

〒675-0112 兵庫県加古川市平岡町山之上新原170番地
Tel. 079-427-0292 / Fax. 079-427-0556

播磨工場

〒675-0180 兵庫県加古郡播磨町新島8番地
Tel. 079-435-2131 / Fax. 079-435-2132

坂出工場

〒762-8507 香川県坂出市川崎町1番地
Tel. 0877-46-1111 / Fax. 0877-46-7006

海外事務所

台北事務所

15F, Fu-key Bldg., 99 Jen-Ai Road, Section 2, Taipei, Taiwan
Tel. +886-2-2322-1752 / Fax. +886-2-2322-5009

現地法人事務所

Kawasaki Heavy Industries (U.S.A.), Inc.

60 East 42nd Street, Suite 2501, New York, NY 10165 U.S.A
Tel. +1-917-475-1195 / Fax. +1-917-475-1392

Kawasaki do Brasil Indústria e Comércio Ltda.

Avenida Paulista, 542-6 Andar, Bela Vista, 01310-000, São Paulo, S.P., Brazil
Tel. +55-11-3289-2388 / Fax. +55-11-3289-2788

Kawasaki Trading do Brasil Ltda.

Avenida Paulista, 542-6 Andar, Cj. 61D, Bela Vista, 01310-000, São Paulo, S.P., Brazil
Tel. +55-11-3266-2790 / Fax. +55-11-3266-2853

Kawasaki Heavy Industries (U.K.) Ltd.

4th Floor, 3 St. Helen's Place, London EC3A 6AB, U.K.
Tel. +44-20-7588-5222 / Fax. +44-20-7588-5333

Kawasaki Heavy Industries Middle East FZE

Dubai Airport Free Zone, Bldg. W6, Block-A, Office No.709,
P.O. Box 54878, Dubai, UAE
Tel. +971-4-214-6730 / Fax. +971-4-214-6729

Kawasaki Heavy Industries (India) Pvt. Ltd.

Room No: 1777, ITC Maurya, Sardar Patel Marg, Diplomatic Enclave,
New Delhi - 110021, India
Tel. +91-11-4358-3531 / Fax. +91-11-4358-3532

Kawasaki Heavy Industries (Singapore) Pte. Ltd.

6 Battery Road, #23-01, 049909 Singapore
Tel. +65-6225-5133 / Fax. +65-6224-9029

Kawasaki Trading (Thailand) Co., Ltd.

12Ath Floor, Unit B, Kamolsukosol BLDG, 317 Silom Road,
Bangrak, Bangkok 10500, Thailand
Tel. +66-0-2631-1151 / Fax. +66-0-2234-4756

Kawasaki Heavy Industries Management (Shanghai), Ltd.

10F, Chong Hing Finance Center, 288 Nanjing Road West,
Huangpu District, Shanghai 200003 China
Tel. +86-21-3366-3100 / Fax. +86-21-3366-3108

Kawasaki Trading (Shanghai) Co., Ltd.

10F, Chong Hing Finance Center 288 Nanjing Road West,
Huangpu District, Shanghai 200003, People's Republic of China
Tel. +86-21-3366-3700 / Fax. +86-21-3366-3701

KHI (Dalian) Computer Technology Co., Ltd.

Room 205, International Software Service Center, Dalian Software Park, 18
Software Park Road, Dalian, China
Tel. +86-411-8474-8270 / Fax. +86-411-8474-8275

Hydrogen Engineering Australia Pty Ltd

Level 6, Suite 6.09, 2 Queen Street, Melbourne, VIC 3000, Australia
Tel. +61-404-809-288

Kawasaki Heavy Industries Russia LLC

Office 1803 (18th Floor), Entrance 3, Krasnopresnenskaya nab. 12, 123610,
Moscow, Russian Federation
Tel. +7-495-258-2115 / Fax. +7-495-258-2116

Kawasaki Heavy Industries (Thailand) Co., Ltd.

28th Floor, Sathorn Square Office Tower 98 North Sathorn Road, Silom,
Bangrak, Bangkok 10500, Thailand
Tel. +66-2-163-2839 / Fax. +66-2-163-2841

