

技術紹介

省エネルギー油圧ショベルシステムの開発

田 中 勇 多 ・ 小 島 正 成

1 はじめに

近年，地球温暖化問題や持続可能な社会の実現に向け，建設機械においても省エネルギー化が強く求められている．特に油圧ショベルでは，油圧システムに起因するエネルギー損失の低減が強く求められている．

また，ショベルなどで使用される油圧制御システムにおいては電子制御化が進展しており，システム全体として高効率化を実現する為には，従来技術だけに依存しない新たな制御技術及びコンポーネントの開発が必要な状況にある．

本技術紹介では，油圧ショベルにおけるエネルギー損失の一つであるブリードオフ流量損失に着目し，その低減を目的としたカヤバ独自の油圧制御システム開発について紹介する．

2 システム開発経緯

2.1 開発方針

省エネルギー油圧ショベルシステムの開発に当たり，システムの導入しやすさを考慮し，アクチュエータなどの主要構成要素は可能な限り既存品を流用した．その上でカヤバ独自の技術を「アドオン」することで省エネルギー効果を得る構成とした．

2.2 システム開発用ショベルの選定

ショベルシステム開発対象として，一般に操作性が優れるとされるオープンセンタ・ネガティブコントロール方式（以下ネガコン方式）¹⁾を採用する機体を選定した（写真1）．油圧ショベルの作業装置は，一般にブーム，アーム，バケットで構成される²⁾．以降，本稿ではこれらの名称を用いて説明する．

また，主要コンポーネントであるコントロールバルブの改造を容易にするため，カヤバ製コントロールバルブを搭載する機体を対象とした．システムの汎用性を確保する観点から，電子制御ポンプ（タンデム2ポンプ構成）とアクチュエータは既存のものを使用する前提とした．



写真1 システム開発用ショベル

2.3 性能把握と消費エネルギー分析の実施

現状機体のエネルギー分析を行うため，選定した開発用ショベルに各種センサを追加し，性能測定を実施した．その結果を基にした消費エネルギー分析結果を図1に示す．

図1よりポンプ出力エネルギーに対する消費エネルギーは，アクチュエータ有効仕事と損失に分かれる．損失は主に圧力損失，漏れ損失，機械損失に分類される．分析の結果，複数アクチュエータを同時に操作した場合の操作性確保に必要な圧力損失は対象外とし，アクチュエータの力行に寄与しない純粋な損失であるブリードオフ損失の低減に着目した．

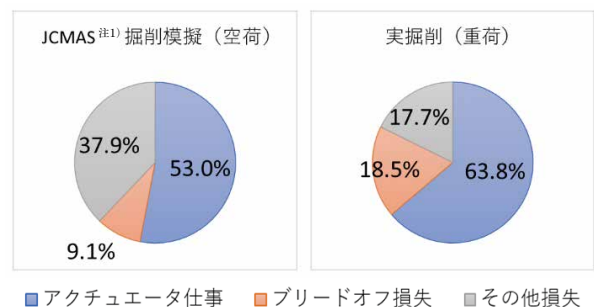


図1 消費エネルギー分析結果

注1）日本建設機械工業会（JCMAS）が制定する建設機械分野の団体規格

2.4 システムのコンセプト

オープンセンタ方式のコントロールバルブは、各スプールセクションにブリードオフ制御機構を有しているが、本システムではこれらを一つに集約する。更にブリードオフ回路を通過する流量を検知し、ポンプ吐出流量とブリードオフ回路面積を協調制御することで、従来の操作性を損なわずブリードオフ流量のみを低減し、高効率化を図る。

ブリードオフ流量は、ポンプ吐出流量と負荷側要求流量（圧力応答含む）との不一致により発生する。従って「ポンプ吐出流量」と「システム圧力」を制御対象とした。このうちポンプ吐出流量は一般的な電子制御ポンプにより任意に制御可能なため、システム圧力を能動的に制御するための新規油圧コンポーネントを開発した。

3 新規油圧コンポーネント

3.1 Bleed-off Relief Valveの概要

ブリードオフ回路の電子制御化を目的として、新たに開発した「開弁圧制御弁」Bleed-off Relief Valve（以下BRV）を写真2に示す。

主な特徴は以下の通りである。

- ①ブリードオフ回路機能の集約
- ②BRV開弁圧の電気制御機能
- ③BRV通過流量の測定機能

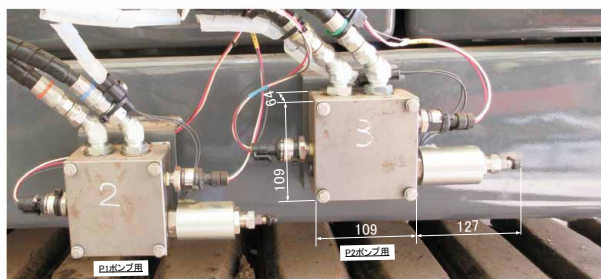


写真2 BRV試作品外観

3.2 BRVの技術的特徴

BRVの構成回路図を図2に示す。ブリードオフ回路の油路面積制御部にバランスピストン型リリーフ構造を採用し、BRV開弁時のシステム圧力をBRV自身の機械的構造により受動的に安定させている。これにより、BRVの能動制御はソレノイド電流による開弁圧目標指示のみで、高応答・高精度かつ安定したシステム圧力制御が可能となる。

更にメインフロー最下流に固定絞りを設置し、絞り前後差圧を圧力センサで測定することで、BRV開弁時の通過流量を高応答で検出できる。

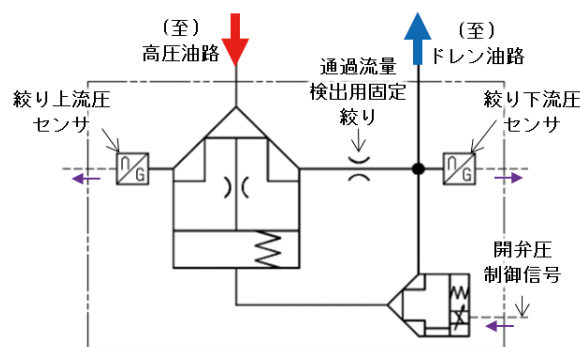


図2 BRV構成回路図

4 BRVシステムの構成と制御

4.1 BRVシステムの油圧回路

BRVシステム油圧回路の簡略図を図3に示す。本システムは、操作レバー（Joystick, J/S）、リアルタイムシミュレータを用いた電子制御ユニット（ECU）、ソレノイドドライバ（Driver）、電磁比例減圧弁、電気制御式可変容量ポンプ、コントロールバルブ、アクチュエータで構成される。

主な機体の改造点は、選定機体の既存油圧回路のポンプラインから分岐するようにBRVを設置した。またメータイン回路導通と同時にブリードオフ回路を閉じるために、メインスプールを変更した。更に制御上不要なネガコンリリーフを削除し、メインスプール中立時の圧力損失低減を図った。

これらにより、既存構成を大きく変更することなく、ベース機体の設計値をほぼそのまま流用可能なBRVを付加したシステムを構成した。

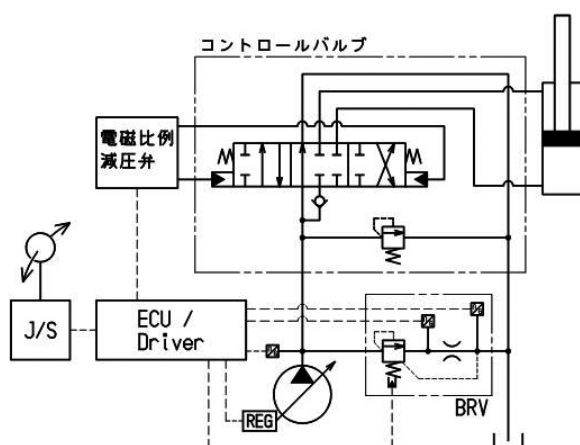


図3 BRVシステム油圧回路図（簡略版）

4.2 BRVシステム開発手法

ショベルシステムは複数の油圧コンポーネントから構成され、各要素の相互影響や過渡特性の影響も大きく、システム挙動は複雑となる。そのため、実

機評価だけでは制御アルゴリズムを含めた設計検討に多大な時間を要する。そこで本開発ではModel Based Development（以下MBD）の手法を用い、シミュレーションモデル上で事前にシステム挙動を評価することで、効率的な設計検討を行った。

MBDモデルとして、制御アルゴリズム（コントローラモデル）と、コンポーネント単体やシステムベンチ、ショベル全体（プラントモデル）を構築し、段階的に評価を実施した。これにより設計値の最適化や制御アルゴリズムの事前検証を行い、試作回数の削減（設計変更1回でBRVコンポーネント設計完了）と評価時間の大幅短縮を実現した。

4.3 ショベルの作動制御

改造前選定機体（以下、従来機）の操作性を維持するため、従来機のパフォーマンス測定データを基に、レバー入力に応じたポンプ吐出流量（作動速度に相当）とシステム圧力上限（起動力に相当）の制御マップを構築した。図4にシステム制御マップ一例を示す。

BRVシステムの制御は、制御マップに基づきポンプ吐出流量とBRV開弁圧を制御するレバー角ポジティブコントロール（以下ポジコン）方式である。

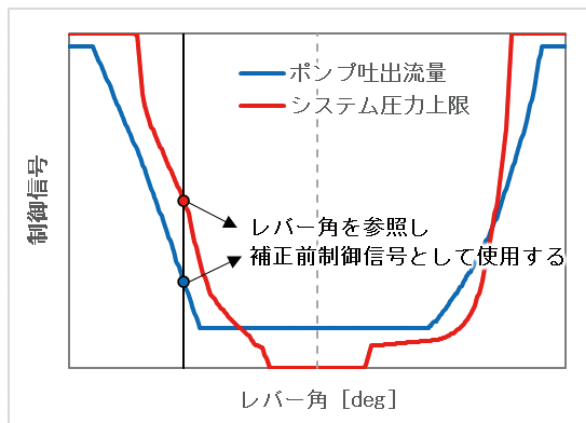


図4 システム制御マップ（例）

単独操作時には各操作の単独操作作用制御マップを使用する。複合操作時には、ポンプ吐出流量は各操作の単独操作作用制御マップを加算し、システム圧力上限は各制御マップの最大値を選択する。これにより従来機と同等の単独・複合操作性を実現している。

また、従来はスプール交換により実施していた作動特性の変更を、本システムでは制御マップの変更により、制御アルゴリズム上で実現できる。

4.4 ポンプ・BRV協調制御

BRVシステムの核心は、ポンプとBRVの協調制御である。図5に協調制御の概要を示す。絞り前後差圧を測定することによりBRV通過流量を検出す

ると、その流量に応じてポンプ吐出流量を低減させると同時に、BRV開弁圧を調整する。これによりシステム圧力を維持しながらポンプ吐出流量から余剰流量のみを削減できる。その結果、ショベル作動時はクローズドセンタ回路と同等の効率で稼働が可能となる。

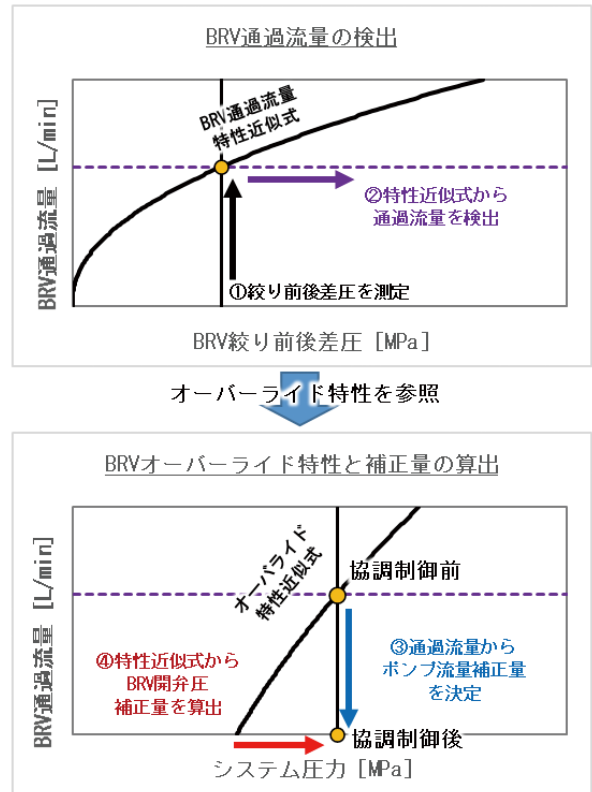


図5 ポンプ・BRV協調制御概要

BRVは、協調制御に適したオーバーライド特性となるように設計しており、一般的な安全弁とは設計思想が異なる。協調制御を成立させるため、BRVのオーバーライド特性を制御アルゴリズム上で参照し、ポンプ吐出流量とBRV開弁圧の補正を行うことで、協調制御に起因するシステム作動状態の過剰変化を抑制している。

4.5 出力制限制御

BRVシステムは、エンスト防止のために、ポンプ吐出流量（算出値）とポンプ吐出圧力（測定値）からシステム総出力を算出し、その上限を規制している。

またポンプ吐出流量とBRV通過流量を比較することで、ショベルの作動状態及び作動負荷を把握できる。これらに対応する出力制限制御を実施することで、作動状態や負荷の変化に応じた高効率な運転も可能である。

5 BRVシステムの省エネルギー効果

5.1 従来機とBRVシステムの性能比較

従来機の実測性能とBRVシステムの性能を比較し、操作性の再現性と省エネルギー効果を評価した。

開発用シヨベルでは、操作レバーに電気ジョイスティックを採用し、操作信号を記録しておくことで、シーケンスにより操作の再現が可能である。このため、同一操作信号で性能比較を実施した。

以下に、負荷状態とレバー操作速度が異なる条件における性能比較結果を示す。

5.1.1 軽負荷緩操作

軽負荷緩操作とは、空中操作における作動速度合わせを伴う作業に相当する。一例としてアーム閉じ緩操作の比較結果を図6に示す。

従来機ではブリードオフ流量変化を伴った作動速度制御が実施される制御域である。BRVシステムでは協調制御によりブリードオフ流量が低減されるため、同一作動に必要なポンプ吐出流量が減少する。

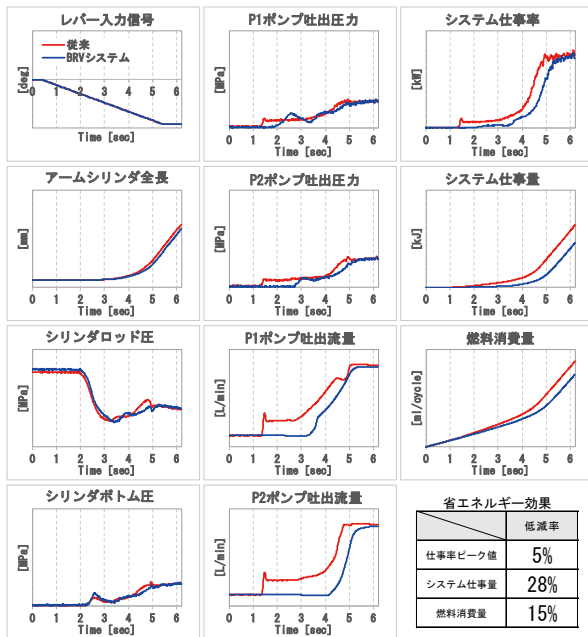


図6 性能比較：アーム閉じ緩操作

5.1.2 軽負荷急操作

軽負荷急操作とは、空中操作における最大作動速度での作業に相当する。一例としてブーム下げ急操作の比較結果を図7に示す。

従来機では作動時のポンプ吐出流量を抑制するため、メインプールがフルストローク位置にあってもブリードオフ流量を伴う制御が行われる。BRVシステムでは、レバー入力情報により流量制御マップを補正することでポンプ吐出流量を抑制するため、

ブリードオフ流量が発生しない。結果として、同一作動で必要とするポンプ吐出流量が減少する。

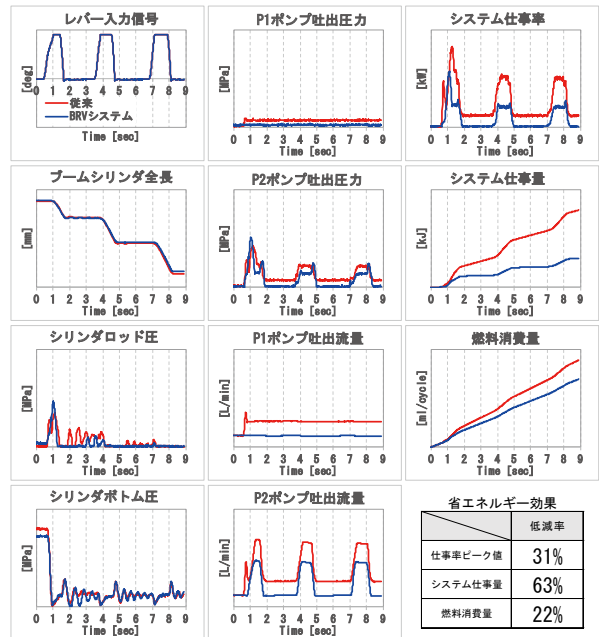


図7 性能比較：ブーム下げ急操作

ただし、BRVシステムの場合でも、従来機においてメインプールフルストローク時にブリードオフ回路が閉回路化する操作（ブーム下げ以外の急操作）では、改善効果は限定的である。

5.1.3 重負荷緩操作

重負荷緩操作とは、掘削などのシステム圧力負荷が大きい作業に相当する。一例としてブームジャッキアップ操作の比較結果を図8に示す。

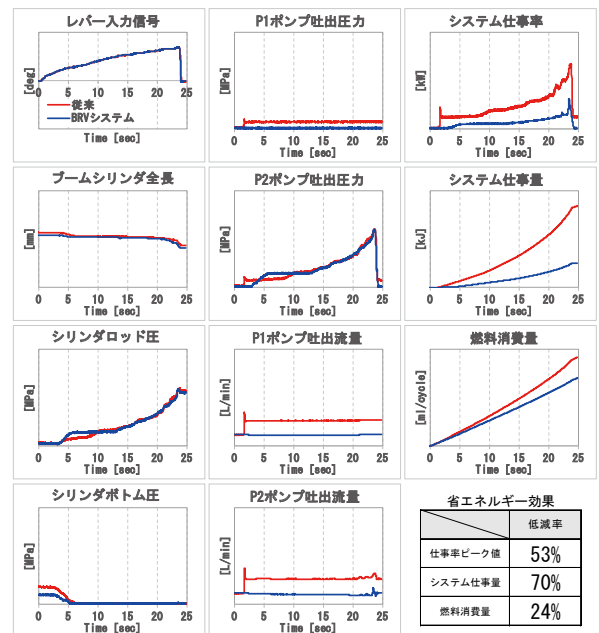


図8 性能比較：ブームジャッキアップ起動

ショベルの作動負荷によりシステム圧が上昇し、アクチュエータが作動しない制御域が存在する場合、従来機では比較的大きいポンプ出力がブリードオフ損失となってしまう。一方、BRVシステムではシステム圧上昇をBRV開弁圧制御により再現しつつ、ポンプとの協調制御によりブリードオフ流量を最小限で抑制し続けるため、起動時に必要なポンプ吐出流量が減少し、大きな省エネルギー効果が得られる。

5.1.4 メインリリーフ作動域

メインリリーフ作動域とは、固い岩盤にバケットを当てたなどの様に、作動負荷が大きく、システム圧がメインリリーフ圧に至った状態に相当する。一例としてアーム閉じシリンダエンド固定で、アーム閉じ緩操作を行った時の比較結果を図9に示す。

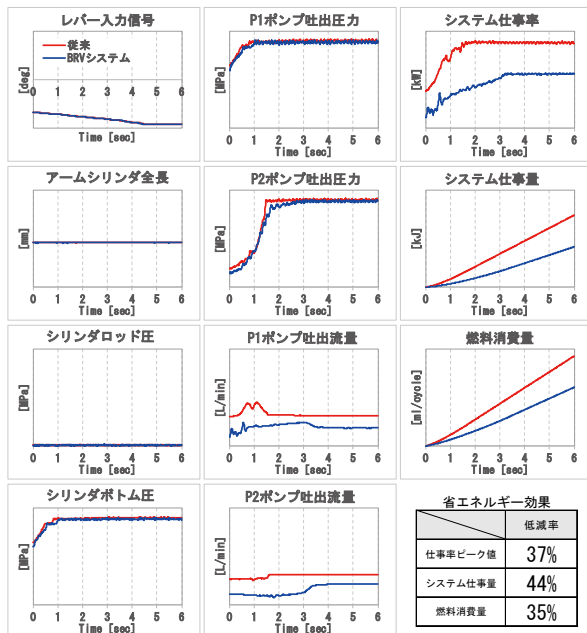


図9 性能比較：アーム閉じリリーフ作動

従来機では、ショベルの作動を伴わない場合、メインリリーフが作動し、エンジン出力上限を考慮したポンプ出力がブリードオフ損失となる。

一方、BRVシステムではメインリリーフ作動圧付近からBRVを敢えて開弁させる。これにより、ポンプ吐出流量とBRV通過流量を比較してアクチュエータの作動状態を推定することができる。メータイン流量が少ない、もしくは発生していない場合は、BRV開弁圧を上昇補正しつつ、メインリリーフ圧に維持するためにポンプ吐出流量を制限する協調制御を実施する。これによりブリードオフ損失を抑制し、非常に高い省エネルギー効果を発揮する。

5.2 代表作動の消費エネルギー比較

前節で述べた動作メカニズムにより、BRVシステムはショベル作動全般で省エネルギー効果を得ることが出来る。

ショベルの代表作動における省エネルギー効果（ポンプ総仕事量及びエンジン燃料消費量における低減率）について、軽負荷緩操作、急操作はそれぞれ9種類、重負荷緩操作は13種類を設定し、各条件における最大最小値及び平均値を一覧化した。また、JCMASで制定されている掘削模擬動作（空荷）、実掘削動作（重荷）についても同様に一覧化した。

表1に示すように、重負荷緩操作において燃料消費量が平均30%減少し、高い省エネルギー効果が認められた。また実掘削においても13%の省エネルギー効果が確認された。一方、軽負荷操作における省エネルギー効果は、軽負荷緩操作で平均17%、軽負荷急操作で平均6%程度にとどまった。

表1 BRVシステム省エネルギー効果まとめ

	低減率	
	ポンプ総仕事量	燃料消費量
軽負荷緩操作 (空中緩操作)	17～71% (平均：35%)	11～28% (平均：17%)
軽負荷急操作 (空中急操作)	0～46% (平均：12%)	0～18% (平均：6%)
重負荷緩操作 (エンド固定緩操作・ジャッキアップ等)	50～70% (平均：61%)	16～40% (平均：30%)
JCMAS掘削模擬	7%	5%
実掘削 (掘削→旋回放土→復帰)	18%	13%

熟練オペレータの作業においては作業効率を優先するため、急操作が多用されると考えられる。従って本システムによる省エネルギー効果は「軽負荷急操作」相当になると推測される。

一方、実務経験が浅いオペレータや細かい作業が必要な操作においては、緩操作や安全弁作動状態が多用される傾向がある。これらの条件では、BRVシステムの省エネルギー効果は大きくなる。

総じてBRVシステムは、低速・高圧作動条件において高い省エネルギー効果を発揮する油圧制御システムであると言える。

6 まとめ

従来機の操作性を維持しながら、ブリードオフ流量損失のみを低減するカヤバ独自の油圧制御システムを開発し、システムの実現性と省エネルギー効果を確認した。

主な成果として、新規コンポーネントであるBRVの開発と、BRVと電子制御ポンプを協調制御する技術手法を確立した。

BRVシステムは、特に低速・高圧作動条件において高い省エネルギー効果を発揮できる。また、既存システムに設置された安全弁が作動する前後でBRVを開弁し、協調制御を実施することで、従来は安全弁から流出していたエネルギーを抑える省エネルギー効果も発揮できることを確認した。

7 今後の課題

本開発ではオープンセンタ・ネガコン方式を改善対象としたが、その他制御方法との比較評価を進め、BRVシステムの適用可能性を検証していく。

また、建機メーカーへのプレゼンテーションを通じて情報収集や共同開発の可能性を探り、更なる改善点を検討する。更に図10に示すように、実際の製品化に向けたBRVの小型化及び構造最適化を図るとともに、本システムの理解を深める必要があると考えている。



図10 BRV小型化・構造最適化品（検討品）

8 おわりに

本開発の検証にあたり、多大なるご協力を頂きました関連部署の皆様に、この場を借りて感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 福島：用語解説「オープンセンタシステムとクローズドセンタシステム」KYB技報第62号（2021年4月）
- 2) 高井：技術紹介「油圧ショベル用シリンダ変遷」KYB技報第50号（2015年4月）

著 者



田中 勇多

2005年度入社。ハイドロリックコンポーネンツ事業本部技術統轄部システム技術部所属。相模工場バルブ設計室、同第一開発室、システム技術部設計室を経て現職。油圧機器の設計、開発に従事。



小島 正成

2006年度入社。ハイドロリックコンポーネンツ事業本部技術統轄部システム技術部所属。相模工場バルブ設計室、制御技術室、システム技術部設計室を経て現職。油圧機器の設計、開発に従事。