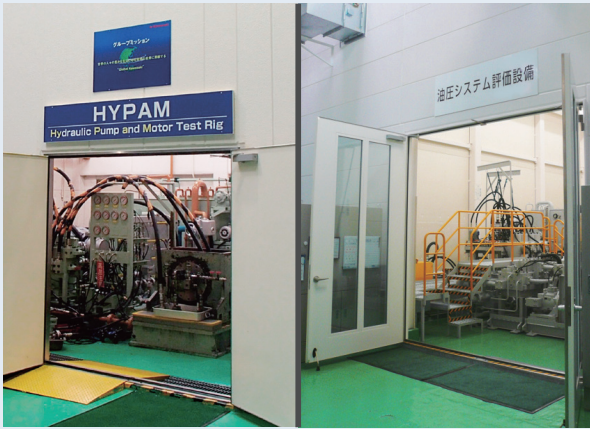


# 油圧機器製品の性能・信頼性向上を支える評価技術

## 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CO<sub>2</sub>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<sup>1)</sup>。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

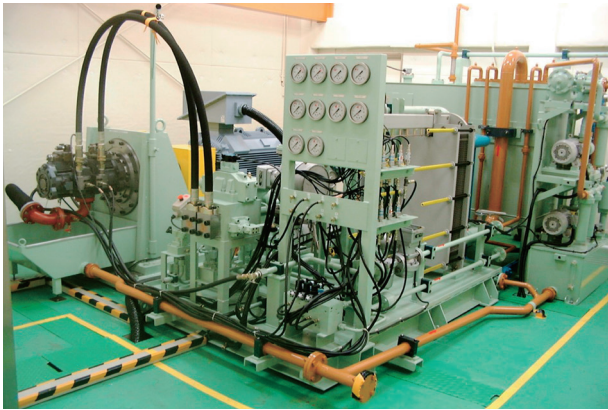


図1 油圧機器評価ベンチ「HYPAM」  
Fig.1 Evaluation bench for hydraulic components HYPAM

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

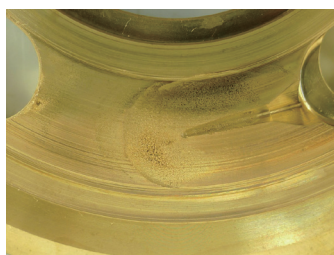


図2 バルブプレート上のキャビテーションによるエロージョンの例  
Fig.2 Example of cavitation erosion on valve plate

で対策を検討している<sup>2)</sup>。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。

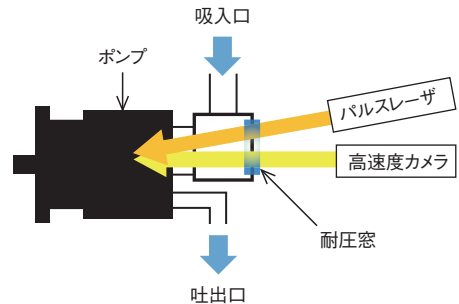


図3 油圧ポンプ内キャビテーションの観測系  
Fig.3 System for observing cavitation bubbles in hydraulic pumps

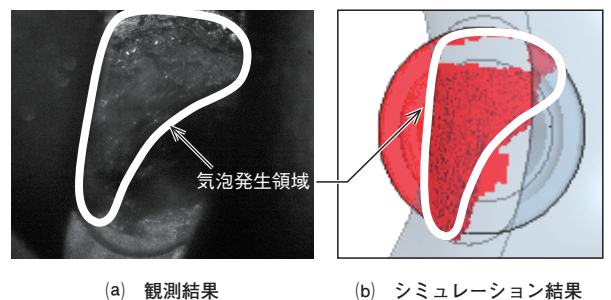


図4 シリンダ内キャビテーションの観測結果とシミュレーション結果との比較  
Fig.4 Observation results of cavitation bubbles in cylinder and comparison with simulation results



#### 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や、天候や土砂の状態などの試験環境が安定しない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<sup>3)</sup>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

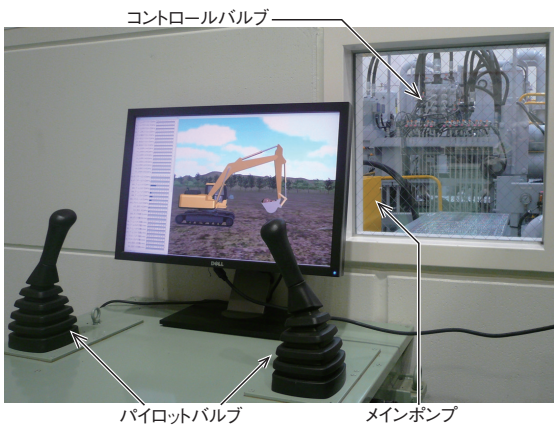


図5 油圧システム評価ベンチ「HILS」  
Fig.5 Evaluation bench for hydraulic systems HILS

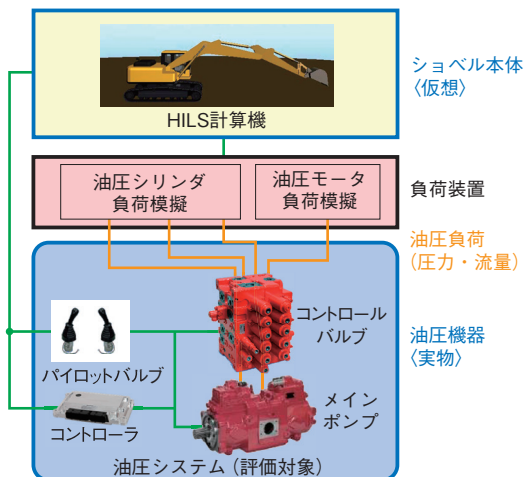


図6 「HILS」の構成  
Fig.6 Configuration of HILS

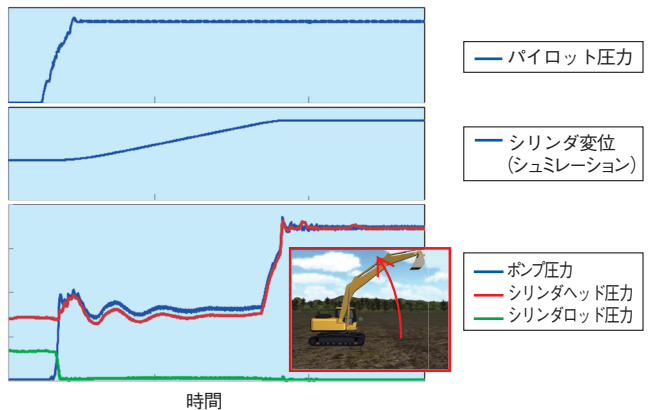


図7 「HILS」の動作例（ブーム上げ操作の応答）  
Fig.7 Example of HILS operation (response to boom-up operation)

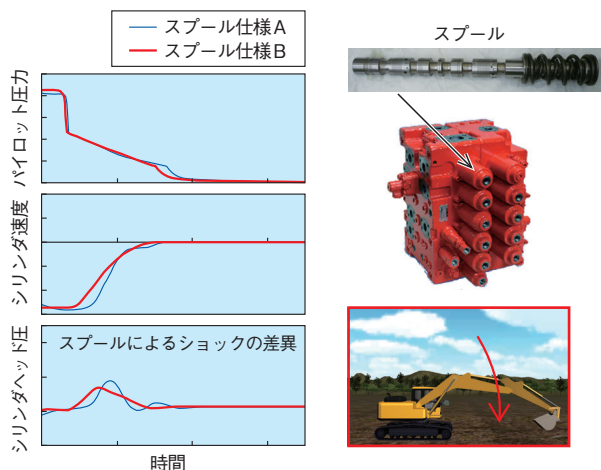


図8 「HILS」による操作性の評価（ブーム下げ止めショックの挙動）  
Fig. 8 Evaluation of operability with HILS (shock behavior when the boom stops moving down)

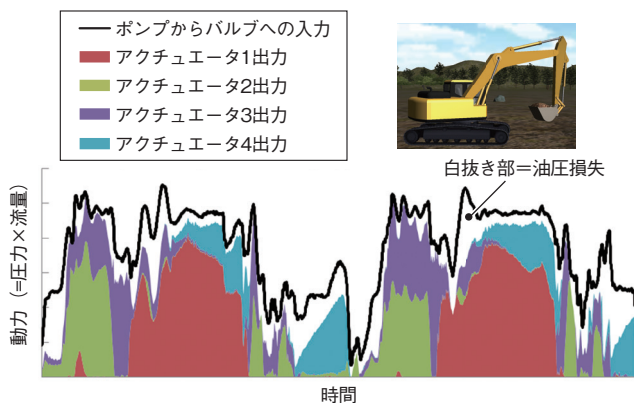


図9 「HILS」による効率の評価  
（掘削積込操作でのコントロールバルブの動力収支）  
Fig. 9 Evaluation of efficiency with HILS  
（Power balance of control valve at digging and loading operation）

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