

(解説)

油圧ショベルの動力系開発プロセスの構築

Developing Power Systems for Hydraulic Excavators



大谷和弘*
Kazuhiro Ootani



南條孝夫**
Takao Nanjo



筒井 昭***
Akira Tsutsui

ACERA Geospec® excavator series have been commercially available since the spring of 2006, through the successful development solving the trade-off between the emission control and fuel savings. This achievement was made possible through a complete hydraulic and power line analysis using an engine bench system. The engine bench system made it possible to thoroughly study the excavator load. As a result of this development, these new excavators achieved to meet emission regulations and to reduce the fuel consumption by 20%.

まえがき = 2006年春に上市したACERA Geospec®(写真1)は、省エネと排ガスのクリーンさで、世界トップクラスの性能を持つ建設機械として登場した。この開発においては、全く新しい動力系開発プロセスを構築し、商品開発に適用した。

建設機械のエンジン排ガス規制は、日・欧・米の主導で強化が進んできている。油圧ショベルはグローバル化が進む市場で、これら全ての規制に適したエンジンを搭載したモデルをタイムリーに提供する必要があり、今や規制の改訂時期がモデルチェンジサイクルになりつつある。

これら規制強化に伴い、エンジンは性能や応答性が変更されることが多く、開発に当たっては、エンジン～油圧系の性能や操作性のマッチング評価を可能な限り事前に行い、試作機での性能評価を最小限にとどめることで、モデルチェンジの立上げのリスクを小さくすることが重要となる。また、コベルコ建機はエンジンを自動

車メーカーなどから供給を受けているため、エンジンメーカーとのエンジン開発作業も効率化し、開発期間を短縮する必要がある。

一方、世界的な環境意識の高まりや、原油高騰の影響もあり、省エネの要望は年々高まっている。建設機械も例外ではなく、省エネの要望は非常に高く商品性をアピールするのに重要なポイントとなる。コベルコ建機の油圧ショベルは、省エネに関してみれば、従来機でも十分な競争力があつたが、このモデルチェンジを機に、20tクラスで現行機比20%の燃費低減を目標に開発を始めた。

まず、開発を実施するに当たり、以下の懸案事項があつた。

エンジン～ポンプマッチングの最適化

燃費の事前予測精度の向上

については、過去の排ガス規制対応で発生した、エンジンの応答性マッチング不良が操作性や燃費に与える悪影響を未然に防ぐ目的で、については、目標である20%削減の蓋然性を事前に精度良く予測し、試作での開発負荷を軽減して開発期間を短縮する目的で開発を行った。

本稿では、これら動力系の一連の開発プロセスとして行った、全油圧モデル解析及びエンジン評価装置を紹介する。また、これらの結果得られた成果と実機で達成した省エネ性能の結果を併せて報告する。

1. 開発プロセスの構築

1.1 新開発プロセスの導入

本開発は、省エネと3次排ガス規制対応を同時に実現するという非常に難易度が高いものであり、また、規制の認証開始のタイミングに商品の上市を合わせるという厳しい時間的制約もあつた。したがって、手戻りが許さ



写真1 ACERA Geospec
Photo 1 ACERA Geospec

*コベルコ建機 開発生産本部 要素開発部 **技術開発本部 機械研究所 ***技術開発本部 生産システム研究所

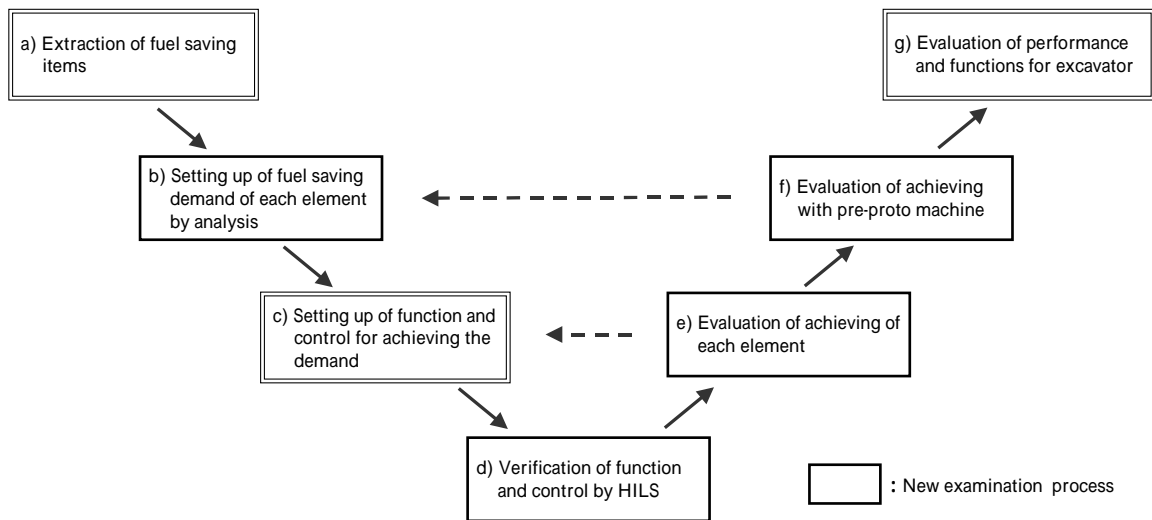


図1 動力系開発プロセス

Fig. 1 Power system development process

れず、試作機での作りこみを極力排除し、フロントローディングの精度を高めるために、新たな開発プロセスを構築する必要があった。

開発プロセスの構築にあたり、図1に示すステップで検討及び開発を行った。

この中で特に、実機での性能評価を行う事前検討として、今回以下の新たなステップを加えた。

- b) 全油圧モデル解析による各機能の省エネ目標設定及び効果予測
- d) エンジン HILS^{注)} ベンチによるパワーライン系性能評価
- e) 各機能での設定目標の達成度の事前評価（試作先行機評価）

これらのステップによって、開発のV字形ステップに深みが増し、試作機の完成度が上がり開発の効率化が図れると考えた。

2. 全油圧モデル解析による予測手法の確立

2.1 全油圧解析手法の確立

コベルコ建機㈱は、旧油谷重工㈱時代より、㈱神戸製鋼所技術開発本部機械研究所と共同で、ショベルの油圧システム動的シミュレーション技術開発を、非線形動的解析プログラムである SINDYS¹⁾ を用いて行ってきた。機構系や配管要素及びエンジン～ポンプ系の動的モデルを考慮することで、図2に示す油圧ショベルのシステム全体をモデル化した SINDYS モデルを作成し、油圧ショベルの掘削作業中における機構系の動作と油圧系の動力解析を行い、油圧回路内の全ての要素における物理現象を計算機上で再現させることが可能となった²⁾。

2.2 SINDYS モデルの適用

省エネ化を推進するとはいへ、商品化に当たってはコスト上昇は極力避けなければならず、まず新たなデバイスは追加せずに達成できる手段を検討した。

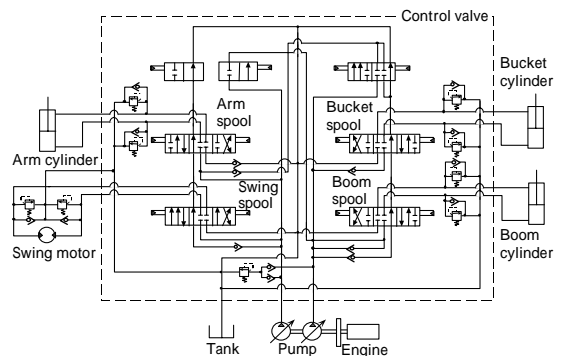


図2 油圧ショベルの油圧システム

Fig. 2 Hydraulic system of excavator

手法として、削減可能な動力損失を SINDYS で精度良く分析及び抽出し、各油圧要素で発生する損失を発生部位ごとに分け、図3のように各要素で損失の大きい部位を特定し、速度制御用損失と開口圧損による損失に分けることで、それが削減可能であるかの判断を行った。これらを集計し、表1に示す不要損失の集計を行った。これは、まさに微小な損失をピンセットでつまみ出すような作業であった。

集計の結果、これら油圧損失の低減のみでは省エネ効果は限られており、これらの損失低減を合計しても、目標の燃費低減を達することができないことが明白となった。

したがって、後ほどエンジンベンチシステムでの技術開発で述べる、エンジン制御による直接的な燃費低減の検討も合わせて実施することとなった。

上記のような検討の結果、各要素でのそれぞれの圧損低減・効率改善の目標値を決め、表2の星取表を作成することで、それぞれの機器での省エネ効果を個別にチェックできるようにした。

また、ここで得られた結果をもとに、試作を行う際の購入仕様書に開発要件として記載し要求することで、機器メーカーにも省エネを実現するための明確な目標を提示することができた。このため、目的や要望を理解してもらい易くなり、試作検討の際には多大な協力を得ることができた。さらに、試作検討の中で随時検討経過のデー

脚注) HILS (Hardware In the Loop Simulation) とは、ハードウェアを介したループシミュレーションを意味する。この場合は、エンジンがハードウェアとなる。後に、ショベルコントローラモジュールに取入れる。

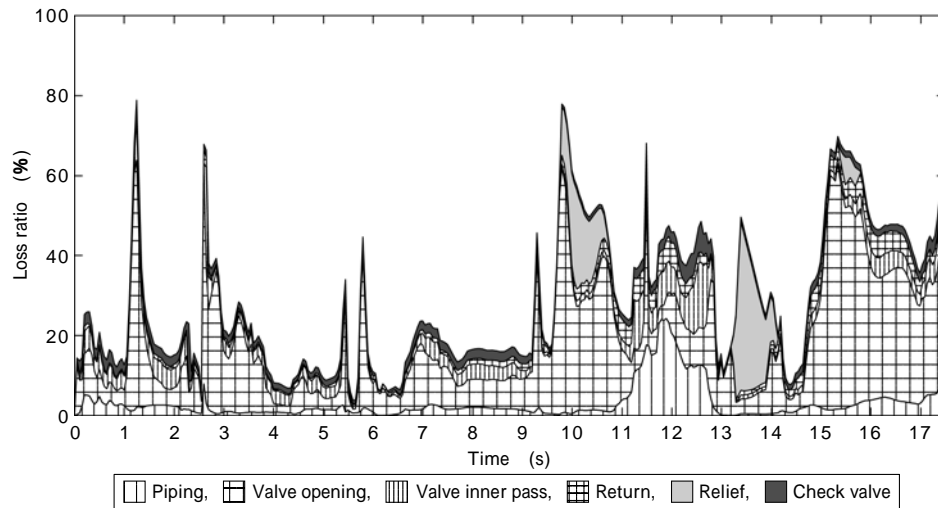


図3 油圧損失分析結果（要素別）

Fig. 3 Simulation result of loss power contribution (each element)

表1 実掘削中の損失分析結果

Table 1 Simulation result of loss power at actual digging

		Element	Total loss (kW)	Needless loss (kW)	Control loss (kW)	
Piping		Piping 1	0.35	0.35		
		Piping 2	0.24	0.24		
		Piping 3	0.34	0.14	0.20	
		Piping 4	0.08	0.08		
		Piping 5	0.41	0.41		
		Piping 6	0.10	0.10		
		Piping 7	1.30	1.30		
		Piping 8	0.18	0.18		
		Piping 9	0.04	0.03		0.01
		Piping 10	0.03	0.02		0.00
Valve opening	Bleed off (B/O)	B/O 301	0.51	0.51		
		B/O 501	0.48	0.48		
		B/O 201	0.12	0.12		
		B/O 401	0.22	0.22		
	Meter In (M/I)	M/I 303	1.73	0.05		1.67
		M/I 302	0.26	0.02		0.24
		M/I 506	0.35	0.17		0.18
		M/I 502	0.12	0.02		0.10
		M/I 504	0.11	0.02		0.08
		M/I 204	0.12	0.03		0.09
		M/I 205	0.03	0.02		0.02
		M/I 404	0.54	0.11		0.43
		M/I 402	0.26	0.09		0.16
		M/O 305	0.27	0.09		0.18
	Meter Out (M/O)	M/O 304	0.50	0.01	0.49	
		M/O 503	1.06	0.27		0.79
		M/O 505	0.61	0.03		0.58
		M/O 202	0.85	0.60		0.24
		M/O 203	0.34	0.22		0.12

表2 省エネ星取表

Table 2 Fuel saving score card

Fuel saving items list	A	B	C
Engine control			
Engine speed increasing control			
Isochronous engine speed control			
Speed shift control			
Engine boost control			
Pump volume increasing			
Pump control			
Pump torque decreasing			
Swing cut-off control			
Arm in cut-off control			
Minimize control of boost volume			
Compensation of pump flow			
Pump leak			
Pump mechanical efficiency			
Swing motor volume increasing			
Engine			
Engine fuel consumption			
Loss decrease			
Piping loss minimize			
Pump piping size up			
Cylinder piping size up			
Boom			
Arm			
Bucket			
Control valve inner pressure loss			
Abolished short elbow (90 deg)			
Return loss minimize			
Arm return quick circuit			
Bucket M/O loss minimize			
Additional spool for arm configuration			
Failure items			
Cooling capacity increasing			
Attachment weight increasing			
Arm control			

タを入手し、直ぐに効果のチェックを行い、必要であれば試作図面や試作品の修正を行った。

このように、省エネ達成度のチェックを逐次行うことで試作前に見直しが十分にでき、後に述べるエンジンベンチでの改善効果と合わせて、試作組立を行うまでに約80%の達成度（約16%低減）を確保できる状態まで上げることができた。

2.3 SINDYS の HILS への適用

SINDYS による解析は、機械の作業時間を示すサイクルタイム予測や、動力・発熱予測と幅広く活用でき、開発の精度向上に大きく貢献した。

またプログラムやモデルなどの見直しにより、リアルタイムでの解析を可能としたことで、動力ベンチ装置にも活用され、HILS システムの油圧シミュレーション部を制御するための中核をなす技術となっている。

3. エンジン～油圧系評価ベンチの開発

3.1 エンジン評価ベンチの製作

新開発プロセスの解析と実機評価をつなぐV字ステップ（図1参照）に示す要の位置に使用する設備として、

エンジンと油圧系を事前評価する新たな評価ベンチの製作を開始した。これは、排ガス規制を満足しながら省エネを達成するために必要不可欠な設備であり、今後の動力系の技術開発においても、中心的な存在になるものとする。

本ベンチシステムには以下の機能がある。

エンジンに与える任意の負荷が繰返し再現できる。

エンジンの瞬時負荷の応答性が評価できる。

ショベルコントローラで制御が可能である。

構成に当たって、最も注力したのがエンジンの負荷装置であり、当初は慣性の小さい動力計の検討も行った。自動車・トラックのHILS用に近年普及してきたものであるが、最速の負荷投入時間が数百msレベルで、実際の油圧負荷である数~数十msに対して、負荷の立ち上がりが遅く評価には不適と判断した。したがって、油圧ポンプと可変リリーフ弁の組み合わせによる負荷制御の構成を最終的に選択した。

エンジンに取付けられる油圧ポンプは、慣性などの影響を考慮し、各エンジンに同クラスの油圧ポンプが装着可能な汎用性を持つことが必要となる。そのため、作動油タンク・オイルクーラなどの付帯設備が必要となる。

圧力を制御する可変リリーフ弁は、電磁比例弁によるもので応答性も良好であり、20tクラスで約30ms以下の応答性を実現した。

エンジンHILSベンチの構成概念図を図4に示す。本システムは、制御・計測部とシミュレーション部に分けられ、これらをリアルタイムに通信しながらそれぞれのPCでエンジン・ポンプの制御を行っている。

実機計測またはシミュレーション結果による負荷パターンを、制御・計測PCよりショベルコントローラに指令を与えてポンプ及びエンジンの制御を行い、同時に可変リリーフ弁に圧力信号を与えることで、実働負荷を再現するシステムを構築した。

3.2 エンジンのベンチ評価

前節記載のベンチを用いて、エンジンの制御手法及び圧損低減の省エネに対する効果を、SINDYSでの解析結果を用いて作成した負荷パターンを再現して評価することで、実機を用いずにエンジン~ポンプ系の性能確認を行うことが可能となった。

また、解析による負荷パターンでのベンチ計測結果より動力分析を行い、エンジンに多用する負荷領域をエン

ジンメーカーに提示することで、エンジンの燃費チューニングが可能になり、エンジンメーカーで燃費特性を改善したECU(Electronic Control Unit)実働時の改善効果を即座に確認できるサイクルが、エンジンメーカーとの間で確立できた。

このように、エンジンメーカーの協力を得て燃費改善をさらに推進し、エンジンの燃費低減を達成することができた。これらの特性を他機種にも展開し、他機種の燃費低減にも有効な結果をもたらした。エンジンの開発途上での改善経過を図5に示す。このように、エンジンメーカーとコベルコ建機㈱とで同時にエンジン評価を行いながら、試作機の組立に向けて省エネ性改善を進めることができた。

また、エンジン制御に関して、実績のあるレギュレーション制御での検討を進めていたが、ショベルの特性上冷却ファンの損失が大きく、多少ではあるが回転数を抑制するアイソクロナス制御(図6参照)を採用し、さらに省エネ効果を得ることができた。

アイソクロナス制御の省エネ効果の評価を、エンジンベンチで動力・燃費の両面から、その得失を確認しながら検討を進めることができ、効果に占める割合が大きいと判断して、最終的に採用に踏切った。ベンチ評価での好例として特記しておきたい。

これらの一連の試験を通じて、省エネ目標であった20%の燃費低減が現実的なレベルとなった。また、実機での燃費計測結果に対しても、ベンチでの計測結果は定性的・定量的にも一致しており、試験装置及び負荷パターンの妥当性も検証できた。

3.3 油圧シミュレーションとエンジンベンチの統合

上記のエンジンベンチは、任意に設定した負荷パター

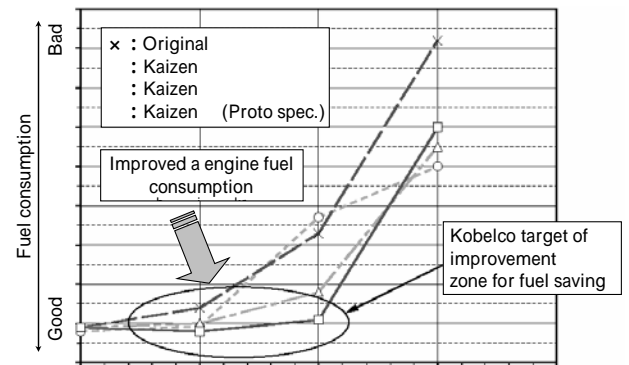


図5 エンジン単体の燃費改善経過

Fig. 5 Improvement progress of engine fuel consumption

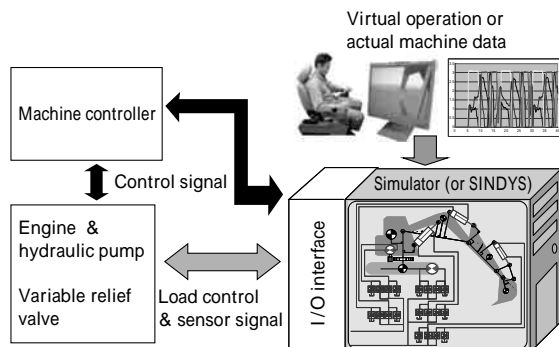


図4 エンジンベンチ系統概念図

Fig. 4 Diagram of engine bench system

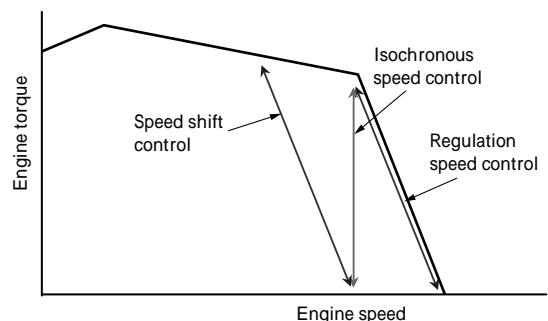


図6 エンジン制御概略図

Fig. 6 Outline figure of engine speed control

ンを再現する方法で評価を行ってきたが、SINDYS のリアルタイム化に伴い、操作レバー入力から油圧シミュレーションに応じた負荷を再現できるようになった。このことで、実機と同じような油圧ポンプの負荷をレバー入力により行うことが可能となった。

これよって、解析するための負荷パターンがない場合でも、それぞれの動作（操作）でエンジン・ポンプの動的な性能評価ができるシステムが完成した。今後は、このシステムを使って、さらに多岐に渡る事前検討が可能となり、事前検討の精度が向上できると考える。

また、上記シミュレーションは、アニメーション表示ができ、実際にアタッチメントの動きに合わせてレバーを操作することが可能となっている。

さらに、ショベル本体のコントローラでの制御が可能であるので、コントローラのプログラムや制御定数のチェックを行うことができた。これらのチェックは現在手作業で行っているが、将来的には自動でチェックできる機能に充実したいと考えている。

4. 実機での評価結果

油圧機器に関して、その機能及び対策効果を確認するために、現行機の油圧システムを新検討のシステムに改造した試作先行機を製作し、事前評価・検証を行った。

特に、当初より注力していた圧損の低減に関し、達成度の評価をこの試作先行機で確認できた。また、配管圧損に関しては、1次元での計算プログラムを作成し、図面作成段階で高精度に圧損の推定が可能となった。試作先行機における評価でこれらに対応した結果、作業量の大幅な向上が達成できた。

また、制御ロジック上の不整合なども試作先行機で確認し、変更した際の燃費変化を逐次 SINDYS モデルにフィードバックをかけ、それぞれ個々の効果をチェックしながら、評価を進めた。

良好な操作性は、コベルコ建機の特徴でもあることから、圧損低減によるアタッチメント速度の向上が、操作性に影響を与えないことを確認するため、操作性の評価を試作先行機でも行った。これらの結果を試作機に反映し、損失を最小限に抑えた操作性のチューニングを進めることができた。

試作機では、さらに操作性を向上させると同時に、省エネ効果を実機で評価することが可能な段階になった。

実機での省エネ効果の評価は、現行機との比較試験によって行った。評価の対象とした動作は、90°旋回溝堀作業で、油圧ショベルの一般的な作業量の評価パターンである。

この結果、20t クラスショベルにおいて、現行機に対して、省エネモード（S モード）で作業量同等で燃費 20% 削減、重掘削モード（H モード）では燃費同等で作業量 8% 向上を確認し、当初目標を達成することができた。

表 3 は、3 種類（表の A、B、C）の機種別の試作機での省エネ効果をまとめたものである。評価指標は生産性（燃費当たりの作業量）で整理した。

この結果、生産性は現行機に対して、S モード・H モ

表 3 実機計測結果（軽作業 / 重作業）

Table 3 Actual machine measurement result (light and heavy duty)

Light duty digging		Productivity (m ³ /ℓ)	
		S mode	H mode
A	Actual measurement result	12.1	10.5
	Improvement vs. current machine	26%	9%
B	Actual measurement result	11.8	10.4
	Improvement vs. current machine	22%	7%
C	Actual measurement result	11.5	10.2
	Improvement vs. current machine	31%	16%

Heavy duty digging		Productivity (m ³ /ℓ)	
		S mode	H mode
A	Actual measurement result	6.0	6.3
	Improvement vs. current machine	11%	17%
B	Actual measurement result	7.0	6.6
	Improvement vs. current machine	43%	35%

Note) ・ Measured by digging with 90 degree swing
 ・ These results are not same in the case of actual use.

ードともに大きく向上し、当初の目的を十分に達成できた。この結果は、旧モデルを使用しているユーザにも、省エネがあらゆる現場で実感できる性能となっていると考えられる。

5. 今後の展望

今回の開発で、動力系開発に対する開発支援のツールとして、SINDYS による全油圧モデルシミュレーションとエンジン HILS ベンチによるエンジン・ポンプのマッチング及び動力・燃費の評価を行うことが可能となった。

さらに、ショベルコントローラの HILS 取込みにより、試作機がなくても、エンジン・ポンプに関する電気系・油圧系制御の評価が可能となった。特に、コントローラに関しては、開発初期より完成度を要する機能として、今後ベンチでの評価の場が増えると考えられる。このことにより、コントローラの開発タイミングを前倒しすることが可能となり、さらに開発期間の短縮も可能となると考える。

これらの技術を駆使し、今後も技術課題の克服を進める予定であるが、現状システムの問題点と今後の課題をまとめると以下のとおりである。

a) 実機での計測（土砂の影響）

本システムは、実機でもばらつきの多い土砂による負荷を想定したシステムであるが、その反力を実測結果から得られた結果を無次元化し定数としていることから、全ての土砂に関して評価ができるものではない。したがって、実機でばらつかずに計測する手法をさらに検討し、HILS モデルにフィードバックして、予測精度を高める必要がある。

また、省エネの評価指標を従来の生産性のみではなく、あらゆる現場を想定し、評価するための指標を今後検討する必要がある。

b) SINDYS モデルの簡易化

SINDYS モデルはその非線形解析の特性上、油圧系の

予測に優れたツールである。入力画面の見直しや、GUI (Graphic User Interface) 化などマンインターフェースの充実を行ってきたが、入力に関しては更なる改善が必要と考える。

c) 動力系システム検証のツール化

現状のベンチシステムは、制御・計測に特化しており、ショベルコントローラのソフト検証機能は手作業で対応している。今後は、動力系の事前検証機能の充実として、制御プログラムソフトのチェックを行うために、コントローラの動作チェック機能の充実を図る。

むすび = 本開発ステップの構築により、以下の検討・評価技術を得ることができた。

エンジン・油圧系動力解析技術

油圧ショベルの負荷が再現できるエンジンベンチ装置レバー入力方式による油圧系リアルタイムシミュレーション技術

エンジンベンチとリアルタイムシミュレーションの統合技術

これら技術を用いることで、新機種では大幅な油圧損失低減とエンジン・ポンプ制御の改善により、現行機比20%の燃費低減(Sモード)と8%の作業量向上(Hモード)を実現することができた。

参 考 文 献

- 1) 藤川 猛ほか：R&D 神戸製鋼技報, Vol.34, No.3(1984) p.109.
- 2) 今西悦二郎ほか：日本機械学会論文集(C編), 69巻, 685号(2003) p.2336.