

1 3 . 油 圧 シ ョ ベ ル に お け る 低 燃 費 性 能 開 発

－ 燃 費 性 能 解 析 技 術 と 機 種 開 発 へ の 適 用 －

(株) 神戸製鋼所 機械研究所 ○ 南條 孝夫

今西 悦二郎

コベルコ建機 (株) 開発生産本部 沼田 直剛

1. はじめに

地球温暖化問題が年々深刻化しており、CO₂削減が大きな社会的ニーズとなっている。わが国においては、建設機械の燃料消費によるCO₂排出量は全分野の約1%に過ぎないが、その中でも油圧ショベルの排出量は51%を占めており、油圧ショベルの燃料消費量削減は重要な課題となっている。そのような背景から、油圧ショベルに対しては、作業性、操作性といった一般機能だけでなく、省エネ化への要求がますます強くなってきた。コベルコ建機では、2006年の排ガス3次規制（特定特殊自動車排ガスの規制等に関する法律）施行に合わせて、中大型機種モデルチェンジ（図1）を行ったが、この一連の開発では、エンジンの排ガス規制対応だけでなく、燃費性能向上を最重要目標に掲げて開発を行った。低燃費性能目標は図2に示すとおり、旧型機に対し、作業量は旧型機同等で燃費を20%削減することを目標とした。

上記の燃費性能向上の達成のためには、エンジンの単体性能改善だけでなく、油圧システムやエンジン/ポンプ駆動源システムをトータルで評価し、システム全体の効率を効率的、効果的に改善

する必要がある。そこで、本開発においては、神戸製鋼独自で開発した油圧制御系を含む機械システムのシミュレーション技術であるSINDYS^{1), 2), 3)}を活用した動力・燃費解析評価技術を開発し、これを機種開発プロセスに組み込んだ。これにより、油圧ショベルの掘削作業などの複雑な挙動や損失寄与度を詳細に評価することができるようになり、対策部位を明確化することで効率的、効果的な対策を行えるようになった。さらに、機器単体の実働負荷での性能評価とより高精度な燃費評価を行うための手法として、解析技術と実際の機器を組み合わせるHILS (Hardware In the Loop Simulation) システムを開発し、商品開発に適用してきた。

本報では、実際の機種開発プロセスにおいて適用してきた、HILSシステムを含む解析評価技術と、これらを活用して行った低燃費化技術について報告するとともに、旧型機と比較した省エネ効果や解析評価の精度検証結果について報告する。また、油圧ショベルの燃費性能評価手法として制定されたJCMAS H 020:2007（土工機械－油圧ショベルの燃料消費量－試験方法）での評価結果についても報告する。



図-1 排ガス3次規制対応の油圧ショベル

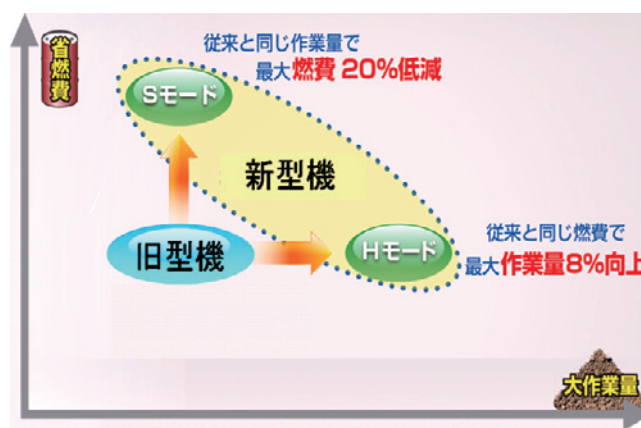


図-2 排ガス3次規制対応機の低燃費性能目標

2. 油圧ショベルの燃費性能解析技術

2.1 解析評価の狙い

油圧ショベルは、エンジンによって油圧ポンプを駆動し、油圧配管、バルブ等の油圧システムによりシリンダ、油圧モータへの流量分配を行い、作業機（アタッチメント）を駆動するシステムである。アタッチメントを駆動するアクチュエータは、ブーム、アーム、バケット、旋回など複数あり、実作業時には、これらのアクチュエータを同時に操作する複雑な複合操作を行う。目標の低燃費性能を達成するにあたり、これまでの実機を用いた動力評価では、システム全体の評価は可能であるが、各部位に関する詳細な動力損失の把握ができず、さらに、複雑な複合操作の中で、一部の部位に関するシステムの変更が全体システムの性能に及ぼす影響を把握することが困難であった。そこで、油圧ショベルを構成するアタッチメント、上部旋回体などからなるリンク機構システム、アタッチメントを駆動する油圧システム、油圧ポンプ・エンジンからなる動力源システムなどを含む油圧ショベルの全体システムを解析評価できる技術を開発した。この技術を用いて、実機製作より前の設計段階で、机上でシステム全体の性能評価だけでなく、個別部位の詳細な動力損失やその寄与度、システム改良による効果等を検討できる評価システムを作ることにより、開発の効率化を目指した。

また、エンジン燃費性能については、コモンレール制御、ターボ制御、EGR 制御等の複雑な制御が組み込まれており、これらの制御のチューニングにより燃費性能が大きく変化するため、燃費性能評価を高精度に行うためには、これを静的なエンジン燃費性能を用いた簡易解析モデルで評価するには不十分である。そこで、実機のエンジンと上記の解析を組み合わせた HILS システムを開発し、実作業時の燃費性能を高精度に評価することを目指した。

2.2 リンク機構システムと油圧システムの連成解析技術

油圧ショベルの油圧システムとリンクシステムの連成解析を行うため、リンクシステムでは変位、油圧システムでは流量積の状態量を用いることによって、連成するシステムを次式のような MCK 形の非線形運動方程式に記述した。

$$[M_L + M_N] \ddot{u} + [C_L + C_N] \dot{u} + [K_L + K_N] u = f - f_N \quad (1)$$

ここで、 u はリンク機構系では変位、油圧系では流量積の状態量を表すベクトルである。 M_L 、 C_L 、 K_L は各時間ステップで一定の線形部分の質量、減衰、剛性マトリックスであり、 f は外力である。 M_N 、 C_N 、 K_N は動的システムを構成する要素に非線形性がある場合の各時間ステップご

とに変化する非線形の質量、減衰、剛性マトリックスであり、 f_N は非線形性を各時間ステップで線形化することによる補正外力である。式(1)によって記述された解析モデルを数値積分する解析コードは神戸製鋼で独自開発した SINDYS を用いており、SINDYS は陰解法による数値積分を行うことができ、油圧システムのような非線形性の強いシステムでも安定して解析することが可能となる。リンクシステムでは、物体が空間を大きく運動することによる幾何学的非線形性を考慮したはり要素⁴⁾、およびトラス要素を用いた。これらの要素を用いて、油圧ショベルのアタッチメントをモデル化したものを図3に示す。油圧システムは、配管要素、バルブ要素、シリンダ要素⁵⁾などを用いて図4のようにモデル化した。シリンダ要素ではポートからの作動油の流入・流出によってストロークが伸縮し、部材端における負荷に応じてシリンダ内部に圧力が生じる。シリンダ要素では油圧システムの作動油流量積とリンクシステムの節点変位が連成しており、連成解析が可能となる。

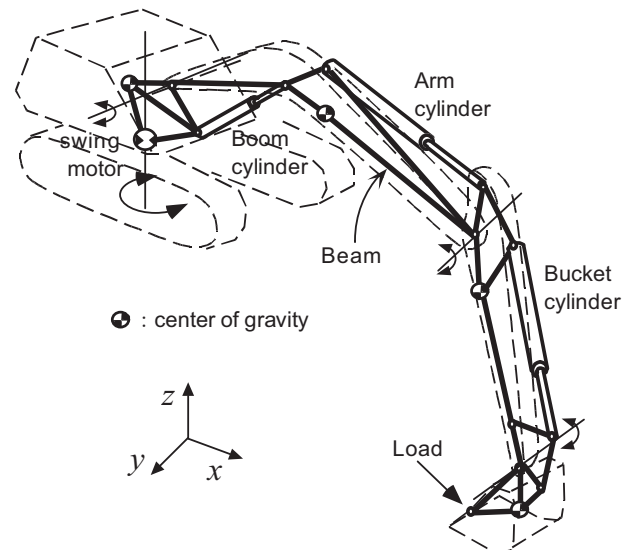


図-3 油圧ショベルアタッチメントのモデル化

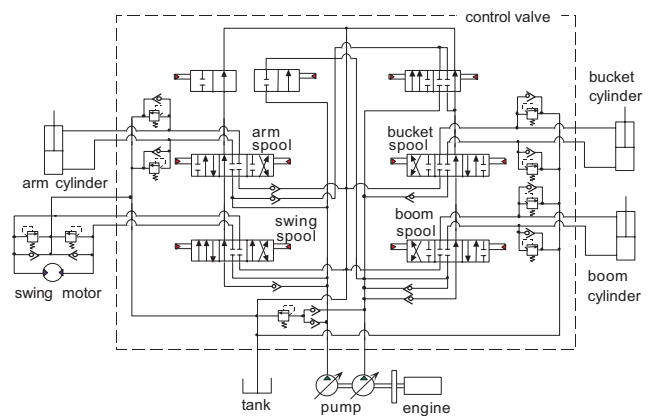


図-4 油圧ショベルの油圧システム

高精度な動力評価のためには、機器の効率特性、油圧システムの配管やバルブ開口や通路の圧損特性、バルブの電気制御特性、掘削時の掘削反力などを精度よくモデル化する必要がある。これらについては、以下のようなモデル化を行った。

(1) 機器効率

油圧モータ等のアクチュエータについては、容積効率、機械効率を各々漏れ流量、損失トルクとしてパラメータ同定した式を用いモデル化する。

(2) 配管圧損特性

直管部、急拡大/急縮小、ベント、エルボなどの形状変化を各配管仕様から抽出し、これらの圧力損失特性を油温も考慮して机上計算してパラメータ化してモデル化する。

(3) バルブ圧損

バルブの各開口の繋がる通路について、バルブ圧損ベンチデータからバルブ開口による損失特性と開口以外の通路損失特性に分けて圧損特性をパラメータ化してモデルに組み込む。

(4) チェック弁、リリーフ弁

チェック弁、リリーフ弁などは流量と圧力の関係が強い非線形性を有するため、断片線形系の非線形な PQ 特性としてモデル化し、逆止弁としての特性とチェック弁開放時のオーバーライド特性をモデル化する。

(5) 電気制御特性

電磁比例弁などの電気制御を用いているバルブのストローク制御については、制御ソフトを SINDYS の解析コードにリンクする形で一体化し、実際の制御ロジック通りに比例弁制御が動作する仕組みを作った。

(6) 掘削時の掘削反力

掘削作業時などのバケットにかかる土からの掘削反力については、バケット掘削面への粘性抵抗としてモデル化し、反力の大きさは、機種ごとに実働データ分析による平均値を用いる。

2.3 エンジン HILS システムによる燃費評価技術

図 5 に、エンジン HILS システムの構成概念図を示す。このシステムは、上記の油圧システムおよびアタッチメントのリンク機構システムから成る解析モデルと実際のエンジン・油圧ポンプを組み合わせた評価システムである。実機のエンジン・油圧ポンプはオペレータのレバー操作などのレバー入力に基づいて実機と同じように油圧ポンプから圧油を吐出する。シミュレータ部ではポンプの吐出流量に基づいて、アクチュエータを駆動する解析を行い作業機の挙動を演算するとともに、ポンプ負荷を演算する。ポンプ出力部の負荷装置は演算されたポンプ負荷を実機に与える仕組みとなっており、実機のエンジン・油圧ポンプと解析モデルが相互にフィードバック制御を行うことによって、実際の挙動を再現することが

できる。エンジンの挙動や燃費は実際のエンジンに取り付けた回転センサや燃費センサにより計測することができる。

HILS システムを用いた評価（以下、HILS 評価）では、解析部分の計算にリアルタイム性が要求されるとともに、ポンプ負荷を与える負荷装置にも高い応答性が要求される。負荷装置には、応答性の速い可変リリーフ弁を利用した負荷装置を用いることにより応答性を確保し、解析計算も、モデル化の工夫による自由度縮小化、式(1)の状態量ベクトルの配列最適化、高速ソルバーの採用などにより、対象機種の評価については十分リアルタイム性を確保することができた。

図 6 にエンジン HILS システムによる燃費評価の例を示す。この評価により、実機を用いずに、実際の作業負荷に相当する負荷をエンジンに与えることができ、エンジンの過渡特性を含めて負荷変動による燃費評価が行える。また、シミュレータ部で解析した作業機の挙動を画面上で確認しながらオペレータによるレバー操作入力を行うことにより、エンジンの応答性を含めてエンジン・ポンプの挙動がアクチュエータの挙動に反映されるので作業のサイクルタイム（土量）評価も高精度に行えることとなる。

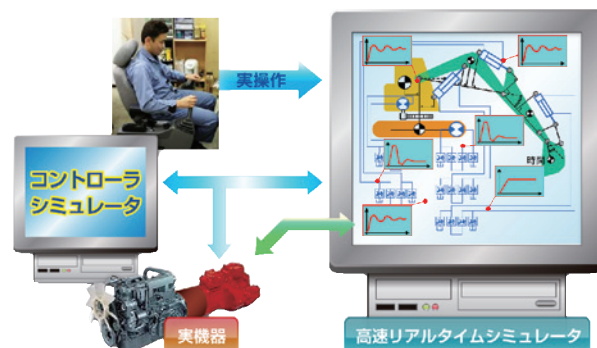


図-5 エンジン HILS システムの構成概念図

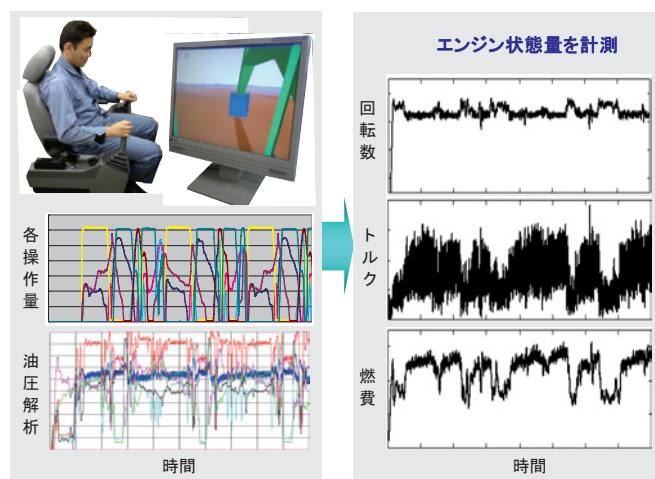


図-6 エンジン HILS システムによる燃費性能評価の例

3. 解析評価システムの精度検証

HILS システムでの燃費評価について精度を確認するため、旧型機での実機評価結果と HILS 評価での性能評価結果を比較する。

図7に油圧ショベルの代表作業である90° 旋回実掘削作業（2 サイクル）での比較を示す。この結果は、精度比較のため、実機評価(Experiment)で測定したオペレータのレバーパターンの波形を、HILS システムの制御入力として与えてその時の応答を実機評価と比較したものである。上段には、アクチュエータ挙動の例としてブームとアームのシリンダストロークを比較しているが、両者は良く一致している。中段は油圧ポンプの圧力お

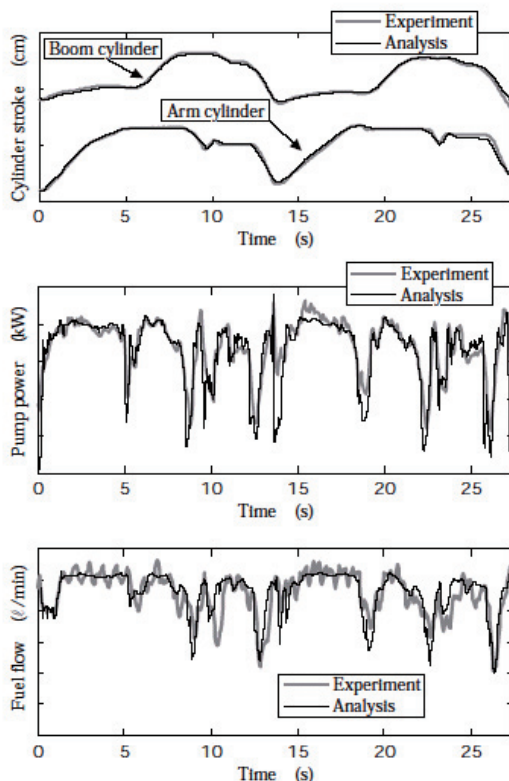


図-7 掘削作業時の実験結果と解析結果の比較

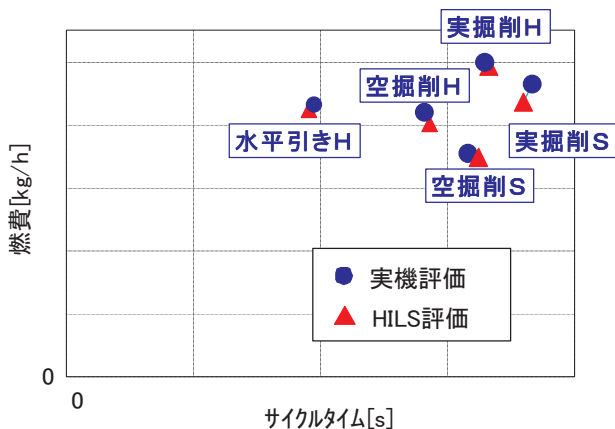


図-8 HILS 評価と実機評価の作業量・燃費比較

よび流量から計算される油圧ポンプ出力動力を比較したものであるが、一部過渡状態での違いが見られるものの負荷変動の状況や負荷の大きさは十分実機の特徴を捉えられており、平均動力としてみれば高精度に実機性能が再現できていることがわかる。燃費評価についても同様に十分な精度を確保しているといえる。

図8は上記の実掘削以外の操作として土を掘削しない空掘削や水平引き操作について操作モードを変えてその精度を比較した結果である。横軸はサイクルタイムで表示しているが、これは土量に対応したものであり、この点の位置が生産性あるいは燃費性能を表している。誤差としては、実掘削Sモードが最も大きいですが、これは土に関わる掘削反力に違いがあるものと推察される。この結果からも、HILS 評価が十分高精度に燃費評価ができていることがわかる。厳密には評価パターンが異なるが、図中の空掘削や水平引き操作は、JCMAS の燃費評価作業における掘削積込動作およびならし動作の模擬動作に近い動作であり、これらが精度よく再現できていることから考えると JCMAS 評価も HILS 評価で十分評価可能であると考えられる。

4. 損失低減と低燃費化技術

4.1 解析による損失寄与度分析

解析評価の例として、実掘削作業時の解析評価から得られた油圧システム各部の損失の評価結果を図9に示す。最も損失寄与度が高い要素は制御バルブ開口であり、次いで、バルブ通路圧損、配管圧損、リリース損失がほぼ同程度の寄与度となっている。図10には、さらに部位別にさらに細かく損失寄与度分析をした結果を示している。これらの分析から損失削減対象となる部位を抽出して対策する。損失削減検討としては以下のようなプロセスで検討した。

- 全損失から、作業上必要な損失を抜き出し、残りの損失から削減対象部位を抽出
 - 対象部位の損失発生状況を考慮して、各部位ごとに削減目標を決定
 - 削減目標を達成するための具体的な仕様変更またはバルブおよびポンプの制御方法の検討
 - 解析評価により上記方法の定量的効果を検証
 - 対象作業以外の操作で不具合が生じないことを検証
 - 燃費削減効果に対するコストアップ試算を行い、費用対効果の評価により実機対応を決定
- なお、(c)～(f)については、最適な仕様決定のために、解析にて繰り返し計算を行う。

これとは別に、油圧ポンプやエンジンなどの機器についても損失分析を行っており、これらの機器については、実作業での解析結果から使用領域

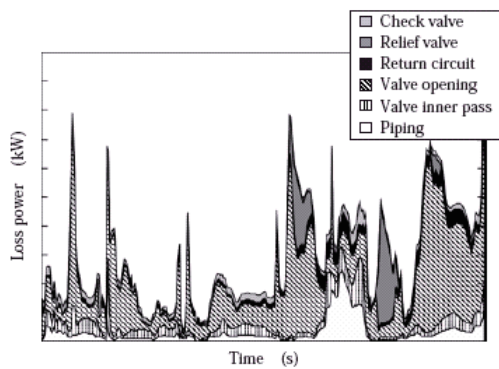


図-9 掘削作業時の油圧動力損失解析結果

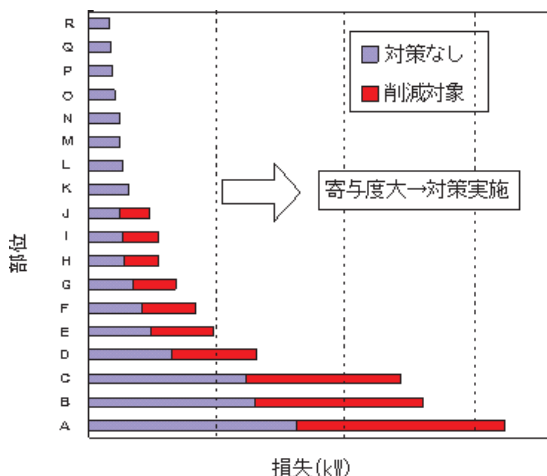


図-10 油圧システム内の損失寄与度解析結果

別に頻度分布を求め、機器単体の効率特性に対し、効率的な使い方になっているかをチェックするとともに、使用頻度が高い領域を重点的に効率改善した。

4.2 低燃費化アイテム

上記の HILS 評価および損失寄与度分析などから、新型機に対する低燃費化アイテムとして以下の項目等を抽出し、改善を行った。

(1) バルブ通路損失低減

バルブ通路の損失は、内部通路の大きさに依存するが、全体を拡大させるとバルブ本体が大きくなりすぎて搭載が困難となる。損失寄与度分析から最も効果的な通路（特に大流量部位）を抽出し、CFD 解析を活用して対象部位に対する最適化を図った。また、リターン回路については、アクチュエータによりリターン流路を変えるなどの損失低減対策を行った。

(2) 配管圧損低減

配管については、損失寄与度分析やコストアップ試算などから効果的な配管を抽出し、特に寄与度の大きい配管については、配管サイズアップを実施した。また、配管経路各部の詳細な圧損評価計算を行い、特に配管接続部や分岐・合流接続部の形状見直しを行い、圧損低減を図った。

(3) 油圧制御損失低減

掘削操作等の制御バルブでの開口制御による油圧損失の全損失に占める割合は非常に大きい。ただし、制動動力に関わる損失や複合操作上必要な開口の絞り制御は残さなければならないので、損失寄与度分析結果をさらに必要損失と不要損失に分類し、不要損失の寄与度の大きい部位やそれに関わる制御の見直しを行った。

主な改善点としては、旋回急操作時に発生するリリーフ損失を低減するポンプ吐出流量のリリーフカット制御や、ポンプ合流制御時の合流油圧回路やその時のポンプ流量制御の最適化による損失低減などのシステム改良などである。また、各バルブの M/I, M/O 開口についても、複合操作の制御性を損なわない範囲で、絞りすぎの開口を最適化して損失低減を図った。

(4) エンジン・ポンプでの燃費改善

エンジン・ポンプの効率率は燃費に直結している要素であり、この部分の改善効果の寄与度は大きい。今回の開発では、油圧システムでの損失低減の効果を動力源の効率改善に最大限に生かすために、油圧システムの改善幅に合わせて油圧吸収馬力の見直しを行うとともに、エンジン回転数の制御領域を HILS 評価を活用しながら最適化させた。エンジン回転数については、アイソクロナス制御をするとともに、従来よりも使用回転数を下げた設定にし、さらに油圧ショベルの負荷特性に合わせてエンジン燃費特性をチューニングすることで高出力域での燃費を大幅に改善することができた。

5. JCMAS 基準燃費評価結果

油圧ショベルの燃費評価方法としては、日本建設機械化協会の規格として 2007 年に制定された JCMAS⁶⁾ 規格がある。コベルコ建機では、これまで燃費評価の社内基準として、90° 旋回実掘削作業を対象に評価してきていたが、統一規格ができたことで改めて旧型機も含めて JCMAS 規格での燃費性能評価を行い、性能を検証した。

JCMAS 規格は、掘削積込動作、ならし動作、走行、アイドリングの 4 つの試験に重み付けを行い、標準動作あたりの燃料消費量を指標として評価するものであるが、アイドリングや走行などの定常動作ではなく、最も評価が予測しにくい掘削積込動作について、実機評価と HILS 評価にて比較検証を行った。

表 1 に、20t 機 (SK200) を対象とした JCMAS 規格での掘削積込作業動作における実機評価と HILS 評価の結果を示す。サイクルタイム、燃費および燃料消費量評価値のどの値も誤差が 3 % 以内の評価結果となっており、実機評価や HILS 評価内での個々のばらつきも考えると平均値とし

ては、十分高精度な評価が行えていることがわかる。JCMAS 規格では、掘削積込評価の重みが 50% と最も高い操作であり、設計・開発段階での HILS システムを含む燃費評価が有効であることが確認できた。

表 2 には、20t 機における JCMAS 規格での最終燃費評価結果と新型機の旧型機に対する燃費削減効果を示す。また、参考として、これまでの社内基準の評価（実掘削）での旧型機に対する燃費削減効果の結果も示す。JCMAS 規格での燃費削減効果は、社内基準での効果に対し、3 ポイントほど小さい効果となる結果となっているが、どちらの評価もほぼ傾向は一致しており、どちらの評価でも性能比較をする上では同様な結果が得られることが確認できた。

なお、旧型機（SK200-6）での作業モードは基本的に 1 種類の単一モードであるが、新型機（SK200-8）は、作業モードとして、H モードと S モードの 2 種類のモード設定をしているため、各モードの評価を併記している。新型機の S モードは、旧型機の作業性能を落とさずに、燃費低減を図ったモードであり、表 2 の掘削積込動作のサイクルタイムでわかるとおり、新型機の S モードでも旧型機に対して同等以上の作業性能を確保していることを確認している。

表-1 JCMAS 規格・掘削積込み動作に対する HILS 評価の精度検証（対象機 SK200-8 H モード）

	サイクルタイム [s]	燃料消費量 [kg/h]	燃料消費量 評価値 $F_1 \cdot M_s \cdot \alpha$ ※1) [kg]
実機評価	14.3	15.3	7.34
HILS評価	14.5	15.5	7.55
誤差	1.9%	1.0%	2.9%

※1) JCMAS規格燃料消費量評価値の計算式における掘削・積込み動作試験に対する燃料消費量評価値

表-2 20t 機（SK200）の JCMAS 最終評価結果と燃費低減効果

	JCMAS評価			社内基準 評価※2)
	燃料消費量※1) 評価値 [kg/標準動作]	効果 [%]	掘削積込動作 サイクルタイム [s] ※3)	効果(参考) [%]
SK200-6(旧型機)	13.5	—	15.5	—
SK200-8(新型機) Hモード	12.8	5%	14.3	8%
SK200-8(新型機) Sモード	11.2	17%	14.9	20%

※1) JCMAS規格の掘削積込み、ならし、走行、アイドリングの結果を含む最終評価値

※2) 社内基準効果は90° 旋回実掘削作業で評価

※3) 作業性能を比較する目安の参考値として示した。

6. まとめ

コベルコ建機では、2006 年の 3 次排ガス規制にあわせた中大型機のモデルチェンジ開発において、昨今の社会的ニーズである CO₂ 削減に応えるべく 20%の燃費低減を目標に低燃費性能開発を行った。この開発では、設計段階での燃費性能予測技術として、実機のエンジン・ポンプと解析評価を組み合わせた HILS 解析システムを開発し、これを開発プロセスに組み入れることにより、効率的な開発環境を実現した。

- (1) 今回開発した HILS システムを含む燃費解析評価手法の精度検証を行った結果、油圧ショベルの代表作業である実掘削作業において、ほぼ実機評価での性能を評価できるに十分な精度の評価が行えることが検証できた。
- (2) JCMAS 規格による燃費評価の掘削積込み動作においても HILS 評価での燃費評価が高精度に評価できることが検証できた。
- (3) これまでの社内基準の評価と JCMAS 規格の評価の結果は、性能差に一定の違いはあるものの、評価としては、どちらの評価でも同様の結果が得られることが検証できた。

参考文献

- 1) 藤川猛・ほか 2 名, 神戸製鋼技報, 34-3(1984), 109-110.
- 2) E. Imanishi et al., Proc. Adv. Mechatro. (1989), 365.
- 3) 今西悦二郎・ほか 5 名, 神戸製鋼技報, 48-2(1998), 14.
- 4) 頭井洋・ほか 3 名, 機論, 52-483(昭 61), 2814.
- 5) 今西悦二郎・ほか 4 名, 機論, 53-492(昭 62), 1171.
- 6) 社団法人日本建設機械化協会規格 JCMAS H 020:2007 土工機械—油圧ショベルの燃料消費量— 試験方法