

(論文)

# 8t級ハイブリッド油圧ショベルSK80Hの開発

## Development of 8 Tonne Class Hybrid Hydraulic Excavator SK80H



鹿児島昌之\*1

Masayuki KAGOSHIMA

In response to the demand for higher fuel efficiency and a lower operational cost, we have developed a new control system for diesel engine-electric motor hybrid excavators. The system comprises controllers for an electric generator-electric motor, an electric swinging motor, and a diesel engine, as well as a battery monitor, which are governed by a hybrid controller. The system, installed in the SK80H model, has achieved a 40% reduction in fuel consumption and a significant reduction in the noise generated from the excavator in comparison with our models on the market. The SK80H model is in the 8 tonne class and has already been launched in the market.

まえがき＝温室効果ガス排出削減による地球温暖化防止への関心が高まり、省エネ技術がますます注目されている。自動車業界では、電動機の高性能化、インバータなどパワーエレクトロニクス技術の進歩、NiMH/Liイオンなどバッテリー技術の進歩などにより、ハイブリッドシステムがすでに商品化され、さらに電気自動車も実用化されつつある<sup>1), 2)</sup>。

コベルコ建機(株)においても、1999年より新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)および(株)神戸製鋼所と共同でシリーズハイブリッドシステムを採用した油圧ショベルの研究開発を行ってきた。その技術をベースに、より実用的なシステムの商品開発を行い、量産機としてのハイブリッドショベルSK80Hを完成させたので報告する。

### 1. ハイブリッドショベルの狙い

#### 1.1 油圧ショベルの構成と動力活用状況

油圧ショベルは、ブーム、アーム、バケット、旋回、および左右走行など複数のアクチュエータを有し、油圧ポンプによってこれらのアクチュエータを駆動させて掘削などの作業を行う(図1)。図2は8t級油圧ショベルによる掘削作業1サイクル分における油圧ポンプの入力パワーおよびアクチュエータの消費パワーの変動の様子を示す。この図からわかるように、従来の油圧ショベルは常に最大負荷に対応できるパワーを油圧ポンプから供給し、たとえ各アクチュエータの消費パワーが低い場合でもその余剰パワーを熱として放出している。これには、各操作の操縦フィーリングを向上するために織り込んでいる操作系損失、あるいは作業装置の下降および旋回停止時などに消費される位置・運動エネルギーの放出によるものが含まれる。図3に油圧ショベルの動力伝達図

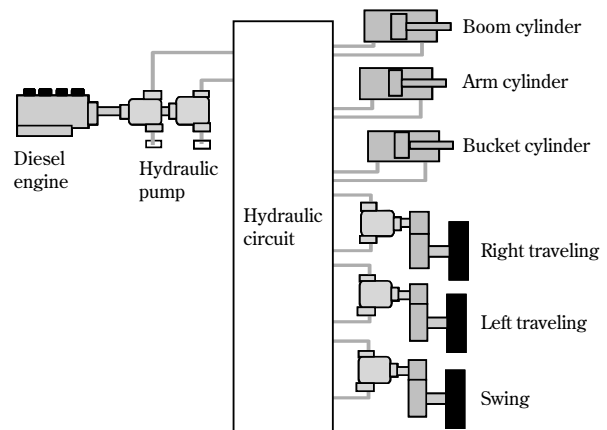


図1 油圧ショベル構成

Fig. 1 Block diagram of hydraulic excavator

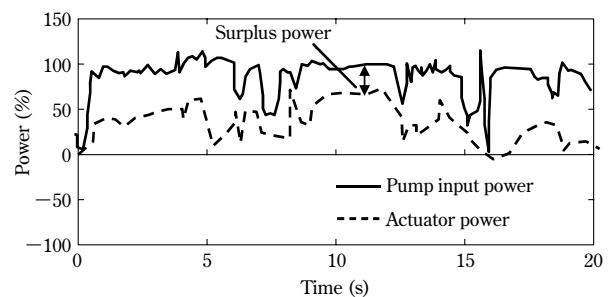


図2 油圧ショベル動力

Fig. 2 Power of excavator

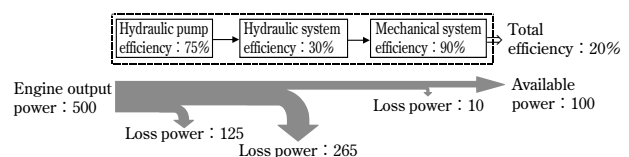


図3 動力伝達図

Fig. 3 Power flow

\*1 コベルコ建機(株) 開発生産本部 要素開発部

を示す。図中には、システム各部の効率、およびエンジン動力を500とした場合のパワーフローを示した。油圧ショベルでは、平均するとエンジン出力パワーの20%しか活用されていないのが現状である。

一方、自動車分野では、ハイブリッドシステムの開発が進み、ハイブリッド自動車として実用化されている。自動車では、主に回生エネルギーの再利用やエンジンの部分負荷運転域でのシステム効率改善を図っている。ところが油圧ショベルは、制御するアクチュエータ数が自動車より多く、各アクチュエータには掘削反力などの大きな抵抗が作用する。さらに、重掘削などの高負荷作業と水平引きや均し（ならし）などの低負荷作業とが短時間に繰返されるため、これらのアクチュエータは大きな負荷変動を受ける。油圧ショベルのハイブリッドシステム化を検討するにあたって自動車との違いを考えたとき（表1）、負荷変動の大きい油圧ショベルに対して自動車用のハイブリッドシステムをそのまま適用するのでは不十分であり、油圧ショベルに適したシステム開発が必要であった。

### 1.2 燃費低減のポイント

前節の検討を踏まえ、油圧ショベルのハイブリッド化においては、以下の3点を狙いとしてシステム開発を行った。

#### 1) 旋回電動化

旋回駆動を電動化することによって回生動力を再利用可能にするとともに、油圧駆動で発生していた損失を大

幅に削減した。また、旋回電動化によってブームなど他アクチュエータからの独立駆動とすることができ、ブームの上げ/旋回の同時操作をはじめとする複合動作時に生じる分配ロスも低減した。

#### 2) 油圧部損失低減

燃費を向上させるためには、単にハイブリッドシステムを搭載するだけでは効果は少なく、油圧系の効率改善が必要である。ポンプやバルブなどの油圧機器および配管系の流動抵抗を点検し、設計や部品を見直すことによって油圧損失を大幅に低減した。

#### 3) エンジン負荷平準化

油圧ショベルの主要動作（掘削、ブーム上げ旋回、積込、ブーム下げ旋回）におけるエンジン負荷状況を図4に示す。比較のため従来ショベルの動力も図中に示している。同図に示したように、低負荷時の余剰エネルギーを利用して発電し、バッテリーに充電する。高負荷時はバッテリーに蓄えた電力を利用して電動機を駆動させ、エンジンを積極的にアシストする。この仕組の導入によってエンジン負荷の平準化が可能となり、搭載エンジンの小型化と高効率運転を実現した。

## 2. ハイブリッドショベル

### 2.1 システム構成

図5にコベルコ建機(株)が開発したハイブリッドシステムの構成を示す。8t級ショベルを対象に、ブームなどの油圧系はパラレル駆動とし、旋回はシリーズ駆動とするシリーズパラレルハイブリッドシステム構成とした。多種多様なハイブリッドシステム構成が考えられるなか、本開発では、電動機などのハイブリッド機器を搭載することによるコストアップの試算結果、およびシミュレーションによって予測した燃費削減効果に基づき、コスト対燃費効果の最も大きいシステムとして本構成を選択した。従来ショベルは、エンジンで駆動されるポンプによって油圧を各アクチュエータに分配するが、本システムではエンジンと発電電動機の両方のパワーでポンプを駆動する。

制御システムは、ハイブリッドコントローラ、電動機

表1 自動車と油圧ショベルの比較

Table 1 Comparison of automobile and hydraulic excavator

	Automobile	Hydraulic excavator
Application	Running	Digging, Leveling, Loading
Operation	Handle, Pedal	Lever (multiaxial)
Number of actuator	1	6
Type of Load	Running resistance	Excavation reaction force
	Inertial force	Inertial force
Load fluctuation	small	big
Velocity fluctuation	small	big

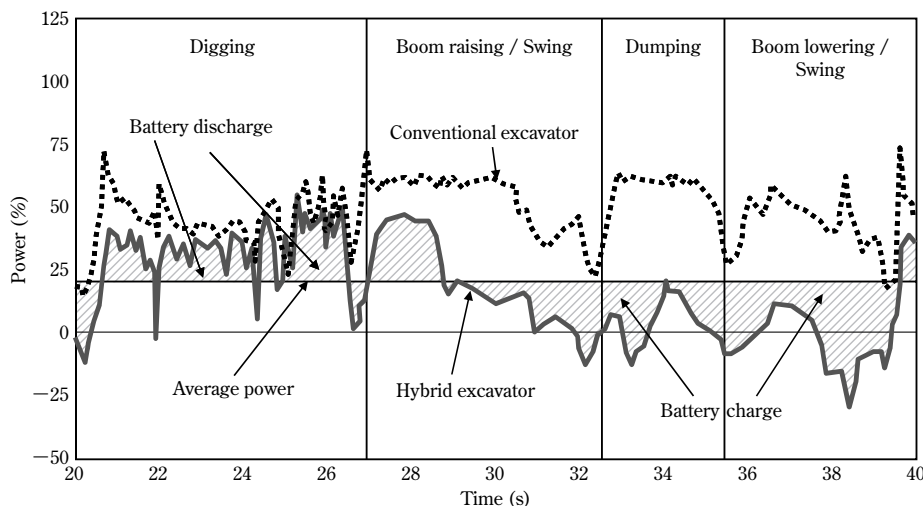


図4 エンジン負荷平準化

Fig. 4 Leveling of engine load

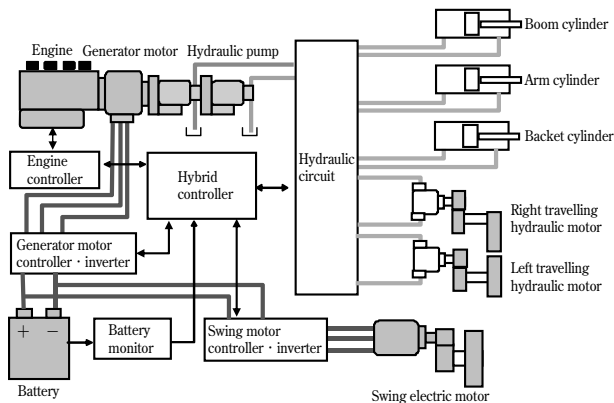


図5 ハイブリッドショベル構成  
Fig. 5 Block diagram of hybrid excavator

コントローラ、エンジンコントローラおよびバッテリーモニタなどの複数のコントローラで構成され(図5)、これらが協調制御を行う。ハイブリッドショベルは、従来のショベルと比べて、とくにインバータノイズなどの過酷なノイズ環境下にさらされるため、センサなどの配線を極力短くする必要がある。そのため、電動機コントローラやバッテリー監視装置を機器と一体化し、さらにコントローラ間を高速のシリアル回線で接続することによってシステムの信頼性を向上させた。

つぎに、各コントローラの機能について説明する。各機器に対して1台のコントローラを割当てており、ハイブリッドコントローラからの指令に基づいて機器制御を行うとともに、機器の故障検出や故障発生時の機器停止制御も行う。ハイブリッドコントローラは、各コントローラからの情報(機器の状態、センシング情報、エラーなど)をすべて受取って統括、管理するとともに、システム全体のパワーマネジメント制御を行う。このように各コントローラで適切な機能分担を行うことにより、システム全体の協調制御を実現した。

## 2.2 ハイブリッド機器

ハイブリッドシステムの性能(システム効率、動力性能)は構成機器のパワー分担をどのように設定するかによって決まる。このため、これらの機器の仕様のなかでも、とくに出力パワーをどのように決めるかが重要である。本開発では、従来ショベルの動力計測結果からシミュレーションなどを行い、各機器に必要なパワーを試算して決定した。表2に示した主要機器について概要を説明する。

### 1) エンジン

燃費を向上させるためには、エンジンの小型化が効果的である。従来40kW程度のエンジン出力が必要であったが、本システムでは一回り小さな27kWのエンジンを搭載している。発電電動機でパワーアシストすることによって、従来と同等の作業スピードおよびパワーを実現することができた。

### 2) バッテリー

ハイブリッドシステムではパワー密度の大きなバッテリーが要求される。そこで、自動車で用いられるものと同クラスのニッケル水素バッテリーを採用した。容量は、放電に関しては、エンジンアシスト時に8tクラスのショ

表2 機器スペック

Table 2 Equipment specifications

Engine	Rated power 27(kW)/1,800(min <sup>-1</sup> )
Generator motor	Rated power 10(kW)/1,800(min <sup>-1</sup> )
Swing electric motor	Rated power 8(kW)/1,890(min <sup>-1</sup> )
Battery	Rated voltage (288V)

ベルに必要な出力から決定した。充電については、旋回電動機からの最大回生パワーに基づいて決定した。

### 3) 発電電動機

発電電動機はエンジンに接続されるため、コンパクトで高効率が要求される。そこで、永久磁石式電動機を採用した。形状はへん平タイプとし、エンジンとポンプ間にビルトインされている。出力は、パワーアシスト時に従来ショベルと同等のパワーが得られることを考慮して決定した。

### 4) 旋回電動機

旋回電動機には高効率の永久磁石式電動機を採用した。インバータ制御と組合わせて旋回減速時のエネルギーの回生が可能である。出力は従来ショベルと同等の旋回加速性能が得られるように決定した。

### 5) インバータ

発電電動機用および旋回電動機用を一体化したインバータを採用した。各電動機の最大負荷を考慮し、これらを駆動するのに必要な容量からインバータ出力を決定した。

## 2.3 ハイブリッドショベルの作動

ショベルは、自動車と比較してアクチュエータ数が多いうえに動作の種類も多い。このため、これらの動作に応じてエンジンやバッテリーなどの動力源を適切に選択することが重要である。ハイブリッドショベルの動作に応じた主要構成機器の作動の様子を図6に示す。

### 1) 無負荷(図6の①)

無負荷時は、バッテリーの充電量が一定値以下の場合、エンジンで発電機を駆動してバッテリーに充電する。これにより、バッテリーの充電量をアシストに必要なレベルに保つことができ、高負荷時の作動に備える。

### 2) 重掘削(旋回動作なし 図6の②)

重掘削時はエンジンでポンプを駆動するとともに、バッテリーの電力で発電電動機を駆動してエンジンをアシストする。バッテリーの電力を利用することにより、小さいエンジンで従来機と同等の動力性能が得られる。

### 3) ブーム上げ旋回(重掘削旋回 図6の③)

旋回動作を含む重掘削時には、エンジンで油圧ポンプを駆動し、バッテリーの電力で旋回電動機を駆動する。エンジンと電動機の協調動作により、油圧系と旋回の複合動作に必要なパワーを得ることができる。

### 4) 旋回制動(図6の④)

旋回減速時は、旋回の回生電力をバッテリーに蓄えるとともに、さらに、エンジンによって駆動されている発電電動機が発電する電力もバッテリーに蓄える。これにより、従来は熱として捨てられていた旋回回生エネルギーを再利用することができる。

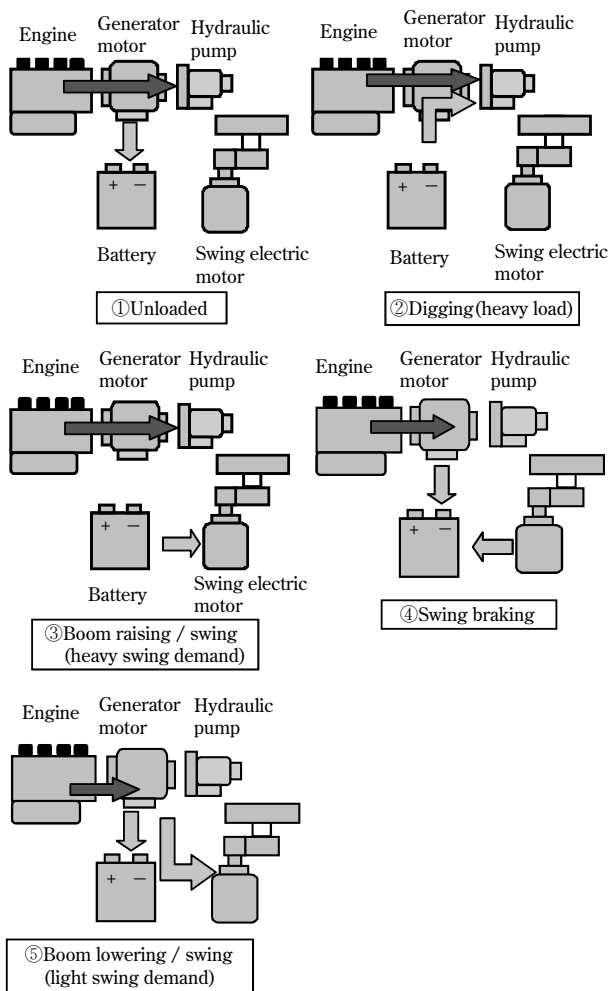


図6 ハイブリッドショベル作動  
Fig. 6 Operation of hybrid excavator

### 5) ブーム下げ旋回（軽負荷旋回図6の⑤）

油圧駆動時のエンジン余剰パワーで発電し、その電力によって旋回電動機を駆動するとともに、バッテリーにも充電する。これによってエンジンの負荷平準化が可能となることに加え、システム効率が向上する。

## 3. ハイブリッド化による効果

### 3.1 ハイブリッド動力源制御

ハイブリッドシステムは、エンジンやバッテリー、電動機などの機器で構成されている。このため、アクチュエータの負荷に応じてこれらの機器のパワーを適切に制御することが重要な課題となる。図7は実機を用いて動力源制御の試験を実施した結果である。図中の②～⑤の番

号はそれぞれ図6で示した②～⑤の動作に対応している。②③は比較的重負荷の場合であり、アクチュエータのトータルパワーがエンジンパワーを超える部分はバッテリーで駆動される発電電動機がパワーアシストを行っている。④は旋回が減速する場合であり、旋回電動機からの回生電力がバッテリーに蓄えられている。⑤はブーム下げ旋回の場合であり、エンジンパワーで旋回を駆動させると共にバッテリーにも充電されている。このように、ほぼ図6に示した動作が実現されている。またバッテリー制御では、バッテリーSOC（充電状態）およびバッテリー温度によってバッテリー充放電の最大パワーを決めている。図7の動作では、充電最大パワーは46%、放電最大パワーは48%に設定されている。バッテリーパワーは変動が大きく、過渡的な状態では充放電最大パワーを超える部分がある（図7○部）。こうした部分を除けば充放電最大パワー以下で制御されており、ハイブリッド動力源制御が狙いどおりに実現されていることがわかった。

### 3.2 燃料消費低減効果

ハイブリッド油圧ショベルの燃費評価については、社団法人日本建設機械化協会規格（JCMAS）により新基準<sup>3)</sup>が制定されている。本試験方法は、掘削・積込動作、均し動作、走行動作、およびアイドリングの各動作を総合的に評価したものである。この基準に基づき、SK80Hの燃費評価を実施した。

図8にJCMAS新基準における燃費計測結果を示す。同図では、コベルコ建機(株)の従来機の燃料消費を100%としたときの各作業時の燃料消費量を示している。掘削・積込作業の場合、40%近い燃料消費低減効果があることがわかる。同時に、CO<sub>2</sub>削減率も最大40%程度であることが確認された。

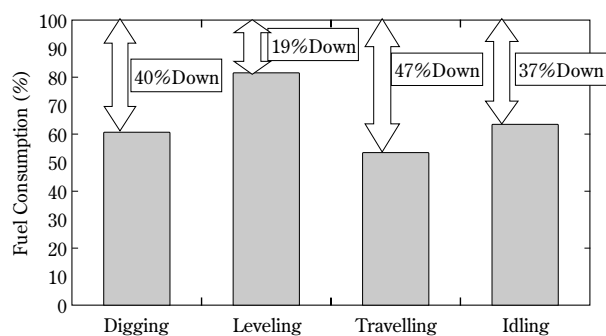


図8 燃料消費の低減  
Fig. 8 Improving of fuel consumption

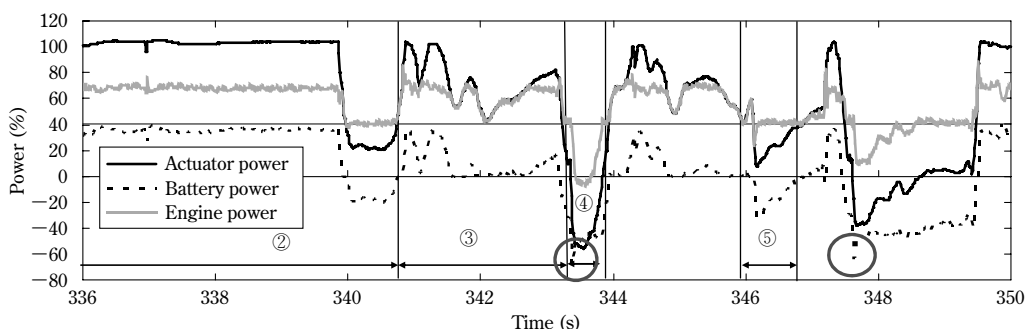


図7 動力源制御試験結果  
Fig. 7 Results of power control test



### 3.3 騒音低減効果

8tクラスのショベルは、都市における土木作業に用いられることから静粛性も重要である。そこで、ハイブリッド化による騒音低減効果を計測した。主に同クラスのショベルと比較すると、エンジンの小型化による騒音低減効果が大きい。SK80Hは、従来機に比べて特別な騒音対策を行ってはいないが、基準値よりも約3dB(A)低い90dB(A)と大幅な低騒音化を達成し、国土交通省の「超低騒音型建設機械」の認定を受けている。したがって、ハイブリッド化は騒音低減にも有効な手段であることがわかった。

**むすび**＝建設機械の省エネ化に向けた取組における量産商品化例として、8t級油圧ショベルを対象に開発した

ハイブリッドショベルSK80Hの概要を紹介した。ハイブリッド化によってエンジンを小型化でき、燃費を40%低減するとともに大幅な低騒音化を達成した。このようなハイブリッドショベルを市場へ広く普及させるためには、この燃費性能を確保しつつ、コストあるいは生産性を改善していくとともに、実稼動データをはじめとするフィールドからの情報に基づいた改良を重ねていくことが重要である。

#### 参考文献

- 1) 近藤宏一ほか. ハイブリッド車用電気式4WDシステムの開発. 自動車技術会学術講演会前刷集, 2001, No.101-01, p.13-16.
- 2) 佐々木正和ほか. キャパシタハイブリッドバスシステムの開発. 自動車技術会学術講演会前刷. 2001, No.102-01, p.9-14.
- 3) 社団法人建設機械化協会. 土木機械—エネルギー消費改善の確認試験方法 JCMAS H020:2010.