

(論文)

ハイブリッドショベルの開発

Development of New Kind of Hybrid Excavator



鹿兒島昌之*
Masayuki Kagoshima



小見山昌之*
Masayuki Komiyama



南條孝夫**
Takao Nanjo



筒井 昭***
Akira Tsutsui

In order to make the construction process used to manufacture heavy machinery more efficient, a 6 ton class hybrid excavator was developed through a collaborative effort between Kobelco Construction Machinery, Kobe Steel, and NEDO. Reductions in fuel consumption were evaluated through simulations for a series of hybrid systems. Then a prototype demonstration machine was built to simulate practical operations. The experimental results proved that the proposed system can reduce fuel consumption by more than 60%. The remaining challenge is to develop a manufacturing process which reduces the cost of the components that constitute this new hybrid system.

ま え が き = 2008 ~ 2012 年に地球温暖化の温室効果ガス排出量を 1990 年比で 5% 以上削減することを目標に、各国・地域の削減数値目標を割当てた京都議定書が 1997 年 12 月の COP3 において採択され、2003 年 10 月にロシアが批准承認したことで、2005 年 2 月 16 日に発効した。しかし、我国の温室効果ガス排出削減目標の 6% は 2002 年度では 7.6% 増加し、13.6% の削減が必要となっており、法的拘束力のある数値目標の達成に向けて、「地球温暖化対策推進大綱」に基づき、省エネルギー対策は加速されようとしている。

我国の温室効果ガス排出量の約 1% が建設機械の燃料消費によるもので、その内、油圧ショベルが 59% を占めるといわれている。その削減対策の手段として注目されているのが、建設機械の省エネルギーやエネルギーの効率向上を目的とするハイブリッドシステム^{(1),(2)}の開発である。

以上のような状況下で、コベルコ建機株式会社では、省エネルギー効果 40% 以上を目標に、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) および神戸製鋼所と共同で 6 トンクラスのハイブリッドショベルを開発し、実作業における省エネルギー効果の実証試験を行ったので、報告する。

1. 油圧ショベルのハイブリッド化の狙い

油圧ショベルは、掘削などの高負荷作業と水平引き・均しなどの低負荷作業を短時間で繰返すため、大きな負荷変動を受ける。また、基本アクチュエータとして、ブーム、アーム、バケット、旋回、左右走行という分散配置されたアクチュエータを持っており、これらのアクチュエータに対し、高エネルギーを高応答に供給するために油圧システムが採用されている。

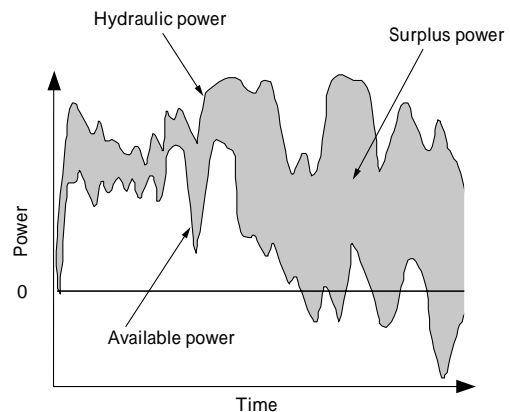


図 1 ショベルの動力
Fig. 1 Power of excavator

従来の油圧ショベルの動力を図 1 に示す。従来の油圧ショベルでは、最大負荷に対応できる動力を油圧ポンプから供給し、余剰動力を熱として放出しながら機械の動きを制御しているため、作業有効動力が低い場合であっても、複合操作時のコントロールバルブでの各アクチュエータへの流量分配や合流のための絞り損失やブリード損失が大きくなり、投入動力はあまり下がらない。また、アタッチメントの下降時や旋回停止時など外部から与えられる位置エネルギーや運動エネルギーも熱として放出している。従来ショベルのエネルギー伝達図を図 2 に示すが、平均するとエンジン出力の 20% しか有効活用されていないのが現状である。

これらの状況を踏まえ、油圧ショベルのハイブリッド化については、以下のような狙いでシステム開発を行った。

- ・アクチュエータの独立駆動による油圧合流・分配ロスの低減
- ・電気油圧駆動アクチュエータによる制御ロスの低減

*コベルコ建機株式会社 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

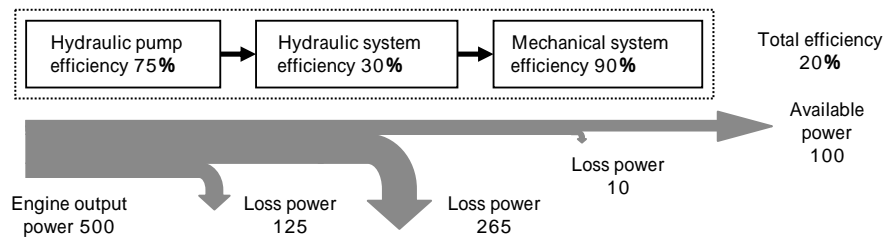


図2 動力伝達図
Fig. 2 Power flow

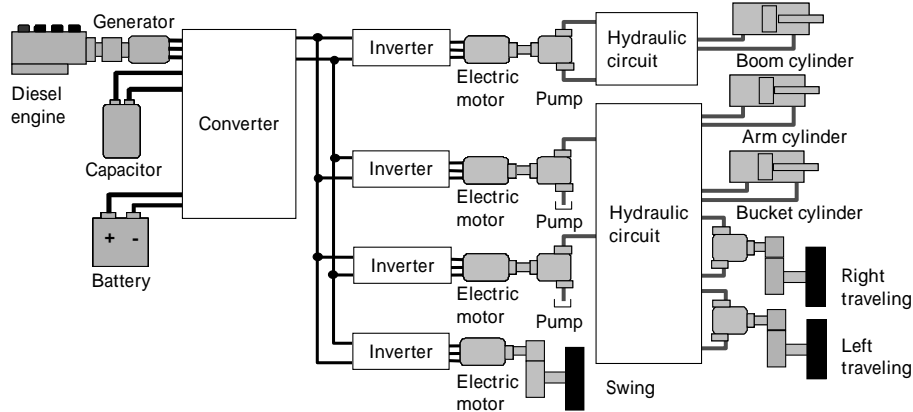


図3 ハイブリッドシステム構成
Fig. 3 Hybrid system configuration

- ・位置エネルギーや運動エネルギーなどの再生エネルギーの再利用
また、動力供給を行う動力源の高効率化については以下の狙いとした。
- ・バッテリー、キャパシタを用いたエンジン負荷の平準化と高効率領域運転
- ・エンジン間欠運転による燃料消費量削減

2. ハイブリッドショベルのシステム構成

今回開発したハイブリッドショベルのシステム構成を図3に示す。

6tクラスのショベルを対象としており、システム構成は図のようなシリーズハイブリッドシステムである。

アクチュエータシステムとしては、6個のアクチュエータを準独立な電動油圧駆動のアクチュエータとしており、油圧でのアクチュエータ間の干渉を最小限に抑えて、従来発生していた油圧システム内での損失を低減させている。また、ブームについては、電動機、両回転油圧ポンプを用いたクローズドシステムとして、ブーム上昇時に蓄積した位置エネルギーをブーム下降時に、油圧を介して電気エネルギーとして再生できるようにしている。旋回は回転運動であることから、油圧は用いず、電動機で直接駆動するシステムとしており、旋回停止時には、上部旋回体の運動エネルギーを電気エネルギーとして再生する。走行システムも回転運動であり電動機駆動に適しているが、電動機と減速機を直結するコンパクトな走行システムの開発が困難であることから、アーム、バケットの油圧源を用いた電動油圧駆動としている。

動力源は、エンジン、バッテリー、キャパシタからなるシリーズ方式のハイブリッド動力源となっている。動力源として、バッテリー、キャパシタを用いることで、

表1 ハイブリッドシステム仕様
Table 1 Hybrid system specifications

Boom	Rated output	20 kW (3,000min ⁻¹)
Arm (Left traveling)	Rated output	11 kW (3,000min ⁻¹)
Bucket (Left traveling)	Rated output	11 kW (3,000min ⁻¹)
Swing	Rated output	6 kW (3,000min ⁻¹)
Engine	Rated output	22 kW (1,600min ⁻¹)
Generator	Rated output	20 kW (6,600min ⁻¹)
Battery	Rated voltage	288 V
	Capacity	6.5 Ah
Capacitor	Max voltage	304 V
	Capacity	11.3 F

ショベルのような負荷変動が激しい場合においても、負荷に対するエンジンパワーの過不足分をバッテリーで補うことができるため、エンジン負荷を平滑化し、従来ショベルより小さなエンジンを用いてエンジンの高効率運転が可能となり、燃費を向上させることができる。

また本システムは、エンジンパワーを一旦電気に置換えているため、バッテリー、キャパシタ出力に余裕がある場合には、ショベルの作業中であってもエンジンを停止して作業を行うことができ、エンジンの間欠運転により、さらに燃料消費を抑えることができる。

ハイブリッドシステム主要機器の仕様を表1に示す。上段はアクチュエータ駆動電動機の仕様、下段は動力源機器の仕様である。駆動電動機は、各アクチュエータの最高出力と同等以上の能力を持つように設定しており、動力源機器仕様は、連続重負荷作業条件とエンジン / 発電機とバッテリーとの電力分担を考慮して決定している。エンジン出力については、従来油圧ショベルの約半分である。

3. 実作業時の燃費シミュレーション

3.1 シミュレーションモデル

ハイブリッドショベルの構成要素である動力源の駆動系および電力系、アクチュエータの油圧系、およびショベルのアタッチメントなどのリンク機構系を全てモデル化し、システム全体の応答を求める動的シミュレーションモデルを神戸製鋼所で開発した非線形動的解析コード SINDYS³⁾を用いて構築した。

このシミュレーションモデルは、燃費性能や省エネ評価を行うのが主な目的であり、各機器の効率特性や損失特性が実機特性を反映したものにしなければならないため、機器特性については、機器の単体試験で採取した特性データと特性パラメータを同定し、モデル化している。

以下にシミュレーションモデルで考慮した主な機器の効率、損失特性を示す。

- ・ バッテリ、キャパシタの充放電効率特性
- ・ 発電機、電動機の効率特性
- ・ エンジンの燃費率特性
- ・ 電気系制御器の効率特性
- ・ 配管、制御弁の絞りによる圧力損失特性
- ・ 油圧ポンプ、電動機の容積効率、機械効率特性
- ・ 主要機器以外の補機での消費動力

3.2 標準負荷モードでの燃費

燃費評価の対象作業としては、6tクラスのショベルの作業として代表的な下水管埋設工事を対象とし、作業現場での稼動状況を独自に調査した結果を基に策定した標準負荷モード⁴⁾に準じた作業で評価することとした。表2に、標準負荷モードのサイクルタイムと時間比率を示す。エンジン停止を除いて軽負荷から重負荷の7作業を対象としており、現実に近い作業での燃費評価である。作業中のアクチュエータ速度および負荷は従来油圧ショ

表2 標準負荷モード
Table 2 Standard work mode

Work	Cycle time (s)	Time ratio (%)
Loading	45	18
Unloading	35	8
Leveling	50	8
Hoisting	80	10
Sheet piling	75	7
Traveling	20	3
Idling	120	23
Engine stop	80	23
Total		100

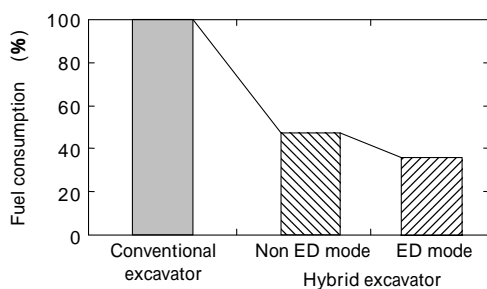


図4 標準負荷モードのシミュレーション結果
Fig. 4 Simulation results of standard work mode

ベルで実測した負荷データを用い、作業工程にあわせてこれらの作業を組合わせて全体で約1時間の連続作業負荷データを作成し、これをシミュレーションでの評価対象作業とした。

図4に、標準負荷モード全体に対するシミュレーションでの燃費評価結果を示す。図にはEDモードあり/なしの2条件の結果を示した。EDモードとは、アクチュエータ負荷とバッテリー、キャパシタの充電状態により、作業中であってもエンジンを停止し、バッテリーとキャパシタのみでアクチュエータを駆動する電気駆動モードを意味し、EDモードありの場合には、エンジンを間欠運転することで高効率域での運転が維持できるため、なしに比べて約10%燃費が向上している。また、従来油圧ショベルに対し、64%の燃費削減効果が期待できる結果となった。

4. 実証試験

本研究開発では、燃費性能を実証するために、実際に6tクラスのハイブリッドショベル実証機を製作し、各種の試験により、従来油圧ショベルのとの性能比較を行った。なお、作業機としての各アクチュエータの作動速度や応答性、操作性評価などの試験で、従来油圧ショベルと同等の性能を有していることを確認している。

以下では、燃費削減効果についての実証結果とシミュレーション予測精度の検証結果を示す。

4.1 下水枝管埋設工事での燃費評価

実証試験では、実際の現場作業での燃費を評価するために、試験場に幅4m、長さ30mのアスファルト舗装道路を造成し、専門工事業者に実証機を供与して、下水枝管埋設の模擬工事を実施した。舗装剥取りから下水管埋設と舗装修復まで、規定どおりの1日工事を3回実施し、燃費データを採取した。

この試験での従来油圧ショベルに対するハイブリッドショベル実証機での燃費比較を図5に示す。図中、ハイブリッドショベルについては、標準負荷モードのシミュレーションで事前予測した結果と実測結果を併せて示している。燃費実測結果はシミュレーション予測結果とほぼ同じとなっており、60%以上の省エネルギー効果が実証された。また、実作業での燃費性能は、標準負荷モードとしてパターン化した作業モードに基づいてシミュレーションを行うことにより精度よく事前予測できることもわかった。

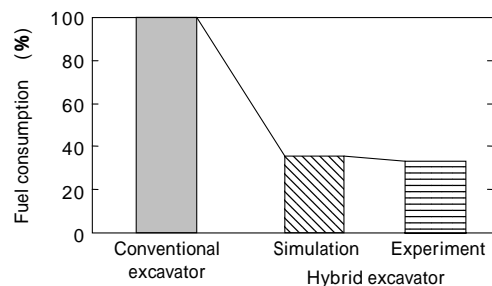


図5 下水枝管埋設工事での燃費評価結果
Fig. 5 Fuel consumption estimated result in sewer branch pipe laying work

5. モニタ機の開発

コベルコ建機㈱ではこの成果を基に、より商品機に近いシステムを開発中であり、INTERMAT2006 および CONET2006 に参考出展を行った。ハイブリッドショベルモニタ機を写真1に示す。

むすび＝建設機械の省エネルギー化のための方策として6tクラスの油圧ショベルを対象に、ハイブリッド化による燃費削減効果をシミュレーションにより評価した。

また、ハイブリッド実証機を製作し、実作業を模擬した燃費性能評価試験の結果から、現行油圧ショベルと同等性能のハイブリッドショベルが、自動車同様に省エネルギー効果を発揮し、60%以上の燃費低減が可能であることが実証された。

今後も商品化に向けて、さらに開発を継続していく。



写真1 ハイブリッドショベル(モニタ機)
Photo 1 Hybrid excavator (Monitor machine)

参考文献

- 1) 佐々木正和ほか：自動車技術会論文集，Vol.32, No.4 (2001) p.181.
- 2) 緒方 誠ほか：自動車技術会論文集，Vol.33, No.1 (2002) p.101.
- 3) 藤川 猛ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.34, No.3 (1984) p.109.
- 4) 小見山昌之ほか：建設の機械化，No.626 (2002) p.28.