

# 電動・ハイブリッド化による 建設機械の省エネルギー化

Adoption of Electrification and Hybrid Drive for More Energy-efficient Construction Machinery

枝村 学  
Edamura Manabu  
井村 進也  
Imura Shinya

石田 誠司  
Ishida Seiji  
泉 枝穂  
Izumi Shiho

電動・ハイブリッド化は、自動車と同じく建設機械においても、省エネルギー化に対して有効なテクノロジーの一つである。

2011年7月、日立建機は、20 tクラスのハイブリッド油圧ショベル「ZH200」をリリースした。ZH200は、ハイブリッド化における、コスト、信頼性・耐久性、安全性の課題をクリアし、省エネルギー性のみならず、操作性や作業性能においても高い評価を受け、順調に稼働台数を伸ばしている。

今後も、日立グループの持つ電動デバイス技術・電子制御技術を建設機械製品に結集させ、顧客ニーズに合致し、かつ省エネルギー性能に優れた製品を提供していく。

## 1. はじめに

近年、地球温暖化抑制のためのCO<sub>2</sub>排出量の削減や原油価格の高騰を背景に、建設機械に対する省エネルギー化への要求が高まっている。これを受けて、省エネルギー型建設機械の使用による公共工事の入札ポイント加算制度や、ハイブリッド建設機械への購入補助金など、国の施策も始まっている。

自動車分野と同様に建設機械分野でも、電動・ハイブリッド化は省エネルギー化に対する有効なテクノロジーの一つである。日立建機株式会社は、以前から電動化建設機械の開発に力を入れており、商用電力（電力会社から供給される電力）を送電線によって供給する商用電動式油圧ショベル、リチウムイオン電池を搭載したバッテリーショベル、シリーズハイブリッド式の大型ホイールローダなどを製品化してきた。さらに、2011年7月には、20 tクラスのハイブリッド油圧ショベル「ZH200」をリリースした。

ここでは、油圧ショベルの省エネルギー化のポイントやハイブリッド化にあたっての課題、およびハイブリッド油圧ショベルZH200の概要について述べる。

## 2. 油圧ショベルの省エネルギー化

エンジンで発生した回転トルクを、車輪に伝達して走行を行う自動車に対して、油圧ショベルでは、エンジンで油圧ポンプを回転し、各油圧アクチュエータを駆動して仕事を行う。そのため、自動車と同じようにモータや蓄電装置を用いても、省エネルギー化にあたってのハイブリッドシステムの動作や考え方は異なる。また、走行距離当たりで燃費評価が可能な自動車に対して、油圧ショベルはその用途や作業が多岐にわたっており、燃費自体を定義しにくい。

### 2.1 油圧ショベルのエネルギー損失

油圧ショベルは、燃料（通常は軽油）をエネルギーとし、各油圧アクチュエータを駆動させることによって、目的とする仕事に変換する機械と考えることができる。

油圧ショベルにおけるエネルギーの損失を図1に示す。

燃料の持つ熱エネルギーはエンジンの軸出力に変換されるが、ここで約60%が熱として放出される。エンジンの

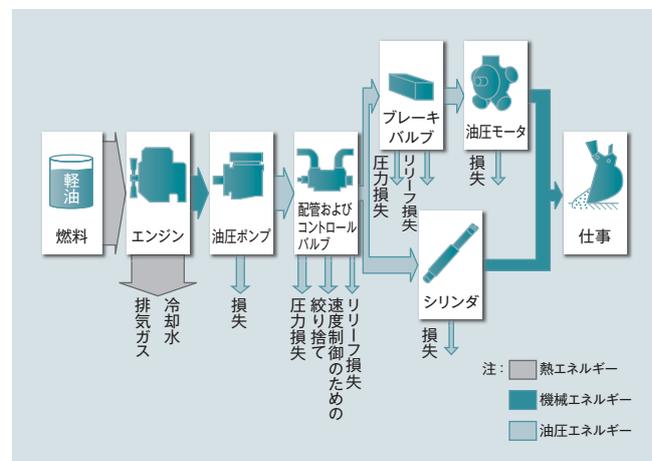


図1 | 油圧ショベルのエネルギー損失

燃料が持つエネルギーは、まずはエンジン、次に油圧システム内で種々の損失となり、実際の仕事に変換されるエネルギーはわずか10%以下である。

軸出力によって油圧ポンプを駆動して油圧エネルギーに変換し、配管およびコントロールバルブを介して、各油圧アクチュエータに分配するが、この過程において、単純な圧力損失のほか、特性の異なる各油圧アクチュエータを自在に動かす制御性を確保するために、多くのエネルギーを油圧システム内で損失する。このほか、作業中に発生する位置エネルギーや慣性エネルギーも、油圧システム内で熱に変換して捨てることになる。作業条件にもよるが、仕事として有効に使われるエネルギーは、燃料の持つエネルギーの10%以下<sup>1)</sup>である。

## 2.2 ハイブリッドシステムの働き

油圧ショベルでは、各種損失を減らすため、油圧機器やシステム、エンジン、構造体や機械要素といった部分で、これまでもさまざまな改良が行われてきた。

ハイブリッドショベルでは、さらに電動デバイスが持つ優れた特性を組み合わせ、システム全体の効率を向上することにより、いっそうの省エネルギー化を図っている。

電動デバイスが持つ代表的な優れた特性は以下のとおりである。

- (1) 制御応答性が高い（エンジン、油圧機器に対して）。
- (2) 駆動・伝達効率が高い（油圧機器に対して）。
- (3) エネルギー回生が可能である（油圧機器に対して）。

油圧ショベルの掘削放土中の油圧ポンプ出力の時間変動データ<sup>2)</sup>を図2に示す。この出力がほぼエンジンの負荷となる。このように、ゼロ近くからエンジンの最大出力近傍まで大きく出力変動することが油圧ショベルの特徴である。

このような負荷変動があったとき、エンジンや油圧ポンプは、必ずしも効率が最良の点で動いているわけではない。本来、回転数を最適化し、高効率点で駆動したいが、エンジン回転の制御応答が遅いことがネックとなっている。ハイブリッド化した場合、上述の特性(1)を生かし、電動モータでアシストしながらエンジン回転数を変化さ

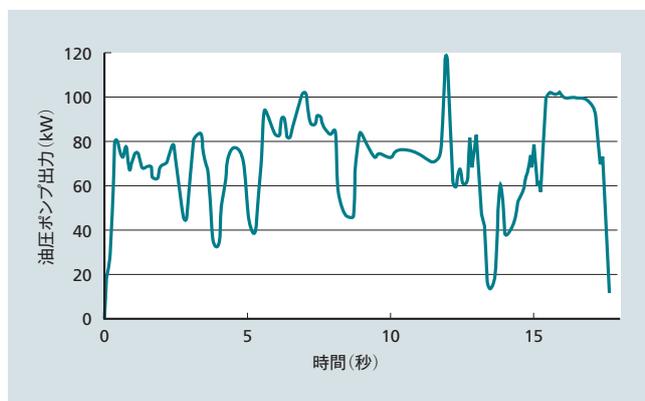


図2 | 掘削放土における20 tクラス油圧ショベルのポンプ出力の時間変動の例  
ゼロ付近からエンジンの最大出力付近までポンプ出力が変動する。

せ、エンジンと油圧ポンプをより効率の高い点で運転することが可能となる（図3参照）。あるいは、特性(2)、(3)を生かし、一部の油圧アクチュエータ、例えば旋回装置の電動化により、システム全体の効率を上げるとともに減速時のエネルギー回生が可能となり、省エネルギー化を図ることができる。これら三つの特性をうまく生かすことにより、このほかの各種、特に油圧システム内のエネルギー損失を低減する可能性を秘めている。

## 2.3 ハイブリッド化における課題

ハイブリッド化が油圧ショベルの省エネルギー化に対して有効なことは言うまでもないが、最も問題となるのは、コストと信頼性・耐久性である。

例えば、トヨタ自動車株式会社のハイブリッド自動車「プリウス」の2010年度の販売台数は国内だけで約30万台（一般社団法人日本自動車販売協会連合会調べ）であったが、油圧ショベルはすべてのクラスを合わせた世界需要が年間15万台にすぎない（ただし、大型ショベル、ミニショベルを除く<sup>3)</sup>）。電気系の部品は大量生産によるコスト低減効果が大きいので、ハイブリッドシステムのコストを抑えるには、ハイブリッドショベルの普及に加えて、機種展開による共通化や自動車用部品<sup>4)</sup>の活用などのコスト低減策が必要である。

また、油圧ショベルは過酷な環境下において20年以上稼働することも珍しくないため、電動デバイス、特に蓄電デバイスの信頼性・耐久性が大きな課題となる。電動デバイスの故障で停止したり、寿命を迎えて修理不能となったりするようでは、顧客にメリットがある機械とは言えない。

さらに、安全性についても十分な配慮が必要である。ハイブリッドショベルでは、高電圧に対する安全性の確保はもちろんのこと、電子制御が不能になったときでも機械が安全に作動することが求められる。

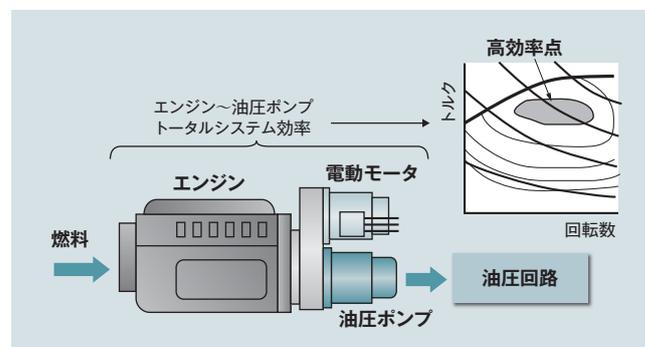


図3 | エンジン、電動モータ、油圧ポンプから成るシステムにおける高効率運転の例

トータルシステム効率が高い領域で運転するよう全体を制御することにより、省エネルギー化を図る。



図4 | ハイブリッド油圧ショベル「ZH200」の外観  
公益財団法人日本デザイン振興会主催の2011年度「グッドデザイン賞」を受賞している。

### 3. ハイブリッド油圧ショベル「ZH200」

日立建機が長年培ってきた電動化建設機械の経験と技術を生かし、その集大成として、20 tクラスのハイブリッド油圧ショベル「ZH200」を製品化した。ZH200は、広く顧客のニーズを調査した結果を踏まえて開発した製品であり、イニシャルコストと優れた燃費性能を高い次元でバランスさせ、かつ、作業や現場の種類を問わず使用可能な実用性を確保したハイブリッド油圧ショベルである(図4参照)。

#### 3.1 ZH200のハイブリッドシステム

ZH200は、新開発の3ポンプ低燃費油圧システム TRIAS (トライアス) にハイブリッドを融合した「TRIAS-HX (トライアスエイチエックス)」を搭載している。TRIAS-HXの概略を図5に示す。

従来の2ポンプ2バルブの油圧システムに対して、TRIASは大容量ポンプとバルブを加えた3ポンプ3バルブ構成となっており、油圧源が増えたことにより、複合操作時の絞り損失が減り、システム効率を向上している。

さらに、電動・油圧複合旋回装置を備え、電動モータに

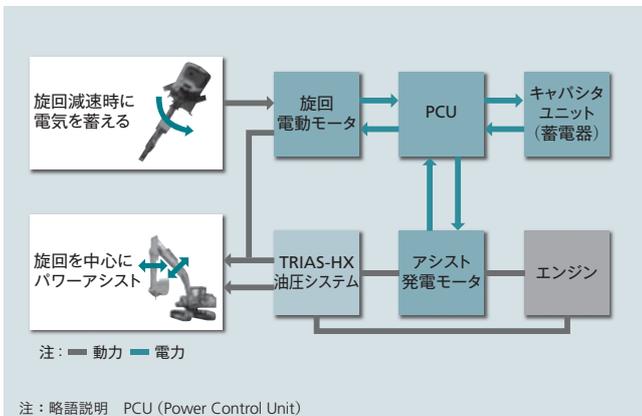


図5 | 「TRIAS-HX」ハイブリッドシステム  
新開発の3ポンプ3バルブ油圧システムとハイブリッドシステムを融合し、優れた基本性能と省エネルギー性を両立している。

よって旋回減速時にエネルギー回生を行い、旋回加速時には加速アシストを行っている。

ZH200はTRIAS-HXシステムの採用に加え、高度なエンジン制御、アイドルストップや油圧配管の圧損低減などの効果により、標準機 (ZX200-3型) 比で20%の低燃費化を達成している。

#### 3.2 ZH200の電動デバイス

ZH200に搭載される電動デバイスは、2台のモータとPCU (Power Control Unit)、キャパシタユニットである。

旋回電動モータは、旋回装置の油圧モータと旋回減速機の間に取り付けられる(図6参照)。旋回電動モータは、水冷式の永久磁石同期電動機で、PCUからの指令でトルク制御され、旋回体の減速時にはエネルギー回生し、加速時には旋回油圧モータ駆動をアシストする。

アシスト発電モータは、エンジン～油圧ポンプの動力軸に接続された永久磁石同期電動機であり、主に、キャパシタユニットの充電量の制御を担っている。

PCUは、モータ駆動用のインバータとチョップパから成るパワー系電気回路を内蔵しており、上位のコントローラからの指令に基づき、2台のモータを指令トルクで駆動する。

キャパシタユニットは、大容量の電気二重層キャパシタ、制御回路、メインリレーなどを内蔵し、旋回電動モータからの回生電力、およびアシスト発電モータの発電電力を蓄電する。

#### 3.3 ZH200のねらいと特徴

ZH200の製品化にあたっては、前述したコストと信頼性・耐久性の課題をクリアする必要があった。

ZH200では、パワー系電気部品について、自動車用の部品を活用しつつ、エネルギー的には油圧システムとの分

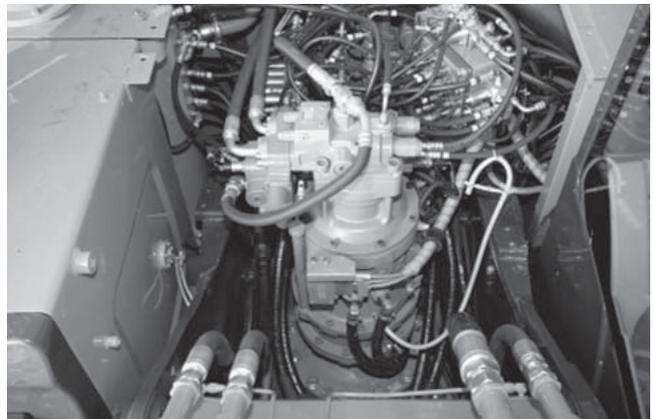


図6 | ZH200の旋回装置  
最上部は旋回油圧モータであり、三相ケーブルが接続される部分が旋回電動モータである。

担を行うことによって最大電流や出力の仕様を下げ、ハイブリッドシステムの低コスト化を実現している。また、キャパシタユニットを含む電動デバイスは車体寿命以上の設計寿命とし、万一電動デバイスが故障しても、油圧単独制御モードに切り替えることによって、できる限り機械が停止しないようにしている。

安全性については、電気的にはハイブリッド自動車・電気自動車に準じた設計としており、機械的には、電気系の故障時においても油圧システムが安全性を担保する設計としている。

さらに、日立建機の油圧ショベルにふさわしい基本性能と操作性も同時に求められた。自動車の場合、走行距離当たりの燃料消費で省エネルギー性を測る。一方、油圧ショベルの場合は、行った作業当たりの燃料消費が問われるべきであるが、容易に計測可能なのは稼働時間当たりの燃料消費である。ここで、思いどおりに動かないショベルは、仮に時間当たりの燃料消費量が小さくても、必ずしも省エネルギーとは言えないことに注意が必要である。例えば、操作性のよい機械なら1回の動作で終わる作業に対して、操作性の悪い機械では2回、あるいはさらに多くのむだな動作を行っている可能性があるからである。ZH200では、シミュレーションと実機テストをシームレスにつなぐことが可能なモデルベース開発手法<sup>5)</sup>を用いて制御アルゴリズムを開発することにより、ハイブリッドでありながら、標準機と比べて違和感のない操作性を実現している。

#### 4. おわりに

ここでは、油圧ショベルの省エネルギー化のポイントやハイブリッド化にあたっての課題、およびハイブリッド油圧ショベルZH200の概要について述べた。

地球温暖化抑制に大きく貢献するには、ZH200のような省エネルギー型の建設機械を市場にさらに普及させることが必要である。日立建機は、今後も、日立グループの電動デバイス技術・電子制御技術を建設機械製品に結集させるとともに、エンジン、油圧システム、構造物、機械要素といった建設機械の基本技術をさらに進化させ、顧客のニーズに応え続けるとともに、さらなる省エネルギー化を実現した建設機械製品を提供していく。

#### 参考文献など

- 1) 岡部：油圧ショベル大全、日本工業出版(2007.10)
- 2) 落合、外：建設機械のハイブリッド化とハイブリッドショベル、建設の施工企画(707)、35-39、日本建設機械化協会(2009.1)
- 3) 日立建機グループ CSR & Financial Report 2011 PDF版、<http://www.hitachi-kenki.co.jp/ir/library/annual.html>
- 4) 吉原、外：ハイブリッド電気自動車用パワートレインの電動化技術開発、日立評論、91、10、768~771(2009.10)
- 5) 成沢、外：制御システムの高度化・高信頼化を支えるモデルベース開発技術、日立評論、91、5、426~429(2009.5)

#### 執筆者紹介



##### 枝村 学

1990年日立製作所入社、日立建機株式会社 制御システムセンター 所属  
現在、建設機械の電子制御システム、電動システムの開発に従事  
博士(工学)



##### 石田 誠司

1990年日立製作所入社、日立研究所 情報制御研究センター モータシステム研究部 所属  
現在、建設機械の電動システムを含む次世代電動技術の研究開発に従事  
電気学会会員、IEEE会員



##### 井村 進也

1998年日立製作所入社、日立研究所 機械研究センター 輸送システム研究部 所属  
現在、建設機械や自動車の制御システムの研究開発に従事  
日本機械学会会員、自動車技術会会員



##### 泉 枝穂

1999年日立製作所入社、日立研究所 情報制御研究センター モータシステム研究部 所属  
現在、建設機械の制御システムやシミュレーションの研究開発に従事  
電気学会会員、自動車技術会会員