

(技術資料)

20t級ハイブリッドショベルSK200H-10の開発

Development of 20-tonne Class Hybrid Excavator, SK200H-10



山崎洋一郎*1
Yoichiro YAMAZAKI



佐伯誠司*1
Seiji SAIKI



古賀信洋*2
Nobuhiro KOGA



筒井 昭*3
Akira TSUTSUI



関山和英*4
Kazuhide SEKIYAMA



前田健吾*5
Kengo MAEDA

Evolution is continuing in power electronics technology, particularly in the automobile industry, to reduce fuel consumption and the environmental burden. This technology was adapted for a hybrid hydraulic excavator, SK200H-10 equipped with a lithium-ion battery, as introduced in this paper. A continuous engine assist has been realized for the hydraulic excavator by effectively using the regenerative energy generated during slewing deceleration, due to the large inertia of its slewing body, and by adopting a lithium ion battery with high output and large capacity. As a result, the fuel consumption of the excavator has been reduced significantly. The scrap handling machine (with magnet), SK210DLC-10, which adopts the same generator motor as SK200H-10 and applies a hydraulic excavator with a totally renewed power generation system, which used to be based on a hydraulic pump, enjoys a remarkably increased magnetic attraction and considerably reduced fuel consumption, thanks to the reduced energy loss during power conversion.

ま え が き = 近年、地球温暖化の原因となるCO₂をはじめとする温室効果ガス、および大気汚染・健康被害をもたらすNO_x（窒素酸化物）などの削減は、エコロジーや持続可能社会を合言葉とした国際社会全体の課題となっている。

建設機械の中で最も稼働台数の多い油圧ショベルにおいても、省エネと環境負荷の軽減は大きな課題となっており、近年ではパワーエレクトロニクス技術を活用したハイブリッド油圧ショベルが商品化されている。

本稿では、さらなる燃料消費削減と環境負荷低減を目的にハイブリッド車(以下、HVという)や電気自動車(以下、EVという)などで活用が進むリチウムイオンバッテリーを搭載したハイブリッド油圧ショベルSK200H-10の概要¹⁾について紹介する。加えて本稿では、SK200H-10と同じ発電電動機を採用し、これまで油圧ポンプを介して行っていた発電システムを一新したマグネット付きスクラップハンドリング機(以下、マグネット仕様機という)SK210DLC-10についても紹介する。

1. 油圧ショベルにおける燃料消費量削減の取り組み

油圧ショベルは、掘削などの高負荷作業とならしなどの低負荷作業とを短時間で繰り返すため、大きな負荷変動を受ける。油圧ショベルのエネルギーフローを図1に示す。図1には、燃焼エネルギーを100%とした場合の油圧ショベル各部のエネルギー損失を併せて示した。油圧ショベルでは最大負荷に対応できる動力をエンジンから供給しているが、各部のエネルギー損失は、エンジンで約55%、油圧ポンプで約15%、油圧システムで約

20%、機械システムで約1%となっており、最終的な有効出力は燃焼エネルギーの9%程度しか利用されていない。

以上の状況を踏まえて、油圧ショベルではこれらのエネルギー損失を削減するために様々な改善が行われている。損失が最も大きいエンジンの燃料燃焼では、コモンレールシステムなどの燃料噴射高圧化によって燃焼効率を改善してきた。さらに、排気側ノズルの開度によって吸入空気量の調整が可能になるよう可変ノズルVGターボ(図2)を採用するなど、燃焼効率の改善を行っている。

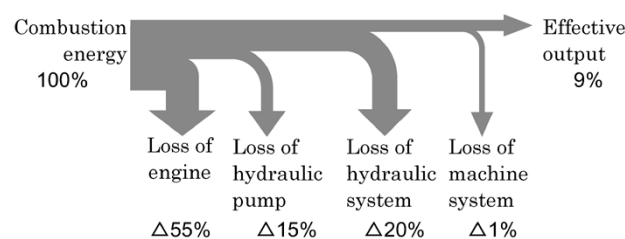


図1 油圧ショベルのエネルギーフロー
Fig. 1 Energy flow of hydraulic excavator

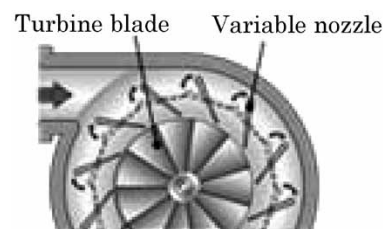
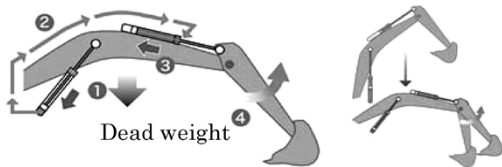


図2 可変ノズルVGターボ
Fig. 2 Variable nozzle VG turbo

*1 コベルコ建機(株) グローバルエンジニアリングセンター 開発本部 先行技術開発部 *2 コベルコ建機(株) グローバルエンジニアリングセンター 開発本部 ショベル開発部
*3 (株)神戸製鋼所 技術開発本部 応用物理研究所 *4 (株)神戸製鋼所 技術開発本部 機械研究所 *5 (株)神戸製鋼所 開発企画部



- ① Boom cylinders are contracted by its dead weight.
- ② High pressed oil goes to arm cylinder.
- ③ Arm cylinders are contracted.
- ④ An arm pushes forward.

図3 油圧回生回路

Fig. 3 Hydraulic regenerative circuit



図4 SK200H-10の外観

Fig. 4 Overview of SK200H-10

エンジンの次に損失の大きい油圧システムにおいては、油圧機器および油圧配管における圧損低減や、油圧ショベルのアタッチメント自重を利用した油圧回生回路(図3)などによってシステムの効率改善を行っている。

これらの効率改善は従来の油圧ショベルでも採用されている技術である。次章以降ではSK200H-10(図4)に採用したハイブリッド技術について紹介する。

2. ハイブリッドシステムの概要

図5にSK200H-10のハイブリッドシステム構成を示す。本システムでは、エンジン動力およびエンジンに直結された発電電動機動力の両方で油圧ポンプを駆動する。さらに、機体旋回用のアクチュエータを電動化して油圧回路と切り離すとともに、旋回減速時の回生エネルギーを電気エネルギーに変換することを可能としている。

コベルコ建機(株)(以下、当社という)では2003年に

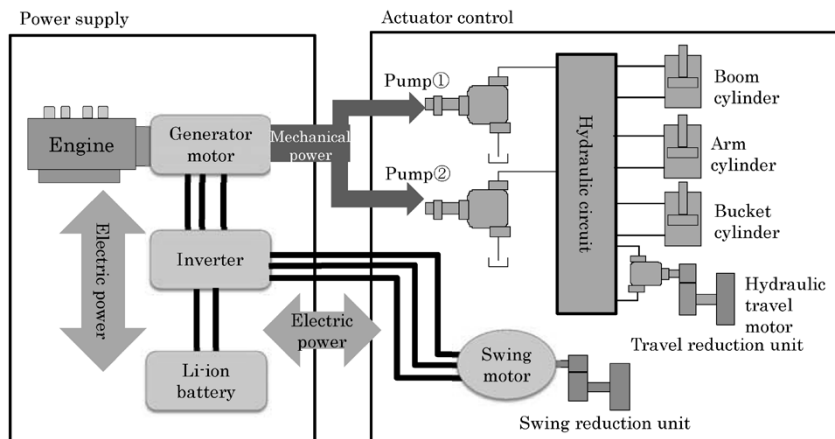


図5 ハイブリッドシステム構成

Fig. 5 Constitution of hybrid system

SK80H, 2009年にはSK200H-9といったハイブリッド油圧ショベルを発売してきた。SK200H-10では、発電電動機でエンジンを持続的にアシストすると同時に、大きな慣性質量をもつショベル旋回体を加減速させるため、高出力で大容量のリチウムイオンバッテリーを初めて採用した。また、ハイブリッド化によって環境性能を大幅に向上させることができた。

3. ハイブリッド機器の概要

SK200H-10に搭載している主要機器(図6)は、車両寸法やレイアウトを標準の油圧ショベルと共通化を図ること、および省エネ性能の追及、作業能力の最大化を図ることを目的とした。そこですべてを一から開発スタートし、発電電動機、旋回電動機、およびリチウムイオンバッテリーユニットについては内製化を行った。

とくに小型高出力化を達成するために、すべての機器は水冷システムを採用した。さらにリチウムイオンバッテリーに関しては、厳しい作業環境や自然環境に対応するために暖気システム、および電動自動車の規格に準拠した保護システムを採用した。以下にその概要を示す。

3.1 発電電動機

標準の油圧ショベルと車体幅を共通にするため、エンジンと油圧ポンプの間に配列可能な軸方向寸法(全長)約140mmの扁平(へんぺい)タイプの水冷式発電電動機を新規に開発した。また、三相交流同期形永久磁石式を採用し、燃費削減に効果的なエンジンアシストを可能にした。さらに、大容量リチウムイオンバッテリーへの充電および旋回電動機の加速に必要な高い発電能力を有し

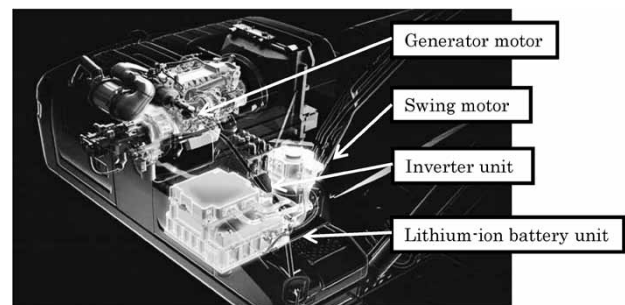


図6 主要ハイブリッド機器の外観図

Fig. 6 Overview of main hybrid device

ている。

3.2 旋回電動機

従来の油圧モータに比肩する搭載性を確保し、標準油圧ショベルと同等の機体旋回性能を実現するために、水冷式の旋回電動機を新規に開発した。三相交流同期形永久磁石式を採用し、旋回減速機へ直結するために縦型高速モータとした。これにより、旋回減速時に生じるエネルギーを効率よく回生し、また滑らかで力強い旋回加速特性を実現させた。

3.3 インバータユニット

機体搭載性を確保するため、旋回電動機インバータと発電電動機インバータの一体構成を図り、水冷方式の小型インバータユニットを新規に開発した。油圧機器やエンジンを制御するコントローラと連動して、発電電動機と旋回電動機の制御およびリチウムイオンバッテリーの充放電制御からなるハイブリッドシステム全体の制御を行って、大幅な燃料消費量の削減を実現させた。

3.4 リチウムイオンバッテリーユニット

リチウムイオンバッテリーは作動温度範囲に制限があるため、冷却機能と暖機機能を兼ね備えた保護ケースに内装している。国際連合危険物輸送勧告への対応はもちろん、リチウムイオンバッテリーの直接および間接的な感電防止策として、漏電検出によって自動で電力を遮断する機能のほか、手動で電力を遮断するスイッチを有しており、HV/EVレベルの信頼性を確保している。

4. SK200H-10の特徴

4.1 省エネ効果と作業量

SK200H-10では高出力・大容量のリチウムイオンバッテリーを採用している。これによって発電電動機のエンジンアシストや旋回減速時の回生エネルギーの有効利用を図ることができ、大幅な燃費低減と作業量アップを達成している。図7に掘削・積み込み作業時における燃費（1時間あたりの燃料消費量）の計測結果を示す。SK200H-10では、従来の油圧ショベルに対して燃料消費量が17%低下しており、またSK200H-9に対しても燃料消費量が12%低い結果が得られている。図8に従来ハイブリッド機との作業量（1時間あたりに運搬した土砂の量）比較結果を示す。図8では作業モードごとの差異を示しており、すべてのモードにおいて7~10%作業量が増加している。作業量の増加は以下に述べる作業性能の向上が寄与している。なお、本計測は当社の社内基準に基づいて計測した結果であり、作業モードは重作業モード（H-mode）、通常作業モード（S-mode）、および省エネモード（Eco-mode）としている。

4.2 作業性能の向上

当社ハイブリッドシステムでは、大きな慣性質量の旋回体を旋回駆動するアクチュエータを完全電動化し、油圧回路と切り離すことによってアタッチメントや走行との複合操作時における油圧干渉をなくしている。さらに、SK200H-10では大容量リチウムイオンバッテリーの採用と旋回電動機の組み合わせによって、旋回の加速エネルギーを大幅にアップさせ、従来に比較してスムーズで

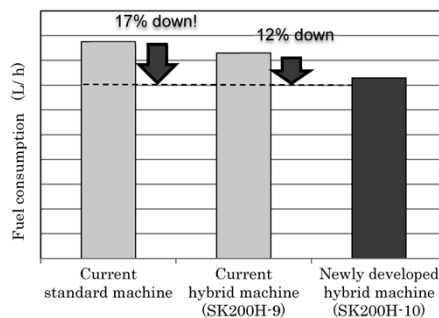


図7 同一作業量での燃費比較

Fig. 7 Comparison of fuel consumption under same workload

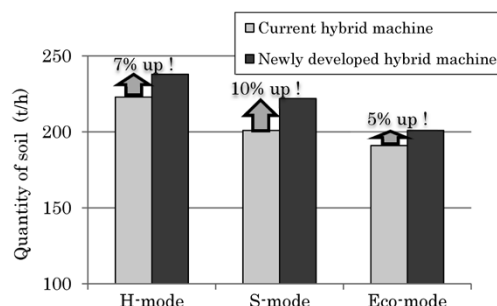


図8 従来ハイブリッド機との作業量比較

Fig. 8 Comparison of work amount between current and newly developed hybrid machine



図9 チルトバケットを搭載したSK200H-10の外観

Fig. 9 Overview of SK200H-10 installed tilt bucket

力強い複合操作性能を実現させている。

SK200H-10の作業性能向上は、国内の土木造成作業のみならず、回転チルトバケット（図9）を多用する欧州エリアや、大型バケットによる作業量を重視する北米エリアなど、多様な作業種別およびエリア特性に対応している。このため、市場稼働機においてはお客様より非常に高い評価が得られている。

5. SK210DLC-10への展開

5.1 新型マグネット仕様機

油圧ショベルを応用したマグネット付きスクラップハンドリング機（マグネット仕様機）にもSK200H-10と同じ発電電動機を採用し、これまで油圧ポンプを介して行っていた発電システムを一新した。図10に新型マグネット仕様機のシステム構成図、図11にその外観を示す。

5.2 吸着量のアップと省エネ効果

電力変換時のエネルギーロスを低減したことにより、マグネット吸着量を大幅にアップさせ、さらに燃料消費量も大幅に低減させた。図12に示したように、電力変

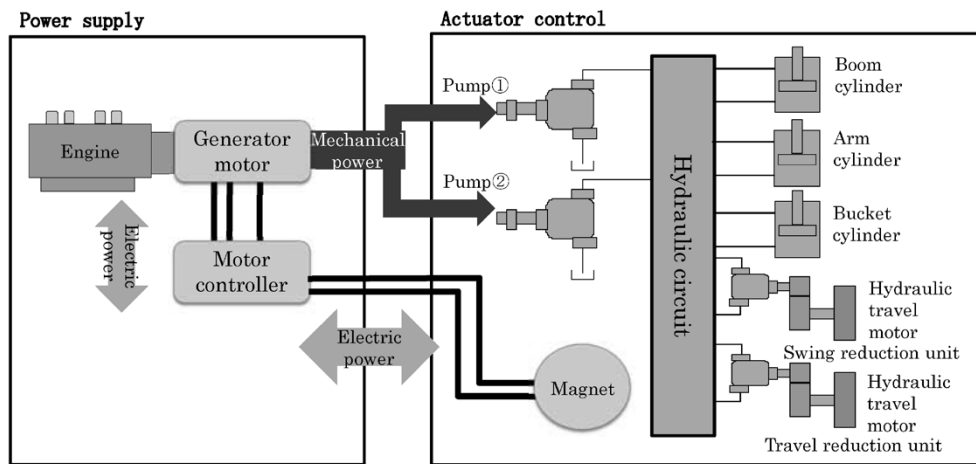


図10 新型マグネット仕様機のシステム構成

Fig.10 System constitution of scrap handling machine with new type magnet



図11 新型マグネット仕様機の外観

Fig.11 Overview of scrap handling machine with new type magnet

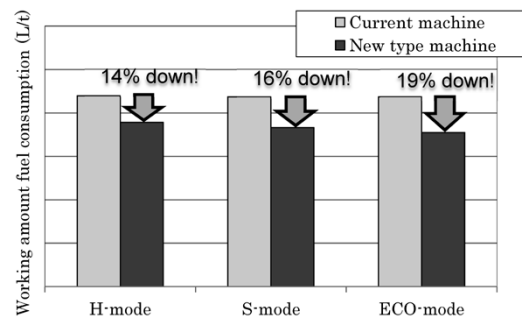


図13 作業量燃費 (L/t) 比較

Fig.13 Comparison of working amount fuel consumption

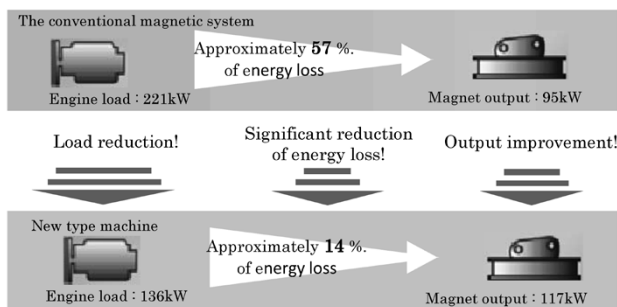


図12 電力変換効率

Fig.12 Power conversion efficiency

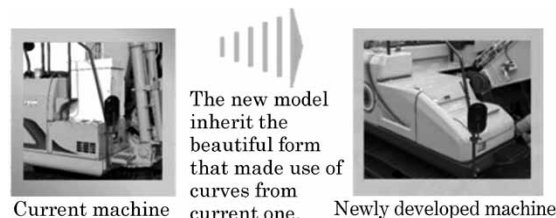


図14 機体右前外観の比較

Fig.14 Comparison of overview of right front between current and newly developed machine

換効率は57%から14%に改善されている。これは、これまで油圧ポンプを介して行っていた発電システムを、エンジンと油圧ポンプとの間に直列に配した発電電動機を用いたシステムに変更したことによる効果である。図13は、当社社内基準に基づいて計測した作業量燃費（運搬した土砂1tあたりの燃料消費量）結果の比較を示す。作業モードごとの差異を示しており、すべてのモードにおいて作業量燃費が14~19%改善している。これは、電力変換効率の改善のみならずマグネットの吸着量向上が寄与している。

5.3 視界性とメンテナンス性の改善

システムのシンプル化と併せて、従来は機体右前にあった制御盤をガード内に収納することによって機体右前のレイアウトをスッキリさせた。これにより、操作オペレータからの視界性とメンテナンス時の機体上面へのアクセス性を大きく改善させることができた（図14）。

6. ITデータの活用

近年、油圧ショベルをはじめとする建設機械では通信機器の搭載とITデータの活用が進んでいる。SK200H-10およびSK210DLC-10においても、油圧システムやエンジンの稼働状態に加え、ハイブリッドシステムやマグネット発電制御システムについても、電動機出力やシステム電圧、主要機器温度など、電動機やインバータ、リチウムイオンバッテリーの稼働状態をきめ細かく監視する機能を搭載している。さらに、こうした機械側の監視データをクラウドサーバにて統計処理し、異常の予兆を検知することによって予防保全とメンテナンスサービスを充実させている（図15）。

また、日々の燃費や作業量などの稼働情報をお客様へ提供しており、機械の運行管理や稼働計画に活用いただいている。

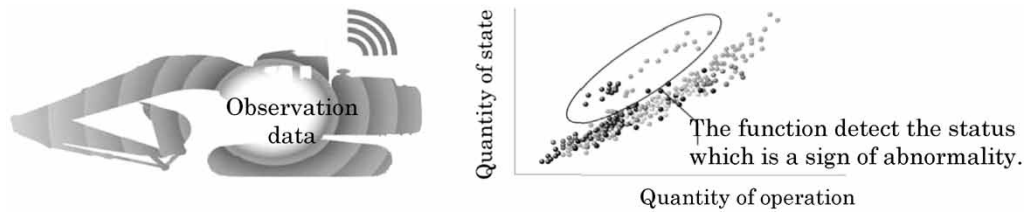


図15 ITデータを活用した状態観察機能
 Fig.15 State observation function using measuring data by IT

むすび = 本稿では、油圧ショベルのCO₂削減および燃費低減への取り組みの一例として、リチウムイオンバッテリーを搭載したSK200H-10および発電システムを一新させたSH210DLC-10について紹介した。

ハイブリッドショベルでは、旋回体の大きな慣性質量が旋回減速する時に発生する回生エネルギーの有効利用を実現した。さらに、高出力・大容量のリチウムイオンバッテリーを採用することによって持続的なエンジンアシストを可能とし、大幅な燃料消費量削減を達成させた。

マグネット仕様機では、電力変換時のエネルギーロス

を低減したことによってマグネット吸着量を大幅にアップさせ、さらに燃料消費量も大幅に低減させた。

今後も自動車業界に先導され、ゼロエミッションに向けた新技術の開発が加速して行くものと推測している。油圧ショベルに代表される建設機械においても、これらの技術をいち早く導入し、さらなる燃費低減や環境負荷の低減につなげて行く所存である。

参 考 文 献

- 1) 佐伯誠司. 建設機械施工. 2017, Vol.69, No.1, p.35-38.