

30. 電動技術によるハイブリッドホイールローダの開発

日立建機（株） ○ 石田 一雄
日立建機（株） 日暮 昌輝

1. はじめに

エンジンの排出ガスによる地球温暖化などの環境影響や石油の枯渇の問題から、化石燃料を使用する自動車などの移動体に対する省エネルギー技術が注目されている。自動車業界では、エンジンと電動技術を組み合わせたハイブリッド車の優れた省エネルギー技術が認知されて広く普及しており、さらに電気自動車や燃料電池自動車の量産段階に入っている。

建設機械業界では、油圧ショベルの旋回機構に電動モータを配したハイブリッド機が普及しつつある。一方、ホイールローダにおいては、一部の大型機の走行系に電動技術を適用した製品があるものの、一般的な建設現場で使用される普及モデルでの量産化が遅れているのが現状である。

日立建機（株）では、過去にハイブリッドホイールローダのコンセプト機や限定発売機を開発した経緯があり、それらの技術蓄積を基盤として2014年に普及モデルのハイブリッドホイールローダの開発を完了した。本論文ではハイブリッドホイールローダのシステム概要と、燃費低減効果などの環境性能、ならびにハイブリッド化にともなう従来機からの改良点を述べる。

2. 開発の経緯

ホイールローダは、タイヤ式のトラクタ系建設機械に分類される。作業装置としてバケットとリフトアームを有しており、主に土砂、砂利、岩石などを掘削し、バケットに積載した土砂などを自走で運搬してダンプトラックなどの運搬機械に積込む作業に用いられる。

ホイールローダは、タイヤ式のため40km/h程度の高速移動が可能である。その機動性の高さゆえに掘削現場間の移動や、積載物の運搬を頻繁に行うため走行頻度の高い建設機械である。また、掘削作業はタイヤに発生する駆動力でバケットを掘削対象物に押し付けることで作業が成立するため、走行系に消費されるエネルギーの割合が非常に大きい。したがって走行系の動力伝達効率の向上などによるエネルギーロスの排除は燃費低減に大きく寄与すると考えられる。

2.1 従来機の走行系駆動方式

従来機のホイールローダの走行系の駆動方式は、HST (Hydraulic Static Transmission) 方式とトルクコンバータ方式に大別される。

ホイールローダの車格は、装備されるバケットの容量（定格積載質量）にて決定され、基本的にバケット容量が大きくなるにつれて運転質量やエンジン出力が大きくなる。現在、当社では標準バケット容量0.3～6.1m³（運転質量1.9～46t）の製品群を量産機としてラインアップしており、3.0m³未満の中小型機にはHST方式を、3.0m³以上の中大型機にはトルクコンバータ方式を採用している。

中大型機に採用されるトルクコンバータ方式はエンジンの動力がトルクコンバータとトランスミッション、車軸を介してタイヤに伝達（四輪駆動）される構造となっており、その構造は自動車と酷似している。

2.2 ハイブリッド機の開発経緯

自動車に酷似した駆動方式を有するホイールローダは、自動車と同様にエンジンと電動技術を組み合わせたハイブリッドシステムを適用することで大きな燃費低減効果が期待できる。そのため当社はハイブリッド機の製品化を目指し研究を進めてきた。（図-1）



図-1 ハイブリッド機の開発経緯

2003年にコンセプト機として、バケット容量1.3m³の中型ハイブリッドホイールローダ（機種名LX70）を開発し、ハイブリッドシステム制御や燃

費低減効果の実証試験などの基礎研究を行った。

その後 2008 年にバケット容量 13m³の大型ハイブリッドホイールローダ（機種名 L130）を開発し限定発売した。当該機は現在も顧客現場で稼働しておりデータの収集を継続しているが、従来システムと比較して約 25%の燃費低減効果が立証されている。ただし、燃費低減効果はハイブリッド化による走行系の省エネルギー効果のみではなく、油圧系などのロスエネルギーの低減効果も含まれていることを付け加えておく。

大型ハイブリッドホイールローダ L130 の主要機器の搭載図を（図-2）に示す。エンジンで発電機を駆動し、動力を電力に変換しインバータを経由して走行電動モータを駆動する方式で、一般的にシリーズ方式とよばれるシステムで構成されている。4 輪に各 1 個の走行電動モータを配置しており、各モータは差動機とプロペラシャフトにて機械的に連結されていることが特徴である。ホイールローダは掘削中に後軸の荷重が低下して車輪が空転を起しやすく、4 個のモータに機械的な接続が無いと空転した車輪の走行電動モータの駆動トルクを有効に利用できない問題があるため、その対策として考案されたものである¹⁾。

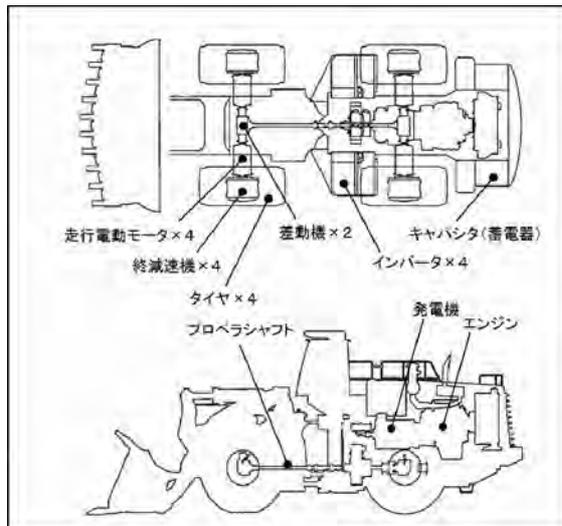


図-2 L130 主要機器の搭載図

3. 普及モデルのハイブリッド機開発

過去のハイブリッド機の開発経緯で蓄積した技術を基盤として、普及モデルであるバケット容量 3.4m³（運転質量 18t）の中型ハイブリッドホイールローダ（機種名 ZW220HYB-5B）を開発した。

3.1 開発課題

ハイブリッド機開発の課題は以下が挙げられる。

(1) システムの費用対効果

自動車に比べて需要台数が少ない建設機械では電気部品がコスト高となり、製品価格が従来機よ

り高額になる。燃費低減効果によるランニングコスト差により、従来機との価格差を短期間で回収できる燃費性能が求められる。

(2) 電動機器の搭載性

従来機よりも車体寸法が大きくなるとホイールローダとしての作業性を損なうとともに、従来機との部品の共通性も低下してコスト高になる。したがって電動機器は従来機の車台に搭載可能な形状・容積にする必要がある。

(3) 電動機器の信頼性・耐久性・安全性

建設機械の稼働現場特有の過酷な環境下に耐え得る電動機器の設計と、暴走などの危険状態に遷移しにくい制御システムの構築が必要。

3.2 ハイブリッドシステムの方式

前述の課題をクリアするために、まずは最適なハイブリッド方式の検討を行った。

自動車におけるエンジンと電動技術を組み合わせたハイブリッド技術は、一般的にシリーズ方式、パラレル方式、シリーズ・パラレル（トルクスプリット）方式に大別される。シミュレーションによる各方式の燃費低減効果の推定結果や、機器の車台への搭載性、メンテナンス性、コストなどを総合的に検討した結果、シリーズ方式がホイールローダに最も適していると判断した。

シリーズ方式ハイブリッドの概念を（図-3）に示す。シリーズ方式では、エンジンは発電機を駆動するのみに使用され、発電機で発電された電力で走行電動モータを駆動するため、エンジンと車軸の間に機械的な動力伝達が存在しないことが大きな特徴である。

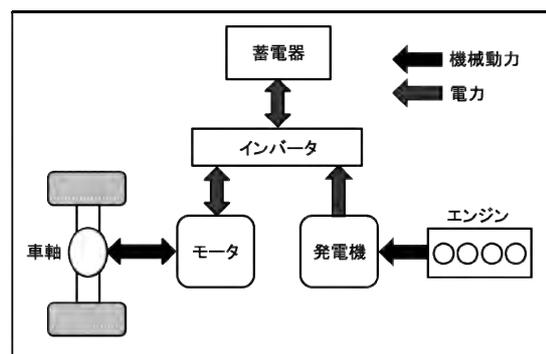


図-3 シリーズ方式ハイブリッドの概念

3.3 ハイブリッドシステムの構成

ZW220HYB-5B のハイブリッドシステムの概略構成図を（図-4）に示す。構成としては、従来のトルクコンバータおよびトランスミッションを発電機と走行電動モータに置き換え、インバータやキャパシタ（蓄電器）を組み合わせている。

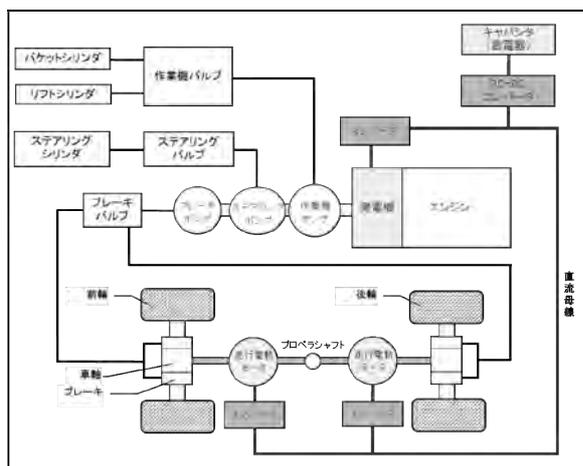


図-4 ZW220HYB-5B ハイブリッドシステム構成

(1) 走行電動モータ

L130では4輪に各1個の走行電動モータを配置した4モータ方式であったが、車軸に動力を伝達するプロペラシャフトの軸線上に走行電動モータを2個配置した2モータ方式に改めた。走行電動モータとモータを制御するインバータの個数が減り、また走行電動モータを機械的に連結する構造も単純化されることからコスト低減に寄与する。

走行電動モータは車軸の差動機を直接駆動する構造としたためトランスミッションなどが存在しない。その結果、クラッチやギヤなどの機械的な摩耗部品が排除され、走行系の信頼性、耐久性、メンテナンス性が向上される。

2個の走行電動モータは、おのおの「低トルク・高回転型」、「高トルク・低回転型」という異なる特性を有しており、高速走行時や掘削作業時などの運転状況に応じて各モータを常に最適な効率で動作させる制御を盛り込んでいる。

ホイールロードは、車体を高速移動させる走行性能と、掘削作業ではバケットを掘削対象物に押し付けるための大きな駆動力の発生を両立させなければならない。走行電動モータを1個で構成すると、掘削時の駆動力を得るためには外径の大きな電動モータが必要となり、同時にそれを制御する高出力のインバータが必要になる。汎用部品が流用できないためコスト高になる点と、車台に搭載するには容積が大き過ぎて不向きであったことから、部品点数は増えるものの2モータ方式はコストと搭載性のバランスと、さらには走行電動モータの動力効率を考慮して考案した。

(2) キャパシタ

蓄電器としてキャパシタをDC (Direct Current) -DC コンバータを介して直流母線に接続している。減速時は走行電動モータに発電動作をさせることで車体の慣性エネルギーを回生電気エネルギーに変換してキャパシタに蓄電し、加速時はその

エネルギーを再利用することが可能である。回生エネルギーを有効利用することで、従来よりも低回転数域でのトルクの小さいエンジン、すなわち小排気量エンジンを採用することが可能となった。その結果、副産物としてエンジン騒音の大幅な低減を実現し、国土交通省の超低騒音型建設機械指定基準を満足する低騒音化を達成した。

(3) 油圧系統

油圧系統は従来機と同様にエンジンによって機械的に油圧ポンプを駆動している。ステアリング系統とブレーキ系統は信頼性の高い従来の油圧システムを踏襲することで、万一、ハイブリッドシステムに異常が発生した場合でもステアリング機能とブレーキ機能を喪失しないシステムとして安全を担保している。併せて油圧系のロスエネルギー低減のためシステムの見直しも行った。

(4) システム制御

各電動機器は、ハイブリッドコントローラによって統括制御される。シリーズ方式は動力伝達が電気のみで行われるため、安全性については重点的に配慮した。制御系の入力デバイス信号の多重化や、コントローラの相互監視、監視マイコンの搭載などの対処を行い、異常を検知した場合は速やかに駆動力を遮断することで不正な駆動力を発生させない、すなわち危険状態に遷移しない制御として構成している。

3.4 ハイブリッド化による燃費低減要因

ハイブリッド化による燃費低減要因を以下に述べる。

(1) 動力伝達効率の向上

エンジンと車軸の間に機械的な動力伝達装置が存在しないため、従来のトルクコンバータやクラッチ、ギヤなどの機械的な伝達ロスが低減される。

(2) エンジンの最適制御

従来機はトルクコンバータやトランスミッションを介して走行動力を伝達するため、必要な走行速度や駆動力を得るためにはエンジン回転数の制約があった。しかし、シリーズ方式ハイブリッドでは走行速度とエンジン回転数の制約が緩和され、コントローラによる自動制御によってエンジンの燃費効率の悪い回転数域を避け、かつ可能な限り低回転数で動作させることができるため燃費向上が図れる。

(3) 回生エネルギーの有効利用

キャパシタに減速時の回生電気エネルギーを蓄電し、加速時に再利用することでエンジンの負荷を軽減できる。

4. 燃費低減効果と従来機からの改良点

前述のハイブリッドシステムを搭載したホイールローダ ZW220HYB-5B (図-5) の燃費低減効果と、従来機からの改良点を以下に述べる。



図-5 ZW220HYB-5B のパワートレイン透視図 (イメージ図)

4.1 燃費低減効果

当社の社内評価基準における従来機 (2010 年モデル) との燃費比較結果を (図-6) に示す。時間あたり燃料消費量は従来機と比較して約 31% の燃費低減効果が確認された。

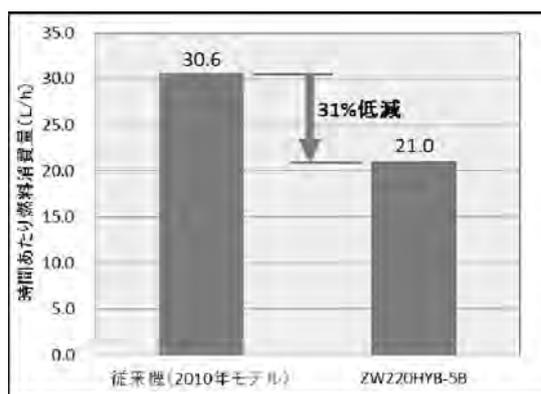


図-6 従来機とハイブリッド機の燃費比較

試験結果では、9.6L/h の燃費低減効果となっているが、社内評価基準は高負荷作業条件での評価であるため実際の稼働現場に比べて燃料消費量が大きく評価されていることに注意願いたい。当社の調査による市場稼働機の平均燃料消費量は社内試験結果の概ね半分程度である。また、アイドリング時間が長いとハイブリッド化の効果が目減りするため、時間あたりの燃料消費量の低減効果は社内試験結果の半分以下と想定される。

仮に 4.0L/h の低減効果とし、軽油単価 117¥/L (2015 年 8 月 17 日現在²⁾) と想定した場合、稼働時間 10,000 時間において、4,680k¥ の燃料コストを削減できる試算結果となる。

ホイールローダは、その汎用性から碎石、農畜産、産廃処理、除雪、港湾荷役など、さまざまな業種で使われるため、作業形態によって燃料消費量の差が大きい。ハイブリッド化による燃費低減

効果は走行頻度が多いほど大きい。走行頻度が少ない場合やアイドリング時間が長い場合は効果が十分に発揮できない場合がある。したがって、ハイブリッド機の燃費特性を發揮できる作業形態の現場への導入を提案することが重要であると考えられる。

4.2 従来機からの改良点

燃費低減と騒音低減に加えて、ハイブリッド化にともない従来機から改良した点を述べる。

(1) 無段変速

トランスミッションを廃止し、電動モータによる無段変速を実現した。掘削作業や登坂作業などで変速操作が不要となり走行操作性が改良された。

(2) 走行・作業の独立制御

従来機は、アクセルペダル操作でエンジン回転数を増減することで、走行速度と作業機速度が連動して増減していた。ハイブリッド機はコントローラでエンジン回転数が自動制御されるため、アクセルペダルは走行速度を、作業機レバーは作業機速度を指令するデバイスとし、独立制御が可能なシステムに改めた。ダンプトラックへの積込み動作を一例とすると、作業機 (バケット) は速く上げたいがダンプトラックに接近するため走行速度は遅くしたいという場面がある。従来機は、作業機を速く上げるためにフルアクセル操作が必要になり、連動して走行速度も速くなってしまうので、走行速度を減速するためにブレーキ操作を同時に行わなければならない。ここに動力ロスが発生していた。ハイブリッド機は走行速度と作業機速度を独立で操作できるため、必要な作業機速度は維持したままアクセルペダルを緩めることで走行速度を減速できる。したがって最小限のブレーキ操作で積込み作業ができ、動力ロスを低減するとともにオペレータの疲労軽減にも寄与する。

5. おわりに

化石燃料を使用する移動体の省エネルギー化技術は、自動車業界に代表されるように電動化が大きな流れとなっており、電動技術の進歩により今後さらに燃費低減効果の拡大が期待される。当社は今後も研究を継続し、さらなる省エネルギー化を実現した建設機械を提供していく所存である。

参考文献

- 1) 伊藤徳孝：ハイブリッド式大型ホイールローダの開発、建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集、平成 22 年度版、pp.75~78、2010 年
- 2) 経済産業省 資源エネルギー庁：給油所小売価格調査結果、2015 年 8 月 19 日公表