

17. ハイブリッド式大型ホイールローダの開発

電動化による環境負荷の低減

日立建機株式会社

伊藤 徳孝

1. はじめに

化石エネルギーの枯渇、地球温暖化、鉱物資源・燃料価格の高騰、バイオ燃料に端を発した食料問題などから環境対応型の製品開発が強く求められてきており、建設機械も同様である⁴⁾。

大型ホイールローダにおいては油圧機器やエンジンの損失低減などに取り組んではいるものの、それだけでは大幅な燃料消費量の低減には限界があり大胆なシステムの見直しが必要であった。その低減対策として近年、注目されているのが電動化とハイブリッドシステムおよびエネルギーの再利用である。

以上のような状況下、以前より電動化に取り組み1997年にバケット容量11m³の大型電機駆動式ホイールローダ（以下電動機と呼称）を開発し、市場に投入して稼働データを蓄積してきている。

本報では、この電動機に対して、さらなる環境負荷低減を目指し、キャパシタを搭載してエネルギーの再利用を図った大型ハイブリッドホイールローダを開発したので、ここに報告する。

2. ホイールローダの現状

ホイールローダとは、主に掘削、運搬、積み込みを行う建設機械で、車輛本体が移動して前記の作業を行う構造であり、車両本体を移動するために多くのエネルギーを消費している。

現状のホイールローダを20,000時間使用したときの運転経費の一例を図1に示す。保有経費の他に修理費と燃料費および油脂・消耗品費が大きな割合を占めている。

エンジンの出力は主にタイヤを駆動する走行系、シリンダを駆動する油圧系および電装品等補機類の動力として使用される。走行系に採用されているトルクコンバータはエンジンの回転数とトルクを流体力により伝達し、回転速度比で0からおよそ1まで、トルク比で3程度まで変換することができる優れた機能を持っておりホイールローダには古くから使用されている。しかし、伝達効率が低い欠点がある。図2に従来のトルコン機でV字掘削作業を行った時のエンジン出力にたいする

エネルギー消費割合の一例を示す²⁾³⁾。走行系、および油圧系のエネルギー損失が大きいことが判る。

油圧系で使用される、ポンプは安価で信頼性の高いギヤポンプが多く使われてきたが、ギヤポンプの吐出量はエンジン回転数に比例して増減するため、作業機に必要な流量をコントロールバルブで絞って制御していることからエネルギー損失が多い。そこで、近年は省エネを目的として可変容量ポンプを使用し、必要な時に必要な部位に吐出する構造としたものが採用されてきている¹⁾。



3. 大型電機駆動式ホイールローダ

3.1 電動機の特徴

電動機の走行系には従来のトルコン機に比べて伝達効率の高い電機駆動式を採用した。動力伝達系統を図3に示す。駆動モータは効率が高く、メンテナンスの容易なACモータを採用し、インバータにより制御する構造とした。発電効率を上げるために作業時のエンジン回転数は1,800回転とし、作業待ちの時は自動でエンジンの回転数を下げる機能を追加した。

エンジン出力を従来のトルコン機と同等としたときの走行性能を図4に示す²⁾³⁾。

トルコン機と比較して伝達効率が高く、モータの出力範囲が広いことから変速機を使わずに必要な駆動力と走行速度を得る事が出来る。この車輛では、作業現場の状況に合わせて最高速度を制限するために速度段を設定して車速を抑えているが最大駆動力は全ての速度段で発揮できる。

したがって、オペレータは作業現場に適した速度段を運転開始時に一度設定するだけで、その後は変速操作することなく安全な速度で作業を続け

ることができる。

油圧系には可変容量ポンプを採用し、運転席のコントロールバルブからの信号で必要に応じて油圧ポンプの吐出量を制御する構造とした。この構造により作業時、オペレータは運転席のコントロールレバーを操作するだけで、いつでも作業機を最大速度で動かすことが可能となり、作業量を増やす事が出来た。

可変容量ポンプを採用したことで、油圧によるエネルギー損失を低減し、作動油温度の上昇を抑え作動油と油圧機器寿命を延長する事が出来た。

さらに、グリース給脂が不要なメンテナンスフリーピンを採用し、グリースによる環境汚染の低減およびメンテナンス間隔の延長を図った。

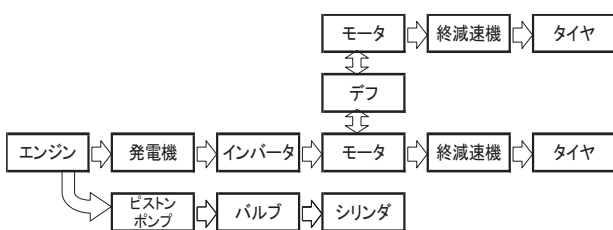


図3 電動機の動力伝達系統

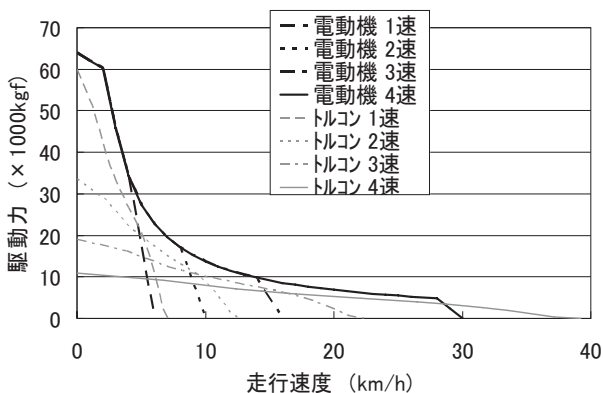


図4 走行性能

表1 時間当たり燃費消費量

機種	燃費 (L/hr)	測定期間
11m ³ 電動機	57.0	ユーザ ¹ I '97/12~'02/2
11m ³ トルコンA	70.1	ユーザ ¹ I '93/1~'94/12
11m ³ トルコンB	64.8	ユーザ ¹ I '93/1~'94/12
11m ³ トルコンC	68.0	ユーザ ¹ I '98/1~12
11m ³ トルコンD	64.1	ユーザ ² II '96/1~12
11m ³ トルコンE	65.0	ユーザ ² II '96/1~12

3. 2 電動機の評価

電動機は1997年から稼働を開始し稼働時間は20,000時間を超えている。表1にバケット容量11m³級ホイールローダの時間当たり燃料消費量を比較した。時間当たり燃料消費量は従来のトルコン機と比較すると約15%減少している²⁾³⁾。

しかしながら、負の評価として次の項目が残った。

- 1) ペダル操作による車輛の動き出しがトルコン機と比較すると0.5秒ほど遅れる。
- 2) 加速は良いが車速をアクセルペダルでコントロールする事が難しい。

これらの問題点は、トルコン機ではエンジンの出力により駆動力が決定されるが、電動機ではエンジンの出力に関わりなく、モータの出力が設定されるため車両の負荷変動に対してエンジン出力の応答が遅れることに起因している。

4. ハイブリッド式大型ホイールローダ

そこで、キャパシタを搭載しエンジン出力の応答遅れを補うことで電動機の欠点を改善し、エネルギーを再利用することでさらなる省エネを図った大型ホイールローダを開発することとなり、バケット容量13m³の大型ハイブリッドホイールローダ(以下ハイブリッド機と呼称)を開発し、2008年に発売した。

ハイブリッド機の外観を写真1に、ハイブリッドシステム構成を図5に、主な仕様を表2に示す。

ハイブリッドシステムは既にも実績のある電動機の電機駆動システムにキャパシタを追加し、車輛が減速するとき、モータで発生した電気エネルギーを回収出来るようにした。回収されたエネルギーは、発進および加速の動力として再利用する。

4. 1 エネルギーの回収

ホイールローダは主に車両の前後進を繰り返して作業を行う。作業時の前後進の切り替えは前後進レバーを操作して行われており、フットブレーキは使用されていないことが多い。そこで、前後進切換時の減速度はアクセルペダルの踏み込み量に比例して増減するよう制御してトルコン機の操作感覚に近づけた。

また、フットブレーキ操作時の、減速時のエネルギーを効率よく回収するために、ブレーキペダルの踏み込み角が少ない範囲では電気ブレーキが作動し、踏み込み角が増え、電気ブレーキの制動力が不足する範囲では電気ブレーキと油圧ブレーキが同時に働く構造とした。ペダル操作角と回生制動力および油圧制動力の関係を図6に示す。

一方、降坂時は電気ブレーキをリターダブレーキとして利用することとした。しかし、この車両の電気ブレーキは制動力に限界があり、高速域では制動力が不足する欠点がある。

そこで、電気ブレーキの制動力が不足するときは自動で油圧ブレーキが働く構造とした。システム構成を図7に、車速制動力特性を図8に示す。

この結果、油圧ブレーキの使用頻度が減りブレーキパッドの摩耗を軽減することができた。



写真1 ハイブリッド機の外観

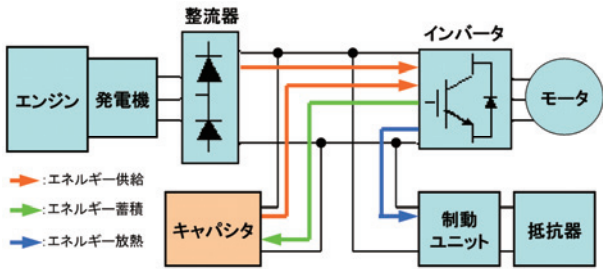


図5 ハイブリッドシステム構成

表2 ハイブリッド機的主要仕様

車両	型式	L130
	バケット容量	13m ³
	常用荷重	23,400kg
エンジン	メーカー	Cummins
	型式	QST30
発電機	出力	735kW
	メーカー	Hitachi
走行モータ	型式	YEFC10UP-RD
	出力	625kVA
キャパシタ	メーカー	Hitachi
	型式	YEFFZO_KK
	出力	110kW
キャパシタ	個数	4
	型式	600L1-70C-DL
	定格電圧	800V
	最大電圧	875V
	最大電流	100A
	静電容量	8.2F

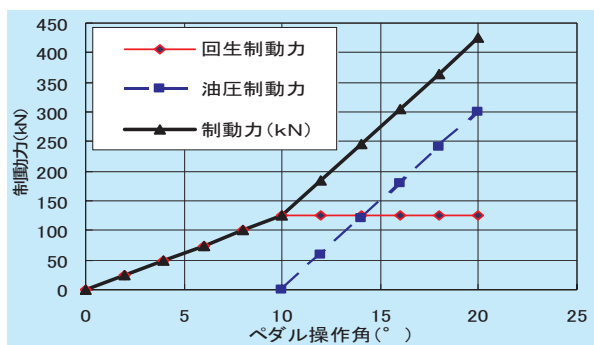


図6 ペダル操作角と制動力



図7 オートブレーキシステム構成

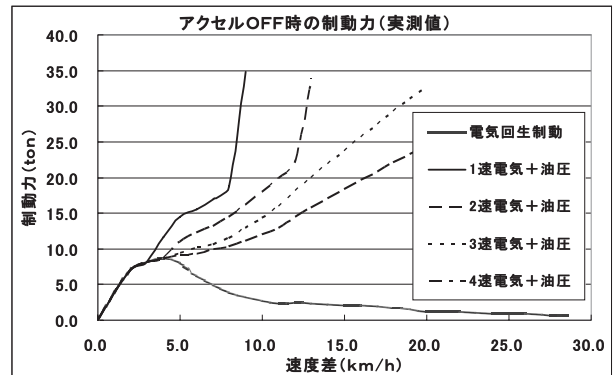


図8 オートブレーキの作動

4.2 キャパシタの仕様

ここでホイールローダに必要なエネルギーを検討してみると、走行系と油圧系を同時に最大出力で操作する場合、エンジン定格出力の150%程度の出力が必要となる。トルコン式の場合はエンジン出力に合わせて機械的に負荷が分担されているが、電動機の場合は負荷の分担はコントローラにより制御され、エンジンおよびキャパシタからのエネルギーが大きいほど走行系および油圧系に大きな負荷を与えることが可能となり、時間当たりの作業量を増やすことができる。

ホイールローダの標準的な作業では、前進で掘削後、荷を積んで後進した後、後進から前進に切り換えて前進、荷を放出する。減速時の電気エネルギーを回収する機会は後進から前進に変換する時であり、最低1回の減速・停止のエネルギーを回収出来るキャパシタの容量が必要である。キャパシタの仕様を表2に示す。

本車両では、さらに燃費を低減するため荷役用油圧ポンプに加えて、ステアリング用にも可変容量ポンプを採用しハンドル操作角に応じた吐出量となるように制御するなど、油圧系の省エネを同時に実施している。

5. 実証試験

キャパシタの効果を実証するために、実機による各種試験により、電動機およびトルコン機との比較試験を行った。ここでは、キャパシタによる操作性の改善効果、作業量および燃料消費量について報告する。

5.1 操作性改善効果

実証試験では、まず当社試験オペレータによる官能評価を実施し、電動機で問題となった2項目について改善効果を確認し、良好な評価が得られた。

図9にアクセルペダルを瞬時に踏み込んだときのキャパシタの有無による発進・加速性を比較する⁴⁾。

アクセル操作に対する車両の追従性能は電動機

が0.8秒後に動き出しているのに対してハイブリッド機は約0.2秒となり0.6秒改善している。
 キャパシタの有無では0.3秒の差があった。

また、キャパシタにより加速性が改善されていることがわかる。

5. 2 エネルギー回生

車輛の前後進を繰り返して行い、キャパシタの有無による充放電の状態および燃費の差を検証した。

図10において下方が減速時の回生電流を、上方が発進および加速の放電を示している⁴⁾。減速時に電気エネルギーがキャパシタに充電され、発進時および加速時に放電されていることが確認される。

前後進走行時の時間当たりの燃料消費量はキャパシタの有無で13%の差が見られた。

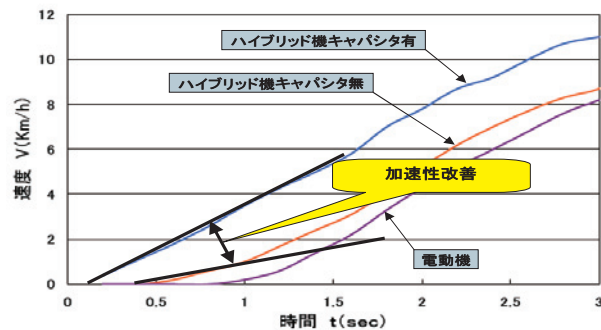


図9 キャパシタの有無による発進・加速性評価

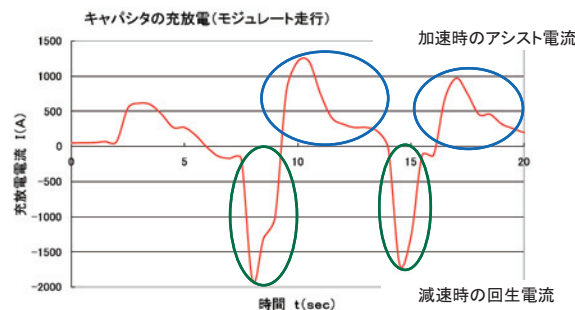


図10 キャパシタの充放電

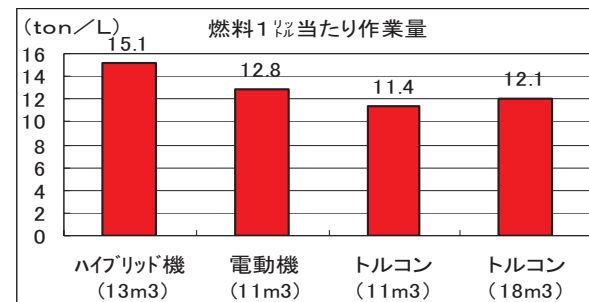


図11 燃料1%当たり作業量(ロード&キャリ工法時)

社内試験終了後、ユーザに納車して、実機評価および実作業時のデータを計測した。試験方法はロード&キャリ工法で行い、燃料消費量は満タン

法、作業量は設備に装備されている計量器から読みとった。燃料1%当たりの作業量を比較するとトルコン機と比較すると図11の通り32%作業量が増加している。

本機は現在、稼働時間は4,000時間を越え、操作性、作業性、燃費、メンテナンスコストでも高い評価を得ている。

これらの結果と20,000時間稼働している電動機の修理費および油脂・消耗品費の実績をもちいて、ハイブリッド機を導入し20,000時間使用したときの運転経費を推定すると図12となり、ユーザにも大きな利益となる事が想定できる。

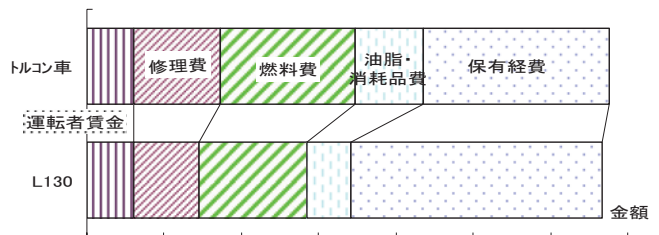


図12 20,000時間稼働時の運転経費

6. おわりに

今回のハイブリッド機はキャパシタを採用することで、車輛の負荷変動に対してエンジンパワーが追従出来ない不足分を補い、燃費低減と作業量の増加および作業性を改善することが確認できた。

自家用車ではバッテリーを搭載した電動自動車一般化されてきているが大型ホイールローダでは、搭載に必要なバッテリーの容積と価格が膨大なことから現状、製品化は困難である。

今後、キャパシタ、バッテリーなどの蓄電技術の進歩により、さらに多くのエネルギーの蓄積および回収が可能となり、エンジンの小型化、油圧系の電動化、バッテリーによる車両の電動化と、省エネが進むことを確信して本文を終わる。

参考文献

- 1) 落合正巳・園田光夫：建設機械のハイブリッド化とハイブリッドショベル、社団法人 日本建設機械化協会 建設の施工企画 '09.1
- 2) 伊藤徳孝他：大型ハイブリッドホイールローダの開発、社団法人 日本機械学会 第17回交通・物流部門大会講演論文集 No.08-68
- 3) 伊藤徳孝：大型ハイブリッドホイールローダの開発、社団法人 日本建設機械化協会 建設の施工企画 No.719
- 4) 伊藤徳孝：ハイブリッド式大型ホイールローダ、社団法人日本フルードパワーシステム学会 Vol.41 No.4