

大型ハイブリッドホイールローダの開発

伊藤 徳孝

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等から，建設機械にも環境対応型の製品開発が求められている。このような背景の下，エネルギー回生が可能な電機駆動式大型ハイブリッドホイールローダを開発した。

主な特徴は①大幅な燃費向上，②走行性能および作業性能向上，③メンテナンスコスト削減，④環境負荷低減，等である。主要コンポーネントはエンジンは排気量30,500 cc，出力735 kW，発電機は625 kVA，モータは110 kW × 4基で構成されており，車載コンピュータシステムによって走行系・荷役系が最適制御されている。

キーワード：ハイブリッド，ホイールローダ，省エネ，電機駆動，キャパシタ

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。

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あるものの，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11 m³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，本報ではこの開発機について報告する。

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，車輈本体が移動して前記の作業を行う構造であり，車輈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。

さらに，ホイールローダによる環境負荷としては，燃料消費の他，排ガス，振動・騒音，作動油・使用済みフィルタ類の廃棄，グリース等潤滑油の垂れ流し，タイヤ摩耗紛による土壤汚染などがあげられる。

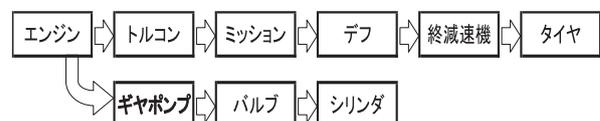
ホイールローダの開発に対しては省エネを含む環境負荷の低減と同時に，顧客に受け入れられる魅力ある車輈であることが必須条件となる。魅力ある製品であるためには車輈の性能・装備はもちろんであるが，運転経費が低い事が重要となる。現状のホイールローダを20,000時間使用したときの運転経費の一例を図一1に示す。保有経費の他に修理費と燃料費および油脂・消耗品費が大きな割合を占めている。



図一1 20,000時間稼働時の運転経費の割合

これらの経費をいかに低減できるかが魅力ある製品としての大きな要素となる。

従来の駆動装置にトルクコンバータを採用したホイールローダ（以下トルコン機と呼称）の動力伝達系統を図一2に示す。



図一2 トルコン機の動力伝達系統

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。

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いるが、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。

図-3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対するエネルギー消費割合の一例を示した。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。



図-3 V字掘削作業時のエネルギー消費割合

3. 大型電機駆動式ホイールローダ

(1) 電動機の特徴

1997年に電動機を開発し、市場に投入して稼働データを蓄積してきている。

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-4に、主要機器の配置を図-5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回転数を下げる機能を追加した。

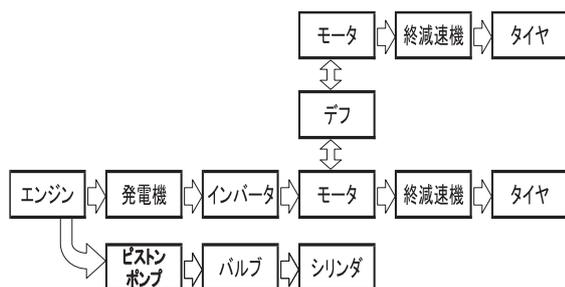


図-4 電動機の動力伝達系統

駆動モータおよび減速機は、図-5に示す通り4輪に配置し、左右のモータ間に差動機を設け、前後の差動機をプロペラシャフトで連結する構造とした。この差動機とプロペラシャフトによる連結で作業時のタイヤの空転を防止すると同時に、旋回時の内外輪差による回転数の差に対して、効率よく動力を伝達できるようになった。

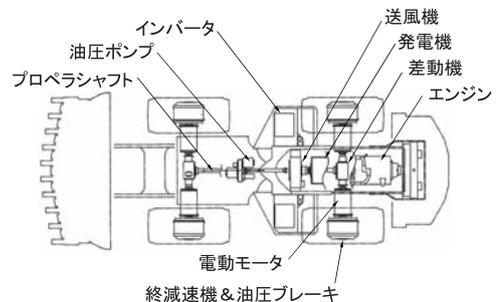


図-5 主要機器の配置

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-6に示す。

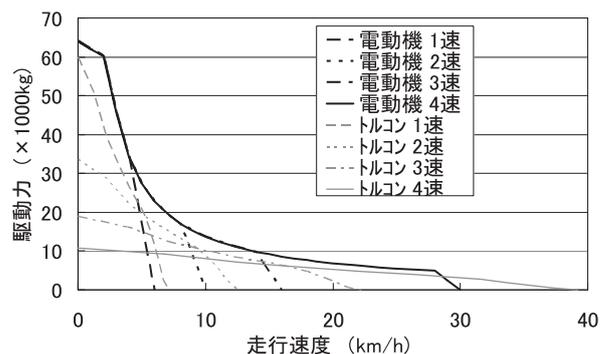


図-6 走行性能

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できる。本車輛では、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いるが最大駆動力は全ての速度段で発揮できる。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の運転席のコントロールレバー操作だけで、アクセルペダルでエンジン回転数を操作することなく作業機を最大速度で動かすことが可能となり、実作業時の作業量を増やす事ができた。

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油圧機器

の寿命を延長する事ができた。

さらに、メンテナンスコストを低減するため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、摩耗の激しいバケット部分には1300 N/mm²級耐摩耗鋼を採用するなどの改善を図った。

(2) 電動機の評価と課題

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。表一1にバケット容量11 m³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。

表一1 時間当たり燃料消費量

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

さらに、メンテナンス費用では駆動部分のオーバホール費用の低減、タイヤ交換時間の延長、グリース使用量の低減など当初目標とした成果が確認されている。

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エンジンの出力が後追いになる事に起因している。エンジンは負荷に応じた動力を出力しており、燃料もこの出力に応じて供給されている。

通常1,800 rpmで無負荷運転しているところに突然大きなトルクを加えると燃料の供給が追いつかず必要な出力を発揮する前に回転数が低下してしまう。特に、近年の排ガス対策型エンジンでは、急激な燃料噴射量の増加を押さえる傾向にあり、急な負荷変動に対応できなくなってきている。

電動機ではエンジン回転数の低下を防止するため、駆動モータ出力の増加特性を制御して、エンジンが回転数低下を起こさない範囲でトルクを変化させ、急激なトルク変動を抑えており、車輛速度がアクセルペダ

ルの指令速度に達するまでの時間に遅れが発生し、運転者が車速をコントロールする事が難しいという結果となっている。

4. 大型ハイブリッドホイールローダ

そこで、キャパシタを搭載してエネルギーの再利用することでさらなる省エネを図り、電動機の欠点を改善し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13 m³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一1に、ハイブリッドシステム構成を図一7に、主な仕様を表一2に示す。

ハイブリッドシステムは既の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に、モータで発生した電気エネルギーを回収できるようにした。回収されたエネルギーは、発進および加速の動力としてエンジン出力の不足分を補うようにした。

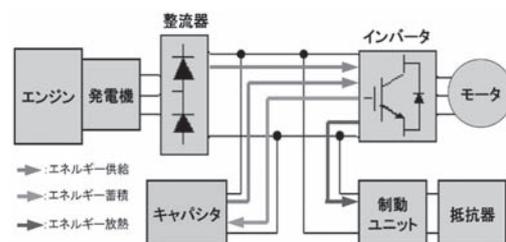
減速時のエネルギーを有効に回収するために、フットブレーキ操作時に、機械式ブレーキと連動して電気ブレーキが働く構造とした。さらに、通常のブレーキ操作時ブレーキペダルの踏み込み角が少ない範囲では電気ブレーキが作動し、その後踏み込み角が増え、電気ブレーキの制動力が不足する時はフットブレーキが作動する構造とした。

この結果ブレーキパッドの摩耗を軽減することができた。

通常のバッテリー・キャパシタを用いたハイブリッドシステム構成では負荷変動に対するエンジンパワーの不足分をバッテリー・キャパシタで補いエンジン負荷を平滑化し、従来機より小さなエンジンを用いる事が一



写真一1 ハイブリッド機の外観



図一7 ハイブリッドシステム構成

表—2 ハイブリッド機の主な仕様

車輦	型式	L130
	バケット容量	13 m ³
	常用荷重	23,400 kg
	車輦総重量	110,000 kg
エンジン	メーカー	Cummins
	型式	QST30
	出力	735 kW
発電機	メーカー	Hitachi
	型式	YEFC10UP-RD
	出力	625 kVA
走行モータ	メーカー	Hitachi
	型式	YEFFZO KK
	出力	110 kW
	個数	4
キャパシタ	型式	600L1-70C-DL
	定格電圧	800 V
	最大電圧	875 V
	最大電流	100 A
	静電容量	8.2 F

通常のバッテリー・キャパシタを用いたハイブリッドシステム

般的である。

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と、エンジン定格出力の150%程度の出力が必要となり、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。

電動機の場合、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。

そこで、本システムでは、エンジン出力は従来機と同等とし、キャパシタに蓄えられたエネルギーは、発進・加速のエネルギーとして利用することで時間当たりの作業量を増やし生産量の増加をはかることとした。

キャパシタ容量は以下の制約もあり、発進・加速に必要な最小限の容量に抑えることとした。

- 1) キャパシタを配置するスペースが限られていること。
- 2) キャパシタが高価であること。

将来的に、小型・大容量で安価なバッテリー、キャパシタが開発されたときは、エンジンを小型化しさらに燃料消費を抑えることが可能である。

ホイールローダの標準的な作業は、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できることが必要である。キャパシタの仕様を表—2に示す。

本車輦では、さらに燃費を低減するために温度感応型の冷却ファンを採用し、荷役用に加えてステアリング用にも可変容量ポンプを採用するなど、油圧系の省エネを同時に実施している。

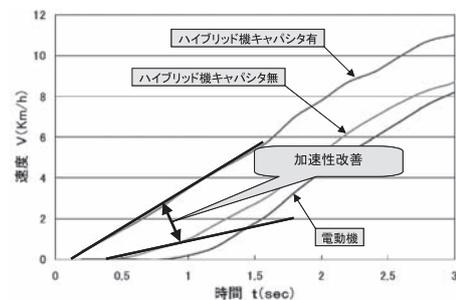
5. 実証試験

本研究開発では、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、作業量および燃料消費量について報告する。

(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、良好な結果が得られた。

図—8で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・加速性能を比較する。アクセル操作に対する車輦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秒となり約0.6秒改善している、さらにキャパシタの有無では0.3秒の差があった。同時に加速性が改善されている。



図—8 キャパシタの有無による発進・加速性評価

(2) エネルギー回生

車輦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。充放電の状態を図—9に示す。

図—9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。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を図—10に示す。キャパシタの有無で13%の差が見られる。

作業時の燃費試験はI字掘削作業の模擬試験により行った。結果を図—11に示す。時間当たりの燃料消費

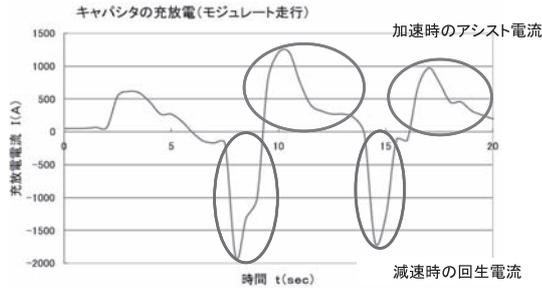


図-9 キャパシタの充放電

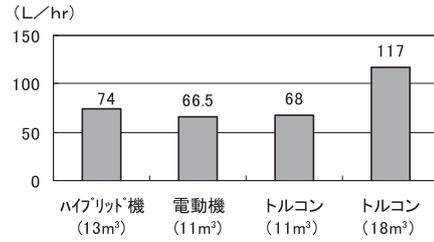
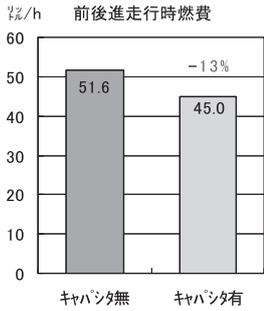
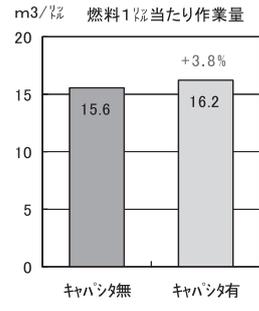


図-13 時間当たり燃料消費量 (ロード&キャリ工法時)



前後進繰り返し走行(前後進モジュレート)
キャパシタ効果≒最大
試験条件 2速フルアクセル
前後進繰り返し
走行区間15m

図-10 前後進走行時燃費



積み込み模擬試験(サイクル)
キャパシタ効果≒最少
試験条件 2速フルアクセル
掘削→フォーム上昇後進→前進
→排土→後進→掘削の繰り返し
走行区間 約10m

図-11 積み込み試験時燃費

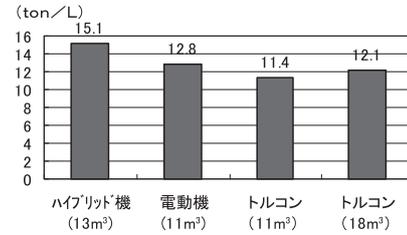


図-14 燃料1リットル当たり作業量 (ロード&キャリ工法時)

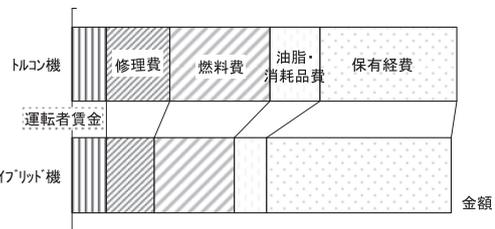


図-15 20,000時間稼働時の運転経費

費量は同等であったがキャパシタ有りの時の時間当たり作業量は3.8%増加した。

社内試験終了後、ユーザに納車して、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で、作業量は設備に装備されている計量器から読みとった。運転操作はユーザのオペレータにお願いした。

試験結果を図-12および図-13に示す。これらの結果から燃料1リットル当たりの作業量を比較すると図-14の通りとなりトルコン式の従来車と比較すると32%作業量が増加した。

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・消耗品費の実績を用いて、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-15となり、ユーザにも大きな利益となる事が想定できる。

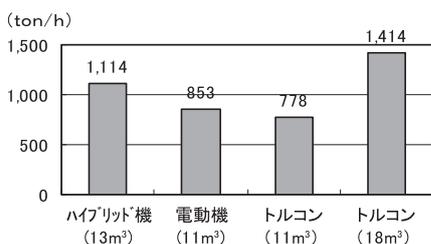


図-12 時間当たり作業量 (ロード&キャリ工法時)

6. おわりに

今回のハイブリッド機は「L130」として市場投入したが、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できない不足分を補い、燃費低減と作業量の増加および作業性を改善できることが確認された。

今後、電動化技術、ハイブリッド化技術、キャパシタおよびバッテリーなど蓄電技術の進歩により、さらに多くのエネルギーの回収および蓄積が可能となり、エンジンの小型化、油圧系の電動化を含め大幅な省エネが進むことを確信して本文を終わる。

JICMA

《参考文献》

- 1) 社日本機械学会 第17回交通・物流部門大会講演論文集 No.08-68
- 2) 建機新報 No.1408 建設施工の環境・安全対策
- 3) 鹿児島昌之他：R&D 神戸製鋼技報, Vol.57 No.1 (Apr.2007)
- 4) 国土交通省 建設機械の排出ガス対策

【筆者紹介】

伊藤 徳孝 (いとう のりたか)
TCM (株)
建設車両事業部
ホイールローダ開発センター
部長

