

ハイブリッドホイールローダ

松井 邦夫

近年、地球温暖化防止のためのCO₂排出削減という国際的課題への取り組みとして、建設機械業界においても、省エネ・環境対策型の製品開発が進められている。中でもホイールローダに関しては、燃料消費量を低減し、作業効率を向上する様々な機構が装備されてきているが、省エネ化への要求はますます高まる傾向にあり、それに応えるためには、システムを革新させる必要がある。その対策の一つとして注目されているのが、ハイブリッドシステムの適用である。

今回、ホイールローダに適したハイブリッドシステム「HYTCs (Hybrid Torque Converter System)」を搭載した、11t級ホイールローダ「65Z Hybrid」を開発したので、その概要を紹介する。

キーワード：ホイールローダ、ハイブリッド、1モータ、遊星機構、省エネ

1. はじめに

近年、地球温暖化等の環境問題に対する意識・関心が高まる中、省エネ技術がますます注目されている。

それに応えるように自動車業界では、ハイブリッドシステムの高効率化を進めることで、更なる低燃費化を実現させ、ハイブリッド車の販売台数を伸ばしている。また、建設機械においては、2008年より、車体旋回エネルギーを回生する、ハイブリッド油圧ショベルが市場へ投入され始めた。

このような状況の中、2005年より、次世代のあるべきホイールローダの姿を求め、ホイールローダに適したハイブリッドシステムの開発に取り組んだ。

2. ホイールローダの現状

(1) 従来機の基本構造

ホイールローダは、主に掘削・運搬・積み込みを行う建設機械で、中型クラス以上の走行系にはトルクコンバータ（以下トルコン）が組み込まれるのが一般的である。また、作業装置・操舵装置・制動装置の駆動源としては、油圧ポンプが装備されている。図-1にトルコン搭載車の動力伝達系統図を示す。

トルコンは、入出力の回転数差（速度比）に応じて伝達トルクが決まる流体継手で、エンジンのトルク変動や変速機から入力される衝撃・振動を吸収減衰し、滑らかなトルク伝達特性を持っていると共に、変速の

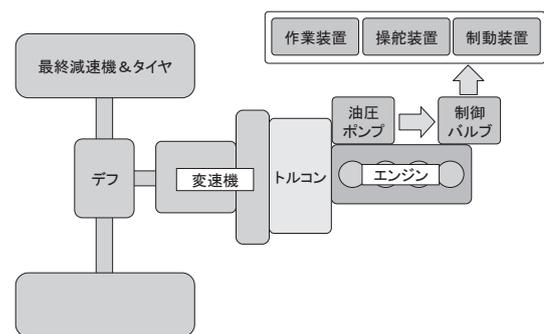


図-1 トルクコン車の動力伝達系統図

自動化ができるなどの利点がある。また、強大な駆動力を必要とする、土砂のすくい込み作業時には、伝達トルクを増幅するなどの優位性を発揮する。

図-2は、トルコンにおける速度比に対するトルク比と効率・吸収トルク係数との関係を示すが、トルコンは全体的に効率が低く、特に低速度比域での効率が極端に低いことが確認できる。そのため、発進、加減速、ストール、前後進切換等の低速度比域の使用頻度が高いホイールローダでトルコンを使用することは、効率面で弱点となっている。一方、高速度比域で効率が低い問題の対応策としては、機械式クラッチでトルコンの入出力軸を直結させる、ロックアップ機構が一般的に知られている。

作業装置等の駆動源として使用されるポンプは、安価で信頼性の高いギアポンプが従来から搭載されてきた。しかし、ギアポンプの吐出量はエンジン回転数に比例して変化するため、油圧系で必要とする流量に対

して、過剰な吐出量となる場合があり、高負荷時には大きなエネルギー損失となる。そのため、近年では、吐出量を制御することができる可変容量ポンプが主流となっている。

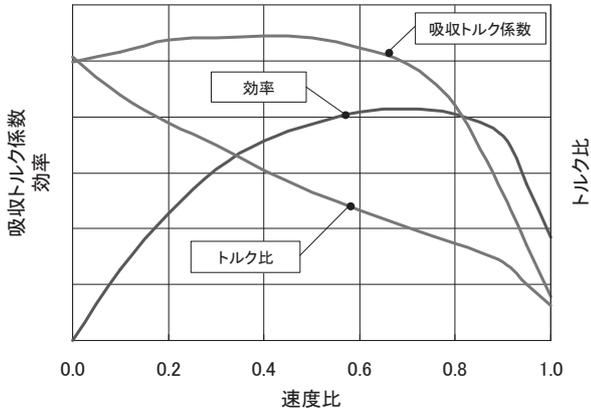


図-2 トルコン性能線図

(2) 従来機のエネルギー損失分析

建設機械の燃費計測方法である JCMAS 規格 V 作業模擬運転（以下 JCMASV）パターンでの動力系・走行系・油圧系の実機計測を行い、そのエネルギー損失を分析した。

図-3 は、JCMASV におけるエネルギー損失を示すグラフであるが、特にすくい込み作業時のトルコン損失、ギヤポンプによる油圧損失が全般的に高いことがわかる。

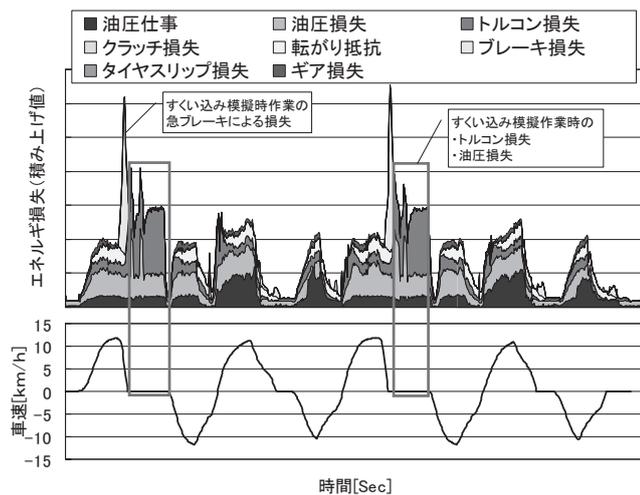


図-3 模擬運転時のエネルギー損失

3. 既存のハイブリッド方式の適用検討

自動車などのハイブリッドシステムは、図-4 に示す、パラレル方式・シリーズ方式・シリーズ/パラレル方式に分類されることが知られている。

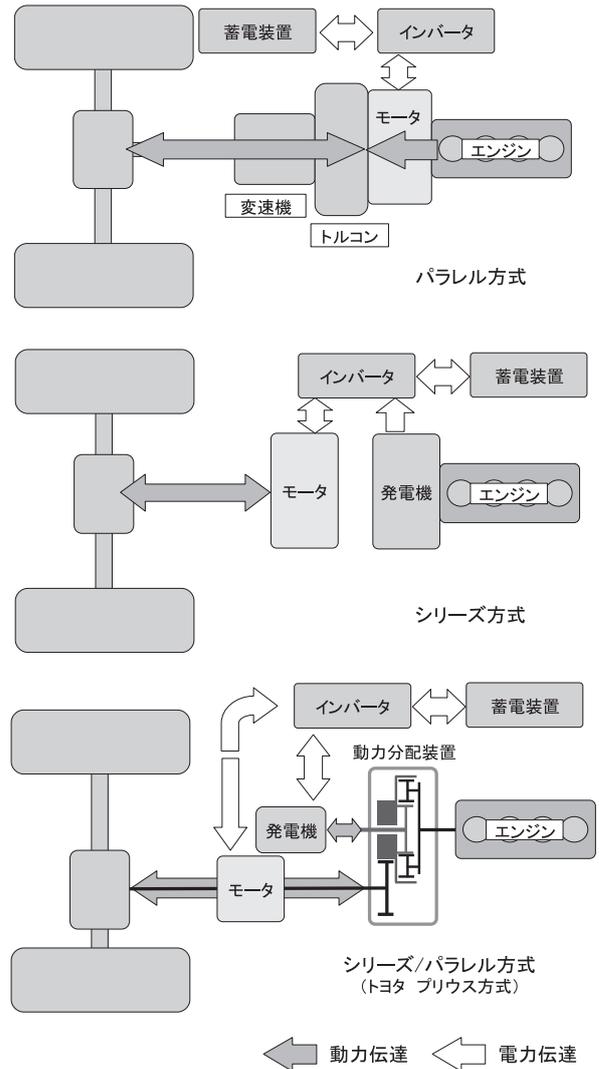


図-4 各種ハイブリッド方式の動力伝達方法

(1) パラレル方式

ホイールローダにパラレル方式を適用する場合、エンジンは主動力、モータを補助動力として、エンジンの出力部位にモータを装着するシンプルな方式となる。しかしながらこの方式では、動力の伝達方法は従来と変わりなく、トルコンに相当する機能を残さざるを得ないために、大きな燃費改善を期待することは困難である。また、減速時の電力回生以外では、エンジン出力に余裕があれば発電させることは可能だが、作業時のホイールローダでは、そのような余裕がほとんどなく、減速時の回生で得られる発電量自体も少ないため、この方式を採用すると、発電量が乏しくなってしまう問題もある。

(2) シリーズ方式・シリーズ/パラレル方式

自動車などのシリーズ方式・シリーズ/パラレル方式は、発進時に必要なトルク性能と高速走行時に必要な回転性能を両立する1つのモータを動力源とするこ

とで、変速機を装備しないケースが多い。

しかしながら、ホイールローダの場合は、上述した通り、低速域において強大な駆動力が必要なため、1つのモータでそれを実現する高トルク性能と、高速走行時の高回転性能を両立させることは困難である。

この解決策として、「1モータ+変速機」または、「2モータ（高トルク型+高回転型）」の選択肢があるが、これらの方式は、モータ・発電機・各専用インバータ等が必要となり、高コストを招く可能性がある。

但し、これらの方式は、蓄電装置の能力が十分あれば、発電機を燃費効率の良いエンジン回転数領域で、一定運転することが可能である。また、発電された電力はインバータ制御することによって、モータ負荷に見合った必要最小限の電力を供給するため、省エネルギー運転が可能である。さらに、シリーズ/パラレル方式においては、トルコン低速度比域では、モータが力行しながらでも発電機でエネルギー回生が可能で、ホイールローダでも、高い燃費改善が期待できるシステムと言える。

4. HYTCs の開発

上述した通り、ホイールローダをハイブリッド化する場合、低速度比域でのトルコンストール状態を可能にすると共に、滑らかなトルク伝達特性を実現する必要がある。また、大幅な燃費改善を実現するためにはエンジン・モータ及び変速機を最適制御し、かつ効率良くエネルギー回生するシステムも必要である。

そこで、既存方式の課題を解決し、ホイールローダに適したハイブリッド方式として、「動力分配装置+1モータ」(図-5)を基本とする、HYTCsを開発した。この動力分配装置は、モータ/ジェネレータ(以下M/G)の回生トルクと遊星歯車の減速比により、安定したトルク増幅を実現すると共に、エンジン・M/Gを制御することにより、エンジンのトルクカーブ上の最適なポイントで出力トルクを制御可能である。

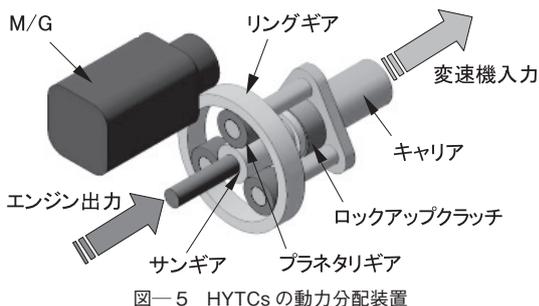


図-5 HYTCsの動力分配装置

(1) システム構成

HYTCsは、図-6に示す通り、走行系(動力分配装置・エンジン・M/G・変速機)・制動装置系・作業装置系・蓄電装置系と、全体を制御する統括コントローラで構成されたハイブリッド方式である。なお、蓄電装置には急速充放電を可能とする、電気二重層キャパシタを採用した。

統括コントローラは、アクセル/ブレーキ指令・車速状況・変速段・蓄電容量に応じて、エンジンとM/Gの回転数・トルク配分や、発進・加速・減速・ストール時の回生または力行状態を最適に制御する。

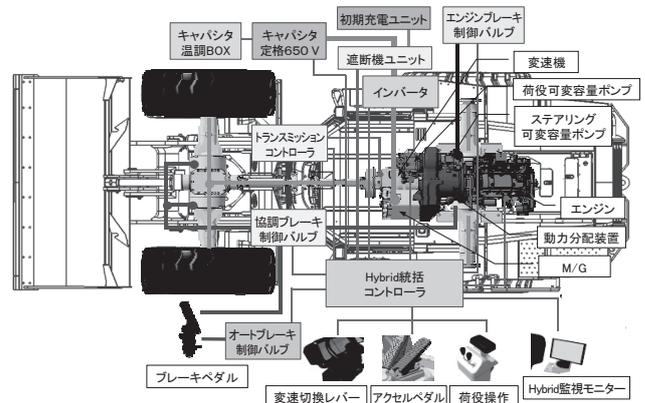
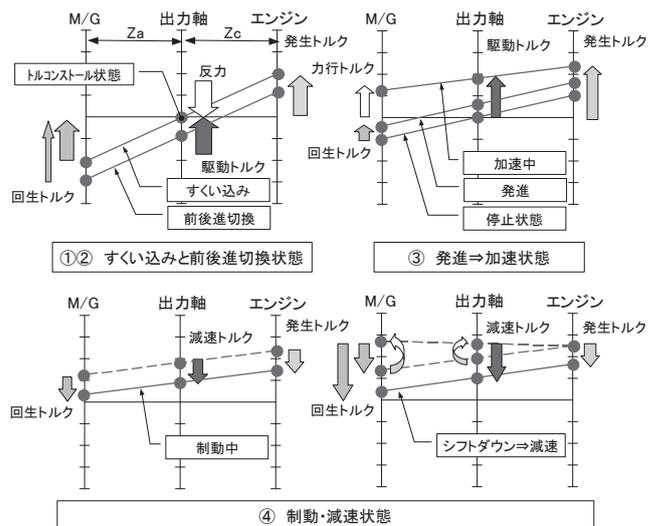


図-6 HYTCs構成図

(2) 動力分配装置の作動原理

動力分配装置の基本的な動きを、M/G・出力軸・エンジンの共線図(図-7)を用いて説明する。



共線図は、遊星歯車の作動状態(軸回転数)を図示する手段として用いられ、上図に示す通り、3要素のギア(M/G・出力軸・エンジン)回転数が必ず直線で結ばれる関係となる。

また、図中の Z_a = サンギア歯数 Z_c = リングギア歯数の比率に合った縦軸間隔となる。(この関係が遊星歯車のギア比となる)

図-7 動力分配装置基本作動

①すくい込み時

M/Gの回生トルクで必要な駆動トルクを確保しつつ、従来捨てられていたエンジン動力をM/Gで回生する。(トルコンストール状態の実現)

②前後進切換

前後進切換時の減速エネルギーを回生するとともに、M/Gの回生トルクにより変速ショックを緩和しつつ、加速まで滑らかな走りを実現している。

③発進・加速時

発進・加速時には、エンジン動力の余剰分をM/Gで回生し、設定速度以上ではエンジン動力にM/G動力をプラスして加速する。(この時もM/G回生トルクを制御することにより、滑らかなトルク伝達を実現)

④制動・減速時

制動・減速時には、M/Gの回生トルクでブレーキ力を発生させる。また、エンジンブレーキ制御バルブにより、油圧ポンプ圧を制御することで、回生量を増やすことが可能である。

(3) シミュレーションによる事前検証

図-8は、JCMASVパターンにおけるシミュレーション結果を示すグラフであるが、図-3と比較すると、すくい込み模擬作業・発進・加速時のトルコン損失が低減していることが確認できる。また、油圧システムの改良や統括コントローラからの制御により、油圧仕事量も全般的に低減している。(図-3・油圧仕事+油圧損失分)

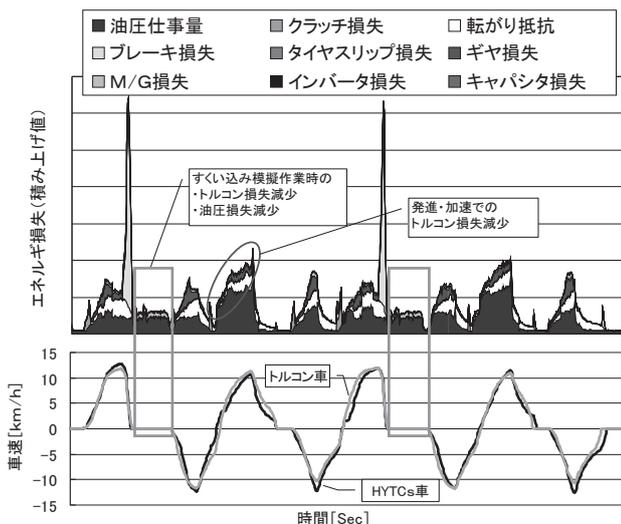


図-8 模擬運転シミュレーション

図-9は、各ハイブリッドシステムのエネルギー損失を比較したグラフであるが、HYTCs方式での電気系効率が高い分、シリーズ方式に対し遜色のない改善効果を得ることを検証できた。

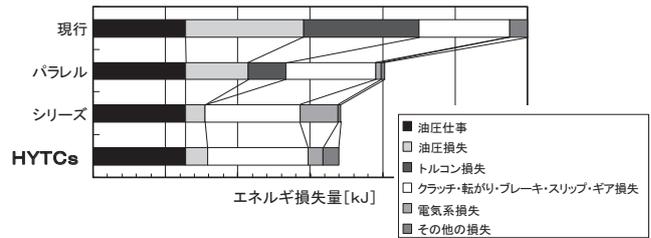


図-9 各ハイブリッド方式のエネルギー損失比較

5. HYTCsの実機検証

HYTCsを搭載した、65Z Hybridの概観を写真-1に、走行性能線図を図-10に示す。



写真-1 65Z Hybrid

走行性能線図は、統括コントローラが指令する牽引力マップにもなっており、線図に応じたトルクを出力するように制御している。従って、牽引力マップを複数設定することにより、対象物の状態に適した牽引力に、瞬時にコントロールすることが可能である。

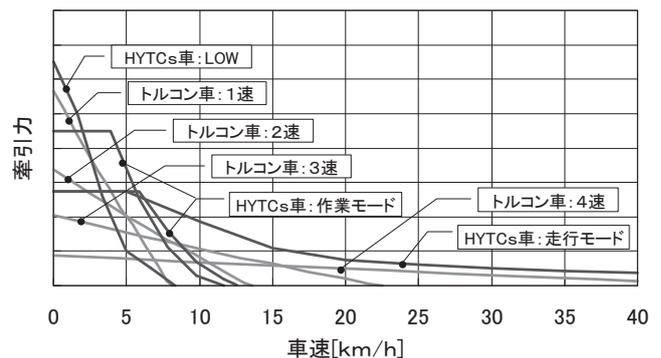
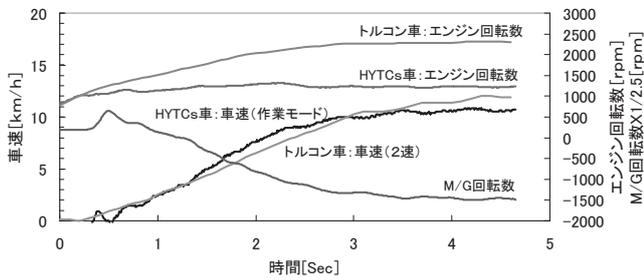


図-10 走行性能線図

(1) 加速性能の検証

図-11に、発進からすくい込みまでの加速性能データの一例を示す。これによると、HYTCsによるM/Gのアシスト効果により、エンジン回転数の上昇を抑えつつ、トルコン車と同等以上の加速性能を有していることが確認できる。

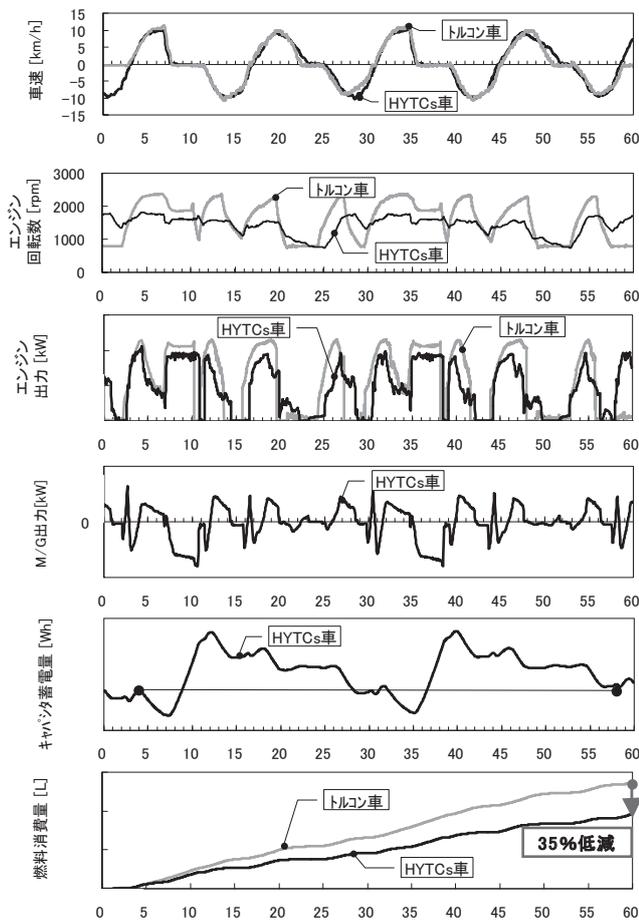
なお、本図で車速が 10 km/h 付近で頭打ちになっているのは、統括コントローラの指令によるものであり、走行性能は任意に設定することが可能である。



図—11 加速性能

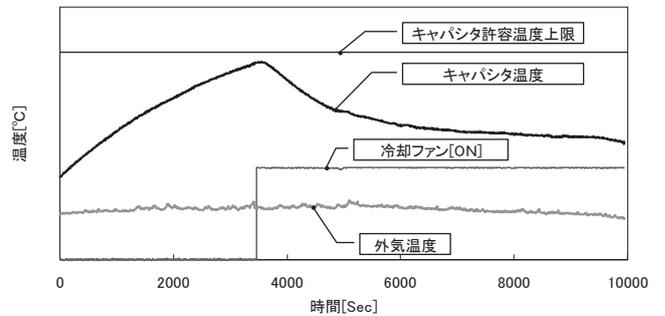
(2) 燃費低減効果他の検証

図—12 は、JCMASV パターンにおける、トルコン車と HYTCs 車の車速・動力系の挙動・燃料消費量を比較したものである。これによると M/G の頻繁な回生・力行動作に追従し、キャパシタ蓄電量が上昇・下降を繰り返すことで、エネルギーを有効活用し燃料消費量を 35% 低減していることがわかる。



図—12 実機性能評価

図—13 は、連続作業でのキャパシタ温度上昇を計測したデータである。安全面を考慮し、キャパシタの冷却には空冷方式を採用しているが、シミュレーションによる冷却用ダクト等の最適化と内部抵抗の低いキャパシタの採用により、過酷な充放電パターンでも期待通りの結果を得ることができた。



図—13 キャパシタの温度上昇評価

(3) 検証結果まとめ

燃費改善 35% を目標として開発を進めた結果、油圧シテム改良の相乗効果も含めて、目標通りの改善を達成することができた。また、キャパシタの蓄電収支バランス制御や、M/G とエンジンの動力配分制御等についても、狙い通りに動作することを確認することができた。

6. おわりに

HYTCs の実機検証結果では、市場へ投入しても充分評価していただけるだけの作業性と燃費改善効果を得ることができたが、製品として市場に幅広く普及させるためには、まだコスト等の克服しなければならない課題が残っている。しかし、今後のパワーエレクトロニクス・蓄電技術の発展により、さらに多くのエネルギー回収・蓄電が可能となり、ハイブリッド建機も安価に提供できる時代が近いと確信している。

最後に、本研究・開発に多大な協力を頂いた、川崎重工業(株)技術開発本部および(株)パワーシステムの開発スタッフに謝意を申し上げます。

JCMA

[筆者紹介]
松井 邦夫 (まつい くにお)
(株) KCM
技術部 開発計画課
基幹職

