

電子制御を活用した HMT(Hydraulic Mechanical Transmission)

ホイールローダの開発

株式会社小松製作所

村本 卓也
講堂 康史朗
○ 竹野 陽

1. はじめに

ホイールローダは採石場や建設工事現場などにおいて積込機として使用され、ダンプトラックとの距離に応じて、アクセルペダル、ブレーキペダル、作業機レバーを連携させた複合的で高度な操作が必要とされる。しかし現在、高齢化による熟練オペレータの減少が問題となっており、運転操作の容易化が強く求められている。

そこで、無段変速機能を有するコマツハイドロリックメカニカルトランスミッション(KHMT)を搭載した中型ホイールローダ WA470-10 を開発した(図-1)。本機では、電子制御を積極的に活用し、エンジン、油機、トランスミッションが最適に制御されることにより、アクセルペダルは車速、作業機レバーは作業機速度と、それぞれ独立して操作することが可能となった。その結果、直感的な操作の実現により非熟練オペレータでも容易にホイールローダを扱うことが可能となり、従来機に比べ操作性を大幅に向上させた。

本稿では、WA470-10 に搭載されたこれらの新機能について紹介する。



図-1 WA470-10

2. 従来機の変速機構

従来ホイールローダはトルクコンバータ+機械式トランスミッション方式または Hydrostatic transmission(HST)方式により構成された。

トルクコンバータ+機械式トランスミッション方式は、トルクコンバータのロックアップ機構や機械式の減速機構により高い伝達効率を発揮する

が、複数段からなる異なる減速比の歯車をクラッチにより切替えるため、作業負荷に応じた変速が発生し、牽引力が段階的に変化する特性がある。

一方でHST方式は油圧ポンプと油圧モータの組み合わせにより構成され、機械式のトランスミッションと比べ、伝達効率は劣るが、油圧により無段変速機能が実現され、牽引力が途切れることなくなめらかに変化するため操作性に優れる。

従来コマツでは使用用途が主に碎石・鉱山現場などでの積込作業となる中型～大型のホイールローダには高効率なトルクコンバータ+機械式トランスミッション方式を採用し、除雪や農畜産分野など用途が多岐にわたり、非熟練オペレータが運転する頻度が高い小型のホイールローダには操作性に優れる HST 方式を採用してきた。

3. KHMT システムについて

3.1 開発の狙い

高い作業効率が求められる中型のホイールローダにおいて、トルクコンバータ+機械式トランスミッション方式の効率の高さと、HST方式が持つ操作性の高さの両立を実現するためコマツハイドロリックメカニカルトランスミッション(KHMT)を搭載した中型ホイールローダ WA470-10 を開発した。KHMT は機械・油圧の2系統でのトルク伝達により、HST方式同様の無段変速機能を有し、オペレータの操作性向上を図りながら高効率化を実現した。

3.2 システム構成

KHMTのシステム構成を(図-2)に示す。KHMTは遊星歯車にサイズの異なる2つの油圧モータを組み合わせた構成となっており、機械と油圧でトルクを伝達している(図-3)。コントローラはアクセルペダルや作業機レバーなどのオペレータ操作、作業機負荷や車速などの車両状態を認識しトランスミッション内の油圧モータやエンジンを電子制御する。

3.3 遊星歯車による無段変速のメカニズム

KHMTは遊星歯車と2つの油圧モータの組み合わせにより無段変速を行う。遊星歯車はリングギア、キャリア、サンギア、プラネタリギアから構成され、動力はリングギア、キャリア、サンギアから外部に伝達される。KHMTはキャリアにエンジン、リングギアに油圧モータ(B)、サンギアに油圧モータ(A)と車軸が接続される(図-4)。実際には遊星歯車とそれぞれのコンポーネント間は減速されて接続されているが、ここでは簡略化のためそれらの減速は省いた状態で説明を進める。

遊星歯車のリングギア(油圧モータ(B)), キャリア(エンジン), サンギア(油圧モータ(A), 車軸)の回転数[rpm]をそれぞれ ω_r , ω_c , ω_s また、リングギアとサンギアの歯数をそれぞれ Z_r , Z_s で表すと、遊星歯車の回転関係は以下のように表される。

$$Z_s \times \omega_s + Z_r \times \omega_r = (Z_r + Z_s) \times \omega_c \quad \dots\dots(1)$$

また、二つの油圧モータは閉回路で接続されていることより、それぞれの容量[cc/rev]を Q_A , Q_B で表すと油圧閉回路における流量のつり合いは以

下のような関係式で表される。ただし、簡略化のため油圧モータの容積効率 η_v は1とする。

$$Q_A \times \omega_s - Q_B \times \omega_r = 0 \quad \dots\dots(2)$$

$$Q_A/Q_B = \omega_r/\omega_s \quad \dots\dots(2)'$$

式(2)'は油圧モータの容量比を調節することにより、リングギア(油圧モータ(B))とサンギア(油圧モータ(A), 車軸)の回転数比が制御されることを示す。つまり、式(1)と合わせると、油圧モータの容量比を調節することでトランスミッションとしての減速比(エンジン(キャリア)回転数/車軸(サンギア)回転数)が制御可能であることが示される。

(図-5)に、式(1)における遊星歯車の回転の関係と式(2)'における油圧モータ容量の関係を図示し、エンジン回転数一定下においてトランスミッションの無段変速機能により車両が加速する過程を示す。

式(1)より、 ω_c は ω_r と ω_s を $Z_s:Z_r$ に内分する回転数であることに着目し、各回転数の横軸を内分比に合わせて図示すると直線上に表される(左軸)。また、 Q_A を ω_r , Q_B を ω_s と同じ横軸上の位置に棒

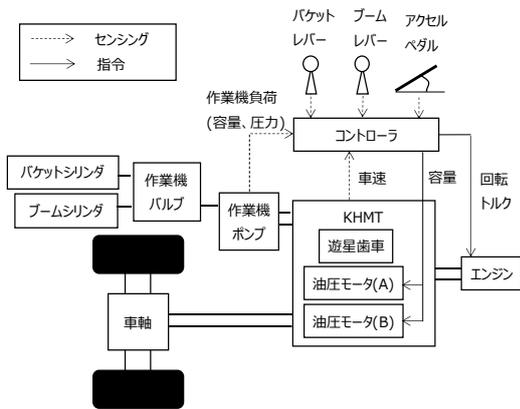


図-2 KHMT システム構成

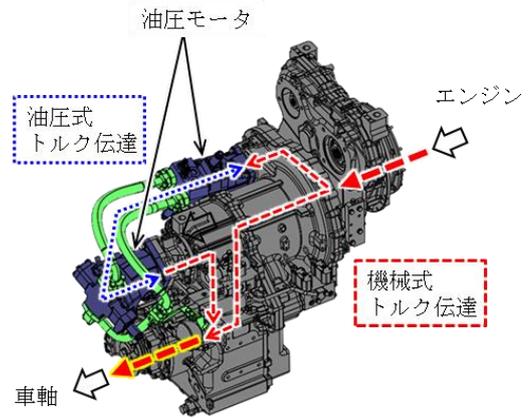


図-3 KHMT 外観

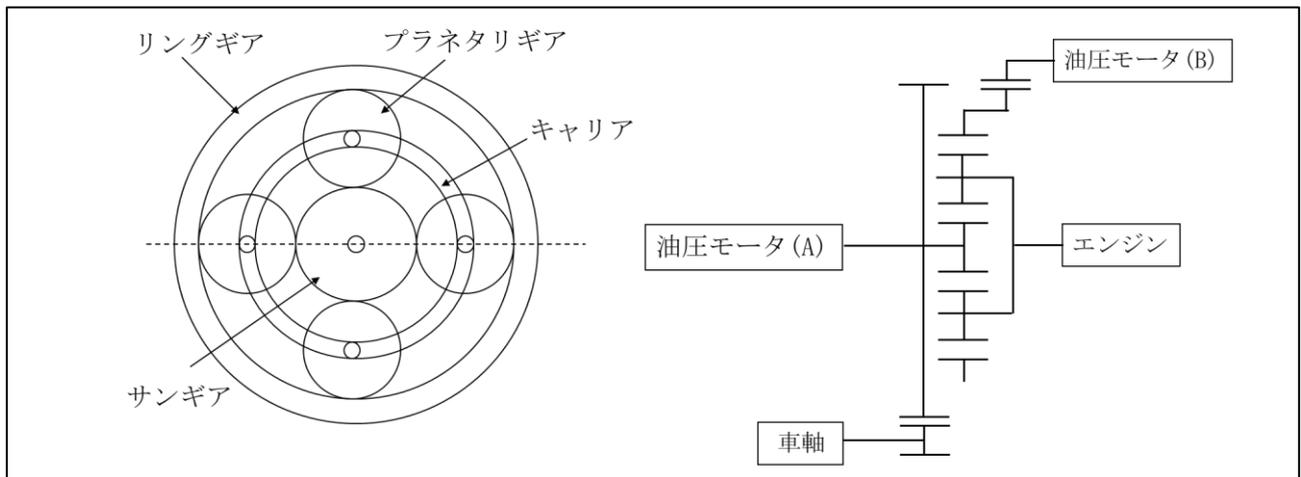


図-4 遊星歯車接続

グラフで図示する(右軸)と、 Q_A/Q_B を調節することにより ω_r/ω_s が制御される様を読み取ることができる。

(図-5)の状況において、KHMTはエンジン回転数一定の下、 Q_B を大きく、また Q_A を小さく電子制御することで車軸(ω_s)を加速させている。このとき油圧モータ(A)は車軸に駆動力を伝えるためにモータとして働き、油圧モータ(B)は油圧モータ(A)へと油を送るためにポンプとして作動する。

KHMTは走行に必要な目標エンジン回転数やオペレータ操作による車速要求をコントローラ内で演算し、2つの油圧モータを電子制御することでトランスミッションとしての減速比を作り上げる。

4. KHMT化による操作性改善

4.1 従来機における操作性の課題

ここではトルクコンバータ+機械式トランスミッション方式の中型ホイールローダにおけるダンプトラックへの積込作業時の操作性について課題を示す。

積込作業においては作業機に土砂を積んだ状態から、排土先であるダンプトラックまでの短い距離において作業機を素早く上げる必要がある。作業機速度はポンプの流量に比例するため、積込に必要な流量を確保するためにオペレータはアク

セルペダル操作によりエンジン回転数を上昇させる。

しかし、トルクコンバータ+機械式トランスミッション方式の車両は変速作業をオペレータが実施しない限り減速比が変わらないため、エンジン回転数上昇に伴い車体は加速する。

オペレータはダンプトラックとの距離を意識し、エンジン回転数をアクセルペダルで、作業機速度を作業機レバーで、車速をブレーキペダルで調節する必要がある、高度な複合操作が要求される。

車両の効率的な稼働は現場の生産能力に影響するため、複雑な複合操作の解消は若手オペレータのみならず、現場オーナーやすべてのオペレータの悩みの種であり改善が求められていた。

4.2 KHMTの作業機・走行独立制御について

KHMTは無段変速機能の特性を生かし、エンジンの回転数制御とアクセルペダル操作を切り離している。これにより、作業機速度は作業機レバーのみ、車速はアクセルペダルのみで操作する作業機・走行独立制御を実現した。

本節では作業機・走行独立制御の仕組みを解説するが、これは制御フローを厳密に表すものではなくコンセプトを示すことが目的であることを付け加えておく。作業機・走行独立制御の概念図を(図-6)に示す。

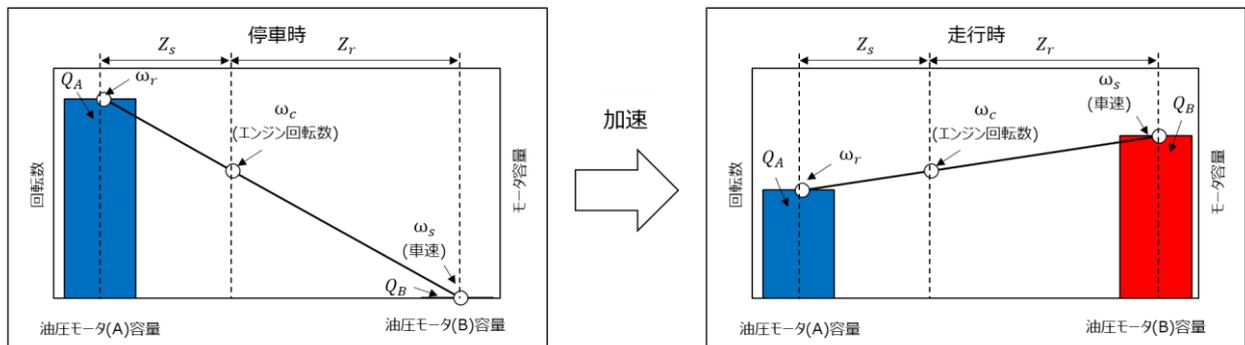


図-5 遊星歯車と油圧モータで無段減速する仕組み

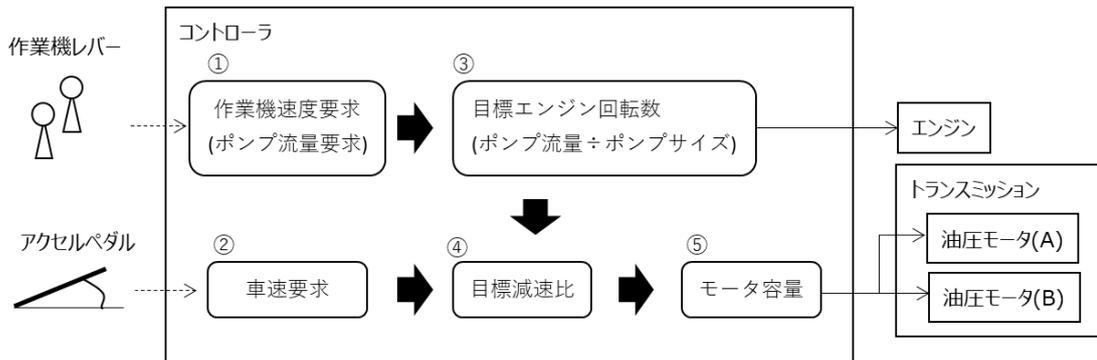


図-6 作業機・走行独立制御概念図

コントローラは作業機レバーとアクセルペダルの情報を取得する。作業機・走行独立制御ではこれらの情報をそれぞれ、作業機速度要求、車速要求と認識する。

オペレータが作業機を素早く動かす目的で作業機レバーを操作した際、コントローラは必要な作業機速度を出すためのポンプ流量を演算し、搭載する作業機ポンプのサイズより、目標とするエンジン回転数を算出する。エンジンはこの目標回転数を元にアクセルペダル操作とは関係なくコントローラから制御される。これはつまり、作業機レバー操作によりエンジン回転数が自動で制御されることを示す。

一方でコントローラはアクセルペダルにより認識した車速要求を実現するため、トランスミッションに必要とされる減速比を演算する。これは作業機レバー操作により決まるエンジン回転数とアクセルペダル操作により決まる車速要求の比を演算することで得られる。KHMT は目標の減速比を実現するため2つの油圧モータを電子制御することでオペレータの車速要求での走行を可能としている。

作業機・走行独立制御により作業機速度と車速を独立して操作可能となり、シンプルで直感的な操作性が実現した。(図-7)にダンプトラックへの積込作業における従来機との操作性の違いを示す。

ダンプトラックへの積込作業は土砂を積んだ状態で作業機を上げる作業から始まる。この時、従来機は作業機を上げるために作業機レバー(右手)を

操作するが、作業機速度を速める際にはエンジン回転数を上げるためアクセルペダル(右足)操作が必要となる。一方で WA470-10 はエンジン回転数が自動で制御されるため作業機レバー(右手)操作のみで作業機速度が調節可能である。

次にダンプトラックへ近づくために車両は走行を始めるが、この時ダンプトラックとの距離を意識して作業機速度と車速を調節する必要がある。従来機では作業機速度を作業機レバー(右手)とアクセルペダル(右足)操作で、また、車速をアクセルペダル(右足)とブレーキペダル(左足)で調節する必要があり高度な複合操作が要求される。一方で WA470-10 は作業機速度を作業機レバー(右手)で車速をアクセルペダル(右足)でそれぞれ独立して操作可能である。

ダンプトラックへの積込は減速しながら作業機速度を調節する必要がある。減速のためにはブレーキペダル(左足)を操作するが、従来機は作業機速度を調節するため、車速の挙動に反してアクセルペダル(右足)操作が必要であり感覚と異なる操作が求められる。一方で WA470-10 は作業機速度を作業機レバー(右手)のみで操作できるため、車速の調節は減速のためのブレーキペダル(左足)操作のみに集中することができる。

WA470-10 は作業機・走行独立制御を採用することにより、従来機において発生していた、作業機レバー(右手)、アクセルペダル(右足)、ブレーキペダル(左足)の高度な複合操作をなくし、より直感的で容易な操作性を実現している。

運転操作		作業機上げ操作	作業機、走行 同時操作	ダンプトラック積込操作
動作イメージ				
従来機	作業機操作	 作業機レバー(右手)  アクセルペダル(右足)	 作業機レバー(右手)  アクセルペダル(右足)	 作業機レバー(右手)  アクセルペダル(右足)
	走行操作		 アクセルペダル(右足)  ブレーキペダル(左足)	 ブレーキペダル(左足) ↑ 車速に影響
WA470-10	作業機操作	 作業機レバー(右手)	 作業機レバー(右手)	 作業機レバー(右手)
	走行操作		 アクセルペダル(右足)	 ブレーキペダル(左足)

図-7 積込作業時の操作性比較

4.3 操作性改善の効果確認

作業機・走行独立制御の操作性向上効果を確認するため、碎石・鉱山現場で一般的に行われる V シェープ作業にて従来機との比較試験を実施した。V シェープとは砂利などの製品をダンプトラックに積込む際に行う作業で、その走行軌跡からこのような名前が付けられている。V シェープ作業の流れを(図-8)に示す。

社内試験の結果、V シェープ作業 1 サイクル当たりのペダル操作頻度はアクセルペダルが 22%低減、ブレーキペダルが 75%低減という結果が得られ、操作性の大幅な向上が確認できた。(図-9)

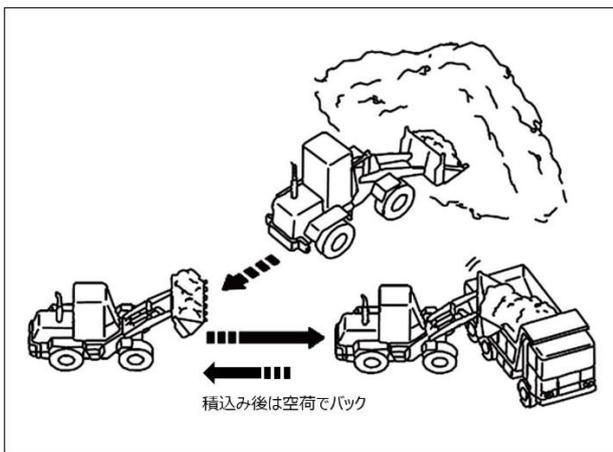


図-8 V シェープ作業

5. 従来機からの燃費向上

操作性向上に加え、KHMT 化に伴い従来機にはなかった、燃費性能を向上させる制御を織り込んだのでここで述べる。

5.1 エンジン低回転マッチング制御

KHMT の制御システムはオペレータの操作に対して車体の状況や負荷を総合的に判断し、エンジンが最適な出力となるよう制御されている(図-10)。これはコントローラがオペレータのアクセルペダル操作(車速要求)と作業機レバー操作(作業機速度要求)に対して必要なパワーのみエンジンに出力するよう指令することにより実現されている。

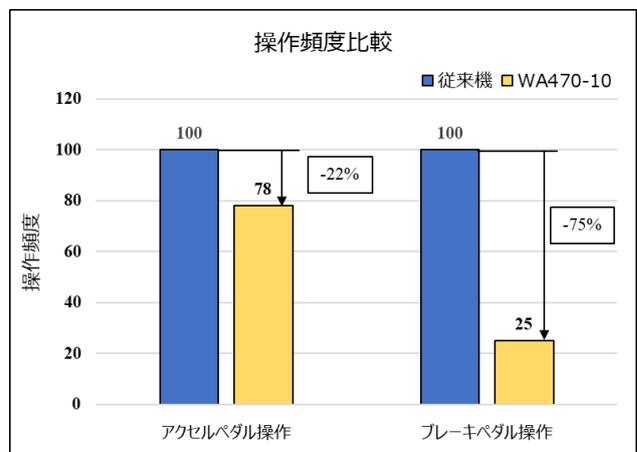


図-9 V シェープ作業における操作頻度比較

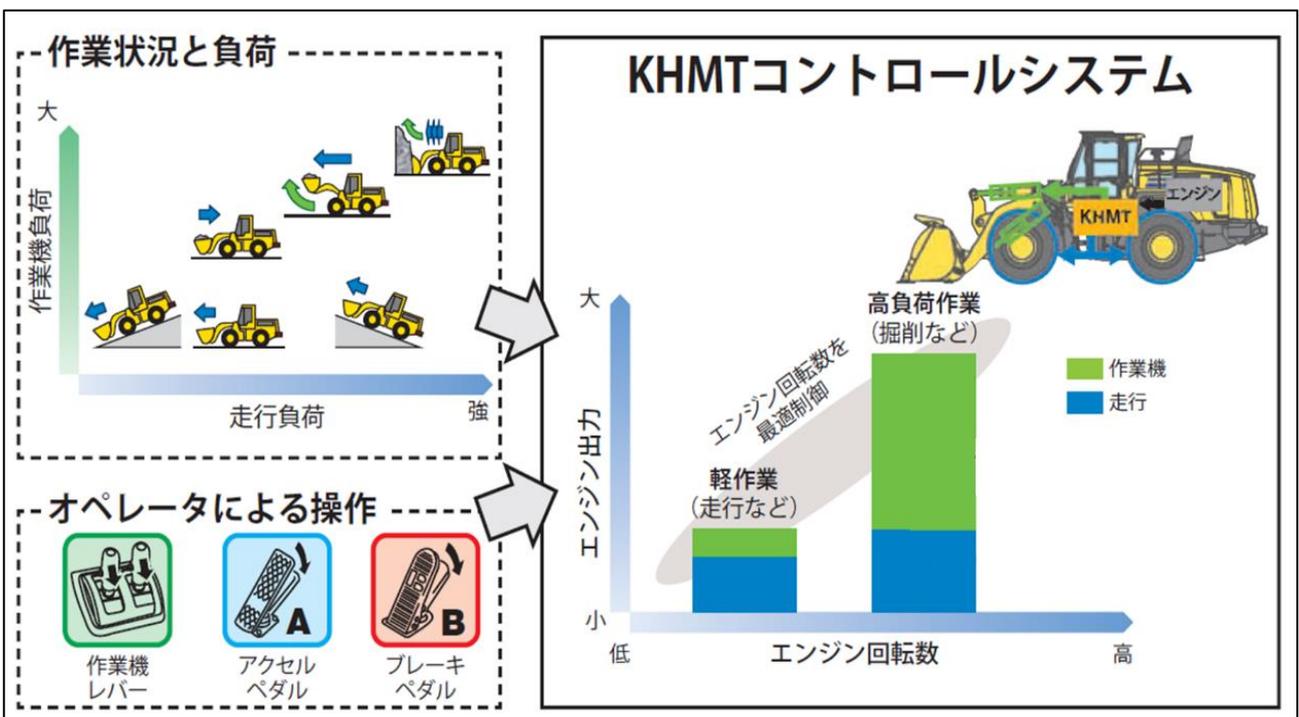


図-10 エンジン低回転マッチング制御

エンジンは掘削や坂道走行など大きな出力が必要とされる局面においては高いエンジン回転数で制御され、低速での平地走行など小さな出力しか必要とされない局面においては低いエンジン回転数で制御される。

一般的にエンジンは回転数が高いほど内部のフリクションが高く効率が悪いとされている。KHMTは無段変速機能の特徴を生かし、従来機と同じ車速で走行する際にエンジン回転数を低く保つエンジン低回転マッチング制御を織り込み燃費向上を図った。(図-11)に平地走行時におけるエンジン回転数の比較結果を示す。比較対象の従来機はWA470-10モデルチェンジ前の現行機種WA470-8を選定した。

(図-11)はWA470-8を各走行速度段での最高車速で走行させた際のエンジン回転数とWA470-10を対応する車速で走行させた際のエンジン回転数を比較した結果を示す。

WA470-10はエンジン低回転マッチング制御により、どの車速域においてもWA470-8よりも低いエンジン回転数で走行が可能である。

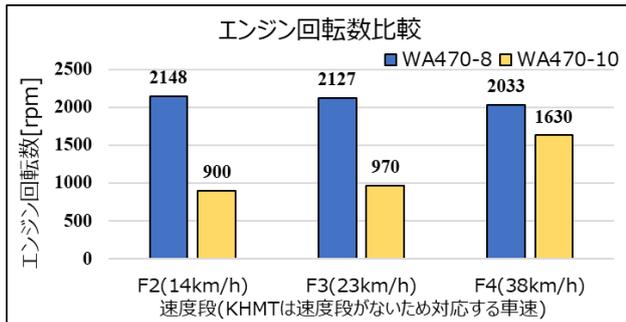


図-11 エンジン回転数比較

5.2 燃費試験結果

社内標準における従来機との積込作業燃費の比較結果を(図-12)に示す。前節同様比較対象の従来機はWA470-8を選定した。試験結果は時間当たりの燃料消費量(L/h)についてWA470-8の試験結果を100として無次元化した値で示す。

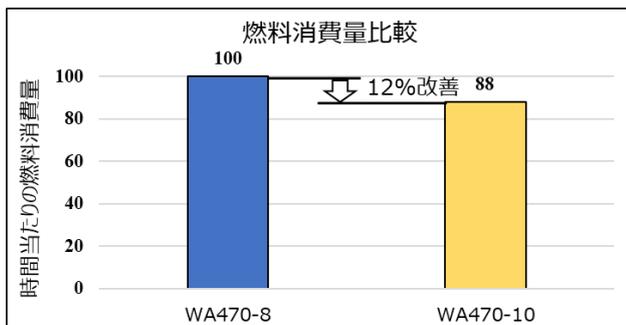


図-12 燃費試験結果

社内試験の結果、燃費は12%改善することを確認した。これはエンジン低回転マッチング制御によるエンジンの効率な使用や作業機・走行独立制御による操作性向上が寄与した結果である。

6. おわりに

KHMTの採用により、長年ホイールローダにおける課題であった高度な複合操作という操作性の問題を大幅に改善することができた。熟練オペレータの減少は今後も進行すると考えられ、運転容易化・操作性向上技術のさらなる普及が求められる。

当社はさらなる操作性・燃費性能を実現する建設機械を開発していく所存である。

参考文献

- 1) 村本卓也・講堂康史朗：中型ホイールローダ WA470/475-10，コマツテクニカルレポート，Vol.65 No.172，pp.50～56，2020年3月31日発行