

(論文)

シテークレーンの燃費改善へのアプローチ

Approach for Improving Fuel Consumption of City Crane



堀 直人*1
Naoto HORI



寺坂穰二*1
Joji TERASAKA



小林隆博*2
Takahiro KOBAYASHI



菅野直紀*3
Naoki SUGANO

For fuel saving in hydraulic wheel cranes, two control systems have been newly developed; namely, a one-way-clutch system and an advanced engine control system. The former allows one-way transmission of power only in the direction from the motor to the axle and eliminates the need for actuators and controllers to control the motor action. The advanced engine control system determines the engine rotation speed in response to half-stroke operations of levers, which prevents unnecessary generation of engine power. It was found that fuel savings of 12% in driving and 20% in crane operation were achieved for the former and the latter systems, respectively, in the practical operation of the cranes.

まえがき＝燃料コストの上昇や環境対応に対するユーザ意識の向上から、省エネ性能に対するニーズはますます大きくなっており、建設機械においても排ガス規制のタイミングに合わせて各社から省エネ性能向上を特徴とする新規モデルが上市されている^{1), 2)}。

コベルコクレーン(株)では、ホイールクレーンのエンジンから走行・作業アクチュエータまでの動力伝達に、主に油圧制御システムを使用している。油圧制御システムではポンプや制御バルブを用いてアクチュエータの挙動を制御しており、各部で大きな動力損失が生じる。したがって、省エネ性能向上には各機器で生じる損失を最小化するように制御、機構をいかに最適化するかが肝要となる。

コベルコクレーン(株)は、2008年にホイールクレーンRK250-7を上市、その後、2011年に実施したマイナチェンジでは、新規開発した技術を盛り込むことで省エネ性能の向上を達成した。本稿では、ホイールクレーンの省エネ化に向けた開発アプローチと開発技術について紹介する。

1. ホイールクレーンの油圧システム

1.1 走行油圧システム

RK250-7では、走行系に油圧式無段階変速 (Hydraulic Static Transmission, 以下HSTという) システム^{3), 4)}を使用している。このHSTシステムは、一般的なトルコンや機械式の変速機と異なり、エンジンと駆動軸の間に油圧を介して動力伝達することを特徴とする。

ホイールクレーンの場合、上部旋回体にクレーン作業用アクチュエータ、下部走行体に走行用駆動軸がある。ここで、トルコンや機械式の変速機を使用した動力伝達方式を採用する場合は、エンジンから出力軸までがほぼ機械的に接続されるため、エンジンは下部に配置して上

部アクチュエータへはセンタスイベルジョイントを介して油圧動力を供給する構成に限定される。しかし、RK250-7では、クレーン安定能力を維持しながら車両サイズをよりコンパクトに構成するため、エンジンを上部旋回体に搭載し、エンジンと駆動軸の間にはレイアウトの自由度が高いHSTシステムを採用した。

RK250-7の油圧システムは図1のように構成されている。走行システム(図1(b))は、動力分割機構を介して可変容量ポンプをエンジンで駆動し、このポンプ吐出油が走行駆動用可変容量モータを駆動することによって回転軸(以下、アクスルという)やタイヤを回転させ、車両を走行させる。モータ排出油をポンプに戻すように、油圧回路が閉回路で構成されていることが特徴である。

ポンプ吐出流量が一定の場合は、モータ容量を大きくするほど駆動トルクが大きくなり、モータ容量を小さくするほど走行速度が速くなる。また、ポンプ流量を大きくすることにより、HSTシステムへの投入動力を大きくすることができる。このようにHSTシステムではポンプ、モータの容量制御により駆動トルク・走行速度の増減を制御する。

1.2 クレーン作業油圧システム

クレーン作業部の油圧システムを図1(c)に示す。動力分割機構を介してエンジンが作業用の可変容量ポンプを駆動し、その吐出油はコントロールバルブを介してウィンチ巻上げ/巻下げモータ、ブーム伸縮シリンダ、およびブーム起伏シリンダへと導入される。コントロールバルブは、作動油を供給するアクチュエータの選択をはじめ、そのアクチュエータの作動方向と速度が制御する。HSTシステムと異なり、アクチュエータからの排出油はコントロールバルブを通して作動油タンクへ戻る。

*1コベルコクレーン(株) 開発本部 要素開発部 *2コベルコクレーン(株) ものづくり統轄本部 品質保証部 *3技術開発本部 機械研究所

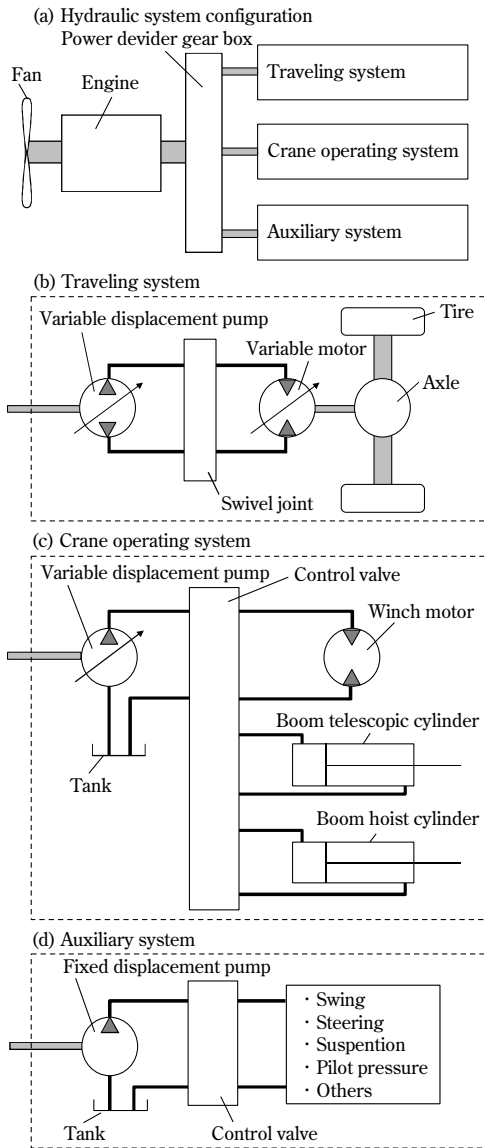


図1 ホイールクレーンの油圧システム構成
Fig. 1 Hydraulic system configuration of wheel crane

2. シミュレーションによる走行燃費予測

新規システムの採用や仕様変更を伴う開発のリードタイム短縮にはシミュレーションによる事前予測が活用されるが、コベルククレーン(株)における走行燃費の予測技術は、定速走行のような単純な走行条件だけに限られていた。しかしながら実際は、定速走行や加速走行、慣性走行、登坂走行などが混合した複雑な走行条件となる。

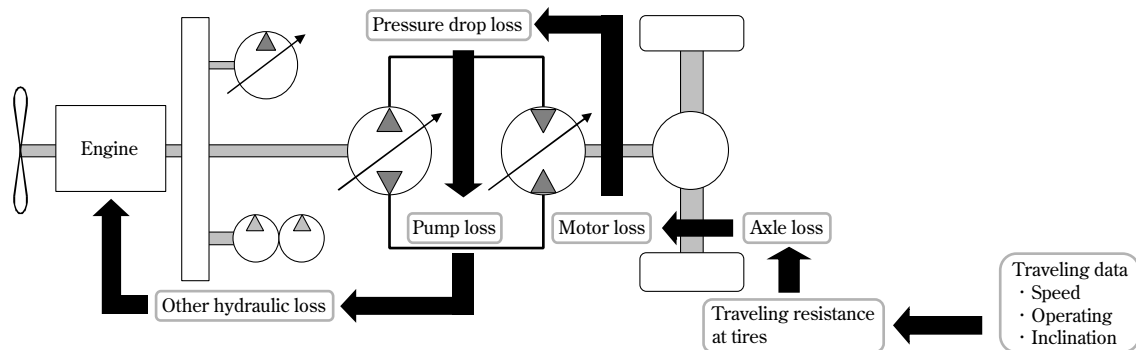


図2 エンジン負荷計算の流れ
Fig. 2 Flow of engine load calculation

このため、実走行データを基に走行燃費を予測するシミュレーション技術を開発する必要があり、走行中の各機器における負荷と損失からエンジン燃料消費量を計算する手法を新たに考案した。

図2に示すように、実測した車速および道路勾配データなどから走行抵抗を算出し、各装置での損失を加算することによってエンジンの回転数と必要トルクを求め燃費を推定する。車速データは走行状態に応じた可変スージングを行って燃費解析でのノイズを低減し、精度良く燃費解析を行うことを可能とした。ポンプやモータでの損失導出では、ニュートン・ラプソン法による反復計算を行った。ポンプの場合、状態方程式として式(1)~(3)が得られる。

$$W_p = W_{EG} - W_{add} \dots \dots \dots (1)$$

$$Q_p P_p = W_p \eta_m \dots \dots \dots (2)$$

$$Q_p = q_p N_p \eta_v \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 W_p 、 W_{EG} 、 W_{add} はそれぞれ、ポンプ、エンジン、補機の動力、 q_p はポンプ容量、 P_p はポンプ圧力、 Q_p はポンプ流量、 N_p はポンプ回転数、 η_v および η_m はそれぞれポンプの容積効率、機械効率である。この流量 Q_p を評価関数、回転数 ω_p を変数として計算を行った。

このシミュレーションモデルの精度検証として、実機走行データと解析結果の比較を図3に示す。図の走行データは速度を階段状に上げていったときのもので、加速時と定速走行時の燃費が解析によりほぼ再現できている。トータルの消費燃料も差異は5%以内であり、本手法の妥当性が確認できた。

3. 走行燃費改善

3.1 ポンプ容量制御⁵⁾

走行時のエンジンはHSTシステムのポンプを駆動するだけでなく、作動油の冷却やステアリング操作、パイロット圧源のため作業用ポンプや補機ポンプを駆動している。これらのポンプはできるだけ容量を下げ、不要時はアンロード運転させているが、制御バルブや配管通過時の圧損による動力損失が生じてしまう。図4は回転数を変化させたときのポンプアンロード圧力計測結果を示す。回転数とともに圧力が上昇しており、ポンプ負荷が増大していることが分かる。また、図5に示すように、エンジンは定格回転数よりも低い回転数域に燃焼効率の良い領域があるため、回転数低減が消費燃料の削減に効

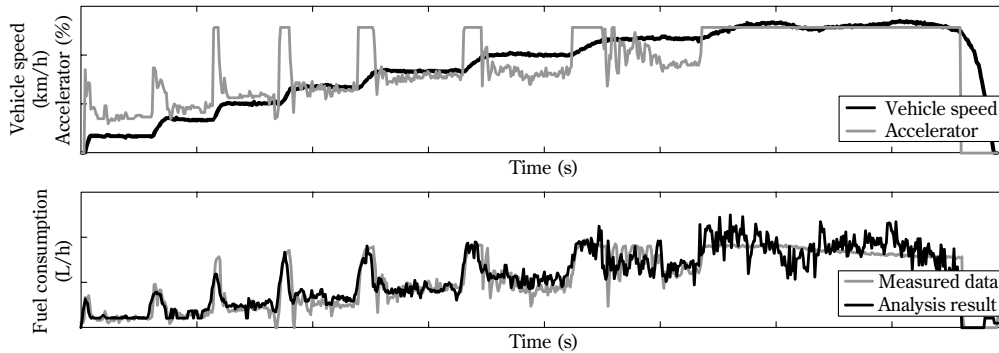


図3 実測とシミュレーションの比較
Fig. 3 Comparison of measured data and simulation

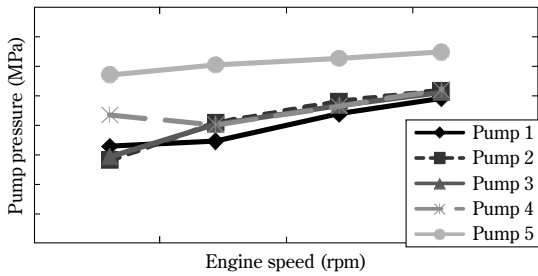


図4 ポンプアンロード圧力
Fig. 4 Unloaded pump pressure

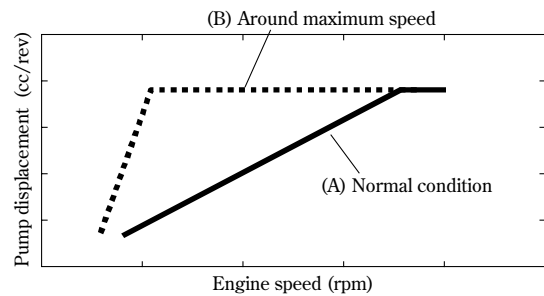


図6 ポンプ容量制御
Fig. 6 Pump displacement control

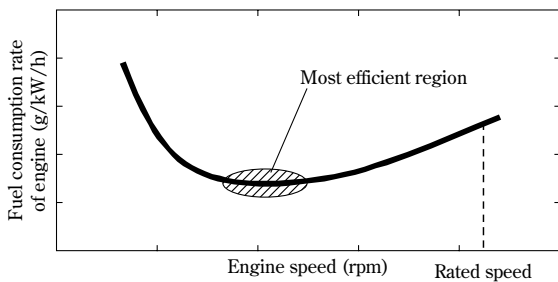


図5 エンジン燃料効率特性
Fig. 5 Engine specific fuel consumption

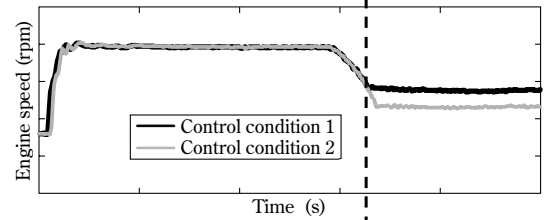
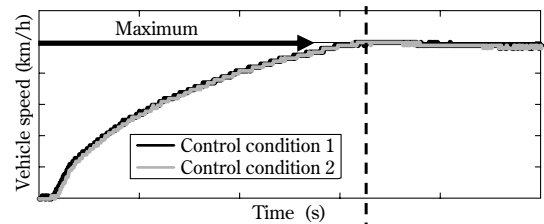


図7 エンジン回転数低減効果
Fig. 7 Effect of engine speed reduction

果がある。これらの特性を踏まえ、以下に示すポンプ容量制御を考案した。

走行用ポンプは、エンジン回転数に対して図6 (A)で示すような一定の関数に従い容量指令値を決定する。ここで、エンジン回転数とともに容量指令値を大きくするのは、エンジン始動時のポンプ容量が大きいと急激に大きなトルクがエンジンに負荷され、回転数の立ち上がり不安定になってエンストを起こすのを防ぐことを目的としている。

エンジンは回転数が高くなるほど大きな動力を出力するため、加速時や登坂時のようにフルパワーを必要とするときはエンジンを高回転数で維持する必要がある。一方で、平地を定速で走行する場合は負荷が小さく必要エンジン動力も小さいため、低い回転数で走行できる。

速度 V におけるエンジン回転数 N_E は式 (4) より求められる。

$$N_E = \frac{q_m \varepsilon_{axle} \varepsilon_{pd}}{q_p \eta_p \eta_m} V \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 ε_{axle} はアクスルの減速比、 ε_{pd} は動力分割機構の減速比、 q_m はモータ容量、 η_m 、 η_p はモータ、ポンプの容積効率である。式 (4) から、モータ容量を小さくして

ポンプ容量を大きくすることによってエンジン回転数を下げることができる。しかしながら、図6 (A) に示す関数のままポンプ容量を制御したとき、エンジン回転数の低下とともにポンプ容量が小さくなるため大きな効果が得られない。そこで、最高速度近傍で定速走行している場合は図6 (B) に示すようにポンプ容量を制御することによってエンジン回転数を低減させるようにした。

また、速度だけでなくアクセル量に対しても本制御を適用し、慣性走行や低速走行のように走行必要動力が小さい条件の場合も、図6 (B) と同様の容量制御を行うことによって幅広い速度域でエンジン回転数を最適化することができた。

図7 はポンプ容量制御を変更して最高速度まで加速走行試験したときの走行速度とエンジン回転数の変化を示

す。条件1は従来の制御，条件2は図6点線(B)で示す制御を適用した結果を示す。走行速度は条件1および2でほぼ同等であるが，最高速走行時のエンジン回転数は条件2の方が低い上に，瞬時燃費で約11%改善しており，本制御の有効性が確認できた。

3.2 ワンウェイクラッチシステム⁶⁾

ホイールクレーンのように重量の大きい車両では，加速・登坂に要するトルクが大きい。モータ出力トルクはモータ容量に比例するため，実機モータ容量も大きくする必要があるので，搭載上の問題からHSTシステムを複数のモータで構成した。一方で，定速走行のような軽負荷走行状態では駆動に要するモータトルクが小さい。このため，一時的に一部のモータをアンロードさせて省エネを図ることも可能であるが，図8に示すようにモータ容量をゼロにしても一定以上の損失トルクが生じる。また，モータ出力の動力合成機構において各モータと一緒に回転する歯車でも抵抗が生じている。

そこで，駆動に使用しないモータの空転ロスを削減するため，動力合成機構に接続されているモータの軸にワンウェイクラッチ(以下，OWCという)を導入したシステム(図9)を考案した。このOWCはモータ2から動力合成機構の方向にのみ動力伝達し，逆方向には伝達させないため，走行中にモータ2の容量をゼロとして駆動力を発生させなくすると，クラッチが切断された状態となって回転が停止する。登坂や加速状態ではモータ2を駆動状態とするため自動的にクラッチが結合し，モータ1とともに動力伝達する。このOWCは，結合・切断にアクチュエータや制御圧源，信号を要しないため，動力伝達システムの変更にあたっては従来のモータ機構からの機器変更は少なく済む。

OWCの効果をベンチ装置で行った確認試験結果を

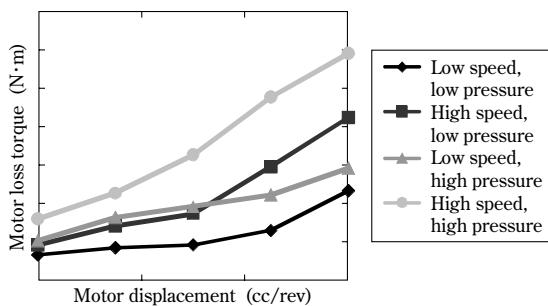


図8 モータの漏れと損失トルク
Fig. 8 Motor leak and mechanical loss

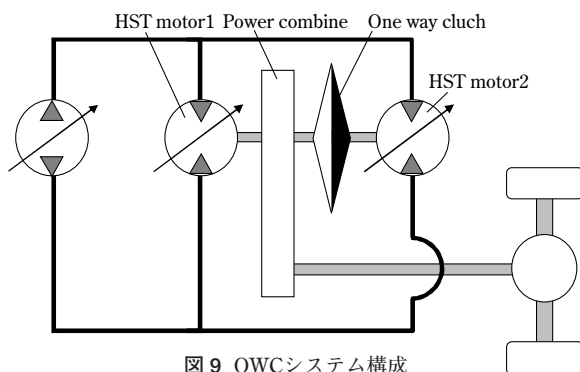


図9 OWCシステム構成
Fig. 9 OWC system configuration

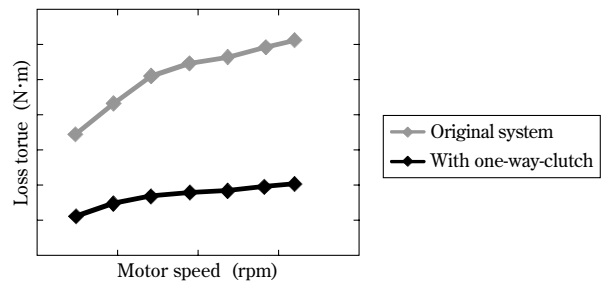


図10 モータ取り付け軸抵抗
Fig.10 Shaft resistance in motor

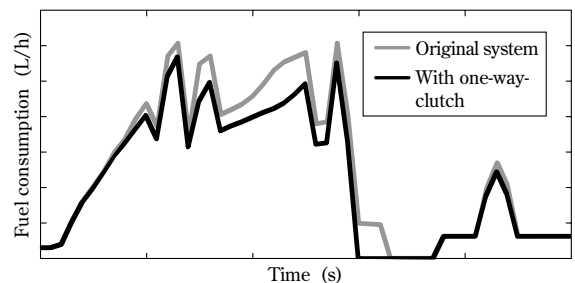
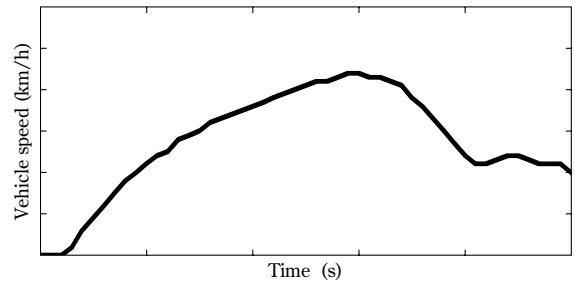


図11 OWCシステムの走行シミュレーション結果
Fig.11 Simulation of OWC system

図10に示す。回転数を変化させて，容量ゼロ状態のモータ取り付け軸の連れ周りトルクを計測した結果，最高速度近傍で約3分の1まで低減できることを確認した。

2章で検討したシミュレーションモデルにOWCシステムによる損失低減の効果を組込んで走行燃費を解析した。その結果を図11に示す。機器の特性上，モータ容量がゼロになるまでは効果がないため，低速域では燃費に改善は見られない。しかしながら，速度が上昇して高速域になると容量ゼロ側のモータが停止し，損失が低減することによって燃費が改善している。市街地走行を想定したテストパターンでは走行燃費が約15%改善される結果が得られた。また，OWCを搭載した試作機による実走行試験結果でも12%改善しており，本システムの効果が実証された。

4. 作業燃費改善

4.1 ポジコン制御

クレーン作業時のアクチュエータ速度はコントロールバルブで制御している。ここでは図12曲線(C)に示す操作レバー量に応じたアクチュエータへの供給油流量を決定しているため，ポンプ吐出流量の内の作業に使用しない余剰分はタンクへ戻す。従来のポンプ制御(図12点線(A))では，レバー量にかかわらずポンプ容量が一定のため低レバー領域で損失が大きい。ここで，レバー量とともにポンプ容量を増大させるポジコン制御(図12折

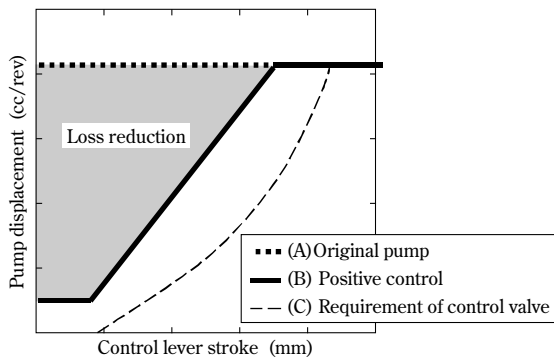


図12 ポジコン制御容量
Fig.12 Pump displacement in positive control

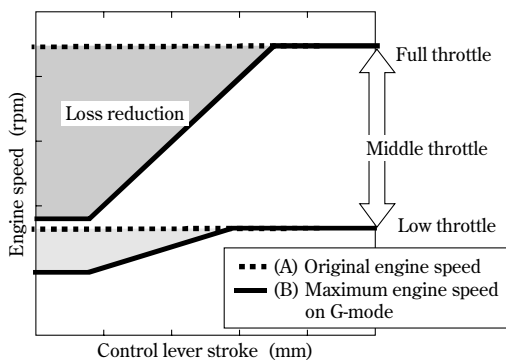


図13 Gモードのエンジン回転数制御
Fig.13 Engine speed on G-mode

れ線 (B)) を導入することにより、この損失を低減することができる。

4.2 レバー感応エンジン回転数制御

クレーン作業は、各種の操作レバーとエンジンアクセルによってアクチュエータの速度制御を行う。アクセルは作業に応じて操作量を制御されるが、通常はアクセル量一定で作業が行われることが多い。フルアクセル状態で作業を行った場合、レバー量にかかわらずエンジン回転数は最大で保持される。3.1節に記述したとおり、エンジン回転数が高いと補機ポンプ負荷が大きくなり、エンジン効率が悪化する要因にもなる。とくにクレーン作業では、作業自体に要する動力が走行時と比較して小さいため、損失の増大が燃費に与える影響が大きい。

そこで、作業速度を要しないレバー微操作領域においてエンジン回転数を制限する、レバー感応エンジン回転数制御『Gモード』を考案した(図13)。アクセル量に応じたエンジン回転数指令を、レバー量に応じた許容最大エンジン回転数で制限することにより、フルアクセル状態の操作でもレバー操作量に連動させてエンジン回転数をこまめに低減させることができる。また、低速から高速までオペレータの操作感覚に合った作業速度を、ア

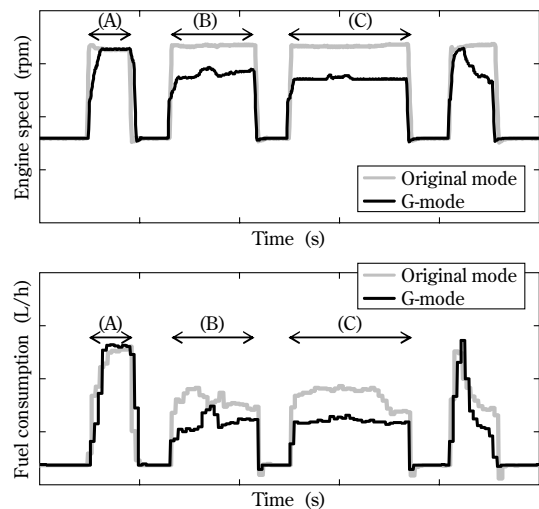


図14 Gモードでのエンジン回転数と作業燃費
Fig.14 Engine speed and fuel consumption on G-mode

クセルワークなしにレバー操作のみで容易に制御することができることも本制御の特徴の一つである。

図14に実作業(ウィンチ巻上げ/下げ、起伏、旋回の複合操作)を行ったときのエンジン回転数と燃費の変化を示す。本試験では、アイドル時を除く作業中はフルアクセル操作固定で行った。図の作業(A)はフルレバー操作のためエンジン回転数は従来制御と同等であるが、ハーフレバー操作の作業(B)、(C)ではGモードでのエンジン回転数が大幅に低減しており、試作機試験で約20%の燃費改善を確認した。

むすび=ホイールクレーンの燃費性能向上を目的に、走行用ポンプの容量を制御する新技術を開発した。また、OWCシステムを開発してモータロスを低減させたことにより、走行燃費を12%低減させることができた。

一方、クレーン作業中の燃費改善のためポジコン制御を導入し、レバー感応エンジン回転数制御『Gモード』を考案することにより、ハーフレバー操作でのエンジン回転数を下げることができ、作業燃費の20%低減を実現した。今後も更なる燃費改善を目指して技術開発を進める。

参考文献

- 1) 鹿兒島昌之ほか. R&D神戸製鋼技報. 2007, Vol.57, No.1, p.66-69.
- 2) 下垣内宏. 建設の施工企画. 2007, No.683, p.37-40.
- 3) 梅田雅夫. 油空圧技術. 1999, Vol.38, No.5, p.24-26.
- 4) 阿部里視. 建設機械. 2011, Vol.47, No.1, p.38-41.
- 5) 特許: 第4589979号.
- 6) 公開特許: 2011-84094.