

重機におけるエンジン回転数と燃料消費量の相関関係について

CO₂削減及び現場施工性の実現に向けて

西松建設株式会社

○ 吉田 千智
井上 洸也
齋藤 貴之

1. はじめに

近年の世界情勢として、気候変動問題への取り組みが加速している。特に地球温暖化を起因とする気候変動（気温上昇や集中豪雨の増加、台風の大型化・強力化による災害発生）は我々の生活に大きな影響を及ぼす。地球温暖化の要因は温室効果ガスの濃度が上昇したことが大きく、その中で7割以上占めているのが二酸化炭素（CO₂）である。¹⁾

これらの現状から、わが国は2050年までにカーボンニュートラルの実現を宣言しており、CO₂排出量の大幅削減に取り組んでいる。

建設業で排出される二酸化炭素の約70%が重機・大型車両の燃料である軽油に起因している。²⁾そこでエンジン高回転抑制やアイドリングストップによる省燃費運転に着目し、重機のエンジン回転数削減と燃料消費量削減効果について検証実験を行った。加えて、燃料消費量に着目し燃料消費量とエンジン回転数を回帰し、燃料消費率・稼働時間などから導出する推定燃料消費量及び実燃料消費量との比較検証を行った。

本論文ではエンジン回転数と燃料消費量の相関関係についてエンジン回転数削減における省燃費運転の効果及びエンジン回転数が燃料消費量に与える影響について検証結果を報告する。

2. 検証実験測定方法

2.1 エンジン回転数計測システム

本検証実験にて使用したエンジン回転数計測システムは弊社で開発を行った『N-ECOMS(ネコムズ)』はNishimatsu - ECo Optimize Monitoring System（重機エコ最適化モニタリングシステム）の略で、エンジン回転数や位置情報、稼働時間から建設機械をモニタリングするシステムである。本実験では、エンジン回転数のみをモニタリングするものとした。

システムの全体構成は図-1に示す。



図-1 『N-ECOMS(ネコムズ)』システム構成

(1)エンジン回転数測定

エンジン回転数は各重機のエンジンと連動した回転部（フライホイールやオルタネータ）に反射シールをセットし、光ファイバーセンサにて照射し反射光を計測することでエンジン回転数を取得する。

取得したデータは無線通信 Wi-Fi または LTE 通信を利用し、表形式でデータを管理するリレーショナルデータベース MySQL に集約される。MySQL はクラウド環境下にあるため、スケーラビリティが高く1秒に1回送信されるデータを格納することが可能となる。

(2)燃料消費量測定

本検証実験にて実際に使用された燃料消費量の計測については満タン法を用いた。満タン法とは、重機へ燃料を満タンにしてから再度燃料を満タンにしたときの給油量を使用した燃料消費量を計算する手法である。

3. エンジン回転数削減における省燃費運転の効果

3.1 検証実験概要

本検証実験では、エンジン回転数削減における燃料消費量と作業効率の関係に着目した。0.8m³ 級

バックホウによる残土搬出ダンプトラックへの積込作業を対象とした。バックホウに前述したエンジン回転数計測システムを取付け、エンジン回転数を監視する。燃料消費量が給油量にて決定するため、作業時間は満タンから再度満タンまでにおける重機稼働時間とした。

作業エンジン回転数[rpm]を 10%下げたときの、エンジン回転数と燃料消費量の相関としてエンジン回転数[rpm]と燃費[L/h]、その際の作業効率として回転数[rpm]と作業量[m³/h]について調査した。

以下の回転数を 3 パターンに分けて実験を行った。最大回転数を基準とし、回転数 90%の定義については、無回転状態 0[rpm]とした時とアイドリング時の回転数 1050[rpm]を最低回転数とした時の 2 パターンの実験を行った。

- ①エンジン回転数 100% 1750[rpm]
- ②エンジン回転数 90% 1570[rpm]
(最低回転数を 0[rpm], 最大回転数 1750[rpm]とした時の 90%)
- ③エンジン回転数 90% 1670[rpm]
(最低回転数を 1050[rpm], 最大回転数 1750[rpm]とした時の 90%)

また、1 台あたりの 10t 積ダンプトラック作業量を計測した。作業に要する時間、0.8 m³ 級バックホウの積込回数をそれぞれ計測した。このとき、作業量[m³/h]への換算は、積載土砂の比重を 2.6 及びダンプトラックの積載重量を 10t として 1 回あたりの作業量を 3.8[m³]とした。

3.2 検証実験結果

3 パターンの回転数から得られた燃料消費量について表-1 に示す。

表-1 エンジン回転数ごとの燃料消費量

作業日	回転数 [rpm]	給油量[L] ※タガの給油	稼働時間[h]	燃費 [L/h]	平均燃費 [L/h]
Day1	1750	129	7.3	17.8	17.6
Day2	(0~1750rpmの100%)	118	6.7	17.5	
Day3	1570	73	6.4	11.5	10.8
Day4	(0~1750rpmの90%)	71	7.0	10.1	
Day5	1670 (1050~1750rpmの90%)	80	5.8	13.9	13.8
Day6		94	6.8	13.8	
Day7		88	6.4	13.8	

表-2 ではエンジン回転数が最大であるパターン①作業時から各パターンの燃料消費量削減率を示す。エンジン回転数をパターン①作業時からパターン③作業時にエンジン回転数を低下させたとき 21.8%(3.8[L/h])燃費が向上した。また、パターン①作業時からパターン②作業時にエンジン回転数を低下させたとき、38.7%(3.0[L/h]) 燃費が向上した。

およそ 100[rpm]下げると 3[L/h]程度の燃料消費量削減効果があることを確認した。

表-2 エンジン回転数ごとの燃料消費量削減率

作業日	回転数 [rpm]	エンジン回転数 削減率[%]	燃費 [L/h]	燃料消費量 削減率[%]	燃料消費量 平均削減率 [%]
Day1	1750	0	17.8	0.0	0.0
Day2	(0~1750rpmの100%)	0	17.5	0.0	
Day3	1570	10	11.5	34.9	38.7
Day4	(0~1750rpmの90%)	10	10.1	42.5	
Day5	1670 (1050~1750rpmの90%)	5	13.9	21.5	21.8
Day6		5	13.8	22.0	
Day7		5	13.8	21.8	

図-2 では 1 台あたりの 10t 積ダンプトラック作業量に要する作業時間[s]を 1 台あたりの積込土量 3.8[m³]にて除算したものを各エンジン回転数で比較したグラフを示す。エンジン回転数をパターン①作業時からパターン③作業時にエンジン回転数を低下させたとき平均 11.0%(12.5[m³/L])燃料消費量[L]あたりの作業量[m³/L]が低下した。パターン①作業時からパターン②作業時にエンジン回転数を低下させたとき、平均 18.4%(18.4[m³/L])燃料消費量[L]あたりの作業量[m³/L]が低下した。平均値から比較するとエンジン回転数を低下させることで作業効率は低下しているが、図-2 の全体ばらつきに着目すると特にパターン②作業時及びパターン③作業時ではデータばらつきが少ないように見受けられる。

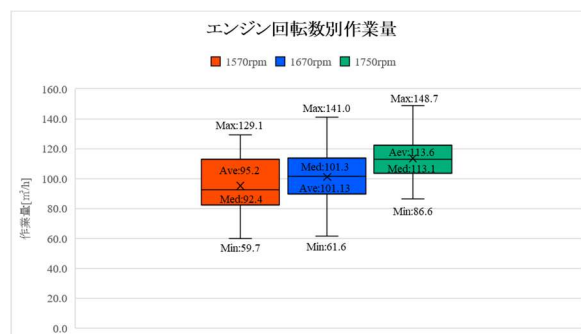


図-2 エンジン回転数別作業量

また、図-2 に燃料消費量を加えたグラフを図-3 に示す。

図-3 らはエンジン回転数が低下すると、燃費が向上していることが見て取れる。あわせて、積込回数が少ないほど作業効率がよい結果となっている。これらは、1 台あたりの積込時間にかきあげ作業も含まれていることが考えられる。先ほどの考察から、パターン②作業時とパターン③作業時には作業量[m³/h]のばらつきが同等であり、かつ図 4 からパターン②作業時はパターン③作業時より明確に燃費がよい。そのため、本検証実験で用いた 0.8 m³ 級バックホウでは最も燃費が良く、作業効率低下をより最小限に留められるエンジン回転数はパターン②作業時である 1570[rpm]を推奨され则认为る。

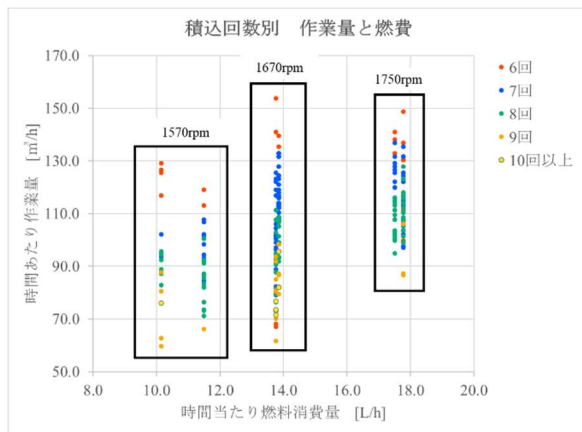


図-3 積込回数別 作業量と燃費

4. エンジン回転数が燃料消費量に与える影響について比較検証

4.1 比較検証実験概要

本検証実験では、エンジン回転数が燃料消費量に与える影響について検証するため、回帰分析を行った。また、比較対象として実際の燃料消費量及び機械の燃料消費率や稼働時間などから導出される燃料消費量を用いた。

対象は土砂積み込み用の1.4 m³級バックホウ、土砂運搬用の20t重ダンプトラック、搬入骨材仕分け用の2.0 m³級ホイールローダの3種類の重機とした。各重機にエンジン回転数計測システムの取付け、エンジン回転数の監視を行う。

4.2 回帰分析

回帰分析は、ある結果に関連する要因がどのくらい影響を与えているか、その因果関係を関数の形で明らかにする統計手法である。本実験では目的変数を燃料消費量、説明変数をエンジン回転数とし回帰分析を行った。式(1)に示すように y を目的変数、 x を説明変数とした一次関数を回帰することで係数 α 及び切片 β を探索する。

$$y = \alpha x + \beta \cdots \cdots (1)$$

式(1)を元に F を燃料消費量[L/日]、 E をエンジン回転数[rpm]として回帰し係数 α 、切片 β を求める。このときエンジン回転数を毎秒毎に計測しているため、 E (エンジン回転数)を作業時間において積分を行う。エンジン回転数が0[rpm]のとき燃料消費量は0[L]であることから切片 β は0である。よって、回帰式は式(2)となる。

$$F = \alpha \int E dt_0 \cdots \cdots (2)$$

式(2)から導出された係数 α 、切片 β (=0)、説明変数 E (エンジン回転数の積分)を式(1)に代入し、式(3)とし燃料消費量 F_r を求める。

$$F_r = \alpha \int E dt_0 \cdots \cdots (3)$$

燃料消費量 F_r を統計的に求めるために、目的変数(燃料消費量)と説明変数(エンジン回転数)の無次元化処理を行った。標準偏差等の各値において除算することで無次元化を行った。

4.3 推定燃料消費量

エンジンにおける燃料消費率 S [g/kWh]及び定格出力 P [kW]、動力負荷率 L 、重機稼働時間 T [h]、軽油比重 C [g/cc]から、燃料消費量 F_e を推定する。

$$F_e = (S \times P \times L \times T) / C \times 1000 \cdots \cdots (4)$$

消費率 S [g/kWh]: メーカー公称値, 定格出力燃料力 P [kW]:
 メーカー公称値, 動力負荷率 L : 機種や作業条件を考慮
 した1時間当たりの平均負荷率, 重機稼働時間 T [h], 軽
 油比重 C [g/cc]: 0.86[g/cc]

4.4 検証結果

実燃料消費量 F 、回帰分析により求めた燃料消費量 F_r 、推定燃料消費量 F_e を1.4 m³級バックホウ、2.0 m³級ホイールローダ、40t重ダンプトラックにおいて比較した。

図-4、図-5、図-6に各重機の燃料消費量比較を図に示す。特に図-5、図-6では実際の燃料消費量 F (赤線)と F_r (緑線)の波形に着目すると類似性が認められるため、燃料消費量とエンジン回転数は相互関係にあり比例関係に近いことが示される。また、図-4においては波形から推定燃料消費量 F_e と回帰燃料消費量 F_r の比例関係を確認した。これは、アクセルワークのないバックホウにおいて他の重機と異なり回転数に変動が少ないことが考えられる。そのため、式(3)及び式(4)より F_r 及び F_e どちらにおいても稼働時間[h]が影響していると考えられる。また、実際の燃料消費量との比例関係が他の重機2つと比べ弱いことが挙げられる。他重機と比べバックホウには前述の通りアクセルワークがなく、エンジンを動力に作用するのは油圧システムのみである。そのため、油圧システムへのエンジン回転数と燃料消費量関係には他の要素への検討が必要と考えられる。

また、各重機における実燃料消費量 F との相対誤差は、バックホウでは F と F_r の相対誤差29.11%、 F と F_e の相対誤差35.25%、ホイールローダでは F と F_r の相対誤差13.35%、 F と F_e の相対誤差370.36%、重ダンプでは F と F_r の相対誤差21.54%、 F と F_e の相対誤差55.95%であった。いずれにおいても、 F と F_r の相対誤差は20%前後(±10%以内)であり、 F_e よりも相対誤差が低く正確な値を示している。データ数を

増やし、回帰を繰り返して行うことでより正確な値を導出すると考えられる。

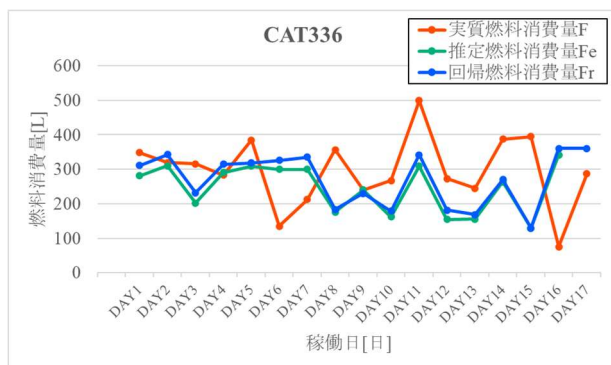


図-4 1.4 m³級バックホウ (CAT336) 燃料消費量比較

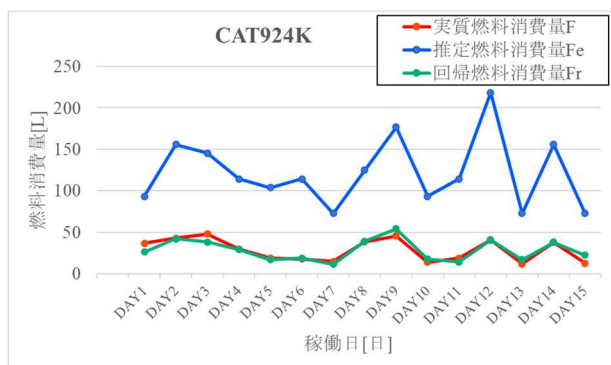


図-5 2.0 m³級ホイールローダ (CAT924k) 燃料消費量比較

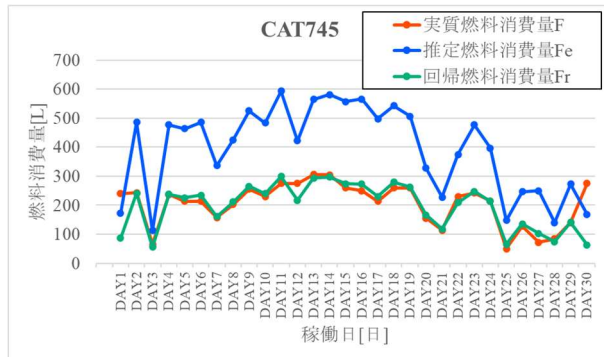


図-6 40t 重ダンプ (CAT745) 燃料消費量比較

5. 課題及び展望

本実験ではエンジン回転数に着目し、燃料消費量について検証を行った。今回の結果を受けて、重機の大きさや機種によらずエンジン回転数が燃料消費量に密接に関係することが認められた。また、比例関係も見取れることからメーカーや重機によらず、容易にかつ正確に燃料消費量を推定することが可能である。また、CO₂削減に向け作業効率が課題となるが、正確な燃料消費量を容易かつ正確に算出することが実現すれば、「施工性」や「コスト」面を考慮したシミュレーションが容易に行えるようになり CO₂削減に向けた取り組みが活発化することと思う。

作業効率との相関関係では0.8 m³級バックホウ、燃料消費量との相関関係では1.4 m³級バックホウ、2.0 m³級ホイールローダ、40t 積重ダンプトラックについて検証したが、まずはより多くの機種やメーカーについて検証し容易に扱えるデータを示したいと考える。

建設業界における CO₂削減には電動機械やハイブリッド機械の導入等、機械側で対策されることが多いが、本検証においてエンジン回転数の制御（＝省燃費運転）が、効果的であることが検証されたと考える。ユーザー（施工）側ができる対策である省燃費運転だが、今後は作業性と両立されるような手法が確立できる方法を模索していく必要がある。

参考文献

- 1) IPCC: Sixth Assessment Report/WG3,SPM B.1.2
- 2) 日本建設業連合会:「わたしたちにできる地球温暖化防止」, pp.10, 2019 年