

ダンプトラックの運搬に関わる CO₂ について

CO₂ emission from dump truck transport

(株)砂子組 ○正 員 戸井田真之介 (Shinnosuke Toida)
 (株)砂子組 正 員 幌村 瑛奈 (Ena Horomura)
 (株)砂子組 正 員 佐藤 欣治 (Kinji Sato)
 (株)砂子組 非会員 男澤 真樹 (Masaki Ozawa)
 (株)砂子組 非会員 湧瀬 かおり (Kaori Fuchise)

1. はじめに

R3 年度に筆者らは、代表的な建設重機であるバックホーの CO₂ 排出量測定を行った。目的は、建設業界の一員としての弊社が、カーボンニュートラルを志向するための基礎調査である。

測定結果によれば、一台のバックホーの稼働時間を 8 時間/日とした場合、CO₂ 排出量は 104.6 kg/日となり、これを一般的に言われている 1 ha 当たりの森林が吸収できる年間炭素吸収量 2.4 t と比較すると、ニュートラルになるためには 15.8 ha の森林の造成が必要という結果になった。この結果は地方中小の土木施工会社である我々には、資源・設備等の面において実現困難と思われ、代替案として間接的にカーボンニュートラルに資する方策として、炭素循環型システムを志向するロードマップを提示した。

過年度の調査では最大限の見積として、一台のバックホーが 1 日 8 時間フル稼働すると仮定したが、ブルやバックホーがフル稼働しない事も少なくない。一方、客土等を運搬するダンプトラックは、ほぼ 1 日 8 時間稼働していると考えられる。さらにダンプでは、積載量の調整等で走行回数や必要台数を変化させる事が可能であり、カーボンニュートラルを目指した運用の自由度が高いと思われたので、CO₂ 排出量に注目したダンプ走行の調査を行った。

2. CO₂ 測定の概要

CO₂ 測定の対象は、土木建設現場において一般的に多用される、10 t ダンプ（排気量 10.83 l）を対象とした。図-1 に測定機材を、図-2 に測定状況を示す。

図-1 の CO₂ プロブには、VAISALA 社製 GPM251、測定範囲：0～20%、動作範囲 0～60℃ を用い、風速プロブは、KANOMAX 社製 0693-00、測定範囲：0～50 m/s である。

図-2 のダンプの排気管から直接吐出される排気は 100℃ 以上あり、CO₂ プロブの動作範囲は 0～60℃ であったため、10 m 程度のアルミダクトをアルミテープで排気管に接続し、導流して冷却水槽で冷やし、動作温度範囲内で CO₂ 濃度を測定した。測定は加減速の影響も考慮するため、エンジン回転数を一定とした静的測定と、回転数を短時間に变化させた動的測定を行った。

測定項目は、エンジン回転数(rpm)、排気風速(m/s)、CO₂ 濃度(%)。ダクト径は 25 cm である。

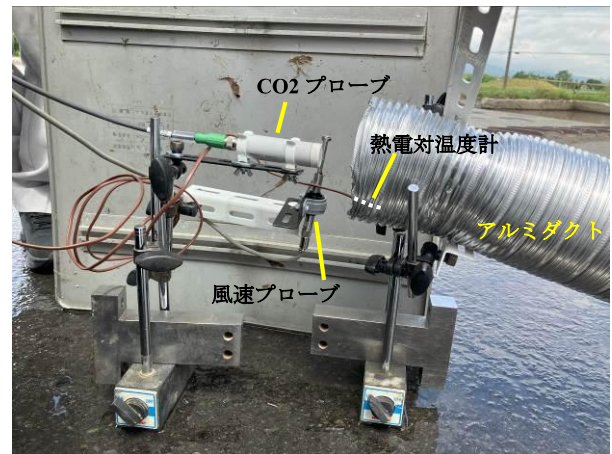


図-1 測定機材

3. CO₂ 流量

測定結果を図-3, 4 に示す。図-3, 4 では、排気速度（風速）はエンジン回転数にほぼ比例している一方、CO₂ 濃度は排気速度に関わらず 2%付近にあり、ほぼ一定に推移する。排気速度とエンジン回転数との相関をとると、図-5, 6 が得られる。静的、動的結果とも相関係数は 0.99～1.00、比例係数は 0.045 m/s/rpm 程度と考えられる。加減速の影響は顕著にはみられない。

回転数－排気速度の比例係数にダクト面積 S をかければ、回転数－排気流量の比例係数が得られる。 $S = \pi \times 0.125^2 = 0.0491 \text{ m}^2$ （ダクト径 25 cm）で、回転数－排気流量の比例係数は静的測定では $0.0582 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}/\text{rpm}$ 、動的測定では $0.0523 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}/\text{rpm}$ となる。

いっぽう理論的な排気流量は、排気量 10.83 l = 0.01083 m^3 のダンプである事より、 $1/2 \times 0.01083 \text{ m}^3/\text{rpm} = 1/2 \times 0.01083 / 60 \text{ m}^3/\text{s}/\text{rpm} = 0.0903 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}/\text{rpm}$ となる。係数 1/2 は、2 サイクルで排気するためである。

実測値と理論値との比を取ると、静的測定では理論値の 64%、動的測定では 58%の排気流量となる。この原因としては、排気ガスがアルミダクトに導流される過程でダクトの壁面抵抗を被り、減速・圧縮された事が考えられる。もしアルミダクト内に一次元流れを仮定でき、かつエンジン回転数に関わらず CO₂ 濃度が一定だとすれば、減速・圧縮の度合いに比例して CO₂ 成分は濃縮され、CO₂ 流量もエンジン回転数に比例するはずである。以上を勘案し、(式.1)で CO₂ 排出流量を計算した。

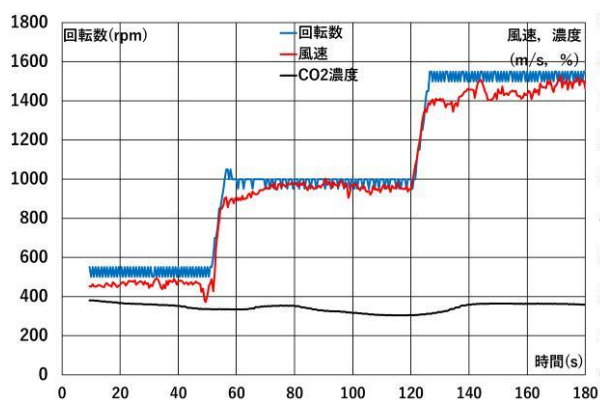
図-2 CO₂ 測定状況

図-3 静的測定結果

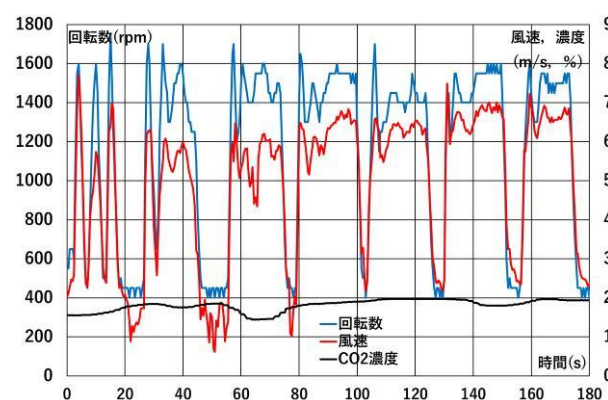


図-4 動的測定結果

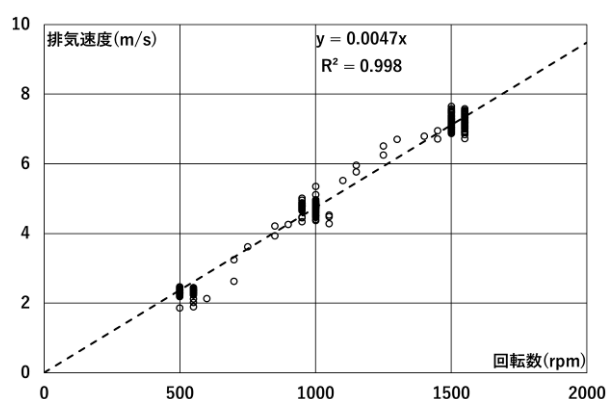


図-5 エンジン回転数と排気速度（静的）

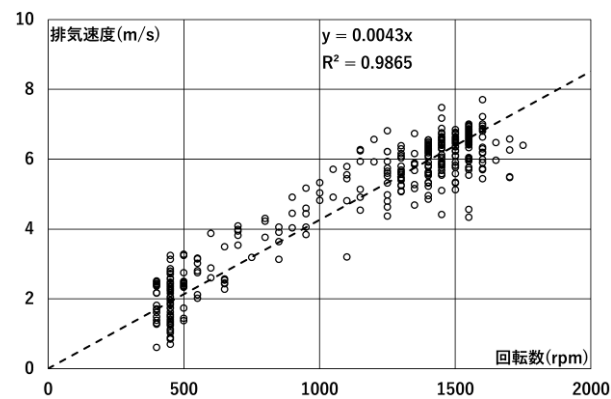
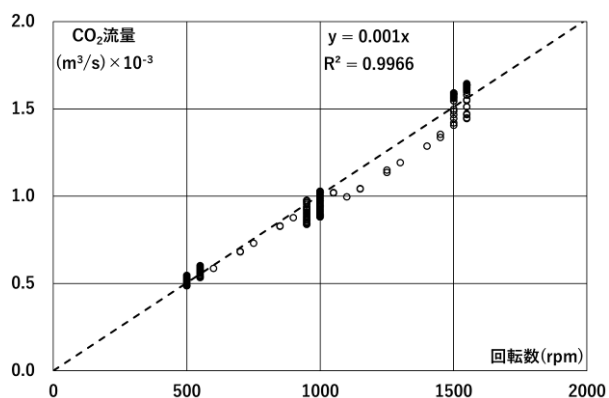
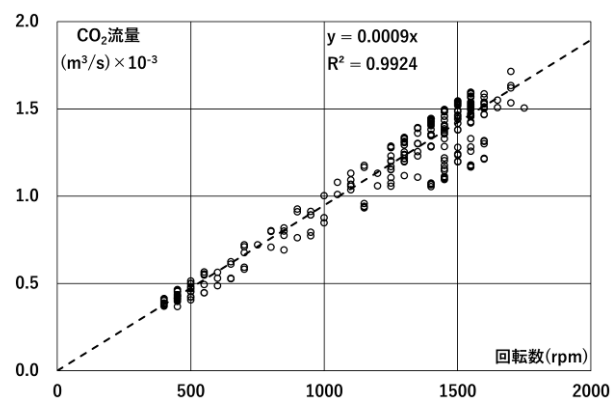


図-6 エンジン回転数と排気速度（動的）

図-7 エンジン回転数と CO₂ 流量（静的）図-8 エンジン回転数と CO₂ 流量（動的）

$$c = \pi \left(\frac{\phi}{2} \right)^2 \times v \times d \quad (\text{式.1})$$

ここに、

c : CO₂ 排出流量(m³/s)
 ϕ : ダクト径(m), $\phi = 0.25$ m
 v : 排気速度(m/s)
 d : CO₂ 濃度(%)/100

回転数—CO₂ 流量の相関である図-7, 8 では、静的、動的結果とも相関係数は 0.99～1.00, 比例係数は $0.001 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}/\text{rpm}$ と考えられる。データのバラツキは減少しており、先の仮定は妥当なものと判断した。

留意点としては、上記測定がいわゆるニュートラ状態、無負荷状態で行われた点である。

単純に考えれば、CO₂ 流量がエンジン回転数だけに比例するのが妥当だったとしても、実走行では積載重量（負荷）に比例する形で比例係数が増大する事も十分に考えられる。しかしながら実走行時の CO₂ 測定は困難だったので、以下では CO₂ 流量がエンジン回転数だけに比例すると仮定する。

4. 単位走行距離当たりの CO₂ 排出量

CO₂ 排出量を $C(\text{m}^3)$ で表す。時間を $t(\text{s})$ とし単位時間当たりの CO₂ 排出量を dC/dt とすれば、

$$\frac{dC}{dt} = \frac{dC}{dx} \frac{dx}{dt} \quad (\text{式.2})$$

が成り立つのは明らかである。ここに $x(\text{m})$ は走行距離。 $dC/dt \text{ (m}^3/\text{s)}$ は CO₂ 流量であるから、前述の結果より、

$$\frac{dC}{dt} = a\omega \quad (\text{式.3})$$

ここに、

a : 比例係数、前述の測定では $0.001 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}/\text{rpm}$

ω : エンジン回転数(rpm)

と書ける。ここでは a を排気係数と呼ぶ。

走行速度 $dx/dt \text{ (m/s)}$ については、

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{3.6} k\omega \quad (\text{式.4})$$

を想定できる。ここに $k(\text{km/h}/\text{rpm})$ はエンジン回転数と速度(km/h)の比例係数で、ここではギア比と呼ぶ。なお、 $1/3.6$ は km/h を m/s に合わせるための倍率である。

(式.3)と(式.4)を(式.1)に代入すれば、

$$\frac{dC}{dx} = 3.6 \frac{a}{k} \quad (\text{式.5})$$

が得られる。

すなわち、単位走行距離当たりの CO₂ 排出量は、排気係数 a とギア比 k だけで決まる。この内、排気係数 a はエンジン特性であるから、實際上 CO₂ 排出量は走行中のギア比 k の選択によって決まる事になる。

よって距離 $L(\text{km})$ 走行した時の CO₂ 排出量は、

$$C = 3600 a \int_0^L \frac{1}{k(x)} dx \quad (\text{式.6})$$

となる。明らかにギア比が高いほど（トップギアよりであるほど）、CO₂ 排出量は少ない。

5. 現場におけるダンプ走行の実態調査

河川盛土現場において、客土を運搬するダンプ 3 台に

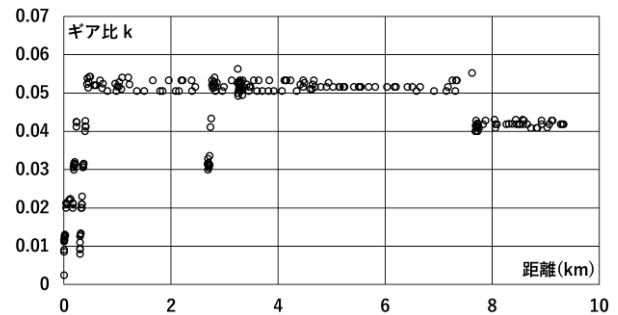


図-9 速度とエンジン回転数の比

対して、その走行実態を調査した。使用したデータは、車載のデジタルタコメーターによるものである。同機構では（時間、速度、エンジン回転数）が記録される。

3 台のダンプのドライバーはそれぞれ別であり、負荷重量平均 13.1 t, 17.0 t, 20.0 t で調査した。図-10 に土取場から盛土箇所までの運行経路を示す。

図-9 に、同一時刻における速度と回転数のギア比の例を示しているが、速度差分の時系列も作成し、ニュートラルになっている可能性のある停車、定速時、減速中の時刻は除いてある。横軸は、時間と速度から積算した走行距離である。同図では明らかに比がいくつかの集団にわかれ、タコメーターの分解能 50 rpm を考慮した閾値を設けて整理すると、図-11～13 となり、縦軸の数字は 1 速, 2 速, 3 速, …を表す。

図-11～13 を比較すると、ドライバーによって多少の癖は出ているものの、図-10 の運行経路に沿った、ほぼ道なりのギア選択となっており、負荷重量の大きい時にローギアよりになるといった傾向も特に認められない。また当然の事ではあるが、交差点やカーブ前後を除いて、ほとんどトップギア付近で走行している。

これらの事実は、実際の走行実態は、積載量や工事に関するオペレーションによってではなく、道路線形等の道路事情や交通状況によって強く規制されている事を、示唆する。

6. 積載量の最適化

ここでは CO₂ 排出流量は負荷重量に比例するものとする。また 5. で述べたように、同一運行経路において、ダンプ走行が道路事情のみに規制され、全てのダンプの走行が同じと仮定する。

ダンプ車重を $M(\text{t})$, $M(\text{t})$ に対する CO₂ 排出量を $\alpha(\text{m}^3)$, 1 日の目標客土量を $V(\text{m}^3)$, 客土の単位体積重量を $w_0(\text{t}/\text{m}^3)$, 積載重量を $w(\text{t})$ で表す。

排出流量は負荷重量に比例する仮定から、1 台のダンプが経路走行中に排出する CO₂ 量 $c_0(\text{m}^3)$ は、

$$c_0 = \alpha \frac{M + w}{M} \quad (\text{式.7})$$

である。1 日の目標客土量からは、1 日の延べ台数 n が、

$$n = V \frac{w_0}{w} \quad (\text{式.8})$$

で計算できる。従って 1 日のダンプ運行で排出される



図-10 運行経路

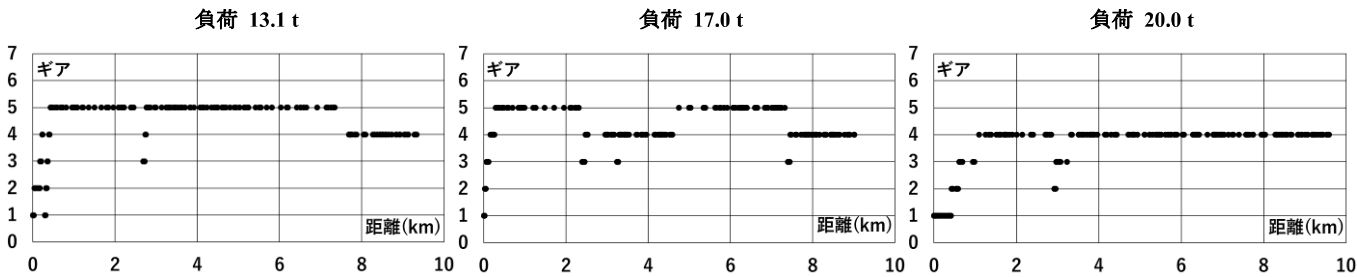


図-11 車番 [4] 走行中のギア

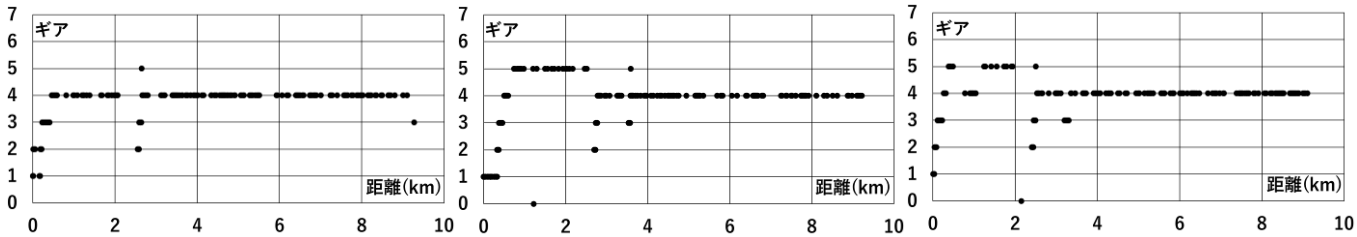


図-12 車番 [8] 走行中のギア

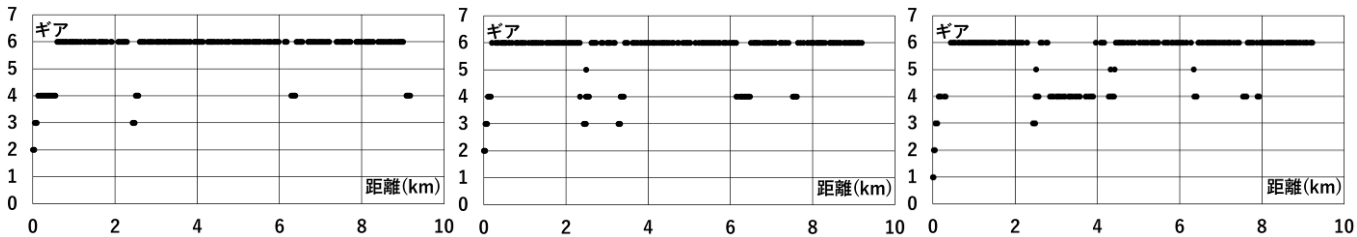


図-13 車番 [12] 走行中のギア

CO₂ 総排出量 $C(m^3)$ は $c_0 \times n$ なので、

$$C = \alpha V w_0 \left(\frac{1}{M} + \frac{1}{w} \right)$$

(式.9)

が得られる。上式より積載量 $w(t)$ が大きいほど CO₂ 排出量は少ない。

7. まとめ

非常に単純化された仮定に基づくものではあるが、以下の結論となった。

- 1) 運行経路は、出来るだけ走りやすい経路を選択すべきである。

- 2) 積載量は、法規が許容する満載量が望ましい。

1)の経路選択に当たっては、デジタルタコメーターによるデータと(式.6)によって、具体的に数値的に検証できるものと考えられる。

[参考文献]

- 1) 重機の CO₂ 排出量の測定と今後の展開, 岩田他, 土木学会北海道支部論文報告集第 78 号, F-02, 2021 年.