

28. 油圧ショベルが各種の動作で排出する 温室効果ガスおよび窒素酸化物の測定

土木研究所 ○吉永 弘志
国土交通省 野村 正之

1. はじめに

建設機械の排出ガスは、特定特殊自動車排出ガスの規制等に関する法律（通称「オフロード法」）の定めにより、原動機単体での測定値により規制されている。規制値は図-1 の例に示すように経年で強化されており、欧米でも同レベルで推移している。さらに近年は新たな変化の兆候がみうけられる。米国 EPA (Environmental Protection Agency) では自動車の路上検査を実施しており、欧州連合 (EU) は、2017 年 9 月以降、実際の路上走行時の排ガス試験 (RDE: real driving emissions test) を順次義務付けることで合意した¹⁾。また、米国では、温室効果ガスの二酸化炭素 CO_2 、亜酸化窒素 N_2O (温室効果は CO_2 の 298 倍²⁾)、およびメタン CH_4 (同 25 倍²⁾) の規制値 (standard) を定めており、重量車のエンジン (HEAVY-DUTY HIGHWAY ENGINES) の CO_2 、 N_2O 、および CH_4 の規制値は 627、0.10、および 0.10 g/hp-hr としている³⁾。自動車の規制は後に建設機械にも波及する見込みが高い。EPA では、確立した見解等ではないと断りつつも、実稼働している建設機械の排出ガスを測定した値を公表している⁴⁾。海外における自動車の規制の動向をふまえると、建設機械の排出ガスについては、(a) 実稼働での測定値、および (b) N_2O と CH_4 の測定値にかかる知見が今後必要となる可能性がきわめて高い。知見不

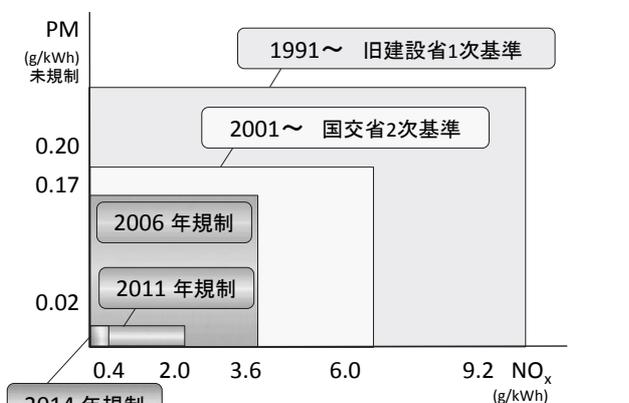


図-1 排ガス規制値の推移例 (定格出力130kW以上560kW未満).

足等により、環境対応の遅れのみならず、拙速な対応 (必要性の低い測定を受け入れや負担の大きい測定方法、評価方法の採択等も含む) になることを防ぐためには、測定にかかる知見を深めておくことが必要である。

土木研究所においては、構内の試験場において搭載式の測定器を建設機械に設置して排出ガスの測定を行ってきた^{5),6),7),8)}。本稿においては測定の概要について紹介するとともに2015年度に測定したデータ⁸⁾を以下の観点で分析した結果等について述べる。

オフロードの法の規制値は仕事量 $W(\text{kWh})$ あたりの排出ガス量 $M_G(\text{g})$ となっているため、排出ガスの濃度 C_G のみならず、エンジンの回転数 R_E 、トルク T_E 、および排出ガスの流量 V_G の測定が必要になる。 R_E の測定は比較的容易であるが、屋外の実機で T_E を直接測定する方法はない。杉谷ら^{5),6),7)} は燃料消費量の測定値および、熱効率の仮定値に基づいて仕事量 (= R_E と T_E の積に相当) を算出し、野村⁸⁾ は ECU (Engine Control Unit) が出力する R_E 、および T_E の信号を利用した。これらの測定値は結果的に屋内でのエンジン単体試験での測定値を振り所にするようになる。一方、排出ガスの流量 V_G については測定方法による違い等が生じる課題がある⁹⁾。

本稿においては、各種の排出ガスの量 $M_G(\text{g})$ と CO_2 の量 $M_{\text{kg-CO}_2}(\text{kg})$ の比を排出率 r_{G/CO_2} とした評価により、測定が簡素になり課題が解消される (表-1) ことについて述べる。この方法は、山本らが推奨する方法^{9),10)} と同一である。

第2章では測定の概要を示す。第3章では、ECU の出力に基づく $W_1 = 2\pi R_E T_E$ と FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy フーリエ変換赤外分光法) に基づく CO_2 の測定値の相関が良いことを示す。次に M_{CO_2}/W_1 が建設機械の待機、走行、ならし、および掘削の異なる作業内容でも一定値で安定していることを示す。このことは M_G/W での評価と $r_{G/\text{CO}_2} = M_G/M_{\text{kg-CO}_2}$ での評価が等価であることを意味する。最後に現行の屋内のエンジン単体試験での規制値および米国での温室効果ガスの規制値を r_{G/CO_2} に換算し、2015年度の測定値と比較した

例について述べる。

表-1 排出ガス評価量の現場測定.

評価量	オフロード法の評価量(屋内での試験法)	本稿が提案する評価量
	M_G / W	$r_{G,CO_2} = M_G / M_{kg-CO_2}$
	M_G : 排出ガス量(g)	M_G : 排出ガス量(g)
	W : 仕事量(kWh)	M_{kg-CO_2} : CO ₂ 量(kg)
測定値	排出ガス濃度, 排出ガス流量, エンジン回転数・トルク	排出ガス濃度, エンジン回転数
測定値の信頼性	屋外の測定では低い	左記よりは高い
現場適用性	△	◎ (安価かつ正確)

表-2 測定概要.

測定日時	2015年10月~2016年1月
測定場所	土木研究所構内
建設機械	油圧ショベル 20t クラス.DPF 装着 1台
動作	待機, 走行, ならし, 実掘削, 模擬掘削
測定装置と内容	ECU: エンジン回転数, トルク FTIR: 排出ガス濃度 流量計(ピトー管式): 排出ガス流量
ガスの種類	CO ₂ , CO, CH ₄ , N ₂ O, NO, NO ₂ , NMHC, NH ₃ , H ₂ O 他.

表-3 測定等項目(図-3).

(A)	エンジン回転 R_E (1/s). ECU の出力.
(B)	トルク T_E (%). ECU の出力.
(C)	CO ₂ 濃度 C_{CO_2} (%). FTIR での測定.
(D)	排ガス流量 V_G (L/s). 流量計での測定.
(E)	動力相当値 $W_1 = R_E \times T_E \times 2\pi / 100$. W_1 に $T_E = 100\%$ でのトルク値(Nm)を乗じた値が動力(W)になる.
(F)	CO ₂ 排出量 M_{CO_2-1} (g/s) [算定法-1]. $M_{CO_2-1} = R_E \times 6.69 / 2 \times r_G \times C_{CO_2} / 100 \times 1.83$, $r_G = (-21.5 + 14 + 15) / 14 \times C_{CO_2} / 100 + 1$ 6.69: エンジンの排気量(L).排気は2回転で1回. 1.83: CO ₂ の 20°C での密度(g/L). r_G : 軽油の燃焼による体積の増加率.化学式は $C_{14}H_{30} + 21.5O_2 = 14CO_2 + 15H_2O$ を仮定.
(G)	CO ₂ 排出量 M_{CO_2-2} (g/s) [算定法-2]. $M_{CO_2-2} = V_G \times C_{CO_2} / 100 \times 1.83$



図-2 油圧ショベルに搭載した測定装置.

2. 測定概要

測定の概要を表-2 および図-2 に示す。DPF (Diesel Particulate Filter)を搭載した 20t クラスの油圧ショベルに測定装置を設置し, 待機, 走行, ならし, 実掘削, 模擬掘削の一連の動作を行い排出ガスの濃度および流量を FTIR およびピトー管式の流量計で測定した。同時にエンジンの ECU の出力よりエンジンの回転数とトルクのデータも取得した。オペレータを3人とし, 出力のモードを出力優先と燃費優先の2種類のモードを組み合わせさせて13回測定した。測定方法の詳細については既に報告している⁸⁾。

3. 測定値

本稿においては,全13回の測定(CASE-1~13)のうち,1回分(CASE-1 10月測定)の測定値について整理し,考察した結果について述べる。

3.1 測定値の時間変化

仕事量 W および CO₂ の量 M_{CO_2} に関連する測定値および測定値を加工した値の時間変化を図-3 に示す(測定等の項目は表-3)。(B)の ECU のトルク出力は最大トルクとの比(%)となっているため動力(W)を算出するためには最大トルク値が必要である。最大トルク値は一般には公開されていないため,本稿ではこの数値を使用せずにデータ処理した。(F)の CO₂ 排出量 M_{CO_2-1} はエンジンの回転数と燃焼の化学式から排出ガスの流量を計算し,濃度を乗ずることで排出量を計算した値である。温度による体積と密度の変化は相殺されると考えた。(G)の CO₂ 排出量 M_{CO_2-2} は排出ガスの流量の実測値を使用している。

建設機械ではエンジンの回転数を固定して動作を行うので R_E および V_G の変動が小さいが,他の測定値等がほぼ同様な時間変動する傾向がみうけられる。未整理ではあるが他の CASE も同様な時間変化をしていた。

なお,各測定値には多少の時間差が生じることが考えられるが,異なる時計で時刻を計測したためデータ整理においては時間変動のタイミングが合うように調整した。

3.2 動力と CO₂ の関係

CASE1 の表-3 の(E)動力相当値 W_1 と(F)の CO₂ 排出量 M_{CO_2-1} および(G)の CO₂ 排出量 M_{CO_2-2} の相関を図-4 に示す。データは 0.2 s 単位で取得したが 1.0 s 間で平均している。相関が良いこと,二種類の算定法に大差がないこと等がわかる。平均の時間を長くすれば,相関はさらに良くなった。未整理ではあるが他の CASE も同様な傾向であった。

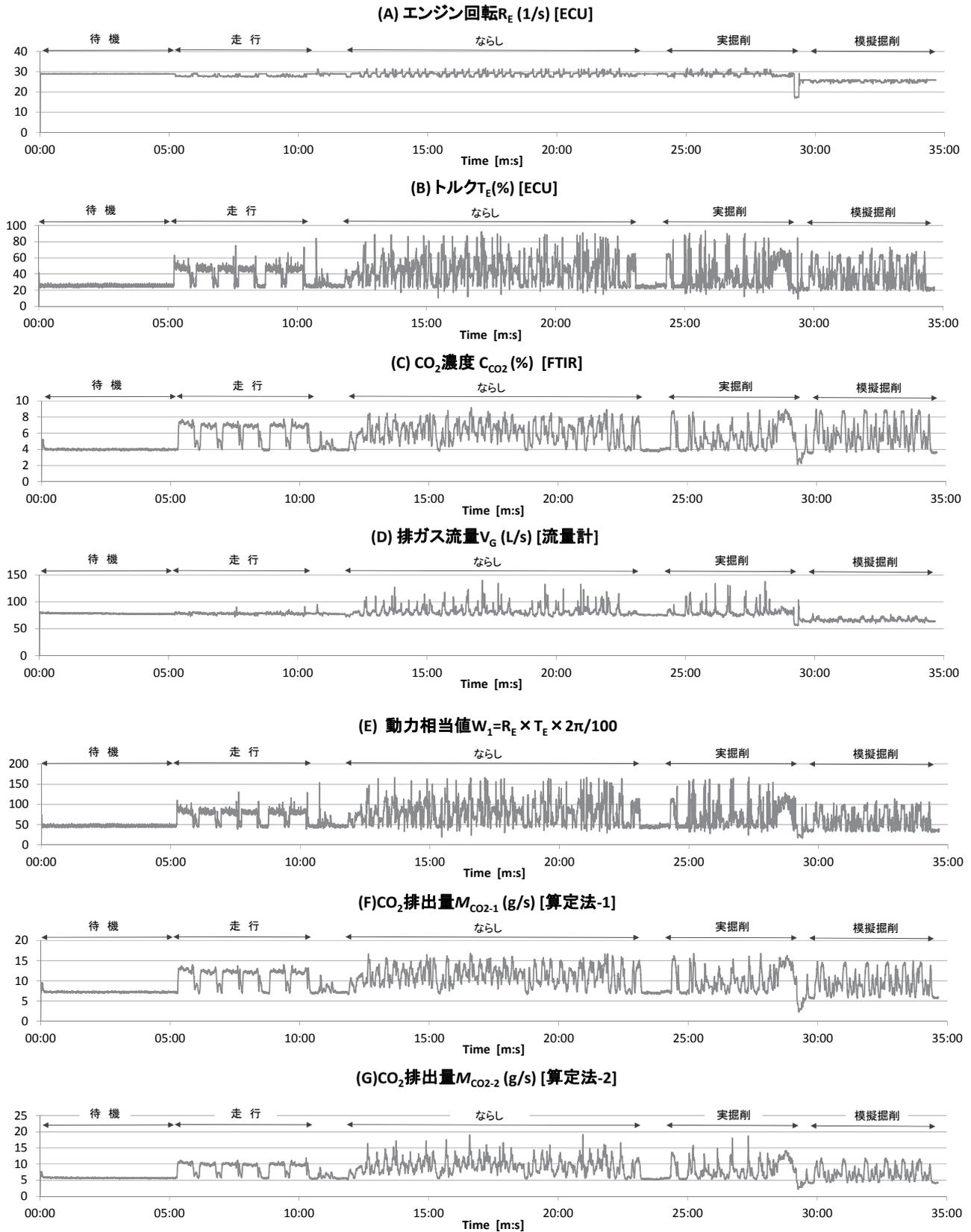


図-3 測定値の時間変化 (CASE-1).

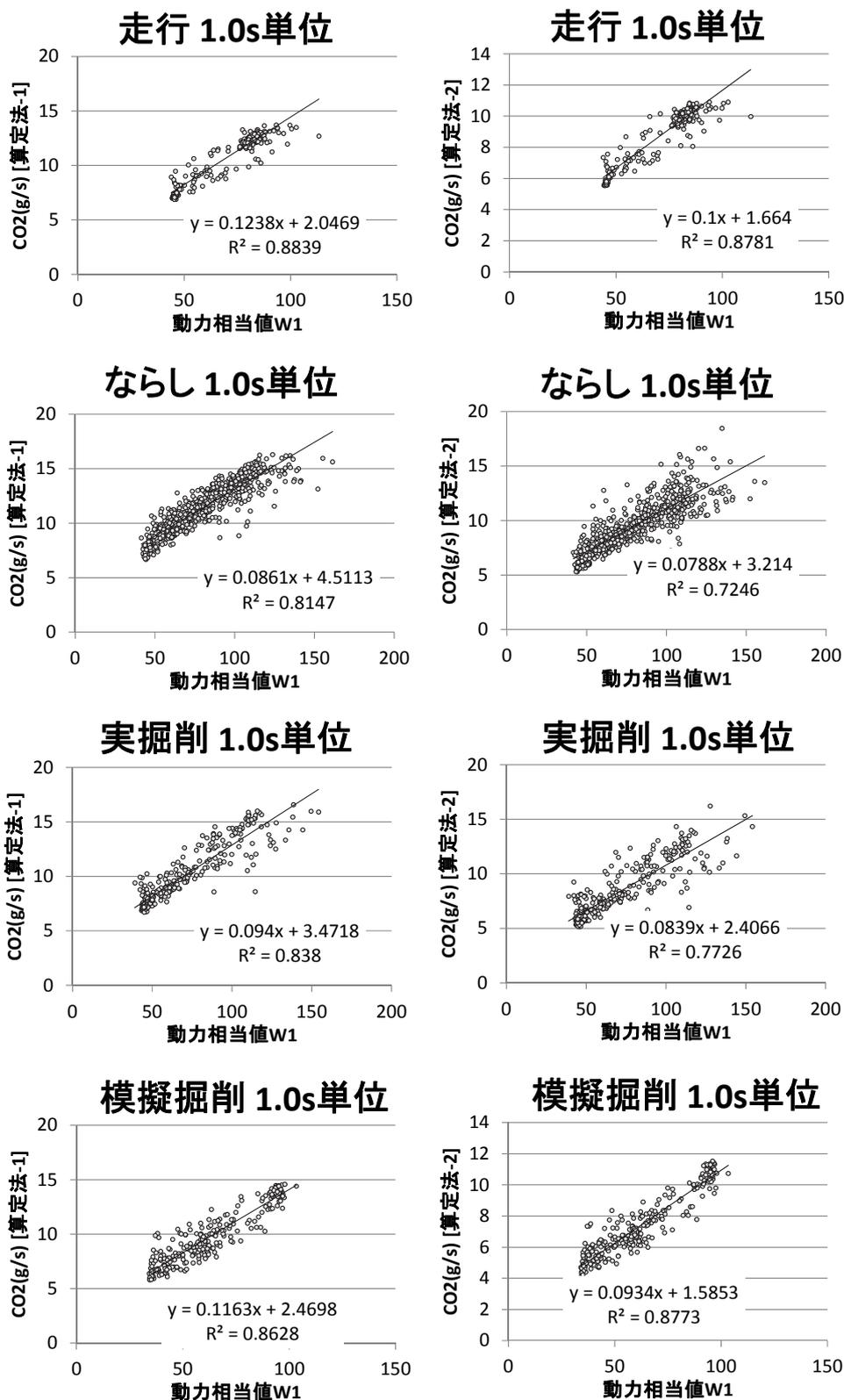


図-4 動力とCO2の相関(CASE-1 1.0 s単位).

次に M_{CO_2}, W_1 , および M_{CO_2}/W_1 を以下の分類で整理した(図-5)。

- (a) 待機, 走行, ならし, 掘削の動作別
- (b) 算定法-1, 算定法-2 の流量の計算方法別

動力相当値 W_1 は走行, ならし, および実掘削で大きくなり, M_{CO_2} は動作別では W_1 と同様の増減をする傾向を把握できる。また算定法-2 では算定法-1 より M_{CO_2} が小さいので流量の測定値が小さくな

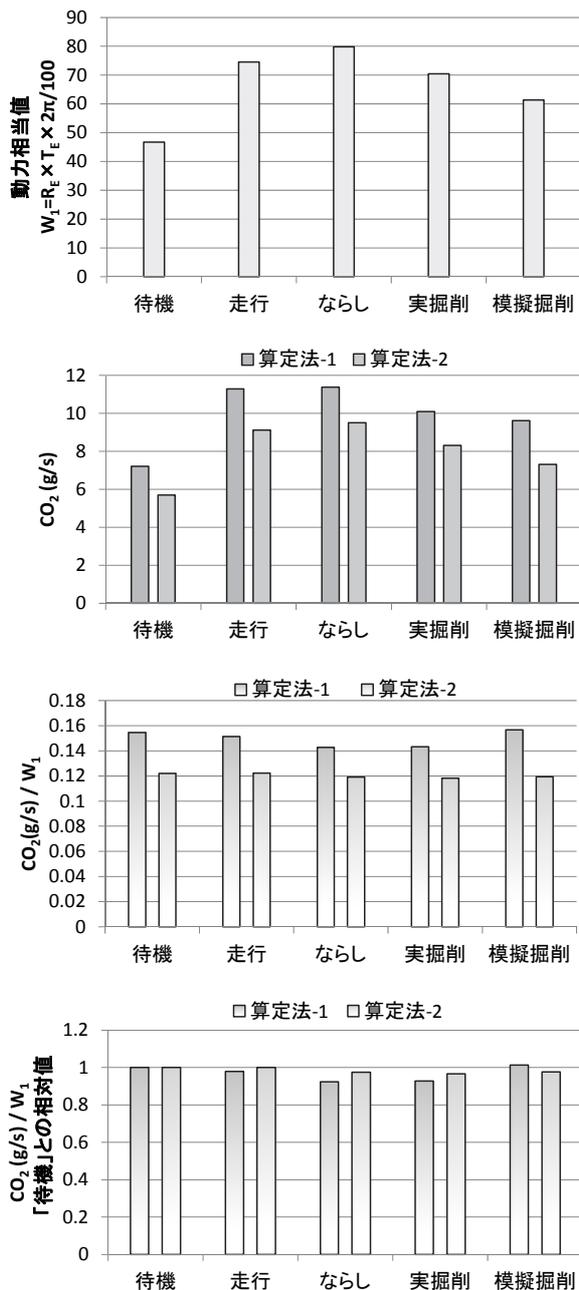


図-5 運転モード、動作、および算定方法別の動力とCO2.

表-4 排出ガス規制値の排出率 $r_{G/CO2}$ への換算例.

熱効率 (%)	規制値(g/kWh)			米国規制 g/kwh換算	$r_{G/CO2}$			
	NO _x	NMHC	CO	N ₂ O,CH ₄	NO _x	NMHC	CO	N ₂ O,CH ₄
20	3.3	0.19	5	0.13	2.67	0.15	4.04	0.11
30	3.3	0.19	5	0.13	4.00	0.23	6.07	0.16
40	3.3	0.19	5	0.13	5.34	0.31	8.09	0.22

る傾向を把握できる。どちらの方法が真値に近いかは不明であるが、ピトー管式の排出ガス流量計の測定値が小さくなる傾向は山本らの報告⁹⁾と一致する。

このように動作の内容、機械のモード、測定方法により W_1 , M_{CO2} , および M_{CO2}/W_1 が異なるが

M_{CO2}/W_1 について「待機」の動作と比較した値 (図-5の最下段) は安定した一定値になっている。このことは M_G/W での評価と M_G/M_{CO2} での評価が等価であることを意味する。したがって、 $r_{G/CO2}=M_G/M_{kg-CO2}$ で各種の排出ガスを評価できる。 $r_{G/CO2}=M_G/M_{kg-CO2}$ で評価する便益は以下である。

- (1) 動力の測定値が屋内でのエンジン試験のデータに依存する矛盾を回避できる。
- (2) 企業秘密的な ECU のデータの提示を求める必要がなくなる。
- (3) 排出ガス流量を測定するための配管、装置等が不要になる。
- (4) 信頼性の確保が困難になると予想される排出ガス流量の測定値を使用しなくても良い。

$r_{G/CO2}=M_G/M_{kg-CO2}$ で評価する方法の妥当性については、今後、他の測定値等でも確認する予定である。

3.3 温室効果ガスおよび窒素酸化物

- (1) 規制値の濃度比への換算

本稿における温室効果ガスおよび窒素酸化物の測定値を規制値と比較する目的で規制値を式(1)~式(3)で $r_{G/CO2}$ に換算した。換算では熱効率、軽油のCO₂ 排出原単位等の数値を使用した。

$$r_{G/CO2} = L_G / M_{CO2,1kWh} \quad \text{式(1)}$$

$$M_{CO2,1kWh} = Q_{1kWh} \times K_{CO2} \quad \text{式(2)}$$

$$Q_{1kWh} = 100 / \eta \times 3600 / 1,000 \quad \text{式(3)}$$

ここで、 L_G :排出ガスの規制値(g/kWh), $M_{CO2,1kWh}$: エンジンの仕事量 1 kWh で排出される CO₂(kg), K_{CO2} : 軽油の CO₂ 排出係数¹¹⁾0.0687 kg-CO₂/MJ, Q_{1kWh} : 仕事量 1 kWh での燃料の発熱量(MJ), η : 熱効率(%),

これらの式に基づいてエンジン出力 75-130kW の2011年規制値を換算した結果を表-4に示す。

- (2) 温室効果ガスおよび窒素酸化物の測定値

$r_{G/CO2}$ に換算した温室効果ガスおよび窒素酸化物 NO_x の測定結果を図-6に示す。表-4の規制値を併記している。ただし、欧州の路上走行試験の試験においては、台上試験の規制値を2.1倍する等の措置を講じている¹²⁾こと等を考慮し、NO_x については規制値を2.1倍した。一例ではあるが、測定値は規制値等を下回る値となった。

4. まとめ

海外における自動車の規制の動向から、建設機械の排出ガスについては、(a)実稼働での測定値、(b)N₂OおよびCH₄の測定値にかかる知見が今後必要となる可能性がきわめて高いと考え、構内で実稼働する油圧ショベルについて、エンジンの回転数、トルク、および排出ガスの流量、ならびにCO₂, N₂O, CH₄, およびNO_x等の濃度を測定し、測定値

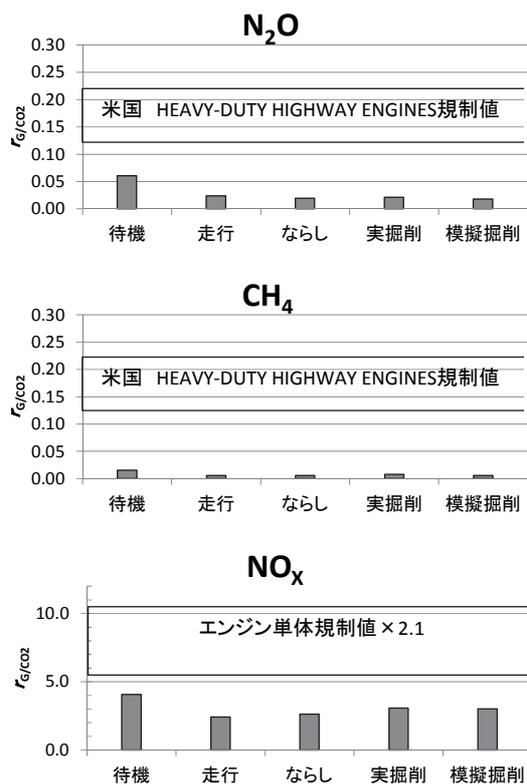


図-6 温室効果ガスおよび窒素酸化物の測定値。

を分析した。

実機での測定においては、トルク及び排出ガスの流量の測定が課題になるが、解決策として**排出ガスの量 M_G (g)と CO_2 の量 M_{kg-CO_2} (kg)の比を排出率 r_{G/CO_2} とした評価量の採択を提案した。** r_{G/CO_2} の評価ではトルクおよび排出ガス流量の測定が不要になる。 r_{G/CO_2} の妥当性の根拠として、動力 W_1 と CO_2 の測定値の相関が良いこと、 M_{CO_2}/W_1 が建設機械の待機、走行、ならし、および掘削の異なる作業内容でも一定値で安定していることを示した。

最後に現在の規制値を r_{G/CO_2} に換算し測定値と比較した。

本稿で示したのは1回の測定値のみであり、本稿の扱いは速報的なものである。今後、他のデータの解析、および測定等を行い知見の進展に努める予定である。

謝辞

実験にあたっては、国立環境研究所の近藤美則氏、元土木研究所(現国土交通省)の上野仁士氏、西山章彦氏、および岩田電業株式会社の岩田恒夫代表はじめ金田三千代氏、村田秀二氏、田孝博氏、齋藤遼吏氏、宇賀神哲哉氏に助言、協力を頂いた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) European Commission: Press release, Commission welcomes Member States' agreement on robust testing of air pollution emissions by cars Brussels, 28 October 2015.
- 2) ELECTRONIC CODE OF FEDERAL REGULATIONS, Title 40, PART 86—CONTROL OF EMISSIONS FROM NEW AND IN-USE HIGHWAY VEHICLES AND ENGINES, §86.1818-12 Greenhouse gas emission standards for light-duty vehicles, light-duty trucks, and medium-duty passenger vehicles.
- 3) ELECTRONIC CODE OF FEDERAL REGULATIONS, Title 40, PART 1036—CONTROL OF EMISSIONS FROM NEW AND IN-USE HEAVY-DUTY HIGHWAY ENGINES, §1036.108 Greenhouse gas emission standards.
- 4) U.S. Environmental Protection Agency, Populations, Activity and Emissions of Diesel Nonroad Equipment in EPA Region 7, 2010.
- 5) 杉谷康弘, 藤野健一, 石松 豊: 車載型計測装置による建設機械の排出ガス計測方法の検討, 土木技術資料 53-7, 2011.
- 6) 石松 豊, 杉谷 康弘, 西山 章彦, 藤野 健一: 実稼働状態の建設機械排出ガス計測結果における一考察, 平成25年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集, pp.195-198, 2013.
- 7) 藤野健一, 西山章彦, 杉谷康弘: 建設機械排出ガスの実態調査事例, ENGINE REVIEW, Vo1.5, No3, 2015.
- 8) 野村正之: 建設機械における稼働時の温室効果ガスの検討, 建設機械 2016.5, pp.63-69, 2016.
- 9) 山本敏朗: センサベースのポータブル排出ガス計測器による車載計測, ENGINE REVIEW, Vo1.5, No.3, 2015.
- 10) 山本敏朗, 堤玲子, 岩田恒夫, 小川恭弘, 加藤裕: 尿素SCRシステム搭載貨物車の路上走行時におけるNO_x, NH₃およびN₂Oの排出挙動, 公益社団法人自動車技術会 学術講演会前刷集, No.68-13, 2013.
- 11) 環境省: 事業者からの温室効果ガス排出量算定方法ガイドライン, 2003.
- 12) TRANSPORT&ENVIRONMENT: Real-world Driving Emissions tests:the facts, December 2015.