ＩＳＳＮ　０３８６－５８７８
土木研究所資料第 4385 号

土　木　研　究　所　資　料

建設機械から排出される温室効果ガスの亜酸化窒素およびメタンの研究

平成 31 年 4 月

国立研究開発法人　土木研究所
技術推進本部　先端技術チーム

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第 4385 号

土 木 研 究 所 資 料

建設機械から排出される温室効果ガスの亜酸化窒素およびメタンの研究

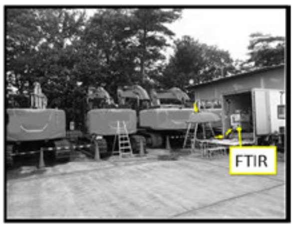
技術推進本部 先端技術チーム
上席研究員 新田 恭士
主任研究員 吉永 弘志

要旨

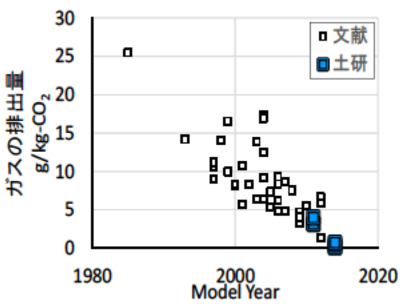
窒素酸化物 NOx の後処理装置 SCR を搭載した油圧ショベル 4 台および SCR 非搭載の油圧ショベル 3 台の排出ガスをフーリエ変換赤外分光光度計 FTIR で測定し，以下を明らかにした.（1） メタン CH_4の温室効果ガスとしてのシェアは，全 7 台で 0.1 %未満であり，亜酸化窒素 N_2O の温室効果ガスとしてシェアは，SCR 搭載車で 2.7%，SCR 非搭載車で 0.45%であった. これらの測定値はオンロード車の文献値と同程度であった.（2） 排出ガス規制の対象となっている NOx, CO，および非メタン炭化水素 NMHC の測定値が，エンジン単体の台上試験で定められた規制値と整合していることを確認し, 2006 年, 2011 年，および 2014 年の排出ガス規制に対応した建設機械を使用する条件でのユニット（ 工種 ）別の排出原単位を算定した.（3） 建設機械もオンロード車と同様に排出ガスの測定よるカーボンバランス法で燃料消費量を測定できる.

キーワード

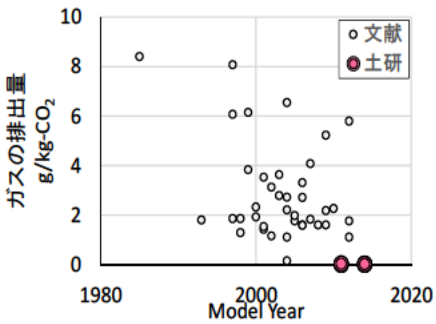
建設機械，温室効果ガス，二酸化炭素, CO_2，亜酸化窒素，一酸化二窒素, N_2O，メタン, CH_4, フーリエ変換赤外分光光度計, FTIR，窒素酸化物，一酸化炭素，非メタン炭化水素，選択的アンモニア酸化触媒, SCR



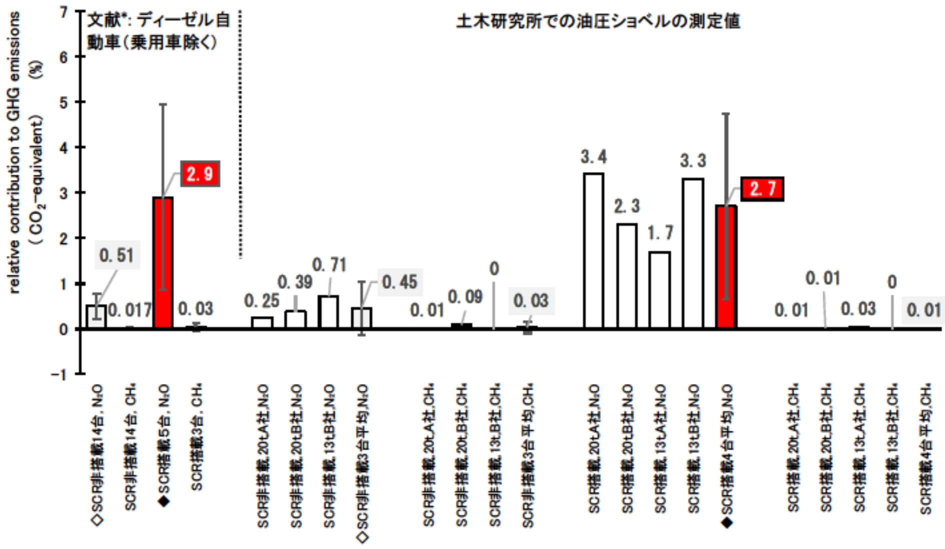
NOx



CO



油圧ショベルの年式と排出ガス量の関係（ P.58 より ）. 文献値の NOx は 4 文献 36 台, CO,は 5 文献 39 台. 土研（ 土木研究所 ）の測定は 7 台.



ディーゼル自動車（ オンロード ）および建設機械から排出される CO_2 以外の温室効果ガスのシェア（ P.40 より ）. *: 国内外の 4 研究機関の文献値.

建設機械から排出される温室効果ガスの亜酸化窒素およびメタンの研究

土木研究所資料　第 4385 号 2019 年 4 月

国立研究開発法人 土木研究所　技術推進本部　先端技術チーム
つくば市南原 1-6

まえがき

オンロードおよびオフロードの自動車から排出される排出ガスにかかる情勢は，国内外でめまぐるしく変化している．オンロードの自動車については，欧米では車載式測定器を使用した測定による規制，または規制当局による試験が行われるようになり，日本，中国，およびインドでも同様な施策が講じられることとなった．さらに欧州では建設機械等のオフロードエンジンの製造業者に車載式測定器による測定値の報告を義務付けることになり，中国でも同様な施策を講じる見込みとなった．一方，米国では温室効果ガスの亜酸化窒素（一酸化二窒素）N_2O，およびメタン CH_4 の規制値（standard）が定められているが，窒素酸化物 NOx の規制強化に対応して尿素選択的還元触媒 SCR（selective catalytic reduction）を搭載したオンロード車からは N_2O が排出される旨の研究報告がみうけられるようになった．

国土交通省においては，オンロード車のみならず建設機械にかかる騒音，振動，および排出ガスにかかる環境対策を各種の法規制と調整しつつ講じている．土木研究所は本省と連携して建設機械の環境対策に関連した研究を実施してきたが，近年は特に排出ガスにかかる知見の重要性が高まっている．このような情勢を受け，2006 年（平成 18 年）に建設機械の排出ガスの研究に着手し，2015 年（平成 27 年）からは温室効果ガスに着目した研究に取り組んでいる．本資料は，2015 年度から 2018 年度までの 4 ケ年に実施した研究の成果をとりまとめたものである．

本資料の構成その他：　本資料は**目次**，**用語**，**本文**，**付録**，および**電子データ**から構成されている．測定値は電子データのみとした．**文献**，および**数式**は，[R.11]，および (Eq. 1) から始まる連番として本文の末尾（P.87），および**付録**（P.93）にまとめた．

目　　次

用　　語

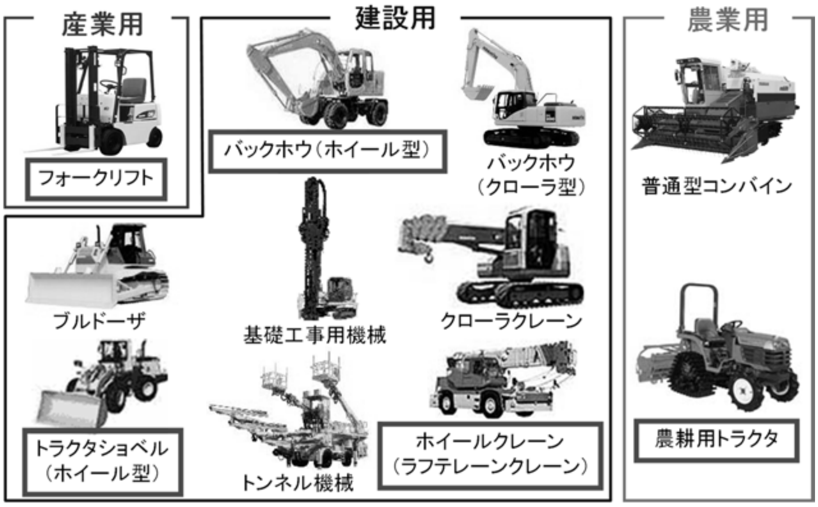
本資料における用語，化学式，略号，および英略語を以下に示す．

用　語

用語	定義，意味，または根拠
建設機械	建設機械抵当法（ 昭和二十九年法律第九十七号 ）第二条に規定する建設機械に該当する自動車．油圧ショベル，およびホイールローダのように走行する車両系建設機械，ならびに発動発電機，および空気圧縮機のような可搬式建設機械に大別される．車両系建設機械は公道を走行するため道路運送車両法の適用を受けるオンロード車（ 通称 ）と公道を走行しないオフロード車（ 通称 ）に分類され，適用される排出ガス規制の法律も異なる．本研究で測定したのは車両系建設機械でオフロード車の油圧ショベルである．建設機械に該当する英文は, construction equipment, construction vehicle, earth-moving machine, nonroad construction equipment, non-road equipment, および off-road construction equipment. ISO では土工機械に相当する earth-moving machine で表記している.
油圧ショベル，バックホウ，パワーショベル，ユンボ, ドラグショベル	定義または意味の説明は省略する．本資料における「油圧ショベル」に該当する用語は以下のように文献により異なる．油圧ショベル[R.24]，バックホウ[R.22][R.25][R.26]，ショベル系掘削機のバックホウ仕様[R.23]，油圧ショベル系掘削機［ **建設機械動向調査** ］，パワー・ショベル［ **労働安全衛生規則** ］, ドラグ・ショベル［ **労働安全衛生規則** ］，ショベル・ローダ[R.09], Hydraulic excavator[ISO]．日本国内でのバックホウは『油圧ショベルの形態の中で，アームの先端に取り付けたショベルの作用面が手前側のタイプを「バックホウ」と呼びます．作業としては機体側に手招きするように引き寄せる形になり，その形状から地表面よりも下の掘削に適しています.』（ 株式会社ヨシカワ web site ）の説明に該当するものであるが，海外での backhoe は tractor または front loader の後方に備えられた掘削用のバケットを意味する（Wikipedia より).
特殊自動車	道路運送車両法施行規則第 2 条において，規定されている．大型特殊自動車，小型特殊自動車があり，ブルドーザ，フォークリフト，農耕トラクタ等の構造が特殊な自動車．このうち，小型特殊自動車は，大きさが，長さ 4.70 m 以下，幅 1.70m 以下，高さ 2.80 m 以下であり最高速度が 15 km/h 以下のもの．（ 農耕トラクタ等にあっては，大きさの制限はなく最高速度が 35 km/h 未満のもの ）[R.08].

<table>
<tr><th>用語</th><th>定義，意味，または根拠</th></tr>
<tr><td>特定特殊自動車</td><td>道路運送車両法に規定する自動車（ 運行の用に供するものを除く.）であって，次に掲げるもの.
一　道路運送車両法に規定する大型特殊自動車及び小型特殊自動車
二　建設機械抵当法に規定する建設機械に該当する自動車
(［ 特定特殊自動車排出ガスの規制等に関する法律 ］)

具体的には下記の建設機械が該当する. (出典:［ 環境省 自動車環境対策課 ］)



注1）▭：公道を走行するものは道路運送車両法で同様に規制
注2）農業用には、自動車に該当しないものもあり（耕耘機等）

海外における NRMM (non-road mobile machinery) に相当する.</td></tr>
<tr><td>特定原動機</td><td>特定特殊自動車に搭載される原動機及びこれと一体として搭載される装置［ 特定特殊自動車排出ガスの規制等に関する法律 ］</td></tr>
<tr><td>排出ガス, emission gas</td><td>自動車が排出する排気ガス，蒸発ガス及びブローバイガスの総称 ［ JIS D0108 ］. 英文では emissionsと表記している論文が多い.</td></tr>
<tr><td>排気ガス, exhaust emission, exhaust gas</td><td>エンジンの排気系から外部に排出されるガス ［ JIS D0108 ］.</td></tr>
<tr><td>排気物質, exhaust emission</td><td>エンジンの排気系から外部に排出される物質. 浮遊粒子状物質を含む［ JIS D0108 ］.</td></tr>
<tr><td>温室効果ガス, greenhouse gases, GHGs</td><td>太陽から地表に届いた熱を受けて地表から放射される赤外線を吸収し，吸収した熱を再び地表に向かって放射することで，地表を暖める効果を有するガス[R.11]. ガスの種類（ 化学式, GWP, 2015 年における日本国内のシェア ）は以下[R.11]. 二酸化炭素（ CO_2, 1, 92.7% ），ハイドロフルオロカーボン類（ HFCs, PFC-14 : 7, 390 など, 3.0% ），メタン（ CH_4, 25, 2.4% ），一酸化二窒素（ 亜酸化窒素 N_2O, 298, 1.6% ）. 米国においてはエンジンから排出される CH_4，および N_2O の規制値 (standard) が定められている[R.13]. 自動車から排出される CH_4は，天然ガスエンジンの不十分な燃焼による副生成物であり, N_2O は三元触媒 TWC および SCR の触媒反応の副生成物[R.44].</td></tr>
</table>

用語	定義，意味，または根拠
地球温暖化係数, global warming potential, GWP	地球の温暖化をもたらす程度の二酸化炭素 CO_2に係る当該程度に対する比を示す数値 [**地球温暖化対策の推進に関する法律**]. ある一定期間におよぼす地球温暖化の影響について, CO_2の影響を 1 としたときの係数[R.11].
温室効果ガスとしてのシェア, relative contribution to GHG emissions (CO_2-equivalent)	ガス G の質量 M_Gと温室効果ガスの総量 (CO_2の質量換算) M_{GHG}の質量比に G の地球温暖化係数 K_Gを乗じた値の%値 ($=100K_GM_G / M_{GHG}$). 国内外の文献における「シェア」[R.11],「寄与率」[R.55],「GHG 中に占める排出割合」[R.56], および「 relative contribution to GHG emissions (CO_2-equivalent)」[R.43]を参考として, 本資料では,「温室効果ガスとしてのシェア, relative contribution to GHG emissions (CO_2-equivalent)」で表記した.
CO_2比の温室効果	ガス G の質量 M_Gと CO_2の質量 M_{CO2}の質量比に G の地球温暖化係数 K_Gを乗じた値の%値 ($=100K_GM_G / M_{CO2}$). 文献では relative contribution to GHG emissions (CO_2-equivalent) に相当する値で CO_2以外の温室効果ガスを評価しているが, 計算には温室効果ガスの総量が必要となる. 本資料では温室効果ガスの総量が不明でも計算できる CO_2比の温室効果も併記した. 双方の値はほぼ一致する.
非メタン炭化水素, non-methane hydrocarbon, NMHC	全炭化水素 (THC) からメタンを除いたもの[R.08].
NRTC, non-road transient cycle	EU 及び米国により策定されたディーゼル特殊自動車用エンジンの排出ガス過渡試験サイクル. NRTC は, UN-ECE/WP29 において, 1998 年協定に基づき日本も参画のもと策定されたディーゼル特殊自動車用世界統一試験規則 NRMM (non-road mobile machinery) に過渡試験サイクルとして規定される[R.08].
in‐service monitoring, ISM	建設機械に搭載されたエンジンの排出ガスのモニタリング. REGULATION (EU) で使用されている用語.
ディーゼル酸化触媒, Diesel oxidation catalyst, DOC	ディーゼルエンジンの排気ガスに含まれる炭化水素 HC, 一酸化炭素 CO などを二酸化炭素 CO_2および水 H_2O に酸化させて低減するための触媒.
三元触媒, three way catalyst, TWC	排気ガス中の NOx を酸化, 還元反応によって低減するための触媒[JIS D0108].
ディーゼル微粒子捕集フィルター, Diesel particulate filter, DPF	ディーゼルエンジンの排気ガスに含まれる粒子状物質 PM を低減するためのフィルター.
尿素 SCR システム, SCR	ディーゼルエンジンの排気ガスに含まれる窒素酸化物 NOx を尿素水から生成したアンモニア NH_3と触媒反応させて窒素 N_2 および水 H_2O に還元して低減するシステム. SCR は選択式還元触媒 selective catalytic reduction の略語. 国内では尿素 SCR と略しているが文献が多いが, 海外の文献では SCR と略しているため, 本資料では SCR とした.
選択的アンモニア酸化触媒, ammonia oxidation catalyst,	SCR で発生した余剰のアンモニア NH_3を除去するための酸化触媒.

用語	定義，意味，または根拠
AMOx	
ソーク時間	エンジン停止時から次に始動するまでの時間.
測定，計測	物理量を機器で測ることを「測定」または「計測」というが，「オンライン学術用語集」(国立情報学研究所) の検索では「測定」としている学会が多いので本資料では「測定」とした.
測定値の信頼性，精度，真値，誤差	文献[R.73]によると「精度」は分野により意味が異なり，測定値の平均が真値に近いことを意味する分野と測定値の標準偏差が小さいことを意味する分野の双方がある. 本資料ではどちらか一方に解されることを避けるため「精度」の用語を使用せず，測定器の誤差の影響が小さく測定値の標準偏差が小さい測定方法が「信頼性」が高い測定方法とした. また，測定結果については「標準偏差」，「誤差率」，「母平均の 95%信頼区間」等の内容の明らかな数値で説明した. 本研究においては測定値の「真値」が不明であったが，「真値」の用語を使用する際には『測定数を増やして平均することで偶然誤差をなくした値を「真値 (ただし系統誤差を含む)」』，『二つの流量計の平均値を真値とみなした』のように前提とした条件を明示した.
フーリエ変換赤外分光光度計, Fourier transform infrared spectrophotometer, FT-IR, FTIR	干渉曲線の信号のフーリエ変換によって分光スペクトルを測定する赤外分光光度計 [JIS K2015]. 炭化けい素，ニッケルクロム合金，セラミックなどを赤外線 (2.5～25 μm) の光源とし，波長別の吸収強度から試料の組成等を分析する. 波長別の吸収強度は，プリズム，回折格子等による物理的 (空間的な) な分光によらず，マイケルソン干渉計で光源の波長の強度を連続的かつ周期的に変化させ，透過光の出力をフーリエ変換して計算する方法 (音や振動の周波数別の強度の計算で多用されている方法) で測定する.
量子カスケードレーザ赤外分光法, quantum cascade laser infra-red, QCL-IR	量子カスケードレーザ (波長 4 μm ～ 10 μm) の波長を素子の温度で連続的に変化させて波長別の吸収強度から試料の組成等を分析する. 掃引できる波長の幅は狭いが，スペクトル線幅が狭いため感度が高く，吸収する波長が近接した複数のガスや低濃度のガスなどを測定できる.
非分散形赤外線分析計, non-dispersive infrared analyzer, NDIR	赤外線の領域に吸収帯をもつ気体または液体の濃度を，その吸収波長での赤外線の吸収強度から測定する装置のうち，吸収帯の選択を分光光度計のようにプリズム，回折格子によらないで，ガスフィルタ又は選択性検出器によって行う赤外線分析計 [JIS D1030. **一部修正**.].
ガスクロマトグラフ, gas chromatograph, GC	気体を移動相にしてカラムに試料を導入し，被検成分を固定相との相互作用 (吸着，分配) の差を利用して，分離，定量するための機器 [JIS K0215]. 分離カラムを通過する時間がガスの種類によって異なる特性を利用し，時間変化する検出器の出力を分析してガスの濃度を測定する. 検出器には FID(flame ionization detector，水素炎イオン化検出器), ECD (electron capture detector，電子捕獲検出器)などがある.
水素炎イオン化検出器, flame ionization detector, FID	水素の燃焼熱によって有機化合物の骨格炭素をイオン化し，そのイオン電流の変化を測定するガスクロマトグラフ用検出器[JIS K0215]. C─H 結合を持つ化合物が水素炎中で燃焼することによって発生するイオンを検出する方法で非メタン炭化水素 THC，メタン CH_4などの有機化合物を測定する.
電子捕獲検出器,	電子捕獲検出器は，多くの有機ハロゲン化合物やニトロ化合物などを選択

用語	定義，意味，または根拠
electron capture detector, ECD	的，高感度に検出するもので，キャリアーガスの流入･流出口をもつ金属製密封容器に納められた放射性同位体元素のβ線源及び電極並びに電極電圧印加用電源で構成する［ JIS K0114 ］．β線源を用いて放出した電子と陽極間の電流の減少量でハロゲン化合物やニトロ化合物などの親電子性化合物を検出する．

化学式または略号

化学式または略号	物質名
CO_2	二酸化炭素
CH_4	メタン
N_2O	一酸化二窒素，亜酸化窒素
HFCs	ハイドロフルオロカーボン
PFCs	パーフルオロカーボン
SF_6	六ふっ化硫黄
NF_3	三ふっ化窒素
NOx	窒素酸化物
CO	一酸化炭素

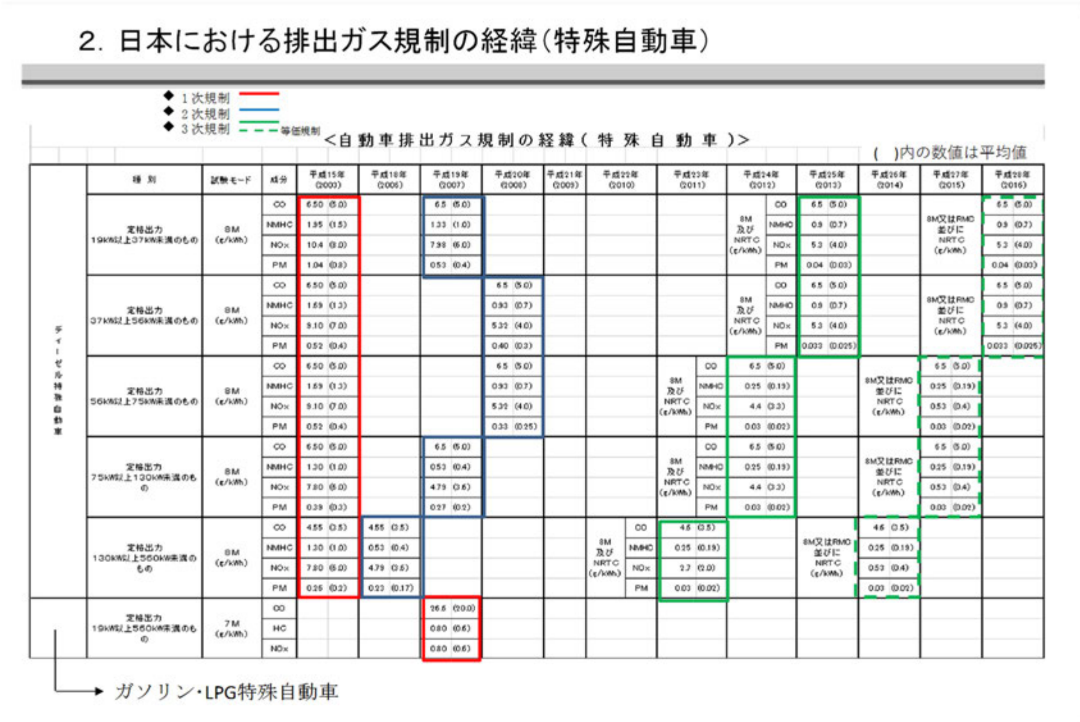
英　略　語

英略語	定義	邦訳または意味
GHGs	greenhouse gases	温室効果ガス
GWP	global warming potential	地球温暖化係数
NMHC	non-methane hydrocarbon	非メタン炭化水素
PN	particulate number	-
NRMM	non-road mobile machinery	-
NRTC	non-road transient cycle	-
RDE	real driving emission	-
ISM	In-service monitoring	-
ISC	in-service conformity	-
PEMS	portable emissions measurement system	-
DOC	diesel oxidation catalyst	ディーゼル酸化触媒
TWC	three way catalyst	三元触媒
AMOx	ammonia oxidation catalyst	選択的アンモニア酸化触媒
SCR	selective catalytic reduction	選択式還元触媒
DPF	diesel particulate filter	ディーゼル微粒子捕集フィルター
FT-IR, FTIR	fourier transform infrared spectrophotometer	フーリエ変換赤外分光光度計
QCL-IR	quantum cascade laser infra-red	量子カスケードレーザ赤外分光法
NDIR	non-dispersive infrared analyzer	非分散形赤外線分析計
GC	gas chromatograph	ガスクロマトグラフ
FID	flame ionization detector	水素炎イオン化検出器
ECD	electron capture detector	電子捕獲検出器
ECU	engine control unit	エンジンの制御用ユニット
CAN	controller area network	輸送用機械やロボット等の機器間のデータ転送に使われる規格
EFM	exhaust flow meter	排気流量計
EPA	Environmental Protection Agency	米国環境保護庁

第１章　背景・目的・本報告の構成・先行研究

1.1　背景・目的

建設機械に搭載される原動機（エンジン）から排出される窒素酸化物 NOx，非メタン炭化水素 NMHC，粒子状物質 PM，および一酸化炭素 CO 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」）により，エンジン単体の台上試験値で規制されている（**図-1.1**[R.08]，**図-1.2**）．国内の規制は，欧州連合 EU，米国等との国際調和を考慮して定められているが，情勢はめまぐるしく変化している（**表-1.1**）．米国では，フォルクスワーゲン社の排出ガスの不正問題を受けて米国連邦環境保護庁 EPA による台上試験と実路走行 RDE（real driving emission）試験を継続することになったが，EU では，公道を走行する自動車の RDE 試験を 2017 年から義務付けており[R.15][R.16]，日本でも 2022 年から導入することになった[R.03]．また，EU では可搬式の排出ガス測定システム PEMS（portable emissions measurement system）を使用して建設機械等の NRMM（non-road mobile machinery）から排出されるガスを測定する ISM（in-service monitoring）を義務づけることになり[R.17]，最速で 2019 年から適用される見込みである．中国でも 2020 年から導入する規制を検討している．一方，米国では，EU および日本において未規制の温室効果ガス GHG（greenhouse gas）の二酸化炭素 CO_2，亜酸化窒素（一酸化二窒素）N_2O（地球温暖化係数は CO_2 の 298 倍[R.12]），およびメタン CH_4（同 25 倍[R.12]）の規制値（standard [R.13]）を定めている．


2. 日本における排出ガス規制の経緯（特殊自動車）

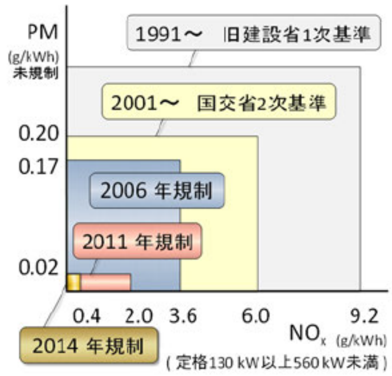
◆ 1次規制
◆ 2次規制
◆ 3次規制　等価規制

<自動車排出ガス規制の経緯（特殊自動車）>

（　）内の数値は平均値

	種別	試験モード	成分	平成15年(2003)	平成18年(2006)	平成19年(2007)	平成20年(2008)	平成21年(2009)	平成22年(2010)	平成23年(2011)	平成24年(2012)	平成25年(2013)	平成26年(2014)	平成27年(2015)	平成28年(2016)
ディーゼル特殊自動車	定格出力 19kW以上37kW未満のもの	8M (g/kWh)	CO	6.50 (5.0)		6.5 (5.0)					8M及びNRTC (g/kWh) CO	6.5 (5.0)		8M又はRMC並びにNRTC (g/kWh)	6.5 (5.0)
			NMHC	1.95 (1.5)		1.33 (1.0)					NMHC	0.9 (0.7)			0.9 (0.7)
			NOx	10.4 (8.0)		7.98 (6.0)					NOx	5.3 (4.0)			5.3 (4.0)
			PM	1.04 (0.8)		0.53 (0.4)					PM	0.04 (0.03)			0.04 (0.03)
	定格出力 37kW以上56kW未満のもの	8M (g/kWh)	CO	6.50 (5.0)			6.5 (5.0)				8M及びNRTC (g/kWh) CO	6.5 (5.0)		8M又はRMC並びにNRTC (g/kWh)	6.5 (5.0)
			NMHC	1.69 (1.3)			0.93 (0.7)				NMHC	0.9 (0.7)			0.9 (0.7)
			NOx	9.10 (7.0)			5.32 (4.0)				NOx	5.3 (4.0)			5.3 (4.0)
			PM	0.52 (0.4)			0.40 (0.3)				PM	0.033 (0.025)			0.033 (0.025)
	定格出力 56kW以上75kW未満のもの	8M (g/kWh)	CO	6.50 (5.0)			6.5 (5.0)			8M及びNRTC (g/kWh) CO	6.5 (5.0)		8M又はRMC並びにNRTC (g/kWh)	6.5 (5.0)	
			NMHC	1.69 (1.3)			0.93 (0.7)			NMHC	0.25 (0.19)			0.25 (0.19)	
			NOx	9.10 (7.0)			5.32 (4.0)			NOx	4.4 (3.3)			0.53 (0.4)	
			PM	0.52 (0.4)			0.33 (0.25)			PM	0.03 (0.02)			0.03 (0.02)	
	定格出力 75kW以上130kW未満のもの	8M (g/kWh)	CO	6.50 (5.0)		6.5 (5.0)				8M及びNRTC (g/kWh) CO	6.5 (5.0)		8M又はRMC並びにNRTC (g/kWh)	6.5 (5.0)	
			NMHC	1.30 (1.0)		0.53 (0.4)				NMHC	0.25 (0.19)			0.25 (0.19)	
			NOx	7.80 (6.0)		4.79 (3.6)				NOx	4.4 (3.3)			0.53 (0.4)	
			PM	0.39 (0.3)		0.27 (0.2)				PM	0.03 (0.02)			0.03 (0.02)	
	定格出力 130kW以上560kW未満のもの	8M (g/kWh)	CO	4.55 (3.5)	4.55 (3.5)				8M及びNRTC (g/kWh) CO	4.6 (3.5)		8M又はRMC並びにNRTC (g/kWh)	4.6 (3.5)		
			NMHC	1.30 (1.0)	0.53 (0.4)				NMHC	0.25 (0.19)			0.25 (0.19)		
			NOx	7.80 (6.0)	4.79 (3.6)				NOx	2.7 (2.0)			0.53 (0.4)		
			PM	0.25 (0.2)	0.23 (0.17)				PM	0.03 (0.02)			0.03 (0.02)		
ガソリン・LPG特殊自動車	定格出力 19kW以上560kW未満のもの	7M (g/kWh)	CO			26.6 (20.0)									
			HC			0.80 (0.6)									
			NOx			0.80 (0.6)									

図-1.1　日本における特定特殊自動車にかかる排出ガス規制値の推移[R.08]．二次規制（青色）は排出ガス対策型建設機械の指定制度（国土交通省）の三次基準に相当する．



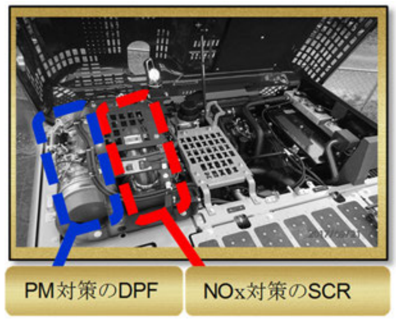
図−1.2　建設機械の排出ガス規制値の推移例．定格出力130kW以上560kW未満．特定特殊自動車排出ガスの規制等に関する法律（ 通称「オフロード法」）が適用されたのは図の2006年規制以降．

表−1.1　排出ガス規制にかかる国際情勢.

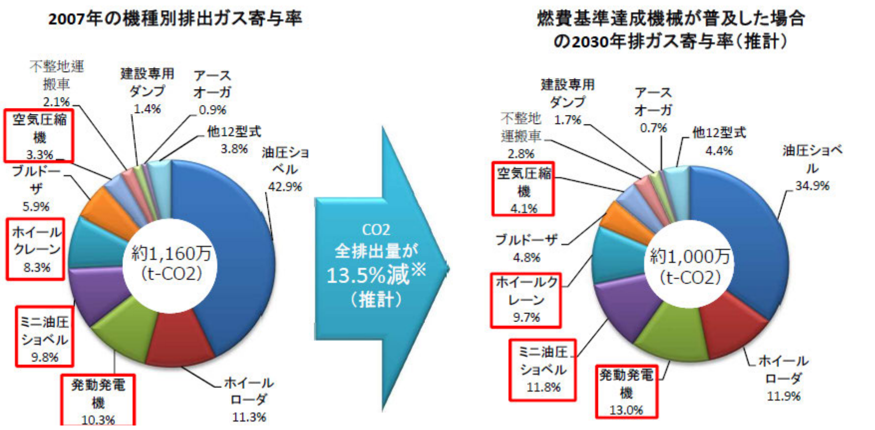
	米国: [2015] VW 社の不正発覚．米国連邦環境保護庁による実路走行 RDE (real driving emission ） 試験を継続. [2014 年モデル～] 自動車には温室効果ガス GHG (greenhouse gas) の CO_2， 亜酸化窒素 N_2O (地球温暖化係数 298)， メタン CH_4 (同　25) の排出基準．建設機械等のエンジンから排出される温室効果ガスの CO_2，および CH_4 の報告義務 (尿素選択的還元触媒 SCR 搭載車は N_2O も追加.) .
	欧州: [2017～] 使用過程車の排出ガスの規制との適合 ISC (in-service conformity) を目的としたディーゼル乗用車等の RDE 規制. [最速 2019] 建設機械等に搭載されたエンジンの測定値の報告 ISM (in-service monitoring) を義務付け. [2011～] 乗用車の浮遊粒子状物質の粒子数 PN （ particulate number ） 規制. [2019～] 建設機械等の PN 規制. NOx，および PM 抑制機能の不具合を診断して警報，および出力制御するシステム NCD (NOx control diagnostic)，および PCD (partcle control diagnostic) の搭載義務 (出力制御は NCD のみ)．建設機械等の取扱説明書に室内試験での CO_2 排出量の記載義務. [2014～]大型自動車のディーゼルエンジンのアンモニア NH_3 規制開始.
	日本: [2022～] RDE 試験（EU が先例) . PN 規制を検討中.
	中国: [2023～] RDE 試験（EU が先例)．走行中の排出ガスをモニタリングして政府のサーバーに送信するシステムをオンロード車に搭載する義務づけ. [最速 2020～]建設機械等の使用過程エンジンの排出物適合 ISC の自主検査，および環境部門監査（EU が先例).
	インド: [2024～] RDE 試験（EU が先例).

自動車から排出されるCH_4は， 天然ガスエンジンの不十分な燃焼による副生成物であり, N_2Oは三元触媒TWC，および尿素選択的還元触媒SCR (selective catalytic reduction) の触媒反応の副生成物[R.44]と説明されていることから，ディーゼルエンジンから排出されるメタンの温室効果の影響は皆無であるが, NOx規制に対応して図−1.3のようにSCRを搭載する機種が増えたため， 温室効果ガスの評価に影響する可能性がある． 国土交通省においては， 建設機械から排出される温室

効果ガスについて，2007年の1130万tを2030年に1000万tに減じる目標を定めており（ **図−1.4** [R.01])，国内におけるN_2O，およびCH_4の排出量を国立環境研究所が公表[R.11]している（ 公表値を図示したものを**図−1.5**に示す．）が，今後の地球温暖化対策の政策判断ではN_2Oの影響（ 文献での，シェア，寄与率，GHGの排出割合, relative contribution to GHG emissions (CO_2-equivalent) に相当する値．）に関する知見が必要になると考えている．また，測定技術は進歩しているものの，日本ではN_2Oの測定方法が定められていないので，測定方法にかかる知見も必要になると考えられる．



図−1.3　2014 年規制に対応して PM 対策の DPF と NOx 対策の SCR を搭載した油圧ショベルの例. DPF: Diesel particulate filter, SCR: selective catalytic reduction (尿素選択的還元触媒). NOx を N_2 と H_2O に還元する.



図−1.4　国内の建設機械から排出される CO_2の削減目標[R.01]. ※ 3 機種について, 2017 年度以降販売されている全ての型式が燃費基準を達成していると仮定. ※ 3 機種の燃費改善のみによる CO_2削減量の推計. 3 機種は燃費基準が定められている油圧ショベル，ホイールローダ，およびブルドーザ

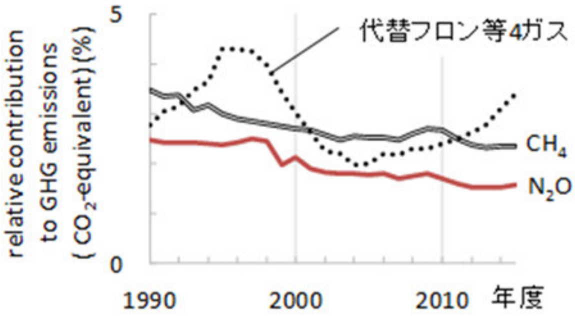


図-1.5　国内におけるCO_2以外の温室効果ガスのシェア．縦軸の値は引用文献[R. 11]では「シェア」としているが，他の文献の「寄与率」，「GHG中に占める排出割合」，「relative contribution to GHG emissions (CO_2-equivalent)」に相当する．代替フロン等4ガスは，ハイドロフルオロカーボンHFCs，パーフルオロカーボンPFCs，六ふっ化硫黄SF_6，および三ふっ化窒素NF_3の合計．

土木研究所では，建設機械から排出される温室効果ガスの亜酸化窒素，およびメタンの概況を把握することと目的として，2015年から2018年までの4年間で油圧ショベル7台の排出ガスを測定した．測定にあたっては測定方法や測定値の信頼性等について検討し，測定結果のとりまとめにあたっては二酸化炭素と比較した亜酸化窒素，およびメタンによる温室効果の影響の程度を明らかにするとともに，最新規制に対応した建設機械から排出される窒素酸化物等の既規制の排出ガスが大きく抑制されたことを明らかにした．

本資料は，以上の知見をとりまとめて公知することで，行政における政策判断や関係者への説明，および他の研究機関等での研究の参考に資することを目的としている．また，　本資料はインターネットでも公開する予定である．

1.2　本報告の構成

本報告の構成を**図-1.6** に示す．各項目の最も下の段に目次を付記した．主題は亜酸化窒素，およびメタンを測定して温室効果を評価すること（ **第 3 章** ）であるが，準備として先行研究を文献調査した(1.3)．また，予算と時間の制約があるので測定を簡素化するとともに信頼性の高いデータを得るための検討を行った(2.2)．さらに目的外の成果として，窒素酸化物等の環境影響評価に資する原単位の算出（ **第 4 章** ），および CO_2の濃度から燃料消費量を測定するカーボンバランス法の検討についても述べた（ **第5章** ）．**第 6 章**で全体をまとめた．

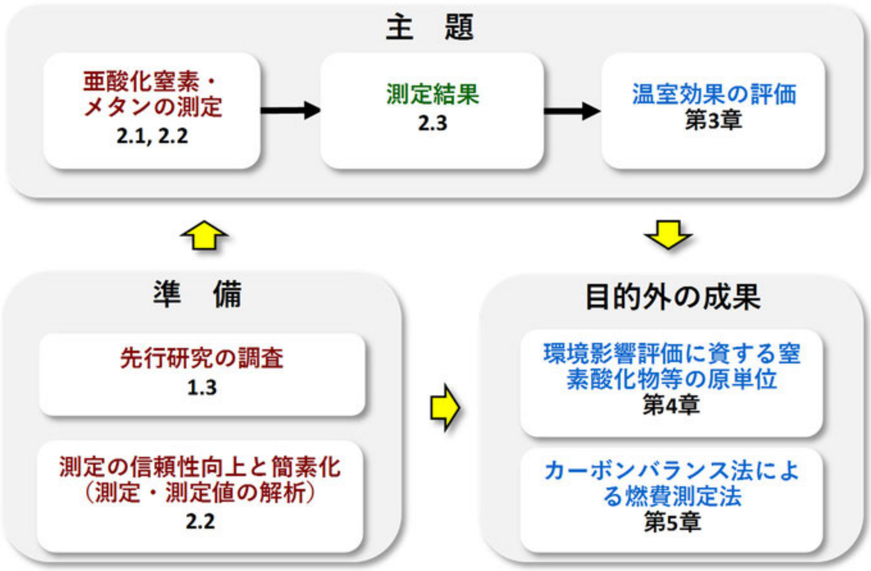


図-1.6 本報告の構成.

1.3　先行研究

建設機械の排出ガスのうち，室素酸化物 NOx 等の大気汚染物質の測定事例(A)は国内外で報告されている．一方，未規制の亜酸化窒素 N_2O 等の温室効果ガスの測定事例は国内外でみあたらず，オンロード車の測定事例(B)がみうけられた．ここでは(A)，および(B)について報告する．

1.3.1　建設機械から排出される大気汚染ガスの測定

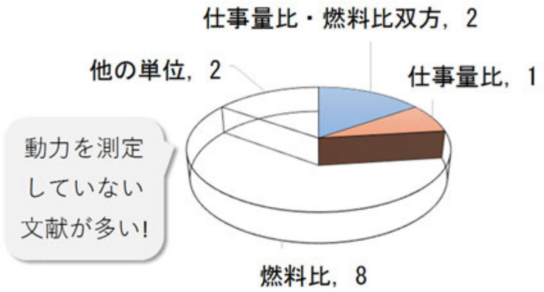
建設機械に PEMS (portable emissions measurement system) を搭載して排出ガスを測定（ 欧州でいう ISM: in-service monitoring:に相当．）した文献をオンライン･データベース DB で検索した (2017 年 6 月). DB は科学技術振興機構 JST の科学技術文献情報（ 主として和文 ）の JDreamⅢ，および米 Thomson Reuters 社の Web of Science とした．また，これらの文献に記載された情報を元に web site で公開されている文献も入手した．検索の用語のうち排出ガスに相当するものは emission 等 (emission* OR gas* OR PEMS OR NOx) とし，排出源に相当するものは建設機械 (((earthmoving OR earth-moving) OR (construction AND machine*) OR (construction AND vehicle*) OR nonroad OR non-road OR offroad OR off-road OR excavator*)) とした．期間を制限しないで Abstract を検索範囲に含めるなど，検索範囲は広く設定した.

検索した文献の一覧を表-1.2 に示す.

表−1. 2　エンジンを建設機械に搭載した条件での排出ガス測定に関する文献．WEB OF SCIENCE（ 掲載されているのはインパクトファクター付きの論文のみ.）で検索した文献にインターネットで公開されていた米国 EPA の文献，および国内の文献を追加，悉皆的な調査ではない．文献番号と本資料での引用文献の対応は以下. A01-[R.28], A02-[R.29], A03-[R.30], A04-[R.31], A05-[R.32], A06- [R.33], A07−[R.34], A08-[R.35], A09-[R.36], A10-[R.37], A11-[R.38], A12-[R.39], A13-[R.40], A14-[R.41], A15-[R.42].

文献番号	第一著者が所属する国, 所属	発表年	建設機械の台数	測定対象とした排出ガス									排出量の単位	
				NO_X			THC			CO	CO_2	PM	/燃料	/仕事量
				N_2O	NO	NO_2	CH_4	NMHC						
									HC					
A01	米国, West Virginia University	2002	1	○							○		g /test	
A02	米国, U.S. Environment Protection Agency	2010	39	○			○			○	○		○	○
A03	米国, North Carolina State University	2008	15		○				○	○	○	○	○	
A04		2008	6	○					○	○	○	○	○	
A05		2008	3		○				○	○	○	○	○	
A06		2010	38	○					○	○	○	○	○	
A07	米国, Oklahoma State University	2012	35	○					○	○		○	g/hのみ	
A08	米国, Virginia Tech	2015	18	○					○	○	○		○	○
A09	米国, University of California, Riverside	2016	27	○			○			○	○	○		○
A10	中国, Beijing Institute of Tehnology	2012	20	○					○	○		○	○	
A11		2016	11	○					○	○		○	○	
A12	中国, Sihuan University	2016	4		○								○	
A13	スペイン, Universidad Castilla La Mancha	2009	1	○								○	○	
A14	日本, 土木研究所	2012	9	○			○			○	○			推定値
A15		2015	1	○	○	○	○			○	○	○	ppmのみ	

建設機械の排出ガスは国内外ともに排出ガスの質量M_G（g）と仕事量W（kWh）の比R_{GpW}（g / kWh）で規制されているが，収集した海外の文献の排出ガス量の単位は**図−1.7** となった. エンジンのトルクは建設機械に搭載した条件では実測できないため，ECU (engine control unit) の電気信号のデータを測定値とみなすことになるが，建設機械ではインターフェースが標準化されておらず[R.32]，大半の建設機械では CAN（ controller area network，輸送用機械やロボット等の機器間のデータ転送に使われる規格 ）のデータへのアクセスが困難[R.35]であるため仕事量比の測定数が少ないと解釈した.



図−1.7　建設機械から排出されるガスの測定値の単位（ 文献数 ）.

油圧ショベルの排出ガスの測定値が仕事量比（ /kWh, /hp ），または燃料比（ /ガロン, /リットル ）で個々の機械別に記載されている 6 編の文献の測定値を全て CO_2比（ /kg-CO_2 ）に換算し，一覧表にした（ 表−1.3). A01, A04, A07, A10, A11, A12, A13, A14，および A15 での測定は機種が異なるもの，単位の換算ができないもの，または複数の機械の代表値であったため含めていない. また，年式の記載のある A02, A05, A06, A08，および A09 の 5 編の文献の 39 台の測定値（ 文献[R.69]では 8 編の文献の測定値（ 45 台 ）としていたが，年式が特定できない文献数，および台数を含めていたため訂正. ）については，年式の関係で NO_X, CO，およびHCの排出量を散布図にし，指数関数での近似式を併記した（ 図−1.8). 測定値は大きくばらついているが，排出ガス量は着実に減少している.

表−1.3 屋外で稼働中の建設機械の排出ガスの測定値. 燃料比，仕事量比の双方があり，単位も異なっていたが全て CO_2比（ g / kg- CO_2 ）に換算した.

文献番号	Test ID	Equipment Type	メーカー	Model	Model Year	Power (kW)	Emission standard	CO_2比の排出量 (g/kg-CO_2)				仕事量比の排出量 (g/kgWh)			文献記載値の単位
								NO_X	NO	HC	CO	NO_X	HC	CO	
A02	0229-3781	Excavator	Case	1085B	1985	89		25.47		6.03	8.41	17.44	4.13	5.76	燃料比 (g/gal) および 仕事量比 (g/kWh)
	9960-5674	Excavator	Komatsu	PC300LC	2003	190		6.43		0.82	2.79	5.06	0.65	2.20	
	8391-333_1	Excavator	John Deere	450D	2006	260		6.20		0.31	1.60	3.97	0.20	1.02	
	8418-0961	Excavator	Komatsu	PC300LC-6LC	1998	173		14.02		0.79	1.86	9.42	0.53	1.25	
	0349-2422	Excavator	Caterpillar	320B	1997	95		10.61		1.03	1.86	7.60	0.74	1.33	
	9272-3481	Excavator	Komatsu	PC400LC	2000	239		8.14		0.53	1.92	5.39	0.35	1.27	
	9272-0853	Excavator	Komatsu	PC400LC	1993	246		14.18		0.83	1.80	12.86	0.75	1.63	
A03	Tier 0	Backhoe					Tier 0		10.59	1.51	8.87				燃料比 (g/gal)
	Tier 1	Backhoe					Tier 1		10.49	1.01	4.44				
	Tier 2	Backhoe					Tier 2		9.98	1.01	1.31				
A05	1	Excavator	Kobelco	SK130	1998	69	Tier 1		10.89	0.45	1.29				燃料比 (g/gal)
	2	Excavator	Caterpillar	320C	2002	103	Tier 1		7.76	0.90	3.13				
	3	Excavator	Komatsu	PC300-7	2001	189	Tier 1		11.09	1.03	1.42				
A06	Backhoe1	Backhoe			2004	88	Tier 2	12.50		3.43	6.55				燃料比 (g/gal)
	Backhoe2	Backhoe			1999	88	Tier 1	9.98		1.21	3.83				
	Backhoe3	Backhoe			2000	88	Tier 1	8.27		1.01	2.32				
	Backhoe4	Backhoe			2004	97	Tier 2	17.34		1.41	1.11				
	Backhoe5	Backhoe			1997	90	Tier 0	11.19		1.51	8.07				
	Backhoe6	Backhoe			2001	90	Tier 1	10.69		1.21	3.53				
	Backhoe7	Backhoe			1999	99	Tier 1	16.54		1.31	6.15				
	Backhoe8	Backhoe			2004	97	Tier 2	16.94		1.71	2.72				
A08		Excavator	John Deere	120C	2004	66	Tier II	9.20		0.95	0.15	2.83	0.29	0.02	燃料比 (g/L) および 仕事量比 (g/kWh)
		Excavator	Kobelco	135SR	2002	70	Tier II	8.28		0.92	1.15	1.82	0.15	0.15	
		Excavator	Komatsu	PC228	2003	82	Tier II	13.89		1.45	3.63	1.92	0.09	0.57	
		Excavator	Caterpillar	320CL	2001	103	Tier II	5.69		0.38	1.53	0.07	0.00	0.02	
		Excavator	Hitachi	EX270LC	1997	125	Tier II	9.05		0.57	6.07	1.93	0.08	0.83	
		Excavator	Kobelco	SK250LC	2004	131	Tier II	6.37		0.50	2.21	0.05	0.00	0.02	
		Excavator	Volvo	EC240	2005	134	Tier II	7.33		0.65	1.76	0.11	0.01	0.01	
		Excavator	Kobelco	SK330LC	2008	177	Tier II	7.52		0.84	1.60	0.27	0.03	0.10	
		Excavator	Komatsu	PC300LC	2005	180	Tier II	5.38		0.34	1.98	0.54	0.03	0.18	
		Excavator	Komatsu	PC160-6	2009	84	Tier III	4.69		0.76	5.23	0.41	0.04	0.25	
		Excavator	Sany	SY215CLC	2012	116	Tier III	1.34		0.92	5.80	0.16	0.02	0.14	
		Excavator	Komatsu	PC200-8	2009	116	Tier III	3.28		0.50	2.18	0.16	0.02	0.08	
		Excavator	Caterpillar	308D	2009	42	Tier IV	4.05		0.19	1.60	0.57	0.03	0.19	
		Excavator	Volvo	EC250D	2012	151	Tier IV	6.68		1.37	1.11	0.14	0.01	0.01	
A09	1_BH	Backhoe	Deere	410J	2007	73.8	Tier 2	8.67		1.11	4.08	7.15	0.91	3.37	仕事量比 (g/hp-h)
	2_BH	Backhoe	Deere	310SSJ	2010	73.8	Tier 3	5.53		0.40	2.26	4.49	0.32	1.84	
	4_BH	Backhoe	Deere	310SG	2006	68.6	Tier 2	9.32		0.57	2.71	6.96	0.43	2.02	
	5_BH	Backhoe	Deere	410G	2006	73.8	Tier 2	8.37		1.07	3.31	6.69	0.86	2.64	
	11_EX	Excavator	Volvo	EC360B	2006	200.6	Tier 3	4.87		0.36	1.58	3.84	0.28	1.25	
	26_EX	Excavator	Komatsu	PC200	2007	115.6	Tier 3	4.84		0.31	1.83	3.55	0.23	1.34	
	27_HB-EX	HB excavat	Komatsu	HB215(hybr d)	2012	110.4	Tier 3	5.83		0.13	1.76	4.12	0.09	1.25	

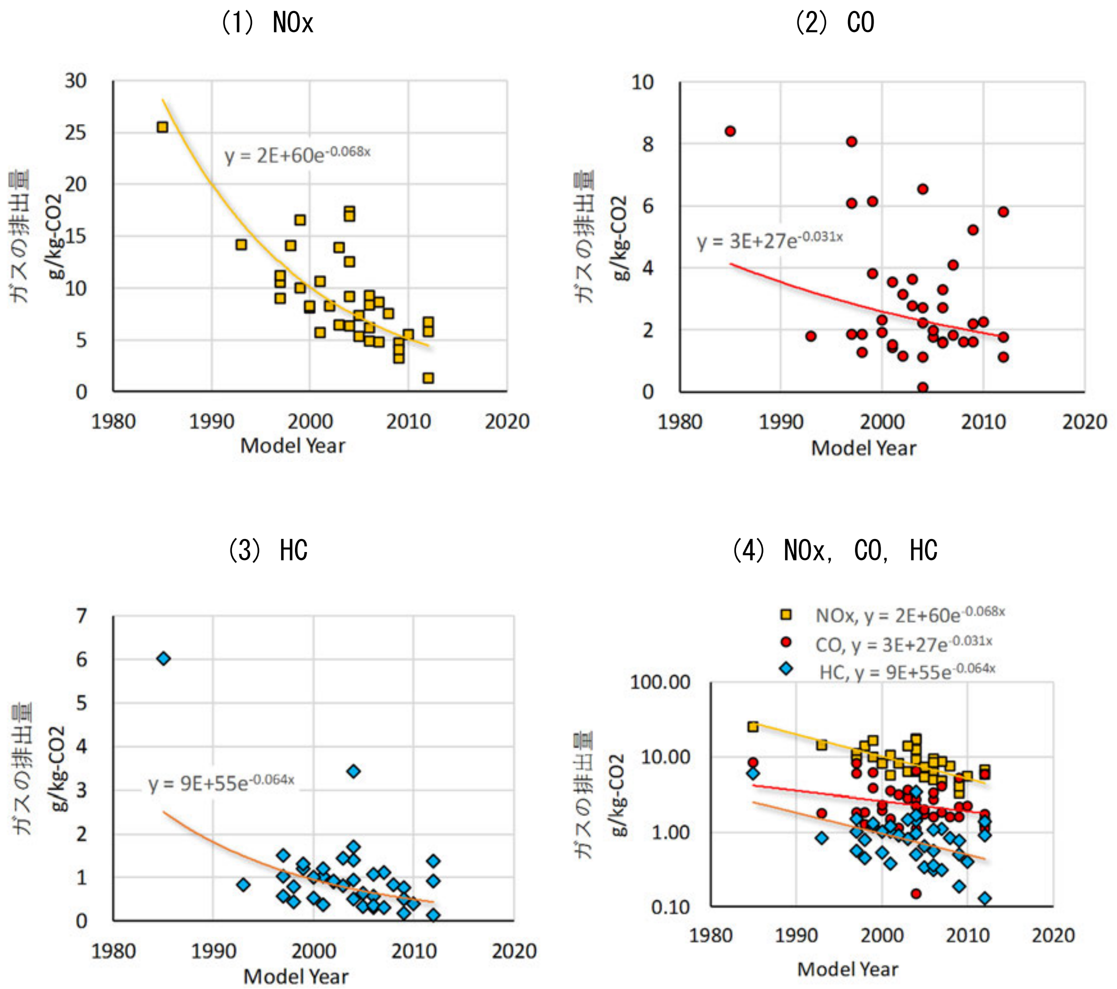
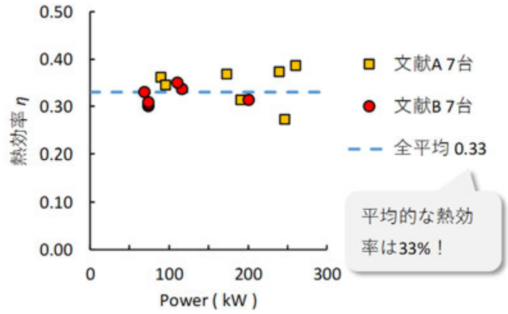


図-1.8 油圧ショベルの年式と排出ガス量の関係（ 文献値 ）. NOx は 4 文献 36 台, CO,および HC は 5 文献 39 台.

ここで油圧ショベルの仕事量比の排出量R_{GpW}が記載されている 3 編の文献での測定値から以下の方法で熱効率 η を算出した． まず, 公表値[R.10]等を使用して燃料比（ /ガロン, /リットル ）の排出量を CO_2 比の排出量 R_{GpCO2}（ g / kg-CO_2 ）（ R_{GpCO2}の補足説明は後述する. ）に換算した. 次に, R_{GpW}（g / kWh）, R_{GpCO2}, および軽油の CO_2 排出原単位 $m = 0.24732$（kg/kWh）（ 公表値[R.10] 0.0687 kg/MJ の単位を変換した値．）と(Eq.8)からηを算出した． 計算式の詳細は付録 A.1 に示す. 3 編の文献のうち, 1 編の文献値はηが 1.0 を超える異常値（ 軽油のエネルギー < 動力 ）になったので除外し, 他の 2 編の文献値[R.29], [R.36]から計算した 14 台のηを図-1.9 に示す． ηの平均値は 0.33 となった.

$$\frac{R_{\mathrm{GpW}}}{R_{\mathrm{GpCO2}}} = \frac{1}{\eta} m \qquad \text{(Eq.8)}$$



図−1.9　熱効率の推定値. 文献 A[R.29], 文献 B[R.36].

<u>ηを仮定して(Eq.8)にあてはめることで，R_{GpCO2} (g / kg-CO_2) とR_{GpW} (g / kWh) の換算ができる.</u>

1.3.2　オンロード車から排出される亜酸化窒素とメタンの測定

建設機械またはオンロード車から排出される亜酸化窒素等の温室効果ガスを測定した文献をオンライン･データベース DB で検索した. DB は科学技術振興機構 JST の科学技術文献情報（ 主として和文 ）の JDreamⅢ，および米 Thomson Reuters 社の Web of Science とした．検索の用語のうち排出ガスに相当するものは亜酸化窒素（ nitrous AND oxide AND gass ）とし，排出源に相当するものは自動車（ vehicle* OR car OR cars ）または建設機械 (((earthmoving OR earth-moving) OR (construction AND machine*) OR (construction AND vehicle*) OR nonroad OR non-road OR offroad OR off-road OR excavator*)) とした．期間を制限しないで Abstract を検索範囲に含めるなど広く検索した.

亜酸化窒素および建設機械の双方の用語を含む文献もみうけられたが， 建設機械から排出される亜酸化窒素を測定した文献はみあたらなかった． オンロード車から排出される亜酸化窒素等の文献は複数あり， これらのなかから乗用車， ガソリンエンジン， 天然ガス， バイオディーゼル等を除き， トラック（ 貨物車 ）またはバスのディーゼルエンジンを測定したものを**表−1.4** に整理した． 先駆け的に測定した文献[R.60][R.61]もみうけられたが， 初期の SCR 搭載車を測定したもので亜酸化窒素等の副生成物を抑制する制御が十分に行われていない車種を測定した可能性があり， 亜酸化窒素の影響を過大評価する可能性があること， および測定方式が記載されていなかったことを考慮して表には含めなかった． 測定方式が記載されていない他の文献も含めなかった.

亜酸化窒素の測定値の単位を仕事量 kWh あたりの質量 g としたものもみうけられたが， 文献[R.61]から推定したエンジンの熱効率を準用し，1.3.1 と同じ方法で CO_2比の排出量に換算し，亜酸化窒素の地球温暖化係数 298[R.12][R.11]により温室効果ガスとしての N_2O のシェア（%）を算出した．さらにエンジンの仕様（ 最高出力 ）を横軸としてグラフ化した（ **図−1.10**， および**図−1.11** ）． 以上の平均値を算出し， 一覧表に整理した（ **表−1.5** ）.

表-1.4 ディーゼルエンジンのオンロード車（ 乗用車を除く ）から排出される亜酸化窒素およびメタンの測定値. WEB OF SCIENCE（ 掲載されているのはインパクトファクター付きの論文のみ.）で検索した文献に国内の文献を追加，悉皆的な調査ではない．文献番号と本資料での引用文献の対応は以下. B01-[R.43], B02-[R.44], B03-[R.45], B04-[R.46], B05-[R.47], B06-[R.48], B07-[R.49].

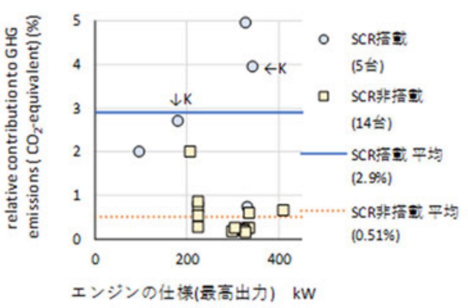
文献番号	第一著者が属する国, 所属	測定対象とした車両					測定方法	測定器		relative contribution to GHG emissions (%)[c]		備考
		識別名	Model Year	エンジン出力	排気量 (L)	排出ガス後処理装置[a]		測定方式[b]	機種	N_2O	CH_4	
B01	カナダ, 環境省	#1 buses(2台)	2006	206 kW	8.9		シャーシダイナモ試験	GC-FID (CH_4), GC-ECD (N_2O)	6890 (GC-FID), 5890A Series II (GC-ECD) (Hewlett-Packard)	2.0	0.13	
		#2 trucks(2台)	2004	331 kW	14.95					0.26	NM[d]	
		#3 Engine out	2004	336 kW	11					0.26	0.026	
		#3 oxidation catalyst	2004	336 kW	11	DOC				0.6	0.023	
		#4 Engine out	2002	224 kW						0.27	NM[d]	
		#4 Clean filter	2002	224 kW		DPF				0.74	NM[d]	
		#4 Regeneration	2002	224 kW		DPF				0.87	NM[d]	
		#5 2004 Freightliner LSD[e]	2004	435 hp	12.8					0.22	NM[d]	
		#5 2004 Freightliner ULSD[e]	2004	435 hp	12.8					0.2	NM[d]	
		#5 2003 Freightliner LSD[e]	2003	400hp	10.8					0.16	0.006	
		#5 2003 Freightliner ULSD[e]	2003	400hp	10.8					0.18	0.018	
		#5 1999 Freightliner LSD[e]	1999	410hp	12					0.25	0.012	
		#6 ULSD[e]	1996	300hp	7.2	DOC				0.53	0.004	
B02	米国,ウエストバージニア大	2010 Tractor-SCR	2010	445hp	12.8	SCR	シャーシダイナモ試験	FTIR	2030 HS (MKS)	0.75	0	
B03	米国, California Air Resources Board	Vehicle 1	2007	550hp		DOC, DPF	路上走行試験	FTIR	MuliGas (MKS)	0.66	0.02	
		Vehicle 2,4,5, &7 (4台)	2013 /2014	405-475 hp		DOC, DPF, SCR				4.96	0.02	車両別の測定値はない.

a 排出ガス後処理装置は以下. DOC: Diesel Oxidation Catalyst, ディーゼル酸化触媒, DPF: Diesel Particulate Filter, ディーゼル微粒子捕集フィルター, SCR: Selective Catalytic Reduction, 尿素 SCR システム, AMOx : Ammonia Oxidation Catalyst, 選択的アンモニア酸化触媒, DPNR: Diesel Particulate NOx Reduction system, PM と NOx を同時に連続浄化する触媒装置. b 測定装置は以下, FTIR: Fourier Transform Infra-red Spectroscopy, フーリエ変換赤外分光法, QCL-IR: Quantum Cascade Laser Infra-red, 量子カスケードレーザ赤外分光法, NDIR: Nondispersive infrared analyzer, 非分散形赤外線分析計, GC: Gas chromatograph, ガスクロマトグラフ, FID: flame ionization detector, 水素炎イオン化検出器, ECD: Electron Capture Detector, 電子捕獲検出器. c 温室効果ガスとしての N_2O, または CH_4のシェア. d NM は not measurable の略. e 燃料の略号は以下. 日本の軽油は ULSD に相当, LSD: low sulphur diesel, 低硫黄軽油, ULSD: ultra-low sulphur diesel, 超低硫黄軽油. f 文献には記載がないが, 適用されている規制等から推測.

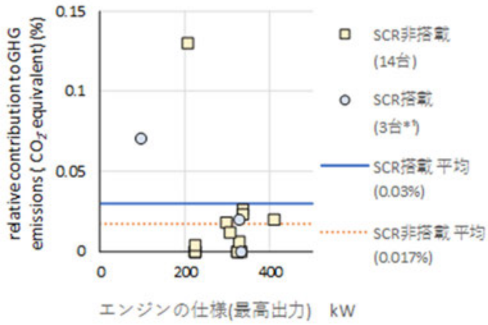
表−1.4　ディーゼルエンジンのオンロード車（ 乗用車を除く ）から排出される亜酸化窒素およびメタンの測定値（ つづき).

文献番号	第一著者が属する国,所属	測定対象とした車両					測定方法	測定器		relative contribution to GHG emiss ons (%)[c]		備考
		識別名	Model Year	エンジン出力	排気量(L)	排出ガス後処理装置[a]		測定方式[b]	機種	N_2O	CH_4	
B04	イタリア, EU Joint Research Centre	Euro V	2005-2012 (推測[f])	343 kW	11	DPF, SCR	路上走行試験	QCL-IR	MEXA1400 QL-NX (HORIBA)	3.96	測定値なし	relative contribution to GHG emiss ons は,文献から推定した熱効率36%で推定
B05	イタリア, EU Joint Research Centre	a Euro VI N3	2013以降 (推測[f])	180kW以上(推測[f])		DOC, DPF, SCR, AMO_X	路上走行試験	QCL-IR	MEXA1499 QL-NX (HORIBA)	2.71	測定値なし	
B06	日本, 交通安全環境研究所	B	2011	96kW	2.999	DPF+SCR	路上走行試験	FTIR	FAST-2200 (IWATA)	2	0.07	暖気時の走行（文献ではIII-1）２回の平均値
B07	日本,東京都環境科学研究所	B車			7.684	SCR	路上走行試験	NDIR		5%以内	測定値なし	査読付き論文でない.
		A車			12.913					約5～30% 平均車速約10-50km/hと正の相関		
		C車			12.808							
		D車			10.836					5%以内		
		E車			12.913							

a　排出ガス後処理装置は以下. DOC: Diesel Oxidation Catalyst, ディーゼル酸化触媒, DPF: Diesel Particulate Filter, ディーゼル微粒子捕集フィルター, SCR: Selective Catalytic Reduction, 尿素 SCR システム, AMOx : Ammonia Oxidation Catalyst, 選択的アンモニア酸化触媒, DPNR: Diesel Particulate NOx Reduction system, PM と NOx を同時に連続浄化する触媒装置. b　測定装置は以下, FTIR: Fourier Transform Infra-red Spectroscopy, フーリエ変換赤外分光法, QCL-IR: Quantum Cascade Laser Infra-red, 量子カスケードレーザ赤外分光法, NDIR: Nondispersive infrared analyzer, 非分散形赤外線分析計, GC: Gas chromatograph, ガスクロマトグラフ, FID: flame ionization detector, 水素炎イオン化検出器, ECD: Electron Capture Detector, 電子捕獲検出器. c　温室効果ガスとしての N_2O, または CH_4のシェア. d NM は not measurable の略. e　燃料の略号は以下. 日本の軽油は ULSD に相当, LSD: low sulphur diesel, 低硫黄軽油, ULSD: ultra-low sulphur diesel, 超低硫黄軽油. f　文献には記載がないが, 適用されている規制等から推測.



図−1.10 温室効果ガスとしての N_2O のシェア（ ディーゼルエンジンのオンロード車 ）. 縦軸は国内の文献での「シェア」,「寄与率」,「GHG 中に占める排出割合」に相当する. 「↓K」, および「←K」の 2 点は推定した熱効率より換算したもの.



図−1.11 温室効果ガスとしての CH_4のシェア（ ディーゼルエンジンのオンロード車 ）. 縦軸は国内の文献での「シェア」,「寄与率」,「GHG 中に占める排出割合」に相当する. 3 台*1: N_2O を測定した 5 台のうち CH_4を測定したものは 3 台.

表−1.5 ディーゼルエンジンのオンロード車（ 乗用車を除く ）から排出される亜酸化窒素およびメタンの温室効果ガスとしてのシェアの平均値（ %).

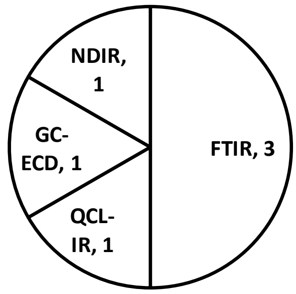
	亜酸化窒素 N_2O	メタン CH_4
SCR 搭載車	2.9	0.03
SCR 非搭載車	0.51	0.017

自動車から排出される CH_4は，天然ガスエンジンの不十分な燃焼による副生成物であり, N_2O は三元触媒 TWC および SCR の触媒反応の副生成物[R.44]と報告されているようにディーゼルエンジンから排出されるメタンの影響は皆無であるが， SCR 搭載車の N_2O は温室効果ガスの削減目標の設定に影響を及ぼす可能性がある.

なお， N_2O の測定方法は日本国内では定められておらず，米国の連邦規則（ Title 40, § 1065.275[R.14] ）には，直線性の検証（ linearity verification ）が行われれば表−1. 6 の分析計のいずれでも選択できる旨が示されている． 表−1.4 の測定器を測定機関数別に整理した （ 図−1.12 ）.

表−1.6　N_2O の分析計（ 米国連邦規則[R.14]より).

分析計	備考
Nondispersive infrared (NDIR) analyzer	非分散形赤外線分析計
Fourier transform infrared (FTIR) analyzer	フーリエ変換赤外吸収法．一例として EPA Test Method 320.
Laser infrared analyzer	レーザ吸光法
Photoacoustic analyzer	光音響効果
Gas chromatograph analyzer	ガスクロマトグラフ式分析計 GC



図−1.12　N_2Oの測定機器（ 研究機関の数 ）. 略称, および記載された文献は以下. FTIR (Fourier transform infra-red spectroscopy, フーリエ変換赤外分光法) [R.44][R.45][R.48], QCL-IR (quantum cascade laser infra-red, 量子カスケードレーザ赤外分光法) [R.46][R.47] (同一機関) , GC-ECD (GC: gas chromatograph, ガスクロマトグラフ, ECD: electron capture detector, 電子捕獲検出器) [R.43], NDIR (nondispersive infrared analyzer, 非分散形赤外線分析計) [R.49]. 測定機器についての記載がない文献, および土木研究所の測定は含めていない.

第２章　測定

2.1　概要

測定方法の概要を**表-2.1** に示す. 2011 年規制, および 2014 年規制に対応して, 後処理装置のディーゼル微粒子捕集フィルターDPF (Diesel particulate filter), ディーゼル酸化触媒 DOC (Diesel oxidation catalyst), および SCR を搭載した 20t, および 13t クラスの油圧ショベルを測定した.

エンジン回転数とトルクは, 2015, 2016, および 2017 年度において CAN (controller area network, 輸送用機械やロボット等の機器間のデータ転送に使われる規格) のデータロガーを使用して測定した. 2018 年度は, 振動センサでエンジン回転数のみ測定した. 排気流量は, 2015, 2016, および 2017 年度においてピトー管式の流量計で測定したが, 2018 年度は測定しなかった. エンジン回転数, トルク, および排気流量の測定を省略した事情等については本節の**補足　測定項目**で説明する.

排出ガスの濃度は FTIR で測定した. 周波数別の音の大きさをフーリエ変換で分析するように, 赤外光の波長別の吸収率を測定して排出ガスの組成を分析する. 測定対象としたガスは CO_2, N_2O, CH_4 の他に CO, NO, NO_2, NMHC (非メタン炭化水素) も含めた.

表-2.1　測定概要.

<table>
<tr><td>測定時期</td><td colspan="4">2015 年度 (10 月, 1 月), 2016 年度 (12 月),
2017 年度 (10 月), 2018 年度 (8 月)</td></tr>
<tr><td>測定場所</td><td colspan="4">土木研究所構内 (2015, 2016 年度)
つくば市内のレンタル会社 (2016, 2017 年度)</td></tr>
<tr><td rowspan="9">測定対象
(建設機械)</td><td colspan="4">油圧ショベル</td></tr>
<tr><td>規制年</td><td>メーカとクラス</td><td>排出ガス後処理装置</td><td>測定年度</td></tr>
<tr><td>2011</td><td>A 社 20t</td><td>DOC, DPF</td><td>2015, 2016</td></tr>
<tr><td>2011</td><td>B 社 20t</td><td>DOC, DPF</td><td>2018</td></tr>
<tr><td>2011</td><td>B 社 13t</td><td>DOC, DPF</td><td>2018</td></tr>
<tr><td>2014</td><td>A 社 20t</td><td>DOC, DPF, SCR</td><td>2017</td></tr>
<tr><td>2014</td><td>B 社 20t</td><td>DOC, SCR</td><td>2018</td></tr>
<tr><td>2014</td><td>A 社 13t</td><td>DOC, SCR</td><td>2017</td></tr>
<tr><td>2014</td><td>B 社 13t</td><td>DOC, SCR</td><td>2018</td></tr>
<tr><td rowspan="5">測定項目と測定装置</td><td>測定項目</td><td colspan="3">測定装置</td></tr>
<tr><td rowspan="2">エンジン回転数, トルク</td><td colspan="3">A 社の測定: CAN データロガー(VECTOR, GL1000)</td></tr>
<tr><td colspan="3">B 社の測定: 振動センサ式回転計</td></tr>
<tr><td>排気流量</td><td colspan="3">ピトー管式流量計 (2015, 2016, 2017 年度)</td></tr>
<tr><td>排出ガス濃度</td><td colspan="3">FTIR (岩田電業, FAST-2200)</td></tr>
<tr><td>測定対象 (ガス)</td><td colspan="4">CO_2, CO, CH_4, N_2O, NO, NO_2, NMHC (非メタン炭化水素), NH_3 他</td></tr>
<tr><td>サンプリング周波数</td><td colspan="4">5Hz (0.2 秒間隔)</td></tr>
</table>

2016年度, 2017年度, および2018年度の測定状況を**図-2.1**, **図-2.2**, **図-2.3**, および**図-2.4**に

示す（ 詳細は**付録A.2**（ P.96 ））. 2015年度は**図-2.1**と同様に測定器を建設機械に搭載して測定した. 2017年度, および2018年度は測定器を建設機械の近傍において測定した. このように建設機械に測定器を車載して測定する方法は杉谷らが確立した手法である[R.65]. 2017年度は流量計を使用したが, 2018年度は使用しなかった. 排気流量測定において誤差の原因となる排気管内の偏流は直管で抑制できる [R.64]ため, 後付けした直管内にピトー管を設置した. FTIRにガスを取込む加熱導管の先端は外気の混入がない位置に設置した.

測定対象の動作は, 2015年度, および2016年度の測定では「待機 (アイドリング) 」,「走行」,「ならし (模擬動作)」,「掘削 (実作業)」, および「掘削・積込み (模擬動作)」 (**表-2.2**) としたが, **2.2**で後述するように「待機」以外の動作は「ならし」で代表できることを確認して, 2017年度, および2018年度は「ならし」のみを測定した. 「ならし」は走行, および旋回の動作を行わないので測定器を車載する必要がなくなり. 測定を簡素化することができた.

図-2.1 2016年度の測定 (1). (左上) 測定器の100V電源を後付けした発電機で供給した. (右上) 排気管を延長した直管の中央に排気流量計のセンサ (ピトー管) を2組 (異なるメーカ) 設置した. 排出ガスの濃度は加熱導管でFTIRにサンプリングして測定した. (左下) FTIRの制御, データ収集は運転席に設置したノートパソコンで行った. 後付けした測定機器で後方の視界が遮られるためモニタカメラを後付けで設置した. (右下) ECUのデータはCANデータロガーで収集した. ノートパソコンがなくても収集できるが, データの確認用にノートパソコンを使用した.

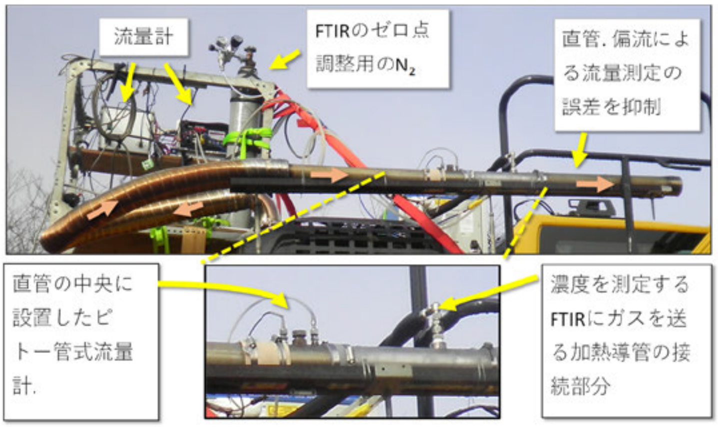


図-2.2 2016 年度の測定（2）．排気管はジャバラの接続管を経由して直管に接続した．直管は文献[R.64]で述べられているように排気流量測定において誤差の原因となる偏流を抑制する目的で設置した．ピトー管の下流で濃度を測定する FTIR で使用するガスを取り込んだ．流量計，および発電機を搭載した架台は荷締機（ 赤色のバンド ）で固定した．

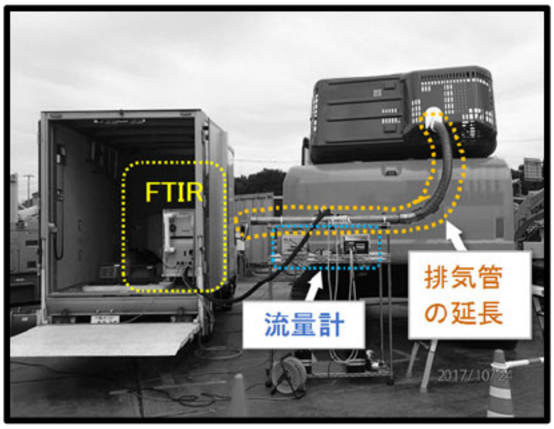


図-2.3 2017年度の測定．排気流量の測定とガスのサンプルするための直管は建設機械の後方に設置し，FTIRは横づけした貨物車の中に設置した．

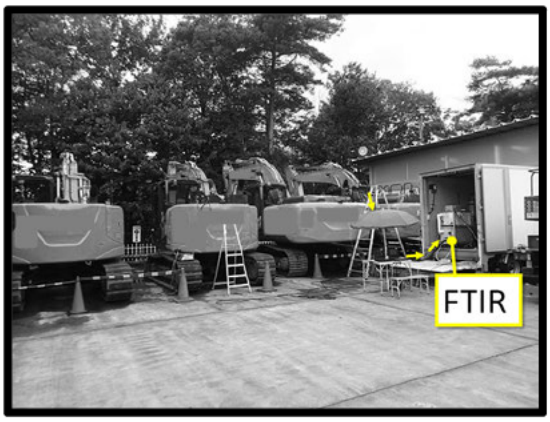
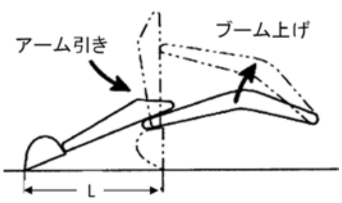


図-2.4 2018 年度の測定．同一の敷地内で油圧ショベル 4 台を測定した．排出ガスは加熱導管で排気管からサンプルした．傘は日よけ．

表-2.2　測定時の動作. 2015 年度，および 2016 年度.

動作	内　容	
待機	5 分間のアイドリング （ 異なる時間の測定有 ）	
走行	片道 25mの区間の往復を 3 サイクル	
ならし （ 模擬動作 ）	 (JCMAS H 020:2014 [R.24]引用 ）	アーム，およびバケットが一直線になる状態を開始姿勢とし，L=4. 5m の範囲で水平引き.
掘削 （ 実作業 ）	掘削，45 度の旋回，およびバケットダンプを 5 サイクル.	
掘削･積込み （ 模擬動作 ）	 (JCMAS H 020:20142 [R.24] 引用 ） （ 開始姿勢はアーム，およびバケットが一直線 ）	開始姿勢，水平引き，バケット掘削，ブーム上げを伴う 90 度の旋回，およびバケットダンプを 5 サイクル （ 異なる時間の測定有 ）.

補足1 測定項目

排出ガスの規制は仕事量比の排出量R_{GpW} （ 付録の(Eq.1))を評価量としているが，温室効果ガスの N_2O，および CH_4は温室効果のシェア （ 海外での用語は relative contribution to GHG emissions (CO_2-equivalent) ） $R_{\mathrm{G_GWP}}$で評価されている （ 付録の(Eq.12), (Eq.13)に相当する値 ）. $R_{\mathrm{G_GWP}}$は CO_2比の排出量R_{GpCO2} （ 付録の(Eq.5))から計算できる. R_{GpW}，およびR_{GpCO2}を得るために必要な測定項目を表-2.3 に整理した. 本研究では排出ガスの評価量をR_{GpCO2}としてVの測定の簡素化について検討した(後述する 2.2 (P.29)，および [R.68]). (a) VとC_{G}の測定値による方法を真値が得られる方法とみなし, (b) R_{E}から Vを推定し （ 付録の(Eq.9) ），Vを測定しない方法, (c) C_{G}の測定値のみによる方法(付録の式(Eq.7) ） を比較し，図-2.5 に示すように(b)および

表-2.3　測定値の評価量と測定項目.

排出ガスの評価量	測定項目			
	エンジン回転数R_{E}	トルクT_{E}	排気流量V	排出ガスの濃度C_{G}
仕事量比の排出量R_{GpW}	○	○	○	○
CO_2比の排出量R_{GpCO2}			○	○

(c)でも信頼性の高い測定値を得ることを明らかにしていた．二つの流量計で測定した排気流量の平均値で計算したR_{GpCO2}を真値とみなした場合の(c)の計算方法の誤差は，比較的濃度の高いNOx で 1.1%, NOx の 1/100 程度のごく低濃度の N_2O でも 3.1%であった（ 表-2.4 (P.32), [R.68]).「真値とみなして」と表現したのは流量計の測定値にも誤差が含まれるためである．流量計による測定値は流量が少ない条件では過少になることや，条件によっては台上試験装置より 20%程度低い値になることも報告されている[R.27].

2018 年度は，(b)または(c)でデータ処理する予定でエンジン回転数R_{E}のみ測定したが，後述する図-2.12 のように除外処理が必要な異常データが含まれため，排出ガス量の計算は(c)によることとし，R_{E}は使用しなかった. 2018 年度において, CAN のデータロガーでの測定を行わなかったのは測定対象とした建設機械の CAN のデータ処理に必要なパラメータの情報等がなかったためである．大半の建設機械では CAN のデータへのアクセスが困難である旨を記載した論文[R.35]があること，および CAN のデータはメーカが取り扱いに留意していることから，第三者による収集については，その是非を含めた検討が必要と考えている．また，排気流量の測定を省略したのは測定台数を増やすために測定を簡素化したためである．排気流量を測定するためには機械毎に異なる排気管の図面を入手して図-2.6 のような接続管を製作することが必要になる. 2018 年度において測定対象とした建設機械は図-2.7 のような二重管の構造をしており，限られた時間でメーカの関係者と協議して接続管を製作することは困難と判断し，排気流量の測定を省略した．高温による事故防止等，なんらかの事情で二重管の構造にしていることも考えられるので，排気流量の測定も，その是非や吸入空気量その他の測定値での代替案の検討が必要と考えている.

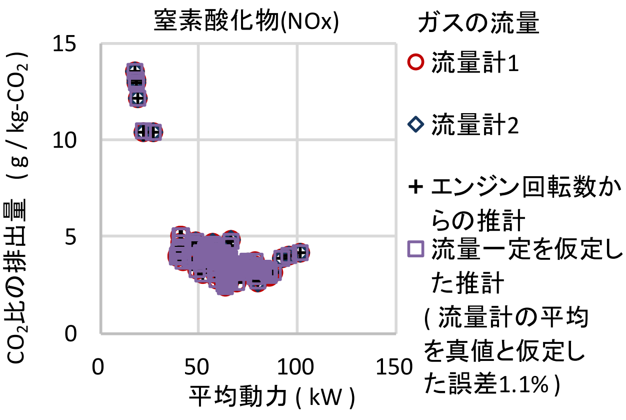


図-2.5　排気流量の測定値または推計値とCO_2比排出の例[R.68].

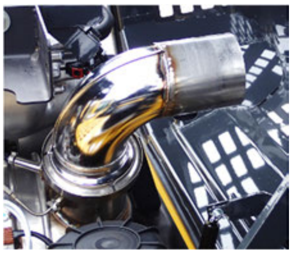


図-2.6　排気流量測定のために製作した接続管の例.

図-2.7　二重構造の排気管の例.

補足 2 FTIR の測定原理

気体が吸収する赤外線の波長は気体の種類により異なり，多種類の混合気体に広い波長分布を光源（シリコンカーバイド）とした赤外線を通過させると各気体で複合的に赤外線が吸収される．一方，図-2.8 のとおり，(1)広い波長分布の赤外線を(2)半透鏡で反射光と透過光に分割し，(3)それぞれ固定鏡と移動鏡で反射させて(4)再合成すると干渉光が得られる．干渉光を検出器で測定した強度は，移動鏡の位置を変化させると各波長固有の周期で変化するので，測定対象の気体を通過させた場合の出力をフーリエ変換し，気体がない場合と比較すれば波長別の吸収率を計算できる．さらに波長別の吸収率を逆行列等で逆解析することで各種の気体の濃度を計算できる．このように光を半透鏡で分割し，再合成させた干渉光を観測する測定方法は，特殊相対性理論の立証や重力波の検出で使用された技術（マイケルソン干渉計）を応用したものであり，フーリエ変換は音や振動の周波数分析で多用されている計算方法である．ともに製造業，環境，医学など実務で広範に活用されている．

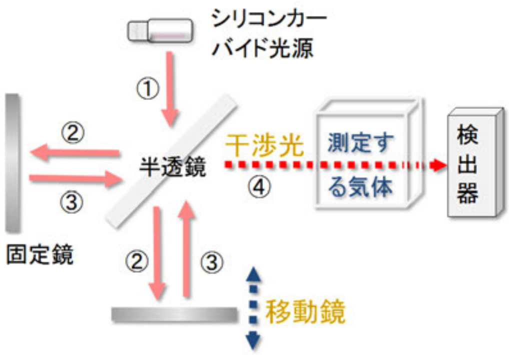


図-2.8　FTIRの模式図.

補足 3 測定値の例

測定器を建設機械に搭載した 2016 年度の測定値の例を図-2.9 に示す. 2017 年度は待機とならしの動作のみを測定し，流量計は1台. 2018 年度は ECU のデータ取得を行わず，エンジン回転数は振動センサで取得した．排出ガスの濃度は全ての年度で取得した.

全てのデータを資料にすると膨大な量となるため付録 A. 3（P. 106）に電子データを添付した.

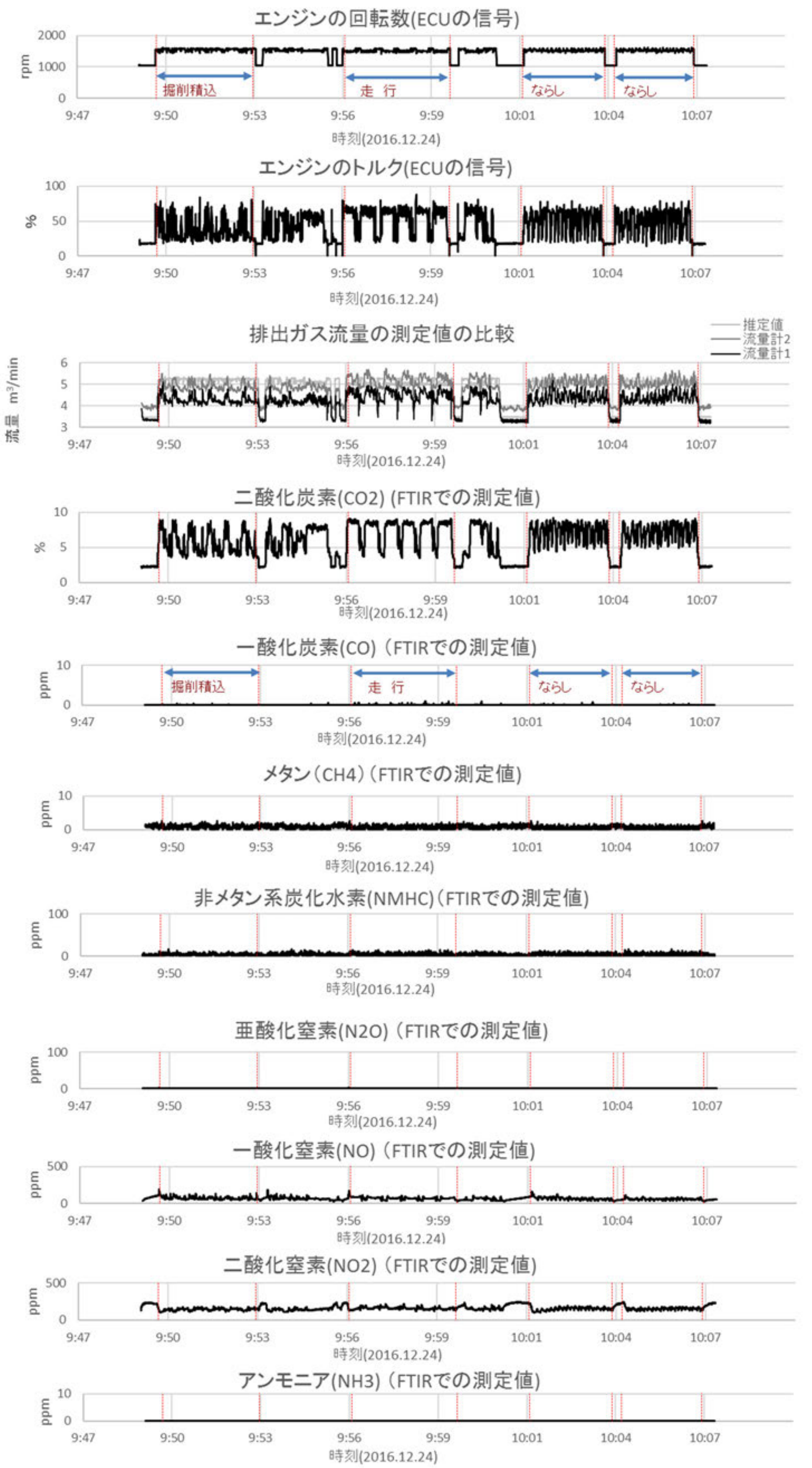


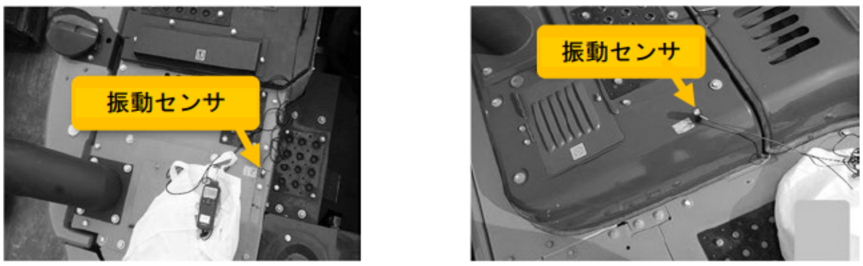
図-2.9 測定値の例. 測定器を建設機械に搭載した2016年度の測定値. データのサンプリングは毎秒5回.

補足 4 エンジン回転数の測定方法

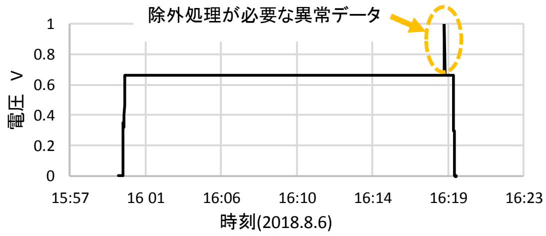
エンジン回転数の測定方法については，CAN のデータロガーによる ECU のデータ取得，光学センサによる方法，音を分析する方法，および振動による測定器を試した. CAN のデータロガーは測定した 2 社 7 台の油圧ショベルのうち1社 3 台で使用し，他の 1 社 4 台の油圧ショベルではコネクタ，およびパラメータの設定情報がなかったので使用しなかった．光学センサはエンジン出力の回転部分に設置することが必要であるが，測定した建設機械のエンジンルームは排出ガス対策等で増えた機器のためが狭く，安全対策のガードが付けられていた（ 図−2.10 ）. 無理をしてセンサを設置すると事故や故障の原因になると判断して使用しなかった.

図−2.10 建設機械のエンジンルームの例. 回転部分への接触を防止するガードが付けられている.

音の分析による方法は，アンドロイドの無料ソフトを入手して試したが，測定値が安定せずデータの取り込みができなかったので，自作のマイクとプログラムで試したが安定した測定値を得ることがきなかった．振動センサによる方法では音の分析よりは安定したデータを得ることができた．しかし，安定したデータを得ることができる設置位置は油圧ショベルごとに異なり（ 図−2.11 ）， 除外処理が必要な異常データが含まれた（ 図−2.12 ）．エンジン回転数は第 5 章（ P.76 ）で述べるように燃料消費量の簡易測定にも活用できるので簡易かつ着実に測定可能な方法を見出す意義があると考えている.



図−2.11 エンジン回転数測定の振動センサの設置位置.



図–2.12 振動センサによるエンジン回転計の測定値の例.

2. 2　測定値の信頼性向上と測定の簡素化

測定値の信頼性を向上させるためには，誤差の少ない測定方法を採択して多数の建設機械を測定して平均値を得ることが必要であり，限られた予算で多数の機械を測定するためには測定の簡素化が必要である.

本研究の 2016 年度，および 2017 年度時点においては，2014 年度規制に対応して SCR を搭載した 10~20t クラスの油圧ショベルが規制の経過措置により市場投入されていなかったので，SCR を搭載していない 2011 年規制車 1 台を測定して，測定値の信頼性向上と測定の簡素化について検討した.

測定値の信頼性を向上させるためには，以下の**課題1**，**課題2**，および**課題3**への対応が必要と考えた.

・**課題1**: 規制値は質量と仕事量の比（g / kWh）で定められているため動力（kW）の測定が必要なるが，動力の計算の元となるエンジンのトルクは，エンジンを架装した建設機械では実測することが不可能である．このため，ECU（engine control unit）の電気信号のデータを拠り所とする[R.29][R.37][R.66][R.67]ことになる．しかし，このデータは室内試験値に基づく推定値であり，建設機械ではインターフェースが標準化されておらず[R.32]，大半の建設機械ではCANのデータへのアクセスが困難[R.35]である.

・**課題2**: 排出量（g）は，排出ガスの濃度と流量の積で算出するため，濃度のみならず流量の測定誤差を含む．流量計による測定値は流量が少ない条件では過少になることや，条件によっては台上試験装置より20%程度低い値になることも報告されている[R.27].

・**課題3**: 土の条件（硬さ，含水比等）により動作（掘削，走行等）に必要な動力が異なる.

オンロード車の RDE 試験では実走行を模擬することを優先する方針で測定方法を定めているが，建設機械の実稼働では，降雨の影響で試験場の土が水分を含んでいると履帯（図–2.13 の例）やバケットに付着する土により負荷が増大する等，多様な要因で負荷が大きく変化することから，実稼働に近い条件で測定すると測定値の標準偏差が大きくなって排出ガスを適正に評価できなくなる可能性が高い.

図–2.13 履帯に付着した土の例.

課題1，および**課題2**については，CO_2との質量比（ g / kg-CO_2 ）で評価する方法（ 山本らが提案している方法[R.57][R.58][R.59] ） で解消できることを報告した[R.67][R.68]．**課題3**については，各種の動作のなかから「待機 （ アイドリング ）」と「ならし （ 模擬動作 ）」を選定することで排出ガスの実情を把握できることを報告した[R.68]．以下，報告内容を示す．

2.2.1　排出ガスの評価量

オフロード法，および海外の排出ガス規制は排出ガスの質量M_{G} （ g)と仕事量W (kWh)の比

$$R_{\mathrm{GpW}}(\mathrm{g} / \mathrm{kWh}) = M_{\mathrm{G}} / W \qquad \text{(Eq.1)}$$

で定められている． さきに述べた「CO_2比の排出量」は，M_{G} （ g)と CO_2排出量M_{CO2} (kg) の比

$$R_{\mathrm{GpCO2}} = M_{\mathrm{G}} / M_{\mathrm{CO2}} \qquad \text{(Eq.5)}$$

となる．R_{GpCO2}は排出ガス濃度 （ ppm ） の時間積算値$\int C_{\mathrm{G}} dt$と CO_2濃度 （ ppm)の時間積算値$\int C_{\mathrm{CO2}} dt$ の比

$$R_{\mathrm{C\_GpCO2}} = \int C_{\mathrm{G}} dt / \int C_{\mathrm{CO2}} dt \qquad \text{(Eq.6)}$$

に排出ガスの密度ρ_{G} （ g / m^3) とCO_2の密度ρ_{CO2} （ g / m^3 ） の比を乗じて 1000 倍した値

$$R_{\mathrm{GpCO2}} \cong 1{,}000 \cdot R_{\mathrm{C\_GpCO2}} \cdot \rho_{\mathrm{G}} / \rho_{\mathrm{CO2}} \qquad \text{(Eq.7)}$$

で近似できる．計算式の詳細は**付録 A.1** （ P.93 ） に示す． 排気流量が時間変動しない場合の(Eq.7)は等号になる．「仕事量比での排出量R_{GpW} (g / kWh)」と「CO_2比の排出量R_{GpCO2} （ g / kg-CO_2)」の 2 種類の評価量について 2016 年度の測定値を解析して信頼性を比較した．2016 年度は**付録 A.2** （ P.96 ） に示すように運転モード （ パワー優先，燃費優先)，エンジンのスロットル （ MAX，中間，MIN ），暖気の有無，動作の緩慢 （ 乱暴，普通，穏やか ），動作の内容 （ 待機，走行，掘削，ならし等 ） を組み合わせることで多様な測定条件とするとともに，排出ガスの流量計を 2 台設置して測定した． 時間平均した動力と 4 種類の排出ガスの関係を**図-2.14** に示す．各ガスの上段がR_{GpW}，下段がR_{GpCO2}である．R_{GpW}では排気流量の測定値・推計値により排出量が異なる （ プロットされる点の位置が異なる．） が，「CO_2比の排出量R_{GpCO2}」では流量の測定値・推計値によらず排出量 （ g / kg-CO_2 ） が一致する （ プロットされる点の位置が一致する．）．さらにR_{GpCO2}を濃度比で近似した(Eq.7) (流量一定を仮定した推計 ） もよく整合する． 以上の結果を**表-2.4** にまとめた． 3 種類の排気流量 （ データ数は 3 ） に基づく排出量R （ 評価量はR_{GpW}またはR_{GpCO2} ） の変動係数C_{V} （ **付録** (Eq.15)．三つのデータの標準偏差σと平均$\bar{R}$との比 ）(%)を 58 回の測定 （ **付録 A.2** の 2016 年度 ） で平均した値$\overline{C_{\mathrm{V}}}$を 2 列目と 3 列目に示した．$R_{\mathrm{GpCO2}}$を採択することで$\overline{C_{\mathrm{V}}}$が大きく減少する．二つの流量計で算出した$R$の平均を真値$R_{\mathrm{T}}$とみなし，エンジン回転数から推計した流量で算出した排出量R_{S} （ 評価量はR_{GpW}またはR_{GpCO2} ） の誤差e_{P} （ (Eq.16))の測定数 58 の平均値$\overline{e_{\mathrm{P}}}$ を 4 列目と 5 列目，同様に(Eq.7)で算出したR_{S}の$\overline{e_{\mathrm{P}}}$を 6 列目に示している．排出ガスの評価量を$R_{\mathrm{GpW}}$(4 列目)とした場合は$\overline{e_{\mathrm{P}}}$が 10%を超えるが，$R_{\mathrm{GpCO2}}$(5,6 列目)では$\overline{e_{\mathrm{P}}}$が 5%以下となった． 排出ガスの評価量として$R_{\mathrm{GpCO2}}$を採択すれば，動力の測定値が不要になるのみならず，排気流量の測定値または推計値の誤差の影響が激減するので測定値の信頼性が飛躍的に向上し，測定を簡素化できる．

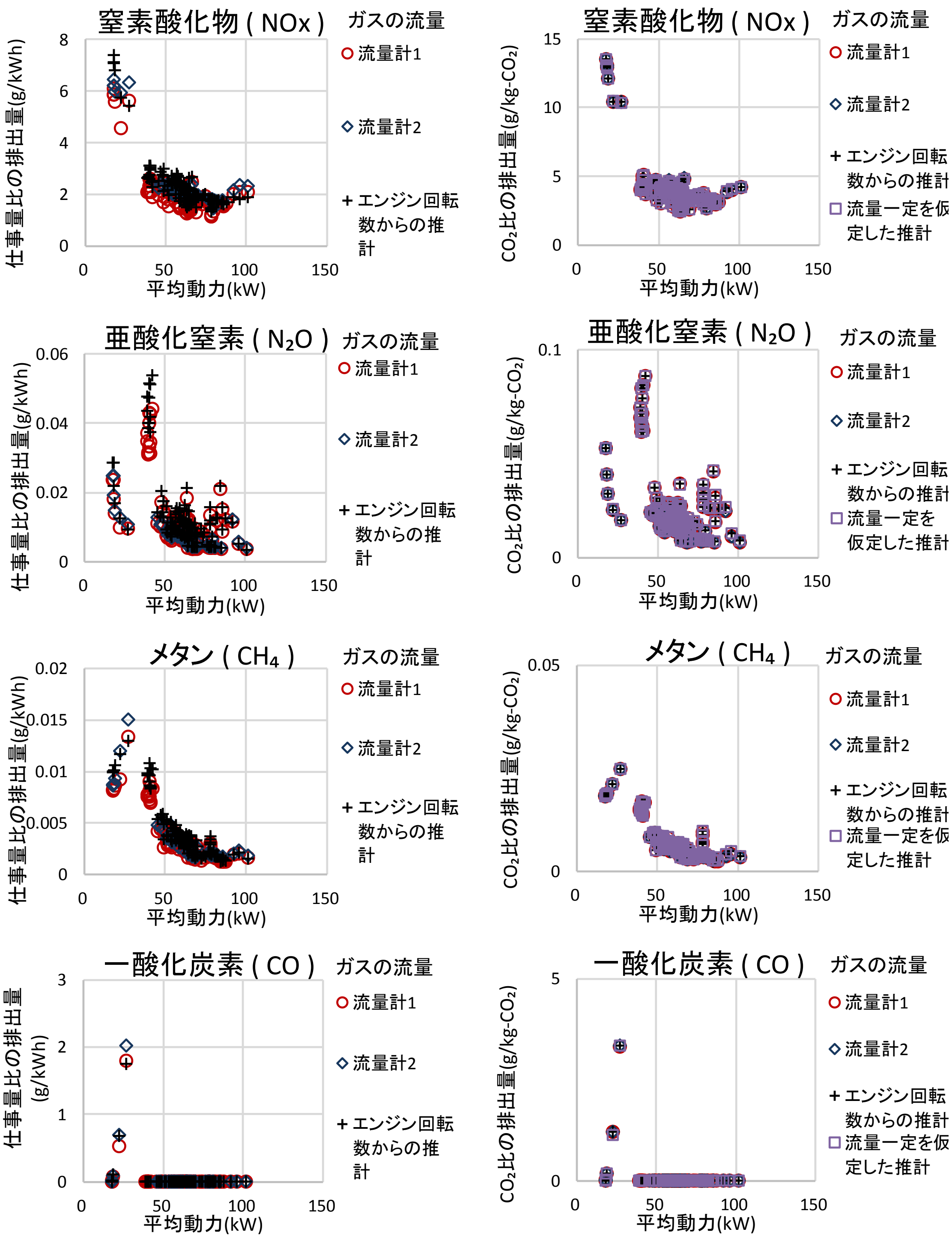


図-2.14　多様な動作条件での排出ガスの評価量.

表-2.4　2 種類の評価量のまとめ.

ガス	変動係数の平均値$\overline{C_\mathrm{V}}$（%）		推計した流量で計算した排出量R_Sの誤差の平均値$\overline{e_\mathrm{P}}$（%）		
			エンジン回転数で推定		(Eq.7)
	R_GpW	R_GpCO2	R_GpW	R_GpCO2	R_GpCO2
NOx	8.7	0.4	12.2	0.7	1.1
CH_4	9.4	1.8	14.0	3.1	3.8
N_2O	9.1	1.4	13.4	2.5	3.1
CO	8.2	2.5	10.3	3.8	4.3

$$C_\mathrm{V} = \frac{\sigma}{\overline{R}} \cdot 100 \qquad \text{(Eq.15)}$$

$$e_\mathrm{P} = \left| 1 - \frac{R_\mathrm{S}}{R_\mathrm{T}} \right| \cdot 100 \qquad \text{(Eq.16)}$$

以上より，建設機械の動作時における排出ガスの評価量として「CO_2比の排出量R_GpCO2」を選定した． 排出ガスの評価量をR_GpCO2とすることで排気流量を推計値としても実測値とした場合とほぼ同一の評価結果となる．

なお，(Eq.1)と(Eq.5)の関係式は付録 A. 1 の(Eq.8)に示す． また，測定値の関係は図-2.15 に示す． 将来，このようなデータが必要になる可能性があるので，排気流量およびエンジントルクの測定値は参考用として取得しておくことが望ましいと考えている．

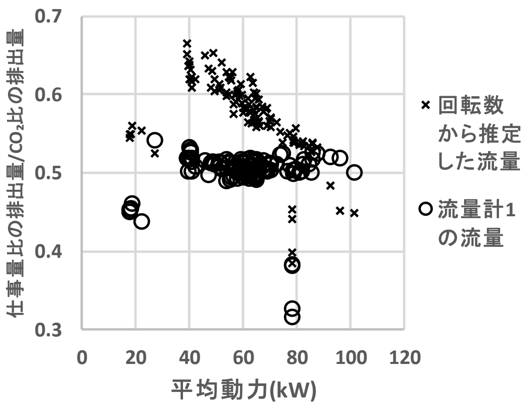


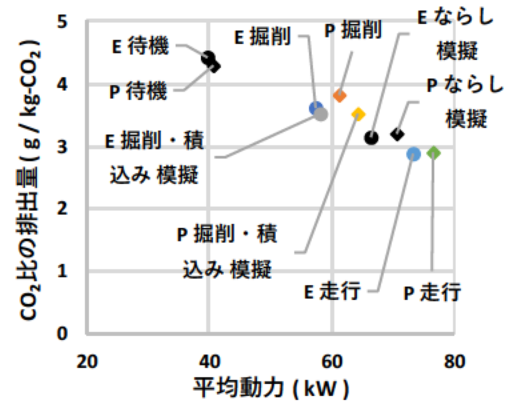
図-2.15　仕事量比での排出量と CO_2比での排出量の比. 本論文での NOx の測定値． 縦軸は式（Eq.8）のkに相当する値．

2.2.2　測定対象動作の選定

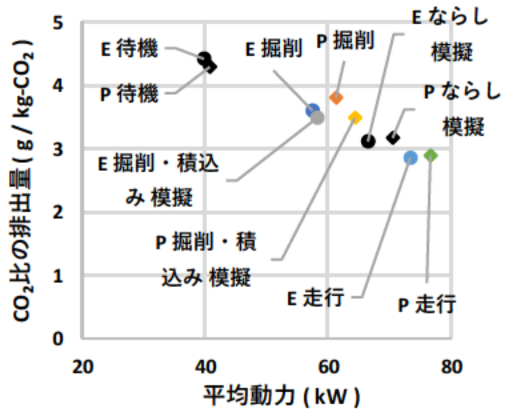
a）動作別の測定値

2015年度は，測定時期，オペレータ，および運転モードの条件を2期（ 10月と1月 ），3人，および2種類（ パワー優先と燃費優先 ）の組み合わせとした約30～40分間の測定を合計で12回 (2×3×2) 行っている（ 付録 A. 2 ）. 図-2.16は動作条件別のNOx (組成はNO_2とNOとした. NOはNO_2に化学変化するので法令[R.06]に準じて NO_2の密度で質量を計算した.) の測定値である

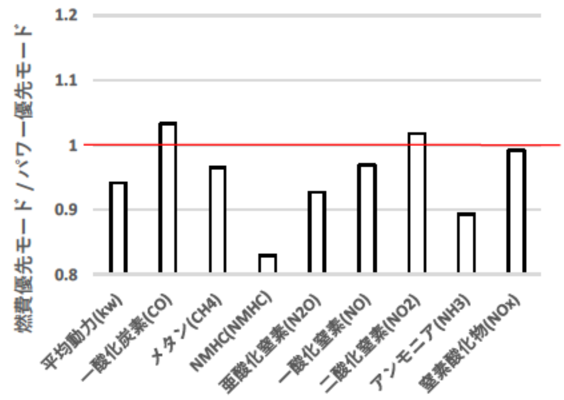
(実測の流量の場合は図−2.17). 一つのプロットは3人×2期=6回の平均値である. 平均的な動力は, 大きい順に「走行」,「ならし (模擬動作)」,「掘削・積込み (模擬動作)」,「掘削 (実作業)」,「待機 (アイドリング)」となり, パワー優先モード(P)の方が燃費優先モード(E)より大きかった. また, R_{GpCO2}は, 動力の小さい「待機」が最も大きく, 動力が大きくなると減少する傾向があり, 他のガスでも同様な傾向がみうけられた参考までにEモードとPモードとの排出量の比を図−2.18に示す.



図−2.16　動作条件別の NOx の測定値 (排気流量推定の場合.). 一つのプロットは 3 人×2 期=6 回の平均値.



図−2.17　動作条件別の NOx の測定値 (排気流量実測の場合). 一つのプロットは 3 人×2 期=6 回の平均値.



図−2.18　燃費優先モードとパワー優先モードのCO_2比排出量.

b）測定する動作の選定

前項で示したように「待機」は他の動作よりも排出量が大きいことから, 今後, 排出ガスの実情を把握する際の測定は必須と考えた. 他の動作は傾向が類似しているのでさらに詳細な解析を行い選定することとした. 図−2.19は2015年度, および2016年度双方の測定値から燃費優先モード, スロットルMAXでの「走行」,「掘削 (実作業)」,「掘削・積込み (模擬動作)」,「ならし (模擬動作)」の測定値の分布を示したものである (実測の流量の場合は図−2.20). 付録 A. 2に示すように測定数は動作により異なる. 凡例にR_{GpCO2}の標準偏差 (σ) を併記している. 各種の動作のなかで「走行」の動力が最も大きいが, 標準偏差が大きい (σ =0.56). これは図−2.13に示す

ように走行条件が土の状態により異なることに起因すると考えている．「掘削 （ 実作業 ）」と「掘削・積込み （ 模擬動作 ）」は傾向が近い，「ならし （ 模擬動作 ）」は「掘削 （ 実作業 ）」，および「掘削・積込み （ 模擬動作 ）」よりも動力が大きく，排出量の測定値は他の動作よりも安定していた （ σ =0.24 ）．動力が大きい要因として動作が速いこと，および旋回の工程 （ 負荷が小さい ） がないことが考えられる．測定値が安定している要因として，模擬動作であることが考えられる．以上から「待機」以外の動作のなかから「ならし」を選定した．測定する動作を「待機」と「ならし」に限定することで，測定器を建設機械に搭載する必要がなくなるので測定用の架台の製作・設置が不要になること，建設機械を試験場まで搬送しなくても測定できること，および測定器の設定時間を短縮できることから，測定に要する時間，および費用を大きく低減させることができた．

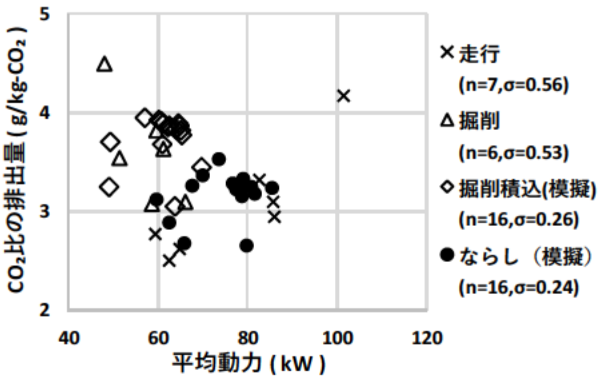


図-2.19 動作別の NOx の測定値の分布 （ 排気流量推定の場合 ）.

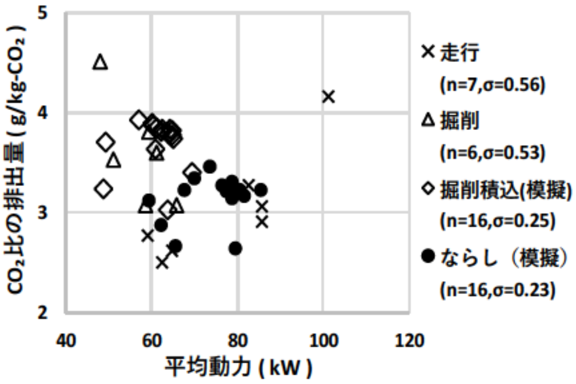


図-2.20 動作別の NOx の測定値の分布 （ 排気流量実測の場合 ）.

2.2.3　測定時間と測定回数

a） 母平均の推定値の誤差

エンジンを機械に搭載して動作させる条件での測定では，ばらつき （ 偏差 ） による誤差 （ すなわち偶然誤差 ） の影響を大きく受けると考えられる．測定値Rの平均$\bar{R}$から母集団の平均$\overline{R_T}$を推定する際には，測定数nを増やすことで$\bar{R}$を真値$\overline{R_T}$ （ ただし，ここでいう真値は偶然誤差を含まないが，系統誤差は含む ） に近づけることができる．「n」と「$\bar{R}$の 95%信頼区間の誤差率e_r (%) 」の関係を調べ，e_rが 10%以下となる条件 （ すなわち，測定値の平均から推定した母集団の平均の誤差が 95%の確率で 10%以下となる条件 ） について考察した. 10%以下としたのは，オンロード車の排出ガス測定にかかる学識経験者に対して排出ガス測定のおおまかな精度についてヒヤリングし，得られた回答が 10%程度で一致したことを参考にした．計算式は付録 A.1 の (Eq.17), (Eq.18), および(Eq.19) に示す. (Eq.17), および (Eq. 18) , は他の研究で統計数理研究所に相談して得た知見を拠り所としている.

b） 待機 （ アイドリング ）

2015 年度の「待機 （ アイドリング ）」の測定は測定時間を 5 分間で統一していた．このうち E モード，スロットル MAX を動作条件とした測定値が 6 個あったので，得られたと想定する測定値を 2 個から 6 個まで一つづつ増加させて誤差を推定した （ 図-2.21 （ 実測の流量の場合は図-2.22 ））. 測定回数を 3 回以上にすると NOx の誤差率は 10%程度以下になるが，NMHC および NH_3 の誤

差率を 10%程度に抑制するためには膨大な測定数を要すると推定される.

NOx は，他のガスよりも桁違いに濃度が高く（図-2.14 参照），将来的に規制値と比較する際に測定値の信頼性が議論となる可能性が高いこと，および国内で導入されることとなった RDE 試験[R.03]において唯一規制対象とされたこと，ならびにすべてのガスの誤差率を 10%以下にすることは現実的に不可能であることから，必要な測定回数は NOx に着目して定めることが妥当と考えた．他のガスについては，測定値の平均値に誤差の推定値を加算した値で評価する方法等が考えられる.

以上，NOx については，5 分間を 1 回とした測定を 3 回行うことで誤差率が 10%程度以下の測定値を得ることができると推定したが，オンロード車の排出ガス測定にかかる学識経験者にヒヤリングして，測定値はエンジンの暖気状態で異なること，エンジンのコールドスタートはエンジン停止後 6 時間と規定されている旨の指導をいただいて，2017 年度および 2018 年度の測定は「待機」は排出ガスの排出量が暖気後よりも多いコールドスタートで 20 分の測定を 3 回行うこととした.

図-2.23，および図-2.24 に 2018 年度の NOx，および N_2O 測定値を示す．3 回の測定値には 10%以上の差がみうけられるので，今後の測定においても 3 回以上の測定が必要であると考えている.

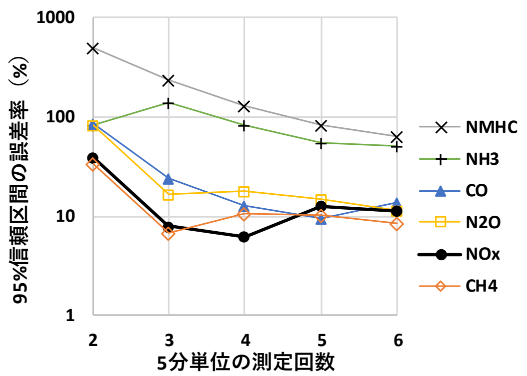


図-2.21「待機」の誤差率（排気流量推定の場合）.

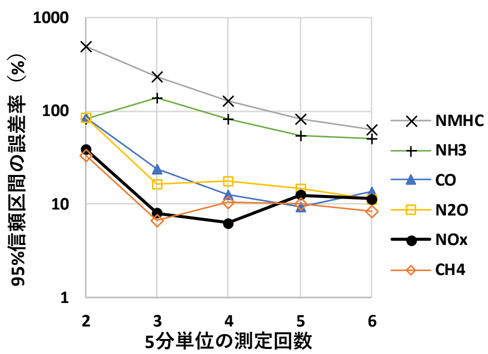


図-2.22「待機」の誤差率（排気流量実測の場合）.

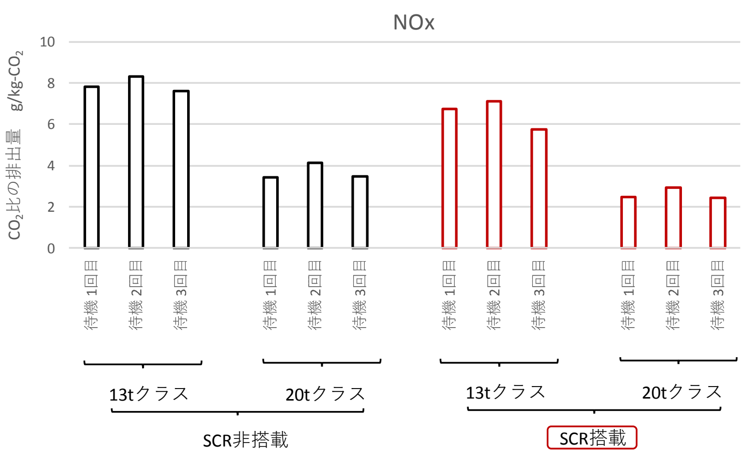
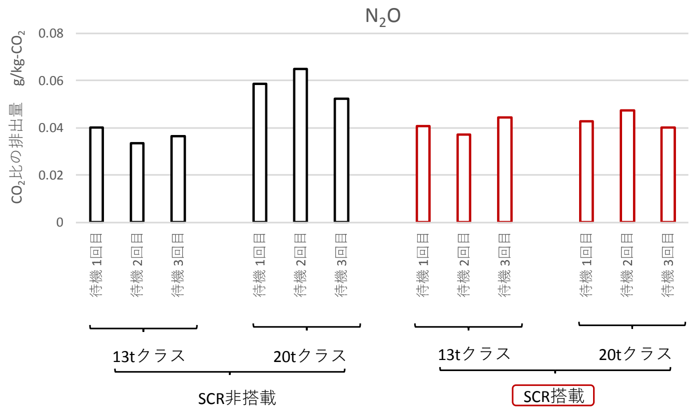


図-2.23「待機」における NOx の測定値（2018 年度測定）．1台の機械ごとに 3 回づつ測定.



図−2.24 「待機」における N_2O の測定値（ 2018 年度測定 ）. 1台の機械ごとに 3 回づつ測定.

c） ならし（ 模擬動作 ）

2015 年度の「ならし （ 模擬動作 ）」の測定は 1 回の測定回数を 30 サイクルで統一して測定した.「待機」と同様に E モード, スロットル MAX での測定値から誤差を推定した （ 図−2.25 （ 実測の流量の場合は図−2.26)) . 「ならし」は「待機」とは異なり運転者による違いの影響を受けた可能性がある. 2016 年度は同一の運転者で 10 サイクルを 1 回として測定した. E モード, スロットル MAX での誤差率を図−2.27 に示す （ 実測の流量の場合は図−2.28). 運転者が異なる場合には 30 サイクル×6 回=180, 同一の場合は 10 サイクル×6 回=60 の測定数が確保できれば, NOx の誤差率は 10%程度以下となる. 他のガスについては, 測定値の平均値に誤差の推定値を加算した値で評価する方法等が考えられる.

以上, NOx については, 運転者を 3 人とし, それぞれ 60 サイクルの測定を行うことで誤差率が 10%程度以下の測定値を得ることができると推定したが, 2017 年度および 2018 年度の測定は運転者を 3 人とし, 2017 年度は 100 サイクル, 2018 年度は 50 サイクルの測定を行った.

図−2.29, および図−2.30 に 2018 年度の NOx, および N_2O 測定値を示す. 3 人による 3 回の測定値には 10%以上の差がみうけられるので, 今後の測定においても 3 人以上の測定が必要であると考えている.

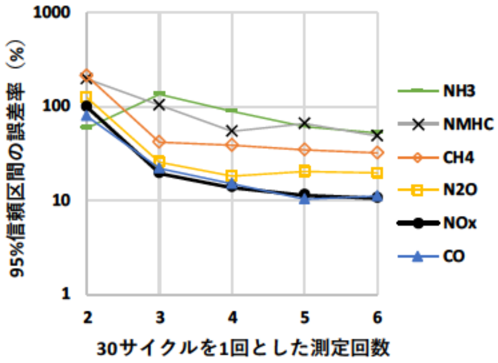


図-2.25「ならし(模擬動作)」（ 運転者 3 人 ）の誤差率（ 排気流量推定の場合).

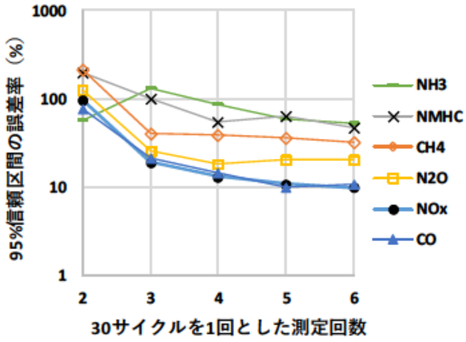


図-2.26「ならし(模擬動作)」（ 運転者 3 人 ）の誤差率（ 排気流量実測の場合).

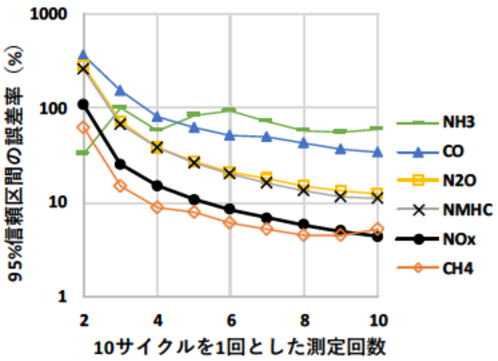


図-2.27「ならし(模擬動作)」（ 運転者 1 人 ）の誤差率(排気流量推定の場合).

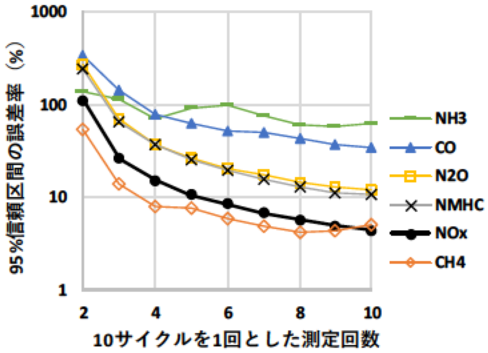


図-2.28「ならし(模擬動作)」（ 運転者 1 人 ）の誤差率(排気流量実測の場合).

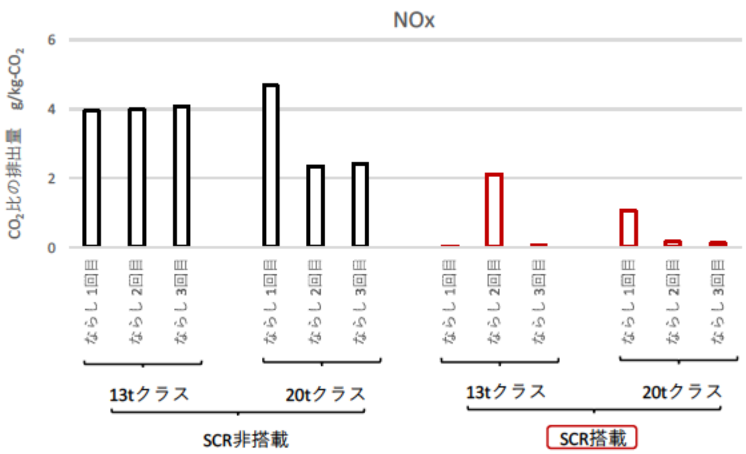


図-2.29 「ならし(模擬動作)」における NOx の測定値 (2018 年度測定). 1台の機械ごとに 3 回づつ測定.

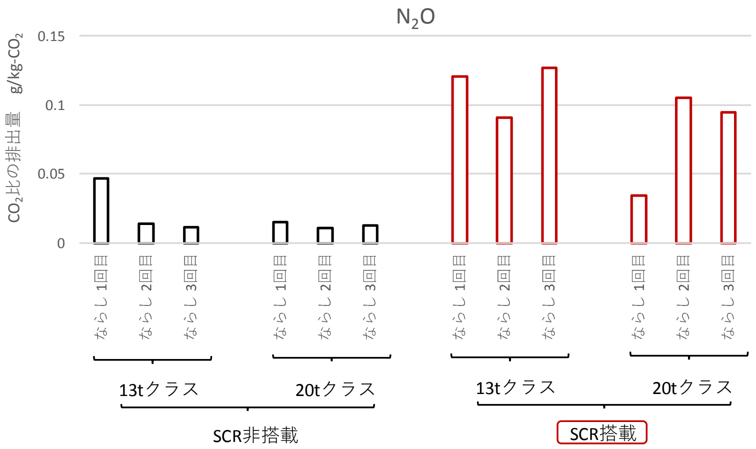


図-2.30 「ならし(模擬動作)」における N₂O の測定値（ 2018 年度測定 ）. 1台の機械ごとに 3 回づつ測定.

2. 3　測定結果

測定結果をまとめたものを**表-2.5** に示す．規制値の換算値を「ならし（ 模擬動作 ）」に併記した．台上試験では暖機運転してから測定を行うこと，台上試験の過渡試験サイクル NRTC (non-road transient cycle) の試験モードでは本研究における「待機 (アイドリング)」に相当するエンジンの稼働がないことから規制での測定でのエンジン動作は「ならし」に近いと考えた．詳細は 4. 2. 3 (P. 55) で述べる．国内外の文献において，温室効果ガスは relative contribution to GHG emissions (CO_2-equivalent)で評価されているが，分母の温室効果ガスを CO_2のみとした「CO_2比の温室効果」も併記した．評価量がわずかに大きくなる.

表-2.5 測定結果.

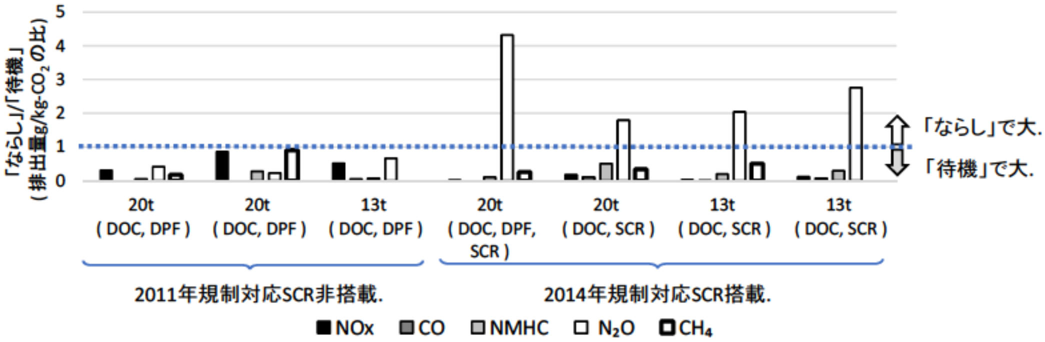
動作	規制年	規格	メーカ	排出量 (g/kg-CO_2) NOx 測定値	NOx 規制値の換算値*4	CO 測定値	CO 規制値の換算値*4	NMHC 測定値	NMHC 規制値の換算値*4	CO_2比の温室効果*5 (%) N_2O	CO_2比の温室効果*5 (%) CH_4	温室効果のシェア（relative contribution to GHG emissions（CO_2-equivalent)）(%) N_2O	温室効果のシェア (%) CH_4
待機*1	2011	20t	A	10.38	-	2.26	-	0.38	-	0.61	0.06	0.61	0.06
	2011	20t	B	3.68		0.3		0.11		1.75	0.1	1.72	0.10
	2011	13t	B	7.91		0.77		0.92		1.09	0.03	1.08	0.03
	2011年規制平均			7.32		1.11		0.47		1.15	0.06	1.14	0.06
	2014	20t	A	7.07	-	0.78		0.3		0.81	0.04	0.80	0.04
	2014	20t	B	2.61		0.1		0.1		1.3	0.03	1.28	0.03
	2014	13t	A	8.51		1.92		0.31		0.84	0.06	0.83	0.06
	2014	13t	B	6.54		0.32		0.34		1.22	0.02	1.21	0.02
	2014年規制平均			6.18		0.78		0.26		1.04	0.04	1.03	0.04
ならし*2	2011	20t	A	3.17	(4.4)	0	(6.67)	0.02	(0.25)	0.25	0.01	0.25	0.01
	2011	20t	B	3.14		0		0.03		0.39	0.09	0.39	0.09
	2011	13t	B	4		0.03		0.06		0.72	0	0.71	0.00
	2011年規制平均			3.44		0.01		0.04		0.45	0.03	0.45	0.03
	2014	20t	A	0.09	(0.53)	0		0.03		3.5	0.01	3.38	0.01
	2014	20t	B	0.45		0.01		0.05		2.33	0.01	2.28	0.01
	2014	13t	A	0.17		0.01		0.06		1.71	0.03	1.68	0.03
	2014	13t	B	0.73		0.02		0.1		3.36	0	3.25	0.00
	2014年規制平均			0.36		0.01		0.06		2.73	0.01	2.66	0.01
実工事の推定*3	2011	20t	A	3.76	-	0.18	-	0.05	-	0.28	0.01	0.28	0.01
	2011	20t	B	3.18		0.02		0.04		0.5	0.09	0.50	0.09
	2011	13t	B	4.32		0.09		0.13		0.75	0	0.74	0.00
	2011年規制平均			3.76		0.1		0.08		0.51	0.03	0.51	0.03
	2014	20t	A	0.66	-	0.06		0.05		3.28	0.01	3.18	0.01
	2014	20t	B	0.63		0.02		0.05		2.25	0.01	2.20	0.01
	2014	13t	A	0.85		0.17		0.08		1.64	0.03	1.61	0.03
	2014	13t	B	1.2		0.04		0.12		3.19	0	3.09	0.00
	2014年規制平均			0.83		0.07		0.08		2.59	0.01	2.52	0.01

*1: コールドスタートでのアイドリング. アドリングストップ機能は解除. *2: 模擬動作. *3: 下記文献に記載されたショベル系掘削機11台のアイドリングの時間率27%, および土木研究所が測定した時間当たりのCO_2排出量のアイドリング時とならし時の比24%に基づいて推定した. Lewis, P; Leming, M; Rasdorf, W: Impact of Engine Idling on Fuel Use and CO_2 Emissions of Nonroad Diesel Construction Equipment, JOURNAL OF MANAGEMENT IN ENGINEERING, vol.28, no.1, pp.31-38, 2012. *4: 規制値の単位は仕事量比g/kWhであるが, 熱効率33%を仮定してCO_2比g/kg-CO_2に換算した. *5: CO_2との質量比に地球温暖化係数を乗じた値の%. 温室効果のシェアと同程度の値となる.

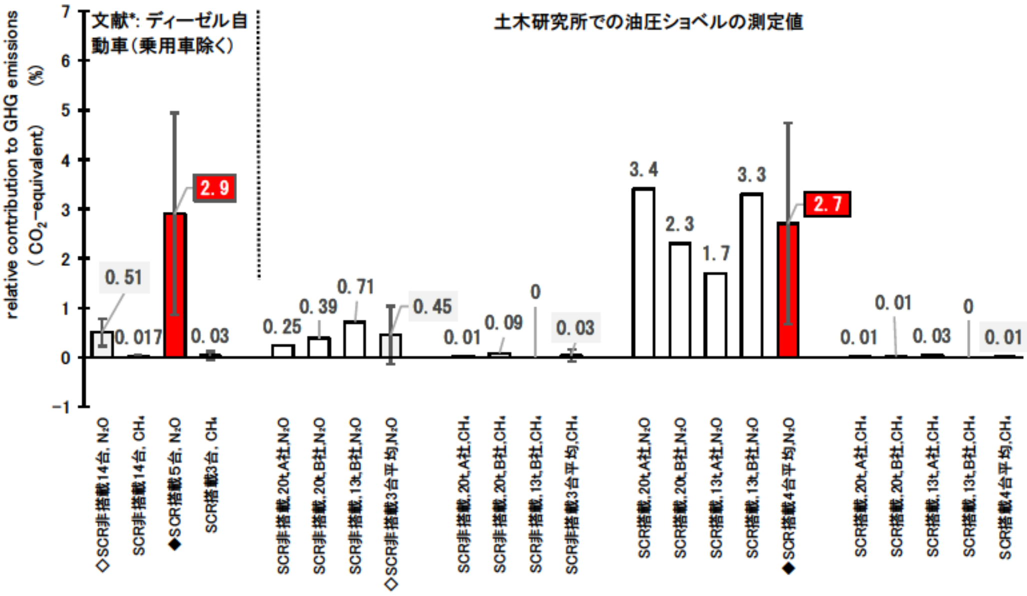
排出量をCO_2比（g/kg-CO_2）とし, さらに「ならし」と「待機」の比を算定したものを図-2.31に示す. 2014年規制に対応してSCRを搭載した機種のN_2Oのみが1.0以上となり,「ならし」の排出量が多かった. 文献[R. 61], および学識経験者へのヒヤリングにより, SCR搭載車ではSCR触媒から脱離したアンモニアが, 後段の酸化触媒で酸化されてN_2Oが生成することが原因と推定した.

測定対象とした油圧ショベルは, 全てアイドリングストップ機能が装備されていたこと, および「な

らし」におけるN_2Oの温室効果が大きいことから，「ならし」における温室効果ガスとしてのシェア (relative contribution to GHG emissions (CO_2-equivalent)) の平均値を算定し，図−1.10，および図−1.11の文献値と比較した結果を図−2.32に示す．N_2O，およびCH_4の地球温暖化係数GWP (global warming potential) は，米国の連邦規則集[R.12]に記載され，国立環境研究所[R.11]でも使用している298，および25とした．温室効果ガスとしての CH_4のシェアは，全7台で0.1 %未満であった．N_2OのシェアはSCR非搭載車3台の平均で0.45%であったが，SCR搭載車4台の平均で2.7%となった．この値は，公道を走行するSCR搭載のディーゼル車5台の文献値の平均2.9%と同程度であった．



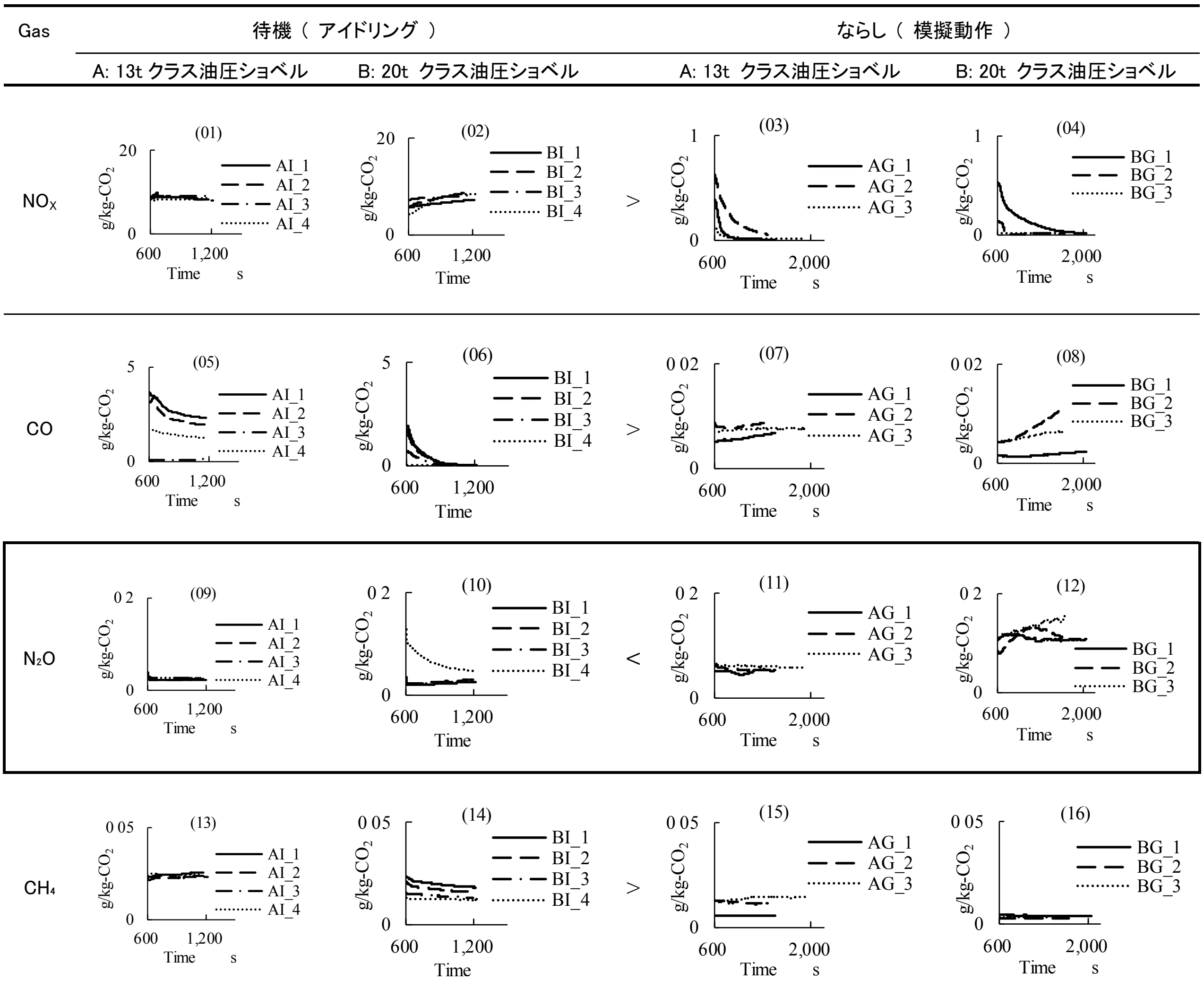
図−2.31 「ならし(模擬動作)」での排出量と「待機(アイドリング)」での排出量の比.



図−2.32 ディーゼル自動車 (オンロード) および建設機械から排出されるCO_2以外の温室効果ガスのシェア．縦軸は国内の文献での「シェア」，「寄与率」，「GHG 中に占める排出割合」に相当する．本報告では 付録の(Eq.12)，および(Eq.13)で計算した．*: 環境省 (カナダ)，ウエストバージニア大 (米国)，California Air Resources Board (米国)．EU Joint Research Centre (イタリア)，交通安全環境研究所 (日本) の文献値．測定方式が記載されていない文献を除外し，文献より推定した熱効率で CO_2比に換算した文献を含む．エラーバーの範囲は，測定値の平均値の分布を t 分布と仮定して推定した母平均の 95%信頼区間.

補足：測定値の時間変化と測定回ごとの違い

図−2.9（P.27）に示すように測定値は時間変化し，図−2.23，図−2.24，図−2.29，および図−2.30 に示すように測定値は測定回ごとに異なる値になる．温室効果への影響を把握するために温室効果ガスの時間変化を把握する必要がなく，総量の把握が必要になるため，測定値に求められる信頼性は平均値等の代表値となる．図−2.33 は亜酸化窒素の排出量が多い SCR 搭載車 2 台を測定した 2017 年度の測定値を 600 秒間の移動平均値として処理したものである．ガスの種類，動作の種類，および機械による排出ガスの特徴を表−2.6 にまとめた．「待機」と「ならし」の比較では N_2O 以外のガスは「待機」の方が大きく，N_2O は「ならし」の方が多い特性が異なった．「待機」の測定では(05)の AI_4，および(10)の BI_4 は他の測定と傾向が異なっていたが，測定開始時にエンジンが暖機されていたことが原因と考えられる．よって，次年度の「待機」の測定は，ソーク時間（機関停止時から機関再始動時までの時間）を 6 時間以上として測定することとした．「ならし」の N_2O および CH_4 の測定値は 600 秒で比較的安定していたが，NOx および CO は 600 秒経過後も変化する傾向があったので次年度以降の測定でも同程度の継続時間で測定することとした．また，測定回ごとに測定値の違いが見受けれたので次年度の測定数は「待機」では 3 回，「ならし」では異なる操作者による 3 回とした．



(17)

No.	ソーク時間 T_s	温度［°C］測定開始 - 測定終了	
		排出ガス	エンジン冷却水
AI 1	6h<Ts	16 - 66	11 - 55
AI_2	6h<Ts	21 - 69	13 - 58
AI 3	58m(G) *1	32 - 83	67 - 73
AI_4	4m(I) *1	52 - 77	56 - 67
BI 1	6h<Ts	11 - 77	20 - 63
BI_2	6h<Ts	14 - 75	25 - 64
BI 3	80m (I) *1	13 - 78	54 - 70
BI_4	16m (G) *1	104 - 96	86 - 77

(18)

No.	ソーク時間 T_s	温度［°C］測定開始 - 測定終了	
		排出ガス	エンジン冷却水
AG 1	欠測	54 - 201	75 - 80
AG_2	15m(I) *1	63 - 185	73 - 78
AG 3	2m(G) *1	108 - 185	80 - 78
BG_1	欠測	141 - 212	81 - 81
BG 2	28m (G) *1	54 - 238	81 - 82
BG_3	18m (I) *1	127 - 214	87 - 83

図-2.33　排出ガス量の 600 秒間の移動平均値. 測定開始後 600 秒から移動平均値を得ることができるので横軸は 600 秒からとした. 時間変化が小さい測定項目は 600 秒の測定でも十分であり, 時間変化が大きい測定項目はより長い時間の測定が必要であると解することができる. (17), (18)のソーク時間はエンジン停止時から再始動時までの時間. *1: 測定前の動作が「アイドリング」(I) または「ならし」(G).

表-2.6 ガスの種類，動作の種類，および機械による排出ガスの特徴．「ならし」は模擬動作．

<table>
<tr><th rowspan="2">ガス</th><th colspan="2">「待機」と「ならし」の違い</th><th rowspan="2">暖機の有無の違い(「待機」).</th><th rowspan="2">2台の機械の違い.</th><th colspan="2">安定した測定値を得る方法(案)</th></tr>
<tr><th>「待機」</th><th>「ならし」</th><th>「待機」</th><th>「ならし」</th></tr>
<tr><td rowspan="2">NOx</td><td colspan="2">「待機」＞「ならし」</td><td rowspan="6">20t クラスの CO と N_2O のみ暖機の有無による違いあり.</td><td rowspan="6">ほぼ同様の傾向.</td><td rowspan="2">600 秒の測定で十分.</td><td rowspan="4">600 秒以下の測定では過大.</td></tr>
<tr><td>時間変化小.</td><td>長時間で減少.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">CO</td><td colspan="2">「待機」＞「ならし」</td><td rowspan="2">600 秒以下の測定では過大 .</td></tr>
<tr><td>ばらつき大．長時間で減少.</td><td>時間変化小.</td></tr>
<tr><td>N_2O</td><td colspan="2">「待機」<「ならし」 (他のガスと異なる)．時間変化小.</td><td colspan="2" rowspan="2">600 秒の測定で十分.</td></tr>
<tr><td>CH_4</td><td colspan="2">「待機」＞「ならし」．時間変化小.</td></tr>
</table>

2.4　まとめ

2015 年度から 2018 年度までの 4 年間に油圧ショベル 7 台の排出ガスをフーリエ変換赤外分光光度計 FTIR で測定した．測定対象とした油圧ショベルは 2011 年規制に対応してディーゼル微粒子捕集フィルターDPF を搭載しているが尿素選択的還元触媒 SCR は搭載していない機種 3 台，および 2014 年規制に対応して SCR を搭載した機種 4 台とした．

2015 年度，および 2016 年度は測定値の信頼性向上と測定の簡素化の検討を行った．2011 年規制に対応した油圧ショベル 1 台に測定器を搭載し，「待機 (アイドリング)」，「走行」，「ならし (模擬動作)」，「掘削・積込み (模擬動作)」，および「掘削 (実作業)」の動作での測定値を分析した．「動力」，および「仕事量比のガスの排出量」は，「待機」と「待機以外の動作」で異なる傾向があった．「待機以外の動作」のなかでは「ならし」の測定値の標準偏差が最も小さく，「動力」，および「仕事量比のガスの排出量」が他の動作と同程度であった．以上から測定対象の動作は「待機」と「ならし」で代表することとした．測定対象とする動作を「待機」，および「ならし」の二種類とすることで，レンタル会社の敷地等で機械を移動させることがなくても測定することが可能になった．一方，文献調査の結果に基づいて「仕事量比の排出量 (g/kW-h) 」(排出ガスの規制値で使用されている評価量) と「CO_2比の排出量 (g/kg-CO_2) 」とを換算する式を作成し，測定値の分析に基づいて「CO_2比の排出量 (g/kg-CO_2) 」を評価量として採択することで排気流量の測定誤差の影響を抑制できることを明らかにした．

2017 年度，および 2018 年度は，これらの簡素化した測定方法で残り 6 台の測定を行った．

測定値をとりまとめた結果，温室効果ガスとしてのメタンCH_4のシェアは，全7台で0.1 %未満であった．亜酸化窒素N_2Oのシェアは，SCR非搭載車3台の平均で0.45%であったが，SCR搭載車4台の平均で2.7%となった．この値は，公道を走行するSCR搭載のディーゼル車5台の文献値の平均2.9%と同程度であった．

第３章　建設機械から排出される亜酸化窒素の温室効果ガスとしてのシェアの予測

3.1　既往の知見

国内および建設業における CO_2排出量を図-3.1 に示す．建設業による排出量は国内総量のおおむね 1%になる．国土交通省においては燃費基準を達成した建設機械を普及させることで 2007 年の 1,160 万 t を 2030 年の 1,000 万tに削減する目標を定めている（ 図-1.4）．本研究の対象としている温室効果ガスの亜酸化窒素 （ 一酸化二窒素 ） およびメタンの温室効果ガスとしてのシェアは国内総量では図-1.5 とされている．

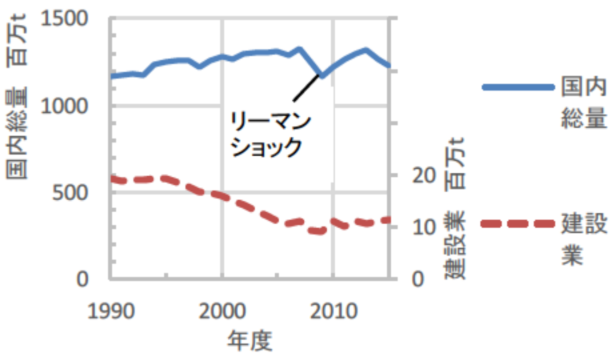


図-3.1　国内における CO_2排出量．　国立環境研究所の web site [R.11]に記載されていたデータをグラフ化．

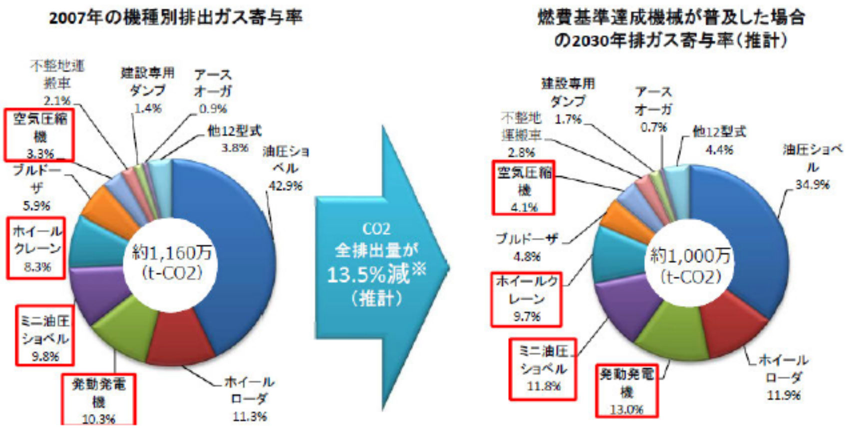


図-1.4 （再掲） 国内の建設機械から排出される CO_2の削減目標[R.01]．※ 3 機種について，2017 年度以降販売されている全ての型式が燃費基準を達成していると仮定．※ 3 機種の燃費改善のみによる CO_2削減量の推計．3 機種は燃費基準が定められている油圧ショベル，ホイールローダ，およびブルドーザ

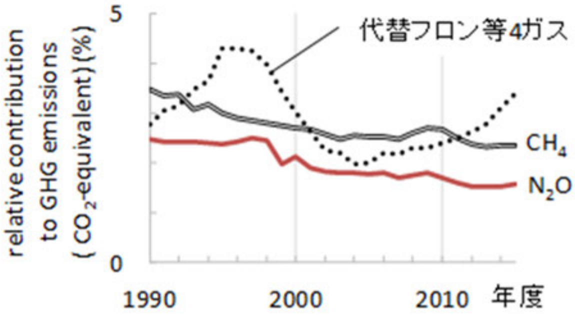


図-1.5　国内におけるCO_2以外の温室効果ガスのシェア(再掲). 縦軸の値は引用文献[R.11]では「シェア」としているが，他の文献の「寄与率」，「GHG中に占める排出割合」，「relative contribution to GHG emissions (CO_2-equivalent)」に相当する．代替フロン等4ガスは，ハイドロフルオロカーボンHFCs，パーフルオロカーボンPFCs，六ふっ化硫黄SF_6，および三ふっ化窒素NF_3の合計．

建設機械から排出される亜酸化窒素，およびメタンのうち温室効果ガスとしての影響があるのは亜酸化窒素のみであることが**第２章**において明らかになった．ここでは 2014 年規制に対応して SCR を搭載した建設機械への更新がほぼ完了する見込まれる時期，および亜酸化窒素の温室効果ガスとしてのシェアを予測した．

3.2　建設機械の排出ガスのうち SCR 搭載車から排出される割合

建設機械に搭載されているエンジンの NOx の規制値は D1, D2 区分のエンジンでは 4.0g/kWh, D3, D4, D5 区分のエンジンでは 0.4g/kWh と定められている. 0.4g/kWh の規制への対応では電動とのハイブリッドエンジンで SCR を使用しない例があるが，大半のエンジンには SCR が搭載されている．ここでは，全ての建設機械のエンジンが 2014 年規制対応にものに更新された場合の SCR 搭載車から排出される排出ガスの割合を

$$R_{\mathrm{G\_SCR}} = \frac{G_{\mathrm{SCR}}}{G_{\mathrm{SCR}} + G_{非\,\mathrm{SCR}}} \cong \frac{N_{\mathrm{SCR}} \cdot \overline{P_{\mathrm{SCR}}}}{N_{\mathrm{SCR}} \cdot \overline{P_{\mathrm{SCR}}} + N_{非\,\mathrm{SCR}} \cdot \overline{P_{非\,\mathrm{SCR}}}} \qquad \text{(Eq.20)}$$

で推定した．ここで，G_{SCR}： SCR 搭載車の排出ガスの総量，$G_{非\,\mathrm{SCR}}$： SCR 非搭載車の排出ガスの総量，N_{SCR}： SCR 搭載車の型式数，$\overline{P_{\mathrm{SCR}}}$： SCR 搭載車の定格出力の平均，$N_{非\,\mathrm{SCR}}$： SCR 非搭載車の型式数，$\overline{P_{非\,\mathrm{SCR}}}$： SCR 非搭載車の定格出力の平均．

型式数および定格出力は，**付録　B.1　型式届出特定特殊自動車一覧**(出典:環境省[R.09])に基づいて集計し（ **表-3.1** ），

$$R_{\mathrm{G\_SCR}} = \frac{21{,}944 - 74}{21{,}944 + 5{,}214} = 81\% \qquad \text{(Eq.21)}$$

を算出した．なお，少数生産車は含めなかった．

表-3.1 NOx の 2014 年規制の型式数とエンジン出力.

排出ガス規制区分	NOx規制値	d: 型式数	e: エンジン出力の平均 kW	f=c×d
a: D1, D2	4.0g/kWh	135	39	5,214
b: D3, D4, D5	0.4g/kWh	112	196	21,994
c: D3 SCR非搭載	0.4g/kWh	1	74	74

3. 3 建設機械の推定使用年数

以下の三つ方法を比較した.

1) 税法上の耐用年数を準用.

2) 建設機械損料表を準用.

3) 建設機械動向調査から推定.

1) 税法上の耐用年数を準用.

所得税または法人税の減価償却費の算定において省令で定められている建設機械の耐用年数を準用する. 建設機械は総合工事業用設備に該当し（ 図-3.2), 省令で定められた耐用年数は 6 年である.

減価償却資産の耐用年数等に関する省令
(昭和四十年大蔵省令第十五号, 最終更新:平成三十年財務省令第三十一号)
第一条　所得税法(昭和四十年法律第三十三号)第二条第一項第十九号(定義)又は法人税法(昭和四十年法律第三十四号)第二条第二十三号(定義)に規定する減価償却資産(以下「減価償却資産」という。)のうち鉱業権(租鉱権及び採石権その他土石を採掘し又は採取する権利を含む。以下同じ。)、坑道及び公共施設等運営権以外のものの耐用年数は、次の各号に掲げる資産の区分に応じ当該各号に定める表に定めるところによる。
・・・・
二　所得税法施行令第六条第三号又は法人税法施行令第十三条第三号に掲げる資産　別表第二(機械及び装置の耐用年数表)
・・・・

別表第二　機械及び装置の耐用年数表

番号	設備の種類	細目	耐用年数
			年
・・・・・・・			
30	総合工事業用設備		六
・・・・・・			

図-3.2 減価償却資産の耐用年数等に関する省令の抜粋.

2) 建設機械損料表を準用.

土木工事の積算で使用されている「建設機械等損料表」[R.22]には表-3.2 の例のように建設機械の分類別の標準使用年数が記載されている.

表-3.2　建設機械損料表に記載された標準使用年数の例.

機械の分類	年間標準運転日数	標準使用年数(年)	
ブルドーザ 3t 級～15t 級	80	12.5	平均 12
ブルドーザ 18t 級～32t 級	110	11.5	
バックホウ 0.01m^3～0.22m^3(山積み)	90	10	平均 9.5
バックホウ 0.28m^3～5m^3(山積み)	110	9	

3) 建設機械動向調査から推定.

経済産業省と国土交通省が共同で実施している平成 25 年度（ 平成 25 年 4 月から平成 26 年 3 月まで ）の建設機械動向調査（ 統計法に基づく一般統計調査 ）に記載されている推定保有台数および購入台数から建設機械の使用年数を推定した（ 表-3.3). バックホウ（ 油圧ショベル ）は 9.6 年となり表-3.2 とほぼ一致した. 一方, ブルドーザの推定使用年数が 20.7 年と長めになったが, ブルドーザと油圧ショベルの年間運転日数は表-3.2 に示すように大きく異なることがないことから, ブルドーザの購入台数が経年で減少したことに起因する誤差と考えた.

表-3.3　平成 25 年度建設機械動向調査から推定した建設機械の使用年数.

分類	機械名	規格	区分	コード	推定保有台数	購入台数	推定使用年数
土工機械	履帯式ブルドーザ（ハンドガイドを除く）	ブレード付整備重量	３～１０ｔ未満	012	18, 602	808	
			１０～２０ｔ未満	013	5, 636	251	
			２０ｔ以上	014	4, 147	315	
		計			28, 385	1, 374	*20.7
	＊ 購入台数が経年で減少している機種では推定値が過大になる.						
	油圧式ショベル系掘削機（ハンドガイドを除く）	標準バケット平積容量	０　２㎥未満	041	337, 188	29, 592	
			０．２㎥～０．６㎥未満	042	201, 772	25, 544	
			０．６㎥以上	043	107, 261	12, 420	
		計			646, 221	67, 556	9.6
	履帯式トラクタショベル（クローラローダ）			061	5, 208	37	
	車輪式トラクタショベル（ホイールローダ）	標準バケット山積容量	０．６㎥未満	071	63, 386	7, 700	
			０．６㎥～３．６㎥未満	072	65, 580	6, 739	
			３　６㎥以上	073	8, 652	541	
		計			137, 618	14,980	9.2
	合計				817, 432	83,947	9.7
運搬機械	油圧式トラッククレーン	最大吊上能力	５ｔ未満	101	13, 868	342	
			５ｔ～４０ｔ未満	102	0	1	
			４０ｔ以上	103	0	105	
					13, 868	448	*31
	＊ 購入台数が経年で減少している機種では推定値が過大になる.						
	機械式トラッククレーン			111	0	0	
	ホイールクレーン（ラフテレーンクレーンを含む）	最大吊上能力	２０ｔ未満	115	39, 518	857	
			２０ｔ以上	116	0	1, 330	
					39, 518	2, 187	*18.1
	合計				53, 386	2,635	*20.3
	＊ 購入台数が経年で減少している機種では推定値が過大になる.						
総計					870, 818	86,582	**10.1**

以上，３種類の推定方法を整数にまるめて比較した（ 表-3.4 ）. 建設機械損料表に記載されている使用年数は，最も使用台数の多いバックホウ　（ 油圧ショベル ）　で建設機械動向調査から推定した値と一致したこと，および年間の使用日数が多い機械の使用年数が短い値となっていることから，建設機械損料表に記載されている使用年数が妥当と考えた.

表−3.4 建設機械の使用年数の推定.

機種	推定保有台数(平成 25 年)	1)税法上の耐用年数を準用.	2) 建設機械損料表を準用.	3) 建設機械動向調査から推定.
ブルドーザ	3 万台	6	12	*21
バックホウ(油圧ショベル)	65 万台		10	10
土工機械全般	82 万台			10
運搬機械全般	5 万台			*20
土工機械全般＋運搬機械全般	87 万台			10

* 購入台数が経年で減少したため推定値が過大となったと考えられる.

また，温室効果ガスの国内排出量の概況を把握するにあたっては，以下の理由で建設機械の全体の平均的な使用年数を 10 年とすることが妥当と考えた.

・表−3.3 に示すように建設機械の過半数がバックホウ（ 油圧ショベル ）であり，この使用年数が 10 年であること.

・建設機械動向調査から推定した「土工機械全般＋運搬機械全般」の使用年数 10 年がバックホウ（ 油圧ショベル ）の使用年数 10 年と一致したこと.

・機械の分類ごとに細分化した使用年数を設定しても分類ごとの台数のデータがないためこの使用年数を活用することができないこと.

・規制対象のガスについては, 10 年で更新されないことで最新機械と比較して大量の排出ガスを排出することが考えられるが，温室効果ガスとしての亜酸化窒素については，古い機械の排出量が SCR を搭載した最新の機械の排出量を上回るおそれがないこと.

3.4 亜酸化窒素の温室効果ガスとしてのシェア

2014 年規制に対応した建設機械が市場に本格的に投入されたのは 2017 年度が初年度である.大半の建設機械が 2014 年規制に対応したものに更新される年次を 10 年目の 2026 年度までとした建設機械から排出される温室効果ガスとしての亜酸化窒素のシェア（ contribution to GHG emissions (CO_2-equivalent) ）を図−3.3 に示す. 2026 年における建設機械からの CO_2を 1000 万 t とすると 1000 万 t×2.3%=23 万 t の CO_2に相当する亜酸化窒素が排出されると見込まれる. CO_2以外の温室効果ガスの国内総量に占めるシェア（ contribution to GHG emissions (CO_2-equivalent) ）については公開されているが（ 図−1.5 ）, 2026 年に建設機械から排出される亜酸化窒素のシェアは近年の国内総量に占める亜酸化窒素のシェアと同程度である.

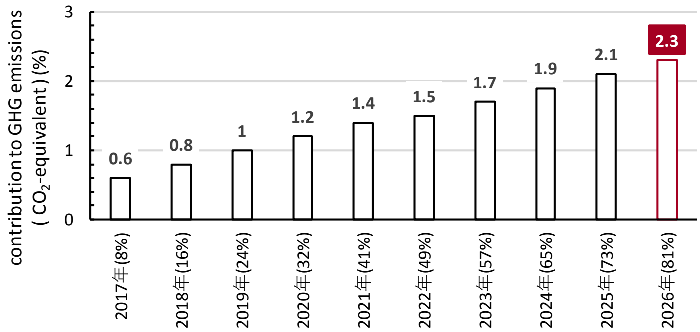


図-3.3 建設機械から排出される亜酸化窒素の CO_2比の温室効果. 縦軸は付録の(Eq.12)に相当する値. 横軸のラベルの括弧内は SCR を搭載した建設機械からの排出ガスのシェア. 亜酸化窒素の CO_2比の温室効果を SCR 搭載車, および SCR 非搭載車で, 2.7%, および 0.45%とし, オフロード法の規制対象となっている全ての建設機械が 2014 年規制車に更新された時点での SCR 搭載車の排出ガス量の割合を 81%と推定した場合の推定.

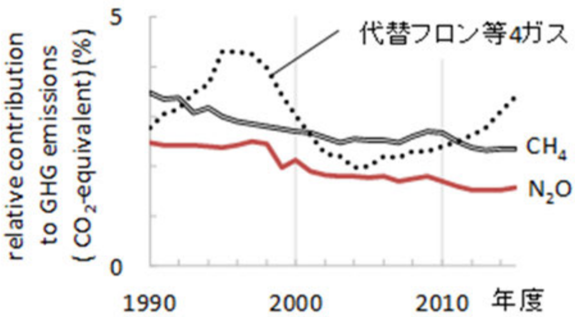


図-1.5 国内におけるCO_2以外の温室効果ガスのシェア(再掲). 縦軸の値は引用文献[R.11]では「シェア」としているが, 他の文献の「寄与率」, 「GHG中に占める排出割合」, 「relative contribution to GHG emissions (CO_2-equivalent)」に相当する. 代替フロン等4ガスは, ハイドロフルオロカーボンHFCs, パーフルオロカーボンPFCs, 六ふっ化硫黄SF_6, および三ふっ化窒素NF_3の合計.

3.5 まとめ

建設機械から排出される温室効果ガス GHG の CO_2は国内総量のおおむね 1%程度であり, 国土交通省においては燃費基準を達成した建設機械を普及させることで 2007 年の 1,160 万 t を 2030 年の 1,000 万tに削減する目標を定めている. GHG には CO_2以外にメタン, 亜酸化窒素, 代替フロン等があり, 日本国内における GHG としてのシェア (relative contribution to GHG emissions (CO_2-equivalent)) はそれぞれおおむね 2～3%であるが, 建設機械から排出される可能性があるのはメタンと亜酸化窒素である. 本研究での測定では, 温室効果ガスとしてのメタンのシェアは 0.1%未満であったが, 亜酸化窒素のシェアは尿素選択的還元触媒 SCR (selective catalytic reduction) 搭載車, および SCR 非搭載車で 2.7%, および 0.45%であった. SCR 搭載車からの排出ガスの割合は, 大半の建設機械が 2014 年の排ガス規制対応車に更新される 2026 年時点で 81%と推定し, 2026 年時点において建設機械から排出される亜酸化窒素の温室効果ガスとしてのシェアは 2.7%×81% = 2.3%と推定した. この排出量は温室効果で CO_2に換算すると 1000 万 t×2.3%=23 万 t に相当する.

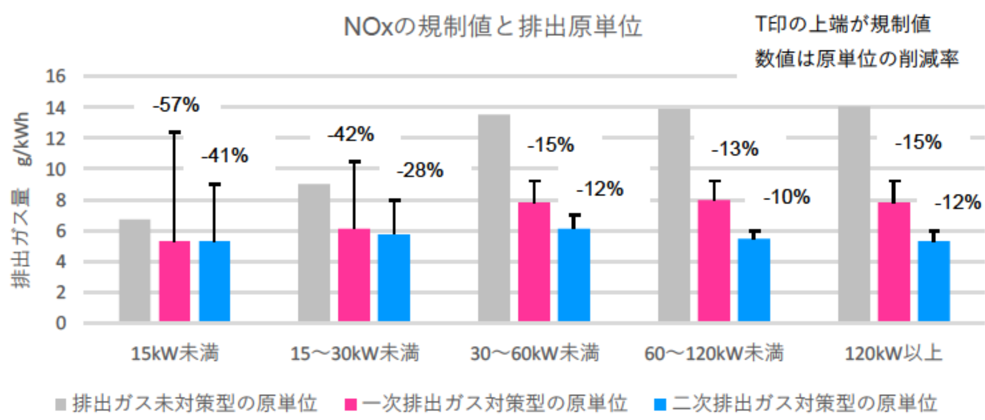
第４章　目的外の成果１ － 窒素酸化物等の環境影響評価に資する排出原単位

環境影響評価法（ 平成 9 年に成立，平成 11年から施行 ）では，一定規模以上の道路，ダム，空港等の 13 種類の事業については，法で定めた手続きで環境影響評価を行うことを定めている．国土交通省の事業のなかでも適用数が多い道路事業における環境影響評価における大気環境等の予測評価に資することを目的として旧土木研究所は「道路環境影響評価の技術手法」（ 以下，「技術手法」という.）を策定した．技術手法は平成 12 年の初版の刊行以降，国土技術政策総合研究所，および土木研究所において，知見の進展に伴う改定を行ってきた．これまでに法が適用された 80 以上の道路事業の他，発電所，ダム，面整備等の他の事業の他，法の適用外の環境影響評価でも技術手法は活用されている.

ここでは，技術手法のなかの「建設機械の稼働に係る二酸化窒素及び浮遊粒子状物質」[R.19][R.20]の予測における研究成果の活用策を検討した.

4.１　現行の技術手法に記載された排出原単位と規制値

道路環境影響評価の技術手法に記載した排出ガスの原単位（ ユニット別の原単位の元となった数値 ）を排出ガスの規制値（ 正確には基準値 ）と比較した（ 図−4.1，図−4.2 ）．原単位はエンジン単体の台上試験での測定値に基づいて定められたものである．原単位と規制値ではエンジンの定格出力の分類が異なるので，規制値の分類を原単位の分類に対応させた（ 表−4.1 ）．規制値に対する原単位の削減率は一次排出対策型の NOx の平均で 28%，二次対策型の NOx の平均で 21%，二次対策型の PM の平均で 38%であった.



図−4.1 NOx の規制値と排出原単位.

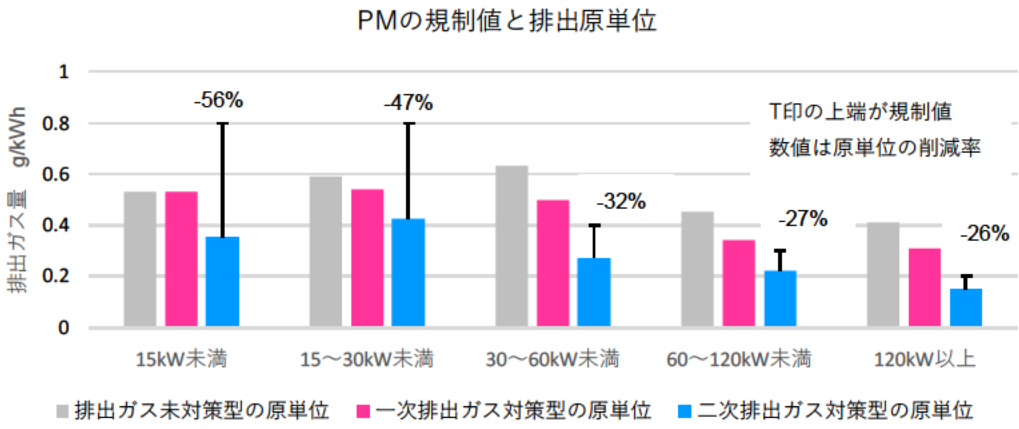


図-4.2 PM の規制値と排出原単位.

表-4.1 規制値と排出原単位で異なるエンジンの定格出力の分類.

エンジンの定格出力の分類

技術手法の原単位	規制値	
	一次排出対策型	二次排出対策型
15kW未満	7.5～15kW未満	8～19kW未満
15～30kW未満	15～30kW未満	19～37kW未満
30～60kW未満	30～272kW以下	37～75kW未満
60～120kW未満	30～272kW以下	75～130kW未満
120kW以上	30～272kW以下	130～560kW以下

4.2　使用過程車の測定値と規制値

使用過程車の排出ガスの測定値と規制値と関係について，オンロード車，および建設機械の文献値を整理するとともに土木研究所の測定値についても整理した.

4.2.1 オンロードディーゼル車の文献値

政府（国土交通省，環境省）は，欧米における排出ガスの不正事案を契機として，実路走行 RDE (real driving emission ）試験を実施し，結果を報告している（ 図-4.3，図-4.4 ）. 表-4.2, および図-4.5 はこれらを整理したものである. 台上試験の測定値の平均値は規制値を下回っていたが，路上走行試験の測定値の平均値は規制値の 3 倍程度となっていた.

試験結果一覧（参考）　国土交通省　環境省

＜試験結果＞ ※ NOxの結果のみ抜粋（CO等は規制値超過無し）

単位：g/km

自動車製作者	車種	台上試験	路上走行試験(※2)					
		JC08-Combined	都市内		都市間		高速	
			往路	復路	往路	復路	往路	復路
マツダ	CX-5	0.06	0.079	0.05	0.052	0.04	0.095	0.101
	デミオ	0.062	0.103	0.064	0.064	0.057	0.081	0.051
日産	エクストレイル	0.144 (※1)	0.301	0.143	0.757	0.229	0.937	0.44
三菱	デリカD5	0.104 (※1)	0.331	0.33	0.223	0.292	0.194	0.351
トヨタ	ランドクルーザープラド	0.06	0.336	0.325	0.328	1.017	0.363	0.228
	ハイエース（貨物）	0.11	1.422	1.664	1.394	1.48	0.241	0.254
BMW	320d	0.063	(※3)	0.077	(※3)	0.146	(※3)	0.031
メルセデス・ベンツ	ML350	0.105	0.311	0.110	0.253	0.168	0.148	0.072

(※1) ドライバーを変更した結果、台上での規制値以下となったため、車両に問題なし
(※2) 測定日、気温・湿度、交通状況等が異なる
(※3) 測定装置の不具合により、復路のみ検証

図–4.3 排出ガス不正事案を受けたディーゼル乗用車等検査方法見直し検討会中間報告(2016.4.21)[R.02]抜粋.

調査結果一覧（参考）　国土交通省　環境省

調査車両	走行ルート	天候	気温 ℃	エアコン設定	平均車速				調査結果(NOx排出量)				
					都市内 km/h	都市間 km/h	高速 km/h	トータル km/h	台上 g/km	都市内 g/km	都市間 g/km	高速 g/km	トータル g/km
乗用車1	往路	晴れ時々曇り	33.0	オート 25℃	20.1	27.4	91.7	30.1	0.065	0.217	0.124	0.098	0.149
	復路	晴れ時々曇り	34.0		18.4	32.3	93.3	30.3		0.279	0.098	0.098	0.163
乗用車2	往路	晴れ	35.0	オート 25℃	17.6	28.1	91.4	28.2	0.053	2.720	0.439	0.089	1.148
	復路	晴れ	35.4		16.5	32.2	88.3	28.1		2.155	0.121	0.099	0.847
貨物車1	往路	晴れ	29.7	風量:4段階中2段目 温度設定:冷房域の中間	18.5	27.5	83.9	28.4	0.114	0.105	0.090	0.103	0.099
	復路	晴れ	30.9		20.8	29.4	88.4	31.1		0.127	0.082	0.140	0.116
貨物車2	往路	晴れ	31.8	風量4段階中2段目 温度設定:冷房域の中間	17.3	27.6	81.6	27.4	0.099	0.411	0.220	0.201	0.283
	復路	くもり	27.1		29.9	30.4	87.2	34.7		0.253	0.229	0.271	0.249

注1：測定日が異なることにより、気温・湿度、交通状況等が異なる。
注2：路上走行時のNOx排出量については、気温、交通状況等の条件により、保護制御が作動した車両があることに留意する必要がある。
注3：エアコンの作動は路上走行調査時のみであり、台上調査時は作動させていない。
注4：台上調査時と路上走行調査時の車両の重量は異なる。
注5：いずれの結果も、欧州試験法における試験成立条件を満足していない。
注6：気温は、調査車両に取り付けた温度計により計測した気温の試験中における平均値を示す。
注7：全体のNOx排出量は、GPSから算出した走行距離で加重平均して算出している。

図–4.4 排出ガス不正事案を受けたディーゼル乗用車等検査方法見直し検討会最終報告(2017.4.20)[R.03]抜粋.

表-4.2　RDE 試験の測定値一覧.

測定車両	台上試験での規制値(a) (g/km)	報告	台上試験 車両別の測定値 (g/km)	台上試験 車種別平均(b) (g/km)	台上試験 b/a	路上走行試験 車両別の測定値 (g/km)	路上走行試験 車種別平均(c) (g/km)	路上走行試験 c/a
乗用車_1			0.06			0.07		
乗用車_2			0.06			0.07		
乗用車_3			0.14			0.47		
乗用車_4		中間報告	0.10			0.29		
乗用車_5	0.08		0.06	0.08	0.99	0.43	0.30	3.8
乗用車_6			0.06			0.08		
乗用車_7			0.11			0.18		
乗用車_8		最終報告	0.07			0.16		
乗用車_9			0.05			1.00		
貨物車_1		中間報告	0.11			1.08		
貨物車_2	0.15	最終報告	0.11	0.11	0.72	0.11	0.48	3.2
貨物車_3			0.10			0.27		

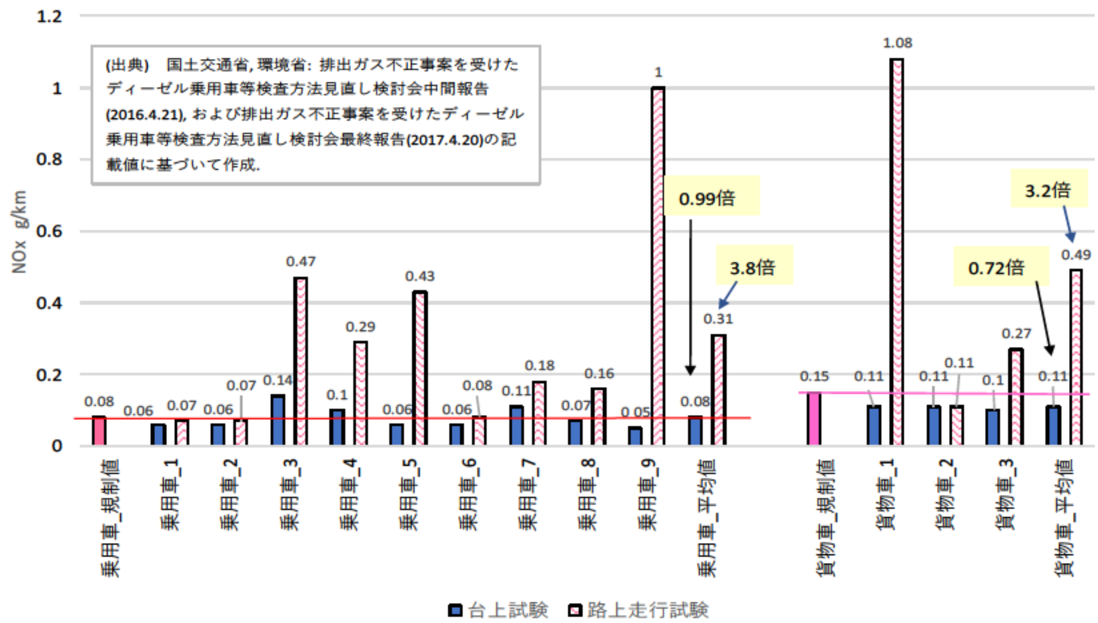


図-4.5　RDE 試験の測定値のグラフ.

4. 2. 2 建設機械の文献値

海外の論文に掲載された油圧ショベルの PEMS (portable emissions measurement system) での測定値 (欧州でいう ISM: in-service monitoring:に相当.)については 1. 3. 1 で整理したが, さらに, これらの測定値を規制の段階別に国内の規制値と比較した (図-4.6, 図-4.7). 規制の段階別の台数は Tier2 で 15 台, Tier3 で 7 台となった. 国内の規制値は国際的な調和が図られているため同時期の生産車に対する規制値とした. 規制値は定格出力に応じて異なるが, 最も厳しい 75-130kW の定格出力に適用される規制値とした. 個別には規制値を大幅に上回る測定値もあったが, 平均するとほぼ規制値以下となった.

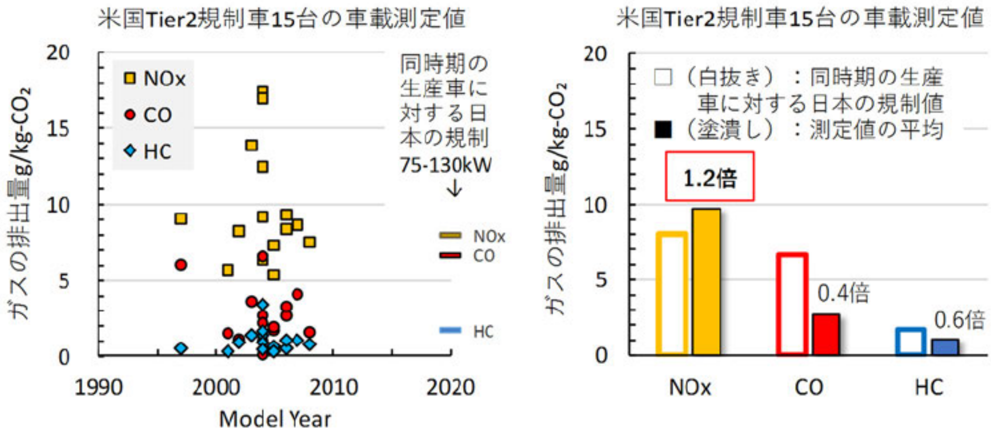


図-4.6　車載式測定器での油圧ショベルの排出ガスの測定値-Tier2.

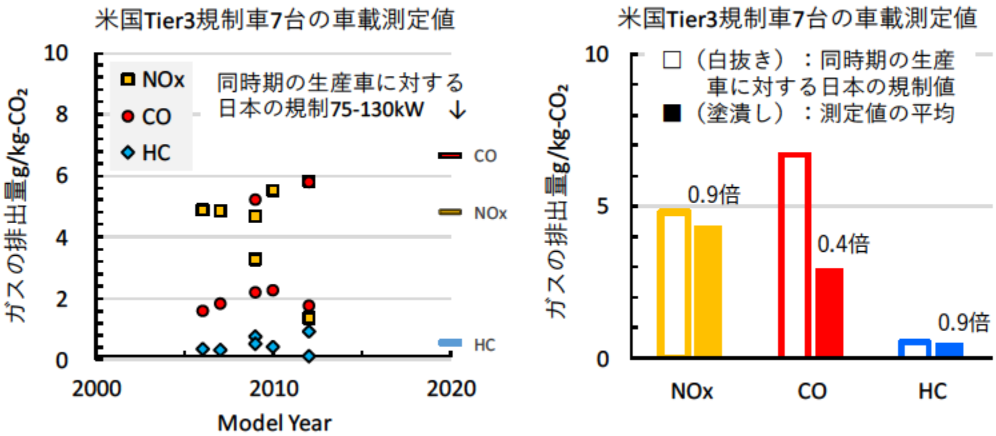


図-4.7　車載式測定器での油圧ショベルの排出ガスの測定値-Tier3.

4.2.3　土木研究所の測定値

測定結果をまとめたものを表-2.5 に示したが，ここでは「待機（アイドリング）」と「ならし（模擬動作）」の測定値を統合した「実工事の推定」について述べる．

アイドリングとアイドリング以外の作業時間ついて調べた文献[R.71]のなかから油圧ショベル 11 台を抽出し，アイドリング時間の割合r_{tI}を計算すると$r_{tI} = 0.27$となった．次にアイドリング，およびならしにおける時間あたりの CO_2排出量（g / s）を 2017 年に測定した 2 台の油圧ショベルで調べ，アイドリング時の排出量とならし時の排出量の比r_{mI}を算定すると$r_{mI} = 0.24$となった（表-4.3）．

表-2.5 測定結果(再掲).

動作	規制年	規格	メーカ	排出量 (g/kg-CO_2)						CO_2比の温室効果[*5] (%)		温室効果のシェア（relative contribution to GHG emissions（CO_2-equivalent））(%)	
				NOx		CO		NMHC					
				測定値	規制値の換算値[*4]	測定値	規制値の換算値[*4]	測定値	規制値の換算値[*4]	N_2O	CH_4	N_2O	CH_4
待機*1	2011	20t	A	10.38		2.26		0.38		0.61	0.06	0.61	0.06
	2011	20t	B	3.68	-	0.3		0.11		1.75	0.1	1.72	0.10
	2011	13t	B	7.91		0.77		0.92		1.09	0.03	1.08	0.03
	2011年規制平均			7.32		1.11		0.47		1.15	0.06	1.14	0.06
	2014	20t	A	7.07		0.78	-	0.3	-	0.81	0.04	0.80	0.04
	2014	20t	B	2.61		0.1		0.1		1.3	0.03	1.28	0.03
	2014	13t	A	8.51	-	1.92		0.31		0.84	0.06	0.83	0.06
	2014	13t	B	6.54		0.32		0.34		1.22	0.02	1.21	0.02
	2014年規制平均			6.18		0.78		0.26		1.04	0.04	1.03	0.04
ならし*2	2011	20t	A	3.17		0		0.02		0.25	0.01	0.25	0.01
	2011	20t	B	3.14	(4.4)	0		0.03		0.39	0.09	0.39	0.09
	2011	13t	B	4		0.03		0.06		0.72	0	0.71	0.00
	2011年規制平均			3.44		0.01		0.04		0.45	0.03	0.45	0.03
	2014	20t	A	0.09		0	(6.67)	0.03	(0.25)	3.5	0.01	3.38	0.01
	2014	20t	B	0.45		0.01		0.05		2.33	0.01	2.28	0.01
	2014	13t	A	0.17	(0.53)	0.01		0.06		1.71	0.03	1.68	0.03
	2014	13t	B	0.73		0.02		0.1		3.36	0	3.25	0.00
	2014年規制平均			0.36		0.01		0.06		2.73	0.01	2.66	0.01
実工事の推定*3	2011	20t	A	3.76		0.18		0.05		0.28	0.01	0.28	0.01
	2011	20t	B	3.18	-	0.02		0.04		0.5	0.09	0.50	0.09
	2011	13t	B	4.32		0.09		0.13		0.75	0	0.74	0.00
	2011年規制平均			3.76		0.1		0.08		0.51	0.03	0.51	0.03
	2014	20t	A	0.66		0.06	-	0.05	-	3.28	0.01	3.18	0.01
	2014	20t	B	0.63		0.02		0.05		2.25	0.01	2.20	0.01
	2014	13t	A	0.85	-	0.17		0.08		1.64	0.03	1.61	0.03
	2014	13t	B	1.2		0.04		0.12		3.19	0	3.09	0.00
	2014年規制平均			0.83		0.07		0.08		2.59	0.01	2.52	0.01

*1: コールドスタートでのアイドリング. アドリングストップ機能は解除. *2: 模擬動作. *3: 下記文献に記載されたショベル系掘削機11台のアイドリングの時間率27%, および土木研究所が測定した時間当たりのCO_2排出量のアイドリング時とならし時の比24%に基づいて推定した. Lewis, P; Leming, M; Rasdorf, W: Impact of Engine Idling on Fuel Use and CO_2 Emissions of Nonroad Diesel Construction Equipment, JOURNAL OF MANAGEMENT IN ENGINEERING, vol.28, no.1, pp.31-38, 2012. *4: 規制値の単位は仕事量比g/kWhであるが, 熱効率33%を仮定してCO_2比g/kg-CO_2に換算した. *5: CO_2との質量比に地球温暖化係数を乗じた値の%. 温室効果のシェアと同程度の値となる.

表−4.3 時間あたりの CO_2 排出量のアイドリング時とならし時の比.

	CO_2排出量g/s	アイドリング時の排出量/ならし時の排出量	平均
20tアイドリング	2.5	0.22	0.24
20tならし	11.0		
13tアイドリング	1.5	0.26	
13tならし	5.7		

表−2.5 の「アイドリング」，および「ならし」の重みづけw_{I}，およびw_{G}を

$$w_{\mathrm{I}} = \frac{r_{\mathrm{tI}} r_{\mathrm{mI}}}{r_{\mathrm{tI}} r_{\mathrm{mI}} + 1 - r_{\mathrm{tI}}} = 0.082 \qquad \text{(Eq.22)}$$

および

$$w_{\mathrm{G}} = \frac{1 - r_{\mathrm{tI}}}{r_{\mathrm{tI}} r_{\mathrm{mI}} + 1 - r_{\mathrm{tI}}} = 0.918 \qquad \text{(Eq.23)}$$

として実工事の推定値を算定した．海外の文献値（ 図−1.8 ）に土木研究所の測定値に基づく実工事の推定値を追記すると図−4.8 になる．排出ガスが着実に抑制されていることを把握できる.

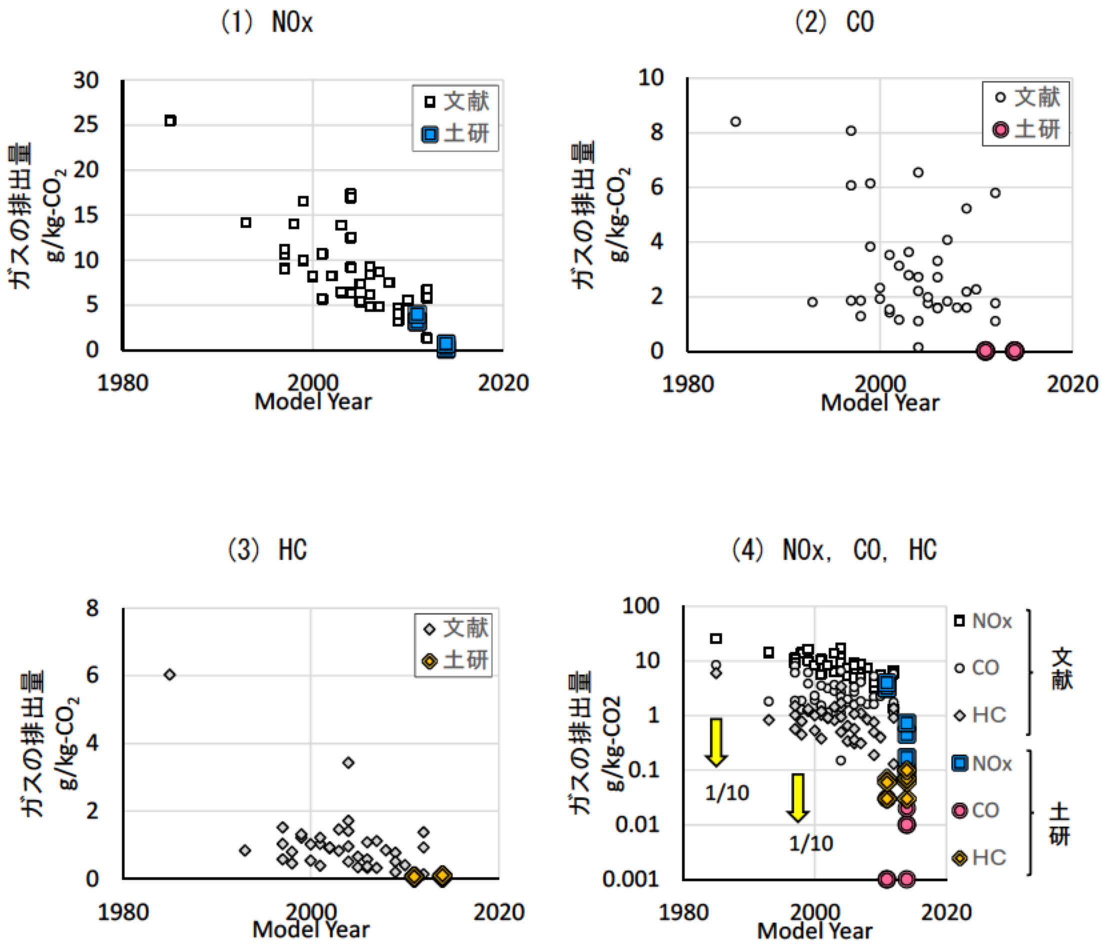


図-4.8 油圧ショベルの年式と排出ガス量の関係（ 土木研究所の測定値と文献値 ）. 文献値の NOx は 4 文献 36 台, CO,および HC は 5 文献 39 台．土木研究所（ 土研 ）の測定は 7 台でグラフは「待機（ アイドリング ）」, および「ならし（ 模擬動作 ）」の測定値を合成して実工事を推定した値．土研の Model Year は適用されている排出ガス規制の年次とした.

表-2.5 の規制値と測定値の関係を図-4.9，図-4.10 に図示する. 2014 年規制車の NOx の実工事の推定値のみが規制値の換算値を上回っていたが，他のガスは規制値を下回っていた．実工事の推定にあたっては，コールドスタートのアイドリングの測定値を使用し，アイドリングストップ機能が働かない前提で推定しているので安全側（ 推定値が高め ）である.

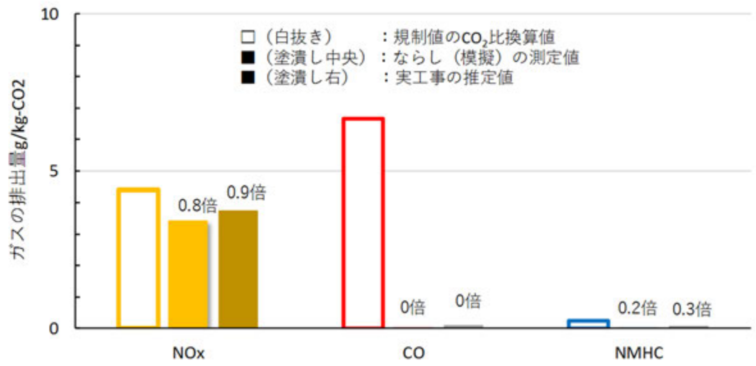


図-4.9　2011 年規制車の測定値 （ 3 台の平均 ）.

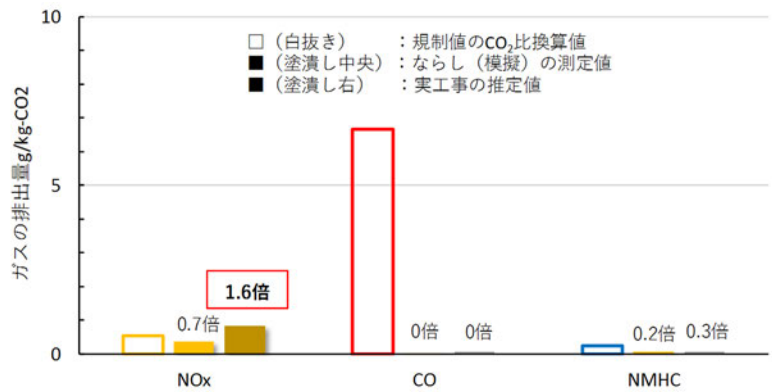


図-4.10　2014 年規制車の測定値 （ 4 台の平均 ）.

オンロード車の RDE 試験においては台上試験での規制値の 3 倍程度の NOx が排出された測定値が報告されていたが，建設機械では文献値，および土木研究所の測定値ともに台上試験での規制値を大きく上回ることがなかった要因として，エンジンの動力系統の違いが考えられる．建設機械では図-4.11 に示すようにエンジンで油圧ポンプを駆動させて走行，および作業機を動作させる．動作時のエンジンスロットルは図-4.12 に示すように固定しているため図-2.9 (P.27)の例のようにエンジン回転数の変化は小さい．このことで建設機械にエンジンを搭載した条件で排出ガスを抑制する機能が台上試験と比較して大きく低下することがなかったと考えられる．

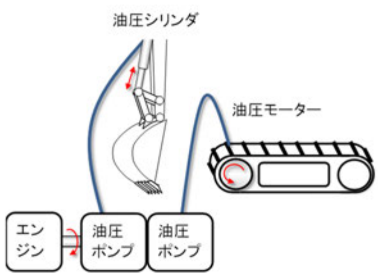


図-4.11　油圧ショベルの動力系統の模式図.

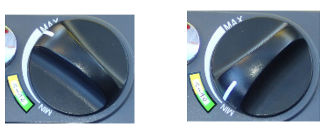
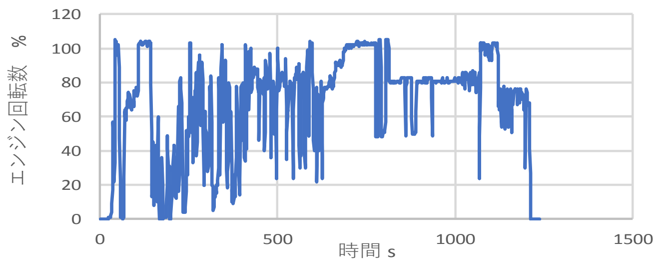
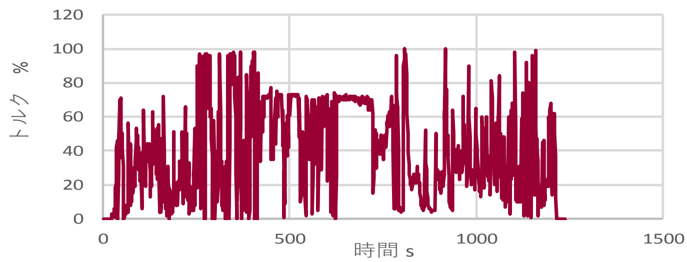


図-4.12　油圧ショベルのエンジンスロットルの例.

なお,参考までに排出ガス規制における台上試験の過渡試験サイクル NRTC (non-road transient cycle) におけるエンジン回転数とトルクを図−4.13, 図−4.14 に示す. エンジンの回転数が変動しないで一定の小さいトルク値が継続するアイドリングに相当する部分がないので, 動作条件は本研究の実験における「ならし (模擬動作)」(図−2.9 (P.27)参照) に近い.



図−4.13 NRTC のエンジン回転数.



図−4.14 NRTC のトルク.

4.3　エンジンの排出原単位の設定と課題.

現行の技術手法で使用したエンジンの排出原単位は, エンジン単体の台上試験値を使用しているため, 規制値よりも小さい値となっている. しかし, 排出ガスについては PEMS (portable emissions measurement system) による測定が行われるようになったことを考慮すると台上試験値よりも PEMS での測定値を拠り所とすることが適切と考えた. PEMS での測定値は, 図−4.5 のようにオンロード車から排出される NOx の測定値が規制値を大幅に上回っているとの報告例がある. しかし, 建設機械の測定値が台上試験での規制値 (ただし, CO_2 比に換算した値) を上回っていたのは, 図−4.6 の文献値の NOx で 1.2 倍, 図−4.10 の土木研究所測定値の NOx の 1.6 倍のみであり, おおむね規制値以下であった. PM についても光吸収係数測定器 (オパシメータ) で測定したが, 2011 年規制車, 2014 年規制車ともにほぼ 0 であり, 規制値を大きく下回っていた (付録 A. 4 (P. 108)).

以上を考慮すると 2014 年規制車の NOx 以外は規制値で予測することが安全側で妥当であると判断できる. 測定値が台上試験での規制値を超過した 2014 年規制車の NOx については, 以下の方法が考えられる.

(案 1) 2011 年規制値を採択.

(案 2) 2014 年規制値にオンロード車の RDE (real driving emission) 規制での割り増し値 CF 値 (conformity factor) を準用して設定. 欧州の路上走行試験の規制値は, 台上試験での規制値に CF 値=2.1 を乗じた値を当面の規制値とし, 将来, CF 値=1.5 に引き下げることとしているのでこれら

を準用.

（案 1)を採択する場合, 数値の根拠が明確でわかりやすいが, 2014 年規制値の 10 倍の値になり過剰な上乗せ値になる. 一方, (案 2)を採択する場合, 台上試験値の 2.1 倍, または 1.5 倍は, 土木研究所での測定結果の 1.6 倍に近い値であるが, 設定根拠が不明確である.

さらに排出ガスの抑制にかかる社会的な影響について考察する. 2014 年規制車を使用する場合には, 燃料の軽油以外に SCR で消費する尿素（ 通称「アドブルー」）を購入する必要があり, 使用者の経済的な負担が増える. メーカも装置の開発や搭載にかかる費用を価格に転嫁することができないので負担している. このように多くの社会的負担の上に排出ガス規制が進展したにもかかわらず, その効果が排出ガスの予測評価で反映できないことは好ましくない.

以上を総合的に考察して(案2)の CF 値=2.1 を採択して暫定的な排出原単位を設定し, アイドリングストップの実情を調べて見直すこととする. 理由を整理すると以下となる.

・建設機械の使用過程車の測定値はオンロード車のように台上試験の規制値を大きく上回ることがないことは海外の文献, および土木研究所の測定で確認できた.

・欧州の路上走行試験での規制値は, 台上試験での規制値に CF 値=2.1 を乗じた値としている. 今後, これらの規制値に整合するように排出ガスが抑制されることになるが, 車両全体の平均値はこの値を下回ることになる. 土木研究所の実験値から実工事を推定した結果は, コールドスタートのアイドリング時の排出量をアイドリングストップなしで見込む安全側（ 推定値が大きくなる方法 ）でも台上試験での規制値の 1.6 倍であり, 2.1 倍を下回っている.

・排出ガスの 2014 年規制の導入にあたっては, 製造業, 使用者等の社会的な負担を強いている. このことを環境影響の予測においても評価する必要がある.

技術手法の改定に資するエンジンの排出原単位を**表-4.4**, および**表-4.5** に示す.

表-4.4 窒素酸化物のエンジン排出係数原単位$\overline{\mathrm{NOx}}$（ g/kWh).

定格出力	改定前			追記の原単位(案)[*1]		
	排出ガス未対策型	一次排出ガス対策型	二次排出ガス対策型	2006年規制[*2]	2011年規制	2014年規制
15kW未満	6.7	5.3	5.3	－	－	－
15～30kW未満	9.0	6.1	5.8	－	4.0	4.0
30～60kW未満	13.5	7.8	6.1	6.0	4.0	4.0
60～120kW未満	13.9	8.0	5.4	4.0	3.3	** 0.84
120kW以上	14.0	7.8	5.3	3.6	3.3	** 0.84

*1: 規制値による. 出力区分が改定前と異なるが, 複数の区分にまたがる場合は, 排出量が大きい値を採択した. **は規制値にCF値=2.1を乗じて割り増しした値.

*2: 三次排出ガス対策型も含む. 規制値が二次排出ガス対策型を上回るものについては空欄とし, 測定値に基づく二次排出型を準用した.

表−4.5 粒子状物質のエンジン排出係数原単位$\overline{\mathrm{PM}}$(g/kWh).

定格出力	改定前			追記の原単位(案)*1		
	排出ガス未対策型	一次排出ガス対策型	二次排出ガス対策型	2006年規制*2	2011年規制	2014年規制
15kW未満	0.53	0.53	0.36	−	−	−
15～30kW未満	0.59	0.54	0.42	−	0.03	0.03
30～60kW未満	0.63	0.50	0.27	−	0.03	0.03
60～120kW未満	0.45	0.34	0.22	−	0.02	0.02
120kW以上	0.41	0.31	0.15	−	0.02	0.02

*1：規制値による．出力区分が改定前と異なるが，複数の区分にまたがる場合は，排出量が大きい値を採択した.
*2：規制値が二次排出ガス対策型を上回るものについては空欄とし，測定値に基づく二次排出型を準用した.

なお，技術手法の改定案に資する NOx の排出量は 4.3.1 で述べたようにアイドリングストップを考慮していない．近年の建設機械にはアイドリングストップ機能が標準的に装備されており，オンロード車ではアイドリングストップの影響が詳細に調べられていることから（ 事例[R.52] [R.53])，建設機械についても実情を調べて見直すことが必要である.

4.4　建設機械を組み合わせたユニットでの排出原単位

4.4.1　計算方法

技術手法においては複数の機械を組み合わせ， 図−4.15 に示すように[R.19][R.20]，一日に排出される NOx，および SPM のユニット別の排出係数E (g / ユニット / 日)を示している. Eは,建設機械iの排出係数原単位Q_i (g / h)に運転 1 日当たりの標準運転時間

$$h_i\ (\mathrm{h} / 日) = 年間標準運転時間/年間標準運転日数$$

を乗じた値をユニットが構成する建設機械で合計した

$$E = \sum_i Q_i \cdot h_i \qquad \text{(Eq.24)}$$

とし， Q_iは, 仕事率W_i（ kW ） に表−4.4， および表−4.5 のエンジン排出係数原単位e_i （ g / kWh ）を乗じた値$Q_i = W_i e_i$ としている. 土木工事におけるW_iを測定することは困難であるが, 台上試験での燃料消費率$A_{\mathrm{r}i}$ （g / h）と仕事率W_iの比b （g / kWh）および土木工事での燃料消費率$A_{\mathrm{r}i}$ （ g / h ） からW_i=$A_{\mathrm{r}i}/b$として計算している． $A_{\mathrm{r}i}$は土木工事費を計算する際の計算方法を準用し, エンジンの定格出力P_iと定格出力あたりの燃料消費率$B_{\mathrm{r}i}$から$A_{\mathrm{r}i}$=$P_i B_{\mathrm{r}i}$で計算している.

よってQ_iの計算式は

$$Q_i = P_i B_{\mathrm{r}i} b^{-1} e_i \qquad \text{(Eq.25)}$$

となる.

今回の改定案の作成にあたっては, 台上試験値bがなかったので代替策で計算した． エンジンは排出ガス対策と燃費改善策により燃料消費率が変化している可能性があるが， 土木工事での$B_{\mathrm{r}i}$の増減と台上試験でのbの増減が同じ割合で変化するので$B_{\mathrm{r}i}b^{-1}$は燃料消費率の増減で変化

しないとみなし，現行 (改定前) の原単位の設定値からr_i=$B_{ri}b^{-1}$を計算し，準用した.

表－2.5.11　ユニットの排出係数と排気管高さ

工事の種別	ユニット	排出係数 (g/ユニット/日) ※上段：排出ガス未対策型 中段：一次排出ガス対策型 下段：二次排出ガス対策型		代表排気管高さ (m)
		NO_x	SPM	
掘削工	土砂掘削	9,700	290	3.1
		5,400	220	3.1
		3,800	110	3.1
	軟岩掘削 硬岩掘削	18,000	520	2.9
		10,000	400	2.9
		7,000	200	2.9
盛土工（路体、路床）	盛土（路体、路床）	8,600	260	3.0
		4,800	190	3.0
		3,400	100	3.0
法面整形工	法面整形（掘削部） 法面整形（盛土部）	4,400	140	2.4
		2,500	110	2.4
		1,800	71	2.4

図-4.15「道路環境影響評価の技術手法」における排出原単位の記載(抜粋).

現行 (改定前) の技術手法の原単位作成のデータから計算したr_iを表-4.6 に示す.

表-4.6 r_i.

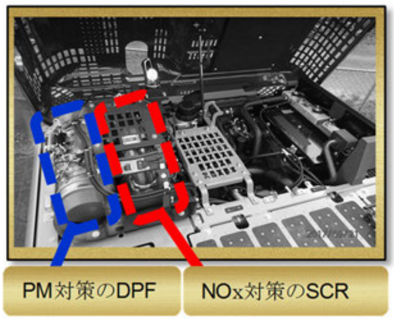
エンジンの定格出力	土木工事の工事費積算基準で使用していた燃料消費率 ($L \cdot h^{-1} \cdot (kW)^{-1}$)											
	0.044	0.05	0.085	0.089	0.1	0.103	0.108	0.111	0.153	0.17	0.175	0.189
15kW未満	0.103	0.117	0.199	0.209	0.235	0.242	0.253	0.260	0.359	0.399	0.411	0.443
15～30kW未満	0.110	0.124	0.212	0.222	0.249	0.256	0.269	0.276	0.381	0.423	0.436	0.470
30～60kW未満	0.125	0.142	0.242	0.253	0.285	0.293	0.307	0.316	0.435	0.484	0.498	0.538
60～120kW未満	0.128	0.145	0.247	0.259	0.291	0.299	0.314	0.323	0.445	0.494	0.508	0.549
120kW以上	0.129	0.147	0.249	0.261	0.293	0.302	0.316	0.325	0.448	0.498	0.513	0.554

なお， 第５章 (P. 76) で後述するが，時間当たりの燃料消費量とCO_2排出量が比例することを文献調査で確認し，エンジンコントロールユニット ECU の信号に含まれるエンジン動力と時間当たりのCO_2排出量が比例することを土木研究所の測定値で確認し，これらから，時間当たりの燃焼消費量とエンジン動力が比例することを確認した． このことは，上記のbに相当する値が，エンジンを建設機械に搭載した条件でも一定， すなわちエンジンの熱効率がエンジン負荷の大小によらず一定であることを意味する.

4.4.2　排気管の高さ・排出ガス濃度の距離減衰・エンジン出力

(1)　排気管の高さ

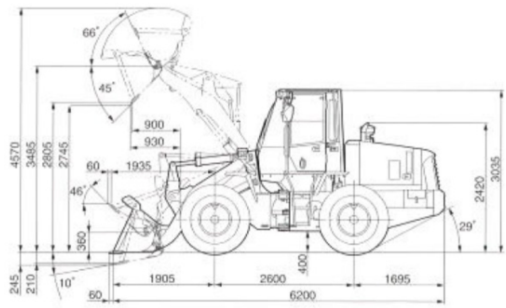
「道路環境影響評価の技術手法」[R.19][R.20]には土砂掘削， 盛土等のユニット別の代表排気管高さが記載されている． 排出ガス対策により図-1.3 のように排出ガスの後処理装置が搭載されるようになったので， エンジンルームが大きくなり， 排気管の高さも高くなる傾向があるのでこの代表排気管高さの見直しについて検討した.

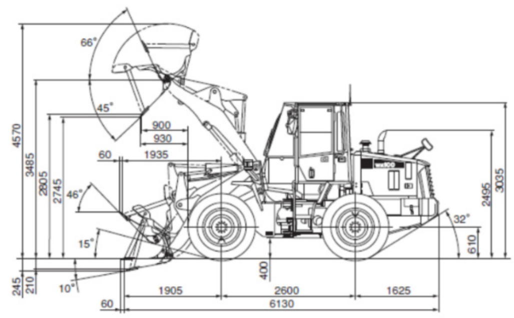


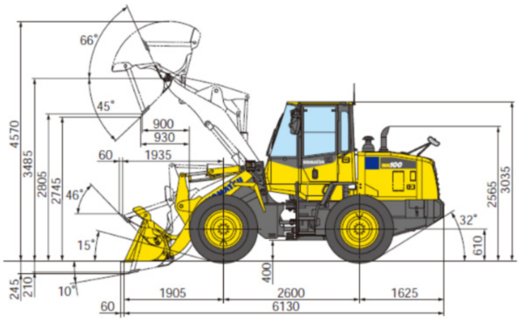
図−1.3　2014 年規制に対応して PM 対策の DPF と NOx 対策の SCR を搭載した油圧ショベルの例（　再掲　）. DPF: Diesel particulate filter, SCR: selective catalytic reduc-tion (尿素選択的還元触媒). NOx を N_2 と H_2O に還元する.

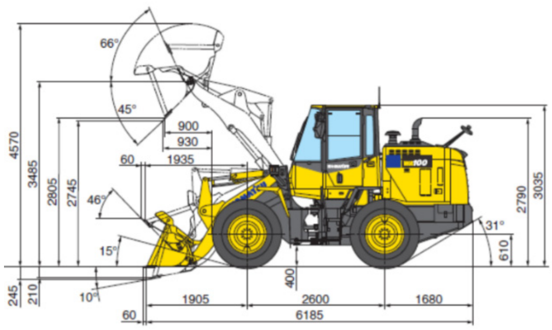
まず，ホイールローダー，バックホウ，およびホイールクレーンの排気管の高さの経年変化について調べた．同一メーカで同程度の規格（バケット容量，質量等）のカタログを過去に遡ってインターネットで収集できる機種のなかから排気管の高さを推定できる代表的な機種を選定し，経年変化を調べた．次に比較のために同程度の規格の他社の製品で最新の排出ガス規制（2014 年規制）に対応した機種の排気管の高さを調べた（**表−4.7 ～ 表−4.12**）.

表−4.7 排気管高さの推移例 コマツホイールローダ 1.3m3.

<table>
<tr><th>国交省指定制度</th><th>オフロード法</th><th>排気管高さ m</th><th>図面</th></tr>
<tr><td>2 次基準</td><td></td><td>2.42</td><td>

WA100-5</td></tr>
<tr><td>3 次基準</td><td></td><td>2.495</td><td>

WA100-6</td></tr>
<tr><td></td><td>3 次規制
2011 年規制</td><td>2.565</td><td>

WA100-7　後処理装置　DOC</td></tr>
<tr><td></td><td>3 次規制
2014 年規制</td><td>2.79</td><td>

WA100-8　後処理装置 DOC+SCR</td></tr>
</table>

表-4.8 参考　日立建機ホイールローダ 1.1～1.6m³.

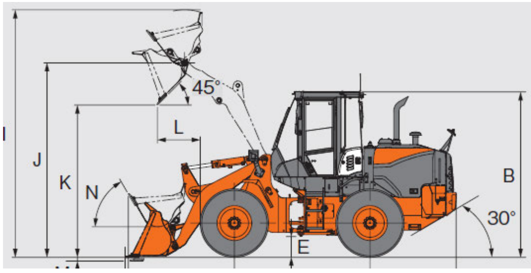
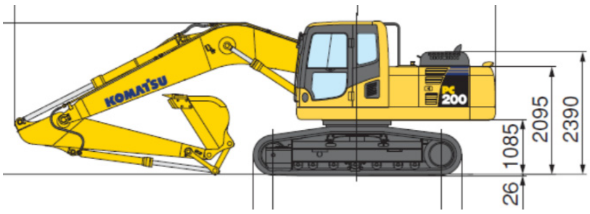
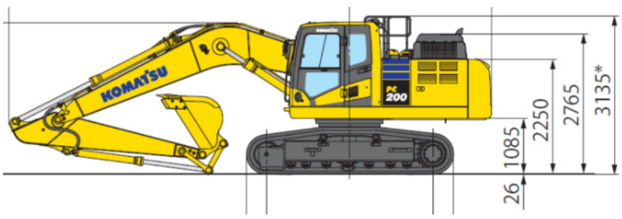
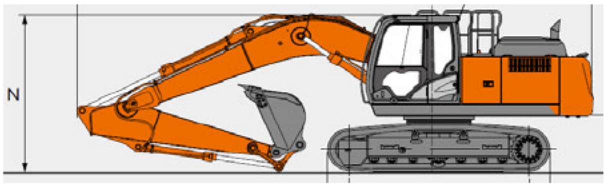
国交省指定制度	オフロード法	排気管高さ m	図面
	3 次規制 2014 年規制	3.14	 ZW100-s　後処理装置 DOC+SCR

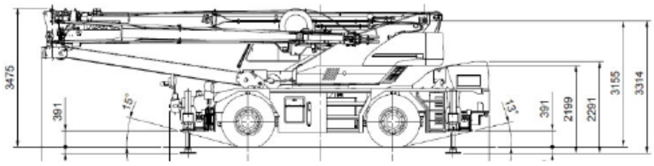
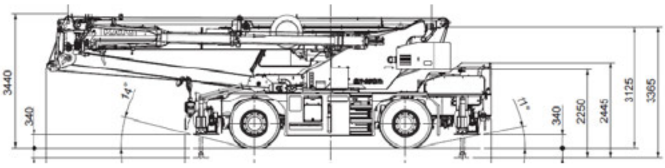
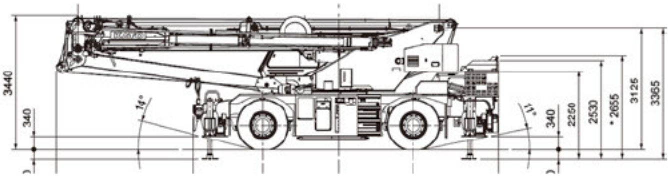
表-4.9 排気管高さの推移例　コマツバックホウ山積 0.8m³（平積 0.6m³）.

国交省指定制度	オフロード法	排気管高さ m	図面
3 次基準	2006 年規制	2.39	 PC200-8
	3 次規制 2011 年規制	2.605	 PC200-10　後処理装置 DPF
	3 次規制 2014 年規制	2.765	 PC200-11　後処理装置 DPF+SCR

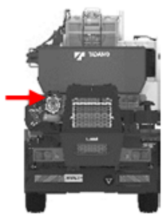
表−4.10 参考　日立建機バックホウ山積 0.8m³(平積 0.6m³).

国交省指定制度	オフロード法	排気管高さ m	図面
	3 次規制 2014 年規制	3.02	 ZX200-6 後処理装置 DOC+SCR

表−4.11 排気管高さの推移例　加藤製作所　ラフテレーンクレーン 25t 吊.

国交省指定制度	オフロード法	排気管高さ(推定) m	図面
	2006 年規制	1.6	 KR-25H-V_7
	2011 年規制	2.1	 KR-25H-V_8
	2014 年規制	2.4	 KR-25H-F

表−4.12 参考　タダノ　ラフテレーンクレーン 25t 吊.

国交省指定制度	オフロード法	排気管高さ(推定) m	図面
	2014 年規制 *タダノ*	1.9	 GR-250N

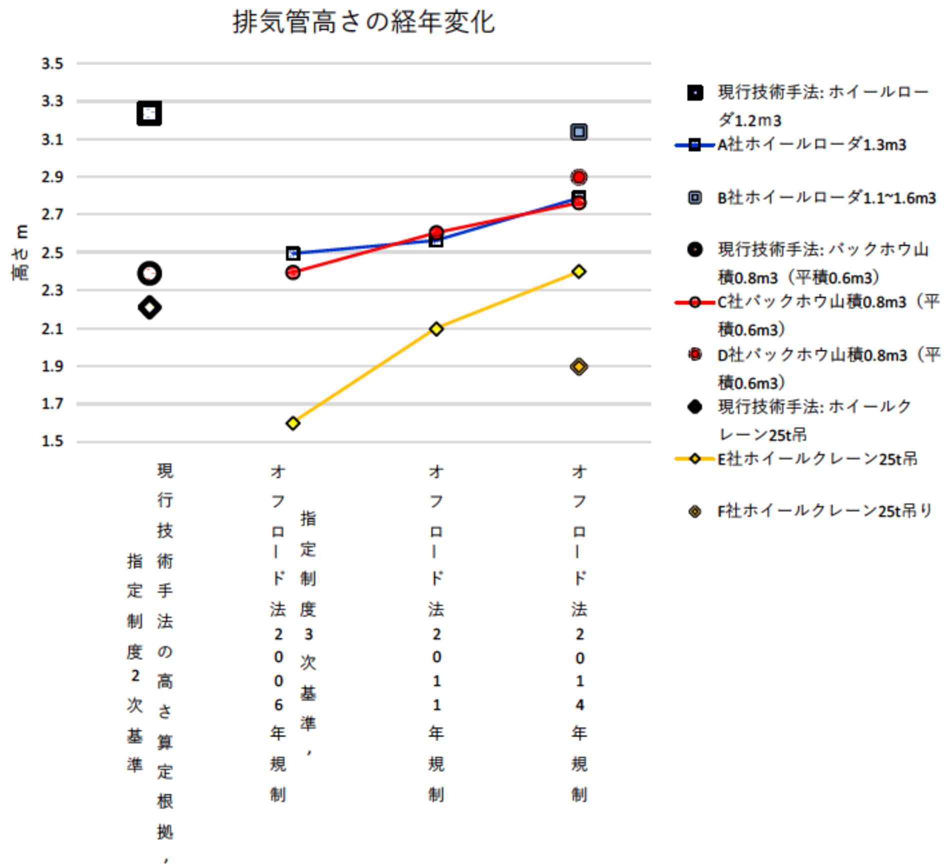


図-4.16 規制年次と排気管の高さの関係.

次に，排気管の高さを機種，排出ガスの規制年次で整理して図-4.16 にまとめた．個別の機種別には排気管高さが高くなっている傾向を把握できる． しかし，排気管の高さはメーカーによって大きく異なり，ホイールローダ，およびホイールクレーンの排気管の高さは，現行の技術手法よりも 2014 年規制車の方が低い値となった．現行の技術手法では排気管の高さを 0.1m 単位で設定しているが，このように細かく設定することは困難であり，必要性も低い．

(2) 排出ガス濃度の距離減衰

排気管高さが排出ガス濃度の計算値に及ぼす影響についてプルーム式を計算モデルとし， 表-4.13 の条件で表-4.14 を計算ケースとし， 外部 （ 福山コンサルタント ） に委託して試算した．

表−4.13 計算条件.

項目		計算条件
排出原単位	mg/s	1
排出源の高さ	m	1，2，3，4
排気管から予測点までの水平距離	m	1，2，5，10，20，50，100
風向		順方向
大気安定度		濃度が高くなる条件，および濃度が低くなる条件（ 実務的な条件とする ）の 2 種類
予測地点の高さ	m	1.5，4.0
バックグラウンド濃度	ppm	0
NO_2 の密度	kg/m^3	1.91（20℃，1atm）．道路運送車両の保安基準を定める告示（2009.7.30）別添 42 による.
予測値		濃度 ppm

表−4.14 計算ケース.

<table>
<tr><th colspan="2">ケース</th><th>排出源
単位</th><th>排出源
高さ</th><th>排気管から予測点までの水平距離</th><th>風向</th><th>風速:
大気安定度</th><th>予測地点
高さ</th><th>BG</th></tr>
<tr><td colspan="2">1</td><td rowspan="16">1mg/s</td><td>1m</td><td rowspan="16">1m
2m
5m
10m
20m
50m
100m</td><td rowspan="16">順方向</td><td>1m/s:A</td><td>1.5m</td><td rowspan="16">0ppm</td></tr>
<tr><td rowspan="3">2</td><td>A</td><td>2m</td><td rowspan="3">1m/s:A</td><td rowspan="3">1.5m</td></tr>
<tr><td>B</td><td>3m</td></tr>
<tr><td>C</td><td>4m</td></tr>
<tr><td rowspan="4">3</td><td>A</td><td>1m</td><td rowspan="4">5m/s:D</td><td rowspan="4">1.5m</td></tr>
<tr><td>B</td><td>2m</td></tr>
<tr><td>C</td><td>3m</td></tr>
<tr><td>D</td><td>4m</td></tr>
<tr><td rowspan="4">4</td><td>A</td><td>1m</td><td rowspan="4">1m/s:A</td><td rowspan="4">4.0m</td></tr>
<tr><td>B</td><td>2m</td></tr>
<tr><td>C</td><td>3m</td></tr>
<tr><td>D</td><td>4m</td></tr>
<tr><td rowspan="4">5</td><td>A</td><td>1m</td><td rowspan="4">5m/s:D</td><td rowspan="4">4.0m</td></tr>
<tr><td>B</td><td>2m</td></tr>
<tr><td>C</td><td>3m</td></tr>
<tr><td>D</td><td>4m</td></tr>
</table>

計算結果を**図−4.17**，**図−4.18** に図示する．発生源からの距離は，建設機械の大きさを考慮して 10m 以上とし，排気管の高さによらずほぼ一致する 50mまでとした．仮に排気管の高さを 1m 過大に設定した場合，予測値は最大で 23%過小になる．しかしながら，建設機械は工事中に移動するのでこの誤差の影響は極めて小さい．

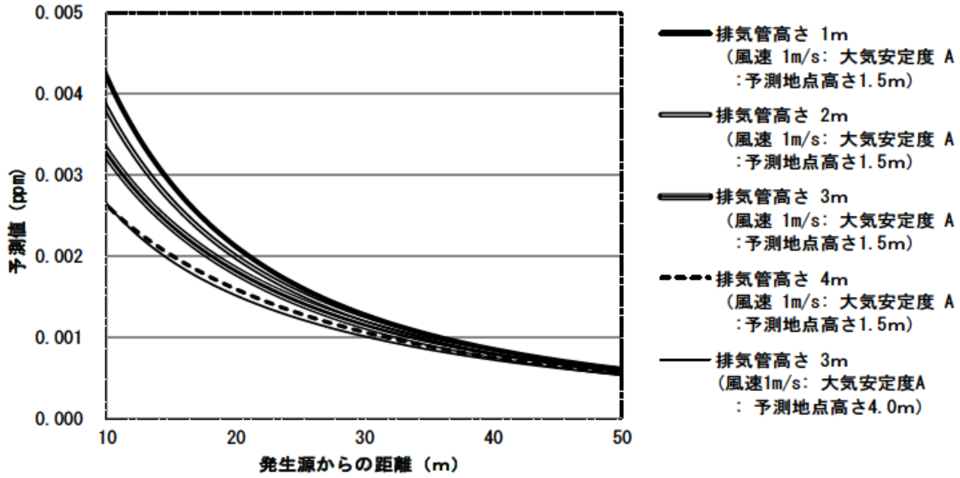


図-4.17　排気管の高さと排出ガス濃度の距離減衰（ 濃度が高くなる条件-大気安定度 A ）.

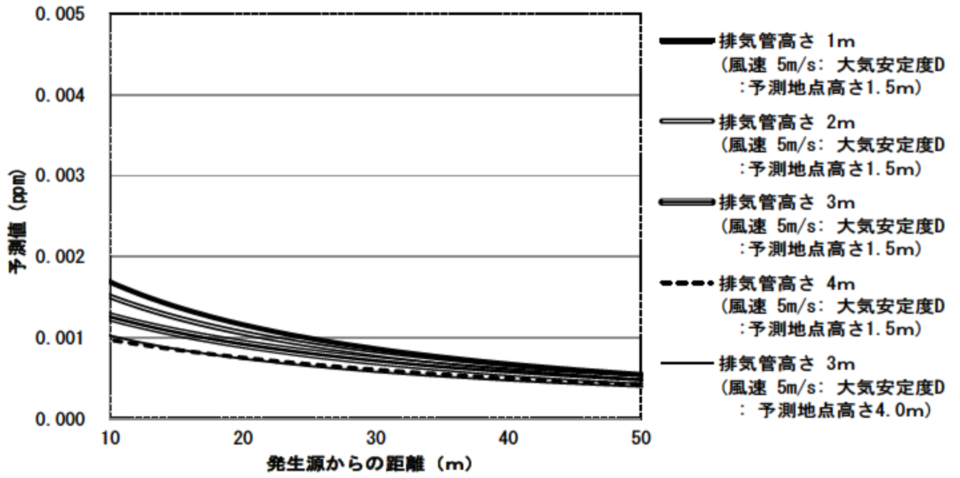


図-4.18　排気管の高さと排出ガス濃度の距離減衰（ 濃度が低くなる条件-大気安定度 D ）.

以上の調査結果をふまえて排気管の高さは以下で設定した.

STEP1　2018 年度に販売されている複数の建設機械の排気管高さの平均値（H_{mi}）を算出する.

STEP2　H_{mi}を組み合わせてユニット別の代表排気管高さH_{uj}を設定する.

STEP3　現行（ 改定前 ）の技術手法の代表排気管高さとH_{uj}を比較して低い方を選択し, 切り捨てて（ 予測値が大きくなる安全側で ）1 m 単位にまるめる.

(3) エンジン出力

エンジン出力は， エンジンの熱効率の改善による向上，排出ガス対策に伴う低下， および後処理装置の SCR の搭載によりエンジン本体の排出ガス対策が軽減されることによる向上等，向上および低下の双方の要因で変化することが考えられる. 排出ガス量の計算ではエンジンの定格出力を使用しているため，エンジンの定格出力の経年変化について調べた. 調査方法は，環境省，および国土交通省がインターネットで公表している「型式届出特定特殊自動車一覧」，および「排

出ガス対策型建設機械 <第2次基準値>」とインターネットに公開されているカタログから機械の型式，エンジン出力を調べる方法とした．**図-4.19** はエンジンの定格出力について技術手法における排出量計算で使用した値と機械別の推移をグラフ化したものである．ホイールクレーンは技術手法の策定時に使用した定格出力と調査対象のメーカの定格出力に差があり，2006 年規制以降の経年で低下する傾向があるが，バックホウは経年で上昇する傾向があった．

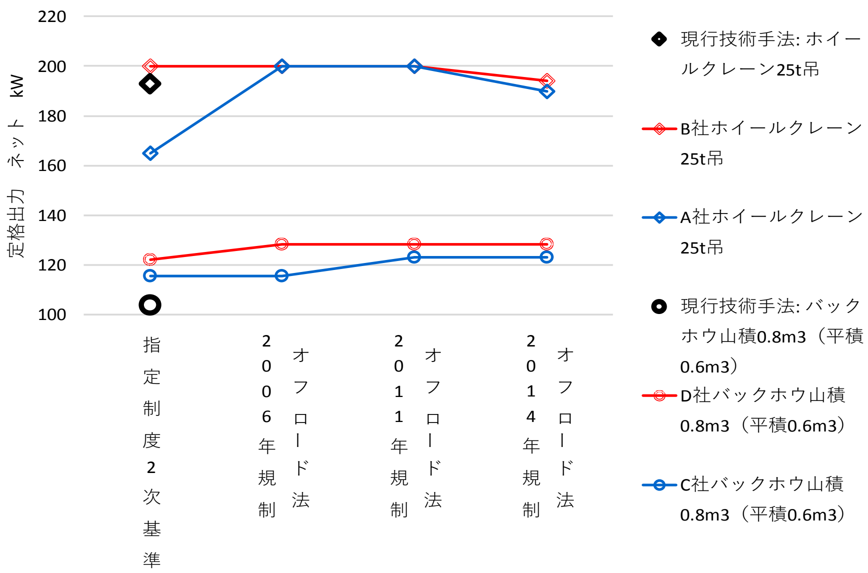


図-4.19　建設機械のエンジン出力の経年変化.

2006 年規制対応車以降の排出原単位を計算するにあたって，現行の技術手法の計算で使用したエンジン出力をそのまま準用することも考えられるが，この値が必ずしも全体の平均的な値でないと考えられるので，原単位を計算する際のエンジン出力は以下の優先順位で採択した．

1．建設機械等損料表[R.22]（ 図-4.20 の中央の緑色の書籍 ）

土木工事の積算で使用するものなので実務と整合している．また,国土交通省の第1次基準，第2次基準，第3次基準（ 2006 年規制 ），2011 年規制，および 2014 年規制のエンジン出力が記載されている（ **図-4.21** ）．

図-4.20　参考図書. 左から[R.23][R.25][R.22][R.26].

分類コード 機械名称	規格 諸元	規格 機関出力 (kW)	規格 機械質量 (t)	(1) 基礎価格 (千円)	(2) 標準使用年数 (年)	年間標準 (3) 運転時間 (時間)	年間標準 (4) 運転日数 (日)	年間標準 (5) 供用日数 (日)	(6
01　ブルドーザ及びスクレーパ									
0101　ブルドーザ									
012［普通・排出ガス対策型（第1次基準値）］									
030－001	3t級（3～ 4t）	29	3.8	4,160	12.5	400	80	140	[illegible]
060－001	6　（6～ 8）	53	6.8	7,040	12.5	400	80	140	[illegible]
090－001	9　（9）	67	9.9	8,590	12.5	400	80	140	[illegible]
110－001	11　（10～12）	78	10.9	11,100	12.5	400	80	140	[illegible]
150－001	15　（13～16）	100	14.6	14,400	12.5	400	80	140	[illegible]
180－001	18　（18～20）	136	18.0	19,000	11.5	720	110	180	[illegible]
210－001	21　（24～26）	152	21.9	28,200	11.5	720	110	180	[illegible]
320－001	32　（33～37）	208	31.7	33,500	11.5	720	110	180	[illegible]
013［普通・排出ガス対策型（第2次基準値）］									
030－001	3t級（3～ 4t）	29	3.8	4,540	12.5	400	80	140	[illegible]
060－001	6　（6～ 8）	53	6.8	7,750	12.5	400	80	140	[illegible]

図-4.21　建設機械等損料表の記載例.

2. 型式届出特定特殊自動車一覧，および型式承認少数生産車一覧[R.09]

オフロード法に適合した建設機械等について環境省が公表している一覧. 機械の型式および出力が記載されている. **付録　B.1** に電子データを添付する.

3. 日本建設機械要覧 2016[R.23]（ **図-4.20** の最も左の紺色の書籍 ）

建設機械の解説と機械の仕様の一覧表が記載されている．機械の仕様には排出ガス規制への対応も記載されている.

4.4.3　建設機械を組み合わせたユニットでの排出原単位

建設機械機械を組み合わせたユニットでの排出原単位を 4.4.1 で述べた計算方法で計算した. 現行の「道路環境影響評価の技術手法」[R.19][R.20]に記載されているのは，排出ガス未対策型，一次排出ガス対策型，および二次排出ガス対策型までであり，これに 2006 年規制, 2011 年規制, および 2014 年規制を追記した（ **表-4.15** ）．組み合わせの機械は，**国土交通省土木工事積算基準**[R.25]，および**土木施工の実際と解説**[R.26]により確認した．網掛けは本研究成果での追記部分である.

表 4.15(1)　　ユニットの排出係数と排気管高さ.

工事の種別	ユニット	排出ガス規制	排出係数（g/ユニット/日）		代表排気管高さ(m)
			NOx	SPM	
掘削工	土砂掘削	排出ガス未対策型	9,700	290	3.1
		一次排出ガス対策型	5,400	220	
		二次排出ガス対策型	3,800	110	
		2006年規制*	3,100	130	3
		2011年規制	2,900	17	
		2014年規制	730	17	
	軟岩掘削 硬岩掘削	排出ガス未対策型	18,000	520	2.9
		一次排出ガス対策型	10,000	400	
		二次排出ガス対策型	7,000	200	
		2006年規制*	4,300	200	2
		2011年規制	4,100	25	
		2014年規制	1,100	26	
盛土工 （路体、路床）	盛土工 （路体、路床）	排出ガス未対策型	8,600	260	3.0
		一次排出ガス対策型	4,800	190	
		二次排出ガス対策型	3,400	100	
		2006年規制*	2,900	130	2
		2011年規制	2,200	14	
		2014年規制	940	16	
法面整形工	法面整形 （掘削部） 法面整形 （盛土部）	排出ガス未対策型	4,400	140	2.4
		一次排出ガス対策型	2,500	110	
		二次排出ガス対策型	1,800	71	
		2006年規制*	1,400	75	2
		2011年規制	1,300	8	
		2014年規制	290	7	
路床安定処理工	路床安定処理	排出ガス未対策型	11,000	--	2.9
		一次排出ガス対策型	9,900		3.0
		二次排出ガス対策型	9,600		3.1
		2006年規制*	4,300		2
		2011年規制	4,300		
		2014年規制	1,300		
バーチカルドレーン工	サンドドレーン 袋詰めサンドドレーン	排出ガス未対策型	26,000	--	2.3
		一次排出ガス対策型	24,000		
		二次排出ガス対策型	23,000		
		2006年規制*	9,100		2
		2011年規制	9,100		
		2014年規制	--		--
締固改良工	サンドコンパクションパイル	排出ガス未対策型	26,000	--	2.3
		一次排出ガス対策型	24,000		
		二次排出ガス対策型	23,000		
		2006年規制*	9,100		2
		2011年規制	9,100		
		2014年規制	--		--

*：三次排出ガス対策型の場合を含む.

注1. 二次排出ガス対策型以前は国土技術政策総合研究所が公表している正誤表の値.
注2. ユニットを構成する機械の一部が当該規制年に対応していない場合は旧規制対応の機械とした.
注3. 新しい規制で排出量が増加している要因は, 出力, または運転時間の増加.
注4. 代表排気管高さが低くなった要因は, 切り下げて1m単位にしたこと, および排気管の高さが低い発電機等の排出量の寄与率の増加.

表 4.15(2)　　ユニットの排出係数と排気管高さ.

工事の種別	ユニット	排出ガス規制	排出係数（ g/ユニット/日 ）		代表排気管高さ(m)
			NOx	SPM	
固結工	粉体噴射攪拌	排出ガス未対策型	27,000	--	2.0
		一次排出ガス対策型	22,000		
		二次排出ガス対策型	22,000		
		2006年規制*	8,200		2
		2011年規制	8,200		
		2014年規制	7,200		
土留・仮締切工	鋼矢板（アースオーガ併用圧入工）	排出ガス未対策型	20,000	--	2.3
		一次排出ガス対策型	13,000		2.4
		二次排出ガス対策型	12,000		2.4
	同上　ホイールクレーンでの油圧駆動	2006年規制*	1,700		2
		2011年規制	1,600		
		2014年規制	620		
旧橋撤去工	旧橋撤去	排出ガス未対策型	15,000	--	2.1
		一次排出ガス対策型	9,100		1.9
		二次排出ガス対策型	6,800		1.7
		2006年規制*	3,500		2
		2011年規制	3,200		
		2014年規制	760		
掘削工（トンネル）	トンネル機械掘削**	排出ガス未対策型	47,000	1,400	--
		一次排出ガス対策型	26,000	1,100	
		二次排出ガス対策型	25,000	980	
		2006年規制*	13,000	560	
		2011年規制	12,000	150	
		2014年規制	4,700	150	
	トンネル発破掘削**	排出ガス未対策型	63,000	1,900	
		一次排出ガス対策型	34,000	1,400	
		二次排出ガス対策型	32,000	1,300	
		2006年規制*	19,000	810	
		2011年規制	18,000	190	
		2014年規制	7,200	190	
場所打杭工	リバースサーキュレーション工	排出ガス未対策型	18,000	--	2.2
		一次排出ガス対策型	15,000		2.3
		二次排出ガス対策型	15,000		2.3
		2006年規制*	4,700		2
		2011年規制	4,500		
		2014年規制	4,100		
地中連続壁工	地中連続壁	排出ガス未対策型	29,000	--	2.3
		一次排出ガス対策型	26,000		2.3
		二次排出ガス対策型	24,000		2.4
		2006年規制*	8,900		2
		2011年規制	8,700		
		2014年規制	7,400		

*：三次排出ガス対策型の場合を含む.

**: 二次対策排出型までは二方としていた．2006年規制以降は二方に限定していない.（積算基準, および建設機械等損料表においては二方の分類がないため, トンネル工事の運転時間の記載値で計算した.）.

注1. 二次排出ガス対策型以前は国土技術政策総合研究所が公表している正誤表の値.

注2. ユニットを構成する機械の一部が当該規制年に対応していない場合は旧規制対応の機械とした.

注3. 新しい規制で排出量が増加している要因は, 出力, または運転時間の増加.

注4. 代表排気管高さが低くなった要因は, 切り下げて1m単位にしたこと, および排気管の高さが低い発電機等の排出量の寄与率の増加.

4.5　まとめと課題

大気環境の予測に活用することを目的として排出ガスの2006年規制 （ 排出ガス対策型建設機械の三次基準), 2011年規制, および2014年規制に対応して工事を実施した場合のユニット (工種) 別の排出ガスの原単位を検討した.

まず, 文献に基づいてオンロード車, および建設機械のPEMS (portable emissions measurement system) での測定値と室内の台上試験で定められた規制値の関係を調査した. オンロード車の実路走行RDE (real driving emission ） 試験の測定値は台上試験で定められた規制値を大きく上回っていたが, 建設機械の実現場での測定値は台上試験で定められた規制値とよく整合していた.

次に土木研究所における測定値を規制値と比較した. 排出ガス規制の対象となっている窒素酸化物NOx, 一酸化炭素CO, および非メタン炭化水素NMHCの「待機 （ アイドリング)」, および「ならし （ 模擬動作 ）」の測定値, ならびにアイドリングの時間率にかかる文献値にもとづいて, 「待機」, および「ならし」の測定値を合成して「実工事の排出量」 (換算値) を算出した. 「実工事の排出量」 (換算値) は, 経年で減少している文献値のほぼ延長線上の値であり, 台上試験の規制値とも整合することを確認した. 土木研究所の測定値は測定台数が少ないため, 測定値を予測の原単位とすることは適切ではないが, これまで多大な社会的な負担で排出ガス規制への対応が図られ, 結果として大幅に排出ガスが削減されていることを可能な限り環境影響評価に活用することが妥当と判断し, 測定値が規制値以下であることが確認できた機種は規制値をエンジンの排出原単位とし, 測定値が規制値の1.6倍となった一部の機種は割り増し係数を乗じて安全側 （ 予測値が大きい側 ） でエンジンの排出原単位を設定した. 割り増し係数は欧州の路上試験の規制で採択されいるCF値=2.1を採択した.

最後に建設機械を組み合わせたユニットでの原単位の設定を検討した. 検討にあたっては, 排気管の高さの経年変化, 排気管の高さと排出ガス濃度の距離減衰, エンジン出力の経年変化, 組み合わせ機械の経年変化, および各機械の排出ガス規制対応について調べた. 排気管の高さは排出ガス対策により高くなる傾向があったが, 機種により異なる場合があることや, 排出ガスの予測値に及ぼす影響が軽微であることを考慮して, 安全側 (予測値が大きい側) で従来の 0.1m 単位を 1.0m単位に見直した. これらを総合して 2006 年規制 （ 排出ガス対策型建設機械の三次基準), 2011 年規制, および 2014 年規制に対応して工事を実施した場合のユニット別 （ 各種の工種別 ） の排出原単位を設定した.

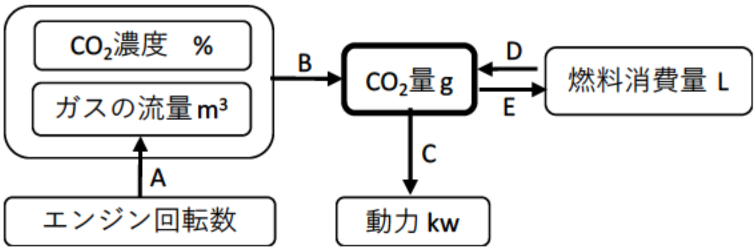
なお, 組み合わせ機械の一部に最新規制に対応してない機種が含まれること, 割り増し係数を乗じたこと, およびアイドリングストップを考慮しなかったことで予測値が過大となる設定値である. 今後, 新たに規制対応した機械, およびアイドリングストップの実情等を調べて下方修正することが必要である.

第 5 章　目的外の成果 2 – カーボンバランス法による燃費測定方法

5. 1　はじめに

排出ガスの測定においては，ガスの濃度のみならず，エンジン回転数，排気流量等も測定する．また，建設機械の排出ガスを測定した文献のなかには，仕事量比および燃料の質量比の双方で排出ガス量が記載されているものがある． 測定値等は異なる発想で再解析すれば新たな知見を得ることができる． ここでは，排出ガス測定データを再解析し，図–5.1 の模式図の A, B，および E の関係を利用してエンジン回転数と CO_2濃度のデータから燃料消費量（ 燃費 ）が計算できることを示す． さらに，燃費改善策についての考察を述べる． ここでの記載内容は建設機械と施工法シンポジウムで発表した内容[R.69]に追加の測定を行ったものを付記したものである．

なお，オンロード車の燃料消費率試験方法を定めた規格 JIS D1012[R.21]においては，CO_2濃度等から燃費を計算するカーボンバランス法も記載されており，実務でも活用されている．有識者からは，自動車（ オンロード ）の燃料の配管の途中に燃料計を設置すると異常検知して車の制御が正常ではなくなってしまう場合があり，燃費はカーボンバランス法で測定している旨を御教示いただいた．



図–5.1　CO_2等の測定値の関連の模式図.

5. 2　文献

建設機械に測定器を搭載して排出ガスを測定した文献をオンライン・データベース DB で検索した． DB は科学技術振興機構（JST）の科学技術文献情報（ 主として和文 ）の JDreamⅢ，および米 Thomson Reuters 社の Web of Science とした． また，これらの文献に記載された情報を元に web site で公開されている文献も入手した．

Phill Lewis, P.E.は North Carolina State University の H. Christopher Frey が測定した[R.72]34 台の建設機械の燃費 x（liter / h）と CO_2（g / h）y の関係を整理し，

$$y = 2638x \quad (R^2 = 0.9952) \tag{5. 1}$$

の関係が得られた旨を報告している[R.71]. この値は環境省が公表[R.10]している軽油の排出係数から算出した値 2624 ×10^3 g-CO_2/ m^3-軽油と有効数字 2 桁で一致する． さらに文献ではアイドリングによる過剰な CO_2排出量の測定値についても述べている．

$$\eta = \frac{\text{Nonidle Time}}{\text{Nonidle Time} + \text{Idle Time}} \tag{5. 2}$$

で定義した operational efficiency η（ ここでは「熱効率η」とは異なる変数．）と過剰な燃料

additional fuel の割合N_Eの関係を散布図にしており，0.32~0.97 の範囲で分布するηと 0~0.5 の範囲で分布するN_Eの回帰式を

$$N_E = -0.41 \cdot \ln(\eta) - 0.03 \quad (R^2 = 0.85) \qquad (5.3)$$

としている．この文献は，建設機械についても，カーボンバランス法で燃費が測定できることの拠り所，および建設機械のアイドリングストップ機能の効果を予測する際の参考として活用できる．

5.3　土木研究所での測定値

測定した CO_2の質量M_{CO2} g と軽油の排出係数 2624 ×10^3 g-CO_2/m^3-軽油 から軽油の燃費V_{oil} m^3を

$$V_{oil} = \frac{M_{CO2}}{2624 \times 10^3} \qquad (Eq.\,14)$$

で算出できる．M_{CO2}は,排気流量V（m^3 / s）とCO_2の濃度C_{CO2}（ppm）の測定値および CO_2の密度ρ_{CO2}（g / m^3）から

$$M_{CO2} = \int \frac{C_{CO2}\rho_{CO2}V}{1{,}000{,}000}dt \qquad (Eq.\,3)$$

で計算できる．本研究では，Vをエンジン回転数から推定すること（ 図-5.1 の A ）による簡易な燃費測定法と活用案について測定値に基づいて検討した．

表-5.1 燃費測定方法の比較.

測定項目		測定方法		
		一般的な方法	カーボンバランス法	本稿が提案する簡易な燃費測定法
燃料の流量		○		
排気流量	実測		○	
	エンジン回転数から推定			○
ガスの濃度	CO_2		○	○
	CO, THC		○	

（○：測定）

表-5.1 は燃費の測定方法について燃料の流量を測定する方法，カーボンバランス法，および本研究で提案する簡易な燃費測定法を比較したものである．燃料の流量を後付けの装置で直接測定する際には配管の加工が必要になる．CO_2等と燃費には図-5.1 の模式図の関連があるのでCO_2等を測定すれば燃費を測定できる．カーボンバランス法では燃料の流量測定を排気流量の測定に代替するが，排気流量の測定で排気管の加工が必要になる．簡便法ではこれをエンジン回転数で代替する（ 図-5.1 の A）．排気流量の推定値V_Pは，エンジンの 2 回転で排気量に相当するガスが排出されると仮定し，エンジンの回転数R_E（/ s），エンジンの排気量D（m^3），および排気と吸気の体積比（ 同一温度に換算 ）r_G から

$$V_{\mathrm{P}} = R_{\mathrm{E}} \frac{D}{2} r_{\mathrm{G}} \qquad \text{(Eq. 9)}$$

で計算できる．この推定値は過給を考慮しないことで過小，排気再循環（ EGR: Exhaust Gas Recirculation ）と体積効率を考慮しないことで過大となることから，これらの影響が大きい場合には(Eq.9)は燃費の簡易推定に活用できないことになる．排気と吸気の体積比r_{G}は，軽油の燃焼での体積増加率r_{F}から

$$r_{\mathrm{G}} = 1/(1 - r_{\mathrm{F}} \frac{C_{\mathrm{CO2}}}{1{,}000{,}000}) \qquad \text{(Eq. 10)}$$

で計算できる．軽油成分 $C_{14}H_{30}$, $C_{15}H_{32}$, $C_{16}H_{34}$ のうち中央値的な $C_{15}H_{32}$ の燃焼式

$$\mathrm{C_{15}H_{32} + 23O_2 = 15CO_2 + 16H_2O}$$

を仮定すると$r_{\mathrm{F}} = (-23 + 15 + 16)\ /\ 15$となる. CO_2の濃度の上限は約 15%，平均的には 5%程度なので，r_{G}は最大で約 1.09，平均で 1.03 程度になるが，過給，および排気再循環 EGR を考慮しないラフさとは不釣り合いなことから本研究の解析では$r_{\mathrm{G}} = 1$とした.

エンジン回転数の測定方法は，ECU の信号，光学センサ，オルタネータの漏れ磁束，音，振動等の測定方法のなかから選択できる（ **補足 4 エンジン回転数の測定方法** P.28 参照 ）．また，精緻なカーボンバランス法では CO_2以外の炭素化合物の CO，および THC（ 非メタン炭化水素 ）の測定値を要するが，これらは CO_2比で 1%以下なので簡便法では測定を省略する.

図-5.2 は**第 2 章**で述べた 2015 年度の測定値について「エンジン回転数から推定した排気流量V_{P}に基づく燃費$V_{\mathrm{oil,P}}$」と「実測した排気流量に基づく燃費$V_{\mathrm{oil,M}}$」の関係を図示したものである．軽油の燃費の単位×10^{-6} m^3 は，×10^{-3}l（ リットル ），および ml（ ミリリットル ）に相当する．**図-5.2** の回帰式で$V_{\mathrm{oil,P}}$を$V_{\mathrm{oil,M}}$に換算できる.

なお，流量計による測定値は流量が少ない条件では過少になることや，条件によっては台上試験装置より 20%程度低い値になることも報告されており（ 文献例[R.27] ），必ずしも$V_{\mathrm{oil,M}}$が$V_{\mathrm{oil,P}}$よりも真値に近いとは限らない.

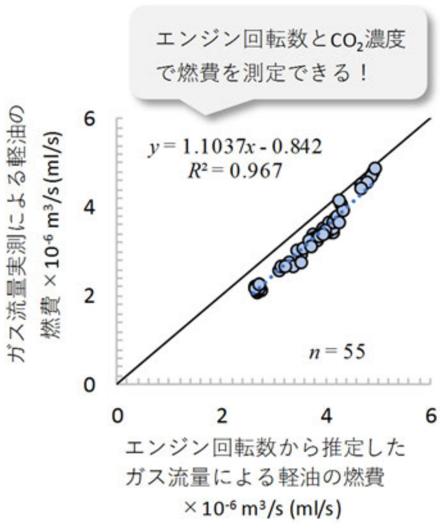
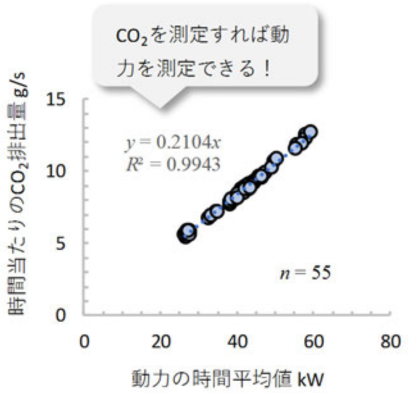


図-5.2　推定した排気流量による燃費と実測した排気流量による燃費.

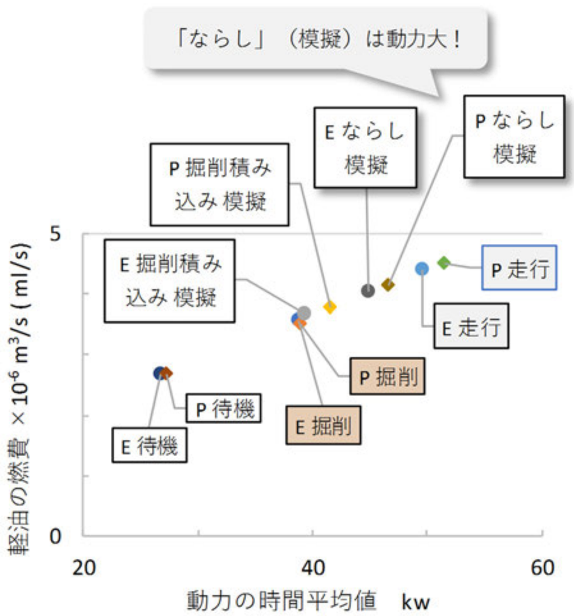
補足：動力　時間平均した動力と時間当たりの CO_2排出量の関係を整理した（ 図−5.3 ）. 動力（ kW ）は, ECU のエンジン回転数とトルク（ 比例値 ）, および熱効率 $\eta = 0.33$から計算した. CO_2の排出量は濃度と流量の測定値から算出した. 図−5.2 での相関が良好であることから, 以下の解釈ができる.
・ECU の出力に基づく熱効率が動作の内容によらずほぼ一定.
・動力の多寡を CO_2の多寡で判断できる（ 図−5.1 の C ）.



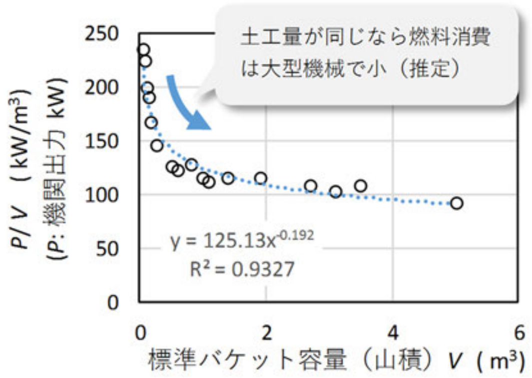
図−5.3　動力と CO_2排出量の測定値.

図−5.4 は図−5.3 を動作別に整理し横軸を動力, 縦軸をエンジン回転数から算出した流量で計算した燃費としたものである（P は 5 データの平均, E は 6 データの平均. ）. 動力, および燃費は大きい順に「走行」,「ならし（ 模擬動作 ）」,「掘削・積込み（ 模擬動作 ）」,「掘削（ 実作業 ）」,「待機（ アイドリング ）」となり, パワーモードがエコモードより大きい傾向も把握できる. 地面に触れることのない「ならし（ 模擬動作 ）」が「掘削（ 実作業 ）」よりも動力が大きくなったのは予想外であった. 要因として, 動作のスピードが比較的早く, アーム等の部品, および油圧の作動油の運動エネルギー（ 速度の 2 乗に比例 ）が大きいことが考えられる. このことから, 以下を予測した.
・過度な速度の抑制や速度の速い動作に着目したエネルギーの回生は燃費改善の効果が大きい.
・大きな力の低速作業は, 小さな力の高速作業よりも燃料消費が少ない.

なお, この実験とは無関係であるが, 図−5.5 は土工用機械の経費の算出に使用する損料表[R.22]に記載されていたバックホウ（ 油圧ショベル ）について, 横軸をバケット山積容量 V m^3（ ここでの V は排気流量 V とは異なる. ）, 縦軸を機関出力 P kW と V の比 P / V としてプロットしたものである. この文献では仕事量あたりの燃費 L/kWh は機械の大きさによらない一定値が記載されているので, 縦軸は土量比の燃費に比例するとみなせる. このデータからは大きい機械を使用して掘削回数を減らせば燃費消費が少なくなると推定できる. また, オンロード車では加速よりも最大速度（ 規制速度の意味ではない. ）の抑制の方が燃料消費抑制に効果があることが明らかにされている（ 文献例[R.54] ）. 高速になると空気抵抗が速度の 2 乗で増加するオンロード車と建設機械では要因は異なるが, アーム等の可動部, および油圧の作動油の運動エネルギーは速度の 2 乗に比例するのでこれらの運動エネルギーが排熱となれば燃料消費が過大となると考えられる.



図−5.4　動作別の動力と燃費の測定値．P: パワー優先モード，一つのプロットは 5 データの平均値. E: 省燃費優先モード，一つのプロットは 6 データの平均値.

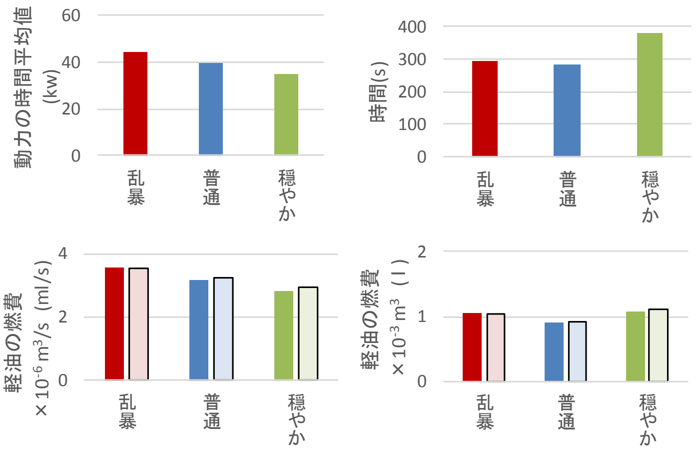


図−5.5　バックホウの大きさと土量比の動力.

さらに，より詳細な燃費分析ができるか試行した． **図−5. 6** は試行的に一人のオペレータで運転の緩慢を「乱暴」，「普通」，および「穏やか」に変化させた際の測定値である．動作は「掘削・積込み（ 模擬動作 ）」，および「掘削 （ 実作業 ）」を異なる場所で行ったが，測定値は一連の動作とみなして合算した．燃費は「実測した排気流量に基づく燃費$V_{\mathrm{oil,M}}$」と「エンジン回転数から推定した排気流量に基づく燃費$V_{\mathrm{oil,P}}$を**図−5. 2** の回帰式で補正したもの」を併記した．動力の時間平均値 （ 左上 ） は大きい順に「乱暴」，「普通」，「穏やか」となり毎秒 （ 1/s ） の燃費 （ 左下 ） も同じ傾向になった．動作に要した時間 （ 右上 ） は大きい順に「穏やか」，「乱暴」，「普通」となった．燃費（ 右下 ） も同じ順になった．簡易な燃費測定法は燃費の詳細な分析に使用できることが確認できた．

なお，この測定は試行的な一例であり，個人差など条件により異なる結果となる可能性もある．また，<u>「穏やかな操作」は時間を要し燃料の消費量も大きいが，1 回あたりの土量 （ m^3 ） を大きくでき</u>

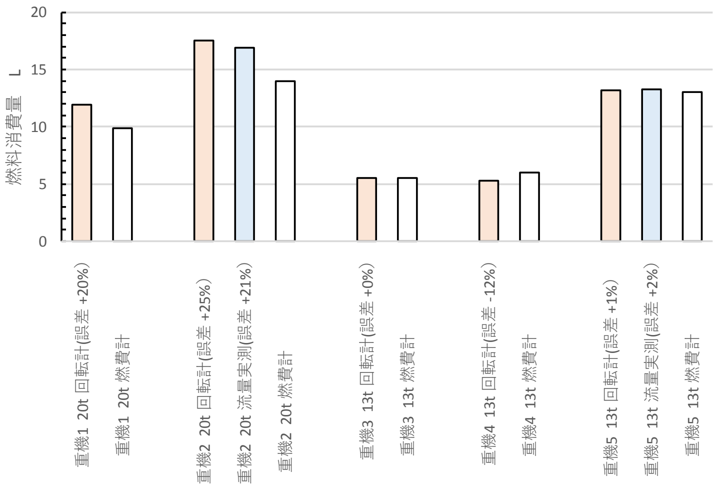
る可能性があること，騒音・振動が抑制されること，安全確認のための心理的なゆとりを確保できること等に留意することが必要と考えている．



図−5.6　動作方法別の測定値の一例.

補足：建設機械の燃費計との比較

最近の建設機械の ECU の信号には燃料噴射量のデータが含まれており，ユーザーが使用可能な燃費計が設置されている．ECU の燃料データを取得することができなかったので，ユーザー向けの燃費計での測定値とカーボンバランス法（本研究での簡便法）での測定値を比較した（図−5.7）．2017 年度は排気流量を実測したのでこの流量によるものとエンジン回転数から推定した排気流量の双方での推定値とし，2018 年度はエンジン回転数からの推定値のみとした．どの測定値が真値に近いかは定かではないが，ユーザー向けの燃費計での測定値を真値とみなした．重機 5 では，三つの燃費がほぼ一致したが，重機 1，および重機 2 では 20%程度の誤差が生じた．



図−5.7　建設機械のユーザー向けの燃費計とカーボンバランス法（試行）の燃料消費量の比較．縦軸の単位は燃費計の L（リットル）とした．

5.4　まとめ

以下に「わかったこと」，「考察」，「課題」，および「展望」を述べる．

排出ガス測定にかかる海外の文献を調査して以下のことがわかった．

1）建設機械の燃費は CO_2の測定によるカーボンバランス法で測定できる．

土木研究所で測定した排出ガスのデータを分析して以下のことがわかった．

2）エンジン回転数から推定した排気流量と CO_2濃度から燃費を推定することが可能であり，操作方法が「乱暴」，「普通」，および「穏やか」と異なることによる燃費の違い等，燃費の詳細な分析に使用できる．

3）熱効率（ ECU のデータからの計算値 ）は，動作の内容によらずほぼ一定．

4）動力（ ECU のデータからの計算値 ）と CO_2排出量の直線回帰の決定係数 R^2は 0.99 なので CO_2排出量で動力の多寡を推定できる．

燃費の推定結果から以下の考察を行った．

5）空荷で地面に触れることのない「ならし（ 模擬動作)」の燃費が走行・掘削等の他の動作と同程度以上であることから，速度の速い動作は燃費が大きいと解釈し，過度な速度の抑制や速度の速い動作に着目したエネルギーの回生は燃費改善の効果が大きいと予測した．逆に大きな力の低速作業は，小さな力の高速作業よりも燃料消費が少ないと予測した．

以下に提案した燃費測定法の課題と対応案について述べる．

6）本研究では，亜酸化窒素の測定を主目的としたため，濃度計に FTIR を使用したが，JIS D1012 自動車-燃料消費率試験方法[R.21]の規定，および可搬式の排出ガス測定システム PEMS (portable emissions measurement system) に搭載されている CO_2の濃度の測定器は，非分散形赤外線分析計 NDIR (nondispersive infrared analyzer) である．いずれも高価な機器であり，燃費の簡易測定を目的とする場合には安価な CO_2の濃度センサが必要になる．しかし，いくつかの測定機器メーカに問い合わせをしたが，本研究のように「高温」かつ「高濃度」の CO_2を「簡便」かつ「高速」に「長時間」測定可能なセンサを見つけることができなかった．代替案として既に建設機械に搭載されている NOx または O_2 のセンサのデータを使用し，O_2 濃度から CO_2濃度を推定することが考えられる．有識者からは自動車（ オンロード ）に搭載されているジルコニアの NOx センサは O_2 濃度も測定できるので CO_2濃度を計算することが可能である旨の意見をいただいた．既に車載の O_2センサの測定値から計算した CO_2排出量が実験室の自動車試験装置で測定した CO_2排出量と −2～3 %で一致することを確認した事例が報告されていた[R.50]．燃費測定のフィジビリティスタディは，センサの特性を熟知し信号を容易に扱うことができるエンジンの専門家による方が適切であろう．

7）排気流量をエンジン回転数の測定で代替する方法に関しては，回転数の測定方法として CAN のデータロガーによる ECU のデータ取得，光学センサによる方法，音を分析する方法，および振動による測定器を試した．しかし，簡易かつ着実に測定可能な方法は確定できなかった．既に建設機械に搭載されている吸入空気量のセンサの活用方法も含め，今後も検討する意義があると考えている．有識者からは吸入空気量センサはエンジンの制御にも使用されているので信頼性が高い旨の御意見をいただいた．オンロード車の排出ガスの測定では使用されていた（ 事例[R.52])．フィジビリティスタディは，センサの特性を熟知し信号を容易に扱うことができるエンジンの専門家

による方が適切であろう.

最後に展望について述べる.

8) ECU の燃料噴射のデータを取得する方法は燃料使用量の計画値を得る方法であるのに対して, カーボンバランス法は燃料使用量の実績を測定する方法であり, 燃料使用量の実績を燃料の流量で測定する方法の代替手段としての用途は必ず見いだされると考えている. オンロード車の燃費測定は燃料の流量を測定する方法でなくカーボンバランス法で行われている. 本研究で提案する簡便法は, 燃料, および排気の配管を加工する必要がなく, どのようなエンジンでも燃費を測定できる汎用性があるので, センサの課題が解消されれば, 将来, 有望な技術と考えている. オンロード車では車載の O_2 センサの測定値に基づいてゆっくりとした加速よりも適度な加速で走行する走行方法で燃料消費量が少なくなるとの分析を行った事例もある[R.51].

なお, 空荷で力が小さいが速度が速い「ならし (模擬動作)」の燃費が大きいとの知見は, 動作の速度に着目した燃費対策のみならず, 筋肉の疲労が小さくても手軽にカロリー消費ができる運動方法等、多方面で参考となると考えている.

第 6 章　まとめ

以下で本報告書の主要部分についてまとめる.

6.1　実施したこと

本研究においては, 建設機械の排出ガスにかかる文献調査, 測定, および測定値の解析を行った.

文献調査においては, 建設機械から排出される窒素酸化物等の大気汚染物質, および亜酸化窒素等の温室効果ガスの測定事例を収集し, これらの測定値についてとりまとめるとともに文献値から平均的な熱効率を求め, 排出ガスの「仕事量比の排出量（ g/ kW-h ）」と「CO_2比の排出量（ g/ kg-CO_2 ）」の換算式を設定した. さらにオンロード車と同様にカーボンバランス法で燃料消費量を測定できることを確認した.

測定においては, 2015 年度から 2018 年度までの 4 年間に油圧ショベル 7 台の排出ガスをフーリエ変換赤外分光光度計 FTIR で測定した. 油圧ショベル 7 台のうち 3 台は 2011 年規制に対応した機種（ 尿素選択式還元触媒 SCR（ Selective Catalytic Reduction ） 非搭載 ）とし, 4 台は 2014 年規制に対応した機種（ SCR 搭載 ）とした. 2015 年度, および 2016 年度は測定器を建設機械に搭載した条件で SCR 非搭載の油圧ショベル 1 台で「待機（ アイドリング ）」, 「走行」, 「ならし（ 模擬動作 ）」, 「掘削・積込み（ 模擬動作 ）」, および「掘削（ 実作業 ）」の動作の測定を行った. 2017 年度は SCR を搭載した油圧ショベル 2 台で「待機」, および「ならし（ 模擬動作 ）」の測定を行い, 2018 年度は SCR 非搭載の油圧ショベル 2 台, および SCR 搭載の油圧ショベル 2 台で「待機」, および「ならし（ 模擬動作 ）」の測定を行った.

測定値の解析においては, 2015 年度, および 2016 年度の測定値に基づいて, 信頼性向上と簡素化の検討を行った. 測定対象とする動作を「待機」, および「ならし」の二種類とし, 測定値をCO_2比の排出量で評価することで, (1) 「動力が小さく仕事量当たりの排出量が多い動作」と「動力が大きく仕事量当たりの排出量が小さい動作」の測定値が得られること, (2) 排気流量の測定誤差の影響を抑制できること, (3) 測定場所の制約がなくなり, 測定に要する治具の加工および配管の加工が不要になることで測定が簡素化できることを明らかにした. 他の 6 台は簡素化した測定方法で測定した. 2018 年度は測定値をとりまとめた. 温室効果ガスについてはオンロード車の文献値と比較し, 建設機械全般から排出される温室効果ガスに対する亜酸化窒素のシェアの将来予測を行った. 規制対象のガスについては文献値および規制値と比較し, 環境影響評価の予測に資することを目的として, 2006 年規制（ 排出ガス対策型建設機械の三次基準 ）, 2011 年規制, および 2014 年規制に対応して工事を実施した場合のユニット別（ 各種の工種別 ）の排出原単位を設定した. さらに CO_2の測定値から燃料消費量を計算した.

6.2　新たな知見

以下のことがわかった.

・ SCR 搭載車では, 窒素酸化物 NOx, 一酸化炭素 CO, 非メタン炭化水素 NMHC, メタン CH_4, および亜酸化窒素 N_2O のうち, N_2O のみ動力の小さい「待機」よりも動力の大きい「ならし」の排出量（ g / kg-CO_2 ） が多かった（ 図-2.31[P.40] ）.

・ 温室効果ガスとしてのメタン CH_4のシェアは，全 7 台で 0.1 %未満であり，亜酸化窒素 N_2O のシェアは，SCR 非搭載車 3 台の平均で 0.45%であったが，SCR 搭載車 4 台の平均で 2.7%となった．SCR 搭載車の 2.7%は，公道を走行する SCR 搭載のディーゼル車 5 台の文献値の平均 2.9%と同程度であった（ 図−2.32[P.40]).

・ 建設機械の排出ガスのうち，SCR 搭載車のシェアは，大半の建設機械が，2014 年の排ガス規制対応車に更新されると見込まれる 2026 時点で 81%と推定し，この時点において温室効果ガスとしての亜酸化窒素のシェアは 2.7%×81% = 2.3%であり，CO_2の質量に換算すると建設機械から排出される CO_2の国内総量 1000 万 t×2.3%=23 万 t に相当すると推定した（3.4[P.49]).

・ 排出ガス規制の対象となっているNOx，CO，およびNMHCの建設機械に搭載されたエンジンでの排出量は，エンジン単体の台上試験による規制値と整合することが文献値，および土木研究所測定値の双方で確認できた（4.2.2[P.54], 4.2.3[P.55]).

・ 建設機械もオンロード車と同様にカーボンバランス法で燃料消費量を測定できる（5.2[P.76]).

・ エンジン回転数から推定した排気流量と CO_2濃度の測定値から燃料消費量を推定できる(5.3[P.77]).

6.3　知見の活用

本研究で得られた知見に基づいて「温室効果ガス測定方法-油圧ショベル（ 研究のためのデータ収集用 ）」(付録 A.5[P.111]) をとりまとめた．他機関での温室効果ガスの測定，他各種の排出ガス測定の参考に資することを期待している．温室効果ガスとしての亜酸化窒素，およびメタンのシェアについての知見は，講演会，および論文で発表した他，学識経験者，および行政関係者へ情報を提示した．今後，政策判断の参考に資することを期待している．2006 年規制，2011 年規制，および 2014 年規制に対応して工事を実施した場合のユニット別（ 各種の工種別 ）の排出原単位（4.4.3[P.72] ）は環境影響評価の技術手法（ マニュアル)[R.19][R.20] の改定に資することを期待している．また，建設機械の排出ガスが経年で着実に減少していること（ 図−4.8[P.58]) を多くの方が知る一助となれば意義が大きいと考えている.

6.4　展望

国際的な潮流を鑑みると日本においても，今後，エンジンを建設機械に搭載した条件での排出ガスの測定，および規制，ならびに温室効果ガスの亜酸化窒素の測定，および規制が必要か否かを議論される時期は必ずおとずれることになるであろう．本資料が参考にされることを期待する.

以下，目的外の成果についての展望を述べる．環境影響評価の予測に使用する原単位については暫定的にアイドリングストップを考慮しない安全側（ 大きめ ）の数値で設定した．また，最新の排出ガス対策に未対応の機械も含んでいる．今後，アイドリングストップの実情とともに新たに規制対応した機械を調べて下方修正する予定である．現在，建設機械の燃料の測定方法は，計画値としての燃料噴射量，または実績値としての燃料の流量を測定測定する方法の二種類であるが，オンロード車で実績値を測定する方法はカーボンバランス法である．本研究成果がカーボンバランス法での建設機械の燃費測定方法の技術開発や規格化の検討に進展することを期待する．さらに速度の速い動作を対象とした燃費対策が着目されることも期待する.

謝辞

本研究は土木研究所に在籍していた杉谷康弘（～2014年度），野村正之（2015年度）の研究を引き継いで実施したものであり，測定方法の主要部分は両者によって確立されたものである．測定，および測定値の解析・解釈については，共同研究を実施している国立環境研究所の近藤美則氏と今野秀徳氏，交通安全環境所の山本敏朗氏，茨城大学の田中光太郎氏，ならびに日本自動車研究所の相馬誠一氏にご指導をいただいた．また，海外における排出ガス規制の最新動向についてはヤンマー株式会社の三上哲正氏に御教示いただいた．その他，行政関係者，ならびに製造業関係の皆様からも排出ガスに関する政策，および技術に関する御教示をいただいた．関係の皆様に謝意を表する．

文献

本文, および後述する**付録**での引用文献・参考文献を示す. 網掛けは特に有益な文献.

[R.01] 国土交通省: 平成 26 年度建設施工の地球温暖化対策検討分科会, 分科会資料. 国土交通省 (web site 参照日 2018.10.15).

[R.02] 国土交通省: 排出ガス不正事案を受けたディーゼル乗用車等検査方法見直し検討会中間報告, 平成 28 年 4 月 21 日.

[R.03] 国土交通省:排出ガス不正事案を受けたディーゼル乗用車等検査方法見直し検討会 最終とりまとめ, 平成 29 年 4 月 20 日.

[R.04] 道路運送車両の保安基準の細目を定める告示【2008.03.25】別添 41(重量車排出ガスの測定方法).

[R.05] 道路運送車両の保安基準の細目を定める告示【2009.07.30】別添 42 軽・中量車排出ガスの測定方法.

[R.06] 道路運送車両の保安基準の細目を定める告示【2010.03.18】別添 43 ディーゼル特殊自動車排出ガスの測定方法.

[R.07] 道路運送車両の保安基準の細目を定める告示【2008.03.25】別添 109 無負荷急加速時に排出される排出ガスの光吸収係数の測定方法.

[R.08] 中央環境審議会大気・騒音振動部会自動車排出ガス専門委員会(第 60 回), (web site 参照日 2017.12.16).

[R.09] 環境省: 型式届出特定特殊自動車一覧, (web site 参照日 2018.6.4).

[R.10] 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(試案 ver1.6), (web site 参照日 2017.8.25).

[R.11] 国立環境研究所: 日本国温室効果ガスインベントリ報告書(NIR) , (web site 参照日 2017.11.15)

[R.12] U.S. GOVERNMENT PUBLISHING OFFICE: ELECTRONIC CODE OF FEDERAL REGULATIONS, Title 40, PART 86ー 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. (参照日 2016.08.17)

[R.13] U.S. GOVERNMENT PUBLISHING OFFICE: ELECTRONIC CODE OF FEDERAL REGULATIONS, Title 40, PART 1036ーCONTROL OF EMISSIONS FROM NEW AND IN-USE HEAVY-DUTY HIGHWAY ENGINES, §1036.108 Greenhouse gas emission standards. (参照日 2016.08.17)

[R.14] U.S. GOVERNMENT PUBLISHING OFFICE: ELECTRONIC CODE OF FEDERAL REGULATIONS, Title 40, PART 1065ーENGINE-TESTING PROCEDURES, §1065.275 N_2O measurement devices.

[R.15] European Commission: Press release, Commission wel-comes Member States' agreement on robust testing of air pollution emissions by cars Brussels, 28 October 2015.

[R.16] 深野泉: これが欧州の RDE 試験だ, Nikkei Automotive, 2016.11.

[R.17] The European Union (EU), REGULATION (EU) 2016/1628 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 14 September 2016, Official Journal of the European Union, 2016.

[R.18] COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU) 2017/655 of 19 December 2016.

[R.19] 角湯克典, 吉永弘志: 道路環境影響評価の技術手法(平成 24 年度版)2.5 建設機械の

稼働に係る二酸化窒素及び浮遊粒子状物質(参考項目以外の項目), 2013.(http://www nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn0714.htm)

[R.20] 国土交通省国土技術政策総合研究所道路交通研究部道路環境研究室: 正誤表, 2015.(http://www nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn0714.htm)

[R.21] 一般財団法人 日本規格協会: JIS D1012, 2005 自動車-燃料消費率試験方法.

[R.22] 一般社団法人 日本建設機械施工協会: 平成 30 年度 建設機械等損料表.

[R.23] 一般社団法人 日本建設機械施工協会: 日本建設機械要覧 2016.

[R.24] 一般社団法人 日本建設機械施工協会標準部会, JCMAS H020:2014.

[R.25] 一般財団法人 建設物価調査会 (発行), 国土交通省大臣官房技術調査課 (監修) : 平成 30 年度版 国土交通省土木工事積算基準.

[R.26] 一般財団法人 建設物価調査会: 改訂 6 版 写真でみる土木工事の施工手順 土木施工の実際と解説.

[R.27] 公益社団法人 自動車技術会 [GIA フォーラム] Real World エミッション低減に向けた車載排ガス計測: PEMS の最新動向, pp.17, 2017.

[R.28] Mridul Gautam, Daniel K. Carder, Nigel N. Clark, Donald W. Lyons: Testing for Exhaust Emissions of Diesel Powered Off-Road Engines, Prepared for the California Air Resources Board and the California Environmental Protection Agency, ARB Contract Number 98-317, 2002.

[R.29] U.S. Environmental Protection Agency, Populations, Activity and Emissions of Diesel Nonroad Equipment in EPA Region 7, 2010 (revised by EPA stuff in 2011).

[R.30] H. Christopher Frey, William Rasdorf, Kangwook Kim, K; Shih-hao Pang, Phil Lewis: Comparison of Real-World Emissions of B20 Biodiesel Versus Petroleum Diesel for Selected Nonroad Vehicles and Engine Tiers, TRANSPORTATION RESEARCH RECORD, 2058, pp.33-42, 2008.

[R.31] Frey H. Christopher, Kim Kangwook, Pang Shih-Hao, Rasdorf William J.: Characterization of Real-World Activity, Fuel Use, and Emissions for Selected Motor Graders Fueled with Petroleum Diesel and B20 Biodiesel, JOURNAL OF THE AIR & WASTE MANAGEMENT ASSOCIATION, vol.58, no.10, pp.1274-1287, 2008.

[R.32] Abolhasani Saeed, Frey H. Christopher, Kim Kangwook, Rasdorf William, Lewis Phil, Pang Shih-Hao: Real-world in-use activity, fuel use, and emissions for nonroad construction vehicles: A case study for excavators, JOURNAL OF THE AIR & WASTE MANAGEMENT ASSOCIATION, vol.58, no.8, pp.1033-1046, 2008.

[R.33] Frey H. Christopher, Rasdorf William, Lewis Phil: Comprehensive Field Study of Fuel Use and Emissions of Nonroad Diesel Construction Equipment, TRANSPORTATION RESEARCH RECORD, no.2158, pp.69-76, 2010

[R.34] Phil Lewis, William Rasdorf, H. Christopher Frey, Michael Leming: Effects of Engine Idling on National Ambient Air Quality Standards Criteria Pollutant Emissions from Nonroad Diesel Construction Equipment, TRANSPORTATION RESEARCH RECORD, 2270, pp.67-75, 2012.

[R.35] Heidari Bardia, Marr Linsey C.: Real-time emissions from construction equipment compared with model predictions, JOURNAL OF THE AIR & WASTE MANAGEMENT ASSOCIATION, vol.65, no.2, pp.115-125, 2015.

[R.36] Tanfeng Cao, Thomas D. Durbin, Robert L. Russell, David R. Cocker, George Scora, Hector Maldonado, Kent C. Johnson: Evaluations of in-use emission factors from off-road construction equipment, ATMOSPHERIC ENVIRONMENT 147, pp.234-245, 2016.

[R.37] Fu Mingliang, Ge Yunshan, Tan Jianwei, Zeng Tao, Liang, Bin: Characteristics of typical non-road machinery emissions in China by using portable emission measurement system, SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT, vol.437, pp.255-261, 2012.

[R.38] Zihang Peng, Yunshan Ge, Jianwei Tan, Mingliang Fu, Xin Wang, Ming Chen, Yao Lu, Yue Wu: Real-World Emission from In-Use Construction Equipment in China, AEROSOL AND AIR QUALITY RESEARCH, vol.16, no.8, pp.1893-1902,2016.

[R.39] Zhen Li, Kaishan Zhang, Kaili Pang, Baofeng Di: A fuel-based approach for emission factor development for highway paving construction equipment in China, JOURNAL OF THE AIR & WASTE MANAGEMENT ASSOCIATION, vol.66, no.12, pp.1214-1223, 2016.

[R.40] Armas O, Lapuerta M, Mata C, Perez D: Online Emissions from a Vibrating Roller Using an Ethanol-Diesel Blend during a Railway Construction, ENERGY & FUELS, vol.23, pp.2989-2996, 2009.

[R.41] 建設機械排出ガスの実稼働状態における評価に関する研究，土木研究所 web site. (https://www.pwri.go.jp/jpn/results/report/report-seika/2012/pdf/sei-01.pdf)（参照日 2016.8.8 ）.

[R.42] 杉谷康弘，藤野健一: バイオディーゼル燃料の普及に向けた排出ガス調査-車載型排出ガス計測装置による計測事例，建設機械施工, Vol.67, No.2, pp.60-64, 2015.

[R.43] GRAHAM Lisa A., RIDEOUT Greg, ROSENBLATT Deborah, HENDREN Jill : Greenhouse gas emissions from heavy-duty vehicles, Atmos Environ, Vol.42, No.19, pp.4665-4681, 2008.

[R.44] Arvind Thiruvengadam, Marc Besch, Daniel Carder, Adewale Oshinuga, Randall Pasek, Henry Hogo, Mridul Gautam: Unregulated greenhouse gas and ammonia emissions from current technology heavy-duty vehicles, JOURNAL OF THE AIR & WASTE MANAGEMENT ASSOCIATION, vol.66, No.11, pp.1045-1060, 2016.

[R.45] Quiros David C., Smith Jeremy, Huai Tao, Hu Shaohua , Thiruvengadam Arvind : Greenhouse gas emissions from heavy-duty natural gas, hybrid, and conventional diesel on-road trucks during freight transport, Atmospheric Environment, Vol.168, pp.36-45, 2017.

[R.46] SUAREZ‐BERTOA Ricardo, MENDOZA‐VILLAFUERTE Pablo, BONNEL Pierre, PERUJO Adolfo, ASTORGA Covadonga, LILOVA Velizara, HILL Leslie: On-road measurement of NH_3 and N_2O emissions from a Euro V heavy-duty vehicle, Atmospheric Environment, Vol.139, pp.167-175, 2016.

[R.47] Mendoza-Villafuerte Pablo, Suarez-Bertoa Ricardo, Giechaskiel Barouch, Riccobono Francesco, Bulgheroni Claudia, Astorga Covadonga, Perujo Adolfo: NOx, NH_3, N_2O and PN real driving emissions from a Euro VI heavy-duty vehicle. Impact of regulatory on-road test conditions on emissions,Science of the Total Environment,Vol.609, pp.546-555, 2017.

[R.48] 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 NOx, NH_3,および N_2O 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.

[R.49] 陸田雅彦，門屋真希子，岡田めぐみ，舟久保千景，大谷義明，柳井孝一，小谷野眞司，山崎実: 大型および小型使用過程車の排出ガス調査結果について，大気環境学会年会講演要旨集, Vol.56th, p.407, 2015.

[R.50] 近藤美則，小林伸治，森口祐一，田邊潔:車載型機器による走行動態調査と走行動態の燃費及び排出ガスに及ぼす影響の解析，自動車技術会論文集, Vol.35, No.3, pp.77-83, 2004.

[R.51] 近藤美則: 自動車のエネルギー・環境問題を考えよう-誰にでもできる車の低公害化-，環境科学総合研究所年報，第 23 巻, pp.1-20, 2004.

[R.52] 近藤義則，小林伸治，森口裕一: 車載型機器による走行動態及び排出ガスの計測，自

動車技術会論文集, Vol.36, No.5, pp,105-111, 2005.
[R.53] 近藤美則, 加藤秀樹: 車両利用中のアイドリングストップが大気環境に及ぼす影響の考察, 大気環境学会誌, Vol.47, No.4, pp.155-161, 2012.
[R.54] 加藤秀樹, 鈴木勉, 佐藤祥路, 安藤良輔, 近藤美則: 交通ミクロシミュレータを用いたエコドライブによる CO_2 削減効果分析, エネルギー・資源, Vol.37, No.1, pp.27-33, 2016.
[R.55] 山本敏朗, 佐藤進, 常山順子, 岩田恒夫, 小川恭弘: 車載式フーリエ変換赤外分析装置を用いたガソリン排出ガス中の N_2O および CH_4 の解析, 自動車技術会論文集, Vol.41, No.6, 2010.
[R.56] 山本敏朗, 堤玲子, 岩田恒夫, 小川恭弘, 加藤裕: 乗用車から排出される N_2O, CH_4 および C_6H_6 の FTIR 分析, 自動車技術会論文集, Vol.42, No.5, pp.1059-1065, 2011.
[R.57] 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 NOx, NH_3 および N_2O 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.
[R.58] 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.
[R.59] 山本敏朗, 堤玲子, 水嶋教文, 渡辺敬太郎: NOx センサベースの車載計測器による路上走行時における重量貨物車の NOx 排出量評価, 自動車技術会論文集, Vol.46, No.5, 2015.
[R.60] 鈴木央一: 地球温暖化防止への取組み CO_2 の「脇役」たちー自動車排出ガスにおけるメタン, 亜酸化窒素の排出実態と今後ー, 自動車技術, Vol.62, No.11, pp.91-97, 2008.
[R.61] 鈴木央一, 石井素, 山本敏朗: 自動車から排出される亜酸化窒素の排出傾向についてー最近の技術革新による排出特性の変化ー, 交通安全環境研究所フォーラム講演概要, Vol.2011, pp.13-16, 2011.
[R.62] 田中光太郎, 深川駿輔, 関田将大, 金野満, “レーザ吸収分光法を用いた自動車から排出されるアンモニアの車載計測”, 自動車技術会, 47. 2 (2015) pp. 369-374.
[R.63] Kotaro Tanaka, Kai Miyamura, Kazushi Akishima, Kenichi Tonokura, Mitsuru Konno, “Sensitive measurements of trace gas of formaldehyde using a mid-infrared laser spectrometer with a compact multi-pass cell”, Infrared Physics and Technology, 79, 1-5, 2016.
[R.64] 相馬誠一, 南利貴: 重量車の車載型排ガス計測器に関する検討(第 1 報)―計測法の検討―, 自動車研究, Vol.32, No.12, pp.689-692, 2010.
[R.65] 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.
[R.66] 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.
[R.67] 吉永弘志, 野村正之: 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, 平成 28 年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集, pp.109-114, 2016.
[R.68] 吉永弘志: 建設機械の排出ガス測定にかかる信頼性向上と簡素化, 土木学会論文集 G(環境), Vol.73, No.6, pp.Ⅱ_321-Ⅱ_332, 2017.
[R.69] 吉永弘志, 排出ガスの測定値から読み解く燃費・熱効率と燃費改善策, 平成 29 年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集, pp.131-136, 2017.
[R.70] 吉永弘志, 新田恭士: 建設機械から排出される温室効果ガスの亜酸化窒素とメタンの概況把握を目的とした排出ガスの測定, 建設機械施工, Vol.71, No.4, 2019.
[R.71] Lewis, P; Leming, M; Rasdorf, W: Impact of Engine Idling on Fuel Use and CO_2 Emissions of Nonroad Diesel Construction Equipment, JOURNAL OF MANAGEMENT IN

ENGINEERING, vol.28, no.1, pp.31-38, 2012.

[R.72] H. Christopher Frey, William Rasdorf, and Phil Lewis: Comprehensive field study of fuel use and emissions of nonroad diesel construction equipment, Transport Research Record 2158, pp.69-76, Transportation Research Board, 2010.

[R.73] 秋山賢一:精度って何？, 自動車研究, Vol.29, No.12, pp.7-8, 2007.

付録

A　本研究固有の資料

A.1　計算式

計算式	番号	記号
$R_{\mathrm{GpW}} = M_{\mathrm{G}} \,/\, W$	(Eq.1)	R_{GpW} ：仕事量比の排出量（g / kWh）, M_{G} ：排出ガスの質量（g）, W ：仕事量（kWh）
$M_{\mathrm{G}} = \int \frac{C_{\mathrm{G}}\rho_{\mathrm{G}}V}{1{,}000{,}000}dt$	(Eq.2)	C_{G} ：排出ガスの濃度（ppm）, ρ_{G} ：排出ガスの密度（g / m^3）, V ：排気流量（m^3 / s）, t: 時間（s）
$M_{\mathrm{CO2}} = \int \frac{C_{\mathrm{CO2}}\rho_{\mathrm{CO2}}V}{1{,}000{,}000}dt$	(Eq.3)	M_{CO2}： CO_2 の質量（g）, C_{CO2}： CO_2 の濃度（ppm）, ρ_{CO2}: CO_2 の密度（g / m^3）
$W = \int \frac{2\pi R_{\mathrm{E}}T_{\mathrm{E}}}{1000 \cdot 3600}dt$	(Eq.4)	R_{E} ：エンジン回転数（/ s）, T_{E} ：トルク（N・m）
$R_{\mathrm{GpCO2}} = M_{\mathrm{G}} \,/\, M_{\mathrm{CO2}}$	(Eq.5)	R_{GpCO2} ： CO_2 質量比の排出量（g / kg-CO_2）, M_{CO2} ： CO_2 の量（kg）
$R_{\mathrm{C\_GpCO2}} = \int C_{\mathrm{G}}dt \,/ \int C_{\mathrm{CO2}}dt$	(Eq.6)	$R_{\mathrm{C\_GpCO2}}$ ： CO_2 濃度比の排出量, C_{CO2} ： CO_2 の濃度（ppm）
$R_{\mathrm{GpCO2}} \cong 1{,}000 \cdot R_{\mathrm{C\_GpCO2}} \cdot \rho_{\mathrm{G}} \,/ \rho_{\mathrm{CO2}}$	(Eq.7)	ρ_{CO2} ： CO_2 の密度（g / m^3）
$k = \frac{R_{\mathrm{GpW}}}{R_{\mathrm{GpCO2}}} = \frac{M_{\mathrm{CO2}}}{W} = \frac{1}{\eta}m$	(Eq.8)	k :仕事量比の排出量と CO_2 比の排出量の比, η ：エンジンの熱効率, m ：軽油の CO_2 排出原単位（kg/kWh）. 0.0687 kg//MJ (環境省 web site 掲載値）を採択して単位を変換すれば, $m =$ 0.24732 kg/kWh.
$V_{\mathrm{P}} = R_{\mathrm{E}}\frac{D}{2}r_{\mathrm{G}}$	(Eq.9)	V_{P} ：エンジン回転数から推定した排気流量の概算値（m^3 / s）. 2 回転で排気量に相当するガスが排出されると仮定, D ：エンジンの排気量（m^3）, r_{G} ：排気と吸気の体積比（同一温度に換算）. 注) この推定値は過給を考慮しないことで過小, 排気再循環 EGR（exhaust gas recirculation）と体積効率を考慮しないことで過大となる.
$r_{\mathrm{G}} = 1/(1 - r_{\mathrm{F}}\frac{C_{\mathrm{CO2}}}{1{,}000{,}000})$	(Eq.10)	r_{F} ：軽油の燃焼での体積増加率. 軽油成分 $C_{14}H_{30}$, $C_{15}H_{32}$, $C_{16}H_{34}$ のうち中央値的な $C_{15}H_{32}$ の燃焼式 $C_{15}H_{32}+23O_2=15CO_2+16H_2O$ を仮定すると $r_{\mathrm{F}} = (-23 + 15 + 16) \,/\, 15$.
$r_{\mathrm{G}} = 1$	(Eq.11)	CO_2 の濃度の上限は約 15%, 平均的には 5%程度なので, r_{G} は最大で約 1.09, 平均で 1.03 程度になるが, 排気再循環 EGR を考慮しないラフさとは不釣り合いなことから $r_{\mathrm{G}} = 1$ とした.

計算式	番号	記号
$R_{\mathrm{N2O\_GWP}} = \dfrac{K_{\mathrm{N2O}} \cdot M_{\mathrm{N2O}} \cdot 100}{(M_{\mathrm{CO2}} + K_{\mathrm{N2O}} \cdot M_{\mathrm{N2O}} + K_{\mathrm{CH4}} \cdot M_{\mathrm{CH4}})}$ (建設機械から排出される温室効果ガスを CO_2, N_2O, および CH_4 の 3 種類とみなした場合の式.)	(Eq.12)	$R_{\mathrm{N2O\_GWP}}, R_{\mathrm{CH4\_GWP}}$： 温室効果ガスとしての N_2O, および CH_4のシェア (relative contribution to GHG emissions (CO_2-equivalent)) (%), $K_{\mathrm{N2O}}, K_{\mathrm{CH4}}$： N_2O, および CH_4の地球温暖化係数. 本論文では $K_{\mathrm{N2O}} = 298$, $K_{\mathrm{CH4}} = 25$としたが, 異なる値を使用している文献もある.
$R_{\mathrm{CH4\_GWP}} = \dfrac{K_{\mathrm{CH4}} \cdot M_{\mathrm{CH4}} \cdot 100}{(M_{\mathrm{CO2}} + K_{\mathrm{N2O}} \cdot M_{\mathrm{N2O}} + K_{\mathrm{CH4}} \cdot M_{\mathrm{CH4}})}$ (建設機械から排出される温室効果ガスを CO_2, N_2O, および CH_4 の 3 種類とみなした場合の式.)	(Eq.13)	
$V_{\mathrm{oil}} = \dfrac{M_{\mathrm{CO2}}}{2624 \times 10^3}$	(Eq.14)	V_{oil}： 軽油の燃費 m^3
$C_{\mathrm{V}} = \dfrac{\sigma}{\bar{R}} \cdot 100$	(Eq.15)	C_{V}: 変動係数. σ: 排出量の標準偏差, $\bar{R}$: 排出量の平均値.
$e_{\mathrm{P}} = \left\| 1 - \dfrac{R_{\mathrm{S}}}{R_{\mathrm{T}}} \right\| \cdot 100$	(Eq.16)	e_{P} : 誤差 (%), R_{S}: 推定を含む測定値, R_{T}: 真値とみなした測定値.
$e_{\mathrm{t}} = t(n-1, \dfrac{\alpha}{2}) \dfrac{s}{\sqrt{n}}$	(Eq.17)	e_{t}: 母集団の平均の推定値の誤差, $t(n-1, \alpha/2)$: スチューデントの t 分布の t の値, n: サンプル数, α: 危険率 (95%信頼区間の場合は 0.05), s^2: 不偏分散.
$P\{\bar{x} - e_{\mathrm{t}} < u < \bar{x} - e_{\mathrm{t}}\} = 1 - \alpha$	(Eq.18)	P: 確率, $\bar{x}$: サンプル平均, u: 母集団の平均.
$e_{\mathrm{r}} = \dfrac{e_{\mathrm{t}}}{\bar{x}} \cdot 100$	(Eq.19)	e_{r}: 誤差率 (%)
$R_{\mathrm{G\_SCR}} = \dfrac{G_{\mathrm{SCR}}}{G_{\mathrm{SCR}} + G_{非\,\mathrm{SCR}}} \cong \dfrac{N_{\mathrm{SCR}} \cdot \overline{P_{\mathrm{SCR}}}}{N_{\mathrm{SCR}} \cdot \overline{P_{\mathrm{SCR}}} + N_{非\,\mathrm{SCR}} \cdot \overline{P_{非\,\mathrm{SCR}}}}$	(Eq.20)	$R_{\mathrm{G\_SCR}}$： SCR 搭載車からの排出ガスの割合. G_{SCR}： SCR 搭載車の排出ガスの総量, $G_{非\,\mathrm{SCR}}$： SCR 非搭載車の排出ガスの総量, N_{SCR}： SCR 搭載車の型式数， $\overline{P_{\mathrm{SCR}}}$： SCR 搭載車の定格出力の平均， $N_{非\,\mathrm{SCR}}$： SCR 非搭載車の型式数, $\overline{P_{非\,\mathrm{SCR}}}$： SCR 非搭載車の定格出力の平均.
$R_{\mathrm{G\_SCR}} = \dfrac{21{,}944 - 74}{21{,}944 + 5{,}214} = 81\%$	(Eq.21)	

計算式	番号	記号
$w_{\mathrm{I}} = \dfrac{r_{\mathrm{tI}} r_{\mathrm{mI}}}{r_{\mathrm{tI}} r_{\mathrm{mI}} + 1 - r_{\mathrm{tI}}} = 0.082$	(Eq.22)	w_{I}，w_{G} ： 建設機械の排出ガスの「アイドリング（Idling）」， および「ならし（Grading）」の排出量の寄与率．r_{tI} :アイドリング時間の割合．$r_{\mathrm{tI}} = 0.27$とした．，r_{mI} :「アイドリング」と「ならし」の時間当たりの排出量の比．$r_{\mathrm{mI}} = 0.24$とした． 建設機械の動作をアイドリングとアイドリング以外の動力の大きい動作に二分し， 動力の大きい動作での排出ガス量を「ならし」の動作での測定値で代表させて実工事での排出ガス量を推定する目的で使用.
$w_{\mathrm{G}} = \dfrac{1 - r_{\mathrm{tI}}}{r_{\mathrm{tI}} r_{\mathrm{mI}} + 1 - r_{\mathrm{tI}}} = 0.918$	(Eq.23)	
$E = \sum_i Q_i \cdot h_i$	(Eq.24)	E: 一日に排出される NOx, および SPM の排出係数（g/ユニット/日), Q_i: 建設機械 i の排出係数原単位（g/h), h_i: 運転 1 日当たりの標準運転時間（=年間標準運転時間/年間標準運転日数 ）
$Q_i = P_i B_{\mathrm{r}i} b^{-1} e_i$	(Eq.25)	P_i: エンジンの定格出力（kW), $B_{\mathrm{r}i}$: 定格出力あたりの燃料消費率（g / kWh), b: 燃料消費率（g / h ）と仕事率W_i(kW/h)の比（g / kW), e_i: エンジン排出係数原単位（ g / kWh ）.

A.2　外注・機器構成・日程・留意事項 （ 部分的に電子データ ）

(1) 外注

測定，排出ガスの拡散計算，および燃料の成分分析の外注先を表-A.2.1 に示す．外注の成果品については，個人情報等，公開に支障がある部分をマスキングして電子データで添付する．

表-A.2.1　外注先

業務名	契約の相手方	業務内容
平成 27 年度建設機械排出ガス等計測補助業務	岩田電業㈱	車載型排出ガス分析装置の設置，調整，及び計測等の補助．測定器の調達を含む．
平成27年度排出ガス等スペクトル分析業務	岩田電業㈱	車載型排出ガス計測装置により測定した建設機械の排出ガスのスペクトル分析及び検証．
建設機械排出ガス測定補助業務	岩田電業㈱	建設機械が模擬作業で発生する排出ガスの測定にかかる設置，調整，及び計測等の補助．測定器の調達を含む．
建設機械排出ガス計算業務	㈱福山コンサルタント東京支社	建設機械の排気管から排出されるガスの濃度計算．
平成 29 年度建設機械排出ガス測定業務	岩田電業㈱	建設機械が模擬作業で発生する排出ガスの測定業務．測定器，および建設機械 2 台の調達を含む．
平成 30 年度建設機械燃料分析	㈱エス・ブイ・シー東京	建設機械に使用されている燃料の分析．サンプル数 1.
平成 30 年度油圧ショベル排出ガス測定業務	岩田電業㈱	油圧ショベルが模擬作業で発生する排出ガスの測定業務．測定器，および建設機械 4 台の調達を含む．

(2) 機器構成

機器構成を図-2.1～図-2.4 (P.22～P.23)，および図-A.2.1～図-A.2.4 に示す. 2015 年度，および 2016 年度は測定器を油圧ショベルに搭載して測定した (図-2.1，図-2.2，図-A.2.1) . 2015 年度は排気流量計を 1 台設置したが, 2016 年度は 2 台設置した. 2017 年度，および 2018 年度は油圧ショベルに近接させた貨物車に測定器を設置して測定した (図-2.3，図-2.4，図-A.2.3，図-A.2.4). 2017 年度は排気流量計を1台設置したが, 2018 年度は設置しなかった．排気流量を測定するための直管を接続する際にはオーダーメードの接続管を製作し, FTIR を建設機械に搭載する際には防振器を設置した (図-A.2.2).

なお，測定機器の仕様等の詳細については電子データで添付する.

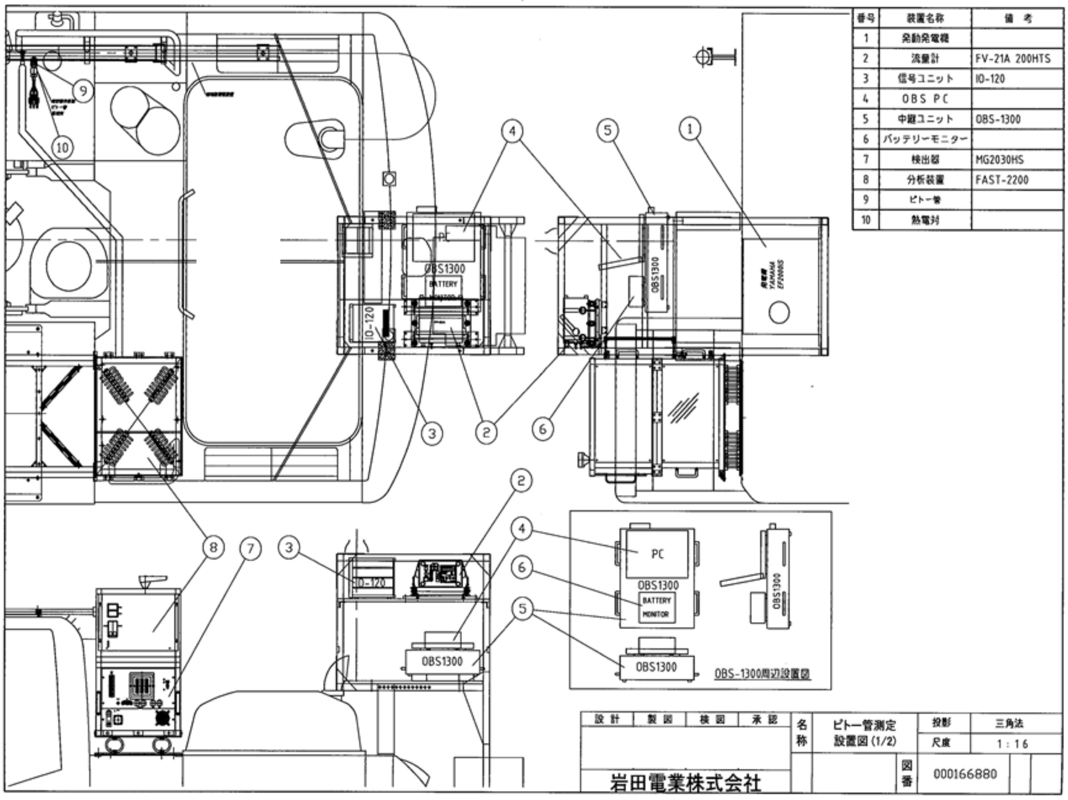
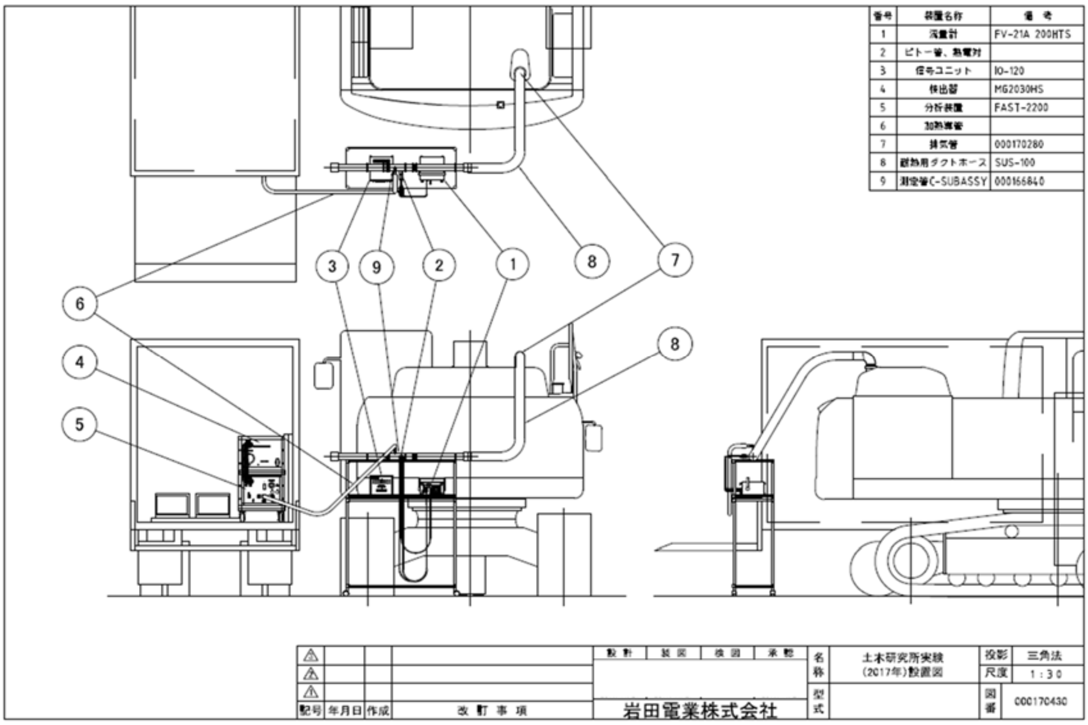


図-A.2.1　測定機器の配置（ 2016 年度の測定，2015 年度も同様 ）．⑨のピトー管の上流，および下流の直管はガスの流れを安定させるために測定用に後付けしたものである．⑦と⑧から構成される FTIR のサンプル部分は，⑨の下流に設置した．FTIR の下に設置しているものはワイヤーロープ防振器．

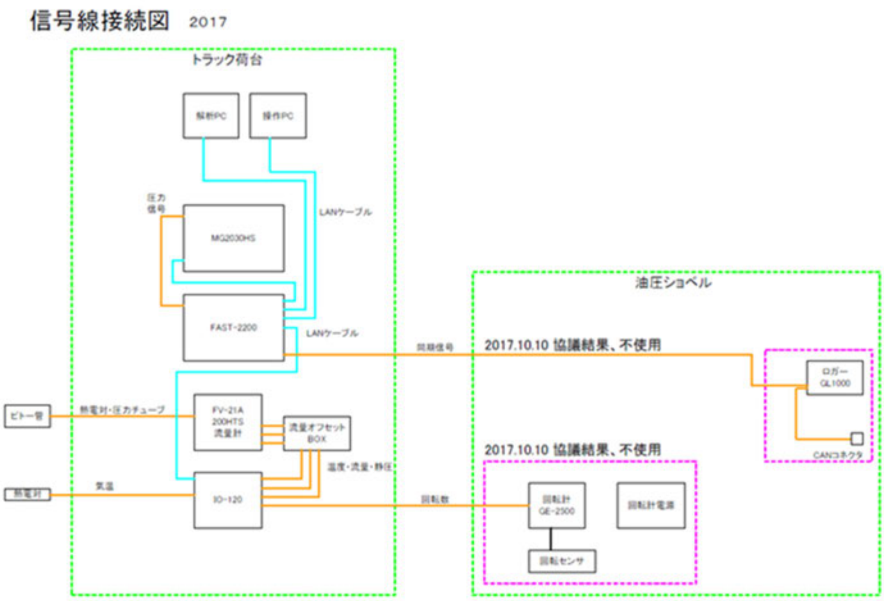
(1) 排気流量計のため接続管

(2) ワイヤーロープ防振器

図-A.2.2　測定機器の写真．(1) 排気流量計用の直管とエンジンの排気管を接続するため製作した接続管．(2) FTIR の防振対策として設置したワイヤーロープ防振器．



図−A.2.3　測定機器の配置（ 2017 年度の測定 ）. 2018 年度の測定では排気流量は測定しなかったので②ピトー管，⑧ダクトホース （ 延長した排気管 ） を設置しないで，⑥加熱導管を排気管に直接設置した.



図−A.2.4 信号線接続図（ 2017 年度の測定 ）. 排気流量計（ FV−21A ），気温, FTIR（ FAST−2200 ）のデータは LAN を介して解析用 PC に記録した． CAN のデータロガーGL1000 の同期信号はとらず，後処理で時刻合わせをした．GL1000 で回転数のデータを収集したので回転計は使用しなかった.

(3) 日程

測定の日程を表-A.2.2, A.2.3, A.2.4 および A.2.5 に示す.

表-A.2.2 測定の日程 1（ 2015 年度 ）.

操縦者	モード	スロットル	Cold start	動作	模擬作業の別	No.		測定日	開始時刻	終了時刻	気象庁の気象データ つくば（舘野）			
											気圧 hPa	気温 ℃	湿度 %	風速 m/s
A	P	MAX		待機		CASE1	1	10/20	11:26	11:31	1011.9	21.1	74	1.6
A	P	MAX		走行		CASE1	2	10/20	11:31	11:36	1011.9	21.1	74	1.6
A	P	MAX		ならし	模擬	CASE1	3	10/20	11:38	11:48	1011.9	21.1	74	1.6
A	P	MAX		掘削		CASE1	4	10/20	11:50	11:54	1011.9	21.1	74	1.6
A	P	MAX		掘削積み込み	模擬	CASE1	5	10/20	11:55	12:00	1011.9	21.1	74	1.6
A	E	MAX		待機		CASE2	1	10/20	13:58	14:03	1010.2	22.2	61	1.8
A	E	MAX		走行		CASE2	2	10/20	14:03	14:08	1009.8	22.7	60	2.6
A	E	MAX		ならし	模擬	CASE2	3	10/20	14:09	14:21	1009.8	22.7	60	2.6
A	E	MAX		掘削		CASE2	4	10/20	14:24	14:28	1009.8	22.7	60	2.6
A	E	MAX		掘削積み込み	模擬	CASE2	5	10/20	14:30	14:35	1009.8	22.7	60	2.6
B	P	MAX		待機		CASE3	1	10/21	9:55	10:05	1017.9	17	70	3.6
B	P	MAX		走行		CASE3	2	10/21	10:05	10:10	1018	16.5	69	4.8
B	P	MAX		ならし	模擬	CASE3	3	10/21	10:11	10:28	1018	16.5	69	4.8
B	P	MAX		掘削		CASE3	4	10/21	10:29	10:31	1018	16.5	69	4.8
B	P	MAX		掘削積み込み	模擬	CASE3	5	10/21	10:37	10:40	1018	16.5	69	4.8
B	E	MAX		待機		CASE4	1	10/21	10:54	11:03	1018	16.5	69	4.8
B	E	MAX		走行		CASE4	2	10/21	11:03	11:08	1018.1	17.2	63	3.8
B	E	MAX		ならし	模擬	CASE4	3	10/21	11:09	11:29	1018.1	17.2	63	3.8
B	E	MAX		掘削		CASE4	4	10/21	11:31	11:33	1018.1	17.2	63	3.8
B	E	MAX		掘削積み込み	模擬	CASE4	5	10/21	11:35	11:38	1018.1	17.2	63	3.8
C	P	MAX		待機		CASE6	1	10/22	9:51	9:59	1015.8	17.9	72	1.5
C	P	MAX		走行		CASE6	2	10/22	9:59	10:06	1015.8	17.9	72	1.5
C	P	MAX		ならし	模擬	CASE6	3	10/22	10:09	10:23	1015.9	18.7	67	2.8
C	P	MAX		掘削		CASE6	4	10/22	10:24	10:28	1015.9	18.7	67	2.8
C	P	MAX		掘削積み込み	模擬	CASE6	5	10/22	10:31	10:37	1015.9	18.7	67	2.8
C	E	MAX		待機		CASE7	1	10/22	10:50	10:55	1015.9	18.7	67	2.8
C	E	MAX		走行		CASE7	2	10/22	10:55	11:01	1015.9	18.7	67	2.8
C	E	MAX		ならし	模擬	CASE7	3	10/22	11:02	11:15	1015.6	18.8	72	3.1
C	E	MAX		掘削		CASE7	4	10/22	11:16	11:20	1015.6	18.8	72	3.1
C	E	MAX		掘削積み込み	模擬	CASE7	5	10/22	11:22	11:26	1015.6	18.8	72	3.1
A	E	MAX		待機		CASE8	1	1/20	14:57	15:01	1005.3	6.7	56	4.2
A	E	MAX		走行		CASE8	2	1/20	15:01	15:05	1006	6.6	56	5.1
A	E	MAX		ならし	模擬	CASE8	3	1/20	15:05	15:14	1006	6.6	56	5.1
A	E	MAX		掘削		CASE8	4	1/20	15:15	15:18	1006	6.6	56	5.1
A	E	MAX		掘削積み込み	模擬	CASE8	5	1/20	15:19	15:23	1006	6.6	56	5.1
B	P	MAX		待機		CASE9	1	1/21	11:22	11:25	1015.1	7.8	34	4.5
B	P	MAX		走行		CASE9	2	1/21	11:25	11:29	1015.1	7.8	34	4.5
B	P	MAX		ならし	模擬	CASE9	3	1/21	11:30	11:40	1015.1	7.8	34	4.5
B	P	MAX		掘削		CASE9	4	1/21	11:41	11:43	1015.1	7.8	34	4.5
B	P	MAX		掘削積み込み	模擬	CASE9	5	1/21	11:44	11:47	1015.1	7.8	34	4.5
B	E	MAX		待機		CASE10	1	1/21	13:14	13:17	1012.6	8.7	29	5.3
B	E	MAX		走行		CASE10	2	1/21	13:17	13:21	1012.6	8.7	29	5.3
B	E	MAX		ならし	模擬	CASE10	3	1/21	13:22	13:32	1012.6	8.7	29	5.3
B	E	MAX		掘削		CASE10	4	1/21	13:33	13:35	1012.6	8.7	29	5.3
B	E	MAX		掘削積み込み	模擬	CASE10	5	1/21	13:37	13:40	1012.6	8.7	29	5.3
C	P	MAX		待機		CASE11	1	1/25	13:36	13:39	1012.9	6.3	21	6.6
C	P	MAX		走行		CASE11	2	1/25	13:39	13:42	1012.9	6.3	21	6.6
C	P	MAX		ならし	模擬	CASE11	3	1/25	13:43	13:52	1012.9	6.3	21	6.6
C	P	MAX		掘削		CASE11	4	1/25	13:53	13:56	1012.9	6.3	21	6.6
C	P	MAX		掘削積み込み	模擬	CASE11	5	1/25	13:58	14:02	1012.9	6.3	21	6.6
C	E	MAX		待機		CASE12	1	1/25	14:23	14:27	1013.2	7.3	21	6
C	E	MAX		走行		CASE12	2	1/25	14:27	14:32	1013.2	7.3	21	6
C	E	MAX		ならし	模擬	CASE12	3	1/25	14:32	14:41	1013.2	7.3	21	6
C	E	MAX		掘削		CASE12	4	1/25	14:46	14:49	1013.2	7.3	21	6
C	E	MAX		掘削積み込み	模擬	CASE12	5	1/25	14:53	14:57	1013.2	7.3	21	6
A	P	MAX		待機		CASE13	1	1/26	9:34	9:38	1021.6	0.2	61	2.4
A	P	MAX		走行		CASE13	2	1/26	9:38	9:42	1021.6	0.2	61	2.4
A	P	MAX		ならし	模擬	CASE13	3	1/26	9:43	9:52	1021.6	0.2	61	2.4
A	P	MAX		掘削		CASE13	4	1/26	9:54	9:56	1021.6	0.2	61	2.4
A	P	MAX		掘削積み込み	模擬	CASE13	5	1/26	9:59	10:03	1021.6	0.2	61	2.4

表-A.2.3 測定の日程 2（ 2016 年度 ）.

操縦者	モード	スロットル	Cold start	動作	模擬作業の別	No.		測定日	開始時刻	終了時刻	気象庁の気象データ つくば（舘野）			
											気圧 hPa	気温 ℃	湿度 %	風速 m/s
D	P	MAX	Cold	待機		G11		12/23	10:19	10:29	995.4	15	72	1.2
D	E	MIN		待機		G14		12/23	11:00	11:10	995.5	17	61	3.2
D	E	MAX		待機		G13		12/23	11:10	11:15	995.5	17	61	3.2
D	P	MAX		待機		G15		12/23	11:15	11:20	995.5	17	61	3.2
D	P	MIN		待機		G12		12/23	11:20	11:25	995.5	17	61	3.2
D	P	MAX		走行		G17	1	12/23	13:22	13:27	995.1	16.4	34	4.9
D	P	MAX		ならし	模擬	G17	2	12/23	13:31	13:35	995.1	16.4	34	4.9
D	P	MAX		ならし	模擬	G17	3	12/23	13:36	13:39	995.1	16.4	34	4.9
D	P	MAX		ならし	模擬	G17	4	12/23	13:42	13:45	995.1	16.4	34	4.9
D	P	MAX		ならし	模擬	G17	5	12/23	13:46	13:53	995.1	16.4	34	4.9
D	P	MAX		ならし	模擬	G17	6	12/23	13:56	14:01	995.1	16.4	34	4.9
D	P	MAX		掘削積み込み	模擬	G17	7	12/23	14:04	14:08	995.2	16.8	29	7.2
D	P	MAX		掘削積み込み	模擬	G17	8	12/23	14:09	14:12	995.2	16.8	29	7.2
D	P	MAX		掘削積み込み	模擬	G17	9	12/23	14:13	14:16	995.2	16.8	29	7.2
D	P	MAX		掘削積み込み	模擬	G17	10	12/23	14:17	14:20	995.2	16.8	29	7.2
D	P	MAX		掘削積み込み	模擬	G17	11	12/23	14:21	14:23	995.2	16.8	29	7.2
D	P	MAX		掘削積み込み　乱暴	模擬	G31		12/23	14:50	14:53	995.2	16.8	29	7.2
D	P	MAX		掘削積み込み　普通	模擬	G32		12/23	14:56	14:58	995.2	16.8	29	7.2
D	P	MAX		掘削積み込み　穏やか	模擬	G33		12/23	15:00	15:04	996.1	15.8	28	5.4
D	P	MAX		掘削　乱暴		G34		12/23	15:10	15:11	996.1	15.8	28	5.4
D	P	MAX		掘削　普通		G35		12/23	15:13	15:14	996.1	15.8	28	5.4
D	P	MAX		掘削　穏やか		G36		12/23	15:16	15:18	996.1	15.8	28	5.4
D	P	MAX	Cold	待機		G21	1	12/24	8:42	8:46	1014.6	6	53	2.4
D	P	MAX		走行		G21	2	12/24	8:51	8:54	1014.6	6	53	2.4
D	P	MAX		ならし	模擬	G21	3	12/24	8:58	9:00	1014.6	6	53	2.4
D	P	MAX		掘削積み込み	模擬	G21	4	12/24	9:04	9:08	1015.4	7.4	49	4.5
D	P	中間		掘削積み込み	模擬	G23	1	12/24	9:37	9:40	1015.4	7.4	49	4.5
D	P	中間		掘削積み込み	模擬	G23	2	12/24	9:41	9:43	1015.4	7.4	49	4.5
D	P	中間		掘削積み込み	模擬	G23	3	12/24	9:44	9:46	1015.4	7.4	49	4.5
D	P	中間		掘削積み込み	模擬	G23	4	12/24	9:47	9:49	1015.4	7.4	49	4.5
D	P	中間		掘削積み込み	模擬	G23	5	12/24	9:50	9:53	1015.4	7.4	49	4.5
D	P	中間		走行		G23	6	12/24	9:56	9:59	1015.4	7.4	49	4.5
D	P	中間		ならし	模擬	G23	7	12/24	10:02	10:04	1016.3	8.9	41	3.4
D	P	中間		ならし	模擬	G23	8	12/24	10:05	10:07	1016.3	8.9	41	3.4
D	P	中間		ならし	模擬	G23	9	12/24	10:08	10:10	1016.3	8.9	41	3.4
D	P	中間		ならし	模擬	G23	10	12/24	10:11	10:13	1016.3	8.9	41	3.4
D	P	中間		ならし	模擬	G23	11	12/24	10:14	10:16	1016.3	8.9	41	3.4
D	E	MAX		ならし	模擬	G22	1	12/24	10:46	10:48	1016.3	8.9	41	3.4
D	E	MAX		ならし	模擬	G22	2	12/24	10:49	10:51	1016.3	8.9	41	3.4
D	E	MAX		ならし	模擬	G22	3	12/24	10:52	10:54	1016.3	8.9	41	3.4
D	E	MAX		ならし	模擬	G22	4	12/24	10:55	10:57	1016.3	8.9	41	3.4
D	E	MAX		ならし	模擬	G22	5	12/24	10:58	11:00	1016.3	8.9	41	3.4
D	E	MAX		ならし	模擬	G22	6	12/24	11:01	11:03	1016	9.9	39	2.9
D	E	MAX		ならし	模擬	G22	7	12/24	11:04	11:06	1016	9.9	39	2.9
D	E	MAX		ならし	模擬	G22	8	12/24	11:07	11:09	1016	9.9	39	2.9
D	E	MAX		ならし	模擬	G22	9	12/24	11:10	11:12	1016	9.9	39	2.9
D	E	MAX		ならし	模擬	G22	10	12/24	11:13	11:15	1016	9.9	39	2.9
D	E	MAX		走行		G22	11	12/24	11:17	11:23	1016	9.9	39	2.9
D	E	MAX		掘削積み込み	模擬	G22	12	12/24	11:26	11:28	1016	9.9	39	2.9
D	E	MAX		掘削積み込み	模擬	G22	13	12/24	11:29	11:31	1016	9.9	39	2.9
D	E	MAX		掘削積み込み	模擬	G22	14	12/24	11:32	11:35	1016	9.9	39	2.9
D	E	MAX		掘削積み込み	模擬	G22	15	12/24	11:36	11:39	1016	9.9	39	2.9
D	E	MAX		掘削積み込み	模擬	G22	16	12/24	11:40	11:42	1016	9.9	39	2.9
D	E	MAX		掘削積み込み	模擬	G22	17	12/24	11:43	11:45	1016	9.9	39	2.9
D	E	MAX		掘削積み込み	模擬	G22	18	12/24	11:46	11:48	1016	9.9	39	2.9
D	E	MAX		掘削積み込み	模擬	G22	19	12/24	11:49	11:51	1016	9.9	39	2.9
D	E	MAX		掘削積み込み	模擬	G22	20	12/24	11:53	11:55	1016	9.9	39	2.9
D	E	MAX		掘削積み込み	模擬	G22	21	12/24	11:56	11:58	1016	9.9	39	2.9

表−A.2.4 測定の日程 3（ 2017 年度 ）.

番号	測定機クラス	操縦者	モード	スロットル	Cold start	動作	データのファイル名			測定日	開始時刻	終了時刻	気象庁の気象データ つくば（舘野）				燃費測定	備考
							FTIR		GL1000				気圧 hPa	気温 °C	湿度 %	風速 m/s		
01	20t	A	P	MAX	Cold	待機	A	11	36	10/24	14:27	14:47	1020	15.5	59	2		
02	20t	B	E	MAX		ならし模擬動作	A	32	40	10/24	15:43	16:18	1020	15.3	58	2.2		
03	20t	A	P	MAX	Cold	待機	A	12	45	10/25	10:06	10:26	1017	12.7	96	1.2		
04	20t	C	E	中間		ならし模擬動作	A	33	47	10/25	10:51	11:26	1017	12.7	96	1.2		B33-2との比較データ
05	20t	A	E	MAX		待機	A	21-1	51	10/25	11:42	12:02	1017	12.9	94	1		再測定（測定ミス対応）
06	20t	A	P	MAX	Cold	待機	A	13	58	10/25	13:23	13:43	1015	13.9	91	1.3	1回目	
07	20t	A	E	MAX		ならし模擬動作	A	31	58	10/25	14:01	14:30	1015	13.3	94	2		
08	20t	C	E	MAX		ならし模擬動作	A	33-2	64	10/25	14:58	15:25	1015	13.3	94	2		
09	13t	A	P	MAX	Cold	待機	B	11	70	10/26	9:48	10:08	1020	13.6	81	1.1	2回目	
10	13t	A	E	MAX		ならし模擬動作	B	31	72	10/26	10:23	10:47	1020	16	67	1.4		
11	13t								74	10/26	10:58	11:06	1020	16	67	1.4		B32の練習
12	13t	B	E	MAX		ならし模擬動作	B	32	75	10/26	11:08	11:40	1019	17	63	1.3		
13	13t	A	P	MAX	Cold	待機	B	12	82	10/26	12:38	12:58	1019	18.3	50	1.4		
14	13t						C	01-2	87	10/26	13:46	13:56	1018	18.5	49	2.2		見学者への説明対応
15	13t						C	01-3	88	10/26	13:57	14:00	1018	18.5	49	2.2		
16	13t	C	E	MAX		ならし模擬動作	B	33	91	10/26	15:28	15:53	1018	17.9	50	2.9		
17	13t	A	P	MAX	Cold	待機	B	13	99	10/27	10:14	10:34	1020	17	63	1.5		
18	13t	A	E	MAX		待機	B	21	99	10/27	10:38	10:58	1020	17	63	1.5		

表-A.2.5 測定の日程 4（ 2018 年度 ）.

日付	動作内容	測定動作開始時間	測定機械識別記号*1	データを識別する記号*1	測定機クラス	排出ガス後処理装置	操縦者	（参考）気象庁の気象データ（つくば市館野）		
								気温(°C)	湿度(%)	気圧(海面)(hPa)
8月6日	アイドリング	13:52	ZYX13-11	-01	13t	DOC, DPF	-	28.8	77	1004.2
		14:27	ZYX13-14	-01	13t	DOC, SCR		29.3	75	1003.9
		15:18	ZYX20-11	-01	20t	DOC, DPF		29.1	72	1004
		15:58	ZYX20-14	-01	20t	DOC, SCR				
8月7日	アイドリング	9:46	ZYX20-11	-02	20t	DOC, DPF	-	22	93	1009.7
	ならし動作	10:52	ZYX20-11	-B	20t	DOC, DPF	B	22.6	93	1009.5
		11:13	ZYX20-11	-C	20t	DOC, DPF	C	23.4	88	1009.2
		11:43	ZYX20-11	-A	20t	DOC, DPF	A			
	アイドリング	12:52	ZYX20-14	-02	20t	DOC, SCR		24.2	85	1008.9
	ならし動作	13:15	ZYX20-14	-A	20t	DOC, SCR	A	25.9	79	1008.5
		13:32	ZYX20-14	-B	20t	DOC, SCR	B			
		13:49	ZYX20-14	-C	20t	DOC, SCR	C			
	アイドリング	14:40	ZYX13-11	-02	13t	DOC, DPF	-	24.7	80	1008
	ならし動作	15:05	ZYX13-11	-A	13t	DOC, DPF	A	24.9	80	1007.7
		15:20	ZYX13-11	-B	13t	DOC, DPF	B			
		15:34	ZYX13-11	-C	13t	DOC, DPF	C			
	アイドリング	16:05	ZYX13-14	-02	13t	DOC, SCR	-	24.9	80	1007.6
	ならし動作	16:28	ZYX13-14	-B	13t	DOC, SCR	B			
		16:43	ZYX13-14	-C	13t	DOC, SCR	C			
		17:02	ZYX13-14	-A	13t	DOC, SCR	A	25	78	1007.3
8月9日	アイドリング	15:07	ZYX13-11	-03	13t	DOC, DPF	-	29	81	996.4
		15:38	ZYX13-14	-03	13t	DOC, SCR				
		16:15	ZYX20-11	-03	20t	DOC, DPF		30.3	75	996.7
		16:44	ZYX20-14	-03	20t	DOC, SCR				

8月8日は天候不良のため測定中止.

*1: 測定時のデータファイルにはメーカが特定できる文字列が入っていたのでこのような表記にした.

(4) 留意事項

測定器を建設機械に搭載して測定する場合には降雨時の防水対策が必要となる．本研究においては**図-A.2.5** のようにブルーシートで応急対策を講じた．**図-A.2.6**，**図-A.2.7**，**図-A.2.8** のようにエンジンルーム，排気管，および排出ガスは高温になるのでこのような対策はエンジンを停止して十分に冷却してから行うことや，ブルーシートをかけたままエンジンを稼働させないように留意することが必要である．回転計等のセンサを設置する場合も高温に留意する．また，測定器を建設機械に設置する場合は**図-A.2.9** のように高さ 2 m以上の高所作業となる．測定時においても保護帽を着用するなど安全確保に留意する．また，建設機械の周囲は死角が多く，近年は**図-A.2.10** のようにカメラで建設機械の周囲を確認するモニタする装置が設置されているが，測定器でカメラの視界が遮らせることもある．本研究においては**図-A.2.11** のように後付けのモニタカメラを設置したが，安全には細心の注意を払う必要がある．さらに，夏季においては運転席が**図-A.2.12** のように高温になる．測定機器の設置，および測定時には熱中症対策にも配慮することが必要である．本研究の測定において 2015 年度，2016 年度，および 2017 年度の測定においては運転席のエアコンを停止させたがが，自動車の RDE 試験においてはエアコンを使用している（**図-4.4, P.53**）ことを考慮して，2018 年度の測定においてはエアコンを使用した．

図-A.2.5 ブルーシートによる防水対策.

図-A.2.6 エンジンルームの赤外線画像.

図-A.2.7 排気管の赤外線画像.

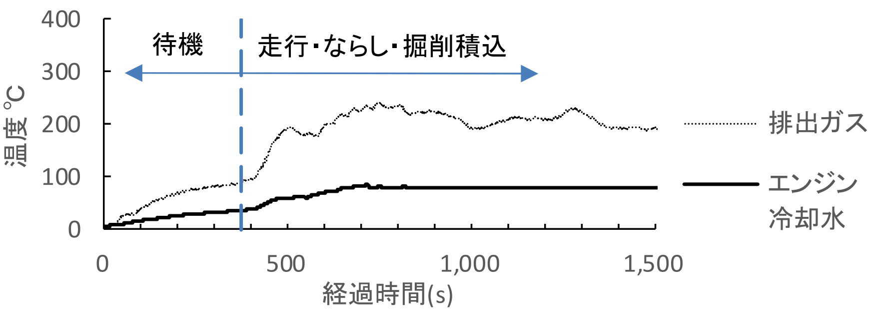


図-A.2.8 排出ガスおよびエンジン冷却水温度の時間変化例.

図-A.2.9　クレーンでの機器の設置作業.

図-A.2.10　建設機械の周囲のモニタ装置の例.

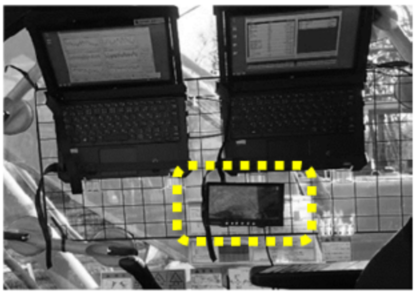


図-A.2.11　後づけしたモニタカメラ

図-A.2.12　夏季における運転席の赤外線画像.

A.3　測定データ（ 電子データ ）

測定データは DVD-R で添付する. 図-A.3.1, 図-A.3.2 は測定データの抜粋をグラフ化したものである.

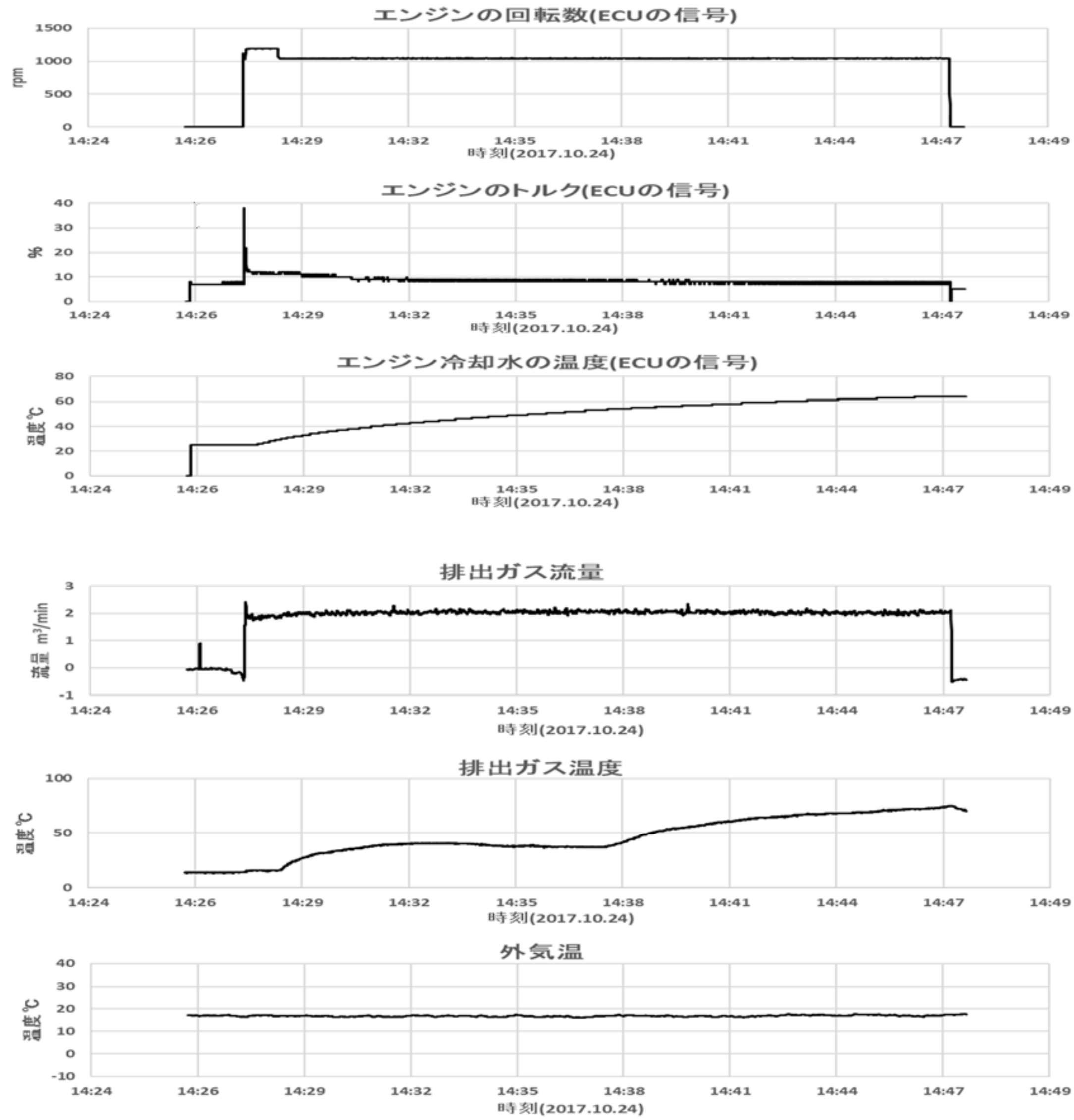


図-A.3.1 測定データ抜粋 1.

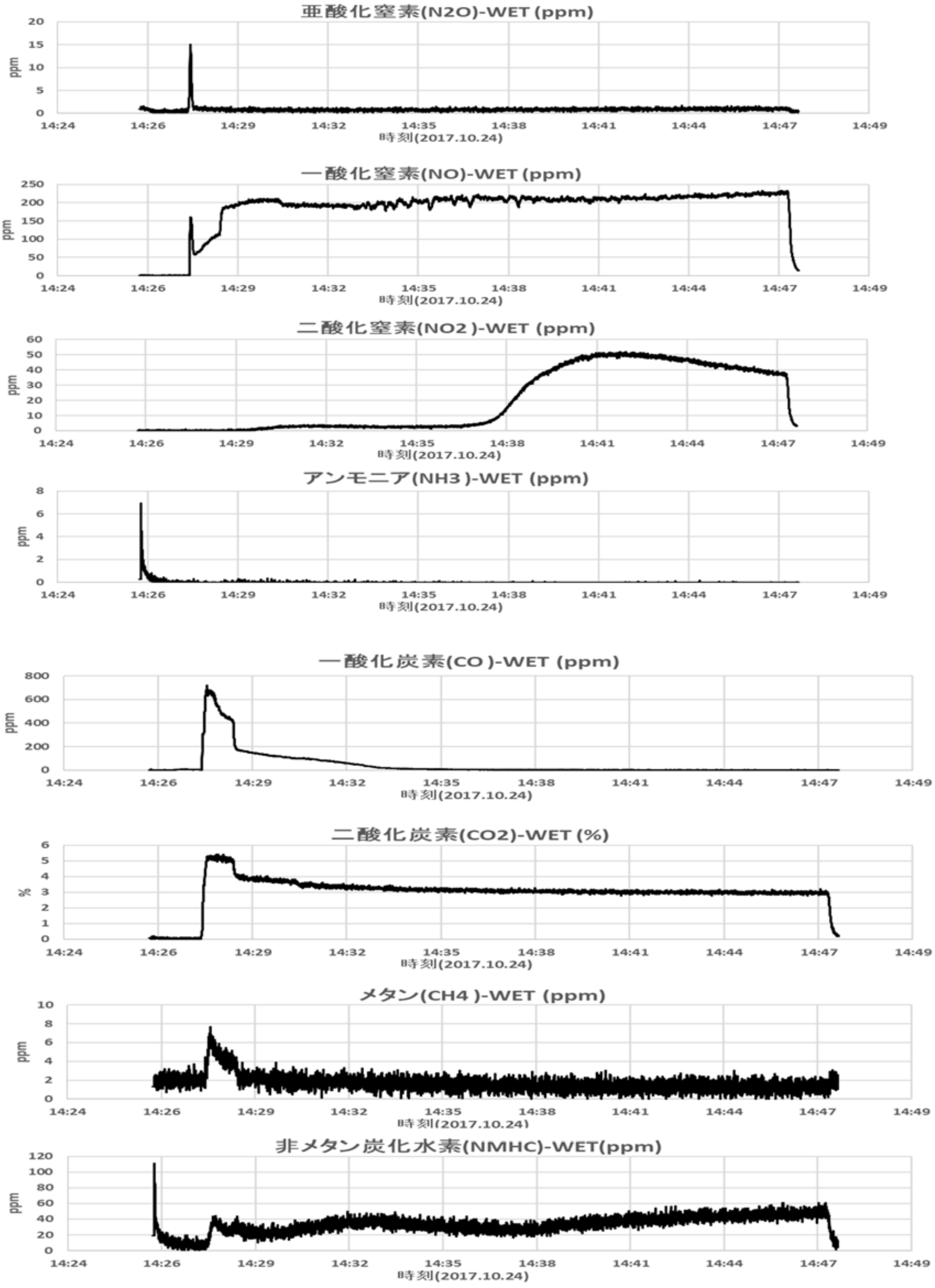
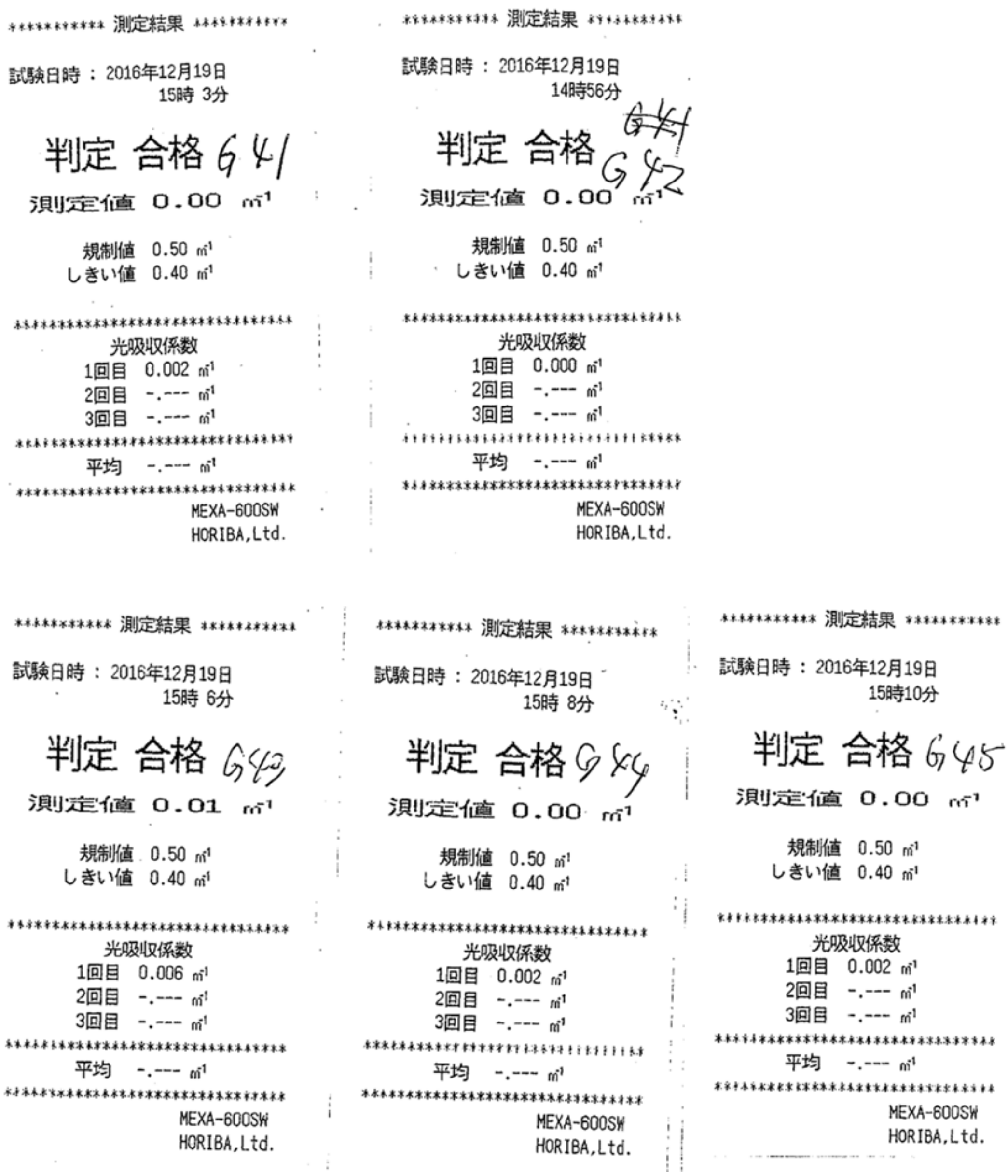


図-A.3.2 測定データ抜粋 2.

A. 4　光吸収係数測定器（オパシメータ）での測定値

光吸収係数測定器（オパシメータ）での測定値を**図-A.4.1**, **図-A.4.2**, および**図-A.4.3** に示す. 測定器は（株）堀場製作所の MEXA-600SW を使用した. 測定値は規制値 0.5 m^{-1} に対して最大でも 0.09 m^{-1} であった. 2015 年度の測定値も 2016 年度と同程度であったが, 熱転写式の印字のため経年で文字がかすれていたので記載しない. 熱転写式の記録紙に印字した測定値はコピーまたはイメージスキャンしておくことが必要である.



*********** 測定結果 ***********
試験日時 ： 2016年12月19日 15時 3分
判定 合格 G41
測定値 0.00 m^{-1}
規制値 0.50 m^{-1}
しきい値 0.40 m^{-1}
****
光吸収係数
1回目 0.002 m^{-1}
2回目 -.--- m^{-1}
3回目 -.--- m^{-1}
****
平均 -.--- m^{-1}
****
MEXA-600SW
HORIBA,Ltd.

*********** 測定結果 ***********
試験日時 ： 2016年12月19日 14時56分
判定 合格 ~~G41~~ G42
測定値 0.00 m^{-1}
規制値 0.50 m^{-1}
しきい値 0.40 m^{-1}
****
光吸収係数
1回目 0.000 m^{-1}
2回目 -.--- m^{-1}
3回目 -.--- m^{-1}
****
平均 -.--- m^{-1}
****
MEXA-600SW
HORIBA,Ltd.

*********** 測定結果 ***********
試験日時 ： 2016年12月19日 15時 6分
判定 合格 G43
測定値 0.01 m^{-1}
規制値 0.50 m^{-1}
しきい値 0.40 m^{-1}
****
光吸収係数
1回目 0.006 m^{-1}
2回目 -.--- m^{-1}
3回目 -.--- m^{-1}
****
平均 -.--- m^{-1}
****
MEXA-600SW
HORIBA,Ltd.

*********** 測定結果 ***********
試験日時 ： 2016年12月19日 15時 8分
判定 合格 G44
測定値 0.00 m^{-1}
規制値 0.50 m^{-1}
しきい値 0.40 m^{-1}
****
光吸収係数
1回目 0.002 m^{-1}
2回目 -.--- m^{-1}
3回目 -.--- m^{-1}
****
平均 -.--- m^{-1}
****
MEXA-600SW
HORIBA,Ltd.

*********** 測定結果 ***********
試験日時 ： 2016年12月19日 15時10分
判定 合格 G45
測定値 0.00 m^{-1}
規制値 0.50 m^{-1}
しきい値 0.40 m^{-1}
****
光吸収係数
1回目 0.002 m^{-1}
2回目 -.--- m^{-1}
3回目 -.--- m^{-1}
****
平均 -.--- m^{-1}
****
MEXA-600SW
HORIBA,Ltd.

図-A.4.1 オパシメータの測定値１. 2016 年度に測定した 2011 年規制対応の 20t クラスの油圧ショベル.

測定結果

試験日時：2017年10月26日
16時 2分

判定 合格

測定値 0.02 m^{-1}

規制値 0.50 m^{-1}
しきい値 0.40 m^{-1}

光吸収係数
1回目 0.018 m^{-1}
2回目 -.--- m^{-1}
3回目 -.--- m^{-1}

平均 -.--- m^{-1}

MEXA-600SW
HORIBA,Ltd.

測定結果

試験日時：2017年10月26日
16時 3分

判定 合格

測定値 0.02 m^{-1}

規制値 0.50 m^{-1}
しきい値 0.40 m^{-1}

光吸収係数
1回目 0.018 m^{-1}
2回目 -.--- m^{-1}
3回目 -.--- m^{-1}

平均 -.--- m^{-1}

MEXA-600SW
HORIBA,Ltd.

測定結果

試験日時：2017年10月26日
16時 4分

判定 合格

測定値 0.02 m^{-1}

規制値 0.50 m^{-1}
しきい値 0.40 m^{-1}

光吸収係数
1回目 0.016 m^{-1}
2回目 -.--- m^{-1}
3回目 -.--- m^{-1}

平均 -.--- m^{-1}

MEXA-600SW
HORIBA,Ltd.

測定結果

試験日時：2017年10月26日
13時11分

判定 合格

測定値 0.00 m^{-1}

規制値 0.50 m^{-1}
しきい値 0.40 m^{-1}

光吸収係数
1回目 0.000 m^{-1}
2回目 -.--- m^{-1}
3回目 -.--- m^{-1}

平均 -.--- m^{-1}

MEXA-600SW
HORIBA,Ltd.

測定結果

試験日時：2017年10月26日
13時11分

判定 合格

測定値 0.00 m^{-1}

規制値 0.50 m^{-1}
しきい値 0.40 m^{-1}

光吸収係数
1回目 0.000 m^{-1}
2回目 -.--- m^{-1}
3回目 -.--- m^{-1}

平均 -.--- m^{-1}

MEXA-600SW
HORIBA,Ltd.

測定結果

試験日時：2017年10月26日
15時56分

判定 合格

測定値 0.00 m^{-1}

規制値 0.50 m^{-1}
しきい値 0.40 m^{-1}

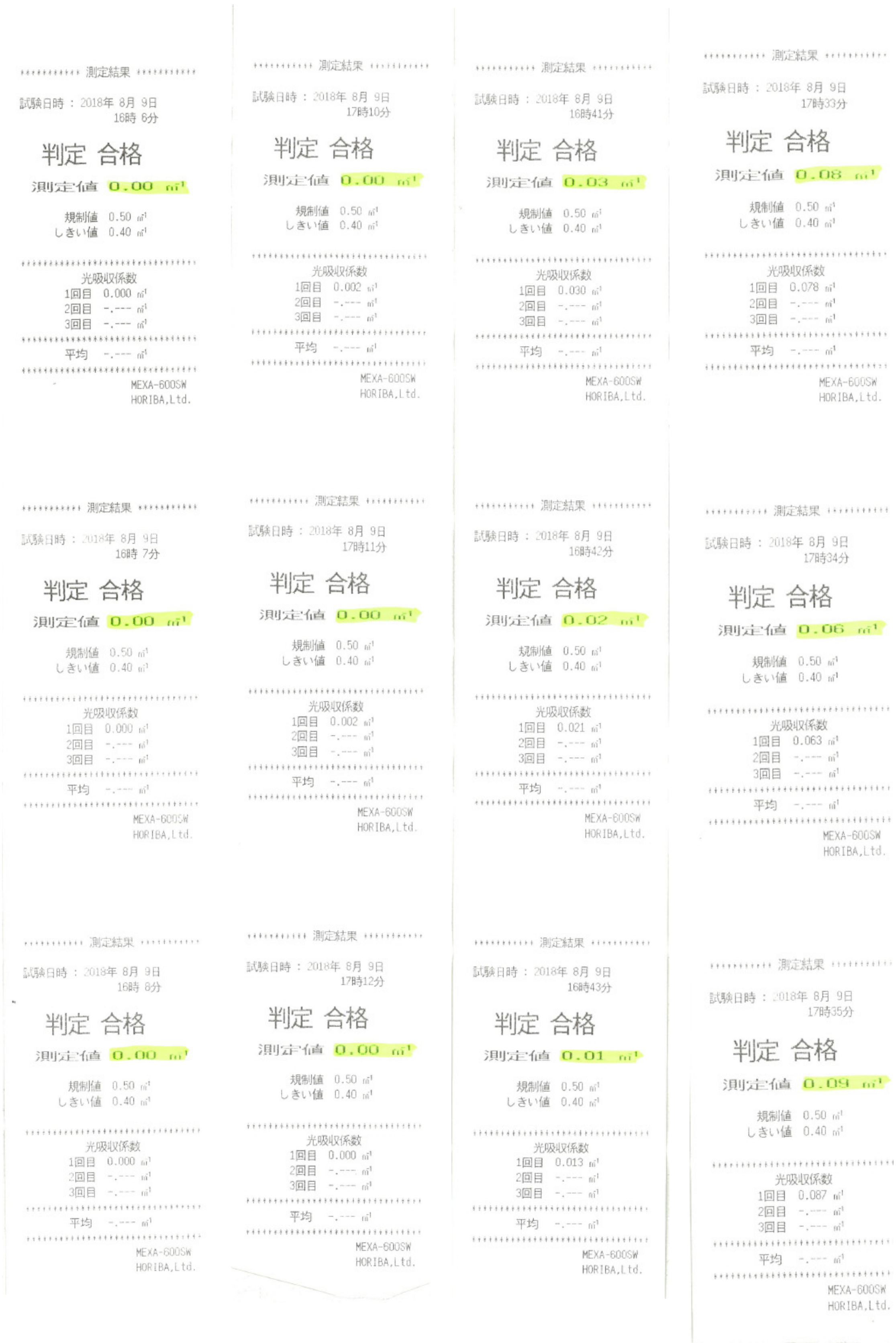
光吸収係数
1回目 0.002 m^{-1}
2回目 -.--- m^{-1}
3回目 -.--- m^{-1}

平均 -.--- m^{-1}

MEXA-600SW
HORIBA,Ltd.

2014 年規制対応 13t　　　　2014 年規制対応 20t

図-A.4.2 オパシメータの測定値 2. 2017 年度に測定.



2011 年規制対応 13t　　2011 年規制対応 20t　　2014 年規制対応 13t　　2014 年規制対応 20t

図−A.4.3 オパシメータの測定値 3. 2018 年度に測定.

A.5　本研究に準拠した温室効果ガスの測定方法

本研究に準拠した温室効果ガスの測定方法を次頁以降に添付する.

温室効果ガスの測定方法-油圧ショベル
（ 研究のためのデータ収集用 ）
2019 年 4 月

国立研究開発法人　土木研究所

目　次

参考文献は[M.01]から始まる連番とし，12. 文献にまとめた.

「温室効果ガスの測定方法-油圧ショベル 2019 年 4 月 国立研究開発法人 土木研究所」．温室効果ガスの亜酸化窒素，およびメタンの概況把握を目的とした測定方法であり，機械毎の測定数等の条件は個別の機械の評価が可能な仕様でない.

1. 目的

土木研究所は，建設機械から排出される亜酸化窒素 N_2O，およびメタン CH_4 の概況を把握することを目的として，これらの排出ガスを測定している．測定値は論文等で公表しているが，温室効果ガスの概況を正確に把握するためには，土木研究所のみの測定値だけでなく複数の機関，および複数の測定方法に基づく測定結果と比較することが必要と考えられる．比較することで測定値がおおむね整合する場合には測定値の信頼性が高まり，測定値がかい離する場合には原因を調べることで安定した測定値を得る方法が見いだされたり，排出量が増減する要因の解明に展開する可能性がある．また，論文には測定の概要のみを記載していて測定時に設定した条件等の詳細は記述していないので，これらも公表することが必要と考えている．本測定方法は，土木研究所におけるこれまでの測定結果から得られた知見に基づき今後の測定方法案としてまとめたものである．測定対象とする動作，測定時間，および測定回数等は，測定対象とするガス等の種類，および測定値を使用する目的に応じて定めることが必要である（例： 個別の機械の燃費評価が目的の場合は，多様な動作を同一条件で測定．個別のエンジンの性能評価が目的の場合は，測定条件を厳密に設定できる台上試験，または測定値から推定した母平均の信頼区間が目標値以下となるように計画した数量の車載測定．)．本測定方法は，温室効果ガスの概況を簡素かつ信頼性の高い方法で把握することを目的とし，正確な測定値を簡素に得ることができるように配慮して見直してきたが，取り扱いについては以下の点に留意することが必要である．

・本測定方法は，簡素かつ信頼性の高い方法で温室効果ガスの概況を把握することを目的としたものである．本測定方法では個別の機械の性能評価に供する程度まで測定値の標準偏差を抑制することができない．(P.131 で後述するように 30~40%の誤差率．)

・測定値が安定する条件，および偏向する要因が明らかになれば，本測定方法は修正する．

・本測定方法では，アイドリングストップ機能を解除して測定する等，建設機械を使用する実情とは異なる条件での測定値を得る．

・本測定方法は，他の測定方法との比較検討を前提として公表するものであり，他の測定方法に対して排他的ではない．

・本測定方法による測定値が他の測定方法による測定値と整合しない場合には比較・検証を継続することが必要である．

（補足）

建設機械に搭載されるエンジンから排出される窒素酸化物NOx，非メタン炭化水素NMHC，粒子状物質PM，および一酸化炭素CO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」）により，エンジン単体の室内試験値で規制されている．この規制は，公道を走行する自動車（以下，「オンロード車」という．）の動向をふまえたものであるが，近年，欧米におけるオンロード車の排出ガス規制に新たな変化の兆候がみうけられる．欧州連合EUは，2017年9月以降，実路走行RDE (real driving emission) 試験を順次

義務付ける（文献例[M.01][M.02]）．さらに，建設機械等のNRMM（non-road mobile machinery）に搭載したエンジンからの排出ガスを測定して報告するISM（in-service monitoring）を義務付けることになり[M.03][M.04]，早ければ2019年に規制対象となるエンジンを搭載した建設機械が測定対象となる．EUと同様に国内のオンロード車でも2022年からRDE試験での規制が導入される[M.05]．また，米国では温室効果ガス（GHG: greenhouse gas）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[M.06]），およびメタンCH_4（同25倍[M.06]）の規制値（standard）を定めており[M.07]，国内でも路上走行時の測定が行われるようになった．

以上の動向をふまえると，建設機械の稼働時の排出ガスおよび温室効果ガスの概況を把握するための測定データが必要になる可能性が高い．これまで測定した事例が国内外で報告されているが（文献例[M.08]～[M.13]），測定値の信頼性についての検討が行われた記述がみあたらない．路上走行試験では室内試験よりも排出量が大きくなる旨の調査結果を拠り所としてEUが路上走行試験を導入した経緯をふまえると，信頼性の高い測定方法が必要である．

測定値の信頼性を高めるためには，一定の定められた条件で測定すること，測定値の標準偏差が小さい動作を選定すること，および複数回の測定を行うことが必要である．測定数を増やして平均すれば信頼性が向上するが，測定に要する経費が増大する．測定費用については，公的機関によらなくても結果的には国民負担になるため，測定を簡素化して経費を抑制することが必要である．

なお，本測定方法においてアイドリングストップ機能を解除して測定することとした理由は以下である．

・アイドリングストップ機能は普及の過渡期である．将来，排出量を算定する際にはこの機能の普及率および稼働状況を盛り込んだ平均的なアイドリング時間とアイドリング時の排出量から計算することが想定されるため，アイドリング時の排出量を把握することとした．

2. 適用

2.1　建設機械と測定方法

本測定方法で測定する建設機械は，標準バケット定格容量 0.28～1.9m^3 クラスのディーゼルエンジン駆動型油圧ショベルとする．また，建設機械に搭載されている原動機から排出されるガスの測定方法には表 2.1 の 4 種類が考えらえるが，本測定方法は模擬動作を行う方法とする．

なお，これまでに標準バケット定格容量 0.5，および 0.8m^3 クラスの油圧ショベルを測定し[M.13]～[M.15]，支障のないことを確認している．

表 2.1　建設機械に搭載される原動機から排出されるガスの測定方法（案）

測定方法	本測定方法	備考
原動機単体試験（室内）		規制に適用されている.
シャーシダイナモ試験（室内）		建設機械での実施例はない.
模擬動作の測定	○	測定事例が報告されている[M.08]～[M.13].
実作業の測定		

2.2　測定対象とするガス

各種のガスを表 2.2 に整理した．温室効果ガスとして測定するのは CO_2, N_2O, および CH_4 であるが，窒素酸化物等は排出ガスの特性を把握する際に参考となるので，測定できる場合には参考値として測定する.

表 2.2 測定対象とする排出ガス

排出ガス		国内での規制	地球温暖化係数	■：要測定，□：参考値として測定	
一酸化炭素	一酸化炭素 CO	有			□
	二酸化炭素 CO_2	－	1	■	
炭化水素	メタン CH_4	－	25	■	
	非メタン炭化水素 NMHC	有			□
窒素酸化物 NO_x	一酸化窒素 NO	有			□
	二酸化窒素 NO_2				□
	亜酸化窒素 N_2O	－	298	■	
粒子状物質 PM		有			□

（補足）

図 2.1 および図 2.2 は NOx および N_2O の測定値の例である. 2017 年度時点で販売される建設機械には排出ガス規制に対応して SCR を搭載することが多い. SCR では，尿素水から生成したアンモニアで窒素酸化物を窒素と水に還元しているが，過剰となったアンモニアが酸化され, N_2O となって排出されることがある．このため N_2O の排出量は機種により大きく異なることが考えられる.

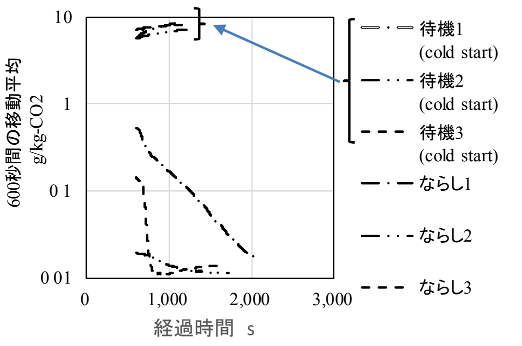


図 2.1　NOx の測定値の例．600 秒間の移動平均値のためグラフの開始時刻が 600　s となっている．

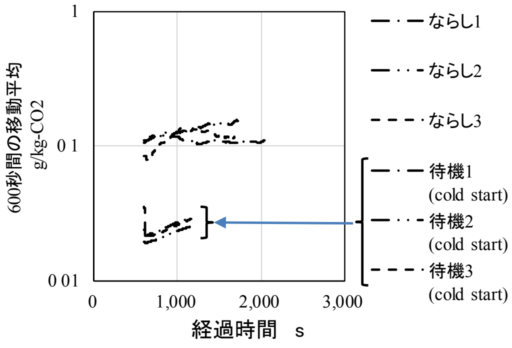


図 2.2　N_2O の測定値の例．600 秒間の移動平均値のためグラフの開始時刻が 600　s となっている．

3．引用規格

本測定方法では下記の規格等を部分的に引用した．（ 追補を含む．）

・JCMAS H020　土工機械－エネルギー消費量試験方法―油圧ショベル[M.16]
・JIS A 8403－4　土工機械－油圧ショベル－第 4 部：バケットの定格容量[M.17]
・JIS D 0006－1　土工機械－エンジン－第 1 部：ネット出力試験方法[M.18]
・JIS K 2204　軽油[M.19]
・JIS K 2249－4　原油及び石油製品―密度の求め方―第 4 部：密度・質量・容積換算表[M.20]

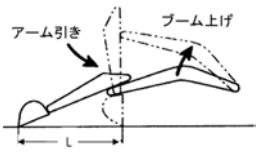
4．測定対象とする動作

測定対象とする動作は，「待機（ アイドリング ）」，および「ならし（模擬動作）」とする．動作の内容および数量の詳細は **9．測定時における動作**で示す．

（補足）

油圧ショベルは，待機，走行，掘削，積込，およびならし等の動作を行う．**表 4.1** の動作における動力および排出ガスを測定した文献[M.14]（ **図 2.1**，および**図 2.2** とは異なる機種）によると，動力は大きい順に「走行」，「ならし（模擬動作）」，「掘削・積込み （ 模擬動作 ）」，「掘削（ 実作業 ）」，「待機」となり，NOx（ CO_2比 ）は「待機」が最も大きく，動力が大きくなると小さくなる傾向がみうけられた．一方，測定値の標準偏差は「待機」，および「走行」で大きく，「ならし」で小さかった．以上から，動力が小さく排出ガスの大きい動作として「待機」を選定し，動力が大きく排出ガス量が小さい動作のなかから測定値が安定している動作として「ならし」を選定した．文献[M.14]と同じ測定データで N_2O をグラフにしたものを **図 4.1**，および**図 4.2** に示す．N_2O についても，ほぼ同様の傾向がみうけられた．測定する動作をこれらの 2 種類に限定することで、**図 4.3** のように測定機器を建設機械に搭載しない条件で動作に伴う排出ガスを測定することができる．

表 4.1 測定における各種の動作.

動 作	内　容
待機	アイドリングを 5 分間（ 異なる時間の測定有 ）
走行	片道 25m の区間 3 往復
ならし(模擬動作) (JCMAS H 020:2014[M.16] 引用)	 アーム，およびバケットが一直線になる状態を開始姿勢とし，L=4.5m の範囲で水平引き
掘削(実作業)	掘削, 45 度の旋回, およびバケットダンプを 5 サイクル
掘削・積込み（模擬動作） (JCMAS H 020:2014[M.16] 引用)	 開始姿勢（ アーム，およびバケットが一直線 ），水平引き，バケット掘削，ブーム上げを伴う 90 度の旋回，およびバケットダンプを 5 サイクル(異なる時間の測定有)

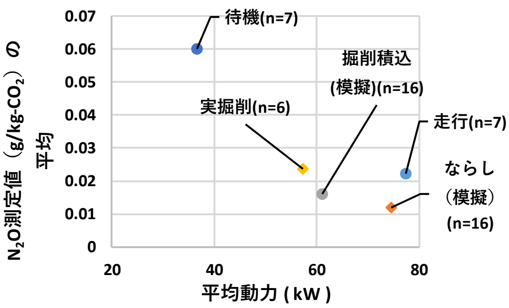


図 4.1　各種の動作別の N_2O の測定例(平均値).
（ 図 2.2 とは異なり N_2O の排出量が少ない機種.）

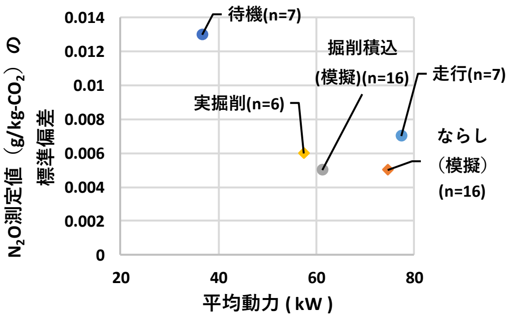


図 4.2 各種の動作別の N_2O の測定例(標準偏差)
（ 図 2.2 とは異なり N_2O の排出量が少ない機種. ）

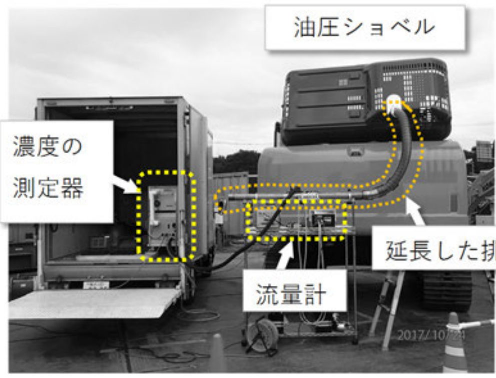


図 4.3　油圧ショベルの測定例

なお，燃料消費量（ 燃費 ）の試験方法[M.16]では「待機」，および「ならし (模擬動作)」の他に「走行」，および「掘削・積込み（模擬動作)」の動作も測定する．燃費の改善を目的として走行・旋回等の特定の動作に着目した対策が講じられた場合には「走行」，および「掘削・積込み（ 模擬動作 ）」の動作での燃料消費量が減少するので測定が必要である．しかし，本測定方法は N_2O および CH_4 の排出量を CO_2 比で把握するものであり，測定の簡素

化と測定値の信頼性向上を目的として「待機」, および「ならし（模擬動作)」に限定した. 燃費の試験と測定対象とする動作が異なるのは, 測定目的が異なること起因することに留意されたい.

5. 測定値

測定値は, 排出ガスの濃度・流量・温度, 原動機の回転数・トルク, 外気の温度・湿度・大気圧, および燃料消費量とする. 測定の必要性を含めた測定項目の一覧を表 5.1 に示す. 外気の温度・湿度・大気圧は, 排出ガスの測定値が増減する要因の解明において使用する可能性があるので測定する. 燃料消費量は CO_2 の排出量との整合性を確認する目的で測定する.

表 5.1 測定値

測定項目		測定目的	測定方法	測定の必要性
排出ガス	濃度	排出ガス量の算出	各種分析計	◎不可欠
	流量		排気流量計 EFM （ exhaust flow meter ）	○必要
	温度		温度センサ	○必要
原動機	回転数	動力の算出・流量の推定	ECU の信号取得, または回転計	○必要
	トルク	動力の算出	ECU の信号取得	△可能な場合
外気の温度・湿度・大気圧		排出ガス量の変動要因の分析	測定用のセンサ設置, または近傍の気象庁公表値の引用	○必要
燃料消費量		CO_2 の排出量との整合性を確認	ECU の信号取得, または燃料計	△可能な場合

（補足）

測定値の使用目的等について表 5.2 に示した数式で説明する. オフロード法, および海外の排出ガス規制は排出ガスの質量 M_{G} (g)と仕事量 W (kWh) の比 R_{GpW} (g / kWh) で定められている （ 式(1) ）. （ ただし, 米国の温室効果ガス規制は単位に馬力 hp を使用 ）. このため, 排出ガスを R_{GpW} で評価する際には, M_{G} と W の測定値が必要になる. M_{G} の測定値を得るためには排出ガスの濃度と流量の測定が必要になる（ 式(2) ）. また, W の測定値を得るためには, 原動機の回転数とトルクの測定値が必要になる（ 式(3) ）. しかしながら, 建設機械に搭載された原動機のトルクを実測することは実務的には不可能である. このため, 動作する建設機械から排出される排出ガス量の評価は式(4)で定める CO_2 比 R_{GpCO2} (g / kg-CO_2) とする. R_{GpCO2} は排出ガス濃度 （ ppm ） の時間積算値 $\int C_{\mathrm{G}}dt$ と CO_2 濃度 (ppm) の時間積算値 $\int C_{\mathrm{CO2}}dt$ の比 $R_{\mathrm{C\_GpCO2}}$（ 式(5) ） に密度比を乗じて質量比に換算し, 1000 倍した値で近似できる （ 式(6) ）. 排出ガスの流量が時間変動しない場合の式(6)は等号になる. R_{GpW} と R_{GpCO2} はエンジンの熱効率 η を設定すれば式(7)で換算できる. 油圧ショベルのエンジンの熱効率を文献値[M.08][M.09]から推定した例を図 5.1 に示す. 熱効率の平均値は 0.33 であり, t 分布を仮定した 95%信頼区間は $0.31 \leq \eta \leq 0.35$ である. エンジン単体試

験時のデータ等，信頼できる熱効率が使用できる場合にはその値とし，不明な場合で複数の建設機械からの排出ガスの総量を推定する場合（機械毎の評価でない場合）には$\eta = 0.33$とすることが考えられる．

表 5.2 排出ガス量の計算式

計算式	番号	記号
$R_{\mathrm{GpW}} = M_{\mathrm{G}} / W$	(1)	R_{GpW} ：仕事量比の排出量（g / kWh），M_{G} ：排出ガスの質量（g），W ：仕事量（kWh）
$M_{\mathrm{G}} = \int \frac{C_{\mathrm{G}} \rho_{\mathrm{G}} V}{1{,}000{,}000} dt$	(2)	C_{G} ：排出ガスの濃度（ppm），ρ_{G} ：排出ガスの密度（g / m^3），V ：排出ガスの流量（m^3 / s），t: 時間（s）
$W = \int \frac{2\pi R_{\mathrm{E}} T_{\mathrm{E}}}{1000 \cdot 3600} dt$	(3)	R_{E} ：エンジン回転数（/ s），T_{E} ：トルク（N · m）
$R_{\mathrm{GpCO2}} = M_{\mathrm{G}} / M_{\mathrm{CO2}}$	(4)	R_{GpCO2} ：CO_2質量比の排出量（g / kg-CO_2），M_{CO2} ：CO_2の量（kg）
$R_{\mathrm{C\_GpCO2}} = \int C_{\mathrm{G}} dt / \int C_{\mathrm{CO2}} dt$	(5)	$R_{\mathrm{C\_GpCO2}}$ ：CO_2濃度比の排出量，C_{CO2} ：CO_2の濃度（ppm）
$R_{\mathrm{GpCO2}} \cong 1{,}000 \cdot R_{\mathrm{C\_GpCO2}} \cdot \rho_{\mathrm{G}} / \rho_{\mathrm{CO2}}$	(6)	ρ_{CO2} ：CO_2の密度（g / m^3）
$k = \frac{R_{\mathrm{GpW}}}{R_{\mathrm{GpCO2}}} = \frac{M_{\mathrm{CO2}}}{W} = \frac{1}{\eta} m$	(7)	k ：仕事量比の排出量と CO_2比の排出量の比，η ：エンジンの熱効率，m ：軽油の CO_2排出原単位（kg/kWh）. 0.0687 kg/MJ（環境省 web site 掲載値）を採択して単位を変換すれば，$m = 0.24732$ kg/kWh.

各種の制約により測定値を得ることができない項目が生じた場合でも排出ガス濃度の測定値があれば，式(5)，および式(6)でR_{GpCO2}を計算することができる．式(5)，および式(6)による計算値の誤差は，流量の実測値を真値とみなした場合に 5%未満である[M.14].

なお，主なガス成分の密度は表 5.3 とする．

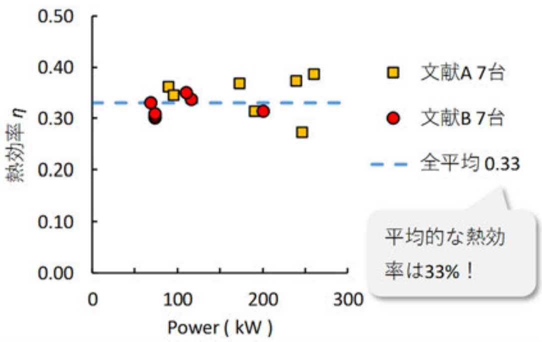


図 5.1　エンジンの熱効率の推定値. 文献 A[M.09]，文献 B [M.10]．

「温室効果ガスの測定方法-油圧ショベル 2019 年 4 月 国立研究開発法人 土木研究所」. 温室効果ガスの亜酸化窒素，およびメタンの概況把握を目的とした測定方法であり，機械毎の測定数等の条件は個別の機械の評価が可能な仕様でない．

表 5.3 ガス成分の密度

ガス名	化学式	密度(kg/m^3)(20℃, 1atm)	根拠
一酸化炭素	CO	1.17	文献[M.21]
二酸化炭素	CO_2	1.83	文献[M.21]
亜酸化窒素	N_2O	1.84	1.978(0℃, 1atm).文献[M.23]を 20℃に換算
一酸化窒素	NO	1.25, 1.91(NOx 換算時)	文献[M.22]
二酸化窒素	NO_2	1.91	文献[M.22]
アンモニア	NH_3	0.72	0.771(0℃, 1atm). 文献[M.23]を 20℃に換算
メタン	CH_4	0.67	0.717(0℃, 1atm). 文献[M.23]を 20℃に換算
非メタン炭化水素	NMHC	0.579	文献[M.21]

6. 測定条件

測定にあたっては測定対象とする機械（ 以下「測定対象機械」という．）または説明変数以外の要因で測定値が変動することを回避することを目的として， 測定対象機械の稼働，および大気の条件を設定する．

6.1　測定対象機械の稼働条件

測定対象機械は， 測定する動作以外の要因で原動機の負荷が変動することがないように稼働条件を設定する．

測定対象機械の稼働条件は以下とする．

a) **装備**：バケットは標準のものを使用し，その他の装備も製造業者が指定する標準状態とする．ただし，動作，質量及び質量バランスに影響を与えない場合はこの限りではない．

b) **使用燃料**：**付属資料 F.1** とする．

c) **燃料充填量**: 燃料タンク容量の 3 分の 2 以上とする．

d) **冷却ファン**： 冷却ファンの回転速度を可変制御する構造の場合はフルアクセルにおいてファン回転速度を最高回転速度の 70%以上に設定する． ただし， エンジン回転の低速時にファン回転数が低下することは許容する．

e) **補機類**：エアコン等の補記類を使用した場合には記録する．

なお， オンロード自働車の路上走行試験ではエアコンを使用している． 夏季においてエアコンを使用しないと**図 6.1** のように高温になるので熱中症の危険がある．

図 6.1　夏季における運転席の赤外線画像.

「温室効果ガスの測定方法-油圧ショベル 2019 年 4 月 国立研究開発法人 土木研究所」．温室効果ガスの亜酸化窒素，およびメタンの概況把握を目的とした測定方法であり，機械毎の測定数等の条件は個別の機械の評価が可能な仕様でない．

6.2　大気条件

大気条件は，原動機が標準的な条件で稼働すること，および測定機器が適する条件を考慮して選定することが望ましい．原動機の大気条件は以下の式(8)，(9)又は(10)のいずれかで計算した大気係数f_a (JIS D 006-1) が 0.93～1.07 (できれば 0.98～1.02 の範囲) となる大気圧，温度，および湿度の条件が望ましいがエンジン単体の台上試験のように調整できないため, 気温は 278～308（K）(5～35(℃))で雨天等の多湿な天候を避けて測定し，測定時のf_aを記録することが望ましい．f_aの計算に必要な外気の温度・湿度・大気圧は表 5.1 で示したようにセンサによる測定値，または気象庁の公表値とする．

測定機の大気条件は，各測定機の取扱説明書で確認する．

a) 無過給及び機械式過給エンジン

$$f_a = (99/P_d) \times (T/298)^{0.7} \tag{8}$$

b) 給気冷却器なし又は給気―空気冷却器付ターボ過給エンジン

$$f_a = (99/P_d)^{0.7} \times (T/298)^{1.2} \tag{9}$$

c) 給気―液体冷却器付ターボ過給エンジン

$$f_a = (99/P_d)^{0.7} \times (T/298)^{0.7} \tag{10}$$

ここで，T ：エンジンの空気取り入れ口における絶対温度 (K)，P_d ：乾燥大気圧 (kPa)

P_dは式(11)で計算する．

$$P_d = P_a - P_w \tag{11}$$

ここで，P_a : 大気圧 (kPa)，P_w: 水蒸気圧 (kPa)．P_wは，以下の式(12)または(13)で求める．

飽和水蒸気圧は，式(14)[M.24]または付属資料 F.3[M.24]による．

d) 通風型乾湿計の乾球温度及び湿球温度を使用する場合

$$P_w = P_{e2} - 0.5\,(\theta_1 - \theta_2) \times (P_a/755) \tag{12}$$

ここで，P_{e2} : θ_2の飽和水蒸気圧，θ_1 : 乾球温度 (K)，θ_2 : 湿球温度 (K)

e) 通風型乾湿計のデータから得られた相対湿度を使用する場合，

$$P_w = P_{e1} \times (U/100) \tag{13}$$

ここで，U : 相対湿度，P_{e1} : θ_1の飽和水蒸気圧．

$$P_e = \begin{bmatrix} \exp(-6096.9385\theta^{-1} + 21.2409642 \\ -2.711193 \times 10^{-2} \times \theta \quad + 1.673952 \times 10^{-5} \times \theta^2 \\ +2.433502 \times \ln\theta \quad) \end{bmatrix} \times 10^{-3} \tag{14}$$

ここで，P_e : θ の飽和水蒸気圧．

7. 原動機の仕事量の測定

原動機の仕事量の測定は任意とし，測定値はグロス軸出力とする．実機に搭載した原動機の仕事量を測定する方法は確立されていないため測定は任意とする. CAN (controller area network, 輸送用機械やロボット等の機器間のデータ転送に使われる規格) のデータロガーで取得した ECU (engine control unit) の信号や燃料消費量から推定すること等も可能であるが，これらは実測値でないことに留意する必要がある.

（補足）

図 4.1，図 4.2，および図 5.1 の動力は CAN のデータロガーで取得したものである.

なお, EU の ISM (in-service monitoring)[M.04]は，原動機の製造メーカに対して報告義務を課したものである. 製造メーカは ECU で機器を制御しているので扱いは容易であり, EU の ISM では ECU のデータも測定項目に含めている.

8. 排出ガスの濃度及び流量の測定

測定するガスは，表 2.2 とする．排出ガスの濃度と流量は時間変動が把握できる方法で直接測定する．測定のサンプリング周波数は 5Hz (0.2 秒間隔) を標準とし, 測定値の記録は 1Hz (1.0 秒間隔) に平均した値とする. 5Hz で記録し，後処理で平均して 1Hz の記録値を作成する方法でも良い.

（補足）

測定器によっては振動対策や温度管理が必要な場合もある. (例：防振架台上に計測器を設置，検出器，バルブ，配管などを 463±10K (190±10℃) に加熱して維持 ）.

8.1　濃度

排出ガスの濃度の測定機器は，道路運送車両の保安基準を定める告示に規定するものまたは，測定値の信頼性について公的機関の測定値で確認できるものとする.

（補足）

規制対象となっている排出ガス成分の分析計は，道路運送車両の保安基準の細目を定める告示[M.21][M.22]により規定されている（ 表 8.1 ）.

表 8.1　ガス成分と分析計

排出ガス成分	分析計
CO	非分散形赤外線分析計 (NDIR)
THC	加熱水素イオン化形分析計（HFID)
NMHC	ガスクロマトグラフ式分析計（GC-FID) 又は，選択燃焼式メタン分析計（NMC-FID)
CH_4	選択燃焼式メタン分析計（NMC-FID)
	ガスクロマトグラフ式分析計（GC-FID)
NO_x	化学発光分析計（CLD)
	加熱形化学発光分析計（HCLD)
CO_2	非分散形赤外線分析計（NDIR)

未規制の N_2O の分析計は日本では定められていないが，規制値が定められている米国の連邦規則（Title 40，§1065.275[M.25]）には，直線性の検証（linearity verification）が行われれば表 8.2 の分析計のいずれでも選択できる旨が示されている.

表 8.2　N_2O の分析計（ 米国連邦規則[M.25]より ）

分析計	備考
Nondispersive infrared (NDIR) analyzer	非分散形赤外線分析計
Fourier transform infrared (FTIR) analyzer	フーリエ変換赤外吸収法．一例として EPA Test Method 320.
Laser infrared analyzer	レーザ吸光法
Photoacoustic analyzer	光音響効果
Gas chromatograph analyzer	ガスクロマトグラフ式分析計

8.2　排気流量

排気流量はピトー管式流量計，または公的機関の測定で測定値の信頼性が確認された排気流量計 EFM (exhaust flow meter) で測定する.

なお, ECU の吸入空気量のデータを取得できる場合には取得する.

9. 測定時における動作

排出ガスの測定にあたっては建設機械による模擬動作を行う．建設機械を動作させる際には労働安全衛生法を遵守し，測定の計画時には危険を想定して回避策を講じる．

（補足）

建設機械による模擬動作を行って排出ガスを測定する．機械の操作にあたっては，労働安全衛生法に定める車両系建設機械運転技能講習（ 整地・運搬・積込み用及び掘削用 ）の修了証の交付を受けた者を運転者とする等，労働安全衛生法を遵守する．作業計画では機械および測定関係者の配置，動作の手順，測定機器の稼働，および想定した時間経過を示し，関係者に周知する．また，安全上の配慮事項については，危険予知訓練 KYT 等により意識を高める．留意点を以下に列記する．

・定常的な業務とは異なり計画どおりに進行しないことの想定．
・定めた手順での操作，および実験の記録等，運転者に慣れない仕事が増えることの考慮．
・同一の動作を比較的長い時間，繰り返して実施することによる運転者の体調変化の把握．
・カラーコーン，およびカラーバーを設置することによる作業範囲の明示．
・高温になる排気管等（ 図 9.1， 図 9.2 ）への接触等による火傷，火災，および機器の損傷の防止．
・排気管の加工，測定のための運転席への乗り降りの高所作業の注意喚起．

図 9.1　エンジンルームの赤外線画像.

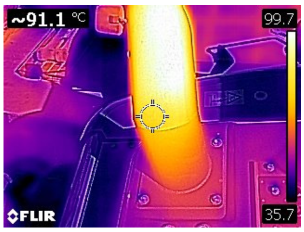


図 9.2　排気管の赤外線画像.

9.1　待機（ アイドリング ）

原動機の動力が小さい条件での排出ガスを把握することを目的とし，原動機をアイドリングさせた「待機（ アイドリング ）」を測定する．

9.1.1　動作条件

測定対象機械を停止させ，作業機を地面に下して実施する．ソーク時間（ エンジン停止時から次に始動するまでの時間 ），エンジンスロットル（ アクセルダイヤル，アクセルレバー ）の設定，およびアイドリングストップ機能の有無・設定を測定記録に記載する．

（補足）

特定特殊自動車排出ガスの規制等に関する法律に基づくディーゼル特殊自動車排出ガス

の測定方法[M.22]では，冷機状態試験，および暖機状態試験を以下で定めている．
-(a) 冷機状態試験: エンジン及び排気後処理装置を室温まで自然冷却された後の冷機状態試験，又は強制冷却しエンジン冷却液及び潤滑油の温度，排気後処理装置及び全てのエンジン制御装置が, 293 K (20℃ ）から 303 K (30 ℃ ）の間で安定した後，エンジンの始動と共に開始.
-(b) 暖機状態からのソーク期間: 冷機状態での NRTC モード試験終了後，エンジンを 20± 1 分の間停止させた状態.
-(c) 暖機状態試験:ソーク期間後直ちにエンジン始動操作を開始した時点から開始.

図 2.2 の待機はコールドスタート（ ソーク時間 6h 以上 ）での測定値であり， 図 4.1 および図 4.2 は測定開始前にエンジンを暖めた後（ 上記の暖気状態ではない ）の待機の測定値である．N_2O はコールドスタートの待機で測定値が特異となることがないこと （ 図 2.2 ），コールドスタートの待機が実情に近いこと， および本測定方法は個別の機械の評価ではなく排出特性の把握を目的としていることから， 原則としてコールドスタートで測定することとする． 図 9.3 はコールドスタートでの排出ガスおよびエンジン冷却水温度の時間変化例である．

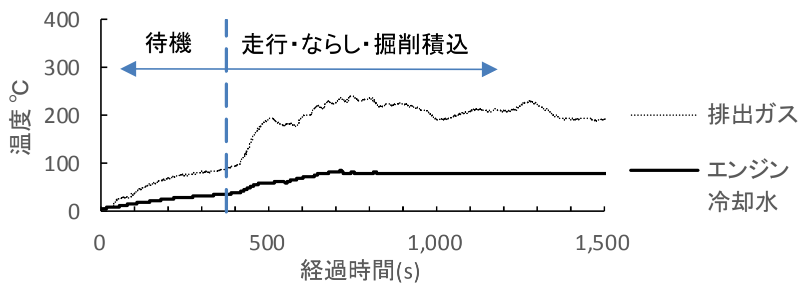


図 9.3　排出ガスおよびエンジン冷却水温度の時間変化例

なお， EU の ISM (in-service monitoring)[M.04]では，暖機運転後に測定を開始することを定めている．

9.1.2　測定数

1 回 1200 秒の測定を 3 回実施する．
なお，この測定数は研究の進捗により見直す．

（補足）
近年の建設機械にはアイドリングストップ機能が装備されているが， 測定時にはその機能を解除する． 本測定方法での待機の測定値は建設機械を使用する実情と異なることに留意することが必要である．

「温室効果ガスの測定方法-油圧ショベル 2019 年 4 月 国立研究開発法人 土木研究所」．温室効果ガスの亜酸化窒素，およびメタンの概況把握を目的とした測定方法であり，機械毎の測定数等の条件は個別の機械の評価が可能な仕様でない．

9.2　ならし（模擬動作）

原動機の動力が大きい条件での排出ガスを把握することを目的とし，「ならし」の模擬動作を測定する.

9.2.1　動作条件

平坦かつ水平な地面に履帯前後方向と作業機の動作方向が同一になるように機械を配置し，走行を停止した状態で作業機を動作させる. 動作時はエンジンスロットル（アクセルダイヤル，アクセルレバー）を最大位置，少なくとも一つのレバーは最大ストロークとし，可能な限り素早く操作する. ソーク時間（エンジン停止時から次に始動するまでの時間），直前の動作，およびエンジンスロットル（アクセルダイヤル，アクセルレバー）の設定を測定記録に記載する.

(補足)

通常作業がアイドリング後に行われることを想定し，原則として「待機」試験後に実施する. なお，負荷の大きい動作後とアイドリング後では排出ガスの特性が異なる.

9.2.2　模擬動作

ならし 1 サイクルの模擬動作パターンは次のとおりとする（文献[M.16]引用. 図 9.4 参照）.

① 開始姿勢　アームヒンジピン，バケットヒンジピン及びバケットつめ先が一直線になるようにフロントを最大に伸ばし，つめ先の地上高さを 30cm 以内におく.

② 水平引き　ブームを上げながらバケットつめ先が表 9.1 ならし距離 L に到達するまでバケットつめ先が地面と接触しないようにアームを引く. この間ブームとアームだけ操作し，バケットつめ先との間隔は 30cm 以内を目標とする.

③ 開始姿勢に戻る　ブーム下げ及びアーム押しを操作し開始姿勢に戻る.

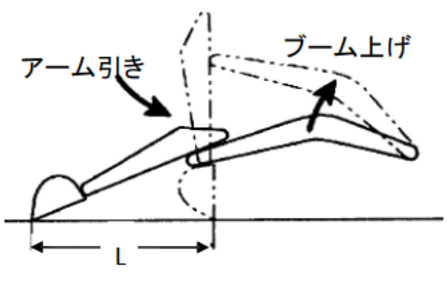


図 9.4　ならし動作

「温室効果ガスの測定方法-油圧ショベル 2019 年 4 月 国立研究開発法人 土木研究所」. 温室効果ガスの亜酸化窒素，およびメタンの概況把握を目的とした測定方法であり，機械毎の測定数等の条件は個別の機械の評価が可能な仕様でない.

表 9.1　ならし距離

クラス（Vs）	標準バケットの定格（山積）容量[M.17]・範囲	*L*（m）
0.28m^3	0.25m^3 以上～0.36m^3 未満	2.5
0.45m^3	0.36m^3 以上～0.47m^3 未満	3.5
0.5 m^3	0.47m^3 以上～0.55m^3 未満	4.0
0.6 m^3	0.55m^3 以上～0.7 m^3 未満	4.0
0.8 m^3	0.7 m^3 以上～0.9 m^3 未満	4.5
1.0 m^3	0.9 m^3 以上～1.05m^3 未満	4.5
1.1 m^3	1.05m^3 以上～1.3 m^3 未満	4.5
1.4 m^3	1.3 m^3 以上～1.7 m^3 未満	5.0
1.9 m^3	1.7 m^3 以上～2.4 m^3 未満	5.0

9.2.3　測定数

ならしの測定は，3 人の運転者で実施する．各運転者は 9.2.2 の①～③の動作を 5 サイクル行う度に小休止しながら合計で 50 サイクルになるまで繰り返す.

（補足）

図 9.5 は 10 サイクルで小休止しながら連続測定した際の測定値の例である．燃料消費量の測定方法を定めた JCMAS H020:2014[M.16]の「ならし」の測定では 1 回 10 サイクルの測定を 5 回行い所要時間の最長と最短の 2 回の測定値の除いた 3 回の測定値の平均値を算出することとしているので実質的に 50 サイクル測定して 30 サイクルの測定値を得ることになる．本測定方法で異なる数量としたのは以下の理由による.

・図 2.2 のならしは 3 人の運転手でそれぞれ 100 サイクル測定したものである．50 サイクル以下の 600 s の測定値と 100 サイクルの測定値で大きな差がなかったので 50 サイクルに減じることとした．しかし, 3 人の測定値の平均でも約 30～40%の誤差率（95%の確率での母平均の推定値の片側の幅）となった[M.15]ので 3 人以上で測定することが望ましいと考えた.

・10 サイクルの動作を連続すると運転者の疲労感が大きいので 5 サイクルごとに小休止することとした.

本測定方法の測定では 50 サイクルを 3 人で測定するので実質的に 150 サイクルの測定値を得たことになる．排出ガスは燃料消費量とは異なり 0 に近い値に抑制しているので誤差率が大きくなることが考えられる．誤差率が大きいので測定数を増やす必要があると短絡的に解釈されることがないように留意する必要がある.

「温室効果ガスの測定方法-油圧ショベル 2019 年 4 月 国立研究開発法人 土木研究所」．温室効果ガスの亜酸化窒素，およびメタンの概況把握を目的とした測定方法であり，機械毎の測定数等の条件は個別の機械の評価が可能な仕様でない.

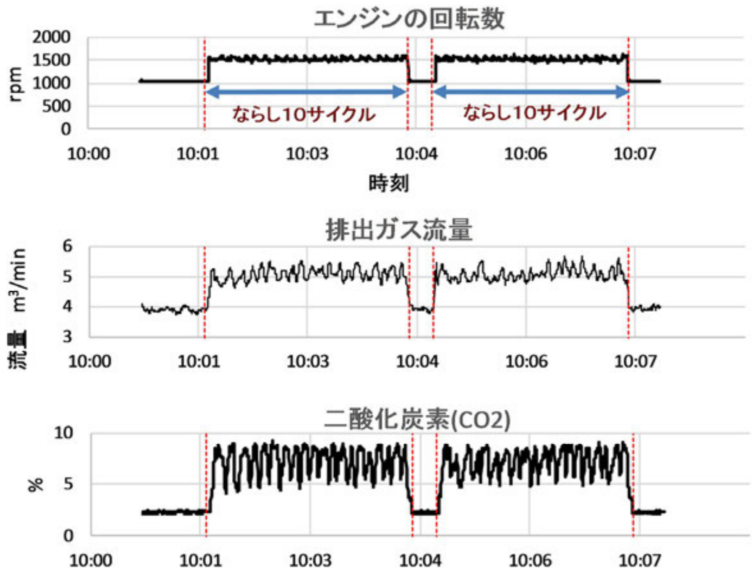


図 9.5　 2 回で 20 サイクルのならし動作を測定値した例

9.3　その他の測定

その他の測定は測定対象機械の特性に応じて任意に実施する.

（補足）

黒煙の測定は光吸収係数測定器 （ オパシメータ ） による方法が簡便である. 測定方法は「道路運送車両の保安基準の細目を定める告示【2008. 03. 25】別添 109」[M.26] に準じる. 近年販売される建設機械にはディーゼル微粒子捕集フィルターDPF (Diesel particulate filter) が搭載されている. 粒子状物質 PM を光吸収係数測定器 （ オパシメータ ） で測定した事例では皆無 (最新規制の 1/50 以下となる $0.01m^{-1}$ 以下 ） であった.

10. 測定結果の整理

測定記録には測定番号を設定するとともに日時, 場所, 気象, 建設機械の仕様, 運転モード等の測定条件, および測定機器を明示する. また, 測定値は計算プログラムによる後処理を考慮し, 統一した様式で整理する.

測定記録に付す測定条件は表 10.1, および表 10.2 とする. 表 10.2 は「待機」1200 秒, または「ならし」50 サイクルの測定ごとに作成する.

表 10.1　測定記録-測定条件(1).

			記載例・備考
測定場所			茨城県つくば市南原 （緯度,経度)=(36.1263, 140.0714)
建設機械			
	製造業者名		○○機械製作所
	建設機械の名称	油圧ショベル	油圧ショベル
	機械型式		
	定格出力(kW)ネット (JIS　D　0006－1)		118
	機械質量(kg) (燃料･作動油含むが運転者は含まない)		例 1: 19600 例 2: 20100 (ただし,カタログ記載の運転質量)
	標準バケットの定格（山積）容量(m^3) (JIS　A　8403－4)		0.8
CAN のデータロガー			
	製造業者名		
	型式		
	測定値		エンジン回転数・トルク,および冷却水温度
	サンプリング周波数		5Hz
排気流量計 (EFM :exhaust flow meter)			
	製造業者名		
	型式		
	測定値		流量,ガスの温度,およびガスの圧力
	サンプリング周波数		5Hz
排出ガス濃度の測定器 1			
	製造業者名		
	型式		
	測定値		CO_2, CO, CH_4, N_2O, NO, NO_2, NMHC, および NH_3 の濃度,ならびに気温
	サンプリング周波数		5Hz
排出ガス濃度の測定器 2			
	製造業者名		
	型式		
	測定値		
	サンプリング周波数		5Hz

表 10.2　測定記録-測定条件(2).

		記載例・備考
測定番号		2017M1-01 （ 識別しやすいこと,および整列しやすいことを考慮して設定）
記録周波数		例 1:5Hz 例 2:5Hz でサンプルしたデータを平均処理して 1Hz で記録
測定日時		
測定日		2017 年 12 月 24 日
直前の動作		例 1:なし 例 2:ならし（模擬動作）
ソーク時間*1		例 1:6h 以上 例 2:5m
エアコン等の補機類の使用		例 1:エアコン(冷房)使用 例 2:灯火使用
測定開始時刻　時:分		10:46
測定終了時刻　時:分		11:04
気象（測定開始時点）		
気温（℃）		9.4
湿度(%)		40
大気圧(hPa)		1019.5
運転者の年齢,労働安全衛生法に基づく技能講習の種類(測定時に運転する機械にが該当するもの),および修了証交付年月日		40 歳, 車両系建設機械（整地等）, 平成 28 年 5 月 14 日
測定動作		ならし（模擬動作） 5 サイクル×10 回=50 サイクル

*1: エンジン停止時から次に始動するまでの時間

測定値は CSV または量販されている表計算ソフトのファイル形式で整理する．ファイル名は測定を開始した日時を原則とする（ 例 : 2016_12_24-08_42.csv ）．一つのファイルに複数の測定番号の測定データが含まれる場合には対応表を作成する．ファイルに格納するデータは(A) : 測定器から出力された時刻別の値（ いわゆる「生データ」 ）のみとする（ ただし，測定器で 1Hz への平均処理を行う場合は平均後の値)．測定値の整理例を図 10.1 に示す．測定値は計算プログラムにより後処理を行うことを考慮し，データの最初の行，および各データの列は全ての測定で同一となるようにする（ 例:データは 3 行目から開始する．亜酸化窒素は 3 列めとする．）．(A)を加工して得られる値（ 例 : 濃度と流量から計算した排出ガス量(g) ）は別ファイルとし，生データと加工したデータは明確に区別できるようにする．

Datetime	排出ガス濃度の測定器							排出ガス流量の測定器							CANデータ			
	二酸化炭素 (CO_2) (%)	亜酸化窒素 (N_2O) (ppm)	メタン (CH_4) (ppm)	一酸化炭素 (CO) (ppm)	一酸化窒素 (NO) (ppm)	二酸化窒素 (NO_2) (ppm)	外気温度 (℃)	time	Exh flow rate (m³/min)	Exh temp (degC)	Exh press (kPa)	Amb temp (degC)	Amb press (kPa)	Amb humidity (%)	t[s]	EngSpeed[rpm]	ActualEngPercentTorque[%]	EngCoolantTemp[deg]
2016/12/24 8:42:16.3	0.017	0.292	1.54	0	0	0	7.7	192	0.046	9.161	102	7.385	102.1	55.31	12.85	0	17	7
2016/12/24 8:42:16.5	0.056	0.259	2.042	0.174	0.014	0	7.6	192.2	0.101	8.368	102	6.976	102.1	55.22	13.05	0	17	7
2016/12/24 8:42:16.7	0.01	0.205	2.329	0.56	0	0	7.7	192.4	0.067	8.255	102	7.076	102.1	55.24	13.25	134.3	61	7
2016/12/24 8:42:16.9	0.018	0.464	1.82	1.346	0	0	7.7	192.6	0.075	8.511	101.7	7.192	102.1	55.09	13.45	134.3	61	7
2016/12/24 8:42:17.1	0	0.458	1.7	0	0	0.035	7.7	192.8	0.427	8.096	102.3	7.221	102.1	55.25	13.65	172.6	61	7
2016/12/24 8:42:17.3	0.099	0.562	2.586	0	0.701	0.078	7.6	193	0.386	7.806	101.8	7.381	102.1	55.06	13.85	635.6	59	7
2016/12/24 8:42:17.5	0.022	0.553	1.54	0	0.709	0	7.6	193.2	0.539	7.996	102	7.065	102.1	55.02	14.05	900.5	52	7
2016/12/24 8:42:17.7	0.085	0.63	2.043	0	0.326	0	7.7	193.4	0.672	8.249	102.8	7.236	102.1	55.09	14.25	1036	37	7
2016/12/24 8:42:17.9	0.065	0.802	1.461	0	0	0	7.7	193.6	1.352	8.341	101.3	7.268	102.1	55.39	14.45	1041	36	7
2016/12/24 8:42:18.1	0.027	1.032	1.759	0	0	0	7.7	193.8	2.347	7.599	102.1	7.196	102.1	55.32	14.65	1028	36	7
2016/12/24 8:42:18.3	0.354	0.961	1.606	0	0.661	0	7.7	194	2.791	8.304	101.8	7.246	102.1	55.27	14.85	1039	34	7

図 10. 1　測定値の整理例

11. あとがき

本測定方法は，国立研究開発法人土木研究所が平成 27 年度から平成 30 年度の 4 年間に「建設機械における温室効果ガス及び排出ガスの影響評価に関する研究」として国土交通省より配分を受けた交付金で実施した研究に基づいている．土木研究所における測定方法・測定結果については，他の機関の測定方法・測定結果と比較することも必要と考えている．土木研究所における測定方法は研究の各年度で見直してきたが，今後も知見の進展に伴い見直しをすることが望ましい．

12. 文献

[M. 01] European Commission: Press release, Commission welcomes Member States' agreement on robust testing of air pollution emissions by cars Brussels, 28 October 2015.

[M. 02] 深野泉: これが欧州の RDE 試験だ, Nikkei Automotive, 2016.11.

[M. 03] REGULATION (EU) 2016/1628 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 14 September 2016.

[M. 04] COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU) 2017/655 of 19 December 2016.

[M. 05] 国土交通省:排出ガス不正事案を受けたディーゼル乗用車等検査方法見直し検討会最終とりまとめ　平成 29 年 4 月 20 日.

[M. 06] 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.

[M. 07] 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.

[M. 08] Mridul Gautam: Testing for Exhaust Emissions of Diesel Powered Off-Road Engines, Prepared for the California Air Resources Board and the California EnvironmentalProtection Agency, ARB Contract Number 98-317, 2002.

[M. 09] U.S. Environmental Protection Agency, Populations, Activity and Emissions of Diesel Nonroad Equipment in EPA Region 7, 2010 (revised by EPA stuff in 2011).

「温室効果ガスの測定方法-油圧ショベル　2019 年 4 月　国立研究開発法人　土木研究所」．温室効果ガスの亜酸化窒素，およびメタンの概況把握を目的とした測定方法であり，機械毎の測定数等の条件は個別の機械の評価が可能な仕様でない．

[M.10] Tanfeng Cao, Thomas D. Durbin, Robert L. Russell, David R. Cocker, George Scora, Hector Maldonado, Kent C. Johnson: Evaluations of in-use emission factors from off-road construction equipment, ATMOSPHERIC ENVIRONMENT 147, pp.234-245, 2016.

[M.11] Fu Mingliang, Ge Yunshan, Tan Jianwei, Zeng Tao, Liang, Bin: Characteristics of typical non-road machinery emis-sions in China by using portable emission measurement system, SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT, vol.437, pp.255-261, 2012.

[M.12] 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.

[M.13] 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.

[M.14] 吉永弘志: 建設機械の排出ガス測定にかかる信頼性向上と簡素化, 土木学会論文集 G(環境), Vo1.73, No.6, II_321-II_332, 2017.

[M.15] 吉永弘志, 新田恭士: 建設機械から排出される温室効果ガスの亜酸化窒素とメタンの概況把握を目的とした排出ガスの測定, 建設機械施工, vol.71, No.4, 2019.

[M.16] 一般社団法人日本建設機械施工協会標準部会, JCMAS H020:2014. 土工機械－エネルギー消費量試験方法—油圧ショベル

[M.17] JIS　A　8403－4　土工機械－油圧ショベル－第4部：バケットの定格容量

[M.18] JIS　D　0006－1　土工機械－エンジン－第1部：ネット出力試験方法

[M.19] JIS　K　2204　　軽油

[M.20] JIS　K　2249－4　原油及び石油製品-密度の求め方-第4部：密度・質量・容積換算表

[M.21] 道路運送車両の保安基準の細目を定める告示【2009.07.30】別添　42　軽・中量車排出ガスの測定方法

[M.22] 道路運送車両の保安基準の細目を定める告示【2010.03.18】別添　43　ディーゼル特殊自動車排出ガスの測定方法

[M.23] 平成 15 年理科年表

[M.24] 道路運送車両の保安基準の細目を定める告示【2008.03.25】別添　41（重量車排出ガスの測定方法）

[M.25] ELECTRONIC CODE OF FEDERAL REGULATIONS, Title 40, PART 1065－ENGINE-TESTING PROCEDURES, §1065.275 N_2O measurement devices.

[M.26] 道路運送車両の保安基準の細目を定める告示【2008.03.25】別添　109　無負荷急加速時に排出される排出ガスの光吸収係数の測定方法

付属資料

F.1　燃料

使用する軽油の標準規格は表 F.1 とし，品質の確認ができる書類を添付することとするが，燃料の調達・交換が実務的に困難な場合は一般のガソリンスタンドで供給されている表 F.2 とし, F.2 に例示する成分分析を行う．いわゆるバイオ燃料は排出ガスの特性が異なるので使用しない．

表 F.1　測定時に使用する燃料．台上試験時の燃料の規格[M.22]に準拠．

燃料の性状又は物質名	単位	基準		試験方法
		最小	最大	
セタン指数		53	60	JIS K 2280
密度 g / cm^3		0.815	0.840	JIS K 2249
蒸留性状 50% 留出温度 90% 留出温度 終点	 K （℃） K （℃） K （℃）	 528 (255) 573 (300) －	 568 (295) 618 (345) 643 (370)	JIS K 2254
引火点	K （℃）	331 (58)	－	JIS K 2265-3
動粘度（試験温度 303 K（30℃））	mm^2 / s	3.0	4.5	JIS K 2283
総芳香族	vol %	－	25	JPI 法 HPLC*1
多環芳香族	vol %	－	5.0	JPI 法 HPLC*1
硫黄分	wt - ppm	－	10	以下のうちいずれかの方法 JIS K 2541-1 JIS K 2541-2 JIS K 2541-6 JIS K 2541-7
脂肪酸メチルエステル(FAME)	%	－	0.1	濃度測定方法告示に規定する方法*2
トリグリセリド	%	－	0.01	

*1: 海外では IP391(FAME 混合軽油)（あるいは同等の EN 12916），および IP548(軽油)が最も普及しているが，道路運送車両の保安基準の細目を定める告示[M.22]に規定する JPI 法とする．IP391，および IP548 での mass%の測定値は，軽油および各芳香成分の比重で vol%に換算することが必要である．

*2: 経済産業省告示第七十八号: 揮発油等の品質の確保等に関する法律施行規則（昭和五十二年通商産業省令第二十四号）第二十二条第五項、第二十三条第五項及び別表第五の軽油生産業者、軽油輸入業者及び軽油加工業者の委託に係る分析の項の試験方法の欄第四号の規定に基づき、軽油中の脂肪酸メチルエステル又はトリグリセリドの濃度の測定方法として経済産業大臣が定める方法．

表 F.2　一般のガソリンスタンド等で市販されている軽油．JIS K 2204 文献[M.19] で定める 2 号．

燃料の性状又は物質名	仕様	根拠
セタン指数	45 以上	品質確保法による軽油(B0)の強制規格. JIS K2204-2007 の 1 号, 2 号に適合.
密度	0.86g/cm^3 以下	JIS K2204-2007.
蒸留性状 90%留出温度	360℃以下	品質確保法による軽油(B0)の強制規格. JIS K2204-2007 の 1 号，2 号に適合.
引火点	50℃以上	JIS K2204-2007(1 号，2 号に適合).
動粘度(30℃)	2.5mm^2/s 以上	
硫黄分	0.001 質量%以下	品質確保法による軽油(B0)の強制規格. JIS K2204-2007 の 1 号，2 号に適合.
脂肪酸メチルエステル	0.1 質量%以下	品質確保法による軽油(B0)の強制規格.
トリグリセリド	0.01 質量%以下	

F.2　燃料の成分分析

燃料の成分分析を行う際には，建設機械から燃料を抜き取り（ 図 F.2.1 ），分析機関に委託する．燃料は危険物として扱う必要があるため，分析機関に直接持ち込むか，または専用の容器（ 図 F.2.2 ）に入れて搬送可能な運送会社に搬送を委託する．分析機関には運送会社，および専用の容器の手配を含んで委託できる機関と搬送関係を含めることができない機関の双方がある．

図 F.2.1 燃料の抜き取り

図 F.2.2 配送用の容器

分析結果の事例を図 F.2.3 に示す．

		試験方法	単位	
密度：振動式 15℃		JIS K2249	g/cm3	0.8364
引火点：PMCC	PMCC法	JIS K2265-3	℃	69.5
動粘度：30℃		JIS K2283	mm²/s	3.836
蒸留：常圧	初　留　点	JIS K2254	℃	174.0
	５%留出		℃	203.5
	１０%留出		℃	218.0
	２０%留出		℃	241.5
	３０%留出		℃	258.0
	４０%留出		℃	271.5
	５０%留出		℃	283.0
	６０%留出		℃	294.0
	７０%留出		℃	306.0
	８０%留出		℃	319.5
	９０%留出		℃	338.0
	９５%留出		℃	354.5
	９７%留出		℃	-
	終　点		℃	364.5
	全留出量		vol%	97.5
	残油量		vol%	1.5
	減失量		vol%	1.0
ｾﾀﾝ指数	ＪＩＳ法	JIS K2280		55.4

図 F.2.3 燃料の分析結果の事例.

		試験方法	単位	
脂肪酸ﾒﾁﾙｴｽﾃﾙ濃度		品確法告示第78号	mass%	<0.1
ﾄﾘｸﾞﾘｾﾘﾄﾞ濃度		品確法告示第78号	mass%	<0.01
軽油組成分析（JPI法）	飽和分	JPI-5S-49	vol%	76.2
	オレフィン分		vol%	0.0
	一環芳香族分		vol%	19.8
	二環芳香族分		vol%	2.9
	三環芳香族以上		vol%	1.1
	総芳香族		vol%	23.8
	多環芳香族		vol%	4.0
軽油組成分析（IP法）	一環芳香族分	IP548	mass%, vol%換算値	23.0, 21.9（O-ｷｼﾚﾝの比重 0.8790で換算）
	二環芳香族分		mass%, vol%換算値	2.1, 1.8（1-ﾒﾁﾙﾅﾌﾀﾚﾝの比重 1.001で換算）
	三環芳香族分以上		mass%, vol%換算値	1.2, 0.9（ﾌｪﾅﾝﾄﾚﾝの比重 1.180で換算）
	総芳香族		mass%, vol%換算値	26.3, 24.6
	多環芳香族		mass%, vol%換算値	3.3, 2.7
硫黄分：紫外蛍光法		JIS K2541-6	ppm	8

＊軽油組成　JPI法

本サンプルは、オレフィン分が精度規定範囲外となります。

＊軽油組成　IP法

本サンプルは、FAMEが含有されていないことが確認されましたので、試験法をIP391（FAME混合軽油）からIP548（軽油）に変更しました。

図 F.2.3 燃料の分析結果の事例 （ つづき ）.

F.3　水の飽和水蒸気圧表

単位：kPa

温度 K(°C)	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
273(0)	0.61121	0.61567	0.62015	0.62467	0.62921	0.63378	0.63838	0.64301	0.64767	0.65236
274(1)	0.65708	0.66183	0.66661	0.67142	0.67626	0.68114	0.68604	0.69098	0.69594	0.70094
275(2)	0.70597	0.71103	0.71613	0.72126	0.72641	0.73161	0.73683	0.74209	0.74738	0.75270
276(3)	0.75806	0.76345	0.76888	0.77434	0.77983	0.78536	0.79092	0.79652	0.80215	0.80782
277(4)	0.81352	0.81926	0.82503	0.83084	0.83669	0.84257	0.84849	0.85445	0.86044	0.86647
278(5)	0.87254	0.87864	0.88479	0.89097	0.89719	0.90344	0.90974	0.91607	0.92245	0.92886
279(6)	0.93531	0.94180	0.94834	0.95491	0.96152	0.96817	0.97486	0.98160	0.98837	0.99519
280(7)	1.0020	1.0089	1.0159	1.0299	1.0299	1.0370	1.0441	1.0512	1.0584	1.0657
281(8)	1.0729	1.0803	1.0876	1.0951	1.1025	1.1100	1.1176	1.1252	1.1328	1.1405
282(9)	1.1482	1.1560	1.1638	1.1717	1.1796	1.1876	1.1956	1.2037	1 2118	1.2199
283(10)	1.2281	1.2364	1.2447	1 2530	1.2614	1.2699	1.2784	1.2869	1 2955	1.3042
284(11)	1.3129	1.3217	1.3305	1.3393	1.3482	1.3572	1.3662	1.3753	1.3844	1.3935
285(12)	1.4028	1.4121	1.4214	1.4308	1.4402	1.4497	1.4593	1.4689	1.4785	1.4882
286(13)	1.4980	1.5078	1.5177	1.5277	1.5377	1.5477	1.5579	1.5680	1.5783	1.5886
287(14)	1.5989	1.6093	1.6198	1.6303	1.6409	1.6516	1.6623	1.6730	1.6839	1.6948
288(15)	1.7057	1.7167	1.7278	1.7390	1.7502	1.7614	1.7728	1.7842	1.7956	1.8071
289(16)	1.8187	1.8304	1.8421	1.8539	1.8658	1.8777	1.8897	1.9017	1.9138	1.9260
290(17)	1.9383	1.9506	1.9630	1.9755	1.9880	2.0006	2.0133	2.0260	2.0388	2.0517
291(18)	2.0647	2.0777	2.0908	2.1040	2.1172	2.1305	2.1439	2.1574	2.1709	2.1845
292(19)	2.1982	2.2120	2.2258	2 2397	2.2537	2.2678	2.2819	2.2961	2.3104	2.3248
293(20)	2.3392	2.3538	2.3684	2.3831	2.3978	2.4127	2.4276	2.4426	2.4577	2.4729
294(21)	2.4882	2.5035	2.5189	2.5344	2.5500	2.5657	2.5814	2.5973	2.6132	2.6292
295(22)	2.6453	2.6615	2.6777	2.6941	2.7105	2.7271	2.7437	2.7604	2.7772	2.7941
296(23)	2.8110	2.8281	2.8452	2.8625	2.8798	2.8972	2.9148	2.9324	2.9501	2.9679
297(24)	2.9858	3.0037	3.0218	3.0400	3.0583	3.0766	3.0951	3.1136	3.1323	3.1511
298(25)	3.1699	3.1889	3.2079	3 2270	3.2463	3.2656	3.2851	3.3046	3.3243	3.3440
299(26)	3.3639	3.3838	3.4039	3.4240	3.4443	3.4647	3.4852	3.5057	3.5264	3.5472
300(27)	3.5681	3.5891	3.6102	3.6315	3.6528	3.6742	3.6958	3.7174	3.7392	3.7611
301(28)	3.7831	3.8052	3.8274	3.8497	3.8722	3.8947	3.9174	3.9402	3.9631	3.9861
302(29)	4.0092	4.0325	4.0558	4.0793	4.1029	4.1266	4.1505	4.1744	4.1985	4.2227
303(30)	4.2470	4.2715	4.2960	4.3207	4.3455	4.3705	4.3955	4.4207	4.4460	4.4715
304(31)	4.4970	4.5227	4.5485	4.5745	4.6005	4.6267	4.6531	4.6795	4.7061	4.7328
305(32)	4.7597	4.7867	4.8138	4.8410	4.8684	4.8959	4.9236	4.9514	4.9793	5.0074
306(33)	5.0356	5.0639	5.0924	5.1210	5.1497	5.1786	5.2077	5.2368	5 2662	5.2956
307(34)	5.3252	5.3550	5.3848	5.4149	5.4451	5.4754	5.5059	5.5365	5.5672	5.5981
308(35)	5.6292	5.6604	5.6918	5.7233	5.7549	5.7868	5.8187	5.8508	5.8831	5.9155
309(36)	5.9481	5.9808	6.0137	6.0468	6.0800	6.1133	6.1469	6.1805	6 2144	6.2484
310(37)	6.2825	6.3169	6.3513	6.3860	6.4208	6.4558	6.4909	6.5262	6.5617	6.5973
311(38)	6.6331	6.6691	6.7052	6.7415	6.7780	6.8147	6.8515	6.8885	6.9256	6.9630
312(39)	7.0005	7.0382	7.0760	7.1141	7.1523	7.1907	7.2292	7.2680	7.3069	7.3460
313(40)	7.3853	7.4248	7.4644	7.5042	7.5443	7.5845	7.6248	7.6654	7.7062	7.7471
314(41)	7.7882	7.8296	7.8711	7.9128	7.9546	7.9967	8.0390	8.0815	8.1241	8.1670
315(42)	8.2100	8.2532	8.2967	8.3403	8.3841	8.4282	8.4724	8.5168	8.5615	8.6063
316(43)	8.6513	8.6965	8.7420	8.7876	8.8335	8.8795	8.9258	8.9723	9.0189	9.0658
317(44)	9.1129	9.1602	9.2077	9 2555	9.3034	9.3516	9.3999	9.4485	9.4973	9.5463
318(45)	9.5956	9.6450	9.6947	9.7446	9.7947	9.8450	9.8956	9.9464	9.9974	10.049
319(46)	10.100	10.152	10.204	10.256	10.308	10.361	10.414	10.467	10.520	10.573
320(47)	10.627	10.681	10.735	10.790	10.845	10.899	10.955	11.010	11.066	11.122
321(48)	11.178	11.234	11.291	11.348	11.405	11.462	11.520	11.578	11.636	11.694
322(49)	11.753	11.812	11.871	11.930	11.990	12.049	12.110	12.170	12.231	12.292
323(50)	12.353	12.414	12.476	12.538	12.600	12.663	12.725	12.788	12.852	12.915

A.6　研究発表（部分的に電子データ）

本研究においては以下の論文等を発表した.著作権を有する法人等に許可を得て転載したもの（“○”印）を次頁以降に示す．また，発表会での説明資料（“□”印）を電子データで添付する.

番号	引用文献の番号	論文等	転載	説明資料
A6.01	[R.66]	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.	○	
A6.02	[R.67]	吉永弘志，野村正之：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，平成 28 年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集, pp.109-114, 2016.	○	□
A6.03		吉永弘志，梶田洋規：車載式測定器による建設機械の実稼働での排出ガスの測定，土木技術資料, 58-12, pp.40-43, 2016.		
A6.04	[R.68]	吉永弘志：建設機械の排出ガス測定にかかる信頼性向上と簡素化，土木学会論文集 G(環境), Vol.73, No.6, pp. Ⅱ_321-Ⅱ_332, 2017.	○	□
A6.05	[R.69]	吉永弘志，排出ガスの測定値から読み解く燃費・熱効率と燃費改善策，平成 29 年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集, pp.131-136, 2017.	○	□
A6.06		建設機械が各種の動作で排出する温室効果ガスの測定，国立研究開発法人土木研究所 Web マガジン, 2018		
A6.07		吉永弘志：建設機械が排出する亜酸化窒素の温室効果に関する研究，第 16 回　環境研究シンポジウム, 2018		□
A6.08	[R.70]	吉永弘志，新田恭士：建設機械から排出される温室効果ガスの亜酸化窒素とメタンの概況把握を目的とした排出ガスの測定，建設機械施工, vol.71, No.4, 2019.	○	

建設機械における稼働時の温室効果ガスの検討

(元)（国研）土木研究所　野村 正之
Masashi Nomura

1. はじめに:検討の背景

建設機械の排出ガス規制は、「特定特殊自動車排出ガスの規制等に関する法律」（以下、「オフロード法」という。）に基づき、エンジンメーカがエンジンの型式指定を受け、車両メーカが型式指定を受けたエンジンを搭載した車両を基準適合させて製造・基準適合表示を付して出荷し、ユーザーは適合表示を付した車両を使用することになっており、ユーザーは、排出ガスの黒煙汚染度又は光吸収係数の値が基準値を超える場合に整備命令や罰則を受ける枠組みで施行されている。

オフロード法で規定する排出ガス試験は、エンジンが搭載される機械の種類に関係なく特定特殊自動車（建設機械、農業機械、産業機械等が含まれる。）全般の標準的な一律の運転モード（負荷と回転数の組合せ）で実施される。エンジンがこの試験による排出ガス値の基準値を下回る場合に、排出ガス規制に適合したことになり、様々な機械に搭載されることになる。

しかし、全てのエンジンの試験運転モードが一律であるため、それぞれの機械の運転モードにおける排出ガス値については明らかになっておらず、実際の稼働中にどの程度の排出ガスを排出しているかは不明である。これは、環境影響評価の場合などに、個々の事業や工事における排出ガスの影響を評価する場合に評価の精度に影響を及ぼす可能性がある。

また、近年のエンジン制御は、電子化（機械的メカニズムによる制御でなくプログラムソフトによる制御）されており、規定の運転試験モード以外の運転条件では、排出ガス値よりも、より燃費の向上を重視した制御を行うことも比較的容易になっている。このため、燃料の燃焼状態が変動し規制ガスの発生状況に変動を誘発する場合があり、排出ガス等の変化に注意する必要性を招来している。

2. 検討の課題

オフロード法の強化により、2011（平成 23）年規制としてPM排出量が9割削減（たとえば、定格出力 130kW 以上 560kW 未満のもので 0.17g/kWh から 0.02g/kWh）とされ、さらに 2014（平成 26）年規制として NOx 排出量が5割削減（たとえば、定格出力 130kW 以上 560kW 未満のもので 3.60g/kWh から 2.0g/kWh）とされ、大幅に強化されたことに対応して、ディーゼル微粒子捕集フィルター（以下「DPF」という。）の装着と尿素SCR（選択的触媒還元）の装着が実行または予定されている。DPF装着車両は既に各社より販売されつつあるが、尿素SCR装着車両は平成 28 年度より日本国内市場に投入されていく予

日本工業出版「建設機械」 第 52 巻 5 号 pp.63-69. “建設機械における稼働時の温室効果ガスの検討”より転載.

定である(このため、土木研究所における研究においては、尿素SCRの装着の有無により研究プロセスを2分割せざるを得なかった)。これまでエンジン本体技術(コモンレール、排気再循環等)からエンジン後処理技術により排出ガスが低減しており、稼働状況における排出ガスの状況は不明である。特に、尿素SCRの導入は、温室効果ガス(以下、Green House Gas を略して「GHG」という。)の変動を招来する可能性もあり、新しいメカニズムを有する建設機械の排出ガス(以下、Exhaust Gas を略して「EG」という。)の発生状況を把握する必要がある。

また、大型ディーゼル貨物車については、EG 規制の強化に伴い、NOx 低減を目的として、尿素SCRの導入が進んでいるが、EG 温度が低下して NOx 低減効果が低下するとの報告もある。さらに、建設機械においては、未だ、現場に対応済み機械が十分に利用されている状況になく、検証を行う必要がある。

そこで、本報では、尿素SCRが導入された際に対比できるように、DPFが搭載された建設機械に、車載式フーリエ変換赤外分析装置(以下「車載式 FTIR 分析装置」という。)を搭載して、各種 GHG 及び EG を計測している流れについて概要を記述するものとする。それらをもとに、尿素SCRからのアンモニアスリップとともに温室効果に影響があるとされる亜酸化窒素(N_2O)の排出を同定するための基礎となる NOx、N_2O、NH_3 等の排出状況について概説していくものである。

3. 実験方法

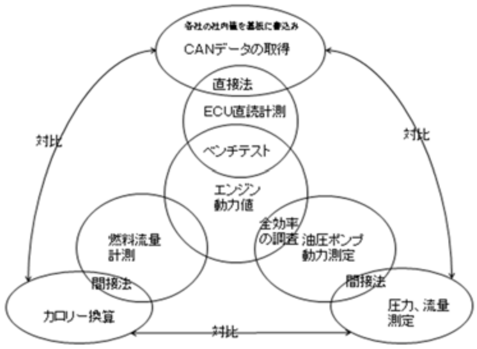
3－1　動力の推定

建設機械の GHG 及び EG を計測するためには、単位時間当たり排出質量と動力の同時把握を実施しなければならない。

自動車の動力は、エンジンベンチ試験においダイナモメータより取得しており、シャシダイナモ試験は、車速や駆動力をエンジンベンチ試験の代表的数値を適用して試験を実施し、EG を測定することになる。建設機械もエンジンの型式指定を取得する際はダイナモメータにより動力を取得している。

しかし、建設機械においては、シャシダイナモ試験のための設備が存在しないことに加え、稼働中の動力を得るためには、走行に加えて掘削の状態が存在し、掘削状態においては走行しないためシャシダイナモ試験を行うことができず、シャシダイナモを換装する計測手段が必要となる。このため、次の3つの方法が存在すると推定している。

すなわち、カロリー換算法、ECU(エンジンコントロールユニット)計測法、油圧ポンプ計測法である。それらの方法の中の特質は、第1図に示すとおりである。



第１図　動力取得に向けた検討の関連

カロリー換算法は、消費された軽油の質量を流量計により(利用されずに還流される燃料を控除した上で)実流量を測定し、質量あたりのカロリーを仮定した上にディーゼルエンジンの効率を一律に仮定する必要がある。このため、データとしてとして利用するには仮定が多く使いにくい数値であることから本検討では対象としなかった。

ECU計測法は、車両に装着された伝送路に

日本工業出版「建設機械」 第 52 巻 5 号 pp.63-69. "建設機械における稼働時の温室効果ガスの検討"より転載.

形成されたCAN（Controlled Area Network）からデータを取得するものである。建設機械の場合は、SAE（Society of Automotive Engineers）が制定したJ1931に準拠して取得できる場合が多い。製造メーカごとにデータ構成を追加することもあるが、転送速度やエラーフレームの取扱に注意すれば、トルクや回転数など幅広くデータ取得することができる。土木研究所の実験においては、車載型小型データロガーGL－1000（独ベクター社製）を使用した。

油圧ポンプ計測法は、油圧ポンプをダイナモメータの様に計測手段とする方法である。本検討に用いている20t級油圧ショベルの場合においては、油圧ポンプがエンジンシャフトから直結されているため、油圧ポンプ効率、エンジン回転数を取得できれば、データ取得が可能である。実験では、フロータービン（米フローテック社製）を利用した。

なお、実運転により得られる計測値は、ECU計測法ではグロス値であるが、油圧ポンプ計測法ではネット値であり、グロス値に換算する必要があるが、ラジエター等補機を取り外して運転操作することができない（JIS D1001 付属装置装着条件を参照のこと）ため、通常はネット値とグロス地を換算して補正することが必要になると推定している。

今後は、ECUデータと油圧ポンプデータで対比検証した上で、動力計測手法を考案する必要がある。本報では、ECU計測法を利用することとした。

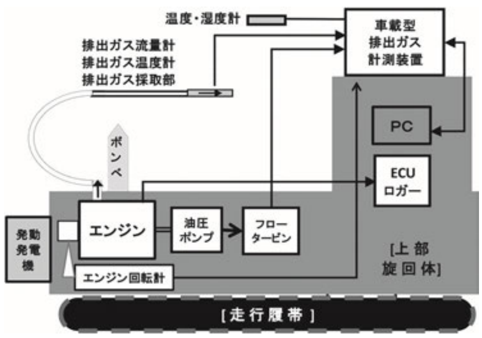
３－２ 実験方法

①実験装置の構成と計測対象

実験に用いた油圧ショベルは、現在時点（本報告の実験を実施した平成 27 年 10 月）では、DPFを搭載し尿素SCRを搭載しない20トン級を用いている（北米では平成27年4月より販売されているが日本国内には販売されていないための措置である）。

装置の構成は、運転室の上部に車載式FTIR分析装置（岩田電業（株） FAST-2200）を積載し、カウンターウエイト後部に、電源（発動発電機）、エンジン回転計、校正用窒素ガスボンベ、流量計、動力計、データロガー）を取り付けた架台を積載し（第2図参照）、排気管からステンレス製のフレキシブルホースを使って排出ガス分析部への導管の設置を行った。また、別途、排出ガスの質量換算に必要となる瞬時排出ガス流量は、ピトー管法（堀場製作所製 OBS-1000）により計測を行った。

分析対象としたGHG及びEG等の濃度の測



第２図　　計測装置の配置と構成

第１表　　ガス成分一覧表（暫定版）

区分	名称	分子式	備考
排出ガス	一酸化炭素	CO	直接
	一酸化窒素	NO	直接
	二酸化窒素	NO2	直接
	アセチレン	C2H2	直接
	エタン	C2H6	直接
	窒素酸化物	NOx	直接
温室効果ガス	亜酸化窒素	N20	直接
	メタン	CH4	直接
	二酸化炭素	CO2	直接
	アンモニア	NH3	直接
	水	H20	直接
PRTR	エチレン	C2H4	直接
	アクロレイン	C3H4O	スペクトル分析
	アセトアルデヒド	CH3CHO	スペクトル分析
	エチルベンン	C8H10	スペクトル分析
	キシレン	C8H10	スペクトル分析
	スチレン	C8H8	スペクトル分析
	トルエン	C7H8	スペクトル分析
	1-3ブタジエン	C4H6	スペクトル分析
	ベンズアルデヒド	C7H6O	スペクトル分析
	ベンゼン	C6H6	スペクトル分析
	ホルムアデヒド	HCHO	スペクトル分析

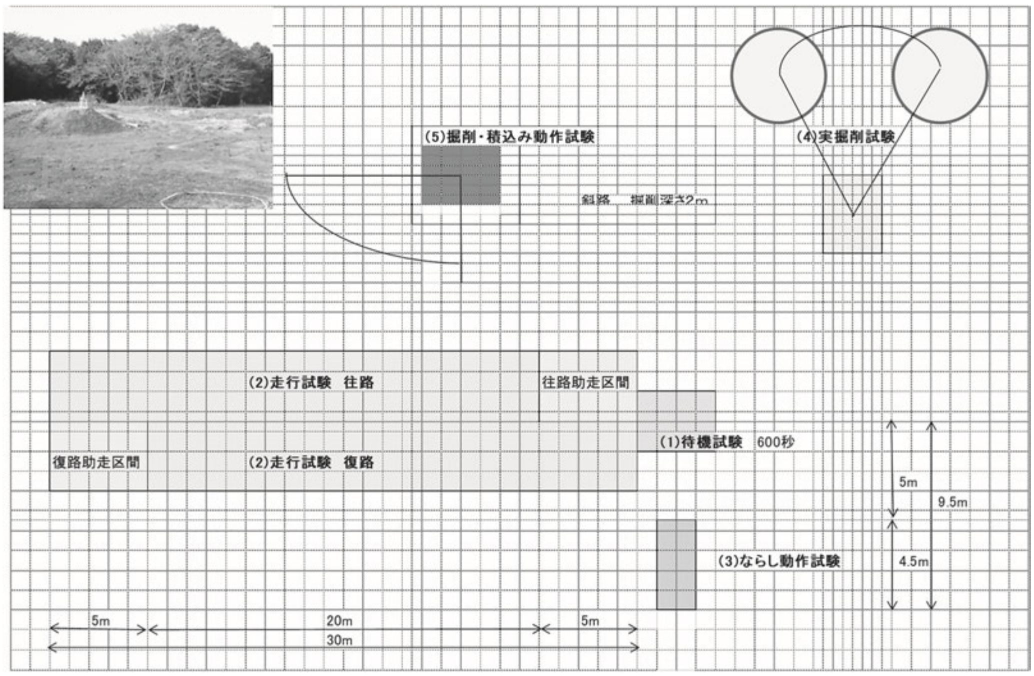
定は、0.2 秒サンプリングで連続的に実施した。また、そのガス成分については第1表に示すGHG、EG、PRTR（化学物質排出移動量届出制度）関連ガスの種類について直接測定とスペクトル分析を実施中である。

②試験場と運転操作

計測を実施した試験場は、第3図に示す土木研究所の屋外建設機械実験施設である。

また、運転操作のモードは、パワー重視モード（Pモード）、燃料重視モード（Eモード）の両方で実施した。

運転操作方法については、現行では基準は存在しないが、第２表に示すとおり「土工機械―エネルギー消費量試験方法―油圧ショベ



第３図　　試験場全景

第２表　　運転操作方法

	区分	主要条件		備考
1	待機試験			300～600秒程度
2	走行試験	往路	25m	前進（助走区間5mを含まない、アクセルダイアルはフルスロットル位置）
		復路	25m	旋回体を旋回させて後進
3	ならし動作試験	ならし距離	4．5m	1回は①～③の連続10サイクル（アクセルダイアルはフルスロットル位置）繰り返し
				①開始姿勢：アームヒンジピン、バケットヒンジピン及びバケットつめ先が一直線になるようにフロントを最大に伸ばし、つめ先の地上高さ30cm以内におく
				②水平引き：ブームを上げながらバケットつめ先がならし距離4.5mに到達するまで、バケットつめ先が地面と接触しないようにアームを引く。
				③開始姿勢に戻る：ブーム下げ及びアーム押しを操作し開始姿勢に戻る。
4	実掘削試験			左右45度交互に掘削及び放土
5	掘削・積込み動作試験	掘削深さ 障害物高さ	2．0m 2．5m	1回は①～⑥までの模擬動作を連続5サイクル（アクセルダイアルはフルスロットル位置）繰り返し
				①開始姿勢：アームヒンジピン、バケットヒンジピン及びバケットつめ先が一直線になるようにフロントを最大に伸ばし、つめ先の地上高さ30cm以内におく
				②水平引き：ブームを上げながらバケットつめ先が地面と接触しないようアームが垂直になるまで、バケットつめ先が地面と接触しないようにアームを引く。
				③バケット掘削：バケット開口部が水平になるまで操作する。
				④旋回・ブーム上げ：旋回とブーム上げだけ操作し、バケットがバー（障害物）の真上にきたところで止める。
				⑤バケットダンプ：バーの上で、バケットつめ先がアームヒンジピン及びバケットヒンジピンと一直線になるまでバケットダンプだけ操作する。
				⑥開始姿勢に戻る：旋回ブーム及びアームを操作し開始姿勢に戻る。
6	黒煙計測試験			オパシメータによる

（注）条件、備考は「土工機械－エネルギー消費試験方法－油圧ショベル」（JCMAS H 020：2014）を参照

日本工業出版「建設機械」 第 52 巻 5 号 pp.63-69. “建設機械における稼働時の温室効果ガスの検討”より転載.

ル」（JCMAS　H　020）に準拠し、待機、走行、ならし動作、実掘削、掘削・積込動作の各状態について実施した。

4. 測定結果

平成 27 年 10 月 20 日～22 日に実施した実験計測について、現在データ分析中であるため、本報については速報暫定値であり今後修正が必要になる。また、3名の被験者の内1名を選定して掲載したが、運転操作のモードや被験者により多少の変動がみられるため、今後分析修正する予定である。

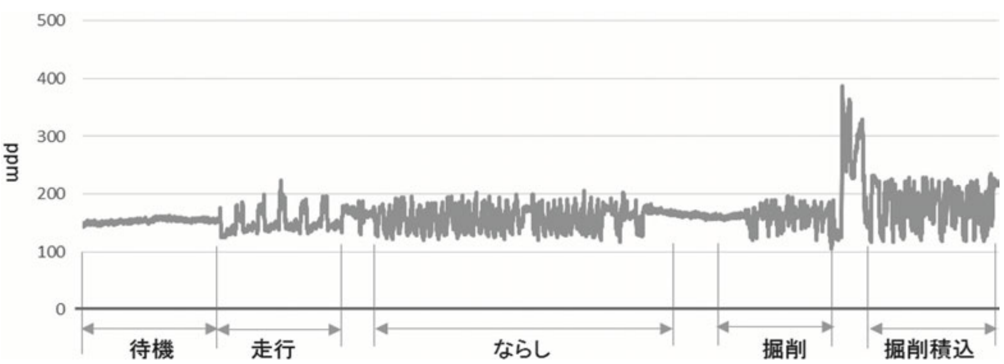
第4図は、NOx の排出状況を時系列で示したものである。待機及び走行については変化が少ない一方で、ならし動作及び掘削・積込では変動がみられる。これは、動力についても同様の傾向が出ている。負荷変動に応じて油圧力が、調整されるが、一定圧で油圧リークが発生するためピーク値が突出して発生することはない。

第5図～第7図は、NOx、CO、N_2O の試験状態別排出状況を示している。

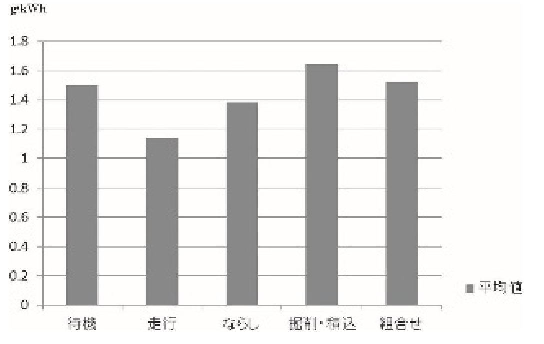
第5図より、NOx について、諸対策が効果を表して平均値で2011年規制値を下回っている。なお、瞬間値では、掘削・積込状態において違った傾向も見られる。今後、尿素 SCR が装着されると更に低減されるものと推測されるので、追跡調査を予定している。

第6図より、CO について既に 2014 年規制 5.0g/kWh に対して十分にクリアしていることがわかる。この点については、NMHC についても同様である。

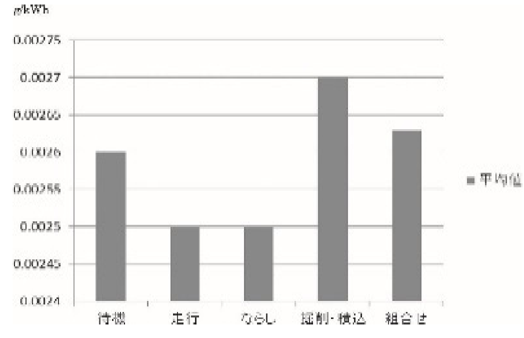
第7図より、N_2O の排出状況を確認することができるが、この状態に対して尿素SCRを投入して極端な増大がなければ、GHG の増加等は



第４図　排出の実態例（ＮＯｘ）　（被験者Ａ：　Ｅモード）

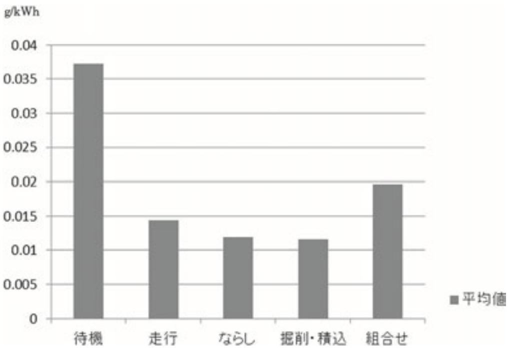


第５図　排出状況（NOｘ）（被験者Ａ　Ｅモード）



第６図　排出状況（CO）（被験者Ａ　Ｅモード）

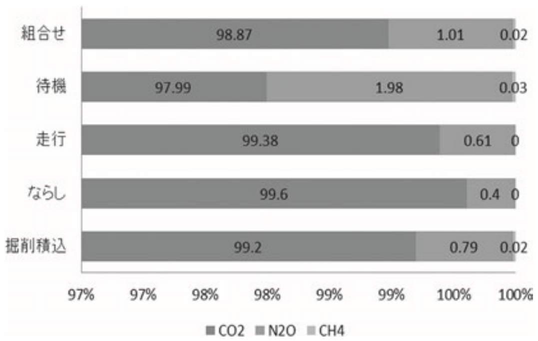
日本工業出版「建設機械」 第 52 巻 5 号 pp.63-69. “建設機械における稼働時の温室効果ガスの検討”より転載.



第７図　排出状況（N_2O）（被験者Ａ　Ｅモード）

発生していないことになる。この課題については今後の課題である。

図8に GHG に中に占める CO_2、N_2O および CH_4 の排出割合（ CO_2換算による質量比率 ）を示す。



第８図　GHG の排出割合

ここで、CO_2の温室効果を1とした場合、N_2O は 310 倍、CH_4 は 21 倍であるとして、GHG の排出量は以下の式で算出した。

$$\text{GHG 排出量} = CO_2\text{排出量} + N_2O\ \text{排出量} \times 310 + CH_4\text{排出量} \times 21$$

なお、自動車と建設機械を比較して自動車のように1km あたりの排出は計算できないので、JCMAS を参照し、掘削・積込動作 50%、ならし動作 10%、走行 10%、待機 30%で平均の排出質量から換算している。その対比については、第3表に示す。

GHG の排出構成は、CO_2：98.87％、N_2O :1.01%、CH_4:0.02%であった。中型ディーゼル貨物自動車での構成が、CO_2:98～99%、N_2O：2～1%、CH_4：0.1～0.3%程度であることと比較すると N_2O や CH_4 が低めの傾向となっている。なお、待機試験について、傾向が違うことに対しては、運転が開始されてからの時間経過と暖機の変化によるものと推定するが、今後検討を進めていく予定である。

5. おわりに：まとめ

平成27年度の実験では、温室効果ガスの排出状況のうち、尿素SCRにより対策を実施する前の状況について、基礎的なデータを取得することができた。今後は、日本国内において、対策済みの機械に同様の計測を実施することにより、温室効果ガスの低減効果を同定することが可能になるものと考える。また、今後の建設機械に関する排出インベントリを検討するための基本データになるものと考える。

さらに、GHG の構成割合を明確にするため、距離換算を案出し時間排出質量により分析を

第３表　１Km 換算距離の算出方法

項目		掘削・積込	ならし動作	走行	待機	合計（組合せ）
構成比率		50%	10%	10%	30%	100%
実走行距離		0m（作業有）	0m（作業有）	100m（作業無）	0m（作業無）	100m（作業無）
1km換算距離		500m	100m	100m	300m	1,000m
1km距離換算	標準時間	600sec	120sec	120sec	360sec	1,200sec
	サイクルタイム等	30.0sec	12.0sec	2往復（3.0km/h）		
	サイクル等	20回	10回	2*(2*25)m		
参考：JCMAS燃費標準	標準時間	1,800sec	360sec	360sec	1,080sec	3,600sec
	サイクルタイム等	14.8sec	6.6sec	6.8往復（3.4km/h）		
	サイクル等	121回	54回	6.8*(2*25)m		

日本工業出版「建設機械」 第 52 巻 5 号 pp.63-69. “建設機械における稼働時の温室効果ガスの検討”より転載.

日本工業出版「建設機械」 第 52 巻 5 号 pp.63-69. “建設機械における稼働時の温室効果ガスの検討”より転載.

行ったが、建設機械の掘削作業の特性を反映する確定した方法が存在しないため、実験による実働に近いサイクルタイムを利用することの是非については、更なるデータの検討が必要である。

なお、操作者の熟練度や掘削対象物の影響等も考えられるが、現在時点ではその影響が明確に得られていない。また、今後使用が開始される他の種類の建設機械についても検討する余地があるものと考えている。

謝辞

本報の作成にあたり、共同研究を実施している(国研)国立環境研究所　近藤美則氏の助言に謝意を表するとともに、操作方法検討について土木研究所先端技術チーム　上野仁士氏、西山章彦氏に協力頂き深く謝意を表する。また、実験計測で協力頂いた岩田電業㈱代表　岩田恒夫氏はじめ金田三千代氏、村田秀二氏、船田孝博氏、齋藤遼吏氏、宇賀神哲哉氏に謝意を表する。

＜参考文献＞

(1) 西山章彦・杉谷康弘・藤野健一:“建設機械実稼働状態の排出ガスにおける通常モードと省燃費モードの対比について”、土木学会第 69 回年次学術講演会論文集、pp.193-194(2014.9)

(2) 山本敏朗・堤玲子・岩田恒夫・小川恭弘・加藤裕:“乗用車から排出される N_2O、CH_4 および C_6H_6 の FTIR 分析”、自動車技術会論文集、Vol.42、No.5、pp.1059-1065(2011.9)

(3) 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 NOx、NH_3 および N_2O の排出挙動”、自動車技術会学術講演会前刷集、No68-13、pp25-30(2013.5)

【著者紹介】
野村　正之
（元）（国研）土木研究所　技術推進本部
先端技術チーム

日本工業出版「建設機械」 第 52 巻 5 号 pp.63-69. “建設機械における稼働時の温室効果ガスの検討”より転載.

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　〇吉永　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_20(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_20, 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。知見不足等により，環境対応の遅れのみならず，拙速な

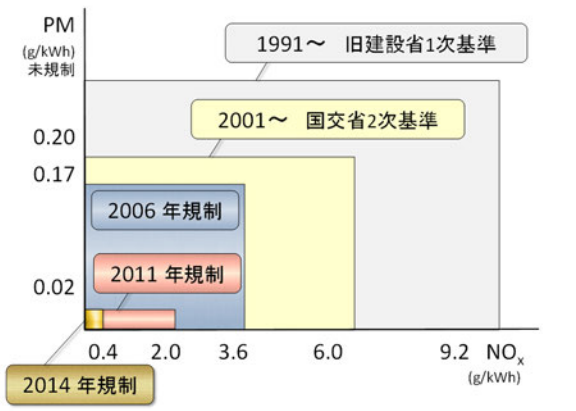


図-1　排ガス規制値の推移例（定格出力130kW以上560kW未満）.

対応 (必要性の低い測定の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(kwh)あたりの排出ガス量 M_G(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 $\boldsymbol{T_E}$，および**排出ガスの流量** $\boldsymbol{V_G}$ 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拠り所にすることになる。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 $\boldsymbol{M_G}$ (g)と $\boldsymbol{CO_2}$ の量 $\boldsymbol{M_{kg\text{-}CO2}}$ (kg)の比を排出率 $\boldsymbol{r_{G/CO2}}$** 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_{CO2}/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 $r_{G/CO2}=M_G/M_{kg\text{-}CO2}$ 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 $r_{G/CO2}$ に換算し，2015 年度の測定値と比較した例について述べる。

平成 28 年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集, pp.109-114, “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”より転載.

表-1　排出ガス評価量の現場測定.

	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
評価量	M_G / W M_G: 排出ガス量(g) W: 仕事量(kWh)	$r_{G/CO2}=M_G/M_{kg\text{-}CO2}$ M_G: 排出ガス量(g) $M_{kg\text{-}CO2}$: 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_2O,NO, NO_2, NMHC, NH_3, H_2O 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_{CO2} (%) . 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 $M_{CO2\text{-}1}$ (g/s) [算定法-1]. $M_{CO2\text{-}1}=R_E\times 6.69/2\times r_G\times C_{CO2}/100\times 1.83$, $r_G=(-21.5+14+15)/14\times C_{CO2}/100+1$ 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℃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 $M_{CO2\text{-}2}$ (g/s) [算定法-2]. $M_{CO2\text{-}2}=V_G\times C_{CO2}/100\times 1.83$

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 CO_2 の量 M_{CO2} 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 CO_2 排出量 $M_{CO2\text{-}1}$ 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 CO_2 排出量 $M_{CO2\text{-}2}$ 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 CO_2 の関係

CASE1 の表-3 の(E)動力相当値 W_1 と(F)の CO_2 排出量 $M_{CO2\text{-}1}$ および(G)の CO_2 排出量 $M_{CO2\text{-}2}$ 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。

平成 28 年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集, pp.109-114, "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"より転載.

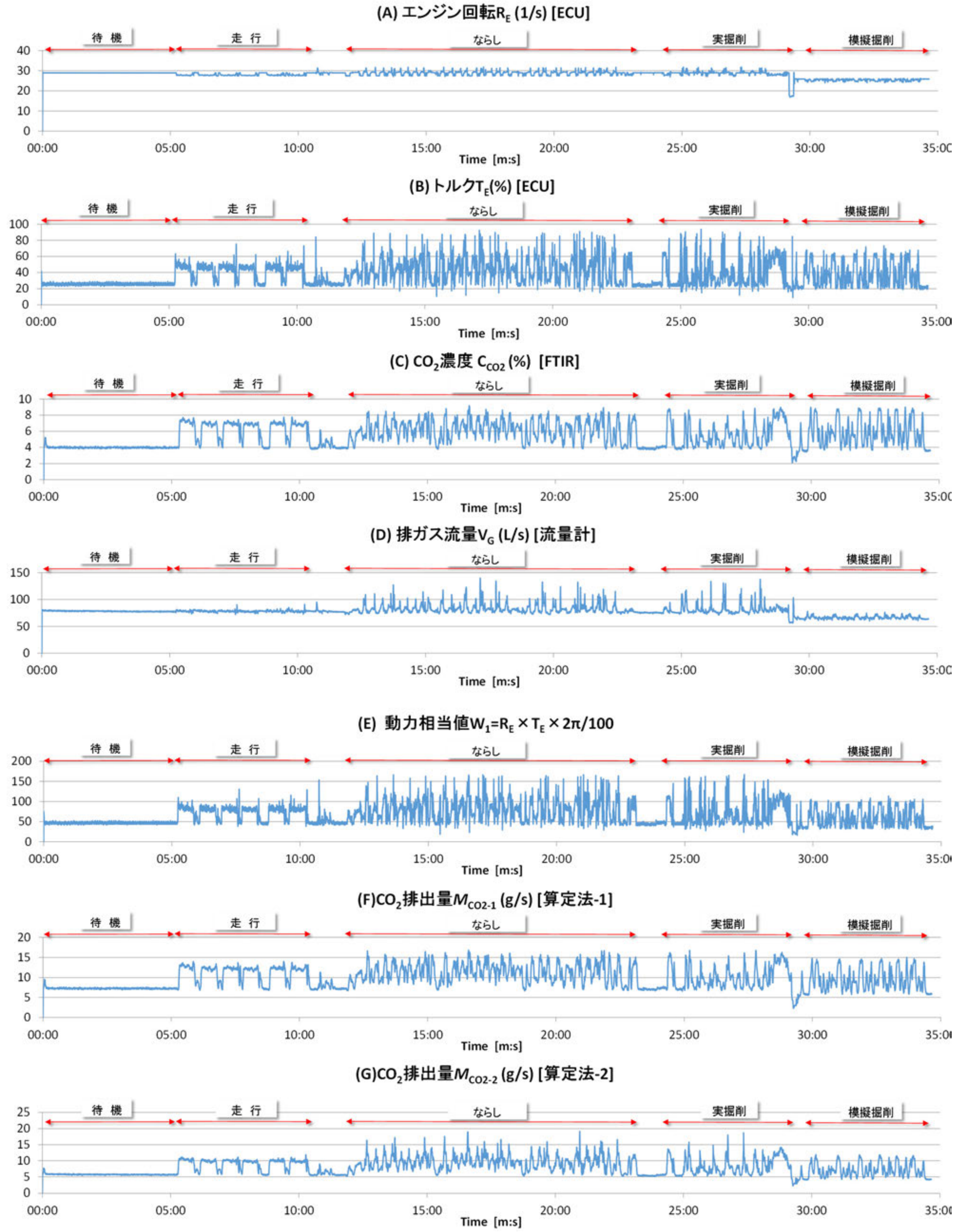


図-3　測定値の時間変化(CASE-1).

平成 28 年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集, pp.109-114, “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”より転載.

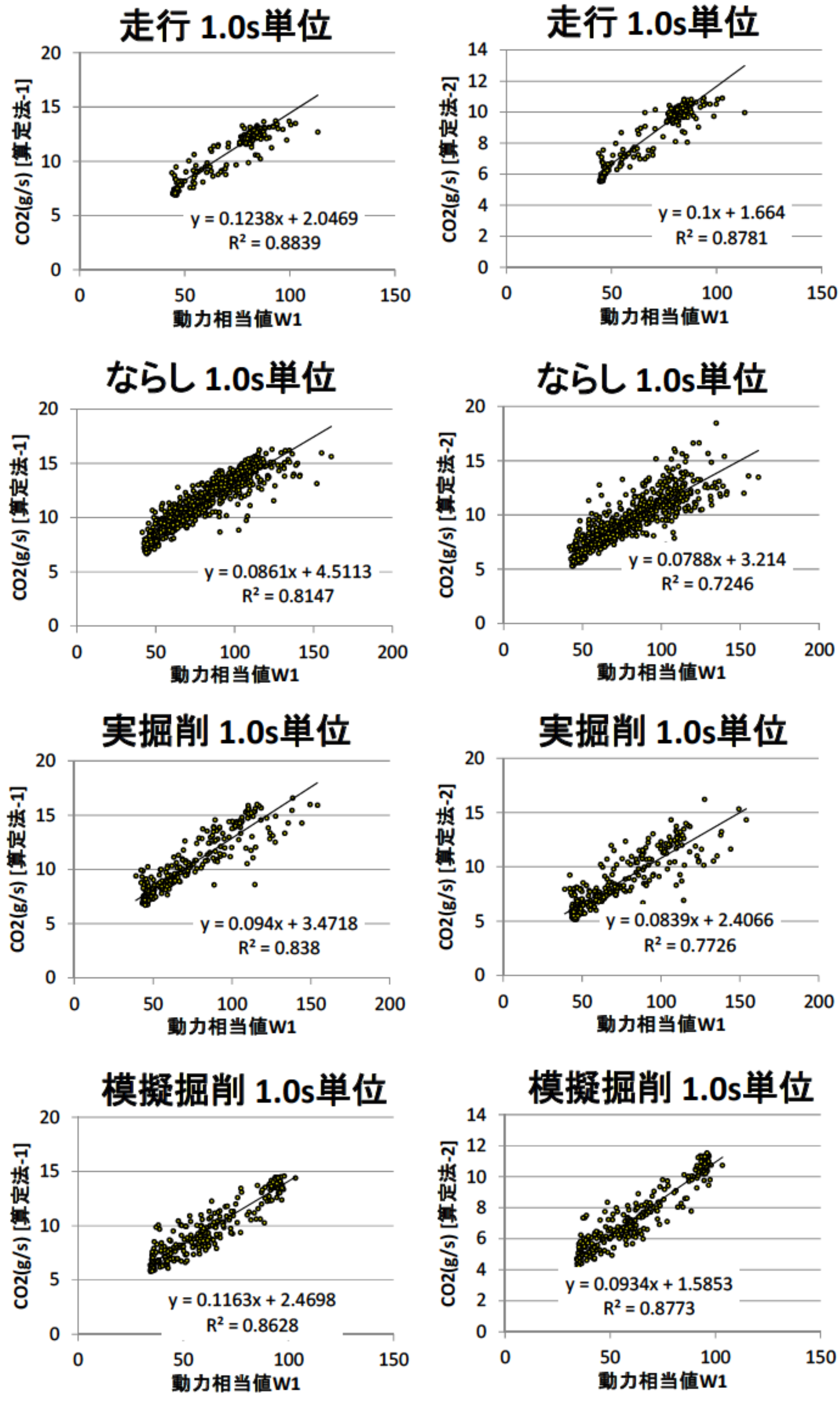


図-4　動力と CO2 の相関(CASE-1 1.0 s 単位).

次に M_{CO2},W_1, および M_{CO2}/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_{CO2} 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_{CO2} が小さいので流量の測定値が小さくな

平成 28 年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集, pp.109-114, "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"より転載.

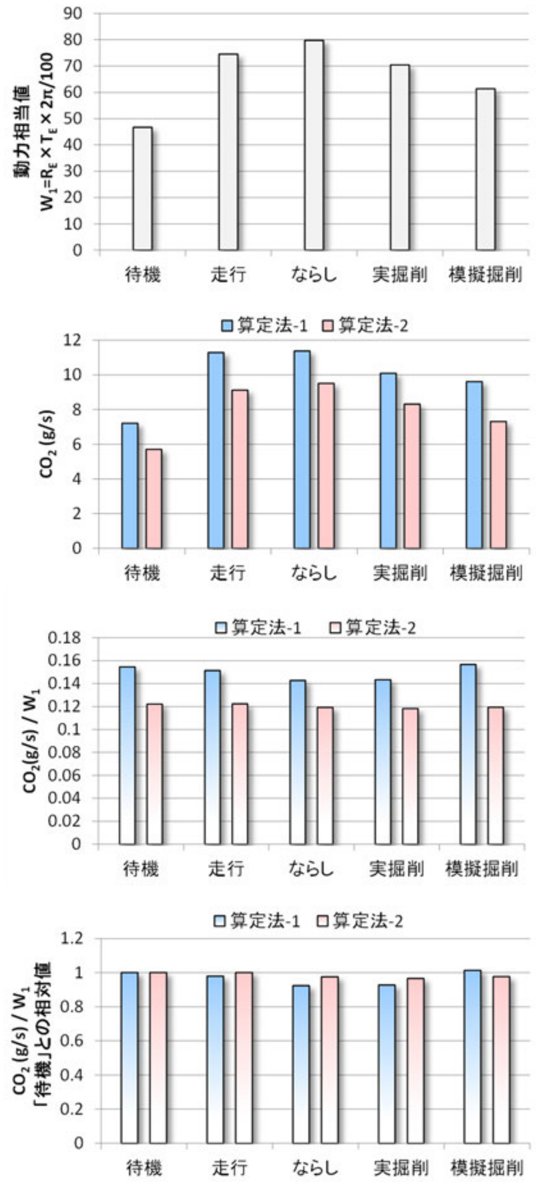


図-5　運転モード,動作,および算定方法別の動力と CO_2.

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_2O,CH_4	NO_X	NMHC	CO	N_2O,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, $r_{G/CO2}=M_G/M_{kg\text{-}CO2}$ で各種の排出ガスを評価できる。$r_{G/CO2}=M_G/M_{kg\text{-}CO2}$ 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。

$r_{G/CO2}=M_G/M_{kg\text{-}CO2}$ 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 CO_2 排出原単位等の数値を使用した。

$$r_{G/CO2}=L_G/M_{CO2,1kWh} \qquad \text{式(1)}$$
$$M_{CO2,1kWh}=Q_{1kWh}\times K_{CO2} \qquad \text{式(2)}$$
$$Q_{1kWh}=100/\eta\times 3600/1{,}000 \qquad \text{式(3)}$$

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 CO_2(kg), $K_{CO2,f}$: 軽油の CO_2 排出係数[11]0.0687 kg-CO_2/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

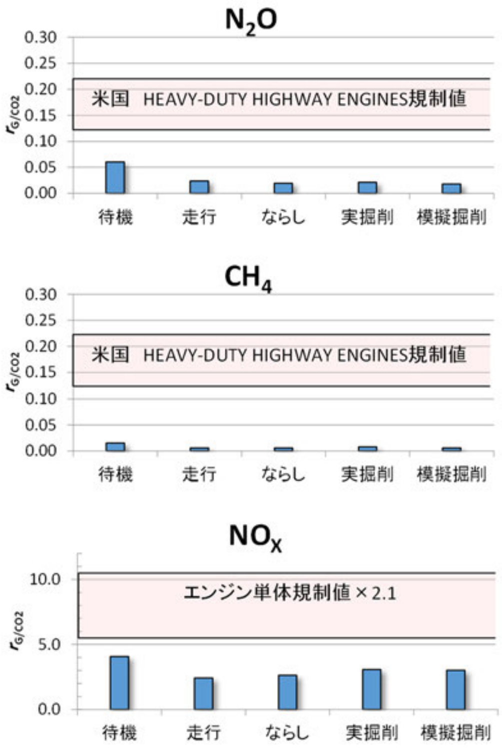
$r_{G/CO2}$ に換算した温室効果ガスおよび窒素酸化物 NOx の測定結果を図-6　に示す。表-4 の規制値を併記している。ただし,欧州の路上走行試験の試験においては，台上試験の規制値を2.1倍する等の措置を講じている[12]こと等を考慮し, NOx については規制値を 2.1 倍した。一例ではあるが，測定値は規制値等を下回る値となった。

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)N_2O および 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と考え，構内で実

平成 28 年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集, pp.109-114, “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”より転載.

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 CO_2, N_2O, 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 $M_{kg\text{-}CO2}$ (kg)の比を排出率 $r_{G/CO2}$ とした評価量**の採択を提案した。$r_{G/CO2}$ 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。$r_{G/CO2}$ 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_{CO2}/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 $r_{G/CO2}$ 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 NOx, 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.

平成 28 年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集, pp.109-114, “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”より転載.

建設機械の排出ガス測定にかかる信頼性向上と簡素化

吉永弘志[1]

[1]正会員　国立研究開発法人　土木研究所
[1]E-mail: h-yoshinaga_pwri.go.jp

建設機械の排出ガスについては，エンジン単体の室内試験値により規制されているが，近年，自動車の動向をふまえ，建設機械として動作する際に排出するガスの測定事例が，国内外で報告されるようなった．今後，排出量の多寡を議論する際には測定値の信頼性を明らかにすることが必要となり，多数の建設機械の測定値を得るためには測定の簡素化が必要になると考えている．本論文では構内における測定値を解析した結果に基づいて，「CO_2との質量比（g/kg-CO_2)」を評価量とすること，および測定する動作を「待機」と「ならし（模擬動作）」の二種類に設定することで，測定値の信頼性が向上すること，および測定が簡素化されることを明らかにした．さらに，NOxの測定値については,「待機」は5分間の測定を3回行い，「ならし（模擬動作）」は60サイクルを1回とした測定を異なる運転者で3回行うことで，偶然誤差が95%の確率で10%以内となると推定した．

Key Words : *earth moving machinery, exhaust gas, GHG, PEMS, ECU*

1.　はじめに

(1)　背景

建設機械に搭載されるエンジンから排出される窒素酸化物NOx，非メタン炭化水素NMHC，粒子状物質PM，および一酸化炭素CO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」）により，エンジン単体の室内試験値で規制されている（規制値の例. **図-1**）．この規制は，公道を走行する自動車（以下，「オンロード車」という．）の動向をふまえたものであるが，近年，欧米におけるオンロード車の排出ガス規制に新たな変化の兆候がみうけられる．欧州連合EUは，2017年9月以降，路上走行時の排ガス試験（RDE: Real Driving Emissions test）を順次義務付ける[1)2)]．この措置は，路上走行試験では室内試験よりも排出量が大きくなる旨の調査結果を拠り所とした経緯がある．同様に国内でも2022年からRDE試験での規制が導入される[3)]．また，米国では，温室効果ガス（GHG: greenhouse gas）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[4)]），およびメタンCH_4（同25倍[4)]）の規制値（standard [5)]）を定めており，国内[6)]でも路上走行時の測定が行われるようになった．今後，建設機械についても，エンジン単体ではなく各種の動作時に排出されるNOx，NMHC，PM，CO，およびGHG（以下，これらを総称して「排出ガス」という．）にかかる測定・評価・規制等が議論になる可能性がある．これまで建設機械の動作時に排出される排出ガスについては，海外[7)8)9)10)11)12)13)]，および国内[14)15)16)17)18)]での測定例が報告されている．測定評価等の必要性の判断にあたっては，測定方法，および多数の建設機械での測定値に関する知見が必要になると考えている．オンロード車はエンジンの動力をギア・トルクコンバータ等で伝達させて走行するが，建設機械は，油圧モータの油圧で伝達させて動作する（**図-2**の模式図）．また，オンロード車はエンジンスロットルでエンジン回転数とトルクを変化させて走行するが，建設機械はエンジンスロットルを**図-3**のように一定値に設定し，負荷に応じてトル

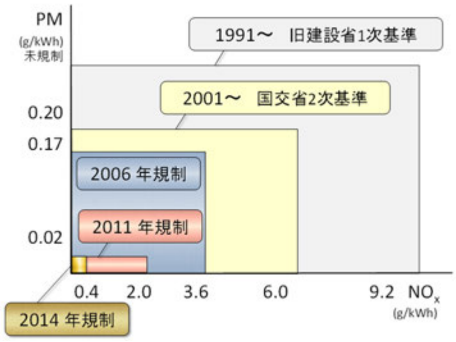


図-1　排ガス規制値の推移例
(定格出力130kW以上560kW未満).

土木学会論文集 G(環境), Vol.73, No.6, pp.Ⅱ_321-Ⅱ_332, 2017.“建設機械の排出ガス測定にかかる信頼性向上と簡素化”より転載.

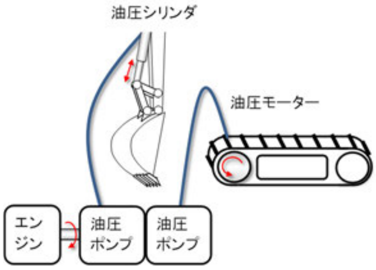


図-2 油圧ショベルの動力系統の模式図.

図-3 油圧ショベルのエンジンスロットルの例.

図-4 履帯に付着した土の例.

表-1　用語.

用語	本論文での定義
排出ガス	エンジンから排出される大気汚染物質（ 例：一酸化炭素 ），および温室効果ガス（ 例：メタン）を総称して排出ガスという.
排出ガスの測定値	測定器が出力する値（ 例：濃度（ ppm ）），およびこれらの値を加工して得られる値（ 例：質量と仕事量の比（ g / kwh ））を総称して測定値という.
排出ガスの評価量	排出ガスの測定値のうち，最終的に排出量として評価する値をいう（ 例：質量と仕事量の比（ g / kwh ））.
仕事量比の排出量	排出ガスの評価量のうち，一定の時間内に排出されたガスの質量（ g ） とエンジンの仕事量（ kwh ）の比をいう．単位は g / kwh.
CO_2比の排出量	排出ガスの評価量のうち，一定の時間内に排出されたガスの質量（ g ）と CO_2 の質量（ kg ）の比をいう．単位は g / kg-CO_2.
測定値の信頼性	真値との差が近いこと，および偏差が小さいことが測定値の信頼性には求められるが，本論文の測定では真値が不明なため，偏差が小さいことをいう.
建設機械の動作	建設機械の実作業（ 例：掘削，走行 ），および模擬動作（ 例：ならし）を総称して動作という.
模擬動作	バケットを空にした模擬的な動作をいう.

クを変化させて動作する．オンロード車ではRDE試験での調査結果を拠り所としてRDE試験による規制が導入されることになったが，動力伝達の機構が異なる建設機械ではオンロード車とは傾向が異なる可能性も大きい．また，オンロード車のRDE試験では実走行を模擬することを優先する方針で測定方法を定めているが，建設機械の実稼働では，降雨の影響で試験場の土が水分を含んでいると履帯（ 図-4の例）やバケットに付着する土により負荷が増大する等，多様な要因で負荷が大きく変化することから，実稼働に近い条件で測定すると偏差が大きくなって排出ガスを適正に評価できなくなる可能性が高い.

(2)　目的

排出量の多寡を議論する際には測定値の信頼性を明らかにすることが必要となり，多数の建設機械の測定値を得るためには測定の簡素化が必要になると考えている．本論文は，測定にかかる信頼性向上と簡素化を目的とし，本論文の研究は正確かつ簡素な測定方法を確立し，排出ガスの実情把握に資することを目的とする.

測定値の信頼性を向上させるためには，以下の課題1，課題2，および課題3への対応が必要と考えている.

・課題1:　規制値は質量と仕事量の比（g/kwh）で定められているため動力（ kw ）の測定が必要なるが，動力の計算の元となるエンジンのトルクは，エンジンを架装した建設機械では実測することが不可能である．このため，エンジンの制御用ユニット(ECU：Engine Control Unit ）の電気信号のデータを拠り所とする[10,12,17,18]ことになる．しかし，このデータは室内試験値に基づく推定値であるため信憑性に疑念をいだかれる可能性が極めて高い．また，建設機械ではインターフェースが標準化されていない[7]ことや企業秘密的な情報が含まれているため収集が困難であり，測定できない[13]ことがある.

・課題2: 排出量（g）は，排出ガスの濃度と流量の積で算出するため，濃度のみならず流量の測定誤差を含む.

・課題3: 土の条件（ 硬さ，含水比等 ）により動作（ 掘削，走行等 ）に必要な動力が異なる.

課題1，および課題2については，CO_2との質量比（g/kg-CO_2）で評価する方法（ 山本らが提案している方法[19,20,21]）で解消できることを速報的に報告した[18]．本論文においては，多様な測定条件，およびガス種のデータに基づいて，より明確に示す．課題3については，各種の動作のなかから「待機」と「ならし（模擬動作）」を選定することで排出ガスの実情を把握できることを示す．以上により測定値の信頼性が向上し，測定が簡素化できる.

なお，建設機械から排出される温室効果ガスのN_2O，およびCH_4を測定した文献は土木研究所の測定によるもの[17,18]以外にみあたらない．また，測定値の信頼性について論じた報告は本論文以外にみあたらない.

(3)　構成

本論文の2.では測定の概要，について述べる．3.では，

測定値を解析した結果に基づき，排出量の評価量として「CO_2比の排出量（g / kg-CO_2）」を選定したこと，測定対象とする動作として「待機」と「ならし (模擬動作)」を選定したこと，および測定値の信頼性を確保するために必要な測定回数について述べる.

(4) 用語

排出ガスにかかる一般的な用語については，web site で確認できるので説明を省略する．本論文固有の用語は表-1とする.

表-2　測定概要.

測定時期	2015 年度(10 月, 1 月), 2016 年度(12 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	
測定項目と測定装置	測定項目	測定装置
	エンジン回転数, トルク	CAN データロガー (VECTOR,GL1000)
	排出ガス濃度	FTIR (岩田電業,FAST-2200)
	排出ガス流量	ピトー管式流量計(2015 年度は 1 台,　2016 年度は 2 台)
測定対象(ガス)	CO_2, CO, CH_4, N_2O, NO, NO_2, NMHC (非メタン炭化水素), NH_3 他	
サンプリング周波数	5Hz (0.2 秒間隔)	

図-5　油圧ショベルに搭載した測定装置.
(転載元の図の一部をマスクングしている.)

2.　測定

(1)　概要

測定の概要を表-2および図-5に示す．ディーゼル微粒子捕集フィルター　(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（模擬動作）」，「掘削（実作業）」，および「掘削積込（模擬動作）」の動作を行って排出ガスの流量と濃度を連続測定した．2016年度は流量計を排気管に直列に2台設置し，双方の測定値を比較した．（ 連続した測定値の一部を後述する図-6に示す．）．2015年度の測定数は，測定時期，オペレータ，および運転モードの条件を2期 (10月と1月)，3人，および2種類(パワー優先と燃費優先) の組み合わせとした約30～40分間の測定が合計で12回 (2×3×2)となった. 2016年度は，運転モード，アクセル開度，動作の緩慢，測定回数, コールドスタート (エンジン冷却水の温度) 等を変化させた各種の測定を15種類行った．詳細については付録１に示す.

油圧ショベルはエンジンで油圧ポンプを駆動し油圧モータ, および油圧シリンダで走行, 旋回, 掘削等の動作を行う (図-2) . 通常の運転ではエンジンのアクセル開度を固定し，4本のレバーで走行・旋回・掘削等の動作を行う．各動作は表-3に示すとおりとした．排出ガスの濃度，および流量はフーリエ変換赤外分光法 (FTIR：Fourier Transform Infrared Spectroscopy. 測定原理は付録２.) ，およびピトー管式の流量計で測定した．同時にECUの電気信号に含まれる回転数とトルクのデータをCAN(Controller Area Network, 輸送用機械やロボット等の機器間のデータ転送に使われる規格) のデータロガーで取得した.

なお, 別途, オパシメータで簡易なPM測定も行ったが, ほぼ0に近い値であった.

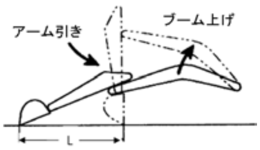
(2)　測定値の例

図-6に測定値の時間変化の例を示す．付録１の全動作でこのような測定値を0.2秒間隔で記録した（ただし，流量計を2台として測定したのは2016年度のみ.) . その他のガスの測定例は付録３に示す．エンジンのスロットルは図-3で示したように固定しているが，負荷に応じてエンジン回転数，およびトルクは変化する.

排出ガスの流量は流量計1, および流量計2の測定値,ならびに推定値を併記している．ここで測定値の違いについて測定値の一部で説明する. 9:50～9:53間の流量計1, および流量計2の測定値はおおむね4~5，および4.8~5.3 m^3/minで変動しており, 二つの流量計で 20％程度の違いがある. 計量法に基づく検定制度がある測定器では器差の許容範囲が定めらているが, 流量計は検定制度がない

ためこの差が許容範囲か否かを判断することができない.（参考までに普通騒音計の検定公差は1.5 dBであるが, dBを真数に戻すと-30~+40%の差が許容されていることになる.）. 欧州のRDE試験では測定値のバラツキ等を考慮し，室内試験値に基づく規制値の2.1倍を許容範囲としている[1)2)]こと，および2022年から導入されることになった国内の RDE 試験[3)]では「機器測定によるばらつきマージン」（文献[3)]には用語の定義がみあたらない.）を 0.5（=50%） 見込んでいることから，実稼働での測定方法は測定値の偏差が大きいことを前提として検討することが必要と考えられる. 推定値はエンジンの回転数と排気量に基づくものであり（**付録４** の式(付.4)），過給を考慮しないことで過小，排気再循環（EGR: Exhaust Gas Recirculation）と体積効率を考慮しないことで過大となる. 推定値が二つの測定値よりもおおむね過大な値となっているのは, EGR と体積効率の影響を考慮しない影響が大きいことに起因すると考えられる.

表-3　測定時の動作.

動作	内　容	
待機	アイドリング / 　5 分（異なる時間の測定有）	
走行	片道 25mの区間往復/3 サイクル	
ならし (模擬)	 (JCMAS H 020:2014[22])引用）	アーム，およびバケットが一直線になる状態を開始姿勢とし，L=4. 5m の範囲で水平引き
掘削 (実作業)	掘削，45 度の旋回，およびバケットダンプ /5 サイクル	
掘削積込 （模擬）	 （ JCMAS H 020:2014[22]） 引用) （開始姿勢はアーム，およびバケットが一直線）	開始姿勢，水平引き，バケット掘削，ブーム上げを伴う 90 度の旋回，およびバケットダンプ /5 サイクル(異なる時間の測定有)

3. 解析

(1) 排出ガスの評価量の選定

a）評価量

オフロード法，および海外の排出ガス規制は排出ガスの質量M_{G}（g）と仕事量W(kwh)の比 R_{GpW}（g/kwh）で定められている（式(1)）.「1. はじめに」で述べた「CO_2比の排出量」は，M_{G}（g）とCO_2排出量M_{CO2}（kg）の比R_{GpCO2}（g/kg-CO_2）となる（式(2)）. R_{GpCO2}は排出ガス濃度（ppm）の時間積算値$\int C_{\mathrm{G}}dt$と CO_2濃度（ppm）の時間積算値

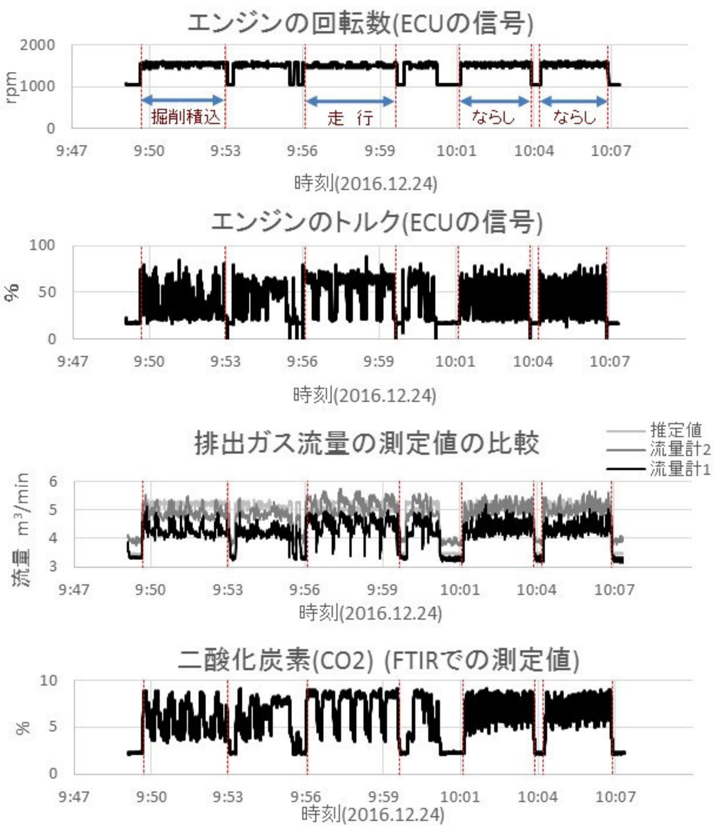


図-6　測定値の時間変化の例.

$\int C_{CO2}dt$ の比R_{C_GpCO2}(式(3))に排出ガスの密度ρ_G（g / m³)と CO_2の密度ρ_{CO2}（g / m³)の比を乗じて 1000 倍した値で近似できる（ 式(4)). 計算式の詳細は**付録４**に示す. 排出ガスの流量が時間変動しない場合は式(4)は等号になる.

$$R_{GpW} = M_G \,/\, W \tag{1}$$

$$R_{GpCO2} = M_G \,/\, M_{CO2} \tag{2}$$

$$R_{C\_GpCO2} = \int C_G dt \,/ \int C_{CO2} dt \tag{3}$$

$$R_{GpCO2} \cong 1{,}000 \cdot R_{C\_GpCO2} \cdot \rho_G \,/ \rho_{CO2} \tag{4}$$

b) 評価量の選定

「仕事量比での排出量R_{GpW}(g/kwh)」と「CO_2比の排出量R_{GpCO2}　(g/kg-CO_2)」の2種類の評価量について2016年度の測定値を解析して信頼性を比較した。2016年度は**付録１**に示すように運転モード（ パワー優先，燃費優先)，エンジンのスロットル（ MAX，中間，MIN ），暖気の有無，動作の緩慢（乱暴，普通，穏やか），動作の内容(待機，走行，掘削，ならし等)を組み合わせることで多様な測定条件とするとともに，排出ガスの流量計を2台設置して測定した．時間平均した動力と4種類の排出ガスの関係を**図-7**に示す．各ガスの上段がR_{GpW}，下段がR_{GpCO2}である．R_{GpW}ではガスの流量の測定値・推計値により排出量が異なる(プロットされる点の位置が異なる．)が，「CO_2比の排出量R_{GpCO2}」では流量の測定値・推計値によらず排出量(g / kg-CO_2)が一致する（ プロットされる点の位置が一致する．）．さらにR_{GpCO2}を濃度比で近似した式(4)(流量一定を仮定した推計） もよく整合する．以上の結果を**表-4**　にまとめた．3種類の排出ガス流量（ データ数は3 ）に基づく排出量R（ 評価量はR_{GpW}またはR_{GpCO2} ）の変動係数C_V（ 式(5). 三つのデータの標準偏差σと平均$\bar{R}$との比) (%)を58回の測定(**付録１**の2016年度 ）で平均した値$\overline{C_V}$を2列目と3列目に示した．R_{GpCO2}を採択することで$\overline{C_V}$が大きく減少する．二つの流量計で算出したRの平均を真値R_Tとみなし，エンジン回転数から推計した流量で算出した排出量R_S（ 評価量はR_{GpW}またはR_{GpCO2})の誤差e_P（ 式(6))の測定数58の平均値$\overline{e_P}$ を4列目と5列目，同様に式(4)で算出したR_Sの$\overline{e_P}$を6列目に示している．排出ガスの評価量をR_{GpW} (4列目)とした場合は$\overline{e_P}$が10%を超えるが，R_{GpCO2}(5,6列目)では$\overline{e_P}$が5%以下となった．排出ガスの評価量としてR_{GpCO2}を採択すれば，動力の測定値が不要になるのみならず，排出ガス流量の測定値または推計値の誤差の影響が激減するので測定値の信頼性が飛躍的に向上し，測定を簡素化できる．

表-4　2種類の評価量のまとめ.

	変動係数の平均値$\overline{C_V}$ (%)		推計した流量で計算した排出量R_Sの誤差の平均値$\overline{e_P}$(%)		
			エンジン回転数を使用		式(4)
	R_{GpW}	R_{GpCO2}	R_{GpW}	R_{GpCO2}	
NOx	8.7	0.4	12.2	0.7	1.1
CH_4	9.4	1.8	14.0	3.1	3.8
N_2O	9.1	1.4	13.4	2.5	3.1
CO	8.2	2.5	10.3	3.8	4.3

$$C_V = \frac{\sigma}{\bar{R}} \cdot 100 \tag{5}$$

$$e_P = \left|1 - \frac{R_S}{R_T}\right| \cdot 100 \tag{6}$$

以上より，建設機械の動作時における排出ガスの評価量として「CO_2比の排出量R_{GpCO2}」を選定する．本節以降では排出ガスの流量をエンジン回転数からの推計値とし，R_{GpCO2}で評価した結果について述べる．排出ガスの流量を推計値としても実測値とした場合とほぼ同一の評価結果となる．参考として流量計1（2015年度，および2016年度双方で使用 ）の測定値を流量とした場合の評価結果を**付録5**に記載する．

なお，式(1)と式(2)の関係式は**付録４**の式(付.3)に示す．また，測定値の関係は**付録６**に示す．将来，このようなデータが必要になる可能性があるので，排出ガス流量およびエンジントルクの測定値は参考用として取得しておくことが望ましいと考えている．

(2)　測定する動作の選定

a) 動作別の測定値

2015年度は，測定時期，オペレータ，および運転モードの条件を2期（10月と1月)，3人，および2種類（ パワー優先と燃費優先 ）の組み合わせとした約30～40分間の測定を合計で12回（2×3×2）行っている（ **付録１**）．ここでは測定値の傾向を示すことを目的として，典型的なデータを抜粋して示す．**図-8**は動作条件別のNOx (組成はNO_2とNOとした. NOはNO_2に化学変化するので法令[23)]に準じて NO_2の密度で質量を計算した．）の測定値である(実測の流量の場合は**図-15**）．一つのプロットは3人×2期=6回の平均値である. 平均的な動力は, 大きい順に「走行」，「ならし（模擬動作）」，「掘削積込(模擬動作)」，「掘削(実作業)」，「待機」となり，パワー優先モード(P)の方が燃費優先モード(E)より大きかった. また，R_{GpCO2}は，動力の小さい「待機」が最も大きく，動力が大きくなると減少する傾向があり，他のガスでも同様な傾向がみうけられた参考までにEモードとPモードとの排出量の比を**付録７**に示す.

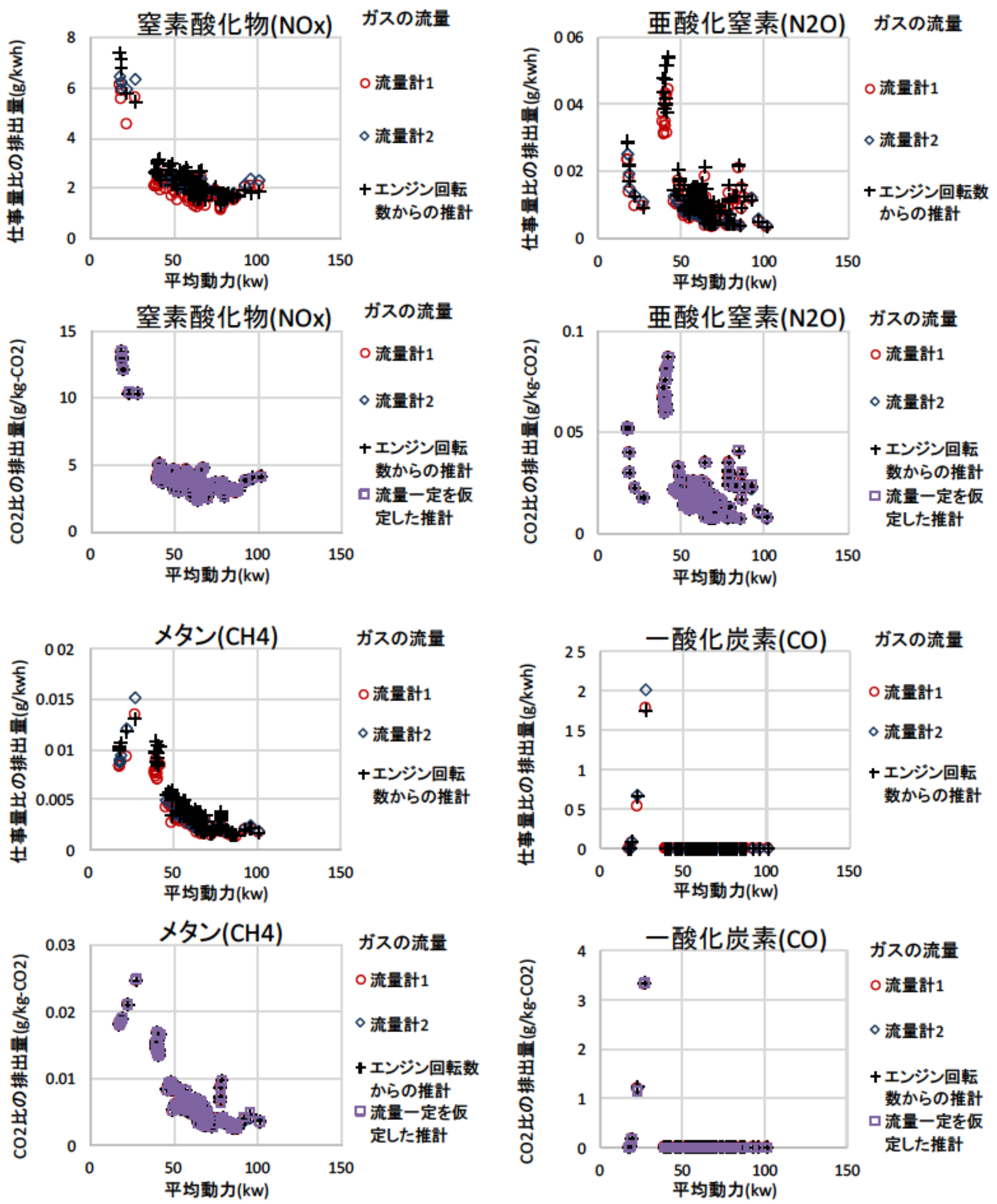


図-7　多様な動作条件での排出ガスの評価量.

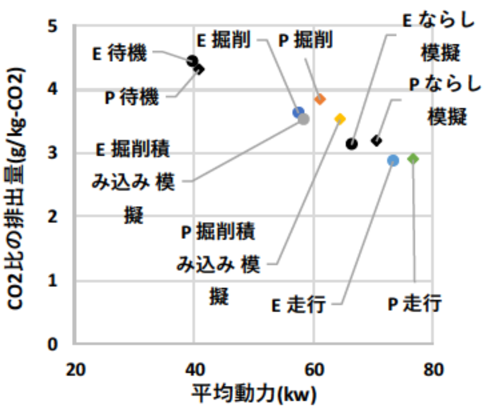


図-8　動作条件別の NOx の測定値.

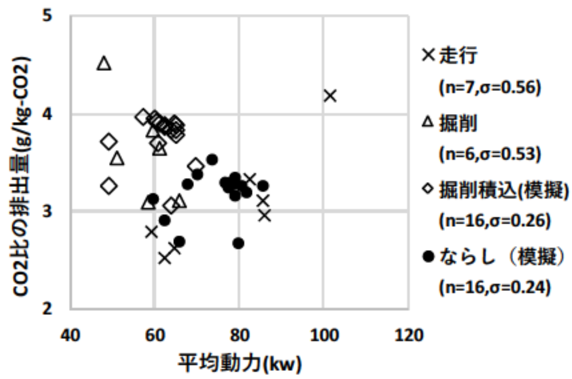


図-9　動作別の NOx の測定値の分布.

土木学会論文集 G(環境), Vol.73, No.6, pp. II_321- II_332, 2017. “建設機械の排出ガス測定にかかる信頼性向上と簡素化”より転載.

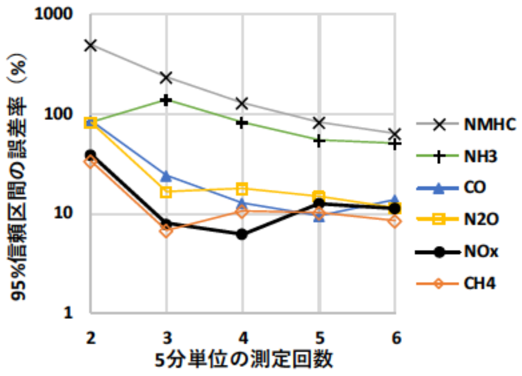


図-10「待機」の誤差率.

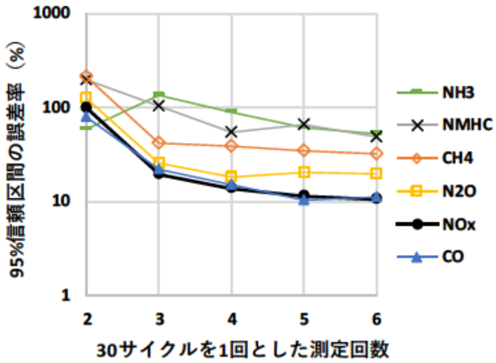


図-11「ならし（模擬動作）」(運転者 3 人)の誤差率.

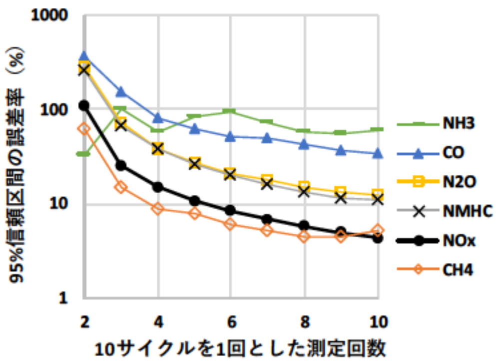


図-12「ならし（模擬動作）」(運転者 1 人)の誤差率.

b）測定する動作の選定

前項で示したように「待機」は他の動作よりも排出量が大きいことから，今後，排出ガスの実情を把握する際の測定は必須と考えた． 他の動作は傾向が類似しているのでさらに詳細な解析を行い選定することとした．図-9は2015年度，および2016年度双方の測定値から燃費優先モード，スロットルMAXでの「走行」，「掘削（実作業）」，「掘削積込（模擬動作）」，「ならし（模擬動作）」の測定値の分布を示したものである(実測の流量の場合は図-16)．付録 1 に示すように測定数は動作により異なる．凡例にR_{GpCO2}の標準偏差（σ）を併記している．各種の動作のなかで「走行」の動力が最も大きいが，偏差が大きい(σ=0.56)．これは図-4に示すように走行条件が土の状態により異なることに起因すると考えている．「掘削（実作業）」と「掘削積込（模擬動作）」は傾向が近い，「ならし（模擬動作）」は，「掘削（実作業）」，および「掘削積込（模擬動作）」よりも動力が大きく，排出量の測定値は他の動作よりも安定している(σ=0.24)．動力が大きい要因として動作が早いこと，および旋回の工程(負荷が小さい)がないことが考えられる．測定値が安定している要因として，模擬動作であることが考えられる．以上から「待機」以外の動作のなかから「ならし（模擬動作）」を選定する．測定する動作を「待機」と「ならし（模擬動作）」に限定することで，測定器を建設機械に搭載する必要がなくなるので測定用の架台の製作・設置が不要になること，建設機械を試験場まで搬送しなくても測定できること，および測定器の設定時間を短縮できることから，測定に要する時間，および費用を大きく低減させることができる．

(3) 測定回数と母平均の推定値の誤差

a）母平均の推定値の誤差

エンジンを機械に搭載して動作させる条件での測定では，ばらつき（偏差）による誤差（すなわち偶然誤差）の影響を大きく受けると考えられる．測定値Rの平均$\bar{R}$から母集団の平均$\overline{R_{\mathrm{T}}}$を推定する際には，測定数$n$を増やすことで$\bar{R}$を真値$\overline{R_{\mathrm{T}}}$（ただし，ここでいう真値は偶然誤差を含まないが，系統誤差は含む）に近づけることができる．そこで本論文の測定値について，「n」と「$\bar{R}$ の 95%信頼区間の誤差率e_{r}（%）」の関係を調べ，e_{r}が10%以下となる条件（すなわち，測定値の平均から推定した母集団の平均の誤差が95%の確率で10%以下となる条件）について考察した. 10%以下としたのは，オンロード車の排出ガス測定にかかる学識経験者 2 名（後述する謝辞に記載した方とは一致しない.）に対して排出ガス測定のおおまかな精度についてヒヤリングし，得られた回答が 10%程度で一致したことを参考にした．計算式は付録 4 の（付.7），（付.8），および(付.9）に示す. (付.7)，および(付.8)，は他の研究で統計数理研究所に相談して得た知見を拠り所としている．

b）待機

2015 年度の「待機」の測定は測定時間を 5 分間で統一していた．このうち E モード，スロットル MAX を動作条件とした測定値が 6 個あったので，得られたと想定する測定値を 2 個から 6 個まで一つづつ増加させて誤差を推定した　(図-10 (実測の流量の場合は図-17))．測定回数を 3 回以上にすると NOx の誤差率は 10%程度以下になるが，NMHC および NH_3 の誤差率を 10%程度に抑制するためには膨大な測定数を要すると推定される．

土木学会論文集 G(環境), Vol.73, No.6, pp. II_321- II_332, 2017. “建設機械の排出ガス測定にかかる信頼性向上と簡素化”より転載.

NOx は, 他のガスよりも桁違いに濃度が高く(付録３参照), 将来的に規制値と比較する際に測定値の信頼性が議論となる可能性が高いこと, および 国内で導入されることとなった RDE 試験 [3]において唯一規制対象とされたこと, ならびにすべてのガスの誤差率を 10%以下にすることは現実的に不可能であることから, 必要な測定回数はNOxに着目して定めることが妥当と考えた. 他のガスについては, 測定値の平均値に誤差の推定値を加算した値で評価する方法等が考えられる.

以上, NOx については, 5 分間を 1 回とした測定を 3 回行うことで誤差率が10%程度以下の測定値を得ることができると推定したが, 今後, 各種の条件で測定を行い, 測定値の偏差が大きくなる要因, および安定した測定値が得られる条件が明らかになれば, 見直しが必要と考えた.

c）ならし（模擬動作）

2015 年度の「ならし（模擬動作）」の測定は 1 回の測定回数を 30 サイクルで統一して測定した. 「待機」と同様にＥモード, スロットル MAX での測定値から誤差を推定した (図-11 (実測の流量の場合は図-18)) . 「ならし（模擬動作）」は「待機」とは異なり運転者による違いの影響を受けた可能性がある. 2016 年度は同一の運転者で 10 サイクルを 1 回として測定した. Ｅモード, スロットルMAXでの誤差率を図-12に示す(実測の流量の場合は図-19). 運転者が異なる場合には 30 サイクル×6 回=180, 同一の場合は 10 サイクル×6 回=60 の測定数が確保できれば, NOx の誤差率は 10%程度以下となる. 他のガスについては, 測定値の平均値に誤差の推定値を加算した値で評価する方法等が考えられる.

以上, NOx については, 運転者を 3 人とし, それぞれ 60 サイクルの測定を行うことで誤差率が10%程度以下の測定値を得ることができると推定したが, 今後, 各種の条件で測定を行い, 測定値の偏差が大きくなる要因, および安定した測定値が得られる条件が明らかになれば, 見直しが必要と考えた.

4. まとめ

建設機械が「待機」,「走行」,「ならし (模擬動作)」,「掘削（実作業）」, および「掘削積込（模擬動作）」の動作で排出するCO_2, CO, CH_4, N_2O, NO, NO_2, NMHC (非メタン炭化水素), およびNH_3を土木研究所の構内で測定した. 測定にかかる信頼性向上と簡素化を目的としたデータ解析を行い, 以下の結論を得た.

◆排出量の評価量は, エンジンの単体試験で使用している仕事量比 (g / kwh) ではなく, CO_2比 (g / kg-CO_2) を採択することで, 動力 (kw), および排出ガス流量の測定誤差の影響を受けなくなり, 測定値の信頼性が向上するとともに測定が簡素化される.

◆測定する動作は, 「待機」, および「ならし（模擬動作）」の2種類を選定することで, 動力の小さい条件, および動力の大きい条件の双方の測定値が得られる. 「ならし（模擬動作）」は, 走行・掘削等の他の動力が大きい動作よりも測定値の偏差が小さく信頼性が高い. この二つの動作に限定することで測定が簡素化される.

◆「待機」の動作では 5 分間を 1 回とした測定を 3 回行い, 「ならし（模擬動作）」の動作では, 60 サイクルを 1 回とした測定を異なる運転者で 3 回行い, 測定値をそれぞれ平均すれば, NOx については 95%の確率で偶然誤差が 10%以内になると推定した.

今後, さらなる信頼性向上と簡素化のための測定を行うとともに, 測定対象とする建設機械を増やし, 排出ガス量の実情把握に資する予定である.

5. 謝辞等

本稿は2015年度に土木研究所の野村正之, 伊藤圭, 上野仁士, および西山章彦が測定したデータに2016年度の測定値を加えて解析したものである. また, 測定および測定値の解析については, 共同研究を実施している国立環境研究所の近藤美則氏と今野秀徳氏, ならびに交通安全環境所の山本敏朗氏にご指導をいただいた. 関係の皆様に謝意を表する.

付録１　測定時の動作条件

次頁の上段に示す.

付録２　FTIRの測定原理

FTIR の測定原理は以下である. 気体が吸収する赤外線の波長は気体の種類により異なり（例 : CO_2およびCH_4は, 4.3 および 3.7 μm）, 多種類の混合気体に広い波長分布を光源（シリコンカーバイド）とした赤外線を通過させると各気体で複合的に赤外線が吸収される. 一方, 図-13 のとおり, (1)広い波長分布の赤外線を(2)半透鏡で反射光と透過光に分割し, (3)それぞれ固定鏡と移動鏡で反射させて(4)再合成すると干渉光が得られる.
干渉光を検出器で測定した強度は, 移動鏡の位置を変化させると各波長固有の周期で変化するので, 測定対象の気体を通過させた場合の出力をフーリエ変換し, 気体が

2015年度

操縦者	モード	スロットル	Cold start	動作	模擬作業の別	開始時刻	動作時間
A	P	MAX		待機		10/20 11:26 06	05分12秒
A	P	MAX		走行		10/20 11:31:18	05分01秒
A	P	MAX		ならし	模擬	10/20 11:38 21	10分15秒
A	P	MAX		掘削		10/20 11:50 58	03分07秒
A	P	MAX		掘削積込	模擬	10/20 11:55 51	04分43秒
A	E	MAX		待機		10/20 13:58:10	05分18秒
A	E	MAX		走行		10/20 14:03 28	05分10秒
A	E	MAX		ならし	模擬	10/20 14:09 54	11分15秒
A	E	MAX		掘削		10/20 14:24 59	03分19秒
A	E	MAX		掘削積込	模擬	10/20 14:30 23	04分47秒
B	P	MAX		待機		10/21 9:55:43	09分56秒
B	P	MAX		走行		10/21 10:05:19	05分09秒
B	P	MAX		ならし	模擬	10/21 10:11 31	16分53秒
B	P	MAX		掘削		10/21 10:29:40	01分51秒
B	P	MAX		掘削積込	模擬	10/21 10:37 06	02分55秒
B	E	MAX		待機		10/21 10:54 37	08分37秒
B	E	MAX		走行		10/21 11:03:14	05分05秒
B	E	MAX		ならし	模擬	10/21 11:09 36	20分17秒
B	E	MAX		掘削		10/21 11:31 33	01分49秒
B	E	MAX		掘削積込	模擬	10/21 11:35 39	03分17秒
C	P	MAX		待機		10/22 9:51:47	07分42秒
C	P	MAX		走行		10/22 9:59 29	06分52秒
C	P	MAX		ならし	模擬	10/22 10:09 04	14分06秒
C	P	MAX		掘削		10/22 10:24 34	03分55秒
C	P	MAX		掘削積込	模擬	10/22 10:31 02	06分19秒
C	E	MAX		待機		10/22 10:50 06	05分05秒
C	E	MAX		走行		10/22 10:55:11	06分01秒
C	E	MAX		ならし	模擬	10/22 11:02 03	13分12秒
C	E	MAX		掘削		10/22 11:16:43	03分18秒
C	E	MAX		掘削積込	模擬	10/22 11:22 07	04分40秒
A	E	MAX		待機		1/20 14:57 57	03分06秒
A	E	MAX		走行		1/20 15:01 03	04分14秒
A	E	MAX		ならし	模擬	1/20 15:05:43	08分34秒
A	E	MAX		掘削		1/20 15:15 29	02分32秒
A	E	MAX		掘削積込	模擬	1/20 15:19 28	04分02秒
B	P	MAX		待機		1/21 11:22:12	02分52秒
B	P	MAX		走行		1/21 11:25 04	04分47秒
B	P	MAX		ならし	模擬	1/21 11:30 25	09分40秒
B	P	MAX		掘削		1/21 11:41:11	02分06秒
B	P	MAX		掘削積込	模擬	1/21 11:44:49	02分28秒
B	E	MAX		待機		1/21 13:14 23	03分19秒
B	E	MAX		走行		1/21 13:17:42	04分14秒
B	E	MAX		ならし	模擬	1/21 13:22 56	09分16秒
B	E	MAX		掘削		1/21 13:33 30	02分00秒
B	E	MAX		掘削積込	模擬	1/21 13:37 30	02分30秒
C	P	MAX		待機		1/25 13:36 55	02分57秒
C	P	MAX		走行		1/25 13:39 52	02分38秒
C	P	MAX		ならし	模擬	1/25 13:43 23	08分51秒
C	P	MAX		掘削		1/25 13:53:47	03分05秒
C	P	MAX		掘削積込	模擬	1/25 13:58 52	04分02秒
C	E	MAX		待機		1/25 14:23:48	04分08秒
C	E	MAX		走行		1/25 14:27 56	04分40秒
C	E	MAX		ならし	模擬	1/25 14:32 57	08分49秒
C	E	MAX		掘削		1/25 14:46 37	02分54秒
C	E	MAX		掘削積込	模擬	1/25 14:53 53	04分01秒
A	P	MAX		待機		1/26 9:34 53	03分29秒
A	P	MAX		走行		1/26 9:38 22	04分24秒
A	P	MAX		ならし	模擬	1/26 9:43 37	08分45秒
A	P	MAX		掘削		1/26 9:54 00	02分50秒
A	P	MAX		掘削積込	模擬	1/26 9:59 03	04分04秒

2016年度

操縦者	モード	スロットル	Cold start	動作	模擬作業の別	開始時刻	動作時間
D	P	MAX	Cold	待機		12/23 10:19:15	10分00秒
D	E	MIN		待機		12/23 11:00:59	09分31秒
D	E	MAX		待機		12/23 11:10:50	04分10秒
D	P	MAX		待機		12/23 11:15:40	04分20秒
D	P	MIN		待機		12/23 11:20:40	04分40秒
D	P	MAX		走行		12/23 13:22:09	04分51秒
D	P	MAX		ならし	模擬	12/23 13:31:14	04分40秒
D	P	MAX		ならし	模擬	12/23 13:36:10	03分48秒
D	P	MAX		ならし	模擬	12/23 13:42:10	03分38秒
D	P	MAX		ならし	模擬	12/23 13:46:23	07分04秒
D	P	MAX		ならし	模擬	12/23 13:56:00	05分27秒
D	P	MAX		掘削積込	模擬	12/23 14:04:58	03分38秒
D	P	MAX		掘削積込	模擬	12/23 14:09:17	03分18秒
D	P	MAX		掘削積込	模擬	12/23 14:13:17	03分14秒
D	P	MAX		掘削積込	模擬	12/23 14:17:10	03分09秒
D	P	MAX		掘削積込	模擬	12/23 14:21:08	02分48秒
D	P	MAX		掘削積込　乱暴	模擬	12/23 14:50:47	03分00秒
D	P	MAX		掘削積込　普通	模擬	12/23 14:56:06	02分51秒
D	P	MAX		掘削積込　穏か	模擬	12/23 15:00:58	03分32秒
D	P	MAX		掘削　乱暴		12/23 15:10:03	01分54秒
D	P	MAX		掘削　普通		12/23 15:13:03	01分55秒
D	P	MAX		掘削　穏か		12/23 15:16:03	02分46秒
D	P	MAX	Cold	待機		12/24 8:42:17	03分48秒
D	P	MAX		走行		12/24 8:51:06	03分36秒
D	P	MAX		ならし	模擬	12/24 8:58:03	02分56秒
D	P	MAX		掘削積込	模擬	12/24 9:04:03	03分59秒
D	P	中間		掘削積込	模擬	12/24 9:37:00	03分39秒
D	P	中間		掘削積込	模擬	12/24 9:41:00	02分40秒
D	P	中間		掘削積込	模擬	12/24 9:44:00	02分29秒
D	P	中間		掘削積込	模擬	12/24 9:47:00	02分31秒
D	P	中間		掘削積込	模擬	12/24 9:50:00	03分19秒
D	P	中間		走行		12/24 9:56:00	03分39秒
D	P	中間		ならし	模擬	12/24 10:02:00	02分41秒
D	P	中間		ならし	模擬	12/24 10:05:00	02分35秒
D	P	中間		ならし	模擬	12/24 10:08:00	02分24秒
D	P	中間		ならし	模擬	12/24 10:11:00	02分40秒
D	P	中間		ならし	模擬	12/24 10:14:00	02分28秒
D	E	MAX		ならし	模擬	12/24 10:46:02	02分35秒
D	E	MAX		ならし	模擬	12/24 10:49:02	02分22秒
D	E	MAX		ならし	模擬	12/24 10:52:15	02分06秒
D	E	MAX		ならし	模擬	12/24 10:55:03	02分25秒
D	E	MAX		ならし	模擬	12/24 10:58:02	02分17秒
D	E	MAX		ならし	模擬	12/24 11:01:02	02分21秒
D	E	MAX		ならし	模擬	12/24 11:04:02	02分20秒
D	E	MAX		ならし	模擬	12/24 11:07:02	02分25秒
D	E	MAX		ならし	模擬	12/24 11:10:02	02分12秒
D	E	MAX		ならし	模擬	12/24 11:13:02	02分05秒
D	E	MAX		走行		12/24 11:17:02	06分11秒
D	E	MAX		掘削積込	模擬	12/24 11:26:02	02分53秒
D	E	MAX		掘削積込	模擬	12/24 11:29:02	02分44秒
D	E	MAX		掘削積込	模擬	12/24 11:32:02	02分58秒
D	E	MAX		掘削積込	模擬	12/24 11:36:02	03分06秒
D	E	MAX		掘削積込	模擬	12/24 11:40:04	02分51秒
D	E	MAX		掘削積込	模擬	12/24 11:43:02	02分40秒
D	E	MAX		掘削積込	模擬	12/24 11:46:02	02分39秒
D	E	MAX		掘削積込	模擬	12/24 11:49:02	02分54秒
D	E	MAX		掘削積込	模擬	12/24 11:53:02	02分32秒
D	E	MAX		掘削積込	模擬	12/24 11:56:02	02分37秒

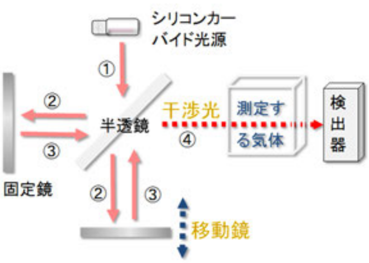


図-13　FTIRの模式図.

ない場合と比較すれば波長別の吸収率を計算できる．さらに波長別の吸収率を逆行列等で逆解析することで各種の気体の濃度を計算できる．このように光を半透鏡で分割し，再合成させた干渉光を観測する測定方法は，特殊相対性理論の立証や重力波の検出で使用された技術（マイケルソン干渉計）を応用したものであり，フーリエ変換は音や振動の周波数分析で多用されている計算方法である．ともに製造業，環境，医学など実務で広範に活用されている.

付録３　動作別の測定値（その他のガス）

図-14 に示す.

付録４　計算式

計算式の詳細を次頁の上段に示す.

土木学会論文集 G(環境), Vol.73, No.6, pp.Ⅱ_321-Ⅱ_332, 2017.“建設機械の排出ガス測定にかかる信頼性向上と簡素化”より転載.

計算式	番号	記号
$R_{\mathrm{GpW}} = M_{\mathrm{G}} / W$	(1)	R_{GpW} ： 仕事量比の排出量 （ g / kwh ），M_{G} ： 排出ガスの質量 （ g ），W ： 仕事量 （ kwh ）
$M_{\mathrm{G}} = \int \frac{C_{\mathrm{G}} \rho_{\mathrm{G}} V}{1{,}000{,}000} dt$	(付. 1)	C_{G} ： 排出ガスの濃度 （ ppm ）， ρ_{G} ： 排出ガスの密度 （ g / ㎥ ），V ： 排出ガスの流量 （ ㎥ / s ）
$W = \int \frac{2\pi R_{\mathrm{E}} T_{\mathrm{E}}}{1000 \cdot 3600} dt$	(付. 2)	R_{E} ： エンジン回転数 （ / s ）， T_{E} ： トルク(N・m)
$R_{\mathrm{GpCO2}} = M_{\mathrm{G}} / M_{\mathrm{CO2}}$	(2)	R_{GpCO2} ： CO_2 質量比の排出量 （ g / kg-CO_2 ），M_{CO2} ： CO_2 の量 （ kg ）
$R_{\mathrm{C\_GpCO2}} = \int C_{\mathrm{G}} dt / \int C_{\mathrm{CO2}} dt$	(3)	$R_{\mathrm{C\_GpCO2}}$ ： CO_2 濃度比の排出量，C_{CO2} ： CO_2 の濃度 （ ppm）
$R_{\mathrm{GpCO2}} \cong 1{,}000 \cdot R_{\mathrm{C\_GpCO2}} \cdot \rho_{\mathrm{G}} / \rho_{\mathrm{CO2}}$	(4)	ρ_{CO2} ： CO_2 の密度 （ g / ㎥ ）
$C_{\mathrm{V}} = \frac{\sigma}{\bar{R}} \cdot 100$	(5)	C_{V}： 変動係数. σ： 排出量の標準偏差，$\bar{R}$： 排出量の平均値.
$e_{\mathrm{P}} = \left\lvert 1 - \frac{R_{\mathrm{S}}}{R_{\mathrm{T}}} \right\rvert \cdot 100$	(6)	e_{P} ： 誤差 （ % ），R_{S}： 推定を含む測定値，R_{T}： 真値とみなした測定値.
$k = \frac{R_{\mathrm{GpW}}}{R_{\mathrm{GpCO_2}}} = \frac{M_{\mathrm{CO_2}}}{W} = \frac{1}{\eta} m$	(付. 3)	k ：仕事量比の排出量と CO_2 比の排出量の比， η ：エンジンの熱効率，m ： 軽油の CO_2 排出原単位(kg/kwh). 0.0687 kg//MJ （環境省 web site 掲載値） を採択して単位を変換すれば，$m = 0.24732$ kg/kwh.
$V_{\mathrm{P}} = R_{\mathrm{E}} \frac{D}{2} r_{\mathrm{G}}$	(付. 4)	V_{P} ： エンジン回転数から推定した排出ガスの流量の概算値（ ㎥ / s ）. 2 回転で排気量に相当するガスが排出されると仮定， D ： エンジンの排気量 （ ㎥ ），r_{G} ： 排気と吸気の体積比（同一温度に換算）. 注）この推定値は過給を考慮しないこで過小， 排気再循環 （ EGR： Exhaust Gas Recirculation ）と体積効率を考慮しないことで過大となる.
$r_{\mathrm{G}} = 1/(1 - r_{\mathrm{F}} \frac{C_{\mathrm{CO2}}}{1{,}000{,}000})$	(付. 5)	r_{F} ： 軽油の燃焼での体積増加率. 軽油成分 $C_{14}H_{30}$， $C_{15}H_{32}$， $C_{16}H_{34}$ のうち中央値的な $C_{15}H_{32}$ の燃焼式 $C_{15}H_{32}+23O_2=15CO_2+16H_2O$ を仮定すると $r_{\mathrm{F}} = (-23 + 15 + 16) / 15$.
$r_{\mathrm{G}} = 1$	(付. 6)	CO_2 の濃度の上限は約 15%， 平均的には 5%程度なので，r_{G} は最大で約 1.09， 平均で 1.03 程度になるが， 排気再循環 EGR を考慮しないラフさとは不釣り合いなことから本論文の解析では $r_{\mathrm{G}} = 1$ とした.
$e_{\mathrm{t}} = t(n-1, \frac{\alpha}{2}) \frac{s}{\sqrt{n}}$	(付. 7)	e_{t}： 母集団の平均の推定値の誤差，$t(n-1, \frac{\alpha}{2})$： スチューデントの t 分布の t の値，n： サンプル数，α： 危険率 （ 95%信頼区間の場合は 0.05 ），s^2： 不偏分散.
$P\{\bar{x} - e_{\mathrm{t}} < u < \bar{x} - e_{\mathrm{t}}\} = 1 - \alpha$	(付. 8)	P： 確率，$\bar{x}$： サンプル平均，u： 母集団の平均.
$e_{\mathrm{r}} = \frac{e_{\mathrm{t}}}{\bar{x}} \cdot 100$	(付. 9)	e_{r}： 誤差率 （ % ）

付録５ 排出ガス流量を実測とした場合の評価結果

図-15, 16, 17, 18, 19 に示す.

付録６ 仕事量比での排出量とCO_2比での排出量の比

本論文での NOx の測定値を図-20 に示す. 縦軸は式(付.3) に相当する値.

付録７　燃費優先モードとパワー優先モードの排出量の比較

燃費優先モード(E)とパワー優先モード(P)のCO_2比での排出量の比を図-21に示す.

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) 深野泉：これが欧州の RDE 試験だ, Nikkei Automotive, 2016.11.
3) 国土交通省：排出ガス不正事案を受けたディーゼル乗用車等検査方法見直し検討会 最終とりまとめ 平成 29 年 4 月 20 日.
4) 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.
5) 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.

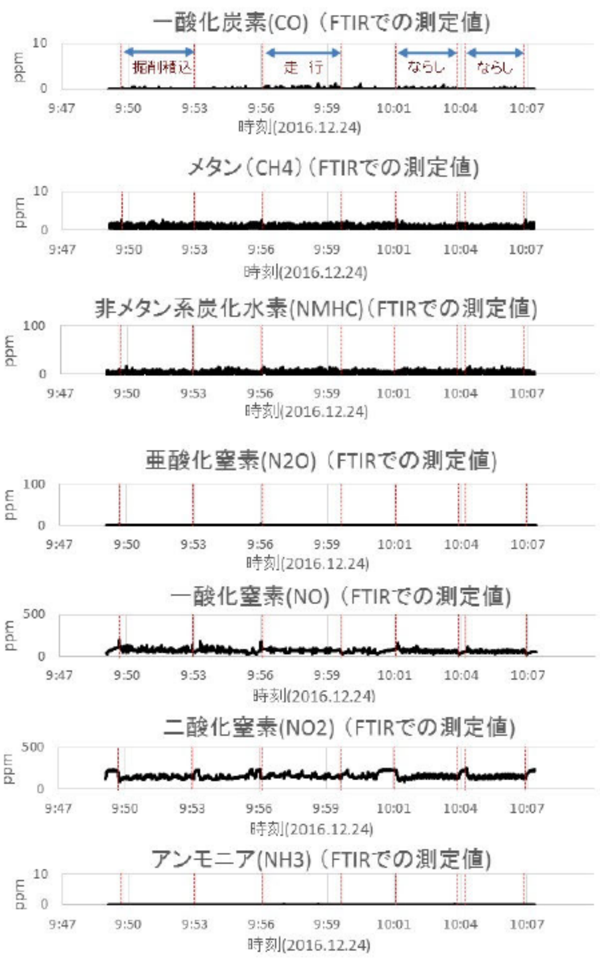


図-14　測定値の時間変化の例(2).

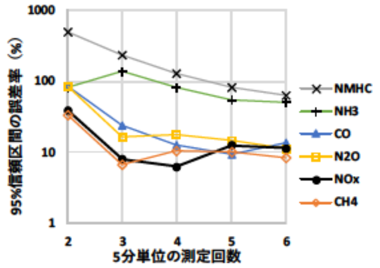


図-17「待機」の誤差率（ 流量実測の場合 ）.

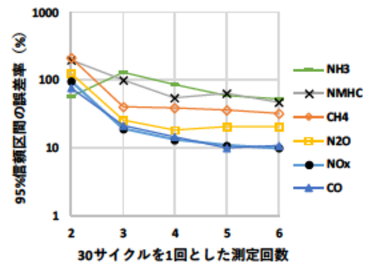


図-18「ならし（模擬動作）」(運転者 3 人)の誤差率（ 流量実測の場合 ）.

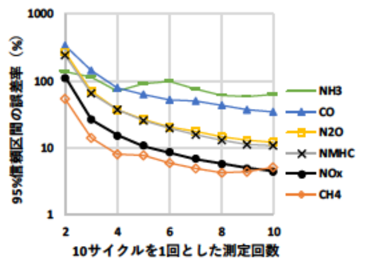


図-19「ならし（模擬動作）」(運転者 1 人)の誤差率（ 流量実測の場合 ）.

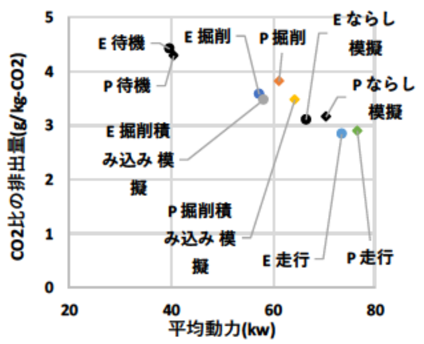


図-15　動作条件別のNOxの測定値（ 流量実測の場合 ）.

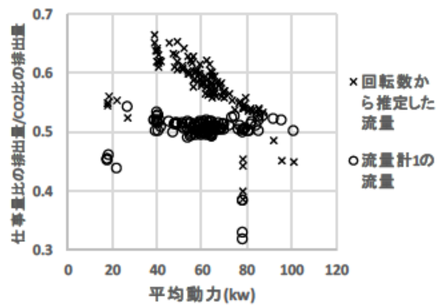


図-20　仕事量比での排出量とCO_2比での排出量の比.

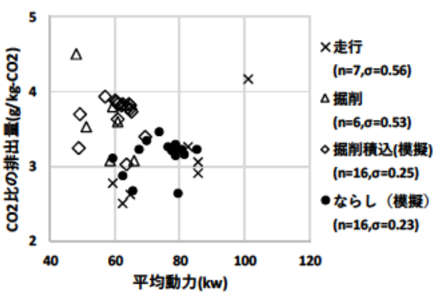


図-16　動作別のNOxの測定値の分布（ 流量実測の場合 ）.

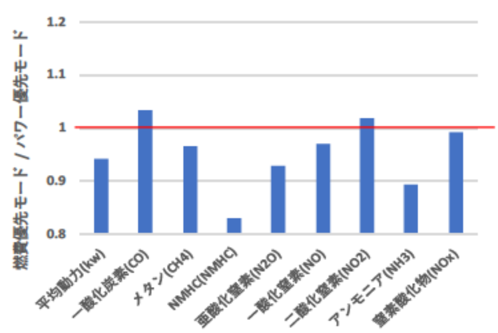


図-21　燃費優先モードとパワー優先モードのCO_2比排出量.

土木学会論文集 G(環境), Vol.73, No.6, pp. II_321- II_332, 2017.“建設機械の排出ガス測定にかかる信頼性向上と簡素化”より転載.

6) 山本敏朗, 佐藤進, 常山順子, 岩田恒夫, 小川恭弘: 車載式フーリエ変換赤外分析装置を用いたガソリン排出ガス中の N_2O および CH_4 の解析, 自動車技術会論文集, Vol.41, No.6, 2010.
7) Abolhasani Saeed, Frey H. Christopher, Kim Kangwook, Rasdorf William, Lewis Phil, Pang Shih-Hao: Real-world in-use activity, fuel use, and emissions for nonroad construction vehicles: A case study for excavators, JOURNAL OF THE AIR & WASTE MANAGEMENT ASSOCIATION, vol.58, no.8, pp.1033-1046, 2008.
8) Frey H. Christopher, Kim Kangwook, Pang Shih-Hao, Rasdorf William J.: Characterization of Real-World Activity, Fuel Use, and Emissions for Selected Motor Graders Fueled with Petroleum Diesel and B20 Biodiesel, JOURNAL OF THE AIR & WASTE MANAGEMENT ASSOCIATION, vol.58, no.10, pp.1274-1287, 2008.
9) Armas O, Lapuerta M, Mata C, Perez D: Online Emissions from a Vibrating Roller Using an Ethanol-Diesel Blend during a Railway Construction, ENERGY & FUELS, vol.23, pp.2989-2996, 2009.
10) U.S. Environmental Protection Agency, Populations, Activity and Emissions of Diesel Nonroad Equipment in EPA Region 7, 2010.
11) Frey H. Christopher, Rasdorf William, Lewis Phil: Comprehensive Field Study of Fuel Use and Emissions of Nonroad Diesel Construction Equipment, TRANSPORTATION RESEARCH RECORD, no.2158, pp.69-76, 2010.
12) Fu Mingliang, Ge Yunshan, Tan Jianwei, Zeng Tao, Liang, Bin: Characteristics of typical non-road machinery emissions in China by using portable emission measurement system, SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT, vol.437, pp.255-261, 2012.
13) Heidari Bardia, Marr Linsey C.: Real-time emissions from construction equipment compared with model predictions, JOURNAL OF THE AIR & WASTE MANAGEMENT ASSOCIATION, vol.65, no.2, pp.115-125, 2015.
14) 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.
15) 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.
16) 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.
17) 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.
18) 吉永弘志, 野村正之: 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, 平成 28 年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集, pp.109-114, 2016.
19) 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 NOx, NH_3 および N_2O 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.
20) 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.
21) 山本敏朗, 堤玲子, 水嶋教文, 渡辺敬太郎: NOx センサベースの車載計測器による路上走行時における重量貨物車の NOx 排出量評価, 自動車技術会論文集, Vol.46, No.5, 2015.
22) 一般社団法人日本建設機械施工協会標準部会, JCMAS H020:2014.
23) 道路運送車両の保安基準の細目を定める告示　別添 43 ディーゼル特殊自動車排出ガスの測定方法.

（2017.3.24　受付）

RELIABILITY IMPROVEMENT AND SIMPLIFICATION OF METHOD FOR MEASURING EXHAUST GAS FROM EARTH-MOVING MACHINERY

Hiroshi YOSHINAGA

Exhaust gas from earth-moving machinery is regulated using chamber tests for the engines installed in the machines. On the other hand, in line with the trends in on-road vehicles, measurements on exhaust gas emitted from working earth-moving machinery have been reported in Japan and other countries. The reliability of such measured values must be determined in order to discuss the magnitude, and measurement methods must be simplified in order to obtain much data on various machines in the future. This paper proposes using CO_2-based emission rate (g/kg-CO_2) to evaluate the amount of gas emissions, and choosing ‘Idling’ and ‘Grading (simulated work)’ when measuring working machines in order to improve the reliability of measured values and to simplify the measurement. It is predicted that measurement of 5 minutes of ‘Idling’ performed three times, and 60 cycles of ‘Grading (simulated work)’ performed three times by different machine operators can control the precision of estimated random errors of the measured NOx values to no more than 10% with 95% reliability.

土木学会論文集 G(環境), Vol.73, No.6, pp.Ⅱ_321-Ⅱ_332, 2017. “建設機械の排出ガス測定にかかる信頼性向上と簡素化”より転載.

28. 排出ガスの測定値から読み解く燃費・熱効率と燃費改善策

(国研) 土木研究所　○　吉永　弘志

1．はじめに

排出ガスの測定においては, ガスの濃度のみならず, エンジン回転数, 排出ガスの流量等も測定する。また, 建設機械の排出ガスを測定した文献のなかには, 仕事量比および燃料の質量比の双方で排出ガス量が記載されているものがある。測定値等は異なる発想で再解析すれば新たな知見を得ることができる。本稿では, 文献, および土木研究所での排出ガス測定時のデータ (以下, 「排出ガス測定データ」という。) を読み解いて得られた知見を報告する。文献の解析では, 油圧ショベルの平均的な熱効率η, および年式が新しくなると排出ガス量が減少する相関図を示す。排出ガス測定データの再解析では, 図-1 の模式図の A, B, および E の関係を利用してエンジン回転数と CO_2 濃度のデータから燃料消費量 (以下, 「燃費」という。) が計算できることを示す。さらに, 燃費改善策についての考察を述べる。

2．文献

2.1　調査方法

建設機械に測定器を搭載して排出ガスを測定した文献をオンライン・データベース DB で検索した。DB は科学技術振興機構 (JST) の科学技術文献情報 (主として和文) の JDreamⅢ, および米 Thomson Reuters 社の Web of Science とした。また, これらの文献に記載された情報を元に web site で公開されている文献も入手した。

2.2　調査結果と活用策 1−燃費と CO_2 の関係

2.2.1 調査結果

Phill Lewis, P.E.は North Carolina State University の H. Christopher Frey が測定した [1]34 台の建設機械の燃費 x (liter / h) と CO_2 (g / h) y の関係を整理し, 式(1)の関係が得られた旨を報告している [2]。この値は環境省が公表 [3]している軽油の排出係数から算出した値 2624 $\times 10^3$ g-CO_2/ m^3-軽油と整合する。さらに文献ではアイドリングによる過剰な CO_2 排出量の測定値についても述べている。式(2)で定義した operational efficiency η (ここでは「熱効率η」とは異なる変数。) 過剰な燃料 additional fuel の割合N_Eの関係を散布図にしており, 0.32~0.97 の範囲で分布するηと 0~0.5 の範囲で分布するN_Eの回帰式を式(3)としている。

$$y = 2638x \quad (R^2 = 0.9952) \tag{1}$$

$$\eta = \frac{\text{Nonidle Time}}{\text{Nonidle Time} + \text{Idle Time}} \tag{2}$$

$$N_E = -0.41 \cdot \ln(\eta) - 0.03 \quad (R^2 = 0.85) \tag{3}$$

2.2.2 活用策

自動車の燃費測定では CO_2 等の測定によるカーボンバランス法も使用されている(文献例 [4])。上記の文献は, 建設機械についても, カーボンバランス法で燃費が測定できることの拠り所, および建設機械のアイドリングストップ機能の効果を予測する際の参考として活用できる。

2.3 調査結果と活用策 2−熱効率

2.3.1 調査結果

建設機械の排出ガスは国内外ともに排出ガスの質量 M_G (g)と仕事量W (kwh)の比R_{Gpw} (g / kwh)で規制されているが, 収集した海外の文献の排出ガス量の単位は図-2 となった。エンジンのトルクは建設機械に搭載した条件では実測できないため, エンジンの制御用ユニット(ECU：Engine Control

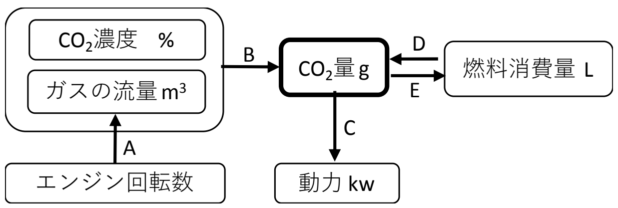


図-1　CO_2 等の測定値の関連の模式図.

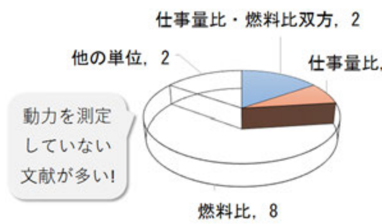
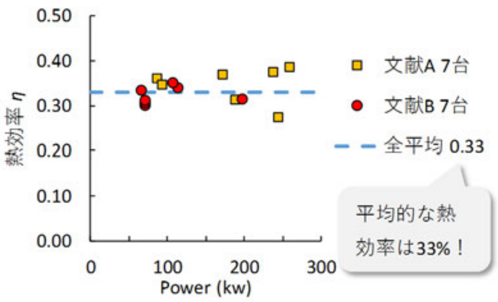


図-2　建設機械から排出されるガスの測定値の単位 (文献数) .

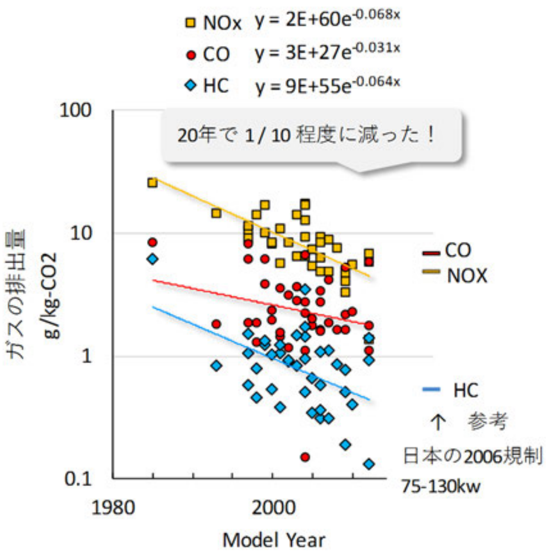
平成 29 年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集, pp.131-136, "排出ガスの測定値から読み解く燃費・熱効率と燃費改善策"より転載.

Unit）の電気信号のデータを測定値とみなすことになるが，建設機械ではインターフェースが標準化されていない[5)]ことや企業秘密的な情報が含まれているため測定できない[6)]ことがある。このため仕事量比の測定数が少ないと解釈した。

ここで油圧ショベルの仕事量比の排出量R_{GpW}が



図–3　熱効率の推定値.



図–4　油圧ショベルの年式と排出ガス量.

表–1　測定概要.

測定時期	2015 年度(10 月, 1 月), 2016 年度(12 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	
測定項目と測定装置	測定項目	測定装置
	エンジン回転数, トルク	CAN データロガー（VECTOR,GL1000）
	排出ガス濃度	FTIR（岩田電業,FAST-2200）
	排出ガス流量	ピトー管式流量計(2015 年度は 1 台，2016 年度は 2 台)
測定対象(ガス)	CO_2，CO，CH_4，N_2O，NO，NO_2，NMHC（非メタン炭化水素），NH_3他	
サンプリング周波数	5Hz（0.2 秒間隔）	

記載されている 3 編の文献での測定値から以下の方法で熱効率 η を算出した。まず，公表値[3)]等を使用して燃料比(/ガロン, /リットル)の排出量を CO_2 比の排出量 R_{GpCO2} (g / kg-CO_2)（R_{GpCO2}の補足説明は後述する。）に換算した。次に，R_{GpW}（g / kwh），R_{GpCO2}，および軽油の CO_2 排出原単位 m = 0.24732 (kg/kwh)（公表値[3)] 0.0687 kg/MJ の単位を変換した値。）と式(4)からηを算出した。計算式の詳細は**付録**に示す。3 編の文献のうち，1 編の文献値はηが 1.0 を超える等の異常値になったので除外し，他の 2 編の文献値[7),8)]から計算した 14 台のηを図-3 に示す。ηの平均値は 0.33 となった。

$$\frac{R_{GpW}}{R_{GpCO2}} = \frac{1}{\eta} m \tag{4}$$

補足：R_{GpCO2}

R_{GpCO2}は，文献[9),10),11),12)]で提唱されている排ガス評価量である。計算式の詳細は**付録**に示す。熱効率の優劣が反映できない点でR_{GpW}に劣る。しかし，R_{GpW}で使用する ECU のトルク値は実測値ではなく

室内試験値に基づく自己申告的な推計値であるのに対して，R_{GpCO2}で使用する測定値は全て後付けの測定装置で実測できる。さらに，測定が簡素化できて誤差が小さいこと[12)]，および 2.3 のように燃料比（ /ガロン, /リットル ）等で測定した測定値を活用できることで非常に優れていると考えている。

2. 3. 2　活用策

ηを仮定して式(4)にあてはめることで，R_{GpCO2}（g / kg-CO_2）とR_{GpW}（g / kwh）の換算ができる。油圧ショベルの排出ガスの測定値が仕事量比（ /kwh, /hp），または燃料比（ /ガロン, /リットル ）で記載されている 8 編の文献の測定値(45 台)を全て CO_2 比（ /kg-CO_2)に換算し，年式の関係で散布図にした(**図–4**)。右端には日本の 75-130kw クラスの 2006 規制値を 2. 2 の方法で換算した値を併記している。油圧ショベルが排出する NOx, CO, HC はおおむね 20 年間で 1/10 に抑制されたと解釈できる。

3．排出ガス測定データ

土木研究所が 2015 年度に測定した排出ガス量については既に報告している[12),13)]。2016 年度の排出ガス量についても別途報告する予定である。本稿では CO_2 の測定値で簡易に燃費が計算できることを示すとともにその活用策について述べる。

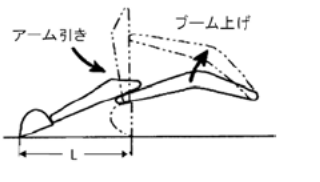
3. 1　測定方法

測定の概要を**表–1** および**図–5** に示す。ディーゼル微粒子捕集フィルター（DPF: Diesel Particulate Filter）を搭載した 20 t クラスの油圧ショベルに測定装置を設置し，**表–2** に示す「待機」，「走行」，「ならし（模擬動作）」，「掘削（実作業）」，および「掘削積込（模擬動作）」の動作を行って排出ガスの流量と濃度を連続測定した。2015

平成 29 年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集, pp.131-136,“排出ガスの測定値から読み解く燃費・熱効率と燃費改善策”より転載.

図-5　油圧ショベルに搭載した測定装置.
（ 転載元の図の一部をマスクングしている.）

表-2　測定時の動作.

動作	内　容
待機	アイドリング /　5 分（ 異なる時間の測定有 ）
走行	片道 25mの区間往復/3 サイクル
ならし (模擬)	 アーム，およびバケットが一直線になる状態を開始姿勢とし，L=4.5m の範囲で水平引き (JCMAS H 020:2014 引用 ）
掘削 (実作業)	掘削，45 度の旋回，およびバケットダンプ /5 サイクル
掘削積込 (模擬)	 開始姿勢，水平引き，バケット掘削，ブーム上げを伴う 90 度の旋回，およびバケットダンプ /5 サイクル(異なる時間の測定有) (JCMAS H 020:20142 引用) (開始姿勢はアーム，およびバケットが一直線 ）

年度の測定数は，測定時期，オペレータ，および運転モードの条件を 2 期（10 月と 1 月)，3 人，および 2 種類(パワー優先と燃費優先 ）の組み合わせとした約 30～40 分間の測定が合計で 12 回（2×3×2)となった。2016 年度は，運転モード，アクセル開度，

表-3　燃費測定方法の比較.

測定項目		測定方法		
		一般的な方法	カーボンバランス法	本稿が提案する簡易な燃費測定法
燃料の流量		○		
ガスの流量	実測		○	
	エンジン回転数から推定			○
ガスの濃度	CO_2		○	○
	CO，THC		○	

（○：測定）

動作の緩慢，測定回数，コールドスタート（ エンジン冷却水の温度 ）等を変化させた各種の測定を 15 種類行った。

3.2　CO_2の測定値に基づく燃費計算

3.1 の測定では燃料の流量を測定していない。しかし，2. で述べたように測定した CO_2の質量M_{CO2} g と軽油の排出係数 2624 ×10^3 g-CO_2/m^3-軽油 から軽油の燃費 V_{oil} m^3 を算出することができる（ 式(5))。M_{CO2}は,排出ガスの流量VとCO_2の濃度の測定値から計算できる(付録)。本節では，Vをエンジン回転数から推定すること（図-1 の A）による簡易な燃費測定法と活用案について述べる。

$$V_{oil} = \frac{M_{CO2}}{2624 \times 10^3} \tag{5}$$

3.2.1 簡易な燃費測定法

表-3 は燃費の測定方法について燃料の流量を測定する方法，カーボンバランス法，および本稿で提案する簡易な燃費測定法を比較したものである。燃料の流量を後付けの装置で直接測定する際には配管の加工が必要になる。CO_2 等と燃費には図-1 の模式図の関連があるので CO_2 等を測定すれば燃費を測定できる。カーボンバランス法では燃料の流量測定を排出ガス流量の測定に代替するが，排出ガスの流量の測定で排気管の加工が必要になる。本稿の簡便法ではこれをエンジン回転数で代替する(図-1 の A)。排出ガスの流量V_Pの計算式は付録の式(付.6)に示す。V_Pは過給を考慮しないことで過小，排気再循環（EGR: Exhaust Gas Recircula-tion）と体積効率を考慮しないことで過大となる。エンジン回転数の測定方法は，ECU の信号，光学センサー，オルタネータの漏れ磁束，および音等の測定方法のなかから選択できる。また，精緻なカーボンバランス法では CO_2 以外の炭素化合物の CO，および THC(非メタン炭化水素)の測定値を要するが，図-4 に示すようにこれらは CO_2 比で 0.1%程度なので簡便法では測定を省略する。

図-6 は「エンジン回転数から推定した流量V_Pに基づ

平成 29 年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集, pp.131-136, “排出ガスの測定値から読み解く燃費・熱効率と燃費改善策”より転載.

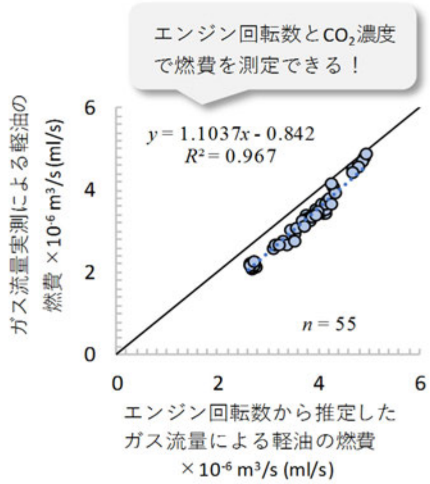


図-6　ガス流量推定の燃費とガス流量実測の燃費.

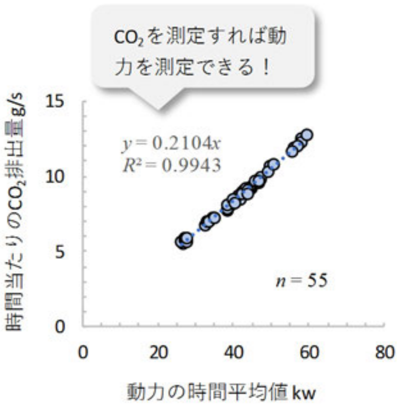


図-7　動力と CO_2 排出量の測定値.

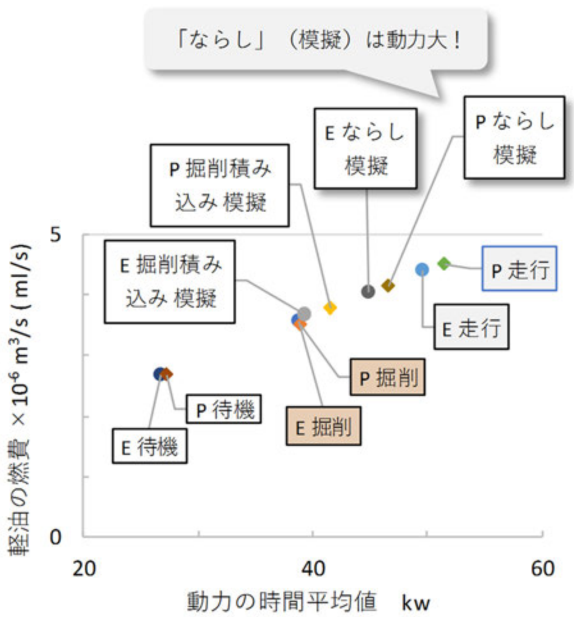


図-8　動作別の動力と燃費の測定値.

く燃費$V_{\mathrm{oil,P}}$」と「実測した流量に基づく燃費$V_{\mathrm{oil,M}}$」の関係を図示したものである。軽油の燃費の単位×10^{-6} m^{3}は，×10^{-3}l （リットル），および ml (ミリリットル) に相当する。図-6 の回帰式で$V_{\mathrm{oil,P}}$を$V_{\mathrm{oil,M}}$に換算できる。

なお，流量計による測定値は流量が少ない条件では過少になることや，条件によっては台上試験装置より 20%程度低い値になることも報告されており(文献例 [14])，必ずしも$V_{\mathrm{oil,M}}$が$V_{\mathrm{oil,P}}$よりも真値に近いとは限らない。

補足：動力

図-7 は時間平均した動力と時間当たりの CO_2 排出量の関係を整理したものである。動力 (kw) は, ECU のエンジン回転数とトルク（比例値），および熱効率 $\eta = 0.33$から計算した。CO_2 の排出量は濃度と流量の測定値から算出した。図-6 での相関が良好であることから，以下の解釈ができる。

・ECU の出力に基づく熱効率が動作の内容によらずほぼ一定。

・動力の多寡を CO_2 の多寡で判断できる(図-1 の C)。

3. 2. 2 活用例 1－動作の種類と燃費

図-8 は図-7 を動作別に整理し横軸を動力，縦軸をエンジン回転数から算出した流量で計算した燃費としたものである（P は 5 データの平均, E は 6 データの平均。)。動力，および燃費は大きい順に走行，ならし（模擬），掘削積込（模擬），掘削，待機となり，パワーモードがエコモードより大きい傾向も把握できる。地面に触れることのない「ならし（模擬）」が「掘削」よりも動力が大きくなったのは予想外であった。要因として，動作のスピードが比較的早く，運動エネルギー(速度の 2 乗に比例)が大きいことが考えられる。このことから，以下を予測する。

・過度な速度の抑制や速度の速い動作に着目したエネルギーの回生は燃費改善の効果が大きい。

・大きな力の低速作業は，小さな力の高速作業よりも燃料消費が少ない。

なお，この実験とは無関係であるが，図-9 は土工用機械の経費の算出に使用する損料表 [15]に記載

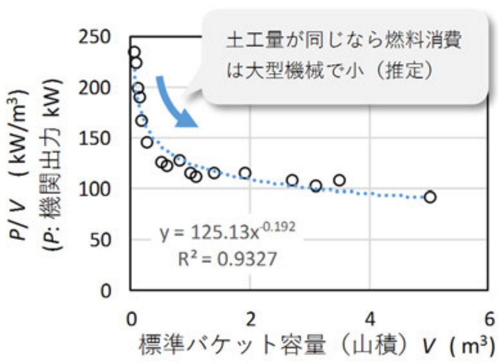


図-9　バックホウの大きさと土量比の動力.

平成 29 年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集, pp.131-136, “排出ガスの測定値から読み解く燃費・熱効率と燃費改善策”より転載.

されていたバックホウ（油圧ショベル）について，横軸をバケット山積容量 V m^3（ここでの V は排出ガス流量 V とは異なる。），縦軸を機関出力 P kW と V の比 P/V としてプロットしたものである。この文献では仕事量あたりの燃費 L/kwh は機械の大きさによらない一定値が記載されているので，縦軸は土量比の燃費に比例するとみなせる。このデータからは大きい機械を使用して掘削回数を減らせば燃費消費が少なくなると推定できる。

3.2.3 活用例 2–燃費の詳細分析

図-10 は試行的に一人のオペレータで運転の緩慢を「乱暴」，「普通」，および「穏やか」に変化させた際の測定値である。動作は「掘削積込（模擬）」，および「掘削」を異なる場所で行ったが，測定値は一連の動作とみなして合算した。燃費は「実測した流量に基づく燃費 $V_{\mathrm{oil,M}}$」と「エンジン回転数から推定した流量に基づく燃費 $V_{\mathrm{oil,P}}$ を図-6 の回帰式で補正したもの」を併記した。動力の時間平均値（左上）は大きい順に「乱暴」，「普通」，「穏やか」となり毎秒(1/s)の燃費（左下）も同じ傾向になった。動作に要した時間（右上）は大きい順に「穏やか」，「乱暴」，「普通」となった。燃費（右下）も同じ順になった。簡易な燃費測定法は燃費の詳細な分析に使用できることが確認できた。

なお，この測定は試行的な一例であり，個人差など条件により異なる結果となる可能性もある。また，「穏やかな操作」は時間を要し燃費も大きいが，1 回あたりの土量（m^3）を大きくできる可能性があること，騒音・振動が抑制されること，安全確認のための心理的なゆとりを確保できること等も考えられるので「穏やかな操作」が劣ると短絡的に解釈されるのは本意ではない。

4．まとめと展望

4.1　まとめ

排出ガス測定にかかる海外の文献を調査し，以下のことがわかった。

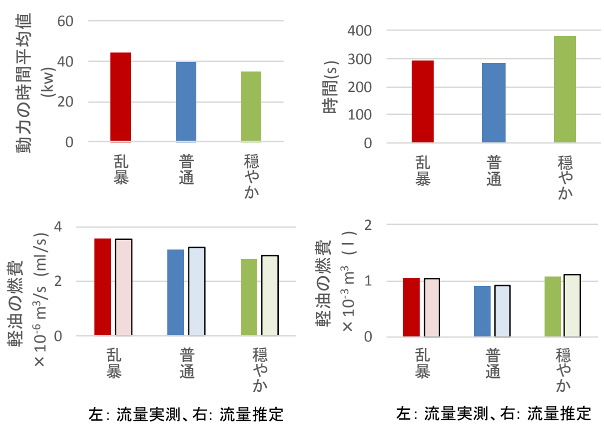


図-10　動作方法別の測定値の一例.

◆建設機械の燃費は CO_2 の測定によるカーボンバランス法で測定できる。CO_2 以外の炭素化合物を考慮しないことによる誤差は 0.1 % 程度。

◆現行規制の排出ガスの単位は，仕事量あたりの排出量（g/kwh）であるが，この単位で適切に測定されたと解釈できた論文の割合は 13 編のうち 2 編と低かった。この要因はエンジントルクの測定が困難であることに起因すると推定した。

◆2 編の論文に基づいて油圧ショベル 14 台の熱効率 η を推定した。平均値は 33%であった。

◆η を仮定することで仕事量比の排出量 R_{GpW}（g/kwh）と CO_2 比の排出量 R_{GpCO2}（g/kg-CO_2）の換算ができる。

◆油圧ショベルが排出する NOx, CO, および HC はおおむね 20 年間で 1/10 に抑制されたと解した。

土木研究所で測定した排出ガスのデータを分析して以下のことがわかった。

◆エンジン回転数と CO_2 濃度による簡易な燃費測定法を提案した。この方法での測定値は，実測したガス流量に基づく燃費に直線回帰(R^2=0.97)で補正できることを確認した。

◆熱効率（ECU のデータからの計算値）は，動作の内容によらずほぼ一定。

◆動力（ECU のデータからの計算値）と CO_2 の直線回帰の決定係数 R^2 は 0.99 なので CO_2 で動力の多寡を判断できる。

◆簡易な燃費測定法を活用し，動作の種別ごとに動力・燃費を計算した。地面に触れることのない「ならし」の模擬動作時の動力・燃費が他と比較して大きいことから，速度の速い動作は燃費が大きいと解釈し，以下を予測した。

・過度な速度の抑制や速度の速い動作に着目したエネルギーの回生は燃費改善の効果が大きい。

・大きな力の低速作業は，小さな力の高速作業よりも燃料消費が少ない。

◆簡易な燃費測定法は，操作方法が「乱暴」，「普通」，および「穏やか」と異なることによる燃費の違い等，燃費の詳細な分析に使用できることを確認した。

4.2　展望

CO_2 のみならず，土量（m^3）・騒音・振動等の測定を追加し，機械の大きさ，バケット容量，操作の速度・丁寧さ，1 回当たりの掘削量，およびオペレータの個人差等を変数とした解析を行うことで施工時間，燃費，安全・環境，個人差等を総合的に評価した最適な施工方法を見出すことも可能になると考えている。既に実務担当者は経験的に実践している可能性も高い。数値で明確になることの波及効果は大きいと考えている。

平成 29 年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集, pp.131-136, "排出ガスの測定値から読み解く燃費・熱効率と燃費改善策"より転載.

付録 計算式

計算式	番号	記号
$R_{\mathrm{GpW}} = M_{\mathrm{G}} / W$	(付.1)	R_{GpW} ： 仕事量比の排出量 （ g ／ kwh ），M_{G} ： 排出ガスの質量 （ g ），W ： 仕事量（ kwh ）
$M_{\mathrm{G}} = \int \frac{C_{\mathrm{G}} \rho_{\mathrm{G}} V}{1{,}000{,}000} dt$	(付.2)	C_{G} ： 排出ガスの濃度 （ ppm ）， ρ_{G} ： 排出ガスの密度 （ g ／ m^3 ），V ： 排出ガスの流量（ m^3 ／ s）
$W = \int \frac{2\pi R_{\mathrm{E}} T_{\mathrm{E}}}{1000 \cdot 3600} dt$	(付.3)	R_{E} ： エンジン回転数（ ／ s ）， T_{E} ： トルク(N・m)
$R_{\mathrm{GpCO2}} = M_{\mathrm{G}} / M_{\mathrm{CO2}}$	(付.4)	R_{GpCO2} ： CO_2質量比の排出量（ g ／ kg-CO_2 ），M_{CO2} ： CO_2の量（ kg ）
$k = \frac{R_{\mathrm{GpW}}}{R_{\mathrm{GpCO2}}} = \frac{M_{\mathrm{CO2}}}{W} = \frac{1}{\eta} m$	(付.5)	k ：仕事量比の排出量と CO_2 比の排出量の比， η ：エンジンの熱効率，m ： 軽油の CO_2 排出原単位(kg/kwh)．0.0687 kg//MJ（環境省 web site 掲載値 3)）を採択して単位を変換すれば，$m = 0.24732$ kg/kwh.
$V_{\mathrm{oil}} = \frac{M_{\mathrm{CO2}}}{2624 \times 10^3}$	(5)	V_{oil}： 軽油の燃料消費量 m^3．軽油の排出係数 2624 ×10^3 g-CO_2/ m^3-軽油は環境省 web site 掲載値 3)に基づいて算出した.
$V_{\mathrm{P}} = R_{\mathrm{E}} \frac{D}{2} r_{\mathrm{G}}$	(付.6)	V_{P} ： エンジン回転数から推定した排出ガスの流量の概算値（ m^3 ／ s ）．2 回転で排気量に相当するガスが排出されると仮定， D ： エンジンの排気量 （ m^3 ），r_{G} ： 排気と吸気の体積比（同一温度に換算）． 注）この推定値は過給を考慮しないこで過小，排気再循環 （ EGR: Exhaust Gas Recirculation ）と体積効率を考慮しないことで過大となる.
$r_{\mathrm{G}} = 1/(1 - r_{\mathrm{F}} \frac{C_{\mathrm{CO2}}}{1{,}000{,}000})$	(付.7)	r_{F} ： 軽油の燃焼での体積増加率．軽油成分 $C_{14}H_{30}$，$C_{15}H_{32}$，$C_{16}H_{34}$ のうち中央値的な $C_{15}H_{32}$ の燃焼式 $C_{15}H_{32}+23O_2=15CO_2+16H_2O$ を仮定すると $r_{\mathrm{F}} = (-23 + 15 + 16) / 15$.
$r_{\mathrm{G}} = 1$	(付.8)	CO_2 の濃度の上限は約 15%，平均的には 5%程度なので，r_{G}は最大で約 1.09，平均で 1.03 程度になるが，排気再循環 EGR を考慮しないラフさとは不釣り合いなことから本論文の解析では$r_{\mathrm{G}} = 1$とした.

参考文献

1) Frey, H. C., Rasdorf, W., and Lewis, P.: Results of a comprehensive field study of fuel use and emissions of nonroad diesel construction equipment, Transport Research Record 158, Transportation Research Board, 2010.
2) Lewis, P; Leming, M; Rasdorf, W: Impact of Engine Idling on Fuel Use and CO2 Emissions of Nonroad Diesel Construction Equipment, JOURNAL OF MANAGEMENT IN ENGINEERING, vol.28, no.1, pp.31-38, 2012.
3) 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（試案ver1.6），環境省web site.
4) 独立行政法人自動車技術総合機構審査事務規程: Test Requirements and Instructions for Automobile Standards（TRIAS）99-005-01 燃料消費率試験（10･15 モード）.
5) Abolhasani Saeed, Frey H. Christopher, Kim Kangwook, Rasdorf William, Lewis Phil, Pang Shih-Hao: Real-world in-use activity, fuel use, and emissions for nonroad construction vehicles: A case study for excavators, JOURNAL OF THE AIR & WASTE MANAGEMENT ASSOCIATION, vol.58, no.8, pp.1033-1046, 2008.
6) Heidari Bardia, Marr Linsey C.: Real-time emissions from construction equipment compared with model predictions, JOURNAL OF THE AIR & WASTE MANAGEMENT ASSOCIATION, vol.65, no.2, pp.115-125, 2015.
7) U.S. Environmental Protection Agency, Populations, Activi-ty and Emissions of Diesel Nonroad Equipment in EPA Re-gion 7, 2010.
8) Cao, T; Durbin, TD; Russell, RL; Cocker, DR; Scora, G; Maldonado, H; Johnson, KC: Evaluations of in-use emission factors from off-road construction equipment, ATMOSPHERIC ENVIRONMENT, vol.147, pp.234-245, 2016.
9) 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NOx, 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.
10) 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.
11) 山本敏朗，堤玲子，水嶋教文，渡辺敬太郎: NOxセンサベースの車載計測器による路上走行時における重量貨物車のNOx排出量評価，自動車技術会論文集, Vol.46, No.5, 2015.
12) 吉永弘志，野村正之: 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，平成28年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集, pp.109-114, 2016.11.
13) 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, 2016.5.
14) 公益社団法人　自動車技術会　[GIAフォーラム] Real Worldエミッション低減に向けた車載排ガス計測：PEMSの最新動向. pp.17, 2017.
15) 一般社団法人　日本建設機械施工協会　平成28年度建設機械等損料表.

平成 29 年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集, pp.131-136, “排出ガスの測定値から読み解く燃費・熱効率と燃費改善策”より転載.

建設機械から排出される温室効果ガスの亜酸化窒素とメタンの概況把握を目的とした排出ガスの測定

吉永 弘志[1]・新田 恭士[2]

[1] 国立研究開発法人土木研究所 主任研究員（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）
E-mail : h-yoshinaga_pwri.go.jp
[2] 国立研究開発法人土木研究所 上席研究員（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）

建設機械から排出される温室効果ガスの亜酸化窒素（N_2O）とメタン（CH_4）の概況を把握することを目的として油圧ショベル7台の排出ガスをFTIR（フーリエ変換赤外分光光度計）を使用したPEMS (Portable Emissions Measurement System) で測定した．測定対象の動作は，動力の小さい「待機」，および動力が走行，掘削等と同程度の大きさで測定値の標準偏差が小さい「ならし（模擬動作）」の2種類とした．国内外の文献にみあたらない以下の知見を得た．(1) SCR（尿素選択的還元触媒）搭載車の「ならし（模擬動作）」で排出されるN_2Oの温室効果が相対的に大きい．(2)「ならし（模擬動作）」で排出されるN_2Oの温室効果ガスとしてのシェア(relative contribution to GHG emissions (CO_2-equivalent)) は，SCR非搭載車 3台の平均で0.45%，SCR搭載車 4台の平均で2.7%であった．SCR搭載車の2.7%は公道を走行するSCR搭載の自動車5台の文献値と同程度の値であった．

キーワード: *greenhouse gas, N_2O, CH_4, earth-moving machinery, SCR, portable emissions measurement system, FTIR*

1. はじめに

1.1 背景

建設機械に搭載されるエンジンから排出される窒素酸化物（NOx），非メタン炭化水素（NMHC），粒子状物質（PM），および一酸化炭素（CO）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」）により，エンジン単体の室内試験値で規制されている（規制値の例．**図-1.**）．国内の規制は，欧州連合（EU），米国等との国際調和を考慮して定められているが，情勢はめまぐるしく変化している．米国では，VW 社の排出ガスの不正問題を受けて米国連邦環境保護庁（EPA）による台上試験と実路走行（RDE: Real Driving Emission）試験を継続することになったが，EU では，公道を走行する自動車の RDE 試験を 2017 年から義務付けており [1), 2)]，日本でも 2022 年から導入することになった [3)]．また，EU では可搬式の排出ガス測定システム（PEMS: Portable Emissions Measurement System）を使用して建設機械等の non-road mobile machinery から排出されるガスを測定する ISM (in-service monitoring)を義務づけることになり [4)]，最速で 2019 年から適用される見込みである．中国でも 2020 年から ISM を導入する規制を検討している．一方，米国では EU および日本では未規制の温室効果ガス（GHG: greenhouse gas）の二酸化炭素 (CO_2)，亜酸化窒素（N_2O)(地球温暖化係数はCO_2の 298 倍 [5)])，およびメタン (CH_4) (同 25 倍 [5)])) の規制値 (standard [6)]) を定めており，測定値の報告を義務づけている．

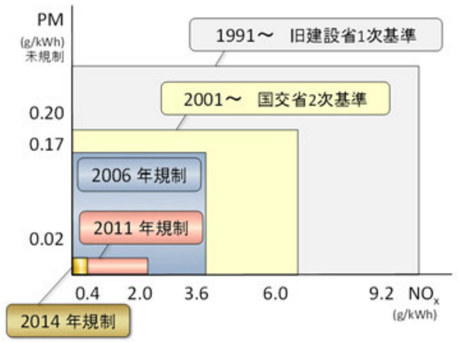


図-1　排出ガス規制値の推移例（定格出力130kW以上560kW未満）

自動車から排出される CH_4 は，天然ガスエンジンの不十分な燃焼による副生成物であり，N_2O は三元触媒 TWC，および尿素選択的還元装置（SCR: Selective

建設機械施工, Vol.71, No.4, 2019,“建設機械から排出される温室効果ガスの亜酸化窒素とメタンの概況把握を目的とした排出ガスの測定”より転載.

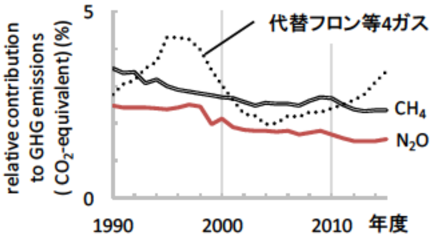


図-2　国内におけるCO_2以外の温室効果ガスのシェア
縦軸の値は引用文献[9]では「シェア」としているが，他の文献の「GHG中に占める排出割合」，「relative contribution to GHG emissions (CO_2- equivalent)」に相当する．代替フロン等4ガスは，ハイドロフルオロカーボンHFCs，パーフルオロカーボンPFCs，六ふっ化硫黄SF_6，および三ふっ化窒素NF_3の合計

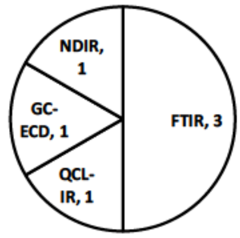


図-3　N_2Oの測定方法ごとの機関別の数
記載された文献，および略称の意味は以下．FTIR[7,12,15]: Fourier Transform Infra-red Spectroscopy, フーリエ変換赤外分光法, QCL-IR[14,16]（1機関2文献）, Quantum Cascade Laser Infra-red, 量子カスケードレーザ赤外分光法, GC-ECD[10], GC: Gas chromatograph,ガスクロマトグラフ, ECD: Electron Capture Detector, 電子捕獲検出器, NDIR[13]: Nondispersive infrared analyzer, 非分散形赤外線分析計．測定機器についての記載がない文献，および土木研究所の測定は含めていない

Catalytic Reduction ）の触媒反応の副生成物[7]と説明されていることから，ディーゼルエンジンから排出されるCH_4による温室効果の影響は皆無であるが，NOx規制に対応してSCRを搭載する機種が増えたため，N_2Oが温室効果ガスの評価に影響する可能性がある． 国土交通省においては， 建設機械から排出される温室効果ガスについて，2007年の1130万tを2030年に1000万tに減じる目標を定めており[8]，国内におけるN_2O，およびCH_4のシェアを国立環境研究所が公表[9]している （ 公表値を図示したものを**図-2**に示す． ） が， 今後の地球温暖化対策の政策判断ではN_2Oの影響（シェア）に関する知見が必要になると考えている．また，測定技術は進歩しているものの，日本ではN_2Oの測定方法が定められていないので， 測定方法にかかる知見も必要になると考えられる．

1.2 既往の研究

国内外の文献を科学技術振興機構（JST）の科学技術文献情報 （ 主として和文 ） の JDreamⅢ，および米 Thomson Reuters 社の Web of Science で検索した（2018 年 5 月 ）．貨物車， バス等のディーゼルエンジンの自動車から排出される N_2O，および CH_4 については国内外で研究されている[7),10)~16)]が， 建設機械から排出される N_2O，および CH_4 の測定値について報告したものは，過年度の土木研究所によるもの[17)~19)]以外にみあたらなかった． 土木研究所においてはフーリエ変換赤外分光法（FTIR：Fourier Transform Infrared Spectroscopy）で N_2O を測定したが， 他機関での測定方法ごとの機関別の数を**図-3** に示す．また， 文献に記載された N_2O， および CH_4 の温室効果ガスとしてのシェア（ relative contribution to GHG emissions (CO_2-equivalent) ）を**図-4**， **5** に示す． N_2O についてはシェアが 30%程度と読み取れるグラフを記載した文献もみうけられたが， これらの図には含めていない． その理由は，2008 年の発表のため， 初期の SCR 搭載車を測定したものであり，副生成物の抑制が十分に行わ

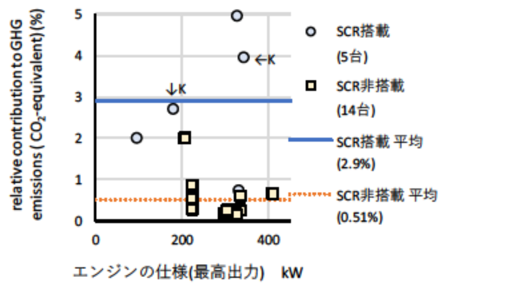


図-4　温室効果ガスとしてのN_2Oのシェア（ ディーゼルエンジンの自動車 ）
縦軸は国内の文献での「シェア」，「GHG中に占める排出割合」に相当する．「↓K」，および「←K」は推定した熱効率より換算したもの

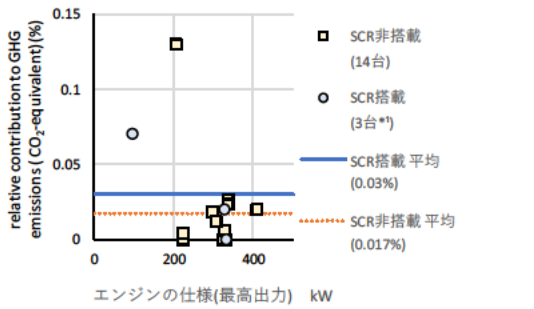


図-5　温室効果ガスとしてのCH_4のシェア（ ディーゼルエンジンの自動車 ）
縦軸は国内の文献での「シェア」，「GHG中に占める排出割合」に相当する．3台*1: N_2Oを測定した5台のうちCH_4を測定したものは3台

れていなかったことが考えられること， および測定方法が記載されていなかったためである．測定方法が示されていない他の文献も除外した． 一方， 温室効果ガスとしてのシェアが記載されていない文献もみうけられたが，文献[11)]の記載値に基づいて推定した熱効率$\eta = 36\%$を準用し， 仕事量比の排出量R_{GpW}をCO_2比の排出量R_{GpCO2}に換算してグラフに含めた（ **図-4**の2点 ）．換算の方法は**付録 a.1**に示す．

建設機械施工, Vol.71, No.4, 2019, “建設機械から排出される温室効果ガスの亜酸化窒素とメタンの概況把握を目的とした排出ガスの測定”より転載.

温室効果ガスとしてのシェア（平均値）は大きい順に, SCR搭載車のN_2Oで2.9%, SCR非搭載車のN_2Oで0.51%, SCR搭載車のCH_4で0.03%, およびSCR非搭載車のCH_4で0.017%となった.

1.3 本研究

土木研究所では, 建設機械から排出されるN_2OとCH_4の概況を把握することを目的として2015年から2018年の4年間で油圧ショベル7台の排出ガスを測定した. 2015年度, および2016年度は測定予定のSCR搭載車が市場投入されていなかったので, SCR非搭載車1台を測定して, 偏差が少なく,かつ実稼働での動力を代表できる測定値を簡素に得る方法について調べた. 簡素化した測定方法で2017年度はSCR搭載車2台を測定し, さらに2018年度はSCR搭載車2台, およびSCR非搭載車2台を測定した.

2. 測定

2.1 測定方法

測定方法の概要を**表-1**に示す. 2011年規制, および2014年規制に対応して, 後処理装置のディーゼル微粒子捕集フィルター（DPF: Diesel Particulate Filter）, ディーゼル酸化触媒（DOC: Diesel Oxidation Catalyst）, およびSCRを搭載した20t, および13tクラスの油圧ショベルを測定した.

エンジン回転数とトルクは, 2015, 2016, および2017年度においてCANデータロガーを使用して測定した. 2018年度は, 振動センサーでエンジン回転数のみ測定した. 排気流量は, 2015, 2016, および2017年度においてピトー管の流量計で測定したが, 2018年度は測定しなかった. エンジン回転数, トルク, および排気流量の測定を省略した事情等については**付録 a. 2** で説明する. 排出ガスの濃度はFTIR（測定原理は**付録 a. 3.**）で測定した. 周波数別の音の大きさをフーリエ変換で分析するように, 赤外光の波長別の吸収率を測定して排出ガスの種類別の濃度を分析する. 測定対象としたガスはCO_2, N_2O, CH_4の他にCO, NO, NO_2, NMHC（非メタン炭化水素）も含めた.

2016年度, および2017年度の測定状況を**図-6**, および**図-7**に示す. 2015年度は**図-6**と同様に測定器を建設機械に搭載して測定した. 2018年度は**図-7**と同様に測定器を建設機械に隣接させたが, Flow Meter（流量計）は使用しなかった.

表-1　測定概要

<table>
<tr><td>測定時期</td><td>2015 年度（10 月, 1 月）, 2016 年度（12 月）, 2017 年度（10 月）, 2018 年度（8 月）</td></tr>
<tr><td>測定場所</td><td>土木研究所構内（2015, 2016 年度）
つくば市内のレンタル会社（2016, 2017 年度）</td></tr>
<tr><td>測定対象（建設機械）</td><td>油圧ショベル
<table>
<tr><th>規制年</th><th>メーカとクラス</th><th>排出ガス後処理装置</th><th>測定年度</th></tr>
<tr><td>2011</td><td>A 社 20t</td><td>DOC, DPF</td><td>2015, 2016</td></tr>
<tr><td>2011</td><td>B 社 20t</td><td>DOC, DPF</td><td>2018</td></tr>
<tr><td>2011</td><td>B 社 13t</td><td>DOC, DPF</td><td>2018</td></tr>
<tr><td>2014</td><td>A 社 20t</td><td>DOC, DPF, SCR</td><td>2017</td></tr>
<tr><td>2014</td><td>B 社 20t</td><td>DOC, SCR</td><td>2018</td></tr>
<tr><td>2014</td><td>A 社 13t</td><td>DOC, SCR</td><td>2017</td></tr>
<tr><td>2014</td><td>B 社 13t</td><td>DOC, SCR</td><td>2018</td></tr>
</table></td></tr>
<tr><td>測定項目と測定装置</td><td>
<table>
<tr><th>測定項目</th><th>測定装置</th></tr>
<tr><td>エンジン回転数, トルク</td><td>CAN データロガー（VECTOR,GL1000）（2015, 2016, 2017 年度）
振動センサー式回転計（2018 年度, 回転数のみ）</td></tr>
<tr><td>排気流量</td><td>ピトー管式流量計（2015, 2016, 2017 年度）</td></tr>
<tr><td>排出ガス濃度</td><td>FTIR(岩田電業,FAST-2200)</td></tr>
</table></td></tr>
<tr><td>測定対象(ガス)</td><td>CO_2, CO, CH_4, N_2O, NO, NO_2, NMHC（非メタン炭化水素）, NH_3 他</td></tr>
<tr><td>サンプリング周波数</td><td>5 Hz（0.2 秒間隔）</td></tr>
</table>

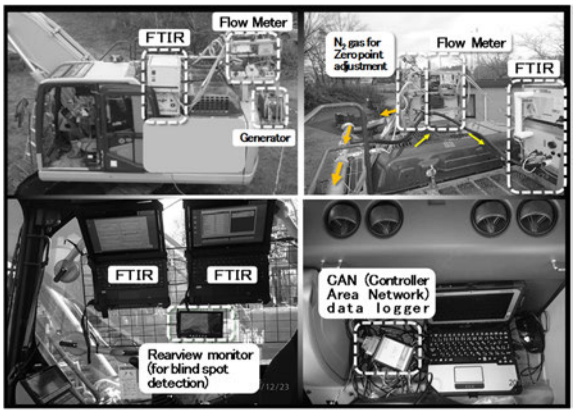


図-6　2016年の測定

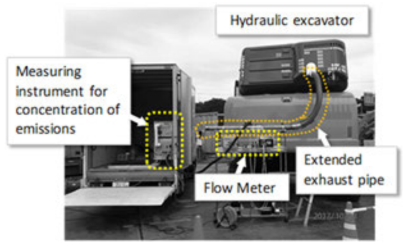


図-7　2017年の測定[20]

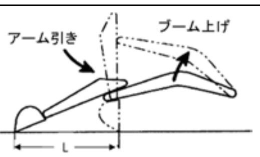
建設機械施工, Vol.71, No.4, 2019, "建設機械から排出される温室効果ガスの亜酸化窒素とメタンの概況把握を目的とした排出ガスの測定"より転載.

測定対象の動作は，2015年度，および2016年度の測定では「待機」，「走行」，「ならし(模擬)」，「掘削(実作業)」，「掘削・積込（模擬）」としたが，以下が明らかになった[21]ので2017年度，および2018年度の測定対象の動作は「待機」と「ならし(模擬)」の2種類とした（**表-2**）.

図-8 は動作別の動力と CO_2 比の排出ガス量をプロットしたものである.「待機」は他の動作と動力，および排出ガス量が大きく異なるので測定は必須とした.「待機」以外の動作は動力，および CO_2 比の排出ガス量が同程度であり，「待機」以外の動作のなかで「ならし（模擬）」は中心に近い値であった. さらに,「ならし(模擬)」は測定値のばらつき（ 標準偏差 ）が最も小さかった.

なお，本調査はCO_2比の排出量の測定のため「ならし（模擬）」で代表できると判断したが，燃料消費量の測定においては各種の動作別の測定値が必要と考えている.

表-2　測定時の動作

動作	内　容
待機	アイドリング / 20 分（異なる時間の測定有）. コールドスタートで 3 回測定.
ならし(模擬)	 L＝4.5 m（20t クラス） L＝4.0 m（13t クラス） （JCMAS H 020:2014[22]引用） アーム，およびバケットが一直線になる状態を開始姿勢とし，L の範囲で水平引き. 2017 年度は 100 サイクル×3 人，2018 年度は 50 サイクル×3 人.

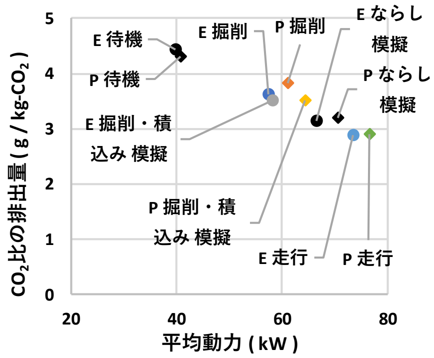


図-8　動作別の NOx の測定値[21]．CO_2 1 kg 当りの排出量（g）．E: エコモード, P: パワーモード．各プロットは 3 人×2 回=6 回の測定値の平均

2.2 測定値の解析

測定値は**図-9**に示すように時間変動する． 温室効果ガスに関して必要な知見は総排出量のため， データ処理においては時間変動する測定値を時間平均すればいいが，測定時間， 測定数が十分であるかどうかを確認しておくことが必要である. 温室効果の影響が大きいと考えられ

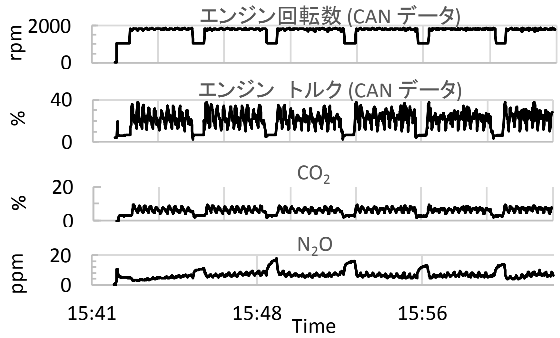


図-9　「ならし（ 模擬 ）」の測定値の例

5 Hz でサンプリングしたデータを 1 Hz に平均処理している. N_2O の濃度がアイドリング時に多いのは，直前の動作の影響と考えられる. 長時間のアイドリングでは少なくなる

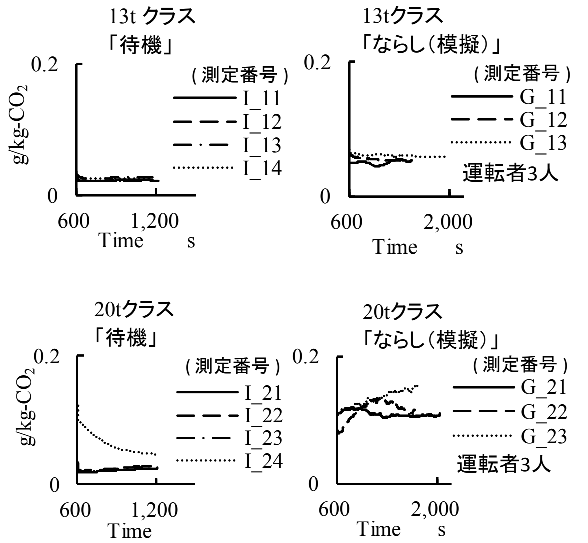


図-10　SCR搭載車から排出されるN_2O

600秒間の移動平均値としたため開始時刻は600秒となっている.「待機」の測定の開始は， I_11, I_12, I_21, およびI_22では6時間以上のエンジン停止後, I_13は「ならし(模擬)」後58分, I_14は「待機」後4分, I_23は「待機」後80分, I_24は「ならし(模擬)」後16分

るのはSCR搭載車のN_2Oのため，N_2Oの測定値の測定時間，および測定数による変動について. グラフ化して定性的に調べた. **図-10**は2017年度の測定値の600秒間の移動平均を示す.「待機」の測定では, I_24の測定値の傾向が他と異なっていた. 学識経験者にヒヤリングして以下が原因と考えた. SCR搭載車では尿素から生成したアンモニアで窒素酸化物を窒素と水に還元しているが，「待機」の測定前の「ならし（模擬）」の動作で生成したアンモニアが「待機」では過剰になり，未反応のアンモニアが酸化して亜酸化窒素が生成された. 2018年度の「待機」測定は，エンジン停止後6時間以上経過した後のコールドスタートで統一した. グラフの600秒（1~600秒の平均）は，1200秒（601秒~1200秒の平均）と大きく変わらないので，測定時間は600秒で十分と考えられるが，他目的で他のガス

建設機械施工, Vol.71, No.4, 2019,“建設機械から排出される温室効果ガスの亜酸化窒素とメタンの概況把握を目的とした排出ガスの測定”より転載.

を分析することも考慮して1200秒の測定は継続することにした．「ならし（模擬）」の測定値は，13tクラスでは操作者による違いがなかったが，20tクラスでは操作者による測定値の違いが大きかった．2018年度の測定においても操作者を3人として平均することにした．また，動作の繰り返し数は100回としたが，各操作者の半分の時間での排出量と試験終了時点での排出量に大きな違いがないこと，3人の測定値を平均すること，および単調な操作の繰り返しによる運転者の精神的な疲労を考慮して，2018年度の測定においては50回に減じることにした．

3. 測定結果

排出量をCO_2比（g/kg-CO_2）とし，さらに「ならし(模擬)」と「待機」の比を算定したものを**図-11**に示す．2011年規制対応の3台は尿素SCR非搭載であり，2014年規制対応の4台は尿素SCRを搭載していた．尿素SCRを搭載した機種のN_2Oのみが1.0以上となり，「ならし(模擬)」の排出量が多かった．文献[11]，および学識経験者へのヒヤリングにより，SCR搭載車ではSCR触媒から脱離したアンモニアが，後段の酸化触媒で酸化されてN_2Oが生成することが原因と考えた．

測定対象とした油圧ショベルは，全てアイドリングストップ機能が装備されていたこと，および「ならし(模擬)」におけるN_2Oの排出量が相対的に多いことから，「ならし(模擬)」におけるN_2O，およびCH_4の温室効果ガスとしてのシェア（relative contribution to GHG emissions（CO_2-equivalent）の平均値を算定し，**図-4**，および**図-5**の文献値

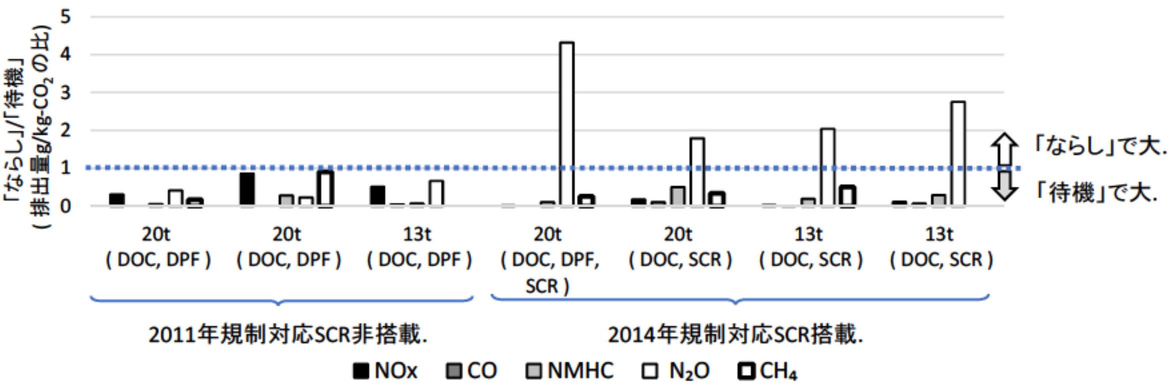


図-11　「ならし(模擬)」動作での排出量と「待機」での排出量の比

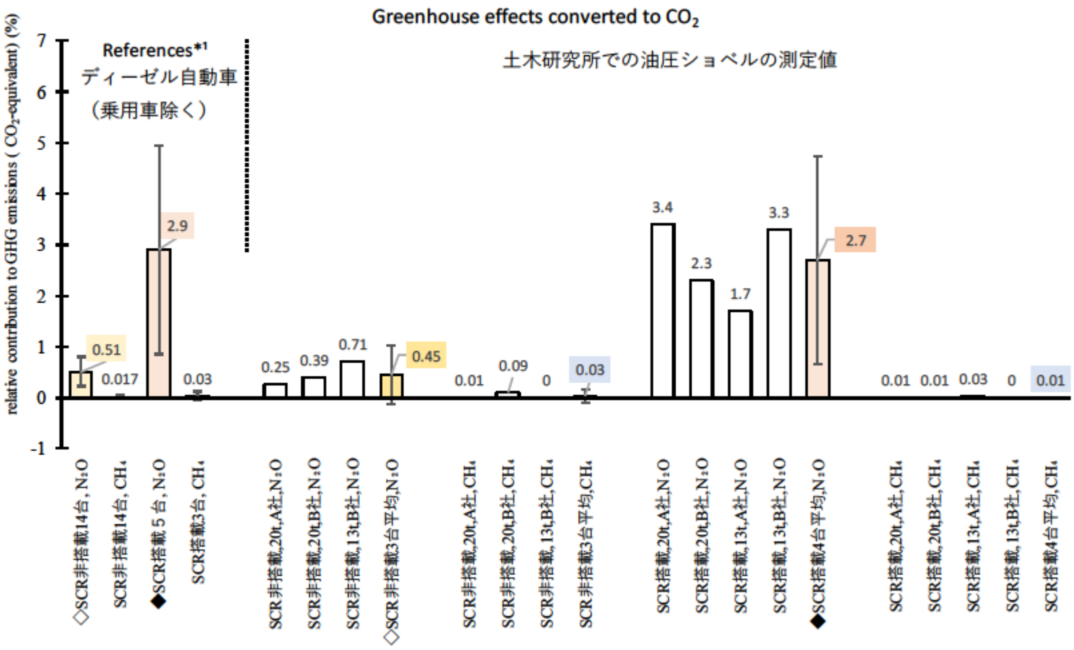


図-12　ディーゼル自動車および建設機械から排出されるCO_2以外の温室効果ガスのシェア

縦軸は国内の文献での「シェア」，「GHG中に占める排出割合」に相当する．本論文では 付録の式(a8),および(a9)で計算した．References*1: 環境省(カナダ)，ウエストバージニア大(米国)，California Air Resources Board(米国)．EU Joint Research Centre(イタリア)，交通安全環境研究所(日本)の文献値．測定方式が記載されていない文献を除外し，文献より推定した熱効率でCO_2比に換算した文献を含む．エラーバーの範囲は,測定値の平均値の分布をt分布と仮定して推定した母平均の95%信頼区間

建設機械施工, Vol.71, No.4, 2019,“建設機械から排出される温室効果ガスの亜酸化窒素とメタンの概況把握を目的とした排出ガスの測定”より転載.

と比較した結果を図-12に示す. N_2O, およびCH_4の地球温暖化係数（GWP: global warming potential）は, 米国の連邦規則集[5]に記載され, 国立環境研究所[9]でも使用している298, および25とした. CH_4のシェアは, 7台全て0.1 %未満であった. N_2Oのシェアは, SCR非搭載車3台の平均で0.45%であったが, SCR搭載車4台の平均で2.7%となった. この値は, 公道を走行するSCR搭載のディーゼル車5台の文献値の平均2.9%と同程度であった.

4. おわりに

米国では, EUおよび日本では未規制の温室効果ガス（GHG: greenhouse gas）の二酸化炭素（CO_2）, 亜酸化窒素（N_2O）（地球温暖化係数はCO_2の298倍[5]）, およびメタン（CH_4）（同25倍[5]））の規制値（standard[6]）を定めている. ディーゼルエンジンから排出されるCH_4は極微量のため温室効果の影響は皆無であるが, NOx規制に対応してSCR（尿素選択的還元装置）を搭載する機種が増えたため副生成物のN_2Oが温室効果ガスの評価に影響する可能性がある. 国土交通省においては, 建設機械から排出される温室効果ガスについて, 2007年の1130万tを2030年に1000万tに減じる目標を定めており[8], 今後の政策判断ではN_2Oの影響（シェア）や測定方法に関する知見が必要になると考えられる.

そこで, 油圧ショベル7台から排出されるN_2O とCH_4を以下の通り測定した. (1) 測定装置はFTIR（フーリエ変換赤外分光光度計）でガスの濃度を測定するPEMS（Portable Emissions Measurement System）とした. (2) 2015年度, および2016年度は, SCR非搭載の20tクラスの油圧ショベル1台で「待機」, 「走行」, 「ならし(模擬)」, 「掘削(実作業)」, および「掘削・積込（模擬）」の動作を測定し, 測定値の信頼性向上と簡素化の検討を行った[21]. (3) 2017年度, および2018年度は, 20t, および13tクラスのSCR搭載車とSCR非搭載車の双方の油圧ショベル（合計6台）を簡素化した測定方法で測定した. 測定対象の動作は, 動力が小さい「待機」, および動力が走行, 掘削等と同程度の大きさで排出ガスの測定値の標準偏差が小さい「ならし（模擬動作）」の2種類とした.

測定値をとりまとめ, 国内外の文献にみあたらない以下の知見を得た. (1) SCR（尿素選択的還元装置）搭載車の「ならし（模擬動作）」で排出されるN_2Oの温室効果が相対的に大きい. (2)「ならし（模擬動作）」で排出されるN_2Oの温室効果ガスとしてのシェア（relative contribution to GHG emissions（CO_2-equivalent））は, SCR非搭載車 3台の平均で0.45%, SCR搭載車 4台の平均で2.7%であった. SCR搭載車の2.7%は公道を走行するSCR搭載のディーゼル自動車5台の文献値と同程度の値であった.

謝辞：本研究は土木研究所に在籍していた杉谷康弘（～2014年度）, 野村正之（2015年度）の研究を引き継いで実施したものである. 測定および測定値の解析については, 共同研究を実施している国立環境研究所の近藤美則氏と今野秀徳氏, 交通安全環境所の山本敏朗氏, ならびに茨城大学の田中光太郎氏にご指導をいただいた. 関係の皆様に謝意を表する.

付録

a. 1 計算式

計算式を表-3に示す. 仕事量比の排出量R_{GpW}, CO_2比の排出量R_{GpCO2}, および熱効率ηには式(a5)の関係がある. 文献にR_{GpW}とR_{GpCO2}の記載があればηを算出できる. また, R_{GpW}とηの推定値からR_{GpCO2}を算出できる.

温室効果ガスとしてのN_2O, およびCH_4のシェア（relative contribution to GHG emissions（CO_2-equivalent））$R_{\mathrm{N2O\_GWP}}$, および$R_{\mathrm{CH4_GWP}}$は式(a8), および(a9)で計算した.

a. 2 測定項目

NOx等の排出ガスの規制値は仕事量比の排出量R_{GpW}で定められているので規制値の単位での排出ガス量を評価するためにはエンジン回転数R_{E}, およびトルクT_{E}の測定値が必要になるが, $R_{\mathrm{N2O\_GWP}}$, および$R_{\mathrm{CH4_GWP}}$は式(a8), および(a9)で計算できるので, 温室効果ガスのシェアを評価する際にはR_{E}, およびT_{E}の測定値は必要ではない. これらの評価量を得るために必要な測定項目を表-4に整理した. 研究では規制されているガスの評価量, および測定の簡素化を検討したので, R_{E}, およびT_{E}の測定値も活用したが, $R_{\mathrm{N2O\_GWP}}$, および$R_{\mathrm{CH4_GWP}}$を知るために必要な測定値は排気流量V, および排出ガスの濃度C_{G}となる.

本研究においては, Vの測定の簡素化について2015年度, および2016年度の測定値で検討した[21]. (a) VとC_{G}の測定値によるR_{GpCO2}（式(a. 4)）を真値とみなし, (b) R_{E}から Vを推定し, Vを測定しない方法, (c) C_{G}の測定値のみによる方法（式(a. 7)）を比較し, 図-13に示すように(b)および(c) でも信頼性の高い測定値を得ることができることが明らかになった. 二つの流量計で測定したVの平均値で計算したR_{GpCO2}を真値とみなした場合の(c)の計算方法の誤差は, 比較的濃度の高いNOxで1.1%, NOxの

建設機械施工, Vol.71, No.4, 2019, “建設機械から排出される温室効果ガスの亜酸化窒素とメタンの概況把握を目的とした排出ガスの測定”より転載.

表-3　計算式

計算式	番号	記号
$R_{\mathrm{GpW}} = M_{\mathrm{G}} / W$	(a1)	R_{GpW} ：仕事量比の排出量（ g / kWh ）, M_{G} ：排出ガスの質量（ g ）, W ：仕事量（ kWh ）
$M_{\mathrm{G}} = \int \frac{C_{\mathrm{G}}\rho_{\mathrm{G}}V}{1{,}000{,}000} dt$	(a2)	C_{G} ：排出ガスの濃度（ ppm ）, ρ_{G} ：排出ガスの密度（ g / m³ ）, V ：排気流量（ m³ / s ）.
$W = \int \frac{2\pi R_{\mathrm{E}} T_{\mathrm{E}}}{1000 \cdot 3600} dt$	(a3)	R_{E} ：エンジン回転数（ / s ）, T_{E} ：トルク(N・m).
$R_{\mathrm{GpCO2}} = M_{\mathrm{G}} / M_{\mathrm{CO2}}$	(a4)	R_{GpCO2} ： CO_2 質量比の排出量（ g / kg-CO_2 ）, M_{CO2} ： CO_2 の量（ kg ）
$k = \frac{R_{\mathrm{GpW}}}{R_{\mathrm{GpCO2}}} = \frac{M_{\mathrm{CO2}}}{W} = \frac{1}{\eta} m$	(a5)	k ：仕事量比の排出量と CO_2 比の排出量の比, η ：エンジンの熱効率, m ：軽油の CO_2 排出原単位(kg/kWh). 0.0687 kg/MJ（環境省 web site 掲載値）を採択して単位を変換すれば, $m = 0.24732$ kg/kWh.
$R_{\mathrm{C\_GpCO2}} = \int C_{\mathrm{G}} dt / \int C_{\mathrm{CO2}} dt$	(a6)	C_{CO2}： CO_2 の濃度（ ppm ）.
$R_{\mathrm{GpCO2}} \cong 1{,}000 \cdot R_{\mathrm{C\_GpCO2}} \cdot \rho_{\mathrm{G}} / \rho_{\mathrm{CO2}}$	(a7)	ρ_{CO2}： CO_2 の密度（ g / m³ ）.
$R_{\mathrm{N2O\_GWP}} = \frac{K_{\mathrm{N2O}} \cdot M_{\mathrm{N2O}} \cdot 100}{(M_{\mathrm{CO2}} + K_{\mathrm{N2O}} \cdot M_{\mathrm{N2O}} + K_{\mathrm{CH4}} \cdot M_{\mathrm{CH4}})}$ (建設機械から排出される温室効果ガスを CO_2, N_2O, および CH_4 の 3 種類とみなした場合の式.)	(a8)	$R_{\mathrm{N2O\_GWP}}, R_{\mathrm{CH4\_GWP}}$： 温室効果ガスとしての N_2O, および CH_4 のシェア（ relative contribution to GHG emissions（ CO_2-equivalent ））(%), $K_{\mathrm{N2O}}, K_{\mathrm{CH4}}$： N_2O, および CH_4 の地球温暖化係数. 本論文では $K_{\mathrm{N2O}} = 298$, $K_{\mathrm{CH4}} = 25$ としたが, 異なる値を使用している文献もある.
$R_{\mathrm{CH4\_GWP}} = \frac{K_{\mathrm{CH4}} \cdot M_{\mathrm{CH4}} \cdot 100}{(M_{\mathrm{CO2}} + K_{\mathrm{N2O}} \cdot M_{\mathrm{N2O}} + K_{\mathrm{CH4}} \cdot M_{\mathrm{CH4}})}$ (建設機械から排出される温室効果ガスを CO_2, N_2O, および CH_4 の 3 種類とみなした場合の式.)	(a9)	

表-4　測定値の評価量と測定項目

排出ガスの評価量	測定項目			
	エンジン回転数 R_{E}	トルク T_{E}	排気流量 V	排出ガスの濃度 C_{G}
仕事量比の排出量 R_{GpW}	○	○	○	○
GHG のシェア $R_{\mathrm{N2O\_GWP}}$, $R_{\mathrm{CH4\_GWP}}$			○	○

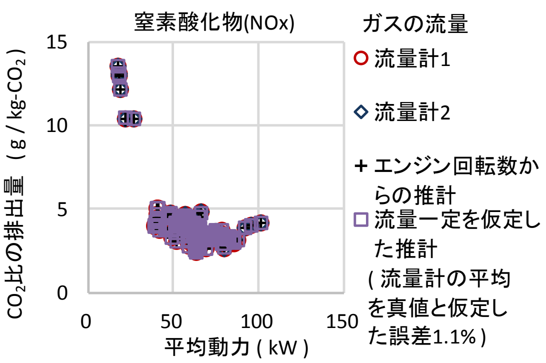


図-13　排気流量の測定値または推計値と CO_2 比排出量の例[21]

1/100程度のごく低濃度のN_2Oでも3.1%であった[21]. 「真値とみなした」と表現したのは流量計の測定値にも誤差が含まれるためである.

2018年度は, (b)または(c)でデータ処理する予定でエンジン回転数R_{E}を測定して排気流量を測定しなかったが, **図-14**のようにエンジン回転数の測定値には除外処理が必要な異常データが含まれため, 排出ガス量の計算は(c)によることとし, R_{E}は使用しなかった.

2018年度において, CANのデータロガーでの測定を行わなかったのは測定対象とした建設機械のCANのデータ処理に必要なパラメータの情報等がなかったためである. 大半の建設機械ではCANのデータへのアクセスが困難である旨を記載した論文[23]があること, およびCANの

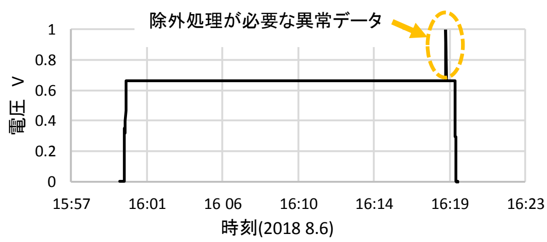


図-14　エンジン回転計の異常データの例

建設機械施工, Vol.71, No.4, 2019, "建設機械から排出される温室効果ガスの亜酸化窒素とメタンの概況把握を目的とした排出ガスの測定"より転載.

図-15 排気流量測定のために製作した接続管の例

図-16　二重構造の排気管の例

データはメーカが取り扱いに留意していることから，第三者による収集については，その是非を含めた検討が必要と考えている．また，排気流量の測定を省略したのは測定台数を増やすために測定を簡素化したためである．排気流量を測定するためには排気管の図面を入手して**図-15**のような接続管を機械毎に製作することが必要になる．2018年度において測定対象とした建設機械は**図-16**のような二重管の構造をしており，限られた時間でメーカの関係者と協議して接続管を製作することは困難と判断し，排気流量の測定を省略した．高温による事故防止等，なんらかの事情で二重管の構造にしていることも考えられるので，排気流量の測定も，その是非や吸入空気量その他の測定値での代替案の検討が必要と考えている．

a.3 FTIR

FTIRの測定原理は以下である[21]．気体が吸収する赤外線の波長は気体の種類により異なり，多種類の混合気体に広い波長分布を光源（シリコンカーバイド）とした赤外線を通過させると各気体で複合的に赤外線が吸収される．一方，**図-17**のとおり，(1)広い波長分布の赤外線を(2)半透鏡で反射光と透過光に分割し，(3)それぞれ固定鏡と移動鏡で反射させて(4)再合成すると干渉光が得られる．干渉光を検出器で測定した強度は，移動鏡の位置を変化させると各波長固有の周期で変化するので，測定対象の気体を通過させた場合の出力をフーリエ変換し，気体がない場合と比較すれば波長別の吸収率を計算できる．さらに波長別の吸収率を逆行列等で逆解析することで各

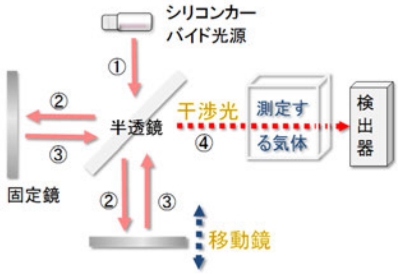


図-17　FTIRの模式図[21]

種の気体の濃度を計算できる．このように光を半透鏡で分割し，再合成させた干渉光を観測する測定方法は，特殊相対性理論の立証や重力波の検出で使用された技術（マイケルソン干渉計）を応用したものであり，フーリエ変換は音や振動の周波数分析で多用されている計算方法である．ともに製造業，環境，医学など実務で広範に活用されている．

参考文献

1) European Commission: Press release, Commission wel-comes Member States' agreement on robust testing of air pollution emissions by cars Brussels, 28 October 2015.
2) 深野泉: これが欧州の RDE 試験だ, Nikkei Automotive, 2016.11.
3) 国土交通省：排出ガス不正事案を受けたディーゼル乗用車等検査方法見直し検討会 最終とりまとめ 平成29年4月20日.
4) The European Union (EU), REGULATION (EU) 2016/1628 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 14 September 2016, Official Journal of the European Union, 2016.
5) U.S. GOVERNMENT PUBLISHING OFFICE: 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.（参照日 2016.08.17）
6) U.S. GOVERNMENT PUBLISHING OFFICE: 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.（参照日 2016.08.17）
7) Arvind Thiruvengadam, Marc Besch, Daniel Carder, Adewale Oshinuga, Randall Pasek, Henry Hogo, Mridul Gautam: Unregulated greenhouse gas and ammonia emissions from current technology heavy-duty vehicles, JOURNAL OF THE AIR & WASTE MANAGEMENT ASSOCIATION, vol.66, No.11, pp.1045-1060, 2016.
8) 国土交通省: 平成26年度建設施工の地球温暖化対策検討分科会，分科会資料．国土交通省 web site（参照日 2018.10.15）.
9) 国立環境研究所: 日本国温室効果ガスインベントリ報告書（NIR）, http://www-gio.nies.go.jp/aboutghg/nir/nir-j.html（参照日 2017.11 15）
10) GRAHAM Lisa A., RIDEOUT Greg, ROSENBLATT Deborah, HENDREN Jill : Greenhouse gas emissions from heavy-duty vehicles, Atmos Environ, Vol.42, No.19, pp.4665-4681, 2008.
11) 鈴木央一，石井素，山本敏朗: 自動車から排出される亜酸化窒素の排出傾向について―最近の技術革新による排出特性の変化―,交通安全環境研究所フォーラム講演概要,Vol.2011, pp.13-16, 2011.
12) 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 NOx, NH_3,および N_2O 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.

建設機械施工, Vol.71, No.4, 2019,“建設機械から排出される温室効果ガスの亜酸化窒素とメタンの概況把握を目的とした排出ガスの測定”より転載.

13) 陸田雅彦，門屋真希子，岡田めぐみ，舟久保千景，大谷義明，柳井孝一，小谷野眞司，山崎実：大型および小型使用過程車の排出ガス調査結果について,大気環境学会年会講演要旨集,Vol.56th , p.407 , 2015.

14) SUAREZ - BERTOA Ricardo, MENDOZA - VILLAFUERTE Pablo, BONNEL Pierre, PERUJO Adolfo, ASTORGA Covadonga, LILOVA Velizara, HILL Leslie: On-road measurement of NH_3 and N_2O emissions from a Euro V heavy-duty vehicle,Atmospheric Environment,Vol.139, pp.167-175, 2016.

15) Quiros David C., Smith Jeremy, Huai Tao, Hu Shaohua , Thiruvengadam Arvind : Greenhouse gas emissions from heavy-duty natural gas, hybrid, and conventional diesel on-road trucks during freight transport, Atmospheric Environment,Vol.168, pp.36-45, 2017.

16) Mendoza-Villafuerte Pablo, Suarez-Bertoa Ricardo, Giechaskiel Barouch, Riccobono Francesco, Bulgheroni Claudia, Astorga Covadonga, Perujo Adolfo: NOx, NH_3, N_2O and PN real driving emissions from a Euro VI heavy-duty vehicle. Impact of regulatory on-road test conditions on emissions,Science of the Total Environment,Vol.609, pp.546-555, 2017.

17) 杉谷康弘，藤野健一：バイオディーゼル燃料の普及に向けた排出ガス調査-車載型排出ガス計測装置による計測事例，建設機械施工, Vol.67 No.2, pp.60-64, 2015.

18) 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.

19) 吉永弘志，野村正之：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，平成28年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集, pp.109-114, 2016.

20) https://www.pwri.go.jp/jpn/about/pr/webmag/wm044/kenkyu.html（参照日 2018.10.16).

21) 吉永弘志：建設機械の排出ガス測定にかかる信頼性向上と簡素化，土木学会論文集 G(環境), Vol.73, No.6, pp.Ⅱ_321-Ⅱ_332, 2017.

22) 一般社団法人日本建設機械施工協会標準部会，JCMAS H020:2014.

23) Heidari Bardia, Marr Linsey C.: Real-time emissions from construction equipment compared with model predictions, JOURNAL OF THE AIR & WASTE MANAGEMENT ASSOCIATION, vol.65, no.2, pp.115-125, 2015.

（平成30年11月16日 受付，平成30年12月23日 採用決定）

MEASUREMENT OF EXHAUST GAS TO CLARIFY THE APPROXIMATE AMOUNT OF THE GREENHOUSE GASES NITROUS OXIDE AND METHANE EMITTED BY EARTH-MOVING MACHINES

Hiroshi YOSHINAGA[1] and Yasushi NITTA[2]

[1] Senior Researcher, Public Works Research Institute

[2] Leader of Advanced Technology Research Team, Public Works Research Institute

To clarify the approximate amount of the greenhouse gases (GHGs) nitrous oxide (N_2O) and methane (CH_4) emitted by earth-moving machines, a series of measurements were carried out using a portable emissions measurement system (PEMS) that included a Fourier transform infrared (FTIR) analyzer. A total of seven hydraulic excavators were provided for testing: three machines that conform to the 2011 Japanese standards without selective catalytic reduction (SCR) and four machines equipped with SCR that conform to the 2014 standards. The measurements were taken during two types of operation: idling, which is a low-power operation, and grading (simulated work), which is a higher power operation than idling. Grading has similar power requirements to traveling and excavation, and variation in the measured values is small. The results provided the following information which has hitherto not been published in Japan or elsewhere. (1) Earth-moving machines equipped with SCR emit relatively large amounts of N_2O during grading (simulated work). (2) The relative contribution to GHG emissions (CO_2-equivalent) of N_2O during grading (simulated work) by the three non-SCR-equipped vehicles, and by the four SCR-equipped vehicles account for averages of 0.45% and 2.7% respectively. The average of 2.7% for SCR-equipped vehicles is roughly equal to the average of 2.9% obtained in five measurements described in the literature reporting on SCR-equipped vehicles traveling on public roads.

建設機械施工, Vol.71, No.4, 2019,“建設機械から排出される温室効果ガスの亜酸化窒素とメタンの概況把握を目的とした排出ガスの測定”より転載.

A.7　有識者との意見交換会資料

本研究成果についてはオンロード車の排出ガスに関する有識者と意見交換した．資料の一部，および議事録を次頁以降に掲載する．意見交換で得られた知見を基に資料の一部を修正した．海外における建設機械等のオフロードエンジンの規制の動向の他，自動車にはエンジンの制御，および排出ガスに関連した各種のセンサーが取り付けられるようになり，これらのセンサの情報に基づく排出ガスの測定や規制が行われるようになったことやデータを収集してサーバに送信する等，IT技術の進展に伴う測定方法の進展に関する貴重な知見を得ることができた．

なお，意見交換会への出席を依頼する際には，本資料の内容，および発言に対する責任を担っていただく必要はないことを条件とした．

建設機械の排出ガスにかかる意見交換会

日時：平成31年1月30日　14:30～16:30
場所：中央合同庁舎 2 号館 B2 会議室 A

議事次第

1. 開会・趣旨説明
2. 自己紹介と関連する話題の提供
3. 主題　温室効果ガスとしての亜酸化窒素とメタン
4. 主題外　環境影響評価での排出ガスの予測
5. 主題外　燃費の測定
6. 機械・社会システムの転換による環境改善について

（ 時間不足のため 3.以降は簡易な説明となった. ）

出席者

［ 有識者 ］（ 五十音順 ）

国立環境研究所 地域環境研究センター	主席研究員	近藤美則
日本自動車研究所エネルギ・環境研究部 パワートレイングループ	主任研究員	相馬誠一
茨城大学機械工学科	教授	田中光太郎
ヤンマー株式会社 エンジン事業本部	専任部長	三上哲正
独立行政法人自動車技術総合機構交通安全環境研究所 環境研究部	主席研究員	山本敏朗

［ オブザーバ ］

国土交通省公共事業企画調整課	施工安全企画室長	森下博之
	課長補佐	北川順
	環境技術係長	内田佳希
環境省自動車環境対策課	課長補佐	吉田潔
欠席：環境省総務課環境技術管理室	室長補佐	松川尚生
欠席：国土技術政策総合研究所社会資本高度化研究室	室長、主研	

［ 事務局 ］

国立研究開発法人土木研究所　上席研究員　新田、主任研究員　吉永・田中

配布資料

有識者の方からご提供いただいた資料
土木研究所資料（草案）
環境影響評価法に基づいた道路環境影響評価一覧
環境影響評価条例に基づいた道路環境影響評価事例
道路環境影響評価の技術手法
（ 抜粋　2.5　建設機械の稼働に係る二酸化窒素及び浮遊粒子状物質 ）

議事録

01 開会

土木研究所　新田上席研究員挨拶，趣旨説明.

02 有識者からの情報提供他

02 01 ヤンマー　三上さん 海外の規制の最新動向

02 01 01 欧州：StageⅤ以降は EU 指令を受けた各国の法律から EU としての規制に変更になった.Stage V からは PN(particle number)規制，ISM(in service monitoring)の導入．PN 規制に対応するためには DPF(diesel particle filter)は必須と考えられる．ノンロードのアンモニアはスリップの量で規制されている．NOx 抑制機能診断システムの搭載(Stage IV から)が必須となっている．NOx 制御に異常があった場合、出力を下げる制御が行われる．又、DPF フィルタ取り外し、センサ異常に対する警告が必要となった。ISM に対応する検討をしているが搭載する位置，振動対策で苦慮している．建設機械の取り扱い説明書に試験サイクルでの CO_2 を記載する義務がある．Q:市販されている建設機械には NOx のセンサーや PMのセンサーが搭載されているのでしょうか? A: Stage Ⅳ以降の市場投入機は SCR および NOx のセンサーが搭載されていて診断も行います．DPF フィルタの抜取りは差圧，温度等で監視する方法があります.

02 01 02 中国：GB（GB:Guo jia Biao zhun）4 の規格では ISC(in service conformity)の基準値が設けられている．自主検査と環境部門による監査の双方がある.

02 01 03 米国：温室効果ガスの CO_2 とメタンの報告義務．さらに SCR 搭載車は亜酸化窒素の報告義務.

02 02　JARI 相馬さん

02 02 01 専門分野：2005 年から PEMS(portable emissions measurement system)の業務を実施．現在は国交省委託の「2022 年から導入されるディーゼル乗用車等の路上走行検査」の検討業務や自工会委託の重量車及び小型車の実路走行試験に関する研究を実施．排ガスのリモートセンシング，OBM（on board monitoring）の研究もしている．参考情報として，中国の重量車の最新規制(国 VI 規制）では市場投入車の排ガスデータを政府のデータサーバに送信されるシステムの搭載が義務づけられる予定である旨を紹介.

02 02 02 今後の課題：自動車排出ガスの寄与度や大気環境への影響度を検討して対策を講じるべきか否かを判断すること，PN，低温排ガス，タイヤ・ブレーキ由来の粉塵

02 02 03 小型ガソリン直噴車の PEMS 計測精度にかかる調査結果: 測定器は堀場と AVL の 2 社．双方の濃度の測定値は低温で湿度が高いエンジン始動直後では wet 法と dry 法（双方とも認められている方法）で測定値が異なることがあるが，公定試験で用いられる試験室の定置式の測定器による測定値とよく一致した．排気流量の測定値は低速で 20%程度ほど低めに出る測定器もある．測定では ECU の吸入空気量のデータを真値とみなしている．このデータが正しいことは定置式の測定器で確認している．吸入空気量のデータはエンジンの制御に使用しているので信頼性は高いが，製品ばらつきや耐久劣化までは確認できていない．日欧の PEMS 規制では排気流量の測定では自動車に搭載されているセンサーのデータを使用することができないので後付のピトー管で測定する．PEMS の課題は低速で排気流量が少ない走行における排気流量測定の精度．排気流量計には測定誤差があるがＥＵの規定はクリアできている．PN は測定が難しくばらつきが大きい．Q:オンロード車ではカーボンバランス法で燃費を測定しているのでしょうか？A:自動車での燃費の測定はカーボンバランス法が主流．車は精密に制御されているので燃料の配管の途中に燃料計を設置すると異常検知して車の制御が正常ではなくなってしまう場合がある． Q:CO_2 の濃度は NDIR

(Non-dispersive infrared analyzer)で測定しているのでしょうか？A: ＮＤＩＲで測定しています.

02 03 交通安全環境研究所　山本さん

02 03 01 専門分野：三元触媒，2000 年から PEMS，現在は SEMS.

02 03 02 SEMS(センサーベース)測定: PEMS 測定では電源確保が課題　２～３時間のデータ収集で 100kg 程度の鉛電池が必要．このため NOx センサーとピトー管（一部では吸入空気量のデータ使用）で測定する方法へ移行．自動車メーカは車載のセンサーだけで測定できるが，データは機密扱いされている．データをデジタコに記録してデジタコメーカのサーバーに送信．しかしドライバーがいやがるので今後は別の方法に移行したい．NOx センサーは酸化ジルコニア．O_2 センサとしても使用されているセンサーで O_2 も測定できる．弱点はアンモニアをＮＯと誤認識すること．流量の誤差の影響を減らすために CO_2 比で評価している．欧州，および日本の Light Duty 車の RD E (real driving emission)規制では CO_2 ベースで排出ガスを計算する範囲を決めている．O_2 濃度と CO_2 濃度は高い相関，O_2 濃度から CO_2 濃度を測定できる．一般の PEMS のセンサーは CLD（加熱式化学発光）法．昨年度まではピトー管を使用していたが，今年度から吸入空気量のデータに変えることにした．運転時間を調べたらアイドリングが 1/3 ぐらいの割合であった．アイドリングストップは信号待ちでは有効だが，長時間の待機では補機，エアコン等の使用があるのでアイドリングストップしないのが実情．これまでの試験では半積載を測定してたが，満積載や空積載のある実情に近い条件で尿素 SCR 搭載車を測定すると満積載か空積載で排出量が異なる．積載量は測定していないが，積載量が多い条件では NOx が増加する傾向があったので今後は積載量も調べた方がいい．Q: 個々の NOx センサー毎に特性が異なるのでしょうか? A: 個々の NOx センサー固有の特性を持っているので一本，一本の検量が必ず必要になる.

02 04 国立環境研究所　近藤さん

02 04 01 専門: ＥＶ等のライフサイクル CO_2，ＥＶの開発・評価，1998 年末から環境研へのシャーシダイナモ導入の担当となり現在まで運用担当．2001 年から PEMS（今で言う SEMS）を共同開発したが，当時は NOx 計測に酸化ジルコニアセンサを使用していた．ただアンモニアの影響を受けるのでガソリン車には使用できず，PEMS 用 NOx 計測はガソリン車・ディーゼル車の計測ができる CLD に移行した．また，今流行っている車両データを通信回線を使ってサーバにおくるシステムは 2000 年頃には既にあったので，現在の通信回線を使ったデータ収集やセンサベースの PEMS 開発が進められていることを聞き，その動きに感慨深い.

02 04 02 課題：CLD を使う PEMS は，標準ガスの入手が可能な地域では使用できるが，ガス入手に難がある途上国等では使用困難．一方，2003 年頃に NOx センサを使った路上調査を実施した経験があるが途上国でもガスが不要な SEMS は使える．PEMS 軽量化の妨げの一因である重量物の鉛蓄電池は，リチウムイオンにした方がいいが測定器メーカが対応に乗り気でない．消費電力の少ない PEMS 開発が必要．電動化や自動化などの自動車の変化への対応．環境基準の妥当性．費用対効果を考慮して排ガスをどこまで下げるべきか，決める段階ではないか，そうしないといつまでも規制（と費用対効果の小さい開発）がつづく．オフロード車は機種が多いため調査を行う機種の代表制が課題，オフロード車に一律規制をかけて得られる環境改善効果が正確に効果評価できるかが課題.

02 05 茨城大　田中先生

02 05 01 最近の動向と専門：SIP のプロジェクトでは内燃機械の熱効率が 50%を達成した次の目標はライフサイクル CO_2 で電気自動車に太刀打ちできそうな 60%．研究課題は燃料，後処理装置の表面反応，アッシュでのセンサの被毒，レーザー計測によるアンモニア・メタン・炭化水素の計測．15 万 km 走行した自動車，軽自動車はアンモニア多い．（事前の QA）

Q:波長変調吸収分光法はノイズの少ない FM ラジオの原理と考えていいのでしょうか？単にフィルタをかけて目的の周波数成分を測定すると違うのでしょうか？A: まさにラジオの原理です．ただ，単に吸収分光のシグナルにバンドパスフィルターをかけることと決定的な違いは，ゼロバックグラウンドになることです．もとの吸収成分があると増幅できませんが，ゼロバックグラウンドになると増幅ができ，微弱な信号を取り出すことができるというメリットがありますので，単にフィルターをかけることとは異なり，高感度な計測ができることになります．

02 05 02 今後の展開：亜酸化窒素の PEMS 装置の開発，ガソリン自動車用アンモニアセンサーの開発，メタンの安定炭素同位体の計測法の開発（農作物の産地偽装の検知にも応用可能），触媒開発に有用な構造別炭化水素類の定量計測法の開発，イソシアネート化合物の可搬型簡易計測法の開発，SEMS による PN 計測．（事前の QA）Q:アンモニアをエネルギーキャリアとして活用する検討が進んでいますが，アンモニアの漏えいの測定技術が必要となることはないでしょうか？　A: アンモニアのリークについては，大きな問題に発展する可能性があります．

03 土木研究所の成果報告

温室効果ガスの亜酸化窒素，規制対象となっている NOx，一酸化炭素 CO，炭化水素 HC，黒煙の測定値を文献値と比較した結果を報告した．さらに環境影響評価のマニュアルの記載値に最新規制対応場合の排出原単位を追記した案を報告した．（事前の QA）Q: 亜酸化窒素の将来予測する際に建設機械が 10 年で全て更新する見込みを前提としているが，更新されないで残存する機械もあるので残存率を考慮すべきではないでしょうか？A:規制対象のガスについては，古い規制の機械の排出量が多いので少数が残っていても影響が大きいので残存率の考慮は重要と考えられますが，亜酸化窒素は最新の規制に対応して SCR を搭載した機械から排出されるので，古い機械が残っていても影響は小さく，安全側（影響を大きく見積る側）で計算したので問題はないと考えました．また，近年の建設機械については残存率のデータもありませんでした．(事後の QA) Q:サンドドレーン排出原単位の計算で最新規制対応のトラクタショベルと旧規制対応のサンドパイル杭打ち機で計算しているが，サンドパイル杭打ち機も最新の排出ガス規制対応しているのではないでしょうか?　A:建設機械損料表，日本建設機械要覧，環境省の少数特例の一覧表でも調べましたが排ガス規制対応している機械はみあたりませんでした．積算基準は市場単価に移行されているため積算基準でも機械の排ガス対応はわかりません．

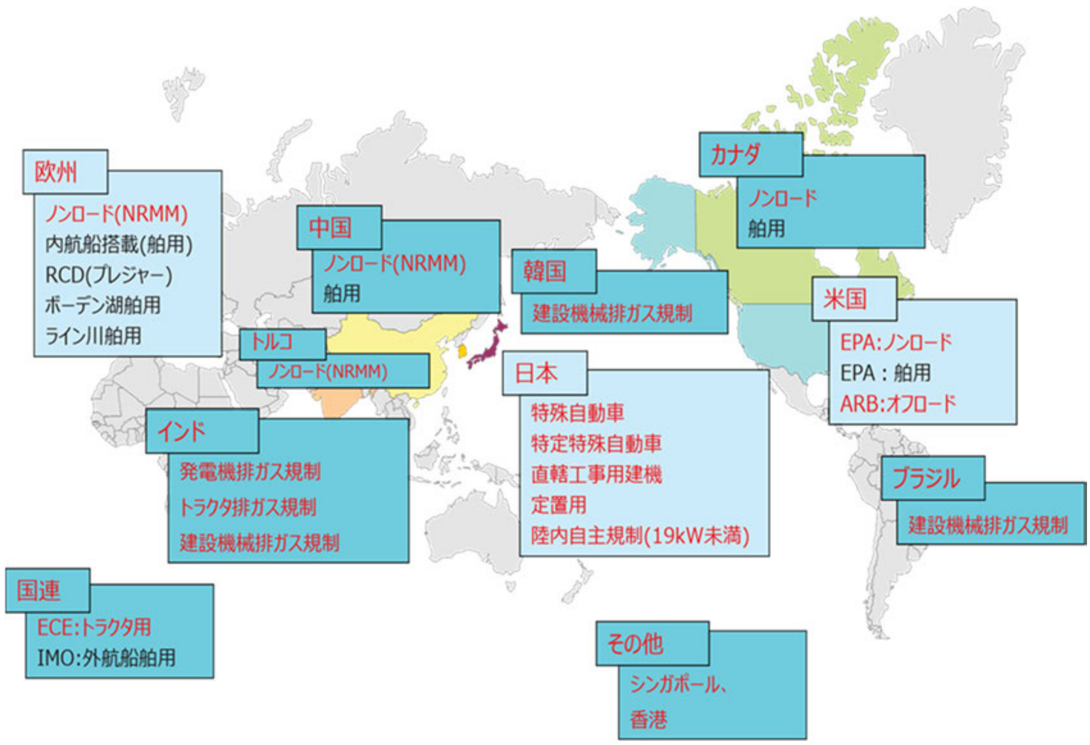
04 閉会

新田上席：参考となるお話を聞かせいただいたことへの御礼．土木研究所は法に対応したアセスメントのマニュアルを作成してきた．排出ガス対策が進展しているにもかかわらずマニュアルへの反映が遅れていた．今後，有効活用できるようにしたい．配布した資料についてご意見・ご指導等を賜れればありがたい．

有識者の方から御提供いただいた資料

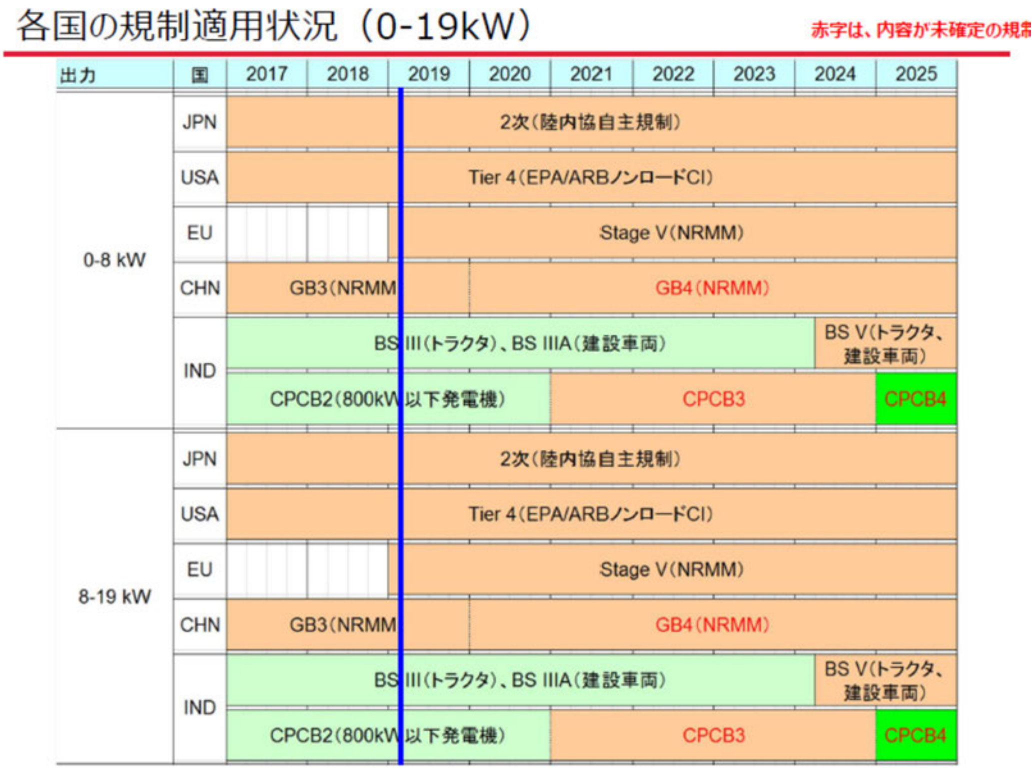
世界のノンロードエンジン排ガス規制

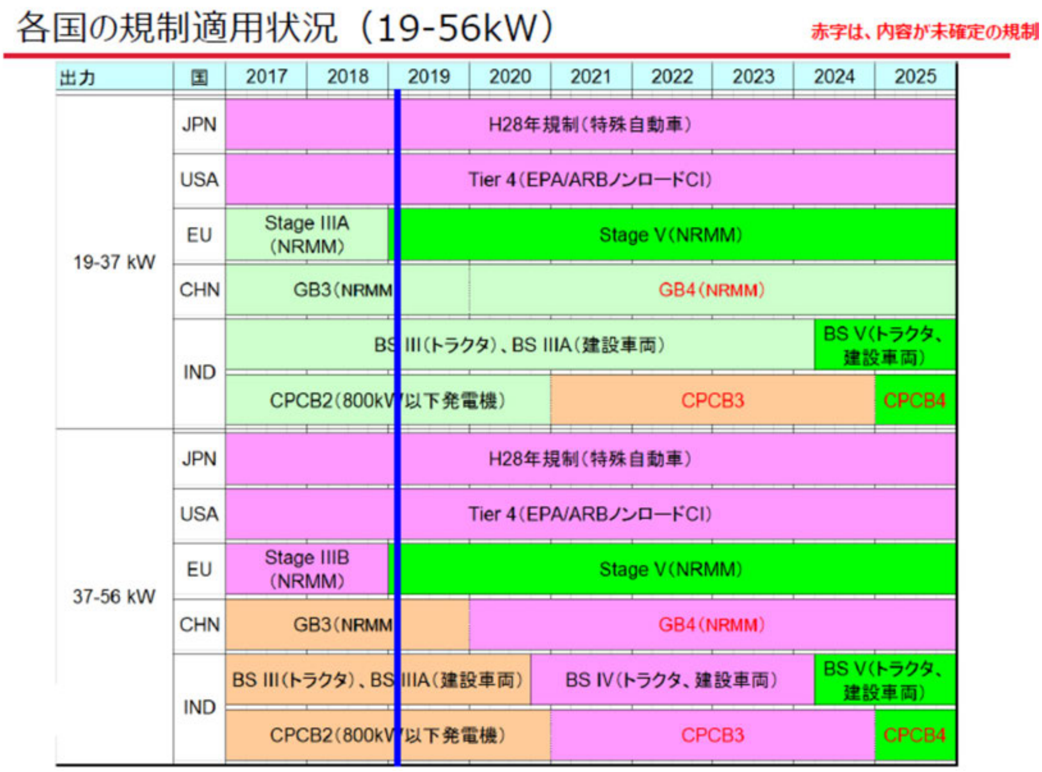
世界の主要排ガス規制



1

有識者の方から御提供いただいた資料





有識者の方から御提供いただいた資料

欧州NRMM Stage V排ガス規制

欧州/NRMM Stage V排ガス規制（概要）

1）「Regulation」として公布される（「Directive」ではないため、各国法への展開が不要）。
2）全て「Stage V」と呼称される（既存のカテゴリも、新規カテゴリも）。
3）ノンロードCI(ディーゼル)エンジンは19kW未満及び560kW超えの規制導入、及び19-560kWの規制強化（PN規制導入含む）。
4）ノンロードSI （ガソリン、ガス）エンジンは、19kW未満の規制強化とガスエンジンへの範囲拡大(従来はガソリンのみ）、及び19kW超えのSIエンジンの規制導入（56kW以上はCIエンジンに整合）などが挙げられる。

Page: 6

欧州/ノンロード移動機械（NRMM）Stage V排ガス規制（本文と関連規則）

✓ 欧州排ガス規制は規制本文と関連規則に区分される。

内容	規制本文 NRMM Regulation	関連規則 Supplementing Regulation on NRMM		
Name of Act	Regulation (EU) 2016/1628	Regulation (EU) 2017/654	Regulation (EU) 2017/655	Regulation (EU) 2017/656
主な内容	規制値、適用時期、試験サイクルなど	技術要件（試験手順、計測機器・構成方法、試験サイクルの詳細など）、エンジンファミリの選定、試験免除の詳細、など	インユース試験の技術要件（エンジン選定方法、計測機器・試験手順、データまとめ方法など）	情報パッケージの中身、情報資料のテンプレート、ラベル要求、認証番号の付与方法、など
発行時期	2016年9月16日	2017年4月13日		

Page: 7

欧州/NRMM Stage V排ガス規制（適用開始時期）

＜ノンロードCIエンジン（56kW以上はSIエンジンも含む）＞

カテゴリ	出力カテゴリ kW	点火方式	速度モード	Stage V適用開始時期 (NRE、NRG)	
				エンジン型式認証 (Type Approval)	エンジン市場投入 (Placing on the Market)
NRE	0-8	CI	可変速 一定速	2018年1月1日	2019年1月1日
	8-19				
	19-37				
	37-56				
	56-130	All		2019年1月1日	2020年1月1日
	130-560			2018年1月1日	2019年1月1日
	> 560				
NRG	> 560				

・NRE：ノンロード移動機械のエンジン（所定のカテゴリに該当しないエンジンはNREとなる）
・NRG：発電機セットエンジン

Page: 8

欧州/NRMM Stage V排ガス規制（適用開始時期）

＜ノンロードSIエンジン＞

カテゴリ	出力カテゴリ kW	点火方式	速度モード	排気量 SV (cm^3)	Stage V適用開始時期 (NRSh、NRS)	
					エンジン型式認証 (Type Approval)	エンジン市場投入 (Placing on the Market)
NRSh	0-19	SI	可変速 一定速	< 50	2018年1月1日	2019年1月1日
				>= 50		
NRS	0-19		可変速 >= $3600min^{-1}$、一定速	80-225		
				>= 225		
			可変速< $3600min^{-1}$	80-225		
				>= 225		
	19-30		可変速 又は 一定速	<= 1000		
				> 1000		
	30-56			All		

・NRSh：基準出力が19kW未満である手持ち式SIエンジン。
・NRS：基準出力が56kW未満で、またNRShに含まれないSIエンジン。

Page: 9

欧州/NRMM Stage V排ガス規制（排ガス規制値）

✓ Stage V排ガス規制値は

カテゴリ	出力カテゴリ kW	点火方式	速度モード	Stage V規制値（NRE、NRG） CO	HC	NOx	PM	PN
				g/kWh				#/kWh
NRE	0-8	CI	可変速 一定速	8.00	7.50		0.40*1)	-
	8-19			6.60	7.50		0.40	-
	19-37			5.00	4.70		0.015	$1x10^{12}$
	37-56			5.00	4.70		0.015	$1x10^{12}$
	56-130	All		5.00	0.19	0.40	0.015	$1x10^{12}$
	130-560			3.50	0.19	0.40	0.015	$1x10^{12}$
	> 560			3.50	0.19	3.50	0.045	-
NRG	> 560			3.50	0.19	0.67	0.035	-

*1) 手始動可能な空冷直噴エンジンのPM規制値=0.60g/kWh
*2) A：デュアルフュ-エルエンジンのHC規制値の乗数

Page: 10

欧州/NRMM Stage V排ガス規制（排ガス規制値）

＜ノンロードSIエンジン＞

カテゴリ	出力カテゴリ kW	点火方式	速度モード	排気量 SV (cm^3)	Stage V規制値（NRSh、NRS） CO	HC+NOx
					g/kWh	
NRSh	0-19	SI	可変速 一定速	< 50	805	50
				>= 50	603	72
NRS	0-19		可変速=> 3600min^{-1}	80-225	610	10
			可変速< 3600min^{-1} 一定速	>= 225	610	8
	19-30		可変速 一定速	<= 1000	610	8
				< 1000	4.40*1)	2.70*1)
	30-56			All		

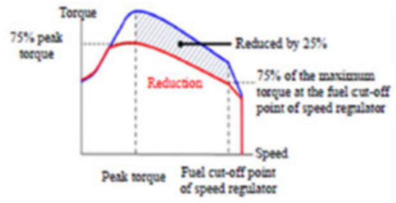
*1) CO≦20.6g/kWh及びHC+NOx≦2.7g/kWhを条件として、(HC+NOx)x$CO^{0.784}$≦8.57の規制値も認められる。

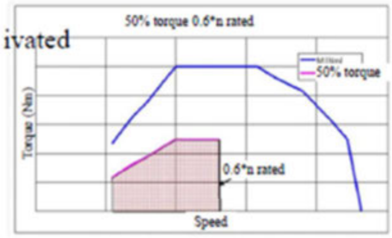
Page: 11

NCD(NOx Control Diagnostic)要求

- NOx抑制機能の不具合を診断する、NOx抑制機能診断システム(NOx Control Diagnostic)を備えること。
- 診断項目：SCRシステム、
  電子制御EGRバルブ、センサー
- 上記の異常発生時時は、警報とトルク制限が必要。
- NCD要求は、欧州Stage V 規制と同等
- 出力制限方法
  0. 異常検知時：発報
  1. 軽度対処誘導システム
     10時間後：　75%トルク減少
  2. 重度対処誘導システム
     20時間後：　50%トルク減少
     回転数60%減少

コントロール条件：
①高さ1600mまで
②雰囲気温度 -7℃～35℃
③冷却水温度 ≧70℃





PCD(Particulate Control Diagnostic)要求

- 微粒子制御措置の不具合を診断する、微粒子制御診断システム(Particulate Control Diagnostic)を備えること。
- 診断項目：フィルター取り外し、センサー
- 上記の異常発生時時は、警報

コントロール条件：
①高さ 1600mまで
②雰囲気温度 -7℃～35℃
③冷却水温度 ≧70℃

Page: 13

欧州/NRMM Stage V排ガス規制（移行規定）

Stage V規制開始前までに生産された「0~19kW未満の未規制エンジン」及び「19kW以上で現行規制の認証取得済みエンジン」は「移行エンジン」として、Stage V規制開始後、2年間は市場投入が可能である。

- ✓ 作業機の生産は規制開始後1年半以内に完了しておく必要がある。
- ✓ 移行期間後に在庫となったエンジンは、非規制地域に販売が必要

<table>
<tr><th>Power</th><th>Content</th><th colspan="2">2018</th><th colspan="2">2019</th><th colspan="2">2020</th><th colspan="2">2021</th><th colspan="2">2022</th></tr>
<tr><td rowspan="3">0～56kW
搭載作業機</td><td>規制開始</td><td colspan="2">IIIA/IIIB/規制なし</td><td colspan="8">Stage V</td></tr>
<tr><td>生産期間</td><td></td><td></td><td colspan="3">作業機生産期間</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>投入期間</td><td></td><td></td><td colspan="4">市場投入期間</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="3">56～130kW
搭載作業機</td><td>規制開始</td><td colspan="4">Stage IV</td><td colspan="6">Stage V</td></tr>
<tr><td>生産期間</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td colspan="3">作業機生産期間</td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>投入期間</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td colspan="4">市場投入期間</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="3">130～
560kW
搭載作業機</td><td>規制開始</td><td colspan="2">Stage IV</td><td colspan="8">Stage V</td></tr>
<tr><td>生産期間</td><td></td><td></td><td colspan="3">作業機生産期間</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>投入期間</td><td></td><td></td><td colspan="4">市場投入期間</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

「作業機生産台数が100台/年の作業機メーカ」または「モバイルクレーン」は上記＋12ヶ月、「19kW未満のSIエンジンを搭載した除雪機」は上記＋24ヶ月の延長猶予がある。

Page: 14

免除規定

Stage Vの免除規定は以下の通り;

1）輸出免除

第3国へ輸出されるエンジンは、本規制に従う必要は無い。
輸出免除ラベルが必要

2）軍用免除

軍向けで使用されるエンジンは、本規制に従う必要は無い。
「軍向け」とは、消防、民間防衛団体、公安維持に責任を負う部隊、及び緊急医療機関は含まない。
軍用免除ラベルが必要

3）試験免除

EU域内での試験用エンジンは、本規定に従う必要は無い。
1)試験計画について当局の認可(当局の認可後輸出可能)
2)試験免除ラベルの貼付け
3)適合宣言書を各エンジンに添付

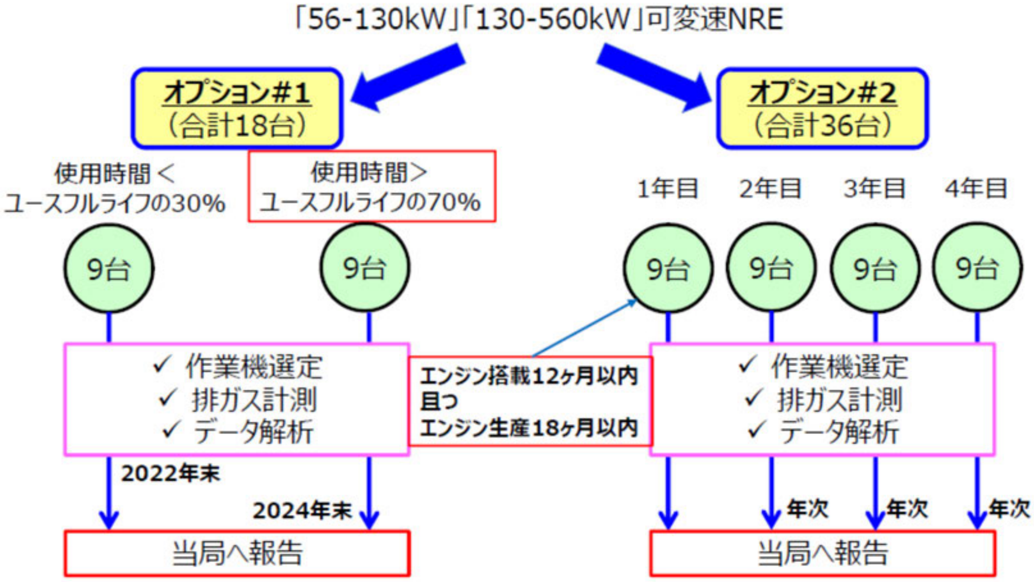
Page: 15

使用過程エンジンの排出物の測定、報告（ISM）

- Stage Vより市場で稼働中の作業機搭載エンジンの排ガスを測定し、試験結果の報告が必要(In Service Monitoring「ISM」)
- Stage Vでは可変速NRE「56-130kW」「130-560kW」で実施。
- エンジンメーカが報告義務。
- ISM試験は、EU域内で実施が必要（域外での試験は不可）。
- 計測は、ガス成分のみ（PMは計測不要）。試験結果は、報告義務のみ。
  (ISM基準値は無い)

Page: 16

使用過程エンジンの排出物の測定、報告（ISM）



Page: 17

使用過程エンジンの排出物適合(ISC)/中国GB4(案)

- 37-560kWエンジン搭載車両が対象。
- PEMSによる車両搭載状態で排ガス計測
- 計測項目はNOxのみ。インユース基準値は規制値の2.5倍。
- 実施方法

コントロール条件：
①高さ2400mまで
②雰囲気温度266K～311K
③冷却水温度≧70℃

自主検査 (新規生産の車両)
①機械メーカー
車両ファミリーによる試験計画、検査結果を情報公開
②エンジンメーカー (PEMSでは実施しない)
COP報告(試験計画、検査結果を情報公開する必要がある)

環境部門監査
①対機械メーカー
PEMS試験を実施すると共に自主検査記録、情報公開内容などをチェック
②対エンジンメーカー
生産一致性や自主検査データなどのチェック
③市場の車両のPEMSによる試験

Page: 18

GHG報告義務

1）EPA

GHG報告(申請書に記載)： CO_2 、CH_4

NOx後処理装置付エンジンのGHG報告(申請書に記載)：N_2O

2）EU

ユーザへの報告（取扱説明書に記載）：CO_2

以上

2019 年 1 月 30 日 建設機械の排出ガスにかかる意見交換会

自己紹介と関連する話題の提供

相馬誠一

（一般財団法人）日本自車研究所

1

自己紹介

- 氏名 相馬 誠一 （そうま せいいち）
- 勤務先 （一財）日本自車研究所【JARI】
- 所属 エネルギ・環境研究部 パワートレイングループ
- 職歴概要
  - ・1997 年 4 月 JARI 入所
  - ・1997 年度から主に「JCAP」,「JCAP-II」のガソリン関連業務に従事.
    並行して，ガソリン(四輪車,二輪車)の排ガス・エバポ(燃料蒸発ガス)の
    法規作成に関する検討やデポジット評価試験法作成業務にも従事.
  - ・2004 年度からはディーゼルの排出ガス燃費，計測評価関連業務にも従事.
  - ・2005 年度より PEMS(車載式排ガス分析計)業務に従事し，自工会や官庁
    からの委託調査を担当.
    これまでに大型車・小型車の PEMS 計測精度や評価手法の検討などを実施.
  - ・2016 年度と 2017 年度に環境省二輪車次期排ガス規制検討業務に従事.
  - ・2018 年度から国交省路上走行検査に関する調査業務に従事.
- 学会・委員会活動
  - ・自技会：排出ガス試験法関連の会議体(エンジンテスト分科会)の委員を拝命.
  - ・自工会：ディーゼル，PEMS，OBD(車載式故障診断)，二輪車排出ガス
    関連の会議体などの委員を拝命.
  - ・官庁：PEMS や排出ガス関連の検討委員会や WG 委員を拝命.

2

自己紹介及び話題提供

近藤　美則

国立研究開発法人国立環境研究所
地域環境研究センター
広域大気環境研究室
主席研究員

2019/01/30(水) 14:30～16:40
中央合同庁舎2号館B2会議室A

Prepared for “建設機械の排出ガスにかかる意見交換会”

経歴（車にかかわる研究に関して）

1993年頃	ガソリン車や電気自動車(EV)のライフサイクルCO2分析
1995～98年頃	EV開発、EV用電池の性能評価
1998年末頃	研究所へのシャシーダイナモ(C/D)設備導入担当
2000年前後	乗用車の利用実態調査
2001年～	C/D試験（特に、ディーゼル車PM）、 車載型排ガス計(PEMS) 開発
2003年～	ディーゼル車からのナノ粒子排出実態把握
2006年頃	エコドライブ評価（乗用車）、EV評価
2009年頃	非メーカー製プロトタイプEVの性能評価
2011年～	直噴ガソリン車からのナノ粒子排出実態把握 LPG車の排ガス評価
2015年頃～	VW不正を受けた市販車の排ガス排出実態調査 補機利用や気温等が燃費や排ガスに与える影響評価

排ガスの研究での課題

オンロード車
・排気ガスの濃度レベルはかなり低い。
・濃度から排出量への変換には負担（人、もの、金）が多くかかる。
・対策すべき限界を誰が判断するのか、できるのか。

オフロード車
・種類や使用形態（含場所）は多様で、試験の代表性は？
・どのような規制がこのカテゴリの排出削減に真に効果的か？
・規制と効果に対する評価、効果評価が必要。

今後、排ガス関係でとりくむべき課題（個人の見解）

オンロード車（乗用）
・電動化が進み、エンジンの利用環境は現状とは大きく変わるはず。
・定常的な動作範囲で発電用に間欠的に使用するのみになると、排ガス処理装置は新たな開発課題を持つか？
・自動運転車が増えた場合、どんな排気量のエンジンが生き残る？

オンロード（貨物）
・電動化はどのサイズまで入るか？
・排気後処理装置の耐久性は信頼できるか？
・乗用車がEV主力になった際、エンジン用燃料供給はどうなる？

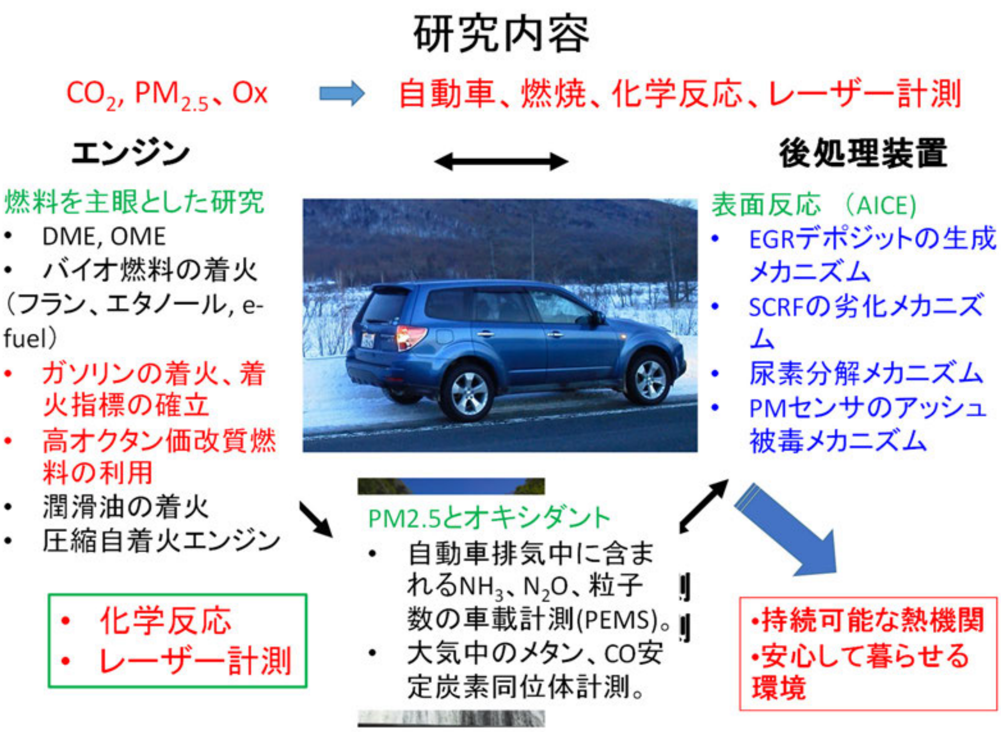
オフロード車
・貨物と同じような状況では。

　点源や線源等の汚染物質発生源として、環境基準達成への対応の必要性（どのレベルまで環境が良くなったら対策/規制をしないとするか）の判断が必要。そもそも現状の環境基準値は妥当か？

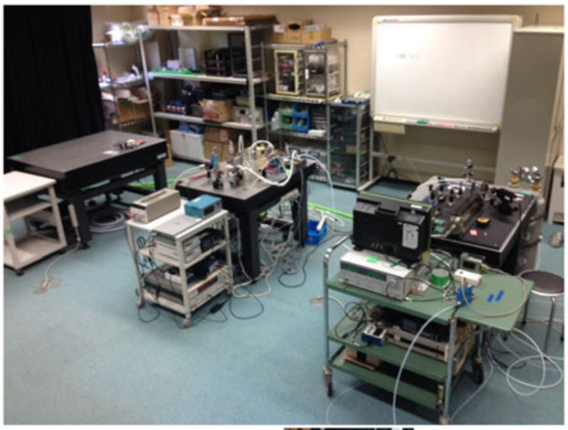
茨城大学における研究の紹介
～持続可能な内燃機関に向けて～

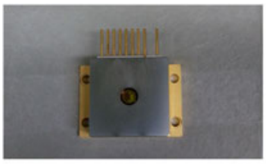
2019.1.30

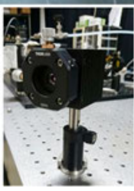
茨城大学　田中光太郎



茨城大学レーザー計測実験室



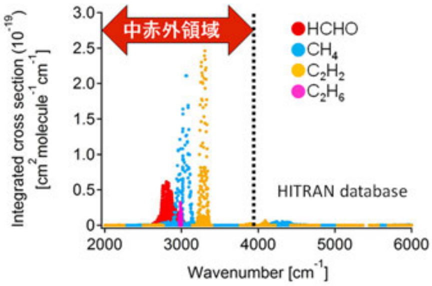


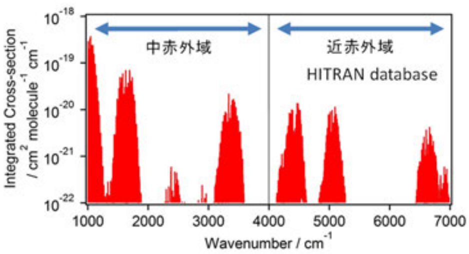


中赤外レーザー
近赤外レーザー
⇒
NH_3、N_2O (自動車排気中)
HCHO、H_2O_2 (燃焼場)
燃料濃度計測
イソシアン酸(HNCO)
CO_2、CH_4安定同位体

中赤外・近赤外半導体レーザーを用いた微量成分計測

中赤外領域は分子の基本振動周波数領域であり、強い吸収帯が存在する(分子の指紋)。

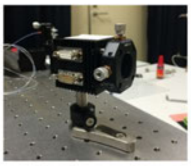


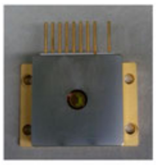


NH₃吸収スペクトル

中赤外領域光源の発展

- 炭化水素、窒素酸化物などの定量計測に応用。



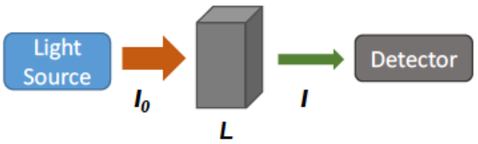


燃焼中間生成物・排気計測、燃料濃度計測(バイオ燃料成分濃度、オクタン価、燃料のセンシング)、デポジットの構成炭化水素の推定への応用。

4

直接吸収分光法

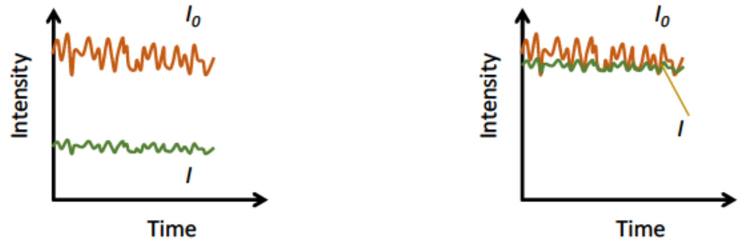
Beer-Lambert' Law



Detection sensitivity strongly depend on the fluctuation of light intensity

$$I_0/I = \exp(-\sigma c L)$$

σ: absorption cross section(cm^2 molecule^{-1})
c: concentration (molecule cm^{-3})
L: optical path length (cm)



「observable」　「unobservable」

5

波長変調吸収分光法

中心周波数w_cに変調周波数w_mをかける。

$$E(t) = E_0 \exp[i(\omega_0 t + \beta \sin \omega_m t)]$$
$$= E_0 \exp(i\omega_0 t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta) \exp(in\omega_m t) \quad J_n(b) \text{ :n th Bessel function}$$
$$\alpha(\omega_0 + \beta\omega_m \cos \omega_m t) = \sum_{n=0}^{\infty} H_n(\omega_0) \cos n\omega_m t$$

吸収長L、吸収係数a(w)を透過すると

$$I_T(w) = I_0(w)[1-a(w)L]$$

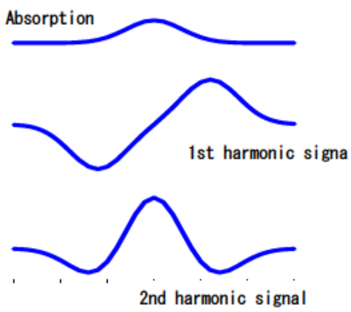
変調振幅が小さいとき、フーリエ成分は以下のようにかける。

$$H_n(\omega_0) = \frac{2^{1-n}}{n!}(\beta\omega_m)^n \left.\frac{d^n\alpha(\omega)}{d\omega^n}\right|_{\omega=\omega_0}$$

フーリエ成分をロックインアンプでn次の位相敏感検出する。

1st harmonic signal $\quad S(\omega_0) \propto I_0 L \beta\omega_m \left.\frac{d\alpha(\omega)}{d\omega}\right|_{\omega=\omega_0}$

2nd harmonic signal $\quad S(2\omega_0) \propto \frac{1}{4} I_0 L (\beta\omega_m)^2 \left.\frac{d^2\alpha(\omega)}{d\omega^2}\right|_{\omega=\omega}$



・bw_mが反値半幅の2.2倍に等しいとき、感度が最も高くなる。
・ゼロバックグランド測定。

6

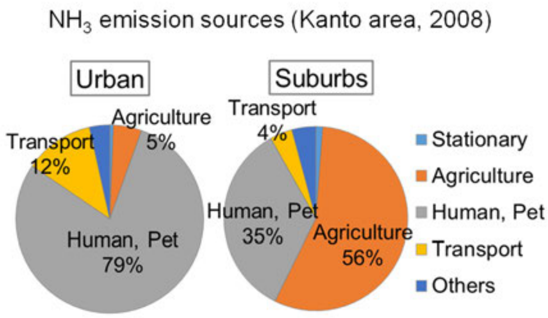
アンモニア（NH_3）

環境への影響

- 土壌・水の酸性化
- 粒子状物質（PM）の二次生成に寄与

発生源

- 自然起源
- 農業起源
- 自動車排出ガス
  - 三元触媒（TWC）
  - 尿素選択還元触媒（Urea-SCR）



道路交通の集中する都市部において，自動車起源のNH_3排出割合は高くなる．

排出実態を把握する必要がある．

7/18

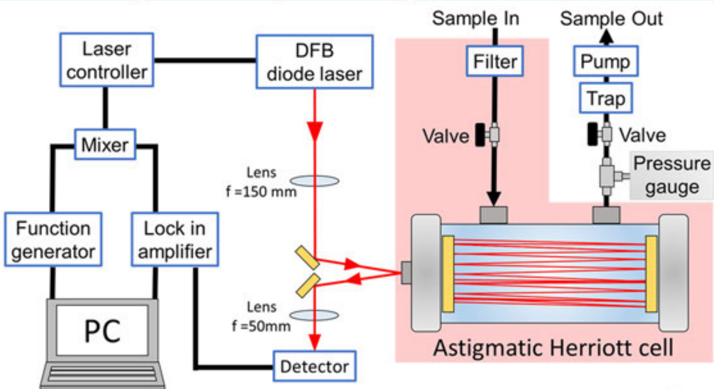
計測装置・方法（光学計測部）

発振波長1.515 μmのDFB半導体レーザー
波長変調吸収分光法を応用して構築した装置

Astigmatic Herriott 型
多重反射セル(4)

選定吸収波数	6599.90 cm^{-1}	セル内圧力	10.0 kPa	容積	0.13 L
応答時間	約 1 s	セル温度	140 ℃	全長	146 mm
検出限界	0.3 ppm	流量	2 slm	光路長	9.8 m

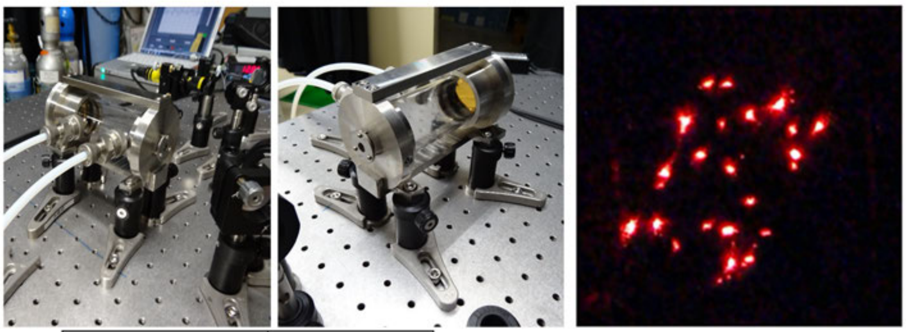
光学計測部
＋
制御装置類
500 mm
×
500 mm
×
765 mm



(4) Kotaro Tanaka, Kai Miyamura, Kazushi Akishima, Kenichi Tonokura, Mitsuru Konno, "Sensitive measurements of trace gas of formaldehyde using a mid-infrared laser spectrometer with a compact multi-pass cell", Infrared Physics and Technology, 79, 1-5, (2016).

小型多重反射セルの構築

- 応答速度を速くする。　　火星におけるメタンの計測用セルとして開発



実際のスポットパターン

容積	0.13 L
全長	146 mm
高さ	79 mm
ミラー間距離	100 mm

CO_2の安定炭素同位体計測などへも展開

焦点距離	100 mm
サイズ	1 inchi ×1inchi
入射口半径	2 mm
実光路長	9.8 m

走行ルート

The driving route for on-board measurements.

市街地区間(A–B, C–A)：約17 km
高速走行区間(B–C)　：約10 km
総走行距離　　　　：約27 km

総走行時間　　　　：約3500 s

走行コースを一周し，再びスタート地点に戻るまでを1回の計測とした.

データサンプリング：1秒毎

関田、田中ら、自動車技術会秋季大会2017

アンモニア計測車両

アンモニア車載計測装置

レーザー吸収分光法
＋
波長変調分光法

計測例

・三元触媒を搭載したガソリン車
・ディーゼル酸化触媒を搭載したディーゼル車

ガソリンエンジン	軽	小型	普通
三元触媒	○	○	

※ 軽乗用車：～660 cc
小型乗用車：660～2000 cc
普通乗用車：2000 ～ cc

ディーゼルエンジン	ディーゼル酸化触媒 (DOC)	NOx吸蔵還元触媒 (NSR)	尿素 SCR 触媒
微粒子捕集フィルタ (DPF)	○	○	○

※ DPF (Diesel Particulate Filter)
DOC (Diesel Oxidation Catalyst)
NSR (NOx Storage Reduction)
SCR (Selective Catalytic Reduction)

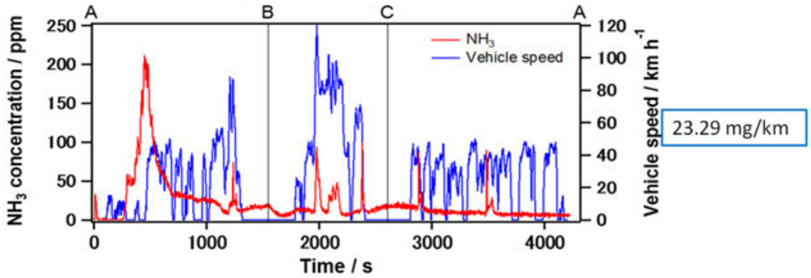
試験車両(一例)

	No. 1	No. 2	No.3
Fuel type	Gasoline	Diesel	Gasoline
Engine type	In line 4 cylinder NA	In line 4 cylinder Turbo	In line 3 cylinder Turbo
Displacement (L)	1.99	2.18	0.658
Max. power output (kW per rev / min)	98 / 5600	129 / 4500	38/6800
Post treatment device	TWC	DOC + DPF	TWC
Vehicle mass (t)	1.68	1.56	1.16
Emission standard	2005	2009	2005
Model year	2014	2015	2017
Mileage traveled (km)	11000	8800	17700

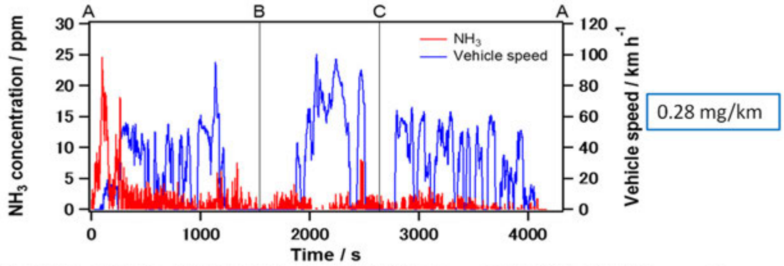
田中 光太郎, 深川 駿輔, 関田 将大, 金野 満, “レーザ吸収分光法を用いた自動車から排出されるアンモニアの車載計測”, 自動車技術会, 47. 2 (2015) pp. 369-374.
霜山ら、環境工学総合シンポジウム、2018.

アンモニア計測例（小型ガソリン車、ディーゼル車）

ガソリン乗用車(No.1)から排出されるNH_3濃度[3]

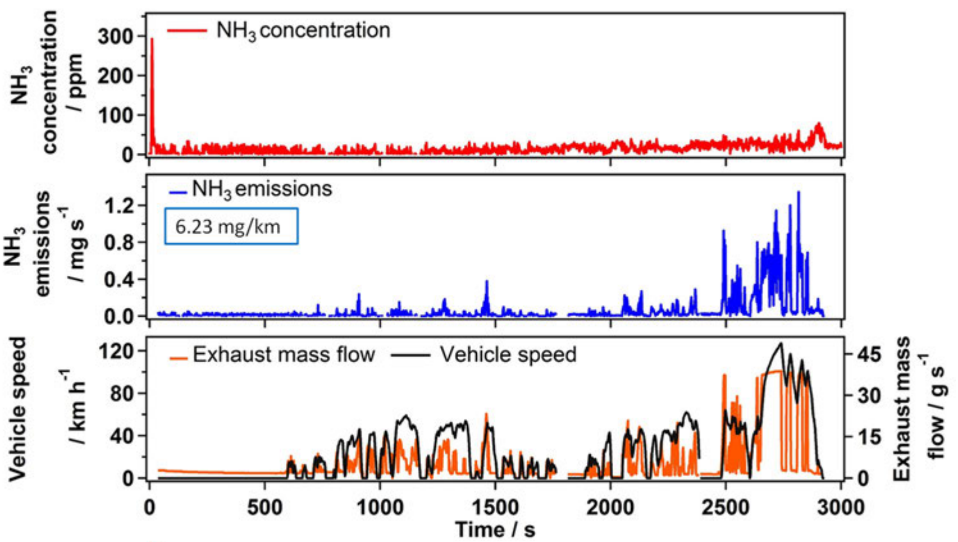


ディーゼル乗用車(DOC+DPF, No.2)から排出されるNH_3濃度[3]



(3) 田中 光太郎，深川 駿輔，関田 将大，金野 満，"レーザ吸収分光法を用いた自動車から排出されるアンモニアの車載計測"，自動車技術会，47. 2 (2015) pp. 369-374.

アンモニア計測例2（軽自動車, No.3）



エンジン始動直後と高速走行時に高排出

14

霜山ら、環境工学総合シンポジウム、2018.

今後の展開

- 亜酸化窒素のPEMS装置の開発
- ガソリン自動車用アンモニアセンサーの開発
- SEMSによるPN計測（PEMSからSEMSへ）
- 触媒開発に有用な構造別炭化水素類の定量計測法の開発
- メタンの安定同位体計測法の開発
- イソシアネート化合物（イソシアン酸）の可搬型簡易計測法の開発

15

B　一般に公開されている資料

B.1　型式届出特定特殊自動車一覧 （ 電子データ ）

環境省 web site (https://www.env.go.jp/air/car/tokutei_law.html)より．入手した一覧表を電子データで添付する (参照日は 2018 年 11 月 8 日.).

B.2　EU における non road mobile machinery の in service monitoring (電子データ)

使用過程の non road mobile machineryn の排出ガスの測定にかかる EU 規則 COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU) 2017/655 of 19 December 2016 の原文よび和訳を電子データで添付する (参照日は 2017 年 8 月.).

土木研究所資料

TECHNICAL NOTE of PWRI

No.4385 April 2019

編集・発行 ©国立研究開発法人土木研究所

国立研究開発法人土木研究所 企画部 業務課

〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6 電話 029-879-6754

土木研究所資料　第四三八五号　建設機械から排出される温室効果ガスの亜酸化窒素およびメタンの研究　平成三十一年四月　国立研究開発法人　土木研究所