投稿論文 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(N₂O)とメタン(CH₄)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(尿素選択的還元装置)搭載車の「ならし(模擬動作)」で排出される N₂O 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 N₂O 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 N₂O 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 N₂O 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 N₂O 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 N₂O の温室効果がスとしてのシェア(relative contribution to GHG emissions (CO₂-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.

$\neq - \nabla - \mathcal{K}$: greenhouse gas, N₂O, CH₄, 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(CO₂), 亜酸化窒素(N₂O) (地球温暖化係数はCO₂の298倍⁵⁾),およびメタン(CH₄) (同 25 倍⁵⁾)の規制値(standard⁶⁾)を定めており、測定 値の報告を義務づけている.

自動車から排出される CH₄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, N₂O は三元触媒



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 SF₆、および三ふっ化窒素 NF₃ の合計

TWC,および尿素選択的還元装置(SCR:Selective Catalytic Reduction System)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 CH₄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、N₂O 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 N₂O、および CH₄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 N₂O 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 N₂O 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(IST)の科学技術文 献情報(主として和文)の JDream Ⅲ, 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 N₂O, および CH₄ 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 N₂O, および CH₄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N₂O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 N₂O, および CH₄の 温室効果ガスとしてのシェア(relative contribution to GHG emissions(CO₂-equivalent))を図-4,5に示す.N₂O 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





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-ECD¹⁰⁾,GC:Gas chromatograph, ガスクロマトグラフ,ECD:Electron Capture Detector,電子捕 獲検出器,NDIR¹³⁾: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



図-4 温室効果ガスとしての N₂O 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 CH4 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}: N₂O を測定した5台のうち CH₄ を測定した ものは3台

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 η = 36%を準用し,仕事量比の排出量 R_{GpW} をCO₂比の排出 量 R_{GpC02} 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.

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 N₂O で 2.9%, SCR 非搭載車の N₂O で 0.51%, SCR 搭載車の CH₄ で 0.03%, および SCR 非搭 載車の CH₄ 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 N₂O と CH₄ の概況を把握することを目的として 2015 年度から 2018 年 度の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

測定時期	2015年度(10月,1月),2016年度(12月), 2017年度(10月),2018年度(8月)							
測定場所	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)							
測定対象(建設機械)	油圧ショベル							
		規制年	×	ーカと クラス	排出ガス後 処理装置	測定 年度		
		2011	А	社 20 t	DOC, DPF	2015, 2016		
		2011	011 B社20		DOC, DPF	2018		
		2011	B社13t		DOC, DPF	2018		
		2014	А	社 20 t	DOC, DPF, SCR	2017		
		2014	В	社 20 t	DOC, SCR	2018		
		2014	A社13t		DOC, SCR	2017		
		2014	В	社 13 t	DOC, SCR	2018		
測定項目と測定装置	測定項目			測定装	置			
	エンジン回転			CAN データロガー				
	数,トルク			(VECTOR,GL1000)				
				(2015, 2016, 2017年度) 振動センサーズ回転計				
	排気流量			(2018年度,回転数のみ)				
				ピトー管式流量計				
				(2015, 2016, 2017 年度)				
	排	出ガス濃	度	FTIR (岩田電業, FAST-2200)				
測定対象(ガス)	CO_2 , CO, CH ₄ , N ₂ O, NO, NO ₂ , NMHC (非							
サンプリング国連粉	5日7(02秒問題)							
「シンフランフロ仮数	0.2 (U.2 (V.2 (V.1) 円)							

表-1 測定概要

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 20 t, および 13 t 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 CO₂、N₂O、CH₄ の他 に CO, NO, NO₂、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.



図-6 2016年度の測定



図-7 2017 年度の測定²⁰⁾

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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂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



図-8 動作別の NOx の測定値²¹⁾. CO₂1kg 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



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. N₂O 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 N₂0 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

おくことが必要である. 温室効果への影響が大きいと考 えられるのは SCR 搭載車の N₂O のため, N₂O の測定値 の測定経過時間、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 CO₂ 比(g/kg-CO₂)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 N₂O 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 N₂O 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 N₂O の排出量が相対的に多いことから、 「ならし(模擬)」における N₂O、および CH₄ の温室効果 ガスとしてのシェア (relative contribution to GHG emissions (CO₂-equivalent)の平均値を算定し、図-4、および



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。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 CO₂ 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 図-5の文献値と比較した結果を図-12に示す. N₂O, お よび CH₄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. CH₄ のシェアは、7 台全て 0.1%未満であった. N₂O 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(CO₂)、亜酸化窒 素(N₂O)(地球温暖化係数は CO₂ の 298 倍⁵⁾)、およびメ タン(CH₄)(同 25 倍⁵⁾)の規制値(standard⁶⁾)を定めてい る.ディーゼルエンジンから排出される CH₄ 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 N₂O 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 N₂O 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 N₂O と CH₄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 20 t 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、20 t、お よび 13 t 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 N₂O 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 N₂O の温室効果ガスとしてのシェア(relative contribution to GHG emissions(CO₂-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} , CO₂ 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 N₂O, および CH₄ のシェア(relative contribution to GHG emissions(CO₂-equivalent)) $R_{N20_{GWP}}$, および $R_{CH4_{GWP}}$ 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_{N20_GWP} ,および R_{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_{N20_GWP} ,および R_{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) $V \ge C_G$ の測定値による $R_{GpCO2}(\exists(a.4))$ を真値とみなし、(b) R_E から $V \ge 推定し, V \ge 測定しない方法, (c) C_G$ の測定 値のみによる方法($\exists(a.7)$) 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 1/100 程度のごく低濃度の N₂O でも 3.1%

計算式	番号	記号
$R_{\rm GpW} = M_{\rm G} / W$	(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).
$M_{\rm G} = \int \frac{C_{\rm G} \rho_{\rm G} V}{1,000,000} dt$	(a2)	$C_{\rm G}$: 排出ガスの濃度 (ppm), $\rho_{\rm G}$: 排出ガスの密度 (g/m ³), V: 排気 流量 (m ³ /s).
$W = \int \frac{2\pi R_{\rm E} T_{\rm E}}{1000 \cdot 3600} dt$	(a3)	$R_{\rm E}$:エンジン回転数 (/s), $T_{\rm E}$:トルク (N・m).
$R_{\rm GpCO2} = M_{\rm G} / M_{\rm CO2}$	(a4)	R_{GpCO2} : CO ₂ 質量比の排出量 (g/kg-CO ₂), M_{CO2} : CO ₂ の量 (kg).
$k = \frac{R_{\rm GpW}}{R_{\rm GpCO2}} = \frac{M_{\rm CO2}}{W} = \frac{1}{\eta}m$	(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.
$R_{C_GpCO2} = \int C_G dt / \int C_{CO2} dt$	(a6)	C_{CO2} : CO ₂ の濃度 (ppm).
$R_{\rm GpCO2} \cong 1,000 \cdot R_{\rm C_GpCO2} \cdot \rho_{\rm G} / \rho_{\rm CO2}$	(a7)	$ \rho_{\text{CO2}} $: CO ₂ の密度 (g/m ³).
$R_{N20_{GWP}} = \frac{K_{N20} \cdot M_{N20} \cdot 100}{(M_{C02} + K_{N20} \cdot M_{N20} + K_{CH4} \cdot M_{CH4})}$ (建設機械から排出される温室効果ガスを CO ₂ , N ₂ O, および CH ₄ の3種類とみなし た場合の式.)	(a8)	$R_{\text{N2O}_{GWP}}$, $R_{\text{CH4}_{GWP}}$: 温室効果ガスとしてのN ₂ O, およびCH ₄ のシェア (relative contribution to GHG emissions (CO ₂ -equivalent))(%), K_{N2O} , K_{CH4} : N ₂ O, およびCH ₄ の地球温暖化係数.本論文では K_{N2O} = 298, K_{CH4} = 25 としたが, 異なる値を使用している文献もある.
$R_{CH4_GWP} = \frac{K_{CH4} \cdot M_{CH4} \cdot 100}{(M_{CO2} + K_{N20} \cdot M_{N20} + K_{CH4} \cdot M_{CH4})}$ (建設機械から排出される温室効果ガスを CO ₂ , N ₂ O, および CH ₄ の 3 種類とみなし た場合の式.)	(a9)	

表-3 計算式

	測定項目							
排出ガスの 評価量	エンジン 回転数 <i>R</i> _E	トルク T _E	排気流量 V	排出ガス の濃度 <i>C</i> _G				
仕事量比の排 出量 <i>R</i> _{GpW}	0	0	0	0				
GHG のシェア $R_{\rm N2O_GWP}$, $R_{\rm CH4_GWP}$			0	0				

表-4 測定値の評価量と測定項目



図-13 排気流量の測定値または推計値と CO₂比排出量の例²¹⁾

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 $R_{\rm E}$ 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ため、排出ガス量の 計算は(c) によることとし、 $R_{\rm E}$ 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 のデータはメーカが取り扱いに留意しているこ





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

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



図-17 FTIR の模式図²¹⁾

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

- 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)
- 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, 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.
- 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 NH₃ and N₂O 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 heavyduty 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, NH3, N₂O 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.

- 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ボジウム論文集・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.

(2018.11.16 受付, 2018.12.23 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 YOSHINAGA¹ and Yasushi NITTA²

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 (CH₄) 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 (CO₂-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.