

# ENGINE REVIEW

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN Vol. 5 No. 3 2015

JSAE エンジンレビュー

特集:

新たなエミッション規制～排ガスの車載計測～

- ・Trend Of Real World Emissions Regulation
- ・建設機械排出ガスの実態調査事例の紹介  
Introduction of Survey case of construction machinery exhaust gas
- ・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  
On-board Measurement by Sensor-based Portable Emission Measurement System



公益社団法人 **自動車技術会**

- コラム：●エンジンとの対話：遠藤 浩之／編集委員 1  
Communication with Engine
- 特集：新たなエミッション規制～排ガスの車載計測～
- ・ Trend Of Real World Emissions Regulation: 2  
Leslie Hill (HORIBA, Ltd.)
  - ・ 建設機械排出ガスの実態調査事例の紹介： 8  
藤野 健一，西山 章彦（土木研究所），杉谷 康弘（国土技術政策総合研究所）  
Introduction of Survey case of construction machinery exhaust gas
  - ・ 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： 12  
山本 敏朗（交通安全環境研究所）  
On-board Measurement by Sensor-based Portable Emission Measurement System

**■ JSAE エンジンレビュー編集委員会**

委員長： 飯田 訓正（慶應義塾大学）  
副委員長： 村中 重夫（元日産自動車）  
幹事： 飯島 晃良（日本大学）  
委員： 遠藤 浩之（三菱重工業）  
金子 タカシ（JX 日鉱日石エネルギー）  
菊池 勉（日産自動車）  
小池 誠（豊田中央研究所）  
小酒 英範（東京工業大学）  
佐藤 唯史（ケーヒン）  
清水 健一（元産業技術総合研究所）  
下田 正敏（日野自動車）  
鈴木 央一（交通安全環境研究所）  
西村 知江子（堀場製作所）  
野口 勝三（本田技術研究所）  
平井 洋（日本自動車研究所）  
山崎 敏司（編集）

発行所： 公益社団法人 自動車技術会  
発行日： 2015 年 9 月 30 日  
発行人： 竹村 純（三菱自動車工業）  
〒102-0076 東京都千代田区五番町 10-2  
電話：03-3262-8211

●コラム

## エンジンとの対話

Communication with Engine



遠藤 浩之

Hiroyuki ENDO

三菱重工業株式会社

Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

免許を取得して 30 年になった。振り返ると 9 基のエンジンを所有したことになる。下表に示す通り様々な形式のエンジンを所有してきた。今後 6 気筒を超えるマルチシリンダのエンジンを所有できるとは思えないので、残りはディーゼルくらいである。

所有年	ストローク	気筒数	気筒配列	燃料	燃料供給	過給機	排気量(cc)
1985	2	3	V	ガソリン	キャブレタ	なし	249
1989	4	2	V	ガソリン	キャブレタ	なし	248
1992	4	4	L	ガソリン	キャブレタ	なし	747
1989	4	6	L	ガソリン	ポート噴射	なし	1998
1991	4	4	L	ガソリン	ポート噴射	なし	1836
1998	4	6	V	ガソリン	ポート噴射	ターボ	2498
2003	4	6	L	ガソリン	ポート噴射	なし	2597
2005	4	4	L	ガソリン	ポート噴射	なし	1499
2015	4	4	F	ガソリン	筒内直噴	ターボ	1998

エンジンとの対話という点では、最初に所有した V 型 3 気筒の 2 ストロークエンジンが最も印象深い。極端に狭いパワーバンドで、常にエンジン回転数を意識しながら運転する必要があった。うまくパワーバンドを使って運転することが出来ると満足感が高かった。直列 4 気筒の無過給エンジンはパワーの出し入れが回転数にリアで扱いやすかった。直列 6 気筒の無過給エンジンは応答はのろいが滑らかな高級感があった。

現在所有するエンジンは、ターボ過給の筒内直噴 4 気筒ガソリンエンジン。それなりにターボラグは残っているが非常に完成度が高いエンジンである。しかし、トランスミッションが CVT と言うこともあり、エンジンとの対話が大変難しい。アクセルペダルの踏み代と実際のスロットル開度の関係が 3 種類も変えられるのも違和感がある。アダプティブクルーズコントロールを使えばアクセルペダルに触る必要もない。要はエンジンとつながっている感覚に乏しい。一方、OBD II を用いたモニタリングができるのはエンジン屋としては大変面白い。精度は分からないが、燃料流量、空気流量、出力、点火時期などを表示できるので、高速 100km/h 巡航時の燃費率が 400g/kWh もあるとか、アイドリングでも案外リッチだなあとか、エアコンは結構燃料使っているなあとかが数字で分かる。エンジンとの対話方法は 30 年前の 2 ストロークエンジンと全く違うものの、これはこれで楽しい。

今後は、ほとんどの乗用車がハイブリッド化されていくと思われる。そうなるとますますエンジンとの対話は難しくなる。自動運転も技術的にはあと 10 年あれば実現しそうな勢いである。エンジンとの対話を楽しむのは今のうちである。

# Trend Of Real World Emissions Regulation

Leslie Hill  
 HORIBA, Ltd.

## 1. Introduction

One of the hottest topics in the field of vehicle / engine exhaust emissions at the present time is that of “Real World” emissions measurement and the legislation that requires it. Whilst this topic is considered to be new, its roots actually go back more than fifteen years and so its introduction has actually been quite gradual. However, now that the necessary portable emissions measurement technology, test procedures and the various result calculations / reporting have been confirmed, the applications and uses for “real world emissions” in legislation are expanding rapidly. This review looks at the development of Real World Emissions Regulations and looks forward to future potential uses.

## 2. On-Road Emissions Measurement for Heavy Duty Diesel Vehicles: 1998 Consent Decree: EPA versus Heavy Duty Truck Engine Manufacturers

As a result of legal action [1] between the USA Environmental Protection Agency (EPA) and several HD engine manufacturers related to their real world NO<sub>x</sub> emissions being considerably above the statutory levels measured when their engines were tested in a laboratory, the EPA mandated that further tests, additional to the FTP transient cycle, were required for certification. The first was a Supplemental Emissions Test (SET) which is a series of measurements made at steady engine speed and load settings selected by EPA, designed to simulate truck operation on a freeway. The second was a Not-To-Exceed (NTE) test, designed as a “Field Test”, to confirm that the emissions of the vehicle operating within the NTE specified control area of engine speed and load (figure 1) and under real road / driving conditions, does not exceed the applicable FTP limits, after the allowance of a tolerance factor.

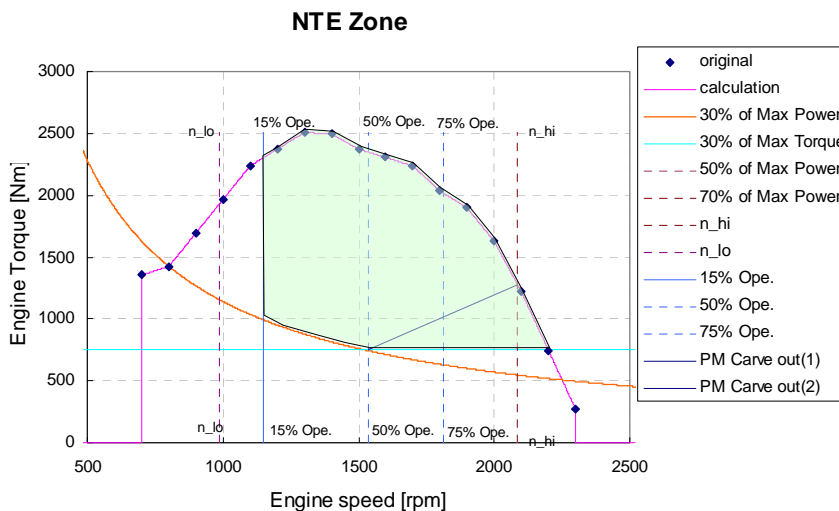


Figure 1 NTE Zone (data from [2])

The “in use” measurement of NO<sub>x</sub>, NMHC, CO, CO<sub>2</sub> for on-road trucks and buses was started in 2007 and the measurement of PM mass followed in 2011. It is expected that the measurement of the same exhaust components will be legislated for vehicles in the Non-Road Mobile Machinery (NRMM) category in 2017 with testing to commence a year or two years later.

USA legislation initiated the movement towards confirming the “in service” emissions using vehicles operated on the road. Real world emissions measurement was quickly taken up by emissions legislators in Europe as part of the drive to reduce atmospheric pollution, especially NO<sub>2</sub>, due to heavy duty trucks and buses.

**3. Europe: In Service Conformity for Heavy Duty On-Road Vehicles and Non-Road Mobile Machinery**

The EU Commission DG-ENTR (now known as DG-GROWTH) initiated the discussion on “In Service Conformity” of HD on-road trucks and buses following the USA in 2003. The working group formed was comprised of the EU Commission, personnel from the EU Joint Research Centre (JRC - the EU Commission’s In-House Science Service) and representatives from Technical Authorities, ACEA (Association Europeens des Constructeurs d’Automobiles) and the Portable Emission Measurement System (PEMS) manufacturers.

The legislative requirement for In Service Conformity was defined in EU Directives issued in 2005 and 2007 [4] with the purpose of applying PEMS to HD vehicles “in order to better control in-use emissions including Off-Cycle Emissions and to facilitate the in service conformity process”.

A PEMS Pilot Programme organised by JRC quickly confirmed that the USA NTE process could not be generally applied for European road conditions. Under the NTE rules, the engine had to be within the NTE zone shown in figure 1 for a period not less than 30 seconds in order for a emissions measurement to be valid.

JRC showed several examples of heavy duty vehicle on-road tests that confirmed that the NTE criteria would result in road tests for which very little of the data would be valid (figure 2).

As an alternative to the USA NTE, the JRC developed the Moving Average Window method that is more appropriate for European roads and traffic (figure 3).

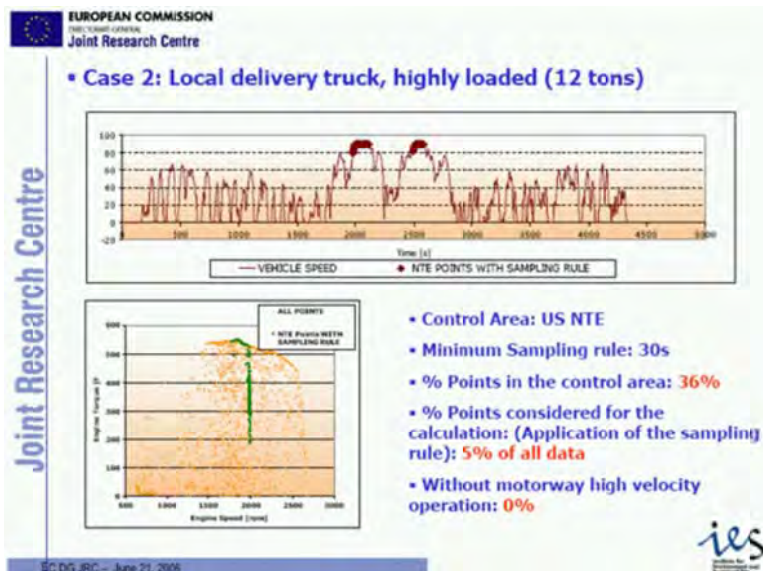


Figure 2 An example of heavy duty vehicle on-road test [3]

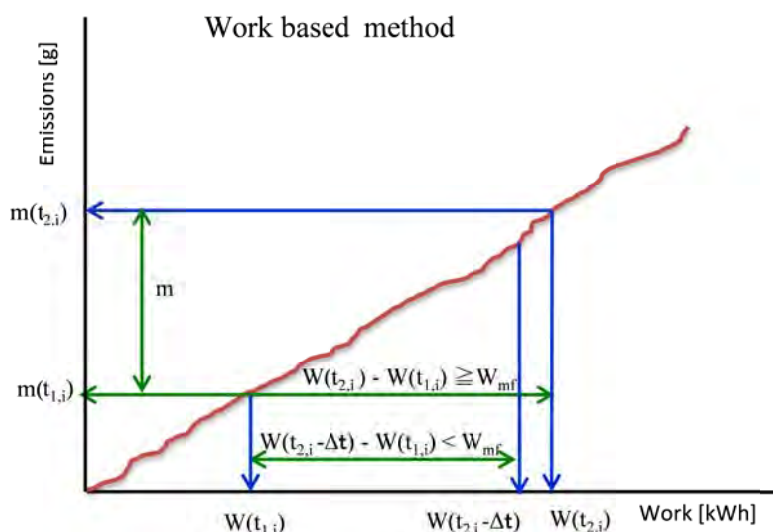


Figure 3 Work based method (data from [4])

For the Moving Average Window method defined in the Commission Regulation (EU) 582/2011, all of the exhaust mass emissions are used but averaged over windows of work equivalent to that generated over the WHTC cycle that is specified for the EURO VI type approval test. Emissions measurements recorded before the engine coolant has reached 70 deg C or before it has been operating for 20 minutes (whichever is first) are not used in the Moving Average Windows. In order to be used in the final calculation, each window must be valid in terms of the minimum work rate and the reported emissions are limited to the 90<sup>th</sup> percentile value.

In a more recent EU Directive (64/2012), the EU Commission required that HD vehicles must meet the specified emissions limits when tested using PEMS in order to be type approved, as opposed to demonstrating that the vehicles conform in service after type approval as originally defined in the Commission Regulation (EU) No 582/2011. This applied to all newly homologated EURO VI engines from 2014 onwards for THC, CO, NO<sub>x</sub> and CO<sub>2</sub>, NMHC and CH<sub>4</sub> are required for engines operating on methane fuel.

As part of the Commission Regulation (EU) 582/2011, the legislation specified that any additional requirements with respect to off-cycle in-use vehicle testing shall be introduced after the assessment of the PEMS procedures set out in Annex II. The assessment shall be finalised by 31 December 2014<sup>1</sup>.

As part of this assessment [5], the EU Commission has proposed a number of possible changes to the calculations and reporting of the exhaust emissions data, primarily to increase the amount of valid data generated by the on-road test and also to more closely define the criteria for an acceptable road trip. Discussions on these proposals continue with the Industry.

Finally, JRC has completed its specifications for the equipment to be used for the measurement of PM mass from on-road heavy duty vehicles and the applicable test procedures and calculations [6]. These are being finally discussed in 2015 and will be introduced in due course, probably from 2016.

Following the introduction of the PEMS method for In Service Conformity for on-road heavy duty vehicles, its application for the engines used for NRMM vehicles was piloted, primarily for agricultural and construction uses.

The basic use of the PEMS and the required components remains the same. The main issues are largely practical given the more restricted space available in many of the NRMM vehicles. In addition, the operating conditions of some NRMM vehicles is more difficult than on-road in terms of vibration, shock, dust and possible exposure to water.

The main difference to the on-road vehicles is related to the criteria surrounding the Moving Average Windows in order to avoid the issues associated with extended idling of the engine during the PEMS test which can adversely affect the calculation of the brake specific emissions. JRC has made proposals on how these extended idle periods can be excluded from the final result calculations and reports.

Currently, it is expected that the application of PEMS for some NRMM categories for gaseous components (THC or NMHC, NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub>) will occur in 2016 and for PM mass in 2018 [7]

#### 4. Europe: Real Driving Emissions For Light Duty Vehicles (RDE-LDV)

It has been known for several years that the continuing reduction in the exhaust emissions from vehicles driven by EURO legislation has not resulted in the expected reduction in the atmospheric levels of NO<sub>2</sub>, as shown in the European map of NO<sub>2</sub> nonattainment (Figure 4).

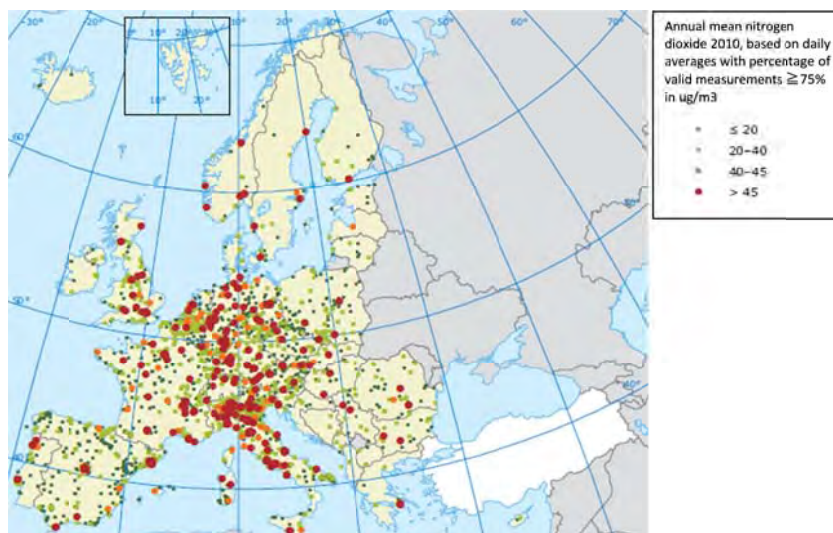


Figure 4 Annual mean concentration of NO<sub>2</sub> in 2010 [8]

Consequently, the difference observed in the exhaust emissions from the HD on-road engines during type approval (on the engine dynamometer) and vehicles using the same type of engine when tested on the road, initiated a program to test light duty vehicles (LDVs) under the same comparative conditions [9].

The JRC located in Ispra (Italy) performed on-road testing on a variety of LDVs over a variety of test routes as well as in their own chassis dynamometer emissions test laboratory.

The PEMS systems used were identical to those used for the HDV program and measured THC, CO, CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emissions.

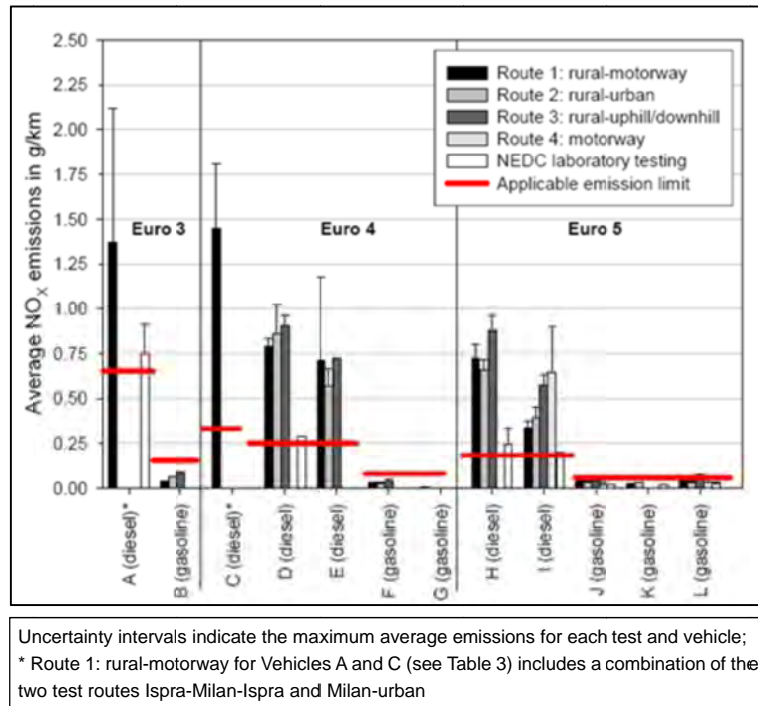


Figure 5 Average NO<sub>x</sub> emissions on the PEMS test routes and during NEDC testing in the laboratory [9]

The results from the JRC program (figure 5) showed that whilst the exhaust emissions from all the gasoline vehicles when tested on the road matched their measured emissions in the laboratory, the emissions from all of the diesel vehicles emitted between two and four times the mass emissions of NO<sub>x</sub> that was emitted in the laboratory. This difference was thought to be caused either by the lower ambient temperature during the on-road testing (the laboratory test is performed at 20 - 30 deg C) or due to the actual real world driving cycles (as opposed to the New European Drive Cycle – NEDC applied in the laboratory test).

As a result of the above program, the EU Commission started a new working group entitled RDE-LDV. The purpose of which was to develop a supplementary test method for LDVs, in addition to the current Type Approval test, with the aim to ensure that the exhaust emissions in the real world would match those emitted in the test chassis dynamometer laboratory.

Two RDE-LDV test methods were proposed initially:

- An additional test in an environmental chassis dynamometer test cell where the ambient temperature could be varied outside of the standard 20 – 30 deg C that is applicable for the current Type Approval test. The speed v time drive cycle to be applied would be created from a standalone program called the Random Cycle generator, whose database contained the European road trips logged as the EU contribution to the new World Light Duty Vehicle Test Procedure (WLTP). In this way, a real world road test would be simulated.
- The use of a PEMS to install in the LDV to allow its emissions to be measured on the road under real driving conditions.

After a period of discussion, it was concluded that the RDE-LDV test procedure would be based on the use of a PEMS. The Random Cycle method was retained as a back up in case that a PEMS instrument for Particle Number (PN) could not be developed as a practical device. TNO (the Netherlands Organisation for Applied Scientific Research) was commissioned to finalise the Random Cycle generator program, which they delivered to the working group in September 2014.

Having confirmed the PEMS as the default method of measuring the real driving emissions of LDVs, the working group activities then focussed on the details of its application. This was mainly in two areas, the calculation / reporting of the measured data and the boundary conditions / procedure for the on-road test.

#### Calculation / Reporting Of Measured Data

Two methods were proposed for the calculation and reporting of the measured data, both of which would allow the ability to “normalise” the driving style of the vehicle i.e. the exhaust emissions are neither influenced by a driver who is too aggressive or too gentle, which could be detrimental to either the vehicle manufacturer or the environment respectively.

- The Moving Average Window method: as applied to HD on-road and off-road vehicles, with the relevant modifications for LDVs and their method of certification.
- Power Binning or the Standardised Wheel Power Frequency Distribution (SPF) method: this method was originally developed by the Technical University of Graz (Institute for Internal Combustion Engine and Thermodynamics) and known as CLEAR (Classification of Emissions from Automobiles in Real driving).

The conclusion from the RDE-LDV working group, having consulted with EU Technical Authorities and Member States, was that the Moving Average Window method would be the default method but both methods would be applicable during the monitoring phase of the RDE-LDV introduction and a final decision would be made by 2020, some time after the proposed introduction of the RDE test with mandatory NTE limits.

#### RDE Test Procedure / Boundary Conditions

As a result of protracted negotiations of the working group, it was decided that some of the boundary conditions would have two levels: Moderate and Extended with potentially different limits for NTE. For example, the moderate conditions for the test temperature would be from 0 to 30 deg C with extended conditions being from – 7 to 35 deg C. Similarly, for altitude, the moderate conditions would be up to 700m with the extended conditions being up to 1300m. Similarly again, the vehicle loading factor would have moderate and extended ranges.

Exhaust emissions from the vehicle cold start will be measured and logged but not used in the calculations and reports until the cooling water reaches 70 deg C or the engine has been operating for 5 minutes.

Another key factor is the design of the road trip. Experience gained during the use of the PEMS for HD vehicle testing has shown the effect of the road trip structure on the exhaust emissions. So it is not just necessary to detail the vehicle speed ranges and relative proportions for the urban, rural or motorway segments of the journey, but also the order of the segments is also to be specified : urban then rural then motorway in that specific order.

The necessary legislation to mandate the measurement of the real driving emissions for light duty vehicles was being processed through the EU at the time of writing this review. No vote was taken during the Commission TCMV (Technical Committee - Motor Vehicles) meeting on the 24<sup>th</sup> March 2015 but the draft RDE-LDV legislation was passed in the subsequent meeting on May 19<sup>th</sup> 2015.

From the proposed legislation, the reporting of RDE NO<sub>x</sub> and CO emissions will be required for all new EURO 6 homologations from January 2016 for monitoring and reporting purposes only. Measurement of NO<sub>x</sub>, CO and PN with NTE limits would be applied from September 2017 at the earliest, assuming that a viable method/procedure for a PN-PEMS can be completed by the end of 2015 as planned. It is anticipated that the quantification of the NTE limits could be applied in two stages.

#### Future Applications and Use Of PEMS

In principle, the USA has already specified “Field Testing” by means of PEMS for all applications of the internal combustion engine that use the CFR Part 1065 for certification. These not only include those heavy duty on-road trucks/buses and non-road mobile machinery but also small on-road/off-road engines, locomotives and engines for marine use. The timing of the introduction of PEMS testing for some of these categories is still to be confirmed.

Only light duty vehicles in the USA are specifically not included for “field testing”.

As detailed in the review, Europe will apply PEMS for real driving emissions for LD vehicles as well as for heavy duty vehicles for on-road and off-road applications.

In future, the EU Commission has indicated that PEMS testing will be evaluated for other applications of internal combustion engines such as inland marine vessels, small utility engines and possibly even light-aircraft and helicopters.

#### Acknowledgements

The author would like to gratefully acknowledge the contributions and editing of C. Nishimura, M. Nishikawa and A. Ikushima of HORIBA, Ltd.



## References

- [1] Consent Decree: EPA v various HD Diesel Engine Manufacturers 22/10/1998
- [2] EPA Title 40 CFR Part86 Subpart-N (as of 6th October 2000)
- [3] PEMS Pilot Programme Meeting, Brussels, 21<sup>st</sup> June 2006 (Not-published)
- [4] Commission Regulation (EU) No 582/2011 (as of 25th May 2011)
- [5] JRC Technical Reports: PEMS EMISSIONS TESTING OF HEAVY DUTY VEHICLES/ENGINES: ASSESSMENT OF PEMS PROCEDURES IN FULFILMENT OF ARTICLE 14(3) TO REGULATION (EU) 582/2011, Report EUR 27251 EN
- [6] JRC Technical Reports: EU-PEMS PM Pilot Program: Testing, data analysis and results (Not-published)
- [7] NRMM PEMS State Of Play Meeting : JRC, Ispra, 16<sup>th</sup> December 2011 (Not-published)
- [8] Figure 4: European Environment Agency  
Report No 4/2012: Air Quality In Europe. 2012 Report
- [9] ISBN 978-92-79-19072-8 : JRC Technical Reports: EUR 24697 EN – 2011  
"Analyzing on-road emissions of light-duty vehicles with portable emission measurement systems (PEMS) "

## Definitions /Abbreviations

### EPA

USA Environmental Protection Agency

### SET

Supplemental Emissions Test

### NTE

Not-To-Exceed

### NRMM

Non-Road Mobile Machinery

### JRC

EU Joint Research Centre

### ACEA

Association Europeans des Constructeurs d'Automobiles

### PEMS

Portable Emission Measurement System

### RDE-LDV

Real Driving Emissions For Light Duty Vehicles

### WLTP

World Light Duty Vehicle Test Procedure

### PN

Particle Number

# 建設機械排出ガスの実態調査事例の紹介

Introduction of Survey case of construction machinery exhaust gas

藤野 健一, 西山 章彦

Kenichi FUJINO, Akihiko NISHIYAMA

国立研究開発法人 土木研究所

Public Works Research Institute (PWRI)

杉谷 康弘 (元 土木研究所)

Yasuhiro SUGITANI

国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management

## 1 はじめに

本稿では、建設機械のうち特種自動車に分類される自走式のものを対象とする。この場合、建設機械のほとんどが動力にディーゼルエンジンを使用していると考えてよい。また、その排出ガスの自動車全体に対する割合は、環境省によれば、窒素酸化物( $\text{NO}_x$ )が15.6%、全炭化水素(THC)が7.5%、一酸化炭素(CO)が2.3%、粒子状物質(PM)が20.9%(平成24年値)と推計されている。

こうした推計値や環境基準の達成の状況、排出ガス低減技術の開発状況、諸外国の状況等に基づいて、中央環境審議会において、排出ガス規制の方向性が議論される。そのため、排出ガス実態をより正確に推計することは、排出ガス規制の方向性を議論する上で、非常に重要な要素である。また、大規模な建設工事を実施する場合には、事前に工事による環境影響の予測評価(いわゆる環境アセスメント)を実施する必要があるが、その予測を行うためには、工事中に建設機械から排出される排出ガスの量を建設機械毎に把握しておく必要がある。これらの推計や予測に使用される値は、建設機械の製造年とその年に対応する排出ガス基準値・規制値や、基準・規制に規定された試験方法で測定した値を参考にする場合もある。しかし、実際の工事現場と同じ状況で、実際に作業をしている建設機械の排出ガスを計測した値で検証することが、より正確性の向上に繋がる。以下では、試行的に建設機械排出ガスの実態計測を行った事例を紹介する。

## 2 建設機械の排出ガス規制との関連について

排出ガス規制の観点から建設機械を分類すると、道路を走行するもの(いわゆるナンバーがついていて、車検が必要なもの)と、道路を走行しないものに分けられる。道路を走行するものは「道路運送車両法」の、道路を走行しないものは「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」と言う)の適用をそれぞれ受けることになる。

道路を走行するものとしては、ホイールクレーンや除雪グレーダ等を、道路を走行しないものとしては、油圧ショベルやブルドーザ等を思い浮かべていただくとよい。なお、法律は異なっても、排出ガス性能を決定する試験方法や規制値は双方で整合が図られている。また、建設機械、農業機械、産業機械(フォークリフト等)は、排出ガス規制の上では同じ特殊自動車として位置づけられており、特殊自動車の排出ガス試験の内容はどの機械でも同じになっている。また、排出ガス試験は建設機械の状態ではなく、搭載される前のエンジンの状態で、規定の運転条件の排出ガス値を測定することによって行われている。

この運転条件の特徴は、特殊自動車を代表する幾つかの運転条件を足し合わせた平均的なものになっていることである。従って、それぞれの建設機械、例えば油圧ショベルの運転条件とも異なっているし、ブルドーザの運転条件とも異なっている。

図1は建設機械の排出ガス規制で規定されているディーゼル特殊自動車8モード法であるが(排出ガス規制にはこれとは別に過渡状態を計測するNRTCモードも存在するがここでは省略する)、青丸で示した運転条件での排出ガス値に青丸横の数値(重み係数)をかけて試験値とすることになっている。一方、油圧ショベルの一般的な作業では、作業開始時にダイヤルレバーで定格回転速度付近まで回転数を上げ、作業中は回転数を操作することなく、掘削作業や旋回、走行等を行うため、図1の赤枠部分の条件での運転となる。こうしたことから、建設機械の排出ガス実態を把握するためには、建設機械の実際の作業時の計測が有効であると考えられる。

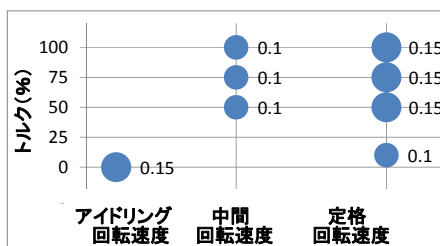


図1 ディーゼル特殊自動車8モード法

### 3 作業中の建設機械の排出ガス計測について

#### 3.1 排出ガス計測における制約条件について<sup>1)</sup>

作業中の排出ガス計測には、車載型の排出ガス計測装置が必要である。測定装置には、測定値が正確であること以外にも建設機械の特性に応じた条件を満足することが求められる。さらに、建設機械の運転室は操作者1人が乗れるスペースしかなく、不整地運搬車のように運搬を目的とするもの以外では、荷物を搭載するスペースもない。そのため、限られた場所に搭載できることが必要である。

油圧ショベルでは、ある程度の大きさのものであれば、運転室の上部に設置スペースが確保できるため、そこに車載型排出ガス計測装置を搭載することができる。それ以外にもガスボンベや燃料流量計、エンジン回転計、電源(発動発電機)を搭載する必要があるが、これらについては直接車体に設置するスペースが確保できないので、別途搭載用架台を車体に取り付けて搭載することも一つの方法である。

排出ガス測定器の操作やデータを記録するパソコンについては、信号を無線通信できる場合を除き(この場合には、運転者以外が操作・確認することが可能)、運転者が操作・確認できるように運転席に設置する必要がある。作業中は、車体に激しい振動や揺れが発生する場合もあるため、それらに耐えられるように強固に取り付ける必要があるとともに、油圧ショベルのアームなどを動かす際に設置した機器と接触しないようする必要がある。

これらを考慮して測定に必要な機器を設置した例を図2、図3に示す。



図2 車載型排出ガス計測装置搭載状況(1)



図3 車載型排出ガス計測装置搭載状況(2)

#### 3.2 振動の影響について<sup>2)</sup>

車載型排出ガス計測装置を油圧ショベルに搭載した場合、実際に排出ガスを計測することができるかどうかを確認する必要がある。これを検証するために、実際の作業中の振動に対して排出ガス計測装置が正常に測定できるか調査した(表1)。

オフロード法の規定では、排出ガスの測定方法として、 $\text{NO}_x$ については化学発光分析計(CLD)又は非分散形紫外線分析計(NDUV)を、COについては非分散形赤外線分析計(NDIR)を、THCについては水素炎イオン化法分析計(FID)が標準となっている。車載型の排出ガス測定装置としては、これらの測定方法を使用する装置を選定した。国内で調達可能な装置を調査した結果、現状で2社の製品が存在することが分かった。この2社の装置は、 $\text{NO}_x$ に関する測定原理が異なることから、両方の装置を試験することとした。A社製は、いったん $\text{NO}_2$ をNOに変換した後に全てのNOを計測することにより、 $\text{NO}_x$ 値を出力する。B社製は、NOと $\text{NO}_2$ をそれぞれ計測し、 $\text{NO}_x$ 値はそれらを合計する。 $\text{NO}_x$ 以外の測定原理は基本的に同じである。排出ガス測定装置の諸元を表2に示す。



測定装置のサンプル採取口からは、ガスボンベから濃度が既知のガスを送り続け、各動作条件で発生する振動により、各センサの出力するガス濃度値の変化を調査した。「影響あり」となっているものが、振動により値の変化があったもので、図4、図5に値の変化の例を示す。図中の桃色線が振動加速度的値で、紺色線がガス濃度値である。

調査の結果、履帯式の車両が走行するときのガタガタガタと連続する振動や、作業中に突発的に起こる衝撃的な振動に対して、正確な値を示さない場合があることが分かった。測定した値を解析するには、こうした結果に基づいて、異常値を排除することや、誤差があることを前提とした解釈・分析を行う必要がある。

表 1 振動影響検証結果

動作条件	NOx又は NO・NO2	CO	THC
①旋回操作(180度)	○	○	○
②走行(コンクリート面)	○	○	○
③走行(土地面)	○	影響有り	影響有り
④走行(不整地)	○	影響有り	影響有り
⑤走行(登り坂)	○	影響有り	○
⑥掘削・旋回・積み込みの一連動作	○	○	○
⑦バケット地面押し当て動作	○	○	○
⑧クローラ端部落とし動作	○	○	影響有り
⑨アーム上げ動作	○	○	○
⑩アーム下げ動作	○	○	○

表 2 車載型排出ガス測定装置諸元

測定項目	測定原理	
	A社製	B社製
NOx	CLD	(NOとNO2を合計する)
NO	—	NDUV
NO2	—	NDUV
CO	NDIR	NDIR
THC	FID	FID
寸法 (mm)	約 W350 × H330 × D500	約 W516 × H404 × D622
質量	約 29kg	約 35kg
外観		

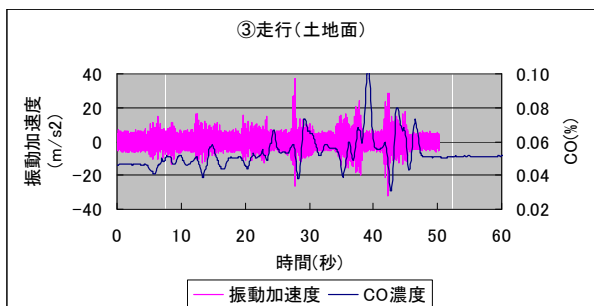


図 4 振動影響事例(1)

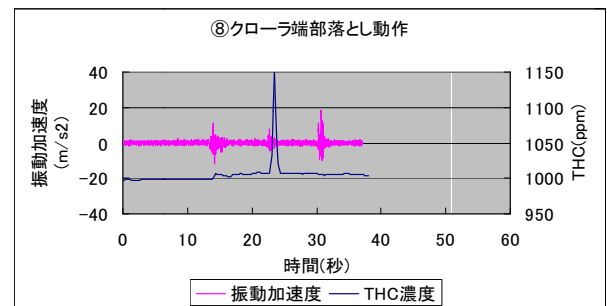


図 5 振動影響事例(2)

#### 4 排出ガス計測事例

##### 4.1 メーカーが異なる場合の排出ガスの違い<sup>3)</sup>

油圧ショベルの排出ガス計測を行った結果(例)を図 6～図 11 に示す。それぞれの排出ガスについて、「掘削」(エンジン回転数を最大にし、掘削、90度旋回、排土作業を繰り返し行った条件。負荷が連続的に変化する)と、「待機」(エンジンを最小回転数にし、無負荷でアイドリングしている条件)を一定時間行い、その時間の平均値として整理している。

測定した機種は、代表的な三つのメーカー(図では X 社、Y 社、Z 社で表記)のバケット容量(油圧ショベルの一般的な規格を示し、作業内容により機種を選定する場合の目安となる)が 0.8m<sup>3</sup> の型式のものである。詳細は明らかにはできないが、エンジンの定格出力は、排出ガス規制区分の D4(75kW～130kW)に該当するもので、オフロード法 2006 年基準に適合しているもので、後処理装置は装着されていない。

それぞれの型式について、別々の 3 台を測定しており、X 社の型式のものであれば、X1、X2、X3 と表記している。これらによれば、NO<sub>x</sub> では Y 社のものが、CO、THC では X 社のものが他 2 社のものより高い値を示しており、それぞれの工事現場で使用する油圧ショベルのメーカーが異なると、実際の排出ガスの排出量は 2 倍以上異なる場合があり得ることを示している。また、例えばトンネルや地下などの閉所作業では、建設機械の入れ替えがあった場合などに、濃度が高くなる可能性もあるので注意が必要である。

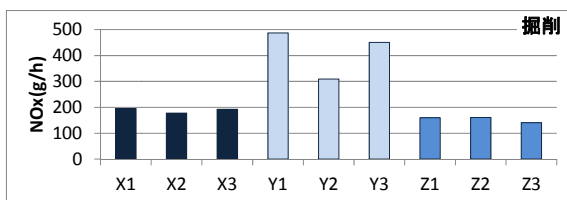


図 6 NO<sub>x</sub>の排出ガス計測事例(掘削)

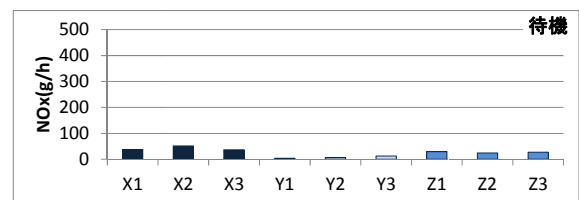


図 7 NO<sub>x</sub>の排出ガス計測事例(待機)

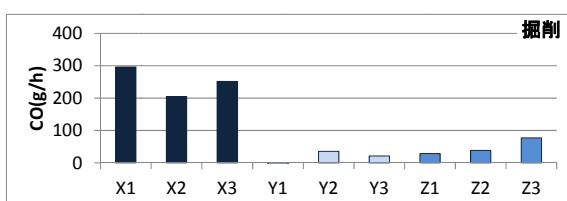


図 8 COの排出ガス計測事例(掘削)

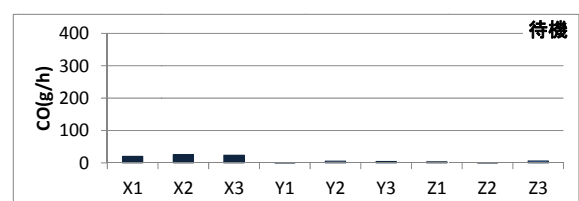


図 9 COの排出ガス計測事例(待機)

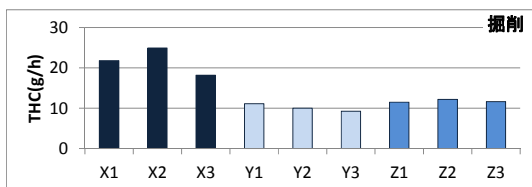


図 10 THC の排出ガス計測事例(掘削)

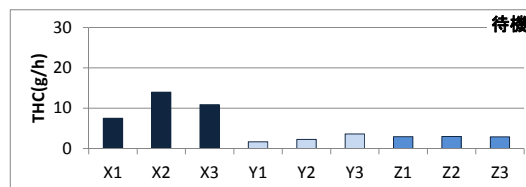


図 11 THC の排出ガス計測事例(待機)

#### 4.1 運転モードが異なる場合の排出ガスの違い<sup>4)</sup>

油圧ショベルの場合、その現場での作業条件に応じて、運転者が強い掘削力などパワー重視で使用したい場合と、軽作業が中心でパワーよりもむしろ燃費重視で使用したい場合がある。メーカーでは、そうした要求に応えるため、運転者がスイッチ等により、その二つのモードを切り替えられるようにしている。図 12～図 14 に X 社の 3 台について、掘削作業での二つのモード(図中においてパワー重視を P モード、燃費重視を E モードと記載)。で測定した値を示す。

NO<sub>x</sub>についてはパワー重視モードでの排出量が多いが、CO と THC では、燃費重視モードでの排出量の方が多くなっている。燃費重視モードで作業した場合には、燃料消費量が少なくなるため燃料代の節約とともに、CO<sub>2</sub> 排出量も減り、温室効果ガスの低減にも繋がるが、必ずしも有害な排出ガスも同時に削減されない可能性があることに注意する必要があることが判明した。

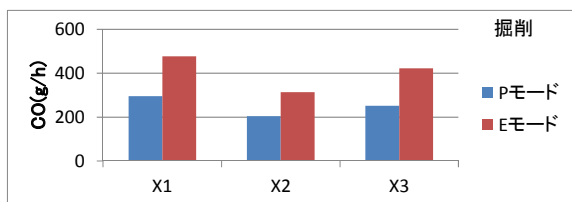


図 12 NO<sub>x</sub> の排出ガス計測事例(3)

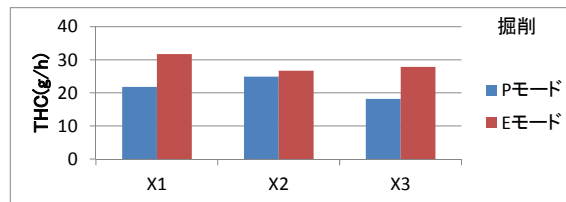


図 13 NO<sub>x</sub> の排出ガス計測事例(4)

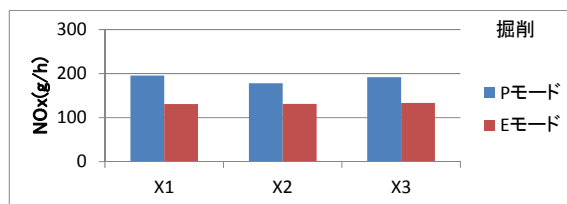


図 14 NO<sub>x</sub> の排出ガス計測事例(5)

#### 5 おわりに

本稿では、車載型排出ガス計測装置を使用して、実際に掘削作業などを行っている場合の排出ガスを計測した事例を示した。ここで示したのは時間当たりの排出量であるが、排出ガス規制と比較するためには規制値の単位である[g/kWh]で評価ができるようにする必要がある。しかし、分母となる仕事を現場で正確に測定することには課題も多く、今後の検討が必要である。また、建設機械の排出ガス規制は、2011年にPMの強化が、2014年にNO<sub>x</sub>の強化が行われている。これらに対応するため、いわゆる後処理装置が装着されるエンジンも搭載されるようになってきているが、今後、これらの排出ガス実態についても調査を実施する予定である。

建設機械の排出ガスについては、ここで紹介したような実態調査を行った例を見るのが少ない。読者の方々に、建設機械での事例をお持ちの方や、建設機械のこうした研究にご興味がある方は、ぜひ独立行政法人土木研究所(平成27年4月以降は国立研究開発法人土木研究所)までご一報いただければ幸いです。

#### 【参考文献】

- 1) 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, 第53巻, 第7号, 2011
- 2) 杉谷康弘, 藤野健一, 石松豊:車載型排出ガス計測装置による建設機械排出ガス評価について, 建設施工と建設機械シンポジウム論文集, pp.65~68, 2010
- 3) 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, 建設施工と建設機械シンポジウム論文集, pp.195~198, 2013
- 4) 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比較について, 土木学会第 69 回年次学術講演会概要集, pp.193~194, 2014

# 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

On-board Measurement by Sensor-based Portable Emission Measurement System

山本 敏朗

Toshiro YAMAMOTO

交通安全環境研究所

National Traffic Safety and Environment Laboratory

## 1 はじめに

リアルワールドにおける自動車の環境性能評価の重要性の高まりから、実路走行時において排出ガス分析ができるように車載型排出ガス計測器 (PEMS: Portable Emission Measurement System) が開発された。同装置は、排出ガス中の  $\text{NO}_x$  (窒素酸化物),  $\text{CO}$ ,  $\text{HC}$  (炭化水素) 等の分析を行うために複数の分析部を持ち、またディーゼル車ではサンプリングする排出ガス中の水分の凝集を防ぐためにライン加熱するといったように、実験室の定置型排出ガス分析装置をコンパクトにして車載可能にした装置といえる。一方、実路走行時の排出ガス測定を排気管直挿型センサ等で行う方法<sup>1), 2)</sup>が存在する。本稿ではディーゼル車を対象にして、排出ガス成分中でも重要な  $\text{NO}_x$  と  $\text{CO}_2$  の排出量を、排気管直挿型の  $\text{NO}_x$  センサを用いた小型かつ簡便な装置で測定する方法について紹介する。

## 2 センサベース・ポータブル排出ガス計測器 (SEMS) 構築の背景

今世紀に入り、我が国および欧米においては、新型自動車に対する排出ガス規制が次々と強化されてきた。それに伴ってディーゼル車には、ディーゼル微粒子捕集フィルタ (DPF), 尿素 SCR システム (尿素水を排気管内に噴射して  $\text{NH}_3$  を生成させ、触媒装置でこの  $\text{NH}_3$  により  $\text{NO}_x$  を還元浄化する装置) 等の排気後処理装置や高度な電子制御装置が搭載された<sup>3)</sup>。これらの装置は、車両の運転条件や気温等の環境条件によって、その作動状態が大きく影響されるため、車両型式認証 (以下、認証) 時の室内試験での排出ガス状態と実路走行時の排出ガス状態との乖離が顕在化することとなった。上記の国々では、室内設備のエンジンダイナモメータ (ED) あるいはシャシダイナモメータ (CD) (ED, CD 共に自動車の路上走行状態を模擬する装置) に供試エンジンあるいは供試車両を設置して行う排出ガス試験によって排出ガス規制の強化を図り大気質の改善を進めてきたが、近年、その改善効果が頭打ちとなってきた<sup>4)</sup>。これは前述したように室内試験と実路走行時で排出ガス状態が異なること、即ち、認証時の公定試験モード (排出ガス試験で運転する JE05 モード等の走行パターン) を外れた走行状態での高い  $\text{NO}_x$  排出やエンジン冷機状態からの始動 (コールドスタート) 時のエミッション (排出ガス中の有害物質) 増加の存在、さらに使用過程車 (車検登録済みの現在使用中の車) における排出ガス低減装置 (DPF, 尿素 SCR システム等) の故障・劣化に伴うエミッションの増加に起因するものと考えられた。そこで、欧米では、認証時あるいは使用過程において、試験車両を実路走行させ、そのときの排出ガスを PEMS で測定する排出ガス試験法<sup>5)</sup> の導入が検討され、重量車の認証試験から導入を始めた。同様に、我が国においても、中央環境審議会第十一次答申<sup>6)</sup> において、PEMS 導入について検討することが望ましいとされた。

このように、PEMS 試験は、欧米において導入が開始されたが、我が国への導入には、幾つかの課題が存在する。まず、既存の PEMS は、定置型排出ガス分析計と比べればコンパクトではあるが、本体とバッテリーを合わせると 100kg 程の重量であり、設置場所が問題となる。ここで、我が国と欧米では、使用されることの多い貨物自動車の形態が異なる。即ち、我が国では箱車が多いのに対して、欧米では運転席と荷台が分離できる構造のトレーラ式車両が多い。このことから、試験実施時に、欧米では PEMS の取り付けが容易な覆い等のない荷台の選択が可能なのに対して、我が国ではサンプリングプローブ等を通すために荷台に穴を開ける等の加工が必要となる。この試験車への加工は所有者の同意無しでは実施できず、我が国に PEMS 試験法を導入するに当たった課題となる。また、使用過程において同試験を実行するには、PEMS の取り付けおよび操作を専門の技術者が行うこととなるため、試験対象の商用車を一定期間借用する必要がある。これに伴って事業者は経済的な不利益を被ることになるため、PEMS 試験の導入においては何らかの対策が必要となる。

これらの課題の解決策として本稿で提案するのが、「センサベース・ポータブル排出ガス計測器 (SEMS: Sensor-based Portable Emission Measurement System)」であり、これを簡易型 PEMS として用いて実路走行時に  $\text{NO}_x$  および  $\text{CO}_2$  排出量の測定を行い、これらのデータを基に重量貨物車の環境性能を評価する試験である。ここで、SEMS は、運送事業用貨物車への導入が進むデジタル式の運行記録計 (デジタルタコグラフ、略して「デジタコ」)<sup>7)</sup> に、排気管直挿型  $\text{NO}_x$  センサ<sup>8)</sup> の信号やピトー管式排出ガス流量計からの排出ガス流量信号、あるいは CAN (Controller Area Network) 端子からエンジン制御信号である吸入空気量、燃料噴射量等の信号を取り込むことにより構築される。以下に、これまで検討してきた SEMS 試験の概要を記す。

## 3 SEMS の構築

### 3.1 SEMS の構成例

本稿で紹介する SEMS の構成例を、図 1 に示す。同図に示すように、テールパイプに装着するステンレス製の円筒に排気管直挿型  $\text{NO}_x$  センサ、排出ガス流量計測用ピトー管 (静圧用、動圧用) および排出ガス温度センサを取り付け、そこから測定される  $\text{NO}_x$  センサ信号 ( $\text{NO}_x$  濃度,  $\text{O}_2$  濃度, 空燃比 (A/F: 混合ガス中の空気と燃料の重量比)), 排出ガス流量信号, 排出ガス温度信号, またデジタコの基本信号である車速信号, エンジン回転速度信号および GPS (全地球測位システム) 信号, さらに CAN 信号 (吸入空気量, 燃料噴射量 等) をデジタコに収録する構成となっている。ここで、ステンレス製の円筒の先端部には、テールパイプとの着脱が容易なように、手動での締め付けが可能な留め具を設けている。

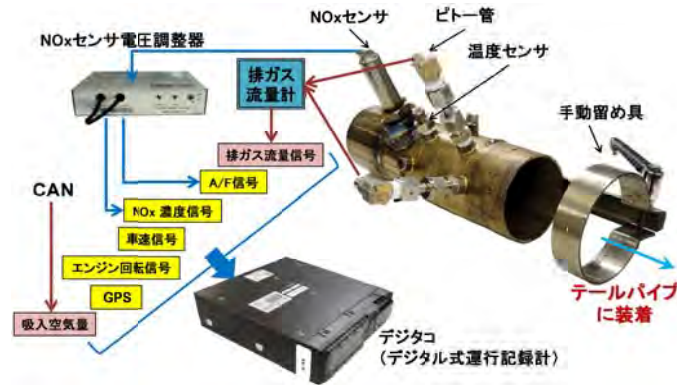


図1 センサベースの計測システム(SEMS)の構成例

### 3.2 車載用ジルコニア式 NO<sub>x</sub> センサ

本稿で紹介するSEMSの主要構成要素が車載用 NO<sub>x</sub> センサである。同センサは、ジルコニア(ZrO<sub>2</sub>)の O<sub>2</sub> イオン伝導性を応用したセンサ基板で構成され、図2に測定原理を示す。NO<sub>x</sub> センサはジルコニア固体電解質の積層構造体であり、二つの内部空間、三つの O<sub>2</sub> ポンプで構成される。第1空間には第1の O<sub>2</sub> ポンプとして一対の電極が配置され、この電極間に調整した電圧を印加することで O<sub>2</sub> を内部空間から汲み出したりは汲み入れることにより、可燃性ガスを燃焼させ数 ppm の O<sub>2</sub> 濃度レベルに常に保持する。この原理から、同センサでは第1ポンプの O<sub>2</sub> ポンプ量から排出ガス中の O<sub>2</sub> 濃度およびエンジンの A/F も検出可能である。奥に配置された第2空間には、第2の O<sub>2</sub> ポンプと NO<sub>x</sub> 測定用ポンプが配置され、第2の O<sub>2</sub> ポンプで排出ガス中の O<sub>2</sub> を更に汲み出した上で、NO<sub>x</sub> 測定用ポンプで NO<sub>x</sub> を O<sub>2</sub> と N<sub>2</sub> に分解してその O<sub>2</sub> 分圧を検出する。この検出値と、第1空間の余剰 O<sub>2</sub> 分の補正から、排出ガス中の NO<sub>x</sub> 量に比例した出力信号を取り出す。表1に供試 NO<sub>x</sub> センサの基本性能を示す。同表に示す通り、同センサで測定可能な NO<sub>x</sub> 濃度の上限は、1,000ppm である。また、本稿で紹介する試験では、NO<sub>x</sub> センサにより、NO<sub>x</sub> 濃度、A/F および O<sub>2</sub> 濃度を同時測定した。

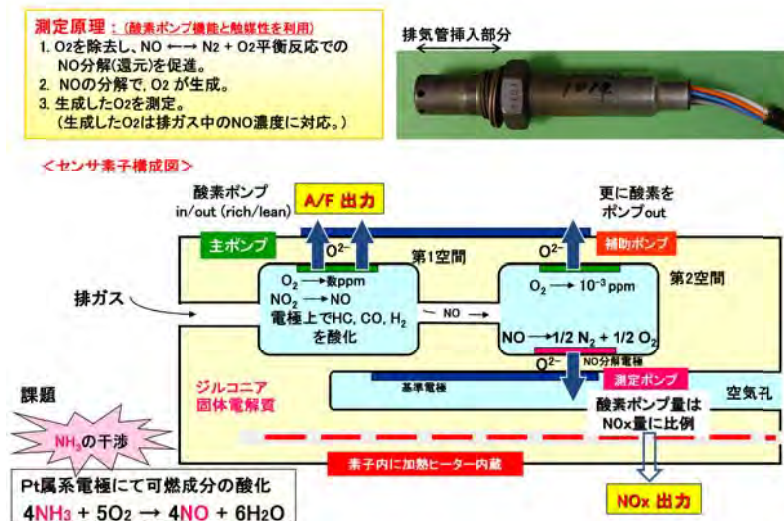


図2 NO<sub>x</sub> センサの測定原理

表1 供試のジルコニア式 NO<sub>x</sub> センサの主要諸元

測定原理	ZrO <sub>2</sub> 素子のO <sub>2</sub> ポンプ機能を利用
NO <sub>x</sub> 出力レンジ	NO: 0~1000ppm 出力: 0.31~4.8V 応答性: <400 m sec
A/F出力レンジ	A/F=13.2~17.2 出力: 2.16~2.81V
O <sub>2</sub> 出力レンジ	O <sub>2</sub> =0~18% 出力: 2.5~4.5V 応答性: <200 m sec

NO<sub>x</sub>センサの外観



### 3.3 デジタル式の運行記録計(デジタコ)

試験に用いたデジタコは、車速、エンジン回転速度および GPS の入力に用いる基本ハーネスのみならず、入力信号の追加ができる拡張ハーネスを有する。図 3 に、試験用デジタコの信号の入・出力関係を示す。これまでの試験では、一部の路上走行試験において、NO<sub>x</sub> センサからの NO<sub>x</sub> 濃度出力信号と A/F 出力信号を拡張ハーネスを通じてデジタコに入力した。今後、CAN データの吸入空気量信号やピトー管式排出ガス流量信号についても、拡張ハーネスからの入力を検討していく予定である。

試験用デジタコには、通信モジュールが内蔵されていることから、図 3 に示すように拡張ハーネスへの信号入力が全てできるようになれば、試験車両とは別の場所において、実路走行時の NO<sub>x</sub> および CO<sub>2</sub> 排出量データを運行情報や位置情報等とリンクさせてリアルタイムに取得できる。これまでに、遠隔地でのデータの取得および活用の可能性を検討するため、実路走行時に、NO<sub>x</sub> センサの NO<sub>x</sub> 濃度出力信号をクラウドサーバに送信してサーバ上にデータを記録し、そのデータの適正を検証する試験等を実施している。デジタコ内蔵の通信モジュールを使って NO<sub>x</sub> センサ信号等をクラウドサーバ上に記録し、そのデータを基に遠隔地で NO<sub>x</sub> 排出量や燃費等の検査を行うことができれば、SEMS を装着した状態で通常業務を行ってもよく、従来型 PEMS 試験の課題の一つである商用車を一定期間占有することによる運送事業者への負担を解消できる可能性がある。

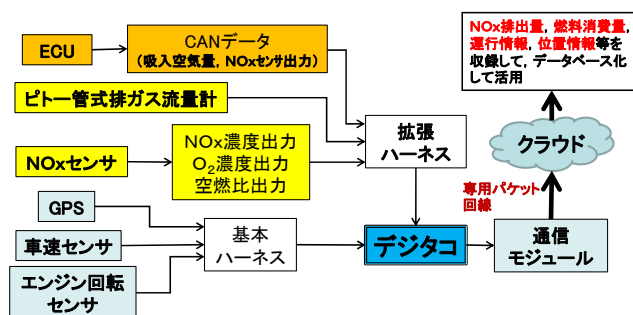


図 3 試験用デジタコの信号の入出力関係

### 3.4 SEMS の特長

本稿において簡易型 PEMS として提案する SEMS の特長を以下に記す。

- ① 装置は排気管直挿型 NO<sub>x</sub> センサとデジタコで構成され、サイズは NO<sub>x</sub> センサが A/F センサ程度、またデジタコがカーオーディオ程度とコンパクトである。
- ② 装置重量は、NO<sub>x</sub> センサとデジタコを合わせて 1kg 程度であり、100kg 超の計測器の搭載が不要となる。
- ③ 水素、空気およびスバンガス(5成分混合)から成る3本のガスボンベの搭載が不要となる。
- ④ 消費電力の大幅低減により大型バッテリーの搭載が不要となる。
- ⑤ NO<sub>x</sub> センサは排気管に取り付け、またデジタコは運転席のダッシュボードに設置するため、従来型 PEMS のように荷台に設置スペースを設ける必要がない。従って、荷台等への加工は一切不要となる。
- ⑥ NO<sub>x</sub> センサは、尿素 SCR システム使用のセンサで代用できる。また、今後、NO<sub>x</sub> センサが OBD (On Board Diagnosis: 車載式故障診断) に使用される場合は、これとの併用も可能である。

## 4 SEMS による NO<sub>x</sub> および CO<sub>2</sub> の測定

### 4.1 NO<sub>x</sub> 濃度および排出ガス流量測定の正確さ

本稿で提案する SEMS による排出ガス測定において、要となるのは、NO<sub>x</sub> センサを用いた NO<sub>x</sub> 濃度の測定の正確さであり、さらに NO<sub>x</sub> 排出量は NO<sub>x</sub> 濃度に排出ガス流量を乗算して求めることから、排出ガス流量の測定の正確さである。

エンジンの冷機始動(コールドスタート)あるいは暖機始動(ホットスタート)における NO<sub>x</sub> センサの NO<sub>x</sub> 濃度測定値と PEMS による NO<sub>x</sub> 濃度測定値を時系列で比較した結果を図 4 に、また両者の相関を図 5 に示す。相関図では、JE05 モード運転時の瞬時値をプロットしているにもかかわらずばらつきも少なく、両者には極めて強い相関性が認められる。しかしながら、時系列図、相関図ともに 100ppm 以下の低濃度域のプロットに注目すると、NO<sub>x</sub> センサの方が高応答であるにもかかわらず NO<sub>x</sub> センサの値が PEMS の値に比べて小さい場合が多く観測され、NO<sub>x</sub> センサの低濃度域の測定に問題があることが推察される。また、NO<sub>x</sub> センサでは、1,000ppm 以上のプロットが頭打ちとなり、供試 NO<sub>x</sub> センサの測定限界であることが分かる。以上の結果から、NO<sub>x</sub> センサの NO<sub>x</sub> 濃度測定の正確さは、NO<sub>x</sub> 低濃度測定での課題が残るが、試験用 PEMS と概ね同等であると考えられる。

本稿の SEMS では、NO<sub>x</sub> 排出量の算出において必須となる排出ガス流量を、ピトー管式排出ガス流量計での測定あるいは CAN の吸入空気量信号(熱線式質量流量計による測定)および NO<sub>x</sub> センサの A/F を用いた算出により取得した。図 6 に、両手法により取得した瞬時排出ガス流量を時系列で比較した結果を示す。また図 7 に、両者の相関を示す。両図より、両者には強い相関性が認められ、高流量域ではばらつきも少ない。一方、低流量域では、ピトー管式排出ガス流量値が小さく計測される場合が多く観測され、ピトー管式排出ガス流量計測では低流量域の測定精度に問題があることが考えられる。



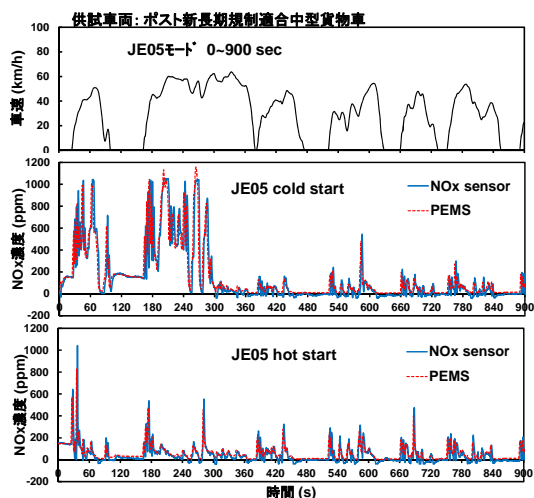


図6 NO<sub>x</sub> センサと PEMS による NO<sub>x</sub> 濃度測定値の比較

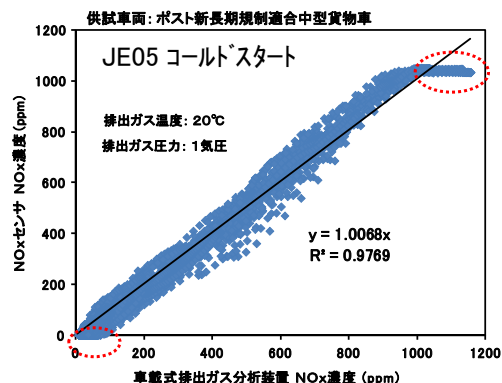


図5 NO<sub>x</sub> センサによる NO<sub>x</sub> 濃度測定値と PEMS による NO<sub>x</sub> 濃度測定値の相関

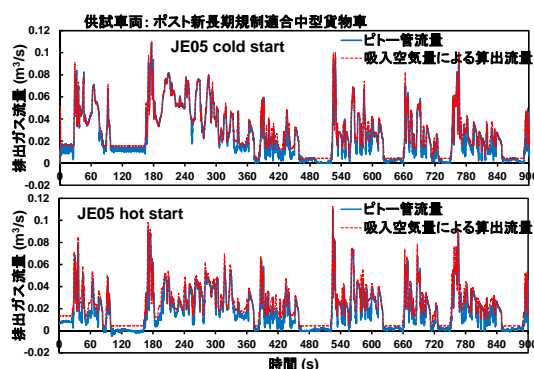


図6 ピトー管流量と吸入空気量算出流量の比較

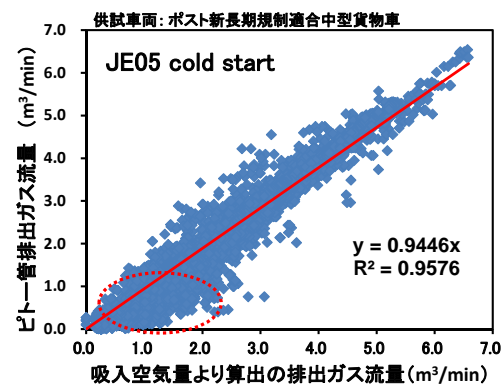


図7 ピトー管式排出ガス流量測定値と吸入空気量より算出の排出ガス流量の比較

#### 4.2 NO<sub>x</sub> センサを用いた NO<sub>x</sub> 排出量の算出における正確さ

次に、供試 NO<sub>x</sub> センサによって算出される NO<sub>x</sub> 排出量の正確さを、他の手法による算出値と比較することによって評価した。図8に、従来の PEMS 測定で得られる結果と NO<sub>x</sub> センサを用いた測定で得られる結果を整理して示す。同図に示すように、NO<sub>x</sub> 排出量は、ピトー管式流量計による排出ガス流量あるいは CAN から取得した吸入空気量のいずれかを用いて算出し、それぞれを比較して評価を行った。図9に、CD にポスト新長期規制適合中型貨物車を設置して、JE05 モードコールドスタート試験(2回)、JE05 モードホットスタート試験(1回)および ECE 改変モード(欧州試験モードを基に最高速度を 90km/h に変更した走行モード)ホットスタート試験(1回)の計4回の試験を実施したときの NO<sub>x</sub> 排出量(g/test)を、I~Vの方法で算出し、それらを I の値を 100 とする指数で表し、その4回の試験の平均値を比較して示す。ここで、Iの方法(定置型排出ガス分析装置による CVS 法バッグ分析)は公定試験法で定められた方法であることから、Iの値を真値近傍の目標値と考えると、本稿で提案する「NO<sub>x</sub> センサ+CAN 取得の吸入空気量」の IIの方法による算出値は、Iの値を 3.1% 下回り、また従来の PEMS 測定による算出値である「PEMS+ピトー管排出ガス流量」の Vの方法では、Iの値を 5.6% 下回っている。これらの測定値の低下は、IVの「PEMS+CAN 取得の吸入空気量」の値が Iの値をいずれの試験条件においても 3.4% 程度上回っていることを考えると「PEMS による NO<sub>x</sub> 濃度測定精度の低下」あるいは「CAN 取得の吸入空気量の測定精度の低下」がそれらの原因とは考えにくい。このことから、IIの方法では「NO<sub>x</sub> センサの低濃度域での測定値の低下」が、また Vの方法では「ピトー管式排出ガス流量計の低流量域での測定値の低下」が、それぞれの原因である可能性が高い。なお、2回の JE05 モードコールドスタート試験の結果は、I~Vの方法のいずれにおいてもよく一致し、再現性が認められる。IIIの方法では、図4および図6に示すように、JE05 モードコールドスタートにおいて、スタート時の NO<sub>x</sub> の高濃度排出および排出ガス流量の増加によって、NO<sub>x</sub> 濃度、排出ガス流量ともに測定精度が良い条件となり、NO<sub>x</sub> 排出量が I の目標値に近づく。一方、JE05 モードホットスタート試験および ECE 改変モードホットスタート試験では、「NO<sub>x</sub> センサの低濃度域での測定値の低下」と「ピトー管式排出ガス流量計の低流量域での測定値の低下」が重なることにより、算出される NO<sub>x</sub> 排出量が I の目標値から大きく乖離したと考える。

以上より、本稿では、NO<sub>x</sub> 排出量の算出において、「NO<sub>x</sub> センサ+CAN 取得の吸入空気量」の方法が公定試験法と概ね同等の結果を示し、また、「NO<sub>x</sub> センサ+ピトー管排出ガス流量」の方式においても従来型 PEMS と同等の結果であったことから、SEMS の有効性を検証することができたと考える。

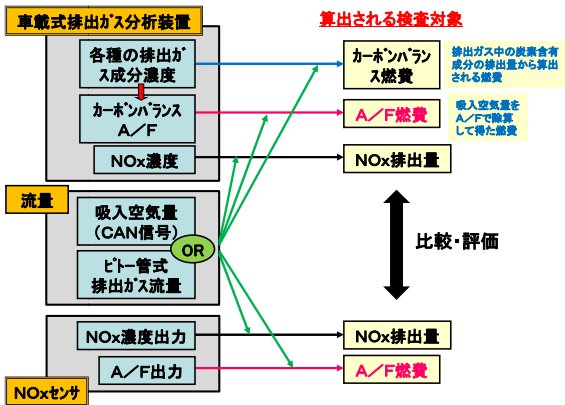


図8 NO<sub>x</sub> センサ or PEMS による測定値から算出される NO<sub>x</sub> 排出量および燃費

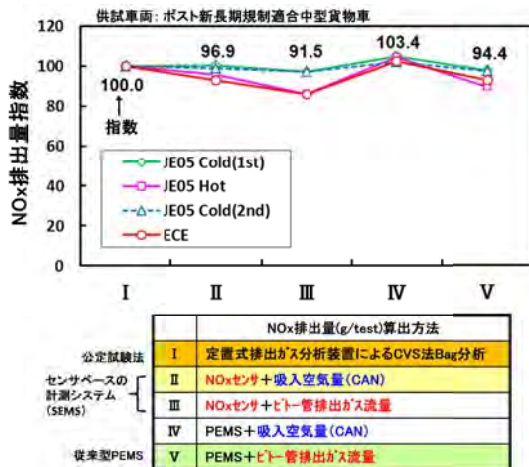


図9 各種運転条件における各種算出方法による NO<sub>x</sub> 排出量の比較

### 4.3 NO<sub>x</sub> センサの O<sub>2</sub> 濃度測定値を用いた排出ガス中の CO<sub>2</sub> 濃度算出

本稿では、NO<sub>x</sub> 排出量の評価指標として、欧州で実路走行時の排出ガス評価法として提案されているウィンドウ平均法<sup>9)</sup>に従って、排気管から排出される CO<sub>2</sub> 1kg 当たりの NO<sub>x</sub> 排出量 (g) を、「NO<sub>x</sub> 排出率 (g/kg)」と定義して用いることを提案する。路上走行試験では、排出量の算出に必要な瞬間排出ガス流量を高精度に測定することは困難であるが、上記の指標では、以下の式で示すように、同一の瞬間排出ガス流量で分母と分子を算出するため、瞬間排出ガス流量の測定誤差が相殺されて、排出ガス流量の測定精度の影響を受けにくい利点がある。

$$NO_x \text{ 排出率 (g/kg)} = \frac{\sum (NO_x \text{ 濃度} \times \text{排出ガス流量} \times NO_x \text{ 密度})}{\sum (CO_2 \text{ 濃度} \times \text{排出ガス流量} \times CO_2 \text{ 密度})}$$

SEMS を用いた試験において、NO<sub>x</sub> 排出率 (g/kg) を導入するため、NO<sub>x</sub> センサを用いた CO<sub>2</sub> 濃度の算出方法について検討した。ディーゼルエンジンでは、吸入空気中に噴射された軽油のほとんどが完全燃焼した後に排出されていると考えられる。図 10 は、ポスト新長期規制適合中型貨物車を用いて JE05 モードコールドスタート試験を実施し、そのときの排出ガス中の O<sub>2</sub> 濃度と CO<sub>2</sub> 濃度を定置型排出ガス分析計で連続測定し、それらを露点計で測定した水蒸気濃度によって wet 状態に換算して散布図にプロットした結果である。O<sub>2</sub> 濃度と CO<sub>2</sub> 濃度の間には極めて高い直線性が認められる。CO<sub>2</sub> 濃度がゼロのときは、燃料カット制御状態等が想定され、そのときの O<sub>2</sub> 濃度は、空気中の濃度である 21% 近傍となる。また、O<sub>2</sub> 濃度がゼロのときは、空気過剰率 λ が 1 であり、そのときの CO<sub>2</sub> 濃度は燃料の H/C より求められる。このように、排出ガス中の O<sub>2</sub> 濃度と CO<sub>2</sub> 濃度の間には、図 10 に示す関係が一般的に成立しているものと考えられる<sup>10)</sup>。

次に、この関係を使って排出ガス中の CO<sub>2</sub> 濃度を算出する方法を考察した。図 11 に、NO<sub>x</sub> センサによって測定した O<sub>2</sub> 濃度とその O<sub>2</sub> 濃度から算出される CO<sub>2</sub> 濃度の関係 (一次式をプロットした結果) を示す。図中の x 軸の切片座標は、上述したように (21, 0) となる。また、y 軸の切片は、以下の式で λ = 1 のときであり、燃料の H/C に依存する。

$$CO_2 \text{ 濃度 (\%)} = 100 / (4.76 \times \lambda + H/C \times (1.19 \times \lambda + 0.25))$$

従って、供試燃料では、H/C = 1.90 であることから、y 軸の切片座標は、(0, 13.34) となる。x 軸の切片と y 軸の切片を結ぶ直線 (y = -0.6352x + 13.34) が水蒸気を含まない dry 状態での O<sub>2</sub> 濃度と CO<sub>2</sub> 濃度の関係を表すと考えられる。この関係を、水蒸気を含む wet 状態の関係に変換して一次式で近似すると、y = -0.5741x + 12.225 となる。この関係を用いて、ディーゼル車においては、NO<sub>x</sub> センサの O<sub>2</sub> 濃度測定値から CO<sub>2</sub> 濃度を算出できる。

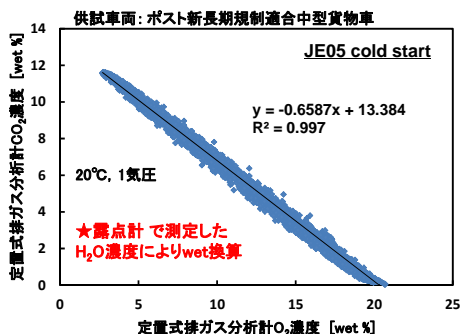


図10 ディーゼル排出ガス中の O<sub>2</sub> 濃度と CO<sub>2</sub> 濃度の関係

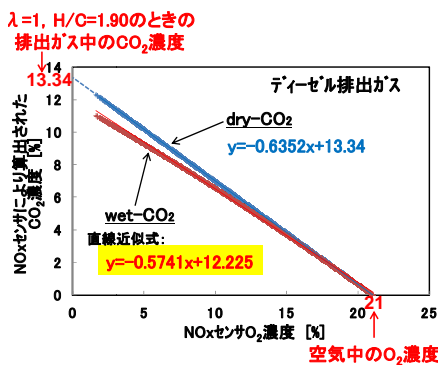


図11 NO<sub>x</sub> センサの O<sub>2</sub> 濃度測定値を用いた CO<sub>2</sub> 濃度算出

## 5 SEMSを用いたNO<sub>x</sub>排出量評価方法の検討

NO<sub>x</sub>排出率(g/kg)によるNO<sub>x</sub>排出量評価の有効性を検証した<sup>11)</sup>。まず、NO<sub>x</sub>排出量(g/test)およびCO<sub>2</sub>排出量(g/test)を算出するには、NO<sub>x</sub>濃度およびCO<sub>2</sub>濃度に瞬時排出ガス流量を乗算する必要がある。本稿において、瞬時排出ガス流量は、ピトー管式排出ガス流量計の測定値、あるいは吸入吸気量(CAN)とA/Fを用いた算出値により取得している。図12は、CD試験における、各種モード走行時の総排出ガス流量を縦軸に、吸入空気量(CAN)を横軸に、上記の二つの方法で測定および算出した値をプロットした結果である。同図より、いずれのモード走行においても、ピトー管式排出ガス流量計の測定値は吸入吸気量(CAN)とA/Fを用いた算出値よりも小さく、両者の値は乖離していることが分かる。これは、ピトー管式排出ガス流量計の低流量域における測定精度の低下が主な原因と考えられる。

次に、ピトー管式排出ガス流量計による測定値、あるいは吸入吸気量(CAN)とA/Fを用いた排出ガス流量算出値を用いて、各種モード走行時のNO<sub>x</sub>排出率(g/kg)をそれぞれ算出して比較し、瞬時排出ガス流量の測定精度の影響を考察した。これらのNO<sub>x</sub>排出率(g/kg)と、それぞれのエンジン仕事量ベースのNO<sub>x</sub>排出量(g/kWh)との関係を、図13に示す。図中のII、III、IVおよびVのプロットにおけるNO<sub>x</sub>排出率(g/kg)は、図中の表に示す方法でNO<sub>x</sub>濃度、CO<sub>2</sub>濃度および瞬時排出ガス流量をそれぞれ取得し、それらを基にしてNO<sub>x</sub>排出量(g/test)およびCO<sub>2</sub>排出量(g/test)を算出し、さらにNO<sub>x</sub>排出量(g/test)をCO<sub>2</sub>排出量(g/test)で除算して求めた。即ち、NO<sub>x</sub>濃度およびCO<sub>2</sub>濃度の測定はNO<sub>x</sub>センサあるいはPEMSを、また瞬時排出ガス流量はピトー管式排出ガス流量計あるいは吸入吸気量(CAN)とA/Fを用いた算出方法により取得している。同図より、図12で示したピトー管式排出ガス流量値と吸入吸気量(CAN)とA/Fを用いた排出ガス流量算出値の乖離が、NO<sub>x</sub>排出率(g/kg)の算出において、分母、分子に同じ瞬時排出ガス流量値を用いて演算することにより測定誤差が相殺されて、同一のモード走行ではII、III、IVおよびVのいずれのプロットも概ね一致していることが分かる。また、図13より、NO<sub>x</sub>排出率(g/kg)とエンジン仕事量ベースのNO<sub>x</sub>排出量(g/kWh)の間には、極めて強い相関関係が認められることから、NO<sub>x</sub>排出率(g/kg)は、NO<sub>x</sub>排出量評価の有効な指標であることが分かる。さらに、この相関関係が路上走行時においても成立しているかを確認するため、路上走行試験データ(一般道走行、走行距離5.93km、平均車速21.4km/h)によりNO<sub>x</sub>排出率(g/kg)を算出して、図13中にプロットして示す。JE05モードホットスタート(JE05H)近傍にプロットが集中していることから、測定誤差の相殺効果も、またエンジン仕事量ベースのNO<sub>x</sub>排出量(g/kWh)との相関関係も共に認められ、路上走行時においてもNO<sub>x</sub>排出率(g/kg)は有効な指標であることが分かる。

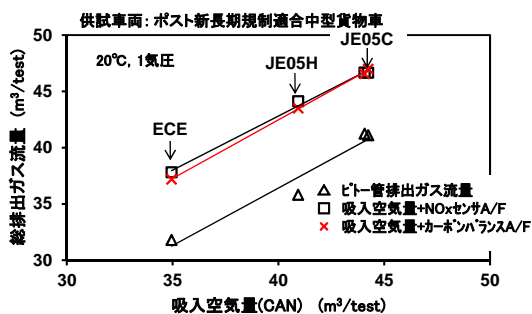
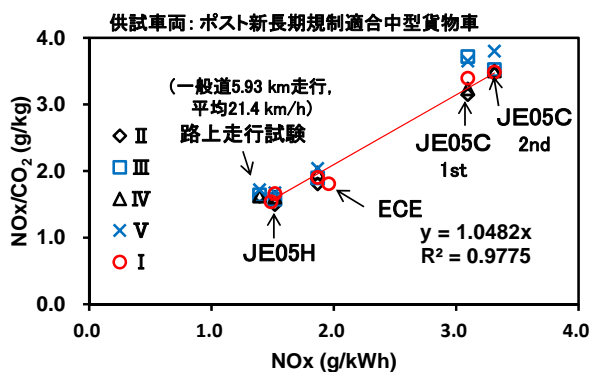


図12 各種モード走行時の総排出ガス流量における吸入空気量およびA/Fからの算出値とピトー管式排ガス流量計による測定値の比較



	NO <sub>x</sub> , CO <sub>2</sub> 濃度および排出ガス流量取得方法
I	定置式排出ガス分析装置によるCVS法Bag分析
II	NO <sub>x</sub> センサ+吸入空気量(CAN), NO <sub>x</sub> センサA/F
III	NO <sub>x</sub> センサ+ピトー管排出ガス流量
IV	PEMS+吸入空気量(CAN), NO <sub>x</sub> センサA/F
V	PEMS+ピトー管排出ガス流量

図13 各種モード走行時のNO<sub>x</sub>排出率(g/kg)とエンジン仕事量ベースのNO<sub>x</sub>排出量(g/kWh)の関係

## 6 今後の展開

本稿では、SEMSの試験用測定装置としての有用性について述べた。しかしながら、将来的には、積算計としての役割に着目するところが大きい。リアルワールドにおけるエミッション評価において常に課題となるのが、環境条件等のエミッションへの影響をどのように考えて評価するかである。この関係性を明らかにすることは、極めて有意義であるが、一方、本来の目的である有害物質の排出抑制の観点からは、もっと単純な発想があってもよいと考える。個々の車両から排出される有害物質の積算量を把握することによって環境負荷を評価する考え方は、個々の車両の使い方や環境条件がどうであれ、かなり公平な評価方法のように考えられる。今後、SEMSを構成する排出ガスセンサは、エンジンや排出ガス後処理装置の制御用等で、ディーゼル車、ガソリン車共に導入が進むことが予想される。筆者は、各車両に装備されたSEMSからNO<sub>x</sub>排出量等の信号がクラウドサーバーに送信されて、積算排出量で環境負荷を評価する時代が来ることを夢想している。

## 7 まとめ

ジルコニア式 NO<sub>x</sub> センサ, デジタコおよびピトー管式排出ガス流量計を組み合わせた計測器(SEMS: Sensor-based Portable Emission Measurement System)を構築し, このSEMSを車載型排出ガス計測器として用いて, ディーゼル重量車から排出されるNO<sub>x</sub>およびCO<sub>2</sub>を測定する方法や測定値の正確さ, さらに実路走行時のNO<sub>x</sub>排出量を評価する方法について紹介した。以下に, それらをまとめて示す。

- (1) 公定試験法による測定値あるいは従来型PEMSでの測定値との比較により, SEMSの測定値の正確さは従来型PEMSと同等であることを示した。
- (2) CO<sub>2</sub> 1kg 当たりのNO<sub>x</sub>排出量(g)「NO<sub>x</sub>排出率(g/kg)」をNO<sub>x</sub>排出量の評価指標とすると, 指標算出に必要なCO<sub>2</sub>濃度をNO<sub>x</sub>センサのO<sub>2</sub>濃度から算出でき, NO<sub>x</sub>センサと排出ガス流量計のみでNO<sub>x</sub>排出率の算出が可能であることを示した。
- (3) NO<sub>x</sub>排出率は, 瞬時排出ガス流量の測定精度の影響を受けにくい利点を有し, さらにエンジン仕事量ベースのNO<sub>x</sub>排出量(g/kWh)との間に極めて強い相関関係が認められることから, NO<sub>x</sub>排出量評価の有効な指標であることを示した。
- (4) PEMS試験法の導入には, PEMS搭載のための車両加工や試験中の商用車借用の課題が存在するが, SEMSは荷台搭載不要で通信モジュールによる遠隔地検査が可能であることから, これらの課題を解決できる可能性があることを示した。

通信モジュール内蔵のSEMSは, 排出ガス低減装置の故障診断や車両の使用過程での環境負荷量の算定および予測にも役立つものと考えられる。本稿が他分野の皆様におかれましては参考になれば幸いである。

## 【参考文献】

- 1) 田原茂樹, 横田久司, 秋山薫, 鹿島茂, 国領和夫: 車載型NO<sub>x</sub>計による実走行時排出ガス計測とシャシーダイナモメータ測定値との比較, 東京都環境科学研究所年報 2002, pp.133-139, (2002)
- 2) 山本敏朗, 堤玲子, 水嶋教文: 車載型高機能運行記録装置を用いた重量貨物車の燃費およびNO<sub>x</sub>排出量検査 -NO<sub>x</sub>センサによる燃費およびNO<sub>x</sub>排出量測定-, 自動車技術会論文集, Vol.46, No.1, pp.191-198, (2015)
- 3) 大聖泰弘: ディーゼル自動車の排出ガス対策技術の最新動向, 平成 25 年度交通安全環境研究所フォーラム 2013 講演概要, pp.41-62 (2013)  
[https://www.ntsels.go.jp/kouenkai/h25/3\\_daisho.pdf](https://www.ntsels.go.jp/kouenkai/h25/3_daisho.pdf)
- 4) Daniel Rutherford: 欧米, アジア等におけるディーゼル自動車の排出ガス対策技術とその現状, 平成 25 年度交通安全環境研究所フォーラム 2013 講演概要, pp.63-74 (2013)  
[https://www.ntsels.go.jp/kouenkai/h25/4\\_rutherford.pdf](https://www.ntsels.go.jp/kouenkai/h25/4_rutherford.pdf)
- 5) 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-, JARI Research Journal, 第32巻 第12号(2010.12)
- 6) 環境省: 今後の自動車排出ガス低減対策のあり方について(第十一次報告), (2012.8. 10)  
[http://www.env.go.jp/air/car/taisaku/t07-2403\\_1.pdf](http://www.env.go.jp/air/car/taisaku/t07-2403_1.pdf)
- 7) 国土交通省: 第3回「トラックにおける運行記録計の装着義務付け対象の拡大のための検討会」会議資料, (2012.8. 9)  
<http://www.mlit.go.jp/common/000221050.pdf>
- 8) 井内穰, 木原信隆: 厚膜ジルコニアNO<sub>x</sub>センサを使用した直挿型NO<sub>x</sub>計 MEXA-120NO<sub>x</sub>, HORIBA Technical Reports No.15, pp.47-51 (1997.9)  
<http://www.horiba.com/jp/publications/readout/article/nox-nox-mexa-120nox-1338/>
- 9) 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2報) -実路試験評価法の検討-, JARI Research Journal, (2012.2)  
[http://www.jari.or.jp/Portals/0/resource/JRJ\\_q/JRJ20120201\\_q.pdf](http://www.jari.or.jp/Portals/0/resource/JRJ_q/JRJ20120201_q.pdf), (参照: 2015.4.26)
- 10) Robin Vermeulen, Willar Vonk, Thomas Lvens, Norbert Ligterink: The Netherlands In-Service Testing Program for Heavy-Duty Vehicle Emissions 2012, TNO report TNO 2013 R10960, pp.28-30 (2013)
- 11) 山本敏朗, 水嶋教文, 渡辺敬太郎: NO<sub>x</sub>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NO<sub>x</sub>排出量評価, 平成 26 年度交通安全環境研究所フォーラム 2014 講演概要, pp.85-88 (2014)