③ 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

環境研究領域　　※山本 敏朗　　水嶋 教文　　渡辺 敬太郎

１．まえがき

排出ガス規制の強化に伴い、ディーゼル車には尿素ＳＣＲシステム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。これらの装置は、運転条件や気温等の環境条件により作動状態が影響され、認証試験時と路上走行時で排出ガス性能が異なる可能性がある。このことから、現在、路上走行時の排出ガス性能評価が重要となっている。欧米では、車載型排ガス計測器（ＰＥＭＳ：Portable Emission Measurement System）で測定する排出ガス試験法を導入して対策しているが、我が国ではＰＥＭＳ搭載時に車両加工が必要となる等の問題[1)]があり、同試験法の導入は困難である。この問題の解決策として、本研究では、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（デジタコ）に排気管直挿型ＮＯｘセンサの信号や吸入空気量、燃料噴射量等のＣＡＮ（Controller Area Network）からの信号等を取り込むことにより、新たに燃費・ＮＯｘ計測機能付きデジタコを構成し、これを簡易型ＰＥＭＳとして用いて実走行時に燃費およびＮＯｘ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実用性能を評価する試験を提案した。

前報[1)]において、上記コンセプトに従い、ＮＯｘセンサ、デジタコおよびピトー管式排ガス流量計を組み合わせた計測器（ＳＥＭＳ：Sensor-based Emission Measurement System）を構築し、同装置が従来型ＰＥＭＳと同等以上の測定性能を有することを示した。本報では、このＳＥＭＳ等を用いて、シャシダイナモメータ（ＣＤ）台上試験および路上走行試験を実施してＮＯｘ排出量データ等を収集し、これを基に重量貨物車のＮＯｘ排出実態を評価する方法を検討した。

表１．供試車両の主要諸元

車両ｶﾃｺﾞﾘ	小型貨物車
年式	2012
車両総重量(kg)	6,585
最大積載量(kg)	3,000
車体形状	ﾊﾞﾝﾎﾞﾃﾞｨｰ
走行距離(km)	8,725
ｴﾝｼﾞﾝ型式	直列4気筒，ｲﾝﾀｰｸｰﾗｰﾀｰﾎﾞ
ｴﾝｼﾞﾝ排気量(L)	3
ｴﾝｼﾞﾝ最高出力(kW/rpm)	110/2800
ｴﾝｼﾞﾝ最大ﾄﾙｸ(Nm/rpm)	375/1400～2800
排出ガス対策	EGR，DOC+DPF
適合排出ガス規制	平成22年規制

２．実験方法

本試験では、試験車両のＣＡＮに接続して、車速、エンジン回転速度、吸入空気量および燃料噴射量の各信号を取得した。試験車両の主な諸元を表１に示す。試験車両の荷台には、計測データの比較に用いる従来型ＰＥＭＳ（堀場製作所製ＯＢＳ－２２００車載式排出ガス分析装置）を搭載し、同装置付属のピトー管式排ガス流量計により瞬時排出ガス流量を計測した。ジルコニア式ＮＯｘセンサ[2)]（日本ガイシ製）を用いて、ＮＯｘ濃度、O_2濃度および空燃比（Ａ／Ｆ）を計測した。供試車両を用いたＣＤ台上試験では、ＮＯｘ排出量評価方法を検討するため、ＪＥ０５モードあるいはＥＣＥモードを運転して各種データを測定した。なお、モード試験前の暖機運転は、簡易暖機条件（２０分間の６０km/h 定常運転後、１０分間のソーク）で行った。さらに、上記評価方法が実路走行時に適用可能かどうかを検証するため、路上走行試験（東京都道１４号（東八道路）の交通安全環境研究所付近から小金井南中西交差点付近までの往復走行）を実施した。

３．実験結果および考察

３．１．ＮＯｘセンサのO_2濃度測定値を用いた排出ガス中のCO_2濃度算出

本報では、ＮＯｘ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[3)]に従って、排気管から排出される

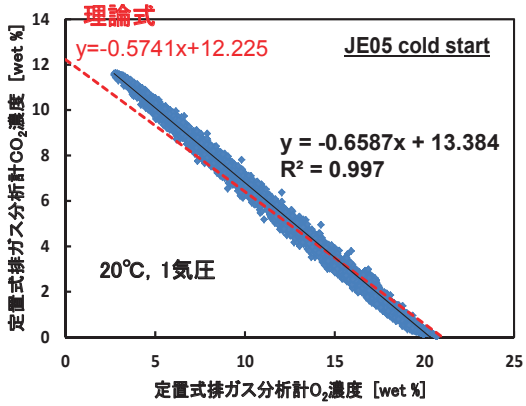


図１．ディーゼル排出ガス中のＯ$_2$濃度とＣＯ$_2$濃度の関係

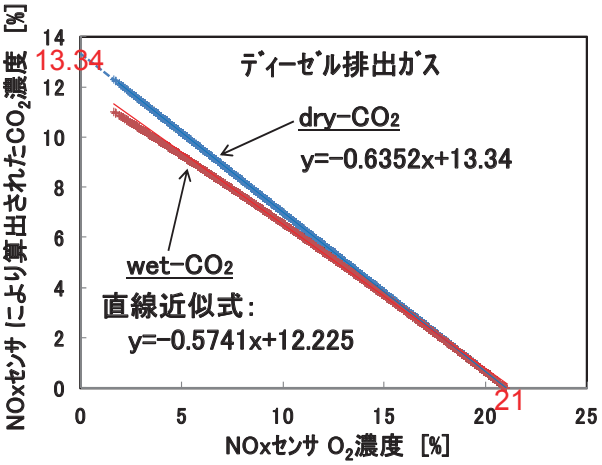


図２．ＮＯｘセンサのＯ$_2$濃度測定値を用いたＣＯ$_2$濃度算出

ＣＯ$_2$１kg当たりのＮＯｘ排出量（g）を、「ＮＯｘ排出率（g/kg)」と定義して用いることとした[4]。路上走行試験では、排出量の換算に必要となる瞬時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、同一の瞬時排出ガス流量で分母と分子を算出するため、瞬時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。

ＳＥＭＳを用いた試験において、ＮＯｘ排出率（g/kg）を導入するため、ＮＯｘセンサを用いたＣＯ$_2$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１は、供試車両を用いて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$_2$濃度とＣＯ$_2$濃度を定置式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$_2$濃度とＣＯ$_2$濃度の間には極めて高い直線性が認められる。ＣＯ$_2$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$_2$濃度は、空気中の濃度である２１%近傍となる。また、Ｏ$_2$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$_2$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$_2$濃度とＣＯ$_2$濃度の間には、図１に示す関係が一般的に成立しているものと考えられる[5]。

次に、この関係を使って排出ガス中のＣＯ$_2$濃度を算出する方法を考察した。図２に、ＮＯｘセンサによって測定したＯ$_2$濃度とそのＯ$_2$濃度から算出されるＣＯ$_2$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$_2$濃度（%）＝１００／（４．７６・λ＋Ｈ／Ｃ・（１．１９・λ＋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$_2$濃度とＣＯ$_2$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、ＮＯｘセンサのＯ$_2$濃度測定値からＣＯ$_2$濃度を算出し、ＰＥＭＳによるＣＯ$_2$濃度測定値と比較した結果を、図３に

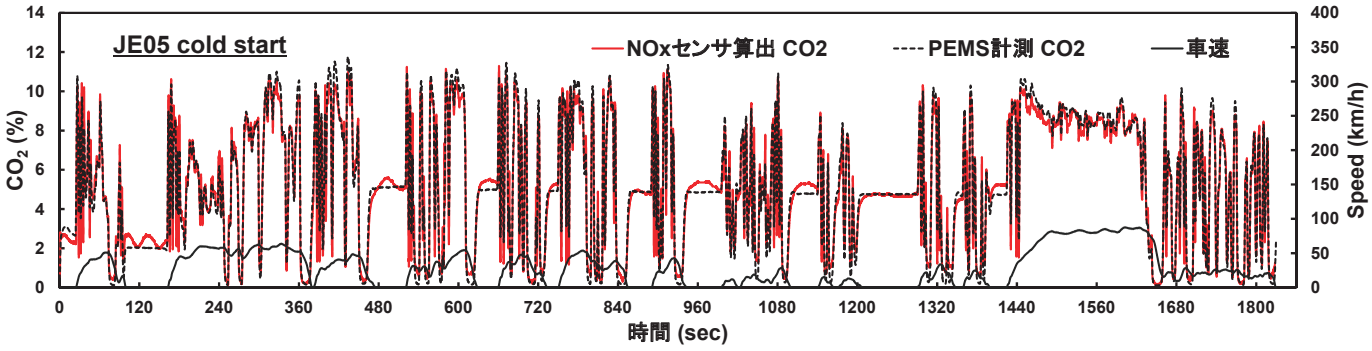


図３．ＮＯｘセンサにより算出されたＣＯ$_2$濃度とＰＥＭＳ計測のＣＯ$_2$濃度の比較

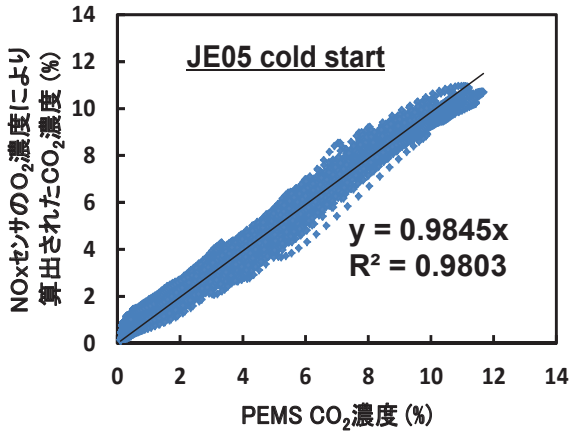


図４．ＮＯｘセンサによるＣＯ$_2$濃度算出法の正確さ

示す。同図は、ＪＥ０５モードコールドスタート試験の結果を時系列にプロットしたものであり、両者はアイドリング状態を除き概ね一致している。ここでアイドリング状態は、燃料カット制御状態直後であることが多く、ＮＯｘセンサに取り込まれた被測定ガス中に多くのＯ$_2$が存在してＯ$_2$のポンピング除去に負荷がかかり、ＮＯｘセンサＯ$_2$濃度の計測に不具合が生じた可能性がある。また、両者の相関を図４に示す。同図より、両者には強い相関関係が認められる。

以上より、ディーゼル車においては、ＮＯｘセンサのＯ$_2$濃度測定値を用いて排出ガスのＣＯ$_2$濃度の算出が可能であると考えられる。

３．２．ＮＯｘセンサを用いたＮＯｘ排出量評価方法の検討

ＮＯｘ排出率（g/kg）によるＮＯｘ排出量評価の有効性を検証した。先ず、ＮＯｘ排出量（g/test）およびＣＯ$_2$排出量（g/test）を算出するには、ＮＯｘ濃度およびＣＯ$_2$濃度に瞬時排出ガス流量を乗算する必要がある。本試験において、瞬時排出ガス流量は、ピトー管式排ガス流量計の測定値、あるいは吸入吸気量（ＣＡＮ）とＡ／Ｆ（混合ガス中の空気と燃料の重量比）を用いた算出値により取得している。図５は、ＣＤ台上試験における、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２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わかる。これは、ピトー管式排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ＮＯｘ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ＮＯｘ排出率（g/kg）と、それぞれのエンジン仕事量ベースのＮＯｘ排出量（g/kWh）との関係を、図６に示す。図中のⅡ、Ⅲ、ⅣおよびⅤのプロットにおけるＮＯｘ排出率（g/kg）は、図中の表に示す方法でＮＯｘ濃度、ＣＯ$_2$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ＮＯｘ排出量（g/test）およびＣＯ$_2$排出量（g/test）を算出し、さらにＮＯｘ排出量（g/test）をＣＯ$_2$排出量（g/test）で除算して求

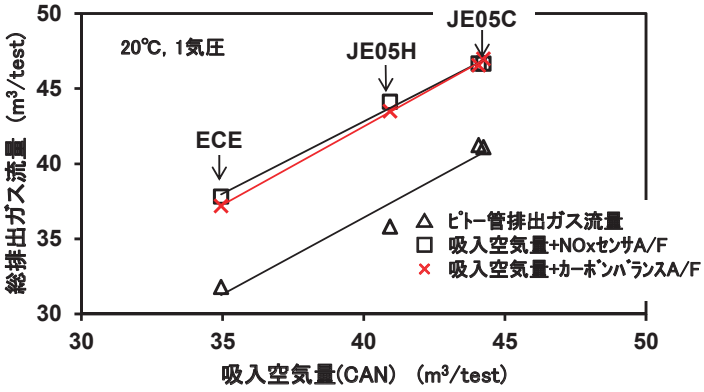
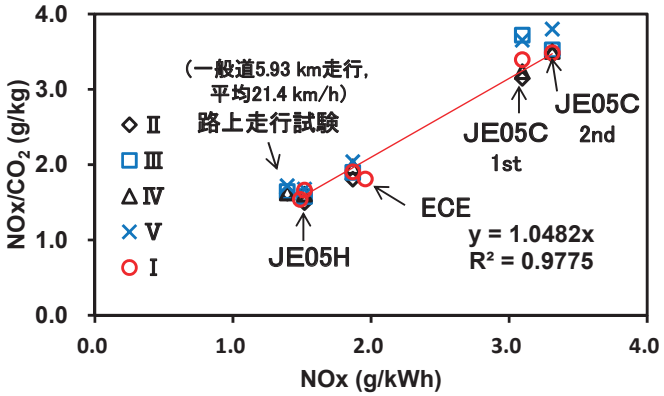


図５．各種モード走行時の総排出ガス流量における吸入空気量およびＡ／Ｆからの算出値とピトー管式排ガス流量計による測定値の比較



	NOx, CO_2濃度および排出ガス流量取得方法
Ⅰ	定置式排出ｶﾞｽ分析装置によるCVS法Bag分析
Ⅱ	NOxｾﾝｻ＋吸入空気量(CAN)，NOxｾﾝｻA/F
Ⅲ	NOxｾﾝｻ＋ﾋﾟﾄｰ管排出ｶﾞｽ流量
Ⅳ	PEMS＋吸入空気量(CAN)，NOxｾﾝｻA/F
Ⅴ	PEMS＋ﾋﾟﾄｰ管排出ｶﾞｽ流量

図６．各種モード走行時のＮＯｘ排出率(g/kg)とエンジン仕事量ベースのＮＯｘ排出量(g/kWh)の関係

めた。すなわち、ＮＯｘ濃度およびCO_2濃度の測定はＮＯｘ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５で示したピトー管式排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、ＮＯｘ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わかる。また、図６より、ＮＯｘ排出率（g/kg）とエンジン仕事量ベースのＮＯｘ排出量（g/kWh）との間には、極めて強い相関関係が認められることから、ＮＯｘ排出率（g/kg）は、ＮＯｘ排出量評価の有効な指標であることがわかる。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ＮＯｘ排出率（g/kg）を算出して、図６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ＮＯｘ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ＮＯｘ排出率（g/kg）は有効な指標であることがわかる。

４．まとめ

ＮＯｘセンサ、デジタコおよびピトー管式排ガス流用計を組み合わせた計測器（ＳＥＭＳ：Sensor-based Emission Measurement System）等を用いて、シャシダイナモメータ台上試験および路上走行試験を実施し、これらの試験で収集したＮＯｘ排出量データ等を基にして重量貨物車のＮＯｘ排出実態を評価する方法について検討した。その結果、以下の点が明らかとなった。

（１）重量貨物車のＮＯｘ排出量の評価指標として、排気管から排出される$CO_2$１kg当たりのＮＯｘ排出量（g）を、「ＮＯｘ排出率（g/kg）」と定義して用いることを提案した。本指標を用いるときに必要となるCO_2濃度を、ＮＯｘセンサのO_2濃度から算出する方法を明らかにし、ＮＯｘセンサと排出ガス流量計のみでＮＯｘ排出率（g/kg）の算出が可能であることを示した。

（２）本研究で提案する$CO_2$１kg 当たりのＮＯｘ排出量（g）を示す「ＮＯｘ排出率（g/kg）」は、排出量の換算に必要となる瞬時排出ガス流量の測定誤差を相殺できることから、瞬時排出ガス流量の計測方法に依存しないという利点を有すると共に、エンジン仕事量ベースのＮＯｘ排出量（g/kWh）との間には、極めて強い相関関係が認められることから、ディーゼル車のＮＯｘ排出量評価の指標として極めて有用であると考える。

謝辞

本研究を進めるにあたり、試験用デジタコのデータ収録プログラムの改造およびセッティング等において株式会社トランストロンの倉地晶氏、桂剛氏、塚本恒久氏および村瀬勇樹氏、試験車の運転において株式会社プラウドの宮本文昭氏、データ処理および解析に元交通安全環境研究所環境研究領域の堤玲子氏にご尽力いただいた。ここに謝辞を表する。

参考文献

１）山本敏朗，堤玲子，水嶋教文：高度化したデジタコを用いた重量貨物車の使用過程での燃費およびＮＯｘ排出量検査方法に関する研究－ＮＯｘセンサによる燃費およびＮＯｘ排出量測定－，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. 53-58 (2013)

２）井内穣，木原信隆：厚膜ジルコニアＮＯｘセンサを使用した直挿型ＮＯｘ計 MEXA-120 NOx，HORIBA Technical Reports No. 15，pp. 47-51 (1997. 9)
http://www.horiba.com/jp/publications/readout/article/nox-nox-mexa-120nox-1338/

３）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/resource/pdf/JRJ/JRJ20120201_q.pdf

４）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，自動車技術会論文集，Vol. 44，No. 6，pp. 1489-1496，(2013)

５）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)