

③ NO_x センサを用いた重量車排出ガス計測システムにおける NO_x 濃度測定等の高精度化に関する検討

環境研究部

※山本 敏朗 鈴木 央一 柴崎 勇一

1. まえがき

ディーゼル重量車の排出ガス規制は、エンジン単体でのエンジンダイナモメータ室内試験によって実施されている。一方、欧州では、排出ガス規制の強化にもかかわらず、都市部における大気質の改善が進まないことから、新たな規制として、車両に車載型排出ガス計測システム（PEMS：Portable Emissions Measurement System）を搭載して路上走行時の排出ガス性能を評価する試験（RDE：Real Driving Emissions）が始まっている。これは、実使用条件下での排出ガスを低減させれば、大気質の改善効果が期待できるとの考えであるが、多様な走行条件となる路上走行において、適切な評価法を定めることの難しさがある。わが国でも国際基準調和の観点から重量車のRDE試験に関する検討は始まっているが、欧州との交通事情等の違いから調整事項も多く存在し、実施段階までには、さらなる時間を要するものと考えられる。

本報では、重量車の路上走行時の排出ガス計測を、ジルコニア（ZrO₂）式NO_xセンサ等の排気管直挿型センサを用いた計測システム（SEMS：Sensor-based Emissions Measurement System）¹⁾で行う場合の課題を明らかにするとともに、その改善策について検討した。欧州のRDE路上走行試験では、認証試験で用いる定置型排出ガス分析計をコンパクトにして車載可能としたPEMSを用いるが、電源部とガスポンペを加えると重量200kg超となって設置は容易でなく、消費電力が大きいことから計測可能時間は2時間～3時間と短い。このことは、評価試験を実施する上での制約となる。一方、SEMSでは、排気管直挿型センサであることから設置は容易で、電源は車両バッテリーから供給できるので長時間の計測が可能である。しかしながら、課題も存在する。現状のNO_xセンサ（限界電流型ZrO₂センサ）は、認証時のNO_x分析に用いる化学発光（CLD）

法に比べて測定精度が劣り、さらに排出ガス中のNH₃をNO_xに誤検知するNH₃干渉問題²⁾がある。本報では、NO_xセンサの測定精度の改善策として、NO_x濃度算出時の検量線を重量車の排出ガスに適合するように修正するとともに、NH₃干渉を補正するために排気管直挿型NH₃センサ（混成電位型ZrO₂センサ）の導入を検討した。以下に、これらの検討結果の概要を報告する。

2. 検討方法

NO_xセンサのNO_x濃度測定における測定精度の改善策を検討するため、3台の試験車両のシャシダイナモメータ試験による排出ガス測定データを用いた。試験車両は、小型貨物車A（平成28年規制適合、車両総重量4.7t）、中型貨物車B（平成28年規制適合、車両総重量7.8t）および大型貨物車C（平成21年規制適合、車両総重量25t）である。それぞれの車両の排気管には、NO_xセンサを装着するとともに定置型排出ガス分析計（CLD法）のサンプリングプローブを接続し、WHVCモード等を走行して、NO_xセンサ出力、NO_x濃度（CLD法）等を連続的に取得した。そして、NO_x濃度算出用の検量線を用いてNO_xセンサ出力をNO_x濃度に換算し、定置型排出ガス分析計のNO_x濃度（CLD法）と比較することにより、測定精度の改善策を探った。

NH₃干渉補正の検討には、上記の大型貨物車C（積算走行距離：約68万km）の排気管に、NO_xセンサおよびNH₃センサを装着し、さらに定置型排出ガス分析計（CLD法）を接続して、シャシダイナモメータ試験を行った。供試車両に装着されている尿素SCR触媒は、性能劣化が進行して、エンジン高負荷運転域ではテールパイプからのNH₃排出が認められることから、この領域のデータを用いて、NH₃センサのNH₃濃度の測定性能や同センサを用いたNO_xセンサのNH₃干渉を補正する方法について検討した。

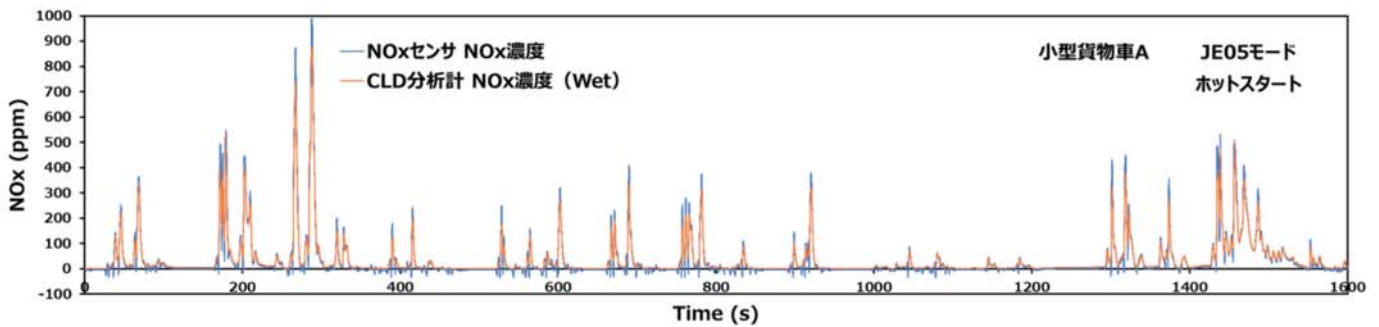


図1 NOx センサによる NOx 濃度測定値と定置型排出ガス分析計 (CLD 法) による NOx 濃度測定値の比較

3. 実験結果および考察

3. 1. NOx センサの NOx 濃度測定値の補正

図1に、小型貨物車Aが、シャシダイナモメータ試験において、JE05モードを走行したときのNOx センサによるNOx濃度測定値と定置型排出ガス分析計 (CLD法) によるNOx濃度測定値を時系列で比較した結果を示す。同図より、両者は概ね一致しているものの、NOx排出のない条件でNOxセンサのNOx濃度がマイナス側に変動している領域が観測され、またNOx濃度が急増・急減する変動のピーク値においてNOxセンサの濃度が定置型排出ガス分析計 (CLD法) の濃度より大きくなっていることがわかる。ここで、NOxセンサの応答性は定置型排出ガス分析計 (CLD法) よりも高いことから、変動の立ち上りのピーク値が大きくなる時は立ち下りのピーク値も大きくなるはずであるが、立ち上りのピーク値のみが大きい場合が観測され、応答性では説明できない誤差要因の存在が考えられる。

まず、NOxセンサにおけるNOx濃度のマイナス側への変動について考察し、その補正方法を検討した。ここで、供試NOxセンサは、ZrO₂固体電解質のO₂イオン伝導性を応用したセンサ基板で構成される。ZrO₂の内外面にO₂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O₂を測定空間から汲み出す。その上で、NOx測定用ポンプでNOxをO₂とN₂に分解してそのO₂分圧をO₂イオン伝導量として検出する。この検出値を基に、排出ガス中のNOx量に比例した出力信号を取り出す。この測定原理から、NOxセンサ出力のマイナス側への変動は、O₂を測定空間に汲み入れる場合に生じることが考えられる。急なアクセル操作等によってセンサ基板に温度降下が生じる場合、電極にNOが吸着し難くなりCOのみが吸着するとの報告³⁾がある。このCOを酸化するためにO₂

が測定空間内に汲み入れられてセンサ出力がマイナス側へ変動している可能性がある。ただし、この出力のマイナス側への変動は、NOx排出のない条件で生じていることから、マイナス出力をゼロとして処理すれば排出量への影響はないものと考えられる。

次に、NOx濃度が急増・急減する変動のピーク値において、NOxセンサの濃度が定置型排出ガス分析計 (CLD法) の濃度より大きくなることについて考察した。NOxセンサは、NOx濃度に比例した電圧出力を検出し、その出力をモデルガス (N₂、O₂、NO、H₂O : 3%、室温) により作成した検量線を用いて濃度に換算している。図2に、小型貨物車AがJE05モードを走行したときのNOxセンサによるNOx濃度電圧出力値と定置型排出ガス分析計 (CLD法) によるNOx濃度測定値の関係を示す。図中のオレンジ色の直線は、モデルガスによる検量線であり、赤色の破線はCLD法によるNOx濃度測定値の近似直線を示す。同図より、NOx濃度電

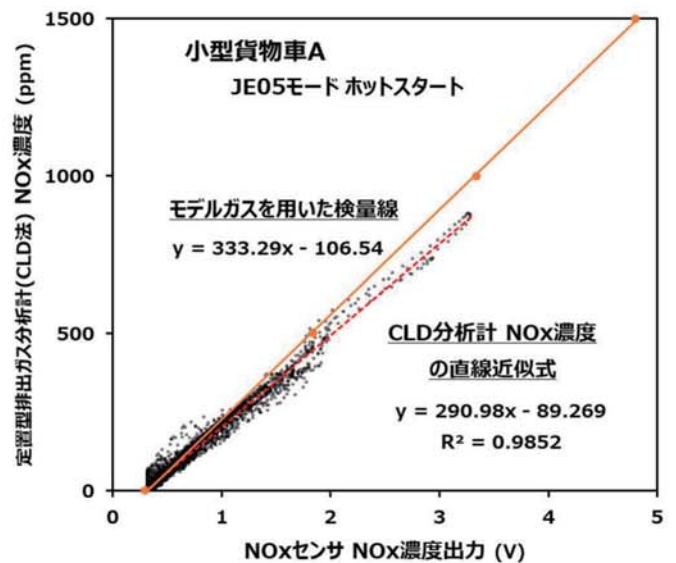


図2 NOx センサによる NOx 濃度電圧出力値と定置型排出ガス分析計 (CLD 法) による NOx 濃度測定値の関係

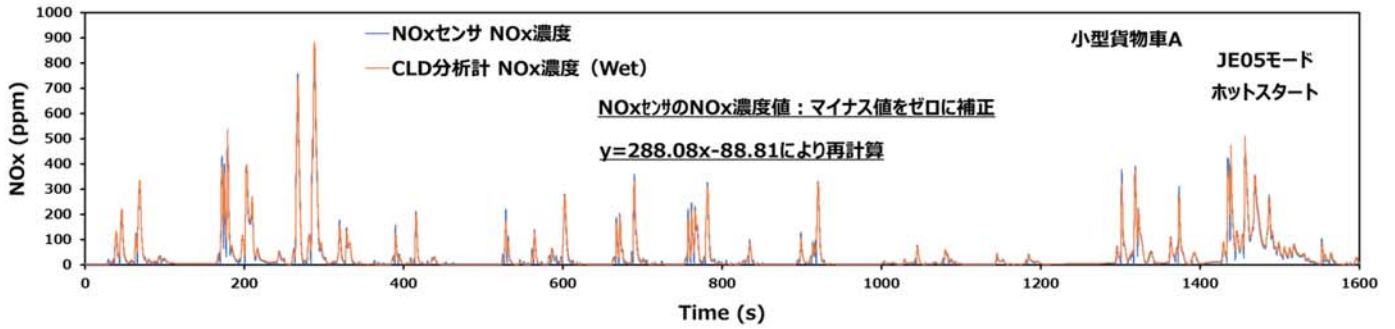


図3 NOx センサのNOx 濃度測定値（補正後）と定置型排出ガス分析計（CLD 法）のNOx 濃度測定値の比較（補正：NOx センサのNOx 濃度出力を、マイナス値をゼロに置き換えた上で、①式の検量線を用いてNOx 濃度を再計算）

圧出力に対するNOx 濃度測定値（CLD 法）は、モデルガスによる検量線を用いたNOx 濃度換算値よりも小さくなることわかる。このことは、モデルガスによる検量線が小型貨物車Aの排出ガスに適合していないことを示している。このように検量線の適合不良が、NOx 濃度変動のピーク値において、NOx センサの濃度が定置型排出ガス分析計（CLD 法）の濃度より大きくなる原因であると考えられる。そこで、小型貨物車 A が JE05、WHVC 等のモードパターンをコールドスタートあるいはホットスタートで走行したときのNOx センサによるNOx 濃度電圧出力値と定置型排出ガス分析計（CLD 法）によるNOx 濃度測定値の関係を分析して、以下に示す小型貨物車 A 用の検量線を作成した。

$$y = 288.08 x - 88.81 \quad \dots \text{①式}$$

y : NOx 濃度 (ppm)、x : NOx センサ出力 (V)

①式の作成過程を以下に示す。図 2 に示すような NOx センサの NOx 濃度電圧出力値と定置型排出ガス分析計（CLD 法）の NOx 濃度測定値の直線近似式における「傾き」と「y 切片」は、走行条件により排出ガス中の H₂O 濃度が変動することに起因して変化すると考えられる。小型貨物車 A では、検量線の分析に用いたモード走行データの平均 H₂O 濃度は、5.4%~6.7%の範囲で変化したが、「傾き」と「y 切片」それぞれの変化はわずかであったことから、検量線①式の「傾き」と「y 切片」は、分析に用いたモード走行データの「傾き」の平均値および「y 切片」の平均値とした。

ここで、図 1 の NOx センサの NOx 濃度出力を、マイナス値をゼロに置き換えた上で、①式の検量線を用いて NOx 濃度を再計算した結果を、図 3 に示す。同図より、NOx センサによる NOx 濃度測定値と定置型排出ガ

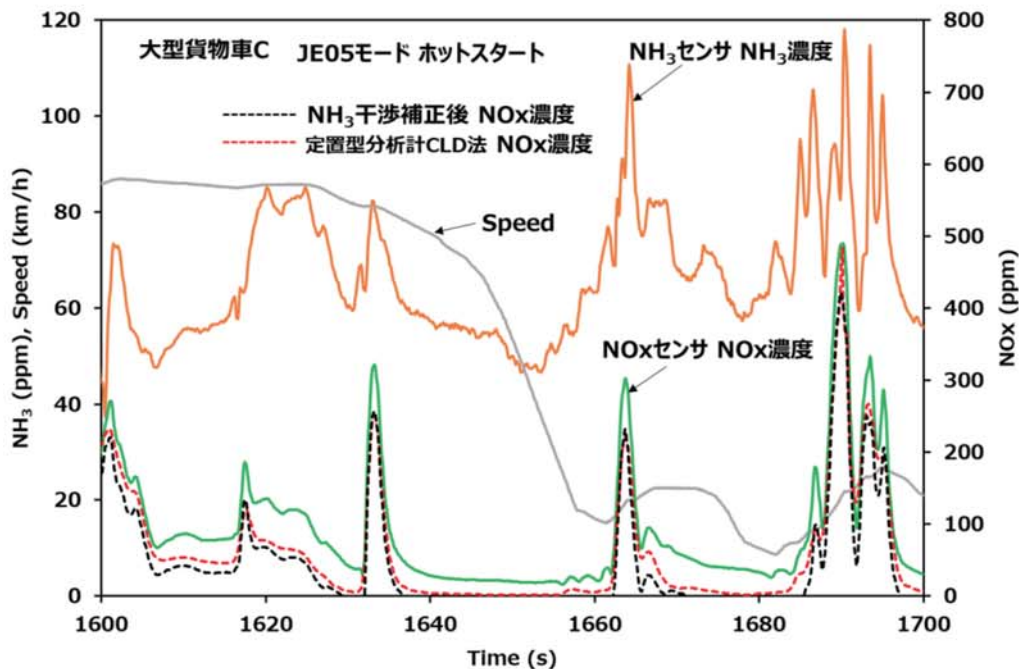


図4 JE05 モード走行時におけるNOx センサのNOx 濃度測定値、定置型排出ガス分析計（CLD 法）のNOx 濃度測定値およびNH₃ センサのNH₃ 濃度測定値の時系列変化

ス分析計（CLD法）によるNO_x濃度測定値は、NO_x濃度変動のピーク値においてよく一致し、NO_xセンサのNO_x濃度測定値の補正が適切であることがわかる。

同様に、中型貨物車Bおよび大型貨物車Cについても各車両に適合する検量線を作成し、補正法の有効性を確認した。試験車両において、H₂O濃度等の排出ガス組成が異なる場合は、検量線を車両ごとに用意する必要があると考えられた。

3. 2. NH₃センサによるNO_xセンサのNH₃干渉補正

図4に、大型貨物車Cが、シャシダイナモメータ試験において、JE05モードを走行したときのモード最後のショートトリップにおけるNO_xセンサによるNO_x濃度測定値、定置型排出ガス分析計（CLD法）によるNO_x濃度測定値およびNH₃センサによるNH₃濃度測定値を時系列で表示して示す。同図より、大型貨物車C（積算走行距離：約68万km）では、NH₃（オレンジ色の線）が50ppm～120ppmの範囲で変動して排出されていることがわかる。そのため、NO_xセンサのNO_x濃度（緑色の線）は、NH₃をNO_xと誤検知して、定置型排出ガス分析計（CLD法）のNO_x濃度（赤色の破線）より大きな値となっている。ここで、NH₃センサのNH₃濃度測定値を用いてNO_xセンサのNH₃干渉の補正が可能かどうかを検討した。NH₃は、NO_xセンサのPt族系電極（センサ温度：700℃程：内蔵ヒータで温調）において、以下に示す酸化反応により、NO_x（NOおよびNO₂）を生成している。



ここで、供試NO_xセンサの上記反応におけるNH₃からNO_xを生成する転換率は、約80%として、以下の式により、NO_xセンサのNH₃干渉を補正することとした。

$$\text{NO}_x \text{ 濃度補正值} = \text{NO}_x \text{ 濃度測定値} - \text{NH}_3 \text{ 濃度} \times 0.8 \quad \dots \text{②式}$$

この②式を用いてNO_xセンサのNH₃干渉を補正した結果を、図4中に黒色の破線で示す。同図より、NO_x濃度補正值（黒色の破線）は、定置型排出ガス分析計（CLD法）のNO_x濃度値（赤色の破線）と概ね一致していることがわかる。このことから、NH₃センサのNH₃濃度の測定性能および同センサを用いたNO_xセンサのNH₃干渉の補正方法は、適正であると考えられる。ただし、NH₃のNO_xへの転換率80%は、走行条件等によって変化することが考えられ、適切な設定値については、今後の検討課題としたい。

4. まとめ

ZrO₂式NO_xセンサを用いた重量車排出ガス計測システム（SEMS）におけるNO_x濃度測定の高精度化に関する課題とその改善策について検討した。その結果、以下の点を明らかにした。

(1)NO_xセンサのNO_x濃度出力のマイナス側への変動は、急なアクセル操作等によってセンサ基板に温度降下が生じ、電極にNOが吸着し難くなりCOのみが吸着し、このCOを酸化するためにO₂が測定空間内に汲み入れられて生じているものと考えられた。ただし、NO_x排出のない条件で生じていることから、マイナス出力をゼロとして処理すれば排出量への影響はないものと考えられる。

(2)NO_x濃度が急増・急減する変動のピーク値において、NO_xセンサの濃度が定置型排出ガス分析計（CLD法）の濃度より大きくなるのは、センサ添付のモデルガスによる検量線が試験車両の排出ガスに適合していないことに起因する。新たに、試験車両の実排ガスデータを基に検量線を作成し、これを用いてNO_x濃度を再計算することにより、上記の課題が改善された。

(3)排気管直挿型NH₃センサ（混成電位型ZrO₂センサ）のNH₃濃度測定値を用いて、NO_xセンサのNH₃干渉の補正方法を検討した。供試NO_xセンサにおいてNH₃からNO_xを生成する転換率を約80%として、NO_xセンサのNO_x濃度測定値からNH₃濃度測定値の80%の値を減算することにより補正できるとの見通しを得た。

参考文献

- 1) 山本敏朗，鈴木央一，山口恭平，“NO_xセンサベースの車載計測器を用いた重量貨物車の路上走行時におけるNO_x排出量の測定とNO_x抑制装置の機能診断”，自動車技術会論文集，Vol. 49，No. 3，pp. 642-649（2018）
- 2) 山本敏朗，野田明，阪本高志：排出ガス対策装置の車載機能診断システム（OBD）に関する性能要件及び機能評価法の研究（第1報）—触媒劣化の検知方法に関する基礎的考察—，平成12年度（第30回）交通安全公害研究所研究発表会講演概要，pp. 93-96（2000）
- 3) 藤井朝文ほか，“高精度リアA/Fセンサの開発”，自動車技術会2017年春季大会学術講演会講演予稿集，20175303（2017）