

実車試験における車載型排出ガス分析計の不確かさ評価

—EN17507に基づく不確かさの把握—

Uncertainty Evaluation of a Portable Emission Measurement System (PEMS)
during Real Driving Tests

— Measurement uncertainty based on EN17507 —

岩佐 聰洋^{*1}

Toshihiro IWASA

松岡 正紘^{*1}

Masahiro MATSUOKA

羽二生 隆宏^{*2}

Takahiro HANIU

リアルワールド（実路環境）において排出ガスを評価する需要が高まっていることから、国内外の規制において Real Driving Emission (RDE) 評価が導入されている。RDE 評価では路上を走行し、車載型排出ガス分析計 (PEMS) を用いて排出ガスを計測するため、従来の台上試験とは異なる計測の不確かさが存在する。本稿では、一般財団法人日本自動車研究所 (JARI) における RDE 評価の信頼性と品質の向上を目的として、車載型排出ガス分析計による計測の不確かさを欧州標準規格 EN17507 に基づいて評価したので報告する。

KEY WORDS: 環境・エネルギー・資源、排出ガス、計測技術、路上走行、PEMS、不確かさ

1. はじめに

2020 年に国内でディーゼル軽・中量車向けの路上走行試験規則が導入されたように、近年は従来の台上試験での排出ガス評価に加えて、車載型排出ガス分析計 (Portable Emission Measurement System: PEMS) を用いたリアルワールドでの排出ガス (Real Driving Emission : RDE) 評価の需要が高まっている。欧州では現在、欧州委員会によって新しい排出ガス規制 (Euro7) の導入が進められており、2024 年 5 月には優先される法令 (上位法, EU 2024/1257¹⁾) が公布された。上位法での台上試験における規制値 (Heavy Duty Vehicle/NOx の場合) は 200 mg/kWh となっている。一方で、路上走行試験における排出ガス規制では、PEMS による計測の不確かさを考慮するため PEMS マージンまたは適合係数と呼ばれる数値を台上試験の規制値に乗じて評価しており、PEMS 性能の向上に伴いこれらの数値を段階的に減少させてきた²⁾。Euro7 上位法における路上走行試験の NO_x 規制値は 260 mg/kWh であり、PEMS マージンに換算すると 1.3 である。従来の排出ガス規制 (EuroVI) における PEMS マージンが 1.5 であったことを考えると、RDE 評価に求められる計測精度は 10% 程度高まったと言える。路上走行試験においては台上試験と異なり、PEMS によって排出ガスを計測するため、計測環境の変化等による計測の不確かさが増加する。欧州では欧州標準規格 EN17507 に基づき、PEMS による計測の不確かさを定量化している。一般財団法人日本自動車研究所 (Japan Automobile Research Institute : JARI) においても保有する PEMS の計測の不確かさを定量化して、JARI で実施する路上走行試験の信頼性と品質を向上させていくことが重要である。

本稿では、重量車 1 台を対象に、JARI の環境型シャシダイナモーメタ (Chassis Dynamometer : C/D) を用いた台上試験および路上試験を実施して排出ガスの計測を行い、EN17507 に基づき PEMS による計測の不確かさを評価した。本稿では、その結果について報告する。

* 2025年5月9日受理

*1 一般財団法人日本自動車研究所 環境研究部 博士（工学）

*2 一般財団法人日本自動車研究所 環境研究部

2. EN17507とは

EN17507 は CEN/TC301 (Comité Européen de Normalisation/Technical Committee) で開発され、欧州標準規格となっている。この規格では図 1 に示すような流れで不確かさの評価手順を定義している。不確かさ評価は実車を用いた試験による手法である Type-A 評価と実車試験以外 (PEMS 単体) による手法である Type-B 評価の 2 つの手法があり、それぞれで得た不確かさを合成することにより最終的な不確かさを決定する。Type-B 評価は主に PEMS メーカーにおいて実施されるため、本研究では Type-A 評価に着目し、台上試験と路上走行試験を実施した。台上試験では計測システムと計測対象である排出ガスの不確かさが考慮され、PEMS と定置型排出ガス分析計の感度差を評価する繰り返し精度や平均的な差異を評価するシステム偏差を算出する。ここで定置型排出ガス分析計は PEMS に比べて計測不確かさが小さく、基準値が得られる装置として使用した。路上走行試験では計測システムと排出ガスの不確かさに加えて測定方法、オペレータ、計測環境の不確かさが考慮され、繰り返し精度を算出する。

不確かさ評価で用いる評価式を式 (1) ~ 式 (5) に示す。ここで x_{PEMS} は台上試験における PEMS の計測値、 x_{Ref} は台上試験における定置型排出ガス分析計の計測値、 x は路上試験における PEMS の計測値である。台上試験の結果から繰り返し精度 (u_{EVR}) およびシステム偏差 (u_{Bi}) を、路上試験の結果から繰り返し精度 ($u_{EVO,road}$) をそれぞれ算出する。算出した 3 つの不確かさから合成不確かさ ($u_{MP,road}$) を算出する。

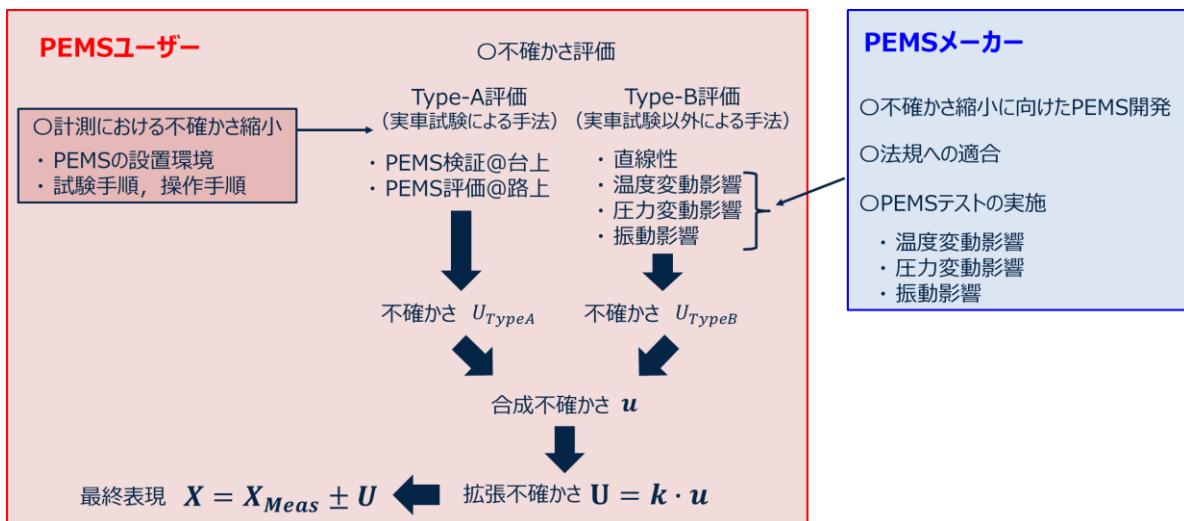


図1 EN17507における不確かさ評価の流れ

$$\Delta x = x_{PEMS} - x_{Ref} \quad \text{式 (1)}$$

$$u_{EVR} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta x_i - \bar{\Delta x})^2} \quad \text{式 (2)}$$

$$u_{Bi} = \frac{1}{\sqrt{3}} |\bar{x}_{PEMS} - \bar{x}_{Ref}| \quad \text{式 (3)}$$

$$u_{EVO,road} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{式 (4)}$$

$$u_{MP,road} = \sqrt{u_{Bi}^2 + \max\{u_{EVR}^2; u_{EVO,road}^2\}} \quad \text{式 (5)}$$

3. 台上試験および路上走行試験

EN17507 の Type-A 評価を行うため、PEMS (HORIBA,OBS-ONE) を用いた台上試験および実路試験を実施した。試験車両には、平成 28 年（2016 年）規制に適合したディーゼルハイブリッド重量車を用いた。当該車両は後処理装置として NO_x を浄化する尿素 SCR (Selective Catalytic Reduction) などを搭載した車両である。以降においては、当該車両の排気特性に言及することを避けるため、NO_x 排出量については数値の明記をしていない。

3.1 台上試験

台上試験では JARI の環境型 C/D において、定置型排出ガス分析計と PEMS を使用して排出ガスを比較評価した。走行モードは WHVC (Worldwide Harmonized Vehicle Cycle) モードであり、室温 (23°C)、積載量、および走行抵抗を固定して全 26 回の試験を実施した。なお、車両暖機状態および試験開始時における駆動バッテリーの SOC (State Of Charge) は成り行きとした。本試験では毎回一定の条件で試験を実施し、試験前のコンディションは直前の試験により一定に調整されるため、追加の後処理装置に対して行う事前調整（プレコンディショニング）は実施しなかった。

台上試験結果から PEMS の計測精度を検証した。台上試験は 5 日間実施し、3 つの始動条件から結果を得た。全 26 回の NO_x 排出量結果一覧を図 2 に示す。車両暖機状態は通常の Cold スタート（冷却水温度 23°C、12 時間以上の静置（ソーク））と Hot スタート（冷却水温度約 80°C、連続試験）に加えてその中間となる状態（Mid : 冷却水温度 23°C～80°C、1 時間以上 12 時間未満の静置（ソーカ））が含まれているため、車両暖機状態ごとに色分けしている。定置型排出ガス分析計 (Stationary) と PEMS の差異に着目すると、試験ごとの排出量の傾向が同様であることが分かる。重量車向けの PEMS 許容誤差が存在しないため、欧州小型車用法規の許容誤差 (15 mg/km または比較参考値の 15% のうち大きい値) を適用して、PEMS 検証 (validation) を行った結果を図 3 に示す。ここで欧州小型車用法規の許容誤差は赤線で表記した。Hot 試験の一部の結果で許容誤差をやや上回ったものの、Cold 試験と Mid 試験での誤差は最大で 15 mg/km であり、欧州小型車用法規の評価基準を満足した。以降の不確かさ評価には、路上走行試験の試験条件と同様にソーカを実施した Cold 試験および Mid 試験のデータである 6 回分の試験データを使用した。

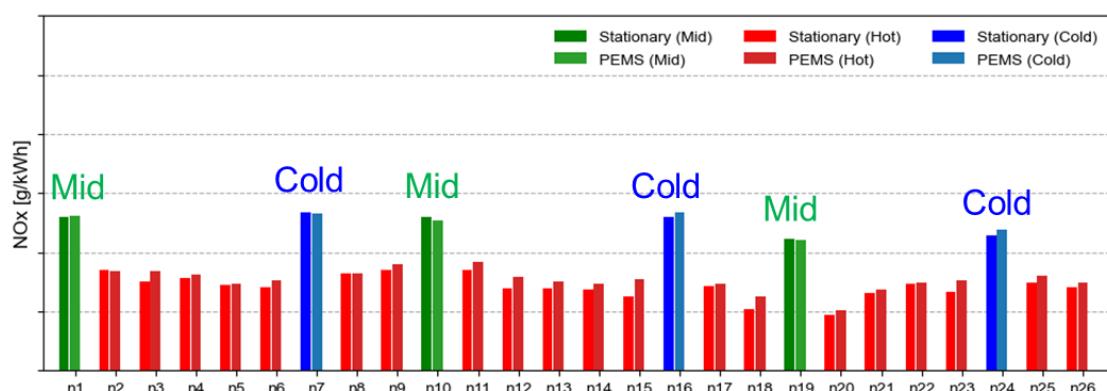


図2 全26回の台上試験におけるNO_x排出量一覧（定置型分析計およびPEMSの計測値）

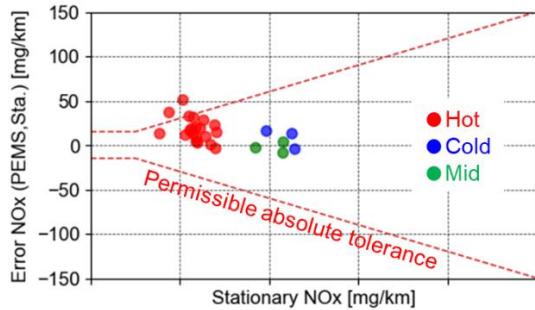


図3 WHVCモード試験 (Cold, Hot, Mid) におけるNO_x排出量と欧州小型車用法規の評価基準

3.2 路上走行試験

PEMS の不確かさ評価に適した実路試験ルートで試験を実施するため, 2023 年 4 月時点での道路運送車両の保安基準別添 119³⁾ を参考に試験ルートを検討した. 本研究の試験ルートが満たすべき要件は以下の通りとした.

- ・走行時間は 90 分～120 分であること.
- ・低速域 (40 km/h 以下の速度), 中速域 (40 km/h 超え 60 km/h 以下の速度), および高速域 (60 km/h を超える速度) が以下の割合で含まれること.
(低速域 : 15%～35%, 中速域 : 20%～40%, 高速域 : 35%～55%) .
- ・停止や加減速を多く含むルートであること.
- ・重量車である試験車両が走行できること.
- ・計測環境が一般温度条件と一般高度条件の範囲内 (気温 : 0°C～35°C, 海拔 : 700 m 以下) であること.

これらの要件を満たすルートとして図 4 に示す走行ルートを設定した. 試験前には C/D でプレコンディショニングを行い, 試験はすべて Cold スタートで実施した. なお, 路上を走行する際には不要な加減速等は行わず, 周囲の交通にあわせた運転を行った.

図 4 に示すルートで路上走行試験を 10 回実施した. 図 5 に 10 回目の試験における車速, 標高, および走行距離割合を示す. 選定した試験ルートは市街地(Urban), 郊外(Rural), および高速道路(Motorway)から構成されている. 全 10 回すべての試験で各車速域の走行距離割合は本研究の要件を満足した. また, PEMS に付属している GPS の位置情報から取得した標高データは, 始点から終点までの標高は 0 m ～100 m の範囲にあり, 本研究の要件を満たしていた.

本試験ルートで取得した計測データに対して, RDE 評価で使用される移動平均ウィンドウ (Moving Averaging Window : MAW)³⁾ 処理を行い, 路上走行試験における排出ガスを評価した. MAW 法は走行区間を一定の仕事量や CO₂ 排出量となる複数のウィンドウで区切って排出ガスを評価する手法である. 図 6 に全 10 回の NO_x 排出量結果の一覧を示す. 図 6 の箱ひげ図は移動平均処理データの 100%tile 値, 75%tile 値, 50%tile 値, 25%tile 値, 0%tile 値をそれぞれ示している. また, 図中に全 10 回の 100%tile 値から算出した変動係数 (Coefficient Of Variation : COV) を示している. 実路試験 10 回を通して計測環境や走行などが変化することによって排出量が変化していることが分かる.

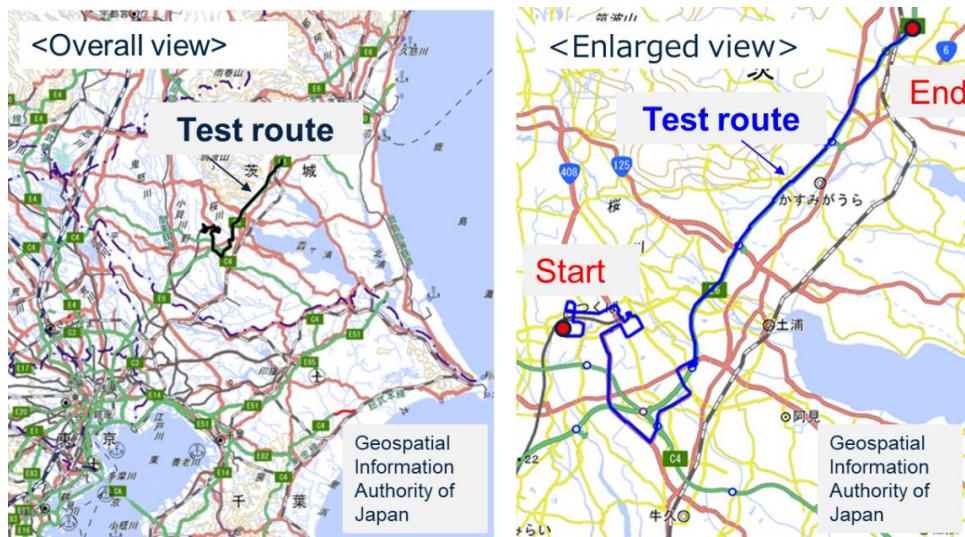


図4 路上走行試験ルートの概略図

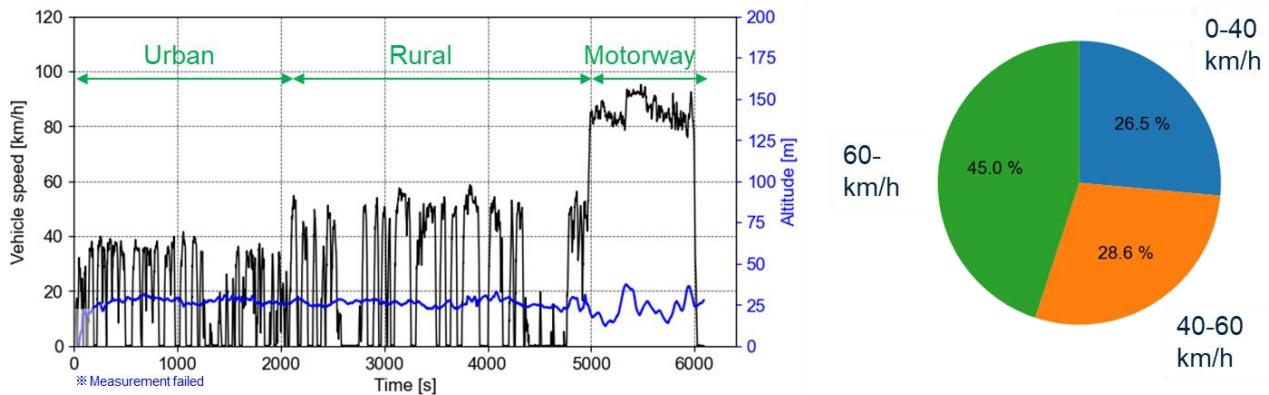


図5 路上走行試験（10回目試験時）の車速パターン、標高、および走行距離割合

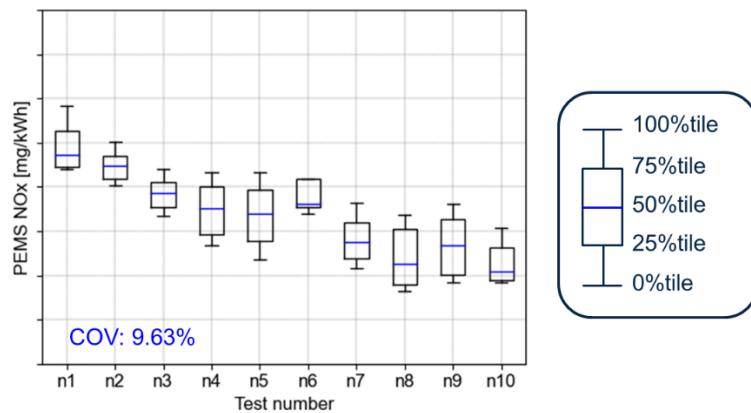


図6 全10回の路上走行試験におけるNO_x排出量一覧（PEMS計測値）

4. PEMSの不確かさ評価

台上試験と路上走行試験から得られた計測データを用いて、PEMSによる計測の不確かさを評価した。また、計測の不確かさに影響する因子について考察した。なお、EN17507で推奨されている方法に対して、限られた試験データでの不確かさ評価となっていることに留意いただきたい。

4.1 台上試験と路上走行試験での計測における不確かさの定量化

台上試験全6回の結果と路上走行試験全10回の結果をEN17507の手順で統計処理を行い、繰り返し精度やシステム偏差といったPEMS計測値の不確かさを算出した。各不確かさはUrban, Rural, Motorway、および全領域であるTotalの4つの走行領域ごとに評価した。

表1に台上試験における計測の不確かさを示す。表の下段には不確かさの程度を相対的に評価するため、Euro7の規制値(200 mg/kWh)に対する相対不確かさを示している。車速フェーズごとに見ると、繰り返し精度とシステム偏差は、Urbanで最も大きく、相対不確かさはそれぞれ38%と42%であった。

表2に台上試験と路上走行試験による計測の合成不確かさを示す。合成不確かさは、台上試験結果から得られた繰り返し精度とシステム偏差および路上走行試験から得られた繰り返し精度を用いて算出した。表の下段にはEuro7の規制値(260 mg/kWh)に対する相対不確かさを示している。台上試験における計測の不確かさと比べると、路上走行試験における計測の不確かさはすべての車速フェーズで大きくなる傾向にある。合成不確かさを見るとRuralで最も大きく、その相対不確かさは90%であった。

表1 全6回の台上試験における計測の不確かさ (NO_x排出量)

	Urban	Rural	Motorway	Total
u _{EVR} [mg/kWh] (台上試験)	76	51	16	15
u _{Bi} [mg/kWh] (台上試験)	85	45	35	4
相対不確かさu _{EVR} *	38%	25%	8%	8%
相対不確かさu _{Bi} *	42%	23%	18%	2%

*Euro7規制値=200mg/kWhに対する相対不確かさ

表2 全6回の台上試験および全10回の路上走行試験における計測の不確かさ (NO_x排出量)

	Urban	Rural	Motorway	Total
u _{EVR} [mg/kWh] (台上試験)	76	51	16	15
u _{Bi} [mg/kWh] (台上試験)	85	45	35	4
u _{EVO} [mg/kWh] (路上走行試験)	97	229	57	89
合成不確かさ u _{MP} [mg/kWh]	129	234	67	90
相対不確かさu _{MP} *	50%	90%	26%	34%

*Euro7規制値=260mg/kWhに対する相対不確かさ

4.2 計測の不確かさに影響を及ぼす因子

車速フェーズ別に計測の不確かさを見た場合、Ruralで最も大きくなつた。以下、路上走行試験におけるRuralでの計測の不確かさの要因について考察した。

図7に10回目の路上走行試験におけるNO_xの瞬時排出量を一例として示す。NO_xの排出量はUrbanやRuralで大きく、Motorwayでは小さいことが分かる。これは本試験車両に搭載されている尿素SCRがMotorwayでは活性化していることでNO_xを浄化するためであると考えられる。尿素SCRが活性温度域

となるタイミングを把握するために、尿素 SCR の温度に影響を及ぼす排出ガス温度を調べた。図 8a に ウィンドウあたりの NO_x 排出量と排出ガス温度の関係、図 8b に全 10 回の NO_x 排出量と時間割合（排出ガス温度が 140°C 以上となる時間の割合）の関係をそれぞれ示す。Urban, Rural, Motorway の順に経時で排出ガス温度が上昇するにつれて NO_x 排出量が減少していることが分かる。尿素 SCR に関する既往研究⁴⁻⁶⁾ から、SCR 触媒の活性温度域を 140°C と仮定すると、本試験においては Rural で活性温度域に移行している。図 8b を見ると、全 10 回の実路試験の中で活性温度域となっている時間は Urban で 0%，Motorway で概ね 100% となるが、Rural では 0%～30% の間でばらついていることが分かる。以上のことから、実路試験における NO_x 計測値の不確かさが Rural で大きくなった主な要因は、尿素 SCR が活性温度域となっている時間のばらつきによるものと考えられる。

他方、図 8a を見ると、同一の排出ガス温度においても、NO_x の排出量がばらついている。路上走行試験においては試験ごとに交通流が異なり、走行動態が大きく変化するため、走行動態が NO_x 排出量に及ぼす影響を調べた。図 9a に NO_x 排出量で色付けした平均車速と RPA (Relative Positive Acceleration) の関係、図 9b に NO_x 排出量で色付けした排出ガス温度と RPA の関係をそれぞれ示す。ここで RPA はある走行区間での加速強度を表す相対的正加速度である³⁾。平均車速が 40 km/h～60 km/h である Rural の RPA は 0.06～0.13 であることが分かる。また、図 9b において Rural となる箇所に着目すると、全 10 回の路上走行試験を通して RPA が高いほど、NO_x 排出量が増加していることが分かる。このことから、路上走行試験における Rural での不確かさは、活性温度域となっている時間のばらつきに加えて走行動態のばらつきが影響したものと考えられる。

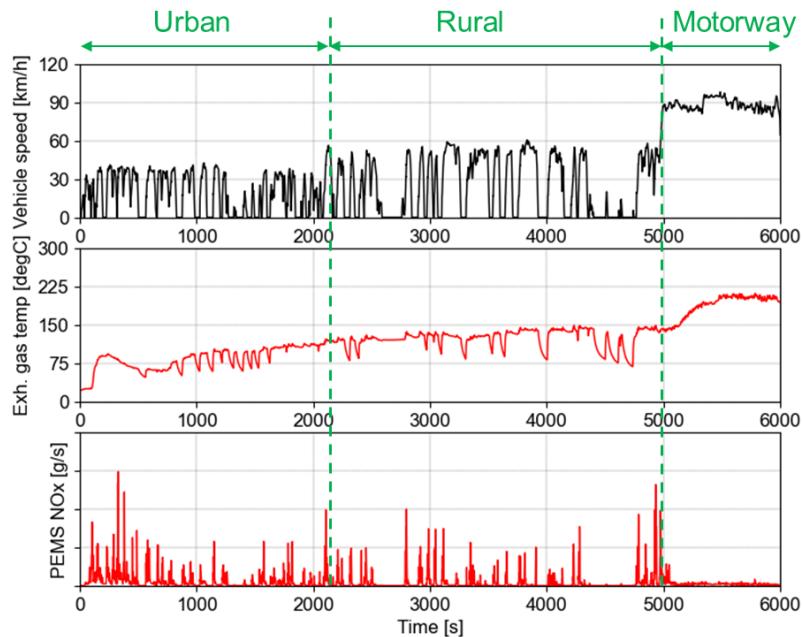
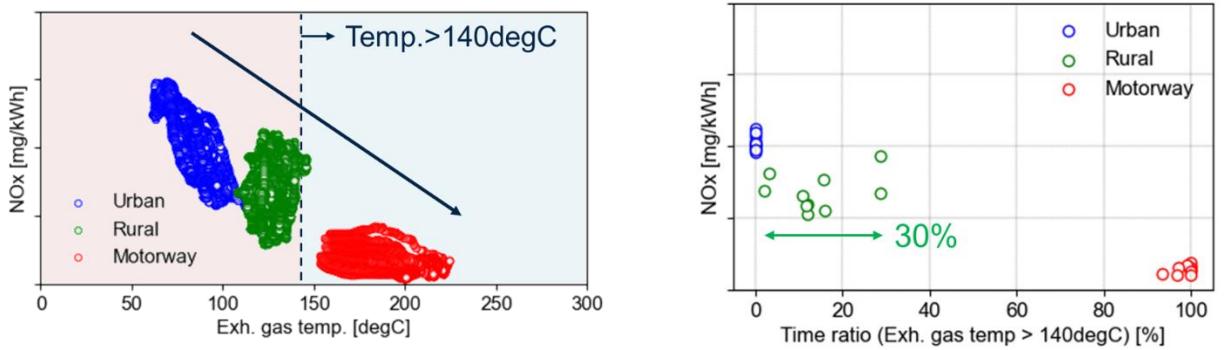


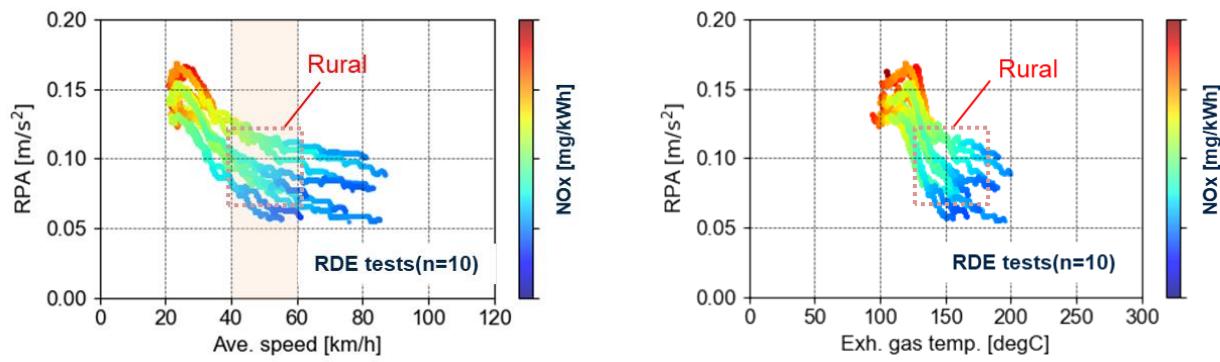
図7 路上走行試験（10回目試験時）における排出ガス温度とNO_x排出量の瞬時データ



a) MAW法により得られたウィンドウあたりの排出ガス温度とNO_x排出量の関係

b) 全10回の時間割合（排出ガス温度が140°C以上となる時間の割合）とNO_x排出量の関係

図8 路上走行試験における走行領域ごとのNO_x排出量と排出ガス温度の関係



a) 平均車速とRPAの関係

b) 排出ガス温度とRPAの関係

図9 MAW法により得られた全10回の路上走行試験結果

5. PEMSの不確かさ評価結果の活用例

不確かさを計測値と併せて表示するために拡張不確かさを算出した。ただし、本調査では実車試験をベースとする Type-A 評価のみで算出する拡張不確かさとした。EN17507 に記載されているように式 (6) から Total での拡張不確かさを算出し、式 (7) から測定値と併せた表記とした。ここで、 U は拡張不確かさ、 k は約 95% の信頼水準を与える包含係数、 u は合成不確かさ、 X_{Meas} は測定値である。

$$U = k \cdot u \quad \text{式 (6)}$$

$$X = X_{Meas} \pm U \quad \text{式 (7)}$$

定量化した計測の不確かさから、PEMS 計測の不確かさを考慮した排出ガス評価を試みた。ディーゼル軽・中量車に適用されている国内法規（道路運送車両の保安基準）や、次期欧州法規（Euro7）に定められている PEMS マージンや規制値と比較した結果の一例を図 10 に示す。国内法規に定められている PEMS マージンと比べて、今回算出した拡張不確かさは 1/3 程度と小さく、JARI における RDE 試験の計測技術が高い信頼性をもつことが分かる。一方で Euro7 における RDE の規制値と比べると、台上試験での規制値と拡張不確かさから算出した値が大きくなっていることが分かる。今後、PEMS マージンと言った PEMS 計測の不確かさに由来する数値が減少していくことを考えれば、JARIにおいても RDE 試験技術を更に向上させていく必要があると言える。

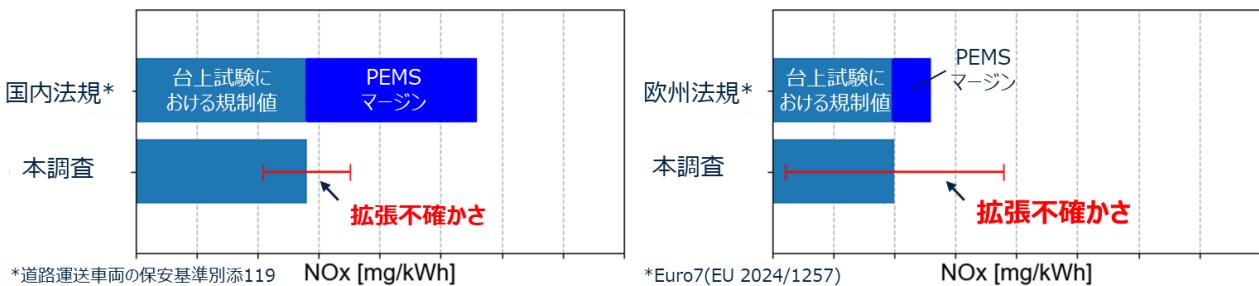


図10 計測の不確かさを考慮した排出ガス評価の一例

6.まとめ

台上試験を6回、路上走行試験を10回繰り返し試験して、JARIで保有しているPEMSによる計測の不確かさをEN17507で評価した。得られた知見を以下に記す。

台上試験 (Cold試験およびMid試験)

- ✓ PEMSから得られたNO_x排出量と定置型排出ガス分析計から得られたNO_x排出量の差は最大15mg/kmでよく一致しており、PEMS計測の不確かさを評価するために十分な計測精度を持つことを確認できた。

路上走行試験

- ✓ 低速域、中速域、および高速域の割合は本研究で設定した試験ルートの要件を満たしていた。

PEMSによる計測の不確かさ

- ✓ 台上試験と路上走行試験の結果から算出した合成不確かさは、Urban: 129 mg/kWh, Rural: 234 mg/kWh, Motorway: 67 mg/kWh, Total: 90 mg/kWh (Euro7規制値に対する相対不確かさはUrban: 50%, Rural: 90%, Motorway: 26%, Total: 34%)であった。
- ✓ 台上試験における計測の不確かさ(16 mg/kWh~85 mg/kWh)に比べて、路上走行試験における計測の不確かさ(57 mg/kWh~229 mg/kWh)は大きかった。
- ✓ 車速フェーズごとに比較すると、尿素SCRが活性温度域となっている時間や路上走行試験における走行動態のばらつきに起因してRuralでの不確かさは229 mg/kWhとなり、最も大きくなった。

PEMSの不確かさ評価結果の活用例

- ✓ 参考までにType-A評価のみから算出した拡張不確かさを国内法規やEU法規におけるPEMSマージンや規制値と比較した。本調査におけるRDE試験技術は国内法規に定められているPEMSマージンの1/3程度であり、一定の測定精度を持つことが分かった。

参考文献

- 1) European Union: REGULATION (EU) 2024/1257 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L_20240125T, (参照 2025-5-9)
- 2) Giechaskiel B, et al.: Real Driving Emissions (RDE): 2020 assessment of Portable Emissions Measurement Systems (PEMS) measurement uncertainty, Publications Office of the European Union (2021), ISBN 978-92-76-30230-8, [doi:10.2760/440720](https://doi.org/10.2760/440720)
- 3) 国土交通省:道路運送車両の保安基準 別添119 路上走行時のディーゼル軽・中量車排出ガスに関する技術基準, <https://www.mlit.go.jp/jidoshia/content/B119.pdf>, (参照 2025-5-9)
- 4) Watkins T, et al.: Impact of Accelerated Hydrothermal Aging on Structure and Performance of Cu-SSZ-13 SCR Catalysts. Advances in NOx Reduction Technology (2015), [doi:10.4271/2015-01-1022](https://doi.org/10.4271/2015-01-1022)

-
- 5) Okada Y, et al.: Study on Improvement of NO_x Reduction Performance at Low Temperature Using Urea Reforming Technology in Urea SCR System, SAE Technical Paper 2019-01-0317 (2019), [doi:10.4271/2019-01-0317](https://doi.org/10.4271/2019-01-0317)
 - 6) Tanaka K, et.al.: Experimental and Modeling Study of NH₃-SCR on a Hydrocarbon-Poisoned Cu-CHA Catalyst, SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility (2023), [doi:10.4271/2023-01-1659](https://doi.org/10.4271/2023-01-1659)