

Selected Article

一般論文

連続固体粒子数測定装置 MEXA-2000SPCSシリーズ

篠原政良，大槻喜則

MEXA-2000SPCS, MEXA-2100SPCSは、いずれもエンジン排ガスに含まれる固体粒子のうち、一定の粒径範囲の粒子数をリアルタイムに計測する装置である。このうち、MEXA-2000SPCSは、トンネル希釈計測を主なターゲットにしている。従来機種であるMEXA-1000SPCSと同じく、欧州の次期規制Euro 5/6で採用されるUN/ECE Regulation No.83, Rev.3, Amend.2の要求に適合している。MEXA-1000SPCSの高性能はそのままに、規制要求対応により特化した形で構成を見直すことにより、従来比1/3という大幅なサイズダウンを実現した。これにより、試験セルなどでの据え付けや移動の自由度が大きく向上した。また、MEXA-2100SPCSはダイレクト計測専用構成されている。このように、MEXA-2000SPCSシリーズでは、豊富なオプションとラインナップによりさまざまな用途への応用が可能となっている。

はじめに

近年、欧州を中心に、自動車エンジンから排出される粒子状物質(PM)を、従来の「排出質量」に加えて「排出粒子数(PN)」でも規制する動きがある。そのための新しい計測方法が国連欧州経済委員会(UN/ECE)傘下の委員会で2001年ごろから検討され始め、2009年4月にUN/ECE Regulation No.83, Revision3, Amendment2^[1]として正式に発行された。また、欧州連合(EU)からは、この新しい計測法を使用することを前提に、Commission Regulation (EC)No.692/2008^[2]として、2008年7月、軽量車(LDV)に対する具体的な規制値が発表されてい

る。ディーゼル車については、Euro 5として2011年から $PN_{6.0} \times 10^{11}$ 個/kmという規制値を追加、ガソリン車については規制値未定ながらEuro 6として2014年より粒子数規制を導入、というのがその内容である。

このような粒子数計測方法検討の流れをうけ、弊社では以前、粒子数計測装置MEXA-1000SPCSを製品化した^[3~5]。さらに、今回、より具体的になった計測要求に応えるため、最新の規制対応に特化したMEXA-2000SPCS, MEXA-2100SPCSを新たに開発した。本稿では、このMEXA-2000SPCSシリーズの概要と性能評価例を紹介する。

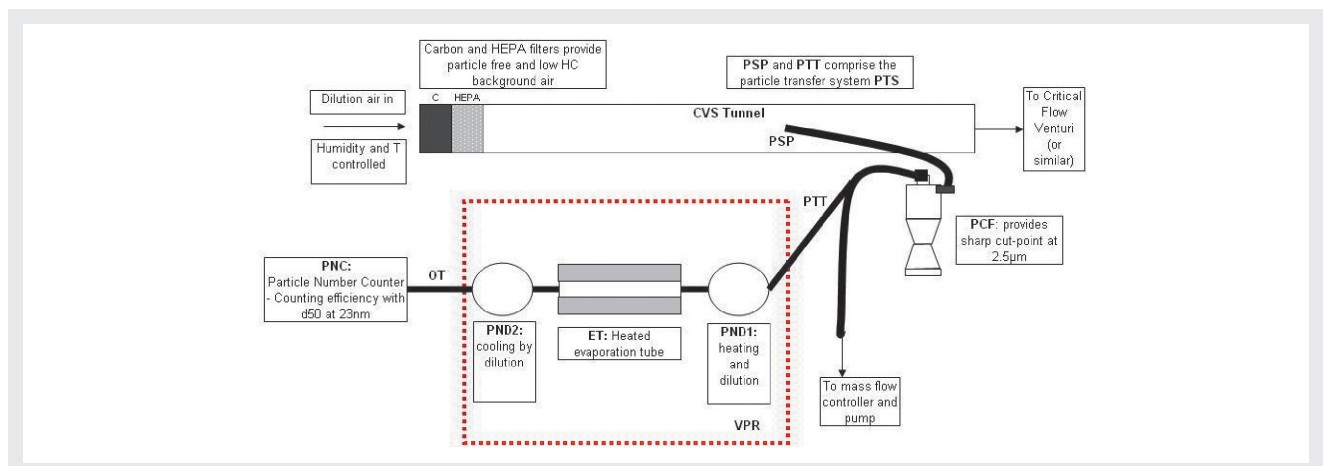


図.1 Euro5/6で推奨されている粒子数計測システム^[1]

Euro 5/6におけるPN計測システムの要件

推奨システムの構成

図1に、Euro 5およびEuro 6で推奨される粒子数計測システムの概略を示す¹。まず、全流希釈トンネルで希釈されたエンジン排ガスの一部をプローブで採取し、50%カットオフ粒径 $2.5\ \mu\text{m}\sim 10\ \mu\text{m}$ の分級器(サイクロンなど)を通して、粗大粒子を除去する。次に、サルフェートやSOFによる揮発性粒子が新たに形成されないよう、 $150^{\circ}\text{C}\sim 400^{\circ}\text{C}$ の加熱希釈器(PND1)で希釈する。さらに後段の蒸発管(ET, $300\sim 400^{\circ}\text{C}$)にて、希釈トンネルにおいてすでに形成されていた揮発性粒子を気化させる。その後、冷却希釈器(PND2)で再度希釈してサンプル温度を 35°C 以下に下げ、再凝縮による粒子生成と熱泳動による粒子損失を防止する。PND1における希釈比は10倍～200倍の範囲で可変、PND2は10倍から15倍の適当な固定値で使用できることが推奨されている。このPND1からPND2までの部分は、揮発性粒子除去部(VPR)と呼ばれる。VPRにより固体粒子のみとなったサンプルは、検出器である粒子数カウンタ(PNC)に導入される。具体的には、検出下限 23nm の凝縮粒子カウンタ(CPC)の使用が想定されている。検出する粒径の下限が決まっているのは、システムによる測定の際のばらつきを抑えるためである。

なお、上記構成のうちの分級器は、トンネル内に挿入するプローブが同じ機能を持つ場合は省略できる。図2に、一例として、「傘付きプローブ(Hatted Probe)」といわれるものを示す。

システムの性能と校正・チェック

Euro 5/6では、上述のシステムに使用するCPCを少なくとも年に1回校正することを要求している。ただし、システムのサンプルである固体微粒子には濃度既知の基準物質というものがない。そのため、何らかの方法で発生させた粒子から一定粒子径のものを抽出し、そのサンプルに対するCPCの指示をエアロゾルエレktロメータの指示と比較する手法をとる。あるいは、そのような手法で校正された「基準CPC」と校正対象のCPCを比較する、という方法も認められている。校正精度としては、いずれの場合も、基準濃度とCPC出力の回帰式の決定係数(R^2)が 0.97 以上であることが求められる。

このほか、Euro 5/6には、VPRにおける固体粒子透過や揮発性粒子除去効率のチェック、あるいはCPCに関する性能チェックの要求も規定されている。概略を以下にあげる。なお、[]内はチェックの頻度である。

- ・粒径 d の固体粒子のリダクションファクタ(PCRF, 後述)を $fr(d)$ とすると、

$$0.95 < fr(30\text{nm}) / fr(100\text{nm}) < 1.3,$$

$$0.95 < fr(50\text{nm}) / fr(100\text{nm}) < 1.2 [1\text{回}/\text{年}]$$

- ・VPRにおける揮発性粒子除去率が、テトラコンタン($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{38}\text{CH}_3$)粒子にて 99% 以上[1回/年]
- ・システム全体におけるゼロ点(HEPAフィルタを通した空気)の指示が $0.5\text{個}/\text{cm}^3$ 未満[試験ごと]
- ・CPCサンプル流量が基準値の $\pm 5\%$ 以内の範囲[1回/月]
- ・CPC単独では、ゼロ点指示が $0.2\text{個}/\text{cm}^3$ 以下、大気レベルでの指示が $100\text{個}/\text{cm}^3$ 以上[1回/日]

なお、PCRFは、正確にはParticle concentration reduction factorと呼ばれ、VPR入口における粒子濃度

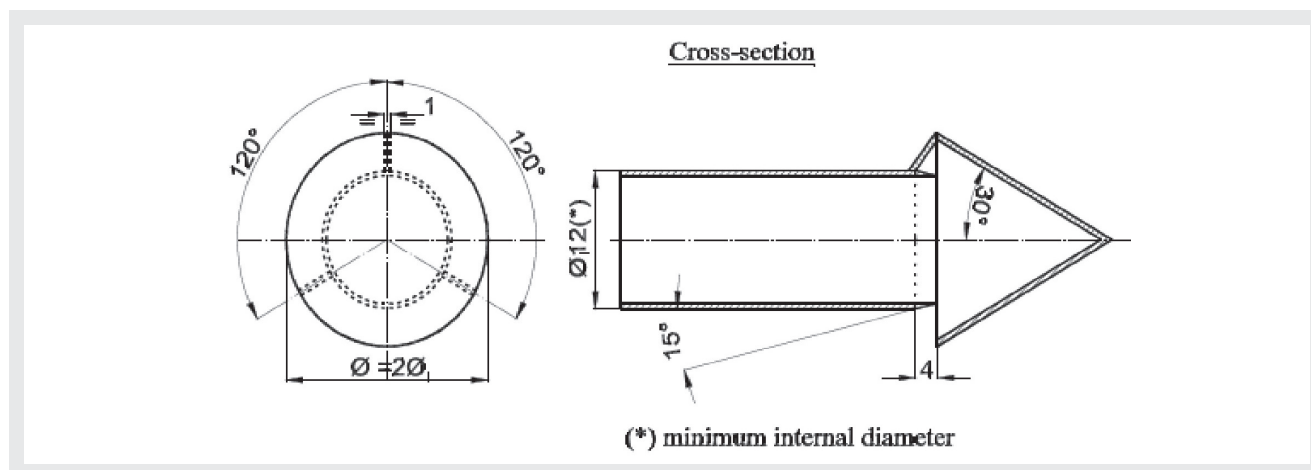


図2 傘付きプローブの例^[1]

$N_{in}(d)$ をVPR出口における粒子濃度 $N_{out}(d)$ で除したものである。

$$Fr(d) = \frac{N_{in}(d)}{N_{out}(d)}$$

VPRには希釈器(PND1, PND2)が含まれるため、PCRFは、希釈器における希釈係数(DF)にVPR全体の固体粒子透過係数を加味した数値になる。VPRのDFを固定した場合の粒子径30nm・50nm・100nmの各PCRFの平均値をMean PCRF(\overline{fr})という。

$$\overline{fr} = \frac{fr(30nm) + fr(50nm) + fr(100nm)}{3}$$

走行距離あたりの排出粒子数(個/km)を算出する場合には、このMean PCRFを用いて、CPCからの粒子濃度出力をVPR入口における希釈前の濃度に換算する。

MEXA-2000SPCSシリーズの概要

開発コンセプト

弊社では、Euro 5/6の前提となる粒子計測法の案が議論され始めた段階から粒子数計測システムの検討を始め、いち早くMEXA-1000SPCSとして製品化した^[3~5]。ただし、ドラフト検討段階での未確定な要求をベースとしていたこともあり、最終的なEuro 5/6の要求よりも広い範囲をカバーする仕様となっていた。多くの機能を持つ分、装置が大型であったため、システムの据え付け・運搬のしやすさにやや難があった。そこで、規制要求が明確になったのにあわせ、より構成をスリム化し規制対応に特化した「MEXA-2000SPCS」シリーズを新たに開発した。

MEXA-2000SPCSシリーズの特徴

図3に、固体粒子数測定装置MEXA-2000SPCSの外観、表1に概略仕様を示す。MEXA-2000SPCSは、規制で要求されているとおりのトンネル希釈計測を前提としている。また、基本機能については、ほぼMEXA-1000SPCSのものが踏襲されている。MEXA-1000SPCSと比較した場合の最大の特徴は架台の小型化で、高さ方向で約1/3を実現している。また、MEXA-2100SPCSは、高温・

高圧になる排気管からの直接サンプリングに対応した、ダイレクト計測専用機である。それ以外の機能や構成は、MEXA-2000SPCSとほぼ同等となっている。以下、MEXA-2000SPCSの例を中心に、シリーズの主な特徴をまとめる。



図3 MEXA-2000SPCS(本体架台)の外観

表1 MEXA-2000SPCSの仕様概要

| 型式 | MEXA-2000SPCS, |
|----------|--|
| 測定項目 | 固体粒子状物質の粒子数 0-10000~0-50000個/cm ³ (装置内希釈後) |
| 装置構成(標準) | 本体架台:揮発性粒子除去部(VPR), 粒子数カウンタ部(PNC)内蔵 制御部:制御PC(ノート型) |
| VPR仕様 | 希釈器(WRCF): 1次希釈器:DF10~200 2次希釈器:DF15 サンプル流量:10L/min |
| PNC仕様 | 検出器: レーザー散乱凝縮粒子カウンティング(CPC) |
| 外形寸法(標準) | 434(W)×731(D)×600(H)mm (制御部・オプションユニット別, 突起物を除く) |

(1)システム構成

MEXA-1000SPCS同様、MEXA-2000SPCSの装置構成はEuro 5/6の推奨フローに準じ、粒子計測に必須となるVPR(PND1, ET, PND2)やCPCはすべて本体架台に収納している。その一方、傘付きプローブでの代用が可能なサイクロンは、外付けのオプションとした。また、MEXA-1000SPCSではDFチェック専用の部品なども標準で内蔵されているが、使用頻度はそれほど高くないことから、これも別ユニットとして分離した。その結果、基本部分の大幅なサイズダウンが可能となり、計測セルでの据え付けや移動の自由度が向上した。

(2)DF範囲の再設定

MEXA-1000SPCSのDF仕様はPND1：10～700，PND2：10～50であり，規制要求に対しかなり余裕のあるものになっている。これに対し，MEXA-2000SPCSでは，PND1：10～200，PND2：15固定という，より規制要求にあわせた設定を選択した。この見直しにより，従来はPND1・PND2両方に採用していた連続希釈器^[3,5]をPND1側のみの使用とすることができ，希釈部の構成を単純化することができた。これは，MEXA-1000SPCSが持っていた高い希釈精度を保ったままで装置を小型化するのにも貢献している。

(3)ソフトウェア機能

既述のように，Euro 5/6では計測の信頼性を確保するための校正・チェックについても規定されている。MEXA-2000SPCSでは，MEXA-1000SPCSと同じく，各種のチェックシーケンスをソフトウェアから制御することができる。以下に代表的なものをあげる。

- ・VPRのPCRF値のチェック
- ・VPRにおける揮発性粒子除去効率のチェック
- ・システムのゼロレベル・大気レベルチェック
- ・CPCサンプル流量のチェック
- ・CPCのゼロレベルチェック
- ・システム・検出器のリニアリティチェック
- ・DFのチェック

なお，Euro 5/6の要求のうち，CPCの感度校正については特別な校正基準が必要なことから，ユーザによるオンサイトで絶対値校正は想定していない。その代替チェックとなるのがリニアリティチェックで，校正時に要求される精度(決定係数)の基準を満たしているかどうかの確認をおこなう。また，DFのチェックは直接には要求されていないが，精度管理上はやはり重要なチェック項目である。

このほか，MEXA-2000SPCSでは，設定されているMean PCRFを用いた粒子数濃度の換算表示など，より最新規制にあわせた機能も追加されている。

(4)オプションラインナップ

MEXA-2000SPCSシリーズでは，さまざまなアプリケーションと性能チェック作業を考慮して，次のように多くのオプションユニットを準備している。

- ・サイクロンユニット(CYU)：外付けサイクロン
- ・セレクトユニット(SCU)：ラインセクタ(サイクロン内蔵)
- ・サンプルリターンユニット(SRU)：トンネルへのサンプル還流ユニット
- ・DFチェッカ(DFC)：DFチェック用
- ・固体粒子発生器(LCU)：リニアリティチェック・PCRFチェック用
- ・揮発性粒子発生器(VGU)：揮発性粒子除去効率チェック用

図4に，オプションユニットを含めたシステム配置例を示す。このように，MEXA-2000SPCSシリーズをオプションと組み合わせることで，規制準拠のトンネル希釈サンプリングだけでなく，排気管からのダイレクトサンプリングなど幅広い計測が可能である。

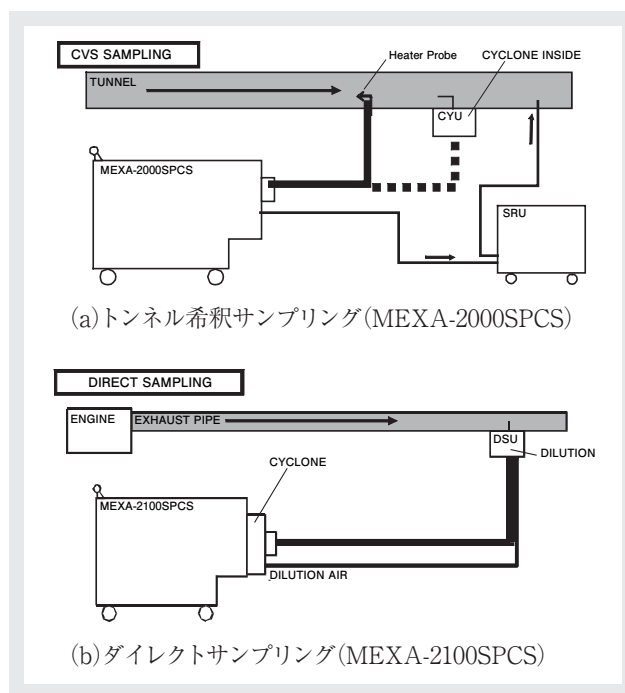


図4 計測アプリケーションの例

MEXA-2000SPCSシリーズの基本性能

固体粒子のリダクションファクタ

図5に，PCRFの評価方法を示す。固体粒子の発生には，上述のLCUを使用した。LCU内では，NaCl溶液をアトマイザで噴霧し，液滴中の水分をドライヤで除去して，NaClの固体粒子を発生させている。微分型移動度分析装置(DMA)によって発生粒子を分級し，必要な径(30 nm・50 nm・100 nm)の粒子のみを選択する。このサンプルをVPR経由でCPCに導入したときとVPRをス

スキップしたときとの粒子濃度を比較し、PCRfを算出する。

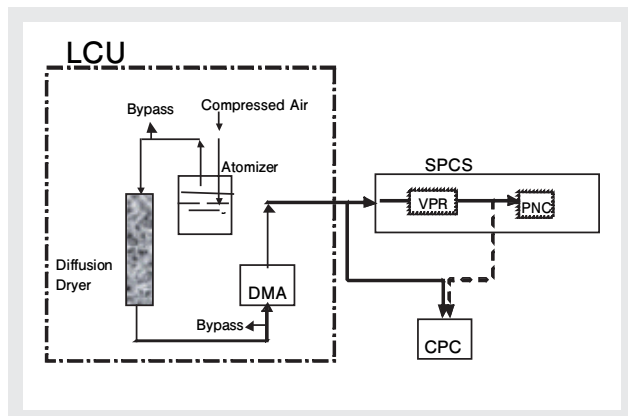


図5 PCRfの試験

図6に、DFの設定を150～3000の範囲で変化させ、PCRfを評価した結果を示す。横軸は粒子径(Dp)、縦軸は粒子径100 nm時のPCRf (fr(100 nm))で正規化した各粒子径のPCRfである。なお、規制で要求されている範囲は、fr(30 nm)、fr(50 nm)について、fr(100 nm)を基準にそれぞれ95%～130%、95%～120%である。図より、いずれのDF設定でもこの条件を十分満足していることがわかる。

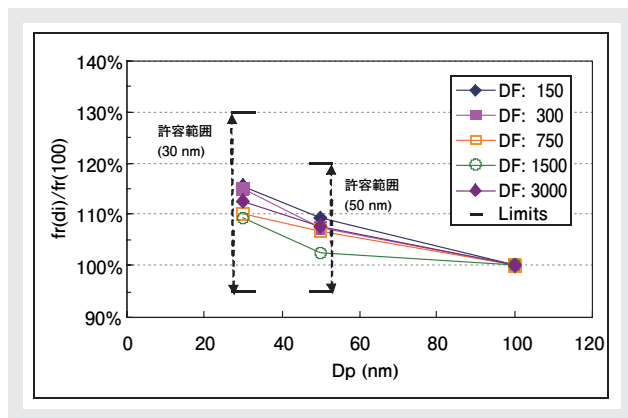


図6 PCRfの評価結果

揮発性粒子の除去効率

図7に、揮発性粒子除去効率の評価方法を示す。揮発性粒子として指定されているテトラコンタン粒子は、VGUを用いて発生させる。PCRf計測時と同様、DMAによって発生粒子を分級し、VPR経由の場合とスキップした場合の粒子濃度から除去効率を求める。

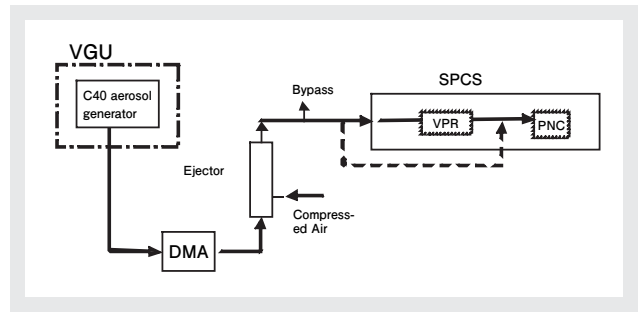


図7 揮発性粒子除去効率の試験

図8に、ETの温度設定を300～380℃の範囲で変化させ、粒子径30 nm・50 nm・100 nmの揮発性粒子の除去効率を評価した結果を示す。低温側でやや効率が下がる傾向があるが、いずれの条件でも規制で要求される99%以上を満足している。実際の温度制御範囲は350±20℃であり、この範囲であれば少なくとも99.5%以上の効率が確保できていると推測される。

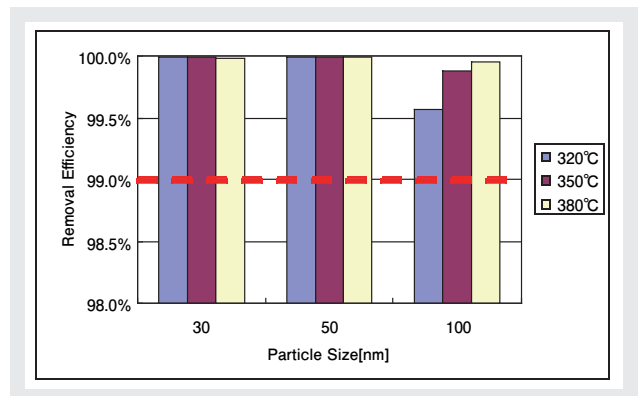


図8 揮発性粒子除去効率の評価結果

希釈係数の精度

MEXA-2000SPCSシリーズでは、DFCおよび外部のガス分析計と接続することで、スパンガスによるDF値の実測が可能である。図9に、この機能で求めたDF値の設定値に対する誤差(%)を示す。評価の対象としたのはSPCS1～SPCS2の2式である。ガス分析計は化学発光検出(CLD)方式のNO計、スパンガスにはNOを用いた。図より、150から3000という広範囲の希釈係数において、誤差は±5%以内であったことがわかる。なお、Euro 5/6において現在DFの精度は規定されていないが、ドラフト段階では誤差許容範囲±10%という数値が提案されていた。

図10に、DFと粒子径100 nmでのPCRF (fr (100 nm))との相関を示す。回帰式の傾きは1よりやや大きい1.0323となったが、PCRFにはVPRにおける粒子透過係数も含まれることから妥当な値と考えられる。決定係数は0.9996と極めて良好であり、DF精度の確保がPCRFの安定にもつながることを示唆する結果といえる。

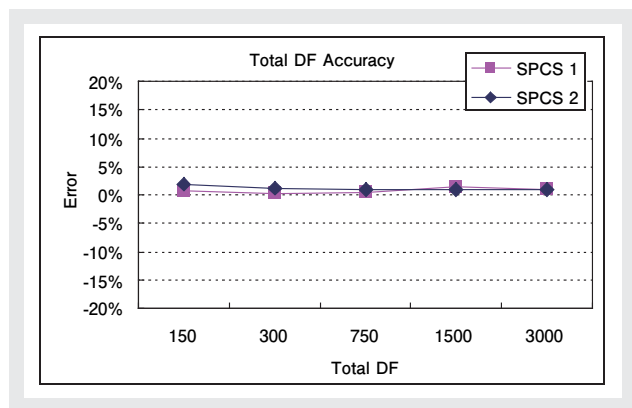


図9 DF精度の評価結果

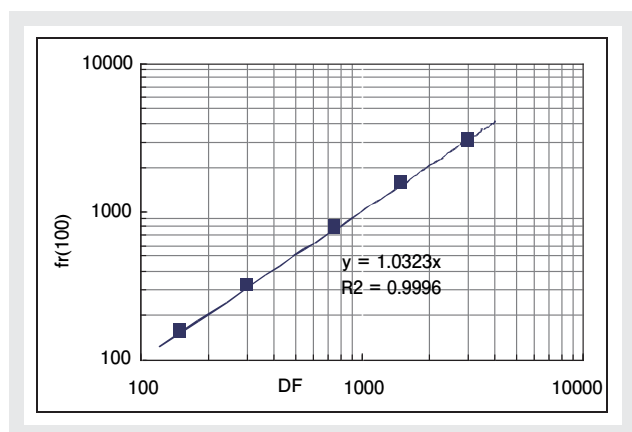


図10 DFとPCRFの比較(粒子径100nm)

実車によるMEXA-1000SPCSとの比較

以下、ディーゼル車(またはエンジン)および直噴ガソリン車を用いて、MEXA-1000SPCSとMEXA-2000SPCSの相関試験を実施した例を紹介する。

試験のセットアップ

図11に、車両試験時のセットアップの例を示す。エンジン試験の場合も、マイクロトンネルを使用している以外、構成はほぼ同等である。トンネルからのサンプルの採取には、傘付きプローブを使用した。その出口を2つに分岐し、それぞれ47℃の加熱配管でMEXA-1000SPCSおよびMEXA-2000SPCSと接続した。また、MEXA-2000SPCS側にはサイクロンは搭載されていないため、条件をそろえる意味でMEXA-1000SPCSの内部サイクロンもスキップした。さらに、VPRのDF設定は両システムで同一とした。

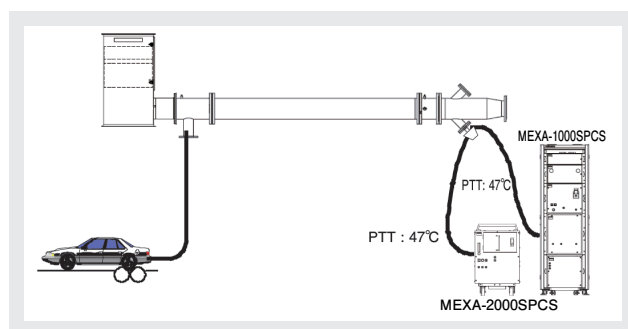


図11 実車試験時のシステムセットアップ

粒子数濃度の連続測定

図12に、排気量2.0Lのディーゼル車(DPF付き)による粒子数濃度の連続計測例を示す。走行モードはJC08である。両システムによる粒子数濃度結果は、ピーク位置・

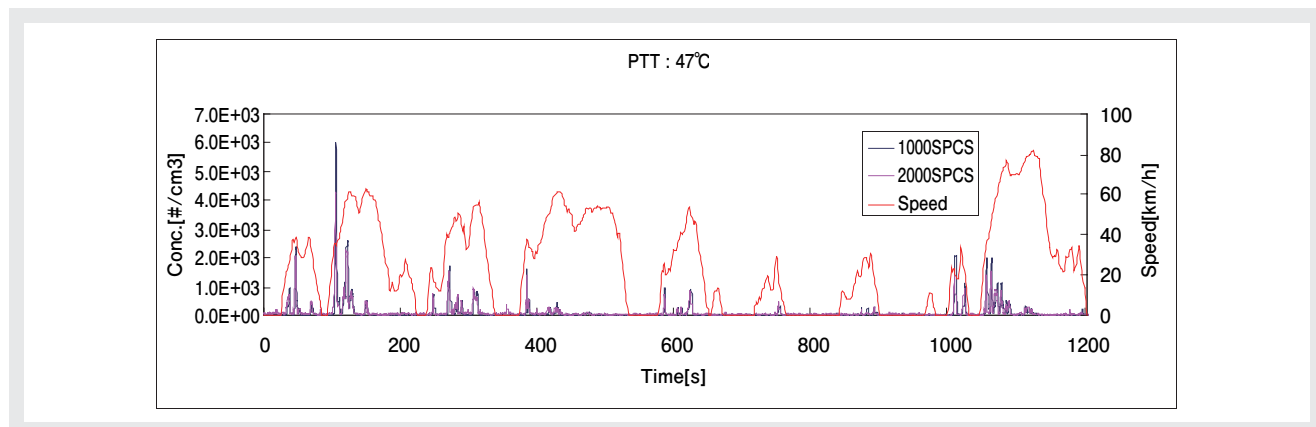


図12 連続測定結果の比較(ディーゼル車, JC08)

強度とも互いに良く一致していることがわかる。モード全体の総排出粒子数としても、MEXA-1000SPCSで 2.29×10^{10} 個/テスト、MEXA-2000SPCSでは 2.36×10^{10} 個/テストと、ほぼ同等の結果であった。

総排出量での比較

図13に、排気量2.0Lのディーゼルエンジンで計測した場合の総排出粒子数比較を示す。JC08モードおよび定常モードを条件を変えて運転し、DPFを装着する場合、しない場合の両方でデータを採取した。図より、DPFの有無により排出粒子数には $10^4 \sim 10^5$ 倍という大きな開きがあるにもかかわらず、その広い範囲にわたって両システム間に良好な相関がみられることがわかる

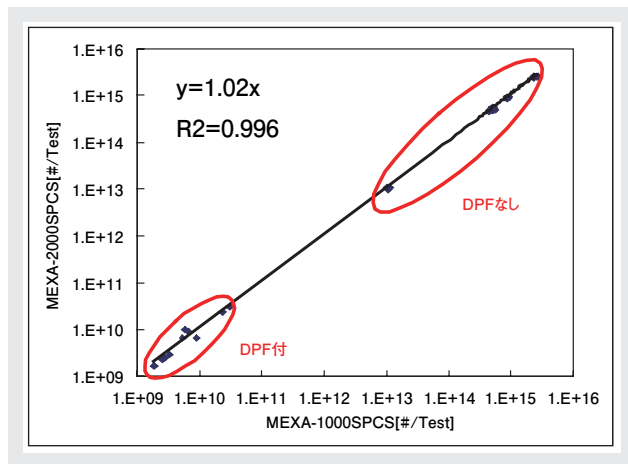


図13 総排出粒子数での比較(ディーゼルエンジン, 2.0L)

モードの違いによる影響

図14に、直噴ガソリン車両を供試車両として、FTP75, NEDC, 定常運転の各モードで両システムを比較した結果を示す。いずれの走行モードでも両システムの差は5%以内で、計測結果は非常に良く一致している。すなわち、始動時のエンジン状態や流量・排気温に差がある状態でも、両システムの相関性は維持できていることがわかる。

まとめ

本稿では、欧州の次期規制であるEuro 5/6にターゲットを絞った、新しい固体粒子数測定装置MEXA-2000SPCSシリーズについて紹介した。MEXA-2000SPCSシリーズは、従来機種であるMEXA-1000SPCSの高い機能はそのままに、仕様や構成をより規制にあわせて絞り込み、大幅なサイズダウンを実現している。さらに、トンネルCVS希釈計測を前提としたMEXA-2000SPCS, ダイレクト計測用のMEXA-2100SPCSというシリーズラインナップと豊富なオプションにより、規制対応から研究開発用途まで、さまざまな計測アプリケーションへの応用が可能である。

粒子数計測は、今後、他の車両カテゴリ、他地域の規制にも取り入れられる可能性があり、ますます注目が高まると予想される。エンジンおよび後処理装置の研究開発分野における低濃度粒子計測に、MEXA-2000SPCSシリーズがMEXA-1000SPCSともども貢献できることを期待している。

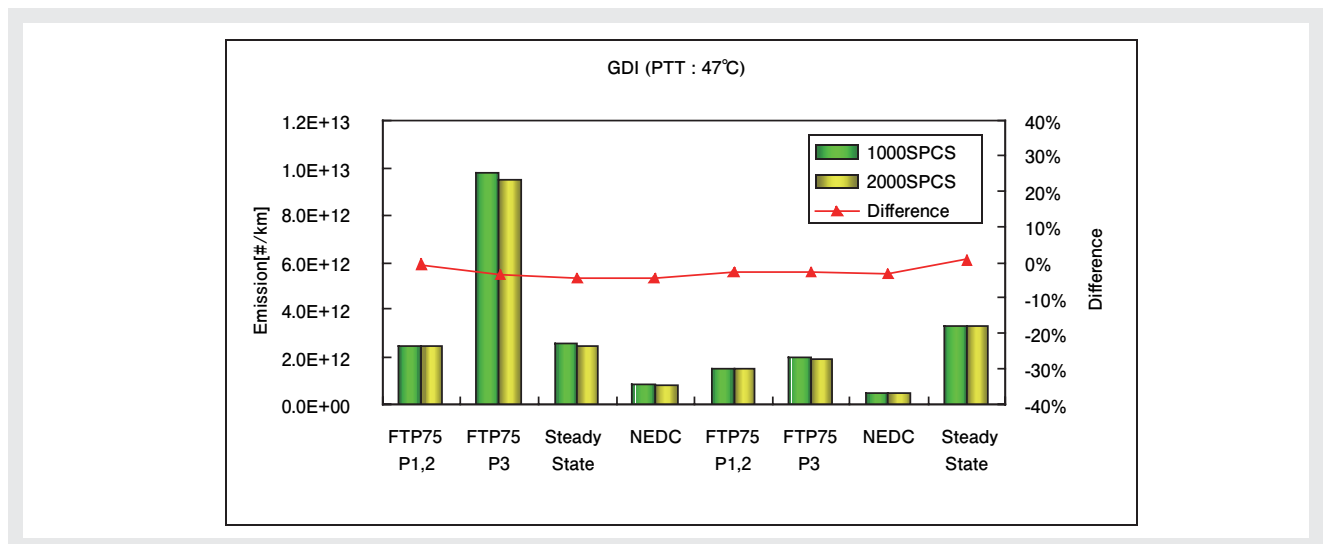


図14 各種走行モードの比較(直噴ガソリン車)

略語一覧

CPC : Condensation Particle Counter
 DF : Dilution Factor
 DMA : Differential Mobility Analyzer
 DPF : Diesel Particulate Filter
 ET : Evaporation Tube
 PCRf : Particle Concentration Reduction Factor
 PMP : Particle Measurement Program
 PNC : Particle Number Counter
 PND : Particle Number Diluter
 SOF : Soluble Organic Fraction
 SMPS : Scanning Mobility Particle Sizer
 VPR : Volatile Particle Remover

参考文献

- [1] UN/ECE Regulation No.83, Revision 3, Amendment 2;
<http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29regs/r083r3a2e.pdf>
- [2] COMMISSION REGULATION (EC) No.692/2008;
<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:199:0001:0001:EN:PDF>
- [3] 浅野一朗他：エンジン排出固体粒子数測定システムの開発, 自動車技術会論文集, Vol.30, No.3, p.43-48(2007)
- [4] 浅野一朗他：固体粒子数測定システムによるスタート粒子排出挙動の調査, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.115-07, p.13-16(2007)
- [5] 日下竹史他：連続固体粒子数測定装置 MEXA-1000SPCS, Readout No.34, p.50-59



篠原 政良

Masayoshi Shinohara

株式会社 堀場製作所
 自動車計測システム統括部
 自動車計測開発部
 ジョブリーダー
 工学博士



大槻 喜則

Yoshinori Otsuki

株式会社 堀場製作所
 自動車計測システム統括部
 自動車計測開発部
 PM/sampling チーム