



## DMS500 を用いた DPF 測定

2 ステージのダイリューションシステムを内蔵する Cambustion の DMS500 は、ダイナミックレンジが広く、加熱サンプルラインのオプションが次に示す色々な DPF のアプリケーションに比類なく適しています：

- ・ 効率測定
- ・ DPF のロードと再生の研究
- ・ 破損フィルタの検出

本アプリケーションノートは、DMS500 を用いてこのような測定を如何にして行うか、また得られたデータに期待できる特徴等について述べます。小型または大型ディーゼルエンジンに取り付けた DPF (別名 FAP または DPT) や CRT (連続再生トラップ) システムと、車両またはエンジンダイナモメータでテストすることにも同様に関連します。

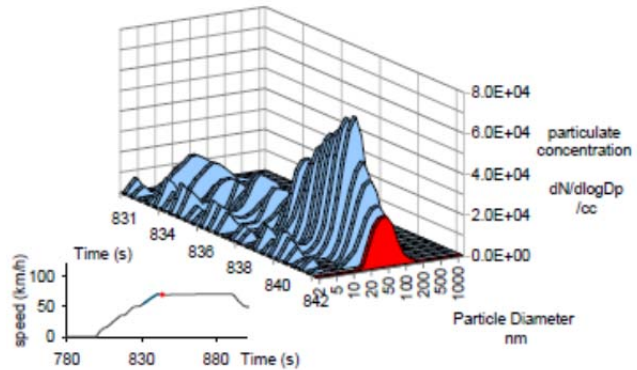


Fig. 1 : DMS500 で測定した DPF 下流側の粒度分布：高速の加速時に空間速度が速くなると、凝集モード粒子の吹く抜けが起こります。

このようなアプリケーションでは DPF の上流側と下流側の測定が必要となるため、ダイリューショントンネルからのサンプルではなく、エキゾーストシステムからダイレクトに吸引する必要があります。これにはかなり広いダイナミックレンジや、サンプルポイントの出口における幅広い温度、圧力および湿度の影響を受けないことが求められます。通常のエミッションサイクルテストでこれらの測定を行うには、トランジェント状態で起こる現象を高速で捉える高応答特性の測定器が求められます。

## 推奨する測定機器類

## 2 ステージのダイリューションシステムを内蔵した DMS500

- ・ 他の余分なサンプリング機器を装備すること無く、後処理しないエキゾーストガスでのダイレクト測定に対応できます；外付けのダイリューションシステムより便利であり、その理由は：
  - 内蔵のダイリューションシステムは、DMS のユーザインターフェースでコントロールします。
  - 適用した希釈比に対し、濃度測定が DMS で自動的に補正されます。
- ・ DMS500 の応答性は、現在入手可能な如何なるウルトラファイン粒子測定器より高速です。
  - トランジェント現象を正確に解析でき、モダル解析に対するマス流量の正確な時間合わせができます。
- ・ DMS は全粒度分布を測定し、カーボン系の凝集モード粒子を、液体系の核生成モード粒子から識別します。また従来のマス測定に併せ、直径による粒子濃度のリアルタイムウェイトリングを行うこともできます。
- ・ 比類のない新しいソフトウェア (アプリケーションノート DMS06 参照) は、核生成モード粒子と凝集粒子モード粒子を自動的に識別し、それぞれのモード粒子をマスまたは粒子数でリアルタイム (DMS01 v2 参照) に出力することができます。
- ・ 2 種類のゲインを有する DMS はダイナミックレンジが広いいため、高濃度の核生成モード粒子中に共存する、低濃度のカーボン系凝集モード粒子測定を行うことができます。

DMS のリモートサイクロン (オプションの加熱サンプルラインに付属) は計測時の応答性をより良いものにし、粒子の凝縮とサンプルラインの汚れを少なくします。この部分には希釈比の低い環状のプライマリダイリューションが内蔵されています。

このオプションの加熱サンプルラインを推奨します。DMS500 を加熱して使うと、凝縮の心配をすることなく、湿り気が多いエキゾーストガスの測定が可能となります。また粒子数濃度が非常に低い DPF 下流側の測定にも利用できます。

上流側と下流側の同時計測には 2 台の測定器を使用します。開発時間を大幅に減らすのと同様、エンジンアウト側における粒子排出の再現性はあまり良くないため (特に EGR 量の変動や周囲の環境により)、DPF の効率測定精度を大幅に改善します。

### DPF 上流側の測定

DPF 上流側のエキゾーストガス温度は比較的高くて回転数や負荷の変動による急速な圧力変動を受けやすく、この部分では高濃度の粒子数濃度となっています。エキゾースト配管に取り付けた継手に、長さ 1/4 インチの金属配管でリモートサイクロンを接続することをお奨めします。この配管を流れる流量は比較的少ない (DMS のサンプル流量をプライマリダイリューションの希釈比で割り算した流量) ので、配管による人為的な冷却と応答性の悪化を防ぐため、できるだけ短くする必要があります。関心ある粒径の等速吸引では、サンプルチューブの切り口が流れに向き合い、境界層を超えてエキゾースト配管の中へ突き出すのがベストですが、さほどきわどいものではありません。

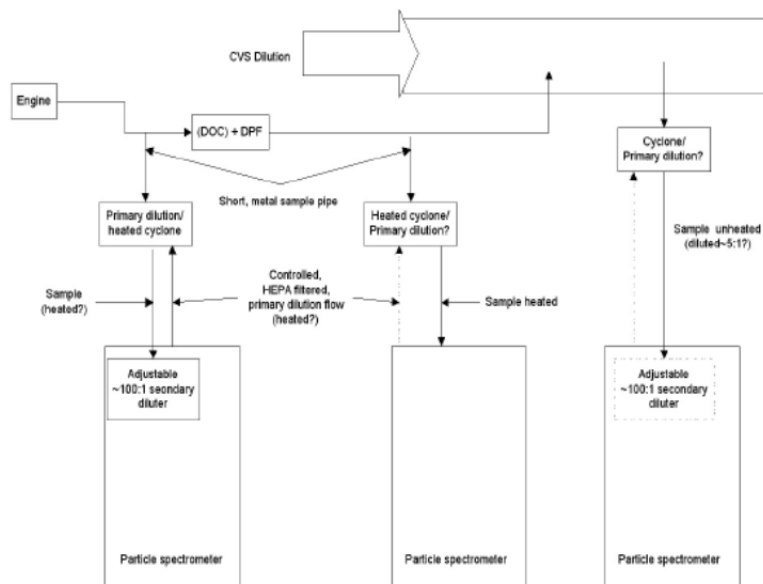


Fig. 2 : DPF 前後, および CVS トンネルからの推奨サンプリング位置

サンプルオリフィスは加熱サンプルラインの中, または非加熱のリモートサイクロンの中に取り付けることとします: このように取り付けると, サンプルラインの中が DMS のカラム (分級部) と同じ圧力になって応答性を維持し, 凝縮と粒子の損失を最小限にします。DMS のサンプルオリフィス前後では差圧 ( $\Delta P$ ) が大きくなり, ほぼ大気圧となっている他の測定器に較べて過渡的なサンプル圧力の変動に対する感度を下げています。

リモートサイクロンの中にはプライマリダイリュータが内蔵されています。プライマリダイリューションの希釈比は, 「4」または「5」に設定することを推奨します: この希釈比は DMS500 のユーザインターフェースで選定し, ダイリューションコレクション (希釈比の掛け戻し) をイネーブルにすると, 実粒子濃度の自動計算を行います。プライマリダイリューションを使うには, DMS500 にオイルフリーの圧縮空気を供給する必要があります; この空気を濾過するフィルタは本機に内蔵されています。このプライマリダイリューションはエキゾースト配管から吸引するサンプルの量を減らし, サンプルライン内の凝縮を防いで粒子のロスが最小限になるよう, サンプルの温度を下げます。加熱サンプルラインを使用する場合には, DMS のユーザインターフェースでサンプルラインの温度をチェックすることができます (「info」ダイアログボックスの「sample temperature」); フレキシブルチューブの許容最大温度は 150°C なので, エキゾースト配管のサンプルポイントとリモートサイクロン間の金属配管の長さを長くしてこの温度を超えないようにするか, またはプライマリダイリューションを増やします。

本装置のクリーニングを最小限にするには DMS500 を「High」ゲインで使用し、メインユーザインターフェイス画面のダイナミックレンジインジケータが、平均的にグリーンゾーンからはみ出ないようにします。このレベルを超えて連続使用するとカラムの内部へ粒子が付着する危険性が高まり、低レベルが S/N 比を危うくして偽の信号を出力する原因となります。セカンダリダイリューションの希釈比は、グリーンゾーンの信号レベルが得られるよう調整しなければなりません：「dilution correction：希釈率補正」が選定されているとダイリューションが自動補正されます。小型ディーゼルでは通常、セカンダリダイリューションの希釈比を 200 にします；最近の大型ディーゼルでは、これより何倍か低くなります。データ収録中に希釈比を変更することもあります：この希釈比は連続的に測定され、現在値が本機の出力に取り込まれます（「dilution correction」が On になっているならば）：とは言え、多少のトランジェントエラーは発生します。

加熱サンプルラインが取り付けられている場合には、凝縮や核生成モード粒子の形成を少なくする（DPF の上流側はテールパイプエミッションを代表しませんし、分かり難くなっています）ため、更なる備えとして約 60°C、または測定条件に矛盾がないよう DMS がサンプリングしている DPF の下流と同じ温度に設定することをお奨めします。

### DPF 下流側の測定

リモートサイクロンのサンプリングポイントは、エキゾーストガスが十分に混ざり合ったフィルタの十分下流側に取り付ける必要があります：排気管直径の約 10 倍あれば十分です。サンプルライン中の凝縮を防止するため、プライマリダイリューションを約 4 倍にし、最低でもサンプルライン温度を 60°C、そしてカラムを約 40°C に加熱する必要があります。したがって高効率のフィルタでは、加熱サンプルラインが低めの希釈比を可能にするため、感度の改善が期待できます。エキゾーストとリモートサイクロンを接続する非加熱配管の最低長は、サンプルガスの温度が 150°C 以下になるような長さにする（選定されたプライマリダイリューションの値で）必要があります。

「High」ゲインにおけるダイナミックレンジスケールのグリーンゾーン内で平均信号レベルを保つよう、一般的には比較的少なめのダイリューションにします。DPF 付きの乗用車における総希釈比（プライマリ × セカンダリ）は約 40 から、高効率フィルタでは希釈が必要ないこともあります。とは言え、フィルタ下流側の粒子数濃度は、フィルタ上流側に比べて幅広く変化することを心得ることが重要です。サポートマットが冷えているときのフィルタ周辺のリークについては、まったく新しいフィルタでは捕集効率が悪く、空間速度が速いところでの貫通と DPF 再生時に比較的短時間の吹き抜けがありますが、高濃度の凝集モード粒子についてはダイリューションの設定を行う際に考慮しなければなりません。

フィルタ下流側の核生成モード粒子濃度も極めて高くなることがあります（これらの粒子は、ガスの相がフィルタを通り抜ける際に温度の低い排気ガス成分、またはダイリューションの過程で生成される前物質のどちらかで構成されます）。DPF 性能に関する調査の殆どでは、核生成モードが主要な関心事項ではなく、プライマリダイリューションの希釈比を低くしてサンプルラインを推奨温度に加熱し、低圧吸引（サンプルの滞在時間が短くなる）することで核生成モード粒子の生成を最小限にするところです：このようにすることで、関心ある凝集モード粒子の測定がやさしくなります。とは言っても、ある条件では高濃度の核生成モード粒子が生成されることもあります。DMS500 の「Custom」ゲインを設定し、次のような場合に凝集モードの測定を最適化して使用することができます：「Custom」ゲインレンジでエレクトロメータリングの 1 から 8 までを「Low」に設定し、残りを「High」ゲインにします。粒径レンジによってゲインを変えると DMS のデータ処理で自動的に処理され、実際の計測濃度に対してより適正な感度が得られるダイナミックレンジとなります。核生成モード粒子の高濃度では、これらの粒子が液体で非常に小さいため、カラムのクリーニングが必ずしも必要になることはありません。

あるアプリケーションでは、周囲の環境で形成されるのを代表した核生成モードを生成することが要求される場合があります。この場合にはプライマリダイリューションを「5」に設定しサンプルラインを加熱しないと、DMS500 のメインユニット（サンプルラインは大気圧になって滞在時間が長くなる）に取り付けているサンプル流量用のレストリクタが、道路脇で観測される粒子に類似した核生成モードを生成することになります。しかし滞在時間が長くなると、必然的に測定系全体の応答性が悪くなります。核生成モードの生成に関する詳細については Cambustion にお尋ね下さい。

## ダイリュージョントンネルでの測定

テールパイプエミッションの測定も、設備があれば CVS のダイリュージョントンネルを使うこともあります：この測定は従来方式のろ紙測定と比較する、1 秒毎のエミッションデータを用意するときには特に有用となります。トンネルで行われるダイリュージョンは粒子凝縮の危険性を避け、加熱ラインもプライマリダイリュージョンも必要としません。最速の応答性を失わずにサンプルラインの汚れを減らすには、レストリクタ（オリフィス）付きのリモートサイクロンを、ダイリュージョントンネルに近い部分へ取り付ける必要があります。

粒子フィルタを取り付けたダイリュージョントンネル内部の粒子数濃度はあまり高くないため、セカンダリダイリユータ（フィルタ無しのエンジンでは必要になります）を使う必要はありません。

トンネルで行われるダイリュージョンは一般に、高濃度の核生成モード粒子を形成することになります。それ故 DMS500 のゲインレンジ設定を、「custom」ゲインにすると便利かも知れません。フィルタ下流側の測定で述べたようにこの設定では、エレクトロメータのリング 1 から 8 を「low」ゲインにし、その他を「high」ゲインにします。

## データの処理と解釈

ダイリュージョン補正をアクティブにすると、DMS から出力される粒子数濃度がエキゾーストガス中の濃度そのものに相当しますので、計算による濃度の後処理を行う必要がなくなります。テスト室のデータ収録システムを DMS のアナログ出力のひとつに使うことでこれを接続し、約 25nm から 200nm の粒径レンジをトータル粒子数に相当するよう設定します：こうすると殆どの核生成モード粒子を除外し、粒子フィルタ（DPF）効率の高速評価ができるようになります。

比類のない新しいソフトウェア（アプリケーションノート DMS06 参照）は、核生成モード粒子と凝集粒子モード粒子がオーバーラップしても自動的に識別することができ、それぞれのモード粒子の質量を計算し（DMS01 v2 参照）、各モード粒子に比例したアナログ出力として既存の設備機器へ収録することができます。DMS のデータファイルはまた、Excel のアドインツールを使って後処理計算をすることもできます。

DPF の効率は、エキゾーストの上流（CVS トンネルからではなく）とフィルタ下流で測定した粒子数濃度の単純な比をとることで簡単に計算できます。フィルタ前後の同時測定を行った時の濾過効率のほぼ正確なリアルタイム計算は、フィルタ前の測定がフィルタ後の粒子濃度に比べ、DPF 内における滞在時間の遅れをもたずです。

特に効率の計算は、フィルタ後のノイズに敏感です：フィルタ後の平均的な濃度の正確な計算は、測定中のノイズよりかなり高くなるはずで、DMS500 のインターフェースにあるアベレージング機能は、次のことを確かめてから選定する必要があります：データファイルに収録した濃度を平均化することは、データ処理中にノイズの効果的なひずみ修正が行われるため、あまり効率的ではありません。

サンプルの平均化処理を過去に振り返って増やすには、Excel で働く DMS データ処理ツールが、収録されたエレクトロメータの電流を平均化するのに使うことができるので、これを行ってから平均電流を再逆計算します。

DPF のトラップ効率は運転条件やフィルタの状態、および異なるフィルタ間で大きく変わることがあります。いくつかのクリーンなフィルタでは、トラップ効率が 90%以下の特性を示すことがありますが、煤の薄膜層ができると急速に効率が上がります。一方、その他のフィルタでは 99.99%以上の効率となっています。一般に最も悪いフィルタの有効性は、高回転および高負荷で流量が増えると見られるようになります。サポートマットを通過するフィルタ素子周りのリークは、温度の依存性があると思われる場合があります：時によっては熱膨張で素子間の隙間が狭くなるまでのエキゾーストシステムが冷えているときにだけリークが起きます。フィルタからのリークは殆どが低負荷で観られます。フィルタを流れる流量は差圧にリニアな特性を示しますが、リーク箇所からのリーク流量はしばしばフィルタ差圧の平方根に比例するため、エキゾーストガスの流量が低さに比例してリークがより深刻となります。これらのファクタにより、テストサイクル全体で観られる非常に低い累積エミッションは、DMS500 のリアルタイム測定で簡単に検出することができます。

明らかな負の DPF 効率、フィルタ下流側の核生成モード粒子を形成する際にしばしば観られます。このような場合には DMS500 で全領域の測定をすることで、これらの粒子を凝集モード粒子と簡単に区別することができます。この粒子モード識別は、単純な総粒子数をカウントする装置で行うことはできません。

フィルタ効率のダイレクト計算は、DMS の粒子濃度測定から行うことができます。エキゾーストのダイレクト測定からサイクルエミッションを計算するには、瞬時エキゾーストマス流量 (CVS システムで行う測定ではなく、この流量はトータルエミッションにダイレクトに関係します) の掛け算が必要になります。この計算は排気ガス流量信号がエンジンのテスト設備 (エンジン制御システムまたは排気ガス流量計) から得られる場合には、データ解析用のパッケージ、またはスプレッドシートを用いて簡単に行うことができます。この計算が要求される場合には、排気ガス流量の信号を DMS500 のアナログ入力端子に接続することで、DMS のデータファイルに記録される粒子数測定と同期してこの信号を記録することができます。

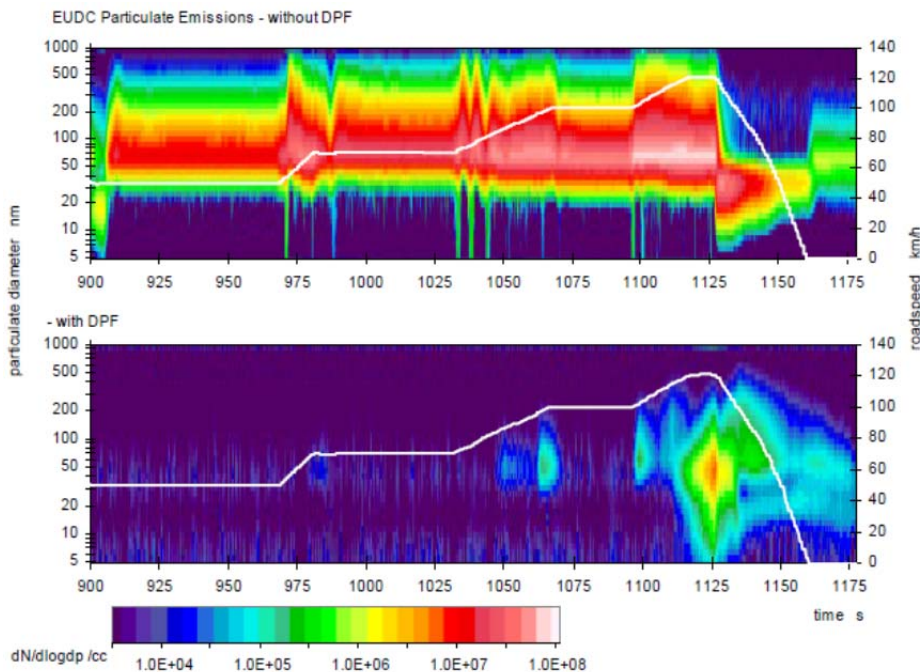


Fig. 3 : EUDC サイクル最終部における DPF 有無のエミッション比較

ヨーロッパのエキストラアーバンサイクルにおける最後の 300 秒における DPF 前後のエミッションを比較した図を Fig. 3 に示します。上記で述べたいくつかの結果がここに図解されています。DPF を取り付けないと負荷状態や無負荷でそれぞれ、凝集モードと核生成モードのエミッション粒子を行き交う典型的な変化を示します。フィルタの下流における粒子濃度は一般に、生エキゾーストガス濃度の 1/3 以下となります。エキゾーストガスの流量が少ないとこのフィルタは、99.9%以上の効率となります。とは言え約 1060 秒と 1100 秒の加速時には、凝集モードの吹き抜けが観られます。

DPF 下流の 1115 秒以降に大きな核生成モード粒子の生成物が観測されています (これらの計測は加熱なしのプライマリダイリューションをして行いました) : このような粒子は触媒またはフィルタの素材が 400°C を超えたときにしばしば観測されます。この粒子の生成は、ドライブサイクルの低温運転の間に放出された硫黄または炭化水素が、触媒またはフィルタに付着することが原因となっています。この運転条件ではこれらの物質が数十秒間に渡って非常に高濃度でエキゾースト中に現れ、ここでは凝集モード粒子よりやや小さいとはいえ、通常では観られない大きな核生成モード粒子を生成しています。希釈なしか、または加熱プライマリダイリューションをすると、この核生成モード粒子の組成が減ることがあるため、凝集モード粒子の濾過作用を調査するに際には、より都合良いものになります。

これ以降は 2 台の DMS500 を使い、DPF の効率<sup>1,2</sup> を同時測定した内容に切り替えます。DPF を搭載した 4 気筒のコモンレール式ディーゼルエンジンに 2 台の DMS500 システムを接続し、トランジェント型のエンジンダイナモメータ上で運転します。種類の異なる幾つかのサンプル DPF を、以下のよう

な条件で調べました：

- ・ 25°Cでエンジンをソークした後、約 550°Cで 600 秒間の再生をかけた DPF
- ・ NEDC ドライブサイクル (#1)
- ・ トラップ基盤へ約 2g のスートをトラップさせるロードサイクル (定常状態)
- ・ NEDC ドライブサイクル (#2)

CVS トンネルを用い、ろ紙を使った一般的な測定を行いました。

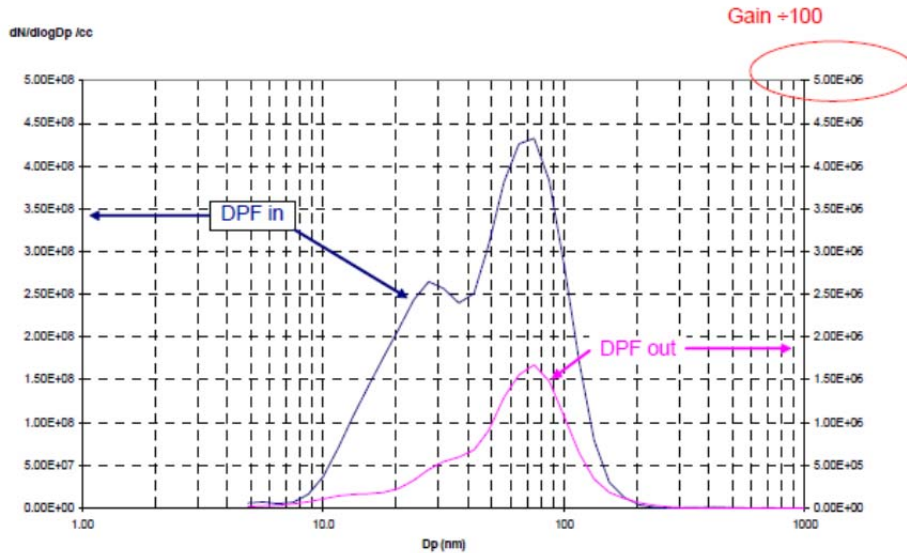


Fig. 4

上記に示す Fig. 4 のグラフは、DPF に流入するガスと、DPF から出てくるガスの平均的なエアロゾルの粒度分布を示しています。このデータはテストしたすべての DPF を代表したものであり、約 75nm のところに凝集モード粒子のピークを持つ特性を示しています。これらのデータはすべて、希釈比の補正を行っています。フィードガス測定ではっきりと見える核生成モード粒子は、テールパイプ側では大幅に少なくなっています。

ここに示す粒度分布のデータは、75nm の dN/dlogDp 値 (粒子数濃度) となっています。トランジェントダイナモメータのドライブサイクルはコンピュータでコントロールされているため、複数テストにおけるエンジンアウト側のエアロゾルの再現性は良好だと思われます。粒径 75nm のエアロゾル (固体エキゾースト物質を代表) 量に対応するトランジェント粒径分布データは、Fig. 5 にプロットした 6 回のテストにおいて良好な再現性を示しています。

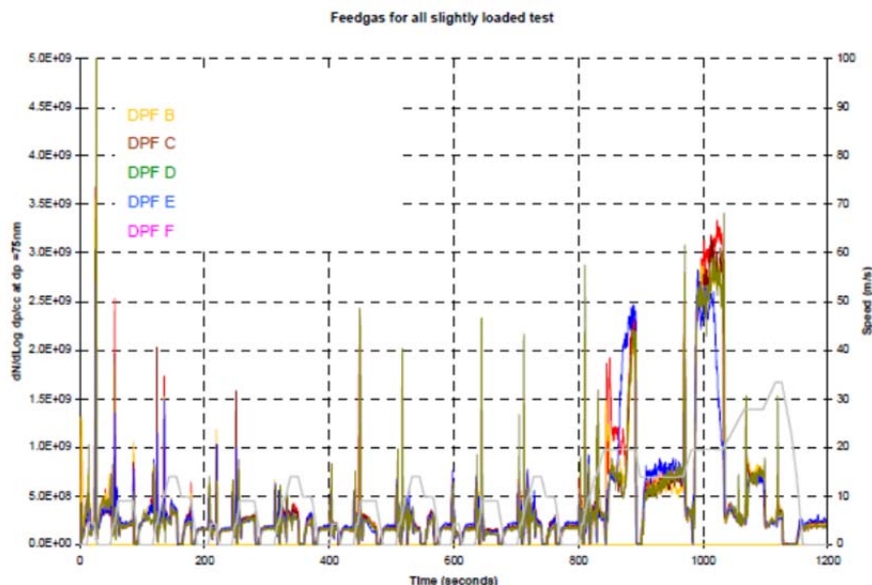


Fig. 5

Fig. 6 のグラフは異なる 6 種類の DPF に対し、トラップを行うクリーニングサイクルに続く最初のドライブサイクルで、75nm (固体物質) に対応する粒度分布のデータをまとめた結果を示しています。Y 軸のゲインファクタは、前のグラフに較べて 1/10 となっています。

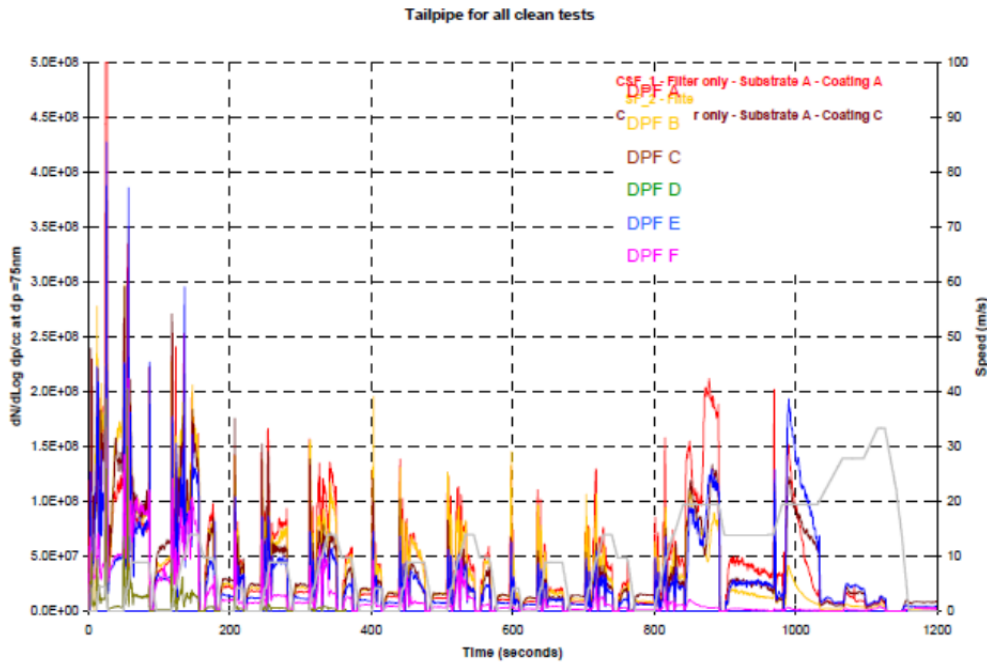


Fig. 6

このデータは色々な DPF により、75nm のトランジェント部分で異なる特性を示しています。

Fig. 7 のグラフは異なる 6 種類の DPF に対し、上記で示した最初のドライブサイクルに続くドライブサイクル、およびそれ以降のロードサイクルに対して 75nm (固体物質) に対応する粒度分布データをまとめた結果を示しています (上述)。Y 軸はフィードガスデータに較べて 1/100 となるよう、10 倍のセカンドファクタにより更に小さくなっています。

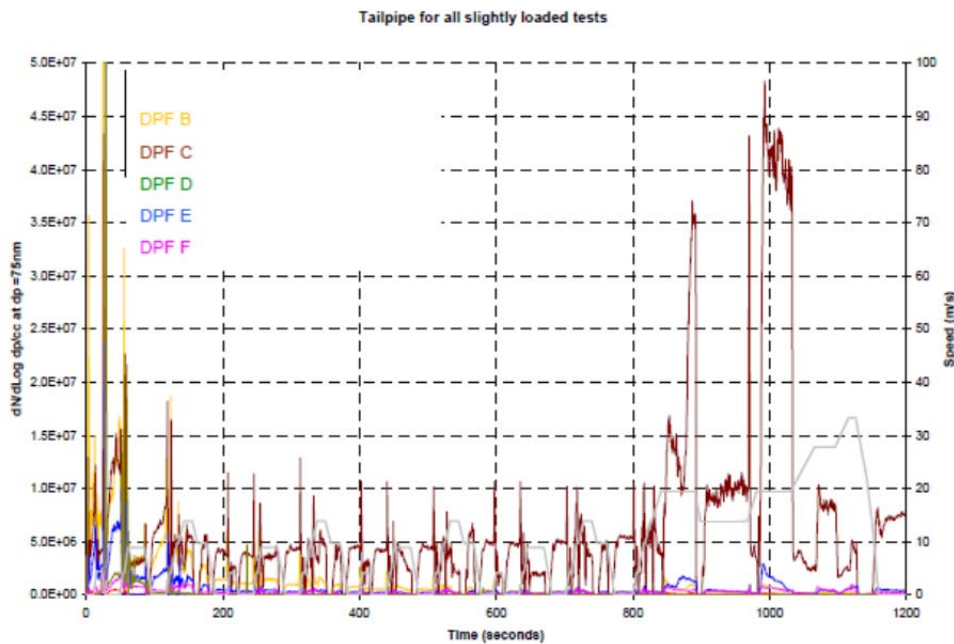


Fig. 7

このデータはテストしたすべての DPF に対するトラップ能力が、少量のトラップロードをした後では著しく改善されているということを示しています。しかしあるものは、他のもの較べて明らかに良くなっています。

「クリーン」な DPF データでの比較では、すべてのトラップに対してロード量が違うところでトラップ性能の改善を示しています。トラップ C のデータは、この DPF にリークがある可能性を示しています。

Fig. 8 のグラフは DPF A に約 2g のロードを行ったときの、75nm のところにおけるエンジンアウトおよびテールパイプアウトのエアロゾルを示しています (Y 軸には 1000 倍のゲインの違いがあります)。

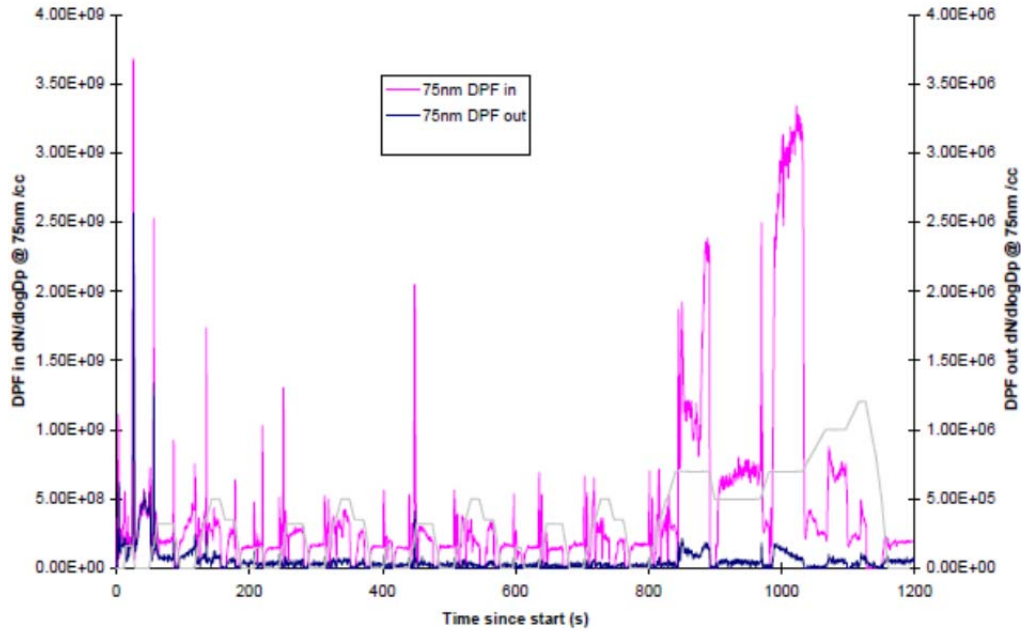


Fig. 8

DPF の捕集効率は、以下のように定義できます：

$$\eta = 100 \times (DPFin - DPFout / DPFin)$$

この式を使って Fig. 9 に示す、捕集効率を計算することができます (粒径 75nm での粒子数をベースとして)。このグラフにはクリーニングサイクル (紺) と、その後のロードサイクル (ピンク) に続いて DPF A のデータが含まれています。

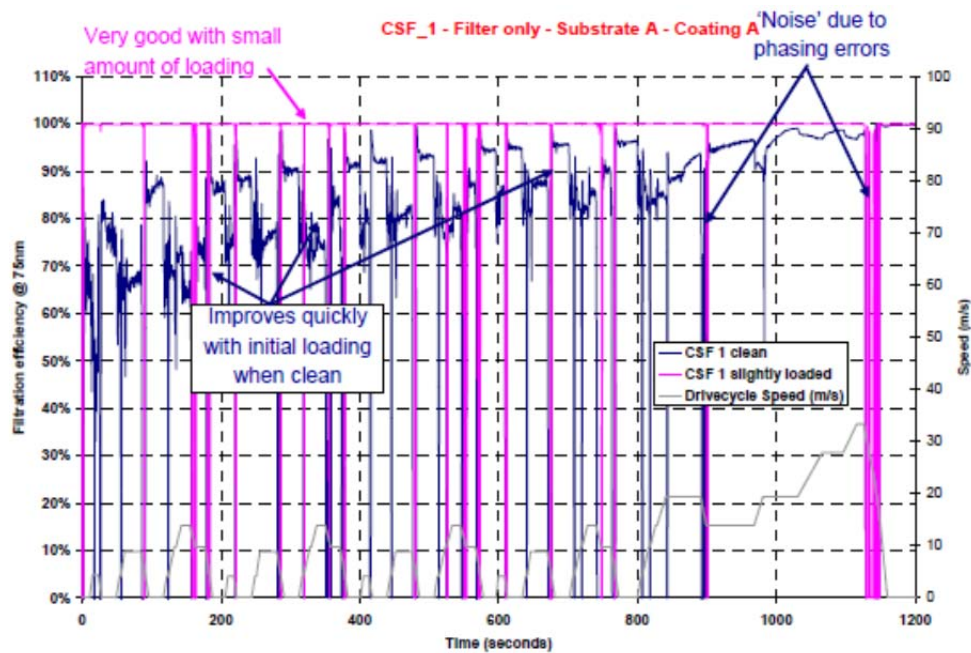


Fig. 9



このデータの非常に急峻な過渡特性に関連したフェーズの違いは、効率を示すプロットデータの「ノイズ」となってしまうことにご留意ください。捕集効率のプロットは明らかに、この DPF へ 2g のスタートロードを行った後に、効率の大幅な改善があることを示しています。更にクリーンな DPF とスタートロードした DPF の何れの捕集効率も、ドライブサイクル運転中の改善が一般に観られます。この捕集効率改善の効果は、以下の Fig. 10 に示す DPF G に対応したデータでも証明されました。

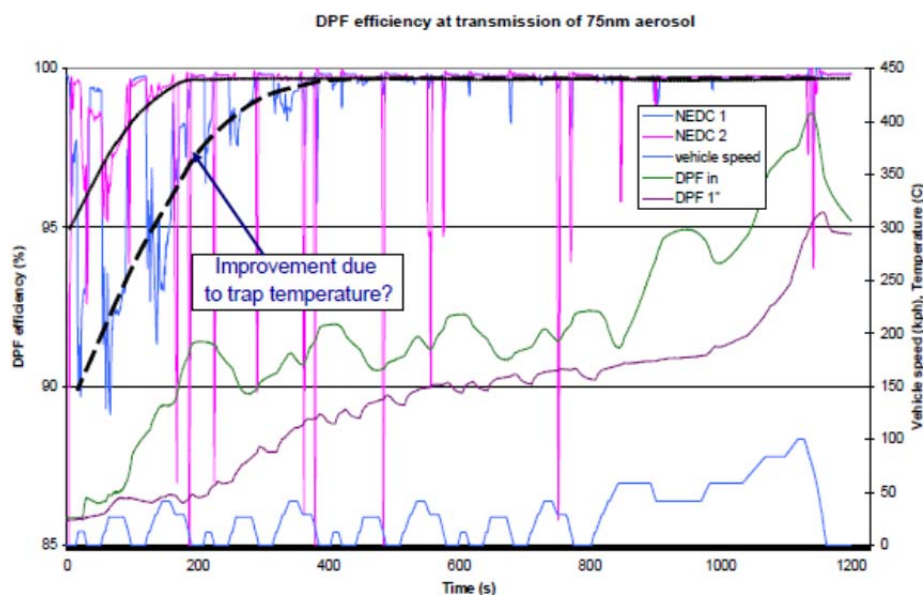


Fig. 10

最後のグラフに示すデータは、DPF G の捕集効率が約 2g のスタートロード後では改善していることを示していますが、DPF A に較べてかなり悪くなっています。すべての DPF では一般に、NEDC 運転中での効率改善を示しています。この改善の軌跡は、概して DPF の入口や、DPF の入口から 1 インチ奥まったところで測定したエキゾースト温度と一致しています。DPF が暖まった時のフィルタ性能の明らかな改善は、温度で拡散が増加したことによるものと思われます（高温で密度が低くなり、滞在時間が減ったにも拘わらず）。

## 要約

DPF や CRT の性能を測定するのに、DMS500 を使えることが証明されました：

**DPF の上流** — リモートサイクロン、内蔵式の 2 ステージ型希釈器、およびできれば加熱サンプルラインを DMS500 と共に使うと、次のことに対応できます：

装置内部やサンプルライン内の凝縮を防止する

排気ガス後処理システムからの少量サンプル抽出

**DPF の下流** — DMS500 の加熱サンプルラインや一次希釈器、およびオプションの二時希釈器を用い、核生成モード粒子と凝集モード粒子で別々のゲインを設定すると：

過渡時の吹き抜けがある低濃度の凝集モード粒子や、核生成モード粒子の形成等ダイナミックレンジの広い測定

凝縮の防止

秒単位毎の DPF 効率測定

**CVS トンネル** — 次の測定には DMS500 に内蔵の二時希釈器を使います：

サイクル全体に渡るフィルタ捕集マス測定的相关性

核生成モード粒子と凝集モード粒子の識別

**データ処理** – DPF 効率の計算, ダイレクトエキゾースト測定からマス流量を測定してトータルエミッションを計算, マス計算した粒子のリアルタイムアナログ出力を他の機器へ送る

上記のことを以下の表に整理すると：

	DPF 上流 –ダイレクト	DPF 下流 –ダイレクト	DPF 付きで トンネル	DPF 無しで トンネル
ハードウェア				
<i>DMS500</i>	●	●	●	●
リモートサイクロン	●	●	● 推奨	● 推奨
加熱サンプルライン	● 推奨	● 推奨		
ダイリューション				
プライマリ	4	0 – 4	不要 (除く CVS)	不要 (除く CVS)
セカンダリ	50 – 200	0 – 20	不要	50 – 500
トータル	200 – 1000	0 – 40	不要	50 – 500
ゲインレンジ				
High	●			●
Custom		● (≤8 low, >8 high)	● (≤8 low, >8 high)	
アプリケーション	DPF の効率測定		フィルタとのマス相関	
	DPF のマスロード	DPF の不良品診断		エンジンの キャリブレーション
	エンジンの キャリブレーション			
DMS の主な優位点	低サンプル 流量	ダイナミックレンジが広い		
	生ガスサンプリングが可能			
	超高速応答特性			
	自動モード識別とマス計算			
	既存設備やデータ収録システムとの統合が容易			

その他の情報やご不明な点につきましては Cambustion 宛に問い合わせるか, または [www.cambustion.co.uk](http://www.cambustion.co.uk) のサイトをご覧ください.

1 Diesel Particulate Filter Performance evaluation with Fast Aerosol Spectrometers N. Collings, T. Hands, G. Inman, 16th Regional Conference of Clean Air and Environment in Asian Pacific Area, Japan 2005

2

Real-Time Diesel Particulate Filter Efficiency and Mass Measurement From Spectral Data. T. Hands, C. Nickolaus, J. Symonds, American Association of Aerosol Research, Austin, USA 2005