

オパシメータによるディーゼルエンジンの排出ガ斯特性の把握

位田晴良*・上嶋敏裕*

Grasp of Exhaust Gas Characteristic of Diesel Engine by Using Opacity Meter

Haruyoshi Ida and Toshihiro Uejima

The grasp of the exhaust gas characteristics in various operating conditions is important for the development of the exhaust gas purification technology of diesel engines. However, the super low mass PM analyzer, which is expensive and whose operation is difficult, is necessary to measure accurately the amount of PM included in the exhaust gas. On the other hand, optical penetration type smoke meters (opacity meters) have been introduced to car inspection instead of optical reflection type smoke meters. Opacity meters can measure PM comparatively easily. In this paper, the grasp of the exhaust gas characteristics of the diesel engine by using opacity meter is examined. As a result, the influence on the PM measurement value by using opacity meter is clarified.

Keywords: Diesel Engine, PM Measurement, Opacity Meter

1. 緒言

ディーゼルエンジンの改良は、動力性能の向上は当然のことながら、エンジンから排出される粒子状物質（PM : Particulate Matters）など有害物質の低減技術が求められている。そのため、エンジンの運転条件に対して排出ガ斯特性を把握することが重要である。排出ガスに含まれるPMの計測手段として、部分的に気化不十分となった燃料粒が火炎に曝され分離した炭素である煤（Soot）、未燃焼の燃料やオイルなど有機溶剤可溶成分（SOF : Soluble Organic Fraction）、硫黄酸化物（Sulfate）を分離し、それぞれの量を分析する方法がある。しかし、この方法は、操作に慣熟を必要とする大規模な設備が必要である。

一方、従来の自動車車検制度では、ディーゼル車の排出ガスによるフィルタの汚染度でPM排出量を判断する光反射式スモークメータ（スモークメータ）が使用されている。このフィルタの汚染度は、おもにPMに含まれるSootによる着色に依存している。しかし、近年のディーゼル車に対する排出ガス規制の強化とそれに伴う排出ガス低減技術の向上により、最新技術が導入されたディーゼル車から排出されるPMおよびPMに含まれるSootは微量であり、相対的にPM中のSOFの割合が増加する傾向にある。これに対しスモークメータは微量なPMやSOFの計測が困難であるとされている。そこで現在では、微量なPMの計測が可能であるとして、光透過式

* 機械工学科

スモークメータ（オパシメータ）が導入されている．オパシメータは光を直接排出ガスに照射し，吸収，散乱される光の強度から PM 排出量を計測する．これらスモークメータおよびオパシメータは超微量 PM 分析装置と比較すると，PM に含まれる各成分の分離計測はできないものの操作が容易である．

本研究では，超微量 PM 分析装置，スモークメータおよびオパシメータを用いて小型ディーゼルエンジンの PM 排出量を計測し結果を比較する．この比較によって，超微量 PM 分析装置が示す排出ガス特性に対して，スモークメータおよびオパシメータが示す PM 検出傾向が一致することを確認し，スモークメータおよびオパシメータによる PM 計測が，超微量 PM 分析装置を用いない簡易的な排出ガス特性の把握方法として有効であるか検討する．

2. 小型ディーゼルエンジンによる性能試験

2.1 実験方法

実験装置は小型ディーゼルエンジン，負荷装置および排ガス計測装置から構成される．この装置においてエンジン回転数および負荷（正味平均有効圧）を安定運転不能となるまで変化させた場合のPM排出量を計測した．このPM排出量の計測において，スモークメータおよびオパシメータを用いた測定値と超微量PM分析装置を用いた計測値を比較した．超微量PM分析装置では，PMを専用フィルタへ3分間サンプリングし，その後ガス化により排出量が求められる．本研究においては超微量PM分析装置（HORIBA MEXA-1370PM），スモークメータ（BANZAI ZEXEL DSM-10N）およびオパシメータ（BOSCH RTM215J）の3種類の計測器による比較を行うが，超微量PM分析装置による計測値が最も正確であるので¹⁾，これを比較基準とする．

また，PMの生成状況を推定するため，エンジン性能（燃費，排気温度，シリンダ圧力）ならびにNO_x濃度を計測し燃焼状態の確認を行った．さらに，異なる使用燃料がスモークメータおよびオパシメータを用いた場合の計測値に与える影響を確認するため，バイオディーゼル燃料（BDF）を用いることにより，軽油を使用した場合との計測結果を比較した．

2.2 測定用エンジン

実験に用いたディーゼルエンジンの諸元をTable 1 に示す²⁾．

Table 1 Specification of the diesel engine used in this work

Engine type	Horizontal, water cooled, 4 stroke
Combustion chamber	Direct injection
Cylinder / Bore and stroke [mm]	Single / 102 × 105
Displacement [l]	0.857
Maximum power [kW] {PS} / Engine speed [min ⁻¹]	12.5 {17.0} / 2400
Compression ratio	17.8
Air charging	Naturally aspirated

2.3 スモークメータ

スモークメータに内蔵されたサクションポンプにより，エンジンからの排出ガスがサンプリングプローブを通じて一定量吸引される．この際，排出ガスはフィルタを通過しPMが捕集される．PMが付着し汚染されたフィルタに光源から光を照射し，放射輝度率を検出にすることにより汚染度（黒煙濃度）を計測する（Fig.1）³⁾．

なお，汚染度[%]と放射輝度率[%]の相関は，JIS D 1101 により以下のように定義されている．

$$\text{汚染度}[\%] = 100 - 1.15 \times \text{放射輝度率}[\%]$$

また，フィルタについては，放射輝度率が 90

±1.5%のものを使用することになっている．したがって，スモークメータを用いた計測においては，未使用フィルタの汚染度は以下の通りである．

$$\text{汚染度} = 100 - 1.15 \times 90 = -3.5\%$$

つまり，汚染度-3.5（-1.775～-5.225）%の未使用フィルタをスモークメータの排出ガス導入路中に設置し，PMを捕集する．

2.4 オパシメータ

予め決められた長さの測定室にエンジンからの排出ガスを導入し光を透過させる．発光部からの光は排気ガス中の煙で減衰されて受光部に入る．この減衰された光量からPMによる排出ガスの汚染度（光吸収係数） $[\text{m}^{-1}]$ を計測する（Fig.2）⁴⁾．

2.5 供試燃料

使用する燃料はジャパンエナジー社製の2号軽油および油籐商事社製のBDFとした．BDFは菜種油等の植物油および廃食用油を原料として製造されたディーゼル燃料である．

これら2種類の燃料の主な性質をTable 2に示す^{5,6)}．BDFは

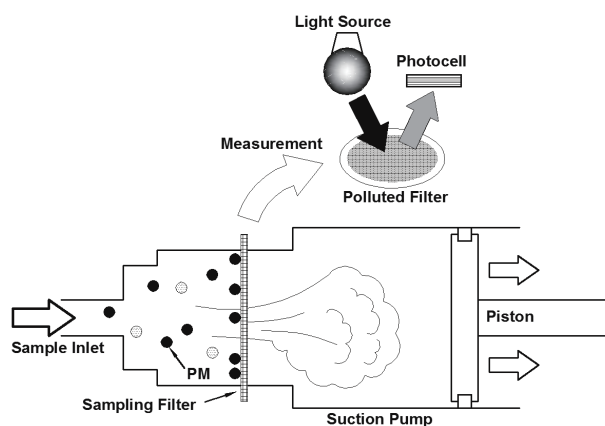


Fig.1 Schematic of smoke meter measurement system (optical reflection type)

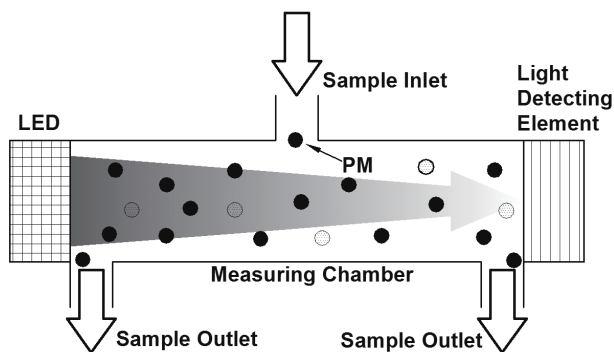


Fig.2 Schematic of opacity measurement system (optical penetration type)

Table 2 Specification of light oil and BDF used as fuel

Item	Light oil	BDF
Density (288K) $[\text{kg}/\text{m}^3]$	818	886
Kinematic viscosity(323K) $[\text{m}^2/\text{s}]$	1.80×10^{-6}	3.79×10^{-6}
Flash point [K]	325	428
Oxygen content [wt%]	0.26	11.24
Gross calorific value $[\text{kJ}/\text{kg}]$	46.0×10^3	39.9×10^3

軽油と比較すると、引火点、動粘度および酸素濃度が高く、総発熱量は小さいことがわかる。これら2種類の燃料を用いることにより成分割合が異なるPMの排出を狙う。

3. 実験結果および考察

測定用エンジンの常用回転数付近($1000 \sim 2200 \text{min}^{-1}$)において、エンジン回転を安定させるために最低限の負荷をかけた条件から、過負荷で一定回転数を保持できなくなるまで負荷を上昇させ、この場合の実験結果を次に記述する。なお、一般的に低負荷から高負荷に変更すると供給燃料の増加により空気過剰率が低下するため、局所的に不完全燃焼が発生しPM排出量は増加する。

3.1 PM成分がスモークメータ計測値に及ぼす影響

スモークメータではSOFの計測が困難であるとされている。また、これまでの検討において、BDFは軽油を使用した場合と比較すると、低負荷時は未燃焼燃料（SOF）を多く含むPMが増加し、高負荷時はPM排出量が減少する傾向であることがわかっている⁷⁾。低負荷時つまり供給燃料が減少する運転条件では、BDFは粘度および着火点が高いため燃焼温度が上昇し難く燃料の着火が活性化しないためPM排出量が増加するものと考えられる。また、高負荷時つまり供給燃料が増加する運転条件では、燃焼温度が上昇するため燃料の着火が活性化することに加えてBDFに含まれる酸素が燃焼を促進するためPM排出量が減少するものと考えられる。

そこで、PM中の成分（SOFの割合）がスモークメータの計測値に及ぼす影響を確認するため、PMに含まれるSOFの増減が顕著である運転条件（BDF使用、エンジン回転数 1400min^{-1} ）において、超微量PM分析装置およびスモークメータを使用しPM排出量の計測特性を比較した。この場合の超微量PM分析装置で分析したPMに含まれる成分と正味平均有効圧の関係をFig.3、スモークメータで計測した汚染度（黒煙濃度）と正味平均有効圧の関係をFig.4に示す。なお、以降

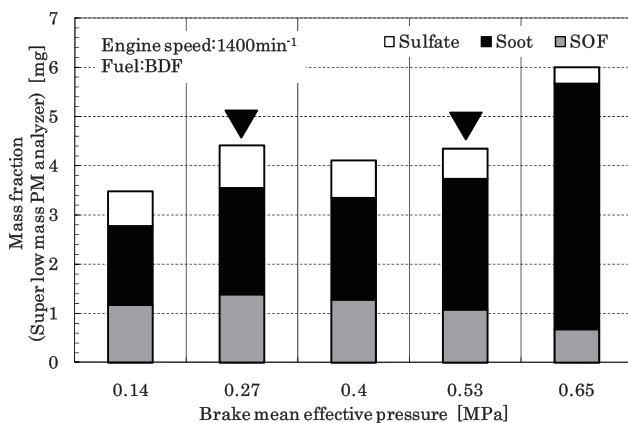


Fig.3 Comparison of mass fraction of the sulfate, soot and SOF contained in PM measured by super low mass PM analyzer for engine speed 1400min^{-1} using BDF

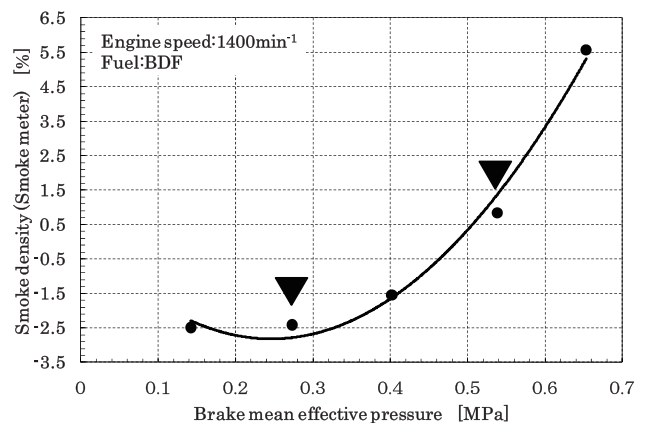


Fig.4 Variation of pollution degree with brake mean effective pressure measured by smoke meter for engine speed 1400min^{-1} using BDF

に示す超微量PM分析装置による計測値は、3 分間のサンプリングで専用フィルタに捕集されたPMの質量である。

Fig.3 より、PM 排出量がほぼ同等の条件（正味平均有効圧 0.27MPa および 0.53MPa、図中▼印）であっても正味平均有効圧 0.53MPa の場合は Soot の割合が高く相対的に SOF の割合が低く、成分の割合に違いがあることがわかる。また、Fig.4 より、これらの PM 排出量がほぼ同等の条件（図中▼印）においてスモークメータにより検出されたスモーク濃度は、Soot の割合が高く SOF の割合が低い正味平均有効圧 0.53MPa の場合に高い値を示す。つまり、スモークメータの検出感度は、PM に含まれる Soot および SOF の割合に影響を受けることが確認できる。

3.2 計測器の違いと PM 成分が検出特性に及ぼす影響

計測器の違いとPM成分が検出特性に及ぼす影響を検討するため、PMに含まれる成分の変化が顕著になるよう軽油およびBDFを使用し、超微量PM分析装置による計測値に対してスモークメータおよびオパシメータによる計測値の比較を行った。全ての計測器による検出傾向が明確であり、最も比較がし易い運転条件（エンジン回転数 1000min^{-1} ）における超微量PM分析装置によるPM排出量と正味平均有効圧の関係をFig.5、PMに含まれる成分と正味平均有効圧の関係をFig.6に示す。

Fig.5、Fig.6 より、前述したとおり、軽油を使用した場合と比較して BDF を使用した場合は低負荷時に未燃焼燃料（SOF）を多く含む PM が増加し、高負荷時に PM 排出量が減少する傾向が確認できる。また、軽油を使用した場合、高負荷になると Soot の割合が高い PM が多く排出されることがわかる。

Fig.5、Fig.6 と同じ運転条件（エンジン回転数 1000min^{-1} ）においてスモークメータおよびオパシメータを使用して計測した汚染度と正味平均有効圧の関係をFig.7に示す。

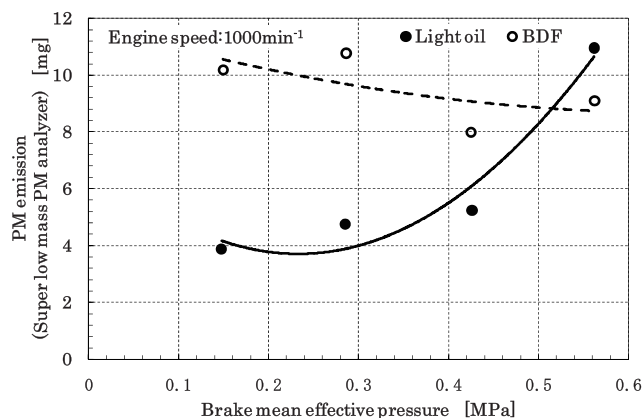


Fig.5 Variations of PM emission with brake mean effective pressure measured by super low mass PM analyzer for engine speed 1000min^{-1} using light oil and BDF

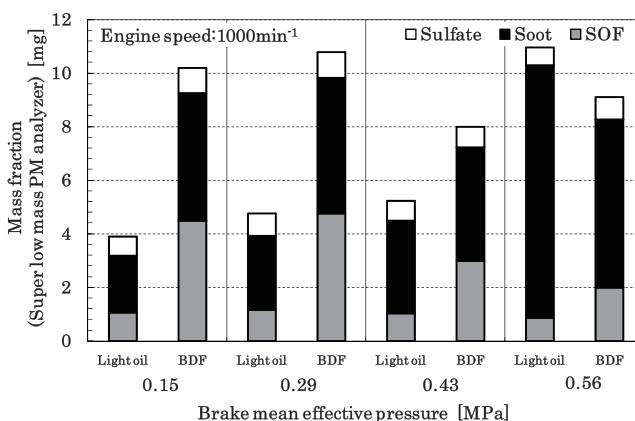


Fig.6 Comparison of mass fraction of the sulfate, soot and SOF contained in PM measured by super low mass PM analyzer for engine speed 1000min^{-1} using light oil and BDF

Fig.5, Fig.6 の軽油使用時に負荷とともに PM 排出量が増加する傾向は Fig.7 (a)においても見られる．これは PM に含まれる Soot の割合が高いため，スモークメータが黒煙濃度を高い感度で検出できているものと考えられる．しかし，Fig.5, Fig.6 では BDF を使用した低負荷の場合，PM 排出量は高いことがわかるが，Fig.7 (a)ではその傾向が見られない．これは PM に含まれる SOF の割合が高いため，スモークメータの検出感度が低下しているものと考えられる．

オパシメータの計測結果を示す Fig.7 (b)では，BDF を使用した場合の PM に含まれる SOF の割合が高い条件においても PM 排出量の変化を高い感度で検出している．一方，同図において軽油を使用した場合の PM 排出量の変化がほとんど見られない．Fig.5, Fig.6 においても軽油使用時の PM 排出量は低いものの，BDF 使用時の検出感度を参考にすると，オパシメータを用いて検出できない量ではないものと考えられる．この場合のオパシメータの感度が低い原因は不明である．

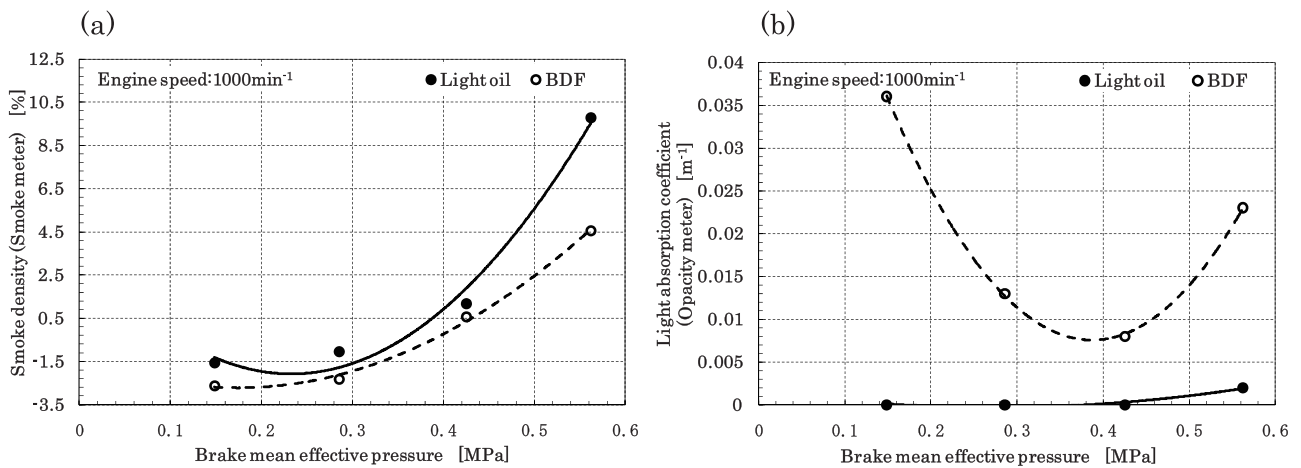


Fig.7 Variations of pollution degree with brake mean effective pressure measured by smoke meter (a) and opacity meter (b) for engine speed 1000min⁻¹ using light oil and BDF

3.3 計測器の違いとエンジン回転数が検出特性に及ぼす影響

計測器の違いとエンジン回転数が検出特性に及ぼす影響を検討するため，エンジン回転数が 1000min⁻¹，2200min⁻¹時，超微量PM分析装置の計測結果に対して，スモークメータおよびオパシメータによる計測結果を比較した．

エンジン回転数が 1000min⁻¹時，軽油を使用した場合の超微量PM分析装置による汚染度と正味平均有効圧の関係はFig.5 に示したとおりである．同条件のスモークメータおよびオパシメータによる計測結果をFig.8 に示す．また，エンジン回転数が 2200min⁻¹時の超微量PM分析装置，スモークメータおよびオパシメータによる計測結果をFig.9 に示す．

Fig.5, 8, 9 より，超微量PM分析装置による計測結果に対して，エンジン回転数が 1000min⁻¹の場合はスモークメータの感度が高く，エンジン回転数が 2200min⁻¹の場合はオパシメータの感度が高くなることがわかる．

エンジン回転数の変更によって検出感度が変化する原因は、スモークメータについては Fig.1 に示すように、その計測器に排出ガスを吸引するポンプが内蔵されており、エンジン回転数が低く排出ガスの流速が低い条件であっても PM を自己吸引できるため検出感度が低下しないものと考えられる。また、スモークメータのサンプリングプローブ先端は Fig.10 に示すようにキャップ構造になっている。この構造は JIS D 8004 において、「採取孔が直接資料ガスの動圧を受けないこと」と定められているためであり、排出ガスの流れ方向に対して下流側が開口している。したがって、エンジン回転数の上昇に伴い排出ガスの流速も上昇すると PM を上流側に吸引することが困難になるため検出感度が低下するものと考えられる。

一方、オパシメータは、排出ガスを自己吸引する構造になっていないため、Fig.10 に示すようにサンプリングプローブ先端はキャップ構造になっておらず、排出ガスの導入は排気圧力に依存している。したがって、エンジン回転数が低い場合の検出感度は低い、エンジン回転数の上昇に伴い排出ガスの動圧も上昇すると検出感度が高くなるものと考えられる。

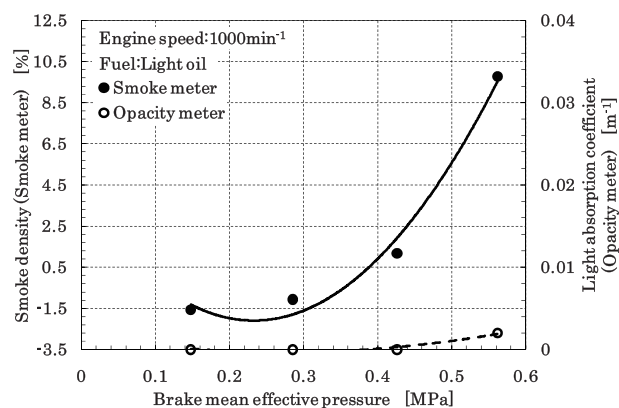


Fig.8 Variations of PM emission with brake mean effective pressure measured by smoke meter and opacity meter for engine speed 1000min^{-1} using light oil

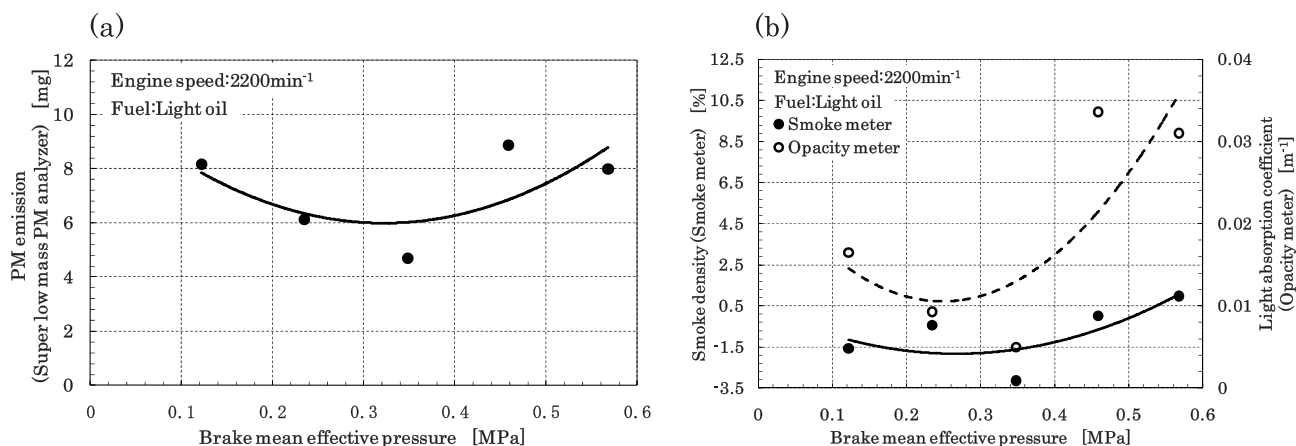


Fig.9 Variations of PM emission with brake mean effective pressure measured by super low mass PM analyzer (a), smoke meter and opacity meter (b) for engine speed 2200min^{-1} using light oil

4. 結言

比較的取り扱いの容易なスモークメータおよびオパシメータを用いた PM 排出量の計測が、超微量 PM 分析装置を用いない簡易的な排出ガス特性の把握方法として有効であるか検討するため、

スモークメータならびにオパシメータを用いて小型ディーゼルエンジンの PM 排出量を計測し，超微量 PM 分析装置を用いた計測結果と比較を行った．

近年の車検に導入されているオパシメータは，スモークメータで検出が困難な Soot の割合が低い PM を計測できるためであるが，これは本研究においても運転条件および使用燃料の変更を行い，PM に含まれる Soot の割合が減少し相対的に SOF の割合が増加した排出ガスを計測することにより，スモークメータの検出感度が低下する条件でもオパシメータによる計測が可能であることを確認した．

また，エンジン回転数を変更した PM 排出量の計測をそれぞれの計測器で行うことにより，スモークメータおよびオパシメータの検出感度は排出ガスの流速に左右され，エンジン回転数が低い場合はスモークメータの検出感度が高く，エンジン回転数が高い場合はオパシメータの検出感度が高くなることが明らかになった．

これらより，PM の排出特性を把握する場合，オパシメータは微量な Soot しか含まない PM を計測することはできるが，エンジン回転数によって検出感度が変化するため十分に有効な手段とは言えない．したがって，オパシメータの検出感度とエンジン回転数の相関を明らかにすることにより，超微量 PM 分析装置を用いない簡易的な排出ガ斯特性の把握が実現できる可能性がある．

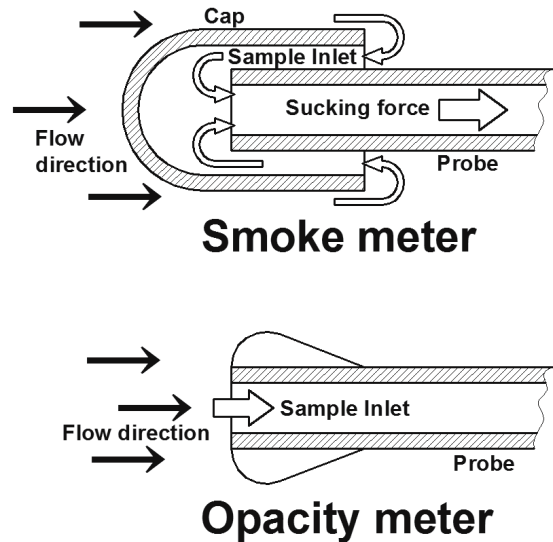


Fig.10 Comparison of probe tip of smoke meter and opacity meter

参考文献

- 1) HORIBA 超微量 PM 分析装置 MEXA-1370PM, 株式会社堀場製作所(2004), 51.
- 2) ヤンマーディーゼルエンジン NF 形シリーズ取扱説明書, ヤンマー(2003), 9.
- 3) BANZAI ZEXEL, ディーゼルスモークメータ DSM-10N 取扱説明書, 株式会社ゼクセル(1999)
- 4) BOSCH, ボッシュオパシメーター取扱説明書, ボッシュ株式会社(2009), 10.
- 5) 野田明, バイオ液体燃料の内燃機関への適用における研究開発, バイオ液体燃料, NTS(2007), 482.
- 6) 島津テクノリサーチ, 測定分析結果報告書, 発行番号 KC-24895(2005)
- 7) 位田晴良, 上嶋敏裕: 福井工業大学紀要, 41(2011), 170-177.

(平成 24 年 3 月 31 日受理)