

船用ディーゼル機関における大気汚染物質計測法の
高度化に関する研究
—分流希釈システムによるPM濃度計測の比較と
希釈排気中の揮発性有機化合物の計測—

大橋 厚人*

**Study on the Development of Measuring Method for Air Pollutants
Emitted from Marine Diesel Engine
—Comparative Experiments of PM Concentration Measurements
by Partial Flow Dilution Method and
Measurement of Volatile Organic Compounds Contained in Diluted Exhaust Gas—**

by

Atsuto OHASHI

Abstract

In the field of automobiles, full flow dilution system has been made as the de facto standard of PM measurement. On the other hand, the full flow dilution system cannot be used for marine diesel engines with large exhaust gas flow rate. First, because no de facto standard of PM measurement for marine diesel engines has been established, it is necessary to find a certain method which guarantees reliable result for PM measurement. For this purpose, the author proposes a method to compare the PM concentration simultaneously measured by two partial flow dilution systems based on JIS B 8008-1. Next, the diluted exhaust gas after filtration of PM still contains volatile organic compounds (VOC). Many of the VOC components become fine particles due to chemical change after releasing to the atmosphere. However, there are very few measurements of the VOC components. Therefore, the author shows devices for measuring the VOC components including in the diluted exhaust gas after filtration of PM, and shows the results of the VOC components emitted from a medium speed 4-stroke diesel engine with a heavy fuel oil.

* 環境・動力系

原稿受付 平成30年5月21日

審査日 平成30年8月7日

目 次

1. まえがき	74
2. 分流希釈システムの相互比較	75
2.1 実験装置および実験方法	75
2.2 実験結果および考察	76
2.2.1 供試機関 1 における実験結果	76
2.2.2 供試機関 2 における実験結果	78
3. 希釈排気中の揮発性有機化合物に関する計測事例	80
3.1 実験装置および実験方法	80
3.2 実験結果および考察	82
4. まとめ	83
謝辞	83
参考文献	83

1. まえがき

船舶の動力源として使われているディーゼルエンジンからは、窒素酸化物 (NO_x)、硫黄酸化物 (SO_x)、粒子状物質 (PM) などの有害成分が排出され、これらの有害成分は、人体への健康影響や気候変動の原因物質として注目されている。このような背景を受けて、国際海事機関 (IMO) では段階的な NO_x 削減規制が実施されている。SO_x については、燃料油中の硫黄分削減により、こちらも段階的な削減規制が実施されている。一方、PM については、PM 排出率と燃料中の硫黄含有率に比例関係があることから^{1)~4)}、燃料油中の硫黄分削減により間接的に PM 排出量削減が担保されてきた。このような規制導入には、意思決定のための情報が必要となるため、規制導入前に対象排出物の計測法や排出実態に関して研究することが重要となり、当所ではこれまで PM 計測法や船用ディーゼル機関の PM 排出特性に関して研究してきた。

船用ディーゼル機関に適用可能な PM 計測法は、JIS B 8008-1⁵⁾に規定されており、自動車用の PM 計測法と多くの原理を共有している。自動車の分野では、全流希釈法 (排気のすべてを希釈する方法) が PM 計測のデファクトスタンダードとされている⁶⁾。PM は、定められた方法で PM 捕集用フィルタに捕集されたものとされているため、NO_x 計測において NO_x 計を校正する標準ガスに当たるものが存在せず、これの代わりになるものとしてデファクトスタンダードを使用している。しかし、全流希釈法は、装置が大掛かりで高価なため、小型の分流希釈法 (排気の一部を採取して希釈する方法) が開発され、等価な結果を保証するため、全流希釈法との同等性について研究がされ、改良されてきた⁶⁾⁷⁾。例えば、軽油を使用する自動車用ディーゼル機関の排気を対象とした全流希釈システムと分流希釈システムの同等性評価は、土屋と山崎⁷⁾によって行われた。各種テストサイクルにおいて PM 排出率を全流希釈システムの結果に対して比較を行い、改良前の分流希釈システムは最小で -20%の結果を示した。改良後の分流希釈システムでは -6%から +17%までを示し、改良後には全流希釈システムより分流希釈システムの結果のほうが大きい場合もあり、全流希釈システムも含めて、PM 損失が数割程度あることが明らかである。さらに、規格を満たしているシステムにおいても、PM 損失に大きな差があることが確認できる。

全流希釈法、分流希釈法ともに JIS B 8008-1 に記述されており、船用ディーゼル機関にも適用可能である。しかし、船用ディーゼル機関は排気流量が多いため全流希釈法を事実上利用できず、分流希釈法を船用ディーゼル機関に適用した研究が行われてきた^{1)~3), 8)~10)}。船用ディーゼル機関から排出される PM は、重油中の硫黄が酸化されたサルフェートや、潤滑油や燃料起源の可溶性有機化合物 (SOF) を多く含む特徴をもつ。これらは、分流希釈法を構成する排気導入管や希釈トンネル内壁において冷却されると凝縮し、スート等の固形分が付着・剥離すると計測値の減少だけでなく、増大をまねく可能性もある。これまで当所では、PM 中に含まれるサルフェートやカルシウムを指標として、分流希釈システム内の損失量を試算する研究を行ってきた¹⁾²⁾。その結果、サルフェートやカルシウムについては 4~5 割の損失が見込まれた。これらの指標から損失を補正した値を求めること

は可能であるが、サルフェートやカルシウムは PM 成分の一部であるため、PM 成分のすべてに関して補正を行うことは非常に難しい。また、船用ディーゼル機関において、複数の分流希釈システムの同時計測による比較が行われた例は無く、計測系が規格を満たしているとしても、システム間でどの程度の差異があるかが把握されていない。このように、自動車の分野では全流希釈法がディファクトスタンダードとされていることに対して、船用の分野では、他の PM 計測システムとの同等性については確認がされておらず、さらに、ディファクトスタンダードが確立されていない状態である。これらのことより、計測結果を保証する何らかの方法を見つける必要がある。

上で述べた PM 計測システムにおいて、PM 捕集するフィルタを通過した気体（希釈排気）にも、ガス状の有害物質が含まれている。の中には、規制の対象となっている NOx や SOx 以外にも、燃料や潤滑油起源の揮発性有機化合物が含まれている。しかし、それらの成分に関してはこれまでほとんど計測されてこなかった^{11),12)}。これらの成分の多くは、大気に放出後、化学変化により粒子化して微小粒子状物質（PM_{2.5}）となる。したがって、発生源から住環境への影響を議論する場合、発生源において粒子として排出される物質と、発生源では気体として排出され、排出後化学反応により粒子となる物質とに分けて議論する必要がある¹³⁾。しかし、排出源で PM に含まれる有機化合物であるのか、それとも気体として排出されるのかについても知見が少ない¹⁴⁾。当所ではこれまで希釈排気を樹脂に通して吸着捕集することで、多環芳香族炭化水素（PAHs : Polycyclic Aromatic Hydrocarbons）について計測した実績がある¹⁵⁾。しかし、より分子量の小さな揮発性有機化合物の成分については、計測されてこなかった。

本報告の2章では、船用ディーゼル機関において PM 計測結果を保証する方法として、2台の供試機関において、2台の分流希釈システムにより PM 濃度を同時計測して比較する方法を紹介する¹⁶⁾。3章では、PM 計測用フィルタを通過した希釈排気に含まれる揮発性有機化合物の成分を計測するための実験装置を紹介するとともに、これをC重油使用時の供試機関に適用した事例を紹介する^{17),18)}。

2. 分流希釈システムの相互比較

2.1 実験装置および実験方法

表2.1に2台の供試機関の主要目を、図2.1に2台の分流希釈システムの概要を示す。供試機関1は、船用中速4ストロークディーゼル機関(MU323DGSC)である。供試機関2は、船用2ストロークディーゼル機関(3UEC37LA)である。分流希釈システムは両装置とも、旧版の規格¹⁹⁾に準拠して作られている。装置1では、システム内の希釈トンネルで希釈された希釈排気全量を、フィルタを通してPMを捕集する全量捕集方式を採用している。排気管に設置した分岐管へ直接取り付けて、プローブを通った排気がトンネル内の負圧によって引き込まれる構造となっている。さらに、排気管の内部から希釈トンネルまでの排気導入部を直管の二重管構造とし、ガイドライン¹⁰⁾に記述されている構造を取り入れている。装置2では、希釈排気の一部をフィルタを通してPMを捕集する部分捕集方式となるよう機器類を取り外す改造を行い、また、PM捕集フィルタをバイパスするバイパスラインを取り外す改造も行われている。装置2は、排気管に設置したプローブからトランスファーチューブを経由してトンネル内のベンチュリによる負圧によって排気を引き込む構造となっている。そのため、供試機関の排気管から排気を混合させる希釈トンネルへの管長は装置2の方が長く、ベンチュリ部の圧力も装置1のトンネル内圧力と比較して高いため、希釈トンネルへの排気の引き込み状態は、排気管内の背圧に大きく影響される。排気採取位置は、供試機関1では装置1が上流側に位置し、供試機関2では装置2が上流側とした。

機関の運転には、低硫黄A重油を使用した。供試機関1においては、船用特性、負荷率50%と75%にて、それぞれ3回同時計測による比較実験を、2回行った。供試機関2においては、船用特性、負荷率50%と75%にて、それぞれ3回同時計測による比較実験を行った。なお、供試機関1においては、1回目の装置2のPM捕集量にややばらつきがあったため、2回目の比較実験を実施した。両装置とも、規格に準拠した操作によってPM計測を行った。下記の式により、PM濃度を装置ごとに求め、両者を比較した。

$$PMconc = \frac{q * M}{V} \quad (2.1)$$

$PMconc$: 排気中 PM 濃度 [mg/m³_{N-wet}]

M : PM 捕集量 [mg]

V : PM 捕集フィルタを通過した希釈排気容積 [m³_{N-wet}]

q : 希釈比 [-]

表 2.1 供試機関の主要目

	供試機関 1	供試機関 2
名称	MU323DGSC 船用 4 ストローク中速ディーゼル機関	3UEC37LA 船用 2 ストローク低速ディーゼル機関
シリンダ径 (mm)	230	370
シリンダ数	3	3
ピストン行程 (mm)	380	880
出力 (kW)	257	1103
回転速度 (rpm)	420	188

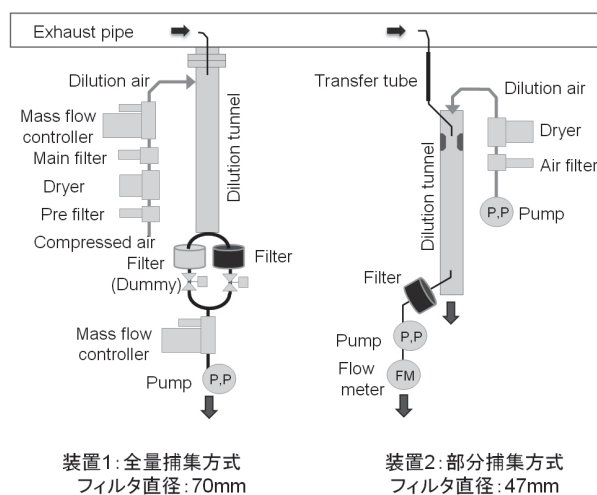


図 2.1 分流希釈システムの概要¹⁶⁾

2.2 実験結果および考察

2.2.1 供試機関 1 における実験結果

図 2.2 および図 2.3 にそれぞれ負荷率 50%および 75%の PM 濃度計測結果を示す。図では、(a)に 1 回目の計測、(b)に 2 回目の計測結果を示した。負荷率 50%の図 2.2 では、1 回目の計測（図 2.2(a)）では、装置 2 の計測結果にややばらつきがあった。それに対して、2 回目の計測（図 2.2(b)）では、装置 1、装置 2 の計測結果がほぼ一致する結果となった。負荷率 75 %の図 2.3 では、1 回目の計測（図 2.3(a)）では、装置 1 において計測 1～3 にかけて減少する傾向が見られ、装置 2 に関しては増加の傾向が見られた。2 回目の計測（図 2.3(b)）では、装置 1 に対して装置 2 の PM 濃度が低くなった。また、各装置の計測 1 から 3 の濃度のばらつきは、負荷率 50%の 1 回目（図 2.2(a)）に比べ小さかった。

図 2.4 に、同時計測ごとに、装置 1 で得られた PM 濃度に対する装置 2 の PM 濃度の比を示す。装置 1 と装置 2 は、全体では±30%以内で一致した。それぞれの分流希釈システムは固有の PM 損失を持つが、その損失を受けた PM 濃度が、±30%以内で一致し、規格準拠という点以外ではじめて相互に保証を得ることができた。土屋と山崎⁷⁾によると、前述のように全流希釈システムと分流希釈システムでは、全流希釈システムの結果に対し、改

良前の分流希釈システムは最小で -20%の結果を示し、改良後の分流希釈システムは -6%から +17%を示している。本報告で述べた分流希釈システムだけの比較においては、土屋と山崎の結果と直接比較することはできないが、相互に PM 濃度の保証を得ることができた一方、その一致の度合いから改良の余地が残されていると考える。図 2.4 の中で、2 回目の負荷率 50%の PM 濃度比は、±3%で非常によく一致した。しかし、それ以外の条件では、同じ条件の 3 回の計測の中でもばらつきがあった。

図 2.5 に各条件の装置 1 の平均 PM 濃度を基準として、それぞれの装置の平均 PM 濃度比と値の幅を縦棒で示す。装置 1 は、それぞれの条件で平均値に対し±3%以内で再現性の良い結果を得ることができた。一方、装置 2 の結果は変動が大きくなった。装置 1 と 2 では、前述の通り希釈トンネル内の圧力が異なり、装置 1 では装置 2 より排気を吸引する力大きい。供試機関 1 は、動圧過給方式のため排気に大きな圧力脈動があり、大橋ら²⁰⁾は、本報告の実験位置とは異なる場所にて計測結果を報告している。したがって、吸引する力の弱い装置 2 では、排気管内の圧力脈動の影響を受けやすいため、計測系内での PM の付着・剥離が起き、PM 濃度の変動の要因になったと考えられる。

PM に含まれる硫酸イオン（サルフェート）をイオンクロマトグラフィで定量し、PM に対する重量比を求めた結果を図 2.6 に示す。各条件で 1 点のみ分析を行った。サルフェートの重量比は、それぞれの条件で装置 1 の方が 3～5 倍多くなった。サルフェートの起源は主に排気中の SO_3 であり、温度低下により凝縮して硫酸となるとともに、PM として捕集される。したがって、装置 2 では、計測系内壁面での損失が多く、サルフェートの重量比が小さくなったと考える。サルフェートの損失位置を特定することができれば、その対策を立てることにより、両装置の結果はより良く一致すると考える。

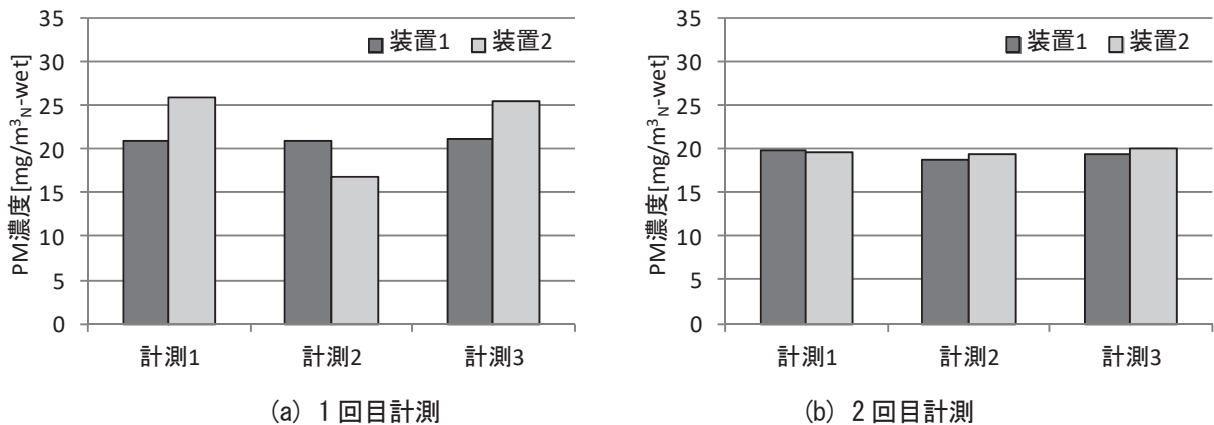


図 2.2 PM 濃度 (供試機関 1, 負荷率 50%)¹⁶⁾

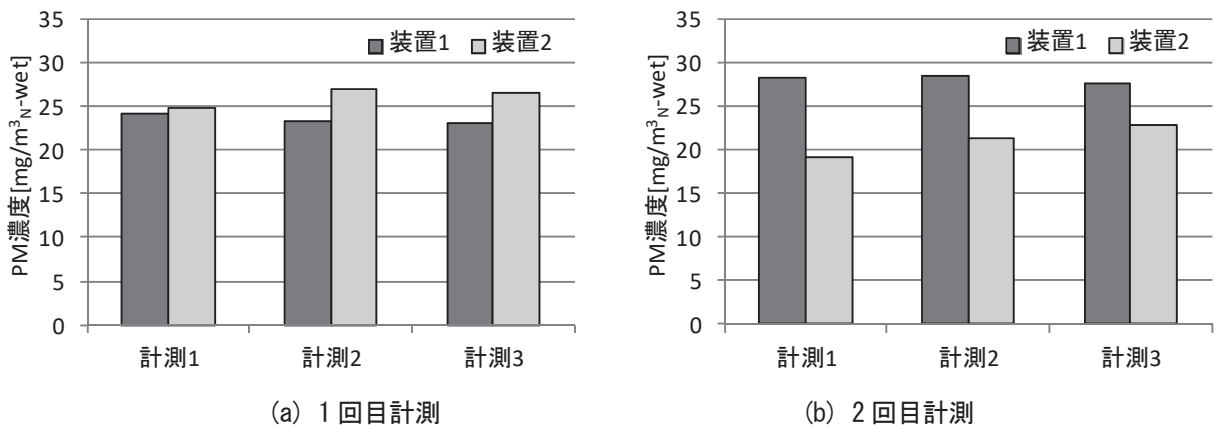


図 2.3 PM 濃度 (供試機関 1, 負荷率 75%)¹⁶⁾

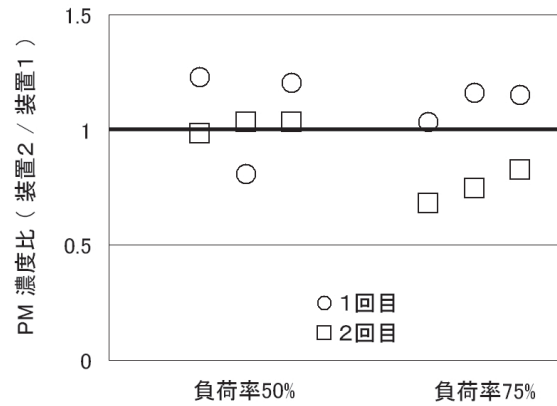


図 2.4 装置 1 の PM 濃度に対する装置 2 の PM 濃度の比（供試機関 1）¹⁶⁾

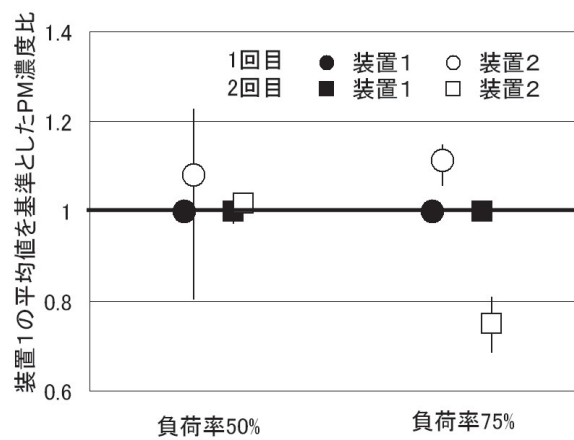


図 2.5 装置 1 の平均値を基準とした PM 濃度比（供試機関 1）¹⁶⁾

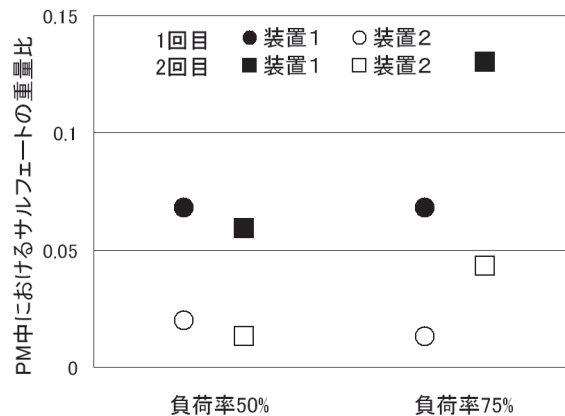


図 2.6 サルフェートの重量比（供試機関 1）¹⁶⁾

2.2.2 供試機関 2 における実験結果

図 2.7 に供試機関 2 の実験による PM 濃度を示す。図 2.7 では(a)に負荷率 50 %, (b)に負荷率 75 %の結果を示した。いずれの負荷率においても、供試機関 1 の結果に比べると装置 1, 2 の計測 1～3 のばらつきは小さくなった。供試機関 2 は静圧過給方式のため、排気の圧力脈動が供試機関 1 より小さいため、計測結果の再現性が良くなったと考えられる。

図2.8に、同時計測ごとに、装置1で得られたPM濃度に対する装置2のPM濃度の比を示す。装置2の結果は、装置1の結果に対して-20%で一致した。これは、供試機関1の図2.4の両装置の一致の範囲（±30%）内であり、供試機関2においても同じ範囲内で、相互に保証を得ることができた。

図2.9に各負荷率の装置1の平均PM濃度を基準として、それぞれの装置の平均PM濃度比と値の幅を縦棒で示す。それぞれの条件に対して、装置1は±2%で、装置2は±6%で再現性の良い結果を得ることができた。

PMに含まれる可溶性有機化合物（SOF）分をソックスレー抽出により定量し、PMに対する重量比を求めた結果を図2.10に示す。SOFの重量比は、装置1と装置2の結果がほぼ一致し、8割を示した。したがって、PMの主要成分がSOFであるので、SOFがどのように計測系内で損失するかがわかれば、その対策を立てることにより、両装置の結果はより良く一致すると考える。

土屋と山崎⁷⁾は、トランスファーチューブの短縮が全流希釈法との同等性の向上につながることを示している。さらに、目視によりトランスファーチューブの内壁を確認し、特にフィッティングを使用している部分での粒子付着が多いことを報告している。フィッティングを使用している部分では、熱容量が大きくなるため、排気と管壁の温度差が大きくなり、排気中のすすやSOFが冷却されて、管壁に付着すると解説している。本報告では、装置2のみがトランスファーチューブを使用しており、この部分の短縮や短絡が可能であれば、計測結果がより一致する可能性がある。しかし、トランスファーチューブは、スペースが十分確保できない場所においては、装置設置のために必要となる場合がある。したがって、もし、トランスファーチューブの影響を機差要因として把握することが可能であれば、計測場所の自由度向上に加えて、計測結果の保証を確保することができる。

今後、装置の改良と計測経験を積み重ね、再度、比較実験を行うことにより、計測結果はより良く一致していくと考える。

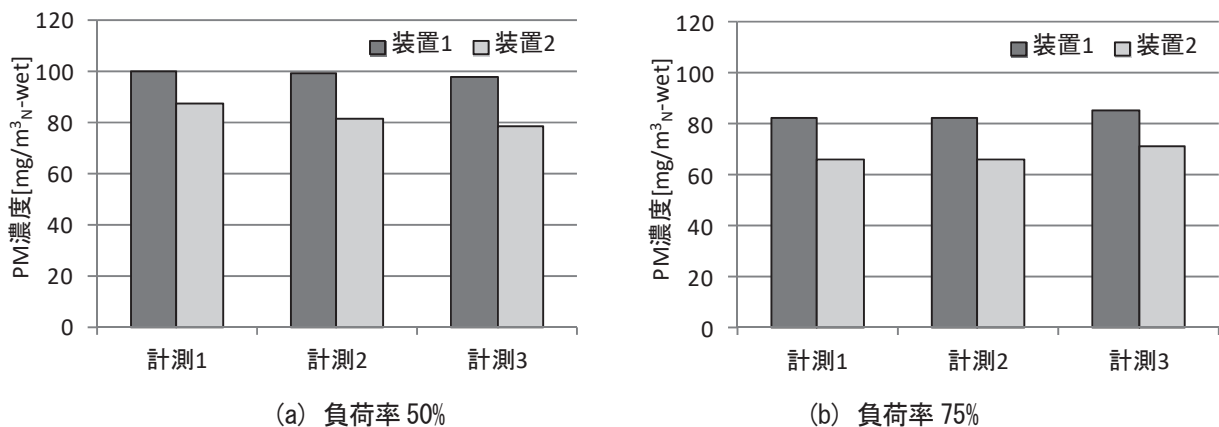


図2.7 PM濃度（供試機関2）¹⁶⁾

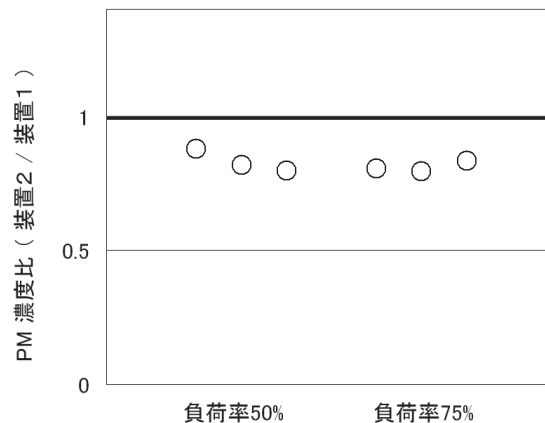


図2.8 装置1のPM濃度に対する装置2のPM濃度の比（供試機関2）¹⁶⁾

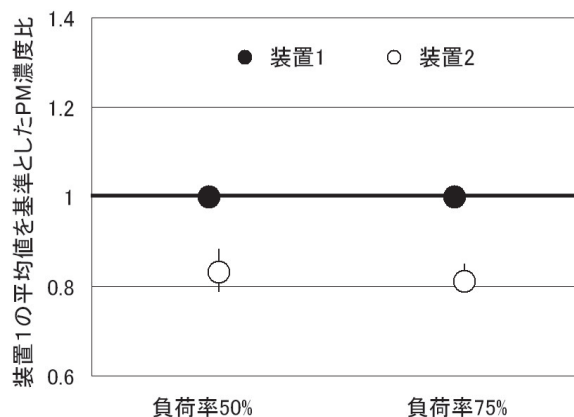


図 2.9 装置 1 の平均値を基準とした PM 濃度比 (供試機関 2) ¹⁶⁾

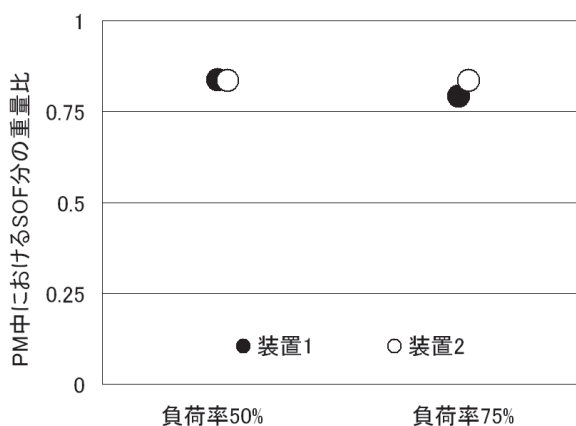


図 2.10 SOF 分の重量比 (供試機関 2) ¹⁶⁾

3. 希釈排気中の揮発性有機化合物に関する計測事例

3.1 実験装置および実験方法

供試機関は、表 2.1 の供試機関 1 を使用した。供試機関の運転には C 重油（硫黄分 2.60 wt%）を使用し、100% 負荷率と船用特性 25% 負荷率にて実験を行った。

揮発性有機化合物を計測するための希釈排気を捕集するシステムを、図 3.1 に示す。図 2.1 に示した装置 1 を改造して使用した。PM を捕集するフィルタ（図 3.1 の F1）を通過後の希釈排気を追加装置に分岐して、捕集バッグ（ジーエルサイエンス製 スマートバッグ PA）に採取した。捕集バッグには、バックからの湧き出し物質を減らすため、前処理を施した。前処理として、バッグに窒素を封入し、80℃で 30 分間加熱後、窒素を排出する作業を、3 回繰り返した。F1 から分岐部まではフッ素樹脂系のチューブを用い、外側を保温した。分岐後は SUS 管を使用し、52℃以上に加温した。試料の採取は、図 3.1 に示した F1 に流路を切り替え後、コック A を閉・コック B を開にして、追加装置のポンプを一定流量で起動し、SUS タンク内圧力が F1 下流と平衡になるとともに、希釈排気の CO₂ 濃度が一定になった後、コック A を開・コック B を閉に切り替えて採取した。希釈比や F1 のフィルタ前温度などは、PM 捕集条件の範囲内に制御した ¹⁹⁾。採取中は、CO₂ 濃度計（島津製作所製 CGT-7000）により希釈排気中の CO₂ 濃度を計測し、捕集後、この CO₂ 濃度と捕集バッグ内の CO₂ 濃度が濃度計の精度内で一致することを確認した。排出率を求めるための希釈比や排気流量は、規格 ¹⁹⁾ に準拠して求めた。

希釈排気中の揮発性有機化合物の計測に使用した 2 台のガスクロマトグラフを表 3.1 に示す。炭素数 2 までの炭化水素の計測には装置 A を使用し、炭素数 3 以上の揮発性有機化合物については装置 B を使用した。使用した

5種の標準ガスを表3.2に示す。クロマトグラム上のピークの保持時間の比較から揮発性有機化合物の種類を特定し、ピーク面積の比較から希釈排気中の濃度を求めた。なお、ピーク近辺のノイズ幅の3倍を検出下限²¹⁾とし、さらにその3倍をここでは定量下限として採用し、これを超えたピークについて排出率を求めた。

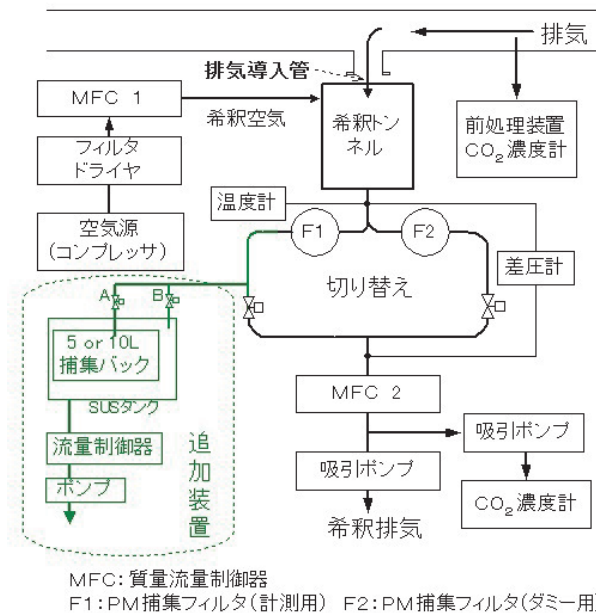


図3.1 希釈排気捕集システム

表3.1 ガスクロマトグラフの設定

	装置 A	装置 B
計測対象となる揮発性有機化合物の範囲	炭素数 1 と 2	炭素数 3 以上
装置名	島津製作所製 GC-8AIF	島津製作所製 GC-2014ATF/SPL
カラム	Porapak-N, 3 mmI.D. × 2 or 3 m	Rtx-1, 0.53 mm I.D. × 60 m, 膜厚: 5.0 μm
試料注入量	4.5 or 5 ml, 全量注入	5 ml, 全量注入 島津製作所製 HGS-2 使用
キャリアガス	窒素 150kPa	ヘリウム 30 ml/分
カラムオープン温度	60 °C	-45 °C 2.5 分 → -10 °C @ 10 °C/分 → 140 °C @ 5 °C/分 → 140 °C 3 分
検出器	FID 120 °C	FID 180 °C

表3.2 標準ガス

ガスの種類	濃度・組成	供給者
メタン	5 ppm, 窒素ベース	高千穂商事
エチレン	10 ppm, Air ベース	大陽日酸
アセトアルデヒド	100 ppm, 窒素ベース	大陽日酸
アクロレイン	100 ppm, 窒素ベース	大陽日酸
PAMs-J-56	炭素数 2 から 9 の炭化水素 55 成分とアセトン を各々 1 ppm 含有, 窒素ベース	大陽日酸

3.2 実験結果および考察

図 3.2 に装置 A により炭素数 2 までの炭化水素を対象として、100%負荷率において排気中濃度を求めた結果を示す。実験は 2 回実施し、それぞれの実験で 2 回試料を捕集した。各捕集試料について 3 回計測し、平均値を示した。図に示していないエタンについては、検出下限を超えなかった。メタン、エチレン、アセチレンの全平均に対し、4 回の計測値は、 $\pm 20\%$ で再現した。本事例では、排気中のメタン濃度が、大気中のメタン濃度より低くなった。この原因は、重油や潤滑油の未燃成分からはメタンができにくく、さらに大気中に存在したメタンの一部が燃焼しているためではなかろうかと考える。

図 3.3 に船用特性 25%負荷率における揮発性有機化合物の排出率を示す。3 回行った実験の各捕集試料について 3 回計測し、平均値を示した。ナフタレンについては、標準ガスがなく、試薬により保持時間を確認し、標準ガス PAMs-J-56 の平均の応答により、排出率を求めた。これ以外に、定量下限を超えた未知ピークが 2 本存在した。本計測では、ナフタレンより保持時間の長い（炭素数が多い）ピークは定量下限を超えなかった。これは、PM 計測用フィルタを通過した試料を計測しているため、より炭素数が多い成分は、PM として捕集され、本装置では計測されにくいと考える。成分別に見るとエチレン、メタン、ベンゼンの順に排出率が多かった。同条件の PM 排出率は、数 g/kWh となるため、これと比較して、成分別の揮発性有機化合物の排出率は、2 桁以上小さい結果となった。

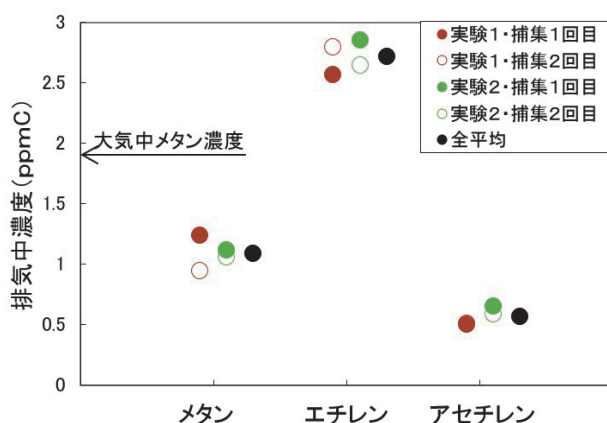


図 3.2 炭素数 2 までの炭化水素濃度 (100%負荷率)

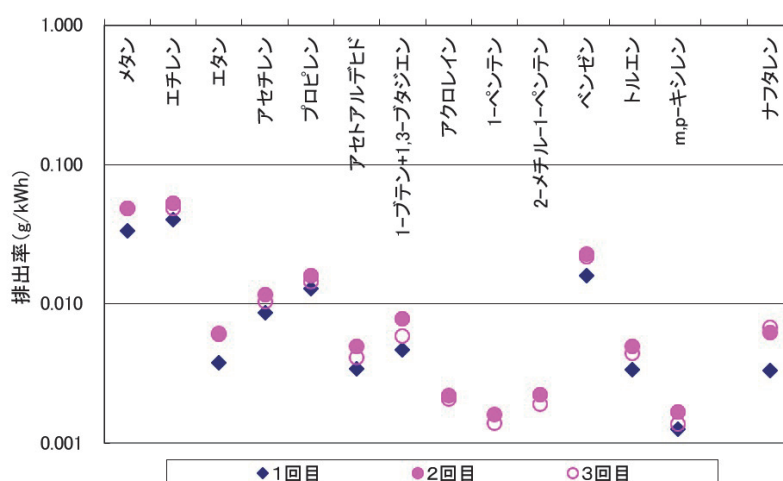


図 3.3 25%負荷率における揮発性有機化合物の排出率

(1 回目のアクロレイン、1-ペンテン、2-メチル-1-ペンテンについては、定量下限未満であった。)

4. まとめ

本報告の2章では、船用ディーゼル機関を対象とし、分流希釈システムのPM計測結果を保証するための方法として、2台の分流希釈システムによりPM濃度を同時計測して比較する方法を紹介した。その結果、2台の供試機関による比較実験から、PM濃度は $\pm 30\%$ 以内で一致し、規格準拠という点以外で相互に保証を得ることができた。今後、装置の改良と計測経験を積み重ね、再度、比較実験を行うことにより、計測結果はより良く一致していくと考える。

3章では、PM計測用フィルタを通過した希釈排気に含まれる揮発性有機化合物の成分を計測するための実験装置を紹介するとともに、これをC重油使用時の船用ディーゼル実験機関に適用した事例を紹介した。炭素数2までの炭化水素を対象として、100%負荷率における排気中濃度の計測事例を示した。メタン、エチレン、アセチレンの全平均に対し、4回の計測値は、 $\pm 20\%$ で再現した。排気中のメタン濃度は大気中のメタン濃度より低くなった。この原因は、重油や潤滑油の未燃成分からはメタンがでにくく、さらに大気中に存在したメタンの一部が燃焼しているためではなかろうかと考える。船用特性25%負荷率における揮発性有機化合物の計測事例を示した。成分別に見るとエチレン、メタン、ベンゼンの順に排出率が多かった。

謝 辞

本研究は、当所元グループ長の井亀 優氏、当所元任期付き研究員の徐 芝徳博士、東京海洋大学の塚本達郎教授、佐々木秀次助教、古堅・牧野技術研究所の協力を受けて実施しました。本報告の2章に記した研究は、東京海洋大学との共同研究により実施しました。関係各位の協力を感謝します。

参考文献

- 1) 井亀 優, 大橋厚人, 石村恵以子, 西尾澄人, 徐 芝徳, 高木正英, 羽鳥和夫, 高橋千織, 宮田 修, 今井康之, 船用ディーゼル機関から排出される粒子状物質(PM)の計測とその排出特性, 海上技術安全研究所報告, 第11巻第2号(2011), pp.91-110.
- 2) 大橋厚人, 井亀優, 石村恵以子, 西尾澄人, 高木正英, 徐芝徳, 排気希釈システム内のサルフェート損失の定量評価, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第45巻第3号(2010), pp.127-132.
- 3) 塚本達郎, 船舶からのPM排出実態について, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第42巻第1号(2007), pp.31-34.
- 4) C. Kurok, V. Pawils, H. Brumm, H.J. Gotze, Emission of Particulate matter from marine diesel engines, Presentation at IMO BLG-WGAP2, Berlin (2007).
- 5) JIS B8008-1:2009 往復動内燃機関-排気排出物測定-第1部:ガス状排出物および粒子状排出物の台上測定.
- 6) 後藤雄一, 塚本雄次郎, マイクロトンネルを用いたPM測定法に関する研究, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.112-01, 20015604(2001).
- 7) 土屋賢次, 山崎 均, PM計測におけるマイクロトンネルと全量希釈トンネルの比較, 自動車研究, 第25巻第5号(2003), pp.149-152頁.
- 8) 前田和幸, 高崎講二, 津田 稔, 阿部清三, 希釈率がPM計測に及ぼす影響, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第38巻第8号(2003), pp.509-513.
- 9) K. MAEDA, K. TAKASAKI, G. KON, M. TUDA, M. HORI, PM Emission from Ships - How to measure and reduce PM during voyage, 26th CIMAC, No.87(2010).

- 10) 船用ディーゼル機関起源の PM 計測に関するガイドライン, 日本マリンエンジニアリング学会, JIME-PM-01-0001-2010.
- 11) 中島康晴, 高杉喜雄, 桑原孫四郎, 西尾澄人, 石村恵似子, 張 潔, 西川和美, 尾崎高司, 船用ディーゼル機関から排出される VOC の計測及び評価, 第 64 回マリンエンジニアリング学術講演会論文集(2000), pp.19-22.
- 12) 飯村文成, 星 純也, 天野冴子, 樋口雅人, 石井康一郎, 鮫島弘尚, 藤田昌廣, 市橋玄吾, 芳住登紀子, 停泊中船舶からの炭化水素の排出状況, 東京都環境科学研究所年報 2005, pp.247-249.
- 13) 森川多津子, 広域大気質予測モデルにおける粒子状物質 (PM) 濃度予測のための発生源データ, エアロゾル研究, 第 23 巻第 3 号, 181-186(2008).
- 14) 徐 芝徳, 石村恵以子, 大橋厚人, 井亀 優, 西尾澄人, 船用ディーゼル機関排気の SOF と THC 濃度の関係, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第 46 巻第 3 号 (2011), pp.448-453.
- 15) 安藤裕友, 宮田 修, 今井祥子, 高橋千織, 仁木洋一, 徐 芝徳, 西尾澄人, 船用ディーゼルエンジンの排ガス中に含まれる有害物質に関する分析, 海上技術安全研究所報告, 第 11 巻第 2 号 (2011), pp.111-126.
- 16) 大橋厚人, 徐 芝徳, 佐々木 秀次, 塚本達郎, PM 濃度による分流希釈システムの比較, 日マリ学誌, 第 49 巻第 1 号 (2014), pp.126-131.
- 17) 大橋厚人, PS-19 PM 捕集フィルタを通過した炭化水素等に関する計測事例, 第 14 回海上技術安全研究所研究発表会講演集 (2014), pp.254-255.
- 18) 大橋厚人, 希釈排気中の炭化水素等に関する計測事例, 第 84 回マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集(2014), 日本マリンエンジニアリング学会, pp.15-16.
- 19) JIS B8008-1 : 2000 往復動内燃機関-排気排出物測定-第 1 部 : ガス状排出物および粒子状排出物の台上測定.
- 20) 大橋厚人, 井亀 優, 高木正英, 石村恵以子, PM 計測における排ガス脈動の影響について, 第 77 回マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集 (2007), 日本マリンエンジニアリング学会, pp.5-6.
- 21) 役に立つガスクロ分析, 編集 : (社) 日本分析化学会ガスクロマトグラフィー研究懇談会, みみずく舎, 2010.