実験用舶用ディーゼル機関における 粒子状物質の計測

大橋 厚人、井亀 優

Measurement of Particulate Matter

of Laboratory Marine Diesel Engine

by

Atsuto OHASHI and Masaru IKAME

1. まえがき

熱効率が高く、安価な重質油を使用できるディー ゼル機関は、船舶の主機関及び発電用機関として幅 広く採用されている。これら舶用ディーゼル機関が 排出する NOx、SOx については、2005 年 5 月より排 出規制が発効し、現在は規制強化について検討が進 められている。その一方で、舶用ディーゼル機関か ら排出される煤など(正確には凝縮性の成分も含め 粒子状物質と呼び、以下、PM と略す)については 現在規制されておらず、2005 年 7 月に開催された 国際海事機関の第 53 回海洋環境保護委員会におい て、初めて検討項目に加えられた。

自動車では国内でもPM規制が行われ、計測手法 も確立している。PM計測の規定(JIS B 8008、 ISO-8178)では、"往復動内燃機関"についてPM計 測法が規定されており、清浄な空気で4倍以上に稀 釈し、52(℃)以下でフィルタ上に捕集したものを PM(ISO-8178では、Particulatesと呼んでいる) と定義している。排ガスの稀釈方法は大きく二つに 分けられる。一つは、排ガスをすべて希釈する全量 希釈法であり、もう一つは、排ガスの一部分のみ希 釈する部分希釈法である。ここでは、排ガスを清 浄な空気で稀釈し温度を下げる装置を、稀釈トン ネルと呼んでいる。自動車の分野では、全量希釈



図-1 PM計測系

法がデファクトスタンダードとされている¹⁾。しか し、舶用ディーゼル機関は排気量が非常に大きいた め、巨大な全量希釈トンネルが必要となり、全量希 釈法は事実上適用できない。そのため、部分希釈法 を適用した測定が行われている^{2,3)}。これらの中で、 前田³⁾は、使用燃料や機関速度が自動車と異なるた め、PMの性質が自動車と異なり、舶用ディーゼル 機関では独自の PM 計測システムを開発する必要が あると報告しているように、計測手法として課題が 残されている。また、前述の規定では、硫黄分 0.8 (%) までの燃料が適用範囲とされており、硫黄含有量の 高い舶用燃料の多くが適用できない現実もある。こ の様な背景から、当所においても舶用ディーゼル機 関排ガスに対応した PM 計測手法の確立にむけた研 究を進めており、平成19年度からは、地球環境保全 等試験研究費(環境省)により、3年計画で、PM 計測法に関する研究を行っている。この中では、当 所の実験用舶用ディーゼル機関に部分稀釈法を 適用して、硫黄分が 0.8 (%)より多い燃料を含め 種々の燃料で、PM 排出率の測定を行うとともに、 PMの分析(硫酸分の割合、有機溶媒に溶出する 成分割合や揮発特性、粒径分析、個々の粒子の 化学分析等々)を行っている。

本小論文では、この中で、当所実験用舶用デ ィーゼル機関に部分稀釈法を適用したときに 明らかになった、PM計測に対する排ガス脈動の 影響と、PM 粒径計測例とその分級した粒子の電 子顕微鏡による観測例について紹介する。 舶用 機関から排出されるPM粒径計測については、 Kasper⁴⁾が2ストロークディーゼル機関において測 定例を報告しているが、情報は非常に少ない。PM は、粒径により沈着機構がことなり、気体に近いナ ノパーティクルでは熱拡散による拡散沈着が主とな り、ミクロンオーダー以上では、慣性やさえきりの 効果により壁面に沈着する。したがって、粒径情報 は、人体影響を議論するため呼吸器系内の沈着部位 を求めたり 5)、測定系内の沈着量を評価する上で重 要な情報となる。

2. 実験装置および実験方法

2.1 PM計測系

図-1に当所の部分希釈法の計測系を示す。

以下、次章で引用する排ガスの希釈の度合い(希 釈比:q)について示す。希釈比の求め方は数種類 規定されている。ここでは、排ガスと希釈排ガス中 のCO₂濃度から計算する方法(式(1))と、部分希釈 トンネルに送る希釈空気流量と、それを排ガスと混 合した希釈排ガスの流量を実測し、二つの流量の差

表-1 供試機関の主要目

メーカー及び型式	マツイ MU323DGSC	
	立て型 4 ストローク	
	ディーゼル機関、過給機、	
	空気冷却器付き	
シリンダ数	3	
内径 (mm)	230	
行程 (mm)	380	
定格出力(kW (PS))	257 (350)	
最大回転速度(rpm)	420	

表-2 燃料性状

油種		A重油	潤滑油
密度@15℃	(g/cm^3)	0.8614	0.8967
動粘度@50℃	$C(mm^2/s)$	3.1	63.3
引火点	(°C)	84	222
流動点	(°C)	-17.5	-15.0
残炭	(wt%)	0.02	14.1
水分	(vo1%)	0.01	0.17
灰分	(wt%)	0.00	1.02
硫黄	(wt%)	0.09	0.52
金属分析	(ppm)		
(Na,Mg,Al	,Si,P,Ca	0	Na=3,Mg=14,
,V,Cr,Fe,Ni	, Cu, Zn,		A1=4, P=443,
Mo, Sn, Ba, Ph))		Ca=4240, Fe=
			2, Cu=2, Zn=5
			26, Pb=1

が吸引している排ガスであることから求める方法 (式(2)、ISO-16183より)を用いる。

$$q = \frac{(conc_E - conc_A)}{(conc_D - conc_A)} \quad \cdot \quad \cdot \quad (1)$$

 $CONC_E$: 排ガス中の湿り状態 CO_2 濃度

*conc*_D:希釈排ガス中の湿り状態 CO₂濃度

conc₄:希釈空気中の湿り状態 CO₂濃度

$$q = \frac{G_{TOTW}}{\left(G_{TOTW} - G_{DILW}\right)} \quad \cdot \quad \cdot \quad (2)$$

 G_{TOTW} :湿り状態の希釈排ガス質量流量(kg/h)

 G_{DILW} :湿り状態の希釈空気質量流量(kg/h)

2.2 供試機関

当所実験用舶用ディーゼル機関の主要目につい て表-1に示す。

2.3 供試燃料

実験に使用している燃料は、自動車で使用 される軽油と異なり、低硫黄A重油である。



燃料・潤滑油性状は、PM排出に大きな影響を 与えるため、それらの分析例を表-2に示す。

3. 実験結果及び考察

3.1 排ガス脈動の影響

前田が指摘している舶用ディーゼル機関の特異性 に加えて、当所舶用ディーゼル実験機関では、排ガ ス脈動がPM計測に影響を与えていることがわかっ た⁶⁾。以下、その概要を述べる。

PM計測系の機能を確認するため,前章で述べた 二つの希釈比(式(1)、(2))が一致するかどうかに ついて、確認実験を行った。図-1に示した測定系に おいて、流量を計測するマスフローコントローラ(以 下、MFCと略す)のMFC1(希釈空気)とMFC2(希釈 排ガス) 共に100 (・/min)に設定し (式(2)による 希釈比:無限大、すなわち希釈トンネル内に排ガス が入らず希釈用空気だけがそのまま希釈排ガスとし て MCF2 を通過するという条件)、各エンジン出力で の排ガスと希釈排ガスの CO2 濃度を計測し、式(1)に よる希釈比を求めた。図-2はその結果である。希釈 排ガス CO。濃度は、1(%)以上を示し、式(1)による 希釈比はエンジン出力 25 (%)では7となり、エンジ ン出力の増加と共に希釈比は小さくなった。従って、 両者は大きく異なった。問題は、式(2)による希釈比 を無限大すなわち、希釈トンネル内に排ガスが入ら ない条件に設定したにも関わらず、実際には、排ガ スが希釈トンネル内に侵入している点である。エン ジン出力 25 (%)において、式(1)から計算した希釈 比から、希釈トンネル内への排ガス吸引流量を計算 すると14 (・/min)となる。さらに、流量の収支か ら、14 (・/min)の排ガスが希釈トンネル内に入るな らば、希釈排ガスの流量が一定(MCF2の位置で)で

表-3 圧力測定機材

デジタルマノメータ	YEW TYPE 2654			
圧力センサ	TOYODA DD101K 10K			
DC アンプ	TOYODA AA3004			
フィルタ	NF 回路ブロック P-86			





(舶用特性、低硫黄重油を使用)

ある以上、希釈空気が同量排ガス管側に流出しな ければならない。これらの現象を説明する原因と して、ディーゼルエンジンの燃焼が連続的でなく 燃料の急激な燃焼を繰り返すことに起因する排ガ ス管内の圧力変動(脈動)により、希釈空気と排 ガスが入れ替わっている可能性があると考えられ、 次の測定を行った。

表-3 に圧力測定機材の概略、図-3 に排ガス管内 で計測した総圧の測定例を示す。図-3 に示した排 ガス管内の総圧は、平均圧が1(kPa)ではあるが、 -9(kPa)から11(kPa)の範囲で大きく変動した。 なお、変動の周期は本機関の排気弁開時期の周期 と一致している。図-2に示した実験では、式(2) による希釈比は無限大であり、本来、サンプリング プローブからは吸引されないはずである。しかし、 排ガス管内で大きな負圧を示すとすれば、それに伴 い希釈空気が排ガス管内へ吸い出され、逆流する可 能性がある。同時に、大きな正圧を示す間は、排ガ スがトンネル内に押し込まれるはずである。これら の排ガスと希釈空気の入れ替わりの結果として、時 間平均的に見た場合排ガスがトンネル内に流入し、 排ガス起源の CO₂が希釈排ガスで計測され、図-2 に 示した希釈比となることがわかった。

希釈空気が逆流していることにより、排ガス吸引 時のサンプリングプローブでの沈着成分が排ガス管 内へ戻されることからPM排出率が過小評価される 可能性がある。さらに、希釈空気の逆流は、サンプ リングプローブを冷却するために、プローブ内の沈 着を促進している可能性もあり、さらに過小評価し ている可能性がある。図-4 に示したPM排出率は、 逆流の影響を小さくするためサンプリングプローブ の内径を規定内で一番細くした場合の測定例である。 これまでの結果と比較して、エンジン出力によって は若干の増加が見られたが、プローブを細くするこ とで、プローブ管内の体積に対する表面積が増え、 プローブ内の沈着を増加させる要因もあるため、今 後も検討していく予定である。

以上より今後は、これらの影響を考慮又は影響を受けない計測システムの構築が必要となる。

3.2 PM粒径計測例

以下、当所実験用舶用ディーゼル機関でのPM粒 径計測例を示す⁷⁾。

粒径計測装置として幅広く使われているものに

サンプルガス



表-4 ELPIカスケードインパクタの仕様

段	ノズル数	ノズル直径	中位径*
		(mm)	(μm)
13	1	8.3	10.01
12	1	6.3	6.59
11	3	3.2	3.92
10	14	1.4	2.42
9	17	1	1.58
8	20	0.7	0.980
7	48	0.4	0.627
6	50	0.3	0.386
5	27	0.3	0.249
4	19	0.3	0.161
3	21	0.3	0.101
2	40	0.3	0.058
1	69	0.3	0.029

*中位径:インパクタに 50%の粒子が捕集さ れる粒径を空気力学径(密度1g/cm³の球形 粒子)で示す。

ELPI (Electrical Low Pressure Impactor) 及び SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer) があ る⁸⁾。我々は、分級した粒子の形状・成分をさら に分析するため、粒子を回収しやすい ELPI

(Dekati 社製)を用いることとした。ELPI は,図 -5に示すように PMを含むサンプルガスを吸引し、 コロナ放電により PMを帯電させ、表-4 に示す 13 段のカスケードインパクタを用いて 0.03~10 (μ m)の間で分級させ、その情報を P Mがインパクタ に与えた電気量から求めている。なお、粒径計測 は、排ガスを希釈器 (Dekati 社製 FPS-4000)で希 釈して行った。

発電特性 25(%)において、1(Hz)で2分間記録した平均粒径を図-6に示す。なお、図中の値は、希釈比を補正して、希釈比1に規格化している。 個数分布から質量分布への換算は、空気力学径を仮定して行った。

個数分布に着目すると、一番小さな粒径の個数 が非常に多くなったが、質量分布に着目すると、 一番大きな粒径で最大値をとり、3.92 (μm)以上 の粒径で、全質量の8割程度を占めた。

Kasper⁴の測定例では個数分布が示されており、 図-6 の最大値を示す粒径より2桁大きな値を示 している。また、SMPS にて粒径を計測しているた め、測定器の制限から1(μ m)以上のデータは示さ れていない。

塚本ら⁹⁾は、自動車用ディーゼル機関の排ガス を希釈トンネルで希釈し、PM粒径を ELPI で測定 している。彼らの結果では、1(μm)より大きい粒 径がほとんど検出されていない。一方、われわれ の結果では、重量ベースでは、1(μm)より大きい 粒径が8割以上を占め、この点が大きく異なって



図-6 発電特性 25%時の個数分布と重量分布

いる。燃料・エンジンが異なるため、単純な比較は できないが、今後さらなるデータの蓄積と、回収し た粒子の分析を行い、舶用ディーゼル機関から排出 され P M の特徴を明らかにしていく必要がある。

3.3 分級した粒子の電子顕微鏡による観測例 舶用特性75(%)で希釈排ガスをELPI に導入して 分級し、インパクタに取り付けたアルミ箔を回収し て、観測試料を得た。PM粒子の観察には、エネル ギー分散型X線検出器(EDX:JED-2200)を付属した フィールドエミッション型高分解能走査電子顕微鏡 FE-SEM(JSM-8500F)を用い(いずれも日本電子社製)、 必要に応じて成分分析を行った¹⁰⁾。なお、観測は高 真空中で行うため、PM中の揮発性物質は取り除か れている。

燃焼によって発生するスートは、9段(表-4に示 したインパクタの段を示す)よりわずかながら観察 され始め、それから粒径の小さなプレートでは、ス ートの凝集体がほとんどを占めるようになった。こ れらスートの一次粒子は、写真-1に示すとおり、20 ~60(nm)のサイズで、段によってこの一次粒子のサ イズ自体が変わることはなかった。また、これらの スートの中に、数百(nm)から大きくても2(μm)以 下の球形結晶粒がみられ、分析の結果、CaSO4である と考えられた。この他にも、スート内にはサブミク ロンオーダーの結晶粒が観察されたが、球形でない 粒子では重金属成分が含まれていることが多かっ た。

9段より粒径が大きなプレートでは、金属粒子を 多く含む粒子が散見された。これらの粒子は、均一 な組成のものではなく、写真-2に示すとおり金属系 の元素から成る微粒子が凝集しているものが多かっ た。

以上の結果から、比較的大きなサイズの金属系粒 子は、表-2の分析結果から考えると、潤滑油由来で あることが推測される。

4. まとめ

自動車用に開発されてきたPM計測装置を舶用 ディーゼル機関に適用するに当たって、その問題 点や舶用機関の特徴について述べてきた。今後船 舶に適用可能な計測システムを確立していくこと としている。

謝辞

本研究の一部は地球環境保全等試験研究費(環 境省)で実施したものであり、関係各位の協力に 感謝します。



写真-1 7段のスートと CaSO4 粒子



写真-2 12段で捕集された粒子

参考文献

- 1) 塚本雄次郎、後藤雄一:「マイクロトンネルを 用いた PM測定法に関する研究(第2報) – サンプリング系が PM測定に及ぼす影響につ いて-」、平成12年度(第30回)交通安全 公害研究所研究発表会講演概要(2000)、 pp. 105-108
- 2) 塚本達郎,船舶からのPM排出実態について、 日マリ学誌、Vol.42 (2007)、pp.31-34
- 3)前田和幸:「船舶における P M の計測と生成機 構」、日マリ学誌、Vol. 42 (2007)、pp. 23-30
- 4) Adelheid Kasper:「Particle Emission from Sulzer 2-stroke Marine Diesel Engines -Measurement, Analysis and Reduction」,日 マリ学誌、Vol.40 (2005)、pp.100-102
- 5)Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection, ICRP Publication 66: PERGAMON Press (1994)
- 6)大橋厚人、井亀 優、高木正英、石村惠以子: 「PM計測における排ガス脈動の影響について」、第77回(平成19年秋季)マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集(2007)、 (社)日本マリンエンジニアリング学会、 pp.5-6
- 7)大橋厚人、井亀 優、高木正英、石村惠以子: 「舶用機関から排出される粒子状物質の粒径 分布計測」、第76回マリンエンジニアリング 学術講演会講演論文集(2007)、(社)日本マリ ンエンジニアリング学会, pp. 59-60
- 8) 船戸浩二:「自動車排出微粒子の粒径分布計測 法と設備」、自動車技術、Vol. 59、No. 7(2005)、 pp. 59-64
- 9) 塚本雄次郎、小高松男:「電子式低圧インパク タを用いたディーゼル粒子状物質連続測定法 に関する研究(第1報)」、平成10年度(第 28回)交通安全公害研究所研究発表会講演概 要(1998)、pp.75-78
- 10)高橋千織,大橋厚人,井亀優:「舶用機関から排出される粒子状物質のSEM 観察」、第76回マリンエンジニアリング学術講演会講演論 文集(2007)、(社)日本マリンエンジニアリン グ学会、pp.61-62