

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 22 日現在

機関番号：12614

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820420

研究課題名(和文) 船用ディーゼル機関から排出される粒子状物質の計測手法と排出特性に関する研究

研究課題名(英文) Study on the measurement method and characteristics of particulate matter from marine diesel engine

研究代表者

佐々木 秀次 (SASAKI, Hidetsugu)

東京海洋大学・海洋科学技術研究科・助手

研究者番号：00554958

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、船用2ストロークディーゼル機関から排出される粒子状物質のPM濃度を計測した。PM濃度は、ISO8178-1に準拠した重量濃度計測を行うとともに、2種類の希釈方法を行った排ガスに対して粒径分布の計測を実施した。供試機関には電子制御式の船用2ストロークディーゼル機関(3UEC33LS2-Eco)を使用した。供試燃料油に低硫黄A重油を使用するとともに、硫黄分濃度の高いA重油も使用し比較を実施した。研究の結果、船用2ストロークディーゼル機関から排出される粒子状物質は、大部分が100nm以下で形成されていることが把握できた。また、硫黄分濃度が高くなると、その粒径は大きい領域へも影響を及ぼす。

研究成果の概要(英文)：In this research, the measurement of the particle size distribution and particulate concentration was performed with a low-speed two-stroke marine diesel engine. Measurement of the PM density was based upon ISO8178-1. And then, Particle Size distribution was measured to the exhaust gas which did 2 kinds of dilution method (Hot-dilution, Cooled-dilution). A three-cylinder Electronically controlled low speed two-stroke marine diesel engine (3UEC33LS2-Eco) was used as the test engine and 2 types of fuel oil (Low sulfur fuel oil and High sulfur fuel oil) was used. The results show that Most of Particulate matter from 2-stroke marine diesel engine is less than 100 nm. When the concentration for the sulfur content of fuel oil is high, Particulate size also becomes big. The increase of a small particulate matter of particulate-size was confirmed in the case which was diluted of ISO 8178-with compliant cooling.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：船用ディーゼル機関 粒子状物質 PM 排ガス希釈 粒径分布

### 1. 研究開始当初の背景

ディーゼル機関から排出される大気汚染物質には、NO<sub>x</sub>(窒素酸化物)、SO<sub>x</sub>(硫黄酸化物)、HC(炭化水素)、CO(一酸化炭素)、PM(粒子状物質)などが挙げられ、これらの大気汚染物質による、酸性雨、光化学スモッグ等の環境への悪影響、呼吸器障害、発ガン要因等の健康への影響が危惧されている。現在、陸上の工場、事業所及び自動車からの排出ガスに対してはさまざまな規制が行われてきており、今後のさらなる取り組み強化が展開されている。

一方、船舶に関しては、国際海事機関(IMO)において船舶からの大気汚染の防止に関連した国際的取り決めを確立すべく、1990年初頭より検討が開始され、1997年秋に船舶大気汚染に関する新たな取り決めが採択された。2005年5月にこの規制が発効し、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>、VOCs(揮発性有機化合物)、ハロン及びCFCsに対する規制が開始した。さらに2008年10月に開催されたIMOの海洋環境保護委員会(MEPC)においてNO<sub>x</sub>およびSO<sub>x</sub>規制の強化案が採択されている。船舶からの粒子状物質については、SO<sub>x</sub>規制により燃料中の硫黄分が制限されるため、これに伴う削減は期待できるが直接の規制については今のところ行われる予定はない。

船用ディーゼル機関から排出されるNO<sub>x</sub>は、その削減手法の研究に伴って様々な機関で排出濃度の計測が行われているが、粒子状物質に関しては規制の対象となっていないこともあって、これまでほとんど計測されていない。特に大型船の主機関として使われている大形2ストローククロスヘッド型ディーゼル機関は、陸上の実験用機関がほとんど存在しないために計測例が少ない。また、低減対策についてもこれまではNO<sub>x</sub>が中心で、粒子状物質についてはほとんど検討されていない。この様に船用ディーゼル機関に関する粒子状物質の計測および低減対策は、自動車用や陸上用の機関に比べて非常に遅れているのが現状である。

ディーゼル機関から排出される粒子状物質について、ISO(国際標準化機構)では往復動内燃機関全般に希釈法を採用することを提案しており、ISO8178にその測定法が定められている。そこでは、粒子状物質は、排気ガスを希釈トンネルに導き大量の空気で希釈後、フィルター上に捕集された物質として定義されている。希釈法は、大形の機関ではトンネル本体や希釈空気を送る装置が大きくなり、測定自体に困難が伴う。トラックやバスのディーゼル機関を対象とした粒子状物質計測設備(希釈トンネル)は、国内にも存在するが、それでもトンネルの全長は12mと巨大なものになっており、自動車用と比べて出力が100倍以上にもなる船舶のディーゼル主機関を対象とした設備は非現実的である。このため最近、大形機関からの粒子状物質計測のためにマイクロ希釈トンネル(超小型の

希釈トンネルで機関からの排気ガスの一部をトンネルに導き希釈する)に関する規格が、従来の希釈トンネルでの計測結果との相関などの調査研究の後に、ISOで承認(ISO 16183)され、これを利用した計測が開始されているが、大形の船用ディーゼル機関への適用例はほとんどない。このように、船用ディーゼル機関から排出される粒子状物質の計測においては解決すべき問題が多く残されている。一方、陸上における粒子状物質の環境基準では、2009年9月に新たに微小粒子状物質(PM<sub>2.5</sub>)の環境基準が告示された。これは、工業専用地域や車道等の一般公衆が通常生活していない地域を除いて、50%分離粒径2.5μm以下の微粒子に対して、1年の平均値が15μg/m<sup>3</sup>以下で、かつ、1日の平均が35μg/m<sup>3</sup>以下を基準値としている。それ以前の環境基準では10μm以下の浮遊粒子状物質を対象としていたが、微小な粒子になるほど重量あたりの表面積が多いことなどから、呼吸器や循環器への悪影響が強いことが示唆されているとともに、重力沈降が非常に小さく大気中に長時間浮遊する。自動車用の機関に関しては、既に重量ではなく粒径と個数による評価が検討されており、今後、環境や人体への影響を正確に評価していくためには、粒子状物質の成分や粒径の把握が不可欠となる。このような状況において、沿岸を航行する船舶や、港内に停泊する船舶等から排出される粒子状物質に関しても例外ではなく、排出される粒子状物質の粒径分布の把握が最重要課題であると考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究では、大型船舶の主機関として最も用いられている船用2ストロークディーゼル機関から排出される粒子状物質の排出特性、および、環境面、健康面に大きな悪影響を与え、大気中の浮遊時間が長いナノ粒子までを含めた粒径分布を明らかにすることを目的とする。ナノ粒子の計測手法の違いが計測される粒径分布等へ与える影響を把握することで、計測手法による計測結果の変化要因を明らかにする。さらに、機関の負荷率等の運転要因がPM排出状況へ与える影響を把握し、排ガス処理装置(DPFやSCR、触媒)の開発に寄与するデータとするとともに、汚染物質排出源としての排出状況を把握する。

### 3. 研究の方法

研究では供試機関として船用2ストロークディーゼル機関(3UEC33LS-Eco)を使用した。供試機関の概要を表1に示す。この機関は、大型船舶の主機関として多く使われているユニフロー掃気、クロスヘッド型の低速機関で、シリンダ径330mm、シリンダ数が3、最高出力が1,275kW(162rpm)である。また、排気弁駆動、燃料噴射ポンプ駆動、シリンダ油注油機と始動時の始動空管制は電子制御となっている。供試機関の出力軸は精密軸

馬力計を介して水制動力計に接続されており機関の出力を吸収する。この水制動力計の設定によってトルク（負荷）を調整する。本研究では、機関の負荷特性を船用特性（出力軸にプロペラが装着されている状態を模擬した運転で、出力(L)は回転数(N)の3乗に比例する）にて実施している。図1に機関回転数(横軸)と負荷率(縦軸)の関係を示す。

表1 供試機関の主要目

機関名称	3UEC33LSII-Eco
行程	1050[mm]
シリンダー径	330[mm]
シリンダー数	3
出力	1275[kW]
回転速度	162[rpm]

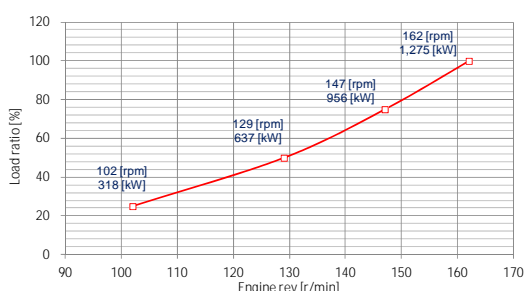


図1 機関回転数と負荷率の関係

本研究では、硫黄分濃度の異なる2種類の燃料油（JIS 1種1号油(以降、LSA重油と記す)およびJIS1種2号油(以降、HSA重油と記す)）を供試燃料油とした。それらの代表性状を表2に示す。なお、実験を複数回実施しているLSA重油に関しては、同一規格の燃料油を使用しているが、ロットによる多少の差があるためここでは一例を示している。LSA重油は硫黄分濃度0.089%、HSA重油では硫黄分濃度0.73%の燃料油である。

表2 供試燃料油の代表性状

	LSA	HSA
密度(15 ) g/cm3	0.869	0.873
反応	中性	中性
灰分[mass%]	0.001	0.001
動粘度(323 K)[mm2/s]	2.717	2.749
硫黄分 mass%	0.089	0.73
引火点[ ]	91.5	91.0
総発熱量[kJ/kg]	45220	44940

図2に実験装置の概要を示す。実験装置は上述の供試機関、計測系から構成される。本研究では、排ガスのサンプリング、希釈方法を大別して、希釈トンネルによる希釈サンプリング(クールダイリューション:以降C/Dと記す。)ロータリーディスク希釈器を用いて加熱した希釈空気および希釈環境による

希釈(ホットダイリューション:以降H/Dと記す。)の2種類を実施している。

C/Dでは、機関の排ガスの一部を分流しトランスファーチューブを經由して希釈トンネルに導く。希釈トンネルでは濾過した清浄な空気によって希釈を行いその希釈後排ガスに関して、フィルターによる重量濃度計測、ELPIによる粒径分布と粒径別の個数濃度の計測を実施した。なお、フィルターによる重量濃度計測および希釈方法は、ISO8178-1(対応JIS B8008-1)に準拠しており、ELPI(Electric Low Pressure Impactor)による計測では、希釈トンネルによって帰社した排ガスを更に2次希釈することでELPIの計測濃度範囲に対応した。ELPIは粒子状物質をインパクトによって空気動力学径で分級し、それぞれの濃度を計測する。

H/Dでは、機関の排ガスの一部を分流し、トランスファーチューブを介してロータリーディスク型希釈器に導く。ロータリーディスク希釈器では、一律の大きさの凹みが等間隔に付いた希釈ディスクが回転することによって排ガスを希釈空機内に輸送し希釈を行うが、希釈ディスクと接したブロックを加熱し設定した温度環境による希釈が行われる。希釈後、SMPS(Scanning Mobility Particle Sizer)において粒子状物質をモビリティ径別に分級した排ガスを、パーティクルカウンタ(凝縮粒子型)にて濃度を計測する。

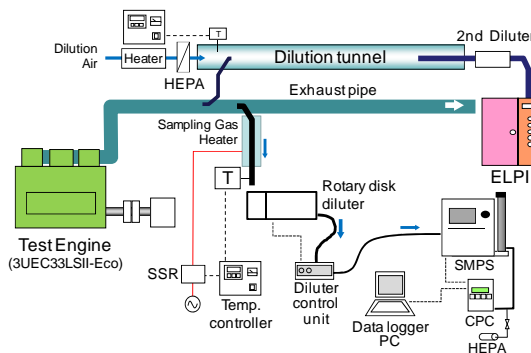


図2 実験装置の概要

#### 4. 研究成果

##### (1) フィルタ重量濃度

最初に機関から排出されるPM重量濃度を把握するため、フィルタによる重量濃度計測を実施した。図3に機関負荷率とPM重量濃度の関係を示す。図は縦軸にPM重量濃度を示しており、棒グラフは左から機関負荷率25%、50%、75%、100%の計測結果を示している。また、この結果はLSA重油による運転時の排ガスである。機関負荷率25%から75%まででは負荷率が高い程、PM重量濃度が高くなる結果であり、その後、負荷率100%では、PM重量濃度が減少し負荷率50%とほぼ同様の濃度となった。フィルター上に捕集したPMを、ジクロロメタンを溶媒とするソ

ックスレー抽出法により、SOF(Soluble Organic Fraction, PMのうち有機溶剤に溶けるもの)を分離し、その重量を秤量した。図4に負荷率とSOF分割合の関係を示す。このSOF分割合は、抽出を行ったPM重量に対するSOF重量の割合である。

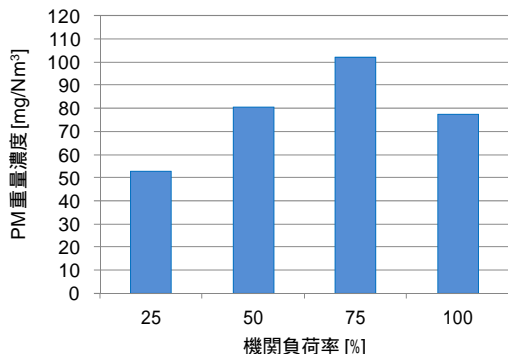


図3 PM重量濃度(LSA重油)

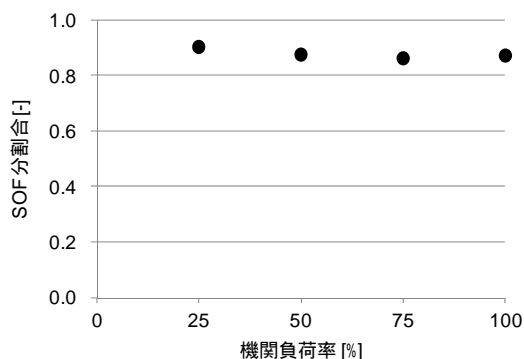


図4 負荷率とSOF分割合の関係

SOF分割合は全ての負荷率で0.85以上と高く、また計測を行った機関4負荷率(25, 50, 75, 100%)では、負荷率75%で最も低いSOF分割合となった。

### (2) ホットダイリユーションによる計測

図5にホットダイリユーションを行い、SMPSによって計測した機関4負荷率の粒径と個数濃度の関係を示す。図は縦軸に個数濃度(dN/dLogDp)、横軸に粒径を示しており、希釈率及びダイリユーション温度はそれぞれ、1000倍、423Kの計測結果である。

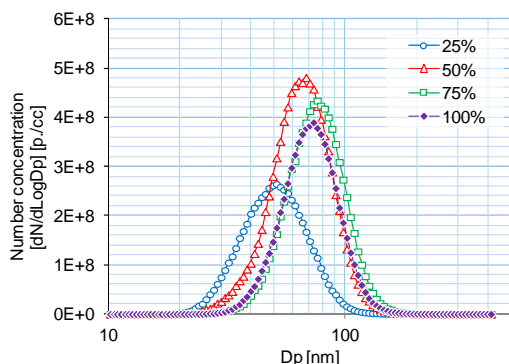


図5 粒径と個数濃度の関係(H/D)

縦軸に示す濃度は、希釈率を考慮した排気管内の濃度に換算した値である。全ての負荷率においてモノモーダルな分布であり、大部分が100nm以下の粒子によって形成されている。

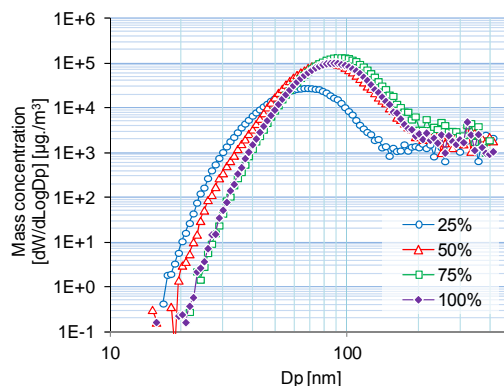


図6 粒径と重量濃度の関係(対数軸, H/D)

図6にSMPSによる粒径分布(重量濃度)を示す。重量濃度は図2に示した個数濃度を粒子が球形で密度1.0 mg/ccと仮定して換算しており、縦軸に重量濃度(dW/dLogDp)を対数軸で示している。粒径は大きいほど1個あたりの粒子重量も大きくなるが、個数濃度と同様に全ての負荷率で100 nm以下に重量濃度のピークが表れる。個数濃度とともに、重量濃度においても小粒径の粒子が非常に多いことが分かる。図7にSMPSによる計測粒径範囲の総個数濃度(PN: Particle Number)を示す。ここで示す総個数濃度は、各負荷率の単位体積辺りの粒子個数であり希釈率を考慮し排気管内の値に換算した濃度である。総個数濃度は、機関負荷率25%に対して50%で高濃度かつ4負荷率の極大濃度となり、それより高い負荷率では総個数濃度は減少していく結果であった。

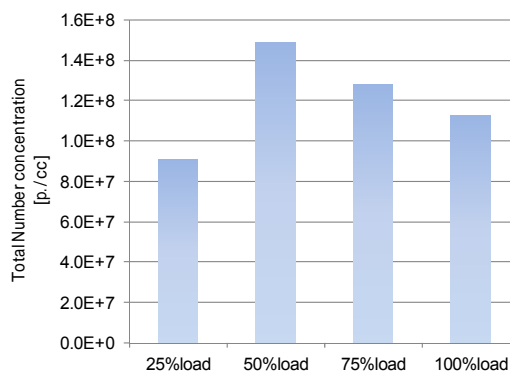


図7 SMPSによる粒子状物質の総個数濃度

### (3) クールドダイリユーションによる計測

図8にELPIによる粒径分布(個数濃度)の計測結果を示す。図は横軸に粒径、縦軸に個数濃度(対数軸, dN/dLogDp)を示しており、濃度は希釈トンネルおよび2次希釈器の希釈率を考慮した排気管内濃度に換算している。全ての負荷率において最も小さい粒径に個数濃度のピークが表れる。100 nm以上の粒径



ではピークの個数濃度と比較して個数濃度は大きく減少しており、個数濃度の大部分が100 nm以下で形成されていることがわかる。

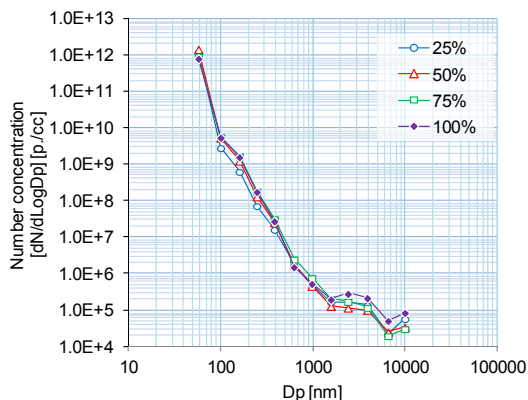


図 8 ELPI による粒径分布(個数濃度, dN/dLogDp)

(4) 燃料油の硫黄分濃度が PM の粒径分布に及ぼす影響

図 9 に LSA および HSA 使用時の粒径と個数濃度の関係を示す。図は機関負荷率 75%において排ガスの H/D を行い、SMPS によって計測した粒径分布で横軸に粒径、縦軸に個数濃度 (dN/dLogDp) を示している。LSA 運転時はモノモーダルな分布となるのに対し、HSA 運転時には 30-40 nm および 80 nm の 2 つの粒径領域に極大値を持つバイモーダルな分布となった。LSA 運転時には表れない 30-40 nm の極大値は、個数濃度が特に高く計測された。これは、燃料油中の硫黄分濃度が高い事に伴い、核生成される粒子が増大したためであると考えられる。図 10 に C/D を行い、ELPI によって計測した粒径と個数濃度の関係を示す。図 8 に示した SMPS の計測粒径範囲より大きい領域に濃度の高い分布は確認されず、LSA よりも粒径がやや大きい領域にも濃度が確認されるが、HSA においても段部分が粒径の小さい粒子で形成されていることが分かった。

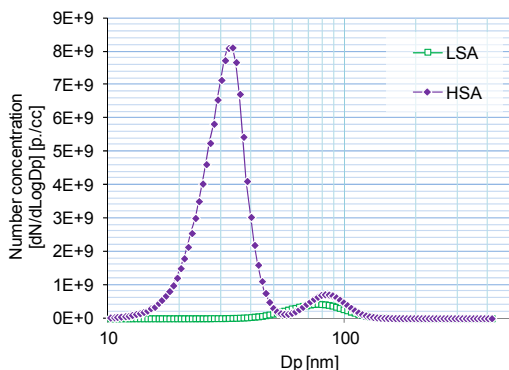


図 9 粒径と個数濃度の関係 (75 % Load, H/D)

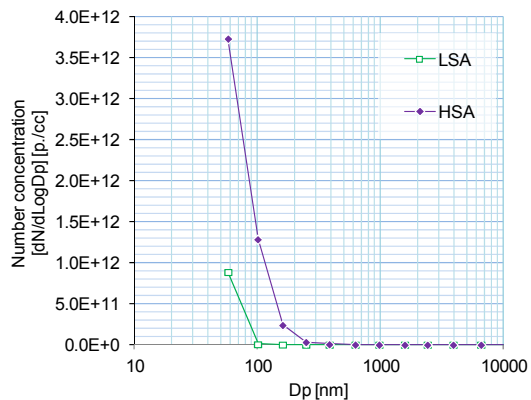


図 10 粒径と個数濃度の関係 (75 % Load, C/D)

#### <引用文献>

例えば、塚本達郎、船用ディーゼル機関における PM の排出特性、日本マリンエンジニアリング学会誌、第 41 巻 3 号、pp.71-77、2006。

ISO/DIS8178-1 RICE-Exhaust emission measurement - Part 1, 2006

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 2 件)

佐々木秀次, 塚本達郎, 船用 2 ストロークディーゼル機関から排出される粒子状物質の個数濃度と粒径分布, 日本マリンエンジニアリング学会 84 回マリンエンジニアリング学術講演会論文集, pp.101-102, 2014 年 11 月 20 日, 「海峡メッセ下関(山口県・下関市)」

朱遠彬 佐々木秀次, 塚本達郎, 船用 2 ストロークディーゼル機関の PM、NOx 排出特性-掃気温度、シリンダー冷却水温度の影響, 日本マリンエンジニアリング学会 84 回マリンエンジニアリング学術講演会論文集, pp.105-106, 2014 年 11 月 20 日, 「海峡メッセ下関(山口県・下関市)」

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐々木 秀次 (SASAKI, Hidetsugu)

東京海洋大学・海洋科学技術研究科 助手

研究者番号: 00554958

(2) 研究協力者

塚本 達郎 (TSUKAMOTO, Tatsuro)