

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：12614

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18293

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に関する研究

研究課題名(英文) Study on measurement method for Dust and PM concentration of exhaust gas from marine diesel engine

研究代表者

佐々木 秀次 (Sasaki, Hidetsugu)

東京海洋大学・学術研究院・助教

研究者番号：00554958

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000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と4ストローク機関の排ガスを対象とした煤じん濃度計測装置を製作し煤じんとPMの同時計測を実施した。計測の結果、煤じん計測時にフィルタ温度によって計測される煤じん濃度は3倍程の差が出る可能性がある。煤じん計測は排気管内温度と同程度の温度で計測する必要があるが、少しの温度差によって煤じん量が大きく変化する。船用4ストロークディーゼル機関の煤じんとPM濃度を比較すると、PM中のISF分濃度と煤じん濃度は概ね一致する。2ストロークディーゼル機関のPM中のSOF分割率は非常に高く、煤じん濃度はISF濃度より高い値を示し、排気管内においてSOF分凝縮が確認された。

研究成果の概要(英文)：In this study, we made a prototype device for measuring Dust concentration of exhaust gas from marine two-stroke diesel engine and marine four-stroke diesel engine. The results of the research are as follows, Depending on the gas temperature at the filter, the dust concentration of exhaust gas from the 4-stroke engine measured is about three times different. It's necessary to filtration dust on the filter same gas temperature as the inside the exhaust pipe temperature, but the dust filtration on the filter by a little difference in temperature changes greatly. In comparison with the dust and PM concentration of exhaust gas, the ISF concentration in PM is generally consistent with the dust concentration. The ratio of SOF in PM concentration of exhaust gas from marine two-stroke diesel engine is very high. The dust concentration was higher than the ISF concentration into PM. The Dust contains a lot of SOF fraction. It is considered that the SOF component is condensed in the exhaust pipe.

研究分野：内燃機関

キーワード：船用ディーゼル機関 粒子状物質 PM 煤じん 凝縮・凝集

1. 研究開始当初の背景

船用ディーゼル機関から排出される粒子状物質(PM)排出量に関する計測の多くはISO8178-1(JIS B8008-1)に準拠して行われている。自動車分野や陸上の環境基準値や陸上の発電機関等では、煤じん計測や固定発生源排出の粒子状物質(JIS Z8808, JIS Z7151)等による表記が行われており、それらの計測手法も大きく異なる。船用のディーゼル機関やそれらの排気後処理装置は、船舶に使用される他、陸上の内燃力発電所等でも使用され、それらの排出値、捕集効率、規制値等が融通されていない。本研究では、船用ディーゼル機関から排出される粒子状物質(PM, Particulate Matter)に関して、JIS や ISO で定義される複数の計測法、および粒径分布等の計測結果から、それらの比較および簡易的に行える濃度換算手法を提案する。

2. 研究の目的

船舶で使用されるディーゼル機関は大きく分類して、2 ストローク低速機関、4 ストローク高速・中速・低速機関に分類される。船舶において2 ストローク低速機関は主に大型船舶の主機関(推進機関)に使用されており、4 ストローク機関は補機関(発電機関)や、中・小型船の主機関等に使用されている。これらの機関は陸上においても小規模発電所の発電機関やポンプ場の動力源、大規模建築物における自家発電機関、コージェネレーションシステム等、船舶以外の陸上でも多くの用途に利用されている。

ディーゼル機関から排出される大気汚染物質には、NO_x(窒素酸化物)、SO_x(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。

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_{2.5})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 2.5 μm 以下の微粒子に対して、1年の平均値が 15 μg/m³ 以下で、かつ、1日の平均が 35 μg/m³ 以下を基準値としている。それ以前の環境基準では 10 μm 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。

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_x、SO_x、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_xおよびSO_x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_x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とされている。

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、大型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、大型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。一方、陸上に設置される機関では、JIS Z8808やJIS Z7151を適用した排ガス中のダスト濃度の測定、固定発生源排出粒子の濃度測定等、用途や設置方法によって様々な計測方法が行われ、設置許可の申請や排ガス後処理装置効率の測定に使用されている。

このように、機関の設置方法、使用用途、適応法令・条例等によって、計測手法が全く異なり、例えば陸上用に開発された排気後処理手法が船舶用に展開されない等の、技術展開の弊害が起きている。その一方で、ディーゼル機関から排出される粒子状物質は、運転方法や負荷率、機関の方式、燃料油の性状等によってその性状が大きく異なる。そのため、各計測手法間で単純な換算は不可能であり、各計測手法における測定値のデータ蓄積が必要であると考えられる。

3. 研究の方法

以上のような背景の下で、申請者は、これまでに現有の船用低速ディーゼル機関(船用2 ストローククロスヘッド型ディーゼル機関)(3気筒、排気タービン過給機付、シリンダ径:330mm、出力:1275kW、回転数:162rpm)や、船用高速ディーゼル機関(船用4 ストロークトランクピストン型ディーゼル機関)(3

気筒、排気タービン過給器付、シリンダ径：130mm、出力：73.6kW、回転数：1200 rpm)に現有の小型希釈トンネルを取り付けてA重油やC重油を燃料として運転・計測を行い、機関負荷率やシリンダ注油率と粒子状物質排出濃度の関係、粒径分布の違いなど調べ、船用ディーゼル機関の粒子状物質排出特性を明らかにしてきた。

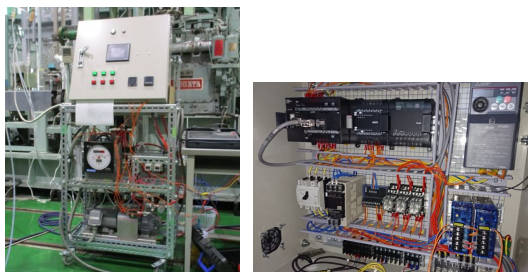
本研究では、これまでの研究成果を生かして、2種類の船用ディーゼル機関から排出される粒子状物質に対して、計測手法による測定値の変化を計測し、それらの知見を利用し、機関負荷率や、燃料油の成分等を変化させ、その変化に対する排出特性、計測値の把握を目的とする。

計測手法の違いは、排ガスのサンプリング時温度の違い等があることから、排ガス中に含まれる揮発性成分による測定差が考えられる。研究では申請者が知見を持っているISO8178による計測をベースとして、計測結果の変動幅、揮発性物質の濃度、ソックスレー抽出法を使用したSOF/ISF分割の算定を実施する。

4. 研究成果

(1) 煤じん計測装置の製作

図1に製作し煤じん計測装置の外観および煤じん計測装置の制御部を、図2に煤じん計測装置の系統図を示す。



(a) 装置外観 (b) 装置の制御部
図1 煤じん計測装置

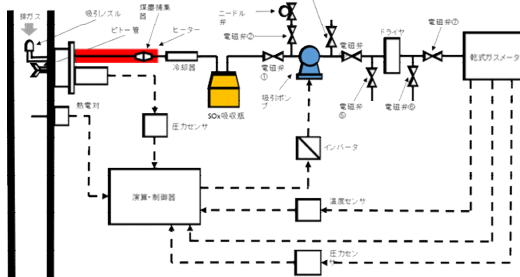


図2 煤じん計測装置の系統図

製作した装置は、煤じんフィルタのサンプリングを行うポンプ、マスフローコントローラ、ガス流量計(体積流量計)、制御部および計測系によって構成される。ポンプはインバータによって回転速度が調整できるようになっており、マスフローメータとともにサン

プリングの吸引速度の調整が行える。また、サンプリング流路には、バイパス流路が備えられており、測定開始前にバイパス流路によって等速吸引を実現するポンプ回転速度を予め調整できるようになっている。制御部では、サンプリングプローブとともに排気管内に挿入したピトー管、熱電対等によって計測した動圧、静圧、温度等の計測値を処理し、排ガスの平均流速を算出し、等速吸引を実施するためのサンプリング流量(吸引速度)になるように、ポンプ回転速度、マスフローコントローラを調整する。

標準的な煤じん計測装置は、フィルタをホルダーへ設置後、温度等の条件を設定し、計測開始可能な状態になってから、計測対象の排気管(もしくはダクト)の計測口にプローブを挿入し計測を開始する。本研究で実施したディーゼル排ガスの計測では、状況にもよるが運転中に排気管の計測口を開けることは、排ガスの計測室内への漏洩や排ガス温度の観点から非現実的で有り、今回製作した装置では、電磁弁およびその開閉制御によって計測を出来るように工夫を行った。

また、ディーゼル機関の排気管内では、運転中には激しい圧力脈動があり、最初、計測開始前や計測中にフィルタの破損(破れ)が多発し計測が困難であった。サンプリングプローブ-フィルタ間に高温用のバルブ(濃度減衰を防止するためフルポアバルブを選定)を挿入することで、計測開始前のフィルタ破損を防止するとともに、フィルタホルダ内のフィルタ固定方法を工夫し、フィルタの破損を防止した。

(2) PM 計測装置

本研究では JIS B8008 による PM 計測濃度と煤じん濃度の比較を実施している。図3にPM計測装置の概要を示す。

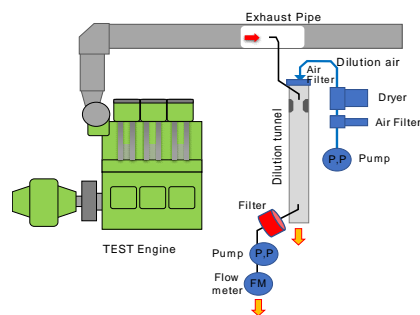


図3 PM計測装置の概要

PM計測装置は希釈トンネルと希釈空気系統、フィルタ系統にて構成される。機関から排出された排ガスの一部を排気管に挿入したサンプリングプローブからトランスファチューブを経由して希釈トンネルへ導く。希釈トンネルは、排ガスの一部に清浄な希釈空気を混合し排ガスを希釈冷却する。希釈トンネルの出口にはフロアを設置し、希釈トンネル内を負圧とすることで排ガスを効率よく希釈トンネル内へと導いている。フィルタの

入口部分では 47 ± 5 [] になるように、希釈空気温度を調整している。希釈率は排ガス、希釈後排ガス、希釈空気の二酸化炭素濃度から算出している。希釈後排ガスの一部を希釈トンネル内から分流しフィルタを通過させる。このフィルタ上に捕集された PM を秤量することで、PM 重量を計測し、希釈率、フィルタ通過希釈排ガス量等から PM 濃度を算出した。

(3) 捕集フィルタの特性

JIS B8008 における PM 計測では PTFE 処理されたグラスファイバフィルタを用いた。また、煤じん計測では、バインダーを含まない石英フィルタを用いた。PM 計測のフィルタの最高使用温度は 260 ，一方、煤じん計測のフィルタは 1093 である。PM 計測のフィルタは PTFE 処理されており吸湿性が少ないとされている。一方、石英フィルタは吸湿性が多く、秤量や静置時の条件でどの程度重量に差が生じるかを予め調べた。フィルタの吸湿重量を図 4 に示す。

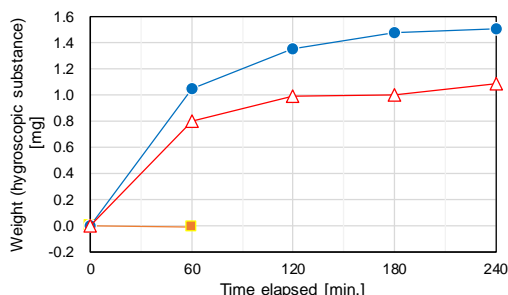


図 4 フィルタの吸湿重量 (47mm ,石英フィルタ)

図 4 は横軸に経過時間、縦軸に吸湿による重量変化を表している。試験開始 (図の 0 min.) までフィルタを炉に保管して、その後、各条件の静置を開始した。図中の丸で示すプロットは、秤量試験室 (雰囲気: 22 ± 3 [], 湿度: 45 ± 8 [%RH]) に静置した状態、三角で示すプロットはドライデシケータ (シリカゲルによる乾燥) 内に静置した状態、四角で示すプロットは炉内 (250 []) に静置した状態を示している。また、直径 47mm の石英フィルタは 1 枚、大凡 115~125 mg である。秤量試験室内に静置した場合 1 時間で 1.0 mg 程度の吸湿があり、その後 3 時間程度で吸湿量 1.4 mg 程度となり値が安定する。ドライデシケータ内に静置した場合は、秤量試験室に静置した場合と比較して、吸湿重量は 20 %程低い値となる。炉内に静置した場合には重量は変化しない。JIS Z8808 では、捕集前後に高温の炉内に静置し、その後、ドライデシケータ内で冷却し計量する事となっているが、冷却時では計量前後とも冷却時間等を合わせる等の注意が必要であることが分かる。また、直径 47 mm のフィルタで最初の 1 時間で 0.8 mg 程度の吸湿の影響があることを考慮する必要がある。

(4) 供試機関および供試燃料油

本研究で使用した供試機関の主要目を表 1 および表 2 に示す。供試機関には船用 4 ストロークディーゼル機関 (表 1) および船用 2 ストロークディーゼル (表 2) を用いた。船用 4 ストロークディーゼル機関は、回転速度 1200 rpm, 最高出力 73.55 kW の高速ディーゼル機関である。また、船用 2 ストロークディーゼル機関は、回転速度 162 rpm, 最高出力 1,275 kW の電子制御式低速ディーゼル機関である。

表 1 供試機関の主要目(4 ストローク機関)

Name	3L13AHS
Bore [mm]	130
Stroke [mm]	160
Number of cylinder	3
Output [kW]	73.55
Engine speed [rpm]	1,200

表 2 供試機関の主要目(2 ストローク機関)

Name	3UEC33LSII-Eco
Bore [mm]	330
Stroke [mm]	1050
Number of cylinder	3
Output [kW]	1275
Engine speed [rpm]	162

両方の供試機関とも、機関の運転には市販の低硫黄 A 重油 (JIS1 種 ,1 号油) を使用した。

(5) 煤じん計測時の捕集温度の影響

船用 4 ストロークディーゼル機関の排ガスを利用し、煤じん計測時の捕集フィルタ温度が計測される濃度値に与える影響を調べた。なお、この計測では、PM 濃度に関して同時計測を実施した。図 5 に実験装置の構成を示す。

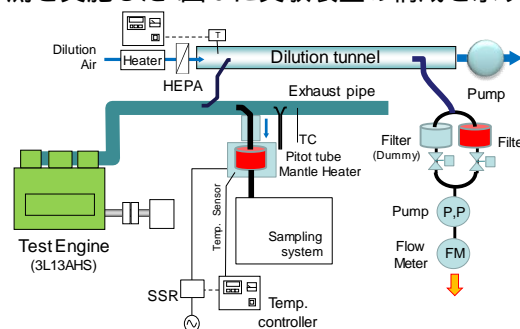


図 5 実験装置の構成

装置は供試機関とその排気管に接続した煤じん計測用サンプリング装置、希釈トンネル類で構成される。JIS B8008-1 による PM 計測は図中の希釈トンネルを用いて行った。希釈トンネルは排気管内にプローブを設置し、排ガスの一部を希釈トンネル内へ導き、清浄な希釈空気によって希釈するとともに 47 ± 5 まで冷却する。その後希釈した排ガス中の PM をフィルタによって捕集し重量による計測を実施した。JIS Z8808 による煤じん濃度計測は排気管内にプローブを設置し排ガ

ス中の煤じんを直接フィルタ上へサンプリングした。プローブ先端には、内径 6mm の吸引ノズルを設置しピトー管によって計測した排ガス流速と吸引流速の相対誤差が -5 ~ +10 % となるように吸引流速を調整しており、また、フィルタホルダおよび排気管からのチューブではヒータによる加熱を行っている。既往の研究から船用 4 ストロークディーゼル機関から排出される PM は、発電機特性の低負荷率時に SOF(Soluble Organic Fraction) 分割が高い事が報告されている。ここでは、排ガスの計測時の温度等が計測値に与える影響が大きいと考えられる、発電機特性の負荷率 30 % の排ガスに関して、PM と煤じんの同時計測を行った。

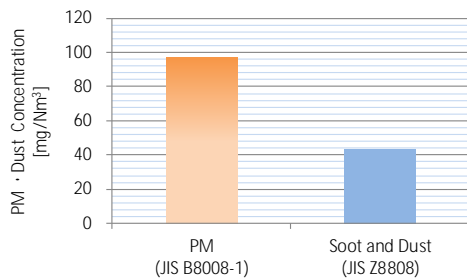


図 6 PM および煤じん濃度

図 6 に同時計測した PM および煤じん濃度を示す。図は発電機特性の負荷率 30 % の計測結果で、縦軸に PM または煤じん濃度 (mg/Nm³) を示している。また、煤じん計測ではフィルタホルダ温度を 250 (吸引ノズル部排ガス温度 280) で計測している。PM 濃度に対して煤じん濃度が 44.3 % となり、既往の研究で発電機特性の負荷率 30 % の ISF 割合が 45 % 程であったことから SOF 分が殆ど気体となっており計測されていないためであると考えられる。図 7 に計測(捕集)後の PM 計測と煤じん計測のフィルタを示す。図に示すように PM 計測フィルタに対して煤じん計測フィルタでは黒色が濃く完全黒色に近い状態であった。

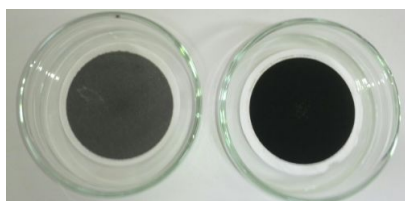


図 7 捕集後フィルターの状況

(左 PM 計測フィルタ、右：煤じん計測フィルタ)

フィルタホルダ温度を 150 ~ 260 の範囲で 4 温度選択し、計測される煤じん濃度の比較を行った。図 8 にフィルタホルダ温度と計測される煤じん濃度の関係を示す。図は縦軸に計測される煤じん濃度、横軸にフィルタホルダ温度を示している。図のようにホルダ温度によって計測される煤じん濃度が大きく変化し、ホルダ温度が 150 の計測値は図 6 に示した PM 濃度より高濃度となる。船用デ

ィーゼル機関の排ガス煤じん濃度を計測する場合、サンプリング位置や温度に特に留意する必要があると考えられる。

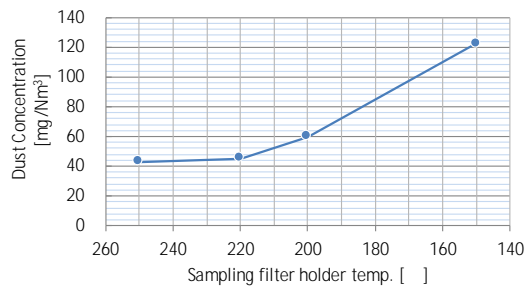


図 8 フィルタホルダ温度と計測される煤じん濃度の関係

(6) 船用 4 ストロークディーゼル機関の煤じん濃度

図 9 に船用 4 ストロークディーゼル機関の船用特性(プロペラ負荷特性)運転時の PM 濃度を示す。図は左から機関負荷率 30 %, 50 %, 75 %, 100 % の PM 濃度を示しており、それぞれ灰色の部分 ISF 分、黄色の部分 SOF 分を表している。計測は図 5 に示した計測器構成で、JIS B8008 に準拠して行った。フィルタ秤量後、ジクロロメタンを溶媒としたソックスレ抽出を実施し、SOF 分を分離、秤量し SOF 分の割合を算出した。

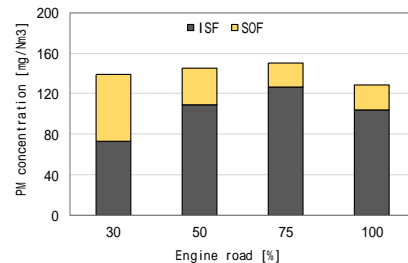


図 9 PM 濃度(船用 4 ストローク、船用特性、LSA 重油)

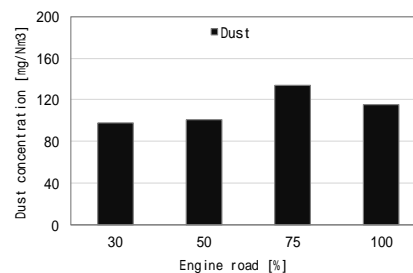


図 10 煤じん濃度(船用 4 ストローク、船用特性、LSA 重油)

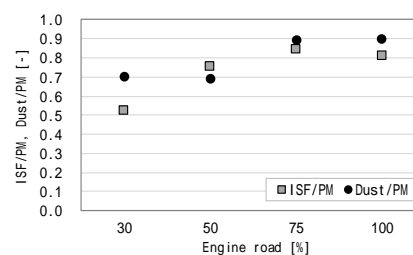


図 11 PM 濃度に対する ISF,煤じん濃度比率

図 10 に図 9 に示した PM 計測と同時計測を実施した煤じん濃度を示す。図は図 9 と同様に左から機関負荷率 30, 50, 75, 100 % を表しており、縦軸に煤じん濃度を表している。煤じん濃度、PM の ISF 濃度ともに、機関負荷率 75 % で最も高い濃度となった。

図 11 に図 9, 10 で示した値から、PM 濃度に対する ISF, 煤じん濃度比率を示す。

図は横軸に機関負荷率、縦軸に PM 濃度に対する比率 (PM 濃度を 1 とする) を表しており、四角のプロットが ISF, 丸のプロットが煤じんを示している。SOF は高温な排ガス中ではガス状と考えられるが、図 9 に示す結果から煤じん濃度比率が ISF 濃度比率より高い、すなわち、煤じんとして SOF の一部がフィルタ上に捕集されていることが分かる。負荷率 100 % の煤じん計測の秤量後フィルタをソックス抽出した結果、フィルタ上に捕集された煤じん 7.781 mg から 0.195 mg (約 2.5 %) の SOF 分が確認された。

(7) 船用 2 ストロークディーゼル機関の煤じん濃度

図 12 に船用 2 ストロークディーゼル機関の PM 濃度を示す。図は左から機関負荷率 25, 50, 75, 100 %, 縦軸に PM 濃度を示しており、図中の灰色部分が ISF 分, 黄色部分が SOF 分を示している。4.6 項で示した船用 4 ストロークディーゼル機関と比較すると、全ての負荷率において SOF 分の割合が高く、また、PM 濃度、ISF 濃度ともに負荷率 50 % で最も高い濃度を示す。

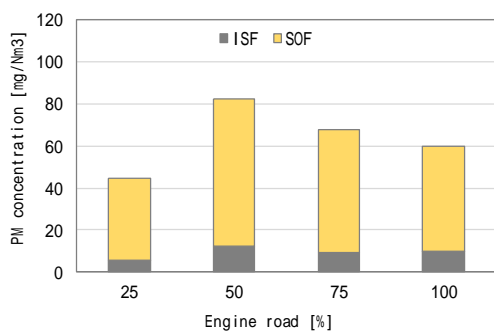


図 12 PM 濃度 (船用 2 ストローク, 船用特性, LSA 重油)

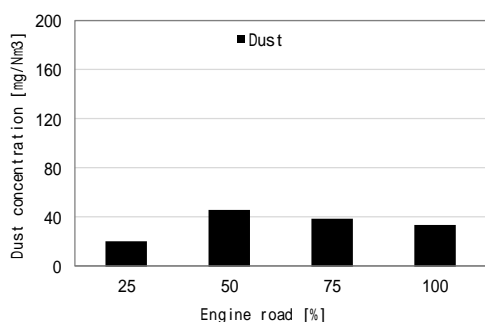


図 13 煤じん濃度 (船用 2 ストローク, 船用特性, LSA 重油)

図 13 に船用 2 ストロークディーゼル機関の煤じん濃度を示す。図は図 10 と同様に左から機関負荷率 25, 50, 75, 100 % を示しており、縦軸は煤じん濃度を示している。船用 4 ストロークディーゼル機関の排ガスと比較すると、図 10 の ISF 分濃度、図 11 の煤じん濃度から、ISF 濃度に対して煤じん濃度は高く、煤じんに多くの SOF が含まれると考えられる。SOF 分は排気管内の高温、高濃度状態において凝縮核となる ISF 表面に凝縮すると考えられているが、その凝縮状況は把握されていなかった。煤じん計測によって、排気管内コンディション (温度、凝縮成分露点温度 (濃度)、圧力等) においても、凝縮生成成分の一部が凝縮していることが分かった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 1 件)

佐々木秀次, 塚本達郎, 船用ディーゼル機関の排ガス中の PM 濃度と煤じん濃度の比較, 日本マリンエンジニアリング学会 86 回マリンエンジニアリング学術講演会 論文集 pp.57-58 2016 年 10 月 24 日, 「姫路商工会議所 (兵庫県・姫路市)」

〔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〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐々木 秀次 (SASAKI, Hidetsugu)
東京海洋大学・学術研究院 助教
研究者番号: 00554958

(2) 研究協力者

塚本 達郎 (TSUKAMOTO, Tatsuro)
東京海洋大学・学術研究院 教授