

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：12614

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2021

課題番号：17K06961

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状態変化に関する研究

研究課題名（英文）Study on change in physical state of particulate matter exhausted 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・准教授

研究者番号：00554958

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、船用ディーゼル機関の排ガスに含まれる凝縮性成分の状態変化に関する計測を実機の排ガスを使用して行った。研究の結果から、船用4ストロークディーゼル機関の排ガスでは、排気管内の温度環境において、凝縮性成分の核生成が起きており、船用2ストローク低速ディーゼル機関の排ガスでは、核生成による変化は比較的少ないことが計測によって明らかになった。4ストローク機関の凝縮性成分は沸点が低温である燃料油が多くを占めていて、2ストローク機関は沸点が高温である潤滑油成分が多くを示していることが考えられることから状態変化に関しても由来となる燃料油や潤滑油の沸点による影響、排出濃度による影響があることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、船舶において主機関や発電機関として利用されるディーゼル機関の排気管内における、凝縮性成分の粒子化の状態変化に関して考察している。研究成果は排気管に装備されるエコノマイザやSCR触媒、スクラパー装置、集塵装置、セラミックフィルタ等の機器類において、設置場所等によって排ガス内に浮遊する粒子量や粒径、濃度の予測を行うための一資料となり、これらの機器の設計・計画、ガス接触面積等の計画、ガス接触表面の孔等の計画、効率、劣化度合いの予測等、また集塵を目的とする機器においては、捕集ターゲットとなる粒子の濃度や粒径、機器通過後の新たな粒子生成を考える上で必要となり、これらの項目に寄与すると考える。

研究成果の概要（英文）：In this study, characteristics of condensation and nucleation of particulate matter in exhaust gas from marine diesel engine were investigated. As a result, in the exhaust gas from marine 4-stroke diesel engine, nucleation and condensation components occurs in exhaust pipe conditions. In addition, exhaust gas from marine 2-stroke low-speed diesel engines has change relatively little due to nucleation particulate matter relative to exhaust gas from 4-stroke engine. It is considered that most of the condensable particulates in exhaust gas from 4-stroke engines derived from fuel oils with low temperature boiling point, and its particulates from 2-stroke engines are mainly lubricating oil components with a high temperature boiling point. Changes in the state of nucleation and condensation particles in exhaust gas are affected also affected by the boiling point of the fuel oil and lubricating oil, concentrations of the exhaust gas.

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 凝縮性成分 揮発性成分 核生成 粒径分布

1. 研究開始当初の背景

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。

ディーゼル機関から排出される粒子状物質は、有機溶剤に溶解する可溶性有機物質(SOF)、固形の炭素質を主とする不可溶性有機物質(ISF)に分類される。船用ディーゼル機関の排ガスを希釈トンネルを使用した希釈・冷却を行い、濾紙上にサンプリングした粒子状物質では、SOFが多くを示している。発がん性、変異原性とされる多環芳香族炭化水素はSOFに多く含まれている。また、SOF分は揮発性成分であり、サンプリング時の温度や濃度、希釈温度、倍率によってはガス状であり、サンプリング方法によっては検出されないもしくはカウントされない等が考えられるが、低質油が利用される船用ディーゼル機関の排ガスを対象としてまとめられた物が存在しない。

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。ここでは、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。

陸上に設置される機関では、JIS Z8808を適用した排ガス中のダスト濃度の測定やJIS Z7151を適用した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。

ブラックカーボンとは、IMO(国際海事機関)において定義の決定が2015年に行われ、吸光度、高温安定性、有機溶剤不可溶である等、定義された。しかし、計測方法に関しては決定に至ってなく、反射式スモークメータや、光音響法等の比較検討や計測手法に関する研究が進められている。また、環境分野の研究として、船用ディーゼル機関の排ガスに含まれるすすの変異性調査として、排気管内堆積粒子状物質を対象とした研究等が行われている。

2. 研究の目的

前記の背景のように、粒子状物質の計測方法は目的に応じて、多数の手法があり研究・評価等が進められている。しかし、前述のとおり、SOF分の多い船用ディーゼル機関の排ガスでは、揮発性成分が多く、特に環境への悪影響評価で使用されるPAH等は揮発性成分であるため、計測時に計測される状態である必要があると考えるが、機関から排出された排ガスが、どのような時間経過、温度変化後、どのようにサンプリングを行い、計測法に合わせた希釈等の濃度調整や温度変化を行った場合に、揮発性成分の核生成頻度や凝集進捗状況を明らかにする必要があると考えられる。また、それらが、実際に船舶のファンネルから大気へ放出される状態と、どのように違うのかを把握する必要がある。

本研究では、これまでの研究成果を生かし、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、排気管内における粒径分布と、揮発性成分の核生成状況を、粒径分布計測手法とJIS Z8808による計測を行い、個数濃度だけでなく重量濃度に対する考察を行う。また、排気管内における温度低下、すなわち、高濃度状態における温度低下が計測される粒子状物質に対する検討も実施する。機関からの排出後、排気管内における温度低下や、排ガスエコノマイザのような熱回収機器(排ガス側から見て排ガス冷却器)が粒子状物質の核生成に与える影響を把握する。

排気管内の状態を把握した後、それらを計測するためのサンプリング(吸引速度と排ガス速度の関係等)条件、サンプリング後の排ガス温度変化、低温希釈、高温希釈、希釈倍率による粒子

状物質の計測を行い、計測値変化、SOF の凝縮状態等を把握し、現在行われている計測手法のサンプリング環境別の、粒子状物質の状態を明らかにする。

3. 研究の方法

研究は実験を主体に進めた。実験は陸上のテストベンチに設置された船用 4 ストローク中速ディーゼル機関(3 気筒, 73.6 kW, 1200 min⁻¹), 船用 2 ストローク低速ディーゼル機関を使用している。それぞれの機関(以降, 供試機関)を、燃料油として JIS1 種 1 号重油を使用して運転して、排出される排ガスを排気管からサンプリングして実験を行っている。機関の詳細は後に記載する。排ガスの計測は、粒子状物質濃度とその個数濃度粒径分布を中心に実施しているが、一部、HC 濃度(ガス成分)の同時計測も実施した。

粒子状物質の希釈手法は、希釈トンネル(ミニトンネル)を用いた低倍率希釈と、エゼクタ希釈器を用いた希釈、ロータリーディスク式希釈器を用いた高倍率希釈を用いて、一段希釈または二段希釈を行っている。また、排ガス温度の低下状態や再加熱に関しては、流路となる貫通穴を加工した金属ブロックに、プラグヒーターを埋め込み、ブロック温度またはブロック通過後の排ガス温度を用いて加熱量を制御することで排ガスの温度変化を行った。

4. 研究成果

(1) 船用 4 ストロークディーゼル機関の排ガス温度変化と粒子濃度の関係

船用 4 ストロークディーゼル機関の排ガスを対象とした実験では、JIS B8008-1 に準拠した PM 濃度(質量濃度)計測と同時に、粒径分布および個数濃度の計測として、Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS)によって分級した粒子濃度を凝縮粒子カウンタ(Condensation Particle Counter, CPC)による計測、および、多段低圧インパクターで粒子濃度を粒子の帯電量で計測する Electrical Low Pressure Impactor (ELPI)を用いた計測を実施した。実験に使用した供試機関の主要目を表 1 に示す。図 2 に燃料油

に市販の低硫黄 A 重油(JIS 1 種 1 号重油)を使用して、発電機負荷特性(機関回転速度一定でトルクのみが変化する負荷特性)で運転したときに排出される排ガスの PM 濃度および Soot 濃度を示す。(a)に示す PM 濃度は図 1 に示す希釈トンネルにてフィルタ上に捕集した PM 質量濃度であり、そのフィルタをジクロロメタンを溶媒とするソックスレー抽出によって SOF 分の割合も求めている。図のように機関負荷率が高いほど、ISF の濃度も高くなる傾向があり、一方、SOF 分割率は負荷率が高いほど低下する傾向がある。(b)に示す Soot 濃度は、反射式フィルタスモークメーターにて無希釈状態の排ガスを通過させたフィルタの反射率から FSN を求め Soot 濃度に換算した値である。(a)の PM 中の ISF 濃度とほぼ等しい傾向と値を示すが、Soot 濃度の方が若干低い値を示すことがわかる。このことから、排気管内において Soot の黒色度を低下させる Soot 表面への凝縮物、凝縮状態があることや、Soot 以外の潤滑油添加物の固形成分が含まれていること等が

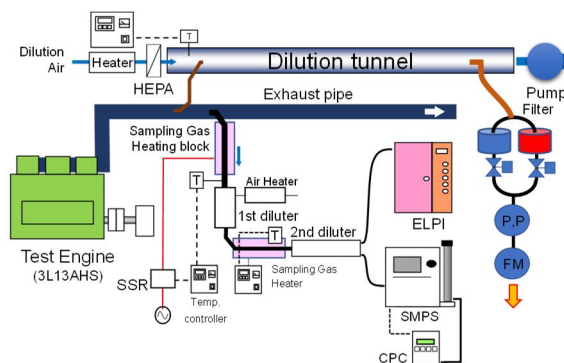
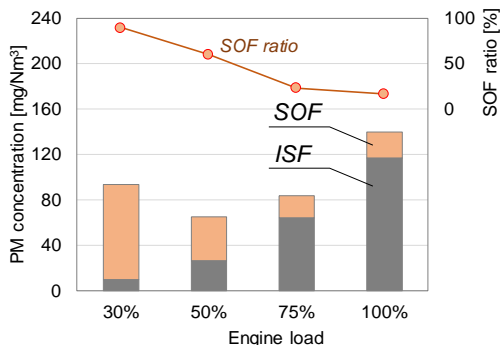


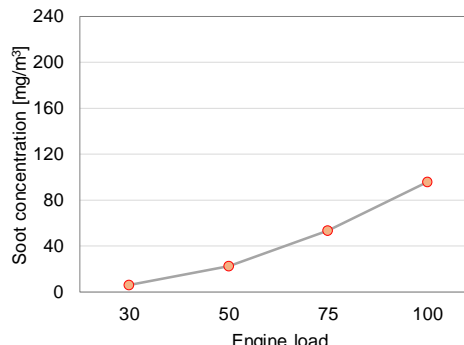
図 1 実験装置の概要

表 1 供試機関の主要目(船用 4 ストローク機関)

Name	3L13AHS
Type	4-stroke turbocharged medium speed marine diesel engine
Output	73.55 [kW]
Engine speed	1200 [min ⁻¹]
Cylinder number	3
Bore × Stroke	130 [mm] × 160 [mm]



(a) PM 濃度および SOF 割合



(b) Soot 濃度

図 2 PM 濃度・Soot 濃度 (発電機負荷特製)

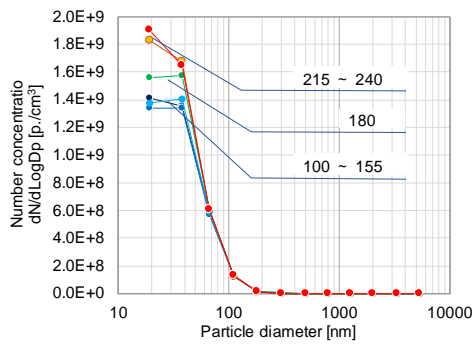


図3 排気温度低下による粒径分布変化
(発電機負荷特製, 機関負荷率 30%)

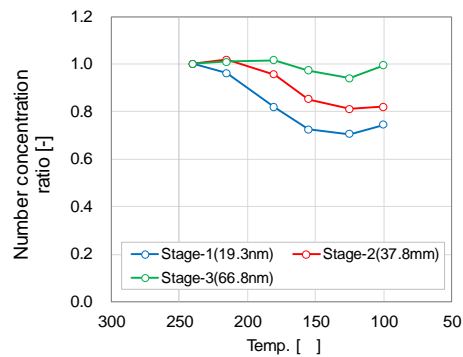


図4 排気温度低下と個数濃度変化の関係
(発電機負荷特製, 機関負荷率 30%)

考えられ¹⁾, それらの影響が反射式スモークメータの Soot 濃度に影響があることを考慮して計測結果を扱う必要があると考えられる。

図3に図2で示したPM濃度の中で最もSOF分の割合が高い機関負荷率30%の排ガスを,加熱ブロックを通過させ温度低下させた場合のELPIによる粒径と個数濃度の関係を示す。ELPIによる計測では,加熱ブロック通過直後の排ガスを,エゼクタ方式の希釈器により2段階希釈(加熱希釈)しており,1段目の希釈率は13.78,2段目の希釈率は190として,約2600倍に希釈して計測している。なお図3の個数濃度は,計測濃度に希釈率を掛けた排気管内排ガス濃度である。図から計測された粒子は

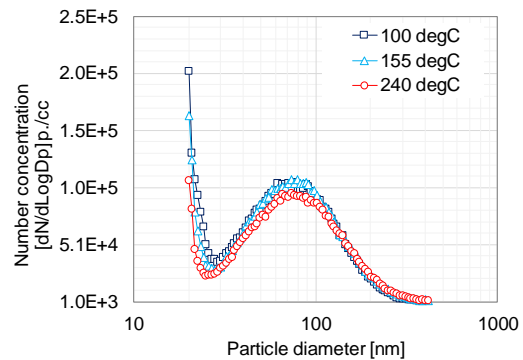


図5 粒径と個数濃度の関係
(発電機負荷特製, 機関負荷率 30%)

その大部分が粒径 200 nm 以下で構成されていることがわかる。加熱ブロックの温度の違いによって,個数濃度が大きく変化する粒径は 60 nm 未満であることがわかる。また,加熱ブロックの温度が低いほど,60 nm 未満の個数濃度が低く計測されることがわかる。希釈していない排ガスの温度が低下した場合,揮発性成分が核生成し核生成領域個数濃度が上昇すると考えられるが,実験では核生成領域と考えられている 60 nm 未満の粒子の個数濃度が低下している。これは温度低下によって核生成した粒子の管内壁面への付着による濃度損失であると考えられる。図4に加熱ブロック通過後の排ガス温度を横軸とした排気温度低下と個数濃度変化の関係を示す。図に示すように粒径 50 nm 未満の Stage-1, 2 が排気温度低下によって個数濃度の減少が見られるが,粒径 50 nm 以上の Stage-3 以降では殆ど個数濃度変化が無い。これらのことより,排気温度低下に伴う排気管内では,温度低下によって粒径の小さい領域の粒子,すなわち,揮発性成分である SOF 分が減少するとともに,排気管内壁への付着等が盛んに起きていることが考えられる。図5に SMPS にて計測を行った粒径と個数濃度の関係を示す。図は横軸に粒径,縦軸に個数濃度を示しており,図中の凡例に示す温度は加熱ブロック通過後の排ガス温度である。図5から,最も小さい粒径では加熱ブロック温度が低いほど高い個数濃度となっており,核生成²⁾粒子量が多く検出されていることがわかる。これは,加熱ブロックを通過した排ガスの SMPS までの計測過程において,CPC に到達するまでのごく短時間の間に,核生成した粒子が検出されていることが考えられ,排ガス温度の低下時に図3,4で示した粒径の小さい粒子の減少率が高いが,一部は減損せずに排出される,または,排ガス流の下流に流されていることや,核生成による粒子化が継続していることが考えられる。

(2) 船用 2 ストロークディーゼル機関の排ガス温度低下時のガス状物質と粒子の状態変化

前項では船用 4 ストロークディーゼル機関の発電機負荷特性時の PM 濃度および低負荷率時の状態変化に関する研究成果の一例を示した。本項では一般的に船用 4 ストロークディーゼル機関より燃料消費率が低く,かつ,低速機関であるために燃料油未燃分の排出が少ないと考えられる,船用 2 ストローク低速ディーゼル機関の排ガスを対象に,粒子への状態変化をガス側で揮発性成分および生成された粒子に着目した実験を行った。図6に実験装置の概要,表2に供試機関の主要目を示す。

実験装置の概要を図1に,供試機関の主要目を表1に示す。実験装置は供試機関と計測器類で構成される。計測機器類は,排ガス管から加熱サンプリングラインおよび加熱フィルタを経由して HC 濃度を計測する THC 濃度計(H-FID),排ガスに温度変化を与えるために分岐した排ガ

ス管(分岐管)と、分岐管から加熱サンプリ
ングラインを經由して高倍率希釈を行うエ
ゼクタ希釈器および、粒子の粒径分布を計測
する ELPI(Electric low pressure impactor)
で構成される。供試機関は船用 2 ストロ
ーク低速ディーゼル機関(3UEC33LSII-Eco)
であり、機関運転時の燃料油は市販の低硫
黄 A 重油(JIS1 種 1 号重油, 硫黄分 0.072
m%)を使用した。HC 濃度計測における排ガ
ス冷却は加熱サンプリングラインの温度制
御によって行った。粒径分布計測では機関
負荷の安定後に室温の分岐管に排ガスを流
し、温度上昇の過程を連続的に計測するこ
とで、排ガス温度と粒径分布の関係を計測
した。図 7 に機関負荷率 75 %の排ガスに
よる排ガス温度と HC 濃度低減率の関係を
示す。基準 THC 濃度はサンプリングライン温
度 191 における THC 濃度(191 ppmC)と
した。計測される THC 濃度は排ガス温度が
低いほど低濃度となり、100 の温度低下で
20 %、150 の温度低下で 40 %低下するこ
とが確認できる。これは、排ガス温度の低下
によって凝縮した HC 成分が THC 計測時の
加熱フィルタによって捕集され濃度が低下
したためであり、船用 2 ストロークディー
ゼル機関の排ガスでは、凝縮温度が低い
成分が含まれている。PM 計測時に使用する
希釈トンネルでは、希釈后排ガス温度が 42
~ 52 の範囲でフィルタによる捕集質量を
計測するが、希釈を行った場合凝縮量は低
下するため、希釈トンネルにおいてもガス
状の HC が多く存在し、希釈冷却の過程に
よっては計測質量に差を及ぼすことが示唆
される。

図 8 に分岐管内排ガス温度と個数濃度の
関係を示す。図の個数濃度は、ELPI の最下
段インパクト(0.029-0.058 μm)で計測され
た個数濃度の値である。図は横軸に排ガス
温度、縦軸に個数濃度を示している。排ガス
温度が低下するほど、粒子の個数濃度は上
昇している。191 では、 8.5×10^7 (p/cm^3)程
度の濃度であるのに対して、120 では
 $8.7 \sim 8.75 \times 10^7$ (p/cm^3)程度まで濃度が上
昇する。この粒径の範囲は凝集前の核生成
モード粒子 2)が多く含まれると考えられる
ため、排ガスの温度低下によってガス状
の HC が核生成、凝縮をして濃度が上昇し
たと考えられる。

これらの研究より、船用 4 ストロークディー
ゼル機関の排ガスでは、排気管内の温度環
境において、凝縮性成分による核生成が起
きており、その一方、船用 2 ストローク低
速ディーゼル機関の排ガスでは、核生成に
よる変化は比較的少ないことが計測された。
4 ストローク機関の凝縮性成分は沸点が低
温である燃料油が多くを占めていて、2 ス
トローク機関においては、沸点が高温であ
る潤滑油成分が多くを示していることが考
えられることから、状態変化に関しても由
来となる燃料油や潤滑油の沸点による影
響、排出濃度による影響があることが考
えられる。また、2 ストロークディーゼル
機関の排ガスでは、排気管内において排ガ
スの状態変化の大部分が既に完了しており
、温度変化による状態変化する質量は小
さいことが考えられる。

<引用文献>

- 1) 福田, 山崎, 佐々木, 塚本, 船用 4 ストロークディーゼル機関の THC 排出特性, 日本マリンエンジニアリング学会第 89 回マリンエンジニアリング学術講演会, 2019, pp.307-308.
- 2) H. Sasaki, T. Tsukamoto, Study on the measurement method and characteristics of particulate matter from marine diesel engines, The International Council on Combustion Engines Congress 2016, Helsinki, Paper No.205.

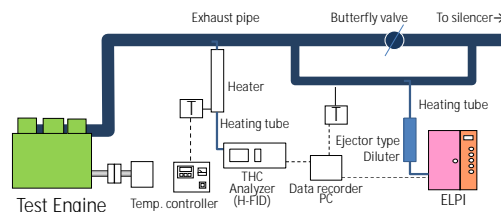


図 6 実験装置の概要

表 2 供試機関の主要目(船用 2 ストローク機関)

Name	3UEC33LSII-Eco
Type	2-stroke turbocharged Low-speed Electronically Controlled marine diesel engine
Output	1,275 [kW]
Engine speed	162 [min^{-1}]
Cylinder number	3
Bore \times Stroke	130 [mm] \times 160 [mm]

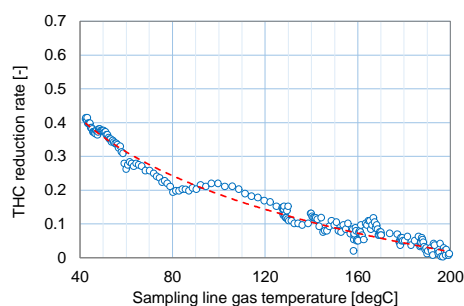


図 7 排ガス温度と HC 濃度低減率の関係

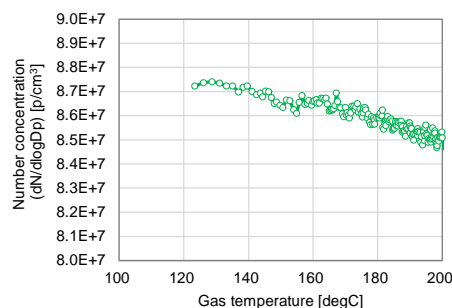


図 8 排ガス温度と個数濃度の関係
(50 % load, ELPI(Stage1[0.029-0.058 μm]))

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 佐々木秀次, 山崎健太, 塚本達郎
2. 発表標題 船用ディーゼル機関の粒子状物質濃度に関する研究-排ガス温度と粒子核生成の関係
3. 学会等名 第89回マリンエンジニアリング学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山崎健太, 佐々木秀次, 塚本達郎
2. 発表標題 船用ディーゼル機関の粒子状物質濃度計測に関する研究-フィルタ温度と捕集流量が計測濃度へ与える影響
3. 学会等名 第89回マリンエンジニアリング学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福田祥太, 佐々木秀次, 大橋慶勸, 塚本達郎
2. 発表標題 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気管内状態変化
3. 学会等名 第91回マリンエンジニアリング学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	塚本 達郎 (Tsukamoto Tatsuro) (50207346)	東京海洋大学・学術研究院・教授 (12614)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	大橋 慶勤 (Ohashi Yoshisada)	東京海洋大学・学術研究院・助手 (12614)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関