

令和 3 年 6 月 18 日現在

機関番号：12614

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01635

研究課題名(和文) 船用ディーゼル機関から排出されるPMの計測法簡易化に関する研究

研究課題名(英文) Research on simplification of PM measurement method exhausted from marine diesel engine

研究代表者

塚本 達郎 (Tsukamoto, Tatsuro)

東京海洋大学・学術研究院・教授

研究者番号：50207346

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 8,300,000円

研究成果の概要(和文)：2種類の船用ディーゼル機関の排ガスを対象にISO 8178に規定された希釈トンネルによる計測、THC濃度の計測およびSoot濃度の計測を実施した。PMはSOFとISFに分けて分析し、希釈法と直接法による計測値の比較や、PM中のISF濃度とSoot濃度の比較、THC濃度とPM中のSOF濃度の計測値の比較を行った。特に2ストローク機関では、SOFに沸点の高い潤滑油由来の成分が多く含まれ、THC濃度よりもSOF濃度が高いことがわかった。船用ディーゼル機関のPM排出特性を明らかにするとともに、簡易計測のためのデータを得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

船用4ストロークおよび2ストロークディーゼル機関から排ガス中のPM計測、THC計測およびSoot計測を行い、それらの排出特性を明らかにした。PMについては、ISFとSOFに分けて分析を行い、ISF濃度とSoot濃度には強い相関があることがわかった。THC濃度計測では、希釈排ガスの計測、前処理フィルタの温度を変化させた計測も行い、SOF濃度とTHC濃度の比較からは、計測前の排ガス処理条件、機関の種類や運転条件によってHCの凝縮状態が変化することがわかった。これらの知見は、PM計測法の簡易化や排出されるPMの削減対策に活用できる。

研究成果の概要(英文)：The measurement of particulate matter (PM) contained in the exhaust gas of diesel engines has been carried out by the method specified in ISO 8178 and PM emission is evaluated by weight concentration. PM measurement using a dilution tunnel specified in ISO 8178, THC concentration measurement, and Soot concentration measurement were performed for the exhaust gas of two types of marine diesel engines. The measured values were compared between the dilution method and the direct method, ISF concentration and Soot concentration in PM, and THC concentration and SOF concentration in PM. It was found that SOF exhausted from two-stroke engine contains a large amount of component derived from lubricating oil having a high boiling point, and the concentration of SOF indicates higher value than that of THC. In this study, the characteristics of PM emission from marine diesel engines were clarified and data for simple PM measurement were obtained.

研究分野：内燃機関工学

キーワード：船用ディーゼル機関 排ガス計測 粒子状物質

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_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、事業所およ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¹⁾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)、ハロンおよび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が直接の規制については行われていない。

ディーゼル機関から排出されるPM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トンネルを用いて排ガスを希釈・冷却して計測する方法を採用することが決められており、ISO 8178-1(Reciprocating internal combustion engines - Exhaust emission measurement - Part 1: Test-bed measurement of gaseous and particulate exhaust emissions)にその測定法が定められている²⁾。また、日本工業規格(JIS)においても、ISO8178-1に対応した規格として、JIS B8008-1が制定されている。これらの規格では、ろ過した清浄な空気中、一次捕集フィルタの直前において、315 K(42℃)を超え325 K(52℃)以下まで希釈した排気から、決められたフィルタ上に捕集されるすべての物質をPMと定義している。ディーゼル機関から排出されるPMは、このフィルタ上に捕集された物質の重量でPM濃度(mg/Nm³)または排出率(mg/kWh)として評価されている。また、2010年に行われたIMOのMEPC 60(海洋環境保護委員会)において北極域におけるブラックカーボン(BC)の影響に関する問題提起が行われ、その後、BCの定義、計測法に関して議論が進められている。BCは黒色の元素状炭素であり、燃料油中の炭素分が燃焼した際に生成される炭素成分であり、可視光吸収率、熱的安定状態、有機溶剤可溶状態等に関する性質で定められている。BCの定義は、2015年に行われたIMOのMEPC68において承認され、その後、計測法に関する調査、議論が進められている。

しかし、これらの粒子状物質に関する計測は技術的、運用的に非常に難しく、高い再現性をもった計測を実施するには知見とともに経験を持った計測技術者が行わなければならない。また、市販のPM計測機器は自動車用機関を対象として設計・製作されており、大気に放出される排ガスに揮発性成分であるSOF分やHC分を多く含む、船用ディーゼル機関の排ガス計測を行うには、知見者による計測装置改良や運用を行う必要があり、ISO、JISの規定を満たしていても、個々の計測装置の仕様の違いや運用スキルによって、計測される濃度値に差を生じており、他の計測や研究との絶対値的比較や、全体値の把握を行うことが困難な状況となっており、その結果、環境基準値としての評価、規制値としての評価等としての計測として利用できていないと考えられる。

2. 研究の目的

船用ディーゼル機関から排出されるPM計測を対象とした計測器の違いに関する研究として近年下記のものあげられる。PM(ISO8178、JIS B8008)に関する計測機器の器差に関する研究は、研究代表者、研究分担者、他の研究機関を含み研究を実施している。現時点で得られている成果として、2種類の希釈トンネルを使用して、船用4ストロークディーゼル機関および船用2ストロークディーゼル機関の排ガスを同時計測し、計測されるPM質量濃度の比較をしたところ、絶対値に若干の差が生じた。この差は、特に動圧過給されている船用4ストロークディーゼル機関で大きい。また、希釈トンネル内が負圧となり排ガスを吸引する方式と、希釈トンネル内が大気圧で排ガスを排気管内背圧もしくは希釈トンネル内ベンチュリによる駆動力で引き込むタイプでは、計測される結果に差が生じていることが考えられた。

BCに関する計測法の調査研究として、益田らのグループはISO8178の計測で使用する希釈トンネルを用いて、バインダーの含まない石英フィルタ上へPMを採取し、炭素成分分析を行い、他の計測器による計測値との比較を行ない、黒色炭素に特化して計測結果の公表を行っている³⁾。

このように、計測手法による計測値の差異、規格に定められている同一の計測手法によっても用いる計測器による器差によって計測値が異なるという問題があることは広く認識されているが、船用ディーゼル機関の排ガス計測手法を研究する研究者が扱う機器での比較が多く、また、計測技術者の技量差が生じる可能性がある計測値の検討が中心に行われているのが現状である。本研究では、多くの技術者が実施可能で、計測技術者の技量差が生じにくい簡便な計測法からPM濃度を予測するための基礎的研究とデータの収集および考察を実施することで、船用ディーゼル機関から排出されるPMの計測に関する簡易化を提案し、計測を普及させていくためのデ

ータ提示を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、ISO 8178 による計測値 (PM 質量濃度) を基準として、ISF と SOF 割合、THC 濃度等を加味した計測値に対して、濾紙式スモークメータ、透過式スモークメータ、電子式計数インパクタ、光学式パーティクルカウンタ等を用いて、機関種別 (船用 2 ストロークディーゼル機関、船用 4 ストロークディーゼル機関)、負荷率、運転特性 (プロペラ特性、発電機特性)、燃料油 (MDO、MFO)、シリンダ注油率等の PM 排出へ影響を与える要因、および排ガスサンプリング時の希釈手法別の、計測器間の相互的濃度変換を行える相関関係を調べる。

4. 研究成果

(1) 船用 4 ストロークおよび 2 ストロークディーゼル機関の HC 排出実態

最初に、船用ディーゼル機関から排出される HC の濃度計測を実施した。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。

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

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

THC 濃度の計測は加熱型 THC 測定装置 (MEXA-1170HFID, HORIBA) を使用した。この計測は、水素炎イオン化 (FID) 法を用いており、計測対象は全炭化水素 (THC) である。濃度はメタン基準の等価炭素濃度で計測される。計測手法は JIS D1030 に準拠し計測時のサンプルガス (無希釈の排ガス) は加熱フィルタ (191) による前処理 (固形粒子のフィルタリング) を行っている。

図 1 に船用ディーゼル機関から排出される HC 濃度を示す。図は (a) に船用 4 ストローク高速ディーゼル機関、(b) に船用低速 2 ストロークディーゼル機関の機関負荷率と排出濃度の関係を示している。それぞれのグラフは縦軸に THC 濃度、横軸に機関負荷率を示しており、船用 4 ストロークディーゼル機関では、プロペラ負荷特性 (FPP 時の主機負荷特性、丸プロット)、定速負荷特性 (発電機原動機や CPP 時の主機負荷特性、四角プロット)、船用 2 ストロークディーゼル機関ではプロペラ負荷特性の計測結果を示している。

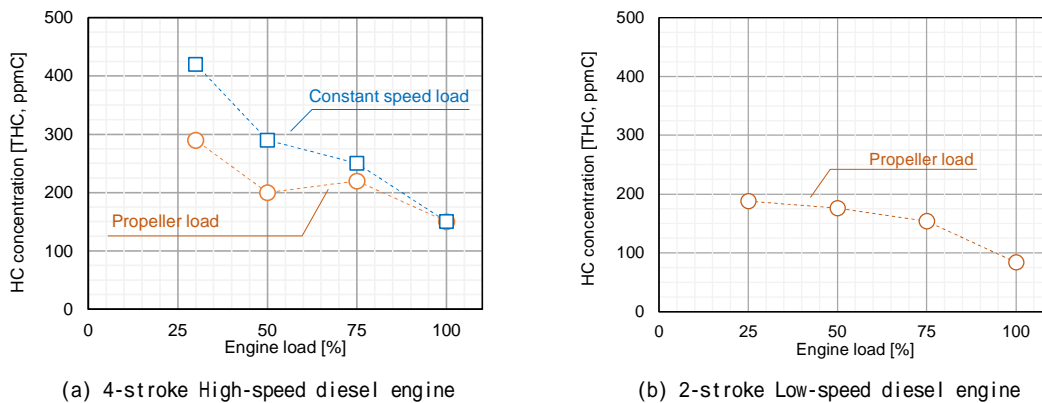


図 1 船用ディーゼル機関から排出される HC 濃度

船用 4 ストロークディーゼル機関から排出される THC 濃度レンジは、低負荷率時において 200-500 ppmC、高負荷率時において 150-250 ppmC であり、高負荷の方が低濃度であることがわかった。また、同時に計測した FSN による Soot 濃度は、低負荷率時で 5-110 mg/m³ であり、負荷率が高いほど高い値であり THC 濃度と逆の傾向を示した。船用 2 ストロークディーゼル機関から排出される排ガスの計測では、THC 濃度は、80 ~ 200 ppmC となり、船用 4 ストロークディーゼル機関の THC 濃度より低い値となった。これらの排ガスを対象に ISO8178 による PM 計測を行った結果、PM 中の SOF 分割率は 2 ストロークディーゼル機関の方が高い値を示しているが、THC 濃度値は低い値であることがわかった。THC 濃度の計測では、ディーゼル機関の排ガスでは 191 の加熱フィルタを通過したガスに対して FID 計測を実施するが、これらの結果より排ガス温度

191 において SOF 分の多くが凝縮し、加熱フィルタ上に捕集され、THC 濃度計測値が低い値であったこと、さらに高沸点の HC 成分が多かったことが考えられる。

(2) THC 濃度と粒子状物質濃度との関係

図 2 に船用 4 ストロークディーゼル機関の定速負荷特性時の PM 濃度を示す。PM 質量濃度はフィルタに採取後、さらにソックスレー抽出によって、ISF 分と SOF 分を分離し、それぞれの質量濃度を計測した。図は縦軸に質量濃度、横軸に機関負荷率を表しており、各棒グラフの下部は ISF、上部は SOF の濃度を表している。PM 計測と同時に計測を行った Soot 濃度と ISF 濃度の関係を図 3 に示す。図は縦軸に ISF 濃度、横軸に Soot 濃度を表している。

PM 濃度では、ISF 濃度が負荷率の上昇とともに増加するが、SOF 濃度は負荷率の上昇とともに低下する。THC 濃度は SOF 濃度と同じく負荷率の上昇とともに低下する傾向がある。図 3 に示した Soot 濃度は、濾紙によって排ガス中の粒子を捕集し、その反射率によって Soot 濃度を算出している。この濃度は、ろ紙上の粒子状物質の黒色度が低下した場合に、低い値を示すことになる。図 3 の結果では Soot 濃度と PM 計測の ISF 濃度は、きれいに直線上に並んでいるが、ISF 濃度の方が高く、Soot 濃度計測時に揮発性成分の凝縮、捕集によって黒色度が低下したか、サルフェイト等の影響が考えられる。揮発性成分が凝縮している場合には、HC が凝縮していると考えられるが、凝縮した HC は前処理によって計測濃度から除外されるため、HC 濃度が低く計測される可能性がある。

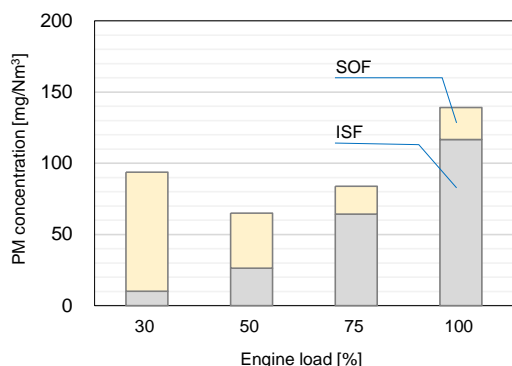


図 2 PM (ISF・SOF)質量濃度
(4-stroke High-speed engine, Constant speed load)

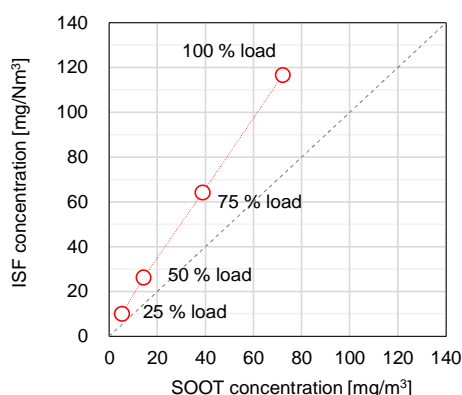


図 3 SOOT 濃度と ISF 濃度の関係
(4-stroke High-speed engine, Constant speed load)

図 4 に HC 濃度と SOF 濃度の関係を示す。図は、縦軸に SOF 濃度、横軸に HC 濃度を表している。図から SOF 濃度と HC 濃度は、一定の正の相関傾向が見られるが、低濃度（高負荷）のときにはこの関係から少し外れていることがわかる。機関から排出される HC や SOF は、由来が燃料油が潤滑油である。燃料油、潤滑油とも多成分の混合であるが、燃料油成分の沸点は低い方に多くの割合があり、逆に潤滑油成分沸点は、燃料油と比較して高い方に多くの割合があると考えられる⁴⁾。このため、機関の負荷率の違いによって、特に負荷が高いときには、燃焼室の温度が高く、燃料よりも潤滑油由来の HC が排出されやすいと考えられる。HC 生成の由来成分の割合が異なるために、一定の相関傾向があるものの、直線上に位置する分布では無かったことが考えられる。

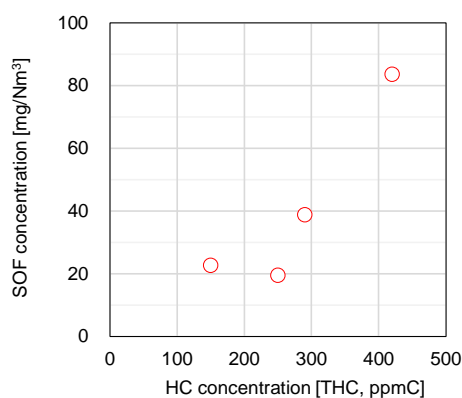


図 4 HC 濃度と SOF 濃度の関係
(4-stroke High-speed engine, Constant speed load)

(3) HC の凝縮による濃度減衰傾向

THC 計測においては、191 の加熱フィルタにより前処理されるが、この過熱フィルタの温度を変化させた場合の凝縮による濃度減衰傾向を調べた。実験は、JIS D1030 に準拠した THC 計測のサンプリングラインに、加熱温調が可能なサンプリングラインとプライマリフィルタを設置し、その温度変化による THC 濃度を計測した。

図 5 にプライマリフィルタ温度と THC 濃度の関係を示す。図は縦軸に THC 濃度、横軸にプライマリフィルタ温度を示している。この図は、船用 2 ストロークディーゼル機関の機関負荷率

75 %運転時の排ガスを供試排ガスとして実験を行った計測値である。プライマリフィルタが 191 以上を初期条件として、温度を低下させていく方法で計測を実施した。図からプライマリフィルタ温度が低下すると、THC 濃度計測値も低下することがわかる。また、191 以下の温度帯で、温度の低下とともに連続的に低下しており、191 以下の温度帯においても、凝縮が起こっていることが予想される。この結果から、前項の希釈トンネルを用いて計測した SOF 分は、希釈トンネルによる、希釈後排ガス温度 47 ± 5 に低下していく過程において、揮発状態であった HC が凝縮して SOF として計測されていると考えられる。また、前記の通り、由来成分が多成分であることから、機関負荷率によって希釈トンネルにおける凝縮状態にも変化があったものと推測される。

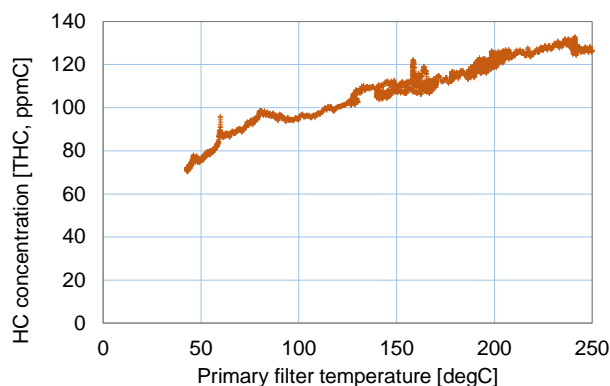


図5 HC濃度とSOF濃度の関係
(2-stroke Low-speed engine, Propeller load)

凝縮状態に及ぼす希釈による影響を調べるために希釈トンネルによって希釈された排ガスの THC 濃度を計測した。図6に希釈率と THC 濃度の関係を示す。図は縦軸に THC 濃度、横軸に希釈率を示して

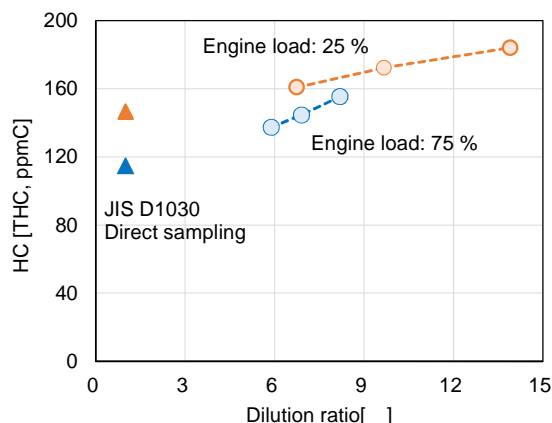


図6 希釈率とHC濃度の関係
(2-stroke Low-speed engine, Propeller load)

いる。図中の希釈率 1 上にある三角のプロットは、直接法による計測(JIS D1030 準拠)を行った濃度である。図では機関負荷率 25 % (橙色) および 75 % (青) の結果を示しており、THC 濃度は希釈率で換算した排気管内の排ガス濃度である。図から、いずれの負荷率においても、直接法による計測濃度より、希釈トンネルによって希釈した排ガスの方が HC 濃度が高い値を示す。これは、希釈によって揮発性成分の絶対濃度が低下したため、凝縮する HC が少なくなったためであると考えられる。なお、希釈トンネルは JIS B8008 に準拠しており、すなわち希釈排ガスの温度は 47 ± 5 まで低下している。この場合においても、直接法による計測(無希釈でサンプリングラインが 191)より高い濃度を示すことから、排気管内ではさらに高い濃度の HC が揮発状態のガスとして存在していることがわかる。

(4)まとめ

船用ディーゼル機関の PM 計測において、ISF 濃度は Soot 濃度と良い相関があり、Soot 濃度計測に置き換え可能であることがわかった。また HC の凝縮状況について知見が得られたことから、排ガスの希釈や前処理手法を目的に合わせて適切に活用することによって、THC 濃度計測が SOF 濃度計測に利用できることがわかった。

引用文献

- 1) MARPOL Annex VI , International Maritime Organization (IMO) .
- 2) ISO 8178-1, Reciprocating internal combustion engines -- Exhaust emission measurement -- Part 1: Test-bed measurement systems of gaseous and particulate emissions (2017) .
- 3) 例えば, A. Masuda et . al , Determination of Black Carbon Concentration from Marine Diesel Engines by Multi-Instrumental Measurements , Proceedings of the International Symposium on Marine Engineering ISME (2017) , B13-315 .
- 4) 例えば, 石村ら, 熱重量分析法による PM 成分 (SOF) の由来の検討, 日本マンエンジニアリング学会誌, 第 45 巻, 第 4 号(2010), pp.147-150.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 福田 祥太, 山崎 健太, 佐々木 秀次, 塚本 達郎
2. 発表標題 船用4ストロークディーゼル機関のTHC排出特性
3. 学会等名 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講演論文集
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 船用ディーゼル機関のTHC排出特性に関する研究 - 排ガスの温度変化がTHC、SOF濃度に与える影響
3. 学会等名 日本マリンエンジニアリング学会第90回マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集
4. 発表年 2020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	佐々木 秀次 (Sasaki Hidetsugu) (00554958)	東京海洋大学・学術研究院・助教 (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
---------	---------