

令和元年6月27日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06922

研究課題名（和文）船舶由来のPM組成への影響因子解明及び大気質計算用PMインベントリの精緻化

研究課題名（英文）Elucidation of Main Influence Factors on Ship-derived PM Composition and Elaboration of PM Emission Data from Ships for Air Quality Calculations

研究代表者

城田 英之（SHIROTA, Hideyuki）

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：40344238

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）：PM計測精度が良好で船上計測に適用できる可搬式PM捕集装置を製作した。この装置を複数の船用ラボディーゼル機関に設置して燃料種類／機関サイクル数／機関負荷率等をパラメータとした運転試験を実施し、PM計測と組成分析を行った。得られたPM計測データを比較分析し、燃料種類（A・C重油）の相違が、船舶由来のPM組成に大きな影響を与える因子であることを示した。船舶由来のPM組成プロファイル（EC、OC、硫酸塩等の組成割合テーブル）を設定し、AIS（船舶位置情報）に基づき船舶PM排出インベントリ（2016年）を作成した。このデータを用いて大気質計算を実施し、船舶由来のPM_{2.5}濃度を算出・評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

船舶由来のPM組成を船上で計測するには、NO_xやSO_xなど他の大気汚染物質の計測に比べて大規模な装置構成と煩雑な手順を要するなど、難易度が高く長らく手つかずの状態にあったが、本研究で作成した可搬式PM捕集装置により、高精度かつ簡易的にPM組成物質の船上計測を行うことが可能となった。また、当該捕集装置を用いた船用ラボディーゼル機関の排気試験により、これまで系統的な分析事例のなかった船舶由来のPM組成に関する詳細が明らかになった。さらに上記の排気試験結果に基づき船舶排出インベントリを精緻化したことで、大気質計算によって従来よりも高精度で船舶由来のPMの環境影響を評価することが可能となった。

研究成果の概要（英文）：Portable PM collection device applicable for on-board PM measurement whose measurement accuracy is satisfactory. Emission tests using lab diesel engines for ship with the device installed, were conducted with fuel type, engine cycle, engine load varied as parameters. At that time, PM emissions were measured and those compositions were analyzed chemically. Based on analysis of the PM data obtained by the emission tests, it is reasonable to suppose that difference of fuel type (marine distillate/residual fuel) is one of the factors which have considerable influences on ship-derived PM composition. After a ship-derived PM composition profile (a table which shows compositional ratios of elemental carbon, organic carbon, sulfate and so forth for ship-derived PM) was set, PM emission data from ships as of 2016 were made based on AIS data by using the profile. Air quality calculations were conducted using the emission data and ship's contributions to PM_{2.5} concentrations were evaluated.

研究分野：伝熱工学、エネルギー工学、環境影響評価

キーワード：粒子状物質 大気質計算 船舶排気 インベントリデータ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

我が国で使用される輸送機関のうち、自動車は我々の生活圏内で運用され、かつ他の交通手段よりも圧倒的に台数が多いことから、その排ガスが人体の健康に及ぼす影響が大きい。このため1970年代よりNO_x (窒素酸化物)、SO_x (硫黄酸化物)、PMを対象とした厳しい排ガス規制が段階的に課せられ、自動車由来のPM計測手法に関する研究が早くから進められてきた。一方で、船舶燃焼由来の大気汚染物質の多くは陸域から離れた海上で局所的に排出されるため、船舶を対象とした環境規制値はNO_xとSO_xにのみ設定されているのが現状である。しかしながら、PM_{2.5}を取り巻く昨今の情勢に鑑みると、船舶由来のPMが将来的に問題視される可能性は極めて高い。

自動車分野のPM計測においては、希釈トンネルを用いてすべての排ガスを空気で希釈した後にフィルタで捕集する全流希釈法がデファクトスタンダードとされているが、全流希釈法は装置が高価で大掛かりなため、排気の一部を採取・希釈して計測する分流希釈法が開発され、全流希釈法と等価な結果を保证するための研究が行われている。また、自動車由来のPMに関しては、車種・燃料種別ごとの実測データが詳細に蓄積されており、自動車由来のPM組成に関する実態は徐々に明らかになりつつある。PMは、工場や輸送機関等の大気汚染物質発生源から直接排出される一次粒子と、ガス状の前駆物質が大気中で光化学反応を起こして粒子化する二次粒子から成っており、生成に關する物質が多岐にわたるためPMの計測にはNO_xやSO_xと比べておおむね十~数十倍程度の大規模な装置と煩雑な手順が必要である。しかしながら、船舶を対象とするPM計測に関しては本研究分担者等によるわずかな研究事例があるのみであり、船舶に由来するPMの組成やその計測手法について十分に解明されているとは言い難い。

2. 研究の目的

我が国では、陸上大規模排出源に対して先行的に厳しい排ガス規制を課した結果、船舶由来の排ガスの大気環境への影響は相対的に増大しつつあると言われている。こうした状況を背景に、国土交通省では2010~13年に船舶を対象とするECA(放出規制海域)の設定に関する技術的検討が行われ、大気質シミュレーション計算による大気汚染物質の船舶寄与割合の評価や規制導入の有無を考慮した将来予測が実施された。その際に検討で用いられたのは、EPA(米国環境保護庁)の主導で政府が大気環境改善政策を検討するためのツールとして開発されたCMAQ(Community Multi-scale Air Quality)である。CMAQは、PM_{2.5}やO₃(オゾン)のように複雑な物理・化学プロセスと相互作用を経て生成される物質の環境影響を評価するのに適した大気質モデルである。

CMAQ等の大気質シミュレーションモデルを用いて信頼度の高い計算結果を得るには、計算範囲における精度の高い排出源・大気汚染物質ごとのインベントリデータを整備することが特に重要となる。我が国の船舶インベントリデータとしては、Lloyd's船舶動静データ等に基づき本研究代表者らにより開発されたデータと、AIS(船舶位置情報)等をベースとして海洋政策研究財団(現海洋政策研究所)により開発されたデータが、我が国周辺海域で実船舶から排出される大気汚染物質を現時点で最も忠実に反映した船舶インベントリデータである。

通常、インベントリとして供されるデータはNO_x、PM、HC(炭化水素)等、大括りの物質として整備される。これらのデータを大気質モデルに適用して大気質計算を行う際には、発生源ごとに設定された組成割合に基づき、上記物質を大気質モデルごとに規定された個別成分に対応させる必要がある。例えば、CMAQ ver4.7.1の気相反応サブモデルSAPRC99-ae5におけるPM_{2.5}の組成(個別成分)はEC(元素炭素)/OC(有機性炭素)/Nitrate(硝酸塩)/Sulfate(硫酸塩)/Others(その他)の5種類であり、船舶由来のPM_{2.5}については船舶に特有な組成割合を用いて振り分けを行うのが妥当である。

船舶燃焼に由来するPMの組成は、燃料中硫黄分や運転条件等によって大きく変わることが経験的に知られているが、これまでに系統的な分析事例に関する報告はない。このため、近年行われた経済産業省による「JATOP(自動車排出ガス低減による大気改善プログラム)」や国土交通省による上記検討等の国レベルの検討では、停泊中の外航コンテナ船の補助ディーゼル発電機の排ガス計測で得られた極めて限定的なデータに基づく船舶PM組成プロファイルを用いて大気質計算が行われた。しかしながら、今後PM_{2.5}やオゾン等の二次生成メカニズムの解明や大気質計算精度の向上を推進する観点からは、船舶航行実態がより忠実に反映されたPM組成プロファイルの開発が必要不可欠である。

以上の状況を踏まえ、本研究では以下の2項目を目的とした。

(1) 船舶燃焼に由来するPMの組成解明によるPM発生源情報整備への寄与

複数の船用ラボディーゼル機関を対象に、燃料種類/機関ストローク数/機関負荷率等をパラメータとして、定量性の確保に留意した手法を用いて船舶由来のPM組成物質の計測・分析を行う。実験条件(パラメータ)の相違がPMの組成に与える影響について調べ、PM組成への主要影響因子を解明する。

(2) 大気質シミュレーション用船舶PM排出インベントリデータの精緻化による大気環境研究の発展への寄与

研究代表者らがこれまでに開発した船舶PMインベントリデータを、実船計測データ等に基づく船舶PM組成プロファイルの開発等により精緻化することにより、大気質シミュレーションによるPM濃度推定精度の向上、ひいては大気環境研究の発展に資する。

3. 研究の方法

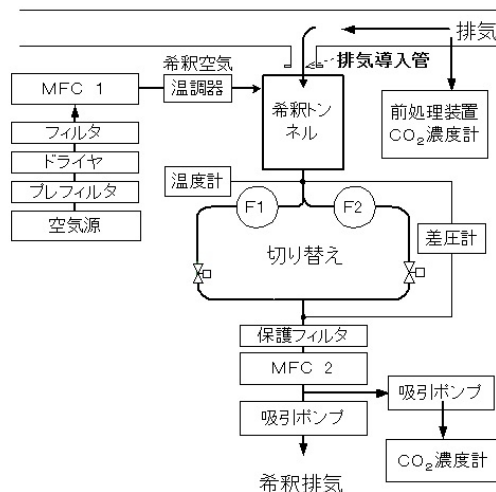
(1) 船舶燃焼に由来するPMの組成解明

我が国の大型・中型船舶に搭載されている船用低速ディーゼル機関は、自動車等で用いられる小型高速ディーゼル機関と比べて、排ガス量が極めて多い、燃焼時間が長い、硫黄含有率の高い燃料を

使用する等の理由により、排出されるPMがSulfateや潤滑油起源のSOF(可溶性有機化合物)を多く含む、等の特徴がある。通常、船舶機関から排出されるPM計測にはISO8178-1及びこれをJIS化したJIS B 8008-1に規定されている分流希釈法が使用されるが、この手法では排気輸送管や希釈トンネルの内壁で排ガスが冷却されることで凝縮しやすく、その凝縮物にSoot(すす)が付着・剥離することでPMの計測値に大きな影響を及ぼす。

そこで本研究では、計測されるPMの“定量性”を重視し、図1に示す計測系を用いてPM計測を行う。すなわち、船舶主機から排出されるPMを、事前にラボ実験用船舶ディーゼル機関で計測系内の損失評価及び複数システムでの相互保証を行った分流希釈システムを用いて実施し、PMの定量性を保証する。

PMの採取は、図1の分流希釈システムを用いてフッ素樹脂処理ガラス繊維フィルタ及び石英フィルタ上に捕集することにより行い、フィルタの秤量値、捕集流量、希釈比、機関データ等よりPM排出率を算出する。その後、熱分離光学補正法を用いてEC、OC等の炭素成分の質量、イオンクロマトグラフ法を用いて SO_4^{2-} 、 NO_3^- 等のイオン成分の質量をそれぞれ求め、PM重量に対する比から、それぞれの排出率を求める。



MFC: 質量流量制御器
F1: PM捕集フィルタ(計測用) F2: PM捕集フィルタ(ダミー用)

図1 分流希釈システムの概念図

上記の分流希釈システムについては、船上計測等にも適用できるよう可搬式のPM捕集装置を作成し、PMの定量性が保証されることを確認する。次に、このPM捕集装置を複数のラボディーゼル機関に設置し、燃料種類/機関サイクル数/機関負荷率等をパラメータとした運転試験を実施し、PM計測・組成分析を行う。最後に、これらの試験結果に基づき、EC、OC、Nitrate、Sulfate等のPM組成に対して機関種類、運転条件、使用燃料等の諸因子が及ぼす影響を与えるかを解析し、船舶燃焼由来のPM組成への主要影響因子の洗い出しを行うことによって、船舶燃焼由来のPMに特徴的なPM組成を明らかにする。

(2) 大気質シミュレーション用船舶PM排出インベントリデータの精緻化

(1)で得られた試験解析結果や文献調査結果に基づき、燃料種類等に応じて船舶のPM排出実態を適切に反映させたPM組成プロファイル(EC、OC、Nitrate、Sulfate等の組成割合一覧)を作成する。次に、このプロファイルを用いて作成した排出インベントリデータを用いて大気質シミュレーション計算を実施し、従来のPM組成プロファイルを用いて得られた計算結果等と比較することにより感度解析を行い、本研究で作成したPM組成プロファイルの性能検証を行う。さらに、船舶に起因するPMの環境寄与度の算出を試みる。

4. 研究成果

(1) 船舶燃焼に由来するPMの組成解明

分流希釈システムを用いた可搬式PM捕集装置の作成と定量性の確認

「3. 研究の方法」に記載した分流希釈システムを用いた可搬式PM捕集装置を作成し(図2)これを海上技術安全研究所内の船用ラボ4サイクルディーゼル機関及び外部協力機関の船用ラボ2サイクルディーゼル機関に設置してPM計測試験を行った。可搬式PM捕集装置とPM計測用排気希釈装置(エフテクノ製、MIT-2000CT型)により計測されるPM排出率を比較したところ、両者は非常に良く一致しており、可搬式PM捕集装置の定量性が確認された(図3)。



図2 ラボディーゼル機関の排気管に設置した装置でPMを捕集する様子

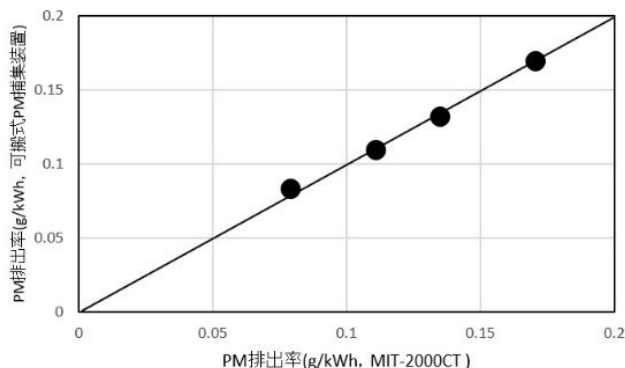


図3 PM計測装置2機によるPM排出率の比較結果

燃料種類等をパラメータとした運転試験による PM 計測及び組成分析

次に、複数の船用ラボディーゼル機関を対象に、燃料種類 (A 重油 / C 重油、硫黄含有率 0.071 ~ 2.49%)、機関ストローク数 (2 ストローク / 4 ストローク)、機関負荷率 (25 ~ 100%) 等をパラメータとして、上記の可搬式 PM 捕集装置を用いて PM 計測を行い、PM 組成に関する詳細な分析を行った (詳細については「5. 主な発表論文等」雑誌論文 を参照のこと)。

さらに、排気採取位置の違いが PM 計測結果に影響するかどうかという点についても、詳細な実験を通じて検討を行い、10m 離れた位置で排気採取を行っても、定常運転時においては PM 計測結果にほぼ影響がない等の結果を得た (詳細については「5. 主な発表論文等」雑誌論文 を参照のこと)。

(2) 大気質シミュレーション用船舶 PM 排出インベントリデータの精緻化

PM 組成プロファイルの作成及び PM 排出インベントリデータの精緻化

(1) で取得した PM 排出データを分析した結果、燃料種類 (A 重油 / C 重油 (硫黄含有率)) 及び機関ストローク数 (2 ストローク / 4 ストローク) については PM 組成への主要な影響因子であることが判明した。このうち、機関ストローク数についてはさらなる実験データの蓄積・分析が必要であることから、今回は使用燃料の相違を考慮した PM 組成プロファイルを作成し (一次評価) PM 排出量データの精緻化を試みた。

PM 排出インベントリデータの精緻化については、(a) PM 排出係数の更新、及び (b) PM 組成プロファイルに基づく 5 成分への分配、の 2 段階によって行った。PM 排出係数については、これまで旧 GL 社 (Germanischer Lloyd) による船用エンジンの PM 実測データを元に設定していたが、その後より多くのデータを元に設定された 3rd IMO GHG Study 2014 により更新するのが最も妥当と判断し、これを参考に設定した。

PM 組成プロファイルについては、(1) で取得した PM 排出データ等の分析結果に基づき、以下の考え方によって設定した。

Nitrate : 排出量ゼロとする。

Sulfate : 燃料中硫黄分の PM 転化率を 2% として推算する。

OC : 燃料中 S 分に関わらずほぼ一定値 (0.1g/kWh) とする。

EC : PM 排出量の 5% とする。

Others : PM 量 - (Nitrate 量 + Sulfate 量 + OC 量 + EC 量) とする。

2016 年を対象年として作成した PM 組成プロファイルを表 1 に示す。ここで、外航船の C 重油の硫黄含有率については IMO Sulfer Monitoring (2016 年) を、内航船の C 重油 / A 重油の硫黄含有率については「第 14 回内航海運における使用燃料油、潤滑油に関する実態調査報告書」(内航総連) をそれぞれ参考にした。燃料消費率については、外航船 / 内航船の別、船種の別に関わらず、C 重油を使用する船舶では 195 [g-fuel/kWh]、A 重油を使用する船舶では 205 [g-fuel/kWh] と仮定した。

表 1 PM 組成プロファイル (対象年 : 2016 年)

PM 排出係数及び PM2.5 プロファイル (2016 年)		S 分 [%]	燃料消費率 [g-fuel/kWh]	排出係数					
				PM [g/kWh]	Nitrate [g/kWh]	Sulfate [g/kWh]	OC [g/kWh]	EC [g/kWh]	Others [g/kWh]
外航船	C 重油	2.58	195	1.39	0	0.302	0.1	0.0693	0.916
	内航船	C 重油	2.33	195	1.31	0	0.273	0.1	0.0655
	A 重油	0.4	205	0.282	0	0.0492	0.1	0.0141	0.118

次に、2016 年 8 月における我が国周辺海域の AIS 情報を解析し、上記の PM 組成プロファイルを用いて、PM 排出インベントリデータ (2016 年版) を作成した。データの作成にあたっては、海上技術安全研究所においてこれまでに開発した手法をベースとした。

AIS は、2008 年 7 月 1 日より一定の要件を満たすすべての船舶に搭載が義務化されており、沿岸海域における船舶航行の実態 (航路及び航行速度等) を良好に反映していると考えられるため、高精度の排出インベントリの作成に適している。一方で、AIS 搭載船舶は比較的大きいものに限定される (国際航海に従事する 300 総トン以上の船舶及び国際航海に従事しない 500 総トン以上の船舶等) ことから、本研究では、500 総トン未満の AIS 非搭載船舶の航行隻数については、500 ~ 1,000 総トンの AIS 搭載船舶及び港湾統計に基づいて推定・補完した。データ作成手法の詳細については、文献 (城田ほか、AIS 情報を用いた船舶由来の大気汚染物質排出インベントリの作成、第 85 回マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集、2015、45-46) を参照されたい。

作成した PM 排出インベントリデータによって、2016 年における我が国沿岸 50 海里以内の船舶燃料消費量及び船舶由来の組成別 PM 排出量を推定した結果を表 2 に示す。

表2 AIS 解析結果に基づく船舶燃料消費量及び船舶由来の組成別 PM 排出量の推定結果
(対象年：2016 年、我が国沿岸 50 海里以内の総合計)

排出インベントリ (2016 年) 我が国沿岸 50 海里以内		燃料消費量	PM				
			Nitrate	Sulfate	OC	EC	Others
		[ton/yr]	[ton/yr]	[ton/yr]	[ton/yr]	[ton/yr]	[ton/yr]
外航船(航行時のみ)	C 重油	3.54×10^6	0	4.40×10^2	1.46×10^2	1.01×10^2	1.33×10^3
内航船(航行時のみ)	A 重油 / C 重油	2.84×10^6	0	2.40×10^2	1.13×10^2	5.83×10^1	7.55×10^2

大気質シミュレーション計算による PM 組成プロファイルの性能検証

(2) で作成した PM 組成プロファイルの性能を検証するため、当該プロファイルを反映させた PM 排出インベントリデータをはじめとする発生源別大気汚染排出量データを用いて、大気質シミュレーション計算を実施した。

発生源別大気汚染排出量データについては、陸上発生源起源の排出量として、REAS (東アジア領域の人為発生源汚染物質の排出量データ)、JATOP (Japan Auto-Oil Program) により推定された排出量データを使用した。また、実際の気象場を再現するために、気象モデルとして WRF (Weather Research and Forecasting) を用いた。大気質シミュレーション計算については、米国環境保護庁 (EPA) が開発した CMAQ (Community Multiscale Air Quality) 4.7.1 モデルを用いた。CMAQ モデル計算条件の概要を表 3 に示す。

表3 CMAQ モデル計算条件の概要

大気質モデル	CMAQ-4.7.1
中心緯度・経度	36N, 140E
格子数 (x, y, z)	105 x 108 x 14
水平格子サイズ	18 x 18 km

CMAQ により得られた大気質計算結果を、2013 年以前の船舶 PM 排出インベントリを用いて求めた従来の計算結果と比較したところ、船舶起源の PM 排出量は日本周辺の全海域において低下していた。船舶以外の大規模発生源に由来する PM 排出量も低下しているため、船舶に起因する PM の環境寄与度に関する詳細な分析にはさらなる検討が必要だが、我が国において 2013 年に 15%程度であった PM_{2.5} の環境基準達成率がその後急速に改善され 2016 年には 88%程度となっている現状と定性的に符合していることが確認された。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

大橋 厚人、中村 真由子、PM 計測における排気採取位置の影響、日本マリンエンジニアリング学会、査読有、54 巻、4 号、2019、(印刷中)

横井 威、城田 英之、AIS データに基づく船舶起源大気汚染物質の排出インベントリの作成方法と大気質シミュレーション、海上技術安全研究所報告、査読有、18 巻、2019、375-388

大橋 厚人、城田 英之、中村 真由子、益田 晶子、船用ディーゼル機関から排出される PM の分析事例 - 大気質シミュレーションへの適用、日本マリンエンジニアリング学会誌、査読有、52 巻、6 号、2017、778-787 (第 43 回日本マリンエンジニアリング学会論文賞受賞)

DOI : <https://doi.org/10.5988/jime.52.778>

[学会発表] (計 2 件)

城田 英之、横井 威、船舶由来の大気汚染物質インベントリの作成と精緻化、日本機械学会第 27 回交通・物流部門大会 (TRANSLOG2018)、2018

Hideyuki SHIROTA, Takeshi YOKOI, Atsuto OHASHI, and Mayuko NAKAMURA, Elaboration of PM Emission Data from Ships for Community Multi-scale Air Quality Modeling System (CMAQ), Proc. Int. Symp. Marine Engineering (ISME2017 Tokyo), 2017

[図書] (計 0 件)

なし

[産業財産権]

出願状況 (計 0 件)

なし

取得状況 (計 0 件)

なし

[その他]

なし

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：横井 威

ローマ字氏名：(YOKOI, Takeshi)

所属研究機関名：国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

部局名：環境・動力系

職名：主任研究員

研究者番号(8桁)：20586698

研究分担者氏名：大橋 厚人

ローマ字氏名：(OHASHI, Atsuto)

所属研究機関名：国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

部局名：環境・動力系

職名：上席研究員

研究者番号(8桁)：20358394

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：中村 真由子

ローマ字氏名：(NAKAMURA, Mayuko)