

PS-15 船用ガス機関および船用ディーゼル機関から

排出される粒子状物質の比較

環境・動力系 * 中村 真由子、大橋 厚人、市川 泰久、仁木 洋一

1. はじめに

近年、リーンバーンガス機関は環境負荷物質（二酸化炭素(CO₂)、大気汚染物質)の排出削減に寄与できる船用機関として注目されている¹⁾。リーンバーンガス機関は、燃料および燃焼方式の特性により、ディーゼル機関で問題視されている硫黄酸化物(SO_x)、窒素酸化物(NO_x)、粒子状物質(PM)の排出が少ないことが知られている。このため、船用ガス機関の燃焼特性や排ガス特性に関する報告は近年増えつつある²⁾³⁾。一方でガス機関におけるPM排出特性については、粒径に着目した研究はあるものの⁴⁾、組成に着目した研究は少なく、トラック用エンジンに限られている⁵⁾。PMは様々な成分から構成されており、たとえば元素状炭素(Elemental Carbon: EC)、有機炭素(Organic Carbon: OC)、硫酸塩、硝酸塩等の成分から構成される。そのため、PMを重量や粒径で評価するだけでなく、組成まで分析することで、生成要因を解明することができ、削減方法を検討するために重要な情報となる。

本研究は、船用ガス機関から排出されるPM排出率を計測するとともにPM組成(EC、OC、サルフェート、ナイトレート、その他の成分)を分析し、船用ディーゼル機関のPM排出特性と比較することで、船用ガス機関の特徴を明らかにすることを目的とする。

2. 実験方法

2.1 供試機関と運転条件

表1に実験に使用した船用ガス機関と船用ディーゼル機関の諸元および運転条件を示す。どちらの機関も回転数一定の発電特性で運転し、機関安定後に計測を開始した。

燃料は、船用ガス機関では都市ガス(13A)を、船用ディーゼル機関では低硫黄A重油(硫黄分0.08 mass.%)を使用した。都市ガスの成分を表2に示す。

2.2 PM計測および分析

試料の捕集には、分流希釈システム(JIS B 8008-1:2000 準拠)を使用した。試料はPM計測法の手順に従い、フッ素樹脂バインダーガラス繊維フィルタ(Pa11社、TX40HI20-WW)および石英繊維フィルタ(Pa11社、2500QAT-UP)を用いて行い、各条件二回または三回ずつ捕集し、ブランク補正を行うために、トラベルブランク用のフィルタを用意した。PM排出率の算出には計算過程で完全燃焼を仮定したユニバーサルカーボンバランス法を用いた。ただし、ガス機関から排出されるHC成分については、不完全燃焼を考慮して計算を行った。TXフィルタおよび石英フィルタに捕集されたサンプルは、PM中

の成分を明らかにするためにEC、OC、サルフェート、ナイトレートに分けて分析した。PM全量からEC、OC、サルフェート、ナイトレートを引くことでその他の成分の量を求めた。その他の成分には、灰分、サルフェートの結合水、OCに伴う水素、金属等が含まれている。サルフェートおよびナイトレートはサブプレッサータイプのイオンクロマトグラフィー(島津製作所、コントローラー: SCL-10 AVP、カラム: Shim-pack IC-SA 2)により分析した。ECおよびOCはThermal Optical Analysis(TOA)法によって分析し、装置はカーボンエアロゾル分析装置(Sunset Laboratory、Model 5)を使用した。光学補正法は、透過率補正(TOT)を用いた。

表1 供試機関の諸元と運転条件

機関	ガス機関	ディーゼル機関
型式	4ストローク 高速	4ストローク 中速
定格出力	400 kW	750 kW
定格回転数	1800 rpm	1000 rpm
燃料噴射方式	ポート噴射	電子制御
燃焼方式	希薄燃焼 副室火花点火	-

表2 都市ガスの組成

CH ₄	89.47	vol%
C ₂ H ₆	5.64	
C ₃ H ₈	3.88	
iso-C ₄ H ₁₀	0.48	
n-C ₄ H ₁₀	0.53	
低位発熱量	49.3	MJ/kg

3. 結果

3.1 船用ガス機関から排出されたPMの特性

図1に船用ガス機関から排出されたPMの排出率と組成を示す。PM排出率は、低負荷率ほど高く、100%負荷では最も少なかった。まずEC排出率は負荷率の違いによる変化はなく、すべての負荷で極めて低い値であった。一方、OC排出率は負荷依存性があり、低負荷率ほど高くなる傾向があった。OC成分はPM排出率の60-70%を占めており、低負荷率でのPM排出率の増加は、OCの増加が主な原因であった。サルフェートについてはわずかに検出されたが、燃料の都市ガスに添加されるにおい成分に含まれる硫黄と潤滑油に含まれる硫黄に由来すると考えられる。ナイトレートはサルフェートよりも多く検出された。その他の成分は低負荷率の方が高くなる傾向にあった。サルフェートが極めて少ないことから、結合水はほとんど含まれていないため、OCに伴う水素がその他成分の主たる成分であると考えられる。

3. 2 PM 排出特性の比較

図2に船用ガス機関と船用ディーゼル機関⁶⁾から排出されたPM、OC、ECの排出率を比較した結果を示す。船用ガス機関のPM排出率は船用ディーゼル機関のPM排出率よりも低く、いずれの負荷率においても半分未満であった。EC排出率は船用ガス機関の方が著しく低かった。一方、OC排出率は25%負荷においては、船用ガス機関からの排出の方が、船用ディーゼル機関よりも多かった。

船用ガス機関の方が、EC排出率が少ない要因は、ディーゼル機関の拡散燃焼方式に比べて、ガス機関の希薄予混合燃焼方式の燃焼過程で生成されるEC量が少ないためと考えられる。一方、OC排出については、ガス機関の燃料はガス状であり炭素数の少ないアルカンが主成分であることから、ディーゼル機関のように液体燃料の未燃分によるOC排出は無いと考えられる。このためガス機関からのOC排出は潤滑油由来であると考えられた。ディーゼル機関においてOC排出率が比較的高い要因は潤滑油の他に、未燃の燃料が含まれているためと考えられた。

4. まとめ

船用ガス機関から排出されるPMは低負荷率ほど、高い排出率となる傾向があり、その要因はOC排出率の増加であった。船用ガス機関と船用ディーゼル機関のPM排出率および組成を比較すると、船用ガス機関の方が、PMおよびECの排出は少なかった。一方でOC排出率に大きな差はなかった。

謝辞

本研究は、国土交通省と国立研究開発法人海上技術安全研究所の委託契約に基づいて、平成27年度に実施された「船舶から排出されるブラックカーボン排出状況及び対策技術に関する調査研究業務」によって実施されたものです。関係各位に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 安枝信次, 日本エンジニアリング学会誌, 第47巻, 第6号(2012), 46-50
- 2) 市川泰久, 平田宏一, 日本エンジニアリング学会誌, 第52巻, 第2号(2017), 99-106
- 3) Yasuhisa Ichikawa, Hidenori Sekiguchi, Oleksiy Bondarenko, Dong-Hoon Yoo, Koichi Hirata, Proceedings of the ASME 2016 ICEF,
- 4) Tianyang Wang, David C. Quiros, Arvind Thiruvengadam, Saroj Pradhan, Shaohua Hu, Tao Huai, Eon S. Lee and Yifang Zhu, Environ. Sci. Technol., 51(2017), 6990-6998
- 5) David C. Quiros, Arvind Thiruvengadam, Saroj Pradhan, Marc Besch, Pragalath Thiruvengadam, Berk Demirgok, Daniel Carder, Adewale Oshimiyga, Tao Huai and Shaohua Hu, Emiss. Control Sci. Technol., 2(2016), 156-172
- 5) Arvind Thiruvengadam, Marc C. Besch, Seungju Yoon,

John Collins, Hemanth Kappanna, Daniel K. Carder, Alberto Ayala, Jorn Herner and Mridul Gautam, Environ. Sci. Technol., 48(2014), 8235-8242

6) 大橋厚人、城田英之、中村真由子、益田晶子、日本マリンエンジニアリング学会誌、52巻6号(2017)、778-787

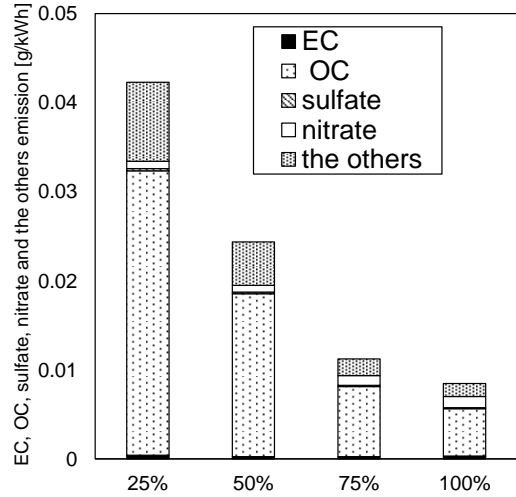


図1 船用ガス機関から排出されるPMの組成

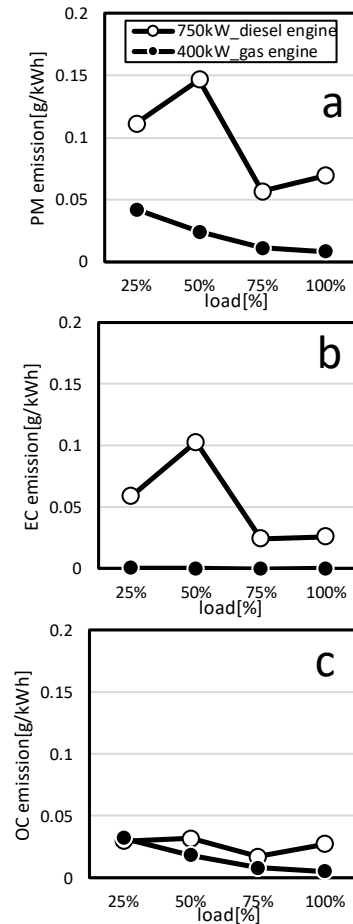


図2 船用ガス機関および船用ディーゼル機関から排出されるPM、EC、OC排出率の比較

a: PM排出率 b: EC排出率 c: OC排出率