

船用ディーゼル機関の起動時における大気環境汚染物質の排出特性評価

山西 大^{1†}・津田 稔²・平野尊之²・前田和幸¹

Evaluation of exhaust emission characteristics at starting in marine diesel engines

Dai Yamanishi^{1†}, Minoru Tuda², Takayuki Hirano², Kazuyuki Maeda¹

Marine diesel engines can easily generate soot and SOF at starting and steam caused by the combustion for hydrogen in the fuel is condensed in the atmosphere. When marine diesel engines start, soot and SOF are primarily emitted as evaluation of exhaust emission characteristics. To evaluation of exhaust emission characteristics at starting, the experiment in this study used a small-sized marine diesel engine equipped with high accuracy PM measurements system was conducted. As a result, the followings objectives were clarified. (1) The quantitative evaluation of exhaust emission is possible by the continuous measurement of PM emission immediately after the starting. (2) A large amount of SOF is included in the evaluation of exhaust emission characteristics at starting. (3) PM emission and the temperature of cooling water have a correlation.

Key words : marine diesel engines, soot , SOF, PM emission, exhaust emission characteristics

1. はじめに

船用ディーゼル機関から排出される大気環境汚染物質としては、NO_x(窒素酸化物)、SO_x(硫黄酸化物)、PM(粒子状物質)などが挙げられる。特にPMは人の呼吸器系疾患の原因となる可能性があるため、IMO等においても規制の対象となっている。船舶は、通常、人の生活圏から離れた場所を航行するため、これらの大気環境汚染物質が人の健康等に及ぼす影響は小さいと考えられ、自動車等に比べ規制が遅れていたが、近年は厳しい規制の対象となりつつある¹⁾。船舶から排出される大気環境汚染物質が問題とされるのは、港や狭水道など船舶が集中しかつ人の生活圏に近い場所である。特に出港等におけるエンジンの起動は、船舶が集中している港の中で行なわれるため、船用ディーゼル機関の起動時における大気環境汚染物質の排出特性を明らかにする必要がある。船用ディーゼル機関はその特性上、起動時に燃料の不完全燃焼によるSoot(黒煙)、燃料や潤滑油の未燃成分であるSOF(有機可溶成分)を生成しやすく、この他にも低温下においては、燃料油中に含まれる水分の燃焼により生成された水蒸気が大気中で凝縮す

るため、PMの成分であるSootとSOFや凝縮した水蒸気による白煙を生成しやすい。起動時における大気環境汚染物質の排出特性に関する研究としては、CCDカメラで撮影した青・白煙の写真画像をコンピュータに取り込み画像処理することにより定量的評価を行なう方法²⁾や、レーザシート光を光源として排気管から出る白煙の濃度と質量を定量的に測定するための計測システムの開発³⁾が行なわれているが、いずれの方法を用いても大気環境汚染物質であるSootやSOFを定量的に評価することはできない。

そこで本研究では、船用ディーゼル機関から排出される大気環境汚染物質を定量的に評価するために、水産大学が開発した高精度PM計測システム^{4,5)}を船用小型高速ディーゼル機関の排気ラインに接続し、まず、機関起動直後から連続的にPMを捕集した。これと同時に、冷却水温度、燃料消費量、筒内圧力等エンジン各部の計測を行った。次に、PMの成分をソックスレー分析するとともに、燃焼解析により起動時の燃焼状態を解明した。その結果、船用ディーゼル機関の起動時における大気環境汚染物質の排出特性を明らかにした。

¹水産大学校海洋機械工学科 (Department of Ocean Mechanical Engineering, National Fisheries University)

²水産大学校練習船耕洋丸 (Training Ship Koyo-maru, National Fisheries University)

[†]別刷り請求先 (Corresponding author): yamanishi@fish-u.ac.jp

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置

実験には、漁船用小型高速ディーゼル機関(4気筒水冷4サイクル直接噴射式ディーゼル機関)を使用した。Table 1に、供試機関の主要目を示す。Fig. 1に供試機関と運転制御盤を示す。大気環境汚染物質の映像による評価方法として、排出ガスをビデオカメラにより連続的に撮影した。またPM計測による評価方法として、高精度PM計測システムを用いて起動直後から連続的にPMを捕集した。このPMは精密天秤により質量を計測後、ソックスレー抽出法によりSOFとISF(有機非可溶成分)に成分を分離した。

Fig. 2に水産大学校が開発した高精度PM計測システムの概要を示す。図において、排気は吸引ポンプにより吸引され、希釈空気は空気圧縮機から供給される。サンプリングプローブから吸引された排出ガスは排気導入管により希釈トンネル内に導入された後、希釈トンネル内で希釈空気用フィルタ、圧カプロワーを通過してきた $25\pm 5^{\circ}\text{C}$ の清浄な空気により、温度が $47\pm 5^{\circ}\text{C}$ になるように希釈される。希釈された排気中のPMは、フィルタホルダーに設置された一対のフィルタにより捕集され、実験前後におけるフィルタの質量差がPMの質量となる。JIS/ISOに規定された計測方法では、排気は垂直方向から希釈トンネルに入り、90度の曲がりを得て管内で空気により希釈される。一方、希釈空気は水平方向から希釈トンネルに入り、希釈トンネル内の排気導入管の曲がり部を冷却した後、排気を希釈する。しかし、排出ガス中のSOFは沸点が高いため、この方法では希釈トンネル内で希釈空気により冷却されて凝縮したSOFが排気導入管の内壁に付着して、測定値にばらつきが生じる欠点がある。このため、本計測システムでは、排気が水平方向から希釈トンネルに入り曲がり部を通ることなく希釈空気により希釈され、SOFが凝縮しないような構造に改良した。また、希釈トンネル内の排気導入管は断熱のため二重管構造となっており、硫黄分が0.8%以上で高沸点成分を多むC重油を燃料とするエンジンの排出ガス計測においても高精度な計測が可能である^{6,7)}。PMは2組の捕集フィルタにより捕集した。燃料は市販の軽油を使用した。Table 2に、供試燃料油の性状を示す。

2.2 実験方法

実験は、機関を起動後アイドル状態で約30分間運転し、起動直後より連続的にPM、燃料消費量、筒内圧力、冷却水温度、排出ガス温度などを計測した。なお、筒内圧力センサーは、キスラー社製で測定精度は $\pm 1\%$ である。

Table 1 Specification of experimental device

Type		S4M-MTK, 4 cylinders 4-stroke, DI, Turbocharged
Engine Output	kW	103
Engine Speed	min^{-1}	2400
Cylinder Bore	mm	110
Piston Stroke	mm	125
P_{me}	MPa	1.08
P_{max}	MPa	10.30
Nozzle		0.32 x 5

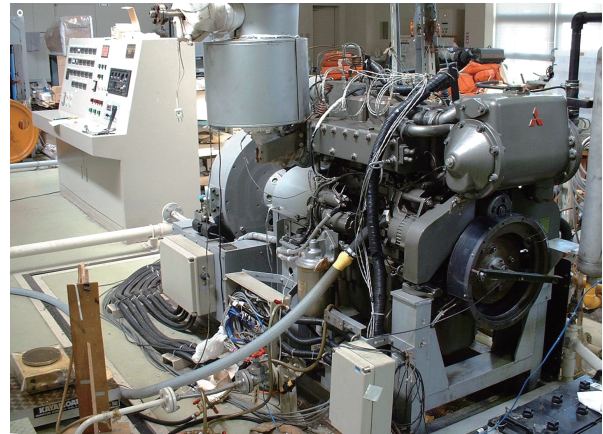


Fig. 1 Experimental engine

Table 2 Fuel properties

		Gas Oil
Density(15°C)	g/m^3	0.8359
Kinematic Viscosity	mm^2/s	3.791 (30°C)
C	wt%	86.2
H	wt%	13.7
S	wt%	—

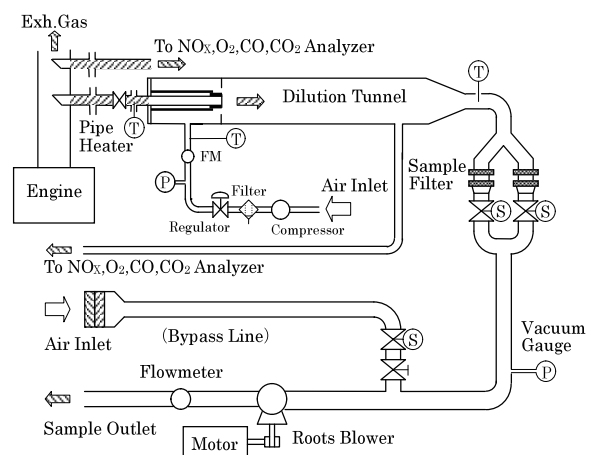


Fig. 2 Measuring system of exhaust emissions

温度計は、測温抵抗体を使用した。大気環境汚染物質を映像により評価する方法として、排出ガスをビデオカメラにより起動直前から連続的に撮影した。また、大気環境汚染物をPM計測により評価する方法として、まず、本システムによりPMを連続的に捕集し、次に捕集したPMを精密天秤により質量を計測後、ソックスレー抽出法により成分分析を行った。PMは起動直後より2組のフィルタを使用して、それぞれ2分間の捕集量とし、燃料消費量は精密天秤を用いて、起動直後から約10秒ごとに連続的に計測を行った。燃焼解析のために、小野測器製のDS-2000series燃焼解析システムを用いてクランク角度0.1度ごとに筒内圧力を採取し、解析にあたっては1サイクル毎および150サイクルの平均値を用いて指圧線図と熱発生率のグラフを作成した。

3. 実験結果と考察

3.1 排出ガスの評価

Fig. 3 にビデオカメラを使用した排出ガスの映像を示す。起動10分後には、かなり減少していることが分かる。Fig. 3 に示すように、起動直後には燃料油の水素分に起因する水蒸気と燃料の未燃分であるSOFからなる大気環境汚染物質が多量に排出されるが、これらの変化を映像により定量的に評価するため、風を遮るための遮へい板を排気管出口側に設置したが、わずかな風でも煙に乱れが生じた。また、大気環境汚染物質の光の当たり具合による色の変化などがあり、定量的な計測は困難であった。

Fig. 4 に起動時から約30分間におけるPM排出量を示す。起動時は約70 g/hのPMが排出されているが、時間の経過とともに減少し、約10分後以降は安定した値(約5 g/h: 起動時の約1/14)を示している。Fig. 5 に時間経過に伴う燃料消費量を示す。起動時は約3.7kg/hの燃料消費量であ

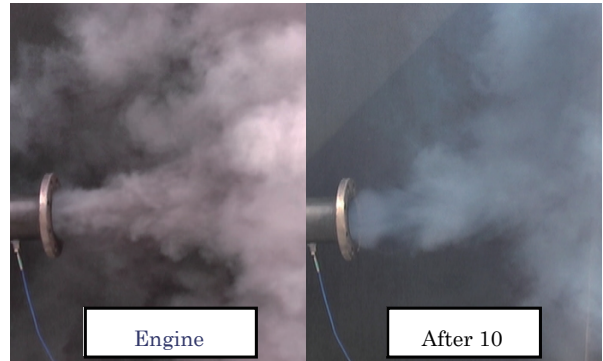


Fig. 3 Change in exhaust emission with elapsed time

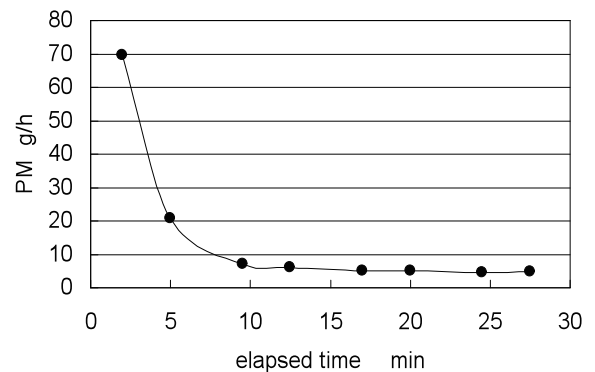


Fig. 4 Change in PM emissions with elapsed time

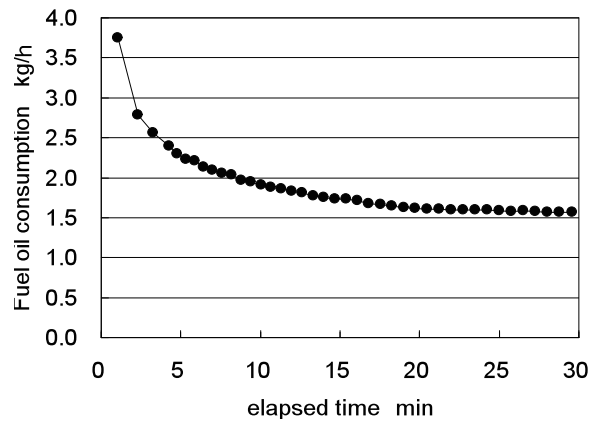


Fig. 5 Change in fuel oil consumption with elapsed time

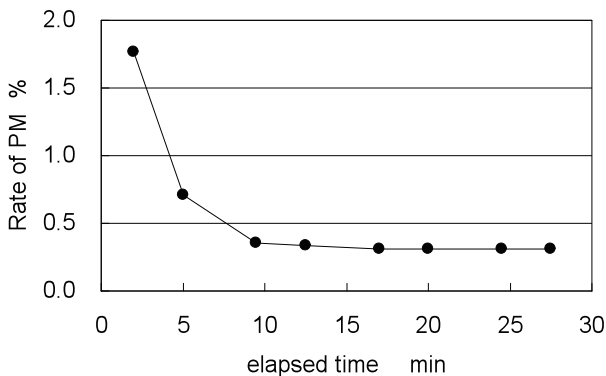


Fig. 6 Change in rate of PM with elapsed time

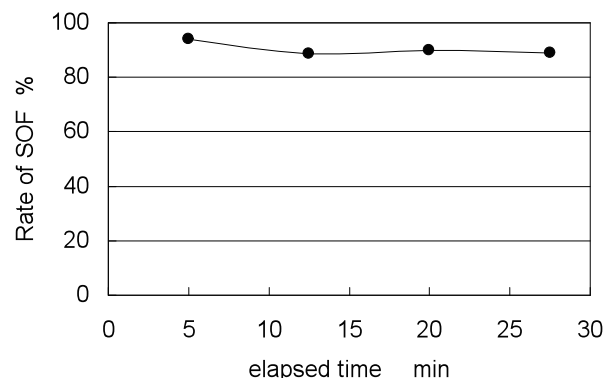


Fig. 7 Change in rate of PM with elapsed time

るが、時間の経過とともに減少している。起動より約10分後には約1.8kg/hとなり、起動時の約半分に減少し、約20分後からは安定した値となっている。Fig. 6に時間経過に伴う燃料に対するPMの排出割合を示す。起動時は燃料の約2%がPMとして排出され、起動より10分後には約1/5まで減少し、安定した値となっている。Fig. 7に時間経過に伴うSOFの割合を示す。PM中のSOFの割合は起動直後から、30分経過するまで約90%の値でほぼ一定であり、時間経過による変化がほとんどない。

3.2 燃焼解析

起動時の燃焼状態を解明するために、燃焼解析システムにより筒内圧を計測し指圧線図と熱発生率から解析を行った。Fig. 8, 9に起動後から9サイクル目までの指圧線図と熱発生率の変化を示す。起動直後では、各サイクルともバラツキが大きく、安定した燃焼が行われていない。8サイクル目では、熱発生率の変化が極めて少なく圧力の上昇がほとんどないが、9サイクル目では熱発生量が急減に大きくなり、最大圧力も著しく高くなっている。これらの原因として8サイクル目に燃え残った燃料が、9サイクル目に一気に燃焼を起こしたためだと考えられる。Fig. 10にエンジン起動から2分、15分および29分後における指圧線図と熱発生率を示す。起動2分後は着火遅れが大きく熱発生量も大きいですが、時間の経過とともに最高圧力が低くなり、着火遅れも短くなっている。Fig. 11に時間経過に伴う冷却水温度の変化を示す。時間の経過とともに冷却水温度は上昇し、約20分で温度が70℃以上となり安定している。Fig. 12に冷却水温度とPM排出量並びに燃焼消費量の関係を示す。起動時の冷却水温度が低い時は、PM排出量と燃料消費量は多く、冷却水温度が上昇するにつれて減少する。これらから、PM排出量と燃料消費量は冷却水温度と相関があると言える。

3.3 考察

Fig. 5, 6, 12に示すように、起動直後における燃料消費量は、約10分後の安定状態の約2倍の値であり、そのうちの1.8%がPMとなって大気中に排出されている。排出されたPMのほとんどは未燃の燃料であるSOFであるため、これが大気環境汚染物質として観察されるものと考えられる。起動時に大気環境汚染物質が大量に排出される原因として、小型高速機関においては起動前のシリンダライナやピストンの温度は外気温度に近いので、燃焼室の温度が上昇するまでは着火遅れが長く、燃焼状態も極端に悪いと考えられる。特に起動時にPMの排出量が多い理由として、Fig. 7, 8に示すように、8サイクル目のようにほ

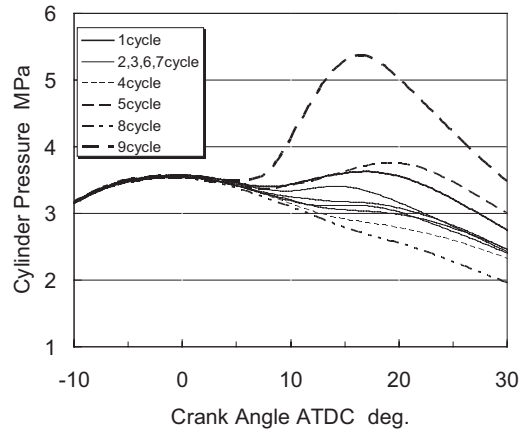


Fig. 8 Change in cylinder pressure with engine starting

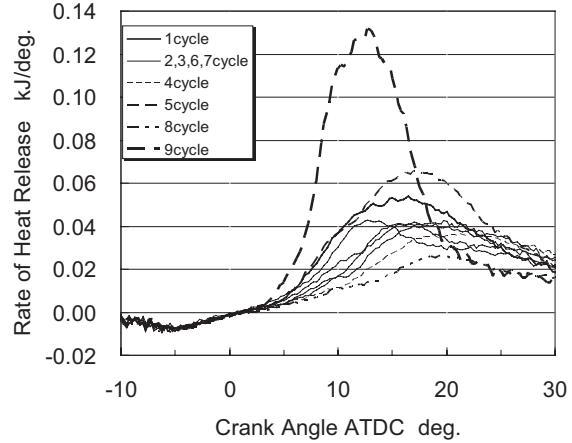


Fig. 9 Change in heat release rate with engine starting

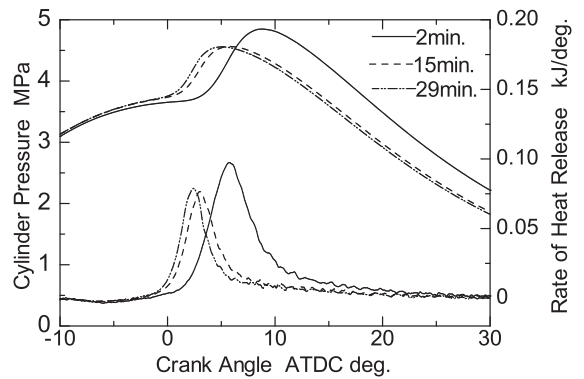


Fig. 10 Change in cylinder pressure and heat release rate with elapsed time

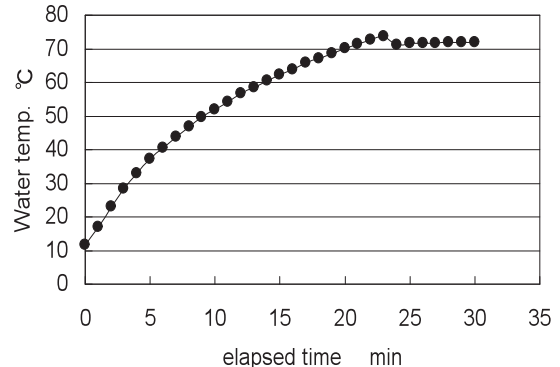


Fig. 11 Change in water temperature with elapsed time

とんど燃焼してないサイクルもあり、これがPMとして排出されるためと思われる。

Fig. 12 に示すように冷却水温度の上昇によりPM 排出量と燃料消費量は大幅に低減されるが、Fig. 7 に示すようにPM 中のSOFの割合は、約90%で一定であり冷却水温度の影響は、ほとんど変化がみられない。

以上の結果より、排出ガス中のPMを分析することにより大気環境汚染物質であるSootやSOFを定量的に評価できる事が分かる。

4. まとめ

本研究により得られた結果は、次のとおりである。

- (1) 排出ガス中のPMを分析することにより大気環境汚染物質であるSootやSOFを定量的評価することができる。
- (2) 起動直後におけるPMと燃料消費量の値を20分後の安定した状態と比較するとPMは約14倍、燃料消費量は約2.5倍と高い値を示す。また燃料消費量に対するPMの値は1.8%で安定した値(0.3%)の6倍である。
- (3) 起動時からアイドリング運転中に排出されるPMに占めるSOFの割合は、約90%と非常に高い値を示す。
- (4) 起動時における大気環境汚染物質の排出量と燃料消費量は、冷却水温度と相関がある。

文 献

- 1) 船舶からの大気汚染物質放出規制海域(ECA)に関する技術検討委員会について、国土交通省、
http://www.mlit.go.jp/maritime/maritime_tk7_000008.html
- 2) 常本秀幸, 石谷博美, 中島繁盛則: 低温始動時の始動白煙の定量的評価法について, 北見工業大学地域共同研究センター研究成果報告書, 5, (1998)
- 3) 杉山義保, 神本武征, 陳之立: ディーゼル機関の白煙測定法に関する研究, 微粒化, Vol.16(55), 10-16(2007)
- 4) JIS B8008-1:2009 往復動内燃機関 - 排気排出物測定 - 第1部: ガス状排出物及び粒子状排出物の台上測定
- 5) ISO 8178-1:2006 Reciprocating internal combustion engines - Exhaust emission measurement - Part 1: Test - bed measurement of gaseous and particulate exhaust emissions
- 6) 前田和幸, 高崎講二, 津田稔, 阿部清三, 希釈率がPM計測値に及ぼす影響, 38(8), 37-41(2003)
- 7) Maeda,K,et al., Measurement of PM Emission from Marine Diesel Engines,CIMAC Congress 2004 Kyoto,Paper No.107(2004)

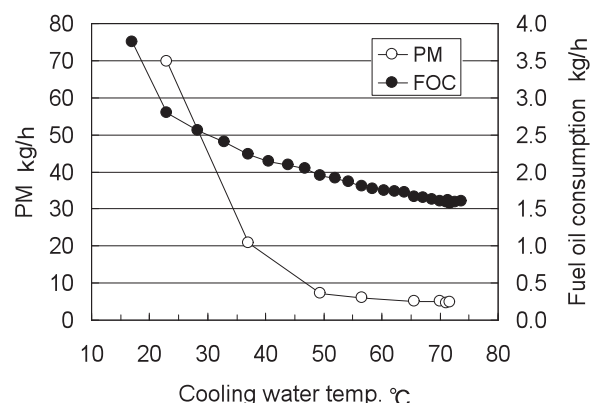


Fig. 12 Change in PM and fuel oil consumption with cooling water