

船用機関における大気汚染物質の 抑制技術に関する研究

高杉 喜雄*、西尾 澄人*、石村恵以子*、中島 康晴*、
大橋 厚人*、桑原孫四郎*、菊地 正晃*、張 潔*、
菅 進*、西川 和美**、尾崎 高司***、松崎 範行***、
大立 康裕***

Study on the Suppression Technologies of Harmful Gas Pollutant from Marine Engine

by

Yoshio TAKASUGI, Sumito NISHIO, Eiko ISHIMURA, Yasuharu NAKAJIMA,
Atsuto OHASHI, Magoshiro KUWABARA, Masaaki KIKUCHI, Jie ZHANG, Susumu KAN,
Kazumi NISHIKAWA, Takashi OZAKI, Noriyuki MATSUZAKI, Ohtachi YASUHIRO

Abstract

The regulation of exhaust emissions from ships was discussed as prevention policy of air pollution by the International Maritime Organization (IMO) from the viewpoint of global environmental protection, and it will go into force in the near future. At the same time, the proposal that revises the contents every five years after the regulation starts was adopted, which suggests that other harmful emissions will be regulated in the near future as well as NO_x and SO_x. On the other hand, some NO_x reduction methods which are expected to be utilized for marine diesel engines have been found to increase other harmful emissions.

Thus, this study primarily aims combustion improvement and control with electronic control of fuel injection system and valve driving system to reduce air pollutants in exhaust gas totally. In addition, emission state of Volatile Organic Compound (VOC), of which behaviors have been unknown in the case of marine diesel engines, and influence of fuel and other factors on composition of Particulate Matter (PM) are investigated as well as adaptable measurement methods of VOC and PM for ships. The following results were obtained:

1. In the study on electronic control of fuel injection system of marine Diesel engine, a trial fuel injection apparatus was manufactured to aim simultaneous reduction of NO_x and PM, and the following results were obtained:

- a) Electronic control of fuel injection system caused significant reduction of PM emission.
- b) Optimization of fuel ignition timing by electronic control provided a considerable effect at lower engine loads in particular. At 25% engine load, the optimum ignition timing, which improved NO_x emission, PM emission and Specific Fuel Consumption

* 機関動力部 ** 材料加工部 *** 航海訓練所

原稿受付 平成13年 7 月23日

審査済 平成13年11月14日

(SFC) simultaneously, was obtained.

c) At higher engine loads, an increase in actuating hydraulic pressure could improve SFC and PM emission.

d) For emulsified fuel, no obvious optimum fuel ignition timing was obtained because pressure drop in the rear part of injection period increases exhaust gas temperature.

2. In the study on operation of electronic-controlled Diesel engine, electronic control of valve driving system was conducted following fuel injection system to aim further improvement of SFC and simultaneous reduction of NO_x and PM by the synergistic effect of these apparatuses, and the following results were obtained:

a) Easy determination of desirable fuel ignition timing based on fuel injection timing and ignition delay by displaying of average value of each timing datum was enabled. And, it was found that exhaust valve opening timing is available as an index of engine operation.

b) At lower engine loads, the optimum ignition timing, which improves NO_x emission and SFC simultaneously, was obtained.

c) It was found that delaying of exhaust valve opening timing might improve NO_x emission and SFC simultaneously.

3. In the study on measurement and evaluation of VOC from marine Diesel engine, the measurement was conducted for experimental and on-board engines to establish VOC measurement adaptable to actual ships, and the following results were obtained:

a) In general, the concentration of methane, ethylene, propylene and benzene in exhaust gas was considerable while ethane and propane were slight.

b) In all experiments, methane concentration in exhaust gas fell below its concentration in ambient air. Thus, evaluation of methane emission is to be based on net emission coefficient or IPCC net emission coefficient.

4. In the study on on-board PM measurement, the measurement was conducted for experimental and on-board engines to establish PM measurement adaptable to actual ships, and the following results were obtained:

a) Some problems such as participation of PM in measurement system remain for Fast FID Method, Filter Oscillation Method and β-ray Absorption Method.

b) Fast FID Method has enough maneuverability and response for real-time measurement. However, suitable evaluation function should be applied to consider the influence of sulphate in PM.

c) Filter Oscillation Method is very available because it has portability and quick response. However, it is affected by ship rolling so that some arrangements should be treated.

d) β-ray Absorption Method endures ship rolling. However, the improvement of control program is demanded to evaluate the errors.

目 次

1.	緒言
2.	船用ディーゼル機関の燃料噴射系の電子制御化の研究
2. 1	実験装置および実験方法
2. 2	A重油使用時の実験結果及び考察
2. 2. 1	船用負荷運転結果
2. 2. 2	着火タイミングの影響－25%負荷の場合
2. 2. 3	作動油圧に関する考察
2. 3	乳化燃料使用時の運転試験結果
2. 3. 1	燃料噴射圧特性
2. 3. 2	負荷率の影響
2. 3. 3	噴射タイミングの影響
2. 3. 4	作動油圧の影響
2. 4	まとめ
3.	電子制御化ディーゼル機関の運転

3. 1	実験装置
3. 2	吸排気弁開閉時期設定について
3. 3	燃料噴射時期と吸排気弁開閉時期制御について
3. 3. 1	平均表示の方法
3. 3. 2	平均した各時期の有効性について
3. 4	燃料噴射・吸排気弁の電子制御化運転の結果について
3. 4. 1	燃料噴射時期の影響
3. 4. 2	排気弁開閉時期の影響
3. 5	まとめ
4.	船用ディーゼル機関から排出される揮発性有機化合物の計測及び評価
4. 1	排出係数の設定
4. 2	実験機関及び燃料
4. 3	結果及び考察
4. 4	まとめ
5.	実船でのPM計測について
5. 1	高速FID法による粒子状物質の計測
5. 1. 1	実験方法
5. 1. 3	実験結果及び考察

5.2 フィルター振動法による停泊中の実船でのPM計測について

5.2.1 実験装置

5.2.2 実験結果及び考察

5.3 フィルター振動法による航海中の実船でのPM計測について

5.3.1 実験装置

5.3.2 実験結果及び考察

5.4 ベータ線吸収法による実船でのPM計測

5.4.1 実験装置

5.4.2 実験結果及び考察

5.5 まとめ

6. 本研究により得られた成果

7. 研究発表

8. 参考文献

1. 緒言

地球環境保護の観点から大気汚染防止対策として、船舶からの排ガス規制が国際海事機関(IMO)において審議され、近く発効の予定である。また、規制開始から5年毎に内容を見直す案も同時に採択されたことから、近い将来にはNO_x及びSO_x以外の有害排出物についても規制の適用が及ぶものと予想される。

一方で、船用ディーゼル機関のNO_x低減対策として実用化が期待されている各種方法は、NO_x以外の有害排出物質の増加が懸念されることから、本研究では燃料噴射系及び吸排気動弁駆動系の電子制御化を通して燃焼改善及び燃焼制御を行い、排ガス中の大気汚染物質を総合的に抑制する技術についての研究を行った。

また、船用ディーゼル機関では殆ど挙動が知られていない揮発性有機化合物(VOC)の排出実体、及び微粒子状浮遊物質(PM)組成に与える使用燃料等の影響を調査するとともに、将来に向けて船舶に適合したVOC及びPM計測法についての研究を行った。

「船用ディーゼル機関の燃料噴射系の電子制御化の研究」では当所の中速ディーゼル実験機関を用いて燃料噴射系の電子制御化を試み、A重油及び乳化燃料での運転を行い、燃料消費率を増加させることなく、NO_xあるいはPMの排出量を低減させる燃焼範囲を調査した。

「電子制御化ディーゼル機関の運転」では燃料噴射装置に続き、吸排気弁装置の電子制御化を試みたが、電磁弁作動に起因するバラツキの問題があり、この対処方法について検討を加えた。

「船用ディーゼル機関から排出される揮発性有機化合物の計測及び評価」では種々の船用ディーゼル機関から排出されるVOCを計測し、燃料性状や機関運転条件等がその排出特性に与える影響について検討し、さらに、これらの排出係数を算出することによりVOC排出量の

評価を行った。

「実船でのPM計測について」では船舶からの排出されるPMの計測方法の確立を目指し、高速FID法、フィルター振動法、ベータ線吸収法による各PM測定器を使い、フィルタ振動法との比較あるいは実船での測定から検討を行った。

2. 船用ディーゼル機関の燃料噴射系の電子制御化の研究

船用ディーゼル機関に対しては、熱効率の一層の改善と共に排ガ斯特性の飛躍的な改善が期待される。そのため、最適な燃焼制御を行う手段として、当所の中速ディーゼル実験機関を用いて燃料噴射系の電子制御化を試みた。試作した装置を取り付けた実験機関は、装置の改良と調整を経て、A重油を使用して安定した運転ができるようになった。これに続き、乳化燃料での運転を行った。乳化燃料はNO_x排出量の低減に大きな効果が期待できるが、燃焼の悪化によるPMの増加や燃料消費率の増加を招きやすく、燃料噴射系について注意深い設計変更が必要とされる。試作した燃料噴射装置を乳化燃料に対して使用する場合、A重油と同様の改善が得られるか、また、乳化燃料に対する特別な課題が生じるかを調査した。

2.1 実験装置および実験方法

実験には当所の3気筒4サイクル中速ディーゼル機関を使用した。燃料噴射ポンプは既設のボッシュ式ポンプをそのまま使用し、駆動用カム軸を取り外して油圧駆動方式に改造した。試作した燃料噴射制御装置はマイクロコンピュータを用いたコントロールユニットと油圧ユニット、および電磁弁を一体化した燃料噴射シリンダユニットで構成されている。燃料噴射時期はコントロールユニットからシリンダ毎に調整する。図1に装置の概要を示す。実験機関、噴射ポンプおよび燃料噴射弁の要目を表1に示す。

試作装置を取り付けた機関の運転は、当初、極めて不安定であり、燃焼異音の発生や機関の振動、油圧配管系の振動等、種々の問題が生じた。これらに対して、油圧回路にアキュムレータを取り付け元圧の安定を図ること、電磁弁の電気回路と油圧アクチュエータースプールの改良等により動作信号から燃料噴射までの時間を短縮し、動作の安定性を高める等を行った。この結果、噴射時期は安定し、実験機関は25~100%負荷まで安定して運転ができるようになった。しかし、作動油圧を高めて高負荷で運転を行う場合、まだ噴射時期のバラツキが大きく、機関の運転が不安定になる傾向がみられた。このため、実験は作動油圧20MPaの条件を中心にして、負

荷率を変えた場合および燃料噴射時期の影響を調べたのち、一部の運転条件で作動油圧の影響を調べた。比較として示すカム駆動式の実験は噴射装置改造の前に実施したものである。負荷は船用負荷特性で与えた。燃料はA重油を使用した。

乳化燃料はA重油を基材とし、加水率(燃料に対して混合調整する水の体積比率)及び葉油率(乳化燃料の安定化を図る目的で使用する添加剤の燃料に対する注入比率であり、0.5%とした)の制御には乳化燃料製造装置(セキエマーDND200A)を使用した。加水率が増加すると共に、動粘度および比重は増加する。

実験では、加水率30%で負荷を25～75%まで変えた場合、および船用特性25%負荷において加水率を0～45%まで変え、噴射時期を変化させた場合について調べた。油圧装置の作動油圧は20MPaとした。

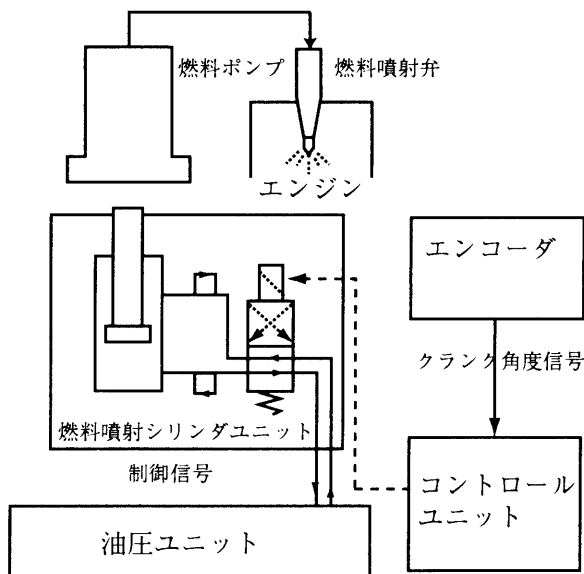


図1. 油圧駆動電子制御式燃料噴射システム

表1. 機関、噴射ポンプ、噴射弁の要目

機関	型式	4サイクルディーゼル機関
	シリンダー	230φ×380、3気筒
	最大出力×回転数	257kW×420rpm
噴射ポンプ	型式	ボッシュ式
	プランジャ寸法	22φ×23
噴射弁	噴穴	0.28φ×9

排ガス計測には、NO_xは化学発光式NO_x分析計、PMはダブルダイリュージョントンネルシステム、酸素濃度は磁気風式酸素濃度計を使用した。NO_x濃度は13%酸

素濃度値に換算して整理した。燃料噴射時期は、着火時期で整理することにした。着火時期は、シリンダ内圧力の上昇率が $dp/d\theta > 1000\text{MPa}/\text{度}$ (θ :クランク角)となるクランク角と定義した。実験では各シリンダ毎に電磁弁開時期を調整し、3シリンダの着火時期をそろえるようにした。

2. 2 A重油使用時の実験結果および考察

2. 2. 1 船用負荷運転結果

燃料噴射装置を油圧駆動電子制御式に改造した実験機関は、船用特性で25～100%の負荷範囲ではほぼ良好に運転することができた。図2～図4に25～100%負荷における実験結果を示す。ここで作動油圧は20MPaであり、燃料噴射時期は燃料消費率がほぼ最小となるように設定している。

燃料消費率(図2)は、電子制御化によって25%負荷ではカム駆動式と比較して大きな改善が得られたが、75%負荷以上ではカム駆動式に及ばなかった。NO_x排出量(図3)は電子制御化によって全負荷範囲で180～250ppmの改善が得られた。PM排出量(図4)も電子制御化によって大幅な改善が得られた。負荷に対するPM排出特性は全負荷範囲でフラットとなり、25%負荷で

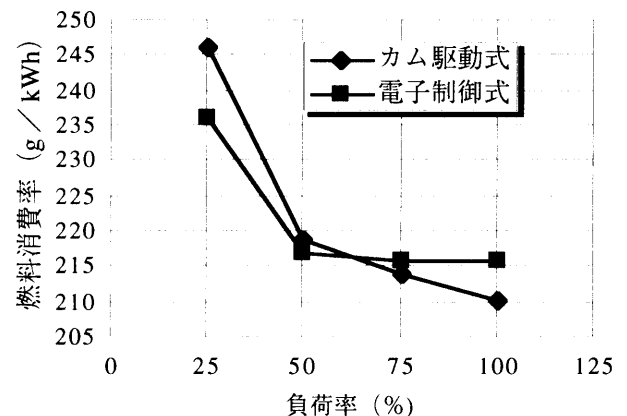


図2. 負荷特性-燃料消費率

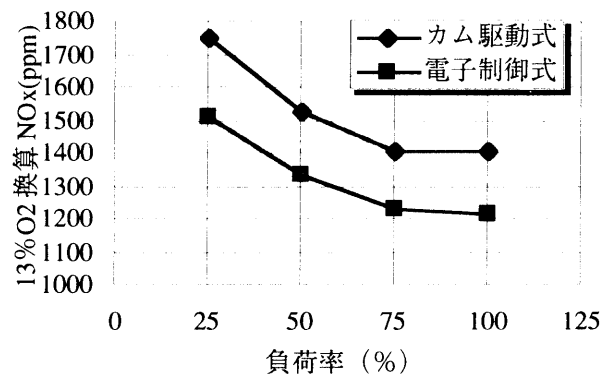


図3. 負荷特性-NO_x濃度

はカム駆動式でPM排出量が増加したが、電子制御化によって排出量はカム式の1/3となった。

図5にカム駆動式および電子制御油圧駆動式の場合のクランク角に対する燃料噴射圧の変化を示す。カム駆動

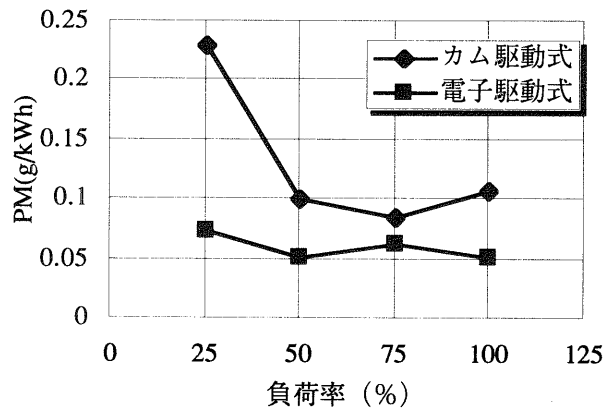


図4. 負荷特性-PM排出量

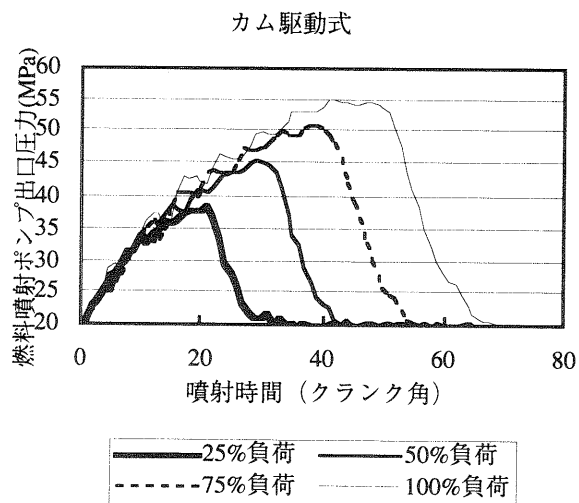
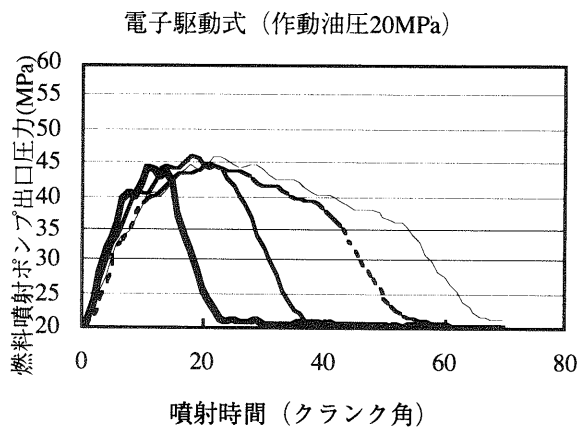


図5. 燃料噴射圧特性

の場合、クランク角に対する噴射初期の噴射圧の上昇は比較的緩やかであり、また噴射最高圧力および噴射持続時間(クランク角)は負荷の増大と共に増加する。これに対して油圧駆動の場合、噴射圧の上昇速度はカム式に比べて大きく、最高噴射圧は負荷(回転速度)によってほとんど変わらない。このため、低負荷(低回転速度)ではカム駆動に比べて最高圧力も高くなるが、高負荷では最高圧力は低くなり、これに伴って噴射持続時間はカム式よりさらに長くなる。高負荷において燃料消費率が

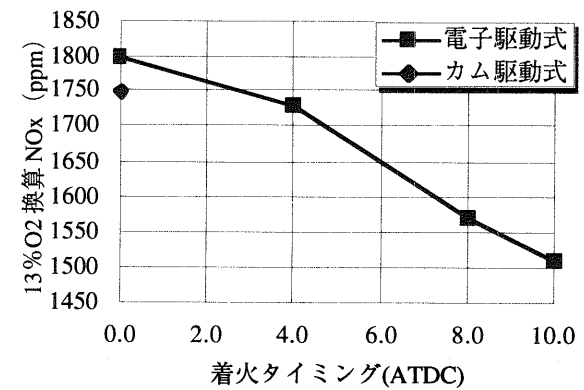


図6. 着火タイミングの影響-NOx濃度

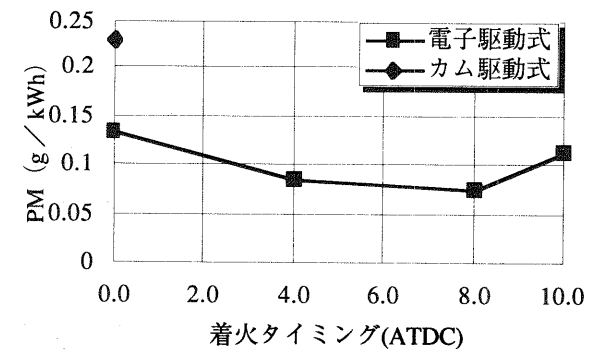


図7. 着火タイミングの影響-PM排出量

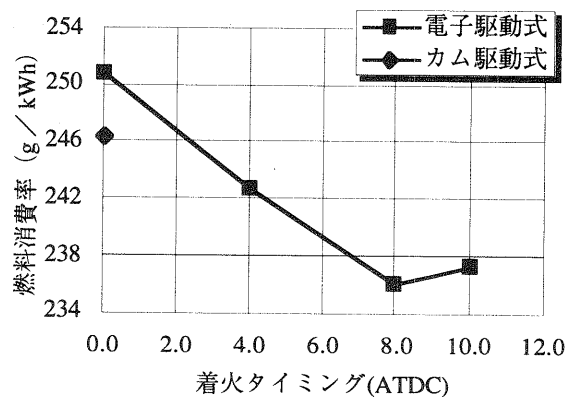


図8. 着火タイミングの影響-燃料消費率

カム式に及ばない理由は、燃焼の終了がカム式より遅くなるためと考えられる。

2. 2. 2 着火時期の影響—25%負荷の場合

カム駆動式では定格負荷近辺で最適値を取るために燃料噴射時期を設定するため、低負荷では最適値からのずれが大きくなり、機関性能と排ガス特性は悪化する。そこで、船用25%負荷条件で、着火時期をクランク角で上死点から上死点后10度まで変えて、最適噴射時期を調べた。カム駆動の場合の着火時期はほぼ上死点である。

図6～図8に着火時期を変えた場合のNO_xとPM排出特性、および燃料消費率を示す。NO_x排出量(図6)は着火時期が上死点から遅れるに従って減少し、クランク角0度から10度までの間で約16%減少する。PM排出量(図7)は着火時期が遅れるに従って減少し、クランク角8度で最小値をとり、さらに着火を遅らせると再び増加する。燃料消費率(図8)はPM排出特性と同様に着火時期をクランク角8度とした時に最小となる。これらから分かるように、着火時期を上死点后8度とすると排ガス特性と機関性能を同時に改善することができ、カム駆動式と比較してNO_xは11%、PMは68%、燃料消費率は4%の改善が得られる。

25%負荷時のPM排出量は、図7から分かるように着火時期が上死点であっても、電子制御化によってカム式の場合の約60%に減少した。カム式と電子制御式の噴射圧特性を比較すると(図5)、25%負荷では噴射初期の圧力上昇率および最高噴射圧はカム式に比べて油圧駆動電子制御式の方が大きく、特に噴射初期の噴霧の高速化がPM低減につながったものと推測される。

図9に着火時期を変えた場合の指圧線図を示す。着火時期を遅くするに従ってシリンダー内最高圧力は低下

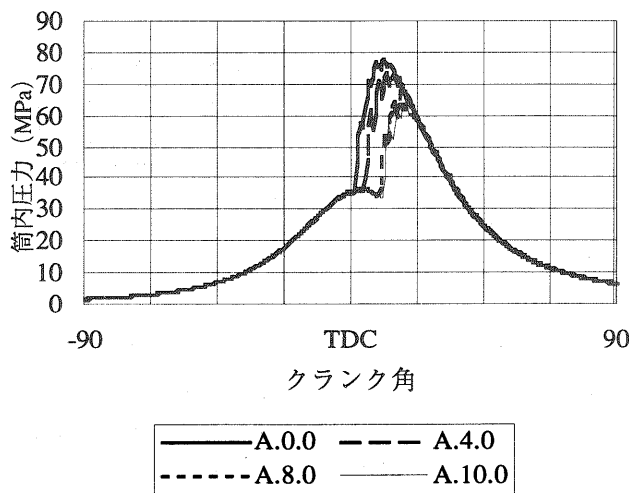


図9. 着火タイミングの影響 - 指圧線図の比較

し、着火時期を8度とすることは部材強度の面からも好ましい。

2. 2. 3 作動油圧に関する考察

本装置では作動油圧を30MPaまで高めることができるが、作動油圧を高くすると着火時期のバラツキが大きくなり、運転が不安定になる傾向が見られた。このため30MPaの実験は燃料消費率の測定に限り、また負荷も

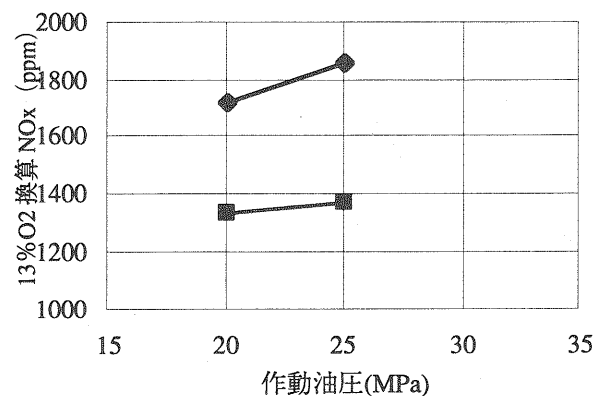
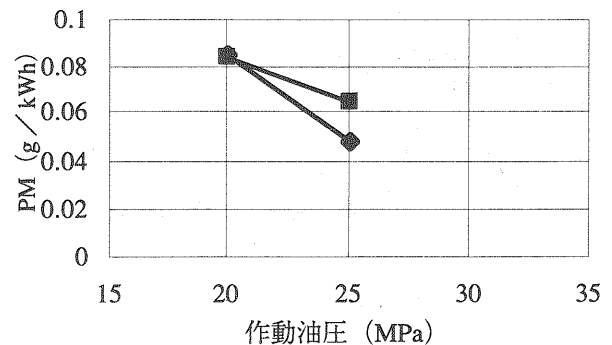
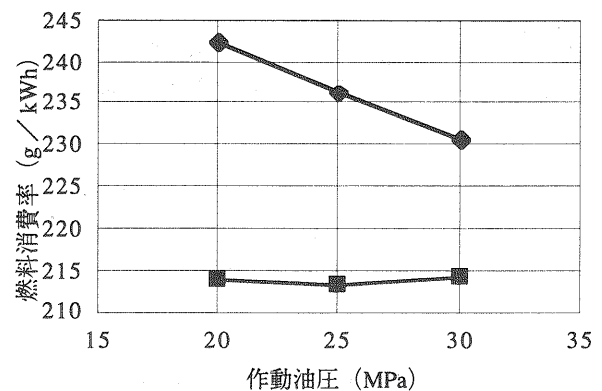


図10. 作動油圧の影響

75%までとした。

図10に25%負荷および75%負荷における作動油圧の影響を示す。着火時期は25%負荷では上死点後4度、75%負荷では2度を設定した。25%負荷では作動油圧の上昇とともに燃料消費率は改善され、これに伴ってNOx排出量はわずかに増加するが、75%負荷では燃料消費率、NOx排出量ともに差は認められなかった。PM排出量の測定値はばらつきが大きく、有意の結果とするにはデータが不足しているが、作動油圧の上昇とともに若干改善される傾向が見られた。しかし、2.3で述べるように、作動油圧を高めて性能が悪化する場合もあり、作動油圧と着火時期の適切な選定が重要である。

図11に作動油圧を変えた場合の燃料噴射圧特性を示す。作動油圧を20MPaから1.5倍の30MPaに上昇させても最大噴射圧の変化は1.2倍に止まり、作動油圧に比例しては増加しない。これは、本装置の油圧回路の構成や流路抵抗によると考えられるので、動作精度の改善とともに燃料噴射圧の可変範囲をより大きく取ることのできる装置の改良が必要である。

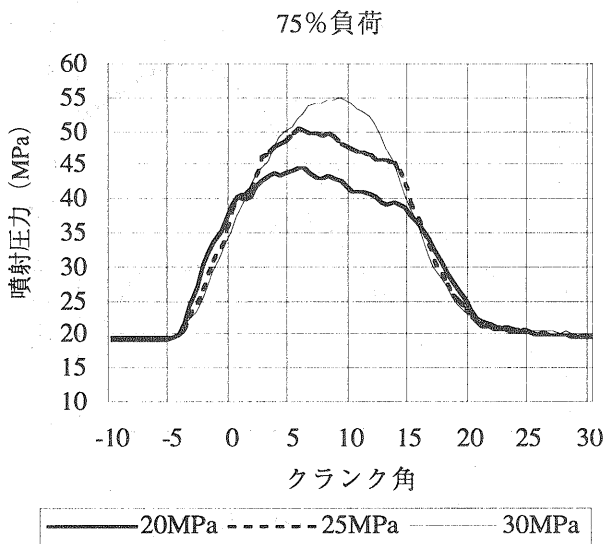


図11. 噴射圧力に対する作動油圧の影響

2. 3 乳化燃料使用時の実験結果及び考察

2. 3. 1 燃料噴射圧特性

最初に乳化燃料使用時の燃料噴射圧特性を検討する。図1に加水量30%として負荷率を変えた場合の噴射圧特性(図12a;油圧駆動式、図12b;カム駆動式)を示す。図では比較が容易なように噴射開始時期をそろえて表示した。

噴射開始後の噴射圧は、カム式ではなめらかに上昇するのに対し、油圧式は急速に上昇する。最大噴射圧はカム式では負荷(回転速度)によって大きく変わるのに対し、油圧式では負荷率による変化は小さい。加水率が高く、負荷が高い場合、油圧式では噴射後半に噴射圧が低下する傾向が見られる。乳化燃料は加水率とともに燃料流量が増大するので、A重油に比べて噴射持続時間が長くなり、噴射終了が遅れる。カム式に対して、着火時期が最適値をとるように噴射開始時期を遅く設定する場合、噴射終了時間はさらに遅れる。このような結果、油圧式で乳化燃料を使用する場合、機関排ガス温度が上昇して上限を越えやすくなり、運転可能な範囲が狭められる。乳化燃料に対して本方式の電子制御式燃料噴射装置を適用する場合は、燃料流量の増加に対する慎重な考慮が必要である。

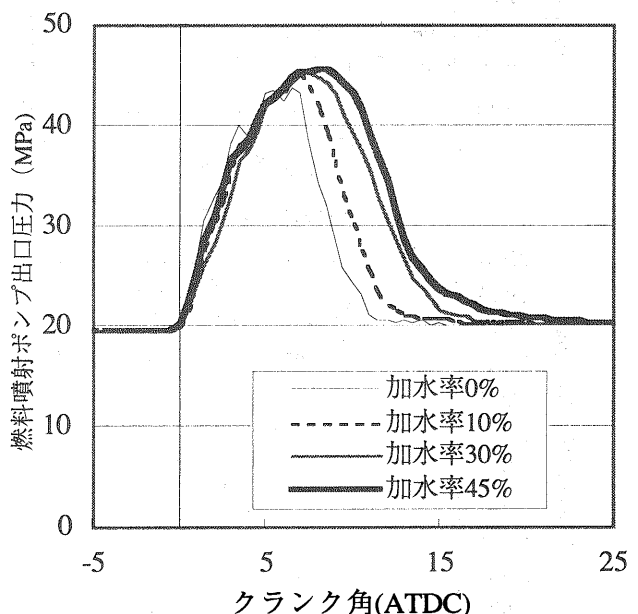


図12 a. 燃料噴射圧力特性 (油圧駆動式)

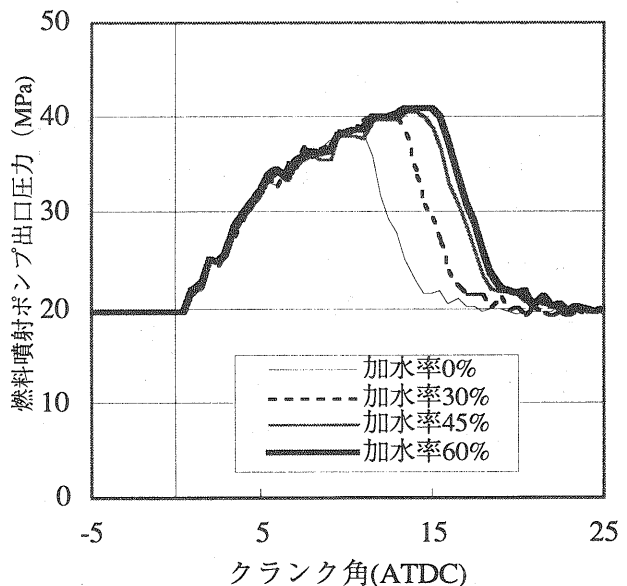


図12 b. 燃料噴射圧力特性 (カム駆動式)

2. 3. 2 負荷率の影響

図1 3に加水率0% (A重油) および30% (乳化燃料)

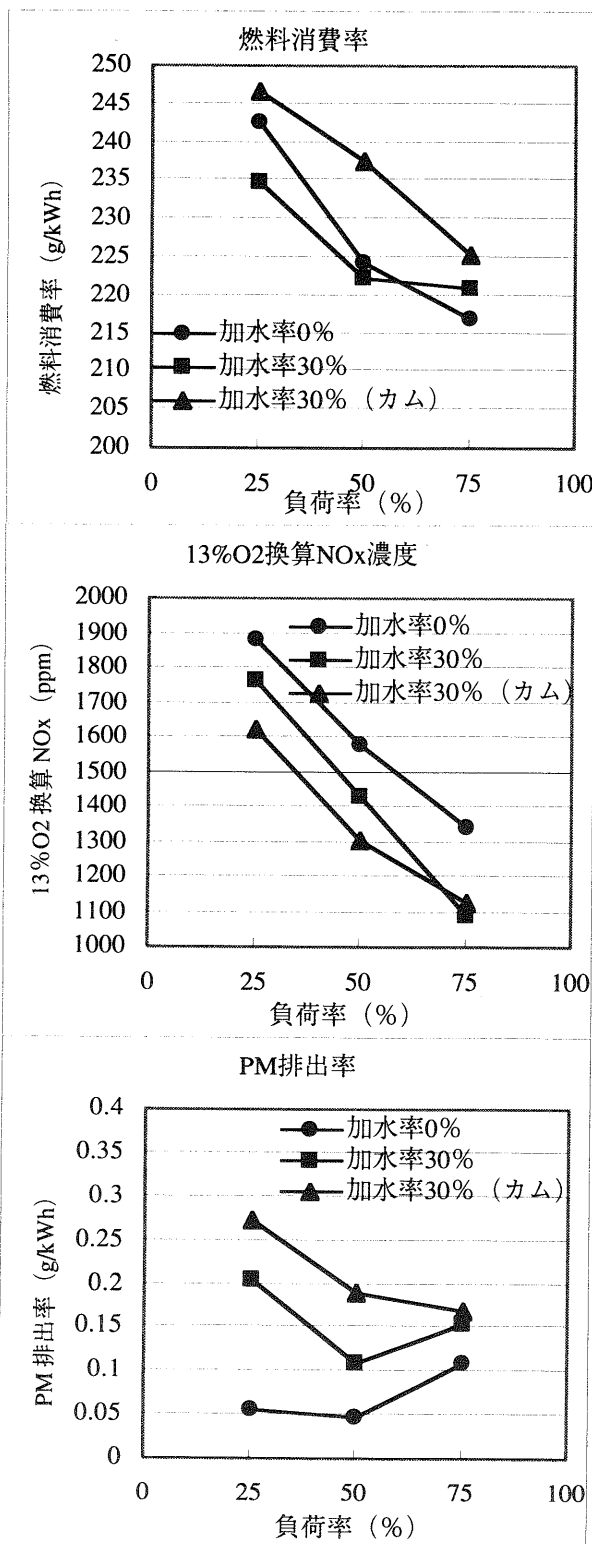


図1 3. 燃料消費率と排ガ斯特性 - 負荷率の影響

で負荷を25～75%まで変えた場合のNO_xとPM排出率および燃料消費率を示す。作動油圧は20MPaとし、着火時期は上死点後4～6度に設定した。加水率0%の結果は前章と若干異なるが、計測結果は機関の調整状況によって変動するため、ここでは同一シリーズの運転結果をそのまま示した。図には加水率30%のカム駆動時の結果も参考のため示した。油圧駆動式の場合もカム式と同様に加水によってNO_xが減少し、PMが増加した。カム式の実験時期が異なるため、両者の比較は厳密とはいえないが、油圧式のNO_x排出量がやや高く、PM排出量がやや低い結果が得られた。一方、燃料消費率は30%加水によって25%負荷では3%程度の改善が得られたが、75%負荷での燃料消費率は加水0%より悪化した。図1 4に75%負荷時の噴射圧特性と指圧線図を示す。75%負荷における加水による燃料消費率の悪化は、燃料流量の増加と噴射時期の遅れが重なり、燃焼が遅れ過ぎた結果と思われる。

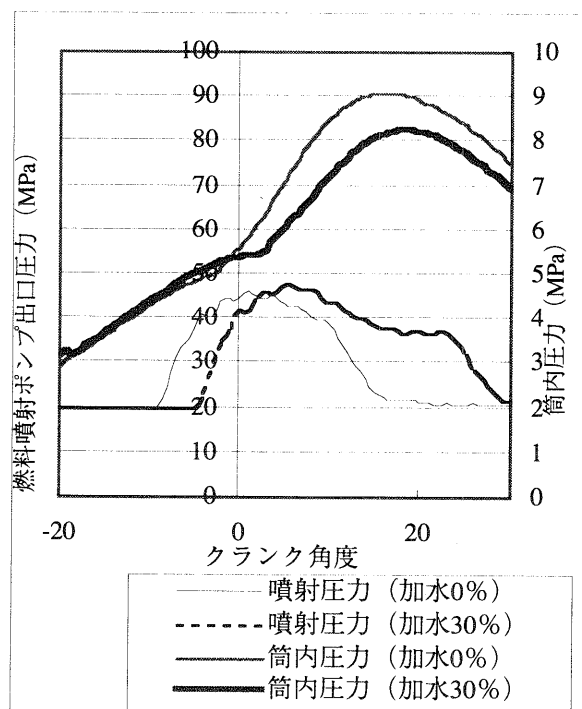


図1 4. 燃料噴射圧力と指圧線図 - 加水率の比較

2. 3. 3 噴射時期の影響

図1 5に25%負荷で噴射時期を変えた実験結果を示す。噴射時期は着火時期で整理した。着火時期はシリンダ毎に異なり、その差は最大4度程度となることもあったが、ここでは3シリンダの平均値を示した。

加水率は0～45%まで変えた。A重油使用では燃料消費率とNO_xおよびPM排出率を同時に改善する最適着

火時期が約8度となることを示したが、今回も加水率0%の場合は同様な結果が得られた。しかし、加水率10%以上では燃料消費率、NO_x、PM排出量の着火時期に対する傾向にはばらつきが多く、A重油に見られるよう

な燃料消費率、PM排出量およびNO_x排出量を同時に低減できる最適着火時期を明確にすることはできなかった。データのばらつきは、加水によって着火時期のずれが増加したことがひとつの理由と思われる。また、加水によって燃料噴射持続時間が増加し、A重油に見られたような顕著な噴射時期の影響が出にくくなった可能性も考えられる。

2. 3. 4 作動油圧の影響

本実験シリーズでは主に作動油圧 20MPa で実施した

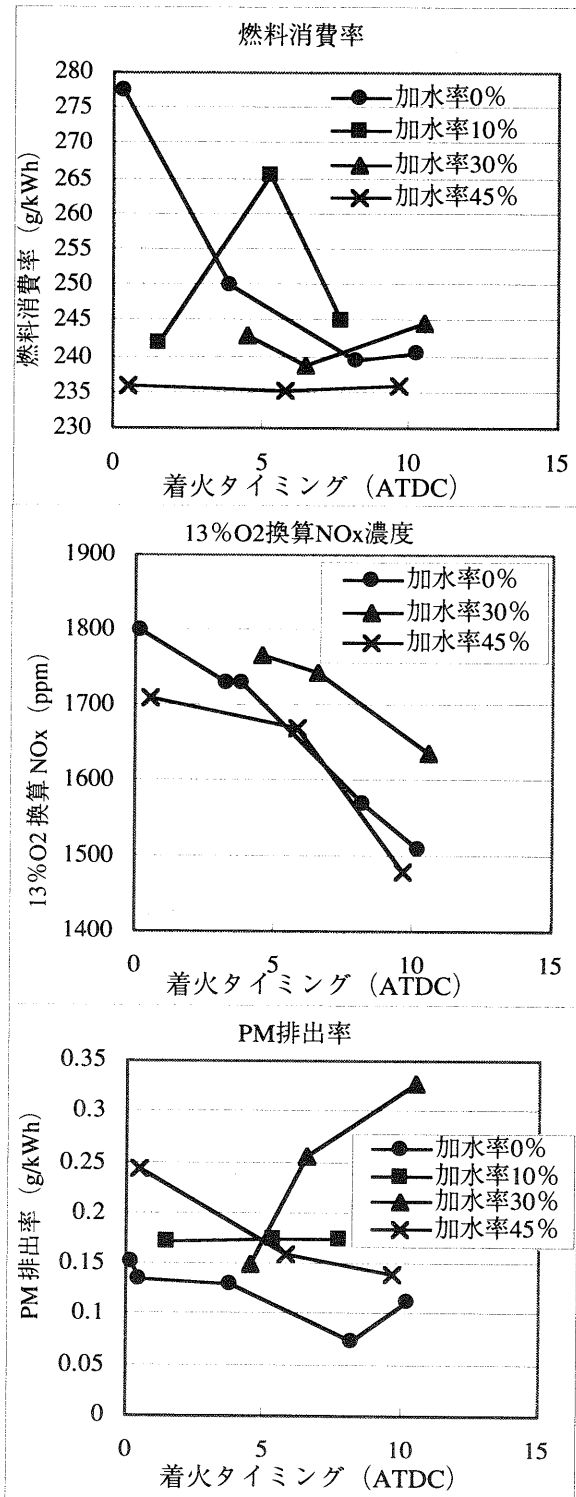


図15. 燃料消費率と排ガス特性
- 噴射タイミングの影響

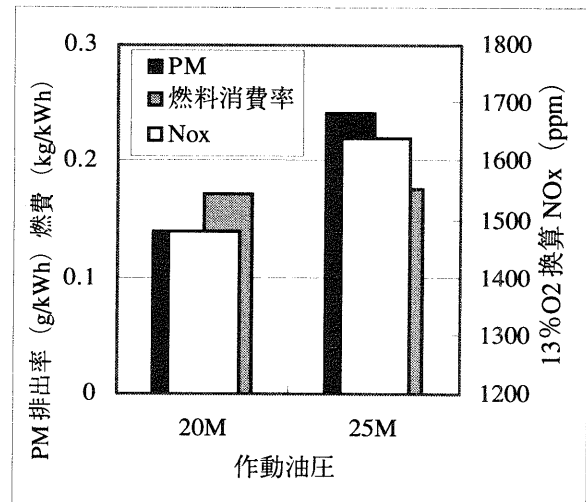


図16. 燃料消費率と排ガス特性 - 作動油圧の影響

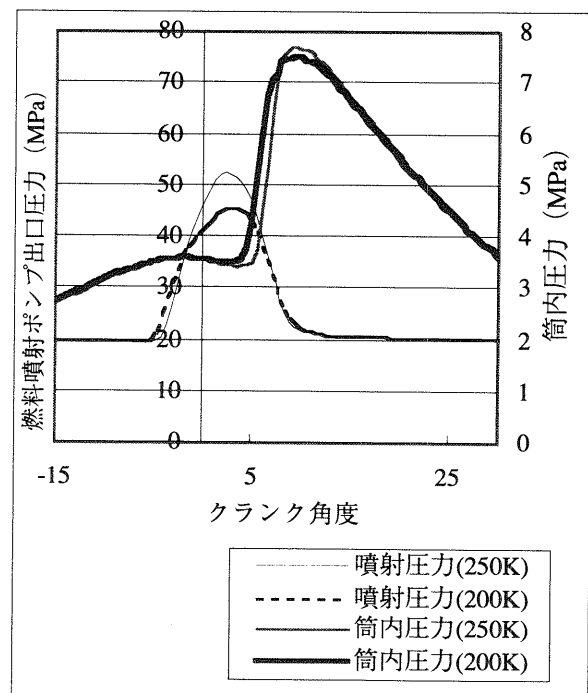


図17. 燃料噴射圧力と指圧線図 - 作動油圧の影響

が、加水率45%、負荷率25%の条件で、作動油圧を25MPaとして運転を行い、作動油圧の影響を検討した。図16にその結果を示す。燃料消費率、NO_x濃度、PM排出量とも、25MPaより油圧の低い20MPaの方がよい結果が得られた。図17に作動油圧を変えた場合の噴射圧特性とシリンダ内圧力分布を示す。乳化燃料を使用する場合、燃料流量の増加に適応するように噴射圧の増加が必要となるが、ここで見られるように低負荷では噴射圧の低い方がよい性能が得られる場合もあり、負荷に応じての噴射圧力（噴射圧分布）と噴射時期の適切な組み合わせが重要と思われる。

2. 4 まとめ

当所の機関の燃料噴射系を油圧駆動電子制御式に改造し、ほぼ良好な運転試験を実施することができ、次のような結果を得た。

A 重油について

a) 燃料噴射系を油圧駆動電子制御化することにより、カム駆動式に比べてPM排出量を大幅に低減させることができた。低負荷では、噴射時期の適正化と共に燃料噴射初期の噴射圧力の上昇によって燃料噴霧特性が改善された結果と考えられる。

b) 電子制御による着火時期の最適化は特に低負荷域で効果が大きく、25%負荷では、NO_x排出量、PM排出量および燃料消費率を同時に改善する最適着火時期が得られた。最適着火時期は機関負荷条件によって異なるため、電子制御による最適化制御は排ガス特性の改善に有効である。

c) 低負荷域では油圧作動圧力を高めることにより、燃料消費率およびPM排出特性の改善の傾向が認められた。しかしNO_x特性の改善は実験範囲では得られなかった。作動油圧と噴射時期は適切な組み合わせを選ぶ必要がある。

d) 本装置では作動圧力を高くすると燃料配管の振動や着火時期のぶれが生じ、機関運転が不安定になる傾向が認められた。しかし、本試作装置は電子制御の研究用装置としては十分に有用であり、今後動作の安定性を高めると共に、装置の小型化、高圧化など一層の改良が必要である。

乳化燃料について

a) 乳化燃料に対する運転では、加水率と負荷が高い場合、排ガス温度が上昇して実験範囲が限られたが、実施したパラメータ範囲での運転は良好であった。

b) 油圧駆動式では燃料噴射の後半に圧力が低下する傾向が見られ、加水率の高い乳化燃料の高負荷域での運転で噴射圧低下が顕著であった。乳化燃料では燃料流量が増加するので作動油圧の増加や適切な噴射弁、ポンプ等の選定が必要である。

c) 燃焼制御には、燃料と負荷に応じて噴射圧分布と噴射

時期の適切な組み合わせが重要であり、本装置はその研究に有用な手段であることが確認できた。

本装置によって種々の形態の噴射圧分布を得ることができたので、燃焼解析も実施し、最適燃焼制御を目指して研究を進めたい。

3. 電子制御化ディーゼル機関の運転

燃料噴射装置の油圧駆動電子制御化に続き、吸排気弁装置の電子制御化を試み燃料噴射装置との相乗効果を期待したが、運転上の問題点が表面化してきた。それは、従来の機関では燃料噴射ポンプあるいは吸排気弁は機械的にクランク軸と同期しているため、制御対象としての燃料噴射時期あるいは吸排気弁開閉時期の表示は必要なかった。これに対し、本装置では電気信号がコントロールユニットから発せられ、燃料噴射ポンプあるいは吸排気弁作動までにある時間遅れがあり、回転速度により各時期は変化する。このため、各時期を目標値へと制御するため、燃料噴射・吸排気弁開閉時期表示システム（以下、表示システム）で各時期の表示を行った。しかし、この時間遅れは電磁弁作動に起因するバラツキを含むため、各時期の正確な把握が困難であった。今回、各時期の制御を容易にすることを目的に平均表示を行った。同時に制御を行う上で平均表示が有効であるか、ディーゼルエンジン分析計データから検討を行った。また、上記の過程から燃料噴射時期、吸排気弁開閉時期の適切な組み合わせで相乗効果が期待できる運転データを得たので報告する。

3. 1 実験装置

使用した機関の主要目は表1の通りである。電子制御装置は油圧ユニット、コントロールユニット、シリンダユニットで構成され、各時期の監視は表示システムで行うが、その構成を図18に示す。

燃料噴射装置では各シリンダ毎に燃料噴射ポンプの下に油圧シリンダユニットを取り付け、電磁弁の開閉によって油圧駆動する。この電磁弁はディサ制御を行いバラツキを小さく押さえている。吸排気弁装置では各シリンダーに吸気弁と排気弁が1組ずつ、全体で6個の弁があり、6個の油圧シリンダユニットを押棒の下に取り付け、電磁弁により油圧駆動する。これは燃料噴射装置に採用した方法と同じであるが、開閉時期をそれぞれ確実に制御するためダブルアクション電磁弁を使用している。

油圧ユニットの作動油タンクは両装置共用であるが、油圧ポンプは燃料噴射装置用に45kW、吸排気弁装置用には20kWモーターが使用される。それぞれの油圧ラインには脈動防止のためアキュムレータを設置している。

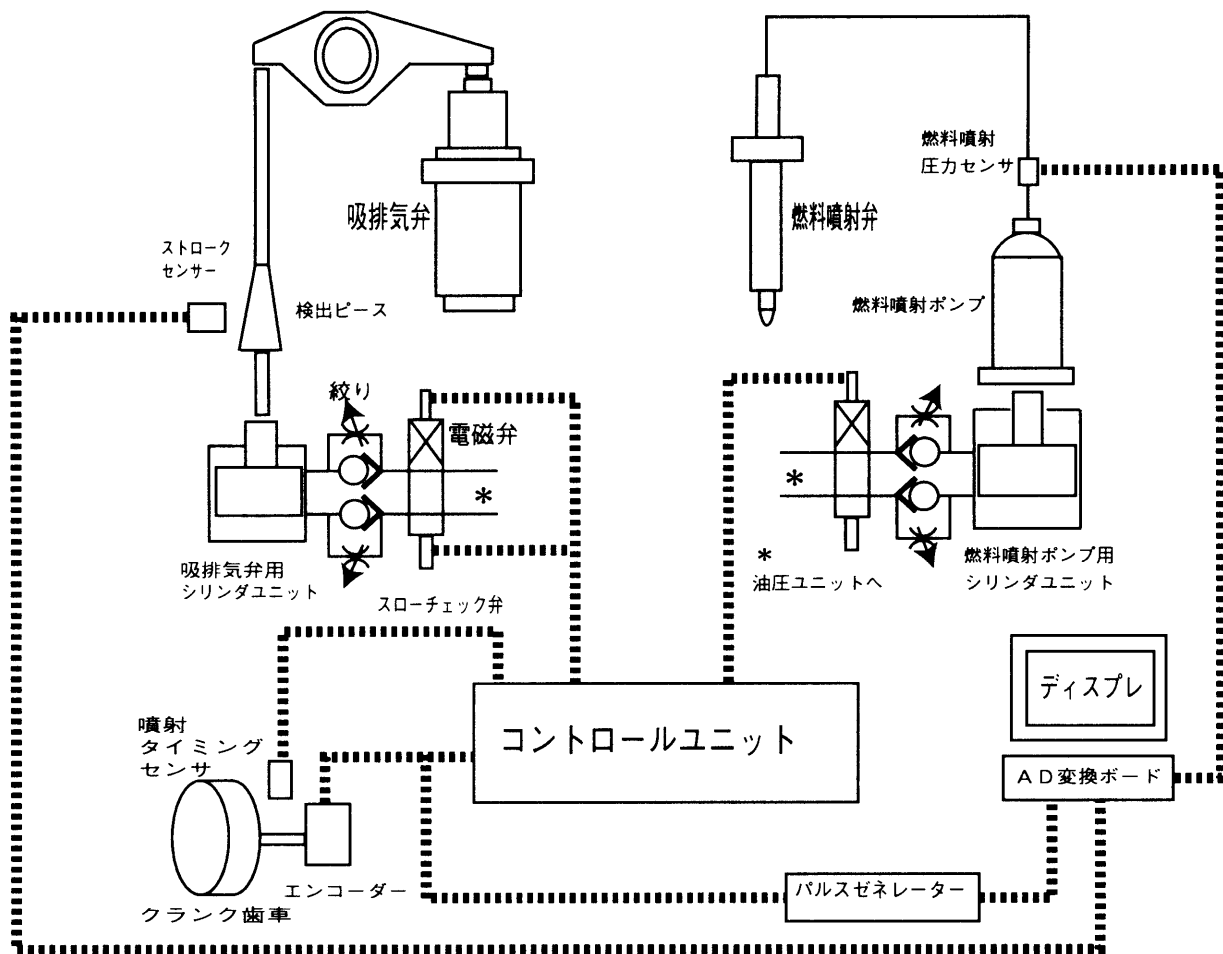


図18. 全体構成

コントロールユニットはロータリーエンコーダ信号を基に各電磁弁に電気信号を発するが、電子制御機関では自動的に最適燃焼を得るため、本来、各時期を指示する機能、そして指示通りに制御する機能が必要と考えられる。しかし、本装置ではテンキーを手動操作し0.5度の精度で各時期の制御を行っている。

表示システムの燃料噴射圧力は燃料噴射ポンプ出口に圧力センサーを設け、その信号をロータリーエンコーダ信号とA/D変換ボードで同期させ、ディスプレイ上に燃料噴射圧力曲線として表した。吸排気弁の作動はプッシュロッドの一部を円錐状に加工した検出ピースと渦電流式ストロークセンサーの間隙を電圧に変換したものを燃料噴射圧力と同様に処理し、吸排気弁揚程曲線として表示する。

3. 2 吸排気弁開閉時期設定について

吸排気弁の制御パラメータは各弁の動作開始時期および弁速度があり、動作開始時期はコントロールユニットで設定し、弁速度はスローチェック弁で調整する。この

設定、調整は負荷条件毎に異なり、機関性能の最適化を図るには燃料系も含めた適切な組み合わせをとる必要がある。ここでは、従来のカム駆動時とほぼ同じ運転ができることを目標にして、吸排気弁開閉時期の設定を行った。

3. 2. 1 弁速度の設定について

各弁の開閉動作は作動開始時期と終了時期およびその間の開閉曲線が重要である。カム駆動式ではこれらはすべてカムによって固定されるのに対し、本方式では動作開始時期はコントロールユニットで容易に設定できるが、作動開始から終了までの作動曲線は油圧駆動独特の変化をする。すなわち、カム駆動では弁開閉の動作は開始から終了まで滑らかに変化するが、本方式では直線的となる。このため弁閉時は弁座への衝撃的な接触を防ぐため、油圧シリンダにクッションを設けている。

弁の動作速度、すなわち作動開始から終了までの時間はスローチェック弁で個々に調整する。この調整にあたっては、弁速度が速すぎると弁バネの自己発振が考え

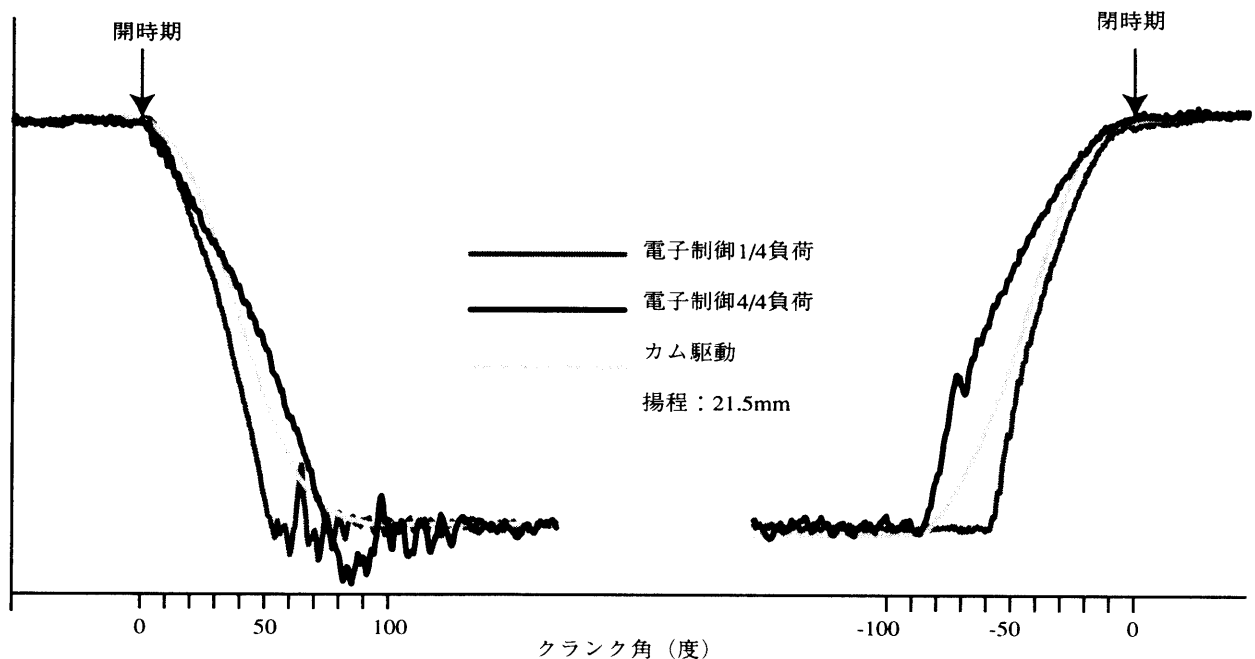


図19. カム駆動および電子制御式における吸気弁開閉曲線の一例

られるため、100%負荷でカム駆動時と同程度となるように設定した。すなわち、カム駆動時の各弁開閉動作はクランク角で70～80度であるので、100%負荷で同程度となるように、各弁の油圧シリンダユニットのスローチェック弁絞りを調整した。

図19にカム駆動の場合および本方式の開閉曲線の一例を示す。作動油圧は20MPaに固定した。開閉動作をクランク角で表すと、カム駆動では負荷(回転速度)によらず一定であるが、本方式では実時間が一定のため、クランク角度では回転速度に反比例して変わり、100%負荷では80～90度、25%負荷では45～55度となる。

3. 2. 2 弁開閉時期の設定

今回の実験では、カム駆動時とはほぼ同じ状況で機関を運転できることを目標にして、設定・調整を行うことにした。最初に各弁の開閉時期をカム駆動と同じに設定したところ、排ガス温度が上昇し機関の運転ができなくなった。排ガス温度は排気弁開閉時期によって大きく変化することから、カム駆動と油圧駆動の排気弁の開き初めの開度曲線の違いが原因と考えられた。このため、各負荷での排ガス温度がカム駆動時とはほぼ同じになるように排気弁開閉時期だけを変更することにした結果、カム駆動に比べて100%負荷で15度、25%負荷で25度程度遅く設定することになった。また、排気弁閉時期はオーバーラップ期間に影響を与えず、また、他筒からの排ガス干渉を起こさないことを目安とした。吸気弁開閉時期は25%負荷時に排ガスの吸気側への逆流を起こさない程度とした。吸気弁閉時期は体積効率あるいは圧縮に影響

が少ないことを目安とした。このように表2の開閉時期で実験機関を運転することができた。

表2. 吸排気弁開閉時期

	開閉 時期	排気弁	吸気弁
カム駆動	開 閉	BBDC80度 ATDC35度	BTDC66度 ABDC35度
電子制御 25%負荷	開 閉	BBDC55度 ATDC40度	BTDC55度 ABDC40度
電子制御 50-100%負荷	開 閉	BBDC60度 ATDC40度	BTDC60度 ABDC40度

しかし、コントロールユニットから電気信号が発せられ実際に電磁弁が作動するまでには時間的なバラツキあり、弁揚程線図から求めた開閉時期は一回毎に異なり、正確な設定あるいは変更は困難であり、まず、この問題に対応する必要がある。

3. 3 燃料噴射時期と吸排気弁開閉時期制御について

3. 3. 1 平均表示の方法

燃料噴射時期については、図20に示すように表示システムから得られた燃料噴射圧力曲線の15%値が示す

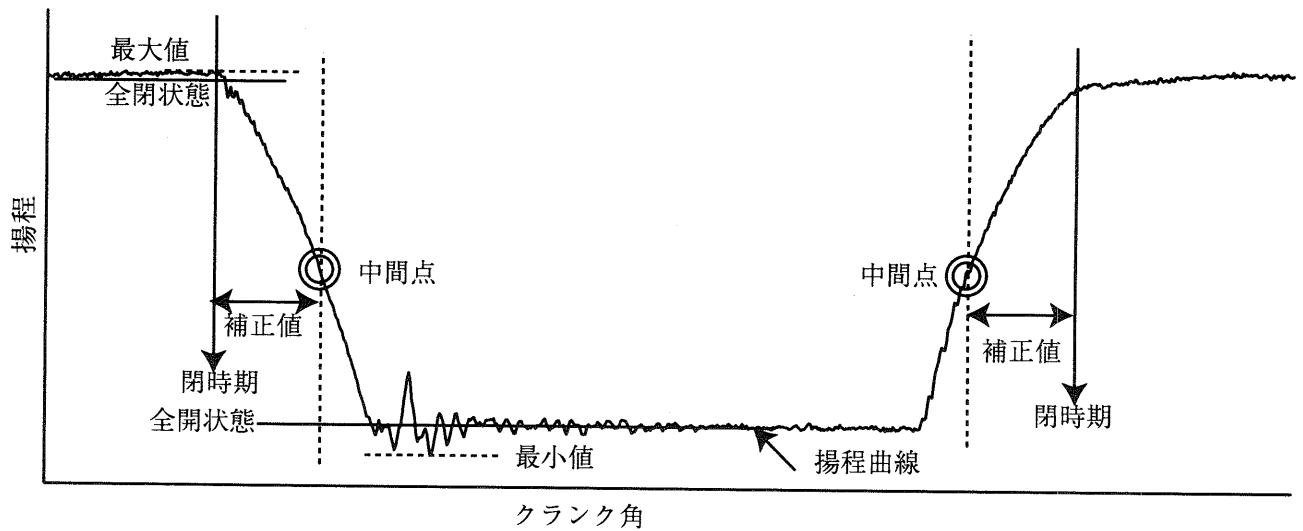


図22. 吸排気弁揚程線図

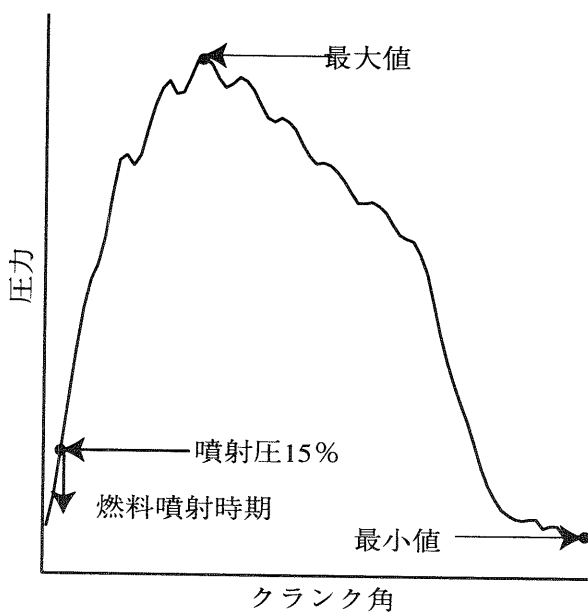


図20. 燃料噴射圧力線図

クランク角度とした。しかし、一回毎の燃料噴射時期はバラツキのため一定せず、YSK System 社製ディーゼルエンジン分析計（以下、分析計）から得られる着火時期との整合が困難であった。この対策として燃料噴射時期を平均して表示すれば着火時期と整合がとれると考え、まず、バラツキの分布を測定した。図21は船用特性50%負荷でのバラツキを示す。図から、各シリンダで違いはあるが、 $\pm 1.0 \sim 1.5$ 度の範囲に全てが収まる事が解る。また、負荷上昇とともにバラツキの範囲は大きくなる傾向にあるが、違いはわずかである。このため、燃料噴射圧力曲線上に現れるノイズの影響を考慮して12回のサンプリングを行い、最高値、最低値を除いた10回の平均を燃料噴射時期として表示した。

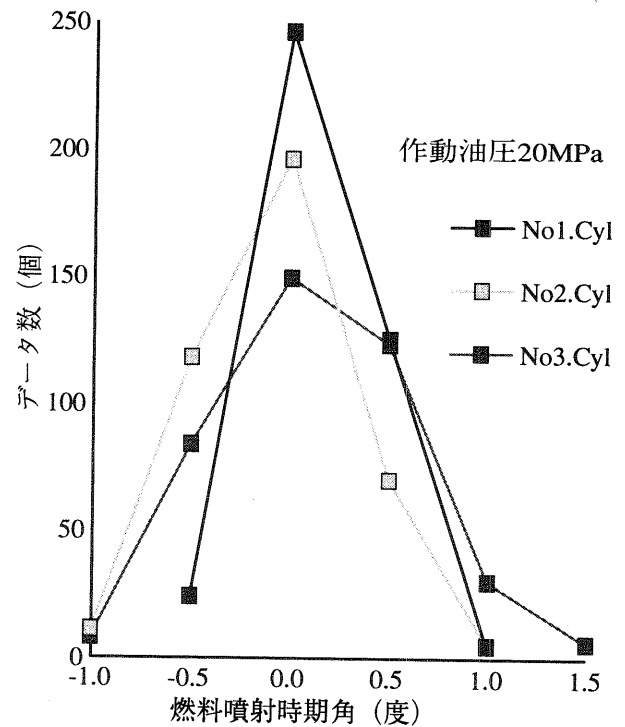


図21. 燃料噴射時期のバラツキ（400点計測）

吸排気弁開閉時期については、図22に示す揚程曲線から開閉時期を求めている。しかし、バラツキのため、更に、この曲線は押棒の横揺れ、タペットクリアランス等の影響を含むため、目測結果は一定せず、開閉時期の設定が困難であった。この対策として、燃料噴射時期と同様、平均化を試みた。まず、個々の揚程曲線形状は比較的安定していることに注目して、各弁開閉中の中間点が示すクランク角度からバラツキを調査した。図23に船用特性50%負荷での、排気弁開閉動作時中間点のバラツキを示す。図から排気弁開閉時期で ± 6 度の範囲に全て

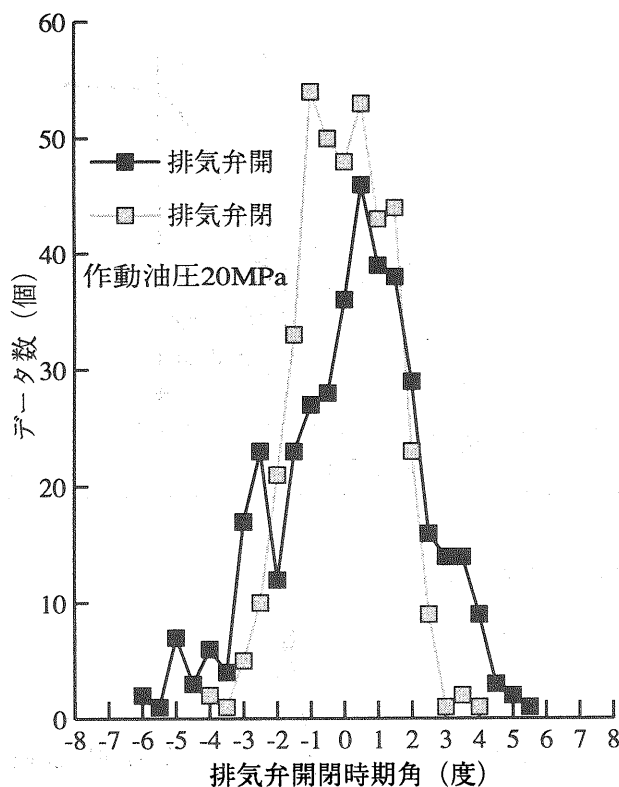


図 2.3. 排気弁開閉時期のバラツキ (400 点計測)

が収まることが解る。従って、各中間点について燃料噴射時期と同様の方法で平均し、予め求めた補正値を加減して開閉時期とした。

3. 3. 2 平均した各時期の有効性について

燃料噴射時期については、平均した表示を基にテンキー操作を行うと、操作に応じた変化を示す。しかし、電子制御化の目的の一つは負荷あるいは回転数に応じ、適切な着火時期を得ることにある。ここでは各負荷における着火時期と着火遅れの関係を調査した。なお、着火時期は分析計から得たものであり、着火遅れは平均した燃料噴射時期と着火時期の差とした。図 2.4 に結果を示すが、各シリンダで多少の相違はあるが、着火遅れは燃料噴射時期に応じて同じ傾向で変化している。テンキーの操作が 0.5 度単位で行われることからすれば、この相違は運転上、誤差と見ることができる。換言すれば、平均した燃料噴射時期と着火遅れのデータからテンキー操作を行い、希望する着火時期を容易に求めることが可能である。

吸排気弁開閉時期についても、平均した表示を基にテンキー操作を行うと、それに応じた変化があるが、平均した開閉時期はあくまでも表示であり、実際の開閉時期と一致しているとは限らない。ここでは分析計から得た排気弁開閉時期を実際の開閉時期として、平均した開閉時期との比較を行った。図 2.5 に縦軸に分析計から得た排気弁

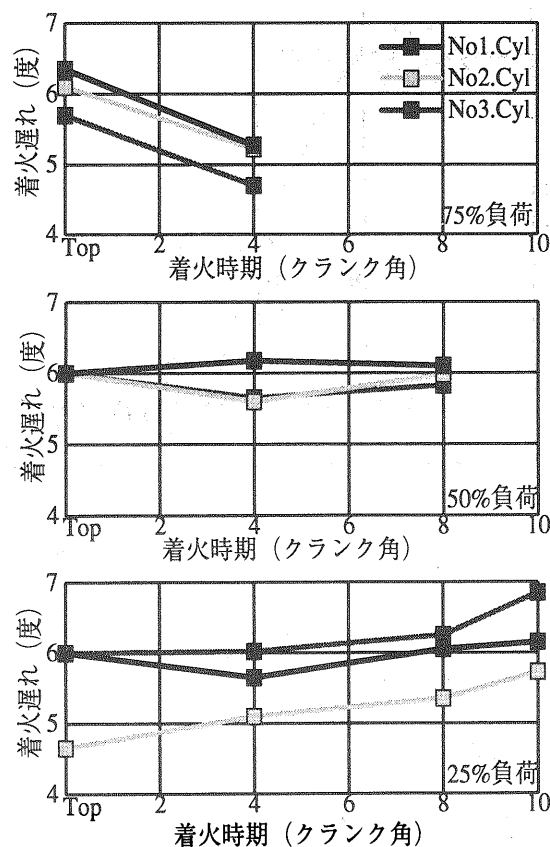


図 2.4. 船用特性各負荷における着火遅れ

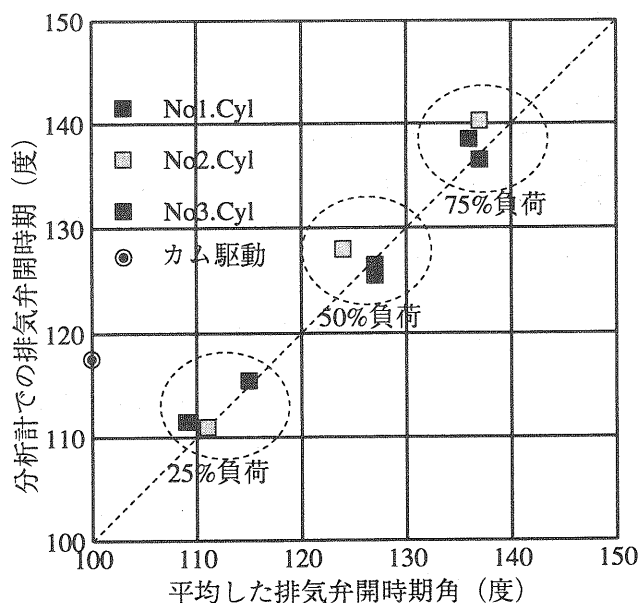


図 2.5. 平均した排気弁開閉時期と燃焼解析装置から求めた開閉時期の関係

開時期、横軸に平均した開閉時期を取り両者の関係を示した。同時に、カム駆動時の排気弁開閉時期を参考として、縦軸に分析計から得た値、横軸に取扱説明上の値を示す

が、両者の差は17.5度であった。今回は両者の差は4度のものもあるが、多くは1～2度の範囲にあり、分析計から得られた排気弁開じきと平均した開時期の差が少ないのが電子制御化の特徴として挙げられる。実験では吸排気弁開閉時期変更を10度単位で行うため、この程度の差であれば指標としての役割を果せるものと考ええる。因みに、両者の関係から適正な補正値の選定、あるいは中間点位置の変更等により更に差は小さくなる考えられる。

3. 4 運転の結果及び考察

3. 4. 1 燃料噴射時期の影響

燃料噴射系と吸排気弁系を共に電子制御化した実験機関で、まず、燃料噴射時期(着火時期)を変えて燃料消費率等について調べた。図26に25～75%負荷の着火時期に対する燃料消費率、NOx濃度、排ガス温度、Pmax(最高筒内圧)を示す。なお、燃料噴射ポンプ用油圧シリンダ作動油圧は20MPaである。

燃料消費率に関しては、25%負荷では着火時期が上死点后8度、50%負荷では上死点后4度、75%負荷では上死点で低くなった。25%負荷での結果は燃料噴射系のみを電子制御化した場合と一致した。NOx濃度は、図から分かるように燃料噴射時期を遅らせることにより、Pmaxの低減とともに低減するのが分かる。

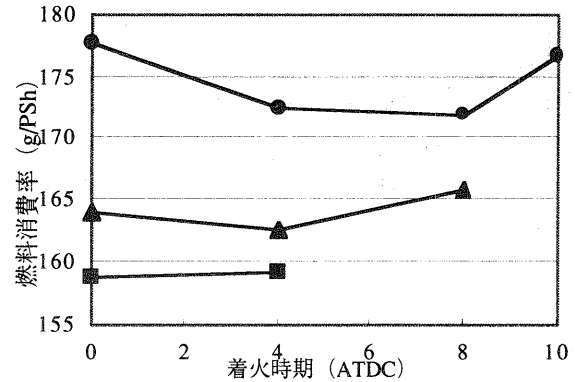
3. 4. 2 排気弁開時期の影響

低負荷域では燃焼期間が短いため燃料噴射時期を遅らせる余裕があり、NOx排出量と燃料消費率を同時に改善する最適着火時期が得られた。しかし、高負荷ではクランク角で表される燃焼期間が長いいため、燃料噴射時期を遅らせる余裕が少ないと考えられる。

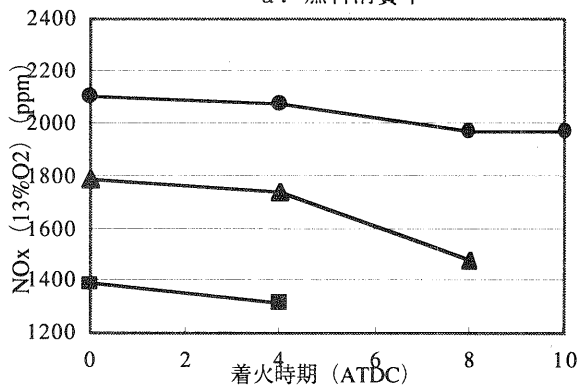
以上をふまえ、着火時期を一定とした条件で排気弁開時期がNOx排出量と燃料消費率に与える影響を調べた。図27に25～75%負荷における排気弁開時期に対する燃料消費率、NOx濃度、排ガス温度、Pmax、過給圧を示す。燃料噴射ポンプを作動させる作動油圧は20MPa、着火時期は上死点后約4度とした。

図から分かるように燃料消費率は排気弁開時期を遅らせることにより低減する。これは、仕事エネルギーに使われる熱エネルギーが多くなり、排ガスとして出ていく熱エネルギーが減少するためである。これは、排ガス温度の低下からも分かる。

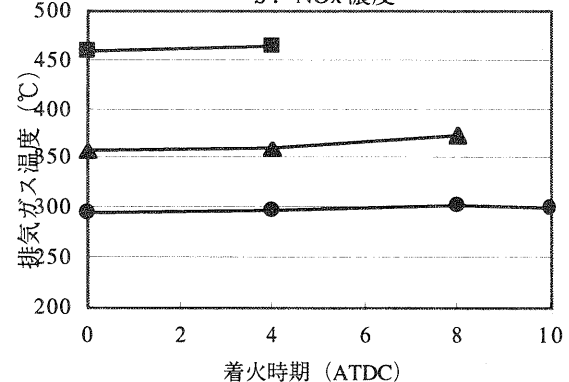
NOx濃度に関しては、Pmaxの変化と同じ変化をする。高負荷である75%負荷時では、排気弁開時期を遅らせるにつれPmaxが低下し、NOx濃度も減少する。燃料消費率の改善により噴射される燃料の量が減ったことと、排ガス温度の低下により過給圧が減ったためPmaxが低



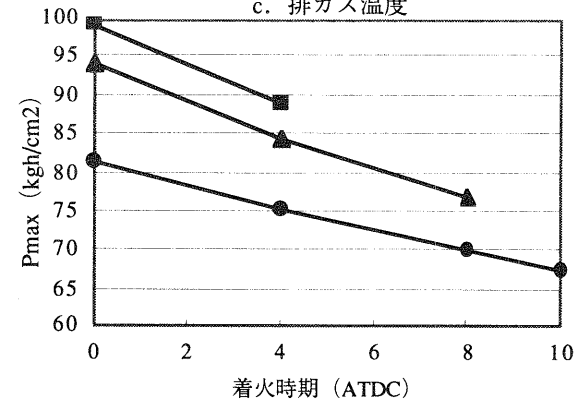
a. 燃料消費率



b. NOx 濃度



c. 排ガス温度



d. Pmax

図26. 燃料噴射時期の影響 (作動油圧 20MPa)

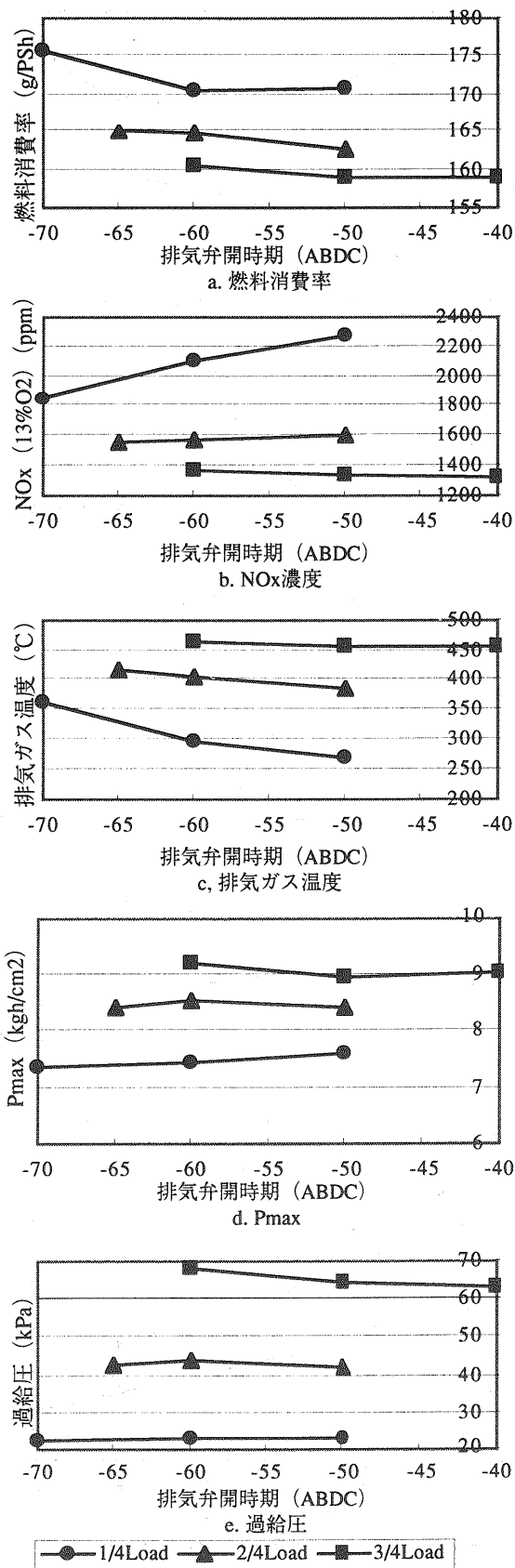


図 27. 排気弁の開く時期の影響
(作動油圧 20MPa、着火時期 ATDC 4°)

下したものと考えられる。低負荷である 25% 負荷時の実験では、排気弁開時期を遅らせるに従い P_{max} が上昇し、 NO_x 濃度も増加した。これは燃料消費率の改善により噴射される燃料の量は減少するが、過給圧が高くなる傾向にあることから、 P_{max} が上昇したものと考えられる。排ガス温度の低下にも関わらず過給圧が高くなる傾向にあるのは、本実験機関は動圧過給であり、この排気弁開時期設定範囲では、排ガスの脈動との関係が影響しているためと考えられる。低負荷では、さらに排気弁開時期を遅らせることにより、燃料消費率と NO_x 排出量を同時に改善できると考える。

3. 5 まとめ

燃料噴射装置の油圧駆動電子制御化に続き、吸排気弁装置の電子制御化を試み、運転を行い、次の結果を得た。

- 各時期の平均表示を行った結果、燃料噴射時期と着火遅れから容易に希望する着火時期が得られるようになった。また、排気弁開時期は運転の指標として使用できることが解った。
- 電子制御ディーゼル機関において低負荷時では、 NO_x 排出量及び燃料消費率を同時に改善する最適着火時期があることを確認した。
- 排気弁開時期を調整することにより、 NO_x 排出量及び燃料消費率を同時に改善できる可能性があることを確認した。

4. 船用ディーゼル機関から排出される揮発性有機化合物の計測及び評価

燃焼機関から排出される揮発性有機化合物 (VOC) には、二酸化炭素に次ぐ温室効果ガスであるメタン等が含まれており、地球温暖化等への影響から関心を持たれているが、その排出実態については未解明の点が多く、特に船用ディーゼル機関からの排出状況については殆ど検討されていない。本研究では、種々の船用ディーゼル機関から排出される VOC を計測し、燃料性状や機関運転条件等がその排出特性に与える影響について検討し、さらに、これらの排出係数を算出することにより VOC 排出量の評価を行った。

4. 1 排出係数の設定

ディーゼル機関からの VOC 排出量を評価するに当たっては、下記の条件を仮定し、燃料の水素/炭素 (H/C) モル比 (x)、空気過剰率 (λ) 及び計測した排ガス中の VOC 成分の濃度 (モル分率) から排出係数 (無次元量) を算出した。

- (1) 炭素及び水素のみからなるとみなせる燃料に対して、 CH_x なる仮の分子式を与える。
- (2) 空気を窒素と酸素のみからなる混合気とし、組成を窒素：酸素＝79：21（モル比）とする。
- (3) 燃料は完全に燃焼する。
- (4) 微量排ガス成分は、排ガス中の主成分及び排ガス流量に影響を与えないものとする。

さらに、この排出係数を気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の改正ガイドラインに基づいて以下のように換算した。IPCC 型式の排出係数は g/MJ の単位を有し、使用された燃料の発熱量に対して排ガス成分の排出量を与える。ここでは発熱量として真発熱量（低位発熱量）を用いた。

$$\text{IPCC排出係数} = \text{排出係数} \times 1000 / \text{燃料の発熱量}$$

$$\text{排出係数} = \text{mg} \times \text{VOC成分のモル分率} \times$$

$$[(4+x) \{ (ra+1) \lambda - 1 \} / 4 + 1] / \text{mf}$$

$$\text{排出量} = \text{排出係数} \times \text{燃料流量}$$

$$\text{mg} : \text{VOC成分の分子量}$$

$$\text{mf} : \text{燃料の仮の分子量} (= 12.011 + 1.008x)$$

$$\text{ra} : \text{空気中の窒素/酸素モル比} (= 3.76)$$

4. 2 実験装置及び方法

実験には4種類の船用ディーゼル機関及び6種類の燃料を使用した。機関1は高速4サイクル機関、機関2及び3は中速4サイクル機関、ならびに機関4は低速2サイクル機関であり、機関1及び2は当所の実験用機関、

表3. 機関の主要緒元

	Engine-1 (High-speed)	Engine-2 (Medium-speed)	Engine-3 (Medium-speed)	Engine-4 (Low-speed)
Type	4-stroke	4-stroke	4-stroke	2-stroke
Bore (mm)	112	230	180	520
Stroke (mm)	110	380	230	1050
No. of Cylinders	1	3	6	6
Rated Output (kW)	12	257	441	4560
Rated Speed (rpm)	2600	420	-	-
Mean Piston Speed (m/s)	-	5.32	-	-
Compression Ratio	18.5	13.0	-	-

表4. 燃料の主要性状値

	Engine-1 Diesel Oil	Engine-2		Engine-3	Engine-4	
		MDO1	MFO1	MDO2	MDO3	MFO2
Density (at 288K) (g/cm ³)	0.8340	0.8553	0.9555	0.8632	0.8699	0.9596
Kinematic (at 303K) (mm ² /s)	3.894	3.850	—	4.239	4.775	—
Viscosity (at 323K) (mm ² /s)	—	2.532	163	2.471	3.021	145
Flash Point (K)	336	355	389	353	354	—
Pour Point (K)	—	248	—	251	273	—
Carbon Residue (mass%)	—	0.065	11.1	0.058	0.090	13.3
Water (vol.%)	0.00	0.00	0.1	0.00	0.00	0.3
Ash (mass%)	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.03
Carbon (mass%)	84.0	84.9	84.2	86.6	86.9	—
Hydrogen (mass%)	15.9	15.0	11.4	12.7	12.5	—
Sulphur (mass%)	0.029	0.08	2.92	0.19	0.85	1.70
Nitrogen (mass%)	<0.01	0.01	0.22	0.02	0.02	—

機関3及び4は航海訓練所練習船「銀河丸」に発電機及び主機用機関である。

燃料は機関1には軽油、機関2にはA重油(MDO1)及びC重油(MFO1)、機関3にはA重油(MDO2)、ならびに機関4にはA重油(MDO3)及びC重油(MFO2)を用いた。これらの機関の主要諸元及び燃料の主要性状値を表3及び4に示す。機関2では機関負荷率を50%及び75%に変えて計測を行った。また、機関3での計測は接岸中に、機関4での計測は航海中に実施した。さらに、機関4ではA重油、A重油からC重油への切替時、C重油、C重油からA重油への切替時の4つの場合において計測を実施した。

VOC成分として、メタン、エタン、エチレン、プロパン、プロピレン、ベンゼン、トルエン、ホルムアルデヒドを選び、下記の方法で計測した。

(1) メタン：内容量1Lの真空瓶をあらかじめ脱気し、排ガス採取口で真空瓶のニードルバルブを開いて排ガスを採取した。この試料を水素炎イオン化検出器型ガスクロマトグラフ(FID-GC)にガスシリンジを用いて直接注入し、メタンの定量分析を行った。

(2) エタン、エチレン、プロパン及びプロピレン：内容量12Lのステンレス製キャニスターをあらかじめ脱気し、排ガス採取口でキャニスターのニードルバルブを開き採取した。この試料を水酸化カリウム充填管を通過させ脱水脱炭酸を行った後、液体酸素で冷却した濃縮管に一定量濃縮し、濃縮管を加熱することにより試料をFID-GCに導入し、定量分析を行った。排ガスには高濃度の二酸化炭素及び水分が含まれ、GC導入時にこれらの影響で圧力変動が発生し、キャリアーガスが変動して保持時間の変動やFIDの炎の消滅が起こる。これを防ぐため、濃縮時に上記の脱水脱炭酸を行う。

(3) ベンゼン及びトルエン：内容量10Lのポリエステル製バッグをアクリル製の吸引口付き容器に入れ、排ガス採取口に接続し、手押し吸引ポンプにより容器内を減圧し、バッグ内に採取した。この試料を上記と同様の脱水脱炭酸を行った後、Tenax TAを充填した捕集管に一定量濃縮し、捕集管を加熱することにより試料をFID-GCに導入し、定量分析を行う。

(4) ホルムアルデヒド：ベンゼン及びトルエンの場合と同様、バッグに排ガスを採取し、直ちに試料採集管に移し分析時まで冷暗所に保存した。この採集管の下に強カチオン交換樹脂管及び共栓付遠沈管を、上にアセトニトリルの入ったガラスシリンジを接続し、アセトニトリルを流下させホルムアルデヒドを溶出させ、無水硫酸ナトリウムを加えて振り混ぜ脱水した。アセトニトリル層を別の共栓付遠沈管に移し、窒素ガスを吹き付けてアセトニトリルを揮発させ、これに酢酸エチルを加え、内標準溶液を添加しGC分析用試料液とした。このGC分析用試料液をアルカリ熱イオン化検出器(FTD)型GCに注入し、キャピラリーカラムで不純物を分離した後、定量

分析を行った。

4. 3 結果及び考察

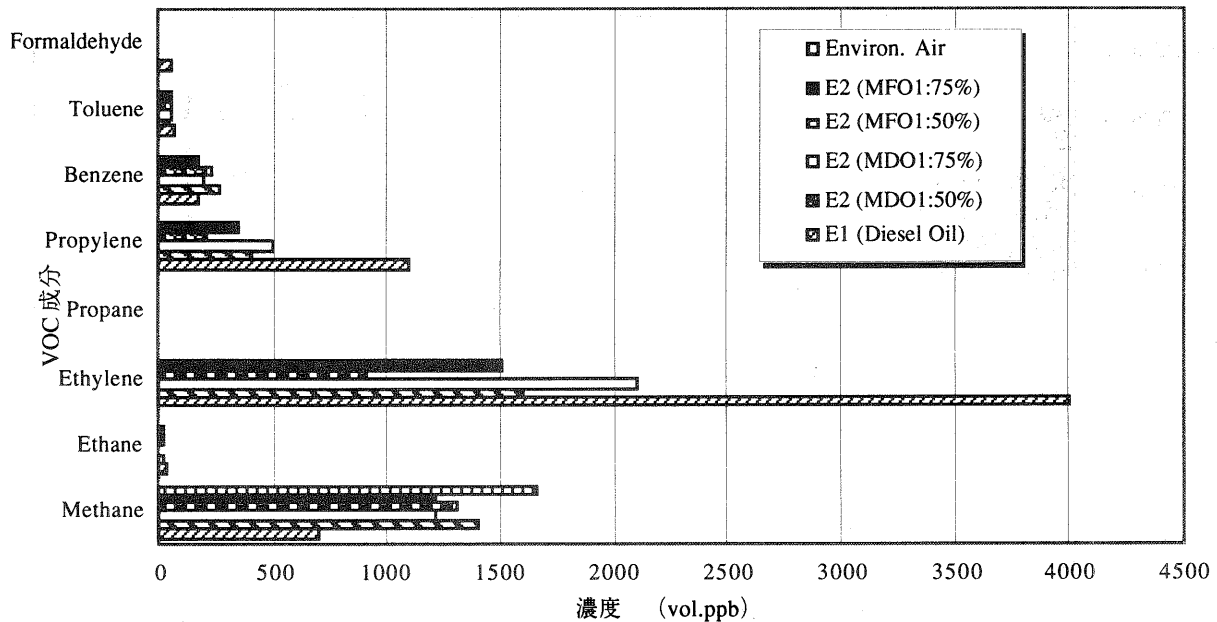
4. 3. 1 VOC成分の排出特性

VOC計測の結果を図28に示す。図中に参考として環境大気中の各成分の濃度も示した(メタンは1)、その他は2))。

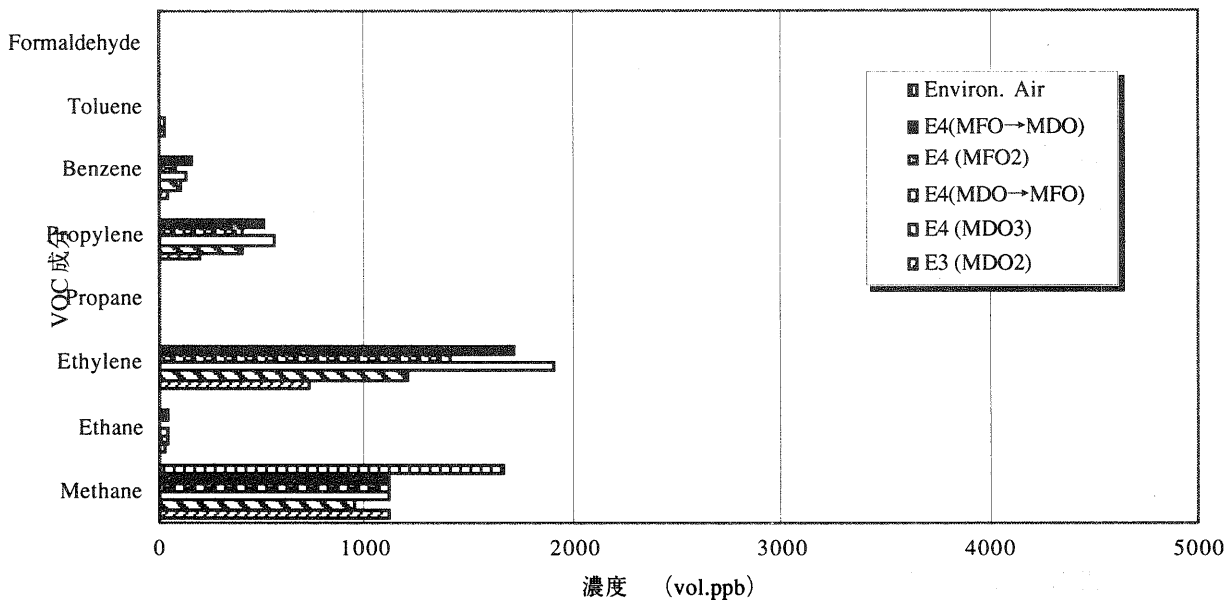
全般的な傾向として、いずれの機関及び燃料の場合も、計測対象物質のうちメタン、エチレン、プロピレン及びベンゼンの排出量が多かった。飽和炭化水素であるエタン及びプロパンの濃度は、同じC2及びC3炭化水素であるにも関わらず、不飽和炭化水素であるエチレン及びプロピレンよりも遙かに低い。この傾向は、炭素及び水素の供給源である燃料の組成がH/Cモル比で1.6～2.3であったことと一致している。また、不飽和炭化水素ではプロピレンよりエチレンの、芳香族炭化水素ではトルエンよりもベンゼンの排出量が多い。エチレン・プロピレンやベンゼン・トルエンのように分子構造に類似性を持つ物質の間では、分子量の増大にともなって濃度が低下する傾向が見られた。さらに、高速機関では中速機関と比較してホルムアルデヒドの排出量が多い。また、メタンを除く全ての計測物質の排出濃度は、環境大気中の濃度を大きく上回った。

次に、各機関ごとに各成分の排出特性を検討した。高速機関では、エチレンの排出濃度が突出して高く、プロピレン、メタン及びベンゼンがそれに続いている。これに対して、中速機関では全般的にメタン及びエチレンの排出濃度が高く、プロピレン及びベンゼンがこれに次いでいる。燃料性状及び機関運転条件の影響はメタンではほとんど見られないが、エチレン濃度はA重油と比較してC重油では30～40%低下した。また、いずれの燃料を使用した場合でも、機関負荷率を50～75%に上昇させた際に、エチレン濃度は30～60%増大した。この傾向はプロピレンでもほとんど同様である。一方、ベンゼンでは燃料油種による影響はほとんど見られなかったが、機関負荷率の上昇とともに濃度が低下した。エタン、プロパン及びトルエンについては、排出濃度が計測器の検出限界に近い低濃度であったこともあり、燃料性状及び機関運転条件による排出特性への顕著な影響は見出されなかった。また、ホルムアルデヒドの濃度はいずれも検出限界(10 vol.ppb)以下であり、高速機関に比べて顕著に低下した。

さらに、低速機関では全般的に中速機関と類似した傾向を示したが、燃料油種の変更による排出濃度の変化は比較的少なかった。しかし、エチレンでは燃料の切替時においてA重油及びC重油での定常運転時よりも濃度が増大した。この燃料の切替は船体の増速(A重油→C重油)及び減速(C重油→A重油)に当たり、運航モード



a. 陸上での計測



b. 海上での計測

図28. VOC成分の排出濃度

の切替がエチレン濃度の増大をもたらしている。この傾向はプロピレン及びベンゼンでも同様であるが、メタンでは見られなかった。以上のように、高速機関と中・低速機関の間では、VOCの排出特性に相違が見出された。

4. 3. 2 VOC成分の排出係数の算出及びその評価

計測結果を基に算出した各VOC成分の排出係数及びIPCC排出係数を図29及び30に示す。排出係数にも

機関機種や燃料性状等によりある程度の変動があるが、換算の過程で燃料性状や空気過剰率の影響が除去されるため、排出濃度と比較して変動は小さくなっている。また、質量ベースの量であるので、分子量の大きなベンゼンやトルエンの寄与が相対的に大きくなっている。

この排出係数の算出は、対象物質が環境大気中に含まれていない、または環境大気中での濃度が排出濃度に比べて著しく低いことを前提としている。しかし、実際に排出濃度を測定した結果、メタンの排出濃度は環境大気中での濃度 (1,650 vol.ppb) よりも低い値を示した。そ

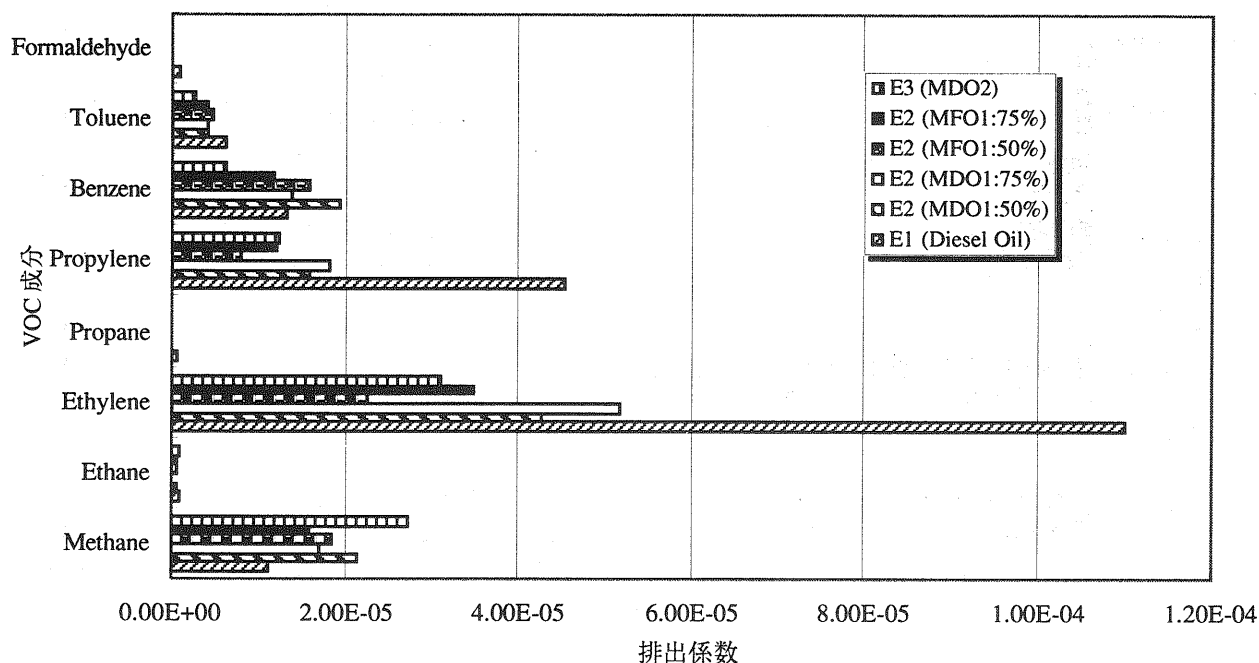


図 29. VOC 成分の排出係数

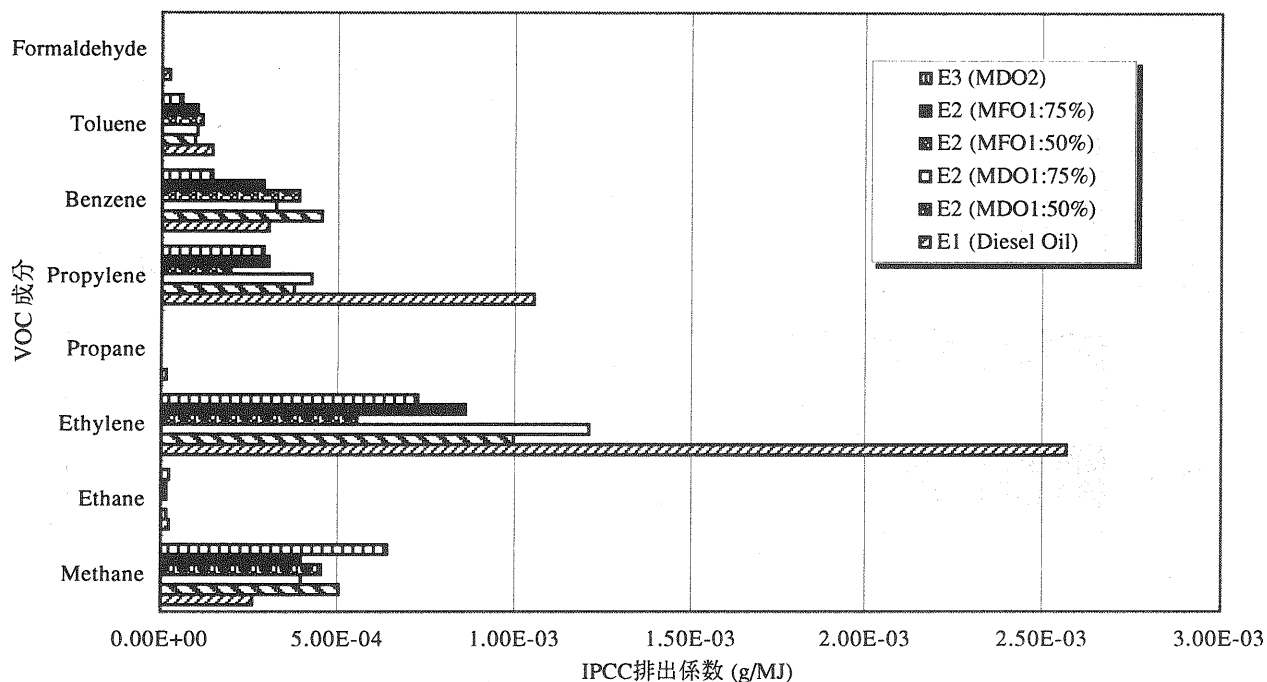


図 30. VOC 成分のIPCC 排出係数

ここで、燃焼機関が温室効果ガスを減少させる(負の排出源となる)場合が存在することをふまえ、下記のように機関から排出された量から機関に吸入される空気に含まれる量を差し引くことにより正味排出量を算出した。排ガス流量の算出法は前述の方法と同一である。また、IPCC 型式の正味排出量も同様に算出した。これらの結果を図 3 1 及び 3 2 に示した。

正味排出量 = 排出係数 × 燃料消費量 - 機関吸入量
 機関吸入量 = 全空気量 (機関吸入乾燥空気量) × 環境大気中濃度
 正味排出係数 = 正味排出量 / 燃料消費量
 IPCC 正味排出係数 = 正味排出係数 × 1000 / 燃料の発熱量

本研究の実験条件では、メタンの正味排出係数及び

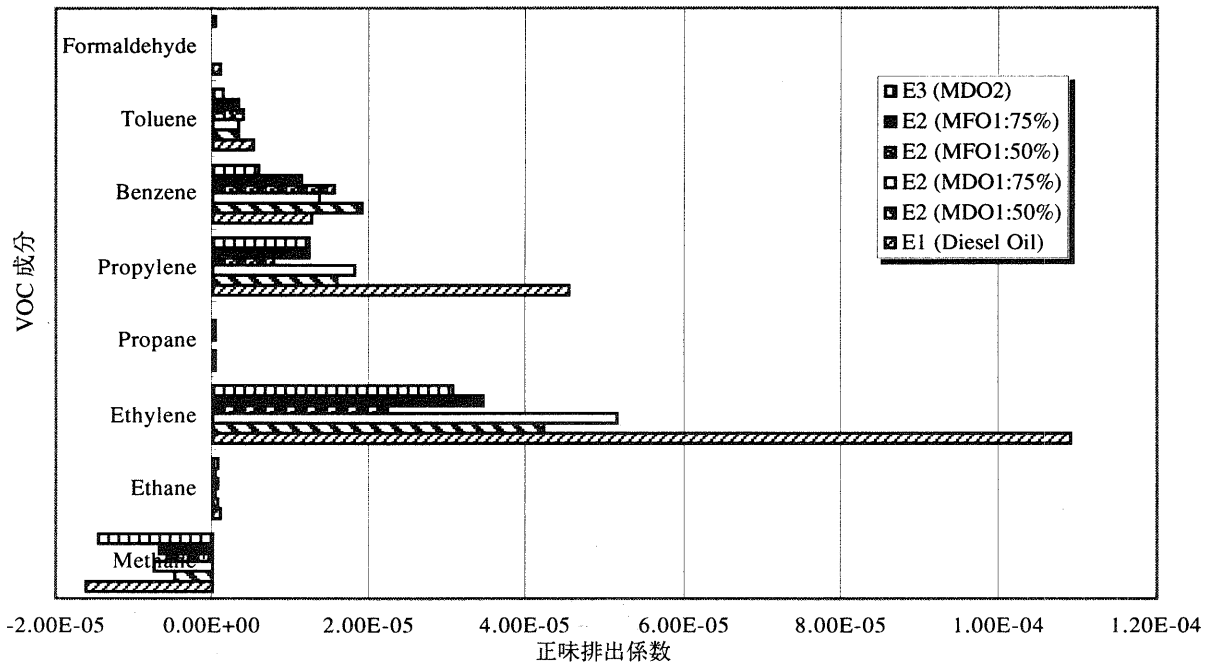


図 3.1. VOC 成分の正味排出係数

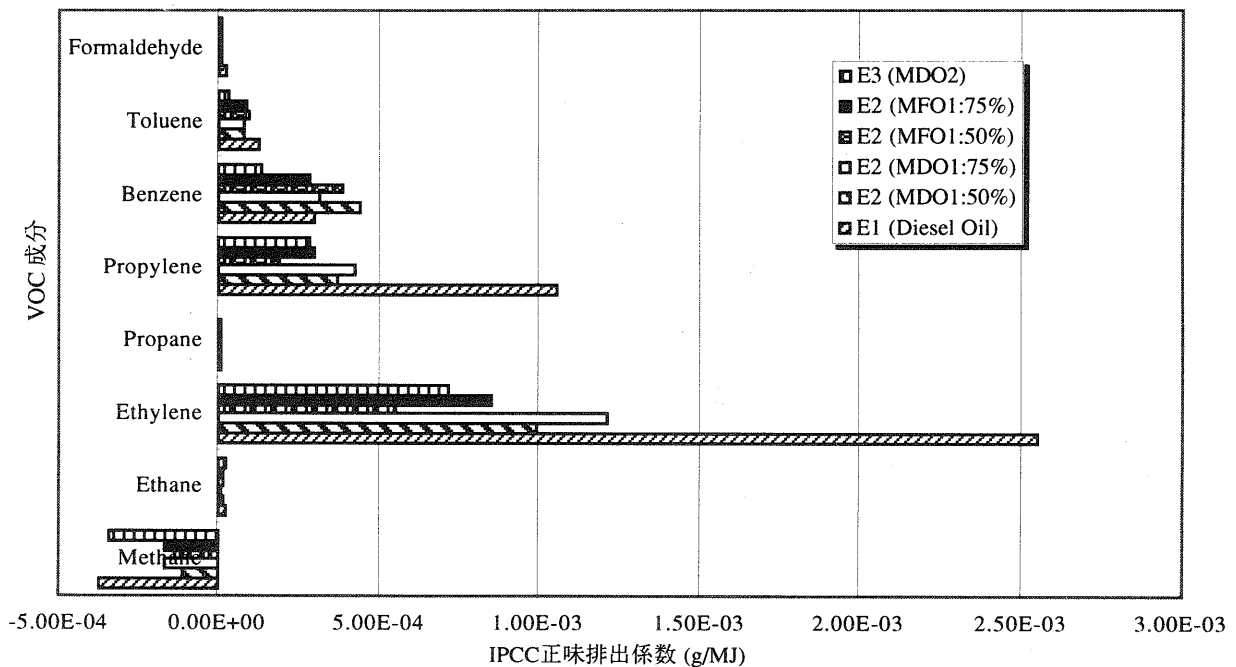


図 3.2. VOC 成分の IPCC 正味係数

IPCC 正味排出係数は負の値となった。同様な事例は運転条件によってはプロパンでも見出された。このような事例が存在するため、排出評価は正味排出係数あるいは IPCC 正味排出係数に基づいて行うことが妥当と考えられる。ただし、メタン以外の主要成分では排出係数と正味排出係数との間に顕著な違いは見られなかった。

4. 4 まとめ

種々の船用ディーゼル機関から排出される VOC を計測し、排出係数を算出することにより VOC 排出量の評価を行い、次の結果を得た。

a) 計測した成分の中では、メタン、エチレン、プロピレン、ベンゼン等が主要な成分であり、エタンやプロパンの排出量はきわめてわずかであった。

b) メタンなどでは排出量が吸入量を下回る場合があ

り、こうした成分に対しては機関は吸収源（負の排出源）となっている。

c) これらの結果から、排出評価は正味排出係数あるいはIPCC正味排出係数に基づいて行うことが妥当と考えられる。

5. 実船でのPM計測について

船舶からの粒子状物質（PM）の排出は、地球環境に甚大な影響を与えるおそれのあるものと認識されているものの、その排出特性、組成等はまだ十分に解明されていない。

一方、PMの計測方法には国際標準化機構(ISO)で規定されている希釈トンネルを用いたフィルタ重量法が存在するが、主として陸上用機関を想定して規定されたものであるため、操作性等の点で実船での計測には適用しがたい。

そのため、実船に適用できる計測方法の確立を目指し、まず、高速応答型の水素炎イオン化検出器（FID）を利用した計測方法（高速FID法）を採り上げ、当所の中型中速ディーゼル船用機関でフィルタ重量法との比較を行った。次に、フィルタ振動法によるPM測定器（R&P社製 TEOM-1400、以下TEOMと略す）を用いて、航海訓練所の練習船「銀河丸」停泊中に補助発電機用ディーゼル原動機（以下、発電機原動機）のPM測定を行った。続いて、主機において動揺等を考慮に入れ2台のTEOMを使い測定を行い、最後にTEOMとベータ線吸収法による測定器（ESM社製 FH62-C14）での測定を実施した。この測定と前後し、当所の機関を用いて、フィルタ振動法及びベータ線吸収法とフィルタ重量法の比較測定を行い、実船で得られた結果に関して検討を行った。

5. 1 高速FID法による粒子状物質の計測

5. 1. 1 実験方法

実験機関は当所の機関(条件:カム駆動)であり表1に主要諸元を示した通りである。これをA重油及びC重油を用いて運転し、高速FID法とフィルタ重量法によりPM計測を行い、その結果を比較した。表5及び6に使用した燃料の性状値及び運転条件を示す。

本研究で比較した計測方法の概要は、下記の通りである。

(1) フィルタ重量法：排ガスの一部を煙道から希釈トンネルへと分流させ、ここに圧縮空気を送り込み、排ガスを希釈した後に52℃以下の温度でフィルタを通過させ、フィルタ上にPMをサンプリングする。これを温度25℃、湿度50%の恒温恒湿槽内に24時間静置した後、微量天秤を用いてPMの重量を測定し、排出率を算出する。本研究では、希釈トンネルとしてMIT-1000(ファームテック製)を用いてこの方式による計測を行った。この装置の概要を図33に示す。

さらに、重量測定後に溶媒抽出によりPMに含まれる可溶性有機成分(SOF)を分離し、その重量を測定した。溶媒抽出では、溶媒としてジクロロメタンを100ml使用し、16時間還流してSOFを抽出した。これをメンブラン濾過し、ロータリーエバポレータにより溶媒をほぼ留去した後に秤量ビンに移し、窒素ガスを吹きつけて乾燥させ、SOFを分離した。

(2) 高速FID法：FIDはガスクロマトグラフ等の検出器として広く用いられている。PMを含む排ガスをFIDに導入すると、図34に示すように、連続的な出力に加えてパルス状の出力が発生する。これらの出力のうち、連続的な出力をSOFに、パルス状の出力をSoot（主として無機炭素からなる固体粒子）に対応させることにより、FIDをPM計測装置としている。本研究では、この方式に基づくMEXA-1220PM（堀場製作所製）を用いて計測を行った。この装置の概要を図35に示す。装置はPMを検出するためのダイレクトラインと、参照用であるフィルタラインの2本の検出系を有する。ダイレクト

表5. 基材燃料の代表的性状値

油種/性状値		A 重油	C 重油
密度 @15℃	(g/cm3)	0.8581	0.9555
動粘度 @50℃	(mm2/s)	2.5	163
引火点	(℃)	86	116
流動点	(℃)	-30	-7.5
残炭	(mass%)	0.044	11.1
水分	(vol.%)	<0.05	0.1
灰分	(mass%)	<0.01	0.02
硫黄	(mass%)	0.06	2.92
窒素	(mass%)	0.02	0.22

表6. 機関の運転条件

	船用特性				発電機特性			
負荷率 (%)	25	50	75	100	25	50	75	100
出力 (kW)	64.3	128.5	192.8	257	64.3	128.5	192.8	257
回転数 (rpm)	265	333	382	420	420	420	420	420

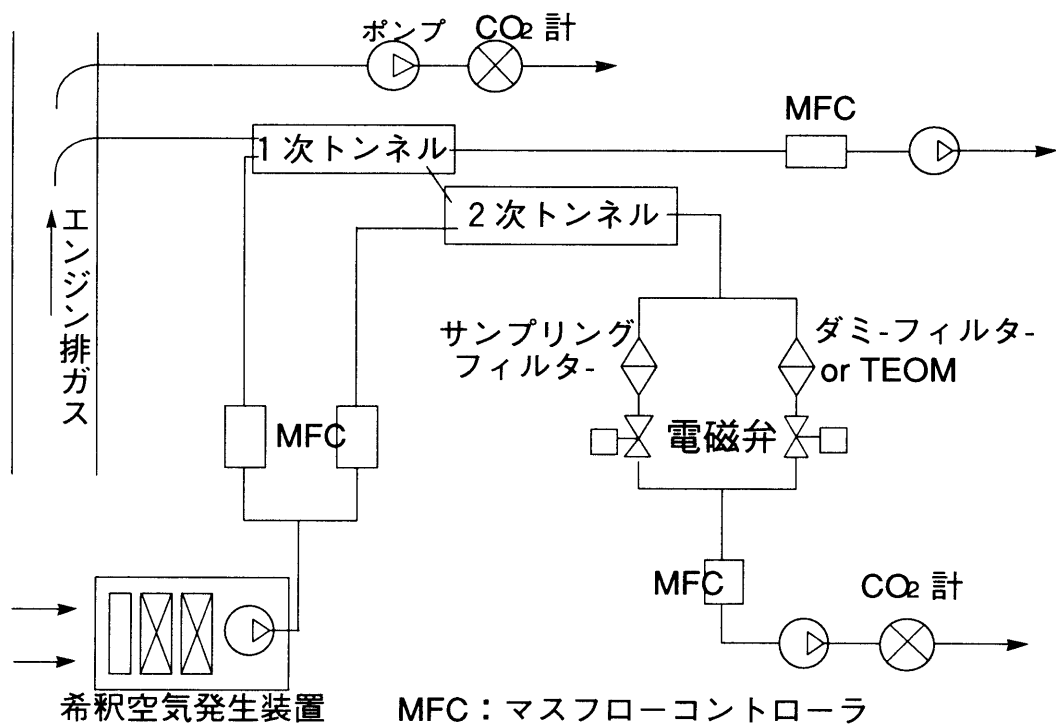


図3 3. 希釈トンネルのフローダイヤグラム

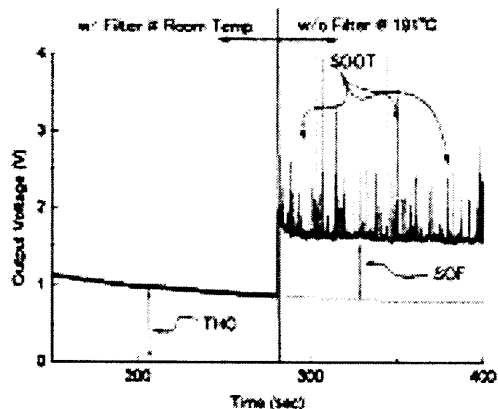


図3 4. FID による PM 測定 の原理

ラインは導入路を 191℃ に保持し、排ガスを直接 FID に導入する。一方、フィルタラインは導入路を 52℃ に保持し、フィルタを通過させて PM を除去した排ガスを FID に導入する。フィルタラインの出力値を炭化水素 (THC) に相当するものとみなし、ダイレクトラインの出力値からフィルタラインの出力値を差し引いたものを PM に相当する出力値とする。この出力値を適当なしきい値を設定して連続成分とパルス状成分に分離し、前者を SOF、後者を Soot に対応させる。SOF と Soot では FID 検出器に対する感受性が異なるため、それぞれに適当な係数をかけ、これらの合計を PM の排出濃度とする。本研究では、自動車用ディーゼル機関でのデータを元に設定された係数を使用した。

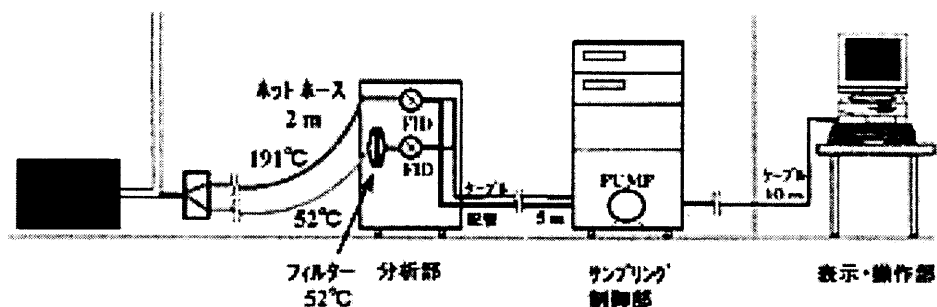


図3 5. 高速 FID 法による計測装置の概要

5. 1. 2 実験結果及び考察

まず、高速FID法及びフィルタ重量法により求めたPM排出濃度との関係を検討した。図3-6に両者の関係を示す。(a)において全データの比較を、(b)において運転特性別の比較を、(c)～(f)において燃料油種及び運転特性別の比較を行った。その結果、両者の間には正の相関関係の存在が伺え、概ね、比較するデータを細かく分類するにつれて両者の間の相関性が向上することがわかった。しかし、異なる運転特性で測定した場合、回帰直線の傾きが大きく異なる結果となった。このため、FIDの出力値を評価する上では、運転特性による影響を考慮する必要性が示唆される。また、いずれの計測方法においても、機関負荷25%において高いPM排出濃度を示したが、負荷50%以上ではPM排出濃度が低下し、負荷による相違は顕著ではなかった。このため、低負荷域におけるPM排出濃度を正確に捉えることが、評価係数を求める上で特に重要になると考えられる。

次に、高速FID法により求めたSOFの排出濃度と、フィルタ重量法により採取したPMから抽出分離したSOFの排出濃度との関係を検討した。図3-7に両者の関係を示す。PMの場合と同様に、両者の間には正の相関関係があり、また、比較するデータを細かく分類するにつれて両者の間の相関性は向上した。また、異なる運転特性で測定した場合、回帰直線の傾きが大きく異なった。このため、SOFの排出濃度を評価する上でも、運転特性による影響を考慮する必要性が示唆される。

さらに、PMには燃料中の硫黄分に応じて硫酸ミスト及び硫酸塩が含まれており、C重油を用いた場合、これらの硫酸分の影響が無視できないほど大きくなると考えられる。しかし、FIDでは硫酸分は検出できないため、燃料中の硫黄分からPM中に含まれる硫酸分を推定し、これを元にFID出力値に適当な値を加えて補正する必要がある。

以上の結果から、高速FID法によるPMの計測手法として、下記のような評価関数を仮定し、これにFID出力

値を代入してPM排出率を見積もる方法が提案される。しかしながら、データの蓄積が充分ではないため、今後もデータの蓄積を行う必要がある。また、操作性、リアルタイム計測等の面では、十分な性能を有することが確認された。

PM 排出率 = SOF 排出率 + Soot 排出率 + 硫酸分排出率

SOF排出率 = $f_1(\text{SOFFID})$, SOFFID: 高速FID法でのSOF出力値

Soot排出率 = $f_2(\text{SootFID})$, SootFID: 高速FID法でのSoot出力値

硫酸分排出率 = $f_3(\text{SFUEL})$, SFUEL : 燃料中の硫黄含有率

5. 2 フィルタ振動法による停泊中の実船でのPM計測

5. 2. 1 実験装置

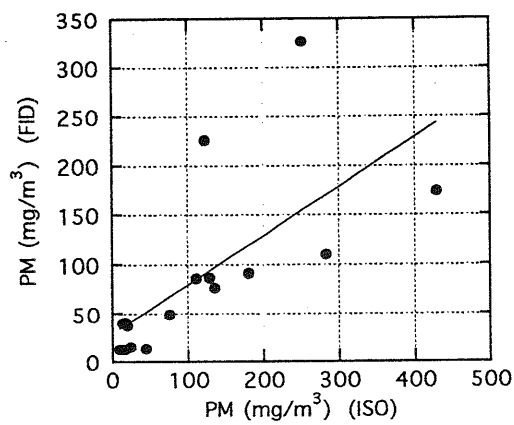
実験に使用した機関の概要と使用燃料について表7及び8に示す。実船実験での測定系を図3-8に示す。フィ

表8. 使用燃料と供試箇所

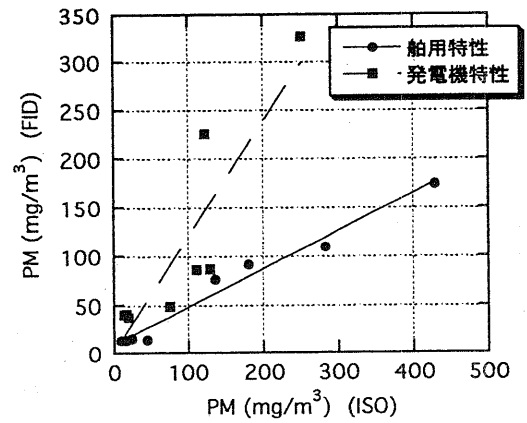
	中型中速 ディーゼル機関	発電機用 ディーゼル機関
油種	A 重油	A 重油
密度 @15℃ (gr/cm ³)	0.8581	0.8701
動粘度 @50℃(mm ² /s)	2.5	2.99
引火点 (℃)	86	82
流動点 (℃)	-30	-
残炭 (mass%)	0.044	0.05
水分 (vol%)	<0.05	0.07
灰分 (mass%)	<0.01	0.001
硫黄 (mass%)	0.06	0.85

表7. 使用エンジン

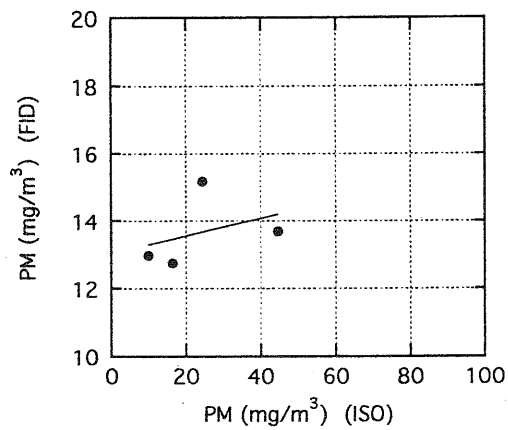
形式	中型中速ディーゼル機関 立て型4サイクル3シリンダ 過給機、空気冷却器付き	銀河丸補助発電機用ディーゼル機関 立て型4サイクル6シリンダ 過給機、空気冷却器付き
燃料油	A 重油	A 重油
内径 (mm)	230	220
行程 (mm)	380	300
定格出力(kw(PS))	257 (350)	(840)
発電器出力 k w		560
最大回転数(rpm)	420	720



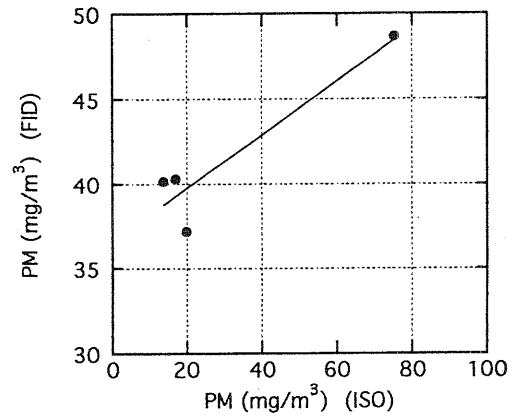
a 全データの比較



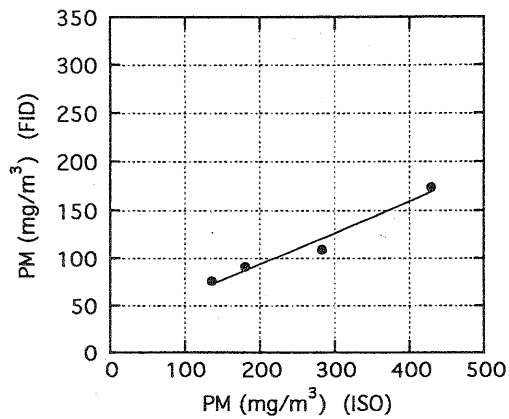
b 運転特性格別の比較



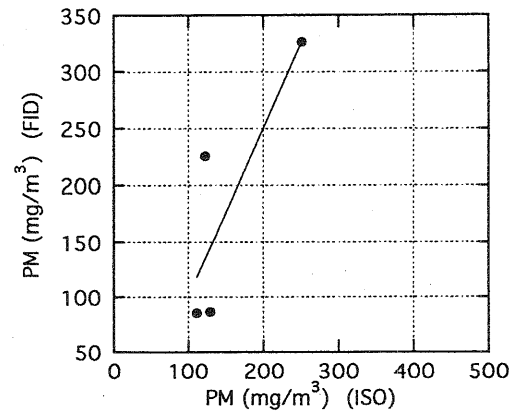
c 船用特性・A重油



d 発電機特性・A重油



e 船用特性・C重油



f 発電機特性・C重油

図3.6. PM排出濃度における高速FID法とフィルタ重量法の比較

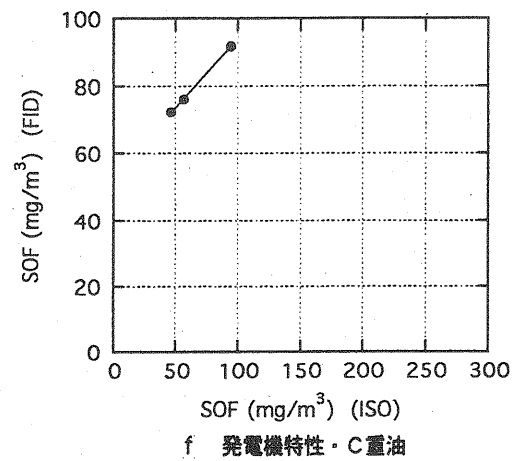
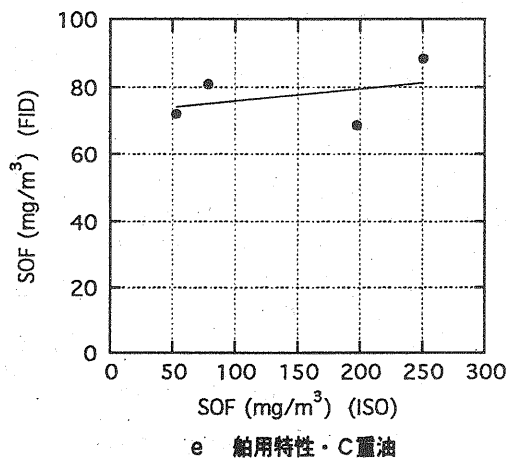
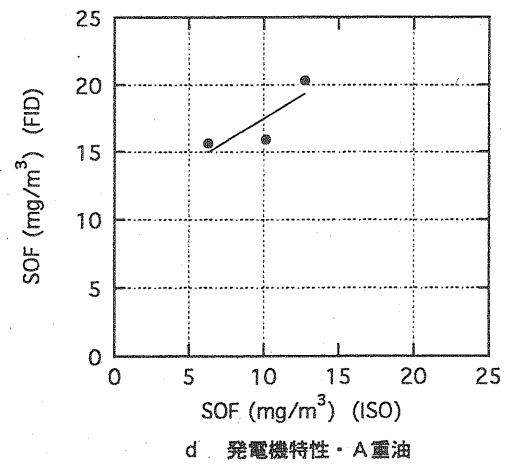
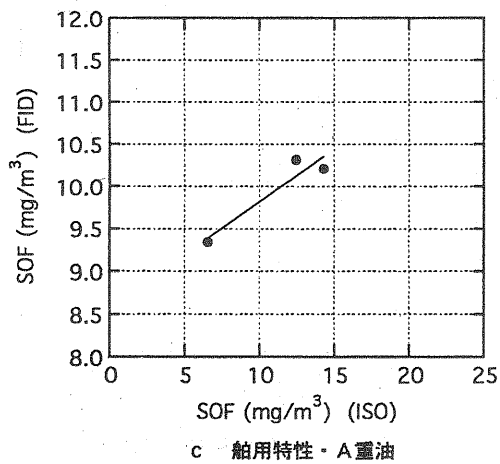
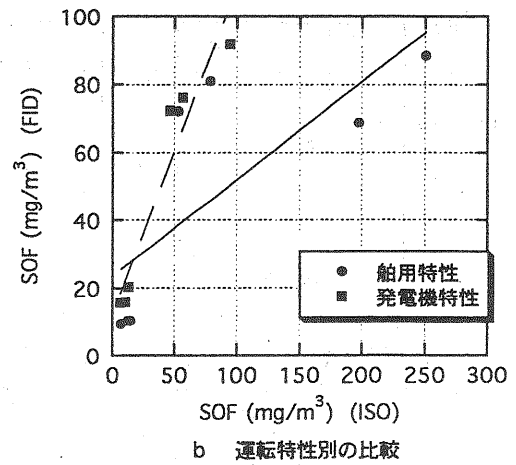
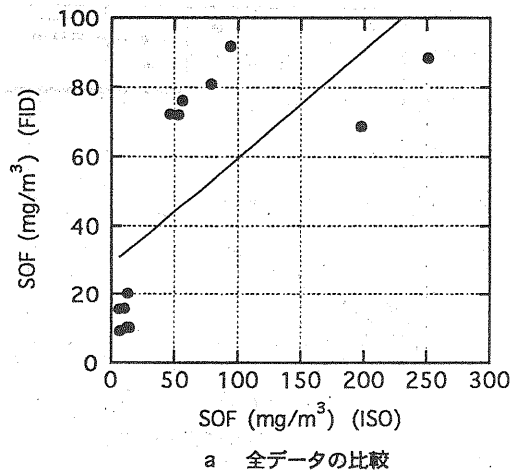


図37. SOF 排出濃度における高速FID法とフィルタ重量法の比較

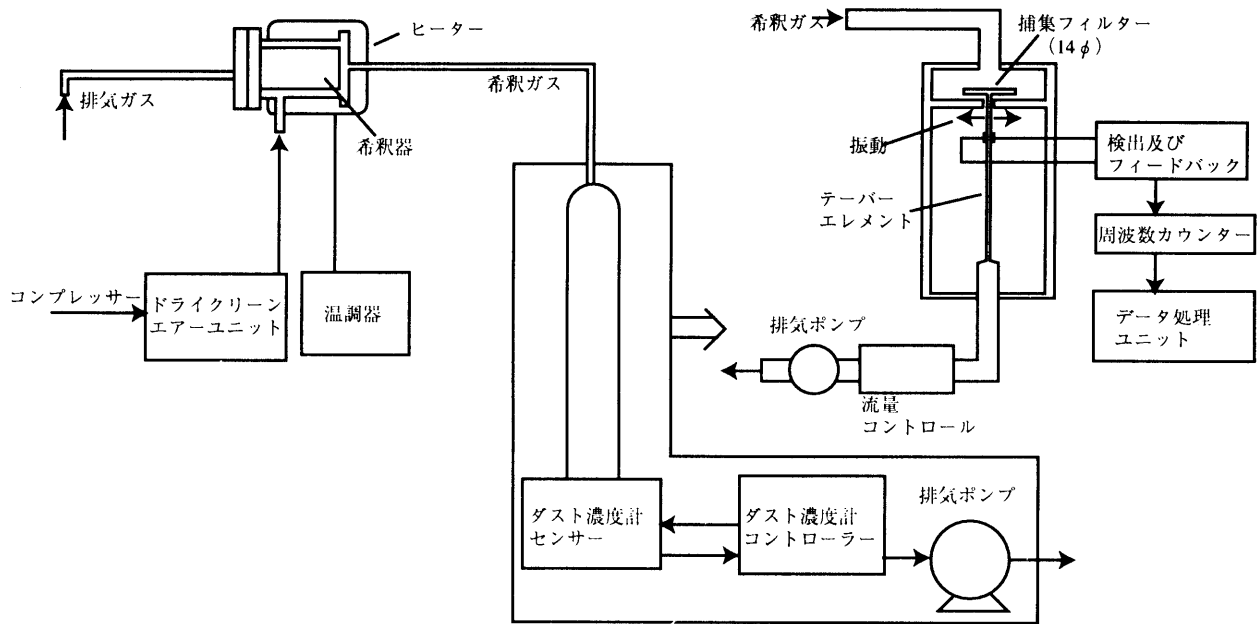


図39. フィルタ振動法 (TEOM-1400) 測定原理

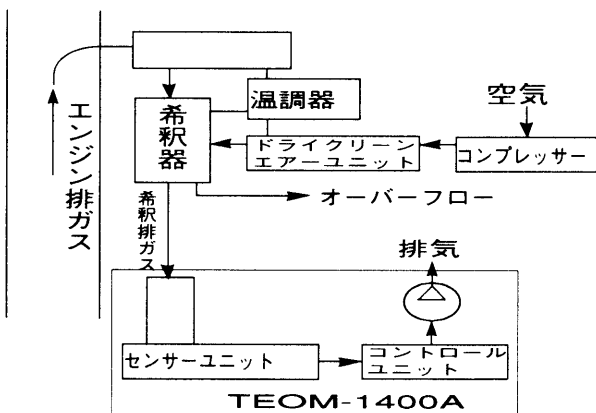


図38. 実船実験での測定系

ルタ振動法によるPM測定については測定原理を図39に示す。捕集フィルタに時間とともに集積されるPM質量により、捕集フィルタが取り付けられたテーパエレメントの固有振動数が変わることを利用し、PM重量を求める。したがって、振動数の微小な変化がPM質量算出に影響を与えるため、実船測定には、動揺振動から受ける影響に関しても考慮する必要がある。なお、フィルタ重量法によるPM測定は、5. 1. に述べた通りである。

5. 2. 2 実験結果及び考察

(1)「銀河丸」発電機原動機でのフィルタ振動法によるPM計測

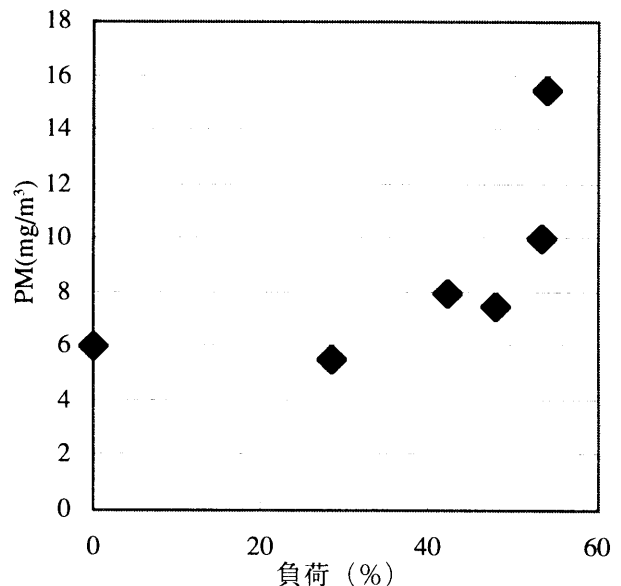


図40. PM排出特性 (銀河丸発電機用ディーゼル機関、A重油)

図40に発電機原動機におけるフィルタ振動法による測定結果を示した。なお、ここで示す負荷は発電機出力である。0～30%まではPMの増加は小さく、その後、負荷とともに増加している。過去に当所の機関 (条件：カム駆動、発電機特性) にてフィルタ重量法を用いて行った測定の一例では、25%負荷で46mg/m³程度、50～100%負荷で6～23mg/m³程度を示し、低負荷域で大きな値となる傾向があった。本測定では低負荷でのPMの増加が見られず、また、50%負荷付近で近い値となった。

図4-1に、発電機出力を47%に固定して長時間計測したチャートを示す。図から分かるとおり出力を固定しているにもかかわらず4分周期の増減が見られた。フィルタ振動法はPM捕集によるフィルタ重量の変化で固有振動数が変わることを利用している関係から、動揺、振動、加速度等の影響を受ける。今回は停泊中であつたが、動揺、振動が感じられた。波、横揺れの周期は10秒程度といわれ、4分周期のPMの増減には関係はないものと思われる。しかし、半ば閉じられた海面では静振と呼ばれる非常に長い周期の加速度の変化が起こる事があるため、この静振の影響を否定できない。しかし、今のところ、測定中にガバナにおけるロード・リミッターの目盛りが2.8から3.0の間を周期的に動いていた。周期から考えて、これが原因ではないかと推測する。

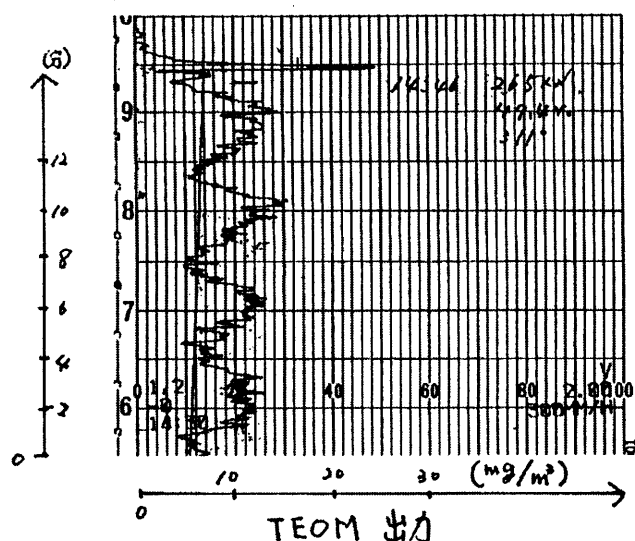


図4-1. 発電機出力47.0%で長時間計測のチャート

同一出力でも、周期変動があることが船用ディーゼル機関の特性であるなら、フィルタ重量法においても周期の整数分のサンプリング時間か、周期が無視できるだけ長い期間のサンプリング時間を確保することが必要となる。

また、排ガス測定後サンプリング管を排ガスから室内空気に切り替えた場合、その後、数分間にわたって測定器の指示値がマイナスを示すとともに、フィルタ重量が減少した。これは、排ガス中のPMが多量の水分などの蒸発性物質を含んでおり、TEOMの内部は50℃に保たれているため、フィルタ上に集められるとともに蒸発しているのではないかと予想している。今後、原因を明らかにするとともに、PM指示値に何らかの補正が必要となるかもしれない。さらに、今回はTEOMのサンプリング時間を10秒としたが、捕集量と蒸発量が平衡に達するのであれば、目的に応じてサンプリング時間を調節することにより、よりよいデータが得られるものと思う。

(2) フィルタ重量法とフィルタ振動法の比較

図4-2に、当所の機関（条件：電子制御、船用特性）を用いて行ったフィルタ振動法とフィルタ重量法の比較測定の結果を示した。フィルタ重量法の結果は、低負荷と高負荷でPM排出量が多くなるU型の変動を示しており、これは、過去に測定した結果と同じ変動を示した。一方、フィルタ振動法の結果は、50～75%負荷でほぼ一定、負荷が下がるとともに小さな値となった。ただ、本測定時に希釈器とTEOMの接続配管は温度保護がされていなかったため、何らかの影響を受けた可能性がある。この結果を見る限り、フィルタ振動法による測定結果はフィルタ重量法による測定結果の1/5～1/2の範囲で変動した。

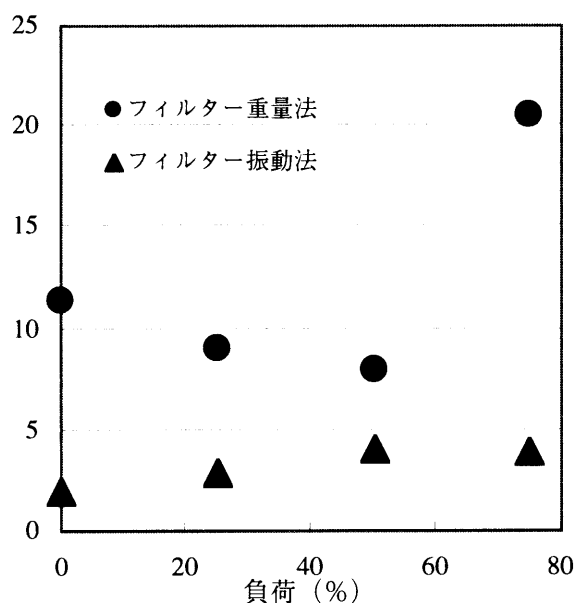


図4-2. フィルタ重量法とフィルタ振動法の比較

実船での測定では、機器の設置などの制限で測定系を長い配管でつなぐ必要がある。たとえば、排ガスを希釈器に導入するために、5mの加熱導管を用いている。したがって、この管内でのPMの沈着量を考慮する必要がある。仮に粒径が均一であり、かつ、低負荷と高負荷でのPMの粒径が同じであれば、同じ補正値を乗することで値の補正が可能である。しかし、残念ながら、フィルタ重量法に対して単純な補正はできなかった。よって、図4-1に示した発電機原動機の測定結果の解釈にあたっては、測定系配管内沈着の考慮をするほか、配管の短縮や温度管理の見直しなど多くの検討課題を含むことが分かった。

5.3 フィルタ振動法による航海中の実船でのPM計測

5.3.1 実験装置

表9．使用エンジン

形式	中型中速ディーゼル機関 立て型4サイクル 3シリンダ 過給機、空気冷却器付き	銀河丸補助発電機用ディーゼル機関 立て型4サイクル 6シリンダ 過給機、空気冷却器付き
燃料油	A重油	A重油
内径 (mm)	230	220
行程 (mm)	380	300
定格出力(kw(PS))	257 (350)	(840)
発電器出力 kw		560
最大回転数(rpm)	420	720

表10．使用燃料と供試箇所

	中型中速 ディーゼル機関	発電機用 ディーゼル機関
油種	A重油	A重油
密度@15℃ (gr/cm ³)	0.8581	0.8701
動粘度@50℃ (mm ² /s)	2.50	2.99
引火点 (℃)	86	82
流動点 (℃)	-30.0	-
残炭 (mass%)	0.044	0.05
水分 (vol%)	<0.05	0.07
灰分 (mass%)	<0.01	0.001
硫黄 (mass%)	0.06	0.85

本章に関係した機関の概要と使用燃料について表9及び表10に示す。本測定系は5.2に示した測定系と同様であり、主機2号過給器排ガス出口から6mmのノズルを用いて排ガスをサンプリングし、5mの加熱導管を用いて機関室右舷中段においた希釈器、TEOMに接続したが、配管の短縮、温度保護等の改造を加えたものである。

TEOMのセンサーユニットにはいくつかの振動対策がとられている。ところが、センサーユニット全体がゆっくり傾けられる場合に大きなエラーを生じることが判明した。したがって、排ガス測定中にどの程度船体動揺の影響を受けているかを評価するため、TEOMをもう一式用意し、フィルタと乾燥剤を通した空気を流し、測定期間中変動を示すかどうかを調べた。排ガス測定は平成12年9月20日、川崎から晴海埠頭までの航行時に行った。

5. 3. 2 実験結果および考察

図43に主機におけるPM測定の結果を示した。TEOMの設定は2.32 l/minのサンプリング流量で20秒

間平均の値を20秒ごと出力させた。この図で示しているのは希釈器をととした希釈排ガス中のPM濃度である。本希釈器内では、希釈用圧搾空気がサンプル取り入れノズルの周りに作るマイナス圧により排ガスを吸入する構造となっている。25～40 l/minの希釈用圧搾空気流量で希釈比10の特性を持っている。ただし、排ガスのサンプリング位置(2号過給器排ガス出口)では加圧状態であったので、希釈比に影響を与えていた可能性がある。さらに、エンジン排ガス流速に関わらず希釈圧搾空気を一定流量としたので、非等速サンプリングとなっている。この図では、およそ0～2000 μ g/m³の範囲で変動している。

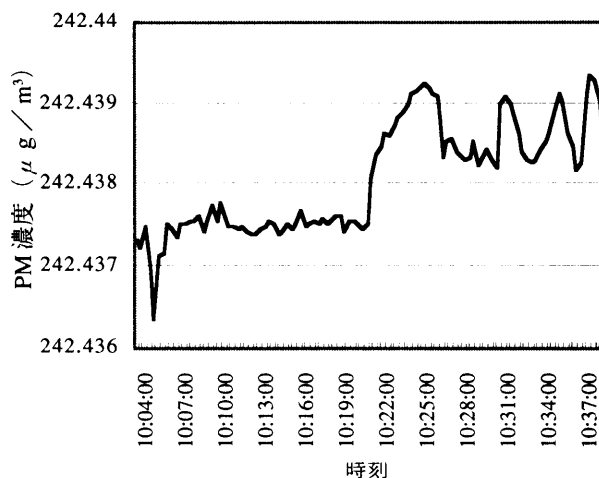


図43．主機PM測定値（希釈後濃度）

図44には、清浄空気を流したもう一式のTEOMの測定結果を同じ時刻について示した。この図では振動数変化を示している。このTEOMには清浄な空気を流しているのでフィルタ重量に変化がないため一定値を示すはずであるが、船体動揺のため大きな変動を示している。なお、図中の0.001Hzの振動数変動は、校正定数から1.7 μ gのフィルタ重量の変化に対応し、仮に1分で

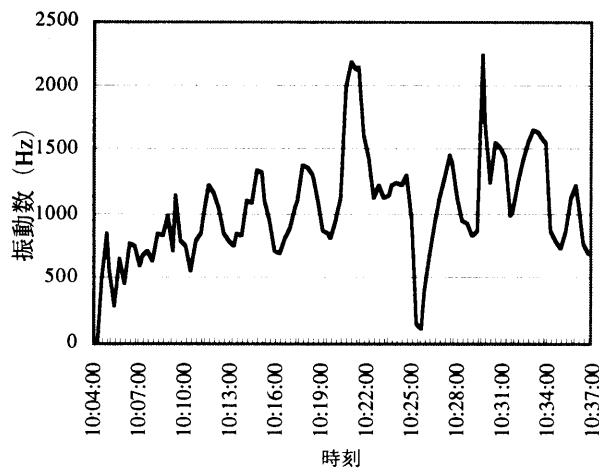


図 4 4. 主機 PM 測定値（希釈後濃度）

変化したとすると $733 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($1.7/0.00232$) に対応し、大きな影響を与えていることがわかった。

図 4 3 から 10 時 10 分から 20 分にかけて振動数が安定している部分があり、3 分 20 秒の周期がみられた。この間、主機出力はおおよそ 30% で一定であった。希釈比を 10 とすると平均で $10 \text{ mg}/\text{m}^3$ となる。周期変動に関しては、前回の発電機用ディーゼル原動機でも観察されており、原因は前回同様、ガバナにおけるロード・リミッターの特性により、負荷一定でも消費燃料の増減があるためと考えている。

5. 4 ベータ線吸収法による実船での PM 計測

TEOM を実船に持ち込む場合、船体動揺の影響を大きく受けるので、ここでは動揺の影響を受けない測定法としてベータ線吸収法による PM 計測を試みた。

5. 4. 1 実験装置

本章で使用した機関、使用燃料、測定系は 5.2 で述べた通りであるが、測定に応じて希釈器から、フィルタ振動法かベータ線吸収法の測定器のどちらかに接続した。

ベータ線吸収法は、放射線源から放出されるベータ線が透過する質量に応じて遮蔽され減少していく現象を利用して、フィルタ上に捕集された PM 質量を測定する。本測定器 (FH62-C14) では放射線源として ^{14}C が用いられている。検出器には比例計数管が用いられ、検出器の有感領域内での電離数に応じた出力が得られるため、環境中に存在するラドン子孫核種からのアルファ線を弁別することができる特性を持っている。

5. 4. 2 実験結果および考察

図 4 5 には、ベータ線吸収法による主機排ガス中の PM 測定結果を示した。サンプリング流量は、 $16.67 \text{ l}/$

min、フィルタ上の PM 重量の累積値を 1 分ごとに出力している。放射性崩壊は、ランダムな過程であるため、放射線測定から出力されたカウント数から統計解析により、測定値の誤差評価が必要となる。現在の制御プログラムでは、カウント数が出力できず誤差評価を行うことができなかった。ここでは、フィルタ振動法との比較のため、図中測定期間のうち主機出力がおおよそ 30% のであった 8:46 ~ 8:52、9:06 ~ 9:14 の期間の流量と蓄積 PM 質量から濃度を求めた。その結果、前者は 9.0、後者は $9.7 \text{ mg}/\text{m}^3$ となり平均値ではフィルタ振動法の結果とよく一致した。

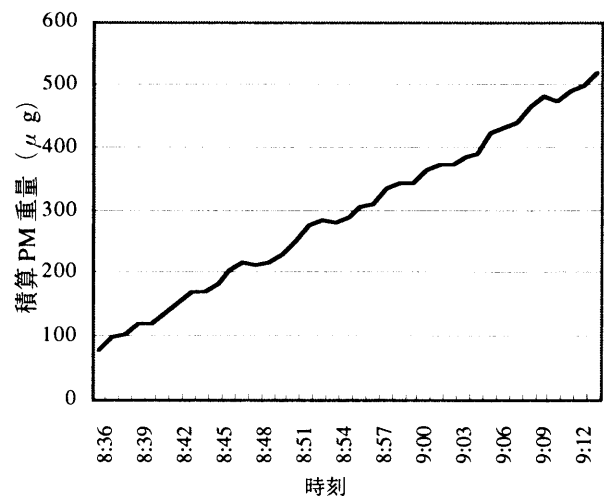


図 4 5. ベータ線吸収法による主機 PM 測定値（希釈後濃度、平成 13 年 3 月 23 日）

5. 5 まとめ

高速 FID 法による粒子状物質の計測では得られたデータを比較検討し、

- 高速 FID 法は操作性、リアルタイム計測等の面では十分なものとして評価できる。今後の改良により、船用機関での PM 計測方法として活用しうると期待される。
- 高速 FID 法及びフィルタ重量法の間には正の相関関係が見いだされ、比較するデータを細かく分類することにより相関性が向上するものの、運転特性等が相関性に大きく影響することがわかった。
- 高速 FID 法による計測から PM 排出率を見積もるには PM 中の硫酸分の影響を考慮し、適当な評価関数を用いる必要があるが、これにはデータの蓄積が必要である。

フィルタ振動法による停泊中の実船での PM 計測では得られたデータを比較検討し、

- 発電出力一定であってもおおよそ 4 分周期の排出変動を示した。
- フィルタ重量法の結果より過小評価することがわ

かった。

c) 過小評価の原因の一つとして、測定系内でのPMの沈着が考えられ、できるだけ測定系内の配管を短くするように改良した。

フィルタ振動法による航海中の実船でのPM計測では、30%出力で10mg/m³、3分20秒の周期変動が観察できた。ただし、以下の問題点があった。

a) 排ガス流速に対して等速サンプリングしていない。
b) サンプリング部が加圧されているので希釈比に影響を与えている可能性がある。

c) フィルタ振動法による計測とフィルタ重量法とは、結果が一致していない。

d) 測定系内の沈着量の評価が必要である。

e) フィルタ振動法は船体動揺の影響を大きく受けるので設置に工夫が必要である。また、動揺の影響を受けない測定法の検討も必要である。

ベータ線吸収法による実船でのPM計測では得られたデータを比較検討し、

a) 30%出力で両者とも平均10mg/m³の結果を示した。

b) 5.3.2で示した問題点は解決されていない。

c) ベータ線吸収法ではエラー評価などのため制御プログラムの改良が必要である。

以上、それぞれの計測方法に多くの検討課題があることがわかった。

6. 本研究により得られた成果

本研究では船用ディーゼル機関の電子制御化により燃料消費率を落とすことなく大気汚染物質の低減を目指す。また、船用ディーゼル機関から排出されるVOC、PM測定方法の確立を目指し研究を進めた。

「船用ディーゼル機関の燃料噴射系の電子制御化の研究」では燃料噴射装置の試作を行い、NO_x及びPMの同時低減を目指し、次の結果を得た。

a) 燃料噴射系の電子制御化により、PM排出量を大幅に低減させることができた。

b) 電子制御化による着火時期の最適化は低負荷域で効果が大きく、25%負荷ではNO_x排出量、PM排出量及び燃料消費率を同時に改善する最適着火時期を得た。

c) 高負荷域では作動油圧力を高めることにより、燃料消費率及びPM排出特性の改善傾向が認められた。

d) 乳化燃料を使用すると燃料噴射後半の圧力低下あるいは燃料噴射期間増大から排ガス温度が上昇する等の現象があり、明確な最適時期は得られなかった。

「電子制御化ディーゼル機関の運転」では燃料噴射装置に続き吸排気弁装置の電子制御化を実施し、両装置の相乗効果で更なる燃料消費率の向上、NO_x及びPMの同時低減を目指し、次の結果を得た。

a) 各時期の平均表示を行い、燃料噴射時期と着火遅れ

から容易に希望する着火時期が得られるようになった。また、排気弁開時期は運転の指標として使用できることが解った。

b) 低負荷時では、NO_x排出量及び燃料消費率を同時に改善する最適着火時期があることを確認した。

c) 排気弁開時期を遅らせることにより、NO_x排出量及び燃料消費率を同時に改善できる可能性があることを確認した。

「船用ディーゼル機関から排出される揮発性有機化合物の計測及び評価」では実船に適應するVOC計測法の確立を目指し、実験機関及び実船において計測を実施し、次の結果を得た。

a) 全般的傾向としてメタン、エチレン、プロピレン及びベンゼンの排出量が多く、エタンやプロパンの排出量はきわめてわずかであった。

b) メタン排出濃度は全て環境大気中での濃度を下回った。従って、排出評価は正味排出係数あるいはIPCC正味排出係数に基づいて行うことが妥当と考えられる。

「実船でのPM計測について」では実船に適應するPM計測法の確立を目指し、実験機関及び実船において計測を実施し、次の結果を得た。

a) 高速FID法、フィルタ振動法、ベータ線吸収法、いずれの方法でも測定系内でのPMの沈着等の多くの課題が残された。以上をふまえ、

b) 高速FID法は操作性、リアルタイム計測等の面では十分なものとして評価できる。しかし、PM中の硫酸分の影響を考慮し、適当な評価関数を用いる必要がある。

c) フィルタ振動法では測定装置の可搬性と速い応答性により、非常に有用である。しかし、船体動揺の影響を大きく受けるので工夫が必要である。

d) ベータ線吸収法では船体動揺の影響を克服できた。しかし、エラー評価などのため制御プログラムの改良が必要である。

7. 研究発表

1) 石村恵以子他：電子制御式燃料噴射装置について、日本船用機関学会第63回マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集、1999、pp.149～152

2) 張潔他：燃料噴射系の電子制御化による船用ディーゼル機関の排ガ斯特性の改善 その1 A重油の場合、日本船用機関学会第64回マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集、2000、pp.11～14

3) 張潔他：船用ディーゼル機関燃料噴射系の電子制御化の研究 第1報 A重油使用時の運転試験結果、船舶技術研究所第74回研究発表会講演集、2000、pp.11～16

4) 石村恵以子他：船用ディーゼル機関燃料噴射系の電子制御化の研究 第2報 乳化燃料使用時の運転試験結果、船舶技術研究所第74回研究発表講演集、2000、pp.41

～ 44

5) 張潔他: 燃料噴射系の電子制御化による船用ディーゼル機関の排気ガス特性の改善 A重油使用時の運転結果、日本船用機関学会誌、35 巻 12 号 (2000) pp.841～847

6) 張潔他: 燃料噴射系の電子制御化による船用ディーゼル機関の排気ガス特性の改善 その2 A重油および乳化燃料使用時の熱発生率の解析、第 65 回マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集、2001、pp.85～88

7) 西尾澄人他: 電子制御式吸排弁について、第 74 回船舶技術研究所研究発表会講演集、2000、pp.29～32

8) S.Nishio et al: Assesment and Treatment for Harmful Exhaust Emissions from Marine Diesel Engines、ISME (International Symposium on Marine Engineering) TOKYO 2000、p.329-334

9) 高杉喜雄他: 電子制御化ディーゼル機関の運転について - その 1: 吸排気弁開閉時期の設定について、第 65 回マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集、2001、pp.73～76

10) 石村恵以子他: 電子制御化ディーゼル機関の運転 - その 2: 燃料噴射時期と吸排気弁開閉時期制御について、日本船用機関学会第 65 回マリンエンジニアリング学術講演会高連論文集、2001、pp.77～80

11) 西尾澄人他: 電子制御化ディーゼル機関の運転 - その 3: 燃料噴射・吸排気弁の電子制御化運転の結果について、日本船用機関学会第 65 回マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集、2001、pp.81～84

12) 中島康晴他: 船用ディーゼル機関から排出される揮発性有機化合物(VOC)の計測、機械学会第 8 回交通・物流部門大会: 川崎: 1999

13) 中島康晴他: 船用ディーゼル機関から排出される VOC の計測及び評価、日本船用機関学会第 64 回マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集、2000、pp.19～22

14) Y.Nakajima et al.: Measurement and Analysis of Particulate Matter(PM) from Marine Diesel Engines、ISME TOKYO 2000、p.313-318

15) Y.Nakajima et al.: Study on Emissions Characteristics of Air Pollutions from 4-stroke Marine Diesel Engine with Emulsified Fuel at both Shop and On-board Tests、4th International Conference ICE99、1999、Naples

16) Y.Nakajima et al.: Emission Characteristics of Particulate Matters from Ships、Proceedings of Marine Environmental Engineering Tecnolgy Symosium、U.S.A.2001

17) 中島康晴他: 船用ディーゼル機関から排出される粒子状物質の計測、船舶技術研究所第 73 回研究発表講演集、1999、pp.218～223

18) 中島康晴他: 船用ディーゼル機関から排出される粒子状物質の新規計測法の検討、日本船用機関学会第 63 回マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集、

1999、pp.121～124

19) 松崎範行他: フィルター振動法による実船での PM 計測について、日本船用機関学会第 64 回マリンエンジニアリング学術講演講演論文集、2000、pp.85～88

20) 大橋厚人他: フィルター振動法による実船での PM 測定について(その 2)、第 65 回マリンエンジニアリング学術講演講演論文集、2001、pp.1～4

21) 大橋厚人他: フィルター振動法による船用ディーゼル機関の PM 計測に関する基礎研究、第 74 回船舶技術研究所研究発表会講演集、2000、pp.37～40

22) 大橋厚人他: 実船での PM 測定に関する基礎研究、第 1 回海上技術安全研究所研究発表会講演集、2001、pp.319～322

23) 西川和美他: 高速ディーゼルエンジンのパティキュレート及び排ガスの排出特性、第 73 回船舶技術研究所研究発表会講演集、1999、pp.301～304

24) 西川和美他: 高速ディーゼルエンジンの燃料中の硫黄分と排ガス特性、第 74 回船舶技術研究所研究発表会講演集、2000、pp.25～28

25) 西川和美他: フィルター振動法によるディーゼル排ガス中の水分の影響を考慮したより微小な排出粒子の測定、第 1 回海上技術安全研究所研究発表会講演集、2001、pp.323～326

26) 中島康晴他: 船用ディーゼル機関から排出される亜酸化窒素の排出特性、第 74 回船舶技術研究所研究発表会講演集、2000、pp.33～36

8. 参考文献

1) 佐藤修一他: 油圧駆動電子制御システムによるエンジン性能向上 その 1 油圧作動式燃料噴射給排気弁駆動機構、日本船用機関学会誌、26 巻 6 号 (1991)、pp.268～276

2) 鹿島宗: 油圧駆動電子制御システムによるエンジン性能向上 その 2 電子制御システム、日本船用機関学会誌、26 巻 6 号 (1991)、pp.277～286、

3) 藤井龍雄他: 油圧駆動電子制御システムによるエンジン性能向上 その 3 試験機関の運転と機関性能の評価、日本船用機関学会誌、26 巻 7 号 (1991)、pp.350～357

4) (株)松井鉄工所技術部: 低燃費機関の開発、漁船機関、1978.8、pp.7～10

5) Lars Th Collin: Drastic Diesel NOx Reduction at Maintained Fuel Consumption Through a New Combustion System、Proceeding ISME YOKOHAMA、1995、p.491-497

6) 新井雅隆: 噴霧と噴霧燃焼 (ディーゼル噴霧の形成と着火) エンジンテクノロジー、2 巻 6 号 (2000)、pp.82～87

7) 青山太郎: ガソリン予混合圧縮着火エンジンについて

て、自動車技術、53巻9号（1999）、pp.39～44

8) J. C. Wall et al: Fuel Composition Effects on Heavy-Duty Diesel Particulate Emissions, 1985, SAE Paper 841364

9) 環境庁大気保全局大気規制課監修、浮遊粒子状物質対策検討会：浮遊粒子状物質汚染予測マニュアル、1997

10) 産業環境管理協会：米国HEIディーゼル・ワーキング・グループ特別報告書、1999

11) 中島政治他：エンジン・トータル電子制御システムのための基礎研究、日本舶用機関学会誌、34巻7号（1999）、pp.419～426

12) 日本化学会編：季刊化学総説No.10大気の化学、1990

13) 財団法人日本環境衛生センター：ディーゼル機関の排ガス分析報告書、1999

14) 中島徹他：ディーゼルパティキュレートフィルタ(DPF)による排出ガス性状の改善、エアロゾル研究、15巻4号（2000）、pp.344～352

15) 南齋規介：産業関連表を用いたわが国における人為起源の粒子状物質排出量の推計と解析、エアロゾル研究、15巻4号（2000）、pp.353～363.

16) 前田和幸他：船舶におけるPMの測定方法、第65回マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集、2001、pp.9～12

17) 前田和幸他：船舶のPM測定精度向上に関する研究、日本舶用機関学会第64回マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集、2000、pp.89～92

18) 西田修身他：船用低質燃料油の燃焼特性および排出物について、日本舶用機関学会第64回マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集、2000、pp.31～34

19) 塚本雄次郎他：マイクロトンネルを用いたPM測定法に関する研究（第2報）—サンプリング系がPM測定に及ぼす影響について—、交通安全公害研究所研究第30回発表会講演概要、2000、pp.105～108

20) 高崎講二他：最近の船用重油の燃焼特性に関する研究、日本機械学会第16回内燃機関シンポジウム講演論文集、2000、pp.301～305