



水混合燃料技術を用いた排気エミッションの低減

山西, 大

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2024-03-05

(Date of Publication)

2025-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙第3443号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100490199>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



博 士 論 文

水混合燃料技術を用いた排気エミッションの低減

令和 6 年 1 月

山 西 大

目 次

第1章 序 章	1
1.1 本研究における背景	1
1.1.1 船舶における NO _x 規制	1
1.1.1.1 IMO NO _x 1 次規制	1
1.1.1.2 IMO NO _x 2 次規制	1
1.1.1.3 IMO NO _x 3 次規制	2
1.1.2 船舶における SO _x ・PM 規制	3
1.1.3 船舶における GHG 排出規制	3
参考文献	4
1.2 本研究の目的と意義	6
1.2.1 船舶における NO _x 規制対応	6
1.2.2 船舶における BC 規制対応	7
1.2.3 船舶における GHG 排出規制対応	8
1.2.4 船舶における NO _x , BC, GHG 対応技術の実用化	9
参考文献	11
1.3 本論文の構成	12
第2章 本研究に関するこれまでの研究	14
2.1 IMO NO _x 規制対応技術	14
2.1.1 IMO NO _x 規制前（燃焼改善や燃費低減技術）	14
参考文献	14
2.1.2 IMO NO _x 規制	15
2.1.2.1 IMO NO _x 1 次規制対応技術	15
参考文献	16
2.1.2.2 IMO NO _x 2 次規制対応技術	16
2.1.2.2.1 燃焼改善（機関ファインチューニング）	16
2.1.2.2.2 水エマルジョン燃料	17
参考文献	20
2.1.2.3 IMO NO _x 3 次規制対応技術	21
2.1.2.3.1 SCR（選択式還元触媒：Selective Catalytic Reduction）	21
2.1.2.3.2 EGR（排ガス再循環：Exhaust Gas Recirculation）	21
2.1.2.3.3 ORM（酸素低減膜：Oxygen Reduction Membrane）	22
参考文献	24
2.2 BC 規制対応技術	24

参考文献	2 5
2.3 GHG 対応技術	2 6
2.3.1 バイオ燃料	2 6
2.3.2 アンモニア燃料	2 7
参考文献	2 8

第3章 水混合燃料による排気エミッション対応

(IMO NO_x 2次規制, BC 規制, GHG 規制) 2 9

3.1 はじめに	2 9
3.2 実験装置と方法	3 0
3.2.1 水混合燃料生成装置	3 0
3.2.2 PM 計測装置	3 2
3.2.3 実験方法	3 3
3.3 結果と考察	3 3
3.3.1 NO _x -SFOC トレードオフの確認	3 3
3.3.2 NO _x -SFOC トレードオフに対する水混合燃料の影響	3 7
3.3.3 BC 排出量に対する水混合燃料の影響	4 0
3.3.4 SFOC に関する考察	4 2
3.4 まとめ	4 3
参考文献	4 3

第4章 水混合燃料による IMO NO_x 3次規制対応

4 5

4.1 はじめに	4 5
4.2 実験装置と方法	4 6
4.2.1 実験装置	4 6
4.2.2 実験と解析方法	4 9
4.3 結果と考察	4 9
4.3.1 酸素低減膜による NO _x の低減効果と SFOC の変化	4 9
4.3.2 水混合燃料による NO _x の低減効果	5 6
4.3.3 酸素低減膜と水混合燃料の組合せによる NO _x と SFOC の低減	5 6
4.3.4 IMO NO _x 3次規制対応技術としての課題と展望	6 3
4.3.4.1 SFOC と設置容積および維持・管理	6 3
4.3.4.2 環境対応と今後の課題	6 3
4.4 まとめ	6 5
参考文献	6 5

第5章 水混合燃料による IMO BC 規制対応 6 8

5.1 はじめに	6 8
5.2 船用ディーゼルエンジン用ブラックカーボン (BC) ゼロシステムの構成	6 9
5.2.1 供試エンジン	6 9
5.2.2 水混合燃料生成装置	7 1
5.2.3 PM 計測装置	7 3
5.2.4 BC 低減触媒	7 4
5.2.5 新設計の再生燃焼器付き DPF	7 4
5.3 各構成要素における BC 低減効果	7 6
5.3.1 水混合燃料生成装置	7 6
5.3.2 BC 低減のための触媒	7 9
5.3.3 DPF のブラックカーボン低減と再生効果	8 2
5.3.4 DPF の性能向上	8 4
5.3.4.1 DPF 再生に必要な温度	8 4
5.3.4.2 DPF の性能向上装置	8 5
5.3.4.3 船舶への DPF 適用例	8 8
5.4 まとめ	8 9
参考文献	8 9

第6章 水混合燃料による GHG 対応 9 1

6.1 水混合動植物性油燃料	9 1
6.1.1 まえがき	9 1
6.1.2 実験装置と方法	9 1
6.1.2.1 植物油性燃料および動物油性燃料の性状	9 1
6.1.2.2 動植物油を用いたエンジンの排ガス特性実験	9 3
6.1.3 実験結果と考察	9 3
6.1.4 まとめ	9 5
6.2 アンモニア水混合燃料	9 6
6.2.1 まえがき	9 6
6.2.2 実験装置と方法	9 6
6.2.3 実験結果と考察	9 8
6.2.4 まとめ	1 0 2
参考文献	1 0 3

第7章 水混合燃料技術の実用化 1 0 4

7.1 まえがき	1 0 4
----------------	-------

7.2 実船対応型水混合燃料供給システムの開発	1 0 5
7.2.1 燃料中の水粒子の挙動	1 0 5
7.2.2 水混合燃料生成装置の概要	1 0 8
7.2.3 実船対応型水混合燃料供給システム	1 1 0
7.2.3.1 起動時	1 1 1
7.2.3.2 負荷率 40%未満	1 1 1
7.2.3.3 負荷率 40%以上から 80%未満	1 1 1
7.2.3.4 負荷率 80%以上	1 1 2
7.2.3.5 ブラックアウト時	1 1 2
7.3 実船を用いた実証実験	1 1 2
7.3.1 実験装置と方法	1 1 3
7.3.2 実験結果	1 1 6
7.3.2.1 実船の運航時に必要となる機能の作動確認	1 1 6
7.3.2.2 水混合燃料を使用した時の NO _x , BC, GHG の改善効果	1 1 7
7.3.3 BC および GHG 削減技術としての今後の展望	1 1 9
7.3.4 実船対応型水混合燃料供給システムにおける今後の課題	1 2 1
7.4 まとめ	1 2 1
参考文献	1 2 2

第8章 まとめ 1 2 4

8.1 水混合燃料による排気エミッション対応	1 2 4
8.2 水混合燃料による IMO NO _x 3 次規制対応	1 2 5
8.3 水混合燃料による IMO BC 規制対応	1 2 5
8.4 水混合燃料による GHG 対応	1 2 6
8.5 水混合燃料技術の実用化	1 2 7

主な略称	1 2 9
------------	-------

謝 辞	1 3 1
-----------	-------

第1章 序 章

1.1 本研究における背景

1.1.1 船舶における NOx 規制

1.1.1.1 IMO NOx 1次規制

1980 年半ばまでは船舶から排出される NOx（窒素酸化物）に関する規制はなかったが、環境問題への関心が高まる中、呼吸器系への疾患や酸性雨等を引き起こす原因となる NOx などの大気汚染物質削減が世界的な課題となった。このような状況の中、1988 年に IMO（国際海事機関: International Maritime Organization）において、酸性雨による被害が問題になっていたノルウェーから船舶起源の NOx 規制に関する提案がなされた。これをきっかけに、IMO において船舶から排出される NOx 規制の検討が始まり、2005 年 5 月 19 日より海洋汚染防止国際条約（MARPOL73/78: International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as modified by the Protocol of 1978 relating thereto）の付属書 VI（船舶からの大気汚染防止のための規則）が発効された。その条約の対象は、2000 年建造開始以降の外航船舶に搭載される出力 130kW を超える船用ディーゼルエンジンである。

1.1.1.2 IMO NOx 2次規制

2008 年に開催された、IMO 総会の下部組織である MEPC58（第 58 回海洋環境保護委員会: Marine Environment Protection Committee）において、IMO NOx 1 次規制値から 15~22%削減する NOx 2 次規制が 2011 年から実施されている。

このような状況の中、2011 年実施の IMO NOx 2 次規制対応技術として、燃料噴射時期遅延などのエンジン本体の改善で対応してきたが、これを実施した場合 SFOC（燃料消費率: Specific Fuel Oil Consumption）の低下を招く。

本研究では、IMO NOx 2 次規制対応技術として、水混合燃料を用いて SFOC を

悪化させることなく NOx を低減することを目的とした実験を行った。

1.1.1.3 IMO NOx 3 次規制

2016 年からは、大気環境の改善が必要な特定の沿岸域を指定海域（ECA：Emission Control Area）として、アメリカ・カナダの沿岸域などの指定海域において IMO NOx 1 次規制値から 80%削減とする IMO NOx 3 次規制が採択された。また、2021 年 1 月 1 日より、北海およびバルト海が指定海域に加わった。

IMO NOx 3 次規制対応技術としては、SCR（選択式還元触媒：Selective Catalytic Reduction）、EGR（排ガス再循環：Exhaust Gas Recirculation）、ORM（酸素低減膜：Oxygen Reduction Membrane）などがある。

SCR は、既に確立された技術^{1)~6)}とされ、4 ストローク機関において多くの実施例がある。SCR は、排気管中に触媒を取り付け、その上流から尿素水の噴霧を吹き込むと尿素水は排ガスの熱によって分解され、アンモニアに変化する。そして、触媒反応によって、NOx とアンモニアは無害な窒素と水に変換する技術である。一般に、船舶用 SCR には、ハニカム形状をしたチタン・バナジウム系の触媒が用いられる。課題としては、本体および尿素タンクの設置容積等に注意を要し、排ガス温度が高温である必要やアンモニア過多によるアンモニアスリップ（リークアンモニア）現象に注意する必要がある。また、還元剤である尿素水が必要なためランニングコストを要する。

EGR は、2 ストローク機関における対応技術^{7)~9)}とされている。EGR の原理は、排ガスの一部を給気系に還流し、その不活性ガスによって燃焼室内の酸素濃度を下げるとともに熱容量を増加させ、燃焼ガス温度を低下させることによって NOx を低減する技術である。課題として、排ガスの浄化によるスクラバ処理水の問題と燃費の悪化に注意を要する。

ORM は、空気のみを対象とする安全・安心な技術^{10),11)}とされている。ORM は、膜の表裏に圧力差を生じさせることにより、高压側から低压側に空気の一部が透過する。その際、酸素分子を優先的に透過させる性質を持つため、時間の経過とともに膜の高压側の空気は低酸素濃度の空気を供給することにより NOx を低減する技術であるが、膜の信頼性と耐久性が未だ確立されていない。

本研究では、燃費の悪化を抑えて NO_x を IMO 3 次規制値まで低減させる技術を確立することを目的として ORM と水混合燃料を組み合わせた実験を行った。

1.1.2 船舶における SO_x・PM 規制¹²⁾

SO_x および PM（粒子状物質：Particulate Matter）については、新造船，就航船を問わない全船舶を対象とした SO_x・PM 規制（燃料中に含まれる硫黄分の上限が 3.5%）が 2012 年からスタートし，2020 年からはそれまでの 3.5%からその上限を 0.5%とする，更に厳しい規制が実施されている。なお，指定海域においては，2015 年から 0.1%と，一般海域より厳しい規制値が適用されている。

さらに，2010 年 3 月に行われた MEPC60 において，「北極圏における船舶からの BC（ブラックカーボン：Black Carbon）排出削減」に関する問題がノルウェー，スウェーデン，米国から共同提案され，MEPC62（2011 年 7 月）において，「国際海運からの BC 排出が北極海域に及ぼす影響とその規制の必要性」として検討することが合意された。なお，IMO では，北極海航路における BC 規制が検討されているが，未だ BC の計測方法が定められておらず，北極海を航行予定の船舶の BC の排出実態も明らかにされていない状態である。北極海は閉鎖された海域であるため，BC 排出をゼロにするための研究が急務とされている。

本研究では，船用ディーゼルエンジンから排出される BC を可能な限り低減することを目的とした BC ゼロシステムの開発についての報告と，船用ディーゼルエンジンを用いて，本システムにおける低減効果を検証した。

1.1.3 船舶における GHG 排出規制^{13),14)}

国際海運からの GHG（温室効果ガス：Green House Gas）排出削減対策を委ねられた IMO が，2018 年に「GHG 削減戦略」を採択した。それによれば，2008 年を基準として 2030 年までに輸送量あたりの GHG 排出量を 40%以上改善し，2050 年までに GHG 総排出量を 50%以上削減とし，今世紀中に GHG 排出ゼロを目指すとしている。これを受けて，我が国においても 2019 年に，「国際海運のゼロエミッションに向けたロードマップ」が示された。それによれば“LNG 燃

料による GHG 削減”となるが、将来に向けては“水素・アンモニア燃料”，“船上 CO₂ 回収”，“風力の活用”などが不可欠としている。その後，気候変動対策への世界的な関心がさらに高まり，国際海運においても GHG 排出削減に，より一層取り組むことが求められている。我が国においては，2021 年 10 月に日本政府および海運業界が 2050 年までに国際海運からの GHG 排出ゼロを目指すことを発表した。国際海運からの GHG 排出削減対策を委ねられた IMO においては，2018 年に「GHG 削減戦略」を採択した。それによれば，2008 年を基準として 2050 年までに GHG 総排出量を 50%以上削減することとし，今世紀中に GHG 排出ゼロを目指すとしていたが，世界的な“2050 年カーボンニュートラル”の動きの中，2023 年 7 月に，MEPC80 において，「2050 年頃までに GHG 排出ゼロ」をはじめとする新たに強化された GHG 削減目標等を盛り込んだ「2023 IMO GHG 削減戦略」が採択された。その概要は次のとおりである。

- (1) 2030 年までに，GHG ゼロエミッション燃料等の使用割合を 5～10%
- (2) 2040 年までに，GHG 排出を 70～80%削減
- (3) 2050 年頃までに GHG 排出ゼロ

また，IEA（国際エネルギー機関：International Energy Agency）によると 2050 年におけるエネルギー消費の見通しによれば，海運セクターにおいては水素，アンモニアおよびバイオ燃料が有力視されると分析されている。

本研究では，GHG 排出ゼロを目的として，動植物油燃料を船用小型高速ディーゼルエンジンに使用して，水を混合した場合の燃焼特性を明らかにした。さらに，アンモニア水混合燃料を用いて同様な実験を行い，これらの結果を解析した。

参考文献

- 1) 平田宏一，仁木洋一，船用 4 ストロークディーゼルエンジンにおける SCR 研究, JIME, 46-6(2011), 817-824.
- 2) Takahiro Fujibayashi, Shinji Baba, Hironaka Tanaka, Development of Marine SCR System for Large Two-stroke Diesel Engines Complying with IMO NO_x Tier III, CIMAC Congress Shanghai, Paper No.29, 2013.
- 3) Niko Soikkeli Marko Lehtikainen, Kaj-Olof Ronnback, Design aspects of SCR systems

- for HFO fired marine diesel engines, CIMAC Congress Shanghai, Paper No.179, 2013.
- 4) Petra Steffe Kathrin Liepert, Richard Losher, Ingo Bader, High Performance Solutions for IMO TIER III - System Integration of Engine and Aftertreatment Technologies as Element of Success, CIMAC Congress Shanghai, Paper No.212, 2013.
- 5) Johnny Briggs, Joseph McCarney, Field experience of Marine SCR, CIMAC Congress Shanghai, Paper No.220, 2013.
- 6) 馬場真二, 中尾 徹, 船用大型 2 サイクル機関での SCR による排ガス対策, JIME, 46-6(2011), 825-830.
- 7) Toshinori Shirai, Sumito Yokobe, Shoichi Ibaragi, EGR system Development on MES Test engine, 4S50ME-T9, CIMAC Congress Shanghai, Paper No.176, 2013.
- 8) Masanori Higashida, Takuroh Nakamura, Ikumi Onishi, Katsuhiko Yoshizawa, Hirotaka Takata, Takamichi Hosono, Newly Developed Combined EGR & WEF System to comply with IMO NOx Regulation Tier 3 for Two-stroke Diesel Engine, CIMAC Congress Shanghai, Paper No.200, 2013.
- 9) Johan Kaltoft Mikkel Preeme, Development of integrated EGR system for two-stroke diesel engines, CIMAC Congress Shanghai, Paper No.219, 2013.
- 10) 前田和幸, 清水 敦, 大野裕一, 山西 大, 新濱智広, 塚本雅弘, 低酸素・高加湿給気による NOx の 80%低減, JIME, 48-3(2013), 378-382.
- 11) Atsushi Shimizu, Hirokazu Ohno, Yosuke Koizumi, Kazuyuki Maeda, Dai Yamanishi, Development of a Nitrogen-enrichment/Humidification Membrane System for NOx Emission Reduction in a Marine Diesel Engine, JIME, 48-3(2013), 397-402.
- 12) 高橋千織, 益田晶子, 中村真由子, 大気環境規制の動向と燃料多様化が規制対策に及ぼす影響 - 燃料転換とブラックカーボン削減対策, JIME, 54-38(2019), 328-333.
- 13) 前田和幸, ゼロエミッションに向けた機関艀装, JIME, 58-3(2023), 289-295.
- 14) 竹島茂樹, 塩出敬二郎, 川上雅由, 伊丹良治, 塚本達郎, IMO2050GHG 削減目標に向けた各シナリオにおける船用燃料, Proceedings of JIME 2023, S77-82.

1.2 本研究の目的と意義

1.2.1 船舶における NOx 規制対応^{1),2)}

酸性雨による被害が問題になっていたノルウェーから船舶起源の NOx 規制に関する提案をきっかけに、2005 年より開始された IMO NOx 1 規制は、大形低速機関における規制値が緩やかなものとなっている。

IMO NOx 1 次規制は、エンジン本体での対応（燃料噴射系および燃焼室の設計と燃焼マッチングによる対応）技術で対応可能なものとしており、大形 2 サイクル低速機関の高温高圧燃焼を基本とした低燃費特性に配慮したものであった。

IMO NOx 2 次規制は、2011 年から実施されており、エンジン本体の改善で対応可能としたものであるが、SFOC（燃料消費率：Specific Fuel Oil Consumption）の悪化を招く恐れがある。このため、経済面や GHG 排出量を低減するために、SFOC の改善が解決すべき課題である。

NOx 3 次規制は、2016 年から実施されており、エンジン本体の改善で対応することは困難である。この規制には SCR、EGR、ORM などの技術を用いることで対応することができるが、解決すべき課題が、以下の様にある。SCR は排ガス温度が高温である必要やアンモニア過多によるアンモニアスリップ（アンモニアリーク）現象に注意を要する。また、還元剤である尿素水の確保やランニングコストを要する。EGR はスクラバー（排ガス洗浄装置）から排出される処理水問題や SFOC の悪化に注意を要する。ORM は、空気のみを対象とする安全・安心な技術であるため注目すべき技術であるが、膜の信頼性と耐久性が未だ確立されていない。

このように、IMO NOx 2 次規制・NOx 3 次規制に対応した技術が開発されているが、それぞれに解決すべき課題が残っている。

これに対して、本研究では、NOx 2 次規制対応技術としての課題に対しては、SFOC を悪化させることなく NOx を低減することを目的として、水混合燃料を用いてエンジン性能と排ガスに及ぼす影響を以下の実験で明らかにした。

(1) 燃料噴射時期をクランク角度 1～3 度進めることによる NOx 排出量と SFOC

のトレードオフの確認.

- (2) 燃料噴射時期を変化させた場合の水混合割合の変化により, NO_x と SFOC のトレードオフに及ぼす水混合燃料の影響を評価.
- (3) 高精度 PM 計測システムを用いて, 粒子状物質 (PM) 排出に及ぼす水混合燃料の影響と PM 中の BC 割合の評価.
- (4) 各実験から得られたシリンダー内圧力と燃料噴射管圧力を用いて燃焼解析を行い, 着火時期, 最高圧力とその時期, 熱発生率, 燃焼速度, 燃焼割合を明らかにする.

次に, NO_x 3 次規制対応技術として, SFOC の悪化を抑えて NO_x を IMO 3 次規制値まで低減させる技術を確立することを目的として, まず, ORM を用いて給気中の酸素濃度を 21~17% に変化させた時の, エンジン性能の変化と排ガス特性を明らかにした. 次にこの結果を解析することにより, ORM による NO_x 低減技術の有用性と限界を明らかにした. 更に燃料に水を混合した水混合燃料 (WMF : Water Mixed Fuel) による実験と, ORM と水混合燃料を組み合わせた実験を行うとともにその結果を解析した. また, ORM と水混合燃料を併用は, 今後期待できる NO_x 低減技術であるが, 運航者の立場から実用化のために ORM と水混合燃料の併用に課せられた課題について示した.

1.2.2 船舶における BC 規制対応³⁾

IMO における排ガス規制のうち, SO_x および PM については, 燃料油中の硫黄分含有量を規制することを基本としている. 船用燃料油中の硫黄含有量を規制することで PM 中に占めるサルフェート分 (硫酸化合物) が減少するため PM が低減できる. PM 中の BC については, 「北極圏における船舶からのブラックカーボン排出削減」に関する問題がノルウェー, スウェーデン, 米国から共同提案され, IMO では, 北極海航路における BC の規制が検討されているが, 未だ BC の計測方法が定められていないため, 北極海を航行予定の船舶における BC の排出実態も明らかにされていない状態である.

このような背景から, 近い将来, BC の計測方法が定められ, 北極海航路における BC 排出削減に対する規制が実施されることが予測される. このため, 船用デ

ディーゼル機関から排出される BC の低減技術の開発を行う必要がある。

本研究では、船用ディーゼルエンジンから排出される BC を可能な限り低減することを目的として、下記の要素を備えた“船用ディーゼル機関の BC ゼロシステム”を開発するとともに、船用ディーゼルエンジン（214kW/3101min⁻¹）を用いた実験において、本システムの低減効果を検証した。

- (1) 燃焼初期の燃焼室内での BC の発生を低減するため、燃料に水と触媒を添加する。
- (2) 排ガス中に含まれる BC を最大限除去するため、排気ラインに DPF（Diesel Particulate Filter）を設置する。
- (3) DPF に捕集された BC を除去するため、エンジンと DPF の間にバーナーを設置する。
- (4) DPF の燃焼過程で発生する灰分（Ash）を除去するため、DPF に圧縮空気を利用した洗浄装置を設置する。

1.2.3 船舶における GHG 排出規制対応^{4),5)}

国際海運からの GHG 排出削減対策を委ねられた IMO が、2018 年に「GHG 削減戦略」を採択されたことをきっかけに、2021 年に日本政府および海運業界においては、2050 年までに国際海運からの GHG 排出ゼロを目指すとしている。IMO においては、「2023 IMO GHG 削減戦略」が採択されたことを示した。また、IEA による 2050 年におけるエネルギー消費の見通しによれば、海運セクターにおいてはバイオ燃料、アンモニアおよび水素が有力視されると分析されている。

本研究では、将来有力視されているバイオ燃料とアンモニア燃料に着目して、次の様な実験を行った。

バイオ燃料は、再生可能な植物や動物などの生物体由来のエネルギーを利用する燃料である。バイオ燃料である廃食油を使用するためには、次の 3 つの方法がある。①FAME（脂肪酸メチルエステル：Fatty Acid Methyl Ester）原料としてメチルエステル化処理によって製造する方法、②HVO（水素化処理油：Hydrotreated Vegetable Oil）水素化処理を行って製造する方法、③SVO（粗植物油：Straight Vegetable Oil）化学処理をせず直接利用する方法がある。①、②の手法で

は、燃料を生成するために多くのエネルギーの必要や高いコストなど解決すべき課題が多くある。本研究では、GHG 排出ゼロを目指して、バイオ燃料を用いた実験を次の様に行った。まず、③の様に化学処理をせず直接利用する方法を用いて、出来るだけ小さいエネルギーと低コストにより燃料を生成した植物油燃料を用いた実験を行った。次に、動物油を植物油と同様な手法で生成して同様の実験を行った。実験は、動植物油を燃料として船用小型高速機関で運転した時の指圧線図、燃料噴射管内圧力、燃料消費量などのエンジン性能と、排ガス中に含まれる NO_x, CO 成分などを分析した。さらに、水を混合して同様な実験を行い、水混合植物油の燃焼特性を明らかにした。

GHG 排出ゼロを目指して、アンモニア燃料を用いた実験は、次の様に行った。アンモニアは、炭素を含まないため燃焼しても CO₂ を排出しないゼロエミッション燃料であるが、着火温度が 631℃と高く難燃性である。本研究では、アンモニア燃料に関する実験において、アンモニアの燃焼には、アンモニア水と燃料を混合させたアンモニア水混合燃料を使用して、小型高速機関の負荷率を 50%に設定し、軽油にアンモニア水を 15%, 25%, 35%混合した燃料を用いた実験を行い、燃焼条件が厳しい小型高速機関においてアンモニアが良好に燃焼することを確認した。また、これらの結果を解析するとともに、その特性を活用した小型高速機関におけるアンモニアの燃焼システムを提案した。本システムは、排気系統に SCR を設置することにより、Fuel NO_x を未燃アンモニアによって低減することが可能となる。

1.2.4 船舶における NO_x, BC 対応技術の実用化⁷⁾

水混合燃料技術を用いることにより、NO_x が低減できる。これは、水が蒸発する際の気化熱により着火遅れ期間が長くなるとともに、比熱の増加による燃焼温度の低下するためである。また、一般に、負荷率一定において燃料に水を混合しても一回の燃焼における燃料の噴射量はほぼ一定であるが、水の混合割合に比例して水混合燃料の噴射量が増加し、噴霧への導入空気量が増加するため燃焼が改善される。これにより BC が低減されるとともに SFOC が改善される可能性がある。一般に、船舶に用いられている石油系燃料は、約 86%の炭素分で

構成されているため、SFOC が改善されると GHG も削減される。このように、水混合燃料技術を有効に活用することにより、現在、国際海運に求められている NOx, BC, GHG の低減が可能となる。

これまで、水技術を利用した研究は多く行われているが、ほとんどが研究室レベルであり、実船に搭載して実験を行った研究はあまり行われていない。また、水混合燃料技術を実船に搭載して安全に運用するにあたり、水混合燃料技術が実船に適用するために必要な課題の検討は、ほとんど行われていない。

本研究では、水混合燃料技術を実船に適用する場合に解決すべき課題を次の様に提案した。燃料に水を混合する場合、通常、燃料の貯蔵やエンジンへの供給ラインにおいて燃料と水が分離するのを防止するための添加剤（界面活性剤）を使用するが、混合が不均一であったり、エンジンの停止時やブラックアウト時に燃料供給ラインに水が混合された燃料が残留すると、時間の経過とともに燃料と水が分離して、起動困難やエンジン損傷などのトラブルの原因となる。また、同一の燃料噴射装置を用いた場合、水の混合割合に比例して噴射される燃料の割合が減少するため、最大出力が制限される。

水混合燃料技術を実船に適用することにより、国際海運に求められている NOx, BC の低減に貢献することを目的として、まず、軽油や A 重油および C 重油に水を混合した場合の燃料中における水粒子の挙動を解析した。

次に、この解析結果を基に開発した添加剤を必要としない“水混合燃料生成装置”の概要を示すとともに、この装置を、エンジンの起動時、低負荷運転時、通常運転時、高負荷運転時、およびブラックアウト時にも対応可能にするために、それぞれの運転状態に対応した燃料をエンジンに供給可能な制御装置を増設した“実船対応型水混合燃料供給システム”を開発し、その概要を示した。

更に、このシステムを水産大学校の練習船“天鷹丸”の発電装置に設置し、実船の運航時に必要となる機能の作動確認および水混合燃料を使用した場合の NOx, BC の改善効果を明らかにした。

これまで水混合燃料技術の活用は実験室レベルであったが、本研究において実船に搭載するために必要な起動時、通常運転時、高負荷運転時、およびブラックアウト時に対応するための課題をすべて解決することで、実船における運用が可能であることを明らかにした。さらに、本研究結果から“実船対応型水混合

燃料供給システム”を実船に搭載するために解決すべき今後の課題を示した。

参考文献

- 1) Dai Yamanishi, Kazuyuki Maeda, Tomohisa Dan, Application of a newly developed Water Mixture Fuel generator to IMO regulations. JIME, 53-3(2018), 380-385.
- 2) 前田和幸, 山西 大, 清水 敦, 大野裕一, 小熊淳一, 酸素低減膜と水混合燃料による IMO NO_x 3 次規制対応. JIME, 51-2(2016), 230-237.
- 3) Minoru Tsuda, Kazuyuki Maeda, Dai Yamanishi, Masateru Ishida, Development of Black Carbon Zero System for Marine Diesel Engines, CIMAC Congress Busan, Paper, No.124. 2023.
- 4) 山西 大, 津田 稔, 前田和幸, 段 智久, 水混合動植物性燃料による CO₂・NO_x・BC の同時低減, Proceedings of JIME 2022, 145-146.
- 5) 津田 稔, 山西 大, 石田雅照, 井原 剛, ディーゼルエンジンにおけるアンモニア水混合燃料の燃焼特性評価, Proceedings of JIME 2023, 199-200.
- 6) Kazuyuki Maeda, Junichi Hayashi, Atsushi Shimizu, Hirokazu Ohno, Junichi Oguma, Atushi Sakane, Dai Yamanishi, Development of NO_x Reduction System that Combines an Oxygen Reduction Membrane with Water Mixed Fuel, CIMAC Congress Helsinki, Paper No.176, 2016.

1.3 本論文の構成

本論文は、次に示す8章から構成され、各章のタイトルと構成は、以下に示す。

第1章 序章

第2章 本研究に関するこれまでの研究

IMO による NO_x 規制と SO_x-PM 規制（BC 規制）および GHG 排出規制に対する技術に対して、従来の研究概要と解決すべき課題を述べるとともに、本研究との対比を行い本研究の意義を示す。

第3章 水混合燃料による排気エミッション対応

添加剤を用いずに水混合燃料を生成するシステムの開発を行い、水混合燃料により SFOC が悪化させることなく NO_x と BC の排出の同時低減効果を述べるとともに、水混合燃料が IMO NO_x 2 次規制や IMO BC 規制および IMO GHG 規制に対応した技術であることを示す。

第4章 水混合燃料による IMO NO_x 3 次規制対応

ORM（酸素低減膜）による NO_x 低減技術の有用性と限界を明らかにするとともに、ORM と水混合燃料との組み合わせにより IMO NO_x 3 次規制に対応可能であることを示す。

第5章 水混合燃料による IMO BC 規制対応

DPF と水混合燃料を用いた“船用ディーゼル機関の BC ゼロシステム”の開発について述べるとともに、本システムが IMO BC 規制に対応可能であることを示す。

第6章 水混合燃料による GHG 対応

動植物油を燃料として使用するために、燃焼特性や課題を明らかにするとともに、水混合技術により NO_x を低減できる可能性を示した。次に、アンモニア燃料を使用するために、アンモニア水と燃料を混合させたアンモニア水混合燃

料を使用して、燃焼条件が厳しい小型高速機関においてアンモニアが良好に燃焼することを示した。これらから、水混合燃料用いて動植物油やアンモニアと水混合技術を組み合わせにより“2050 年対応 GHG 削減”に対応可能であることを示す。

第 7 章 水混合燃料技術の実用化

これまで、実験室レベルであった水混合燃料生成装置を実船に搭載するために実船対応型水混合燃料供給システムを開発するとともに、これを実船に搭載して実施した実験結果を示す。

第 8 章 まとめ

第 3 章から 7 章において得られた結論を示す。

第2章 本研究に関するこれまでの研究

2.1 IMO NO_x 規制対応技術

2.1.1 IMO NO_x 規制前（燃焼改善や燃費低減技術）

広瀬ら¹⁾は、船用大型ディーゼル機関におけるエマルジョン燃料による燃費節減と波及効果についての研究をしている。本研究によると、エマルジョン燃料は着実にシリンダ内の燃焼状態を改善しそれによって燃費も低減できたことを明らかにしている。

山本ら²⁾は、水エマルジョン燃料使用実績について運航者の立場から考察している。本研究では、乳化燃料油製造蔵置を練習帆船日本丸の3号発電用原動機（中速船用ディーゼル機関）に取り付けて2000時間余りの本格運転した実船検証を行っている。

以上のように、1990年頃までのIMO NO_x 規制前においては、ディーゼルエンジンやボイラーの燃料に水を添加した水エマルジョン燃料は、主に燃焼改善や燃費低減技術としての研究が行われており、NO_x の低減は主たる目的ではなかった。

参考文献

- 1) 広瀬弓夫, 豊田 済, 松 勇二, エマルジョン燃料による燃費節減と波及効果について -船用大形ディーゼル機関の場合-, MESJ, 19-1(1984), 47-52.
- 2) 山本訓史, 神田一郎, 水エマルジョン燃料油使用実績に関する運航者からの考察, MESJ, 35-1 (2000), 38-45.

2.1.2 IMO NO_x 規制

2.1.2.1 IMO NO_x 1 次規制対応技術

IMO NO_x 1 次規制値は、機関回転数により変化し、大型低速機関における規制値が緩やかなものとなっている。規制値については、規制前レベルの 70%とされ、規制実施時の燃料噴射系および燃焼室の設計と燃焼マッチングによる対応技術で対応可能なものとしており、大形 2 サイクル低速機関の高温高圧燃焼を基本とした低燃費特性に配慮したものであった。それに対して IMO NO_x 1 次規制値に対して次の様な研究が行われている。

近藤¹⁾の中小型機関の排出 NO_x の低減技術とその排出レベルの予測説によると、NO_x 排出は燃費率および黒煙に対してそれぞれにトレードオフの関係にあり、それらの同時低減は非常に困難であり、燃焼室内での NO_x の生成量は、燃焼火炎温度の低下と高温状態の持続時間の短縮により低減でき、具現的には、燃料噴射時期の遅延が現状技術で有効な方策であると述べている。

近藤ら²⁾は、単気筒機関におけるディーゼル NO_x の低減のために、燃焼室形状の影響について研究をしており、従来の浅皿型燃焼室での性能に対し、上記要素の適正な組み合わせにおいて、燃料消費率とスモークの大幅な悪化を伴うことなしに、排出 NO_x (13% O₂ 換算値) を 30%低減できることを示している。

園田ら³⁾は、低速 2 サイクルディーゼル機関の NO_x 排出特性について、次の様にまとめている。①低速機関と高速機関では、NO_x の発生形態には本質的な差はないが、高温での滞留時間が大きく影響している。②掃気温度が高くなると、NO_x は増加する傾向にある。③爆発度が大きくなると NO_x も増加する。④NO_x は 90%負荷近傍で最大値を示す。⑤NO_x 排出量は、燃料噴射ノズルの影響を大きく受ける。⑥低速機関の NO_x は湿度に対して鈍感である。

近藤ら⁴⁾は、NO_x に関する燃焼室形状の影響について研究をしている。本研究によると、大幅に NO_x を低減するには、燃料噴射時期の遅延が有効であると述べている。

以上のように、IMO NO_x 1 次規制は、エンジン本体での対応（燃料噴射系および燃焼室の設計と燃焼マッチングによる対応）技術で対応可能なものとして

おり、大形 2 サイクル低速機関の高温高压燃焼を基本とした低燃費特性に配慮したものであった。

参考文献

- 1) 近藤博美, 中小型機関の排出 NO_x の低減技術とその排出レベルの予測, MESJ, 28-11 (1993), 694-701.
- 2) 近藤博美, 新 隆雄, 弓場友昭, 河野高秀, 単気筒機関におけるディーゼル NO_x の低減 -燃焼室形状の影響-, MESJ, 28-11(1993), 725-734.
- 3) 園田憲一, 山下 尚, 中山信義, 神社洋一, 桜井秀明, 低速 2 サイクルディーゼル機関の NO_x 排出特性, MESJ, 29-6(1994), 422-429.
- 4) 園田憲一, 山下 尚, 中山信義, 神社洋一, 桜井秀明, 単気筒機関におけるディーゼル NO_x の低減-広範囲運転での NO_x に関する燃焼室形状の影響-, MESJ, 29-11(1994), 798-801.

2.1.2.2 IMO NO_x 2 次規制対応技術

IMO NO_x 2 次規制の対応技術として、エンジンの燃焼改善（機関ファインチューニング）や水技術を用いた手法がある。エンジンの燃焼改善では、燃料噴射系の調整や燃料噴射時期の遅延等により NO_x を低減する技術である。水技術とは、一般に水の高い比熱と蒸発時に熱を奪うことによる冷却効果を利用し、燃焼温度を下げ、NO_x 低減をはかる技術とされ、燃料に水を添加する技術は、燃料油に水と界面活性剤を添加し、機械的に攪拌して燃料中に水を分散させて燃料を生成する技術である。

2.1.2.2.1 燃焼改善（機関ファインチューニング）

燃焼改善（機関ファインチューニング）による対応技術については、次のような研究が行われている。一般に水技術に比べて NO_x を低減する事で燃費が悪化する恐れがあり、NO_x 低減効果は、水技術に比べて小さい傾向にある。

池上ら¹⁾は、小型直接噴射式ディーゼル機関において高圧噴射する際に NOx と燃焼騒音の低減を目指して、初期噴射率の抑制および先立ち噴射を行った場合の機関性能および排気特性を調べた。その結果、中・高負荷では初期噴射率を抑制すると、NOx および騒音を低減することができることを明らかにしている。

秋元²⁾は、高速、中速の両者の燃焼現象の相違を考察しながら低 NOx 技術を提案し、研究用単気筒機関を使用して燃料噴射時期遅延により NOx が低減できるが、燃費や排気温度が大幅に増加することを示した。

以上のように、エンジンにおける燃料噴射時期遅延による手法を用いて NOx 2 次規制値に対応できるが、燃費の悪化を招く恐れがある。このため、SFOC を悪化させずに NOx を改善できる技術が必要となる。

2.1.2.2.2 水エマルジョン燃料

三橋ら³⁾は、乳化燃料で燃焼改善が計れる理由として、ディーゼル機関での水の働きは、噴霧エネルギーの増大による空気の巻き込み効果の増大、着火遅れ期間期間中の予混合気の形成、着火後の科学的、物理的作用等が考えている。また、大形ディーゼル機関による性能試験から結局、燃料噴射期間は伸びるが燃焼期間は殆ど伸びておらず、このことが燃料消費率の悪化を押さえている証拠でもあるとしている。

塚本ら⁴⁾は、乳化燃料駆動ディーゼル機関の性能に及ぼす影響の燃料噴霧特性と機関性能の研究を行っている。本研究によると、水・軽油乳化燃料の噴霧特性ならびに噴射特性が機関性能、特に燃料消費率に及ぼす影響について調べた。その結果、乳化燃料は軽油に比べて噴霧特性が悪化するためにもかかわらず燃料消費率および吐煙濃度の低減が得られること、また、乳化燃料の場合には低噴射率・低圧噴射を行う事によって、NOx を大幅に低減し得ると同時に、燃料消費率および吐煙濃度を低減し得るとしている。

張ら⁵⁾は、実際の機関燃焼室内部における乳化燃料と非乳化燃料の燃焼過程の差異を高速度カメラより調査して、次の事を明らかにしている。乳化燃料の着火遅れは非乳化燃料の A 重油より長い。また、乳化燃料の噴射量が増すと着火はやや遅れる。同一噴射時期において、乳化燃料中の A 重油の量を A 重油のみの

場合と同一にした時、A 重油のみの場合に比べて、乳化燃料の残輝の消滅は早く、燃焼期間も短い。乳化燃焼による NOx の減少は、A 重油より乳化燃料の燃焼温度が低く、高温度維持持続時間も短いことによるものとしている。

西川ら⁶⁾は、エマルジョン燃料による NOx、スモークの低減の研究のなかで高温燃焼室とエマルジョン燃料を組み合わせることによって燃料消費率を悪化させずに排気中の NOx、CO、スモーク濃度を同時に大幅低減が可能であると示している。

崔ら⁷⁾は、乳化燃料油の安定性と機関性能および燃焼特に大きな影響を与える因子として乳化燃料油中の水粒子径と水添加率とに注目して、水添加率を多くすると、平均水粒子径が大きくなり、安定性が劣るようになる。また、着火おくれ時間は長くなり、排気ガス温度は下がり、NOx 濃度は低下し、スート質量は低減することを明らかにしている。

三木ら⁸⁾は、大型 2 サイクルディーゼル機関において水エマルジョン燃料を使用して陸上試運転時に種々の NOx 低減試験を実施し、その効果を確認について NOx は 50%の水エマルジョン燃料において 35%低減し、スモークは殆ど変化なく、燃費は約 1%悪化した。Pmax を調整すると、NOx 低減率は若干低くなったが、燃費の変化はほとんどなくなっていることを明らかにしている。

中川ら⁹⁾は、乳化燃料のディーゼル燃焼特性に関する研究を行っている、水添加による単位発熱量当たりの運動量の増加にともない、噴霧内への空気導入率、噴霧内の乱れによる混合能力が増大するため、燃焼性能が向上する。これにより、高温燃焼領域に素早く比較的冷たい空気が導入、混合され、燃焼領域の温度が低くなるため、NOx 生成量を低減できると同時に排炭の生成を抑制できるとしている。

中山ら¹⁰⁾は、水エマルジョン燃料による高速ディーゼル機関を使った A 重油と C 重油水エマルジョン燃料の実験を行い、C 重油の場合も A 重油の場合と同様、水エマルジョン燃料は、NOx 低減対策として極めて有効な手段であることを明らかにしている。

野原ら¹¹⁾は、C 重油に 30%までの水と少量の添加剤を混合したエマルジョン燃料油で実機試験を行い、添加剤を用いたエマルジョン燃料油は極めて良好で、熱を加えても均一が保たれ、実用可能である。NO 排出量は大幅に低減できるこ

とを明らかにしている。

東田ら¹²⁾は、実機サイズの2ストロークディーゼル試験機関用のEGRと水エマルジョン燃料(WEF)システムを新たに開発し、数々の試験を実施している。その結果は、以下の通りである。MDO(船舶用ディーゼルオイル: Marine Diesel Oil)のエマルジョン化に際しては、燃料用油溶性添加剤と水用水溶性添加剤を使用し、純燃料油質量100%に対し合わせて1%~2%を添加している。75%負荷では水添加率の増加に伴いNO_x排出量は単調に減少し、水添加率50%にて約35%のNO_x削減を達成している。また、水添加率40%までは僅かであるが燃費改善があることを明らかにしている。

以上、燃料に水を混合する事でNO_xを燃費が悪化させずにNO_x2次規制まで低減できることが明らかにされている。また、燃焼が改善されるためBCや、スートを低減させる効果があることが示されている。

以上のように、エンジンにおける燃料噴射時期遅延による手法を用いるとIMO NO_x2次規制値に対応できるが、燃費の悪化を招く恐れがある。このため、SFOCを悪化させずにNO_xを改善できる技術の確立が必要とされる課題である。また、燃料に水を混合することで、IMO NO_x2次規制値に対応できるが、一般に、燃料に水を混合して水エマルジョン燃料を生成するためには、添加剤(界面活性剤)を必要とされ、通常、燃料に対する添加剤の割合は約0.5~1%である。また、燃料と水の混合割合に最適な添加剤の量を制御するための装置および添加剤に要する費用(燃料の5~10倍の価格)が必要になる。C重油を燃料とする場合は添加剤を必要としないとされているが、SO_x規制により、燃料油を低硫黄A重油や軽油に切り替えた場合、水エマルジョン燃料は、添加剤なしでは使用できなくなる可能性がある。このため、添加剤を用いることによるNO_xの低減効果に対するコストが大きすぎるため実用化には至っておらず、添加剤を用いずに燃料と水を混合させる技術が必要となる。

本研究では、IMO NO_x2次規制対応技術として、燃費を悪化させることなくNO_xを低減することを目的として、添加剤を用いずに水と混合して生成した水混合燃料を用いてエンジン性能と排ガスに及ぼす影響を明らかにするための実験を行った。

参考文献

- 1) 池上 詢, 中谷好一郎, 山根浩二, 田中章太郎, 先立ち噴射および初期噴射率抑制によるディーゼル燃焼の改善, JSME, B63-613(1997), 3158-3163.
- 2) 秋元成太, 中速ディーゼル機関の低 NO_x 燃焼技術, JIME, 36-5(2001), 340-344.
- 3) 三橋一哉, 高崎 潔, 立石又二, 中川 洋, 安藤耕太郎, 氏家則義, 内燃機関の水分添加燃焼について, MESJ, 13-8 (1978), 601-607.
- 4) 塚原 実, 吉本康文, 楠 洋一, 乳化燃料駆動ディーゼル機関の性能に及ぼす噴射特性の影響(第 2 報 燃料噴霧特性と機関性能), JSME(B), 54-506 (1988), 2955-2960.
- 5) 張 瓏, 松本隆一, 緒方一彦, 大出幸宏, 高速ディーゼル機関における乳化燃料の燃焼, MESJ, 23-4 (1988), 251-256.
- 6) 西川和美, 宮城靖夫, 塩出敬二郎, エマルジョン燃料による NO_x, スモーク低減, MESJ, 26-9 (1991), 550-554.
- 7) 崔 秉喆, 尹在 燮, 古屋 隆, 中島栄市, 岡田 博, 船用重質油エマルジョンのディーゼル機関への応用, MESJ, 26-4 (1991), 143-149.
- 8) 三木好信, 中野克彦, 園田憲一, 中村陽一, 徳岡哲夫, 桜井秀明, 船用大型ディーゼル機関の NO_x 低減策について -実機に於ける効果の拡大-, MESJ, 29-2(1994), 208-214.
- 9) 中川 洋, 森 俊一, 遠藤浩之, 乳化油燃料のディーゼル燃焼特性に関する研究, JSME(B), 61-590 (1995), 3554-3560.
- 10) 中山信義, 山下 尚, 園田憲一, 神社洋一, 桜井秀明, 水エマルジョン燃料の実用化試験研究 -A 重油と C 重油の特性比較試験-, MESJ, 61-590(1995), 661-667.
- 11) 野原廣次, 土田光三, 西田修身, 藤田浩嗣, 原野 亘, 柳 東勲, I Made Ariana, Kartika Kus Hendratna, C 重油・水エマルジョン燃料油による実機試験結果, JIME, 43-6(2008), 759-766.
- 12) 東田正憲, 中村卓朗, 大西郁美, 吉澤克浩, 細野隆道, EGR と水エマルジョン燃料の組み合わせによる NO_x 低減技術, JIME, 48-6(2013), 747-752.

2.1.2.3 IMO NOx.3 次規制対応技術

2.1.2.3.1 SCR（選択式還元触媒：Selective Catalytic Reduction）

平田ら¹⁾は、船用 4 ストロークディーゼルエンジンにおける SCR についての研究を行い、船舶搭載のための技術課題について考察し、SCR システムを船用 4 ストロークディーゼルエンジンに適用する際の主な技術課題をまとめている。また、燃料中の硫黄分による触媒の劣化特性の把握と対策について詳細に調べ、船舶の運航状態に応じた SCR 運転方法や運用上の技術課題を解決する必要があるとしている。

古賀ら²⁾は、SCR 脱硝装置の搭載について機関艀装の観点から今後の課題について検討している。機関艀装の観点からみれば、大掛かりな装置であるため多くの設計変更や工数・物量の増加は不可避であると考えている。また、エンジンケーシングの拡張や還元剤タンクの追加等他のセクションに影響を与えることも多く、船全体での調整が必要となり、さらに還元剤の管理、スートブロー等のメンテナンス作業の増加など、乗組員の負担増は避けられないと示している。

濱岡ら³⁾は、4 ストローク中速ディーゼル機関の IMO NOx 3 次規制対策の一例として、SCR による NOx 低減について次の様の述べている。船用 SCR の技術課題に対する取組みは、実用化に向けては、さらなる装置の小形化、還元剤消費量の抑制や複数台の機関における対応（SCR の稼動）が必要になってくる。

以上、SCR は、IMO NOx 3 次規制に対応した技術であることが示されているが、機器の小型化の課題、アンモニアスリップ（リークアンモニア）の問題や尿素水の確保が必要とされる。

2.1.2.3.2 EGR（排ガス再循環：Exhaust Gas Recirculation）

植田⁴⁾は、三菱 UE 機関における低圧 EGR システムの開発について報告している。スクラバ性能については、本スクラバは小型化に成功しており、エンジン上に搭載することが可能としている。このエンジン搭載型スクラバにおいても同様の除去性能を確認できており、装置が大きくなりがちという低圧 EGR の短所を克服することができることを示している。

平岡⁵⁾は、低圧 EGR による船用低速機関の NOx 低減についての研究をしている。その結果、試験エンジンでの性能検証および実機による実船搭載試験を通じて、IMO NOx 3 規制に適合し、その特性上から他システムに比べて燃費優位性が高く他に類を見ない低圧 EGR システムを開発している。

洵上ら⁶⁾は、IMO NOx 3 次規制対応技術と機関艙装(EGR)について研究をしている。IMO NOx 3 次規制への対応技術としては、高圧、低圧の EGR、SCR が存在しており、これらのシステム中から選定を行い、限られたスペースにプラントとして配置可能とし、メンテナンス性も満足した配置として成立させることが最大の使命であるが、従来の機関室広さでは機関室全体配置を成立させる事が困難となり、場合によっては、パーシャルデッキの追加、バンカータンク配置の変更、機関室長さの延長等、ある程度積み荷を犠牲にし、配置を成立させなければならないケースも想定する必要があると述べている。

東田⁷⁾は、EGR と WEF を組み合わせたエミッション低減システムの就航試験状況について報告をしている。本報告によると排ガススクラバの処理水は、傾斜管沈殿槽と遠心分離機により廃水中に含まれる水中浮遊粒子物質(SS)を除去している。浄化された水は濁度センサ、PAH センサ、pH センサを設けた分析槽に供給され、各計測値が基準値を満足していれば船外排出される構造となっているが、複雑な工程が必要であるとされている。

以上、EGR は、他の技術との組み合わせにより、IMO NOx3 次規制に対応できる技術であることが示されているが、燃費の悪化、スクラバの設置、その処理水問題や設置するための機関室の配置に考慮する必要がある。

2.1.2.3.3 ORM (酸素低減膜 : Oxygen Reduction Membrane)

林⁸⁾は IMO NOx 3 次規制対応技術において酸素低減膜の研究を行っている。本研究によると水エマルジョン燃料との組合せで試験を実施した。一般に、何れの NOx 削減手段でも最も低減が困難とされる 25%負荷での試験結果では、酸素低減膜+エマルジョン燃料に加え、若干、燃料噴射時期を遅延させることで、約 80%の NOx 低減を達成した。高負荷域でも同様の結果が得られており、本方式での IMO NOx 3 次規制が可能であることが確認されている。

前田ら⁹⁾は、膜技術を用いた船用ディーゼル機関用 NOx 低減システムの開発の研究を行っている。本研究によると高速機関に“高加湿システム”を接続して加湿すると、加湿量の増加とともに NOx の値は低下する。EGR や給気加湿は、給気および燃焼ガス中に含まれる二酸化炭素や水蒸気の比熱が空気よりも大きく、燃焼室への燃料による供給熱量に対する燃焼温度の変化が小さくなる（火炎温度の低減）効果と、二酸化炭素や水蒸気などの混入による給気中の酸素濃度の低下による効果によって NOx の生成を抑制する技術である。本装置を用いると、給気中の水蒸気量の増加とともに NOx の値は減少し、加湿量を約 16% にすることにより IMO NOx 3 次規制を満足する値となることを明らかにしている。

以上、ORM は、他の技術と組み合わせることにより IMO NOx 3 次規制を満足することができる技術であることが示されている。

以上のように、SCR は、単体で IMO NOx 3 次規制に対応できる技術であるとされている。しかし、排ガス温度が高温である必要やアンモニア過多によるアンモニアスリップ（リークアンモニア）現象に注意する必要がある。また、還元剤である尿素水が必要なためランニングコストを要する等の課題がある。

EGR は、他の技術との組み合わせにより、IMO NOx 3 次規制に対応できる技術であるとされている。しかし、SFOC の悪化、長期使用における信頼性の懸念、船用大型ディーゼル機関への適用においては、排ガス中の Soot を除去するための高効率のスクラバを必要とするが、排出される汚染水の処理方法についての課題がある。ORM は、他の技術と組み合わせにより IMO NOx 3 次規制に対応できる、また、空気のみを対象とする安全・安心な技術である。しかし、膜の信頼性と耐久性の確立について課題がある。

本研究では、IMO NOx 3 次規制対応技術として、SFOC の悪化を抑えて NOx を IMO 3 次規制値まで低減させる技術を確立することを目的として ORM と水混合燃料を併用することにより、SFOC を悪化させることなく NOx を低減できる可能性があることを示した。

参考文献

- 1) 平田宏一, 仁木洋一, 船用 4 ストロークディーゼルエンジンにおける SCR 研究, JIME, 46-6(2011), 817-824.
- 2) 古賀輝久, 久保貴秋, 福屋 悟, 青坂亮摩, SCR 脱硝装置と機関艀装 -過給機前置きシステムと後置きシステム, JIME, 48-1(2013), 21-23.
- 3) 濱岡俊次, SCR による NO_x 低減 - 4 ストローク中速ディーゼル機関の IMO 3 次規制対応, JIME, 48-6(2013), 753-758.
- 4) 上田哲司, 三菱 UE 機関における低圧 EGR システムの開発, JIME, 50-6(2015), 726-730.
- 5) 平岡直大, 伊藤和久, 上田哲司, 低圧 EGR による船用低速機関の NO_x 低減, JIME, 52-4(2017), 506-509.
- 6) 渕上哲哉, NO_x 三次規制対応技術と機関艀装(EGR), JIME, 53-1(2018), 17-20.
- 7) 東田正憲, 西山徹, 大西郁美, 仲尾進士, EGR と WEF を組み合わせたエミッション低減システムの就航試験状況, JIME, 57-3(2022), 311-314.
- 8) 林 潤一, 規制対応技術開発動向および新しい低減技術-酸素低減膜, JIME, 48-6(2013), 742-746.
- 9) 前田和幸, 清水 敦, 林 潤一, 膜技術を用いた船用ディーゼル機関用 NO_x 低減システムの開発-環境にやさしい NO_x と CO₂ の同時低減技術, JIME, 51-3(2016), 300-306.

2.2 BC 規制対応技術

古堅¹⁾らは, 静電サイクロン方式 DPF による船舶起源 PM の低減の研究を行っている. この静電サイクロン DPF は, 微粒子の PM を高効率で捕集でき, かつ PM 捕集に伴う目詰まりを生じないメンテナンスフリーの装置であるが, 実用化に当たっての主要課題は装置の小型化の課題があるとしている.

平松²⁾は, 船用ディーゼル機関向け電熱ヒータによる自己再生式 DPF の開発の研究を行っている. 本装置は, 例えば 5 ユニット形の場合, 4 つのユニットで PM を捕集し, 同時に残りの 1 ユニットの再生. 再生ユニットを順番にローター

ションすることで DPF の運転を停止することなく連続的に PM の捕集とフィルタの再生を行う構造である。しかし、頻繁に DPF のローテーションが必要なため、連続的に伝熱ヒータを使用することとなり、設置スペースや消費電力の問題があるとされている。

乾ら³⁾は、船用機関における電気集塵式 PM 低減技術の研究を行っている。電気集塵装置は、構造的に目詰まりが起きない（圧力損失が小さい）ため、高風速処理（小型化）が可能、保守が容易といった利点があり、家庭用空気清浄機から産業用排煙浄化プラントまで、幅広く適用されている。船舶で使用する場合は、主に主要機器として湿式スクラバを採用しているが、大量の排ガスを処理するため非常に大型の装置となっており、特に新造船については、IMO NOx 規制への対応も勘案する必要がある。搭載を検討する上で、機器が大形のため機関艙装設計への影響が多くなると述べている。また、スクラバの廃水の処理問題についての課題があるとされている。

以上のように BC 低減技術については、近い将来、北極海航路における BC 排出削減に対する規制が実施されることが予測されることから、船用ディーゼル機関から排出される BC の低減技術の開発について進められている。しかし、機器の大型化であるため装置の小型化の課題、伝熱ヒータを使用する場合は、消費電力問題、スクラバを使用する場合は廃水の処理問題等の解決すべき課題がある。また、機器の大型化のため機関艙装設計の考慮が必要である。

水混合燃料を使用することによりエンジンから排出される PM (BC) が低減し、さらに DPF を使用することにより、限りなく BC の排出を低減できる船用ディーゼル機関の BC ゼロシステムの開発を目的とした研究を行った。

参考文献

- 1) 古堅宗勝, 高橋輝久, 静電サイクロン方式 DPF による船舶起源 PM の低減, JIME, 46-6(2011), 837-842.
- 2) 平松宏一, 船用ディーゼル機関向け伝熱ヒータによる自己再生式 DPF の開発, JIME, 48-4(2013), 502-504.

- 3) 乾 貴誌, 船用機関における電気集塵式 PM 低減技術, JIME, 48-4(2013), 534-539.

2.3 GHG 対応技術

IEA (国際エネルギー機関 : International Energy Agency) が 2021 年 10 月に発行した「Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector 4th revision」による海運部門のエネルギー消費の見通しでは, 水素, アンモニア, バイオ燃料が主体になっていくと分析されている. バイオ燃料を使用すると, NO_x の排出量は, 増加するが, バイオ燃料に水を添加することにより NO_x を低減できる.

2.3.1 バイオ燃料

段ら¹⁾は, 廃食用油のディーゼル機関における燃焼改善を目的として, 低沸点・高セタン価のジメチルエーテル(DME)を廃食用油に混合し, 小型直接噴射式ディーゼル機関を用いて燃焼特性について研究を行い, NO_x の排出量は DME を混合することで低減され, Smoke, PM は DME を混合することで大幅に低減されることを示している.

西尾ら²⁾は, 船用ディーゼル機関における菜種油の燃焼および排ガス特性について研究を行い, メチルエステル化処理をしていない菜種油の船用ディーゼル機関への使用は, 高負荷では NO_x を増加させ, 低負荷では燃焼悪化により燃焼悪化により CO, スモークを増加させる傾向にあることを示している.

西尾ら³⁾は, 船用ディーゼル機関におけるバイオ燃料の燃焼改善に関する研究をしている. 本研究では, 船用中速ディーゼル機関の高負荷状態 (エンジン負荷率 : 75%load) で廃食油と C 重油混合割合変更実験では, 廃食油を C 重油に混合することによって, スモーク, PM, CO の低減が可能としている. さらに, 菜種油を使用して, A 重油混合実験では, 燃焼改善によりスモークおよび CO を低く抑えつつ, NO_x を低減することができる事を示している.

2.3.2 アンモニア燃料

若杉ら⁴⁾は、アンモニア-空気予混合気へのパイロット着火および燃焼過程の可視化計測について研究をしており、軽油パイロット・アンモニア予混合燃焼の主燃焼促進と燃焼期間の短縮が可能なことを明らかにしている。

益田ら⁵⁾は、アンモニア混焼機関の開発について研究をしている。本研究では、急速圧縮装置を用いてパイロット液体燃料によるアンモニア予混合気の着火条件および燃焼特性について明らかにし、単気筒エンジンでその条件を再現することでアンモニア燃料によるエンジン運転の可能性を明らかにしている。

仁木ら⁶⁾は、アンモニア混焼ディーゼル機関における補助燃料の性状に関して補助燃料性状がエンジン性能に及ぼす影響について研究をしており、エンジン試験の結果から補助燃料のセタン指数がエンジンの排気性能や燃焼安定性に及ぼす影響について、セタン指数を指標として比較調査を行い、排ガス成分や燃焼の相違について報告している。

仁木ら⁷⁾は、アンモニア混焼ディーゼル機関における補助燃料の性状に関して補助燃料性状がアンモニア混合気の着火および燃焼に及ぼす影響について研究しており、NH₃ 混焼ディーゼル機関の着火および燃焼過程に及ぼす補助燃料性状の影響を調査し、エンジン試験の結果について考察している。

以上のように、植物性由来のバイオ燃料を使用することで GHG を排出できることが示されているが、バイオ燃料は含酸素燃料であるため NO_x が増加する傾向にある。本研究では、バイオ燃料である動物油燃料と植物油燃料を使用した実験を行い、燃焼特性を明らかにした。さらに植物油燃料に水を混合する事により NO_x の低減効果を示した。

本研究においては、アンモニアの燃焼については、アンモニア水と燃料を混合させたアンモニア水混合燃料を使用して、燃焼条件が厳しい小型高速機関においてアンモニアが良好に燃焼することを確認した。また、その特性を活用した小型高速機関におけるアンモニアの燃焼システムを提案した。

参考文献

- 1) 段 智久, 橋本正孝, 浅野一朗, 中村卓朗, DME 混合によるディーゼル機関での植物性廃食用油の燃焼改善, JIME, 41-3(2006), 438-443.
- 2) 西尾澄人, 徐 芝徳, 井亀 優, 春海一佳, 平田宏一, 岸 武行, 仁木洋一, 福田 哲吾, 永井建夫, 船用ディーゼル機関における菜種油の燃焼及び排ガス特性, JIME, 45-5(2010), 743-749.
- 3) 西尾澄人, 徐 芝徳, 井亀 優, 大橋厚人, 桑原孫四郎, 船用ディーゼル機関におけるバイオ燃料の燃焼改善に関する研究, JIME, 47-2(2012), 249-256.
- 4) 若杉卓也, 鶴 大輔, 田島博士, アンモニア-空気予混合気へのパイロット着火および燃焼過程の可視化計測, Proceedings of JIME 2023, 183-184.
- 5) 益田 豊, 眞島 豊, 相場宏樹, 宮内健太, 廣瀬孝行, アンモニア混焼機関(28ADF)の開発, Proceedings of JIME 2023, 185-186.
- 6) 仁木洋一, 川内智詞, 高橋千織, 橋本直樹, アンモニア混焼ディーゼル機関における補助燃料の性状に関する研究 第一報 補助燃料性状がエンジン性能に及ぼす影響, Proceedings of JIME 2023, 195-196.
- 7) 川内智詞, 仁木洋一, 高橋千織, 橋本直樹, アンモニア混焼ディーゼル機関における補助燃料の性状に関する研究 第二報 補助燃料性状がアンモニア混合気の着火および燃焼に及ぼす影響, Proceedings of JIME 2023, 197-198.

第3章 水混合燃料による排気エミッション対応¹⁾

(IMO NO_x 2次規制, BC 規制, GHG 規制)

3.1 はじめに

IMO（国際海事機関：International Maritime Organization）は、NO_x 規制（2011年から2次規制）、ECA（指定海域：Emission Control Area）（2016年から）、EEDI（新造船のエネルギー効率設計指標：Energy Efficiency Design Index）（2013年から）を定めた規制を発効した。IMOは、燃料油中の硫黄分（2020年～）、ECA規制の拡大（2021年～）、BC（ブラックカーボン：Black Carbon）排出量の制限など、さらなる規制を検討している^{2),3)}。今後設計される船用ディーゼルエンジンの性能は、これらすべての規制を満たす必要がある⁴⁾⁻⁷⁾。そこで本研究では、新たに開発した添加剤を必要としないWMF（水混合燃料：Water-Mixed Fuel）技術を用いることで、NO_x、EEDI、BC排出に関するIMO規制のすべてを満たすことを目的としたシステムを開発した。水混合燃料とエマルジョン燃料の主な違いは、水混合燃料が添加剤を必要としないことである。燃料噴射装置の直前に水混合燃料生成装置を設置することで、水と燃料が分離する時間を与えずに水混合燃料がシリンダー内に噴射される。

本研究の実験では、4ストロークの船用小型高速ディーゼルエンジンを使用した。水混合燃料がエンジン性能と排出ガスに及ぼす影響を明らかにするために、以下の実験を行った。

(1) 燃料噴射時期をクランク角度1～3度進めることによるNO_x排出量とSFOC（燃料消費率：Specific Fuel Oil Consumption）のトレードオフの関係の確認、(2) 燃料噴射時期を変化させた場合の水混合割合の変化により、NO_xとSFOCのトレードオフに及ぼす水混合燃料の影響を評価、(3) PM計測装置を用いて、粒子状物質（PM：Particulate Matter）排出に及ぼす水混合燃料の影響とPM中のBC割合の評価、(4) 各実験から得られたシリンダー内圧力と燃料噴射管圧力を用いて燃焼解析を行い、着火時期、最高圧力とその時期、熱発生率、燃焼速度、燃焼割合を明らかにした。

3.2 実験装置と方法

水混合燃料生成装置は、水産大学校の 4 ストロークエンジンに接続された。表 1 に、供試機関の主要目を表 2 に、本研究で使用した供試燃料の性状を示す。

3.2.1 水混合燃料生成装置

図 1 に、本研究で使用した新開発の水混合燃料生成装置の概略図を示す。この装置は、水を添加剤なしで軽油などの揮発性燃料に混合する。図 1 では、上部の三方弁によりエンジンに供給される燃料を、通常の燃料油または水混合燃料に切換えられる。コントロールパネルで設定された水の割合は、水タンクの出口に設置された流量調整弁によって水の混合割合が調整され燃料に混合される。水混合燃料の流体混合器は駆動部を持たない静止流体ミキサーであり、圧力を使用して、直列に接続されたハニカム構造の要素に不均一な流体を送り込む。この装置は高速で超微粒化が可能で混合物を均一化する。流体混合器で生成された水混合燃料は、既存のエンジンに後付けできる構造の燃料噴射装置に送られる。ミキサーは、添加剤を用いずに 2 種類の水混合燃料を生成できる。(1) 水が粒子群となって油中に分散する「水中油滴型」水混合燃料、(2) 油の粒子群が水中に分散する「油中水滴型」水混合燃料があり、今回実験に使用した水混合燃料は、水の混合割合を質量比で設定した W/O(油中水滴)型である。流体混合器と循環ポンプの間には、水混合燃料回収管と三方弁を介して分離タンクが接続されている。分離タンクは、密度差を利用して水と燃料とを分離させて回収することにより燃料を再利用できる。

Table 1 Test engine specifications

Type	Units	6LY-WST
Number of cylinders	—	6
Cylinder bore	mm	100
Piston stroke	mm	110
Maximum power	kW	214
Maximum speed	min ⁻¹	3,101
Maximum mean effective pressure, P_{me}	MPa	1.59

Table 2 Fuel oil properties

Property	Units	GO(Gas oil)
Density	kg/m ³	828.4
Kinematic viscosity	mm ² /s	3.357
C content	wt. %	86.2
H content	wt. %	13.8
S content	wt. %	0.0007

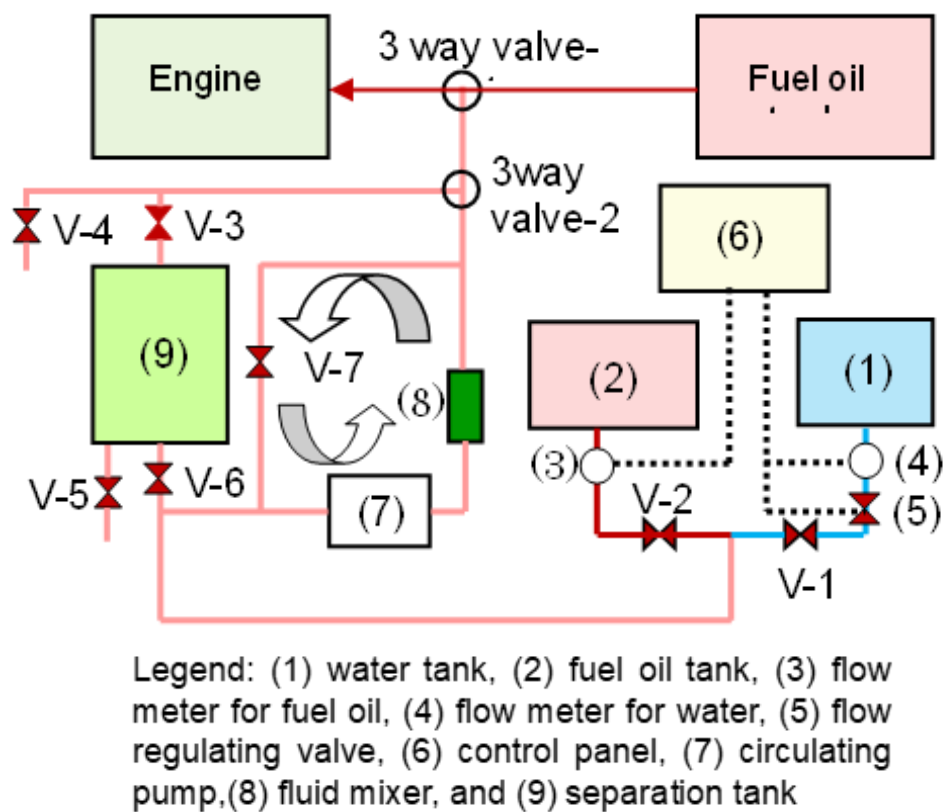


Figure 1 Schematic diagram of newly developed WMF generator

3.2.2 PM 計測装置

図 2 に、PM 計測装置の概略図を示す。採取プローブにより採取された排ガスは、フレキシブルヒータと保温材により加熱・保温された排気トランスファチューブを経て、水平方向から希釈トンネルに入る。エンジンの排気ガスを水平の希釈トンネルに導入するために 2 重管が使用されていて、このチューブの構造と温度により、PM の主成分である潤滑油と燃料油の不燃性成分から生じる SOF（可溶性有機成分：Soluble Organic Fraction）が希釈トンネルの移送ラインに付着しにくくなる。PM は捕集フィルターに捕集され、その成分（BC，SOF，サルフェート）はソックスレー抽出法によって分析した。

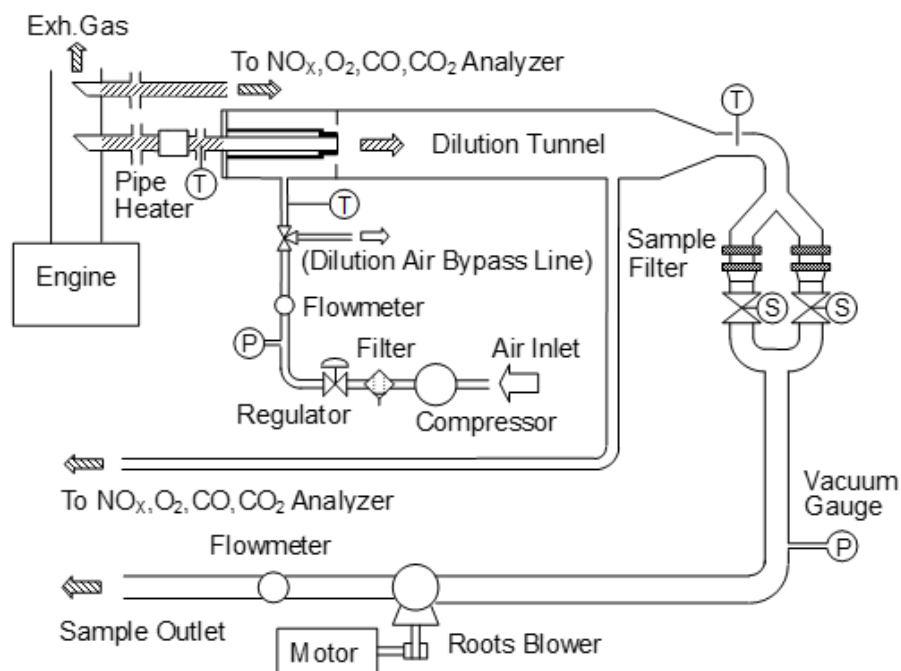


Figure 2 Schematic of the PM measurement system

3.2.3 実験方法

まず，エンジンの負荷率を 75% (2817min^{-1}) に設定し，基準燃料噴射時期を上死点前 7 度に設定した．次に，シリンダー内圧力，燃料噴射管圧力，その他にエンジンデータ，NO_x，CO，CO₂，O₂ 濃度，PM 捕集など，基本的な運転データと排気エミッションを計測した．次に，水混合燃料生成装置を使用して，水と燃料油の混合割合が 11%，25%，43%の水混合燃料をエンジンに供給した．最後に，噴射時期を標準のタイミングから 3 度まで段階的に 1 度ずつ進めて同様な実験を繰り返し行った．

3.3 結果と考察

3.3.1 NO_x-SFOC トレードオフの確認

図 3 に，NO_x と SFOC のトレードオフの特徴を示す．一般に，燃料噴射時期を進めると SFOC は改善されるが，NO_x 排出量は増加する．燃料噴射時期を 3 度まで段階的に 1 度ずつ進めた場合，SFOC は約 3%改善され，CO₂ 排出量は低減したが，NO_x 排出量は約 25%増加した．

図 4 に，燃料噴射時期を変えた場合のシリンダー内圧力と燃料噴射管圧力の変化を示す．燃料噴射時期を進めた場合，最高シリンダー内圧力が上昇した．

図 5 に，燃料噴射時期を変えた場合の熱発生率の変化を示す．逆に，NO_x 排出量を減少させるようにタイミングを設定すると，SFOC は悪化して CO₂ 排出量は増加した．燃料噴射時期を進めると着火時期も進むが，熱発生率のパターンは変わらない．

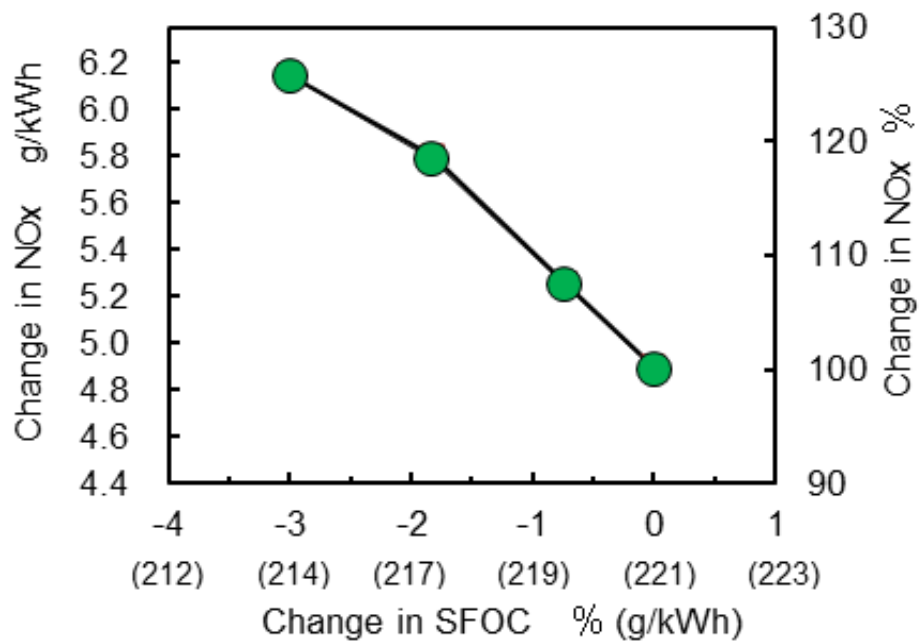


Figure 3 Characteristics of NOx - SFOC trade - off

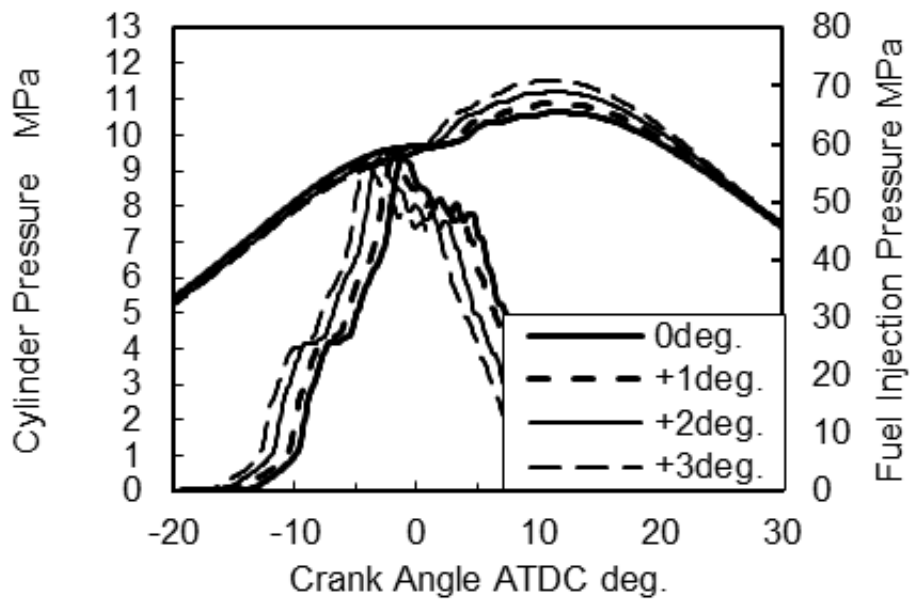


Figure 4 Cylinder and fuel pressures for different fuel injection timings
(ATDC = after TDC)

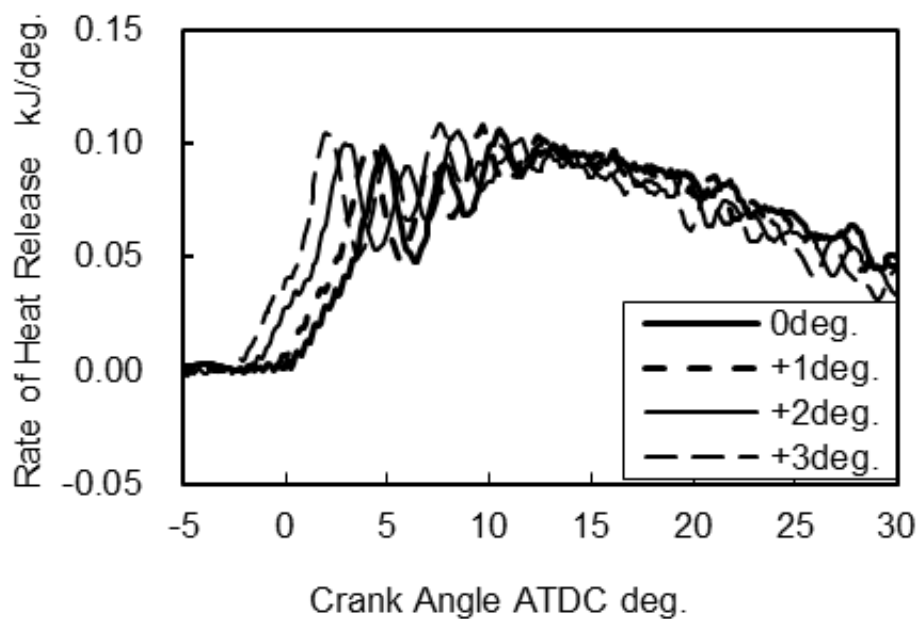
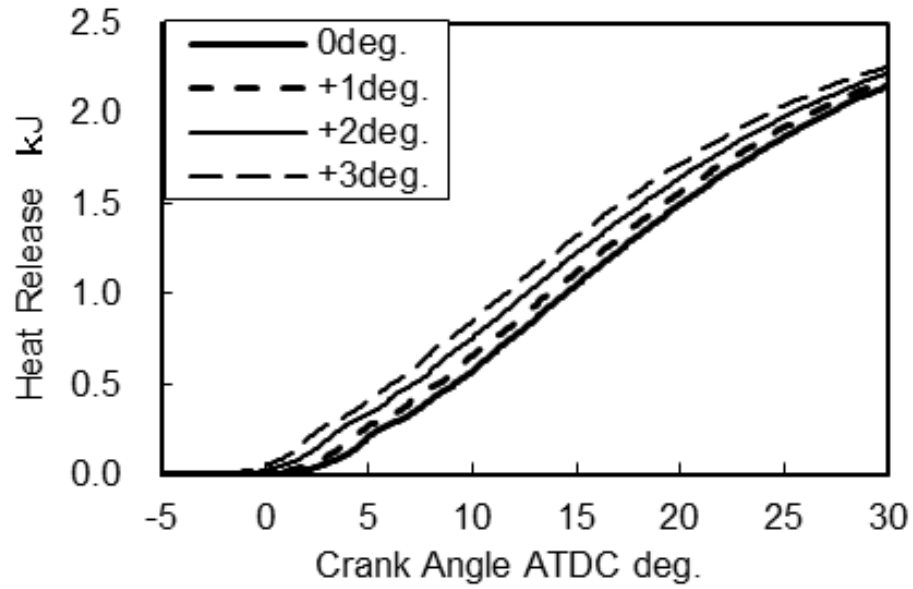


Figure 5 Rate of heat release for different fuel injection timings

図 6 に、燃料噴射時期を変えた場合の熱発生量の変化を示す。熱発生量は、図 5 に示す熱発生率をクランク角度ごとに積分して求めたものである。図 6(b)に示すように、クランク角度 43 度を境に熱発生量は減少している。これ以降は、ベースラインの燃料噴射時期が最も熱発生量が大きくなるが、噴射時期を 3 度進めると、SFOC が改善された。

(a)



(b)

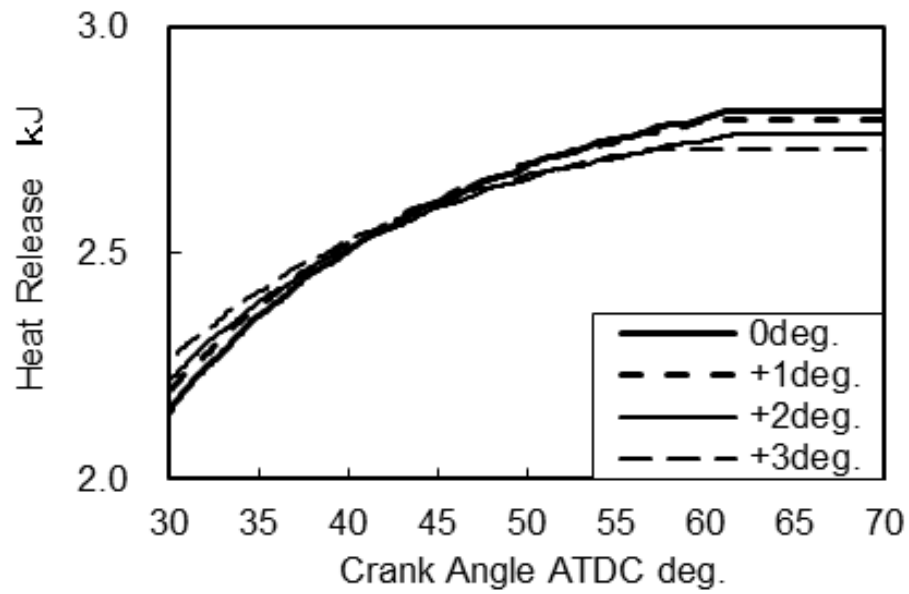


Figure 6 Total heat release over the combustion cycle for different fuel injection timings:
(a) -5-30(deg.) ATDC and (b) 30-70(deg.) ATD

3.3.2 NO_x-SFOC トレードオフに対する水混合燃料の影響

図 7 に、水混合割合を変化させたときの NO_x 排出量と SFOC の変化を示す。通常 NO_x を低減させるためには、SFOC の悪化を招く。燃料に水を混合すると、SFOC が悪化されることなく NO_x が低減できる。これは、水が蒸発する際の気化熱により着火遅れ期間が長くなるとともに、比熱の増加による燃焼温度の低下により NO_x が低減する。また、水の混合割合に比例して水混合燃料の噴射量が増加し、噴霧への導入空気量が増加するため燃焼が改善されるためである。これは、水が蒸発する際の気化熱により着火遅れ期間が長くなるとともに、比熱の増加による燃焼温度の低下により NO_x が低減する。また、水の混合割合に比例して水混合燃料の噴射量が増加し、噴霧への導入空気量が増加するため燃焼が改善されるためである。

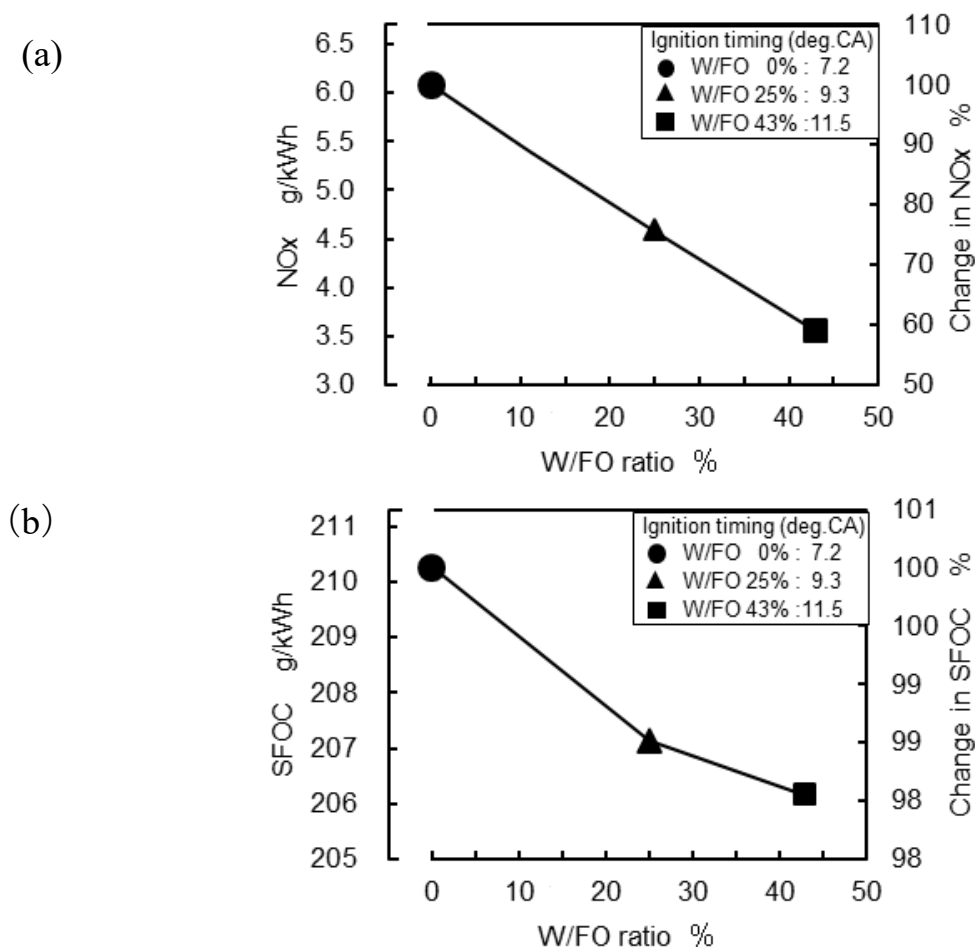


Figure 7 summarizes the variations in NO_x emissions and SFOC at different W/FO ratios

図 8 に、水混合割合を変えた場合のシリンダー内圧力と燃料噴射管圧力の変化を示す。水の割合が増えるにつれて、燃料噴射期間が長くなり、最大噴射管圧力が上昇した。これは、水の割合が増加すると水混合燃料の粘度が増加し、噴射速度が低下するためと考えられる。また、着火遅れ期間が長くなると、最高シリンダー内圧力も上昇する傾向にある。

図 9 に、水混合割合を変えた場合の熱発生率の変化を示す。水の割合が増加するにつれて、予混合燃焼期間の燃焼速度は増加する一方、クランク角度 5～10 度で拡散燃焼段階の燃焼速度は低減し、クランク角度 10 度以降のいわゆる「後燃え」が改善されている。

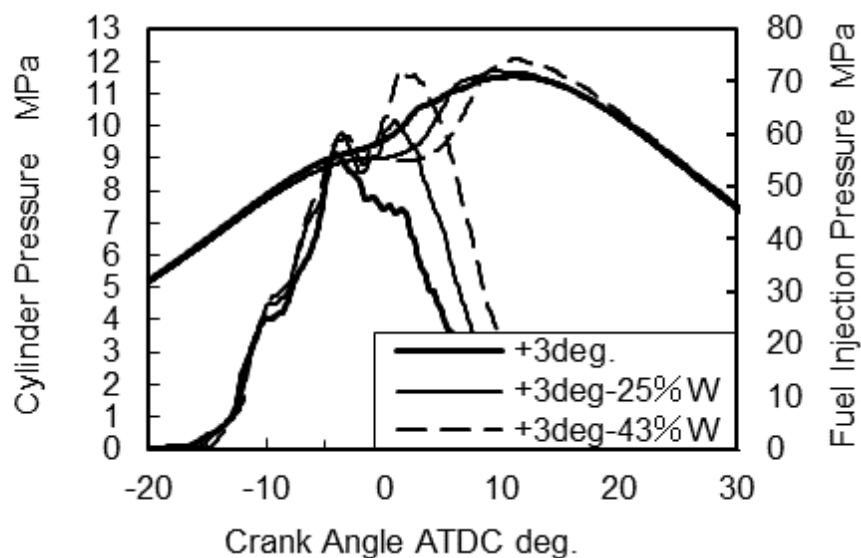


Figure 8 Cylinder and fuel pressures using WMFs with different W/FO ratios

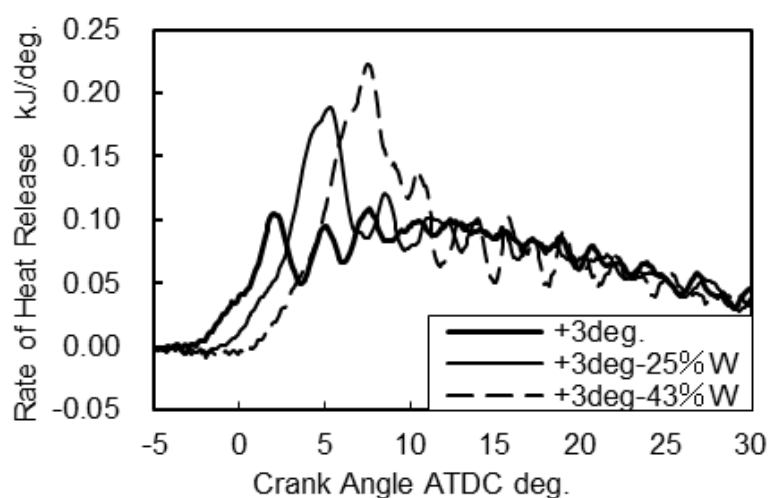


Figure 9 Rate of heat release using WMFs with different W/FO ratios

図 10 に、水混合割合を変えた場合の熱発生量の変化を示す。水混合燃料を使用した場合、図 10(a)に示すように、着火遅れが長いので燃焼開始が遅れる。しかし、その後の急激な燃焼により燃料のみの場合より大きくなり、クランク角度 5～10 度付近からクランク角 30 度付近までこの状態は変わらない。図 10(b)より、クランク角度 45～50 度付近でこの関係が逆転し、燃料に水を混合することで熱発生量が減少し、SFOC の向上が確認できる。

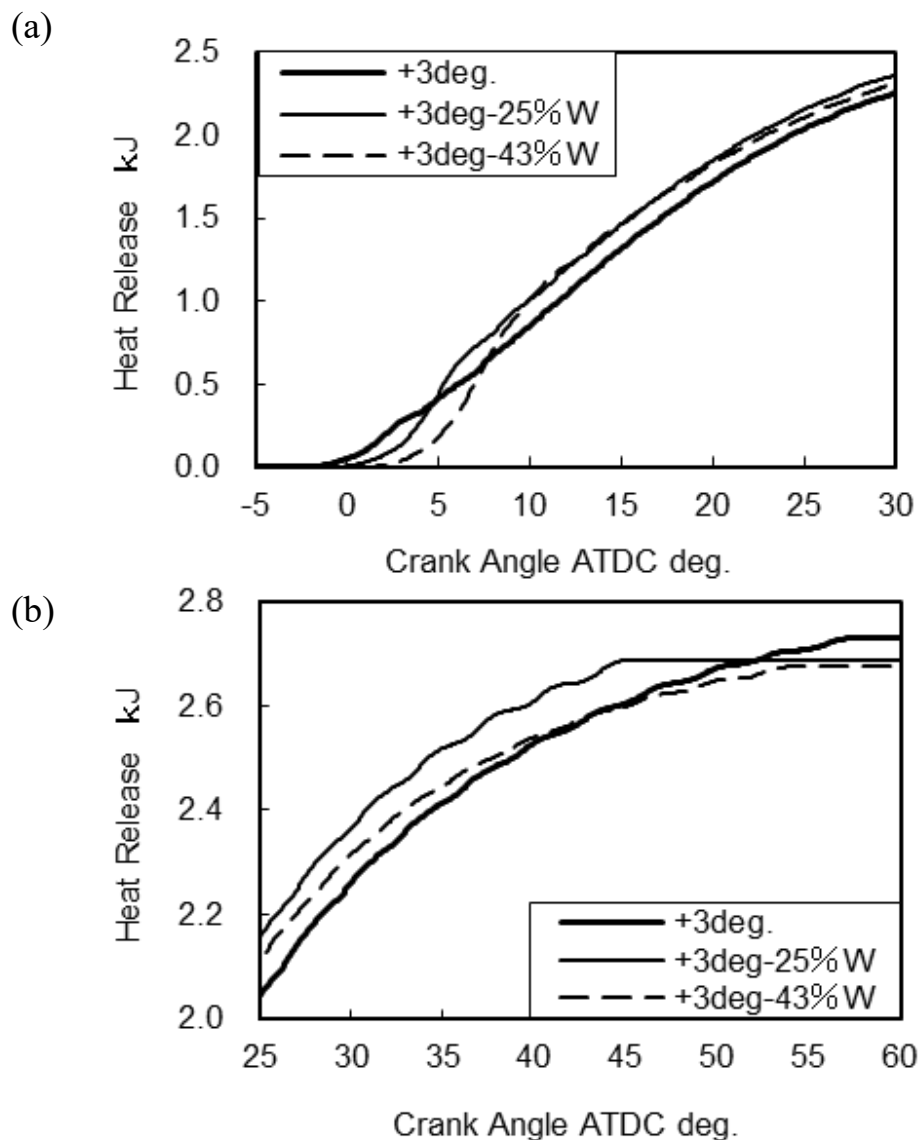


Figure 10 Total heat release over the combustion cycle using WMFs with different W/FO ratios:(a) -5-30(deg.) ATDC and (b) 25-60(deg.) ATDC

以上の結果から、燃料に水を混合すると着火遅れが大きくなり、着火までに噴射する水混合燃料の量が増加することが分かった。その結果、噴射された流体の噴射量に比例して噴霧中に導入される空気が増加するため、燃料に対する空気量が増加する。

さらに、水の混合割合が増えると燃料の割合が減少し、噴霧時の空気と燃料の割合が増えるため、燃焼が改善される。本研究で計算した熱発生量は冷却損失を考慮したものである。燃料に水を混合して使用した場合、燃料噴霧時に導入される空気量が増加し、燃焼時間が短縮されるため、プラスの効果が観察された。また、膨張行程におけるピストンの押し付け力として、燃料中の水蒸気が体積膨張となり、火炎温度の低下による冷却損失が減少した。

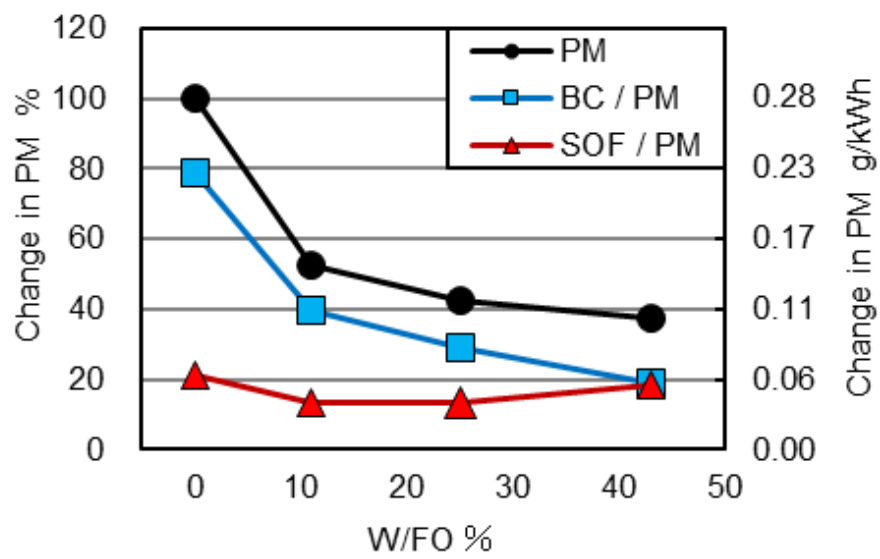
一方、噴射期間が長くなると、水の蒸発による熱損失が大きくなり、マイナスマイナス効果を上回ると SFOC を改善させることができた。NO_x は、水混合燃料の効果が生じた。水の混合割合と噴射時期を最適化することで、プラス効果が水分の蒸発による気化熱と着火遅れ期間の延長により燃焼温度が低下すると低減すると考えられる。

以上の理由から、水混合燃料を使用すると NO_x 排出量と燃料消費量のトレードオフの関係から外れる。

3.3.3 BC 排出量に対する水混合燃料の影響

図 11 に、水混合燃料を採用した場合の BC 排出量の低減効果を示す。図 11(a) は、水混合割合を増加させたときのスートの排出量の減少をまとめたものである。図 11(b)は、PM フィルター色が黒から明るい灰色へと徐々に変化していることから、捕集されたスートの量が減少していることを示している。スートの量は、水混合割合が 25%と 43%では、それぞれ約 60%および 80%に低減した。

(a)



(b)

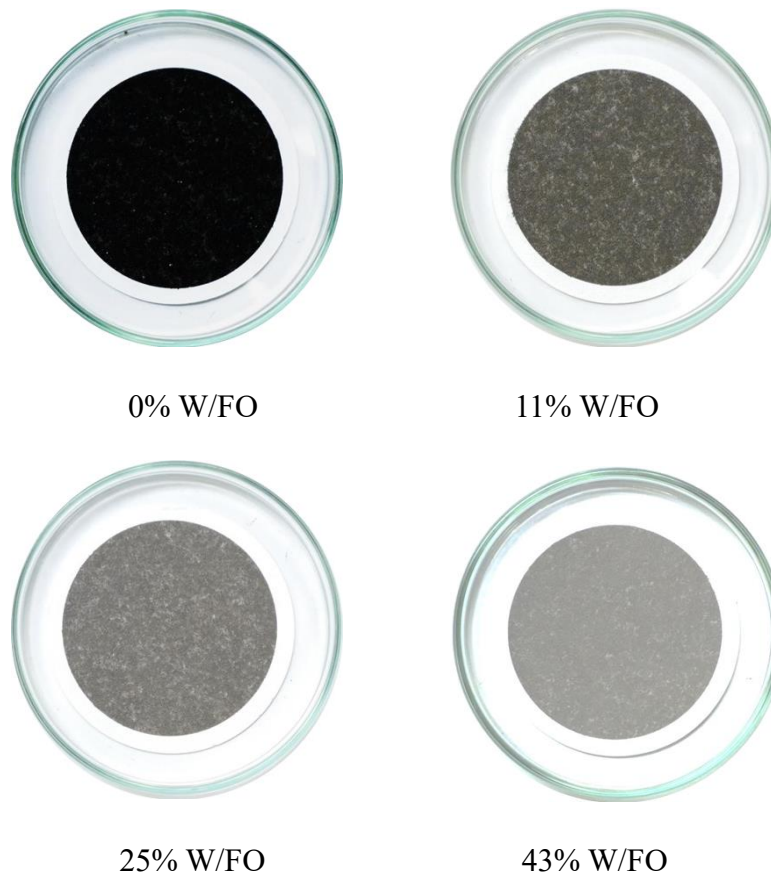
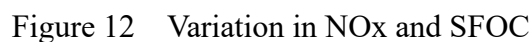


Figure 11 Decrease in BC emissions with increased W/FO ratio:
(a) numerical results and (b) images of BC on filter media

図 12 は、水混合燃料技術による NOx と SFOC の同時低減の可能性を示している。●点は、IMO NOx1 次規制値とした基準点で、この時の NOx を 100%，SFOC の変化割合を 0%とする。NOx を IMO NOx2 次規制値（約 80%）まで低減させると SFOC が 2%以上悪化する（△点）。一方、水混合燃料技術を用いると SFOC が悪化せずに NOx が低減し、水を 43%混合する事で NOx を IMO NOx2 次規制値以上の 60%以下に低減できる（◎点）。この状態で、燃料噴射時期を進めることにより NOx を IMO NOx2 次規制値（80%）にすることにより SFOC を改善することができる（□点）。すなわち、NOx と SFOC の同時低減が可能となる。



3.4 まとめ

本章では、添加剤を用いずに水混合燃料を生成するシステムを開発し、水混合燃料を使用して SFOC を悪化させることなく NO_x と BC の排出を同時に低減することを目的とした実験を実施した。その結果、次の結論を得ることができた。

- (1) 水混合燃料を使用すると、NO_x と燃料消費量のトレードオフの関係は、従来の燃料を使用した場合と異なる。
- (2) 燃料に水を混合することで、燃料消費量を悪化させることなく、NO_x 排出量を確実に低減できる。例えば、20%の水を含む燃料と水を混合させた場合、NO_x 排出量を約 20%低減することができる。
- (3) 燃料に水を混合することで PM と BC の排出は、確実に低減できる。例えば、20%の水を含む水混合燃料は、PM と BC の排出量を従来の燃料の半分以上に低減することができる。

以上の結果より、水混合燃料技術は、ほとんどの IMO 排出規制に対して有効であるといえる。

参考文献

- 1) Dai Yamanishi, Kazuyuki Maeda, Tomohisa Dan, Application of a newly developed Water Mixture Fuel generator to IMO regulations, JIME, 53-3(2018), 380-385.
- 2) Takahiro Fujibayashi, Hitachi Zosen, Shinji Baba, Hironaka Tanaka, Development of Marine SCR System for Large Two-stroke Diesel Engines Complying with IMO NO_x Tier III, CIMAC Congress Shanghai, Paper No.29, 2013.
- 3) Toshinori Shirai, Mitsui Peter Skjoldager, Sumito Yokobe, Shoichi Ibaragi, EGR system Development on MES Test engine 4S50ME-T9, CIMAC Congress Shanghai, Paper No.176, 2013.
- 4) Minoru Tsuda, National, Dai Yamanishi, Kazuyuki Maeda, Development of DPF [Diesel Particulate Filter] with a Regenerator for Marine Diesel Engines, CIMAC Congress Shanghai, Paper No.255, 2013.

- 5) Masanori Higashida, Takuroh Nakamura, Ikumi Onishi, Katsuhiro Yoshizawa, Hirotaka Takata, Takamichi Hosono, Newly Developed Combined EGR & WEF System to comply with IMO NOx Regulation Tier 3 for Two-stroke Diesel Engine, CIMAC Congress Shanghai, Paper No.200, 2013.
- 6) Junichi Hayashi, Atsushi Shimizu, Hirokazu Ohno, Junichi Oguma, Atushi Sakane, Dai Yamanishi, Development of NOx Reduction System that Combines an Oxygen Reduction Membrane With Water Mixed Fuel, CIMAC Congress Shanghai, Paper No.176, 2013.
- 7) Kazuyuki Maeda, Akihiko Azetsu, Hirokazu Ohno, Atsushi Shimizu, Tomohiro Niihama, Masahiro Tsukamoto, Dai Yamanishi, Reduction of NOx Emission by 80% Using the Newly Developed System with a Polymer Membrane in Marine Diesel Engines, CIMAC Congress Shanghai, Paper No.423, 2013.

第4章 水混合燃料によるIMO NO_x 3次規制対応^{1),2)}

4.1 はじめに

2016年から実施されるIMO(国際海事機関:International Maritime Organization)のNO_x 3次規制は、1次規制値の80%減(2次規制値の約75%減)という厳しいものである。2011年実施の2次規制まではエンジン本体の改善等で対応してきたが、IMO NO_x 3次規制に対応するためにはSCR(選択式還元触媒: Selective Catalytic Reduction), EGR(排ガス再循環: Exhaust Gas Recirculation), ORM(酸素低減膜: Oxygen Reduction Membrane)等の低減技術を併用する必要がある。SCRは4ストローク機関において多くの実施例があり、既に確立された技術³⁾⁻⁸⁾であるが、本体および尿素タンクの設置容積等に注意を要する。EGRは2ストローク機関における対応技術とされている⁹⁾⁻¹¹⁾が、排ガスの浄化技術とSFOC(燃料消費率: Specific Fuel Oil Consumption)の悪化に注意を要する。ORMは空気のみを対象とする安全・安心な技術¹²⁾⁻¹³⁾であるが、膜の信頼性と耐久性が未だ確立されていない。

これまでの研究により、ORMを小型高速機関および大型低速機関の実験用機関に接続した実験を行い、いずれの機関においても給気中の酸素濃度を低減することによりORM単独でIMO NO_x 3次規制に対応可能であることを明らかにした¹⁴⁾。また、小型高速機関および大型低速機関を用いた実験によれば、いずれの機関においても燃料に水を混合することにより、ある混合割合まではSFOCを悪化させることなくNO_x低減が可能であるとの報告がある¹⁵⁾⁻¹⁸⁾。

本研究では、SFOCの悪化を抑えてNO_xをIMO 3次規制値まで低減させる技術を確立することを目的として、まず、ORMを用いて給気中の酸素濃度を21～17%に変化させた時の、エンジン性能の変化と排ガス特性を明らかにした。次にこの結果を解析することにより、EGRとORMによるNO_x低減技術の有用性と限界を明らかにした。更に燃料に水を混合したWMF(水混合燃料: Water Mixed Fuel)による実験と、ORMとWMFを組み合わせた実験を行うとともに、その結果を解析した。その結果、給気中の酸素濃度を17%まで低下させることによりIMO NO_x 3次規制に対応できるがSFOCが約3%悪化すること。ORMとWMF

を併用することにより，SFOC を悪化させることなく NO_x を低減できる可能性があることなどを示すとともに，運航者の立場から，ORM と WMF が IMO NO_x 3 次規制対応技術として今後解決すべき課題を示した．

4.2 実験装置と方法

4.2.1 実験装置

図 1 に，実験に用いた酸素濃度低減装置と水混合燃料生成装置を含む実験装置の概要を示す．給気は，空気圧縮機により加圧された後，酸素濃度低減装置に入り，酸素濃度が 21～17%の任意の値に設定される．燃料は，水混合燃料生成装置により燃料に対する水の混合割合が質量割合（mass %）で 0～60%の任意の値に設定される．エンジンは，動力計と運転制御装置により機関速度とトルクが任意の値に設定される．エンジンから出た排ガスは，排ガス分析装置および PM 捕集システムにより NO_x, O₂, CO, CO₂, SO_x 濃度が計測されるとともに PM が捕集される．エンジンには筒内圧力および燃料噴射管内圧力センサー，燃料噴射弁のリフトセンサーおよび各種圧力・温度計が装備されており，これらの値は燃焼解析装置および運転制御盤に入力される．

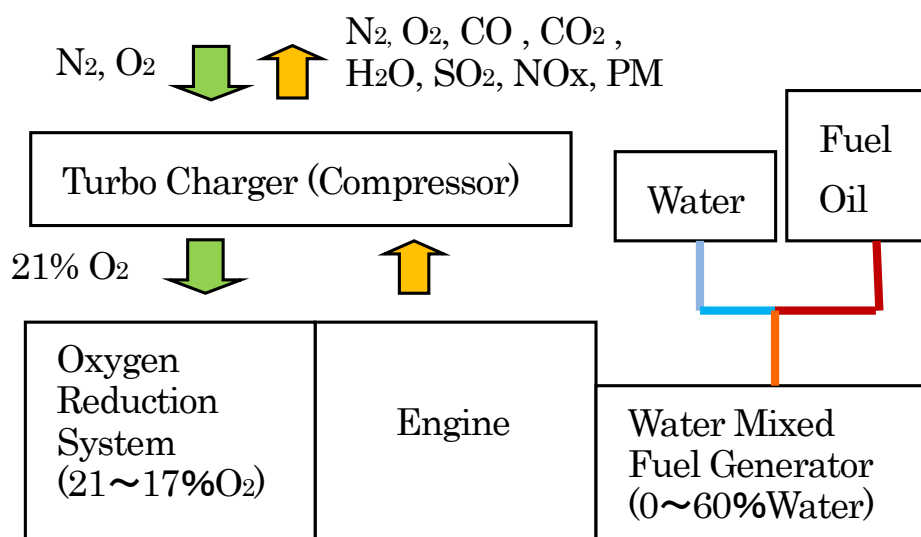


Figure 1 Schematic showing the flow of suction air, exhaust gas, and WMF in the experimental apparatus

図 2 に、酸素濃度低減装置に組み込まれた ORM の作動原理を示す。この膜は通常過給機と燃焼室（給気側）の間に設置され、膜に接するのは空気のみであるため常に清浄な状態で作動できる。図において、加圧された酸素分子と窒素分子からなる給気が膜に接すると、酸素分子が優先的に膜を通過し、燃焼室に至る空気は窒素分子に富んだ成分（低酸素給気）となる。この酸素分子の移動量は時間と膜面積および圧力に比例するため、効果的に低酸素空気を得るためには、形状の工夫等により容積に対する膜面積を大きくするとともに、給気の圧力を高くする必要がある。

図 3 に、水混合燃料生成装置の概要を示す。通常燃料は燃料タンクから直接エンジンに供給される。これとは別に、(1) 水タンク、(2) 水混合燃料用燃料タンク、(3) 水混合燃料用流量計、(4) 水混合燃料に使用する水の流量計、(5) 流量調整弁、(6) 水混合燃料における水の混合割合を任意に設定可能な制御装置、(7) 循環ポンプ、(8) ミキサー、(9) 補助タンクから成る“水混合燃料生成装置”を燃料の供給ラインに接続することにより、任意の水混合割合に設定された水混合燃料がエンジンに供給できる。この“水混合燃料生成装置”の主要部を成す(8) ミキサーは、駆動部を持たない静止型流体混合機で、ハニカム構造のエレメントを直列に連結したユニット内部に複数の流体を加圧通過させ、せん断力を作用させることにより、超微粒化かつ均一化混合を短時間で行うことができる装置である。

表 1 に、2011 年以降に製造された IMO NO_x 2 次規制対応供試機関の主要目を示し、表 2 に、実験に使用した燃料油の性状を示す。

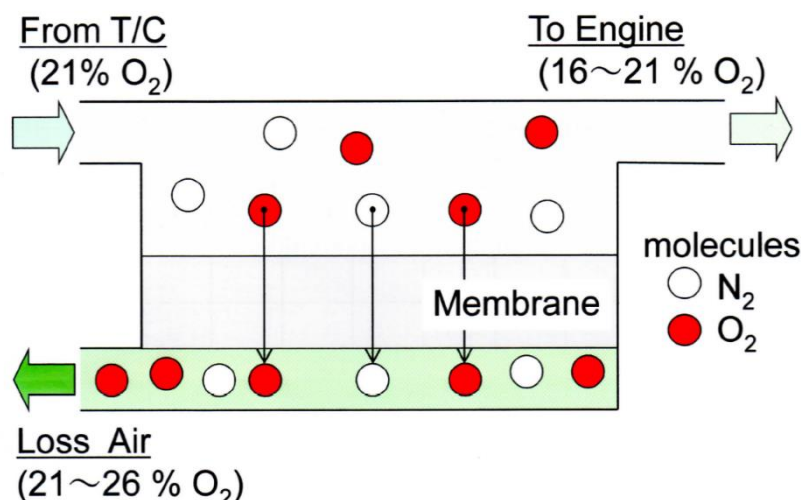
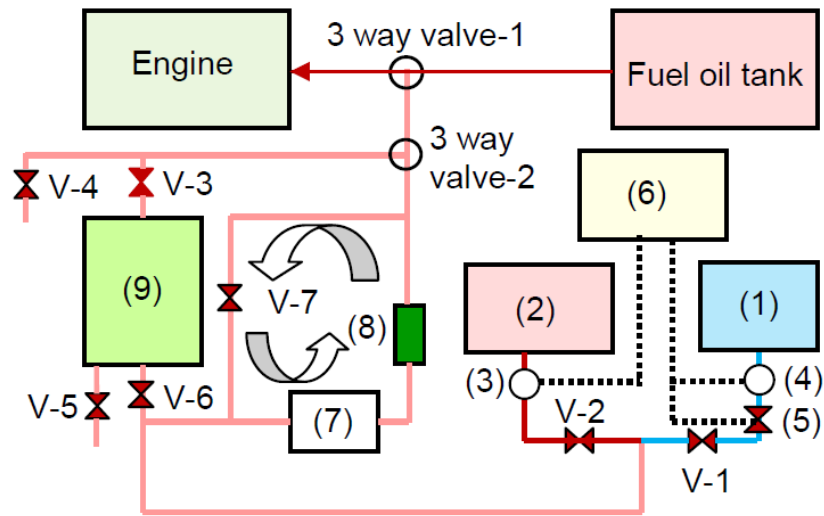


Figure 2 Operational principle of the Oxygen Reduction Membrane



Legend: (1)water tank, (2)fuel oil tank, (3)flow meter for fuel oil, (4)flow meter for water, (5)flow regulating valve, (6)control panel, (7)circulating pump,(8) fluid mixer, and (9)separation tank

Figure 3 Diagram of the WMF generator

Table 1 Test engine specifications

		4 Stroke
Number of Cylinders		6
Cylinder Bore	mm	100
Piston Stroke	mm	110
Max. Power	kW	214
Engine Speed	min ⁻¹	3101
Max. Pme	MPa	1.59
Fuel Type		Gas oil

Table 2 Fuel properties

Fuel Type		Gas oil
Density	kg/m ³	828.4
Kinematic Viscosity	mm ² /s	3.357
C	wt. %	86.2
H	wt. %	13.8
S	wt. %	0.0007
N	wt. %	-

4.2.2 実験と解析方法

実験は、まず ORM を用いて給気中の酸素濃度を 21～17%に変化させた時の、エンジン性能の変化と排ガス特性を明らかにした。次にこの結果を解析することにより、ORM による NO_x 低減技術の有用性と限界を明らかにした。更に ORM によって給気中の酸素濃度を 19%まで低下させ、これに燃料に対する水の質量割合を 11, 25, 43, 60%にした水混合燃料を組み合わせた実験を行うとともに、その結果を解析した。なお、筒内圧力、燃料噴射管内圧力等の燃焼解析に用いたデータは 150 サイクルを平均したものを用いた。また給気圧力は、図 1 に示す圧縮機を用いて、負荷率 75, 50, 25%において、いずれの実験においてもそれぞれ 144 kPa, 72 kPa, 36 kPa 一定とした。

4.3 結果と考察

4.3.1 酸素低減膜による NO_x の低減効果と SFOC の変化

図 4 に、給気中の酸素濃度のみを低減した時の、船用特性上の負荷率 75%における酸素濃度と NO_x の関係を示す。図 2 に示す酸素低減膜の駆動力は、膜の表裏の圧力差であるので、給気中に含まれる酸素濃度を低減するためには、膜の表（正圧）側の圧力を上げるか、膜の裏（負圧）側の圧力を下げる必要がある。本実験においては、圧縮機を用いて膜表側の圧力を上げた場合と、真空ポンプを用いて膜裏側の圧力を下げた場合の両方の実験を行った。図 4 の黒丸●は、圧縮機によって圧力を上げることにより給気中の酸素濃度を下げた場合を示し、白三角△は真空ポンプによって圧力を下げた場合を示す。図に示すように、いずれの場合も酸素濃度の低下とともに NO_x は減少し、酸素濃度を約 17%にすることにより IMO NO_x 3 次規制値を満足する値となっている。

図 5 に、圧縮機によって酸素濃度を低減する方法を用いて、船用特性上の負荷率 25, 50, 75%において同様の実験を行った結果を示す。図において、いずれの負荷率においても酸素濃度の低下とともに NO_x の値は減少し、酸素濃度を

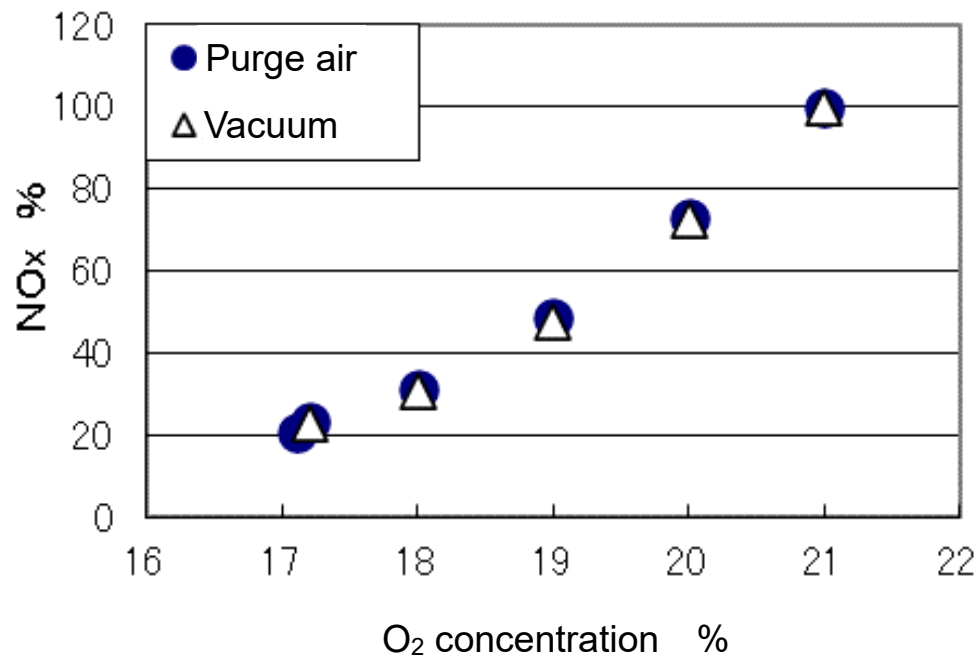


Figure 4 The effect of decompression with a vacuum pump

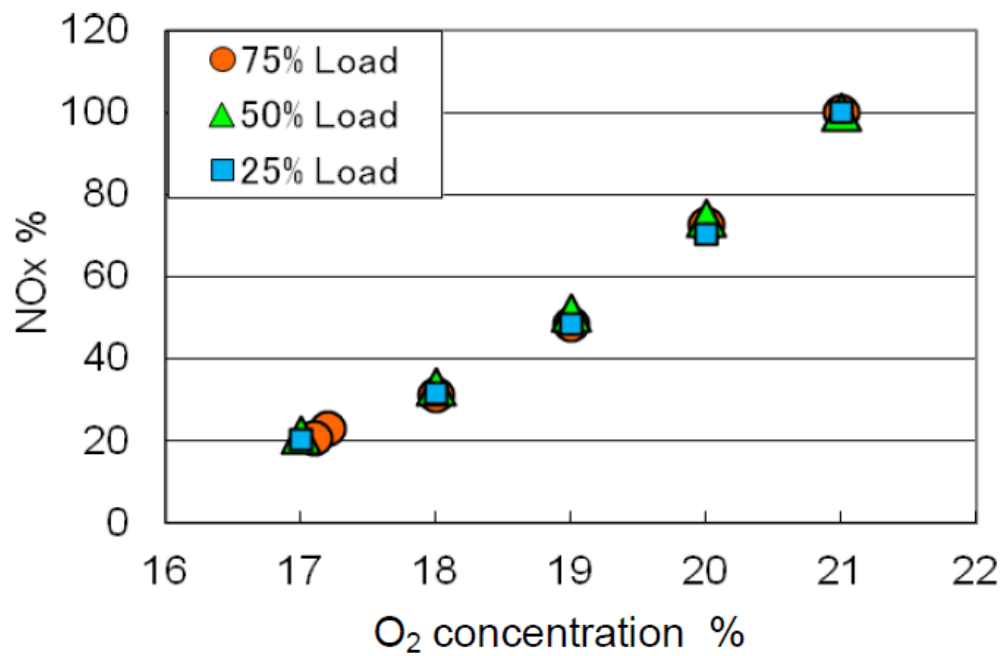


Figure 5 Change in NOx emissions with O₂ concentration

約 17%にすることにより IMO NO_x 3 次規制値を満足する値となっている。定容燃焼器と噴霧燃焼の可視化装置を用いた実験によれば、燃焼用空気の酸素濃度 (21%) を 16%まで下げることにより 2000°C以上の火炎がほとんど観察されなくなり NO_x が激減し、CO₂ 濃度が高いほどこの効果が大きいとされている¹²⁾。本実験においては、吸入空気の酸素濃度のみを低下させているが、EGR は CO₂ を含む低酸素濃度の排ガスを用いるため、酸素濃度に対する NO_x の低減効果は更に大きくなるものと考えられる。

図 6 に、酸素濃度による SFOC の変化を示し、図 7 に、NO_x と SFOC の関係を示す。図 5, 図 6, 図 7 から、(1) 負荷率 75, 50, 25%において、酸素濃度を 21%から 19%まで下げることにより NO_x を約 50%低減できるが、SFOC が約 0.5%悪化すること。(2) 更に酸素濃度を 19%から 17%まで下げることにより NO_x を約 80%低減できるが、SFOC が約 3%悪化すること。(3) NO_x と SFOC はトレードオフの関係にあるがその割合は一定でないことがわかる。酸素低減膜を用いて酸素濃度を下げる場合、その駆動力は膜表裏の圧力差であり、酸素濃度を低くするためには高濃度の酸素分子を含む多量の空気を装置外に放出する必要がある。このため酸素濃度を 19%以下にすることは、SFOC の悪化率が大きくなるとともに給気ロス（外部に放出する空気量：図 2 中の“Loss Air”）も増大し、これを補うために給気量を増大させる必要があり非効率的であると言える。また同様の原理（給気の酸素濃度低下による NO_x 低減）を用いる EGR においても、EGR 率をある値以上にすると急激に SFOC の悪化率が増大するとの報告があり⁹⁾、これに加えスクラバー等の洗浄装置の能力向上が求められる。以上のことから、NO_x 低減を目的として給気中の酸素濃度を下げる場合、最も効果的な酸素濃度の値が存在するものと考えられる。

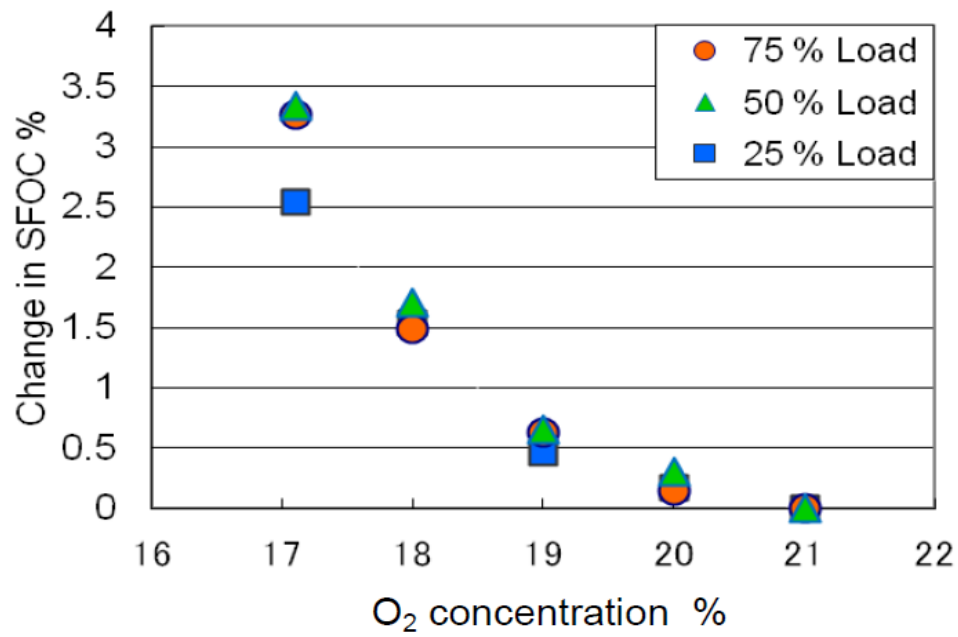


Figure 6 SFOC as a function of O₂ concentration

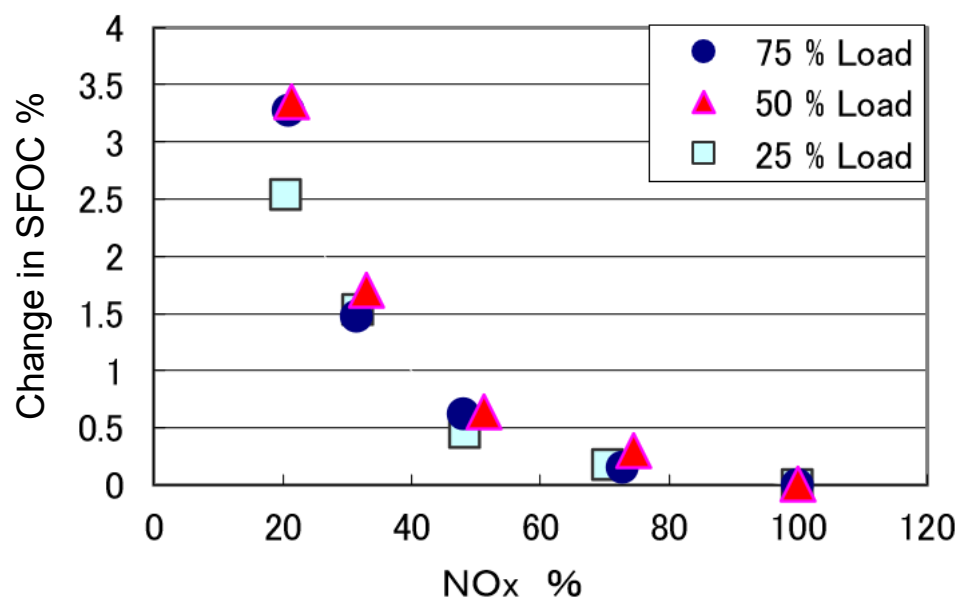


Figure 7 SFOC as a function of W/FO ratio

図 8 に、給気中の酸素濃度のみを低減した場合の指圧線図と燃料噴射管内圧力の変化を示す。図において、酸素濃度を低下させても圧縮圧力および噴射時期と噴射圧力は変化しないが、酸素濃度の低下とともに圧力の上昇割合が小さくなるとともに最高圧力が低下している。また、噴射期間がわずかに長くなっているが、これは図 6, 7 に示す SFOC の悪化を裏付けるものである。

図 9 に、酸素濃度の低下による熱発生率の変化を示す。図において、酸素濃度が低下しても着火時期はほぼ同じにも係らず、着火後の熱発生が緩慢になっている。これは、図 8 に示すように噴射波形は変化しないので、予混合気中に含まれる導入空気量が同じ場合、酸素濃度の低下により、着火遅れ期間中に形成される噴霧中に含まれる酸素の絶対量が減少するため、燃焼が緩慢になったためと考えられる。

図 10 に、酸素濃度の低下による熱発生量の変化を示す。熱発生量とは熱発生率からクランク角度毎の燃料の発熱量の積算値を求めたものである。図 10(a)において、上死点付近においては酸素濃度が低下するほど各クランク角度に対する燃料の熱量積算値は減少している。しかし、図 10(b)に示すように、上死点後 50 度付近からこの関係は逆転し、酸素濃度が低下するほど総熱発生量は多くなり、SFOC の悪化が裏付けられている。

以上の結果から、給気中の酸素濃度を低下させることにより、負荷率 75, 50, 25%において、単独で、NO_x の値を I IMO NO_x 3 次規制値まで低減することができるが、酸素濃度を 19%以下にすると SFOC の悪化率が急激に増加する。これは、給気中の酸素濃度が低下すると着火後の燃焼が緩慢になることに起因しているため、EGR や ORM などのような給気の酸素濃度低下による NO_x 低減技術は、SFOC を悪化させない（燃焼速度の低下を招かない）範囲においては有効であるが、それを超えると非効率的であることがわかる。

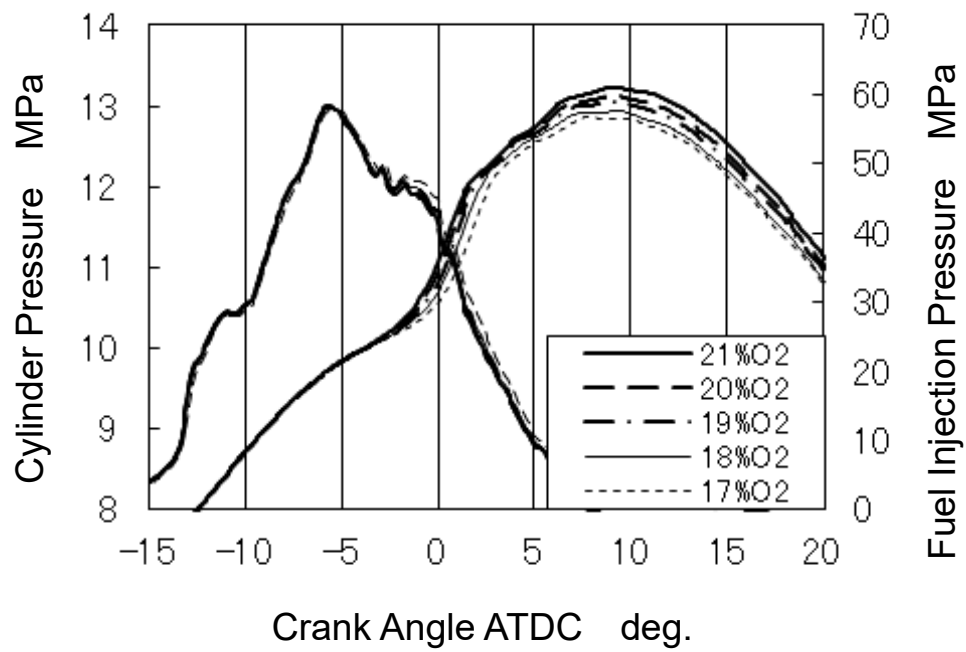


Figure 8 Cylinder and fuel pressures for different O₂ concentration

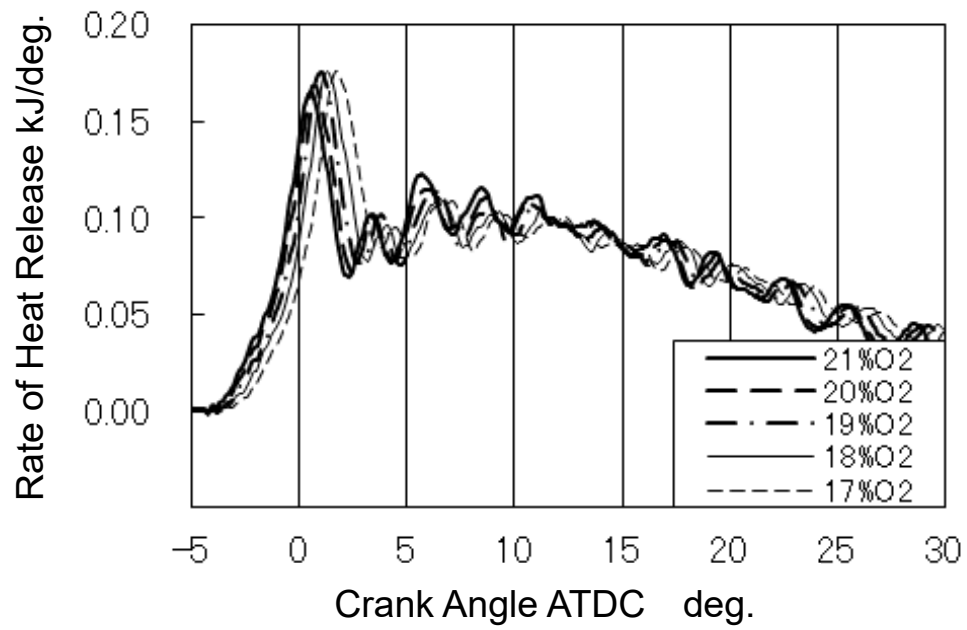


Figure 9 Rate of heat release for different O₂ concentration

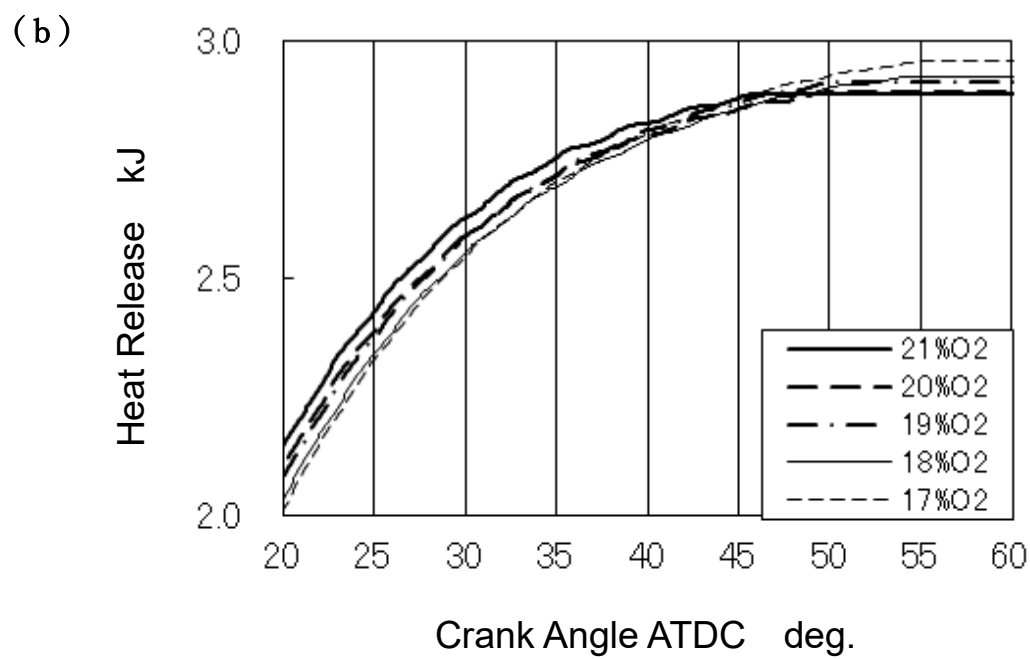
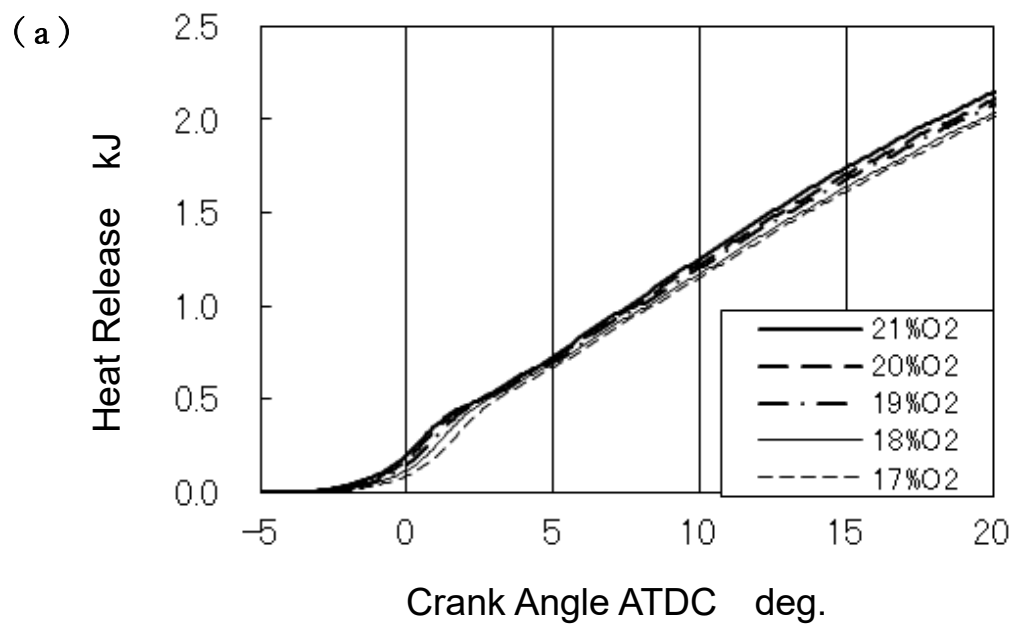


Figure 10 Total heat release over the combustion cycle for different O₂ concentration

4.3.2 水混合燃料による NOx の低減効果

図 11 に、燃料に水を混合した時の水の混合割合による NOx の変化を示す。水の混合割合の増加とともに NOx は減少し、負荷率 50, 75%においては水の混合割合を 60%にすることにより NOx が 40~50%減少している。燃料に水を混合することにより、大型機関においても SFOC の悪化を招くことなく NOx を低減できる可能性がある^{9),17)}が、水の混合割合の増加に伴い燃料ポンプの能力向上が求められるため、本実験のように既存のエンジンを用いる場合の水混合割合は、約 60%が限界となる。また、水混合燃料のみでは NOx を IMO 3 次規制値まで低減することは困難であることがわかる。

4.3.3 酸素低減膜と水混合燃料の組合せによる NOx と SFOC の低減

これまでの実験結果を基に、SFOC を悪化させずに NOx を IMO 3 次規制値まで低減する実験を行った。

図 12 に、ORM により酸素濃度を 21%から 17%まで低下させた場合と、酸素濃度を 19%まで低下させた状態で水の混合割合を 11, 25, 43, 60%に変化させた場合の NOx の変化を示し、図 13 に、この時の SFOC の変化を示す。図 12 において、酸素濃度の低下とともに NOx の値は 19%において約 50%, 17%において約 80%減少し、酸素濃度を 17%にすることにより IMO NOx 3 次規制値を満足する値となっている。しかし、図 13 に示すように、ORM 単独で NOx を IMO 3 次規制値まで低減させた場合、SFOC の悪化を伴う。これに対し、ORM により酸素を 19%まで低減した後水混合燃料を併用すると、水の混合割合が 60%の時、NOx は IMO 3 次規制を満足する値となる。この場合、図 13 に示すように、SFOC は悪化せず逆に改善された状態で NOx を低減することができる。

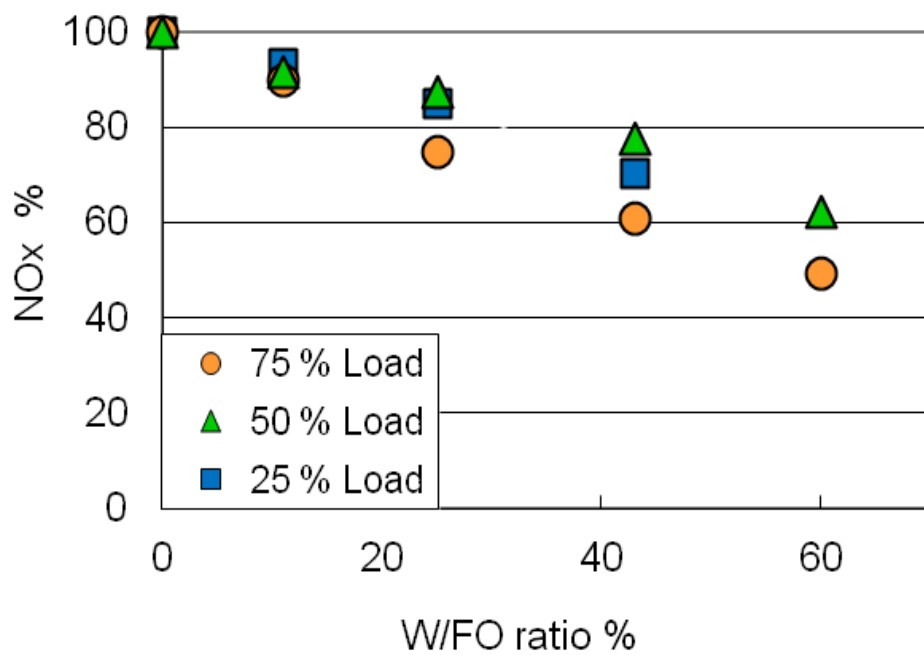


Figure 11 Relationship between W/FO ratio and NOx

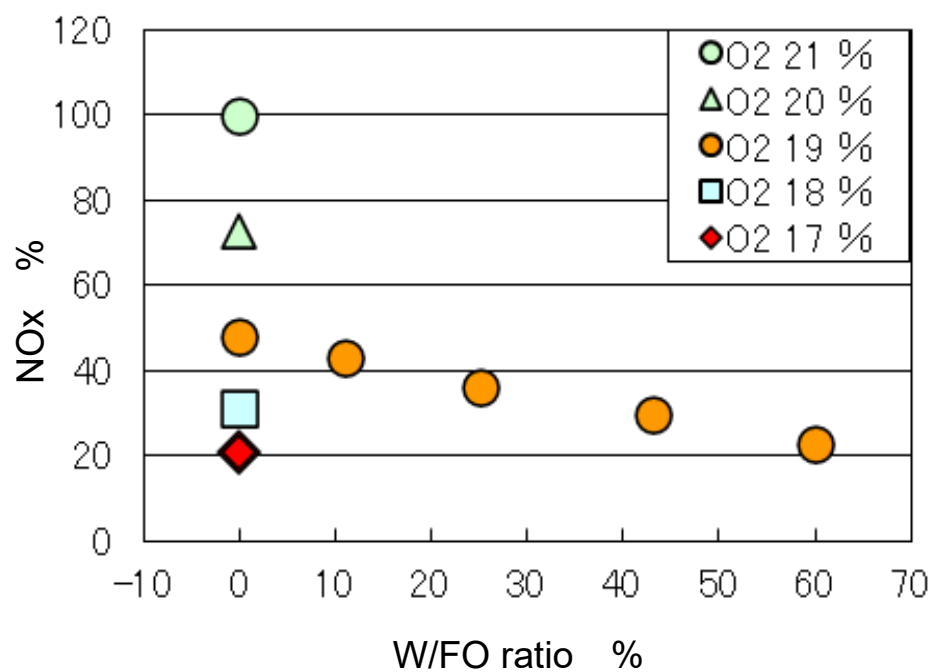


Figure 12 Variations in NOx when employing ORM and WMF

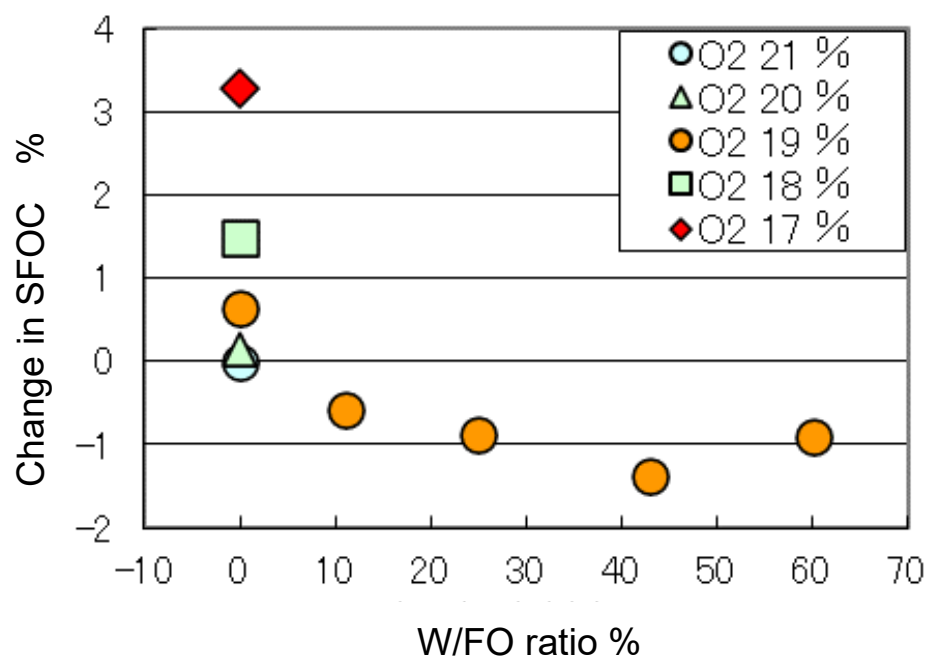


Figure 13 Variations in SFOC when employing ORM and WMF

図 14 に、負荷率 75%における通常の運転状態（図中の 21%O₂-0%W）と ORM により酸素濃度を 19%まで低下させた時の運転状態（19%O₂-0%W）およびこの状態から燃料に混合する水の割合を 25%（19%O₂-25%W）から 60%（19%O₂-60%W）まで変化させた時の指圧線図と燃料噴射管内圧力の変化を示す。図において、酸素濃度を 19%まで低下させても指圧線図と燃料噴射管内圧力はほとんど変化しないが、燃料に水を混合することにより着火遅れが長くなるとともに、噴射管内の最大圧力が高くなり噴射期間も長くなっている。

図 15 に、同様の状態における熱発生率の変化を示す。酸素濃度を 19%に低下しても燃焼が緩慢になるだけで熱発生率のパターンはほとんど変化しないが、燃料に 25%の水を混合することにより予混合燃焼量が急激に増加している。また、この傾向は水の混合割合を増加させることにより更に顕著となっている。これは、次のような理由によるものと考えられる。水の混合割合が増加すると着火遅れ期間が長くなるが、これにより着火するまでに噴射される水混合燃料の量が多くなるとともに、これに比例して噴霧に導入される空気量が増加する。一方、水の混合割合の増加とともに噴射される水混合燃料中に占める燃料の割合は減少する。その結果、水の混合割合の増加とともに、噴霧中に占める燃料に対する空気の割合が増加することにより燃焼が改善されるため、予混合燃焼量が増加する。

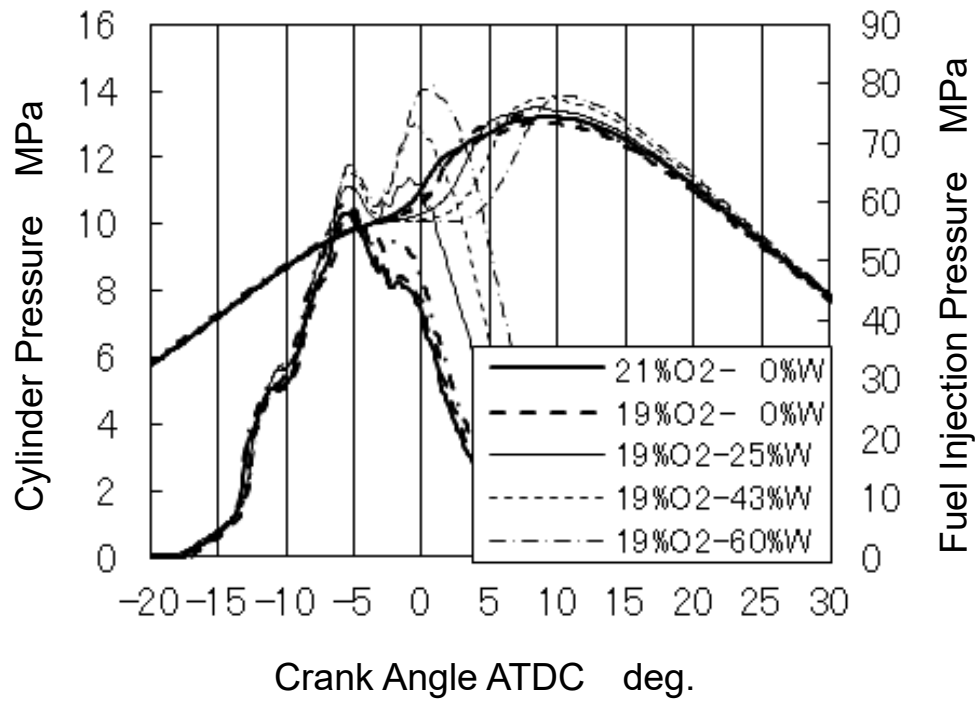


Figure 14 Cylinder and fuel pressures for different W/FO ratios and O₂ concentration

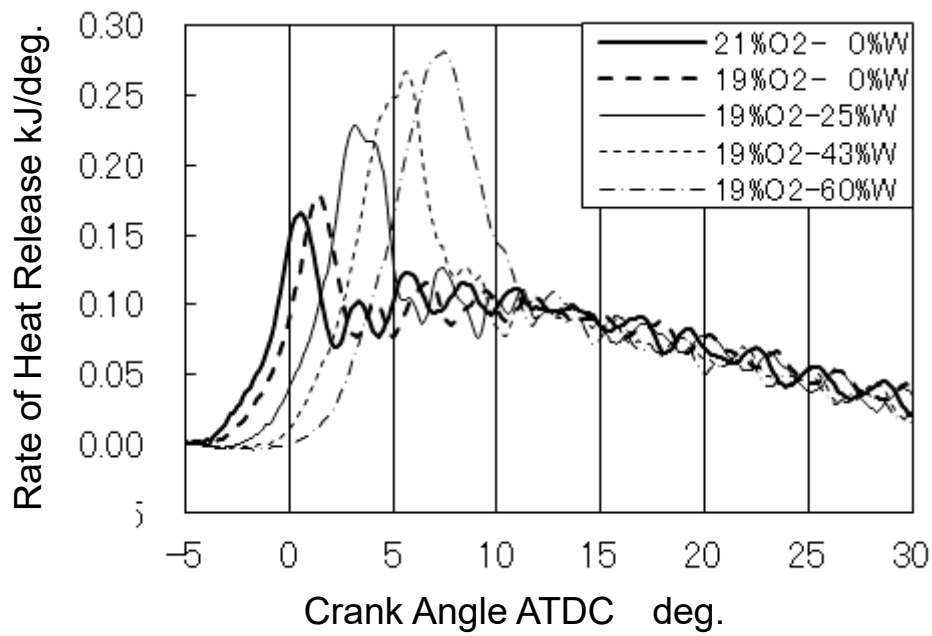


Figure 15 Rate of heat release for different W/FO ratios and O₂ concentration

図 16 に、同様の実験における熱発生量の変化を示す。図 16(a)に示すように、着火遅れが長い分だけ燃焼の開始時期が遅れるが、その後の急激な燃焼により熱発生量の積算値はクランク角度が 5～8 度付近において通常運転時（21%O₂-0%W）を上回り、上死点后 20 度以上までこの状態は変わらない。このため、図 14 に示すように、ピストンが上死点から遠ざかり燃焼室容積が増加しているにも係らず筒内圧力は上昇し、これが仕事に変換されるため SFOC が向上したものと考えられる。また図 16(b)に示すように、上死点后 40 度付近からこの関係は逆転し、燃料に水を混合することにより総熱発生量は減少し、SFOC の改善が裏付けられている。

以上の結果より、給気中の酸素濃度低下により酸素の絶対量が減少しても、水を混合することにより総噴射量が増加するため、それに伴って噴霧に導入される空気の総量が増加し、燃料に対する空気の供給量の増加により燃焼が改善されたものと考えられる。

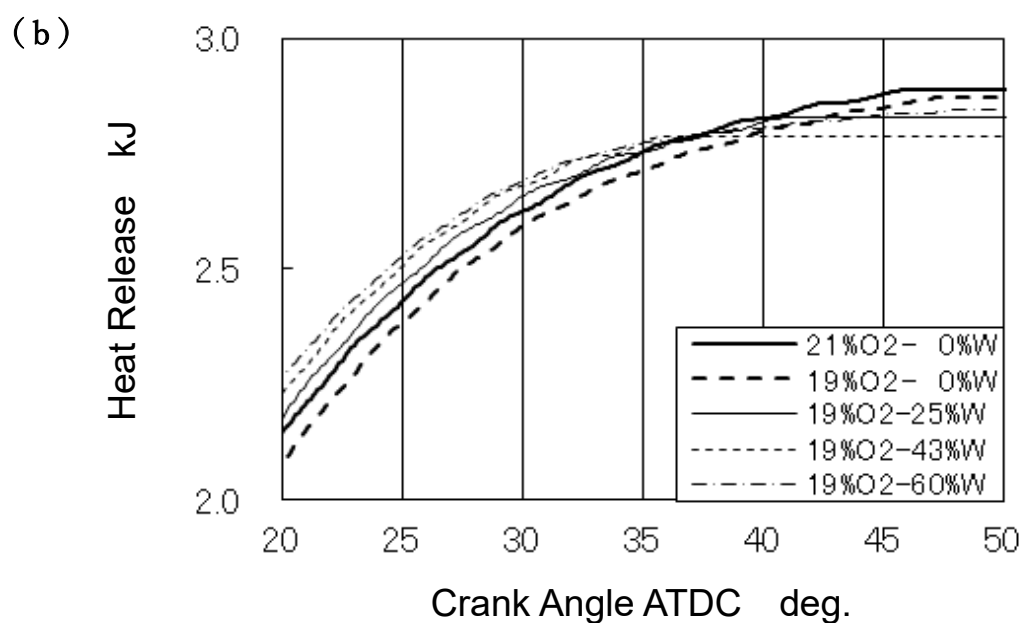
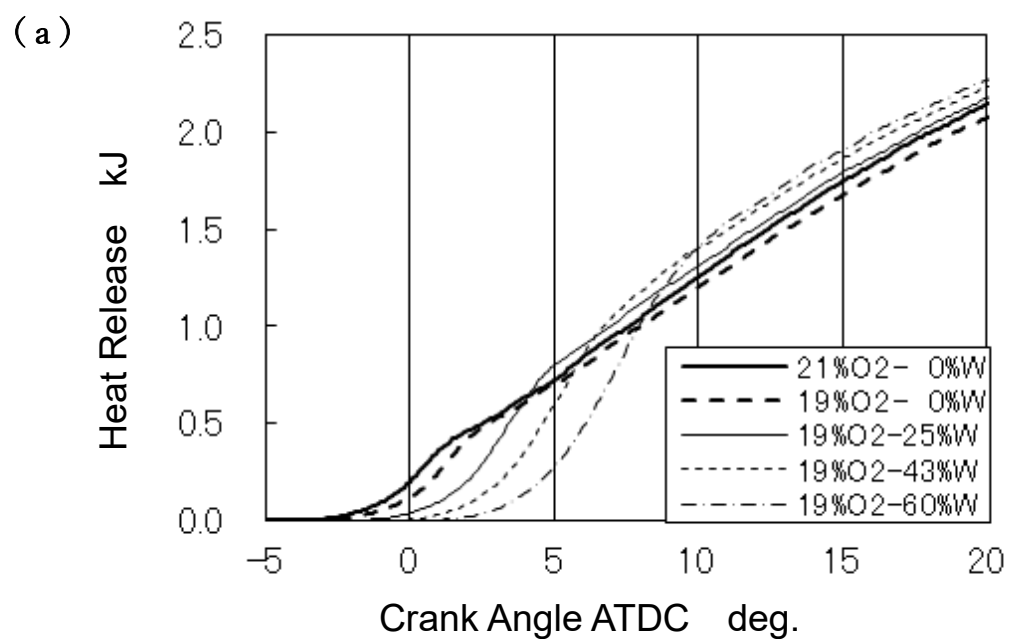


Figure 16 Total heat release over the combustion cycle for different W/FO ratios and O₂ concentration injection timings

4.3.4 IMO NOx 3 次規制対応技術としての課題と展望

本節ではこれまでの実験結果を用いて、運航者の立場から、ORM と WMF が IMO NOx 3 次規制対応技術として今後解決すべき課題について論じる。

4.3.4.1 SFOC と設置容積および維持・管理

図 12, 図 13 に示すように、給気中の酸素濃度を約 17%まで低下させることにより NOx を IMO 3 次規制値まで低減することができるが、SFOC の悪化を招く。また図 4 に示すように、酸素濃度を低減する方法としては ORM の正圧と負圧を用いる場合の両方が同じ効果を示すため、両者の単独または組合せによる効果的な方法を検討できるが、いずれの方法を用いても、酸素濃度を下げするためには ORM の膜面積を増加させることによる設置容積の増大や、給気ロスの増大を補うための措置（過給機や真空ポンプの能力向上等）が求められる。この課題は、同じ原理（給気中の酸素濃度低下による NOx 低減）を用いている EGR についても、同様であるといえる。すなわち、酸素濃度低減のために排ガスの再循環量を増加させると、SFOC の悪化に加えスクラバーや過給機等の能力向上や洗浄水の後処理量が増加する。この対応策として、燃料に水を混合する技術を併用することにより効果的に NOx を低減可能となる⁹⁾。また、図 3 に示す水混合燃料生成装置は、水タンクと燃料タンクを船内の清水ラインと燃料供給ラインに置き換えると、流量計、流量調整弁、コントローラおよび循環ポンプとミキサーから構成される極めてシンプルかつ省容積のシステムとなる。このように、水混合燃料を併用することは ORM や EGR の負担を軽減できるとともに、設置容積および維持・管理の面からも有用な方法となる。

4.3.4.2 環境対応と今後の課題

IMO NOx 3 次規制は環境改善のための規制であり、この対応技術は想定される船舶のあらゆる運航（機関の運転）状態において環境に悪影響を及ぼすことがあってはならない。

ORM は、近年新たに開発された素材を用いた革新的な技術であるが、未だ実験室レベルのデータしか公表されていない。この技術は、ORM の表裏の圧力差が駆動力となるため、高圧の空気又は負圧を造り出すための装置が必要となるが、圧縮装置（過給機）と真空ポンプは既に確立された技術である。このため、乗組員による機器の保守・管理が容易であり、更に構成要素は膜と圧縮空気のみであるため人為的な誤操作や機器の作動不良等に起因するトラブルが起きても、環境に悪影響を及ぼさない。

燃料に水を混合する技術は、既存船においても比較的容易に、かつ確実に NOx 低減ができる方法としてよく知られている。しかし、一般に IMO NOx 3 次規制海域において使用される軽油や低硫黄 A 重油と水を混合するには、「添加剤（界面活性剤）」を必要とする¹⁶⁾。このため、添加剤を投入するための装置や添加剤そのものに要する費用を考慮する必要がある、SFOC の改善効果が相殺される可能性がある。これに対して、本実験に用いた装置は、水をナノレベルまで微粒化することより添加剤無しで水混合燃料を製造することができるため、装置が小型・軽量化できる。また、SCR、EGR 等の他の NOx 低減技術との組み合わせにより、IMO NOx 3 次規制対応技術としての役割も期待できる。しかし燃料に水を混合した場合、①水と燃料の不均一混合に起因すると考えられる燃焼不良や燃料ポンプの焼付や異常磨耗、②発停時や低負荷時における失火や燃焼不良、③水の混合割合を増やした場合の出力の制限等の問題が発生する可能性がある。また、本実験に使用した水混合燃料生成装置は、軽油等の水との密度差が大きな燃料でも添加剤なしで水混合燃料を生成することができるが、常時攪拌する必要があるため、ミキサーで圧力差により微粒化を行うための駆動力と管路抵抗に相当する動力を供給する必要がある。本実験におけるこの供給動力は約 0.5 kW であり、この装置で出力約 800kW のエンジンまで対応可能である。この供給動力が SFOC のマイナス要因として作用する割合は、対象となるエンジンの出力によって変化するが、低負荷運転や小出力のエンジンでは SFOC に大きな影響を及ぼす可能性がある。今後は、これらの課題を解決するための技術や方法を明らかにするとともに、長時間運転による状況確認を行なうことにより、信頼性と耐久性向上に関する研究を進める必要がある。

4.4 まとめ

IMO の NO_x 3 次規制対応として、ORM（酸素低減膜）単独および WMF（水混合燃料）との組合せによる NO_x 低減効果とエンジン性能の変化を明らかにする実験を行い、次の結論を得た。

- (1) ORM を用いて給気中の酸素濃度を低下させることにより、負荷率 75, 50, 25%において、単独で、NO_x の値を IMO 3 次規制値まで低減することができるが、酸素濃度を 19%以下にすると SFOC の悪化率が急激に増加する。これは、給気中の酸素濃度が低下すると着火後の燃焼が緩慢になることに起因しているため、SFOC を悪化させない（燃焼速度の低下を招かない）範囲においては有効であるが、それを超えると非効率的である。
- (2) ORM と WMF を組み合わせることにより、SFOC を悪化させることなく IMO NO_x 3 次規制値を満足できる可能性がある。これは、給気中の酸素濃度低下により酸素の絶対量が減少しても、水を混合することにより総噴射量が増加するため、それに伴って噴霧に導入される空気の総量が増加し、燃料に対する空気の供給量の増加により燃焼が改善されるためである。
- (3) ORM と WMF の組合せは SFOC, 設置容積, 維持・管理および環境対応という観点からみて今後期待できる NO_x 低減技術であるが、実用化のためには ORM の信頼性と耐久性および水技術に課せられた課題に対応する技術と方法を明らかにしていく必要がある。

参考文献

- 1) 前田和幸, 山西 大, 清水 敦, 大野裕一, 小熊淳一, 酸素低減膜と水混合燃料による IMO NO_x 3 次規制対応, JIME, 51-2(2016), 230-237.
- 2) Kazuyuki Maeda, Atsushi Shimizu, Hirokazu Ohno, Junichi Oguma, Atsushi Sakane, Dai Yamanishi, Development of NO_x Reduction System that Combines an Oxygen Reduction Membrane with Water Mixed Fuel, CIMAC Congress Helsinki, Paper No.176, 2016.
- 3) 平田宏一, 仁木洋一, 船用 4 ストロークディーゼルエンジンにおける SCR,

- JIME, 46-6(2011), 817-824.
- 4) Takahiro Fujibayashi, Shinji Baba, Hironaka Tanaka, Development of Marine SCR System for Large Two-stroke Diesel Engines Complying with IMO NOx Tier III, CIMAC Congress Shanghai, Paper No.29, 2013.
 - 5) Niko Soikkeli, Marko Lehtikoinen, Kaj-Olof Ronnback, Design aspects of SCR systems for HFO fired marine diesel engines, CIMAC Congress Shanghai, Paper No.179, 2013.
 - 6) Petra Steffe, Kathrin Liepert, Richard Losher, Ingo Bader, High Performance Solutions for IMO TIER III - System Integration of Engine and Aftertreatment Technologies as Element of Success, CIMAC Congress Shanghai, Paper No.212, 2013.
 - 7) Johnny Briggs, Joseph McCarney, Field experience of Marine SCR, CIMAC Congress Shanghai, Paper No.220, 2013.
 - 8) 馬場真二, 中尾 徹, 船用大型 2 サイクル機関での SCR による排ガス対策, JIME, 46-6(2011), 825-830.
 - 9) Toshinori Shirai, Sumito Yokobe, Shoichi Ibaragi, EGR system Development on MES Test engine 4S50ME-T9, CIMAC Congress Shanghai, Paper No. 176, 2013.
 - 10) Masanori Higashida, Takuroh Nakamura, Ikumi Onishi, Katsuhiko Yoshizawa, Hirotaka Takata, Takamichi Hosono, Newly Developed Combined EGR & WEF System to comply with IMO NOx Regulation Tier 3 for Two-stroke Diesel Engine, CIMAC Congress Shanghai, Paper No.200, 2013.
 - 11) Johan Kaltoft, Mikkel Preem, Development of integrated EGR system for two-stroke diesel engines, CIMAC Congress Shanghai, Paper No.219, 2013.
 - 12) 前田和幸, 清水 敦, 大野裕一, 山西 大, 新濱智広, 塚本雅弘, 低酸素・高加湿給気による NOx の 80%低減, JIME, 48-3(2013), 378-382.
 - 13) Atsushi Shimizu, Hirokazu Ohno, Yosuke Koizumi, Kazuyuki Maeda, Dai Yamanishi, Development of a Nitrogen-enrichment/Humidification Membrane System for NOx Emission Reduction in a Marine Diesel Engine, JIME, 48-3(2013), 397-402.
 - 14) Kazuyuki Maeda, Hirokazu Ohno, Atsushi Shimizu, Tomohiro Niihama, Masahiro Tsukamoto, Dai Yamanishi, Reduction of NOx Emission by 80% Using the Newly Developed System with a Polymer Membrane in Marine Diesel Engines, CIMAC

Congress Shanghai, Paper No.423, 2013.

- 15) 中川 洋, 森 俊一, 遠藤浩之, 乳化油燃料のディーゼル燃焼特性に関する研究 (<小特集>エンジンシステムの新展開), JSME, 61-590(1995), 3548-3553.
- 16) 中山信義, 山下 尚, 園田憲一, 神社洋一, 桜井秀明, 水エマルジョン燃料の実用化試験研究 -A 重油と C 重油の特性比較試験-, MESJ, 30-9(1995), 661-667.
- 17) 東田正憲, 中村卓朗, 大西郁美, 吉澤克浩, 細野隆道, EGR と水エマルジョン燃料の組み合わせによる NOx 低減技術, JIME, 48-6(2013), 747-752.
- 18) 東田正憲 中村卓朗 大西郁美 仲尾進士 植田育大 細野隆道 西山 藍 秋山 隼太, 2 サイクルディーゼル機関の複合低環境負荷システム“K-ECOS”, Proceedings of JIME 2015, 235-238.

第5章 水混合燃料によるIMO BC規制対応¹⁾

5.1 はじめに

海上輸送は、あらゆる経済にとって必要な要素である。残念ながら、外航船には高出力のエンジンが必要であり、これらは大量の大気汚染物質や温室効果ガスを排出する傾向がある。大気汚染と地球温暖化を防止するためには、船舶から排出されるNO_x、PM（粒子状物質：Particulate Matter）、CO₂の排出量の削減が急務である。地球温暖化の影響で北極海の氷が減少していることを受け、北極海航路が検討されている。これが実現すれば、東アジアとヨーロッパの距離は3割から4割短縮される。さらに、航路のリスクも軽減される。例えば、マラッカ海峡やソマリア沖での海賊のリスクや、スエズ運河の遮断等のトラブルなどが考えられる。船用ディーゼルエンジンから排出されるブラックカーボン（BC：Black Carbon）は太陽光を吸収するため大気を加熱する。さらに、BCは雪や氷が完全に溶けるまで溶かし続ける恐れがあるため、BCは氷の融解を促進し、気候変動を加速させる可能性がある。現在、国際海事機関（IMO：International Maritime Organization）でBC規制が検討されている。北極海は閉鎖された海域であるため、BC排出をゼロにするための研究が急務とされる。10年前よりBCの低減技術の研究を行っており、その成果は国際燃焼機関会議（CIMAC：Conseil International des Machines a Combustion）²⁾⁻⁴⁾、日本マリンエンジニアリング学会（JIME：Japan Institute of Marine Engineering）⁵⁾、自動車技術会（JSAE：Society of Automotive Engineers of Japan）⁶⁾⁻¹⁰⁾などで発表している。

本研究では、船用ディーゼルエンジンからのBCの排出を可能な限り低減させるシステムの開発について報告する。船用ディーゼルエンジン(214kW/3,101min⁻¹)を用いた実験において、本システムの低減効果を検証した。以下に、提案したシステムの概要を示す。

- (1) 燃焼初期の燃焼室内でのBCの発生を低減するため、燃料に水と触媒を添加する。
- (2) 排ガス中に含まれるBCを最大限除去するため、排気ラインにDPF（Diesel Particulate Filter）を設置する。

- (3) DPF に捕集された BC を除去するため、エンジンと DPF の間にバーナーを設置する.
- (4) DPF の燃焼過程で発生する灰分を除去するため、DPF の近傍に圧縮空気を利用した洗浄装置を設置する.

5.2 船用ディーゼルエンジン用ブラックカーボン (BC) ゼロシステムの構成

図 1 に、今回開発したブラックカーボン (BC) ゼロシステムの概要を示す. 本システムでは、(1) BC を減少させるために燃料に水を添加、(2) BC を減少させるために燃料に触媒を添加、(3) 排ガス中の BC を最も多く捕集するために DPF を設置、(4) DPF 中の BC を除去するためにバーナーを設置、(5) 灰分 (Ash) を除去するための洗浄装置を設置する.

5.2.1 供試エンジン

水混合燃料生成装置を水産大学校の 4 ストローク船用高速ディーゼルエンジンに接続して BC の低減効果を確認した. 表 1 に、供試エンジンの主要目を示し、表 2 に、本研究で使用した供試燃料の性状を示す.

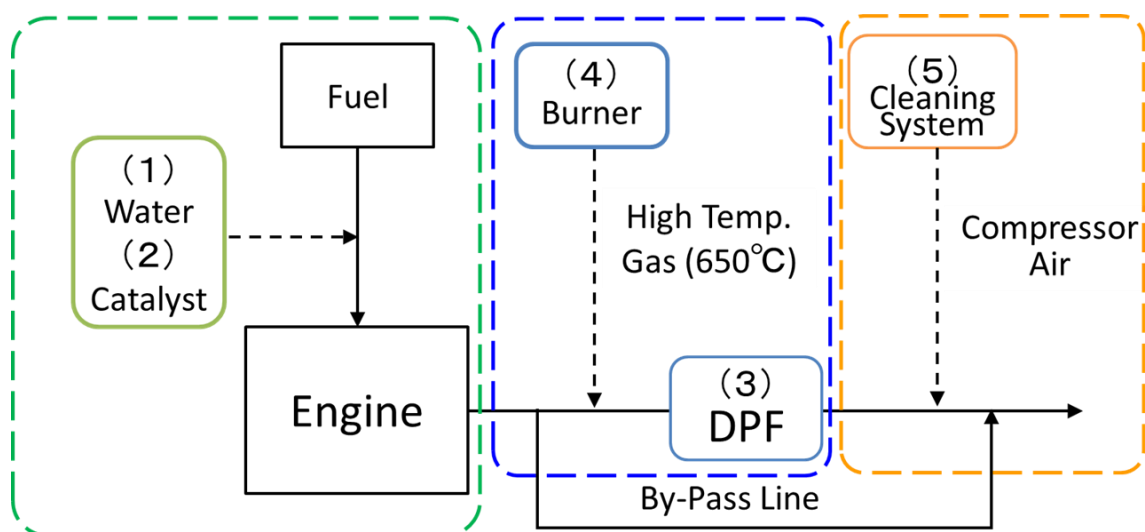


Figure 1 Outline of the newly developed black carbon (BC) zero system

Table 1 Test engine specifications

Number of Cylinders		6
Cylinder Bore	mm	100
Piston Stroke	mm	110
Max. Power	kW	214
Engine Speed	min ⁻¹	3101
Max. Pme	MPa	1.59
Fuel Type		Gas oil

Table 2 Fuel properties

Fuel Type		Gas oil	MDO
Density	kg/m ³	828.4	857.6
Kinematic Viscosity	mm ² /s	3.357	3.143
C	wt. %	86.2	86.0
H	wt. %	13.8	12.8
S	wt. %	0.0007	0.09
N	wt. %	-	0.01

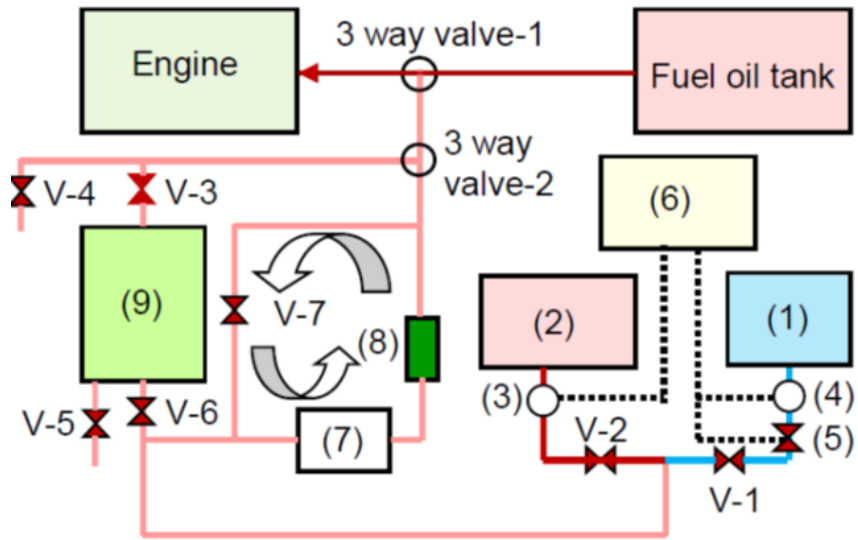
5.2.2 水混合燃料生成装置

図 2 に、本研究で新たに開発した水混合燃料生成装置の構成図を示す。まず、燃料噴射装置の直前に水混合燃料生成装置を設置することで、水と燃料が分離する時間を与えずに水混合燃料をシリンダー内に噴射する。この装置は、油中水滴型と、水中油滴型の水混合燃料の両方を生成することができる。図 2 に示すように、燃料油は通常、燃料油タンクからエンジンに直接供給される。

燃料油への水の添加（油中水滴型水混合燃料）は、いくつかの段階を経て開始される：(1) バルブ “V-2” と “V-3” を開き，“V-1” を閉じて水混合燃料生成ラインに燃料油のみを供給する，(2) 水の混合割合の設定値を制御盤に入力する，(3) バルブ “V-1” を開いて水混合燃料生成に備える（この状態はバルブ “V-4” を開くことで確認できる），(4) 三方バルブ “1” と “2” の流れの方向を切り替えて水混合燃料をエンジンに供給する。

燃料油から水混合燃料に切り換える場合は、次の手順で行う。(1) バルブ “V-2” を閉じてバルブ “V-1”，“V-3” を開き，水混合燃料生成ラインに水だけを供給する。(2) 制御盤に水の混合割合を入力する。(3) バルブ “V-2” を開き，水混合燃料を生成する準備をする（この状態はバルブ “V-4” を開くことで確認できる）。これら全ての工程において，バルブ “V-5” と “V-6” は閉じられている。また，バルブ “V-7” の開度に応じてエンジンに供給される水混合燃料の圧力を調整することができる。

図 3 に、水混合燃料生成装置と関連する実験装置の写真を示す。図 3(a)では、流体混合器（ミキサー）を燃料噴射装置の直前に配置している。図 3(b)は、循環ポンプとその他の装置の位置関係を示している。



Legend: (1)water tank, (2)fuel oil tank, (3)flow meter for fuel oil, (4)flow meter for water, (5)flow regulating valve, (6)control panel, (7)circulating pump,(8) fluid mixer, and (9)separation tank

Figure 2 Diagram of water mixed fuel [WMF] generator

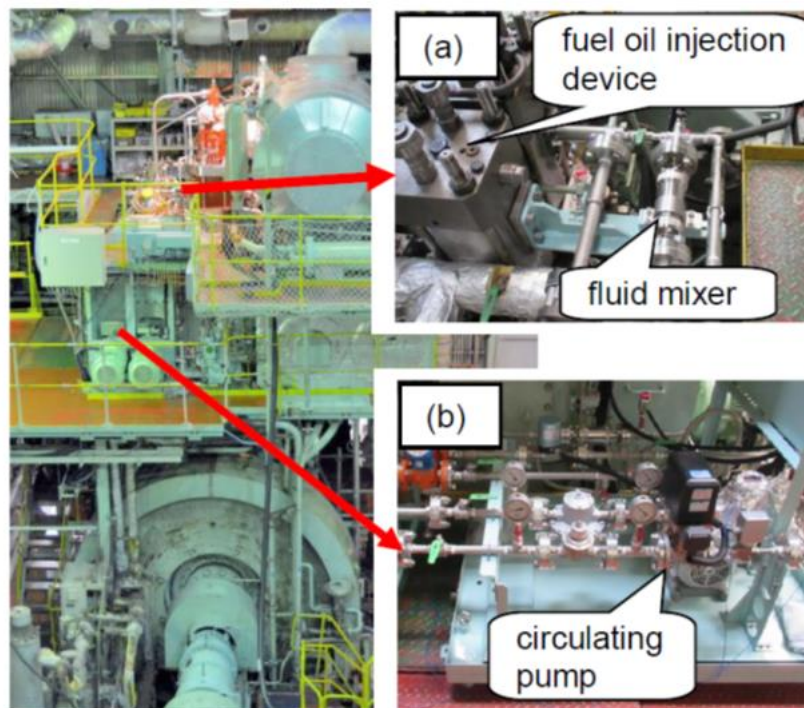


Figure 3 Water mixed fuel generator and associated experimental apparatus (two-stroke engine)

5.2.3 PM 計測装置

図 4 に、PM 計測装置の概略を示す。排ガスは排気管に取り付けられたサンプリングプローブよりストレートのラインを通り希釈トンネルに入る。エンジンの排ガスを希釈トンネルに導入するために 2 重管システムが使用され、この管は排気管と同様の環境を作り出すために保温されている。チューブの構造と高温により、PM の主成分である潤滑油や燃料油の不燃成分に由来する SOF が希釈トンネルの移送ラインに付着しにくくなる。PM の組成（スート (BC)、SOF、サルフェート）は、ソックスレー抽出により分析した。

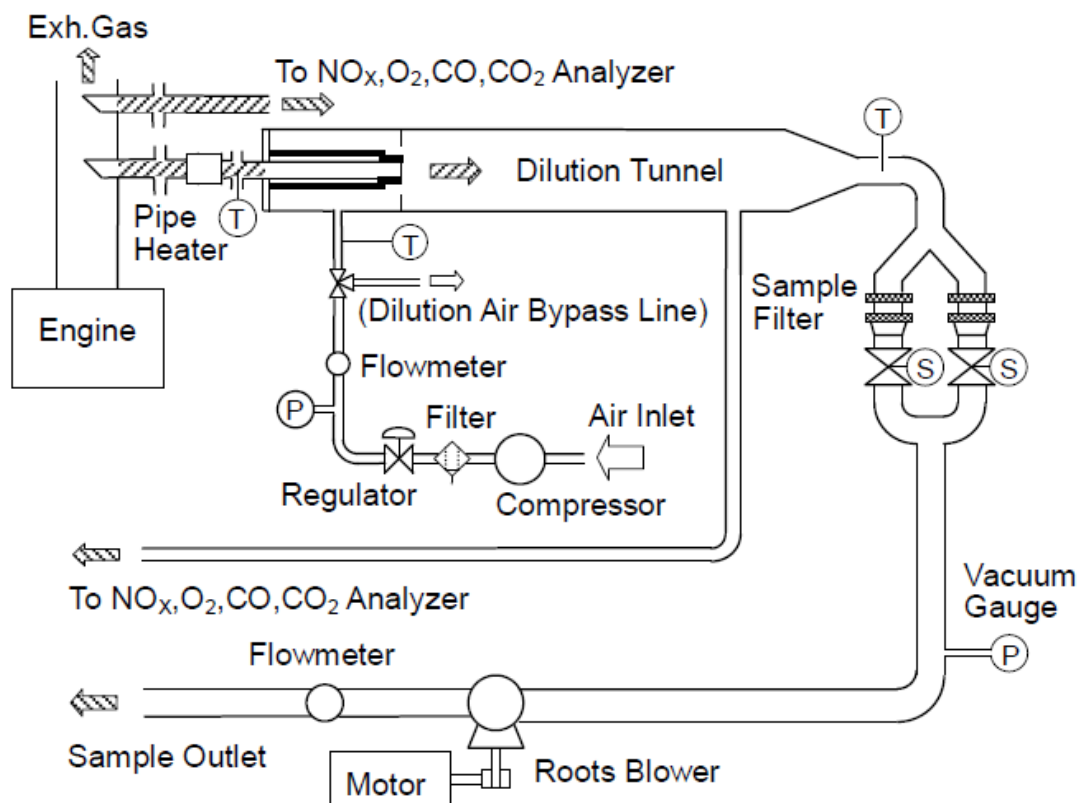


Figure 4 PM measurement system

5.2.4 BC 低減触媒

自動車では，スート（BC）を低減するために多くの Ce（セリウム）触媒が使われている．Ce は酸素分子を貯蔵できるため，燃焼室内における BC の発生を抑制できる．

表 3 に，本研究で使用した Ce 触媒の特性を示す．今回の実験では，燃料中の添加剤の割合が約 330ppm であるため，添加剤 CeO₂ (7.37%) 以外の成分 (92.63%) に大きな影響を与える．本実験では，触媒はあらかじめ燃料に添加して使用した．

Table 3 Properties of catalyst

CeO ₂ Concentration to Fuel	wt. ppm	25
CeO ₂ Concentration to Additives	wt. %	7.37
Density of additives (15 deg. C)	g/cm ³	0.917

5.2.5 新設計の再生バーナー付き DPF

図 5 に，DPF の設置位置を示す．DPF はエンジンの過給機後の排気管内にあり，排気管内にあるバルブを切り替えることで，必要に応じてバイパスにすることができる．

図 6 に，再生バーナーを備えた新設計の DPF の構成を示す．DPF の内部は燃焼室とフィルター空間から構成されている．排気ガスは図の左側から燃焼室に入り，オリフィスを通してフィルターに到達する．フィルターには，自動車の無触媒の排気ろ過システムに使用されているものと同じセラミックが使用されている．排ガス中の PM は，このフィルターを通過する際に除去される．フィルターにエンジン性能を低下させるほどの PM が蓄積されると，燃料を燃焼室に噴射することにより，PM を高温の排ガスによって燃焼除去される．

図 7 は，エンジンの排気管に取り付けられた新設計の DPF を示している．排ガス経路が 1 本しかないため，外観構成がシンプルであるため省スペースで設置できる．本装置は，図 1 の (4) バーナーに相当する．図 6，図 7 に示すように，排気管内に設置することで，スペースを有効活用できる．

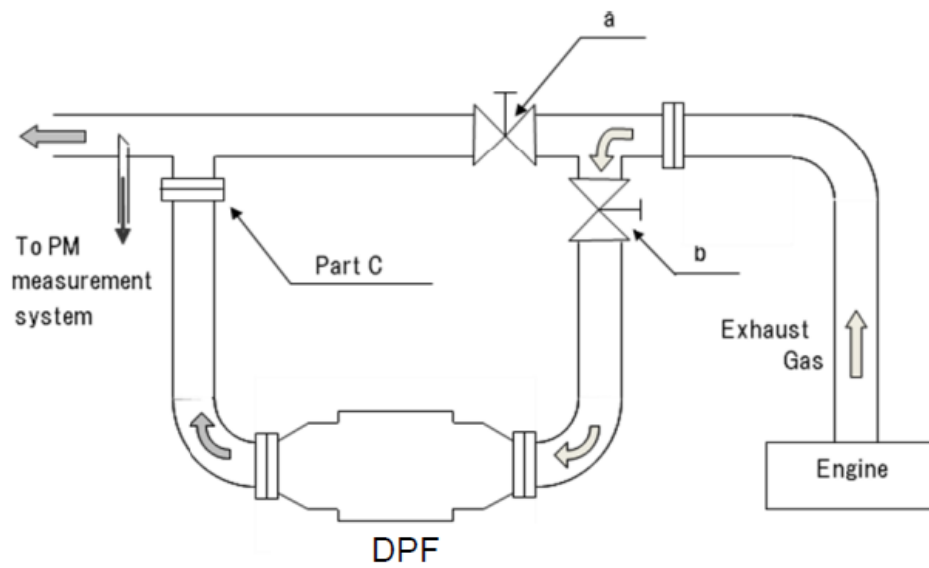


Figure 5 Installation position of the DPF

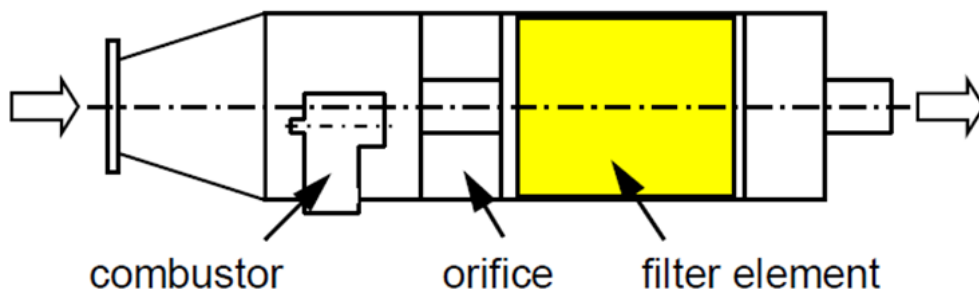


Figure 6 diagram of the newly designed DPF with a regeneration combustor



Figure 7 shows the new DPF installed in the exhaust pipe

5.3 各構成要素における BC 低減効果

5.3.1 水混合燃料生成装置

図 8 に、水混合燃料を使用した場合のスート (BC) 排出量の低減効果を示す。図 8(a)に、スート (BC) 排出率 (g/kWh) の変化を示し、図 8(b)に、フィルターの色調に基づく PM 捕集量の変化を示す。ここでは、水の混合割合が大きくなるにつれてスート (BC) の発生量が減少している。水の混合割合が 25%と 43%の場合、スート (BC) 量はそれぞれ約 60%と 80%減少している。同時に、PM フィルターは濃い黒色から明るい灰色へと徐々に変化している。

図 9 に、ディーゼルエンジンにおける燃料の微粒化を示す。第一段階では、燃料噴射弁から高速で噴射された燃料が微小な液滴を形成する。この液滴はその後、噴霧に巻き込まれた高温の空気によって加熱され、可燃性の空気と燃料の混合気を形成する。巻き込まれる空気の量は、噴射される流体の運動量に比例する。

図 10 に、噴射開始後同じ経過時間における 2 種類の流体の噴霧中の燃料油量と巻き込み空気量の比較を示す。(a)で示す流体は燃料油のみ、(b)で示す流体は水混合燃料である。噴射時間までの流体(a)と(b)の運動量と質量はほぼ等しい。流体の噴霧に含まれる空気の量(a)と(b)は、ほぼ同じになる。流体 (b) の噴霧中の燃料油の量は、流体 (b) に含まれる水分により、流体(a)の噴霧量よりも少なくなる。したがって、流体 (b) の噴霧における空燃比は流体(a)の噴霧よりも高くなる。

図には示されていないが、流体の噴射終了時には、流体(b)の水の混合割合に比例して、噴射された流体(b)の運動量が流体(a)の運動量よりも大きくなる。したがって、流体 (b) の噴霧中の巻き込み空気量は、流体 (a) の噴霧中の巻き込み空気量よりも多くなる。さらに、両方の流体中の燃料油の量は噴射終了時にほぼ等しくなっている。また、流体 (b) の噴霧における空燃比は、流体 (a) の噴霧における空燃比よりも大きくなる。このように、水混合燃料の噴霧における空燃比は、燃料油のみの噴霧よりも常に高くなる。したがって、PM の排出量は、水混合燃料の水混合割合に比例して減少する。

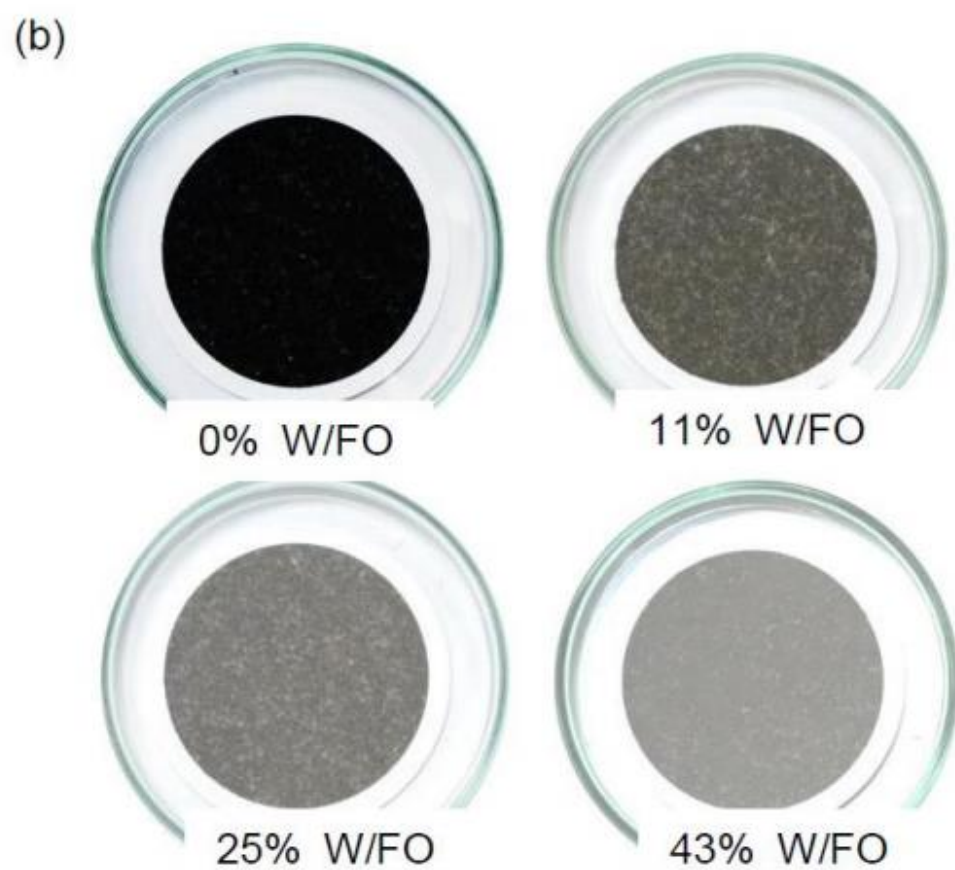
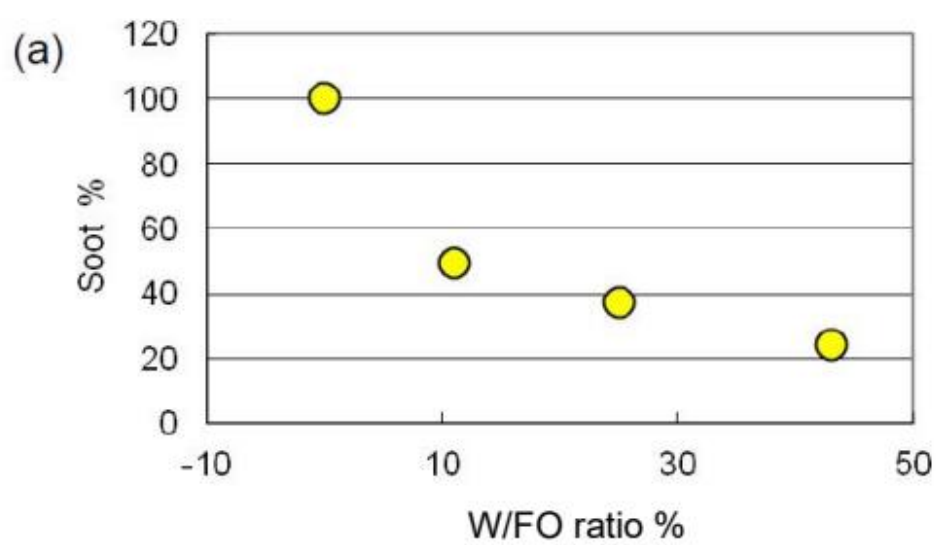


Figure 8 Decrease in soot (black carbon)

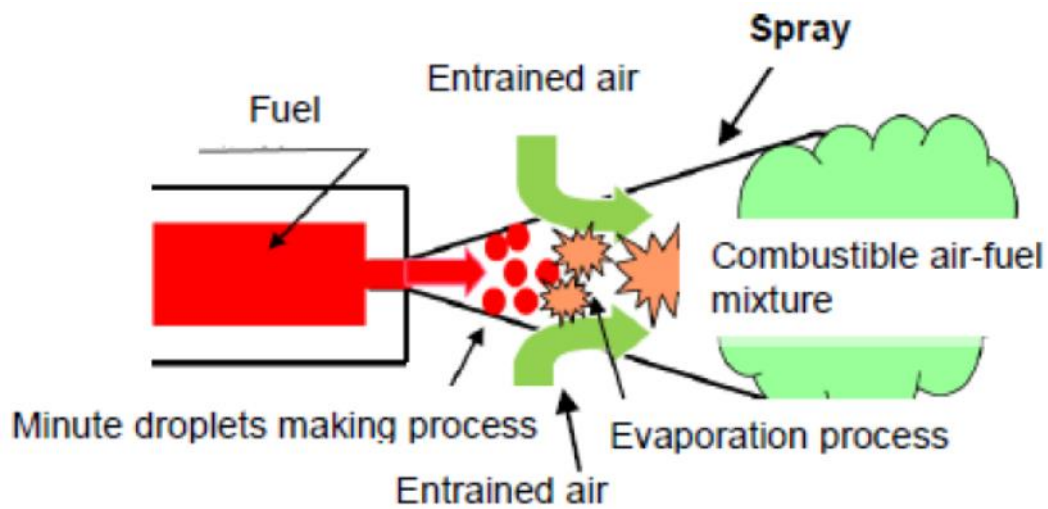


Figure 9 Diagram of fuel atomization process

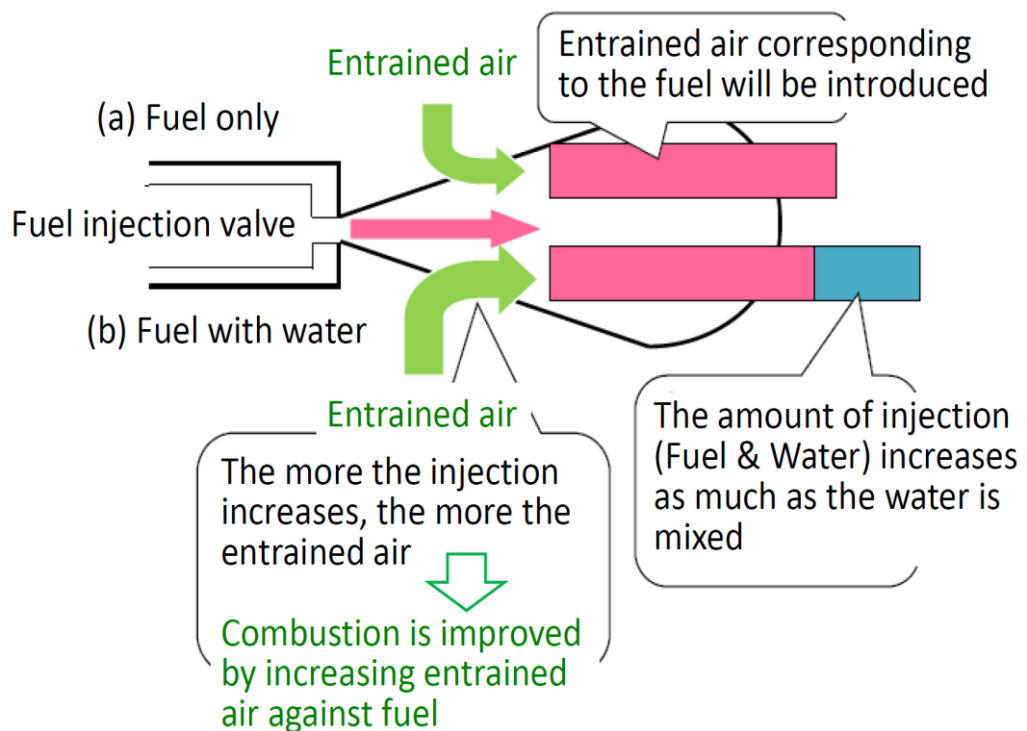


Figure 10 Amount of fuel oil and entrained air in sprays (a) for fuel only and (b) for WMF.

一方、水混合燃料は燃料消費率（SFOC）にプラス面とマイナス面の影響を与える。プラスに作用するのは、燃料噴霧中の導入空気量の増加による燃焼時間の短縮、蒸発した水によるピストンへの仕事量の増加、火炎温度の低下による冷却損失の減少である。水の蒸発による熱損失があるが、水の混合割合と噴射タイミングを最適に設定することで、プラスの効果がマイナスを上回れば SFOC は改善される。

5.3.2 BC 低減のための触媒

触媒は、最初の燃焼工程で燃焼室内でのスート（BC）の発生を減少させるために燃料に直接添加される。図 11 に、 CeO_2 を含む添加剤を使用した場合のスート（BC）の低減効果を示す。燃料に CeO_2 触媒を添加することで、スート（BC）の発生量を約 20% 減少させることができる。この図では、SOF 値は変化していないが、スート（BC）の値は 20% 以上減少している。これは添加剤に含まれるセリウム特性によるものである。

図 12 に、 CeO_2 が酸素を貯蔵および放出するメカニズムを示す。図に示すように、周囲の酸素濃度が高い場合、 CeO_2 は酸素分子を吸収して蓄える。しかし、周囲の酸素濃度が低い場合、 CeO_2 は蓄えていた酸素分子を放出する特性がある。エンジンの燃焼室では、図 9 に示すように、ノズルから噴射された燃料が周囲の空気を導入して燃料と空気の混合気を形成する。ここで、燃料とともに噴射された CeO_2 は、このような酸素濃度の高い部分に CeO_2 を蓄える。通常の状態では、着火遅れ後の燃焼では、燃料と空気の混合気中の酸素が先に消費される。その結果、燃料と空気の混合気は酸素不足となり、BC が発生する。一方、燃料に CeO_2 が含まれている場合、着火遅れ中に CeO_2 が酸素を吸収し、酸素不足の状態では吸収した酸素を放出する。その結果、図 11 に示すようにスート（BC）は 20% 以上減少する。

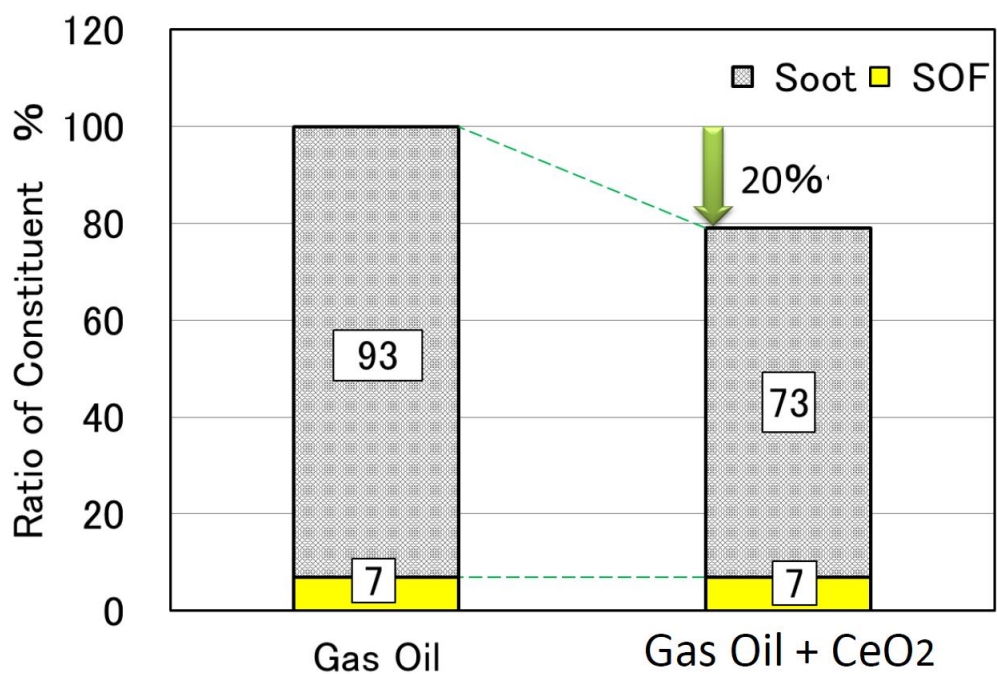


Figure 11 BC reduction effect of using additives containing CeO₂

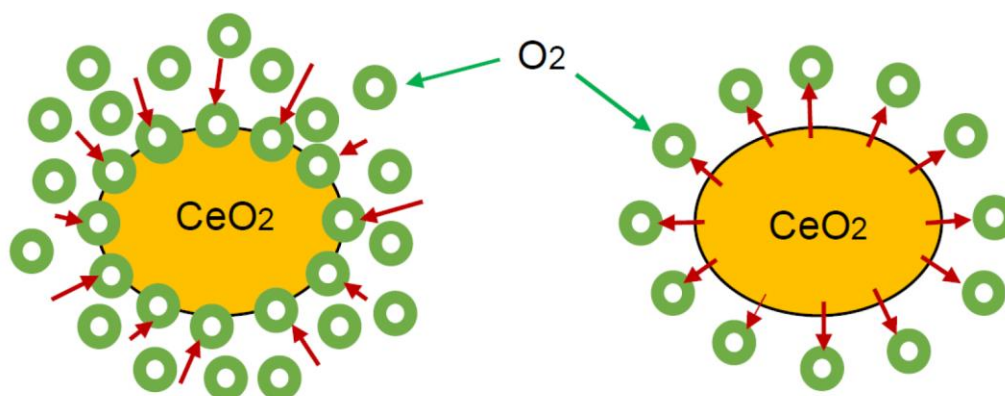


Figure 12 Mechanism by which CeO₂ stores and releases oxygen

図 13 に、水混合燃料と触媒の組み合わせによるスート (BC) の低減効果を示す。図 8 に示すように、スート (BC) は燃料に水を混合することで大幅に低減できる。燃料に 10%の水を混合することで、スート (BC) の量を半減させることができる。一方、図 11 に示すように、燃料に CeO_2 を混合することで、スート (BC) の量を 20%以上低減することができる。水と CeO_2 を同時に燃料に混合することで、相乗効果によりスート (BC) を 70%削減することができる。削減効果は水の混合割合が高くなるほど大きくなる。

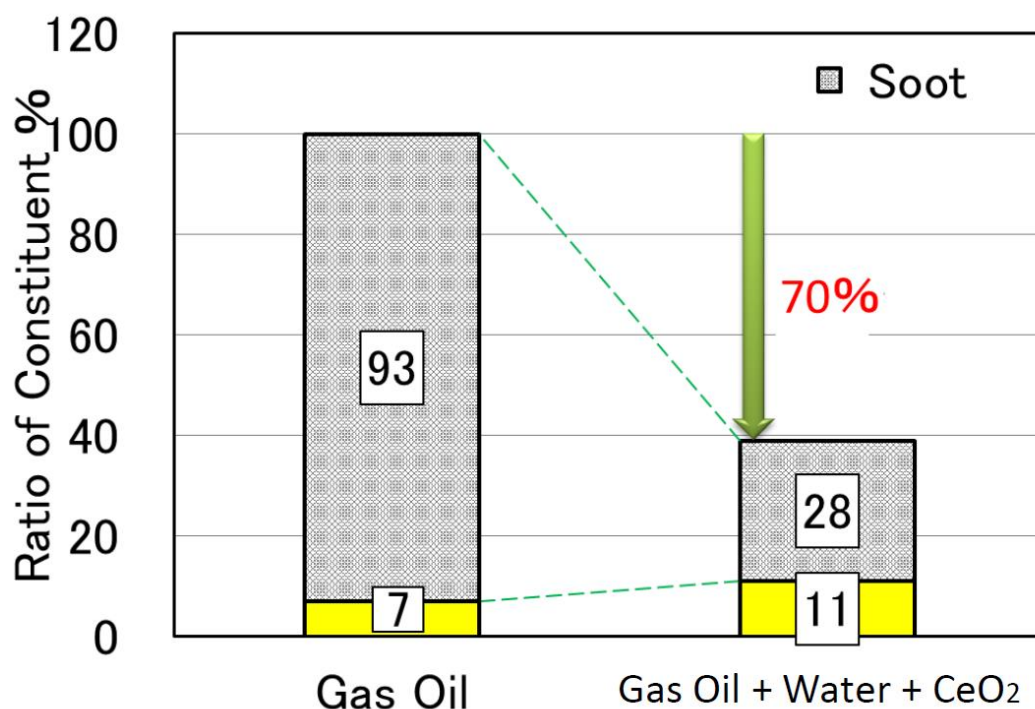


Figure 13 Reduction of BC by combining WMF and the catalyst

5.3.3 DPF のブラックカーボン低減と再生効果

図 14(a)および図 14(b)に、軽油または船用ディーゼル油（MDO）を使用した場合の PM の低減効果を示す．軽油を使用した場合は，DPF で約 70%の PM が除去され，MDO を燃焼させた場合は DPF で約 84%の PM が除去されている．MDO の場合，サルフェートの一部も除去されるため，減少割合はさらに大きくなる．

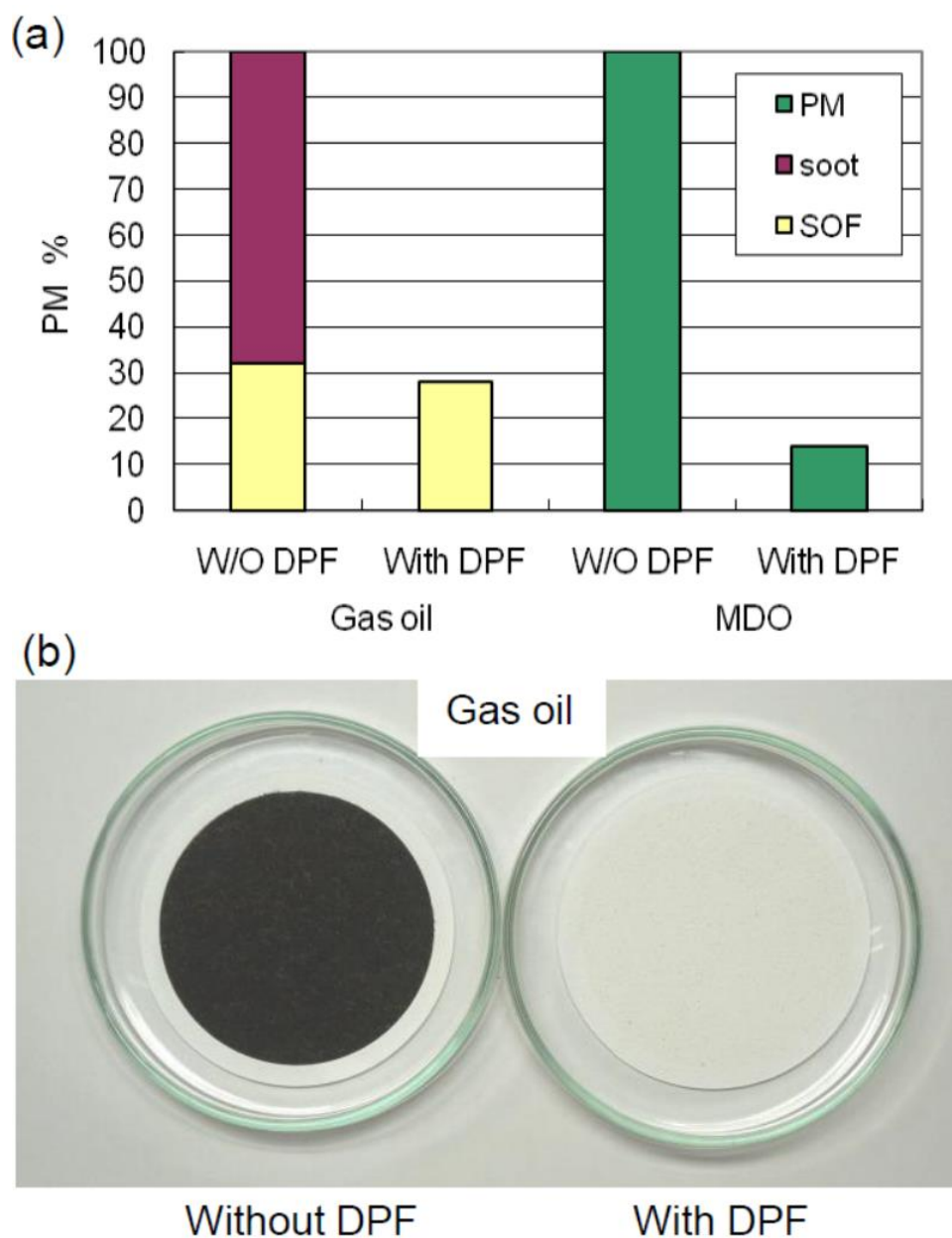


Figure 14 Decrease in PM when burning gas oil and MDO

図 15 に、75%負荷における排気圧力、燃費（SFOC）の変化率、および DPF の出口温度の変化を示す。排気圧力は運転時間と共に上昇し、それに伴い SFOC が悪化している。160 分経過後、負荷率を 25%程度に調整し、DPF にバーナーを使用して再生を試みた。このとき、DPF を通過する排ガス流量が減少するため、排気圧力が低下する。DPF の出口温度が約 700℃になると、排気圧力は急激に低下した。負荷率を約 240 分経過後に再び 75%まで上昇させたところ、排気圧力と SFOC の上昇率は初期値に戻っていることを確認した。これらの結果から、DPF はエンジン運転中でも再生可能であることがわかった。

一方、長期間使用すると、燃料中に含まれる灰分（Ash）が DPF に蓄積されるため、圧縮空気による逆洗浄を行い除去する必要がある。灰分（Ash）を除去するための洗浄装置については、今後新たに開発する必要がある。

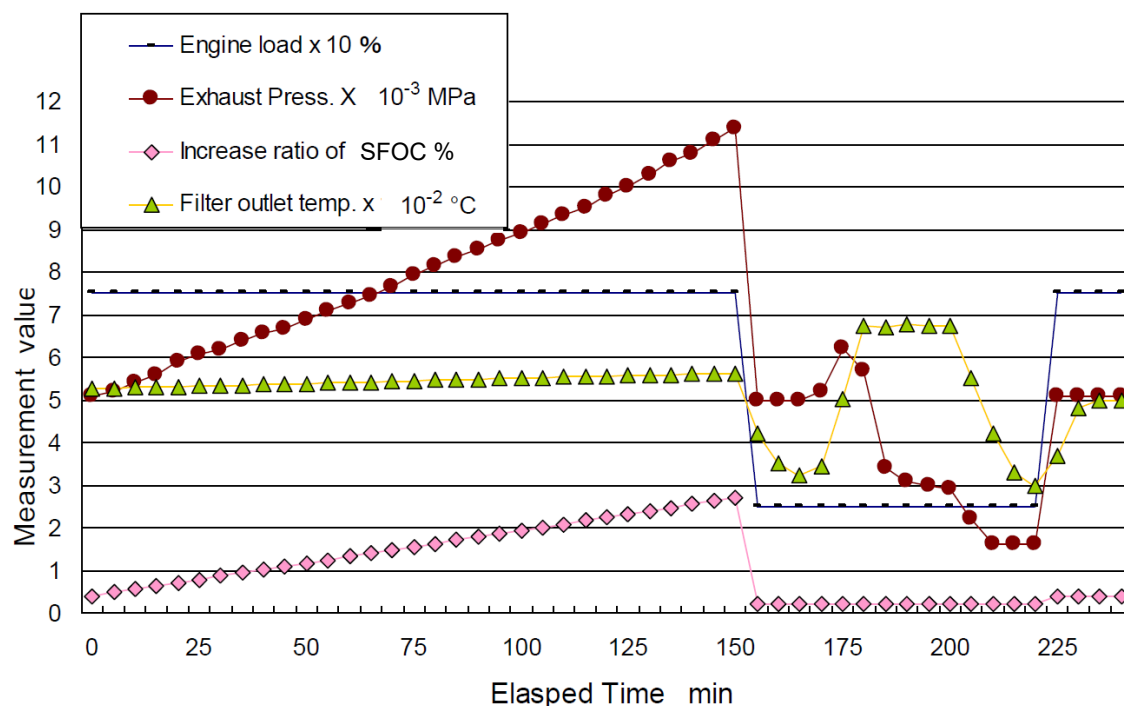


Figure 15 Change in exhaust pressure, increase rate of SFC, and outlet temperature

図 16 に、再生後のフィルターの写真を示す。スート（BC）は再生によって完全に除去され、セラミックの表面がはっきりと見える。しかし、バーナーの炎がフィルターの中央に集中するため、より効率的に再生するためには炎が均等に当たるように改良する必要がある。

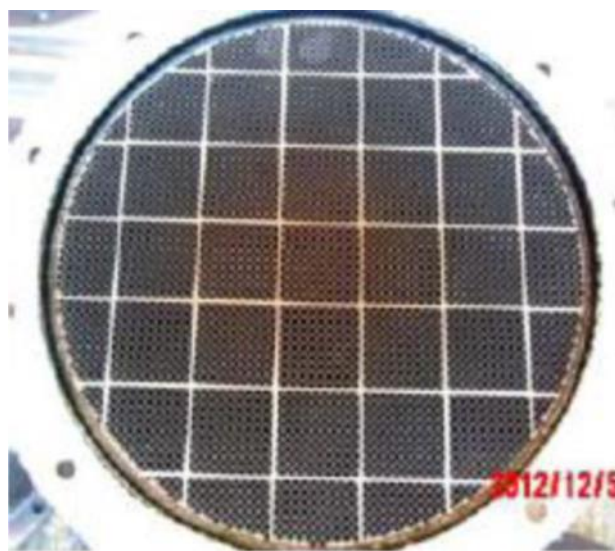


Figure 16 Photographs of the filter after regeneration

5.3.4 DPF の性能向上

5.3.4.1 DPF 再生に必要な温度

DPF の再生に最適な条件を明らかにするために、温度と時間の影響を調べた。図 17 に、フィルターの再生温度と再生時間の関係によるフィルターの写真を示す。PM が付着した状態のフィルターを炉に入れて、再生に要した時間を記録した。フィルターは、船用高速ディーゼルエンジンを 75%負荷で運転して捕集されたもので、各フィルターの PM の組成と質量は同じである。フィルターの色は、PM に含まれるスート（BC）の量に比例する。フィルターの色は、600℃では時間の経過とともにごくわずかに変化するだけであるが、炉の温度を 650℃に調整すると 3 分以内に退色し始め、9 分後には完全に消失する。700℃ではほぼ 1 分、800℃では 1 分未満に短縮される。これらの結果は、温度を上げることに

より再生時間を短縮できることを示している。

5.3.4.2 DPF の性能向上装置

図 17 に示すように DPF に捕集されたスート（BC）を再生するには 600℃以上の温度が必要であることが分かる。

図 18(a)に、DPF の温度計設置状況の写真を示し、図 18(b)に温度計を設置して計測した内部温度分布を示す。この図に示すように、DPF の中心部から半分の領域までは、ほぼ同じ温度であるが、周辺部になるほど温度が低下していることが分かる。

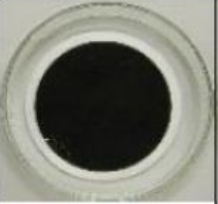
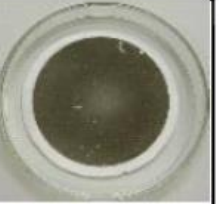
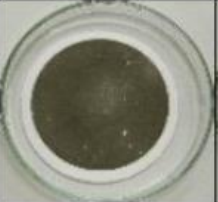
Furnace Temp. ℃	Time			
	0min.	1min.	3min.	9min.
600				
650				
700				
800				

Figure 17 Filter regeneration at various temperatures

(a)



(b)

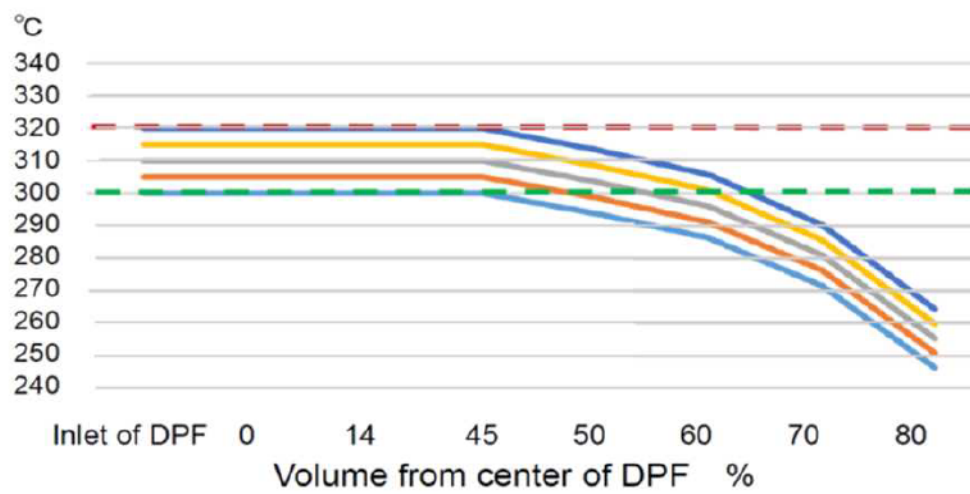


Figure 18 Photograph and measurement results for the internal temperature distribution by attaching a thermometer at approximately 300°C.

図 19 に、新開発の真空断熱装置を搭載した DPF を示す。この装置は主に内筒、外筒、スペーサチューブ、溝付き支持板から構成されている。内筒と外筒で真空空間を作り、スペーサチューブで空間を支えている。中空円筒管は内筒に螺旋状に巻き付けられている。この装置を DPF の外周に取り付けることで、DPF を断熱することができる。

図 20 に、本装置装着後の DPF 内部の温度分布を示す。DPF 内部の温度は均一であることがわかる。DPF の外周から真空断熱装置の外周に向かって温度が急速に低下している。これは真空断熱装置の断熱効果によるものである。

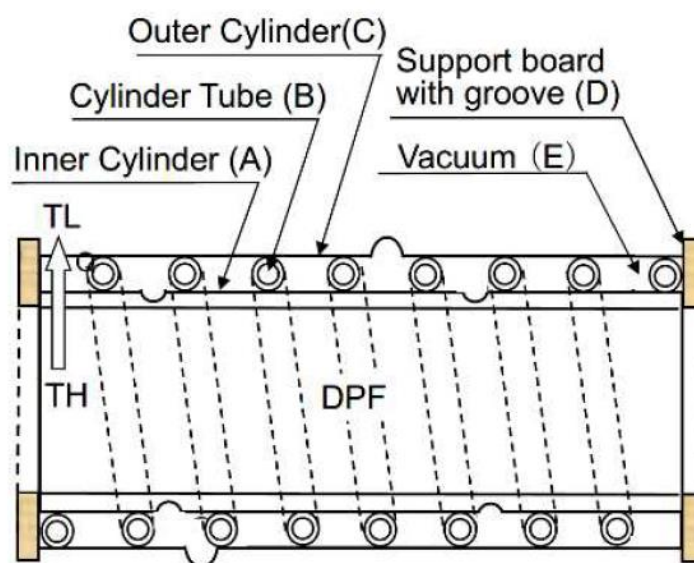


Figure 19 DPF equipped with a newly developed vacuum insulation device

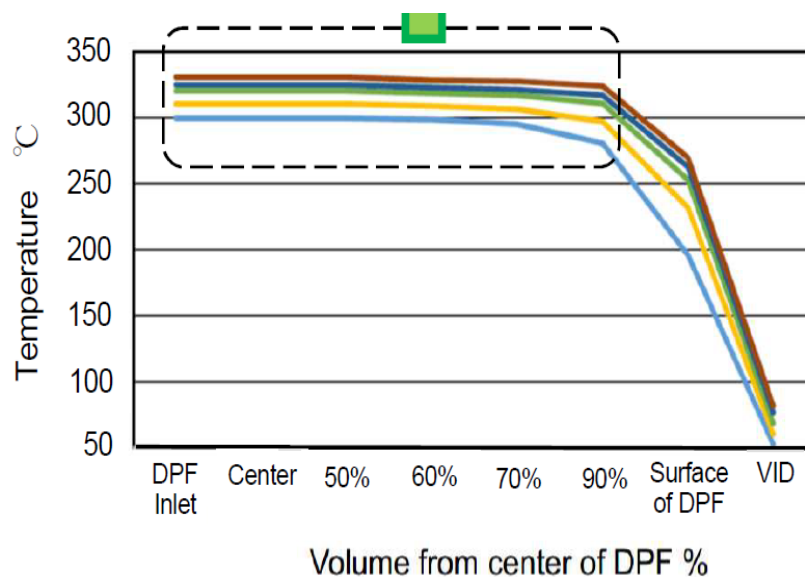


Figure 20 Temperature distribution inside the DPF after installing this device

5.3.4.3 船舶への DPF 適用例

図 21 に、DPF システムを実際の船舶の排気管に設置した例を示す。外洋を航行する船舶から発生する PM は、人体に悪影響を及ぼすと考えられており、DPF の使用が検討されている。大型船(a)の場合、排気管の外側に複数のフィルターを配置することで、スペースを有効に利用でき、緊急時のアクセスも容易である。沿岸地域を航行する小型船(b)の場合、1 つのフィルターを配置し、DPF を再生する場合は、バイパスラインで使用される。

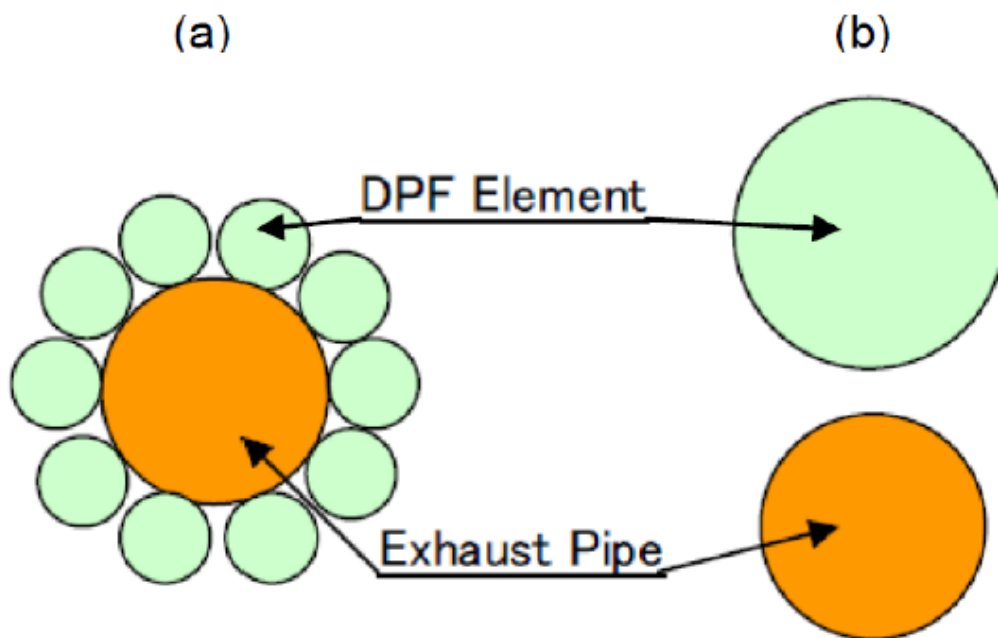


Figure 21 Example of how such a DPF system might be installed in the exhaust pipe of an actual ship

5.4 まとめ

本研究で提案したシステムの有効性を評価した結果、以下の事が明らかになった。

- (1) 燃料に 15%の水を添加することで、スート (BC) の発生量を約 60%低減させることができる。
- (2) 燃料に CeO_2 触媒を添加することで、スート (BC) の発生量を約 20%低減させることができる。
- (3) 燃料に水と触媒の両方を加えることで、スート (BC) の発生を約 70%低減させることができる。
- (4) 排気ラインに DPF を設置することで、残りのスート (BC) のほとんどを除去できる。
- (5) DPF に蓄積された BC の大部分は、エンジンと DPF の間に設置されたバーナーで除去・燃焼させることができる。
- (6) 一方、長期間使用すると、燃料中に含まれる灰分 (Ash) が DPF に蓄積されるため、圧縮空気による逆洗を行い除去する必要がある。この装置については、今後新たに開発する必要がある。

このシステムを使用することで、船用ディーゼルエンジンからのスート (BC) 排出をゼロに近づける可能性がある。

このシステムは、船用ディーゼルエンジンからの BC 排出をゼロに近づける可能性がある。また、地球環境はわずかな影響であっても元の状態に戻ることはいたため、提案システムのような地球環境への影響を最小限に抑える、あるいはそれ以上影響させないような技術的解決策は、最大限に活用されるべきであると考ええる。

参考文献

- 1) Minoru Tsuda, Kazuyuki Maeda, Dai Yamanishi, Masateru Ishida, Development of Black Carbon Zero System for Marine Diesel Engines, CIMAC Congress Busan, Paper, No.124, 2023.

- 2) Kazuyuki Maeda, Takasaki, Goichi Kon, Minoru Tsuda, Machiko Hori. PM Emission from Ships - How to measure and reduce PM during voyage, CIMAC Congress Bergen, Paper No.87, 2010.
- 3) Kazuyuki Maeda, Junichi Hayashi, Atsushi Shimizu, Hirokazu Ohno, Junichi Oguma, Atushi Sakane, Dai Yamanish, Development of NOx Reduction System that Combines an Oxygen Reduction Membrane with Water Mixed Fuel, CIMAC Congress Helsinki, Paper No.176, 2016.
- 4) Kazuyuki Maeda, Hirokazu Ohno, Minoru Tsuda, Dai Yamanishi, Next-Generation Concept Engines to Meet Stronger Environmental Restrictions, CIMAC Congress Vancouver, Paper No.182, 2019.
- 5) 山西 大, 津田 稔, 石田雅照, 山本幸典, DPF を用いた船舶起源 PM(BC)の捕集・除去システムの開発, Proceedings of JIME 2021, Paper 277-278.
- 6) Minoru Tsuda, Kazuyuki Maeda, Dai Yamanishi, Katsuya Narita, Yoriyuki Kambe, Kiyotaka Omote, Effect of cerium coating on oxidative breakdown of particulate matter in a diesel particulate filter, JSAE Congress 2020(Autumn), Paper No.20206240.
- 7) Minoru Tsuda, Dai Yamanishi, Masateru Ishida, Kazuyuki Maeda, Kazuyuki Maeda. Development of system that continuously recycle DPF in the low load, JSAE Congress 2021(Spring), Paper No.20215154.
- 8) Minoru Tsuda, Dai Yamanishi, Masateru Ishida, Junichi Ohara, Kazuyuki Maeda. Development of Continuously Regenerated DPF System at Low Load with Suction Air Heater, JSAE Congress 2021(Autumn), Paper No.20216018.
- 9) Minoru Tsuda, Junichi Ohara, Dai Yamanishi, Masateru Ishida, Kazuyuki Maeda, Effect on performance improvement of DPF by setting vacuum insulation device, JSAE Congress 2022(Spring), Paper No.20225075.
- 10) Minoru Tsuda, Junichi Ohara, Dai Yamanishi, Masateru Ishida, Kazuyuki Maeda. Development of vacuum insulation device for DPF with high performance on heat transfer, JSAE Congress 2022(Autumn), Paper No.20226012.

第6章 水混合燃料によるGHG対応^{1),2)}

6.1 水混合動植物性油燃料

6.1.1 まえがき

燃料に水を混合することにより、NO_x や BC (ブラックカーボン: Black Carbon) の同時低減が可能である。また、CO₂ の低減効果はエンジンの種類と運転状態により異なり、NO_x と SFOC (燃料消費率: Specific Fuel Oil Consumption) のトレードオフの関係を利用したCO₂の低減はすべてのエンジンにおいて可能であるが、CO₂の低減割合に比例してNO_xが増加する。これに対し、動植物性燃料は、再生可能エネルギーであり、実質的なCO₂の排出量をゼロにすることが可能である。

本研究では、動植物油性燃料を船用小型高速機関に使用して、水を混合した場合の燃焼特性を明らかにした。

6.1.2 実験装置と方法

6.1.2.1 植物油性燃料および動物油性燃料の性状

表1に、一般的な軽油、A重油、C重油、植物性燃料および動物性燃料の性状を示し、図1に、5種類の燃料油の温度-動粘度曲線を示す。通常、ディーゼル機関において良好な噴霧を得るためには、動粘度を20cSt以下の必要がある。本実験では、植物性燃料および動物性燃料を70℃まで加熱を行うことにより動粘度を20cSt以下になるように調整して実験に使用した。

Table 1 Fuel properties

項 目	単位	Gas Oil	A-Oil	C-Oil	Vegetable Oil	Animal Oil
Density	g/cm ³	0.8072 (40°C)	0.8236 (40°C)	0.9334 (90°C)	0.8903 (70°C)	0.8857 (70°C)
Kinematic viscosity	mm ² /s	2.20 (40°C)	2.78 (40°C)	20.0 (90°C)	16.6 (70°C)	17.29 (70°C)
Carbon	mass%	86.0	87.6	88.0	77.2	76.3
Hydrogen	mass%	13.6	12.4	10.8	11.6	11.9
Sulphur	mass%	—	0.4	0.88	—	0.0057
Oxygen	mass%	—	—	—	11.2	11.4
Low Heating Value	MJ/kg	42.96	42.06	40.59	37.73	36.65

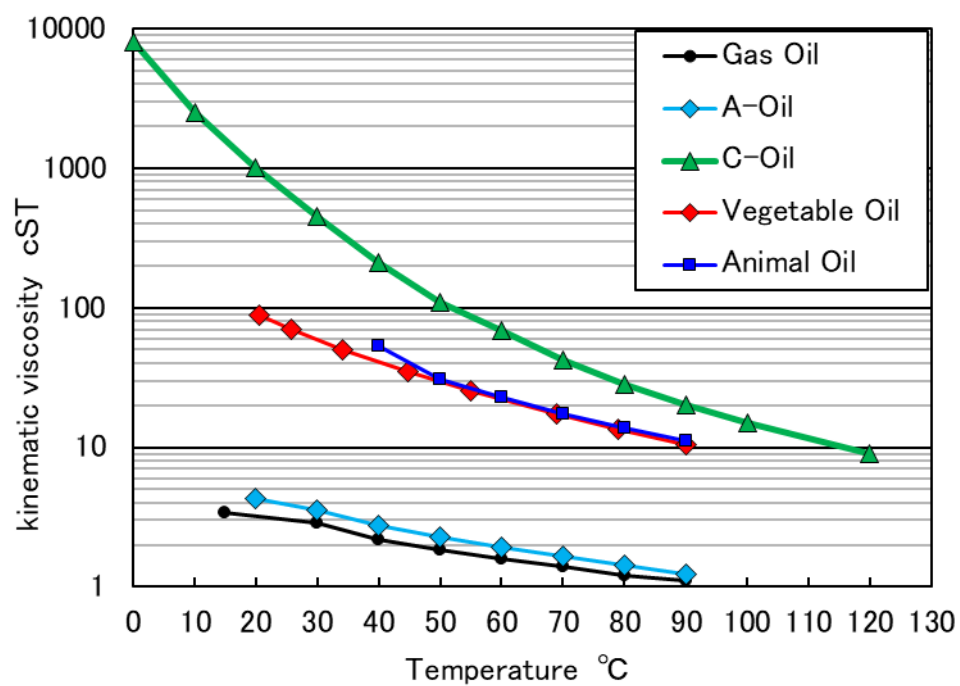


Figure 1 Temperature-kinematic viscosity diagram

6.1.2.2 動植物油を用いたエンジンの排ガス特性実験

実験は、動植物油性燃料を船用小型高速ディーゼル機関 ($214\text{kW}/3101\text{ min}^{-1}$) に使用して、水を混合した場合の燃焼特性を明らかにした。なお、動物油は、軽油に 25% と 50% を混合させて使用した。

6.1.3 実験結果と考察

図 3 に、水混合割合による NO_x とスート (BC) の変化を示す。植物油と動物油から排出される NO_x は軽油より高いが、水を混合する事により NO_x を低減できる。また、植物油は、軽油と比較して、スート (BC) の排出量が少なく、水を混合させない状態でも軽油の約半分となり、水を混合する事でさらにスート (BC) の低減効果がある。

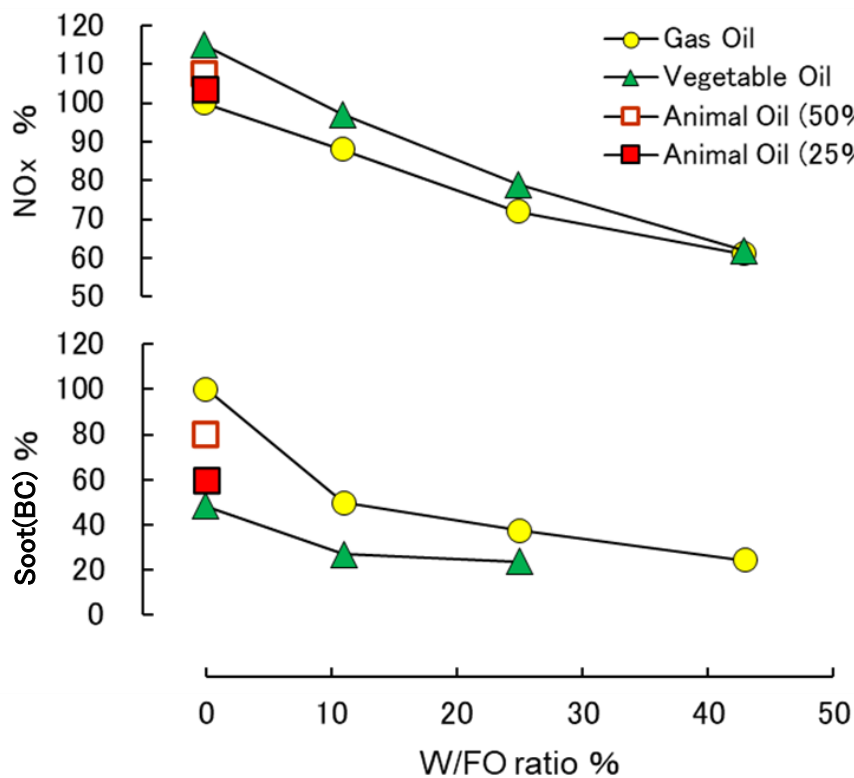


Figure 3 Variation of NO_x and Soot(BC) with water mixing ratio

図 4 に、スート（BC）の低減効果を示す．動植物油を用いるとフィルタの色が薄くなり，水を混合する事でさらにスート（BC）の低減効果がある．

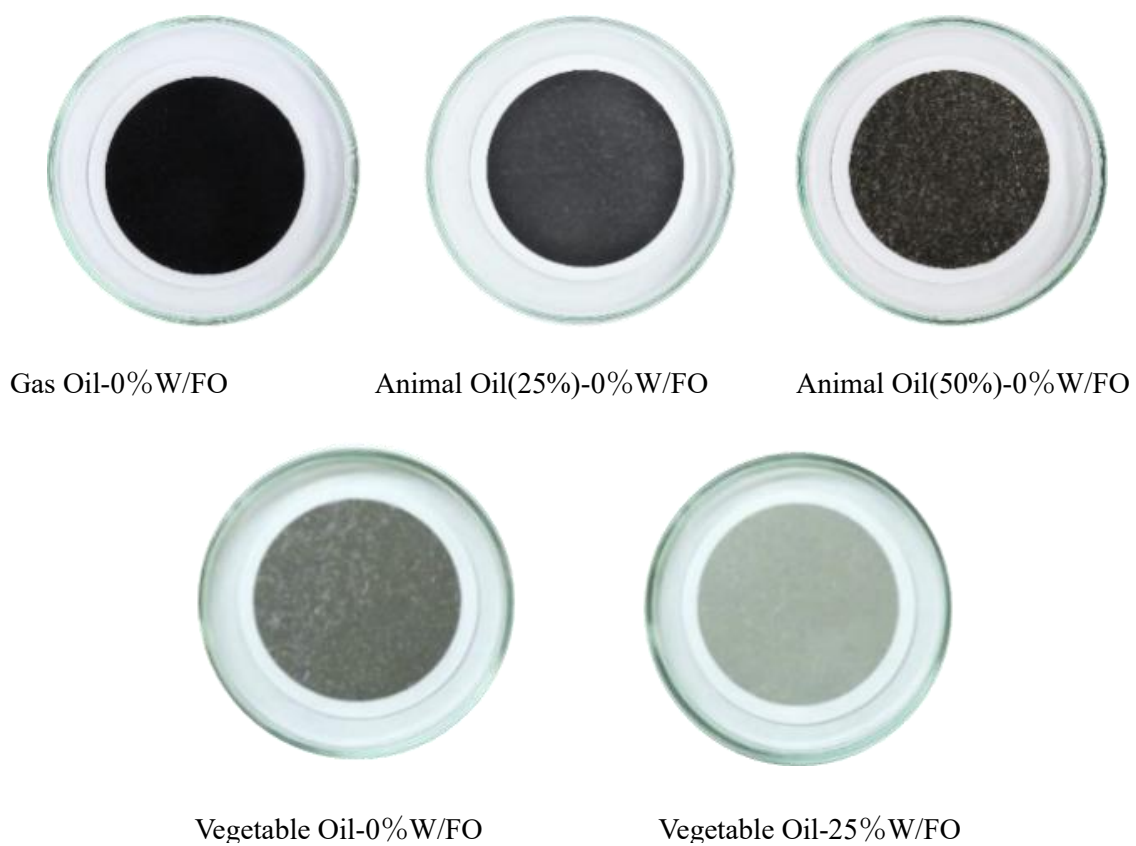


Figure 4 Effectiveness of reducing Soot(BC)

図 5 に、植物油性燃料におけるシリンダ内圧力と噴射圧力を示す。軽油に比べて粘度が高いため、噴射圧力が高く噴射期間が長くなる。

以上より、動植物油を燃料とする事で CO_2 の排出量をゼロに近づけることができ、BC も低減できる。また、燃料に水を混合することで NO_x と、さらにスート (BC) の低減効果が大きくなる。

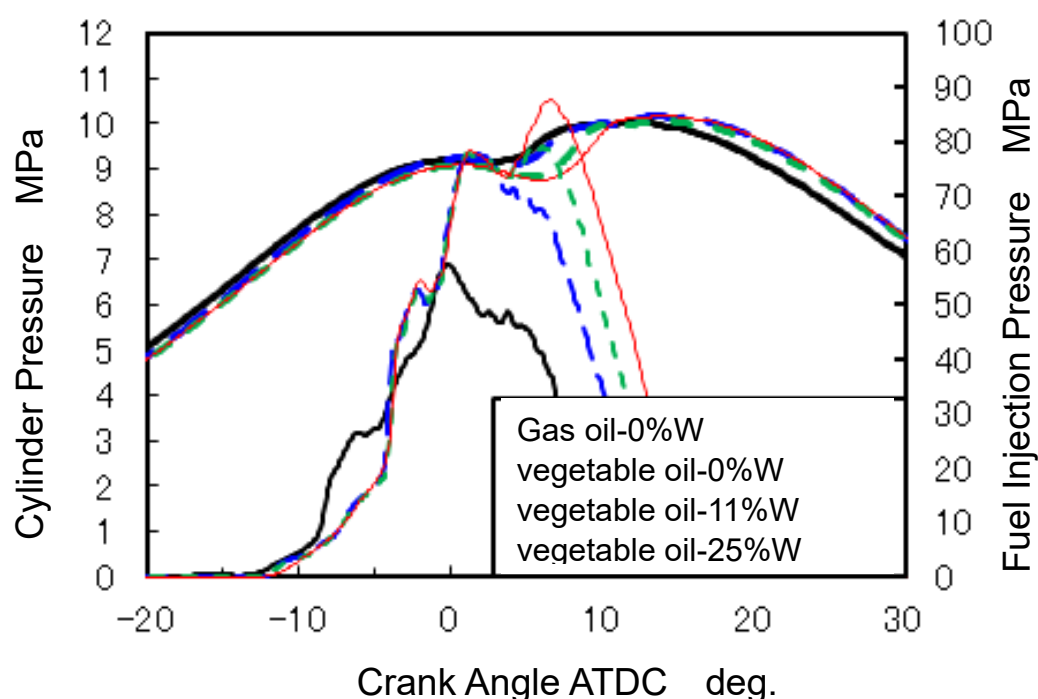


Figure 5 Cylinder and fuel pressures for different W/Vegetable fuel oil ratios

6.1.4 まとめ

- (1) 加熱した水混合動植物油性燃料を用いることにより、既存の大型エンジンにおいても CO_2 の排出量をゼロに近づけることが出来るとともに NO_x 、スート (BC) の同時低減が可能となる。
- (2) 動植物油燃料については、陸上の施設や航空機のゼロエミッション燃料との競合となるため、船舶における全ての燃料を“動植物性燃料”に置き換えることは困難である。

(3) しかし，“アンモニア混合燃料技術”における「アンモニアの助燃用燃料」として使用することにより，「2023 IMO GHG 削減戦略」に示された「2050 年頃までに GHG 排出ゼロ」に対応できる可能性がある。

6.2 アンモニア水混合燃料

6.2.1 まえがき

2050 年 GHG 対応（ゼロエミッション）燃料としてアンモニア燃料が注目されている。アンモニア燃料は化石燃料に比べて着火性と燃焼速度において劣るため，小型高速機関における燃焼は困難とされている。本研究では，まず，水産大学校に設置された定格 $214\text{kW}/3101\text{min}^{-1}$ の小型高速機関の負荷率を 50%に設定し，軽油にアンモニア水を 15%混合した燃料を用いて運転した時の指圧線図，燃料噴射管内圧力，燃料消費量などのエンジン性能と，排ガス中に含まれる NO_x ，CO 成分などを分析した。その後，アンモニア水の混合割合を 25%および 35%にして，同様の実験を行った。次に，これらの結果を解析するとともに，その特性を活用した小型高速機関におけるアンモニアの燃焼システムを提案した。

6.2.2 実験装置と方法

図 6 に，実験に使用した“アンモニア水混合燃料生成装置”の概要を示す。図において，通常燃料は燃料タンクから直接エンジンに供給される。これとは別に，①アンモニア水タンク，②軽油タンク，③軽油用流量計，④アンモニア水用流量計，⑤流量調整弁，⑥燃料に対するアンモニア水の混合割合を任意に設定可能な制御装置，⑦循環ポンプ，⑧ミキサーから成る“アンモニア水混合燃料生成装置”を燃料の供給ラインに接続することにより，任意の割合に設定されたアンモニア水混合燃料がエンジンに供給できる。表 2 に，供試機関の主要目を示す。燃料は市販の軽油を使用し，アンモニア水は市販の“25%アンモニア水”を使用した。

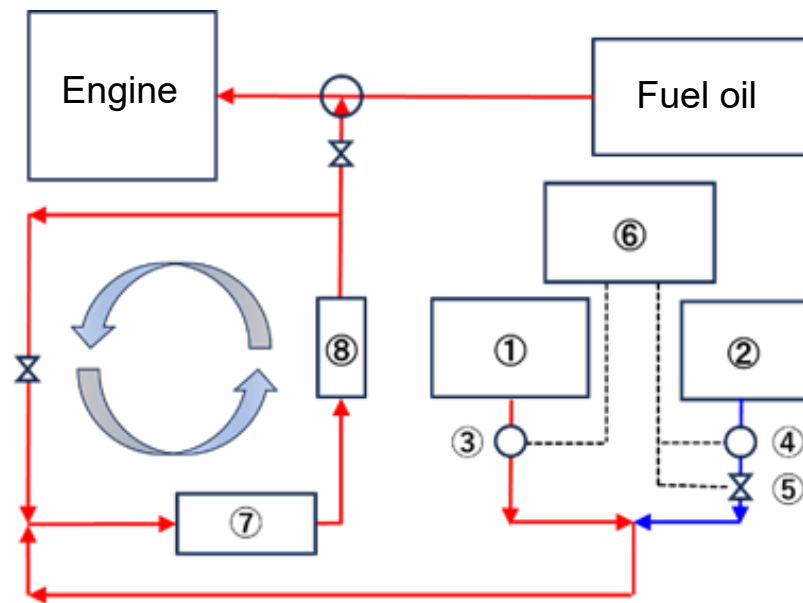


Figure 6 Diagram of the ammonia water mixed fuel generator

Table 2 Test engine specifications

		4 Stroke
Number of Cylinders		6
Cylinder Bore	mm	100
Piston Stroke	mm	110
Max. Power	kW	214
Engine Speed	min ⁻¹	3101
Max. Pme	MPa	1.59
Fuel Type		Gas oil

6.2.3 実験結果と考察

図 7 に、“25%アンモニア水”を燃料に混合して運転したときの、アンモニア水混合割合に対する、NO_x および SFOC（軽油の消費量から算出）の関係を示す。図において、NO_x はアンモニア水混合割合 15%では 0%の値とほぼ同じであるが、それ以上の混合割合では直線的に増加している。これは混合割合 15%では、アンモニア水に含まれる水の NO_x 低減効果とアンモニアの燃焼によって生成される Fuel NO_x の値が相殺されるが、アンモニア水の混合割合が増加するとともに Fuel NO_x の生成量が水による NO_x 低減量よりも多くなることを示している。また、アンモニア水を混合すると軽油の燃料消費率が改善されていることから、アンモニアの発熱量が出力に変換されていることが分かる。

図 8 に、アンモニア水混合割合に対する指圧線図と燃料噴射圧力の変化を示す。図において、アンモニア水に含まれる水の影響により噴射量が増加するとともに着火遅れが長くなっている。

図 9 に、アンモニア水混合割合に対する熱発生率の変化を示す。図において、アンモニア水混合割合の増加とともに、予混合燃焼量が増加しているが、燃焼期間（燃え切り）は改善されている。

図 10 に、アンモニア水混合割合に対する燃焼割合の変化を示す。図において、アンモニア水混合割合が増加すると燃焼の開始時期は遅くなるが、噴射された燃料の燃焼割合からアンモニアが良好に燃焼していることが分かる。なお、排ガス中のアンモニア濃度を計測した結果、150～500ppm であった。

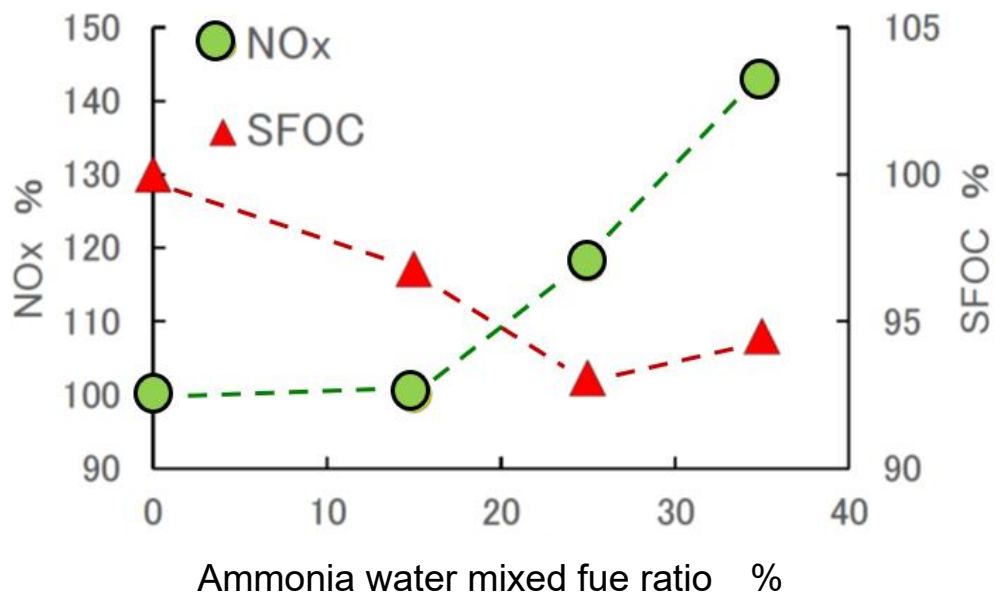


Figure 7 Combustion characteristics of ammonia in high-speed engine

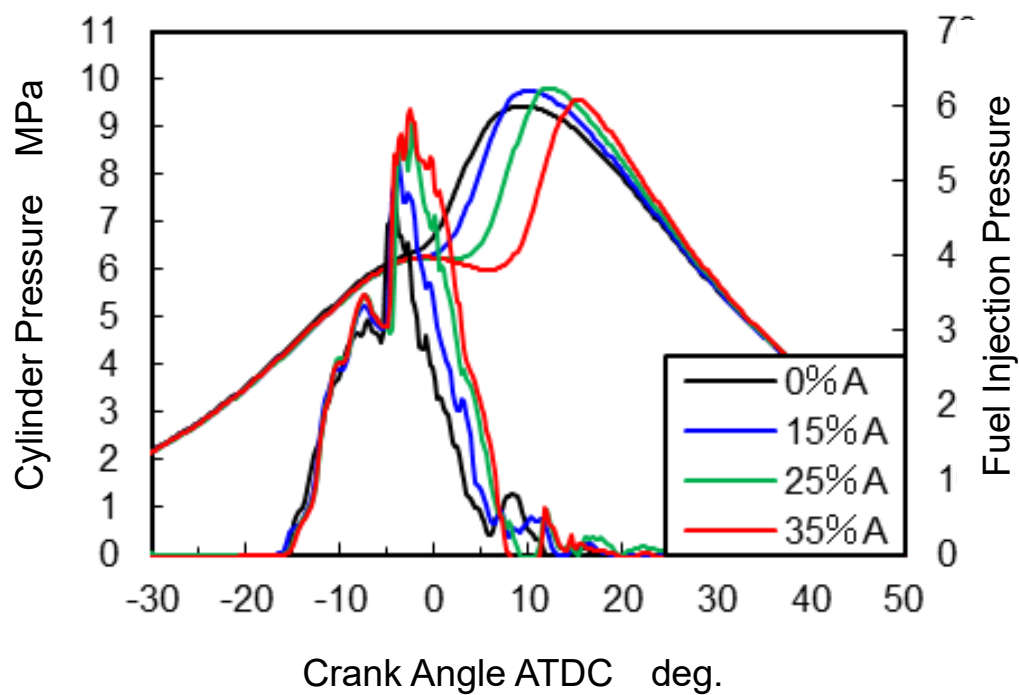


Figure 8 Cylinder and fuel pressures for different Ammonia water/FO ratios

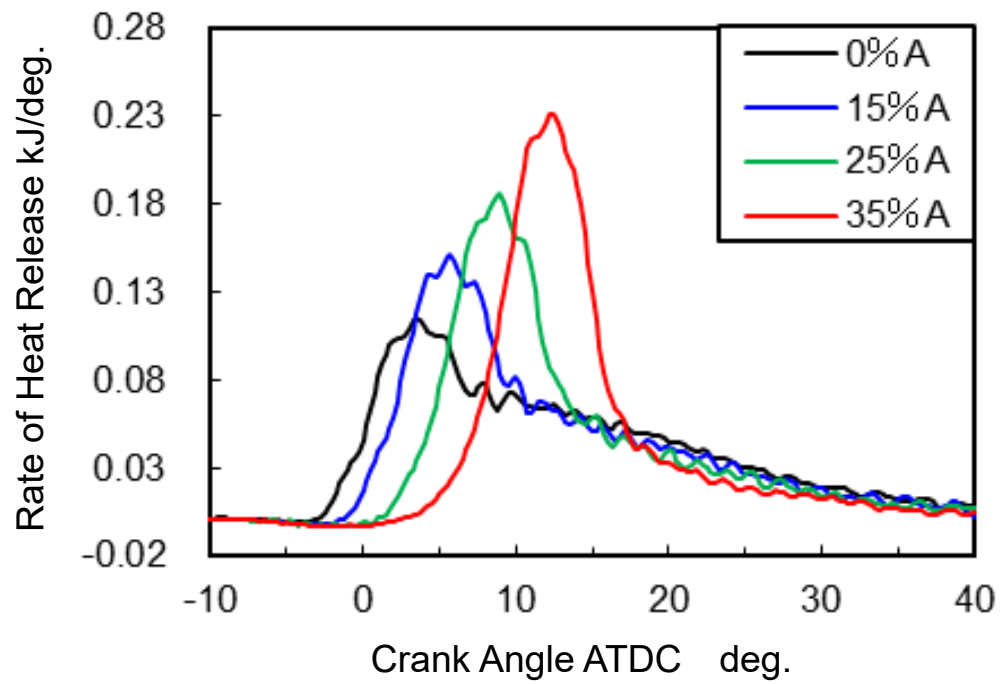


Figure 9 Rate of heat release for different Ammonia water/FO ratios

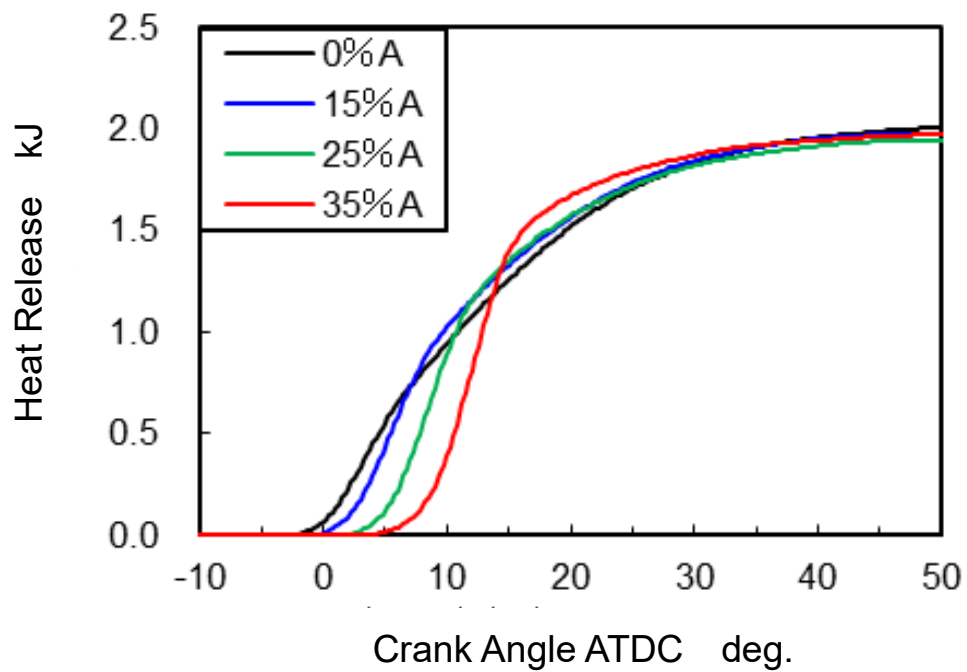


Figure 10 Total heat release for different Ammonia water/FO ratios

以上の結果から、小型高速機関におけるアンモニア燃焼では、Fuel NO_x を生成するとともに排ガス中に未燃のアンモニアを含むが、良好に燃焼し、GHG の削減に貢献できることが明らかになった。しかしアンモニアの燃焼により温室効果係数が CO₂ の 300 倍である N₂O 発生 の恐れがある。今後は、N₂O の生成機構を解明し、その低減方法や後処理装置等の開発などを検討する必要がある。

図 11 に、小型高速機関にも対応可能なアンモニアの燃焼システムを示す。排気系統に SCR を設置したシステムを用いることにより、Fuel NO_x を未燃アンモニアによって低減することが可能となる。

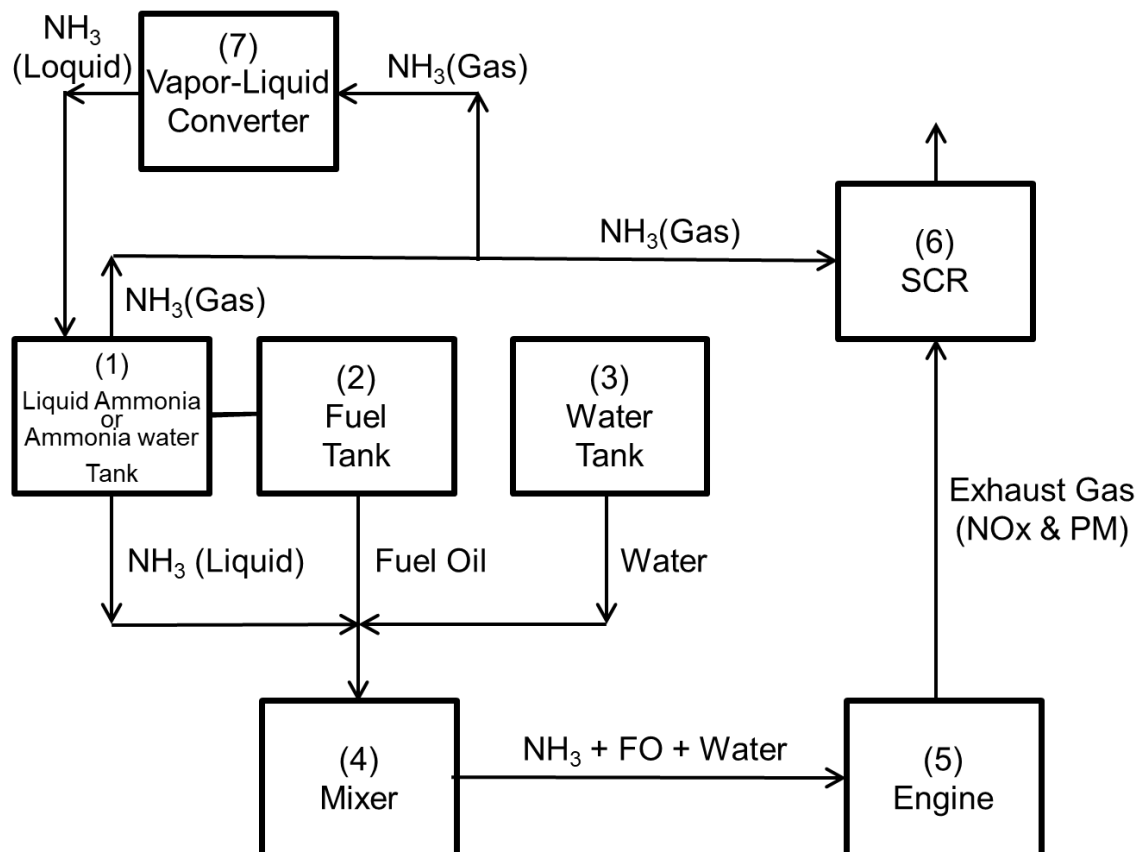


Figure 11 Outline of the Ammonia combustion system for retrofit

6.2.4 まとめ

- (1) “水混合燃料技術”は、約 2~3 μm まで微粒化した水粒子を燃料中に混合することにより、排ガス中の NO_x と PM を低減する技術であるが、水の代わりに“アンモニア水”を用いることにより（この技術を“アンモニア水混合燃料技術”と呼ぶ）、水混合燃料が有する“ NO_x と PM を低減”という特性を維持した状態で、アンモニアの燃焼（ CO_2 を排出しない）による発熱量の増加分だけ、軽油や重油などの化石燃料の燃焼量が軽減され、 CO_2 の低減が可能となる。
- (2) この技術を用いることにより、「2023 IMO GHG 削減戦略」に示された「2030 年までに、GHG ゼロエミッション燃料等の使用割合を 5~10%」に対応できる可能性がある。
- (3) 水の代わりに“液体アンモニア（原液）”を用いることにより（この技術を“アンモニア混合燃料技術”と呼ぶ）、化石燃料の燃焼により、アンモニア燃焼の特性である“着火しにくい”、“燃焼速度が遅い”などの難燃性を補い、液体アンモニア（原液）による発熱量の増加分だけ、軽油や重油などの化石燃料の燃焼量が軽減され、 CO_2 の低減が可能となる。
- (4) 排気系統に SCR を設置したシステムを用いることにより、Fuel NO_x と未燃アンモニアとをチタン・バナジウム系触媒を用いて反応させ N_2 に変換することによって低減することが可能となる（レトロフィットが可能となる）。
- (5) アンモニアの燃焼における課題は、次の通りである。
 - (ア) アンモニアの毒性
 - (イ) 着火しにくく燃えにくいというアンモニアの燃焼特性
 - (ウ) アンモニアの組成に起因する“Fuel NO_x ”と、“地球温暖化係数 265 の N_2O ”が生成・排出される。
- (ア) については、既に市販されており、常温・常圧での貯蔵・移送が可能な“アンモニア水”を用いることにより、原則、特別な装置や取扱いが不要となる。
- (イ) については、助燃剤として燃焼特性に優れた“化石燃料”や“動植物性燃料”を用いることにより、液体アンモニアを良好に燃焼させることが可能となる。
- (ウ) “Fuel NO_x ”については、燃料に水を混合（アンモニア水混合燃料）する

ことにより低減可能である。また，“Fuel NO_x”と“N₂O”の低減については，「燃焼改善による方法」や，「排気管系統に触媒を用いた低減装置を設置する」などの研究・開発を実施する必要がある。

- (6) 水産大学校においても，現在，“水混合燃料技術”を活用した，“アンモニア水混合燃料技術”を用いてこれらの研究・開発を実施中で有り，今後は“液体アンモニア混合燃料技術”を用いた研究・開発を計画している。

参考文献

- 1) 山西 大，津田 稔，前田和幸，段 智久，水混合動植物性燃料による CO₂・NO_x・BC の同時低減. *Proceedings of JIME 2022*, 145-146.
- 2) 津田 稔，山西 大，石田雅照，井原 剛，ディーゼルエンジンにおけるアンモニア水混合燃料の燃焼特性評価. *Proceedings of JIME 2023*, 199-200.

第7章 水混合燃料技術の実用化¹⁾

7.1 まえがき

IMO (International Maritime Organization) における船舶起源の排ガス規制は、2000 年の NO_x 1 次規制に始まり、2011 年の NO_x 2 次規制、2016 年の NO_x 3 次規制と厳しさを増している。これに加え、一般海域における燃料油の硫黄分濃度規制が実施されており、北極海航路における BC (Black Carbon) 規制が検討されている。また、国際海運からの GHG (温室効果ガス : Green House Gas) 排出削減対策を委ねられた IMO が 2018 年に採択した「GHG 削減戦略」を境に、我が国においては GHG 削減に対応する技術開発が活性化するとともに、国際的にも GHG 排出削減により一層取り組むことが求められている。

水混合燃料技術を用いることにより、水が蒸発する際の気化熱により着火遅れ期間が長くなるとともに、比熱の増加による燃焼温度の低下により NO_x が低減する。また、一般に、負荷率一定において燃料に水を混合しても一回の燃焼における燃料の噴射量はほぼ一定であるが、水の混合割合に比例して水混合燃料の噴射量が増加し、噴霧への導入空気量が増加するため燃焼が改善される。これにより BC が低減される^{2),3)}とともに出力時間当たりの燃料消費量を示す SFOC (Specific Fuel Oil Consumption) が改善^{4),5)}される可能性がある。一般に、船舶に用いられている石油系燃料は、約 86%の炭素分で構成されているため、SFOC が改善されると GHG も削減される⁶⁾。

このように、水混合燃料技術を有効に活用することにより、現在、国際海運に求められている NO_x, BC, GHG の低減が可能となるが、これを実船に適用する場合、次のような解決すべき課題がある。燃料に水を混合する場合、通常、燃料の貯蔵やエンジンへの供給ラインにおいて燃料と水が分離するのを防止するための添加剤 (界面活性剤) を使用するが、混合が不均一であったり、エンジンの停止時やブラックアウト時に燃料供給ラインに水が混合された燃料が残留すると、時間の経過とともに燃料と水が分離して、起動困難やエンジン損傷などのトラブルの原因となる。また、同一の燃料噴射装置を用いた場合、水の混合割合に比例して噴射される燃料の割合が減少するため、最大出力が制限される。

本研究では、水混合燃料技術を実船に適用することにより、国際海運に求められている NOx, BC の低減に貢献することを目的として、まず、軽油や A 重油および C 重油に水を混合した場合の燃料中における水粒子の挙動を解析した。次に、この解析結果を基に開発した、添加剤を必要としない“水混合燃料生成装置 7” の概要を示すとともに、この装置を、エンジンの起動時、低負荷運転時、通常運転時、高負荷運転時、およびブラックアウト時にも対応可能にするために、それぞれの運転状態に対応した燃料をエンジンに供給可能な制御装置を増設した“実船対応型水混合燃料供給システム”を開発し、その概要を示す。更に、このシステムを水産大学校の練習船“天鷹丸”の発電装置に設置し、実船の運航時に必要となる機能の作動確認および水混合燃料を使用した場合の NOx, BC の改善効果を明らかにするとともに、今後の展望を示す。

7.2 実船対応型水混合燃料供給システムの開発

7.2.1 燃料中の水粒子の挙動

水を微粒化して燃料に混合した時、水の粒子の沈降速度 V は、ストークスの式 (1) で示される。

$$V = \frac{D_p^2 (\rho_p - \rho_f) g}{18\eta} \quad (1)$$

上式において、 V ：沈降速度[m/s]、 D_p ：水の粒子径[m]、 ρ_p ：水の密度[kg/m³]、 ρ_f ：燃料油の密度[kg/m³]、 g ：重力加速度[m/s²]、 η ：燃料油の粘度[kg/(m・s)]である。

式 (1) を用いて、船舶用燃料として用いられている軽油、A 重油および C 重油に水を混合したときの水の粒子の挙動を考察する。表 1 に、軽油、A 重油および C 重油の代表的な性状を示す。表 1 より、水との密度差が大きく粘度が低い（低密度・低粘度の）軽油や A 重油中における水の粒子は沈降速度が大きくなるため、燃料と分離しやすい。これに対し、水との密度差が小さく粘度が大きい C 重

油中における水の粒子は沈降速度が小さくなるため、燃料と分離しにくいことが分かる。このことから、軽油や A 重油に水を混合する場合、燃料と水の分離を防止するための添加剤が必要になるが、C 重油の場合はこれを必要としないとされていた。しかし、ストークスの式 (1)によれば、沈降速度 V [m/s] には水の粒子径 D_p [m]が大きく係わっている。

図 1 に、軽油、A 重油および C 重油に粒子径 D_p [m]の水を混合した場合の、水の粒子径 D_p [m]と沈降速度 V [m/s] の関係を示す。図において、粒子径が 50[μm]において軽油と A 重油中における水の粒子の沈降速度を C 重油中における水の粒子の沈降速度と比較した場合、軽油と A 重油中における水の粒子の沈降速度は C 重油中における水の粒子の沈降速度の約 50 倍となるが、軽油と A 重油中における水の粒子径を 5[μm]以下とすることにより C 重油と同程度になり（分離しにくくなり）、軽油と A 重油中における水の粒子径を 2[μm]以下とすることにより、C 重油中における粒子径 10[μm]の水の粒子と同程度の沈降速度となる（更に分離しにくくなる）。

以上、低密度・低粘度である軽油や A 重油は C 重油に比べて分離しやすいため添加剤を必要とするとされてきたが、ストークスの式を用いた解析結果によれば、水の粒子径をできるだけ小さくすることにより、低密度・低粘度の燃料中においても、燃料と水が分離しにくくなることが示された。

Table 1 Properties of used fuel oils in research studies

	Density (kg/m ³)	Kinematic viscosity (cSt)
GO (40°C)	807.2	2.20
MDO (40°C)	823.6	2.78
MFO (90°C)	933.4	20.0

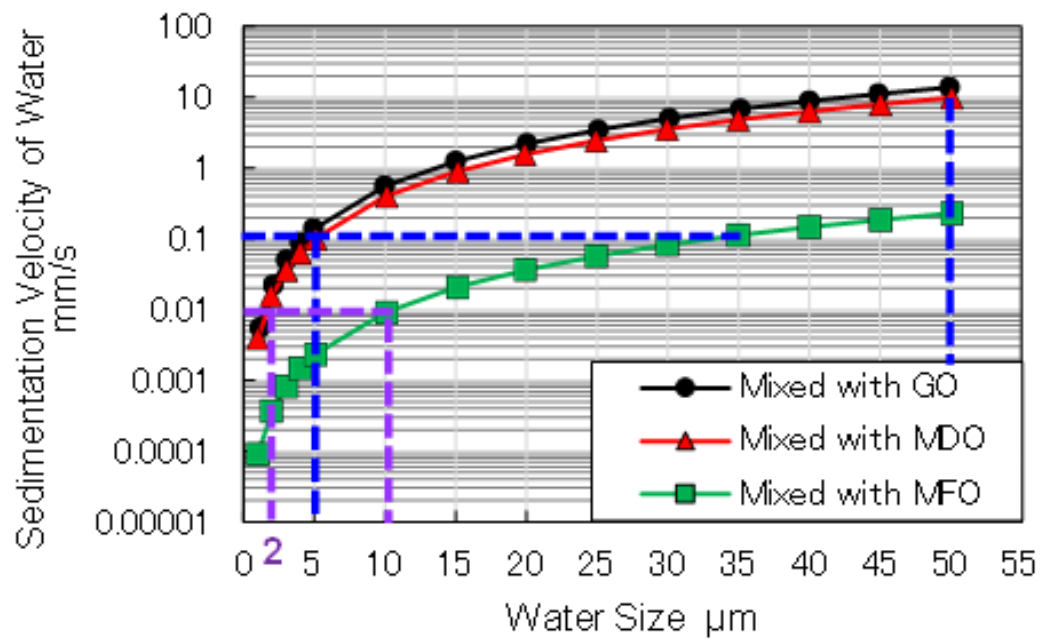


Figure 1 Relationship between water particle size and sedimentation velocity inside water mixed fuel

7.2.2 水混合燃料生成装置の概要

前節において、軽油や A 重油に水を混合する場合、水の粒子径をできるだけ小さくすることにより、燃料と水が分離しにくくなるため、添加剤を必要としなくなる可能性があることを示したが、この特性を用いて開発した“水混合燃料生成装置”の概要を図 2 に示す。

通常、燃料は①燃料タンクから直接②エンジンに供給される。これとは別に、③水タンク、⑨水混合燃料用流量計、水混合燃料に使用する⑦水用流量計、水用⑥流量調整弁、水の混合割合を設定する⑧コントロールユニット、④循環ポンプ、ミキサー（ラモンドナノミキサー⁸⁾）⑤（以下、ミキサーと呼ぶ）から成る“水混合燃料生成装置”を燃料の供給ラインに接続することにより、設定された水混合割合の水混合燃料がエンジンに供給できる。

この“水混合燃料生成装置”の主要部である⑤ミキサーは、駆動部を持たない静止型流体混合器で、ハニカム構造のエレメントを直列に連結したユニット内部に複数の流体を加圧通過させ、せん断力を作用させることにより、超微粒化かつ均一化混合を行うことができる装置である。

図 3 に、本装置を用いて C 重油に水を混合したときの水の粒径分布を示す。生成される粒子径は、1~2[μm]であることから、軽油や A 重油に水を混合した場合も同様の粒子径となった場合、図 1 から、水の粒子径が約 10[μm]の C 重油と同程度の分離特性となる。このことから、低密度・低粘度の燃料に水を混合させた場合でも、図 2 に示すように、①燃料タンクから供給される燃料と③水タンクから供給される水を合流させた後に、エンジンの燃料噴射装置に④循環ポンプと⑤ミキサーから構成される循環ラインにおいて水を連続的に微粒化させながらその一部をエンジンに供給して、燃料と水が分離する前に噴射することにより、添加剤を必要としなくなる。

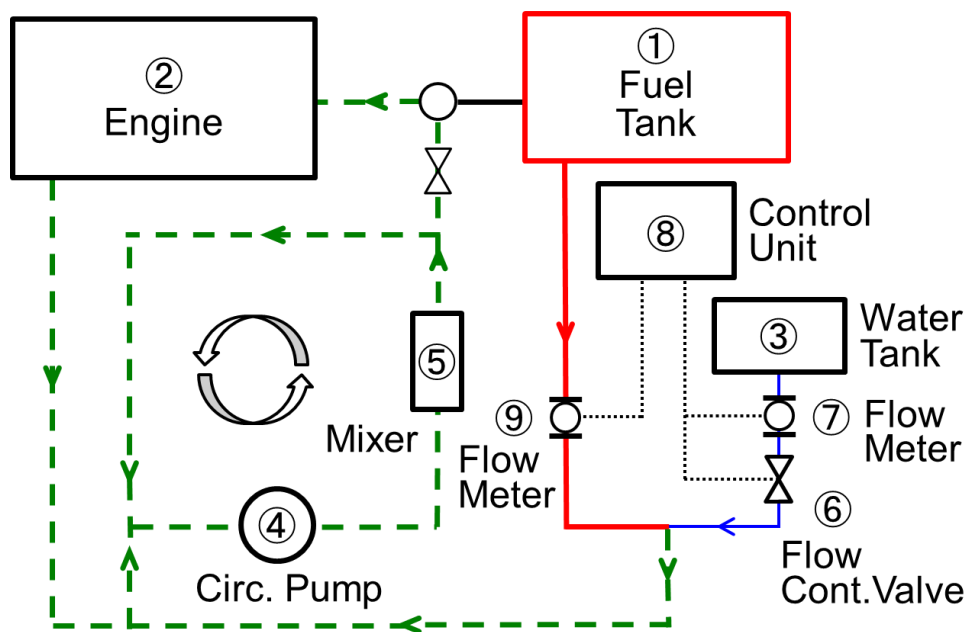


Figure 2 Schematic diagram of WMF generator

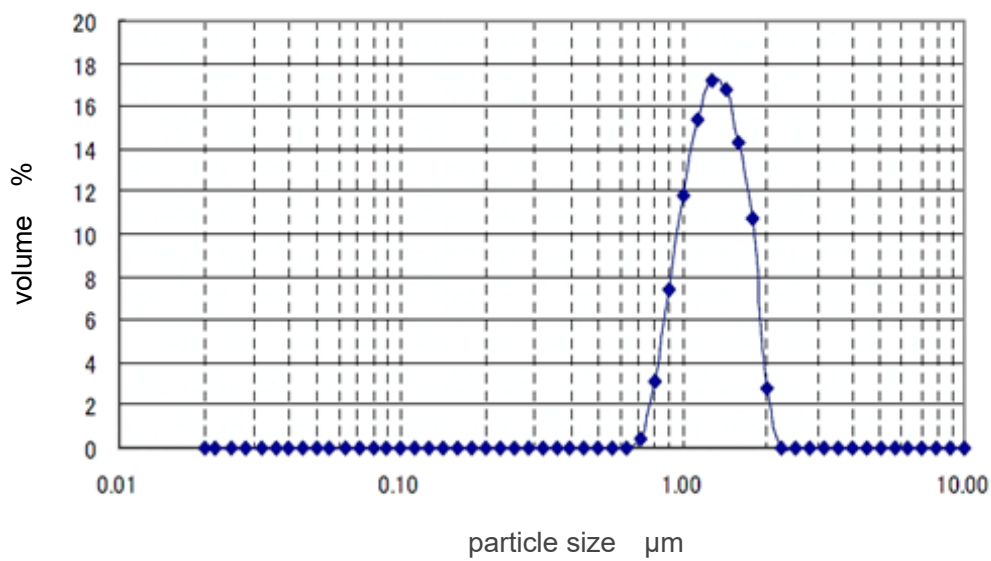


Figure 3 Water particle size distribution generated by WMF

7.2.3 実船対応型水混合燃料供給システム

図4に、新たに開発した，“実船対応型水混合燃料供給システム”の概要を示す。本システムは，エンジンの運転状態を(1) 起動時，(2) 負荷率 40%未満，(3) 負荷率 40%以上から 80%未満，(4) 負荷率 80%以上，(5) ブラックアウト時の 5 種類に設定し，それぞれの運転状態によってエンジンに供給される燃料の種類（燃料又は水混合燃料）を切換えることが可能な制御装置と分離タンクを備えている。エンジンに水混合燃料を供給する負荷率を 40%から 80%という値に設定したのは，主機関や発電機用機関は，一般に負荷率 40%以下では燃焼が悪化し，負荷率 80%以上ではエンジン各部において機械的・熱的な応力が増加するとともに熱効率も低下するという理由から，エンジンは負荷率 40%から 80%の範囲で使用される場合が多いためである。なお，負荷率 40%から 80%という設定値は，本システムを設置した船舶の運転条件により変更（再設定を含む）することが可能である。

以下に，図4を用いて“実船対応型水混合燃料供給システム”における，エンジンの運転状態に対応したバルブの作動状況と，エンジンに供給される燃料の種類を示しながら，本システムの概要を述べる。

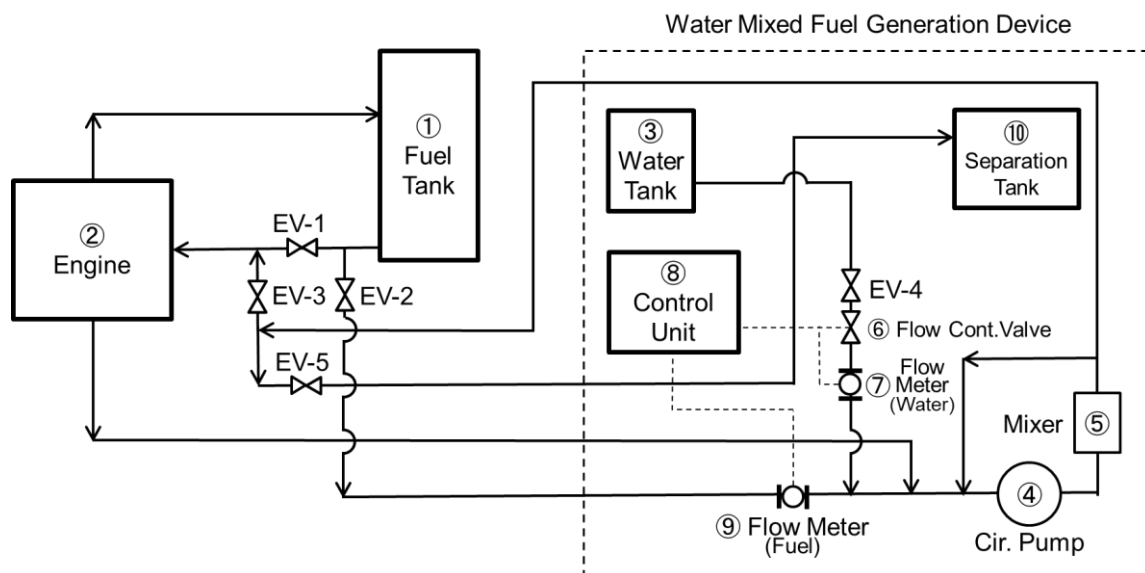


Figure 4 Schematic diagram of Water-Mixed Fuel Supply System for Ships in Service

7.2.3.1 起動時

起動時は、①燃料タンクから②エンジンの間に設置された“EV-1”を開き、①燃料タンクと“水混合燃料生成装置”の間に設置された“EV-2”と、“水混合燃料生成装置”とエンジンの間に設置された“EV-3”を閉じて運転することにより、エンジンには燃料のみが供給される。

7.2.3.2 負荷率 40%未満

①燃料タンクに貯蔵された燃料のみによってエンジンを起動させた後、“水混合燃料生成装置”に設置された④循環ポンプを起動するとともに、①燃料タンクから②エンジンの間に設置された“EV-1”を閉じて、①燃料タンクと“水混合燃料生成装置”の間に設置された“EV-2”と、“水混合燃料生成装置”とエンジンの間に設置された“EV-3”を開いて運転することにより、②エンジンには、①燃料タンクから供給された燃料が“EV-2”、“水混合燃料生成装置”、“EV-3”を経てエンジンに供給される。この時、“水混合燃料生成装置”に設置された③水タンクから⑤ミキサーに至る“EV-4”を閉じた状態にしておくことにより、②エンジンには①燃料タンクに貯蔵された燃料のみが供給される。

7.2.3.3 負荷率 40%以上から 80%未満

負荷率が 40%以上になると、③水タンクから⑤ミキサーに至る“EV-4”を開いた状態にすることにより、②エンジンには、①燃料タンクに貯蔵された燃料と③水タンクから供給された水が⑤ミキサーによって混合され、水混合燃料が供給される。なお水の混合割合は、①燃料タンクから⑤ミキサーに至る燃料の流量と、③水タンクから⑤ミキサーに至る水の流量を、⑨燃料流量計と⑦水流量計により計測し、その信号を⑧コントロールユニットに送信し、予め設定した水の混合割合になるように水の⑥流量調整弁を制御することにより、エンジンの負荷が変動しても水の混合割合を設定値に保つことができる。

7.2.3.4 負荷率 80%以上

燃料に水を混合した場合、燃料噴射ポンプにおける連続最大出力時の燃料吐出量は、水を混合した分だけ減少するため最大出力が制限されることになる。本システムにおいては、水の混合割合を最大 20%に設定するとともに、負荷率が 80%以上になると③水タンクから⑤ミキサーに至る“EV-4”を閉じることにより、②エンジンには①燃料タンクに貯蔵された燃料のみが供給されるため、負荷率 80%以上においても出力が制限されない通常の運転が可能となる。

7.2.3.5 ブラックアウト時

水混合燃料による運転中にブラックアウトが発生した場合、燃料供給システムには水混合燃料が残存し、時間の経過とともに燃料と水が分離すると、再起動の際にエンジントラブルが発生する可能性がある。本システムでは、ブラックアウトからの復旧時において、“EV-4”を閉じて水の供給を止めるとともに、“EV-3”を閉じて“EV-5”を開いた状態で④循環ポンプを作動させることにより、①燃料タンクから供給された燃料のみが“水混合燃料生成装置”内に供給され、残存した水混合燃料を⑩分離タンクに送出するという機能を持たせている。これにより、水混合燃料供給システムに残存した水混合燃料のほとんどを①燃料タンクから供給された燃料に置き換えることが可能となる。

7.3 実船を用いた実証実験

前章において、新たに開発した“実船対応型水混合燃料供給システム”の概要と特徴について述べたが、本章では、まず、本システムを実船に搭載された発電機用エンジンに設置して、実船の運航時に必要となる機能の作動を確認した結果を示す。次に、水混合燃料を使用した時の NO_x と BC の改善効果を示す。さらに、この装置を BC および GHG 低減技術に組み込んだ場合の期待される効果と今後の展望を示す。なお、実証実験には、九州運輸局の海事技術専門官の立ち会いのもと、2 号発電機を使用して実施した。

IMO NOx 規制は、定格出力 130kW を超えるディーゼルエンジンに適用され主機関用ディーゼルエンジンおよび発電機用ディーゼルエンジンが対象となる。

「船用ディーゼルエンジンからの NOx 排出に関するテクニカルコード」によれば、NOx 排出率には重み係数が設定され、使用頻度の高い負荷域が高い配分となっており、機関の用途（主機関、補機関等）により配分が異なる。補機関である発電用ディーゼルエンジンにおいては、負荷率 10, 25, 50, 75, 100% の 5 つの負荷率にそれぞれ重み係数が設定され、それぞれ 0.1, 0.3, 0.3, 0.25, 0.05 となっている。本実験で負荷率 50% に設定した理由は、重み係数は 0.3 で他の負荷率と比較して大きく NOx 規制に対して低減効果が大きいためである。また、停泊中に発電機の負荷率を 50% 以上に設定する事は、困難であるためである。

7.3.1 実験装置と方法

実験は、水産大学校の練習船“天鷹丸”に搭載されている発電機とそれを駆動するエンジン、配電盤および“実船対応型水混合燃料供給システム”から構成される発電システムを用いて行った。

図 5 に、練習船“天鷹丸”の写真を示す。表 3 に供試船舶の主要目、表 4 に供試機関の主要目、表 5 に供試発電機の主要目を示す。燃料は、A 重油（JIS 1 種 2 号）を使用した。



Figure 5 Training ship “Tenyo Maru”

Table 3 Specifications of “Tenyo Maru”

Gross Tonnage	t	995
International Gross Tonnage	t	1,350
Length×Breadth×Depth	m	64.67 × 11.90 × 6.68
Max. Power	kW	1,700
Engine speed	min ⁻¹	260

Table 4 Specifications of test engines

Type	-	6NY16L - EW
Cylinder bore	mm	160
Piston stroke	mm	200
Max. Power	kW	500
Engine speed	min ⁻¹	1,200
Number of cylinder	-	6
Fuel Oil	-	Marine Diesel Oil

Table 5 Specifications of generator

Type	-	NTAKL - VEK
Output / Speed	kW / min ⁻¹	400 / 1,200
Voltage/Current	V / A	450 / 642

図 6 に、実験に用いた発電システムの概要を示す。図に示すように、発電機から発信された出力（電力）信号は配電盤を経て“実船対応型水混合燃料供給システム”のコントロールユニットに送られ、発電機の出力に対応するエンジンの負荷率に相当する信号によって、システム内のバルブ制御が行われる。実験におけるエンジンの負荷率は、冷凍装置、空調装置および各ポンプ類などを発停させて電力負荷を増減させることにより行った。

実験は、まず、燃料タンクから直接エンジンに燃料を供給するラインを用いてエンジンを起動した後、燃料が“水混合燃料生成装置”を経てエンジンに至るラインに切換えて、実船の運航時に必要となる機能の作動確認を行った。次に、負荷率約 50%における、排ガス温度、シリンダー内最高圧力、電力量、排ガスデータ（NO_x, O₂, CO, CO₂）、燃料消費量等の計測および BC の捕集を行った。排ガスデータは排ガス分析計、燃料消費量は“水混合燃料生成装置”に設置された燃料流量計、BC はオパシメータを使用して、1 分ごとに計測を行うとともに、水産大学校が開発した高精度 PM 計測装置を用いて捕集した。また、同様の計測により、負荷率約 50%において燃料に水を 15%混合したときのデータを採取した。

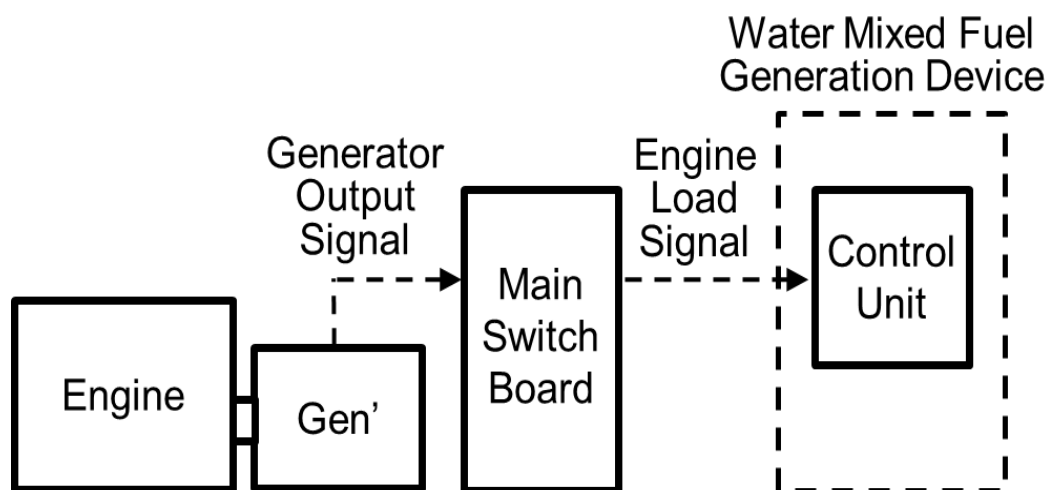


Figure 6 Diagram of generator system

7.3.2 実験結果

7.3.2.1 実船の運航時に必要となる機能の作動確認

実船の運航時に必要となる機能の作動確認を行うために、まず、燃料タンクから直接エンジンに供給するラインを用いてエンジンを起動した後、水の混合割合を 15% に設定した状態で、燃料を“水混合燃料生成装置”を経てエンジンに至るラインに切換えても、燃料のみの運転が継続することを確認した。次に、負荷率を上昇させ、負荷率が 40% 以上になると水の混合割合が 15% の水混合燃料が供給されていることを確認した。さらに、負荷率を低下させ、負荷率が 40% 以下になると、水が自動的に遮断され、燃料のみの運転に切換わることを確認した。なお、水の混合割合はエンジンの運転中に燃料噴射ポンプ直前より水混合燃料をメスシリンダーに採取・静置して燃料と水を分離させた状態で、それぞれの量を計測することにより確認した。最後に、負荷率が 80% 以上になると水が自動的に遮断され燃料のみの運転に切換わるという機能の確認は、コントロールユニットに設置された発電機の出力信号（エンジンの負荷率）の受信部に、エンジンの負荷率 80% に相当する信号を与えたとき、水が自動的に遮断され、燃料のみの運転に切換わることを確認した。また、ブラックアウト時の作動確認も同様の方法を用いて実施したところ、水の供給が自動的に停止するとともに、電源復旧後、循環ポンプを運転することによりライン内の水混合燃料が分離タンクに回収されるという機能により、ライン内に残存する水混合燃料が回収されて、燃料供給系統内を水が混合していない燃料に置き換えることができることを確認した。

以上、実船の運航時に必要となる機能の作動確認を実施し、全ての機能が良好に作動することを確認した。

7.3.2.2 水混合燃料を使用した時の NO_x, BC の改善効果

図 7(a)に、実船において水混合後の経過時間に伴う NO_x の変化を示し、図 7(b)に、水混合後の経過時間に伴う SFOC の変化を示す。また、図 7(c)に、水混合後の経過時間に伴う BC の変化と、水混合の前後における PM 捕集フィルターに捕集された BC の写真を示す。

図 7(a), (b), (c)において、時間の経過とともに NO_x の値は徐々に低下、SFOC の値は一時低下した後徐々に復帰、BC の値は徐々に低下、という経過を経て約 35 分後に安定した値になっている。これは、機関室における機器の配置上、水混合燃料生成装置をエンジンから離れた位置に設置したため、連結配管内の燃料が完全に切り替わるまでに約 35 分間を要したためである。

このように、“水混合燃料生成装置”と燃料噴射装置を連結する配管の内部容積が大きいと、水混合供給システム内の水混合燃料の全てが設定された値に置き換わるまでの時間が長くなるため、NO_x と SFOC の値が安定するまでの時間も長くなるとともに、配管内で燃料と水が分離する可能性がある。本実験においては、5 分毎に、燃料噴射ポンプ直前に設置した燃料サンプル採取弁から水混合燃料を採取して水混合燃料の状態を確認したが、燃料と水の分離は見られなかった。

図 7(c)において、水を混合すると時間の経過とともに BC が低減し、水を混合してから約 35 分後の状態を燃料のみの運転と比較すると、約 45%となっている。また、PM 捕集フィルターの色も、水を混合する前は黒色だが、水を混合すると灰色となり BC が低減していることが、視覚的にも確認できる。

以上、実船に“実船対応型水混合燃料供給システム”を設置した実験結果から、本システムを用いることにより、SFOC を悪化させることなく NO_x と BC の同時低減が可能であることが明らかになった。

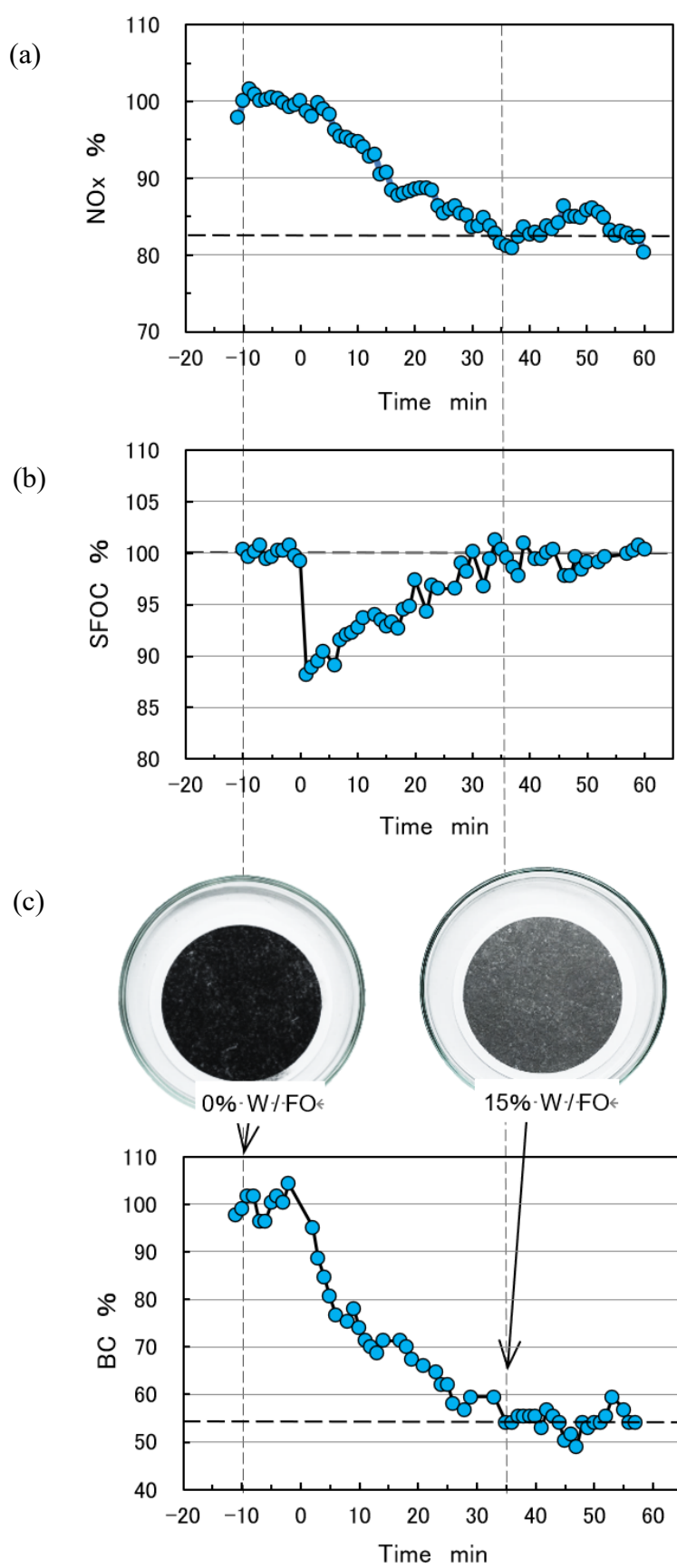


Figure 7 Changes in NO_x, SFOC, and BC with time

7.3.3 BC および GHG 削減技術としての今後の展望

前節において“実船対応型水混合燃料供給システム”を実船に搭載することにより、NO_x、BC の同時低減も可能となることを述べたが、本節では本システムの更なる活用の可能性について検討する。

図 8 に、本システムにセリウム系添加剤、DPF (Diesel Particulate Filter)、燃焼システムおよび逆洗システムを増設した“BC (ブラックカーボン) ゼロシステム⁹⁾”を示す。このシステムは、エンジンの燃焼室において“実船対応型水混合燃料供給システム”を用いて BC を半減するとともに、セリウム系触媒を含む燃料添加剤により約 20%低減すると、相乗効果により BC を約 70%低減することが可能である¹⁰⁾。残りの約 30%を DPF で捕集するとともに、捕集された BC を燃焼システムにより燃焼除去することができる。現在 IMO において北極海航路における BC の計測・低減技術が検討されているが、この装置を船舶に搭載することにより、通常運転（運航）時において船舶から排出される BC を大幅に低減できる可能性がある。

図 9 に、燃料にアンモニア水を混合した燃料を用いて定格 214kW/3101min⁻¹の小型高速エンジンを、負荷率 50%において、運転した時の NO_x と SFOC（軽油の消費量から算出）の変化を示す¹¹⁾。この実験は、図 2 に示す“水混合燃料生成装置”の③水タンクに、“25%アンモニア水”を入れることにより生成された“アンモニア水混合燃料”を用いて行ったものである。

通常、アンモニアが燃焼すると Fuel NO_x により NO_x 濃度は増加するが、図において、アンモニア水を 15%混合した場合においては、アンモニア水に含まれる水分による NO_x 低減効果により NO_x は増加していない。また、アンモニア水の混合割合の増加とともに SFOC が改善されている。

このように、“実船対応型水混合燃料供給システム”を“BC ゼロシステム⁸⁾”に活用することにより、船舶から排出される BC を大幅に低減できるとともに、次世代燃料とされるアンモニアの効果的・効率的な燃焼技術にも適用可能である。

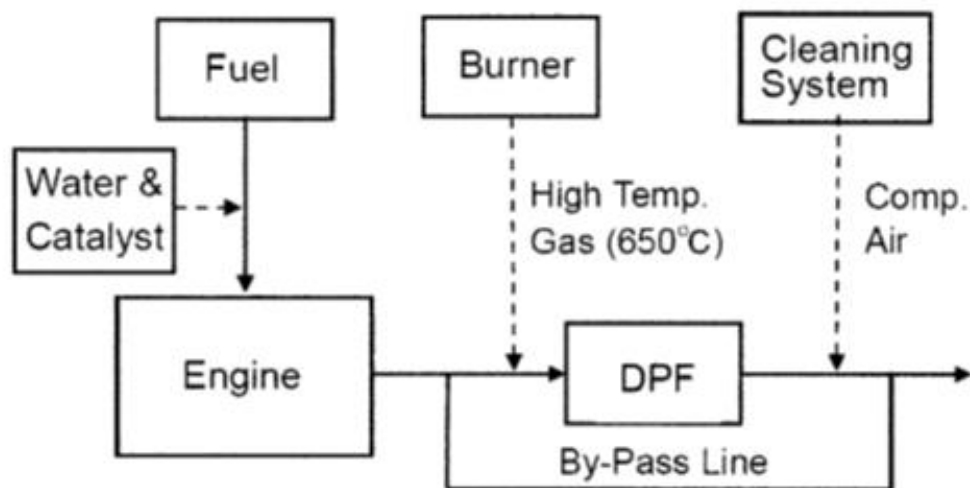


Figure 8 Outline of the newly developed black carbon (BC) zero system

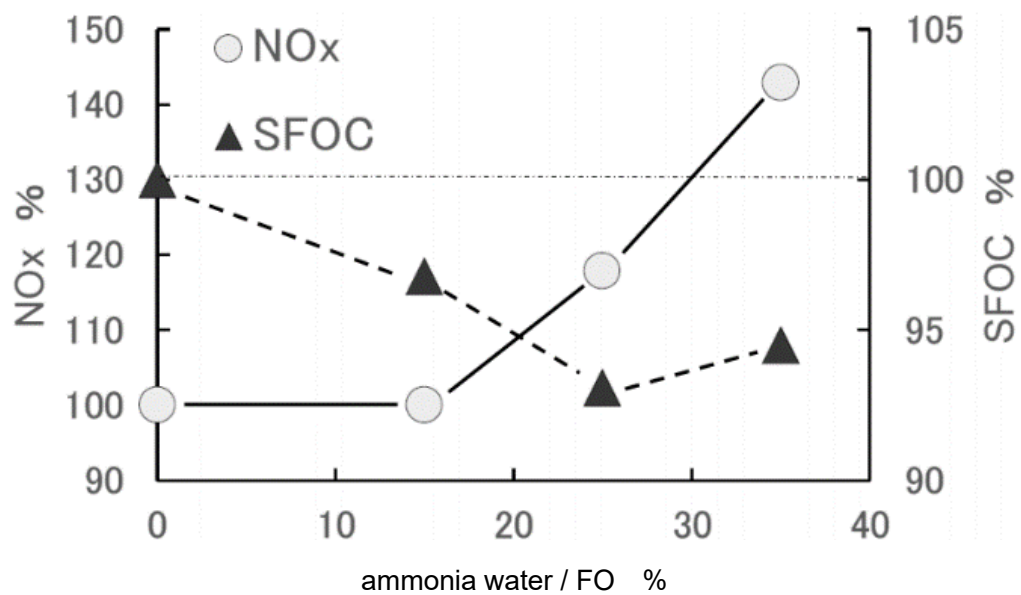


Figure 9 Combustion characteristics of ammonia in high speed engine¹¹⁾

7.3.4 実船対応型水混合燃料供給システムにおける今後の課題

図 7 (a), (b), (c)に示す様に、燃料を切り替えてから安定した値になるまで、約 35 分間かかっている。これは、陸上の実験室と異なり機関室における機器の配置上、水混合燃料生成装置をエンジンから離れた位置に設置したため、連結配管内の燃料が完全に切り替わるまでに時間を要したためである。このことより、燃料の切換時間を短縮するには、連結配管の長さを可能な限り短くするために水混合燃料供給システムをエンジンに出来るだけ近い位置に設置する必要がある。また、連結配管の容量を減少させることで、ブラックアウト時水混合燃料の回収量が小さくなる。しかし、実船においては、機関室における機器の配置上、燃料ラインが長くなる恐れがあり、特に大型機関では、連結配管の容量をできるだけ小さくなるように機器配置を考慮した機関室設計が必要となる。

本実験では、発電用機関を用いた実証実験を実施してその機能の確認と水混合燃料の効果を確かめたが、今後は、主機関を用いた実証実験を実施し、実船対応型水混合燃料供給システムの機能とその効果の検証が必要となる。

7.4 まとめ

軽油や A 重油のような低密度・低粘度の燃料に対しても添加剤を必要としない“水混合燃料生成装置”を用いた“実船対応型水混合燃料供給システム”を開発し、このシステムを実船に搭載してその機能の作動確認および水混合燃料を使用した場合の NO_x, BC の改善効果を明らかにした。その概要は次のとおりである。

- (1) ストークスの式を用いた解析結果によれば、水の粒子径をできるだけ小さくすることにより、低密度・低粘度の燃料中においても、燃料と水が分離しにくくなることが示された。
- (2) 低密度・低粘度の燃料に水を混合する場合、燃料タンクから供給される燃料と水タンクから供給される水を合流させた後に、エンジンの燃料噴射装置に循環ポンプとミキサーから構成される循環ラインにおいて水を連続的に微粒

化させながらその一部をエンジンに供給して、燃料と水が分離する前に噴射することにより、添加剤を必要としなくなる。

- (3) エンジンの運転状態を、起動時、負荷率 40%未満、負荷率 40%以上から 80%未満、負荷率 80%以上、およびブラックアウト時の 5 種類に設定し、それぞれの運転状態によってエンジンに供給される燃料の種類(燃料又は水混合燃料)を切換えることが可能な制御装置を備えた、“実船対応型水混合燃料供給システム”を開発した。
- (4) “実船対応型水混合燃料供給システム”を水産大学校の練習船“天鷹丸”に搭載して実証実験を行った結果、起動時、通常運転時、高負荷運転時、およびブラックアウト時に必要となるすべての機能が正常に作動するとともに NOx と BC が低減することを確認した。
- (5) 燃料の切換時間の短縮や、ブラックアウト時の水混合燃料の回収量が少量になるため、水混合燃料供給システムは、エンジンに出来るだけ近い位置に設置する方が良い。しかし、実船においては、機関室における機器の配置上、燃料ラインが長くなる恐れがあり、特に大型機関では、連結配管の容量が大きくなるため機器配置を考慮した機関室設計が必要となる。
- (6) 本実験では、発電用機関を用いた実証実験を実施して、実船対応型水混合燃料供給システムの機能の確認と水混合燃料の効果を確かめたが、今後は、主機関を用いた実証実験を実施し、同様に検証する必要がある。

参考文献

- 1) 山西 大, 段 智久, 津田 稔, 実船対応型水混合燃料供給システムの開発, JIME, 59-3(2024).
- 2) Kazuyuki Maeda, Atsushi Shimizu, Hirokazu Ohno, Junichi Oguma, Atushi Sakane, Dai Yamanishi, Development of NOx Reduction System that Combines an Oxygen Reduction Membrane with Water Mixed Fuel, CIMAC Congress Helsinki, Paper No.176, 2016.
- 3) 高橋千織, 益田晶子, 中村真由子, 大気環境規制の動向と燃料多様化が規制対策に及ぼす影響 - 燃料転換とブラックカーボン削減対策, JIME, 54-3(2019),

- 328-333.
- 4) 三橋一哉, 高崎 潔, 立石又二, 中川 洋, 安藤耕太郎, 氏家則義, 内燃機関の水分添加燃焼について, MESJ, 13-8(1978), 601-607.
 - 5) 東田正憲, 中村卓朗, 大西郁美, 吉澤克浩, 細野隆道, EGR と水エマルジョン燃料の組み合わせによる NO_x 低減技術, JIME, 48-6(2013), 747-752.
 - 6) Dai Yamanishi, Kazuyuki Maeda, Tomohisa Dan, Application of a Newly Developed Water Mixture Fuel Generator to IMO Regulations, JIME, 53-3(2018), 380-385.
 - 7) Kazuyuki Maeda, Kenichi. Mogami, Water-Mixture-Fuel Generation Device, PCT/JP2014/072771, 2015-05-03.
 - 8) Kenichi Mogami, Hidehiro Kumazawa, 静止型流体混合装置, JP Patent No. 4456176, 2010-04-28.
 - 9) Minoru Tsuda, Kazuyuki Maeda, Dai Yamanishi, Masateru Ishida, Development of Black Carbon Zero System for Marine Diesel Engines, CIMAC Congress Busan, Paper No.124, 2023.
 - 10) 山西 大, 津田 稔, 石田雅照, 山本幸典, DPF を用いた船舶起源 PM(BC)の捕集・除去システムの開発, Proceedings of JIME 2021, 277-278.
 - 11) Kazuyuki Maeda, ゼロエミッションに向けた機関艀装, JIME, 58-3,(2023), 289-295.

第8章 まとめ

本研究では、まず、1章と2章において、IMO による NO_x 規制と SO_x-PM 規制および GHG 排出規制の概要と課題について述べ、これらの背景と課題から本研究の目的と意義を示すとともに、これまでの研究の概要を示した。

次に、3章と4章において、水混合燃料が IMO NO_x 2次規制、IMO BC 規制および IMO GHG 規制に対応した技術であることを述べるとともに、膜技術と水混合燃料との組み合わせにより IMO NO_x 3次規制に対応可能であることを示した。

さらに、5章と6章において、DPF と水混合燃料により IMO BC 規制に対応可能であることを示すとともに、動植物油やアンモニアと水混合技術を組み合わせることにより“2050年対応 GHG 削減”に対応可能であることを示した。

最後に、7章において、これまで、実験室レベルであった水混合燃料生成装置を実船に搭載するために実船対応型水混合燃料供給システムを開発するとともに、これを実船に搭載して実施した実験結果を示した。

以上のまとめから、水混合燃料技術によってエミッションの低公害化をはかることができる

3章から7章において得られた結論は、次に示すとおりである。

8.1 水混合燃料による排気エミッション対応

添加剤を用いずに水混合燃料を生成するシステムを開発し、水混合燃料を使用して SFOC を悪化させることなく NO_x と BC の排出を同時に低減することを目的とした実験を実施した。その結果、次の結論を得ることができた。

- (1) 水混合燃料を使用すると、NO_x と燃料消費量のトレードオフの関係は、従来の燃料を使用した場合と異なる。
- (2) 燃料に水を混合することで、燃料消費量を悪化させることなく、NO_x 排出量を確実に低減できる。例えば、20%の水を含む燃料と水を混合させた場合、NO_x 排出量を約 20%低減することができる。
- (3) 燃料に水を混合することで PM と BC の排出は、確実に低減できる。例えば 20%の水を含む水混合燃料は、PM と BC の排出量を従来の燃料の半分以下に

低減することができる。

以上の結果より、水混合燃料技術は、ほとんどの IMO 排出規制に対して有効であることを示している。

8.2 水混合燃料による IMO NO_x 3次規制対応

IMO NO_x 3次規制対応として、ORM（酸素低減膜）単独および WMF（水混合燃料）との組合せによる NO_x 低減効果とエンジン性能の変化を明らかにする実験を行い、次の結論を得た。

- (1) ORM を用いて給気中の酸素濃度を低下させることにより、負荷率 75, 50, 25%において、単独で、NO_x の値を IMO 3次規制値まで低減することができるが、酸素濃度を 19%以下にすると SFOC の悪化率が急激に増加する。これは、給気中の酸素濃度が低下すると着火後の燃焼が緩慢になることに起因しているため、SFOC を悪化させない（燃焼速度の低下を招かない）範囲においては有効であるが、それを超えると非効率的である。
- (2) ORM と WMF を組み合わせることにより、SFOC を悪化させることなく IMO NO_x 3次規制値を満足できる可能性がある。これは、給気中の酸素濃度低下により酸素の絶対量が減少しても、水を混合することにより総噴射量が増加するため、それに伴って噴霧に導入される空気の総量が増加し、燃料に対する空気の供給量の増加により燃焼が改善されるためである。
- (3) ORM と WMF の組合せは SFOC, 設置容積, 維持・管理および環境対応という観点からみて今後期待できる NO_x 低減技術であるが、実用化のためには ORM の信頼性と耐久性および水技術に課せられた課題に対応する技術と方法を明らかにしていく必要がある。

8.3 水混合燃料による IMO BC 規制対応

本研究で提案したシステムの有効性を評価した結果、以下の事が明らかになった。

- (1) 燃料に 15%の水を添加することで、BC の発生量を約 60%低減させることが

できる。

- (2) 燃料に CeO_2 触媒を添加することで、BC の発生量を約 20%低減させることができる。
- (3) 燃料に水と触媒の両方を加えることで、BC の発生を約 70%低減させることができる。
- (4) 排気ラインに DPF を設置することで、残りの BC のほとんどを除去できる。
- (5) DPF に蓄積された BC の大部分は、エンジンと DPF の間に設置されたバーナーで除去・燃焼させることができる。
- (6) 一方、長期間使用すると、燃料中に含まれる灰分 (Ash) が DPF に蓄積されるため、圧縮空気による逆洗浄を行い除去する必要がある。この装置については、今後新たに開発する必要がある。

8.4 水混合燃料による GHG 対応

- (1) 加熱した水混合動植物油性燃料を用いることにより、既存の大型エンジンにおいても CO_2 の排出量をゼロに近づけることが出来るとともに NO_x 、スート (BC) の同時低減が可能となる。
- (2) 動植物油燃料については、陸上の施設や航空機のゼロエミッション燃料との競争となるため、船舶における全ての燃料を“動植物性燃料”に置き換えることは困難である。
- (3) “水混合燃料技術”において、水を“アンモニア水”に置き換えることにより、「2023 IMO GHG 削減戦略」に示された「2030 年までに、GHG ゼロエミッション燃料等の使用割合を 5~10%」に対応できる可能性がある。
- (4) 水を“液体アンモニア (原液)”に置き換えることにより、「2023 IMO GHG 削減戦略」に示された「2040 年までに、GHG 排出を 70~80%削減」に対応できる可能性がある。
- (5) 水を“液体アンモニア”に、化石燃料を“動植物性燃料”に置き換えることにより、「2023 IMO GHG 削減戦略」に示された「2050 年頃までに GHG 排出ゼロ」に対応できる可能性がある。
- (6) 水産大学校においても、現在、“水混合燃料技術”を活用した、“アンモニア

水混合燃料技術”を用いてこれらの研究・開発を実施中で有り、今後は“液体アンモニア混合燃料技術”を用いた研究・開発を計画している。

8.5 水混合燃料技術の実用化

軽油や A 重油のような低密度・低粘度の燃料に対しても添加剤を必要としない“水混合燃料生成装置”を用いた“実船対応型水混合燃料供給システム”を開発し、このシステムを実船に搭載してその機能の作動確認および水混合燃料を使用した場合の NO_x、BC の改善効果を明らかにした。その概要は次のとおりである。

- (1) ストークスの式を用いた解析結果から、水の粒子径をできるだけ小さくすると、低密度・低粘度の燃料中においても、燃料と水が分離しにくくなる。
- (2) 低密度・低粘度の燃料に水を混合する場合、燃料タンクから供給される燃料と水タンクから供給される水を合流させた後に、エンジンの燃料噴射装置に循環ポンプとミキサーから構成される循環ラインにおいて水を連続的に微粒化させながらその一部をエンジンに供給して、燃料と水が分離する前に噴射することにより、添加剤を必要としなくなる。
- (3) エンジンの運転状態を、起動時、負荷率 40%未満、負荷率 40%以上から 80%未満、負荷率 80%以上、およびブラックアウト時の 5 種類に設定し、それぞれの運転状態によってエンジンに供給される燃料の種類(燃料又は水混合燃料)を切替えることが可能な制御装置を備えた、“実船対応型水混合燃料供給システム”を開発した。
- (4) “実船対応型水混合燃料供給システム”を水産大学校の練習船“天鷹丸”に搭載して実証実験を行った結果、起動時、通常運転時、高負荷運転時、およびブラックアウト時に必要となるすべての機能が正常に作動するとともに NO_x と BC が低減することを確認した。
- (5) 燃料の切替時間の短縮や、ブラックアウト時の水混合燃料の回収量を可能な限り少量にするため、水混合燃料供給システムは、エンジンに出来るだけ近い位置に設置する方が良い。しかし、実船においては、機関室における機器の配置上、燃料ラインが長くなる恐れがあり、特に大型機関では、連結配管の容量

が大きくなるため機器配置を考慮した機関室設計が必要となる。

- (6) 実験では、発電用機関を用いた実証実験を実施して、実船対応型水混合燃料供給システムの機能の確認と水混合燃料の効果を検証したが、今後は、主機関を用いた実証実験を実施し、同様に検証する必要がある。

主な略称

略 称	全 称	和 名
BC	Black Carbon	・ブラックカーボン
CIMAC	Conseil International des Machines a Combustion	・国際燃焼機関会議
DPF	Diesel Particulate Filter	・ディーゼル・パティキュレート・フィルター
EEDI	Energy Efficiency Design Index	・エネルギー効率関連条約
EGR	Exhaust Gas Recirculation	・排ガス再循環
FAME	Fatty Acid Methyl Ester	・脂肪酸メチルエステル
GHG	Green House Gas	・温室効果ガス
HVO	Hydrotreated Vegetable Oil	・水素化处理油
IEA	International Energy Agency	・国際エネルギー機関
IMO	International Maritime Organization	・国際海事機関
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change	・気候変動に関する政府間パネル
JIME	Japan Institute of Marine Engineering	・日本マリンエンジニアリング学会
JSAE	Society of Automotive Engineers of Japan	・自動車技術会
JSME	The Japan Society of Mechanical Engineers	・日本機械学会
LNG	Liquefied Natural Gas	・液化天然ガス
MARPOL 73/78	International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as modified by the Protocol of 1978 relating thereto	・1973年の船舶による汚染の防止のための国際条約に関する1978年の議定書 ・マルポール 73/78 条約 ・海洋汚染防止条約

略 称	全 称	和 名
MDO	Marine Diesel Oil	・ 船舶用ディーゼルオイル (JIS 規格 A 重油相当品)
MEPC	Marine Environment Protection Committee	・ 海洋環境保護委員会
MESJ	Marine Engineering Society in Japan	・ 日本船用機関学会
NO _x	NO, NO ₂	・ 窒素酸化物, ノックス
ORM	Oxygen Reduction Membrane	・ 酸素低減膜
PM	Particulate Matter	・ 粒子状物質
SCR	Selective Catalytic Reduction	・ 選択式還元触媒
SFOC	Specific Fuel Oil Consumption	・ 燃料消費率 g/kWh
SOF	Soluble Organic Fraction	・ 可溶性有機成分
SO _x	SO ₂ , SO ₃	・ 硫黄酸化物, ソックス
SVO	Straight Vegetable Oil	・ 粗植物油
WMF	Water-Mixed Fuel	・ 水混合燃料

謝 辞

本論文の執筆にあたり，ご指導を引き受けてくださった神戸大学大学院海事科学研究科故藤田浩嗣教授に，深く感謝の意を表しお礼申し上げます。

本論文をとりまとめるにあたり，故藤田浩嗣教授より快くご指導をお引き受けいただき，長きに渡り多大なるご指導，ご教授を賜りました神戸大学大学院海事科学研究科 段 智久教授に，心より深く感謝の意を表しお礼申し上げます。

本論文の作成にあたり，ご査読と多くの有益なご助言を賜りました同大学大学院海事科学研究科 内田 誠教授，三村治夫教授に，心より感謝の意を表しお礼申し上げます。

本研究の推進にあたり，長年にわたり，ご指導，ご鞭撻を受け賜りました水産大学校前田和幸名誉教授に，心より深く感謝の意を表しお礼申し上げます。

本論文を作成に当たり，多くの有益なご助言を受け賜りました水産大学校海洋機械工学科津田 稔教授に，深く感謝の意を表しお礼申し上げます。

水産大学校の練習船“天鷹丸”において，水混合燃料生成装置を使用した実験では，貴重なデータを得ることができました。当時の秦 一浩 船長，井原 剛 機関長，山根基弘 二等機関士をはじめ乗組員の皆様には大変お世話になりました。心よりお礼申し上げます。

旭化成ケミカルズ株式会社との共同研究により，酸素低減膜と水混合燃料による NOx 低減に関する貴重なデータを得ることができました。実験に際しご協力を頂きました清水 敦氏，大野祐一氏，小熊淳一氏にお世話になりました。心よりお礼申し上げます。

水産大学校海洋機械工学科石田雅照講師には，実験およびデータ整理等でご協力を賜りました。深く感謝の意を表しお礼申し上げます。

最後に，筆者の研究活動の援助を与えてくれた両親に深く感謝いたします。そして著者をいつも励ましてくれた最愛の妻 綾恵，二人の娘 葵と茜にも心から感謝の意を表し，本研究の謝辞といたします。