



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。



(別紙様式3)

論 文 内 容 の 要 旨

氏 名 山西 大

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

水混合燃料技術を用いた排気エミッションの低減

1. 船舶における NO_x 規制対応

IMO (国際海事機関) NO_x (窒素酸化物) 規制には一般海域を対象とする NO_x 2 次規制と、指定海域を対象とする NO_x 3 次規制があり、NO_x 2 次規制は、エンジン本体の改善で対応可能であるが、SFOC (燃料消費率) の低下を招き、NO_x 3 次規制は、SCR (選択式還元触媒)、EGR (排ガス再循環)、ORM (酸素低減膜) などで対応可能であるが、SCR は本体および尿素タンクの設置容積等に注意を要し、EGR は排ガスの浄化技術と燃費の悪化に注意を要し、ORM は膜の信頼性と耐久性が未だ確立されていない等の課題がある。

本研究では、まず、NO_x 2 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、水混合燃料がエンジン性能と排ガスに及ぼす影響を明らかにした。その概要は次のとおりである。

- (1) 燃料噴射時期をクランク角度 1~3 度進めることにより、NO_x 排出量と SFOC (燃料消費率) にはトレードオフの関係があることを確認した。
- (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した。
- (3) 高精度 PM (粒子状物質) 計測システムを用いて、PM 排出に及ぼす水混合燃料の影響と PM 中の BC (黒煙) 割合を評価した。
- (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。

次に、NO_x 3 次規制対応技術として、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、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水混合燃料 (Water Mixed Fuel, 以後 WMF と記す。) 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 3 次規制に対応できるが燃費が約 3% 悪化すること。ORM と WMF を併用することにより、燃費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 3 次規制対応技術として今後解決すべき課題を示した。

2. 船舶における BC 規制対応

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。

そこで本研究では、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ことにより、BC は約 70% 低減する。
- (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) を設置することにより、ほとんどの BC を除去可能である。
- (3) DPF に捕集された BC を除去するため、エンジンと DPF の間に燃焼装置を設置することにより、DPF に堆積した BC を燃焼除去することができる。
- (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ことにより、燃焼によって除去できなかった BC を DPF の外に排出することが可能となる。本装置については、今後開発する必要がある。

3. 船舶における GHG (地球温暖化ガス) 排出規制対応

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 排出ゼロを目指し、IMO においては、「2023 IMO GHG 削減戦略」が採択された。また、IEA (国際エネルギー機関) 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、まず、バイオ燃料を用いた GHG 排出ゼロを目的として、動植物油燃料に水を微粒化して混合した時の燃料中の水粒子の挙動をストークスの式を用いて水粒の沈降速度を求め、粒子径と沈降速度の関係から水を微粒化することにより添加剤を必要としない理由を考察した。さらに、動植物油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。

次に、アンモニア燃料を用いた GHG 排出ゼロを目的として、水産大学校に設置された定格 214kW/3101min⁻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% 及び 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。

4. 船舶における NO_x、BC、GHG 対応技術の実用化

水混合燃料技術を用いることにより NO_x と BC の同時低減が可能となる。また、NO_x と GHG と相関がある SFOC とのトレードオフ特性と、水混合燃料技術が持つ SFOC を悪化させることなく NO_x を低減可能という特性を活用することにより、BC と GHG の同時低減が可能となる。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 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。

そこで本研究では、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 NO_x, 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 NO_x, BC の改善効果を明らかにするとともに、今後の展望を示した。さらに、本システムを“BC ゼロシステム”および“アンモニアの燃焼システム”の一部として用いることにより、IMO の BC, GHG 削減技術として活用できることを提案した。

氏名	山西 大		
論文 題目	水混合燃料技術を用いた排気エミッションの低減		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	段 智久
	副査	教授	内田 誠
	副査	教授	三村 治夫
	副査		
	副査		印
要 旨			
<p>IMO（国際海事機関）によるNO_x（窒素酸化物）の排出規制には、一般海域を対象とするNO_{x2}次規制と、指定海域を対象とするNO_{x3}次規制がある。NO_{x2}次規制は、エンジン本体の改善で対応可能であるが、SFOC（燃料消費率）の低下を招くおそれがある。NO_{x3}次規制はSCR（選択式還元触媒）、EGR（排ガス再循環）、ORM（酸素低減膜）などで対応可能であるが、SCRは本体および尿素タンクの設置容積等に注意を要し、EGRは排ガスの浄化技術と燃費の悪化に注意を要し、ORMは膜の信頼性と耐久性が未だ確立されていない等の課題がある。</p> <p>本研究では、まずNO_{x2}次規制対応技術として、SFOC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、水混合燃料（Water Mixed Fuel、以後WMFと記す）がエンジン性能と排ガスに及ぼす影響を明らかにしている。次に、NO_{x3}次規制対応技術として、SFOCの悪化を抑えてNO_xをIMO3次規制値まで低減させる技術を確認することを目的として、ORMを用いて吸気中の酸素濃度を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ている。それら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ている。さらに、燃料に水を混合したWMFによる実験と、ORMとWMFを組み合わせた実験を行っている。その結果、吸気中の酸素濃度を17%まで低下させることにより、IMO NO_{x3}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を示すとともに、運航者の立場から、ORMとWMFがIMO NO_{x3}次規制対応技術として解決すべき課題を示している。</p> <p>本論文は全8章で構成されており、まず第1章と第2章において、IMOによるNO_x排出規制、SO_x（硫黄酸化物）およびPM（粒子状物質）・BC（ブラックカーボン）排出規制およびGHG排出規制の概要と課題について述べ、それらの社会的背景と課題から本研究の目的と意義を示すとともに、これまでの関連研究の概要を示している。</p> <p>第3章から第7章までに示された概要は、次のとおりである。</p> <p>第3章はWMFによる排気エミッション対応についてまとめている。エマルジョン調製のために添加剤を用いずにWMFを生成するシステムを開発し、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、以下の結論を得ている。</p> <p>(1) WMFを使用すると、NO_xとSFOC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。</p> <p>(2) 燃料に水を混合することで、SFOC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。</p> <p>(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WMF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。</p>			

氏名 山西 大

第4章は WMF による IMO NO_x3 次規制対応についてまとめている。IMO による NO_x 3 次規制対応として、ORM 単独および WMF 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、以下の結論を得ている。

- (1) ORM を用いて吸気中の酸素濃度を約 2vol.% 低下させることにより、エンジン負荷率 75、50、25% において、単独で NO_x の排出量を 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。これは吸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_x3 次規制値を満足できる可能性がある。これは吸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混合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。

第5章は WMF による IMO BC 規制対応についてまとめている。提案したシステムの有効性を評価した結果、以下の事を明らかにしている。

- (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 CeO₂ 触媒を約 330ppm 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（粒子状物質捕集フィルタ）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 の間に設置された別の燃焼装置で除去・燃焼させることができる。

第6章は WMF による GHG 対応についてまとめている。

- (1) 加熱した水混合動植物油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 CO₂ の排出量をゼロに近づけることができるとともに、NO_x、BC の同時低減が可能となる。
- (2) 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を明らかにしている。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 を未燃アンモニアと白金触媒を用いて反応させ N₂ に変換することによって低減することが可能となる。

第7章は WMF 技術の実用化についてまとめている。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、GHG の改善効果を実証している。さらに、本システムを“BC ゼロシステム”および“アンモニアの燃焼システム”の一部として用いることにより、IMO の BC、GHG 削減技術として活用できることを提案している。

最期に、第8章として本研究の総括を行い、水混合燃料（WMF）技術よってエミッションの低公害化をはかることができることを示している。

以上のように、本研究は船舶に搭載されている熱機関であるディーゼルエンジンについて、その排気エミッションの低公害化を水混合燃料技術によって達成する研究をしたものであり、複数の技術を組み合わせることによって IMO による各規制をクリアできる重要な知見を得たものとして価値のある集積である。提出された論文は海事科学研究科学学位論文評価基準を満たしており、学位申請者 山西 大氏は、博士（工学）の学位を得る資格があると認める。