

6 GHG削減に向けた代替燃料燃焼技術に関する研究の展望

仁木 洋一*, 高木 正英*, 川内 智詞*, 市川 泰久*

Prospects for Research on Alternative Fuel Combustion Technologies for GHG Reduction

by

NIKI Yoichi, TAKAGI Masahide, KAWAUCHI Satoshi and ICHIKAWA Yasuhisa

Abstract

Diesel engines used for ship propulsion and power generation emit carbon dioxide, which is a greenhouse gas (GHG). It is crucial to eliminate such hazardous emissions from ships to protect the environment. Toward this end, diesel engines with carbon-free or carbon-neutral fuels have been investigated as alternatives to traditional fuels. At the National Maritime Research Institute, GHG reduction and marine environmental protection is being prioritized as a project for the next seven years. The project comprises six sub-themes based on research activities from the previous seven-year project. This article discusses the prospects of three sub-themes of the project, the goal of which is to overcome barriers to the use of alternative fuels such as hydrogen, ammonia, and biofuels. This paper outlines the research and development of combustion strategies with engines and a combustion facility for hydrogen and ammonia. For liquid alternative fuels and LNG, this paper also presents a study on safety and environmental aspects, such as an ignitability assessment and an unburned methane reduction with a catalyst.

* 環境・動力系

原稿受付 令和 5年 4月 27日

審査日 令和 5年 5月 23日

1. はじめに

持続可能な発展と暮らしやすい社会の実現のために、船舶から排出される環境負荷物質を削減し海洋環境を保護する必要がある。船舶から排出される環境負荷物質としては、航行する船舶の船体に塗布された防汚塗料由来の化学物質、沈船からの海洋流出重油や、船舶の推進機や発電機として用いられる動力システムから排出される排ガスなどがある。これら環境負荷物質の削減は強く求められており、船舶の動力システムからの排ガスに含まれる温室効果ガス（GHG）の削減は、近年特に注目されている。国際海事機関（IMO）では、2030年に2008年比40%以上の改善、2050年には半減、今世紀中のGHG排出ゼロの目標を定めた。また、内航海運においては、2021年に閣議決定された「地球温暖化対策計画」¹⁾によって、2030年度に181万トンの二酸化炭素（CO₂）削減（2013年度比約17%削減）の目標が決められた。「第5期国土交通省技術基本計画」²⁾、「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」³⁾等では、GHG削減のために、水素（H₂₃

本報告では、海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所（以下、海技研）において今後7年間に計画している重点研究の一つ「重点研究6 GHG削減技術の高度化および安全・環境対策に関する研究」として実施される研究の内、H₂・NH₃やメタノール等液体代替燃料の燃焼と利用普及に資する3つの研究課題、小項目1と同2と同3の一部、を紹介する（図-1）。なお重点研究6全体と前述以外の小項目については、講演5を参照していただきたい⁴⁾。H₂・NH₃に関連する研究では、燃料利用の普及に向けて、エンジン、定容燃焼器を用いた燃焼技術開発、カーボンニュートラル（全体としてGHG排出量がゼロになる）までに過渡的に使用する燃料では、液体代替燃料の既存燃料との混合時の着火性評価、天然ガス利用時の排ガス処理による安全・環境面に貢献する研究を実施する。次章から、それぞれの研究に関する前年度までの研究成果と今年度からの研究開発の展望を述べる。

2. 水素・アンモニア燃焼エンジン等の専焼コンセプトの開発（小項目1）

H₂やNH₃は、燃焼してもCO₂を発生しないカーボンフリー燃料として、陸上での利用に加えて船用としての利用に関する研究開発が実施されている。海技研では、これまでに実施しているリーンバーンガスエンジンを用いたH₂利用技術に関する研究、ディーゼルエンジンを用いたNH₃と炭化水素燃料の混焼（二種以上の燃料供給によるエンジン内燃焼）に関する研究を引き続き実施すると共に、2050年のGHG排出量ゼロを目指したNH₃専焼（一種のみの燃料供給によるエンジン内燃焼）方法の基礎的な燃焼方法開発に取り組む。

GHG削減技術の高度化		安全・環境対策および船舶の航行時における環境負荷低減に関する研究開発			
小項目1 水素・アンモニア燃料エンジン等の専焼コンセプトの開発	小項目2 次世代燃料のエンジン燃焼解析技術の高度化	小項目3 次世代燃料使用における安全・環境評価技術	小項目4 船舶運航における環境影響評価技術の高度化	小項目6 重油のエマルジョン化による流動促進及び回収技術の開発	
小項目5 内航・外航海運の省エネ化・GHG削減対策に資する普及・実用技術					
社会実装・行政対応					

図-1 重点研究6「GHG削減技術の高度化および安全・環境対策に関する研究」の枠組み

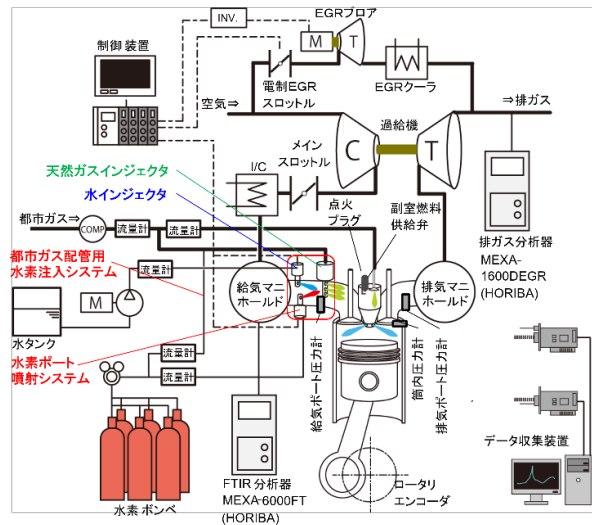


図-2 リンバーンガスエンジンにH₂を供給するレトロフィットシステム

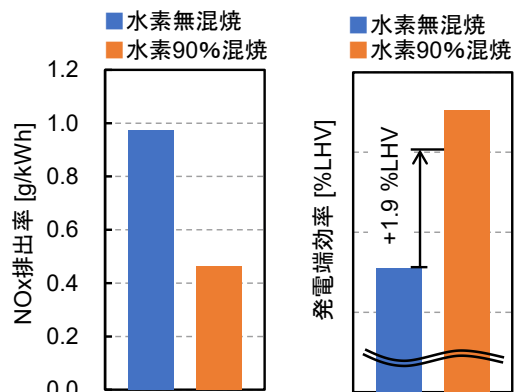


図-3 負荷率93%における水素無混焼および水素熱量混焼率90%のNO_x排出率と発電端効率（LHV：低位発熱量）

2.1 水素専焼対応技術

H₂は、LNGや天然ガスの主成分であるメタンと比較すると、最小着火エネルギーが1/20程度で、可燃範囲が広く、最大燃焼速度が8倍程度と大きい。このため、H₂は容易に着火し、着火後は極めて高速に燃焼する。このような燃焼特性は、エ

エンジンの燃焼室に空気と H₂ の混合気を吸入する過程において、混合気が自然に着火・燃焼して吸気系に燃焼ガスが逆流するバックファイアや、燃焼室内において通常より早く着火することでシリンダ内圧が異常に高くなるブレイグニッションの発生が懸念される。さらに、可燃範囲が広いこと、H₂ 漏洩時には、火災の危険性が高いことから、燃料供給システムからの漏洩以外にも、クランクケースや煙道における安全性に関する評価や対応技術の開発が必要となる。以上のことから、H₂ 専焼技術の開発には、H₂ の持つ激しい燃焼特性を抑制する燃焼制御技術の開発が重要となる。

これまでに、天然ガスに性状に近い都市ガスを燃料とする発電出力 400kW のリーンバーンガスエンジンに H₂ を供給するレトロフィットシステム（図-2）を開発し、H₂ 専焼、都市ガス専焼、H₂ と都市ガスを混焼する技術の研究開発を実施してきた⁹⁾。そこでは、短時間ではあるが、エンジン負荷率 25—93%において、H₂ の混焼率（全供給熱量に対する H₂ が占める割合）90%での運転を行った。実験では、90%以上の GHG 削減を達成するとともに、NO_x 排出率の低減と熱効率の改善を確認した（図-3）。また、クランクケース内の安全性の評価も実施している⁹⁾。H₂ の混焼率が高まると、クランクケース内ガスが可燃範囲に入ることを確認し、対策技術としてクランクケース内を空気によって掃気するシステムを開発し評価を実施した。

本年度からの研究では、H₂ 専焼を目指した研究開発を実施する計画である。H₂ 専焼運転が実施できるように現有の H₂ 供給設備を改装し、H₂ 専焼時の異常燃焼に関する技術課題を明確にする。次に、異常燃焼対策技術の効果検証を進める。また、強化学習を用いたエンジン制御技術の研究開発も実施する計画である。

2. 2 アンモニア燃焼支援

NH₃ は、液化温度が大気圧下で-33.3℃と H₂ より高いこと、液化 NH₃ の体積当たりのエネルギー密度が H₂ よりも高い特徴があり、船用での燃料利用に注目があつまっている。ただし、NH₃ は燃焼性が悪く、既存のディーゼル機関では燃料として単体で利用することは難しい。そのため、NH₃ を着火燃焼させるために、少量の重油やメタンガスや H₂ 等をパイロット燃料として用いるデュアルフューエル方式を用いた燃焼方式での開発が進められている。

これまでに、船用中速ディーゼル機関の吸気に NH₃ ガスを混合することで、NH₃ と船用 A 重油の混焼実験を実施している⁷⁾。その結果、NH₃ 供給量の増加と共に未燃 NH₃ の排出や温室効果を持つ N₂O が排出されることが確認された。さらに、小型の単気筒ディーゼル機関を用いて、未燃 NH₃ と N₂O を低減させるための燃焼方法を研究開発してきた⁸⁾。その結果、軽油を通常の噴射時期よりも早期に噴射することで、未燃 NH₃ と N₂O の低減を達成した（図-4）。一方で、高い混焼率の場合には、効果が得られないことや、NO_x や CO 等の排ガス成分の増加などの課題も明らかになった。また、船用低速 2 ストローク機関に適用する NH₃ 燃焼コンセプトである層

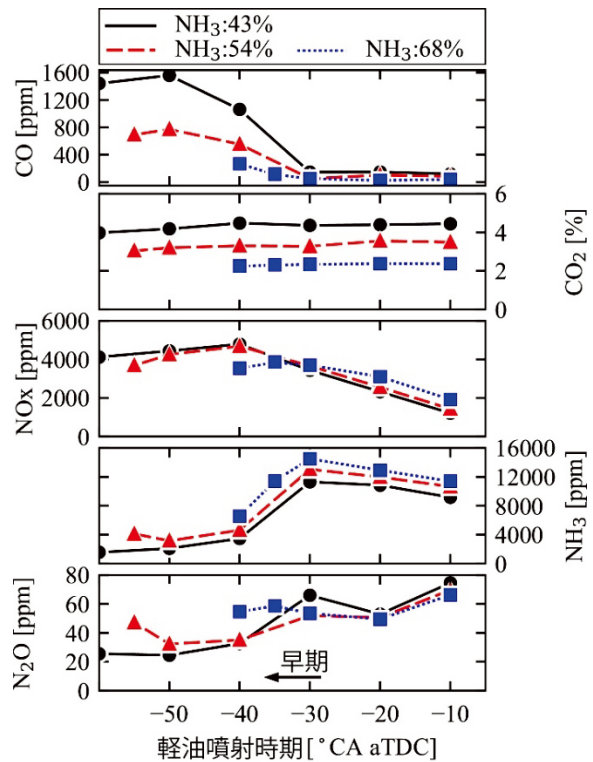


図-4 軽油早期噴射による未燃 NH₃ と N₂O の低減効果

状 NH₃ 噴射技術を対象として、新規開発した可視化定容燃焼試験装置を用い、NO_x 生成特性や燃焼プロセスに関する基礎研究も実施している^{9),10)}

本年度からの研究では、NH₃ ガスと空気の混合比率を変更し、より NH₃ が燃えやすいとされる条件において、エンジンの運転の安定性や排ガス成分の変化を確認する。さらに、上述の軽油の噴射時期の早期化を実施し、環境負荷物質の排出量の低減を行う。2024 年度には、4 ストロークの NH₃ デュアルフューエルエンジンを搭載したタグボートが竣工予定であり¹¹⁾、NH₃ の混焼技術が急速に開発されている。一方、商用エンジンが完成した後であっても、より高効率で環境負荷物質の排出の少ないエンジンを目指すためには、燃焼現象の解析は必須である。本研究では、実エンジンを使用した NH₃ ガスと空気の混合気を燃焼させて、排ガス成分の変化や燃焼を解析することで、その特性を明らかにし、より高度なカーボンフリー燃料の利用に資する研究開発を実施する。

2. 3 アンモニア専焼方法開発

NH₃ 燃料利用に関して、副室を用いた 4 ストロークエンジンに適用可能な NH₃ の専焼利用に関する基礎的な研究を実施する。現在は、燃料価格変動への対応や冗長性の観点から、船用エンジンとしては、デュアルフューエルエンジンによるガス燃料の利用が進んでいる。今後、GHG 排出ゼロを達成するためには、カーボンニュートラル燃料またはカーボンフリー燃料のみによる動力システムの運転が望まれる。デュアルフューエルエンジンのパイロット燃料を前者であるバイオ燃料に置き換えることも GHG 排出量ゼロを達成する方法である。しかし、デュアルフューエルエンジンは、パイロット

燃料のために、燃料タンクやエンジンへの燃料供給システムは依然として必要であり、簡素化の面では不利である。一方、後者である NH_3 は船用燃料としての期待が大きく、その燃料利用が普及した将来には、 NH_3 単体での燃料利用技術が望まれると考えられる。

本研究ではエンジンに適用する目的で、 NH_3 の単体燃焼方法の開発を実施する。 NH_3 は単体では燃やすことが困難であるので、一部を H_2 に変換して NH_3 に混ぜるかパイロット燃料とすることで着火・燃焼させるための研究を実施する。

3. 次世代燃料のエンジン燃焼解析技術の高度化(小項目2)

これまで海技研では、船用エンジンのエンジン内燃焼を対象に、エンジンの1回の燃焼が再現できる急速圧縮膨張装置を用いて研究を実施してきた。本装置では、燃焼室内ガスに相当する温度・圧力場が、油圧駆動のピストン圧縮によって再現され、単噴孔ノズルから噴射される燃料噴霧の着火・燃焼過程が調査できる。本装置の特色は、燃焼室内の圧力計測と排気計測だけでなく、エンジン計測では困難とされる燃焼の可視化が行える点である。この特色を活かして、船用燃料油やメタン・空気予混合気中に噴射された液体燃料などの着火・燃焼過程を対象に、研究を進めてきた。本装置では、単一噴霧、静止雰囲気場が対象となる。エンジン内の現象をこのように単純化することで、燃焼に作用する複合的な要因が排除され、噴霧燃焼に内在する問題に取り組める。一方、性能向上の観点からエンジン燃焼を評価する場合、燃焼に与える複数噴霧に起因する噴霧同士の相互作用や空気流動の影響は無視できない。実機開発に活用する知見を得るためには、上記装置で設定した単純化した場での評価には限界があり、基礎試験と実機試験との乖離を埋める新たな試験装置が必要と考えた。

こうした理由から、海技研では、実機と同スケールで且つ、実機内の現象を極力忠実に再現できる新たな燃焼試験装置の開発を進めている。図-5は現在開発を進める装置の断面図である。本装置は、2ストロークエンジンを想定した直径350mm、厚さ150mmの円筒状の空間をもつ定容容器である。実機の燃焼室内に相当する高温、高圧場だけでなく、空気流動も再現される。装置は円周上に合計6か所のポートを備えており、2ストロークエンジンの実機と同様に複数の噴射弁が取り付けられる構造としている。このように燃焼室内の大きさや雰囲気条件、噴射条件など燃焼に影響するパラメータが実機相当に再現できるため、実機開発に活用しやすいデータが取得できる。

小項目2では、実機相当の現象が再現できる本装置を用いて、CFD (Computed Fluid Dynamics, 数値流体力学) 解析の検証に利用可能なデータベースを構築することも目的としている。近年では、実機の開発においてエンジンCFDが活用されている。現状のエンジンCFDは、初期条件、境界条件だけから現象を予測できるものとなっておらず、計測結果にもとづく初期条件の入力や、噴霧モデルの定数調整が必要となっている。すなわち、実機に限りなく近い条件で得られたデ

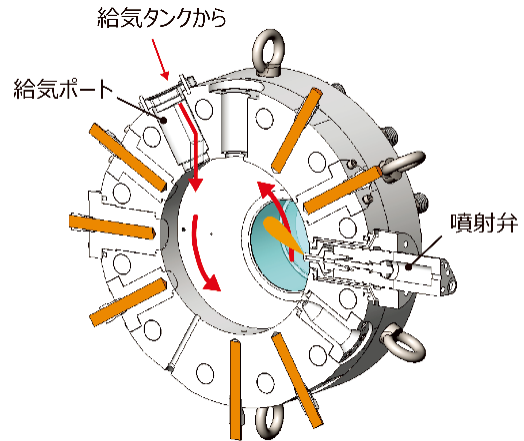


図-5 大型2ストローク船用エンジンの燃焼室を模した燃焼試験装置

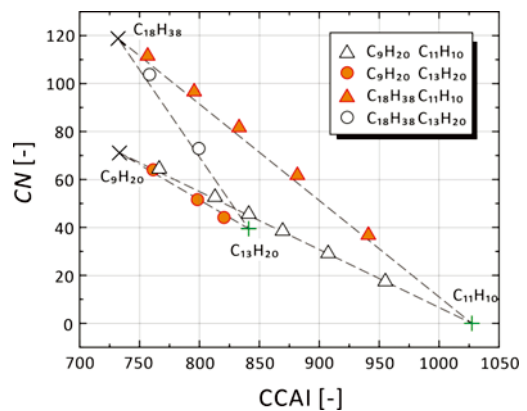


図-6 炭化水素の混合比変化による CCAI と実測した着火性の比較

ータをもとに初期条件の設定やモデル定数を調整できれば、エンジン CFD の予測精度を向上できる。想定するデータには、可視化試験で得られる噴霧画像だけでなく、初期条件や境界条件となる雰囲気温度や圧力、噴射率なども含まれる。信頼性の高いデータを取得するため、燃焼解析技術の高度化を進める予定である。

7年間実施する重点研究では、 H_2 、 NH_3 を対象に研究を進め、メタノールやバイオ燃料まで対象を拡張する計画である。研究初年度では、 H_2 、 NH_3 の燃焼試験を実施するため、単発試験用の燃料噴射系を構築し、それらを試験装置に搭載して燃焼試験を実施する。

4. 次世代燃料使用における安全・環境評価技術(小項目3)

小項目3では、液体燃料とエンジンからの排ガス処理に着目して研究を実施する。前述の H_2 、 NH_3 のようなガス燃料の他に、GHG 対応燃料としてバイオ燃料やエタノール等の液体燃料を製造、利用することも考えられている。これら液体代替燃料はエンジン等の設備の改造や調整を行わずに既存燃料に混合することが想定されことから、ドロップイン燃料と称する。また、天然ガスも既存の石油系液体燃料よりも GHG 排出量が小さい。これらは、カーボンニュートラルへの過渡

期の対応燃料として考えることができ、本研究ではこれらの燃料を対象にし、着火性の評価や環境対策として触媒を利用した排ガス中の環境負荷物質の低減方法の高度化に関する研究を実施する。

4.1 ドロップイン燃料の着火性評価

ドロップイン燃料は、使用時にエンジンを大幅に改造する必要がない上、既存のインフラも使用できることが利点となる。液体燃料の着火性は、船用エンジンの保守や船舶の安全な運航のために、重要な燃料性状である。これまで、船用燃料は物理的な燃料物性から計算される着火性指標、セタン指数または CCAI (Calculated Carbon Aromaticity Index) , に基づいて評価されていたが、近年の低硫黄船用燃料では、燃料の製造方法が多様になり、これまでの着火性指標と着火性の関係が不明確であった。着火性評価指標は、既存燃料の実験結果を基に作成されているため、燃料中の成分比率が変化していることに起因する影響度を調べた。燃料の着火性の評価のために、既存の船用 A, C 重油に対して、炭化水素の混合物として燃料のモデル化を行うことによって、着火性における炭化水素の分子構造による効果を評価し、燃料中の成分比率が、重油の着火性指標に及ぼす影響を明らかにした (図-6) 12,13)。

危急の課題として代替燃料の中でもバイオ由来のドロップイン燃料を、既存の燃料と混合する利用方法が検討されている。本研究では、それらドロップイン燃料と既存の燃料の混合割合と着火性の関係評価を行う。ドロップイン燃料はバイオ燃料の他にも、様々な炭化水素が考えられている。まずは、アルコール系燃料であるメタノール、エタノールと既存燃料の混合率と炭化水素の分子構造の影響を評価する。着火性の評価には、図-7 に示す着火性計測用実験装置を用い、燃料を高圧高温の容器内に噴射して着火させることで、燃料の着火・燃焼性を調べる。具体的な実施内容として、初めに代替燃料と既存燃料の混合燃料の着火性評価を行う上で、統一したデータ取得を行うため、今後実施していく実験条件を検討、決定する。その後、アルコール系燃料であるメタノール、エタノールと既存燃料を構成する炭化水素 (n アルカン、イソアルカン、シクロアルカン、芳香族など) の混合率と着火性の関係の評価する。

将来、GHG 削減のために様々なドロップイン燃料の使用が予測される。これらを混合燃料として使用することを想定した時、分子構造の影響を調べることは、想定されていないドロップイン燃料が出現した時の推定データとなり、予測式を作成すれば、より利用価値が高いと考える。また、これまで検討されてこなかったドロップイン燃料は、着火と混合に関する線形性が維持できているかが不明であり、これらのデータを示すことが既存燃料との混合による方法での利用が促進されると考えられる。

4.2 排ガス処理方法の高度化

海技研では、これまでにディーゼル機関から排出される窒

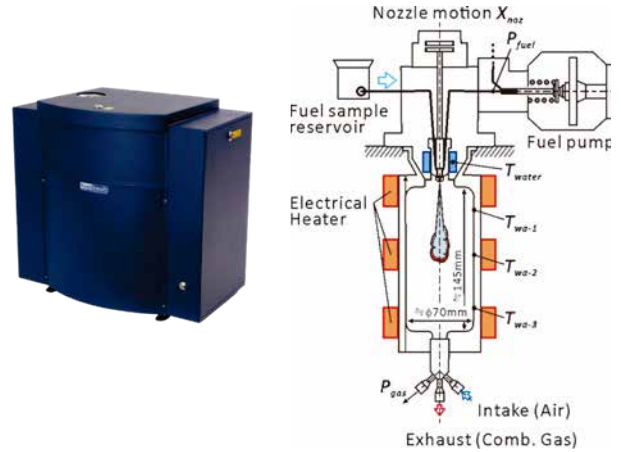


図-7 着火性計測用実験装置の外観と内部構造

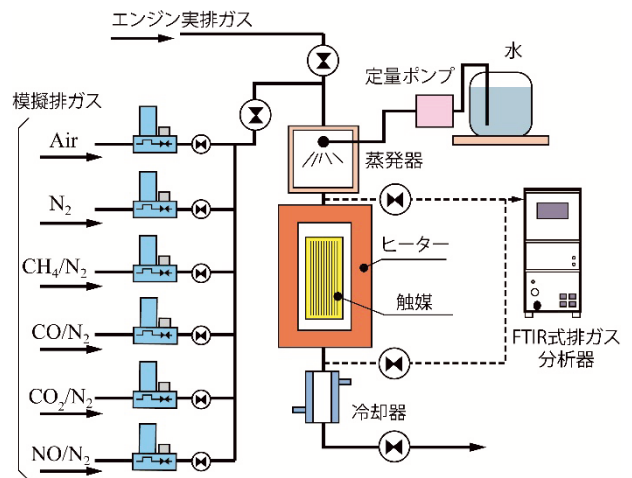


図-8 小型ガス流通式反応器 (マイクロリアクター)

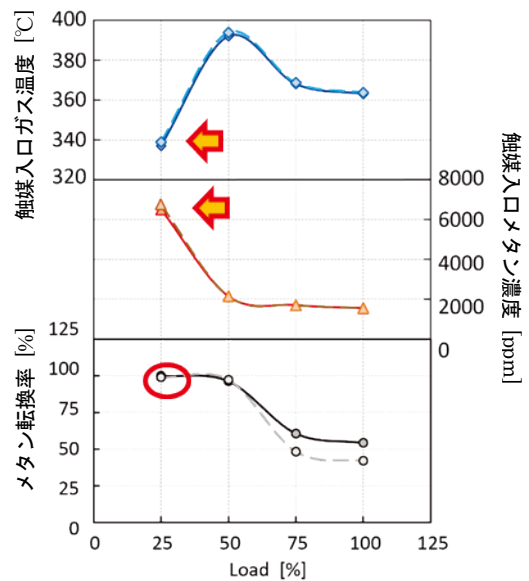


図-9 実排ガスを用いた触媒性能試験結果

素酸化物 (NOx) の低減装置として触媒を用いる SCR (Selected Catalytic Reduction, 選択触媒還元) 脱硝装置の船用化の研究に従事してきた¹⁴⁾。また、近年では船用 LNG 燃料エンジンから排出される未燃メタン (メタンスリップ) の後処理触媒の性能評価の研究を実施し、図-8 に示すマイクロリアクターと呼ばれる小型ガス流通式反応器を用いて、リーンバーンガスエンジンの実排ガスやボンベガスにより調整した模擬排ガスを用いた性能評価実験も実施している。図-9 に、既存のリーンバーンガスエンジンの実排ガス中におけるメタン後処理触媒の性能評価を行った一例を示す。当該エンジンは、高負荷率における発電機運転を前提としているため、低負荷率では、未燃メタンが多く発生する (図-9 中段)。また、低負荷率では排ガス温度も低い (図-9 上段) ことから、メタン酸化反応が起こりづらいため性能が低いと予想されるが、触媒によるメタン転換率 (図-9 下段) は約 100% と高い性能が示された。一方、排ガス温度が比較的高く、触媒性能が発揮されると予想された 75% や 100% の高負荷率では、メタン転換率は 5 割程度と低い性能に留まった。この原因を確認するために、実排ガスに含まれる各ガス成分が触媒性能に及ぼす影響を模擬ガスを用いて評価した結果、触媒上で酸化するメタンや一酸化炭素 (CO) の発熱による触媒温度の上昇や、排ガス中の NOx や水が触媒性能の低下に及ぼす影響が明らかになった¹⁵⁾。

小項目 3 では、排ガス中のメタンの酸化による発熱や NOx の影響による触媒性能の変化を考慮した実排ガスにおける触媒性能評価手法の開発を実施する。

5. まとめ

本報告では、重点研究 6 「GHG 削減技術の高度化および安全・環境対策に関する研究」の一部として実施する 3 つのエンジン、燃料、後処理技術に関する研究 (小項目 1, 2, 3 の一部) について、関連するこれまでの成果、本年度に実施予定の研究及び中長期計画中の展望を報告した。これらの研究は、将来必要になる技術を開発するものである。海技研が、民間企業に先駆けて研究を実施することで、関連する基礎的な技術を広く公開することが可能である。これにより国内の船用産業の活性化に資することができる。さらに、民間企業との共同研究や行政からの要請への対応による実用技術の開発を実施することで、船舶からの GHG 削減に関する技術開発、国際競争力強化及び我が国経済の持続的な発展へ貢献する。

なお、本報告内容の一部である H₂ 専焼対応技術、次世代燃料のエンジン燃焼解析技術の高度化、ドロップイン燃料の着火性評価については、ポスターセッションにおいてより詳細な報告をしているので、ご参照いただきたい。

References

- 1) <https://www.env.go.jp/content/900440195.pdf>
- 2) <https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001479986.pdf>
- 3) https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_war

- 4) 益田晶子, 他, 環境・動力系における GHG 削減・環境保全への取り組み, 海上技術安全研究所報告第 23 巻別冊, 講演 5, (2023) .
- 5) 市川泰久, 船用リーンバーンガスエンジンの水素専焼に向けた技術開発, 第 22 回海上技術安全研究所研究発表会講演集, 第 22 巻 (2022)
- 6) 中村真由子, 市川泰久, リーンバーンガス機関におけるブローバイガスの成分分析および水素混焼時のクランクケース内ガス可燃性評価, 海上技術安全研究所報告, 第 22 巻, 第 3 号, (2022)
- 7) 仁木洋一市川泰久, 新田好古, 平田宏一, アンモニア混焼ディーゼル機関に関する研究開発の現状, 第 21 回海上技術安全研究所研究発表会講演集, (2022).
- 8) Yoichi Niki, Reduction in Unburned Ammonia and Nitrous Oxide Emissions From an Ammonia-Assisted Diesel Engine With Early Timing Diesel Pilot Injection, J. Eng. Gas Turbines Power, Vol. 143(9), 091014, (2021).
- 9) Yasuhisa Ichikawa, Yoichi Niki, Koji Takasaki, Hideaki Kobayashi and Akihiro Miyagi, NH₃ combustion using three-layer stratified fuel injection for a large two-stroke marine engine: Experimental verification of the concept, Applications in Energy and Combustion Science, Vol.10,100071 (2022).
- 10) Yasuhisa Ichikawa, Yoichi Niki, Koji Takasaki, Hideaki Kobayashi and Akihiro Miyagi, Experimental study of combustion process of NH₃ stratified spray using imaging methods for NH₃ fueled large two-stroke marine engine, Applications in Energy and Combustion Science, Vol.13,100119 (2023).
- 11) https://www.ihico.jp/ips/all_news/20220712.html
- 12) 高木, 二成分系モデル燃料による船用重質油の着火性指標に関する評価, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 56-5 (2021) , pp.830-835.
- 13) 高木, 川内, 船用燃料の着火性評価のための燃料成分推定-推定手法の構築と多成分燃料 (残渣油) への適用, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 58-1 (2023) ,pp.117-124.
- 14) 平田宏一, 他 13 名, 海上技術安全研究所における船舶用 SCR システムに関する研究, 海上技術安全研究所報告, 第 11 巻, 第 2 号, (2011), pp.1-19.
- 15) Yoshifuru Nitta, et al. "Performance Evaluation of Methane Oxidation Catalyst for Marine Gas-Engine in Actual Exhaust and Simulated Gas", The Proceedings of the International symposium on diagnostics and modeling of combustion in internal combustion engines (COMODIA 2022), 2022, pp. C7-1.