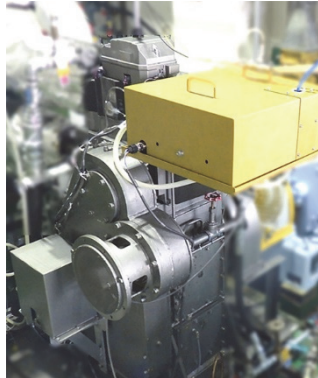


# 船舶分野の低炭素化に貢献する 低コストなメタノール・軽油混焼エンジンの開発

Development of a Low-Cost Methanol–Diesel Dual-Fuel Engine  
Contributing to the Decarbonization of Ships



山本 高之<sup>\*1</sup>  
Takayuki Yamamoto

古賀 智大<sup>\*2</sup>  
Tomohiro Koga

高橋 知大<sup>\*2</sup>  
Tomohiro Takahashi

田中 貴文<sup>\*3</sup>  
Takafumi Tanaka

小暮 涼介<sup>\*3</sup>  
Ryosuke Kogure

高木 亮輔<sup>\*3</sup>  
Ryosuke Takagi

低炭素・カーボンニュートラル社会の達成に向けて、船用主機・補機への展開を目指したメタノール・軽油混焼エンジンの開発を推進している。メタノールはカーボンニュートラル燃料の中でも水素やアンモニアに比べて取扱いが容易で、船舶用の代替燃料として有望だが、燃焼変動や未燃メタノール排出の抑制が技術課題である。三菱重工業株式会社は燃焼システムに軽油パイロット着火方式を採用し、CFD 解析を活用して混合気形成の最適化や燃焼挙動の詳細検討を行うとともに、単筒試験機による試験で燃焼制御の適用効果を検証した結果、燃焼変動と未燃メタノール排出を大幅に低減できることを確認した。これらの知見を多気筒実機の開発に展開し、カーボンニュートラル社会への貢献を目指す。

## 1. はじめに

世界的なカーボンニュートラルの潮流の中で、海運部門においても温室効果ガス(以下、GHG)削減に向けた取組みが積極的に進められている。特に、駆動用及び補機用エンジンの燃料にカーボンニュートラル燃料を利用することは、GHG 排出量の大幅な削減を可能にする重要な手段である。カーボンニュートラル燃料としてはメタノール、アンモニア、水素などが候補として挙げられるが、その中でもメタノールは常温、常圧で液体であり、エネルギー密度が高いこと、取扱いが比較的容易であることから、船舶の代替燃料として最も早く市場での実証が進められている。メタノールは燃焼時の CO<sub>2</sub> 排出量が化石燃料に比べて少なく、特に e-メタノールやバイオメタノールを用いた場合には CO<sub>2</sub> 排出が実質ゼロと見なされる。日本海事協会の報告によれば、2025 年 6 月時点で総トン数 5000GT 以上のメタノール燃料船が 62 隻就航しており、今後も就航隻数の増加が見込まれている<sup>(3)</sup>。三菱重工業株式会社(以下、当社)は、メタノールを軽油で着火するメタノール・軽油混焼エンジンの開発に取り組んでおり、本報では単筒試験機及びCFD 解析を活用した燃焼技術の開発状況について紹介する。

## 2. メタノール・軽油混焼エンジンの概要

表 1 に化石燃料とメタノールを含む代替燃料の物性値を示す。メタノールは水素やアンモニアと異なり常温常圧で液体であるため、液化に要するエネルギーを必要としない利点がある。また、アンモニアと比較して毒性が低く、取扱いの容易さが普及促進の要因となっている。一方で、セタン価が低く自己着火しにくい燃料であるため、強制着火させるための着火源を用いることが一般

\*1 三菱重工業株式会社 総合研究所 燃焼研究部 主席研究員

\*2 三菱重工業株式会社 総合研究所 燃焼研究部

\*3 三菱重工エンジン&ターボチャージャ株式会社 エンジン・エネルギー事業部 エネルギー技術部

的である。着火方式としては火花点火方式と軽油パイロット着火方式が存在するが、現在、船舶に採用されているメタノールエンジンの多くは軽油パイロット着火方式を採用しており、当社もこの方式によるエンジン開発を進めている(図1)。本方式では、吸気ポートにメタノールを噴射し、メタノールと空気の混合気を形成して燃焼室に導入する。混合気はピストンによって圧縮され高温・高圧となり、その中に軽油を噴射することで軽油が自己着火し、その火炎を火種としてメタノールの予混合気を燃焼させる仕組みである。軽油パイロット着火方式の大きな利点は、軽油単独で通常のディーゼルエンジンとしても運転可能であるため、運用の柔軟性が高い点にある。また、メタノール軽油混焼エンジンは既存のディーゼルエンジンを活用し、メタノール噴射装置を追加する形で改造を行うことができるため、低コストでメタノール燃料対応が可能となる。一方で、メタノールと軽油の2種類の燃料を安定的に着火・燃焼させるためには、適切な燃焼条件の設定が必要であり、当社ではCFD解析や単筒試験機を用いてその検証を進めている。

表1 燃料物性値の比較

|                             | ガソリン    | 軽油      | 水素       | アンモニア     | メタノール |
|-----------------------------|---------|---------|----------|-----------|-------|
| 状態(常温・常圧)                   | 液体      | 液体      | 気体       | 気体        | 液体    |
| 密度(液体) (kg/m <sup>3</sup> ) | 750     | 850     | 71@-253℃ | 682 @-33℃ | 792   |
| 低位発熱量(MJ/kg)                | 43.1    | 43.2    | 120      | 18.6      | 19.7  |
| 沸点(℃)                       | 35~180  | 240~350 | -253     | -33       | 65    |
| 蒸発潜熱(kJ/kg)                 | 290~380 | 250~300 | -        | -         | 1100  |
| セタン価                        | -       | 40~55   | -        | -         | 3     |

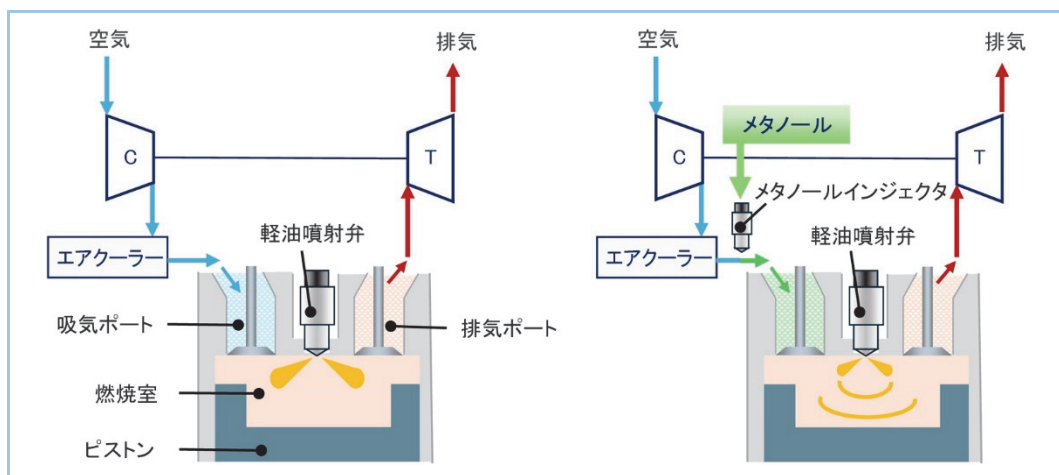


図1 メタノール・軽油混焼エンジンシステム

### 3. メタノール混焼エンジンの技術課題

メタノール混焼エンジンの開発においては、燃焼変動の抑制及び未燃メタノールの排出抑制が重要な技術課題となる。メタノールは蒸発潜熱が高いため、吸気ポート内に噴射し気化する際に給気の熱を奪う、また混合気中のメタノールが軽油の反応速度を低下させる効果もあり、軽油単独燃焼時に比べて軽油が着火しにくく燃焼が不安定になりやすい。また、吸気ポートに噴射したメタノールが蒸発する前に吸気ポート壁面に付着すると、燃焼室内に供給されるサイクルごとのメタノール量にばらつきが生じ、燃焼変動が増大する要因となる。燃焼変動が大きくなると、燃焼の弱いサイクルが増加し不完全燃焼を引き起こすため、未燃メタノールの排出増加につながる。これらの課題は軽油に対するメタノールの割合が高まるほど顕著になるため、高いメタノール混焼率を実現して GHG 排出量を効果的に削減するためには、メタノール噴射、軽油噴射、空気過剰率、吸入空気温度など、混合気形成及び燃焼条件に関わるパラメータを最適化して、燃焼を安定化する対策が不可欠となる。

## 4. CFD を活用したメタノール・軽油混焼技術の開発

混合気形成及び燃焼条件に関わる仕様の最適化にあたっては、CFD 解析を活用している。メタノール混焼エンジンの開発においては、CFD 解析を用いて流動特性や燃焼挙動の詳細な検討を行い、安定した燃焼を実現するための設計指針の策定に役立てている。CFD 解析は目的に応じて混合・流動解析と燃焼解析を使い分けており、それぞれ具体的には以下に示す検討などに活用している。

### (1) 混合・流動解析(非燃焼解析)の活用例

- ・燃焼室内における均一混合気形成
- ・吸気ポート壁面へのメタノール付着の抑制
- ・吸排気オーバーラップ中のメタノールの吹き抜け防止

### (2) 燃焼解析の活用例

- ・サイクル間の燃焼変動の予測と対策検討
- ・燃焼制御パラメータの最適化(空気過剰率, 噴射タイミング, 給気温度等)
- ・熱効率向上策, 排気ガス性状改善策の検証

前述のとおり、メタノールの混焼割合を上げていくと燃焼変動が生じるため、混焼率を上げていくためには、その対策を打つことが重要になる。燃焼変動が生じる要因としては、燃焼室内に供給されるメタノール量や燃焼室内の混合気濃度分布がサイクルごとに変化することなどが挙げられ、これにはメタノールを噴射するインジェクタの噴孔仕様(噴孔径, 噴孔数, 噴射方向など)や噴射条件(噴射タイミング, 噴射圧力, 噴射期間など)など、メタノール噴射に関わる条件だけでも、数多くの影響因子が存在する。これらを最適化するには試行錯誤が必要となり、試験で最適化するには膨大な工数を要するため CFD 解析を積極的に活用している。

図 2 は、メタノールインジェクタの噴孔仕様を検討するために、吸気行程中における筒内のメタノール濃度分布を解析した事例である。改善後はメタノールインジェクタから吸気ポートへの噴射方向を変更し 2 つの吸気バルブを通過するメタノールの分配やタイミングを調整した結果だが、改善前に比べメタノール濃度が均一化されていることが分かる。これによりサイクルごとの濃度分布の変動が低減し、燃焼変動の抑制効果が期待できる。ここで示した空気とメタノールの混合状態を確認する非燃焼解析は、次に示す燃焼解析に比べ計算負荷が低いため、この解析でまず筒内のメタノール濃度分布や吸気ポート壁面へのメタノールの付着量を確認してインジェクタ仕様を絞り込んだ上で、次に示す燃焼解析に進む手順を踏むことにより、効率的に検討を進めている。

図 3 は燃焼解析により筒内圧力と熱発生率のサイクル変動を予測した事例である。本解析は、実際のエンジンで生じる吸気～圧縮～膨張～排気のサイクルを忠実に再現しており、これを複数サイクル連続で計算することにより、実際のエンジン内で生じる燃焼変動の予測を可能としている。改善後の計算は、メタノールの噴射圧力, 噴孔径, 噴射期間, 噴射位置, 給気温度など、複数のパラメータを調整した結果で、改善前に比べて筒内圧力, 熱発生率ともサイクル変動が抑制されることが確認できた。このように、エンジン部品を試作する前に CFD を用いた机上検討で燃焼変動の予測が可能であり、本手法を活用して短期開発を推進している。

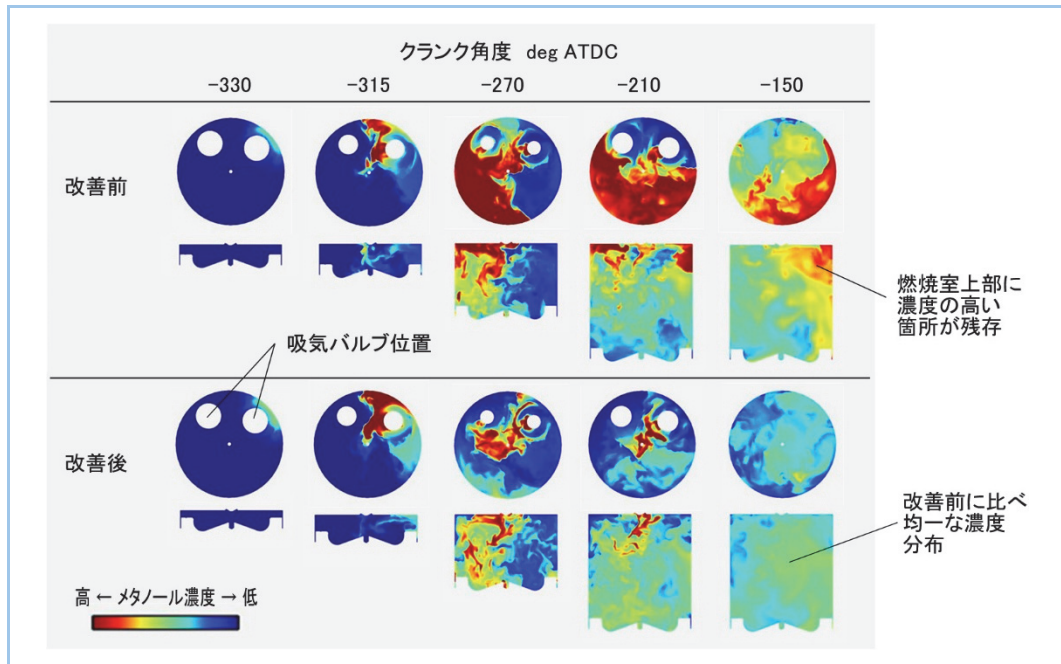


図2 CFD 解析結果 筒内メタノール濃度分布の予測

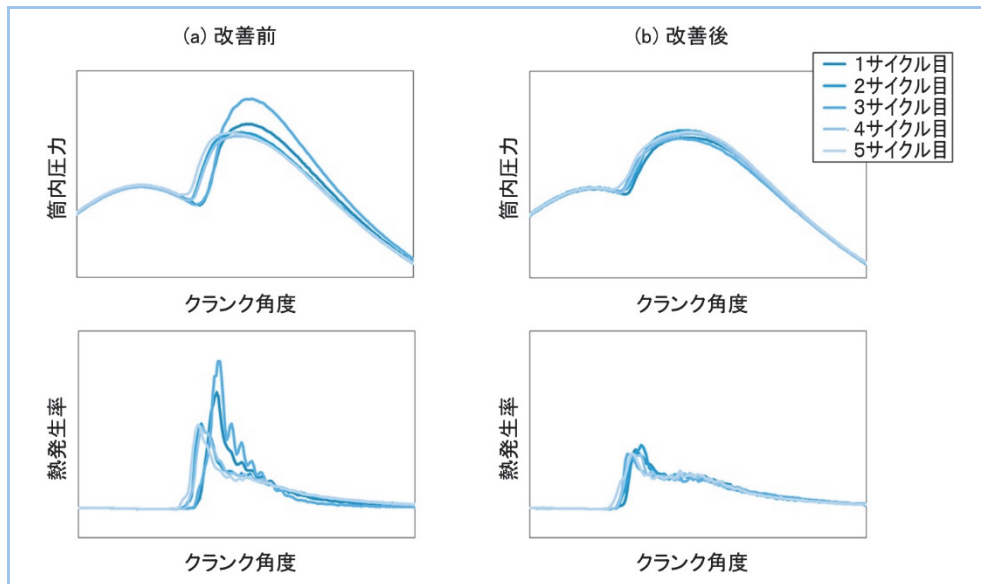


図3 CFD 解析結果 筒内圧力と熱発生率のサイクル変動の予測

## 5. 単筒試験機による燃焼試験

メタノールの燃焼特性の把握には、図4に示す単筒試験機を活用している。この試験機は、当社の主力機種であるSRシリーズと同一のシリンダボア径で設計されており、ここでの検証部品は、スケールアップせずに直接SRシリーズの多気筒実機へと展開することができる。

図5に軽油専焼とメタノール混焼の筒内圧力と熱発生率の比較を示すが、軽油専焼時に比べてメタノール混焼時には着火が大きく遅れていることが分かる。また、サイクルごとの燃焼変動も増え、未燃メタノールの排出も増加する結果となった。図6は、燃焼変動と未燃メタノールの低減策として、空気過剰率、軽油噴射タイミング、給気温度の制御による効果を確認した結果である。ここでは、開発のベースとなるSRシリーズのディーゼルエンジンから条件を変更しない場合を“制御なし”，メタノール混焼向けに変更した場合を“制御あり”として比較した結果を示している。空気過剰率と軽油噴射タイミングをメタノールの燃焼特性に合わせて制御する効果は非常に大きく、燃焼変動と未燃メタノール排出を大きく低減することができた。給気温度を上げることは、燃焼変動や未燃メタノールの顕著な低減には直接繋がらなかったが、着火時期が早まる効果が確認さ

れており、メタノール混焼時の着火の遅延による失火のリスクを抑える対策として有効である。これらの知見を基に、現在実機の制御システム開発を進めている。また、CFD 解析を用いて検討したメタノールインジェクタを試作中であり、単筒試験機により評価した後、SR シリーズの多気筒エンジンへ適用し、メタノール・軽油混焼エンジンの実用化を図る。

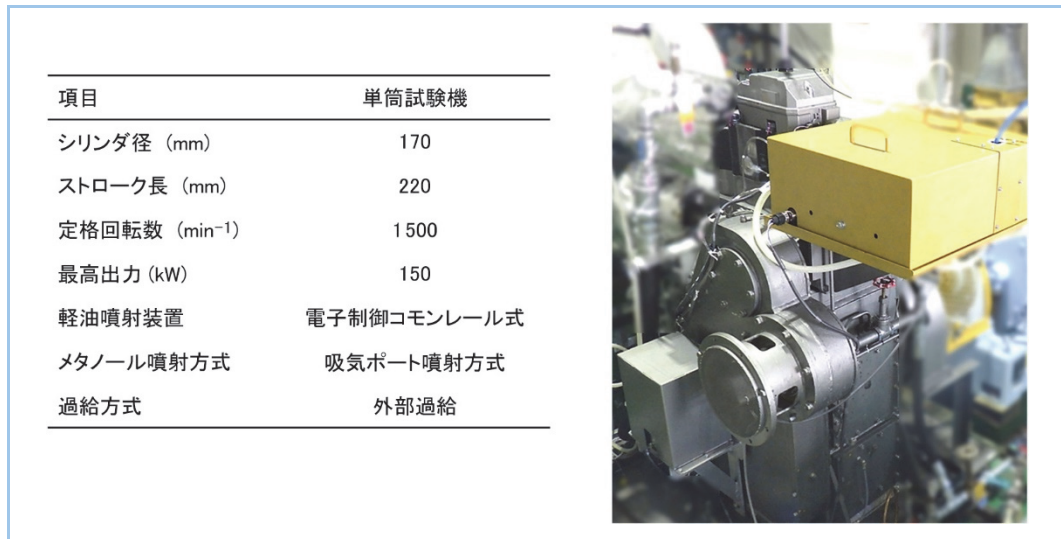


図4 メタノール・軽油混焼試験用単筒試験機

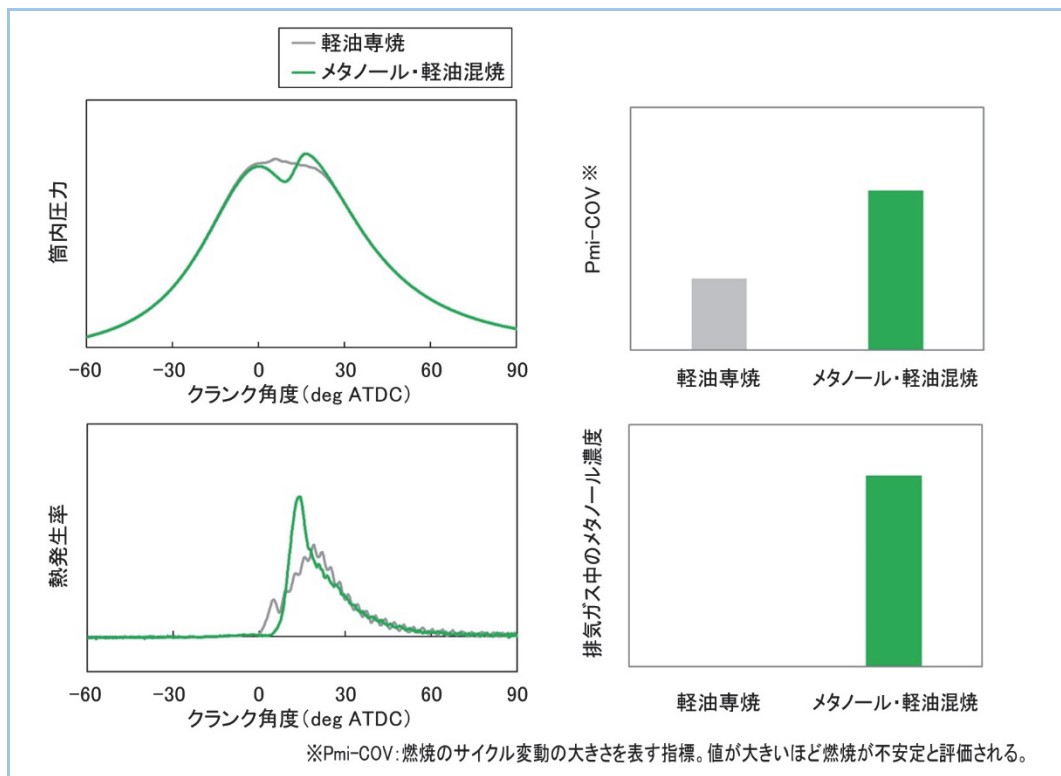


図5 単筒試験機試験結果 軽油専焼とメタノール・軽油混焼の比較

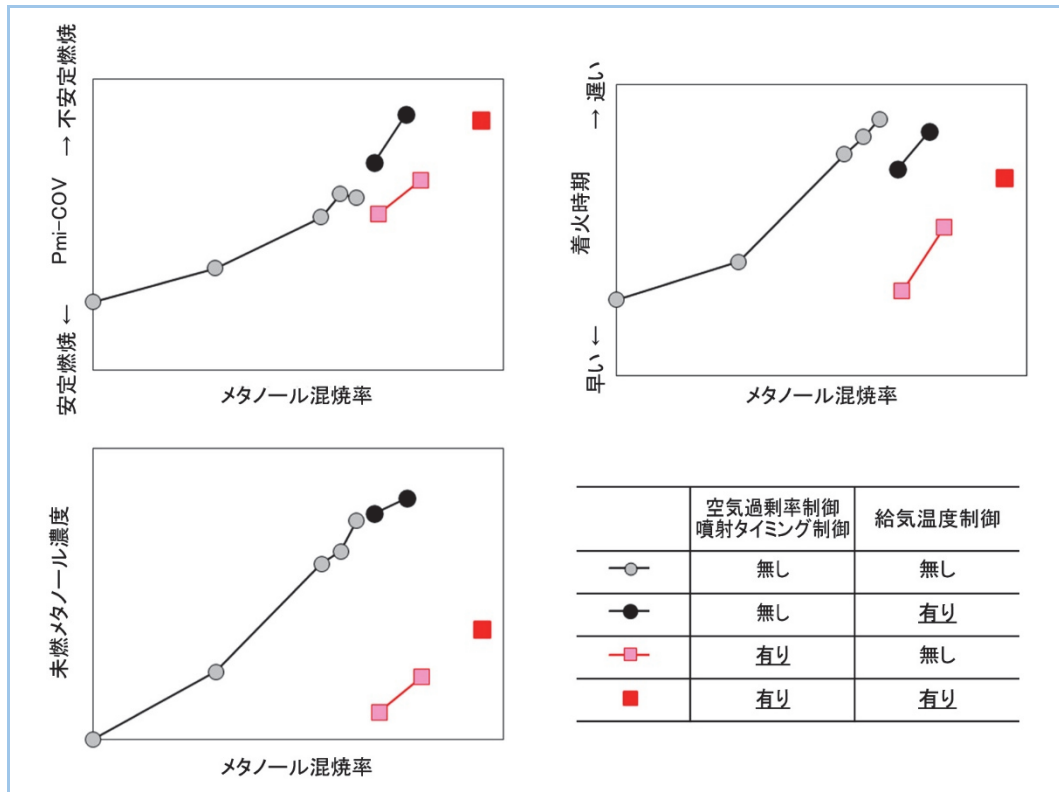


図6 燃焼制御による燃焼安定化効果と混焼率向上

## 6. まとめ

これから到来する低炭素・カーボンニュートラル社会に向け、船用主機・補機への展開を目指したメタノール・軽油混焼エンジンの開発を推進している。技術課題となる燃焼変動や未燃メタノール排出に対し、CFD 解析と単筒試験機を活用してメタノール混合気形成の最適化や、燃焼制御システムの開発を進めており、ここで開発した要素技術を SR シリーズの多気筒機開発に展開し実用化を図る。三菱重工グループは 2040 年の Net Zero 実現を目標に“2040 年カーボンニュートラル宣言”をしており、発電用、船用、車両搭載用エンジンの脱炭素・低炭素化を推進し、カーボンニュートラル社会の実現に貢献していく。

## 参考文献

- (1) 今森祐介ほか、低炭素・カーボンニュートラル社会に貢献する水素・アンモニアエンジンの開発、三菱重工技報 Vol.59 No.4 (2022)
- (2) 田中貴文ほか、アンモニア混焼エンジンの技術開発、三菱重工技報 Vol.62 No.2 (2025)
- (3) 日本海事協会、ClassNK 代替燃料インサイト Version 3.1,  
[https://download.classnk.or.jp/documents/ClassNKAlternativeFuelsInsight\\_j.pdf](https://download.classnk.or.jp/documents/ClassNKAlternativeFuelsInsight_j.pdf)