

船用燃料としてのメタノール*

福島 健史** 渡邊 学***

1. はじめに

地球温暖化や気候変動に対して、世界が一致団結して取り組む必要があるという認識の下、1992年に国連で気候変動枠組条約（UNFCCC）が採択され、1994年に発効した。これに基づき必要な国際的取り組みを行うために「国連気候変動枠組条約締約国会議（Conference of the Parties；COP）」が開催されている。2015年に開催されたCOP21では「パリ協定」が採択され、世界全体の長期目標として、「世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて2度より十分低く保つ（2度目標）とともに、1.5度に抑える努力を追求する（1.5度目標）」ことが示された。さらに2018年に発表された「IPCC 1.5°C特別報告書」では、世界の気温上昇を1.5°C未満に抑えるためには2050年前後にネットゼロが必要であることが示され、各国政府がカーボンニュートラルの実現を目指した取り組みを発表し、わが国でも2020年8月に国会にて2050年までにカーボンニュートラルの実現を目指すことを宣言した。

海事分野においても2018年4月に開催された第72回海洋環境保護委員会（MEPC72）においてGHG削減目標を盛り込んだIMOのGHG削減初期戦略が採択された。このなかで2050年までに2008年比でGHG排出総量を最低半減することと、今世紀の早いうちにカーボンニュートラルを目指すことが示された。その後2023年7月に開催されたMEPC80では、2023年版IMO GHG削減戦略が採択され、目標として2040年までにGHG総排出量の最低70%削減（2008年比）と遅くとも2050年頃までにGHG排出量ネットゼロが合意された。

GHG削減という観点から様々な対策が検討されている中で、燃料の炭素排出強度を下げることも検討されており、水素やアンモニアといったいわゆるゼロエミッション燃料の利用についても検討が進んでいるが、これらを使うエンジンが主機として船舶に搭載されるには至っていない。

*原稿受付 令和6年2月13日。

**正会員 株式会社三井E&S（玉野市玉3丁目1番1号）

***正会員 ENEOS株式会社（横浜市中区千鳥町8）

一方で、再生可能エネルギーによる電力で水を電気分解して得られた水素と二酸化炭素を原料として合成された「再エネ合成燃料」もGHG排出量はゼロとみなせることから注目を浴びている。メタノールもこの再エネ合成で製造することができること、およびすでにメタノールを燃料とするエンジンが実用化されていることから、海運における早期のカーボンニュートラルを実現する手段として、船用燃料としての“メタノール”への関心は高い。本稿では、船用燃料としてのメタノールについて、その特徴について紹介するとともに船用主機への適用性についても検討し、既に実用された例（ME-LGI機関）のシステム概要等を紹介する。

2. メタノールの特徴

2.1 メタノールの物性

メタノールとその他の主要な燃料の物性値を表1に示す^{[1]-[9]}。メタノールがカーボンニュートラル船用燃料として期待されている大きな理由が常温で液体であることである。表より明らかなように、水素やアンモニアに比べて沸点（蒸発温度）が高く、加圧することなく液体として扱うことができる。そのため、従来の燃料供給システムをわずかな改造で利用できる可能性があり、早期のカーボンニュートラル実現へのハードルが低いとみなされている。

また燃焼性の観点から見ると、メタノールは自然発火温度が高く、自着火性を示すセタン価が低い。このことから拡散燃焼をさせるCI燃焼（ディーゼル燃焼）機関に使用する際には単独で自着火させることが難しく、何らかの着火源が必要となる。一方で沸点が低いことから容易に気化させやすく、アンチノック性を示すオクタン価が高いことから、予混合燃焼をさせるSI燃焼機関のほうが燃焼のコントロールはたやすい。しかし船用主機として用いる場合は、拡散燃焼ゆえの燃焼の安定性と未燃スリップが少ない点や高圧縮比ゆえの高熱効率などの理由から、さらには従来の船用燃料

と併用する二元燃料とする観点からもディーゼル燃焼方式が採用されている。

また、メタノールは軽油などと比べても蒸気圧が高く、沸点も低いことから容易に気化しやすく、劇物に指定されているように暴露時の急性毒性もあることから貯蔵時の取り扱いに関しては、従来のMGOやバンカー油、さらにはLNGなどのガス燃料などとは異なった管理が必要となる。

2.2 メタノールの製造

メタノールは一酸化炭素と水素を原料として合成することにより工業的に製造されており、その製造プロセスは完成されている。現在、メタノールを製造する際の原料となる一酸化炭素と水素は天然ガスや石炭などの化石燃料を改質することで得られる合成ガス(Syngas)を使用しており、これによって製造されたメタノールはグレイメタノールやブラウンメタノールと呼ばれている。これらはカーボンニュートラル燃料ではない。

一方で、バイオマスをガス化・改質して得られた合成ガスや再生可能エネルギーにより得られた水素と二酸化炭素を原料に合成されたメタノールはカーボンニュートラル燃料であり、グリーンメタノールと呼ばれている。さらには化石燃料由来の原料であっても、Carbon Capture and Storage (CCS) と組み合わせることでカーボンニュートラルとしたメタノールはブルーメタノールとよばれている。これらの関連を図1に示す^[10]。

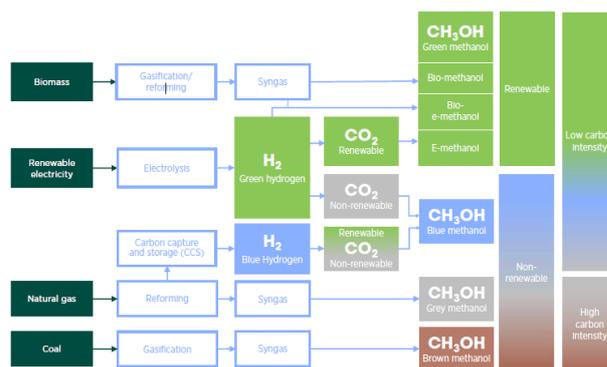


図1 メタノールの製造プロセスの区分

世界のメタノール生産量は過去10年間で2倍以上となり、2019年には約9,800万トンに達している(図2)。メタノールは化学製品の製造に使用される基礎化学物質の1つで、メタノールの生産量の約3分の2は化学物質の製造に使用されており、残りは燃料として使われている。メタノールの需要は今後も増加すると見込まれ、2050年までに5億トン以上に達すると予測されている^[10]。

表1 各種燃料の物性値^{[1]~[9]}

		メタノール	軽油	メタン	アンモニア	水素
化学名		CH4O	炭化水素混合物	CH4	NH3	H2
分子式		CH4O	炭化水素混合物	CH4	NH3	H2
分子量		32.04	平均190	16.04	17.03	2.02
CAS番号		67-56-1	68476-31-3	74-82-8	7664-41-7	1333-74-0
融点, 凝固点, 流動点	°C	-97.8	-29~-18	-182.0	-77.7	-259.4
沸点	°C	64.7	160~360	-161.6	-33.4	-252.9
引火点	°C	12.2	71以上	-188	132	データなし
自然発火温度	°C	464	254~285	537	651	500~571
爆発範囲(燃焼限界)	vol.%	5.5~44	1.0~5.0	5~15	15.4~33.6	4~76
蒸気密度(空気=1)	-	1.11	データなし	0.555	0.5967	0.0695
液体密度(20°C)	g/cm3	0.7914	0.810~0.936	0.422 (-33.4°C)	0.72	0.0708(-253°C)
蒸気圧	kPa	12.3(20°C)	0.28~0.35(21°C)	-	0.857×10 ³ (20°C)	-
オクタン価(RON)	-	112	-	約130 (メタン価=100)	約130	(メタン価=0)
セタン価	-	2~5	40~70	-	-	-
低位発熱量	MJ/kg	19.8	43.20	50.02	18.6	120.0

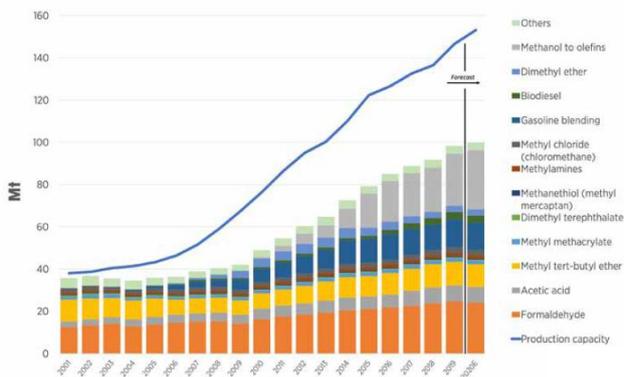


図2 メタノールの生産量

2.3 メタノールの価格

メタノールは現在化石燃料から製造されていることから、燃料用途の場合は化石燃料価格に連動している(図3)^[11]。しかしながら今後グリーンメタノールが増加すると価格は増加すると見込まれており、その主な要因はグリーン水素と二酸化炭素の価格である。特に再エネ電源で作るグリーン水素のコストが大きいのが、2050年に向けて低下することが期待されている(図4)。

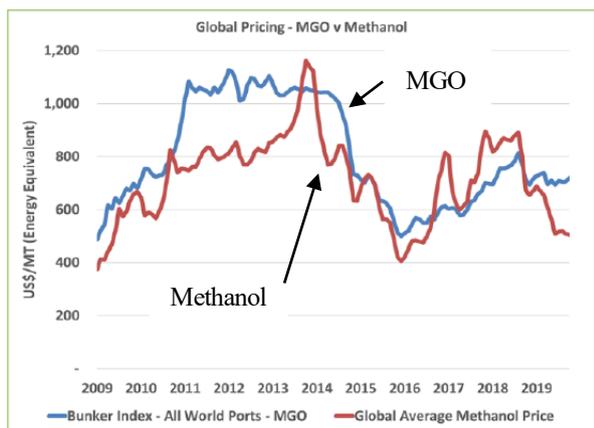


図3 燃料用メタノールの価格推移

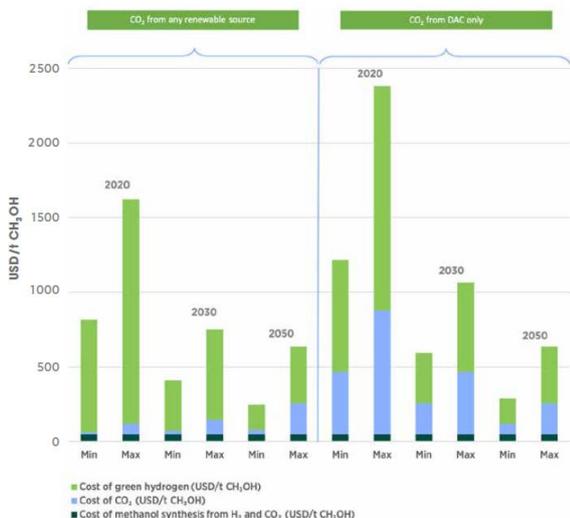


図4 グリーンメタノールの価格予測

3. ME-LGI 機関のコンセプト

ME-GI 機関同様、ME-LGI 機関は電子制御式低速ディーゼル機関に二次燃料(代替燃料)関連部品を追加することによって、重油での運転と二次燃料での運転の両方を可能とした二元燃料機関である。燃費特性が優れるディーゼル燃焼方式を採用しており、二次燃料での運転の際は少量の重油をパイロット燃料として噴射することで着火の安定性を得ている。このため、シリンダカバーには重油燃料用と二次燃料用の2種類の燃料噴射弁が搭載される(図5、図6)。

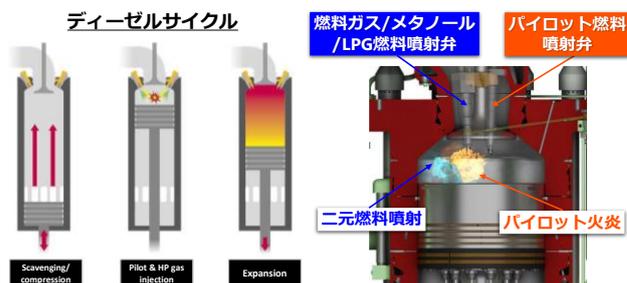


図5 ディーゼル燃焼行程

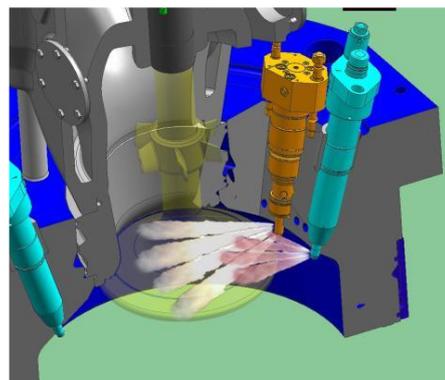


図6 ME-LGI 機関の燃料噴射弁配置

ME-LGI 機関では比較的低压で液化し易い燃料の特性を活かし、低压のまま液体として主機関へ供給し、液体で噴射する形態を採用している。二元燃料噴射に際し、ME-LGI 機関では省スペース化も兼ねて、燃料昇圧機能を持つ燃料弁(Fuel Booster Injection Valve; FBIV)を採用している。FBIVは次世代機関での重油燃料噴射弁としてMAN Energy Solutionsで開発された技術であり、ME-LGI 機関では液体としての二次燃料の使用を想定した改造を加えたものを使用している。

4. ME-LGI 機関 システム概要

4.1 船体側ME-LGI 関連機器

図7にME-LGIシステムの概要を示す。船体側に追

加される主要機器は、メタノールサービスタンク、LFSS (Low flush point liquid Fuel Supply System), FVT (Fuel Valve Train) の主に3つであり、メタノールサービスタンクには主機関で燃料として使用するメタノールを、船体のストレージタンクより移送して貯蔵する他、パージ先としての機能を兼用する場合には、メタノールとシーリングオイルの分離機構も有する。LFSS はポンプや熱交換器を持つユニットであり、タンクから供給されたメタノールを約 1.3MPa に昇圧して主機関へ圧送する (図 8)。FVT は主機関と LFSS の間に設置されるバルブユニットであり、メタノール運転終了時に FVT 上のメタノールラインに設けられる2つのブロックバルブが閉じることで主機関へのメタノール供給を遮断する。また、FVT には窒素タンクより接続される窒素ラインがあり、後述する主機関および LFSS のパージ実施時の窒素供給を制御する (図 9)。

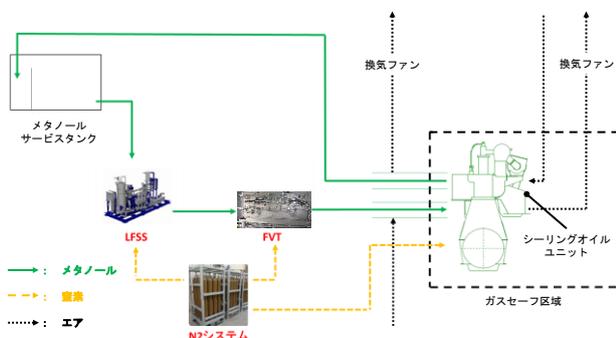


図 7 ME-LGI 機関 システム概要



図 8 メタノール供給システム (LFSS)



図 9 バルブユニット (FVT)

4.2 主機関側 LGI 関連機器

主機関側の LGI 関連機器は主にシリンダカバー周辺に集中し、各シリンダには FBIV やメタノール噴射を制御するためのブロック類が追加される (図 10, 図 11, 図 12)。FBIV は重油用燃料噴射弁に加えてシリンダカバーに追加される。FBIV に供給された約 1.3MPa のメタノールは、作動油で駆動されるプランジャにより昇圧され、約 55MPa でシリンダ内に噴射される。また、図 12 に示すように FBIV 内ではメタノールが作動油ラインへ漏れ出ることを防止するため、摺動部であるプランジャとスピンドルに 4MPa 程度のシーリングオイルを供給しており、更にこれはメタノールの潤滑性の低さを補う役割も担う。シーリングオイルはシーリングオイルユニットより各シリンダの FBIV へ供給される。シーリングオイルユニットにはシステム油が供給される。

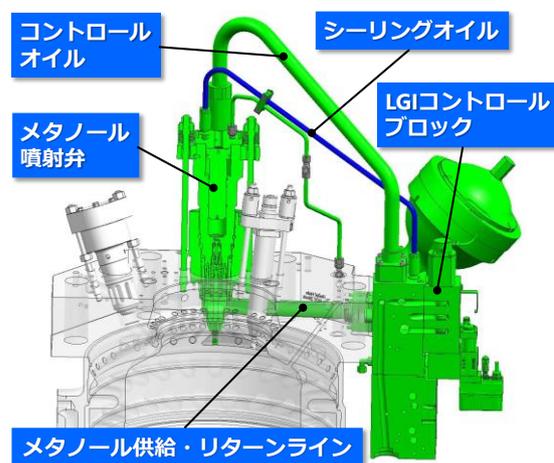


図 10 ME-LGI 機関シリンダカバー

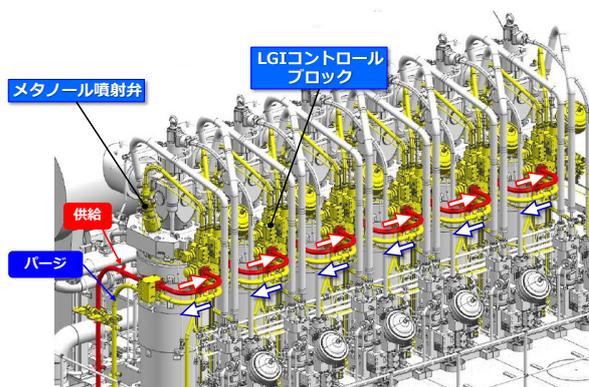


図 11 メタノールの流れ

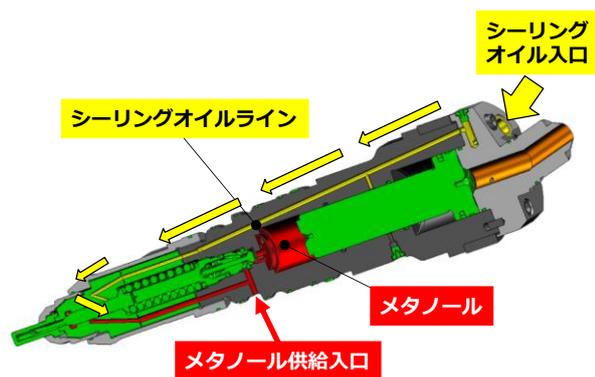


図12 メタノール噴射弁 (FBIV)

FBIV へのメタノール供給および噴射制御のための作動油供給はシリンダカバー付きのブロックにて制御されている。メタノールと作動油の接触を避けるため、ブロックは作動油制御を行うLGI油圧制御ブロックとメタノール供給制御を行うメタノールブロックに分かれている。各シリンダのメタノールブロックはチェンパイプと呼ばれる配管で数珠繋ぎとなり、図11に示すように一端のシリンダに供給されたメタノールは、このチェンパイプを通して隣接するシリンダへ供給されていく。また、上記2つのブロック下方にはパージブロックが設置され、メタノール運転終了時にはFBIV、ブロック、配管内のメタノールがこのブロックを介してドレンラインへ排出される。

4.3 安全性

メタノールは人体に有害であり、かつ引火性の高い燃料であるため、安全性を考慮したシステムおよび制御設計が必要である。構造面では、機関室内のメタノール配管に二重管構造を採用することで漏洩を防止しており、二重管の内外管間のアニュラススペースにはHCセンサによるメタノール漏洩監視機能や、ファンによる換気機能を持たせることで安全性を高めている。また、FVTから主機関へのメタノール供給配管は全て一意の箇所への勾配を持たせることでメタノールが滞留することを防止している。

制御面では、メタノール運転中にメタノール系統に異常が発生した際はメタノール運転を停止し、即座に重油運転へ切り替えるシーケンスを適用しており、更にメタノール運転停止時には機関室内の配管や機器中のメタノールを窒素でパージすることで完全にメタノールを排出し、機関室をメタノールフリーの状態とする。また、メタノール運転開始前にはメタノールラインの自動耐圧試験実施によりシステムの健全性を確認するシーケンスを適用している。主機関側だけでなくLFSSにおいても同様に安全性を考慮しており、LFSS停止の際は自動でパージを行うことでシステム内のメ

タノールを排出する機能を持たせている。

5. メタノール燃料の排ガス規制対応

5.1 窒素酸化物 (NOx)

ディーゼル燃焼サイクルを採用するME-LGI機関では、NOx三次規制に対応するために、主燃料と同じEGR (Exhaust Gas Recirculation) を装備する必要がある。

5.2 硫黄酸化物 (SOx)

二次燃料は、硫黄分を含まない燃料であり、SOx排出はパイロット燃料の硫黄分のみとなるため、大幅な削減が可能となる。ただし、ME-LGI機関は、起動時及びメタノール燃料系異常発生時には、主燃料への切り替えが自動的に行われるため、主燃料およびメタノール燃料両方の運転モードにSOx規制対応が求められる。

6. 就航後の改造

船用燃料としてのメタノールがカーボンニュートラルを視野に注目を浴びていることを背景に、大きな船隊を所有している船主を中心にレトロフィットの需要も高まりつつある。メタノールは常温常圧で液体であり、他の代替燃料と比べて取扱いが容易であるため、他の代替燃料への改造と比べ改造も容易であることが考えられる (図13)。

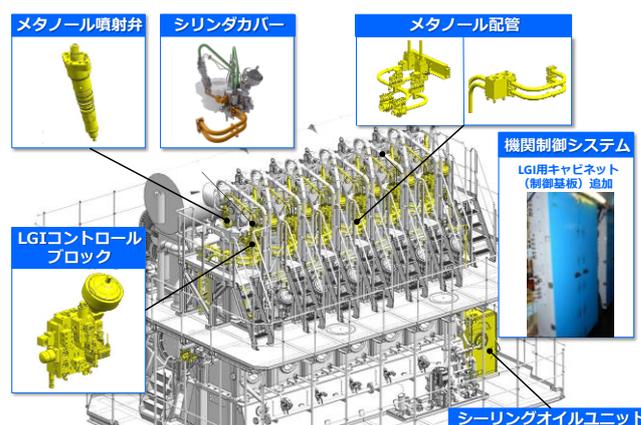


図13 ME-LGI機関追加部品

7. おわりに

メタノールに限らず代替燃料一般の共通課題として、グリーン燃料としての価格やそのインフラ整備が挙げられる。特にメタノールやアンモニアは低位発熱量が

重油と比較し、半分程度であるため、従来の燃料タンク容積では船舶の航続距離は制限されることになる。定期航路で用船される船舶にとっては、燃料補給の頻度が多くなる程度の問題であるものの、不定期航路で用船される船舶にとってはより一層のインフラ整備が求められる^[12]。

渡邊 学

- ・日本マリンエンジニアリング学会 正会員
- ・1961年生.
- ・ENEOS 株式会社 中央技術研究所 サステナブル技術研究所 燃料技術グループ
- ・東北大学大学院 資源工学専攻修了
- ・専門分野：燃料・燃焼

参考文献

- [1] 厚生労働省「モデル SDS 情報」サイト,
https://anzeninfo.mhlw.go.jp/anzen_pg/GHS_MSD_FND.aspx (参照日 2024 年 2 月 12 日)
- [2] Methanol Health and Safety Guide, WHO, 1997
- [3] 日本内燃機関連合会シンポジウム資料, WIN-GD, 2021
- [4] "Knocking Characteristics of Pure Hydrocarbons", ASTM, 1958
- [5] "Compendium of Experimental Cetane Numbers", NREL, 2017
- [6] SIP「アンモニア直接燃焼」終了報告書, JFE エンジニアリング(株), 2019
- [7] 水素の物性, 阿部他, 水素エネルギーシステム Vol.27, No. I (2002)
- [8] CRC Handbook of Chemistry and Physics. 95th Edition (2014),
- [9] エネルギー源別標準発熱量, 資源エネルギー庁
- [10] INNOVATION OUTLOOK RENEWABLE METHANOL, International Renewable Energy Agency, 2021
- [11] "Methanol as a Marine Fuel", Methanol Institute, 2020
- [12] 谷口, 岡崎, メタノール燃焼低速ディーゼル機関「ME-LGIM」の紹介, 日マリ学誌, 58-4 (2023), 106-109

著者紹介

福島 健史

- ・日本マリンエンジニアリング学会 正会員
- ・1984年生.
- ・(株)三井 E&S 船用推進システム事業部 R&D センター
- ・岡山大学