

## GHG 削減に向けた船舶用エンジンと燃料開発の取り組み

高崎 講二\*

## 1. はじめに

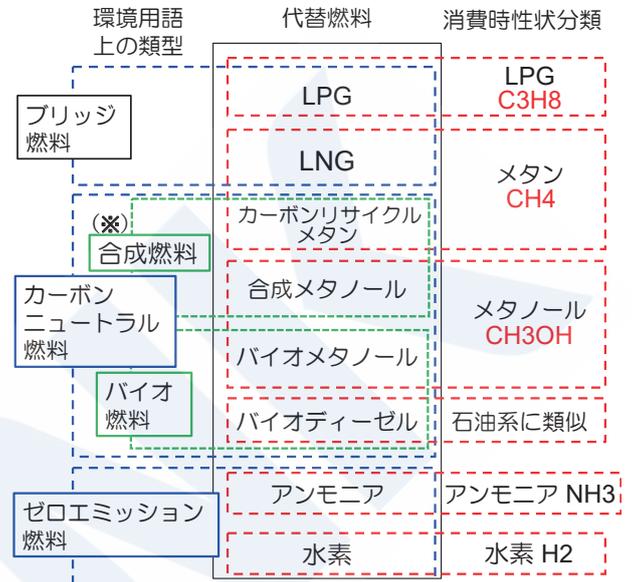
国際海運からのGHG（温室効果ガス）を大幅に削減するIMO目標達成のため、炭素Cを含まない水素とアンモニアを燃料とする船用エンジンの開発が急務となっている。また、カーボンニュートラルとして合成されたメタンやメタノールも、バイオ燃料と同様に実質ゼロカーボンと見なされる可能性がある。本稿では、これら5種類の代替燃料のエンジン内での燃焼について解説する。

図1はそれら燃料を分類したものである。ここではLPGの解説は省略する。図にあるようにメタンとメタノールの分子には炭素Cが含まれており、燃焼させるとCO<sub>2</sub>は発生する。ただし、ゼロカーボンへの「ブリッジ（橋渡し）燃料」と呼ばれるように、軽・重油と比較したCO<sub>2</sub>発生量（発熱量当たり）は、天然ガスの主成分であるメタンで25%程度減少し、メタノールでは1割ほど減少する。

LNG燃料船やメタノール燃料船でそれ以上のCO<sub>2</sub>削減効果を得るには、上述のカーボンニュートラルなメタンやメタノールを混ぜて使う必要がある。図2はそのようなメタンの作り方の例<sup>1)</sup>で、陸の発電所・製鉄所などから回収したCO<sub>2</sub>とグリーン水素を合成する。陸側で一旦CO<sub>2</sub>排出ということにすれば、それを回収して作るメタンはカーボンニュートラルと定義される想定になる。また、そのメタンからグリーンメタノールを作ることもできる。

一方、アンモニアと水素はCO<sub>2</sub>を発生しないが、それらを使う船用エンジンが未だ開発途上にある。本稿では、NEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）のグリーンイノベーション（GI）基金による、アンモニア・水素エンジンの開発状況についても紹介する。

それら5種類の燃料の性状について、国土交通省海事局・GHGゼロエミッションプロジェクトのHP<sup>2)</sup>から表1を引用する。この表には、特に船上での液体貯蔵に関する項目が抜粋されている。それぞれのタンク容量は液体の体積当たり発熱量でほぼ決まる。またタンクの種類や貯蔵条件は、大気圧下の沸点に従ってその表の様に設定されている。



※）合成燃料の用語は、回収された二酸化炭素と再生エネルギー由来の水素を利用するものを差し、かつカーボンニュートラルと認められることを前提として使用している。

図1 代替燃料の分類（出典：日本海難防止協会資料）  
[https://www.nikkaibo.or.jp/pdf/2022\\_GHG\\_J.pdf](https://www.nikkaibo.or.jp/pdf/2022_GHG_J.pdf)

表2にNKから発表されている性状表を示す。本稿ではこちらの表を基に解説する。順番であるが、①バイオ燃料②メタノール③アンモニア④メタン（天然ガスの主成分）⑤水素の順で、特にエンジン内での着火・燃焼特性について、③アンモニアでは排気有害成分についても紹介する。

①②③の燃料は、タンクからエンジンへのライン内でも液相をキープでき、筒内へのディーゼル噴射が可能である。また③アンモニアは、気化させて供給することで空気との混合気を作り、オットーサイクル型燃焼をさせることも可能である。

一方、④メタン⑤水素はタンク内では超低温で液化されているが、エンジン内へは気体で供給される。これらの燃焼パターンは、ディーゼルサイクル型とオットーサイクル型の2種類が考えられる。LNG燃料船の天然ガスエンジンについて、両タイプの燃焼上の特徴を後で復習する。上記のGI基金による船用水素エンジン開発も両タイプで行われている。

\* 九州大学名誉教授・海上技術安全研究所フェロー



図2 カーボンニュートラルメタンの作り方の例<sup>1)</sup>

表1 ゼロエミッション燃料の性状（国交省HP<sup>2)</sup>の性状表より船上液体貯蔵に関する部分を抜粋）

	水素 H2 (LH2)	アンモニア NH3	カーボンリサイクル CR 合成メタン CH4	CR 合成メタノール CH3OH	バイオディーゼル (FAME)
低位発熱量 (GJ/t)	120.0	18.8	50.0	19.9	37.1
液体密度 (t/m <sup>3</sup> )	0.0708	0.7	0.422	0.79	0.885
熱量当たり体積比 (VLSFO 比、@液化状態)	4.42	2.86	1.78	2.39	1.14
沸点 (°C) (大気圧下)	-253	-33	-161	65	345~354
船上での貯蔵方法 (液体状態)	真空防熱タンク	Type C (低温 or 加圧)	Type C (低温 or 加圧)	常温常圧 船体付きタンク	常温常圧 船体付きタンク
		独立方形タンク/メンブレン	独立方形タンク/メンブレン		
船上貯蔵時の性状 (液体状態)	abt.-250 °C、0.5 MPa	-30~-10 °C、0.07~0.5 MPa	-160~-140 °C、0.07~0.5 MPa	常温、常圧	常温、常圧

表2 代替燃料の性状（NK資料）

燃料投入時	③液体・気体 NH3	④気体 CH4	液体 C重油 (基準)	②液体 CH3OH	(液体 (LPG)) (C3H8)	⑤気体 H2
	アンモニア	メタン	HFO	メタノール	プロパン	水素
ガス比重 kg/m <sup>3</sup> @ 沸点	0.876	1.820		1.206	2.385	1.340
ガス比重 kg/m <sup>3</sup> @ 20°C	0.707	0.659		---	1.840	0.083
液比重 kg/m <sup>3</sup> @ 4°C	633.1	---	989 @15°C	805.9	523.2	---
液比重 kg/m <sup>3</sup> @ 沸点	682.3	422.5		748.7	580.8	70.8
沸点 °C @ 大気圧	-33	-161	---	65	-42	-253
飽和蒸気圧 barA @ 45°C	17.8	---	---	---	15.3	---
自己着火温度 °C	630	537	250	385	450	585
引火点 °C	---	-175	>60	12	-105	---
可燃下限界 (燃料 vol.%)	15	5.3	1	6	1.7	4
可燃上限界 (燃料 vol.%)	30	17	7	36.5	10.9	75
最小着火エネルギー mJ	45	0.274	0.24 (ガソリン)	0.174	0.240	0.017
燃焼速度 cm/s	7	37	30 (ガソリン)	48	47	270
低位発熱量 MJ/kg	18.8	48.0	40.2	19.9	46.3	119.9

## 2. バイオ燃料（FAME）の燃焼

バイオ燃料の種類には、(1)パーム油・菜種油など粗バイオ燃料、(2)それを変換して粘度をA重油並みに下げた脂肪酸メチルエステル：FAME（Fatty Acid Methyl Ester）、(3)さらに水素化処理をして、鉱油と全く変わらないパラフィン系炭化水素にしたHVO（Hydrotreated Vegetable Oil: 水素化分解油）、また(4)バイオメタノール・バイオエタノールなども考えられる。

HVOは航空機でも使われる高級燃料なので船には回って来ないと考え、ここではFAMEについて解説する。一般のFAMEは、密度・粘度だけでなく自己着火性や燃焼性もA重油に劣ることはない。

低位発熱量は、表1にFAMEの値として37.1（GJ/t）とある様に、燃料分子中に1割ほど酸素が含まれる分だけ重油よりは低くなる。ただし、これは重油と混ぜて使う（例えばB30（FAME30%+重油70%））場合にはほとんど問題とならない。

また、重油に比べてNO<sub>x</sub>が1-2割増加するという問題もあった。これについては、すでにMEPC78において画期的な判断が下されている。即ち、バイオ燃料混入によるNO<sub>x</sub>増加については規制の対象とはならない。

これによって、重油焚きのエンジンに何の調整も加えず使用できる真のドロップイン燃料となった。

今後は荷主からの要望も増えると思われる。ただし、課題はその生産量にあると認識される。世界的に食料を燃料にすることに抵抗感があり、今は食用廃油などを原料とするが、その量が限られている上に航空業界との取り合いも懸念される。

その他、粗バイオ燃料とFAMEの取り扱いの点では、微生物の発生また長期保管の禁止など注意を要する点もあり、本会機関部から解説も出されている（[https://www.classnk.or.jp/hp/ja/info\\_service/bio/](https://www.classnk.or.jp/hp/ja/info_service/bio/)）。また本年3月に、海事局から「船舶におけるバイオ燃料取り扱いガイドライン」が発表されている（<https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001597437.pdf>）。

## 3. メタノールの燃焼

筆者らは、MAN社のメタノール燃焼・低速主機2ストロークエンジン開発（2015年）に先駆けて、メタノール噴霧燃焼の可視化解析を行っている<sup>3)</sup>。

メタノールCH<sub>3</sub>OHの性状を表2で見ると、大気圧下の沸点が65℃であり常温では液体であるため、重油焚きと同様の高圧のディーゼル噴射が可能である。ただし分子量の半分が酸素で、質量当たりの低位発熱量は重油の半分以下である。そのため、同じ出力を得るには重油の約2倍の質量を、また密度差から体積では約2.4倍を噴かなければならない。

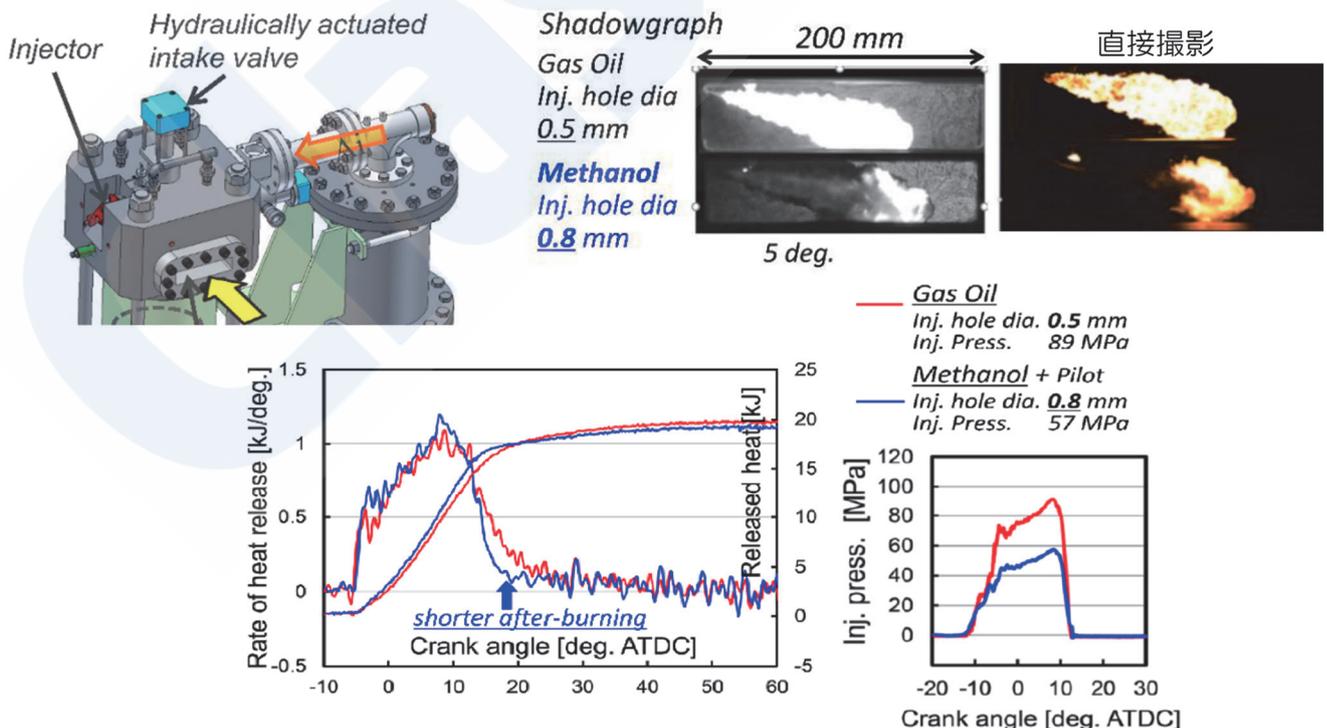


図3 メタノールの噴霧燃焼解析結果（左上：ディーゼル燃焼可視化装置 右上：軽油とメタノールの噴霧火炎 下：軽油とメタノールの噴射圧力と熱発生率比較）

ここでは、メタノールが低カロリーながら良好な燃焼特性を示すことを証明する。表2では自己着火温度が重油より高いため、メタノール噴霧の着火には重・軽油のパイロット噴射を必要とする。着火には火種を要するメタノール噴霧であるが、一旦着火すると後述のように優れた燃焼特性を示す。メタンや水素も同様であるが、ここでは自己着火性と燃焼性を区別して考える必要がある。

図3中に、ディーゼル雰囲気模擬して各種燃料の高圧噴霧火炎を解析できる装置を示す。それを使用した筆者らの過去の研究<sup>3)</sup>で、軽油とメタノールの噴霧火炎を高速度撮影した結果を図中に示す。

右上のカラー写真は直接撮影による画像で、軽油噴霧が輝炎を発生して燃えているのに対して、メタノール噴霧は先端のパイロット燃料だけが輝炎で、それに続くメタノール火炎本体は目に見えない。その左はシャドウグラフ法による画像で、この方法ではメタノールの不輝炎が黒く捉えられている。

軽油の輝炎は良好な燃焼をイメージさせるが、実際は逆で、輝炎は火炎中でSootが生成される際の発光である。つまり、メタノールの不輝炎はSoot発生のない良好な燃焼を意味する。実機でもメタノールからの黒煙発生は皆無である。また図中の熱発生率の比較でメタノールの後燃えが短いことから、燃料噴射終了後の燃焼速度がメタノールの方が速いことも明らかである。

2015年に三井造船で試験された初号機（500mm シリンダ径：7S50ME-B9.3-LGI）のデータ<sup>4)</sup>では、

A重油に比べて熱効率は同等あるいは多少良好で、またNOxは約3割の低減が確認できた。このように、エンジンがすでに開発され就航していることは利点である。

ただし、課題はカーボンニュートラル（グリーンあるいはバイオ）メタノールの供給量と私見される。火付け役となったコンテナ船大手のマースク社では、それらの調達に尽力していると伝えられる。

#### 4. アンモニアの燃焼

アンモニアの取り扱い上の注意点は、やはり毒性や腐食性ということになるが、燃焼上もいくつか課題がある。表2に戻ってアンモニアの性質を眺めてみる。大気圧下での沸点は-33℃であるため、気体としてエンジンに供給することも、またラインを与圧してタンクから液体のまま供給することも可能である（MAN社の発表では、安全を見てラインの与圧は8MPa）。分子式に窒素が含まれることから発熱量は低く、液体でも重油の約3倍の体積を噴かなければならない。

アンモニアは自己着火温度が表2中最高で、また燃焼速度に代表される燃焼性は最低となっており、着火性も燃焼性も悪い燃料である。そこで重・軽油によるパイロット噴射、後述のポスト噴射による燃焼サポートが必要とも予想される。ただし、重・軽油からはCO<sub>2</sub>が出ることになるので、その最低量で燃焼を改善することが目標となる。



図4 グリーンイノベーション基金プロジェクトの例・アンモニア燃料国産エンジン搭載船舶の開発 (NEDO HP : <https://www.nedo.go.jp/content/100938630.pdf>)

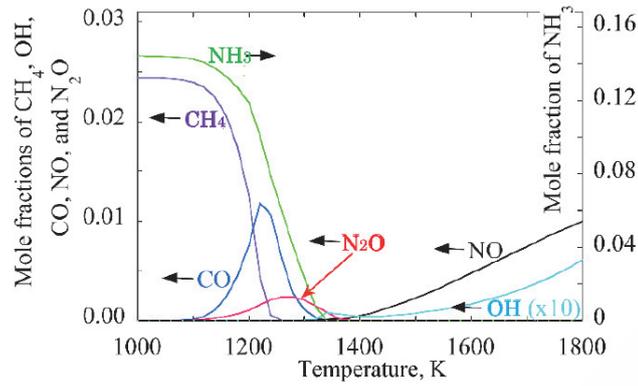


図5 N<sub>2</sub>Oを含む排気有害成分の生成温度領域<sup>5)</sup>

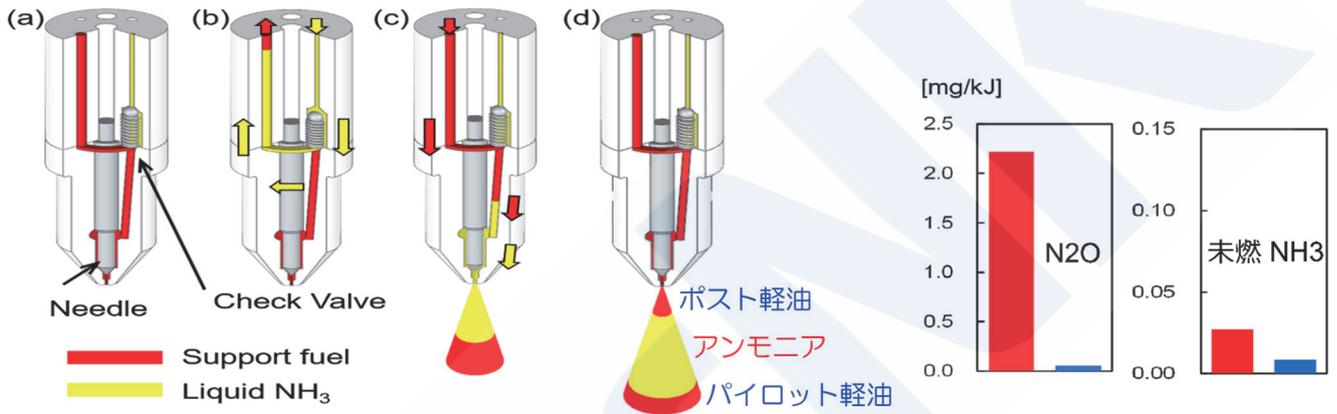


図6 層状アンモニア噴射システムのメカニズム（左）と海技研の燃焼装置による実験結果の一例（右）  
（右グラフ：赤色データはポスト燃料なし（アンモニアで終わる）の場合のN<sub>2</sub>O・未燃NH<sub>3</sub>の排出量  
青色データはポスト燃料（軽油相当）を噴射した場合）

ここでは、前述のGI基金による「アンモニア燃料国産エンジン搭載船舶の開発」テーマについて紹介する。図4はその概要で、タグボート用4ストローク機関は、アンモニアを吸気管に送り込み混合気を作るオットーサイクル型、外航船向けの低速2ストローク機関は、アンモニアを液体として筒内に噴射するディーゼル機関として設計されている。

アンモニア自身はCO<sub>2</sub>を発生しないが、上述したパイロット重・軽油の必要性以外にも課題がある。それがN<sub>2</sub>O（亜酸化窒素）発生の懸念である。N<sub>2</sub>OはCO<sub>2</sub>の約300倍もの温暖化効果を有し、これが多少とも発生するとGHGの削減効果を台無しにする。

図5は、東北大学・小林教授らが、N<sub>2</sub>Oを含む排気成分の生成温度について調べた結果である<sup>5)</sup>。火炎内でN<sub>2</sub>Oが生成される温度域は、NOが生成されるような通常の噴霧火炎温度に比べてかなり低い（約1300K）ことが分かる。また、その温度域では未燃アンモニアも急激に増加している。

N<sub>2</sub>O生成を抑制するには、アンモニア噴霧の燃焼が不活発で火炎温度が低い条件を作らないことが

重要と思われる。その一案として、海上技術安全研究所とジャパンエンジン社が共同研究する層状噴射技術を紹介する。

図6左はそのメカニズムで、その(d)に示すように、アンモニア噴霧の前後にディーゼル軽油を噴射する。1層目の軽油はアンモニアに着火するパイロットとして機能し、3層目（ポスト）の軽油は燃焼末期にアンモニア噴霧燃焼を活性化させ、火炎の高温を保ってN<sub>2</sub>Oを低減させる役目をもつ<sup>6)</sup>。

本研究では、実機の雰囲気模擬した燃焼装置による実験から、排気有害成分に対するポスト噴射の効果を明確にした。図6右に実験結果の一例を示す。赤色の棒グラフは、ポスト軽油が噴けられない設定にして、アンモニア燃焼で終わった場合のN<sub>2</sub>Oと未燃アンモニアの排出量、青色はポスト噴射をした場合を示す。これによると、ポスト軽油はN<sub>2</sub>Oの低減に劇的な効果を見せ、また未燃アンモニアもそれによって激減している。ジャパンエンジン社では、このシステムを単気筒テスト機に適用して運転実験を行う。

## 5. 天然ガス燃焼のレビューと水素エンジン

後述の水素エンジンの場合も、天然ガスエンジン同様にディーゼルサイクル型とオットーサイクル型の燃焼が考えられる。ここでは始めに、天然ガスの場合の両タイプの燃焼について復習する。現在、LNG燃料船の低速2ストローク主機として、前者のME-GI型（MAN社）と、後者のX-DF型（WinGD社）が採用されている。

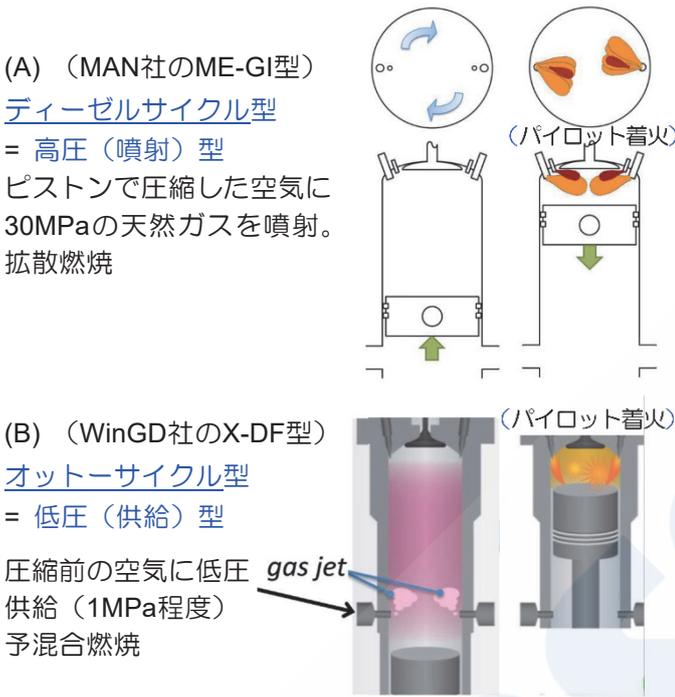


図7 低速2ストローク天然ガスエンジンの2種類の作動パターン

図7にそれら2種類の作動、燃焼の違いを示す。前者の図(A)は、通常のディーゼル機関と同様に、ピストンが空気だけを圧縮した後、パイロット重油と高圧（30MPa）の天然ガスを噴射するタイプである。これは「高圧型」とも呼ばれている。

後者では、図の(B)に示すように、ピストン上昇前から1MPa程度の天然ガスを筒内に供給し、圧縮行程中に均一混合気を作る。混合気はピストンで圧縮された後にパイロット重油で着火され、火炎が混合気中を燃え広がって行く（火炎伝播と呼ばれる）。供給ガス圧力から「低圧型」と呼ばれている。

中・高速の4ストローク天然ガスエンジンは、今のところ全てオットーサイクル型である。図8に示すように、吸気管に天然ガスを供給し空気との混合気を作る。さて、後述する水素燃焼4ストローク機関も同様で、吸気管の同じ位置に水素供給ノズルを付ける。実際は天然ガスエンジンをベースに開発されるので、両方のノズルを設置して水素の割合を徐々に増やす方法が採られている。

オットーサイクル型の燃焼では、ノッキングと過早着火（プレイグニション）が懸念される。これらは混合気の活性によって引き起こされる。過早着火と言うのは、図9に示すように、ピストンが混合気を圧縮する途中で、例えばシリンダ潤滑油が火種となって着火するような現象である。これが起こるとパイロット燃料による着火時期制御は無効となり、図9の右に示すように筒内圧力のサイクル変動が極めて大きくなる。前述のX-DFでは、大量のEGR（排気ガス再循環）を掛けることで、混合気の活性を抑えてこの問題を解決している。

水素の自己着火温度が高いことと矛盾を感じるかも知れないが、水素混合気はメタンよりさらに活性である。つまり、表2中の低い最小着火エネルギーと広い可燃上下限界（可燃範囲の燃料濃度Vol.%）が要注意である。混合気が十分にできる前でも、筒内の潤滑油粒子や残留ガスから過早着火する可能性がある。

図10に示す水素エンジン開発プロジェクトにおいても、中・高速4ストロークのオットー型水素エンジン開発では、EGRだけでなく混合気の希薄化等で過早着火とノッキングを抑えている。

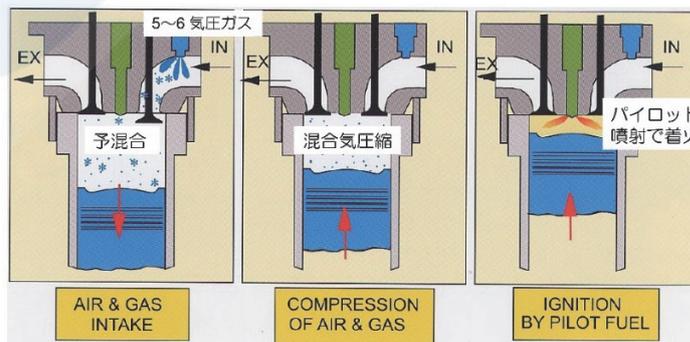


図8 中・高速4ストローク天然ガスエンジンの混合気形成（オットーサイクル型）  
（オットー型水素エンジンの場合も水素供給位置は吸気管）

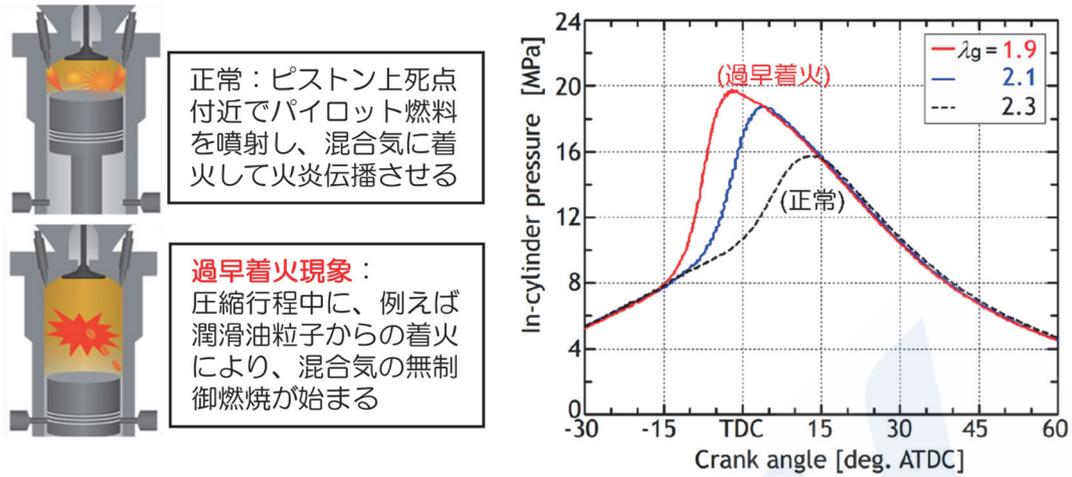


図9 過早着火発生のメカニズム（左）と過早着火時の指圧線図（右）  
（実機で過早着火がランダムに発生すれば過大なサイクル変動に至る）

## 6. ディーゼルサイクル型水素エンジンの燃焼

ここでは、オットー型に比べ研究が少ないディーゼルサイクル型水素エンジンについて解説する。分子量比（2：16）から水素の密度はメタンの1/8である。表2では水素の質量当たり発熱量はメタンの2.4倍あるが、気体体積で考えると同じ熱量を得るのに約3倍の噴射を要する。しかし噴射初速が音速となる高圧噴射の場合、水素の音速がメタンの約3倍あるため、噴口径を極端に大きくしなくても十分な量の水素を噴射できる。

ここでは、図3に示した燃焼可視化装置を使って、

高圧で噴射された水素噴流の燃焼をシャドウグラフで可視化した。表2にあるように水素の自己着火温度は高いため、始めにパイロット軽油（熱量5%）で着火させた。その模様を図11(A)に示す。白い火炎はパイロット軽油で、それによって着火された水素火炎は不輝炎となって黒く写っている。

一方、図11(B)は、水素噴射時の空気温度を通常よりも高くし（測定できていないが700℃程度と推定）、水素噴流の自己着火を試みた結果である。この写真から、水素噴流は2コマ目（5.5°）で自己着火し、その後は通常のディーゼル噴霧火炎と同様に、運動量理論に基づいて経過時間の平方根に比例して発達しているように見える。



事業期間：①、② 2021年度～2030年度(10年間)

出典：川崎重工業(株)、ヤンマーパワーテクノロジー(株)、(株)ジャパンエンジンコーポレーション

図10 船用水素エンジン及びMHFS (Marine Hydrogen Fuel System) の開発 (NEDO HP)

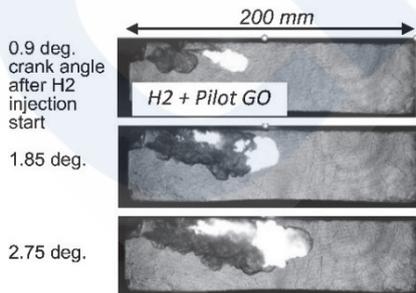
図11(C)は、水素とメタンの高圧噴流の熱発生率を比較したものである。どちらもパイロット軽油で着火している。両燃料とも同じ圧力（30 MPa）でほぼ同じタイミングまで噴射されている。どちらも噴射率に沿った矩形の熱発生率を示すが、水素の方が噴射終了後に早く燃え切っていることが分かる。

ディーゼルサイクル型では、原理的にオットー型のような過早着火・ノッキングは起こらない。さらに熱発生率は一義的には燃料噴射率によって制御でき、それらはオットー型に対する利点と言える。

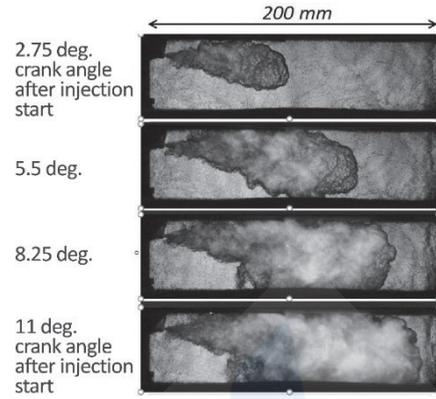
## 7. まとめ

ゼロカーボン燃料の「本命」は？と聞かれることも多いが、現時点では、それぞれ以下の特色から世界で共存して行くものと予想される。

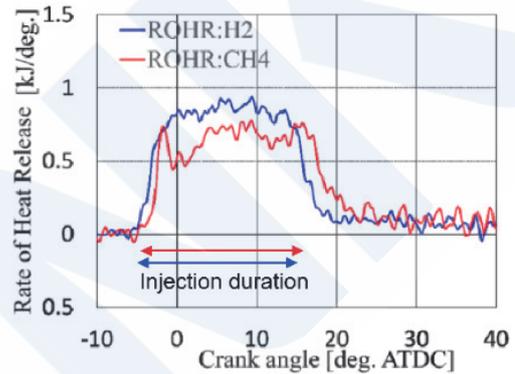
- ・バイオ燃料はドロップイン燃料で燃焼上の問題もないが、やはり原材料の量の方が課題と思われる。
- ・メタノールも同様で、パイロット燃料は要ものの燃焼性は良好である。すでにエンジン自体の開発も終わっている。ただし世界的な供給については、カーボンニュートラルなメタノールが船用燃料だけの需要では、陸の方にも供給される水素・アンモニアのように普及しない懸念もある。
- ・アンモニアに関しては $N_2O$ の課題を予想しているが、さらなる研究開発のためには実機運転の結果が待たれる。
- ・水素エンジンの開発は、これまでの天然ガスエンジンの技術にも後押しされて順調に進行中である。またいずれの燃料も製造コスト面で重油の数倍にもなり、普及には補助金などの整備も必要である。これについては、経済的手法として「課金・還付制度」を日本からIMO MEPCに提案している。



(A) 軽油パイロットによる高圧水素噴流の着火



(B) 高温空気中での水素噴流の自己着火・燃焼



(C) 水素とメタン噴流の熱発生率の比較  
(どちらも軽油パイロットによる着火)

図11 高圧水素噴流（30 MPa）の燃焼解析  
（30 MPaの水素を8 MPa空気中に噴射）

## 参考文献

- 1) 国土交通省ホームページ（2022）国際海運の2050年 カーボンニュートラル達成に向けて <https://www.mlit.go.jp/maritime/content/001484433.pdf>
- 2) 国土交通省ホームページ（2022）2050年の国際海運からの温室効果ガス排出量ネットゼロの実現に向けて. 2022年3月. <https://www.mlit.go.jp/maritime/content/001484435.pdf>
- 3) Takasaki, et al., CIMAC 2016, Paper No.91.
- 4) 三井造船技報 218号：2017年1月.
- 5) Okafor, et al., Fuel; 287: 119433 (2021).
- 6) Oba, et al., CIMAC 2023, Paper No.101.
- 7) Takasaki, et al., CIMAC 2023, Paper No.103.