

8 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

市川 泰久*

Technology Developments toward Hydrogen Single-Fueled Marine Lean-burn Gas Engine

by

ICHIKAWA Yasuhisa

Abstract

We are aiming to develop a hydrogen single-fueled reciprocating internal combustion engine to reduce greenhouse gas (GHG) emissions from the marine sector. One of the important issues for the development of the engine is to suppress the combustion speed of hydrogen. In this study, an actual lean-burn gas engine for Japanese city gas (13A) was retrofitted by installing hydrogen supply systems. The retrofitted engine was successfully operated with 96 % hydrogen energy mixing ratio by shutting off the pre-chamber fuel supply of Japanese city gas (13A) and increasing the air intake manifold pressure for more lean-burn at 50 % load. During the experiments, the cylinder pressure was measured, and the emissions (NO_x, THC, CO, H₂) were analyzed. The results verified that stable combustion could be maintained. Furthermore, we found that the NO_x emission rate and unburned fuel emissions were lower and the gross thermal efficiency was higher than when fueled with 100 % Japanese city gas (13A).

* 環境・動力系動力システム研究グループ

原稿受付 令和 4 年 4 月 27 日

審査日 令和 4 年 6 月 1 日

1. はじめに

近年、地球温暖化対策の観点から、外航・内航海運においても海上輸送から排出される温室効果ガス（GHG: greenhouse gas）の削減が強く求められており、水素やアンモニアなどのゼロエミッション燃料の船用利用が注目されている。

そこで、当研究所では船舶における水素利用を促進するため、水素利用の安全性に関する評価や規格の検討、水素利用船導入のロードマップの作成、水素利用コンセプトシップの提案などの様々な視点から活動を行っている。船舶における水素利用法としては、内燃機関や燃料電池等が考えられている。内燃機関における水素利用の特徴としては、プロペラ直結時に省スペースであること、一部部品を水素対応にする必要があるが信頼性の高い既存機関部品および周辺機器を使用できること、二元燃料機関として水素混焼やバックアップ燃料への切り替えが行えること、高純度な水素が必要である燃料電池と比べて低純度な水素が利用できることなどがある。

著者は、水素に関するインフラやサプライチェーンが整備途上の時期から利用可能な船用動力システムを想定して、天然ガス機関に対して、水素専焼、天然ガス専焼、両燃料混焼の全てが可能なガスエンジンの開発を行っている。ガス機関で天然ガスと水素を混焼・専焼する場合には、水素は天然ガスと比較して燃焼速度が著しく速い等の燃焼特性を有することから、燃焼制御技術の開発が不可欠となる。

本稿では、当所既設の天然ガスに性状に近い都市ガスで運転する発電出力 400 kW のリーンバーンエンジンにおいて、水素を混焼する際に考慮した天然ガス／水素混焼の基礎特性について概説する。さらに、既設ガスエンジンに水素供給システムをレトロフィットすることで、負荷率 50%において、ほぼ専焼に近い水素熱量混合率 96%で実証運転に成功したので報告する。

2. 天然ガス／水素混焼の基礎特性

当所既設のリーンバーンガスエンジンをを用いて天然ガスと水素の混焼運転を検討するため、初めに、混合燃料の基礎特性の調査を行った。表 1 は、天然ガスの主成分であるメタン（CH₄）と水素（H₂）の燃料基礎特性を示す。

同表から水素の体積発熱量は、メタンの 1/3 以下であるが、ガス燃料の熱量噴射量の指標であるウォッペ指数の両者間の差は約 10%程度と小さいことがわかる。これは、同じ熱量の天然ガスと水素をインジェクタから供給する場合、水素は天然ガスに対して 3 倍以上の体積を噴射する必要があるが、同一インジェクタを用いることができることを意味する。この同一インジェクタを天然ガスにも水素にも利用可能であることは、天然ガス／水素混合燃料を噴射する際の利点となる。ただし、インジェクタは、水素脆性や水素リークに対応することが重要である。

また、水素の最大燃焼速度（MCP: maximum combustion potential）は、メタンと比較すると大幅に速いため、天然ガスで運転するリーンバーンガスエンジンに水素を混焼させる

表-1 メタン（CH₄）と水素（H₂）の燃料基礎特性

	メタン	水素
体積発熱量 [MJ/Nm ³]	35.8	10.8
ウォッペ指数 [MJ/Nm ³]	53.4	48.4
最大燃焼速度 (MPC) [-]	36	282
最小点火エネルギー [mJ]	0.29	0.015
着火温度 [K]	900~920	800~850
可燃範囲 [vol.%]	5-15	4-75

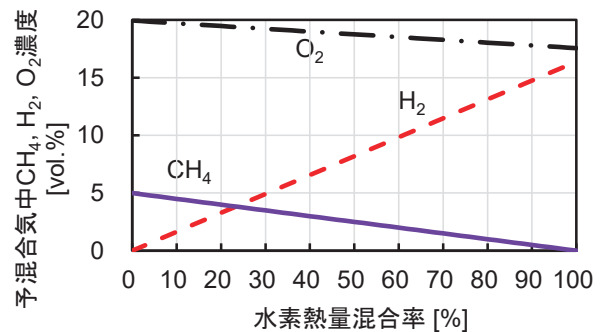


図-1 メタン／水素混合燃料を供給した場合の予混合気中の CH₄, H₂, O₂ の濃度

と、シリンダ内の燃焼期間が短くなり筒内圧力・温度が増大することが予想できる。この水素混焼による筒内圧力・温度の増大は、窒素酸化物（NO_x）排出率の増大やノッキングの発生といった問題を生じさせる場合がある。したがって、高い水素熱量混合率においてリーンバーンガスエンジンを運転するためには、水素による急速な燃焼を抑制する技術が不可欠となると考えられる。また、水素は可燃範囲が広く、最小着火エネルギーが低いことから、シリンダに予混合気を吸入する前段階において着火・燃焼するバックファイアや、意図しないタイミングで点火するプレイグニッションの発生が懸念される。さらに、水素リーク時の着火・燃焼の危険性が高いことから、安全性に関する評価や対応技術の開発が必要となる。

図 1 は、水素熱量混合率に対する予混合気中のメタン（CH₄）、水素（H₂）、酸素（O₂）の濃度を示す。なお、同図は、空気過剰率 λ=2.0 の給気マニホールド圧力を維持（すなわち、シリンダ充填モル数を維持）し、供給燃料熱量を一定（すなわち、エンジン出力を一定）にした状態において、メタン／水素混合燃料を供給した場合の計算結果である。メタン 100% の予混合気中のメタン濃度は、5 vol.% であるのに対し、水素 100% の予混合気中の水素濃度は、メタンと比較し 3 倍程度の体積が供給されることから、16 vol.% に増大する。このシリンダ内の予混合気は、ピストンリング合口などを介してクランクケースに流出するため、シリンダ内の予混合気中の水素濃度の増加は、クランクケース内燃料濃度の増加に繋がる。このため、水素混焼時はクランクケース内の燃料濃度が可燃範囲に入らないように注意が必要となる。また、水素 100% の燃料濃度がメタン 100% の燃料濃度と比較して高いため、シリンダ中の空気充填量が減り、水素 100% の予混

合気中の酸素濃度は低下する。一方で、空気過剰率は、水素がメタンに比べて燃焼に必要な酸素量が 1/4 と少ないため、水素熱量混合率を高くするほど増大する。

本研究では、これらの調査・検討結果を考慮し、当所既設のリーンバーンガスエンジンを用いた都市ガスと水素の混焼運転では、下記の対策を実施している。1)水素の急速な燃焼を抑制する技術として、希薄燃焼、排気再循環、水噴射技術の適用。2)異常燃焼の対策として、燃焼状態の常時監視。3)バックファイアの対策として、吸気ポート内の水素滞留を防止する噴射タイミングの吸気行程内制御。4)水素リーク時の着火・燃焼対策として、水素検知警報機の設置とクランクケース内の燃料濃度計測・監視と換気システムの追加。

3. 実験装置と実験条件

3. 1 実験装置

表2は、当所既設のリーンバーンガスエンジンの諸元、図2は、実験システムの概要をそれぞれ示す。当エンジンは、定格発電出力 400 kW、回転速度 1800 min⁻¹の補機特性を持ち、着火方式に副室火花点火方式を用いている。燃料ガスは都市ガス（13A）を用い、その供給方式は各気筒の給気配管に設置されたガスインジェクタによるポート噴射方式となっている。

本実験では、当エンジンによる水素混焼実験を行うため、新たに水素供給システム（水素ポート噴射システムおよび都市ガス配管用水素注入システム）を構築した。水素ポート噴射に用いるインジェクタは、都市ガスインジェクタ付近の給気配管に取り付け、水素噴射のタイミング・期間は、水素の吹き抜けや滞留を防止するため、吸気行程期間内に行うよう

表-2 リーンバーンガス機関の諸元

エンジン名	AYG20L-SE (ヤンマー)
形式	希薄燃焼 / 副室火花点火
シリンダ径/行程	155 mm / 180 mm
気筒数	6
発電出力/回転速度	400 kWe / 1800 min ⁻¹ (60 Hz)

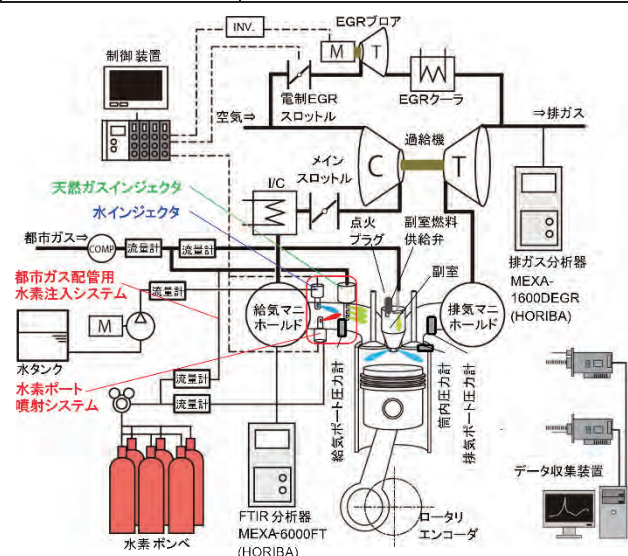


図-2 実験システムの概要

表-3 リーンバーンガスエンジンの運転条件

機関回転速度	1800 min ⁻¹	
発電出力(負荷率)	200 kWe (50%)	
図示平均有効圧力	0.77 MPa	
点火時期	-12.0 deg.ATDC	
水素熱量混合率	0 %	96 %
空気過剰率, λ	1.73	2.65
給気マニホールド圧力	146 kPa _{abs}	183 kPa _{abs}
給気温度	30 °C	18 °C
副室燃料流量割合	2.5 vol.%	0 vol.%

に制御した。また、70%以上の水素熱量混合率で運転する場合は、水素インジェクタの最大噴射量の制限により、都市ガス配管用水素注入システムも合わせて使用した。なお、エンジン本体（圧縮比や吸排気バルブタイミング、過給機設定など）には設定変更を加えておらず、本水素供給システムは既存エンジンに対するレトロフィットシステムとなっている。

なお、本実験では使用していないが、本実験システム内の水噴射装置と排気再循環装置は、燃焼抑制技術に関する研究に用いている。

3. 2 実験条件

表3は、当エンジンの運転条件を示す。本実験における負荷率は、船用補機で使用頻度の高い50%（発電出力200kW、図示平均有効圧力0.77MPa）とした。水素無混焼時の空気過剰率は、IMOのNOx3次規制を参考として、NOx排出率が1g/kWhになるように設定した。また、水素96%混焼時の空気過剰率は、基準となる水素無混焼時の燃焼期間（後述する燃焼質量割合20～80%のクランク角度期間）と同等となるように、給気マニホールド圧力により調整した。なお、50%以上の水素熱量混合率で運転する場合は、運転を安定化させるため、副室への都市ガス供給を停止した。なお、水素100%運転は、回転速度制御をしている都市ガスインジェクタの供給圧力調整装置の制限から実施していない。

4. 結果と考察

4. 1 水素96%混焼時の燃焼特性

図3は、水素無混焼時と水素96%混焼時におけるクランク角度に対する筒内圧力、熱発生速度、燃焼質量割合を示す。これらの燃焼特性は、第6気筒に設置した筒内圧力計で取得した300サイクル分のデータを元に解析を行った。

水素96%混焼時の熱発生速度と燃焼質量割合は、水素無混焼時と同等の波形になっていることが確認でき、空気過剰率を適切に調整すれば、高い水素熱量混合率においても燃焼速度の抑制が可能であることが明らかになった。また、水素96%混焼時の燃焼期間を基準となる水素無混焼時と同等となるように給気マニホールド圧力を高めた結果、水素96%混焼時の筒内圧力は、水素無混焼時と比較して高くなっている。このことから、希薄燃焼における空気過剰率の制御では、ピストン・シリンダ・シリンダヘッドの許容圧力に配慮が必要である。なお、本実験中、懸念されたノッキングやバックファイアなどの異常燃焼は確認されていない。

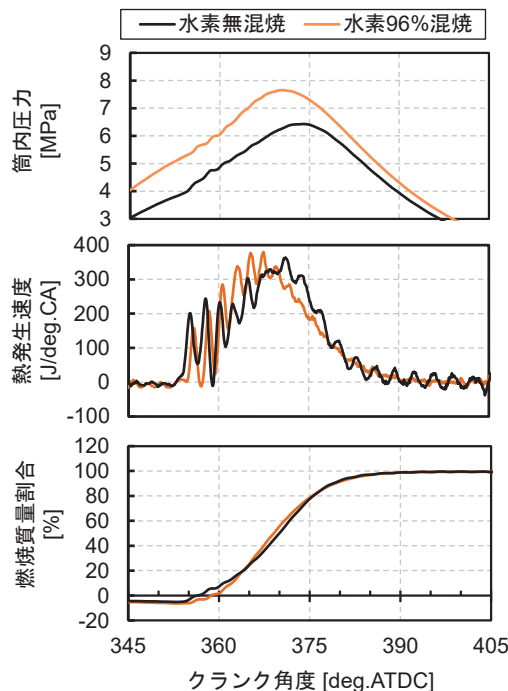


図-3 クランク角度に対する筒内圧力，熱発生速度，燃焼質量割合

図4は，水素無混焼時と水素96%混焼時における図示平均有効圧力の変動率（IMEP C.O.V.）を示す．サイクル毎の燃焼の安定性を示すIMEP C.O.V.は，水素無混焼時と水素96%混焼時において同等であり，水素96%混焼時においても十分に安定燃焼していることが確認できる．

4.2 水素96%混焼時の排気特性

図5は，水素無混焼時と水素96%混焼時におけるNOx排出率を示す．水素96%混焼時は，水素無混焼と比較して，NOx排出率が90%以上低下したことが確認できる．この90%以上低下した値は，水素無混焼時に空気過剰率や点火時期を幅広く変更した場合でも達成できない値である．リーンバーンガスエンジンにおけるNOx生成は，高温の燃焼ガス内部で空気中の窒素が酸化することで生成することが知られており，水素96%混焼時では，空気過剰率の増加によって燃焼ガス温度が低下したため，窒素の酸化反応速度が抑制され，低いNOx排出率が実現されたと考える．さらに，副室式リーンバーンガスエンジンでは，副室燃焼に起因して発生するNOxも重要となるが，水素96%混焼時では，副室への燃料供給を停止したため，副室燃焼に起因するNOx生成も抑制されたと考える．

図6は，水素無混焼と水素96%混焼時における排気中の全炭化水素（THC: total hydrocarbon），一酸化炭素（CO），水素（H₂）濃度をそれぞれ示す．水素無混焼時では，排気中のTHC濃度が1817 ppm，CO濃度が522 ppm排出されているが，水素96%混焼時は，これらのガスがほとんど検出されなかった．これは，供給燃料が100%都市ガスから96%水素に置換されたためである．また，水素96%混焼時の排気中のH₂濃度は，303 ppmであり，水素無混焼時の排気中のTHC濃度（≒未燃燃料濃度）と比較すると大幅に低いことが確認でき

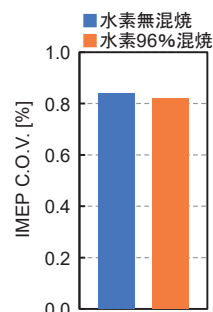


図-4 IMEP C.O.V.

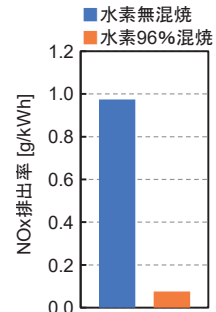


図-5 NOx 排出率

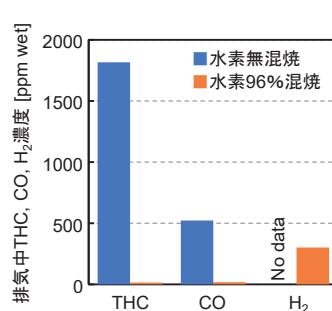
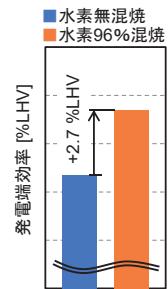
図-6 排気中 THC, CO, H₂ 濃度

図-7 発電端効率

る．つまり，水素96%混焼時は，排気中の未燃燃料濃度が大幅に低減できることが明らかになった．

4.3 水素96%混焼時の熱率

図7は，水素無混焼時と水素96%混焼時における発電端効率を示す．水素96%混焼時は，水素無混焼時と比較して，熱発生速度と燃焼質量割合がほぼ同等であるにもかかわらず，発電端効率が+2.7%LHVと向上している．これは，燃焼温度低下による熱損失低減，給気マニホールド圧力の増加によるポンプ損失（吸排気行程におけるピストン仕事）の低減，未燃燃料の排出低減が寄与したと考える．

5. まとめ

本研究では，当所既設の都市ガス用リーンバーンガスエンジンに対して水素供給システムをレトロフィットし，負荷率50%において水素専焼に近い水素熱量混合率96%の運転を行った．この結果，水素96%混焼時であっても，副室燃料供給を停止し，給気マニホールド圧力を高めてシリンダ内を希薄化することにより，シリンダ内燃焼期間を水素無混焼時と同等に調整することが可能であり，安定燃焼が実現できることを実証した．さらに，水素96%混焼時は，水素無混焼時と比較して，NOx排出率および未燃燃料の排出が低く，発電端効率が向上できる利点もあることが明らかになった．

今後，負荷率100%を含む幅広い負荷条件において，水素無混焼から水素専焼まで，自在にかつ安全に水素燃焼を可能とする技術の確立に向けて研究を推進する予定である．

参考文献

- 1) 平田，川北，GHG削減プロジェクトチームの活動計画，海上技術安全研究所報告，第20巻（2020），pp.19-24.