

水素混焼ガスエンジンに関する研究

市川 泰久*

Study on Hydrogen Mixed Combustion in Lean Burn Gas Engine

by

ICHIKAWA Yasuhisa*

Abstract

We are aiming to develop a hydrogen mixed combustion method for a natural gas fueled reciprocating internal combustion engine to reduce greenhouse gas (GHG) emissions from the marine sector. The main goals for the development of the engine are to suppress the combustion speed and abnormal combustions of hydrogen. In this study, an actual lean-burn gas engine for Japanese city gas (13A) was retrofitted by installing hydrogen supply systems. We adopted the following strategy to operate at a high hydrogen mixing ratio: (a) the pre-chamber fuel supply was shut off, (b) the air intake manifold pressure was increased for more lean burn, and (c) the ignition timing was adjusted to optimize combustion timing. The retrofitted engine was successfully operated with an over 90% hydrogen energy mixing ratio under wide load ratio conditions 50-93%. During the experiments, the cylinder pressure was measured, and the emissions were analyzed. The results verified that stable combustion could be maintained. Furthermore, we found that the NOx emission rate and unburned fuel emissions were lower and the 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 6年 1月 17日

審査日 令和 6年 2月 26日

目 次

1. まえがき	54
2. 水素供給レトロフィットシステムの開発	54
3. 水素高混焼率運転時のエンジン性能	55
3.1 実験方法	55
3.2 実験結果	56
4. まとめ	59
References	59

1. まえがき

気候変動防止を目的として、日本政府や国際海事機関は温室効果ガス（GHG: greenhouse gas）の期限付き削減目標を定めており、国内海運および国際海運から排出される GHG の排出削減が強く求められている。このためカーボンフリー燃料（利用時に CO₂ を排出しない燃料）である水素の船用利用が注目されている。海上技術安全研究所（以下、海技研と呼ぶ）では船舶における水素利用を促進するため、船用ガスエンジンでの水素利用技術の研究・開発を推進している。水素のエンジン利用時の特徴は、燃料電池と比較すると、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。一方で、水素は従来ガス燃料の天然ガスと比較して、幅広い空気過剰率において燃焼速度が速く最小点火エネルギーが小さい等の激しい燃焼特性が課題である¹⁾。エンジン燃料として水素の課題を解決するために、燃焼制御技術や安全管理技術に関する研究・開発が不可欠となる。

これまで著者らは、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技術の研究・開発を行っている¹⁾。本報では、海技研既設のリーンバーンガスエンジンにおいて水素混焼するために海技研が独自に開発した水素供給レトロフィットシステムの紹介と、幅広い負荷率においてほぼ専焼に近い水素熱量混焼率におけるエンジン性能を報告する³⁾。なお、報告する研究成果は 2016—2022 年度の中長期計画中に実施した内容である。

2. 水素供給レトロフィットシステムの開発

表 1 は、海技研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。本エンジンは、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採用している。燃料は、天然ガスに性状が近い都市ガス（13A）を用いている。都市ガスの供給方式は各気筒の給気配管に設置された都市ガスインジェクタによるポート噴射方式であり、エンジンコントローラが噴射期間を調整することで回転速度が維持される。

本エンジンによる水素混焼運転を行うために、水素供給レトロフィットシステムを独自開発した。本システムは、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からなる 2 つの水素供給システムを備えている。まず、水素ポート噴射に用いるインジェクタ（HANA 製、H2100Green）は、既設の都市ガスインジェクタ付近の給気配管に各気筒 2 本ずつ取り付けられている。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に制御した。また、水素熱量混合率 60% 以上で運転する場合は、水素インジェクタの最大噴射量の制限や安定したエンジン回転速度調節のために、都市ガス配管用水素注入システムも併用し

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. 本設備の水素貯蔵量の制約から, 水素高混焼率時の運転時間は20分程度と短い.

著者らの従来研究から, 水素供給時にクランクケース内燃料濃度が高まり, 混焼率によっては可燃範囲に入ることが分かっている³⁾. そこで安全に水素混焼運転を実施するために, 本エンジンにはクランクケースを空気で希釈するシステムを追加した. 水素混焼時は, 300NL/min程度の空気をクランクケースに供給することで, ランクケース内燃料濃度2%以下を維持している.

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, 水素混焼時の燃焼抑制技術に関する研究に用いている^{4),5)}.

表1 ガスエンジン諸元

エンジン名	AYG20L-SE (ヤンマーパワーテクノロジー製)
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 kW / 1800 min ⁻¹ (60 Hz)

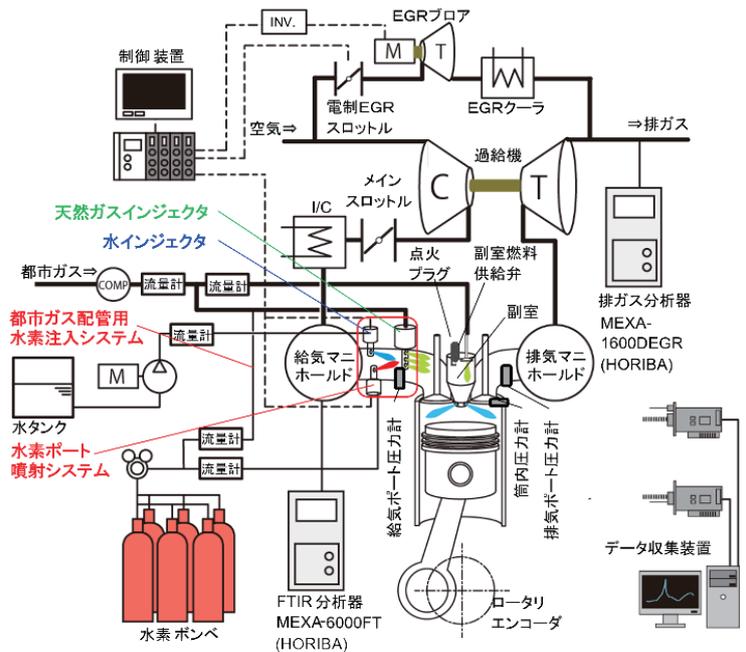


図1 実験システムの概要

3. 水素高混焼率運転時のエンジン性能

3.1 実験方法

表2は, エンジン運転条件を示す. 負荷率は50%, 75%, 93%, 回転速度は1800min⁻¹に設定した. 基準となる水素無混焼時は, 点火時期は-13.3°ATDCに設定し, 空気過剰率はNOx排出率がIMOのNOx三次規制値を参考に1g/kWhになるように給気マニホールド圧力を調整した. 水素高混焼時の熱量混焼率は, 各負荷率においてそれぞれ96%, 97%, 90%に設定した. なお, 水素100%運転を実施しなかった理由は, 異常燃焼等の制限ではなく, 設備上の制約によるものである. 水素の激しい燃焼特性への対応として, 水素高混焼率時は, 予備試験の結果か

ら下記 a)–c)のエンジン運転パラメータを調整した。a)水素の急速な燃焼や異常燃焼の発生を抑制するためメインスロットルを全開にして可能な限り希薄化。b)燃焼安定化のために副室燃料供給を停止。c)燃焼重心位置が都市ガス専焼運転に近づけるように点火時期を調整。ここで燃焼重心位置は、シリンダ内の燃焼による熱発生量が燃焼完了時の50%になるクランク角度を意味している。a)の操作の結果として、水素高混焼時の空気過剰率は2.56, 2.74, 2.70 となり、水素無混焼時に比べて大幅に燃料希薄な状態で運転している。b)の操作により、水素を高い混焼率で運転する際に異常燃焼を起こさずに安定燃焼させることが可能となった。c)の操作の結果、点火時期を-12.1, -13.3, -11.3 °ATDC に調整した。水素無混焼時に対して2°程度の調整であり、点火時期の軽微な変更で燃焼重心位置の調整が可能であった。

エンジンの性能評価においては、筒内圧力計測による燃焼特性評価や排ガス分析装置 (HORIBA 製 MEXA-1600 DEGR) やガスクロマトグラフ (Agilent 製 490 Micro GC) による排気組成分析などを実施した。また、NO_x 排出率や排気流出熱量の算出に必要な排気流量の推定は、酸素バランス法を参考に算出した。

表2 エンジン運転条件

	単位	水素無混焼 (都市ガス運転)			水素高混焼率運転		
		L50 C100	L75 C100	L93 C100	L50 H96	L75 H97	L93 H90
発電出力	kW	200	300	370	200	300	370
発電端有効圧力	MPa	0.69	1.00	1.26	0.69	1.00	1.26
負荷率	%	50	75	93	50	75	93
H ₂ 熱量混合率	%	0	0	0	96	97	90
回転速度	min ⁻¹	1800					
空気過剰率	-	NO _x 排出率 1.0 g/kWh に調整			スロットル全開		
		1.79	1.88	1.95	2.56	2.74	2.70
点火時期	°ATDC	-13.3			$q_{MFB50\%}$ を基準条件に合わせる		
					-12.1	-13.3	-11.3
副室燃料流量割合	%	2.5			0		

3.2 実験結果

図2は、水素無混焼時と水素90-97%混焼時の筒内圧力と熱発生速度を示す。同図から、水素混焼時の筒内圧力は水素無混焼時に比べて高いことがわかる。これは、水素混焼時はスロットル全開にしているために、圧縮開始時のシリンダ内圧力が増加したことが要因である。高負荷率における最大筒内圧力の増加は、エンジン燃焼室の許容強度の観点から注意が必要であるが、本実験においては負荷率93%における最大筒内圧力の増加量は0.5 MPa程度と比較的軽微であり、許容できると判断する。次に、同図の熱発生速度から、すべての負荷率において水素混焼時と水素無混焼時は同様の波形をしていることがわかる。従って、水素混焼運転時に採用した第3.1項の運転調整 a)–c)により、水素高混焼率運転においても燃焼速度を水素無混焼時と同程度に抑制可能であることが明らかになった。なお、水素はノッキングやプレイグニッションなどの異常燃焼が発生しやすいことが課題であるが、本実験における第6気筒の筒内圧力計測結果および試験者による聴覚的な判断からは、異常燃焼の発生は確認されていない。

図3は、水素無混焼時と水素90–97%混焼時の負荷率に対するNO_x 排出率を示す。水素混焼時のNO_x 排出率は、水素無混焼時よりも半分以下と大幅に低い。特に負荷率50%では、水素無混焼と比較して90%以上低減する超低NO_x 運転を実現している。ここで、ガスエンジンにおける主なNO_x 生成は、燃焼による高温雰囲気下で空気中の窒素が酸化するサーマルNOによることが知られている。従って、水素混焼時の低NO_x 排出は、希薄燃焼による燃焼温度の低下が、サーマルNOの生成を抑制したためと考えられる。

図4は、負荷率75%における排気中可燃性ガス濃度と排気に流出する可燃性分熱量を示す。同図の排気中可燃性ガス濃度から、水素無混焼時は CH_4 、 C_2H_6 などの都市ガス成分を主で、その他に CO 、 H_2 などの燃焼中間生成物が含まれる。一方、水素高混焼率運転時は、ほとんどが水素である。水素混焼時の合計排気中可燃性ガス濃度は850ppm程度であり、水素無混焼時の2500ppm程度に対して大幅に低い。ここで、シリンダ内予混合気中燃料体積濃度は、水素無混焼時は4%であるが、水素混焼時は水素の体積発熱量が都市ガスの3.7分の1と低いいため13.8%と大幅に高くなる。水素混焼時の予混合気中燃料濃度が水素無混焼時よりも高いにもかかわらず、水素混焼時の排気中可燃性分濃度が低いことは、水素混焼時は高い燃焼効率を有することを意味する。続いて、図4の排気流出熱量から、燃料成分に着目すると水素混焼時は水素無混焼時の82%低減していることがわかる。このように、水素混焼運転では、燃焼効率が大幅に改善する。これは、水素の消炎距離が短い燃焼特性のためと考える。この燃焼効率の改善幅から発電端効率におよぼす影響を推定すると、水素混焼運転は水素無混焼運転より+1.5%point程度改善すると推測できる。

図5は、負荷率75%における吸排気行程を拡大した指圧線図を示す。同図から、水素混焼時の方が吸排気行程の筒内圧力は高圧側にシフトしている。水素混焼時・無混焼時の吸排気行程により構成されるサイクルは、いずれも反時計回りであり、図示仕事において負の仕事すなわち損失になっていることがわかる。ここで、指圧線図上のサイクル面積は発生する仕事を示すが、吸排気行程の仕事は、水素無混焼時は160J、水素混焼時は111Jである。吸気行程の筒内圧力に関連する給気マニホールド圧力は、過給機コンプレッサ出口圧力に対してスロットル弁で圧力を調整した結果である。水素混焼時におけるスロットル全開操作では、主としてスロットル弁の圧力低下量が最小化されることで給気マニホールド圧力が高まり、吸気行程の筒内圧力は高まる。一方、排気行程の筒内圧力に関連する排気マニホールド圧力は、過給機タービン圧力比によって定まる。スロットル全開操作では、排気流量が増大することで過給機タービン圧力比が増加し、排気行程の筒内圧力は高まる。これらの給排気マニホールド圧力のバランスの変化により、水素混焼時では排気行程よりも吸気行程の筒内圧力上昇が上回ることで、吸排気行程の仕事が増加したと考える。従って、水素混焼時は水素無混焼時に比べて吸排気行程の損失が30%程度改善した。これは、吸排気行程仕事の改善幅から発電端効率におよぼす影響を推定すると、水素混焼運転は水素無混焼運転より+0.5%point程度改善すると推測できる。

以上の燃焼効率と吸排気行程サイクルの改善によって、水素混焼時の発電端効率は水素無混焼時に比べて2.0%point程度向上する可能性がある。

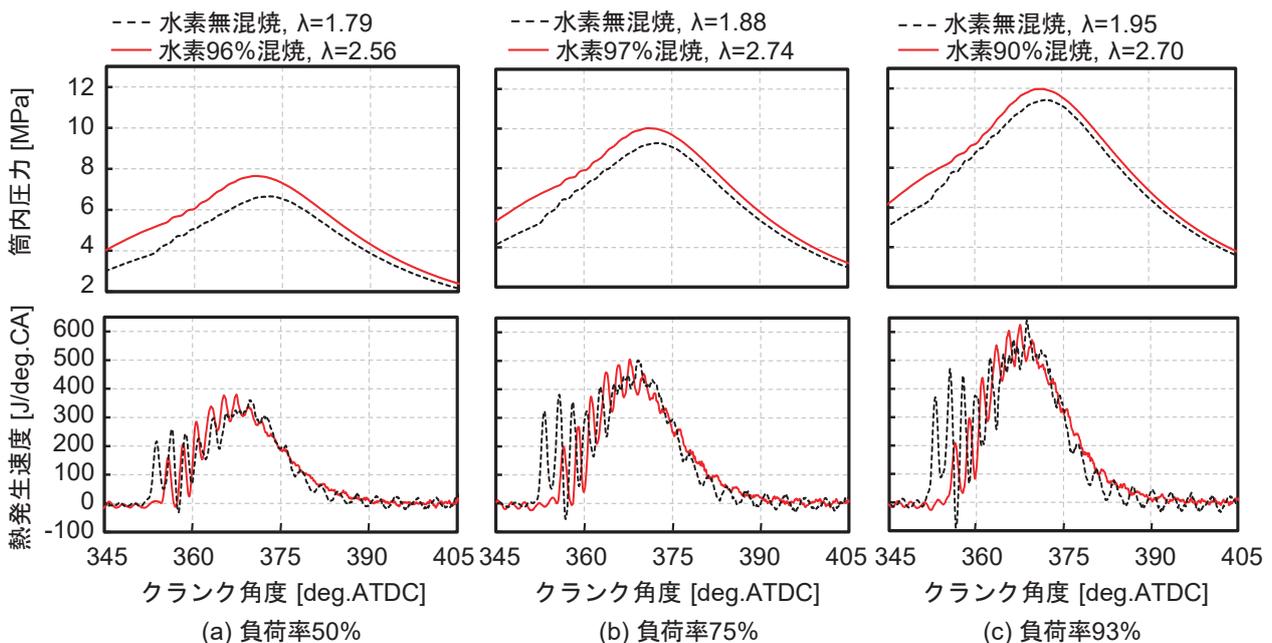


図2 クランク角度に対する筒内圧力と熱発生速度²⁾

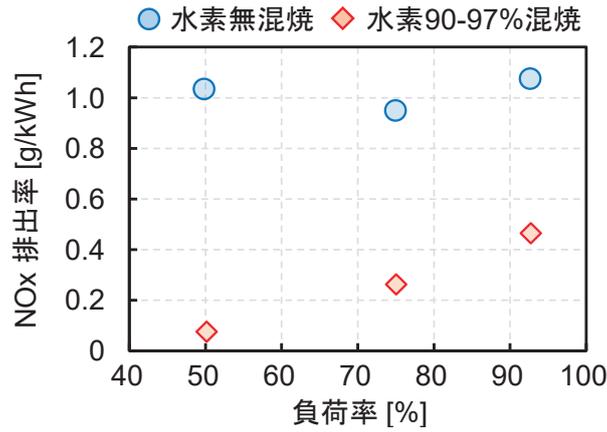


図3 各負荷率におけるNOx 排出率²⁾

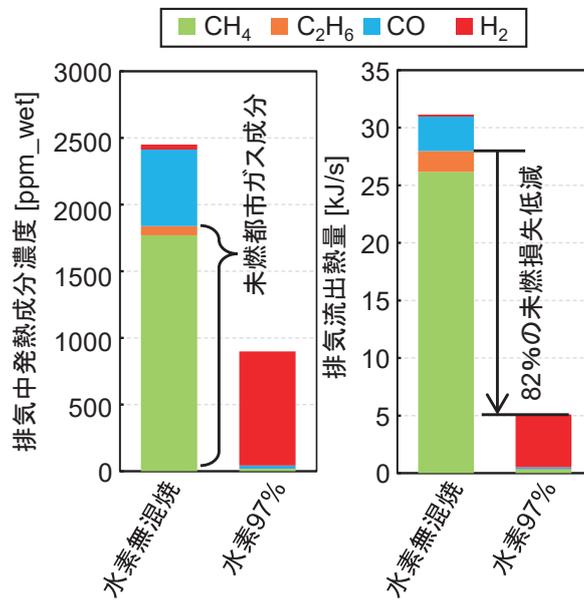


図4 負荷率75%における排気中可燃性ガス濃度と排気に流出する可燃性分熱量²⁾

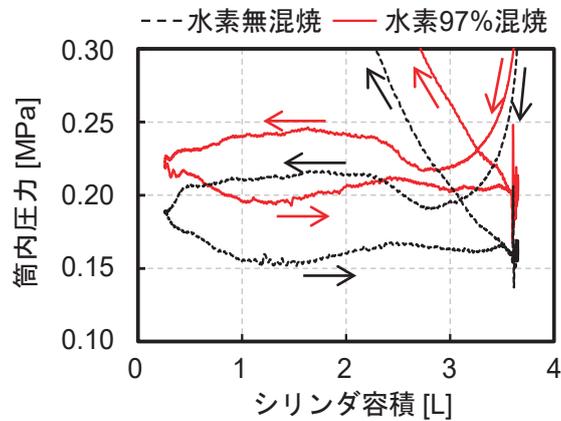


図5 負荷率75%における吸排気過程を拡大した指圧線図

4. まとめ

本研究では、海技研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混焼運転を実現するために独自開発した水素供給レトロフィットシステムを紹介するとともに、50%–93%の幅広い負荷率において水素専焼に近い水素熱量混合率90–97%におけるエンジン性能を報告した。水素高混焼時であっても、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、幅広い負荷率で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が明らかになった。さらに、水素高混焼時であっても、水素無混焼時と比較して、NO_x 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可能性を示した。

References

- 1) Ichikawa Y.: Technology Developments toward 100% Hydrogen Combustion in Marine Lean-burn Gas Engine, Papers of National Maritime Research Institute, Vol.22 (2022) pp.41-44. (in Japanese)
- 2) Ichikawa Y.: Performances of lean-burn gas engines at high hydrogen mixing ratios, Proceedings of 93rd Conference on Japan Institute of Marine Engineering (2023) pp.193-194. (in Japanese)
- 3) Nakamura, M. and Ichikawa Y.: Compositional of blowby gas from lean-burn gas engine and evaluation of gas combustibility in crankcase during hydrogen co-combustion, Papers of National Maritime Research Institute, Vol.22, No.3 (2022) pp.29-42. (in Japanese)
- 4) Ichikawa Y., Sekiguchi H. and Hirata K.: Study on combustion control in hydrogen-mixed lean burn gas engines with exhaust gas recirculation technology, Proceedings of 89th Conference on Japan Institute of Marine Engineering (2019) pp.301-302. (in Japanese)
- 5) Ichikawa Y. and Sekiguchi H.: Study on suppression of combustion by water injection for hydrogen-assisted gas engine, Proceedings of 90th Conference on Japan Institute of Marine Engineering (2020) pp.191-192. (in Japanese)