

PS-10 水素専焼ガスエンジンの技術開発

環境・動力系 * 市川 泰久、Bondarenko Olexiy

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カーボンフリー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進めてきた¹⁾。

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の開発を目指して研究を進めている。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。

本報告では、これまでの水素混焼技術研究の成果を解説するとともに、当所において今後7年間に計画している重点研究の一つ「重点研究6 GHG削減技術の高度化および安全・環境対策に関する研究」として実施する水素専焼技術研究の今年度からの研究開発の展望を述べる。

2. これまでの研究成果

当所では、表-1に示す発電出力400 kW、回転速度1800 min⁻¹、6気筒の副室火花点火式リーンバーンガスエンジンに対して、独自開発した水素供給システムをレトロフィットして水素混焼実験を進めてきた。燃料ガスは天然ガスに性状に近い都市ガス（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。図-1は実験システムの概要を示す。水素供給は、水素ポート噴射システムで噴射するとともに、既設天然ガスインジェクタのガス供給配管に水素を注入することができる。なお、水素の激しい燃焼特性（燃焼速度が速い、着火エネルギーが低い、可燃範囲が広い）への対応として、水素混焼運転では、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。

著者らはこれまでに、水素混焼運転において、メタンスリップ低減効果、排気再循環効果²⁾、給気水噴射効果³⁾、クラ

表-1 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 kW / 1800 min ⁻¹ (60 Hz)

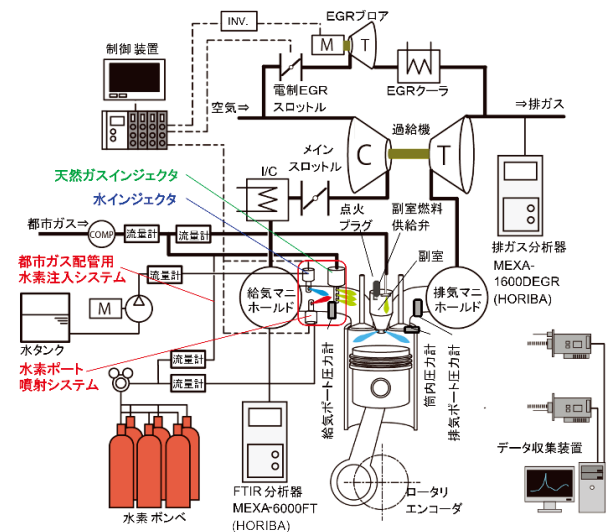


図-1 実験システムの概要

クケース内ガス可燃性評価⁴⁾、高混焼率運転時のエンジン特性⁵⁾、強化学習を用いたエンジン運転パラメータの最適制御法などの研究を実施してきた。本報では研究成果の例として、高混焼率運転時のエンジン特性について紹介する。これまでの研究において、短時間ではあるが、エンジン負荷率25%—93%において、水素混焼率（全供給熱量に対する水素が占める割合）90%での運転を行った。負荷率93%（発電出力370 kW、軸端平均有効圧力1.3 MPa）において水素混焼率90%にて運転した場合の燃焼特性を図-2に、NOx排出率、発電端効率を図-3にそれぞれ示す。運転条件は下記の通り設定した。まず、空気過剰率は都市ガス専焼はNOx排出率を1.0 kg/kWhになるように調整し、水素混焼時は可能な限り給気マニホールド圧力を高めて希薄に設定した。点火時期は、都市ガス専焼は-13.0° ATDC（上死点後クランク角度）に設定し、水素混焼時は燃焼重心位置を都市ガス専焼時に近づくように調整した。副室燃料供給は、都市ガス専焼は全燃料供給の2.5%に設定し、水素混焼時は供給を停止した。なお本実験では、燃焼抑制技術の排気再循環や給気水噴射は適用していない。図-2から、筒内圧力は都市ガス専焼時に比べて水素90%混焼時は、希薄化にともなうシリンダ吸入ガス圧力の増加によって高めに推移している。しかし、水素90%混焼時の最大

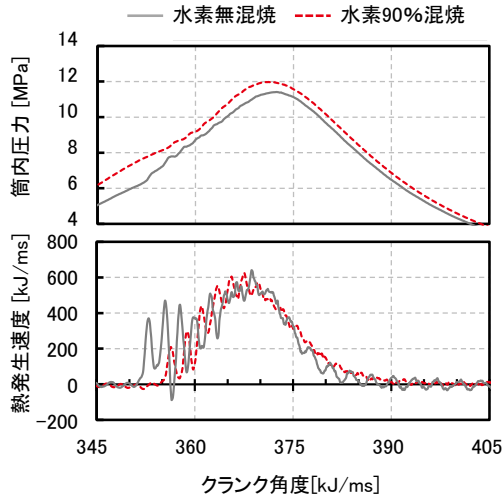


図-2 負荷率 93%における水素無混焼と水素熱量混焼率 90%の燃焼

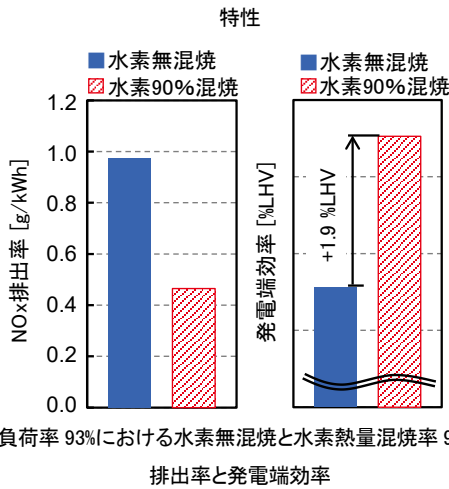


図-3 負荷率 93%における水素無混焼と水素熱量混焼率 90%の NOx 排出率と発電端効率

筒内圧力は、都市ガス専焼時の 4%程度増加であり軽微であった。同図の熱発生速度は、着火直後に相違があるものの、主要な熱発生期間である 360—380° CA(クランク角度)において、ほぼ同等の熱発生パターンが実現できることがわかる。図-3から、NOx 排出率は都市ガス専焼時に比べて水素 90%混焼時は半減することがわかる。これは水素混焼時には希薄条件で燃焼しているため、燃焼温度が低下してサーマル NOx の生成が抑制されたためと考える。同図から、水素 90%混焼時の発電端効率は、都市ガス専焼時に比べて+1.9%増加することがわかる。これは、水素燃焼による燃焼効率の改善や、燃焼温度の低下による冷却損失の低減などが寄与したと考える。

3. 今後の展望

本年度からの研究では、本エンジンの製造メーカーとともに、水素専焼を目指した研究開発を実施する計画である。まず、水素専焼運転が実施できるように既存の水素供給設備を改装し、水素専焼時の異常燃焼に関する技術課題を明確にする。次に、異常燃焼対策技術の効果検証を進める。図-4は、開発済みの給気水噴射装置の噴射の様子を示す。本装置は、水噴流に高圧空気噴流を衝突させることで、微粒化を促進し

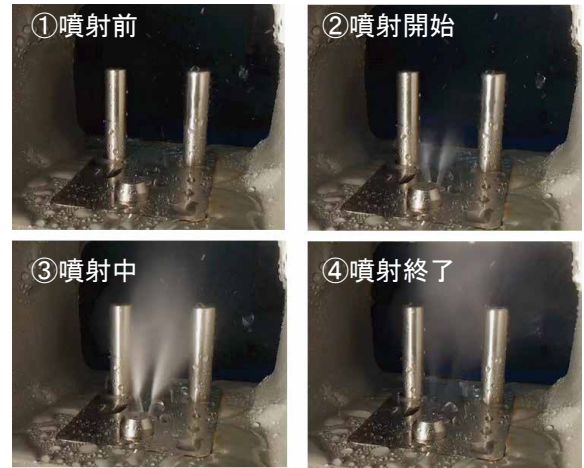


図-4 給気水噴射システムの作動の様子

ている。

さらに、水素混焼エンジンの負荷変動時や運転環境の変化に対応し、安全かつ異常燃焼を発生しないようにすることを目指し、強化学習を用いたエンジン運転パラメータの最適制御モデルの検討を進める計画をしている。

4. まとめ

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実現を目指した、これまでの研究成果の一部を紹介した。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た実験から、幅広い負荷率において水素熱量混焼率 90%の運転を行い、低 NOx 排出率と高効率を実証した。今後は、水素専焼を目指し、エンジン製造メーカーとともに、専焼時における安全管理技術や燃焼技術の研究開発を推進する予定である。

参考文献

- 1) 平田宏一, 川北千春, 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.
- 2) 市川泰久, 関口秀紀, 平田宏一, 排気再循環技術による水素混焼リーンバーンガス機関の燃焼抑制に関する研究, 第 89 回マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集(2019)
- 3) 市川泰久, 関口秀紀, 水素混焼ガス機関に対する水噴射による燃焼抑制技術の研究, 第 90 回マリンエンジニアリング学術講演会講演論文集(2020)
- 4) 中村真由子, 市川泰久, リーンバーンガス機関におけるブローパイガスの成分分析および水素混焼時のクランクケース内ガス可燃性評価, 海上技術安全研究所報告, 第 22 巻, 第 3 号, (2022)
- 5) 市川泰久, 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, 第 22 回海上技術安全研究所研究発表会講演集, 第 22 巻 (2022)