

マリン用水素直噴エンジンと水素ボートシステムの開発

Development of a Hydrogen Direct-Injection Engine and Hydrogen Boat System for Marine Applications

鬼形 朋良 平本 成実 弘田 雅士 能勢 幸憲 Hien H. Nguyen

要旨

プレジャーボートの動力に必要なエネルギーは自動車の約10倍と見積もられており、電動化でのカーボンニュートラル達成の実現にはバッテリの大容量化など多くの課題がある。そこで本研究ではカーボンニュートラルの実現を目指し、水素直噴エンジンを適用した水素ボートシステムの開発を行った。エンジン開発では異常燃焼を抑制し、信頼性を確保しつつ、自然吸気水素直噴エンジンとして航走に適した性能を実現した。また水素ボートシステムは従来のプレジャーボートのパッケージングを維持し、水素タンクをはじめとした水素供給システムを搭載し、水素を安全に取り扱うため、水素に特化したフェールセーフシステムを開発した。

Abstract

The energy required to power a pleasure boat is estimated to be approximately ten times that of an automobile, and achieving carbon neutrality through electrification presents numerous challenges, including the need for significantly larger battery capacity.

In this study, we developed a hydrogen direct-injection engine system for pleasure boats with the aim of realizing carbon neutrality.

In the course of engine development, we successfully suppressed abnormal combustion, ensured reliability, and achieved performance suitable for cruising with a naturally aspirated hydrogen direct-injection engine.

Furthermore, the hydrogen boat system maintains the packaging of a conventional pleasure boat while incorporating a hydrogen supply system, including hydrogen tanks, and features a hydrogen-specific fail-safe mechanism designed to ensure safe operation.

1 はじめに

地球環境と人々の豊かな活動を持続させるには、マリン製品におけるカーボンニュートラル対応が不可欠である。プレジャーボートの動力に必要なエネルギーは自動車の約10倍とされており、特に大型船外機ではバッテリおよびモータへの置き換えが困難と予測される。そこで、当社は環境性能と商品性の両立を目指し、水素船外機ボートの可能性を探求した。

水素エンジンの開発においては、エンジン単体の開発に留まらず、水素供給系やフェールセーフ機構なども含めたシステム全体の実現性を検討することが重要である。加えて、安全な運用方法の確立やマリン製品への適用性の評価も、開発初期からの重要な検討項目とした。開発は社内の各部門をまたいだ連携に加え、社外の専門パートナーとの協力により(図1)、それぞれの強みを活かしながら技術を蓄積し、着実に前進している。

本稿では、水素を安全に使用しつつ、エンジンの持つ力強さを維持しながら、使用時に二酸化炭素を排出しないボートの試作開発の状況について報告する。



図1 開発パートナー

2 エンジン開発

2-1. 概要

本開発では、「ヤマハ船外機」のフラッグシップとして市場から高い評価を受けているガソリン船外機「F450A」(V8 5.6L)をベースに、水素燃料対応に向けた仕様変更を行った(図2)。「F450A」を選定した理由は、大出力帯への挑戦により水素エンジンの可能性をより広く探求できることに加え、直噴レイアウ

トが採用されており、水素用直噴インジェクタの搭載に大幅な設計変更を要しないためである。開発においては、自然吸気水素エンジンとして航走に適した性能を目標とし、水素燃焼に特有の異常燃焼への対応や、燃焼特性の違いに起因する部品への対策を講じることで信頼性の確保を図った。



図2 水素エンジン船外機

表1 参考_「F450」(ガソリン仕様)のスペック

Maximum power	450 HP
Bore × stroke	96×96mm
Compression ratio	12.3
Number of cylinders	8
Displacement	5560cm ³
Fuel injection method	Direct injection

水素エンジンとしての主な変更点は、水素供給配管および専用インジェクタの装着である。さらに、水素燃焼に合わせて、ピストンとスパークプラグの仕様を変更し、インジェクタ先端には筒内に噴射する水素噴流を最適化するアダプタを装着した。これらの改良により、当初の出力性能と比較して約40%の向上を確認した。現時点でのエンジン性能曲線を図3に示す。同図にて水素エンジンでは高回転域においてガソリンエンジンに対して出力が低下する傾向にあるが、これは点火前に水素が着火する異常燃焼(以下ブレイク)の回避および耐久性への配慮から、最大筒内圧を意図的に抑制した結果である。有効とみられる各構成部品の選定に関しては、「F450A」を単気筒化したエンジン(図4)による試験結果をフィードバックすることで、点火プラグ仕様をはじめとした各部品の純粋な性能を効率的に把握することができた。なお、更なる出力向上に向けて研究開発は現在も継続中である(図5)。

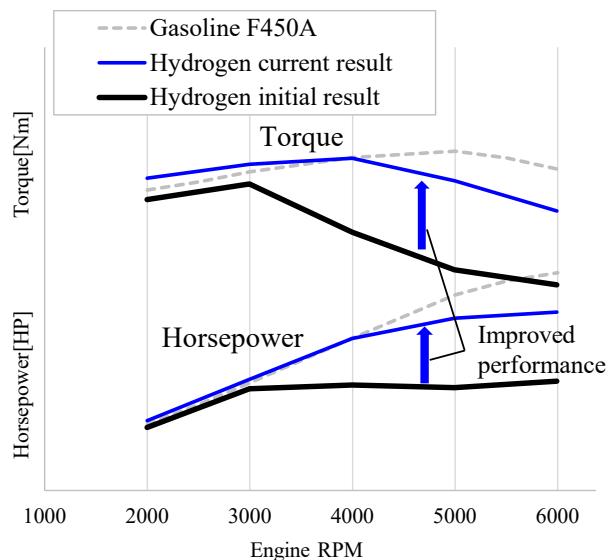


図3 エンジン性能曲線

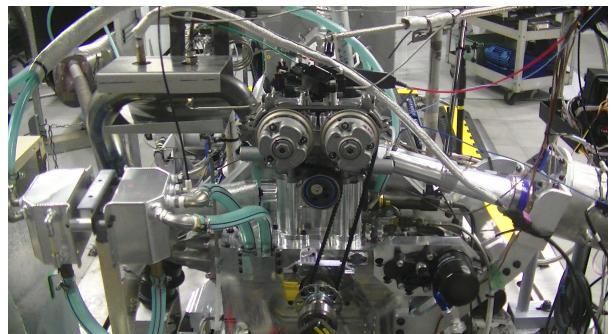


図4 試作単気筒水素エンジン台上試験



図5 水素船外機台上試験

2-2. 異常燃焼への対応

水素は燃焼室内へ充填される際の流動状態において空気と混合しにくく、また、ガソリンと比較して着火しやすい特性を有する。このため、燃焼室内に残留した熱源や混合気の不均質性を原因として、図6に示すようなブレイクが発生しやすいことが知られている。したがって、ブレイクの抑制は性能向上および信頼性確保における重要な課題である。

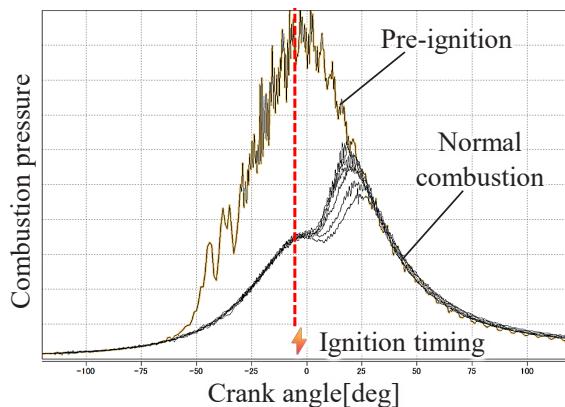


図6 プレイグ発生時の燃焼圧イメージ

本エンジンにおいても、他の多くの水素エンジンと同様に高回転域で燃焼安定性が低下し、プレイグが発生しやすい傾向が確認された。筒内流動のシミュレーション結果からは、水素における筒内混合気の均質度が低く、可燃範囲が局所的に偏在することが明らかとなり、これがプレイグの要因であると考えられた。この課題に対し、筒内混合気の均質度向上を目的として、吸気ポートを高流量ポートおよび高タンブルポートへ変更し、筒内流動場が混合気形成に与える影響をシミュレーションにて評価した。また、インジェクタ先端にアダプタを装着し、アダプタ先端の噴流孔形状を変更することで、噴流設計による改善の可能性についても検討を行った。これらのシミュレーション結果から以下の知見を得た。

- 筒内に直接噴射される水素噴流は、噴射直後から噴射場にとても強い乱流エネルギーを生成する。
- 筒内均質度の向上にはタンブル流の強化が有効である。当エンジンでは、インジェクタを燃焼室ボア中心にマウント(センタマウント)することで、水素噴流によるタンブル強化(噴流によるタンブルアシスト)が期待できる。
- センタマウントインジェクタのベース噴孔(円形単孔)による噴射では、噴射直後のタンブルは強まるが、その効果は持続せず、筒内の均質度も低く、局所的なリッチ領域が残存しやすい。

以上の結果を踏まえ、図7に示す先端形状を試作した。当該アダプタは図8の噴流コンセプトに示す通り、インジェクタから噴射された水素がガイド構造に沿って扇状(Fan-shaped)に拡散して噴射することで筒内の均質度を高める効果を狙った。また扇状の噴流を排気側に傾けることにより水素の噴流によって強いタンブル流を生成し(図9)、圧縮上死点前まで高い乱流強度を維持できる(図10)ことが分かった。結果として、図11および図12に示すように、円形単孔のBase水素噴射に比べて筒内の均質度を向上させることができた。図12は筒内のプレイグが発生し易い比較的リッチなLambda領域の存在分布を水素

噴流改善前後で比較したものである。

※図9から12は同噴射量、同噴射時期での比較結果

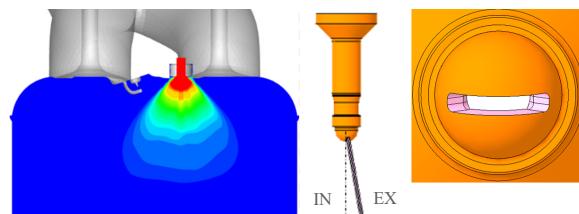


図7 噴流改善アダプタ

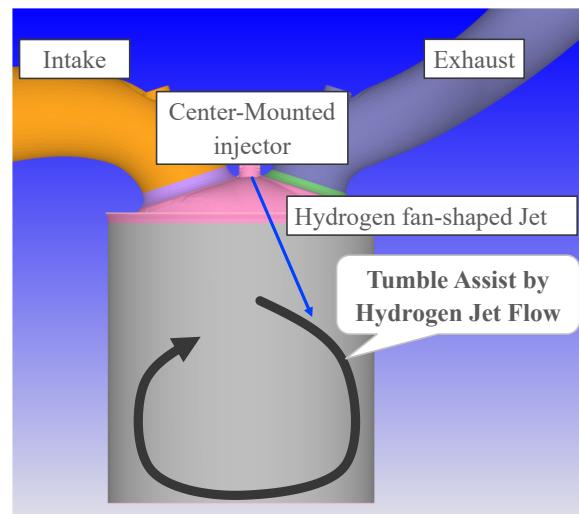


図8 噴流コンセプト

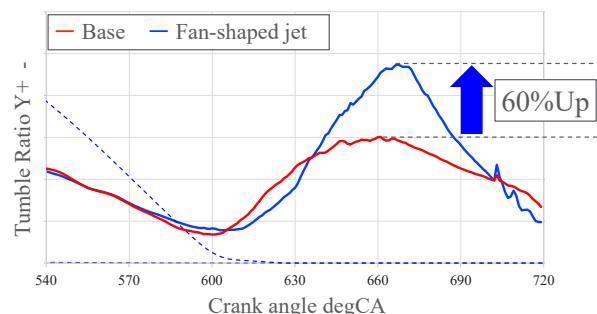


図9 噴流違いによるタンブル流の差

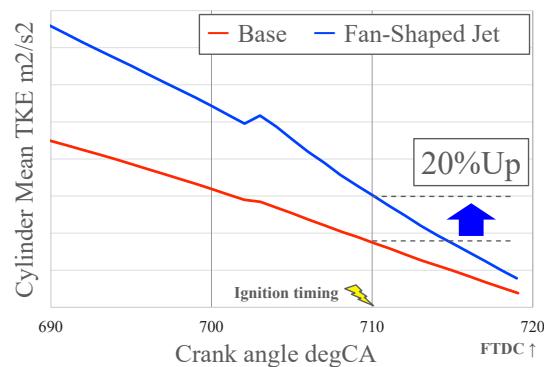


図10 圧縮上死点付近の乱流強度の差

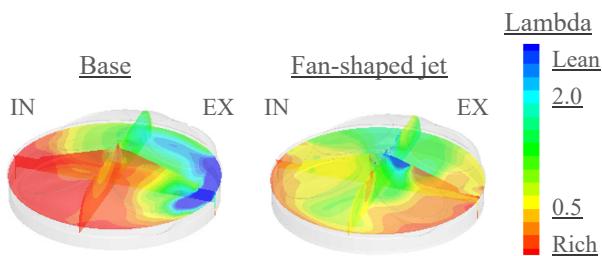


図11 筒内均質度シミュレーション結果 @20BTDC

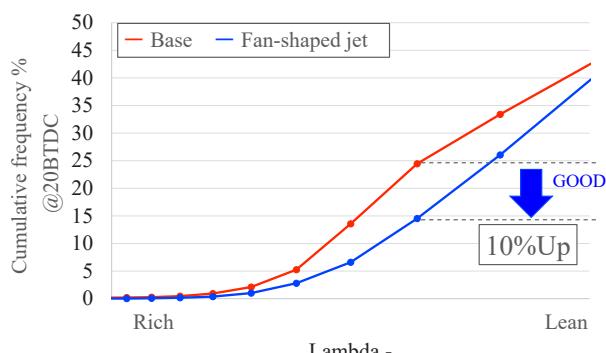


図12 噴流デザイン改善によるリッチ領域の低減効果

本アダプタを実機に適用することで、燃料投入量を増量し、Lambdaをリッチ側に設定してもプレイグの発生を抑制することが可能となり(図13)、出力性能および信頼性の向上を実現した。

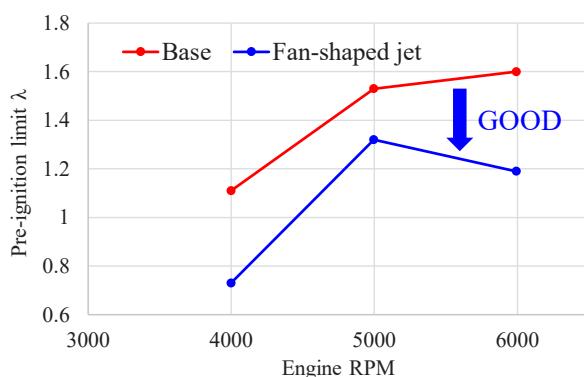


図13 実機での筒内均質度改善によるプレイグ発生λの差

さらに、混合気の圧縮による自着火を抑制する目的で、圧縮比をガソリン仕様よりも低下させた。加えて、残留熱による自着火を防止するため、ガスケットの少ないスパークプラグへ変更するなど、複合的な対策を講じた。

以上のエンジン単体開発を踏まえ、当エンジンをボートへ搭載するにあたっては、万が一プレイグが発生した場合に備え、フェールセーフシステムによりエンジンの破損防止を狙っている。ボートに搭載した水素制御システムは、エンジンの燃焼圧

を常時監視しており、プレイグにより規定値を超える異常燃焼圧を検知した際には、水素インジェクタの噴射を停止することで、エンジンを速やかに停止させる。

2-3. 信頼性の確保

水素燃焼はガソリン燃焼と比べて高温となり、かつ燃料に気化潜熱がないため、燃焼室温度が上昇する傾向にある。この燃焼温度上昇が原因とみられるバルブシート摩耗を試験中に確認したことから、摩耗の発生原理(図14)をもとにバルブシート材質を見直し、対策を講じた(図15)。また、水素燃焼により発生する水分に起因する錆への対策として、バルブおよびバルブシートの材質の変更を実施した。発生する水によるオイルの希釈については、定期的な交換により大きな問題は生じていないが、長期使用に伴う劣化に対して調査と検討を継続している。

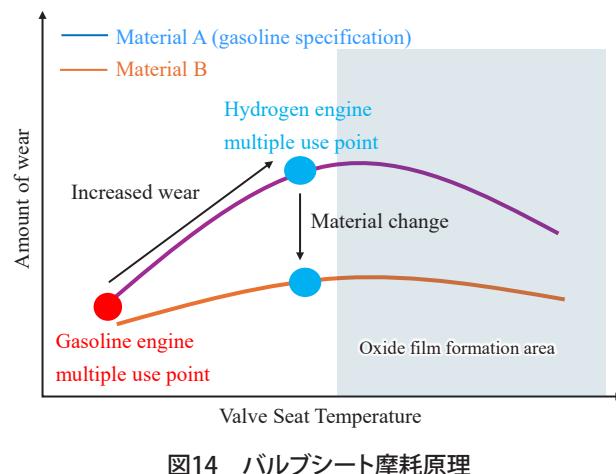


図14 バルブシート摩耗原理

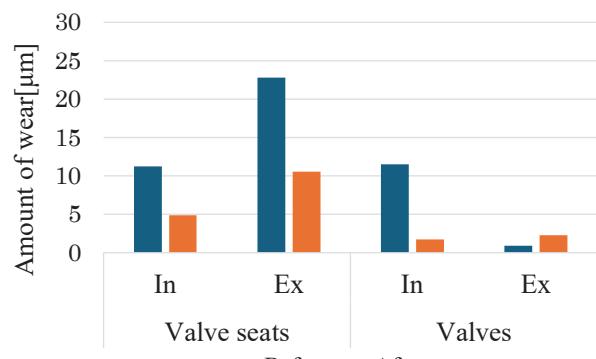


図15 バルブシート摩耗量

3 ボート開発

ボート開発にあたっては、大型船外機の世界最大市場である米国において、“ヤマハモーターコーポレーション,U.S.A.(以下YMUS)”が中心となり、ボートビルダーの“Regulator社”、水素

タンクシステム設計を担当する“Roush社”、および“ヤマハ発動機株式会社(以下当社)”を含む4社による協力体制を構築し、共同で開発に取り組んだ。ボートの作成から航走テストは米国にて実施している。

3-1. ベースボート選定

船外機は、さまざまな形状や大きさのボートに取り付け可能である必要があり、高い汎用性が求められる。本開発では、“Regulator社”的ペイボートタイプ「26XO」(図16)を選定した。「26XO」は入り江や近海に加え、河川や湖などの多様な水域に対応可能であり、優れた操縦性(ドライバビリティ)を備えている。これにより、異なる環境下での船外機の性能を幅広く評価することが可能となる。また、船体サイズや構造が一般的なプレジャーボートに近いため、新たに開発した水素エンジンの汎用性や実用性を検証する上でも適していると判断した。

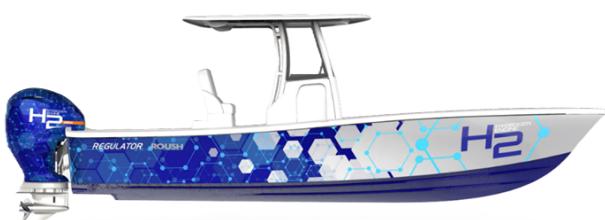


図16 Regulator 26XO

Regulator「26XO」全長:8.2m、幅:2.83m、乾燥重量:2,871kg

3-2. 水素ボートのタンクレイアウト

水素ボートの製作にあたり、水素タンクの大きさ、搭載数、配置方法について“Regulator社”、“Roush社”とともに協議を重ねた結果、デッキ下への搭載するレイアウトを採用した。これにより低重心化と居住性の両立を図った。デッキ下には本来、ローワーハル(船底)を補強する構造体(レインフォースメント)が存在するが、本設計では水素タンクを固定するブラケット等が船体の構造部材を兼ねることで、必要な強度を確保している。

採用したタンクは気体タンク3本で構成され、1本あたりの容積は244L、重量188kg、充填最大圧力は70MPaである。

船体は滑走状態に移行する前にバウ(船首)が上がり、姿勢が大きく変化した後に滑走状態へ移る特性があり、重心位置が後方に偏ると航走性能を損なう可能性がある。このため、タンク3本のレイアウトはバウ側に2本、スター(船尾)側に1本とし、重心バランスに配慮した(図17)。

また、タンク搭載時には、ネック部に緩衝材を設け、航走時の衝撃に耐えられる構造とした(図18)。

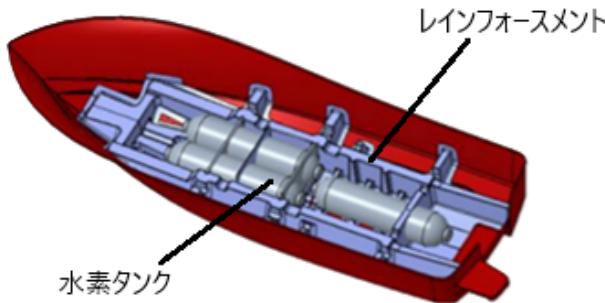


図17 水素タンク搭載レイアウト

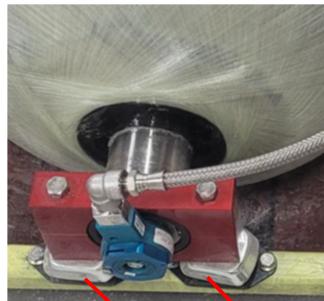


図18 水素タンクネックマウント

3-3. 水素供給システム

ボートに搭載する水素供給配管には、水素脆化対策として全てステンレス鋼(SUS材)を採用した。配管継ぎ手には、水素燃料モビリティ分野で実績のある専用のフレアナット方式を用い、メンテナンス性の向上および組み付け時のばらつき吸収を可能とした。

3本の高圧水素タンクから供給される水素は、まずハイプレッシャマニホールドで合流し、各タンク間の圧力を均一化する。その後、減圧機構としてレギュレータを介し、ロープレッシャマニホールドを経由してエンジンへ供給される。供給圧力は10MPaに設定している。

各マニホールドには圧力センサおよび温度センサを装着し、船内に設置された水素システム監視モニタにて常時状態を確認できるようにしている(図19)。水素漏洩や圧力異常などの異常を検知した際には、水素配管各部に設置された電磁遮断弁が作動し、水素の供給を停止するとともに、配管内の水素をバージするシステムが作動する。

水素は着火しやすく可燃域が広いため、バージ時にデッキ内部へ滞留すると火災に繋がる恐れがある。そこで、水素が非常に軽い気体である特性を踏まえ、確実に大気中へ開放することを目的として、バージラインを船のルーフ部に設ける構造とした(図20)。

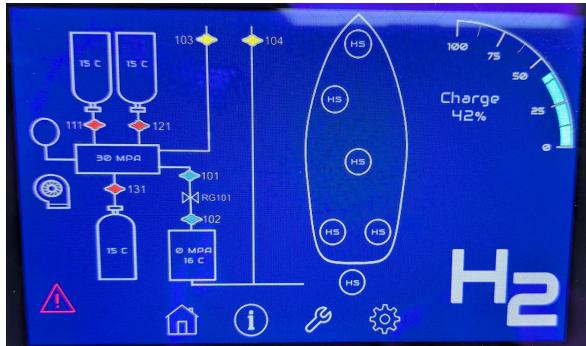


図19 水素システム監視モニタ

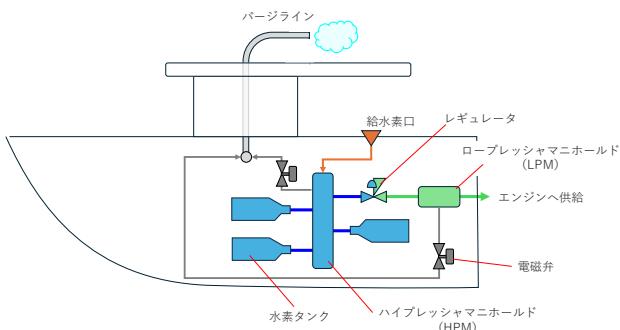


図20 水素供給システム

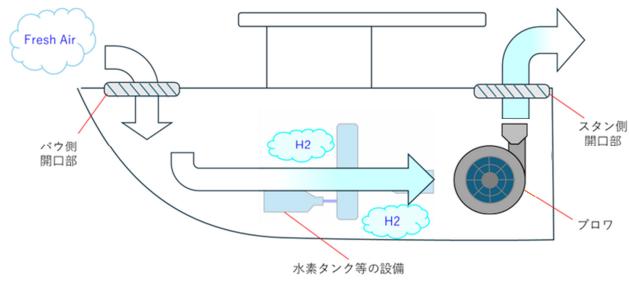


図21 艇体内部の水素掃気

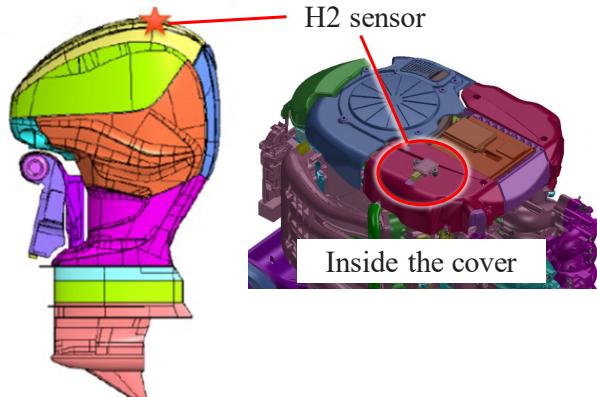


図22 船外機の水素センサ装着位置

3-4. 水素漏洩への備え

水素は分子サイズが小さく、漏れやすい性質を有する。このため、万が一の水素漏洩に備え、艇体内部5カ所に水素濃度センサを配置した。

また、漏洩時には艇体内部に水素ガスが滞留することが想定されるため、デッキ部に掃気構造を設け、ハウジング側に吸気開口部、スタン側に排気開口部を配置し、プロワによる強制掃気を行う構成とした(図21)。エンジン始動前には必ず水素ガス掃気システムを作動させ、プロワで艇体内を掃気し、水素ガス濃度があらかじめ設定した閾値以下にならない限り、エンジンを始動できない制御としている。

一方、エンジン側で水素が漏洩した場合、船外機ではカウル内の上方に水素が滞留することが想定される。このため、カウル内のエンジン最上部に水素濃度センサを設置し、早急な漏洩検知を可能とした(図22)。なお、船外機はチルト操作によりエンジンの傾きが変化する特有の使用方法があるため、いかなるチルト角度においても検出可能となるよう、センサは適切な位置に配置している。

3-5. 転舵時の水素配管の対応

船外機は、船の転舵、トリム操作、チルトに応じて、艇体に対して上下左右に傾ける必要がある。このため、エンジンと艇体を接続する水素配管にも、船外機の可動範囲に追従する柔軟性が求められる。本システムでは、金属性のフレキシブル配管を採用し、ボート側の水素配管に接続している。しかし、高圧の水素供給時には、フレキシブル配管が硬直し、可動性を阻害する懸念が生じる。この課題に対しては、フレキシブル配管の取り回しにゆとりを持たせたレイアウトとし(図23)、曲げ角度を低減する工夫を施した。さらに、船外機側に水素配管用の堅牢なブラケットを新設することで(図24)、従来の船外機と同等の転舵角、トリム角、チルト操作を可能とした。



図23 水素フレキシブル配管の取り回し

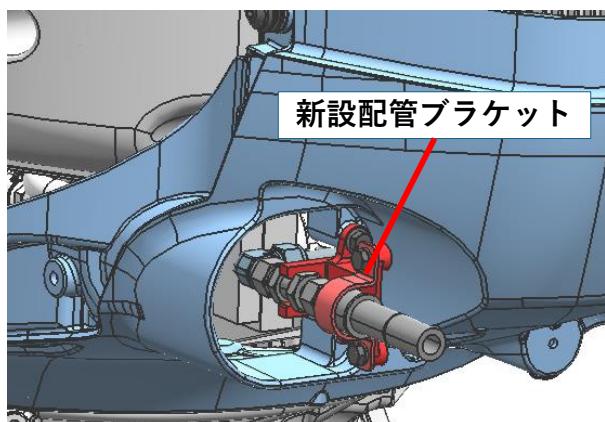


図24 水素配管プラケット

4 水素充填

4-1. 水素船外機ボートへの水素供給システム

水素供給システムは、海洋環境における安全性、性能、環境要件を満たすよう設計されている。本システムでは、15~30分という迅速な燃料補給時間を実現し、最大70MPaに対応した先進的なタンク技術を採用した。燃料インターフェースには、“SAE J2600”準拠のコネクタと、耐腐食性に優れた材料を使用することで、海洋環境における高い耐久性を確保している。急速充填時の高圧および熱負荷に対応するため、船内タンクには圧力開放装置と温度センサを内蔵し、安全性を確保した。さらに、水素漏れ検知機能、自動供給停止機構、適切な接地、防爆仕様の構成部品、効果的な換気など、包括的な安全対策を講じることで、高い信頼性と安全性を備えた給水素システムを実現している(図25)。



図25 陸上での水素供給作業

4-2. 移動式水素供給装置(Air Products HF-150)

水素供給装置として採用した“Air Products HF-150”は、貯蔵と供給を一体化したコンパクトな移動式水素燃料供給装置であり、1台のトレーラーにより構成される(図26)。本装置は、一回の積載で最大80kgの35MPa水素を供給可能であり、設置寸法は長さ7.9m×幅2.6m×高さ2.1mで、一時的な設置にも柔軟に対応できる。本プロジェクトにおいて70MPaではなく35MPaを採用した理由は、操作の簡便性、および、コストの観点によるものである。圧力が低いため複雑な圧縮システムが不要となり、メンテナンス頻度の低減および運用の信頼性向上が期待できる。さらに、35MPaシステムは材料への負荷が少なく、熱安定性にも優れているため、初期段階における海洋用途において、安全性およびコスト効率の両面で優れている。安全な運用には、訓練を受けた作業者による取り扱い、定期的なリーケチェック、静電気防止のための接地、供給元である Air products 社の安全プロトコルの遵守が必要となる。本システムは操作性にも優れており、マリナドッグでの海洋用途に適している。テスト期間を通じて“HF-150”は高い信頼性を発揮し、水素船外機の初期開発フェーズにおいて、実用的かつ有効なソリューションとして機能した。なお、装置の立ち上げや運用に際しては、“Air Products社”より現地対応を含む技術サポートが提供され、円滑なシステム構築に大きく貢献いただいた。



図26 移動式水素供給装置(Air Products HF-150)

5 まとめ

本研究では、水素船外機の実用性と課題を多角的に検証した。

5-1. エンジン開発

出力性能と信頼性確保のため、水素燃焼に合わせた変更や工夫が必要であり、これらは船外機に限らず他の水素エンジンモビリティにも共通する課題である。本研究では、水素噴射による吸気タンブル流の強化と噴流形状の工夫により筒内均質度を高め、課題の1つである異常燃焼を抑制した。

また、水素の広い可燃範囲は、セッティングの柔軟性を高め、短時間でボート特性への適合を可能にした。

5-2. ボート開発

大型水素タンクの搭載による航走性能や艇体剛性への影響は、搭載位置やマウント方法の工夫により、最小限に抑制した。高圧水素配管の張力による船外機の可動制限も、フレキシブル配管の選定により解消し、ボートのパッケージングとして十分に成立することも分かった。

航走時には、排出ガス特有の臭気がなく快適性が向上し、V8エンジンの高回転域での加速感および心地よいエンジンサウンドは維持されており、水素燃料と大型船外機の高い親和性を体感することができた(図27)。



図27 水素船外機プレジャーボートの航走状態

5-3. 水素供給

高圧タンクと安全機構を備えたボートの水素供給システムにより、比較的迅速かつ信頼性の高い充填が可能となった。テストを実施した米国では、ボートへの水素供給は移動式の水素供給装置により実現することができた。マリーナドックにおいて水素ステーションを建設することなく、比較的手軽な水素供給の可能性を探ることができた。

6 おわりに

水素船外機ボートは、2024年のマイアミインターナショナルボートショーにて初公開され、その後も国際展示会や講演を通じて技術発信を継続している。これらの活動を通じて、マリン製品のカーボンニュートラル対応および新たなエンジン技術に対する高い期待と関心が多くの方々から寄せられた。2025年1月には、本システムを用いた実水域での航走試験を実施し、水素船外機プレジャーボートとしての基本性能を確認した。現時点では、性能向上および運用実証に向けた基準点を確認できた段階にあると認識している。今後、製品化を見据えた解決すべき課題は多岐にわたる。まず、今回のテスト環境とは異なる幅広いマリン用途の条件に適合した水素供給インフラの整備が必要である。エンジン技術においては、燃費改善、出力向上、排気中の NOx 低減の両立といったさらなる性能向上が求められる。加えて、ユーザーが安心して利用できるよう、ハードウェアおよびシステム両面における安全性とメンテナンス性の強化も不可欠である。今後も技術の蓄積と改良を継続することで、単なるカーボンニュートラル対応という環境価値にとどまらず、商品性および市場性の両面からも選ばれる価値ある製品の実現を目指し、挑戦を続けていく所存である。

■著者



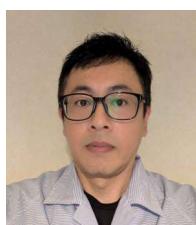
鬼形 朋良
Tomoyoshi Onikata
技術・研究本部
AM 開発統括部
第2技術部



平本 成実
Narumi Hiramatsu
技術・研究本部
AM 開発統括部
第2技術部



弘田 雅士
Masashi Hirota
マリン事業本部
開発統括部
先行開発部



能勢 幸憲
Yukinori Nose
マリン事業本部
開発統括部
先行開発部



ヒエン H. グエン
Hien H. Nguyen
Yamaha Motor Corporation, U.S.A.
Marine Innovation Engineering Division

■映像ライブラリー

水素船外機ボート 開発の軌跡 紹介動画

[https://global.yamaha-motor.com/jp/design_technology/
technical/mov/YMC-TR60_TechPaper_01.html](https://global.yamaha-motor.com/jp/design_technology/technical/mov/YMC-TR60_TechPaper_01.html)

