

カーボンニュートラルを実現する水素エンジンの研究

Study on Hydrogen Engines for Carbon Neutrality



市 聡 顕① Satoaki Ichi
 渡 部 寛 之② Hiroyuki Watanabe
 宇 積 陽 一③ Yoichi Utsumi
 和 泉 恭 平④ Kyohei Izumi
 有 馬 一 樹⑤ Kazuki Arima
 丸 橋 健 人⑥ Taketo Marubashi
 久 野 篤 志⑦ Atsushi Hisano
 桜 井 洋 太⑧ Yota Sakurai
 中 尾 祥 典⑨ Yoshinori Nakao

地球温暖化防止の観点からカーボンニュートラルを目指す動きが世界的に加速しており、川崎重工グループでは水素のサプライチェーン構築を推進している。カワサキモータースでは水素燃料内燃機関（水素エンジン）を用いたモビリティの実用化を目指しており、エンジン内の水素噴流の挙動把握を実験やシミュレーションで実施している。また、四輪車、二輪車に搭載して実機研究を実施している。

Kawasaki Heavy Industries Group is developing a hydrogen supply chain in response to the accelerating worldwide movement toward carbon neutrality to prevent global warming. Kawasaki Motors is conducting experiments and simulations to analyze hydrogen jet flows within engines, with the aim of commercializing new mobility solutions based on hydrogen-fueled combustion engines. The research engine has also been mounted on a four-wheeled and two-wheeled vehicles to explore practical applications.

まえがき

地球温暖化防止の観点からカーボンニュートラルを目指す動きが世界的に加速しており、モビリティに対してはその期待は大きくなっている。用途に応じて蓄電池電動車・燃料電池電動車・代替燃料エンジン車（アルコール／合成燃料／水素等）など利点の異なるさまざまな方式を最適に組み合わせる「マルチパスウェイ」の手法が、早期にCO₂排出量を低減するためには必要であると考えられている。中でも水素燃料エンジン車（以下水素エンジン車）は、従来のパワースポーツ小型モビリティの利点を深化させながら、カーボンニュートラルを実現できる手法として注目されている。

1 背景

川崎重工グループでは、水素を「つくる」「ためる」「はこぶ」「つかう」を一気通貫したサプライチェーンの構築を推進している。カワサキモータースでは水素を「つかう」ソリューションとして、小型モビリティのカーボンニュートラル（CN）化に向けて水素エンジンを用いたモビリティの実用化を目指している。

(1) 水素エンジンの特徴と課題

水素の燃焼生成物は水でありCO₂を排出しない。また、ガソリンに比べて燃焼速度が速く可燃範囲が広い特徴を有している。このため、水素エンジンはパワースポーツ小型モビリティに求められる俊敏な応答（レスポンス）を実現できるため、カーボンニュートラルを実現すると共に、新たな走行フィーリングを実現できると期待されている。さらに、燃焼期間が短くなり理論サイクルに近づくため、高効率化が期待される。

一方で、着火温度は高いが着火エネルギーが低いため、微小な高温部分が原因で着火して過早着火やノッキングといった異常燃焼や吸気管に炎が逆流するバックファイア¹⁾が懸念される。また、消炎距離が短いことに起因する熱損失増加とエンジンオイルの燃焼、高温の燃焼ガスを起因とする窒素酸化物の生成²⁾などが懸念されるが、その詳細なメカニズムは解明されていない。

さらに燃料が常温で気体であるため、小型モビリティにはその搭載方法や漏れを“防ぐ”“検知する”“とめる”技術の獲得が必要となる。

(2) 水素小型モビリティ・エンジン研究組合

HySE : Hydrogen Small mobility & Engine technology Association

前項のような課題を解決しなければ水素エンジンを実用化することはできないが、水素の物性を制御する基本的な技術を各社が並行して研究することは非効率であるため、技術組合を設立して共同で解決に取り組むこととした。正組合員としてカワサキモーターズ株式会社・スズキ株式会社・本田技研工業株式会社・ヤマハ発動機株式会社、特別組合員として川崎重工業株式会社とトヨタ自動車株式会社が参画して、技術組合HySEを2023年5月に設立した。主な取組内容は、水素エンジン（要素研究・実機研究に基づく水素エンジンモデルの構築）と、ストレージ（タンク・周辺機器）に関する共通課題の研究と検討である。さらに、水素エンジンが日本固有の技術ではなく、広く世界の企業とも連携して世界標準の技術となるように取り組むことも大きな方針である。

2 水素エンジンの研究

(1) 燃料供給方式の選定

燃料供給方式として、吸気ポート内に燃料を噴射して混合気を形成しシリンダ内に供給するポート噴射方式（PI）と、シリンダ内に直接燃料を噴射して混合気を形成する筒内直接噴射方式（DI）がある。

PI方式では、理論空燃比状態で混合気に燃料が占める体積割合はガソリンの約2%に対して水素は約30%となる。吸入できる空気量が水素の体積分だけ減少するため、シリンダ容積あたりの発熱量は約16%減となる。さらに、高負荷時は吸気工程中にシリンダ内で着火した炎が吸気ポートに達するバックファイアが発生する可能性があり、高負荷運転に課題がある。

DI方式では、吸入空気量は減少せず、バックファイアを避けることができるため、高出力が求められる小型内燃機関には適した方式である。このため本研究ではDI方式を選択した。

(2) 空気供給方式の選定

水素燃焼では燃焼温度が高くなると窒素酸化物NO_xが生成することが知られており、これを抑制するためには希薄燃焼（リーンバーン）が有効である。しかし、リーンバーンでは出力が低下するため、これを補う手段として過給方式の採用が有効である。本研究では空気量の選択範囲を拡大するため、過給方式を選択した。供試エンジンとして「Ninja H2」用過給エンジン³⁾⁴⁾⁵⁾をベースとした。主要諸元を表1に示す。

表1 諸元表
Table 1 Specifications

エンジン形式	Inline 4
排気量 [cm ³]	998
ボア×ストローク [mm]	76.0×55.0
ストローク/ボア	0.72
圧縮比	8.5

(3) 燃料供給圧力の設定

DI方式において、吸入空気量の確保と吸気ポートへの水素の逆流を防ぐため、水素供給開始（SOI）タイミングは吸気弁閉（IVC）後とした。また点火時期（IgT）までに噴射を終了する必要がある。クランクアングルで100CA程度なので、機関回転数6000min⁻¹の場合実時間は4ms程度であるが、12000min⁻¹では2ms程度しかなく、理論混合比にするためには、この時間で、約100Ncm³の水素を筒内に供給する必要があるため、燃料の供給圧力は2～10MPa以上と高圧にする必要がある。

(4) 混合気形成の最適化

水素供給は量だけではなく、適正な濃度分布の混合気を形成して、点火時期に点火プラグ近傍に可燃混合気を誘導する必要がある。3D CFDによるシミュレーションを用いて現象の把握と改善品の設計検討を行った。この計算結果を図1に示す。左に示す噴射方向では、燃料濃度の偏りなどが見られる計算結果となり、実機評価では過早着火やノッキングなどの異常燃焼が発生した。右に示すよう下向きに燃料噴射方向の改良を行ったところ、混合気分布が改善される結果となり、実機運転でも異常燃焼を抑制することができた。このように水素エンジンでは筒内の水素の挙動を把握⁶⁾することが非常に重要である。

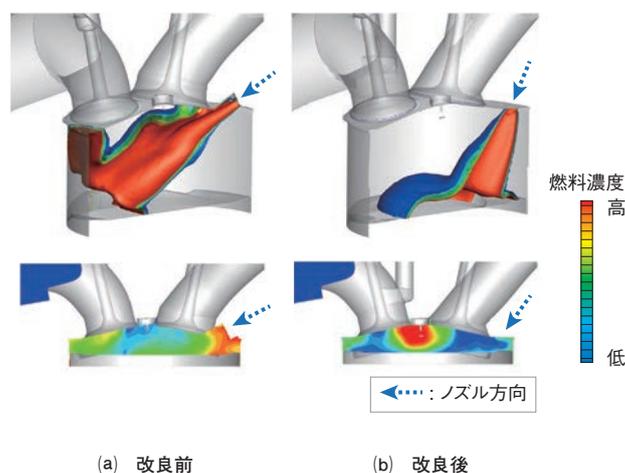


図1 燃料混合シミュレーションによる混合気改良
(上段：噴射後 下段：点火前)

Fig. 1 Improved mixture through simulation of mixed air and fuel

3 水素噴流の挙動把握

(1) 実験

異常燃焼や窒素酸化物の生成を考える上で、分子量が大きく異なる水素(2)と空気(30)の混合現象を理解することが非常に重要である。定容容器に水素を噴射した場合の水素と空気の混合について測定した事例を紹介する。

DI方式においては、エンジン筒内へ水素を供給するために、筒内圧よりも十分に高い圧力で水素を噴射する必要があり、インジェクタのノズル出口近傍圧が背圧（筒内圧）より2倍以上高くなると、衝撃波を伴う不足膨張噴流となり複雑な噴流構造となる。

そこで、水素噴流の挙動および拡散現象を理解するため、定容容器内で容器内圧および水素噴射圧を変化させた場合の水素噴流の挙動をシュリーレン法により撮影した。噴射試験は定容容器内へインジェクタから水素を所定時間噴射して、容器に取り付けたガラス窓から高速度カメラ（Vision Research社製：Phantom V2512）により撮影した。

試験条件を表2に示す。圧縮工程での噴射を想定して、容器内圧を0.2MPaから1.0MPaに設定し、噴射圧の変化に対する水素噴流挙動の変化を観察した。圧縮行程前半（IVC近傍）の噴射を想定した水素噴流挙動を図2(a)に示す。容器内圧を低圧雰囲気場の筒内圧相当（0.2MPa）に設定して噴射圧2MPaで噴射した。噴射後2.0msec後には、容器内の水素が拡散していく様子が見える。

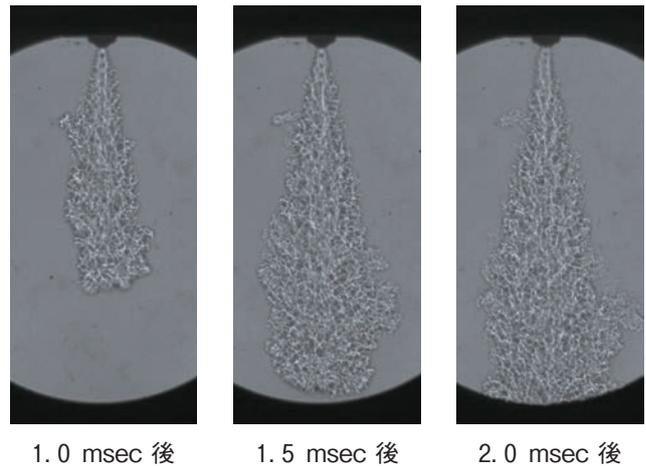
圧縮行程中盤における噴射圧を変化させた場合の水素噴流挙動を図2(b)と図2(c)に示す。高噴射圧の場合は、噴流先端の到達距離が伸長して噴射後に水素が拡散している。また、低圧雰囲気場での噴射と比較すると水素噴流が塊となりその場に留まり続ける様子が見える。このような水素噴流の特徴的な観察結果により、水素噴流の挙動および混合現象について理解を深めて、エンジン筒内での混合気濃度分布の適正化に寄与していく。

(2) 数値シミュレーション

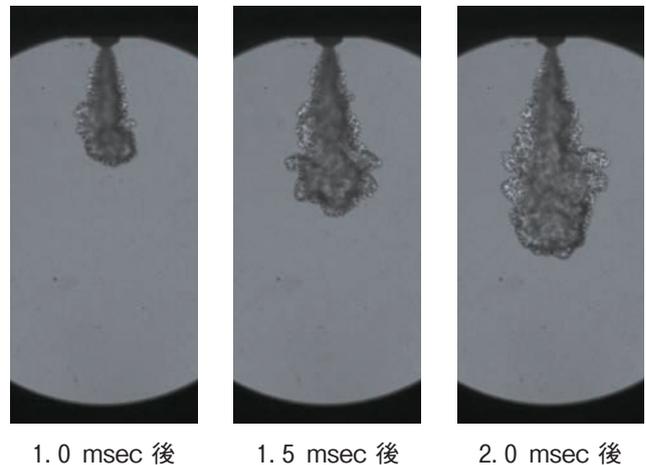
水素噴流に伴う空気との混合気形成過程の把握が重要である。そのため、①水素噴射に関するパラメトリックな検討や②混合過程の様子を評価するためには、CFD解析による数値シミュレーションの実施が有効な手段と考える。

表2 シュリーレン法による水素噴流の撮影試験条件
Table 2 Conditions for Schlieren photography of hydrogen jet flow

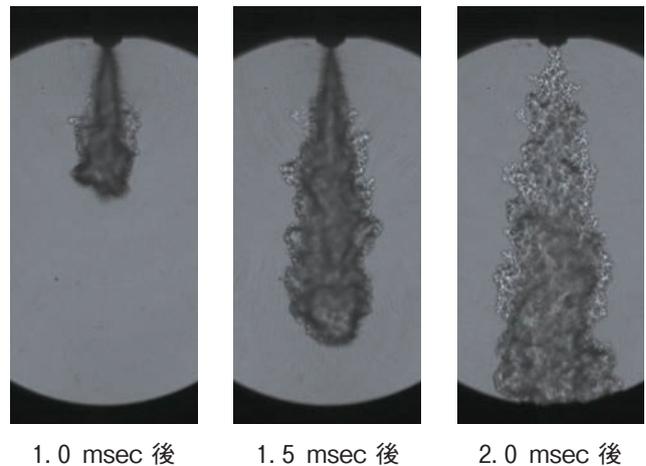
燃料	水素
燃料噴射圧 [MPa]	2.0-10.0
燃料温度 [K]	300
噴射時間 [ms]	1.0
容器内圧 [MPa]	0.2-1.0
容器内気体	窒素
フレームレート [fps]	39000



(a) 噴射圧 2 MPa, 容器内圧 0.2 MPa



(b) 噴射圧 2 MPa, 容器内圧 1 MPa



(c) 噴射圧 10 MPa, 容器内圧 1 MPa

図2 水素噴流のシュリーレン画像
Fig. 2 Schlieren images of a hydrogen jet flow

前述の通り、高圧の水素噴流は一般的に超音速流となり非常に大きな乱流が発生する。よって、水素と空気の乱流拡散現象が重要となるため数値シミュレーションを行う上で乱流モデルを選定する必要がある。乱流を平均化してモデル化するRANS: Reynolds Averaged Numerical Simulationと、指定メッシュサイズ以上の渦スケールは直接数値計算を行い、それ以下の渦スケールはモデル化するLES: Large Eddy Simulationがある。

また、水素の噴射のモデリング手法は、インジェクタ内のリフティングパーツのモーションを模擬してリフティングパーツ上流側に噴射圧境界を与える方法とした。水素直噴エンジンの場合には時々刻々筒内圧が変化するため、リフティングパーツモーション込みで噴射モデルの構築が必要と考えた。しかし、インジェクタ内部の詳細は不明であるため、インジェクタ外観からおおよその着座位置直径を仮決定して、インジェクタのカーテンエリア（開口部）の時間履歴を噴射信号履歴の様子と1サイクル当たり水素噴射量に合うように合わせ込みした。

表2の試験条件において、噴射圧6 MPaで、容器内圧1 MPaとした際の定容器における噴射開始後1 msec時の水素噴流可視化の試験と数値シミュレーションの比較結果を図3に示す。シュリーレン画像試験およびLESでは噴流界面の乱流の渦構造による凹凸をとらえているのに対して、RANSでは噴流界面に凹凸がなく平均化されるため噴流形状は涙型となった。すなわち、乱流モデルによって噴流界面の面積が異なることが分かり、混合拡散の程度に幾分かの差が生じるとみられる。次に、噴流到達距離と噴射角の比較結果を図4に示す。噴流到達距離は噴流の運動量や筒内衝突後の混合挙動をみる上で重要な指標であるが、試験と数値シミュレーション（LES/RANS）ともに噴流到達距離は良好に一致し、いずれの乱流モデルにおいても試験と再現性があることが分かった。一方、噴射角は噴流の広がり进行评估するうえで重要な指標であり、噴射角にお

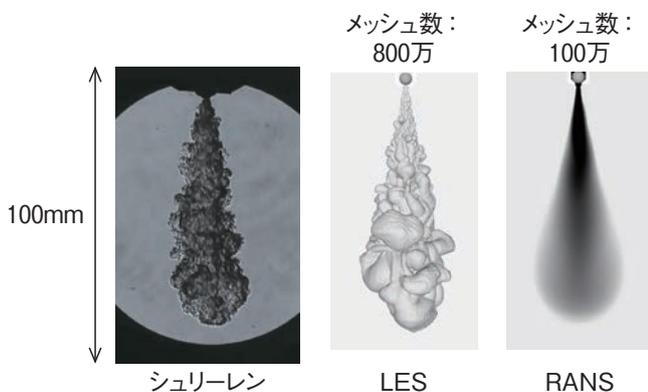


図3 定容器水素噴流可視化の試験と解析の比較結果
(噴射開始後1 msec 噴射圧6 MPa, 容器内圧1 MPa)

Fig. 3 Comparison of visualized hydrogen jet flow within a constant volume vessel with simulated images

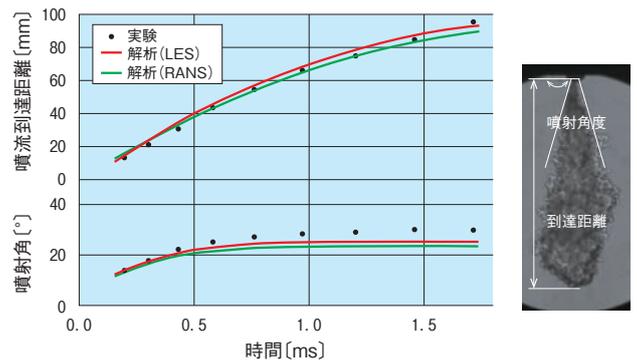


図4 噴流到達距離と噴射角の試験と解析の比較結果
(噴射圧6 MPa, 容器内圧1 MPa)

Fig. 4 Comparison of jet flow distances and angles in tests and simulations

いては噴射後半で試験と解析とで若干の差があるが、LESとRANSの結果の差はほぼない。なお計算時間は、RANSが約1.5日に対しLESは約14日となり大きな差がある。

以上から試験との検証の結果、水素噴流の数値シミュレーション技術を構築できた。水素と空気の混合過程の現象を詳細に評価する際はLES、多くの設計パラメータ（噴射位置/噴射方向/噴射圧等）を大域的に検討するにはRANSと乱流モデルを使い分けると良いと考える。

4 水素エンジンの実機評価

(1) 実機環境での水素エンジン研究

水素エンジンを二輪車などの小型モビリティに適用する場合、台上試験だけでなく実走行で発生する課題の抽出と対策が必要である。実走行において、エンジンにはユーザー要求による加減速や走行する路面の勾配や滑りやすさや、周囲を走行する車両による影響などの状態変化に対応する過渡特性が重要である。さらに異常燃焼・排出ガス・走行フィーリングなどへの影響も考慮する必要がある。

加えて、燃料供給系システムが必要であり、水素タンク・充填口・調圧バルブなどの「水素ストレージシステム」、ストレージシステムの状態を把握し制御を行う「水素ストレージ制御システム」、水素漏出を「防ぐ」「検知する」「止める」を行う「水素安全システム」を搭載する必要がある。

これらのシステムを搭載し、運転者と車両の状態監視者が同乗して、制御の適合をリアルタイムで実施できる「動く実験室」として、当社製オフロード四輪車「TERYX KRX1000」をベースに試験用水素ビークルを製作して研究に活用している。エンジンはDI方式4気筒を採用した。

研究車の構築においては、HySEメンバーと共に取り組んだことで、短期間で安全性を確保しながら走行試験を実施することができた。カーボンニュートラルという共通の目標に向けて、これまでには考えることができなかった「企業の枠を超えた仲間づくり」が実現できた（図5）。



図5 水素ビーグルをサーキットでお披露目
Fig. 5 The unveiling of the hydrogen vehicle at a racetrack

(2) 過酷環境での水素エンジン研究

HySEにおいて水素エンジンを研究するにあたり、現状未知で容易に想像できない課題を早期に抽出して水素エンジンの基盤技術構築を加速するため、世界一過酷なモータースポーツともいわれるダカールラリーに参加した。Dakar 2024のMission 1000（期間：2024/1/3～19、開催地：サウジアラビア）は、水素エンジン車・バイオ燃料エンジン車・燃料電池車・電動車とそのハイブリッドなど、カーボンニュートラルに向けた次世代パワートレインの開発を促すため2024年から新設されたカテゴリである。11日間でおおむね1000km走行する。全11ステージの路面は砂漠や砂丘、荒野など多様で、標高は0～1700m程度、朝夕の寒暖差も大きく、さまざまな過酷環境での試験が短期間で可能となる。主催者が移動式水素ステーションを用意したことで参加が可能となった。加えて、ダカールラリーは世界で2番目に視聴者数が多いと言われており、HySEの取り組みや水素エンジンという選択肢を世界に向けてアピールするとともに、仲間作りの輪を世界に広げることも狙いとした。

我々は四輪バギー車（名称：「HySE-X1」）で参加（図6）し、エンジンはDI方式4気筒である。エンジン適合は出



図6 HySEメンバーと「HySE-X1」
Fig. 6 HySE members with the HySE-X1

力を重視した全域ストイキオメトリ（理論空燃比）付近とし、多様な路面・標高での走破性を高めることで可能な限り多くの距離を走行して、データを取得する方針とした。準備期間は4カ月と短期間であったが、前項の経験とラリー経験者の支援があり、全11ステージ922km中830kmを走行することができた。100kmを超えるステージでは燃費を重視した走行をおこない、50km程度のステージでは高負荷運転を行うなど、負荷条件を変えながら走行（図7）し、走行中に複数の異常燃焼を観測することができた。またテレビ・ネット記事・Dakar 2024参加中のライブ中継など多くのメディアで取り上げられ、世界に向けたHySEの取り組みのアピールができ、今後の仲間作りにも貢献できた。ここで得られた結果や経験は、これからの水素エンジンの技術開発に活用していく。

(3) 二輪車における水素エンジン研究

二輪車は四輪車に比べて搭載可能なスペースが限定され、車体の引き起こしや押し歩きが必要で質量の制限も大きい。また、転倒のリスクもあることから、転倒時の機器の保護など二輪車特有の課題を早期に抽出して解決することが必要である。さらに、現状では限定的な整備を充実させていくためには、技術実証を行う試験車両が必要となる。公道試験走行が可能になれば、実環境での既存車両との関係の確認や市中の水素ステーション利用時の課題の抽出など、より幅広い研究が実施可能となる。

このような背景から、水素エンジン搭載の二輪車を製作（図8）し、研究を行うことにした。エンジンはDI方式4気筒である。水素タンクは車体後方左右に合計2個搭載している。タンクの周囲はパイプ材で保護して、タンクは固定部材で固定するとともに、外側をCFRP製カバーで覆う構造とすることで、転倒や衝突時でも水素タンクに第三者が直接接触しない構造とした。この構造でFEM解析を実施して、衝突時の水素タンクの挙動を確認した。タンク容量は圧縮水素充填技術基準JPEC-S0003に基づいて設置さ



図7 砂地を疾走する「HySE-X1」
Fig. 7 HySE-X1 racing across sandy terrain



図8 水素二輪車
Fig.8 Hydrogen-powered motorcycle

れた市中の水素ステーションで補給できる最小サイズから、50L（2kg）とした。ただし、二輪車のタンクサイズは国連協定規則UNR146で23Lまでしか規定されていないため、本試験車両を活用して車両区分に応じた拡張を関係機関に働きかけていく。

排出ガスは、希薄燃焼方式を採用して、NOx排出量を低減することができた。

水素エンジンの可能性を広く伝えていくため、2024年7月20、21日に鈴鹿サーキットで開催された8時間耐久レース会場で公開走行を実施した。さらにフランスにおいて公開走行を実施し、世界に向けて水素エンジンの可能性を示すことができた。

あ と が き

水素エンジンビークルを普及させるためには、技術的な面だけでなく関連する法律や供給インフラの整備が必要である。また、自動車工業会で「マルチパスウェイ」を提唱しており、水素エンジンを広く社会に知って頂くため、広報活動が重要である。試験用水素ビークルは、サーキットでのイベントや東京都主催のゼロエミッションビークルの展示会で公開走行を実施して都知事に試乗していただくなど、社会的な認知度向上のための活動にも活用した。

水素エンジンの研究⁷⁾⁸⁾は古くから行われているが、近年のストレージやインジェクタなどの機器の急速な発達とカーボンニュートラルに対する世界の関心の高まりから、その実用化が期待されている。我々は特に小型モビリティに着目して、その実用化を実現するため、研究開発のみならず、実証・仲間作り・世論作り・法整備などさまざまな角度から取り組みをすすめていく。

参 考 文 献

- 1) 近藤, 飯尾, 昼間, 古濱: “水素エンジンの異常燃焼に関する研究”, 日本機械学会論文集 (B編), 63巻, 610号 (1997-6), 論文No.96-1481, pp2209-2214 (1997)
- 2) 二宮, 興石, 昼間, 染谷: “高圧水素噴射エンジンのNOx低減に関する研究”, 日本機械学会通常総会講演会講演論文集, 70th, Pt.2, pp731-733 (1993)
- 3) H.Watanabe, S.Ichi, M.Saito, K.Arima, T.Ishibashi : Development of a Supercharged Engine for Motorcycle with a Centrifugal Supercharger, Small Engine Technology Conference, No.2015-32-0729 (2015)
- 4) 渡部, 市, 成岡, 齋藤: “モーターサイクル用過給エンジンの開発”, 川崎重工技報, No.180, pp.12-15 (2019)
- 5) 市, 松田, 久野, 桜井, 齋藤: “二輪車用過給ガソリンエンジンのための筒内燃料直接噴射技術の開発”, 自動車技術会論文集, Vol.53, No.6, pp1186-1191 (2022)
- 6) 宮川, 宮元, 丹野, 塚本, 大村, 高橋, 中田: “噴流MBD活用による水素直噴エンジン混合気形成の改善” トヨタ・テクニカル・レビュー, Vol.69, No.1, pp.39-47 (2023)
- 7) 古濱: “未来をひらく水素自動車”, 東京電機大学出版局 (1992)
- 8) 石山, 塩路: “高性能水素エンジンの開発” エネルギー・資源, Vol.21, No.1, pp.62-67 (2000)



市 聡 顕



渡 部 寛 之



宇 積 陽 一



和 泉 恭 平



有 馬 一 樹



丸 橋 健 人



久 野 篤 志



桜 井 洋 太



中 尾 祥 典