

終 了 報 告 書

S I P (戦略的イノベーション創造プログラム)

課題名「エネルギーキャリア」

研究開発テーマ名「水素エンジン技術開発」

研究題目「オープンサイクル用エンジン試験機において、

高圧直接噴射水素噴流の過濃混合気塊点火燃焼による熱効率向上研究開発」

研究開発期間：平成26年7月1日～平成30年3月31日

研究担当者：三原 雄司

所属研究機関：東京都市大学

目次

1. 本研究の目的	4
2. 研究開発目標とマイルストーン	6
3. 研究開発実施内容	8
3-1. 過濃混合気塊の点火・燃焼方式の噴流形状の最適化による熱効率向上と NO _x 生成軽減	
3-1-1. 研究開発に用いた過濃混合気塊の点火・燃焼方式(PCC 燃焼)の特性	
3-1-2. 研究開発に用いた高圧水素噴射弁の特性	
3-1-3. 噴流形状の最適化等による熱効率向上と NO _x 生成軽減	
3-2. オープンサイクル用エンジン試験機用高圧水素噴射弁の耐久性と信頼性の向上	
3-3. 研究開発を支援する基盤技術の開発と適用	
3-3-1. シャドウグラフ法による火炎と噴流の可視化	
3-3-2. SIBS による点火時の点火プラグ近傍水素濃度(空気過剰率 λ)の定量計測 (岡山大学と連携)	
3-3-3. CFD 数値計算による水素噴流の詳細解析(早稲田大学と連携)	
3-3-4. 3線式薄膜流束センサーによる水素エンジンの熱流束の計測	
3-4. まとめ	
3-5. 今後の課題	
4. 外部発表実績	30
5. 特許出願実績	31
6. 参考文献	32

図表一覧

図 1 水素エンジン技術開発の目標
図 2 直接噴射式水素エンジン(オープンサイクル)のシステム構成
図 3 年度ごとの目標値とタイムスケジュール
図 4 PCC 燃焼(過濃混合気塊点火燃焼)の噴流と点火・燃焼のイメージと特徴
図 5 噴孔形状による PCC 燃焼の火炎が燃焼室壁面に衝突する様子の差異(高速シャドウグラフ写真による可視化)
図 6 予混合気燃焼の未燃焼水素発生による熱効率の低下と噴射時期遅角による改善の効果
図 7 高圧水素噴射弁の仕様と形状
図 8 実験に用いたオープンサイクル小型エンジン用高圧水素噴射弁の噴射特性
図 9 使用した単噴孔ノズルと他噴孔ノズルおよび噴流の方向
図 10 熱効率を優先させる噴射時期による熱効率の向上効果
図 11 噴孔形状による熱効率向上効果と多噴孔ノズルの冷却損失低減効果
図 12 噴流形状変化による熱効率向上効果と関連因子の相関
図 13 試作した高圧噴射弁用噴孔(噴孔数 6×噴孔径 $\Phi 0.6\text{mm}$)

- 図 14 燃焼室形状と噴流角度、噴孔多重列化
- 図 15 噴射時期と λ に対する熱効率向上と NO_x 生成の感度(噴流角度 25°、噴孔 5×Φ1.0mm の場合)
- 図 16 噴流仕様の制御による目標値達成の状況
- 図 17 噴射角度 35° による熱効率向上と NO_x 生成低減の効果
- 図 18 熱効率向上と NO_x 生成低減に効果の高かった因子の効果と進捗の履歴
- 図 19 噴射角度による噴流と燃焼室壁面の相対関係
- 図 20 多噴孔噴流のプラトー化イメージ
- 図 21 混合気の希薄化による出力の低下(仕様番号は図 16 に対応)
- 図 22 噴射角度が熱効率、NO_x 生成、冷却損失に与える影響
- 図 23 過給による出力向上、NO_x 低減および熱効率の向上
- 図 24 オープンサイクル用高圧噴射弁 O-リング溝とバックアップリングの形状変更
- 図 25 テーパー付バックアップリングにより発生が抑制された O-リングの噛み込み摩損
- 図 26 DLC加工法変更による弁シート部の耐摩耗性向上効果 (SEM/EDX 写真による表面原子分布の画像)
- 図 27 レーザーシャドウ法で可視化した 5 噴孔ノズル噴流の噴射開始以降の経時変化
- 図 28 噴射ガス窒素と水素の噴流の可視化画像の差異
- 図 29 SIBS の原理図
- 図 30 SIBS で計測した点火開始時期 SOI 遅角による点火時点火プラグ近傍時 λ の変化
- 図 31 PCC 燃焼の点火時の燃料分布のイメージ図 CACS(Centroidal Axially Charge Stratification)
- 図 32 噴流の数値計算結果と可視化実験の比較
- 図 33 CFD 数値計算による点火位置における水素濃度の経時変化
- 図 34 本学で試作した高応答熱流束センサーの構成と構造
- 図 35 燃焼室の熱流束センサー取り付け位置
- 図 36 燃焼室内における噴流飛翔側と反飛翔側の熱流束の差異
- 図 37 噴流角度違いによる噴流飛翔側熱流束の差異
- 表 1 平成 28 年度以降のオープンサイクル熱効率と NO_x の目標値
- 表 2 平成 28 年度以降に準備または評価した噴孔の仕様
- 表 3 耐久性を向上させるために取り組んでいる課題

1. 本研究の目的

(1) 高効率な発電、船舶用の水素エンジンを実現するために開発する水素エンジンシステム、高圧水素インジェクタ、極低温液体水素高圧ポンプ技術を現在製品化されている天然ガス燃料用の7MW級の発電用ガスエンジンに適用することにより、水素を燃料とする発電用ガスエンジンとしての技術実証を実施し製品化につなげて行く。また、当面の目標として液体水素運搬船におけるボイルオフガスを燃料として利用できる船舶推進用エンジンとして製品化を図ることも目的とする。

(2) 水素エンジンを社会導入するまでに克服すべき課題は、安全、安心なガスエンジンとして成立させ、天然ガスがCO2フリーの水素に置き換わることである。本研究開発の目標は、従前の天然ガスエンジンと同等の熱効率と環境調和性の同時達成を目指すことであり、図1および図2に示すように、高圧の水素をエンジン内へ直接噴射し、水素を燃焼さ

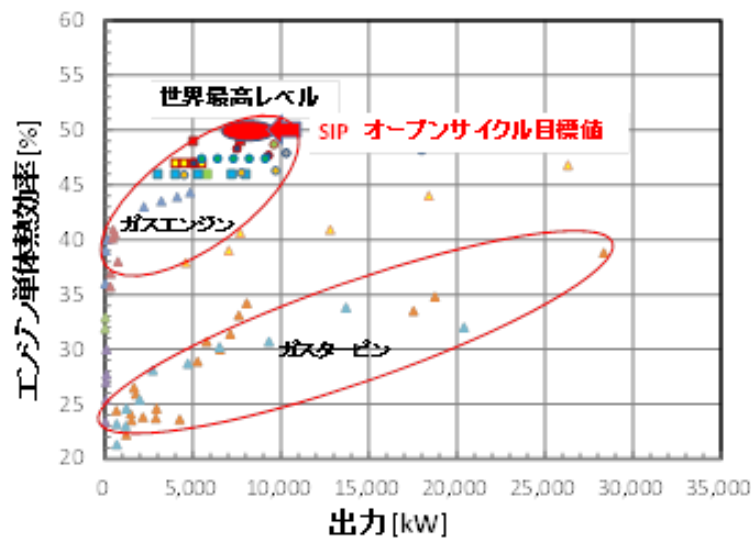


図1 水素エンジン技術開発の目標

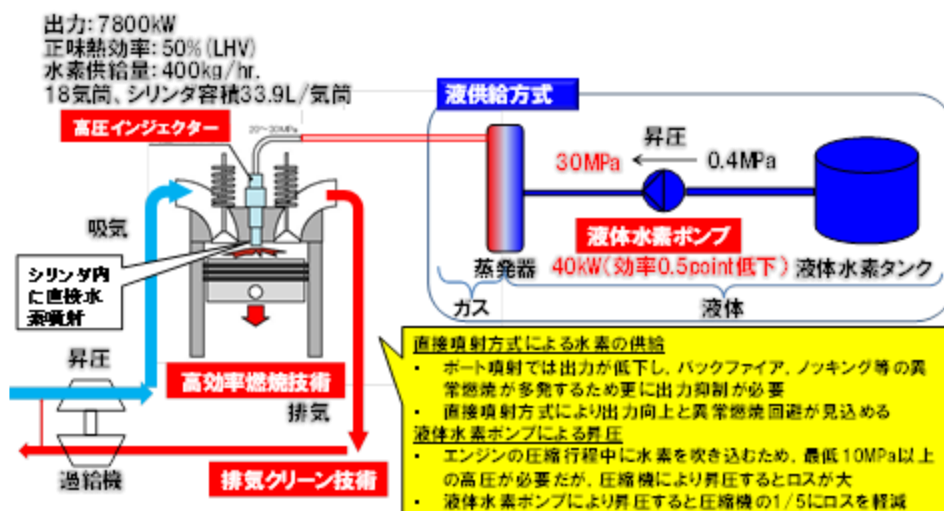


図2 直接噴射式水素エンジン（オープンサイクル）のシステム構成

せる水素エンジンにおいて、新しい水素噴流制御技術、点火方式、および排気クリーン化技術により同図に示す目標値である高い熱効率と低窒素酸化物 NOx の同時達成を目指し、本研究題目グループでは次の研究課題を実施する。

a. オープンサイクル用エンジン試験機において、熱効率の向上と窒素酸化物 NOx 生成低減を両立させる技術の研究開発を行う。熱効率の向上は、平成 27 年度まで開発を進めた空気の代わりにアルゴンと酸素の混合ガスを用いるクローズドサイクル用に開発した過濃混合気でコンパクトかつ燃焼室壁面に密着しない形状の混合気塊を点火燃焼させる燃焼方式を用い、形成する噴流形状と噴流に取り込む空気の一層の最適化を行い、水素燃焼エンジンの解決すべき課題の一つである冷却損失を軽減させ熱効率を向上させ、さらに窒素酸化物 NOx の生成低減も追及する。この手段として、これまでの本学独自で試験機用に開発されている高圧噴射弁を用いて、噴孔形状、噴孔数、噴射方向などの要求値を明らかにする。なを、上記課題を実現するための基本的な燃焼方式は PCC 燃焼 (Plume Ignition and Combustion Concept; 過濃混合気塊点火燃焼コンセプト) として開発済みであり、目標達成のため下記に示す最適化を行う。

○熱効率向上と NOx 生成低減を同時に実現するために噴射時期の最適化 (噴射終了から点火までの混合気形成時間の最適化)

○燃焼室壁面への密着程度の低い噴流形状の最適化 (前出)

また、オープンサイクル用エンジン試験機に用いる高圧噴射弁も既に開発済みであり、噴孔の諸元を変更追加工するだけで、実験遂行が可能であるなど即戦力として使用できる状態にある。また、燃焼室形状、圧縮比、バルブタイミングおよびガス流動など機関主要諸元の見直しを、目標値を達成するための項目として追加し、必要に応じこれを実施する。

窒素酸化物 NOx 生成の低減は、これまでに実績のある希薄混合気 (高空気過剰率 λ) や排気再循環 EGR などの混合気の希釈化技術により実現することを狙うが、希釈化による機関の出力低下を補うために、給気の加圧 (すなわち過給) を行う。また、これまでの知見である給気の希釈化による冷却損失の低減に起因する熱効率の向上効果にも期待している。開発目標値は、チーム目標値である正味熱効率 50% (7 MW 級エンジンにおける単体の正味熱効率)、NOx 排出濃度 200 ppm ($O_2=0\%$ 換算) を本学で所有している小型試験機関で達成する。

b. オープンサイクル用エンジン試験機に用いる高圧水素噴射弁の性能向上 (サイクル毎の噴射量の安定化) と耐久性の向上開発を、各部位の DLC 加工法の適用最適化などトライボロジー的アプローチにより行い、オープンサイクル用エンジン試験機による目標値達成と研究効率の向上を実現させる。また、これらの結果を高圧水素噴射弁開発チームに先行情報として提供し、研究テーマ内の研究効率化を図る。

c. 燃焼室内の伝ば火炎と噴流の形状を可視化する技術を開発し、噴流や伝ば火炎の形状が冷却損失を軽減させるに相応しい形状であるか否かを確認・検証できるようにし、岡山大学が開発を担当する SIBS 法による火花点火時の水素-空気の混合比の定量的計測法と、噴流形状最適化の一環として、研究に用いる噴流の過給に対応する雰囲気空気の高圧化や

噴流方向の最適化による水素噴流の形状や水素の濃度の変化の定量的影響を観るために、水素噴流の数値流体力学 CFD によるシミュレーションを早稲田大学と連携して実施し、研究遂行の基幹基盤技術とする。また新たに、冷却損失を定量的に計測する熱流束センサーの開発と水素エンジンへの適用も行う。

2. 研究開発目標とマイルストーン

- a. オープンサイクル用エンジン試験機による正味熱効率目標値を、排気量の差を補正した後チーム目標値である正味熱効率目標値 50%（出力 7 MW 級での目標値）とする。NO_x 排出目標値は、チーム目標値の 200 ppm（O₂=0%換算）とする。
- b. 噴射弁を、研究開発期間内で十分な耐久性と性能安定性で研究開発ができるように、耐久性の目標値を 500 時間に設定するとともに、耐久性と性能安定性向上の技術をオープンサイクル用エンジンに用いる高圧水素噴射弁開発チームに移管する。
- c. 伝ば火炎と噴流の可視化法、火花点火時の水素-空気混合比を定量的に計測する SIBS 法（火花誘起ブレイクダウン分光法）、岡山大学が開発分担）、および水素噴流の数値流体力学 CFD 計算（早稲田大学が開発と適用を分担）により、燃焼室内に噴射した水素噴流の形状および燃焼室壁面との相対位置、および水素-空気混合気の混合比の値と、噴射弁の噴孔仕様（数、径、噴射方向など）の関係が、推定できるような解析力を涵養する。また、燃焼室内の熱流束を計測し、冷却損失の定量的な評価ができるような研究開発を行う。

年度ごとのマイルストーンを次に示す。

・ H 2 6 年度 :

- a. オープンサイクル用エンジン試験機において、オープンサイクルエンジンにおける熱効率向上技術課題を抽出する。

・ H 2 7 年度 :

- a. オープンサイクル用エンジン試験機において、水素噴流の過濃混合気塊への点火・燃焼、かつ燃焼室壁面への密着の低い混合気塊を形成する噴射弁形状の最適化等により熱効率を向上させる。

b. 水素噴流の可視化技術確立（窒素）

- c. 数値計算による水素噴流の貫徹距離、広がり、濃度分布などの定量化（早稲田大学と連携）

・ H 2 8 年度 :

- a. オープンサイクル用エンジン試験機において、水素噴流燃焼の要求値と制御法を明らかにし、熱効率向上を実現する。さらに、圧縮比やバルブタイミングなど機関主要諸元の最適化による熱効率向上効果を検討する。また、希薄空燃比（高λ）や EGR と過給の組み合わせにより NO_x 生成低減のポテンシャルを評価する。目標値は正味熱効率 50%（7 MW 級機関単体換算）とする。

- b. オープンサイクル用エンジン試験機用高圧水素噴射弁の耐久性と信頼性を向上させる（耐久性目標値 200 時間）。

- c. 水素噴流の可視化技術確立（水素）
- d. 数値計算手法の水素噴流の最適化への適用（早稲田大学と連携）
- ・ H 2 9 年度：
 - a. オープンサイクル用エンジン試験機において、希薄空燃比（高λ）や EGR により低下した出力を過給により回復させ、その際に生じる可能性のある NOx 生成の増加を一層の水素噴流の制御、圧縮比やバルブタイミングなどの機関主要諸元の最適化を必要に応じ組み合わせ、希薄空燃比（高λ）や EGR と過給の組み合わせにより出力低下なしで熱効率 5 0 %（7 MW 級機関単体換算）と NOx 生成低減の目標値 4 0 0 ppm（O₂=0%換算）を達成する。
 - b. オープンサイクル用エンジン試験機用高圧水素噴射弁の耐久性と信頼性を向上させる（耐久性目標値 5 0 0 時間）
 - c. 火炎・噴流の可視化手法、SIBS 法による点火時の混合気濃度計測法、噴流の CFD 数値計算法の適用により、得られた高熱効率と NOx 生成低減仕様の、混合気の状態が理解できるようにする。
- ・ H 3 0 年度：
 - a. オープンサイクル用エンジン試験機において、水素噴流の制御と必要に応じ圧縮比やバルブタイミングなど機関主要諸元の最適化、さらに希薄空燃比（高λ）や EGR と過給の組み合わせにより、正味熱効率目標値 5 0 %（7 MW 級機関単体換算）と NOx





技術目標値	H26	H27	H28	H29	H30
		* 7MW級エンジン単体の正味熱効率 (LHV) ** O ₂ =0%換算			
サイクル理論・システム検討 	熱効率* NOx**	45% ▼	50% ▼	50% ▼ 400ppm	50% ▼ 200ppm
オープンサイクルエンジン 	オープンサイクルエンジンにおける技術課題を導出（東京都市大）	水素当量比センシング（火花放電ブレイクダウン分光法（Spark Induced Breakdown Spectroscopy, SIBS）の要素技術開発（岡山大）			
		水素噴流の過濃混合気塊への点火・燃焼室壁面に付着しない混合気塊の形成等（東京都市大、岡山大）			
		水素噴流燃焼制御（可視化、シミュレーション）（東京都市大、岡山大、産総研、早稲田大）			
		冷却損失低減	空気導入改善	オープンサイクルモデル試験実証	
		サイクルシミュレーション検討 エンジンシステム検証：作動ガス組成、圧縮比等の最適化により高効率化および低NOx化を、数値シミュレーションやモデル試験により検証			
高圧水素噴射弁 		単体試験装置により実現	試設計、試作、課題抽出・解決、実装（噴射弁）、噴射弁・ポンプの効率化		
液体水素昇圧ポンプ 					

図3 年度ごとの目標値とタイムスケジュール

生成低減目標値である 200 ppm (O₂=0%換算) を達成する。

b. 火炎・噴流の可視化手法、SIBS 法による点火時の混合気濃度計測法、噴流の CFD 数値計算法、熱流束計測法の適用により、得られた高熱効率と NO_x 生成低減仕様の、混合気の状態と冷却損失の特徴が理解できるようにする。

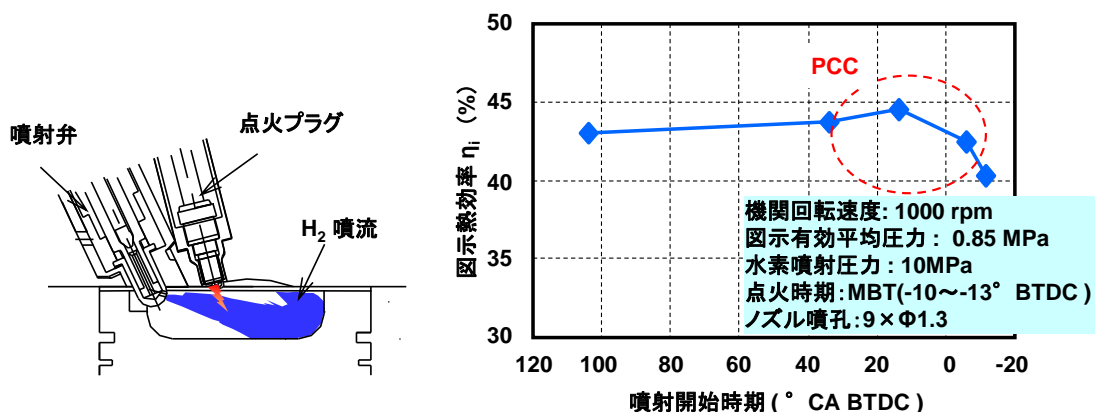
以上のタイムスケジュールと年度ごとの目標値を、図 3 に示す。

3. 研究開発実施内容

3-1. 過濃混合気塊の点火・燃焼方式の噴流形状の最適化による熱効率向上と NO_x 生成軽減

3-1-1. 研究開発に用いた過濃混合気塊の点火・燃焼方式(PCC 燃焼)の特性

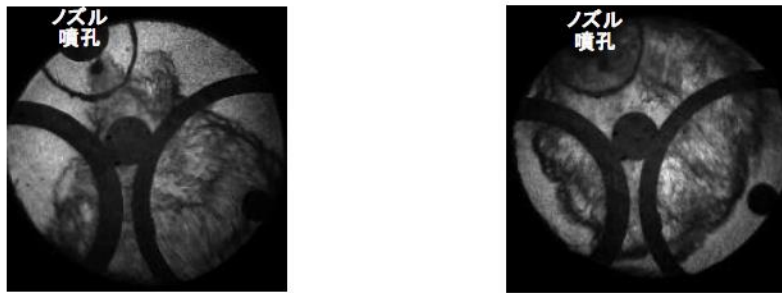
これまでの研究開発により成立性が確認されている高圧で噴射される水素噴流を噴射期間中または噴射終了近傍で火花点火し燃焼させる「過濃混合気塊の点火燃焼 (Plume Ignition and Combustion Concept; PCC燃焼)」は、図 4 (a)示すように噴射した噴流が燃焼室に分散する前の塊の状態での点火燃焼させることによって NO_x の生成を抑制する燃焼方式である⁽¹⁾。過濃混合気にも拘わらず燃焼速度の高い水素の燃焼特性を活用することと、噴射時期とノズル噴孔の形状を最適化し噴流の形状などを制御することによって、噴射した噴流が燃焼室壁面に到達する以前に火炎伝ばを終わらせるコンパクトな伝ば火炎により、壁面近傍で燃焼する混合気の割合を軽減させ冷却損失を低減させることができるため熱効率の向上ができ、図 4 (b)に示すように大幅に NO_x 生成を抑制したにもかかわらず熱効率の低下を最少にすることができる燃焼方式である。図 5 に、噴孔形状によって火炎が燃焼壁面に衝突する様子が大きく異なる高速シュリーレン写真を示すが、このような火炎の壁面への衝突を制御させることによって、冷却損失を軽減させ熱効率を改善することが可能である。



(a) PCC 燃焼における噴射した水素噴流の位置と点火のイメージ

(b) PCC 燃焼の熱効率改善を示す噴射時期の特徴

図 4 PCC 燃焼 (過濃混合気塊点火燃焼) の噴流と点火・燃焼のイメージと特徴



(a) 単噴孔による壁面に衝突する伝ば火炎 (冷却損失が高い) (b) 多噴孔により壁面衝突の少ない伝ば火炎 (冷却損失が低い)

図5 噴孔形状によるPCC燃焼の火炎が燃焼出壁面に衝突する様子の差異 (高速シャドグラフ写真による可視化)

本プロジェクトでは、作動気体にアルゴンと酸素の混合気を用いたクローズドサイクル燃焼（平成26年度と27年度の燃焼方式、以降第一期と略呼）では、NO_x生成を考慮する必要がないため、熱効率向上に特化させた噴流の最適化を目標にして研究開発を行った。作動気体をアルゴンから空気に変更した平成28年度と29年度（第二期と略呼）では、NO_x生成低減も必要であるため、PCC燃焼方式をNO_x生成の低い希薄混合気の燃焼に適用した。希薄混合気にPCC燃焼を適用し噴流を混合気塊の状態では燃焼させると、図6に示すように均質な混合気の燃焼に比べて未燃焼水素の排出が大幅に低減でき、その結果均質混合気の燃焼よりさらに熱効率が向上できることが明らかになり^②、第二期では希薄混合域における熱効率の向上と、混合気塊の燃焼により増加するNO_xの生成を軽減させることで目標値を達成させる研究開発を進めた。

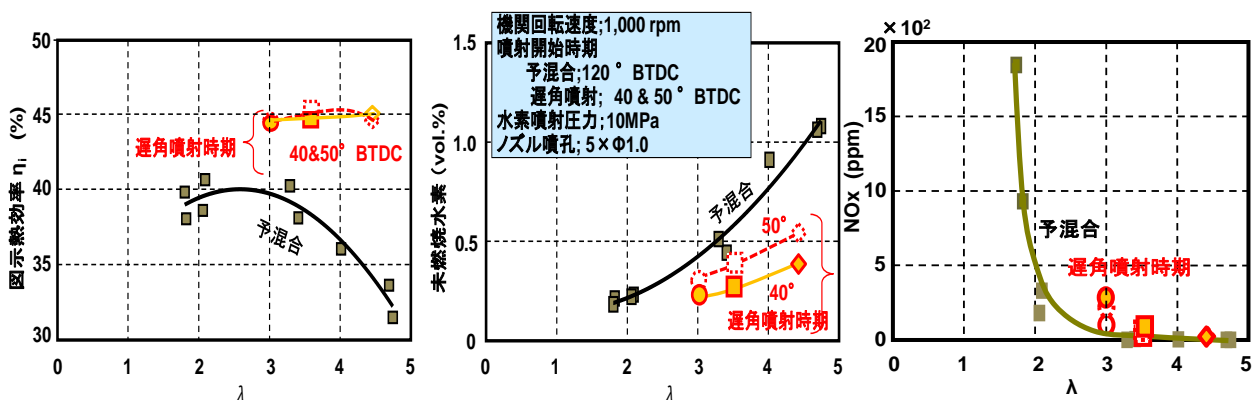


図6 予混合気燃焼の未燃焼水素発生による熱効率の低下と噴射時期遅角による改善の効果

3-1-2. 研究開発に用いた高压水素噴射弁の特性

PCC燃焼を成立させている主要因子の一つが、短時間で高压水素燃料を噴射させる高速作動高压水素噴射弁であり、本プロジェクトでは本学の小型エンジン用に開発した噴射弁

項目		仕様
噴射性能	最大噴射量	400mL(N)/30° CA@3000rpm
	最少噴射量	35 mL(N)/min.
	最大噴射圧力	20 MPa
	初期弁シート 水素漏れ量	<100mL(N)/min.
	噴射回数	複数回数噴射/行程
噴射安定性	サイクル毎変動	<±10%
	経時変化	

外形形状:
日野J05Dエンジン用



図7 高圧水素噴射弁の仕様と形状

を用いた^③。この噴射弁の外観とノズルキャップの形状および主要な仕様を図7に示す。この噴射弁は本学独自開発であり、噴射弁外部に設置したコモンレール油圧により駆動噴射弁内のニードルを作動させ筒内に直接高圧水素を噴射させる高圧水素噴射弁であり、噴孔形状はホールノズルである。コモンレールの油圧駆動によりニードルを作動させることで、高速で駆動することができ20 MPaまでの高圧噴射と多段噴射が可能である。また、同図に示すように噴射弁の先端に取り付けたノズルキャップを変更して噴流の形状や噴射方向の制御を行った。図8に、この噴射弁の噴射特性を示す。コモンレール油圧駆動により、同図に示すピエゾ作動噴射弁（カナダ West Port 社開発噴射弁）より高速作動が実現できている。高圧水素は、高圧水素ポンベから供給したが、本プロジェクトのチーム目標は、液体水素を圧縮して高圧水素として用いることである（図2参照）。

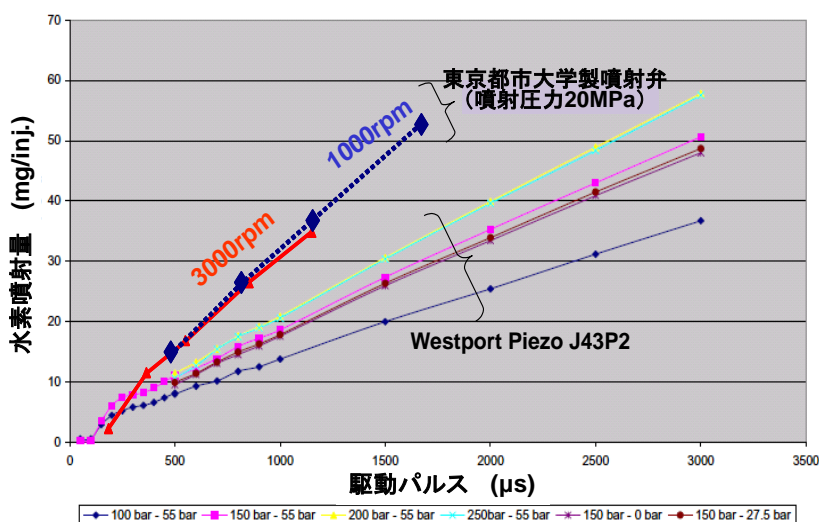


図8 実験に用いたオープンサイクル小型エンジン用高圧水素噴射弁の噴射特性

3-1-3. 噴流形状の最適化等による熱効率向上と NOx 生成軽減

(1) クローズドサイクルを前提にした熱効率向上に特化した研究開発

平成26年度と27年度に実施した第一期の研究開発では、作動気体として空気の代わりにアルゴンと酸素を用いるクローズドサイクルにより熱効率を向上させる研究を行った。アルゴンのクローズドサイクルでは、窒素酸化物 NO_x の生成は無くまたアルゴンの熱力学的な特性から熱効率の大幅な向上が期待できるため、チームの熱効率目標値を60%（7 MW発電クラス 33.9 L/気筒 機関の低位発熱量ベースの正味熱効率）と設定した。このうち、噴流の改良や冷却損失低減など燃焼改善による平成27年度の割り当てを 33.9 L/気筒 機関正味熱効率50%（本学の小型試験機関の図示熱効率換算で45%）と設定した。

噴流形状は噴流が燃焼室壁面に到達する以前に火炎伝ばを終わらせるコンパクトな伝ば火炎形状により、かつ壁面近傍の燃焼を軽減させ冷却損失を低減させるため単噴孔ノズル6種、多噴孔ノズル1種合計7種の評価を行った(図9)。

噴射した燃料の過濃混合気塊に点火・燃焼させる燃焼方式で、混合気塊内の水素濃度と

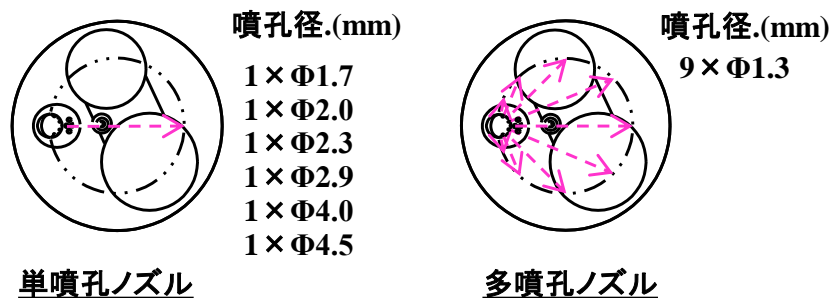


図9 使用した単噴孔ノズルと他噴孔ノズルおよび噴流の方向

燃焼室内空間配置の制御により、水素エンジンの課題である高い冷却損失と燃料の散逸を軽減させ、大幅な熱効率の向上を実現させる研究において、噴射した過濃混合気塊の点火までの時間を最適化させることによって下記のような大幅な熱効率の向上を実現することができた。

- いずれの噴孔仕様においても、噴射開始時期が上死点前 30°~50°BTDC で、供試機関の図示熱効率が最大となる（図10破線円部）。これは、噴射開始から点火までの時間を適切に取ることによって適切な量の空気が噴流に取り込まれ空気との混合が促進され空燃比が最適化されたためである。これ以上混合時間を長くすると、燃料が燃焼室に拡散し過ぎ壁面近傍における燃焼の程度が増加すると考えられ、その弊害である冷却損失が増加し、熱効率は低下する傾向を示す。
- この噴射開始時期により、燃料塊を分散させ噴射される9噴孔で図示熱効率が3ポイント上昇し46.2%が達成できた（図11下図破線円部）。図10下図に示すようにこの実験では NO_x が増加しているが、本プロジェクトでは、空気すなわち窒素を使用しないでその代わりにアルゴンを用いるクローズドサイクルでエンジンを運転することを想定しているため、NO_x の生成は無いのでこの最高熱効率の噴射時期を選定する

ことが可能である。

c. 本供試機関(行程容積 1.05 L)の図示熱効率は、正味熱効率 40.7% (図 11 下

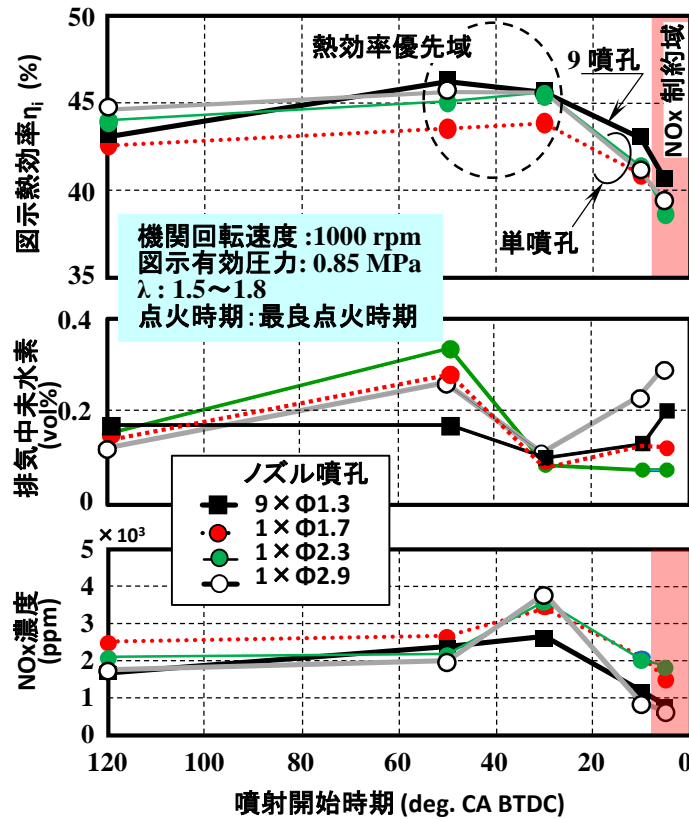


図 10 熱効率を優先させる噴射時期による熱効率の向上効果

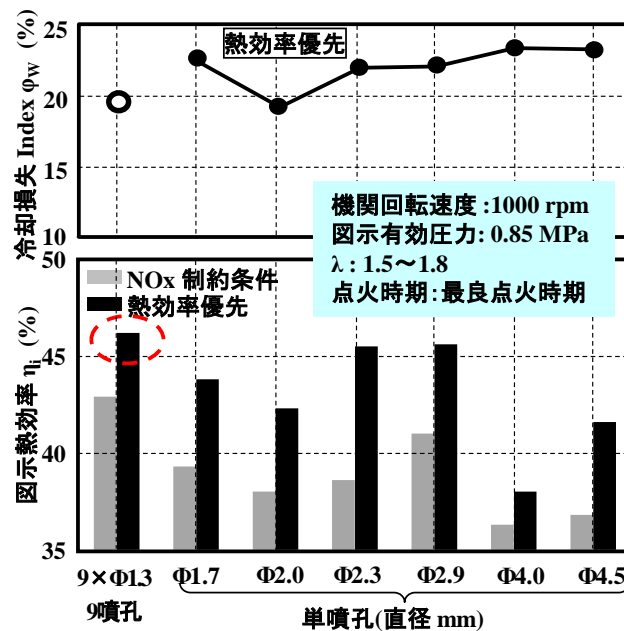


図 11 噴孔形状による熱効率向上効果と多噴孔ノズルの冷却損失低減効果

図の図示熱効率46.2%と機械効率88%から算出)に対応し、本年度の目標値40%を超える値である。

d. また、同図に示すように混合気塊を分散させた多噴孔の熱効率が最も高くかつ冷却損失が低い(図11上図)。

(2) 噴流形状最適化による冷却損失低減の評価

図9に示した全7噴孔の熱効率優先噴射開始時期 SIO における熱効率の値と、冷却損失を簡易的に表す冷却損失 index、燃焼室に燃焼せずに残った燃料量を簡易的に表す未燃焼水素 index および排気中水素濃度の関係を図12に示す。冷却損失 index および未燃焼水素 index は、いずれも熱発生率から簡易的に算出した値である。この図から、熱効率が最大となる SOI における熱効率の値は、冷却損失と主熱発生終了時の未燃焼水素量の両者と強い相関があり、高い熱効率を示した9噴孔やΦ2.9mm、2.3mm、1.7mm噴孔ノズルは、いずれもこれらの値が低い値となり、熱効率が高い要因であることを示している。これとは逆に、噴孔の大径化で最大熱効率は低下し、冷却損失と未燃焼水素が増加している。この原因は噴流の燃焼室上壁面との干渉が増加することにより冷却損失が増加したためであると考えている。さらに、大径化により噴流への空気導入が減少し未燃焼水素が増加することも示唆されており、これが熱効率低下のもう一つの原因である。

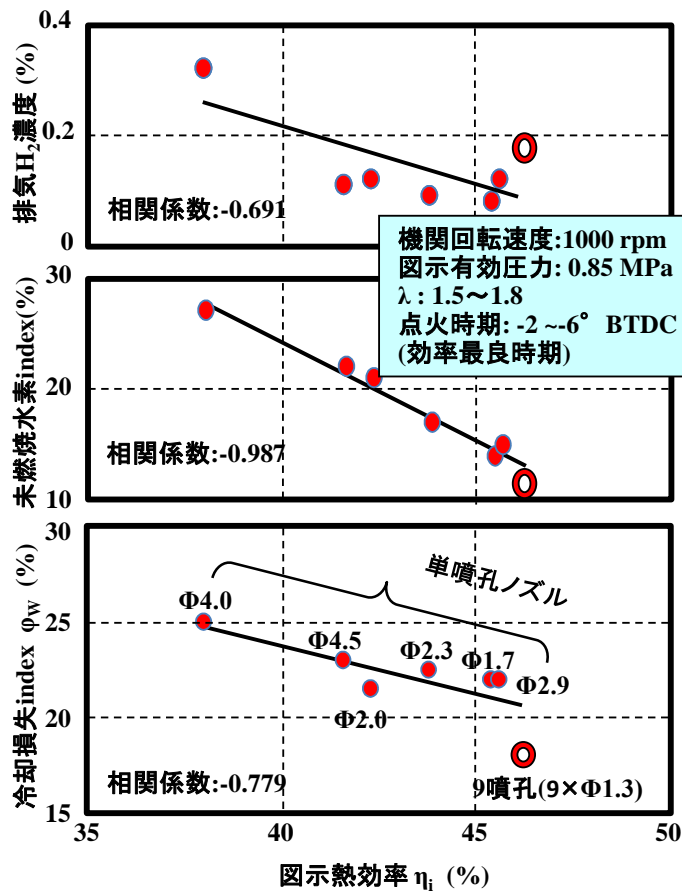


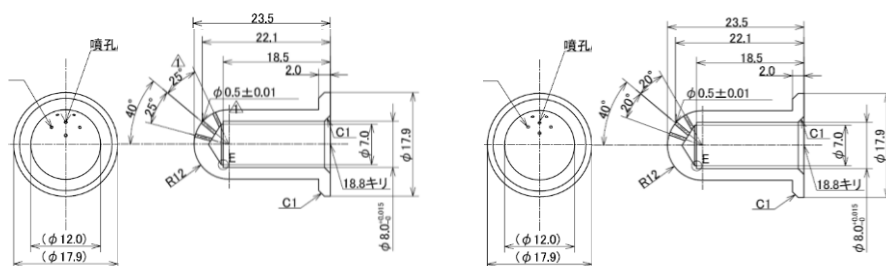
図12 噴流形状変化による熱効率向上効果と関連因子の相関

このことから、噴孔仕様（径と数）を選定することによって、燃焼室壁面近傍の燃焼が軽減され冷却損失熱量が軽減したと、噴流への空気を取り込みが促進され燃焼効率が向上したことを示しており、これまで仮説的に述べてきた両因子の効果が図12により確認されたと考えており、今後も未燃焼水素 index と冷却損失 index を熱効率向上の効果を表すパラメーターとして活用していく。

一方、排気中で計測した未燃焼水素は、熱効率向上とは必ずしも高い相関を示さなかった。このことは、主熱発生終了後有効な仕事に活用されない酸化課程を経て排気管中に排出され未燃焼水素として計測されることを示唆しており、図12上図に示すように $\Phi 4.0$ 噴孔など噴孔径の過大化により生じる過濃未燃焼燃料塊の存在など噴流の局所的な特性を反映している可能性が高い。同様に、9噴孔の場合も平均値より高い排気中未燃焼水素濃度を示しており、これはこれまでの可視化写真で観察されている両最端の噴孔から噴出される噴流の不活性さに起因していると考えており、今後はこの部分の噴流改善が必要であることを示している。

(3) 燃料の分散を高めた噴孔ノズルの設計と試作

これまでに得られた知見を反映させ、燃焼室壁面に密着しないコンパクトな形状で、かつ空気の導入を促進させるため燃焼室に対して分散を高め混合気塊を形成させ、水素燃焼エンジンの解決すべき課題である冷却損失を軽減させ熱効率を向上させることを狙い噴孔数と径・噴流分散角を検討し、図13に示す噴射弁キャップの噴孔を設計し試作をした。また、今年度購入したホルビガー社の噴射弁は、現在使用している本学製オープンサイク



(a) 25° 分散型中実噴流用噴孔

(b) 20° 分散型中実噴流用噴孔

図13 試作した高圧噴射弁用噴孔（噴孔数6×噴孔径 $\Phi 0.6\text{mm}$ ）

ル用高圧水素噴射弁に比べて噴射期間が大幅に長い（大略3倍のオーダー）。この噴射弁のノズル噴孔も上記試作噴孔と同様に燃焼室空間に対して分散を高めた形状に設計してある。

(4) 作動気体を空気にしたオープンサイクルによる熱効率と NO_x の目標値の達成状況

平成28年度以降の第二期では、それまで前提としていた作動気体としてアルゴンと酸素を用いるクローズドサイクルから、通常空気を用いるオープンシステムで熱効率の目

標値を達成する研究開発に変更を行った。作動気体に空気を用いることによって目標値にも窒素酸化物 NOx を加え、下表に示すような新たな目標値とした。すなわち、定置式発電

表1 平成28年度以降のオープンサイクル熱効率と NOx の目標値

項目	目 標 値			備 考
	平成28年度	平成28年度	平成28年度	
正味 熱効率	50%	50%	50%	排気量33.9L/気筒換算、 低位発熱量
NOx	—	400 ppm	200 ppm	排気内O2濃度0%補正、 後処理装置使用無し

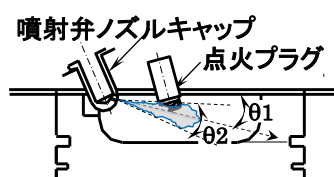
用に適用されている窒素酸化物 NOx 排出を、大気汚染防止法による規制値より更に厳しい大都市圏自治体条例の規制値を、後処理装置を用いないで達成する目標値である。熱効率は、現在のガス発電エンジンを凌駕する値ではあるが、厳しい NOx の規制を同時に満たす必要があるため、50%に下げた。

(a) 評価した噴孔の仕様

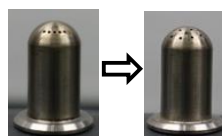
平成28年度から行った研究内容と目標値の変更に従い、オープンサイクルにより熱効率向上と NOx 生成抑制を両立させるため、水素噴流の燃焼室内分散を極力抑えながら噴流へ

表2 平成28年度以降に準備または評価した噴孔の仕様

因 子		水 準			狙 い
1	2	3	4	5	
1	噴流角度(図14a、 θ_1)($^{\circ}$)	15	25	35	燃焼場壁面離し→熱効率向上
2	噴孔数	3	5	7	燃料分散→NOx低減
3	噴孔列(図14b)	1列	3列	2列	燃料分散→NOx低減
4	噴孔径(mm)	$\Phi 0.6$	$\Phi 1.0$	$\Phi 0.4$	噴流空気導入→NOx低減
5	噴流扇角度($^{\circ}$)	90	60	30	燃料分散→NOx低減
6	噴流上下広がり角(図14a、 θ_2)($^{\circ}$)	± 15	± 25		燃焼場壁面離し→熱効率向上
7	点火位置(壁面からの距離mm)	7.5	9.5	10.5	燃焼場壁面離し→熱効率向上
クローズドサイクル(H27年度)からの変更仕様		<ul style="list-style-type: none"> ・噴孔仕様：単噴孔→$5 \times \Phi 1.0\text{mm}$、噴流扇角度$90^{\circ}$ ・点火位置(壁面からの距離)：3.5mm→7.5mm 			



(a) 噴流角度



(b) 噴孔列三重列化

：評価済水準・因子

図14 燃焼室形状と噴流角度、噴孔多重列化

の空気導入を増加させることを狙って、表 2 に示す仕様の噴孔の評価を行った。

(b) 噴射開始時期と λ に対する熱効率と NO_x 生成の特性

いずれの噴孔仕様においても、図 1 5 に示すように噴射開始時期 SOI を遅角させる(上死点に近づける)ことによって噴流塊が濃くなり熱効率は向上するが、 NO_x の生成が増加するため空気過剰率 λ を高め希薄な混合気とすることで NO_x 生成を低下させ目標とするレベルを指向する。混合気の希薄化により熱効率は向上するが、希薄化の度を超すと熱効率は低下する。

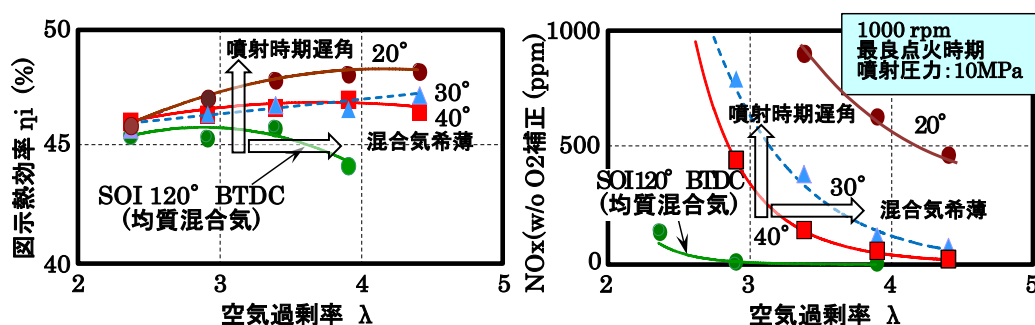


図 15 噴射時期と λ に対する熱効率向上と NO_x 生成の感度(噴流角度 25° 、噴孔 $5 \times \Phi 1.0\text{mm}$ の場合)

(c) 噴流の制御による熱効率と NO_x 生成目標値達成の経過 (噴流角度 25° の効果)

図 1 5 に示した噴孔仕様ごとに得られた噴射開始時期 SOI と燃料の混合比 λ を変えた場合の熱効率と NO_x 生成量の関係を、図 1 6 のようにまとめ目標達成の状況を次のように評価した。

- ・噴流角度を燃焼室上壁面から 15° から 25° に大きくすること、および噴孔径 0.6mm 化や噴流扇角 60° を組み合わせることにより、SOI $30 \sim 40^\circ$ BTDC と λ $4.0 \sim 5.0$ の組み合わせで、希薄混合気を使用しているため出力は低下しているが平成 28 年度目標値である熱効率 $\geq 50\%$ のみならず、平成 29 年度目標値である $\text{NO}_x \leq 400\text{ppm}$ を達成する結果が得られた (図 1 6 中(b)、(c)、(d))。
- ・この効果は、噴流塊の燃焼室内での配置を燃焼室上壁面から離すことによって、主燃焼場が燃焼室壁面から離れることによる冷却損失の低減により得られた (別途図示する)。
- ・さらに、噴孔の多重列化により(図 1 6 中 e)、同様に出力は低下しているが最終年度目標値である正味熱効率 $\geq 50\%$ かつ $\text{NO}_x \leq 200\text{ppm}$ を満たす結果が得られた。
- ・この効果は、噴孔の配置を多重化することにより噴射する噴流塊の適切な分散と噴流塊内の水素燃料の均質化が実現できたためである。また、点火位置を壁面から離すことによっても(図 1 6 中 f)熱効率の向上と NO_x 生成が低減され、同様に出力は低下しているが最終年度目標値を満たす結果が得られた。
- ・噴孔形状の適合化によって熱効率を改善できた結果、必ずしも高圧噴射に頼る必要のない早期圧縮期間噴射 (均質混合気狙い) により、目標値を満たす値が得られたことも特

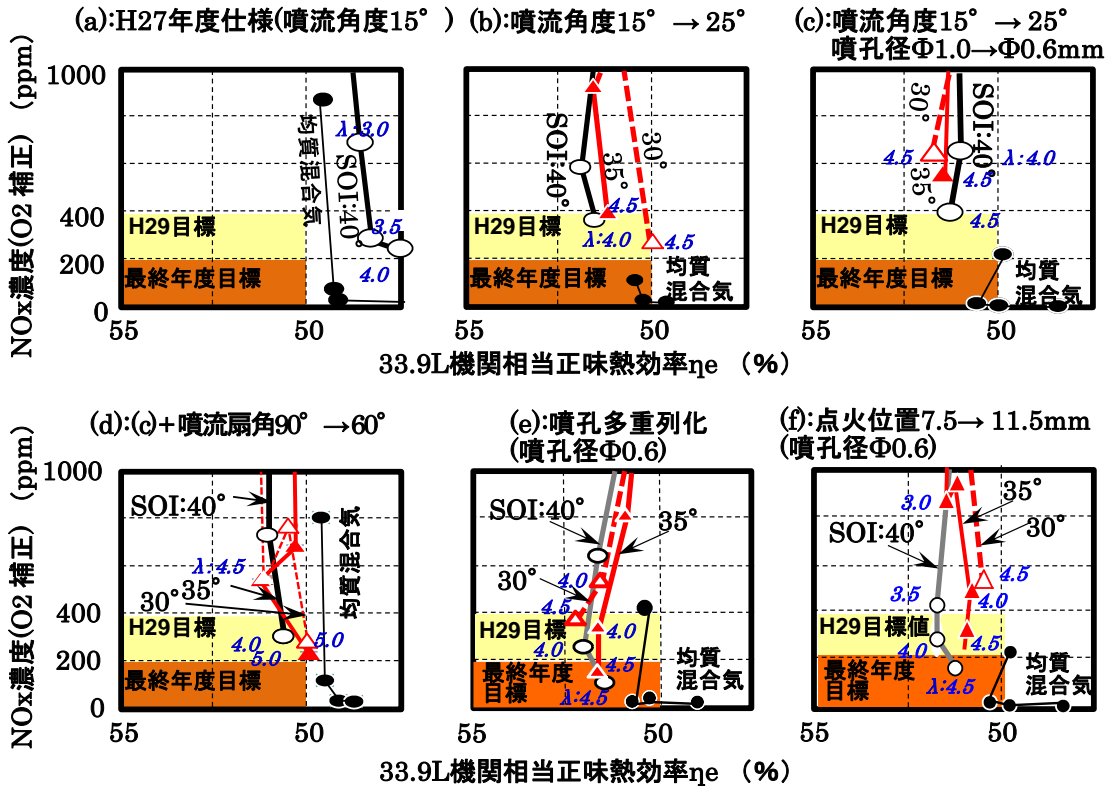


図 16 噴流仕様の制御による目標値達成の状況

筆すべきである(但し、熱効率は上死点近傍噴射である PCC 燃焼より低い)。

(d) 噴射角度 35° 化による熱効率の一層の向上と NO_x 生成の大幅な低減および最終年度目標値達成の状況

一層の混合気塊内水素濃度の均質化を狙って噴射角度を 35° に大きくし、噴孔径、点火位置の組み合わせなど噴孔仕様の最適化による熱効率向上と NO_x 生成低減効果の評価を行った。

この結果、噴射角度 35° と噴孔径 0.6mm の組み合わせにより図 17 に示すようにこれま

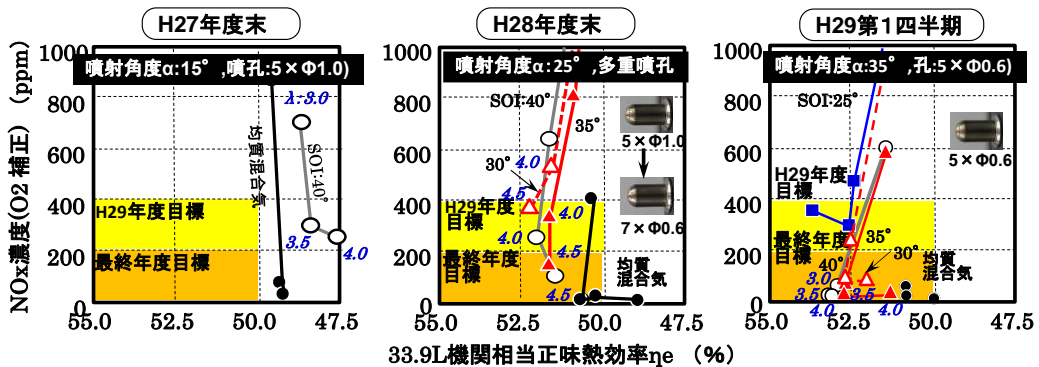


図 17 噴射角度 35° による熱効率向上と NO_x 生成低減の効果

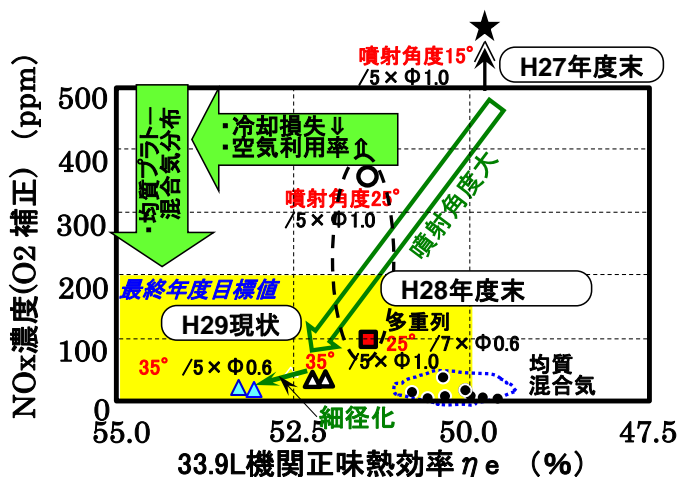


図 18 熱効率向上と NOx 生成低減に効果の高かった因子の
効果と進捗の履歴

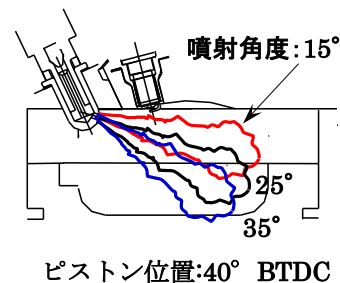


図 19 噴射角度による噴流と
燃焼室壁面の相対関係

で達成できていた結果に比べ、さらに高い熱効率と NOx の生成低減が実現できた。これまでに得られている成果で効果の大きかった因子・水準の効果とその履歴を図 18 にまとめると、次のことがらが明らかになった。

- ・噴射角度 35° と噴孔径 Φ0.6mm の組み合わせにより、混合気希薄化により出力の低下を伴っているが、最終年度目標値の熱効率を達成しかつ目標値の 1/10 のレベルまで NOx 生成濃度を低減することができた。
- ・評価した因子の中で、噴射角度の拡大が最も大きな熱効率向上効果を引き出したと考えられる。これは、これまでも度々述べている噴流配置の場合、すなわち燃焼の場合を燃焼室上壁面から離すことによる冷却損失の低減効果であると考えている (図 19)。
- ・また、NOx 生成低減は噴孔の細孔化や噴孔数増加が大きな効果を表しており、これは噴流の内部濃度分布の均質化 (図 20 で均質プラトー化と表現) が高くなったためであると考えている。

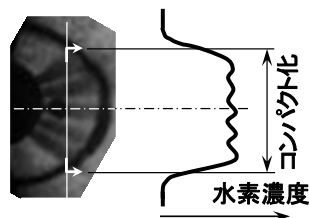


図 20 多噴孔噴流のプラトー化イメージ

・希薄混合気の使用により、出力は希薄混合気使用前のレベルである 0.85 MPa に比べて大幅に低下している (図 21)。しかしながら、出力は過給により NOx 増加の跳ね返りなしに回復させることができた。その効果については次項で述べる。

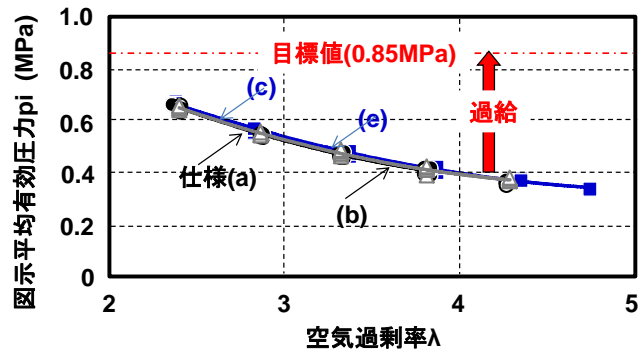


図 21 混合気の希薄化による出力の低下 (仕様番号は図 16 に対応)

(e) 噴流最適化による冷却損失低減と噴流内濃度均質化の効果

図 1 8 など、たびたび熱効率向上は冷却損失軽減の効果であることを述べてきたが、一例として噴射角度を変えた場合の効果について図 2 2 に示す。噴射角度 15° では、明らかに冷却損失が増加していることから、冷却水が循環しているなどの理由で冷却損失に

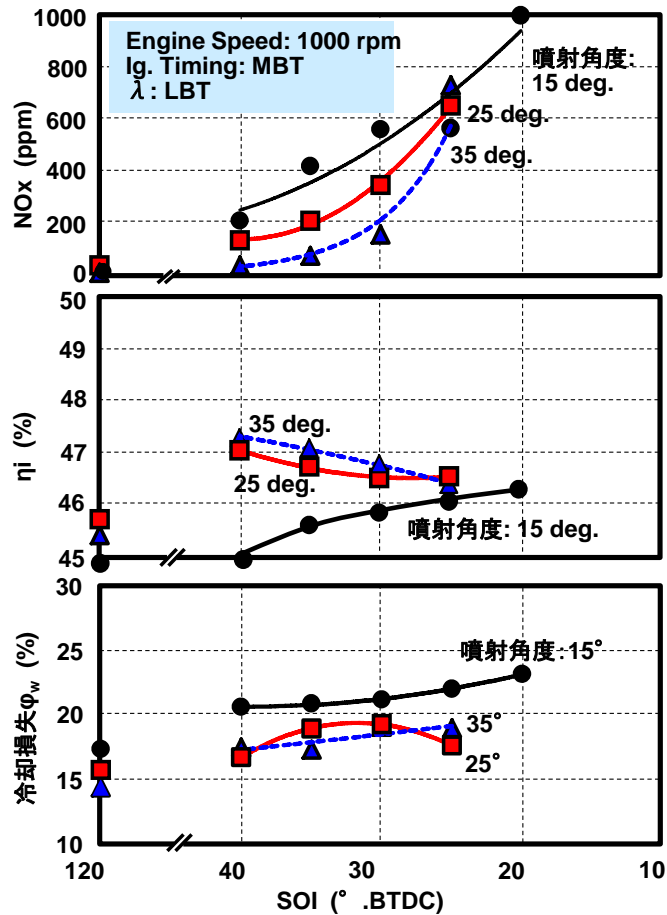
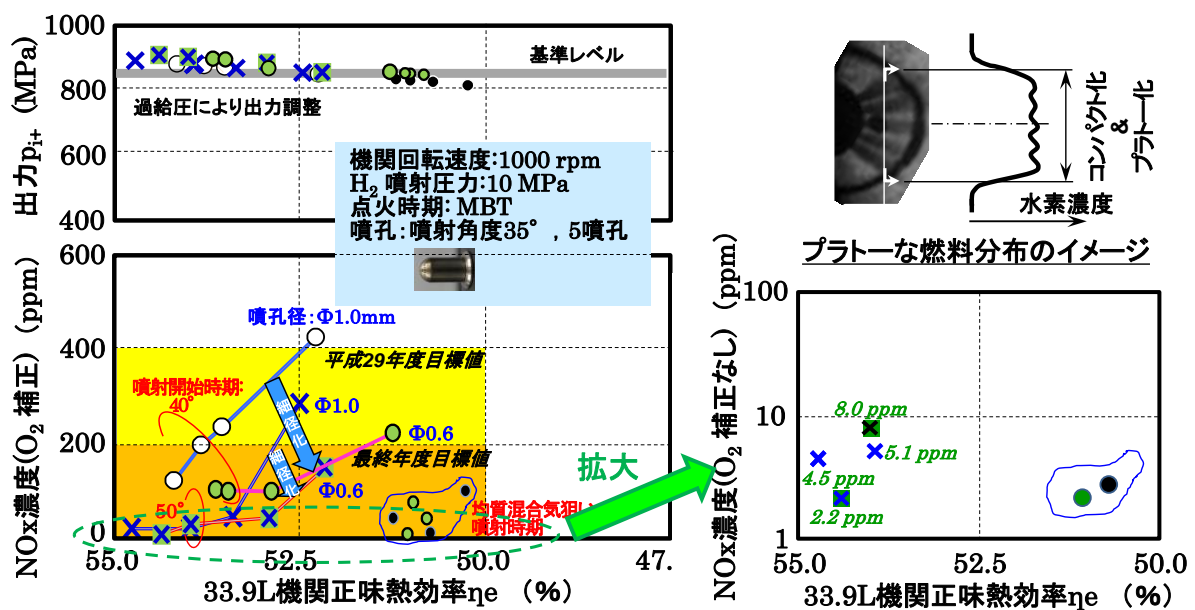


図 22 噴射角度が熱効率, NOx 生成, 冷却損失に与える影響

対して影響の大きい燃焼室上壁面近傍に燃焼ガスが集中し冷却損失が高くなり、その結果熱効率が低下したとの説明が妥当である。ところが、この効果はさらに噴射角度を大きくした35°では現れず冷却損失は25°の場合と同じレベルであった。半面35°では、NOx生成が大幅に低下していることから、冷却損失の増減とは異なる事象、例えば噴流塊内部の水素と空気の混合が促進され、NOx生成低減とともに熱効率が向上したと解釈することができる。この混合の促進は、図19のイラストで示したように、噴流のヘッド側壁面とは対向するピストン上面に噴流が衝突して生じたと考えている。

(f) 過給による出力向上と NOx 生成への影響

過給による出力回復の実験を体系づけて行った。この結果、図23(a)に示すように過給により出力を希薄混合気適用以前の値である0.85 MPaに戻しても、NOx排出レベルは影響を受けず、最終年度目標値200ppmの1/10のレベルを実現できた。燃料分布のプラトー化(同図(b)上図)が大きな影響を受けなかったと考えている。熱効率は、過給によりさらに向上し目標値を大幅に達成した正味熱効率54%を超える値を達成することができた。この要因は、内燃機関の一般的な特性である出力向上による冷却損失割合の低下で説明でき、希薄混合比と過給の組み合わせによる相乗効果であり、本研究の副産物の一つである。また、O2補正を行わない場合、最低NOx排出レベル2.2ppmを実現でき、CO2排出のない



(a)出力向上効果と熱効率向上効果および NOx 生成への跳ね返り (b)達成できた NOx 低減効果

図 23 過給による出力向上, NOx 低減および熱効率の向上

水素エンジンを“ニアゼロエミッション”と呼ぶに相応しいレベルの性能を達成することができた。

3-2. オープンサイクル用エンジン試験機用高圧水素噴射弁の耐久性と信頼性の向上

本研究課題の研究開発には、これまで本学独自で開発を進めてきたコモンレール油圧駆動による高速作動高圧水素噴射弁を用いており、この高圧水素噴射弁の使用により PCC 燃焼の実現が可能となった。図 7 にその仕様と形状写真を示すが、性能に関する開発目標値は既に達成済みであるが、耐久性だけは現状 100 時間であり、エンジンの性能開発用に使用する耐久性としても十分な性能ではない。本研究課題では、この耐久性を 500 時間に伸ばす研究開発にも取り組んだ。

耐久性を 500 時間に伸ばすために取り組んだ課題は、表 3 に示す 3 項目でいずれも漏洩性が高くかつ潤滑性の低い水素燃料の特性に起因する症状であり、耐久性を 100 時間でトラブルが発生している項目である。

表 3 耐久性を向上させるために取り組んでいる課題

No	トラブル部位 (症状)	推定原因	施した対策
1	弁ニードルシート部 (ニードル部摩耗&漏洩発生)	低潤滑性による弁-弁座部の摩耗	・DLC加工 ・DLC加工法見直し
2	弁ニードルー弁本体 (ニードル側摩耗発生)	低潤滑性によるしゅう動部の摩耗	・加工&組立時の点検強化 ・DLC加工 ・DLC加工法見直し
3	水素-作動油隔離部 Oリング (摩損発生)	低潤滑性とバックアップ・リング隙間への噛み込みによる破損	・バックアップ・リング設計変更 ・Oリング材質見直し

本研究開発で、下記対応を行ったオープンサイクル用高圧噴射弁の、耐久性向上と摩耗などによる作動安定性向上の評価を行った（耐久性目標値 500 時間、現時点の進捗 100 時間）

- 弁ニードルシート部の磨耗軽減のための DLC 加工膜の硬度変更
- 弁ニードルー弁本体間しゅう動部の磨耗軽減のための DLC 加工法改良
- 弁ニードルの水素-作動油間 O-リング溝とバックアップリング溝形状の形状変更 (図 24 参照)

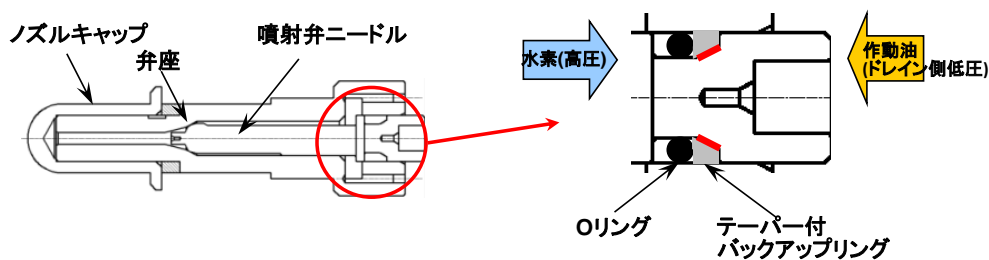


図 24 オープンサイクル用高圧噴射弁 O-リング溝とバックアップリングの形状変更

100 時間の耐久実験が終了した現時点で、これまで同じ耐久時間で発生していた O-リングの摩損発生が無くなったことから、バックアップ・リングをテーパー付に変更することによって、これまでの形状で存在していた弁本体しゅう動部との間の隙間が楔型形状の効果で無くなり、図 25 中図に示すように O-リングの噛み込みが防止できたが、同図右写真で観察されるように O-リングしゅう動部の摩耗痕が発生したため O-リング材質の変更を行った。また、ニードルしゅう動部と弁座の摩耗も同時に防止できた (図 26)。しかしながら、目標である 500 時間に向けた耐久実験は平成 29 年度までには実施できなかった。

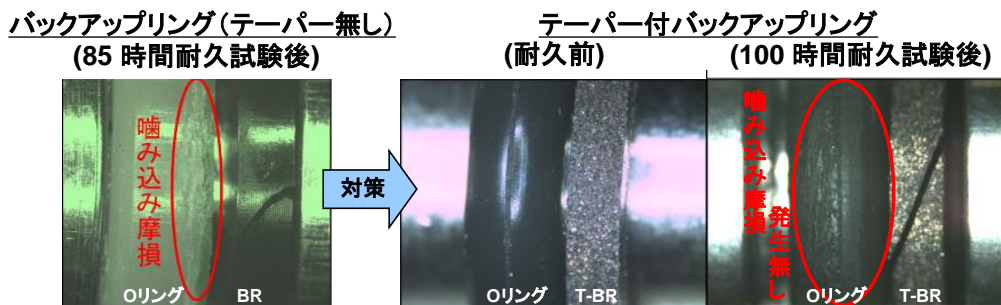
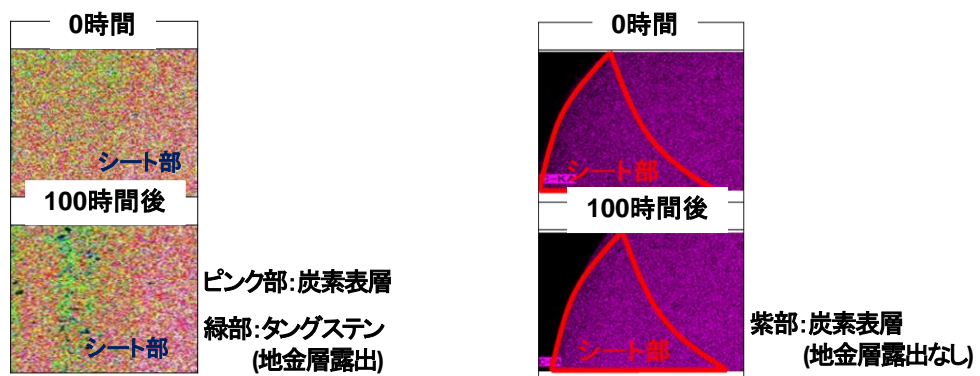


図 25 テーパー付バックアップリングにより発生が抑制された O-リングの噛み込み摩損



(a) 対策前の 100 時間耐久経時変化

(b) 対策後の 100 時間耐久経時変化

図 26 DLC 加工法変更による弁シート部の耐摩耗性向上効果 (SEM/EDX 写真による表面原子分布の画像)

3-3. 研究開発を支援する基盤技術の開発と適用

3-3-1. シャドウグラフ法による火炎と噴流の可視化

性能の研究開発に用いている単気筒エンジンと同機種エンジンに燃焼室内可視化を可能にする光学的な変更を加え、燃焼室内へ噴射した噴流と伝ばする火炎をシャドウグラフ法により可視化した。平成 26 年度に、これまで用いていたアルゴン・イオンレーザーに比べて操作の簡便な半導体励起 YAG レーザーを購入し可視化実験に用いている。

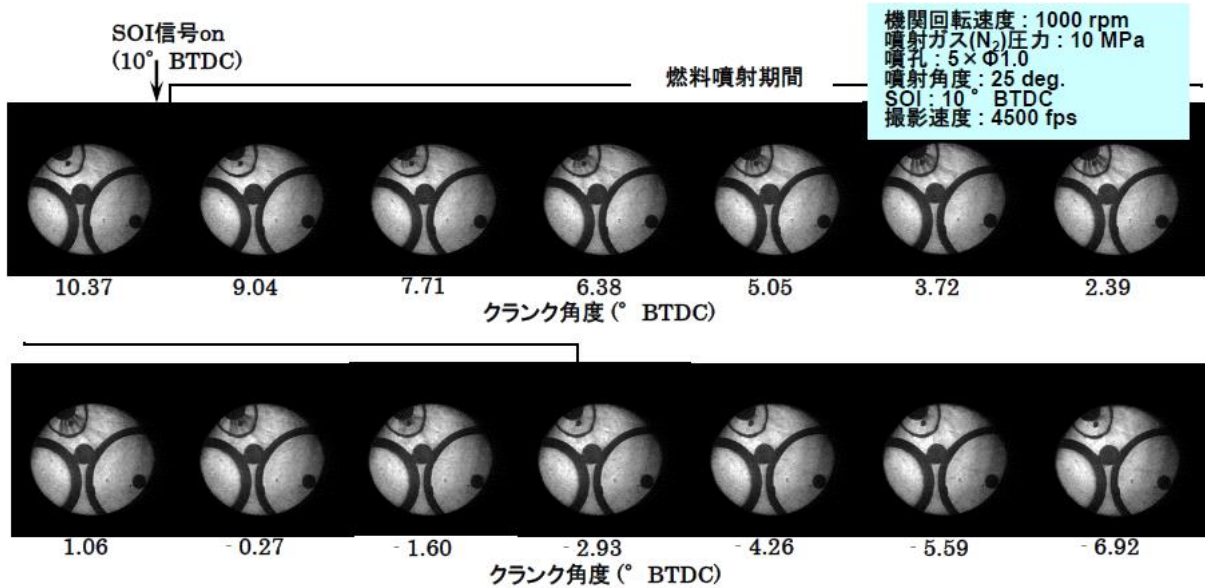


図 27 レーザーシャドウ法で可視化した5噴孔ノズル噴流の噴射開始以降の経時変化

図 27 は、性能向上に効果の大きかった5噴孔数で噴射角度が25°のノズル噴流の噴射開始時期以降の経時変化を撮影した。この図から、図 20 で示した均質プラトー化が次のように説明できる。すなわち、噴射直後は個別の噴流が独立して燃焼室に噴射されるが、噴射終了時期に近いクランク角度上死点後0.27°近傍から噴流内が均質化し、図 20 に示した噴流全体が均質化に向かう（均質プラトー化に向かう）様子が理解できる。しかしながら、現在は鮮明な噴流の可視化高速写真撮影は噴射ガスに窒素を用いた場合のみであり、水素噴流の鮮明な可視化画像は撮影できていない（図 28）。これは拡散の速い水素は、シャドウグラフ法の撮影原理である周囲の空気との密度差（屈折率の差）が低いことに起因するため、空間分解能の高い光学系が必要である。水素光学系の見直しなど再構築を行い、水素噴流の可視化に取り組んでいく。

伝ば火炎の撮影は、本報告でも図 5 に用いた写真のように鮮明な画像撮影が可能であり、本プロジェクトでも有用な支援ツールとして適用されてきた。

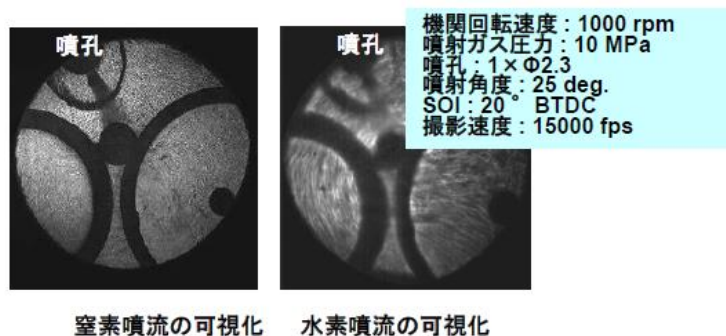


図 28 噴射ガス窒素と水素の噴流の可視化画像の差異

3-3-2. SIBSによる点火時の点火プラグ近傍水素濃度(空気過剰率 λ)の定量計測 (岡山大学と連携)

岡山大学が開発している火花点火時の混合気の水素濃度を定量的に計測する火花誘起ブレイクダウン分光法 (Spark Induced Breakdown Spectroscopy、SIBS) を本プロジェクトのオープンサイクル試験機に適用する研究を両大学共同で行っている。SIBS法は、図29に示すようにエンジンの点火時の火花信号を点火プラグの中心電極に埋め込んだ光ファイバーで取り出し、その信号を分光分析して水素原子の発光(H α)と窒素原子の発光(N)の比から水素濃度即ち λ を計測する手法であり⁽⁴⁾、燃焼室の変更無しで実動中のエンジンの λ の計測が可能である。

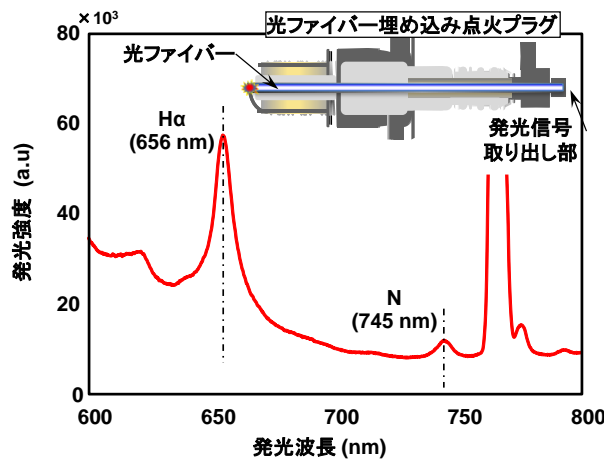


図 29 SIBS の原理図

PCC 燃焼の噴射開始時期 SOI を変えた場合の、点火プラグ近傍における点火時の水素濃度の変化を SIBS 法により計測した結果を図 30 に示す (図 15 の SOI 変化に対応)。この結果から、PCC 燃焼において SOI を遅角するにつれて点火プラグ近傍の λ 、すなわ

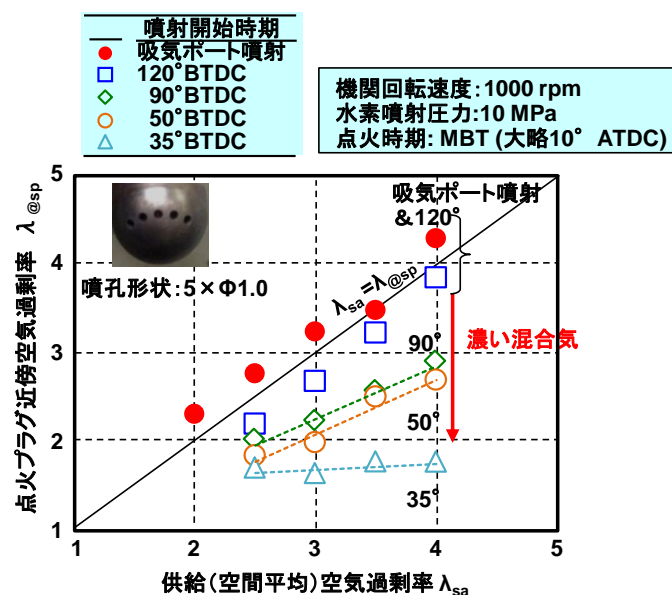


図 30 SIBS で計測した点火開始時期 SOI 遅角による点火時点火プラグ近傍時 λ の変化

ち SIBS で計測した $\lambda_{@sp}$ が供給された混合気の λ_{sa} より低い値（濃い混合気）となっていることがはっきりと計測されている。これまで図 10 や図 15 で示した実験結果に加えて、図 30 で示した SIBS による λ 計測結果から、PCC 燃焼の燃焼室内における点火時の燃料の空間的分布を図 31 に示すように、燃焼室の点火プラグ面とさらにシリンダー軸中心部に濃い燃料が成層化され配置されているイメージでイラスト化してみた。中心寄り軸方向混合気成層化 CACS と呼ぶ。

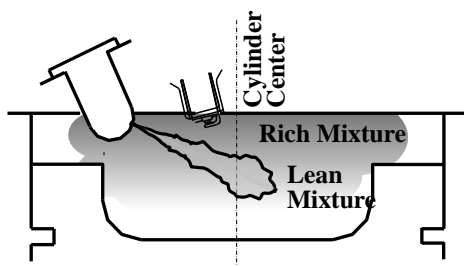


図 31 PCC 燃焼の点火時の燃料分布のイメージ図
CACS(Centroidal Axially Charge Stratification)

3-3-3. CFD 数値計算による水素噴流の詳細解析(早稲田大学と連携)

燃焼室内に噴射する噴流形状などの制御に必須な基幹基盤技術の一つとして、噴射した噴流の CFD 数値計算を、早稲田大学と連携して行っている。計算手法は、高速で噴出される水素噴流の高乱流場における高拡散特性、高対流特性を適切に計算できる下記の手法を選んだ⁵⁾。

- ・差分スキーム：高次精度差分法の一つである CIP 法 (Constrained Interpolation Profile Scheme)
- ・理論式：Navier-Stokes 方程式 (Stochastic (確率論的)Navier-Stokes 方程式)
- ・乱流動粘性係数：Yakhot-Orszag SGS 乱流モデル

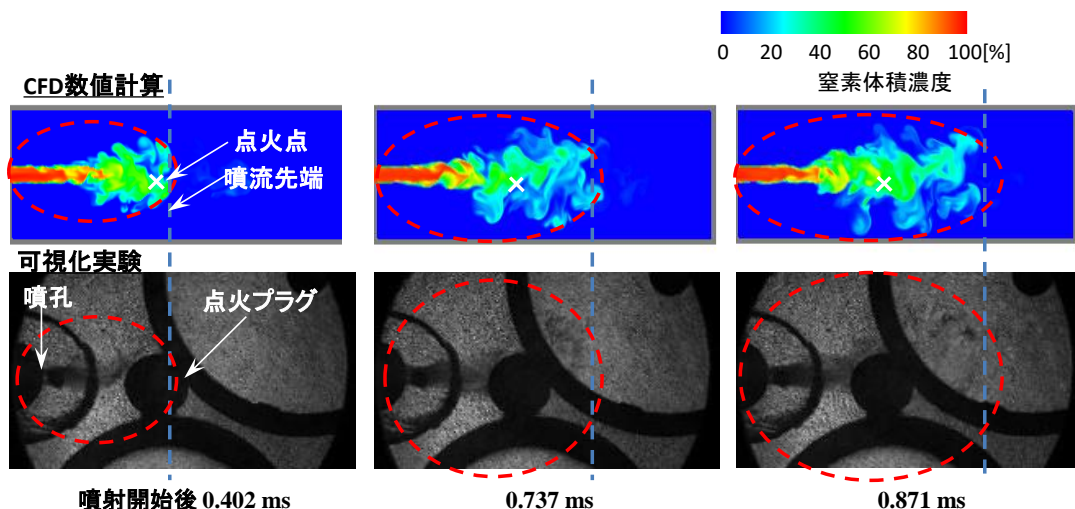


図 32 噴流の数値計算結果と可視化実験の比較

本課題への適用の一例として、高精度 CFD 計算で得られた噴流形状とその経時変化と、本学で行った噴流の可視化実験結果を図 3 2 に示す。噴流気体には可視化実験で撮影が可能な窒素を用いた。同図から高精度数値計算で得られた高圧噴流のイメージが得られ、また両者のペネトレーション先端部の到達距離の時間経過は、概ね一致することがわかった。

また、燃焼室へ噴射する水素噴流の計算を行い、燃料噴射後の点火位置（実機関で噴孔部から 20 mm の位置）における水素濃度の経時変化を算出した。供給 λ は略 1.0 である。図 3 3 に示すように、噴射期間初期では点火位置における水素体積濃度が略 60% ($\lambda = 0.25$) であり、その後濃度が低下し噴射終了時では水素濃度が略 30% 弱 ($\lambda = 1.0$) となり、その後この濃度が維持される特性を有することが計算された。参考までに同図に付け加えたが、供給 λ は異なるが前項で触れた SIBS による計測結果は供給 λ が 4.0 で点火位置での計測 λ が略 1.7 ~ 2.0 となっている。

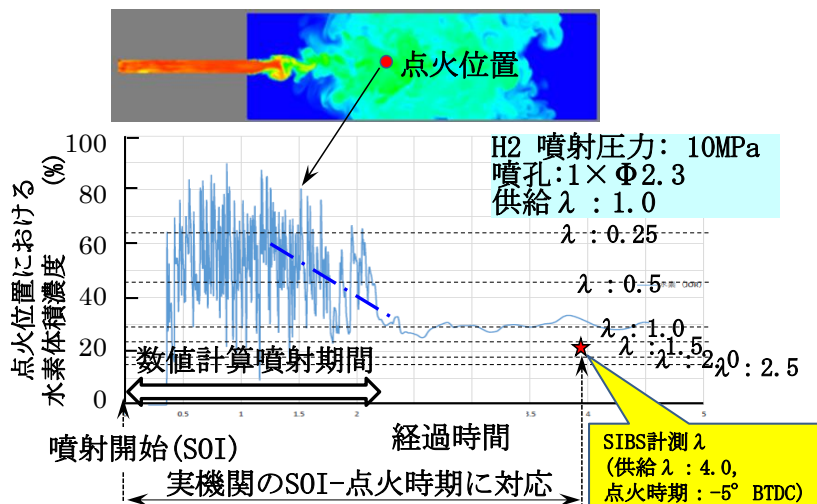


図 33 CFD 数値計算による点火位置における水素濃度の経時変化

これら以外、水素噴流の場を理解するため多くの適用計算を行った。詳細に関しては早稲田大学からの報告書を参照していただきたい。

3-3-4. 3線式薄膜流束センサーによる水素エンジンの熱流束の計測

これまで述べてきたように、水素エンジンの解決すべき課題の一つが水素燃料の速い燃

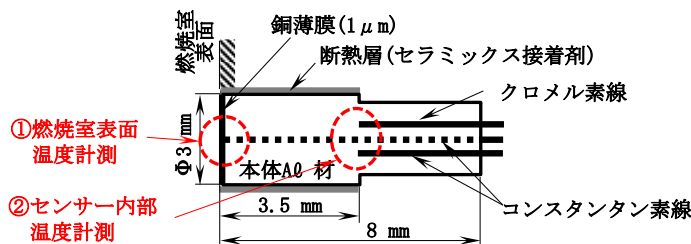


図 34 本学で試作した高応答熱流束センサーの構成と構造

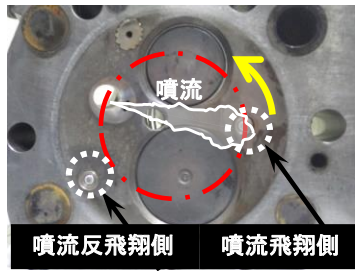
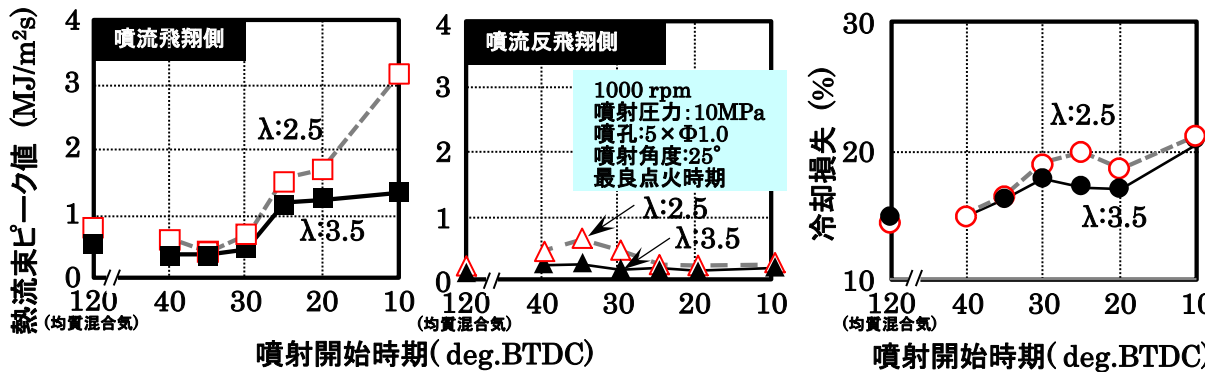


図 35 燃焼室の熱流束センサー取り付け位置

焼と薄い燃焼ガス部境界層に起因する高い冷却損失を低減させることであり、この低減のため本課題では噴流の形状等の最適化を行い、その効果を実現できた結果を述べてきた。これまで用いてきた冷却損失の評価には、燃焼室内の圧力計測をベースにした簡易的な手法である冷却損失 index (詳細は本報告書では触れていない。) を用いてきた。この冷却損失を定量的にかつより正確に計測するために、また噴射した水素噴流塊の燃焼が燃焼室壁面に接触する状態を表す局所的な冷却損失を計測するために、3線式熱流束センサーを試作し評価した。図 3 4 がその構成と構造であり、燃焼室表面側の温度①とセンサー内部 3.5 mm の位置②における温度をそれぞれ熱電対の原理により計測することによって、熱流束(流れる熱量)を計測できるセンサーである。特長は、センサー径が 3 mm の細径であり燃焼室内の取り付け場所を自由に選べることと、薄膜表面加工により厚さ 1 μ m の温度計測



(a) 熱流束計測値 (b) 指圧線図から算出した冷却損失
図 36 燃焼室内における噴流飛翔側と反飛翔側の熱流束の差異

が可能であるため応答性が高いことである。

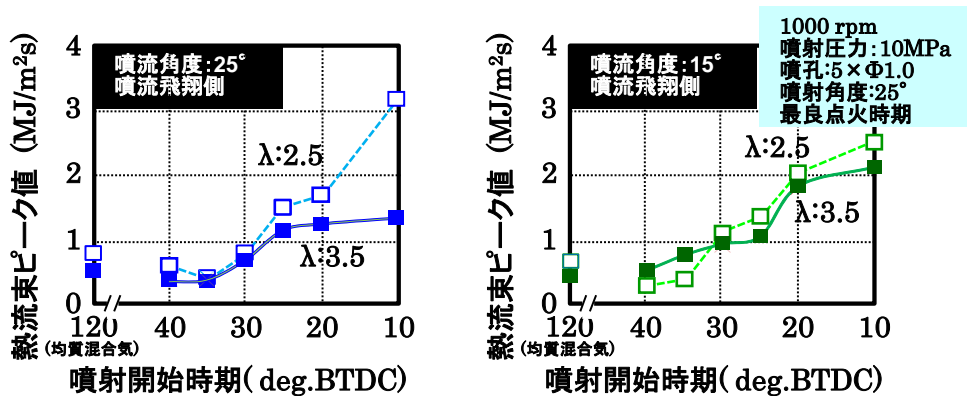
本課題では図 3 5 に示すように燃焼室内の噴流の飛翔側と反飛翔側の 2 箇所に該センサーを取り付け、噴射した燃料噴流の燃焼室壁面との干渉の状態と両位置の冷却損失熱流束の特性を、計測値が最大となるクランク角度における熱流束値で評価した。この結果を図 3 6 にまとめて示すが、次の事柄が明らかになった。

- 噴射開始時期 SOI を遅角させ PCC 燃焼を実現させることによって、噴流飛翔側の熱流束が大幅に増加、すなわち冷却損失が大幅に増加する。この値は、均質混合気を想定した SOI 120° における値の 4~5 倍となる。

- SOI 遅角による熱流束の増加、および均質混合気燃焼より大幅に高い熱流束を示す特性は、同図に示す指圧線図から算出した冷却損失の増加の特性に対応している。
- いずれの λ においても、噴流飛翔側の熱流束が反飛翔側に比べて大幅に熱流束が高い、すなわち冷却損失が大幅に高い。

以上のように、噴流飛翔側の熱流束が高い値を示していることから、本研究で使用している燃焼室形状および噴流配置位置の場合、噴流飛翔側の冷却損失が機関全体の高い冷却損失の要因になっていることが理解できた。逆の言い方をするとこの冷却損失の値を軽減できる噴流を設計することによって、図 23 で示した熱効率を、一層高くできる可能性があることを示唆しているとも理解できる。このことから、今後の噴流形状最適化の取り組みにおいて、熱流束計測値の特性をウォッチングしながら進めるやり方に取り組んでいく。

また、図 3 で示した熱効率向上効果の高かった噴流角度 25° の熱流束を、噴流角度 15° の値と比較した(図 37)。この結果、噴流角度 15° では SOI 遅角による熱流束が増加することやこの値が均質混合気狙いの SOI より高くなる特性は 25° と同様であるが、指圧線図計測から算出した冷却損失が高い噴流角度 15° の噴流飛翔側熱流束の $\lambda 2.5$ が必ずしも高く計測されなかった。熱流束センサーに接触する伝ば火炎の形状を可視化するなど、この原因解明も重要な課題である。



(a) 噴流角度 25° (b) 噴流角度 15°
 図 37 噴流角度違いによる噴流飛翔側熱流束の差異

3-4. まとめ

(a) 噴流の噴射角度や噴孔の配置・数などの選定による噴流形状の最適化、噴射から点火までの空気取り込み時間の最適化による適切に制御された噴流塊濃度の制御を行うことによって大幅な熱効率向上と NO_x の低減を同時に実現し、研究チームの最終年度である平成 30 年度の目標値である熱効率 50% (LHV 換算における 7 MW 級エンジン単体の正味熱効率) 以上、 NO_x 生成量 200 ppm 以下を本学が担当する小型試験機関を用いた実験段階で、1 年前倒しでしかも NO_x 生成量については目標値の十分の一のレベルを達成することができた。過給を組み合わせることで、希薄混合気の使用にも拘わらず出力の低下は伴っていない。過給による更なる出力向上が可能なことも確認済みである。

(b) 熱効率の向上は、これまで水素エンジンの課題であった水素燃料の特性に起因する高い冷却損失を、過濃混合気でコンパクトかつ燃焼室壁面に密着しない形状の混合気塊を点火燃焼させる燃焼方式により低減できたことと、もう一つの課題であった高負運転域における高いNO_x生成の抑制を同時に実現できことであり、工学的にも大きな意義がある。

(c) 達成できたNO_xレベルは一桁ppmレベルであることから、二酸化炭素CO₂の排出が無い水素エンジンを“**高熱効率・高出力・ニアゼロエミッション水素エンジン**”と呼ぶに相応しい技術開発である。この技術は、水素燃料の燃焼特性を十分に活用した燃焼方式である。

(d) 目標値を達成した結果を得る上で、SIBS法による点火位置・点火時期における燃料濃度の定量的計測、CFD数値計算による燃料濃度の空間的分布と経時変化の把握およびレーザーシャドウグラフ法による噴流と伝ば火炎形状の可視化など研究支援基盤技術が大きな役割を果たした。また、熱流束センサーによる燃焼室壁面からの冷却損失を計測する手法は、今後の一層の冷却損失低減効果を評価し熱効率向上に有用な情報を入手する手段として適用できることが分かり、改良と適用を進めていく。

(e) オープンサイクルエンジン試験機用高圧噴射弁は、今年度では目標値である500時間の体系づけた耐久性評価を実施できる段階でないが、性能試験を行う上では安定した性能を維持しており、熱効率・NO_x生成量目標値を満たした実験結果を得る上で重要な役割を果たした。

3-5. 今後の課題

本研究開発による成果は、定置発電用または船舶用大型ガス機関に適用する要素技術の一つである燃焼技術を小型試験機関により実行し得られた結果である。現在実用化されている中型・大型ガス機関は、噴射弁位置が燃焼室中央に配置されていることやボア径が本研究で用いた小型試験機関よりは大きいなど大きく異なる。このことから、今回開発した“**高熱効率・高出力・ニアゼロエミッション水素エンジン**”の燃焼技術を実用化につなげるために、上記した実用化されている中・大型ガス機関の要素、すなわち本研究で用いた小型試験機関とは異なる燃焼室中央に配置した噴射弁の噴流や大ボア径エンジンに適用する次期ステージの基礎研究（または応用研究と呼んでも良い）が必要である。私共大学の研究者としては、このような実用化を前提とした技術開発を行うガス機関関連の企業をパートナーとして探す努力を進めるつもりである。この場合、噴射弁や高圧ポンプなど関連する要素部品の開発も必要になるなど、“**高熱効率・高出力・ニアゼロエミッション水素エンジン**”の実用化には多くのバリアがあるため多くの仲間が必要である。我が国において自動車用以外の水素インフラの実用化が2030年頃だと考えると、この時期までに“**高熱効率・高出力・ニアゼロエミッション水素エンジン**”の実用化を理解してくれる仲間を増やす必要があり、このために私共は大学の研究者として、この技術の技術広報的な役割も演じていくつもりである。

4. 外部発表実績

(1) 論文発表

<査読付き> 3件

[1] Improvement of Thermal Efficiency and Reduction of NO_x Emissions by Burning a Controlled Jet Plume in High-pressure Direct-injection Hydrogen Engines, Yasuo Takagi, Hiroki Mori, Yuji Mihara, Nobuyuki Kawahara, Eiji Tomita, International Journal of Hydrogen Energy, Vol.42, Issue 41(2017), Elsevier, pp26114-26122

[2] Local fuel concentration measurement through spark-induced breakdown spectroscopy in a direct-injection hydrogen spark-ignition engine, Kazi Mostafijur Rahman, Nobuyuki Kawahara, Daichi Matsunaga, Eiji Tomita, Yasuo Takagi, Yuji Mihara, International Journal of Hydrogen Energy, Vol.41, No. 32(2016), Elsevier, pp14283-14292

[3] 熱効率向上を指向した噴射時期と噴流形状による高圧筒内直接噴射水素エンジンの熱効率向上に関する研究, 高木靖雄, 森裕樹, 中川研司, 三原雄司, 富田栄二, 河原伸幸, 自動車技術会論文集, Vol.47, No.3, pp705-710, (May 2016)

<査読なし(総説等含む)> 11件

[1] 水素直噴火花点火機関における水素噴流と燃焼の数値解析, 陰山和気, 河原伸幸, 富田栄二, 高木靖雄, 三原雄司, 第28回内燃シンポジウム講演集, 平成29年12月

[2] SIBS法による水素エンジンでの点火プラグ近傍プラズマ分光解析, 谷広貴, 河原伸幸, 富田栄二, 高木靖雄, 三原雄司, 第28回内燃シンポジウム講演集, 平成29年12月

[3] Instantaneous Surface Temperature Measurement in Internal Combustion Engine Using Newly Developed Coaxial Type Thin-film Temperature Sensor, Daijiro Ishii, Hiromi Saito, Yuji Mihara, Yasuo Takagi, SETC(Small Engine Technology Conference), Co-organized by JSAE and SAE International, JSAE 20179113(CDR), November 15-17, 2017 in Jakarta, Indonesia

[4] 筒内直接噴射水素エンジンの噴流制御による熱効率の向上とNO_x低減効果および燃焼特性に関する研究, 佐藤稜汰, 糀谷喜久, 高木靖雄, 三原雄司, 富田栄二, 河原伸幸, 自動車技術会 2017年秋季大会学術講演会予稿集(CD)、2017年10月

[5] 筒内直接噴射水素エンジンの燃焼室の局所熱流束計測による水素噴流の挙動と冷却損失低減効果の評価に関する研究, 糀谷喜久, 佐藤稜汰, 齋藤広海, 石井大二郎, 高木靖雄, 三原雄司, 自動車技術会 2017年秋季大会学術講演会予稿集(CD)、2017年10月

[6] Large eddy simulation of the penetration length and mixing process of high speed hydrogen gas jets for various operating conditions of engines, Remi Konagaya, Ken Naitoh, Yasuo Takagi, Yuji Mihara, 自動車技術会 2017年春季学術講演会講演予稿集(CD)、2017年5月

[7] Unsteady Three-Dimensional Computations of the Penetration Length and Mixing Process of Various Single High-Speed Gas Jets for Engines, R. Konagaya, K. Naitoh, K. Tsuru, Y. Takagi, Y. Mihara, SAE Technical paper 2017-01-0817, 2017

[8] 直接噴射水素エンジンの水素噴射角度が熱効率に与える影響とブローバイ水素濃度による噴流位置評価に関する研究、糝谷喜久、佐藤稜汰、高木靖雄、三原雄司、自動車技術会関東支部学術研究講演会講演予稿集(CD)、2017年3月

[9] Computation of Turbulent Mixing Process of Single High-Speed Hydrogen Jets,, Konagaya. R. Naitoh, K.. Okamoto, T. Tsuru, K. Takagi, Y. Mihara、 Y. Book of abstracts of The 2016 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT-2016), APISAT-2016-F1-1, 2016.10, Toyama, Japan. pp.1-5、 (USB data)、 (Oct. 2016)

[10] スーパーセル法を用いた水素DISIエンジン内水素噴流挙動の数値シミュレーション、笠原勇喜、河原伸幸、富田栄二、森裕樹、高木靖雄、三原雄司、自動車技術会2015年秋季学術講演会、2015年10月

[11] 直接噴射水素エンジンの冷却損失低減による熱効率の向上と冷却損失評価法の特性に関する研究、高山飛鳥、森 裕樹、村瀬貴是、石井大二郎、高木靖雄、三原雄司、自動車技術会関東支部学術研究講演会講演予稿集(CD)、2016年3月

(2) 学会、展示会等発表

<招待講演> 国内0件、海外0件

<口頭発表> 国内7件、海外4件 ((1) 論文発表査読なし蘭に記載))

<ポスター発表 国内0件、海外0件

<展示会、ワークショップ、シンポジウム等> 国内1件、海外0件

[1] R&D of Direct Injection Hydrogen Engines in Tokyo City University, Yasuo Takagi, Japan-China Workshop on Prospect and Subject of New Energy Application for Automobiles, July 6, 2017

(3) プレス発表

[1] 2018年5月18日「大型発電用、高出力・高熱効率・低NO_x水素エンジンの燃焼技術を開発 ～地球温暖化など大気環境保全への貢献も期待～」

(4) マスメディア等取材による公表

なし

5. 特許出願実績

なし

6. 参考文献

- [1] 高圧筒内直接噴射水素エンジンの過濃混合気噴流点火の基礎的特性の研究、及川昌訓、小笠原悠介、近藤慶一、長沼要、高木靖雄、佐藤由雄、自動車技術会論文集、Vol.42、No.4、pp903-908、(2011)
- [2] 高圧筒内直接噴射水素エンジンの部分負荷運転における熱効率の特性と過濃混合気塊燃焼による向上の効果、三浦宏太、関根花南、前田翔、中川研司、三原雄司、高木靖雄、佐藤由雄、自動車技術会論文集、Vol.45、No. 4、pp657-662、(2014)
- [3] 重量車用筒内高圧直接噴射水素エンジンシステムの研究開発、高木靖雄、山根公高、長沼要、佐藤由雄、川村淳浩、後藤 雄一、自動車技術会学術論文集、Vol.39、No.5、pp65-70、(2008)
- [4] M. A. Rahman, N. Kawahara, K. Tsuboi, E. Tomita, Visualization and concentration measurement of a direct injection hydrogen jet in a constant-volume vessel using spark-induced breakdown spectroscopy, Int. J. of Hydrogen Energy, Vol. 39, Iss.31 (2014), pp17896-17905.
- [5] Stochastic determinism for capturing the transition point from laminar flow to turbulence, Ken Naitoh, Hiromu Shimiya, Japan J. Indust. Appl. Math. (2011) 28:3-14