

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「火花放電ブレイクダウン分光(SIBS)法による高圧直噴水素エンジンでの点火プラグ近傍局所混合気濃度計測」

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： 富田 栄二

所属研究機関：岡山大学

目次

1. 本研究の目的	1
2. 研究開発目標とマイルストーン	1
3. 研究開発実施内容	3
3-1. オープンサイクル用エンジン試験機における水素当量比センシング技術の開発	3
3-2. CFD シミュレーションを用いた水素当量比センシング技術の計測精度検証	15
3-3. まとめ	
3-4. 今後の課題	
4. 外部発表実績	23
5. 特許出願実績	24
6. 参考文献	24

図表一覧

- 図 1 SIBS 点火プラグの概要
- 図 2 水素直噴エンジンおよび噴流概要
- 図 3 空気過剰率 $\lambda = 3.0$ におけるシリンダ内圧力履歴
- 図 4 空気過剰率 $\lambda = 3.0$ において得られた SIBS スペクトラム
- 図 5 発光強度比と設定空気過剰率との関係
- 図 6 圧力依存性を考慮しない場合の計測空気過剰率
- 図 7 計測時のシリンダ内圧力が計測に与える影響
- 図 8 圧力を考慮した補正 MAP
- 図 9 圧力依存性が PFI 実験時に与える影響
- 図 10 圧力依存性を考慮して得られた計測空気過剰率
- 図 11 噴射時期が点火プラグ近傍空気過剰率に与える影響
- 図 12 エンジンシリンダ内での層状燃料分布の概念図
- 図 13 プラズマ温度算出方法
- 図 14 プラズマ密度算出方法
- 図 15 水素/窒素発光強度比とプラズマ温度・密度の関係
- 図 16 燃料噴射時期を変更した場合のシリンダ内圧力履歴
- 図 17 水素/窒素発光強度比とプラズマ密度の関係
- 図 18 ガスパーセル法の概要
- 図 19 計算格子の大きさが噴流形状に与える影響
- 図 20 水素噴流挙動
- 図 21 流動場および質量分率の分布
- 図 22 水素噴流の到達距離の時間変化
- 図 23 圧縮膨張機関における水素噴流挙動
- 図 24 水素噴流挙動
- 図 25 点火プラグ近傍空気過剰率の比較

1. 本研究の目的

本提案で利用する火花放電ブレイクダウン分光(SIBS)法は、水素原子～窒素原子発光強度比と混合気濃度が相関関係にあることを利用したものである。水素混合気濃度を定量的に計測するために、雰囲気圧力・温度の影響を評価し、計測精度の向上を目指す。さらに、東京都市大学で行われるエンジン実験において、水素混合気濃度計測を行い、熱効率向上に与える影響を評価する。

2. 研究開発目標とマイルストーン

出口を見据えた具体的な研究開発目標、実証研究後の社会導入に至る目標との関係に関しては以下の通りである。社会導入において水素エンジンシステムは水素エンジン以外に水素タンク、水素高圧ポンプ、水素ガスインジェクタ、凝縮器等の多数の要素部品により構成される。社会へ出るシステムはそれら要素を統合したものになるため、要素部品によるエネルギーロスが少なからず生じる。したがって、本研究開発では、研究目標として、オープンサイクル型直噴水素エンジンにより、エンジン単体熱効率が50%を超えつつNO_xを200ppm(O₂=0%換算)に抑える高効率・クリーン燃焼技術を実証することを目指す。これらの研究開発目標はMW級ガスエンジンとしていずれも世界最高水準であり、高効率・クリーンな水素燃焼を実現するための液体水素昇圧ポンプおよび高圧水素インジェクタの技術開発も並行して行い、長期使用に耐えうる高い信頼性技術を構築し、実用システムにおいても十分に高いパフォーマンスを発揮することを目標とする。

提案時における水素エンジンの技術レベルとしては、本事業提案時において、水素エンジン技術に関する提案者らの経験から熱効率40%程度の実績があり、水素噴流制御等の要素技術に関する知見も備えている。ただし過去の実績では小型システムでの実験検討に限られる。エンジンの熱効率はエンジン出力(サイズ)が大きいほど熱効率が高い傾向にある。大型の水素エンジンは実用化されていないため、直接的に比較対象となるエンジンは存在しないが、現状技術レベルを勘案すると7MW級エンジン単体で45%程度と考えている。

実証研究の技術目標値と社会導入の目標達成の間における目標は、本事業で構築した各基盤技術を統合した水素エンジンシステムの構築を目指し、統合システムでは要素部品によるロスを極力抑え、LHV換算における7MW級オープンサイクル型直噴水素エンジン単体の正味熱効率として50%を技術目標値として設定する。エンジンの熱効率は、定義によって様々な呼び方をなされるが(例えば機械損失を含む熱効率は図示熱効率と呼ばれる)、本研究計画書に記す熱効率とは、全て7MW級エンジン単体の正味熱効率として換算されたものである。

本研究の技術目標を達成するために排気損失、冷却損失、機械損失等の損失を極限まで低減すべく、冷却損失を低減する燃焼制御技術を開発し、等容度、圧縮比、比熱比等を向上してサイクル論から効率を高め、高圧水素製造の損失を低減する技術を開発する。

社会導入までに掲げるべき技術目標としてはシステム内の要素部品同士のエネルギー授受を加味し、互いのロスをカバーしてシステム全体の効率を高く維持する技術開発が必要である。また可燃性が極めて高い水素を扱うため、安全・信頼性の確保は重要であり、燃料である高圧水素を液体水素から高効率に供給するための液体水素高圧ポンプ及びガスリーク防止と耐久性・信頼性向上を両立したインジェクタ技術が必要である。

技術目標値以外に達成すべき項目としては、水素という新しいエネルギーを社会へ導入するためには社会受容性の確保が重要である。そのためには安全性を確保するための技術要件を明確化し、規制緩和への技術指針を示す必要がある。

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)		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	
		サイクルシミュエンジンシステム検証：作動ガス組成、圧縮比レシジョン検討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 					

マイルストーン

- 初年度：オープンサイクル用エンジン試験機において、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
- 2年度：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、かつ燃焼室壁面に密着しな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（技術目標値：熱効率 40%）
- 3年度：オープンサイクル用エンジン試験機において正味熱効率 50%達成
- 4年度：オープンサイクル用エンジン試験機において正味熱効率 50%，NOx 400ppm 以下を達成
- 5年度：オープンサイクル用エンジン試験機において正味熱効率 50%，NOx 200ppm 以下を実証

3. 研究実施内容

3-1. オープンサイクル用エンジン試験機における水素当量比センシング技術の開発

本研究では、水素直噴連続燃焼機関において点火プラグ近傍水素当量比計測を行うために火花誘起ブレイクダウン分光法（以下、SIBS法として示す。）を用いている。SIBS法は、火花放電により非伝導性物質を励起させて電氣的に生成されるプラズマを用い、発光スペクトルを計測する手法である。既存の内燃機関に用いられている点火プラグを利用できるため実機における計測が比較的行いやすい。本研究におけるSIBS点火プラグの概要を図1に示す。本研究ではプラグの中心に貫通孔を開け、光ファイバを組み込み可能な点火プラグを使用する。プラグに組み込んだ光ファイバから火花放電時の発光スペクトルを計測し、2元素の発光強度の比を用いることで燃料濃度の計測を行う。本研究では水素原子発光と窒素原子発光の発光強度比 (I_H/I_N) を使用した。また、スペクトル計測には、小型ファイバ型分光器 (Flame) および EMCCD カメラと分光器 MK-300 を使用した。

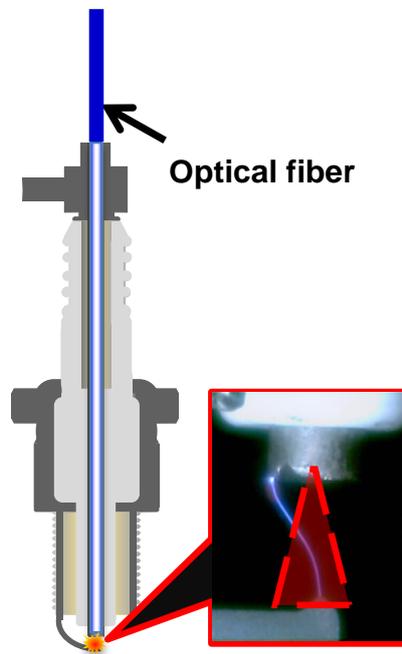


図1 SIBS 点火プラグの概要

本研究では東京都市大学に設置されている試験用単気筒内燃機関を用いた。また、図2に本研究で用いたインジェクタを示し、噴流と点火プラグとの位置関係を示す。Flat cone jet の5孔インジェクタは東京都市大学が独自開発したコモンレール式筒内直接噴射用水素噴射弁であり、コモンレール油圧駆動を用いることで20MPaまでの高圧噴射と多段噴射を可能としている。シート状噴流のスプレーガイド方式になっており、中央の噴孔から噴流が点火プラグに向う配置とした。

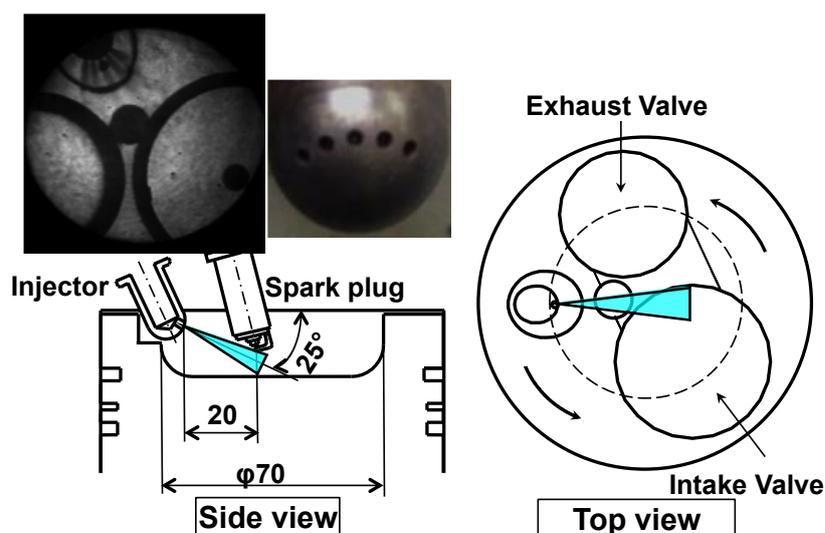


図2 水素直噴エンジンおよび噴流概要

まず、発光強度比と空気過剰率の関係を調べるため、水素燃料のポート噴射(PI)により、シリンダ内に予混合気を吸入した。計測時圧力が SIBS 計測に及ぼす影響を調べるために、点火時期(Ig.T.)とスロットル開度を変化させて実験を行った。空気過剰率 $\lambda = 3.0$, スロットル開度 50%, Ig.T.= 20~0°BTDC の条件におけるシリンダ内の平均圧力履歴を図 3 に示す。また、SIBS 計測によって得られたスペクトル分布の発光強度平均値を図 4 に示す。図 3 において、Ig.T.=0° BTDC における圧力が約 1.6MPa, さらに Ig.T.= 20° BTDC での最高圧力は約 2.5MPa にまで到達している。このような厳しい環境下においても SIBS 計測が可能であることから、光ファイバ組込型点火プラグの耐圧性を確認できた。図 4 のスペクトル分布から、燃料起因の 656nm の水素原子発光, 空気起因の 745nm の窒素原子発光と 777nm の酸素原子発光を確認することができた。スペクトル分布の短波長側と比べると、他の発光との干渉が少なく、背景発光の処理が容易なため、これら 3 つの原子発光で発光強度比をとる。

図 5 に背景発光処理をして得られた原子発光の発光強度比と空気過剰率の関係を点火時の圧力ごとに示す。Ig.T.= 20° BTDC, 点火時圧力 $P_{ig} = 1.1\text{MPa}$ と Ig.T.= 5° BTDC, $P_{ig} = 1.6\text{MPa}$ はスロットル開度 50%, Ig.T.=0° BTDC, $P_{ig} = 3.1\text{MPa}$ はスロットル開度 100%の実験で得られた結果である。図 5(a)は水素原子と窒素原子の発光強度比(I_H/I_N), 図 5 (b)は水素原子と酸素原子の発光強度比(I_H/I_O)を示している。 I_H/I_N と I_H/I_O の両方で、空気過剰率が希薄側になると、発光強度比が小さくなる線形的な傾向が得られた。また、図 5 (a), (b)の両方において、計測時の圧力が高くなると、傾きが急勾配になっている。図 4 のスペクトル分布も圧力上昇に伴い、発光強度が全体的に弱くなっており、計測時の圧力が SIBS 計測に影響していることがわかる。また、図 5 (a)よりも図 5 (b)の方が、傾きの変化が小さく、発光強度比の値もばらつきが小さい。これは、スペクトル分布の波長域によって圧力依存性が異なり、酸素原子発光よりも窒素原子発光が圧力の影響を受けやすいためだと考えられる。そのため、圧力上昇に伴い、窒素原子発光と酸素原子発光が強くなることで設定した空気過剰率に対する発光強度比の変化が小さくなり、傾きが急勾配になったと考えられる。また、傾きが小さいほど空気過剰率に対する発光強度比の変化が小さくなるので、精度が良い。そのため、 I_H/I_O よりも I_H/I_N が感度よく局所空気過剰率を算出できる。

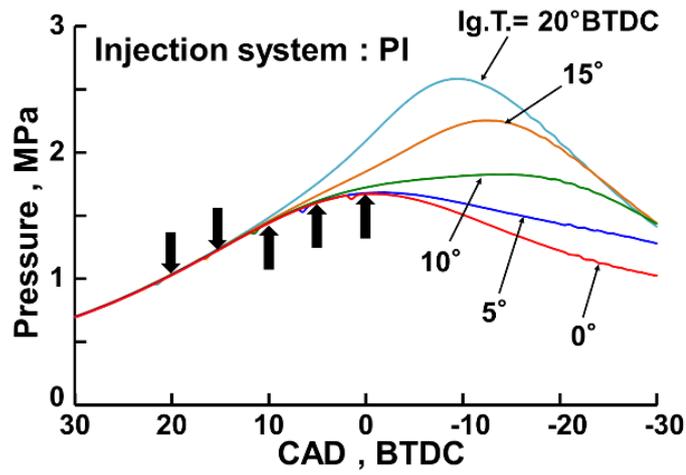


図 3 空気過剰率 $\lambda = 3.0$ におけるシリンダ内圧力履歴

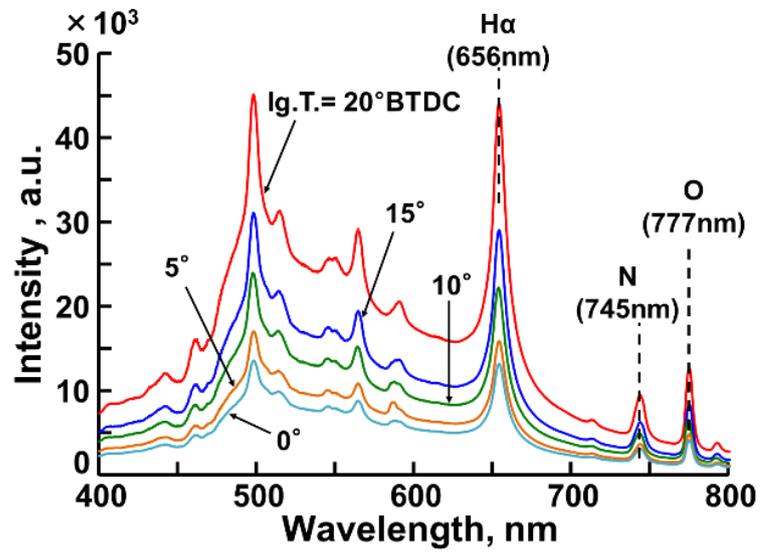
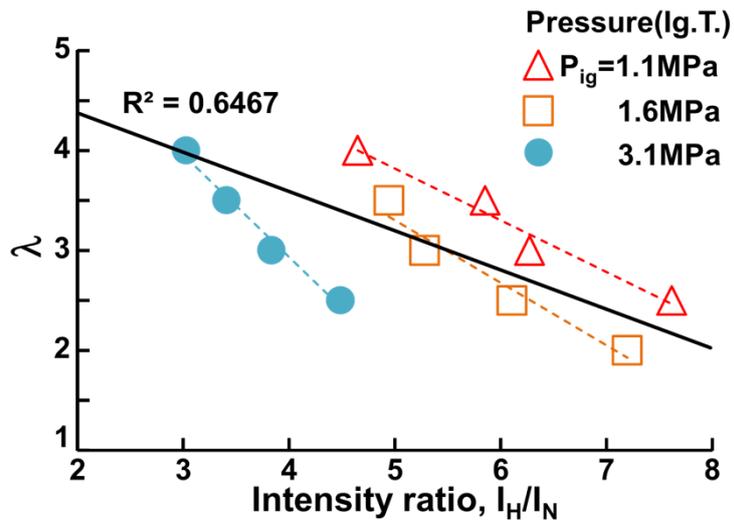
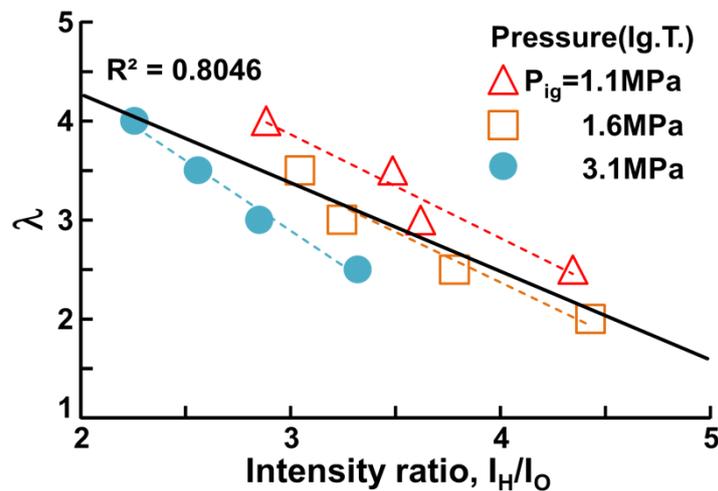


図 4 空気過剰率 $\lambda = 3.0$ において得られた SIBS スペクトラム



(a) 水素原子と窒素原子発光強度比



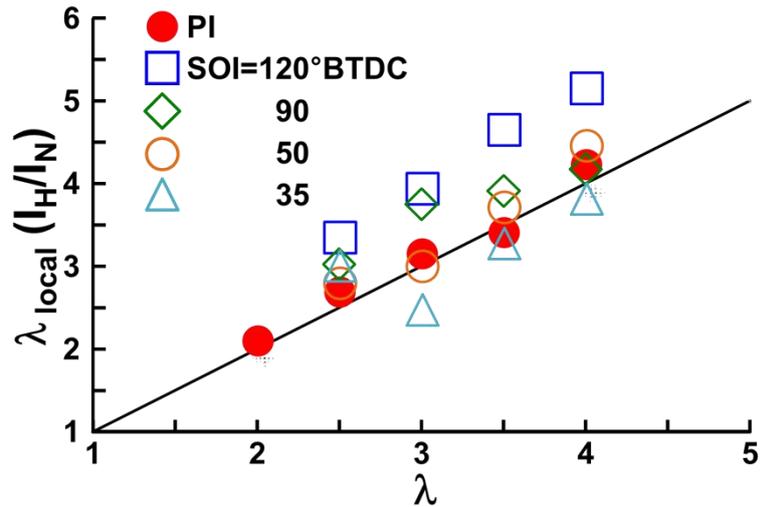
(b) 水素原子と酸素原子発光強度比

図 5 発光強度比と設定空気過剰率との関係

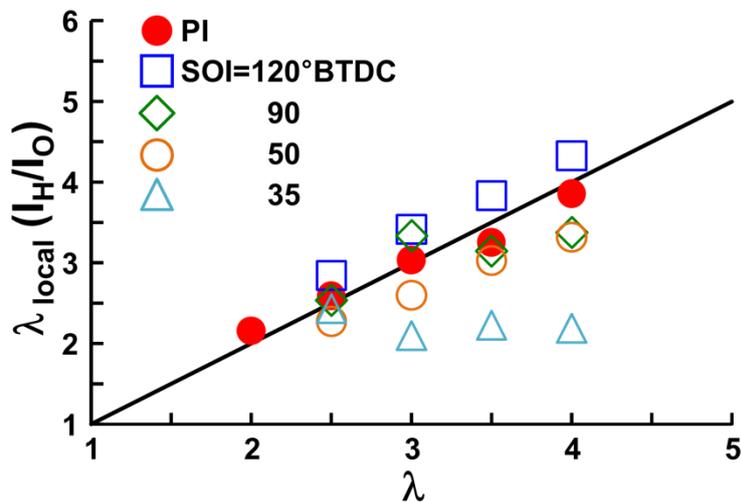
次に、図 5 で得られた発光強度比と空気過剰率の関係を用いて、筒内直接噴射方式での局所空気過剰率を計測した。図 2 のインジェクタを用い、スプレーガイド方式で実験を行った。混合気の成層化状態を調べるために、噴射開始時期 $SOI = 120 \sim 35^\circ BTDC$, $I_{g.T.} = MBT$, $\lambda = 2.0 \sim 4.0$ を条件とした。また、原子発光の圧力依存性が、計測した局所空気過剰率に及ぼす影響を調べるため、圧力依存性を考慮しない局所空気過剰率算出方法と圧力依存性を考慮した算出方法を比較した。

まず、圧力依存性を考慮しない局所空気過剰率を算出した。図 5 の発光強度比と空気過剰率の関係は、圧力依存性による傾きの変化を考慮せずに、実線のように全ての点における近似直線を用いる。その関係から算出した筒内直接噴射方式での局所空気過剰率の平均を図 6 に示す。図 6 (a) は、 I_H/I_N の原子発光強度比を用い、図 6 (b) は I_H/I_O の原子発光強度比を用いている。図 6 (a) は、噴射時期を遅角させても PI の結果と近い値を示している。また、ほぼ予混合状態だと考えられる $SOI = 120^\circ BTDC$ が PI よりも薄い値を示している。これは、圧力依存性を無視したために全体的に空気過剰率が高く見積もられていることが原因だと考えられる。一方、図 6 (b) は、 $SOI = 120 \sim 50^\circ BTDC$ で、設定した空気過剰率

と計測した局所空気過剰率が近い値を示しているが、 $SOI = 35^\circ$ BTDC では設定した空気過剰率に関係なくほぼ同じ局所空気過剰率を示している。これは、噴射時期の遅角により、燃料が拡散せずに点火プラグ近傍に濃い混合気が形成されていることが原因だと考えられる。図 6 (a),(b)を比較すると、用いる発光強度比によって局所空気過剰率の値や傾向が異なっている。これは、図 5 の圧力依存性が I_H/I_N と I_H/I_O で異なることが原因だと考えられる。そのため、圧力依存性が小さい I_H/I_O は比較的良好な精度で混合気の成層化をとらえることができているが、圧力依存性が大きい I_H/I_N は精度が悪化しており、成層化の傾向をとらえることができていない。



(a) 水素／窒素原子発光強度比により得られた空気過剰



(b)水素／酸素原子発光強度比により得られた空気過剰率

図 6 圧力依存性を考慮しない場合の計測空気過剰率

次に、計測時の圧力が局所空気過剰率計測に及ぼす影響を調べるため、圧力依存性を考慮しない局所空気過剰率と圧力依存性を考慮した算出方法を比較する。圧力依存性を考慮するため、図6の計測時シリンダ内圧力に伴う傾きの変化を図7に示す。点火時の圧力が高くなると、傾きが急勾配になっていることがわかる。そこで、図8に示すように発光強度比、シリンダ内圧力および設定空気過剰率の関係を補正MAPとして示し、点火時圧力に対応した傾きを導き、圧力依存性を考慮した局所空気過剰率を算出する。PIにおいて、圧力依存性を考慮しない場合と考慮した場合の局所空気過剰率の平均を図9に示す。圧力依存性を考慮しない場合と考慮した場合で、局所空気過剰率はほぼ同じ値を示した。変動係数COVは圧力依存性を考慮することで、全体的に小さくなっており、考慮しない場合よりも良い精度で局所空気過剰率を計測できることがわかった。

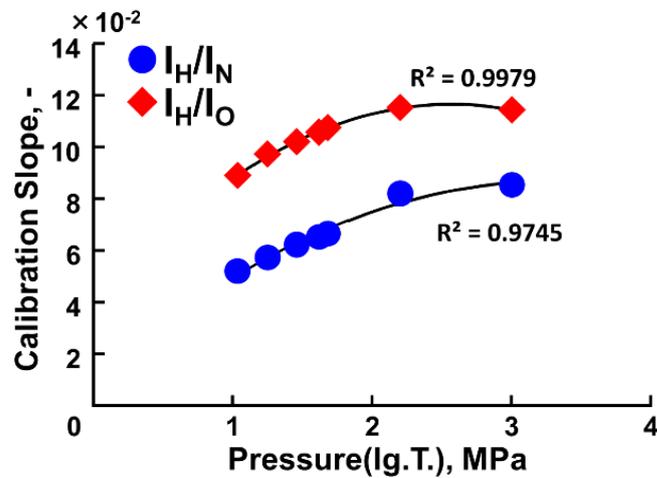


図7 計測時のシリンダ内圧力が計測に与える影響

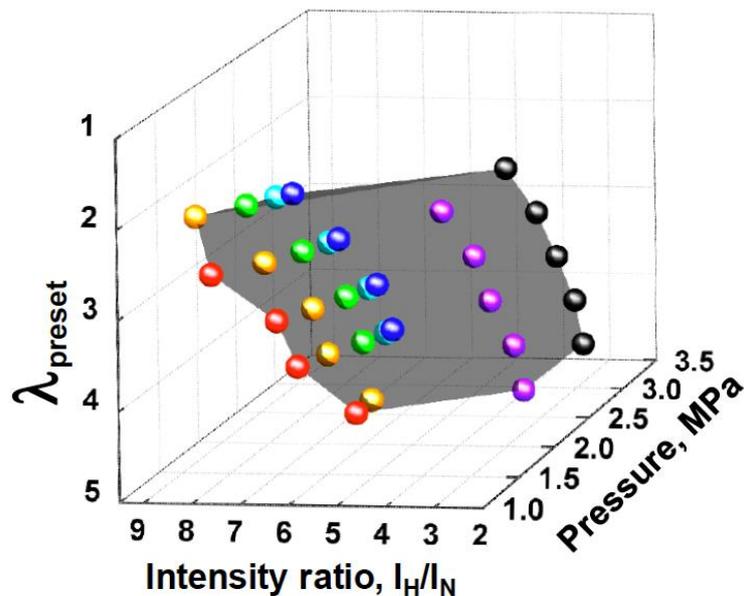


図8 圧力を考慮した補正MAP

次に、圧力依存性を考慮した I_H/I_N の発光強度比を用いて算出した局所空気過剰率 $\lambda_{local}(I_H/I_N)$ を図 10 に示す。図 6(a)では、局所空気過剰率が全体的に高く見積もられていたが、圧力依存性を考慮した図 10 では、全体的に下方へ移動している。これは、圧力依存性を無視した場合、図 7 の傾きが圧力上昇に伴って急勾配になることで、算出された局所空気過剰率が本来の値よりも高く見積もられることが原因だと考えられる。つまり、圧力依存性を考慮した発光強度比と空気過剰率の関係を用いることで、図 6 では得られなかった実際の局所空気過剰率に近い値を求めることができていると考えられる。

図 11 に燃料噴射時期を変更した場合の点火プラグ近傍での空気過剰率を示す。燃料噴射時期が遅角化されることで、点火プラグ近傍に燃料濃度の濃い領域が発生していることが分かる。これより、エンジンシリンダ内での層状燃料分布の概念図を図 12 に示す。点火プラグ近傍には燃料濃度が高い混合気が集まっている。この過濃混合気に点火することで希薄燃焼条件下においても安定した点火が実現できている。この過濃混合気は火炎伝播速度も速くなるため、初期の火炎伝播の安定化につながっている。また、コンパクトな燃焼領域を実現することで、壁面での冷却損失低減に寄与し、熱効率向上に役立っている。このように点火プラグに光ファイバを組み込み、SIBS 計測を実現できたことで、水素直噴エンジンにおける燃料層状状態を把握することができ、高熱効率向上に重要な知見を得ることができた。

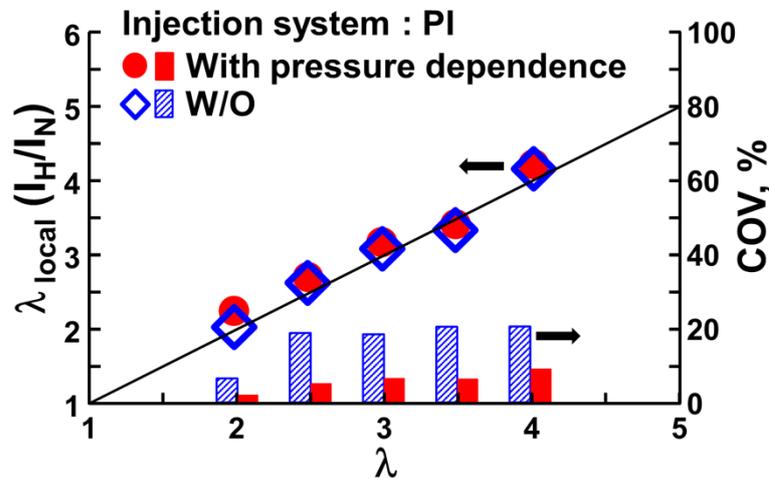


図 9 圧力依存性が PFI 実験時に与える影響

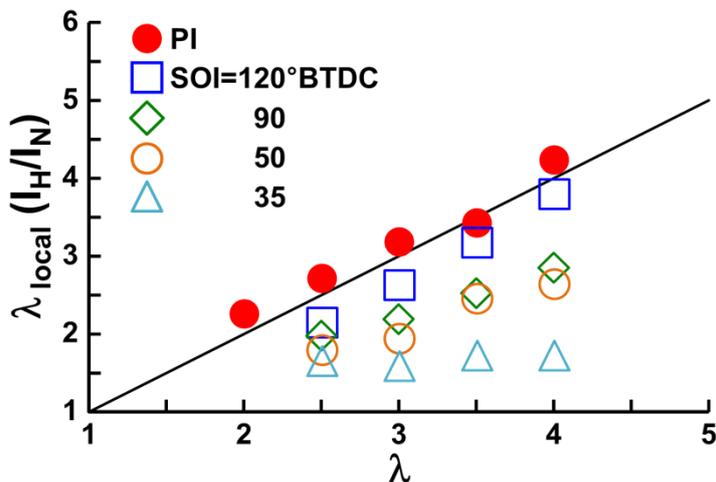


図 10 圧力依存性を考慮して得られた計測空気過剰率

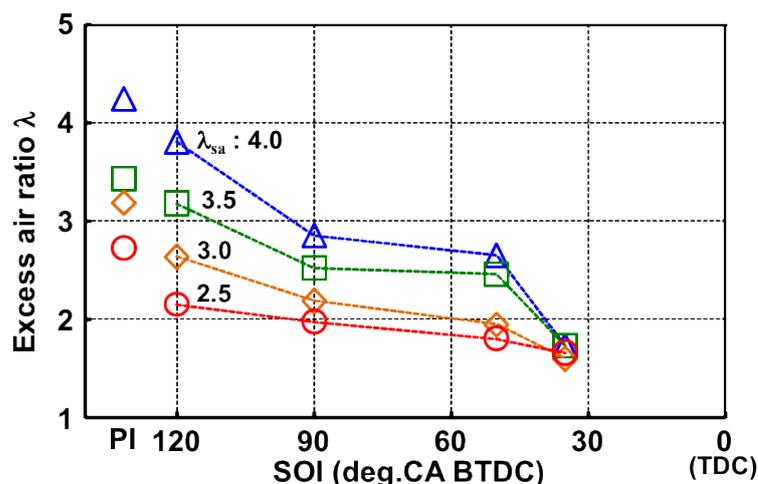


図 11 噴射時期が点火プラグ近傍空気過剰率に与える影響

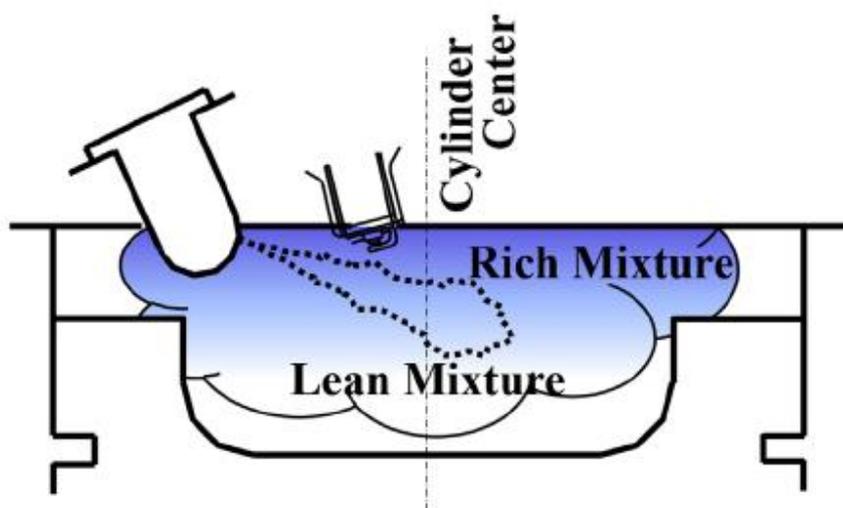


図 12 エンジンシリンダ内での層状燃料分布の概念図

つぎに SIBS 計測によるプラズマ状態の把握方法を検討する。点火から混合気へのエネルギー遷移が高効率で行われるためにはプラズマの状態が重要な要素となってくる。本研究では、プラズマ温度・密度を発光スペクトルから算出し、それらがどのパラメータとどういった相関があるかということ明らかにしていく。プラズマ温度を SIBS 法と関係の強い電子の励起に関連した電子励起温度、プラズマ密度を発光スペクトルの拡がりやシュタルク拡がりや模擬して算出した電子密度とそれぞれ定義した。

電子励起温度を算出するために、熱力学的平衡状態における放電プラズマ内の原子、イオン、電子は、それぞれの温度が等しい局所熱平衡状態 (LTE: Local Thermal Equilibrium) と仮定した。すなわち、原子、イオン、電子の速度分布を単一のプラズマ温度で記述することができる。プラズマ温度を求めるために、以下に示すボルツマン方程式に H_{β} と H_{α} のスペクトル線の放射係数を利用して算出可能である式を用いた。

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{g_1 A_1 \lambda_1}{g_2 A_2 \lambda_2} \exp\left(\frac{E_1 - E_2}{kT_{plasma}}\right) \quad (1)$$

I_1, I_2 はスペクトル線の放出係数 [$W \cdot m^{-3} \cdot sr^{-1}$], λ_1, λ_2 はスペクトル線の波長 [nm], A_1, A_2 は自然放出係数, g_1, g_2 は統計的重み, k はボルツマン定数, E_1, E_2 は準位エネルギー [eV], T_{plasma} は電子励起温度 (プラズマ温度) [K] を表している. 式(1)に対して自然対数を取ると, 統計的重みと上準位エネルギー E における一次方程式が得られる.

$$\ln\left(\frac{I_1 \lambda_1}{g_1 A_1}\right) - \ln\left(\frac{I_2 \lambda_2}{g_2 A_2}\right) = \frac{E_1 - E_2}{kT_{plasma}} \quad (2)$$

同一原子の二つの発光スペクトル線について同式の差を求めると式(3)の関係が得られる.

$$T_{plasma} = \frac{E_1 - E_2}{k \ln\left(\frac{\lambda_1 A_2 g_2 I_1}{\lambda_2 A_1 g_1 I_2}\right)} \quad (3)$$

式(3)において, H_β と H_α の発光強度を使用した. また, その他の値は NIST のデータベースより値を引用した.

また, 電子密度 (プラズマ密度) $N_{plasma} [cm^{-3}]$ を算出する条件を式(4)に示す.

$$N_{plasma} = 10^{12} \times T^{\frac{1}{2}} (E_1 - E_2)^3 \quad (4)$$

電子密度の計算にはスペクトルのシュタルク拡がりの考え方を利用した. プラズマ中の発光原子は, 周囲のイオンや電子による微視的電場の影響を受けて, シュタルク効果によるスペクトル線の拡がりを生じる. シュタルク効果とは, 外部電場の影響によって原子に電気双極子が誘起され, この電気双極子と電場の相互作用によるエネルギーを生じることで縮退が解け, 原子発光の線スペクトルに拡がりを生じる現象である. プラズマ中の微視的電場は電子密度に依存するため, スペクトル線の電子密度を測定することによって, プラズマの電子密度を求めることができる. H_α 線についてシュタルク拡がりを測定し, 式(5)を利用して電子密度 N_{plasma} を算出した.

$$N_{plasma} = 8.02 \times 10^{12} \left(\frac{\Delta\lambda_{1/2}}{\alpha_{1/2}}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (5)$$

$\Delta\lambda_{1/2}$ はスペクトルの半値全幅 (FWHM) であり, $\alpha_{1/2}$ は収縮シュタルク幅であり, 文献よりその値を引用した.

これらの式を用いて, プラズマ温度・密度を導くグラフを図 13, 14 に示す. 図 13 は H_β と H_α の発光強度比, 図 14 は H_α の半値全幅を発光スペクトルより求めることで, その値が導出される. これらと設定当量比の相関を調べたところ, プラズマ温度は約 6000~8000K, プラズマ密度は約 $1.5 \sim 2.5 \times 10^{18} cm^{-3}$ という値を示した. しかし, ばらつきが大きく, 相関や傾向は見られなかった. 原因としては, 放電現象が非常に非定常な状態であり, 設定当量比といった設定値での評価では, それぞれのサイクル毎の放電現象を捉えられないことが考えられる. そこで, それぞれのサイクルにおける当量比を表した

値に対する定量評価を行うことを考えた。それぞれの事象に落とし込むために岡山大学に設置している圧縮膨張機関において計測した各サイクルの水素と窒素の発光強度比における相関を図 15 に示す。図 15 より水素と窒素の発光強度比増加に対して、プラズマ温度は減少、プラズマ密度はほぼ一定の傾向をそれぞれ示した。この発光強度比は、厳密には水素と窒素の原子量比に起因しており、プラズマ温度に関しては水素原子量の増加に伴い、温度が低下するのに対して、プラズマ密度はほぼ一定値を示すことがわかった。

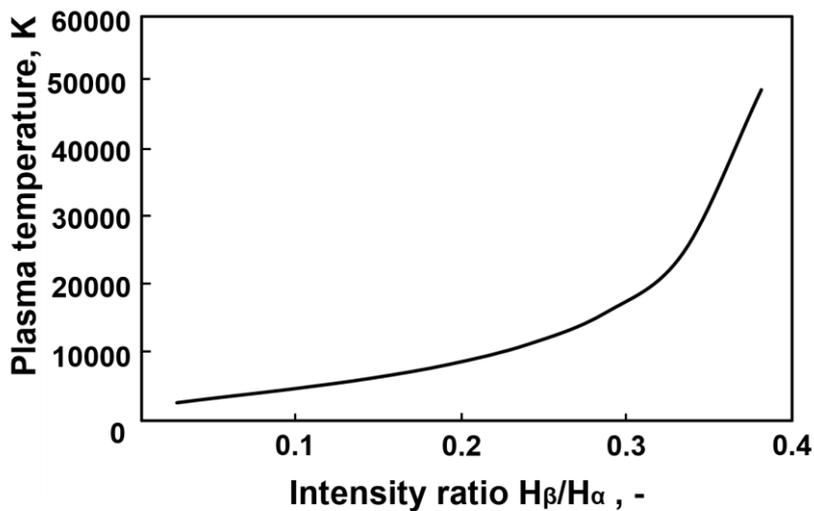


図 13 プラズマ温度算出方法

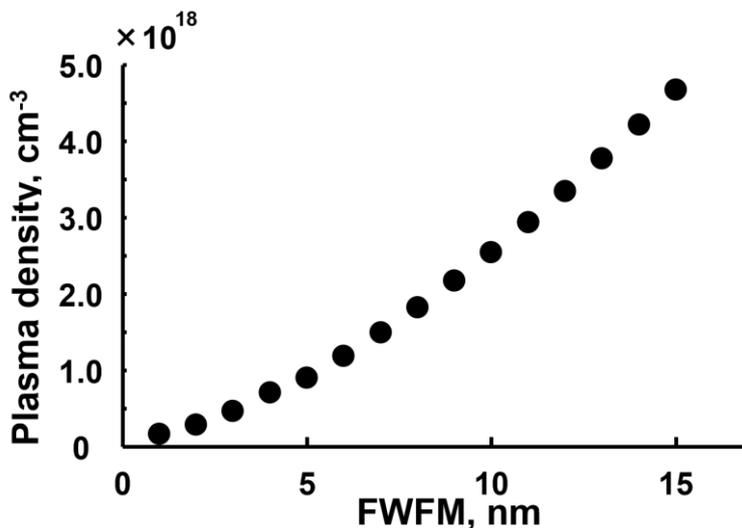


図 14 プラズマ密度算出方法

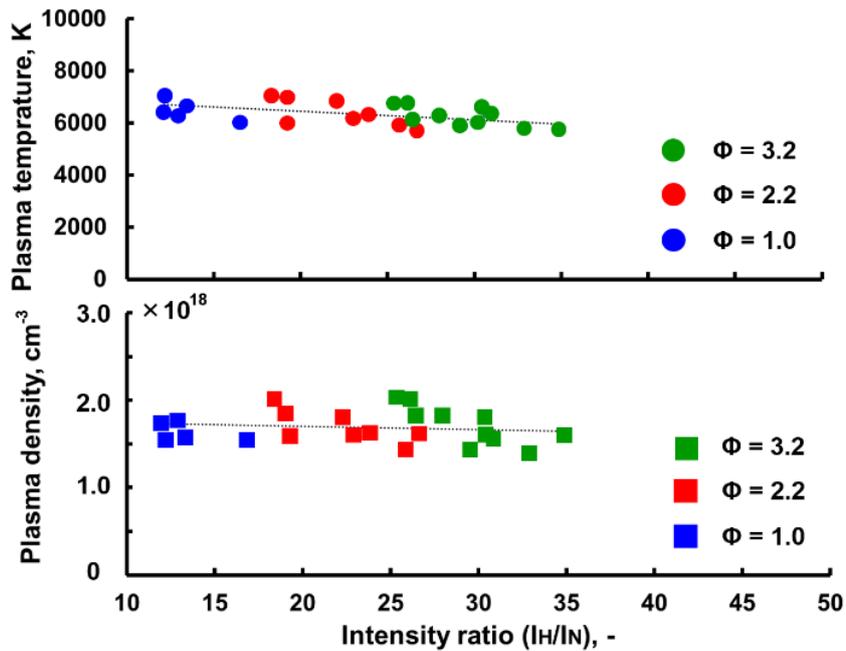


図 15 水素／窒素発光強度比とプラズマ温度・密度の関係

次に、実機関における点火プラグ近傍の局所燃料濃度計測を行った。空気過剰率 $\lambda=3.0$, SOI=40~120° BTDC, I_g.T.=20° BTDC の圧力履歴を図 16 に示す。噴射時期の遅角に伴い圧力の立ち上がりが急激になっている。実機関においても光ファイバ組込型点火プラグを用いて、プラズマ温度・密度の算出を試みた。しかし、プラズマ温度に関しては、H_βの発光が確認できなかった。実機においては $\lambda=3.0$ 付近の比較的水素が薄い条件下で運転しており、それによりH_βが検出されなかったため、プラズマ温度を算出することができなかった。そこで、プラズマ密度のみを算出し、水素と窒素の発光強度比との相関を調査した。図 17 に $\lambda=3.0$, SOI=40~120° BTDCにおけるプラズマ密度と発光強度比の関係を示す。燃料濃度に起因した発光強度比の増加に伴い、プラズマ密度も増加する傾向を示した。水素連続燃焼機関でプラズマ密度を算出することができた。直噴により点火プラグ近傍の数密度が増加するに伴い、プラズマ密度も増加する傾向を示した。

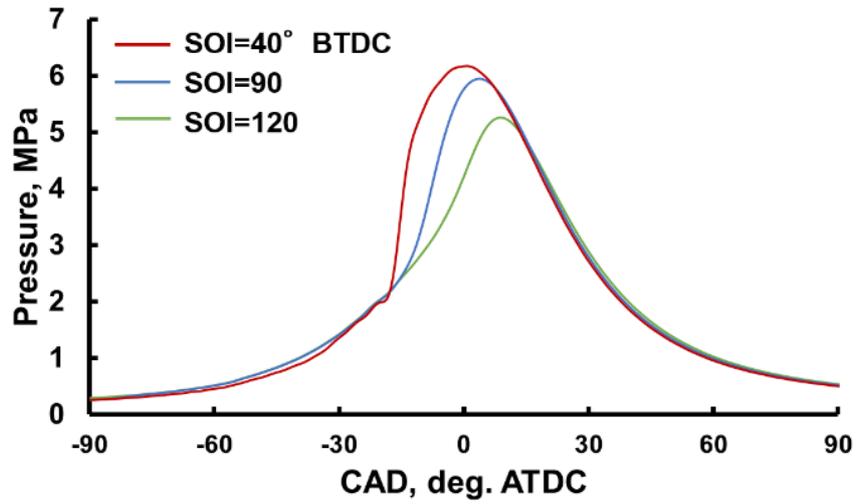


図 16 燃料噴射時期を変更した場合のシリンダ内圧力履歴

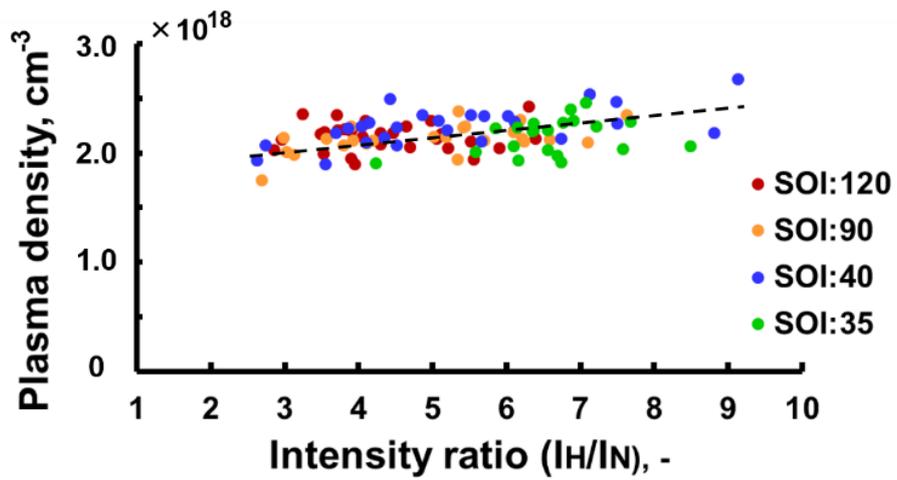


図 17 水素／窒素発光強度比とプラズマ密度の関係

3-2. CFD シミュレーションを用いた水素当量比センシング技術の計測精度検証

上述したように SIBS 計測システムを開発することで、実用水素エンジンにおける点火プラグ近傍燃料～空気混合比の計測が可能となってきている。さらなる計測精度向上のために違う手法との比較検討が必要である。一方、開発した SIBS 計測システムは、点火プラグ近傍のみの計測手法であるため、シリンダ内の水素噴流挙動を把握することも重要となる。そこで、エンジンシリンダ内の水素噴流挙動を数値シミュレーションにより解明するために水素エンジンの数値シミュレーション手法の開発を行っている。

本研究では大阪市立大学の脇坂知行教授によって作成されたエンジンシリンダ内の燃焼・噴霧解析プログラムである GTT(Generalized Tank and Tube)を使用した。GTT コードでは、境界適合格子による有限体積法、時間的離散化には陰解法を用いている。また、使用した乱れモデルは $k-\epsilon$ 2 方程式モデルであり、質量、運動量、エネルギー、濃度などの各保存式は次の一般方程式で表される。

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\vec{v}\phi - \Gamma_{\phi}\text{grad}\phi) = S_{\phi} \quad (6)$$

ここで、 t :時間、 \vec{v} :速度ベクトル、 ρ :密度、 ϕ :従属変数、 Γ_{ϕ} :有効拡散係数、 S_{ϕ} :生成・消滅を表すソース項である。ここで、圧力計算においては SIMPLEC 法を用い、流速計算には TVD スキーム、濃度計算においては VCIP スキーム、乱流エネルギーや乱流エネルギーの散逸率などの計算については Hybrid スキームを用いた。

本研究では、水素噴流を表現するためにガスパーセル法を用いた。ガスパーセル法は離散液滴モデルにおけるパーセルの概念を、気体噴流計算における局所的な運動量を考慮するために応用したものであり、噴射するガス全体を数千～数十万個のパーセルというラグランジュ粒子で表現する手法である。ガスパーセル法概念図を図 18 に示す。

ガスパーセル法では噴射したすべてのガスパーセルにおいてタイムステップごとに運動方程式を計算することによってそれぞれの挙動を計算する。この際、気相に対する運動量の影響は、ラグランジュ粒子一個を構成する粒子数を乗じて評価を行い、気相側における計算時においては、パーセルの持つ質量、体積は寄与しないものとし、運動量を除いた濃度輸送や熱輸送などの現象はすべて気相側のみで計算を

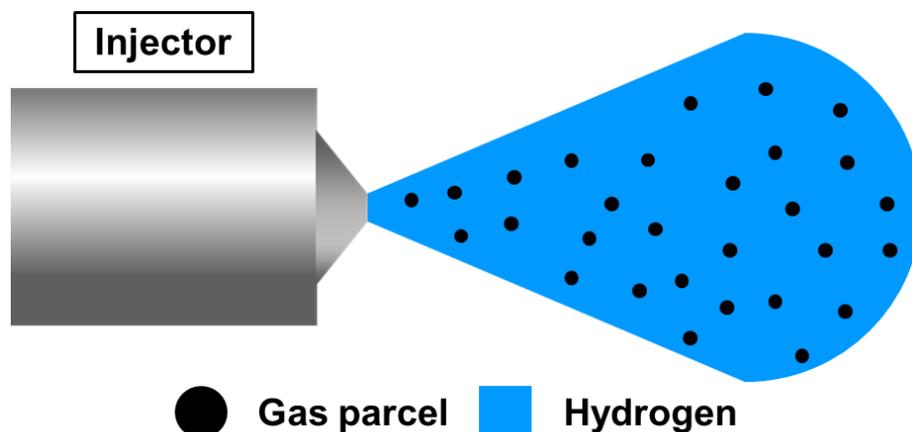


図 18 ガスパーセル法の概要

行う。また、噴射する全ガスパーセルの合計質量は実験によって得られた値と同一としている。ガスパーセルの直径はメッシュ間隔が噴孔径以上の場合は噴孔径と同一で噴孔出口に配置しており、一方メッシュ間隔が噴孔径未満の場合はガスパーセル直径をメッシュ間隔と同一とし、噴孔出口に該当する領域において噴孔直径範囲内に乱数を用いて円盤状に配置した。このとき、境界条件として、ガスの流入質量および成分濃度を噴孔位置のセルに与えた。

ガスパーセル法において、各ガス粒子の位置はガス粒子の速度 \vec{v}_d および時間刻み Δt から次式により導出する。

$$\vec{x}_d^n = \vec{x}_d^o + \vec{v}_d \Delta t \quad (7)$$

ここで、上添え字 n は新しいタイムステップ、 o は一つ前のタイムステップを表す。このとき、運動方程式により、ガス粒子の加速度は以下の式で求める。

$$\vec{a}_d = \frac{3 \rho_g}{8 \rho_d} \frac{|\vec{v} + \vec{v}^i - \vec{v}_d|}{r_d} (\vec{v} + \vec{v}^i - \vec{v}_d) C_D \quad (8)$$

ここで、 ρ_g : 気相ガス密度、 \vec{v} : パーセルが存在する位置における気相側速度、 \vec{v}^i : 変動成分である。また、 C_D : 抵抗係数であり、球の場合と同じ値を使用した。また、ガス粒子が気相側へ与える影響として、あるタイムステップ内において失った運動量に補正係数 C_{ag} とガスパーセルを構成するガス粒子数 n_d を乗じて、算出された運動量 \vec{S}_d を気相側へ与えている。

$$\vec{S}_d = -C_{ag} n_d (m_d^n \vec{v}_d^n - m_d^o \vec{v}_d^o) \quad (9)$$

このとき、 m_d : ガス粒子の質量であり粒子体積に噴射ガス密度を乗じて導出している。また、 n_d は以下の式で与えられる。

$$n_d = \frac{m_g}{\frac{4}{3} \pi \rho_d r_d^3} \quad (10)$$

ここで、 m_g : 一つのパーセルが代表する質量(総噴射ガス質量を全噴射パーセル数で割った質量)、 ρ_d : 噴射ガス密度、 r_d : ガス粒子半径を表す。気相との相対速度がしきい値以下になった場合は、ガスパーセルが気相へ与える影響が少なくなるため、計算負荷の観点より削除する。今回しきい値は 1.0m/s とした。また、ガスパーセルが壁面に衝突した後の挙動は、jet モデルに基づいた挙動を示す。

本研究室で行われた定容容器における水素噴流可視化実験を対象に水素噴流計算を行った。本実験は容器内にレーザーシートを作成し、噴孔部にトレーサ粒子(マイクロバルーン、平均粒径 40 μ m)を塗布した状態で水素を噴射する。そのときに水素噴流が形成する流動場に追従してトレーサ粒子が流れるため、その粒子のレーザーシートからの散乱光をもって水素噴流と仮定している。

ガスパーセル法において、流動場はラグランジュ粒子によって作成されるが、濃度輸送などの現象はオイラーメッシュ側で計算される。そのため、計算によって得られる水素噴流形状はメッシュサイズに大きく影響を受ける。そのため、適切なメッシュ間隔について検証を行った。図 19 にメッシュ間隔による噴流形状の違いを示す。Case I はメッシュ間隔が噴孔径の 2 倍である 2.0mm、Case II は噴孔径と同じ間隔である 1.0mm、Case III は噴孔径の半分である 0.5mm で作成しており、計算における水素噴流形状は質量分率 0.01% の等値面とした。Case I の結果は実験値と比較して水素噴流が過剰に太く表現さ

れており、水素噴流形状を再現できているとは言い難い。このように、噴孔径以上の計算メッシュを用いて計算を行う場合、計算精度に問題があることが確認できた。Case IIにおいては、Case Iより比較的水素噴流の凹凸を再現できており、下流側ほど噴流幅が広がっていく様子が確認できる。しかし、噴孔近傍においては噴射角を再現できておらず、直線的に表現されている。これに関して、ガスパーセル法の水素供給方法が影響していると考えられる。本手法ではパーセルの初期位置、つまり噴孔出口に該当するセルにガスパーセルが代表する質量を与えている。そのため、噴孔出口における燃料濃度が非常な濃くなるために隣接するセルに水素が輸送されやすいものと考えられる。このため、Case IIではメッシュ分解能が不足しており、噴流上流において再現できていないものと考えられる。Case IIIにおいては、定性的ではあるが上流から下流にかけて噴流幅の勾配がよく再現されている。この結果より、ガスパーセル法を用いて水素噴流を計算するには噴孔径の半分程度のメッシュ分解能が必要であることが判明した。

図 20 に計算によって得られた水素噴流と実験結果を比較して示す。計算における水素噴流は前節と同様に質量分率 0.01% の等値面とした。実験によって得られた水素噴流挙動と同様に、下流側へ向かうにつれて噴流幅が広がりながら発達している様子が確認できる。図において水素噴流は非対称に表現されているが、これはガスパーセルの初期位置を決定する際に乱数を用いていることが原因と考えられる。そのため、ガスパーセルが配置される初期位置に偏りが生じたため、このような結果が得られたと考えられる。今回の計算において、噴射したガスパーセルの数は 62500 個/ms としたが、さらなる計算精度を求める場合は、偏りを減らすために噴射パーセル数を増加させることが望ましい。図 21 に噴射開始後 0.4ms における流動場および質量分率の分布を示す。噴流先端部において、活発に周囲の気体を取り込みながら発達している様子が捕らえられている。水素の質量分率に着目すると、噴孔付近では比較的高い水素濃度の分布を示しており、下流側へ向かうほど雰囲気気体との混合が促進され、水素の質量分率が低くなっていく様子が確認できる。これより、水素噴流における混合気形成過程が再現できているものと考えられる。また、図 22 に各雰囲気気圧におけるペネトレーションの実験との比較を示す。このように各条件において、初めの立ち上がりした後、緩やかにペネトレーションが伸びていく様子が表現できており、特に噴射後期においては実験値と良好な一致をしていることが確認できる。これらの結果より、ガスパーセル法を用いた場合、ノズル出口下 20mm の領域においては、定容容器内における水素噴流挙動が再現できることがわかる。

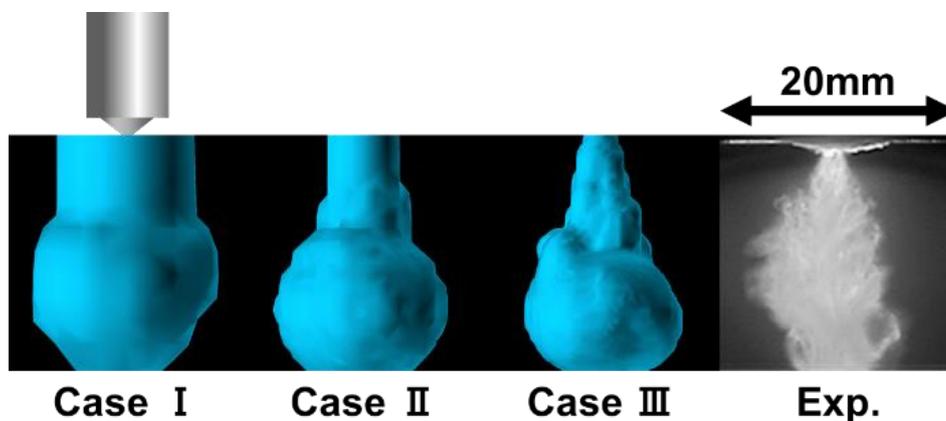


図 19 計算格子の大きさが噴流形状に与える影響

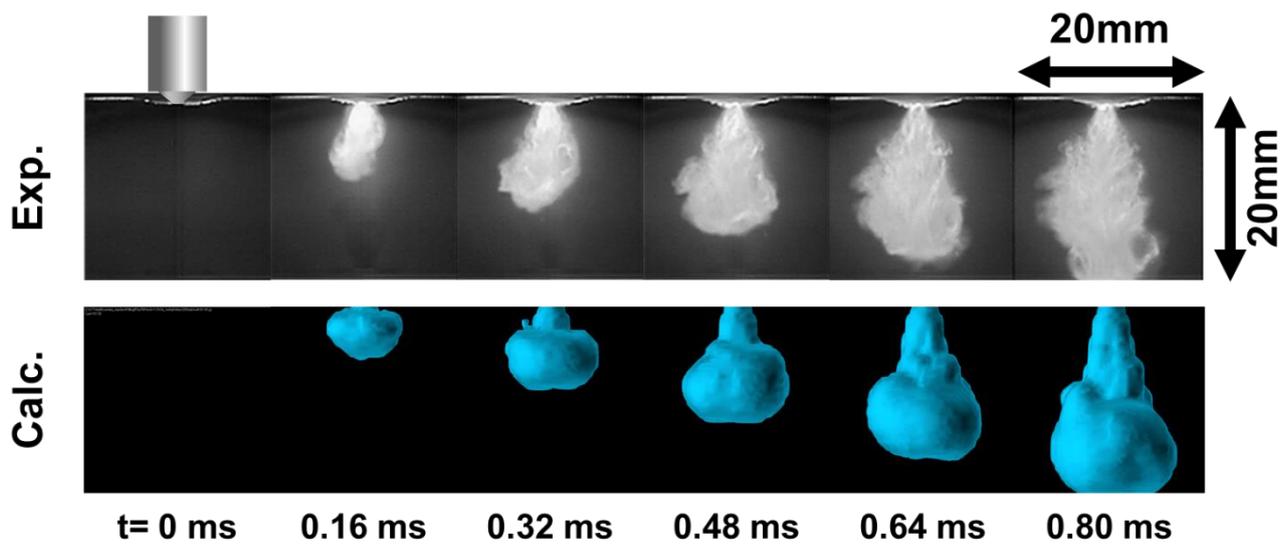


図 20 水素噴流挙動

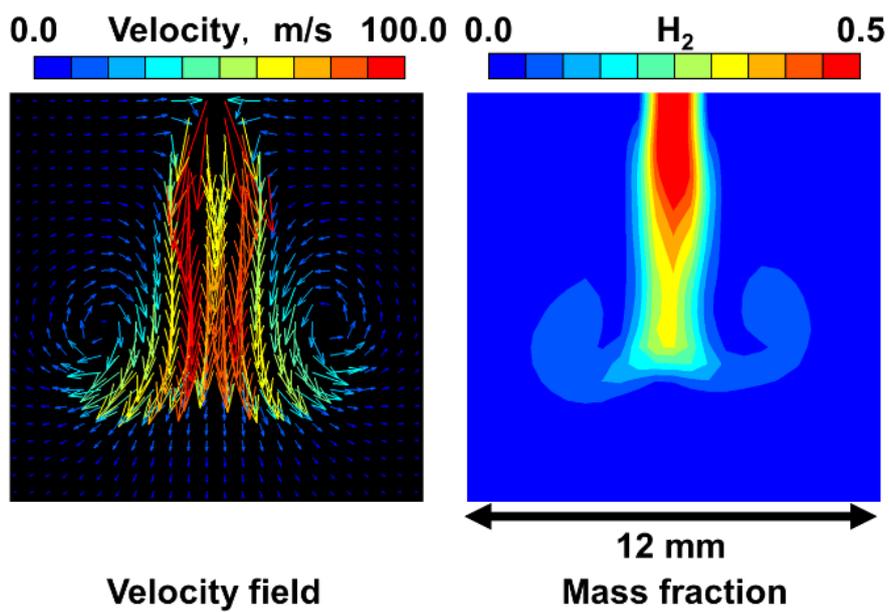


図 21 流動場および質量分率の分布

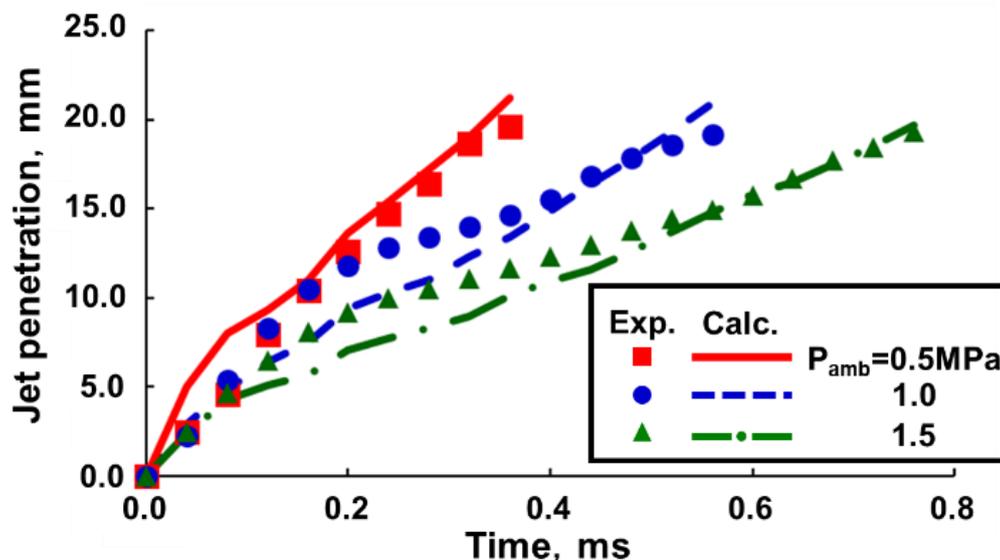


図 22 水素噴流の到達距離の時間変化

つぎに、本研究で行われた圧縮膨張機関における水素噴流の燃焼場の可視化画像との比較を行った。図 23 に噴射期間中における水素噴流挙動を示す。計算における水素噴流は、当量比 $\Phi=0.1$ の等値面とした。噴射開始より 3.0deg.ASOI の段階ですでにピストン上部に衝突しており、圧縮膨張機関における混合気形成過程の大部分において水素噴流は壁面に衝突していることが予測できる。ピストン上部に衝突後、水素は端部において隆起した状態で、噴射軸方向を中心として進展している様子が確認できる。また、このとき噴射軸方向に対して最も水素が輸送されていく様子が確認できる。噴射終了後において水素噴流はシリンダライナに衝突したのち、筒内中心に向かって発展していく様子がとらえられている。図 24 に、壁面衝突後である 3.0 deg. ASOI の噴射軸断面における流動場および水素質量分率の分布図を示す。図 24 (a) は筒内全体を示しており、図 24 (b) は(a)における白枠で囲われた領域をより詳細に示した図である。図 24 (a) より、噴射された水素はノズル出口付近では高濃度および速度を示しており、水素噴流によって筒内に激しい流動場が形成されている様子が表現されている。また、水素の質量分率に着目すると、壁面に衝突した水素は噴射方向に沿って、先端部分に多く滞留している様子が確認できる。これに関して、水素噴流の存在する領域としない領域の境界部、つまり衝突水素の端部分は流動場が小さい領域であることが考えられる。そのため、端部では比較的速度の速い上流側から多くの燃料が輸送されるためにこのような結果が得られたと考える。次に、図 24 (b) における流動場に注目すると、噴流先端部において渦が発生しており、気体噴流の壁面衝突した際の挙動を再現できているものと考えられる。また、渦が形成されている領域において高い質量分率を示している。

点火プラグ近傍における水素濃度を SIBS 結果と CFD 結果で比較する。燃料噴射時期を変更した場合、SIBS 計測結果と CFD 計算結果は非常に良い一致を示した。これにより、SIBS 計測結果の妥当性を検証できた。また、CFD により水素噴流挙動を把握できることが明らかになった。

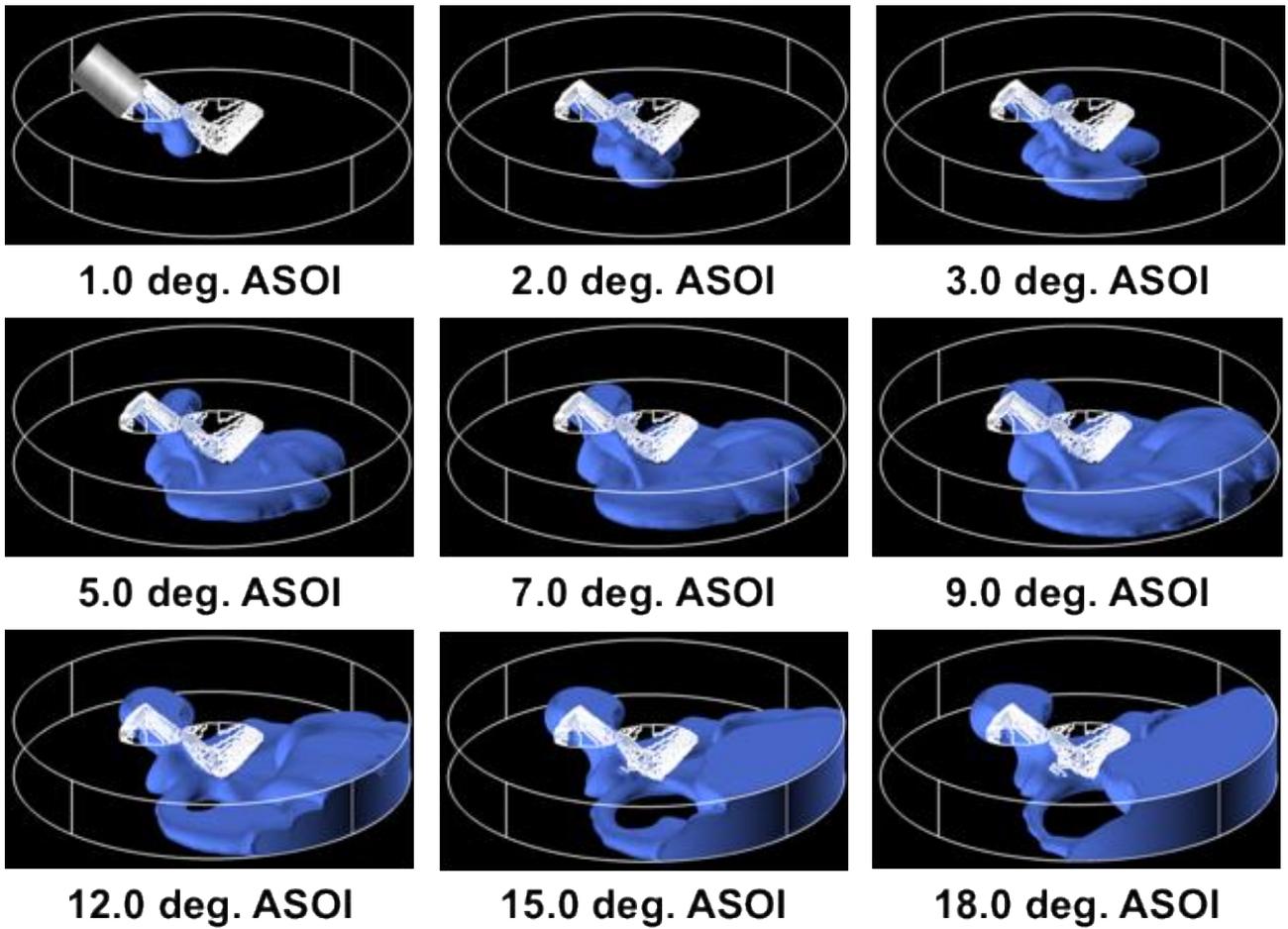
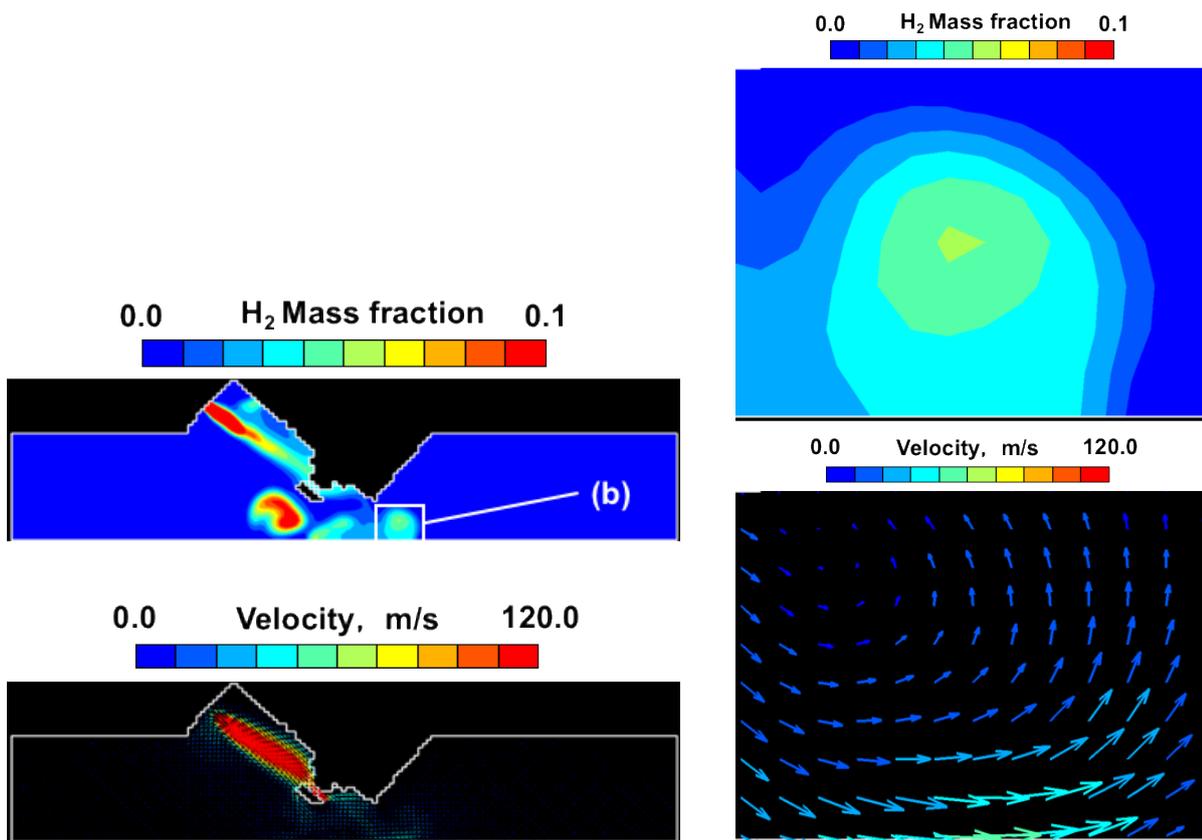


図 23 圧縮膨張機関における水素噴流挙動



(a) 水素噴流の概要

(b) 壁面近傍の水素噴流挙動

図 24 水素噴流挙動

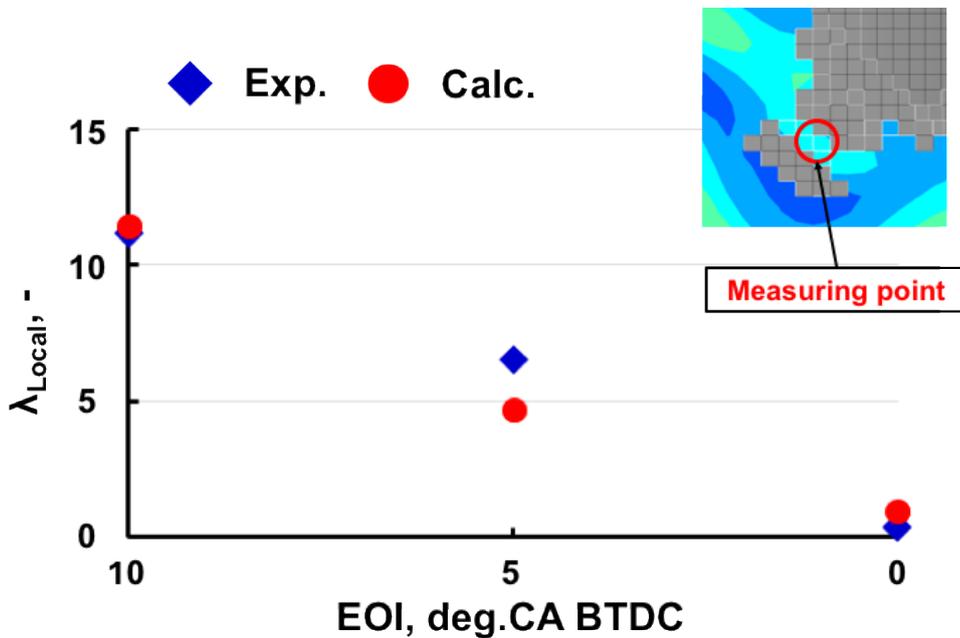


図 25 点火プラグ近傍空気過剰率の比較

3-3. まとめ

水素直噴エンジンにおける点火プラグ近傍水素燃料濃度計測技術を開発した。火花放電ブレイクダウン分光(SIBS)法は、水素原子～窒素原子発光強度比と混合気濃度が相関関係にあることを利用して計測を実施している。以下に得られた知見を示す。

- ・ 光ファイバ組込点火プラグを改良し、東京都市大学での水素エンジン実験に使用できるものを開発できた。
- ・ 点火時期でのシリンダ内圧力により、水素原子/窒素(酸素)原子の発光強度比の関係が影響を受け、設定空気過剰率との線形関係での傾きが異なることが明らかになった。スロットル開度、点火時期を変更し、シリンダ圧力が変わった場合の水素原子/窒素(酸素)原子の発光強度比の関係を補正MAPとして作成した。この補正MAPを使用することで、吸気管に水素燃料を噴射させ、シリンダ内での水素～空気混合気濃度が均一であると仮定した場合の計測精度は10%程度まで向上した。
- ・ 東京都市大学でのオープンサイクル用水素直噴エンジンにおいて、過濃混合気塊での点火時における空気過剰率計測を行った。過濃混合気塊と早期燃料噴射条件での点火プラグ近傍空気過剰率が異なる傾向を示すことを確認した。エンジンシリンダ内には軸方向に成層化された燃料濃度分布を示し、高効率化、低NO_x排出に寄与していることが明らかになった。
- ・ GTTコードとガスパーセル法を用いることで、エンジンシリンダ内水素噴流挙動の解析を行った。ガスパーセル法を用いて水素噴流挙動を再現する場合、噴孔径の半分程度のメッシュ分解能が必要であることが判明した。定容容器における水素噴流計算において、噴流先端部において活発に周囲気体との混合が行われる様子が再現でき、噴流先端距離においても、実験値との一致が見られた。CFDツールを用いてSIBS計測システムでの局所空気過剰率計測精度の検証を行い、比較的良い一致を示し、SIBS計測の有用性を示すことができた。

3-4. 今後の課題

東京都市大学にて実施されている水素直噴エンジン実験に対応するために、以下のことを実施することで、より詳細な現象把握につながると考えている。

- ・ 東京都市大学では過給条件での実験を実施している。過給条件でのSIBS計測を実施することで、さらなる水素噴流挙動の把握につながり、熱効率向上と低NO_xに寄与することが可能となる。
- ・ 東京都市大学における水素直噴エンジンにおけるCFDシミュレーションを実施することで、SIBS計測結果の精度検証ならびにさらなる水素噴流挙動の把握につながり、熱効率向上と低NO_x化に寄与することが可能となる。

4. 外部発表実績

(1) 論文発表

<査読付き> 1件

・2016年8月24日 「International Journal of Hydrogen Energy」にて論文が掲載された。
Vol.41, (2016), pp.14283-14292.

Kazi Mostafijur Rahman, ○河原伸幸, 松永大知, 富田栄二, 高木靖雄*, 三原雄司* (岡山大学, *東京都市大学)

Title: Local fuel concentration measurement through spark-induced breakdown spectroscopy in a direct-injection hydrogen spark-ignition engine

<査読なし (総説等含む)>

該当なし

(2) 学会, 展示会等発表

<招待講演> 国内1件 (国際会議)

・2016年3月8日(火)に2nd International Forum on Advanced Technologies (IFAT2016)にて講演発表 (Keynote speech) を行った。

○河原伸幸, 富田栄二, 高木靖雄*, 三原雄司* (岡山大学, *東京都市大学)

「Local air-fuel ratio measurement using spark-induced breakdown spectroscopy (SIBS) in a hydrogen DISI engine」

<口頭発表> 国内4件

・2015年10月14日(水)自動車技術会秋季大会にて発表を行った。

河原伸幸, ○笠原勇喜, 富田栄二, 高木靖雄*, 三原雄司* (岡山大学, *東京都市大学)

「ガス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」

・2016年12月6日に第27回内燃機関シンポジウムにて講演発表を行った。

河原伸幸, 亀田瑞城, Rahman Kazi Mostafijur, 富田栄二, 高木靖雄*, 三原雄司* (岡山大学, *東京都市大学)

「水素直噴火花点火機関における火花誘起ブレイクダウン分光法による局所空気過剰率計測 (露光条件が局所空気過剰率計測に与える影響)」

・2017年12月7日に第28回内燃機関シンポジウムにて講演発表 (2件) を行った。

谷 広貴, 河原伸幸, 富田栄二, 高木靖雄*, 三原雄司* (岡山大学, *東京都市大学)

「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」

陰山和気, 河原伸幸, 富田栄二, 高木靖雄*, 三原雄司* (岡山大学, *東京都市大学)

「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 (ガスパーセル法を用いた水素噴流挙動の数値解析)」

<ポスター発表>

該当なし

<展示会，ワークショップ，シンポジウム等> 国内 1 件

- ・2016年8月25日～26日にJSTフェア2016に参加し，ポスター発表を行った.
「点火プラグ一体型水素濃度センサの開発」

(3) プレス発表

- ・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

該当なし

5. 特許出願実績

該当なし

6. 参考文献

特になし.