



乱流予混合火炎の火炎面の三次元挙動に関する研究

橋本, 英樹

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2008-09-25

(Date of Publication)

2014-07-23

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲4418

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1004418>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



氏 名 橋本 英樹
博士の専攻分野の名称 博士（工学）
学 位 記 番 号 博い第 551 号
学位授与の要件 学位規則第 5 条第 1 項該当
学位授与の日付 平成 20 年 9 月 25 日

【 学位論文題目 】

乱流予混合火炎の火炎面の三次元挙動に関する研究

審 査 委 員

主 査 教 授 富山 明男
教 授 平澤 茂樹
教 授 藤田 一郎
准教授 細川 茂雄

地球温暖化防止のために炭化水素燃料の燃焼に代わる新たなエネルギーの開発が急がれている。しかし、現実的な代替エネルギーの確立には至っておらず、未だ必要なエネルギーの80%近くを燃焼に依存している現状では、当面、エネルギーを燃焼に頼らざるを得ない。したがって、環境負荷を考慮したより高効率な各種燃焼装置の開発が当面の重要課題となる。燃焼装置の高効率かつ低環境負荷化の実現には、乱れによる燃焼促進効果を積極的に利用した乱流予混合燃焼の採用が有効な手段である。しかし、燃焼場における乱流特性等の条件により火炎は局所的に消炎し、さらには火炎全体の消炎へと移行し、ついには燃焼が維持できなくなる。このことは乱れによる燃焼促進効果に限界が存在することを示しており、実用燃焼器を設計、開発する上で極めて重要な問題である。

乱流予混合火炎の構造や乱流燃焼速度は未燃焼混合気の乱流特性の影響を強く受け、乱れと火炎の相互作用によって決まると考えられている。乱れと火炎の相互作用の理解には火炎面の動き、すなわち火炎面挙動の把握が必要不可欠であるが、火炎面挙動を計測するための決定的手法はこれまで確立されていなかった。一方、乱流燃焼の計測に要求される時間分解能および空間分解能の高さや乱流特性に対する実験条件の設定自由度の低さ等により、数値計算による乱流燃焼の研究が非常に重要な役割を果たすようになってきた。しかし、現段階では乱流燃焼に関する三次元直接数値計算結果等と比較し得る実験結果は極めて限られており、その妥当性の検討は困難な状況にある。したがって、乱れと火炎の相互作用を明らかにし乱流予混合火炎における燃焼促進メカニズムを解明するため、また数値計算結果と実験的事実を照合・検討し数値計算技術をさらに進展させるためにも、火炎面挙動の三次元計測手法の確立が急務であるといえる。

そこで本研究では、乱流予混合火炎の火炎面挙動を三次元計測する手法を確立し、火炎面の三次元挙動を明らかにすることを目的とした。まず、四つの受感部を有する静電探針による火炎面挙動の三次元計測手法を確立した。次に、乱流燃焼ダイアグラムにおいて基礎的な火炎構造として火炎片領域に分類される乱流予混合火炎を対象に、確立した手法を用いて火炎面の三次元挙動を計測した。

本論文は六つの章より構成されている。以下に各章の概要をまとめる。

第1章は緒論である。乱流予混合燃焼に関する従来の研究を概観し、本研究の目的を明確にした。

第2章では、四つの受感部を有する静電探針を製作し、製作した静電探針を使用して乱流予混合火炎の火炎面挙動の三次元計測手法を開発した。静電探針により計測されるイオン電流波形は、使用する静電探針の構造や局所的な火炎面の形状などの様々な因子に依存

して変化する。したがって、乱流予混合火炎より得られるイオン電流波形を解析し、火炎面挙動を三次元計測する際に考慮すべき因子を明確にする必要があった。そこで、静電探針法に関する過去の文献を調査し、静電探針法の適正使用条件および基本的特性を明確にし、それらに基づき四つの受感部を有する静電探針を製作した。また、静電探針法は接触法であるために、静電探針を火炎に挿入することによる擾乱の影響が問題となる。そこで、製作した静電探針による擾乱の影響を調べ、形状の最適化を行った。また、形状の最適化を行った静電探針により記録される乱流予混合火炎のイオン電流波形の解析手法を検討し、火炎面移動速度の計測誤差を考察した。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 静電探針の突き出し量を15mm以上とした場合、平均流速に及ぼす擾乱の影響は無視できる。
- (2) A/D変換の時間分解能を1MHzとした場合、各受感部の座標と火炎面が受感部を通過する時刻の計測誤差による火炎面移動速度の計測誤差は2%以下である。
- (3) 四つ受感部で形成される空間を通過する火炎面を局所的に平面と仮定することによる火炎面移動速度の計測誤差は、曲率半径が4mmの火炎面に対して10%程度である。

第3章では、第2章で開発した四つの受感部を有する静電探針による火炎面挙動の三次元計測手法を確立し、量論比付近におけるプロパン・空気乱流予混合ブレンズン火炎の火炎面の三次元挙動を調べた。まず、バーナ中心軸上における火炎面の三次元挙動を調べ、本計測結果の妥当性を検証した。次に、火炎片領域を多重火炎と皺状層流火炎の二領域に区分した場合に、両領域とその境界に分類される乱流予混合火炎における火炎面の三次元挙動を計測した。その結果、以下の結論を得た。

- (4) 四つの受感部を有する静電探針により、乱流予混合火炎の火炎面挙動を三次元計測できる。
- (5) 未燃焼混合気側に移動する場合と燃焼ガス側に移動する場合で、火炎面挙動は異なる。
- (6) 火炎構造が多重火炎と皺状層流火炎に分類される場合でも、本実験条件では火炎面挙動に有意差はない。
- (7) 平均流速や乱れ強さに基づき火炎面移動速度を議論する際には、熱膨張による流れの変化を考慮する必要がある。
- (8) 局所燃焼速度と局所熱膨張は、未燃焼混合気側に移動する火炎面の移動速度を加速し、燃焼ガス側に移動する火炎面の移動速度を減速する。

(氏名：橋本 英樹 NO. 3)

第4章では、乱流燃焼特性に影響を及ぼす混合気固有の性質である層流燃焼速度と火炎面前後における密度変化が火炎面挙動に及ぼす影響を明らかにすることを目的に、層流燃焼速度が等しい希薄、過濃なプロパン・空気およびメタン・空気乱流予混合火炎の火炎面の三次元挙動を調べた。また、乱流予混合火炎の火炎面挙動に及ぼす選択拡散の影響を考察した。その結果、以下の結論を得た。

- (9) 希薄、過濃メタン火炎および希薄プロパン火炎の火炎面挙動に有意差はない。
- (10) 他の条件とは異なり、過濃プロパン火炎の火炎面は移動方向にかかわらず半径方向にはバーナ外側に偏向して移動する。
- (11) 希薄プロパン火炎に比べ、過濃プロパン火炎の火炎面移動速度は大きい。
- (12) 過濃プロパン火炎では、乱れが火炎面の凹凸を誘起し、火炎面の凹凸が選択拡散を助長し、選択拡散による局所燃焼速度の増加が火炎面の湾曲をさらに助長するという非線形な正のフィードバック効果が表れる。

第5章では、流れと火炎の形態が火炎面挙動に及ぼす影響を明らかにすることを目的に、ブンゼン火炎と同様の非燃焼時の流れに対し、ブンゼン火炎とは異なる火炎形態をとる乱流予混合V型火炎の火炎面挙動を調べた。その結果、以下の結論を得た。

- (13) V型火炎とブンゼン火炎の火炎面挙動は大きく異なる。
- (14) V型火炎では、未燃焼混合気側に移動する火炎面の速度ベクトルの軸方向成分が負になる場合がある。
- (15) V型火炎では、付着点近傍の局所熱膨張は主にバーナ外側に向かって起こる。これが、未燃焼混合気側に移動する火炎面の速度ベクトルの軸方向成分が負となる主因である。
- (16) 流れと火炎の形態の違いによる火炎面挙動の相違に関しても、局所熱膨張と局所燃焼速度が重要な役割を果たす。

第6章では、各章において得られた知見を総括し、本研究の結論を示した。

以上、本研究では乱流予混合火炎の火炎面挙動の三次元計測を実現し、火炎面の移動速度を定量的に評価した。その結果、従来の計測手法では評価し得なかった乱流予混合火炎において選択拡散の影響が現れるメカニズムを明確にできた。また、V型火炎における軸方向速度成分が負である火炎面の存在を発見するとともに、その発生メカニズムを明確にした。

氏名	橋本 英樹		
論文題目	乱流予混合火炎の火炎面の三次元挙動に関する研究		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	富山 明男
	副査	教授	平澤 茂樹
	副査	教授	藤田 一郎
	副査	准教授	細川 茂雄

要旨

地球環境保全の観点から、環境負荷を低減化した高効率燃焼装置の開発が求められている。燃焼装置の高効率化、低環境負荷化の実現には、乱れによる燃焼促進効果を積極的に利用した乱流予混合燃焼が有効な手段である。しかし、乱流予混合火炎の燃焼限界、乱流燃焼速度は乱れと火炎の相互作用によって決まると考えられているが、火炎面挙動、すなわち火炎面の移動速度や傾き、曲率などの計測手法が確立されていないためこれらの物理的機構は明らかにされていない。したがって、乱れと火炎の相互作用を明らかにし乱流予混合火炎における燃焼促進メカニズムを解明するため、また近年急速に発展している数値計算技術の妥当性検証のためにも、火炎面の三次元計測手法の確立が急務である。そこで、本研究では、火炎面移動速度の三次元計測手法を確立するとともに乱流予混合火炎の火炎面挙動を明らかにすることを目的としている。

第1章は、本研究の背景ならびに従来研究を整理した後、本研究の目的を述べている。

第2章では、四つの受感部を有する静電探針を用いた乱流予混合火炎の火炎面移動速度の三次元計測手法を開発している。この際、静電探針により計測されるイオン電流波形が静電探針の構造や局所的な火炎面形状などの様々な因子に依存するため、過去の研究を調査・分析し、四つの受感部を有する静電探針設計指針を提示している。また、静電探針により生じる擾乱の影響を調べ、静電探針形状の最適化を図るとともに、得られたイオン電流波形の解析手法を検討し、火炎面移動速度の計測誤差を検討している。その結果、(1)静電探針の突き出し量を15mm以上とすると平均流速に及ぼす擾乱の影響は無視できること、(2)イオン電流のサンプリング周波数を1MHzとした場合、各受感部の座標と火炎面が受感部を通過する時刻の計測誤差による火炎面移動速度の計測誤差は2%以下であること、(3)四つ受感部で形成される測定領域内を通過する火炎面を平面と仮定することにより生じる火炎面移動速度の計測誤差は、曲率半径が4mmの火炎面に対して10%程度であることを明らかにしている。

第3章では、前章で開発した火炎面移動速度の三次元計測手法を理論混合比付近におけるプロパン・空気乱流予混合ブンゼン火炎に適用し、火炎面の三次元挙動を調べている。まず、バーナ中心軸上における火炎面移動速度を測定し、本計測結果の妥当性を検証している。次に、多重火炎と皺状層流火炎の境界に分類される乱流予混合火炎における火炎面の三次元挙動を調べている。その結果、(4)四つの受感部を有する静電探針により、乱流予混合火炎の火炎面移動速度を三次元計測可能であること、(5)火炎面移動速度は、未燃焼混合気側に移動する場合と燃焼ガス側に移動する場合で異なること、(6)多重火炎と皺状層流火炎の火炎面移動速度に有意な差はないこと、(7)熱膨張による流れの変化は火炎面移動速度に影響を及ぼし、非燃焼時の流れ場に基づく火炎面移動速度の推算値と大きく異なること、(8)局所燃焼速度と局所熱膨張は、未燃焼混合気側に移動する火炎面の移動速度を加速し、燃焼ガス側に移動する火炎面の移動速度を減速することを明らかにしている。

第4章では、混合気固有の性質として定義される層流燃焼速度と火炎面前後における密度変化が火炎面挙動に及ぼす影響を明らかにするために、層流燃焼速度が等しい希薄/過濃なプロパン・空気およびメタン・空気乱流予混合火炎の火炎面の三次元燃焼速度を調べている。その結果、(9)希薄・過濃メタン火炎および希薄プロパン火炎の火炎面燃焼速度に有意差はないこと、(10)過濃プロパン火炎の火炎面は、他の条件とは異なり移動方向にかかわらず半径方向バーナ外側に偏向して移動すること、(11)希薄プロパン火炎に比べ、過濃プロパン火炎の火炎面移動速度は大きいこと、(12)過濃プロパン火炎では、乱れが火炎面の凹凸を誘起し、火炎面の凹凸が選択拡散を助長し、選択拡散による局所燃焼速度の増加が火炎面の湾曲をさらに助長するという非線形な正のフィードバック効果が表れることを明らかにしている。

氏名

橋本 英樹

第5章では、流れと火炎の形態が火炎面挙動に及ぼす影響を明らかにするために、非燃焼時にはブンゼン火炎と同様の流れであるにも関わらず、燃焼時にはブンゼン火炎とは異なる火炎形態をとる乱流予混合V型火炎の火炎面挙動を調べている。その結果、(13)V型火炎とブンゼン火炎の火炎面挙動は大きく異なること、(14)V型火炎では、未燃焼混合気側に移動する火炎面の速度ベクトルの軸方向成分が負になる場合があること、(15)V型火炎では、付着点近傍の局所熱膨張は主にバーナ外側に向かって生じ、これが未燃焼混合気側に移動する火炎面の速度ベクトルの軸方向成分が負となる主因であること、(16)流れと火炎の形態の違いによる火炎面挙動の相違に関しても、局所熱膨張と局所燃焼速度が重要な役割を果たすことを明らかにしている。

以上、本研究は、従来計測が困難であった火炎面挙動の三次元計測手法を開発するとともに、乱流予混合火炎の火炎面移動速度を定量的に測定し、乱流予混合火炎の火炎構造・燃焼機構を理解する上で重要な知見を提供したものであり、燃焼工学及び熱流体計測技術における価値ある集積であると認める。よって、学位申請者の橋本英樹は、博士（工学）の学位を得る資格あると認める。