

養成技術者の研究・研修成果等

1. 養成技術者氏名：鳥飼宏之
2. 養成カリキュラム名：燃焼場における有害物質生成機構に関する研究
3. 養成カリキュラムの達成状況

養成カリキュラムの達成状況としては、現在のところ問題なく進んでいる。

火炎の化学的構造を測定できる KrF excimer laser を用いたレーザー誘起蛍光法 (Laser-induced fluorescence:LIF), レーザー散乱法による火炎帯の温度場の可視化などの高出力レーザー測定技術の修得は十分に達成されている。これまでに、大阪大学との共同研究において高温希薄予混合気燃焼場での測定、慶應大学との共同研究で行われた回転ブンゼン予混合燃焼場での測定等を行っている。また、その修得の成果として、燃焼器の設計に重要となる拡散火炎の安定性、そして火災などの可燃性固体表面上に形成される火炎の伝播機構を支配する Edge flame の LIF 法による OH radical 測定を行い、その結果を5月に開催される火災学会において口頭発表、7月に開催される国際燃焼シンポジウムでポスター発表する予定である。

また、燃焼場の詳細反応数値計算が可能である汎用ソフトウェア Chemkin を、実験的に得られるデータの検討、補完等を目的として十分に使いこなしている。

更に、レーザー測定法等を修得するのと同時に、レーザーによる火炎の消炎技術を『レーザー消火』として提案し、昨年12月に開催された日本燃焼学会において口頭発表、今年3月に行われた衝撃波学会においてポスター発表を行っている。各学会でのレーザー消火への評価は高く、衝撃波シンポジウムにおいては優れた研究発表に送られる Best Presentation 賞の表彰を受けている。そして、更に、レーザー消火の成果は、5月に行われる火災学会において口頭発表、7月に行われる国際燃焼シンポジウムにおいてポスター発表する予定である。

また、実用燃焼炉において形成される拡散火炎に対して適応性が高い Laminar Flamelet Model に基づく理論混合分率、モル量論比という実験パラメータを用いて、拡散火炎の基本となる対向流拡散火炎の消炎現象を検討した論文を、日本機械学会に投稿し、現在査読中である。その検討に用いた実験パラメータを制御することで、すすやダイオキシン類の有力前駆物質であり、またそれ自身が有害物質である多環芳香族化合物(PAH)を抑制し、同時に火炎の安定性を高めることが可能であることが、養成技術者が所属するグループの研究によって明らかにされてきている。今回の論文執筆により燃焼排出物機構の解明またその抑制技術の達成に核となる実験パラメータの物理的な意味そして知識を修得している。

以上のように、実際の技術の習得、また成果の発表を行っており、カリキュラムは順調に達成されている。

4. 成果

研究目的

環境問題やエネルギー問題という観点から、燃焼技術の高度化に対する要請が強まっている。燃料資源の有効利用をはかるための高効率燃焼技術、燃焼現象の工業的な応用性を更に高めるための高負荷燃焼技術、さらに環境負荷低減のための有害な燃焼排出物の抑制技術等の達成は重要な課題である。特に近年、燃焼排出物の問題に対する社会的な関心が高くなっている。

人体に有害であるすすやダイオキシン類の燃焼排出物の生成過程には、芳香族炭化水素（polycyclic aromatic hydrocarbons: PAH）の形成が深く関わっていることが指摘されている。そしてまたPAH自体が有害な物質である。そのため、燃焼に伴うPAH生成機構の詳細を解明し、それを排出抑制する技術開発の研究は、先にあげた燃焼技術への社会的要請を達成するための根幹をなすものの1つである。そのPAHの研究では、燃料と酸化剤を燃焼場に供給する前に十分な混合を行い、酸化剤と燃料を含む混合気を噴出することにより形成される予混合火炎が多く用いられてきている。しかし、実用燃焼器の多くは、燃料と酸化剤を予め混合せず燃焼場に供給することで形成される拡散火炎を用いている。拡散火炎に注目してPAH やすすの生成・抑制について検討し、知見を集積することは、実用燃焼炉でも使用可能な高度燃焼技術を開発するために重要である。

本カリキュラムでは、実用燃焼器において広く用いられているにもかかわらず、研究例が少ない拡散火炎を対象とし、先に述べたすすやダイオキシンの前駆物質となるPAHの生成機構の解明、またその抑制技術の開発、そしてそれに加えて高負荷燃焼・高効率燃焼を達成できる燃焼技術の開発を研究目的としている。

2. 研究方法

本カリキュラムで用いる実験装置及び測定装置、実験方法について述べる。

2-1 燃焼器（バーナー）

本カリキュラムでは、拡散火炎の検討に有効と考えられる2つのタイプのバーナーを用いて研究を行う。

・対向流拡散火炎バーナー

対向流場は、燃料流と酸化剤流を同軸で対向させ、衝突させることにより形成される流れ場である。その流れ場で形成される対向流拡散火炎は、実用燃焼器などで形成される拡散火炎の安定性、火炎構造等を適切に表現するLaminar Flamelet Modelの根幹をなす。Laminar Flamelet Modelとは、乱流場に形成される火炎がしわ状に折り曲げられ巨視的には乱流現象に支配された火炎に見える場合でも、火炎面近傍の局所現象に注目した場合、その現象は定常な層流火炎と同様な火炎構造及び火炎特性を示すとしたモデルである。このLaminar Diffusion Flamelet Modelが適応可能な拡散火炎が実用燃焼器内で形成される場合、対向流拡散火炎で得られた知見を直接的に活用できる。

・軸対称衝突噴流場を利用したEdge flameバーナー

拡散火炎の安定性は、火炎面の最上流先端に形成される火炎基部(Edge flame と呼ばれる)が支配する。そのため Edge flame の安定機構解明は、燃焼器の設計を行う上で重要となり、さらに燃焼負荷向上を目指して拡散火炎の安定性を高めるためにも必要不可欠となる。Edge flame は、火炎先端部に位置し固体壁面との干渉を有することで形成されるため、固体壁面近傍との干渉を有さない対向流拡散火炎では現象を理解することができない。そこで、Edge flame の研究には、これまでに養成技術者が開発を行ってきた軸対称衝突噴流場を利用したバーナーを用いる。このバーナーは上方に円形ノズル、下方に衝突平板を持ち、衝突平板に多孔質板を埋め込むことで燃料を噴出できる。この条件で火炎を形成すれば、先に述べた対向流拡散火炎が形成される。そして、多孔質板中央に金属円板を埋め込み燃料の噴出を一部止めることにより、火炎中央では火炎が形成されなくなり、火炎基部と同様の状況が生成され Edge Flame が Hole として形成される。このバーナーではバーナリムが存在しないことから、形成される流れ場が、従来の研究で用いられている噴流拡散火炎の流れ場に比べて単純である。また、Edge flame の火炎形状を軸対称として形成できるため、従来から用いられてきた境界層拡散火炎のような End flame を有さないという利点がある。このバーナーで形成される Edge flame は火炎構造や火炎特性の検討が比較的容易であることから、Edge flame の安定機構を解明することが期待できる。

2-2 レーザー測定装置

・レーザー誘起蛍光法(Laser-induced Fluorescence: LIF)

LIFでは火炎の分子、原子、中間生成物であるOH radicalなどの不安定化学種の濃度を測定することができる。この方法では、波長選択を行ったレーザー光を対象の火炎、気体へと照射することで、基底準位にある化学種を適当な励起準位に励起し、その準位より下の準位へ遷移する際に発する特定波長の蛍光を計測し、

その蛍光強度から化学種の濃度などの化学反応に関する情報を得ることができる。

・ ラマン散乱法

レーザーを測定対象であるガスに照射すると、分子・原子によってレーザー光が散乱される。その時、ラマン散乱では、その散乱光の波長がシフトする。その波長の変位量が化学種に依存するため、その変化した波長の値がわかれば化学種を特定でき、またその信号強度から濃度を特定することができる。また、ラマン散乱のスペクトル形状は温度に依存するため、スペクトルの形状がわかれば温度を測定することも可能となる。レーザーシステムとしてはLIFと同様のものを用いる。

2 - 3 燃焼反応制御方法

・ 拡散燃焼反応制御パラメータ

Laminar Diffusion Flamelet Model の基本をなす対向流拡散火炎では初期条件と火炎特性を関係づける 2 つの燃焼反応制御パラメータが定義できる。その 1 つが次式で表される理論混合分率 Z_{st} である。

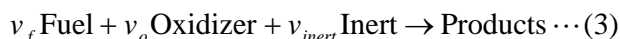
$$Z_{st} = \left[1 + \frac{Y_{f,1} \cdot W_o \cdot o}{Y_{o,0} \cdot W_f \cdot f} \right]^{-1} \dots (1)$$

Y, W は、それぞれ質量分率、分子量、量論係数を表す。下付文字の f, o はそれぞれ燃料、酸化剤を、1,0 の値は各々の初期条件であることを意味する。 Z_{st} は全化学種の拡散係数が等しく、そして火炎面モデル(空気力学的な特性時間と化学反応特性時間との比となるダムケラ数 Da 、火炎面で $Y_f = Y_o = 0$) の仮定の下で得られる。この理論混合分率の値から、流れの中で火炎が形成される位置を評価することができる。

もう一つのパラメータは以下に示すモル量論比: M_{st} である。

$$M_{st} = (v_f / v_o / v_{inert}) \dots (2)$$

M_{st} は燃料、酸化剤、不活性ガスの量論係数の比を表す。ただし不活性ガスの量論係数 v_{inert} は以下の反応式から求まる。



式(3)は総括化学反応式に対向流の燃料流と酸化剤流に含まれる不活性ガスの総モル数を v_{inert} として加えたものである。全化学種の拡散係数が等しくかつ Da で化学平衡を仮定すると、対向流火炎は M_{st} の比に基づく理論断熱火炎温度を示すことになる。つまり、 M_{st} の値は対向流火炎の理論断熱火炎温度を規定する。

これら理論混合分率、モル量論比のパラメータを広い範囲で変化させ、対向流拡散火炎から生成される PAH の生成挙動を調べることにより、実機レベルでの拡散燃焼の高度な制御につながる基礎知見を蓄積することができる。

3 . 成果

本カリキュラムでは、実用燃焼器において広く用いられている拡散火炎を対象に、すすやダイオキシンの前駆物質である PAH の生成機構の解明、またその抑制技術の開発を機軸に、高負荷燃焼・高効率燃焼の達成を可能にする燃焼技術の開発を目的としている。その手段として、上記に示した、対向流バーナ、衝突噴流バーナー、高出力レーザー計測装置、反応制御パラメータ等を用いた実験的な検討を行っている。

その成果として、対向流拡散火炎を用いた研究では、理論混合分率の値を大きくし、反応面を燃料流中に形成することにより、PAH などの排出物の値が低下すると同時に、火炎の安定性が良好になる燃焼条件が存在することが、養成技術者が所属する研究グループで明らかになってきている。更に、モル量論比の値を大きく設定することで断熱火炎温度を下げ、NOx などの排出物をも抑制することが可能となる。この結果は、Laminar Flamelet Model に基づいた燃焼反応制御パラメータが拡散燃焼の行動な制御に有効であることを示している。今後更に、実用燃焼器への燃焼技術の展開を視野に入れて、その 2 つのパラメータを広範囲に変化させて実験データの蓄積を行うことを予定している。

Edge flame の研究では、OH-LIF 法によって Edge flame の化学的な構造を調べ、その安定機構について検討した。その結果、Edge flame の安定性は、OH radical の濃度が増加するほど安定性が増大することを明らかにしている。このような結果が実験的に示された例は無く、Edge flame の安定機構の解明に対して極めて重要な知見といえる。更に、検討を継続することにより Edge flame の安定機構を解明し、高負荷燃焼における火炎の安定性制御技術へ展開することを考えている。

以上をまとめると、今回得られた成果は、拡散火炎の高負荷燃焼を達成するための火炎の安定機構に関する知見、そして、排出物抑制を達成しかつ火炎の安定性を維持できる燃焼条件の解明、特に、反応制御パラメータの重要性を提示している。これらの知見を合わせ、更に検討を進めてゆくことにより、研究目的である高効率、高負荷、そしてクリーン燃焼を達成できる燃焼方法を産業界に対して提案できると考える。

5 . 成果の対外的発表等

(1) 論文発表 (論文掲載済、または査読済を対象。)

国内論文誌

- (1) 北島暁雄, 畑中健志, 竹内正雄, 宮寺達雄, 鳥飼宏之, "対向噴流中に形成される層流拡散火炎を用いた多環芳香族物質生成挙動に関する実験的研究", *燃焼研究* Vol.46-136 (2004)..

国際論文誌

- (1) A. Kitajima, H. Torikai, M. Takeuchi and M. Oya, "Experimental study of extinction and its quantification in laminar and turbulent counterflow $\text{CH}_4\text{-N}_2/\text{O}_2\text{-N}_2$ nonpremixed flames", *Combustion and Flame* 137, pp.93-108 (2004).

(2) 口頭発表 (発表済を対象。)

国内学会発表

- (1) 鳥飼宏之, 北島暁雄, 竹内正雄, "レーザー誘起プラスト波を用いた対向流火炎の消火", *衝撃波シンポジウム*, pp.291-294 (2004).
- (2) 鳥飼宏之, 北島暁雄, 竹内正雄, "拡散火炎のレーザー消火", *燃焼シンポジウム*, pp.77-78 (2003).
- (3) 高橋亨, 渡辺圭子, 青地高伸, 佐宗章弘, 鳥飼宏之, "レーザーによる衝撃波管隔膜能動破断" *衝撃波シンポジウム*, pp.53-54 (2004).
- (4) 高橋亨, 鳥飼宏之, 楊乾鎖, 渡辺圭子, 佐宗章弘, "大出力レーザーを用いた衝撃波管隔膜能動破断", *日本機械学会流体工学部門講演会*, p.9 (2003).

国際学会発表

- (1) Toru Takahashi, Keiko Watanabe, Akihiro Sasoh, Hiroyuki Torikai, Qian-Suo Yang, "Active Shock-Tube-Diaphragm Rupture with Laser Beam Irradiation" *42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit* (2004).
- (2) Skyum Kim, Naohide Urabe, Hiroyuki Torikai, Akihiro Sasoh and In-Seuck Jeung "Impulse Dependence on Propellant Condition in Laser-Driven In-Tube Accelerator" *34th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference* (2003).
- (3) Akihiro Sasoh, Sukyum Kim, Naohide Urabe, Hiroyuki Torikai, In-Seuck Jeung, "Projectile launch characteristics in laser-driven in-tube accelerator", *19th International Colloquium on the Dynamics of Explosion and Reactive Systems* (2003)

(3) 特許等 (出願番号を記載)