

## 論文の要旨

### 急速混合管状火炎の構造制御に関する研究 (A Study on the Structure Control of the Rapidly Mixed Tubular Flame)

氏名 王 艶 雷

管状火炎バーナに燃料と酸化剤を別々に供給し、着火した場合に形成される非予混合管状火炎は、逆火の危険なく、管状火炎の特性を実用燃焼器に適用できる。この非予混合管状火炎は旋回による混合促進効果のために予混合火炎に近い構造を取ることから「急速混合型管状火炎」と呼ばれ、様々な研究が行われてきた。しかし、火炎構造や燃焼状態を制御することを目的とした研究は行われておらず、したがって、燃焼ガス温度や組成を正確に予測し、自在に制御するといったことは困難な現状にある。そこで本研究では、急速混合管状火炎の構造・燃焼状態を制御する手段を見出し、そのメカニズムの解明まで行うことを目的とする。

第1章では、はじめに管状火炎に関するこれまでの研究の概要を述べている。管状火炎は回転伸長流中に形成される円筒状の火炎素として見出され、熱的・空気力学的に安定である特性から様々な可燃性混合気に対してそれらの可燃限界近傍まで安定燃焼可能である。近年、これらの特性を実用に供すべく管状火炎管状火炎バーナが開発され、さらにその応用技術の一つとして、予混合燃焼において問題となる逆火の危険を回避した、非予混合の管状火炎燃焼が提案されている。この非予混合の管状火炎は、旋回による混合促進効果のために予混合火炎に近い構造を取るという事実から「急速混合型管状火炎」と呼ばれ、これまでに (1) 安定燃焼のためには空気吹き出し速度が 20m/s 以上、且つ、旋回強度の目安であるスワール数  $S$  のオーダーが 1 以上でなければならないことが明らかにされているほか、(2) 反応と流れの特性時間の比であるダムケラー数が 1 以下であれば、酸化剤に純酸素を用いても安定燃焼可能であることが明らかにされている。ところが、その燃焼状態を制御する手段については研究がなされた例がなく、確立されていないという問題がある。本研究では、この急速混合管状火炎の燃焼状態を制御する手段を確立することを目的とする。また本研究では、管状火炎バーナ同様、旋回流を利用する乱流旋回燃焼器において急速混合燃焼の制御手段が確立されていることに注目し、それに関する文献を調査から、急速混合管状火炎の構造制御因子として旋回強度や燃料・酸化剤の運動量流束比の 2 つに注目する。

第2章では、本研究で用いられた完全可視化型管状火炎バーナの形状、仕様を詳細に記述している。本研究では内径 30mm、長さ 150mm の両端開放型管状火炎バーナを用いた。バーナは石英製で内部が完全可視化されている。なお、本研究では、急速混合管状火炎の構造制御因子として旋回強度、ならびに燃料/空気の運動量流束比に注目し、これらを目安として「スワール数 ( $S$ )」、ならびに「量論比における空気・燃料の吹き出し流速比 ( $\alpha_{st}$ )」を導入する。実験では、燃料/空気のスリット幅の異なるバーナを複数作成し、さらに、燃料にメタンとプロパンを使用することで  $S$  と  $\alpha_{st}$  を様々に変化させてそれらの影響を詳細に調べている。なお、排出ガス特性を調査する

第5章においては、実用に即してバーナー一端を封じ、他端に長さ 600mm の延長管を取り付けて実験を行った。

第3章では、火炎外観観測、燃焼限界測定、ならびに自発光強度分布の測定を行った結果を示している。スワール数、および吹き出し流速比を変化させた実験の結果、メタン/プロパンの両者において、スワール数を変化させた場合には火炎外観、燃焼限界等に大きな差異が認められないものの、吹き出し流速比を変化させるとそれらが大きく変化することを明らかにした。また、自発光強度分布より得られた火炎直径をもとに、無次元有効火炎直径を算出して燃焼強度の変化を調べたところ、スワール数の異なるバーナでは、当量比変化に対して燃焼強度の変化は同じ傾向を取るものの、吹き出し流速比の異なるバーナでは、燃焼強度が最大となる当量比が大きく変化することが判明した。以上、第3章では吹き出し流速比によって急速混合管状火炎の構造を制御できる可能性があることを示した。

第4章では、吹き出し流速比変化によって燃焼状態が変化するメカニズムを明らかにするべく、火炎帯直前における未燃ガスの局所当量比をガスクロマトグラフによって測定した結果を示している。実験の結果、火炎帯直前の局所当量比 $\phi_{Local}$ は、供給される燃料と空気の流量から求められる総括当量比 $\phi_{Total}$ に対して直線的に変化することが明らかとなった。さらに、総括当量比 $\phi_{Total}$ が同じ条件でも、バーナ軸方向中央断面における火炎帯直前での局所当量比 $\phi_{Local}$ は、空気を高速に吹き出した場合には空気過剰に、一方で、燃料を高速に吹き出した場合には燃料過剰となることが判明した。本章の後半ではこれらの実験的事実に対して運動量流束比をベースに解析を行い、その結果、 $\phi_{Total}$ と $\phi_{Local}$ のずれが空気・燃料の運動量流束比と相関があることを確認した。つまり、空気・燃料の運動量流束比によって急速混合管状火炎燃焼の構造・燃焼状態を予測・制御できる可能性があることを示した。

第5章では、ここまでの知見を活用し、実用に向けた吹き出し流速比変化による低 $NO_x$ 燃焼の可能性について調査を行った。第4章までに、例えば総括当量比 0.8 の条件でも、燃料を高速に吹き出せば、吹き出し部付近では過濃な燃焼を、一方で下流側では超希薄な燃焼を行わせられる可能性が示されている。そこで本章では、メタン/空気の総括当量比 0.8 の条件において、吹き出し部で濃火炎、下流側で淡火炎を形成させるような、いわゆる濃淡燃焼をさせて $NO_x$ 排出を抑制するべく、吹き出し流速比 $\alpha_{st} = 0.25, 0.5$ のバーナを用いて $NO_x, CO, O_2, H_2$ の濃度分布のほか、ガス温度分布の詳細な測定を行った。結果、 $\alpha_{st} = 0.25$ のバーナでは、メタン空気混合気の総括当量比 0.8 の条件で局所当量比 1.6 と 0.5 の超過濃/希薄の濃淡燃焼を実現し、 $NO_x$ 排出濃度 12ppm (CO 非検出) という超低 $NO_x$ 燃焼が可能であることを示した。

第6章は本論文の総括である。すなわち、メタン/プロパン・空気混合気の場合、急速混合管状火炎の構造が旋回強度よりも燃料・酸化剤の運動量流束比によって制御することを結論づけ、さらにはその制御によって濃・淡の構造を有する管状火炎を形成させるという、新しい超低 $NO_x$ 燃焼の可能性を述べている。