

旋回噴流燃焼器を用いた強乱流予混合火炎の研究* (第1報, レーザトモグラフィ法による火炎構造の可視化)

山本和弘*¹, 阿知波朝士*², 小沼義昭*¹

A Study on Highly Turbulent Premixed Flames in a Cyclone-Jet Combustor (1st Report, Visualization of Flame Structure with Tomographic Images)

Kazuhiro YAMAMOTO*³, Tomoshi ACHIHA and Yoshiaki ONUMA

*³ Toyohashi University of Technology, Dept. of Mechanical Engineering,
1-1 Tempaku, Hibarigaoka, Toyohashi, Aichi, 441-8580 Japan

By using a cyclone-jet combustor, we have investigated premixed flames in a highly turbulent flow over a wide range of turbulent properties, with u'/S_L exceeding 10 in a stationary jet flame. With Mie scattering, we obtained tomographic images to visualize the flame structure. We have investigated the velocity field in cold flow with a hot wire anemometer. Results show that, as the turbulence is relatively low, the scale of the turbulence is large and one flame sheet wrinkles, which shows that a typical wrinkled laminar flame is formed. As the exit velocity is further increased, the flame wrinkling is increased, but the size of its wrinkles becomes small with many cusps of the flame front. In some cases, the burned gas may exist in the unburned gas, and vice versa. When the velocity exceeds 30 m/s, one continuous flame sheet cannot be sustained, and the destruction of laminar flame structure occurs, in which small reacting eddies in an intermediate stage of combustion may be embedded. These results are supported by the fact in previous experiments that the probability of intermediate temperature between those of unburned and burned gases becomes high and the PDF of temperature is no longer bimodal. Thus, it appears that, a flame structure changes to be that with distributed reaction zone as the intensity of turbulence is increased.

Key Words: Premixed Combustion, Turbulent Flow, Jet, Flow Visualization, Flow Measurement, Flame Structure

1. 緒 論

乱流火炎に関する研究は、これまでも実験的および理論的に数多く行われている。燃焼器の高負荷化や有害物質の排出抑制のため、燃焼現象をモデル化して燃焼器の開発を行うことは有用であるが、通常モデルはいくつかの仮定に基づいており、提案されたモデルを、実験により検証する必要がある^{(1)~(8)}。

乱流火炎のモデルはいくつか提案されているが、おもに分子輸送が支配的なモデルと乱流輸送が支配的なモデルに大別される。前者は、乱れが比較的弱く、乱れのスケールが大きい場合であり、一般にしわ状層流火炎と呼ばれる。乱流火炎では、多くの場合この構造が現れるので、この火炎に対する詳細な研究は数多く存在する。一方、燃焼場が強い乱れに支配されている場合は、渦により燃焼ガス塊と未燃ガス塊が入り混じり厚い火炎帯をもつ分散型火炎が形成される、と考えられている。この火炎については、理論的な考察からその存在が指摘されたが、その実験結果は非常に少な

い^{(9)~(13)}。これは、乱れを強くするため流速を増大させると、火炎は吹き飛ぶので、強い乱れをもつ火炎を定在的に作り出すことが難しいためである。加えて多くの場合、火炎が特殊な燃焼器の中に形成されるため、その火炎特性を直接計測することが困難であった。

しかしながら本研究において、リング状の強制再循環流火炎をパイロット火炎とした旋回噴流燃焼器を用いることにより、流速 100 m/s という極めて速い流速でも火炎を安定に形成させることに成功した⁽¹⁴⁾。この燃焼器を用いれば、非常に乱れが強い乱流中でも火炎を形成させることが可能となる。また、燃焼器が大気開放型であり、定在火炎が燃焼器上部に形成されるため、各種の火炎特性を容易に測定でき、強乱流予混合火炎の火炎構造を詳細に調べることが可能である。すでにこの燃焼器を用いて、CCD カメラによる火炎撮影、補償回路付き熱電対による温度変動測定を行っている⁽¹⁵⁾。

本研究では、レーザトモグラフィ法による火炎構造の可視化を行い、強乱流場に形成される乱流予混合火炎の火炎構造を詳細に検討した。

2. 実 験 装 置

本研究で使用した燃焼器の概略を図1に示す。燃焼

* 原稿受付 1999年3月2日。

*¹ 正員, 豊橋技術科学大学 (〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)。

*² 豊橋技術科学大学大学院。

E-mail: yamamoto@mech.tut.ac.jp

器は、内径 27 mm、高さ 23 mm の円筒形状の保炎室と、底部中心にある内径 12.7 mm の主噴流ノズルから成る。また、燃焼器の側壁底部には内径 2.4 mm の 2 本の旋回噴流ノズルが半径方向に対して 50° の角度で設置されている。この旋回噴流ノズルにより噴出された予混合気は、燃焼器中を旋回しながら燃焼するので、保炎室内にリング状の強制再循環流火炎が形成される。この火炎は主噴流火炎に対して熱や活性化学種を供給するパイロット火炎となる。これにより主噴流の流速が非常に大きい場合にも、乱流予混合火炎を安定に形成させることが可能である。ただし、主噴流と旋回流の燃料にはプロパンを用いた。

乱流火炎の瞬間的な構造を調べるため、レーザトモグラフィ法を用いて火炎の二次元断面像を求めた。火炎面は燃焼場に添加した微粒子のミー散乱光により可視化される。本研究で用いた光学系の概略図を図 2 に示す。光源には Pulsed Nd : YAG レーザ (Spectra-Physics GCR-170) の第 2 高調波 (波長 : 532 nm, 出力 : 450 mJ/pulse) を用いた。直径約 9 mm のレーザビームを、全反射ミラー、平凹レンズ、平凸レンズを組合せることによって厚さ約 0.3 mm のシート状にし、測定部へ照射した。なお、レーザパルスの発光時間は約 6 ns である。散乱像はレーザシートに対して直角方向からステルカメラにより撮影した。添加する

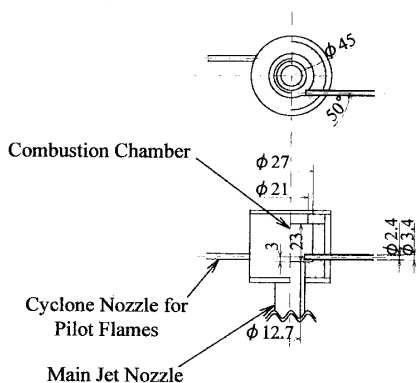


Fig. 1 Cyclone-jet combustor

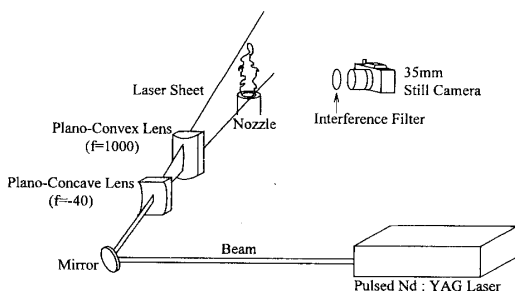


Fig. 2 Experimental setup

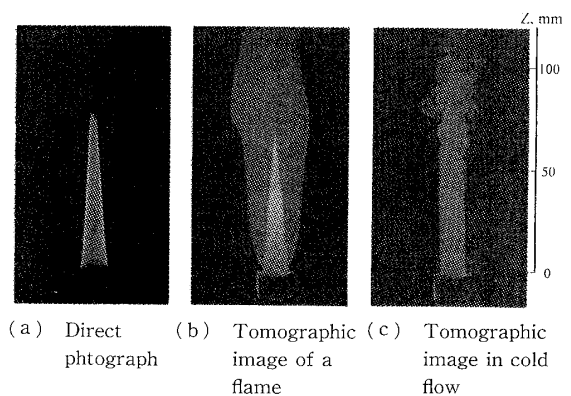
散乱粒子には、幅 3 mm、厚さ 0.2 mm のマグネシウムリボンを流路の途中で撮影直前に燃焼させ、発生する酸化マグネシウム (MgO) を用いた⁽¹⁶⁾。これにより散乱粒子を燃焼場に均一に添加することができる。ただし、混合気の流量に応じて燃焼させるマグネシウムリボンの本数を変え、添加する散乱粒子の量を一定にした。

流れ場について検討するため、熱線流速計を用いて非燃焼時の流速測定を行った。プローブは定温度型の熱線流速計であり、素線径 5 μm のタングステン線を支針 (Kanomax ; 針間距離 2 mm) に電気溶接したものを使用した。

3. 実験結果

3.1 レーザトモグラフィ法による火炎の可視化

3.1.1 火炎の発光帯と散乱光強度の検討 まず初めに、撮影したトモグラフィ像を検討するため、旋回噴流燃焼器の主噴流ノズルと同じ内径をもつブンゼンバーナを用いて、比較的乱れの小さい火炎の撮影を行った。ブンゼンバーナ上に形成される火炎の直接写真 (シャッタースピード 1/125 s) とトモグラフィ像を図 3 (a), (b) に示す。ノズル出口平均流速 $U=3.8$ m/s, 当量比 $\Phi=1.4$ である。非燃焼時のトモグラフィ像も図 3 (c) に示す。非燃焼時の像から、混合気は一樣にバーナから噴出しており、バーナ出口からの高さが 60 mm 程度まで乱れはほとんどないことがわかる。目視によると火炎先端はわずかに変動するものの、ほぼ図 3 (a) のように円すい状の典型的なブンゼン火炎がノズル上に形成されている。図 3 (b) のトモグラフィ像によれば、内側の散乱光の強い部分、その周囲の散乱光の弱い部分、そして散乱光のない部分があることがわかる。図 3 (a) の直接写真と比較する

Fig. 3 Direct photograph and tomographic images ($U=3.8$ m/s, $\Phi=1.4$)

ことにより、散乱光の強い領域が未燃ガス、弱い領域が既燃ガス、散乱光のない領域が散乱粒子を添加していない周囲空気であると思われる。ただし、トモグラフィ像の高さは火炎長よりもわずかに短い。また、用いる混合気の流量が少ない場合、添加した散乱粒子の影響が無視できず、火炎長が変化することがわかった。

そこで、さらにトモグラフィ像について検討するため、2台のカメラを用いて、直接写真とレーザートモグラフィ像の同時撮影を行い、火炎長 L_f とトモグラフィ像の高さ H_t の比較を行った。図4は、 $U=2.1$ m/s、 $\Phi=1.1$ のときにブンゼンバーナ上に形成される火炎に対し、これらの比較を行った結果である。図4中には、最小二乗法により原点を通る直線で近似した関係式も示す。これによると、散乱粒子を添加すると火炎長が変動するものの、つねにトモグラフィ像の高さがわずかに小さく、火炎長のほぼ0.95倍の関係にあることがわかった。したがって、トモグラフィ像と火炎の発光帯とのよい対応が見られた。

以上の結果から、散乱光強度の強い領域は火炎面の内側に位置しているので未燃ガスに対応し、一方、散乱光強度の弱い領域は既燃ガスに対応しているものと思われる。散乱光の違いが生じる理由としては、未燃ガスと既燃ガスに存在する散乱粒子の数密度の違いによるものと思われる。すなわち、未燃ガスは温度が低く密度も大きい、既燃ガスは温度が高く密度も小さい。火炎面を境に密度が急激に変化するので、散乱光強度の境界を明確にとらえることができたものと思われる。また、電子顕微鏡により MgO の粒径を調べた結果、火炎を通過すると粒径が小さくなることが明らかとなった。これにより、レーザーシート上の散乱粒子の数密度がそれほど変化しなければ、火炎面前後で散乱光強度が変化することになる。いずれにしても、散

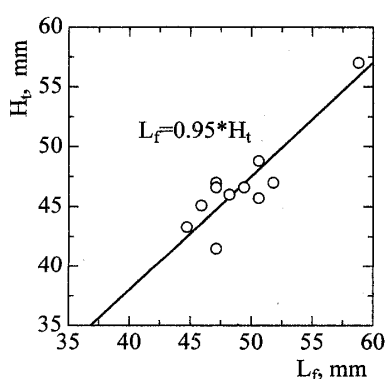


Fig. 4 Flame length and height of the tomographic image ($U=2.1$ m/s, $\Phi=1.1$)

乱光強度の強い未燃ガス領域の形状から火炎面が可視化されており、したがって、トモグラフィ像をもとに乱流火炎の構造を検討することができるものと思われる。

3・1・2 旋回噴流火炎のトモグラフィ像 次に、旋回噴流火炎のトモグラフィ撮影を行った。異なる乱れ強さにおける火炎構造を調べるため、主噴流当量比を一定 ($\Phi_m=0.75$) にして主噴流流速 U_m (ノズル出口平均流速) を変化させ、火炎の断面像を求めた。ただし、いずれの場合も、旋回流ノズルから吹き出すパイロット火炎の条件は、 $U_p=20$ m/s、 $\Phi_p=0.7$ と一定にした。

図5に主噴流流速 $U_m=10$ m/s の旋回噴流火炎の結果を示す。撮影条件は、図3のブンゼン火炎と同じである。図5(a)が火炎の直接写真、図5(b)が火炎のトモグラフィ像である。未燃ガスの乱れについて検討するため、非燃焼時のトモグラフィ像も撮影した [図5(c)]、ただし、非燃焼時についても燃焼時と同様、旋回噴流ノズルから $U_p=20$ m/s で空気のみを吹き出している。

まず、非燃焼時のトモグラフィ像であるが、図3(c)のブンゼン火炎の場合とは明らかに異なり、バーナ出口直後から混合気の流れが乱流であり、大小さまざまな渦構造が見られる。これは、流速が大きいため、また、旋回ノズルからは主流方向とは直交するように混合気が吹き出されることから、乱れが非常に強いと考えられる。流速を変化させたときの実際の乱れについては、流速測定の結果をもとに3・2節で検討することにする。

図5(a)の直接写真によれば、露光時間である1/125 s の間に火炎が激しく変動するため、火炎の構造はとらえきれないことがわかる。しかしながら、

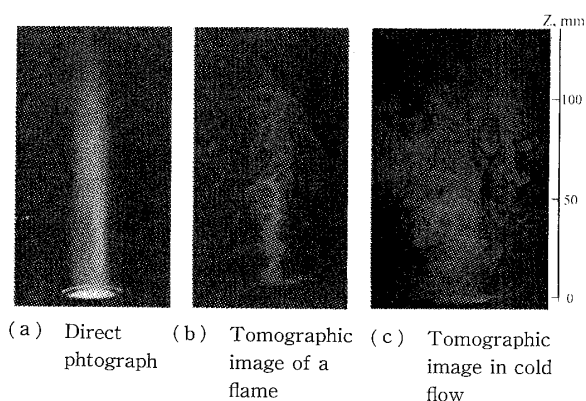


Fig. 5 Direct photograph and tomographic images ($U_m=10$ m/s, $\Phi_m=0.75$)

図5(b)のトモグラフィー像では、レーザーの発光時間が6 nsと短いため、瞬間的な構造がとらえられている。これによると、中心軸付近の散乱光強度の高い部分には、しわ状層流火炎特有のカスプ状の構造が現れていることがわかる。また、高さが約60 mmの位置で、散乱光強度の強い領域が途切れており、いわゆる群島状火炎の形成が推察されるが、今回のトモグラフィー像は二次元の断面のみを可視化しているため、火炎が三次元の構造をとることを考慮すると、これが未燃ガスが孤立している領域かどうかは判断できない。いずれにしろ、乱れによりしわ状の火炎面が現れ、かつ凹凸のスケールが比較的大きいことから、しわ状層流火炎のような火炎構造となっているものと思われる。

次に、当量比 ϕ_m を0.75と一定にし、主噴流流速を $U_m=5\sim 30$ m/sと変化させて、旋回噴流火炎のトモグラフィー像を撮影した結果を図6に示す。流速が比較的遅い場合 [図6(a), (b)], しわの凹凸のスケールが大きく、火炎面が波打っている構造が観察されることから、しわ状層流火炎が形成されていると考えられる。しかしながら、流速を増加させ乱れを強くすると、火炎面がより複雑に波打って凹凸のスケールが小さくなり、また、散乱光強度が強い未燃ガス中にも既燃ガスのポケットが存在するようになった [図6(c)]。流速が30 m/sとなると [図6(d)], 散乱光強度の強い領域中にも大小さまざまな散乱光強度の弱い領域が存在した。また、境界の特定が困難となり、火炎のトモグラフィー像が流速が小さいときには明らかに異なることがわかった。

比較のため、これらの流速に対応する非燃焼時のトモグラフィー像を撮影して、混合気中の乱れについて検討を行った。その結果、乱れにより生成される渦構造が、流速が大きいほど小さくなることが確認され

た。したがって、流速が大きくなり乱れが強くなると、大小さまざまな渦により火炎面が変形を受け、引きちぎられて微小な火炎片になった可能性も考えられる。より詳細な検討が必要であるが、少なくとも、流速が大きい場合のトモグラフィー像では、明確な境界が特定できず複雑に入り組んだ火炎構造が観察され、1枚の火炎面が波打つしわ状層流火炎とは明らかに異なる火炎構造となることが推察された。

3・2 流速測定 最後に、流れ場について検討するため、 $U_m=10\sim 45$ m/sの条件で、熱線流速計を用いて中心軸上の流速を測定し、非燃焼時の速度場を調べた。ただし、トモグラフィー像を求めた流れ場を検討するため、旋回噴流ノズルからも燃焼時と同じ $U_p=20$ m/sで空気のみを吹き出した。得られた時間平均速度 U と変動速度のrms値である u' の軸方向分布を図7に示す。

これによると、いずれの流速でも同じような傾向を示しており、燃焼器出口で最大値をとり、下流へ向かうに従い流速が減衰していることがわかる。また燃焼器出口近傍では、流速のこう配が非常に大きくなっている。図7(b)の速度変動のrms値については、主噴流の分布に対応して、燃焼器出口直後でその値が最大となり、その後下流にいくに従いゆるやかに乱れが減衰していくことがわかった。燃焼器出口直後に乱れが最大となる理由としては、主噴流ノズルからの噴流と周囲空気との大きな速度差があることと、旋回流ノズルからも混合気の主噴流に対し直交する方向に吹き出されるので乱れがかなり大きくなること、の二つが考えられる。乱流格子で実現できる乱れ強さはたかだか1 m/s程度であり⁽¹²⁾、したがって旋回噴流燃焼器を用いることで、非常に強い乱れの中に火炎が形成されていることがわかった。

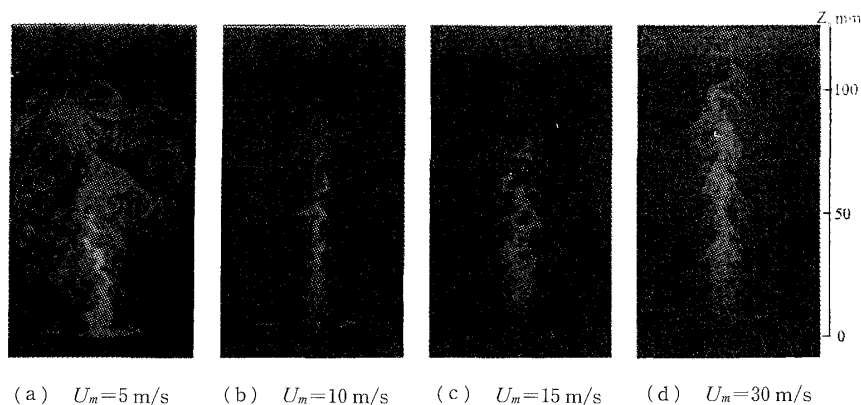


Fig. 6 Tomographic images of flames in a cyclone-jet combustor ($\phi_m=0.75$)

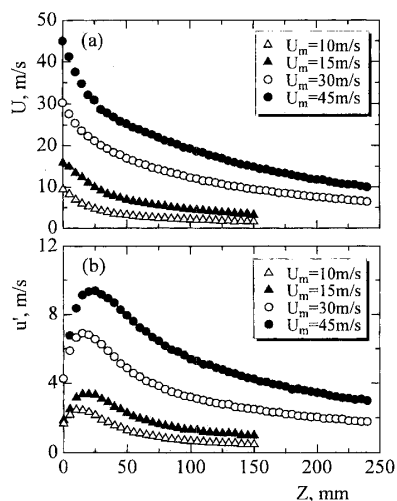


Fig. 7 Axial distributions of (a) mean and (b) rms fluctuating velocities for 10, 15, 30 and 45 m/s in cold flow

4. 考 察

旋回噴流燃焼器を用いて、非常に強い乱れをもつ流れ場に火炎を形成させ、レーザトモグラフィ法による火炎構造の可視化を行った。今回得られた結果について、以下のような検討を行った。

まず、火炎が形成される流れ場であるが、今回の実験条件における乱れについて検討するため、図8(a)に速度変動のrms値と主噴流の平均速度の比の相対乱れ強さ u'/U を、図8(b)にrms値と層流燃焼速度との比である u'/S_L を示す。ただし、燃焼速度はYamaokaらにより得られた値を参考に26 cm/sとした⁽¹⁷⁾。これによると相対乱れ強さは、 $U_m=15\sim 45$ m/sでは、ほぼ同じ曲線上に位置しているが、 $U_m=10$ m/sだけ高い値を示すことがわかる。 $U_m=10$ m/sの場合は、旋回流ノズルから噴出される流れの影響を強く受け、ノズル出口付近では乱れ強さがかなり大きくなるためであると思われる。下流では、粘性による乱れの減衰と流速の低下が同じ程度であるため、相対乱れ強さはいずれも同じ値となる。この結果から、今回の流れ場は十分発達した乱流であり、主噴流の流速を増加させることにより、乱れを強くすることができることがわかった。

また、図8(b)により主噴流流速が30 m/sの場合は、火炎が形成されていると思われる $Z > 100$ mmの領域で、 u'/S_L の値が10程度となった。従来の実験ではこの値が5程度であり⁽¹⁸⁾、したがって、旋回噴流燃焼器を用いることで、非常に乱れの強い流れ場に火炎が安定に形成されていることがわかった。

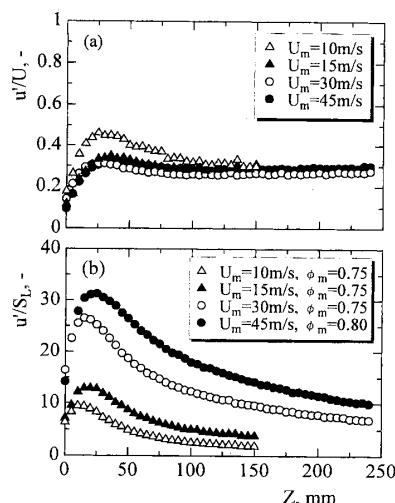


Fig. 8 Axial distributions of (a) u'/U and (b) u'/S_L for 10, 15, 30 and 45 m/s in cold flow

この旋回噴流燃焼器を用いて、CCDカメラによる火炎撮影と遅れ補償回路付き熱電対による温度変動測定をすでに行った⁽¹⁵⁾。この実験では、旋回噴流燃焼器と同じノズル径をもつブンゼンバーナでも同様の測定を行っている。その結果、火炎撮影により、流速が小さい場合は、火炎は連続した1枚の火炎面が波打っている様子が観察された。このときの温度変動をPDFにより整理したところ、未燃ガス温度と既燃ガス温度に対応する位置にピークをもつしわ状層流火炎特有の双峰状の分布となった。しかしながら、流速を上げて乱れを増加させると、1枚の火炎面ではなく火炎が霧のように点在している様子が観測され、微小な火炎の集合体のような火炎構造となることが推察された。このときの温度変動を求めた結果、しわ状層流火炎とは異なり、中間温度の出現確率が高くなることがわかった。また、時定数を変えて温度測定を行っても、中間温度が高くなるというPDFの傾向は変わらなかった。

対向噴流バーナを用いて実験を行った吉田らは⁽⁹⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾、非常に強い乱流火炎では、温度変動のPDFにおいて中間温度が高くなり、このことが、火炎構造がしわ状層流火炎から分散形火炎への火炎構造の遷移を意味する、と指摘している。また、流速を大きくする代わりに、希薄可燃限界近くの混合気を用いて化学反応時間を長くし、相対的に乱れの影響を強く(ダムケラー数は流速を増加させた場合と同様に減少)した香月らの実験でも⁽¹⁰⁾⁽¹³⁾、火炎の温度変動のPDFを求めた結果、やはり高い中間温度の出現確率をもつPDFが報告され、分散型火炎の存在が指摘された。

先の実験では、CCDカメラによる火炎撮影を行っ

たが、光路上の火炎の像が積算されてしまうので、火炎の構造を直接検討することが難しかった。そこで今回、レーザトモグラフィ法による火炎断面像の撮影を行った結果、流速が比較的遅い場合 [図6(a), (b)], 火炎のしわの凹凸のスケールが大きく、火炎面が波打っている様子が観察されたことから、火炎はしわ状層流火炎であると考えられる。しかしながら、流速を増加させ乱れを強くすると、未燃ガスの渦のスケールが小さくなり、未燃ガス中にも既燃ガスのポケットが存在するようになった [図6(c)]. 流速が30 m/s以上になると [図6(d)], 火炎面の境界の特定が難しく、非常に複雑な火炎構造となることがわかった。これらの火炎構造は、Ballalら⁽²⁾およびYoshida⁽⁹⁾が提案した乱流中の渦運動により現れる分散型火炎構造に近いものであるように思われる。ただし、旋回噴流燃焼器を用いた本研究において、分散型火炎の存在を十分に明らかにしたわけではないが、少なくとも強い乱れをもつ流れ場では、しわ状層流火炎とは異なる火炎構造となることが実験により推察された。ただし、古川によっても指摘されているが、乱流予混合火炎の構造を明らかにするためには、十分な時間・空間分解能をもつ計測方法を用いて検討する必要がある⁽⁸⁾。今後、静電探針などを併用してさらなる測定を行い、乱流予混合火炎の構造について検討を行う予定である。

5. 結 論

旋回噴流燃焼器を用いて強乱流中に火炎を形成させ、レーザトモグラフィ法による火炎構造の可視化、熱線流速計による非燃焼場の流速測定を行い、強乱流予混合火炎の火炎構造について検討を行った。その結果、以下の結論を得た。

(1) 旋回噴流燃焼器で測定された乱れ強さは、ノズル出口付近で大きく、下流にいくに従い単調に減衰する。流速が30 m/s以上の場合、流速変動のrms値と層流燃焼速度の比である u'/S_L は、火炎が形成されている領域で10以上の値となった。従来の実験ではこの値が5程度であり、したがって、非常に強い乱れの中に火炎が形成されている。

(2) 粒子のミー散乱光により、火炎の可視化を行

った結果、流速が比較的遅い場合(5, 10 m/s)、火炎のしわの凹凸のスケールが大きく、火炎面は波打っている様子が観察され、火炎がしわ状層流火炎であることがわかった。

(3) 流速を増加させると、未燃ガスの渦のスケールが小さくなり、15 m/sでは未燃ガス中にも既燃ガスのポケットが存在するようになる。流速が30 m/s以上では、1枚の明確な火炎面が存在せず、非常に複雑な火炎構造となることが明らかとなった。

これらの結果は、旋回噴流燃焼器を用いて先に行ったCCDカメラによる火炎撮影、補償回路付き熱電対による温度変動測定の結果を裏付けるものであり、したがって、乱れにより乱流火炎の構造が、しわ状層流火炎から3領域モデルの分散型火炎に近い構造へと変化したことが推察された。

文 献

- (1) Domkohler, G., *Z. Elektrochem.*, **46**(1940), 601-626.
- (2) Ballal, D. R. and Lefebvre, A. H. *Proc. R. Soc., Lond.*, Ser. A, **344**(1975), 217-234.
- (3) Summerfield, M., Reiter, S. H., Kebely, V. and Mascolo, R. W., *Jet Propuls.*, **25**(1955), 377-384.
- (4) Bray, K. N. C., *Turbulent Reacting Flows, Topics Appl. Phys.*, **44**(1980), 115-183.
- (5) Borghi, R., *Recent Advances in Aeronautics Science*, (1985), 117-134.
- (6) Peters, N., *Proc. 21st Symp. (Int.) Combust.*, (1986), 1231-1250.
- (7) 平野敏右, 燃焼の科学と技術, **2**(1994), 5-13.
- (8) 古川純一, 燃焼の科学と技術, **5**(1997), 125-138.
- (9) Yoshida, A., *Proc. 22nd Symp. (Int.) Combust.*, (1988), 1471-1478.
- (10) 香月正司・水谷幸夫・安田俊彦・黒沢要治・小林一弥・高橋丈雄, 機論, **55**-514, B(1989), 1729-1736.
- (11) Yoshida, A., Narisawa, M. and Tsuji, H., *Proc. 24th Symp. (Int.) Combust.*, (1992), 519-525.
- (12) 吉田亮・成澤道則・辻廣, 機論, **58**-552, B(1992), 2571-2576.
- (13) 香月正司・安田俊彦・水谷幸夫, 燃焼の科学と技術, **2**(1994), 69-76.
- (14) 小沼義昭・森川正治, 燃焼研究, **108**(1997), 39-48.
- (15) Yamamoto, K., Achiha, T. and Onuma, Y., *Proc. ASPACC99*, (1999), 480-483.
- (16) 野田進・上高原廉樹・小野寺勝昭・神谷重信・小沼義昭, 機論, **62**-598, B(1997), 711-717.
- (17) Yamaoka, I. and Tsuji, H., *Proc. 20th Symp. (Int.) Combust.*, (1984), 1883-1892.
- (18) Lee, T. W. and Mitrovic, A., *Proc. 26th Symp. (Int.) Combust.*, (1996), 455-460.