



Title	予混合同軸噴流火炎における主火炎吹消え時の火炎構造
Author(s)	伊藤, 献一; Ito, Kenichi; 新井, 康弘 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 112, 25-33
Issue Date	1983-01-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41772
Type	departmental bulletin paper
File Information	112_25-34.pdf



予混合同軸噴流火炎における 主火炎吹消え時の火炎構造

伊藤 献一 新井 康弘
(昭和57年9月30日受理)

Structure of a Premixed Concentric Jet Flame at Main Flame Blow-off

Kenichi ITO and Yasuhiro ARAI
(Received September 30, 1982)

Abstract

The blow-off mechanism of the main flame in a premixed concentric jet flame with a recirculation zone was studied experimentally. Time mean values and fluctuations of the gas temperature and ionization current were measured to investigate the flame structure of the recirculation zone and a flame necking region between the recirculation zone and the main flame. A propane-air mixture was carried to a burner nozzle, which had an inner diameter of 12 mm and a rim thickness of 7.5mm, and a parallel air flow surrounded the burner nozzle coaxially.

The results showed that, in the case of a transition from a normal flame to the near blow-off flame, both of the mean gas temperatures and ionization current values at the flame necking region showed a clear drop. However, in the blow-off mechanism of the main flame in this concentric jet flame, there was a difference between an inner flame and an outer flame, which were distinguished by the position of the flame fronts in the recirculation zone. The relation between fluctuations of the gas temperature and ionization current was also clarified.

1. ま え が き

予混合同軸噴流火炎は厚肉のバーナリム上に形成され、再循環域によって保持されており、その火炎の安定性は、再循環域と外部流との物質交換過程とそれに伴う熱輸送に支配されていることが明らかにされている¹⁾。この火炎において混合気が過濃でその流速が大きい場合、再循環域から下流の主火炎が吹消え、再循環域にのみ火炎が残る、いわゆるバーナ口上炎が形成される。このバーナ口上炎は、主火炎の吹消えによってバーナに供給される混合気のほとんどが未燃のまま下流に流れるため、著しい燃焼効率の低下を引き起こす。したがって、主火炎を伴った通常火炎からバーナ口上炎に遷移する機構を解明することは、燃焼装置の設計において非常に重要なこととなる。

拡散同軸噴流火炎においても、このバーナ口上炎が観察され、それに対する多くの研究^{2~4)}が

行われて来ているが、その機構を十分に解明するにはいたっておらず、まして予混合同軸噴流火炎に対する研究は非常に少ない。当研究室では、従来よりこの予混合同軸噴流火炎の安定性に関する研究を行なって来ている¹⁾⁵⁻⁷⁾が、その主火炎の吹消え機構に関しては触れていない。

本研究では、この火炎の再循環域とその下流の主火炎との接合部の燃焼状態を調べるため、主火炎を伴う通常火炎、バーナ口上炎に遷移する振動火炎、およびバーナ口上炎のイオン電流変動、温度変動をそれぞれ測定した。その結果、通常火炎から振動火炎に遷移するにつれて、主火炎と再循環域の接合部の平均イオン電流値、平均温度がそれぞれ低下することが明らかになった。また、温度とイオン電流の変動波形のそれぞれの特徴も見出すことができ、温度波形とイオン電流波形の関連性が明確となった。

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置

図1に実験装置の概要を示す。燃料は市販LPG(C_3H_8 :97.8%)であり、予混合室で一次空気と予混合されたのち、バーナノズル(内径12mm, リム厚7.5mm)へ送られる。バーナノズルの周囲を平行空気が流れる。燃焼筒は、内径100mm, 長さ1050mmである。

2.2 平均温度と変動温度の測定

火炎の平均温度、および変動温度の測定には、いずれも素線径 $50\mu\text{m}$ のPt/PtRh13%熱電対を用いた。平均温度の測定に用いた熱電対は、熱電対表面での触媒作用を防ぐためシリカコーティングした。変動温度の測定に用いた熱電対は、熱電対の熱慣性を増大させないためコーティングしていない。変動温度測定における熱電対の熱慣性は、Kunugiら⁸⁾により提案された微分回路による熱慣性補償回路で補償した。変動温度の測定周波数帯は、D.C.~2KHzである。平均熱電対時定数は、抵抗加熱方法により測定した。

2.3 平均イオン電流と変動イオン電流の測定

平均イオン電流、および変動イオン電流の測定には、いずれも双極の静電探針を使用した。陽イオンを捕かくするために、受感部には直径0.1mm, 長さ1.5mmの白金線を2本用い、片側に -30V の電圧を印加した。双極にした理由は、単極と違い振動火炎のときでも再循環域下流における局所的なイオン電流を測定できるためである。得られた陽イオンによる電流を抵抗($10\text{K}\Omega$)を介して電圧に変換し、さらに電圧増幅して信号を得た。イオン電流信号は温度信号とともに、実時間相関器

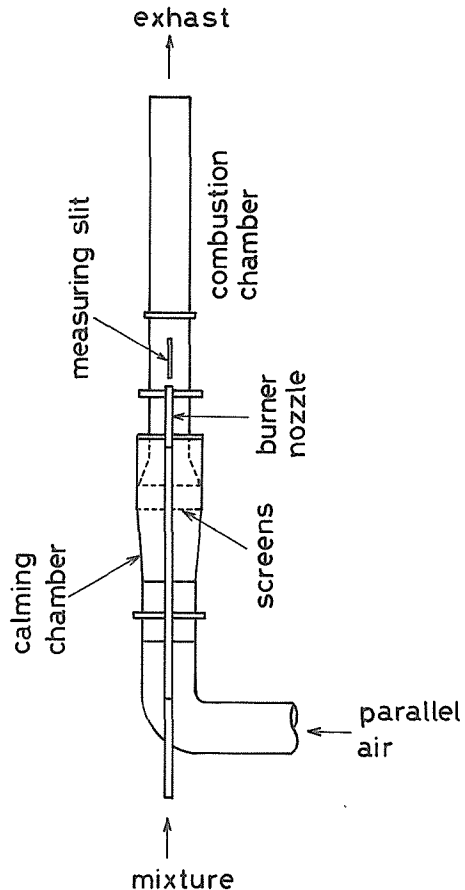


図1 実験装置概要

(日本無線NJZ-360A)に入力した。

2.4 測定条件

平行空気流速 $U_2 = 35 \text{ m/s}$ と一定のときに、混合気流速 U_{mix} と混合気の空燃当量比 ϕ_{AF} を変化させた場合の火炎安定範囲を図2に示す。火炎は上限線と下限線に囲まれた領域に存在し、火炎基部の形状によって分類される。内周炎は火炎面がバーナリム内周上に形成されているもので、火炎安定範囲図で最も大きな領域を占めている。外周炎は火炎面がバーナリム外周上に存在するもので、内周炎から不連続に移行する。バーナ口上炎は再循環域周辺にのみ火炎を残し、それより下流の主火炎は吹き飛んでいる状態にある火炎である。バーナ口上炎形成領域内でも内周炎、外周炎は通常火炎と同様に存在する。測定条件として、外周炎の場合、 $U_2 = 35 \text{ m/s}$, $\phi_{AF} = 0.3$ と一定で、 $U_{mix} = 17.5 \sim 30 \text{ m/s}$ (図において上向き矢印) と変化させ、通常火炎、主火炎吹消え寸前の振動火炎、およびバーナ口上炎を得た。同様に、内周炎においては $U_2 = U_{mix} = 35 \text{ m/s}$ と一定で、 $\phi_{AF} = 0.7 \sim 0.5$ (左向き矢印) と変化させ、通常火炎、振動火炎、バーナ口上炎をそれぞれ得た。

測定位置は、火炎中における再循環域とその下流の主火炎と再循環域の接合部での燃焼状態を明らかにするため、バーナリム端からの高さ $y = 0 \sim 40 \text{ mm}$, バーナ中心軸からの半径方向距離 $x = 3.5 \sim 13.5 \text{ mm}$ とした。

3. 実験結果および考察

3.1 平均温度分布と平均イオン電流分布

炭化水素火炎において支配的な陽イオンは H_3O^+ であり⁹⁾、燃焼反応に深く関与していると言

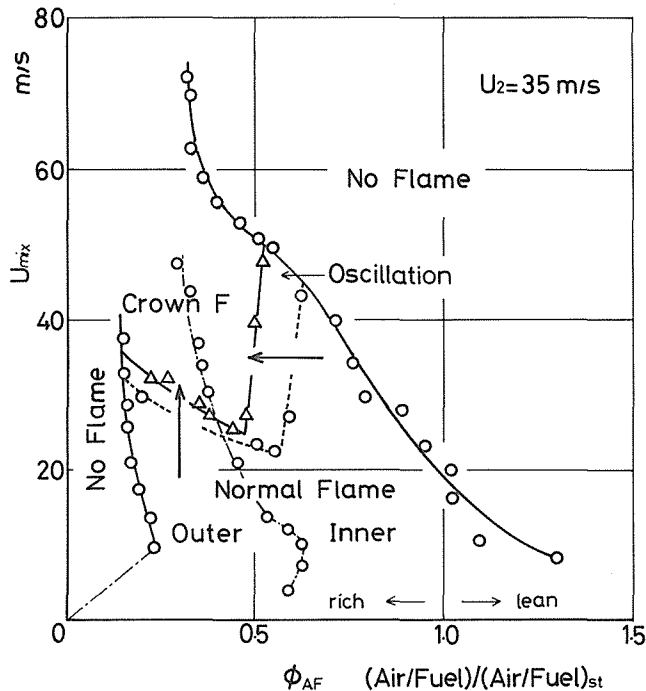


図2 火炎安定範囲

われている¹⁰⁾。この陽イオンを補かくし、その陽イオンの量をイオン電流値の大きさとして表わすことは、平均ガス成分濃度が火炎の時間平均的な燃焼反応状態を示すのに対して、局所的な反応強さを知る上で非常に便利である。

図3および図4に、外周炎の場合の平均温度分布と平均イオン電流分布を示す。これらの図において、 $U_{mix} = 17.5, 20, 22.5$ m/s は通常火炎、 $U_{mix} = 25$ m/s は振動火炎、 $U_{mix} = 27.5$ および 30 m/s はバーナ口上炎である。F.F は可視火炎面を表わし、R.Z はおよその再循環域を表わし、それぞれ斜線と破線で示してある。これらと比較すると、平均温度分布は通常火炎から振動火炎、そしてバーナ口上炎に近づくほど、 $1,400^{\circ}\text{C}$ 以上の最高温度領域の下流方向への広がりが小さくなり、その中心はバーナリムの基部近くに移動することがわかる。また、図4に示した平均イオン電流分布においては、 1.6×10^{-7} A以上の高イオン電流領域はほとんど移動せず、しかもその広がりには変化は少ない。バーナ口上炎では、 $y = 20$ mm 付近より下流で主火炎が吹消えているので、高イオン電流領域はリムの基部に移動しているが、 $U_{mix} = 30$ m/s では 2.0×10^{-7} A 領域が存在している。また、主火炎と再循環域の接合部近傍にあたる $y = 25 \sim 30$ mm 平均イオン電流分布を見ると、通常火炎より振動火炎の方が電流値が低下している。これらの原因は、 U_{mix} が増加することによって、主火炎と再循環域の接合部付近から再循環域に入り込む U_2 側の空気量が増えることであると思われる。すなわち、その誘引空気が再循環域内の端から下流の温度を低下させ、接合部付近では、通常火炎においても燃焼反応が弱い上に、振動火炎では瞬間的

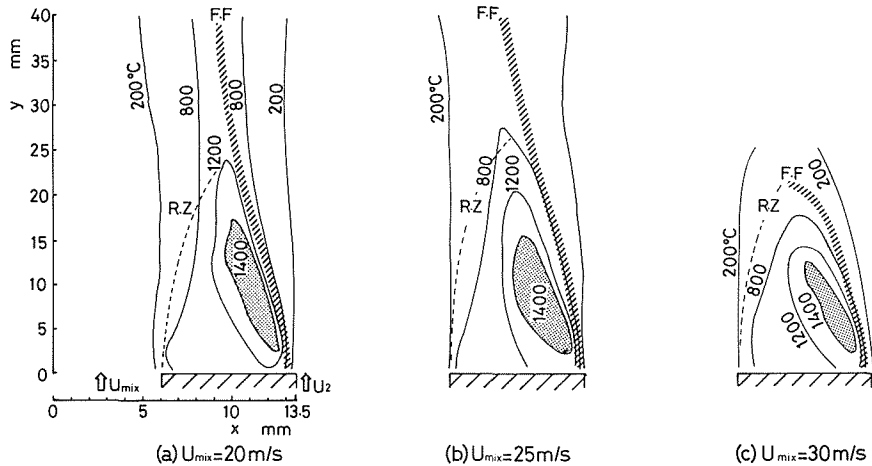


図3 平均温度分布 ($U_2 = 35$ m/s, $\phi_{AF} = 0.3$)

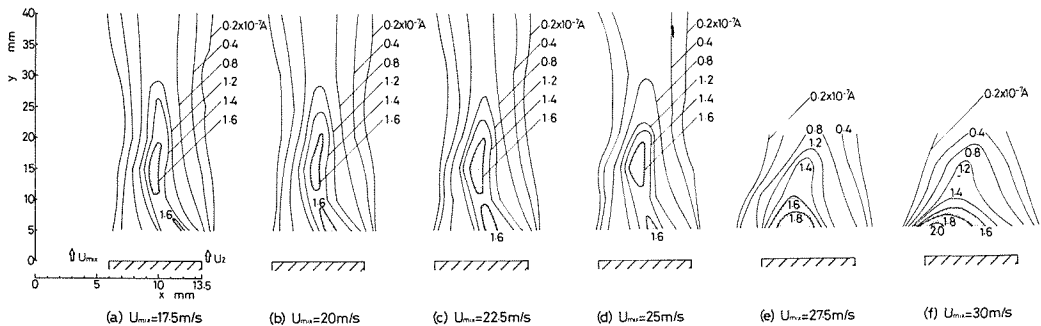


図4 平均イオン電流分布 ($U_2 = 35$ m/s, $\phi_{AF} = 0.3$)

に火炎が吹き飛んでいる状態であり、これらのことよりイオン電流値が低下するのである。また、再循環域内の端で通常火炎に比べて振動火炎では、イオン電流値がかわらないにもかかわらず温度が低下しているのは、燃焼反応そのものの強さは変わらないが、誘引空気増加によって反応による発生熱が奪われるためであろう。

内周炎の場合の平均温度分布と平均イオン電流分布を図5と図6に示す。これらの図において、 $\phi_{AF} = 0.7, 0.65$ は通常火炎、 0.6 は振動火炎、 0.55 および 0.5 はバーナ口上炎である。これらを比較すると、平均温度分布、平均イオン電流分布ともに、通常火炎から振動火炎に移移すると、その最大値領域 ($1,400^{\circ}\text{C}$ 以上、および $2.6 \times 10^{-7} \text{ A}$ 以上) が再循環域内をバーナリムの基部方向に移動することがわかる。また、平均イオン電流分布では、主火炎と再循環域の接合部近傍にあたる $y = 25 \sim 30 \text{ mm}$ でも、振動火炎で著しく電流値が低下していることを示している。このことより、内周炎の場合、通常火炎から振動火炎に移移すると、接合部の反応の低下そのものだけでなく、再循環域内下流における反応、ならびに温度の低下が大きいことがわかる。この場合、 $U_2 = U_{mix} = 35 \text{ m/s}$ と一定なので、流体的な乱れやせん断の変化によるものとの影響とは思えず、この現象は主に ϕ_{AF} に起因するところと大きいと考えられる。すなわち、通常火炎から振動火炎に移移すると、 ϕ_{AF} が小さくなり、再循環域内の端から下流で、比較的薄い火炎帯のために反応が進まず、温度も低下すると考えられる。このような内周炎の主火炎吹消え機構は、内周炎よりも ϕ_{AF} が小さく、火炎帯が厚い再循環域の燃焼状態が違う、上述の外周炎の主火炎吹消え機構と

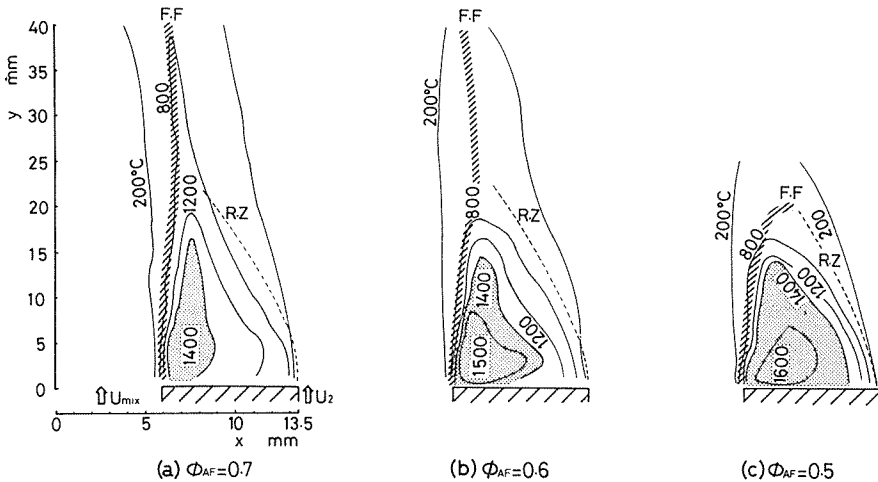


図5 平均温度分布 ($U_{mix} = U_2 = 35 \text{ m/s}$)

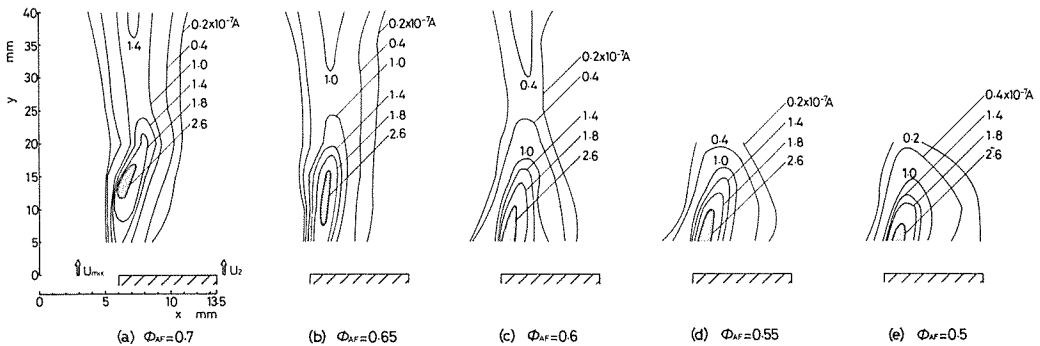


図6 平均イオン電流分布 ($U_2 = U_{mix} = 35 \text{ m/s}$)

はまったく異なるものである。

3.2 温度変動波形とイオン電流変動波形

外周炎における、火炎の温度とイオン電流の変動波形を同時に測定したいくつかの例を図7～9に示す。これらの図において \bar{T} は平均温度である。図7はイオンプローブと熱電対の間隔を2mm、前者を上流側に置いた場合の通常火炎、振動火炎、そしてバーナ口上炎の波形である。測定点は再循環域内の端を含む $y = 20\text{mm}$ 、可視火炎面に近い $x = 9.5\text{mm}$ である。温度波形を見ると、通常火炎に比べてバーナ口上炎に近い方が変動周波数が大きくなっている。一方、イオン電流の変動周波数はどの火炎においてもそれほど相違はない。このことは上述の再循環域内の端の平均温度と平均イオン電流分布の結果に対応していて、平均温度の低下と変動周波数の増加は関係があるように思われる。また、温度とイオン電流の変動波形を比較すると、温度波形の方がお

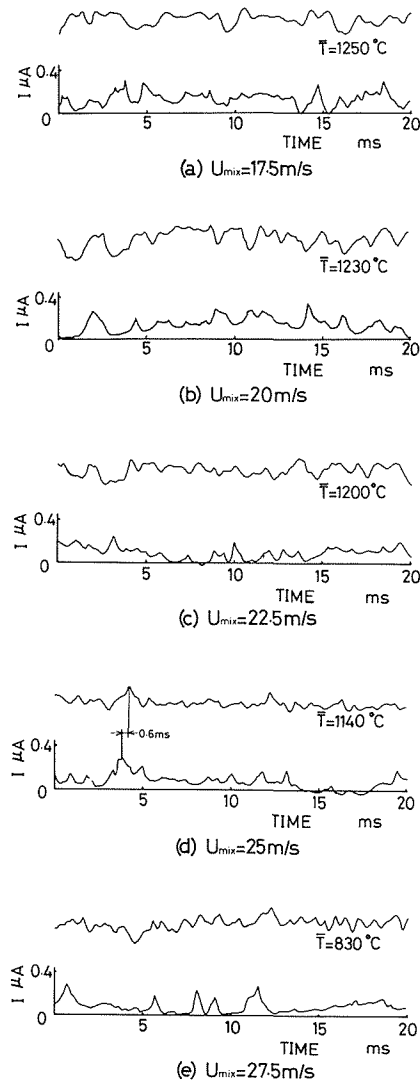


図7 温度変動波形とイオン電流変動波形
($U_2 = 35\text{m/s}$, $\phi_{AF} = 0.3$ $y = 20\text{mm}$, $x = 9.5\text{mm}$)

よそ0.6msの時間的遅れはあるものの、かなりの数のそのピークが、イオン電流波形のピークと一致している。しかしながら、ピークが一致していないところも見られる。これは、ガス温度の上昇が反応ばかりでなく、高温のガス体との接触によっても起こるためである。なお、イオン電流波形と温度波形の時間的遅れは、イオンプローブと熱電対の位置の違いに起因するものと思われる。

図8は通常火炎における再循環域内の端を含む位置での、平行空気側、可視火炎面位置、混合気側の温度とイオン電流の変動を比較したものである。イオンプローブは上流側に位置し、熱電対との間隔は2mmである。この図において、(a)が平行空気側、(b)が可視火炎面位置、そして(c)が混合気側を示している。これらを比較すると、平均温度、平均イオン電流値がともに高い可視火炎面位置に比べて、平行空気側、混合気側の温度、イオン電流の変動周波数がいずれも若干大きいことがわかる。また、混合気側、可視火炎面位置では、温度変動のピークとイオン電流変動のそれが比較的一致しており、とくに温度の一番低い混合気側ではピークの数はいずれも非常に良く一致している。このことより、混合気側では反応が温度変動に対して支配的であると言える。一方、平均温度が比較的高い平行空気側では、温度変動とイオン電流変動の相関性は弱く、これは、この場がほとんど高温の既燃ガスと空気が占められており、反応よりもこれらのガスの混合状態が温度変動に対して支配的であるためと考えられる。

図9はイオンプローブと温度プローブ（熱電対）の上流側位置と、そのプローブ間隔を変えた場合の温度とイオン電流の変動波形である。測定した火炎は通常火炎であり、その測定位置は再循環域内の端を含む可視火炎面位置である。図において、(a)、(b)がイオンプローブが上流、(c)、(d)が温度プローブが上流位置であり、その間隔は、(a)、(c)が2mm、(b)、(d)が10mmである。図

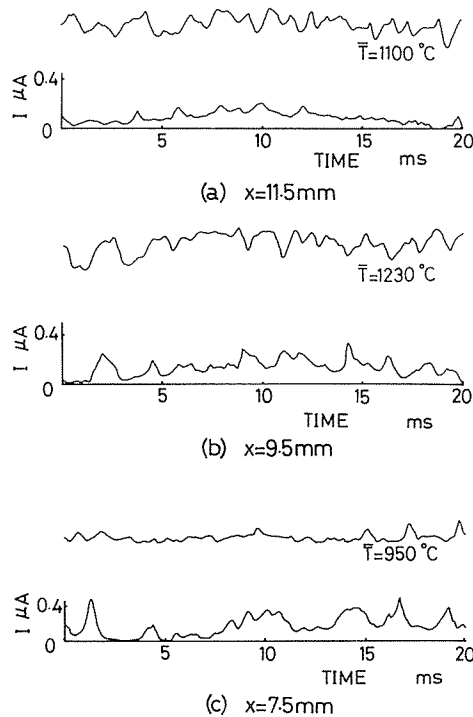


図8 温度変動波形とイオン電流変動波形
 $(U_2 = 35\text{m/s}, \phi_{AF} = 0.3, U_{mix} = 20\text{m/s}, y = 20\text{mm})$

より、プローブ間隔が2mmの場合には温度変動とイオン電流変動に明確な相関があるのに対して、プローブ間隔が10mmになると、2mmの場合と比べて両者の相関はほとんど小さくなる。このことは、この乱流場においては渦の移動距離が大きくなるにしたがって、渦内の温度場ならびにイオン密度が保存されなくなることを示している。

3.3 温度変動値とイオン電流変動値

統計的な温度変動値とイオン電流変動値を比較するために、図10(a), (b)に主火炎と再循環域の接合部付近にあたる $y = 30\text{mm}$ での、外周炎の場合の通常火炎と振動火炎の変動値を示す。図において、 \bar{I} 、および $\sqrt{\bar{I}^2}$ はイオン電流の平均値とその変動のrms値であり、 \bar{T} 、および $\sqrt{\bar{T}^2}$ は温度の平均値とその変動のrms値である。図より、通常火炎、振動火炎とも \bar{T} に対する $\sqrt{\bar{T}^2}$ が2%程度なのに対して、 \bar{I} に対する $\sqrt{\bar{I}^2}$ は60%位を占めており、変動の大きさがイオン電流の方が温度に比べてはるかに大きいことがわかる。バーナ中心軸からの半径方向距離 x に対する各変動値、平均値を比較すると、通常火炎では $x = 9.5\text{mm}$ で \bar{I} 、 $\sqrt{\bar{I}^2}$ 、および \bar{T} の最大値が見られ、この位置は丁度可視火炎面位置に相当する。同様に、振動火炎でも同じ傾向が見られる。しかしながら、振動火炎では平均イオン電流値の低下が著しいにもかかわらず、平均温度の低下はそれほどでもない。また、通常火炎では U_{mix} 側と U_2 側に2つの $\sqrt{\bar{T}^2}$ のピークが見られるの

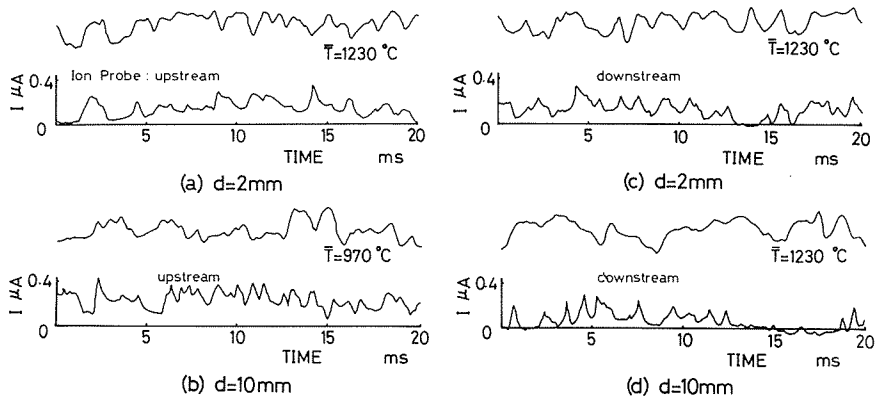


図9 温度変動波形とイオン電流変動波形
($U_2 = 35\text{m/s}$, $\phi_{AF} = 0.3$, $U_{mix} = 20\text{m/s}$, $y = 20\text{mm}$, $x = 9.5\text{mm}$)

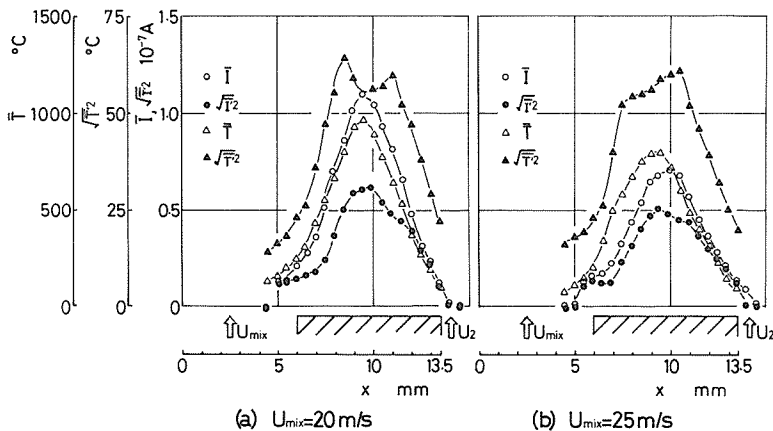


図10 温度変動値とイオン電流変動値 ($U_2 = 35\text{m/s}$, $\phi_{AF} = 0.3$, $y = 30\text{mm}$)

に対して、振動火炎では U_{mix} 側の $\sqrt{\overline{T'^2}}$ がピークをもたなくなる。これらのことより、 U_{mix} 側の $\sqrt{\overline{T'^2}}$ のピークがなくなるのは平均電流値の低下が示す、反応の低下が原因であると考えられる。すなわち、 U_{mix} 側の $\sqrt{\overline{T'^2}}$ のピークは反応が強いときだけ出現するのであろう。

4. 結 論

予混合同軸噴流火炎において、主火炎吹消え近傍の温度変動とイオン電流変動を調べた結果、明らかになったことを以下に要約する。

(1)外周炎では、通常火炎から振動火炎に遷移すると、再循環域と主火炎の接合部付近から再循環域に入り込む平行空気の量が増加するため、接合部で平均イオン電流値、平均温度の低下が大きく、しかも平均温度は再循環域内の端でも低下する。

(2)内周炎では、通常火炎から振動火炎に遷移すると、再循環域内の端から下流の火炎帯が比較的薄いため、 ϕ_{AF} の減少により反応が進まなくなり、平均イオン電流値、平均温度とも再循環域内の端から下流で低下が見られる。

(3)外周炎の場合、再循環域内の端の可視火炎面位置では、通常火炎から振動火炎、バーナ口上炎に遷移するにつれて温度変動の周波数は増加するが、イオン電流変動のそれは変わらない。

(4)外周炎の場合、再循環域内の端の混合気側で、温度変動とイオン電流変動波形とは良く一致するが、平行空気側ではあまり一致しない。

(5)外周炎の場合、乱流燃焼場における渦が局所的にしか保存されない。

(6)外周炎の場合、通常火炎から振動火炎に遷移すると反応の低下により、主火炎と再循環域の接合部の混合気側で、温度変動の rms 値がピークをもたなくなる。

なお、本研究にあたり、実験において立田節雄氏、高橋冬彦氏、山本茂紀氏、ならびに笠井泰彰氏の協力を得たことに謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 伊藤, 佐々木, 機論44-383, (昭53), 2478.
- 2) 齊間, 機論26-168, (昭35), 1144.
- 3) 水谷, 矢野, 機論44-379, (昭53) 1036.
- 4) Minx, E. and Kremmer, H, VDI-Berichte, 199, (1972), 78.
- 5) 立田, 寺田, 伊藤, 機講論802-1, (昭55), 97.
- 6) 高橋, 立田, 伊藤, 新井, 機講論812-1 (昭56), 82.
- 7) 新井, 伊藤, 山本, 機講論882-1 (昭57), 208.
- 8) Kunugi, M. and Jinno, H. 7th Symp. on Comb. (1959), 942.
- 9) Calcote, H. F. ほか2名, 10th Symp. on Comb. (1965), 605.
- 10) Ahlheim and R. Günter, Comb. and Flame, 36, (1977), 117.