



Title	旋回を伴う同軸噴流予混合火炎に関する研究
Author(s)	伊藤, 献一; Ito, Kenichi; 宋, 圭根 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 134, 1-7
Issue Date	1987-01-31
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/42025">https://hdl.handle.net/2115/42025</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	134_1-8.pdf



## 旋回を伴う同軸噴流予混合火炎に関する研究

伊藤 献一\* 宋 圭根\*

(昭和 61 年 9 月 30 日受理)

### Premixed Double Concentric Jets Flame with Swirl Flow

Kenichi ITO and Kyukeun SONG

(Received September 30, 1986)

#### Abstract

Swirl flow has been commonly used for the stabilization of the high intensity combustion process. The swirl flow is imparted to the secondary airflow by the swirl vane. Flame stability limits, flame shape, concentration of combustion gas and temperature distribution in the recirculation zone were measured and high speed schlieren photographs were taken. The results indicate that flame stability limits the decrease with the increasing swirl number in weak swirls because the mixing air and mixture deteriorates by the swirl in the recirculation zone. But, the increase with the increasing swirl number in strong swirls is seen the mixing ratio is promoted by the swirl. when there are no swirl or weak swirls, a recirculation zone formed behind the burner rim affects the flame stability. When there is a strong swirl, a recirculation zone formed by the swirl affects the flame stability.

#### 1. 緒 論

高負荷燃焼において、みられるような、高速気流中での保炎を目的として、ブラフボディ、ステップ、くぼみ壁などに保持された火炎、あるいは、厚肉バーナ同軸噴流火炎などが研究されている。これらの保炎方式はいずれも、保炎器後流に形成される再循環域が利用されている。また、同軸噴流火炎においては、バーナリム後流に形成される再循環域によって、火炎安定性が支配されることが指摘されている<sup>1)</sup>。とくに、伊藤<sup>2)3)</sup>らはこの再循環域内の実質空気比が火炎安定性に影響をおよぼすことが明らかにした。さらに、宋<sup>4)</sup>らは再循環域内に気体吹き出しを行い、再循環域内の実質空気比を制御することによって、保炎性を制御できることを示した。一方、流れに旋回を与えることによって、再循環域を形成させることが可能である。実際に旋回流はガスタービン、工業炉、ボイラ、エンジンにおいて、空気と燃料の混合を促進し、広範囲の燃焼を得るため工業的に用いられている。

旋回流は一般的に軸方向の逆向きの圧力勾配が大きくなって、中央にトロイダル状の大きな再循環域が形成され、バーナの下流から高温の燃焼生成物運び、熱源および活性種の役割をはたし、また、乱れの増加によって、燃焼生成物と混合気との混合が促進され、火炎の長さが短くなり、より安定な火炎が得られる効果があり<sup>5)</sup>、高負荷燃焼の安定性、効率でクリーンな燃焼、希簿

\*機械工学科 燃焼工学講座

燃焼, 低カロリー燃料の燃焼<sup>6)</sup>に有効であると報告されている。しかしながら, 旋回は遠心力による分離作用があり, 混合が抑制され燃焼が遅延するという報告もある<sup>7)</sup>。旋回火炎についての研究は火炎内の流れや, 火炎形状, 汚染物質に関する研究が多く, 火炎安定性との関連を対象した研究はあまりみられない。

本研究では予混合同軸噴流火炎において, パーナの周りを流れる2次空気に旋回を与えた旋回火炎の保炎機構の解明を目的として, 旋回強度の変化に伴う火炎安定範囲, 火炎形状, 再循環域の形状, 再循環域内の熱化学的構造から, 旋回火炎の保炎機構を検討した。

## 2. 実験装置および方法

流体に旋回を与える方法には次の三つの方法が考えられる。(a)流体を接線方向に導入する方法 (b)軸方向管内流に案内羽根を取り付ける方法, (c)装置の回転による方法がある。また, 同軸噴流に対して旋回を与える方法には, 中心噴流と周囲流の双方, 中心噴流あるいは周囲流の片方のみまた, 双方に与える場合, しかもこのとき, 旋回方向を順方向と逆方向にするなどが考えられる。本研究では(b)の方法により周囲流にのみ旋回を与えた。実験装置の概略を図1に示す。燃料は市販のLPG(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>純度97.8 vol%)である。燃料はニードルバルブにより流量を調節されたのち, 1次空気と予混合され, 内径100 mmの燃焼筒内の軸中心に置かれた円管バーナに導かれ流速U<sub>mix</sub>で噴出する。バーナ管は内径12 mm, リム厚さ7.5 mmの黄銅製である。これと同軸環状に流れる2次空気には軸流スワールペーンによって旋回が与えられる。スワラーは有効外径(D)98 mm, パープ径(D<sub>h</sub>)28 mmであり, これをバーナリムノズル出口から上流側に15 mmの位置に取り付けた。図2および表1にスワラーの概略と諸元を示す。

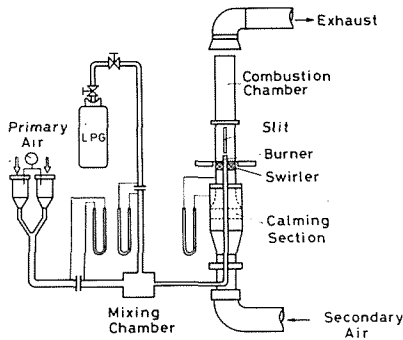


図1 実験装置

旋回の強さはスワール数によって表わされる。実験では旋回角θを10°から45°までの5種類のスワラーを使用した。スワール数は噴流の断面における, 速度分布から求めるが, 強い旋回では噴流中心に大きな再循環域が形成され, そのため, スワール出口流速分布からスワール数を求めることに無理がある。ここでは, 一般によく使われるように, 入力速度分布に基く次式<sup>8)</sup>によって, スワール数を求めた。

$$S = 2/3 \left\{ \frac{1 - (D_h/D)^3}{1 - (D_h/D)^2} \right\} \tan\theta \dots \dots \dots (1)$$

ここで, D<sub>h</sub>はハブ径, Dはスワラー外径である。表

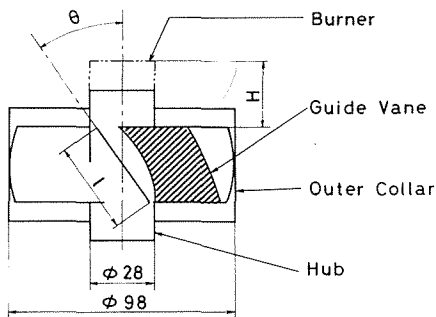


図2 スワラーの形状

表1 スワラーの諸元

θ	S	L(mm)	N	Swirler
10°	0.13	90	12	Single
20°	0.26	80	8	Single
30°	0.41	50	8	Double
40°	0.59	50	8	Double
45°	0.71	50	8	Double

1にはスワール数, スワラー長さ, 羽根枚数を示す。また, Double と示してあるのは  $L=50\text{ mm}$  のスワラーを2枚重ねていることを示す。

再循環域の形状は火炎中に  $\text{NaCl}$  飽和液を外径  $0.5\text{ mm}$  ステンレス管から吹き込み  $\text{Na}$  炎色により求めた。温度測定には  $\text{Pt-Pt}\cdot\text{Rh}13\%$  の素線径  $0.1\text{ mm}$  熱電対を用いた。表面での触媒反応を防止するため, シリカコーティングを施した。ガス分析のための燃焼ガスの採取には, 内径  $0.3\text{ mm}$  の石英管ガス採取プローブを使用し, ガス組成はガスクロマトグラフにより定量分析した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 火炎存在範囲および火炎形成状

予混合同軸噴流火炎の燃焼特性を支配する因子として, 空気比  $\phi_{AF}$ , 混合気流速  $U_{mix}$ , 2次空気流速  $U_2$ , バーナ径  $d$ , リム厚  $t$  が挙げられる。本研究では  $U_2$  一定の条件の下で, ある  $U_{mix}$  の予混合気 が 燃 焼 可 能 な  $\phi_{AF}$  の 範 囲 を 求 め る こ と と し た 。 こ の た め , 火 炎 安 定 範 囲 は 空 気 比  $\phi_{AF}$  と 混 合 気 流 速  $U_{mix}$  に よ り 表 わ す 。 燃 料 希 簿 お よ び 過 濃 側 に お い て 火 炎 が 完 全 に 消 失 し た 時 を 吹 き 消 え と し , そ れ ぞ れ , 上 限 お よ び 下 限 と し た 。 火 炎 は こ の 上 限 線 と 下 限 線 と に 囲 ま れ た 領 域 に 存 在 す る 。 図 3 に 非 旋 回 と 旋 回 時 に お け る 火 炎 存 在 範 囲 を 示 す 。 図 で 吹 き 消 え 界 限 は ● 印 で 示 さ れ る 。 こ の 図 に は 火 炎 の 形 状 を 分 類 し , 各 々 の 存 在 範 囲 も 同 時 に 示 し て 有 る 。 火 炎 形 状 は 火 炎 基 部 に お け る 火 炎 面 の 位 置 に よ り , 内 周 炎 , 外 周 炎 , こ の 中 間 の 遷 移 炎 に 分 け ら れ , こ れ ら と は 別 に , 主 火 炎 が 吹 き 消 え て い る バーナ口上炎, 正常な火炎とバーナ口上炎の状態を繰り返す振動炎, そして, 火炎内部に輝炎が生じる逆流炎に分類できる。旋回を与えると, 図 3 (b), (c) は 非 旋 回 時 (図 3 (a)) に み ら れ た バーナ口上炎 は 出 現 し な く な る 。 弱 い 旋 回 の 場 合 (図 3 (b)) で は 上 限 吹 き 消 え の 最 大 混 合 気 流 速  $U_{mix}$  が 非 旋 回 時 より 小 さ く な り , 火 炎 安 定 範 囲 が 狭 く な る 。 し か し な が ら , 図 3 (c) に 示 し た  $S$  が  $0.59$  以 上 で は 非 旋 回 時 より 上 限 吹 き 消 え が 大 き く な り , 火 炎 安 定 範 囲 は 広 く な る 。

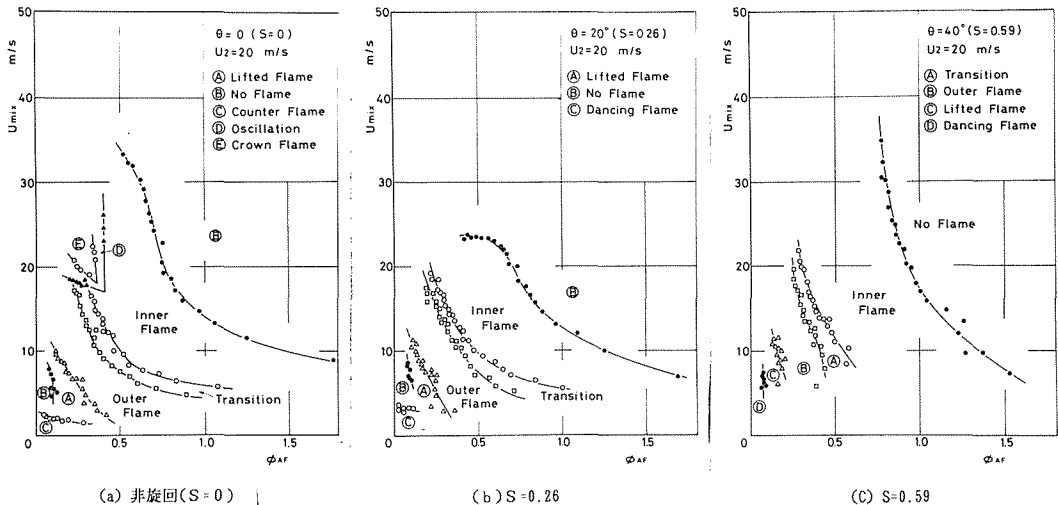


図3 火炎存在領域

#### 3.2 火炎安定範囲におよぼす旋回の影響

スワール数を変化させた場合の火炎安定範囲におよぼす影響を図4に示す。破線は非旋回時の吹き消え曲線である。弱い旋回, すなわち, スワール数  $0.13$  および  $0.26$  の場合, スワール数が大きいと非旋回の場合より上限吹き消え混合気流速は減少し, 火炎安定範囲が狭くなる傾向である。

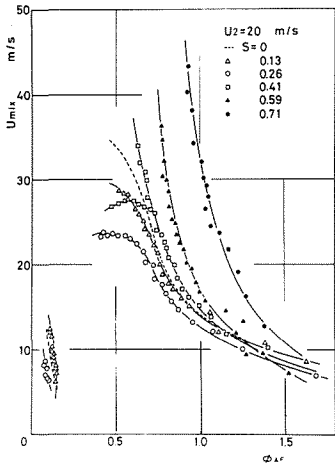
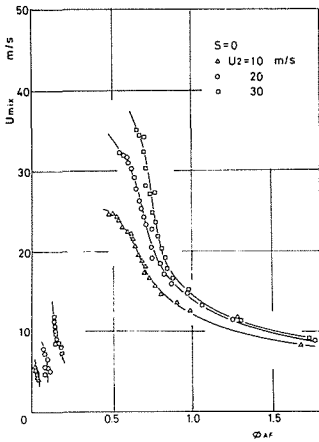


図4 火炎安定範囲におよぼす旋回の影響

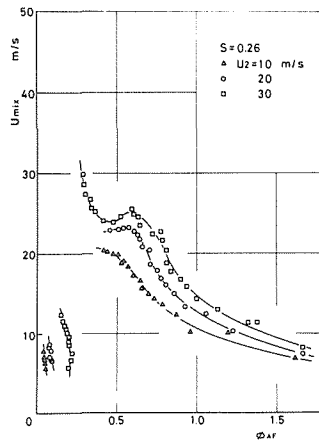
スワール数の0.41以上では、上限吹き消え混合気流速はスワール数が大きくなるほど大きくなり、火炎安定範囲が非旋回時より広がる。例えば、量論混合気の場合、非旋回では  $U_{mix} = 15 \text{ m/s}$  まで保炎可能になるが、 $S=0.26$  では  $12 \text{ m/s}$  に低下し、一方、 $S=0.71$  では  $30 \text{ m/s}$  まで保炎される。そこで上限吹き消えに与える旋回の影響を弱い旋回 ( $S \leq 0.21$ ) と強い旋回 ( $S \geq 0.41$ ) とに大別して考えることにする。

### 3.3 火炎安定範囲におよぼす2次空気流速の影響

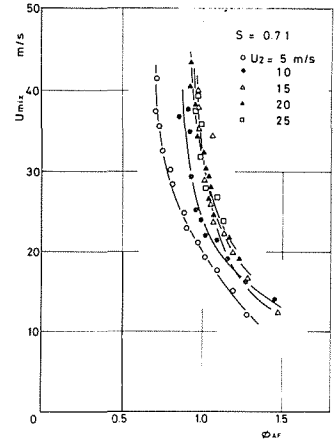
図5に  $S=0, 0.26$  および  $0.71$  における  $U_2$  の違いによる火炎安定範囲を示す。非旋回時と  $S=0.26$  の弱い旋回では  $U_2$  が高いと上限の混合気流速は増加し、火炎安定範囲が広がる。しかしながら、 $S=0.71$  では  $U_2$  が  $10 \text{ m/s}$  以上に増加しても、吹き消え曲線はあまり変化しないが、 $\phi_{AF}$  が  $1.0$  を超えて希薄側まで吹き消え限界がのび  $U_{mix}$  の限界は大きく広がることが示されている。



(a) 非旋回 ( $S=0$ )



(b)  $S=0.26$



(c)  $S=0.71$

図5 火炎安定範囲におよぼす  $U_2$  の影響

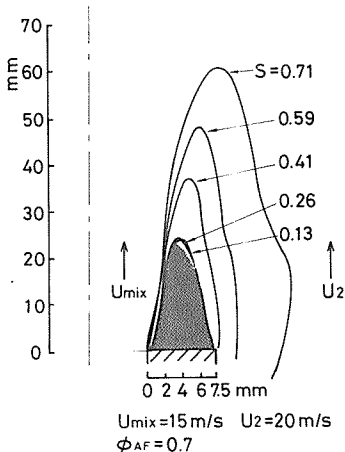


図6 再循環領域の形状

### 3.4 再循環域形成におよぼす旋回の影響

図6は  $U_2 = 20 \text{ m/s}$ ,  $U_{mix} = 15 \text{ m/s}$ ,  $\phi_{AF} = 0.7$  一定にして、スワール数を変化させた場合の再循環域の形状を示す。弱い旋回の場合 ( $S=0.13$ , および  $0.26$ )、再循環域は非旋回時(網目)と同じ位置を占め、先端位置が若干外側を向く。しかしながら、強い旋回の場合には再循環域は軸方向および半径方向に大きく広がっている。これらから、弱い旋回の場合にはバーナリム後流の再循環域が崩壊しておらず、非旋回時と同様に再循環域が保炎性を支配しており、強い旋回では旋回によって、大きな再循環域が生じ、保炎性を向上させていると考えられる。

### 3.5 燃料拡散

図7, 8, 9に各々, 非旋回, スワール数 0.26 および 0.71 における燃料拡散状態をシュリーレン写真および直接火炎写真と共に示す。燃料分布は等温流において測定した結果であり, 燃料の代わりに  $\text{CO}_2$  を用いた。流速条件は  $U_2=20 \text{ m/s}$ ,  $U_{\text{mix}}=15 \text{ m/s}$  である。スワール数 0.26 では分布

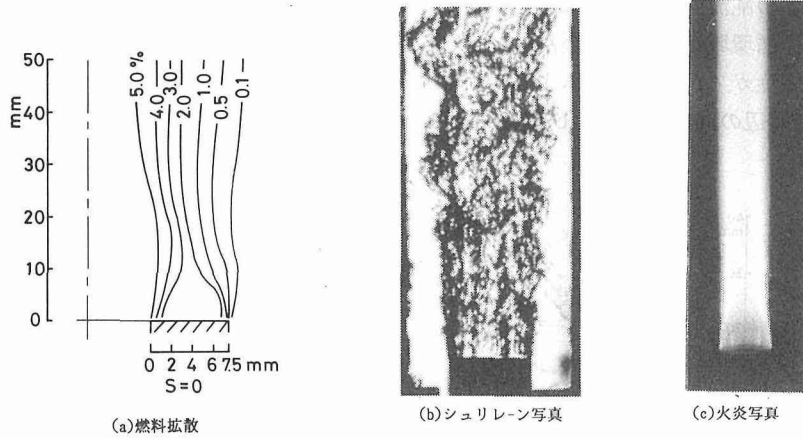


図7 燃料拡散および火炎写真 ( $S=0$ )

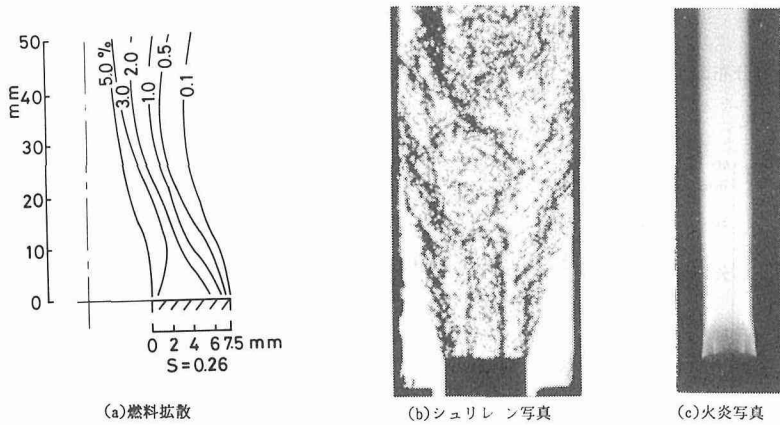


図8 燃料拡散および火炎写真 ( $S=0.26$ )

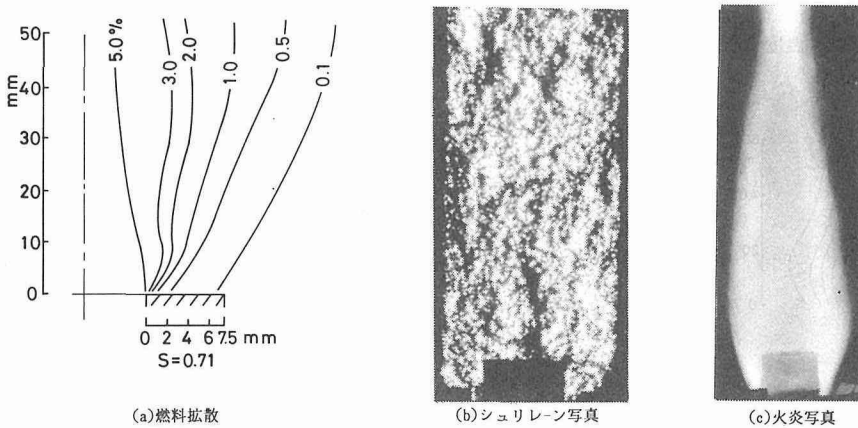


図9 燃料拡散および火炎写真 ( $S=0.71$ )

曲線は全体的に非旋回時より、少し内側に傾いている。また、濃度勾配が少し急になり、燃料拡散が悪くなっていることが分かる。しかしながら、強い旋回( $S=0.71$ )では濃度勾配は非常にゆるやかになり、バーナリムのかかなり外側まで拡がり、広い範囲までよく拡散していることが分かる。シュリーレン写真からも、スワール数 0.26 では 2 次空気が旋回によって、外側に拡がって、混合気と 2 次空気との乱流混合が悪くなっていることが推測される。一方、強い旋回の場合には旋回による大きな再循環域が生じ、強い乱れにより、混合気と 2 次空気との混合が促進されている。また、高温の燃焼ガスがバーナリムより上流側にも伸びている。

### 3.6 再循環域周辺の温度分布および濃度分布

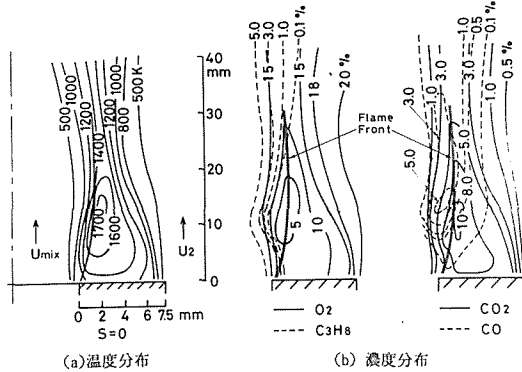


図10 温度分布および濃度分布 ( $S=0$ )

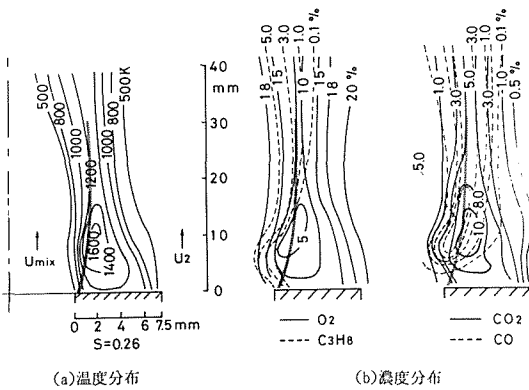


図11 温度分布および濃度分布 ( $S=0.26$ )

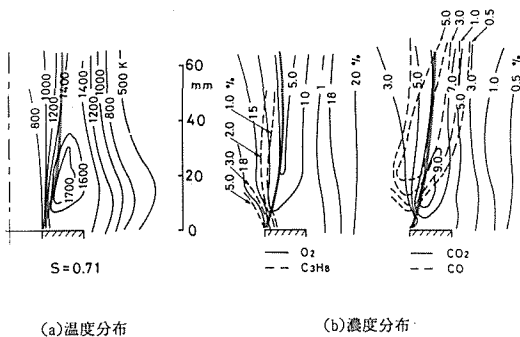


図12 温度分布および濃度分布 ( $S=0.71$ )

強い旋回を与えると再循環域は軸方向および半径方向に大きく拡がり、再循環域内の混合も促進されている。このことから、再循環域内の熱化学的構造は旋回の強さによって、違うものになり、また、保炎性とも密接に関係があると考えられる。図 10, 11, 12 に各々非旋回、弱い旋回 ( $S=0.26$ )、強い旋回 ( $S=0.71$ ) での温度分布および  $C_3H_8$ ,  $O_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$  の濃度分布を示す。スワール数 0.26 では最高温度領域は非旋回時より  $100^\circ C$  ほど低くなる。強い旋回 ( $S=0.71$ ) では最高温度領域は非旋回時より広くなり、温度勾配かがゆるやかになって、燃焼反応が非旋回および弱い旋回時より広い範囲で活発であることが分かる。また、 $O_2$  最低濃度および  $CO_2$  最高濃度領域は弱い旋回 ( $S=0.26$ ) では非旋回時より少し上流に移動する傾向が見られるが、強い旋回 ( $S=0.71$ ) ではこの領域は下流および半径方向に拡がっている。そして、この両領域は非旋回および旋回、いずれも、ほぼ一致しており、最高温度領域とも、ほぼ一致する。 $CO$  最高濃度領域はこれらの領域より混合気側に位置しており、可視火炎面とほぼ一致している。また、 $C_3H_8$  は可視火炎面より外側ではほとんど検出されない。これらの結果からも、弱い旋回では再循環域の混合が悪くなり、燃焼反応が弱くなって、最高温度領域が低くなるが、強い旋回では旋回による大きな再循環域内の混合が促進され、再循環域の最高温度領域が広くなり、広い範囲で、温度および濃度勾配がゆるやかになる。また、主な燃焼反応は可視火炎面近傍で起こっているが、再循環域内でも燃焼反応が進んでいることが明ら

かである。

### 3.7 局所空気比( $\phi$ )および火炎面位置

燃焼反応強度を論じる上で局所空気比は熱発生率と密接に関係があるためよく用いられる。局所空気比はガス濃度成分分布から求められる。図13に非旋回と旋回を伴う場合の局所空気比分布と可視火炎面を重ねて示す。弱い旋回( $S=0.26$ )の場合は非旋回より局所空気比の勾配が少し急になる傾向が示されるが、強い旋回( $S=0.71$ )では非常に局所空気比

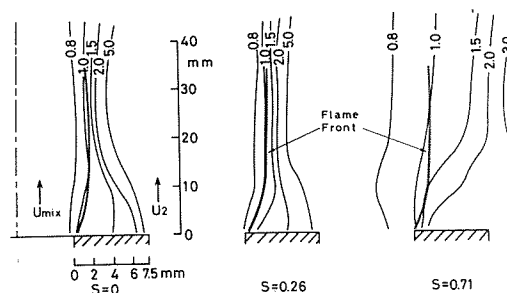


図13 局所空気比分布および火炎面

の勾配がゆるやかになり、これらの傾向は先にのべた温度分布ともよく対応する。視火炎面はいずれの場合も、局所空気比1.0近傍に存在している。これは非旋回での伊藤ら<sup>1)</sup>、また、ディスクに保持された拡散火炎における Minx<sup>9)</sup>らの結果とも一致する。

## 4. 結 論

厚肉バーナ管を持つ同軸噴流火炎の2次空気側に旋回を与えることにより、以下のことが明らかとなった。

- 1) 弱い旋回の場合、バーナリム後流に形成される再循環域が崩壊せず、非旋回と同じように、この再循環域が保炎性を支配する。しかしながら、旋回による遠心力によって、2次空気が外側に拡がり、再循環域内における混合気と2次空気の混合が悪くなり、火炎安定範囲が非旋回時より狭くなる。
- 2) 強い旋回の場合、旋回が原因となる大きな再循環域が生じ、乱れが強くなり、混合が促進され、また、熱源として役割も強化され、火炎安定範囲が広がる。すなわち、強い旋回によって、保炎性は高められる。
- 3) 再循環域内の最高温度領域は弱い旋回では非旋回時より低くなるが、強い旋回では広がる。 $O_2$ 最低濃度領域および $CO_2$ 最高濃度領域はほぼ一致し、また最高温度領域とも一致する。旋回ときにも、可視火炎面は局所空気比( $\phi$ )が1.0近傍で形成される。

## 謝 辞

本実験において、協力いただいた当講座技官山根清隆氏、当時学部学生田住正弘君に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 水谷, 矢野: 日本機械学会論文集, 44巻379号(昭53)1037
- 2) 伊藤, 佐々木, 深沢: 日本機械学会論文集, 43巻374号(昭52)3868
- 3) 伊藤, 佐々木: 日本機械学会論文集, 44巻383号(昭53)2478
- 4) 宋, 伊藤: 23回燃焼シンポジウム(昭60)349
- 5) A. K. Gupta, D. G. Lilley, N. Syred: Swirl Flow, 1984. Abacus Press
- 6) Viola Wroblewska: 16th Symp. (Int.) on Comb. 1976, 401
- 7) 高城, 岡本, 田地, 中筋: 燃焼研究, 69号(昭60)42
- 8) J. M. Beer, N. A. Chigier: Combustion Aerodynamic 1976, Applied Science Pub.
- 9) E. Minx, H. Kremer: VDI-Berichte. 199 (1972) p. 78