

UDC 621.452.32.034:
662.613:
628.512

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-306

航空用ガスタービン燃焼器における排気制御の研究(V)

—— 箱形燃焼器の内部ガス測定結果 ——

鈴木邦男 ・ 齊藤 隆
石井 浅五郎 ・ 山田 秀志

1976 年 8 月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

項 目	担 当 者
実験・計測	佐々木宣卿 [*] 酒井 規行 [*] 外山 郁子 ^{**}

* 川崎重工業(株)

** 原動機部 アルバイター

航空用ガスタービン燃焼器における排気制御の研究(V)*

— 箱形燃焼器の内部ガス測定結果 —

鈴木 邦 男**・ 齊 藤 隆**

石 井 浅五郎**・ 山 田 秀 志**

概 要

航空用ガスタービンからの大気汚染成分排出低減化をはかる資料を得ることを目的として箱形燃焼器模型内部のガス分析を行ない、関係する成分の濃度分布およびその傾向を実験的に求めた。窒素酸化物の挙動はきわめて複雑で、全体的に説明できる段階まで達しなかったが、その他の成分については理解しやすい傾向を示している。

燃焼器の構成要素；スワローやライナ空気孔をかえて、そのガス濃度分布に及ぼす影響も調査した。

1. はしがき

航空用ガスタービン（ジェットエンジンなど）からの大気汚染成分は、ガソリン機関のそれにくらべて低濃度であるが、単位燃料量あたりの排出指数としては小さくなく、他の排出源の規制と並行して航空エンジンに対する排出規制が発表され¹⁾、または検討されている²⁾。

このような現状から、航空用ガスタービンの排出低減化をはかるため、その汚染成分生成に関する資料を得ることを目的として、アニューラ形燃焼器の分割模型に相当する箱形燃焼器の燃焼領域内のガス分析をした。

燃焼実験は、おもに入口空気圧は大気圧、常温付近で行なった。これは、実験の燃焼器作動条件と大幅にことなるが、資料の第1段階のものとして十分に意味のあることと考えられる。

測定結果の解析をしたところ、窒素酸化物(NO_x)はきわめて複雑な挙動を示し、その傾向を完全に説明できる段階まで達しなかったが、いくつかの事柄が判明した。その他の一酸化炭素(CO)、二酸化炭素(CO_2)、酸素(O_2)などの成分については、互によく対応し、説明容易な傾向を示している。

これら各成分の濃度分布は、スワローやライナ第1列空気孔位置をかえることにより大幅に変化し、排ガス組成についても燃焼性能の場合と同様、燃焼器構成要素が

デリケートに影響することが判明した。

2. 燃焼器模型

実験した燃焼器模型は、アニューラ形燃焼器の分割模型に相当する箱形燃焼器模型である。

燃焼器の形式は、うず巻形燃料噴射弁とスワローを組合せたもので、スワローおよびライナの種類をかえてその影響を調べた。隔壁板（スワロー取付板）から補助的な空気流入を行なう呼称ゲジゲジルーバをつけた効果も調査した。

供試ライナは呼称CC20S-1³⁾ およびCC20S-2⁴⁾である。CC20S-1は、隔壁板から第1列空気孔までの距離が49mm、13φ空気孔を4個軸方向に並べたもの、CC20S-2は、隔壁板から第1列空気孔までの距離が69mm、13φ空気孔2個と13×23長円希釈孔を軸方向に並べたものである。このライナと分流板2種類、スワロー3種類を組合せて実験した。CC20S-1、CC20S-2の概要を図1(a)、(b)に示す。スワロー55/43盲付、46φ、55φ二重逆旋回スワローおよびゲジゲジ

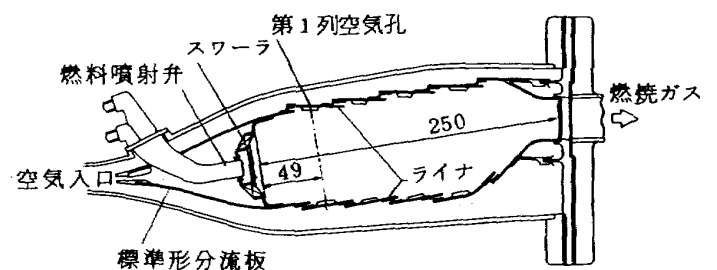


図1(a) CC20S-1 燃焼器模型概要図

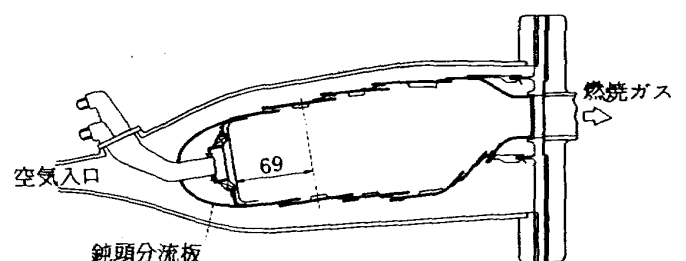


図1(b) CC20S-2 燃焼器模型概要図

* 昭和51年3月12日 受付

** 原動機部

ルーバを図 2 (a),(b),(c),(d) に示す。スワロー 55/43 盲付は、これまで標準形としてきたものである。スワロー 46φ は、外径を 55φ から 46φ と小さくし、スワロー旋回羽根部分を流れる空気流速を高め、混合の促進をはかることおよびライナ幅との寸法的なマッチングをとることを考慮したものである。スワロー 55φ 二重逆旋回スワローは、NASA の文献⁵⁾をもとに試作したもので、混合促進を考慮している。

実験時のライナ、分流板およびスワローの組合せを表 1 に示す。CC20S-1 は大気圧、常温実験のとき燃焼効率が低くであるため、CC20S-2 についての実験を主にし、CC20S-1 はライナ空気孔配置の影響を調べるため、1 ケース加えた。

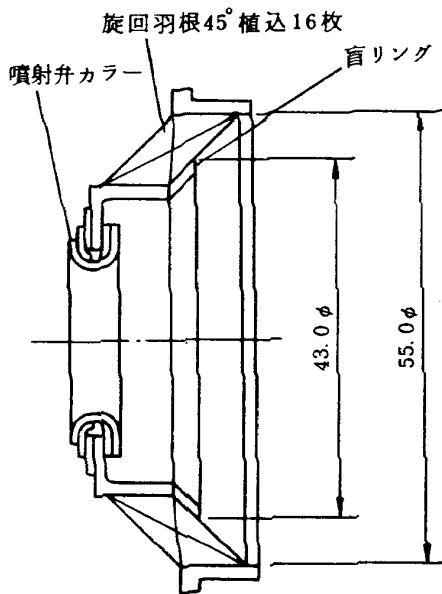


図 2 (a) 55/43 盲付標準スワロー

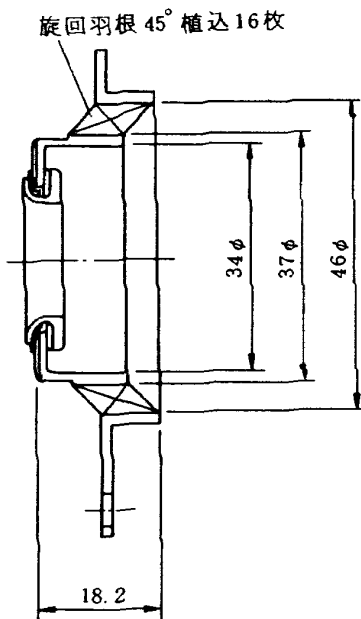


図 2 (b) 46φ スワロー

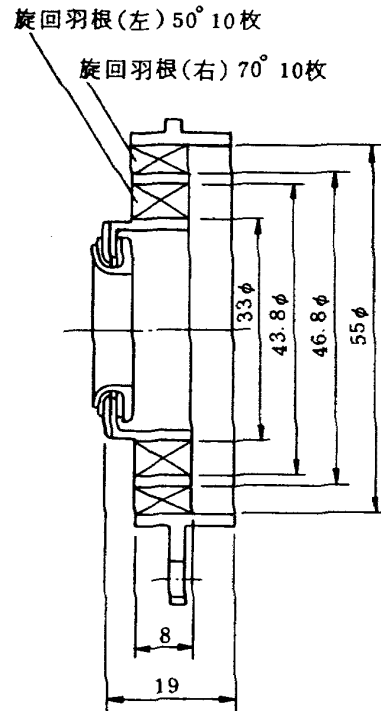


図 2 (c) 55φ 二重逆旋回スワロー

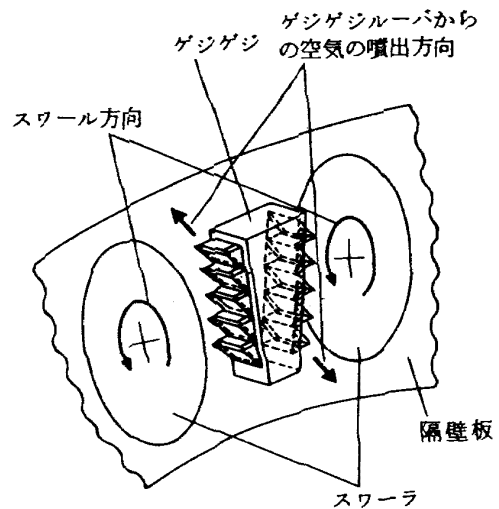


図 2 (d) ゲジゲジルーバ (隔壁板に取付ける補助空気を噴出させるルーバ)

表 1 実験に用いたライナ、分流板 およびスワローの組合せ

番号	ライナ	分流板	スワロー
1	CC20S-1	標準形	55/43 盲付
2	CC20S-2	標準形	55/43 盲付
3	CC20S-2	鈍頭形	46 φ
4	CC20S-2	鈍頭形	46 φ + ゲジゲジルーバ
5	CC20S-2	鈍頭形	55 φ 二重逆旋回

3. 実験装置および実験方法

3.1 実験装置

この実験は、罐形燃焼器試験設備の常圧セクタ燃焼器試験系を用いて行なった。実験装置の主要系統図を図3に示す。

供試燃焼器入口空気温度をブロー吐出温度以上に高める場合には、予熱燃焼器を用いる。予熱燃焼器の能力は、最大 1.0×10^6 kcal/h で、この 1/30 程度の熱量まで使用することができる。実験装置としての許容温度は約 850 K である。すなわち、常圧セクタ燃焼器試験系では、次の条件で実験することができる。

- 空気流量 $w_a = 2.0$ kg/s (最大)
- 空気圧力 $P_1 = 0.35$ kg/cm² G
- 空気温度 $T_1 = 315 \sim 325$ K (予熱なし)
 $= 400 \sim 850$ K (予熱あり)
- 燃料流量 $w_f = 250$ kg/h (最大)
- 燃料圧力 $P_f = 100$ kg/cm² G (最大)
- 使用燃料 ジェット燃料 (Jet A-1)

3.2 計測器

ガス分析に用いた分析計は、堀場製作所製のガスタービン燃焼器内部燃焼ガス濃度測定装置 (MEXA2000S) である。この主要性能は次の通り。

(測定方式)

- i) CO₂ 非分散赤外吸収 (堀場 A IA-21)
 - ii) CO 非分散赤外吸収 (堀場 A IA-21)
 - iii) O₂ 磁気式 (Servomex OA-250)
 - iv) NO_x 化学発光式 (堀場 C LA-31)
 - v) THC 水素炎イオン化方式 (堀場 F IA-31)
- (測定範囲)
- i) CO₂ 0 ~ 5/15 % ダブルレンジ
 - ii) CO 0 ~ 5/15 % ダブルレンジ
 - iii) O₂ 0 ~ 2.5/5/10/25 % 4レンジ
 - iv) NO_x 0 ~ 10/20/50/...../5000 ppm
 NO-NO_x 9レンジ
 - v) THC 0 ~ 200/500/...../100,000 ppm
 (CH₂換算) 9レンジ

(特長)

燃焼器内部からガスを採取する場合、採取量が多いと流れ模様などが変化して、ことなる燃焼状況を示すことがある。このため採取量を極力減少させる必要があるが、MEXA2000S では、標準空気による定流量希釈 (希釈率約 1 : 9) を行なって各分析計に送る試料流量を増し、応答速度の向上、試料前処理の簡易化および高濃度範囲の直線性向上を図っている。

試料ガスの採取には、図4に示す水冷のステンレス製サンプリングプローブを用いた。プローブ出口にはフィルターおよび水分離器をおき、このあと 8φ/6φ のテフ

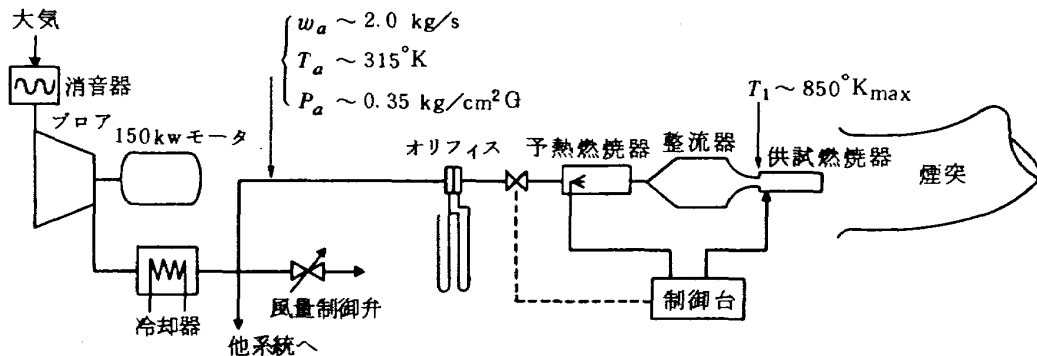


図3 実験装置系統図

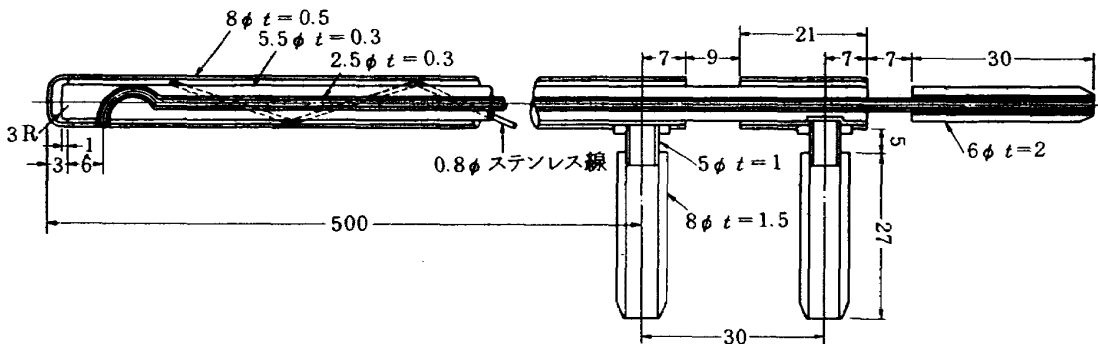


図4 ガス・サンプリングプローブ

ロンチューブで分析計と結んだ。ラインの加熱を行っていないので、THCの測定には凝縮による損失や、吸着後の脱離等によって指示値がテリングするなどの結果、燃焼器の組成変化に対する応答性に問題が生じた。

また、試料吸引量の少ない場合には、ライン内の凝縮水に NO_2 が吸収されて、指示値の低下する場合が考えられる。

燃焼性能の測定に用いた計測器は次の通り。

空気流量；オリフィス

燃料流量；タービン流量計（CC20S-2、55/43 盲付の実験のみピストン式容積形流量計）

出口温度；4点式CA熱電対7本の合計28点

3.3 実験方法

(1) 流れ模様の測定

燃焼器側壁を透明プラスチック板に置換え、図5に示すストリーマを用いて目視により流れの方向を定めこれから作図した。流速の遅いとき、ストリーマが流れの方向に向かず、また速すぎるとストリーマが振動して向きが判定できなくなる。このため、適当な流速範囲が存在するが、この範囲は、設計点流速に対し $1/3$ 以下と低速である。しかし、各風速条件における測定結果を比較すると、流れ模様は高速時からほとんど変わらないようにみられる。

(2) 燃焼実験

燃焼実験は次の条件で行なった。

供試燃焼器入口空気温度； $T_1 = 315 \sim 323\text{K}$, $480 \sim 580\text{K}$ （予熱）

最大断面平均風速； $U_r = 16.5 \sim 19\text{ m/s}$

空燃比； $n = 41 \sim 100$

使用燃料；ジェット燃料 Jet A-1

(3) ガス分析

分析用試料採取位置は、横方向（図6のB-B）に1ピッチ分80mmを10mm間隔で9点、主流方向にスワラ取付板（隔壁板）から23, 36, 46, 66, 90, 110,

130, 150 mm の各位置とした。

4. 実験結果

4.1 流れ模様

(1) CC20S-1, 55/43 盲付スワラの流れ模様

図6のA-A断面について測定した非燃焼時の流れ模様を図7(a)に示す。図7(b)は、ライナ空気孔の中心断面をとったものである。

図7(a)によると、スワラからの空気流はライナ壁面に沿って流れ、この流れと中央部分の逆流とによって生ずるうずが比較的よく観察される。うずの中心は細長く、中心線から25~30mm、スワラ取付板（以下、隔壁板と呼ぶ）からの距離にして $l = 30 \sim 50\text{ mm}$ にある。スワラ中央部の逆流領域の長さは、隔壁板からの距離にして $l \approx 70\text{ mm}$ である。この直後； $l \approx 80\text{ mm}$ 付近に流れ方向の定まらぬ領域が、主流方向長さにして20mmほどある。 $l \geq 110\text{ mm}$ の範囲では、比較的単調な流れ模様を示している。

図7(b)によると、ライナ第1列空気孔からの空気噴流は、その下流側の3列のものにくらべて弱く、貫通距離は10数mm程度である。したがって、この空気噴流がスワラによって生ずる循環流を乱すことは少ないと判断される。ライナ第2列空気孔以後では、空気噴流の貫通は充分にあり、ライナ中央部分で上下からの噴流が衝突している。 $l \geq 110\text{ mm}$ の範囲では、上下ほぼ対称な流れ模様を示す。

(2) CC20S-2, 55/43 盲付スワラの流れ模様

スワラ中心断面（図6のA-A断面）について測定した非燃焼時の流れ模様を図8(a)に、ライナ空気孔中心断面のものを図8(b)に示す。

図8(a)によると、スワラからの流れは、CC20S-1の場合とくらべて、ライナ壁側に寄らず、中央部分の逆流領域が細くなっている。逆流領域の長さは $l \approx 65\text{ mm}$ である。CC20S-1の場合に観察された $l \approx 80\text{ mm}$ 付

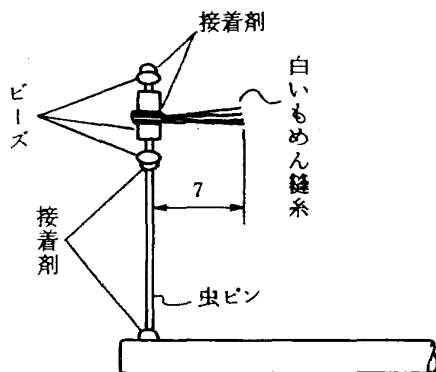


図5 流れ模様測定用ストリーマ

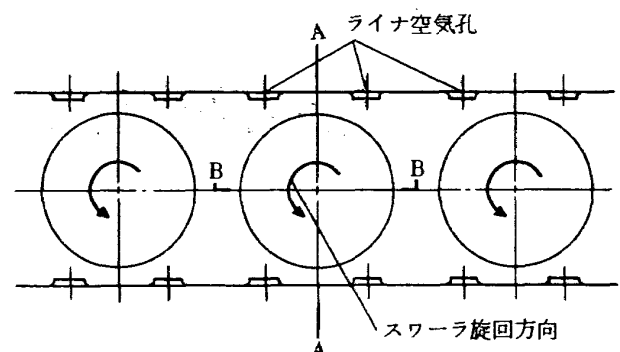


図6 計測断面

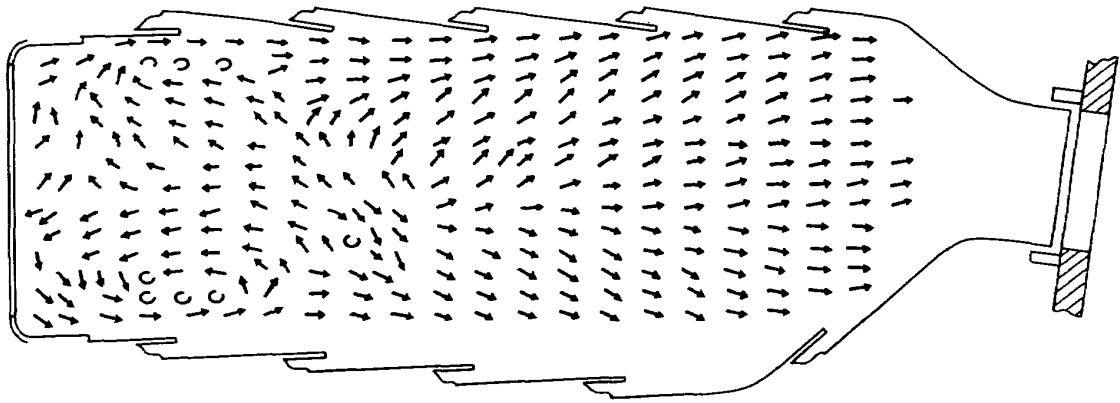


図 7(a) ライナ CC20S-1, スワラ 55/43 盲付の流れ模様 (I - スワラ中心断面)

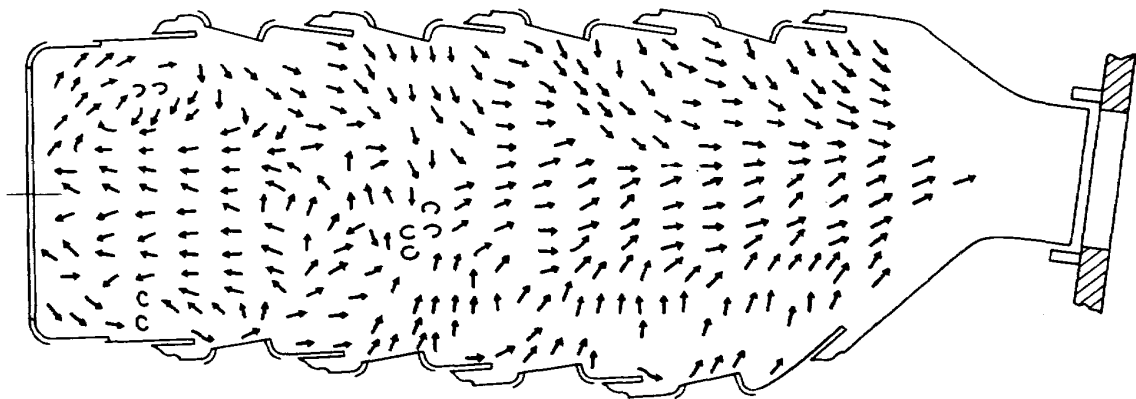


図 7(b) ライナ CC20S-1, スワラ 55/43 盲付の流れ模様 (II - 空気孔中心断面)

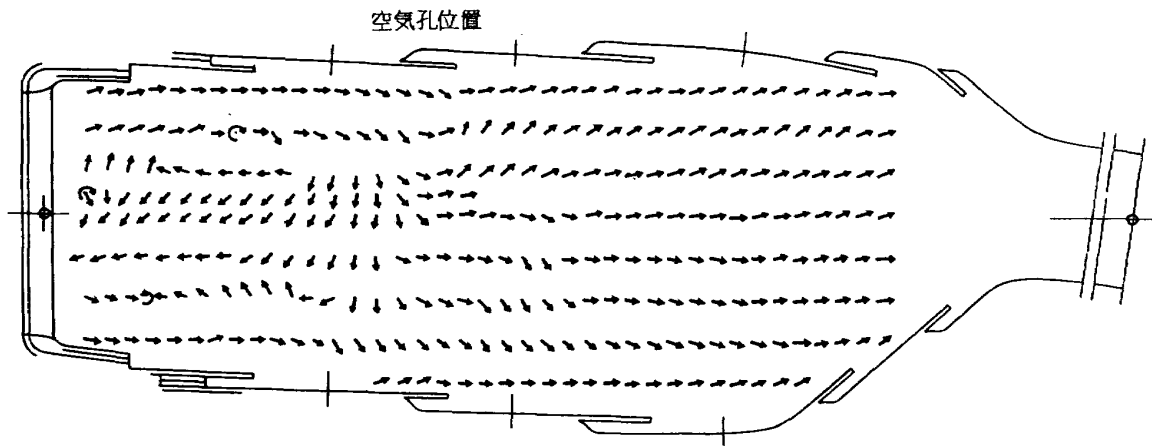


図 8(a) ライナ CC20S-2, スワラ 55/43 盲付の流れ模様 (I - スワラ中心断面)

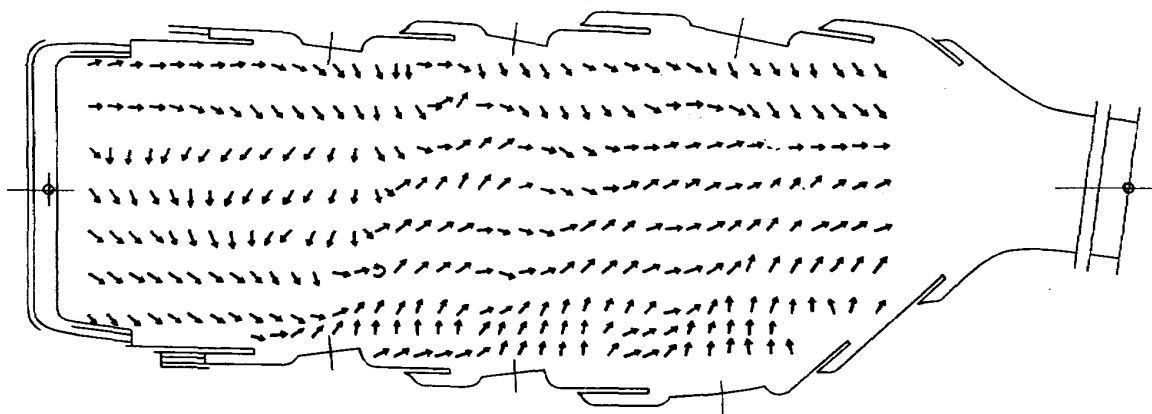


図 8(b) ライナ CC20S-2, スワラ 55/43 盲付の流れ模様 (II - 空気孔中心断面)

近の流れの乱れ(よどみに近い)領域は、ライナ第1列空気孔からの空気噴流によって消えている。

図8(b)によると、ライナ空気孔からの空気噴流の貫通距離は充分にあるが、上下からの噴流がライナ中央部分でやや前後にずれている。ライナ空気孔の主流方向ピッチがCC20S-1にくらべて大きいため、図7(b)と図8(b)を比較すると、CC20S-1のほうが下流側における空気-燃焼ガスの混合が良好なように推定される。

図9は、ガスサンプリングプローブをトラバースしたB-B断面の非燃焼時における流れ模様である。スワラ中央部分の逆流領域長さは $l = 35\text{mm}$ 程度と図8(a)にくらべて短かく示されている。これは、ストリーマの向きの三次元性に基くもので、実用上は図8(a)の長さを考えてよいと思う。その下流側の流れは非対称で、箱形模型の中央部分(図9の下側の境界が模型の中心)に流れが寄る傾向を示す。これは、部分模型として防止がむずかしいので、修正のための対策はとっていない。 $l \geq 90$ の範囲は、ほぼ軸方向の流れになっている。

(3) CC20S-2, 46φスワラの流れ模様

スワラ中心断面の図10(a)によると、スワラからの空気流は、ほぼ頂角 90° の角度で広がり、この流れに誘引される逆流からの流れが存在する。逆流領域の長さは $l \approx 80\text{mm}$ と比較的長いが、その幅は狭い。その下流側の $l \approx 90\text{mm}$ 付近に流れ方向の定まらない領域がわずかに存在する。 $l \geq 100\text{mm}$ の範囲は、単調な流れ模様になっている。

図10(b)に示すライナ空気孔中心断面の流れ模様は $l < 130\text{mm}$ の範囲で、きわめて複雑である。

(4) CC20S-2, 46φスワラ, ゲジゲジルーバ付の流れ模様

ゲジゲジルーバによる流れ模様の変化は、スワラ中心断面およびスワラ中間断面にはない。ライナ空気孔中心断面の隔壁板近傍には、いくぶん変化が現われ、ゲジゲジルーバ付のほうの流れの方向が揃い、乱れおよびよどみがなくなっている。

(5) CC20S-2, 55φ二重逆旋回スワラの流れ模様
スワラ中心断面の図11(a)によると、スワラからの流れはライナ壁面に沿う薄い層になっている。明らかな逆流は、スワラ中央部分に少しあるのみで、あとは逆流に近いという程度の流れを作っている。逆流領域の長さは $l \approx 45\text{mm}$ と短い。しかし、 $l \approx 80\text{mm}$ 付近からも上流に向う流れがみられる。逆流領域が中断されたような形である。 $l \geq 90\text{mm}$ の範囲では、流れ模様は単調である。

ライナ空気孔中心断面の図11(b)によると、 $l \approx 30\text{mm}$ の上側ライナに空気孔があるような形になっている。図11(b)は、燃焼器下流側から見て、スワラの右側の空気孔中心断面であるが、左側の空気孔中心断面では、 $l \approx 30\text{mm}$ 位置の下側ライナに空気孔があるような流れになっている。スワラ旋回方向は、下流側から見て、内径側が右旋回、外径側が左旋回になっている(図2(c))。これより下流側では、他のスワラの場合と大差ない流れ模様を示している。

(6) 燃焼時の流れ模様について

非燃焼時の流れ模様が燃焼時どのように変化するかは、一つの問題である。

CC20S-2, 55/43 盲付スワラの場合を例にとってみると、非燃焼時の図8(b)から、ライナ第1列空気孔からの空気噴流は、ライナ中央(図6のB-B断面)にて上側空気孔からのものが $l \approx 75\text{mm}$ 、下側空気孔から

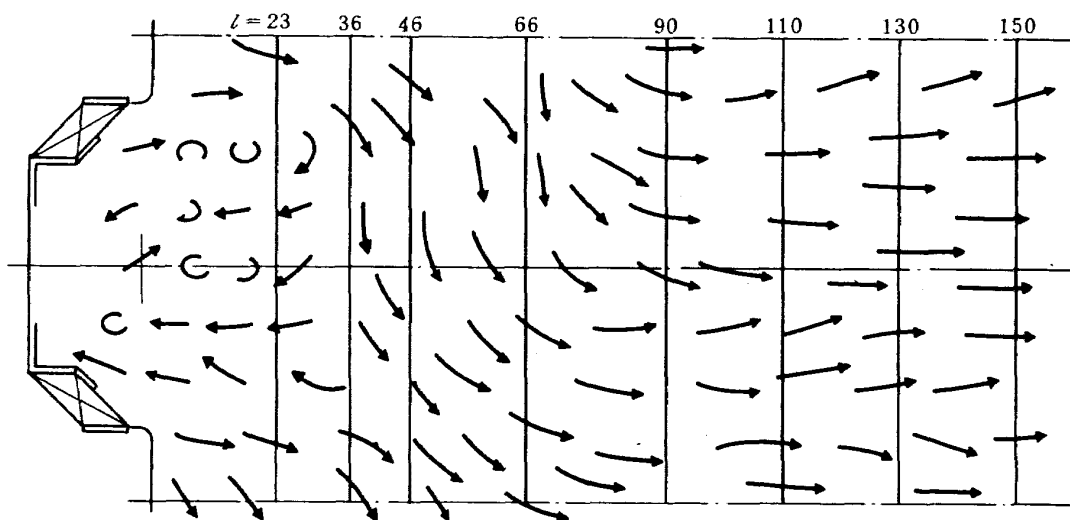


図9 ライナCC20S-2, 55/43盲付スワラ, B-B断面の流れ模様

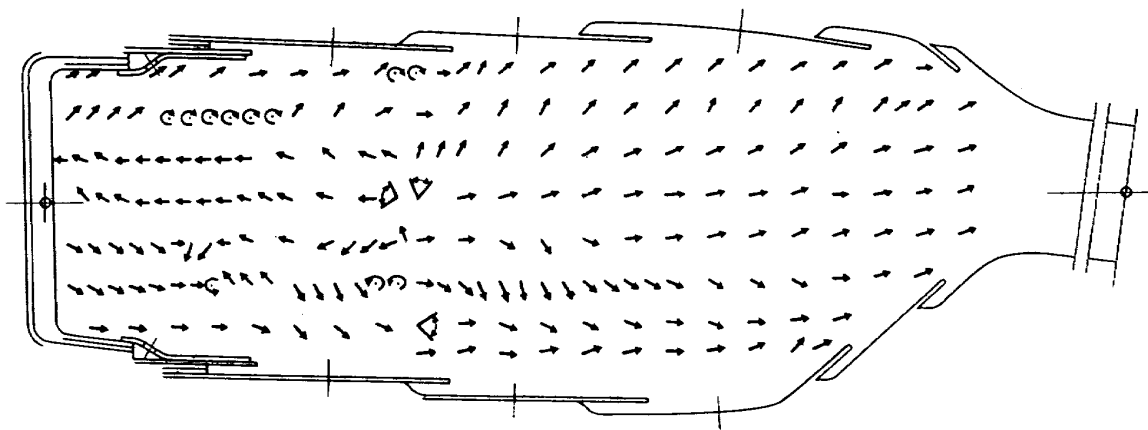


図 10(a) ライナ CC20S-2, スワラ 46φ の流れ模様 (I - スワラ中心断面)

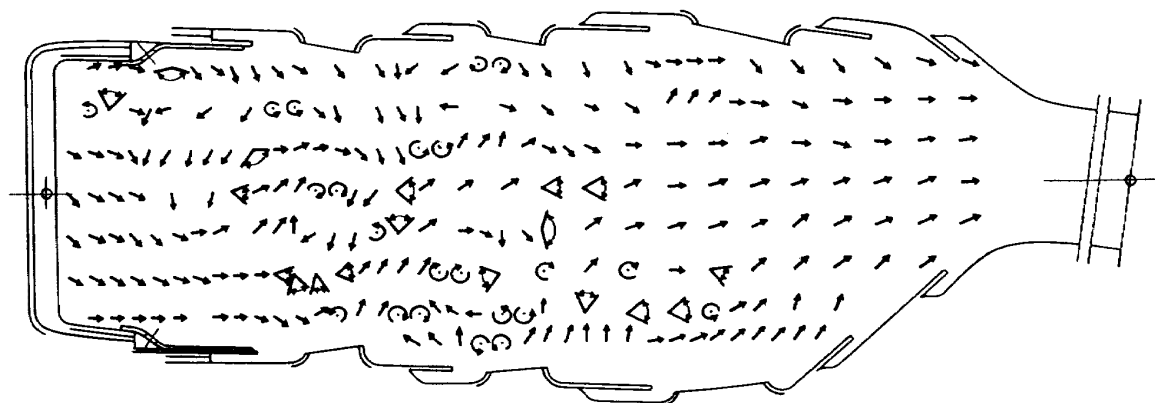


図 10(b) ライナ CC20S-2, スワラ 46φ の流れ模様 (II - 空気孔中心断面)

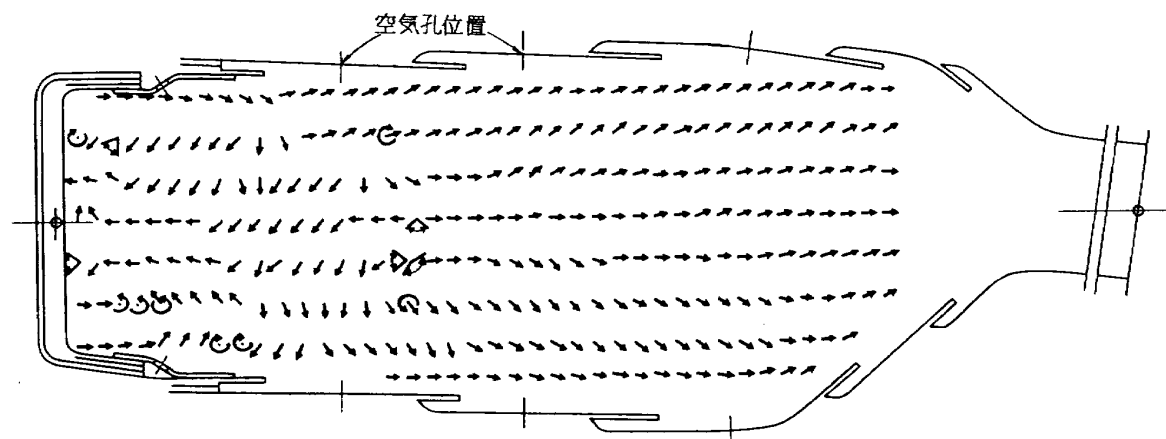


図 11(a) ライナ CC20S-2, スワラ 55φ 二重逆旋回の流れ模様 (I - スワラ中心断面)

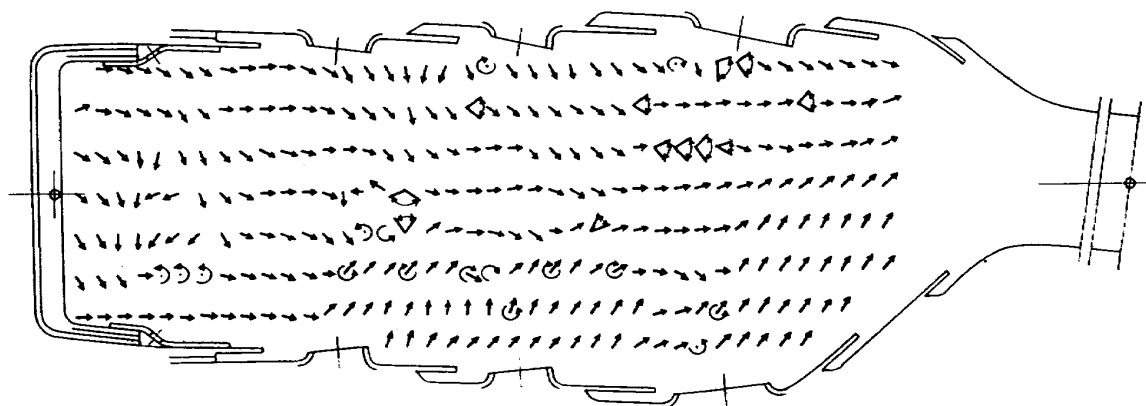


図 11(b) ライナ CC20S-2, スワラ 55φ 二重逆旋回の流れ模様 (II - 空気孔中心断面)

のものが $l \doteq 95\text{mm}$ 付近にあることがわかる。燃焼時、火炎を側壁の石英ガラス窓から観察すると、空気噴流部分は火炎の色の差から容易に判明し、これによると上下ライナからの空気噴流はライナ中央で衝突するが、その位置は空燃比 $n = 90 \sim 100$ のとき $l \doteq 90\text{mm}$ 、 $n = 41 \sim 58$ のとき $l \doteq 110\text{mm}$ となっている。これは、ガス分析の結果とも一致している。この空気噴流の衝突位置の変化は、ライナ中央部分の主流方向の流れが燃焼時に強くなり、噴流が下流側に流されるという感じである。このような変化は、CC20S-1 の場合にも顕著ではないがみられ、燃焼時 - 非燃焼時によってライナ空気孔からの噴流位置のずれがある。

また、燃料噴射弁近傍では、燃料噴霧流のモーメントにより、流れ模様が変化する。⁶⁾すなわち、非燃焼時の弱い逆流は、燃料噴霧流により主流方向の流れにかえられてしまうことが考えられる。

ガス分析結果の検討に対しては以上のことを考慮し、非燃焼時の流れ模様をそのままの形で取入れるのではなく、いくぶん修正して考えた。

4.2 燃焼性能

各供試燃焼器の燃焼性能として、燃焼器出口温度から求めた燃焼効率特性の比較を行なう。

スワラ 55/43 盲付、ライナ CC20S-1 と CC20S-2 についての燃焼効率 - 空燃比の特性を図 12 に示す。この図のデータの場合、燃焼実験後になって、実験装置からの空気の洩れが発見され、図に示したものは、これを修正した値である。修正係数は、圧力計測値などから精度良く求まっており、CC20S-1 の場合の燃焼効率が 100% を超す実験点は、修正係数の不適当さよりも出口温度分布の不均一に基づく平均値の計測誤差によると考えられる。いずれにしても燃焼効率特性は、CC20S-2 のほうが CC20S-1 よりもすぐれている。この傾向は、55/43 盲付スワラ以外の場合にも常にあてはまる。CC20S-2 は、この状態で内部ガスの測定を行なった。

ライナに CC20S-2 を用い、スワラに 46φ、46φ + ゲジゲジルーバ付および 55φ 二重逆旋回を組合せたときの燃焼効率特性の比較を図 13 に示す。46φ スワラの燃焼効率特性は、図 12 の 55/43 盲付のものと同様である。ゲジゲジルーバの効果は、あまり大きなものではないが、一次燃焼領域に空気を多く流入させることに意味がある。

55φ 二重逆旋回スワラを用いたとき、火炎状態の観察からは高い燃焼効率が期待されたが、測定値は 46φ スワラより低く現われている。しかし、 P_1 はほぼ大気圧、

$T_1 \doteq 315\text{K}$ の実験条件としては、悪い値ではない。

出口ガス分析時に測定した燃焼効率値を図 14 に示す。CC20S-2 とスワラ 46φ、46φ + ゲジゲジルーバ付および 55φ 二重逆旋回を組合せた場合の値は、ほぼ図 13 の

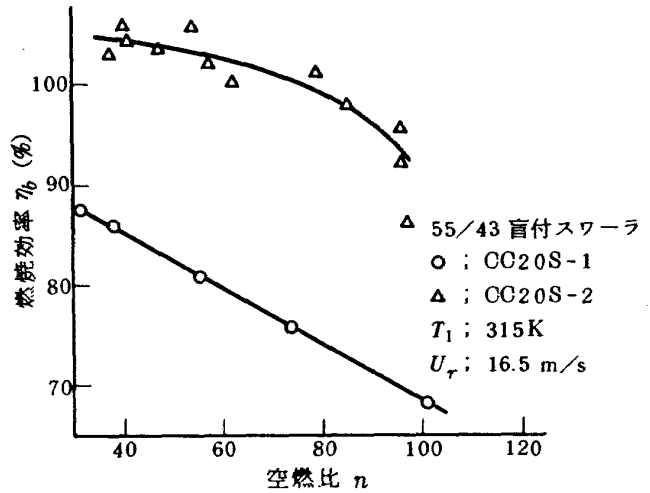


図 12 供試燃焼器の燃焼効率特性(I)

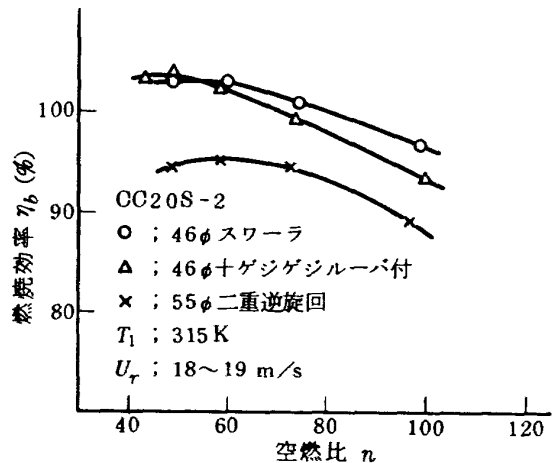


図 13 供試燃焼器の燃焼効率特性(II)

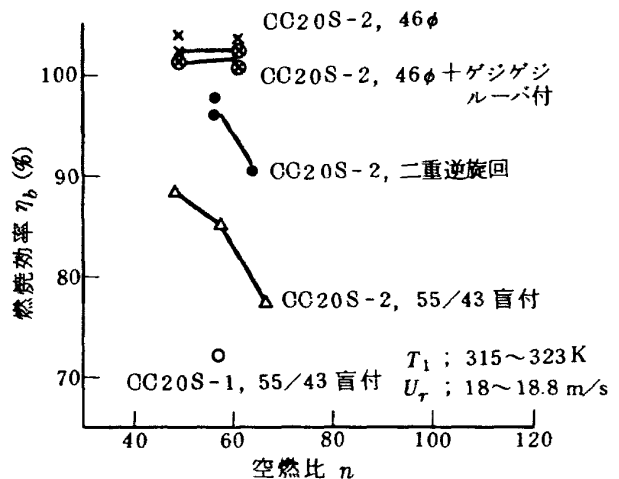


図 14 ガス分析時に測定した燃焼効率

ものと一致するが、CC20S-2 と 55/43 盲付および CC20S-1 と 55/43 盲付を組合せた場合は図12のものから大分低下している。これは、最大断面平均風速の差（図12は $U_r \approx 16.5 \text{ m/s}$ のときのもの、図14は $U_r \approx 18 \text{ m/s}$ のときのもの）によるものと推定される。

このように CC20S-2、スワラ 55/43 盲付の実験については、内部ガス測定時（図14）と出口ガス測定時（図12）の間に、最大断面平均風速の差に基づくと推定される燃焼効率の差異があるため、出口ガス組成と内部ガス組成の関連を求めようとする場合に、この点を考慮する必要がある。すなわち、燃焼器内部のガス組成から定められる局所的な燃焼進捗度の差異が出口燃焼効率の違いとなって現れると考えられるからである。なお、CC20S-1 の場合は、すべて図14の状態 で測定している。

4.3 ガス濃度分布

ガス濃度は CO_2 , CO , O_2 , NO , NO_2 ($\equiv \text{NO}_x - \text{NO}$) の各成分について測定位置の濃度をもとに等濃度線を求め、濃度分布図にまとめた。各測定位置の間の濃度勾配は、直線と近似した。測定位置のます目が荒いため、精度はあまり高くないが、傾向は現われている。

NO や CO 濃度はこれまでの測定によると⁷⁾ 局所当量比 (ϕ_l) および燃焼進捗度に対応する酸素消費効率 (ϵ) と関係があるため、 ϕ_l や ϵ の分布についても計算して求めた。なお、この計算には測定精度の高くない THC 濃度を含めている。

ϕ_l および ϵ は、各測定点におけるガス組成から次の式によって求めた。

$$\phi_l = \frac{F_l}{F_s}$$

$$F_l = \frac{C(\text{CO}_2) + C(\text{CO}) + C(\text{THC})}{C(\text{O}_2) + C(\text{CO}_2) + \frac{1}{2} \{C(\text{CO}) + C(\text{H}_2\text{O})\}} \times \frac{M(\text{C})}{M(\text{O}_2)} \times \frac{f(\text{O}_2)}{f(\text{C})}$$

$F_s = 0.0675$ (Jet A-1 燃料の理論燃空比)

$$\epsilon = \frac{\frac{f(\text{O}_2)}{F_l} - \frac{C(\text{O}_2) \cdot M(\text{O}_2)}{\sum C_i(\text{C}) \cdot M(\text{C})} \cdot f(\text{C})}{\frac{f(\text{O}_2)}{F_l}} \quad (\phi_l > 1.0)$$

$$\epsilon = \frac{\frac{f(\text{O}_2)}{F_l} - \frac{C(\text{O}_2) \cdot M(\text{O}_2)}{\sum C_i(\text{C}) \cdot M(\text{C})} \cdot f(\text{C})}{\frac{f(\text{O}_2)}{F_s}} \quad (\phi_l \leq 1.0)$$

ここに、

- C_i : 成分 i の濃度
- $C_i(\text{C})$: 炭素原子換算で表示した成分 i の濃度
- M_i : 成分 i の分子量
- $f(\text{O}_2)$: 空気の酸素重量分率
- $f(\text{C})$: 燃料の炭素重量分率

4.3.1 CC20S-1 とスワラ 55/43 盲付のときの測定結果

測定結果を分布図にまとめて図15～図21に示す。図15から、 CO_2 の高濃度の箇所は、スワラ中心より図の下側に片寄っているが、これは図9に示したような流れの片寄りの影響とみられる。全体的に CO_2 高濃度の領域が小さく、 CO_2 濃度が通常、燃焼温度と対応していることを考え合えると、高温の領域が小さいといえる。これは、図14の燃焼効率値からも推定されるものである。

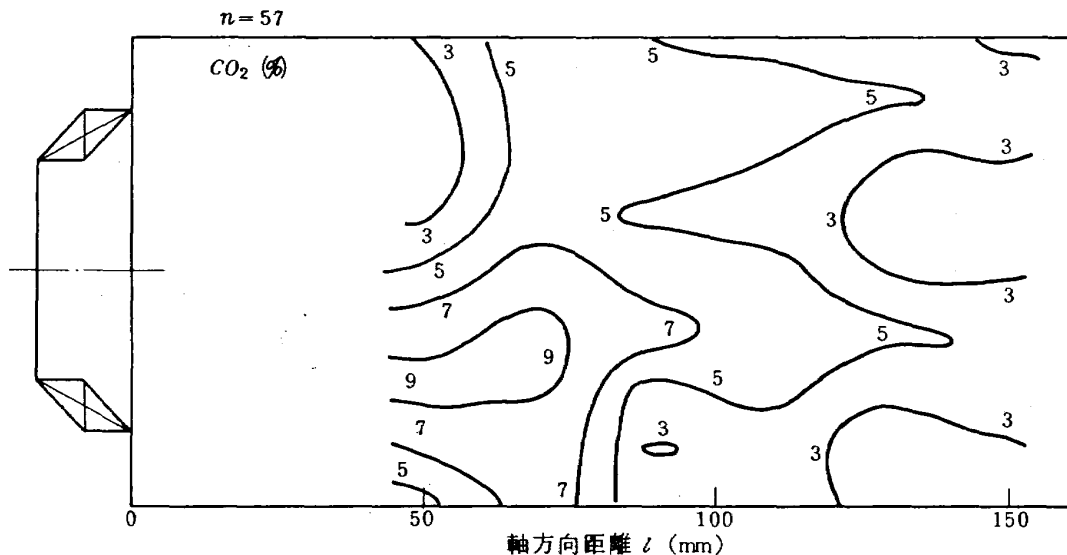


図15 CC20S-1, 55/43 盲付の CO_2 濃度分布

図 16 の CO 高濃度の帯状領域は、図 15 の CO₂ 濃度 5% の等濃度線とほぼ対応している。CO 濃度 1% 以下の領域は、CO₂ 濃度 3% 以下の領域と一致している。

図 17 の O₂ 濃度分布は、図 15 の CO₂ の等濃度線に近い形を示している。ただし、O₂ 濃度の高い部分は CO₂ が低濃度と逆の傾向をもっている。

図 15～図 17 を重ね合せてみると、ライナ空気孔からの空気噴流は、明らかではないが、隔壁板からの距離にして $l \div 90\text{mm}$ と $l \div 130\text{mm}$ 付近に入っていることがわかる。

図 18 の NO 濃度分布は、燃焼温度に対応する CO₂ 濃度分布より図 16 の CO 濃度分布形に近い。すなわち、CO 濃度の高い領域では NO 濃度も高い。図 19 の NO₂ 濃度分布は、CO₂ 高濃度領域のすぐ下流側にピークをつくっている。

図 20 の局所当量比分布をみると、 $\phi_l > 1.2$ の燃料過濃領域は小さく、燃料の分散状態は悪くない。しかし、燃焼に有利な $\phi_l = 0.8 \sim 1$ の領域の主流方向の幅は、他の形式の場合より短かめである。スワラ中心軸に対する $\phi_l > 1.2$ の領域の非対称性は、燃料噴霧の片寄りのためと思われる。

図 21 の酸素消費効率、燃焼効率に対応するものであるが、⁸⁾これは全般に低く、出口燃焼効率の低さに対応している。図 20 および図 21 から、この燃焼器の場合の燃焼効率の低さは、 $l < 50\text{mm}$ の上流側に火炎が少なく、充分な量の高温度ガスを二次燃焼領域に供給できないためと判断される。

4.3.2 CC20S-2 とスワラ 55/43 盲付のときの測定結果

測定結果の分布図を図 22～図 28 に示す。図 22 から

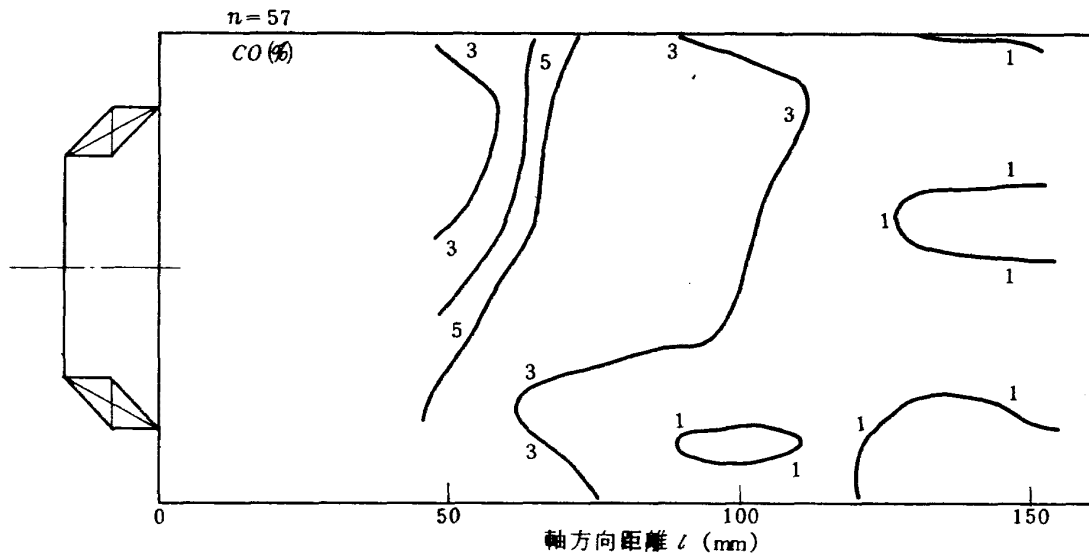


図 16 CC20S-1, 55/43 盲付の CO 濃度分布

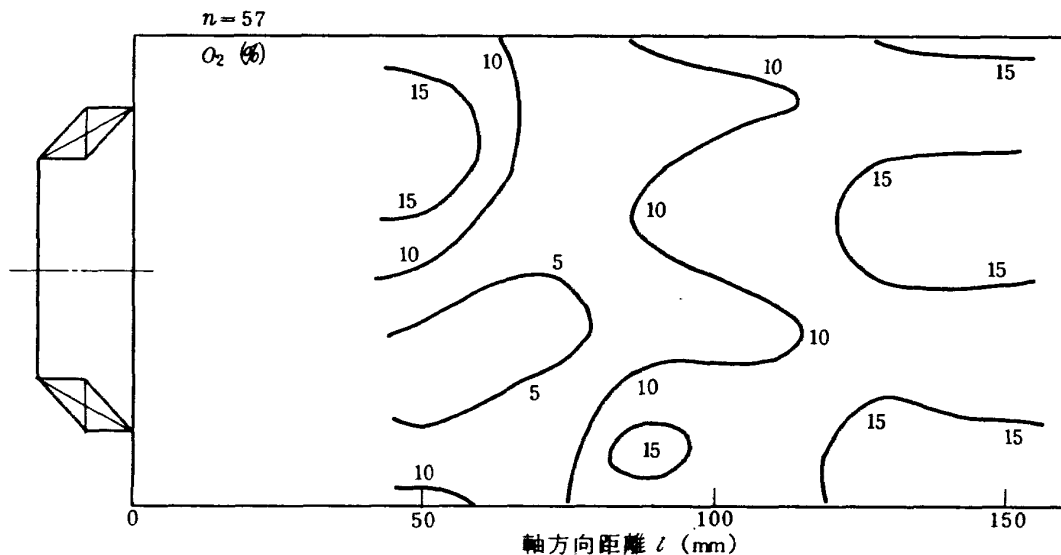


図 17 CC20S-1, 55/43 盲付の O₂ 濃度分布

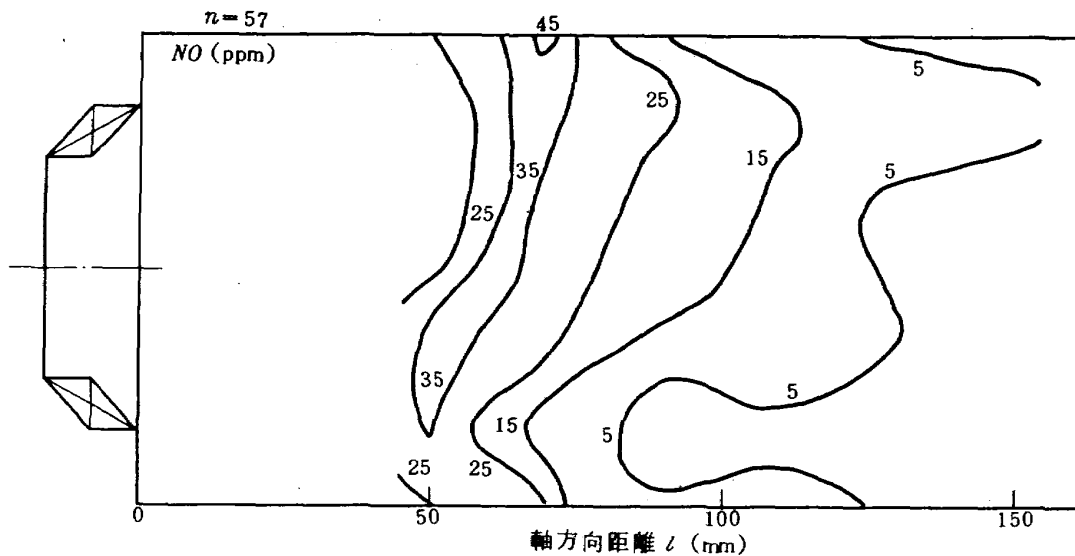


図 18 CC20S-1, 55/43 盲付の NO 濃度分布

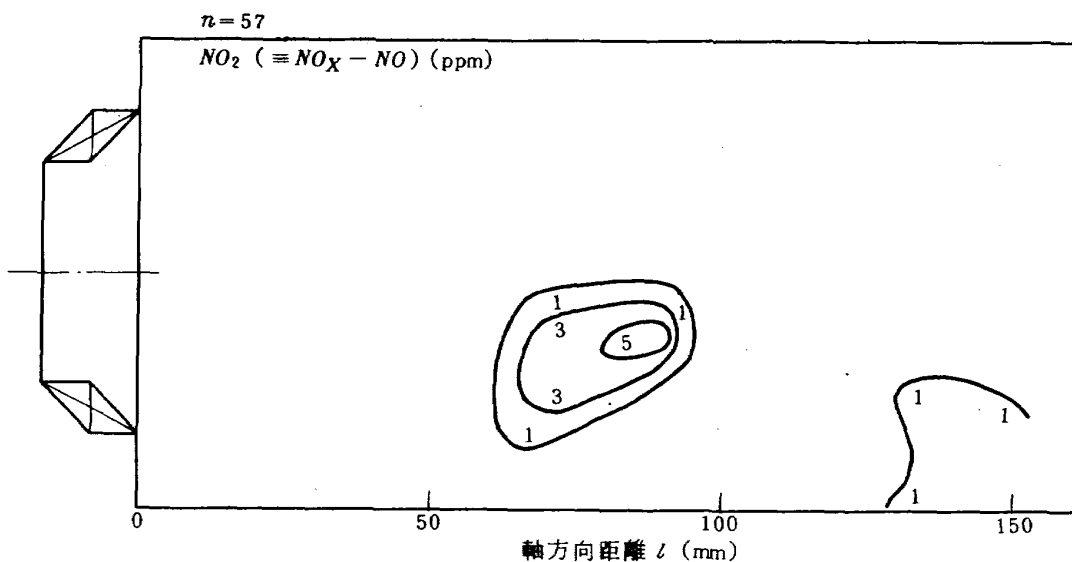


図 19 CC20S-1, 55/43 盲付の NO₂ 濃度分布

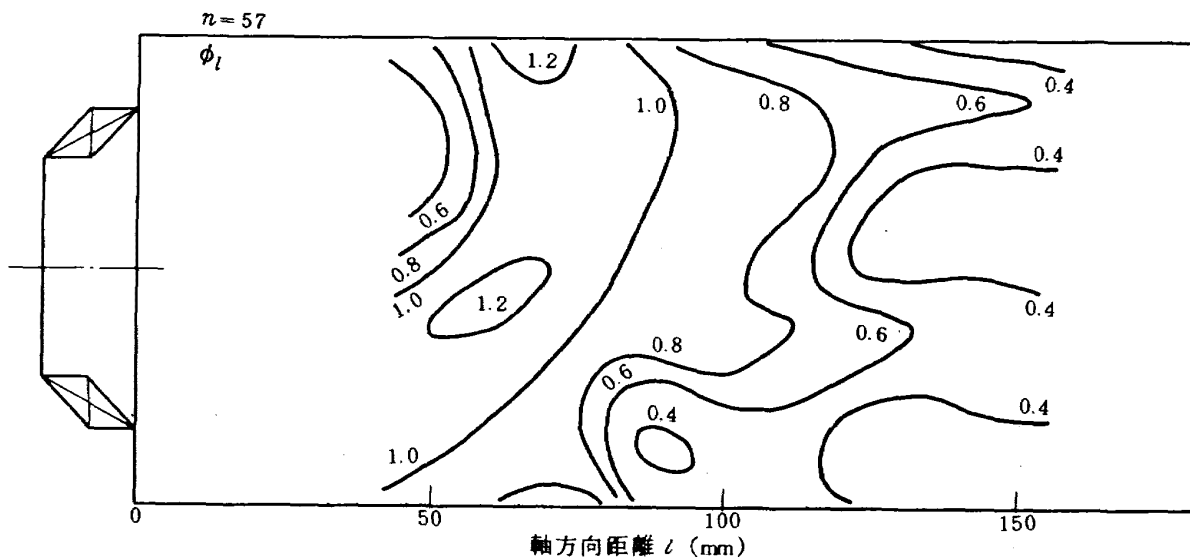


図 20 CC20S-1, 55/43 盲付の局所当量比分布

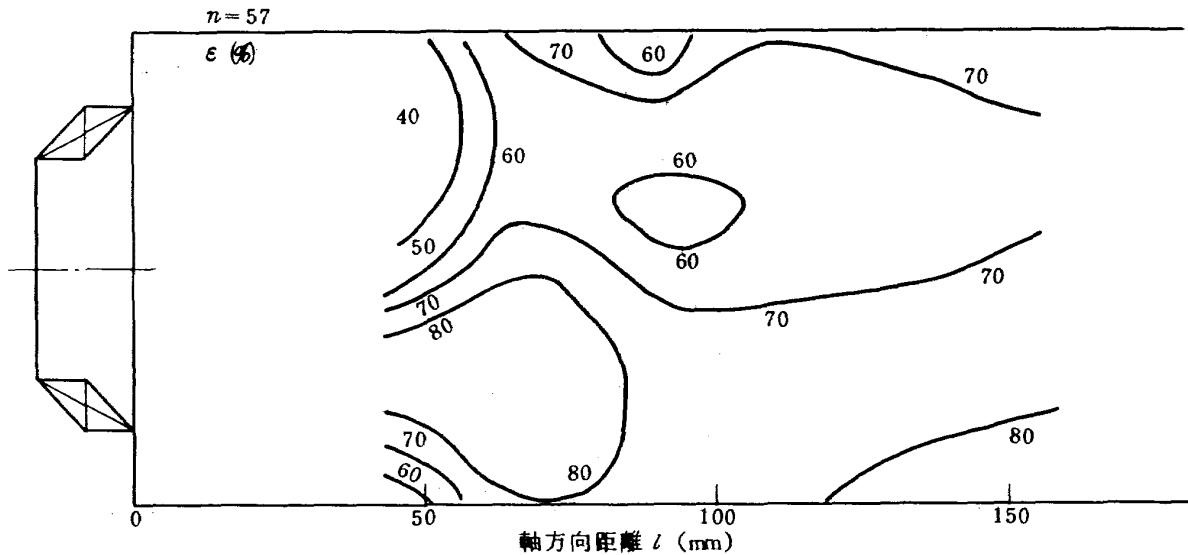
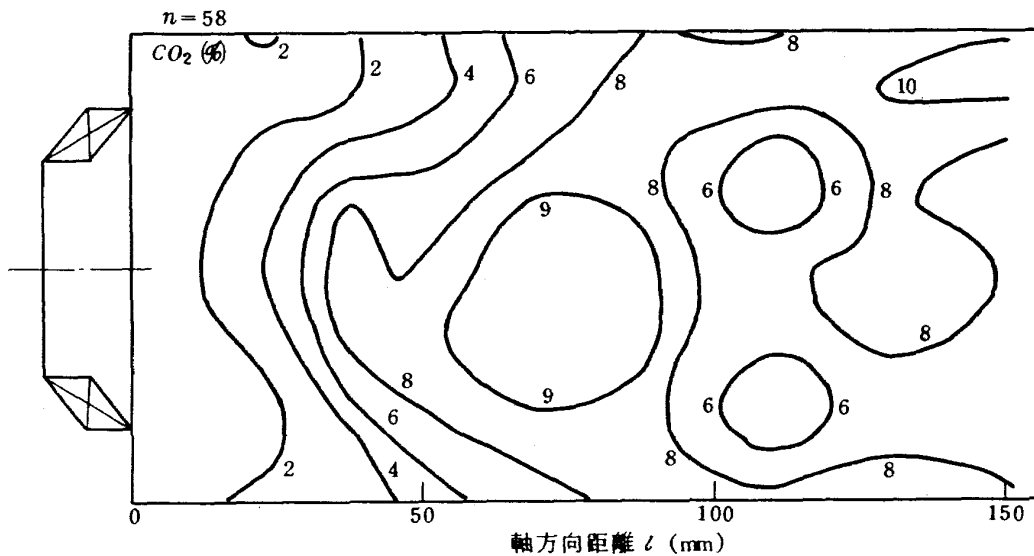


図 21 CC20S-1, 55/43 盲付の酸素消費効率分布

図 22 CC20S-2, 55/43 盲付のCO₂濃度分布

CO₂濃度については、スワーラほぼ中心軸上の $l=75$ mm 付近に高濃度の領域があり、その下流側 $l=110$ mm 付近にライナ空気孔からの空気噴流による低濃度の凹みがある。 $l < 30$ mm の上流側の CO₂ 濃度は低く、ここではほとんど燃焼していないこと、および CO₂ 高濃度の燃焼ガスの逆流が燃焼器上流端まで達していないことが推定される。全般に CO₂ 濃度は、前の CC20S-1 の場合にくらべて高レベルで、燃焼温度の高いことが判明する。

図 23 の CO 濃度は、図 22 の CO₂ 濃度と一応の対応性をもっているが、CO 濃度のピーク値を示す領域は CO₂ 高濃度の位置のすぐ上流側とずれている。ライナ空気孔からの空気噴流の入る位置では CO 濃度の急減がみられる。CO 濃度レベルも CC20S-1 の場合より高い。

図 24 の O₂ 濃度は、図 22 の CO₂ 濃度とよく対応して

いる。

図 25 の NO 濃度分布は、CO 濃度と似た濃度分布を示す。NO₂ 濃度 (図 26) は、ライナ空気孔からの空気流入後に検出され、下流へ行くに従って増加している。

図 27 の局所当量比分布によると、CC20S-2, 55/43 盲付の場合、 $\phi_l > 1.6$ という燃料過濃領域が存在するが、この領域は小さく、燃焼に適当な $\phi_l = 0.8 \sim 1$ の領域が広がっている。局所当量比のピークを示す位置は、NO 濃度がピークを示す位置より上流側にある。なお、図 27 に示した破線は、局所当量比分布から推定した燃料噴霧角である。

図 28 は、酸素消費効率を示したもので、これは、 $l=40$ mm 付近で急激に上昇し、それより下流側は $\epsilon \geq 90\%$ と良好である。

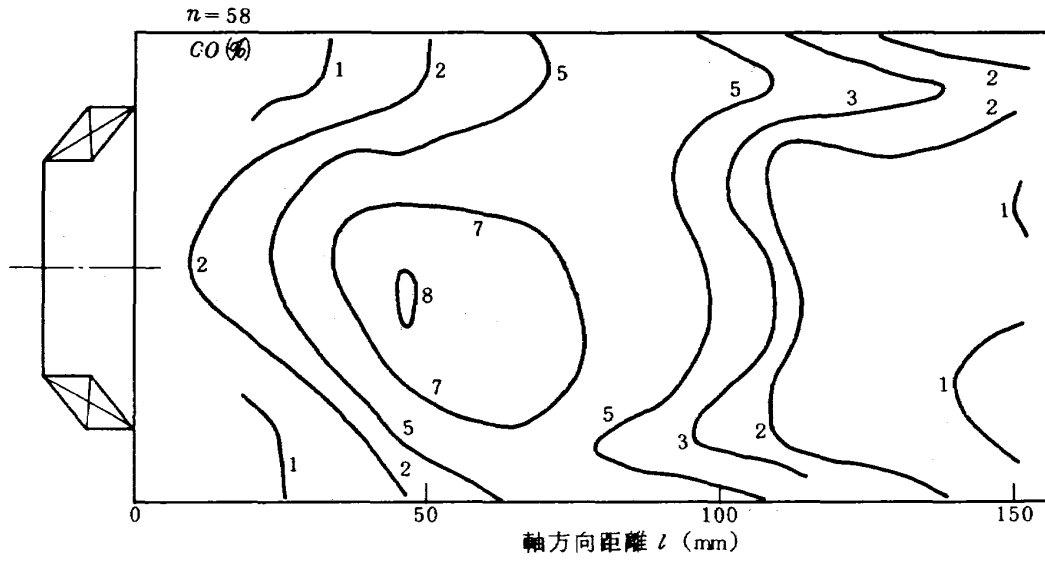


図 23 CC20S-2, 55/43 盲付の CO 濃度分布

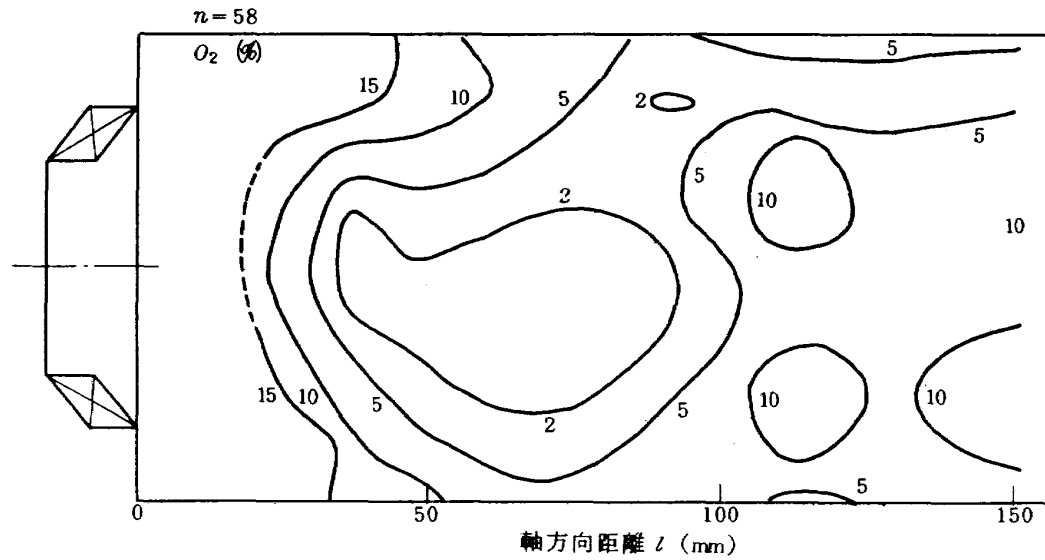


図 24 CC20S-2, 55/43 盲付の O₂ 濃度分布

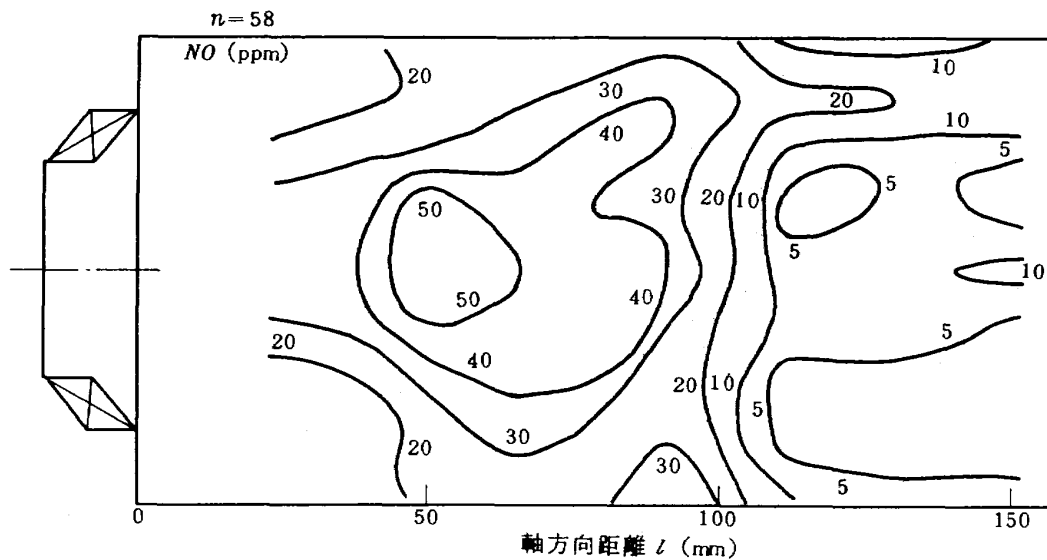


図 25 CC20S-2, 55/43 盲付の NO 濃度分布

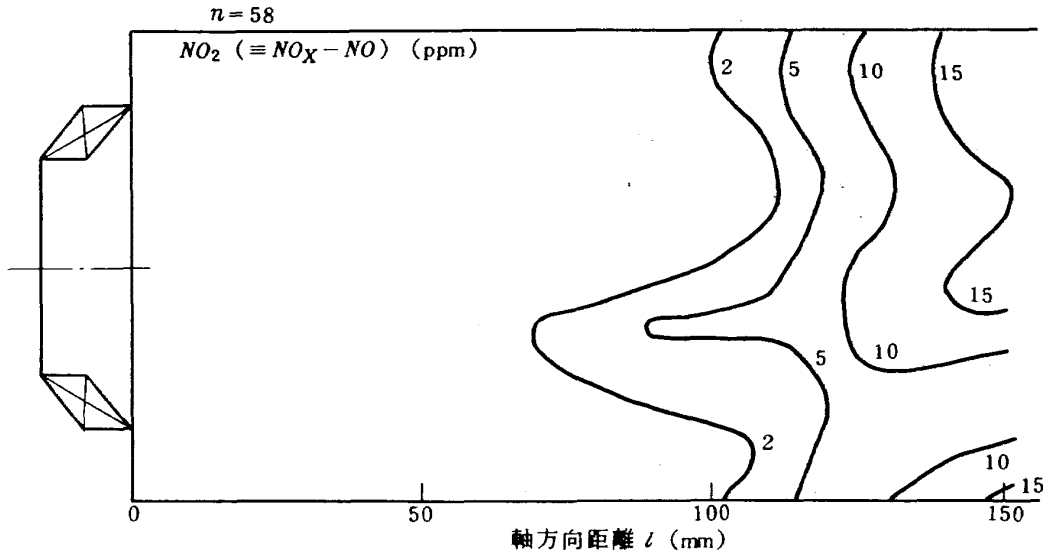


図 26 CC20S-2, 55/43 盲付の NO_2 濃度分布

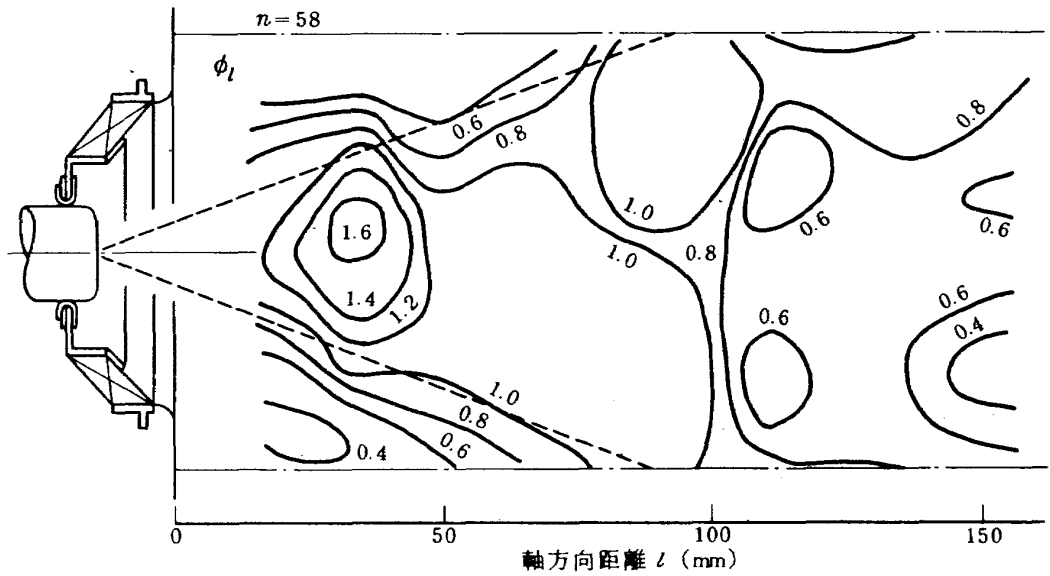


図 27 CC20S-2, 55/43 盲付の局所当量比分布

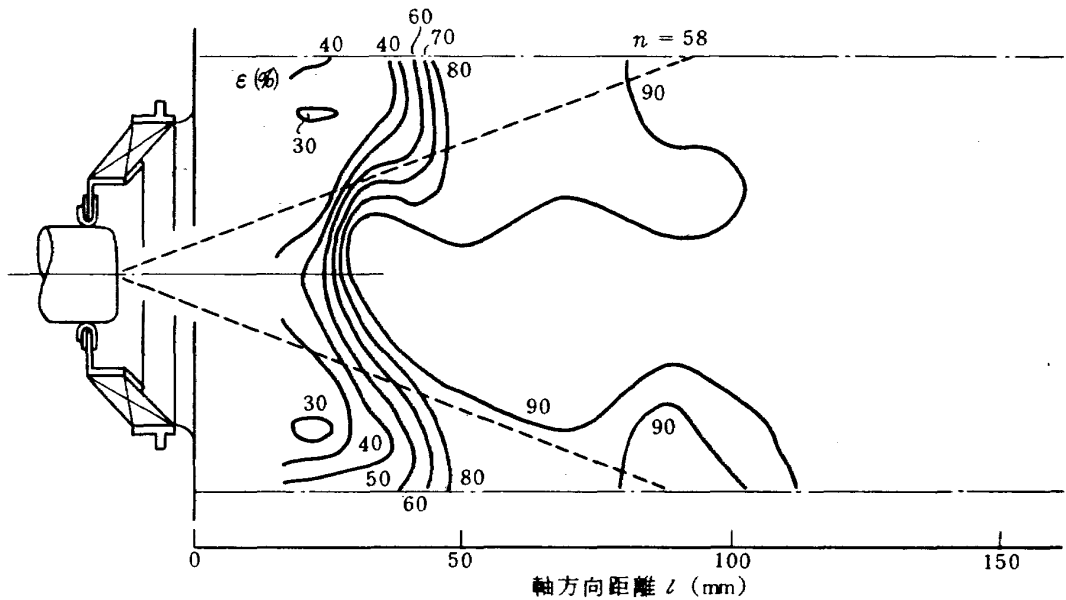


図 28 CC20S-2, 55/43 盲付の酸素消費効率分布

以上のように、CC20S-2はCC20S-1にくらべて、全般的に良好な燃焼状態を示し、内部のNO濃度レベルも高い。ただし、NO濃度はCO濃度と関連していて、燃焼温度が高いため多いとはいえない。

4.3.3 CC20S-2とスワラ46φのときの測定結果
得られた結果を図29～図35に示す。図29によるとCO₂濃度は、上流側に高濃度の領域がなく、ライナ空気孔からの空気噴流の入った $l \approx 90$ mm位置より下流側で高い濃度を示す。この分布は、55/43盲付スワラと大分ことなっている。

図30はCO濃度分布で、図の上側の $l \approx 90$ mm位置に特異なピークをもつほか全般に低めである。

図31のO₂濃度分布は、図29のCO₂濃度分布と対応がとれている。このO₂濃度はすべて8%以上の値を示し、55/43盲付のときに現われたような低濃度の箇所は

ない。この図31によると、ライナ第2列空気孔からの空気噴流は、 $l \approx 150$ mm付近に入っていることがわかる。

図32のNO濃度分布の傾向は、 $l < 50$ mmのデータがないのでライナ上流側における様子が明らかでないが、上流側で高濃度を示し、 $l \approx 90$ mmの空気噴流の入ったところで急激に減少している。CO濃度分布との対応性はある。NO₂は図33にみられるようにほとんど検出されなかった。

図34の当量比分布は、NO濃度やCO濃度の分布形とよく似ている。上流側の $\phi_f \geq 1.6$ の燃料過濃領域の広さは、55/43盲付の場合より大きいと推定される。逆に $\phi_f = 0.8 \sim 1$ の領域は広くない。

図35の局所酸素消費効率の分布によると、 $l \geq 130$ mmの範囲には $\epsilon > 80\%$ のところがあるが、その上流側は $\epsilon < 70\%$ となっている。これから、46φスワラの場合、

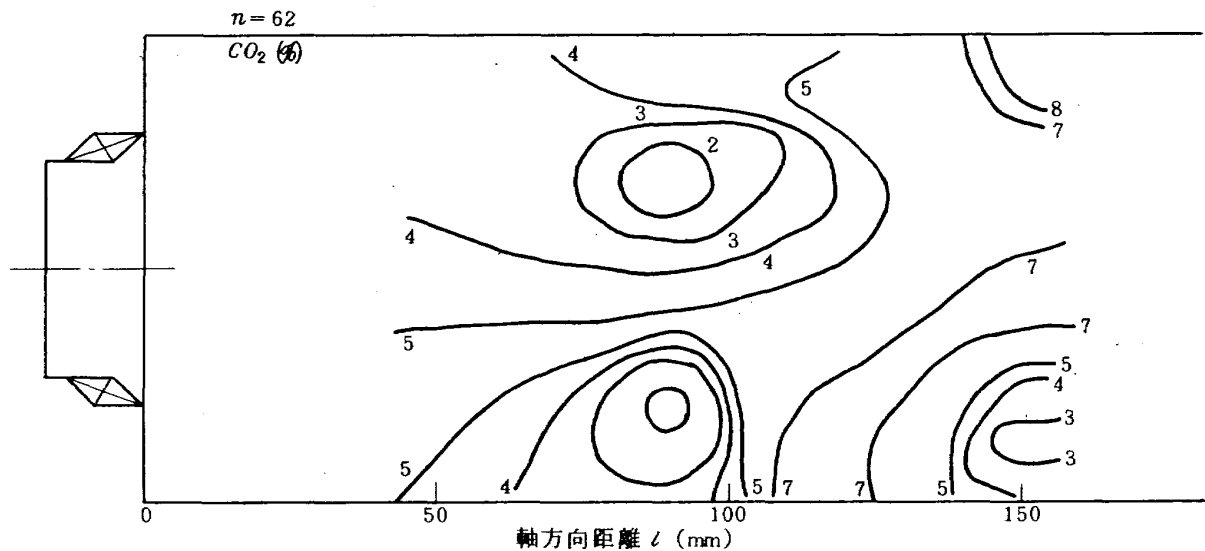


図29 CC20S-2, 46φスワラのCO₂濃度分布

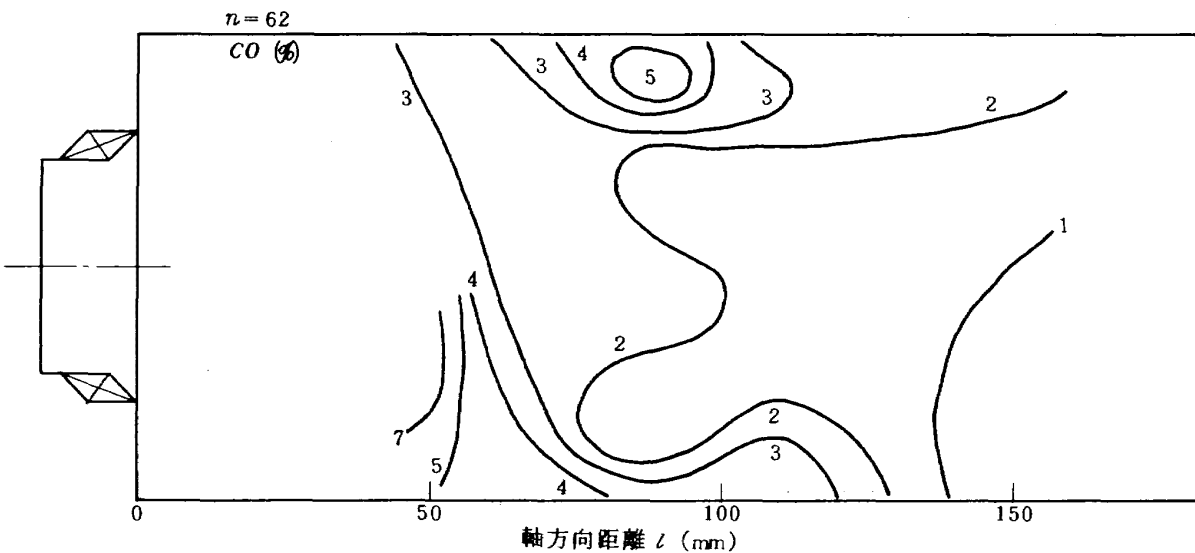


図30 CC20S-2, 46φスワラのCO濃度分布

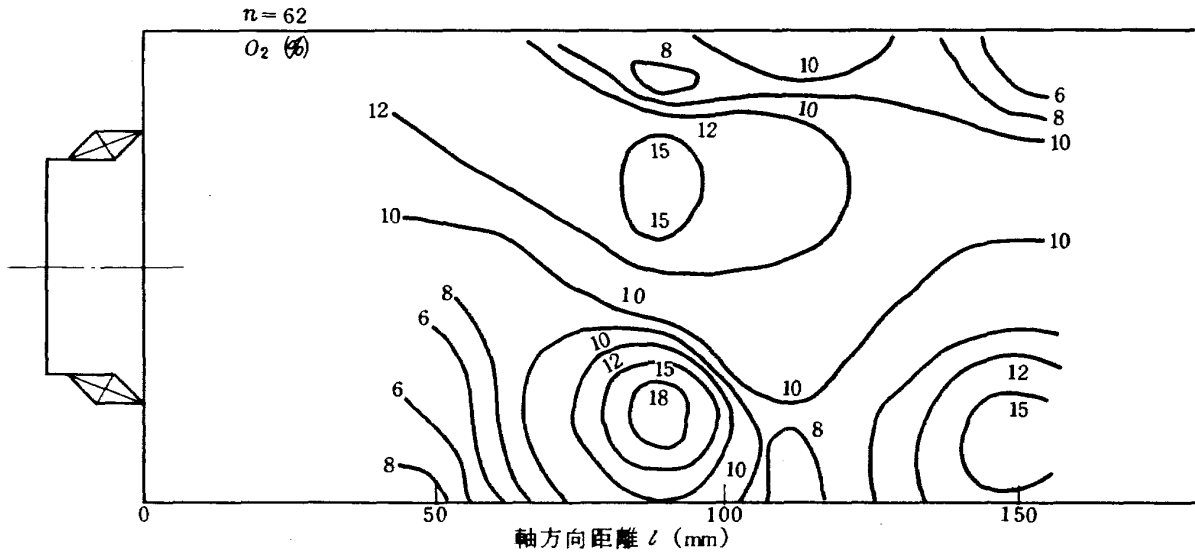


図 31 CC20S-2, 46φ スワローラの O_2 濃度分布

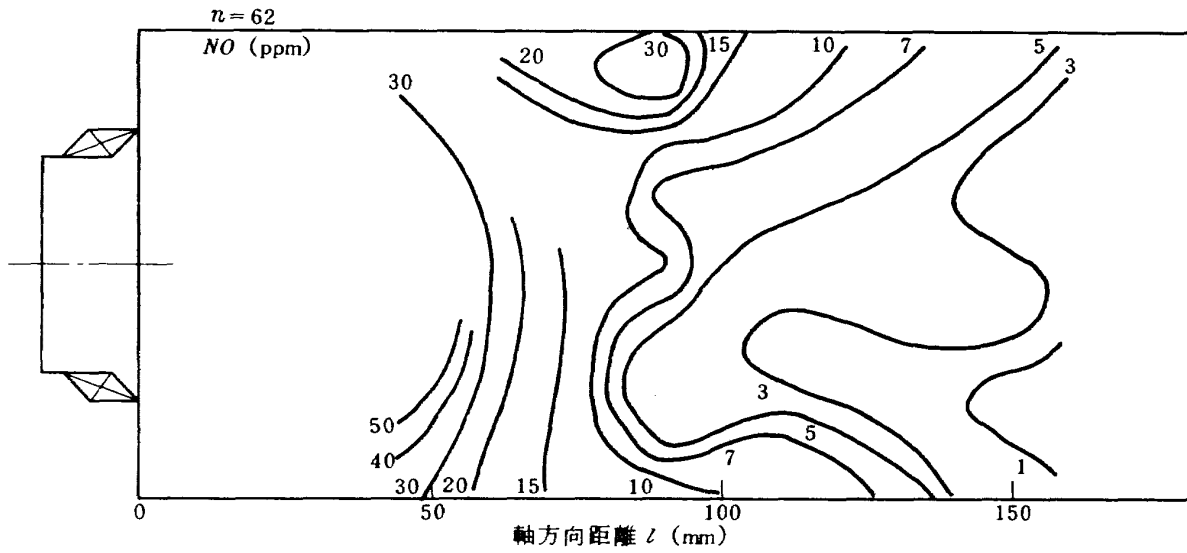


図 32 CC20S-2, 46φ スワローラの NO 濃度分布

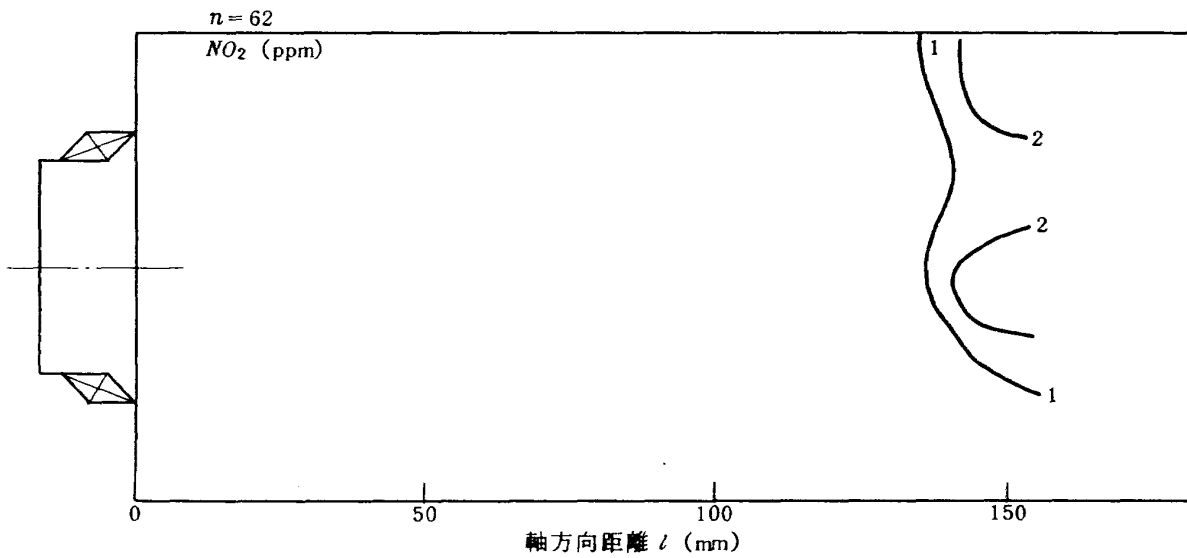


図 33 CC20S-2, 46φ スワローラの NO_2 濃度分布

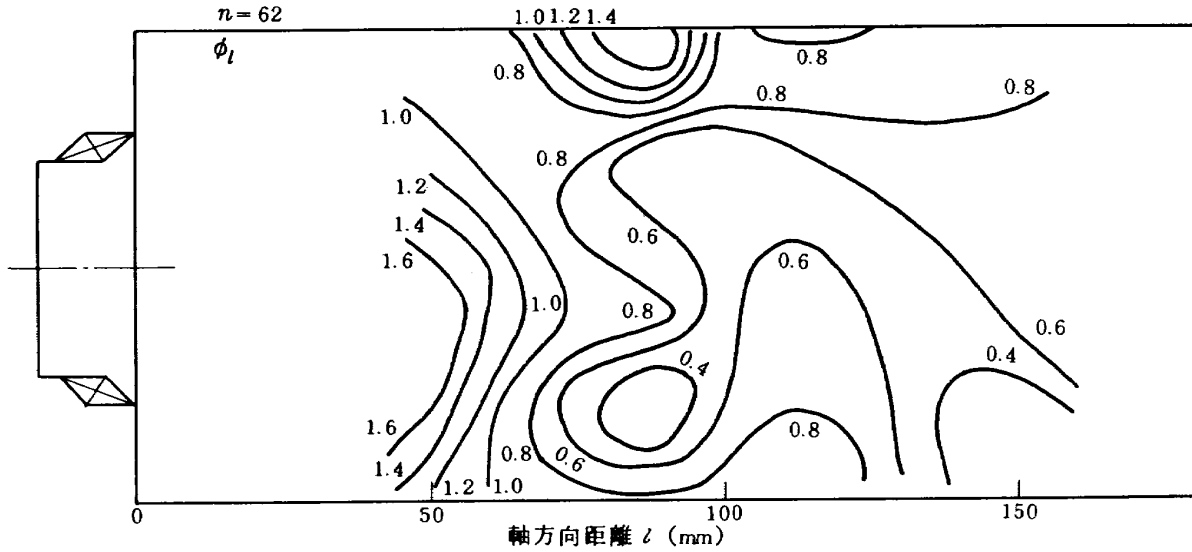


図 34 CC20S-2, 46φ スワローの局所当量比分布

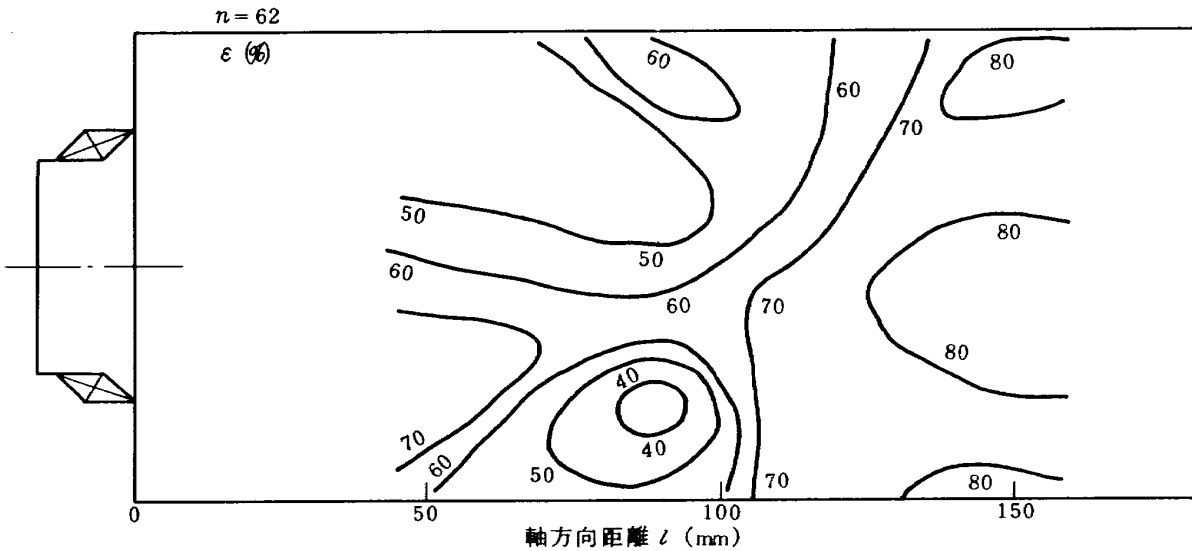


図 35 CC20S-2, 46φ スワローの酸素消費効率分布

燃焼器上流側では、あまり良くもえず、下流側の $\phi_l = 0.6 \sim 0.8$ という燃料希薄領域で燃焼していることがわかる。

図 34 の上側の $l \approx 90$ mm 付近の局所当量比のピークは、となり合う燃料噴霧の交叉点になっているのではなからうか。

4.3.4 CC20S-2 とスワロー 46φ + ゲジゲジルーバ付のときの測定結果

ゲジゲジルーバ付の結果を図 36 ~ 図 42 に示す。図 36 は、 CO_2 濃度分布でゲジゲジルーバなしの図 29 に対応するものである。図 36 では $l \approx 90$ mm 付近のライナ空気孔からの空気噴流の影響が明らかに現われている反面、ゲジゲジルーバなしのときにみられた $l \approx 150$ mm 付近の空気噴流の存在はわからない。 CO_2 濃度は全体に高レ

ベルで、ゲジゲジルーバの効果は、測定した範囲の全域に現われている。

図 37 の CO 濃度分布では、 $l \approx 50$ mm 付近の濃度については図 30 のものと差はないが、 CO 1% の等濃度線は上流側に寄っている。

図 38 の O_2 濃度分布は、図 31 とくらべて下流側で差はないが、 $l \leq 50$ mm の上流側では低濃度を示し、上流側でよく燃焼していることが判明する。

NO 濃度分布 (図 39) は、上流側では高レベルになっているが、 $l \geq 90$ mm の範囲では 5 ppm 以下に低下している。これに対し NO_2 濃度は、図 40 によると、 $l \geq 100$ mm の範囲で検出され、 $l \approx 130$ mm 付近から急増し、 $l \approx 150$ mm で 12 ~ 15 ppm という高濃度な領域がある。これは、図 33 とくらべて著しい違いである。

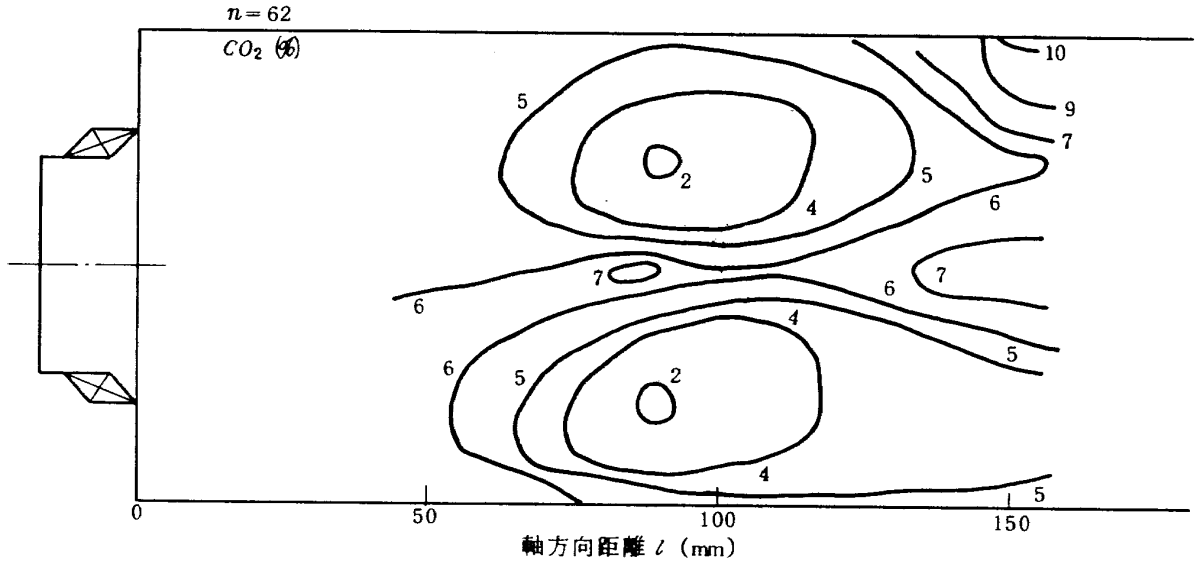


図 36 CC20S-2, 46φ+ゲジゲジルーバ付の CO₂濃度分布

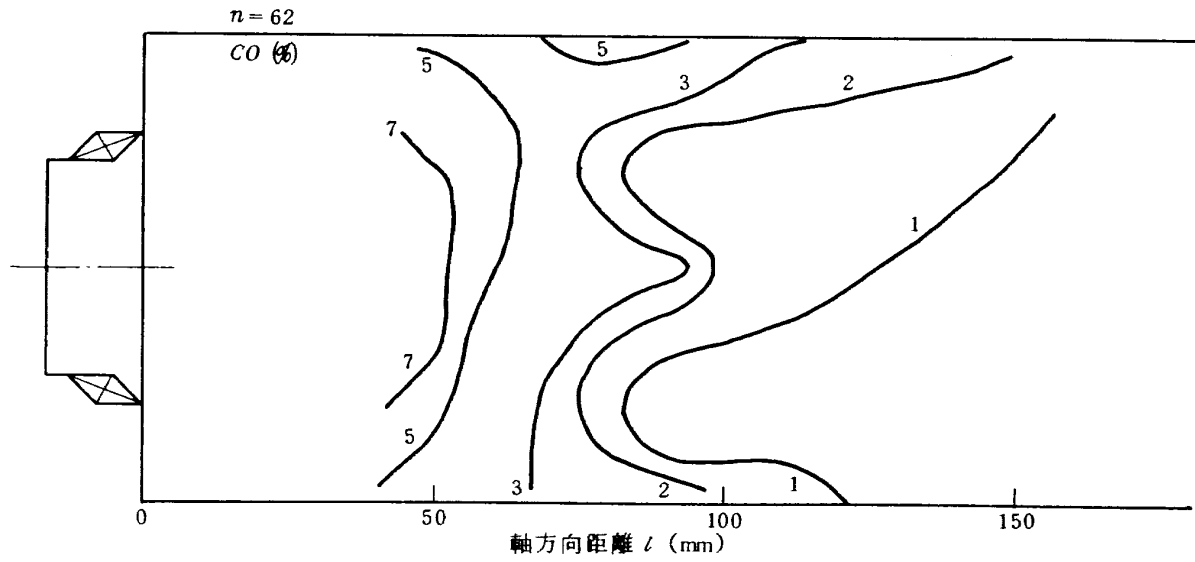


図 37 CC20S-2, 46φ+ゲジゲジルーバ付の CO濃度分布

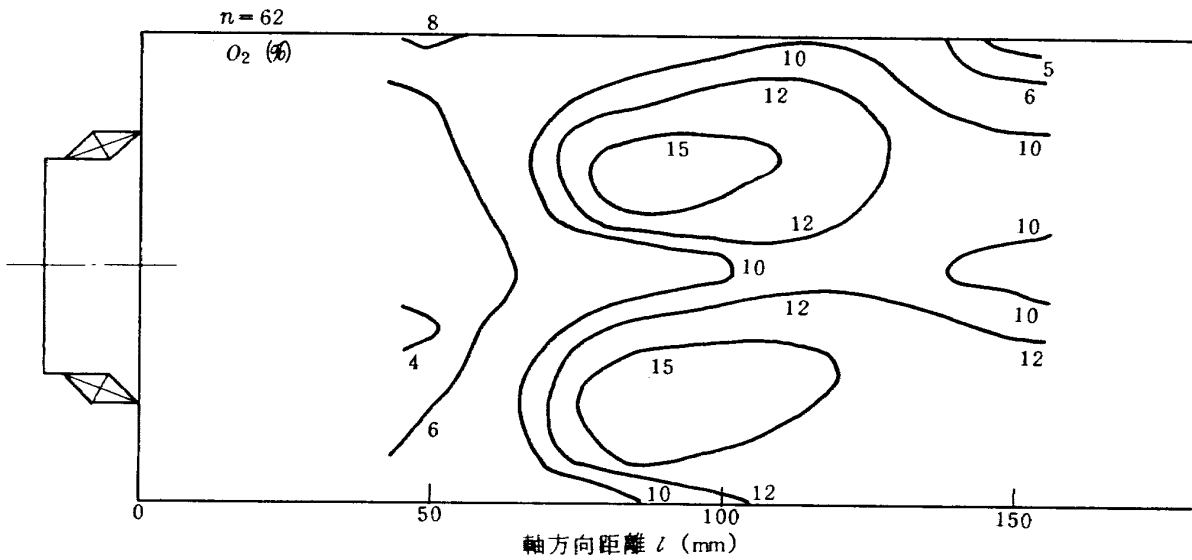


図 38 CC20S-2, 46φ+ゲジゲジルーバ付の O₂濃度分布

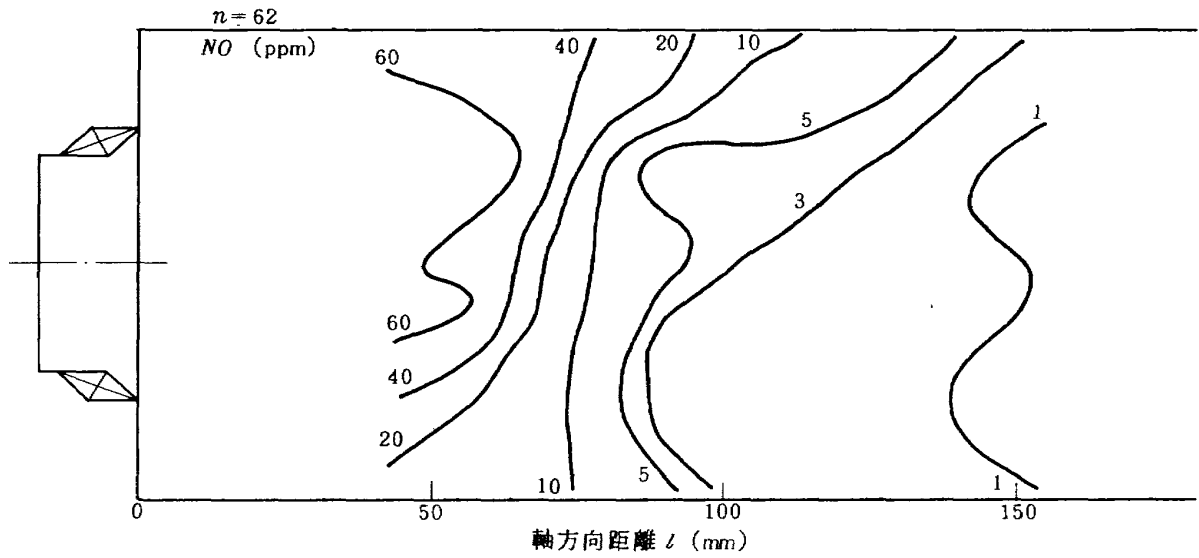


図 39 CC20S-2, 46φ+ゲジゲジルーバ付の NO 濃度分布

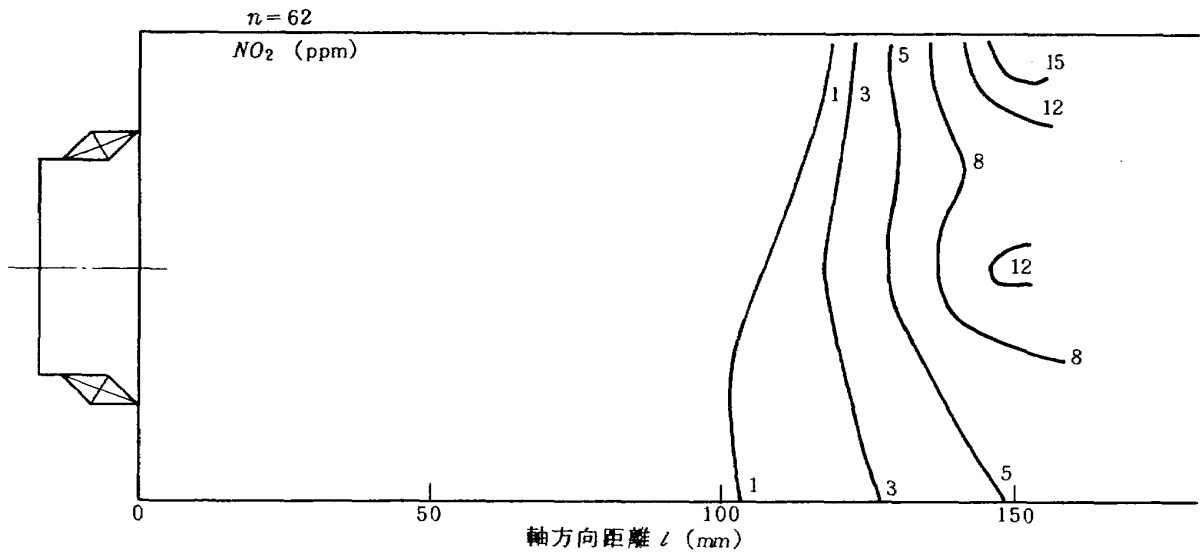


図 40 CC20S-2, 46φ+ゲジゲジルーバ付の NO_2 濃度分布

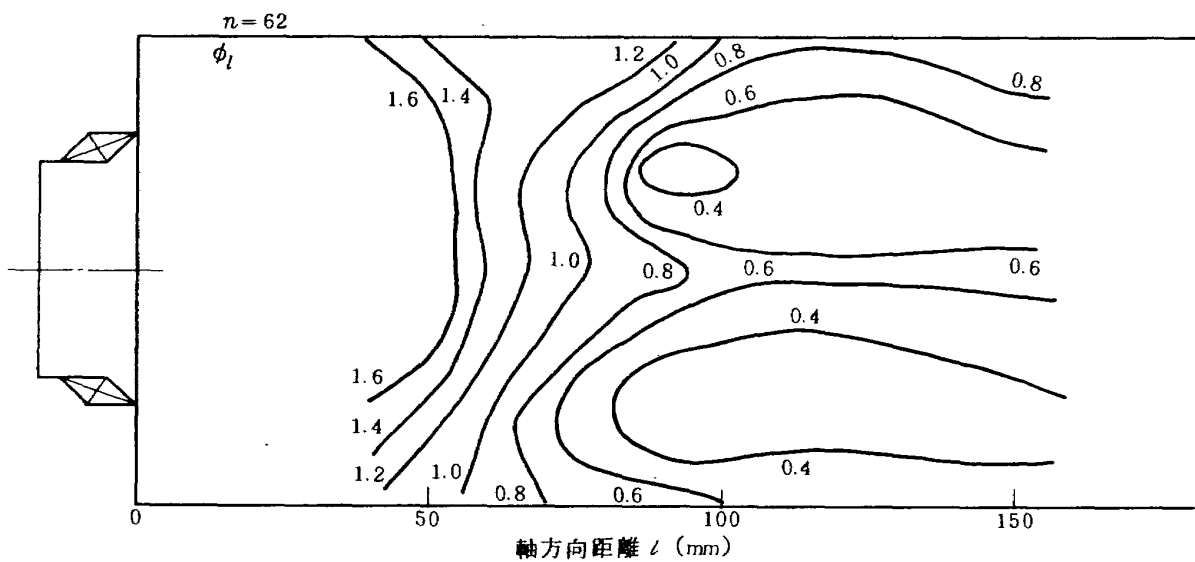


図 41 CC20S-2, 46φ+ゲジゲジルーバ付の局所当量比分布

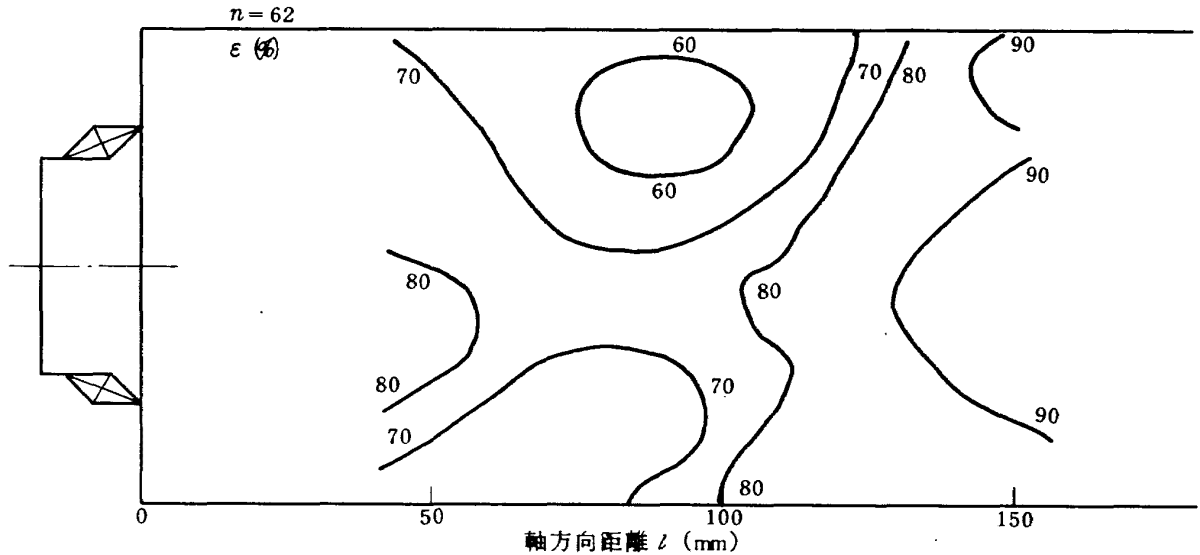


図 42 CC20S-2, 46φ+ゲジゲジルーバ付の酸素消費効率分布

図 41 の当量比分布は、図 34 に対応するものであるが、これには大きな差はない。ただし、 $l \approx 90$ mm 付近の空気噴流の効果は、図 41 のほうが明らかである。

図 42 の酸素消費効率分布は、図 35 と分布形についての差は少ないが、平均して 10 % 程度高レベルになっている。

以上のことは、ゲジゲジルーバによってライナ上流側の保炎性能が向上して燃焼が促進され、これにもなり全体の燃焼効率の向上が得られたためと判断される。

4.3.5 CC20S-2 とスワラ二重逆旋回の際の測定結果

測定結果を図 43 ~ 図 49 に示す。

図 43 の CO_2 濃度分布によると、スワラ中心軸上の濃度が 6 % 程度と比較的低い。 $l \approx 110$ mm 付近の低濃度の凹みは、ライナ空気孔からの噴流によるものである。

その下流側になって CO_2 濃度が 8 % と増加する。この傾向は 46φ スワラの場合と似ている。

図 44 によると、 CO 濃度の最高値は、スワラ中央の $l \approx 70$ mm 付近にあり、 $CO_2 \approx 6$ % の等濃度線の広がっているところである。 CO 濃度はライナ空気孔からの空気噴流により、急激に減少する。

O_2 濃度分布を示した図 45 によると、 CO 濃度がピークを示す箇所直ぐ下流側に最低濃度 2 % を示す小さな領域がある。

図 46 と図 44 を重ね合わせてみると、 NO ~ CO 濃度分布は、特に高濃度領域においてよく一致していることがわかる。 NO_2 (図 47) は、 $l \approx 120$ mm から検出され、 $l = 150$ mm で 6 ~ 8 ppm と 46φ + ゲジゲジルーバ付の場合につく高濃度を示す。

図 48 の局所当量比分布をみると、スワラ中心軸上の

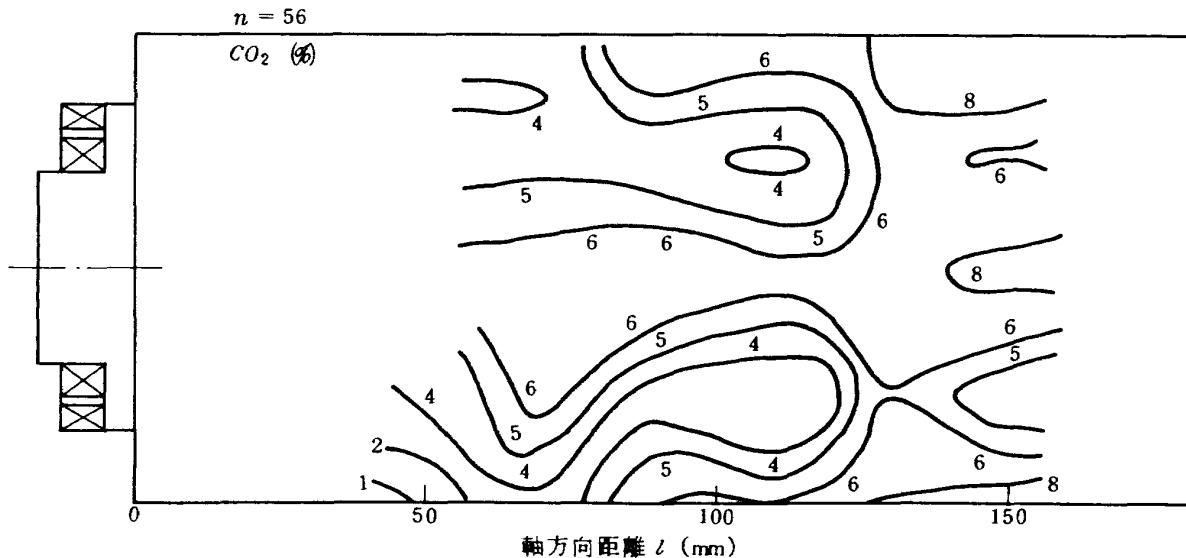


図 43 CC20S-2, 55φ 二重逆旋回の CO_2 濃度

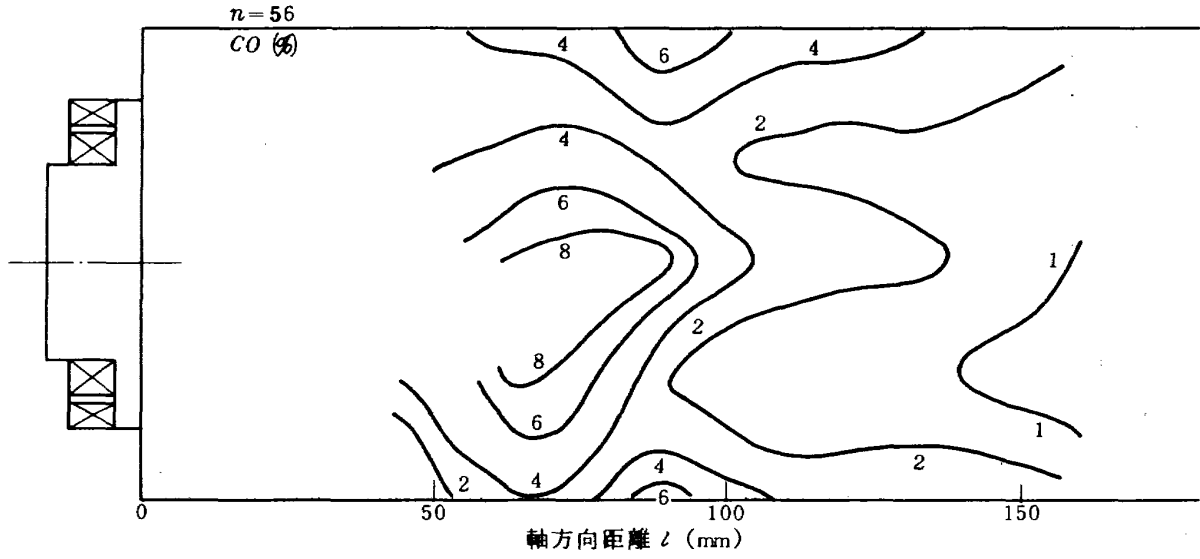


図 44 CC20S-2, 55 ϕ 二重逆旋回の CO 濃度

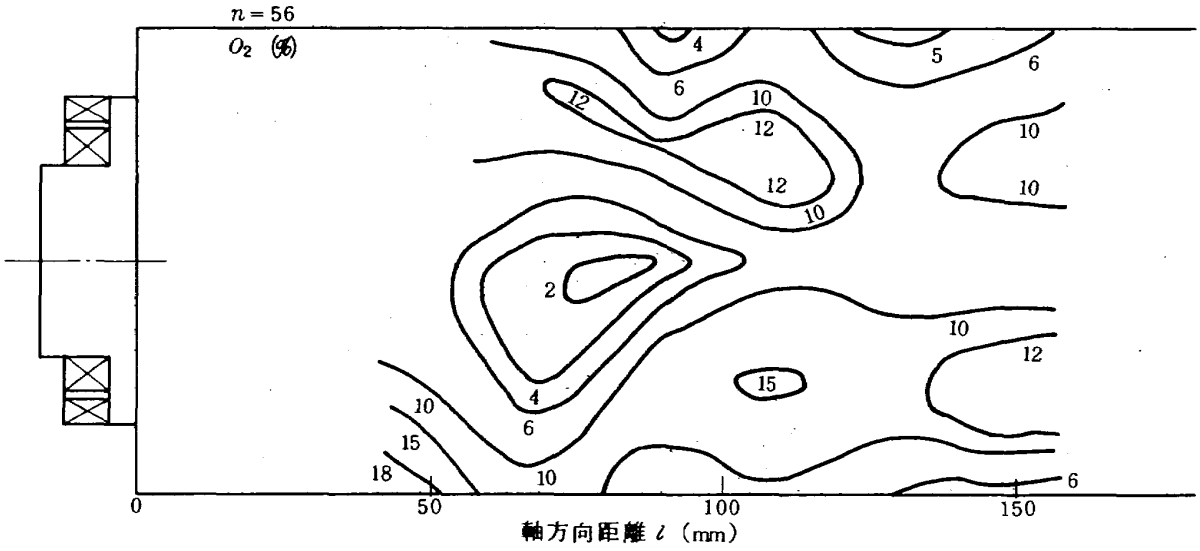


図 45 CC20S-2, 55 ϕ 二重逆旋回の O₂ 濃度

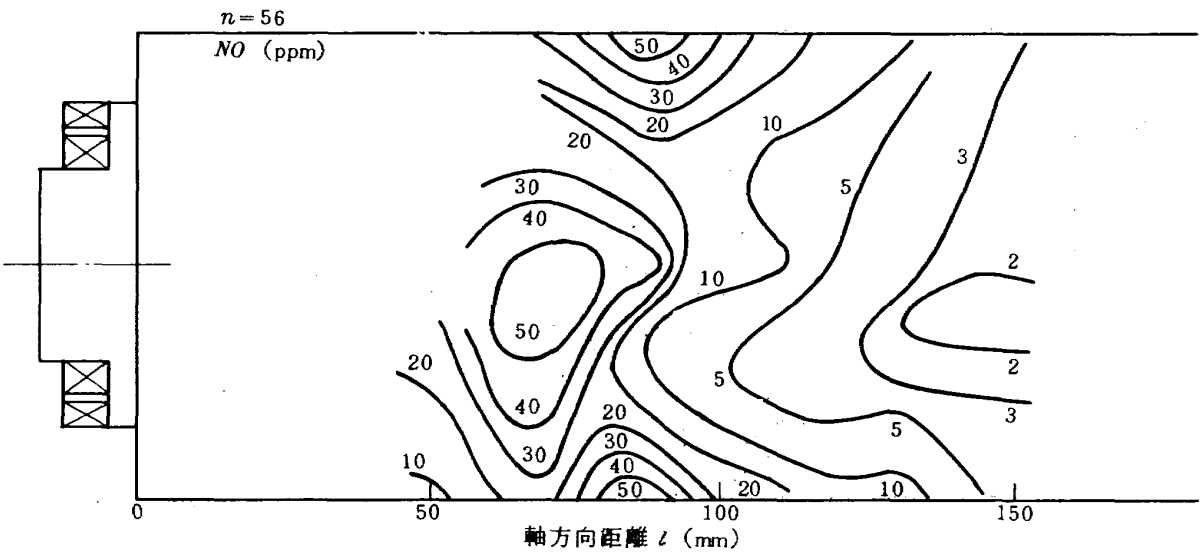


図 46 CC20S-2, 55 ϕ 二重逆旋回の NO 濃度

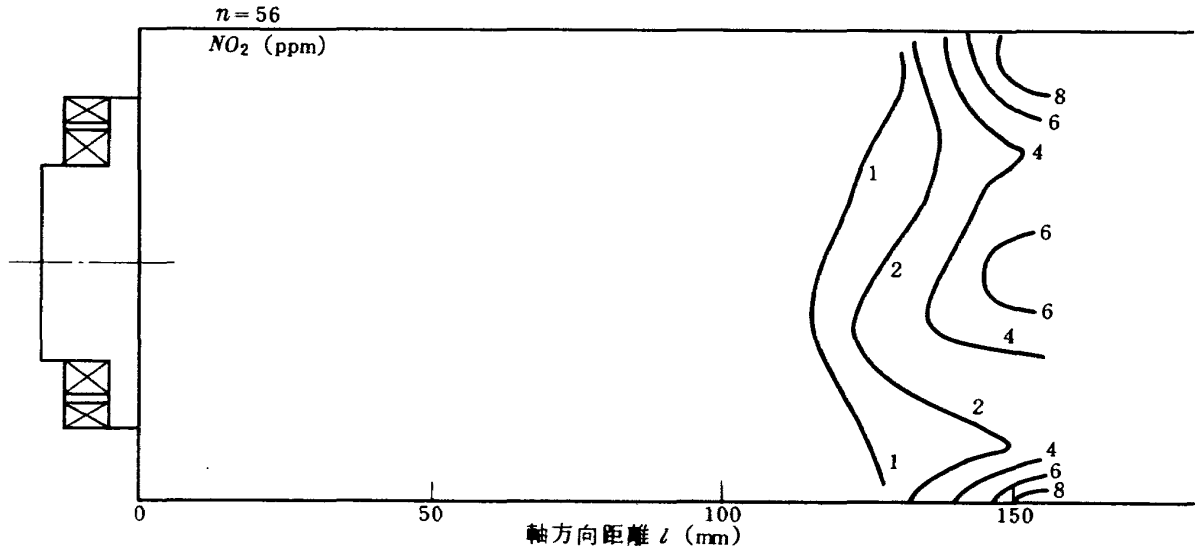


図 47 CC20S-2, 55φ 二重逆旋回の NO₂ 濃度

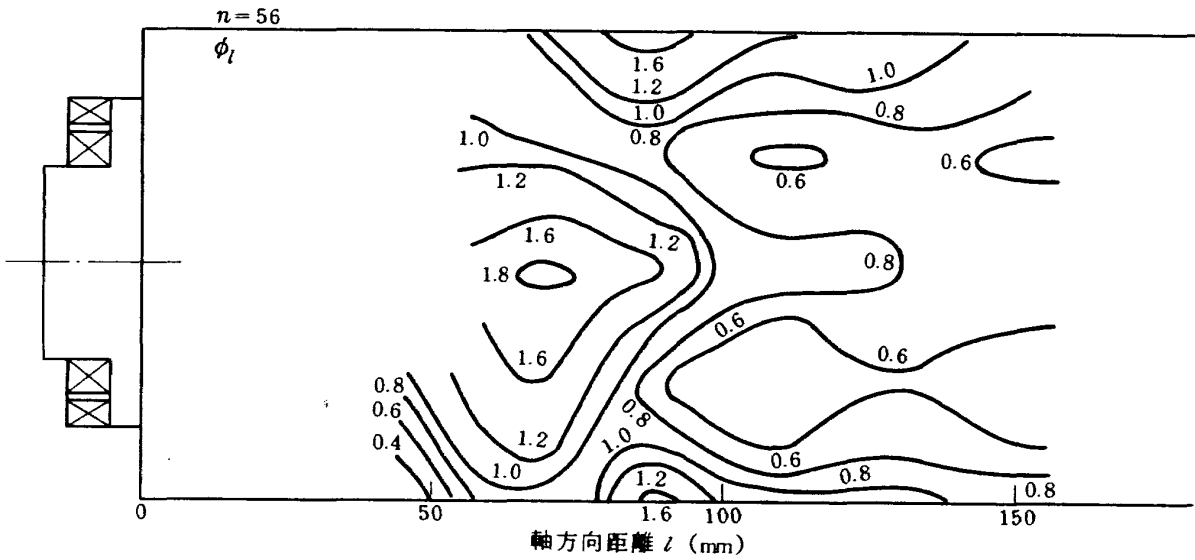


図 48 CC20S-2, 55φ 二重逆旋回の局所当量比分布

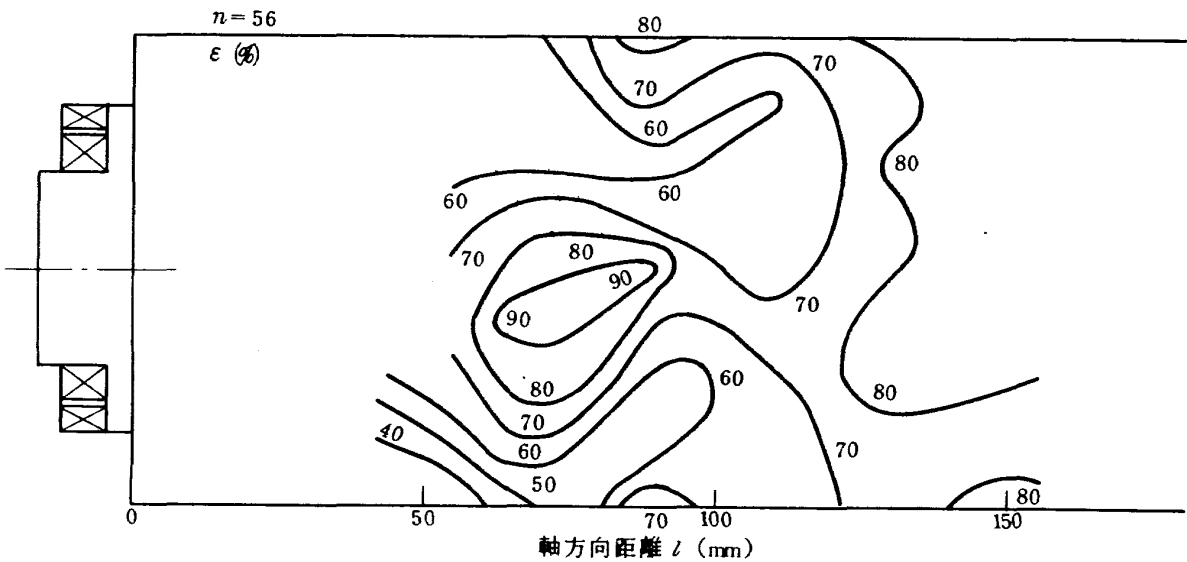


図 49 CC20S-2, 55φ 二重逆旋回の酸素消費効率分布

$l \div 70\text{mm}$ にピークがあり、これに匹敵するピークがスワロー中間の $l \div 90\text{mm}$ にもある。スワロー中間のこのピークは、図44のCO濃度、図46のNO濃度にも現われている。これは、となり合う噴射弁からの燃料噴霧によるもの(図27参照)と考えられるが、スワローの種類によっては現われない。

55φ二重逆旋回スワローの場合、局所当量比の大きな領域が、他のスワローの場合より下流側に寄っていること、またその領域が相当に広がっていることがみられる。このスワローの開口面積は、他のスワローにくらべて大きめになっているので流入空気量が少ないことはなく、この原因は、おもに流れ模様によると推定される。いずれにしても、煙の発生や火炎長さの伸びを考えると好きましくない傾向である。ただし、燃焼器の作動上の有効長さを短かくした状態と考えると、 NO_x 排出低減化に有利になる。

5. 結果の検討

5.1 各燃焼器形式の比較

実験は、5種類の燃焼器形式について行なった。それぞれの形式についての実験条件を表2に示す。CC20S-2, 55/43 盲付スワローについての内部ガス分析を行なったとき、実験装置に空気洩れがあったため、最大断面平均風速が他の場合より低下している。空燃比の設定は、 $n = 57 \sim 58$ を目標にしたが、実測の結果、いくぶんのずれがあり、最大 - 最少で8%程度の差が生じている。

5.1.1 局所当量比分布の比較

局所当量比 ϕ_l の分布について、スワロー中心および

中間位置を主流方向にプロットしたものを図50～図54に示す。燃焼噴射弁側の条件はいずれの場合もほぼ同一になっているので、この当量比分布の差異は、おもに空気流入配分や流れ模様の差に基づいている。ただし、未燃焼燃料分のうち、液体分はトラップにより分析計導入前で除去しているため、分析値には含まれていない。したがって、燃料噴霧や空気側が同一条件であっても燃焼状態により、測定される当量比の値が変化する。すなわち上流側で良好に燃焼していると燃料の蒸発、分解が促進され、局所当量比が多く指示される傾向を示す。

図50のCC20S-1, 55/43 盲付の場合、燃料高濃度のところが軸方向距離 $l = 70\text{mm}$ 付近にあり、距離増加とともに単調に減少している。スワロー中心 - 中間位置の差は少ない。(ϕ_l)_{max} $\div 1.3$ と比較的低いが、これはライナ第1列空気孔が上流側にあること、および上流

表2 各燃焼器形式の実験条件の比較

番号	燃焼器形式		最大断面平均風速 m/s	空燃比 n	摘要
	ライナ	スワロー			
1	CC20S-1	55/43 盲付	18.3	57	内部および出口ガス分析
2	CC20S-2	"	16.5	58	内部ガス分析
2'	"	"	18.0	57	出口ガス分析
3	"	46φ	18.9	61.5	内部および出口ガス分析
4	"	46φ+ゲジゲジルーバ付	18.9	62	"
5	"	55φ二重逆旋回	18.7	56	"

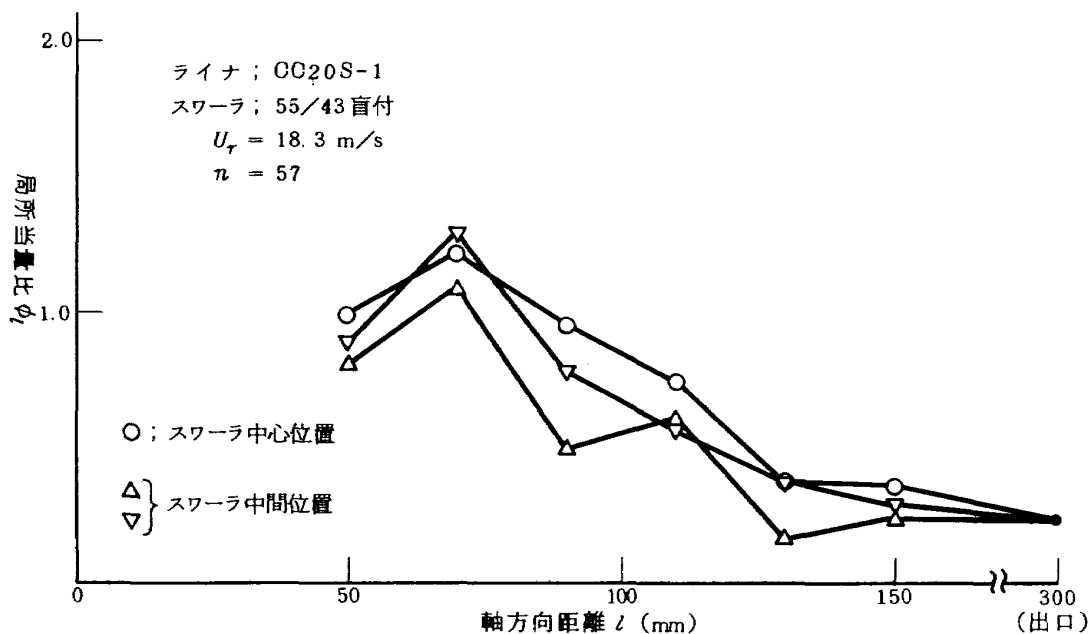


図50 CC20S-1, 55/43 盲付の軸方向当量比分布

側であまり燃焼していないためと推定される。燃焼に有利と考えられる $\phi_l = 0.8 \sim 1$ の範囲は比較的狭い。

図 51 は CC20S-2, 55/43 盲付の場合で, スワーラ中心位置の $l = 36\text{mm}$ のところに $(\phi_l)_{\text{max}} \doteq 1.6$ があるが, その他に著しい燃料過濃の箇所はない。スワーラ中間位置では, 局所当量比が $l = 90\text{mm}$ まで増加し, $l \geq 90\text{mm}$ の範囲ではスワーラ中心とほとんど差がなく, $\phi_l \doteq 0.8$ で $l = 150\text{mm}$ まで達している。スワーラ中間位置の上流側で局所当量比の低い原因は, 燃料噴霧角が狭く, この領域に燃料が流入しないことによる。 $\phi_l = 0.8 \sim 1$ の領域は広い。

図 52 の 46ϕ スワーラの場合, 軸方向距離 $l > 90\text{mm}$ では 55/43 盲付の場合に近い。これより上流側では 55/43 盲付の場合と大分こととなっているが, ガスサンプリングプローブ孔のつまりのため, 試料採取ができず, 上流側の様子については明らかでない。スワーラ中心位置の当量比は, $l = 50 \sim 110\text{mm}$ 間でスワーラ中間位置より低めになっている。これに対し, 図 53 のゲジゲジルーバ付では $l = 50 \sim 90\text{mm}$ の間でスワーラ中心位置の当量比がスワーラ中間位置より高い。このため図 52 のスワーラ中心部分の局所当量比の低さは, 本来, 局所当量比が高いはずであるが, その箇所であまり燃焼していないた

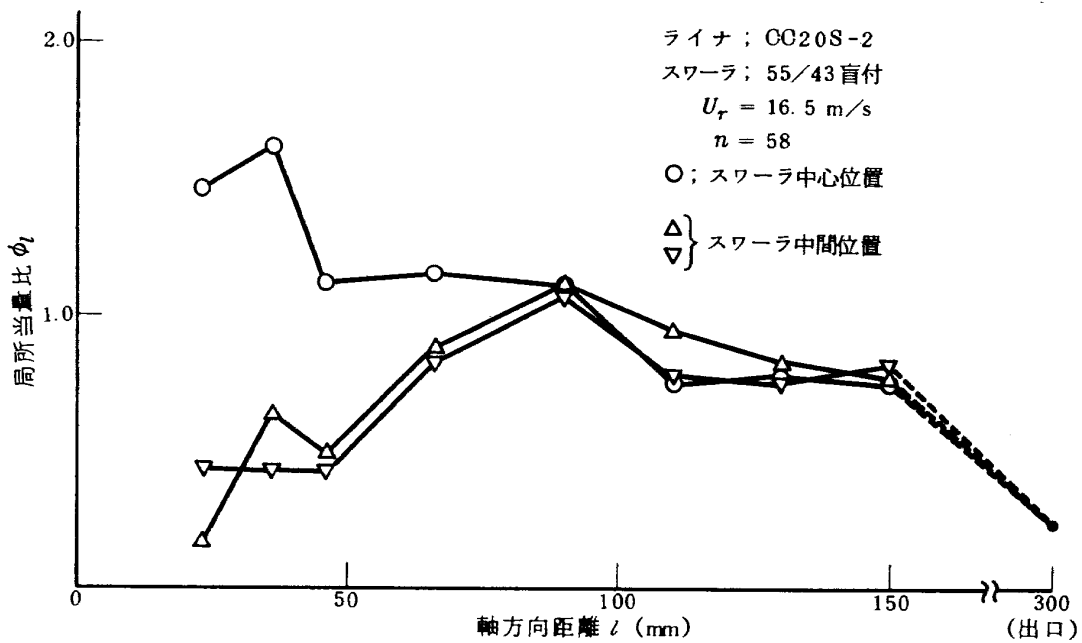


図 51 CC20S-2, 55/43 盲付の軸方向当量比分布

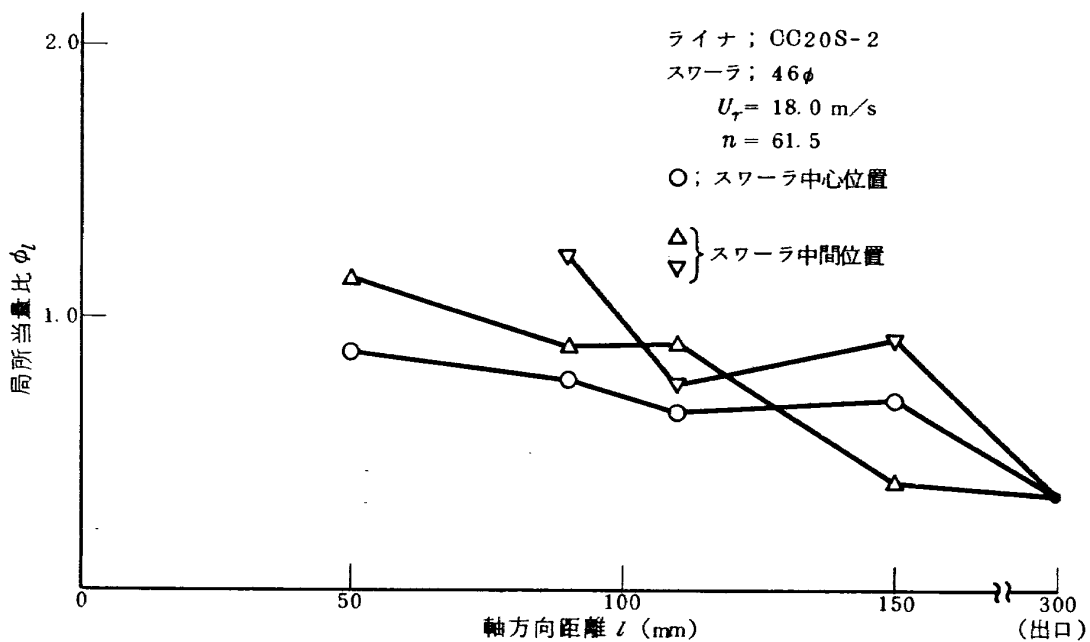


図 52 CC20S-2, 46ϕ スワーラの軸方向当量比分布

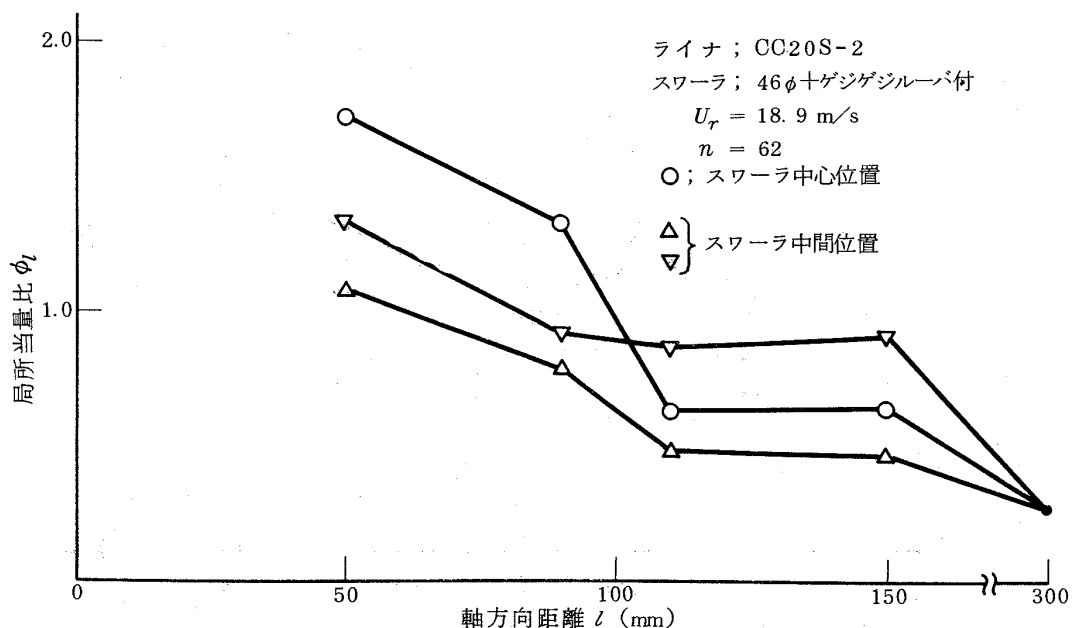


図 53 CC20S-2, 46φ十ゲジゲジルーバ付の軸方向当量比分布

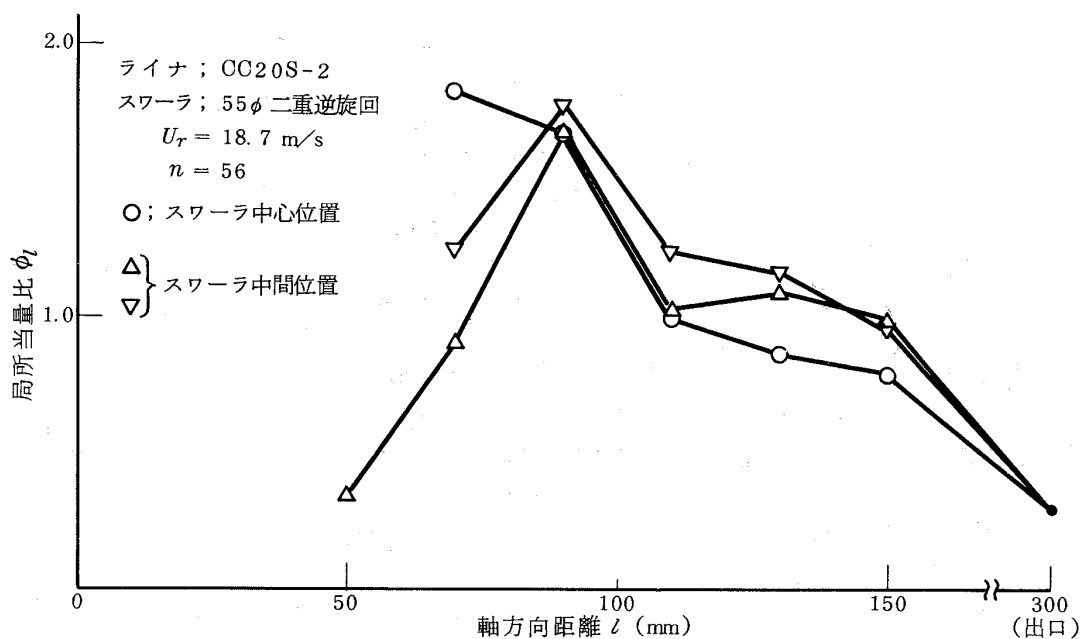


図 54 CC20S-2, 55φ二重逆旋回の軸方向当量比分布

め高濃度に測定されなかったと推定される。

図 54 の二重逆旋回では、スワーラ中心位置の $l=70\text{mm}$ に $\phi_l \approx 1.8$ の燃料過濃箇所があり、スワーラ中間位置では $l=90\text{mm}$ のところに $(\phi_l)_{\max} \approx 1.7$ のピークを示す。なお、 $l \geq 90\text{mm}$ の範囲ではスワーラ中心、中間位置の差は少なく、 $l=110 \sim 150\text{mm}$ 間は、図 51 の場合に近い。図 54 によると、二重逆旋回の場合、燃焼器上流側では、燃料 - 空気の混合や燃焼が行なわれていないと判断され、作動上、燃焼器の有効長さを短縮したようになっている。

以上のように、各燃焼器形式は、それぞれ特徴のある局所当量比分布を示している。

5.1.2 酸素消費効率の比較

図 50 ~ 図 54 に対応する酸素消費効率 ϵ の比較を図 55 図 59 に示す。

CC20S-1, 55/43 盲付の場合 (図 55), $l=70\text{mm}$ で $\epsilon=75 \sim 80\%$ に達するが、その後; $l=90\text{mm}$ 付近でライナからの空気噴流による酸素消費効率の低下があり、その後あまり上昇せず燃焼器出口まで達している。スワーラ中心 - 中間位置の差は少ない。これに対し、図 56 の CC20S-2, 55/43 盲付の場合は、 $l=46\text{mm}$ で $\epsilon \approx 90\%$ に達し、あと $\epsilon=90 \sim 95\%$ のまま燃焼器出口まで達している。 $l=110\text{mm}$ 付近の空気噴流の影響はみられな

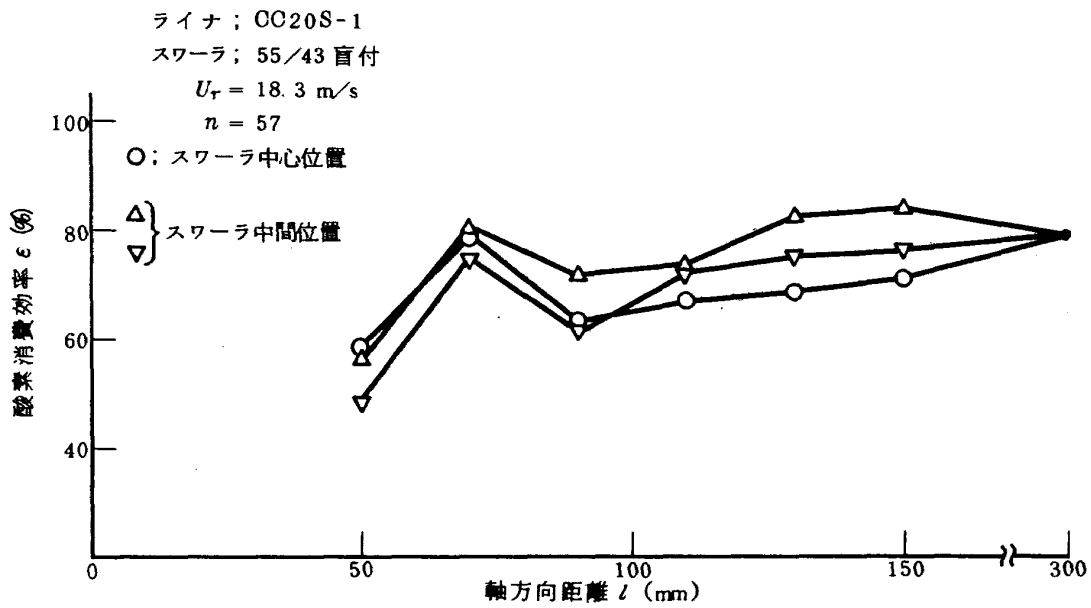


図 55 CC20S-1, 55/43 盲付の軸方向酸素消費効率分布

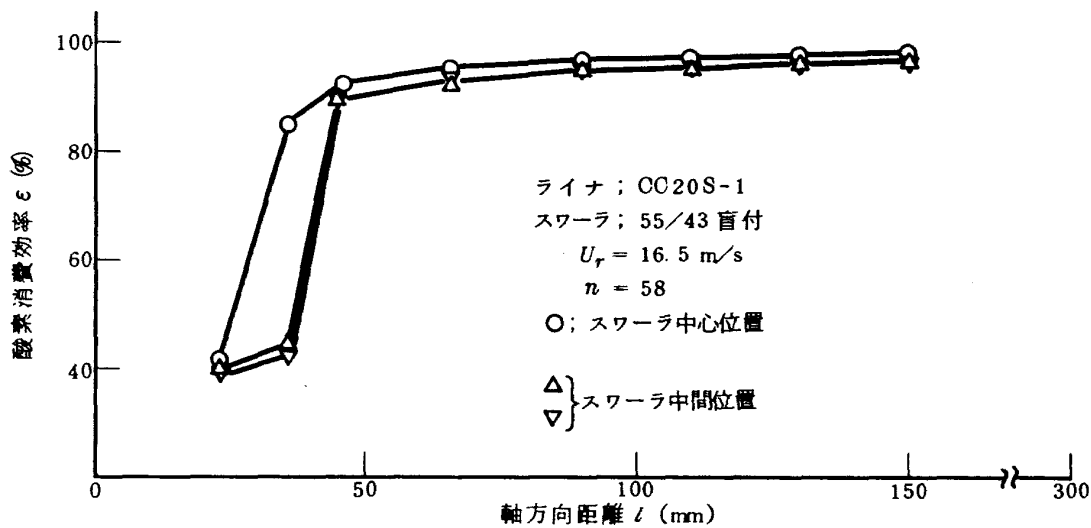


図 56 CC20S-1, 55/43 盲付の軸方向酸素消費効率分布

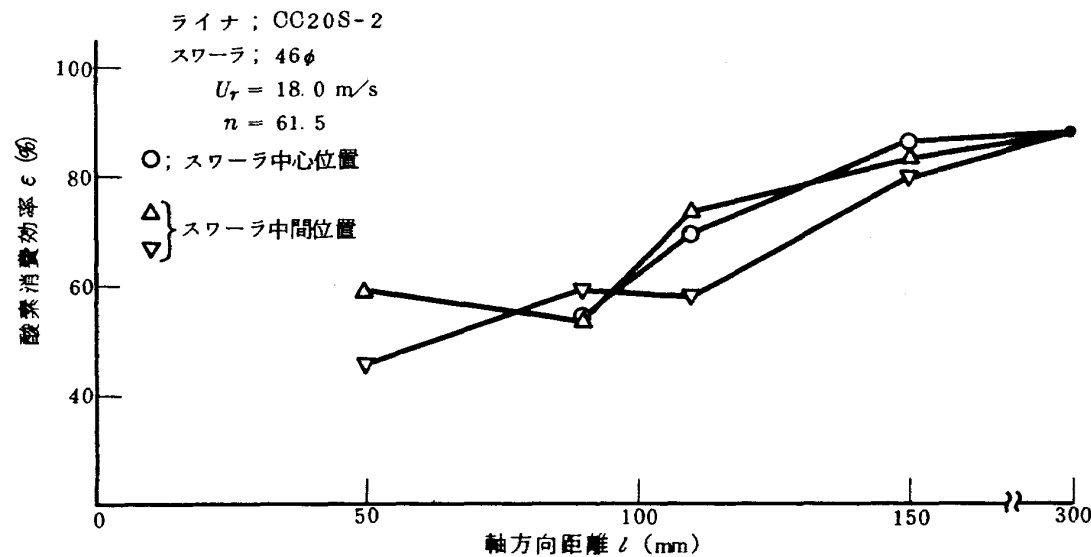


図 57 CC20S-2, 46φ スワーラの軸方向酸素消費効率分布

い。この燃焼器の場合、 $U_r = 16.5 \text{ m/s}$ と風速がやや低下していることが燃焼性能向上に大きく役立っているようである。

図 57 の 46φ スワローの場合、上流側ではあまり燃焼していないが、軸方向距離増加とともに酸素消費効率が上昇し、燃焼器出口では高い燃焼効率を示す。これは、燃焼器下流側でも局所当量比が低くない(図 50 と図 52) ためであろう。図 58 のゲジゲジルーバ付は、図 57 に比べて上流側で多く燃焼しており、それだけ下流側でも効率が高くなっている。

図 59 の二重逆旋回では、 $l = 90 \text{ mm}$ で相当に高い酸素消費効率を示すが、 $l = 110 \text{ mm}$ 位置のライナからの空気噴流により低下し、その後、再び上昇している。この上昇割合は、 $\phi_1 \approx 1$ 付近の領域内であるため大きい。

以上総合すると、燃焼効率を高めるためには、酸素消費効率をなるべく早い時期(上流側)に高める必要がある。

る。酸素消費効率が高くなった($\epsilon \geq 90\%$)直後にライナからの空気噴流を入れると酸素消費効率は低下するが、ある程度の距離をおけば低下しない。酸素消費効率が空気噴流によって低下したのちの再上昇の割合は、その部分の局所当量比に依存する。

上流側で酸素消費効率が高くならなくても、 $\phi_1 = 0.8 \sim 1$ の領域が広がっていれば、出口側の燃焼効率は低くない。

5.1.3 大気汚染成分排出指数の比較

軸方向距離 $l = 150 \text{ mm}$ は、燃焼器の希釈領域入口付近に相当する。この位置において平均した NO_x 排出指数を図 60 に示す。No 1, 3, 4 はほぼ線上にのり、酸素消費効率の高いものほど NO_x 排出指数が多いことを示している。No 2 は平均風速が低いので直接比較はできない。これから判断すると、No 1, 3, 4 について、局所当量比分布や酸素消費効率分布に相当な差があったが、 NO_x 排

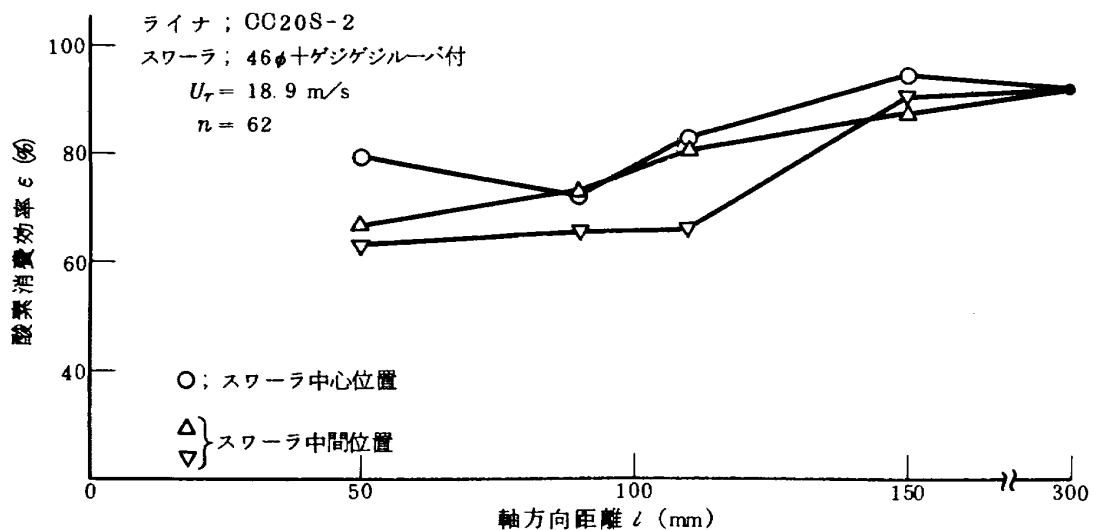


図 58 CC20S-2, 46φ + ゲジゲジルーバ付の軸方向酸素消費効率分布

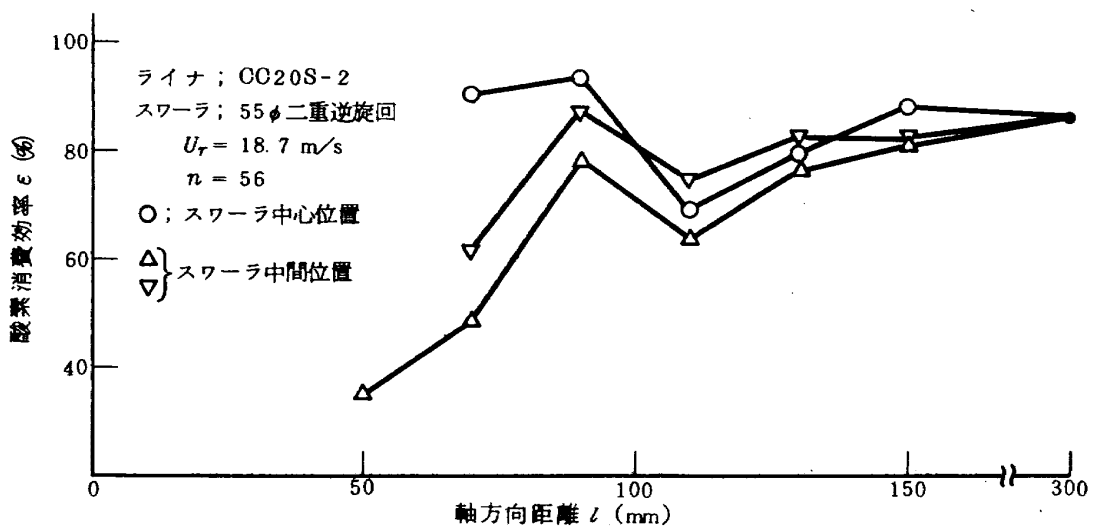


図 59 CC20S-2, 55φ 二重逆旋回の軸方向酸素消費効率分布

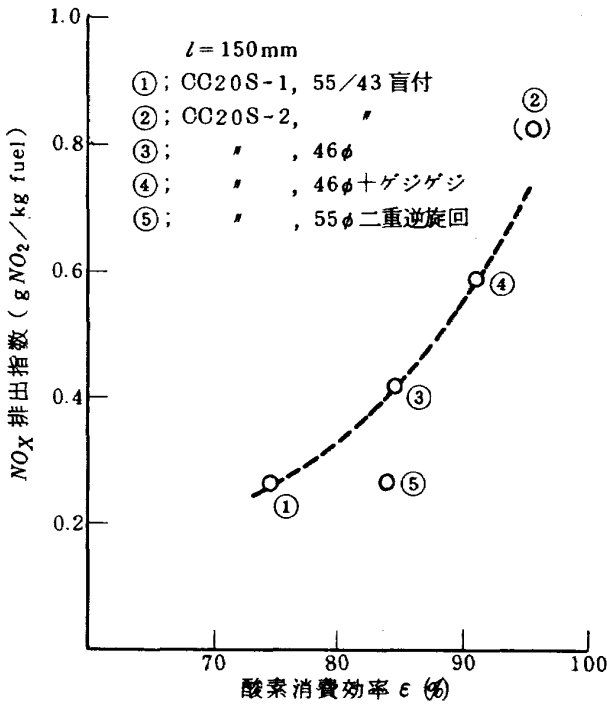


図 60 NO_x 排出指数の比較 (l=150mm の平均)

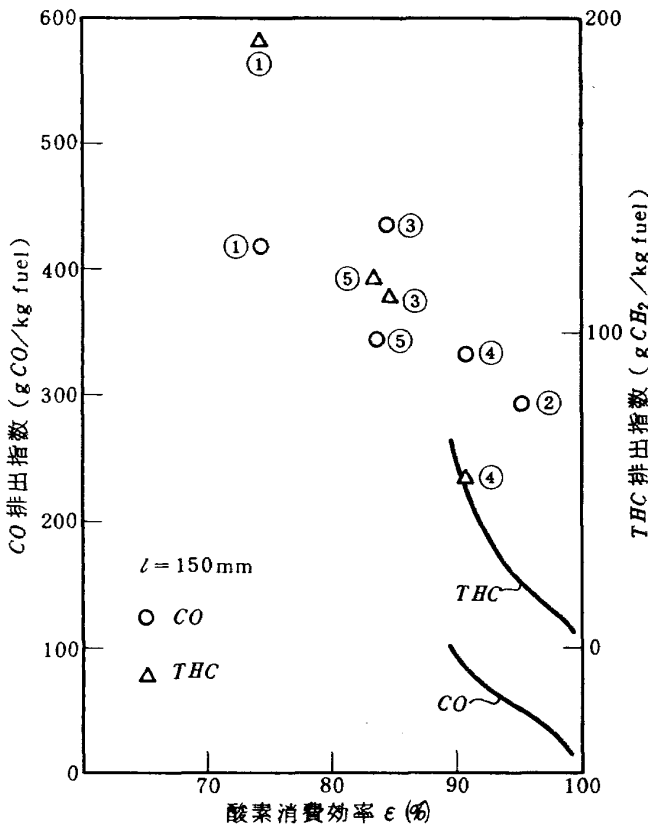


図 61 炭化水素と一酸化炭素の排出指数 (l = 150mm の平均)

出特性については、大きな差はない、といえる。No 5 は、No 1, 3, 4 系より低めの NO_x 排出指数を示す。これは、実際の作動状態が長さの短い燃焼器 (Short combustor) になっているためであろう。

炭化水素 (燃料分; THC) や一酸化炭素の排出指数は、燃焼効率; η_b ($l=150\text{mm}$ の位置では $\phi_l \leq 1$ であるから酸素消費効率とほぼ同一値) に依存し、これを高めない限り排出低減化はできない。この点については、実験に用いたいずれの形の燃焼器も充分でなく、改善の必要がある。参考までに $l=150\text{mm}$ 位置における結果を図 61 に示す。図中の数字は図 60 のものと同一の意味である。

図中の線は、エンジンについて測定した値⁹⁾で、THC 排出指数については線にのっているが、CO 排出指数は、本実験値のほうが、はるかに高レベルになっている。この原因については明らかでない。

5.2 CC20S-2 55/43 盲付の場合の詳細な検討

CC20S-2, 55/43 盲付の組合せは、これを基準に考え、もっとも多く測定を行なっているため、これについて詳細な検討を行なう。

図 22 ~ 図 28 をもとに各成分の軸方向濃度分布を求めると図 62 のようになる。なお、図には CO 濃度を省略しているが、NO 濃度に近い傾向を示す。この図から、軸方向距離 $l=46 \sim 90\text{mm}$ の間は各成分および酸素消費効率にあまり変化なく、 $l=110\text{mm}$ 位置のライナからの空気噴流によって大幅に変化していること、その下流側では、また変化が少なくなっていることが判明する。図 62 および図 22 ~ 図 28, 流れ模様を示した図 8 を合せて考えると、この燃焼器は、ガス測定断面において図 63 に示す区分を行なうことができる。すなわち、

(1) 領域 I ($l \leq 40\text{mm}$); スワラ近傍の領域で燃料噴霧の影響を大きく受け、流れ模様測定時の弱い逆流は、噴霧流により主流方向への流れにかえられ、スワラからの空気が流入している。燃料液滴が多く存在し、ほとんど燃焼していない。また、各成分の濃度勾配が大きく、分析精度にも問題があるので、今回は参考資料として述べる。

(2) 領域 II ($45 \leq l \leq (90 \sim 100\text{mm})$); いわゆる保炎のための循環流領域としての役目を果している領域である。空燃比 $n = 41 \sim 58$ の範囲では各成分の濃度分布が比較的平坦になっている。

(3) 領域 III ($l \geq 110\text{mm}$); ライナ空気孔からの空気噴流の影響を受ける領域である。流れ模様は下流側に向うほぼ単調な形と推定される。当量比は領域 II より小さく、酸素消費効率 $\epsilon \approx 95\%$ を示す。NO₂ が検出される。

5.2.1 領域 I についての検討 (参考資料)

領域 I 内の CO 濃度と局所当量比の関係を図 64 に示す。図 64 中の実験点は軸方向距離 $l = 36\text{mm}$ のもので、 $l = 23\text{mm}$ 位置の平均値も合せて示す。 $l = 23, 36\text{mm}$ の差

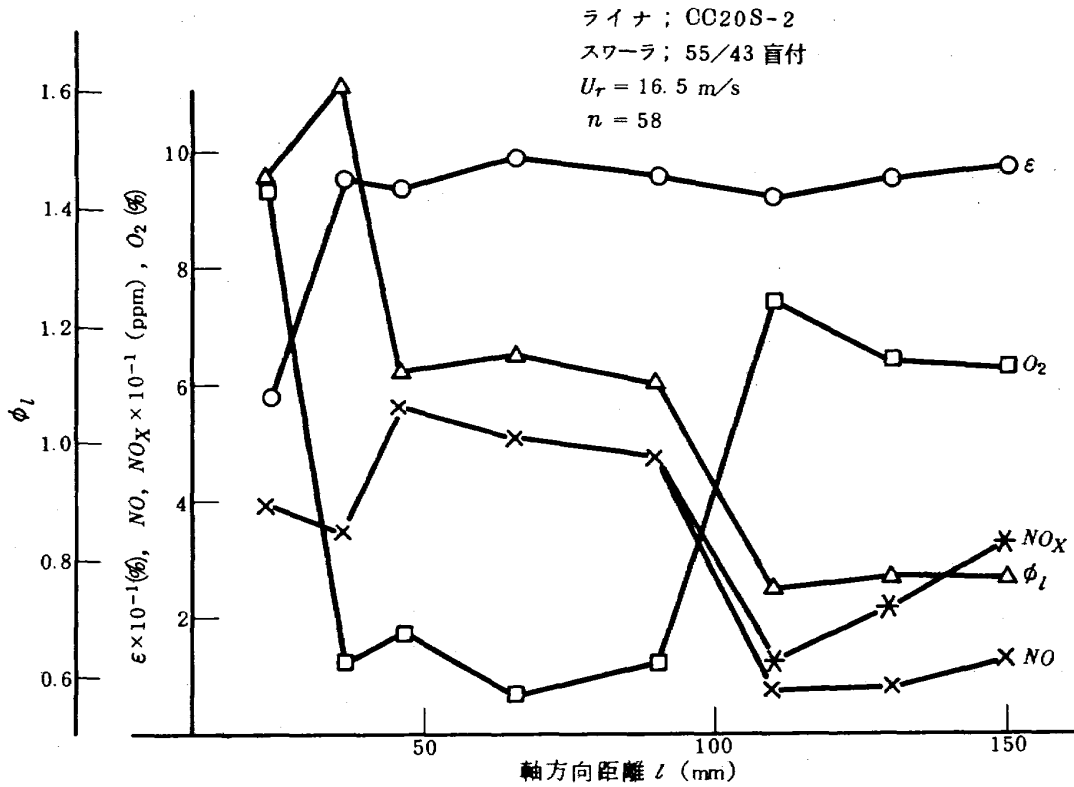


図 62 スワラ中心軸上の濃度分布例

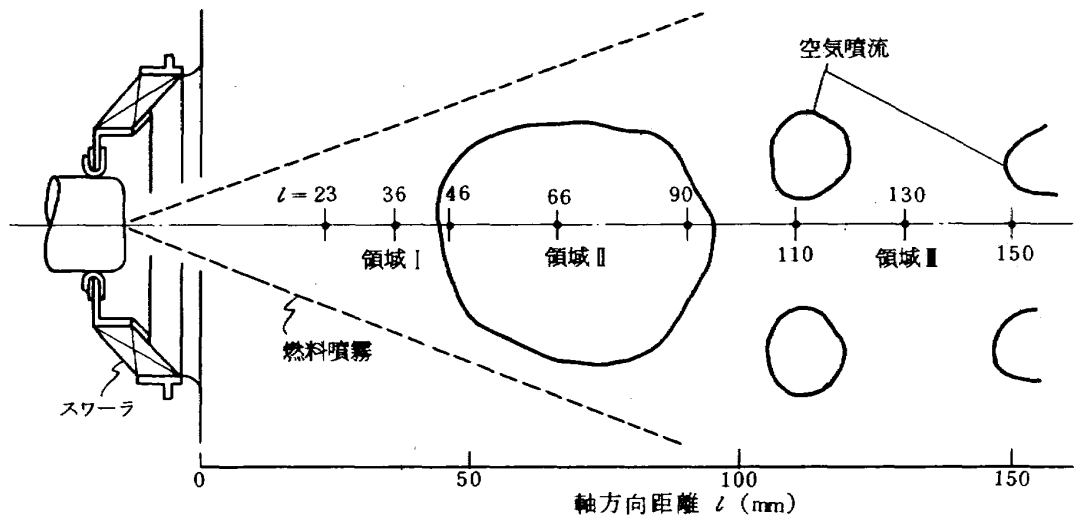


図 63 燃焼領域の区別 (B-B断面, CC20S-2, 55/43 盲付)

はないとみてよい。また、同図には燃料として C_8H_{18} を考え、熱損失なしとした場合の CO 平衡濃度^{10) 11)}を示す。この平衡濃度と測定値の傾向は大分ことなり、 $\phi_l = 0.4 \sim 0.7$ 付近の実験点では冷空気による反応凍結、 $\phi_l = 1.2 \sim 1.6$ 付近の実験点では燃料による冷却が起きていると考えられる。全体空燃比による変化はみられない。図 65 は NO 濃度と局所当量比の関係を示したものである。 $l = 23 \text{ mm}$ の実験点は、ばらついていたので、これを範囲として併記した。 NO 濃度は、局所当量比とともに増加し、 $\phi_l = 1.5$ でもまだ増加の傾向を示す。これ

は、後記の領域 II の場合と同様である。燃焼状態を調べるため、酸素消費効率をとったものを図 66 に示す。これでは軸方向距離の影響が明らかに現われ、軸方向距離の増加にもない酸素消費効率が向上する。図中、 $\phi_l = 0.4 \sim 0.6$ の位置の実験点のばらつきは、燃焼が平面的に進行しない(図 28 参照)ため、実質的に $l = 23, 36 \text{ mm}$ の区別のつけがたいことによる。 $l = 46 \text{ mm}$ 位置は、領域 II に含まれるもので、局所空燃比の如何にかかわらず $\epsilon \geq 85\%$ を示している。

5.2.2 領域Ⅱについての検討

図67に領域Ⅱ内のCO濃度と局所当量比との関係を示す。

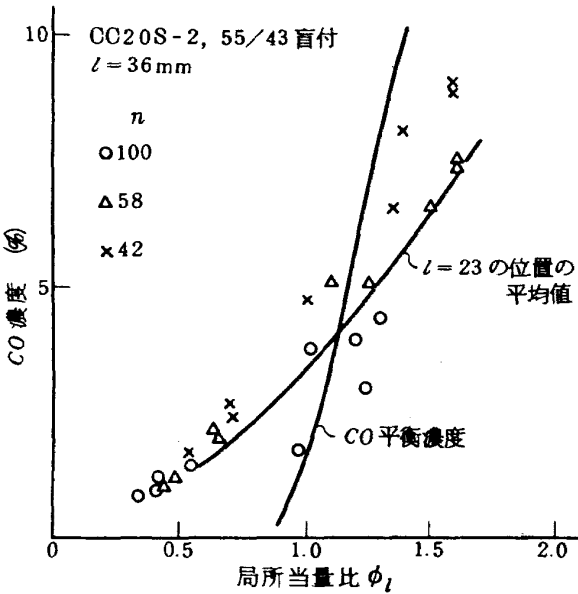


図64 領域Ⅰ内のCO濃度

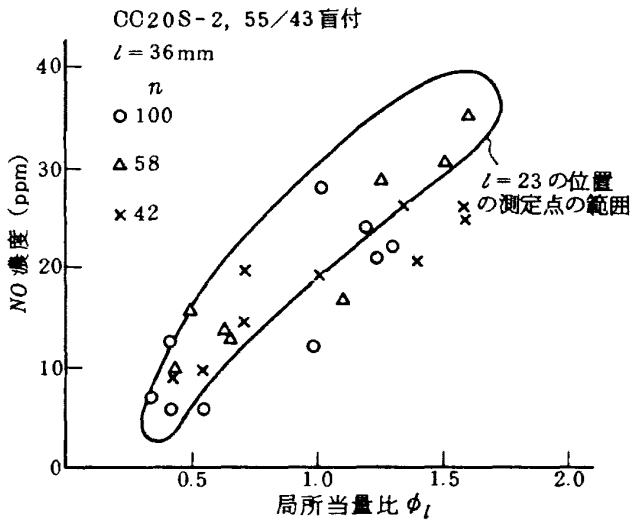


図65 領域Ⅰ内のNO濃度

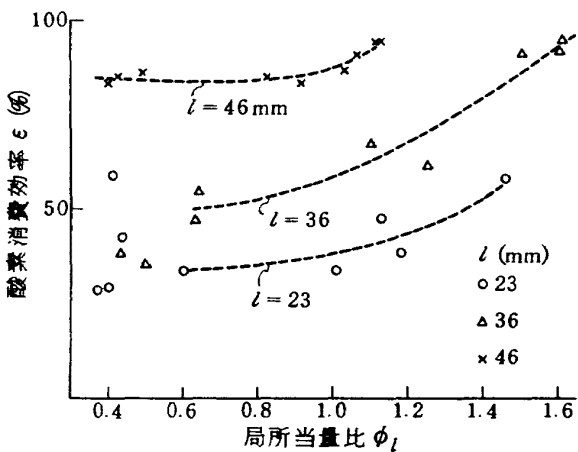


図66 領域Ⅰの酸素消費効率

す。図中実験点は $l = 66\text{mm}$ 位置のもので、 $l = 46\text{mm}$ 、 $l = 90\text{mm}$ 位置の値の平均値も合せて示した。いずれも平衡濃度より高いが、 $l = 46\text{mm}$ のときより $l = 90\text{mm}$ のときのほうが平衡濃度に近づいている。 $l = 66\text{mm}$ 、 90mm の位置の差はわからない。

図68はNO濃度を同様に示したもので、 $l = 46\text{mm}$ の

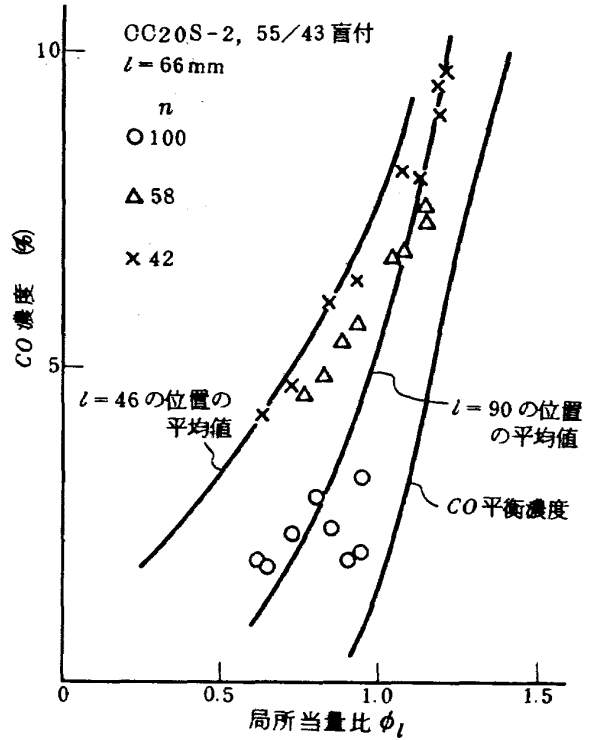


図67 領域Ⅱ内のCO濃度

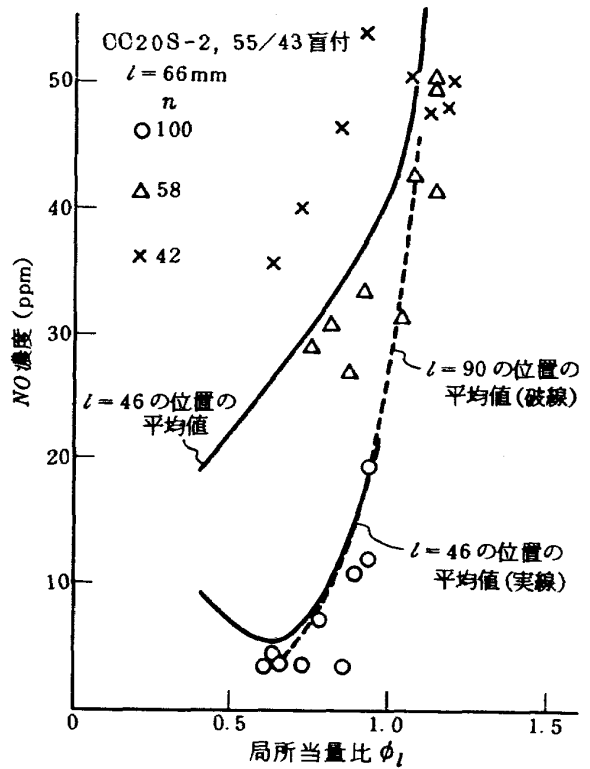


図68 領域Ⅱ内のNO濃度 - Ⅰ

位置の実験点は図に示すように二つの傾向を示している。

$l = 66\text{mm}$ と 90mm 位置についての差はないとみてよい。図69は、図68の $l = 90\text{mm}$ 位置の平均値を示す線上にのる実験点と他のデータと比較したものである。図中の斜線は、プロパン-空気予混合燃焼時のPrompt NO濃度の測定値の範囲¹²⁾を示したもので、実線は著者らのプロパン-空気予混合気バーナ¹³⁾の測定結果である。これから、領域II内のNO濃度は、プロパン-空気のPrompt NO濃度に近く、予混合プロパンバーナ(滞留時間 1.4ms 程度で測定)の結果にも近いことがわかる。なお、この領域の $\text{NO}_2 (= \text{NO}_x - \text{NO})$ 濃度は、 $\epsilon \geq 90\%$ 、 ϕ_l

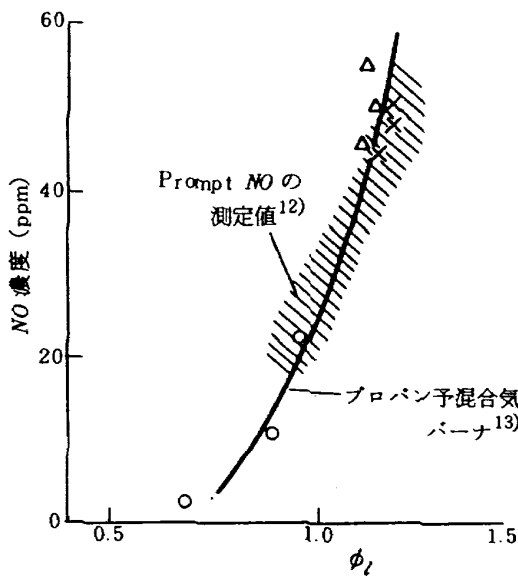


図69 領域II内のNO濃度 - II

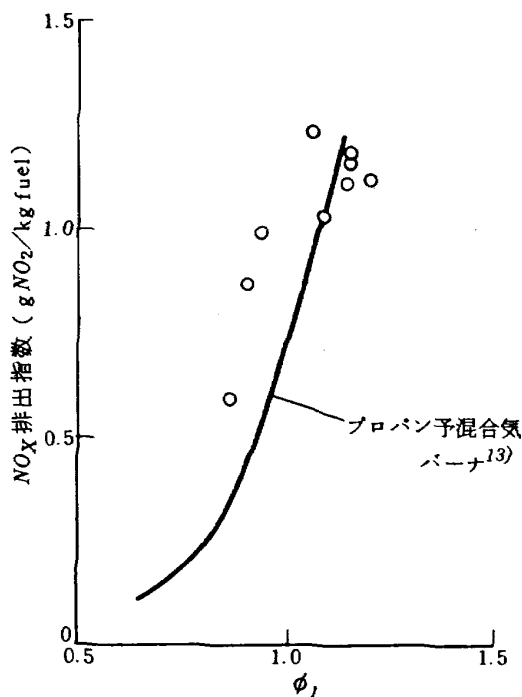


図70 領域II内のNO_x排出指数

< 1 の成り立つ場合のみ検出された。これは、分析計内のコンバータ($\text{NO}_2 \rightarrow \text{NO}$ 変換器)の特性によると考えられる。

図70は、 NO_x 排出指数を示したものである。プロパン-空気予混合気バーナの場合とあまり差はない。

5.2.3 領域IIIについての検討

図71は、領域III内のCO濃度を示したものである。実験点は軸方向位置 $l = 130\text{mm}$ のもので、 $l = 110\text{mm}$ および $l = 150\text{mm}$ 位置の結果については平均値を線で示した。 $l = 130\text{mm}$ 、 150mm の位置による差はなく、平衡濃度に比較的近い。領域IIIについて調べた CO/CO_2 濃度比と局所当量比の関係を図72に示す。同図には、以前にJ-33形燃焼器を用いて求めた関係¹⁴⁾も示した。J-33形燃焼器の場合と今回の結果とは、 $\phi_l > 1.0$ の範囲でことなるが、J-33形燃焼器は内部の混合が今回の例ほど良好でないという燃焼領域内の状態の差にもとずくと考えられる。しかし、 $\phi_l < 0.8$ の範囲では一致し、この範囲では、燃焼器による傾向の差異は少ないとみられる。

図73は、領域III内のNO濃度-局所当量比の関係である。 $l = 110\text{mm} \sim 150\text{mm}$ の範囲では、その傾向にほとんど差はない。これは図68の $l = 90\text{mm}$ 位置の実験点の平均値とも一致している。

この領域IIIでは $\text{NO}_2 (= \text{NO}_x - \text{NO})$ が検出されたが、その傾向を図74に示す。軸方向距離の増加に従って、 NO_2 濃度の増加する傾向があるが、その増加割合は $\phi_l =$

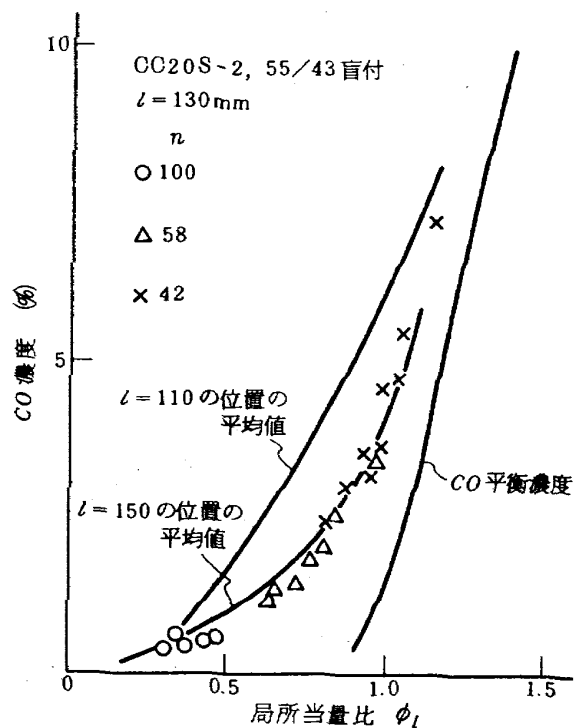


図71 領域III内のCO濃度

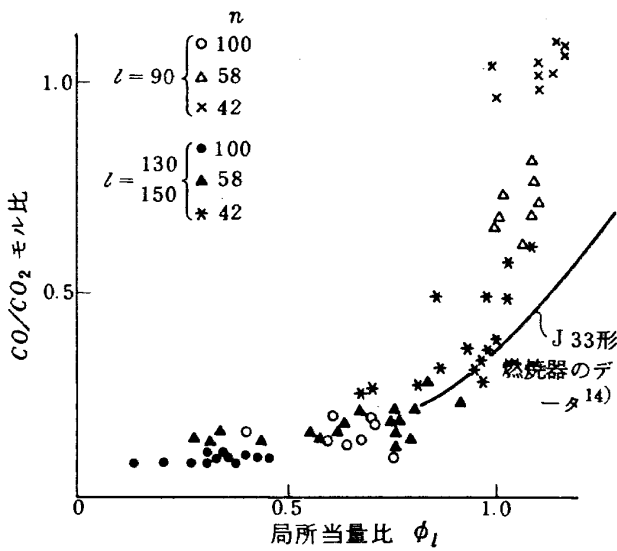


図72 局所当量比とCO/CO₂濃度比との関係

0.8~1の範囲が大きい。図74の実験点を数多くプロットしたものが図75で、これによるとNO₂濃度の最高値はφ_l = 0.85にある。図76は、残留酸素濃度とNO₂濃度との関係である。実験点は大きくばらついているが、その境界を結ぶとO₂濃度5%付近にNO₂濃度の最高値がある。これは図75から算出されるO₂濃度(NO₂濃度のピーク位置でO₂濃度約3.3%)と少しずれているが、実験点のばらつきから何ともいえない。図77はl = 150mm位置のNO/NO_x濃度比を示したものである。局所当量比の増加とともにNO/NO_x濃度比は増加するが、前述のプロパン-空気予混合バーナの結果¹³⁾が一つの限界になっている。

図78はl = 150mm位置のNO_x排出指数と局所当量比との関係で、プロパン-空気予混合バーナの場合にくらべて局所当量比の小さな範囲のNO_x排出指数が大きい。すなわち、燃料希薄燃焼を行なってもNO_x排出指数の低

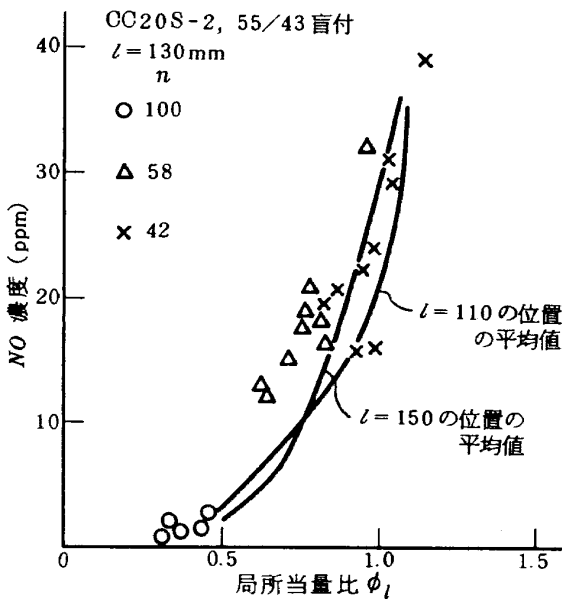


図73 領域Ⅱ内のNO濃度

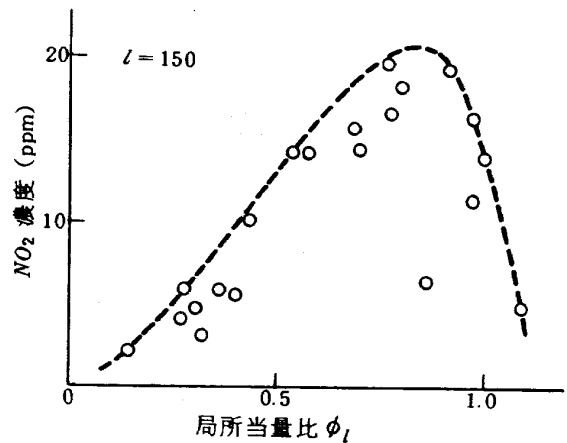


図75 NO₂濃度と局所当量比との関係

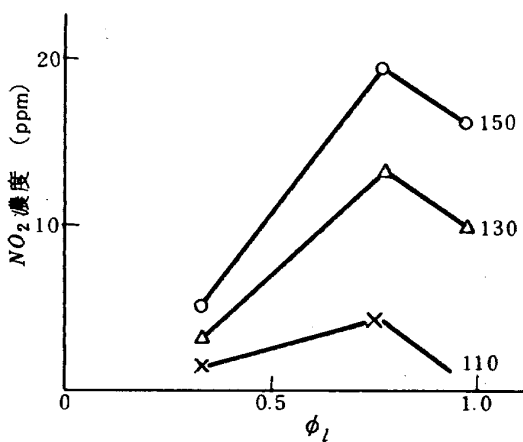


図74 領域Ⅱ内のNO₂濃度

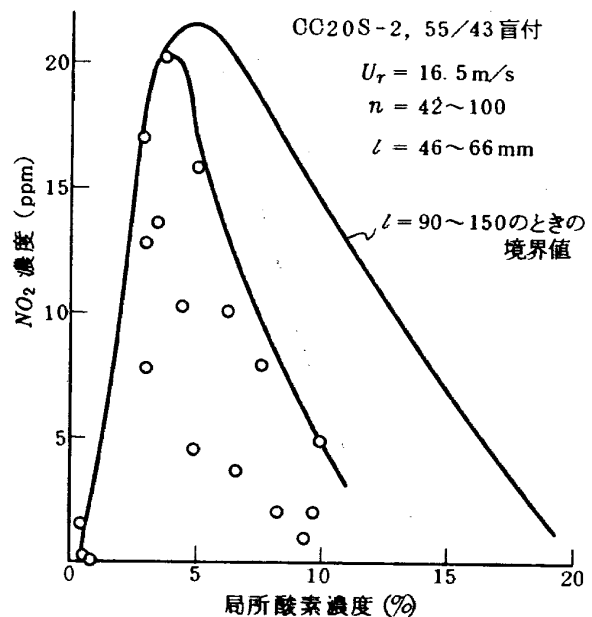


図76 NO₂濃度と残留酸素濃度との関係

下率が少ない。これは、図70の領域Ⅱの場合とことなる点である。

以上の結果をまとめると次のようになる。

- (1) 領域Ⅰ内では、燃焼ガスの流入空気や噴射燃料による冷却・希釈が行なわれている。
- (2) 循環流領域と考えられる領域Ⅱ内は、空燃比 $n =$

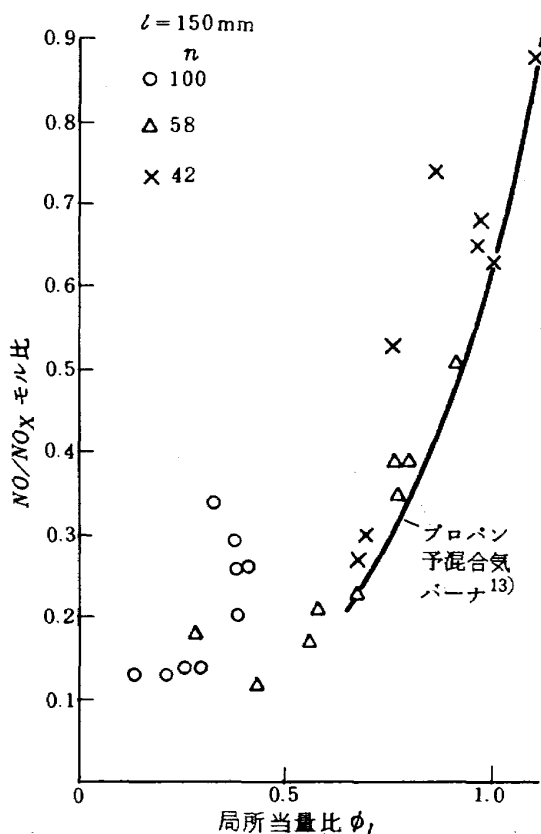


図77 領域Ⅱ内のNO/NO_x濃度比

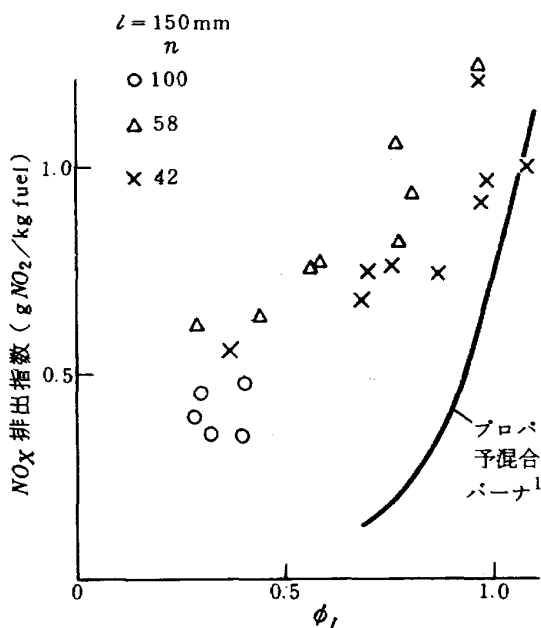


図78 領域Ⅱ内のNO_x排出指数

58-42のとき、ほぼ均質な状態になっている。

- (3) 領域Ⅱ内の酸素消費効率、空燃比をかえても常に90%以上を示す。
- (4) 領域Ⅱ内のCO濃度は、平衡濃度よりいくぶん高い。
- (5) 領域Ⅱ内のNO濃度は、いわゆるPrompt NOのそれに近い値を示す。これは、NO濃度減少に対して、燃料希薄な一次燃焼領域 (Lean Primary Zone) の有効性を示している。
- (6) 二次空気導入によりNO₂が生成される。NO₂濃度は下流へ行くに従って増加するが、その増加割合は、 $\phi_l = 0.8 \sim 1$ の範囲が大きい。
- (7) 燃焼器希釈領域入口 ($l=150\text{mm}$)のNO_x排出指数は、予混合バーナの場合より、局所当量比の減少にともなう排出指数の低下が小さい。また、NO/NO_x濃度比は予混合バーナのそれより高めで、これらは不均質燃焼によるためと思われる。

5.3 各燃焼器形式に対する成分濃度と局所当量比の関係

前節の検討結果から明らかなように各成分濃度はその局所当量比と関係をもっているため、このような整理を行なって燃焼器形式相互の比較を行なう。

5.3.1 CO濃度 - 局所当量比

この関係は、CC20S-1と55/43盲付CC20-2と46φ、46φ+ゲジゲジルーバ付、55φ二重逆旋回の各形式や全体空燃比、測定位置 ($l=50 \sim 150\text{mm}$)に依存せずほぼ1本の線上にのる。この例を図79に示す。これは図64の傾向と一致し、風速を大きくした場合 ($U_r=16.5\text{m/s} \rightarrow 18.5\text{m/s}$)、領域Ⅰに相当する部分の広がるこ

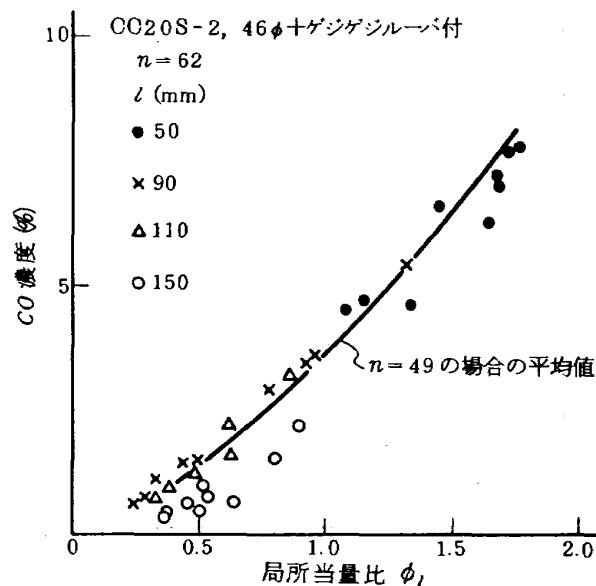


図79 CO濃度と局所当量比との関係の例

とが考えられる。

5.3.2 NO 濃度 - 局所当量比

これも燃焼器形式や全体空燃比によってあまり変化しないが、CC20S-1 の場合はやや異なり、 $\phi_l > 1.2$ の範囲で高濃度を示す。このCC20S-1 のもつ傾向は、CC20S-2, 55/43 盲付の領域Ⅱの様子と似ている。図80はCC20S-1 のもの、図81はその他の場合の例である。

5.3.3 NO₂ 濃度 - 残留酸素濃度

NO₂ 濃度については、局所当量比よりも残留酸素濃度

が意味をもつと考えられるため、これを横軸にとって図示した。

CC20S-2, 46φ スワラの場合、全体空燃比によってNO₂ 濃度が大幅に変化した。これを図82に示す。この全体空燃比の差による軸方向酸素消費効率分布は、ほとんど差がなく、 $l=150\text{mm}$ 位置における酸素消費効率も $n=49$ のとき $\epsilon=84.5\%$ 、 $n=62$ のとき $\epsilon=81.4\%$ 程度の差である。しかし、燃焼器出口ガス分析による燃焼効率では $n=49$ のとき $\eta_c=89.7\%$ 、 $n=62$ のとき $\eta_c=71.8\%$ と大きな差がある。これは、測定断面以外の影響が大きく入っていることを意味し、今回の測定のみでは説明できない。

その他の例を図83に示す。NO₂ 濃度のピークは、残

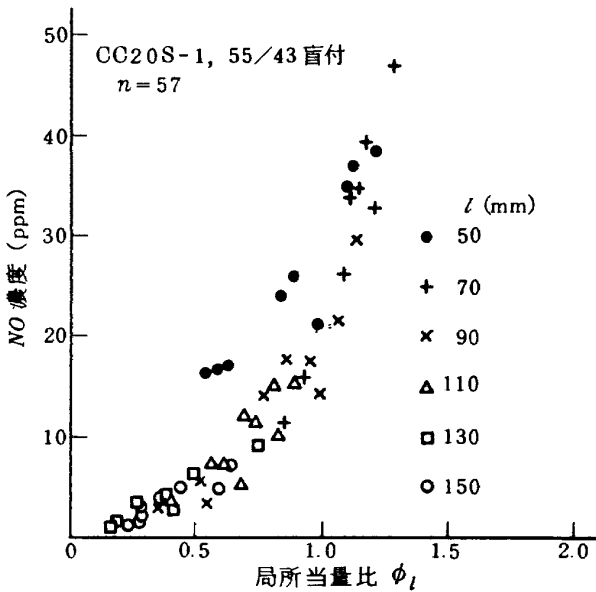


図80 NO 濃度と局所当量比との関係の例-I

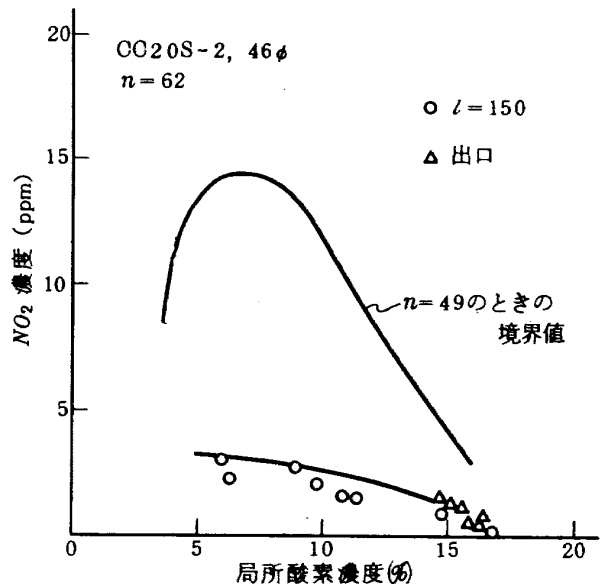


図82 NO₂ 濃度と残留酸素濃度との関係-I

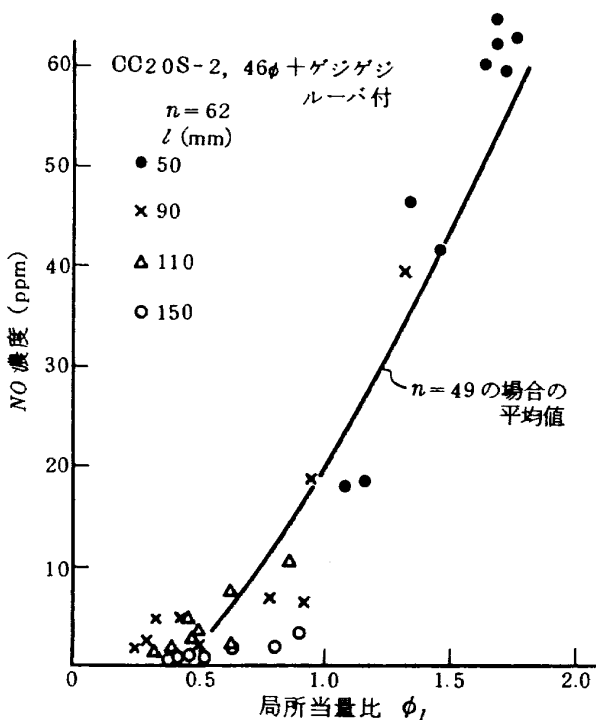


図81 NO 濃度と局所当量比との関係の例-II

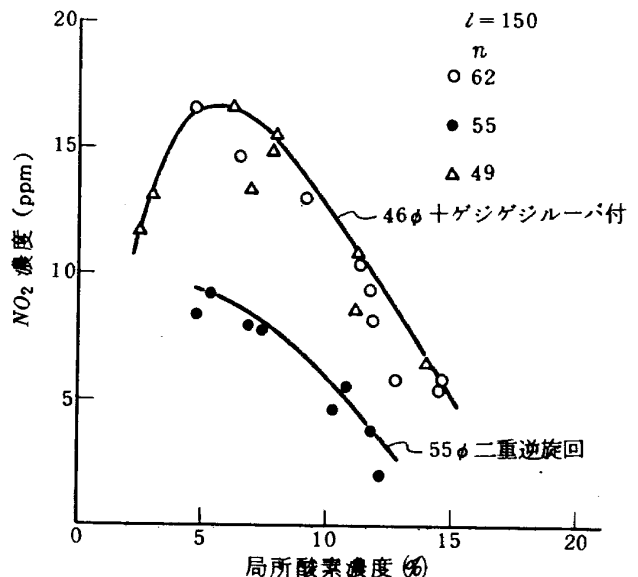


図83 NO₂ 濃度と残留酸素濃度の関係-II

留酸素濃度にして6%付近にあり、図76の場合よりやや酸素濃度の多い側に寄っている。

5.3.4 NO_x 排出指数 - 局所当量比

NO_x 排出指数をその位置のガス組成から計算して求めた代表的な例を図84と図85に示す。

図84では、 $\phi_l > 1$ の範囲で局所当量比増加に伴いNO_x 排出指数の増加が小さい。これに類する傾向は、CC20S-2, 55φ 二重逆旋回 (n=56) の場合にもみられた。一方、図85では、局所当量比増加によってNO_x 排出指数は、 $\phi_l \approx 1.7$ まで直線的に増加している。このよ

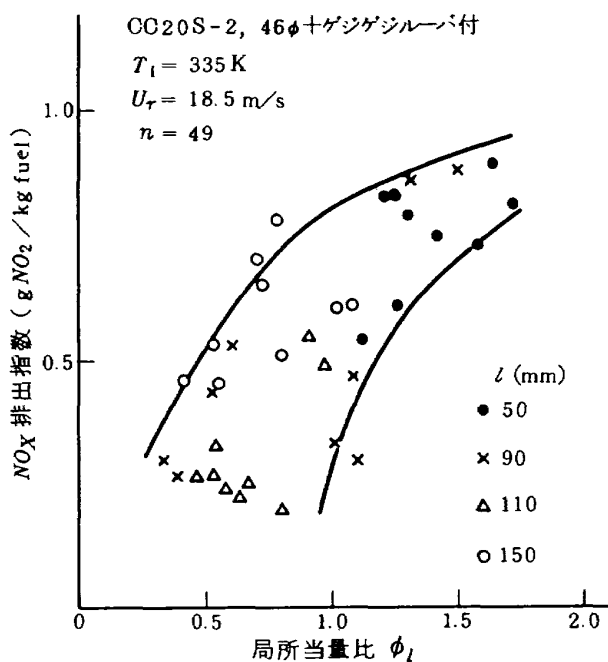


図84 NO_x 排出指数と局所当量比の例〜1

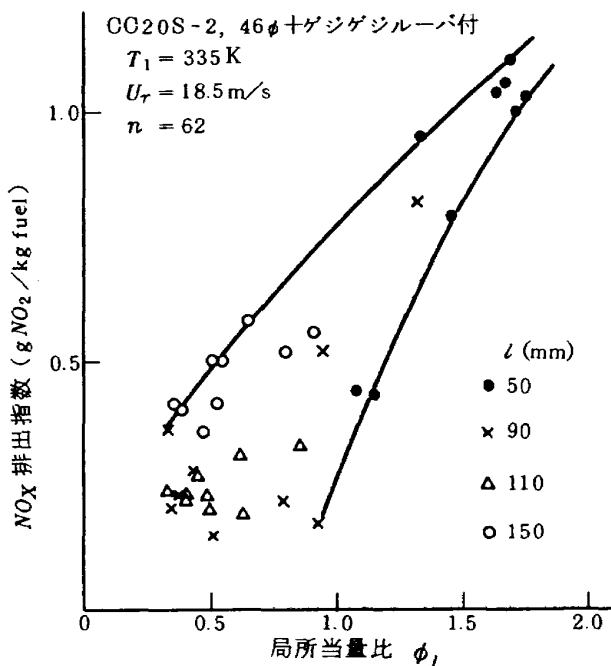


図85 NO_x 排出指数と局所当量比の例〜II

うな傾向はCC20S-2, 46φ スワラ (n=49, 62); CC20S-1, 55/43 盲付 (n=57) の場合にもみられた。いずれもNO_x 排出指数は図84, または図85に示す範囲内におさまっている。

上記2種類の傾向の差は、実験点の記号から、軸方向位置 $l = 50 \sim 70\text{ mm}$ の測定値 ($l = 70\text{ mm}$ の測定値は図84-85には示されていない) の差によるもので、この付近の燃焼状況できまると考えられる。

5.4. 大気汚染成分の燃焼器出口における排出指数

各燃焼器形式について出口におけるCOおよびNO_x 排出指数の比較を行なう。全炭化水素 (THC) については、測定精度の点から省略した (THC 排出指数の傾向については図61参照)。

5.4.1 CO 排出指数

測定結果をまとめて図86に示す。これによると燃焼器形式による差、および全体空燃比による差がある。これは、局所当量比が同一でも全体の燃焼効率が条件によって異なり、CO濃度は、多分に、全体の燃焼効率に依存しているためと考えられる。同図から判断すると、CC20S-2, 46φ スワラまたは46φ + ゲジゲシルーバ付がすぐれている。

5.4.2 NO_x 排出指数

図87に燃焼器の各形式を比較して示す。この図によると2通りの傾向がある。すなわち、局所当量比によって

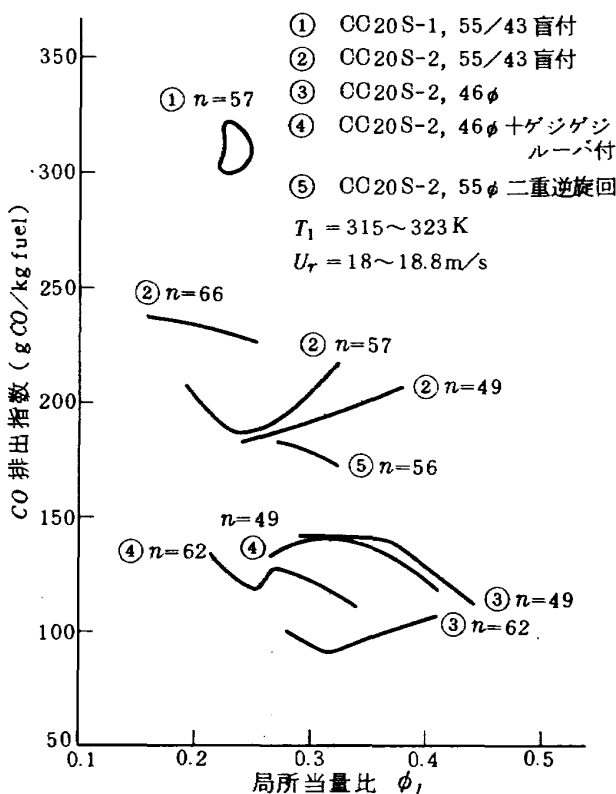


図86 燃焼器出口におけるCO 排出指数

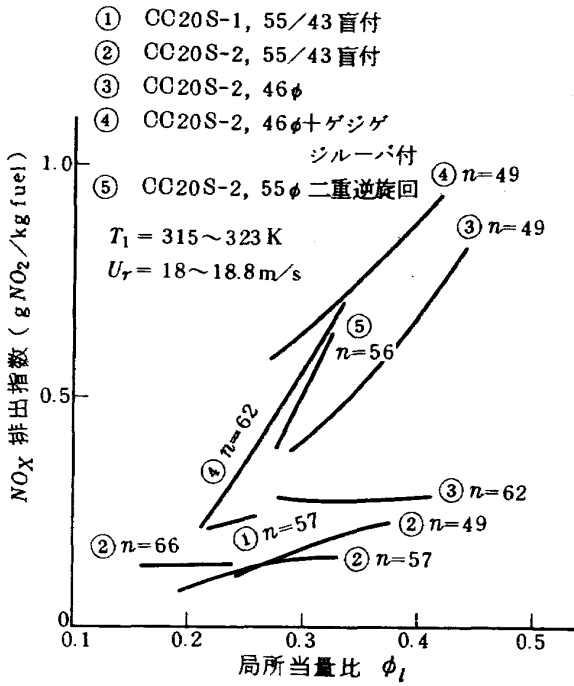


図 87 燃焼器出口における NO_x 排出指数

NO_x 排出指数があまり変化しない場合と、直線的に増加する場合がある。これは、5.3.4 に述べた内部ガスの傾向とは関連をもたない。理由はまだ明らかでないが、一つの注目すべき点であろう。

5.4.3 燃焼器入口空気温度の影響 (参考資料)

使用した実験装置では、供試燃焼器入口空気温度を高めるに予熱燃焼器を用いるため、空気中に燃焼ガスが混入する。この状態では、入口空気温度の影響を正確に調べることができないが、参考資料を得るため実験した。結果を図 88 および図 89 に示す。図 88 の全炭化水素 (THC) については、試料ガス採取系に加熱ラインを用いていないため、測定精度が低く、その傾向については何ともいえない。CO 排出指数は入口空気温度上昇と共に低下するが、実験した 2 種類の燃焼器について、大きな開きはない。図 89 によると、NO_x 排出指数の入口空気温度上昇にともなう増加割合は、燃焼器によって異なることを示している。

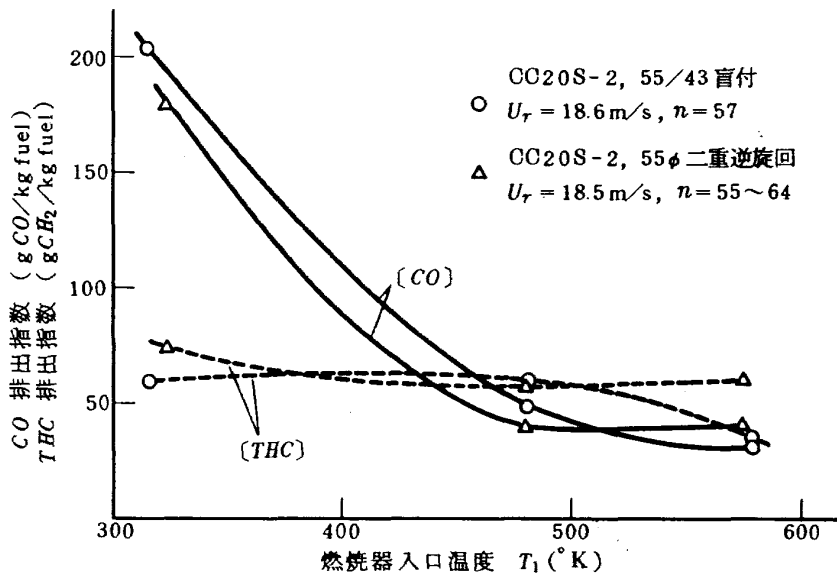


図 88 燃焼器入口空気温度の CO, THC 排出指数に及ぼす効果

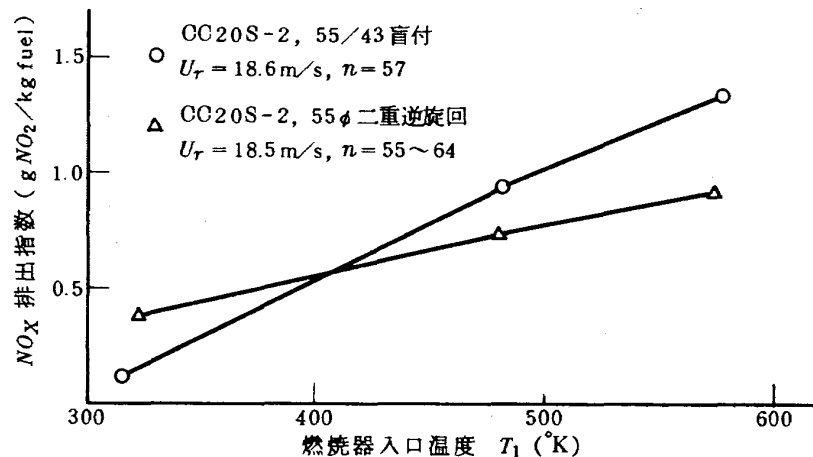


図 89 燃焼器入口空気温度の NO_x 排出指数に及ぼす効果

6. まとめ

ガスタービン用アニュラ形燃焼器の分割模型としての箱形燃焼器模型を用い、ライナとして主流方向に空気孔3個の形と4個の形の2種類、スワラ付近として4種類のもの組合せて大気圧燃焼実験を行なった。測定は主にガス組成とし、燃焼器内部および出口のガス分析を行なった。

内部ガスの分析は、 CO_2 、 CO 、 O_2 、 NO 、 NO_x 、および THC の各成分をとりあげ、ライナ面に対して平行なスワラ中心断面をスワラ付近から燃焼領域出口（希釈領域入口）までトラバースして行ない、これから、各成分の濃度分布図、局所当量比分布図および酸素消費効率分布図を描いて検討した。その結果、次の事柄が判明した。

(1) 燃焼性能向上のためには、なるべく燃焼器上流側で酸素消費効率を高める必要がある。酸素消費効率の高まった ($\epsilon \geq 90\%$) 直後にライナからの空気噴流を入れると効率低下をもたらして好ましくない。ただし、上流側で酸素消費効率が低くても局所当量比 $\phi_l = 0.8 \sim 1$ の領域が広がっていれば、出口燃焼効率は高くなる。

実験に供した燃焼器では、最大断面平均風速をかえたことによる内部ガス濃度分布の変化が相当に大きいと推測された。これは、今後、実験的に調べる必要がある。

(2) 燃焼領域内の CO_2 、 CO 、 O_2 の各局所濃度は互によく対応している。ただし、 CO/CO_2 濃度比と局所当量比との関係は、 $\phi_l > 1$ の範囲で燃焼器形式による差がある。 CO 濃度は、平衡濃度より高めである。

(3) 循環流領域内の NO 濃度は、プロパン-空気予混合気バーナにみられるいわゆる Prompt NO の濃度に近い。また、これは温度にあまり依存していないようである。

NO_2 は、二次空気導入後に検出され、下流側に行くに従って濃度が増加する。その増加割合は $\phi_l = 0.8 \sim 1$ (特に 0.85 付近) の範囲が大きい。この NO_2 濃度は、わずかな状態の変化で大きく変動する。

上流側の NO_2 は、 $\phi_l \leq 1$ 、 $\epsilon \geq 90\%$ の条件が満足される状態でのみ検出されたが、これは分析計のコンバータの特性によるものと推定される。

(4) 供試燃焼器の出口における THC 排出指数は、その測定精度に問題はあがあるが、各種エンジンの排気測定結果とほぼ一致した。しかし、 CO 排出指数は、本実験の場合のほうがはるかに大きく、この原因を追求する必要がある。

(5) 供試燃焼器出口の NO_x 排出指数には、局所当量比に対し二つの傾向がある。一つは局所当量比増加による排出指数の増加が少なく、他は多い。この傾向は、本実験の内部ガス測定結果と関連がなく、測定断面以外の領域の影響によるもので、さらに他の断面についての内部ガスの測定が必要である。

(6) 入口空気温度上昇にもなる NO_x 排出指数の増加割合は、燃焼器形式によってことなる。

以上のように、まだ明らかでないことが多く、これらの解明には、内部ガス濃度分布に及ぼす最大断面平均風速の影響、入口空気温度の影響を調べること、ことなる燃焼器断面についての測定などを行ない、資料の充実をはかる必要がある。

文 献

- 1) Federal Register, Vol. 38, No. 136, Part 87—Control of Air Pollution from Aircraft and Aircraft Engines, (July 17, 1973).
- 2) Aircraft Engine Emissions Study Group (AEESG) Memorandum No. 2, No. 11, (ICAO).
- 3) 鈴木邦男, 石井浅五郎; FJR エンジン用高圧形セクタ燃焼器模型の実験 (I), 航技研資料 TM-265 (1974-10) 「配布先限定」
- 4) 鈴木邦男, 石井浅五郎; FJR エンジン用高圧形セクタ燃焼器模型の実験 (II), 航技研資料 TM-269 (1975-1) 「配布先限定」
- 5) R. D. Ingebo, A. J. Dockocil, and C. T. Norgren; High-Pressure Performance of Combustor Segments Utilizing Pressure-Atomizing Fuel Nozzles and Air Swirlers for Primary-Zone Mixing, NASA TN D-6491 (Sept. 1971).
- 6) 鈴木邦男, 田丸 卓, 堀内正司, 斎藤 隆; ガスタービン燃焼器, 航技研報告 TR-208 (1970-9) p.20
- 7) 鈴木邦男, 斎藤 隆, 江口邦久, 石井浅五郎, 山田秀志; 航空用ガスタービン燃焼器における排気制御の研究 (IV), 航技研資料 TM-288 (1975-12)
- 8) 田丸 卓, 鈴木邦男, 相模 滋, 桜沢義男, 山田秀志; 燃料蒸発管に関する研究 (V), 航技研資料 TM-301 (1976-5)
- 9) F. W. Lipfert; Correlation of Gas Turbine Emissions Data, ASME Paper No. 72-GT-60, (1972).
- 10) 小笠原光信, 高城敏美, 藤井健一; 燃焼ガス中の NO および CO の生成とその低減法に関する基礎的研究 (第2報), 日本機械学会論文集 39 巻, 327 号

(昭 48-11) p. 3427

- 11) 相波哲朗；航空用ガスタービン燃焼器における排気制御の研究(Ⅱ)，航技研資料TM-273(1975-1)
- 12) 佐野妙子；窒素酸化物発生の基本理論，日本ガスタービン学会報，Vol. 3, No. 11(1975-12)p. 3
- 13) 鈴木邦男，齋藤 隆，山田秀志，平田 宏；航空用ガスタービン燃焼器における排気制御の研究(Ⅲ)，航技研資料TM-274(1975-1)
- 14) 大塚貞吉，齋藤 隆，堀内正司，本間幸吉，宮坂彰；ガスタービン用罐形燃焼器における燃焼領域のガス組成と燃焼状態，航技研資料TM-166(1969-11)

航空宇宙技術研究所資料306号

昭和51年8月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺町1880
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182
印刷所 株式会社 共 進
東京都杉並区久我山4-1-7(羽田ビル)
