

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-288

航空用ガスタービン燃焼器における排気制御の研究 (Ⅳ)

— 一次燃焼領域模型による内部ガス濃度の測定 —

鈴木邦男・江口邦久・斎藤 隆
石井浅五郎・山田秀志

1975 年 12 月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

項 目	担 当 者
実 験 ・ 計 測	外山 郁子* 佐々木宣卿**, 酒井 規行**

* 原動機部アルバイト

** 川崎重工業（株）

航空用ガスタービン燃焼器における排気制御の研究 (IV)*

——一次燃焼領域模型による内部ガス濃度の測定——

鈴木 邦男** 江口 邦久** 斎藤 隆**
石井浅五郎** 山田 秀志**

1. は し が き

ガスタービンの排気中に存在する大気汚染成分の生成には、燃焼器の一次燃焼領域が大きな影響を及ぼしていると考えられる。実際の燃焼器では、その一次燃焼領域のみを取上げてもライナ空気孔の影響や燃焼器下流側の影響が含まれて複雑であるため、簡単化した模型として、うず巻噴射弁とスワローを組合せたものを考え、ライナ空気孔は省略した。代表寸法としてのダクト径は315 mmφと500 mmφである。大気圧燃焼実験の結果、315 φと500 φ模型では、燃焼性能上の差は少ないが、 N O_x 濃度の傾向については、相当な差を生じ、興味ある資料を得た。なお、実機の高空気圧状態の推定は、(圧力)×(寸法)を一定に保つという、いわゆるPL Scalingを考えている。¹⁾ そのため、模型の代表寸法 L を実機燃焼器の4～6倍と大きくした。ただし、PL Scalingの実証は、まだ行っていない。

2. 燃焼器模型の設計

実験に用いる燃焼器模型は、ガスタービン燃焼器に広く用いられているうず巻形燃料噴射弁とスワローを組合せた形を考え、ライナ空気孔からの二次空気供給を省略した簡単な形を対象に設計した。これは、スワロー下流側に形成される循環流領域内の様子を主に考えることにし、循環流を乱す因子を除いて一般的に利用できる資料を得ることを目的としたためである。

2.1 燃料噴射弁

使用する燃料噴射弁について次の諸点を考慮した。

(1) 使用燃料は液体燃料として、単純うず巻噴射弁を用いる。

(2) 燃料噴霧の形は、一般のガスタービン燃焼器に用いられている通称ホローコーン(燃料が噴霧円錐面上に多く配分される形、ソリッドコーンに対するもの)とす

る。

(3) 噴霧角は $60^{\circ} \sim 90^{\circ}$ の範囲とし、実験的に燃焼性能に対して最適のもの一種類を選定する。

(4) 燃料噴射圧力は、噴射弁の微粒化特性と実用的な圧力、噴射弁の耐久性とのかね合いから $P_f = 4 \sim 30$ $kg/cm^2 G$ とし、これから実験範囲をカバーする噴射弁容量を選定する。

このような燃料噴射弁の設計資料は充実しており、設計・試作は困難でないが、製作コストや納期的な面から市販のバーナ用ノズル(Delavan社製)を用いることにした。噴射弁の構造概要を図1に、外観を図2に示す。噴射弁容量30 GPH以下は外形が同一で小型にまとめられているが、45～70 GPHのものは大きくなっている。実験に用いた噴射弁容量を表1に示す。噴射弁容量の単位GPHは、「Gallon / hour」の意味で、噴射圧力125 psi(8.8 $kg/cm^2 G$)のときの流量を示している。

表 1 使用した燃料噴射弁の呼称容量

模型寸法	燃料噴射弁容量 (GPH)	
	WA型	L DA型
315 φ	6.0, 12.0, 20, 30	
500 φ	6.0, 12.0, 20, 30	45, 70

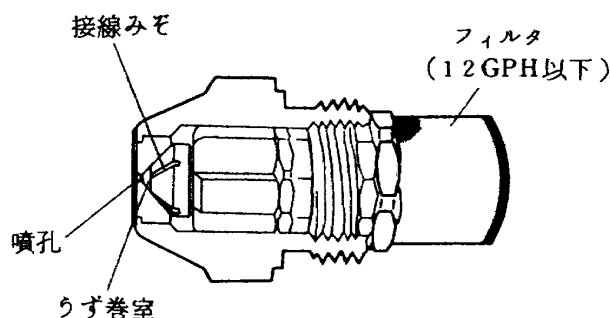


図 1 燃料噴射弁構造概要

* 昭和50年9月1日受付

** 原動機部

2.2 スワーラ

スワーラについて次の点を考慮した。

- (1) スワーラ形状は、標準的な性能を得ることを目的として軸流形とする。
- (2) スワーラ外径は、これまでの実験結果²⁾などをも

とにダクト呼称径の1/2とする。

- (3) スワーラ旋回羽根角度は、一般に良好な性能の得られる 45° とする。³⁾ 旋回羽根のピッチ/コード比は、別に行なった実験の結果⁴⁾から流れの旋回速度成分が充分とれる値に選定する。なお、旋回羽根は製作精度の点

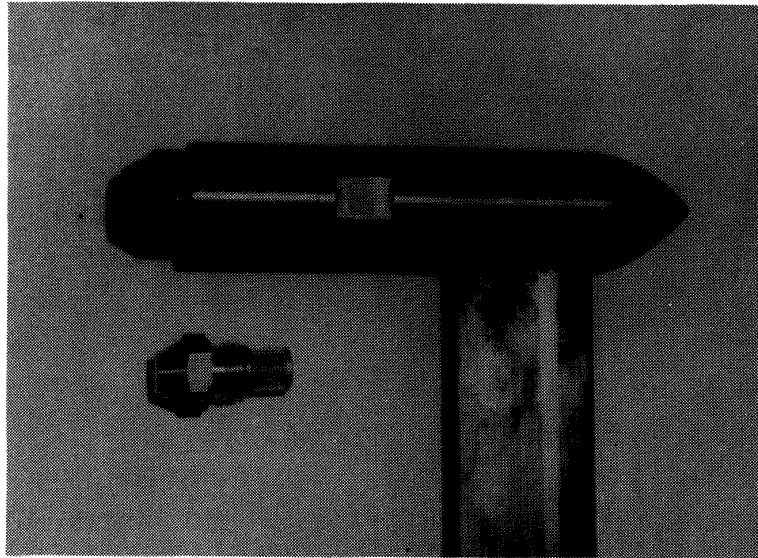


図 2 燃料噴射弁外観
小容量のWA型(下)と大容量のLDA型(上, 支持部付)

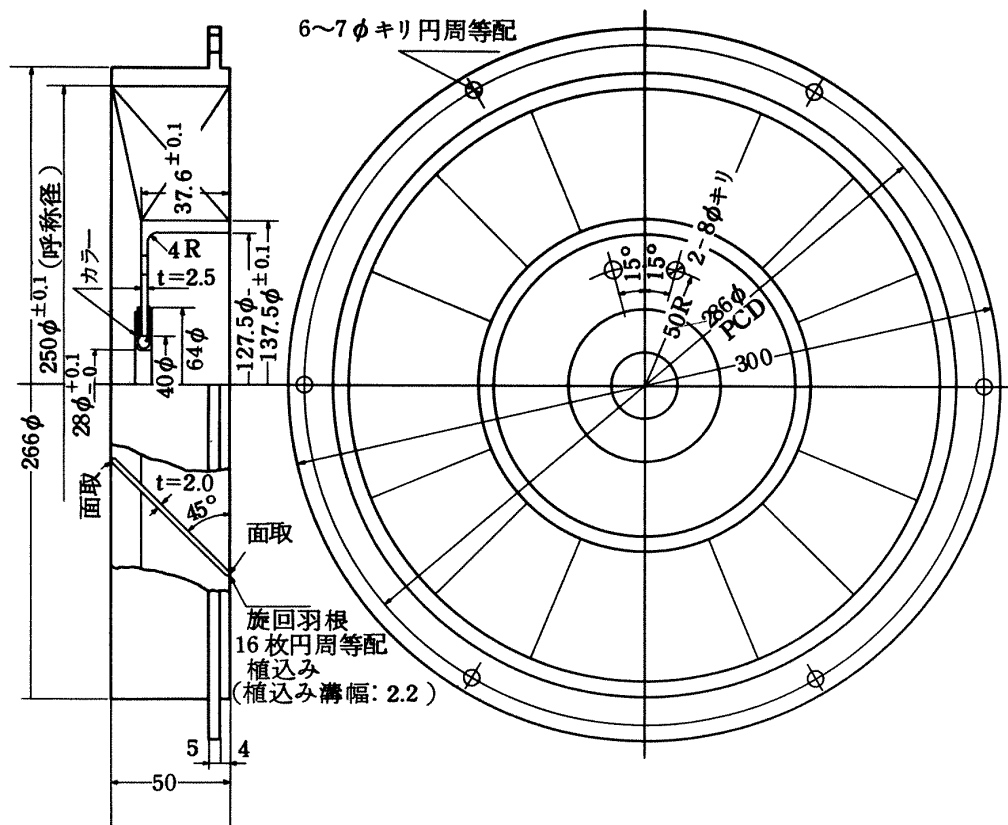


図 3 呼称250φスワーラ(500φ模型用)

から平板とした。

(4) スワラ内径／外径比は、軸流スワラの実例の平均的な値として0.55とする。

試作した500φ模型用の250φスワラの図を図3に、この外観を図4に示す。315φ模型用の157.5φスワラは、その主要寸法を図3の $157.5/250=0.63$ 倍にしている。

2.3 スワラ・コーン

スワラ出口の空気流は、出口側の壁面広がり角度が

小さいと壁面に沿うが、広がり角度が大きいとばかりして二次的な循環流をつくる。

今回の実験では、原則として二次循環流を作らない方式とし、スワラ出口円錐面(以下スワラ・コーンと呼ぶ)の頂角の主循環流に及ぼす影響を調べるため、頂角 60° 、 90° の二種類のものを考えた。

2.4 ケーシング

燃料噴射弁、スワラおよびスワラ・コーンをおさめるものである。315φ模型では、ケーシングに摺動

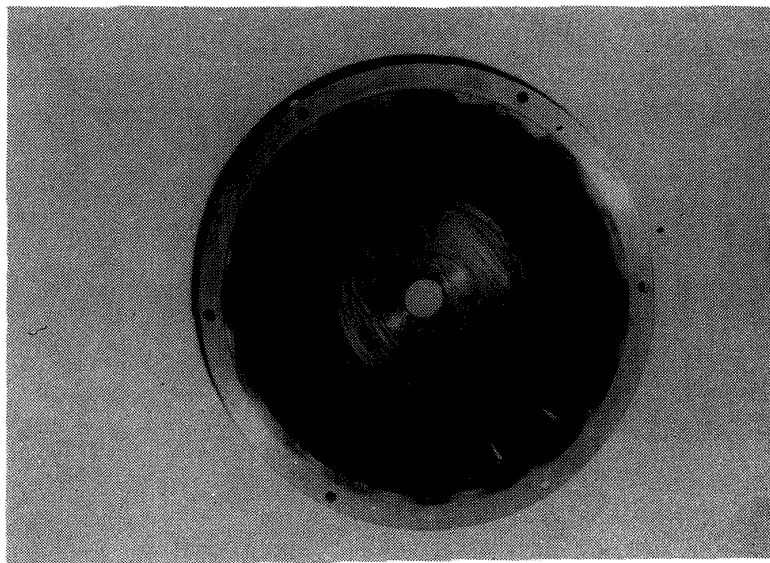


図 4 250φスワラ外観(点火用コイル付)

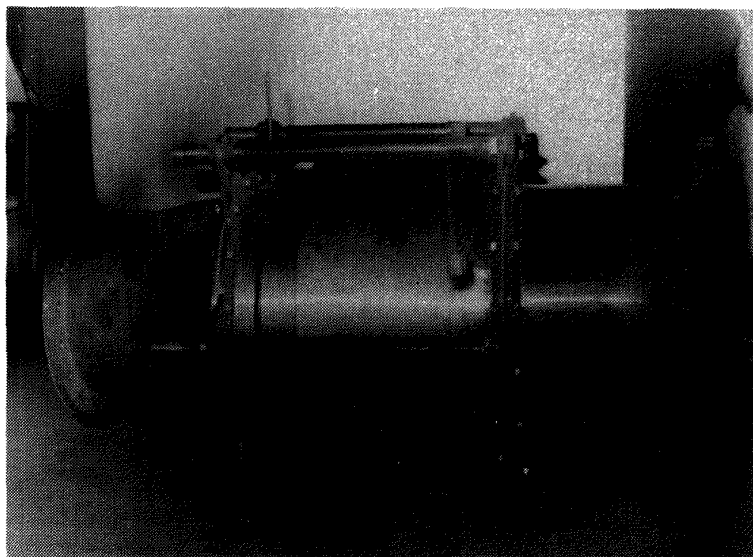


図 5 315φ燃焼器模型外観

部分を設け、燃料噴射弁とスワラとの軸方向相対位置を調整できるようにする。このため、ケーシング外側に6本のステーをつけ、その長さをねじによって調節できるようにした。500φ模型は大きくて、ケーシングの摺動がむずかしいため、燃料噴射弁取付部に短管を入れ、短管長さをかえることによって噴射弁位置を調節するようにした。

2.5 出口ダクト

ケーシング出口部には、呼称径をもつ出口ダクトをつける。これについて次の点を考慮した。

- (1) 出口ダクトの長さは実験的に定める。
 - (2) 出口ダクトは鋼板製とし、必要があれば空冷する程度にとどめる。
 - (3) 計測座として、外径8mmのプロープが挿入できる座をつける。
 - (4) 適当な箇所に直径30mm程度の覗き窓をつける。
- ## 2.6 その他
- (1) 各部品の組立はボルト止めとし、容易に分解できる構造とする。
 - (2) 大気圧燃焼のみを考えているので、軽量にまとめ

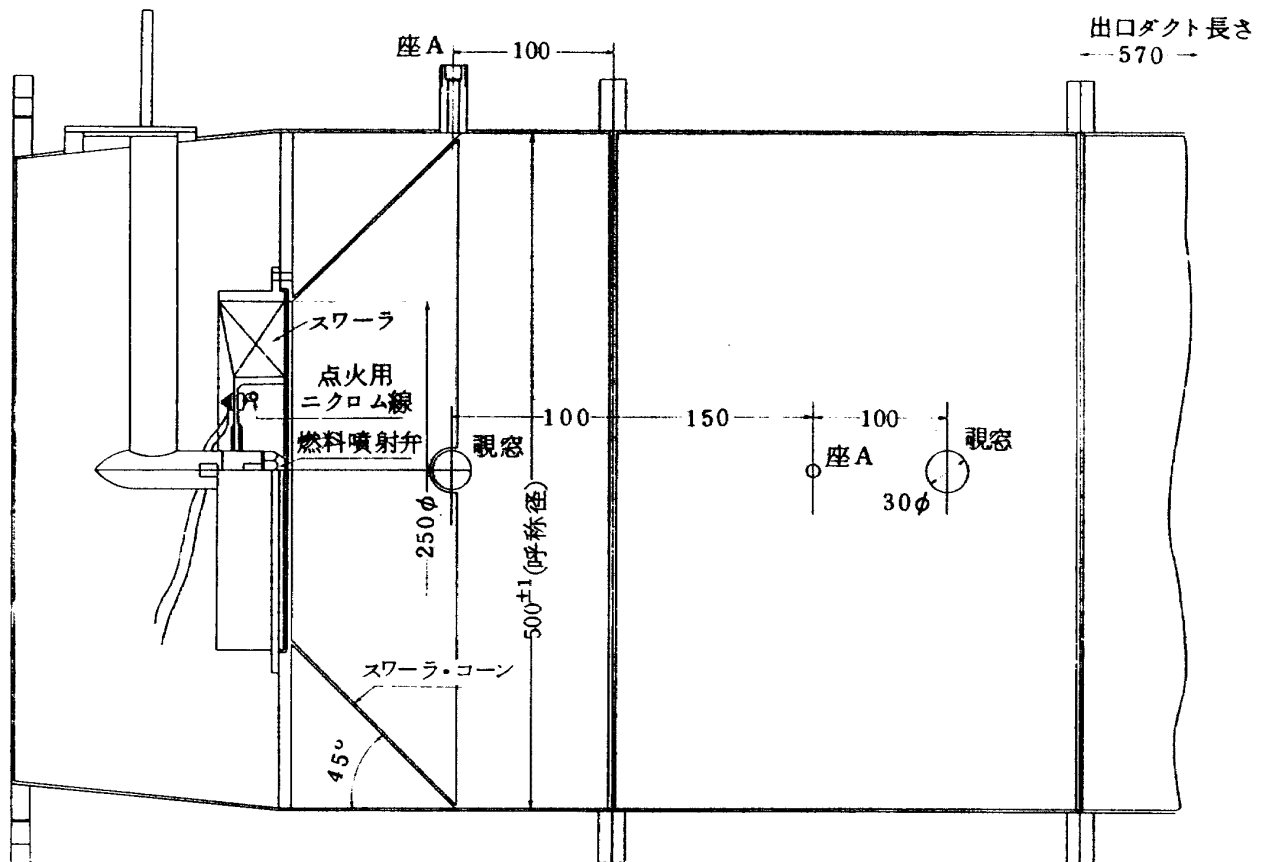


図 6 500φ 燃焼器模型

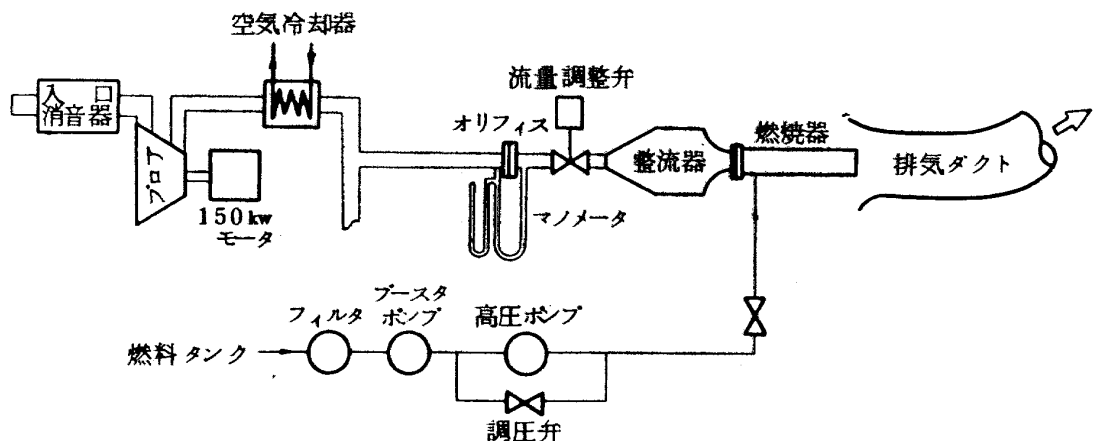


図 7 実験装置系統図

る。

(3) 315 ϕ 燃焼器模型の外観を図5に、500 ϕ 模型の断面図を図6に示す。

3. 実験装置・測定器類

実験装置は、当所原動機部の罐形燃焼器試験設備のセクタ燃焼器試験系を使用した。この系統図を図7に示す。

空気流量測定用オリフィスの公差限界は、設計条件で0.46 kg/sであるが、実験条件によってはこれより流量の少ない範囲も使用したので、流量の少ない条件の測定精度はいくぶん低下している。

燃料流量計はピストン形容積式である。これは少流量において内部リークによる誤差が多くなり、補正をしても精度が低下する。このため、流量の多い範囲からの噴射弁圧力-流量特性による推定値と併用して求めた。

流れ模様は、非燃焼状態で測定した。この測定に用いたストリーマを図8に示す。図8中の白のもめん糸の長

さは実験的に選定した。

温度測定に用いた熱電対は、素線径0.5 ϕ PR熱電対で、熱接点を露出させている。冷接点は常温で起電力をmV計にて読取り、温度に換算した。

ガス分析は、図9に示す水冷のステンレス製試料ガス

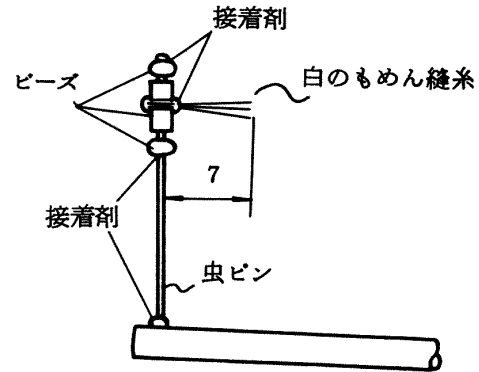


図8 流れ模様測定用ストリーマ

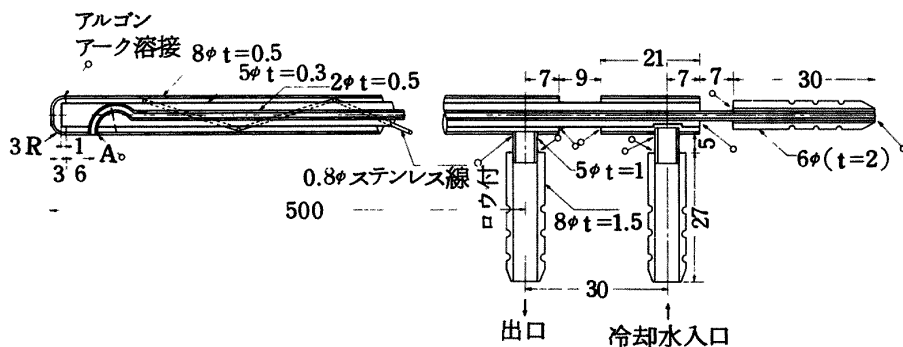


図9 試料ガス採取管

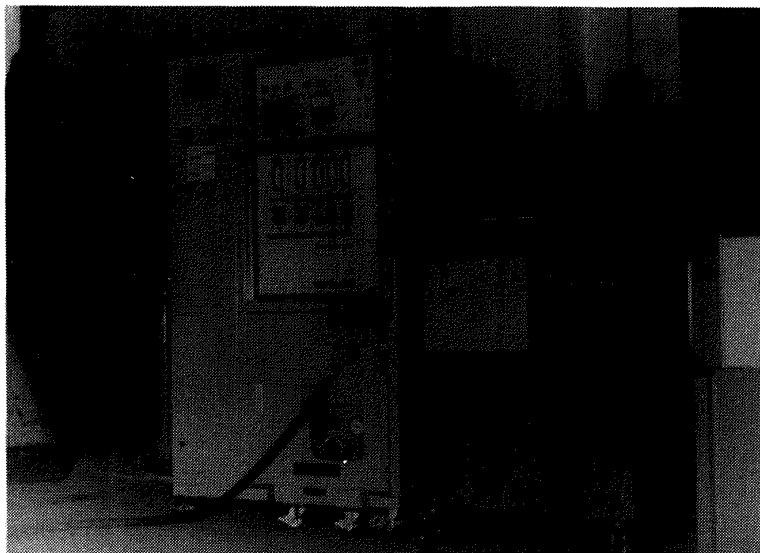


図10 MEXA2000S外観

採取管にて試料を採取し、ガスタービン内部ガス濃度分析計で分析した。この分析計（堀場製作所製 MEXA 2000S）の主要性能を表2に示す。⁵⁾ 図10はMEXA 2000Sの外観である。試料ガスラインはテフロンチューブの非加熱式であるので炭化水素の測定は行なわないことにした。炭化水素の測定としては、加熱ラインとベックマン社のFID（表2参照）を組合せて1回行なったのみである。

4. 実験条件と予備実験

4.1 実験条件

燃焼器出口側を大気開放とし、入口空気温度を約40℃に保って実験を行なった。

空気流量は、非燃焼時のダクト平均風速をジェットエンジンやガスタービン燃焼器の一次燃焼領域の平均風速に合せることから $U_m = 2 \sim 8 \text{ m/s}$ とした。表3は、実例について推定した平均風速である。

空燃比は、理論混合比のとき $n_{st} = 14.8$ になるが、模型出口までに完全燃焼する可能性を考え、これより大きな空燃比の範囲とした。使用燃料はジェット燃料Jet A-1である。

流れ模様の測定の際の風速は、大きくとるとストリーマの支持部が振動して観察がむずかしくなり、小さくとると流速のおそい部分の流れの方向がわかりにくいいため、これらのかね合いから測定しやすい状態として $U_m \sim 2 \text{ m/s}$ 前後とした。

4.2 予備実験

試作した燃焼器模型は、燃焼性能の調整のため、構造的に可変箇所を多くとっているが、これらの組合せをすべて実験すると膨大な量にのぼり、実験パラメータの減

少を目的に予備実験を行なった。

4.2.1 スワラ・コーン角度の選択

スワラ・コーンは、前述のように、頂角にして60°と90°の2種類のものを製作したが、このうちのどちらを本実験に用いるか流れ模様の測定により判定した。315φ模型の流れ模様の測定結果を図11(a), (b)に示す。スワラ・コーン角度の差異による流れ模様のちがいは、本質的にはないが、コーン角度90°のほうが次のような点で好都合と思われ、これを採用することにした。

(1) トロイダルボルテックスのうず中心は、両者とも細長くのびているが、コーン角度90°のほうが歪みが少なく、素直な形をしている。

(2) トロイダルボルテックスのうず中心は、コーン角度90°のほうが、いくぶん上流側に寄り、燃料噴霧をうず中心に向けて噴射するように考えると、このほうが良好な性能を得ることに対し有利と思われる。

4.2.2 出口ダクト長さ

出口ダクト長さが短かいと、ダクト出口端から大気が

表 3 燃焼器実例から推定した一次燃焼領域の平均風速

種類	U_m m/s	摘 要
ジェットエンジン	5.65	J.S. Clarke, 1955 ⁶⁾
	6.67	JR100 (航技研) ⁷⁾
	5.4	JR200 (航技研, 原型) ⁸⁾
	≈7.0	JR200 (航技研) ⁹⁾
ガスタービン	3.7	小型汎用ガスタービン ¹⁰⁾
	3.8	船研, 小型模型 ¹¹⁾
	1.46	大型ガスタービン ¹²⁾

表 2 ガス分析計主要性能

測定成分	測定器形式	濃 度 レ ン ジ
MEXA 2000S		
全炭化水素	FID	0~200, …… , 0~100000 ppm C9 レンジ
窒素酸化物	CLD	0~10, …… , 0~5000 ppm 9 レンジ
一酸化炭素	NDIR	0~5, 0~15% ダブルレンジ
二酸化炭素	NDIR	0~5, 0~15% ダブルレンジ
酸素	磁気モーメント	0~2.5, 5, 10, 25% 4 レンジ
ベックマン 402型		
全炭化水素	FID	0~5 ppm, …… , 0~1% C 8 レンジ

FID: 水素炎イオン化検出器

CLD: 化学発光式

NDIR: 非分散形赤外線吸収

循環流領域内へ吸引され、これによって燃焼状況が大きく影響される。

はじめ計画したダクト長さは、スワラ出口面から $1.22 D_n$ (D_n はダクト呼称直径) で、大気吸引がみられたため、これを防ぐ目的から出口絞り板として、ダクト中央に孔を1個あけたものとダクト外周側に孔を8個等配したものの2種類について実験したが、いずれも循環流領域の形状が歪み、火炎安定性が低下した。これから、

出口ダクト長さをのばすことにし、各種の出口ダクト長さについて流れ模様を測定した。その結果、ダクト長さを $3 D_n$ 以上にすればよいことが判明し、この状態で燃焼実験を行なった。¹³⁾

4.2.3 燃料噴霧角の選定

燃料噴霧は、トロイダルボルテックスのうず中心付近へ向うよう調整するとよいといわれている。¹⁴⁾ 循環流領域、トロイダルボルテックスのうず中心と燃料噴霧との

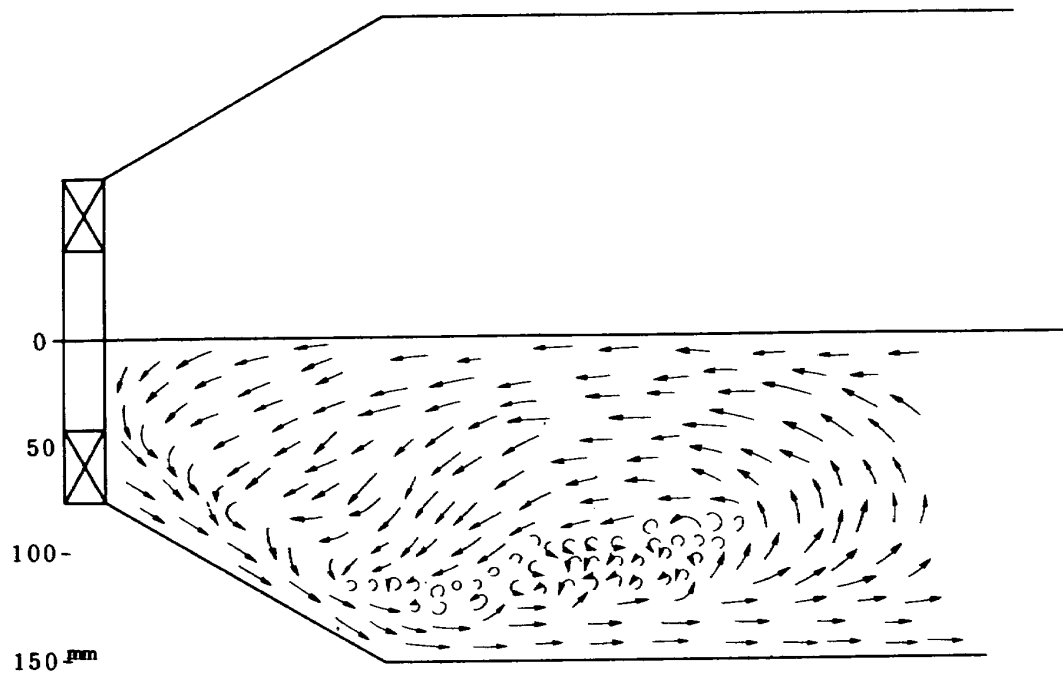


図 11(a) 315φ, 60°コーン付の流れ模様

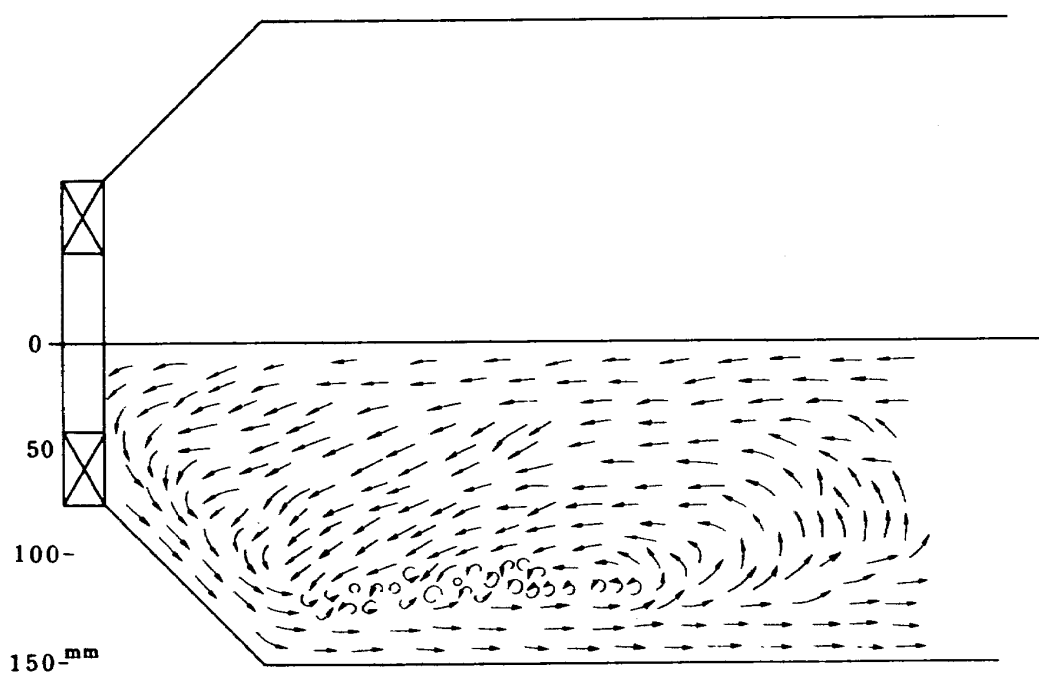


図 11(b) 315φ, 90°コーン付の流れ模様

相対位置を図12に示す。噴霧角 90° のとき、燃料噴霧は、循環流領域の境界に近いところを通り、トロイダルボルテックスうず中心の上流端をかすめてダクト壁面に衝突する。噴霧角 60° のとき、燃料噴霧は、循環流領域内からトロイダルボルテックスうず中心のやや下流側を通してダクト壁面に衝突する。噴霧の気流中を通過する距離は、噴霧角 60° のときのほうが 90° のときより、単純に考えると1.4倍ほど長い。

燃焼性能上、噴霧角 60° と 90° の差は相当にあり、 60° のときのほうが良好であった。また、噴霧角 70° と 80° は、 60° と 90° の中間的な性能を示し、この間に最良の噴霧角の存在しないことを確認した。これから噴霧角 60° を採用したが、燃料噴霧について次の事柄が影響し合って燃焼性能に現われていると判断される。

- (1) 噴霧の循環流領域内を通過する距離
- (2) 循環流領域と噴霧の通過する相対位置
- (3) トロイダルボルテックスうず中心と噴霧の通過する相対位置

- (4) 噴射弁の噴霧特性（粒径分布、分散特性）

4.2.4 燃料噴射弁軸方向位置の選定

空燃比の大きな状態で噴霧弁とスワラとの軸方向相対位置をかえると図13に示すような変化が観察された。すなわち、上流側に噴射弁のあるとき（図13(a)）、火炎は循環流領域の境界に沿って広がり、空燃比を低下させると火炎はダクト断面にわたり、一様に長くなる。噴射弁を下流側に突出したとき（図13(b)）、火炎は広がらず毛筆の穂先のような形になり、空燃比を低下させると、ほぼ相似形を保ちつつ大きくなる。なお、この位置でも噴霧角の大きな噴射弁を用いれば（ $\alpha_f = 60^\circ$ から 80° にした）、広がった火炎が得られる。このほかに、燃料希薄側の火炎吹消え特性は図13(a)のほうが良

好、図13(b)は噴射弁の焼損する恐れのあること、相当地炭素堆積のあることなど観察された。以上のことから、今回の実験では図13(a)、(b)のほぼ中間をとり、スワラ出口面と噴射弁噴孔と揃えることとした。

4.2.5 測定位置

流れ模様の測定結果などから、スワラ取付面を基準として $1D_n$ 、 $2D_n$ 、 $3D_n$ の軸方向距離で半径方向にトラバースして測定することにした。 $1D_n$ 位置は、循環流領域内のやや下流寄りのところで、循環流内の様子を調べることを目的とする。これより上流側、たとえば $0.6D_n$ 位置では、ガス分析用試料採取孔が炭素と燃料油の

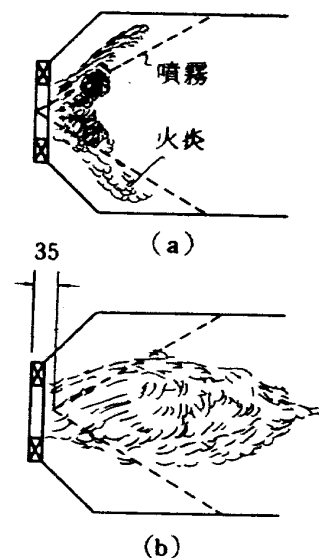


図13 燃料噴射弁軸方向位置と火炎形状の変化（ 315ϕ 模型）
 $U_m = 6.8 \text{ m/s}$, $n = 95$
 $(6\text{GPH}60^\circ \text{A}, P_f = 15 \text{ kg/cm}^2 \text{G})$

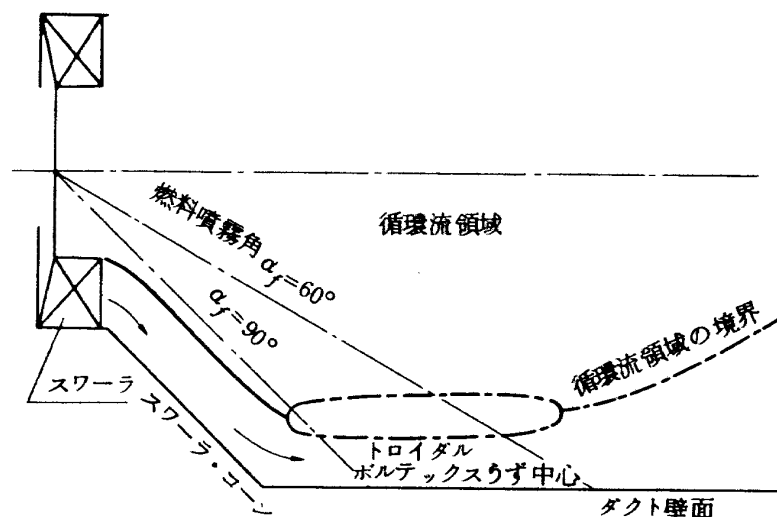


図12 燃料噴霧角と流れ模様との関係

混合した脂のようなものでつまりやすく、系統的な測定が困難であった。 $1.5 D_n$ 位置は循環流の下流端付近に相当し、 $2 D_n$ 位置では循環流領域出口の平均値が得られる。 $3 D_n$ 位置は、温度分布や濃度分布が $2 D_n$ 位置よりさらに均一化され、測定精度の点で $2 D_n$ 位置のものよりよくなる。

今回の測定としては、 $1 D_n$ 位置を主体とし、その他の位置は参考資料を得るためのものと考えた。

5. 流れ模様の測定結果

流れ模様の測定は、予備実験として行なったものであるが、ここで詳細に述べる。流れ模様は、図11に示すような形になっている。これを模式化して示したものを図14に示す。

スワラから流出した空気流は、スワラ・コーン壁面に沿って広がり、ダクト壁面に沿って流れる。この空気流の一部は、スワラ出口面からある距離のところでダクト中心部に向い、さらに上流側に向って流れる。ここに循環流が形成される。循環流のうず中心はリング状になり、これをトロイダルボルテックスと呼ぶ。トロイダルボルテックスのうず中心は細長く引延ばされている。

循環流領域より下流では、ダクト中心部分に流れの方向の判定し難いよどみ領域のようなものが細長く残り、その外径側は下流へ向う流れになっている。

詳細に調べると図14に示したように、循環流領域の下流側には、よどみ領域が入りこんだ形になっている。

流れ模様について 315ϕ と 500ϕ 模型の差異はほとんどない。ただ、 500ϕ 模型の場合、噴射弁近傍にある流れのよどみ領域が 315ϕ 模型のときより、いくぶん顕著にみられた程度である。

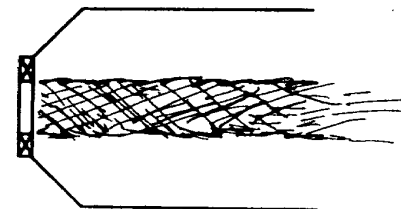
非燃焼時と燃焼時の流れ模様の相異は、重要なことであるが、燃焼時の測定がむずかしく、今回、燃焼時の循

環流領域長さが非燃焼時のものとほぼ同程度という判断をしたにとどまった。

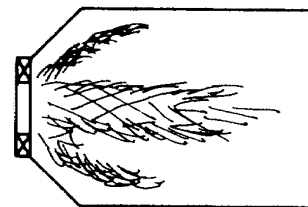
6. 火炎の様子

6.1 火炎の代表的な形状

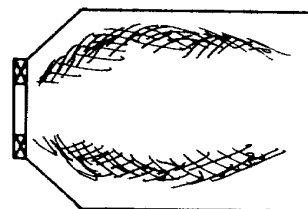
火炎の観察による空燃比をかえた場合の火炎形状の変化を模式化して図15(a)～(d)に示す。図15(a)の柱状火炎は、空燃比の大きな状態で現われ、火炎は全般に暗くすすを帯びている。火炎のまわりに白く燃料噴霧が見られる。図15(b)の火炎は、柱状火炎とカップ状火炎の中間的なもので、柱状火炎の外側に循環流領域の境界に沿う明るい火炎が生じている。この外側の火炎は、柱状火炎の外側に飛ぶ燃料の量が増加して火炎伝は限界内に入



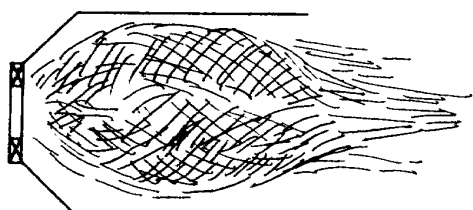
(a) 柱状火炎



(b) 柱状火炎からカップ状火炎への遷移状態



(c) カップ状火炎



(d) カップ状火炎の下流端が閉じた状態

図 15 火炎の代表的形状 (315ϕ 模型)

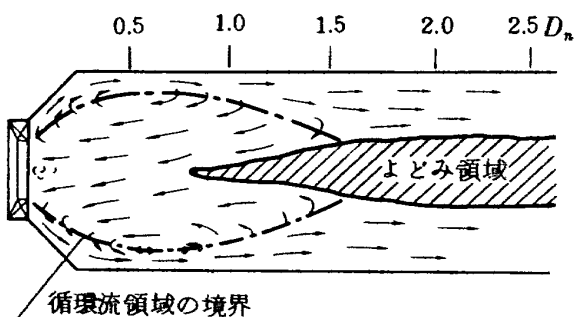


図 14 流れ模様概要

ったため生じたと推定される。この火炎は315φ 模型、には現われたが、500φ 模型では観察されなかった。

500φ 模型の場合、柱状火炎がふくらんでカップ状火炎に移っていく。燃料噴射弁とスワローとの相対位置は315φ 模型、500φ 模型とも相似にしているが、流れ模様のわずかな差異から、500φ 模型のときは、噴射弁を下流側に突出した効果が現われたと推定される。

図15(c)は、カップ状火炎と名付けたもので、柱状火炎は消え、循環流領域の境界に沿う明るい火炎のみとなる。図15(d)は、空燃比を低下させたときのもので、カップ状火炎の先端が閉じ、さらにダクト断面全体にわたって火炎ののびる状態である。

実験した範囲内で火炎は、すべて輝炎であった。

6.2 火炎形状と作動条件との関係

315φ 模型について調べた火炎形状と作動条件との関係を図16(a)(b)に示す。図中、柱状火炎の○印は、柱状火炎からそのまわりに火炎の生じてくる点で、この判定は個人差があると思われる。同一観察者の場合でも図に示した程度の開きがある。カップ状火炎の□印は、柱状火炎の消えた点(火炎中央が暗くなる点)で、判定は比較的容易である。カップの閉じた火炎の△印は、カップ状火炎が閉じて火炎中央部が明るくなる点で、この遷移も明らかであった。

図16(a)と(b)を比較すると、同一形状の火炎は、噴射弁容量の大きなもののほうが空燃比の小さな側に現われる傾向を示している。また、図16(a)の△印は、燃料流量の少ないとき、空燃比一定の線に沿うが、燃料流量 $G_f \sim 9.5 \text{ g/s}$ では空気流量に無関係になってしまう。図16(b)の火炎形状の遷移特性は、いずれもほぼ空燃比一定で変化することを示している。

図17(a)～(c)は、500φ 模型の火炎形状と作動条件の関係である。傾向は315φ 模型の場合と同様であるが、火炎形状の遷移が空燃比一定で起きるということは、噴射弁容量70 GPHを用いてもまだ現われていない。315φ 模型の場合にくらべ、同一噴射弁容量のとき、同一形状の火炎は、空燃比の大きな側に現われている。

7. 温度測定結果

315φ 模型について測定した温度分布の例を図18に示す。半径方向の温度分布は、比較的単純な形で、軸方向距離 $0.6D_n$ 位置を除き、大差ない。ただし、 $1D_n$ 位置までは、ダクト壁面に沿う冷空気流の影響から、壁面近傍の温度低下が大きい。このことから、作動条件による温度変化の傾向を調べる場合の代表温度として、 $1D_n$ 位置では循環流領域内に対応する比較的高温で一様な部分

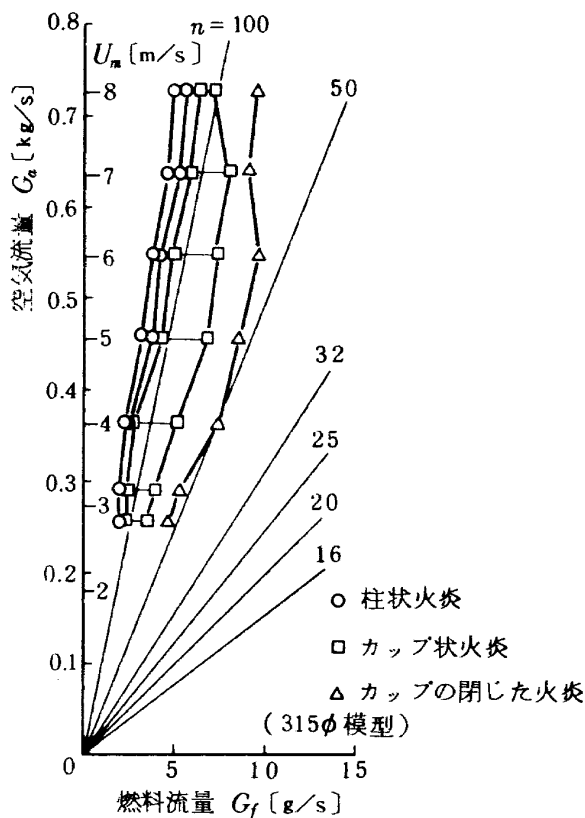


図 16(a) 315φ 模型の火炎形状と作動条件との関係

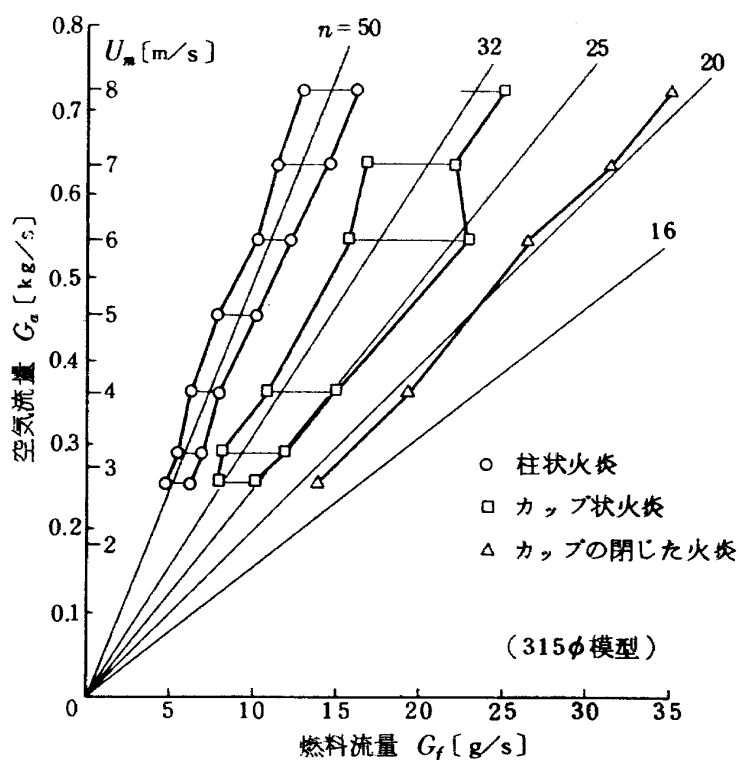


図 16(b) 315φ 模型の火炎形状と作動条件の関係 (噴射弁 30 GPH 60°C)

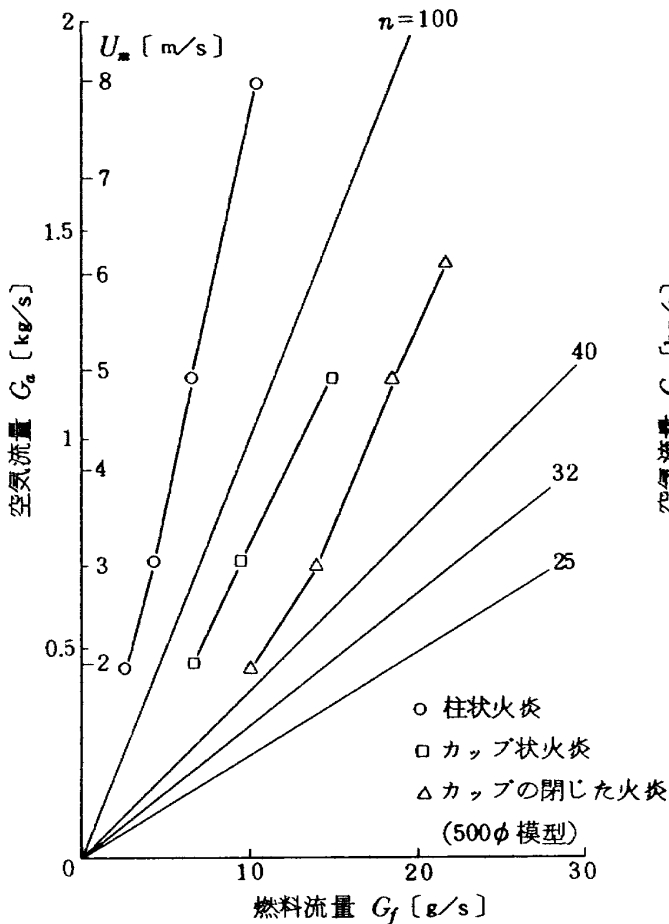


図 17(a) 500φ 模型の火炎形状と作動条件の関係 (噴射弁 12GPH60°A)

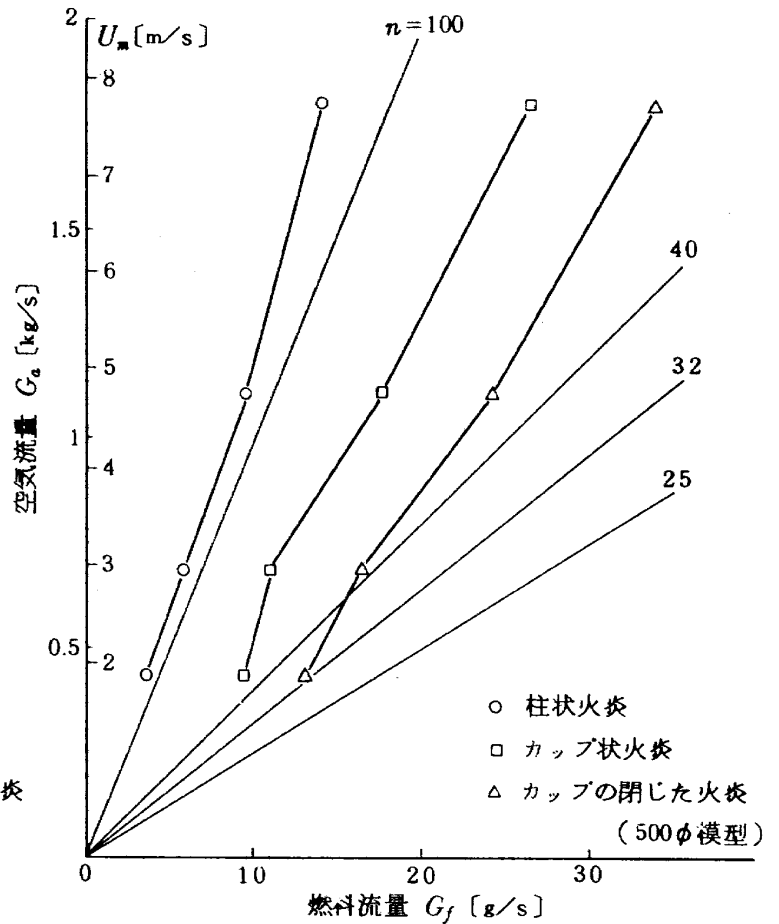


図 17(b) 500φ 模型の火炎形状と作動条件の関係 (噴射弁 30GPH60°A)

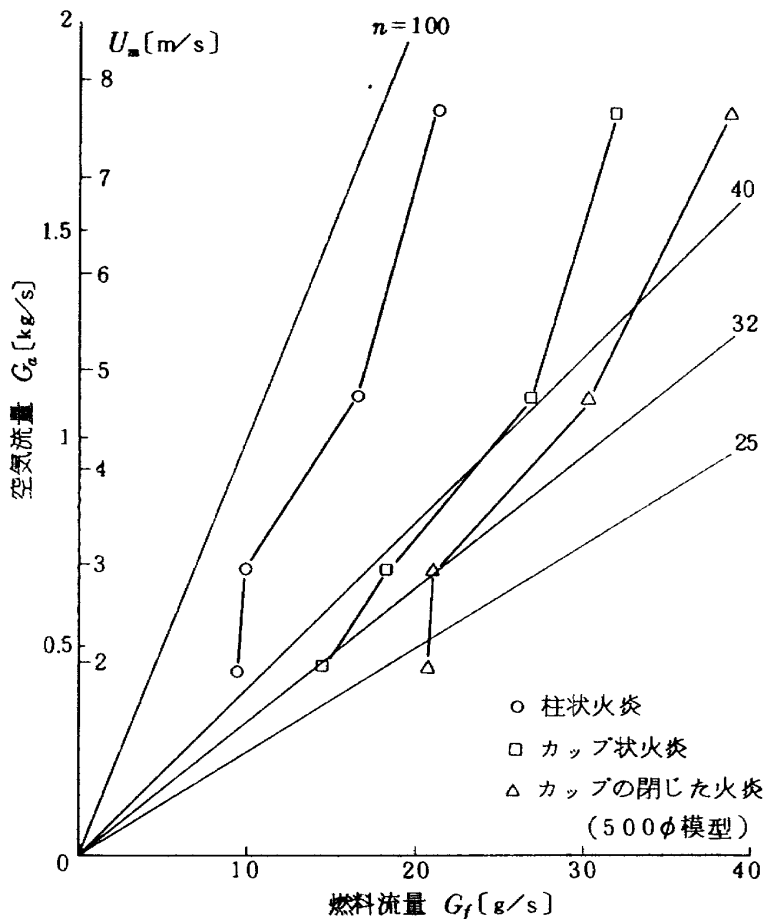


図 17(c) 500φ 模型の火炎形状と作動条件の関係 (噴射弁 70GPH60°A)

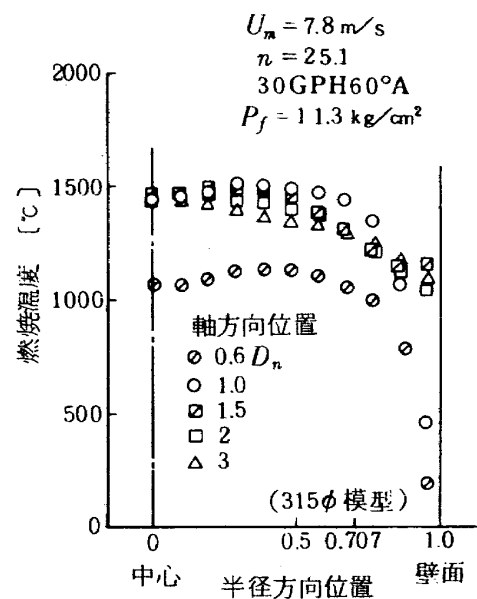


図 18 温度分布測定例

の算術平均値をとり、 $2D_n$ より下流側では、ダクト断面を二等分した半径の位置 ($0.707 \cdot D_n/2$) における値を採用した。これは測定値全体の算術平均値と大差ない値になっている。 $2D_n$ と $3D_n$ 位置では、傾向の差異は少ないので、 $3D_n$ 位置について検討した。

7.1 315φ模型の代表温度の傾向

$1D_n$ 位置における代表温度の傾向を図19に示す。これには、 $0.6D_n$ 位置における結果も併記した。熱電対の焼損から実験点数が多くとれなかったため、 $1D_n$ 位置における空燃比の代表温度に及ぼす影響は明らかでないが、 $0.6D_n$ 位置では顕著に現われ、また、噴射弁容量の影響が少ない。

図20は、平均風速の代表温度に及ぼす影響を調べた

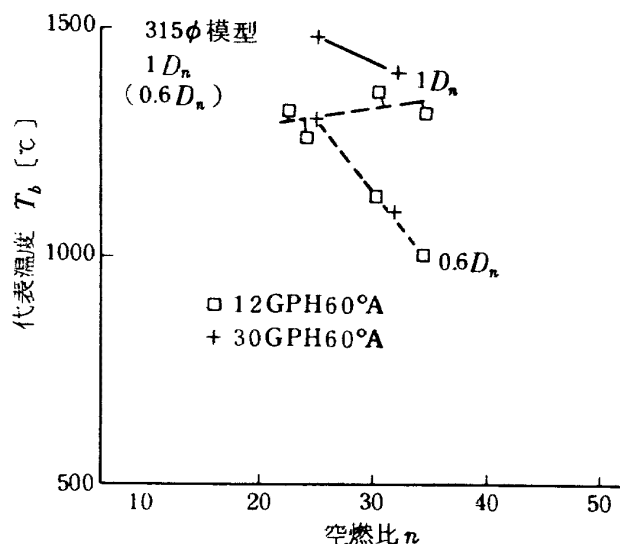


図 19 315φ模型, $1D_n$ 位置の温度の傾向
(空燃比の影響)

もので、やはり実験点数が少なくて明らかにしてはいないが、風速の大きなきほど温度の高くなること、 $U_m \leq 5\text{m/s}$ では、空燃比 $n < 30$ の範囲で空燃比低下により温度の低下することがみられる。

$3D_n$ 位置における代表温度の傾向を図21に示す。同図には、燃料の低位発熱量を $H_u = 10250\text{kcal/kg}$ とし、燃焼ガスのエンタルピを日本機械学会の数表¹⁵⁾から引いて求めた熱損失なしの温度計算値を示した。代表温度が計算値より低い温度になった原因は、次のようなことと考えられる。

- (1) 温度計に輻射損失などがあり、低め値を示している。
- (2) 代表温度が平均値を表わしていない。

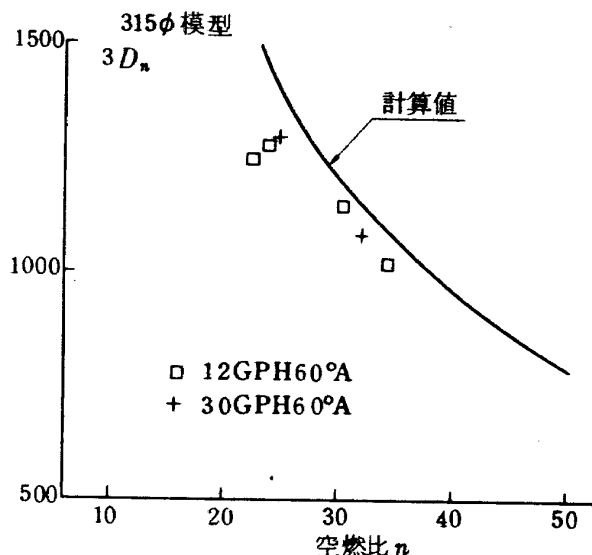


図 21 315φ模型, $3D_n$ 位置の温度の傾向

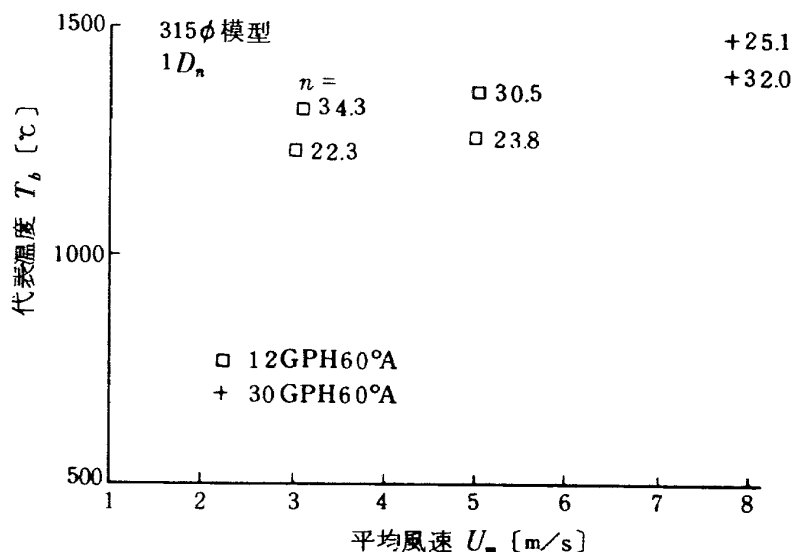


図 20 315φ模型, $1D_n$ 位置の温度の傾向 (平均風速の影響)

(3) $3D_n$ 位置でもまだ未燃焼部分が残っている。これは、空燃比が小さく火炎ののびる状態に考えられる。

(4) ダクトからの熱損失。空燃比 $n < 25$ ではダクトが赤熱し、熱損失として 5~10 % 程度が見られる。

7.2 500φ 模型の代表温度の傾向

$1D_n$ 位置における各状態の代表温度を図 22 に示す。同一空燃比でも温度に相当な幅があるが、全体として空燃比をかえても、あまり変化していない。図 23 は、平均風速の代表温度に及ぼす影響を調べたもので、これによると同一空燃比でも、風速を増すと温度の上昇する傾向を示す。燃料噴射弁容量の影響は、明らかでない。

図 24 は、 $3D_n$ 位置における代表温度を示したもので、 315ϕ 模型の場合と同様、計算値より低めになっている。

実験条件による温度差は相当に大きいですが、図 25 によると、風速の影響が相当に大きいと判断する。ただし、

$U_m = 5 \sim 8 \text{ m/s}$ の間の風速の影響はそれ以下の風速のときに比べて少ない。

7.3 315φ 模型と 500φ 模型の $1D_n$ 位置における代表温度の比較

図 26 は、 315ϕ 模型と 500ϕ 模型の $1D_n$ 位置における代表温度の比較である。ともに幅をもっているが、 500ϕ 模型のほうが同一空燃比に対し、いくぶん高めの温度を示す。なお、上記の温度修正を行なうことにより、 500ϕ 模型 $1D_n$ 位置の代表温度は、空燃比 30 以上で空燃比増加とともに低下する傾向が現われた。

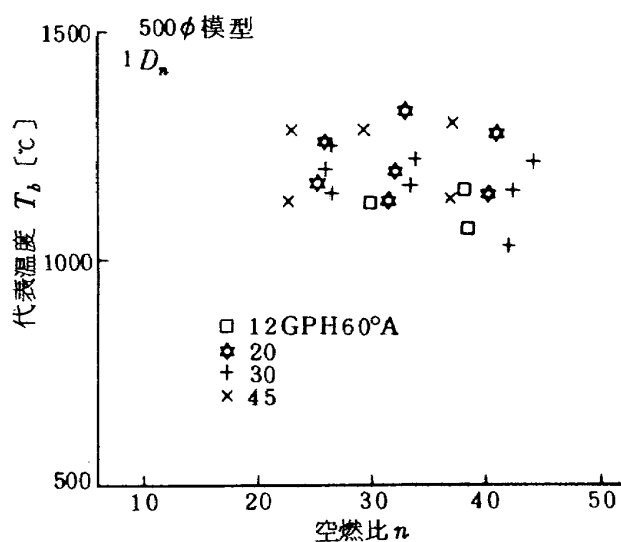


図 22 500φ 模型, $1D_n$ 位置の温度の傾向 (空燃比の影響)

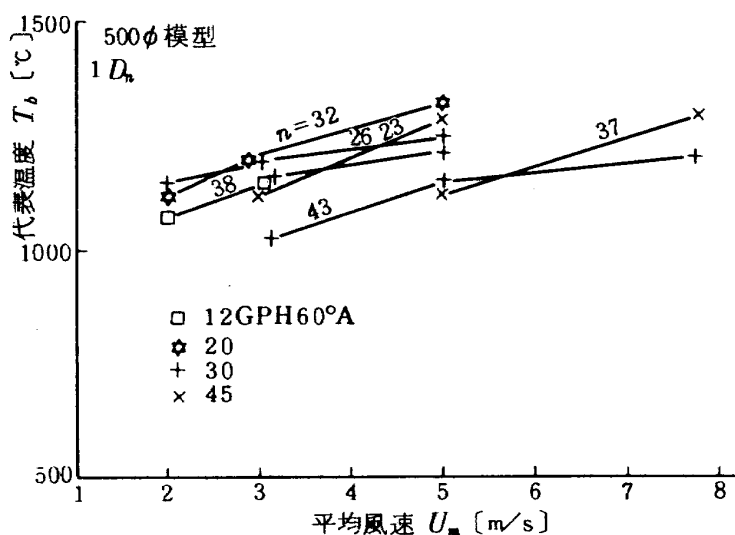


図 23 500φ 模型, $1D_n$ 位置の温度の傾向 (平均風速の影響)

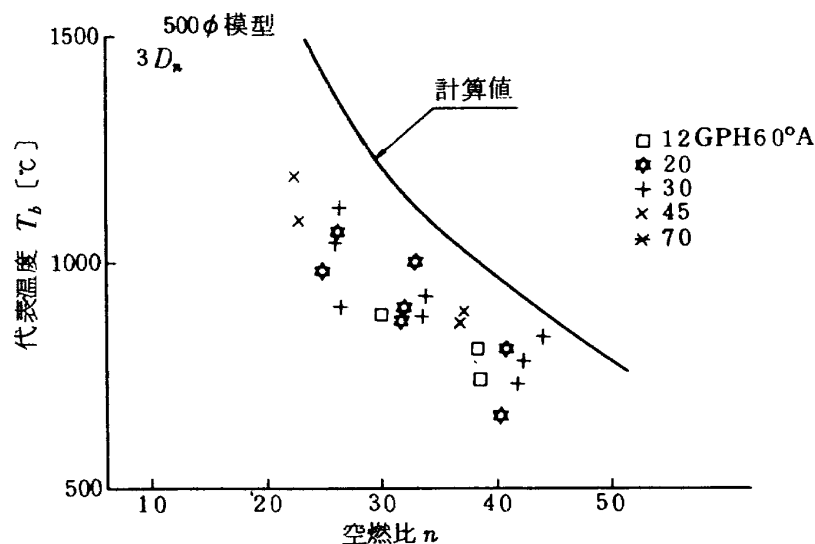


図 24 500φ 模型, $3D_n$ 位置の温度の傾向 (空燃比の影響)

温度測定の実験を行なったあとになって500φ模型のときに用いた熱電対は、315φ模型に用いたと同種の熱電対と比較して温度が低めにでる（起電力が小さい）ことが判明した。この差異を図27に示す。しかし温度検定を行なうと500φ模型の電電対も正常な起電力を示し、いずれが正しいか明らかでないので、前節の結果にはすべて測定値そのままを用いたが、315φ模型との比較においては図27の修正値を用いることにした。

8. ガス分析結果

8.1 半径方向の濃度分布

代表的な半径方向のガス濃度分布を図28(a), (b), (c) および図29(a), (b)に示す。実験条件をかえても濃度分

布形は、ほぼ同様である。ただし、COやNO₂濃度の分布形には、いくぶんかわったものがある。図28, 図29から次のようなことがいえる。

(1) 温度分布とCO₂濃度分布、CO₂濃度分布とO₂濃度分布は、よく対応している。

(2) CO濃度は、ダクト中心部で高くなる場合（図29(a)）と周辺で高くなる場合（図28(a)）とがある。前者は、平均風速のおそいときに現われやすい。

(3) NO濃度は、CO₂濃度と似た分布を示す。しかし、ダクト周辺ではCO₂濃度より濃度の低下が早くなっている。

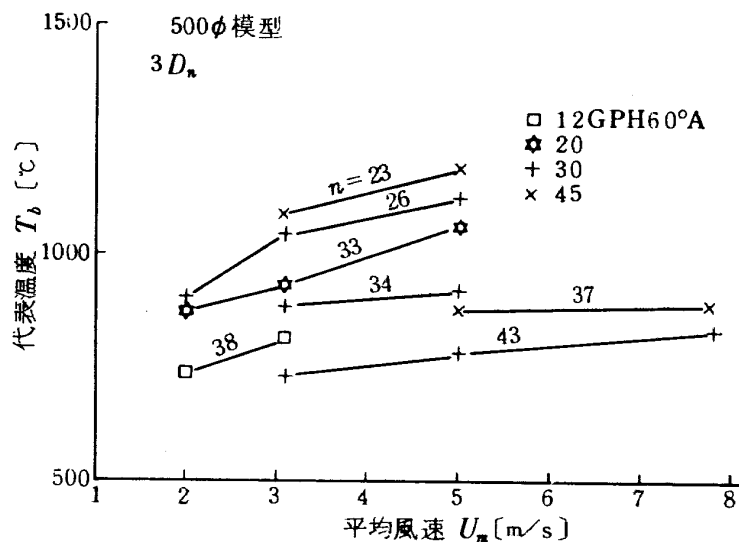


図 25 500φ模型, 3D_n位置の温度の傾向（平均風速の影響）

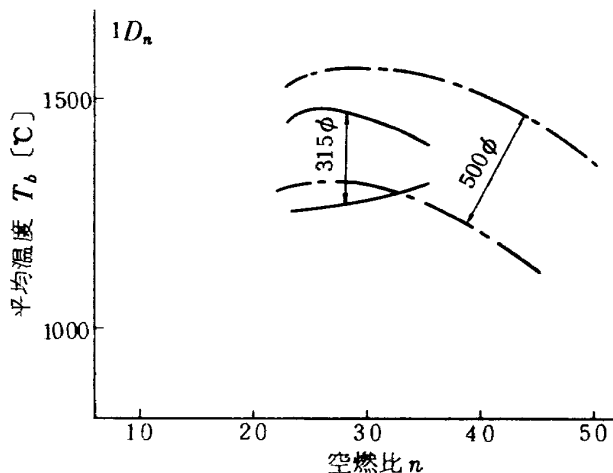


図 26 315φ模型と500φ模型の1D_nにおける代表温度の比較

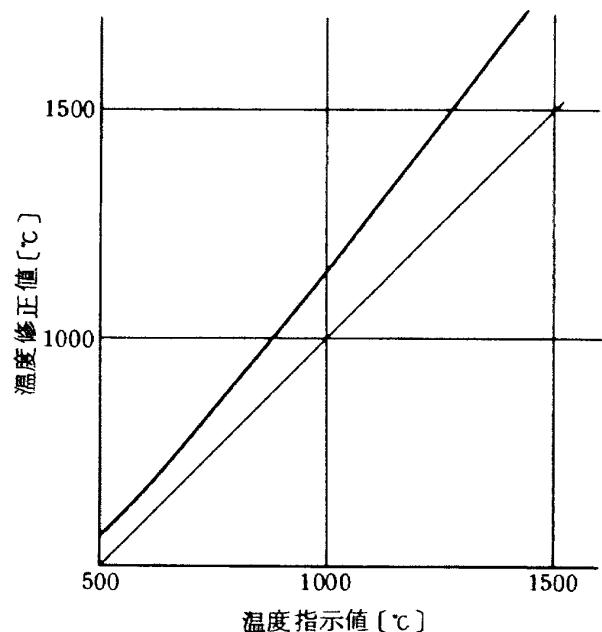


図 27 500φ模型に用いた熱電対の修正

(4) NO_2 濃度は、ダクト周辺のほうが高レベルになり、図 29 (a)にあるようなピークをつくることがある。この NO_2 濃度のピークを示す位置は、 NO 濃度の急減しているところに対応する。

8.2 ガス濃度に及ぼす実験条件の影響

8.2.1 315φ模型のガス分析結果

(1) $1D_n$ 位置の測定結果

Ⅰ) CO_2 濃度 CO_2 濃度の代表値と空燃比 n の関係を図 30 に示す。実験した範囲内では、平均風速 U_m の影響は CO_2 濃度にほとんど現われない。 CO_2 濃度の最高値は 12% 程度であるが、理論混合比で完全燃焼した場合の計算濃度は約 14% である。燃料噴射弁容量の影響として、6~12 GPH を用いたとき、 $n < 30$ の範囲で CO_2 濃度の低下があり、循環流領域内の温度の低下が推定される。 $n > 32$ の範囲では、明らかに示されていないが、噴射容量の小さなもののほうが CO_2 濃度の高くなる傾向を示す。

Ⅱ) CO 濃度 CO 濃度と空燃比 n の関係を図 31 に示す。 n 値の減少とともに CO 濃度は、ほぼ直線的に増

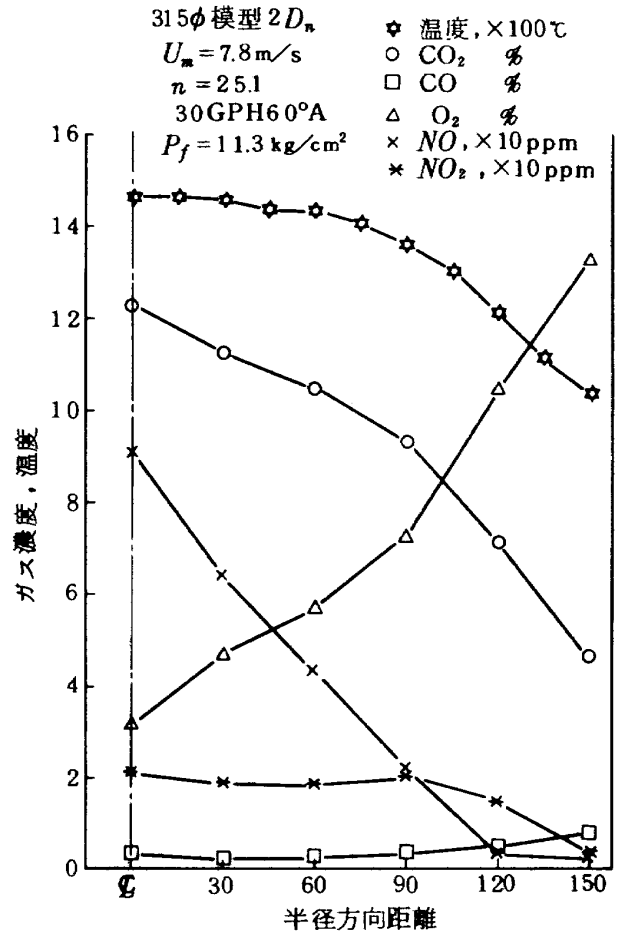


図 28 (b) 315φ 模型, $2D_n$ のガス濃度分布 ($U_m = 7.8 \text{ m/s}$)

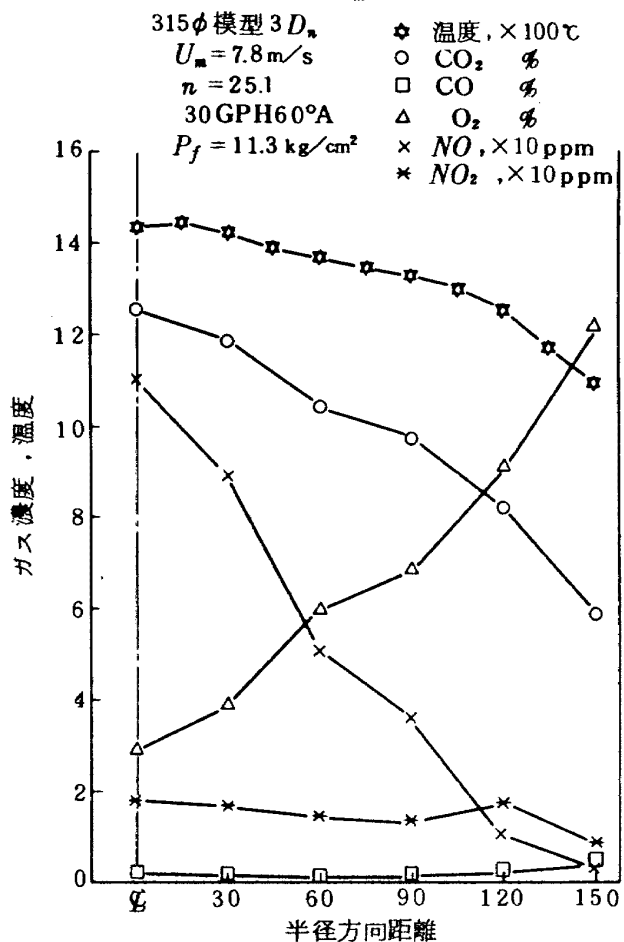


図 28 (c) 315φ, $3D_n$ のガス濃度分布 ($U_m = 7.8 \text{ m/s}$)

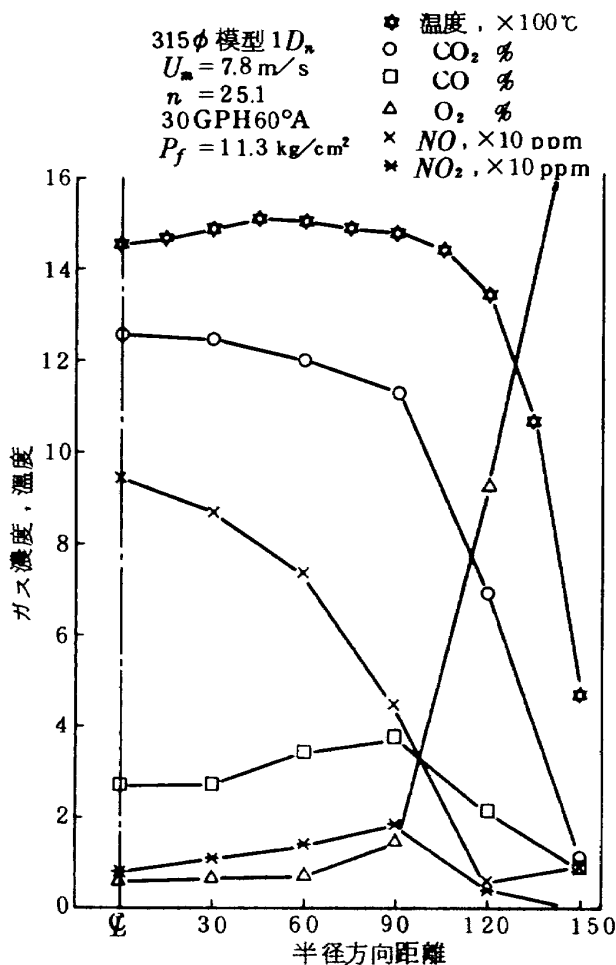
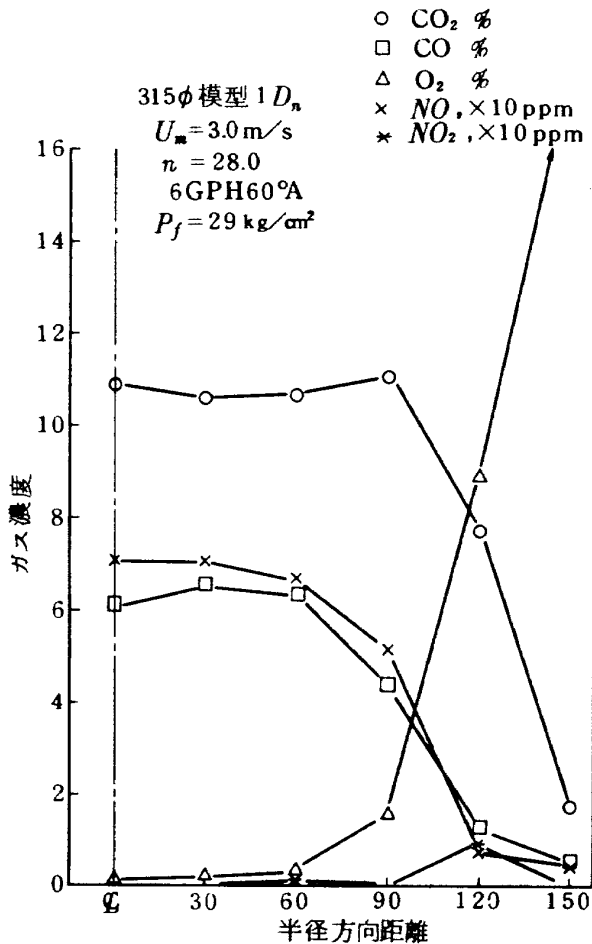
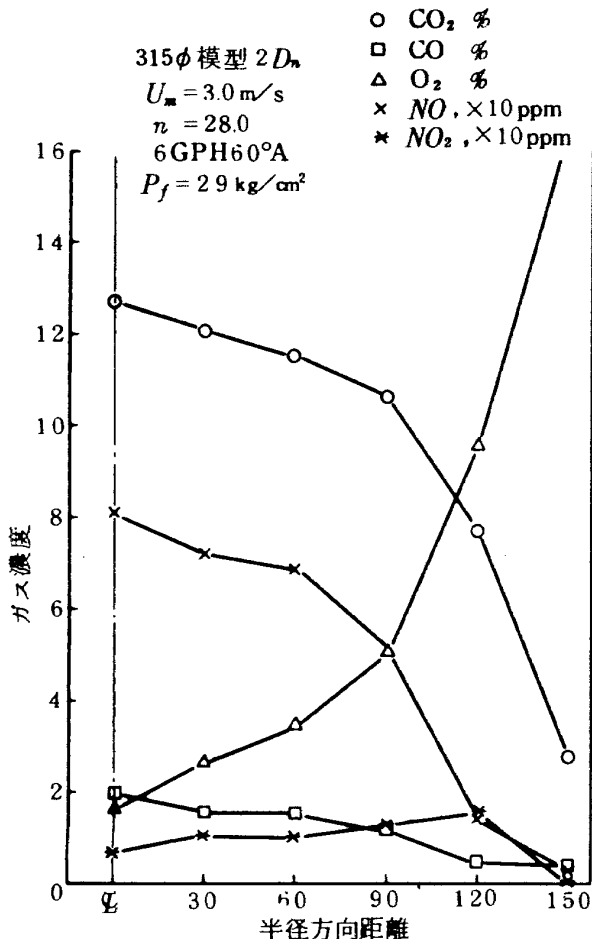


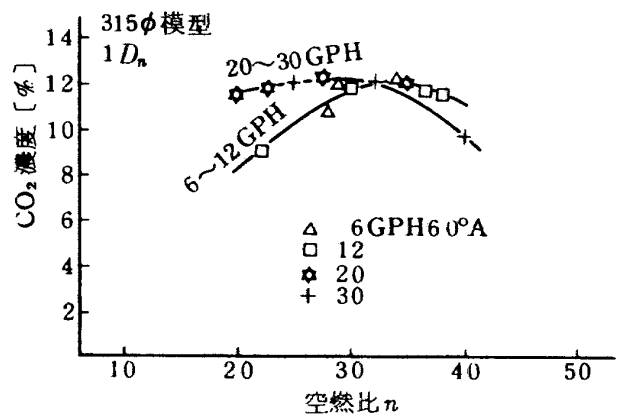
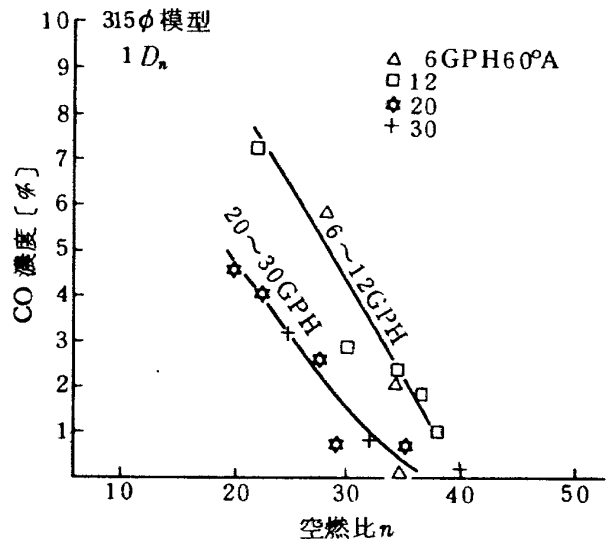
図 28 (a) 315φ, $1D_n$ のガス濃度分布 ($U_m = 7.8 \text{ m/s}$)

図 29(a) 315φ, $1D_n$ のガス濃度分布 ($U_m = 3 \text{ m/s}$)図 29(h) 315φ 模型, $2D_n$ のガス濃度分布 ($U_m = 3 \text{ m/s}$)

加する。燃料噴射弁容量の違いに基く CO 濃度の差異は明らかで、噴射弁容量の小さなきのほうの同一空燃比において CO 濃度が高い。 U_m の CO 濃度に及ぼす影響は、図には示しにくい、 U_m の増加によって CO 濃度の低下がみられる。ただし、 $U_m = 5 \sim 8 \text{ m/s}$ の範囲では、ほとんど差はない。図 32 は、 CO 濃度と残留 O_2 濃度との関係を示したもので、これには噴射弁容量の影響が現われていない。

iii) O_2 濃度 O_2 濃度と空燃比 n との関係を図 33 に示す。 CO 濃度と逆の傾向をもっているが、これは前の図 31, 図 32 から推定できることである。 U_m の O_2 濃度に及ぼす影響も、 U_m 増加によって O_2 濃度がいくぶん増加するという CO 濃度と逆の傾向を示す。

iv) NO_x 濃度 図 34 に NO 濃度と空燃比 n との関係を示す。測定値は相当にばらついているが、これは U_m の影響が含まれているためである。燃料噴射弁容量の NO

図 30 315φ 模型, $1D_n$ 位置の CO_2 濃度図 31 315φ 模型, $1D_n$ 位置の CO 濃度

濃度に及ぼす影響は明らかでない。図35は、残留 O_2 濃度を零に換算したときの NO_x 濃度と n との関係である。噴射弁容量の影響はないが、 U_m の影響が現われている。図35の $U_m = 5 \sim 8 \text{ m/s}$ の測定値の示す傾向は、図30の CO_2 濃度のものとほぼ対応している。

図36は、 NO_2 濃度 ($\equiv [NO_x] - [NO]$) と n との関係を示したものである。これも U_m の影響が含まれているため、 U_m 増加により NO_2 濃度の増加する傾向がある。図37は、 NO_2 濃度と残留 O_2 濃度との関係を示したもので、 O_2 濃度が1%以上あれば NO_2 濃度は相当量になることが判明する。なお、図37には、噴射弁容量の影響がいくぶん現われており、噴射弁容量の大きなもののほうが、同一 O_2 濃度に対して NO_2 濃度が高くなる

ようである。

図38は、 NO/NO_x 濃度比と n との関係を示したものである。これにも、いくぶん噴射弁容量の影響が現われ、大きな容量のほうが、同一空燃比に対し NO/NO_x 濃度比が低い傾向を示す。これは、前記の O_2 濃度、 NO_2 濃度の関連と対応している。図38の測定点のばらつきの原因として、 U_m の影響があり、 U_m を増加させると、 NO/NO_x 濃度比は、多くの場合、減少する傾向を示す。

(2) $3 D_n$ 位置の測定結果

1) CO_2 濃度 CO_2 濃度代表値と空燃比 n との関係を図39に示す。燃料噴射弁容量および平均風速をかえた影響はほとんどなく、1本の線にのる。図中の計算値は、完全燃焼をしたときの平均 CO_2 濃度を表わし、

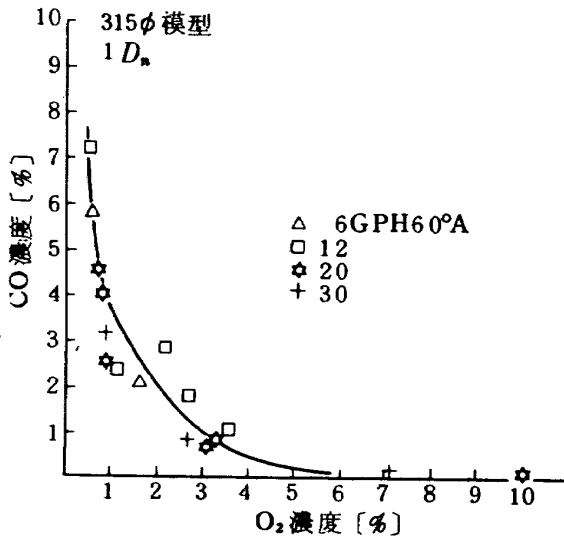


図 32 315φ 模型, $1 D_n$ 位置の $CO \sim O_2$ 濃度の関係

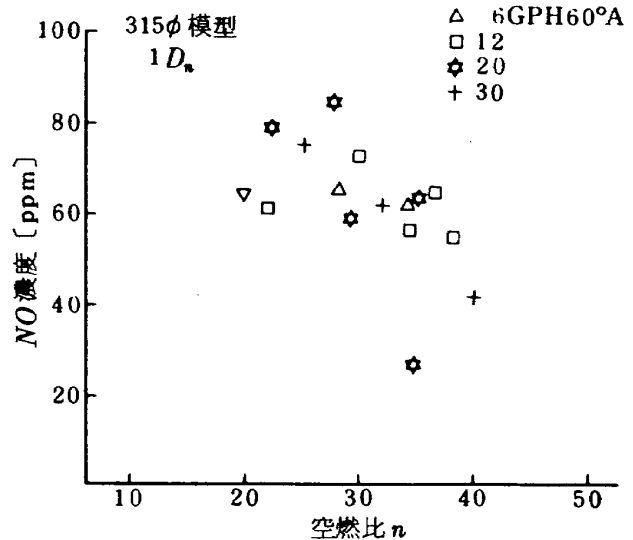


図 34 315φ 模型, $1 D_n$ 位置の NO 濃度

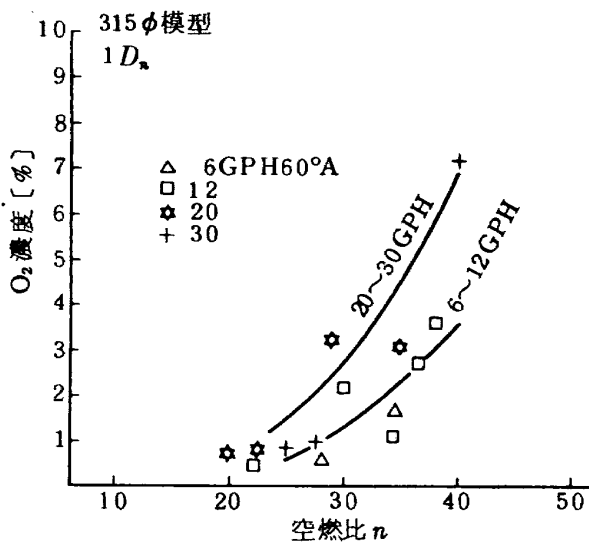


図 33 315φ 模型, $1 D_n$ 位置の O_2 濃度

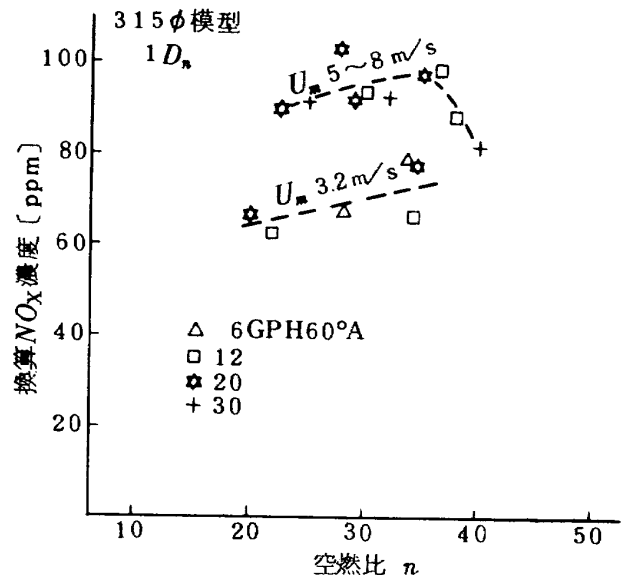
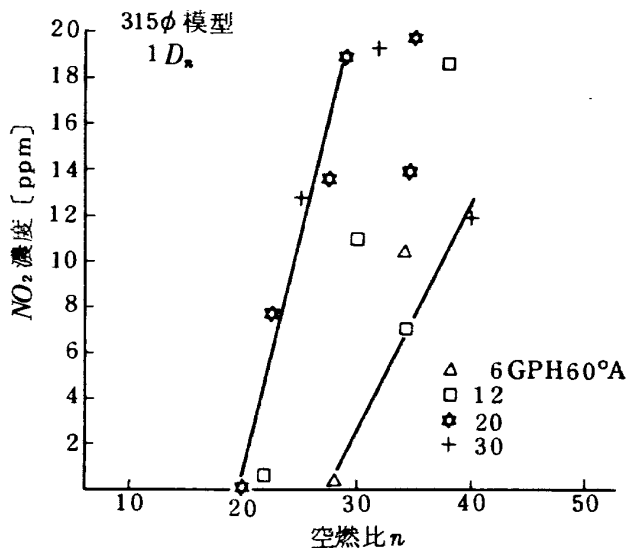
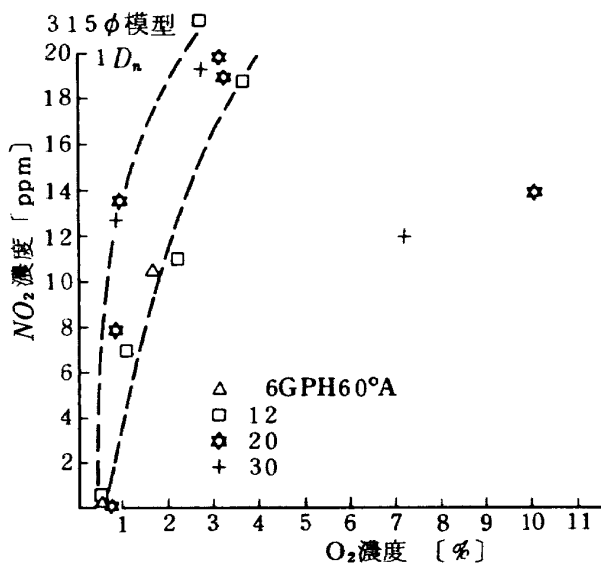
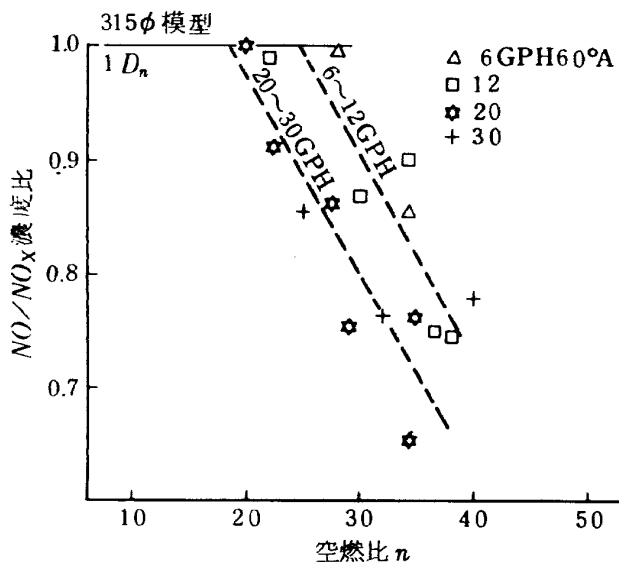


図 35 315φ 模型, $1 D_n$ 位置の換算 NO_x 濃度

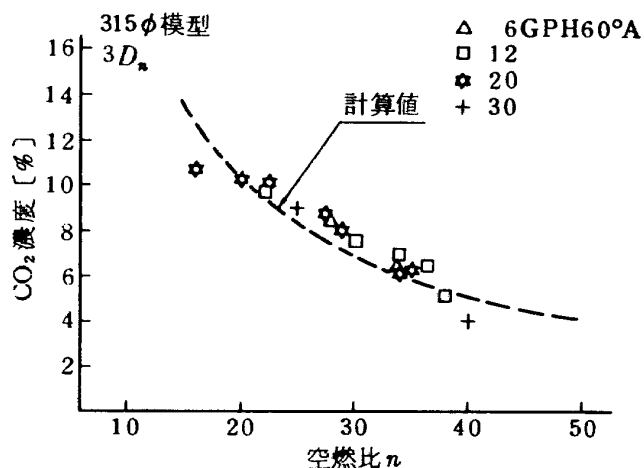
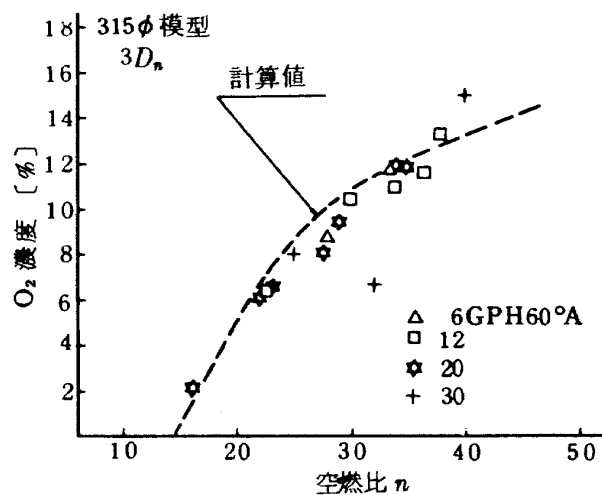
図 36 315φ 模型, 1D_n位置のNO₂図 37 315φ 模型, 1D_n位置のNO₂ ~ O₂ 濃度の関係図 38 315φ 模型, 1D_n位置のNO/NO_x濃度比

これと計測値とはほぼ一致し, 3 D_n 位置では, 完全燃焼に近い状態にあることおよび代表値として適当な値になっていることを示している。n < 20 および n ≈ 40 において CO₂ 濃度が計算値より低下している理由は, 燃焼効率低下に基くものである。これは n < 20 の範囲で CO 濃度が急増すること, n > 40 の範囲で未燃焼燃料が火炎外に飛散している状況から判定できる。

ii) CO 濃度 CO 濃度は, n = 16 のとき 3.5% に達したほか, 3 D_n 位置では全般に低濃度で, 分析計の測定精度を考慮し検討を省略する。

iii) O₂ 濃度 O₂ 濃度の代表値を図 40 に示す。ほぼ計算値と一致し, 図 39 の CO₂ 濃度の傾向とよく対応している。

iv) NO_x 濃度 NO_x 濃度と空燃比 n との関係を図 41 に示す。燃料噴射弁容量や平均風速 U_m の影響はほとんどなく, 1 本の線にのっている。図 42 は, 換算 NO_x 濃度を示したもので, 図 41 にくらべ濃度レベルは

図 39 315φ 模型, 3D_n位置のCO₂濃度図 40 315φ 模型, 3D_n位置のO₂濃度

高くなっているが、傾向に大きな差はない。

図 43 は、 NO/NO_x 濃度比と n との関係である。 $1 D_n$ 位置にくらべて NO_2 濃度が高く、 NO/NO_x 濃度比は小さくなっている。噴射弁容量の影響は明らかでない。

(3) 局所当量比とガス濃度

$1 D_n$ 測定位置においてダクト中央部分と循環流領域周辺部 ($r=0$ および中心から $r=90\text{mm}=0.286 \cdot D_n$) の 2 箇所の局所当量比とガス濃度の関係を求めた。

i) O_2 および CO 濃度 図 44 (a) にダクト中央部分の、図 44 (b) に循環流領域周辺部分の結果を示す。図 44 (a) によると、 O_2 濃度は燃料噴射弁容量や平均風速には依存せず、当量比に対してよく線性的である。当量比 ϕ が、1.0 に近づくとつれて完全燃焼時の O_2 濃度からの外れが大きくなるが、 $\phi > 1.1$ でほとんど零になる。これに對

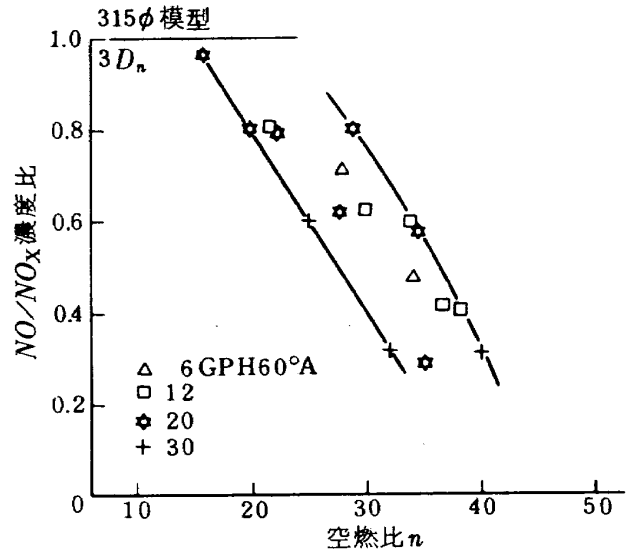


図 43 315φ 模型, $3 D_n$ 位置の NO/NO_x 濃度比

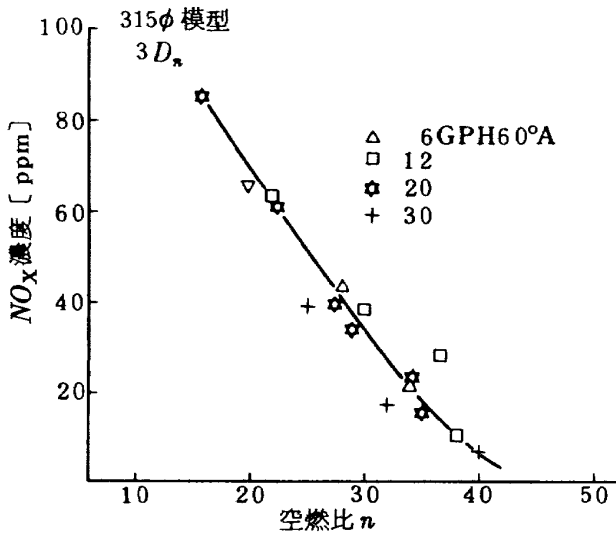


図 41 315φ 模型, $3 D_n$ 位置の NO_x 濃度

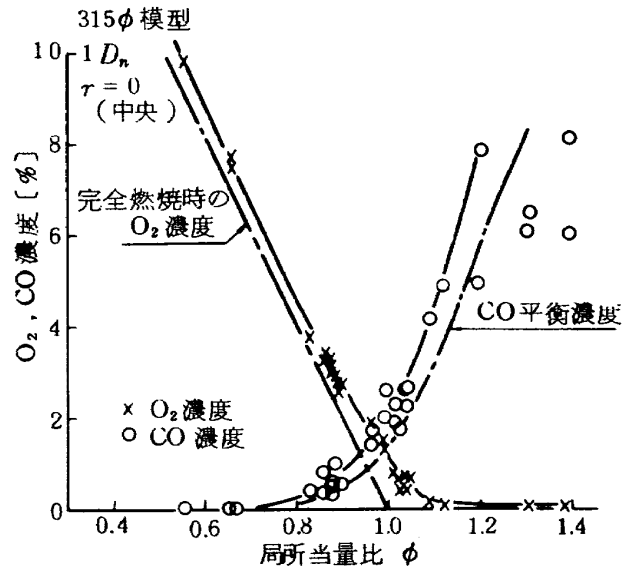


図 44 (a) 315φ 模型, $1 D_n$ 位置中央部分の O_2 , CO 濃度と局所当量比の関係

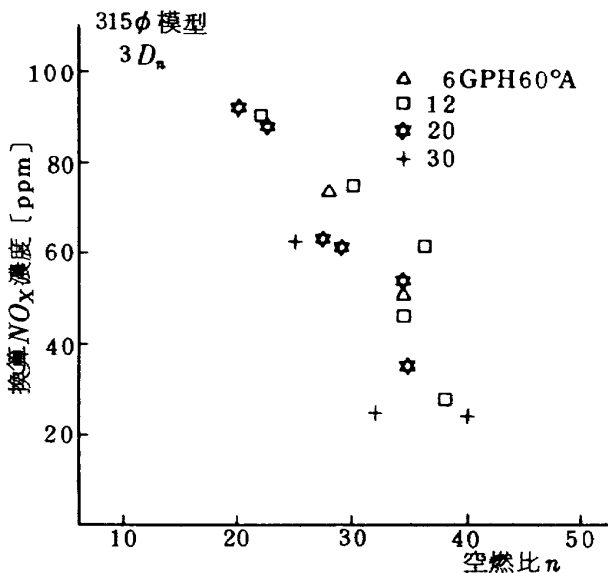


図 42 315φ 模型, $3 D_n$ 位置の換算 NO_x 濃度

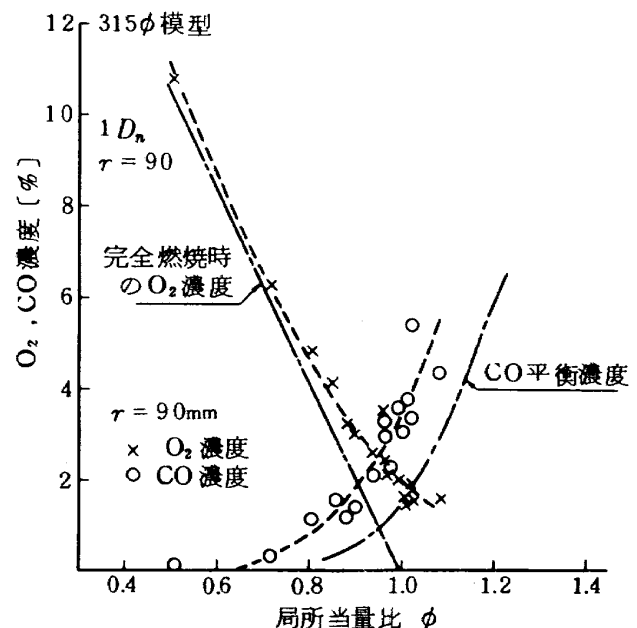


図 44 (b) 315φ 模型, $1 D_n$ 位置, $r=90\text{mm}$ 部分の O_2 , CO 濃度と局所当量比の関係

しCO濃度は、 $\phi \sim 0.85$ から増加しはじめ、 $\phi = 1.0$ のときCO $\sim 2.1\%$ になり $\phi > 1.0$ で急激に増加する。このCO濃度はCOの平衡濃度に近い。

図44(b)のO₂濃度は、 $\phi \leq 0.8$ の範囲で図44(a)のものと一致するが、 $\phi > 0.8$ の範囲で高濃度になり、 $\phi = 1.05$ で1.5%も残存する。CO濃度は $\phi \sim 0.7$ からほぼ直線的に増加し、 $\phi = 1.0$ のときCO $\sim 3.1\%$ となり、平衡濃度より大分多い。これらのことは、 $r = 90\text{mm}$ 部分では、燃焼が十分に進行していないことを示している。

この周辺部分($r = 90\text{mm}$)は中央部分($r = 0 \sim 30\text{mm}$)にくらべ、高温滞留時間が短かく、流速が大きく、

乱れが強い¹⁶⁾という差がある。

ii) NO濃度 図45(a)および図45(b)に結果を示す。図45(a)では、平均風速の影響が現われ、風速の低いときのほうが低濃度である。風速の大きなきのNO濃度の最大値は、実験点についてみると $\phi = 1.02$ 付近にある。

周辺部のNO濃度は、図45(b)に示すように図45(a)の場合より低いレベルである。これには、前記の燃焼不完全さに基づく温度の低いこと、および滞留時間の短いことの二つの原因が考えられるが、どちらの影響が大きいかは、判断できない。

iii) NO₂濃度 NO₂濃度 ($[\text{NO}_x] - [\text{NO}]$) に

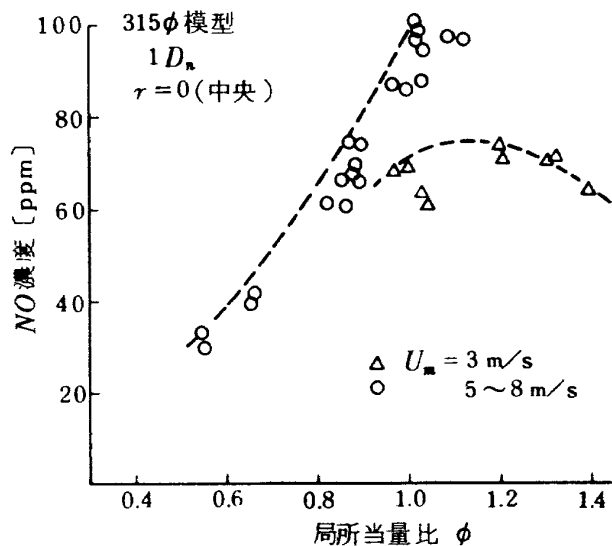


図 45(a) 315φ 模型, $1D_n$ 位置中央部分のNO濃度と局所当量比の関係

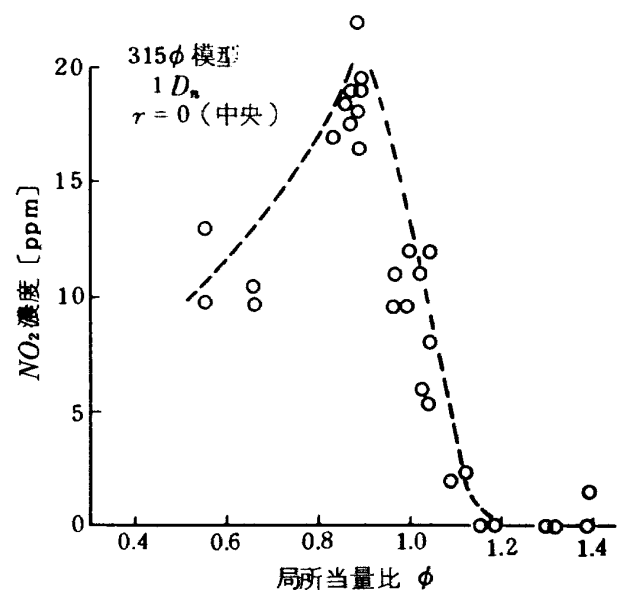


図 46(a) 315φ 模型, $1D_n$ 位置中央部分のNO₂濃度と局所当量比の関係

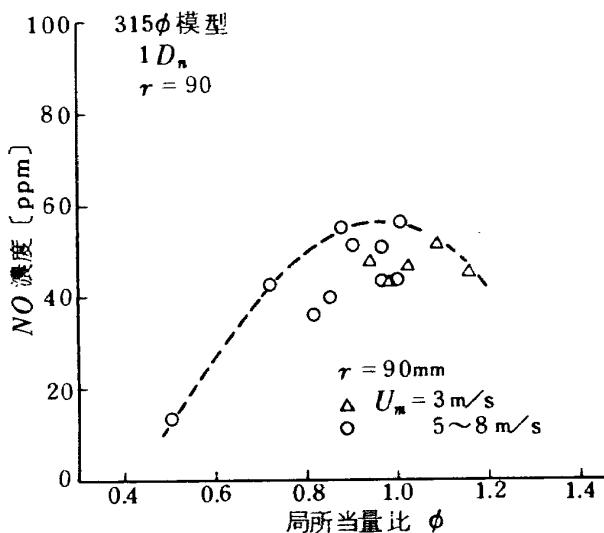


図 45(b) 315φ 模型, $1D_n$ 位置, $r = 90\text{mm}$ 部分のNO濃度と局所当量比の関係

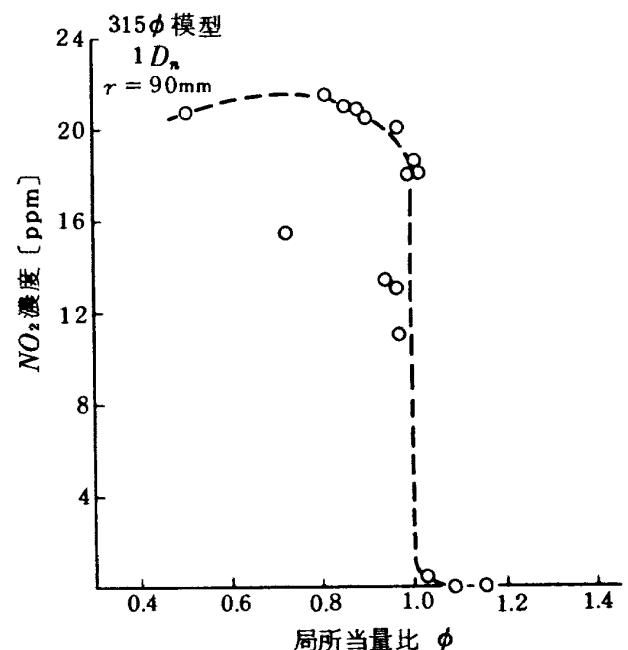


図 46(b) 315φ 模型, $1D_n$ 位置, $r = 90\text{mm}$ 部分のNO₂濃度と局所当量比の関係

ついて得た結果を図46(a)と(b)に示す。図46(a)によると NO_x 濃度は $\phi=0.88$ にピークをつくり、これ以上の ϕ 値で急激に減少し、 $\phi \sim 1.15$ で零になる。一方、図46(b)では、 $\phi > 0.8$ の範囲で徐々に減少し、 $\phi=1$ を境にして $\phi > 1$ の範囲で零になってしまう。このとき、図44(b)によると $\phi > 1$ でも残留酸素は相当にあり、図37の結果を適用すると、 $\phi > 1$ の範囲でも NO_x 濃度は相当に高レベルでもよい筈である。この原因については、明らかでない。

8.2.2 500 ϕ 模型のガス分析結果

(1) $1D_n$ 位置の測定結果

i) O_2 濃度 図47に CO_2 濃度の代表値と空燃比 n の関係を示す。燃料噴射弁容量や平均風速 U_m にはほとんど依存せず、 n の影響も大きなものでない。濃度は10～12%の範囲にあり、もっとも高濃度を示

す n 値は30前後である。

ii) CO 濃度 CO 濃度の代表値と n の関係を図48に示す。噴射弁容量の大きなもののほうが、いくぶん低めの値を示す。図49は、 CO 濃度と O_2 濃度の関係を求めたものである。残留 O_2 濃度4%以下で CO 濃度が急増する。 O_2 濃度の低いとき、同一 O_2 濃度でも CO 濃度の測定値には相当な幅がある。

iii) O_2 濃度 O_2 濃度と空燃比 n との関係を図50に示す。測定値がばらついているが、平均風速 U_m には、ほとんど依存していない。噴射弁容量の O_2 濃度に及ぼす影響は、いくぶんある(噴射弁容量の大きなもののほうが O_2 濃度が高め)。

iv) NO_x 濃度 NO 濃度の代表値と空燃比 n の関係を図51に示す。測定値は大分ばらついているが、これには平均風速 U_m の影響が含まれているためである。図

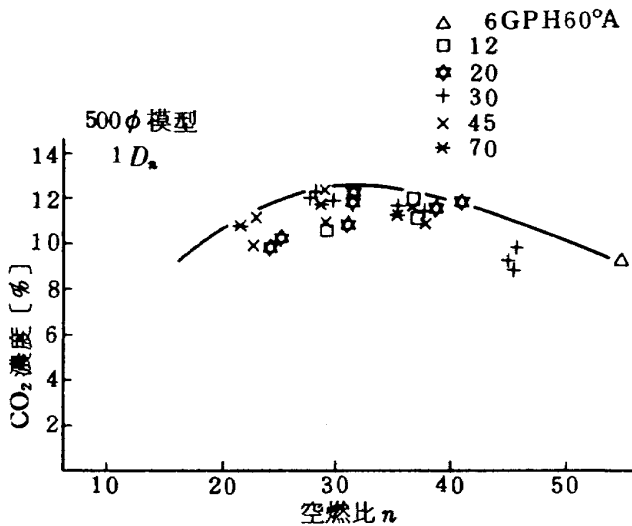


図 47 500 ϕ 模型, $1D_n$ 位置の CO_2 濃度

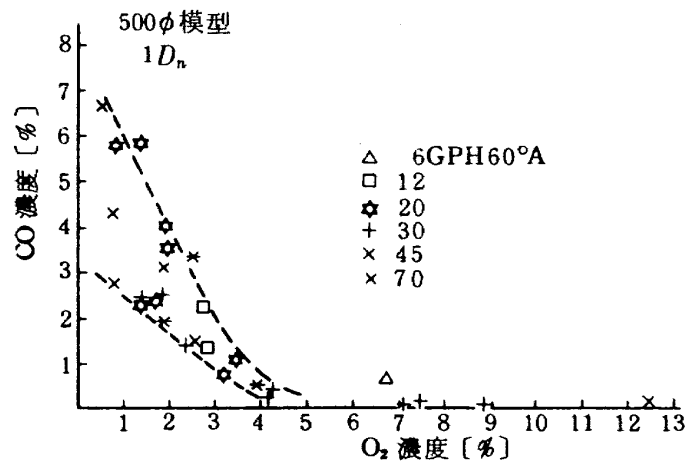


図 49 500 ϕ 模型, $1D_n$ 位置の $\text{CO} \sim \text{O}_2$ 濃度の関係

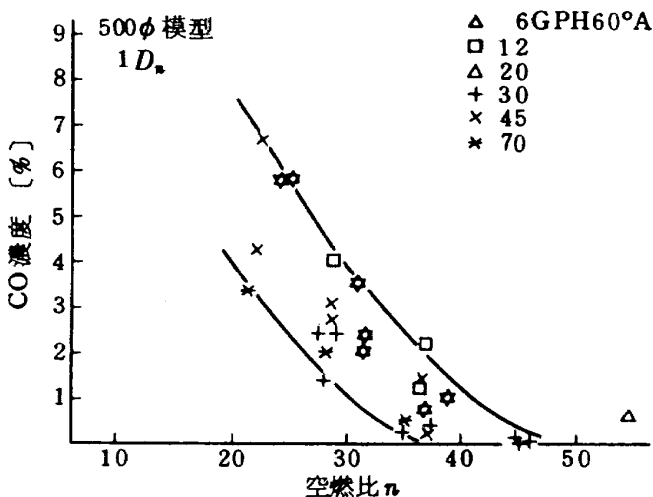


図 48 500 ϕ 模型, $1D_n$ 位置の CO 濃度

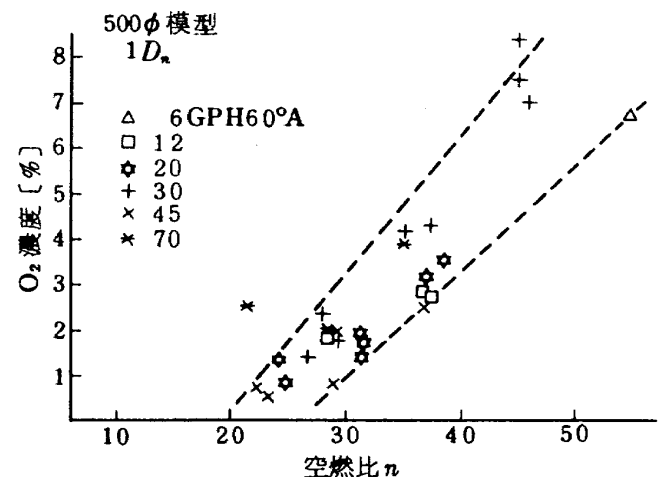
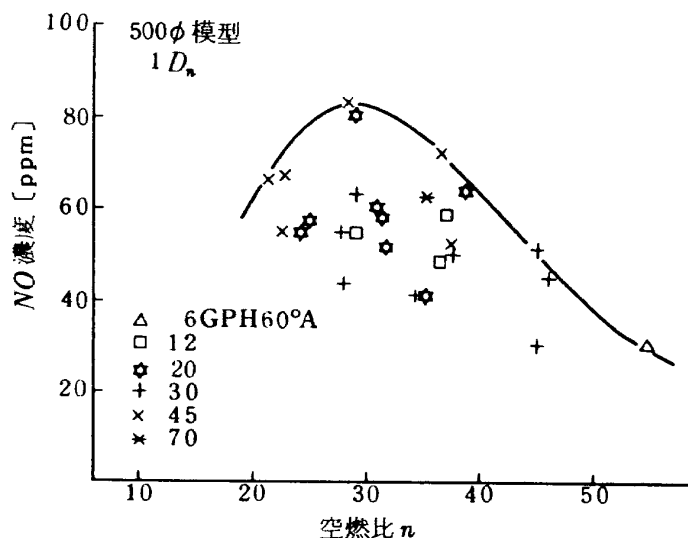


図 50 500 ϕ 模型, $1D_n$ 位置の O_2 濃度

図 51 500φ 模型, $1D_n$ 位置の NO 濃度

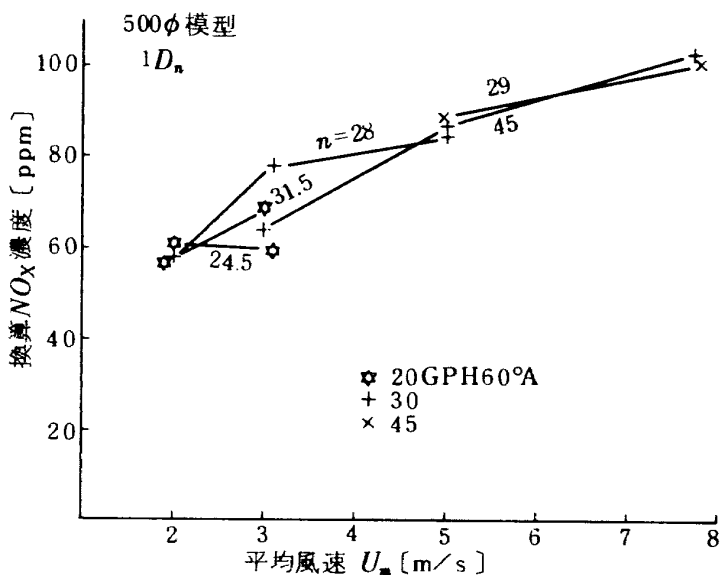
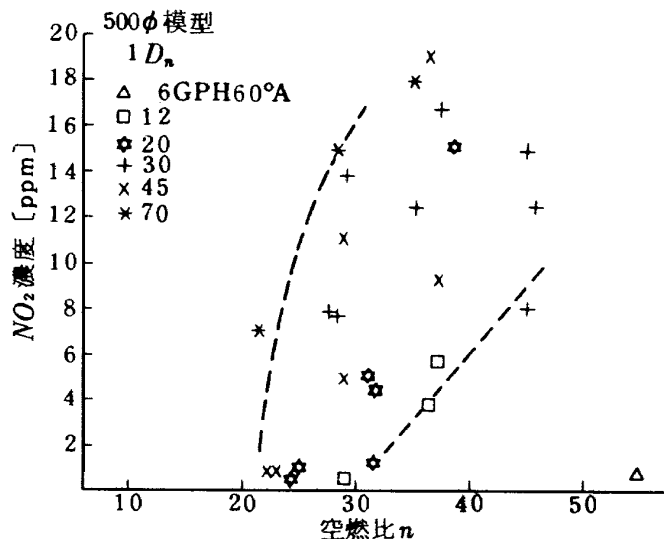
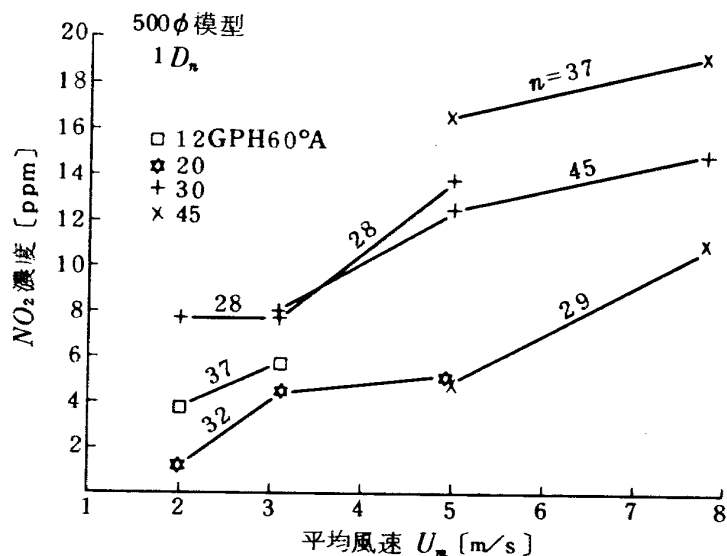
51 の NO 濃度の高レベル側を結ぶと, そのピークは $n \sim 28$ にあり, CO_2 濃度の最高になる空燃比は近くなる。

図 52 は, 換算 NO_x 濃度をとった場合の平均風速 U_m の影響を示したもので, U_m 増加とともに NO_x の増加が明らかである。これには, 燃料噴射弁容量の影響は現われていない。また, n 値の影響もない。

図 53 は, NO_2 濃度と n 値との関係を示したもので, 測定点が大分ばらついている。この NO_2 濃度の U_m 依存性を示したものが図 54 で, U_m の増加とともに, ほぼ直線的に NO_2 濃度の増加がある。

NO_2 濃度と O_2 濃度との関係を図 55 に示す。これには噴射弁容量の影響が現われ, 大きな容量のものの方が低 O_2 濃度のとき高い NO_2 濃度レベルを示す。

図 56 は, NO/NO_x 濃度比と n 値との関係を示した

図 52 500φ 模型, $1D_n$ 位置の換算 NO_x 濃度と風速の関係図 53 500φ 模型, $1D_n$ 位置の NO_2 濃度図 54 500φ 模型, $1D_n$ 位置の NO_2 濃度と風速の関係

もので、同一空燃比に対し、噴射弁容量の大きなもののほうが低い濃度比を示している。

(2) $3D_n$ 位置の測定結果

i) CO_2 濃度 CO_2 濃度と空燃比 n との関係は、 315ϕ 模型の場合と同様、計算値に近い値がでている。なお、平均風速 U_m の影響として、 U_m 増加とともにわずかではあるが CO_2 濃度の上昇がみられる。

ii) CO 濃度 空燃比 n を低下させていくと CO 濃度は高くなるが、 $n=23$ のとき $CO \sim 0.95\%$ になったほか、ほとんど $0.1 \sim 0.2\%$ 程度以下であった。

iii) O_2 濃度 O_2 濃度は CO_2 濃度とよく対応し、ほぼ計算値にのっている。

iv) NO_x 濃度 NO_x 濃度と空燃比 n との関係を図

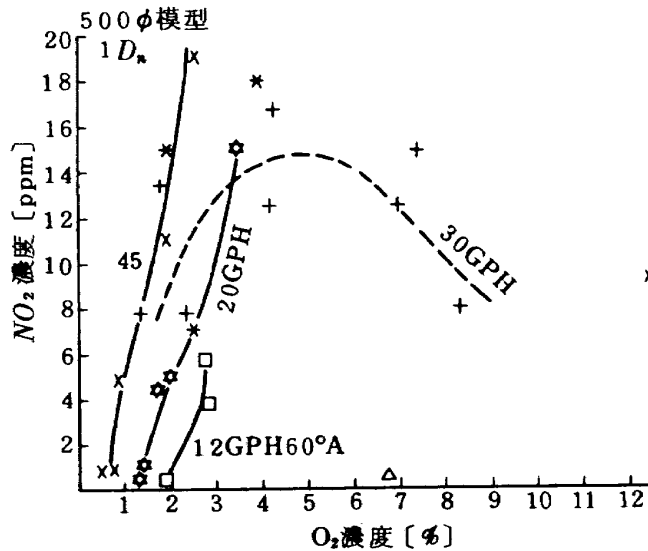


図 55 500φ, $1D_n$ 位置の NO_2 — O_2 濃度の関係

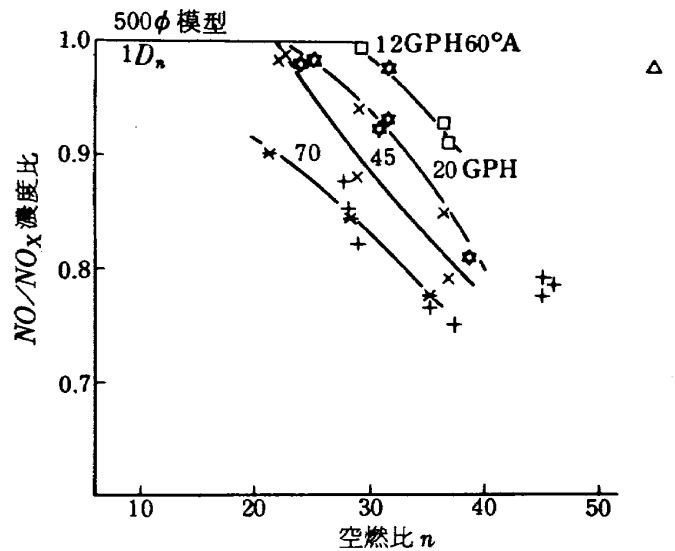


図 56 500φ 模型, $1D_n$ 位置の NO/NO_x 濃度比

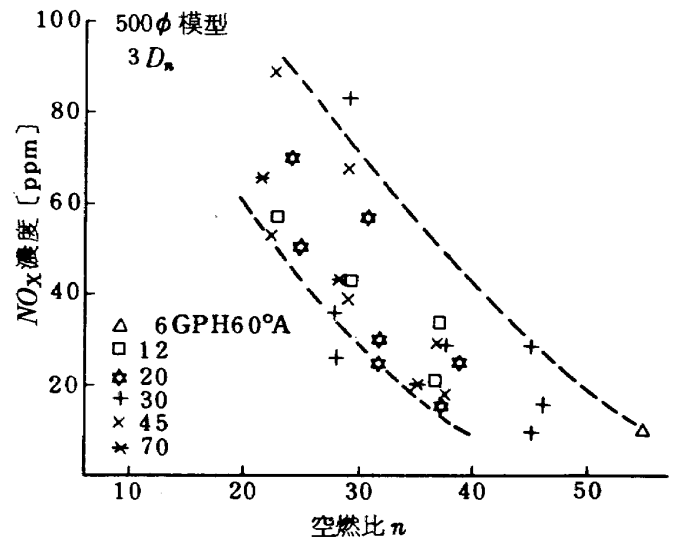


図 57 500φ 模型, $3D_n$ 位置の NO_x 濃度

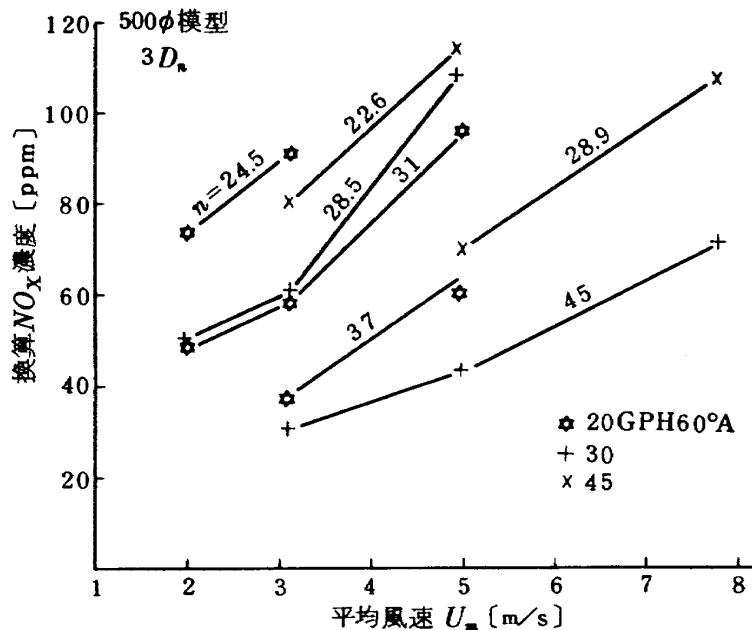


図 58 500φ 模型, $3D_n$ 位置の換算 NO_x 濃度と風速の関係

57に示す。測定値は相当な幅をもっているが、 n 値に対する傾向は明らかである。

NO_x 濃度は U_m 増加とともに増加する。これを図 58 に示す。図 57 では噴射弁容量の影響は明らかではないが、図 58 には現われており、容量の大きなもののほうが低濃度を示している。

NO_2 濃度も U_m 増加によって増加する傾向を示す。

図 59 は、 NO/NO_x 濃度と空燃比 n との関係を示したものである。これにも U_m の影響が含まれており、 U_m 増加によって NO/NO_x 濃度比は減少する傾向をもつ。

(3) 局所当量比とガス濃度

$1D_n$ 測定値においてダクト中央部分と循環流領域周辺部 ($r=0$ および $r=160\text{ mm} = 0.32 D_n$) の 2 箇

所の局所当量比とガス濃度との関係を求めた。複雑な傾向を示す NO 濃度については、 $2D_n$ 位置の中央部分についても求め、 $1D_n$ 位置の結果と比較した。

Ⅰ) O_2 および CO 濃度 $1D_n$ 位置におけるダクト中央部分と循環流領域周辺部における測定結果を図 60 (a), (b) に示す。 CO 平衡濃度は第Ⅱ報の結果を引用した。¹⁷⁾ 燃料噴射弁容量や平均風速をかえた影響はなく、局所当量比のみによって整理される。図 60 (a), (b) は、 315ϕ 模型の図 44 (a), (b) に対応するもので、合せてみるとよく一致し、 $315\phi \sim 500\phi$ の寸法の影響もないことがわかる。

Ⅱ) NO 濃度 NO 濃度と局所当量比の関係を図 61 (a), (b), (c) に示す。図 61 (a) は、 $1D_n$ 位置ダクト中央の

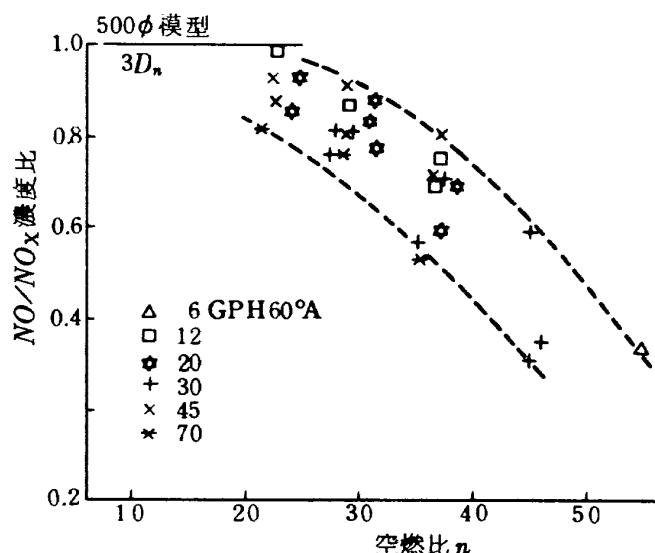


図 59 500φ 模型, $3D_n$ 位置の NO/NO_x 濃度比模型

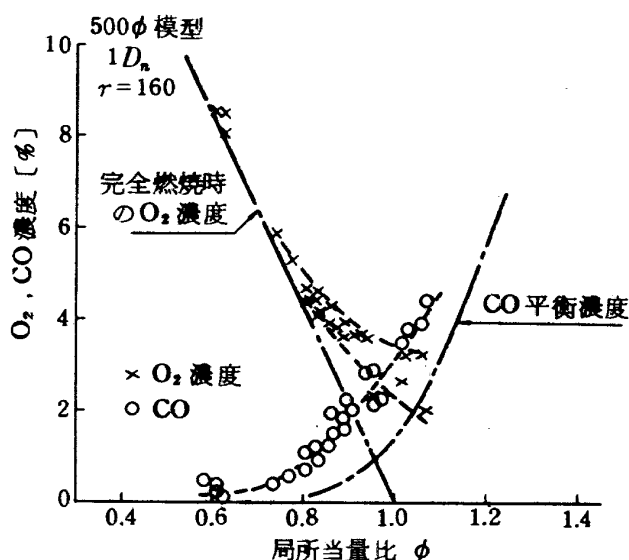


図 60 (b) 500φ 模型, $1D_n$ 位置 $r=160\text{ mm}$ 部分の O_2 , CO 濃度と局所当量比の関係

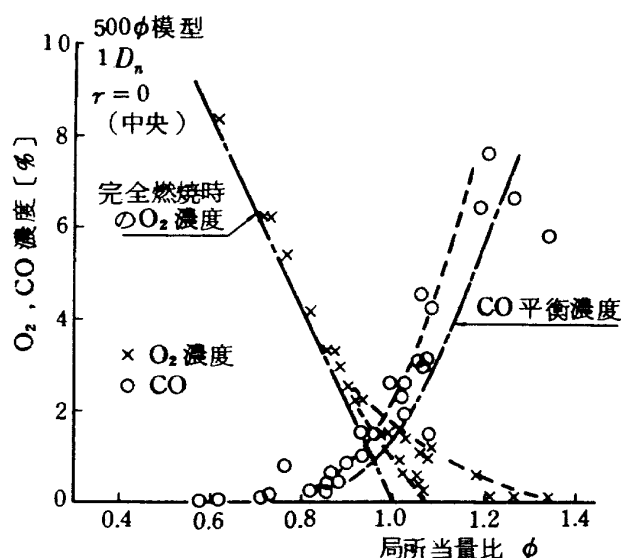


図 60 (a) 500φ 模型, $1D_n$ 位置中央部分の O_2 , CO 濃度と局所当量比の関係

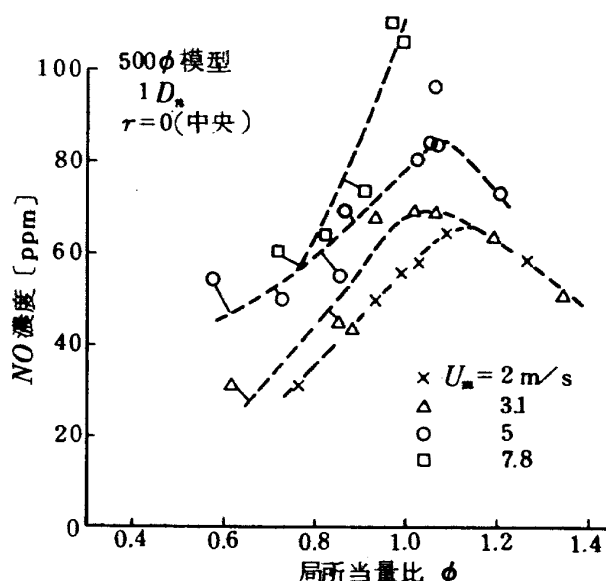


図 61 (a) 500φ 模型, $1D_n$ 位置中央部分の NO 濃度と局所当量比の関係

NO濃度で、平均風速の影響があり、風速を増すほど高濃度になる。最高濃度を示す局所当量比は、 $\phi = 1.0 \sim 1.1$ の間にあると推定される。これは315 ϕ 模型の図45(a)と対応するものであるが、いくぶんことなる傾向が示されている。図61(b)は、 $1D_n$ 位置循環流領域周辺部の結果である。この場合も平均風速によってことなる傾向

が現われた。すなわち、風速のおそい場合には、当量比減少とともにNO濃度の減少がみられるが、風速の大きな場合には、当量比のことなる場合でもNO濃度は変化しない。なお $\phi = 1.0$ 付近では、風速の影響はない。315 ϕ 模型の図45(b)と対応させてみると、500 ϕ 模型のほうがNO濃度が低レベルになっているが、測定位置が

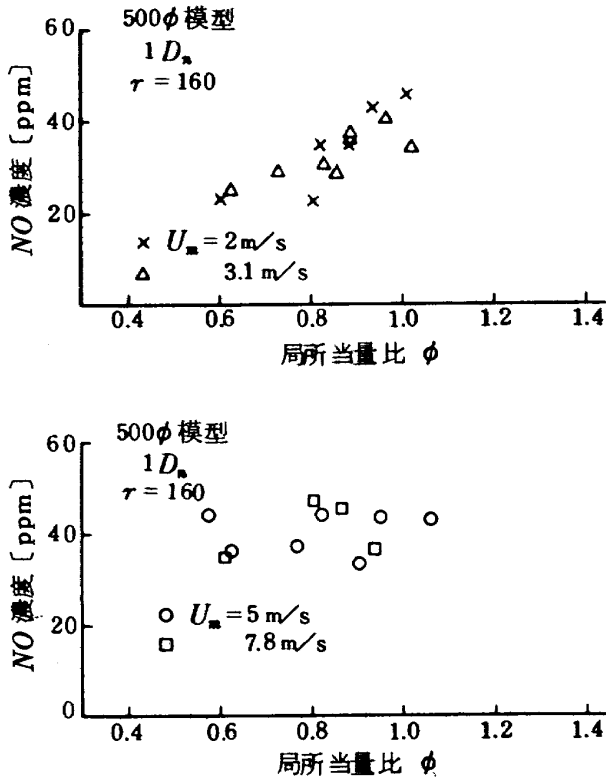


図 61(b) 500 ϕ 模型, $1D_n$ 位置 $r = 160\text{mm}$ 部分のNO濃度と局所当量比の関係

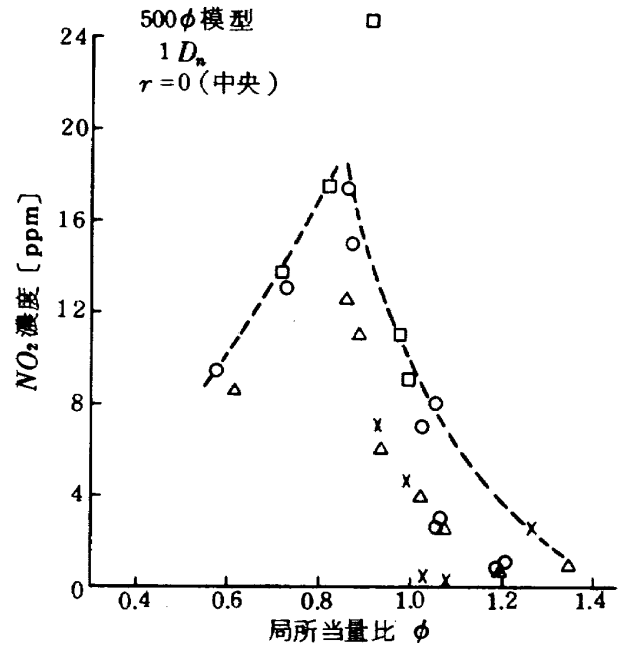


図 62(a) 500 ϕ 模型, $1D_n$ 位置中央部分の NO_2 濃度と局所当量比の関係

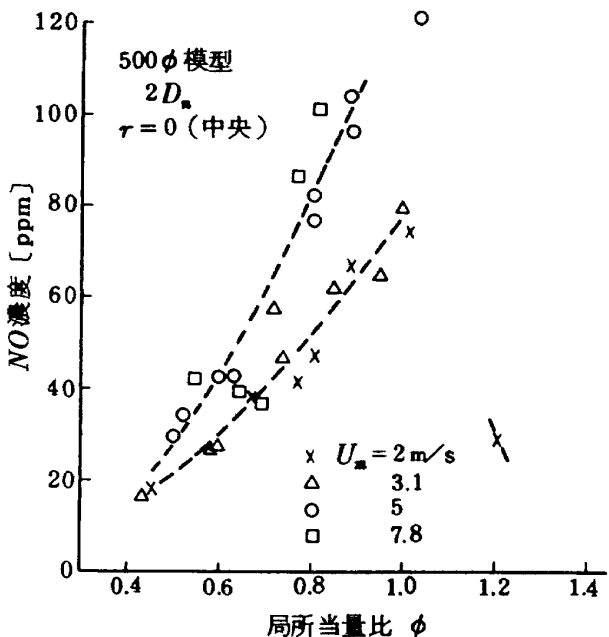


図 61(c) 500 ϕ 模型, $2D_n$ 位置中央部分のNO濃度と局所当量比の関係

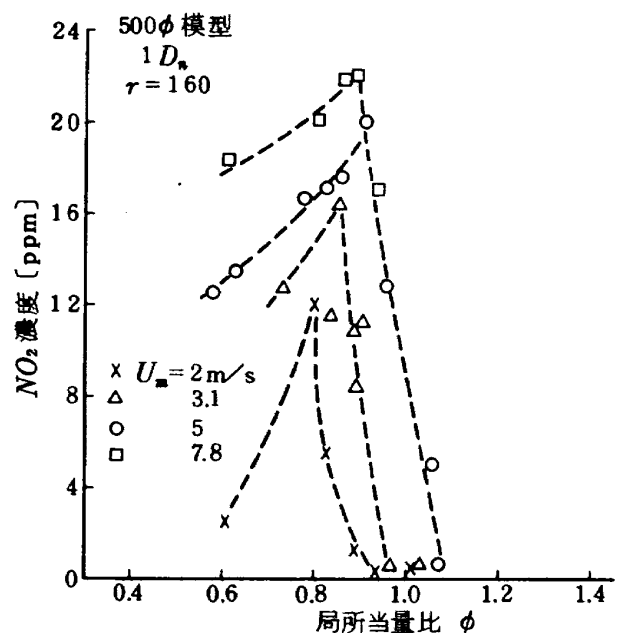


図 62(b) 500 ϕ 模型, $1D_n$ 位置 $r = 160\text{mm}$ 部分の NO_2 濃度と局所当量比の関係

0.286 D_n と0.32 D_n と少しことなるので正確な比較はできない。

図 61(c)は、図 61(a) と比較のため示したもので、図

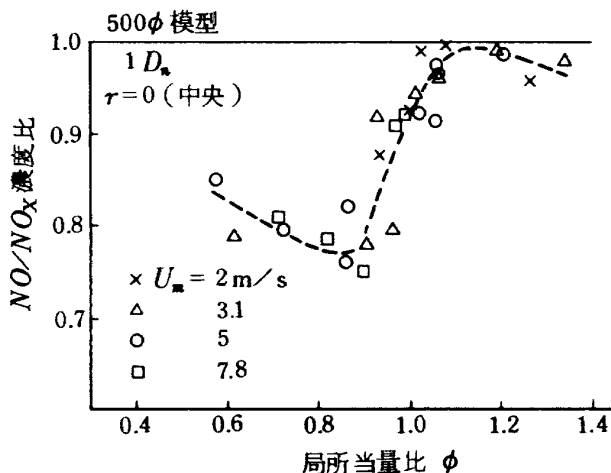


図 63(a) 500 ϕ 模型, $1D_n$ 位置中央部分の NO/NO_x 濃度比と局所当量比の関係

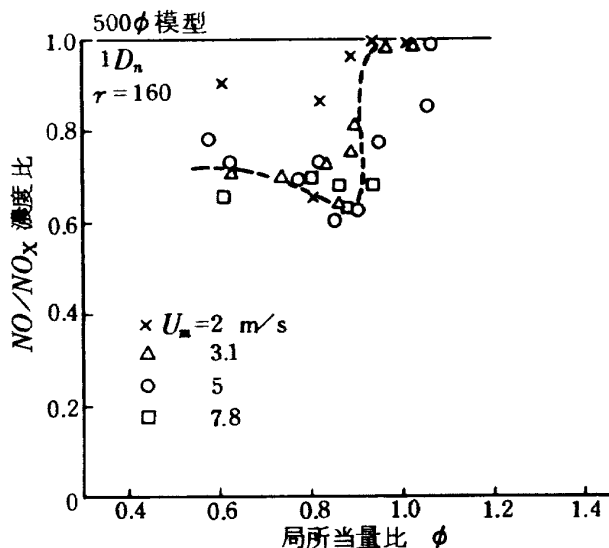


図 63(b) 500 ϕ 模型, $1D_n$ 位置 $r = 160$ mm 部分の NO/NO_x 濃度比と局所当量比の関係

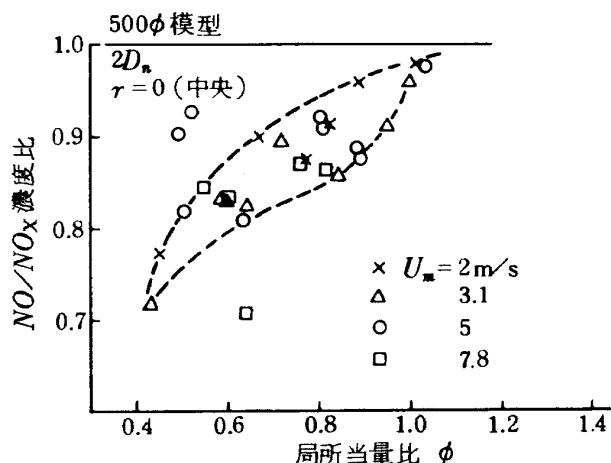


図 63(c) 500 ϕ 模型, $2D_n$ 位置 中央部分の NO/NO_x 濃度比と局所当量比の関係

61(a)と次の点がことになっている。

— $2D_n$ 位置は $1D_n$ 位置にくらべて、 NO 濃度のレベルが高い。

— $2D_n$ 位置では、平均風速の影響が、 $U_m = 2 \sim 3.1$ m/s および $U_m = 5 \sim 7.8$ m/s の二つのグループに分けられている。

— 測定点のばらつきは $2D_n$ 位置のほうが少ない。

iii) NO_2 濃度 NO_2 濃度と局所当量比の関係を図 62(a), (b)に示す。 NO_2 濃度は、 $\phi = 0.8 \sim 0.9$ の間にピークをつくり、この前後で低下する。図 62(a)の中央部分では、平均風速の影響は少ないが、図 62(b)の循環流領域周辺部分では風速の影響があり、風速の大きなきほど NO_2 濃度は高レベルになる。また、周辺部分では、ピーク濃度位置より当量比を増加させると NO_2 濃度は急速に零に近づく。315 ϕ 模型の場合の図 46(a), (b)と比較すると、中央部分(図 46(a)と図 62(a))では、比較的よく似ているが、周辺部分(図 46(b)と図 62(b))では、風速の影響や $\phi < 1$ の範囲の傾向などがことになっている。

iv) NO/NO_x 濃度比 NO 濃度の傾向は、315 ϕ 模型の場合より 500 ϕ 模型の場合のほうが複雑である。このことから、 $1D_n$ 位置にて $r = 0$ (中央) と $r = 160$ mm、および $2D_n$ 位置 $r = 0$ の NO/NO_x 濃度比を求めた。結果を図 63(a), (b), (c)に示す。図 63(c)で

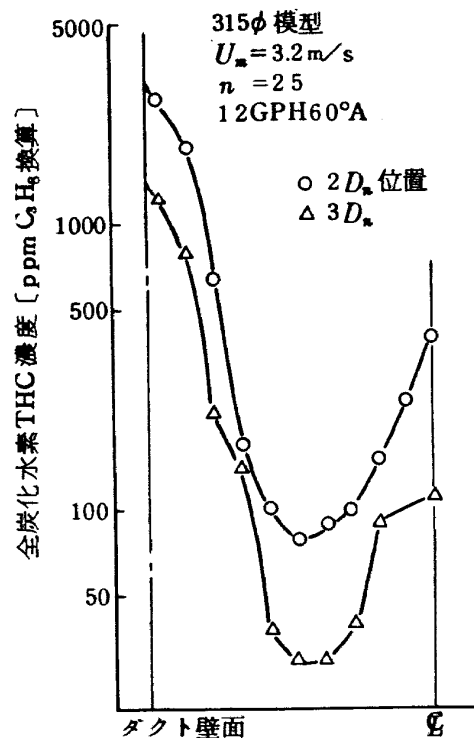


図 64 炭化水素濃度の傾向

は、局所当量比増加とともに NO/NO_x 濃度比の増加がみられ、これまでの測定結果¹⁸⁾や図 56, 図 59 などと同様な傾向であるが、図 63(a)および(b)では、 $\phi < 0.9$ の範囲で、 ϕ 値増加とともに NO/NO_x 濃度比の減少する傾向がみられる。これは、315 ϕ 模型にはみられない特性である。

8.2.3 炭化水素濃度

この実験の場合、分析用ガス採取系は非加熱で行なったため、炭化水素の採取系内への付着があり、測定値の信頼性が低く、系統的調査は行なわなかった。

炭化水素排出の傾向を調べるため、加熱採取系を用いて測定した例を図 64 に示す。この場合でも、採取系に非加熱の箇所(ガラスのコック 1 箇所)が残ったため、指示値に履歴が大きく現われ、低濃度の測定には長時間を要した。図 64 によるとダクト中心部から周辺部に移るにしたがい、一旦減少するが壁面近傍で急激に増加し、桁違いの高濃度になる。中心軸付近で濃度のいくぶん増加している部分は、図 14 の流れ模様を示したよどみ領域に対応する。

8.2.4 煙濃度

煙濃度は、軸方向に $3 D_n$ 以上(出口付近)とし、半径方向に中心位置とダクト周辺の 2 箇所について測定した。用いた煙濃度計は、Bacharach 社のものである。

500 ϕ 模型について測定した結果を以下に述べる。

燃料噴射弁容量 6 ~ 45 GPH 60°A, 平均風速 $U_m = 2 \sim 5 \text{ m/s}$ の条件で得た結果を図 65 ~ 図 67 に示す。図 67 によると、 $U_m = 5 \text{ m/s}$ では噴射弁容量に依存せず、ほぼ空燃比 n の増加とともに煙濃度の増加がある。

$U_m = 2 \text{ m/s}$ のときには、ある n 値のところから n を減

少させると煙濃度の増加が現われている。この最少の煙濃度を示す n 値は、噴射弁容量の大きなものほど小さい。なお、図 65 ~ 図 67 に示した破線は、重ね合すると一致し、 U_m の影響は現われていない。

ダクト壁面付近の煙濃度は、中央部分よりいくぶん高い場合が多い。

9. 実験結果のまとめおよび検討

ガスタービン燃焼器のうず巻噴射弁とスワローを組合せた部分のみを取出したバーナ模型を製作し、大気圧状態にて流れ模様の測定および燃焼実験を行なった。この結果、次のような事柄が判明した。

9.1 流れ模様

流れ模様の測定により、スワロー下流側の循環流領域

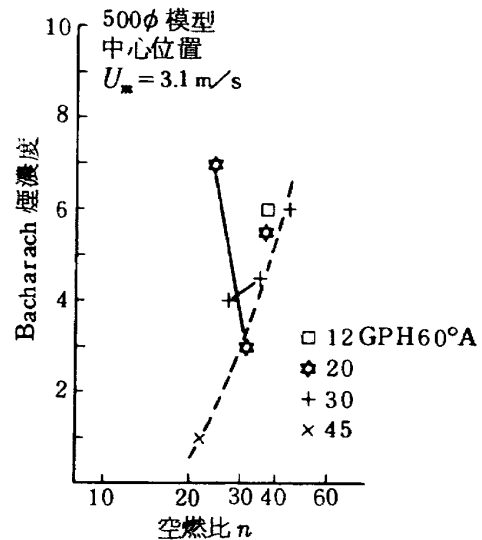


図 66 500 ϕ 模型出口の煙濃度の傾向 (II)

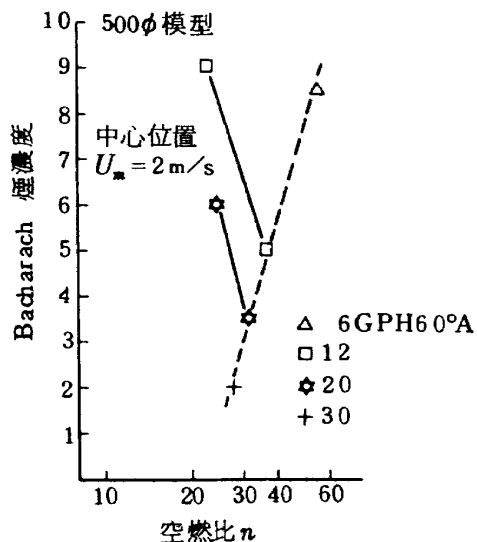


図 65 500 ϕ 模型出口の煙濃度の傾向 (I)

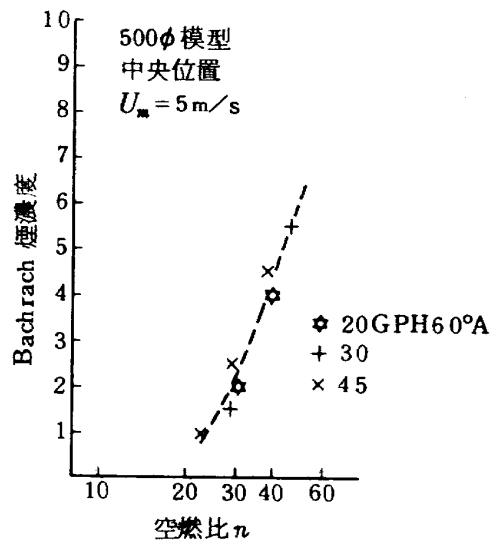


図 67 500 ϕ 模型出口の煙濃度の傾向 (III)

の形状およびその下流側に細長くのびるよどみ領域の存在が明らかとなった。循環流領域の外周側にあるトロイダルボルテックスのうず中心は、断面が細長く引きのばされた形になっている。ダクト出口部からの外気の吸引は、出口ダクト長さをダクト直径 D_n の3倍以上にとると、循環流領域に対して影響がなくなる。

流れ模様は、代表径 315ϕ と 500ϕ 模型で差はない。

9.2 火炎の様子

火炎の様子は、空燃比の大きな状態での柱状火炎から空燃比を低下させていくと柱状火炎とカップ状火炎の共存状態（ 315ϕ 模型のみに現われた）からカップ状火炎、さらにカップの先端が閉じた状態になり、火炎長さの

びるようになる。ガス分析などの測定を行なった範囲は、 315ϕ 模型の場合、一部にカップ状火炎のものがあるが、多くはカップの閉じた状態の火炎になっている。 500ϕ 模型の場合、すべてカップの閉じた状態の火炎で測定を行なった。これから、測定条件における火炎形状は、 315ϕ および 500ϕ 模型についての差は少ないといえる。なお、火炎は、すべて輝炎（黄色炎）であった。

9.3 燃焼温度

軸方向に $1D_n$ はなれた位置にて 315ϕ と 500ϕ 模型の代表温度を比較すると図27のようになり、両者はあまり差はないが、どちらかというとも 500ϕ 模型のほうが高温になっている。図27では、空燃比30以下で温度の低下する傾向を示すが、これは、循環流領域内の当量比が $\phi > 1$ になるためと判断される。全体空燃比と循環流領域の当量比との関係を図68に示す。これには噴射弁容量の影響があり、容量の大きなものほど同一空燃比でも小さな ϕ 値を示す傾向が現われている。なお、低風速時のほうが小さな ϕ 値を示すという傾向もいくぶん含まれている。

$3D_n$ 位置でも両模型についての温度の差は少なく、完全燃焼時の計算温度に近い値を示す（図69）。 $3D_n$ 位置では、空燃比を減少させて温度の低下する範囲は現われていない。

9.4 ガス濃度

9.4.1 CO_2 , CO 濃度

$1D_n$ 位置の CO_2 代表濃度について図30および図47をもとに 315ϕ および 500ϕ 模型を比較すると図70のようになる。 CO_2 濃度レベルは 315ϕ , 500ϕ 模型とも、最高濃度についてはほぼ同様であるが、 315ϕ 模型では、噴射弁容量によって CO_2 の最高濃度を示す空燃比がこととなっている。

図71は、 $1D_n$ 位置における CO 濃度の代表値につ

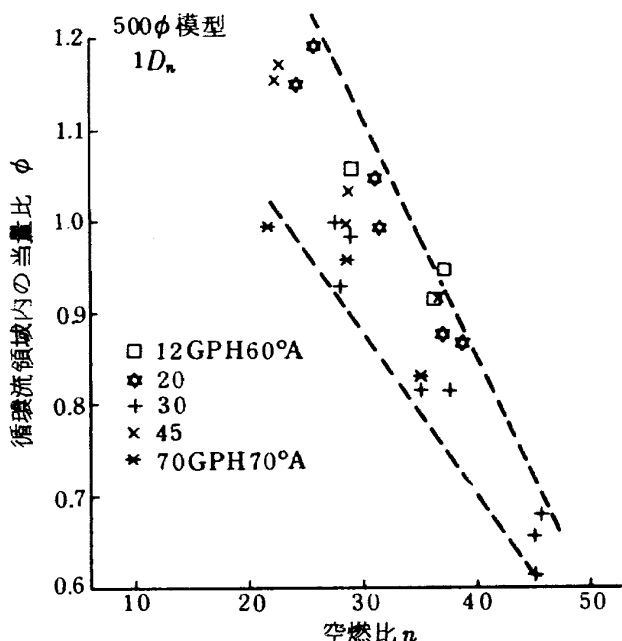


図 68 循環流領域内 (500ϕ 模型 $1D_n$ 位置) の平均当量比と全体空熱比の関係

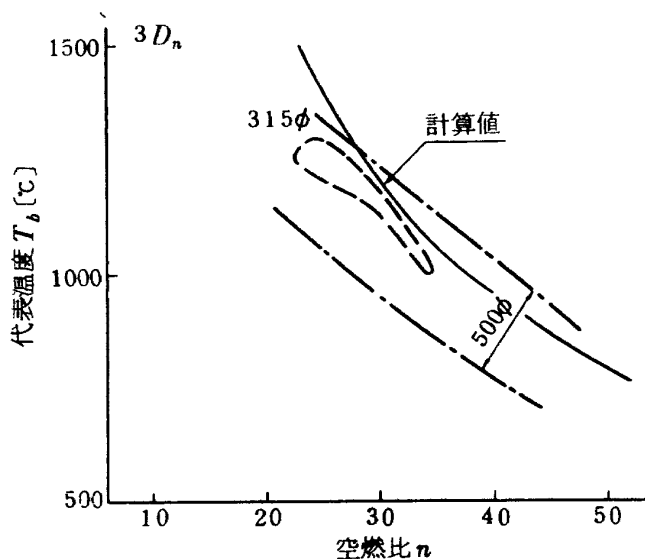


図 69 $3D_n$ 位置における 315ϕ , 500ϕ 模型の代表温度

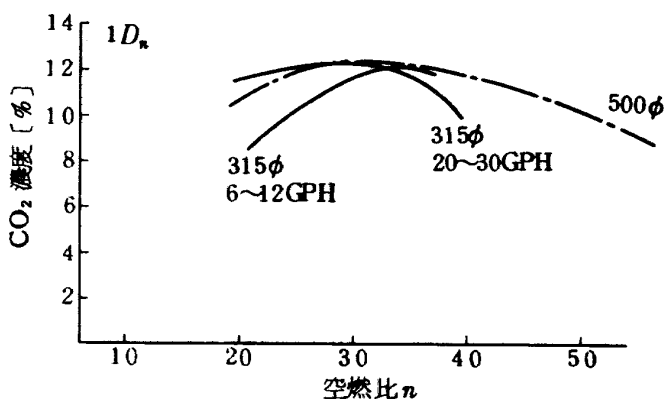


図 70 315ϕ , 500ϕ 模型, $1D_n$ 位置における CO_2 代表濃度の比較

いて示したもので、この実験条件内では、両模型による差は少ない。

9.4.2 NO_x 濃度

1 D_n 位置の NO 代表濃度を 315 ϕ , 500 ϕ 模型について比較したものを図 72 に示す。最高濃度値は両模型ともほぼ同一であるが、500 ϕ 模型のほうが、いくぶん空燃比の大きな側に寄っている。これは、燃料-空気の混合が、小さな模型のほうが良好なためと判断される。

NO_x 濃度 (1 D_n 位置では主に NO) は温度と関連をもち、温度は CO_2 濃度と関連しているため、 NO_x - CO_2 濃度の関係を求めたのが図 73 である。 CO_2 濃度が 11~12% 付近では、同一 CO_2 濃度に対する NO_x 濃度のばらつきが大きくなり、 NO_x 濃度に及ぼすその他の因子の影響が現われている。模型の寸法による差異は少ない。図 74 は NO/NO_x 濃度比を比較したもので、これでは寸法の差異が明らかに示されている。

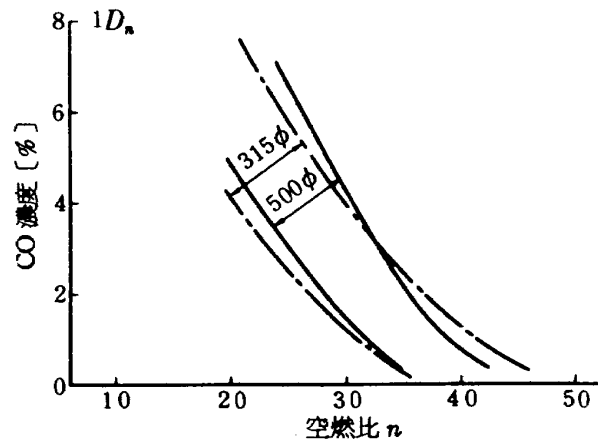


図 71 315 ϕ , 500 ϕ 模型 1 D_n 位置における CO 代表濃度の比較

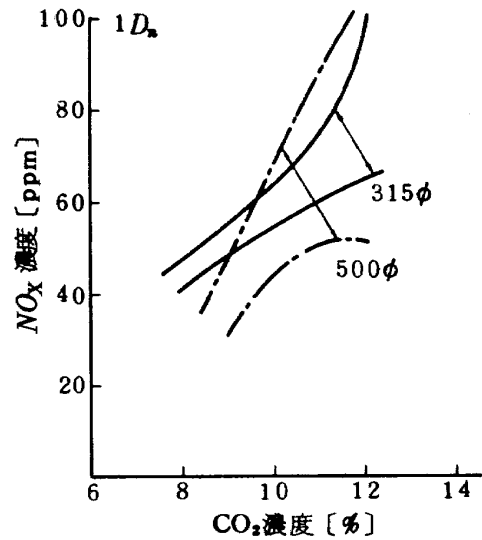


図 73 315 ϕ , 500 ϕ 模型 1 D_n 位置における NO_x - CO_2 濃度の比較

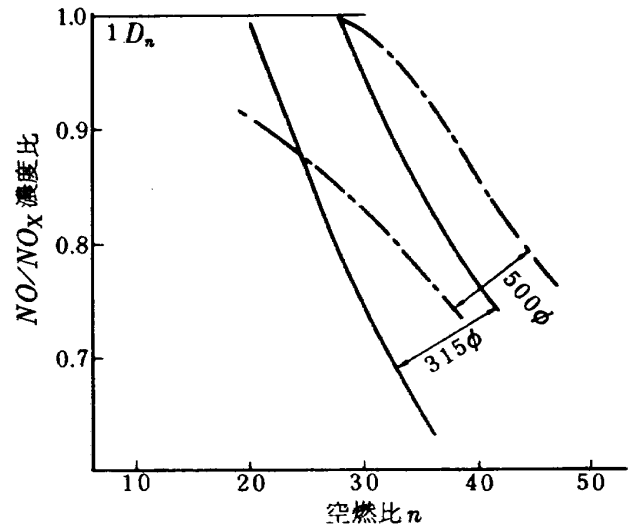


図 74 315 ϕ , 500 ϕ 模型 1 D_n 位置における NO/NO_x 濃度比の比較

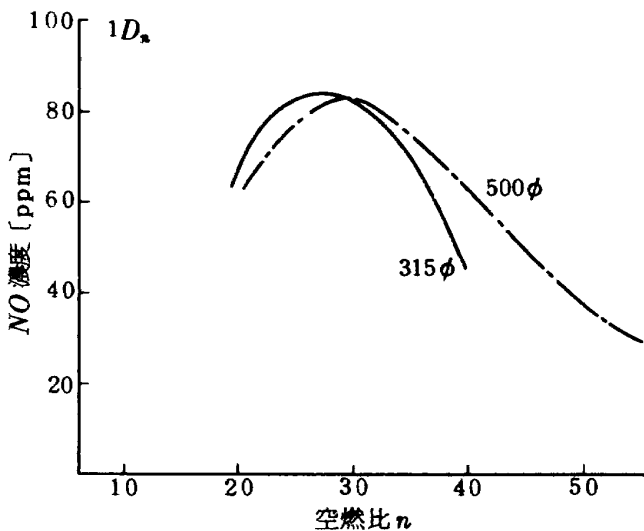


図 72 315 ϕ , 500 ϕ 模型, 1 D_n 位置における NO 代表濃度の比較

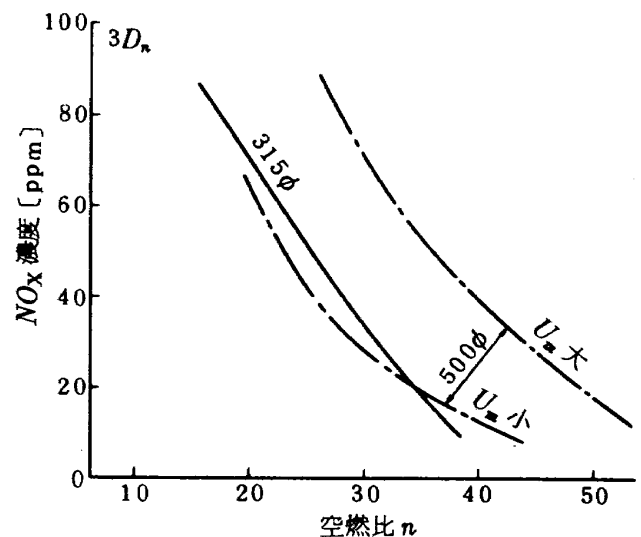


図 75 315 ϕ , 500 ϕ 模型 3 D_n 位置における NO_x 代表濃度の比較

3 D_n 位置における 315 ϕ , 500 ϕ 模型の比較を図 75 および図 76 に示す。図 75 によると, 500 ϕ 模型の場合, 平均風速の影響があり, 風速の大きなきのほうが高濃度である。これは, 風速を高め, 滞留時間を減少させる効果より, 混合促進にともなう温度上昇の効果のほうが大きいとみられる。図 76 は図 74 と同様な傾向である。

NO_x 濃度は, 代表値をとると説明のできる傾向を示すが, 循環流周辺のように温度勾配の大きなところの局所

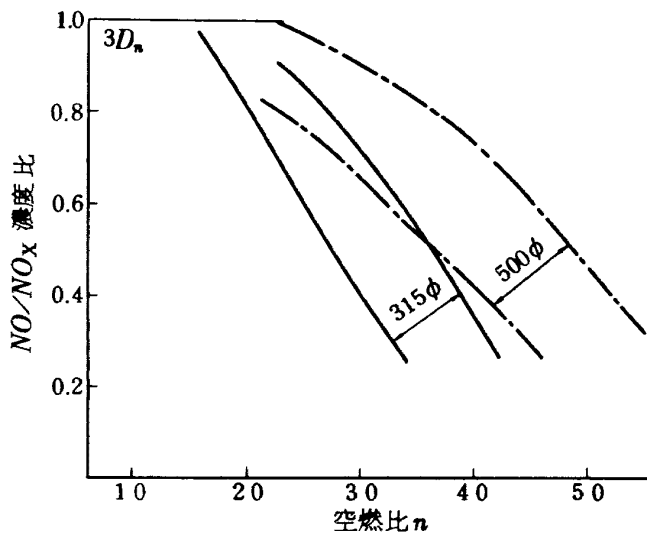


図 76 315 ϕ , 500 ϕ 模型, 3 D_n 位置における NO/NO_x 濃度比の比較

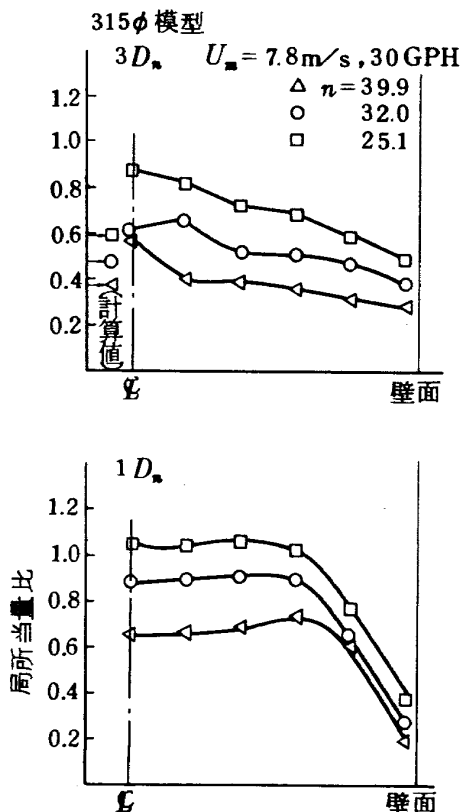


図 77 315 ϕ 模型の局所当量比分布の例

濃度は, その挙動がきわめて複雑で, 統一的な説明はできていない。

9.4.3 HC・煙濃度

HC 濃度は, 2 D_n 位置から下流側において, 壁面近傍のいちぢるしく高濃度な部分を除くと, 中央部分のよどみ領域がいくぶん高濃度になる程度で, 他は低レベルである。

煙濃度は, 炭素粒子の生成・消滅の過程のバランスから決定され, 燃料噴射弁容量を大きくして噴霧粒径を増し, 循環流領域内にとどまる燃料割合を減少させる(多分, 壁面近傍の HC 濃度は増加する)と, 煙濃度が減少し, 空燃比増加による火炎長さの短縮は, 煙濃度を増加させる。

9.5 燃料噴射弁

燃料噴射弁容量を増加し, 同一流量に対して噴霧粒径を大きくすると, 循環流領域内にとどまる燃料割合が減少すると予想され, これを証明するように図 68 の結果や O_2 濃度の増加, CO 濃度の減少, 燃料過濃時の CO_2 濃度の増加がみられた。しかし, NO_x 濃度に関しては, 一定の傾向が現われなかった。また, ガス組成から求めた局所当量比分布(図 77 に代表的な例を示す)にも噴射弁容量の影響は現われず, 全体空燃比の影響だけが表示されている。これらについては, さらに検討する必要がある。

10. 謝 辞

この研究を行なうにあたり, 社団法人日本機械学会研究協力部会, 燃焼寸法効果研究分科会の関係者各位の多大なご協力を得た。ここに感謝の意を表わす。

文 献

- (1) D.G.Stewart : Scaling of Gas Turbine Combustion Systems, Selected Combustion Problems, Butterworths (1956) p. 384
- (2) 江口邦久: スワラの性能向上に関する研究, 日本機械学会第 52 期全国大会講演会 講演論文集 740-16 (1974-11)
- (3) 大塚貞吉, 鈴木邦男, 相波哲朗, 石井浅五郎, 広瀬健樹: 高負荷燃焼器の一次燃焼領域の研究, 航技研報告 TR-143 (1967-10)
- (4) 相波哲朗, 鈴木邦男: スワラからの流れについて(第 1 報), 日本機械学会第 51 期全国大会講演会 講演論文集 730-17 (1973-10)
- (5) 斉藤 隆, 山田秀志: 航空用ガスタービン排気ガ

- ス測定装置の整備進む, 航技研ニュースⅫ186
(1974-11)
- (6) J.S.Clarke: The Relation of Specific Heat Release to Pressure Drop in Aero-Gas-Turbine Combustion Chambers, 1955 Joint Conference on Combustion, The Institution of Mechanical Engineers
- (7) 大塚貞吉, 鈴木邦男, 石井浅五郎, 山中国雅: 超軽量ジェットエンジン試作1号機(JR100)の燃焼器(I), 航技研資料 TM-68 (1965-11)
- (8) 鈴木邦男, 石井浅五郎, 広瀬健樹, 大塚貞吉, 山中国雅: 軽量ジェットエンジン研究試作2号機(JR200)の燃焼器(I), 航技研資料TM-93 (1966-10)
- (9) 大塚貞吉, 鈴木邦男, 石井浅五郎, 広瀬健樹, 山中国雅: 軽量ジェットエンジン研究試作2号機(JR200)の燃焼器(Ⅱ), 航技研資料TM-128 (1968-4)
- (10) 鈴木邦男, 石井浅五郎, 江口邦久, 斉藤 昭, 野村修也: 小形ガスタービン燃焼器の実験, 航技研資料TM-200 (1971-2)
- (11) 根矢 清, 熊倉孝尚: ガスタービン用高温燃焼器の研究(第1報), 日本機械学会第1回シンポジウム, 内燃機関の燃焼講演論文集Ⅻ700-9 (1970-7)
- (12) 真鍋善暢, 白戸 健, 高木圭二, 表 義則: ガスタービンのガス燃焼器における相似性, 三井造船技報第78号 p.41
- (13) 燃焼寸法効果研究分科会: 同分科会研究成果報告書, 日本機械学会 (1975-3)
- (14) J.S.Clarke: 文献(6)と同じ。
- (15) 日本機械学会: 伝熱工学資料 1962 p.222
- (16) 相波哲朗: スワラからの流れについて(I), 航技研報告 TR-376 (1974-7)
- (17) 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(Ⅲ), 航技研資料TM-273 (1975-1)
- (18) 鈴木邦男, 斉藤 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(Ⅳ), 航技研資料TM-274(1975-1)

航空宇宙技術研究所資料288号

昭和50年12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 東京プレス
東京都板橋区桜川 2-27-12
