

UDC 536.46:
621.45.022

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-272

液滴模型前方よどみ領域拡散火炎の解析

田丸卓・S. I. Abdel-Khalik・M. M. El-Wakil

1975 年 1 月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

液滴模型前方よどみ領域拡散火炎の解析*

田丸 卓** S. I. Abdel-Khalik*** M. M. El-Wakil***

An Analysis of the Diffusion Flame in the Forward Stagnation Region of a Simulated Liquid Fuel Drop

By Takashi TAMARU, S. I. ABDEL-KHALIK and M. M. ELWAKIL

The diffusion flame was analyzed in the forward stagnation region of a simulated liquid fuel drop by applying a flame sheet model and a boundary layer theory. Radial profiles were derived for the concentrations of oxygen, nitrogen, fuel and the burned gas, and the temperature. The results show reasonable correspondence with experimental results obtained in the authors' previous work. Effects of some factors that could not be clarified in the experiments were known analytically. It was found, for instance, that cooling of the simulated fuel drop caused significant decrease of the fuel vapor pressure at the liquid surface and also caused the flame sheet to approach the surface.

第1章 まえがき

液体燃料を使用する内燃機関の燃焼器を設計、改良するためには、燃料液滴の燃焼現象を理解することが重要である。そのため、これまで数多くの実験や、理論的解析が、それを解明する目的でおこなわれてきた。しかしいまだに、十分な結果が得られているとはいえない。

これまでおこなわれてきた単一液滴燃焼に関するほとんどの理論解析は、現象を単純化するためと現実の燃焼器内に存在する液滴が小さく、気流との相対速度が無視できることから周囲気体の対流の影響を無視している。すなわち、液滴モデルは図1に示すような球対称で、直径Dの球状液滴が、直径D_rの同心状火炎帯にかこまれていると考える。そしてその火炎帯の外側は、組成、温度、共に周囲大気状態にひとしいと考える。

また、酸素と燃料は、それぞれ周囲無限遠と液滴表面から火炎領域へ拡散してきて、それらの化学反応が

火炎帯で当量比で即座におこなわれると考える。

燃料液体が気化するに要する熱量は、すべて火炎からの熱伝達によって供給されたとする。

ふく射熱伝達と熱拡散効果 (thermal diffusivity) は無視している。

これらの仮定のもとに、燃焼率、火炎温度、燃料表面の燃料蒸気濃度、火炎直径 (図1のD_r)、温度と組成分布などを求めている。

このようなモデルを使用した研究者は、Godsave, Spalding, Goldsmith と Penner, Hottel ら, Long, Wise らなど多数である。

また、Bracco は最近、このモデルでNOの発生について報告している。⁶⁾

以上によって得たおもな結論は、つぎのようなものである。

(1) 燃焼率は、液滴直径に比例する。すなわち、

$$\frac{d(D^2)}{dt} = -\frac{4\dot{m}_l}{\pi\rho_l D} = K$$

ここで、 ρ_l 、 \dot{m} はそれぞれ液滴の密度と燃焼率である。Kは燃焼率定数とよばれる物性定数である。

(2) 火炎と液滴の直径比D_r/D は、一定で、Dに無関係である。

* 昭和49年9月5日受付

** 原動機部

*** University of Wisconsin, U.S.A.

(3) 火炎温度は一定で、断熱火炎温度にほぼひとしい。

(4) 液滴表面での燃料蒸気濃度分率は1以下である。

また、Lorell ら²⁾、Tarifa ら³⁾ および Brzustowski⁴⁾ が有限の化学反応速度の影響について考察した結果、この球対称モデルでは、液滴が大きく、周囲圧力が大きい場合には、ほとんど、またはまったく影響がないと結論した。

Annamalai ら⁵⁾ は球対称モデルをもちいて、燃烧生成物と不活性気体の火炎帯での分布を求めた。そしてそれらの分布が反応物質の消費率や拡散係数にはよらないことを結論した。

球対称モデルを用いた非定常問題については、Chen⁷⁾、Shyu ら⁸⁾、El-Wakil ら⁹⁾、¹⁰⁾、Spalding¹¹⁾、Kotake ら¹²⁾ が報告している。

それらの結果、おもにつぎのことがらが結論されている。

(1) 液滴の温度上昇は、着火前の段階で急激で、燃料蒸気の熱分解が始まると緩慢となる。

(2) 物理的着火遅れと化学的な着火遅れは同程度の時間である。

(3) 着火現象は化学反応律速から拡散律速への遷移状態とみなせる。

(4) 燃烧率、液滴表面温度、火炎と液滴直径比、および火炎温度は準定常理論で予測したような一定の値ではない

以上のように、燃烧液滴を球対称と仮定することによって、液滴の燃烧現象をある程度解析することに成功した。しかし、実際の液滴にたいし、実験対象とする液滴モデルの多くは、測定技術、精度などの点で、寸法の大きなものとなる。

われわれは、液滴燃烧特性を知る一方法として、既

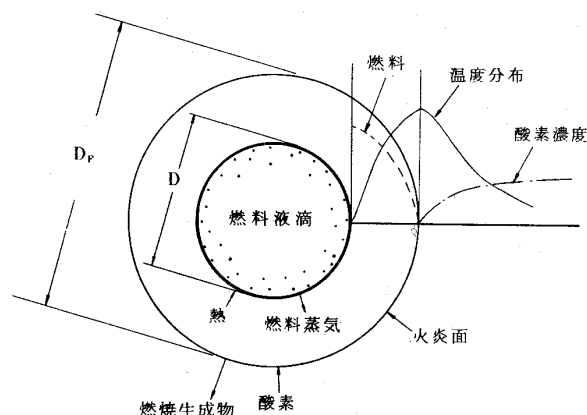


図 1 燃烧液滴の球対称モデル

報にのべたように円筒液滴模型周囲の火炎の組成分布と温度分布を実験的に求め、その模型の物質移動と熱伝達を考察した。

その概要は、つぎのとおりである。多孔質円筒から燃料としてn-ヘプタンを浸み出させ、一様な気流中で定常燃焼をおこなわせた。そのとき形成される火炎について、ガスクロマトグラフ法で、その組成分布を、また光干渉計法で温度分布を、その模型周囲の半径線上について得た。その多成分気体濃度分布から物質移動速度を、また温度分布から対流熱流束分布について求めた。この結果、これまでになく精度で火炎構造を知ることができた。そしてこの結果では、模型の前方よどみ線から円周方向にはかった角度にしても $\theta = 90^\circ$ までは、後流側とくらべて、物質移動、対流熱伝達が圧倒的に大きいことがわかった。

そこで、この場合、理論的解析を与える燃焼液滴模型として球対称を考えるよりは、流れの場を考慮し境界層理論を適用したほうが、より妥当と考えられる。

辻・山岡のおこなった研究に、火炎構造解析を目的として、気体燃料を吹出す多孔質円筒の前方よどみ領域について実験¹³⁾、¹⁴⁾、¹⁵⁾と簡単な空力的理論解析¹⁶⁾をおこなったものがある。その理論解析では、反応速度が無限大であると仮定した火炎面モデルと境界層理論をもちいている。彼等は境界層内物性値を一定と仮定したが、その後、竹野¹⁷⁾は、物性値に温度の影響を考慮し、実験値と比較している；すなわち $\rho\mu$ ＝一定を仮定し、辻らと同じ解析法で解いた。

その結果、位置に関しては、ある比例関数を採用しているものの、組成、温度分布、気体速度分布等が実験値とよい一致をみることを示した。

本報告で用いた解析法は、既報で述べた実験模型が対流の影響下にあることから、辻・山岡の方法にしたがい、この場合に即した境界条件を与えておこなったものである。すなわち円筒表面から、気体燃料が吹出す辻らの境界条件の代りに、火炎からの伝達熱流束に対応する量の円筒表面液膜燃料が気化蒸発すると考えた。

この解析の結果、実験のみでは知り得なかった各種パラメータの影響、効果を知ることができた。

記 号

アルファベット

A 冷却率、(15)式で定義

C_{PF} 混合気の比熱[cal/g·°C]

D	液滴, またはその模型直径 [mm]
D_f	液滴, またはその模型周囲火炎直径 [mm]
\mathcal{D}	拡散係数
f	無次元流れ函数
H_c	熱解離の影響を考慮した燃料発熱量 [cal/g]
H_v	燃料の気化潜熱 [cal/g]
j	単位重量燃料を完全燃焼させるに要する酸素重量
K	燃焼率定数 [mol/s]
k	熱伝導率 [cal/cm·s]
m_f	燃焼率 [g/s]
R	液滴模型半径 [mm]
T	温度 [K]
t	時間 [s]
U_∞	境界層外側気流速度 [cm/s]
u	x 方向気流速度成分 [cm/s]
V	気流速度 [cm/s]
v	y 方向気流速度成分 [cm/s]
X_i	i 成分モル分率
x	液滴模型接線方向座標 [cm]
Y_i	i 成分重量分率
y	液滴模型半径方向座標 [cm]

ギリシヤ文字

α	温度伝導率
η	無次元半径方向距離
Θ	無次元温度
θ	前方よどみ点からの角位置
\int	無次元積分函数
μ	粘性係数 [g/cm·s]
ν	動粘性係数 [cm ² /s]
ρ	密度 [g/cm ³]
ϕ	無次元濃度
ψ	流れ函数

添 字

f	燃料
i	境界層内成分のひとつ (1, 2, 3, または 4)
w	模型液面上の値
1	燃料
2	酸素
3	窒素
4	燃焼生成物

∞	境界層外側の値
I	火炎面より燃料側の領域
II	火炎面より外側の領域

第 2 章 理論解析

既報¹⁾で述べた燃焼液滴模型のよどみ点付近について, 座標および変数を図 2 のようにとる。すなわち, 液滴表面から垂直に一樣気流の方向に Y 軸をとり, 液滴表面に沿った距離を X とする。それらの方向の流速成分を, それぞれ, v , u とする。

仮定を次のようにもうける。

1. 気流は二次元, 定常かつ層流である。
 2. レイノルズ数は境界層方程式が適用できる程大きい。
 3. 境界層内の化学反応物質は, 燃料蒸気 (添字 1) 酸素 (添字 2), 窒素 (添字 3) および燃焼生成物 (添字 4) とする。
 4. 各物性値は, 境界層内で一定である。また, 各反応物質の拡散係数も同一とする。
 5. 燃料蒸気と酸素は火炎面へ当量比で到達し, 即座に反応する。
 6. プラントル数, シュミット数は共に 1 とする。
 7. 粘性によるエネルギーの消散, 運動エネルギー, およびふく射の影響は無視できる。
 8. 火炎面での発生熱量に熱解離の影響を考慮する。
- 以上の仮定にもとづく基礎式を次に示す。

連続方程式は,

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

運動量方程式は

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = U_\infty \frac{dU_\infty}{dx} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (2)$$

各反応物質にたいする拡散方程式は,

$$u \frac{\partial Y_i}{\partial x} + v \frac{\partial Y_i}{\partial y} = \mathcal{D} \frac{\partial^2 Y_i}{\partial y^2} \quad (i=1, 2, 3) \quad (3 \sim 5)$$

ここで

$$\sum_{i=1}^4 Y_i = 1 \quad (6)$$

である。

エネルギー方程式は,

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (7)$$

ここで $\alpha = k / C_p \rho$ は温度伝導率である。

(12) 式中の U_∞ は, 境界層外側の気流速度で, 流体力学の理論から, 一樣気流速度 V , 円筒半径 R のとき

$$U_{\infty} = \frac{2V_x}{R} \quad (8)$$

である。

境界条件は次のごとくである。

(a) 燃料表面 ($y=0$) で,

$$u=0, \quad v=v_w$$

$$Y_1=Y_{1w}, \quad Y_3=Y_{3w}$$

$$T=T_w$$

ここで、添字 w をつけた量は、模型液体表面での値を示す。 v_w , Y_{1w} , Y_{3w} , および T_w は他との関連から求まる定数である。

(b) 境界層の外側 ($y \rightarrow \infty$)

$$u \rightarrow U_{\infty}$$

$$Y_2 \rightarrow Y_{2\infty}, \quad Y_3 \rightarrow Y_{3\infty}$$

$$T \rightarrow T_{\infty}$$

ここで $Y_{2\infty}$ と $Y_{3\infty}$ は、大気的成分から、それぞれ 0.233 と 0.767 にとった。 T_{∞} は気流温度で 25℃ とした。

(c) 火炎面 ($y=y^*$) で,

$$Y_1=0, \quad Y_2=0, \quad T=T^*$$

ここで * 印は、火炎面での値を示す。火炎温度 T^* は

他との関連から決定される。

一般に、反応物質 i の速度 v_i は、拡散速度と対流平均速度 v から成っている。すなわち、

$$Y_i v_i = -D \left(\frac{\partial Y_i}{\partial y} \right) + Y_i v \quad (9)$$

ここで多成分系の平均速度 v は、

$$v = \frac{\sum_i \rho_i v_i}{\sum_i \rho_i} \quad (10)$$

である。そこで、燃料液体の表面を通過する成分は、燃料蒸気のみなので、次の境界条件がなりたつ。

(d) 燃料液体表面の気体側で,

$$D \left[\frac{\partial Y_3}{\partial y} \right]_w = Y_{3w} v_w \quad (11)$$

$$D \left[\frac{\partial Y_1}{\partial y} \right]_w = Y_{1w} v_w \quad (12)$$

(e) 火炎面には、燃料と酸素が当量比で到達すると考え、

$$\left[\frac{\partial Y_1}{\partial y} \right]_{y^*} = -\frac{1}{j} \left[\frac{\partial Y_2}{\partial y} \right]_{y^*} \quad (13)$$

ここで、 j は単位重量燃料を完全燃焼させるのに要する酸素重量である。

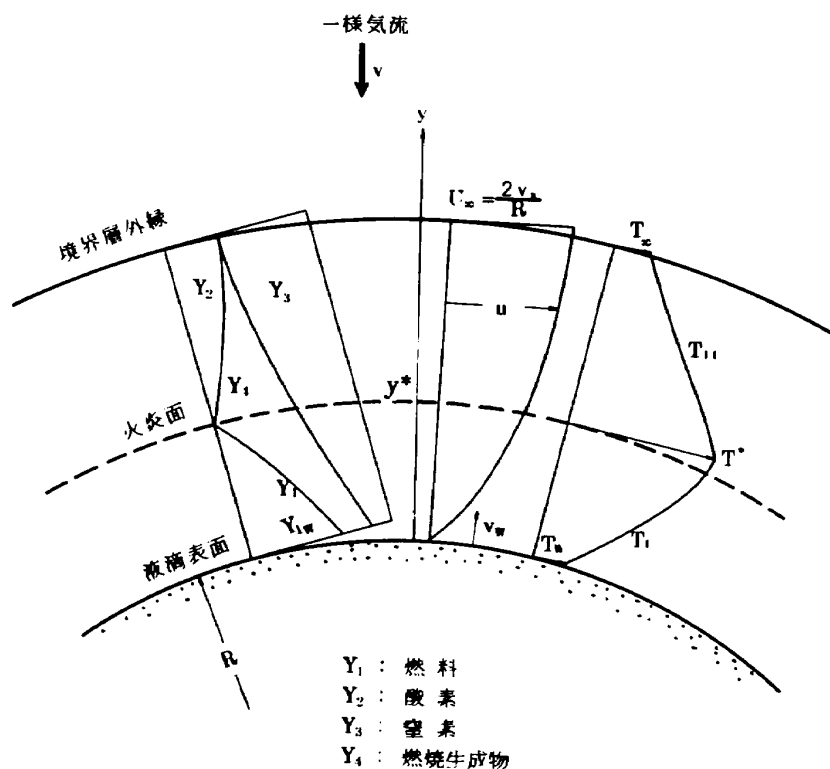


図 2 火炎面モデルと座標のとり方

(f) 火炎面でのエネルギー平衡から,

$$k \left[\frac{\partial T_I}{\partial y} \right]_{y^*} - k \left[\frac{\partial T_{II}}{\partial y} \right]_{y^*} = -\rho \mathcal{Q} H_c \left[\frac{\partial Y_I}{\partial y} \right]_{y^*} \quad (14)$$

ここで温度 T の添字 I, II は図 2 に示すように火炎面を境にして分けた領域での値である。 ρ は混合気の密度, H_c は温度 T^* での燃料単位重量あたりの発熱量で, 熱解離の影響を考慮した値をもちいた。

(g) 液滴表面でのエネルギー平衡は,

$$k \left[\frac{\partial T_I}{\partial y} \right]_w = A \rho v_w H_v \quad (15)$$

ここで, H_v は燃料の蒸発潜熱である。また A は液滴表面に対流熱伝達によって到達した熱量と気化した燃料の潜熱の比として定義され, 今回の実験の場合のように液滴に冷却をほどこした場合には 1 より大となる。厳密には, 液体燃料薄膜での熱伝達等を考えねばならないが本解析の目的から, 簡単のため上記のパラメータで処理した。

ところで拡散方程式(3)と(4)で Y_1 と Y_2 は Burke-Schumann の使った方法によると互に関連づけることができる。すなわち(13)式からもわかるように, 酸素濃度を j で除してできる分布曲線は, 燃料濃度分布曲線になめらかに接続できる。そこで(4)式は(3)式で代用でき, その境界条件は,

$$y=0 : Y_1 = Y_{1w}$$

および

$$y \rightarrow \infty : Y_1 = -\frac{Y_{2\infty}}{j}$$

となる。

運動量方程式を解くために, 一般におこなわれるようにつぎのような流れ関数 ψ を導入する。

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad v = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (16)$$

そしてこの関数 ψ を

$$\psi(x, \eta) = \frac{2Vx}{\sqrt{Re}} f(\eta) \quad (17)$$

と定義する。ここで Re はレイノルズ数,

$$Re = \frac{2VR}{\nu} \quad (18)$$

である。また,

$$\eta = \frac{\sqrt{Re}}{R} y \quad (19)$$

とすると, (1)式は自動的に満足され, (2)式は,

$$f''' + f f'' - (f')^2 + 1 = 0 \quad (20)$$

と変換される。ここで $'$ は η に関する微分を示す。その境界条件は (a), (b) より,

$$\eta=0 : f'=0 \quad , \quad f=f_w = -\frac{v_w}{2V} \sqrt{Re}$$

$$\eta \rightarrow \infty : f'=1$$

である。

(20)式を解くためには, f_w を知る必要があるが, これは以下の関係式により決定される。

つぎに, 拡散方程式(3)と(5)を解くため, 無次元関数を導入する。

$$\phi_1 = \frac{Y_1 + Y_{2\infty}/j}{Y_{1w} + Y_{2\infty}/j} \quad (21)$$

および

$$\phi_3 = \frac{Y_3 - Y_{3w}}{Y_3 - Y_{3w}} \quad (22)$$

これらを用いるとシュミット数 ($Sc = \nu/\mathcal{D}$) が 1 であるという仮定により, (3)と(5)式は

$$\phi_1'' + f \phi_1' = 0 \quad (23)$$

$$\phi_3'' + f \phi_3' = 0 \quad (24)$$

となる。これらの境界条件は, (a), (b) より,

$$\eta=0 : \phi_1=1 \quad , \quad \phi_3=0$$

$$\eta \rightarrow \infty : \phi_1 \rightarrow 0 \quad , \quad \phi_3 \rightarrow 1$$

である。

(23), (24) 式の解は,

$$\phi_1 = 1 - \frac{\mathcal{A}(\eta, f_w)}{\mathcal{A}(\infty, f_w)} \quad (25)$$

$$\phi_3 = 1 - \phi_1 = \frac{\mathcal{A}(\eta, f_w)}{\mathcal{A}(\infty, f_w)} \quad (26)$$

ここで,

$$\mathcal{A}(\eta, f_w) = \int_0^\eta \exp \left[-\int_0^{\eta^+} f d\eta^+ \right] d\eta \quad (27)$$

(27) 式中 η^+ は仮定数 (dummy variable) である。(26) 式を(11)式に代入することにより,

$$Y_{3w} = \frac{Y_{3\infty}}{1 - f_w \mathcal{A}(\infty, f_w)} \quad (28)$$

したがって

$$Y_3(\eta) = Y_{3\infty} \left\{ \frac{1 - f_w \mathcal{A}(\eta, f_w)}{1 - f_w \mathcal{A}(\infty, f_w)} \right\} \quad (29)$$

また, ϕ_3 と ϕ_1 の関係から ϕ_1 についても解けて,

$$Y_{1w} = \frac{-f_w \mathcal{A}(\infty, f_w) - Y_{2\infty}/j}{1 - f_w \mathcal{A}(\infty, f_w)} \quad (30)$$

また,

$$Y_1 = -\frac{Y_{2\infty}}{j} + \left(1 + \frac{Y_{2\infty}}{j}\right) \left[\frac{1 - \frac{\Lambda(\eta, f_w)}{\Lambda(\infty, f_w)}}{1 - \frac{1}{f_w \Lambda(\infty, f_w)}} \right] \quad (31)$$

(31) 式で $Y_1 = 0$ とおくと無次元火炎面位置 η^* が次の関係から求まる。

$$\Lambda(\eta^*, f_w) = \frac{\Lambda(\infty, f_w) + \left(\frac{1}{f_w} \cdot \frac{Y_{2\infty}}{j}\right)}{1 + \frac{Y_{2\infty}}{j}} \quad (32)$$

つぎにエネルギー方程式(7)を解くため、境界層内で火炎面の内、外の領域、それぞれ I, II で、つぎの無次元温度を導入する。

$$\Theta_I = \frac{T_I - T_w}{T^* - T_w} \quad (33)$$

および

$$\Theta_{II} = \frac{T_{II} - T^*}{T_\infty - T^*} \quad (34)$$

これら Θ_I, Θ_{II} が η のみの関数であり、プラントル数 ($Pr = C_p \mu / k$) が 1 であると仮定すると、(7)式はそれぞれの領域にて、

$$\Theta_I'' + f \Theta_I' = 0 \quad (35)$$

$$\Theta_{II}'' + f \Theta_{II}' = 0 \quad (36)$$

境界条件は (a), (b) より、

$$\eta = 0 : \Theta_I = 0$$

$$\eta = \eta^* : \Theta_I = 1, \quad \Theta_{II} = 0$$

$$\eta \rightarrow \infty : \Theta_{II} = 1$$

これらの解は、

$$\Theta_I(\eta) = \frac{\Lambda(\eta, f_w)}{\Lambda(\eta^*, f_w)} \quad (37)$$

$$\Theta_{II}(\eta) = \frac{\Lambda(\eta, f_w) - \Lambda(\eta^*, f_w)}{\Lambda(\infty, f_w) - \Lambda(\eta^*, f_w)} \quad (38)$$

である。

(37), (38) および (21) 式を (14) 式に代入し、(30) と (32) の関係をつかると火炎温度がつぎのように求まる。

$$T^* - T_w = \left\{ (T_\infty - T_w) + \frac{H_c}{C_p} \frac{Y_{2\infty}}{j} \right\} \left[\frac{f_w \Lambda(\infty, f_w) + \frac{Y_{2\infty}}{j}}{f_w \Lambda(\infty, f_w) \left(1 + \frac{Y_{2\infty}}{j}\right)} \right] \quad (39)$$

いっぽう、液滴表面でのエネルギー平衡の関係 (15) より、

$$f_w \Lambda(\infty, f_w) = -\frac{C_p}{AH_v} \left\{ (T_\infty - T_w) + \frac{H_c}{C_p} \cdot \frac{Y_{2\infty}}{j} \right\} \quad (40)$$

となる。(40)において、 A をのぞくと f_w のみが未知数である。 T_w は燃料の蒸気圧によって定まるのでやはり、無次元吹出し速度 f_w の関係である。そこで (40) 式から、任意の A の値をパラメータとして f_w を反復法によって求めることができる。

第3章 計算とその結果

前章、(20) と (24) 式にたいする数値解は、すでにいく人かの研究者によって与えられている。ここでは付録 A-1 に示す解をもちいた。その中間での値は、4 次の多項式近似によって求めた。

計算の対象とした燃料は、既報¹⁾の実験と同じく n -ヘプタンとし、付録 A-2 に示す物性値式を使用した。なお、一定とした物性値は、火炎面での値をとった。

繰返し法により、 f_w を決定する計算の流れ図を図 3 に、その計算プログラムとその出力例を付録 A-3 (a) に示す。この計算には米国、University of Wisconsin の Datacraft 6024/3 を使用した。

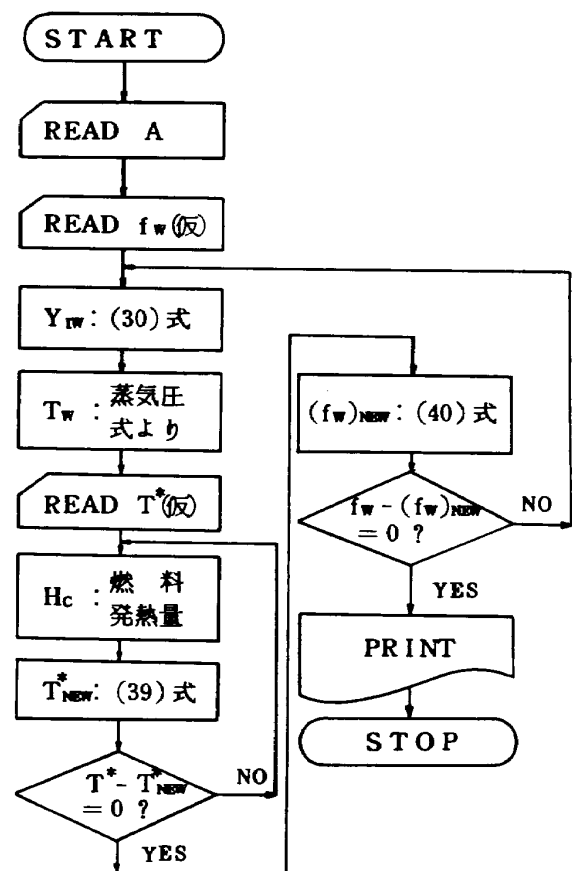


図 3 無次元吹出し速度 f_w を求める計算の流れ図

また、上記の計算により求めた f_w などの境界値をもちいて、最終目的の組成分布と温度分布を求めたプログラムと結果の一例を付録A-3(b)に示す。使用した計算機は、UNIVAC 1108 である。

この結果得られたモル分率分布と無次元温度の半径方向変化を図の4と5に、 f_w , T_w , η および T^* の A に対する変化を表1と図6に示す。

図4では、 A を1, 3, 5, 11 に変えた場合の各

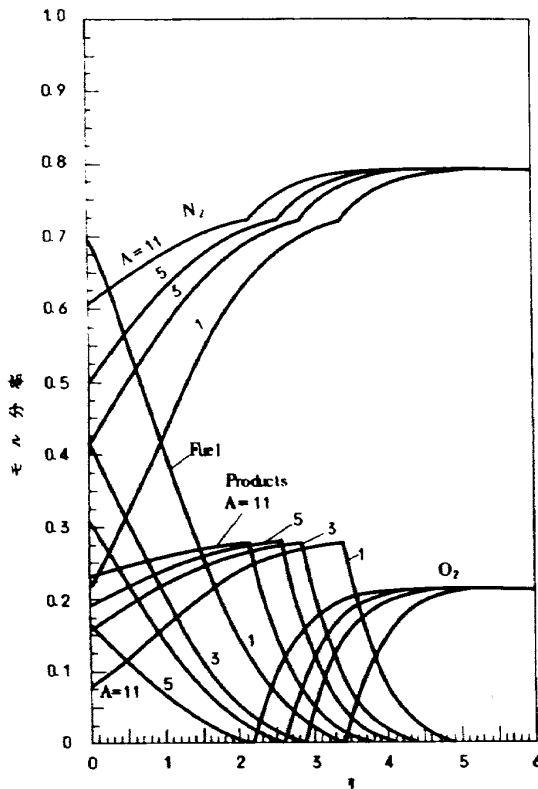


図4 火炎面モデルによる組成分布

組成モル分率の変化を示している。この図で燃料、あるいは酸素濃度がゼロになった点は火炎面の位置である。この図より、 A の値にしたがい、火炎面位置、模型表面での燃料、窒素などの濃度が大きく変化することがわかる。

図5では、 A をパラメータとした無次元温度分布を示す。図中のいずれの曲線もほぼ類似の形をしている。表1または図6に示した主な特性値の結果をみてもみる。

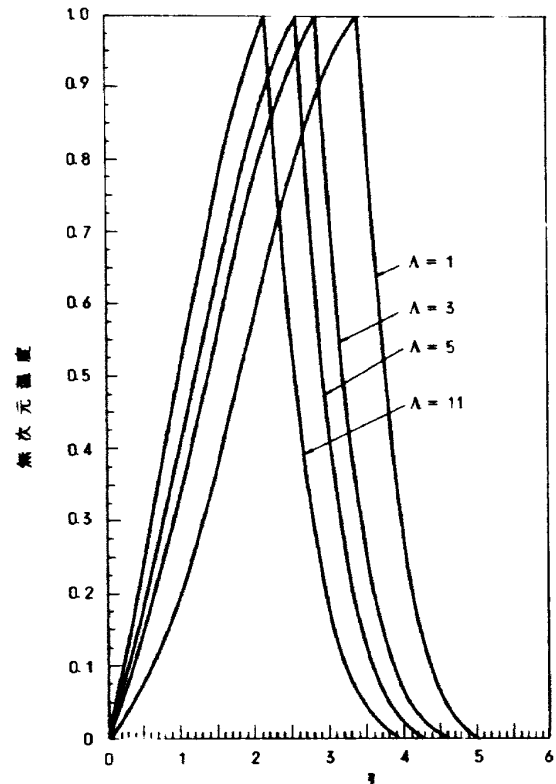


図5 火炎面モデルによる温度分布

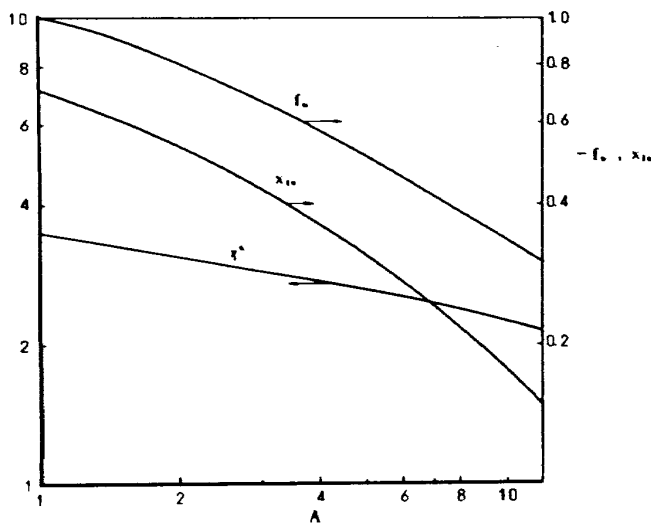


図6 境界値の A による変化

表1 理論解析によるおもな値

A	$-f_w$	$Y_{1,w}$	$X_{1,w}$	$T_w(K)$	$T^*(K)$	η^*
1	1.024	0.90	0.71	361	2279	3.44
3	0.667	0.73	0.43	347	2261	2.88
5	0.516	0.62	0.31	338	2241	2.62
11	0.313	0.41	0.16	322	2178	2.18

Aの値が1から11まで変化した場合、無次元吹出し速度 $-f_w$ 、模型表面燃料濃度 $Y_{1,w}$ 、または $X_{1,w}$ が大巾に変化する。それに反し液面温度 T_w や火炎面位置 η^* および温度 T^* はわずかな変化にとどまる。

Aは(15)式より、模型表面にたいする冷却の度合を示す。そこで模型の冷却の影響は、次のような結果となってあらわれることがわかる。

- i) 模型液面温度の低下。
- ii) 燃料気化速度の減少。
- iii) 液面付近の燃料と生成分濃度の著しい低下。
- iv) 火炎面位置の模型への接近。
- v) 火炎面温度の低下。

第4章 考 察

本解析で得られた結果を、既報¹⁾で得られた実験結果と比較してみる。本解析でもちいた無次元半径方向位置 η と実距離 y との間には(19)の関係がある。理論解析で、境界層内の物性値一定と仮定したが、火炎面での境界条件が物性値に鋭敏であることから物性値として火炎面の値をもちいた。そこで実験値についても火炎面温度に相当する動粘性係数をもちいたレイノルズ数で火炎面位置と一様気流速度の関係を示したものが図7である。これらの実験点は、直接写真によって撮影した火炎面位置に屈折率勾配の存在による視差を補正したものである。

図7中の実線は、前章の解析結果で、液面近傍での燃料蒸気濃度が実験値に最も近い $A=3$ のものを示した。

この比較から本理論解析の結果は、実験値と定性的にも定量的にもかなりの一致をみることがわかる。

つぎに、同じ方法で組成分布を比較してみると図8に示すようになる。燃焼生成物の実験値は、解析値とくらべて値が大きい、これは多成分の和であり、累積誤差がおおきく結果したものと思われる。そのほかの成分については、それぞれ、量、傾向共によい一致をみている。

温度分布については全く定性的にしか一致しない。

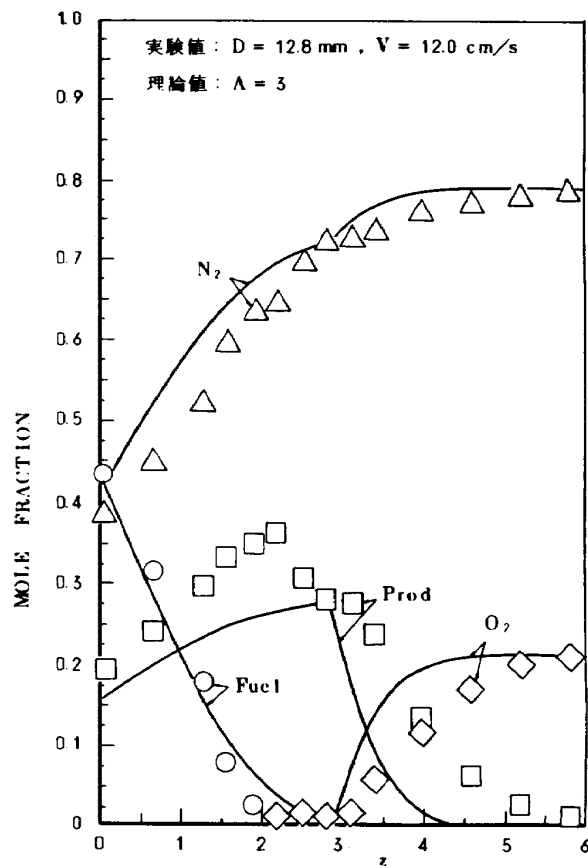


図8 半径方向組成分布の理論解析値と実験値の比較

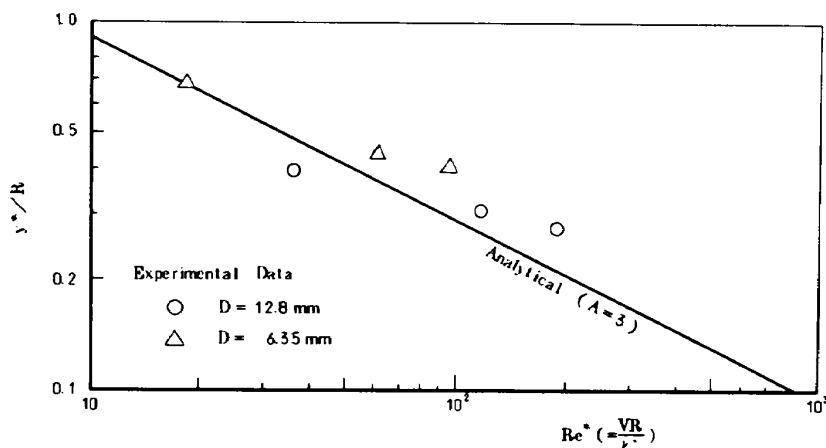


図7

たとえば、理論分析による火炎面位置は 288 であるのにたいし、実験値は、上記の無次元位置換算をおこなうと 1.23 となる。最高温度の値についても 200 K ていどの差がある。

この原因のひとつとしては、エネルギー式中の物性値や境界条件が、物性値一定の仮定に反し、より敏感に影響したものと思われる。

拡散火炎内における物性値の変化に関しては、Mukunda ら¹⁸⁾が、物性論の立場から、メタンとプロパンの火炎について検討した。それによると、プラントル数一定とする近似はよく適合しする。たとえば、空気のプラントル数を 0.73 とすると境界層内でのその変化は 5~8% でしかない。シュミット数については、ルイス数と $Sc = Pr/L_e$ の関係があるが、このルイス数は、本来、拡散係数に依存するものである。ところがこの二成分拡散係数は、比較的軽い分子の場合、境界層内で 6 倍もの変化を示している。しかし、多成分からなる系の解析には $L_{eff} \times (M_i/M_j)$ を一定のルイス数として用いることができることを Mukunda らは結論している。

したがって、本解析において、プラントル数とシュミット数として物性値を消去した分については、仮定 4、による誤差は少ないと判断される。位置関数 η 中の動粘性係数 ν と (40) 式などに表われる C_p は、大きな誤差原因となり得る。

このうち、粘性の影響については、竹野¹⁷⁾が、辻ら¹⁶⁾と同じ方法であるが、Mukunda らも立証している $\mu\rho$ = 一定の関係をつかい多孔円筒吹出しによる拡散火炎について解析をおこない、実験値^{13), 14), 15)}と比較をした。組成や温度分布についてはかなり良い一致がみられる。しかしなお、竹野は位置関係について、ある比例関係をもちなければならなかった。

C_p は Mukunda らによると、境界層内で 3 倍程度の変化をする。

したがって、より正しく現象を定量的に表現するには、これら物性値、個々の変化を考へる必要がある。

実験による組成分布データでは、燃料蒸気および酸素の濃度がほぼ零となる点は、最高温度位置と相異している。たとえば、 $D = 1.28 \text{ cm}^2/\text{s}$, $V = 1.2 \text{ cm/s}$ の場合では、前者が $y = 2.5 \text{ mm}$ 、後者が 2.14 mm の位置にある。これは、実験誤差もあるが、熱解離など複雑な化学反応も基因していると思われる。今回の解析では、流れ速度分布の詳細な測定をおこなわなかったので反

応速度論まで言及できない。火炎面での反応速度を無限大とした仮定の限界がこの辺にあると思われる。

今回の火炎面モデルでは燃料発熱量 H_c は、火炎面での化学平衡状態を考えその断熱発熱量をもちいた。すなわち、この発熱量は、熱解離の影響の分だけ少ない。

最終結果である火炎温度で比較するとつぎのようになる。熱解離を考へた場合の火炎温度は、実験値のものより、200~300 °C 高い。それを考へしない燃料低位発熱量をもちいるとさらに 200 °C ていど高く算出される。

火炎面で化学平衡を考えることは、火炎面で酸素と燃料濃度が零となるという火炎面モデルに矛盾しそうである。しかし、付録 A-3(a) に示す出力例からもわかるように火炎面での平衡状態で酸素の重量分率は、0.006 ていどでほとんど零とみなせる。

そこで、火炎面の発熱量などの物性値は、火炎面で化学平衡状態のものをもちいた。

第 5 章 ま と め

従来より液滴周囲の拡散火炎の解析にもちいられている火炎面モデルと、境界層理論をもちいて、円筒形燃焼液滴模型の拡散火炎について解析をおこなった。その結果、簡単のため境界層内物性値一定の仮定を使っても、適当な温度の代表物性値をとれば、火炎面位置、組成分布に関しては実験結果とよい一致をみることがわかった。また、気流速度や模型冷却の影響などを明らかにすることができた。すなわち、火炎面位置は、気流速度の平方根に比例して模型液面に近ずき、おおよそ、冷却度 A の -5.4 乗に比例して近づく。

模型液面近傍の燃料蒸気濃度は、模型の冷却率が大きくなるにしたがって低下する。既報の実験値は、無冷却の場合 ($A = 1$, $X_f = 0.71$) に比べ、かなり低い値である。すなわち、火炎の定定化のためにおこなった模型冷却は、このような点にたいし影響をおよぼしている。

以上、単純な仮定による解析によっても、既報の実験現象、および測定結果の理解に役立つ結果が得られた。

おわりに、解析にもちいた解の一部や資料を提供いただいた東京大学宇宙航空研究所の辻教授、研究の機会と経済的援助を与えてくださった日本政府と NASA の各位に感謝いたします。

文 献

- 1) 田丸 卓, Abdel-khalik, S.I. and El-Wakil, M.M.; ガス分析と光干渉計による液滴模型の燃焼と熱伝達の実験的解析, 航技研報告 TR-374(昭和49年)
- 2) Lorell, J., Wise, H., and Carr, R.E., "Steady-State Burning of a Liquid Droplet," J.Chem.Phys., 25, p.325 (1956)
- 3) Tarifa, C.S., Del-Notario, P.P., and Moreno, F.G., "Combustion of Liquid Monopropellants and Bipropellants in Droplets," Eighth Symposium (Int.) on Combustion, Williams and Wilkins, p.1035(1961)
- 4) Brzustowski, T.A., "Chemical and Physical Limits on Vapor-Phase Diffusion Flames of Droplets," Can.J.Chem.Eng., 43, p.30 (1965)
- 5) Annamalai, K., Rao, V.K., and Sreenath, A.V., "Distribution of Products around a Burning Droplet: An Analytical Approach," Combustion and Flame, 16, p.287 (1971)
- 6) Bracco, F.V., "Nitric Oxide Formation in Droplet Diffusion Flames," Fourteenth Symposium (Int.) on Combustion, The Combustion Institute, pp.831-842, 1973
- 7) Chen, C.S., "Experimental and Theoretical Studies of Burning Drops of Hydrocarbon Fuels," Ph.D.Thesis, Univ.of Wisconsin (1963).
- 8) Shyu, R.R., Chen, C.S., Goudie, G.O. and El-Wakil, M.M., "Multi-Component Heavy Drop Histories in High Temperature Flow Field," Fuel, 51, (1972) p.135.
- 9) El-Wakil, M.M. and Abdou, M.I., "The Selfignition of Fuel Drops in Heated Air Streams, Part II: Physical Ignition Delay," Fuel, 45, (1966) p.189
- 10) 同上, "Part III: Chemical Ignition Delay," Fuel, 45, p.199(1966)
- 11) Spalding, D.B., "A Theory of the Extinction of Diffusion Flames," Fuel, 33, p.255(1954)
- 12) Kotake, S. and Okazaki, T., "Evaporation and Combustion of a Fuel Droplet," Int.J.Heat Mass Transfer, 12, p.595(1969)
- 13) Tsuji, H. and Yamaoka, I., "The Counter-flow Diffusion Flame in the Forward Stagnation Region of a Porous Cylinder," Eleventh Symposium (Int.) on Combustion, The Combustion Institute, p.979(1967)
- 14) 同上, "The Structure of Counterflow Diffusion Flame in the Forward Stagnation Region of a Porous Cylinder," Twelfth Symposium (Int.) on Combustion, the Combustion Institute p.997(1969).
- 15) 同上, "Structure Analysis of Counterflow Diffusion Flames in the Forward Stagnation Region of a Porous Cylinder," Thirteenth Symposium (Int.) on Combustion, The Combustion Institute, p.723(1971)
- 16) 同上, "A Gasdynamic Analysis of the Counterflow Diffusion Flame in the Forward Stagnation Region of a Porous Cylinder," Inst.Space and Aero Sci., Univ. of Tokyo, Report No 404 (1966)
- 17) Takeno, T., "A Gasdynamic Analysis of a Counter-Flow Diffusion Flame," Comb. Sci. Technology, Vol 5, pp.99-106 (1972)
- 18) Mukunda, H.S., Marathe, A.G. and Ramanani N., "Analysis of Variation of Thermodynamic and Transport Properties in Flames," First National Heat and Mass Trans.Conf. Indian Inst. of Tech., Madras. pp.47-61 (1971)
- 19) Hayasi, N., "On stagnation Flows with Blowing," Fifth U.S.Nat. Congr. Appl.Mech., p.766(1966)

付 録 A-1

辻教授によって提供された(20)と(24)式に関する解は、はじめ林¹⁹⁾によって計算されたものであり、次のように境界値として与えられている。

付表 1

f_w	f''_w	ϕ'_w
0	1.23258767	0.57046523
-0.0	1.17604069	0.50844806
-0.3	1.06867282	0.39439390
-0.5	0.96922955	0.29497537
-1.0	0.75657490	0.11675224

付 録 A-2

n-ヘプタンの気化潜熱 H_v [$\frac{\text{Btu}}{\text{lb}_m}$]
 $H_v = 139.9 + 0.181T - 27875 \times 10^{-4} T^2$
 ($500^\circ \text{R} < T < 960^\circ \text{R}$)

n-ヘプタン蒸気の比熱 C_p [$\frac{\text{cal}}{\text{K} \cdot \text{mol}}$]
 $C_p = A_1 + A_2 \left(\frac{T}{10^3} \right) + A_3 \left(\frac{T}{10^3} \right)^2$
 $+ A_4 \left(\frac{T}{10^3} \right)^3 + A_5 \left(\frac{T}{10^3} \right)^4$

ここで

$$A_1 = -3.50559356 \times 10^{-2}$$

$$A_2 = 154.9442898$$

$$A_3 = -75.5053314$$

$$A_4 = 9.7559667$$

$$A_5 = 2184509045$$

であり、Tの単位は、絶対温度である。

n-ヘプタンの蒸気圧 P [$\frac{\text{lb}}{\text{in}^2}$]

$$\log_{10} P = 5.18879 - \frac{2282.607}{358.420 + T}$$

$$(0.2 < P < 30, T: [^\circ \text{F}])$$

なお、n-ヘプタンの蒸気圧Pと第2章でもちいた重量分率 Y_1 との関係は、次のごとくである。

$$\frac{P}{P_t} = \frac{1}{1 + \left(\frac{2M_1}{M_3 + M_4} \right) \left(\frac{1}{Y_1} - 1 \right)}$$

ここで

P_t : 全圧

M_1, M_3, M_4 : 燃料, 窒素, および燃焼生成物の分子量

である。

付 録 A-3

最初に示すプログラム(a)は、本文に示す冷却率Aを1より21まで変えた場合につき f_w を求めるものである。反復法による f_w の決定にともない、火炎温度等諸値が求まる。

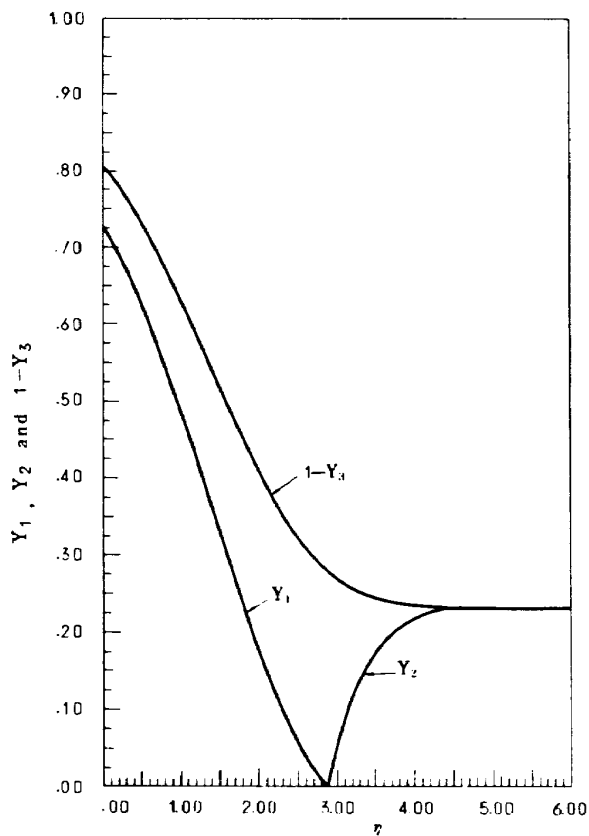
つぎにその出力結果を示す。

プログラム中の記号で、後尾のPはプライム〔'〕を示し、微分値であることを意味する。

プログラム(b)は、プログラム(a)で求めた境界条件にしたがい、本文の(20),(24)式などを解くものである。

その後に示したものは、A=3にたいする出力例である。また付図1~3は、上記プログラムにより描かせた組成と温度分布結果である。付図1は、各成分の重量分率である。

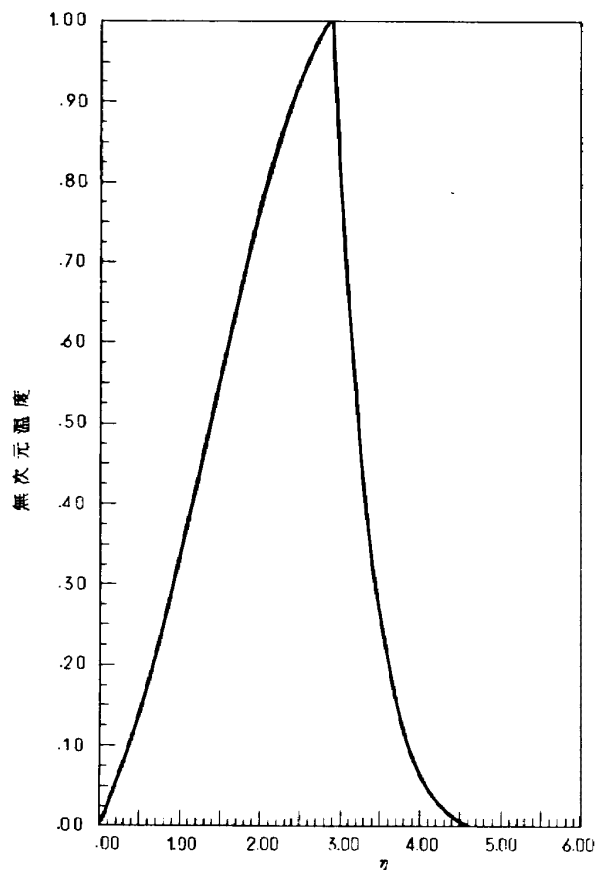
MASS CONCENTRATION FW= 0.667



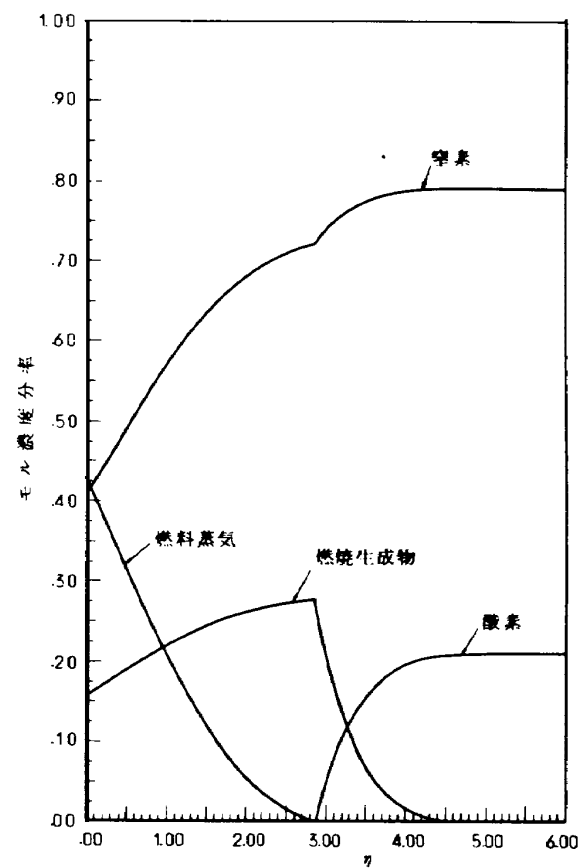
付図 1 半径方向組成重量分率分布

NON DIMENSIONAL TEMP. (FW= .67)

MOLE CONCENTRATION FW= 0.667



付図 2 半径方向無次元温度分布



付図 3 半径方向モル分率分布

プログラム (a)

```

C MAIN PROGRAM
C ONE DIMENSIONAL ANALYSIS ON FLAME SHEET MODEL
REAL M1,M3,M4
DIMENSION X(50)
COMMON /XLOC/ AN,AM,AL,PHI,T,P,X1,X2,X3,X4,X5,X6,X7,X8,X9,X10,
1X11,X12,X13,IERR,HOPP,KLC
COMMON TP,HKANI
HOPR=0
KLI=1
C TF=CHEMICAL EQUILIBRIUM FLAME TEMP. (K)
C TW=SURFACE TEMP. (K)
C HLL=LATENT HEAT (BTU/LB)
C HL=LATENT HEAT (KCAL/GR) AT Ta
C AN=NUMBER OF CARBON ATOMS
C AM=NUMBER OF HYDROGEN ATOMS
C AL=NUMBER OF OXYGEN ATOMS
C PEQ=EQUILIBRIUM PRESSURE (ATM)
C PHI=EQUIVALENCE RATIO
C FUEL DATA
C WRITE(6,90)
90 FORMAT(14,' FUEL= C7H16')
AN=7.
AM=14.
AL=0.
M1=100.158
M3=32.0
M4=452./15.
C FUEL EQUIVALENCE
V=0.233075.05/88.
C COMBUSTION
PEQ=1.
P=PEQ*14.7
PHI=1.
TIF=25.+273.16
C NEXT ARE INITIALLY ASSUMED VALUES OF FM AND TF, RESPECTIVELY
FM=0.5
TF=2000.
WRITE(6,95) FM,TF
95 FORMAT(14,' INITIALLY ASSUMED VALUES'/10X,'FM='F5.2/10X,'TF='
1 F4.1//)
C DO 750 M1=1.11
N1=1
230 X=FM
NIF=1
AA=-5.60999069E-09
AB=1.70441399
CC=-2.7242417
C
C D=-1.53408979
E=-5.67471322
F=GA+AA+BBX+CCX+DXX+EX+EE+XX+XX
Y1=(F+G+V)/(F+G-1.)
C TM (DEG F), P1W (PSI) IN FOLLOWING TWO LINES
P1=P/(2.581/(M3+M4)*(1./Y1-1)+1.)
TM=2282.607/(5.18879-ALOG10(P1))-338.420+460.
C P1=(ATA)
P1=P1W/8
T=TM
HLL=139.9+0.1810T-2.7875*(T/100.)**2.
HLA=7.555919+0.10019P+HLL/100.198
HLL=FLOAT(HLL)*2.-1.
IF(HLL.GT.0) GO TO 5110
WRITE(6,9100) HLL
5100 FORMAT(14,' LATENT HEAT IS MULTIPLIED BY='F4.0)
HLL=1
HL=HLA*HLL
TW=0.5./9.
C
C ITERATION TO GET THE FLAME TEMPERATURE
220 T=TF
C SPECIFIC HEAT OF EACH SPECIES OF PRODUCTS (CAL/MOL.K)
CPH=4.96+
CPH=5.13708+0.0643235*(T/1000.)
CPH=4.964
CPH2=6.9297+0.21048*(T/1000.)+0.69407*(T/1000.)**2-0.1367*(T/1000.
1)***3
CPH3=7.2175+0.62525*(T/1000.)+0.96971*(T/1000.)**2-0.19613*(T/1000
1)***3
CPH4=6.6489+0.637366*(T/1000.)+1.23745*(T/1000.)**2-0.76581*(T/100
1)***3+0.121984*(T/1000.)***4
CPH5=6.74768+0.922*(T/1000.)+0.953344*(T/1000.)**2-0.67666*(T/100
1)***3+0.112397*(T/1000.)***4
CPH2=6.17043+3.15667*(T/1000.)-1.22464*(T/1000.)**2+0.183037*(T/10
1)***3
CPH2=7.13007+2.70775*(T/1000.)+0.1870*(T/1000.)**2-0.133358*(T/10
1)***3
CPH2=5.9590+14.9937*(T/1000.)-9.806064*(T/1000.)**2+3.02153*(T/10
1)***3-7.355667*(T/1000.)***4
CPH2=6.79555-0.00294*(T/1000.)+1.78019*(T/1000.)**2-0.9446+14*(T/1
1)***3+0.142712*(T/1000.)***4
CPH2=0.174039.944
C SUBROUTINE E284 GIVES MOLAR FLUXES OF PRODUCTS
T=0.5./9.
CALL EQBY
IF(IERR.NE.0) GO TO 20
TF=0.5./9.
C SPECIFIC HEAT OF PRODUCTS (KCAL/MOL(PROD.))K)
CPH=X10*PH+X2*CPH+X3*CPH+X4*CPH+X5*CPH+X6*CPH+X7*CPH+X8*CPH+X9*CPH+X10*CPH+X11*CPH+X12*CPH+X13*CPH

```

```

1X9*CPH2O+X10*CPH2+X11*CPN7+X12*CPAR)/100C.
C CP=SPECIFIC HEAT OF PRODUCT (KCAL/GR.K)
PH=X1*1.+X2*16.+X3*14.+X4*2.+X5*17.+X6*28.+X7*3C.+X8*32.+X9*18.+X1
10*44.+X11*28.+X12*40.
CP=CPH/PH
C SUBROUTINE HCOMB GIVES HEAT OF COMBUSTION HC.
CALL HCOMB
C HC=HEAT OF COMBUSTION (KCAL/GR)

HC=HM/100.198
TFX=TW*(TINF-TW+HC/CP*Y)*(1.-Y)/(1.+Y)*(1.-1./FNG))
ERRDR=ABS(TF-TFX)
IF(ERRDR<1.) 200,200,210
210 TF=(TF+TFX)/2.
205 NIF=NIF+1
GO TO 220

200 SXI=(TW-TINF)*CP/HL-HC/HL*Y
C
C ITERATION TO GET 'FW'
C NEWTON'S METHOD X(N+1)=X(N)-F(X(N))/F'(X(N))
XF(1)=1.0
EPS=0.001
DO 700 I=1,30
X=XF(I)
FWG=AA*BA*X+CC*X+DD*X*E+EE*X*X*F
FNSXI=F/G
FPN=(BB*2.+CC*X+3.*DD*X*E+4.*EE*X*X*F)
XF(I+1)=XF(I)-FPN/FPN
II=I+1
FWX=XF(II)
ERRDR=ABS(FWX-XF(I))
IF(ERRDR<EPS) 710,710,700
700 CONTINUE
710 ERR=ABS(FW-FWX)
IF(ERR<0.001) 720,720,730
730 FW=(FW+FWX)/2.
NIN=NIN+1
GO TO 230

720 TWC=TW+273.16
TFC=TF+273.16
TNF=(HC/HL)*Y+0.24*(TINF-TW)/HL/1000.
WRITE(6,940) FW,Y1W,P1W,TW,TWC,HL,TF,TFC,HC
740 FORMAT(140,' FW=',E15.7/10X,' Y1W=',E15.7/10X,' P1W(ATH)='F10.7/
1 10X,' TW(K)='F7.2/10X,' SX='F7.2/10X,' TN(C)='F8.2/11X,' HL(KCAL/GR)='F
2 E15.7/10X,' TFC(K)='F7.2/10X,' TFC(C)='F7.2/10X,' HC(KCAL/GR)='F
3 E15.7)
WRITE(6,942) PH,TNF
745 FORMAT(140,' MOLECULAR WEIGHT OF PRODUCTS='E15.7/' TRANSFER NO.=
1'E15.7)
WRITE(6,943)
746 FORMAT(140,' SPECIES AND THEIR MOLAR CONCENTRATION AT THE FLAME SH
1EET')
WRITE(6,105)
105 FORMAT(' XH X0 XN XH2
1 XOH XCO')
WRITE(6,110) X1,X2,X3,X4,X5,X6
110 FORMAT(14,' 6E13.5/)
WRITE(6,112)
112 FORMAT(' XNO XO2 XM2O XCO2
1 XN2 XAR ')
WRITE(6,115) X7,X8,X9,X10,X11,X12
115 FORMAT(14,' 6E13.5/)
WRITE(6,945) NI
746 FORMAT(14,' NUMBER OF ITERATION='I3)
X=FW
A1=1.2325876704925
A2=0.5747483919875
A3=0.09140756710383
A4=-0.0140988250444
A5=-0.0091709221281
FWPP=A1+.2*X+A3*X*X+A4*X*X*X+A5*X*X*X*X
F1=0.5706652301
H2=0.62541C1609343
B3=0.15010538022
B4=-0.04513621309773
B5=-0.0132422451983
FA1=P*B1+B2*X+B3*X*X+B4*X*X*X+B5*X*X*X*X
WRITE(6,900) FWPP,FA1,P
500 FORMAT(14,' FWPP='F10.6/10X,' FA1NP='F10.8//)
GO TO 75
20 WRITE(6,95) IERR
34 FORMAT(' SUBROUTINE EQHH FAILED. ERROR CODE IS',I4//)
750 CALL
STOP
END

```

SIZE 1591 03067

END LIST

SIZE 901 01605

GENCODE C*FORM
SLINKGO

プログラム (a) の出力

FILE = 27H16

INITIALLY ASSUMED VALUES

F.W. = 0.5
TF = 2000.0

LATENT HEAT IS MULTIPLIED BY= 1.

F.W. = -1.023724E+01
 Y1W = .895277E+00 P1W(ATM) = .7260769
 T(K) = 461.23 T(C) = 88.07 HL(KCAL/GR) = .7768323E-01
 TF(K) = 2279.42 TF(C) = 2006.26 HC(KCAL/GR) = .1110243E+02

MOLECULAR WEIGHT OF PRODUCTS = .2836797E+02
 TRANSFER NO. = .9244339E+01

SPECIES AND THEIR MOLAR CONCENTRATION AT THE FLAME SHEET

XW	XO	XN	XM2	XOH	XCO
.48953E-03	.34672E-03	.26297E-07	.31438E-02	.32656E-02	.13808E-01
XNO	XO2	XM2O	XCO2	XM2	XAR
.76191E-02	.62972E-02	.13510E+00	.10880E+00	.71757E+00	.85570E-02

NUMBER OF ITERATION= 11
 F.W.P. = .74777139
 FAI.P. = .11086193

LATENT HEAT IS MULTIPLIED BY= 3.

F.W. = -.6671317E+00
 Y1W = .7344677E+00 P1W(ATM) = .4617000
 T(K) = 367.48 T(C) = 74.32 HL(KCAL/GR) = .2402589E+00
 TF(K) = 2260.69 TF(C) = 1987.53 HC(KCAL/GR) = .1115500E+02

MOLECULAR WEIGHT OF PRODUCTS = .2840932E+02
 TRANSFER NO. = .3030170E+01

SPECIES AND THEIR MOLAR CONCENTRATION AT THE FLAME SHEET

XW	XO	XN	XM2	XOH	XCO
.49432E-03	.29912E-03	.21322E-07	.29288E-02	.29923E-02	.12808E-01
XNO	XO2	XM2O	XCO2	XM2	XAR
.74901E-02	.30618E-02	.13539E+00	.10989E+00	.71821E+00	.85634E-02

NUMBER OF ITERATION= 10
 F.W.P. = .89236534
 FAI.P. = .22396934

LATENT HEAT IS MULTIPLIED BY= 5.

F.W. = -.5159980E+00
 Y1W = .6181342E+00 P1W(ATM) = .3341944
 T(K) = 338.39 T(C) = 65.23 HL(KCAL/GR) = .4078453E+00
 TF(K) = 2241.18 TF(C) = 1968.02 HC(KCAL/GR) = .1120623E+02

MOLECULAR WEIGHT OF PRODUCTS = .2843021E+02
 TRANSFER NO. = .1798732E+01

SPECIES AND THEIR MOLAR CONCENTRATION AT THE FLAME SHEET

XW	XO	XN	XM2	XOH	XCO
.36778E-03	.25578E-03	.17076E-07	.27172E-02	.27274E-02	.11823E-01
XNO	XO2	XM2O	XCO2	XM2	XAR
.72440E-02	.54302E-02	.13687E+00	.11097E+00	.71883E+00	.85697E-02

NUMBER OF ITERATION= 9
 F.W.P. = .96181495
 FAI.P. = .28787384

LATENT HEAT IS MULTIPLIED BY= 7.

F.W. = -.4233623E+00
 Y1W = .5312781E+00 P1W(ATM) = .2800446
 T(K) = 331.73 T(C) = 58.57 HL(KCAL/GR) = .5782349E+00
 TF(K) = 2220.41 TF(C) = 1947.45 HC(KCAL/GR) = .1125661E+02

MOLECULAR WEIGHT OF PRODUCTS = .2845083E+02
 TRANSFER NO. = .1277241E+01

SPECIES AND THEIR MOLAR CONCENTRATION AT THE FLAME SHEET

XW	XO	XN	XM2	XOH	XCO
.31466E-03	.21606E-03	.13452E-07	.25069E-02	.24679E-02	.10842E-01
XNO	XO2	XM2O	XCO2	XM2	XAR
.70493E-02	.49989E-02	.13634E+00	.11204E+00	.71944E+00	.85760E-02

NUMBER OF ITERATION= 8
 F.W.P. = 1.70638043
 FAI.P. = .33125730

LATENT HEAT IS MULTIPLIED BY= 9.

F.W. = -.3596001E+00
 Y1W = .4636632E+00 P1W(ATM) = .2113831
 T(K) = 326.43 T(C) = 53.29 HL(KCAL/GR) = .7505337E+00
 TF(K) = 2199.47 TF(C) = 1926.31 HC(KCAL/GR) = .1130456E+02

MOLECULAR WEIGHT OF PRODUCTS = .2847057E+02
 TRANSFER NO. = .9899308E+00

SPECIES AND THEIR MOLAR CONCENTRATION AT THE FLAME SHEET

XH	XO	XN	XH2	XOH	XCO
.26864E-03	.18107E-03	.10479E-07	.23043E-02	.22219E-02	.98968E-02
XNH	XO2	XH2O	XCO2	XN2	XAR
.18815E-02	.45809E-02	.13698E+00	.11307E+00	.72003E+00	.85819E-02

NUMBER OF ITERATION= 8
FWPP=1.93819653
FAI=PP= .36317447

LATENT HEAT IS MULTIPLIED BY= 11.

FW= .3132667E+00
YIH= .4103307E+00 P1W(ATM)= .1774659
TH(K)= 322.15 TH(C)= 48.99 HL(KCAL/GR)= .9241515E+00
TF(K)=2177.77 TF(C)=1904.61 MC(KCAL/GR)= .1134997E+02

MOLECULAR WEIGHT OF PRODUCTS= .2848935E+02
TRANSFER NO.= .8083461E+00

SPECIES AND THEIR MOLAR CONCENTRATION AT THE FLAME SHEET

XH	XO	XN	XH2	XOH	XCO
.22708E-03	.15044E-03	.80689E-08	.21097E-02	.19900E-02	.89897E-02
XNH	XO2	XH2O	XCO2	XN2	XAR
.17111E-02	.41782E-02	.13741E+00	.11406E+00	.72059E+00	.85876E-02

NUMBER OF ITERATION= 7
FWPP=1.76182758
FAI=PP= .38733753

LATENT HEAT IS MULTIPLIED BY= 13.

FW= .2774539E+00
YIH= .3864669E+00 P1W(ATM)= .1520752
TH(K)= 318.47 TH(C)= 45.31 HL(KCAL/GR)= .1098905E+01
TF(K)=2155.53 TF(C)=1882.37 MC(KCAL/GR)= .1139268E+02

MOLECULAR WEIGHT OF PRODUCTS= .2850714E+02
TRANSFER NO.= .6831407E+00

SPECIES AND THEIR MOLAR CONCENTRATION AT THE FLAME SHEET

XH	XO	XN	XH2	XOH	XCO
.19449E-03	.12390E-03	.61391E-08	.19238E-02	.17727E-02	.81250E-02
XNH	XO2	XH2O	XCO2	XN2	XAR
.15449E-02	.37924E-02	.13781E+00	.11500E+00	.72112E+00	.85929E-02

NUMBER OF ITERATION= 7
FWPP=1.78038582
FAI=PP= .40654566

LATENT HEAT IS MULTIPLIED BY= 15.

FW= .2496168E+00
YIH= .3305525E+00 P1W(ATM)= .1328240
TH(K)= 315.33 TH(C)= 42.17 HL(KCAL/GR)= .1274435E+01
TF(K)=2133.34 TF(C)=1860.18 MC(KCAL/GR)= .1143164E+02

MOLECULAR WEIGHT OF PRODUCTS= .2852348E+02
TRANSFER NO.= .5917055E+00

SPECIES AND THEIR MOLAR CONCENTRATION AT THE FLAME SHEET

XH	XO	XN	XH2	XOH	XCO
.19978E-03	.11016E-03	.48473E-08	.17514E-02	.15754E-02	.73253E-02
XNH	XO2	XH2O	XCO2	XN2	XAR
.13990E-02	.34340E-02	.13817E+00	.11587E+00	.72161E+00	.85979E-02

NUMBER OF ITERATION= 6
FWPP=1.79498599
FAI=PP= .42180337

LATENT HEAT IS MULTIPLIED BY= 17.

FW= .2286286E+00
YIH= .2998893E+00 P1W(ATM)= .1172395
TH(K)= 312.49 TH(C)= 39.33 HL(KCAL/GR)= .1450819E+01
TF(K)=2110.07 TF(C)=1836.91 MC(KCAL/GR)= .1148882E+02

MOLECULAR WEIGHT OF PRODUCTS= .2853919E+02
TRANSFER NO.= .5219359E+00

SPECIES AND THEIR MOLAR CONCENTRATION AT THE FLAME SHEET

XH	XO	XN	XH2	XOH	XCO
.13150E-03	.82200E-04	.34486E-08	.15838E-02	.13877E-02	.65515E-02
XNH	XO2	XH2O	XCO2	XN2	XAR
.12440E-02	.30854E-02	.13853E+00	.11671E+00	.72208E+00	.86026E-02

NUMBER OF ITERATION= 6
FWPP=1.10715772
FAI=PP= .43461249

LATENT HEAT IS MULTIPLIED BY= 19.

FW= .2076131E+00
YIH= .2735782E+00 P1W(ATM)= .1045598
TH(K)= 309.93 TH(C)= 36.79 HL(KCAL/GR)= .1627856E+01
TF(K)=2086.24 TF(C)=1813.08 MC(KCAL/GR)= .1150319E+02

```

MOLECULAR WEIGHT OF PRODUCTS= .2455386E+02
TRANSFER NO.= .4669491E+00

SPECIES AND THEIR MOLAR CONCENTRATION AT THE FLAME SHEET
      XM      XO      XN      XM2      XCO      XCOH      XCO
      .10760E-03 .63793E-04 .25236E-08 .14235E-02 .12146E-02 .58253E-02
      .11179E-02 .27588E-02 .13886E+00 .11750E+00 .72252E+00 .66070E-02

      XN2      XO2      XM2O      XCO2      XM2      XAP
      .11179E-02 .27588E-02 .13886E+00 .11750E+00 .72252E+00 .66070E-02

NUMBER OF ITERATION= 6
F-PP=1.11730408
FAI-PP= .44534920

```

LATENT HEAT IS MULTIPLIED BY= 21.

F= -.1916169E+00

```

      YIW= .2508201E+00      PIW(ATH)= .0940416
      TW(K)= 307.64      TW(C)= 34.48      HL(KCAL/GR)= .1805471E+01
      TF(K)= 2761.90      TF(C)= 1788.74      MC(KCAL/GR)= .1153468E+02

```

```

MOLECULAR WEIGHT OF PRODUCTS= .2856745E+02
TRANSFER NO.= .4224769E+00

SPECIES AND THEIR MOLAR CONCENTRATION AT THE FLAME SHEET
      XM      XO      XN      XM2      XCO      XCOH      XCO
      .87258E-04 .52117E-04 .18207E-08 .12770E-02 .10367E-02 .51490E-02
      .99106E-03 .24490E-02 .13916E+00 .11823E+00 .72293E+00 .66111E-02

      XN2      XO2      XM2O      XCO2      XM2      XAP
      .99106E-03 .24490E-02 .13916E+00 .11823E+00 .72293E+00 .66111E-02

NUMBER OF ITERATION= 6
F-PP=1.12589346
FAI-PP= .45447899

```

プログラム (b)

```

      MAIN
      CONCENTRATION OF SPECIES
      Y1 =MASS CONCENTRATION OF FUEL
      Y2 =      OXYGEN
      Y3 =      NITROGEN
      Y4 =      PRODUCTS
      XM =MOLAR CONCENTRATION OF FUEL
      C1 =MOLAR CONCENTRATION OF FUEL
      C2 =      OXYGEN
      C3 =      NITROGEN
      C4 =      PRODUCTS
      EMPD=MOLECULAR WEIGHT OF PRODUCTS

      NUMERICAL SOLUTION OF BLASIUS EQUATION ( F'''=F*F''-F'*2+1=0 )
      Y11=F, Y12=F', Y13=F''
      PARAMETER N=300,M=N+1
      DIMENSION YINIT(3),YFINAL(4),SAVE(4,2),FAI30(3),SF(4),
      1 EX(4),GETA(4),FAI3(4),ETA(4),DX(4),Y1(4),Y2(4),Y3(4),Y4(4),
      2 Y1(2),TMP1(4),TMP2(4),TEMP(4),C1(4),C2(4),C3(4),C4(4)
      DATA XX/O.,6.0/ YY/O.,1.0/
      EXTERNAL DERIV3
      SET INTERNAL CONDITIONS
      100 READ(5,110) YINIT(1),YINIT(3),FAI30(2),EMPD
      110 FORMAT(F10.0,F11.0,2F10.0)
      YINIT(2)=0.
      C      INTERVAL (0. - 6.) IS DIVIDED BY N.
      AN= 6.0/FLOAT(N)
      C      COMPUTE SOLUTION
      CALL DEPC(3,0.0,YINIT, 6.0,YFINAL,DERIV3,1.0E-5,0.,0.00001, 3.,
      1 .3,2,AN , 'TRIAL-FAI..', SAVE, M ,2,NOPTS,NOTIFY,520)

      C      INTEGRATION OF F - SIMPSON'S METHOD
      C      INTEGRATION FROM 0. TO ETA(J)
      ETA(1)=0.
      DO 120 J=2,M
      ETA(J)=SAVE(J,1)
      DX(J)=(ETA(J)-ETA(1))/FLOAT(J-1)
      SUM=0.
      DO 130 I=1,J
      130 SUM=SUM+SAVE(I,2)
      JJ=J-1
      DO 140 I=2,JJ
      140 SUM=SUM+SAVE(I,2)
      DO 150 I=2,JJ,2
      150 SUM=SUM+SAVE(I,2)*2.
      SF(J)=SUM+DX(J)/3.
      120 CONTINUE
      C      NOW, SF(2),SF(3)...,SF(M) ARE GIVEN.
      C      SECOND INTEGRATION TO GET GAMMA-ETA FUNCTION
      C      INTEGRATION FROM 0. TO ETA(J)
      DO 200 J=2,M
      EX(J)=EXP(-INTEGRAL F)
      C      EXIF(0)=1, SO THAT WE PUT SUM=1. INITIALLY
      SUM=1.
      DO 210 I=2,J

```

```

      EXIF(1)=1./EXP(SF(1))
210 SUM=SUM+EXIF(1)
      JJ=J-1
      DO 230 I=2,JJ
230 SUM=SUM+EXIF(I)
      DO 240 I=2,JJ,2
240 SUM=SUM+EXIF(I)*2.
      GETA(J)=SUM+DX(J)/3.
      FA13(J)=6*ETA(J)+FA130(2)
C   FA130(2)=FA13* =1/6*HMA(INF)
200 CONTINUE
      FA13(1)=0.
C   PREPARATION FOR CONCENTRATION PROFILE
      GETA(1)=0.
      Y3INF=0.767
      FM=YINIT(1)
      YJ=0.233*25.05/88.
C
      IFS=0
      EM1=100.198
      EM3=28.01
      EM2=32.
      DO 400 I=1,N
      YN=Y3INF*(1.-FM+6*ETA(I))/(1.-FM/FA130(2))
      Y3(I)=1.-YN
      YFUEL=(FM*(1.-FA13(I))-YJ*(FA130(2)-FM*FA13(I)))/(FA130(2)-FM)
      IF(YFUEL) 390,390,380
380 Y1(I)=YFUEL
      Y2(I)=0.
      EM=1./(Y1(I)/EM1+Y2(I)/EM2+YN/EM3+(1.-Y1(I)-Y2(I)-YN)/EMPD)
      GO TO 395
390 IF(IFS) 360,360,370
360 IFS=1
370 Y1(I)=0.
      Y2(I)=YFUEL*88./25.05
      EM=1./(Y1(I)/EM1+Y2(I)/EM2+YN/EM3+(1.-Y1(I)-Y2(I)-YN)/EMPD)
395 C1(I)=Y1(I)*EM/EM1
      C2(I)=Y2(I)*EM/EM2
      C3(I)=YN*EM/EM3
      C4(I)=(1.-Y1(I)-Y2(I)-YN)*EM/EMPD
400 CONTINUE
      FAIFS=FA13(IFS)
      DO 410 I=1,N
      IF(I-IFS) 420,420,430
420 TMP1(I)=FA13(I)/FAIFS
      TMP2(I)=0.
      GO TO 440
430 TMP2(I)=1.-FA13(I)-FAIFS)/(1.-FAIFS)
      TMP1(I)=0.
440 TEMP(I)=TMP1(I)+TMP2(I)
410 CONTINUE
      WRITE(4,290)
290 FORMAT(7X, 'ETA', 19X, 'FA13', 10X, 'F', 10X, 'Y1(FUEL)', 6X,
1 'Y2(OXYGEN)', 6X, 'Y3(NITROGEN)', 6X, 'TEMPERATURE')
      WRITE(4,310) (ETA(I),FA13(I),SAVE(I,2),Y1(I),Y2(I),Y3(I),TEMP(I),
1 I=1,N,2)
310 FORMAT(1H ,F10.7,5X, 6E15.7)

```

This document is provided by JAXA.

4.0399977	.9953317+00	.2540408+01	.0000000	.2197080+00	.2356806+00	.5723546-01
4.0799977	.9959255+00	.2580385+01	.0000000	.2215732+00	.2353397+00	.4995556-01
4.1199976	.9964611+00	.2620363+01	.0000000	.2230754+00	.2350321+00	.4338837-01
4.1599976	.9969936+00	.2660341+01	.0000000	.2244284+00	.2347551+00	.3747348-01
4.1999975	.9973774+00	.2700321+01	.0000000	.2256450+00	.2345060+00	.3215474-01
4.2399975	.9977669+00	.2740302+01	.0000000	.2267373+00	.2342823+00	.2737951-01
4.2799975	.9981140+00	.2780283+01	.0000000	.2277163+00	.2340819+00	.2309948-01
4.3199974	.9984284+00	.2820264+01	.0000000	.2285924+00	.2339025+00	.1926417-01
4.3599974	.9987075+00	.2860247+01	.0000000	.2293757+00	.2337122+00	.1584691-01
4.3999974	.9989565+00	.2900229+01	.0000000	.2300735+00	.2335992+00	.1279396-01
4.4399973	.9991783+00	.2940212+01	.0000000	.2306955+00	.2334719+00	.1007479-01
4.4799973	.9993755+00	.2980194+01	.0000000	.2312486+00	.2333586+00	.7656991-02
4.5199972	.9995506+00	.3020177+01	.0000000	.2317394+00	.2332581+00	.5510405-02
4.5599972	.9997057+00	.3060160+01	.0000000	.2321747+00	.2331690+00	.3607899-02
4.5999972	.9998431+00	.3100143+01	.0000000	.2325598+00	.2330901+00	.1924351-02
4.6399971	.9999644+00	.3140125+01	.0000000	.2329001+00	.2330206+00	.4366487-03
4.6799971	.1000071+01	.3180108+01	.0000000	.2332003+00	.2329590+00	-.8756518-03
4.7199970	.1000146+01	.3220090+01	.0000000	.2334647+00	.2329049+00	-.2031580-02
4.7599970	.1000249+01	.3260072+01	.0000000	.2336971+00	.2328573+00	-.3047739-02
4.7999970	.1000321+01	.3300054+01	.0000000	.2339012+00	.2328155+00	-.3934837-02
4.8399969	.1000385+01	.3340036+01	.0000000	.2340800+00	.2327789+00	-.4721776-02
4.8799969	.1000441+01	.3380018+01	.0000000	.2342366+00	.2327468+00	-.5405977-02
4.9199969	.1000490+01	.3419999+01	.0000000	.2343733+00	.2327188+00	-.6003946-02
4.9599968	.1000532+01	.3459980+01	.0000000	.2344926+00	.2326944+00	-.6525174-02
4.9999968	.1000569+01	.3499960+01	.0000000	.2345964+00	.2326731+00	-.6979167-02
5.0399967	.1000601+01	.3539940+01	.0000000	.2346867+00	.2326546+00	-.7374167-02
5.0799967	.1000629+01	.3579920+01	.0000000	.2347651+00	.2326386+00	-.7714894-02
5.1199967	.1000654+01	.3619899+01	.0000000	.2348331+00	.2326247+00	-.8014143-02
5.1599966	.1000675+01	.3659878+01	.0000000	.2348919+00	.2326124+00	-.8271202-02
5.1999966	.1000693+01	.3699857+01	.0000000	.2349427+00	.2326022+00	-.8492991-02
5.2399966	.1000708+01	.3739835+01	.0000000	.2349865+00	.2325933+00	-.8684650-02
5.2799965	.1000722+01	.3779813+01	.0000000	.2350242+00	.2325855+00	-.8849442-02
5.3199965	.1000733+01	.3819791+01	.0000000	.2350567+00	.2325789+00	-.8991390-02
5.3599964	.1000743+01	.3859768+01	.0000000	.2350845+00	.2325732+00	-.9113073-02
5.3999964	.1000752+01	.3899744+01	.0000000	.2351084+00	.2325683+00	-.9217381-02
5.4399964	.1000759+01	.3939720+01	.0000000	.2351288+00	.2325641+00	-.9306535-02
5.4799963	.1000765+01	.3979696+01	.0000000	.2351461+00	.2325606+00	-.9382546-02
5.5199963	.1000771+01	.4019671+01	.0000000	.2351610+00	.2325575+00	-.9447396-02
5.5599962	.1000775+01	.4059644+01	.0000000	.2351736+00	.2325550+00	-.9502575-02
5.5999962	.1000779+01	.4099620+01	.0000000	.2351843+00	.2325528+00	-.9549528-02
5.6399962	.1000782+01	.4139594+01	.0000000	.2351935+00	.2325509+00	-.9589538-02
5.6799961	.1000785+01	.4179568+01	.0000000	.2352012+00	.2325493+00	-.9623334-02
5.7199961	.1000787+01	.4219540+01	.0000000	.2352077+00	.2325480+00	-.9651840-02
5.7599961	.1000789+01	.4259513+01	.0000000	.2352133+00	.2325468+00	-.9675950-02
5.7999960	.1000791+01	.4299485+01	.0000000	.2352179+00	.2325459+00	-.9696230-02
5.8399960	.1000792+01	.4339456+01	.0000000	.2352218+00	.2325451+00	-.9713218-02
5.8799959	.1000793+01	.4379427+01	.0000000	.2352250+00	.2325444+00	-.9727478-02
5.9199959	.1000794+01	.4419397+01	.0000000	.2352278+00	.2325439+00	-.9739533-02
5.9599959	.1000795+01	.4459367+01	.0000000	.2352301+00	.2325434+00	-.9749576-02

POSITION OF FLAME SHEET ETA= 2.68000
HOLE CONC. OF FUEL AT THE WALL= .93392

```

WRITE(6,320) ETAFIFS),C1(1)
WRITE(6,315) YINIT(1), YINIT(3), FA130(2)
315 FORMAT(1H1, ' INPUT DATA' /10X, 'F0=' /F15.7, /10X, 'F0PP=' /F15.7 /10X,
1 'FA1WP=' /F15.7 /)
320 FORMAT(1H0, 'POSITION OF FLAME SHEET ETA=' /F8.5, ' HOLE CONC. OF
1 FUEL AT THE WALL=' /F8.5)
IF(NOTIFY.NE.0) GO TO 20
CALL INITPL(18,10.8)
CALL GRAPHXX,'LINEAR',YY,'LINEAR',2,'NONE','BLANK','ETASS',
1 'Y1 Y2 AND 1-Y3SS','NORMAL','MASS CONCENTRATION IFB=-0.667ISS',
2 'FULL','BIND')
CALL GRAPHXIETA,'SCAL1',Y3,'SCAL1',N,'NONE','SOLID')
CALL GRAPHXIETA,'SCAL1',Y1,'SCAL1',N,'NONE','SOLID')
CALL GRAPHXIETA,'SCAL1',Y2,'SCAL1',N,'NONE','SOLID')
CALL GRAPHXX,'LINEAR',YY,'LINEAR',2,'NONE','BLANK','ETASS',
1 'TEMPERATURESS','NORMAL','NON-DIMENSIONAL TEMP. IFB=-0.67ISS','FULL
1','BIND')
CALL GRAPHXIETA,'SCAL1',TEMP,'SCAL1',N,'NONE','SOLID')
CALL GRAPHXX,'LINEAR',YY,'LINEAR',2,'NONE','BLANK','ETASS',
1 'C(FUEL) C(02) C(M2) AND C(PROD)SS','NORMAL','HOLE CONCENTRATION
2 IFB=-0.667ISS','FULL','BIND')
CALL GRAPHXIETA,'SCAL1',C1,'SCAL1',N,'NONE','SOLID')
CALL GRAPHXIETA,'SCAL1',C2,'SCAL1',N,'NONE','SOLID')
CALL GRAPHXIETA,'SCAL1',C3,'SCAL1',N,'NONE','SOLID')
CALL GRAPHXIETA,'SCAL1',C4,'SCAL1',N,'NONE','SOLID')
CALL ENDPLT
STOP
20 PRINT 30, NOTIFY
30 FORMAT(5X, 'TROUBLE DURING DEPC CALCULATIONS, NOTIFY=' /I6)
END

```

END OF COMPILEATION: NO DIAGNOSTICS.

```

                                DERIV3
SUBROUTINE DERIV3 (ETA,Y,DY,STORE,ITE57)
DIMENSION DY(1),Y(1), STORE(1)
DY(1)=Y(2)
DY(2)=Y(3)
DY(3)=Y(2)*Y(2)-Y(1)*Y(3)-1.
STORE(1)=ETA
STORE(2)=Y(1)
RETURN
END
END OF COMPILATION:          NO  DIAGNOSTICS.
```

```

                                HL*3
INPUT DATA
FB=          -.467130D
FAPP=        .892385D
FAIMP=       .223970D
```

航空宇宙技術研究所資料272号

昭和50年1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
