群島状とフラクタル火炎面を有する予混合乱流伝ば火炎の構造モデル* (第1報, モデルの確立と予測結果)

城戸 裕之*¹, 黄 樹偉*², 中島 健四郎*¹

A Premixed Turbulent Flame Structure Model Having Reactant Islands and Fractal Flame Surfaces (1st Report, Formulation and Test of the Model)

Hiroyuki KIDO, Shuwei HUANG and Kenshiro NAKASHIMA

A model for the premixed turbulent flame structure has been developed in which the flame zone of a turbulent flame is composed of two parts: a wrinkled flame front and some island flamelets behind it. Their fractions are supposed to vary continuously according to a proposed function of u'/S_{Lo} , where u' is the turbulence intensity and S_{Lo} is the laminar burning velocity. All flamelets were assumed to be fractal ones. The concepts of "flame thickness" and "transition time" for laminar flames were introduced into the model for turbulent flames. The model provides not only the structural parameters but also the burning velocities of turbulent flames.

Key Words: Combustion, Premixed Turbulent Flame, Flame Structure Model, Fractal Surface, Reactant Islands, Turbulent Burning Velocity, Damköhler Number

1. ま え が き

近年, レイリー散乱法⁽¹⁾, シュリーレン写真撮影法⁽²⁾⁽³⁾, 微小探針法⁽⁴⁾, また, レーザシートによる断面写真撮影法^{(5)~(7)}などによる予混合乱流火炎構造の観察により, 乱流火炎の深層構造と局所火炎素面そのものの構造がかなり明らかになってきた。また, 火炎の断面写真のフラクタル解析⁽⁶⁾⁽⁷⁾により, 火炎素面がフラクタル性を有することも確認された。

一方, 予混合乱流火炎構造のモデル化においては, レイノルズ数 Re やダムケラー数 Da などの無次元数で構成される平面を, いくつかの条件で, 定性的に異なる燃焼領域に分ける⁽⁶⁾⁽⁸⁾ことがあるが, 最近では, より定量的な議論が必要になってきた。

本研究は予混合乱流伝ば火炎構造モデルの定量化を目的に, まず, 予混合乱流伝ば火炎に対する実験結果を整理し, それらの結果に基づいていくつかの基本的な仮定を提出した。そして, 基本的仮定から乱流火炎の構造を表すパラメータと乱流燃焼速度などの計算式を誘導した。最後に, モデルによる乱流燃焼速度の予

測値と実測値との比較を行った。

2. 記号と定義

B : 乱流火炎の特性厚さ

C : モデル定数 = 0.5

C_1 : モデル定数 = 4.8

Da : ダムケラー数 = $L_f S_{Lo} / (\eta_0 u')$

Da_η : ダムケラー数 = $L_f S_{Lo} / (4 \eta_0 u')$

f_D : 単位体積混合気中, τ_D 時間内での群島状火炎の燃焼割合

f_W : 単位体積混合気中, τ_W 時間内での前火炎素面の燃焼割合

Ka : Karlovitz 数[式(4)]

L_f : 乱れの縦方向積分尺度

Pr : プラントル数

Re : レイノルズ数 = $L_f u' / \nu$

S_c : 群島状火炎の半径方向燃焼速度

S_{Lo} : 層流燃焼速度

S_T : 乱流燃焼速度

S_W : しわ状火炎(前火炎素面)の燃焼速度

T_b : 定圧断熱火炎温度

u' : 乱れ強さ, 変動速度の二乗平均値とする

ν_K : コルモゴロフ速度尺度 $\equiv \nu / \eta_K$

* 原稿受付 平成2年5月29日。

*¹ 正員, 九州大学工学部 (〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)。

*² 准員, 九州大学大学院。

X_c : 巻き込まれた直後の群島状火炎の平均尺度
(直径)

γ : 火炎素面のひずみ率

δ_{Lo} : 層流火炎素面反応域の厚さ

ε : 乱れエネルギーの消散率

ε_i : フラクタル火炎素面の Inner Cutoff

ε_0 : フラクタル火炎素面の Outer Cutoff

η : 乱流火炎中の局所層流火炎素面予熱域厚さ

η_0 : 層流火炎素面予熱厚さ $= \nu / (Pr S_{Lo})$

η_K : コルモゴロフ長さ尺度

λ_g : テイラー微細尺度

ν : 混合気の動粘度

$\xi = \xi_D / \xi_w$

ξ_D : 群島状火炎の燃焼割合

ξ_w : 前火炎素面の燃焼割合

τ_c : 層流火炎の化学特性時間 $= 2\delta_{Lo} / S_{Lo}$

τ_D : 群島状火炎の燃焼特性時間 $= X_c / (2S_c)$

τ_T : 乱流火炎の燃焼特性時間[式(21)]

τ_w : しわ状火炎の燃焼特性時間 $= \tau_c$

ϕ : 混合気の当量比

3. モデルに基づく実験結果

本論文でのモデル化は、予混合乱流火炎に対する以下の観察結果に基づいている。

(1) 乱流火炎中における化学反応は薄い火炎素面に限られる。図1に示すのは微小探針法により検出された乱流火炎中の火炎素面電位信号⁽⁴⁾である。乱れ強さ u' が層流燃焼速度 S_{Lo} の10倍程度までも、多くの電位信号が層流火炎から得たものに似ており、鋭いピークを有していることが、薄い火炎素面の存在を示唆している。乱れ強さがある程度以下では、火炎素面の厚さが層流火炎のそれと同程度であることは Rajan らのレイリー散乱法による実験⁽¹⁾でも観察されている。

(2) 乱流火炎中の火炎素面のしわと群島状火炎素面の数は乱れ強さとともに増加する。著者らによる定容燃焼容器中における予混合乱流火炎のシュリーレン

図1 乱流火炎素面電位信号

写真⁽³⁾や、Smith によるモデルエンジンの予混合乱流火炎のシュリーレン写真⁽²⁾で、しまの間隔は乱れ強さの増加につれて急激に小さくなることが示されているが、これは火炎素面のしわや群島状火炎素面の数が乱れ強さとともに増加するためと考えられる。

(3) 乱流火炎の火炎領域厚さと火炎領域内の火炎素面の数は u' / S_{Lo} 比の増加につれて増加し⁽⁴⁾、火炎素面の平均間隔は変化が小さく、乱れの縦方向積分尺度の2倍程度である⁽⁴⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。この結果は、乱流火炎構造のパターンが乱れ強さの増加につれて単一の火炎素面から群島状火炎へと変化するものと、群島状火炎の平均尺度は乱れの積分尺度と密接な関係があることを示唆する。

(4) 乱流火炎は u' / S_{Lo} 比の増加につれて燃焼領域 I (単一しわ状火炎) から領域 II (群島状火炎ができた領域) へと遷移し、最後には、火炎の伝ばができなくなる⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。図2に“○”で示すのは、微小探針法で検出された乱流火炎の火炎素面数が1から複数へと変化する境界であり、“●”で示すのは火炎素面数が3個以下から3個以上へと変化する境界(燃焼領域 I と II の境界とされる⁽⁹⁾)である。“□”で示すのは点火エネルギーが0.8 J のとき、50%の確率で火炎伝ばができなくなるものである。図2中の各混合気の性質を表1に示す。火炎構造が u' / S_{Lo} の増加につれて、単一の連続的な火炎素面から群島状火炎へと変化する事がわかる。

(5) 乱流火炎素面はフラクタル性を有し⁽⁶⁾⁽⁷⁾、そのフラクタル次元 D_3 は混合気の当量比 ϕ が1の火炎に対して、 u' / S_{Lo} の増加につれて大きくなる⁽⁷⁾。

(6) 層流燃焼速度 S_{Lo} と乱れ強さ u' 両方が同じ条件のもとでは、乱流燃焼速度 S_T は δ_{Lo} の大きい(したがって、 η_0 の大きい)ものほど小さな値を示す⁽¹¹⁾。 S_{Lo} と u' 両方が同じであることは火炎素面の総面積

図2 実験で決定した乱流火炎の燃焼領域

に大きな差がないものと考えれば、この結果は乱流火炎中の局所層流燃焼速度 S_L が、火炎素面でのひずみ率が大きいほど小さくなることを示唆する。

4. モデルの仮定

(1) 火炎領域はしわ状連続的な前火炎素面とその後ろにある群島状火炎素面から構成される。単位体積混合気のうち、しわ状火炎によりその特性時間 τ_w で燃焼する混合気の割合を f_w 、群島状火炎がその特性時間 τ_D で燃焼する割合を f_D とし、 f_D は次式で表されるものとする。

$$f_D = \exp\left(-C \frac{S_{Lo}}{u'}\right) \quad (1)$$

したがって

$$f_w = 1 - f_D \quad (2)$$

表 1 混合気の性質(その1)

MIXTURE	MOLAR FRACTION				δ_{LO} mm	S_{Lo} m/s	T_b K	η_0 $\times 10^{-4}$ mm	ν $\times 10^5$ m ² /s
	C ₂ H ₆	O ₂	N ₂	He					
85-P10-14	1.0	5.0	12.0	2.00	.146	.858	2496	.284	1.52
85-P10-18	1.0	5.0	11.0	4.50	.177	.846	2472	.365	1.72
79-P10-21	1.0	5.0	10.5	6.50	.213	.791	2440	.454	1.88
49-P10-20	1.0	5.0	17.0	0.36	.198	.494	2329	.415	1.41
50-P10-22	1.0	5.0	16.5	2.00	.219	.501	2310	.476	1.51
49-P10-24	1.0	5.0	16.0	3.20	.240	.493	2299	.534	1.59
46-P10-29	1.0	5.0	15.4	5.60	.289	.464	2262	.675	1.74
33-P10-30	1.0	5.0	20.0	2.00	.298	.331	2168	.712	1.51
22-P10-36	1.0	5.0	24.0	0.00	.358	.224	2060	.896	1.41
17-P10-45	1.0	5.0	26.0	0.00	.451	.169	1986	1.19	1.42

表 2 混合気の性質⁽¹¹⁾(その2)^{***}

MIX-TURE	COMPOSITION	δ_{LO} mm	S_{Lo} m/s	T_b K	η_0 $\times 10^{-4}$ mm	ν $\times 10^5$ m ² /s
43-1A	C ₂ H ₂ +2.50 ₂ +16.55N ₂	.227	.435	2052	.465	1.45
43-2M	CH ₄ +20 ₂ +7.17N ₂	.232	.429	2262	.493	1.51
43-3M	CH ₄ +20 ₂ +6.06N ₂ +0.63He	.250	.442	2253	.549	1.60
43-4A	C ₂ H ₂ +2.50 ₂ +15.74N ₂ +1.77He	.269	.431	2033	.571	1.59
43-5M	CH ₄ +20 ₂ +6.56N ₂ +1.25He	.277	.438	2244	.626	1.70
43-6A	C ₂ H ₂ +2.50 ₂ +14.32N ₂ +4.85He	.338	.434	2000	.752	1.84
43-7M	CH ₄ +20 ₂ +5.64N ₂ +3.12He	.350	.446	2217	.844	2.06
43-8A	C ₂ H ₂ +2.50 ₂ +13.75N ₂ +6.10He	.367	.434	1987	.832	1.95
62-1P	C ₂ H ₂ +50 ₂ +15.2N ₂	.160	.625	2415	.301	1.38
62-2A	C ₂ H ₂ +2.50 ₂ +14.45N ₂	.170	.632	2189	.318	1.45
62-3M	CH ₄ +20 ₂ +6.09N ₂	.173	.620	2375	.341	1.51
62-4M	CH ₄ +20 ₂ +5.59N ₂ +1.03He	.209	.615	2360	.438	1.69
62-5M	CH ₄ +20 ₂ +4.74N ₂ +2.77He	.268	.623	2334	.601	2.04
73-1M	CH ₄ +20 ₂ +5.51N ₂	.150	.745	2437	.284	1.51
73-3M	CH ₄ +20 ₂ +5.06N ₂ +1.09He	.186	.730	2414	.378	1.72
73-4M	CH ₄ +20 ₂ +4.66N ₂ +1.92He	.211	.738	2399	.445	1.88
73-6M	CH ₄ +20 ₂ +3.55N ₂ +4.13He	.287	.742	2370	.647	2.41

*** 動粘度 ν のデータは新たに追加したものである。

ここに C は正の定数である。実験結果(2)~(4)での群島状火炎の割合が u'/S_{Lo} の増加につれて増加することを式(1)で考慮する。 $u'/S_{Lo} \rightarrow 0$ のときに、 $f_D \rightarrow 0$ となり、また、 $u'/S_{Lo} \rightarrow \infty$ のとき、 $f_D \rightarrow 1$ となる。定数 C は実験結果に基づき決める。

(2) 局所の火炎素面は平均的にはテイラー微細尺度を有する渦によりひずまされ、そのひずみ率は $\gamma = u'/\lambda_g$ とする。局所層流燃焼速度 S_L は Law が提出した式⁽¹²⁾に従うものとする。Lewis 数が1のとき、その式は次式となる。

$$S_L = S_{Lo}(1 - Ka) \quad (3)$$

ただし、Karlovitz 数 Ka は次式で定義される。

$$Ka = \gamma \nu / (Pr S_{Lo}^2) \quad (4)$$

局所層流燃焼速度の直接計測は困難なので、式(3)の検証は難しいが、この式に基づいた局所層流燃焼速度の減少量は $(\eta_0/\eta_K)^2$ に比例し、それは η_0 が大きいほど、乱流燃焼速度は小さな値を示すという実験結果(6)と定性的に一致することから、この仮定を採用した。

(3) 乱流火炎中の局所層流火炎素面の予熱域の厚さはコルモゴロフ尺度程度の小さな乱れにより厚くなり、その厚さ η は次式で表せるものとする。

$$\eta = \eta_0 + C_1 \nu_K \eta_0 / S_{Lo} \quad (5)$$

ただし、 C_1 は1程度の定数である。式(5)中、コルモゴロフ速度尺度 ν_K は火炎素面法線方向での対流速度とし、予熱域の遷移時間 η_0/S_{Lo} と定数 C_1 は併せて有効な対流時間として考えられる。

(4) 乱流中のすべての火炎素面はフラクタルな面であり、その Outer Cutoff ϵ_0 は L_f で近似できるものとし、その Inner Cutoff ϵ_i は次式で近似できるものとする。

$$\epsilon_i = \frac{\eta_K}{\eta_K + \eta} \eta_K + \frac{\eta}{\eta_K + \eta} \eta = \frac{\eta_K^2 + \eta^2}{\eta_K + \eta} \quad (6)$$

式(6)中 $\eta_K/(\eta_K + \eta)$ と $\eta/(\eta_K + \eta)$ はそれぞれ η_K と η の重みである。燃焼のない場合では、 $\epsilon_i \approx \eta_K$ という報告⁽¹³⁾があり、これによるモデル⁽¹²⁾もあるが、燃焼のある場合、火炎の特性からの影響も考慮すべきものと考えられる。乱れが強いとき、 $\eta_K \ll \eta_0$ となり、 $\epsilon_i = \eta_K$ とすれば、 $\epsilon_i \ll \eta_0$ となり、火炎素面の定義が不明確となる。しかし、式(6)によれば、 $\eta_K \gg \eta_0$ のとき、 $\epsilon_i \approx \eta_K$ となり、 $\eta_K \ll \eta_0$ のとき、 $\epsilon_i \approx \eta_0$ となる。また、 $\epsilon_0 = L_f$ の仮定については、文献(7)、(13)により、 ϵ_0 は L_f 程度の大きさであることが仮定の根拠である。

(5) 火炎素面のフラクタル次元 D_3 は次式で近似できるものとする。

$$D_3 = 2 + 0.5 \exp \left\{ \frac{-0.53}{\ln(1 + u'/S_{L0})} \right\} \quad \cdots \cdots (7)$$

Mantzaras ら⁽⁷⁾の計測結果によれば、混合気当量比 ϕ が1 のとき、 D_3 が u'/S_{L0} の増加につれて増加することがわかる。式(7)による近似値と Mantzaras らの計測結果との比較は図3に示し、両者はよく一致している。

(6) 火炎面に巻き込まれた直後の群島状未燃混合気塊の平均尺度 X_c は L_f とする。実験結果の(3)により、火炎素面の平均間隔が乱れの積分尺度の2倍程度であるが、未燃混合気塊の間隔が既燃混合気の膨張により大きくなることから、未燃混合気塊の平均尺度は火炎素面の平均間隔より小さいものと考えられる。

5. 諸関係量の計算

(1) 乱れのエネルギー消散率 ε 乱れエネルギーのカスケード理論では、定常的な乱れエネルギー消散過程において、主流から積分尺度程度の乱れへ供給されるエネルギーは次から次へとさらに小さな乱れへ伝送され、最後にコルモゴロフ尺度程度の乱れにより熱として消散されるとしている⁽¹⁴⁾。乱れエネルギーの消散率 ε は、積分尺度の乱れのエネルギー u'^2 とその回転特性時間(Turnover Time) L_f/u' から、次式で概算される⁽¹⁴⁾。

$$\varepsilon = A_0 u'^3 / L_f \quad \cdots \cdots (8)$$

ここで A_0 は1程度の定数⁽¹⁴⁾で、管内流の中心線上での計測結果に基づいた A_0 の値は0.37となっている⁽¹⁵⁾。著者らは定容燃焼容器内のほぼ等方的な乱れのエネルギースペクトルから求めた ε の値が次式で概算できることを示している⁽¹⁶⁾。

$$\varepsilon = A_1 \left(\frac{u'^3}{L_f} \right) \left(\frac{\eta_K}{L_f} \right) \quad \cdots \cdots (9)$$

ここで A_1 は約11の定数である⁽¹⁷⁾。

式(8)、(9)のどちらかに基づいても本モデルには大きな差し支えはないが、定数 C と C_1 をすこし調整

する必要がある。式(9)を用いて最後に誘導した乱流燃焼速度 S_T は実測値により近いので、本モデルは式(9)を採用した。

(2) コルモゴロフ尺度 η_K コルモゴロフ尺度 η_K は $\eta_K \equiv (\nu^3/\varepsilon)^{0.25}$ で定義される。式(9)をこの定義式に代入して次式が得られる。

$$\eta_K = \frac{L_f}{A_1^{0.4} Re^{0.6}} \quad \cdots \cdots (10)$$

したがって

$$\nu_K \equiv \nu/\eta_K = u' A_1^{0.2} / Re^{0.4} \quad \cdots \cdots (11)$$

となる。

(3) テイラー微細尺度 λ_g テイラー微細尺度 λ_g は次式で計算される⁽¹⁴⁾。

$$\varepsilon = 15 \nu u'^2 / \lambda_g^2 \quad \cdots \cdots (12)$$

式(9)を式(12)に代入し、次式が得られる。

$$\lambda_g = \frac{15^{0.5} L_f}{A_1^{0.4} Re^{0.2}} \quad \cdots \cdots (13)$$

(4) Karlovitz 数 Ka 式(4)、(10)、(13)により、次式が得られる。

$$Ka = \frac{Pr}{15^{0.5}} \left(\frac{\eta_0}{\eta_K} \right)^2 \quad \cdots \cdots (14)$$

ただし、 η_0 は $\eta_0 = \nu / (Pr S_{L0})$ で定義される。

(5) しわ状火炎の燃焼速度 S_w と群島状火炎の半径方向燃焼速度 S_c 仮定(4)により、乱流火炎中のすべての火炎素面はフラクタル面であり、そのOuter Cutoffは ε_0 であり、そのInner Cutoffは ε_i であることから、乱流燃焼速度 S_T を誘導するGouldinの方法⁽¹²⁾に沿って、 S_w と S_c は次式で概算できる。

$$S_w = S_c = S_L \left(\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_i} \right)^{D_3-2} \quad \cdots \cdots (15)$$

ここに S_L は局所層流燃焼速度で、式(3)で計算し、 D_3 は火炎素面のフラクタル次元で、式(7)で計算するものである。 S_w 、 S_c と S_L との関係を図4に示す。

(6) 乱流燃焼速度 S_T 仮定(1)により、火炎領域はしわ状連続的な前火炎素面と群島状火炎素面で構成されることから、乱流燃焼速度は前火炎素面での

図3 式(7)と D_3 の実測値⁽⁷⁾との比較

図4 しわ状火炎燃焼速度と局所層流燃焼速度

燃焼速度と群島状火炎素面での燃焼速度との和となる。いま、単位体積の未燃混合気のうち、しわ状火炎がその特性時間 τ_w 内で燃焼する混合気の割合は f_w であることから、 dt 時間内でしわ状火炎の燃焼した混合気量を dF_{w1} とし、群島状火炎の燃焼した混合気量を dF_{D1} とすれば、

$$dF_{w1} = (f_w/\tau_w) dt \quad (16)$$

$$dF_{D1} = (f_D/\tau_D) dt \quad (17)$$

となる。ここで添字の“1”は単位体積のことを表す。また、単位時間内に S_T 方向を法線とする単位面積につき、火炎領域の厚さ方向に存在する B 個の単位体積の混合気が、同時に燃焼しているものとすれば、乱流燃焼速度 S_T は次式で表すことができる。

$$S_T = B \frac{d(F_{w1} + F_{D1})}{dt} \\ = B \frac{f_w}{\tau_w} + B \frac{f_D}{\tau_D} \quad (18)$$

Bf_w/τ_w は前火炎素面による燃焼速度で、 Bf_D/τ_D は群島状火炎素面による燃焼速度である。

B の意味をより明らかにするために、層流火炎を考える。本モデルでは層流火炎の特性厚さは $2\delta_{Lo}$ とし、その特性時間は $\tau_w (=2\delta_{Lo}/S_{Lo})$ としていることから、式(2)により、 $f_D=0$ のとき、 $f_w=1$ となり、したがって、 $S_T = B \cdot S_{Lo}/(2\delta_{Lo})$ となる。層流火炎では $S_T = S_{Lo}$ であることから、 $B=2\delta_{Lo}$ となる。すなわち、 B は層流火炎の特性厚さ $2\delta_{Lo}$ に相当する乱流火炎の特徴的な厚さであり、乱流火炎の構造的パラメータと考えられる。また、 B は火炎領域の厚さと関係があるものの、両者は異なるものである。本研究では B を乱流火炎の特性厚さと呼ぶ。

(7) 乱流火炎の特性厚さ B 前火炎素面の燃焼速度は式(18)により Bf_w/τ_w となるが、一方、式

(15)では、前火炎素面の燃焼速度は S_w であること(フラクタル理論による結果)から、 $Bf_w/\tau_w = S_w$ となり、したがって、

$$B = (\tau_w/f_w) S_w \quad (19)$$

となる。

(8) 乱流火炎の燃焼特性時間 τ_r 式(18)は次式と書くことができる。

$$S_T = B/\tau_r \quad (20)$$

ここに、

$$\frac{1}{\tau_r} = \frac{f_w}{\tau_w} + \frac{f_D}{\tau_D} \quad (21)$$

式(20)から、時間 τ_r は層流火炎の化学特性時間 τ_c に類似するものであることがわかる。したがって、 τ_r は乱流火炎の燃焼特性時間と考えられる。

(9) 群島状火炎の燃焼割合 ξ_D 仮定(1)では単位体積の混合気のうち、群島状火炎による燃焼の割合 f_D と前火炎素面による燃焼の割合 f_w が、それぞれ τ_D と τ_w 時間内で行うものであることから、同じ時間内での群島状火炎の燃焼割合 ξ_D は次式で計算できる。

$$\xi_D = \frac{f_D/\tau_D}{f_D/\tau_D + f_w/\tau_w} = \left(\frac{\tau_r}{\tau_D} \right) f_D \quad (22)$$

また、前火炎素面の燃焼割合 ξ_w は次式で計算される。

$$\xi_w = \frac{f_w/\tau_w}{f_D/\tau_D + f_w/\tau_w} = \left(\frac{\tau_r}{\tau_w} \right) f_w \quad (23)$$

ξ_D と ξ_w の比 ξ は

$$\xi = \frac{\xi_D}{\xi_w} = \left(\frac{\tau_w}{\tau_D} \right) \left(\frac{f_D}{f_w} \right) \quad (24)$$

となる。

6. モデル定数の決定とモデルによる計算結果

6.1 モデル定数の決定 本モデルの二つの定数 C と C_1 は乱流燃焼速度の実測値と予測値との比較に

図5 定数 C と C_1 による計算結果への影響

より次のように決定した。すなわち、図5に示すように、ある混合気(43-1A, 表2参照)に対し、モデルによる乱流燃焼速度予測値 S_T と層流燃焼速度 S_{Lo} との比率 S_T/S_{Lo} を実測した $(dp/dt)_T/(dp/dt)_L$ の値⁽¹⁸⁾に最も近いときの C と C_1 の値を取った。ここに、 dp/dt は燃焼による圧力の上昇率であり、添字の“T”と“L”はそれぞれ乱流と層流のことを表すものである。そこで、 $C=4.8$ と $C_1=0.5$ が得られた。

6・2 計算結果 図6は3種類の炭化水素燃料で作った17種類の混合気に対する乱流燃焼速度 S_T の予測結果と実測値⁽¹¹⁾との比較である。図6中A列のマークは実測した $(dp/dt)_T/(dp/dt)_L$ のデータを、B列のマークはモデルによる S_T/S_{Lo} の予測値を示す。層流火炎素面が非常に厚い混合気(例えば、43-8A, 43-7M, 73-6Mなどの混合気)を除いて、ほとんどの予測値が実測値と一致することはモデルの有効性を示している。

図7は混合気の層流火炎厚さによる乱流火炎の特性への影響を示している。図7(a)はフラクタル火炎素面の Inner Cutoff ε_i 、火炎素面の局所予熱域厚さ η な

どの火炎微細構造に関するパラメータを、図7(b)は群島状火炎の燃焼割合 ξ_b 、乱流火炎の特性厚さ B 、燃焼特性時間 τ_r などの火炎の全体的特性に関するパラメータを示す。

7. モデルの検討

7・1 モデル化方法の考え方 予混合乱流燃焼は極めて複雑な乱流運動に伴う急速な化学反応であることから、そのモデル化にはまず乱れの微細構造と混合気の化学的および熱・物質拡散に関する性質をどのような無次元数で表すかが重要となる。また、乱れと混合気の性質による乱流火炎素面への巨視的、微視的な影響をいかに考慮し、かつ微視的な量をいかに巨視的な量で表すかも重要なこととなる。

本研究では混合気と乱れの性質を表すため、ダムケラー数 Da_η 、レイノルズ数 Re 、プラントル数 Pr および混合気の δ_{Lo}/η_0 比を用いた。 Pr と δ_{Lo}/η_0 比が定数とみなされれば、変数はダムケラー数 Da_η とレイノルズ数 Re だけとなる。乱れと混合気の性質による火炎素面への巨視的な影響は u'/S_{Lo} のパラメータと

図6 モデル予測値と実測値⁽¹¹⁾との比較

火炎素面のフラクタル性質で表し、その微視的な影響はコルモゴロフ尺度 η_K の渦から火炎素面予熱域厚さと火炎素面の Inner Cutoff への影響で考慮している。また、乱れの尺度としては縦方向積分尺度 L_f 、テイラー微細尺度 λ_g とコルモゴロフ尺度 η_K を用い、乱れの構造モデルにより、微視的な量を巨視的な量で表すこととした。

7.2 モデルの検証 本モデルは乱流燃焼速度の予測値で検証した。図6に示すように、層流火炎素面厚さが非常に厚い混合気を除いて、幅広く数多くの混合気に対する乱流燃焼速度の予測結果が実測値と一致することから、モデルの有効性が確認できた。

7.3 乱流火炎の特性厚さと燃焼特性時間 本モデルに導入された予混合乱流火炎の特性厚さ B と燃焼特性時間 τ_r はそれぞれ層流火炎の場合の特性厚さ $2\delta_{Lo}$ と特性時間(特性厚さの遷移時間) $\tau_c (=2\delta_{Lo}/S_{Lo})$ に相当するもので、層流火炎についての火炎素面厚さと化学特性時間の概念を乱流火炎の場合に拡張したのになっている。すなわち、層流火炎の火炎素面が τ_c

の時間内に厚さ $2\delta_{Lo}$ の混合気を燃焼したとすれば、乱流火炎素面が τ_r の時間内に厚さ B の混合気を燃焼することになる。 B の値は乱流火炎領域の厚さとは関係があると考えられるが、両者は異なるものであり、これらの関係をさらに明らかにする必要がある。

7.4 層流火炎との統一性 本モデルは、 $u'/S_{Lo} \rightarrow 0$ のとき、乱流火炎に関するすべてのパラメータが層流火炎のパラメータとなる。例えば、 $u'/S_{Lo} \rightarrow 0$ のとき、 $f_D \rightarrow 0$, $S_L \rightarrow S_{Lo}$, $D_3 \rightarrow 2$, $S_w \rightarrow S_L$, $\tau_r \rightarrow \tau_c$, $B \rightarrow 2\delta_{Lo}$, $S_T \rightarrow S_{Lo}$ となる。

7.5 Gouldin の乱流燃焼速度モデル⁽¹²⁾との関係 本モデルでの二つの定数 C と C_1 を共に零とすれば、基本的には Gouldin の乱流燃焼速度モデルになるが、しかし、Gouldin のモデルでは $Ka \approx (\eta_0/\eta_K)^2$, $\epsilon_i = \eta_K$, $D_3 = 2.37$, としている点が異なる。

7.6 モデルの制限と今後の課題 本モデルにはいくつかの制限があり、これらの制限を解除することは今後の課題である。

まず、本モデルは混合気の当量比 ϕ が1である場合を想定している〔仮定の(2)で Lewis 数を1としている〕ので、混合気の当量比が1でない場合に適用するにはモデルの改良が必要である。

次には、本モデルに含まれる二つの定数 C と C_1 の決定の際に、 u'/S_{Lo} の範囲が約0~10であることはモデルの制限になりうる。今後は $u'/S_{Lo} > 10$ の実験結果を用いて検証する必要がある。

最後には、本モデルに用いた乱流火炎中の局所層流燃焼速度の計算式〔式(3)〕による図6(d)の計算結果は、多くの場合実測値より大きな値を示し、これは火炎素面のひずみによる局所層流燃焼速度の低下はさらに大きなものであることを示唆しており、より詳細な検証が必要である。

8. ま と め

本研究での予混合乱流伝ば火炎の構造モデルでは、火炎領域はしわ状で連続的な火炎素面とその後ろにある群島状火炎素面から構成され、両者の燃焼割合 ξ_w と ξ_D は、それぞれの燃焼特性時間と u'/S_{Lo} の値により決定されること、また、すべての火炎素面はフラクタル性を有し、その Inner Cutoff ϵ_i はコルモゴロフ尺度 η_K と局所層流火炎素面予熱域厚さ η により決定されることなどを仮定している。乱れによる火炎素面の微細構造への影響は、テイラー微細尺度程度の渦により火炎素面がひずまされ、コルモゴロフ尺度程度の渦により局所層流火炎素面予熱域が厚くなることで考慮している。

図7 層流火炎厚さによる乱流火炎特性への影響

本モデルは予混合乱流伝ば火炎の構造の定量化を目的としているが、乱流燃焼速度が火炎の構造と密接に関連しているため、乱流燃焼速度のモデルにもなっている。これによる予測結果は、層流火炎面が非常に厚い例外的な場合を除き、乱流燃焼速度の実測値とよく一致している。

モデル化の方法については、本モデルでの二つの定数を共に零と置けば、基本的には Gouldin の乱流燃焼速度モデル⁽¹²⁾になる。この意味では本モデルは Gouldin の乱流燃焼速度モデルの拡張である。また、層流火炎についての火炎素面の特性厚さと反応特性時間の概念をモデルに導入することにより、乱流火炎を層流火炎の拡張として考えることもできる。このことは、本モデルでの u'/S_{Lo} の値が零になるとき、乱流火炎についてすべてのパラメータが層流火炎についてのものになることから明らかである。

最後に、本モデルによれば、混合気のプラントル数 Pr と比率 δ_{Lo}/η_0 が一定とみなされる場合、乱流火炎構造を表すパラメータ $\xi(=\xi_D/\xi_w)$ と無次元乱流燃焼速度 S_T/S_{Lo} などは、レイノルズ数 Re とダムケラー数 Da 二つの変数だけにより決定され、 $Re-Da$ の平面に示すことができる。この点に関しては、次報で報告する予定である。

終わりに、実験に協力していただいた田上公俊、白山正浩の両君に感謝する。また、本研究費の一部は、文部省科学研究費補助金(一般研究C), No. 02650159 および谷川熱技術振興基金研究助成金によるものである。

ことを記し、謝意を表する。

文 献

- (1) Rajan, S., Smith, J. R. and Rambach, G. D., *Combust. Flame*, **57**(1984), 95.
- (2) Smith, J. R., *SAE Trans.*, **91**, Sec. 1(1982), 150.
- (3) 城戸・中島・黄・北野, 機論, **55**-511, B(1989), 882.
- (4) 城戸・黄・中島, 機論, **56**-521, B(1990), 175.
- (5) Baritaud, T. A. and Green, R. M., *SAE Trans.*, **95**, Sec. 1(1986), 1, 197.
- (6) Mantzaras, J., Felton, P. G. and Bracco, F. V., *SAE Paper*, No. 881635(1988).
- (7) Mantzaras, J., Felton, P. G. and Bracco, F. V., *Combust. Flame*, **77**(1989), 295.
- (8) Peters, N. (Borghi, R. and Murthy, S. N. B., Eds.), *Turbulent Reactive Flows*, (1989), 242, Springer-Verlag.
- (9) 城戸・黄・中島, 27 回燃焼シンポジウム前刷集, (1989), 380.
- (10) Kido, H., Huang, S. and Nakashima, K., to be presented in COMODIA' 90.
- (11) 城戸・和栗・中島, 機論, **51**-466, B(1985), 1899.
- (12) Gouldin, F. C., *Combust. Flame*, **68**(1987), 249.
- (13) Sreenivasan, K. R. and Meneveau, C., *J. Fluid Mech.*, **173**(1986), 356.
- (14) Tennekes, H. and Lumley, J. L., *A First Course in Turbulence*, (1972), 67, 260, MIT Press.
- (15) Abdel-Gayed, R. G. and Bradley, D., *Trans. ASME, J. Fluid Eng.*, **199**(1977), 732.
- (16) Kido, H., Wakuri, Y., Nakashima, K. and Hatanaka, K., *Bull. JSME*, **24**-187(1981), 175.
- (17) Kido, H., Kitagawa, T., Nakashima, K. and Kato, K., *Memo. Faculty Eng., Kyushu Univ.*, **49**-4(1989), 229.
- (18) Babkin, V. S., Babushok, V. I. and Suyushev, V. A., *Combust. Explos. Shock Waves*, **3**-1(1978), 291.