

■原著論文/ORIGINAL PAPER■

予混合燃焼場及び拡散燃焼場に適用可能な統一的燃焼モデルの提案とその評価
(第六報 選択拡散効果の影響の評価とモデルへの考慮)A Proposal of United Combustion Model for Premixed and Diffusion Flames and Its Evaluation
(6th Report: Evaluation of Preferential Diffusion Effect and Its Consideration to the Model)

稲毛 真一・阿部 一幾*・室田 知也

INAGE, Shin-ichi, ABE, Kazuki*, and MUROTA, Tomoya

日立製作所 エネルギー・環境システム研究所 火力開発センタ 〒312-0034 茨城県ひたちなか市堀口 832-2
Hitachi, Ltd. Energy & Environmental Systems Laboratory, 832-2 Horiguchi, Hitachinaka-shi Ibaraki-ken, 312-0034 Japan

2009年1月6日受付; 2009年6月26日受理/Received 6 January, 2009; Accepted 26 June, 2009

Abstract : This paper proposes a unified model that includes an effect of preferential diffusion of hydrogen. As hydrogen has a larger diffusion coefficient than methane and oxygen, the mass fraction of hydrogen varies in a premixed flame which is with curvature. This phenomenon is well known as preferential diffusion of hydrogen. Kido and Nakahara reported that the preferential diffusion influences the blow off limit of turbulent premixed flame and estimated the empirical formula due to experimental data. To simulate combustion phenomena of premixed gas that includes hydrogen with high accuracy, the preferential diffusion should be considered on the combustion model. On this paper, a simple model of the diffusion process of fuel in the premixed gas was evaluated firstly. Next, the results were applied to the author's combustion model. The results were compared with the experimental data by Kido and Nakahara and were in good agreement.

Key Words : Preferential diffusion, Hydrogen, United combustion model, Premixed flame, Numerical simulation

1. 緒言

既報[1-2]において、著者らが提案してきた予混合燃焼モデル[3-4]をベースに、拡散燃焼に対しても適用可能なように拡張した燃焼モデルを構築した。既報において、検証のため、辻及び山岡の層流対向流拡散火炎の実験[5]及び Barlow, Frank のパイロット火炎にサポートされた乱流拡散火炎[6]、更に乱流対向流拡散火炎[7]へと提案モデルを適用した。その結果、実験値との比較により、実用的な数値解析として、層流及び乱流拡散火炎に対する精度を検証できた[8-9]。また、燃料が複数成分で構成される場合の燃焼モデルに関しても、概念を構築した[10]。一方、混合燃料で、特に水素を含有する場合には、水素の拡散係数がメタン他に比して3倍程度大きいため、火炎が曲率を持つ場合、特に渦が火炎を大きく変形する乱流燃焼場では、水素の選択拡散効果が大きく燃焼場に影響することが城戸、中原により報告されている[11-12]。水素含有燃料の燃焼技術の開発は、石炭ガス化ガス、コークス炉ガス等を燃料として使う

燃焼システムにおいて、今後非常に重要になるものと考えられ、基礎的現象の解明と共に、数値解析に基づく高精度予測技術を確立することは極めて有用と考える。本研究は、選択拡散効果が局所燃焼速度に及ぼす影響を、既報で提案した予混合燃焼場及び拡散燃焼場に適用可能な統一的燃焼モデルに取り入れたものである。

2. 統一燃焼モデルの特徴

火炎内の各種成分の質量分率は、混合分率(燃料の質量分率) f と反応進行度 c を導入する事により評価できる。著者らが以前導出した、反応進行度 c による層流及び乱流予混合燃焼モデル[3-4]を以下に示す。反応は総括反応を仮定している。 c 式の反応項を ω とすると、層流燃焼モデルとして、

$$\omega = \frac{8\rho_u Su}{\delta} c^2 (1-c) \quad (1)$$

を得ている[4]。

ここに、 ρ_u は未燃焼ガスの密度、 Su は層流燃焼速度、 δ

* Corresponding author. E-mail: kazuki.abe.nd@hitachi.com

は層流火炎の厚みであり, 次の関係が成立する.

$$Su = \frac{4\lambda_i}{\rho_u C p_i \delta} \quad (2)$$

ここに, λ_i は熱伝導率, $C p_i$ は定圧比熱であり, i は未燃焼ガス温度と断熱火炎温度の平均温度での物理量である. また, 時間或いは空間平均の反応進行度 C 式の反応項を ω_i とすると, 乱流予混合燃焼モデル ω_i としては,

$$\omega_i = \frac{8\rho_u S_l}{\delta_i} C^2 (1-C) \quad (3)$$

を得ている. ここに, S_l は乱流燃焼速度, δ_i は乱流火炎帯の厚み, C は時間或いは空間平均の c である. S_l と δ_i の間にも, (2) と類似の以下の関係が成立する.

$$S_l = \frac{4(\lambda_i + \lambda_r)}{\rho_u C p_i \delta_i} \quad (4)$$

ここに, λ_r は乱流熱伝導率である. 乱れが層流燃焼速度の2倍程度に限定される *Wrinkled laminar flame* のように乱れが比較的小さい場合には, (3) において, $(S_l/\delta_i) = (Su/\delta)$ が成立し, (1) の反応速度にて層流～乱流の予混合燃焼に適用可能となる. その場合, 乱流の効果は, 反応進行度 C の輸送式中の乱流拡散係数により考慮される. これから, *Wrinkled laminar flame* に対する (1) は乱流モデルに依存せず, 乱流拡散係数が, $k-\epsilon$ モデルのような時間平均, *LES* のような空間平均, 更に直接シミュレーションのいずれの場合に対しても適用可能である. (1) で層流燃焼速度 Su を評価する必要があるが, Su は理論式で与えても, 実験値を用いても良い. なお, 燃焼場の圧力及び未燃焼ガスの温度及び予混合気の燃料の質量分率が決まれば, Su は一義的に決定され, 燃焼に対する圧力, 温度, 燃空比の影響を全て包含したモデルである.

さらに, 著者は, 予混合燃焼モデル (1) に火炎伸張の効果 considering, 最終的に以下のモデルを提案した[4].

$$\omega = \begin{cases} \frac{8\rho_u Su}{\delta} I_0^2 c^2 (1-c) & (I_0 > 0.7153) \\ 0 & (I_0 \leq 0.7153) \end{cases} \quad (5)$$

ここに, I_0 は火炎伸張度で, $0 \sim 1$ の値を取り, 火炎伸張の度合いを示す. なお, 火炎伸張度 I_0 は, 次の補助方程式により評価される.

$$\frac{1}{Ka} = -\frac{\rho_0}{\rho_u} \frac{1}{4I_0^2} \ln(1-I_0) \quad (6)$$

ここに, Ka は *Karlovitz* 数であり, $Ka = g\delta/Su$, g は速度勾配であり, ρ_0 は常温・常圧における未燃焼気体の密度 ($\approx 1.17 \text{ kg/m}^3$), ρ_u は解析条件での未燃焼気体の密度である. $I_0 = 1$ は火炎伸張が全く無い状態を表し, $I_0 = 0.7153$ が火炎伸張による消炎限界点を表す. $I_0 \leq 0.7153$ で燃焼モデルは

ゼロ値となるが, これは火炎伸張による消炎を表現している. すなわち, 上式は, 数学的な操作としてモデルをスイッチングしているのではなく, 物理現象としての消炎を反映したものである.

次いで著者らは, (1) をベースに層流拡散燃焼に適用可能なように拡張した[1-2]. その概念を以下説明する. 火炎に直交する座標を x とする. 予混合燃焼の場合は火炎中のある位置における反応は, その位置の反応進行度のみで決定される. 混合分率 f は一定値であると仮定すれば, f により決定される厚み δ を経て燃焼が完了する. それに対して, 拡散火炎帯中では, 混合分率 f が変化, すなわち勾配を持つため, 燃焼が完了するのに必要な火炎厚み δ の距離の間に $(df/dx) \cdot \delta$ だけ f が変化する. 変化率を Δf とし, f の分布関数から Δf だけ変化する微小距離 Δx を逆算する. その微小距離 Δx 内の平均の反応速度をその位置での f における燃焼反応速度と考える. すなわち,

$$\omega_{mean} \cdot \Delta x = \int_x^{x+\Delta x} \omega dx \quad (7)$$

$$\therefore \omega_{mean} = \frac{1}{\Delta x} \int_x^{x+\Delta x} \omega dx \quad (7')$$

予混合燃焼の場合は, $\Delta f = 0$ なので, $\Delta x = 0$ と解釈する. (7') の ω に (1) を用いると,

$$\omega_{mean}(x) = 4 \frac{\rho_u Su}{\Delta x} c^2 (1-c) \frac{\hat{\alpha}(1+\hat{\alpha}c)}{(1+\hat{\alpha}(2c-1))^2} \quad (8)$$

ここに,

$$\hat{\alpha} = \tanh\left(\frac{2\Delta x}{\delta}\right) \quad (9)$$

である. $\Delta x \rightarrow 0$ の時, $\hat{\alpha} \rightarrow 2\Delta x/\delta \rightarrow 0$ であり, ω_{mean} が (1) へ漸近することは, 容易に確認できる. すなわち, $\Delta f \rightarrow 0$ で, 予混合燃焼へ戻る. Δx を適切に評価することにより, ω_{mean} を改めて ω と書けば, 最終モデルは, 以下となる[1].

$$\omega(x) = \frac{4\rho_u Su}{\delta} c^2 (1-c) \frac{\hat{\alpha}(1+\hat{\alpha}c)}{(1+\hat{\alpha}(2c-1))^2} \times \left(\frac{df}{dx} + \frac{\delta}{2} \frac{d^2 f}{dx^2}\right) \left(\frac{df}{dx}\right)^{-1} \quad (10)$$

ここで,

$$\hat{\alpha} = \tanh\left(\frac{2 \frac{df}{dx}}{\frac{df}{dx} + \frac{\delta}{2} \frac{d^2 f}{dx^2}}\right) \quad (11)$$

$df/dx \rightarrow 0$ の極限では, (10), (11) は予混合燃焼モデル (1) へと漸近する. (10), (11) を新たな層流場の統一的燃焼モデルと考える. これは, Su 及び δ を通じて, 燃焼場の圧力, 未燃焼ガスの温度の効果を含み, 予混合燃焼, 拡散燃焼に

統一的に適用できるモデルとなっている。乱流拡散燃焼の場合には、(10), (11)において、 $Su \rightarrow S_f$, $\delta \rightarrow \delta_f$ と置き換えれば良い。但し、 $(S_f/\delta_f) = (Su/\delta)$ として良い。

更に、火炎伸張による消炎効果を考慮した場合には、以下のようなになる[1]。

$$\omega = \frac{4\rho_u Su}{\delta} I_0^2 c^2 (1-c) \frac{\hat{\alpha}(1+\hat{\alpha}c)}{(1+\hat{\alpha}(2c-1))^2} \times \left(\frac{df}{dx} + \frac{\delta}{2} \frac{d^2 f}{dx^2} \right) \left(\frac{df}{dx} \right)^{-1} \quad (I_0 > 0.7153) \quad (12)$$

$$\omega = 0 \quad (I_0 \leq 0.7153)$$

ここに、

$$\hat{\alpha} = \tanh \left(\frac{2 \frac{df}{dx}}{\frac{df}{dx} + \frac{\delta}{2} \frac{d^2 f}{dx^2}} \right) \quad (13)$$

I_0 は火炎伸張度で、予混合燃焼モデル (1) と同様に、補助方程式 (6) により評価される。

上記 (12)~(13) を用いて、反応進行度の輸送式を解けば、予混合燃焼場、拡散燃焼場を統一的に解析可能である。しかし、予混合燃焼場において定義された反応進行度を拡散燃焼場に適用すると、反応進行度の輸送式は f の勾配を含み、 c 単独の方程式としては閉じない。そこで、拡散燃焼場にも適用できるように、以下の様に反応進行度を再定義した。

$$\hat{c} = c \frac{f}{f_{Tmax}} \quad (f \leq f_{st} \text{ は燃料希薄側}) \quad (14)$$

$$\hat{c} = c \frac{1-f}{1-f_{Tmax}} \quad (f > f_{st} \text{ は燃料過濃側}) \quad (15)$$

(14), (15) で、 f_{st} は量論混合分率を、 f_{Tmax} は f が分布する中で、最大断熱火炎温度となる混合分率を意味する。通常、空気・メタン系の拡散燃焼であれば、 $f_{Tmax} = f_{st}$ である。本研究では、例えば、空気と予混合気体の拡散燃焼のような場合も想定しているため、一般には $f_{Tmax} = f_{st}$ とは限らないために、 f_{Tmax} を定義している。この定義を用いると、 \hat{c} の輸送方程式は以下のように、 \hat{c} に対して閉じた式となる。

燃料希薄側 ($f \leq f_{st}$) は

$$\frac{\partial \rho \hat{c}}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i \hat{c}}{\partial x_i} = D \frac{\partial^2 \rho \hat{c}}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{f}{f_{Tmax}} \omega \quad (16)$$

燃料過濃側 ($f > f_{st}$) は

$$\frac{\partial \rho \hat{c}}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i \hat{c}}{\partial x_i} = D \frac{\partial^2 \rho \hat{c}}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{1-f}{1-f_{Tmax}} \omega \quad (17)$$

この定義によれば、予混合燃焼、拡散燃焼で同一の混合

分率及び反応進行度の輸送式を用いる事ができる。以下では、(16), (17) を統一モデルにおける反応進行度の輸送式とする。反応進行度と混合分率により、火炎帯中の各ガス成分の質量分率は以下のように、代数的に評価できる。

($f \leq f_{st}$ は燃料希薄側)

$$Y_{CH_4} = f - f_{Tmax} \hat{c} \quad (18)$$

$$Y_{O_2} = A_{O_2} \left\{ (1-f) + f_{Tmax} \left(1 - \frac{1}{f_{st}} \right) \hat{c} \right\} \quad (19)$$

$$Y_{CO_2} = \frac{M_{CO_2}}{M_{CH_4}} f_{Tmax} \hat{c} \quad (20)$$

$$Y_{H_2O} = \frac{2M_{H_2O}}{M_{CH_4}} f_{Tmax} \hat{c} \quad (21)$$

$$Y_{N_2} = 1 - Y_{CH_4} - Y_{O_2} - Y_{CO_2} - Y_{H_2O} \quad (22)$$

($f > f_{st}$ は燃料過濃側)

$$Y_{CH_4} = f - \frac{f_{st}(1-f_{Tmax})}{1-f_{st}} \hat{c} \quad (23)$$

$$Y_{O_2} = A_{O_2} \left\{ (1-f) - (1-f_{Tmax}) \hat{c} \right\} \quad (24)$$

$$Y_{CO_2} = \frac{A_{O_2} M_{CO_2}}{2M_{O_2}} (1-f_{Tmax}) \hat{c} \quad (25)$$

$$Y_{H_2O} = \frac{A_{O_2} M_{H_2O}}{M_{O_2}} (1-f_{Tmax}) \hat{c} \quad (26)$$

$$Y_{N_2} = 1 - Y_{CH_4} - Y_{O_2} - Y_{CO_2} - Y_{H_2O} \quad (27)$$

ここに、 A_{O_2} は空気中の酸素の質量分率である。以上は、燃料をメタン単独とした場合のモデルの展開を示したが、基本的に混合燃料の場合も化学種の成分が増えるのみで、同一のモデル展開が可能である。その場合も、反応の時定数としての Su/δ を混合燃料に対して適切に与える必要がある。次に、上記モデルをベースに、水素含有燃料での水素選択拡散のモデル化について検討する。

3. 選択拡散効果のモデル化

上記の統一燃焼モデルでは、各混合分率における Su/δ を平均反応速度として与える必要がある。メタンの様に拡散係数が比較的空気に近い場合には、 Su/δ は予混合気の初期燃空比により一義的に決定される。一方、本研究で対象としている水素を含有する燃料の場合、水素の拡散係数は空気のおおよそ3倍であり、選択拡散と呼ばれる独特の現象が起こる。特に乱流燃焼場においては、乱流火炎のうち未燃混合気側に凸な形状を有する部分の先端付近に水素が集中し、局所的に水素濃度が増大する。そのため、水素・メ

タンのように混合した燃料では, 各位置において Su/δ が変化する. この効果を正しく評価し, モデルに考慮しない限り, 水素・メタン混合燃料での燃焼場を高精度に解けない. 本章では, 水素の選択拡散効果をモデル化し, 統一燃焼モデルの更なる高精度化を図る.

3.1. 単一成分燃料と空気における選択拡散のモデル化

まず, 燃料の拡散係数が, 燃料・空気の混合特性に与える影響を未燃焼場について検討する. 一定速度で流れる空気中に, 燃料を点源として供給する状況を図 1 に示す. 燃料は, 空気中を图中的 x 及び y 方向に拡散し, 距離と共に濃度が低下する. 空気の流速を U とすると, 輸送される空気中のある点 A から広がる燃料の輸送式は, 以下のように書ける.

$$U \frac{\partial f}{\partial y} = D_f \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \quad (28)$$

$$\frac{\partial f}{\partial y} = \frac{D_f}{U} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = \hat{D}_f \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}, \text{ 但し, } \hat{D}_f = \frac{D_f}{U} \quad (29)$$

ここに, 空気の流速 U は, 層流燃焼速度 Su と考えて良い. 上式の解は,

$$f = \frac{f_0}{\sqrt{4\pi\hat{D}_f y}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\hat{D}_f y}\right) \quad (30)$$

である. これは, 燃料が x 方向にはガウス分布で濃度が分布し, y 方向には指数関数的に減少していく事を表す. 拡散係数 D_f が大きい程, 燃料拡散の度合いが大きいことがわかる. 点源からの燃料拡散をベースに, 以下より一般的な現象について検討していく.

まず, 層流予混合火炎において燃料拡散係数が燃料濃度に与える影響を調べるために, 図 2 の平面火炎を考える. 図 2 では, 図 1 と異なり, 图中的 x 軸上の各点に無限個の燃料の点源を与える状況を考える. 各点からの燃料は, 上記 (30) に従って空気中を拡散する. 图中的火炎面に予混合気が入る場合の予混合気中の燃料濃度は, x 軸上の各点からの燃料拡散の積分値として求められる. 例えば, 図 2 中の点 A における燃料濃度分布 \hat{f} は, 入口予混合気 (初期予混合気中の燃料濃度) を f_0 とすると, 次式で与えられる.

$$\hat{f} = \frac{f_0}{\sqrt{4\pi\hat{D}_f y}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{4\hat{D}_f y}\right) dx = f_0 \quad (31)$$

これは, x 座標上の各点からの燃料が拡散により交換されながらも, 予混合気中では燃料の点源が x 座標上に無限個存在するために, 平面火炎に流入する際の燃料濃度は初期の燃料濃度と一致することを意味する.

また, 燃料以外の成分の輸送式の解は,

$$Y_{air} = \frac{1-f_0}{\sqrt{4\pi\hat{D}_{air} y}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\hat{D}_{air} y}\right) \quad (32)$$

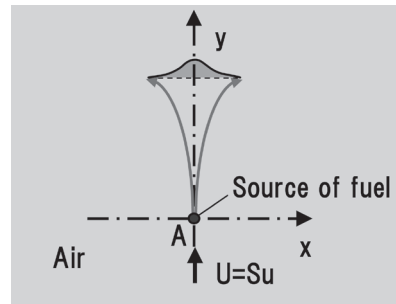


Fig.1 Concept of fuel diffusion in air

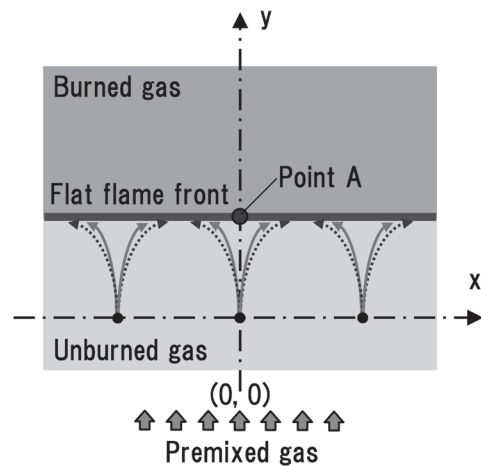


Fig.2 Concept of fuel diffusion in premixed gas toward a flat premixed flame

燃料同様に, 平坦な火炎に投入される際には, 点 A での燃料以外成分の濃度分布 \hat{Y}_{air} は次式で与えられる.

$$\hat{Y}_{air} = \frac{1-f_0}{\sqrt{4\pi\hat{D}_{air} y}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{4\hat{D}_{air} y}\right) dx = 1-f_0 \quad (33)$$

この結果は, 点 A 以外の平面火炎のあらゆる場所において成立する. これより, 平坦な火炎に向かう予混合気中の燃料濃度は拡散速度に依らず, 一定値であることが判る.

次いで, 乱流燃焼場のように, 渦による凹凸のある火炎に対して検討する. 本研究では, 図 3 のように凹凸がペアになった火炎を考える. 選択拡散の効果として, 凹面形状の火炎上の点 A 上流では, 空気よりも小さい拡散係数を持つ燃料成分が集中し, 反対に凸面形状の火炎上の点 B 上流では, 空気よりも大きい拡散係数を持つ燃料成分が集中する. 各点 A, B の燃料濃度をそれぞれ $Y_{(A)}$, $Y_{(B)}$ とすると, 本研究では, 燃料濃度の質量バランスとして, 次を仮定する.

$$Y_{(A)} + Y_{(B)} = 2f_0 \quad (34)$$

次に, 図 4 に示すような, 予混合気に対して半径 r の凹面を持つ火炎を考える. 凹面火炎が形成する予混合気内で

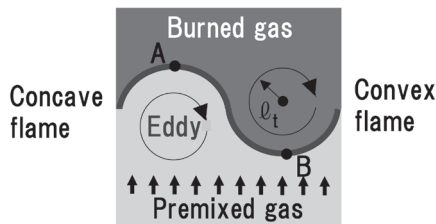


Fig.3 Concept of turbulent premixed flame

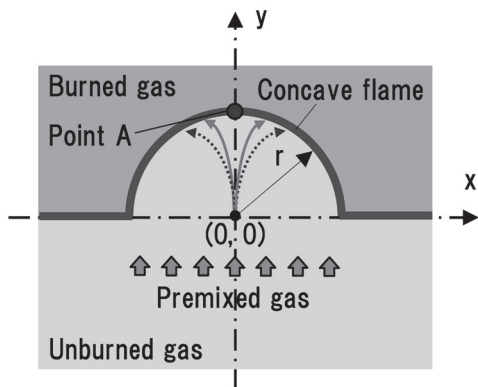


Fig.4 Modeling of concave flame

は、拡散による燃料の交換は、 $x = -r \sim r$ の範囲でのみ行われる。そのため、 $y = r$ の位置を点 A とすると、点 A における燃料の質量は、

$$f_{(A)} = \frac{2f_0}{\sqrt{4\pi\hat{D}_f y}} \int_0^r \exp\left(-\frac{x^2}{4\hat{D}_f y}\right) dx \quad (35)$$

上式で、

$$\frac{x^2}{4\hat{D}_f y} = t^2 \rightarrow \frac{x}{\sqrt{4\hat{D}_f y}} = t \quad \therefore dx = \sqrt{4\hat{D}_f y} dt \quad (36)$$

なる変換をすると、

$$\begin{aligned} \therefore f_{(A)} &= \frac{2f_0\sqrt{4\hat{D}_f y}}{\sqrt{4\pi\hat{D}_f y}} \int_0^{\frac{r}{\sqrt{4\hat{D}_f y}}} \exp(-t^2) dt \\ &= f_0 \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{r}{\sqrt{4\hat{D}_f y}}} \exp(-t^2) dt \end{aligned} \quad (37)$$

今、 $y = r$ であるから、

$$f_{(A)} = f_0 \cdot \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{1}{\sqrt{4\hat{D}_f}}} \exp(-t^2) dt \quad (38)$$

これは、いわゆる誤差関数であり、初等関数では表し得ないので、本研究では Williams の近似式[11]を適用すると、上式は以下のように書ける。この近似式は最大 1% 程度の相対誤差で、誤差関数を近似できる事が知られている。

$$f_{(A)} = f_0 \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{r}{4\pi\hat{D}_f}\right)\right)^{0.5} \quad (39)$$

また、空気についても同様の取り扱いを適用すると、点 A での空気の質量分率は、

$$f_{air(A)} = (1 - f_0) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{r}{4\pi\hat{D}_{air}}}\right)\right)^{0.5} \quad (40)$$

(39) 及び (40) より、点 A における燃料濃度は、次のように書ける。

$$Y_{(A)} = \frac{f_{(A)}}{f_{(A)} + f_{air(A)}} \quad (41)$$

$$= \frac{f_0}{f_0 + (1 - f_0) \cdot \frac{\left(1 - \exp\left(-\frac{r}{4\pi\hat{D}_{air}}}\right)\right)^{0.5}}{\left(1 - \exp\left(-\frac{r}{4\pi\hat{D}_f}\right)\right)^{0.5}} \quad (42)$$

本来は、(42) 中の r として渦の代表スケール他を与えるべきであるが、乱流の極限として、渦のスケールが平面火炎 ($r = \infty$) に比して十分に小さい、すなわち $r \rightarrow 0$ の極限を考えると、

$$Y_{(A)} = \frac{f_0}{f_0 + (1 - f_0) \sqrt{\frac{D_f}{D_{air}}}} \quad (43)$$

のように簡略化できる。この結果は、十分に大きい局率を持つ場においては、初期濃度と燃料・空気の拡散係数比により、燃料濃度が変化する事を意味する。以下、 $r \rightarrow 0$ の極限下でのモデルが、一般の乱流における選択拡散の現象をどの程度、再現できるかを評価する。

(43) の結果は、火炎面が予混合気に対して凹面の場合である。凸面の場合は、(34) の仮定を用いて、

$$\begin{aligned} Y_{(B)} &= 2f_0 - Y_{(A)} \\ &= 2f_0 - \frac{f_0}{f_0 + (1 - f_0) \sqrt{\frac{D_f}{D_{air}}}} \end{aligned} \quad (44)$$

である。拡散係数が同じである場合は、(43)、(44) より、

$$Y_{(A)} = Y_{(B)} = f_0 \quad (45)$$

である。

(44) の結果を城戸らの実験データと比較する[12-13]。城戸らは、予混合気を満たした密閉容器内でファンによる乱れを生成し、先ず非燃焼条件で 2 本の熱線流速計により乱

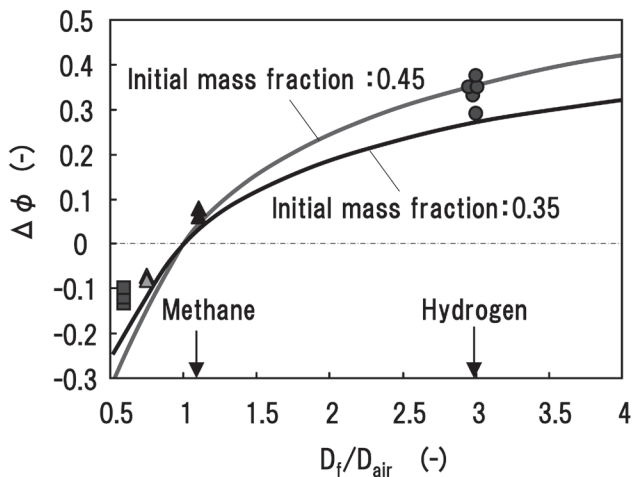


Fig.5 Relationship between $\Delta\phi$ and D_f/D_{air}

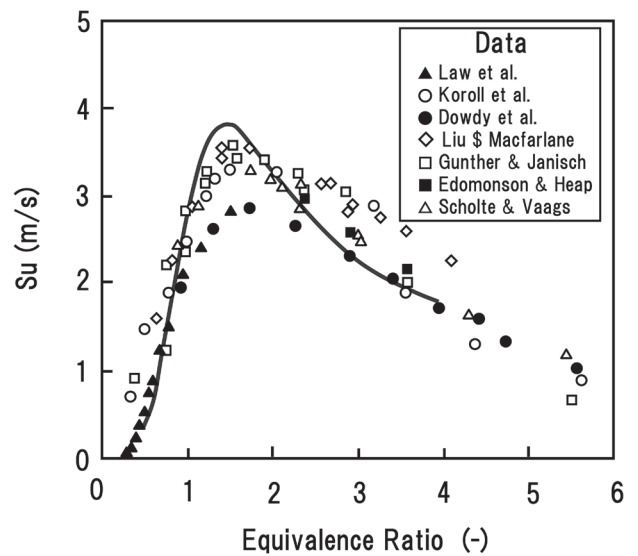


Fig.7 Relationship of Laminar flame speed and equivalence ratio

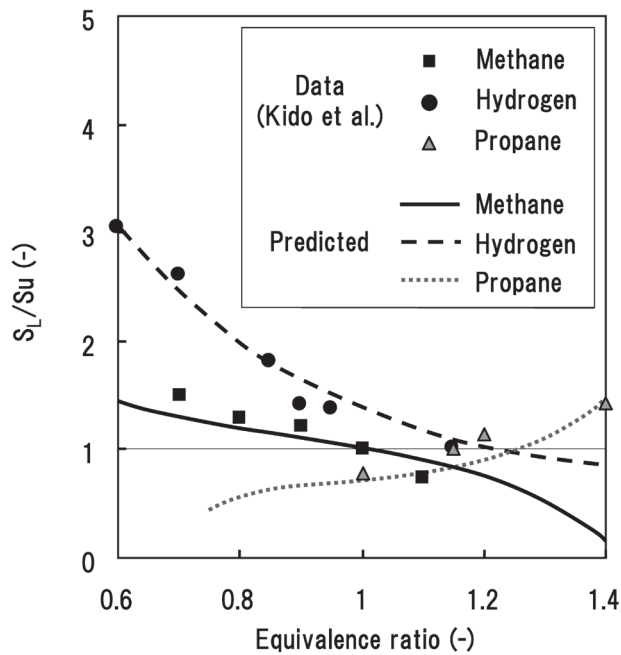


Fig.6 Variation of S_L/S_u with equivalence ratio

流のミクロスケールを測定している。その後、予混合燃焼させて、予混合火炎の火炎形状及び伝播状況をシュリーレンにて評価し、乱流燃焼速度を評価している。特に、拡散係数の異なる複数の燃料を用いて予混合気に対して凸な火炎面での選択拡散による燃料濃度の変化について実験的な評価をしている。予混合気に対して凸な火炎面での燃料濃度の変化 ($\Delta\phi$: 火炎面直前での当量比-初期当量比) と燃料・酸素の拡散係数比との関係を図5に示す。本研究では、(44) と燃料質量分率の変化を当量比の差に換算して比較した。図より、実線で示す(44) は実験データを良く再現できる。城戸、中原は、図5中の実験値を元に、燃料・空気の拡散係数比の関数として、

$$\Delta\phi = 0.3 \ln\left(\frac{D_f}{D_{air}}\right) \quad (46)$$

なる実験式を提案している[13]。一方で、(44) は初期燃料濃度に依存することが特徴である。

次に、選択拡散が働く場合の層流燃焼速度比 (S_L : 選択拡散が働く場合の局所燃焼速度の平均値, S_u : 選択拡散が働かない場合の燃焼速度) と当量比の関係を図6に示す。本研究では、水素、メタン及びプロパンの層流燃焼速度と当量比の関係における実験データから、層流燃焼速度を当量比 ϕ の関数として、以下の代数式を作成した。メタンとプロパンは、層流燃焼速度と当量比の関係に、あまり差異がないことから、同一の式を用いた。

1) 水素 (適用当量比範囲は 0.6~4.0) は

$$S_u = -2.282\phi^5 + 18.55\phi^4 - 56.05\phi^3 + 75.28\phi^2 + 7.69 \quad (47)$$

2) メタン (適用当量比範囲は 0.6~1.4) は

$$S_u = 0.3022\phi^6 - 2.311\phi^5 + 9.518\phi^4 - 21.63\phi^3 + 24.37\phi^2 - 12.00\phi + 2.13 \quad (48)$$

3) プロパンは

$$S_u = 0.3022\phi^6 - 2.311\phi^5 + 9.518\phi^4 - 21.63\phi^3 + 24.37\phi^2 - 12.00\phi + 2.13 \quad (49)$$

参考に、図7に水素の燃焼速度と当量比の関係を、実験値と共に示す。図より、実験の差のバラツキの範囲内で一致していることが判る。(47)~(49)の各燃料の層流燃焼速度の代数式を用いると、選択拡散による当量比の変化に伴い、層流燃焼速度も変化する。したがって、混合気組成により図6から S_L が決定され、ここで S_L を選択拡散を考慮した

Su とすれば、式 (2) より δ が決定でき、 Su/δ を計算できる。図 6 に示すように、(44) で評価した層流燃焼速度の比は各燃料において実験を定性的及び定量的に良く再現できていると考える。

3.2. 水素・メタン燃料と空気における選択拡散のモデル化

前節では単独の燃料について考えたので、以下では水素を含有する混合燃料の例として、比較的实验値が豊富な水素・メタンの混合燃料の場合について検討する。前節同様に、凹凸火炎のペア (図 3) を考え、特に凹面火炎 (図 4) を考えると、凹火炎の点 A における、メタン、水素及び空気の各質量は、上記と同様の考え方によれば、以下の様に展開できる。

$$f_{CH_4} = f_{CH_4(0)} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{r}{4\pi\hat{D}_{CH_4}}\right) \right)^{0.5} \quad (50)$$

$$f_{H_2} = f_{H_2(0)} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{r}{4\pi\hat{D}_{CH_4}}\right) \right)^{0.5} \quad (51)$$

$$f_{air} = (1 - f_{CH_4(0)} - f_{H_2(0)}) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{r}{4\pi\hat{D}_{air}}\right) \right)^{0.5} \quad (52)$$

これより、点 A でのメタン及び水素の質量分率は、それぞれ

$$Y_{CH_4} = \frac{f_{CH_4}}{f_{CH_4} + f_{H_2} + f_{air}} \quad (53)$$

$$Y_{H_2} = \frac{f_{H_2}}{f_{CH_4} + f_{H_2} + f_{air}} \quad (54)$$

前節同様に、乱流の極限として、渦のスケールが平面火炎 ($r = \infty$) に比して十分に小さい、すなわち $r \rightarrow 0$ の極限では、

$$Y_{CH_4} = \frac{f_{CH_4(0)}}{f_{CH_4(0)} + f_{H_2(0)} \sqrt{\frac{D_{CH_4}}{D_{H_2}}} + (1 - f_{CH_4(0)} - f_{H_2(0)}) \sqrt{\frac{D_{CH_4}}{D_{air}}}} \quad (55)$$

$$Y_{H_2} = \frac{f_{H_2(0)}}{f_{H_2(0)} + f_{CH_4(0)} \sqrt{\frac{D_{H_2}}{D_{CH_4}}} + (1 - f_{CH_4(0)} - f_{H_2(0)}) \sqrt{\frac{D_{H_2}}{D_{air}}}} \quad (56)$$

通常、混合燃料の特性は、水素のモル分率にて表されるので、選択拡散後の燃料中の水素のモル比 α を考えると、

$$\alpha = \frac{1}{1 + \frac{Y_{CH_4}}{Y_{H_2}} \frac{M_{H_2}}{M_{CH_4}}} \quad (57)$$

この手法によれば、更に複数種の燃料が混合した場合でも同様の概念が適用可能である。

3.3. 任意の水素・メタン予混合気の層流燃焼速度の評価

(55), (56) により、渦の先端においては、初期の水素・メタン混合気濃度が変化するため、層流燃焼速度も変化する。それを評価するため、任意の割合での水素・メタン予混合燃焼の層流燃焼速度のデータベースを構築する。具体的には、*CHEMKIN* を用いて、水素モル比 $\alpha = 0.1, 0.5, 0.9$ での水素・メタン予混合気の燃料質量分率をパラメータにして、層流燃焼速度を評価し、それから適切な代数式を構築した。使用した素反応メカニズムは *GRI-Mech Ver.3.0* であり、53 化学種 325 素反応が考慮できる。代数式を以下に示す。

$$Su(\alpha, f) = A(f)\alpha^3 + B(f)\alpha^2 + C(f)\alpha + D(f) \quad (58)$$

ここに Su は層流燃焼速度、 α は水素・メタン混合燃料における水素モル比、 f は燃料濃度、 A, B, C, D は α の関数として与えた係数である。現在の適用範囲として、 $\alpha = 0 \sim 0.9$, $f = 0.025 \sim 0.06$ である。

$$A(f) = -2.381 \times 10^7 f^4 + 3.926 \times 10^6 f^3 - 2.467 \times 10^5 f^2 + 6.966 \times 10^3 f - 70.22$$

$$B(f) = 1.147 \times 10^7 f^4 - 2.123 \times 10^6 f^3 + 1.473 \times 10^5 f^2 - 4.471 \times 10^3 f + 47.59$$

$$C(f) = 5.570 \times 10^7 f^4 - 7.512 \times 10^6 f^3 + 3.506 \times 10^5 f^2 - 6.344 \times 10^2 f + 3.60$$

$$D(f) = 3.541 \times 10^7 f^4 - 8.274 \times 10^4 f^3 + 6.512 \times 10^3 f^2 - 1.975 \times 10^2 f + 2.07 \quad (59)$$

(58), (59) により評価した層流燃焼速度と *CHEMKIN* による結果の比較を図 8 に示す。図より、*CHEMKIN* の結果を良く近似できることが判る。

4. 結言

水素の選択拡散効果を理論的に評価し、既報にて提案した統一燃焼モデルを水素含有燃料に対して適用可能なように拡張した。さらに、モデルを乱流燃焼時の局所燃焼速度

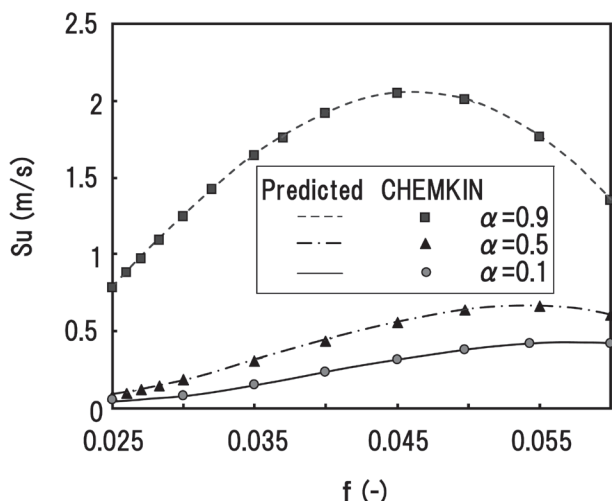


Fig.8 Effect of hydrogen mole ratio on the laminar flame speed

の平均値他の評価に適用し, 実験値と比較した. その結果, 以下の知見を得た.

- i) 単一燃料での層流火炎において, 凹火炎での水素濃度の減少, 凸火炎での水素濃度の増大効果を理論的に評価し, 初期予混合気濃度及び燃料・空気の拡散係数比に依存する濃度の変化式を導出した. 単一燃料での凸火炎での水素濃度増大効果の実験値と比較した結果, 定量的, 定性的に一致した. また, 同じく凸火炎での水素濃度増大効果に伴う, 層流燃焼速度の変化に関しても, 実験値を良く再現する結果となった.
- ii) i) のモデルを, 水素・メタン混合燃料に適用し, より汎用性の高い, 凹火炎及び凸火炎での水素濃度の変化式を導出した. 提案式を任意の水素モル比の水素・メタン混合燃料に対して作成した層流燃焼速度データベースを作成した.

以上より, 水素選択拡散効果を考慮した提案モデルは, 十分な精度で実験を再現することを確認したと考える.

References

1. 稲毛真一, 日本燃焼学会誌, 第 49 巻 150 号, 47, (2007)
2. 稲毛真一, 日本燃焼学会誌, 第 49 巻 150 号, 57, (2007)
3. 稲毛, 大塚, 機論 B 編 61 巻 586 号, 2290, (1995)
4. 稲毛, 大塚, 機論 B 編 63 巻 609 号, 1806, (1997)
5. H. Tsuji and I. Yamaoka, *Proc. Combust. Inst.*, 13, 723, (1971)
6. R. S. Barlow and J. H. Frank., *Proc. Combust. Inst.*, 27, 1087, (1998)
7. Mastorakos, E. Turbulent Combustion in Opposed Jet Flows. Ph. D. Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, (1993)
8. 稲毛真一, 日本燃焼学会誌, 50 巻 154 号, 353, (2008)
9. 稲毛真一, 日本燃焼学会誌, 51 巻 155 号, 63, (2009)
10. Muhammet 他, 日本燃焼学会誌, 50 巻 152 号, 126, (2008)
11. 日本規格協会, 統計数値表, (1972)
12. 城戸他, 機論 B 編 62 巻 600 号, 290, (1996)
13. 城戸, 中原, 機論 B 編 63 巻 614 号, 277, (1997)