

■原著論文/ORIGINAL PAPER■

部分予混合雰囲気中における可燃性固体上の火炎の燃え拡がり解析

Numerical Simulation on Flame Spread over a Solid Fuel in Partially Premixed Atmosphere

緒方 佳典・山本 和弘*・山下 博史

OGATA, Yoshinori, YAMAMOTO, Kazuhiro*, and YAMASHITA, Hiroshi

名古屋大学大学院工学研究科 〒464-8603 名古屋市千種区不老町
Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8603, Japan

2007年3月22日受付; 2007年10月29日受理/Received 22 March, 2007; Accepted 29 October, 2007

Abstract : In this study, we numerically investigated downward flame spread over a thin solid fuel in partially premixed atmospheres. For simplicity, we assumed that the pyrolysis gas consists of methane and nitrogen. To consider the partially premixed atmospheres, methane was added in the opposed air stream. The fuel concentration was kept below the lean flammability limit. For discussing the flame structure, the flame index was obtained to observe premixed and non-premixed flames. Results show that, in the partially premixed atmospheres, the flame spread rate is increased. The high temperature region is enlarged. The premixed flame region is expanded at the leading flame edge, with larger flame temperature. This is because the heat transfer to the unburned solid fuel is intensified. As a result, amount of ejected fuel velocity from the solid surface is increased, which supports the higher flame spread rate in the partially premixed atmospheres.

Key Words : Flame spread, Thin solid fuel, Partially premixed atmosphere, Flame index

1. 緒言

我々人類は、火を使うことによって生活を豊かにしてきた。近年、化石燃料の枯渇や大気汚染など地球規模の問題が叫ばれているが、このような燃焼によるエネルギーの利用は幅広く行われており、その必要性は依然大きい。そのため火がもたらす災害、すなわち「火災」による被害を低減することは重要な課題であるといえる。

一般に火災とは、液体燃料や可燃性の固体などさまざまな可燃物に火炎が着火して、燃焼の領域が燃え拡がっていく現象である。したがって、火災による被害を抑制するには、火炎の伝播機構を理解する必要がある。しかし実際の火災では、周囲雰囲気や流れ場、可燃性固体の形状や材質など様々な要因が絡み合うため、火炎の燃え拡がる過程を直接明らかにすることは難しい。そこで、ろ紙や PMMA などの試料を用いて火災時の燃え拡がり現象を模擬し、可燃性固体上で火炎が燃え拡がる過程について数多くの研究が行われてきた[1-10]。

可燃性固体の燃焼は、熱分解により発生した炭化水素や CO などの可燃性ガスが拡散し、周囲に存在する空気中の

酸素と反応して火炎が形成される。さらに、火炎からの熱によって未燃焼の固体燃料が熱分解され、火炎の燃え拡がりが維持される。ただし実際の火災では、発生した可燃性ガスの全てが燃焼するとは限らず、周囲空気と混合して可燃性の雰囲気形成されることが考えられる。ここで、周囲空気中に希薄可燃限界以下の燃料が混合した状態を「部分予混合雰囲気」と呼ぶことにする[11]。この部分予混合気自体には火炎伝播性はないが、部分予混合雰囲気中を火炎が燃え拡がる場合は、希薄可燃限界以下とはいえ火炎の前方にすでに燃料が存在するため、燃え拡がりの様子が変化することが想定される。したがって、このような部分予混合雰囲気中における火炎の燃え拡がり現象について調べることは防災の観点からも重要である。我々は、可燃性固体としてろ紙を用い、部分予混合雰囲気中の火炎の燃え拡がりの実験を行ってきた[12,13]。その結果、燃料を添加すると火炎の燃え拡がり速度が増加すること、そして高温の領域が拡大し、予熱領域への熱流入量が増加することを明らかにした。しかし、火炎の燃え拡がりは非定常な現象である上、発生する熱分解ガスの成分が非常に多いため、実験だけで現象を解明することは難しい。そこで、対向する空気流中に単一の気体燃料を噴き出す層流平板境界層拡散火炎に着目し、燃料の噴き出し領域を移動させること

* Corresponding author. E-mail: kazuhiro@mech.nagoya-u.ac.jp

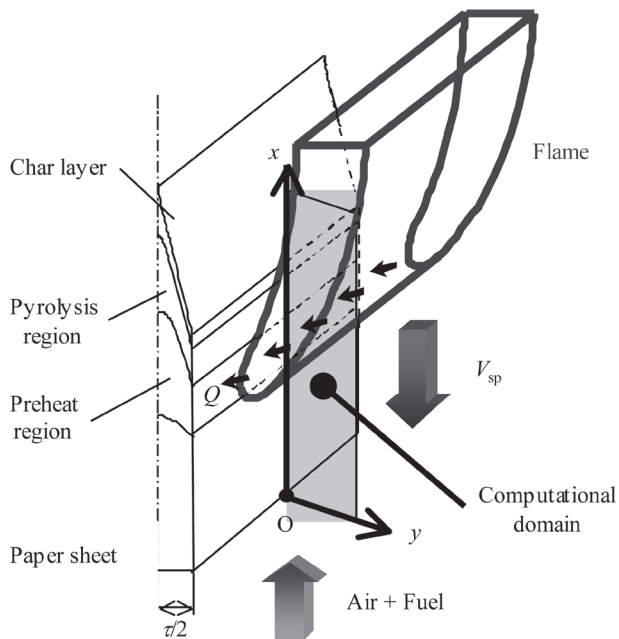


Fig.1 Schematic of downward flame spread and computational domain

によって、火炎の燃え拡がり現象を模擬した数値解析を行なった[14]。これにより実験結果を定性的に説明することができた。

しかし、前回行なった数値解析では、圧縮性や浮力の効果を考慮していなかった。そこで本研究では、密度変化と重力の影響を考慮し、周囲空气中に希薄可燃限界以下のメタン濃度を添加した固体燃料上の火炎の燃え拡がり現象の数値解析を行ない、火炎構造や燃え拡がり速度の変化について調べた。

2. 解析モデルおよび計算方法

2.1. 解析モデルと支配方程式

図1に本研究で対象とする火炎の燃え拡がりの模式図および解析領域を示す。図に示すように、一様な強制対流中に置かれた固体燃料上を火炎が鉛直下方へと燃え拡がる場合を考える。後ほど座標系や計算対象について詳しく説明するが、固体燃料の表面先端に座標原点を設け、表面に対して水平方向を x 方向、鉛直方向を y 方向とした。固体燃料にはセルロースを主成分とする薄い紙を考え、火炎からの熱流入により熱分解した可燃性ガス(メタン)と周囲雰囲気中に存在する酸素が燃焼して火炎が燃え拡がる過程を模擬した。

2.1.1. 気相の反応と支配方程式

本研究では、セルロースを主成分とするろ紙の燃え拡がり現象を考える。ただし簡略化のため、可燃性固体の熱分解により発生する燃料はメタンのみとした。そして反応には、以下に示す一段の総括不可逆反応を用いた[15]。



比熱などの物性値は、JANAF table[16]の値を参考に温度の4次式で与えた。輸送係数に関しては、SmookeらのSimplified Transport Model[17]を適用した。熱力学定数は、CHEMKIN データベース[18]を用いた。また、以下の仮定を用いた。

- ・混合気は理想気体とする。
- ・Soret効果, Dufour効果, 圧力拡散の効果は無視する。
- ・粘性散逸項および圧力仕事項は無視する。

これにより、本解析で使用した気相の支配方程式は以下ようになる。

質量の保存方程式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

運動量の保存方程式

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \rho g \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (4)$$

エネルギーの保存方程式

$$c_p \left[\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} \right] = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \sum_{i=1}^5 h_i w_i \quad (5)$$

化学種の保存方程式

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u Y_i)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v Y_i)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho D_i \frac{\partial Y_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho D_i \frac{\partial Y_i}{\partial y} \right) + w_i \quad (6)$$

理想気体の状態方程式

$$p = \rho R^0 T \sum_{i=1}^5 \frac{Y_i}{m_i} \quad (7)$$

2.1.2. 固相の反応と支配方程式

本解析で使用した固相の支配方程式を以下に示す。

質量の保存方程式

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial t} = -(1 - v_c) K_s \quad (8)$$

固体燃料成分の保存方程式

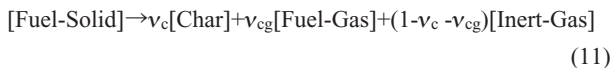
$$\frac{\partial(\rho_s Y_F)}{\partial t} = -K_s \quad (9)$$

エネルギーの保存方程式

$$\rho_s c_{ps} \tau \frac{\partial T_s}{\partial t} = \tau \Delta H_p K_s + \lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial y} - \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{g,\infty}^4) \quad (10)$$

ここで c_{ps} , ΔH_p , λ_g , ε および σ は、それぞれ固相の比熱、熱分解反応の標準生成熱、気相の熱伝導率、放射率およびステファン・ボルツマン定数である。これらの値はそれぞれ $c_{ps} = 1.3 \text{ J/(g K)}$, $\Delta H_p = 64 \text{ J/g}$, $\varepsilon = 0.6$ および $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \text{ K}^4)$ とした。

固相の反応には、以下に示す一段の総括不可逆反応を用いた[19]。



ここで $[\text{Fuel-Solid}]$, $[\text{Char}]$, $[\text{Fuel-Gas}]$ および $[\text{Inert-Gas}]$ は、それぞれ固体燃料, Char, 熱分解ガス中に含まれる可燃性成分 (CH_4) および不活性成分 (N_2) である。また ν_c および ν_{cg} は、Char および可燃性ガス (CH_4) の質量ベースの量論係数であり、 $\nu_c = 0.14$, $\nu_{cg} = 0.23$ を用いた。

熱分解反応の反応速度 K_s は、次式のアレニウス型で与えた。

$$K_s = A_s \rho_{s0} \left(\frac{\rho_s Y_F}{\rho_{s0}} \right)^{\omega_s} \exp \left(-\frac{E_s}{R^0 T_s} \right) \quad (12)$$

ここで A_s , ρ_s , Y_F , ω_s および E_s は、それぞれ熱分解反応の頻度係数、固相の密度、固体燃料の質量分率、反応次数および活性化エネルギーである。反応定数の値はそれぞれ $A_s = 5.0 \times 10^{16} \text{ 1/s}$, $\omega_s = 1.2$ および $E_s = 237 \text{ kJ/mol}$ とした。また固相の物性値はろ紙の値[12-14]を参考に、厚さ $\tau = 0.12 \text{ mm}$ および初期密度 $\rho_{s0} = 800 \text{ kg/m}^3$ とした。

2.2. 計算方法と境界条件

上記の支配方程式の離散化には有限体積法を用いた。対流項には1次風上差分法を、時間展開には1次精度陰解法を用いた。圧力の計算には Patankar の SIMPLE 法[20]を用いた。また時間刻み Δt は、計算条件に応じて $\Delta t = 1.0 \times 10^{-5} \text{ s}$ および $\Delta t = 5.0 \times 10^{-5} \text{ s}$ とした。各時間ステップにおいて SOR 法による繰り返し計算を行なった。

計算領域の大きさは x 方向に 90 mm , y 方向に 20 mm とした(図2)。格子には、 x 方向に361の等間隔格子、 y 方向に121の不等間隔格子を用いた。格子間隔は、 x 方向に 0.25 mm , y 方向に壁面からの距離 y が $0 \leq y \leq 0.5$ の範囲では 0.1 mm とし、 $0.5 \leq y \leq 20$ の範囲では膨張率1.02の不等間隔格子とした。

次に、境界条件について述べる。図2に示すように、①

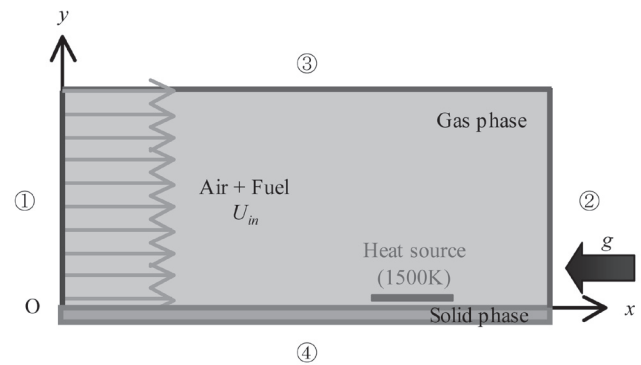


Fig.2 Boundary condition

流入境界、②出口境界、③上部境界および④固相と気相の境界面について、それぞれ説明する。

①流入境界 ($x = 0 \text{ mm}$)

入り口では一様流とし、 x 方向速度 (鉛直方向速度) を一定値、 y 方向速度 v はゼロとする。温度は室温 300 K とする。部分予混合雰囲気とするため、空気に添加したメタンの濃度 (C_f) は、体積割合で 0% から 2% とした。また、燃料以外の成分は空気とした。

$$\left\{ \begin{array}{l} u = U_{in} = 0.25 \text{ m/s} \\ v = 0 \\ T = 300 \text{ K} \\ Y_i = Y_{i,in} \end{array} \right. \quad (13)$$

②出口境界 ($x = 90 \text{ mm}$)

出口では十分発達しているとして、自由流出条件を用いた。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial Y_{\text{CH}_4}}{\partial x} = \frac{\partial Y_{\text{O}_2}}{\partial x} = \frac{\partial Y_{\text{CO}_2}}{\partial x} = \frac{\partial Y_{\text{H}_2\text{O}}}{\partial x} = 0 \end{array} \right. \quad (14)$$

③上部境界 ($y = 20 \text{ mm}$)

上部境界には自由流出条件を用いた.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial Y_{\text{CH}_4}}{\partial y} = \frac{\partial Y_{\text{O}_2}}{\partial y} = \frac{\partial Y_{\text{CO}_2}}{\partial y} = \frac{\partial Y_{\text{H}_2\text{O}}}{\partial y} = 0 \end{array} \right. \quad (15)$$

④固相と気相の境界面 ($y = 0 \text{ mm}$)

可燃性固体から熱分解ガスが噴出されるため, 境界条件は以下ようになる. ただし, 熱分解ガスの噴出し速度は y 方向成分 (可燃性固体に垂直な成分) のみとし, x 方向速度は持たないとした. また, 気相の温度 T_g は, 固相の温度 T_s と等しいとする. 化学種の濃度は固相と気相の境界面での流束のつりあいにより以下の式で与えた. ここで, D_i は各化学種の拡散係数である.

$$\left\{ \begin{array}{l} u = 0 \\ v = v_f = \frac{\dot{m}}{\rho_g} \\ T_g = T_s \\ \dot{m}Y_{\text{CH}_4} - \rho_g D_{\text{CH}_4} \frac{\partial Y_{\text{CH}_4}}{\partial y} = v_{cg} K_s \tau \\ \dot{m}Y_{\text{O}_2} - \rho_g D_{\text{O}_2} \frac{\partial Y_{\text{O}_2}}{\partial y} = 0 \end{array} \right. \quad (16)$$

3. 解析結果および考察

3.1. 着火過程

3.1.1. 燃焼場と固相の熱分解特性

まず, 部分予混合雰囲気中における火炎の燃え拡がり現象について検討する前に, 周囲空気中に体積割合で 0~2% の燃料 (CH_4) を添加した場合の着火過程について説明し, その火炎構造を検討した. 着火は, 固体燃料表面の $x = 60 \text{ mm}$ の位置で, 幅 5 mm の熱源によって行った.

図 3 に, 添加したメタン濃度 (C_f) が 0% と 2% の場合の着火直後の $t = 0.06 \text{ s}$ における温度分布を示す. これによると, 表面の熱源によって固体燃料は熱分解され, 生成した熱分解ガスが周囲空気と反応していることがわかる. また C_f が大きくなるにつれて, 高温の領域が拡大していた.

ここで, 最高温度 T_{max} の時間変化について調べた. 図 4 に, $C_f = 0\%, 1\%, 2\%$ としたときの最高温度 T_{max} の時間変化を示す. これによると, $t = 0.055 \text{ s}$ より前の時刻では T_{max} はほとんど変化しない. しかし着火後は差が見られ, C_f が大きいほど T_{max} は大きくなった. また $t = 0.06 \text{ s}$ では,

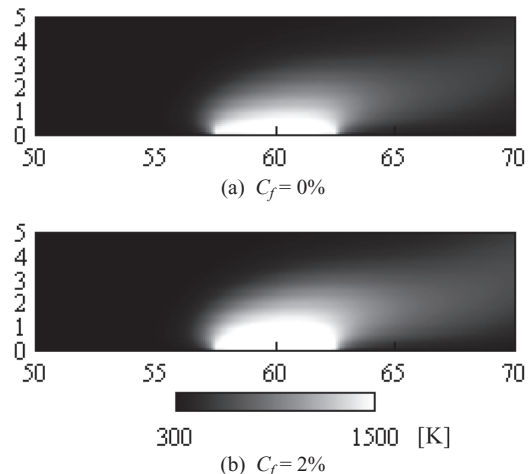


Fig.3 Contour map of temperature at ignition time

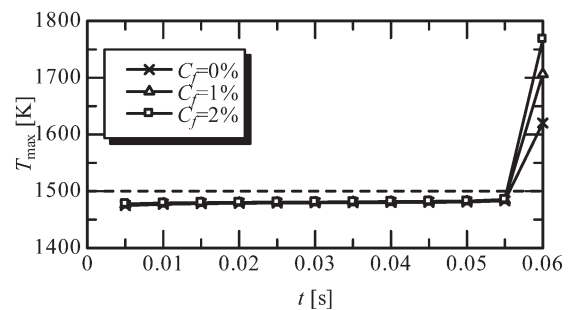


Fig.4 Time variation of maximum temperature

それぞれ 1620 K, 1707 K および 1768 K であった.

図 5 に, 時刻 $t = 0.06 \text{ s}$ における固相表面の温度 T_s および熱分解ガスの噴き出し速度 v_f の分布を示す. これによると, C_f が大きくなるにつれて固相の温度が増加するため熱分解が促進され, 燃料の噴き出し速度も増加していることがわかった.

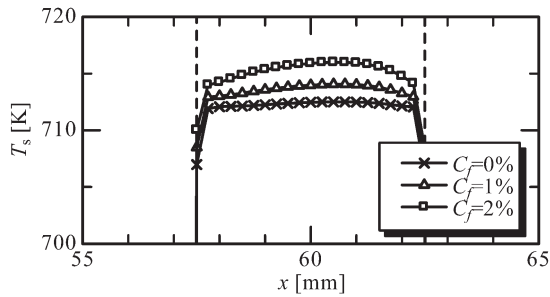
3.1.2. 火炎構造と Flame index

ここでは, 火炎構造について調べるため, 次式で定義される Flame index[21]を求め検討した.

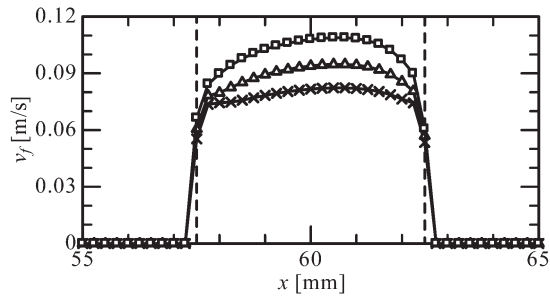
$$G_{\text{FO}} = \text{grad } Y_{\text{F}} \cdot \text{grad } Y_{\text{O}} \quad (q/q_{\text{max}} > 0.01) \quad (17)$$

ここで, G_{FO} が負の場合には拡散火炎, 正の場合には予混合火炎であり, 絶対値が大きいほど反応速度が大きいことを表す. また, q_{max} は熱発生速度の計算領域内での最大値を意味している.

図 6 に $C_f = 0\%$ および 2% における Flame index の分布を示す. これによると, $C_f = 0\%$ の場合には Flame index が負の値となっており, 拡散火炎が形成されていることがわかる. 一方, 燃料を添加した部分予混合雰囲気においては, 拡散火炎の上流部に予混合火炎が形成されていた. また, C_f が大きくなるにつれて予混合火炎が拡大することが

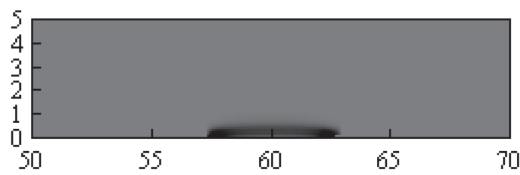


(a) Temperature

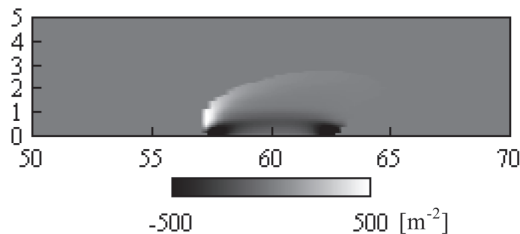


(b) Velocity of fuel ejection

Fig.5 Profiles at solid surface



(a) $C_f = 0\%$

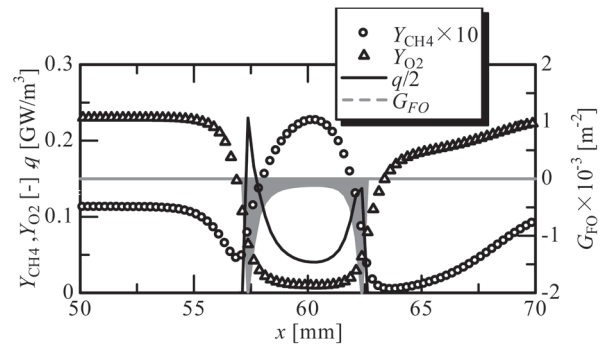


(b) $C_f = 2\%$

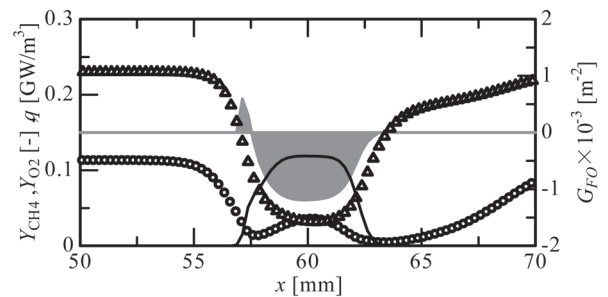
Fig.6 Contour map of flame index at ignition time

わかった。

火炎構造の変化についてより詳細に検討するため、 $C_f = 2\%$ における $y = 0.1\text{ mm}$ および $y = 0.7\text{ mm}$ の断面におけるメタンと酸素の質量分率、熱発生速度および Flame index の一次元分布を図7に示す。図7(a)の $y = 0.1\text{ mm}$ の固相表面近傍では、周囲雰囲気中にメタンが存在していても、燃料を添加しない場合と同様に拡散火炎のみが存在していた。一方、図7(b)の $y = 0.7\text{ mm}$ では、 $x = 57\text{ mm}$ 付近に予混合火炎が形成されていることがわかった。この予混合火炎は、添加されたメタン濃度が高いほどより大きくなった。



(a) $y = 0.1\text{ mm}$



(b) $y = 0.7\text{ mm}$

Fig.7 Profiles of mass fraction, heat release rate and flame index at $C_f = 2\%$

3.2. 火炎の燃え広がり

3.2.1. 燃焼場と固相の熱分解特性

次に、着火後の火炎の燃え広がりを解析した。周囲空気中に体積割合で0~2%の燃料(CH₄)を添加した場合の結果について示し、添加した燃料が火炎の燃え広がりに及ぼす影響について検討した。

図8および図9に添加した燃料濃度 $C_f = 0\%$ および 2% における温度分布をそれぞれ示す。火炎が燃え広がった後の時刻 $t = 1.0\text{ s}$, 2.0 s の分布である。ただし、 $50\text{ mm} \leq x \leq 90\text{ mm}$ の範囲のみを示した。いずれの条件でも着火後は火炎が振動して燃え広がる。ただし、燃料を添加した場合は同時刻における火炎の位置が先行しており、部分予混合雰囲気中では火炎の燃え広がり速度が増加することがわかった。また、 $C_f = 0\%$, 1% , 2% の場合の時刻 $t = 2.0\text{ s}$ の火炎の最高温度を求めたところ、 1790 K , 1815 K および 1840 K となり、燃料を添加することにより温度が増加することがわかった。

次に部分予混合雰囲気中での燃え広がり速度を求めた。図10に、火炎先端位置 x_f (熱発生速度が最大となる位置) の時間変化を示す。なお、着火から 1.0 s の間は火炎の位置がほとんど変化しないため図示していない。これによると、周囲空気中にメタンを添加した場合でも火炎がほぼ一定の速度で燃え広がっていることがわかる。この直線の傾きより算出した燃え広がり速度 V_{sp} と実験値[12,13]を比較した結果を表1に示す。これによると、 C_f が大きくなるにつれて燃え広がり速度が増加する傾向は実験と同じであっ

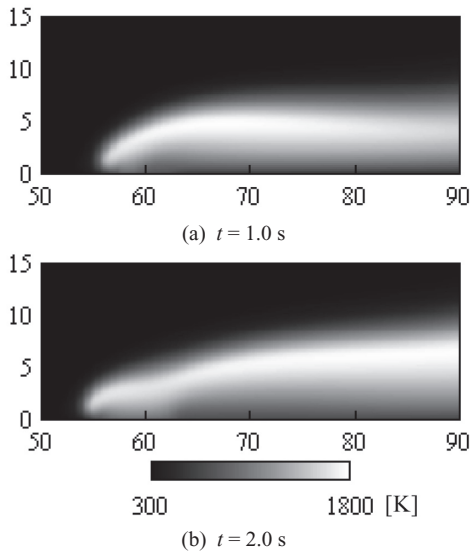


Fig.8 Time histories of temperature at $C_f = 0\%$

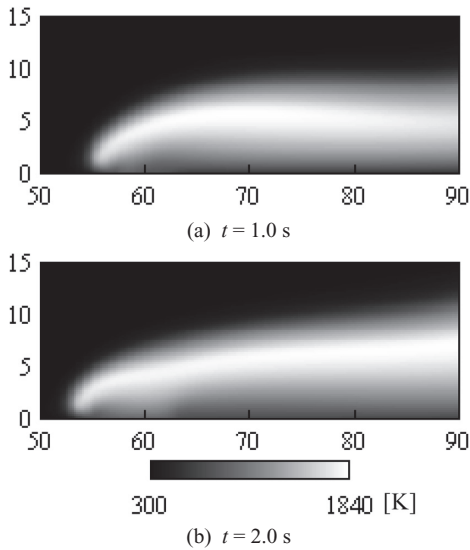


Fig.9 Time histories of temperature at $C_f = 2\%$

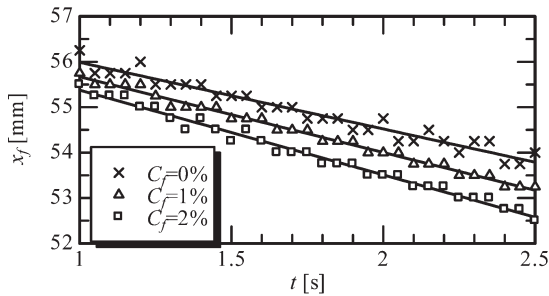


Fig.10 Time variation of flame edge

た。また実験における燃え拡がり速度は 1.91~2.19 mm/s であり, 本計算結果と近い値が得られた。既に行った非圧縮の解析[14]では, 火炎の燃え拡がり速度が 200 mm/s 前後になっていたことから, 固相への熱流入を考慮することにより, 実際の固体燃料上の燃え拡がりに近い場が本モデル

Table 1 Flame spread rate in partially premixed atmosphere

C_f	V_{sp} [mm/s]	V_{sp} [mm/s] on Exp.
0 %	1.47	1.91
1 %	1.67	2.00
2 %	1.87	2.19

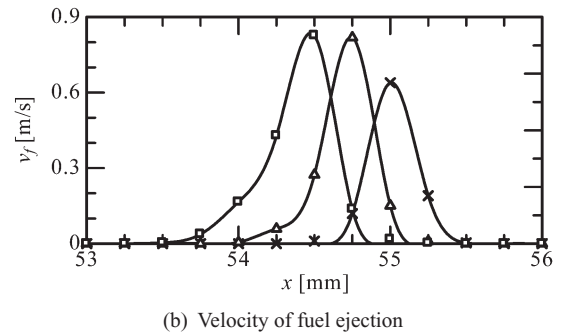
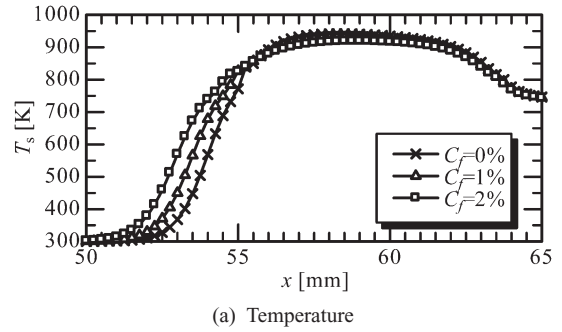


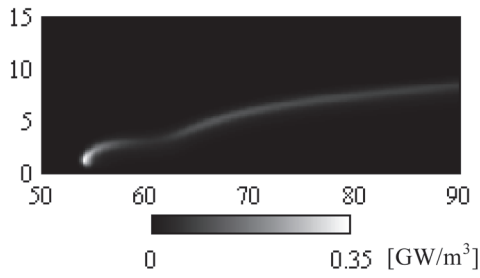
Fig.11 Profiles at solid surface

により再現できていることが確認できた。

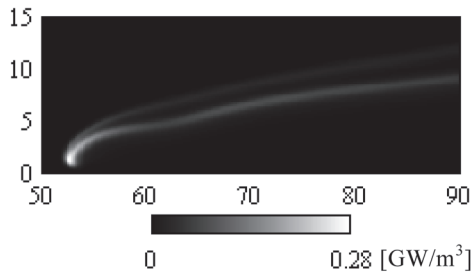
また図 11 に, 燃え拡がり開始からの時刻 $t = 2.5$ s における $C_f = 0\% \sim 2\%$ に対する固相表面の温度 T_s および熱分解ガスの噴き出し速度 v_f の分布を示す。これによると, C_f が大きくなるにしたがって固相表面の高温領域が拡大し, 熱分解ガスが生成される領域もそれぞれ, 約 1.0 mm, 1.5 mm および 2.0 mm と拡大していることがわかる。さらに熱分解ガスの噴き出し速度も増加しており, 気相中により多くの燃料が放出されていることがわかった。これにより火炎の燃え拡がり速度が増加したと思われるが, その理由については次節で考察する。

3.2.2. 火炎構造と Flame index

ここでは, 部分予混合雰囲気中の火炎の燃え拡がり速度の増加について検討するため, 火炎構造を詳細に調べた。燃え拡がり開始から時刻 $t = 2.5$ s 後における $C_f = 0\%$ および 2% に対する熱発生速度の分布を図 12 に示す。これによると, 火炎の先端部で熱発生速度が最大となっており, 最も活発に反応が起こっていることがわかる。また, 周囲空気にメタンを添加することによって反応帯が二重に形成されていることがわかった。

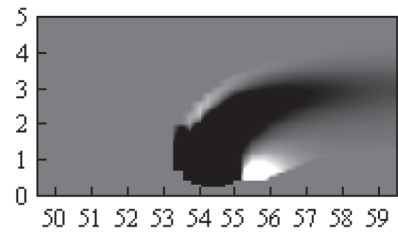


(a) $C_f = 0\%$

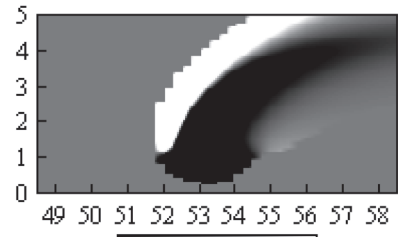


(b) $C_f = 2\%$

Fig.12 Contour map of heat release rate at $t = 2.5$ s

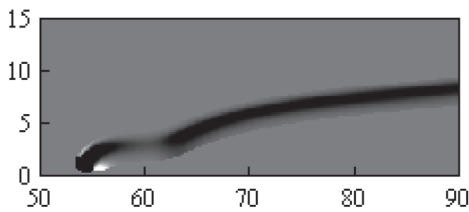


(a) $C_f = 0\%$

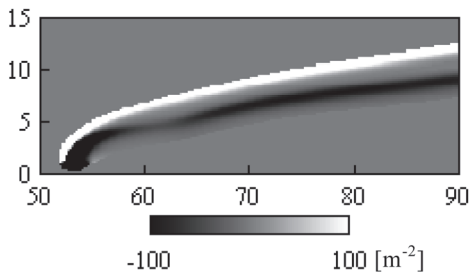


(b) $C_f = 2\%$

Fig.14 Contour map of flame index at $t = 2.5$ s

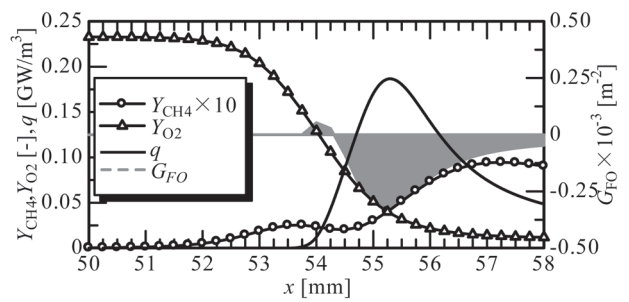


(a) $C_f = 0\%$

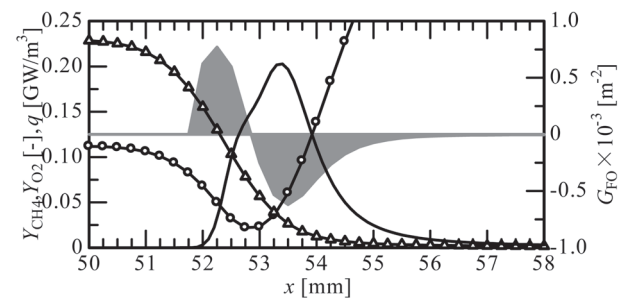


(b) $C_f = 2\%$

Fig.13 Contour map of flame index at $t = 2.5$ s



(a) $C_f = 0\%$



(b) $C_f = 2\%$

Fig.15 Profiles of mass fraction, heat release rate and flame index at $y = 2.5$ mm

次に、燃え拡がり開始から時刻 $t = 2.5$ s 後における $C_f = 0\%$ および 2% に対する Flame index 分布を図 13 に示す。またそれぞれの条件で、火炎先端付近を拡大した図を図 14 に示した。これによると、周囲空気中にメタンが存在する場合は拡散火炎の上部を覆うように予混合火炎が形成されていた。両者を比較すると、 C_f が大きくなるにしたがって Flame index の値が増加しており、図 12 の結果とあわせると予混合火炎で消費される燃料が増えていることがわかった。ただし、図 14(a) によれば燃料を添加しない場合にも予混合火炎は火炎先端の固相表面付近で見られるが、燃料を添加した図 14(b) ではこの予混合火炎は非常に弱くなった。

この火炎構造の変化について検討するため、固相表面からの距離 $y = 2.5$ mm の位置におけるメタンと酸素の質量分率、熱発生速度および Flame index の一次元分布を調べた。その結果を図 15 に示す。これによると、燃料を添加すると火炎の上流部のメタン濃度が増えるため、火炎の前方において熱発生速度が大きくなっていった。これにより火炎先端付近の酸素濃度が減少し、図 14(a) では見られた内側の

予混合火炎が弱められたと思われる。また、熱発生速度の立ち上がり位置を両者で比較すると、周囲に燃料が存在することにより熱発生速度の分布がより上流側に移動した。

以上のことから部分予混合雰囲気では、周囲に燃料が存在することにより火炎先端付近の予混合火炎が拡大し、火炎から固相への熱流入が増えて熱分解が促進され、燃え拡がり速度が増加したものと思われる。

4. 結言

本研究では、可燃性固体上に形成される鉛直下方への火炎の燃え拡がりの数値解析を行なった。対向する空気中にメタンを添加した部分予混合雰囲気中の火炎の火炎構造と燃え拡がり速度について検討した。その結果、以下のような結論を得た。

1. 本解析により得られた燃え拡がり速度は、実験で測定された燃え拡がり速度に近い値となった。固相の反応と熱移動を考慮することにより、実際の可燃性固体上の燃え拡がりに近い場が再現できた。
2. 周囲空気に燃料が存在すると、火炎温度は上昇し、熱分解ガスの噴出し速度は増加した。また高温の領域が拡大し、拡散火炎の上部を覆うように予混合火炎が形成された。
3. Flame index を用いて火炎の先端部を調べた結果、空気中を燃え拡がる火炎においても火炎先端の固相表面付近に予混合火炎が形成されていることがわかった。ただし部分予混合雰囲気中では、拡散火炎上部に形成される予混合火炎の領域が拡大した。

以上により、周囲雰囲気に燃料が存在すると、①拡散火炎の上部に形成される予混合火炎により火炎温度が上昇する、②火炎前方の熱分解領域への熱移動が促進される、③燃料である熱分解ガスの生成量が増加する、の3つの過程により燃え拡がり速度が増加したものと思われる。

謝辞

本研究を実施するにあたって、愛知工業大学の櫛田玄一郎教授には貴重なご助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。

References

1. de Ris, J. N., *Proc. Combust. Inst.* 12: 241-252 (1969)
2. Fernandez-Pello, A. C. and Williams, F. A., *Proc. Combust. Inst.* 15: 217-231 (1975)
3. Hirano, T., Sato, K. and Tazawa, K., *Combust. Flame* 26, 191-200 (1976)
4. Fernandez-Pello, A. C., Ray, S. R. and Glassman, I., *Proc.*

- Combust. Inst.* 18: 579-589 (1981)
5. Fernandez-Pello, A. C. and Hirano, T., *Comb. Sci. Technol.* 32: 1-31 (1983)
6. Colomba Di Blasi, *Combust. Flame* 97, 225-239 (1994)
7. Suzuki, M., Dobashi, R. and Hirano, T., *Proc. Combust. Inst.* 25: 1439-1446 (1994)
8. Yamamoto, K., Mori, K. and Onuma, Y., *Trans. Japan Society for Mechanical Engineers*, B68-672, 2437-2443 (2002) (in Japanese)
9. Yamamoto, K., Mori, K. and Onuma, Y., *Trans. Japan Society for Mechanical Engineers*, B69-680, 946-953 (2003) (in Japanese)
10. Kevin Tolejko, Ioan I. Feier, James S. T'ien, *Proc. Combust. Inst.* 30: 2263-2270 (2005)
11. Ronney, P. D., Greengerg, J. B., Zhang, Y. and Roegner, E. V., *Combust. Flame* 90, 71-83 (1992)
12. Yamamoto, K., Seo, S., Mori, K. and Onuma, Y., *Trans. Japan Society for Mechanical Engineers*, B69-684, 1951-1957 (2003) (in Japanese)
13. Yamamoto, K., Seo, S. and Onuma, Y., *Journal of the Combustion Society of Japan*, V.45-131, 41-48 (2003) (in Japanese)
14. Yamamoto, K., Tojyo, H. and Onuma, Y., *Journal of the Combustion Society of Japan*, V.47-140, 129-136 (2005) (in Japanese)
15. Coffee, et. al., *Combust. Flame* 58, 59-67 (1984)
16. JANAF thermochemical tables, Third Edition, (1985)
17. Smooke, M. D., *Reduced Kinetic Mechanisms and Asymptotic Approximations for Methane-Air Flame*, (1991), 1-28, Springer-Verlag
18. Kee, R. J., et. al., CHEMKIN-II, *SAND* 89-8009, (1989)
19. Kashiwagi, T. et. al., *Proc. Combust. Inst.* 26: 1345-1352 (1996)
20. Patankar, S. V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, 126-130, McGraw-Hill (1980)
21. Yamashita, H., Tsutsumitani, S. and Nag-Jung Choi, *Trans. Japan Society for Mechanical Engineers*, B65-630, 775-782 (1999) (in Japanese)