

# 乱流拡散燃焼における大規模渦構造と化学反応の相互作用\*

水島 二郎<sup>\*1</sup>, 横山 直人<sup>\*2</sup>, 斎藤 加奈<sup>\*1</sup>, 波多野 剛<sup>\*1</sup>

## Interaction between Large Vortex Structures and Chemical Reactions on Turbulent Diffusion Combustion

J. MIZUSHIMA<sup>\*1</sup>, N. YOKOYAMA<sup>\*2</sup>, K. SAITO<sup>\*1</sup> and T. HATANO<sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup> Faculty of Engineering, Doshisha University.

<sup>\*2</sup> Energy Conversion Research Center, Doshisha University.

Methane-air turbulent jet flames are examined both numerically and experimentally. Vortex structures due to shear velocity stimulate chemical reactions. Meanwhile, heat release due to chemical reaction interrupts development of turbulence and dramatically changes the basic nature of fluid. Interactions between large vortex structures and chemical reactions are investigated by direct numerical simulations and experimental measurements to clarify microscopic structures and their dynamics of combustion, which are compared with laminar flamelet models.

**Key Words** : Turbulent Combustion, Diffusion Flame, Large Vortex Structures, Chemical Reactions

### 1. はじめに

乱流燃焼は、流体物理学に現れる乱流、混合、化学反応、熱といった未解決問題を内包する非常に興味深く、かつ、挑戦的な現象である。なかでも、乱流拡散火炎は、実用上最も多く用いられている火炎形態のひとつであり、数多くの実験や数値解析が行われてきたが、その複雑さゆえに十分な解明がなされていない。

乱流燃焼の数値計算においては、流体の持つ時間スケールと化学反応の持つ時間スケールの隔たりが大きいことに由来し乱流場の瞬間的局所火炎構造は定常層流火炎によって模擬できるとする層流火炎片モデル<sup>(12)</sup>が広く用いられてきた。しかしながら、物質線の伸長<sup>(9)</sup>、反応面の厚さの増大<sup>(4)</sup>、カオス混合による化学反応の促進<sup>(14)</sup>など乱流の持つ性質は、化学反応に多大な影響を及ぼすことが予想される。実際、近年の計算機の発達により、乱流予混合燃焼の直接数値計算が可能になると、Navier-Stokes 方程式および素反応からなる詳細化学反応機構により記述される予混合燃焼において、乱流微細渦が予混合火炎にもたらす影響が明らかになりつつある<sup>(11)</sup>。

一方、乱流拡散火炎の数値計算は、現在的大型計算機をもってしても Navier-Stokes 方程式および詳細化

学反応機構に基づく直接数値計算を火炎の全領域にわたって行うことは不可能であり、 $k-\epsilon$  モデル<sup>(6)</sup>など種々の乱流モデルを用いたものや Large Eddy Simulation<sup>(13)</sup>などが行われている。本研究では、流体に関しては噴流に対する Navier-Stokes を直接数値計算し、化学反応にはメタン-空気 4 段階簡略反応機構を用いて、噴流による剪断がもたらす大規模渦構造と化学反応の数値的解析を行う。この種の数値計算では、局所的な消炎が生じることが示されており、そのときの各化学種の流速、濃度、生成速度が評価されている<sup>(7)</sup>。渦構造が化学反応にもたらす効果としては、前述の乱流が持つ性質の他に、渦構造が高温領域の酸化剤側への張り出し、火炎内への酸化剤の巻き込み、高温領域における酸化剤の存在をもたらし、さらには流体の挙動を劇的に変質させる。これらの大規模渦構造と化学反応の相互作用<sup>(2)</sup>を定量的に評価し、層流火炎片モデルとの比較を行うことが数値計算の目的である。

同様に、本研究では乱流拡散火炎の実験も行う。燃焼に関しては多数の実験がなされており、工学的要請から窒素酸化物やすすの生成などの測定がなされている。今回対象とする拡散火炎の燃焼実験では、粒子画像流速測定法 (PIV 法)、レーザ蛍光誘起法 (PLIF 法) を用いた、2 次元平面上での速度場と温度場の測定が可能

\* 2004 年 7 月 17 日 2003 年度成果報告会、原稿受付 2004 年 6 月 18 日

<sup>\*1</sup> 同志社大学工学部 (〒 610-0394 京田辺市多々羅都谷 1-3)

<sup>\*2</sup> 同志社大学エネルギー変換研究センター (〒 610-0394 京田辺市多々羅都谷 1-3)

Email: jmizushi@mail.doshisha.ac.jp

となりつつある。残念ながら、多種の物理量の同時測定や、3次元燃焼場の測定は依然として困難であり、乱流拡散火炎の動的な機構の解明には至っていない。本研究では、PIV法を用いた速度場、感温液晶を用いた温度場の2次元鉛直断面同時測定を行い、大規模渦構造と化学反応の相互作用の動的な機構の解明を行う。これらの動力学を明らかにすることにより、乱流燃焼の微視的構造を理解することが可能となる。

## 2. 数値計算

燃焼系の支配方程式は、質量、運動量、エネルギー、化学種の保存方程式を用いて表される。運動量方程式において外力と体積粘性を無視し、エネルギー方程式において、運動エネルギー、圧力仕事、外力、Dufour効果、輻射、粘性散逸を無視する。さらに、化学種方程式において圧力、熱拡散を無視すると、密度 $\rho$ 、速度 $\mathbf{u}$ 、温度 $T$ 、化学種の質量分率 $Y_i$ に対する支配方程式系は以下ようになる。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0, \quad (1a)$$

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}, \quad (1b)$$

$$\frac{\partial (\rho T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} T) - \frac{1}{c_p} \nabla \cdot (\lambda \nabla T) = -\frac{1}{c_p} \sum_i h_i \omega_i, \quad (1c)$$

$$\frac{\partial (\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} Y_i) - \nabla \cdot (\rho D_i \nabla Y_i) = \omega_i. \quad (1d)$$

ここで、圧力 $p$ 、粘性応力テンソル $\boldsymbol{\tau}$ 、エンタルピー $h$ 、平均定圧比熱 $\bar{c}_p$ は、

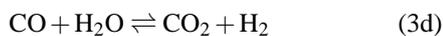
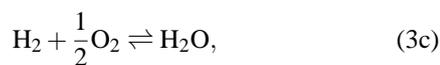
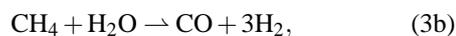
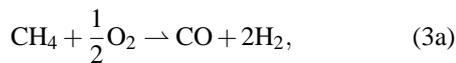
$$p = \rho RT \sum_i \frac{Y_i}{M_i}, \quad (2a)$$

$$\boldsymbol{\tau} = \mu \left( \nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u}) \boldsymbol{\delta} \right), \quad (2b)$$

$$h_i = h_i^0 + \int_{T^0}^T c_{p,i} dT, \quad (2c)$$

$$\bar{c}_p = \sum_i Y_i c_{p,i} \quad (2d)$$

のように与えられる。化学反応には4段階簡略反応機構<sup>(5)</sup>



を用いる。熱化学定数の定圧比熱 $c_{p,i}$ 、エンタルピー $h_i$ 、輸送係数の粘性係数 $\mu$ 、拡散係数 $D_i$ 、熱伝導率 $\lambda$ およ

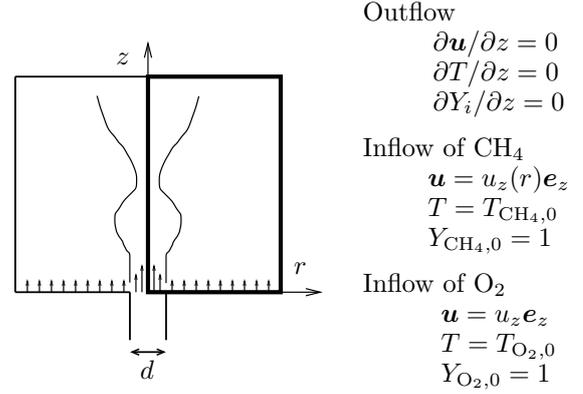


Fig. 1 Computational domain and boundary conditions.

び反応速度 $\omega_i$ は、温度の関数としてCHEMKIN<sup>(8)</sup>を用いて与えられる。

軸対称性を仮定して、図1の太線内部で示される2次元矩形領域のみを解く。境界条件は、Navier-Stokes特性境界条件(NSCBC)<sup>(1)</sup>を用い、流入条件としてメタン噴流の流入、流出条件として自然流出を課す。初期条件として、反応領域全体は酸素によって満たされているものとする。

また、数値計算における離散化は、空間については6次コンパクト差分法<sup>(10)</sup>、時間については4次Runge-Kutta法により行う。

ここで、この系における特徴的な無次元数は、慣性力と粘性力の比 Reynolds 数と流体力学的特性時間と化学反応の特性時間の比 Damköhler 数である。本研究では、Reynolds 数 $Re = v u_z(0) d \rho^{-1} \sim 4 \times 10^3$ 、総括1段階反応機構で定義される Damköhler 数<sup>(3)</sup>は $Da = B_1 \rho^2 d (u_z(0) M_{\text{O}_2}^2 (Y_{\text{CH}_4,0} - Y_{\text{CH}_4,\infty}))^{-1} \sim 5 \times 10^6$ 程度になるように選ぶ。ここで、 $B_1$ は形状に依存する定数、 $M_{\text{O}_2}$ は酸素分子の分子量であり、 $Y_{\text{CH}_4,0}, Y_{\text{CH}_4,\infty}$ は、それぞれ、流入境界、無限遠でのメタンの質量分率を表す。このとき、噴流による剪断がもたらす大規模渦構造が形成される。層流状態にある火炎には存在しない渦構造と化学反応の相互作用、とくに、渦構造およびその多重スケール性のもつ乱流的性質による化学反応の促進を定量的に評価する。

## 3. 実験装置

速度場・温度場同時測定装置の概略図を図2に示す。火炎器は同軸噴流を形成し、その鉛直断面は図1と同様の構成をなしている。反応流体は、内径 $d = 2.0 \times 10^{-3} \text{m}$ のノズルからメタンを出口での中心軸速度 $u_z(0) = 2.8 \times 10 \text{m/s}$ で噴出させるとともに、ノズルの外側から酸素を流入させる。酸素の流入速度

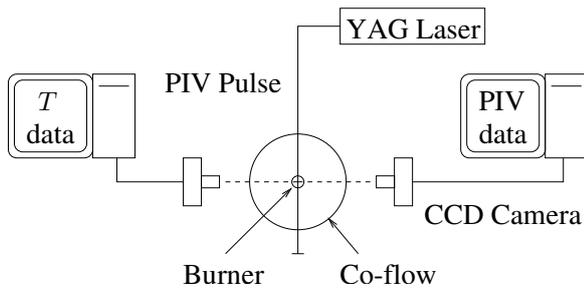


Fig. 2 Experimental arrangement for simultaneous measurement of velocity and temperature fields.

は,  $u_z = 10^{-1} \text{ m/s}$  程度の火炎を維持するために必要な十分小さいものとする。このとき, バーナのもつ燃焼の無次元数は,  $Re \sim 3.4 \times 10^3, Da \sim 5.8 \times 10^6$  である。図1の計算領域に対応する2次元燃焼場は, YAGレーザの照射によるシート光により形成され, 酸化チタンまたは酸化マグネシウムをトレーサ粒子とするPIV法を用いて速度場が, 感温液晶を用いて温度場が同時にCCDカメラによって測定され, そのデータは計算機にとりこまれる。

この実験装置の設定では, 慣性力と重力の比Froude数  $Fr = (u_z(0))^2 / (gd) \sim 2 \times 10^4$  であり, 流入口に比較的近い領域では重力の影響を無視することができ, 熱流体場特有のプルームは形成されない。また, 3次元性の発達も比較的遅いために軸対称近似が成り立つと考えられる。このとき, 速度場の計測データから渦構造を可視化することができる。連続的に得られた速度場および温度場のデータから, 渦構造と化学反応の相互作用の動力学を詳細に調べ, 数値計算から得られた諸量と比較する。

#### 4. ま と め

本報告では, 2004年度に行うメタン-空気慣流拡散火炎の大規模渦構造と化学反応の相互作用に関する数値解析および可視化実験の概要を述べた。本研究により, 火炎を形成する流体および化学反応によって支配される火炎の微視的構造およびその動力学の素過程を理解することが可能となる。

また, 本報告は, 今後の研究予定を多く含んでおり, 研究自体も始まったばかりである。皆様からご意見を賜わることができれば幸いである。

#### 謝 辞

京都大学松本剛氏に Navier-Stokes 乱流に関する議論をしていただいたことは非常に有益であった。また, 同志社大学和田好充氏には実験に関して多くの助言を

いただいた。両氏に心より感謝を表す。

#### 文 献

- (1) Baum, M., Poinso, T. and Thévenin, D., *J. Comput. Phys.*, **116** (1994), 247–261.
- (2) Coats, C. M., *Prog. Energy Combust. Sci.*, **22** (1996), 427–509.
- (3) Coffee, T. P., Kotlar, A. J. and Miller, M. S., *Combust. Flame*, **58** (1984), 59–67.
- (4) Donbar, J. M., Driscoll, J. F. and Carter, C. D., *Combust. Flame*, **125** (2001), 1239–1257.
- (5) Jones, W. P. and Lindstedt, R. P., *Combust. Flame*, **73** (1988), 233–249.
- (6) Jones, W. P. and Whitelaw, J. H., *Combust. Flame*, **48** (1982), 1–26.
- (7) Katta, V. R., Hsu, K. Y. and Roquemore, W. M., *Proc. Combust. Inst.*, **27** (1998), 1121–1129.
- (8) Kee, R. J., Rupley, F. M., Meeks, E. and Miller, J. A., SAND96-8216, Sandia National Laboratories (1996).
- (9) Kida, S. and Goto, S., *Phys. Fluids*, **14** (2002), 352–361.
- (10) Lele, S. K., *J. Comput. Phys.*, **103** (1992), 16–42.
- (11) Nada, Y., Tanahashi, M. and Miyauchi, T., *J. Turbulence*, **5** (2004), 16.
- (12) Peters, N., *Prog. Energy Combust. Sci.*, **10** (1984), 319–339.
- (13) Pitsch, H. and Steiner, H., *Phys. Fluids*, **12** (2000), 2541–2554.
- (14) 植田利久, 反応系の流体力学 (6章), コロナ社 (2002).