

乱流噴霧燃焼の LES

Numerical Simulation of Turbulent Spray Combustion Flows by using LES

伊藤 裕一*・山田 英助**・谷口 伸行*

Yuichi ITOH, Eisuke YAMADA and Nobuyuki TANIGUCHI

1. はじめに

噴霧燃焼はガスタービン、ディーゼルエンジン、火熱炉などの工業用燃焼器に幅広く用いられている。近年の環境問題への対応から、高効率・高出力かつ有害排出物を出さない燃焼器が求められており、このような燃焼器を設計するにあたり、乱流燃焼流れの数値解析にかかる期待は大きい。乱流噴霧燃焼の数値解析において、これまでは $k-\epsilon$ モデルに代表される RANS モデルのような平均モデルに基礎をおいたものが用いられていたが、乱流変動や噴霧液滴と渦構造の干渉、燃焼振動などの非定常な現象の予測においては、本質的な限界があると言わざるを得ない。

一方、近年の計算機の発達に伴い、Large Eddy Simulation (LES) による乱流燃焼解析がなされるようになり、乱流非定常流れ^{1,2)}、固気混相流れ³⁾、乱流燃焼流れ^{4,6)}の解析において平均場や変動場の乱流統計量などの予測に良い成果をあげている。本研究ではこれらのモデルを拡張し乱流噴霧燃焼場に適用することにより、乱流噴霧燃焼場における LES の適用可能性を探ることを目的とする。

2. 支配方程式系

2.1 乱流流れ場の基礎方程式

基礎方程式は LES のために粗視化された低 Ma 数近似圧縮性流体の運動量、質量保存式である。Euler 的に取り扱われる気相の計算には LES を用い、SGS 応力項には Smagorinsky モデル ($C_s = 0.1$) を用いた。

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{p} \tilde{u}_j}{\partial x_j} = \bar{W}_v \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \mu \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \right\} + \bar{W}_v \tilde{u}_{i,d} + T_i - \frac{\partial}{\partial x_j} \{ \bar{\rho} (\tilde{u}_i \tilde{u}_j - \tilde{u}_i \tilde{u}_j) \} \dots \dots \dots (2)$$

ここで \bar{W}_v , T_i は蒸発および運動量の交換による生成項であり、この項によって気相 (Euler phase) と液相 (Lagrangian phase) をカップリングする。

2.2 LES 燃焼モデルと基礎方程式

一般的な燃料において、拡散火炎の持つ性質は保存スカラ (燃料の混合分率) によりほぼ表現できる。また工学的な乱流火炎は一般に、火炎厚さが乱れの最小スケールより薄く、火炎面は層流火炎の集合であると考えられる (Laminar Flamelet Concept)。これらの考えに基づいて温度、密度、化学種濃度は、素反応を考慮した一次元対向拡散火炎の数値計算による値を保存スカラ (混合分率) の関数として与える (Laminar Flamelet Model⁷⁾)。なお、Flamelet Data は CHEMKIN によって求めた。以下に混合分率 Z の輸送方程式を示す。

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{Z}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{Z} \tilde{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \bar{\rho} D \frac{\partial \tilde{Z}}{\partial x_j} - \bar{\rho} (\tilde{Z} \tilde{u}_j - \tilde{Z} \tilde{u}_j) \right\} + \left(\frac{\nu_O}{\nu_O + Y_O^{\max}} \right) \bar{W}_v \dots \dots \dots (3)$$

また、subgrid-scale 乱流流束は渦粘性モデルを採用した。

$$\bar{\rho} (\tilde{Z} \tilde{u}_j - \tilde{Z} \tilde{u}_j) \equiv -\frac{\mu_{SGS}}{Sc_{SGS}} \frac{\partial \tilde{Z}}{\partial x_j} \dots \dots \dots (4)$$

ここで、乱流 Schmidt 数 Sc_{SGS} は 0.5 とした。

2.3 噴霧液滴の取扱い

噴霧液滴は個々のパーセルを Lagrange 的に追跡することで表現する。

$$\frac{dx_{i,d}^k}{dt} = u_{i,d}^k \dots \dots \dots (5)$$

$$\frac{d(D_d^k)^3}{dt} = -\frac{6}{\pi \rho_d} \dot{m} \dots \dots \dots (6)$$

$$\frac{d(D_d^k)^3 u_{i,d}^k}{dt} = \frac{6}{\pi \rho_d} \left\{ T_i^k + g \left(\frac{1}{6} \pi \rho_d (D_d^k)^3 u_{i,d}^k \right) - \dot{m} u_{i,d}^k \right\} \dots \dots \dots (7)$$

ここで x_i^k , u_i^k , D_d^k , ρ_d , \dot{m} はそれぞれ、液滴の位置、速度、直径、液相密度、蒸発量を表わす。また、上付き添え

*東京大学生産技術研究所 人間・社会部門
**東京大学生産技術研究所 計算科学技術連携研究センター

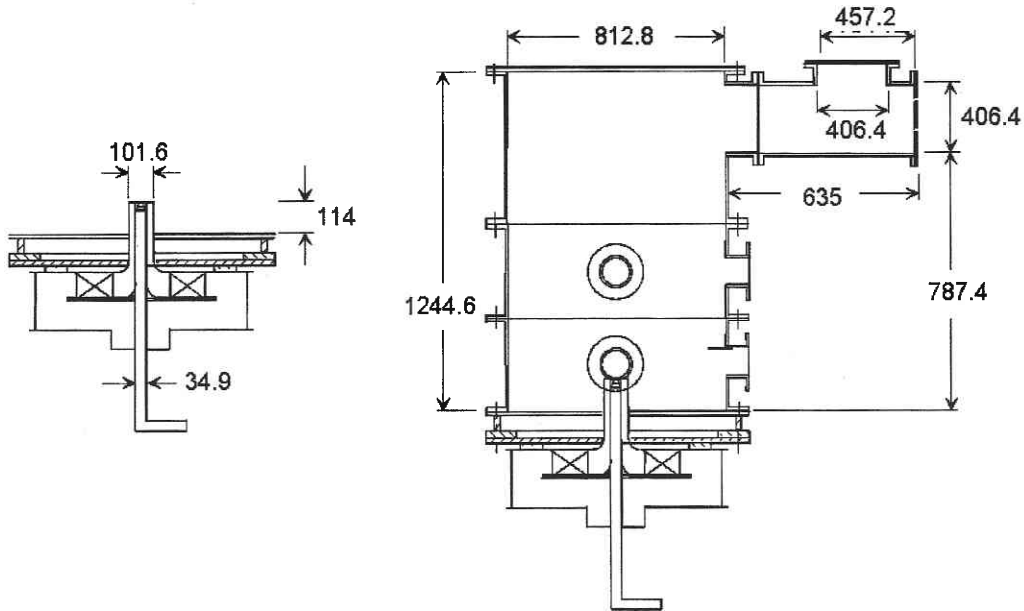


図1 Schematics of the experimental setup⁹⁾ (left: inlet nozzle section, right: whole section).

字 k は液滴番号を表わす.

$$T_i^k = -\frac{\pi}{8} C_D Re_d \mu D_d^k (u_{i,d}^k - u_{i,g}^k) \dots\dots\dots (8)$$

$$Re_d = \frac{D_d^k \rho_g |u_{i,d} - u_{i,g}|}{\mu} \dots\dots\dots (9)$$

$$C_D = \frac{24}{Re_d} (1 + 0.15 Re_d^{0.687}) \dots\dots\dots (10)$$

液滴に働く力は抗力のみを考慮している. 液滴の蒸発は単一液滴の準定常蒸発を仮定し, Frössling モデルを用いた.

$$\frac{dD_d^2}{dt} = -4 \frac{\rho_g \mu}{\rho_d Sc} Sh \ln(1 + B) \dots\dots\dots (11)$$

$$Sh = 2 + 0.552 Re^{1/2} Sc^{1/3} \dots\dots\dots (12)$$

ここで B は Spalding 数である. 気相 SGS 変動成分の液滴挙動への影響は, SGS 変動が等方でガウス分布に従うと仮定しランダムウォークモデルで表現した. 液滴の SGS 成分の気相への寄与は考慮していない.

3. 数値解析手法と解析条件

3.1 参照とする実験体系

本計算で参照する実験体系は, Widmann & Presser によるもの⁹⁾である. 使用された燃焼器概略図を図1に示す. この燃焼器は火炎に与える外部の影響を最小とするためにステンレス製のチャンバに覆われており, その高さは約 1.2 [m], 直径は約 0.8 [m]である. (図1右図参照). 旋回空気がホローコーンインジェクタの周囲の流入部から流入しその直径は約 0.1 [m]である. (図1左図参照). 流入部直径と流入流量でとった Reynolds 数は約 10,000であった. またスワール数は 0.6 となっている. 燃料には Methanol が

表1 Operating Conditions

Fuel Type	Methanol
Fuel flow rate	3.0 kg/h
Fuel temperature	Ambient
Equivalence ratio	0.3
Air flow rate	56.7 m ³ /h
Air temperature	Ambient
Swirl number	0.58
Chamber pressure	Ambient
Reynolds number	10,000

採用された. 実験条件の一覧を表1に示す.

3.2 計算条件

気相の方程式は一般曲線座標系で離散化され, 方程式系の保存性を考慮したスキーム⁸⁾を用いて解析を行なう. 計算の安定化のために混合分率方程式の対流項に QUICK を用い, その他の空間微分項は2次精度中心差分で離散化している. 運動方程式, 混合分率方程式の時間進行には2次精度の Adams-Bashforth 法を用いている. 圧力のカップリングには fractional step 法を用いた.

本計算で解析する計算領域は実験燃焼器全体とした. ただし, 流出部については簡単のため同軸とした. すなわち計算領域は 1.2 [m] × 0.8 [m] の円筒形である. 格子点数は 41 × 37 × 101 (半径, 周, 流れ方向) としており, そのうち流入部をカバーする点は半径方向に 20 点としている. また, 時間刻み $\Delta t = 2.5$ [μ s] とした. 流入部直径と流入空気流量でとった Reynolds 数は 10,000 (実験と同値) としている. また, 燃料の物性はメタノールを仮定している. 燃料液滴の位置における流体の物理量の値は, 双一次補間

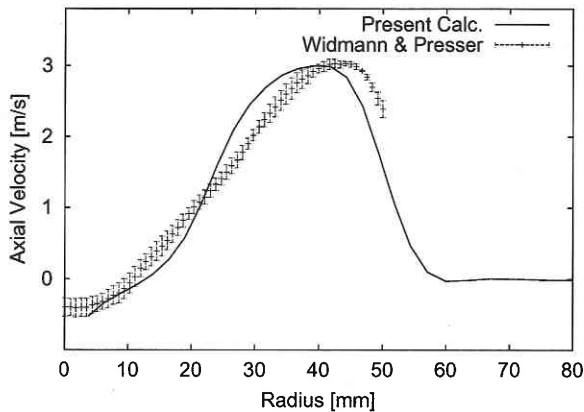


図2 Radial profiles of the axial velocity component compared with experimental result. ($z = 17.6$ [mm])

を用いて計算し、液滴から流体格子への影響の寄与の配分も同様に算出する。

3.2.1 流れの境界条件

旋回流入空気の境界条件は先に述べた実験⁹⁾で得られたノズル近傍の値を用いる。この実験では流れの乱れ成分も計測されており、これも計算に考慮に入れるべきデータであるが、今回は無視している。側壁には no-slip 条件を与え、流出部には対流流出条件を課した。

3.2.2 噴霧液滴粒子の初期条件

噴霧液滴粒子の初期条件は実験で得られたノズル近傍 ($z = 5$ [mm]) の値を用い、その位置から射出する。簡単のため、全ての液滴粒子について初期粒径 49 [μm]、初期速度 22 [m/s]、初期半径方向位置を 3 [mm] とした。ただし周方向の位置についてはランダムに配置している。

4. 解析結果と考察

図2に流入部から $z = 17.6$ [mm] 離れた場所における、流れ方向速度を実験値と比較したものを示す。この図より、平均速度の最大値や逆流域により一致が見られる。さらに旋回の影響によるプロファイルの偏りもよく捕らえられている。この偏りは旋回流れに特有かつ重要な現象であり、RANS モデルでは予測が難しいとされているものであるが、LES によって精度良く予測できることがわかる。

図3に流入ノズル付近の $\nabla^2 p$ で可視化された三次元渦構造を示す。この図を見ると、流入ノズルの内側、外側のリムから出る2つの渦構造があることがわかる。これらの渦構造はそれぞれ時計回りと反時計回りに運動しながら下流に流れ、そこで2つの構造は合体し、急速に崩壊している様子が見てとれる。

図4に噴霧液滴粒子と蒸発した燃料ガス（と流れ方向速度）の様子を示す。噴霧液滴は最初、自身の持つ慣性で移動するが、抗力の影響と蒸発によってエネルギーを失い、局所流れに沿うようになる（このことについては後に述べる）。下流へと流れた蒸発燃料ガスは、空気の流れ同様に非定常な乱れた状態になっていることが見て取れる。そう



図3 Vortical structures visualized using iso-surface of $\nabla^2 p$ and streamwise velocity distribution.

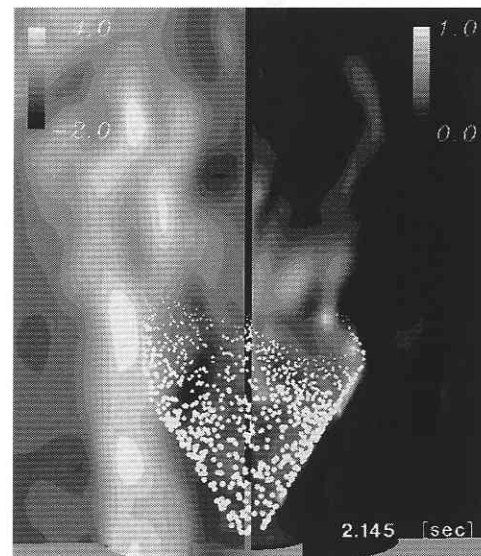


図4 Typical snapshot of fuel concentration distribution

でない蒸発ガスは逆流域に滞留している。このことは、逆流域において、噴霧より外側に燃料ガスが存在することからもわかる。これらのことは、ここで保炎がなされることを示唆している。

図5に液滴の運動と渦構造（図3）の時間履歴を示す。（表示の都合上、手前部分の渦構造を削除していることに注意されたい）この図を見ると流れに沿うようになった液滴が渦構造に巻きついて動くような様子が観測された。このように液滴の運動は、局所渦構造に強く影響を受けることがわかる。

図6に液滴の速度の半径方向分布をいくつかの高さでとったものを示す。この結果から実験、計算双方の結果で液滴速度は流入部を離れるほどに現象していることが見てとれる。しかし本計算では、この傾きや液滴の拡散が捕らえ

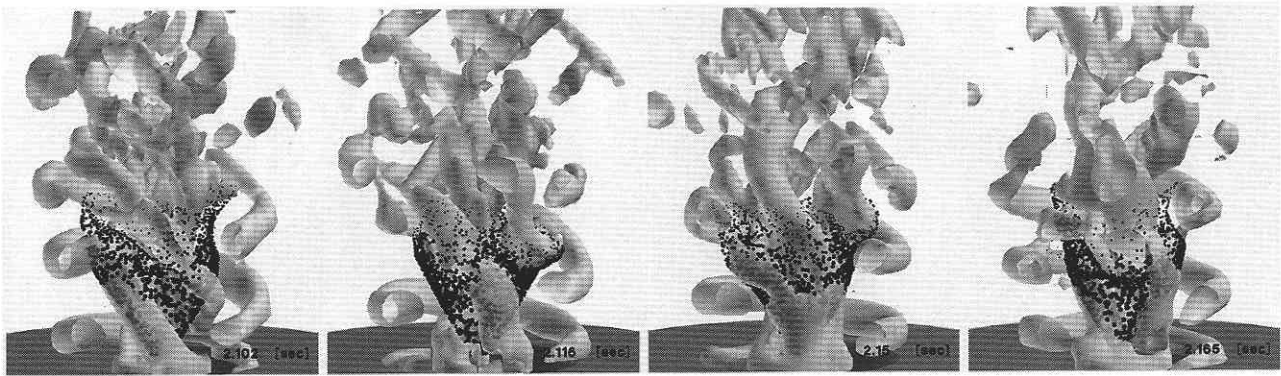


図5 Time series view of the vortical structures and the droplet motion.

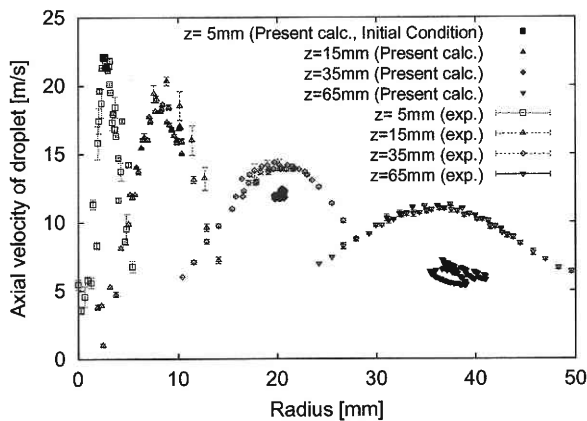


図6 Radial profiles of the droplet axial velocity (red: present computation, blue: experimental results).

られていない。これは計算では初期液滴直径や速度をただひとつに固定しまったのが原因であると考えられる。

なお、本研究で行なった計算の計算時間は HITACHI SR 800/MPP の 1 ノード (理論速度 14.4 GFLOPS) を用いて 1 計算時間ステップあたり 2~3 秒であった。

5. ま と め

乱流噴霧燃焼現象の LES 解析に向けて、乱流運動と蒸発する液滴粒子の運動の解析例を紹介した。旋回の影響による逆流など従来の RANS モデルによる解析では予測の難しかった現象に対しても LES を用いることによって精度良く予測できることを示した。液滴粒子の運動は非定常な渦構造に強く影響を受けている様子を見ることができた。

謝 辞

本研究は文部科学省 IT プログラム「戦略的基盤ソフトウェアの開発」の一環として行なわれている。また数値計算のほとんどは東京大学情報基盤センター HITACHI

SR 8000/MPP を用いて行なわれた。ここに記して謝意を表す。

(2003 年 12 月 15 日受理)

参 考 文 献

- 1) Akselvoll, K., and Moin, P., "Large-eddy simulation of turbulent confined coannular jets", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 315, pp. 387-411, 1996.
- 2) Tominaga, T., Itoh, Y., Taniguchi, N., Kobayashi, T., Hagari, T., and Nonaka, Y., "Numerical Prediction of Turbulent Combustion Flows in Staged Combustor Using LES and Extended G-Equation", *Procs. of the Int. Gas Turbine Congress 2003 (IGTC '03)*, (2003), TS-134 (CDROM).
- 3) Lei, K., Taniguchi, N. and Kobayashi, T., "Full Way Coupling of Large Eddy Simulation for Particle-Laden Turbulent Flows using New Dynamic SGS Models", *Procs. of Turbulence and Shear Flow Phenomena 2*, Vol. 2, (2001), pp. 111-116.
- 4) Hirohata, M., Itoh, Y., Tsubokura, M., Taniguchi, N., and Kobayashi, T., "Large Eddy Simulation of Turbulent Methane-Air Non-Premixed Flame", *Procs. of 4th JSME/KSME Thermal Engng. Conf.*, Vol. 3, (2000), pp. 151-156.
- 5) Pitsch, H., and Steiner, H., "Large-eddy simulation of a turbulent piloted methane/air diffusion flame", *Physics of Fluids*, Vol. 12, No. 10, (2000), pp. 2541-2554.
- 6) Forkel, H. and Janicka, J., "Large Eddy Simulation of a Turbulent Hydrogen Diffusion Flame", *Procs. of Turbulence and Shear Flow Phenomena 1*, (1999), pp. 65-70.
- 7) Cook, A. W., Riley, J. J., and Kosály, A. G., "A Laminar Flamelet Approach to Subgrid-Scale", *COMBUSTION AND FLAME*, Vol. 109, (1997), pp. 332-341.
- 8) Kogaki, T., Kobayashi, T., and Taniguchi, N., "Conservative finite difference Schemes for Incompressible Turbulent Flow in Generalized Coordinates", *Procs. of Turbulence and Shear Flow Phenomena 1*, 1999.
- 9) Widmann, J. F. and Presser, C., "A Benchmark Experimental Database for Multiphase Combustion Model Input and Validation", *Combustion and Flame*, Vol. 129, (2002), pp. 47-86.