B101

反応性噴流の組織的乱流構造に関する研究

松原 幸治(新潟大), 丸島 弘好[○](新潟大), 須藤 仁(電中研)
久保 裕希(新潟大), 小林 睦夫(新潟大)

A Study on Coherent Structures of Turbulence in Reacting Jet

Koji MATSUBARA, Hiroyoshi MARUSHIMA, Hitoshi SUTO
Yuki KUBO and Mutsuo KOBAYASHI

ABSTRACT

Large eddy simulation was performed for a turbulent jet of diluted hydrogen. Treated were the case where hydrogen reacts with surrounded oxygen and the case where only mixing occurs without reaction. Coherent structures of turbulence in these cases were investigated. In reacting case, temperature rise causes significant drop of flow density, and, thus, velocity is two times as higher as the counterpart at the same position of non-reacting case. In spite of dramatic change in order of velocity magnitude, there is close similarity between two-point correlation of reacting case and that of non-reacting case. In two cases, coherent structure inclined against jet central axis was suggested through distribution of two point correlation and PDF of vorticity fluctuation vector.

Keywords: Coherent Structure, Turbulent Jet, Reacting Flow, Large Eddy Simulation

1. 緒 言

乱流中の規則的な流動現象を組織構造と呼ぶ。乱流のモデリングや制御を行う場合、組織構造の知見が必要である。乱流問題の基本的例題の一つ、乱流境界層については、直接シミュレーションと可視化実験によって詳細な検討がなされ、低速ストリーク構造による乱流維持機構が見つかっている⁽¹⁾。既に、その成果に基づいて乱流境界層の効力低減法が開発されている。また伝熱促進デバイスの性能向上にも組織構造に関する知見が役立つと考えられる。いっぽう、気体燃焼に関連が深い自由噴流については、組織構造の検討例が不足しており、十分明らかになっていない。

著者らの研究グループでは、非等温噴流に対して直接シミュレーションと可視化実験を行い、十分発達した乱流領域においてヘアピン状の渦構造が頻繁に現れること、この渦構造は流れに対して約 45°傾いていることを報告した(図2参照)^(2,3)。同様の構造は、榊原らの研究グループによっても報告されている⁽⁴⁾。本論文では、これまでに取り上げられていない化学反応の影響について検討するものとした。

2. 計算手法

希釈水素の同軸噴流を対象とし、化学反応がない場合と化学反応がある場合(拡散火炎)を検討する。中心部

の噴流は窒素で希釈した水素とし、希釈率を0.05とした。図1に示す円筒状計算領域(直径30D、軸方向長さ50D)を設定し、上流側境界で速度およびスカラーにハイパボリック状分布を与える。流体として圧縮性ニュートン流体を仮定する。化学種として H_2 、 O_2 、 H_2O 、 N_2 を考慮し、一段不可逆反応 $H_2 + 0.5O_2 \rightarrow H_2O$ を仮定する。ただし、フレイムシートモデルを仮定し、反応速度が無限大であるとして取り扱う。基礎方程式として、低マッハ数近似を施した連続の式、運動方程式、混合分率輸送方程式、および理想気体の状態方程式を用いる。化学種濃度と温度は、反応速度無限大の仮定に基づいて混合分率から求める。

格子間隔以下の乱れの影響を考慮するため、SGSモデルとして標準型スマゴリンスキーモデルを用いた。混合分率輸送方程式の対流項の差分にはsuperbee制限関数によるTVDスキームを用い、それ以外の差分には四次中心差分を用いた。噴口直径を基準とするレイノルズ数 Re を12,000とし、拡散係数比を0.7とした。時間ステップは、噴口部のクーラン数が0.1になるように設定した。格子点数は226x71x64である。

本計算による流れとスカラーの統計値は、噴口部を除き、高城らの実験結果⁽⁵⁾とよく一致しており、計算結果が十分妥当なことが確認されている⁽⁶⁾。

3. 計算結果

3. 1 瞬時場・統計量

図3、図4、図5および図6に、中心軸上の速度、温度、密度および混合分率の分布をそれぞれ示す。各図には、噴流と周囲流が反応する場合と、これらが反応せず混合だけが起る場合の結果を対比する。図を見ると、反応によって平均的な流れ場が大きく変わることが示されている。すなわち、反応がある場合は、発熱による温度上昇のため密度が大きく低下する。密度の低下は体積の膨張を意味するので、反応が起こる場合には反応しない場合と較べて同一断面における速度が約二倍になっている。混合分率は噴流と周囲流の混合の程度を表す量であり、図6では反応に伴う増速によって混合が遅くなっている。

図7と図8に、混合分率の瞬時分布を示す。噴流の外縁部において周囲流の巻き込みが起こっている。この巻き込みは、流れ方向に約45°傾いた方向で、下流側に向かっている。この組織構造は、密度差がない噴流においても確認されたものであり、ヘアピン状の組織構造^(2,3)と整合するものである。

3. 2 二点相関係数

二点相関係数について検討する。中心軸上の速度がほ

Fig.1 Computational domain

Fig.2 Conceptual model of coherent structure in a jet

ぼ同じになる、非反応性噴流の $z/D=18$ と反応性噴流の $z/D=44$ の断面を取り上げ、これらの二断面に含まれる基準点 $r/b_{1/2}=1.0, 2.0$ 近傍の二点相関係数を比較する。ただし、 $b_{1/2}$ は平均速度の半値幅を表す。半径方向速度 u の z - r 方向二点相関係数を図9、10に示した。これらの図において、二点相関係数の広がり、半値幅の二倍より内側では流れ方向に対して約40度の傾きを持ち、その外側では流れ方向に対してほぼ直角である。このような分布傾向は、平均速度に強く影響される渦の対流速度を反映したものである。すなわち、二点相関係数の分布傾向は、渦の対流速度が中心軸側では速いが、中心軸から離れるほど遅くなり、噴流の外側では一定になることを示唆している。このことは、周囲流を伴わない噴流に対する検討結果^(2,3)と同様であり、ヘアピン状渦構造の姿勢と整合するものである。

Fig.3 Mean velocity distribution

Fig.4 Mean temperature distribution

Fig.5 Mean density distribution

Fig.6 Mean mixture fraction

化学反応なしとありの場合で二点相関係数を比較すると、両者は近い分布をとっており、組織的乱流構造が似たものであることが示唆される。ただし、化学反応がある場合の方が二点相関係数の広がり若干強くなっており、密度変化が影響したものと推察できる。

3. 3 渦度変動

図 1 1、1 2 に二点相関係数と同様に反応なしの $z/D=18$ 、反応ありの $z/D=44$ を選択し、これらにおける渦度変動 ω_z 、 ω_r 、 ω_ϕ の変動強さを示す。化学反応ありの場合では、発達領域にあるため各成分の差は小さくなっている。一方化学反応なしの場合では十分発達していない領域のため、中心付近において変動が強く、成分による差も出ている。

渦度変動ベクトル $\omega = (\omega_z, \omega_r, \omega_\phi)$ の方位を図 1 3 に定義する角度 (α 、 β) によって表現する。

図 1 4、1 5 はモルワイデ図法による渦度変動ベクトル

方位 (α 、 β) の結合確率密度分布であり、座標系は図 1 3 に示す通りである。図 1 4 は化学反応なしの場合、図 1 5 は反応ありの場合であり、それぞれ $z/D=18$ と 44 の付近で z 方向の平均をとり、 $r/b_{1/2}=0.5$ 、1.0、1.5、2.0 の 4 点の結果を示した。流れ方向渦度が正の場合と不の場合に分離して計算したが、これらは β の符号が反転する対称性を持っているので、前者の場合についてのみ結果を示した。2 倍の半値幅の位置について見ると、二つの場合で pdf の分布が大きく異なり、反応がある場合には渦の指向性が強くなっている。しかし半値幅の位置で見ると図 1 4 と 1 5 ではほぼ同等の分布となっている。 $\alpha=30^\circ \sim 45^\circ$ 、 $\beta=20^\circ$ にピークが位置しており、これはヘアピン状渦の姿勢と整合するものである。

Fig.7 Instant distribution of Mixture fraction (No-Reaction)

Fig.8 Instant distribution of Mixture fraction (Reaction)

Fig.9 Two point correlation (No-Reaction, $z/D=18$)

Fig.10 Two point correlation (Reaction, $z/D=44$)

4. 結 言

本研究では、LES によって反応性噴流の組織構造を調査し、二点相関係数と渦度の PDF を検討した。これらに見られる特性は、図 2 に示したヘアピン状渦構造と整合するものであることを示した。

Fig.11 Intensities of vorticity fluctuation
(No-Reaction, $z/D=18$)

Fig.12 Intensities of vorticity fluctuation
(Reaction, $z/D=44$)

Fig.13 Definition of (α, β) and coordinate system

参 考 文 献

- (1) Jeong, J. et al., J. Fluid Mech., 332 (1997), 185-214.
- (2) 須藤ら、日本機械学会論文集B編, 69 巻, 681 号 (2003), 1200-1207.
- (3) Suto, H. et al., Heat Transfer Asian Research, Vol.33, No.5 (2004), 342-346.
- (4) 松田ら、日本伝熱シンポジウム講演論文集、II (2002), 9-10.
- (5) 高城ら、機論 B, 45-400 (1979), 1944-1956.
- (6) 広瀬、新潟大学修士論文(2004).

Fig.14 The joint probability distributions of (α, β)
(No-Reaction, $12 \leq z/D \leq 23$)

Fig.15 The joint probability distributions of (α, β)
(Reaction, $39 \leq z/D \leq 49$)