

論文内容の要旨

非予混合火炎の LES に関する基礎研究

Study for Large Eddy Simulation of Non-premixed Flames by flamelet approach

弘畑 幹鐘 Mikikane HIROHATA

1. 序論

近年、環境排出物規制、燃焼機器の高効率化の観点から、燃焼現象の予測と制御の問題に対して実現象の乱流火炎に対する高精度の時間発展シミュレーション技法が求められている。工学的な乱流火炎では一般に火炎厚さが乱れの最小スケールより薄く、この場合、火炎面は層流火炎の集合 (laminar flamelet) であると考えられる[1]。噴流拡散火炎や対向拡散火炎ならその火炎形状は混合分率の量論混合比における等値面で表現できる。乱流火炎の火炎面をスカラー量輸送で表現する手法を flamelet approach と呼ぶ。火炎面を表現するスカラー量を含む流れ場のシミュレーションと火炎モデルあるいは化学反応計算を分離できることがこの手法の利点で、流れのスケールと反応のスケールが大きく離れている実用燃焼場の解析において計算負荷や精度の観点から有用性がある。また、非定常火炎と渦の干渉など乱流火炎の Dynamics を再現するのに適している。本論文は実バーナ燃焼流れ解析手法開発の第一歩として flamelet approach を用いた非予混合火炎 LES の有用性を検証するものである。まず、既に検証例の存在する水素噴流拡散火炎における予測精度の確認を行い、さらに拡散火炎と予混合火炎の双方の特性を持つ複合火炎に対して Two scalar flamelet approach を適用し噴流浮き上がり火炎の予測を試みた。

2. 拡散火炎 LES による予測精度の検証と可視化

Fig.1 に水素噴流拡散火炎(H3 FLAME) [2]の実験体系における LES 計算の可視化を示す。LES における乱流火炎の粗視化(乱流火炎)モデルには Beta PDF を用いた Presumed PDF モデルを採用した [3]。計算格子数は(流れ方向, 半径方向, 周方向)に 200 x68 x32 である。(a)には渦構造を捕らえる指標として $\nabla^2 p = 0.1$ の等値面の瞬時画像を示した。同軸噴流における渦輪の生成, 合体, 崩壊の様子が確認できる。(b)は瞬時の温度分布である。大規模な螺旋状渦運動により火炎がしわ状に変動する様子が観察できる。Fig.2 に LES と実験結果の統計量の比較を示す。(a)は噴流中心軸における混合分率の軸方向分布, (b)は噴流軸直径 D に対して無次元距離 $X/D=20$ における温度と温度の rms 変動成分の半径方向分布を示す。(a)を見るに本計算は噴流のコア領域の長さを若干短く予測しているため, (b)において中心軸温度に誤差が生じているが火炎面近傍において平均値, 変動成分ともに実用上十分な予測精度を確保している。

3. Two-scalar flamelet approach による複合火炎解析

実火炎では噴流拡散火炎ではその浮き上がりと保炎の際に混合火炎と拡散火炎の双方の性質を持った火炎が存在し, これは部分予混合火炎ないし複合火炎と呼ばれる。Conserved scalar approach を用いたモデルは基本的に混合即燃焼を表現するため未燃混合領域と火炎基部に存在する部分予混合火炎を表現できない。近年, 浮き上がり噴流拡散火炎の基部には edge flame または triple flame と呼

ばれる複合火炎が形成されこれが保炎に寄与するという仮説が有力である[4][5]. これに基づき, 2scalar flamelet approach を用いて浮き上がり噴流火炎モデル化と解析を行う.

3.1 Two-scalar flamelet approach による複合火炎 LES モデル

以下にモデルの仮定を示す.

- ① 濃度混合は混合分率 ξ で表現し, triple flame の伝播性を G 方程式予混合火炎モデルで表現する. Fig.3 に triple flame と two scalar flamelet approach の 概略図を示す.
- ② G をスイッチングパラメータとして $G = G_0$ を火炎面とし, 既燃ガス領域を $G > G_0$, 未燃ガス混合領域を $G < G_0$ で表現する. 浮き上がり火炎基部における火炎厚みは Grid スケールより薄いと仮定する. 予混合火炎面以後の既燃ガス領域は拡散火炎として近似し, 対向拡散火炎から得られる火炎データを用いて近似する.
- ③ 乱流燃焼速度のモデルはダムケラの仮定によるモデルを基礎とするが triple flame の火炎伸張効果を付加する. また triple flame はその火炎曲率による形状効果で見かけの燃焼速度 (= 伝播速度) が対向層流予混合火炎の燃焼速度に対し最大で $\sqrt{\rho_u/\rho_b}$ (メタン空気火炎において約 2.6) 増加するとの知見[6]を元にこれが Subgrid スケールで生じる現象と仮定する. 今回乱流燃焼速度 S_T (Subgrid 燃焼速度) を以下の様に定式化した. ここで $\bar{\phi}$ は体積平均, $\tilde{\phi}$ は Favre 体積平均を示す. α は Subgrid スケールにおけるみかけの燃焼速度の増分, f_q は火炎伸張による減速項, a_l は拡散火炎内層流火炎片の火炎面曲率半径のスケールにおける歪み速度, C_{pg} , C_q はモデル定数, a_q は対向層流拡散火炎が消炎を起こす歪み速度で燃料と酸化剤により決まる.

$$\frac{S_T}{S_L^0(\xi)} = \alpha f_q \left(1 + C_{pg} \left(\frac{\sqrt{(\bar{u}_l - \bar{u}_l)^2}}{S_{Lmax}^0} \right) \right), \quad \alpha = \sqrt{\rho_u/\rho_b}, f_q = \left(1 - C_q \frac{a_l}{a_q} \right), a_l = \left(\frac{\sqrt{(\bar{u}_l - \bar{u}_l)^2}}{\Delta} \sqrt{2\bar{S}_y \bar{S}_y} \right)^{1/2} \quad (2)$$

3.2 浮き上がり噴流火炎 LES による浮き上がり距離の予測

浮き上がり噴流火炎が 2scalar flamelet approach による LES で適切に表現されるかを確認する. 検証計算は Múniz ら(1997)[5]の実験体系において周囲流一定条件と主流速度一定条件の変化を見るために 3点 (FLAME A, B, C とする) 取り, 浮き上がり距離の予測を行った. 計算格子数は (流れ方向, 半径方向, 周方向) に 200 x 78 x 32 である. 浮き上がり距離の予測結果を Fig.4 に示す. 本計算では周囲流速度一定条件の予測は出来ていないが, 周囲流の違いによる浮き上がりの変化の傾向は再現出来ている. 瞬時の G の分布について Fig.5 (a) に FLAME B, Fig.5 (b) に FLAME C を示した. 本計算では FLAME A, B は渦輪との干渉で火炎位置の平均値に対して $\pm 20 \sim 30$ [mm] 程度の幅で変動していることを確認している. この変動幅は剪断層における大規模渦のスケールに相当していると考えられ, FLAME C では計算では変動渦の大きさが小さいため火炎基部はほぼ固定されている. 実験では FLAME A, B が火炎の平均位置に対して約 ± 10 [mm] 程度, FLAME C の変動幅は ± 5 mm 以下の幅で変動していることが観測されている. FLAME A, B は本計算では triple flame 領域での保炎[6], FLAME C は Edge Flame 領域[6]での保炎である. 本計算では噴流拡散火炎の浮き上がりと保炎位置による形状の違いが再現できている.

4. 結論

実バーナ燃焼流れへのflamelet approachを用いたLESの適用を目的としてPresumed PDFモデルを用いた噴流拡散火炎のLESを行い、その高い予測精度を確認した。また複合火炎に適用できるflamelet approachを噴流火炎の浮き上がりと保炎の問題に適用しその有用性を示し、Triple flameによる保炎機構を考慮した乱流燃焼速度モデルの提案を行った。浮き上がり距離の予測精度は現状では不十分であるが今後モデルの改良により将来的にこの浮き上がり火炎解析モデルを利用して火炎形状の制御など実用問題への展開も期待できる。本研究により非予混合火炎に対するflameletモデルの適用性がより広がったと考えられる。

参考文献

- [1] Peters,N.: 21 th Symp. of Combustion (1986) 1231.
- [2] EKT, Flame Data Base <<http://www.tu-darmstadt.de/fb/mb/ekt/flamebase/Welcome.html>>, 1997
- [3] Cook,A.W. and Riley,J.J.: Combustion and Flame 112 (1998) 593
- [4] Müller,C.M., Breibach,H., and Peters,N. : 25 th Symp. of Combustion (1994) 1099.
- [5] Múniz,L. and Mungal,M.G: Combustion and Flame 111 (1997) 16.
- [6] Chen,Y.C. and Bilger,R.W., Combustion and Flame 123,(2000),pp23-45

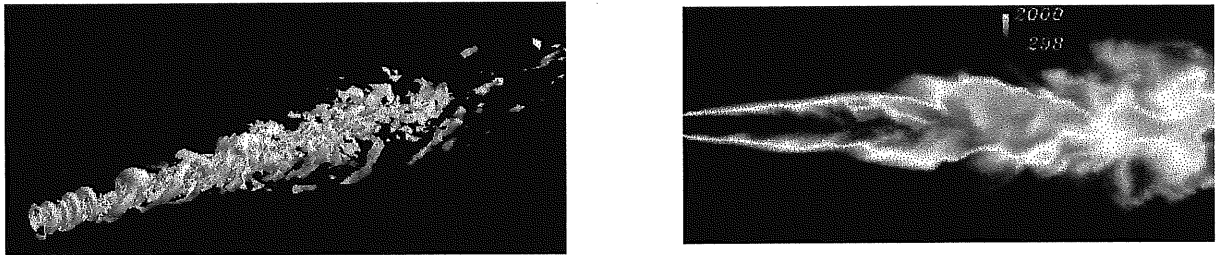


Fig.1 Instantaneous distributions of hydrogen jet diffusion flame
(a) Vortex structure, (b) Temperature distribution

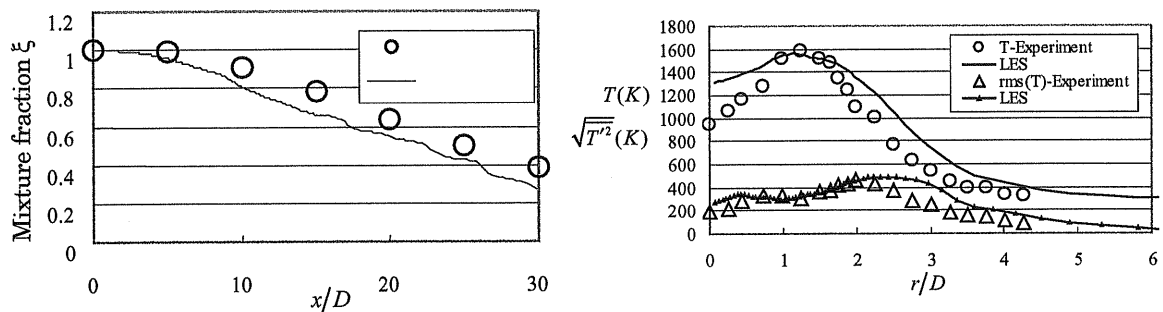


Fig.2 Ensemble mean profiles (a) Mixture Fraction Distribution on The centerline, (b) Radial Profile of Mixture Fraction and Temperature at $x/D=20$

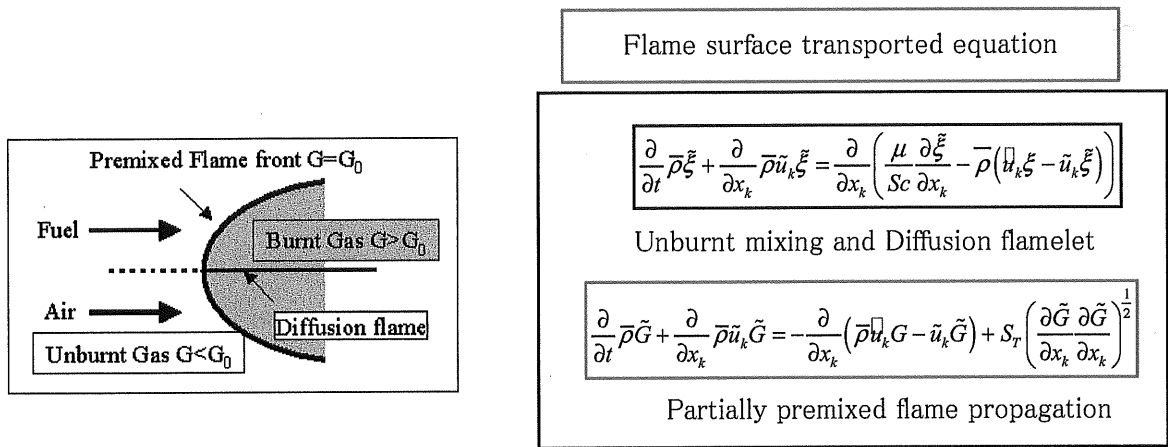


Fig.3 Schematic view of a triple flame and 2-scalar flamelet approach

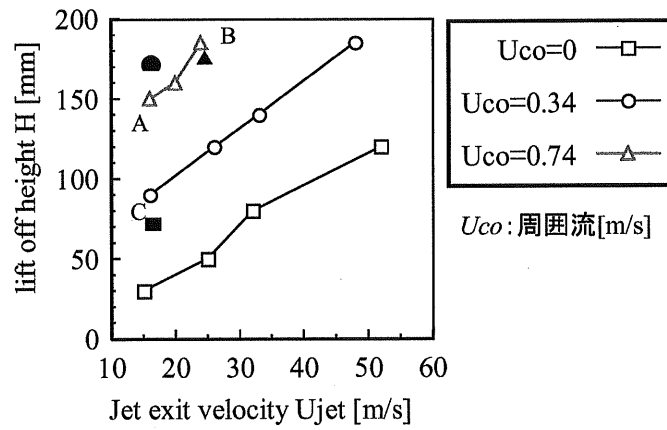


Fig.4 Lift-off point of present calculation (●:FLAME A, ▲:FLAME B, ■:FLAME C.)

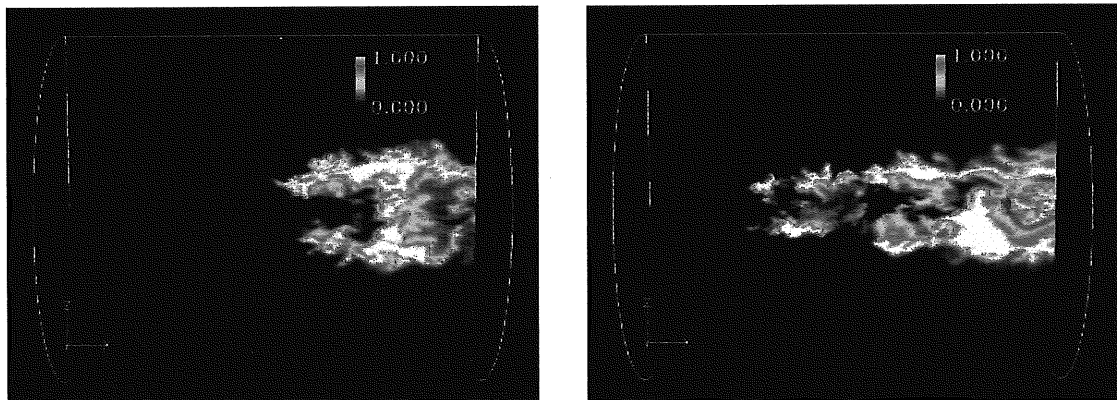


Fig.5 The instantaneous distributions of burnt gas (G)

(a) FLAME B (b) FLAME C