

No.29 強い旋回流を伴う微粉炭燃焼流の非定常数値シミュレーション

(電力中央研究所) ○渡邊裕章, 丹野賢二
(京都大学大学院工学研究科) 黒瀬良一, (電力中央研究所) 牧野尚夫

Unsteady Numerical Simulation of Pulverized Coal Combustion in a Strong Swirling Flow

Hiroaki WATANABE*, Kenji TANNO (CRIEPI),
Ryoichi KUROSE (Kyoto Univ.) and Hisao MAKINO (CRIEPI)

SYNOPSIS: Large-eddy simulation (LES) is applied to a pulverized coal combustion field in a combustion test furnace with a practical advanced low NO_x burner called CI- α , and its validity is investigated by comparing with the experiment. The motion of coal particles is calculated by the Lagrangian method with a parcel model. In the coal combustion modeling, three chemical processes are considered, namely devolatilization, char combustion and gaseous combustion. The direct closure SSFRRM (scale similarity filtered reaction rate model) is used as a turbulent combustion model. The results show that a swirling recirculation flow is formed in the central region close to the burner and its size and strength dynamically change with time. The predicted distributions of gaseous temperature and oxygen concentration are in general agreement with the experiment.

1. 緒言

エネルギー保障の観点から、今後も石炭を重要な資源として利用していくためには、効率と環境保全性の向上が重要である。それには、微粉炭燃焼ボイラ等のエネルギー機器内の石炭反応を深く理解し、その予測技術を培うことが重要である。しかしながら、石炭の反応は、気流内における微粒子の分散といった物理現象と、揮発分放出、固気反応、気相反応といった化学反応が相互に影響し合うため、極めて複雑であり、依然未解明な部分が多い。

近年、流れの数値シミュレーションは、工業機器の設計や運転最適条件の選定のための有用なツールとして認識されつつある。従来、微粉炭燃焼場の数値シミュレーションには、計算負荷が軽い RANS(Reynolds-averaged Navier-Stokes)法が用いられてきたが、その旋回流等の複雑な流れ場に対する適用性の低さが指摘されている¹⁻³。

そこで本研究では、強い旋回流を伴う石炭燃焼炉内における微粉炭燃焼場を対象に、LES(Large-eddy simulation)を実施し、実験との比較によりその有効性を検討する。

2. 数値計算

本計算には、FrontFlowRed-CK (extended by CRIEPI and Kyoto Univ.)を用いた。LESでは、大きなスケール(GS, grid scale)の乱流渦のみを直接計算し、解像可能スケール以下(SGS, subgrid scale)の渦の作用をモデル化する。乱流モデルには、dynamic SGSモデル⁴を用いた。微粉炭粒子は、ラグランジェ的に追跡し、

その燃焼には、揮発分放出⁵、揮発分燃焼⁶、チャー燃焼⁷、および NO_x 生成⁸⁻¹¹の各反応過程を考慮した。

図1に対象とする石炭燃焼炉の概略を示す。本燃焼炉は、定格 100kg/h の横型シングルバーナ方式を採用している。バーナは、CI- α と呼ばれる低 NO_x バーナ¹²を搭載しており、2次空気系と3次空気系にそれぞれ16枚ずつスワラ翼を備えることで、炉内に強い旋回流を形成し、保炎を図る。

本研究の計算条件は実験¹³と同様に設定した。供試炭には豪州 NL 炭を用い、燃焼炉への石炭供給量を約 97.4kg/h とした。燃焼用空気の総流量は空気過剰率 4%となるよう決定し、二段燃焼率を 30%とした。供給する微粉炭粒子の平均径を約 40 μm とした。計算格子は約 27 万点であり、バーナ近傍領域における格子分割を細かく設定した。

3. 結果と考察

図2に、ガス温度の瞬間分布と中心軸上時間平均分布の実験との比較を示す。瞬間分布より、バーナ近傍の1次空気噴流を取り囲む形で高温の領域が形成されており、この領域で微粉炭が着火している様子がわかる。また、時間平均分布より、計算値は実験値と定性的に一致していることがわかる。

図3に、酸素濃度の瞬間分布と中心軸上の時間平均分布の実験との比較を示す。瞬間分布より、酸素濃度は図2で観察された着火領域で急速に低下し、その後二段燃焼空気ポート位置まで酸素がほとんどない領域となる。こうした LES で得られた傾向は、時間平均分布の実験値とも良く一致する。

図4に、軸流速の瞬間およびr.m.s.分布を示す。図より、バーナ近傍には1次空気噴流の両側に負の流速をもつ再循環流が形成されており、その位置は図2で見られた着火領域と一致することがわかる。また、この再循環流の位置と大きさは、時々刻々変化するため、流速が高い正值を示す領域とこの再循環流領域との境界付近にr.m.s.値が高い領域が存在する。このことは、図5の軸方向粒子速度PDFからも確認できる。再循環流の変動とともに、粒子速度は時間平均値を中心に大きく変動していることから、こうした挙動が微粉炭の着火・保炎性に大きな影響をもっているものと考えられる

4. 結言

ガス温度や酸素濃度の炉内分布が実験値と良く一致するとともに、バーナ近傍の流れ場や粒子の非定常な挙動を捉えており、本研究で提案したLES法が微粉炭燃焼場の諸特性を予測する上で有効な手法になる得ることを確認した。

参考文献

1. 黒瀬, ガスタービン学会誌, 35, 243 (2007).
2. Watanabe et al., J. Env. Eng., 4, 1 (2009).
3. Kurose, Makino, Combust. Flame, 135, 1 (2003).
4. Moin, Squires, Cabot, Lee, Phys. Fluids, 3, 2746 (1991).
5. Niksa, Combust. Flame, 100, 384 (1995).
6. Desjardin, Frankel, Phys. Fluids, 10, 2298 (1998).
7. Field, Combust. Flame, 13, 237 (1969).
8. Baulch et al., Evaluated kinetic data for high temperature reactions, Butterworth (1973).
9. De Soete, Proc. Combust. Inst., 15, 1093 (1976).
10. Mitchell, Tarbell, AIChE J., 28, 302 (1982).
11. Levy et al., Proc. Combust. Inst., 18, 111 (1981).
12. Makino, PhD thesis, Kyoto Univ. (1995).
13. Kimoto, Makino, Tsuji, Ikeda, CRIEPI Report, W94013 (1994).

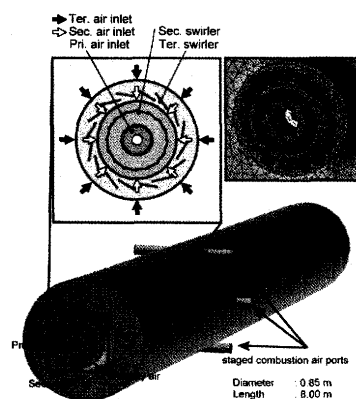


図1 石炭燃焼炉と旋回バーナの概略

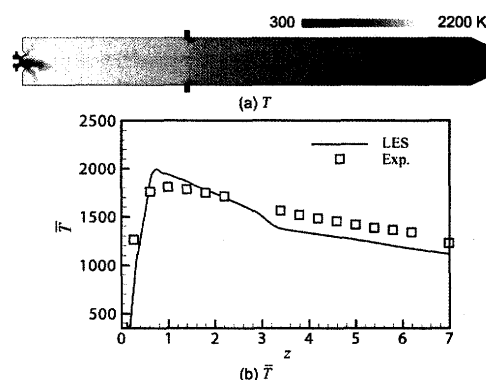


図2 ガス温度(a)瞬間分布, (b)中心軸上時間平均分布

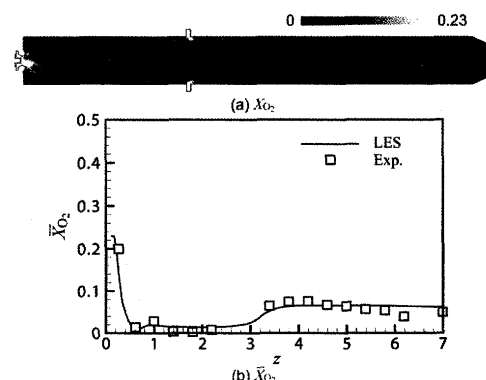


図3 酸素濃度(a)瞬間分布, (b)中心軸上時間平均分布

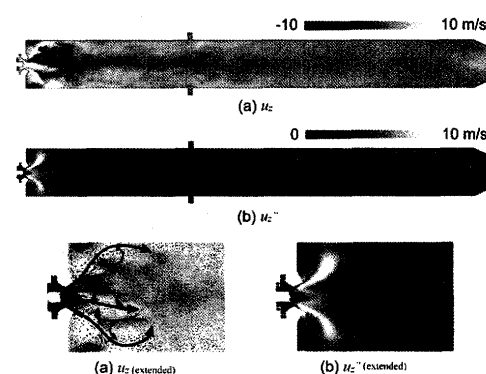


図4 軸流速分布 (a)瞬間分布, (b)r.m.s.分布

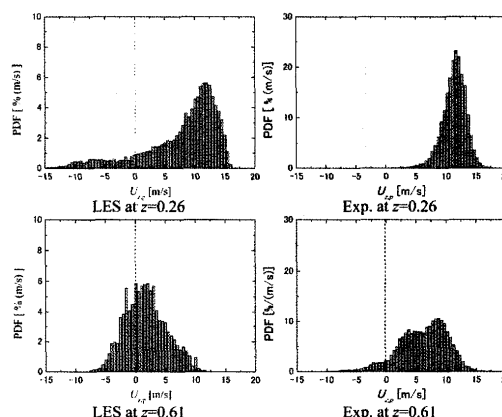


図5 中心軸上軸方向粒子速度PDFの比較