

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：33919

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K04633

研究課題名（和文）工学的スケールでの粉塵爆発現象の数値シミュレーション

研究課題名（英文）Numerical simulation of dust explosion phenomena on actual scale

研究代表者

武藤 昌也（Muto, Masaya）

名城大学・理工学部・准教授

研究者番号：30466445

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、簡易的な解析領域を用いることにより炭塵爆発を模擬した数値シミュレーションを実施した。その結果、燃焼流動場を対象としたLarge eddy-simulation（LES）による非定常解析および高精度な粒子追跡が重要であることが分かった。しかしながら、同解析手法を工学的スケールの現象に適用するにあたり、大規模な三次元燃焼流動場においてLESおよび燃焼反応解析により計算負荷が著しく増大し解析は困難であった。そのため、計算負荷の抑制が今後の課題である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

実験計測が多く行われてきた粉塵爆発現象に対する、数値シミュレーション手法の構築と解析を実施した。本手法により粉塵を含む燃焼流動場における詳細な火炎伝播と粒子運動を捉えられることが分かり、今後の現象解明や予測に非常に有用な手段であることが期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, a three-dimensional numerical simulation was carried out assuming a coal dust explosion using a simple rectangular domain. As a result, it was found that unsteady flow field analysis by large eddy-simulation (LES) for combustion field and accurate particle tracking are important. However, when applying this calculation method to phenomena on an engineering scale, the analysis became difficult because of the increase in computational cost due to the implementation of LES and combustion reaction analysis in a large-scale three-dimensional combustion field. Therefore, suppression of computational cost is a future issue.

研究分野：流体工学

キーワード：粉塵爆発 数値シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

粉体が高温ガスに晒されることにより燃焼を開始し、粉塵爆発が発生する。粉塵爆発の一つである炭塵爆発は炭鉱の坑道や排ガス処理施設においてしばしば発生し¹⁾、多大な被害を生ずるため、この抑制は炭鉱施設における課題である。そのため、粉塵爆発現象の詳細を理解することは、安全技術を発展させる上で必要とされる。一方、粉塵爆発は、産業・自然界においても広く散見される現象であり、実験室程度の小規模スケールでの解析のみでは十分な現象解明につながらないと考えられる。しかしながら、これまでの研究例は実験室規模の実験^{2,3)}が多く、計算例は多くない^{4,5)}。そこで、数値シミュレーションによる、工学的スケールにおける現象解析が必要と考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、Large-Eddy Simulation (LES) を用いた三次元数値シミュレーションを、簡易的な計算領域における炭塵爆発を含む燃焼流動場に適用し、火炎伝播や炭塵粒子の運動を詳細に解析することを目的とする。また、構築した手法を微粉炭燃焼ボイラ内のような工学的スケールの現象に適用し、実用機器内の解析も試みる。

3. 研究の方法

本研究で用いる数値シミュレーションの概要として、流れ場については、ゼロマッハ数近似した非圧縮性流体を LES により解析する。乱流モデルには標準 Smagorinsky モデルを用いる。また、個々の微粒子は代表粒子モデルを用いて Lagrange 的に追跡する。困流に対する微粒子の体積率は十分小さく、微粒子同士の衝突は無視する。微粉炭燃焼は、揮発した揮発ガスの燃焼反応および固定炭素の燃焼反応からなるが、本研究ではこれらの過程を単純化して考えるために、仮想的に、石炭と同程度の密度 (2000 kg/m^3) を持つ微粒子から、最大でも微粒子の質量の半分が CH_4 として蒸発するようなモデル化を施して検討を行う。気相の燃焼モデルとしては Flamelet/progress-variable (FPV) 法と G 方程式をカップリングした FPV/G 方程式法を用いる。FPV 法に用いる Flamelet ライブラリの作成には GRI-Mech 3.0 メカニズム⁶⁾ (53 化学種、325 反応) を用いる。初期に分散させる微粒子の初期粒径は $30 \mu\text{m}$ で一定とする。

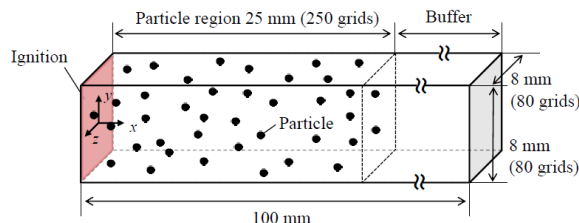


Fig. 1. Schematics of computational domain and particles.

解析対象は長手方向の一方が流出口であるような簡易矩形流路であり、図 1 にその概略を示す。領域の大きさは長手 (x) 方向に 300 mm 、高さ (y) 方向および奥行き (z) 方向に 8 mm とし、 $0 \text{ mm} < x < 25 \text{ mm}$ の領域に初期温度 $T_d = 300 \text{ K}$ の微粒子をランダムに配置する。また、 x 方向境界における圧力の反射を防ぐため、 $25 \text{ mm} < x < 100 \text{ mm}$ にバッファ領域を設定する。計算格子は直交スタガード格子とし、 $0 \text{ mm} < x < 25 \text{ mm}$ の領域の格子間隔は各方向に 0.1 mm の等間隔とする。雰囲気は CH_4 /空気の予混合気 (当量比 0.6) とし、温度は $T_a = 300 \text{ K}$ 、初期圧力は $P = 0.3 \text{ MPa}$ とする。計算初期に $0 \text{ mm} < x < 2 \text{ mm}$ の領域において気相温度を 1500 K に設定することでガスを着火し、 x 正方向へと火炎が伝播する。計算条件としては、微粒子の運動を考慮した場合と無視した場合の 2 ケースとする。本計算には非構造格子有限体積法コード FrontFlow/red (extended by CRIEPI, Kyoto Univ. and NuFD)⁷⁾ を用いる。

4. 研究成果

図 2 に分散微粒子の運動を無視した場合の、図 3 に分散微粒子の運動を考慮した場合の火炎伝播過程における流れ場のガス温度の瞬時分布の時系列を示す。時刻は着火開始からの経過時間を示す。粒子運動を考慮することにより、流路内高さ方向中心付近の温度が粒子運動を無視した場合と比較していずれの自時刻においても大きく上昇していることが分かる。また、火炎先端の時間的な推移から、粒子運動を考慮することにより伝播速度が増大することも分かる。また、いずれの場合においても高さ方向壁面付近の温度が高さ方向中心付近と比較して高い値を示すのは、本研究では壁面に断熱条件を課しており、高さ方向中心付近において生じる微粒子の蒸発潜熱による熱損失が発生しないためと考えられる。粒子運動を考慮した場合と無視した場合との差異は、本研究の条件下においては、粒子運動を考慮することにより、燃焼反応に起因するガス膨張に伴い火炎面下流の微粒子がより下流へと輸送され、粒子運動を無視した場合と比較して、火炎面付近の当量比が量論混合比に近くなったためと考えられる。

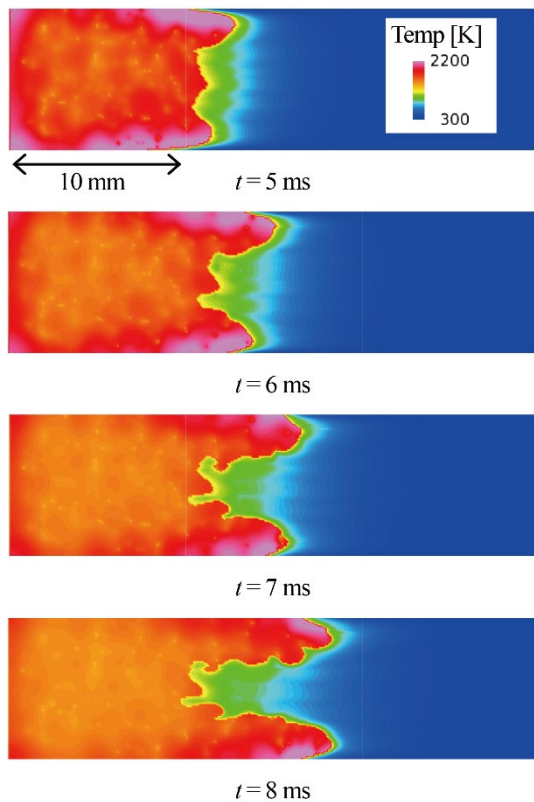


Fig. 2. Time series of gas temperature distribution without particle moving.

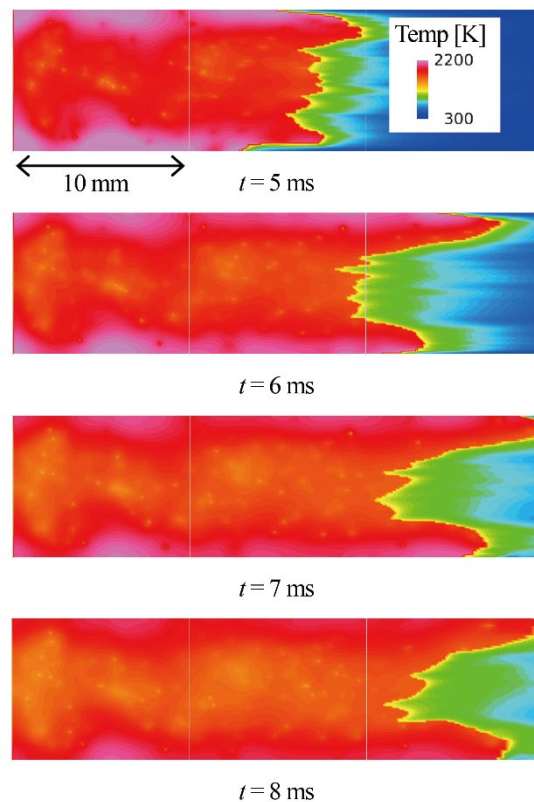


Fig. 3. Time series of gas temperature distribution with particle moving.

本手法を工学的スケールの現象に適用するために計算領域を拡大した解析も試みたが、実現象を再現するための初期乱流場の生成が容易でないこと、解析領域の拡大に伴い計算負荷が著しく増大することから、本手法では十分な解析が難しいことが分かった。

以上より、本研究により得られた成果は以下の通りである。

- (1) 本解析手法 (LES、Flamelet/progress-variable 法および粒子追跡手法) を用いることにより、三次元燃焼流動場における火炎伝播および炭塵粒子の運動解析が計算可能であることを確認した。
- (2) 微粒子運動の考慮が流れ場の温度分布および火炎の伝播速度に大きく影響することから、粒子運動の正確な予測が本研究で対象とする火炎伝播には重要であることが分かった。
- (3) 工学的スケールの現象に対して本解析手法の適用を試みたが、大規模な三次元燃焼流動場における LES および燃焼反応解析により計算負荷が著しく増大し、解析は困難であった。そのため、計算負荷の抑制が今後の課題である。

<引用文献>

- 1) 松田東栄: 可燃性粉じんの爆発危険性評価技術, 産業安全研究所安全資料, 労働省産業安全研究所, 1990.
- 2) Richmond JK, Liebman I: A physical description of coal mine explosions, *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 15, pp. 115-126, 1975.
- 3) Dastidar A, Amyotte P, Going J, Chatrathi K: Inerting of coal dust explosions in laboratory- and intermediate-scale chambers, *Fuel*, Vol. 80, p. 1593-1602, 2001.
- 4) Houim RW and Oran ES: Structure and flame speed of dilute and dense layered coal-dust explosions, *J. Loss Prev. Proc. Ind.*, Vol. 36, pp. 214-222, 2014.
- 5) 志村啓, 松尾亜紀子: 炭塵燃焼の数値解析における反応モデルの影響, 第54回燃焼シンポジウム講演論文集, 2016.
- 6) Gregory PS, David MG, Michael F, Nigel WM, Boris E, Mikhail G, Thomas BC, Ronald KH, Soonho S, Gardiner Jr. WC, Vitali VL, Zhiwei Q: GRIMech3.0, http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/.
- 7) Muto M, Watanabe H, Kurose R, Large Eddy Simulation of Pulverized Coal Combustion in Multi-burner System –Effect of In-furnace Blending Method on NO Emission, *Advanced Powder Technology*, Vol. 30, pp. 3153-3162, 2019.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 武藤昌也	4. 巻 59
2. 論文標題 粉塵爆発に対する数値シミュレーションの適用性の検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 名城大学理工学部研究報告	6. 最初と最後の頁 22-24
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------