

jh180070-NAH

堆積炭塵爆発に対する大規模連成数値解析

松尾亜紀子（慶應義塾大学）

概要 本研究では、地面に堆積した炭塵が衝撃波によって巻き上げられ、炭塵爆発を生ずるまでの一連の過程を解析し、安全防護技術の向上に寄与することを目的とする。炭塵爆発の解析において重要となる気体流動・燃焼と炭塵粒子の分散を再現するため、計算格子を用いる数値流体力学と粒子法の一つである離散要素法を組み合わせたモデルを構築する。また、MPI 並列による大規模並列を用いて解析を高速化する。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名

東北大学サイバーサイエンスセンター

(2) 共同研究分野

- 超大規模数値計算系応用分野
- 超大規模データ処理系応用分野
- 超大容量ネットワーク技術分野
- 超大規模情報システム関連研究分野

(3) 参加研究者の役割分担

松尾亜紀子 (慶應義塾大学)	研究総括
江川隆輔 (東北大学)	並列化処理
小林広明 (東北大学)	並列化処理
磯部洋子 (東北大学)	並列化処理
志村啓 (慶應義塾大学)	数値モデル構築
笠原弘貴 (慶應義塾大学)	数値モデル構築
木村謙仁 (慶應義塾大学)	数値モデル構築

粉塵が空中で十分に分散しているとき、粉塵爆発を生ずる可能性がある。一方で、通常の粉塵は重力によって地表に堆積しているため、粉塵爆発を生ずる危険性は低い。従って、粉塵燃焼が安定的に伝播している状況を解析するためには、堆積粉塵が巻き上がり燃焼する過程を再現する必要がある。

本研究では、粉塵の一つとして炭塵に焦点を当て、一次爆発によって生じた衝撃波が堆積炭塵を巻き上げ、炭塵爆発を生じるまでの過程を解析する数値モデルを構築する。また、解析対象の大きさから計算を高速する必要があるため、MPI 並列によって高速化を行う。

2.2. 意義

2000 年以降、微小産業の発展に伴い粉体工業の需要が増大しており、世界的に粉塵爆発の事故件数が増加している。1990 年代までの粉塵爆発の対策はノウハウによって行われることが多く、新規産業の発展によって既存の防護技術を適用できなくなったことが増大の原因である。また、日本においては団塊の世代の退職に伴って安全管理のノウハウが低下している。従って、粉塵爆発に対する学術的な知見に基づいた、ノウハウによらない安全防護技術の発展が要求されている。

粉塵爆発は、粉体を扱う産業において常に発生する可能性を有しており、一度発生すれば産業施設に甚大な影響を与える。よって、炭塵爆発に対

2. 研究の目的と意義

2.1. 目的

する予防・安全防護技術の発展は幅広い産業の安全工学発達をもたらすものである。そのため、本研究によって堆積炭塵爆発の機構を工学的に明らかにすることで安全工学の発展に資することができる。

炭塵爆発に対する数値解析では、粒子間衝突・衝撃波-粒子干渉・相間反応・気相化学反応が相互干渉的に生じるため、現象が複雑であり数値モデルの構築が不十分である。特に衝撃波-粒子干渉現象に代表される圧縮性流体と粒子群の相間作用は、ロケット推進や土木工学にも現れる。本課題研究によって工学的スケールにおいてこれらの現象を定量的に再現する手法を開発できれば、気相と粒子が混在する固気二相流を解明することに貢献する事ができる。

3. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

本研究で行う解析では、堆積炭塵爆発の端緒となる衝撃波の伝播から燃焼波が定常伝播するまでに 10-100 m オーダーの解析領域が必要となる。一方で、化学反応を正確に模擬するためには μm オーダーの格子解像度が必要となるため、大規模な計算資源を必要とする。

本研究における数値解析は、支配方程式を空間的に離散化した上で同一の計算処理を各離散点・離散要素上で繰り返し行うものであり、ベクトル型コンピュータが最適であると考えている。また共同研究者との事前検討の結果、代表者が開発した MPI (Message Passing Interface) 並列化済コードをワークステーションで解析した場合、CPU メモリからの読み込み時間が原因で速度向上が見込めないと分かった。よって、高メモリバンド幅を有する演算環境を必要とするため、スーパーコンピュータシステムを用いて解析を行う。

本研究において用いる解析モデルは、Eulerian-Lagrangian 法である。これは、流体の流動・化学反応に対して計算格子を用いて解析し (Eulerian 法)、空間において離散的に存在する炭塵粒子群に対しては粒子法 (Lagrangian) によって解析するモデルである。この解析手法は、分散

相である粒子群と連続相である周囲気体の物理的な状態に従って構築しているモデルであるため、現象を再現しやすく解析精度も高い。しかし、Eulerian-Lagrangian 法は大規模計算のための並列化には困難が多い。格子を用いる Eulerian 法と粒子法である Lagrangian 法では、最適な並列化モデルが異なっているため、全体を通して有効な並列化を達成することが難しい。このため、並列化効率を向上させるためには並列化処理に関する専門的知識を必要とする。従って、計算科学を専門とし数値解析モデル構築を担当する慶應義塾大学と計算機科学を専門とし並列処理モデルの改善を担当する東北大学との共同研究によりこれを達成する。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

新規課題のため該当なし

5. 今年度の研究成果の詳細

5.1. 並列モデルの構築

MPI 並列モデルの模式図を図 1 に示す。基本的には、流体計算の計算負荷は格子点数に比例し粒子計算は粒子数に比例する。そこで、空間分割法を用いており、各 MPI ノードが担う格子点数が等しくなるように分割を行う。このため、各 MPI ノ

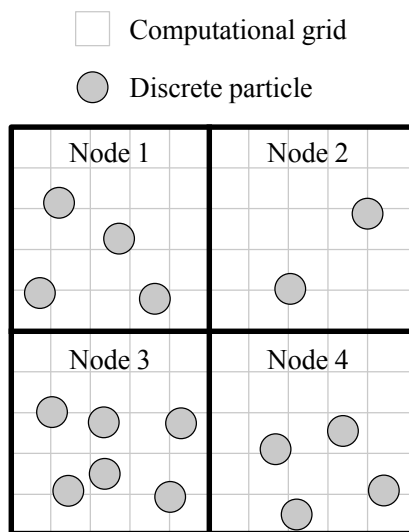


図 1 並列化モデル

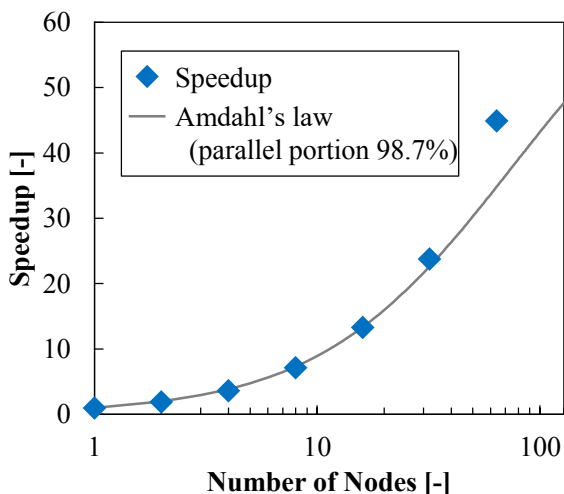


図 2 MPI 並列による計算速度向上 (粒子の堆積する方向に沿って一次的に空間分割を行っている.)

ードが担う粒子数は一定にならず、計算負荷にインバランスが生じる。

このモデルを採用する利点として、流体計算 (計算格子) と粒子計算のカップリングで必要となる物理量交換では通信が必要ないという点がある。気体と粒子は相互に影響しあっているため、気体計算では近傍粒子の物理量を必要とし、粒子は近傍格子点の気体物理量を必要とする。本モデルでは計算格子と近傍粒子が常に同一ノードに存在しているため、近傍の物理量を取得する際に通信を必要としない。一方の欠点としては、先述した粒子数のインバランスによる粒子解析の並列化効率低下がある。本研究で対象とする堆積炭塵爆発の場合、基本的に粒子は燃焼波伝播方向と平行に堆積している。従って、粒子が堆積している方向に空間分割を行えば粒子数のインバランスはある程度解決できる。

図 2 にプロセス数の増加に対する計算速度加速率を示す。ただし、並列化率が改善されるように粒子を堆積させる方向に沿って一次的に空間分割を行っている。計算結果はアムダールの法則による計算プログラムの並列処理割合 98.7%と一致した。プロセス数の増加に従って計算速度加速率が向上していく原因は不明であるが、より多くの

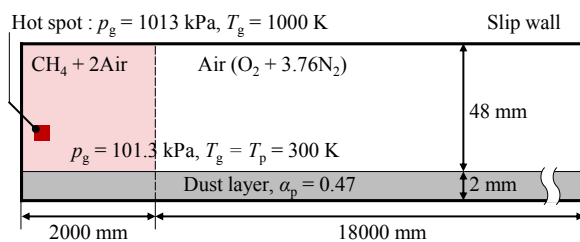


図 3 二次元解析による計算対象の模式図

プロセスを用いた場合にはさらなる改善が期待される結果となった。

5.2. 堆積炭塵爆発問題への適用

MPI 並列モデルを構築し、大規模並列化を行った計算プログラムによる二次元計算の結果を示す。図 3 に解析対象を示す。解析領域下部に炭塵を堆積させている。計算の進展とともに燃焼波が左から右へ伝播し、燃焼波との干渉によって堆積炭塵が空中へ分散・燃焼することで燃焼波の伝播が継続されるという問題である。流体解析に用いる格子点数は $80000 \times 200 = 1600$ 万点とし、粒子解析に用いる離散要素数は 6 万点とした。東北大学サイバーサイエンスセンターの SX-ACE において 100 ノードで解析した。計算時間は 4 日であった。

図 4 に気相温度分布および粒子分布を示す。各時刻における粒子位置を紫色ドットにて表示している。まず、初期条件において配置された高温高压領域によって、CH₄-Air 予混合気において燃焼波が起爆され左から右へと伝播する (1 ms)。その後、燃焼波は反応性気体の含まれない空気領域 ($x > 2.0$ m) の進入することで消炎し、デトネーション波は衝撃波と接触不連続面に分離する (2 ms)。ここで接触不連続面は、衝撃波によって断熱圧縮された空気と高温の既燃ガスとの接触面である。ここで、チャンネル内上部の燃焼生成物は 2000 K 以上であるが、堆積粒子層に近い管内底部領域は 1000 K 程度である。これは、熱輸送による粒子のエネルギー吸収および揮発による吸熱反応、また堆積粒子からの揮発によって生じた CH₄ による温度低下である。気相と炭塵粒子の密

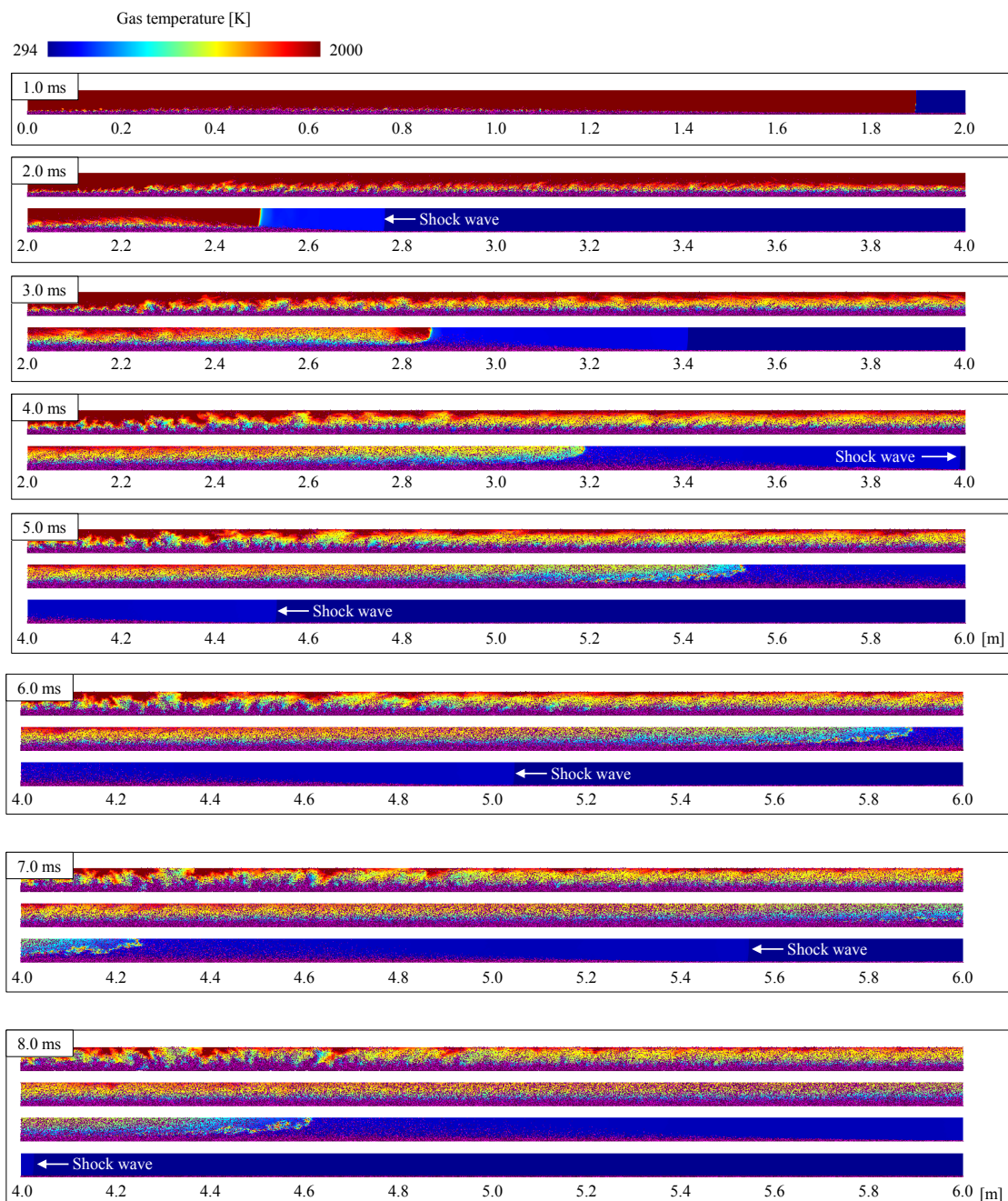


図 4 二次元解析による温度分布および粒子分布の時間発展

度差より，揮発開始後の気相成分には CH₄ 気体が大部分を占めることになる．同様に気相と炭塵粒子の比熱差より，2000 K の既燃ガスに囲まれている炭塵粒子であっても 1000 K 程度までしか上昇しない．従って，揮発によって比較的低温の CH₄ ガスによりチャンネル内が占められることで，気相温度が 1000-1500 K ほど低下する．

3-5 ms にかけて，接触不連続面後方の気相温度が徐々に 2000 K から 1000 K まで低下していく．これは，初期の予混合領域で形成された燃焼

波による既燃ガスが揮発した CH₄ に置換されていくためである．先行する衝撃波による粉塵巻き上げ現象により，堆積炭塵は接触不連続面の前方で浮遊する．ここで，接触不連続面後方の気体は 2000 K の高温であるため熱輸送によって浮遊炭塵は加熱され揮発を始め，チャンネル内気相を CH₄ が占める割合が増加していく．

並列モデルの実装とベクトルコンピュータ SX-ACE によるベクトル計算によって，20 m の計算領域を用いた堆積炭塵爆発を計算することが出来

た。また、解析結果より燃焼波の発達機構や定常伝播時の燃焼波構造を捉えることができた。従って、研究目的として挙げた堆積炭塵爆発を模擬するための数値モデルの構築については成果が得られたと考えている。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

6.1. 現状の進捗状況

本課題研究では、本年度の目的として以下の二点を設定していた。

- 先行研究による実験との比較により、大規模スケールで現象を再現する数値モデルを構築する。
- 堆積炭塵爆発を解析する CFD-DEM コードの並列効率を改善し、大規模並列計算を可能とする。

先述のように、二次元解析では数値モデルの構築を完了したと考えている。また、空間分割方向を一次元的に行うとの制限の下ではあるが、並列効率を向上させスーパーコンピュータでの解析が行えるようになった。しかしながら、計算時間の観点からより多くのノードによる解析を行う必要がある。そのためには、さらなる並列効率の向上が必要であると考えている。

6.2. 今後の展望

二次元解析での数値モデル構築が完了したことから、三次元解析への拡張を行った。三次元解析の場合、空間分割方向を一次元的に行うのみでは分割数が足りずに計算時間が極めて大きくなってしまふ。従って、多次元的に分割を行った際でも並列効率が低下しないモデルを構築する必要がある。現状では、三次元解析用プログラムの作成は完了しており、並列モデルの再検討・改善を行いながら解析をすすめている。なお、粉塵の巻き上げ問題に対しては三次元解析は可能となり、大規模スケールにおける解析が大きく進んだと考えている。しかしながら、燃焼を含む炭塵爆発解析へ

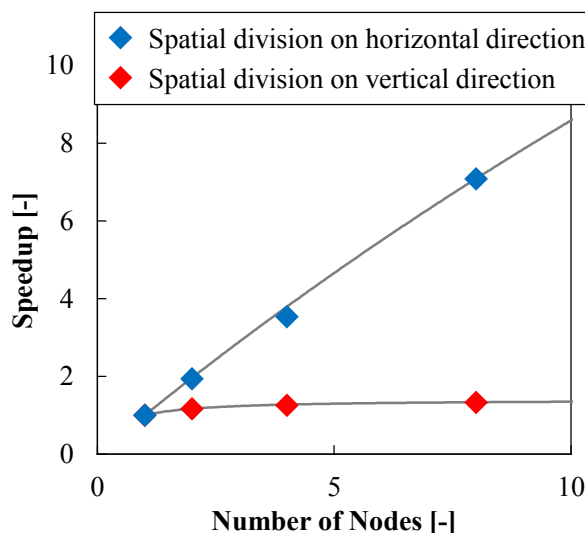


図 5 空間分割の方向と計算速度加速率

向けては、その演算負荷の大きさから、今なお問題が残されている。

図 5 に三次元解析における空間分割の方向による計算速度加速率の比較を示す。並列モデルより当然であるが、空間分割の方向を堆積粒子に対して垂直にした場合、まったく計算が加速されない。従って、並列モデルの改善が必要である。

現状の空間分割法の利点は、気体-粒子間の物理量交換において通信を必要としない点である。気体-粒子間の中で通信が必要となるモデルを採用すると、計算領域全域で毎ステップの通信が必要となるため、通信時間による計算時間増大によって計算が加速されないと考えている。従って、基本的には計算格子と近傍粒子が同一ノードに乗る形での並列モデルを維持したまま、並列効率の向上を行いたい。その手法として、空間分割をサイクリックに行うプログラムを構築中である。

三次元解析が十分行える程度の並列化が達成できた場合には、三次元コードを用いて炭塵爆発問題の解析を行い、より詳細な燃焼波構造を得たいと考えている。

7. 研究成果リスト

(1) 学術論文

- Sugiyama, Y., Ando, H., Shimura, K., and Matsuo, A., Numerical investigation of the interaction between a shock wave and a particle cloud curtain using a CFD-DEM model, Shock Waves, Volume 29, Issue 4, pp 499-510, 2019
- Shimura, K., and Matsuo, A., Using an extended CFD-DEM for the two-dimensional simulation of shock-induced layered coal-dust combustion in a narrow channel, Proceedings of The Combustion Institute, Vol.37, pp. 3677-3684, 2019
- Shimura, K., and Matsuo, A., Two-dimensional CFD-DEM simulation of vertical shock wave-induced dust lifting processes, Shock Waves, Volume 28, Issue 6, pp.1285-1297, 2018

(2) 国際会議プロシーディングス 該当なし

(3) 国際会議発表

- Kasahara, H., and Matsuo, A., The Effect of Acceleration and Exit Velocity on Hypersonic Projectiles Launched by a Ground-based Railgun, AIAA Science and Technology Forum and Exposition (AIAA SciTech 2019), San Diego, USA, January 7-11 2019
- Shimura, K., and Matsuo, A., Numerical simulation of layered coal-dust explosions behind propagating shock wave, 12th International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions (ISHPMIE), Kansas City, USA, August 12 - 17, 2018
- Shimura, K., and Matsuo, A., Using an extended CFD- DEM approach for the two-dimensional simulation of shock-induced

layered coal dust combustion in a narrow channel, 37th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMBUSTION, Dublin, Ireland, July 29- August 3, 2018

- Kasahara, H., and Matsuo, A., The Effect of Exit Velocity and Material on the Sabot Separation in Super-Hypersonic Regime, AIAA Aviation and Aeronautics Forum and Exposition 2018, Atlanta, USA, June 24 - 29, 2018
- Kimura, A., and Matsuo, A., Numerical Investigation of the Gas-particle Flow in the Shock tube Using Discrete Particle and Continuum Model, AIAA Aviation and Aeronautics Forum and Exposition 2018, Atlanta, USA, June 24 - 29, 2018

(4) 国内会議発表

- 志村啓, 松尾亜紀子, 衝撃波による堆積粉塵巻き上げ現象における粒子径の影響に関する数値解析, 平成 30 年度衝撃波シンポジウム, 横浜, 2019 年 3 月
- 木村謙仁, 松尾亜紀子, 衝撃波-粒子群の干渉現象に関する Two-Fluid Model および CFD-DEM の比較検討, 第 32 回数値流体力学シンポジウム, 東京, 2018 年 12 月
- 志村啓, 松尾亜紀子, 流体の圧縮性を考慮した CFD-DEM による衝撃波-堆積粒子群干渉現象に関する解析, 第 32 回数値流体力学シンポジウム, 東京, 2018 年 12 月
- 笠原弘貴, 松尾亜紀子, 極超音速飛しょう体におけるサボ分離挙動に関する数値解析, 平成 30 年度弾道学研究会研究発表会, 東京, 2018 年 11 月
- 志村啓, 岡田佳祐, 土井彰, 田中互, 松尾亜紀子, 水面と砂面の交わる汀線部付近における水中爆風衝撃波の挙動に関する数値解析, 平成 30 年度火薬学会秋季研究発表会, 倉敷, 2018 年 11 月

- 志村 啓, 松尾 亜紀子, 保前 友高, 杉山 勇太, 直管底面に配置された粒子による爆風衝撃波減衰効果に対する数値的検討, 日本機械学会 熱工学コンファレンス 2018, 富山, 2018 年 10 月
- 笠原弘貴, 松尾亜紀子, 地上加速型レールガンによる極超音速飛翔体の過渡弾道数値解析, 第 50 回流体力学講演会, 宮崎, 2018 年 7 月
- 志村啓, 松尾亜紀子, 保前友高, 杉山勇太, 管内を伝播する爆風と堆積粒子の干渉による低減効果に関する数値解析, 火薬学会 2018 年度春季研究発表会, 東京, 2018 年 5 月

(5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)

該当なし