

令和 4 年 5 月 27 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01387

研究課題名（和文）多分散系微粉体がもたらす爆発被害：シミュレーションが解き明かす炭塵燃焼と安全評価

研究課題名（英文）Explosion Damage Caused by Polydisperse Fine Powders: Simulation Reveals Coal Dust Combustion and Safety Assessment

研究代表者

松尾 亜紀子 (Akiko, Matsuo)

慶應義塾大学・理工学部（矢上）・教授

研究者番号：70276418

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 9,800,000円

研究成果の概要（和文）：数値流体力学と離散要素法の組み合わせによる反応性粒子による圧縮性粒子流れに対する解析手法を新たに構築し、衝撃波による堆積粒子分散現象の関わる問題に対する粒子挙動を調べた。対象とする問題に対して従来用いられていた二流体モデルに基づく解析手法では捉えることの出来ない、粒子希薄領域での粒子挙動追跡を目的として新規解析モデルを構築した。また、衝撃波によって誘起される堆積炭塵燃焼に対する数値解析を行い、実験値との比較により本手法の多分散系燃焼問題に対する妥当性を示した。また、定常伝播時の燃焼波構造について解析結果から明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

21世紀に至り、安全技術の進歩にも関わらず粉塵をエネルギー源とする爆発事故が世界および日本において増加傾向にあり、粉塵爆発は粒子を取り扱う産業において常に発生する可能性を有している。粉塵爆発発生には粒子が空気中に浮遊して十分に分散した状態が必要であることから、空気中に分散した状態の粒子群中で引き起こされる粉塵爆発に関して多くの成果が報告されているが、堆積した粉塵（堆積粉塵）の巻き上げ過程を含んだ粉塵爆発に対する研究は少ない。堆積粉塵燃焼は自着火することが無いため、安全対策として必要となる予防技術としては、一次爆発から堆積粉塵燃焼へ遷移過程の解明と爆発へ至る条件の解明が必要である。

研究成果の概要（英文）：A new analytical method for compressible particle flow with reactive particles was developed by combining numerical fluid dynamics and the discrete element method, and particle behavior was investigated for a problem involving the dispersion of deposited particles due to shock waves. A new analytical model was developed to track the particle behavior in the particle-thin region, which cannot be captured by the conventional two-fluid model based analytical method for the target problem. Numerical analysis of shock wave-induced combustion of sedimentary coal dust was also performed, and the validity of this method for polydisperse combustion problems was demonstrated through comparison with experimental data. The structure of the combustion wave during steady-state propagation was also clarified from the analytical results.

研究分野：圧縮性流体力学，燃焼工学，航空宇宙工学

キーワード：爆発 固気混相流 数値解析 燃焼 安全評価

## 1. 研究開始当初の背景

21世紀に至り、安全技術の進歩にも関わらず粉塵をエネルギー源とする爆発事故が世界および日本において増加傾向にある。粉塵爆発は  $\mu\text{m}$  オーダーの粒子を取り扱う産業において常に発生する可能性を有しているが、粉塵爆発が発生するためには粒子が空気中に浮遊して十分に分散した状態である必要がある。通常、粒子は重力によって堆積するために粉塵爆発が発生する可能性は低いですが、他の要因によって堆積粉塵の周囲で一次爆発が生じた場合、爆風によって粒子が巻き上げられることで粉塵爆発が生じる。粉塵爆発に関する研究において、空気中に分散した状態の粒子群中で引き起こされる粉塵爆発に関して多くの成果が報告されているが、堆積した粉塵(堆積粉塵)の巻き上げ過程を含んだ粉塵爆発に対する研究は少ない。実験による先行研究では一次爆発によって発生した堆積粉塵上を伝播する衝撃波に支持される燃焼波は 200-800 m/s の速度を持ち、300-500 kPa の圧力が発生することが報告されているが、実験による更なる現象解明は限界に達している。数値解析による研究報告では、燃焼によって最大で 1 MPa の圧力が発生するとともに燃焼波伝播速度が 1000 m/s に達しデトネーション波の構造が現れたとの報告もあるが、粉塵爆発発生への解明には至っていない。堆積粉塵燃焼は自着火することが無いため、安全対策として必要となる予防技術としては、一次爆発から堆積粉塵燃焼へ遷移過程の解明と爆発へ至る条件の解明が必要であるが、その点について未だ未解明である。

## 2. 研究の目的

本研究では、粉塵爆発全般に対する知見を深める端緒として堆積炭塵燃焼に焦点を当て、その爆発発生機構を数値解析によって解明することを目的とする。対象とする発生機構を「一次爆発から堆積炭塵燃焼へ遷移する粉塵爆発」とし、その過程の解明と爆発へ至る条件を明らかにするものである。

## 3. 研究の方法

堆積炭塵燃焼の各プロセス(堆積炭塵巻き上げ、炭塵燃焼)のために新規に解析コードを構築する。数値解析は各プロセスに応じて開発した、二次元および三次元の固気二相流化学反応解析コードを用いることで実行した。以下の3つの段階に沿って実施し、4. 研究成果にその成果の詳細を記載する。

- (1) 現象再現のための解析コードの新規構築とその検証
- (2) 堆積粒子群上を伝播する衝撃波に対する粒子群の影響を調査するための爆風衝撃波と堆積粉塵群の干渉現象に対する数値解析
- (3) 衝撃波によって誘起される堆積炭塵燃焼に対する数値解析

## 4. 研究成果

- (1) 数値流体力学と離散要素法の組み合わせによる反応性粒子による圧縮性粒子流れに対する解析手法を構築し、流体の圧縮性を考慮する必要のある高速流中において粒子間衝突が粒子挙動を支配する圧縮性粒子流れに対する数値解析を行い、衝撃波による堆積粒子分散現象の関わる問題に対する粒子挙動を調べた。対象とする問題に対して従来用いられていた

二流体モデルに基づく解析手法では捉えることの出来ない，粒子希薄領域での粒子挙動追跡を目的として新規解析モデルを構築した．粒子群挙動に対して粒子間接触が支配的であり粒子変形を無視できるとの仮定のもと，気相に対しては粒子の非圧縮を仮定して流れ場を体積平均した支配方程式を採用し，粒子挙動追跡には粒子間衝突を離散要素法によってモデル化した粒子追跡法を導入した．また，粒子と気相の相間作用として流体抵抗力，マグヌス力，圧力勾配力，対流熱伝達，熱輻射を考慮した．また，流体の対流，化学反応，粒子挙動の解析を時間分離解法により連成した．

非反応粒子における垂直衝撃波と堆積粉塵群の干渉現象に対する数値解析を行い，粒子群挙動に関する先行研究の実験値との比較より計算手法の妥当性を検討した．本解析結果は粒子分散挙動について実験結果とよく一致した．また，粒子群分散過程に対して支配的な力を検討した．粒子間衝突力が粒子分散を開始させていること，粒子飛翔後の粒子挙動に対しても重要であることを示した．マグヌス力の影響は粒子飛翔開始直後の粒子上昇に対して支配的であるが，粒子群上縁部に位置する粒子挙動に対しては限定的であり粒子間衝突力が支配的であった．

- (2) 堆積粒子群上を伝播する衝撃波に対する粒子群の影響を調査するため，爆風衝撃波と堆積粉塵群の干渉現象に対する数値解析を行った．結果より，堆積粒子群は衝撃波減衰効果を有することを示した．粒子による減衰効果としては，気相-粒子間の熱輸送によるエネルギー吸収および相間作用力による衝撃波湾曲効果が存在した．湾曲した衝撃波を支持するためのエネルギーは垂直衝撃波より増加するため，相間作用力によって衝撃波が湾曲させられることにより衝撃波は弱まる．
- (3) 衝撃波によって誘起される堆積炭塵燃焼に対する数値解析を行い，実験値との比較により本手法の多分散系燃焼問題に対する妥当性を検討した．また，定常伝播時の燃焼波構造について検討した．燃焼波構造は拡散火炎的であり，炭塵の揮発に伴う圧力上昇によって誘起された流体の移流によって火炎が超音速で移動することを示した．燃焼によって生成される圧力波によって気相流速が増大するため，粒子に働くマグヌス力が増大する．結果，粒子分散高さは非反応粒子よりも高くなった．

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5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 Nagase Yuri, Sugiyama Yuta, Kubota Shiro, Saburi Tei, Matsuo Akiko	4. 巻 62
2. 論文標題 Prediction model of the flow properties inside a tube during hydrogen leakage	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Loss Prevention in the Process Industries	6. 最初と最後の頁 103955 ~ 103955
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jlp.2019.103955	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Shimura Kei, Matsuo Akiko	4. 巻 37
2. 論文標題 Using an extended CFD?DEM for the two-dimensional simulation of shock-induced layered coal-dust combustion in a narrow channel	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the Combustion Institute	6. 最初と最後の頁 3677 ~ 3684
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.proci.2018.07.066	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Sugiyama Y., Ando H., Shimura K., Matsuo A.	4. 巻 29
2. 論文標題 Numerical investigation of the interaction between a shock wave and a particle cloud curtain using a CFD?DEM model	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Shock Waves	6. 最初と最後の頁 499 ~ 510
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00193-018-0878-1	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Shimura Kei, Matsuo Akiko	4. 巻 37
2. 論文標題 Using an extended CFD?DEM for the two-dimensional simulation of shock-induced layered coal-dust combustion in a narrow channel	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the Combustion Institute	6. 最初と最後の頁 3677 ~ 3684
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.proci.2018.07.066	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Shibue Kakeru, Sugiyama Yuta, Matsuo Akiko	4. 巻 160
2. 論文標題 Numerical study of the effect on blast-wave mitigation of the quasi-steady drag force from a layer of water droplets sprayed into a confined geometry	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Process Safety and Environmental Protection	6. 最初と最後の頁 491 ~ 501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.psep.2022.02.038	査読の有無 有
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15件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 洪江翔, 杉山勇太, 松尾亜紀子
2. 発表標題 衝撃波管内に散布した水液滴と衝撃波の干渉現象に関する数値解析
3. 学会等名 2019年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shimura, K., and Matsuo, A.
2. 発表標題 Numerical simulation of layered coal-dust explosions behind propagating shock wave
3. 学会等名 12th International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions (ISHPMIE) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shimura, K., and Matsuo, A.
2. 発表標題 Using an extended CFD- DEM approach for the two- dimensional simulation of shock-induced layered coal dust combustion in a narrow channel
3. 学会等名 37th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMBUSTION (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 志村啓, 松尾亜紀子
2. 発表標題 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
3. 学会等名 平成30年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 志村啓, 松尾亜紀子
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第32回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 志村啓, 岡田佳祐, 土井彰, 田中互, 松尾亜紀子
2. 発表標題 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
3. 学会等名 平成30年度火薬学会秋季研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 志村 啓, 松尾 亜紀子, 保前 友高, 杉山 勇太
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本機械学会 熱工学コンファレンス2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 志村啓, 松尾亜紀子, 保前友高, 杉山勇太
2. 発表標題 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
3. 学会等名 火薬学会2018年度春季研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shibue, K., Sugiyama, Y., and Matsuo, A.
2. 発表標題 Numerical Analysis on the Mechanism of Blast Mitigation by Water
3. 学会等名 The 9th International Conference on Hydrogen Safety (ICHS 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shibue, K., Sugiyama, Y., and Matsuo, A.
2. 発表標題 Numerical analysis of the effect of water droplets layer location on the blast mitigation
3. 学会等名 The 7th International Symposium on Energetic Materials and their Applications (ISEM2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 洪江翔, 杉山勇太, 松尾亜紀子
2. 発表標題 衝撃波管内に散布した水液滴による爆風圧低減機構に関する数値解析
3. 学会等名 火薬学会2020年度春季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 洪江翔, 杉山勇太, 松尾亜紀子
2. 発表標題 衝撃波管内に散布した水液滴による爆風低減メカニズムに関する数値解析
3. 学会等名 火薬学会2020年度秋季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 洪江 翔, 杉山 勇太, 松尾 亜紀子
2. 発表標題 衝撃波管内に散布した水液滴による爆風圧分布の正規化に関する数値解析
3. 学会等名 火薬学会2021年度春季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 洪江 翔, 杉山 勇太, 松尾 亜紀子
2. 発表標題 管内を伝播する爆風に対する水液滴層の抗力による爆風低減効果
3. 学会等名 日本機械学会 熱工学コンファレンス2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 洪江 翔, 杉山 勇太, 松尾 亜紀子
2. 発表標題 管内を伝播する爆風に対する水液滴層の位置および数による爆風低減効果
3. 学会等名 2021年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2022年



〔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
---------	---------