

粉塵爆発における火炎伝播メカニズムに関する研究の現状

金佑勁（広島大）、安樂敏志（広島大・学）、茂木俊夫（東大）、桑名一徳（山形大）、遠藤琢磨（広島大）、土橋律（東大）、三上真人（山口大）、石川毅彦（JAXA）

Current status of flame propagation mechanisms in dust explosions

Wookyung Kim*, Anraku Satoshi, Toshio Mogi, Kazunori Kuwana, Takuma Endo, Ritsu Dobashi, Masato Mikami, Takehiko Ishikawa

*Hiroshima Univ., Higashihiroshima, Hiroshima 739-8527

E-Mail: kimwk@hiroshima-u.ac.jp

Abstract: The present front-loading research investigated that the combustion characteristics and flame propagation mechanism of dust explosions for lunar and planetary exploration, and planet residence. In order to decide the experimental conditions for microgravity experiments, the flammable limits of various powders and the influences on the particle size on the characteristics and flame speed in a gravitational field were examined. The experimental equipment under microgravity conditions consisted of a powder ejector system, combustion tube, flame arrestor and high speed camera was designed. The flame propagation of dust explosions under microgravity conditions was numerically investigated by using the simplified model of heat conduction equation.

Key words; combustion, flame propagation, dust explosion

1. はじめに

通常重力場において粉塵爆発の燃焼機構の複雑さと燃焼実験の困難さなど様々な問題で粉塵爆発の基礎燃焼特性や火炎伝播機構は未だに解明されていない。さらに、宇宙・惑星環境では可燃性粉体がまき散らされると、沈降しないため、粉塵爆発の危険が継続するため、粉塵爆発のリスクが大きくなるが、宇宙・惑星環境での粉塵爆発事故防止・被害軽減対策は未だに検討されている。これらの課題を克服し、宇宙・惑星環境で粉塵爆発に対する火災安全プロトコルを構築するためには、微小重力場を用いた実験が極めて有効である。本研究の目的は、粉塵爆発の燃焼特性と火炎伝播機構の解明であり、本フロントローディング研究においては、月惑星探査・宇宙惑星居住を実現するため、微小重力環境下での実験を実施して、小規模またはきぼう利用実験の提案に必要な条件を検討する。本研究では下記の3つのタスクを設定し、並列で同時に実施している。

- ① **Task 1（地上実験）**：粉塵爆発の燃焼特性と火炎伝播機構の解明を目指し、具体的には、爆発限界、粉の種類（金属粉体、有機粉体）、粉の粒径が火炎伝播に及ぼす影響を明らかにする。
- ② **Task 2（微小重力実験）**：微小重力実験を用いて微小重力における粉塵爆発の燃焼特性と火炎伝播機構を解明する。
- ③ **Task 3（理論解析・数値解析）**：粉塵爆発の火炎伝播機構の理論を構築し、簡略化解析モデルを開発する。

今年度のTask 1（地上実験）では、粉塵爆発の燃焼特性と火炎伝播機構の解明を目指し、具体的には、爆発限界、粉の種類、粉の粒径が火炎伝播に及ぼす影響を明らかにし、微小重力実験に必要な条件を検討した。Task 2（微小重力実験）では、2020年の微小重力実験に向けて微小重力実験用のエジェクター式粉体分散装置を開発し、全体の実験装置を設計した。Task 3（理論解析・数値解析）では、熱伝導方程式を用いて、燃焼熱が瞬時に放出される点熱源としてモデル化し、微小重力場での粉塵爆発の燃焼特性と火炎伝播機構を数値解析的に検討した。

2. 成果と課題

Task 1（地上実験）では、JIS Z 8818に基づいたハルトマン型吹き上げ装置を用いてアルミニウムと有機粉体であるアミノ酸粉体の爆発下限濃度（MEC）を実験的に調べた。平均粒径がMECに及ぼす影響をFig. 1に示し、平均粒径が小さくなるほどMECの値が小さくなり、粉塵爆発危険性が増加する^[1,2]。しかし、PMMAと石炭粉体の場合は粒径が小さくなると凝集によりMECの値が大きくなるのがわかる。また、アルミニウムと鉄より分枝鎖アミノ酸粉体は平均粒径が大きくなっても、MECの値が変わらないため、粉塵爆発性の危険性が高いものであった。しかし、通常重力場実験では、実験容器内の不均一な流れ場が粉塵爆発の物性値測定に影響を与えるため、粉塵の混合気固有値を得ることが困難であり、また

再現性のある実験を行うことは難しい状況であった。微小重力場を用いた実験が極めて有効であると考えられる。Task 2 (微小重力実験) では、航空機実験を実施するために微小重力実験用のエジェクター式粉体分散装置を開発し、全体の実験装置を設計した。Fig. 2 に設計した微小重力実験装置の図を示す。燃焼器 (体積 0.45 L) は透明ガラス円筒容器であり、粉塵爆発時の火炎伝播様子を高速カメラで撮影する。また、粉塵爆発の際に、内圧の増加により脆弱部が破裂し火炎が噴出するが、フレームアレスター (逆火防止装置) で火炎伝播を抑える設計になっており、航空機実験を安全に実施できると考えられる。フレームアレスターのサイズについては今後検討する予定である。

Task 3 (理論解析・数値解析) では、簡略化解析モデルの開発を目指し、熱伝導方程式を用いて流れの影響を排除して粒径や粉塵濃度が火炎伝播に及ぼす影響が評価できる 3 次元シミュレーションを構築した。Fig. 2 にアルミニウム粉塵爆発における火炎伝播様子を示している。粒径が火炎伝播に及ぼす影響が確認された。

3. 今後の予定

来年度では微小重力場を用いた実験が極めて有効であり、微小重力利用 (航空機実験) により粉塵爆発の爆発限界と火炎伝播機構の解明を目指す。特に、爆発と分散空間の依存性、長時間の微小重力場など小規模またはきぼう利用実験の提案に必要な条件を検討する。来年度では下記の課題を実施する。

- Task 1 (地上実験) では、粉体の種類を増やして爆発限界を取得する。また、粒径分布が爆発限界に及ぼす影響、粉塵爆発の火炎伝播速度の流速依存性を明らかにする。

- Task 2 (微小重力実験) では、まず航空機実験が安全に実施できるように、通常重力場で可燃性ガスを用いて実験装置の安全性の検討を行う。微小重力実験装置を完成して、航空機実験を実施し、粒径、粉体濃度が爆発限界及び火炎伝播に及び影響を明らかにする。

- Task 3 (理論解析・数値解析) では、簡略化解析モデルに粒子の熱容量の影響を組み込み、数値解析を行う。粒径、粉塵濃度、粒径分布が爆発限界に及び影響、重力が火炎伝播に及び影響を数値解析的に調べる。

参考文献

- 1) 一瀬慶人, 他; 粒径及び粒子凝集が粉じん爆発時の火炎伝ば挙動に及ぼす影響, 燃焼シンポジウム (第 57 回) P125, (2019).
- 2) Cashdollar, K. L. and Zlochower, I. A.; Explosion temperatures and pressures of metals and other

elemental dust clouds, *J. Loss Prev. Process Ind.* 20 (2007) 337-348.

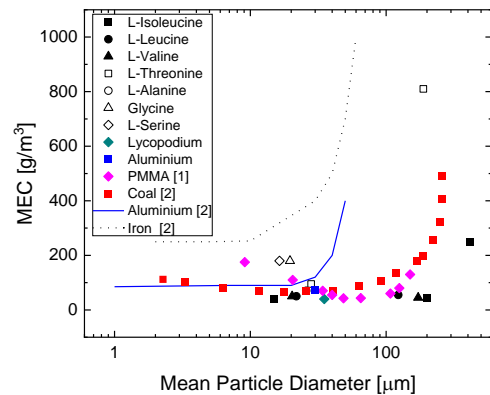


Fig.1 MEC as a function of mean particle diameter

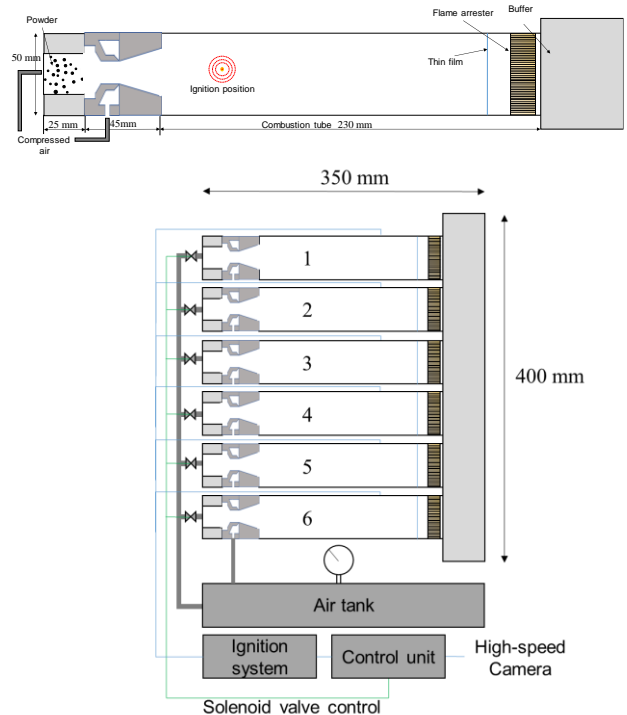


Fig.2 Microgravity experimental equipment

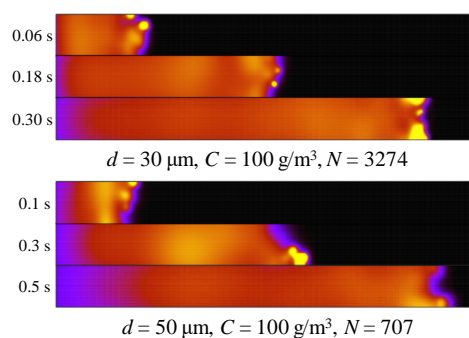


Fig. 3 Effect of particle size on the flame propagation behaviors of aluminum