

微小重力環境における粉塵濃度に対する火炎伝播速度の依存性

金佑勁（広島大），佐伯琳々（広島大・院），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）

Dependence of the flame propagation speed on dust concentration in microgravity environment

Wookyung Kim*, Rinrin Saeki, 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 combustion characteristics and flame propagation mechanisms in dust explosions have not been elucidated owing to various problems such as complexity of combustion mechanism of dust explosions and difficulty in combustion experiments in a gravitational field. Furthermore, the prevention and mitigation of dust explosions in the space environment have not yet been considered. In order to overcome these issues and to establish fire safety protocols for dust explosions, microgravity experiments are extremely effective. To investigate the dependence of flame speed on dust concentration, we developed a high-speed observation system that enabled detailed observation of flame propagation and dust concentration. The present front-loading research investigates the dependence of flame propagation mechanism on dust concentration during dust explosions by conducting microgravity experiments for lunar and planetary exploration, and planet residence. The aims of this work are the risk assessment of dust explosion and development of an energy circulation system that utilizes aluminum powder as fuel.

Key words; Dust explosion, Microgravity, Flame propagation, Aluminum

1. はじめに

長時間有人ミッションにおいて火災爆発安全性の確保は最優先事項の一つであり、粉塵爆発現象に対して重力が本質的な影響を与えることから、微小重力環境におけるリスク評価に資するデータが必要である。本研究の目標は安全管理上重要な爆発下限濃度に関するデータを取得し、燃焼科学に基づいた宇宙惑星居住における粉塵爆発事故防止・被害軽減対策立案を構築することである。爆発事故の報告例が多く、燃焼が激しいことから被害も大きいため、本研究では、アルミニウム粉体の燃焼限界の解明を目指している。アルミニウム粉塵爆発における爆発下限濃度(燃焼限界)を正確に知るために実施すべき科学的課題は粒子間距離に対する火炎伝播速度の依存性であり、それを実現するために平均粒子間距離の可視化、燃焼限界と火炎伝播速度を同時に測定可能な装置が必要である。

本研究の目的は、アルミニウム粉体濃度に対する火炎伝播速度依存性の解明であり、本フロントローディング研究においては、下記の3つのタスクを実施した。

① Task 1: 平均粒子間距離と火炎伝播速度を同時に測定可能な装置を開発し、落下塔実験用装置構築

② Task 2: 微小重力実験実施による粉体濃度に対する火炎伝播速度依存性の検討

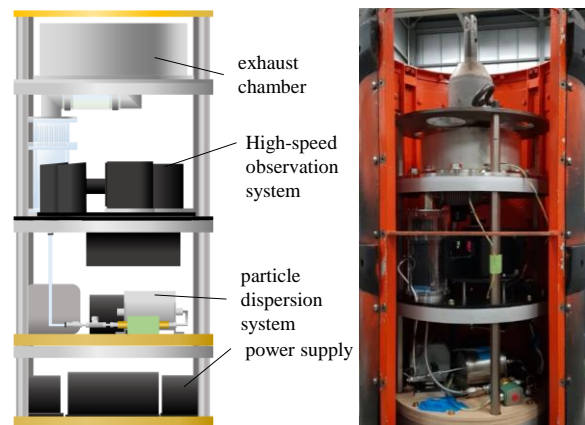


Fig.1 Experimental apparatus for drop tower experiment.

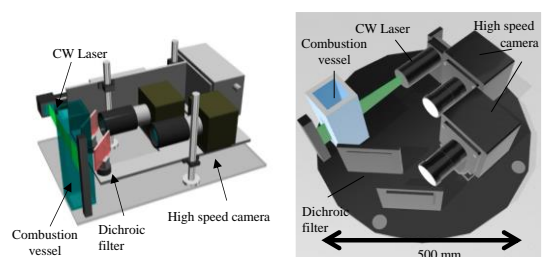


Fig.2 High-speed observation systems in parabolic flight and drop tower experiments.

③ Task 3:理論解析及び数値解析によるアルミニウム粉体の燃焼限界の予測、火炎構造の検討

2. 成果と課題

① Task 1:設計した航空機実験用の仕様から落下塔実験用装置に変更し、電源、制御、点火、分散、撮影、排気システムなどに構成された装置を構築した(Fig.1)。可視化システム(Fig.2)は航空機実験用と落下塔実験用装置で同じ構成であり、粉体分散装置から分散された粒子移動速度、粒子数密度を PIV 計測により撮影した。20 μm アルミニウム粉体を用いて落下塔実験を実施し、可視化システム (PIV による粉塵濃度と火炎伝播測定システム) の妥当性が確認できた。

② Task 2:微小重力場におけるランダムにアルミニウム粒子が分散された際の粒子間距離と粒子移動速度の経時変化を Fig.3 に示す。圧縮空気圧で 0.6 秒間粒子を分散している際には粒子移動速度が速く、粒子間距離も大きく変化する。その後、粒子移動速度が時間とともに減少し、粒子間距離はあまり変化しないことが明らかになり、微小重力環境であれば粉塵爆発における粉塵濃度に対する火炎伝播速度の依存性の解明が可能であることが示された。Fig.4 に示したように、微小重力場における火炎伝播と粒子間距離、速度場変化が同時に測定でき、詳細な火炎伝播挙動と粒子の挙動や速度場変化が火炎伝播に影響を与えることが可視化できた。また、落下塔実験では微小重力時間が短いため、抑えられた速度は燃焼限界付近の速度はあまり変わらないことが確認できた。燃焼限界付近では、観察領域における化学反応速度と流れ場による決まる物理特性時間の競合により決定されるものであり、極めて低速の流れ場まで制御できる環境でなければ、燃焼限界の研究は難しいため、長時間微小重力実験が不可欠である。

③ Task 3:流れの影響を排除して粒子間熱伝導モデルを用いてアルミニウム粉塵爆発における粉塵濃度依存性を評価し、燃焼限界を予測した。Fig.4 にアルミニウム粉体の平均粒子間距離が火炎伝播に及ぼす影響を示す。計算した値は落下塔実験の結果と一致はしないが、火炎速度は平均粒子間距離に依存し、平均粒子間距離が増大すると火炎が伝播しにくくなる傾向が概ね一致した。今回のモデルによる燃焼限界予測結果は約 50 g/m^3 であった。実験データのばらつきの原因として、凝集による見かけ粒子サイズの増加や粒径分布の影響、流れ場など様々なものが考えられ、熱移動、流れ場などを考慮してモデルを拡張する。

3. 今後の予定

今後、航空機実験などより長時間微小重力実験を実施して粉塵濃度に対する火炎伝播速度の依存性を実験で明らかにし、実験に基づいたモデル改良で燃焼限界付近となる条件が割り出されれば宇宙実験で実施すべ

き条件が明確になると考えている。実験値と理論解析結果の比較により燃焼限界を予測し、小規模計画で燃焼限界付近の濃度条件における詳細な火炎構造を解明する。

謝辞

本研究は宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 宇宙科学研究所の宇宙環境利用専門委員会フロンローディング研究助成を受けた。ここに記して謝意を表す。

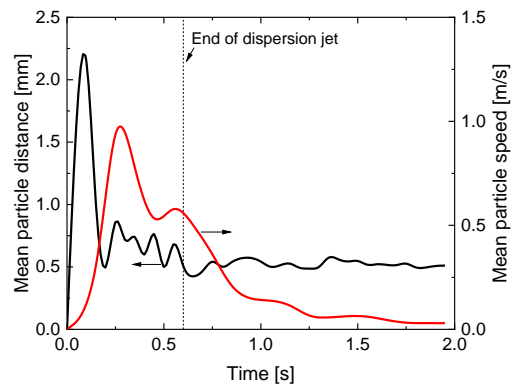


Fig.3 Time histories of mean particle distance and mean particle speed.

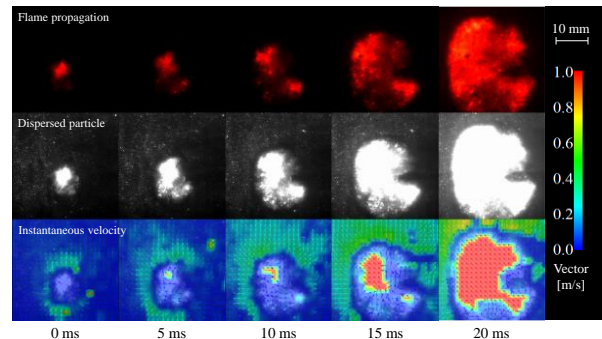


Fig.4 Images of instantaneous velocity, dispersed particles, flame behaviors during dust explosion in microgravity environment.

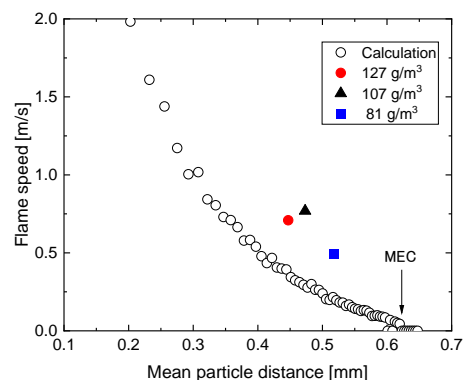


Fig.5 Flame speed as a function of mean particle distance.