

航空機の放物線飛行を利用したアルミニウム粉体燃焼実験

金 佑勁 (広大), 佐伯 琳々 (広大・院), 上野 寧子 (広大・院), 遠藤 琢磨 (広大), 李 敏赫 (東大), 茂木 俊夫 (東大), 土橋 律 (東大), 桑名 一徳 (東京理科大), 矢崎 成俊 (明治大), 三上 真人 (山口大), 石川 毅彦 (JAXA)

Aluminum combustion experiment on board a parabolic flight aircraft

Kim Woogyung*, Rinrin Saeki, Yasuko Ueno, Takuma Endo, Minhyeok Lee, Toshio Mogi, Ritsu Dobashi, Kazunori Kuwana, Shigetoshi Yazaki, Masato Mikami, Takehiko Ishikawa

*Hiroshima Univ., 1-4-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima 739-8527

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

Abstract: Risk assessment of dust explosion accident in space and planetary environment have not been considered. In order to establish fire safety protocols for dust explosions in space and planetary environment, it is necessary to investigate the flame propagation mechanism near flammability limit in the extremely low speed flow field. In the present research, aluminum combustion experiments were conducted in a microgravity environment using parabolic flight of aircraft MU300. The dust concentration, particle speed and aluminum luminous flame were measured by the simultaneous high-speed visualization systems. Results demonstrated that the discrete flame for lean mixtures was observed.

Key words; Dust explosion, Aluminum combustion

1. はじめに

宇宙惑星環境における粉塵爆発の安全プロトコルは未だ検討されていない状況であり、燃焼科学に基づいた宇宙惑星環境における粉塵爆発発生防止・被害軽減対策立案が必要不可欠である。特に、粉塵爆発リスク評価に含まれるパラメータは全て火炎伝播挙動により決まる値であるため、隣接する粉体間の火炎伝播メカニズムを解明することが重要である。火災爆発安全の観点から爆発下限濃度(燃焼下限界)付近の知見が重要であるが、燃焼限界付近の実験では燃焼速度が小さくなるため極低速場において燃焼実験を行うことが必須となる。ここで、重力場では粉塵濃度や雰囲気流れ場を制御することが難しく基礎実験の難しさとして指摘されている¹⁾。本研究では燃焼希薄条件における火炎伝播挙動をターゲットとし、航空機 MU300 の放物線飛行(Diamond Air Service, Inc.)による微小重力環境を約 10 秒間利用することで、低速場におけるアルミニウム粉体の燃焼実験を実施した。昨年度のプロントローディング研究で開発した落下塔用微小重力実験装置をベースに、新たに航空機 MU300 用の微小重力粉塵爆発実験装置が製作された (Fig.1)。本実験装置では実際に粉体や火炎伝播挙動を観察する透明な観察筒の他、燃焼容器や排気チャンバを搭載した。これによりペイロード重量および寸法内に実験機器を収めつつも、放物線飛行で定められた燃焼容器の安全規定を満し安全な燃焼実験を可能にした。また観察筒の上端や下端には燃料粉体や火炎が通過できないよう金属メッシュを組み込み、火炎が伝播する空間を限定している。

本実験装置には 2 台の高速カメラ (Photron FASTCAM Mini AX100) から成る独自の可視化システ

ム (Fig.2) を搭載し、粉塵の粉体速度および粉塵濃度、火炎伝播挙動を同時に観察可能にしている。粉体は、近年事故件数が増加傾向にあり被害も大きいことが報告されているアルミニウムに着目し、メジアン径 22 μm の球形に近い形状の粉末 (Toyo Aluminium K.K.) を使用した。

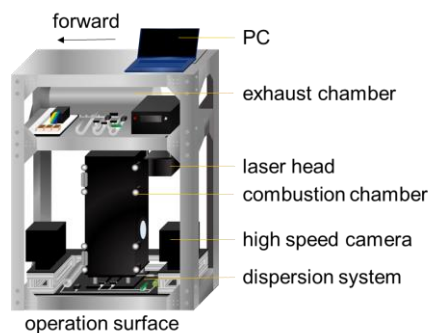


Fig.1 The experimental apparatus for parabolic flight of aircraft MU300.

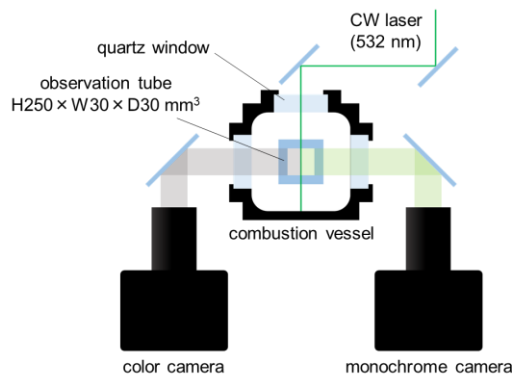


Fig.2 The schematic image of optical diagnostics.

利用専門委員会フロントローディング研究助成を受け実施された。ここに記して謝意を表す。

2. 成果と課題

微小重力実験の開始 ($t = -10$ s) から 2 秒の間気流でアルミニウム粉体を観察筒内に分散し、8 秒間の点火遅れ時間のあと、 $t = 0$ s で 15 kV 高圧トランスの放電により粉塵雲を点火した。観察領域に 5×5 mm の計測領域 ($y=0$ が点火棒位置, top: $65 \leq y \leq 70$ mm, center: $47.5 \leq y \leq 52.5$ mm, bottom: $30 \leq y \leq 35$ mm) を設定し、粉体速度の時間変化を Fig. 3 にプロットした。粉体速度は点火時間の 2 秒前には 1 cm/s 以下となり点火時間まで非常に落ち着いた流れ場になった。また、観察画面角全体の粉塵濃度の時間変化 (Fig.4) では平均値は大きく変化しないものの、エラーバーより、空間中の粉塵濃度は不均一に分布していることが分かる。燃焼実験では火炎先端付近の粉塵濃度を局所的に計測し、各粉塵濃度における $22 \mu\text{m}$ アルミニウム粉体の火炎伝播挙動を比較した (Fig.5)。 $\phi = 1.2$ において火炎は連続的な形状を示したが、希薄な $\phi = 0.14$ では火炎は不連続的な形状を示しいわゆる離散火炎が観察された。この離散火炎は単一粒子の燃焼時間と粒子間の熱拡散時間の比を用いることで説明でき、希薄条件では粒子間の距離が平均的に大きくなり熱拡散時間が大きくなることで火炎伝播モードが変化し離散的な火炎形状を示した。本研究では微小重力環境と低速流れ場における燃焼実験により、離散火炎が観察できたと考えられる。

今後提案する小規模計画に向けた課題としては、実験装置の小型化や粉塵濃度の再現性が挙げられる。観測ロケット実験などでは、燃焼実験の度に観察筒を交換するために複数の観察筒を実験装置に搭載する必要があり、観察筒の個数で実験回数の上限が決まる。また、可視化システムによって実際に浮遊する粉塵濃度を計測するが、実験回数に限りがあるため粉塵濃度の再現性が重要な課題となる。通常重力実験や 2.5 秒落下塔実験を実施しながら、今後も実験装置の改良に取り組む所存である。

3. 今後の予定

欧州側の研究者と協力した日欧共同による観測ロケット実験の提案に向けて、現在準備を進めている。より長時間の微小重力環境を利用し、低速雰囲気中で燃焼限界付近の粉塵濃度に対する火炎伝播速度の依存性を調べる。観測ロケット実験実施に向けて粒子間熱伝導モデルの改良にも取り組み、燃焼限界付近の燃焼挙動の予測を図る。

また、粉体燃焼の基礎研究により、日欧共同で金属粉体燃焼安定化技術開発に取り組み、金属粉体燃焼のエネルギー利用の実現を目指す。

謝辞

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所の宇宙環境

参考文献

- 1) Kim, W., Saeki, R., Ritsu, D., Endo, T., Kuwana, K., Mogi, T., Lee, M., Mikami, M. and Nakamura, Y.; Research on Risk of Dust Explosions in Microgravity for Lunar and Planetary Exploration, Int. J. Microgravity Sci. Appl. 38: 380204 (2021).

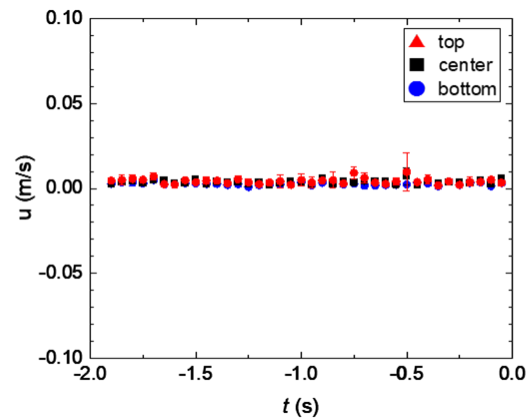


Fig.3 Time histories of particle speed u (m/s) before ignition timing ($t=0$ s).

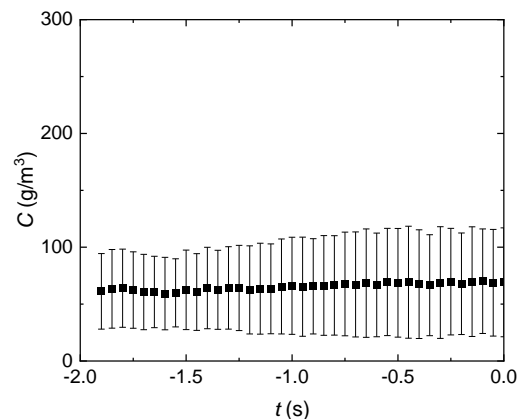


Fig.4 Time histories of dust concentration C (g/m^3) before ignition timing ($t=0$ s).

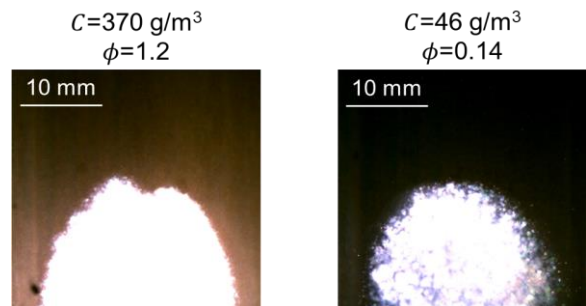


Fig.5 Flame propagation behavior of $22 \mu\text{m}$ aluminum particle in microgravity.