

研究成果報告書

研 究 題 目		アルミニウム粉体燃焼制御による革新的新規クリーンエネルギー創出	実 施 年 度
			2024 年度
代 表 研 究 者	所 属	広島大学大学院先進理工系科学研究科	
	氏 名	金佑勁 印	

1. 研究の目的・背景

本研究は、エネルギー密度が高く、燃焼時に CO₂を排出しないクリーンなエネルギーキャリアとして注目されているアルミニウム (Al) 粉体を用いた新規バーナシステムの開発とその燃焼特性評価を目的とする。特に、近年注目されている「金属燃料エネルギー循環」構想において、Al は地球上および月・火星などの宇宙環境にも豊富に存在することから、地上および宇宙空間の双方で利用可能な次世代燃料として期待されている。

Al 粉体は、粉塵爆発の原因にもなるほど極めて高い反応性を持つが、その反応性を安全かつ安定的に制御し、エネルギーとして活用するためには、着火および火炎安定性に関する詳細な評価が不可欠である。従来の研究では、主に層流条件あるいは高酸素濃度環境下における Al 燃焼の特性に焦点が当てられていたが、実用化を想定したバーナ条件における CO₂のような希釈性・酸化性を兼ね備えた酸化剤との併用は未解明な部分が多く残されている。

本研究では、Al 粉体と空気 (Air) および二酸化炭素 (CO₂) を混合した Al-Air-CO₂燃料系において、CO₂添加がバーナ火炎の着火性および安定性に与える影響を明らかにすることを主目的とした。加えて、安定に火炎が形成された条件下で、火炎の高さおよび形状に基づく火炎表面積を画像解析により定量化し、燃焼速度を算出した。

特に本研究では、CO₂を段階的に添加することで、Al 粉体の火炎形成限界や当量比に対する依存性を整理し、実験的に得られた火炎の可視化画像と粉塵濃度データをもとに、CO₂濃度と火炎安定領域の相関関係を明らかにした。これにより、CO₂を酸化剤として積極的に活用したバーナの安定運転範囲の定量的把握が可能となり、将来的な CO₂資源の有効活用や宇宙での現地資源利用 (ISRU) 技術への展開が期待される。

また、実験ではプロパン-空気予混合火炎による着火法を採用し、CO₂の希釈効果と熱容量の違いが着火挙動や火炎構造に与える影響を詳細に評価した。これにより、金属燃焼に特有の課題である着火遅延や火炎消失に対して、CO₂濃度調整による制御可能性が見出され、今後のバーナ最適設計および安全設計指針の確立に向けた知見が得られた。

本研究は、Al 燃焼に関する基礎的理解を深化させるとともに、CO₂との複合燃焼という視点から実用的な燃焼技術の確立を目指すものである。

2. 研究成果及び考察（申請時の計画に対する達成度合を織込む）

本研究では、当初の研究計画に基づき、Al 粉体と Air および CO₂を混合した混合気を用いた燃焼実験を系統的に実施し、バーナ火炎の着火性、安定性、ならびに燃焼速度の評価を行った。特に、CO₂の酸化剤として性質が Al 粉体の燃焼挙動に与える影響を、可視化画像と定量的データに基づいて明らかにした点が、本研究の大きな成果である。

実験では、CO₂の添加量を段階的に変化させることで、火炎が安定に形成される当量比や粉塵濃度の範囲を把握した（図 1 参照）。

図 1 は CO₂流量と粉塵濃度の関係に基づく燃焼安定領域を示しており、 $\phi = 1.0$ の境界線に対して着火と非着火の分布が整理されている。特に、CO₂流量が一定範囲（6 L/min 以下）であれば火炎が安定に形成される一方、それを超えると不着火、あるいは火炎消失が生じることが示された。この知見は、金属粉体燃焼における希釈効果と熱損失のバランスの重要性を示すとともに、CO₂の適切な利用範囲を指標化する成果である。

さらに、火炎画像を高速カメラにより取得し、平均火炎形状に基づいて火炎表面積を算出した上で、燃焼速度を導出した。測定された燃焼速度は CO₂無添加時と比較して、添加時にわずかな減少を示したが、実用上許容される範囲であり、CO₂の添加によっても火炎の推進力は大きく損なわれないことが確認された。図 2 に示すように、各 CO₂流量において明瞭な火炎形状が形成されており、燃焼の安定性が確認できる。また、Cantera による反応モデルを用いた解析から、火炎温度、火炎構造、主生成物（Al₂O₃）の形成条件を理論的に予測し、実験結果と整合する傾向を確認した。これにより、数値的な補完と実験的知見の融合に成功し、着火性・安定性・反応性を総合的に評価する枠組みが整った。

以上より、申請時に掲げた「CO₂の影響を受けるバーナ火炎の安定性評価と燃焼速度の定量化」という目的は、計画通りに達成されたと評価できる。加えて、CO₂を利用することによる新たな金属燃焼制御の方向性が得られ、学術的意義と将来展望の両面で大きな成果を挙げた。

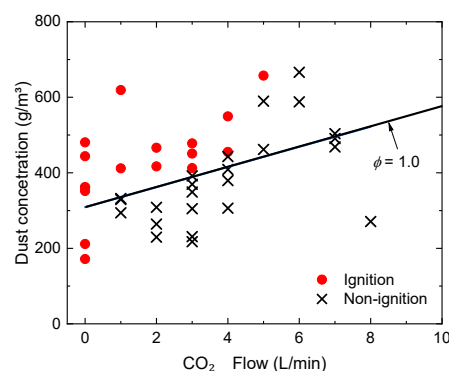


図 1. CO₂流量と粉塵濃度に対する燃焼安定領域

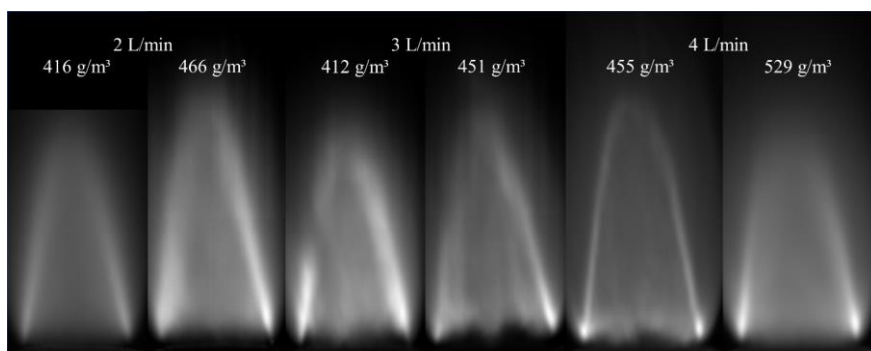


図 2. CO₂流量および粉塵濃度を変化させた際の火炎構造可視化画像

3. 経費の使用状況（申請時の計画に対する実績を記述）

計画では二色温度計・測定波長 0.8-1.1 ミクロンを購入して研究する予定だったが、研究をすすめるうえで優先される備品が防塵・防水型校正用分銅内蔵中量級天びんとロータリーポンプが必要となったため、そちらを優先して購入した。

（金額としては計画と大きく変わっていない）

計画通り学会に参加し、東京出張へ行った。

研究に必要な消耗品も購入し、助成していただいた全額を使いきった。

4. 将来展望（今後の発展性、実用化の見込み等について記述）

本研究で得られた成果は、Al 粉体を燃料とする新しいエネルギー変換技術に対して重要な知見を提供するものであり、特に CO_2 の酸化剤・希釈剤としての活用に関する定量的評価は、今後の金属燃焼制御技術における設計指針として活用可能である。

今後は、実験で得られた着火限界や燃焼安定条件をもとに、より広範な操作条件（流速分布、粒径分布、混合気予熱など）を考慮したバーナ設計の最適化を進めるとともに、燃焼ガス中の NO_x 生成挙動や微粒子排出特性の評価も行う予定である。

また、 CO_2 を反応剤として積極的に取り入れる本システムは、将来的には火星などの CO_2 豊富な大気環境下における宇宙エネルギーシステムへの応用が期待され、JAXA などと連携した実証研究への展開も視野に入れている。産業応用としては、金属粉体を燃料としたマイクロバーナ、可搬型電源、熱源装置への応用が見込まれ、環境負荷低減と資源循環の観点から高い社会的価値が期待される。

5. 成果の発表（学会での発表、学術誌への投稿等を記載。予定を含む）

【国際学会】

- K. Adachi, T. Johzaki, T. Endo, W. Kim, “Development of aluminum-air burner” *International Symposium on Fuels and Energy 2024*, 1-2 July 2024, Hiroshima, Japan

【国内学会】

- アルミニウム粉体の爆発下限濃度に対する二酸化炭素濃度の影響、2025 年度日本火災学会研究発表会、2025 年 5 月 24-25 日、豊橋

【招待講演】

- W. Kim, “Metal-enabled Cycle of Renewable Energy for carbon-free energy”, *UST 2024 Global Mentoring Conference*, 12 July 2024, S. Korea (*Invited*)
- W. Kim, “Exploring Aluminum Dust Combustion: Mechanisms and Applications”, *Special lecture at Harbin Engineering University*, 12-13 August 2024, Harbin, China (*Invited*)

【論文】

- W. Kim, K. Adachi, A. Ueda, “Burning velocity of aluminum-air Flames in a burner and the impact of carbon dioxide addition”, *Fuel*, (2025) submitted.