

令和 6 年 4 月 16 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14379

研究課題名（和文）粉塵爆発における火炎伝播メカニズム解明

研究課題名（英文）Elucidation of flame propagation mechanism in dust explosion

研究代表者

KIM WOOKYUNG (Kim, Wookyung)

広島大学・先進理工系科学研究科（工）・准教授

研究者番号：40781852

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、微小重力場で粒子間の距離と火炎伝播挙動を同時に測定する実験を実施し、アルミニウム粉体の火炎伝播メカニズムを実験的に調べた。微小重力場では通常重力実験における爆発下限濃度以下の濃度でも火炎が伝播することが確認された。さらに、粉塵濃度が低下するほど火炎速度が下がる傾向が得られ、微小重力場におけるアルミニウム粉体濃度に対する火炎速度依存性が明らかになった。また、アルミニウム粉体の爆発下限濃度と最小着火エネルギーの粒径と酸素濃度依存性について実験的に明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

この研究の成果は、粉塵爆発の火炎伝播メカニズムに関する理解を深め、防災対策や安全性確保に重要な知見を提供している。特に、微小重力場を用いた実験により、通常重力下では得られない詳細なデータが得られ、火炎伝播や粒子挙動の特性が明らかになった。これにより、粉塵爆発事故の予防や対策のためのより効果的な手法の開発が可能となり、産業施設や宇宙空間での作業環境の安全性向上に貢献が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, flame propagation mechanism of aluminum powder was experimentally investigated by simultaneously measuring the distance between particles and flame propagation behavior in a microgravity field. It was confirmed that flames propagated in microgravity even at concentrations below the minimum explosible concentration in normal gravity experiments. Furthermore, a tendency that the flame speed decreases with decreasing dust concentration was obtained, and the dependence of flame speed on the aluminum particle concentration in microgravity was clarified. The dependence of the minimum explosible concentration and minimum ignition energy of aluminum powder on particle size and oxygen concentration was also experimentally demonstrated.

研究分野：安全工学

キーワード：粉塵爆発 アルミニウム

## 様式 C-19、F-19-1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

粉塵爆発は火炎伝播を伴う現象であり、火炎伝播機構を明らかにすることは防災の点で重要である。しかし、粉塵爆発の燃焼機構の複雑さや燃焼実験の困難さなど様々な問題のために、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。特に、粉塵爆発では、可燃性粉塵濃度つまり粒子間平均距離によって火炎伝播挙動が決まる。しかし、通常重力場の実験では火炎への浮力の影響や燃料粒子の沈降に加え、粉塵雲の流動状況の影響により、可燃性揮発物のような混合気固有の特性値を粉塵で得ることが極めて困難である。さらに、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、粉塵の混合気に特有な結果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る。また、火炎が浮力の影響を受け、均一に伝播しない。これら諸問題を克服し精密な定量値を得るには、微小重力場実験が極めて有効である。したがって、微小重力場で粒子間の距離と火炎伝播挙動を同時に測定する実験により、粉体濃度と火炎伝播速度を取得し粉体濃度に対する火炎伝播速度の依存性が解明できる。

### 2. 研究の目的

本研究は、微小重力場を活用することにより、粉塵爆発における火炎伝播メカニズムを実験的に解明することを目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究では、アルミニウムは可燃性粉体の中でも粉塵爆発事故が多く、被害が大きいことが報告されており、早急な事故対策が要されるため、アルミニウム粉体を用いて実験を実施した。微小重力場において、粉塵爆発における粒径、酸素濃度が火炎伝播機構に及ぼす影響を定量的に明らかにする。本研究では、電源、制御、点火、分散、撮影、排気システムなどに構成された落下塔実験装置を構築した(図1)。特に、流体に追従する粒子にレーザシートを照射し可視化する粒子画像流速測定法(Particle Image Velocimetry, PIV)を用いて平均粒子間距離と火炎伝播速度を同時に測定した(図2)。

地上実験では JIS 規格に準拠したハルトマン式吹き上げ装置とミキシングタンクを用いて酸素濃度、粒径が爆発下限濃度(MEC)に及ぼす影響を調べた(図3)。さらに、Kühner社のMIKE3を用いて最小着火エネルギー(MIE)の測定を実施した。

### 4. 研究成果

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。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(図4)。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った。点火タイミングで粉体速度は数 cm/s 程度で浮遊するが、微小重力場では粉体が沈降しづらくなり、粉塵爆発のリスクが高まることを示した。微小重力場では通常重力実験における爆発下限濃度以下の濃度でも火炎が伝播することが確認された。つまり、地上では爆発できない濃度でも微小重力環境では爆発することを意味しており、宇宙での安全性確保の検討

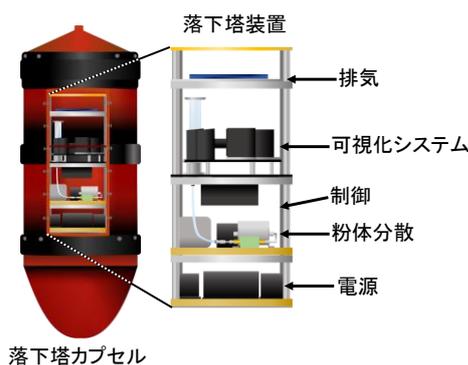


図1. 落下塔実験装置

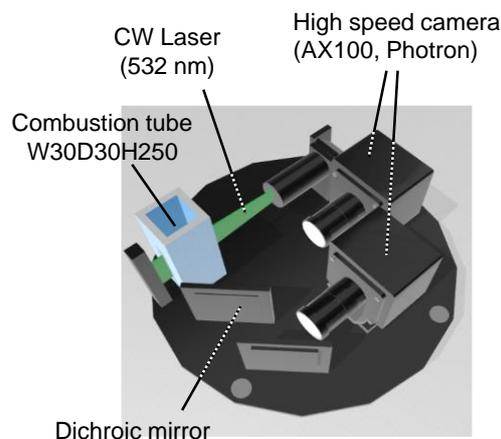


図2. 可視化装置

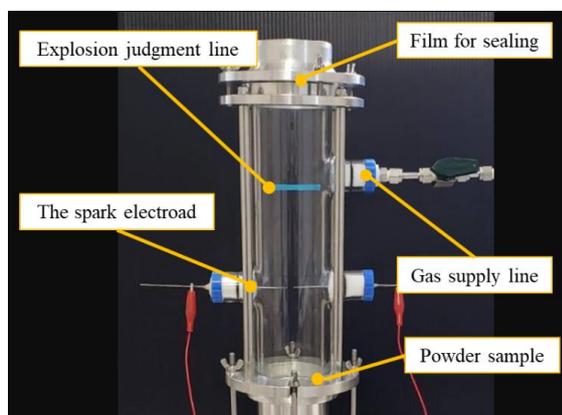


図3. JIS 規格に準拠したハルトマン式吹き上げ装置

の必要性を示した。さらに、粉塵濃度が低下するほど火炎速度が下がる傾向が得られ、微小重力場におけるアルミニウム粉体濃度に対する火炎速度依存性が明らかになった。実験で得られた酸素濃度と粒径を変化させたときの MEC を 図 5 に示す。ここで、粉塵濃度とは、爆発筒に装填された粉末量を爆発筒容積 (約 2 L) で除した値である。酸素濃度のみに着目したとき、どの粒径についても酸素濃度が高くなるにつれて MEC は小さくなる傾向が見られた。その影響は酸素濃度希薄側で顕著にみられ、平均粒径 22  $\mu\text{m}$  の粉体においては、酸素濃度 10-15 vol% の間で MEC は約 2 倍以上変化した。22  $\mu\text{m}$  の粉体では酸素濃度 8vol%, 31 $\mu\text{m}$  と 58  $\mu\text{m}$  の粉体では酸素濃度 10vol% の条件で、どの粉塵濃度においても爆発は確認されなかった。すべての酸素濃度の条件において、粒径が大きくなると、MEC の値は増加する傾向がみられた。またその増加する変化は、酸素濃度が希薄側で顕著にみられた。酸素濃度が変化するとアルミニウム火災にどのような影響を与えるのかを調べるため、アルミニウムの化学反応機構 (12 化学種、12 素反応) を考慮し、Cantera を用いて化学反応解析を行った。当量比 1、初期温度 300 K、初期圧力 1 気圧の条件で、酸素濃度を変化させたときの火炎温度を計算した結果、酸素濃度が高くなると、火炎温度も上昇し、火炎勾配が急になった。すなわち火炎帯が薄くなっている。またその変化は、酸素濃度が低くなっていくにつれて顕著にみられ、酸素濃度 10vol% の条件では、他の条件と比較して火炎温度はより低く、また火炎勾配も緩やかになっている。このことから、火炎伝播がしにくい条件であると考えられる。また、反応速度に対する酸素濃度の影響も調べた。支配的な素反応のうち、R1 ( $\text{Al} + \text{O}_2 = \text{AlO} + \text{O}$ ) の反応速度が非常に大きいことがわかった。酸素濃度の変化に伴う反応速度のピークの値は、酸素濃度が高くなるにつれて大きくなり、特に R1 の変化が大きいことがわかった。R1 はアルミニウムと酸素が直接結びつく反応であるため、酸素濃度変化の影響が大きいと考えられる。

本研究結果と MIKE3 を用いて測定された各研究結果との比較を図 6 に示す。MIE は粒径が小さいもの程小さくなる傾向を示しているが、ナノサイズに近づくにつれ、傾きは緩やかになっていることが分かる。アルミニウム粒子が小さくなると拡散律速領域から反応律速領域になることが知られている。ここでは拡散律速領域 (マイクロサイズ) では粒子直径の 3 乗に依存する MIE が得られ、反応律速領域 (ナノサイズ) では 0.5 乗に依存することが明らかになった。しかし、凝集の影響、ナノサイズのデータが少ないこと、MIKE3 は 1mJ 以下の実験ができないことなど測定に限界があるため、更なる検討が必要である。

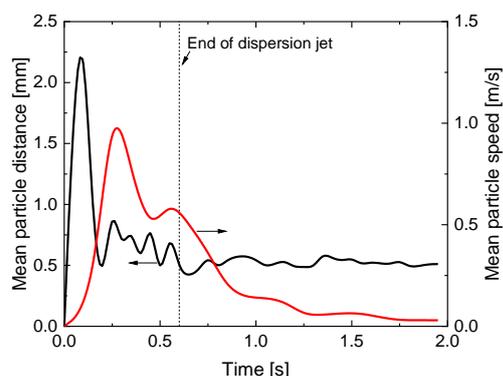


図 4. 粒子間距離と粒子移動速度の経時変化

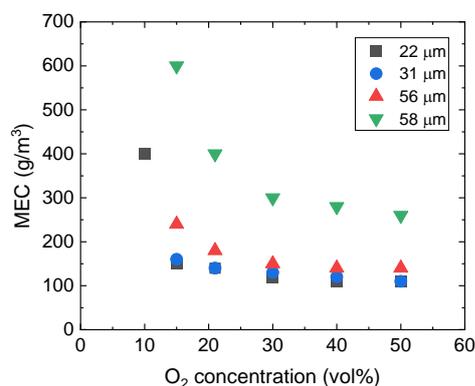


図 5. 酸素濃度に対する爆発下限濃度

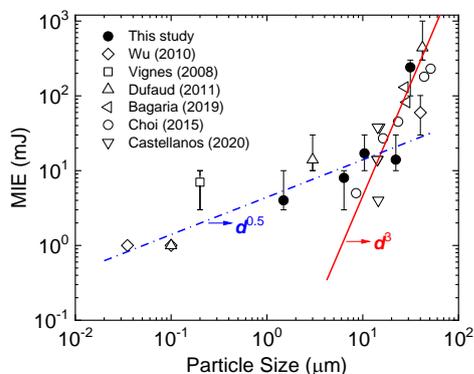


図 6. 最小着火エネルギーの粒径依存性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 W. Kim, R. Saeki, Y. Ueno, T. Johzaki, T. Endo, K. Choi	4. 巻 415
2. 論文標題 Effect of particle size on the minimum ignition energy of aluminum powders	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Powder Technology	6. 最初と最後の頁 118190
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.powtec.2022.118190	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 K. Kuwana, S. Yazaki, W. Kim, T. Mogi, R. Dobashi	4. 巻 195
2. 論文標題 Gravity Effects on the Minimum Explosive Concentrations in 1-D Dust Explosion	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Combustion Science and Technology	6. 最初と最後の頁 1622-1636
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/00102202.2023.2182203	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17件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 飯干璃大、上野寧子、佐伯琳々、金佑勁、崔光石
2. 発表標題 アルミニウムの粉塵爆発における粒径が最小着火エネルギー及び最小爆発濃度に及ぼす影響
3. 学会等名 2022年度日本火災学会研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 上野寧子、佐伯琳々、城崎知至、遠藤琢磨、金佑勁、李敏赫
2. 発表標題 アルミニウム粉塵爆発に及ぼす酸素濃度の影響
3. 学会等名 2022年度日本火災学会研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐伯琳々、上野寧子、土橋律、遠藤琢磨、桑名一徳、茂木俊夫、李敏赫、矢崎成俊、三上真人、中村祐二、石川毅彦、金佑勤
2. 発表標題 航空機の放物線飛行を利用したアルミニウム粉塵爆発実験
3. 学会等名 日本マイクログラビティ応用学会 第34回学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 上野寧子、佐伯琳々、城崎知至、遠藤琢磨、李敏赫、金佑勤
2. 発表標題 酸素濃度の変化がアルミニウム粉塵爆発に与える影響
3. 学会等名 日本マイクログラビティ応用学会 第34回学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐伯琳々、上野寧子、土橋律、遠藤琢磨、桑名一徳、茂木俊夫、李敏赫、矢崎成俊、三上真人、中村祐二、金佑勤
2. 発表標題 微小重力環境を利用した低速流れ場におけるアルミニウム粉塵爆発実験
3. 学会等名 日本機械学会 熱工学コンファレンス2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐伯琳々、上野寧子、土橋律、遠藤琢磨、桑名一徳、茂木俊夫、李敏赫、矢崎成俊、三上真人、中村祐二、金佑勤
2. 発表標題 航空機の放物線飛行を利用した微小重力場でのアルミニウム粉体の挙動解析
3. 学会等名 第60回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐伯琳々、上野寧子、城崎知至、遠藤琢磨、金佑勁
2. 発表標題 微小重力環境におけるアルミニウム粉塵爆発に関する研究
3. 学会等名 第55回安全工学研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Kuwana, S. Yazaki, W. Kim, T. Mogi, R. Dobashi
2. 発表標題 Gravity effect on steady, 1-D propagation through dust clouds
3. 学会等名 28th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Ueno, R. Saeki, T. Johzaki, T. Endo, M. Lee, W. Kim
2. 発表標題 Effect of oxygen concentration on explosion of aluminum dust clouds
3. 学会等名 6th International Symposium on Fuels and Energy (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Ueno, R. Saeki, T. Johzaki, T. Endo, M. Lee, W. Kim
2. 発表標題 Aluminum dust explosion in oxygen-enriched atmospheres
3. 学会等名 The 13th Asian Microgravity Symposium (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 R. Saeki, Y. Ueno, R. Dobashi, T. Endo, K. Kuwana, T. Mogi, M. Lee, S. Yazaki, M. Mikami, Y. Nakamura, W. Kim
2. 発表標題 Flame propagation of aluminum-air mixtures in microgravity environment
3. 学会等名 The 13th Asian Microgravity Symposium (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 W. Kim
2. 発表標題 Metal Fuels for Carbon-Free Energy on Earth and Space
3. 学会等名 The 13th Asian Microgravity Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Parikh, R. Saeki, R. Modal, K. Choi, W. Kim
2. 発表標題 Minimum Ignition Energy and Quenching distance of aluminum dust clouds
3. 学会等名 12th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 ラジブカンティモンダル、佐伯琳々、城崎知至、遠藤琢磨、金佑勁、崔光石
2. 発表標題 Effect of concentration on quenching distance of aluminum dust flames
3. 学会等名 第54回安全工学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐伯琳々、飯干璃大、上野寧子、遠藤琢磨、茂木俊夫、李敏赫、土橋律、桑名一徳、矢崎成俊、三上真人、中村祐二、石川毅彦、金佑勁
2. 発表標題 短時間微小重力実験のための粉塵爆発実験装置の開発
3. 学会等名 第59回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 桑名一徳、矢崎成俊、金 佑勁、茂木 俊夫、土橋 律
2. 発表標題 粉塵爆発の連続体モデル - 1次元定常伝播に及ぼす重力の影響 -
3. 学会等名 第59回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金佑勁、佐伯琳々、飯干璃大、上野寧子、遠藤琢磨、茂木俊夫、李敏赫、土橋律、桑名一徳、矢崎成俊、三上真人、中村祐二、石川毅彦
2. 発表標題 微小重力環境における粉塵爆発リスク評価を目指して
3. 学会等名 日本マイクロ重力ティ応用学会第33回学術講演会
4. 発表年 2021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
---------	---------