フランス国立科学研究センター（フランス）　研修報告書
電磁浮遊装置を用いた鉄粒子の燃焼挙動の酸素依存性

先進理工系科学研究科　機械工学プログラム　上田　晃大

1. はじめに

2025 年 8 月 25 日から同年 9 月 26 日の間，フランスのフランス国立科学研究センターにおいて研究を行った．以下に成果を報告する．

2. 研修/共同研究課題の決定

本研究室では，可燃性ガス・粉体の燃焼特性の解明を目的に実験を行っている．現在，金属粉体の燃焼現象の解明を目的に，雰囲気条件が金属粉体の火炎伝播現象に与える影響について実験的に観察を行っている．一方，フランスのフランス国立科学研究センター(CNRS)の航空部門の研究所である Institut de Combustion, Aérothermique, Réactivité et Environnement (ICARE)では，金属粉体の推進剤への利用を目的に研究を行っており，金属燃焼の分析・評価において優れた設備・知見を有している．今回は，ICARE が所有する電磁浮遊装置を使用して鉄粉体の単粒子の燃焼挙動の観察実験を行うこととした．

3. 研修/共同研究スケジュール

2025 年 8 月 23 日 出国
2025 年 9 月 25 日～9 月 26 日 共同研究
2025 年 9 月 28 日 帰国

4. 研修先/共同研究派遣先の概要

研究所名：Centre national de la recherche scientifique (CNRS)
研究所部門名：Institut de Combustion, Aérothermique, Réactivité et Environnement (ICARE)
所在地：フランス　オルレアン
指導教員：Prof.Fabien Halter

5. 研修/共同研究の内容

5.1 研究背景・実験装置

温室効果ガス排出量の削減に向け，化石燃料に代わる新たな代替エネルギーの探索が急務となっている．近年，金属燃料は次世代のエネルギーキャリアとして注目を集めており，その中でも鉄粉体が有望視されている．鉄粉体をエネルギーキャリアとして利用する利点として，ガス燃料に比べ体積当たりのエネルギー密度が高く，常温常圧で固体であるため貯蔵が容易である点が挙げられる．また，燃焼生成物が固体として存在するため，これを回収・還元することで再び燃料として利用できる燃焼サイクルを構築できるという特徴も有している．

本研究室では，燃焼容器を用いて鉄粉体の燃焼挙動に関する実験的観測を行ってきた．密閉容器内に鉄粉体を分散させ，火花放電によって着火を行い，高速度カメラで火炎伝播挙動を撮影・評価している．粉体燃焼は，単一粒子の燃焼が集合的に進行する「群燃焼」という燃焼形態をとるため，その燃焼特性を理解するには単一粒子の燃焼挙動に関する知見が不可欠である．

金属燃料の燃焼形態は主に二つに分類され，金属燃料の断熱火炎温度と沸点との関係によって決定される．断熱火炎温度が沸点より低い場合，酸化剤が金属表面から内部へ拡散しながら反応が進行する「表面反応型燃焼」となる．一方，断熱火炎温度が沸点を超える場合，燃焼過程で金属が蒸発し，気相中で酸化剤と反応して燃焼が進行する「気相反応型燃焼」となる．空気中では鉄粉体の燃焼は表面反応型に分類されるが，酸素濃度が上昇すると断熱火炎温度も上昇するため，燃料として利用する際には適切な酸素濃度の選定が重要となる．

以上の背景から，本研究では研修先であるフランス国立科学研究センター（CNRS）に設置され

た電磁浮遊装置を用い，単一の鉄粒子を対象として酸素濃度が燃焼挙動に及ぼす影響を実験的に観察した．

実験に使用した電磁浮遊装置の概要[1]を Fig. 1 に示す．装置は，上下に配置された一対の調整電極と，円筒側面に設けられた中心出し電極から構成される．装置上部から鉄粉体を投入し，調整電極および中心出し電極への印加電圧を制御することで，粉体を光軸上に浮遊・保持する．設置後，CO_2 レーザーを照射して鉄粉体を点火した (Fig. 2)．点火後の燃焼挙動は高速度カメラで撮影し，さらに発光波長 630 nm，720 nm，830 nm における発光輝度を測定した．

容器内雰囲気中酸素－窒素混合気の内，酸素濃度 X_{02} を 0.21，0.40，0.50，0.60，0.70，0.80，1.0 として変更して燃条実験を行った．すべての条件において 5 回以上実験を行った．

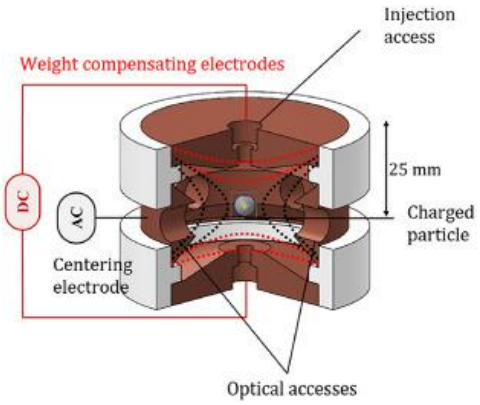


Fig. 1 Schematic diagram of electro levitator

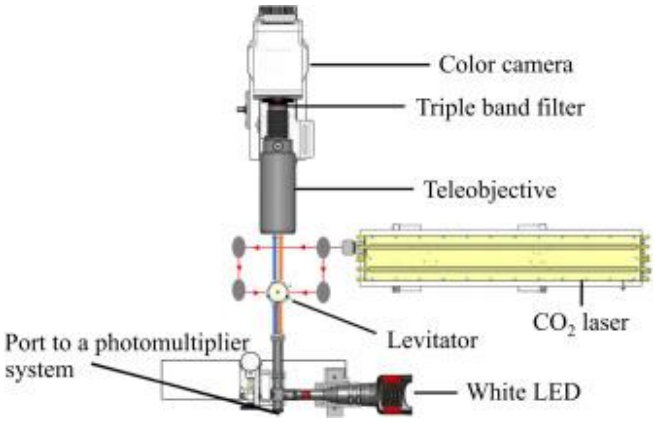


Fig. 2 Schematic of the full experimental setup including the pathways of the CO_2 laser beam (red arrows), the LED light (blue arrows) and the radiative emissions from the combustion (orange arrows)

5.2 実験結果

実験で得られた鉄火炎の発光輝度の時間履歴を Fig. 3 鉄粒子の燃焼挙動を Fig. 4 に示す．時間履歴から，鉄燃焼の特性時間と決定した．点火後から発光輝度が最大になるまでの時間を t_{max}，点火後から燃焼が終了するまでの時間を t_{tot} として鉄燃焼の特性時間と決定した．それぞれの特性時間と酸素濃度の関係を Fig. 5 に示す．実験結果より，t_{max} は酸素濃度に対して負の相関があることがわかる．一方，t_{tot} は酸素濃度が変化してもほとんど同じ値となった．これは，t_{max} は周囲雰囲気から鉄表面への酸素拡散が支配的であるため，周囲雰囲気中の酸素濃度の上昇によって酸

素拡散速度が上昇し，t_{max} が減少したと考えられる．一方，t_{tot} は鉄粒子内部での酸素拡散がしはいてきであるため，周囲雰囲気中の酸素濃度が上昇しても，鉄粒子内部の酸素拡散速度は変化しないため，t_{tot} はほとんど同じ値となったと考えられる．また，既往の研究[2,3]で報告されている鉄粒子の t_{max} の値と比較すると，酸素濃度が 0.36 までは，$t_{max} \propto (X_{O2})^{-1}$ の依存性が確認された．一方，酸素濃度が 0.40 以上の条件下では $t_{max} \propto (X_{O2})^{-2}$ の依存性が確認された．

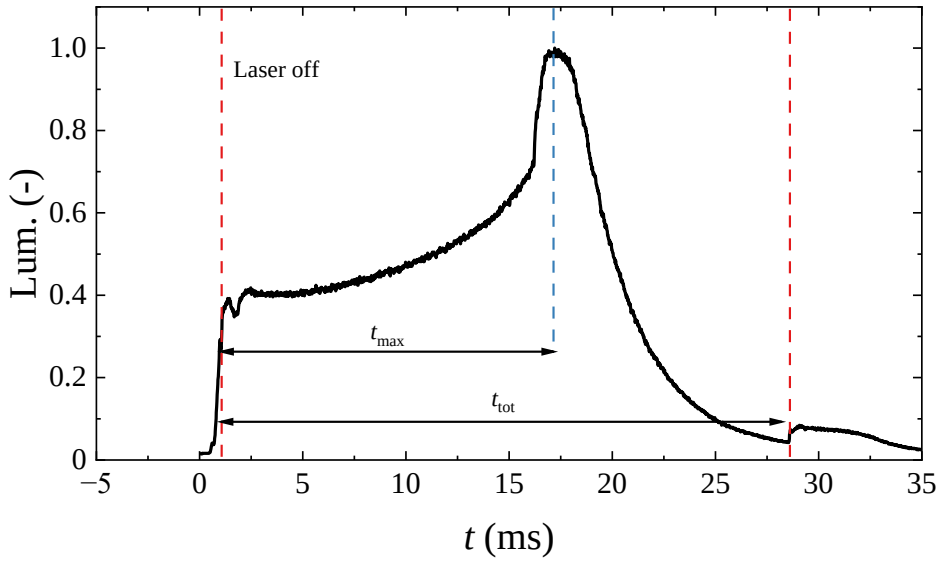


Fig. 3 Time history of the luminous intensity of the iron flame.

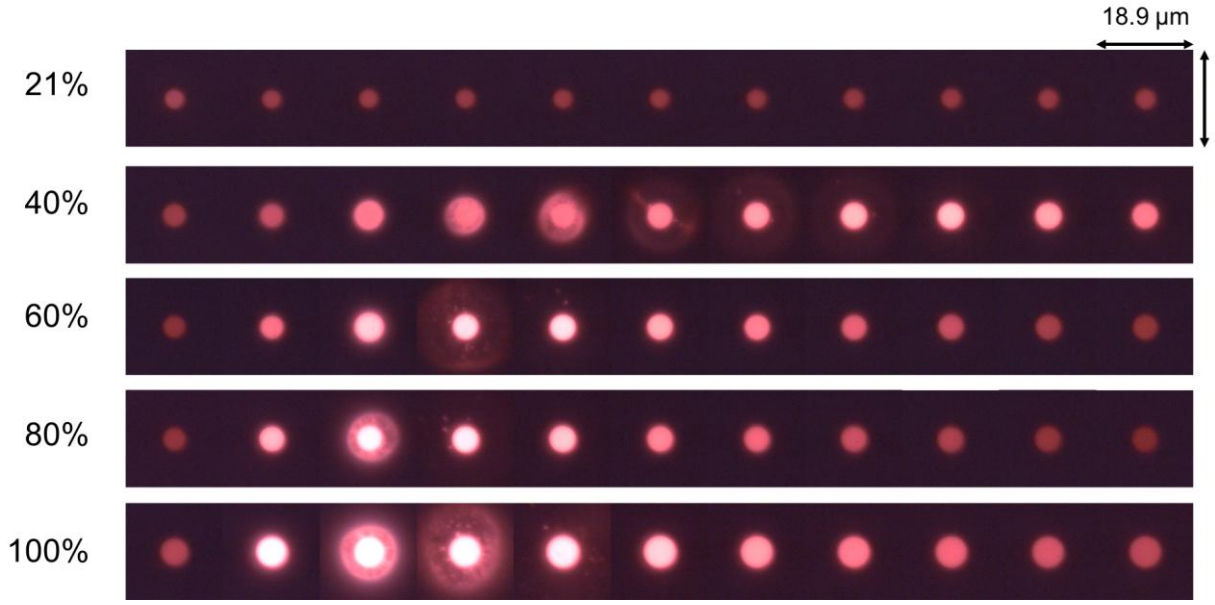


Fig. 4 Images of iron combustion with different oxygen concentrations.

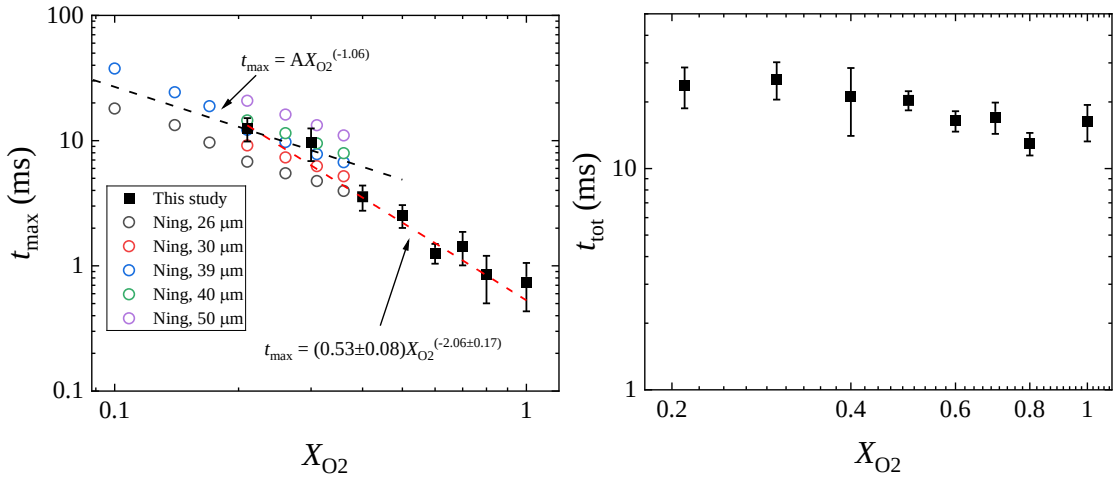


Fig. 5 t_{max} and t_{tot} as a function of oxygen concentrations.

6. まとめ

本研究では，鉄粉体をエネルギーキャリアとして利用する際の基礎的知見を得ることを目的として，単一鉄粒子の燃焼挙動に対する酸素濃度の影響を実験的に検討した．フランス国立科学研究センター（CNRS）に設置された電磁浮遊装置を用い，酸素濃度 X_{02} = 0.21～1.0 の範囲で雰囲気条件を変化させ，鉄粒子の燃焼を CO_2 レーザーで点火し，その発光挙動を高速度カメラおよび多波長測光により観測した．

実験結果より，発光輝度が最大に達するまでの時間 t_{max} は酸素濃度の上昇に伴い減少し，酸素濃度と負の相関を示すことが明らかとなった．一方で，燃焼終了までの時間 t_{tot} は酸素濃度による影響をほとんど受けなかった．これは，t_{max} が周囲雰囲気から鉄表面への酸素拡散過程に支配されるのに対し，t_{tot} は鉄粒子内部での酸素拡散に支配されるためであると考えられる．

また，既往研究との比較から，酸素濃度が 0.36 以下の範囲では $t_{max} \propto (X_{02})^{-1}$ の関係，酸素濃度が 0.40 以上では $t_{max} \propto (X_{02})^{-2}$ の依存性が確認された．これらの結果は，鉄粉体を金属燃料として利用する際の最適酸素濃度の選定に重要な指針を与えるものである．

7. 参考文献

(1) H. Keck. et al., Combustion and Flame, 2024, Vol.268, p.113616
(2) D. Ning. Et al., Combustion and Flame,2022, Vol.236, p.111801
(3) D. Ning. Et al., Fuel,2024, Vol.357, p.129718

8. 謝辞

本共同研究を遂行するにあたり，現地での研究のみならず学内施設や宿泊施設，そして派遣先での生活に関して手厚い準備・協力をしていただいた Fabien Halter 教授，実験装置の使用方法を指導していただいた Hugo Keck 研究員ならびに ICARE の皆様に厚く御礼申し上げます．このような貴重な機会を提供してくださるとともに，本研究への助言，準備をしていただいた広島大学先進理工系科学研究科 金佑勁准教授に深く感謝申し上げます． 派遣前の手続きをはじめ，本プログラムに対して多大なご協力をいただいた実行委員会の諸先生ならびに学生支援グループの国際事業担当の皆様に心より感謝の意を表するとともに，本プログラムの益々のご発展をお祈り申し上げます．