

研究成果報告書

研 究 題 目		水素燃焼における自己相似的な火炎伝播特性	実 施 年 度
			2 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

水素は多様なエネルギー源から製造可能なため、水素発電を社会に実装すれば、水素の調達方法の変更によって様々なエネルギー源の活用が可能となると考えられる。水素利用技術の基盤を確立し、水素社会の実現するためには、水素燃焼における火炎伝播特性の解明は必要不可欠である。本研究では水素燃焼における火炎伝播加速現象の自己相似的な特徴と火炎伝播加速現象の発生機構に着目した。火炎伝播における加速現象を図 1 に示す。火炎伝播は水素と空気の混合気が着火源から火炎が伝播する。このように伝播する火炎は、はじめ滑らかに層流燃焼速度 S_L で伝播する（Ⅰ. Stable regime：安定領域）。ところが、火炎が大きくなると、火炎面の乱れが発達し、火炎面積が増大して見た目の火炎伝播速度が高まる（Ⅱ. Unstable regime：不安定領域）。また、加速された火炎伝播速度はある限界値をもつ自己相似的な火炎構造を持つことが（Ⅲ. Self-similar regime：自己相似的な領域）知られているが、自己相似的な特徴が決まる物理・化学的メカニズムについては未だ不明である。本研究の目的は水素空気混合気における自己相似的な火炎伝播を解明することである。火炎伝播加速現象の自己相似的な特徴については、水素/空気混合気中の水素濃度、初期圧力を変化させて実験を行い、拡散・熱的不安定性と流体力学不安定性が火炎伝播加速現象に及ぼす影響を調べ、火炎伝播の加速指数、自己相似的な特徴を示すフラクタル次元の決定メカニズムを解明した。

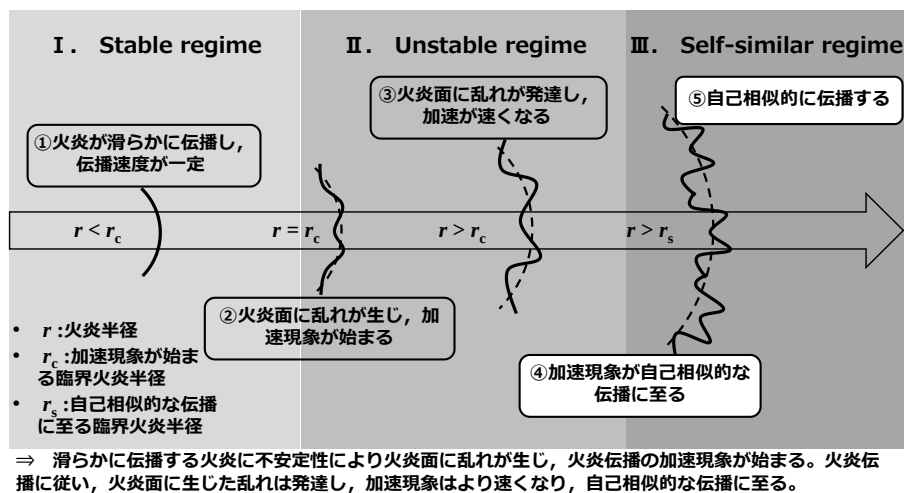


図 1. 火炎伝播における加速現象

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）

自己相似性を測定する一般的な方法は、大規模爆発実験を実施して大規模な火炎（火炎半径 1m 以上）を再現する必要があるため本研究では、無次元化した火炎半径を用いて大規模実験に相当する火炎を評価した。火炎面に生じる乱れの発達をシュリーレン法で観察し、画像解析により加速現象が始まる臨界火炎半径、加速指数、フラクタル次元を明らかにした。初期圧を上げると火炎帯厚さが小さくなり、流体力学不安定性により加速が始まる臨界火炎半径 r_{cl} が小さくなる。また、水素空気混合気では当量比を下げると熱輸送と物質輸送（選択拡散）による熱拡散不安定性により r_{cl} が小さくなる。これらの特性を利用し、本研究では、初期圧を上げて希薄水素空気混合気を用いて実験を行った。測定した水素空気混合気の火炎を図 2 に示す。無次元火炎半径 $r/r_{cl} < 1$ の場合、

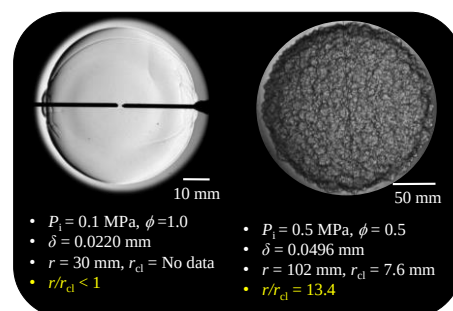


図 2 水素空気混合気の火炎

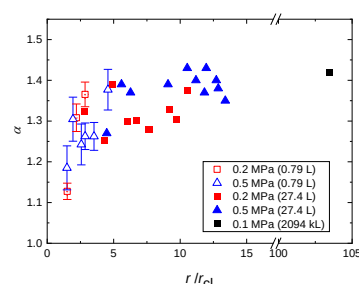


図 3 加速指数と無次元火炎半径の関係

火炎が安定であるが、 $r/r_{cl} = 13.4$ の場合、初期圧と当量比を変化することで流体力学的不安定と熱・拡散不安定性による乱れの発達が顕著になり、不安定な火炎がみられた。加速指数と無次元火炎半径の関係を図 3 に示す。加速指数は無次元火炎半径が大きくなるに従って大きくなり、無次元火炎半径が 10 以上ではある一定の値に漸近することがわかる。つまり、火炎半径が臨界火炎半径より 10 倍以上大きくなると自己相似的な伝播をすることであり、そのときの火炎面は自己相似的な構造になると考えられる。特に、水素空気混合気の大規模実験のデータと比較すると、 $r/r_c > 100$ になっても $\alpha=1.43$ になっており、 $r/r_c > 10$ では自己相似的な伝播する領域であると考えられる。

その結果、火炎半径と臨界火炎半径を無次元火炎半径にして、水素空気混合気の球状伝播火炎の加速現象の領域を以下の通りにまとめた。① **Stable regime**、安定領域 ($r/r_{cl} < 1$) : 火炎が安定、火炎伝播速度が一定である。② **Unstable regime**、不安定領域、($r/r_{cl} > 1$) : 火炎の不安定性により火炎面に乱れが発達し、火炎伝播速度が増加する。③ **Transition regime**、漸近領域 ($1 < r/r_{cl} < 10$) : 流体力学的不安定性による影響が顕著になり、火炎伝播がより加速する。④ **Self-similar regime**、自己相似的な領域 ($r/r_{cl} > 10$) : 自己相似的な伝播をする。

3. 経費の使用状況（申請時の計画に対する実績を記述）

費目	品名	申請時の計画（円）	実績（円）
設備備品	液晶モニター	0	22,808
消耗品	石英ガラス Φ260x70t	400,000	367,200
	ガス、配管などその他消耗品	1,000,000	805,220
旅費	国内学会成果発表	100,000	221,510
謝礼金	研究補助	0	101,500
その他	参加登録費、英文論文投稿料	100,000	92,638

設備備品の液晶モニターは、実験室で使っているモニターが故障したため、本支出から賄っている。また、旅費においては、国内学会ではなく国際会議（ICDERS2019&2nd IWNLF）の旅費に本支出から調達している。研究遂行途中で予定した二重構造の高圧燃焼容器は上手く行かない際に、本研究に関する最先端の研究情報をある国際会議に参加し、重要な研究情報を得ることが出来た。他の国内学会国際会議での発表や他の石英ガラスは科研費から調達して二重構造の高圧燃焼容器を完成し、成果発表を行った。また、学生の実験補助として謝礼金を本支出から調達して研究を進めた（謝礼金への変更については財団に許可を得ている）。このような研究成果が認められ、2020 年日本火災学会内田奨励賞、2020 年安全工学会学術技術奨励賞、2020 年日本燃焼学会奨励賞を受賞する栄に浴した。

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）

本研究は火炎伝播加速現象の自己相似的な特徴に着目して水素燃焼の理解を深めることを目的としており、当該研究分野における戦略的な基礎研究として位置付けられている。本研究において、水素燃焼における自己相似的な火炎伝播特性が明らかになり、水素社会の実現に向けた水素燃焼を利用した水素ガスタービンや水素エンジンの開発、水素の安全技術などに活用されることが期待できる。これらの研究成果は、予混合火炎の伝播現象としての理解という学術的な意義だけでなく、水素を燃料として利用したエネルギーシステム開発に貢献できる。今後、これまでの研究開発成果やこの分野の関係者との議論し、水素社会の実現に向けて従来の発電システムとは異なる水素利用技術の基盤確立を目指す。しかしながら、水素を燃料として利用する際の実用化技術にはまだ様々な課題があり、水素燃焼における火炎伝播メカニズムについて詳細な研究を進めることは今後も重要である。

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）

[学術論文]

1. **W. Kim**, T. Namba, T. Johzaki, T. Endo, “Self-similar propagation of spherically expanding flames in lean hydrogen-air mixtures”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 45 (2020) 25608-25614.

[国際会議プロシーディングス]

2. **W. Kim**, T. Namba, T. Johzaki, T. Endo, “Self-similar propagation of expanding spherical flames in lean hydrogen-air mixtures”, *Proceedings of 13th International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions*, 628-636 (2020) (DOI: 10.7795/810.20200724)
3. **W. Kim**, Y. Sato, T. Johzaki, T. Endo, T. Mogi, R. Dobashi “Self-acceleration of a spherically expanding hydrogen-air flame at elevated pressure”, *The 8th International Conference on Hydrogen Safety*, ID189 (2019)

[国際会議発表]

4. **W. Kim**, T. Namba, “Transition to self-similarity of expanding spherical flame in lean hydrogen-air mixtures”, *The 13th International Symposium on Fire Safety Science*, April 27-May 1, 2021, University of Waterloo, Canada. (Online)
5. **W. Kim**, “Understanding explosion accident of combustible materials from industry to space”, *2020 Korean Institute of Chemical Engineers (KICChE) Fall Meeting International Symposium*, 15 October, 2020, Online (Online) (Invited talk)
6. **W. Kim**, T. Namba, T. Johzaki, T. Endo, “Self-similar propagation of expanding spherical flames in lean hydrogen-air mixtures”, *The 13th International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions*, 27-31 July, 2020, Braunschweig, Germany. (Online)
7. **W. Kim**, Y. Sato, T. Johzaki, T. Endo, T. Mogi, R. Dobashi “Self-acceleration of a spherically expanding hydrogen-air flame at elevated pressure”, *The 8th International Conference on Hydrogen Safety*, 24-26 September, 2019, Adelaide, Australia.
8. **W. Kim**, T. Johzaki, T. Endo, “Cellular instabilities in spherically propagating hydrogen-air flames”, *International Symposium on Precision Engineering and Sustainable Manufacturing 2019*, 10 July, 2019, Da Nang, Vietnam.

[国内会議発表]

9. **金 佑勁**, 難波 拓巳, 城崎 知至, 遠藤 琢磨, 希薄水素空気混合気の球状伝播火炎の自己相似伝播, 2020 年度日本火災学会研究発表会, 2020 年 05 月 28-29 日, 弘前
10. **金 佑勁**, 火炎の不安定性による火炎伝播の加速現象, 火薬学会ガストネーション専門部会ワークショップ, 2020 年 02 月 05 日, 慶応義塾大学, 横浜 (招待)
11. **金 佑勁**, 難波 拓巳, 城崎 知至, 遠藤 琢磨, 水素-空気混合気における自己相似的な火炎伝播, 第 57 回燃焼シンポジウム, 2019 年 11 月 20-22 日, 札幌