

戦略的国際科学技術協力推進事業
日本－中国 研究交流
研究課題「高性能マイクロ燃焼器内における
触媒燃焼のモデリングと実験計測」

研究終了報告書

研究交流期間
平成19年12月～平成23年3月

研究代表者：鈴木 雄二
(東京大学大学院工学系研究科 教授)

1. 研究・交流の目的

燃焼型のマイクロエネルギー源では、液体の炭化水素燃料の持つ高いエネルギー密度を利用し、マイクロスケールにおいて燃料を燃焼させたのちに熱エネルギーを利用して発電を行う。炭化水素燃料は、リチウムイオン電池の数十倍のエネルギー密度を持つため、マイクロエネルギー源は、化学電池に代わる高エネルギー密度電源として期待されている。

本研究では、燃焼限界が広く、比較的低温においても安定かつクリーンな燃焼反応が可能である触媒燃焼を対象として、モデル計算、実験の両面から物理現象を明らかにし、また高燃焼効率、高燃焼密度、低エミッションをもたらすマイクロ触媒燃焼器の開発を行うことを目的とする。具体的には、清華大学側の化学反応速度論、触媒燃焼モデル、マイクロ燃焼実験、数値計算技術と、東京大学側の触媒層形成技術、燃焼器製作技術、最適設計法、レーザー計測技術などにより、相互に補完的な役割を果たしながら研究を進める。

2. 研究・交流の方法

本共同研究では、

1) 化学反応速度モデル、反応メカニズムの検討

細管内の燃焼実験結果を用いた詳細な触媒反応モデルの構築、化学的消炎効果の実験および数値解析による検討

2) マイクロ触媒燃焼の最適設計、および数値解析

マイクロセラミック燃焼器、およびスイスロール型燃焼器の設計およびCFD解析

3) マイクロ触媒燃焼器の実験的評価と数値解析との比較

マイクロセラミック燃焼器、およびスイスロール型燃焼器の燃焼実験とCFDとの比較

を進めていくことを当初計画とした。

特に東京大学では、触媒燃焼チャンバ内の表面・気相反応が重畳する現象を解明するための、化学的消炎効果のレーザー計測と Chemkin を用いた数値解析、燃焼チャンバ内の熱流動、燃焼器壁面内の熱伝導、燃焼反応による発熱をカップリングさせたCFD解析とそれに基づく燃焼器の最適設計、積層セラミック技術を用いた燃焼器の設計と試作、ブタンおよびメタンを用いた燃焼器の評価を行った。

また、研究開始後、本研究で試作する触媒燃焼器を実際にマイクロ発電に応用することを研究項目に加えることとし、触媒燃焼器と選択的放射体を用いたマイクロ熱光発電システムの構築とエネルギー変換効率の検証を試みた。

研究交流については、相互に研究成果を交換し、また、研究を効率的に進めるため、それぞれの研究チームは、相互に研究者を派遣することとした。また、文献情報、実験手法、計測装置などの技術的な内容の交換、実験結果の議論、研究戦略や手法の軌道修正、論文やプロジェクト報告の作成を合同で行うことを予定した。さらには、国際会議に共同研究の成果を発表し、国際ワークショップを開催することを計画した。

本研究開始後、同じ戦略的国際科学技術協力推進事業において、名古屋大学山下博史教授と広州エネルギー研究所が近いテーマで共同研究を行っていることが判った。そこで、2つのプロジェクトの合同ワークショップとして「マイクロ燃焼ワークショップ」を中国および日本で開催し、関連の著名な研究者を招待講演者として迎え、さらに交流の輪を広げることを計画した。

3. 研究・交流実施体制

3. 1 日本側

氏名	所属	役職	学位	役割
(リーダー) 鈴木 雄二	東京大学・大学院工学系研究科・機械工学専攻	教授	博士(工学)	触媒燃焼器の設計, 熱光発電に用いる選択的放射体の試作, 総括 (H19.12-H22.11)
(研究者) 森本 賢一	独)海上技術安全研究所・CFDグループ	研究員	博士(工学)	熱交換器の数値解析 (H19.12-H21.3)
斎木 悠	名古屋工業大学・工学部・機械工学科	助教	博士(工学)	メタン燃焼実験および数値解析 (H21.4-H22.11)
范 勇	東京大学・大学院工学系研究科・機械工学専攻	博士研究員	博士(工学)	触媒燃焼のモデル化 (H19.12-H22.11)
上條 隆史	同上	大学院生 (修士課程)	学士(工学)	触媒燃焼器の試作 (H19.12-H21.3)
切替 大善	同上	大学院生 (修士課程)	学士(工学)	触媒燃焼器の熱光発電への応用 (H21.4-H22.3)
林 伟荣	同上	大学院生 (博士課程)	修士	表面反応の実験計測 (H22.4-H22.11)
石田 啓	同上	大学院生 (修士課程)	学士(工学)	触媒燃焼器の設計, メタン触媒燃焼の実験計測 (H22.4-H22.11)

3. 2 相手国側

氏名	所属	役職	学位	役割
(リーダー) ZHONG Beijing	Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University	Professor	Ph.D.	総括, 触媒燃焼数値解析
(研究者) HOU Lingyun	同上	Associate Professor	Ph.D.	表面反応モデルの構築
(研究者) GONG Jingsong	同上	Lecturer	Ph.D.	表面反応モデルの構築
(研究者) SONG Yana	同上	Postdoctoral Researcher	Ph.D.	マイクロ触媒燃焼の実験計測
(研究者) YANG Qingtao	同上	M.S Student		ブタン燃焼の数値解析
(研究者) DANG Shuai	同上	M.S Student		ブタン燃焼の数値解析

4. 研究成果

4. 1 研究成果の自己評価

- 計画以上の成果がでた 計画通りの成果がでた
 計画とは異なるが有益な成果がでた 計画ほどの成果はでなかった
 いずれでもない

4. 2 研究成果の自己評価の根拠

東京大学：

1) 化学的消炎効果の実験および数値解析による検討

位相ロック LIF 計測システムを新たに構築し、マイクロ燃焼器内部で存在する可能性の高い振動火炎の定量計測を行い、発火から消炎に至る過程を明らかにした。また、Chemkinを用いて、壁面の触媒効果が気相中の反応に与える影響について系統的な検討を行った。

2) マイクロ触媒燃焼器の最適設計、および数値解析

数値解析を用いて、パラジウムを触媒とした半径流型のマイクロ燃焼器内の熱流動解析を行い、全体の反応が拡散律速となるため、混合気入口付近で反応速度が増大して流れ方向に大きな温度差が生じ、熱応力による燃焼器の破損に繋がることが判った。そのため、触媒分布を最適化する、流れ方向を外側から内側にする、の2つの改善案を提案した。

3) マイクロ触媒燃焼器の実験的評価

数値解析結果に基づき、積層セラミック技術を用いてマイクロ触媒燃焼器を試作した。触媒層は、アルミを陽極酸化することにより得られるナノポーラスアルミナに、900℃まで安定なパラジウム触媒を担持させて形成した。ブタンを燃料とした燃焼実験を行い、数値解析結果と良く一致する結果を得て、設計指針が正しいことを明らかにした。

4) 触媒燃焼器と選択的放射体を用いたマイクロ熱光発電システムの構築

熱放射を光電池により電力変換する熱光発電の性能評価を行った。MEMS 技術により Si マイクロキャビティ群による選択的放射体を試作し、放射面温度が 900℃の時、理想的な光電池では 25%の変換効率であることを示した。また、選択的放射体と Ge 光電池を組み合わせ、黒体放射に比べ変換効率が 2 倍になることを示した。さらに、温度効率 70%の細管型再生熱交換器を試作し、予想されるシステムの変換効率は 2%程度であることを明らかにした。

清華大学：

1) マイクロチューブ内のメタン燃焼実験と数値解析

マイクロチューブ内のメタン燃焼について数値解析を行い、実験結果との比較を行った。

2) 新たなブタン触媒燃焼の詳細モデルの構築

49の化学種と171の素反応を用いて、白金上のブタン触媒燃焼の詳細モデルを構築し、感度解析および実験データを用いた検証を行った。

3) スイスロール燃焼器内のメタン燃焼実験と数値解析

様々な入口条件に対してスイスロール型触媒燃焼器の燃焼実験、数値解析を行い、壁面分布を比較するとともに、熱電素子の適切な配置について検討を行った。

4) メタン燃焼器と熱電素子を用いた発電実験

メタン燃焼器と BiTe の熱電素子を用いて発電実験を行い、発熱量や当量比が発電出力や発電効率に与える影響を評価した。最大変換効率として 0.55% が得られた。

共著論文として共同研究成果をまとめることはできなかったが、双方で刺激を受けながら異なるアプローチで触媒燃焼とマイクロエネルギー変換に取り組み、成果を挙げることが出来た。特に、東京大学が当該分野で権威のある国際誌に発表した、触媒燃焼器の開発、マイクロ熱光発電システムの構築、化学的消炎効果の LIF 計測に関する 3 編の論文は、触媒燃焼に関する新しいアプローチとして国際的にも高く評価を受けた。

5. 交流成果

5. 1 交流成果の自己評価

- 計画以上の交流成果がでた 計画通りの交流成果がでた
 計画ほどの交流が行われなかったが成果はでた
 計画ほど交流成果がでなかった
 いずれでもない

5. 2 交流成果の自己評価の根拠

1) 清華大学→東京大学：

- ・キックオフミーティング（平成 20 年 3 月 12～13 日）
3 名が東京大学を訪問。双方の研究内容、共同研究における研究計画について討議

2) 東京大学→清華大学：

- ・合同研究会（平成 20 年 12 月 2～3 日）
2 名が清華大学を訪問。研究の進捗状況の報告と議論。燃焼分野の他の研究者とも交流。この交流により、清華大学の学生 1 名が東京大学の博士課程に進学、研究に参画。
- ・研究打ち合わせ（平成 21 年 10 月 22～11 月 1 日）
1 名が清華大学を訪問、ブタン触媒燃焼モデルの構築について討議
- ・研究打ち合わせ（平成 22 年 8 月 2～5 日）
国際燃焼シンポジウムに合わせて、東京大学側から 3 名が訪問、研究内容について討議

3) 合同ワークショップ：

- ・第 1 回マイクロ燃焼ワークショップ
平成 21 年 10 月 20 日～21 日に本事業の関連の研究課題（代表者：名古屋大学 山下博史教授）の研究グループと合同でワークショップを中国・広州にて開催。3 名の著名な研究者（東北大 丸田薫教授、岐阜大 高橋周平准教授、華中科技大 Chen 教授）を招待し、研究交流。16 件の発表があり、総勢 25 名程度が参加。
- ・第 2 回マイクロ燃焼ワークショップ
平成 22 年 9 月 28 日～29 日に前年度に引き続き、合同ワークショップを名古屋大学にて開催。2 名の研究者（首都大学東京 湯浅三郎教授、東京工業大学福島直哉助教）を招待し、研究交流。22 件の発表があり、総勢 30 名程度が参加。

6. 主な論文発表・特許出願

論文 or 特許	・論文の場合：著者名、タイトル、掲載誌名、巻、号、ページ、発行年 ・特許の場合：知的財産権の種類、発明等の名称、出願国、出願日、 出願番号、出願人、発明者等	特記 事項
論文	Kamijo, T., Suzuki, Y., Kasagi, N., and Okamasa, T., "High-temperature Micro Catalytic Combustor with Pd/Nano-porous Alumina," Proc. Comb. Inst., Vol. 32, Issue 2, pp. 3019-3026 (2009).	Impact factor 3.256
論文	Kirikae, D., Suzuki, Y., and Kasagi, N., "Silicon Microcavity Selective Emitter with Smooth Surface for Thermophotovoltaic," J. Micromech. Microeng., Vol. 20, Issue. 10, No. 104006, 7pp, (2010).	Impact factor 1.997
論文	Fan, Y., Suzuki, Y., and Kasagi, N., "Quenching Mechanism Study of Oscillating Flame in Micro Channels Using Phase-locked OH-PLIF," Proc. Comb. Inst., Vol. 33, No. 2, (2011), pp. 3267-3273.	Impact factor 3.256