

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「革新的な超小型燃焼器を用いたマイクロパワーシステムに関する基礎研究」

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：山下 博史

(名古屋大学大学院工学研究科 教授)

## 1. 研究・交流の目的

最近、高度情報化かつ老人福祉社会においてより快適なライフスタイルを実現するために、微小化された機械装置を様々な産業・社会活動分野へ応用することが期待されている。これらの機械装置の動力源として期待されているマイクロパワーシステムは、超小型かつ極軽量であるだけでなく極めて高いエネルギー密度を有することが必須であり、さらに、環境保全及び環境低負荷型社会構築の観点から、極省資源かつ極省エネルギーであることが切望されており、革新的開発のための研究が喫緊の課題となっている。しかしながら、マイクロパワーシステムを構成する場合、壁面からの熱損失が 50-70%まで増加すること、火炎と壁面の干渉により消炎限界が厳しくなること、高温による各部品の膨張の不均一のために変形が発生し、寿命が短縮してしまうこと、微小空間中で形成される火炎の構造と安定性が未知であることなど、解決すべき多くの問題がある。

そこで、本研究では、高効率かつ高エネルギー密度化された次世代マイクロパワーシステムを開発することを目指して、独自の理論的設計指針の構築と技術的課題の解決策を与えることを目的とする。

具体的には日本側の数値解析技術と中国側の実験計測技術を組み合わせ、緊密な協力関係のもとに、お互いの研究を補完しあいながら、システム開発にあたる。

3年間に亘り、数値的および実験的研究を進展させ、日本側および中国側研究機関において研究交流と研究調査を実施し、超小型燃焼器の壁面表面反応の効果を解明する実験を行う。さらに、本事業の関連の研究グループ（代表者：鈴木雄二）と合同でマイクロ燃焼に関するワークショップを中国および日本で開催する。

本共同研究で日中が交流を通じて相互的に取り組むことで、革新的な次世代マイクロパワーシステムの開発が期待される。

## 2. 研究・交流の方法

### A. 研究方法（具体的な研究項目と役割分担・実施スケジュール）

研究開始時に下記の具体的な研究項目を設定し、日本側研究者を山下・山本・林・篠田グループ（山下 G）と中村・平沢グループ（中村 G）、中国側研究者を趙グループ（趙 G）と徐グループ（徐 G）に分けて個別に分担し、項目ごとに研究実施スケジュールを定め、研究を推進した。研究のまとめは日本側の山下博史教授と中国側の趙黛青教授が担当する。

- I. 超小型燃焼器の燃焼特性および内部の流れの解明（小型燃焼器のスケール効果、小型火炎に特有な燃焼特性の把握）
  - I-1. 超小型燃焼器の燃焼機構に関する数値的研究（日本: 山下 G）
  - I-2. 超小型燃焼器の燃焼機構に関する実験的研究（中国: 趙 G）
  - I-3. マイクロフレイムに対する実験的研究（日本: 中村 G）
- II. 革新的超小型燃焼器におけるキーテクノロジーの進展（多孔体壁面の利用による自己断熱、消炎に与える壁面表面反応の効果、マイクロフレイムアレイの応用）
  - II-1. 燃料供給多孔体壁面を有する超小型燃焼器の自己断熱機構の解明（中国: 趙 G； 日本: 山下 G）
  - II-2. 超小型燃焼器における消炎に与える壁面表面反応の効果の解明（日本: 山下 G； 中国: 趙 G）
  - II-3. マイクロフレイムアレイによる量子的熱制御機能を有した小型燃焼器に対する数値的・実験的研究（日本: 中村 G； 中国: 趙 G）
- III. 革新的超小型燃焼器のプロトタイプ開発（高熱負荷・低熱損失・広可燃範囲の達成）
  - III-1. 前項の成果に基づくプロトタイプ開発に対する数値的研究（日本: 山下 G）
  - III-2. 前項の成果に基づくプロトタイプ開発に対する実験的研究（中国: 趙 G）
- IV. 革新的超小型燃焼器を用いた高性能マイクロパワーシステムの開発（エネルギー変換効率の高効率化、システム運転の安定性）
  - IV-1. システムの開発に対する数値的・理論的研究（日本: 中村 G； 中国: 徐 G）
  - IV-2. システムの開発に対する実験的・理論的研究（中国: 徐 G； 日本: 中村 G）

### B. 交流計画（研究協力関係）

前項の研究項目について、個別に研究した成果を基に研究交流を行い、すべての研究結果を共有し、相互に意見交換を行うために、年一回は日中間の研究交流会を開催することとした。日本グループと中国グループは、それぞれ日本と中国の環境・エネルギー分野の研究拠点を形成しており、日本国名古屋大学と中国科学院広州エネルギー研究所に所属する多数の関連する研究者集団を有している。また、日中両側のリーダーである山下教授と趙教授は燃焼研究において十年以上の長い緊密な研究協力を築いてきた。これを踏まえ、今回の研究協力を基に、さらに長期的な日中の研究協力関係を強化する。

### C. 期待される成果

このプロジェクトから期待される成果としては、(1) 微小空間での燃焼過程における燃焼機構の解明、(2) 熱損失を低減化した超小型燃焼器に関する科学技術の獲得、(3) 超小型燃焼器におけるラジカル失活に与える壁面表面効果に関連する消炎機構の解明、(4) 異なった壁面条件を有する微小空間での燃焼過程に対する数値シミュレーション手法の確立、(5) マイクロパワーシステムにおける熱応力効果と最適設計方法の解明、(6) 上述の革新的技術の統合による高性能超小型燃焼器とマイクロパワーシステムの開発、などが考えられる。

また、日中それぞれが 20~25 編の論文を発表し、国際学術雑誌に約 5 編の論文を投稿する予定である。さらに、この共同提案プロジェクトでは、多くの傑出した研究者が参加し協力して取り組み、彼ら自身の研究レベルを進展させ、日中両国の大学院生を含む若い研究者をも大いに育むことができる。

### 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) 山下 博史	名古屋大学大学院 工学研究科 機械理工学専攻	教授	工学博士	研究の日本側総括 燃焼数値計算コードの開発
(研究者) 山本 和弘	名古屋大学大学院 工学研究科 機械理工学専攻	准教授	博士(工学)	超小型燃焼器の実験 の総括
(研究者) 林 直樹	名古屋大学大学院 工学研究科 機械理工学専攻	助教	修士(工学)	壁面表面反応に関する 数値計算の実施 超小型燃焼器の実験 の実施
(研究者) 篠田 昌久	山形大学大学院 理工学研究科 機械システム工学専攻	准教授	博士(工学)	旋回流を利用した燃 焼器の数値計算の実 施
(研究者) 中村 祐二	北海道大学大学院 工学研究科 機械宇宙工学専攻	准教授	博士(工学)	マイクロフレームに 関する数値計算コー ドの開発および実施
(研究者) 平沢 太郎	中部大学 工学部 機械工学科	准教授	博士(工学)	マイクロフレーム アレイに関する実 験の実施

#### 3. 2 相手国側

氏名	所属	役職	学位	役割
(リーダー) 趙 黛青	中国科学院 広州エネルギー研究所 先進燃焼研究室	教授	博士(工学)	研究の中国側総括 燃焼実験手法の開 発
(研究者) 汪 小慙	中国科学院 広州エネルギー研究所 先進燃焼研究室	副研究員	博士(工学)	超小型燃焼器の数値 計算の実施
(研究者) 蔣 利橋	中国科学院 広州エネルギー研究所 先進燃焼研究室	副研究員	博士(工学)	超小型燃焼器の実験 の実施
(研究者) 楊 衛斌	中国科学院 広州エネルギー研究所 先進燃焼研究室	高級 エンジニア		超小型燃焼器の計測 と分析
(研究者) 馮 耀勛	中国科学院 広州エネルギー研究所 (広東海洋大学)	博士後期 課程学生 (講師)	修士(工学)	超小型燃焼器の計測 の日本側レーザ設備 での実施と分析
(研究者) 徐 進良	中国科学院 広州エネ ルギー研究所 マイクロエ ネルギーシステム研究室	教授	博士(工学)	マイクロパワーシス テムの開発
(研究者) 李 玉秀	中国科学院 広州エネ ルギー研究所 マイクロエ ネルギーシステム研究室	助理 研究員	博士(工学)	マイクロパワーシス テムの実験の実施

#### 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（研究による具体的な成果）

###### A. 新しい知の創造/画期的な科学技術の進展/新分野の開拓について

この日中交流研究により、日中両国の大学院生を含む若い研究者をも大いに育むことができ、研究成果を国内外の学会において発表し、原著論文も学術論文誌に既に 7 件公表した。これらの研究成果を具体的に列挙すると以下ようになる。

(1) マイクロパワーシステムにおける熱源・燃焼器のエネルギー変換効率の低下の原因は、1)燃焼器体積の減少により燃料の燃え残り・不完全燃焼が生じること、2)燃焼器側の表面からの熱損失・ラジカル損失が著しくなることであり、それぞれ対策として、1)体積に見合った燃料流入流量とし、燃焼強度の増加を図る工夫が必要であること、2)「表面からの熱損失」を回収できる多孔体インジェクターの採用がよいこと、また、高温の排気ガスで流入ガスを予熱するのは、排気ガスの温度の低下を招くので、TE等の熱源として利用するには好ましくないこと、開放型で燃焼器表面がない形式で、火炎から直接対象物を加熱するのがよいことを指摘し、下記のような課題に取り組み成果を挙げた。

1) 多孔体インジェクターの有効利用：中国側 G（趙）、日本側 G（山下、林）

多孔体内部の数値モデリングを行い、数値計算結果を得た。

2) 固体壁表面の影響：中国側 G（趙）、日本側 G（山下、山本、林）

微小空間での火炎と壁の干渉現象、表面状態の詳細観察、微小空間における計測精度向上、表面における熱損失・ラジカル損失の低減について解明した。

3) 旋回流燃焼器（燃焼の安定化・高密度化）：日本側 G（篠田）

旋回流中の火炎伝播特性を解明し、超小型燃焼器への活用を検討した。

4) マイクロフレイムアレイ（MFA）：日本側 G（中村、平沢）

MFAは燃焼の高密度化・一様化が可能であり、パワーデバイスよりも加熱装置として、高い燃焼強度で、小さな対象物を均一に加熱できることを明らかにした。

(2) マイクロパワーシステムにおけるパワーデバイスとしてのガスタービンは回転数が大きく、表面摩擦による機械損失や、機械損失以外の耐久性も問題となるのに対し、可動部分がないパワーデバイス（TE、TPV等）の採用が有望ではあるが、素子の制限により効率は高くは望めない。この対策のために下記のような課題に取り組み成果を挙げた。

5) ガスタービン：中国側 G（徐）

高温場で利用できるという特徴があり、従来技術のさらなる発展を目指した。

6) 熱電発電（TE）、熱光起電力発電（TPV）：中国側 G（趙）

上述のように機械損失がなく、直接発電が可能であり、さらに検討を進めた。

(3) マイクロ燃焼学という新分野を切り拓くきっかけを与えたと自負しており、本研究交流から新しい活動の種が生まれつつある。

###### B. 相手国との協力による研究への相乗効果について

本研究の日中のグループは、日本と中国の環境・エネルギー分野の研究拠点を形成しており、多数の関連する研究者の交流の場を形成し、研究への相乗効果を上げることができた。さらに、この研究協力を基に、長期的な日中の研究協力関係を推進できると考える。

###### C. 本研究の今後の展開見込、社会への波及効果について

本研究の成果を応用したマイクロパワーシステムは、高度情報化かつ老人福祉社会においてより快適なライフスタイルを実現するために大いに貢献できると考える。

#### 4. 3 研究成果の補足

これまでの各研究成果を「理想的なマイクロ熱源、マイクロパワーデバイス」として一つに纏めるのはなかなか難しく、用途によって使い分けるといことになると思われる。また、通常サイズの燃焼器に対する知見も得られた。マイクロパワーシステムは元々エクセルギーロスが大きき燃焼を用いるのであり、マイクロパワーシステムではこのことがさらに強調されてしまうので、マイクロサイズでなければできないような用途が狙い目という見解に達している。

## 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) 平成 20 年 1 月 14 日～17 日：本研究交流の立ち上げのための打ち合わせ会  
日本側の山下が中国に出張し、今後の研究・交流の推進方法に関して話し合った。
- (2) 平成 20 年 12 月 2 日～5 日：セミナー、研究交流・調査、学会発表  
3 名の中国側研究者が来日し、セミナーを名古屋大学内で開催した。また、近隣の大学との研究交流と研究調査を実施し、日本の学会で研究成果を発表した。
- (3) 平成 21 年 9 月 6 日～26 日：研究交流  
日本側研究者の若手 1 名が中国の広州エネルギー研究所に 3 週間滞在し、数値計算コードの改良と実験方法や結果の評価について研究交流を行い、多大な成果を収めるとともに、今後の研究交流の礎を築いた。また、これ以降のワークショップの開催に寄与した。
- (4) 平成 21 年 10 月 20 日～21 日：第 1 回合同ワークショップの開催  
日本側研究者 4 名が中国に出張し、中国側の広州エネルギー研究所においてマイクロ燃焼に関するワークショップと見学会を実施した。研究進捗状況の報告と関連の研究の発表が 16 件なされ、関連の委員以外の研究者も招待し、今後の研究の進展と拡大に寄与できた。
- (5) 平成 21 年 12 月 7 日～平成 22 年 2 月 28 日：研究交流  
中国側の研究者 1 名が日本の名古屋大学に 3 ヶ月間滞在し、超小型燃焼器における消炎に与える壁面表面反応の効果を解明するための実験を行い、多くの成果を挙げた。
- (6) 平成 22 年 9 月 28 日～29 日：第 2 回合同ワークショップの開催  
中国側研究者 5 名が来日し、名古屋大学においてマイクロ燃焼に関するワークショップと見学会を実施した。研究進捗状況の報告と関連の研究の発表が 23 件あり、第 1 回と同様な成果を挙げる事ができた。また、名古屋大学の関連の研究室の見学会が実施された。

### 5. 3 交流成果の補足

2 回開催されたワークショップは、いずれも本事業の関連の研究課題（代表者：東京大学 鈴木雄二）の研究グループと合同で実施した。また、ワークショップでの発表論文をまとめた論文集を発行した。

6. 主な論文発表・特許出願

論文 or 特許	<p>・論文の場合：著者名、タイトル、掲載誌名、巻、号、ページ、発行年</p> <p>・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</p>	特記事項
論文	<p>今井 俊幾、山下 博史、林 直樹、趙 黛青</p> <p>超小型燃焼器における壁面でのラジカルクエンチングを考慮した数値解析</p> <p>日本燃焼学会誌、53巻163号、pp.45-56、2011年</p>	相手国側研究チームとの共著論文
論文	<p>佐藤裕也、篠田昌久、山下博史、</p> <p>渦輪に沿った高速火炎伝播のメカニズム</p> <p>日本燃焼学会誌、52巻161号、pp.224-232、2010年</p>	2010年度日本燃焼学会論文賞を受賞
論文	<p>中村祐二、平沢太郎、</p> <p>マイクロ火炎のアレイ化技術による小型・量子制御加熱デバイス、『再生可能エネルギーのすべて』— 太陽光、風力、水力、地熱、バイオマス、未利用エネルギー — 電子材料、2010年7月号別冊、(株)工業調査会、pp.155-163.</p>	<p>依頼執筆</p> <p>技術賞、精密工学会北海道支部「マイクロフレーム発電機の実用化試験」に関連</p>