

## 特定課題研究

### マイクロスケールの燃焼学： 小さな炎がもたらす超燃焼システムへのブレイクスルー

中 村 祐 二

研究代表者： 中村 祐二（北海道大学大学院工学研究院・准教授）

コアメンバー： 井田 民男（近畿大学理工学部・准教授）

桑名 一徳（山形大学理工学部・准教授）

Kozo SAITO（ケンタッキー大学工学部・教授）

関本 孝三（関本技術士事務所・代表）

平沢 太郎（中部大学工学部・准教授）

淵端 学（近畿大学理工学部・准教授）

松岡 常吉（豊橋技術科学大学・助教）

水野 論（近畿大学理工学部・研究員）

#### 前年度からの引継事項

前年度（平成23年度）における4回の研究会により、マイクロフレームを取り巻く研究課題とそれに対するアプローチに関して議論・討論を行い、マイクロ燃焼学という新しい学問領域を形成するための筋道概要が大枠で確定した。まず第1回と第2回会議でマイクロフレームの特徴、特に燃焼限界付近では拡散火炎と予混合火炎の区切りがわかりにくくなり、そもそも燃焼とは何かという問題に直面すること（これこそがマイクロ燃焼学の極みでもある）、マイクロスケールに近づくほど顕著になる特徴的な現象をどのようなパラメータで整理すべきかという問題提起が行われ、特に火炎を構成する火炎構造を計測するためのマイクロ燃焼場のセンシングが大きな課題であることが結論つけられた。第3回では、微小領域のセンシングを解決する代替案として模型実験理論（スケールモデリング）を用いてマイクロフレームをスケールアップする可能性について言及され、スケールモデリングとマイクロフレームの融合の必要性が明示された。第4回ではスケールモデリングの基礎レクチャーとともに空隙を持つ固体内部での燃焼過程の事例紹介がなされ、それがマイクロスケール燃焼学とどのようにリンクするのが議論された。

最終年度である本年度（平成24年度）ではそこを明確にするための継続的な討論を行うために3回の研究会を実施した。また産業界との結びつきも積極的に視野に入れるべく、研究会実施の際には関連業界の方に入っていただき一緒に議論するように心がけた。会議の透明性を高めるために、研究会運営に対して各種関連学協会の協力を仰ぎ、可能な限り共催・協賛としてその学協会の構成メンバに開催案内を周知した。若手の育成事業としての役目を果たすため、昨年度の途中から2名の若手コアメンバ（松岡、水野）を追加して研究会の活性化を試みた。以下、具体的な活動報告をまとめる。

### 第5回マイクロフレーム研究会（於 大分市 平成24年6月30日）

本年度初の開催となる第5回研究会（当該助成事業は2カ年で実施するため連番で表記）では、大分高等工業専門学校環境科学技術センター主催の研究会との位置づけで、センター長である小西教授、機械工学科の菊川准教授にご協力をいただき開催された。一般聴講者としての参加もあり、当該活動を一般にも広く公開することができた。第5回での主たるテーマは、前年度の第4回会議で話題となった「空隙を持つ固体内部での燃焼現象」に関する他の興味深い事例について、大学研究機関より2名（長岡技術科学大学 鈴木准教授、東京工業大学 渡部助教）、企業から1名（旭化成ケミカルズ 杉本様）の講師からそれぞれ話題提供をいただいた。開催会場である大分高専の小西教授や菊川准教授はスケールモデリングの基盤となる模型実験に関する研究実績が豊富であり、固体空隙内部の燃焼実験に関するスケールモデリングの可能性についての議論も合わせて行うことができた。

話題提供を通じて明確になったこととして、固体燃料が持つ空隙内部の輸送過程と化学反応促進に関して関連性が強いことが示されたこと、特にタールの熱分解過程における空隙内部の現象が効果的であることが明確となり、マイクロ空隙を持つ固体燃焼は単なる固体の燃焼という位置づけではなく、そこに空隙の効果を正しくモデル化して含める必要があることが明確となった。興味深いことは、この現象（固体燃焼過程に空隙が作用する）は一般的な空隙を持つ固体可燃物である「バイオマス」のみならず固体推進薬でも類似な効果を認めることから、微小空隙内での物理現象の解明を内包する「マイクロ燃焼学」の確立は様々な領域への展開が可能になることが明確となったことである。様々な事例によりマイクロ燃焼学の重要性を確認するに至り、そこでの物理化学現象をどのようにしてスケールアップして可視化できるようにすればよいかという議論へとバトンが渡され、懇親会でもその内容を中心にした議論が継続された。ブレインストーミングを経て有益な知見を得ることができた。懇親会の後に第二部では、今後の方針としてどのような形で進めてゆくべきかについても議論され、日本実験力学会の下で3月に設立された「スケールモデリング分科会」への引継についても議論した。

### 第6回マイクロフレーム研究会（於 恵庭市 平成24年8月17日）

第6回会議では、ERATO（科学技術振興機構による戦略的創造研究推進事業の一つ）への推薦に向けた緊急検討会という位置づけで行われた。全コアメンバに加えて、前回の参加者である大分高専の小西教授を招待者とした少人数で行われ、北海道恵庭市に位置する近畿大学資源再生研究所でのバイオコークス研究施設の見学を兼ねての開催となった。会議ではメンバの個々人が考える「マイクロ燃焼学が今後担うべき役割と位置付け」に関するブレインストーミングを中心にして、マイクロ燃焼学の進むべき道筋と社会への貢献についての摺合せを行った。

各メンバからの提言内容は、主に「反応活性の高い固体表面と炎との相互作用による燃焼制御」が中心となり、例えば光触媒の併用、ナノ構造材料との融合などが具体的な可能性として示された上で、高クヌッセン数反応流れという新しい学術領域の創成へとつながるものとの素案で合議を得た。また、この学問のアウトカムに相当する技術革新の一つとして、固体物（バイオマス）の燃焼制御を挙げた。中でも、東日本大震災で今も課題として残されるセシウムなどの放射性物質により汚染された瓦礫処理への挑戦が話題に上った。そもそも放射性物質を瓦礫処理過程で出さないようにするには、セシウムのガス化温度より低い低温での瓦礫（固体）処理を実現すればよいが、ここで鍵になるのは「中低温以下での固体燃焼制御の実現性」である。マイクロ燃焼学の枠組みで、バイオマス内部の空隙でのマイクロ燃焼過程を明確にす

ることで、積極的に空隙構造を制御することで燃焼制御を狙うという筋道をたて、基礎から実用までの全てをカバーしたシナリオを作成し、そこにおけるマイクロ燃焼学の役割が大きく、革新的であることが再確認された。

具体的に実施する学術領域とは「固体燃料の燃焼とその表面近傍での物理学」であり、それを制御するために材料学的なアプローチや、反応論的検討、観察手法としてのスケールモデリング（表面現象を別のスケールで再現する方法論の確立）などの要素研究項目を含む。本領域確立のためにはなすべき項目が目白押しであることが改めて明らかになったわけであるが、ここにコアメンバ全員の共通見解が得られたことは極めて大きく、本研究会の活動の将来の出口がより具体的に明示された意義は大きい。この実現が何年後になるのか保証も確約もできないが、我々は一丸となってその達成に向かって個々のフィールドで進むことになる。なお、ここで議論された内容は、ERATOのみならず大型研究資金（CREST、さきがけ、科研費など）の獲得にも活用することで合意を得た。

### 第7回マイクロフレーム研究会（於 神戸 平成25年3月4日）

最後を締めくくる第7回研究会は、神戸市立工業高等専門学校吉本教授のご厚意を得て、神戸高専の会議室にて実施された。本会は日本実験力学学会の「スケールモデリング分科会」、スマートプロセス学会の「環境・エネルギープロセス部会」の協賛・共催事業として一般聴講者の参加を促した上での開催となった。これまでマイクロ燃焼場をセンシングする手法の重要性が何度も確認されており、それを「逃げる」方法としてスケールモデリングを用いてマイクロフレームをスケールアップする方法論が議論されてきたが、今回は燃焼計測を専門とする徳島大学の出口教授を招待講演者に迎えて、マイクロ燃焼場のセンシングの可能性について講演いただいた。また、科研費申請中のマイクロフレームをスケールアップする方法論に関する最近の成果を中村から紹介し、最後に、神戸高専（吉本教授および大学院生）および中外炉（友澤様）から火炎内球状化技術へマイクロフレーム技術が活用できるか否かという新しい応用先についての検討を加えた。幸運にも、第2回研究会にもご参加いただいたマイクロ燃焼に深い知見と見識をお持ちの大阪大学 香月名誉教授にも同席いただき、貴重な意見を伺うことができた。また、閉会にあたり豊田理化学研究所の石橋理事から研究会の今後の発展への期待の言葉をいただいた。

出口教授が開発中の半導体レーザー吸収法とCT法の組み合わせにより、解像度が数十 $\mu\text{m}$ レベルまでを達成可能であることから、マイクロ燃焼の直接センシングの可能性が見出された。直接センシングが可能になれば、スケールモデリングによるマイクロフレームのスケールアップを目指す際の検証データにも活用することができるため、今後とも連携を図ってマイクロ燃焼学に活かしてゆくよう協力してゆくことが確認された。応用技術の例としての火炎内処理やプラズマ支援燃焼という新しい分野へのマイクロフレームの拡張性についても触れることができ、今も新鮮味溢れるテーマであることが再認識された。懇親会後の第2部では直近のエネルギー問題とそこにマイクロ燃焼学の貢献に関する議論もなされ、全員の話が尽きない中で終会を迎えた。

なお、本会議の数日後に東京で行われた第62回理論応用力学講演会（@東工大）にてセッション「OS16：マイクロスケールの輸送・反応場構造」でコアメンバの殆どと再会することになったが、そこでも発表成果に対して新しい発見と議論が生まれた。今後もこのような興味は尽きることがないことを全員が確信した。それだけこの分野には未開なことが多く、多くの研究者の参入が待たれるものであることを暗示している。

## 全体のまとめと今後の抱負

2年間にもわたり、自由なテーマ設定の下で、学会のような堅苦しい雰囲気ではなく、時には暴走も許される討論・議論を通じて、いろいろな経験を持つコアメンバが知恵出しすることができた。その結果として洗練された「マイクロ燃焼学」は、当初考えていた範囲よりもマイクロ燃焼学は広い範囲に貢献・活用されることが明確となった。進むべき筋道や将来的な応用例についてなど具体的な舵取りを任されてきたが、コアメンバと招待者の理解と支援をいただき、これまでぼんやりとしか見えていなかったそれらを明確な言葉や形とすることができたことは、何よりの成果であったと思う。

毎回コアメンバは固定であるのに、会議をする度に次々に新しい課題とアイデアが生まれては消えるという、まさに「黎明期」さながらの時代に、このコアメンバとそれを支援していただけた理解ある財団に巡り合うことができたのは、この上なく幸運であったと言える。特に第6回研究会で示された「(出口の)共通見解」は重要であり、我々コアメンバー一人ひとりが果たすべき機能と役割を認識し、皆が一丸となってその達成に向かうという「未来への道標」を得たことに等しい。これからは財団の支援から離れるが、別途全員がまた膝を付け合せて心ゆくまで議論する場を設け、マイクロ燃焼学の確立に向けて確実な一歩を進めていきたい。

今回の支援を受給してつくづく感じたことは、どんなに研究費があっても、どれだけ計算機の性能が向上しても、どれだけ計測精度が向上しても、非線形的な「変化」をもたらすためには、研究者同士が同じ時間を共有し、心ゆくまで語りあい、互いの意見を交わしながら影響しあうという、一見するとローテクなことがどれだけ不可欠なのかということ再認識したことである。人類の英知とは、人と人とが交流して呼応して加速度的に生まれる非線形的な生産性に起因するものであり、それを間近で見ることができたのは研究者として光栄である。今回、若手育成にも配慮して2名の新進気鋭の若手研究者をコアメンバに追加して活動を続けてきたが、研究者として最も大切な要素である「対話による気づき」の重要性を伝えることができたのではないかと考えている。今後も彼ら若手を巻き込みながら大きな潮流を作り、自己研鑽を続けて精進しながらマイクロ燃焼学の発展を担う基礎を築いてゆきたい。

## 当研究会以外での普及活動

### 【既に終了した分】

2012（平成24）年3月 日本実験力学会の分科会として「スケールモデリング分科会」を発足させた（継続的活動を展開するための措置として有効）。主査はコアメンバである井田准教授、幹事は中村が担当。

2012（平成24）年7月 日本実験力学会2012年次大会（豊橋）にて「OS11:スケールモデリング」を設立・運営（オーガナイザ：井田，中村。発表件数 8件）

2012（平成24）年9月 日本実験力学会誌「実験力学」の「よくわかる実験力学」の寄稿記事としてコアメンバであるSaito教授による解説論文（Scale Modeling: Engineering Problem Solving and R&D）が掲載される（9月号（Vol.12(3), pp.255-259）

2012（平成24）年11月 日本実験力学会主催の国際会議：ISEM12（台北）にて「セッションC4:Scale Modeling」を設立・運営（発表件数 6件）

2013（平成25）年3月 第62回理論応用力学講演会（東京）にてセッション「OS16：マイクロスケールの輸送・反応場構造」を設立・運営（オーガナイザ：中村，井田，桑名。発表件数 6件）

**【今後実施する分】**

日本実験力学会誌「実験力学」の特集号（2013年13巻2号（6月発行予定））にて「スケールモデリング：模型実験を可能にするアプローチ」を企画し、了解される（解説論文2件，一般論文6件程度（小論文委員会主査：中村））。

日本実験力学会2013年次大会（秋田）にて「OS：マイクロスケールでの反応性熱科学と計測」を設立申請して認可される（オーガナイザ：井田，中村）

ISSM-7（第7回スケールモデリング国際会議）にて「Scale Modeling on Combustion」を設立申請され認可される

**【その他】**

戦略的創造研究推進事業（ERATO型研究）による新規研究領域への推薦を継続検討予定

日本燃焼学会より学会誌の連載講座「マイクロ燃焼の科学と技術 I」への第一号記事執筆依頼（中村）（“火炎構造から探るマイクロ燃焼の特徴とこれから”，日本燃焼学会誌 Vol.55, No.171 (2013), pp.44-56）

以上

