

## 研究室紹介

### 東京工業大学大学院理工学研究科 岡崎・伏信研究室

機械制御システム専攻 教授 岡崎 健

〒152-8552 目黒区大岡山 2-12-1

TEL 03-5734-3335 FAX03-5734-2892

Email okazik@mech.titech.ac.jp

<http://www.mech.titech.ac.jp/~epl/eplhomejp.html>

#### 1. はじめに

当研究室は東京工業大学の岡崎キャンパスにあり、所属の機械制御システム専攻(エネルギー事象分野)は、平成12年4月に完了した本学の大学院重点化に伴い新たに生まれた機械系の3専攻の一つで、エネルギー、環境、熱、流体、材力、材料、加工、運動、制御、計測と、機械系を構成するメインの分野を包含する組織となっている。従来の機械系の4専攻をいわばシャッフルする形での再編となったため、旧来の学科の垣根を越えた組織を実現している。また、私をはじめとする教職員は本籍を大学院に置いた形で、工学部機械科学科における学部教育にも携わっている。

#### 2. 研究の対象

エネルギー事象分野という名称が示すとおり、当研究室ではエネルギーに関わる諸現象について、ミクロな基礎現象の解明からマクロな次世代エネルギーシステムまで、特にエネルギー有効利用および地球環境保全に重点を置いて、熱流体工学、燃焼工学、エネルギー工学をベースとした研究活動を行っている。具体的な研究テーマは次節でご紹介するが、現在は特に水素エネルギー社会の未来を開くための高効率製造・有効利用技術の一つの大きな柱としたテーマ設定を行っている。

#### 3. 研究分野

##### 3.1 固体高分子形燃料電池高性能化のためのミクロ・マクロ輸送・反応現象解明

固体高分子形燃料電池(PEFC)に対する社会・産業界の期待については改めて本稿で触れるまでもないことであるが、一方で、これに取り組む上で、今後何かの大きな技術的ブレイクスルーが必要との共通認識があるの

ではなかろうか。当研究室では原子・分子レベルでのいわゆるミクロな現象と、バルクの熱・流動現象の両面から、輸送・反応現象の詳細を明らかにすることで、PEFCのさらなる高性能化につなげる指針を得ることを目的とした研究を行っている。

現状のPEFCの損失低減を考えるに当たっては、カソードでの活性化過電圧、膜のプロトン輸送抵抗をそれぞれ低減することが最重要と考えられる。カソードでの反応を考えるために当研究室では第一原理計算により、触媒表面での $O_2$ の解離吸着機構について検討を行っている。既にPtを始めとする遷移金属元素について計算を行い、dバンド空孔数と反応活性の関係などを明らかにしている。また、膜のプロトン輸送抵抗を考えるために、膜の分子構造をモンテカルロ法により模擬し、この中で陽イオンの輸送抵抗について古典的な分子動力学法により解析している。また白金使用量が少なく高活性な新規の触媒を開発すべく、各種電極表面での活性実験を行っている。

一方、実機のセルサイズでのいわゆるマクロなスケールでの電気化学反応を伴う熱流動現象の詳細を明らかにすることも重要である。実際のセル動作特性やその信頼性・寿命は熱流動管理と密接な関係にある。当研究室ではまず、モデル化したセルとして、3本の流路がまっすぐ流れるタイプのセルを作製し、この流路に沿ってガスをサンプリングすることにより、水素ガスの消費量をガスクロマトグラフを用いた測定を行い、運転条件と水素消費の分布を明らかにした。この条件下では流路入り口付近での水素消費量が多いことから反応に伴う発熱によりこの付近の温度上昇が大きくなることなどを明らかにした。同時に独立に開発した数値計算コード(電気化学反応と熱流動の連成解析)でも同様の結果を得ている。熱電対による測定でもこれを支持する結果が得られたも

の、流路全域に渡る詳細な温度分布を得られたわけではなかったため、引き続いて、サーモグラフィによる温度分布の可視化を行った(図1参照)。おそらく、運転中のPEFCセル内の膜温度分布を可視化した初めての試みと考えられるが、これにより、入り口付近でのホットスポット(高温領域)の存在が確認されている。また、流動管理の観点から、膜内の水の移動に関してその定量化が求められている。既に我々は光学的な手法を用いた膜内の含水分布可視化に成功し発表を行っており、現在、これを実機に適用する試みを行っているところである。またマイクロな視点からの検討で述べた活性化過電圧についても、熱流動管理との関係の観点から検討を開始している。

### 3.2 地球環境保全型石炭・バイオマスエネルギー高効率利用

当研究室ではこれまでに熱再循環を利用した燃焼技術に関する研究を行っており、例えばNOx・SOxの同時大幅低減可能な新たな石炭燃焼技術の開発につなげてきている。この実績を背景に、現在は、反応場の高温化が本質的に重要と考えられる石炭・バイオマスの水素リッチガス化プロセスの可能性を実験と理論の両面から研究している。

水素の大量導入によって省エネルギー、環境保全を推進するためには、高度な水素利用技術の確立はもちろん

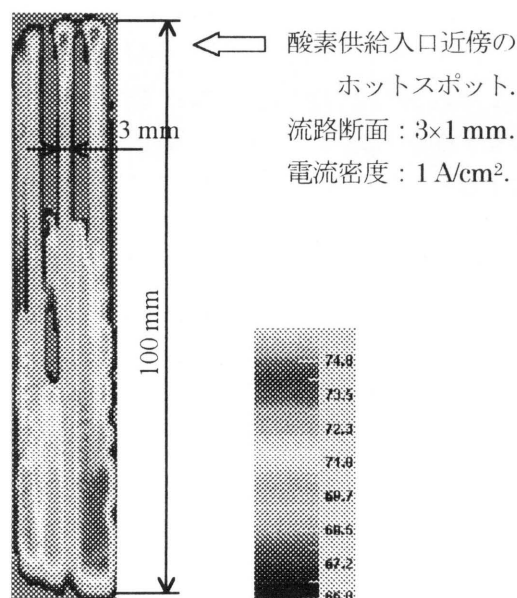


図1 PEFC マイクロチャネル温度分布

のこと、2次エネルギーである水素を高効率に生産する技術基盤の確立が必要不可欠である。当研究室では、自然エネルギーのなかでも量的に大きなポテンシャルを有し、しかも実質的なCO<sub>2</sub>排出量がゼロであるバイオスに着目し、これを高効率かつ水素リッチでガス化する研究を行っている。バイオマスを単に燃焼させ、その熱エネルギーを利用するのではなく、燃料電池などの高効率水素利用技術と組み合わせることによって、従来より格段の高効率・クリーンエネルギーシステムを実現できる可能性がある。

バイオマスは湿潤していることが多く、石油や石炭と比較して発熱量が低いため、従来の熱的に自立させるガス化技術ではタール残渣が多くなり、有効なガス化成分の回収が困難である。そこで、生成ガスの持つ顕熱を回収して原料ガスを予熱する「自己熱再循環」と、さらに他産業からの低中温度熱(100°C~300°C)および余剰プロセス蒸気を組み合わせることでガス化に必要な熱および物質を賄い、高効率バイオマス水素リッチガス化プロセスの実現へとつなげる。

バイオマスの主成分であるセルロースを対象としてDTF(Drop Tube Furnace)を用いたガス化実験を行い、熱再循環を模擬したシミュレーションを行った結果(図2参照)、セルロースから水素へのエネルギー変換効率は約80%に達することを明らかにした。今後、バイオマスの主成分の1つであるリグニンや、実際のバイオマスを用いて実験を行い、高効率化に向けた検討を重ねていく予定である。

また、システム全体として高効率化を図るために、加圧下においてガス化が行われることが考えられる。そのため、加圧下におけるバイオマスの熱分解挙動を解明すべく、急速昇温型加圧示差熱天秤を用いて、大気圧~10気圧までの幅広い圧力範囲でバイオマス熱分解・ガス化の動的挙動を掌握する実験も行っている。当研究室では、

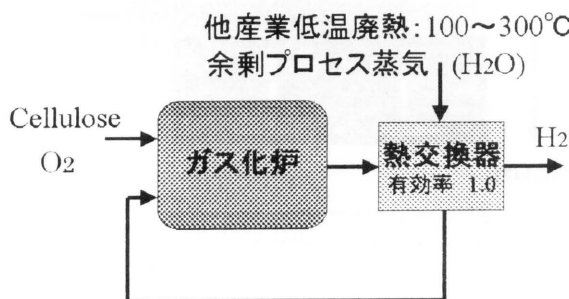


図2 熱再循環モデル

昇温速度、加圧下の影響を組み込んだフラッシュチェーンモデルを用いて、石炭の熱分解・N分放出挙動のモデリングに成功している。今後このモデルをバイオマスへも適用できるよう発展させていく予定である。

### 3.3 大気圧非平衡プラズマケミストリー —基礎と応用—

プラズマプロセスは、半導体の製造から廃棄物処理に至る広い範囲で利用されているが、近年では地球環境問題に対する関心の高まりとともに、有害物質の分解や燃料改質をはじめとする、エネルギー・環境分野へのプラズマの化学的利用が急速に展開している。当研究室でも、これに適した各種プラズマの発生法や新しい反応プロセスの創生、その応用に関する研究を行っている。

プラズマプロセスをエネルギー・環境問題に適用する場合、エネルギー消費を最小限に抑えるだけでなく、多量の物質を処理する必要があることから、オゾン発生法として古くから知られている無声放電やコロナ放電を基本にした大気圧非平衡プラズマが有用である。“大気圧非平衡プラズマ”は、ストリーマと呼ばれる直径約100 $\mu$ mの過渡的な微細放電柱の集合体で(図3参照)、常温常圧でありながら電子温度だけが数万度に達する非平衡状態を形成する反応性プラズマの一種である。近年では減圧下のグロー放電に似た、空間均一性が極めて高いAPG (Atmospheric Pressure Glow-discharge)も開発され、表面改質をはじめとする種々の物質変換プロセスに用いられるようになった。我々の研究室では、この大気圧プラズマリアクターに立ち上がり立下りの急峻なパルス電圧を印加することで、反応場に効率よくエネルギーを注入できるプロセスを開発し、大気圧・100 $^{\circ}$ Cの反応条件で、メタン/水蒸気から直接メタノールを合成する

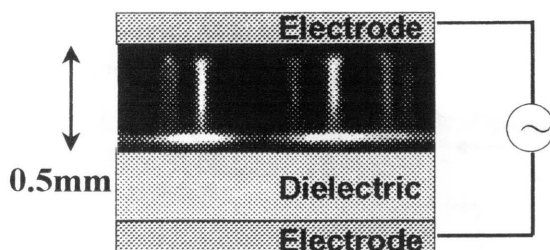


図3 大気圧プラズマリアクターとストリーマ  
( $P_{CH_4}=760$  Torr)

ことに成功した。メタン/水蒸気からメタノールを直接合成できればプロセスのエネルギー効率を大幅に向上できることが期待されるが、この反応は熱化学的に引き起こすことが極めて困難な反応である。

現在は、プラズマ構造の解明を目的として、発光分光分析によるプラズマ反応場内のガス・電子温度温度を行っており、大気圧非平衡プラズマのキャラクタリゼーションや更なる高度非平衡化をはかる為の指針を探究している。また、大気圧非平衡プラズマの応用として、天然ガスの主成分であるメタンをより低温で水素化する技術開発と、ダイヤモンド、カーボンナノチューブをはじめとする高付加価値炭素系素材を大気圧で安価に合成する研究も行っている。

### 3.4 電子・MEMS デバイスにおける熱・エネルギー問題

微細加工技術の進展にともない、従来は想像できなかったような微細な各種電子デバイス、MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) デバイスが開発され、その微細化・複雑化は進行する一方である。例えば最近の半導体デバイスは、その加工寸法が0.2ミクロンを切る領域に達しており、さらに100ナノメートルを下回ることが現実の課題となってきている。ところが、実はこのような微細化を進める過程で深刻となるのは、加工技術の問題だけではない。簡単な学部専門教育の熱伝導の知識を応用すれば容易に想像できるように、トランジスタ等の発熱を伴う素子の温度上昇は寸法減少に反比例する形で深刻になっていくのである。問題はこの温度上昇に伴う素子の動作特性変化、熱応力等による寿命の減少である。ノートパソコンなどが使用中におかしな動作をするのはこのような温度上昇に伴う動作特性の変化によるところが大きい。当研究室では、これら各種マイクロデバイスの正確な温度予測・制御を目的とし、具体的には化合物半導体の電解効果型トランジスタであるGaAs-MESFET (Metal Semiconductor Field Effect Transistor) を対象として、電子輸送とこれにともなう発熱・結晶格子温度上昇を連成した数値計算手法を開発することにより、デバイス内での局所温度上昇・分布の予測、近傍領域への温度上昇の影響、周囲冷却条件の及ぼす影響などを明らかにしている。従来、熱工学の分野では、発熱はデバイス全域で均等に与えられるものとしてこれを基に伝熱計算を行う、という手法が主流であったが、電子輸送を考慮した発熱源予測の重要性、熱的な特性が電子輸送に及ぼす影響、とこれまでの手法では得

られなかった結果を得ることに成功している。デバイスシミュレーターを作る上で、デバイスの温度分布を正確に予測する必要があることも I-V 特性のプロットから明らかにしている。

このようにマイクロデバイスにおける熱問題は主として温度上昇に伴う信頼性、動作特性に関わるトラブルの要因として認識されることが多いが、一方で、デバイス内の熱現象を積極的に利用することがこれらの問題解決に繋がるケースもある。MEMS デバイスは、いわゆるマイクロマシンとして認識されているが、その信頼性問題として大量普及の一つのネックとなるのがスティクションの問題である。これは、MEMS デバイス特有のミクロンオーダーの微細な可動部分が、製造工程・動作中に基板等の周囲部位に付着することで本来の機能を喪失する現象をさす。従来この問題の対策は付着しにくい加工プロセスや表面処理の開発に向けられていたが、一度付着した可動部分を引きはがして元の機能を回復することはできず、一度スティクションを起こせばすなわちそのデバイス自体が不良品となっていた。我々はこの対策として、ナノ秒からフェムト秒のいわゆる短パルスレーザー光で照射することにより、デバイスには熱的なダメージを与えることなくスティクションを生じたデバイスを修復する技術を提案し、その有用性を実験的に実証し

ている。

このように、各種マイクロデバイスの熱問題解決、あるいは熱現象の積極利用により、デバイスの高性能化、高信頼性を目指した研究を行っている。さらに、マイクロミキシング、マイクロリアクターへの展開をはかろうとしている。

#### 4. 研究室生活

当研究室のメンバーは、私をはじめとして教職員6名（他 伏信助教授、多田助手、野崎助手、古田技官、田嶋秘書）、博士課程学生2名（うち1名は社会人）、修士課程学生8名、学部卒研究生5名に加え、ちょうどこの原稿のメット時期に到着の客員教授1名を加えた22名の陣容となっている。学生は在籍中に原則として1回は学会発表を行うことを目標として研究活動に励んでおり、その他講習会への参加など、学生の自主的な研究活動を推奨している。夏には2泊3日の研究室旅行を企画しており、バーベキュー、テニス、海水浴などでリフレッシュすると同時に互いに親睦を深めている。その他、歓送迎（飲み）会、カラオケなどのイベント盛りだくさんで、職員・学生一丸となって、研究・遊びに充実した研究室生活を送っている。

