

## 高度小型分散エネルギーシステムの構築へ向けて

東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻熱流体工学研究室 齋木 悠  
鈴江祥典

### 1. はじめに

小型分散エネルギーシステムは、電力需要地近接に導入され、発電に伴う排熱を利用できるため、従来の大型発電所と比較し、エネルギーをより多様にかつ高効率に利用できる可能性がある。特に、マイクロガスタービンおよび固体酸化物形燃料電池は、コージェネレーション分散電源として多くの利点を有し、その普及が注目されているが、その一方で、克服すべき課題が多いのも現状である。

著者らが所属する東京大学熱流体工学研究室(<http://www.thtlab.t.u-tokyo.ac.jp/>)では、笠木伸英教授、鈴木雄二助教授のもと、また鹿園直毅助教授の協力を得て、約 40 名の学生および研究協力者が、乱流現象の知的制御から、小型分散エネルギーシステム、熱輸送システム、パワーMEMS、バイオMEMS まで、熱流体工学を基盤とした幅広い分野の研究を進めている。本報では、中でも、マイクロガスタービンおよび固体酸化物形燃料電池の高性能化に向けた研究と共に、それらの複合化技術であるハイブリッドシステムに関する研究についてその概要を紹介する。

### 2. マイクロガスタービン ( $\mu$ GT)

マイクロガスタービンは、運転・保守が容易で、振動・騒音特性に優れ、多種燃料が適用可能であるなど、往復動機関と比較し、優れた点が多い。しかしながら、機器

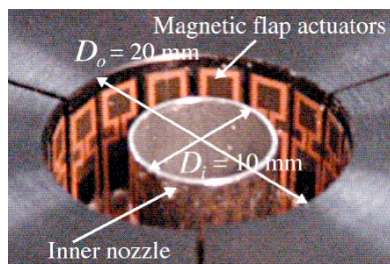


図-1 同軸円管ノズル

の小スケール化には、様々な課題が伴う。例えば、小型燃焼器は、大きな負荷変動を伴うため、燃焼効率の低下、 $\text{NO}_x$  排出量の増加および燃焼不安定が懸念される。そこで、負荷変動に応じて、燃焼特性の改善を行うマイクロアクチュエータを用いた燃焼能動制御システムの構築に取り組んでいる。

本研究では、燃焼器内流れのモデルとして同軸噴流を採用し、18 枚のフラップ型マイクロ電磁アクチュエータ ( $9 \times 3 \text{ mm}^2$ )<sup>1)</sup> を配備した同軸円管ノズルを開発した(図-1)。環状噴流外側せん層に微小擾乱を与えることで、フラップ動作に同期して、大規模渦を生成できる<sup>2)</sup>。

まず、数 kW の燃焼器を想定し、メタン・空気混合の制御を試みた。メタンおよび空気は、それぞれ中心および環状ノズルから供給される。すべてのフラップは同位相で駆動し、駆動周波数  $f_a$  で定義したストローク数  $St_a (=f_a D_o / U_{m,o})$  を変化させた。

図-2 に、PLIF/PIV により計測した自然・制御噴流の燃料濃度場/速度場を示す<sup>2)</sup>。 $St_a=1.0$  の制御噴流では、大規模渦により、内側メタン流体の輸送、それに伴う混合が著しく促進されることが分かる。一方、

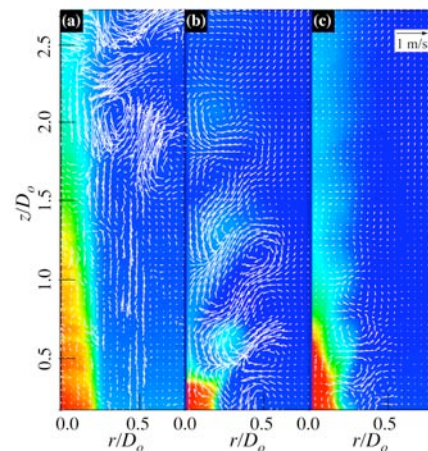


図-2 燃料濃度場および速度場  
(a) 自然噴流, (b)  $St_a=1.0$ , (c)  $St_a=1.7$ <sup>2)</sup>

$St_a=1.7$  では、渦径が小さくなり、混合が

噴流中心軸付近で局所的に行われる。従って、フラップ駆動周波数を変化させることで、混合特性の柔軟な制御が可能である。

上述した混合制御の結果を踏まえ、噴流火炎の能動制御を行った。負荷変動を模擬して、異なる当量比条件 ( $\phi=0.72, 0.48$ ) における燃焼特性の改善を試みた。

表-1 に、CO 排出量と発熱率変動の関係を示す<sup>3)</sup>。  $\phi=0.72$  の火炎では、 $St_a \sim 1.0$  の制御により CO および発熱率変動を改善できる。これは、混合促進により、希薄可燃混合気を火炎に供給できるためである。一方、 $\phi=0.48$  の火炎では、 $St_a \sim 1.7$  による制御効果が大きい。これは、混合が局所的に行われ、噴流中心軸付近に可燃混合気を形成できるためである。従って、混合気生成過程を制御することで、負荷変動を模擬した異なる当量比条件の燃焼特性を改善できる。

表-1 燃焼特性<sup>3)</sup>

Equivalence ratio	$\phi = 0.72$		$\phi = 0.48$	
	Natural	$St_a = 1.0$	$St_a = 1.1$	$St_a = 1.7$
CO [ppm@15% O <sub>2</sub> ]	151 ± 5.8	87 ± 4.1	946 ± 18	528 ± 14
Heat release fluctuation	1.0	0.77	1.0	0.46

### 3. 固体酸化物形燃料電池 (SOFC)

固体酸化物形燃料電池 (Solid Oxide Fuel Cell: SOFC) は、高い発電効率と燃料多様性を有する次世代電源として研究が進められている。SOFC は電解質のオーム損失を低減するために 800~1000 °C 程度の高温で作動されるが、熱変形によるセルの破損やリーク、微細構造の劣化を防ぐために、近年は作動温度の低減が指向されている。信頼性と発電効率の両者を向上するためには、SOFC 電極微細構造の最適化というミクロなアプローチと、セル構造の最適設計、スタック配置の最適化といったマクロなアプローチの両者が求められる。そのため、本研究室ではミクロからマクロまでの階層的なシミュレーション手法の構築を目指して研究を進めている。

これまでに、代表的なセル構造である平板形、円筒形 SOFC それぞれに対する単セ

ル・スタックレベルの解析を行い、単セル性能評価とスタック設計指針の提案を行ってきた。また、高効率かつ高い信頼性が期待される扁平管形 SOFC において、熱物質輸送と電気化学反応を連成した三次元詳細数値解析を行った (図-3)<sup>4)</sup>。解析の結果、熱流動場、電気化学反応場は流れ方向に対してのみ大きな分布を示すことが明らかになった。この結果を踏まえ、熱流動、電気化学反応場の計算を一次元化した簡易な計算モデルを確立し、幅広い運転条件下においてセル発電特性が高精度かつ少ない計算負荷で予測できることを示した (図-4)<sup>4)</sup>。さらに、この簡易計算モデルを用いて電極微細構造がセル発電特性に及ぼす影響の評価を行い、燃料極に粒径 1 μm 程度の材料を用いることで物質輸送促進による発電効率向上が可能となることを示した。

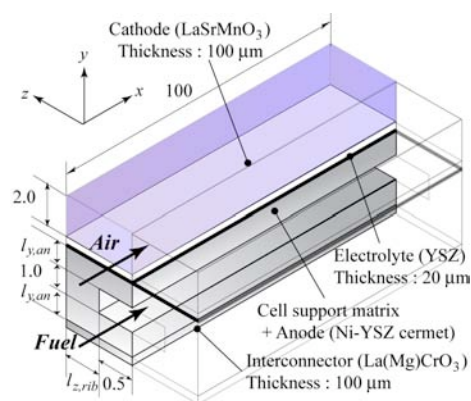


図-3 扁平管形 SOFC 三次元詳細解析領域<sup>4)</sup>

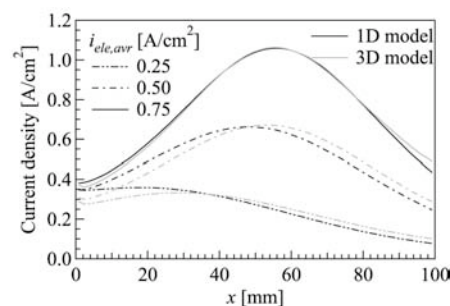


図-4 三次元詳細解析と一次元解析の比較<sup>4)</sup>

現在主流となっている電極支持形のセルでは多孔質電極の微細構造が発電性能と信頼性を左右するため、電極微細構造最適化

に向けて様々な研究が行われている。しかし、電極微細構造は製作条件によって大きく変化するため、最適設計に向けた一般的知見を実験のみから得ることは難しい。そこで本研究室では、複雑な電極微細構造を考慮した詳細な数値解析を行うことで、各製作パラメータの評価を行っている。従来の一次元電極モデルと物質輸送の三次元詳細解析を組み合わせたモデルを作成し、燃料極材料である Ni/YSZ の最適な粒子径比を検討した(図-5)<sup>5)</sup>。また、円筒形単セルでの発電実験を行い、電極材料粒子径や焼成条件による微細構造の変化が発電性能に及ぼす影響を評価することを試みている。

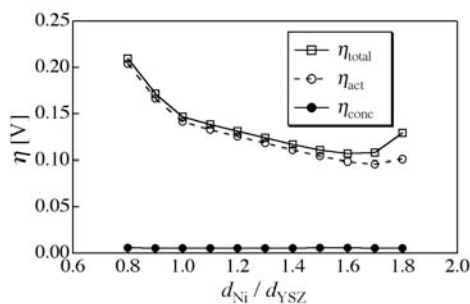


図-5 Ni-YSZ 粒子径比による過電圧変化<sup>5)</sup>

#### 4. $\mu$ GT - SOFC ハイブリッドシステム<sup>6)</sup>

再生式 $\mu$ GT 単体の熱効率は、40%が限界と見られ、燃料電池との複合化による、更なる効率向上が期待される。特に、SOFC は作動温度が高く、その排熱でタービンを駆動し動力回収を行う場合、有利となる。本研究では、出力 30kW の $\mu$ GT - SOFC ハイブリッドシステムを対象とし、サイクル解析を行った。30kW という小規模のシステムを想定したのは、小スケール化に伴うガスタービン要素効率の低下が、ハイブリッドシステムの全体性能にあまり影響しない一方で、SOFC の製造コスト低減に結びつくことを背景としている。

図-6 に、対象システムの構成を示す。また図中には、解析結果の一例を示した。本システムでは、まず空気を圧縮し、再生器で加熱した後、メタンと共に SOFC に供

給して、発電を行う。次に SOFC の排ガス中に含まれる可燃ガスにさらにメタンを加え、燃焼器で燃焼させる。そして、燃焼ガスによりタービンを駆動して、発電を行う。タービンから吐出されるガスは、再生器の加熱源として利用された後排気される。

サイクルパラメータがシステム性能に及ぼす影響を評価した結果、SOFC セルの温度が 1000°C、タービン入口温度が 1250°C の場合、発電効率は 65%以上に達することを明らかにしている。

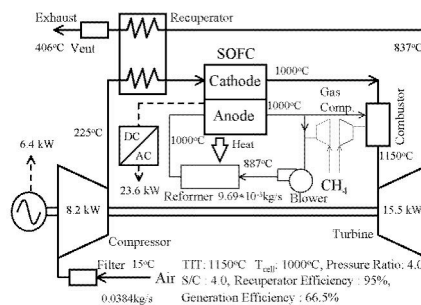


図-6  $\mu$ GT - SOFC ハイブリッドシステム<sup>6)</sup>

#### 5. おわりに

有限な資源と地球環境に配慮した持続型エネルギーシステムの構築は、21 世紀型工学の命題であり、マイクロガスタービンと固体酸化物形燃料電池は、コージェネレーション分散電源として、そのキーテクノロジーとなる可能性を十分に秘めている。今後も、小型分散エネルギーシステムのさらなる高性能化に向けて研究に励む所存である。いつか我々の成果が、ブレークスルーとなることを願いつつ。

#### 参考文献

- 1) Suzuki, H., Kasagi, N., and Suzuki, Y., Exp in Fluids, 36: 498-509 (2004)
- 2) 栗本・他 2 名, 機論 70-694:1417-1424 (2004)
- 3) 斎木・他 4 名, 第 42 回伝熱シンポジウム講演論文集, 397-398 (2005)
- 4) Suzuki, M., Shikazono, N., Fukagata, K., and Kasagi, N., Proc. 4th Int. Conf. Fuel Cell

Science, Engineering and Technology (FUELCELL2006), 9pp (2006)

5) 鈴江・他 2 名, 日本機械学会 2006 年度年次大会講演資料集, 8:352-353 (2006)

6) 上地・他 2 名, 機論 68-666:626-635 (2002)

---

**Title**

Toward Development of High Performance Small Distributed Generation Systems

**Author**

Yu Saiki, Yoshinori Suzue

Turbulence and Heat Transfer Laboratory  
Department of Mechanical Engineering,  
The University of Tokyo

**Contact**

Hongo 7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

saiki@thtlab.t.u-tokyo.ac.jp

suzue@thtlab.t.u-tokyo.ac.jp

**Key words**

Distributed Generation System, Micro Gas Turbine, Combustor, Combustion Control, Solid Oxide Fuel Cell, Numerical Simulation, Hybrid System, Cycle Analysis

**Abstract**

Small-scale distributed generation (DG) systems are expected to play a major role in the future society with minimum environmental impacts. Micro gas turbines ( $\mu$ GT) and solid oxide fuel

cells (SOFC) are considered as core technologies in DG systems. However, various problems should be resolved before these technologies are widely introduced to DG markets. For instance, small combustors of  $\mu$ GT are operated under a wide range of load condition, so it is difficult to keep high combustion efficiency, low nitrogen oxides emission and flame stability. In order to overcome these difficulties, active combustion control technology has to be developed. Our research group has made a coaxial jet nozzle with miniature magnetic flap actuators to control fuel/air mixing and combustion. It is found possible to flexibly manipulate the mixing process and improve the flame characteristics under different load conditions. As for SOFC, its operating temperature causes breakage of cell structure and deterioration in microscopic structure of electrodes. In order to improve the efficiency and durability of SOFC, multiscale simulators for SOFC systems are needed for the optimization of cell and stack design, and of system operation. A highly accurate quasi-1D cell simulator has been developed, and a detailed microstructure-modeling scheme is now being developed. In addition, a hybrid system based on  $\mu$ GT and SOFC, which is expected to achieve a much higher efficiency than conventional  $\mu$ GT, is being studied. We investigate the effects of cycle design parameters on the performance of a  $\mu$ GT-SOFC hybrid system of 30 kW power output. The power generation efficiency of the hybrid system over 65% is expected.