

「資源循環・エネルギーミニマム型システム技術」

平成11年度採択研究代表者

鈴木 健二郎

(芝浦工業大学システム工学部 シニア教授)

「超小型ガスタービン・高度分散エネルギーシステム」

1. 研究実施の概要

我が国の社会は今後ますます個性化する傾向にあると考えられる。それゆえ、それを支えるエネルギーシステムが必要となる。高度分散エネルギーシステムは、エネルギー使用量の空間的・時間的变化を受容できる点で、個性化社会に適する。また、このシステムは自然災害時のライフライン確保を容易にし、インフラ整備に困難度が大きい離島や、国外の過疎地、開発途上国での受容が見込まれる。このシステムを高効率化し、広く導入できれば、家庭にインフラを含むエネルギー利用に対するコスト感を与えることができ、現在では難しいと言われている民生用エネルギーコントロールの困難度を軽減できる。また、大容量発電システムをベースロード供給に特化できるため、資源的な無駄も排し得る。本研究は、超小型ガスタービンと固体酸化物形燃料電池のハイブリッドシステムの、高度分散エネルギーシステムとしての実現可能性の検討や、システムの最適化指針の確立、システム設計に必要なモノグラフやデータベース構築のための基礎研究の推進を行うものである。これまでの検討により提案システムの実現可能性およびシステムの最適化に直接的に影響を与える因子が明らかとし、それら要素の高性能化へ向けた基礎研究を行ってきた。また、研究開始当時には困難と考えていた固体酸化物形燃料電池の作動温度の低下が技術の進歩により急速に現実味を増してきたことから、中低温型燃料電池を採用した場合のシステムについて重点的に検討を行った結果、中低温型燃料電池とマイクロガスタービンのハイブリッドシステムの有望性が明らかとなった。今後のシステム開発はまずは実績のある従来型（高温型）燃料電池を採用してのハイブリッドシステムに注力し、将来的には中低温型の採用を目指すことになる。プロジェクトとしては最終年度を迎えるため、これまで推進してきた研究内容のまとめを行う。

2. 研究実施内容

本研究は9つの研究テーマグループから構成されており、そのそれぞれのグループに関する平成15年度の研究成果を以下に報告する。

(1) 小容積燃焼グループ

- ・MGT用小寸法ペンシル型燃焼器の開発：燃料ノズルを取り囲むように空気噴流ノズル

ルを配するバッフル板を燃焼器入口部に有する小寸法ペンシル型燃焼器開発のための実験を行うとともに、三次元数値解析も実施し、流路の幾何形状やスワール流れ等の燃焼器入口条件、物性値の温度依存性、噴流の加振などが燃料噴流－空気噴流の混合性能に及ぼす影響を検討した。

- ・熱効率向上のためのタービン動翼内全温一定膨張燃焼：ガスタービンの最高温度を向上させることなく、熱効率を向上する方法の一つである全温一定過程を創出するためのタービン動翼内燃焼に関する実験を行った。まずは、燃焼に用いられるタービンと同軸に取り付けられている圧縮機側の空気流量・圧力を制御することにより、タービン動力の吸収と制御の実効性を確認した。次に、燃料噴射機能を有する静翼を製作し、高速流中における着火性能を実験的に調べた。

- ・高温燃焼用触媒の開発とメタン燃焼特性：ヘキサアルミネートの一部をRu等の貴金属で置換した複合酸化物から、加熱還元処理により、これらの貴金属の微粒子をヘキサアルミネート化合物表面に析出させた触媒の活性について検討した。この触媒は、メタンの部分酸化反応に高活性であり、高温でも活性成分であるRuの揮散が少なく、耐熱性が高いことが分かった。

(2) マイクロ伝熱グループ

- ・PS型熱交換器の高性能化に関する研究：伝熱面にディンプル・プロトルージョンをもつプライマリーサーフェス型熱交換器について実験および数値解析により検討した。ディンプル・プロトルージョンによる伝熱促進は低レイノルズ数域でも確認されること、それら配置が伝熱特性に大きな影響を与えることを明らかにした。

- ・多孔質フィン利用熱交換器の検討：発泡金属、金属製スプリングを二次伝熱面として利用するプレートフィン型熱交換器について伝熱実験を行った。スプリングフィンの伝熱性能は商用オフセットフィンを超える場合があり、幾何形状についての系統的な検討を行った。

- ・マイクロチューブ内流れの熱伝達：矩形マイクロチャンネル内を流れる水溶液の温度を測定するマイクロLIF（レーザー誘起蛍光）温度測定システムを開発し、予備実験を行った。蛍光の強度・位置に対する検定を行うことで、チャンネル内流体温度の測定が可能であることが分かった。

- ・ダイナミック熱交換器の製作：高温側の円筒コアが通気孔とフェンスをもち、コアが自律回転して熱交換を果たす円筒型熱交換器を試作した。コアの回転が熱交換特性に影響を及ぼすことが分かった。

- ・小型再生熱交換器の最適設計：剥離による圧力損失増大を抑制しつつ、伝熱促進に有効な強い二次流れを発生しうる斜め波状壁を有する再生熱交換器内の熱流動数値シミュレーションを行った。流路の幾何学的なパラメータを系統的に変化させた結果、ヌッセルト数で2.8倍、伝熱と圧力損失の比である j/f 因子で1.2倍となる極めて優れた設計条件を得た。

(3) 複雑系熱流動グループ

・小型ガスタービンの内部複雑熱流動の解明： 強い曲率を有するチャンネル内乱流のDNSを行い、凸面と凹面それぞれにおける乱流の生成、散逸機構について系統的な知見を得た。さらに、曲率流の予測に適したSGSモデルの導出およびその検証を行った。また、流れ方向、スパン方向、壁垂直方向の三つの軸方向ベクトルの任意二軸成分を有する回転チャンネル乱流のDNSを行い、乱流輸送機構の解明を行った。得られた結果を用い、既存のSGSモデルの検証を行った。

・複雑系熱流動解析のためのDNSとモデリング： 回転タービン翼内で起こる回転、曲り、衝突などの熱流体力学的基本乱流現象のDNSを行った。本年度は、これらDNSデータベースを基に、任意回転軸を持つ回転熱流動場に対する乱流モデルの予測精度の向上を果たした。

(4) 高温・高速マイクロ流動グループ

・低レイノルズ数流れにおけるタービン翼列特性の研究： 低レイノルズ数域におけるタービン翼列性能とレイノルズ数の関係を調べるため、環状翼列風洞を用いて、タービン翼列出口の境界層厚さを、熱線流速計によって測定した。レイノルズ数の低下に伴って、境界層の厚さが急増し、形状係数が乱流側から層流側に変化することが分かった。

・超微細多孔質表面からの水蒸発を利用したハイブリッド軸受の開発： 超微細多孔性媒体（平均孔径：数ミクロン）を軸受材として用いて周囲から軸受隙間に水を浸透させ、軸停止時は水による液体潤滑、軸回転時は水蒸気の蒸発による静圧と通常の動圧によるハイブリッド気体潤滑に関する実験を行った。まずは、起動を想定した液体潤滑状態での挙動特性を調べ、本軸受機構の振れ回り挙動特性を調べた。次に、軸をバーナで加熱することにより軸-軸受隙間間が水蒸気で満たされている状態での回転実験を行った。

(5) 包括コードグループ

・ガスタービン熱流動現象の包括予測コードの開発： 実際のMGTで使用されているタービン翼の乱流モデルによる応用計算を実行し、内部熱流動を明らかにした。

(6) マイクロ計測・制御グループ

・ステップ流れの熱伝達と制御： ステップ上端に置いたフラップを局所的に振動させる場合について、ステップ下流の局所熱伝達率を測定した。稼働させたフラップ直下の熱伝達量が増大する結果が得られ、流れの局所制御の可能性が示唆された。

・翼まわりの流れの制御： 低速風洞において、対称翼の翼前縁に固定小フラップを設置する場合について揚力と抗力を測定した。小フラップが稼働しない場合においても揚力が増大するケースが認められ、小フラップの設置がはく離防止に有効であることが分かった。

・マイクロ制御素子による熱流動制御： フラップ型マイクロ電磁アクチュエータ群によるメタン・空気同軸二重噴流の混合過程の能動制御を導入し、広い当量比条件下で安定、かつ窒素酸化物排出の小さい小型燃焼器を実現すべく実験的評価を行った。本制御において、フラップ駆動の位相差モード10種類と周波数4種類を制御変数とした燃焼実

験を行い、安定性と低NOxの多目的最適解群を得た。

(7) 衝撃損傷解析グループ

・異物衝撃損傷 (FOD) の研究： 小型ガスタービンで多く使用される遠心型ブレードに対して異物衝撃損傷 (FOD) 解析を行い、ブレード前縁先端衝突に対して最大応力発生位置を明らかにした。これにより異物衝突によって引き起こされる構造的破損対策の手がかりが得られた。

(8) 燃料電池グループ

・内部改質SOFCの数値解析： SOFC単セルを対象とする3次元数値解析コードを開発した。円筒型においては内部改質触媒の分布を制御することがセル温度分布を好ましい状態にすることに有効であることを示した。平板 (円板) 型ではインターコネクタの形状と配置がセルの温度分布に影響を与えることを示した。

・固体酸化物形燃料電池に関する研究： Ni-YSZハーフセルを用い、インピーダンス解析により、加圧による燃料極反応の過電圧への影響も調べた。加圧下の燃料極反応では、温度および酸素分圧が一定の時、全圧の上昇とともに電極反応抵抗は減少し、拡散抵抗が増加することがわかった。特に、酸素分圧が低い場合には、燃料極反応で生成する水による濃度過電圧が大きくなることがわかった。

・高温固体電解質燃料電池発電システムの高効率化： 高性能カソード材料として新たに開発した $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Fe}_{0.8}\text{Mn}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ は、 1000°C では電解質である8YSZと反応して分極抵抗が大きくなるが、 900°C においては900時間後も変化せず安定に使用できることを明らかにした。

・熔融塩電気化学プロセスによるマイクロガスタービン用材料の形成： 熔融 $\text{LiCl-KCl-Li}_3\text{N}$ 中における電気化学プロセスにより、SUS 304の表面窒化に成功した。特に、パイプ状のSUS 304の外表面および内面の窒化に成功し、本手法が複雑形状の試料に対しても有効であることを示した。

・100W級SOFCを設置し、その特性の検討を開始した。

(9) LCA (ライフサイクルアセスメント) グループ

・MGT-SOFC-吸収冷凍機からなるマイクロコジェネレーションシステムの性能評価： MGT-SOFCのボトミングとして単効用もしくはシリーズフロー型2重効用のLiBr-水吸収冷凍を導入したサイクルの解析を行った。これまでの定常運転時の性能評価に加え、部分負荷運転時での計算を行えるようにし、さらに、その結果を用いて本システムをエネルギー需要体 (家庭・オフィス等) へ導入した場合の電力・熱供給の最適化を行った。

・廃熱利用型多重効用吸収式冷凍機の最適設計および高効率熱利用： 30kW級マイクロガスタービンとSOFCコンバインドシステムの廃熱を有効に利用する吸収式冷凍機の最適設計を行い、中間廃熱を利用することで高効率化可能であることを示した。また、蓄熱システムの併用で高効率熱利用が可能であることを示した。(神戸)

・超小型ガスタービンのサイクル解析と設計研究： 超小型ガスタービンと組み合わされる固体酸化物形燃料電池の電気化学反応と熱物質移動を回路網法により解析した。平

板型セルを対象とし、空気および燃料の流れ方向、水蒸気改質の冷却効果、熱伝導のセル形状及ぼす影響等について解析を行った。一般的な設計指針として、空気流れ方向、燃料改質方向にセルを短く配置することがセル内温度分布改善に有効であるとの知見を得た。

- ・ MGT本体の概念設計： MGTの性能に関して当初の設計条件を見直し、この結果および今までの研究成果を取り入れてMGT本体の概念計画図を作成した。
- ・ 部分循環型ハイブリッドシステムの検討： SOFCとMGTのハイブリッドシステムにおいて、熱効率の向上を図るために再生器出口空気あるいはSOFC出口ガスの一部を循環させるシステムについて性能検討をおこなった。
- ・ SOFCの低温作動を考慮したハイブリッドシステムの部分負荷特性の解析：ハイブリッドシステムは低温作動であっても良好な部分負荷特性を有し、HS-CGSの導入は従来型のエネルギー供給と比較して大幅な省エネルギーを実現する可能性を有することを示した。
- ・ マルチステージモデルを用いたハイブリッドシステムのサイクル解析：タービン入口に熱交換器を設置しタービン出口温度を低下させると共に熱回収を行うようなシステム構成を採ることで、効率低下を抑制しつつ構成材料の耐熱要求を緩和することが可能であることを示した。

3. 研究実施体制

(1) 小容積燃焼グループ

① 研究分担テーマ長名 (所属、役職)

鈴木健二郎 (芝浦工業大学システム工学部, シニア教授)

② 研究項目

MGT用小寸法ペンシル型燃焼器の開発

- ・ 熱効率向上のためのタービン動翼内全温一定膨張燃焼
- ・ 高温燃焼用触媒の開発とメタン燃焼特性

(2) マイクロ伝熱グループ

① 研究分担テーマ長名 (所属、役職)

鈴木健二郎 (芝浦工業大学システム工学部, シニア教授)

② 研究項目

- ・ PS型熱交換器の高性能化に関する研究
- ・ 多孔質フィン利用熱交換器の検討
- ・ マイクロチューブ内流れの熱伝達
- ・ ダイナミック熱交換器の製作
- ・ 小型再生熱交換器の最適設計

(3) 複雑系熱流動グループ

① 研究分担テーマ長名 (所属、役職)

鈴木健二郎 (芝浦工業大学システム工学部, シニア教授)

- ② 研究項目
 - ・ 小型ガスタービンの内部複雑熱流動の解明
 - ・ 複雑系熱流動解析のためのDNSとモデリング
- (4) 高温・高速マイクロ流動グループ
 - ① 研究分担テーマ長名 (所属、役職)
鈴木健二郎 (芝浦工業大学システム工学部, シニア教授)
 - ② 研究項目
 - ・ 低レイノルズ数流れにおけるタービン翼列特性の研究
 - ・ 超微細多孔質表面からの水蒸発を利用したハイブリッド軸受の開発
- (5) 包括コードグループ
 - ① 研究分担テーマ長名 (所属、役職)
鈴木健二郎 (芝浦工業大学システム工学部, シニア教授)
 - ② 研究項目
 - ・ ガスタービン熱流動現象の包括予測コードの開発
- (6) マイクロ計測・制御グループ
 - ① 研究分担テーマ長名 (所属、役職)
鈴木健二郎 (芝浦工業大学システム工学部, シニア教授)
 - ② 研究項目
 - ・ ステップ流れの熱伝達と制御
 - ・ 翼まわりの流れの制御
 - ・ マイクロ制御素子による熱流動制御
- (7) 衝撃損傷解析グループ
 - ① 研究分担テーマ長名 (所属、役職)
鈴木健二郎 (芝浦工業大学システム工学部, シニア教授)
 - ② 研究項目
 - ・ 異物衝撃損傷 (FOD) 特性の研究
- (8) 燃料電池グループ
 - ① 研究分担テーマ長名 (所属、役職)
鈴木健二郎 (芝浦工業大学システム工学部, シニア教授)
 - ② 研究項目
 - ・ 内部改質SOFCの数値解析
 - ・ 固体酸化物形燃料電池に関する研究
 - ・ 高温固体電解質燃料電池発電システムの高効率化
 - ・ 熔融塩電気化学プロセスによるマイクロガスタービン用材料の形成
- (9) LCAグループ
 - ① 研究分担テーマ長名 (所属、役職)
鈴木健二郎 (芝浦工業大学システム工学部, シニア教授)

② 研究項目

- ・ MGT-SOFC-吸収冷凍機からなるマイクロジェネレーションシステムの性能評価
- ・ 廃熱利用型多重効用吸収式冷凍機の最適設計および高効率熱利用
- ・ 超小型ガスタービンのサイクル解析と設計研究
- ・ MGT本体の概念設計
- ・ 部分循環型ハイブリッドシステムの検討
- ・ SOFCの低温作動を考慮したハイブリッドシステムの部分負荷特性の解析
- ・ マルチステージモデルを用いたハイブリッドシステムのサイクル解析

4. 主な研究成果の発表（論文発表および特許出願）

(1) 論文（原著論文）発表

- 君島真仁，笠木伸英，マイクロガスタービン・熔融炭酸塩形燃料電池ハイブリッドシステムのサイクル解析，日本機械学会論文集（B編）69巻680号，1001-1008，2003年4月.
- 奥田英信，君島真仁，浜名芳晴，笠木伸英，マイクロガスタービンの性能試験に基づくコージェネレーションシステムの導入評価，エネルギー・資源，Vol. 25, No. 1, 70-76，2004年1月.
- Haibin Wu & Nobuhide Kasagi, Turbulent Heat Transfer in A Channel Flow with Arbitrary Directional System Rotation, International Journal of Heat and Mass Transfer, 平成15年8月.
- Haibin Wu & Nobuhide Kasagi, Effects of Arbitrary Directional System Rotation on Turbulent Channel Flow, Physics of Fluids, 平成16年4月.
- 森本賢一，鈴木雄二，笠木伸英，斜め波状壁を用いた再生熱交換器の熱流動特性，日本機械学会論文集（B編），2003年12月22日.
- Hiroshi Iwai, Hiroyuki Watanabe, Kazuya Tatsumi, Kenjiro Suzuki, Conjugate heat transfer for a minimal unit model of counter flow type corrugated primary surface heat exchangers, International Journal of Heat Exchangers, Vol. 4 No.1, p.1-26, 2003.

(2) 特許出願

H15年度特許出願件数：0件（CREST研究期間累積件数：1件）