

「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

(京都大学 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、開発途上国での需要が見込まれる。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を、高度分散エネルギーシステムとして実現するための、フィージビリティの検討や、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。これまでに提案システムのフィージビリティおよびシステムの最適化に直接的に影響を与える因子を明らかとし、H14年度はそれらについての検討を重点的に行ってきた。

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本年度の研究成果を以下順次報告する。

(1) 小容積燃焼グループ

- ・マルチ噴流型燃焼器： バッフル板を設置した燃焼器を用いることにより、特に起動時の常温燃焼の場合に、広い条件範囲で火炎を安定に保つことがわかった。高温燃焼条件においても、燃料流量が比較的大きい場合に吹き飛び限界が高くなる。
- ・小容積高負荷均質燃焼の研究： SOFCとのハイブリッドシステム用超小型ガスタービンにとって最適の、安定した超希薄完全燃焼が実現できる小寸法燃焼器を開発することを目的に、燃料噴流に対する空気噴流の供給流量や吹き込み位置を相対的に変化させて温度分布、ガス分析を実施した。また、数値シミュレーションによって燃料-空気

の混合の良否を予測した。

- ・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として、全温一定過程の導入を考える。全温一定過程はタービン動翼内で燃焼を行うべきであると考え、自動車用ターボチャージャーを用いて実験を行った。拡散火炎の先端がタービン内で吹き飛ばずに保持されることは確認されたものの、全温一定過程の実現には、タービン入口に近いところから燃料を噴き込み、火炎保持機構を工夫する等、さらなる改良の必要がある。
- ・マイクロ燃料注入器とマイクロ保炎器を兼ねた燃焼場の実験： 小容積内での燃焼を安定に完了させるため、燃料混合、および、火炎保持機構の工夫が必要である。幅1mmのV字型およびU字型の燃料注入器を兼ねた保炎器を製作し実験を行った。高速空気流中でも広い可燃限界を達成することがわかった。
- ・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Ni等の金属で置換した複合酸化物均一相を一旦形成させた後に、相分離条件へ変化させることにより、金属ナノデポジットをヘキサアルミネート化合物表面に析出させる新規触媒調製法について検討した。この方法により調製した触媒は、メタンの部分酸化反応および水蒸気改質に高活性であり、またこれらの反応における炭素析出が少ないことがこれまでに分かった。
- ・小容積高負荷均質燃焼の研究： 低NO_x生成（O₂ 0%換算で3ppm）と完全燃焼が達成された希薄予混合旋回燃焼器について、その火炎内部構造（主要成分とNO_x濃度分布および温度分布）の調査を行った。またNO_x排出特性、特に支配的なPromptNO_xの生成特性に対する圧力、空気比、入口温度の影響を数値解析により明らかにした。

(2) マイクロ伝熱グループ

- ・再生熱交換器の小型・高効率化に関する研究： 矩形断面を持つ波形流路、あるいはディンプル・プロトルージョンをもつプレート間の3次元熱流動場を数値解析的に検討し、断面アスペクト比、波形の形状、ディンプル・プロトルージョンの配置が、それぞれの伝熱特性に与える影響を明らかにした。
- ・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。スプリングフィンは既存の商用オフセットフィンを越える伝熱特性を持つ可能性があることが明らかとなった。
- ・マイクロ再生熱交換器の高効率化： マイクロチューブ内の温度分布を調べるために、温度依存性のある蛍光体（YVO₄:Eu）を用いる温度測定装置を製作し、予備実験を行った。蛍光の映像を取得し、その強度を解析することで温度測定が可能であることが分かった。
- ・金属要素を挿入した熱交換器の熱伝達： 金属バネ要素を流路に挿入する場合の熱交換量を測定した。金属バネ要素はインナーフィン要素を越える熱交換性能を達成し得ること、また、線径から圧力損失が概ね推定でき、そのうえでピッチー線径比による伝

熱の最適化が行える点において、伝熱・圧損特性を容易に設定できる特徴をもつことが分かった。単位質量あたりの伝熱性能が高く、機器の軽量化にも有効であることが分かった。

- ・小型再生熱交換器の最適設計： 複雑形状流路内の温度連成を考慮した熱流動解析ツールを開発し、遺伝的アルゴリズムに基づく熱交換器の形状最適化手法を構築した。矩形断面を有する層流ダクトを想定し、伝熱・圧損特性向上のための最適流路形状に対する検討を行った。

(3) 複雑系熱流動グループ

- ・壁面スライドを伴うチャンネル流れの直接数値解析： 圧縮機・タービンにおける翼間流れを単純化したモデルとして、チャンネル壁面が主流方向と垂直な方向にスライドしかつ回転する流れ場に関してDNSを行い、壁面スライドと回転が流れ場に与える影響について検討した。
- ・超小型ガスタービンの内部複雑熱流動の解明： 高回転乱流に関して、より一般的な直交する三軸回転のチャンネル乱流をDNSにより解析し、運動量及び熱輸送機構の解明を行った。また、高回転、高曲率乱流の予測に適したLESモデルの開発及び選定を行った。
- ・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熱流動現象の詳細を明らかにするために、回転、曲り、衝突などの回転タービン翼における熱流体力学的現象の基本を抽出し、それらについてDNSを行なった。本年度は、伝熱を伴う回転チャンネル及び曲りチャンネルについてDNSを行い、プラントル数効果を含めた乱流伝熱現象の詳細を明らかにした。モデリングにおいては、任意回転軸をもつ回転流れ場に対して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： 環状翼列風洞を用いて、マイクロガスタービンが作動する低レイノルズ数域において、タービン翼列の空力特性がどのように変化するかを実験的に調べた。レーザードップラ流速計によって動翼ミッドスパンの非定常流れを測定して、主流乱れ度と動静翼干渉の影響を明らかにした。
- ・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高圧によるハイブリッド気体潤滑を利用した新しい軸受を提案し、その基礎特性を理論的・実験的に調べた。数値解析によりハイブリッド軸受は真円軸受と比較し、偏心が小さく、また、限界回転数が高いことを明らかにした。また、エアタービンにより軸を回転させる実験装置を製作し、起動時の特性を調べた。

(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： 他の研究テーマグループからの知見、および開発中の数値解析コードを統合し、タービン内の熱流動現象に関する包括的な予測コードの開発を行いつつある。

(6) マイクロ計測・制御グループ

- ・マイクロミキサー及びマイクロポンプの構造に関する研究： マイクロガスタービンや燃料電池に燃料を送る場合のマイクロポンプやマイクロミキサーの基本構造に関する研究を行った。燃料をマイクロ流路でミキシングする理論に関して2層流の界面の不安定性理論に基づき検討し、マイクロミキサーの試作を行った。
- ・剥離防止に関する研究： ステップ上端でフラップ振動を与える場合について、ステップ下流の局所熱伝達率を測定した。ステップ背後に生じる熱伝達不良域がフラップの振動振幅、または周波数の増加とともに小さくなり、これが非定常な渦放出の強化と高速流の流入に起因することを見いだした。このことは、フラップ振動が剥離防止に有効であることを強く示唆する。
- ・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を装備したインテリジェントノズルによる同軸二重噴流制御の様子をPIVにより定量的に可視化した。その結果、アクチュエータにより外側せん断層に誘起される渦輪は内側せん断層に複数の渦輪を誘起し、これらの相互作用により、中心流体の輸送を制御出来ることが分かった。

(7) 衝撃損傷解析グループ

- ・異物衝撃損傷 (FOD) の研究： ガスタービン用セラミックのき裂発生条件として臨界接触圧力に着目し、準静的押し込み試験による値と動的荷重負荷に対する解析値とを比較・検討し、妥当な臨界値推定方法について明らかにした。

(8) 燃料電池グループ

- ・内部改質固体酸化物形燃料電池 (SOFC) の熱流動場に関する数値解析： 円筒型SOFCセル内の燃料・空気双方の熱流動場、濃度場を電気化学反応も考慮しつつ、数値的に解析した。内部改質を考慮に入れた。平板型など多様なセル形状に対応できるようコードの改変を進めた。
- ・固体酸化物形燃料電池における燃料適応性： 通常のNi-YSZサーメットにおいては、炭化水素燃料を用いた場合に、炭素析出による性能劣化が問題となる。Ni-YSZサーメットにごくわずかな貴金属を添加することにより、水蒸気改質活性が向上し、電極性能が向上することが明らかになった。Ru, Ptの添加による電極性能向上が顕著で、インピーダンス測定の結果、燃料の拡散に起因する過電圧が減少することが分かった。
- ・高温固体電解質燃料電池発電システムの高効率化： SOFC用カソード材料として新たに開発した $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Fe}_{0.8}\text{Mn}_{0.2}\text{O}_{3-x}$ に関して、電気化学インピーダンス法による詳細な検討を行った。カソード分極の増大および酸素分圧の低下により分極抵抗が減少することが明らかとなり、これが酸素空孔の増加に起因することを示した。
- ・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、SUS430の表面窒化に成功した。窒化物層中の窒化物が CrN であることを確認するとともに、微小ビッカース硬度が約1000にまで大幅に増大したことを確認した。

(9) LCA (ライフサイクルアセスメント) グループ

- MGT/SOFCハイブリッドシステムのシステム解析： マイクロガスタービンと固体酸化物形燃料電池のハイブリッドサイクルのシステム解析を行っている。SOFCを有限個の要素に分割して諸量の分布を考慮するマルチステージモデルを提案し、その有効性を示した。
- MGT-SOFC-吸収冷凍機のサイクル解析： 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。なお、予め設定するタービン入口温度よりもガス温度が高くなるような場合には、熱交換器通過後の圧縮空気を何割かタービン入口へバイパスさせてガス温度を冷却するフローを導入した。各要素の基本特性を把握し、その後、サイクル全体として組み合わせた場合の最適設計を行った。
- 廃熱利用型多重効用吸収式冷凍機の最適設計： 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、独自に開発した液膜モデルを利用して行った。また、多重効用化した場合の問題点として不凝縮性ガス問題を数値的に取り扱い、制御法を開発した。
- 超小型ガスタービンのサイクル解析と設計研究： SOFCの低温作動化の開発動向を受けてGT-SOFCハイブリッドシステムにおけるSOFC作動温度の影響について検討するとともに、圧縮機・タービンならびに再生熱交換器の性能がシステム全体の性能に及ぼす影響の評価を行った。また、SOFCの回路網モデルにもとづく性能評価を行うための計算コードの構築を行った。
- 固体酸化物形燃料電池の電気化学的性能解析とエクセルギー損失評価： 固体酸化物形燃料電池(SOFC)の高性能化の指針を示すため、SOFC電極ならびに電解質における熱的・電気化学的内部プロセスを解析し、局所のエントロピー生成量およびエクセルギー損失を評価した結果、電極反応に起因するエクセルギー損失が全損失の80%以上を占めることが明らかになった。
- 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て再計算をおこなった。また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。
- 低温型SOFCに適合するMGTシステムの検討： 低温型SOFCに適合するMGTシステムの検討をおこなった。その結果、現在の高温型SOFCに適合するMGTを部分負荷で使用することで対応可能であることを明らかにした。

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 (京都大学大学院工学研究科、教授)

② 研究項目

- ・マルチ噴流型燃焼器
- ・小容積高負荷均質燃焼の研究
- ・タービン動翼内全温一定膨張燃焼
- ・マイクロ燃料注入器とマイクロ保炎器を兼ねた燃焼場の実験
- ・高温燃焼用触媒の開発とメタン燃焼特性
- ・小容積高負荷均質燃焼の研究

(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 (京都大学大学院工学研究科、教授)

② 研究項目

- ・再生熱交換器の小型・高効率化に関する研究
- ・多孔質フィン利用熱交換器の検討
- ・マイクロ再生熱交換器の高効率化
- ・金属要素を挿入した熱交換器の熱伝達
- ・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 (京都大学大学院工学研究科、教授)

② 研究項目

- ・壁面スライドを伴うチャネル流れの直接数値解析
- ・超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、京都大学大学院工学研究科、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
- ・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、京都大学大学院工学研究科、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、京都大学大学院工学研究科、教授

② 研究項目

- ・マイクロミキサー及びマイクロポンプの構造に関する研究
- ・剥離防止に関する研究
- ・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、京都大学大学院工学研究科、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、京都大学大学院工学研究科、教授

② 研究項目

- ・内部改質固体酸化物形燃料電池 (SOFC) の熱流動場に関する数値解析
- ・固体酸化物形燃料電池における燃料適応性
- ・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、京都大学大学院工学研究科、教授

② 研究項目

- ・MGT/SOFCハイブリッドシステムのシステム解析
- ・MGT-SOFC-吸収冷凍機のサイクル解析
- ・廃熱利用型多重効用吸収式冷凍機の最適設計
- ・超小型ガスタービンのサイクル解析と設計研究
- ・固体酸化物形燃料電池の電気化学的性能解析とエクセルギー損失評価
- ・MGT本体の概念設計
- ・低温型SOFCに適合するMGTシステムの検討

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

- 辻村浩行, 後藤琢也, 伊藤靖彦, Electrochemical Formation and Control of Chromium Nitride Films in Molten LiCl-KCl-Li₃N Systems, Electrochimica Acta, 2002年7月5日.
- 松沼孝幸, 阿部裕幸, 筒井康賢, 動静翼干渉によるタービン動翼ミッドスパンの非定常流れ, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 30, No. 4(2002年7月号), pp. 312-321, 平成14年7月20日.

- 松沼孝幸, 阿部裕幸, 筒井康賢, LDV Measurements of Unsteady Flow within a Turbine Rotor at Low Reynolds Numbers, JSME International Journal Series B, Vol. 4, No. 3, 平成14年8月。
- 松沼孝幸, 阿部裕幸, 筒井康賢, 低レイノルズ数域におけるタービン静翼の三次元流れ (損失と流れの構造に与えるレイノルズ数の影響), 日本ガスタービン学会誌, Vol. 30, No. 3, pp. 208-215, 平成14年5月20日。
- 松沼孝幸, 阿部裕幸, 筒井康賢, 低レイノルズ数域におけるタービン静翼の三次元流れ (損失と流れの構造に与える主流乱れ度の影響), 日本ガスタービン学会誌, Vol. 30-No. 6(2002年11月号), pp. 526-535, 平成14年11月20日。
- Kazuya TATSUMI, Hiroshi IWAI, Kyoji INAOKA, Kenjiro SUZUKI, Numerical Simulation for Heat and Fluid Characteristics of Square Duct with Discrete Rib Turbulators, Int. Journal of Heat and Mass Transfer, 第45巻第21号, pp. 4353-4359, 平成14年8月24日。
- 小田豊, 岩井裕, 鈴木健二郎, 吉田英生, 多孔質体内熱流動と固体壁内熱伝導の連成解析, 日本機械学会論文集 (B編), 2003年3月号 (第69巻第679号), 平成15年3月25日。

(2) 特許出願

1 件