

「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

(京都大学大学院工学研究科 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・時間的変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となる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が明らかになったので、今後はこれらについての研究を重点化する。

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：前年度提案したマルチ噴流型小寸法燃焼器の燃焼実験で明らかになった火炎安定の流量条件範囲において、燃焼器出口温度の計測を行った。火炎の可視化も行えるよう比較的長い透明石英管を用いたにも関わらず、結果として希薄条件(当量比 ~ 0.4)下でも約 1,000K 以上の排気温度が実現可能であることが分かった。また、小型噴流の相互干渉と混合促進に関する可視化実験、ならびに数値解析も行い、マルチ噴流の有効性を確認した。
- ・全温一定膨張燃焼に関する研究：タービン動翼内全温一定膨張燃焼過程を有するマイクロガスタービンのサイクル解析を行い、その有効性を確かめた。
- ・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：マイクロガスタービンの燃焼器に

において燃料と空気の混合促進と安定な燃焼を目的とした燃料注入器を兼ねたマイクロ保炎器を製作し、高温・高速流中における燃焼実験を行った。

- 高温燃焼用触媒の開発とメタン燃焼特性： アルコキンド法により調製した $\text{Sr}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{MnAl}_{11}\text{O}_{19-\alpha}$ は高温でも安定な構造を持ち、メタン燃焼においては高活性で、 NO_x の発生量が少ないことが明らかとなった。メタン燃焼時に酸素濃度を増加させると、 NO_x 発生は増加し、水蒸気濃度の上昇にともない、 NO_x 発生量は減少する傾向が見られた。
- マイクロガスタービン燃焼器における低 NO_x 、高安定火炎構成の研究： マイクロガスタービン燃焼器の低 NO_x 化の眼目は、燃料の高速な予混合気化にあると考え、その実現を目指した様々な燃焼器を設計し、火炎安定性、排ガス特性を測定した。その結果、3ppm(O_2 0%換算)の低 NO_x を実現できた。また、その生成は主として Prompt NO 生成機構によることを予測した。

(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： 凹凸プレートを用いるプライマリサーフェス型熱交換器の要素を対象に、二次元熱伝導・熱伝達複合数値解析を行い、固体部のプレートに沿う方向の熱抵抗が大きくなると、プレートの伝熱性能が低下する可能性があることを示した。
- 多孔質フィン利用熱交換器の検討： 金属メッシュ、多孔質体など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、伝熱実験および数値解析により基礎的検討を行いその有効性を確認した。
- 孔空きプレートフィン型熱交換器の開発： 流れが垂直、または、ある角度で衝突するように孔の空いたプレートフィンを配置した熱交換器を製作し、その伝熱特性を調べた。
- マイクロ再生熱交換器の高効率化： マイクロチューブ内壁の平均熱伝達率を測定した。層流においても熱伝達率はレイノルズ数に対して一定値を取らず、変化する可能性があることを示した。
- 金属要素を挿入した熱交換器の熱伝達： 金網状金属要素、発泡金属要素を流路に挿入する場合の熱交換量を測定した。金属要素を挿入すると、滑面より熱伝達が促進されること、要素としては空隙率だけでなく、形状や配置が重要なパラメータとなりうることを示した。
- 小型再生熱交換器の最適設計： 超小型マイクロガスタービンの性能向上のため、再生熱交換器の流路断面の最適な分割について考察するために対向流型熱交換器を模擬した正方形及び菱形の管内乱流の直接数値計算を行い、頂角の異なる菱形管のなかでは正方形管の特性が最良であることを示した。

(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である、チャンネル壁面が主流方向と垂直な方向にスライドする流れ場に関して DNS を行い、壁面スライドが乱流場に与える影響について検討し、スライドがない場合に比べて乱れが強くなること、乱流構造が微細化する可能性のあることを示した。壁面がスライドする状態でさらに流路の回転を考慮するためのコードを開発中である。
- 超小型ガスタービンの内部複雑熱流動の解明： タービン内部での強い回転と曲率下での複雑

な熱流動機構を明らかにするために回転する曲がりチャンネル乱流の直接数値計算を行い、データベースの構築を行った。曲率や回転のために、乱流構造が大きく変化することを示し、ラージエディシミュレーションのための予備的検討を行った。

- ・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、その基本現象の詳細を明らかにした。さらにDNSの成果を援用し、回転乱流伝熱場の予測に適したモデルの開発を行い、そこにおける乱流モデルの予測精度の向上に成功した。

(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よるタービン翼性能低下現象の解明： マイクロ化に伴う剥離や渦の発生による翼列の空力性能劣化に対する改善策を検討するため、環状翼列風洞を用いて低レイノルズ数域におけるタービン翼列の空力特性の実験解析を行った。レーザードップラ流速計によって動翼内部の流れを測定し、上流の静翼で発生した二次渦とウェークの影響を調べた。

(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。マイクロ流路における壁面抵抗の影響を低減するために、脈動型のマイクロポンプを圧電素子を用いて作製した。また、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： 剥離と再付着を伴う三次元後ろ向きステップ流れについて、ステップ下流の局所熱伝達率を測定した。そのピーク値が側壁近くで現れ、流れ方向位置がレイノルズ数とともに変化することを見出した。ステップ上端でフラップ振動を与えると、熱伝達率分布はより高いレイノルズ数における分布に近づき、剥離防止効果があることを見出した。
- ・マイクロ制御素子による熱流動制御： 高負荷変動に耐えうる低 NO_x 小型ガスタービン燃焼器のために、マイクロマシン技術の応用によるインテリジェント・ノズルを用いたマイクロ燃焼制御システムを開発した。同軸噴流拡散火炎燃焼の制御において、安定燃焼範囲の拡大と NO_x/UHC 排出特性の改善が可能であることを明らかにした。

(7) 衝撃損傷解析グループ

- ・異物衝撃損傷(FOD)特性の研究： 3次元セラミックタービンブレードに対する粒子衝撃シミュレーションを行った。異物粒子がセラミックブレードに衝突した際の衝撃荷重の時刻歴および亀裂が発生する荷重を調べた。

(8) 燃料電池グループ

- 円筒型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。セル長さ、燃料流量などを変更して検討を行い、セル内に顕著なホットスポットが発生する条件についての知見を得た。
- 放電プラズマ焼結法を用いた固体酸化物型燃料電池単セルの成形に関する研究: SOFC の新しい製法として、放電プラズマ焼結法 (SPS) を試みた。固体電解質、空気極、燃料極をそれぞれの原料粉末から出発して SPS 成形を行い、得られた焼結体を用いて SOFC 単セルを作製し、通電実験による電気的特性の評価を行った。電解質材料は SPS による短時間での緻密体成形が可能であり、この焼結体を用いた SOFC 単セルでの発電が可能であることを確認できた。空気極材料および燃料極材料については、本研究の結果の範囲内では、本法が有効な方法とはいえず、さらに検討する必要がある。
- 固体酸化物形燃料電池における燃料適応性: Ni-YSZ サーマットにおいては、CaO, SrO, CeO₂ などの塩基性酸化物を添加することによってコーク生成速度が大幅に低下した。ごく少量の添加でもコーク生成が抑制されたことより、電池の性能を低下させることなく、燃料適応性を拡大できることが明らかになった。
- 高温固体電解質燃料電池発電システムの高効率化: 新たな SOFC 用カソード材料として、ペロブスカイト型酸化物 La_{0.6}Sr_{0.4}Fe_{0.8}Mn_{0.2}O_{3-x} を開発した。800~900°C におけるインピーダンス測定の結果、分極抵抗が従来の LSM と比べて小さく、また、昇温・降温サイクルによる熱履歴もないことが分かった。
- 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 LiCl-KCl-Li₃N 中における電気化学プロセスにより、ハードコーティング材として有望なクロム窒化物を形成させることに成功した。ここでは、電解電位が貴であるほど窒素濃度が高いこと、また、形成した Cr₂N および CrN が高耐食性を示すことを確認した。

(9) LCA(ライフサイクルアセスメント)グループ

- サーマルジェネレーターサイクルのマイクロガスタービンへの適合性: マイクロガスタービンをコージェネレーション分野に適用する場合、高い電力比率が期待できるサーマルジェネレーターサイクルとマイクロガスタービンさらにはこれに燃料電池 (SOFC) とを組み合わせたハイブリッドシステムについて検討を行った。その結果、両システムとも、効率、比出力において、従来のシステムに比べて高い性能が得られることが明らかになった。
- MGT-SOFC-吸収冷凍機システムの性能解析: MGT-SOFC システムのボトムングとして吸収式冷凍機を付加した系を考え、三者が練成したシステムの解析を行った。
- 超小型ガスタービンのサイクル解析と設計研究: マイクロガスタービンと燃料電池 (SOFC と MCFC) のハイブリッドシステムの小型分散システムとしての部分付加特性についてサイクル解析を行い、最適な運転モードを選択することにより、部分負荷効率の低下を押さえ得ることを示した。

- ・最適システムの提案と LCA による評価：蒸気を再生用熱交換器の前に噴射する再生型ガスタービンシステム、ならびに、多段燃料電池・ガスタービン複合システムを提案し、熱効率やエクセルギー損失の評価を行った。前者は低圧力比で高効率となる特性があり、発電効率 42.4%(HHV)が得られ、後者では発電効率 70%(HHV)を上回ることが示された。

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
- ・ 全温一定膨張燃焼に関する研究
- ・ 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
- ・ マイクロガスタービン燃焼器における低 NO_x、高安定火炎構成の研究

(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
- ・ 孔空きプレートフィン型熱交換器の開発
- ・ 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ン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よるタービン翼性能低下現象の解明
- (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
 - ・ 円筒型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
 - ・ 放電プラズマ焼結法を用いた固体酸化物型燃料電池単セルの成形に関する研究
 - ・ 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
 - ・ サーマルジェネレーターサイクルのマイクロガスタービンへの適合性
 - ・ MGT-SOFC-吸収冷凍機システムの性能解析
 - ・ 超小型ガスタービンのサイクル解析と設計研究
 - ・ 最適システムの提案とLCAによる評価

4. 研究成果の発表

(1) 論文発表

- Pei-Wen LI, Kenjiro SUZUKI, Hajime KOMORI and Jae-Hwan KIM, Numerical Simulation of Heat and Mass Transfer in a Tubular Solid Oxide Fuel Cell, Thermal Science and Engineering Vol.9 No.4 (2001), 2001年7月.
- Hiroshi IWAI, Hiroyuki WATANABE, Kazuya TATSUMI and Kenjiro SUZUKI, Numerical Simulation on Flow and Heat Transfer Characteristics of Primary Surface Heat Exchanger, Thermal Science and Engineering Vol.9 No. 4 (2001), 2001年7月.
- 服部博文(名古屋工業大学機械工学科), 長野靖尚(名古屋工業大学大学院都市循環システム工学), 回転チャネル乱流を解析するための乱流モデル, 日本機械学会論文集, 平成14年1月.

(2) 特許出願

なし