

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 17 日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22360092

研究課題名（和文）

小型蒸気発生器における燃焼／水管内沸騰流の動的連成とシステムの安定化

研究課題名（英文）Dynamic Interaction of Combustion/Boiling Heat Transfer of Compact Steam Generator and its System Stability

研究代表者

小澤 守（ OZAWA MAMORU ）

関西大学・社会安全学部・教授

研究者番号：60112009

研究成果の概要（和文）：特別の保炎機構を持たない管状火炎燃焼器とその周囲に水管を配置することによって高性能の小型蒸気発生器を構築し，その燃焼特性，伝熱特性，排ガス特性，燃焼の安定性など，装置設計上，必須のパラメータの把握を行った．水管としてはベローズ型フレキシブルチューブをらせん状に巻くことにより，燃焼室外壁を構成し，燃焼室長さを短く抑え，かつ十分な伝熱面積を確保することが燃焼/沸騰伝熱双方の安定性に極めて効果的であることを明らかにした．

研究成果の概要（英文）：Combustion/boiling heat transfer interaction is of primary importance in constructing compact steam generator with tubular-frame combustor. In this series of study, combustion characteristics, boiling heat transfer, exhaust gas properties and mutual interaction were experimentally investigated under steady and unsteady conditions, which gave principal design criteria. The optimized compact steam generator at present has been constructed with tubular flame combustor surrounded by spirally-wound bellows-type flexible tube.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	10,900,000	3,270,000	14,170,000
2011 年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2012 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
総計	14,900,000	4,470,000	19,370,000

研究分野：工学（機械工学）

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：伝熱機器，小型蒸気発生器，燃焼，沸騰流，

1. 研究開始当初の背景

燃料の多様性に柔軟に対応できる、また特別の保炎機構を持たない管状燃焼器を用いた小型蒸気発生器は、今後のエネルギー有効利用や高効率利用の上で、非常に高いポテンシャルを有している。しかし小型であるがゆえに燃焼過程と伝熱（抜熱）課程の相互干渉が強く、燃焼器の長さが不適切であれば気柱共鳴的な燃焼振動を引き起こし、それに伴って伝熱性能が悪くなることや、逆に伝熱性能すなわち過度に火炎の冷却が行われた際には燃焼ガス中のCO濃度が高くなる。つまり大型の燃焼器であれば、ある程度燃焼側（ガス側）と冷却側（水側）を分離できるが、小型燃焼器ではガス側と水側の静的のみならず動的な連成が顕著になる。このような現象はコンパクトな蒸気発生器を構成することによって初めて明らかになることであり、従来、ほとんど研究が行われていなかった。

2. 研究の目的

管状火炎燃焼器を用いた小型蒸気発生器モデルを試作して、基本的な水側およびガス側の伝熱特性を求めるとともに、静的並びに動的な燃焼特性とくに燃焼の安定について計測を行う。また燃焼特性とその安定性や伝熱特性に及ぼす燃焼器の幾何学的寸法・形状や燃焼量・燃焼条件の影響を明らかにする。さらに燃焼/伝熱連成問題としてのシミュレーションモデルを構築し、現象理解とともに管状バーナや熱交換器としての設計とシステムの最適化のための指針を得る。

3. 研究の方法

まず非燃焼条件のもとで、燃焼管に接線方向から予混合ガスを導入することによる管状火炎燃焼器モデルの各部の伝熱特性を計測し、さらに13A天然ガスを燃料として、管状火炎燃焼器と、その周囲に水ジャケットをおいた燃焼量10~20kW程度の小型蒸気発生器における燃焼特性と伝熱特性並びに相互干渉や燃焼・伝熱の安定性を調べる。測定項目は管状火炎燃焼器各部の燃焼ガス温度、排ガス特性、伝熱特性などであり、これらに及ぼす燃焼器長さ、燃焼量やノズル部の幾何学的寸法、予混合ガス速度などの影響を明らかにする。さらにすでに研究代表者らによって開発された二相流伝熱流動ダイナミクスのための離散気泡モデルを拡張してガス側と水側の連成問題の数値シミュレーションを行う。

4. 研究成果

本研究の当初は平滑管を用い、管状燃焼部下流の管内にインターナルフィンを設置して、燃焼ガスからの抜熱を促進することによって管状火炎燃焼器/蒸発器を構成できることを

実証し、同時に、非燃焼状態や燃焼状態における静的・動的な特性を求めた。その結果、非燃焼状態において求めた伝熱特性に基づいて、燃焼状態における伝熱特性の予測が可能であること、さらには安定燃焼のための燃焼管長さの限界などについて明らかにした。さらに蒸気発生器全体の熱バランスを保ちつつ高温の過熱蒸気を生成するため、管状火炎燃焼器管（周囲で蒸発が進行するため、ボイラに倣って炉筒という）内に過熱管を挿入するなど様々な試みを行った結果、管状火炎炉筒をじゃばら管によって構成することにより、管状火炎炉筒の蒸発伝熱面を阻害することなく、過熱部の伝熱面積を確保することができ、大気圧条件下で280°Cの過熱蒸気温度を達成した。なおじゃばら管を用いることにより、旋回流を伴う燃焼ガスの流れが阻害される恐れがあったが、実験の結果、本研究の範囲内では外径10.5mmのじゃばら管を用いれば、全く問題がないことが確認された。

燃焼炉筒として平滑管を用いた研究から始めた本一連の研究を通じて、炉筒面での伝熱特性、管状火炎の燃焼特性の静的・動的挙動が明らかとなり、それらを総合して、蒸気発生器全体の熱バランス解析モデルが完成し、蒸気発生器の基本的な設計指針が確立した。

水側の沸騰二相流については、ガス側・水側連成シミュレーションモデルの構築を目指して研究を行い、すでに開発が完了している離散気泡モデルにガス側のモデルを組み込み、ガス側/水側の連成問題解決のための数値シミュレーションのための基本モデルが構築された。このモデルを用いることにより、動的干渉現象の理解ができるようになった。

さらに部分負荷運転や水側の圧力損失低減などを想定すれば、水側を並列管構成とすることが一つの方法として考えられるが、その場合には水側において不安定流動が発生し、管の冷却に支障をきたすことが判明した。この脈動は不安定流動の典型でもある密度波振動と呼ばれるものであり、流動の安定化には伝熱管入口に絞りを入れる必要がある。これらの成果を総合することにより、実用的な設計のための基本データが得られた。その成果ならびに最終年度の成果であるじゃばら管を用いた蒸気発生器や連成シミュレーションについては、現在も研究が継続中であり、今後、順次取り纏めて公表していく予定である。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計2件）

①小澤守，網健行，気液二相流のパターンダイ

ナミクスモデリング, 日本マイクログラビティ応用学会誌, 29-2, pp.84-91, (2012)(査読有).

②小林侑弘, 松本亮介, 小澤 守, 毛笠明志, 竹森利和, 久角喜徳, 香月正司, 舩越 弘, 管状火炎を用いた過熱蒸気発生器の開発, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.77, No.776, pp.997-1001, (2011)(査読有).

[学会発表] (計 13 件)

国際会議

①Tatsuya Sugimoto, Ryosuke Matsumoto, Mamoru Ozawa, Yosuke Shiraga, Akeshi Kegasa, Toshikazu Takemori, Yoshinori Hisazumi, Tsukasa Hori, Masashi Katsuki, Development of Superheated-Steam Generator Using Tubular Flame, Proc. of International Conference on Power Engineering 2013, Wuhan, 2013.10, China (発表確定).

②Ryosuke Matsumoto, Tatsuro Tanikawa, Mamoru Ozawa, Yoshinori Hisazumi, Tsukasa Hori, Noriko Kawai, Yosuke Shiraga, Akeshi Kegasa, Toshikazu Takemori and Masashi Katsuki, Development of Water Heater Using Tubular Flame, Proc. of International Conference on Power Engineering 2013, Wuhan, 2013.10, China (発表確定).

③Mamoru Ozawa, Takeyuki Ami, Kohei Awata, Hisashi Umekawa, Ryosuke Matsumoto, Oil-Water Mixture in Horizontal Mini-Channel, Proc. 6th Japanese-European Two-Phase Flow Group Meeting, CD-ROM No. 5-1, (2012.9), Kumamoto.

④Mamoru Ozawa, Takeyuki Ami, Hisashi Umekawa, Ryosuke Matsumoto, Pattern Dynamics Approach to Two-Phase Flow Dynamics - In Memory of Professor Seikan

Ishigai, the Founder of the First Japan-U.S. Seminar on Two-Phase Flow Dynamics, 2012 Japan-U.S. Seminar on Two-Phase Flow Dynamics, (2012.6), Tokyo.

⑤Ryosuke Matsumoto, Yukihiro Kobayashi, Mamoru Ozawa, Akeshi Kegasa, Yosuke Shiraga, Toshikazu Takemori, Yoshinori Hisazumi, Masashi Katsuki, Development of Superheated Steam Generator Using Tubular Flame, Proceedings of 22nd International Symposium on Transport Phenomena, CD-ROM, (2011.11), Delft, Netherland.

⑥ Hiroaki Takeuchi, Tatsuro Tanikawa, Ryosuke Matsumoto and Mamoru Ozawa, Low NOx Combustion of DME by Exhaust Gas Recirculation Under the High Pressure, Proceedings of the ASME 2011 Power Conference POWER2011 co-located ICOPE-2011, CD-ROM, POWER2011-55392, (2011.07), Denver, USA

国内会議

⑦谷川達朗, 松本亮介, 小澤 守, 河井範子, 堀司, 久角喜徳, 白神洋輔, 毛笠明志, 香月正司, 管状火炎を用いた家庭用コージェネレーションシステム向け補助熱源器の開発, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2012 講演論文集, No.12-62, pp.321-322, (2012.10).

⑧竹内祐亮, 松本亮介, 小澤守, 高圧下における排気再循環を用いた DME の低 NOx 燃焼, 日本機械学会第 16 回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集, No.11-13, pp.381-384, (2011.06).

⑨松本亮介, 皿田侑大, 薦田 弦, 松本亮介, 小澤 守, 毛笠明志, 白神洋輔, 香月正司, 管状火炎の炉筒面での伝熱特性, 第 48 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, Vol.2, E214,

pp.381-382, (2011.06).

⑩ 薦田 弦, 松本亮介, 小澤 守, 管内旋回流動場における伝熱・流動特性, 日本機械学会関西支部第 86 期定時総会講演会講演論文集, No.114-1, pp.13-12, (2011.03).

⑪ 皿田侑大, 松本亮介, 小澤 守, 毛笠明志, 白神洋輔, 香月正司, 管状火炎の炉筒面への伝熱特性, 日本機械学会関西支部第 86 期定時総会講演会講演論文集, No.114-1, pp.2-28, (2011.03).

⑫ 小林侑弘, 松本亮介, 小澤守, 毛笠明志, 竹森利和, 久角喜徳, 香月正司, 船越 弘, 管状火炎を用いた過熱蒸気発生器の開発, 日本機械学会熱工学コンファレンス 2010 講演論文集, No.10-25, pp.185-186, (2010.10).

⑬ 小林侑弘, 松本亮介, 小澤 守, 毛笠明志, 竹森利和, 久角喜徳, 香月正司, 船越 弘, 管状火

炎を用いた過熱蒸気発生器の開発, 日本機械学会第 15 回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集, No.10-6, pp.311-314, (2010.06).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小澤 守 (OZAWA MAMORU)

関西大学・社会安全学部・教授

研究者番号 : 60112009

(2) 研究分担者

松本 亮介 (MATSUMOTO RYOSUKE)

関西大学・システム理工学部・准教授

研究者番号 : 50268314