

Title	管状火炎の燃焼伝熱特性の基礎的解明と産業応用に関する研究
Author(s)	白神, 洋輔
Citation	大阪大学, 2016, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/55937
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

論文内容の要旨

氏 名 (白神 洋輔)

論文題名

管状火炎の燃焼伝熱特性の基礎的解明と産業応用に関する研究

論文内容の要旨

本研究では、管状火炎を産業に応用するにあたって必要な燃焼伝熱特性の基礎的解明を行い、その過程で明らかになった特徴を踏まえて、省エネルギーと環境負荷低減に資する産業応用の可能性を確かめることを目的とした。

第1章では、管状火炎の実用に向けた従来の取り組みを示し、本研究の目的を述べた。

第2章では、実用上の課題となり得る管状火炎バーナの振動燃焼を解析した。発生した振動燃焼時の圧力や火炎からの発光強度の変動を計測することで、管状火炎バーナにおける振動燃焼の周波数は、音響学的共鳴振動モードに火炎振動が重畳する構造となること、さらに、火炎振動は基本周波数とその整数倍の高調波からなり、その周波数は管長にほとんど影響されないことを明らかにした。燃焼管径の拡大や管長の短縮、もしくは量論混合比での燃焼を避けることにより、火炎振動の振幅を低減することができた。一方で、管状火炎バーナ本体の直径を拡大した場合では、音響学的共鳴の半径・周方向モードに起因する振動燃焼が発生することを明らかにした。

第3章では、管状火炎の伝熱特性を解析した。管状火炎バーナに二重管式熱交換器や、コイル状の熱交換器を取り付けて、管状火炎の形成領域や燃焼ガスが流れる領域での被加熱物への熱伝達量を計測した結果、火炎領域の局所熱伝達率は、燃焼ガス領域の熱伝達率と比べて低い値となることや、火炎下端付近でのヌセルト数は、旋回の効果により一般的な円管乱流のヌセルト数と比べて高くなることを明らかにした。

第4章と第5章では、管状火炎の産業応用について検討した。第4章では、管状火炎を空気二段燃焼に用いた場合（以後、管状火炎二段燃焼と呼ぶ）の NO_x 抑制効果を示した。一次燃焼領域に燃料過濃の管状火炎を形成させることで、一次燃焼領域で生成される NO_x をほぼゼロにすることができた。その結果、単段燃焼、および、一次燃焼領域に拡散火炎を形成される従来の空気二段燃焼と比べて、 NO_x が抑制されることを明らかにした。また、管状火炎二段燃焼では、一次燃焼領域からの放熱量を加味して算出した一次燃焼ガス温度と二次燃焼ガス温度がほぼ同等となる条件で、 NO_x 排出量が最小となることがわかった。さらに第4章では、管状火炎二段燃焼の酸素富化燃焼バーナへの適用を検討した。酸化剤中の酸素濃度を高めると、管状火炎が形成できる上限の一次当量比をより高く設定することができ、空気燃焼の場合と同様に、一次燃焼領域での生成される NO_x をほぼゼロにすることができた。また、単段燃焼に対する NO_x 排出量の低減割合は、酸化剤中の酸素濃度が高いほど大きくなることがわかった。管状火炎二段燃焼では、二次燃焼領域における熱発生が緩慢となることで NO_x 生成が抑制されるが、燃焼ガス温度が高くなりやすい高酸素富化率の酸化剤を用いた方が、この効果が顕著に表れた。

第5章では、断熱性の高い管状火炎の中心空間を高温加熱用に利用するバーナへの展開として、管状火炎を粉体の気中加熱バーナとして適用することを検討した。この場合には、粉体を輸送する搬送ガスを、管状火炎の中心空間に向けて軸方向に吹き込む必要があるが、この軸流を伴う管状火炎の燃焼特性は明らかにされていない。そこで、軸流を伴う管状火炎の安定燃焼範囲や燃焼ガス温度といった基礎特性を調べた。副室を設けた急速混合型管状火炎バーナに上流端から軸流を流入させると、軸流のない場合と比べて、火炎が形成される上限の供給空気過剰率が低下した。また、軸流を供給して、スワール数を低下させた場合、スワール数がある閾値を下回ると、火炎がバーナから浮き上がりはじめ、スワール数の低下に伴い、火炎の浮き上がり長さは増加することがわかった。一方で、軸流を流入させても、燃焼ガスが最高温度となる位置は変化するが、燃焼ガスの最高温度はほぼ変わらないことを明らかにした。実証実験では、酸化剤を酸素とする急速混合型管状火炎バーナを用いて行った。炉内温度を 1200°C まで昇温して、実際に粉体を気中で加熱させたところ、融点 (2050°C) の高いアルミナ粉体を球状化させることができた。

第6章では、結論として第2章から第5章までの内容を総括した。

以上の本研究で得られた成果により、管状火炎の燃焼伝熱に関する特徴と制約を明らかにするとともに、その長所を發揮できる産業用の応用例を示すことができた。本研究で得られた成果は、今後の産業部門における省エネルギーや環境負荷軽減に貢献できるものと期待される。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (白神 洋輔)			
論文審査担当者		(職)	氏 名
	主査	教授	赤松 史光
	副査	教授	芝原 正彦
	副査	教授	津島 将司

論文審査の結果の要旨

近年、CO₂の排出量削減を主目的に、産業部門のエネルギーとしてメタンを主成分とする天然ガス・都市ガスの利用割合が拡大している。産業で使用される加熱設備は、我が国の歴史的背景から石油や石炭を燃料として想定して設計されたものが多い。気体燃料である天然ガス・都市ガスへの燃料転換のためには、各種産業における多種多様な被加熱物に合わせて、気体燃料の特性を発揮できる様々な加熱設備の改良やバーナの開発が求められる。本論文では、気体燃料の特徴的な燃焼方式である管状火炎の産業応用について述べている。実用上の課題となり得る振動燃焼について解析がなされ、管状火炎バーナにおける振動燃焼は、音響学的共鳴振動に加えて火炎振動が影響していることを明らかにしている。また、管状火炎の伝熱特性について解析がなされ、火炎領域の局所熱伝達率は火炎下端付近と比べて低い値となるといったバーナの設計と応用において重要な知見を得ている。本論文では、得られた管状火炎の燃焼伝熱特性を踏まえて、管状火炎の具体的な応用例についても検討がなされている。一つは、二段燃焼バーナへの応用である。一次燃焼領域に管状火炎を形成することで、一次燃焼領域におけるNO_x生成が抑制されて、従来の燃焼方式と比べて系外へのNO_x排出量を大幅に低減できることが示されている。もう一つは、粉体気中加熱バーナへの応用である。断熱性の高い管状火炎により粉体を加熱することで、融点(2050℃)の高いアルミナの鋭角を持った粉体を球状化させることができることを実証している。本論文の具体的な成果は、以下のように要約される。

- (1) 振動燃焼時の圧力や火炎発光強度の変動を計測することにより、管状火炎の振動燃焼時の周波数は、音響学的共鳴振動モードに火炎振動が重畳する構造になること、さらに、火炎振動は基本周波数とその整数倍の高調波からなり、その周波数は管長にほとんど影響されないことを示している。また、管状火炎バーナ本体の直径を拡大した場合は、音響学的共鳴の半径・周方向モードに起因する振動燃焼が発生することも明らかにしている。
- (2) 管状火炎バーナに二重管式熱交換器や、コイル状の熱交換器を取り付けて、管状火炎の形成領域や燃焼ガスが流れる領域での被加熱物への熱伝達量を計測することで、火炎領域の局所熱伝達率は未燃混合気が火炎を覆う効果によって低い値となることや、火炎下端付近でのヌセルト数は、旋回効果により一般的な円管乱流のヌセルト数と比べて高くなることを明らかにしている。
- (3) 二段燃焼の一次燃焼領域に燃料過濃の管状火炎を形成させることで、一次燃焼領域で生成されるNO_xをほぼゼロまで抑制でき、単段燃焼や一次燃焼領域に拡散火炎を形成させる従来の空気二段燃焼と比べて、NO_xの生成が抑制されることを明らかにしている。また、酸化剤中の酸素濃度を高めた場合でも、一次燃焼領域での一次当量比をより高く設定することで、空気を酸化剤として用いた場合と同様に、一次燃焼領域で生成されるNO_xをほぼゼロにすることができ、単段燃焼に対するNO_x排出量の低減割合は、酸化剤中の酸素濃度が高いほど大きくなることを示している。
- (4) 管状火炎の中心空間で粉体を加熱することを想定して、粉体を輸送する搬送ガスを管状火炎の中心に軸方向に導入した場合の流れ(軸流)が管状火炎の燃焼特性に及ぼす影響を調べ、軸流を供給した場合には、旋回流の強度を示すスワール数がある閾値を下回ると火炎がバーナから浮き上がり、その後、スワール数の低下に伴って火炎の浮き上がり長さが増加することを示している。一方で、軸流を流入させても燃焼ガスの最高温度はほぼ変わらないことを明らかにしている。実証実験では、酸化剤を酸素とする急速混合型管状火炎バーナにより実際に粉体を気中で加熱し、融点(2050℃)の高いアルミナ粉体を溶融して表面張力の作用により球状化できることを実証している。

以上のように、本論文では管状火炎を産業に応用するにあたって必要不可欠となる燃焼伝熱特性を詳細に調査し、その過程で明らかになった特徴を踏まえて、省エネルギーと環境負荷低減に資する産業応用の可能性を示すことに成功しており、その結果の工学的価値は高い。

よって本論文は、博士論文としての価値があるものと認める。