

博士(工学) 田炳浩

学位論文題名

微小重力環境を利用した同軸噴流拡散火炎の  
すす生成に及ぼす低速周囲空気流影響の研究

学位論文内容の要旨

高温空気燃焼技術は、燃焼用空気を高温に加熱する事で低酸素状態でも燃焼が可能となり、燃焼現象が緩慢に進むため燃焼室内を均一な温度分布にすることができ NO<sub>x</sub> 排出量を大きく低減できるなど工業的に極めて優れた特徴を有しており、焼却炉や加熱炉などへの幅広い応用が期待されている。高温空気燃焼技術を火炉へ適用する場合、もう一つの重要な課題は燃焼場におけるすす生成の問題である。生成されたすすは、炉内の輻射特性を決めるばかりでなく、ばい煙の発生や伝熱面への付着を引き起こす可能性があるからである。

そこで、本研究において、周囲空気を高温化した場に噴流拡散火炎を形成し、そこでのすす生成を調べたところ、周囲空気温度が上昇するとすすの生成が大幅に増加することを見出した。一見すると、周囲空気を高温化した際すすが増加することは当然であるように思われるが、さらに詳しく調べると、空気を高温化したうえで酸素濃度を低下させ、断熱火炎温度が同じになるようとしても、周囲空気を高温化することですす生成が大幅に増加することを見出した。この事実を、周囲空気温度によるすす生成反応速度の上昇のみで説明することは難しく、周囲空気温度の変化による火炎と周囲流の相対的な流動状態の変化の影響について明らかにする必要があると考えた。しかし、燃焼場では、火炎に大きな浮力が生じるため、火炎と周囲空気流の相対的な流動の影響を系統的に調べることは極めて難しく、とくに、周囲空気流速が小さい状況では、相対的な流動状態のすす生成に対する影響が調べられた例はほとんど存在していなかった。

そこで、本研究では、微小重力環境という特殊な場を活用することで、浮力の効果を抑え、系統的に周囲流の変化が火炎のすす生成に及ぼす影響を調べ、高温空気燃焼におけるすす生成の理解の一助にしようとした。本研究では、火炎と周囲空気の相互関係を変化させる手段として、(1) 置かれている場の重力条件を変え、浮力の変化による火炎周囲の流れを変える方法と、(2) 重力を完全に取り除いた場で火炎周囲の流れを系統的に変化させる方法について実験を行った。(1) は、パーシャルグラビティ装置を利用する実験であり(2) は落下塔を利用したマイクログラビティ環境を利用する実験である。これらは、他に類をみないユニークな設備の設置を含む研究であり、従来の研究では見出すことができなかった、低速周囲流におけるすす生成特性を与えることに成功している。また、この結果から、工業的に重要な意味をもつ高温空気燃焼技術におけるすす生成に対し、基礎的な立場からの理解に寄与している。

本研究は、全 6 章から構成されており、本研究の一連の成果をまとめたものである。

第 1 章は序論であり、本実験の背景と目的について論じた他、関連の研究動向、本研究の得られた成果の概要について記述した。

第2章は、高温空気発生装置による実験の方法と実験装置概略、パーシャルグラビティおよび微小重力実験の施設および実験の方法について説明した。また、搭載する実験システムの映像取得法、背景光映像からすす濃度を定量化する手法などについて述べた。

第3章は高温空気における燃焼実験の結果について述べた。周囲空気を高温化および雰囲気ガス組成を変化させたときのすす生成特性、さらに上述の断熱火炎温度を一定に維持した上での雰囲気空気温度とすす生成量の関係等について検討した結果を示す。また、これらの結果に基づいて、周囲空気温度が上昇することによる火炎と周囲空気の密度差縮小が重要な役割を持つことを示唆した。

第4章では、3章で火炎と周囲の密度差縮小が浮力による相対速度を抑制することに着目し、この影響を確認する新たな手段として、パーシャルグラビティ環境の利用を提案している。実験的にパーシャルグラビティを発生することができれば、密度差縮小による浮力影響と等価の影響を、温度場を変化させることなく与えることができる。この結果から、重力レベルが縮小すると、火炎が長くなるだけでなく、火炎中すす濃度が大きく増加することが示され、浮力変化がすす生成に極めて大きな影響を与えることを示した。

第5章は、重力を取り除いたうえで、火炎周囲の流速を変化させる実験を行った。新たに建設された50m級落下塔を用いることで、この実験を可能とした。これによると、周囲流速が極めて小さい条件では、すす生成が流速増加とともに増加していくことがわかった。このことは、火炎と周囲の相対速度が極端に小さくなつた場合、火炎温度の低下を引き起こしすす生成が抑制されることを示している。前章の結果と合わせると、相対流速が極めて小さい場合は相対流速増加とともにすす生成量が増加するか、相対速度がある程度大きくなると一転して、相対流速の増加と共にすす生成の減少が生じることがわかった。これらのことから、火炎においてはすす生成が最大となる相対速度が存在していること、通常重力場における条件では、相対流速がある程度大きくなっている条件であることから、浮力効果が強くなり相対速度が大きい条件になるほうがすす生成の抑制されることわかった。また、これらの点については、数値計算との比較からも議論を行っている。

第6章は結論であり、本研究で得られた結果を総括した。

## 学位論文審査の要旨

主査教授 藤田修

副査教授 工藤一彦

副査教授 小川英之

副査教授 永田晴紀

### 学位論文題名

## 微小重力環境を利用した同軸噴流拡散火炎の すす生成に及ぼす低速周囲空気流影響の研究

高温空気燃焼技術は、燃焼用空気を高温に加熱する事で低酸素状態でも燃焼が可能となり、燃焼現象が緩慢に進むため燃焼室内を均一な温度分布にすることができ NO<sub>x</sub> 排出量を大きく低減できるなど工業的に極めて優れた特徴を有しており、焼却炉や加熱炉などへの幅広い応用が期待されている。高温空気燃焼技術を火炉へ適用する場合、もう一つの重要な課題は燃焼場におけるすす生成の問題である。生成されたすすは、炉内の輻射特性を決めるばかりでなく、ばい煙の発生や伝熱面への付着を引き起こす可能性があるからである。

そこで、本研究において、周囲空気を高温化した場に噴流拡散火炎を形成し、そこでのすす生成を調べたところ、周囲空気温度が上昇するとすすの生成が大幅に増加することを見出した。一見すると、周囲空気を高温化した際すすが増加することは当然であるように思われるが、さらに詳しく調べると、空気を高温化したうえで酸素濃度を低下させ、断熱火炎温度が同じになるようにもしても、周囲空気を高温化することですす生成が大幅に増加することを見出した。この事実を、周囲空気温度によるすす生成反応速度の上昇のみで説明することは難しく、周囲空気温度の変化による火炎と周囲流の相対的な流動状態の変化の影響について明らかにする必要があると考えた。

そこで、本研究では、微小重力環境という特殊な場を活用することで、浮力の効果を抑え、系統的に周囲流の変化が火炎のすす生成に及ぼす影響を調べ、高温空気燃焼におけるすす生成の理解の一助にしようとした。本研究では、火炎と周囲空気の相互関係を変化させる手段として、(1) 置かれている場の重力条件を変え、浮力の変化による火炎周囲の流れを変える方法と、(2) 重力を完全に取り除いた場で火炎周囲の流れを系統的に変化させる方法について実験を行った。(1) は、パーシャルグラビティ装置を利用する実験であり (2) は落下塔を利用したマイクログラビティ環境を利用する実験である。これらは、他に類をみないユニークな設備の設置を含む研究であり、従来の研究では見出すことができなかった、低速周囲流におけるすす生成特性を与えることに成功している。

第1章は序論であり、本実験の背景と目的について論じた他、関連の研究動向、本研究の得られた成果の概要について記述されている。

第2章は、高温空気発生装置による実験の方法と実験装置概略、パーシャルグラビティおよび微小重力実験の施設および実験の方法について説明している。また、搭載する実験システムの映像取得法、背景光映像からすす濃度を定量化する手法などについて述べている。

第3章は高温空気雰囲気における燃焼実験の結果について述べた。周囲空気を高温化および雰囲気ガス組成を変化させたときのすす生成特性、さらに上述の火炎帯温度を一定に維持した上での雰囲気空気温度とすす生成量の関係等について検討した結果を示している。また、これらの結果に基づいて、周囲空気温度が上昇することによる火炎と周囲空気の密度差縮小が重要な役割を持つことを示した。

第4章では、3章で火炎と周囲の密度差縮小が浮力による相対速度を抑制することに着目し、この影響を確認する新たな手段として、パーシャルグラビティ環境の利用を提案している。この結果から、重力レベルが縮小すると、火炎が長くなるだけでなく、火炎中すす濃度が大きく増加することが示され、浮力変化がすす生成に極めて大きな影響を与えることを示した。

第5章は、重力を取り除いたうえで、火炎周囲の流速を変化させる実験を行った。新たに建設された50m級落下塔を用いることで、この実験を可能とした。これによると、周囲流速が極めて小さい条件では、すす生成が流速増加とともに増加していくことがわかった。このことは、火炎と周囲の相対速度が極端に小さくなった場合、火炎温度の低下を引き起こすす生成が抑制されることを示している。

第6章は結論であり、本研究で得られた結果を総括している。

これを要するに、著者は、高温低酸素雰囲気に置かれた噴流拡散火炎のすす濃度増加の機構として、従来から知られている温度上昇に伴うすす生成反応の促進、酸素濃度低下による酸化反応の抑制に加えて、周囲との密度差縮小による浮力効果の低減が重要な因子となっていることを指摘し、これをパーシャルグラビティおよびマイクログラビティ環境を研究手段として取り込むことで初めて検証に成功したものであり、燃焼工学、宇宙環境利用工学の発展に貢献すること大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。