

微小重力環境を活用した壁面への すす粒子付着現象の解明

学位論文内容の要旨

すすは燃焼装置から排出される有害排気成分として知られる一方、火炎中では輻射媒体として作用し加熱炉等においては重要な役割を果たしている。また、ボイラやスチームリフォーマのように炉内に伝熱管が配置されている場合には、炉の立ち上げ時などにすすが伝熱管や炉壁に付着し伝熱効率を著しく悪化させる可能性がある。

特に、高温化学反応プロセスにおいて、炉の立ち上げ時にすすが炉壁や反応管へ付着する問題は無視できず、この点を解明することは高温化学反応プロセスを確立していく上では重要な問題である。しかし、その生成や火炎中の挙動に関してはまだ十分に解明されているとは言えず、燃焼科学の中で残されている重要な研究課題と言える。本研究ではこのすすの壁面への付着問題を微小重力環境というツールを利用し、直接観察を行うとともに数値計算を組み合わせることで付着機構を明らかにしていこうとするものである。

本研究では、一様流中におかれたバーナの壁面から燃料を噴出し、壁面に並行して流れる拡散火炎を形成し、これを微小重力場に置くことで壁面に対し位置の安定した火炎を形成し、火炎中に生成されるすす粒子の生成条件、およびすす粒子の固体壁への付着過程をその場観察(In-situ observation)により検討した。このように火炎から、壁面へのすす付着過程の挙動を直接観察した例はこれまでなく、本研究が初めての試みと考えられる。火炎から壁面への付着挙動に関しては、種々のパラメータが影響を与えと考えられるが、本研究では主に高温空気燃焼を想定し、雰囲気ガス中の酸素濃度および雰囲気ガス温度の影響について検討した。また、炉の立ち上がり時を想定し、雰囲気ガス温度と壁面温度の相互関係についても検討した。また、実験では、通常重力場では浮力の影響が大きく現象が複雑になり、個々の実験変数の影響を明確にとらえることが困難になることを踏まえ、微小重力環境を用いた。現象の観察には火炎の直接映像、および透過光減衰率法による火炎中におけるすす粒子の可視化映像を取得した。円筒バーナを採用して、軸対称の火炎を形成させることにより透過光映像からすす粒子体積分率分布を算出し、火炎中におけるすす粒子の定量的な議論を行った。さらに、DNS(Direct Numerical Simulation)による数値計算を行うことにより、すす粒子に働く温度場および速度場の影響について詳細にとらえ、火炎中に存在するすす粒子に作用するより正確な熱泳動効果を計算することによって、固体壁面近傍におけるすす粒子の挙動および壁面への付着特性を明らかにした。

本論文は全 7 章で構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第 1 章では、実際の燃焼装置におけるすす付着発生状況、燃焼現象およびすす付着に関する現状と研究動向、微小重力場における壁面へのすす付着に関する研究の必要性について説明する。

第 2 章では、これまでに行われているすす生成機構に関する研究の動向およびすすについての基本的な情報のまとめ、さらに本研究で使用した微小重力実験施設の概要を示した。

第 3 章では、微小重力環境下における壁面近傍拡散火炎中のすすの付着の現象をより詳細にとらえるために用いた基礎方程式を示す。そして、本研究で用いた仮定の下でこれらの各基本方程式を単純化した過程および用いた計算方法の詳細を述べる。また、Predictor-Corrector 法のアルゴリズムについて説明し、計算の流れについて述べている。

第 4 章では、本研究の重要な話題であり、様々な場においてその効果が重要であると考えられているにも関わらず、まだ不明な点が多く残されている熱泳動現象について述べる。また、本研究ですすの挙動を調べるために使われた自由分子流れ領域の予測式である Waldmann 方程式の妥当性について述べる。

第 5 章では、本研究で対象としている壁面近傍拡散火炎は境界層型拡散火炎の一種であり、境界層拡散火炎は固体あるいは液体の可燃性物質の表面における燃焼を明らかにするための基礎研究としてその研究が数多く行われているため火炎が 2 次元的に形成される壁面に沿った微小重力場における壁面近傍拡散火炎を対象に 2 次元円筒座標系を用いて数値解析し、火炎形状と流れの場、主流速度などの変化による火炎性状への影響など壁面近傍拡散火炎の全般的な特性の検討を行った。

第 6 章では、本研究での壁面近傍における拡散火炎を壁面に沿って形成される直交流拡散火炎により模擬し、火炎中に生成されるすす粒子の生成条件およびすす粒子の固体壁への付着条件について検討した。主に、高温空気燃焼を想定し、雰囲気ガス中酸素濃度および雰囲気ガス温度の影響について検討した。さらに、数値計算に基づいて、すす粒子に働く温度場および速度場の影響について詳細にとらえ、それに熱泳動速度を加え火炎中のすす運動に対し熱泳動速度が重要な役割を果たしているということを示した。さらに、従来から知られている熱泳動効果の予測式に対し、微小重力実験と数値計算に基づき新たな補正係数の提案を行った。

第 7 章は、本研究の結論であり、本研究で得られた成果をまとめて示す。

本研究により明らかにされた知見は、熱交換器やボイラーなどの燃焼装置の設計、特に伝熱面へのすす付着抑制を考慮した設計に対し基礎的な情報を与えるものと考ええる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 藤 田 修
副 査 教 授 工 藤 勲
副 査 教 授 工 藤 一 彦
副 査 教 授 小 川 英 之

学 位 論 文 題 名

微小重力環境を活用した壁面への スス粒子付着現象の解明

炉内において火炎中に生成されたスス粒子は反応管等の固体壁に付着し伝熱効率を低下させるなどの問題を引き起こす。特に、高温化学反応プロセスにおいて、炉の立ち上げ時にススが炉壁や反応管へ付着する問題は無視できず、この点を解明することは高温化学反応プロセスを確立していく上では重要な問題である。したがって、伝熱管や反応管壁を想定した壁面近傍火炎中におけるスス粒子の挙動および壁面への付着特性について把握することは重要な課題である。

しかし、その重要性にもかかわらず壁面へのスス付着に関する知見は不足している。これまで微粒子の壁面付着に関する研究の大部分はガスまたは流体流れの中で、外部から混入したトレーサ粒子の挙動を観察したものであり、火炎中で発生するススそのものの付着挙動を実際に観察した例はほとんどない。この理由として、通常重力場においては自然対流の影響が強く壁面へのスス付着現象を定量化するのに十分な、安定した火炎を実現することが困難であったためである。この結果、火炎から壁面へのスス付着挙動の定式化や、流れ場におけるスス付着挙動の数値シミュレーションも十分には進展していないのが現状である。

本研究では、上述のような問題を克服する手段として、自然対流の影響を全く受けず完全に安定した火炎を実現できる微小重力環境の利用を導入している。とくに、さまざまな工夫をこらした円筒型バーナ周囲に形成した境界層型拡散火炎、光学計測、微小重力環境、を組み合わせたその場観察(In-situ Observation)技術により火炎から壁面へススが付着する様子を初めて克明に捉えている。またこれらの実験においては、高温化学反応プロセス炉において運転状態に応じ変化する燃焼用空気温度、酸素濃度、壁面温度のスス壁面付着に及ぼす影響について明らかにしている。さらに、これらの実験結果を基に火炎から壁面へのスス付着挙動の物理的過程について考察を行うとともに、数値解析を実施し実験値と良く一致する解析モデルを構築した。これらの結果から、とくにスス粒子の付着挙動に対しては、壁面近傍の温度場に起因する熱泳動力と境界層内部の流速の相互関係が重要な支配因子であることを指摘している。さらに、ここで重要な因子と

なっている熱泳動力の見積もりに対し、適切な予測式の選択とその補正係数の提案を行っている。

本論文の主な成果は以下のようにまとめられる。

1. 微小重力環境を利用し、浮力影響のない安定な火炎を得ることで固体壁面に沿う境界層型拡散火炎中におけるスス付着過程のその場観察を初めて実施した。さらに、実験と数値解析により雰囲気ガス中の酸素濃度、雰囲気ガス温度および壁面温度がススの壁面への付着に及ぼす影響を明らかにした。とくに壁面近傍でのスス付着現象に対しては、壁面近傍の温度場に起因する熱泳動力と境界層内の速度分布の相互関係が付着現象を支配することを示した。これは高温空気燃焼システムである化学反応プロセスやボイラーにおける熱交換器へのスス付着抑制に対する基本的データを提供している。
2. 微小重力環境下における拡散火炎中のススに対する熱泳動効果を見積もる際に、自由分子流れ領域の仮定は妥当であり Waldmann の提唱する熱泳動力の予測式を用いることでスス粒子の壁面近傍での運動を推測できることを示した。さらに、微小重力場におけるその場観察の結果に基づき、予測式における補正係数についてスス粒子に適合する値を提案している。

これを要するに、著者は、壁面へのスス付着現象に対し、従来の研究では実現できなかった実際の火炎で生成したススが壁面へ付着する過程を微小重力環境を活用し初めて捉えるとともに、数値解析を組み合わせた議論によりそのメカニズムを明らかにした。これは各種加熱炉やボイラーなどの燃焼装置設計に係わる重要な新知見を与えるものであり、燃焼工学および宇宙環境利用工学に貢献するところ大なるものがある。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。