

微小重力環境を利用した静止雰囲気中における 個体のふく射着火機構に関する研究

学位論文内容の要旨

固体のふく射加熱による着火は、火災等で見られる着火現象の一つであり、この現象に対する理解は火災安全性の向上などの観点から重要である。そのため数多くの実験や数値解析による研究が行われている。

固体のふく射着火は、加熱時の照射強度、試料特性、形状によりその支配要因が異なり、特に気相における熱伝達や物質拡散は現象に強く影響を及ぼす。そのため気相における熱・物質拡散や化学反応といった要因を系統的に調べることは、固体の着火現象を理解する上で非常に重要であり、また数値解析による研究を進める上でも気相の反応過程に対する詳細なデータが望まれる。しかし、通常重力環境下での実験では、加熱時の自然対流の影響により、気相で生じる一連の過程を定量的にとらえることは極めて困難であった。

そこで本研究では、微小重力環境を利用し、自然対流の影響のない静止雰囲気条件下で固体のふく射着火現象の観察を行った。これにより、その着火過程、特に通常重力環境下では観察が困難な気相における熱輸送や物質拡散、酸化反応やふく射吸収といった要因が着火現象に及ぼす影響について明らかにし、その結果に基づき着火遅れ時間などを定量的に予測できる固体のふく射着火モデルを作成することを目的とした。

微小重力実験は、大型落下施設、および航空機を利用し、試験対象試料としてはほぼ純粋なセルロースであるろ紙を使用した。セルロースは木材や繊維材を構成する主要な成分であり、固体燃料の基本的な着火特性を考える上で代表的な試料である。またセルロースを使用することで過去に数多く行われている着火に関する研究との比較、検討を行うことができる。外部ふく射エネルギー源としては、照射波長、照射強度の影響について検討を行うため、赤外光の照射波長を持つCO₂レーザ(10.6 μ m)と近赤外光の照射波長をもつ半導体レーザ(800.1nm)を用いた。着火の様子は、デジタルビデオカメラにより撮影を行うと同時に、He-Neレーザを用いたMach-Zehnder干渉法により観察を行った。実験は雰囲気酸素濃度、照射波長、照射強度、照射角度を変えて行い、これらの違いが着火過程に及ぼす影響について調べ、固体のふく射着火現象に対する考察を行った。

第1章では、固体のふく射着火に関する従来の研究、本研究の目的、およびその意義について述べた。

第2章では、本研究で用いた微小重力実験装置について説明を行い、その特徴と取得データ、実施した実験条件について説明を行った。また実験で利用した各微小重力実験施設での実験手順について述べた。

第3章では、微小重力環境下における半導体レーザを加熱源としたろ紙のふく射着火実験により、静止雰囲気中でセルロースシートに近赤外光ふく射加熱を与えた場合、熱分解生成物が固体表面からドーム状に拡散し、着火の初期反応が固体近傍の気相中で開始する事を直接映像、および Mach-Zehnder 干渉映像により示した。また雰囲気酸素濃度条件を変えた実験により、酸素濃度の違いが熱分解生成物発生後の気相反応に強く影響を及ぼし、酸素濃度の増加と共に着火遅れ時間が短くなることを示した。

第4章では、微小重力環境下における CO₂ レーザ、および半導体レーザを加熱源としたろ紙のふく射着火実験により、照射強度、照射波長、照射角度といったふく射加熱条件の違いが、静止雰囲気中での固体の熱分解から着火に至る挙動、着火遅れ時間、着火位置に及ぼす影響を観察し、照射波長が異なると着火遅れ時間が大幅に変化すること、着火現象に対し気相におけるふく射吸収が重要な役割を果たすことなどを示した。

第5章では、本実験により得られた知見から、従来の NIST により開発されたセルロースシートの着火モデルでは与えることができなかった照射波長の違いによる固体燃料の吸収率の違い、固相の char 化に伴う吸収率の変化、熱分解生成物によるふく射吸収、を考慮したふく射着火モデルを作成し、気相および固相の支配方程式および計算方法について示した。

第6章では、第5章で示した固体のふく射着火モデルに対して、気相の酸化反応に対する諸定数、熱分解生成物によるふく射吸収に対する諸定数を、これまでに得られた微小重力実験結果との比較により決定した。これにより、通常重力環境下では詳細な観察が困難であり、従来、着火モデルに定量的に取り込むことが難しかった気相酸化反応、気相吸収、熱分解生成物の拡散、等の過程を含めた新たなふく射着火モデルを構築した。

最終章(第7章)は結論であり、本研究で得られた知見の総括を行った。

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 池 川 昌 弘

学 位 論 文 題 名

微小重力環境を利用した静止雰囲気中における

個体のふく射着火機構に関する研究

固体のふく射加熱による着火は、火災等で見られる着火現象の一つであり、この現象に対する理解は火災安全性の向上や固体燃焼の基礎理解などの観点から重要である。これまでの研究から、固体のふく射着火は、加熱時の照射強度、試料特性、形状によりその支配要因が異なり、特に気相における熱伝達や物質拡散は現象に強く影響を及ぼすことが指摘されている。そのため気相における熱・物質拡散や化学反応といった要因を系統的に調べることは、固体の着火現象を理解する上で非常に重要であり、また数値解析による研究を進める上でも気相の反応過程に対する詳細なデータが望まれる。しかし通常重力環境下での実験では、加熱時の自然対流の影響により、気相で生じる一連の過程を定量的にとらえることは極めて困難であり、未だ不明確な部分が多い。

本論文は、固体のふく射着火現象について、気相における諸過程が現象に及ぼす影響について実験的に調べ、固体のふく射着火モデルを構築することを目的としている。そのために、微小重力環境を利用し、自然対流の影響のない静止雰囲気条件下で、雰囲気酸素濃度、外部放射加熱条件を変えて固体のふく射着火現象の観察を行うことで、通常重力環境下では観察が困難な気相における熱輸送や物質拡散、酸化反応やふく射吸収といった要因が着火現象に及ぼす影響について明らかにしている。また実験により得られた結果に基づき、従来、着火モデルに定量的に取り込むことが難しかった気相酸化反応、気相吸収、熱分解生成物の拡散、等の過程を含めた新たなふく射着火モデルを提案している。

本論文の成果は以下のようにまとめられる。

1. 微小重力環境下における半導体レーザ（近赤外光ふく射）を加熱源としたろ紙のふく射着火実験により、静止雰囲気中でセルロースシートに近赤外光ふく射加熱を与えた場合、熱分解生成物が固体表面からドーム状に拡散し、着火の初期反応が固体近傍の気相中で開始する事を直接映像、および Mach-Zehnder 干渉映像により実験的に示した。

2. 静止雰囲気中でセルロースシートに近赤外光ふく射加熱を与えて着火させた場合、酸素濃度の増加と共に着火遅れ時間が短くなることを示し、Mach-Zehnder 干渉映像から得られた干渉縞移動量や着火直前の気相反応の違いから、酸素濃度の違いが熱分解生成物の気相反応に強く影響を及ぼすことを明らかにした。
3. 微小重力環境下における CO₂ レーザ（赤外光ふく射）、および半導体レーザを加熱源としたろ紙のふく射着火実験により、照射強度、照射波長、照射角度といったふく射加熱条件の違いが、静止雰囲気中での固体の熱分解から着火に至る挙動、着火遅れ時間、着火位置に及ぼす影響を観察し、照射波長が異なると着火遅れ時間が大幅に変化すること、着火現象に対し気相におけるふく射吸収が重要な役割を果たすことなどを明らかにした。
4. 微小重力環境を利用した実験により得られた知見から、従来の NIST により開発されたセルロースシートの着火モデルでは与えることができなかった照射波長の違いによる固体燃料の吸収率の違い、固相の char 化に伴う吸収率の変化、熱分解生成物によるふく射吸収、を考慮したふく射着火モデルを作成した。とくに、通常重力環境下では詳細な観察が困難であり、従来、着火モデルに定量的に取り込むことが難しかった気相酸化反応、気相吸収、熱分解生成物の拡散、等の過程に関し、本研究で実施した微小重力実験結果との比較からそれぞれに関する反応速度定数、吸収係数といった定数を決定している。これにより着火遅れ時間等を定量的に予測できる新たな固体のふく射着火モデルを構築した。

これを要するに、著者は、固体のふく射着火現象に対し、従来の研究では不明確であった気相における諸過程が着火に及ぼす影響を定量的に明らかにするとともに、微小重力環境の利用により着火モデルに必要とされる諸定数を与えるための方法論を示した。このことは、従来数値予測が難しかった固体着火遅れ現象を、微小重力実験の導入により、より精密な予測を可能にするものであり、燃烧工学、宇宙環境利用工学の発展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。