

学位論文題名

微小重力場における固体材料の燃焼特性

学位論文内容の要旨

2004年の運用開始が予定されている国際宇宙ステーション(ISS: *International Space Station*)に象徴されるように、有人宇宙活動が一段と長期化・恒常化する中で、微小重力場における火災安全性を向上させることが、具体的に重要な課題となってきた。宇宙船内における火災安全性を評価する際に重要である、固体材料の微小重力場における燃焼特性に関する研究はこれまでも行われているが、実際の微小重力場での実験データは、非常に少ないのが現状である。これは、微小重力実験の機会を得ること自体が容易でないことに加え、固体材料の燃焼現象は、液体や気体燃料の場合と比べて現象の時間スケールが長く、微小重力環境継続時間が十分長くなければ、有効なデータを得ることが難しいためである。

宇宙ステーション内のような微小重力場で起こる火災形態にも様々なものが考えられるが、これまでのスペースシャトル・ミッションにおける事故例を考慮しても、最も可能性が高いものの一つは、多くの機器類において使用されている導線の過熱などに起因して発生する、絶縁用導線被覆材の燃焼であると考えられる。しかし火災安全性に対する重要性にも関わらず、微小重力場での導線被覆材の燃焼特性に関する研究は、これまでほとんど行われていない。

本研究では、10秒間という比較的長時間にわたり、 $10^{-5}G$ 以下の良質の微小重力環境が得られる地下無重力実験センター(JAMIC: *Japan Microgravity Center*)の大型落下塔において実験を行うことにより、微小重力場における静止雰囲気中での導線被覆材の燃焼特性に対して、雰囲気酸素濃度や導線初期温度などの多くの重要な条件が与える影響を、はじめて実験的に明らかにした。また、微小重力場における導線被覆材の燃焼挙動に対し、低速の強制対流が与える影響について明らかにすることを目的として、航空機の放物線飛行による微小重力実験の実施計画にも着手した。

さらに本研究では、微小重力場における低速の強制対流が、固体材料の着火および火災燃え広がり現象に与える影響を明らかにすることを目的として、薄い紙を試料とした微小重力実験をNASA(米国航空宇宙局)Lewis Research CenterおよびNIST(*National Institute of Standards and Technology*)との国際共同研究として行った。紙への着火から定常的な火災の燃え広がりに至るまでの一連の過程を、連続的に観察することにはじめて成功した。また、これらの過程に対して低速の強制対流および火災の幾何学的形状が与える影響についても、明らかにすることができた。

本論文は8章より構成されている。以下にそれぞれの章の概要について述べる。

第1章では、宇宙開発および微小重力場における科学研究の動向について記述するとともに、本研究の背景、目的について述べている。

第2章では、微小重力場での火災安全性に関する従来の研究動向について記述するとともに、実際の事故例をふまえて、本研究の必要性について述べた。

第3章では最初に、JAMICでの実験において使用した、導線被覆材燃焼実験装置の概要について述べた。次に、微小重力場における静止雰囲気中での導線被覆材の燃焼実験を行い、その基本的な燃焼挙動の把握、および、雰囲気酸素濃度などの実験条件が燃焼挙

動に与える影響について、通常重力場での燃焼挙動とも比較しつつ検討した。微小重力場において導線被覆材上を燃え広がる火炎の形状は、通常重力場でのものと大きく異なること、火炎形状は雰囲気酸素濃度やバランスガスの種類などにより影響を受けることを明らかにした。

第4章では、微小重力場における導線被覆材の燃焼実験により得られた火炎燃え広がり速度に対し、様々な実験条件が与える影響について、通常重力場における鉛直下方燃え広がり速度とも比較しつつ検討した。導線被覆材上の火炎燃え広がり速度は、微小重力場において通常重力場よりも大きくなる可能性があることを示した。また、ISSにおいて消火剤として使用される CO₂を雰囲気バランスガスとする場合には、通常重力場よりも導線被覆材の可燃範囲を増加させる場合があることなどを示した。

第5章では、微小重力場における導線被覆材の燃焼現象に対し、低速の強制対流が与える影響を明らかにすることを目的とした、航空機の放物線飛行による微小重力燃焼実験の実施準備を行った。また、微小重力実験の準備段階として、通常重力場における実験を行い、通常重力場での水平方向火炎燃え広がり速度は、対向流速の増加により小さくなることを示した。

第6章では、被覆導線の燃焼時の温度計測結果を示すとともに、被覆導線上の火炎燃え広がり機構に関する検討を行った。微小重力場での気相最高温度(火炎温度)は、同一実験条件における通常重力場での温度よりもかなり低くなること、火炎温度の雰囲気バランスガス種による変化などを明らかにした。また本研究で観察されたように、火炎温度が通常重力場より低いにもかかわらず、被覆導線上の火炎燃え広がり速度が微小重力場において通常重力場よりも大きくなる理由が、幾何学的形状に起因する熱流束増幅効果にある可能性を示した。さらに、微小重力場における CO₂バランス中での火炎燃え広がり速度が、通常重力場におけるよりも他のバランスガス雰囲気と比べ相対的に大きくなり、あるいは微小重力場において可燃範囲が増加する原因が、火炎から放射されたふく射エネルギーの一部を、雰囲気中の CO₂が吸収する効果にある可能性を示した。

第7章では、微小重力場における低速の強制対流が、固体材料の着火および火炎燃え広がり現象に与える影響を明らかにするために、薄い紙を用いた燃焼実験を行った。流れ場の中で紙に着火した場合には、通常重力場とは逆に、下流側への燃え広がりが起こりにくく、上流側への燃え広がりが起こりやすいことが明らかとなった。さらに、上流側への燃え広がり速度は印加流速の増加により大きくなることを示した。また、酸素濃度が比較的低い場合には、燃え広がる火炎先端が曲率を持つ3次元状伝播のほうが、曲率を持たない2次元状伝播の場合よりも、燃え広がり速度が大きくなることなどを示した。

第8章は結論であり、本研究で得られた成果を総括し、今後に残された研究課題について述べている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 伊 藤 献 一
副 査 教 授 工 藤 一 彦
副 査 教 授 工 藤 勲
副 査 助 教 授 藤 田 修

学位論文題名

微小重力場における固体材料の燃焼特性

来世紀初頭に運用開始が予定されている国際宇宙ステーションに象徴されるように、近い将来、有人宇宙活動が一段と本格化・恒常化する中で、微小重力場における火災安全性の確保・向上が、具体的に重要な課題となってきている。

宇宙ステーションやスペースシャトルなどの有人宇宙船内における火災安全性を評価する際に重要なことは、固体材料の微小重力場における燃焼特性である。これに関する研究はこれまでも行われているが、実際の微小重力場において取得した燃焼実験データは、非常に少なく、限られたデータあるいは地上の重力場で得られたデータから安全性を推定しているのが現状である。これは、微小重力実験の機会を得ること自体が容易でないことに加え、固体材料の燃焼現象は、可燃性液体や気体の場合と比べ、現象の時間スケールが長く、微小重力環境継続時間が十分長くなければ、有効なデータを得ることが難しいためであった。

本研究では、このような現況にある固体材料の微小重力環境における燃焼特性について、10秒間という比較的長時間にわたり、良質の微小重力環境が得られる大型落下実験施設を用いた燃焼実験を行うことにより、これまで十分に知られていなかった微小重力環境における固体材料の基礎的な燃焼特性を明らかにし、従来地上実験のみに基づき行われていた火災安全性の判断に対し、新たな判断材料を与えることを目的としたものである。とくに、宇宙火災の最大要因である、宇宙機器類で使用されている導線の過熱火災に着目している。導線の絶縁用被覆材の燃焼を中心として、火災安全性に関与する種々の実験要素を変化させ、微小重力環境に特有な現象を幅広くとらえている。また、これらの実験データに基づき、微小重力環境と通常重力環境の燃焼現象の違いを明確にした上で、微小重力環境が燃焼現象におよぼす本質的影響について考察を加えている。

本研究の主な成果は、以下のように要約される。

まず最初に、本研究で確立した微小重力実験特有の実験技術に関して述べている。つぎに、導線被覆材の微小重力場における燃焼現象の直接観察を行い、火炎の形状、体積、輝度、スス生成特性などが、通常重力場と大きく異なること、さらに火炎形状は雰囲気酸素濃度やバランスガスの種類などの影響を強く受けることを明らかにした。この微小重力火炎に対して、燃え広がり速度を求め、通常重力場における鉛直下方燃え広がり速度と比較した結果、燃え広がり速度が微小重力場において、通常重力

場よりも大きくなる可能性のあることを示した。とくに、宇宙ステーションにおいて消火剤として使用される CO_2 を雰囲気バランスガスとした場合には、通常重力場よりも導線被覆材の燃え広がり速度を増加させ、また可燃最低酸素濃度を増加させる可能性のあることを初めて示した。さらに、被覆導線燃焼時の温度計測結果に基づき、微小重力場における被覆導線上の火炎燃え広がり機構に関する検討を行った。微小重力場での気相最高温度(火炎温度)は、同一実験条件における通常重力場での温度よりもかなり低くなること、また、それにも拘わらず、被覆導線上の火炎燃え広がり速度が微小重力場において通常重力場よりも大きくなることを示した。この点についてさらに考察を進め、固体試料の幾何学的形状に起因する熱流束増幅効果が微小重力環境でとくに大きくなることを指摘した。これらの観察結果はいずれも微小重力環境に特有のものであり、宇宙火災安全性を判断していく上では、地上実験に加えて新たに考慮されていくべき点であることを指摘している。

これを要するに、著者は微小重力環境における固体材料の燃焼実験を通し、これまで知られていなかった微小重力環境特有の燃焼特性を明らかにしており、従来、地上実験のみに基づき行われていた宇宙火災安全性の判断に対し有用な新たな知見を加えるもので、宇宙環境工学、燃焼工学の発展に寄与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。