

宇宙船内火災安全性向上のための 導線被覆材上火炎燃え広がり現象に関する研究

学位論文内容の要旨

宇宙船内における火災の発生要因としては各種機器類で使用されている電気、電子部品や装置に電力を供給するためのケーブルの過熱、もしくは被覆材の絶縁不良によるショートに起因するものが大部分を占めることが報告されている。また、現在建設・運用中の国際宇宙ステーションはこれまでの宇宙船と比較して規模が格段に大きくなるため、火災の初期段階で発見することは非常に困難となる。このため、宇宙船内における火災安全性の確保・向上は重要な課題となっている。

現在、宇宙船内で使用される各種の材料については、米国航空宇宙局(NASA)が規定した可燃性評価試験に合格した材料を使用することとされている。しかし、可燃性評価試験は地上における燃焼試験をもとに材料の可燃性を評価する方法であり、実際の宇宙船内環境である微小重力場での可燃性を評価しているものではない。宇宙船内での燃焼特性は地上での燃焼特性と大きく異なるため、地上実験のみで材料の可燃性評価を行うことは困難である。

このため、導線被覆材を試料とした微小重力実験が実施され、通常重力場より微小重力場の方が燃え広がり速度が速くなる場合が存在すること等が指摘されている。しかし、現状では宇宙船内の火災安全性を確保するための十分な知見が得られていない。本研究では、微小重力場における導線被覆材上火炎燃え広がり現象を明らかにし、微小重力場における知見の不足により、地上実験のみに基づき判断されていた宇宙船内の火災安全性に対し、新たな判断材料を与えることを目的とする。

宇宙船内では内部の雰囲気は必ずしも静止しておらず、各種機器の冷却や船内の換気等の目的で常に低速の空気流が流れている。微小重力場では、このような低速の空気流の存在により燃焼現象が大きく変化する可能性が指摘されている。このため、本研究では、実際の宇宙船内環境である低速空気流中での導線被覆材の燃焼特性に及ぼす主流空気流速等の実験条件の影響を明らかにするため、微小重力実験を実施した。

さらに、導線被覆材上火炎燃え広がり現象の支配機構を明らかにするため、導線被覆材の特徴である試料の断面幾何形状と不燃良導体としての心線の存在に着目し、モデルによる解析を実施した。

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、宇宙船内における火災発生状況、火災安全性確保に関する現状と研究動向、微小重力場における導線被覆材上火災燃え広がりに関する研究の必要性について説明する。

第2章では、本研究で用いた導線被覆材燃焼実験装置について説明するとともに、試料として用いたポリエチレン被覆導線、ETFE被覆導線の特性について説明する。

第3章では、微小重力場の低速空気流中および通常重力場の空気流中での導線被覆材の燃焼実験を行い、主流空気流速、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検討した。微小重力場では、低速空気流中においても、火炎は導線に関して対称な2次元構造となることを示した。また、火炎前縁部の詳細な構造、特に輝炎が形成されるより前方の反応領域を明確にするため、OHラジカル分布の計測を実施し、ポリエチレン被覆導線の場合、OHラジカルの発光強度が空気流速の増加により大きくなり、OHラジカル分布がポリエチレン被覆導線とETFE被覆導線で大きく異なることを示した。

第4章では、微小重力場の低速空気流中および通常重力場の空気流中での燃焼実験で得られた火炎燃え広がり速度に対し、主流空気流速、雰囲気酸素濃度などの実験条件が与える影響について検討した。窒素バランスの場合、低速空気流中における導線被覆材上火炎燃え広がり速度は酸素濃度、被覆材材質の違いによらず極大値を持つことを示した。また、二酸化炭素バランスの場合には、低速空気流中において火炎燃え広がり速度が極大値を持たず、流速の増加とともに単調に減少する場合が存在することを示した。

第5章では、試料の断面幾何形状が火炎燃え広がり速度に及ぼす影響について、気相熱伝達モデルを用いて検討した。試料の断面幾何形状が円筒形である場合には、Stand off distance 低下効果、拡散酸素量増加効果、対数効果の3つの効果が存在するため、低流速領域において火炎燃え広がり速度が流速の低下とともに増加する領域が現れることを示し、この領域を幾何形状効果領域と定義した。また、二酸化炭素バランスの場合には、導線の幾何形状効果に加え、二酸化炭素によるふく射エネルギーの再吸収が火炎燃え広がり現象に大きな影響を与えることを示した。

第6章では、微小重力場の静止雰囲気中における導線被覆材の燃焼現象に及ぼす心線材質の影響を、通常重力場における下方燃え広がりの場合と比較しながら検討した。微小重力場では通常重力場と異なり、火炎燃え広がり速度に及ぼす心線材質の影響が雰囲気酸素濃度により異なることを示した。さらに、心線熱伝導モデルを用いて、酸素濃度が高い場合には銅を心線とした方が火炎先端位置における心線温度が高くなるが、酸素濃度が低い場合には銅心線の方が火炎先端位置における心線温度が低くなるため、燃え広がり速度に及ぼす心線材質の影響は酸素濃度により変化することを示した。

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した。

本研究により明らかにされた知見は、宇宙船内の火災安全性に対して重要な判断材料となるものと考えられる。

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 工 藤 勲

副 査 教 授 梅 村 章

(名古屋大学大学院工学研究科)

学 位 論 文 題 名

宇宙船内火災安全性向上のための 導線被覆材上火炎燃え広がり現象に関する研究

現在建設・運用中の国際宇宙ステーションに代表されるように宇宙船が大規模になると火災を初期段階で発見することは非常に困難となるため、宇宙船内における火災安全性の確保・向上は重要な課題となっている。

宇宙船内における火災安全性を評価する上で重要なことは微小重力環境での材料の燃焼特性である。これに関する研究はこれまで十分とはいえず、特に、宇宙船内における火災原因として最も可能性が高い電気火災に起因する導線被覆の燃焼については、その重要性にもかかわらず火災安全性評価のための知見は不足している。このため、宇宙船内で使用される各種の材料の火災安全性評価は、地上での燃焼試験を基に行われているのが現状である。

本研究は、このような状況にある微小重力環境での固体材料の燃焼現象、中でも火災発生源となる可能性が高い導線被覆材上火炎燃え広がり現象に対し、大型落下塔および航空機を用いた燃焼実験を実施することにより、微小重力環境における火炎燃え広がり現象を明らかにし、従来地上実験のみに基づき判断されていた宇宙火災安全性に対し、新たな判断材料を与えることを目的としたものである。特に、宇宙船内では各種機器の冷却や船内の換気等の目的で常に低速の空気流が流れていることに着目し、低速空気流中における導線被覆材の燃焼特性に及ぼす主流空気流速等の重要な諸条件の影響を明らかにしている。さらに、導線被覆材の物理的特徴である試料の断面幾何形状と不燃良導体としての心線の存在が導線被覆材上火炎燃え広がり現象に与える影響に対して考察を行い、これらが火炎燃え広がりに影響を与えるメカニズムを明らかにしている。

本論文の主な成果は以下のようにまとめられる。

1. 微小重力場および通常重力場において、一様空気流中における燃焼現象の直接観察を行い、微小重力場では通常重力場と異なり、火炎は低速空気流中においても導線に関して対称な 2 次元構造となり、燃焼挙動に及ぼす相対空気流速の影響を純粹に観察することが可能となることを示した。また、火炎前縁部の詳細な構造、特に輝炎形成位置より前方の反応領域を OH ラジカル分布の計測に基づき観察し、その分布状態がポリエチレン被覆導線と ETFE 被覆導線で異なることを示した。
2. 微小重力実験により、火炎燃え広がりにおよぼす周囲空気流速の影響を調べ、宇宙船内換気流程度の流速条件付近で、火炎燃え広がり速度が最大となるという重要な知見を初めて見出した。この現象は、雰囲気不活性ガスの影響を受け、雰囲気ガスが二酸化炭素バランスの場合には現れず、この場合は周囲空気流速の低下とともに燃え広がり速度が単調に増加することを示した。
3. 試料の断面幾何形状が火炎燃え広がり速度に及ぼす影響について検討し、断面形状が円筒形である場合には、Stand off distance 低下効果、拡散酸素量増加効果、対数効果の 3 つの効果が存在するため、低流速領域において火炎燃え広がり速度が流速の低下とともに増加する領域が現れることを示し、この領域を幾何形状効果領域と定義した。周囲流速がさらに低下すると、輻射による温度低下が生じ、結果として特定の低流速条件で燃え広がり速度が極大値を持つことを示した。
4. 微小重力場の静止雰囲気中における導線被覆材の燃焼現象に及ぼす心線材質の影響を検討し、微小重力場では火炎燃え広がり速度に及ぼす心線材質の影響が雰囲気酸素濃度により異なることを示した。さらに、心線熱伝導モデルを用いて、燃え広がり速度に及ぼす心線材質の影響が酸素濃度により変化するメカニズムを明らかにした。

これを要するに、著者は、微小重力環境における導線被覆材の燃焼実験を通して、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初めて見出し、そのメカニズムを明らかにした。これは、宇宙船内における火災安全性の向上に関し重要な新知見を得たものであり、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。