

対向流中における固体燃料管内燃え広がり火炎特性

学位論文内容の要旨

可燃性の固体や液体表面に沿って燃焼領域が伝わる現象を燃え広がりと呼ぶ。燃え広がりとは気相と液体あるいは固体間の反応物質と熱の輸送や化学反応速度などが関わる複雑な現象であり、燃え広がりについて理解することはハイブリッドロケットの燃焼効率の向上や、宇宙ステーションなどの閉鎖空間系での火災の防火技術を改善するために役立つ。これまで平板の固体燃料上の表面の燃え広がりについては実験や数値計算などを用いて広く研究されてきた。一方、流れ場の境界条件が異なる場合、たとえば固体燃料管内の燃え広がりでは、平板では見られない燃焼形態が存在することや火炎長さが定義できることなど、その燃焼機構は平板の場合と異なるが、そのような流れ場の燃え広がりについてはほとんど研究されていなかった。本研究では、固体燃料として数 mm 程度の穴を空けた PMMA を用いて、以下の 3 点から管内燃え広がり火炎特性について調べた。

- (i) 固体燃料管内燃え広がりにおける燃焼形態とその遷移条件 (第 2 章)
- (ii) Thermal regime、Chemical regime および安定燃焼における燃え広がり速度の予測式の構築 (第 3 章)
- (iii) 火炎長さに与えるレイノルズ数およびフルード数の影響 (第 4 章)

第 2 章 固体燃料管内燃え広がりにおける燃焼形態とその遷移条件

固体燃料管内の燃え広がりでは、酸素流速の増加にともない気相の熱輸送が支配的となる燃焼形態 (Thermal regime) から化学反応が支配的となる燃焼形態 (Chemical regime) へと遷移する。平板では Thermal regime から Chemical regime への遷移はダムケラー数によって整理することができることが知られている。一方、管内では火炎先端の酸化剤流速である等価流速を用いて整理することができる。しかし、これまでの研究で見積もられた等価流速は圧力の影響が考慮されておらず、また、ダムケラー数との関係についても明らかになっていなかった。さらに、管内では酸化剤流速が大きくなっても平板で見られるような吹き飛び限界が存在せず、安定燃焼へと遷移して火炎が保持されることが知られている。安定燃焼への遷移は火炎先端前方での剥離の有無によって決まるため、乱流領域では摩擦速度によって決まることがわかっているが、層流領域については研究例がなくまだ理解されていない。第 2 章では雰囲気条件を変えて燃焼実験を行い、管内燃え広がりで見られる各燃焼形態への遷移条件を明らかにすることを目的とした。

Thermal regime から Chemical regime への遷移は燃え広がり速度を酸化剤流速で除した無次元燃え広がり速度を用いることで、平板と同様ダムケラー数によって整理できることがわかった。一方、安定燃焼への遷移については、層流領域においても乱流の場合と同様に壁面でのせん断応力によって定義される層流摩擦速度により、その境界条件が整理できることを明らかにした。この結果は、安定燃焼への遷移が流れ場によらず主流から境界層への運動量輸送によって決まることを示し

ている。また、各燃焼形態の火炎構造を検討し、安定燃焼ではポート拡大部のよどみ点に剥離領域が形成されることで滞留時間を確保していることを示した。このことはポート拡大部に剥離領域が形成できないような酸化剤流速であれば、管内燃え広がりにおいても吹き飛び限界が存在することを示唆している。実際、酸化剤流速を極端に大きくして実験を行い、管内燃え広がりの吹き飛び限界を示した。

第3章 Thermal regime、Chemical regime および安定燃焼における燃え広がり速度の予測式の構築

これまでに平板上の燃え広がりについては、De Ris や Wichman らなどによって燃え広がり速度の理論式を与えられている。一方、管内燃え広がりでは、安定燃焼については実験式が提案されているが、その他の燃焼形態については存在しない。また、安定燃焼の実験式についても吹き飛び限界が考慮されていないため酸素流速が無限大のときも0にならないため、修正が必要である。管内燃え広がりには上述のように閉鎖空間内の火災の基礎モデルとしても考えることができるため、燃え広がり速度を予測することは燃焼学的に興味深いだけでなく、火災予防の観点からも重要な問題である。

第3章では平板における燃え広がり速度の理論式を管内径の影響を考慮して拡張し、Thermal regime における燃え広がり速度の予測式を得た(3.9式)。さらに、酸化剤による火炎の押し戻し効果を実験的に見積もることで、Chemical regime の燃え広がり速度について予測式を提案した(3.14式)。一方、安定燃焼ではポート径を拡大しながら火炎が伝播するため、その燃え広がり速度は固体の熱分解によって律速される。したがって、この燃え広がり速度はハイブリッドロケットなどで見られる燃料後退速度と同様、圧力と酸化剤流速の累乗で見積もることができる。本研究では、吹き飛び限界を考慮してこれまでに提案されている安定燃焼の実験式を拡張し3.18式を得た。予測式から得られた燃え広がり速度は実験結果とよく一致した。

第4章 火炎長さに与えるレイノルズ数およびフルード数の影響

一般に燃え広がりでは燃焼領域外縁部に酸化剤となる空気が存在するため、火炎長さは理論上無限となる。一方、管内燃え広がりでは燃料壁面によって空気が流入しないため火炎長さは有限となり、火炎長さを定義することができる。また、噴流拡散火炎では $Re < 100$ かつ $Fr \gg 1$ のとき、マイクロフレイムと呼ばれる浮力の影響の小さい球状の火炎が得られることが知られており、微小重力火炎に代わるものとして期待されている。これまでのマイクロフレイムの研究は噴流拡散火炎に限られていたため、管内燃え広がりでもマイクロフレイムを観察することができれば燃焼学的に興味深い。

第4章では管内を燃え広がる火炎の長さを定義し、レイノルズ数やフルード数が火炎長さにおよぼす影響を実験的に調べた。その結果、火炎長さはレイノルズ数に対して一次関数的に比例し、浮力支配となる領域では噴流拡散火炎と同様にフルード数の累乗で火炎長さを見積もることができることを明らかにした。この浮力支配となる限界フルード数はレイノルズ数に依存する。また、管内燃え広がりでは $Re < 100$ かつ $Ri < 10$ のとき、マイクロフレイムとなることを見出した。この条件を満たせば、管内燃え広がりで見られるいずれの燃焼形態でもマイクロフレイムを観察することができる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 永 田 晴 紀
副 査 教 授 藤 田 修
副 査 教 授 大 島 伸 行
副 査 准教授 戸 谷 剛

学 位 論 文 題 名

対向流中における固体燃料管内燃え広がりの火炎特性

可燃性の固体や液体表面に沿って燃焼領域が伝わる現象は燃え広がりと呼ばれる。燃え広がりについて理解することは可燃性固体や液体の燃焼の初期段階を制御しようとする場合や、宇宙ステーションやスペースシャトル、ビル、地下鉄内部などの火災について理解し、防火技術を改善する場合において重要である。そのため燃料表面上の燃え広がりについては、実験や数値計算などを用いて広く研究されてきた。しかし、それらの主な研究はプールされた液体燃料や平板の固体燃料について行われており、それら以外の形状の燃料を用いた研究はほとんど行われていなかった。特に固体燃料管内の燃え広がり、吹き飛び限界における燃焼形態の遷移やレイノルズ数が小さい領域における火炎構造など、平板燃料表面上の燃え広がりとは異なる現象が見られることが知られており、その燃焼機構を理解することは基礎燃焼学的に興味深い。また、その応用としては著者らの研究室で検討されている端面燃焼式ハイブリッドロケットの実現や閉鎖空間での火災防止などが挙げられ、工学的にも重要な課題である。

本研究は、アクリル円管内を燃え広がる火炎に関して、燃焼形態および燃え広がり速度が決定される機構を基礎的に明らかにすることを目指したものである。論文は5章により構成されており、内容は以下のとおりである。

第1章は序論であり、研究背景と研究目的について示す。これまでの平板上燃え広がりの研究について詳細に述べ、本研究で扱う管内燃え広がりとの違いについて考察している。

第2章では、固体燃料管内燃え広がりで見られる燃焼形態とその遷移条件を明らかにしている。平板上の燃え広がりではダムケラー数によって決まる吹き飛び限界が存在することが知られているが、管内燃え広がりでは酸化剤流速を大きくしダムケラー数が小さくなったとき、火炎が吹き飛ばす代わりに安定燃焼と呼ばれる燃焼形態に遷移することが知られている。安定燃焼では火炎は円管内壁を上流に伝播することができないため、火炎は燃料後退により流路が拡大している領域に存在し、流路を後退させながら上流に移動する。すなわち、燃焼形態は酸化剤流速が小さい領域から順に、Thermal regime, Chemical regime, および安定燃焼に分類される。本章では、Thermal regime と Chemical regime の境界は、火炎伝播速度を Thermal regime における理論式で無次元化することにより、ダムケラー数で整理できることを示した。また、Chemical regime と安定燃焼の境界は、乱流領

域では壁面摩擦速度によりしきい値が存在することが過去の研究で明らかにされていたが、層流領域においても、壁面摩擦速度を壁面せん断応力と酸素ガスの密度を用いて定義することにより、同様にしきい値が存在することを示した。

第3章では各燃焼形態における燃え広がり速度の予測式を構築した。平板上の燃え広がりについては、De Ris や Wichman によって理論的に導出された燃え広がり速度の予測式があるが、管内燃え広がりについては研究が不足しており、燃え広がり速度の予測式はこれまで得られていない。本章では圧力、酸素流速、および管内径を変えて燃焼実験を行い、以下の成果を得た。Thermal regime においては平板上燃え広がりにおいて構築された理論式が管内燃え広がりにおいても適用可能であることを示し、管内径に依存する式に拡張した。Chemical regime においては、Thermal regime の式に、酸化剤流れにより火炎先端が下流に押し戻される効果を導入することにより予測式を構築した。安定燃焼においては、過去に雰囲気圧力と酸化剤流速の関数として得られた式の流速依存項を修正すると同時に、燃料内径に依存する式に拡張した。

第4章では管内燃え広がりにおいて特徴的に定義される火炎長さに着目し、その構造に与える無次元量(レイノルズ数、フルード数、およびリチャードソン数)の影響を明らかにしている。噴流拡散火炎において、レイノルズ数およびフルード数がそれぞれ $Re < 100$ および $Fr \gg 1$ の条件を満たすとき、マイクロフレイムと呼ばれる球状の火炎が得られることが知られている。マイクロフレイムは浮力による自然対流の影響をほとんど受けない火炎であるため、微小重力火炎に代わり消炎限界近傍の火炎の挙動を調べるための簡便なツールとして期待されている。本章では、火炎長さのフルード数への依存性を調べ、浮力の影響が無視でき、かつレイノルズ数が100以下の領域で伝播する火炎をマイクロフレイムと定義した。その上で、火炎がマイクロフレイムとなる境界は、リチャードソン数によりしきい値が存在することを示した。

第5章は結論であり、本研究で得られた成果を要約して述べている。

これを要するに、著者は、固体燃料管内の燃え広がり挙動を詳細に調べることにより、管内燃え広がり形態がどのような機構で決定されるのかを基礎的に明らかにし、各燃え広がり形態において火炎伝播速度を予測する式を導き出した。また、浮力の影響が無視でき、かつレイノルズ数が100以下の領域において固体燃料管内を伝播する火炎をマイクロフレイムと定義し、マイクロフレイムが得られる条件を明らかにした。これらの知見は基礎燃焼学的に重要な知見であるのみならず、工学的観点からも火災安全性向上に寄与するところ大なるものであり、燃焼工学分野および安全工学分野への貢献が認められる。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。