

論文審査の結果の要旨

氏名：高橋賢一

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：AP系コンポジット推進薬の燃焼表面近傍の反応層でのアルミニウム粒子の集塊と着火

審査委員：（主査）教授 栗原卓雄

（副査）教授 村松且典 教授 田辺光昭

教授 木村元昭

宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所教授 嶋田 徹

日本の固体ロケットは推進性能の向上のために推進薬にアルミニウム粒子を混合してきた。イプシロンロケットやH-IIAロケット/H-IIBロケットの固体ロケットブースターSRB-Aの推進薬には酸化剤に過塩素アンモニウム（AP）、バインダーに末端水酸基ポリブタジエンを混合し、アルミニウム粒子は19%混合している。アルミニウム粒子は燃焼表面近傍で集塊するため、燃焼効率が低下する。このため現在も世界各国で推進薬に混合されたアルミニウム粒子の燃焼特性に関する研究がおこなわれている。本研究はそのうちの、アルミニウム粒子を添加したAP系コンポジット推進薬を用い、燃焼表面近傍の反応層内でアルミニウム粒子が着火したときに反応層内の温度分布へ与える影響、アルミニウム粒子が燃焼表面近傍の反応層内で集塊するときの機構と反応層内の温度分布との関係を求めることを目的に研究を行っている。

燃焼表面近傍の反応層の厚さは雰囲気圧力で変化し、0.1 MPaの雰囲気中で約100から200 μm と非常に薄い。反応層から燃焼表面に入る熱量で燃焼速度が大きく影響を受け、燃焼速度を決定する要因を求める上で反応層内での燃焼波構造を詳細に解明することが重要となる。結晶状の酸化剤と燃料を混合し固相内が不均質になっており、燃焼速度が酸化剤と燃料表面で異なり燃焼表面は平坦ではない。反応層は非常に薄く、燃焼波構造を物理的に直接または間接的に計測することができず、燃焼波構造の全てを解明するには至っていない。従来から行われてきた極細熱電対（白金-白金10%ロジウム、線径は2.5から12.5 μm ）による燃焼表面近傍の温度分布の計測は有効な手段であるが、アルミニウム粒子を添加したAP系コンポジット推進薬では、酸化剤とバインダーによる拡散火炎または着火したアルミニウム粒子によって熱電対が容易に熔融切断され測定が難しく、研究報告は非常に少ない。

AP系コンポジット推進薬に添加されたアルミニウム粒子は燃焼表面上で集塊し、集塊粒径は元の粒径の10倍ほどまで成長する。燃焼表面近傍の反応層付近で集塊し着火するアルミニウム粒子は、反応層内の温度分布に影響を与え、燃焼速度が変化する要因と考えられる。反応層内で集塊し着火するアルミニウム粒子の状況を取得することは、AP系コンポジット推進薬の反応層内の燃焼波構造の一部を解明する重要な研究課題となる。本論文では、実験的な解析と数値流体解析手法を用いてアルミニウム粒子の集塊、燃焼を検討しアルミニウム粒子の集塊の生成過程を明らかにしている。

以下、論文の章立てに沿って審査内容を報告する。論文は第1章の序論から第8章の結論に至る全8章から成り立っている。

第1章は序論であり、本研究の背景及び目的に関して述べている。固体推進薬の1つであるコンポジット推進薬に焦点を置き研究状況を分析している。コンポジット推進薬の酸化剤にAPを使用し燃焼速度を決定する要因を明らかにするために、燃焼表面近傍の燃焼波構造の解明を行ってきた。

第2章は燃焼実験で使用する推進薬と燃焼器について述べている。燃焼時の反応層の厚さを拡大するために酸化剤のAPに硝酸アンモニウム（AN）を加えている。バインダーに燃焼速度を減少させ、炭素の発生を低減させる作用のあるオクタデシルアルコール（Oct）を選択している。ANを増加させると燃焼速度が減少することから燃焼速度を変えるため酸化剤のAPとANの組成比を変化させている。

燃焼表面近傍の反応層内の温度分布の計測を行うために、反応層内で着火したアルミニウム粒子によって切断され難い線径の極細熱電対（白金-白金10%ロジウム、線径は12.5 μm ）をAP系コンポジット推進薬

の中心に埋め込んだ。観測窓のついたストランドバーナーを使用し、白黒高速ビデオカメラを使用して AP 系コンボジット推進薬の燃焼表面近傍を撮影している。

第 3 章は燃焼表面上でのアルミニウム粒子の集塊と着火の観察に関して述べている。AP 系コンボジット推進薬の燃焼表面上のアルミニウム粒子を顕微鏡を通して撮影し、燃焼表面上でアルミニウム粒子が集塊し着火する様子を詳細に観察している。推進薬の固相から現れるアルミニウム粒子と燃焼表面上のアルミニウム粒子が次々に集塊し、反応層内で成長し熔融する。熔融すると球状化し集塊が完了するが粒子径は一樣ではなく混合時の初期粒子径の分散と同じく大きな分散を持っている。燃焼表面近傍の反応層内で集塊したアルミニウム粒子は着火と同時に燃焼表面から離脱している。

着火直後のアルミニウム粒子は、中心に液状のアルミニウム粒子があり、周囲には蒸発したアルミニウムの雲と、周辺の酸化剤と拡散火炎を形成し輝炎層で覆われる。着火直後では、輝炎径は集塊したアルミニウム粒子径の約 1.5 倍になっている。

第 4 章は燃焼表面近傍の反応層内の温度分布を測定している。アルミニウム粒子を添加したときには、無添加と比較して、燃焼速度が 40 %増加している。

AP 系コンボジット推進薬の燃焼表面近傍の温度分布は固相が不均質であることからアルミニウム粒子を混合してないものは小さな温度変動が表れている。アルミニウム粒子を添加したときに、燃焼表面近傍の反応層内の温度分布に、着火したアルミニウム粒子による温度上昇を伴う大きな温度変動と急激な温度上昇が出現している。着火したアルミニウム粒子による温度変動は反応層内の温度分布を大きく変化させる。また、着火したアルミニウム粒子の周辺の温度が上昇し、温度変動が燃焼表面に接近して出現すると、燃焼表面近傍の温度勾配は増加する。

第 5 章は着火したアルミニウム粒子の周辺の温度分布について述べている。AP 系コンボジット推進薬の燃焼生成物は分子量が 24~28 kg/kmol であることから、燃焼ガスを窒素で模擬し、着火したアルミニウム粒子を球体で表面が高温の熱源とし、熱源の粒子が AP 系コンボジット推進薬の燃焼表面から一定の距離にあるときのコンピュータ・シミュレーションを行い、着火したアルミニウム粒子の周辺の温度分布を求めている。

粒子の周辺には流線形の高温領域が形成され、高温領域は粒子の上流から下流に広がり、下流で高温領域が増加し、粒子に近いところの温度は急激に上昇している。これらのシミュレーション結果は熱電対で測定した温度分布に近い形状が得られ、シミュレーション方法は十分評価できる。

第 6 章は集塊したアルミニウム粒子の集塊粒径と集塊範囲に関して述べている。燃焼速度とアルミニウム粒子の集塊粒径の関係を求めるために、酸化剤の AP と AN の組成比を変えて燃焼速度を変化させている。

AN を増加させ燃焼速度が減少すると、アルミニウム粒子の集塊粒径は大きくなっている。

アルミニウム粒子の集塊について集塊範囲を用いて評価している。アルミニウム粒子が AP 系コンボジット推進薬の燃焼表面近傍で集塊前に分布していた領域を示す代表長さで集塊範囲を定義している。集塊するアルミニウム粒子が分布する領域を立方体と仮定し、アルミニウム粒子の集塊範囲は立方体の 1 辺の長さとし観察した結果から、燃焼速度が減少すると、アルミニウム粒子の集塊範囲は増加している。

第 7 章は考察である。AP 系コンボジット推進薬の燃焼速度は燃焼表面近傍の熱平衡から決定し、燃焼表面上の気相側の温度勾配によって変化する。燃焼表面近傍の反応層内で着火したアルミニウム粒子は、反応層内の燃焼ガスの温度を上昇し温度勾配を増加させ、さらに、アルミニウム粒子は輝炎層まで燃焼し続け、輝炎層の温度を上昇させている。これらの温度上昇から温度勾配が増加することによって燃焼速度が増加している。

燃焼速度が変化すると燃焼表面近傍の反応層内の温度分布が変化し、反応層の厚さを変え、アルミニウム粒子の集塊の機構に影響している。AP 系コンボジット推進薬の燃焼表面上で、集塊したアルミニウム粒子は着火すると同時に燃焼表面から離脱している。アルミニウム粒子の集塊は燃焼表面近傍の反応層内で行われ、アルミニウム粒子の集塊範囲は反応層内の温度分布によって決定されている。

第8章は本論文の成果と今後の課題に関してまとめ結論としている。

燃焼表面近傍の反応層内でアルミニウム粒子は着火し、着火したアルミニウム粒子による温度変動が反応層内の温度分布に現れる。アルミニウム粒子の集塊粒径は反応層内の温度分布で決定する。反応層内の温度勾配が予測できれば燃焼速度の推定が可能になり、アルミニウム集塊粒径の予測からアルミニウム粒子の燃焼時間を推定することができ、燃焼効率の向上をはかることが期待できる。

このことは本論文の提出者が自立して研究活動を行い、さらにその高度な専門的業務に従事するに必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

平成26年2月13日