

論文の内容の要旨

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

本論文は全8章から構成されており、以降に各章の概要を述べる。

第1章 序論

酸化剤に過塩素酸アンモニウム(AP)を使用したAP系コンポジット推進薬に関する研究では、燃焼速度を決定する物理及び化学的要因を求めるために、燃焼表面近傍の燃焼波構造の解明に関心が寄せられている。

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100から200 μm 程度と非常に薄い、反応層から燃焼表面に入る熱量が燃焼速度に大きく影響するので、燃焼速度が決まる要因を求めるとして反応層内での燃焼波構造を詳細に解明することが重要である。しかしながら、燃焼表面は平坦ではなく、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非常に困難であり、燃焼波構造の全てを解明するには至っていない。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災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切断されるので研究報告は非常に少ない。

AP系コンポジット推進薬にアルミニウム粒子を添加することにより推進性能が向上し、燃焼の安定性が得られる。アルミニウム粒子に関する研究では、AP系コンポジット推進薬の燃焼ガスを模擬した雰囲気中でアルミニウム粒子の着火と燃焼の実験が行われているが、実際にAP系コンポジット推進薬が燃焼しているときの条件とは差異があるために詳細の解明には至っていない。また、AP系コンポジット推進薬が燃焼しているときのアルミニウム粒子の観察が行われているが、燃焼表面から離れた輝炎層での研究が多く、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の機構に関する研究は非常に少なく十分に解明されていない。

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することが解っており、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るので、燃焼速度が変化する要因の一つと考えられる。反応層内で集塊し着火するアルミニウム粒子の挙動を求めることは、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。

本研究の目的は、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、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を求め、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である。

第2章 燃焼実験で使用する推進薬と燃焼器

AP系コンポジット推進薬の組成は、酸化剤に過塩素酸アンモニウム(AP)と硝酸アンモニウム(AN)、バインダーにオクタデシルアルコール(Oct)、金属燃料にアルミニウム粒子(A1)とした。燃焼表面近傍の反応層内での計測精度を向上させるために反応層を拡大させる必要があり、燃焼速度を減少させ、炭素の発生を低減させるために、バインダーにOctを選択した。酸化剤のAPとANの組成比を変化させ燃焼速度を調整し、ANを増加させると燃焼速度が減少する。

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、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み、着火したアルミニウム粒子によって切断され難い線径とした。

燃焼実験にはストランドバーナーを使用し、観測窓から白黒高速度ビデオカメラを使用してAP系コンポジット推進薬の燃焼表面近傍を撮影した。実験条件は、雰囲気ガスに窒素、温度は293 K(20 $^{\circ}\text{C}$)、雰囲気圧力は0.1 MPaとした。

第3章 燃焼表面上でのアルミニウム粒子の集塊と着火の観察

AP系コンポジット推進薬の燃焼表面上のアルミニウム粒子を撮影し、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観察した。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集塊し、全体が熔融すると球状化し集塊が完了し、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た。アルミニウム粒子は燃焼表面近傍の反応層内で集塊し着火していた。

着火直後のアルミニウム粒子は、中心に熔融した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、その外周部は輝炎層で覆われる。着火直後では、輝炎径はアルミニウム粒子の集塊粒径の1.5倍ほどになる。

ここでの観察は、第4, 5, 6章のアルミニウム粒子の集塊または着火のモデルの基礎となった。

第4章 燃焼表面近傍の反応層内の温度分布

AP系コンポジット推進薬の燃焼速度と燃焼表面近傍の反応層内の温度分布を計測した。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%増加した。

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温度変動と急激な温度上昇が出現した。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た。また、着火したアルミニウム粒子の温度変動が燃焼表面に接近して出現すると、温度変動の周辺の温度が上昇し、燃焼表面近傍の温度勾配は増加した。

第5章 着火したアルミニウム粒子の周辺の温度分布

着火したアルミニウム粒子の周辺の温度分布を求めた。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系コンポ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った。

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、粒子に近いところでは温度が急上昇した。第4章の燃焼実験で温度分布に出現した着火したアルミニウム粒子による温度変動は、コンピュータ・シミュレーションによる温度分布に近い形状をしている。

第6章 集塊したアルミニウム粒子の集塊粒径と集塊範囲

酸化剤のAPとANの組成比を変化させて燃焼速度を変化させ、燃焼速度とアルミニウム粒子の集塊粒径を計測した。ANを増加させると、燃焼速度は 1.0 から 0.4 mm s^{-1} まで減少した。

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増加した。

集塊範囲とは、アルミニウム粒子がAP系コンポ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ある。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辺の長さとした。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範囲は増加した。

第7章 考察

AP系コンポジット推進薬の燃焼表面近傍の熱平衡から、燃焼速度は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させ温度勾配を増加させる。さらに、アルミニウム粒子は輝炎層まで燃焼し続け、輝炎層の温度も上昇させる。燃焼表面近傍の反応層と輝炎層の温度と温度勾配が増加することによって燃焼速度が増加する。

燃焼速度が変化したときには燃焼表面近傍の反応層内の温度分布も変化する。アルミニウム粒子の集塊の機構には反応層内の温度分布が影響している。AP系コンポ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が着火温度 2300 K を超える温度と接触し集塊が完了し、着火すると同時に燃焼表面から離脱する。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と燃焼速度の比によって決定される。

第8章 結論

燃焼表面近傍の反応層内でアルミニウム粒子は着火し、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変動が出現し、この温度変動によって反応層内の温度分布が変化する。また、着火したアルミニウム粒子の周辺には流線形の高温領域が形成される。

燃焼表面近傍の反応層内でアルミニウム粒子は集塊し、集塊粒径は反応層内の温度分布の影響を受ける。燃焼表面近傍で集塊する前にアルミニウム粒子が分布していた領域の代表長さを集塊範囲とすると、集塊範囲は反応層内の温度分布と燃焼速度の比によって決定される。