

論文審査の結果の要旨

氏名：松 本 幸太郎

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：金属粒子を添加したガスハイブリッドロケットの2次燃焼室内の燃焼特性

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

宇宙航空研究開発機構 教授 嶋田 徹

本研究では、着火・燃焼特性及び、燃焼方式の異なる金属粒子を添加したガスハイブリッドロケットの着火・燃焼特性を求め、金属粒子の粒子周囲への熱の移動について解析を行い、金属粒子の燃焼方式の違いがガスハイブリッドロケット2次燃焼室内の燃焼促進に与える影響を求めることを目的としている。本論文の内容は全8章で構成されており、各章の概要を以下に述べる。

第1章 序論

ハイブリッドロケットは固体の燃料に液体の酸化剤を混合して燃焼し推力を発生する推進機関である。ハイブリッドロケットの一種であるガスハイブリッドロケットは1次燃焼室内でガス発生剤を燃焼させ、2次燃焼室に高温の燃料成分過剰ガスを噴射し、混合させ燃焼する。酸化剤は常温以下で充填されており、2次燃焼室内において、燃料成分過剰ガスと酸化剤の混合ガスの温度は比較的低温になる。混合ガスの燃焼時間が長くなり、ガスハイブリッドロケットのC*効率が低下してしまう。ガスハイブリッドロケットと同様に2次燃焼室内で燃料成分過剰ガスと酸化剤を燃焼させるダクトロケットの研究では、表面燃焼方式の金属粒子の一部を気相燃焼方式の金属粒子に置き換えることで、C*効率が向上する効果が得られている。

ガス発生剤に添加された金属粒子は、2次燃焼室内で燃焼することで、混合ガスの燃焼を促進することが考えられる。金属粒子の燃焼は表面燃焼と気相燃焼の2つの燃焼方式に分類される。表面燃焼方式では、金属粒子表面で燃焼が進行する。気相燃焼方式では、金属粒子周囲において表面から蒸発した金属ガスが酸化剤と反応し、拡散火炎を形成する。しかしながら、2次燃焼室内における金属粒子の燃焼による混合ガスの燃焼促進に関する研究、さらに金属粒子の燃焼による燃焼促進に関して詳細な研究がなされていない。

第2章 金属粒子による燃焼促進

ガスハイブリッドロケット2次燃焼室内の定常燃焼時は、圧力が一定であり、金属粒子の燃焼による熱の移動により、粒子周囲のガス温度が増加する。熱の移動は粒子周囲の混合ガス温度を増加させ、反応速度が増加する。

金属粒子は加熱され反応して燃焼が終了するが、1次燃焼室内で燃料成分過剰ガスによって加熱され、高温粒子として2次燃焼室内に流入する。よって、金属粒子の2次燃焼室内における着火遅れ時間は主に化学反応が律速する。燃焼時間が長いと金属粒子は2次燃焼室内で燃焼を完結できず、ノズルから未燃のまま放出し、ガスハイブリッドロケットのC*効率が低下してしまう。

表面燃焼方式の金属粒子は粒子表面で反応が行われるため、金属粒子の燃焼による熱の移動において、混合ガス中で非常に高温な熱容量として存在する。また、気相燃焼方式の金属粒子は、粒子周囲に拡散火炎を形成するため、粒子周囲の広い領域を高温に保持できることが考えられる。本研究では、金属粒子は2次燃焼室内で素早く着火し、燃焼熱が比較的近く、着火性の良いマグネシウム粒子（気相燃焼方式）及びジルコニウム粒子（表面燃焼方式）の2種類の金属粒子を用いている。

添加される金属粒子径は微小であるため、混合ガスとの相対速度は非常に小さい。したがって、定常燃焼時には熱の移動は主に熱伝導によって行われると考えられる。

第3章 実験装置及び実験方法

金属粒子の着火・燃焼特性を取得するために、電気炉を用いている。電気炉内は酸化剤のN₂O（亜酸化窒素）で置換している。金属粒子の着火特性として着火遅れ時間、燃焼特性として燃焼時間を求めるために、ハイスピードカメラを用いて金属粒子の着火及び燃焼の様子を記録した。電気炉内温度は、2次燃焼室

内の理論混合比での混合ガス温度に近い値として、900~1100 K に設定している。電気炉内温度は熱電対を用いて測定した。金属粒子が電気炉内の高温ガスに接触してから輝炎を発生させるまでの時間を着火遅れ時間とし、各温度で20回測定し、平均値を金属粒子の着火遅れ時間とした。輝炎の発生から輝炎が消失するまでの時間を燃焼時間と定義した。

着火実験では、着火が比較的容易に確認できる平均粒径 45 μm の粒子を用いている。燃焼実験では、金属粒子の粒子径を変化させ、金属粒子径と燃焼時間の関係を求めた。

GAP(グリシジルアジ化ポリマー)/AP(過塩素酸アンモニウム)系ガス発生剤を用いている。液体酸化剤には、 N_2O (亜酸化窒素)を用いた。 N_2O は常温で蒸気圧が約5 MPa と非常に高く、液体酸化剤の蒸気圧で酸化剤タンクを加圧することが出来る。

ガスハイブリッドロケット燃焼実験では、2次燃焼室内での燃料成分過剰ガスと酸化剤の混合比は化学量論比1.8の1.3-2.3に設定した。混合比は酸化剤の流量を固定し、ガス発生剤の径を変化させることで、燃焼表面積さらに燃料の流量をかえて調整している。各混合比で圧力及び2次燃焼室内における混合ガスの滞留時間が一定となるように、2次燃焼室内にダミーを入れることで内容積を変え、さらに2次ノズルスロート径を変化させて調整した。

第4章 Mg及びZr粒子の着火・燃焼特性

電気炉を用いた実験より、Mg及びZr粒子の着火遅れ時間を取得し、統計的処理を行い、着火遅れ時間を物理的着火遅れ時間と化学的着火遅れ時間に分けて評価している。ガス発生剤に添加された金属粒子は燃料成分過剰ガス中で高温になり、2次燃焼室内に流入する。金属粒子の熱容量はガスと比較して大きいため、金属粒子は2次燃焼室内で冷却されにくく、燃料成分過剰ガスと同等の温度を保持したまま化学反応が進行すると考えられる。化学的着火遅れ時間と電気炉内温度の関係より、燃料成分過剰ガス温度約1400 Kでの金属粒子の化学的着火遅れ時間を求めた。微小な金属粒子は2次燃焼室内に流入後速やかに着火することが実験的に明らかとなった。

さらに金属粒子の粒子径を変化させて、各金属粒子の燃焼時間と粒子径の関係を取得した。取得した燃焼時間より、ガスハイブリッドロケット燃焼実験において、2次燃焼室内で燃焼を完結させる金属粒子の粒子径が求められた。

第5章 ガスハイブリッドロケットの着火・燃焼特性

ガスハイブリッドロケット燃焼実験より、1次燃焼室、2次燃焼室内の圧力履歴を求めた。2次燃焼室内の圧力の立ち上がりからガスハイブリッドロケットの着火遅れ時間、圧力一定の圧力履歴から定常燃焼時のC*効率を取得した。1次燃焼室のガス温度が約1400Kと高いことから、着火遅れ時間は金属粒子を添加した場合でも添加していない場合とも変わらなかった。C*効率は金属粒子の添加によって増加した。さらに、気相燃焼方式であるMg粒子を添加した場合、表面燃焼方式のZr粒子を添加した場合よりも大幅に増加した。以上より、金属粒子の燃焼による混合ガスの燃焼促進効果は気相燃焼方式の金属粒子の添加がより効果的であることが求められた。

第6章 金属粒子周囲の温度分布及び濃度分布

2次燃焼室内における混合ガスの反応速度は混合ガス温度が上昇すると大きくなる。よって、金属粒子の定常燃焼時における粒子周囲の温度分布及び濃度分布を明らかにしている。粒子径の影響を無くすために、無次元径を用いて解析を行っている。解析結果より、金属粒子は定常燃焼時に粒子周囲に高温領域を形成していることが得られた。

第7章 考察

燃焼実験より得られたガスハイブリッドロケットのC*効率を用いて、2次燃焼室内の燃焼ガス温度をC*の式を用いて求めている。燃焼ガス温度は表面燃焼方式のZr粒子を添加した場合に比べて、気相燃焼方式のMg粒子を添加した場合の方が高くなっている。計算により得られた燃焼ガス温度から、混合ガスの燃焼促進効果を算出し、燃焼促進効率を求めている。燃焼促進効率は気相燃焼方式であるMg粒子を添加した場合、表面燃焼方式であるZr粒子添加時と比較して大きいことが得られている。

金属粒子が2次燃焼室内に均一に分布していると仮定して、金属粒子間距離を算出した。粒子間距離を無次元化し、粒子間の温度分布及び濃度分布を比較している。解析の結果、Mg粒子の粒子間の温度はZr粒子と比較して大きくなることが得られた。Mg粒子の粒子間の温度は N_2O が活発に分解する1200 K以上であるため、 N_2O が十分に分解され、反応が促進されている。気相燃焼方式の金属粒子は、表面燃焼方式

と比較して金属粒子周囲をより高温にし、混合ガスの反応速度を向上させ、C*効率を向上させることが得られた。

第8章 結論

気相燃焼方式と表面燃焼方式を比較すると、金属粒子の燃焼による金属粒子周囲の温度は、気相燃焼方式がより高温に達する。さらに、金属粒子の燃焼によるガスハイブリッドロケット2次燃焼室内の燃焼は、気相燃焼方式の金属粒子が表面燃焼方式と比較してより効果的であることを明らかにしている。

研究成果は熱分解して酸素を生成するガスハイブリッドロケットの燃焼性能向上に役立つ内容になっている。

このことは、本論文の提出者が自立して研究活動を行い、又はその他の高度な専門的業務に従事するため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27年2月19日