

論文の内容の要旨

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

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

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、2次燃焼室内で燃料成分過剰ガスと酸化剤を混合・燃焼させることで推力を得るロケットである。ガスハイブリッドロケットの酸化剤には液体酸化剤が用いられる。この液体酸化剤は一般的に常温以下で充填されているため、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。そのため、混合ガスの燃焼時間が長くなり、2次燃焼室内で燃焼を完結することが難しく、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のC*効率を改善する方法として、ガス発生剤内に微小な金属粒子を添加する方法が挙げられる。金属粒子を添加した場合のC*効率は添加しない場合と比較して向上する結果が得られている。このことから、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していると考えられる。

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。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*効率が向上する結果が得られている。このことから、金属粒子の燃焼方式の違いが2次燃焼室内における混合ガスの燃焼促進に対して影響を与えていると考えられる。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はほとんど行われておらず、金属粒子の燃焼による燃焼促進に関して詳細に調べられていない。

以上より、本研究では金属粒子の着火・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、異なる燃焼方式の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解明することを目的とした。

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次燃焼室内での反応では、混合ガス温度が向上すると反応速度が向上する。定常燃焼時では圧力が一定であるため、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向上する。したがって、熱の移動は粒子周囲の混合ガス温度を向上させ、混合ガスの反応速度が向上する。

ガス発生剤に添加された金属粒子は2次燃焼室内で燃焼を完結させなければならない。したがって、金属粒子の酸化剤雰囲気における着火及び燃焼特性が重要である。金属粒子は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は主に化学反応過程が律速する。燃焼特性として金属粒子の燃焼時間が挙げられる。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、ガスハイブリッドロケットのC*効率が低下してしまう。

金属粒子の燃焼による熱の移動において、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、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、粒子周囲の広範囲を高温に保持できると考えられる。本研究では、金属粒子は2次燃焼室内で素早く着火しなければならぬため、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る。

金属粒子の熱の移動形態には主に熱伝導、対流熱伝達、熱放射がある。熱伝導及び対流熱伝達と比較して熱放射の影響は非常に小さい。また、添加される金属粒子は微小であるため、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た。電気炉内は酸化剤で置換した。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とした。電気炉内温度は熱電対を用いて取得した。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、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した。着火実験は各温度で20回測定し、平均値を金属粒子の着火遅れ時間とした。

金属粒子は粒子径が小さすぎると観察することが難しくなってしまう。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 の粒子を用いた。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。

ガスハイブリッドロケット燃焼実験では、ガスハイブリッドロケットを模擬した小型燃焼器を用いて実験を行った。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付近である1.3-2.3の間に設定した。混合比はガス発生剤の径を変化させることで調整した。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次燃焼室内の内径及び2次ノズルスロート径を変化させた。

ガス発生剤には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た。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。

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た。また、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た。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。燃料成分過剰ガス温度は約1400 Kと高温であるため、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での金属粒子の化学的着火遅れ時間を求めた。得られた化学的着火遅れ時間より、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得られた。

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得られた。

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各燃焼室内の圧力履歴を求めた。2次燃焼室内の圧力履歴より圧力の立ち上がりから着火遅れ時間、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。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変わらなかった。C*効率は金属粒子の添加によって向上した。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向上した。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求めた。式中の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た。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することが得られた。

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、 C^* の式から 2 次燃焼室内の燃焼ガス温度を求めた。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た。得られた燃焼ガス温度から混合ガスの燃焼促進効果を求めるために燃焼促進効率を求めた。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た。

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た。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、反応が促進されたと考えられる。以上より、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

金属粒子の燃焼による金属粒子周囲の温度上昇は、気相燃焼方式が表面燃焼方式と比較してより高温にすることが求められた。また、金属粒子の燃焼によるガスハイブリッドロケット 2 次燃焼室内の燃焼の促進は、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が解明された。