

審査の結果の要旨

論文提出者 羽生 宏 人

本論文は「マグナリウムによる AP 系固体推進薬の低公害化に関する研究」と題し、AP/Al/HTPB 三成分系コンポジット固体推進薬の金属燃料である Al の一部を Mg に替える代わりに、金属燃料そのものを Al と Mg の合金であるマグナリウム(Mg/Al)に置換した中和型推進薬の HCl 抑制効果と、燃焼特性および推進性能に関する実験および解析研究によって得られた成果をまとめたもので、全 7 章で構成されている。

第 1 章は序論で、本研究の目的とその背景について述べている。AP 系固体推進薬の燃焼によって発生する HCl がロケット発射場あるいは燃焼試験場周辺の環境に悪影響を与えるため、HCl 抑制技術の必要性が指摘されている。現在提案されている対策技術は、Cl を金属塩として固定化する中和型推進薬および掃気型推進薬と AP の代わりに Cl を含まない酸化剤を用いる脱塩素系推進薬の 2 つに大別されるが、性能劣化や高価格に阻まれ、実用化が進んでいない。本研究の目的は、短期的な対応策として低公害化と実用性の両立を狙う Mg/Al 利用による中和型推進薬の実用化の可能性を探ることにあり、研究課題が同種推進薬の HCl 抑制効果の定量的な検証をはじめ、その燃焼特性、推進性能など、実用化を模索する上で必要となる推進薬の諸特性の解明に及ぶことを述べている。

第 2 章では、Mg/Al の物理化学特性について述べている。まず、公表されている研究成果等に基づき、Mg/Al は金属間化合物 (Al_3Mg_2 および $Al_{12}Mg_{17}$) で構成される共晶合金で、Mg の成分比率が 35~65mass% の範囲ではその融点が各単体金属よりも 200K 低い、通常の保管環境下で強固な酸化被膜を持たずに安定に存在し、機械的に微粉碎可能である、といった単体や物理的混合物と異なる特性を備えていることを述べている。次いで、著者自身による熱分析などの実験研究によって、Mg/Al の酸化熱は組成平均値と一致し、酸化雰囲気中で Al および Mg 単体よりも低温で速やかにかつ効率よく酸化する、といった特有の酸化反応性を明らかにしている。

第 3 章では、高い信頼性の認められている JANAF 熱力学データを基礎にした汎用の平衡計算プログラムを活用した数値解析によって Mg/Al-AP 系推進薬の気相および凝縮相燃焼生成物の組成解析を行い、酸化アルミニウムマグネシウムの生成によって $MgCl_2$ の生成が阻害されるために、Mg の成分比率を増加しても HCl 抑制効果が必ずしもこれに対応して改善されないこと、ノズル内の膨張過程の進行によるガス温度の低下に伴う化学平衡移動によって、ノズル出口では HCl 生成量が燃焼室内のそれよりも増加すること、等の重要な熱力学的特性を導出している。また、この知見から、燃焼生成物の定量評価実験を遂行する上で、燃焼場における温度管理が重要であることを指摘している。

第 4 章では、従来の QPCB(Quenched Particles Collection Bomb)を燃焼場温度管理の観点から改良を加えた装置を製作・活用して Mg/Al-AP 系推進薬の凝縮相燃焼生成物の捕集・分析を行い、その粒度分布特性および燃焼生成物の組成に関して、燃焼面と捕集位置との距離をパラメータとして解析調査した結果とそれから推察される同種推進薬の特徴的な燃焼機構について著者の理解を述べている。すなわち、Mg/Al 粒子は燃焼表面近傍で燃焼完結に至り、酸化被膜の存在により固相表面で凝集・焼結・集塊等と呼ばれる物理的過程を経て初めて着火・燃焼過程に至る Al よりもその燃焼特性時間が短い。 $MgCl_2$ 生成量が捕集距離の拡大に伴うガス温度の低下に従って減少する。燃焼生成物の組成は燃焼表面近傍で既に平衡に達してお

り、Mg/Al-AP 系推進薬の HCl 生成量は化学平衡プログラムによる予想計算結果にほぼ一致する。HCl 抑制効果をノズル出口面において評価すれば、同一質量組成の Al-AP 系推進薬の約 30%の削減効果があると結論付けている。

第 5 章では、Mg/Al-AP 系推進薬の燃焼機構解析を行っている。三成分系推進薬においては、金属燃料を Al から Mg/Al に置き換えると、線燃焼速度はおよそ 1.4 倍になる。急減圧による燃焼中断面の状態および化学組成分析、極細熱電対(5 μm)による燃焼表面近傍の温度分布測定、火炎の光学観測等の諸実験を組織的に行い、著者がこれらの諸情報を総合して得た Mg/Al 系推進薬の燃焼機構に関する理解を述べ、その高燃速特性の要因を明解に説明している。すなわち、コンポジット推進薬中の Mg/Al 粒子の燃焼機構は、Al のそれと比べて大きく異なり、低融点特性により燃焼表面上で融解、20~30 μm の集塊を形成して反応活性状態になり、それらは燃焼表面もしくは近傍の気相で速やかに着火、燃焼に至る。Mg/Al 系推進薬の燃焼表面近傍の気相温度は Al 系のそれより高く、温度勾配がより急になっている。この現象は、Mg/Al 粒子の低融点、低着火温度特性に加えて、微粒化現象を伴う Mg 先行 2 段燃焼特性によって Al の燃焼過程が促進されて金属燃料全体の燃焼特性時間が大幅に短縮されることによって、火炎の発熱帯域が燃焼表面に近接して形成されるためである。つまり、Mg/Al 系推進薬の高燃速特性の直接要因は、燃焼表面への火炎帯の接近によって固相への熱還流量が Al 系推進薬より相対的に増大し、AP および燃料粘結材の熱分解が促進されることにある、と結論付けている。

第 6 章では、Mg/Al-AP 系推進薬の製造性、燃焼性および推進性能について実験的に検討している。Mg/Al-AP 系推進薬は、Mg 単体を混和する場合と異なり製造上、安全性に問題はなく、適正なスラリー粘度で製造可能であること、小型ロケット・モータの燃焼試験において、Mg/Al-AP 系推進薬の燃焼性は Al-AP 系推進薬と比べて遜色ないことを実証している。著者らが行った小規模燃焼実験では、化学平衡計算による理論予想と異なり、比推力効率および特性排気速度効率共に Al-AP 系推進薬を上回る結果が得られたが、これは、第 4 章および第 5 章で述べた Mg/Al の高い燃焼完結性および短い燃焼特性時間特性の効果が直接発揮されたのに対し、Al-AP 系推進薬の本来備えている燃焼および推進効率がモータ規模の小ささに起因する諸要因に阻害されて十分に発揮されなかったことによる限定的な逆転現象である、との妥当な解説を加えると共に、総合的な判断として同種推進薬の実用化の可能性について明解に言及している。

第 7 章はまとめであり、第 3 章から第 6 章の各章で明らかとなった Mg/Al-AP 系推進薬の諸特性について総括し、実用化に向けた展望とそのために解決されなければならない工学上の研究課題に関する著者の認識を簡明に述べている。

以上要するに、本研究はマグネシウム利用による中和型推進薬の欠点をマグネシウムの代替利用によって克服し、同種推進薬の実用化への可能性を見出すに至っている。特に、共晶合金の活用によって金属燃料の燃焼効率を高め、アルミニウムのマグネシウム置換による性能劣化を抑制し得ることを見出した点、また、金属燃料添加コンポジット固体推進薬の燃焼特性について総合的に研究し多くの新知見を提示した点で工学的に価値の高いものであり、化学システム工学および推進燃料工学に貢献するところは大きい。

よって、本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。