

氏 名 勝身 俊之

学位（専攻分野） 博士（工学）

学位記番号 総研大甲第 1323 号

学位授与の日付 平成 22 年 3 月 24 日

学位授与の要件 物理科学研究科 宇宙科学専攻
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 HAN 系液体推進剤の燃焼に関する研究－燃焼機構の
解明およびスラストの開発－

論文審査委員 主 査 教授 堀 恵一（宇宙科学研究本部）
准教授 徳留 真一郎
准教授 小川 博之
准教授 坪井 伸幸（九州工業大学）
教授 竹ヶ原 春貴（首都大学東京）

論文内容の要旨

Hydroxylammonium nitrate (HAN)系溶液はヒドラジンにとってかわる、衛星の姿勢制御スラスタ用一液性推進剤として有望視されている。硝酸アンモニウム(AN)、メタノール(MeOH)と水を含む一液性推進剤用の溶液は燃焼特性が適度で、凝固点が十分に低く、高密度、低毒性、そしてヒドラジンと比べ性能の指標とされる $\rho \cdot I_{sp}$ が70%高いことが特長である。しかしながら、このHAN系溶液は、一般的に高圧力下において、非常に高い燃速を示す。そのため、爆発事故もいくつか報告されており、実用化には至っていない。燃焼の制御技術を確立するためには、燃焼メカニズムの詳細な把握が必要であるが、未だ解明されていない。近年、HAN系溶液にメタノールを添加することでその燃速が抑制されることが報告されたが、その作用メカニズムについても解明されていない。

そこで、本研究では、HAN系溶液の燃焼メカニズムを把握し、燃焼速度を左右する要素を明らかにすると共に、メタノールが作用するメカニズムを解明することを目的とする。さらに、HAN系溶液をヒドラジンで実績のあるスラスタシステムに適用するため、試験用スラスタにより各種設計パラメータの取得も並行して行う。

供試体として、推進剤用の組成であるHAN, AN, MeOH, 水を含む溶液と、純粋なHAN水溶液を用意し、各種燃焼特性の取得を行った。また、純粋なHAN水溶液については、HAN濃度をパラメータとして、95~50mass%の範囲で7種類用意した。

まず、推進剤としての組成であるHAN, AN, MeOHを含む水溶液において、燃焼速度特性、燃焼波の温度履歴、燃焼波の観察を行った。燃焼速度測定においては、下記の3つの特徴が見られた。1つめに、圧力を上げていくと、ある圧力(遷移圧力)で10mm/s程度から100mm/s以上まで急激に燃速が上昇することが確認された。2つめに、メタノールを添加することで燃焼速度の遷移圧力が3MPaから5MPaへと上昇した。最後に、メタノールを添加することで燃焼速度が全圧力域で低下した。このことから、メタノールを添加することによって、内圧1MPa以下の燃焼器に適用するには十分のマージンが得られたといえる。この結果より、HAN+ANに対して化学両論比を満たすMeOHが含まれるSHP163という溶液がモノプロペラントとして、適用可能であることが発見された。しかし、前述のような燃焼速度特性が得られたものの、その特徴を示すメカニズムは明らかでない。さらに、燃焼波の温度履歴により、気相における化学反応は燃焼速度に影響をほとんど及ぼさないことがわかった。よって、液相における気化過程が燃焼速度を決定づけていると考えられる。次に、燃焼波の観察において、燃焼速度の低い圧力域では、初期状態である液相の上に、気化を伴う二相領域が存在し、そのさらに上に気相が存在していることが確認できた。そして、その気相が褐色であることから、気相においてNO₂生成反応が生じていることが考えられた。一方、燃焼速度の高い圧力域では、液相の上に分厚い二相領域が存在し、その二相領域においてNO₂の存在を示す褐色のガスが確認できた。

さらに、低燃速域から高燃速域へ圧力を上昇させ、その燃焼波の過渡現象を観察した。その結果、液相と二相領域の界面が波打つことにより、気相の褐色のガスが液相に接触し、その点から劇的に気泡の生成が生じるという現象を捉えた。これらの結果より、気泡の成長速度、および燃焼波の不安定性に着目し、燃焼速度の律速段階について考察を行った。その結果、溶液の組成の違いによって、気泡の生成速度が異なることがしめされたが、その差は燃焼速度を決定づけるものではなかった。一方、安定判別において、圧力が高いほど流体力学的不安定の影響が大きくなること、そしてメタノールが多いほど安定化されることが示された。以上より、燃焼における流体力学的不安定性が燃焼速度の急激な上昇を引き起こすトリガとなっていることが判明した。

以上のような燃焼特性の取得および考察を行ったものの、燃焼速度特性を説明するには至らなかった。そこで、本研究では燃焼に影響を及ぼすパラメータを減らすため、HANのみの水溶液の燃焼特性の取得に取り組んだ。圧力とHAN濃度をパラメータとし、線燃焼速度の取得、燃焼波構造の観察及び燃焼温度の計測を行った。その結果、95mass%から80mass%の範囲では、濃度の減少と共に徐々に線燃焼速度が上昇し、80mass%から50mass%では、濃度の減少と共に線燃焼速度が低下することから、80mass%付近に燃焼速度のピークが存在することがわかった。また、95mass%水溶液の燃焼速度は、結晶の燃焼

速度（文献値）と同じオーダーであることから、燃焼機構が結晶と同等であることが推察された。そして、100mm/s以上の高い線燃焼速度を示す領域では圧力への依存性がみられないことから、気相反応の影響がないことが伺える。燃焼波の観察結果から、燃焼速度特性は、燃焼現象により3種に分類できることが分かった。そして、それぞれの種類において燃焼波の温度場も異なることが明らかになった。これらの結果より、2種類の燃焼波構造のモデルを提案する。水溶液に含まれる水の量によって、2種類のうちのどちらかが選択される。水の含有量が多い場合は、二相領域が長くなるために、二相領域中の気泡内において化学反応が進行し、気泡内のガス温度が高くなり、その気泡周辺で突沸が生じると考えられる。これらのことから、100mm/s以上の高い燃焼速度を示す領域においては、気化過程の気泡核生成速度が燃焼速度を直接決定づけていることが示唆された。

さらに、推進剤についても、燃焼波の観察および温度測定より、燃焼速度と燃焼波構造の関係が水溶液の場合と一致することから、水溶液の燃焼波モデルを推進剤のモデルとして適用した。ただし、推進剤の場合は、水の含有量によってではなく、不安定性によって反応の進んだ高温のガスが液相に潜り込むことにより、その周辺で突沸が生じ、気泡核生成速度律速となる。以上により、推進剤の燃焼速度を劇的に上昇させる要素が水の含有量と不安定性であることが判明したことから、推進剤の開発において反応性抑制や凝固点低下のために水の含有量を増やすことは得策ではなく、流体力学的不安定性の評価も必要であることが示された。

本研究では、これらの燃焼波構造のモデル化に加え、実用化目的のスラスタの開発にも取り組んでいる。この取り組みでは、基礎データの取得用に10N級スラスタを試作・試験した。その結果、燃焼室内の温度分布、および圧力等のデータを取得することに成功し、触媒層の長さおよび推進剤の供給量による触媒層温度の傾向を得た。また、インジェクタの最適化や構造材としての耐熱素材の選定も併せて行った。以上の取り組みの成果として、比推力 239 秒、 C^* 効率 0.89 を達成した。また、ヒドラジンと同程度の性能特性において、合計 60 秒以上の作動を達成し、ロケットフェイズでの使用可能性が示された。

博士論文の審査結果の要旨

本論文は、Hydroxyl ammonium nitrate(HAN)、硝酸アンモニウム、メタノール、水の4成分からなる1液性液体推進剤の燃焼機構を解明した。組成の異なる液体推進剤の線燃焼速度特性を調べ、液相、2相流、気相が整然と連なる低燃速域と、泡状の気液界面が非常に高い速度で進行する高燃速域に分かれることを明らかにした。低燃速域から高燃速域への遷移は流体力学的不安定性に起因することを見出し、火炎伸張現象が支配的であること、臨界 Markstein 数が存在することを初めて示した。HAN 水溶液を用いた実験を行い、水分濃度が高い溶液では、2相流中の気泡内での発熱反応に起因する過熱により、微細気泡が急激に生成され見かけ上非常に高い燃速を示すことを、実験且つ理論的に明らかにした。また、低速・高速域が混在する中間的な領域を見出し、気液界面の不安定性と関連付けた。最終的に、水溶液の知見と推進剤の結果を有機的に関連付け、推進剤燃焼機構の総合的な理解に繋げた。

また、当該液体推進剤のスラスタへの応用研究を進め、燃焼触媒の検討、触媒層長・推進剤流量をパラメータとした触媒層温度の制御、噴射器の改良、耐・断熱材の選定など、多岐にわたる実験的検討を通じ、従来のヒドラジンを越える推進性能をロケットフェイズに相当する期間、発揮させることに成功した。

以上の成果は、学術的かつ実用的に高い独創性を有するものである。さらに、計5件(筆頭著者3件)の論文が、Combustion, Explosion, and Shock Wavesなどの査読付学術雑誌に掲載されている。

本審査では、在学期間及び修得単位数が規定を満たしていること、および本論文の内容について出願者の独創性が十分に認められ、また審査制度の確立した学術雑誌に掲載されていることを確認した。そして、審査委員全員参加の下で、関連する専門分野及びその基礎となる分野についての口述試験、英語論文要旨の提出による英語試験および学位論文の公開発表会を実施した。これらにおいて、出願者は学位論文の要点を明確に説明し、質疑応答に対しても的確な対応を行ったことから、専門及び基礎分野に対する知識および学力は十分であると判断された。また、予備審査のときに審査委員から出されていた2つの指摘事項についても、考察が加えられ、明確に回答されたと判定した。さらに、内容についても、HAN系推進剤の燃焼機構の解明と、スラスタの応用について十分な成果を挙げており、オリジナリティが十分に認められると判断した。出願者は、学位論文の内容についてこれまでに4回の国際会議発表、5編の英語論文が学術雑誌に掲載されていること、また、英語の論文要旨も提出済みであり、語学力も十分な水準にあると判断された。

以上より、出願者は学位授与にふさわしい知識と学力を有していると認められ、審査員全員一致で合格、且つ博士(工学)の学位に値すると判断した。