

氏 名 大南香織

学位（専攻分野） 博士（工学）

学位記番号 総研大甲第 1130 号

学位授与の日付 平成 20 年 3 月 19 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 ヒドラジン・四酸化二窒素の燃焼モデルとフィルムクーリ  
ング型二液式スラスタ数値モデルへの応用

論文審査委員 主 査 准教授 坪井 伸幸  
准教授 澤井 秀次郎  
准教授 小川 博之  
教授 越 光男（東京大学）  
教授 林 光一（青山学院大学）

## 論文内容の要旨

宇宙機の二液式推進系には自発着火性のある燃料が用いられ、代表的には燃焼が安定で着火性にも優れている MMH (モノメチルヒドラジン;  $\text{CH}_3\text{NHNH}_2$ ) が多く用いられてきた。しかし近年、科学ミッションをもつ探査機が多くなり、ターゲット天体へのスラスタ排気による汚染防止の観点からヒドラジン ( $\text{N}_2\text{H}_4$ ) と NTO (四酸化二窒素;  $\text{N}_2\text{O}_4$ ) の炭素基を持たない燃料/酸化剤の組み合わせが求められるようになってきた。またヒドラジンの燃焼温度は MMH と比較して高いことからスラスタの高性能化が期待されている。宇宙航空研究開発機構では、小惑星のサンプルリターンをミッションとした HAYABUSA (2003 年打ち上げ) に搭載するためのヒドラジン - NTO を推進剤とした 20N 二液式スラスタを開発した。しかしながら、この 20N スラスタの設計開発は実験による経験的手法に拠っており、時間・費用の面で高コストとなったという問題があった。またスラスタの性能が、流量や噴射位置・角度など、噴射パラメータの変化に敏感で、最適化するには至らなかった。そこで、今後のスラスタ設計開発のためにはスラスタ燃焼室内部での物理挙動を詳細に把握することを目的に、燃焼を含んだスラスタ内部での数値熱流体モデルの構築を行った。

20N 二液式スラスタは、高温の燃焼ガスから燃焼室を保護するため、フィルムクーリング手法を用いて壁面を冷却している。よって、数値モデルはフィルムクーリング燃料が壁を冷やしつつ気化し、燃焼ガスに徐々に取り込まれて燃焼していくような現象を再現できなくてはならない。そのためには、広い酸化剤/燃料質量比 (O/F) で有効で、時間依存性のある、詳細な燃焼反応モデルが必要である。

これまでスラスタの数値解析にはいくつかの例があるが、1~4 反応で代表した総括化学反応を組み入れた解析例のみで、詳細な反応モデルを組み込んだ解析例はない。ヒドラジン-NTO の詳細反応モデルがなかったためである。本論文においても 20N のスラスタの数値モデルに Sawyer と Glassman による二段の総括反応を燃焼モデルとして取り入れ解析を行った。しかし、O/F が当量からはずれるに従い、燃焼温度が断熱火炎温度からはずれてしまい、燃焼室壁の温度予測や性能予測が実験とあわず、O/F を考慮したような数値解析には適当でないことが判明した。そこで本論文では、スラスタの数値解析に組み込み可能で、O/F や流量をパラメータとした解析が可能な、ヒドラジン-NTO の燃焼モデルを構築した。

ヒドラジン-NTO 反応の詳細な燃焼反応モデルはこれまで確立されていなかった。そこで、ヒドラジン-NTO 燃焼反応の有限反応速度を直接調べるのではなく、 $\text{N}_2, \text{H}_2, \text{O}$  を含む検証された素反応をできるだけ多く集めることにより詳細反応モデルの構築を行った。この反応モデルは 245 反応式 30 化学種を含んでいる。詳細反応モデルは、1) 燃焼ガス温度が断熱火炎温度に一致すること、2) 着火おくれ時間が実験と合致すること、3) 十分時間が経過した平衡とみなせる状態の化学組成が化学平衡計算によるものと合致すること の 3 点を O/F に対して確認することで妥当性を検証した。

次に、スラスタの数値解析に適用できるように詳細反応モデルの縮小化を行った。縮小化は主に感度解析を行い、O/F をパラメータとしたときに燃焼ガス温度、着火おくれ時間、

化学種組成について、縮小モデルが詳細モデルでの解析値を再現できるように行った。その結果、61 反応式 23 化学種からなる縮小化された詳細反応モデルを構築できた。

また、詳細・縮小反応モデルにおいて反応経路の解析を行うことで、ヒドラジン・NTO が混合～着火～平衡状態に至るまでの間の火炎内部での反応の変化を明らかにすることができた。特に、着火状態では、特定の反応経路によって着火を生じさせているのではなく、 $10\mu\text{sec}$  の非常に短い期間に、反応経路のネットワークを一気に拡大・多分岐させて行っていることを示し、それを動的に変化させながら、燃焼の平衡状態へ移行するといったメカニズムを明らかにした。更に反応経路解析においても縮小反応モデルが詳細反応モデルによる結果を再現することを確認し、反応経路の観点からも妥当な縮小化を行ったことを示した。

応用として、フィルムクーリング型二液式スラスタ内部流れの数値シミュレーションに縮小化した詳細反応モデルを適用した。気相のみを取り扱ったスラスタの流れ解析では、この縮小化した詳細反応モデルを取込むことで、O/F をパラメータとした数値解析に適用できることを示し、O/F=1.2 近傍でスラスタ性能が最大となる実験結果を再現することができた。さらに液滴を考慮したスラスタ内部流れの数値解析に縮小化した詳細反応モデルを取込んだ。液滴を考慮した 3 次元のスラスタ解析に詳細反応モデルを取込んだことは初めての試みであり、燃焼室内部での液滴の蒸発・燃焼反応を考慮した火炎構造、及び燃焼のメカニズムを明らかにすることができた。フィルムクーリングの効果については、燃焼室壁近傍でヒドラジンが蒸発・徐々に燃焼ガスに取込まれるため、境界層にヒドラジンガスを多く含み、総括反応と比較してより壁面冷却効果が得られることを示した。また中心軸付近の火炎構造については、ヒドラジン・NTO 液滴からのガスの蒸発により中間生成物の生成・混合効果が進み、燃焼室内部の高温ガスを均一化しており、それが更にヒドラジン・NTO の蒸発を促進させるといったメカニズムを明らかにした。また、高温ガスが均一化されるという結果から、2次元解析の妥当性を示した。

このようにスラスタの数値シミュレーションに適用することで、ヒドラジン・NTO の縮小化した詳細反応モデルの有用性を示した。

## 論文の審査結果の要旨

本論文は、二液式スラスタ設計開発に資するため、二液式スラスタ燃焼室内部での物理挙動を詳細に把握することを目的として、燃焼を含んだ二液式スラスタ内部での詳細な数値熱流体モデルを構築し、二液式スラスタ燃焼室内部の解析をおこなったものである。本論文で対象としたのは、近年良く使われるようになって来たヒドラジン ( $\text{N}_2\text{H}_4$ ) と NTO (四酸化二窒素;  $\text{N}_2\text{O}_4$ ) の燃料/酸化剤の組み合わせである。

二液式スラスタは一般に燃焼室壁面に燃料を噴射して冷却する所謂フィルムクーリングを行っており、性能を維持しながら燃焼室壁面温度を要求範囲内に収めることが設計のポイントである。そのためにはフィルムクーリングのための燃料の燃焼過程：燃料液滴の蒸発と燃料蒸気の燃焼、が再現できる解析モデルを構築することが必要である。本論文では解析モデル構築に必要な、酸化剤/燃料質量比 (O/F) に応じた、時間依存性のある、詳細な燃焼反応モデルを初めて構築している。そしてこれまで用いられてきた総括反応モデルと比べて火炎温度と着火遅れ時間を正確に再現する反応モデルの構築に成功している。また感度解析を用いて化学反応の縮小化を行い、スラスタ解析で必要となる O/F の範囲で火炎温度や着火遅れ時間を再現できる最小の縮小化化学反応モデルの構築に成功している。さらに、反応モデルの反応経路解析を行い、ヒドラジンと NTO の火炎構造も明らかにしている。

次に、縮小化された化学反応モデルを、二液式スラスタの液滴の蒸発過程の効果を考慮した 3 次元化学反応流れ解析に初めて適用し、二液式スラスタ設計に有用な幾つかの知見を得ている。

以上のように、本論文の成果は化学反応の学問分野だけでなく今後のスラスタ開発に対しても技術的に大きな貢献をしていると認められる。従って、審査委員会は委員全員一致で、本論文は博士学位論文としてふさわしい水準にあると判定した。