

蠕動運動ポンプを用いた固体推進薬の連続捏和プロセス

岩崎 祥大*1, 伴 遼介*2, 吉浜 舜*2, 中村太郎*2, 羽生 宏人*3

The mixing of solid propellant by an artificial muscle actuator

Akihiro Iwasaki*1, Ryosuke ban*2, Shun Yoshihama*2, Taro Nakamura*2, Hiroto Habu*3

*1 総合研究大学院大学 (The Graduate University for Advanced Studies)

*2 中央大学 (Chuo University)

*3 JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency)

概要

本研究では固体推進薬の連続捏和プロセスを達成することにより、抜本的な固体ロケットの低コスト化・多様なスケールの固体ロケットモータの製造対応を狙っている。連続捏和を可能とする捏和機として蠕動運動ポンプを用いることを提案し、それを用いた捏和プロセスの安全性や利便性について述べる。

1. 緒言

近い将来、宇宙空間の利用はより多様になると予想される。地球近傍の宇宙空間であれば衛星測位システム・降雨観測など人工衛星による社会貢献の充実が期待される。地上や大気の影響を受けない天文観測衛星は今後も宇宙科学の発展に欠かせない。さらに近年は民間企業や大学教育において、小型衛星による地上の光学観測などの宇宙利用や若手技術者・学生の教育が積極的に勧められている。一方、月探査を含めた深宇宙空間の利用も今後の発展が期待できる。このように、様々なスケールの人工衛星・探査機による多様なミッションが行われており、実用・宇宙科学問わず宇宙空間利用は加速すると考えられる。

固体ロケットにおいても宇宙輸送手段として、以上のような宇宙空間の幅広い利用を支えることが求められる。小型衛星の打ち上げ需要増加・多様なミッション要求に対応するためには、小型衛星が主衛星のピギーバックではなくロケットの主ペイロードとして希望の打ち上げ日時・軌道に打ち上げられる小型衛星用のロケットが必要である。さらに、小型衛星が高頻度に打ち上げられ、主ペイロードとして成立するためには抜本的な低コスト化が必要である。惑星探査など深宇宙におけるミッションに対しては、打ち上げコスト低減だけでなく、深宇宙探査軌道へ投入できる性能と弾道特性異常の軽減された正確な打ち上げが重要となる。大型実用衛星など大規模構造体の宇宙輸送においても、固体ロケットはブースタという形で輸送システムの重要な役割を負い、安定した輸送と経済性が求められる。

まとめると固体ロケットに求められることは、推進薬そのものからの抜本的な低コスト化・大量かつ様々なスケールの固体ロケットモータに対応できるモータ製造プロセス・固体ロケットの性能と信頼性向上である。これら低コスト化と信頼性向上を図る場合、製造プロセス全体の検討が有効である。固体ロケットモータ製造プロセスの信頼性は原材料のロットから製造、モータの非破壊検査など一連の工程を管理することによって担保されており、部分的にプロセスの改善を図ることは難しい。本研究では、このような観点から新しい概念に基づいた製造プロセスを提案する。

2. 研究目的

本研究では、大量生産や生産スケール変化に柔軟に対応することができ、かつ既存の製造方法とは全く違う固体ロケットモータ製造を考案することが目的である。

まず、既存のモータ製造方法について述べる。燃料兼結合剤(バインダ)、酸化剤粒子、燃料粒子、その他架橋剤などを図1に示すような捏和機で1バッチずつ捏和する。バインダとしては液状のHTPB (Hydroxyl Terminated Polybutadiene: 末端水酸基ポリブタジエン)、酸化剤にはAP (Ammonium Perchlorate: 過塩素酸アンモニウム)、燃料にはAl (アルミニウム)が一般的な成分である。できた固体推進薬スラリをロケットモータケース内に注型する。注型後、スラリをバインダの重合反応により硬化させる。このような原料投入・製品製造・取り出しを順番に行う製造方法をバッチ式と呼ぶ。



図1 推進薬捏和機

バッチ式の製造方法と全く違う概念であり、大量生産・柔軟な生産スケールへの対応ができるプロセスとして考えられるのは連続式の製造方法である。スラリ自体の流動を用いて連続的に捏和し、モータケースに注型を行う。連続捏和プロセスであれば、流動特性を用いた効率的な捏和機設計が可能であるだけでなく、その捏和機自体がスラリの輸送も行うことができる。しかし、固体推進薬スラリは粒子成分が大半を含むため粘度は数十 Pa・s と高粘度になっており、プロセス達成を難しいものとしている。加えて連続プロセスには、プロセスを長時間自動制御することのできる安全性が必要となるが、捏和対象が推進薬で

あるため、こちらも困難となっている。これらの問題点を受け、本研究では高粘度スラリを連続的かつ安全に捏和可能である蠕動運動ポンプを紹介し、その利点を述べる。

3. 蠕動運動ポンプを用いた捏和プロセス

蠕動運動ポンプは空気圧によって軸方向に収縮する人工筋肉をアクチュエータとする生体模擬ポンプである。図2に示されるように、人工筋肉とチューブ、フランジによって1ユニットが構成され、それが数ユニット結合されることにより図3のように蠕動運動ポンプの形態を成す。

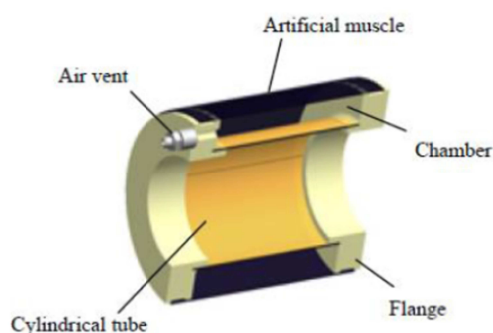


図2 蠕動運動ポンプ (1ユニット)*1



図3 蠕動運動ポンプ(複数ユニット)*1

人工筋肉とチューブの間のチャンバに空気が供給され、空気圧により人工筋肉が伸縮、同時に閉口チューブが流路を密閉する。この動きは輪走筋の役割を模倣している。これにより蠕動運動、腸管内における食物の輸送と混合動作を模擬することが可能となっている。本研究では輸送と混合が可能な蠕動運動ポンプによって、固体推進薬捏和プロセス連続化を目指している。

本研究では、まず蠕動運動ポンプによって高粘度スラリの捏和が可能か検討を行った。液体成分としてポリアクリル酸ナトリウム、粒子成分としてガラスビーズを本ポンプに投

入し、ポンプを直立させた状態で3時間捏和を行った。結果、図4のようにスラリが作製されたことを確認した。



図4 作製したポリアクリル酸ナトリウム / ガラスビーズスラリ

この結果より、蠕動運動ポンプによる高粘度スラリの捏和は可能であり、固体推進薬の連続捏和装置として検討の価値があるとの結論を得た。以下、蠕動運動ポンプによる固体推進薬の連続捏和プロセスの利点を述べる。まずプロセスの安全性に関する利点を述べる。本ポンプでの捏和の際、固体推進薬は内部のシリンダチューブに接し、推進薬と金属の接触が排除されている。さらに本ポンプは空気圧駆動のため、事故はポンプの人工筋肉もしくはシリンダチューブの破裂程度である。加えて、蠕動運動ポンプの仕組みとして複数ユニットから構成されているため、故障時は故障したユニットのみを交換すればよい。攪拌棒によるせん断捏和ではなくスラリの流動性・バインダの伸縮を用いた捏和であるため、強いせん断力がかからない。以上のように、蠕動運動ポンプは固体推進薬スラリを捏和する上で、安全性の向上だけでなく事故・故障の被害低減が見込める。よって蠕動運動ポンプは推進薬スラリを連続的に長時間捏和するための安全管理が容易である。

安全性の観点から蠕動運動ポンプの利点を述べたが、その利点を受けて捏和プロセスに本ポンプを導入した際の利点を述べる。長時間に渡り連続的に捏和できるため、推進薬スラリの流動性を用いた流通式捏和機的设计最適化が行える。捏和機の最適化、小型化及び長時間運用は装置コスト・ユーティリティコスト・推進薬の廃棄量削減にもつながる。さらに、安全で小規模な捏和機であり、かつ捏和機自身は大部分がゴムと樹脂からなる数ユニットの軽量の装置である。大規模な施設は不要となり、固体推進薬・ロケットモータ製造のロケーションフリー化も考えられ、本捏和プロセスはプロセス自身の低コスト化に留まらず、射点へのロケット機体輸送コスト削減やロケット開発の普及に寄与するなど固体ロケットモータ製造に関する低コスト化と利便性向上を追求できる。

4. 今後の課題

蠕動運動ポンプによる固体推進薬の連続捏和プロセスの利点に関して述べたが、本ポンプを用いて作製した推進薬と既存の方法で作製した推進薬の比較・連続プロセスの設計に

は推進薬スラリの粒子分散を定量評価しなければならない。考えられる方法としては可塑剤によって硬化させた推進薬の燃焼速度を高速度カメラによって測定する、推進薬の断面を光学顕微鏡もしくは SEM で観察し、粒子の面積比率を評価するなどが挙げられる。硬化させた推進薬に対する評価だけでは、硬化に数日の時間がかかるため、スラリの粒子分散評価として不十分である。そのため、作製した推進薬スラリーから数サンプル採取し、スラリの粘度を測定する。これらの手法によって、まず既存のバッチ捏和プロセスと蠕動運動ポンプによる連続捏和プロセスそれぞれの推進薬を評価する。

さらに、連続捏和プロセス設計のためには蠕動運動ポンプで捏和中のスラリーに対して粒子分散を評価、及び粒子の動きを可視化することが必要である。そのため、X線による蠕動運動ポンプ捏和過程の可視化、流体シミュレーションによるスラリー流動の解析を行う。

以上の実験・シミュレーションを行うことにより、推進薬の連続捏和プロセス設計に必要な要素を検討していく計画である。

5. 引用

1. K. Suzuki et al., The 2010 IEEE/RSJ International Conference, 2010