

人工筋肉アクチュエータによる固体推進薬の捏和
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, Hiroto Habu*³, Taro Nakamura*²

ABSTRACT

This research aims to reduce the cost of the solid rocket motor production, mainly solid propellant. The production process of the solid rocket propellant are usually employed the multi-batch mixing. However, this study using a peristaltic pump as a mixer will lead to the continuous process. The pump system can mix the powder materials for propellant and we consider that it will make the slurry of the solid propellant efficiently by the mechanism of the fluid dynamics in the pump.

概 要

本研究は固体ロケットの製造プロセスからの抜本的な低コスト化を目標としている。その低コスト化へ繋がるアイデアとしてプロセスの連続プロセス化を目指し、特に固体ロケット推進薬捏和工程に注目した。捏和機に蠕動運動ポンプを用いることでロケット推進薬スラリの流動性を用いた捏和が可能となるだけでなく、安全な捏和を行うことができる。

Keywords: Solid Rocket Propellant, Mixing, Slurry, Artificial Muscle, Peristaltic Pump

1. はじめに

ロケットの打ち上げ費用を大幅に低減させることにより、これまでは輸送コストの面で採算に合わなかった宇宙空間利用の促進が予測される。固体ロケット推進においても、そのシンプルで低コストなロケットシステムを生かした新たな宇宙輸送の形態が期待される。例えば、低コストな固体ロケットによって小型衛星を高頻度に打ち上げるなどが考えられる。近年民間企業や大学教育において、小型衛星による宇宙利用や若手技術者・学生の技術教育が積極的に勧められている。このように小型衛星製作が広く行われる一方で、その衛星を希望の軌道に投入するためのロケットは存在せず、主には相乗り衛星として主衛星

* 平成 26 年 12 月 12 日受付(Received 12 December, 2014)

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

*² 中央大学
(Chuo University)

*³ 宇宙科学研究所 宇宙飛行工学研究系
(Division for Space Flight Systems, Institute of Space and Astronautical Science)

の軌道や打ち上げ日時に合わせたロケットでの打ち上げを余儀なくされている。大きく打ち上げコストを低減したロケットを用いた高頻度な小型衛星の宇宙輸送システムは今後更に強く求められる。また高頻度な宇宙輸送がシステムとして成立することによって、ロケットや宇宙機全般に関わる技術の発展が加速するであろう。さらに、小型衛星の宇宙輸送に限らず、M-V ロケットのような惑星探査が可能な固体ロケットであったり、液体ロケットのブースタであったり、多様な宇宙輸送に対応した様々な形で固体ロケットの需要と低コスト化の要求はこれからも増していくと考えられる。

高頻度の宇宙輸送に対応する形であれ、惑星探査や大規模ペイロードに対応する形であれ、求められる低コスト化のレベルは高い。2013年夏に打ち上げられたイプシロンロケットにおいては、低コスト化に資する技術として例えばモバイル管制システムが開発された。モバイル管制システムとはパソコン2台程度で打ち上げ管制を行う革新的なシステムである。更なる低コスト化を図る場合、固体ロケットモータの製造プロセスの段階からの検討が有効である。なぜなら、打ち上げの高頻度化にせよ、深宇宙探査軌道等への投入や大型ペイロード輸送への対応にせよ、今後は低コスト化と両立して固体ロケットモータ・推進薬の製造量増加が予想されるからである。一方で、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しているため、製造プロセスを検討する場合、新しい概念に基づいた製造プロセスを提案することが必要となる。



図1 推進薬捏和機

2. 研究目的

固体ロケットモータは従来バッチプロセスと呼ばれる原料投入・製品製造・取り出しが順番に行われるプロセスで製造されている。図1に示される捏和機に推進薬原料として酸化剤の過塩素酸アンモニウム(AP)粒子・燃料のアルミニウム(Al)粒子・燃料兼結合剤のバインダ・その他架橋剤などを投入、捏和して推進薬スラリを1バッチずつ製造する。次にそ

のスラリをロケットモータケースに注型して、バインダ(燃料兼結合剤)の重合反応により硬化させる。

一般にバッチごとの製造では質の精確な製品が得られるが、製造装置の設計や装置の稼働面でプロセスは非効率的であるとされている。他方、連続プロセスでは定常的な装置稼働を前提として、装置内流体の流動性など物理的特性を生かした装置設計を行うため、効率が良く製造量変化に対して柔軟に対応できるプロセスが可能であるとされている。固体推進薬の製造量増加と低コスト化に対応できるプロセスを考えるうえで、以上の理由からプロセスの連続化検討は効果的である。

プロセスの連続化において、問題となるのが数万 $\text{mPa}\cdot\text{s}$ を超える固体推進薬スラリの高粘性である。固体推進薬スラリは大半が AP・Al 粒子の固体成分であり、それらを少量かつ高粘度のバインダに分散させている。M-V ロケット用の推進薬の場合、バインダはたったの 12% である。連続プロセス化には装置内流体の流動性を考慮した設計が必要だが、特に難しいのは連続的に高粘性固体推進薬スラリを捏和できるような装置である。ロケットモータ内での燃焼が安定するように、粒子成分が十分に分散したスラリの製造が必要とされるからである。

加えてモータ製造プロセスの連続化へ障害となっているのは推進薬の危険性である。従来の捏和機では金属容器と金属棒を用いて、せん断力によって捏和している。金属同士の接触による火花、強いせん断力非常に繊細な工程管理が必要となり、装置の定常運用を前提とする連続プロセス化へ障害となっている。

以上の点から、固体ロケットモータ製造の連続プロセス化を達成可能で安全な固体推進薬捏和手法の導入を目指す。本研究では人工筋肉アクチュエータを用いた蠕動運動ポンプによる捏和手法について検討を行っている。この手法は、金属棒によるせん断を用いた従来の捏和とは全く違う、推進薬スラリの流動特性を用いた捏和であるため連続プロセスへの適用が可能である。

3. 人工筋肉アクチュエータを用いた捏和

本研究で取り扱う人工筋肉は図 2 に示されるものである。空気を送り込むと空気の圧力によって膨張し、軸方向へ収縮する。さらに軸方向へは炭素繊維で強化されているので、高出力密度を得ることができる。

この人工筋肉をアクチュエータとして用いたポンプが蠕動運動ポンプ(図3)である。蠕動運動ポンプは外側の黒い人工筋肉と内側のゴムチューブで構成されている。人工筋肉とゴムチューブの間のチャンバに空気を送り込むことで駆動する。図3の蠕動運動ポンプを1ユニットとして、図4のようにこのポンプを複数接続させることで人の腸管のような蠕動運動を模擬している。摂取した食物は蠕動運動によって送り出されるが、同時に消化液を

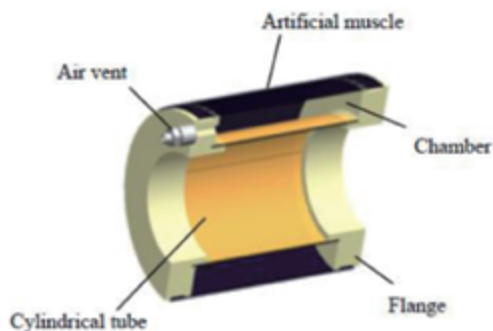


図3 蠕動運動ポンプ (1ユニット)

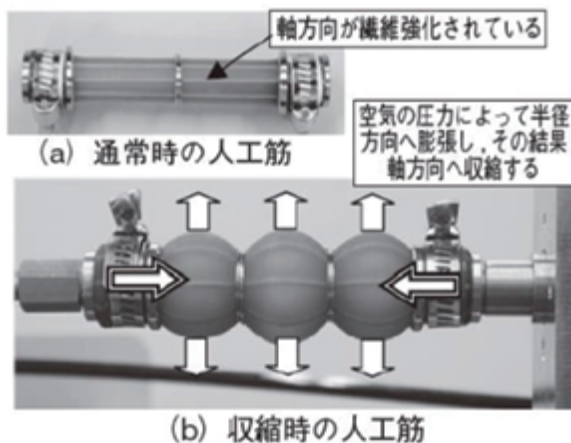


図2 人工筋肉

食物と混合させている。このような食物の輸送と消化液との混合を両立した消化プロセスと同様のことを、蠕動運動ポンプによって固体推進薬製造プロセスに適用する検討を行うことが本研究の特色である。

4. 蠕動運動ポンプによる捏和の利点

蠕動運動ポンプは既に高粘性液体の輸送に関しては実証済みであるため、固体推進薬スラリの流動特性を用いた捏和機の装置設計は十分に実現可能である。またそれだけに限らず様々な利点が得られる。以下にこの捏和機を固体ロケット連続製造プロセスに適用した場合に得られる利点を述べる。

a. 安全性



図4 蠕動運動ポンプ(複数ユニット)

連続プロセスに求められるものは、装置を定常運転・自動制御できるだけの安全性である。固体推進薬は火薬であるため、引火の危険性から安全管理は繊細に行わなければならない。その点が連続プロセス化への障害となっていた。本ポンプは基本的にゴムで構成され、空気圧で駆動しているため、そもそもの着火源が無く危険性は大幅に下げられる。

捏和の仕組みに関しても、攪拌棒によるせん断力を用いないので局所的に強まるせん断力もなく、温度管理も容易である。

b. 廃棄量低減

バッチプロセスでの捏和の場合、攪拌棒や攪拌容器壁に付着した推進薬は廃棄せねばならない。連続プロセスであれば、定常運転しているため廃棄量が削減できる。推進薬を初めとして火薬の保管・処理は安全で広い土地の確保等コストや労力がかかるが、本ポンプはその点に関しても低コスト化・効率化に寄与できる。

c. ロケーションフリー

本ポンプは、前章で述べたように複数のユニットを組み合わせて運転させる。ユニットごとに分解させれば、小さなコストでポンプ自体を輸送することができる。先に述べた安全性も合わせて考えると、本ポンプは安全にどこでも固体推進薬捏和が可能となる。推進薬充填後のロケット機体輸送も大きなコストとなっているため、ロケーションフリーな点は固体ロケット製造の効率化・低コスト化をさらに促進できる。

5. 本研究の展望と今後の計画

本研究において、既に高粘性流体と粉体の捏和は可能となっている。捏和後のスラリを図5に示す。ポリアクリル酸ナトリウムとガラスビーズのスラリを3時間蠕動運動ポンプで捏和した。

今後の目標はまず固体推進薬スラリを実際に捏和することである。その際、重要なのは捏和した推進薬スラリが実際に硬化させれば推進薬として使用可能かどうかを定量的に示すことである。具体的には粒子成分の分散評価に注目する。評価方法の例を以下に示す。

- ・作製した推進薬を実際に燃焼させて燃焼速度を測定する。
- ・スラリを加圧濾過させ、堆積した粒子成分(ケーキ)のケーキ厚さを評価する。
- ・作製した推進薬の薄い試験片を光学顕微鏡や走査線顕微鏡で観察、評価する。

などが考えられる。評価手法の妥当性検討を含め、今後は捏和と粒子分散評価を行っていく。

6. まとめ

固体ロケット推進薬の低コスト化を目標に、本研究では固体ロケットモータ製造プロセスの連続プロセス化を提案した。その連続プロセス化を可能にする推進薬スラリ捏和機として蠕動運動ポンプの適用を検討した。このポンプにより、既存の捏和棒を用いたバッチ方式の捏和とは全く違う、スラリの流動特性を用いた捏和が可能となった。加えて、本ポンプの材質や動力源には着火源もなく、安全性の高いプロセスを達成でき、連続プロセス化

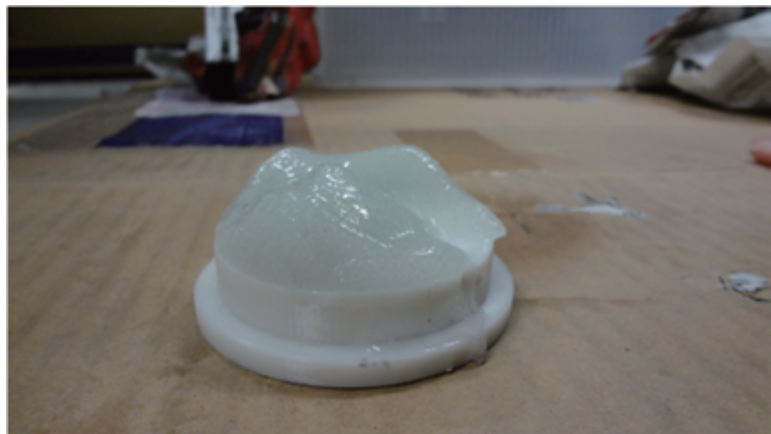


図5 蠕動運動ポンプによって捏和した高粘度スラリ

その連続プロセス化を可能にする推進薬スラリ捏和機として蠕動運動ポンプの適用を検討した。このポンプにより、既存の捏和棒を用いたバッチ方式の捏和とは全く違う、スラリの流動特性を用いた捏和が可能となった。加えて、本ポンプの材質や動力源には着火源もなく、安全性の高いプロセスを達成でき、連続プロセス化

に必要な定常運転，自動制御も安全に行える．さらに廃棄量の低減，ロケーションフリーなどの利点も提案でき，非常に将来性のある推進薬捏和手法である．

今後は推進薬中の粒子分散評価方法を確立し，さらに本手法のプロセス適用，ポンプの最適設計へ向けての検討を行っていく計画である．

参考文献

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