

固体推進薬の安全かつ連続的製造のための蠕動運動型混合搬送装置

～ 実用組成推進薬の製造試験及び地上燃焼試験の報告 ～

Peristaltic Continuous Mixing Conveyor for Composite Propellant Slurry Mixing

～ Manufacturing test and burning test of solid rocket with practical composition propellant ～

○正 山田泰之 (中央大), 芦垣恭太 (中央大), 岩崎祥大(総研大), 萩原大輝(中央大),
根岸海(中央大), 吉浜舜 (中央大), 松本幸太郎 (JAXA),
野副克彦 (日本カーリット), 羽生宏人(JAXA), 正 中村太郎 (中央大)

Yasuyuki YAMADA (Chuo Univ. yamada156@2009.jukuin.keio.ac.jp), Kyota ASHIGAKI (Chuo Univ.),
Akihiro IWASAKI (SOKENDAI), Daiki HAGIWARA (Chuo Univ.), Kai NEGISHI (Chuo Univ.),
Shun YOSHIHAMA (Chuo Univ.), Kotaro MATUMOTO (JAXA), Katsuhiko NOZOE (Japan Carlit),
Hiroto HABU (JAXA) and Taro NAKAMURA (Chuo Univ.)

In recent years, the demand for rocket launching has increased due to the development of space technology. However, using inexpensive rockets is not always possible. Although the cost of solid-propellant rockets is relatively reasonable, safely manufacturing a large amount of solid propellant is difficult, and the manufacturing process is disjointed. Therefore, to achieve safe and continues manufacturing of solid propellant, we have developed the peristaltic mixing conveyor with pneumatic artificial muscle. In Dec.2017, we succeed manufacturing of the over 1kg practical composition propellant by our system, and in Feb.2018, we succeed burning test of it on ground.

Key Words: Composite propellant, Continuous mixing, Peristaltic motion, Pneumatic actuator, Burning test

1. 緒言

近年, 災害観測・社会インフラ等の高度化を目指し, 人工衛星等の宇宙利用の重要性が高まり, 様々なロケットの高性能・低コスト化が取り組まれている. 固体燃料ロケットは小型, 安価かつ取扱いが容易だが, 製造方法がバッチプロセスであり, 設備・運用にコストがかかる. さらに, 推進薬スラリは, 金属攪拌羽による大きなせん断力を利用した発火の危険性がある捏和方法で製造されている. そのため, 推進薬製造の自動化, 大量製造を困難としている.

本研究では, 固体推進薬スラリの製造プロセスを抜本的に変更し, 安全かつ連続的な捏和として, 設備・運用コストの大幅な低減を試みる. 著者らは腸管の蠕動運動を模擬した蠕動運動型混合搬送機を用いて, 低剪断力で安全かつ連続的な捏和の実現を目指している[1]. 蠕動運動を利用した運搬機は幾つか先行例が存在する. Spillman[2]はローラとゴムを利用した蠕動運動搬送機を開発した. Mangan[3]はウミウシの餌食行動を規範とした蠕動運動グリッパを開発した. これらは小さい球状の固体は搬送できるが, 液体は搬送できない. 著者らは, 蠕動運動型混合搬送装置 (図1) の捏和性能の優位性を固体推進薬模擬剤を用いた捏和試験にて示した[1], さらに, 約 400 g の固体推進薬模擬スラリの捏和にも成功している[4].

本報告では, 提案する混合搬送機によって, 実際の固体推進薬の連続的製造の実現可能性を示すため, 1 kg 超の実用組成火薬の連続製造試験と品質確認のための燃焼試験を実施した. 従来の製造プロセスと同等の製造時間にて, ソフトアクチュエータを用いた本混合搬送装置にて, 約 1.65 kg の火薬の捏和に 2017 年度 12 月に世界で初めて成功した. また, 2018 年 1 月に, 本混合搬送機で製造した火薬の推進薬としての性能を, 地上燃焼試験にて確認したので報告する.

2. 固体推進薬製造プロセス

固体推進薬はロケット燃料の一つであり, 酸化剤, アルミニウム粉体等の金属燃料, バインダ, 可塑剤, 硬化剤を混合・練り固めて製造される. 粉体粒子間を結合させるバインダは高粘度流体であるポリブタジエン(HTPB)を用いる. 固体推進



Fig. 1 Peristaltic mixing conveyor.



Fig. 2 Existing manufacturing method: Planetary Mixer.

薬の既存の製造方法では, 図 2 に示すような金属製の容器内部に金属製の羽(棒)を回転させるプラネタリミキサで原材料を混合している. この方法では攪拌羽根の故障時等に発火の危険性があり, 一度の大量な製造が困難である. さらに, 混合後に推進薬を容器からロケットへ自動で運搬する装置は無く, 手動で搬送と注型が行われている. このように, 固体推進薬製造プロセスは危険で高コストかつバッチプロセスである. そのため, 固体推進薬製造には様々な安全管理や設備費, 人件費等がかかり, ロケットの打ち上げ費用を高騰させ, 結果として, 打ち上げ頻度を低下につながっている. このような, 固体推進薬の連続的な製造による低コスト化については, 1980 年代にアメリカ[5]とフラン[6]で実現が試みられた. また, これら既存研究では推進薬スラリが混合・運搬される経路が金属製であるため, 静電気等での発火の恐れを排除できないなどの懸念がある. このように, 安全かつ連続的な固体推進薬の製造を可能とする混合器が望まれている.

3. 腸管の混合動作

腸管(図3)は環状筋と縦走筋で構成されている。腸管に環状に配置される環状筋は収縮と弛緩を繰り返している。腸管の軸方向に配置されている縦走筋は腸管の軸方向に収縮する。腸管は食塊の接触により、環状筋が収縮し管内を狭めつつ縦走筋が収縮して食塊を押し出す。収縮後は弛緩し、元の状態に戻る。この動作をおくる蠕動運動で食塊を搬送する(図4)。この各セグメントの伸縮と内部膨張を模擬した蠕動運動混合搬送装置で固体推進薬の混合搬送を行う。

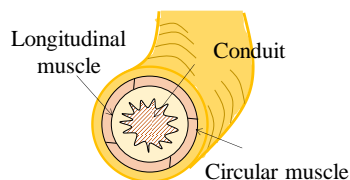


Fig.3 Structure of intestinal tract.

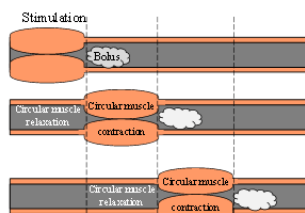


Fig. 4 Peristalsis movement.



Fig.5 Manufacturing test of practical composition propellant



Fig.6 Burning test of solid rocket that used solid fuel kneaded by the peristaltic mixing conveyor

4. 蠕動運動型混合搬送機による固体推進薬製造と燃焼試験

4.1 蠕動運動型混合搬送機

蠕動運動型混合搬送装置は複数のユニットを連結して構成する。各ユニットは異なる空気供給管路を有し、空気圧印加するユニットと時間を個別に、混合や搬送する対象に対して適宜変更できる。本装置は、内部に配置する材料と接触する管路は全てゴム製である。外側には伸縮動作を司る人工筋肉が配置された2重円筒構造である。2重円筒内部がエアチャンバとなっており、ここを加圧することで閉塞・伸縮動作を発生する。

4.2 固体推進薬製造試験

これまで、JAXA 施設内での 400 g 以下での実用組成の固体推進薬燃料スラリの混合試験を実施してきた。今回は、火薬メーカーであるカーリットホールディングス株式会社の工場にて、今後の実製造を見据えて、1 kg を越える推進薬材料を用いたの捏和試験を実施した。蠕動運動型混合搬送機を用いた実用組成の固体推進薬燃料スラリの捏和の様子を図5に示す。

本装置は温水を循環させる調温装置により温度調整されている。さらに、内部温度や印加圧力等のオンタイムでの確認が可能である。この際、従来の製造方法であるプラネタリミ

キサで同材料ロットから同量の火薬を製造して、品質の比較対象として準備している。実験にて混合した推進薬は、適宜脱泡硬化させて、引張試験や断面画像確認から品質の検証を行った。これらの結果から、従来の製造方法で作成した火薬と同等の性能が期待できることが分かった。そのため、さらなる性能確認のために、地上燃焼試験を実施した。

4.3 地上燃焼試験

蠕動運動型混合搬送機により製造された火薬の最終的な品質の確認を行うために地上燃焼試験を実施した。蠕動運動型混合搬送装置を用いた捏和プロセスにより製造した約 1.65 kg の実用組成の固体推進薬スラリを用いて、内径 80 mm 標準小型モータ(一般社団法人火薬学会規格)を作成した。また、プラネタリミキサで同材料ロットから材料を仕立てて、同サイズのロケットモータを比較用に作成した。これらを用いて、地上燃焼試験を実施した。試験の様子を図6に示す。試験結果より、蠕動運動混合搬送装置による固体推進薬の連続的な製造へ確かな手応えを得た。

5. 結言

本研究では、固体推進薬の抜本的コスト低減に向けた安全かつ連続的な捏和システムとして、蠕動運動型混合搬送装置による連続捏和を提案している。蠕動運動型混合搬送装置を用いて、1 kg をこえる実用組成の固体推進薬の捏和に成功した。さらに、これを用いた小型ロケットモータの地上燃焼試験を実施した。これらの結果から、本混合搬送装置を用いた連続捏和システムは実用レベルが大きく期待できる。

今後の展望として、本蠕動運動型混合搬送機を用いて、固体推進薬の連続捏和の完全自動化や高速化を予定している。

謝辞

本研究は、経済産業省 宇宙技術情報基盤整備研究開発事業である「民生技術(人工筋肉)を転用した固体推進薬の製造技術に関する研究開発」において宇宙航空研究開発機構と協力して実施された成果である。また、火薬製造および地上燃焼試験は、カーリットホールディングス株式会社の協力のもと実施した。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- [1] 山田 泰之, 吉浜 舜, 岩崎 祥大, 芦垣 恭太, 松本 幸太郎, 羽生 宏人, 中村 太郎, “蠕動運動型混合搬送機による固体推進薬連続製造の検討”, 日本機械学会論文集, DOI : 10.1299 / transjsme.16-00576
- [2] J. Spillman, “Peristaltic conveyors,” *J. Chartered Mech. Eng.*, Vol. 25, No. 5 (1978), pp. 55–57.
- [3] E. V. Mangan, D. A. Kingsley, R. D. Quinn, G. P. Sutton, J. M. Mansour, and H. J. Chiel, “A biologically inspired gripping device,” *Ind. Robot*, Vol. 32, No. 1 (2005), pp. 49–54.
- [4] Kyota Ashigaki, Shun Yoshihama, Akihiro Iwasaki, Kengo Tagami, Yasuyuki Yamada, Hiroto Habu, Taro Nakamura, “Study of an Automatic Material Input Method for the Continuous Production of Solid Propellant by a Peristaltic Mixer”, 31st International Symposium on Space Technology and Science (31st ISTS), 2017-a-27, Matsuyama, (2017.6)
- [5] J. Thepenier and G. Fonblanc, “Advanced Technologies Available for Future Solid Propellant Grains,” *Acta Astronaut.*, Vol. 48, (2001), pp. 245–255
- [6] C. A. Cervenka, “The Development of a Continuous Mix Process for ASRM Propellant Production”, AIAA paper, Vol. 93, No. 2056 (1993).