

固体推進薬の捏和へ向けた 蠕動運動型混合搬送機 Mark. III の開発と性能評価

芦垣 恭太^{*1}, 山田 泰之^{*2}, 岩崎 祥大^{*3}, 松本 幸太郎^{*4}, 羽生 宏人^{*4}, 中村 太郎^{*2}

Development and performance evaluation of peristaltic mixing transporter Mark. III for continuous kneading of solid propellant

Kyota ASHIGAKI^{*1}, Yasuyuki YAMADA^{*2}, Akihiro IWASAKI^{*3}, Kotaro MATSUMOTO^{*4},
Hirotō HABU^{*4} and Taro NAKAMURA^{*2}

Abstract

We have studied the continuous mixing of propellant slurry with peristaltic mixing transporter to reduce the cost of a solid rocket motor. In the previous study, we confirmed that the propellant slurry mixed with peristaltic mixing transporter had the same performance as a planetary mixer in combustion experiment. The next target is the production efficiency, safety, and quality for actual rocket motor manufacturing. In this paper, as a first step of the target, we report that we developed a new peristaltic mixing transporter with improved motional speed, heating performance and material input. And we confirmed its performance improvement from mixing of simulated propellant slurry.

概 要

我々は固体ロケットモータの低コスト化に向け蠕動運動型混合搬送機による推進薬スラリの連続捏和に取り組んできた。これまでに本装置を用いて捏和した推進薬スラリが従来のプラネタリミキサで捏和した推進薬と同等の性能であることを燃焼実験にて確認した。次の目標は実際のロケットモータ製造に向けた生産効率、安全性、品質である。本論文ではその第一段階として動作速度、加温性能の向上、材料投入方法の改善した新型蠕動運動型混合搬送機を開発し模擬推進薬スラリの捏和からその性能向上を確認した。

doi: 10.20637/JAXA-RR-17-008/0009

^{*} 平成 29 年 11 月 27 日受付 (Received November 27, 2017)

^{*1} 中央大学大学院 理工学研究科 精密工学専攻
(Department of Precision Engineering, Graduate School of Science and Engineering, Chuo University)

^{*2} 中央大学 理工学部 精密機械工学科
(Department of Precision Mechanics, Faculty of Science and Engineering, Chuo University)

^{*3} 総合研究大学院大学 物理科学研究科 宇宙科学専攻
(Department of Space and Astronautical Science, School of Physical Sciences, The Graduate University for Advanced Studies)

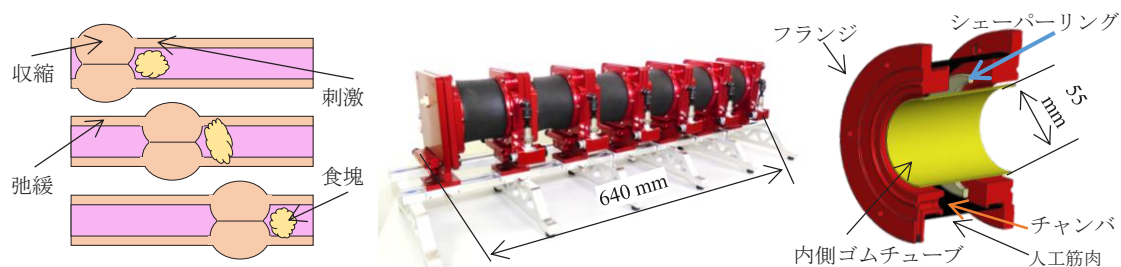
^{*4} 宇宙科学研究所 宇宙飛行工学研究系
(Division for Space Flight System, Institute of Space and Astronautical Science)

1. 緒言

近年、社会インフラ等の宇宙利用に向けたロケットの低コスト、高頻度な打ち上げが望まれている。固体推進薬ロケットは比較的小型かつ安価で取り扱いが容易である¹⁾²⁾。しかし、その製造手法はプラネタリミキサと人の手によるバッチプロセスであるため設備・運用コストが生じている。これは推進薬原材料の高粘性かつ発火性を有する特徴により連続的なプロセスでの製造手法の実現が困難であったためである。プラネタリミキサによる高せん断力を生じる捏和方法は材料の発火の危険性から自動化、大量生産が難しい。固体推進薬の低コスト化に向け、安全かつ連続的な製造手法が望まれている。一方、著者らは小さな力で食塊を混合搬送可能な腸の蠕動運動に着目し、空気圧人工筋肉を用いて蠕動運動を模擬可能な蠕動運動型混合搬送機を開発した。これにより高粘性流体の搬送や粉体の搬送に成功している³⁾。さらに、実際の推進薬を捏和しその燃焼性能より製品レベルの捏和性能を確認した⁴⁾⁵⁾。本装置を用いて実用可能なロケットモータの製造を実現するためには生産効率、安全性、品質の向上が必要である。そこで、第一段階としてkg級の連続捏和の実現とその推進薬の推力測定による捏和評価を目指す。しかし、現装置の単位時間毎の捏和量は少なくkg級のロケットモータ製造のために効率化が必要である。本論文では装置の性能向上、具体的には、動作速度、加温性能の向上、材料投入方法の改善するために効果的な排気を目的とした急速排気弁、ユニット間に配置可能な加温ディスク、捏和開始時の均一投入を促す材料投入装置を導入しこれまでの性能を上回る結果を示した。また、捏和動作の効率化を目標とした本装置による捏和時間計測実験を行い本装置の有用性を示す。

2. 蠕動運動型混合搬送機

図1(a)に腸の蠕動運動を示す。腸管は食塊の接触により、環状筋が収縮し食塊を押し出す。腸管はこの動作を繰り返すことで食塊を搬送する⁶⁾⁷⁾。(b)に6ユニットの蠕動運動型混合搬送機 Mark.IIIを、(c)に単体ユニットの断面図を示す。本装置はユニット構成であり分離・延長が可能である。また主な部品は軸方向繊維強化型人工筋肉（以下、人工筋肉）内側ゴムチューブ、フランジと部品数が少なくメンテナンス性が高い。人工筋肉と内側チューブ間のチャンバへ空気圧印加することで内側チューブが内側突起して管路を閉塞させる。同時に人工筋肉は軸方向へ収縮する。この一連の動作を連続的に発生させることで蠕動運動を実現して様々な物体の混合や搬送を行える。



(a) 腸の蠕動運動 (b) 蠕動運動型混合搬送機 Mark.III(6ユニット) (c) 装置断面

図1 蠕動運動と蠕動運動型混合搬送装置

3. 蠕動運動型混合搬送機による生産性の向上

蠕動運動型混合搬送機の単位時間あたりの捏和回数を増加させるため動作周期の短縮を目指す。動作周期は空気の給排気時間により決まり主に排気時間に時間を要する。そこで、

図 2 (a)のように急速排気弁による効果的な排気を実施した。旧型の蠕動運動型混合搬送機である Mark. I に比べ新型の Mark.III が使用圧力 60 kPa にて排気時間の 55.2 %削減に成功した(図 2(b)). これにより単位時間あたりの捏和回数を約 2.2 倍にすることが可能となった。

図 3 (a)に水での加温ディスクを用いた加温実験環境(b)に結果を(c)に模擬固体推進薬捏和時管内のサーモグラフィーを示す。60 分経過後, Mark. I では管内温度が約 31 °C であった。一方, 加温ディスクを用いた Mark.III では 60 分経過後の水温が約 46 °C に上昇した。また Mark.III は模擬固体推進薬の加温にも成功し本装置の有用性を示した。

続いて投入手法の検討を行った。投入手法のパターンを図 4 (a), (b)に示す。Mark.III にて材料投入装置を導入し(a)のようにユニット間に投入が可能である。従来の投入手法は(b)に示す。各投入手法による性能変化を(c)に示す。なお, 本評価はガラスビーズとポリアクリル酸ナトリウムを計 800 g 用いて 60 分捏和を行った。(c)のように垂直投入における標準偏差が 2 程度になるのは 180 分のため, 材料投入装置により約 66 % の捏和時間が削減されることが分かった。投入装置の使用による効率的な捏和を確認した。

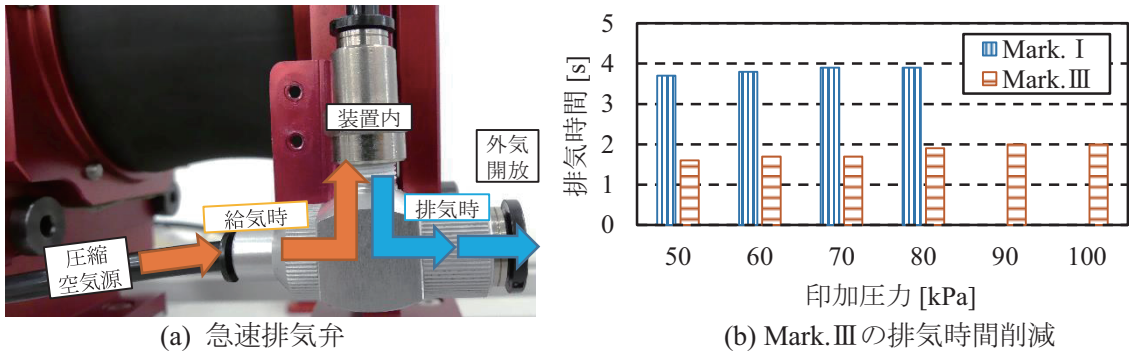


図 2 Mark.IIIの排気時間の改善

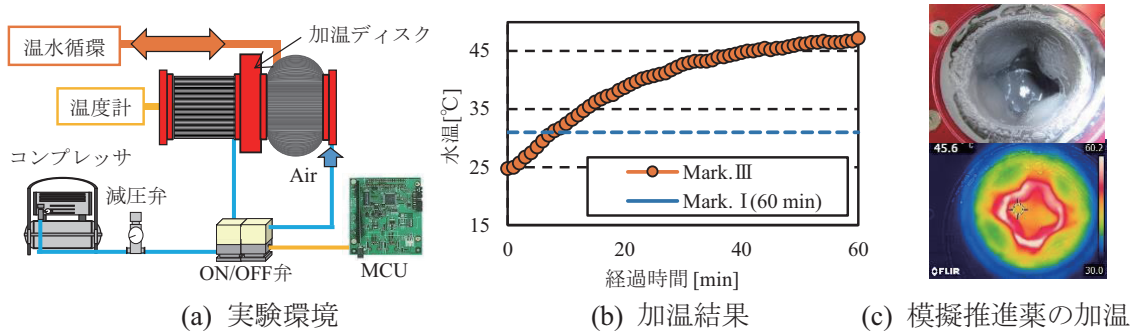


図 3 Mark.IIIの加温性能

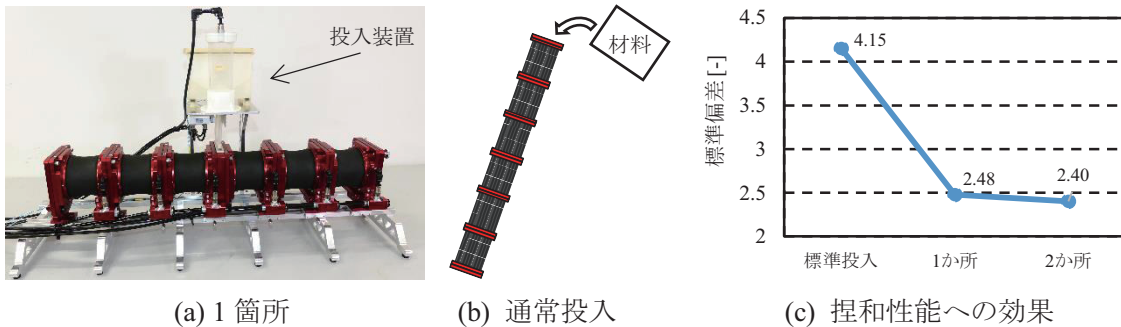


図 4 Mark.IIIの材料投入装置の性能確認

4. 固体推進薬の捏和による性能確認

捏和効率の向上を確認するため Mark.IIIによる捏和実験を行う。図 5 (a)に実験環境を示す。捏和手法は2ユニットによる往復運動を用いる。動作周期は前章の改善から Mark. I の半分である 3 s を用い、加温装置は加温ディスクを使用する。捏和材料は AP 粉末の模擬材として粒径 400 μm の同密度の塩化カリウム粉末、50 μm のガラスビーズと実際の固体推進薬に使われる末端水酸基ポリブタジエン、アルミニウム粉末、アジピン酸ジオクチルを用いる。捏和確認は目視により行う。使用圧力は 60 kPa とする。図 5 (b)より本装置により捏和時間を 66 %削減することに成功した。一方、評価は目視による定性的評価のため今後は燃焼試験などによる定量的評価を行う必要がある。

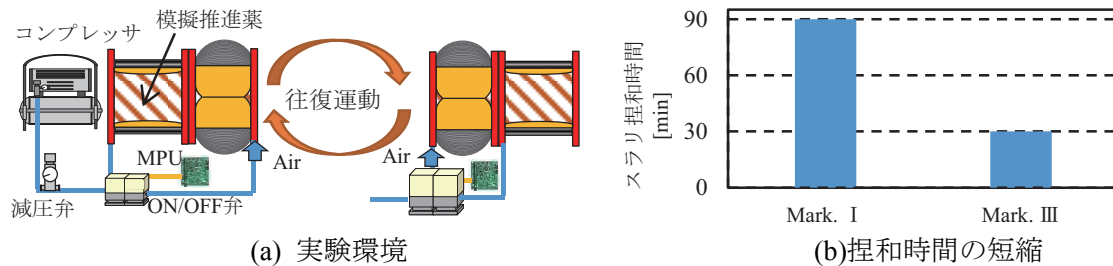


図 5 Mark.IIIによる模擬推進薬の捏和実験

5. 結言

本研究では蠕動運動型混合搬送機によるロケットモータ製造に向けた捏和効率の改善のため排気、加温、材料投入性能の向上を行った。以下に得られた結果を示す。

- ・ 急速排気システムを改善して動作時間を 50 %向上した。
- ・ 加温装置を実装し模擬固体推進薬を 45.6 $^{\circ}\text{C}$ まで加温可能とした。
- ・ 材料投入装置による分散投入で捏和時間を 66 %削減することを確認した。
- ・ 本装置を用いた捏和実験を行い、捏和時間を 30 分とすることに成功した。

引用

- 1) Sutton, G. P (1995), Rocket Propulsion Elements, Sankaido
- 2) Suzuki, K., Rocket engine, Morikita, 2004
- 3) Hirayama, Y., Suzuki, K., and Nakamura, T., Development of a peristaltic pump based on bowel peristalsis verification of the basic characteristic considered change of motion patterns, Proceedings of IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Europa Congress Centre, Budapest, 2011, pp.748–753
- 4) 吉浜舜, 岩崎祥大, 松本幸太郎, 山田泰之, 羽生宏人, 中村太郎, “加温機能を備えた蠕動運動型ポンプによる固体推進薬捏和”, 平成 27 年度宇宙輸送シンポジウム, 宇宙科学研究所研究管理棟, 2016
- 5) Kyota Ashigaki, Shun Yoshihama, Akihiro Iwasaki, Kengo Tagami, Yasuyuki Yamada, Hiroto Habu and 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, Ehime Prefectural Cultural Hall, Ehime, 2017
- 6) R. Harada, S. Uchida, A. Suzuki, and Y. Sato, “Structure and function of human body,” 2nd ed. vol. 5, A. Sato and Y. Saeki, Ed. Tokyo: Ishiyaku Publishers, 2008, ch. 6.
- 7) Miyoshi, S., Ito, S. : Digestive tract contraction exercise detailed exposition, Gastrointestinal motility modifiers - basic and clinical -, Medicine and Drug Journal (1985), pp.193-212