

蠕動運動型混合搬送装置による固体推進薬の製造と燃焼試験

萩原 大輝^{*1}, 芦垣 恭太^{*1}, 若松 康太^{*1}, 岩崎 祥大^{*2}, 野副 克彦^{*3}

田上 賢悟^{*1}, 山田 泰之^{*4}, 羽生 宏人^{*5}, 中村 太郎^{*6}

Kneading of AP Composite Propellant by Peristaltic Muscle Mixer

Daiki HAGIWARA ^{*1}, Kyota ASHIGAKI ^{*1}, Kota WAKAMATSU ^{*1}, Akihiro IWASAKI ^{*2}, Katsuhiko Nozoe ^{*3}, Kengo TAGAMI ^{*3}, Yasuyuki YAMADA ^{*4}, Hiroto HABU ^{*5}, Taro NAKAMURA ^{*6}

ABSTRACT

In order to drastically reduce the cost of solid rocket motors, we have been working on developing continuous kneading technology of composite propellant slurry using peristaltic motion type mixing and conveying equipment. In this report, we improve the equipment for continuousization. Then, a peristaltic motion type mixing and transporting device is installed at the Akagi Factory of Carlit HD Co., Ltd., and 1.65 kg of the actual composition powder is mixed. In addition to laboratory performance tests such as tensile tests and strand burner tests, the performance is confirmed in the ground burning test.

概要

著者らは、固体ロケットモータの抜本的な低コスト化に向けて、蠕動運動型混合搬送装置を用いたコンポジット推進薬スラリの連続捏和技術の実現に取り組んできた。本報告では、連続化に向けた検討と、実組成の火薬材料を用いた捏和実験および燃焼試験について報告する。蠕動運動型混合搬送装置を、カーリットホールディングス株式会社の赤城工場にて設置し、1.65 kgの実組成火薬の捏和実験を行った。引張試験、ストランドバーナ試験などのラボレベルの性能試験に加えて、地上燃焼試験でその性能を評価した。

doi: 10.20637/JAXA-RR-18-006/0006

^{*} 平成30年12月3日受付 (Received December 3, 2018)

^{*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} 宇宙科学研究所 観測ロケット実験グループ
(Sounding Rocket Research and Operation Group, Institute of Space and Astronautical Science)

^{*3} カーリットホールディングス株式会社 (Carlit Holdings Co., Ltd.)

^{*4} 東京電機大学 システムデザイン工学部 デザイン工学科
(Department of Design Engineering and Technology School of System Design and Technology),
中央大学研究開発機構 (Research and Development Initiative, Chuo university)

^{*5} 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)

^{*6} 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)

頭字語/略語

Hydroxyl Terminated Polybutadiene (HTPB): 末端水酸基ポリブタジエン

Aluminum (Al): アルミニウム

Ammonium Perchlorate (AP): 過塩素酸アンモニウム

Diocetyl Adipate (DOA): アジピン酸ジオクチル

Isophorone Diisocyanate (IPDI): イソホロンジイソシアネート

1. 緒言

近年、社会インフラ等の宇宙利用に向け、ロケットの低コスト化や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液体推進薬ロケットに比べ、小型かつ安価で取り扱いが容易である¹⁾²⁾。しかし、固体推進薬の製造手法は、プラネタリミキサと人の手が介在するバッチプロセスであるため、製造を通じて掛かる人件費等の品質管理コストが生じている。バッチプロセスが品質管理コストのボトルネックであると分かっているものの、これまで連続的製造が困難であった。これは、推進薬原材料自体が高粘性かつ発火性を有する特徴であることと、プラネタリミキによる高せん断力を生じる捏和方法が材料の発火の危険性から自動化、大量生産が難しかったためである。以上のように、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、独自の空気圧人工筋肉を用いて腸管等で発生する蠕動運動を模擬可能な蠕動運動型混合搬送装置を研究開発している。この装置は高粘性流体や固液混合流体の搬送や粉体の搬送が可能である³⁾。さらに、実際に400 g以下の推進薬材料を捏和して、製造した燃料の燃焼性能より製品レベルの捏和性能を確認した⁴⁾⁵⁾。また、実運用を見据え、材料の自動投入装置や制御システムを含め、蠕動運動型搬送装置の耐久性や運用性も向上させてきた。本報告では1 kg超の実組成火薬の連続製造および品質の担保を目指して、火薬メーカーであるカーリットHD工場での製造試験を実施する。カーリットHDで捏和試験を実施し、製造した火薬の性能を、引っ張り試験、ストランドバーナでの燃焼圧測定、およびTM-80ロケットモータに仕立てての地上燃焼試験によって、その品質を確認する。

2. 蠕動運動型混合搬送機

図1(a)に腸管の断面構造を示す。腸管は食塊の接触により、輪走筋が収縮し食塊を押し出す。腸管はこの動作を繰り返す蠕動運動で食塊を混合・搬送する⁶⁾。図1(b)に6ユニットの蠕動運動型混合搬送機Mark.IIIを、図1(c)に単体ユニットの構造を示す。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いシンプルな構造である。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する。



図 1 蠕動運動と蠕動運動型混合搬送装置

3. 実推進薬組成での捏和実験方法

経産省・関東東北産業保安監督部より設置許可を得て、カーリットHDの赤城工場内部の火薬製造場において、蠕動運動型混合搬送装置を用いた捏和実験を実施した(図2)。予備実験では装置の駆動状況を確認するために試験的に駆動させた。蠕動運動混合搬送装置の加温には80℃の温水を使用し、蠕動運動ポンプの駆動には0.06 MPaの圧縮空気を使用した。あらかじめ2L容量のプラネタリミキサ(愛工舎製防爆型小型万能混合機)で予混合したHTPB, DOA, IPDI, AL(以下予捏和スラリとする)を、材料自動投入装置で蠕動運動ポンプに仕込み、その後APを粉体材料自動投入装置で投入して100分間捏和し推進薬スラリを試製した。なお試製の際、推進薬スラリの捏和状態を確認するため、20分、40分、60分、80分、100分時に蠕動運動混合搬送装置を開放し、目視で推進薬スラリの状態を確認した。

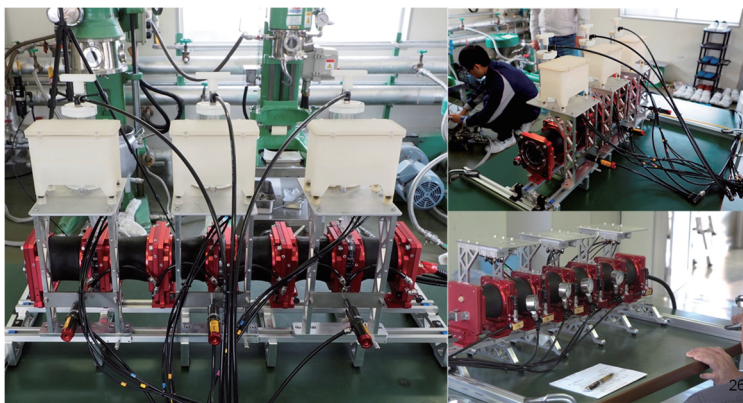


図 2 カーリットHD 赤城工場での火薬混合試験

次に本混合実験では蠕動運動型混合搬送装置の駆動回数を一定にし、駆動時間を短縮する手法として、駆動周期を3秒から2秒に変更し、捏和時間を64分に短縮する推進薬スラリの試製検討も並行して実施した。引張り試験、ストランドバーナ試験、X線非破壊検査およびSEM試験をした。その結果より、混合の均一性の向上を確認した。次に蠕動運動混合搬送装置を6連式から2連式×3セグメントに分割改良し、仕込量の検討を実施し、均一な推進薬スラリの製造方法を確立する。仕込量を500g, 550g, 600gにしたときの捏和試験を行った。

最後に、カーリットHDの施設内にて、本装置で実推進薬組成の燃料材料1.65kgを用いた捏和実験を実施した。そして、TM-80ロケットモータの製造し、燃焼実験を行った。

4. 結果と考察

予備実験では、100分捏和後の推進薬スラリに流動性はなく、未捏和のAP粒子も確認された。原因としては、20分ごとにポンプを開放したことによる推進薬スラリの温度低下、開放の際に傾けたことによるポンプ内部での原料の偏り、硬化剤(IPDI)添加から5時間経過が経過したため一部硬化が進行した等が考えられる。

本番の混合実験で得た試料のX線非破壊検査の結果を図3に示す。捏和量500gのサンプルに関しては同一燃焼圧力において燃焼速度にばらつきが確認され、スラリの不均一性が燃焼特性に対しても影響を与える結果となった。一方、捏和量550g、600gサンプルに関しては同一燃焼圧力において燃焼速度に大きな差異は無く、X線非破壊検査での観察結果のみならず燃焼特性の面からも推進薬の均一性が立証された。

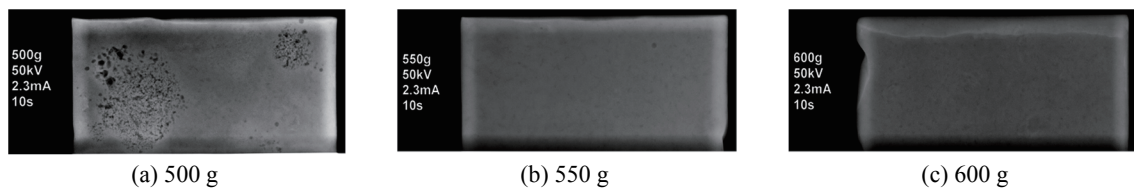


図3 X線非破壊検査

本推進薬組成で作成したTM-80ロケットモータの燃焼実験の様子を図4に示す。プラネタリミキサで混合した同組成の火薬を用いたロケットモータと比較して、遜色ない特性をしめした。

本研究で我々は、火薬材料に接触する部分が全て非金属の捏和装置で、連続的な推進薬の捏和に世界で初めて成功した。



図4 TM-80ロケットモータを用いた地上燃焼試験の様子

5. 結言

本研究では、蠕動運動型混合搬送装置をカーリットHD株式会社の赤城工場に設置し、1.65kgの実組成火薬の混合に成功した。引張試験、ストランドバーナ試験などのラボレベルの性能試験に加えて、地上燃焼試験で、燃焼性能を確認した。今後は、製造スケールを1kgレベルから、増やすことで、さらなる実用化への問題抽出と対応を急ぐ予定である。

引用

- 1) Sutton, George P., and Oscar Biblarz. "Rocket propulsion elements". John Wiley & Sons, 2016.
- 2) 中村佳朗, 鈴木弘一. "ロケットエンジン." 2004.
- 3) Y. Hirayama, K. Suzuki and T. Nakamura. "Development of a peristaltic pump based on bowel peristalsis verification of the basic characteristic considered change of motion patterns". Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2011 IEEE/ASME International Conference IEEE, 2011. p. 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) K. Ashigaki, S. Yoshihama, A. Iwasaki, K. Tagami, Y. Yamada, H. Habu and T. 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, 16(7), pp. 662-667.
- 6) S. Miyoshi, S. Ito, "Digestive tract contraction exercise detailed exposition", Gastrointestinal motility modifiers - basic and clinical -, Medicine and Drug Journal 1985, pp.193-212.