

蠕動運動ポンプを用いた固体推進薬スラリー連続捏和に関する研究

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

Study for the Continuous Mixing of Solid Propellant by Peristaltic Pump

Akihiro Iwasaki^{*1}, Kotaro Matsumoto^{*2}, Shun Yoshihama^{*3}, Yasuyuki Yamada^{*4},
Taro Nakamura^{*4} and Hiroto Habu^{*2}

ABSTRACT

In this study, a peristaltic pump is considered as the application for a continuous mixer of solid propellant slurry. While this pump can achieve a drastic cost reduction of solid propellant manufacturing process, mixing efficiency and factor(s) of the pump for high viscous slurry have not still been examined. Dependences of time and working gas pressure of the pump mixing were acquired. As the consideration, it was cleared that, by the working gas press, the slurry was mixed.

Keywords: Solid Propellant, Continuous Mixing, Slurry, Peristaltic Pump

概 要

本研究は固体推進薬スラリー連続捏和装置への蠕動運動ポンプ適用検討である。本ポンプによって固体推進薬製造プロセスの抜本的な低コスト化が見込めるが、本ポンプによる高粘性スラリーの捏和性能・捏和要素に関しては未解明である。ポンプ捏和の際の時間依存性（捏和特性曲線）を取得し、さらにポンプ捏和操作におけるもう一つの操作パラメータである作動ガス印加圧の影響を取得した。考察の結果、作動ガス印加圧によってスラリーの圧縮捏和が進むことが分かった。

* 平成27年12月9日受付 (Received December 9, 2015)

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

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

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

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

1. 緒言

本研究は、イプシロンロケットに代表される宇宙輸送用大型固体ロケットの抜本的低コスト化へ直接的に寄与する方法として、固体推進薬の新規製造方法を創成するものである。近い将来、GPS衛星や気象衛星に代表される実用衛星をはじめとして、人工衛星が社会基盤を支える重要な役割を担い、その重要度が増すに従いロケットの打ち上げは高頻度化するであろう。しかし、実用衛星一基を打ち上げるロケットですら、世界中のどこを見ても一機百～数十億円を要する現状では、高頻度打ち上げは到底達成できそうにもない。

これまで、固体ロケットの低コスト化を狙い、固体ロケット打ち上げシステム及び製造プロセスの効率化・低コスト化や、固体推進薬の新規材料適用による固体ロケットモータの比推力向上、ロケットモータ燃焼ガスの環境負荷低減が行われてきた。固体ロケットの打ち上げ・製造に関する効率化としては、イプシロンロケットのモバイル管制システム¹⁾が例に挙げられる。このシステムにより、既存のロケット打ち上げ運用イメージを大きく覆し、高頻度打ち上げに対応しうる少人数の効率的打ち上げ運用が可能となった。固体推進薬の新規材料に関する研究としては、新規高エネルギー酸化剤及び新規金属燃料の適用が主である。現在の固体推進薬の主流は、過塩素酸アンモニウム (Ammonium Perchlorate: AP) を酸化剤、金属燃料にアルミニウム (Aluminum: Al) 粉体を用いてこれらをゴムバインダで結合させた AP 系コンポジット固体推進薬である。この AP/Al 系コンポジット固体推進薬に対して、AP の代替としてアンモニウムジニトラミド (Ammonium Dinitramide: ADN) の適用^{2,3)}、Al 粉末の代替としてマグネシウムとアルミニウムの合金であるマグナリウム (Magnalium: Mg-Al) 粉末の適用³⁾によって固体推進薬の高比推力化や環境負荷低減が見込める。

これらの研究とは別の視点で、我々は更なる固体ロケットのコスト低下へ直接的貢献をめざし、固体ロケットモータそのものの製造プロセス、そのプロセスの中でも核となるモータケース直埋式固体推進薬製造プロセスの革新を狙っている。現在この製造手法は推進薬材料投入・推進薬スラリー捏和・推進薬注型の各操作を順番に行うバッチプロセスである。これを一般的に製造効率の良い連続プロセスへ転換することで、固体ロケットモータの信頼性担保方法の転換やプロセス内推進薬滞留量削減も見込め、あらゆる低コスト化が可能となる。

固体推進薬の連続製造に関しては、固体推進薬製造で検討されるべきテーマとして長く挙げられ、実際に固体ロケットモータの製造もおこなわれた^{5,6)}。しかしながら、未だ定常的に実用化されるには至っていない。固体推進薬の異常燃焼を起こさないように、金属燃料粉体と酸化剤粉体が分散させる固体推進薬を連続的に捏和するのは、現行の捏和技術では非常に繊細な検討である。粉体産業界で製品化されている捏和装置⁷⁾の中で、固体推進薬のような高粘性スラリーを十分に連続捏和できるものは、管型スクリーニーダーなど極めて少ない。また連続捏和装置を導入したものの、技術的・経済的にプロセスが成立しなかった。

このような経緯を踏まえ、我々は新規連続捏和装置として、管壁そのものに人工筋肉による駆動力を持つことで高粘度スラリーの輸送・捏和の機能を持つ蠕動運動ポンプ (Fig.1) に着目した。人工筋肉の外壁とゴムチューブの内壁の間 (チャンバ) に作動ガスを印加して駆動する。伴らは

本ポンプの3つの運動方式（蠕動運動・分節運動・振り子運動）によって、それぞれ輸送性能・捏和性能に違いがあることを示し、その中で両端閉口した蠕動運動ポンプ内で内容物を往復搬送する振り子運動が、高粘度スラリの場合においては捏和に適切な運動であることを示した⁸⁾。また、固体推進薬の連続捏和装置には本ポンプが推進薬捏和操作の安全性やプロセス運用の観点から、卓越した優位性を持つことも示されている⁹⁾。



Fig.1 蠕動運動ポンプ

2. 研究目的

今回、蠕動運動ポンプの固体推進薬スラリ連続捏和装置モデリング化を見据え、バッチ式捏和でのポンプの捏和特性取得及び捏和性能に関わる他のパラメータ検討を行う。検討は以下の順に行う。

- 1) 固体推進薬の粘度を模擬した高粒子体積分率・高粘度スラリを用いてバッチ式で捏和操作を行い、捏和特性曲線（スラリ捏和度の捏和時間 t 依存性）を得る。
- 2) スラリ捏和度に対して、捏和時間以外のポンプ操作変数であるポンプ作動ガス印加圧 p_g の依存性を調べることにより、ポンプによる連続捏和操作における重要な要素を抽出・検討する。

本研究において、捏和度は粉体工学ハンドブック⁷⁾に従い、複数点におけるスラリの粘度 η_s を取得し、その分散 σ_s とした。

3. 実験

3.1 実験装置

蠕動運動ポンプは、基本的な捏和操作を検討するため振り子運動を行う最小単位である2セグメントを連結して用いた。両端は閉塞している。この2セグメント連結蠕動運動ポンプを横に置き、捏和操作を行った。(Fig.2)

蠕動運動ポンプ作動ガスは空気であり、コンプレッサー (JUN-AIR OF302, クロダイインターナショナル) によって給気し、変圧弁 (精密レギュレータ小型直動精密レギュレータ RJB500-LLC6-L, CKD) で所定のガス圧に変圧した。

スラリの粘度を取得する粘度計に関しては、回転振動式粘度計である VM-10A-H (セコニック製) を用いた。回転振動式粘度計は JIS Z8803¹⁰⁾ に挙げられている中でも応答が速く、連続測定・流体測定が可能な粘度計である。

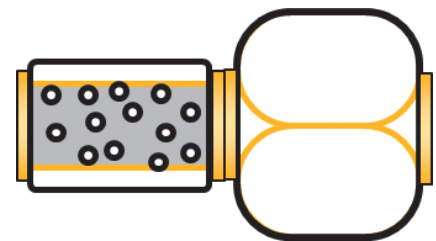


Fig.2 セグメント連結蠕動運動ポンプ

3.2 実験試料

用いるスラリは、ガラスビーズによって3つの粒度分布を持つが高体積分率で分散している固体推進薬スラリの粘度を模擬したスラリである。固体推進薬スラリの粘度もバインダの影響で温度依存性があるが、本研究では岩崎らによって固体推進薬スラリの粘度-温度相関を参考にして、本研究では固体推進薬スラリ捏和操作に適している 58°C 以上での固体推進薬スラリ粘度 50 Pa·s 程度を常温で模擬できるスラリを用いた。

模擬スラリの材料は HTPB プレポリマー (LBP2000, CRAY VALLEY 社製), 工業用ガラスビーズ (粒子 400 μm : J-36, 粒子 200 μm : J-70, 粒子 50 μm : J-320, すべて Potters-Ballotini 社製) を用いた。全量を 350 g 作製し, 成分の質量比は HTPB: ガラスビーズ = 25: 75 とした。ガラスビーズの各粒子径ごとの質量比は 400 μm : 200 μm : 50 μm = 60: 15: 25 とした。このスラリ材料, 組成を常温環境下, 手で 1 時間捏和したところ, 55.6 Pa·s の粘度を示した。よって, 確かに実際の固体推進薬捏和操作時の推進薬スラリ粘度を模擬できている。

3.3 実験条件

捏和特性曲線を取得する実験では捏和時間 t を 12, 24, 36, 48, 60 分とした場合のスラリ捏和度を取得した。

作動ガス印加圧力 p_g の依存性を取得する実験では作動ガス印加圧力 p_g を 10, 30, 50, 70 kPa とした場合のスラリ捏和度を取得した。

4. 結果

実験によって捏和特性曲線を取得した。捏和時間 12 分では Fig.3 左で示すようにほとんどスラリが捏和されていない。粒子の多くはバインダに濡れておらず, 粒子とバインダは分離していた。捏和時間を多くするにつれて捏和は進み, 捏和時間 36 分では Fig.3 右のようにスラリが捏和されていた。実際に各捏和時間における捏和度は Table 1 のようになった。但し, 乾燥した粉体が残っていた捏和時間 12 分におけるサンプルは粉体が残っており粘度計での測定が不可能であった。

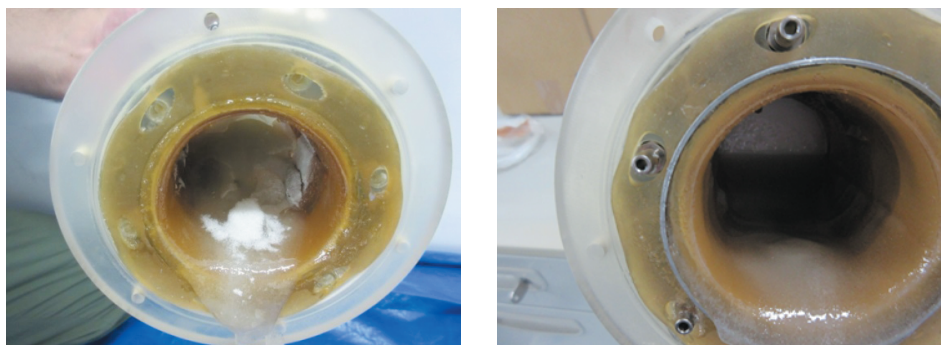


Fig.3 捏和時間 12 分, 36 分におけるポンプ内

Table 1 捏和度の捏和時間依存性

t [min]	point	η_s [Pa·s]			σ_s [-]
24	side	198	380	232	114.7
	center	128	23.5	85.6	
36	side	53.5	83.5	60.5	13.4
	center	54.3	38.6	54.2	
48	side	54.1	60.2	84.6	12.1
	center	56.8	45.6	55.2	
60	side	72.4	52.4	61.8	7.6
	center	55.6	68.2	53.2	

捏和特性曲線を Fig.4 に示す。ほとんど捏和が進んでいなかった 12 分の場合も加味して考えると、捏和度 σ_s は捏和時間 36 分まで急激に下がっている。捏和時間 24 分では捏和度 σ_s が 114.7 であったが、36 分で捏和度 σ_s が 13.4 となっている。それ以上は、捏和時間を増やしてもあまり変化は見られず、捏和時間 60 分でも捏和度 σ_s は 7.6 までしか低下していない。よって、36 分の捏和時間で蠕動運動ポンプによって捏和を十分に行えたと判断できる。また捏和度 σ_s は 13.4 以下ならば、十分に捏和されていると判断できる。Fig.5 は捏和度の作動ガス印加圧力依存性である。10 kPa で 162.4 であった捏和度 σ_s は圧力増加に従い低下した。50 kPa で捏和度 σ_s は 10.2 となっている。その後 70 kPa でも捏和度 σ_s の変化は少なく、13.4 となっている。これは作動ガス圧力 P_g 上昇に従い、蠕動運動ポンプの捏和効率が上昇し、50 kPa ではスラリが十分に捏和されていることを示す。捏和度 σ_s が 13.4 以下では十分な捏和が得られているので、作動ガス圧力 P_g が 50, 70 kPa では十分にスラリが捏和されている。

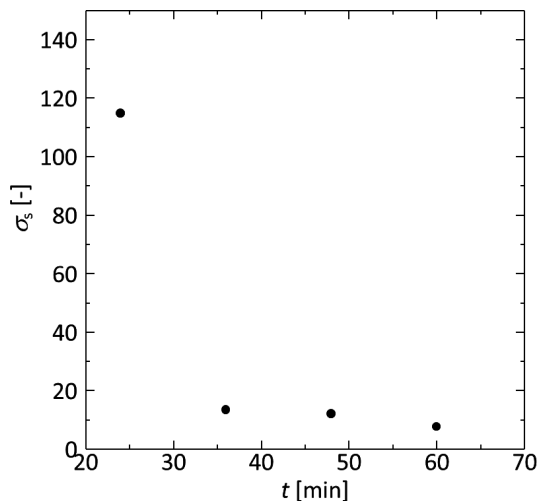


Fig.4 蠕動運動ポンプの混練特性曲線

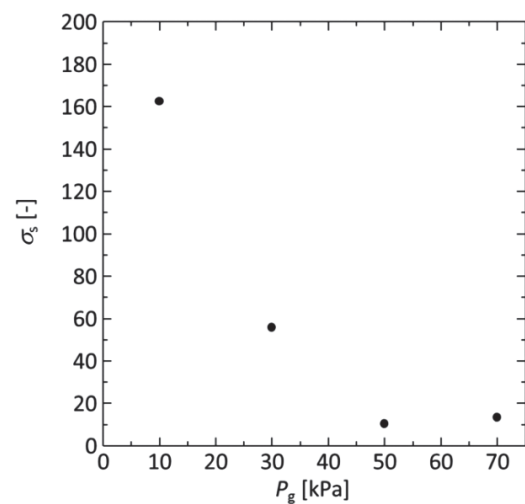


Fig.5 捏和度の作動ガス圧力依存性

5. 考察

ポンプセグメントに作動ガスが印加されるとチャンバが膨張・チューブが閉塞され、内部スラリを排除する。振り子運動の場合、セグメントの片隣が開放セグメントであり、もう一方が閉塞セグメントもしくはポンプ端の閉塞部である。開放セグメントへスラリが流れた場合、作動ガス印加圧に起因するスラリ流動圧力は小さいため、捏和は進まない。一方、閉塞部・閉塞セグメントへスラリが流入した場合、作動ガス印加・チャンバ膨張により、スラリ流路が狭窄され、また閉塞部付近の領域が圧縮される。この領域はポンプ軸方向に関しても外壁の人工筋肉によって支持されているため、これも領域内の圧力上昇に寄与している (Fig.6)。Fig.5 が示す通り、蠕動運動ポンプによる捏和が作動ガス印加圧力に依存性を持つということは、チャンバ膨張によるスラリ圧縮によって捏和されるということを示している。圧縮捏和では凝集している粒子塊へ液体成分が毛細管現象によって内部に浸入し、捏和が進行する。捏和要素に他にせん断・摩擦・折り畳みなどが挙げられるが、AP など高エネルギー物質を用いている固体推進薬に対しては圧縮捏和が安全で適している。閉塞されたポンプセグメントが弁としての機能を果たす⁸⁾ことを利用し、圧縮捏和を行う閉塞領域を作ることによって、ポンプの振り子運動による連続捏和は可能である。

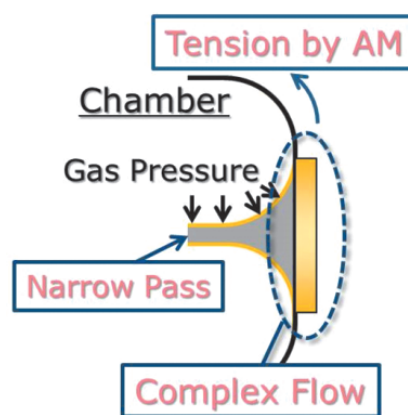


Fig.6 作動ガス印加によるスラリへの影響

6. まとめと今後の展開

蠕動運動ポンプをバッチ式捏和装置として用いた際の捏和特性曲線を取得し、この捏和特性曲線を元にして、作動ガス印加圧力とポンプの捏和性能との関係を検討した。ポンプ端部の閉塞領域において、作動ガス印加によるチャンバの膨張・人工筋肉によるポンプ軸方向の支持によって閉塞領域内のスラリは圧縮捏和されていることが分かった。

今後は実際に蠕動運動ポンプで固体推進薬を捏和し今回と同様、捏和特性曲線を取得した後、蠕動運動ポンプの固体推進薬連続捏和装置を構築する。この連続捏和装置によって捏和した固体推進薬の捏和度・燃焼特性を検討することによって、既存のバッチ式捏和装置との比較を行う。

記号

- t : 捏和時間
 p_g : 蠕動運動ポンプ作動ガス印加圧力
 η_s : 固体推進薬模擬スラリー粘度
 σ_s : 固体推進薬模擬スラリー粘度分散

参考文献

- 1) Y. Morita, T. Imoto, S. Tokudome, R. Yamashiro, K. Kishi, H. Ohtsuka: “Novel Design Concept of the Epsilon Lanunch Vehicle”, 30th International Symposium on Space Technology and Science, paper No. 2015-g-06 (2015)
- 2) K. Fujisato, H. Habu, H. Shibamoto, X. Yu, A. Miyake, K. Hori, “Combustion Characteristics of ADN (Ammonium Dinitramide) Based Solid Propellants”, Transactions of The Japan Society For Aeronautical and Space Science, Aerospace Technology Japan (ISTS Special Issue: Selected papers from the 28th International Symposium on Space Technology and Science), Vol.10, No.ists28, p89-92 (2012)
- 3) E. W. Price, S. R. Chakravarthy, J. M. Freeman: “Combustion of Propellants with Ammonium Dinitramide”, 34th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Cleveland, July 13-15, 1998, A98-35220
- 4) 羽生 宏人, 堀 恵一: “マグナリウム (Mg/Al)-AP 系固体推進薬の燃焼速度特性に関する研究”, Science and Technology of Energetic Materials, 67 (2006), 187-192
- 5) J. Thepenier, G. Fonblanc: “Advanced Technologies Available For Future Solid Propellant Grains”, Acta Astronautica, 48 (2001), 245-255
- 6) C. A. Cervenka: “The Development of a Continuous Mix Process for ASRM Propellant Production”, AIAA paper, 93-2056 (1993)
- 7) 粉体工学ハンドブック, 初版, 粉体工学会 (2014)
- 8) 伴 遼介: “人工筋肉を用いた蠕動運動型ポンプの多機能化についての研究”, 中央大学 修士論文 (2014)
- 9) 岩崎 祥大, 伴 遼介, 吉浜 舜, 中村 太郎, 羽生 宏人: “人工筋肉アクチュエータによる固体推進薬の捏和”, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告 高エネルギー物質研究会平成 26 年度研究成果報告書 (2014), p. 41-47
- 10) JIS Z8803 (2011), “液体の粘度測定方法”
- 11) 岩崎 祥大, 吉浜 舜, 中村 太郎, 羽生 宏人: “固体推進薬連続捏和に関する研究”, 火薬学会 2015 年度春季研究発表会 講演要旨集 (2015), p. 83-84