

## 蠕動運動型ラバー混合器の分散捏和効率に関する検討

岩崎 祥大<sup>\*1</sup>, 芦垣 恭太<sup>\*2</sup>, 松本 幸太郎<sup>\*4</sup>, 山田 泰之<sup>\*3</sup>, 中村 太郎<sup>\*3</sup>, 羽生 宏人<sup>\*4</sup>

### Study of Convective Kneading Efficiency of Peristaltic Rubber Mixer

Akihiro IWASAKI<sup>\*1</sup>, Kyota ASHIGAKI<sup>\*2</sup>, Kotaro MATSUMOTO<sup>\*3</sup>, Yasuyuki YAMADA<sup>\*4</sup>,  
Taro NAKAMURA<sup>\*4</sup>, Hiroto HABU<sup>\*3</sup>

#### Abstract

To develop a safe and continuous composite kneading system, we have practically applied peristaltic rubber mixer (PRM). Its contractive kneading motion by a new soft actuator, air-driven artificial muscle, is so unique that the kneading has not been understood yet. In this paper, the convective kneading efficiency was discussed, pointing at the mixture extrusion by the PRM contractive motion.

#### 概要

安全かつ連続的なコンポジット推進薬捏和システムの実現に向け、我々は蠕動運動型ラバー混合器 (PRM) の実用化に取り組んでいる。PRM は空気圧駆動の人工筋肉という既存の混合器にはない新しいソフトアクチュエータによって収縮動作を行うため、収縮動作と捏和効率との関係は未解明である。今回は PRM セグメントの収縮動作による混合物の押し出し排除から混合器内分散捏和効率に関する考察を行った。

#### 1. はじめに

ローンチビークル (Launch Vehicle, LV) 用固体ロケット推進系では固体ロケットモータ (Solid Rocket Motor, SRM) 内に硬化成形されたコンポジット推進薬が予め充填されており、推進薬の品質はモータ燃焼性能に直結する。加えて、LV 全体で見ると重量の約 9 割が推進薬である。ペイロード打ち上げ市場の急速な拡大が目前に迫る中、十分な品質の固体推進薬を量産する技術は LV のコスト低減へ貢献度高い技術といえよう。

しかながら、実状に目を向けてみると、現在のコンポジット推進薬製造設備では量産

---

doi: 10.20637/JAXA-RR-17-008/0008

\* 平成 29 年 11 月 27 日受付 (Received November 27, 2017)

<sup>\*1</sup> 総合研究大学院大学 理工学研究科 宇宙科学専攻

(Department of Space and Astronautical Science, School of Physical Sciences, The Graduate University for Advanced Studies)

<sup>\*2</sup> 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)

<sup>\*3</sup> 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)

<sup>\*4</sup> 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)

効果に限界が見えてしまっている<sup>1)</sup>。過去の欧米のLVに用いられたコンポジット推進薬では単位体積当たりのコストが年間製造量増加と共に確かに50分の1以上低減したが、プラントの大型化・大小SRMに充填する推進薬の共通化に伴って、この量産効果は頭打ちとなってしまっている。需給バランスの中で頭打ちとなった量産効果を更に促進しようとも、現在のコンポジット推進薬製造プラントはバッチ式捏和器を軸としたバッチプロセスであるため、このままでは製造設備が遥かに大型化してしまうことが予想される。火薬製造プラント保安にも関わるため、プラント大型化は容易ではない。LV用であるがゆえに求められる高い信頼性も、この場合プロセッシング変更による効率向上を阻害するように働いてしまう。製造プラントの製造効率と製造安全性を根本的に見直すことが肝要である。

このような背景の中、推進薬製造のプロセスコンセプトをバッチ式から連続式へ変え、長時間連続稼働でプラント敷地面積当たりの製造効率を向上させることは有効である。既にプリプラント開発も進んでいるが<sup>2,3)</sup>、安全性と密接に関係するのが高エネルギー酸化剤粉体と液状ゴムプレポリマの連続捏和技術である。ロータ回転によって捏和搬送する既存の連続捏和装置では、高エネルギー粉体のロータ軸噛み込みや金属チャンバ接触発火事故への懸念が排除できず、効率と推進薬製造安全性の両立が難しい。そこで著者らはロータ回転に頼らない捏和を行う、新しい安全な連続捏和装置、PRMに関して研究を行っている。

PRMは二層ゴムチューブで構成され、外側は軸方向収縮人工筋肉、内側は推進薬材料との影響を考慮してニトリルブタジエンゴムとなっている。二層チューブ間のチャンバに空気圧を印加すると、PRMは人工筋肉によって軸方向に収縮しつつ、内側チューブが狭窄する(以下、この動作をPRM収縮動作と呼ぶ)。ゴムで構成され、機械せん断に頼らず捏和を行うため、PRMは安全に推進薬捏和ができること示唆されている<sup>4)</sup>。PRM収縮動作は生物の腸管の収縮動作を模擬するものであり、腸管内容物の攪拌搬送と同じように複数PRMセグメントの収縮動作が連動することで、混合搬送操作を行うことができる。コンポジット推進薬もPRMで捏和できることが示されている<sup>5)</sup>。

このようにPRMの有用性は示されたが、PRMは人工筋肉というソフトアクチュエータを用いた収縮動作で捏和を行う、これまでにない捏和機構を持つ。また、それがゆえに、PRM操作パラメータも空気圧や収縮動作間隔、セグメント連動運動パターンと独特のものである。プラント構築を見据えると、操作パラメータの最適解探索のためには捏和機構が内部混合物に与える動きを理解することが重要となる。そもそも、捏和機構は一般的に、混合器内全体の大きな入れかわり(分配捏和)・個々の粒子入れかわりによる均一化(分散捏和)・結合力を持つ凝集体のせん断解砕(せん断捏和)の3要素に分類され、これらのうち3つないしは2つが並行して作用している。そこで、PRM単一セグメントの収縮動作1回が内部混合物に与える作用(具体的には内部チューブ狭窄による圧縮および押し出し排除)に関して、要素ごとに検討を進めている。今回は主にPRMセグメント収縮動作による内部混合物の押し出し排除量の圧力依存性から、PRMの分配捏和要素とその効率に関して考察を行った。

## 2. 実験

### 2.1 模擬未硬化推進薬

実験に用いる模擬未硬化推進薬を複数の組成で作製した。材料には、末端水酸基ポリブタジエン (以下, HTPB; P-41, JSR), アルミニウム粉末 (以下, Al; TFH-A05P, 東洋アルミニウム), 塩化カリウム (以下, KCl; 精製塩化カリウム, ダイソルト) を用いた。KCl に関しては, 篩を用いて粒径  $\phi 425 \sim 300 \mu\text{m}$  のものを分粒して用いた。コンポジット推進薬で用いる過塩素酸アンモニウム粒子を KCl に置き換えた形である。

材料をそれぞれ 15 分真空脱気処理した後, HTPB と Al 粉末をプラネタリミキサで 10 分真空予捏和した。その後得られた予捏和スラリに KCl を投入してプラネタリミキサで 30 分真空捏和して模擬推進薬を作製した。プラネタリミキサのバッチ内は  $65^\circ\text{C}$  の温水で加温した。プラネタリミキサの攪拌ブレードは公転速度 7.8 rpm, 自転速度 15.0 rpm とした。

作製した模擬推進薬の組成は次の表 1 の通りである。

表 1 模擬推進薬の組成比

サンプル名	SP-1	SP-2	SP-3
HTPB	4	12	20
Al	6	18	30
KCl	90	70	50

※単位は wt%

### 2.2 模擬未硬化推進薬の X 線 CT スキャン / 流動性・塑性評価実験

気液固充填構造における各成分の連続性は混合物の流動性/塑性など物理特性に影響を及ぼすため, 湿式粉体の捏和では重要となってくる。推進薬捏和 (HTPB/Al 予捏和スラリと酸化剤粒子の捏和) の場合, 予捏和スラリと酸化剤粒子, 空隙の連続性を考えればよい。

模擬推進薬それぞれの内部を X 線 CT スキャンで可視化した。X 線 CT スキャンには TOSCANER 32300 $\mu$ FPD (TOSHIBA) を用いた。スキャン条件は, 管電圧 130 V, 管電流 300  $\mu\text{A}$ , スライス厚 0.099 mm, ピクセル数は 1024 x 1024 pixel とした。この場合, 得られた CT 画像の画素サイズは  $44.37 \mu\text{m}$  であった。輝度値のダイナミックレンジは 16 bit とした。

また, 充填構造と混合物流動性・塑性の相関で未硬化推進薬を対象としたものはこれまで報告されていない。そこで模擬推進薬各サンプルに対して流動性・塑性を判断する実験を行った。各サンプル 50 g をガラス板の上に 15 分静置し, 形状変化を調べた。また流動性があると判断できたものに関しては, 室温下, 振動式粘度計を用いて粘度の測定を行った。

### 2.3 PRM セグメント収縮動作実験

PRM セグメントを図 1 のように垂直に置き, 下端をフランジで閉塞, 上端をセグメントと内径を合わせたアクリルチューブを接続した。この PRM セグメントの中に 2.1 節で作製した模擬未硬化推進薬および乾式 KCl 粉体, HTPB 単体 (室温下  $4.2 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ , 振動式粘度計で

測定) をそれぞれ摺り切り投入し, PRM セグメントを収縮させた. 収縮させた際に押し出された PRM の内容物量および PRM の軸方向収縮長さを測定した. また, セグメント収縮の様子, 収縮によってセグメント内で圧縮された内容物の観察も行った. PRM 収縮の際の印加空気圧力は 10 – 80 kPa で変化させた.



図1 セグメント収縮実験装置

### 3. 結果と考察

#### 3.1 模擬未硬化推進薬の充填構造とその流動特性

撮像した X 線 CT スキャン画像の例として SP-2 のものを図 2 に示す. CT スキャン画像中で KCl 粒子, 予捏和スラリ, 空隙はそれぞれ別の輝度領域を持つ. これらと輝度値の関係は過去の報告書<sup>6)</sup>を参照されたい. CT 画像からそれぞれの成分の連続性をまとめると表 2 の通りである. また, 表 2 には形状変化や手触りから判断した流動性・塑性の有無も示している.

サンプル	SP-1	SP-2	SP-3
成分の連続構造			
KCl 粒子	無	無	無
HTPB/Al スラリ	無	有	有
空気	有	有	無
流動性	無	無	有 (85.3 Pa·s)
塑性	無	有	有

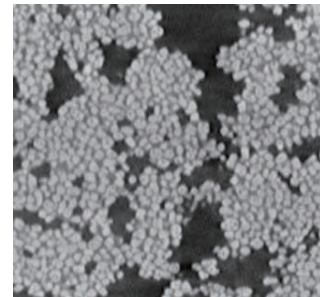


図2 X線CTスキャン画像 (SP-2)

SP-1 の連続構造は一般的にペンデュラ域とよばれ, 流動性も塑性も持たないとされる. また, 状態は粒状であった. SP-2 はファニキュラ域と呼ばれ, 塑性を持つとされる. また状態はペースト状であった. SP-3 はスラリ域と呼ばれ, 流動性と塑性を持つとされる. 実際に観察された物理特性と比較して, 一般的な分類<sup>7)</sup>と対応していることが確認された. 流動性・塑性の有無の判別は適切であると考えられる.

#### 3.2 PRM 収縮動作による内容物の押し出しと圧縮

図 3 に今回の実験で用いた PRM の収縮動作に伴う PRM の軸方向長さ収縮率の圧力依存性を示す. 50 kPa において, 収縮率変化は小さくなっている. この圧力は内部チューブが完全に閉塞する圧力である. 内部チューブが完全に閉塞すると, 軸方向を繊維強化された人工筋肉は半径方向への伸張性が制限されるため, 圧縮空気印加チャンバの拡張も制限され, PRM の軸収縮率も小さくなると考えられる.

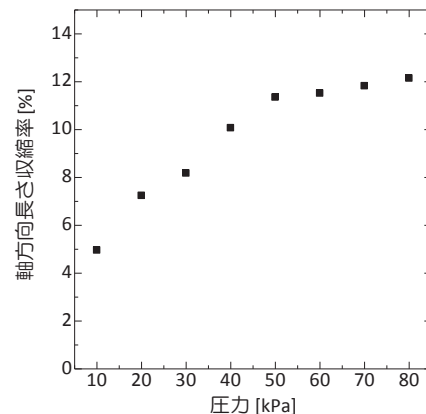


図3 軸方向長さ収縮の圧力依存性

図4はPRM収縮動作によって押し出し排除された内容物の排除率(排除された重量/PRMに投入した重量)である。特徴的であるのはSP-1, 2, KCl粒子である。流動性のあるサンプル(SP-3およびHTPB単体)と比較して50 kPaにおいて明確に排除率変化に違いが生じている。50 kPaまでは排除率が上昇し、50 kPa以降はほぼ変化がない。そのため、PRMの収縮動作および内容物の流動性と深く関係があると考えられる。

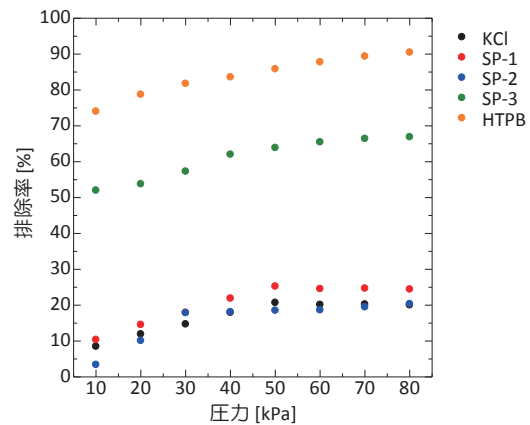


図4 内容物排除率の圧力依存性

チューブ狭窄に従い内部混合物は排除・圧縮されるが、内部混合物の流動性が無い場合、特にチューブ狭窄部からPRM下端閉塞部にかけては上端開放部に向けて流動することができない。結果、内容物の排除はPRMの軸方向収縮による押し出しおよびチューブ狭窄部からPRM上端開放部に向けての排除が主となるため、50 kPa以上の圧力であっても約20%の排除率であり、軸方向収縮に依存した傾向を示していると考えられる。一方、SP-3やHTPBはその流動性によって大きな排除率となっているのであろう。



図5 SP-1 圧縮の様子

60 kPaの印加圧力で粒状のSP-1に対してPRM収縮動作を行ったところ、図5のような圧縮物が確認された。図5の圧縮物の上部は内側チューブの狭窄部に当たり、圧縮物下部はPRM下端閉塞部に当たる。上端開放側は粒子間凝集力が小さく崩れた。また20 kPaの印加圧力では同サンプルの場合、圧縮が十分ではなく凝集力が小さいため、図5のような構造は確認できなかった。

### 3.3 PRMの捏和効率

コンポジット推進薬の捏和を想定した場合、過去の研究においても捏和初期には混合物の多くに流動性が無いことが明らかとなっている。今回の結果から、PRMの分配混合効率、すなわち収縮動作によって混合物を排除し隣のセグメントに搬送する効率をあげるためには、内部チューブが完全に閉塞する圧力が必要であると考えられる。PRMの良好な捏和効率には内部チューブの完全閉塞が重要であるとする山田らの考察<sup>4)</sup>とも合致しており、今回の結果は、それを支持する理由付けの一つとなると考えられる。さらに今後、圧縮によるPRMの分配混合要素に関して検証を行うことで、捏和効率と空気印加圧力に関する定量的な相関が得られると期待している。

#### 4. SRM 製造実験の準備に関して

模擬推進薬を用いた PRM 捏和機構の研究と並行して、実際にメーカー協力の元、PRM を用いた SRM の製造実験を計画している。本年度 10 月末現在で、PRM 捏和装置を工室にインストールし、完成検査および予備実験へと進んでいる。SRM は推進薬約 5 kg 程度を想定しており、製造した SRM は地上燃焼試験を行う予定である。

#### 謝辞

コンボジット推進薬の X 線 CT 撮像において、JAXA 航空技術部門構造・複合材技術研究ユニット 杉本直様に装置操作のご指導を賜りました。この場を借りて御礼申し上げます。

#### 引用

- 1) Dietrich E. Koelle, *Handbook of cost engineering for space transportation systems with TRANSCOST 7.0*, Trans Cost Systems, 2000
- 2) C. A. Cervenka, *AIAA paper*, 1993, 93-2056
- 3) 例えば, D. Scoccimarro et al., *the proceedings of the 63<sup>rd</sup> International Astronautical Congress*, 2012, IAC-12.C4.9.4 など
- 4) 山田 泰之ら, *日本機械学会論文集*, 83 (2017), p.16-00576
- 5) A. Iwasaki et al., *the proceedings of the 67<sup>th</sup> International Astronautical Congress*, 2016, IAC-16.C4.2.7
- 6) 細見 直正ら, *宇宙航空研究開発機構研究開発報告書高エネルギー物質研究会 平成 28 年度研究成果報告*, 2017, JAXA-RR-16-006, pp. 63-68
- 7) N. Mitarai et al., *Advances in Physics*, 55 (2006), pp. 1-50