蠕動運動型人工筋肉混合器による AP 系コンポジット推進薬の捏和

岩崎 祥大[*1], 吉浜 舜[*2], 大竹 可那[*3], 細見 直正[*3], 上垣 那津世[*4], 芦垣 恭太[*5],
松本 幸太郎[*6], 山田 泰之[*5], 田上 賢悟[*7], 山口 聡一朗[*4], 中村 太郎[*5], 羽生 宏人[*6]

Kneading of AP Composite Propellant by Peristaltic Muscle Mixer

Akihiro IWASAKI[*1], Shun YOSHIHAMA[*2], Kana OTAKE[*3], Naomasa HOSOMI[*3],
Natsuyo UEGAKI[*4], Kyota ASHIGAKI[*5], Kotaro MATSUMOTO[*6], Yasuyuki YAMADA[*5],
Kengo TAGAMI[*7], Soichiro YAMAGUCHI[*4], Taro NAKAMURA[*5], Hiroto HABU[*6]

概　要

我々は固体ロケットモータの抜本的な低コスト化に向けて，蠕動運動型人工筋肉混合器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．今回は連続捏和システム構築の初期検討としては最も重要な混合器の捏和性能の評価を行った．本混合器は捏和操作における遮蔽効果を乗り越えて推進薬スラリを捏和でき，プラネタリミキサで混ぜたものと同等の燃焼速度であった．これは，本混合器は高いスラリ捏和性能を持ち，かつ投入した酸化剤粒子の粒度分布を過度に損ねない推進薬が得られることを示している．

Abstract

We have tried to realize a continuous kneading technique of composite propellants with a peristaltic artificial muscle mixer, aiming at a drastic cost reduction of solid rocket motor systems. In this paper, the propellant slurry kneading performance of the peristaltic mixer was estimated, which is one of the most important as the elementary consideration for the continuous kneading. The mixer can knead the propellant slurry through the mask effects in the powder and the slurry systems. Moreover, the propellant had the same combustion rate as the one kneaded by a planetary mixer. These results indicate that the peristaltic mixer has both a high slurry mixing performance and a soft mixing.

doi: 10.20637/JAXA-RR-16-006/0008
[*] 平成 28 年 11 月 24 日受付（Received 24 November , 2016）
[*1] 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 Asrtonautical Science, School of Physical Sciences, The Graduate University for Advanced Studies)
[*2] 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)
[*3] 関西大学大学院 理工学研究科 システム理工学専攻
(Department of Engineering Science, Graduate School of Science and Engineering, Kansai University)
[*4] 関西大学 システム理工学部 物理・応用物理学科
(Department of Pure and Applied Physics, Faculty of Engineering Science, Kansai University)
[*5] 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)
[*6] 宇宙科学研究所 宇宙飛翔工学系
(Division for Space Flight Systems, Institute of Space and Astronautical Science)
[*7] プログレステクノロジーズ
(Progress Technologies)

This document is provided by JAXA.

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 Perchrolate (AP): 過塩素酸アンモニウム
Dioctyl 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

今後来たる高頻度宇宙輸送に向けて，コンポジット推進薬製造プロセスは固体ロケットの抜本的なコスト低減を目指し，既存のプロセスイメージに囚われることなく高安全性と高製造効率双方の両立を実現させていくべきである．なぜなら，固体推進薬組成は固体ロケットモータ推進性能の大元を司っており，固体推進薬製造は固体ロケットモータ製造の主軸を担っているからである．一方で，金属燃料および酸化剤の高分率な粉体成分と高粘性バインダを捏和し，モータケースへ注型・硬化させるプロセスは高度な技術力と徹底した安全性を求められる．結果として，未だにモータの信頼性はバッチ管理に依存したままであり，有効なコスト低減策に窮している．

そこで，我々が提案しているのは，蠕動運動型人工筋肉混合器による安全な推進薬の連続捏和システムである．コンポジット推進薬の連続捏和そのものは古くから存在している．1960 年に Aerojet 社が取り組み始めて以降，2005 年までにフランスの SNPE 社も加えた 2 社が大型固体ロケットモータ用の推進薬を対象としたパイロットプラントのデモンストレーションまで行われた [1-4]．その後も将来固体ロケットが獲得すべき技術の一つとして挙げられている [5] 重要な技術となっている．一般的にプロセス単位操作の連続化そのものが大量生産・製造効率向上を目指した概念である．加えて，固体推進薬製造の場合，コスト低減の本質は連続プロセス概念に従った新規プロセス構築による，プロセス信頼性担保手法と推進薬製造安全性の根本的な見直しこそにある．我々の提案する蠕動運動型人工筋肉混合器を用いた推進薬の連続捏和は，これら抜本的なコスト低減要素を既存の推進薬連続捏和プロセスより更に高めることができる．

蠕動運動型人工筋肉混合器は，ゴムを主な材料とし数 10 kPa の空気圧で駆動し，安全な推進薬取り扱いとスラリ捏和操作を両立させていることは前回の高エネルギー物質研究会研究報告書の通りである [6]．流体の高い搬送性能に関しても報告されており [7]，安全な連続捏和が高く期待される．それに止まらず，蠕動運動型人工筋肉混合器は連続プロセスの概念すらも既存のものを覆すことができる．本混合器は，セグメント連結させて蠕動波を伝達させることで推進薬の連続捏和，捏和と搬送を兼ねた機能を持つ．一方で，セグメント単体はフランジと空気圧駆動式人工筋肉 (軸方向炭素繊維強化ゴム) チューブ・ゴムチューブのみで構成されている．すなわち，安価・簡素な消耗品でありながら，それらをカートリッジ方式で連結させるだけでポンプ機能まで兼ね備えた連続捏和装置となる．我々の提

This document is provided by JAXA.

案する連続捏和システムは，もはやプロセス運用方法まで含めて，既存とは全く違うプロセス概念を創出することが可能である．この研究開発活動こそが，抜本的な固体ロケットコスト低減への寄与となる．

2.　研究目的

本研究の目的は蠕動運動型人工筋肉混合器の推進薬スラリ捏和性能評価である．実際の推進薬スラリの蠕動運動型連続捏和システム構築には，本混合器の捏和性能を把握することが重要となってくる．

そこで，蠕動運動型人工筋肉混合器の最短波長，すなわち捏和操作のみを行う 2 セグメント連結式の混合器を用いて，コンポジット推進薬スラリ捏和性能を評価する．特に推進薬の粒子充填状態の遷移と捏和した推進薬の燃焼速度に着目して評価を行う．

3.　粒子充填状態

3.1　粒子充填状態の分類

一般的に，推進薬スラリのような高粒子分率の気液固分散系に関しては，表 1 のように分類されている[8]．比較的液体量の少ない粉体系，比較的液体量の多いスラリ系があり，その中間の液体量，すなわち粉体の充填間隙を丁度満たす程度の液体量のものを練り土系に分かれる．それぞれの充填形態は固体粒子成分・膜液成分・自由液成分・空気成分の連続・不連続で決定される．粉体系であり，液体成分が少なく，固体粒子が接していて連続的，空隙も連続的であるものをペンデュラ域と呼ぶ．練り土系であり，液体成分は連続的でありつつも粒子間隙すべてを埋めるほどは存在しないものがファニキュラ域である．また，キャピラリ域では，粒子間隙を埋める成分はすべて液体成分であり，その液体成分の一部が粒子表面を覆う膜液ではなく自由液としてふるまう．この自由液が増え，連続的になったものがスラリ域である．ファニキュラ域とキャピラリ域の境界に塑性限界，キャピラリ

表 1 高粒子分率気液固分散系の分類

充填形態	ペンデュラ域	ファニキュラ域	キャピラリ域	スラリ域
レオロジー系	粉体系	練り土系	練り土系	スラリ系
混合	乾式	半乾式	湿式	スラリ
固体粒子	連続	連続	不連続	不連続
膜液	不連続	連続	連続	不連続
自由液	—	—	不連続/連続	連続
空気	連続	連続/不連続	—	—

This document is provided by JAXA.

域とスラリ域の境界に液性限界が存在する.

3.2 レオロジー系間の遮蔽効果

現実の捏和操作では，粉体系・スラリ系において粒子間隙の毛細管現象に起因する次のような遮蔽効果が働く.

(ア) 粉体系における遮蔽効果 (造粒・造塊現象)

粉体系では，液体成分は粉の一部を捕捉して造粒 (塊) 体を作る．中に取り込まれた液体は周りの粉に影響を及ぼすことができない.

(イ) スラリ系における遮蔽効果 (凝集体現象)

スラリ系においても同様に毛管凝縮により自由液が凝集体内に捕捉され (部分的なキャピラリ域の形成)，凝集体の流動化に対して影響を及ぼさない.

以上に示される液体成分を捕捉した粒・塊・凝集体は，液架橋力によって粒子間結合力がより強くなっている．そのため，混合器の捏和要素・混合器への固液投入比率によってはこれらを解砕することができず捏和不能になることもある．そのため，実際にはこれらの遮蔽効果を乗り越える混合器の混合性能が必要となる.

4. 実験

4.1 推進薬スラリの捏和

用いた推進薬成分の用途と重量比率を表 2 に示す. 推進薬全量で 400 g とした. 混合器は図 1 に示す 2 セグメント連結式蠕動運動型人工筋肉混合器を用いた. 混合器の作動ガス圧は 50 kPa とし，コンプレッサより供給した. セグメント間には混合器内加温ディスクを挟み，ディスク内を流れる 80°C の温水で加温した. 蠕動運動波の周期は 12 秒とした.

表 2 推進薬成分

成分	用途	重量比率 [wt%]	投入段階
HTPB	バインダ	12.09	予捏和
Al 粉末	金属燃料	18.00	予捏和
AP ϕ400 μm	酸化剤	40.80	AP 捏和 I
ϕ200 μm	酸化剤	10.20	AP 捏和 I
ϕ50 μm	酸化剤	17.00	AP 捏和 I
DOA	可塑剤	1.00	AP 捏和 II
IPDI	硬化剤	0.91	最終捏和

捏和手順に関しては，まず HTPB と Al 粉末を予捏和する (予捏和段階). HTPB と Al 粉末が全体的にスラリとなり液性を持ったことを確認した後，3 つの流動分布を持つ AP を全量入れ，90 分捏和し (AP 捏和

This document is provided by JAXA.

Ⅰ段階)，その後 DOA を入れてさらに 60 分捏和した (AP 捏和Ⅱ段階)．最後に IPDI を添加し，ヘラで数回手捏和した (最終捏和段階)．捏和した推進薬スラリは 60°C に設定した真空恒温槽内で真空脱気処理した後，60°C の常圧恒温下で 7 日間硬化させた．

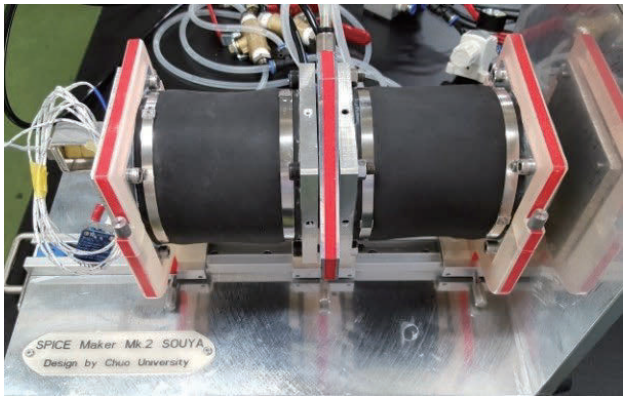
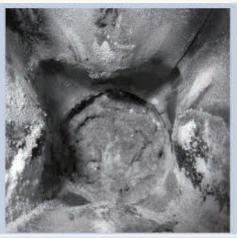


図 1 蠕動運動型人工筋肉混合器

粒子充填状態を詳細に評価するため，AP 捏和Ⅰ段階途中 (捏和時間 30 分) および終了時の推進薬混合物と全捏和操作を終了して脱気処理まで行った推進薬について，ϕ 12 mm，高さ 10 mm のサンプルを作成し，これらを X 線 CT ス

表 3 推進薬混合物の遷移

捏和段階	AP捏和Ⅰ10分	AP捏和Ⅰ20分	AP捏和Ⅰ30分	AP捏和Ⅰ40分
				
	粉・粉塊	粉・粉塊	粉・粉塊	粉・粉塊
流動性	×	×	×	×
捏和段階	AP捏和Ⅰ50分	AP捏和Ⅰ60分	AP捏和Ⅰ70分	AP捏和Ⅰ90分 AP捏和Ⅱ開始
	粉塊・ペースト	粉塊・ペースト	ペースト	ペースト
流動性	×	×	×	△
捏和段階	AP捏和Ⅱ30分	AP捏和Ⅱ60分		
	スラリ	スラリ		
流動性	○	○		

This document is provided by JAXA.

キャンした. X 線 CT スキャンには TOSCANER-30000 (東芝製) を用いた. 管電圧は 100 kV, 管電流は 200 μA に設定した.

4.2 コンポジット推進薬スラリの燃焼速度測定

硬化させた推進薬をチムニ型ストランドバーナで燃焼させた. バーナ内は高圧窒素ガスで 5 MPa に加圧した. 燃焼速度測定にはブレイクワイヤ法を用いた. ヒューズ線はϕ0.3 mm, ヒューズ間隔は 10 mm とした. 推進薬は端面燃焼させるために表面をエポキシ樹脂で被覆した.

5. 結果

5.1 推進薬混合物の性状変化

表 3 に AP 捏和 I , II に行った際の推進薬混合物の遷移と流動性の有無を示す. AP 捏和 I 段階初期では混合物は AP の乾いた粉が多く確認された. また AP 捏和 I 段階開始から 40 分後まで乾いた粉が粉塊を形成していっている様子が確認できる. その後, 粉塊はさらにペーストへと変化し, AP 捏和 II 段階開始時には全体的にペーストとなっている. その後, DOA を加えて更に捏和を進めることで, ペーストは十分に流動性のあるスラリと変化した.

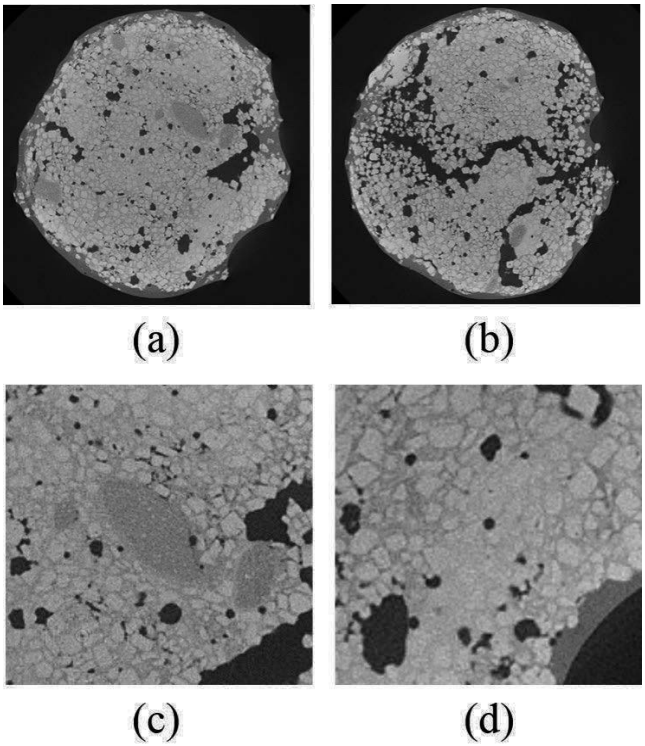


図 2 AP 捏和 I 30 分の推進薬混合物の X 線 CT スキャン画像

AP 捏和 I 30 分の X 線 CT スキャン画像を図 2 に示す. 図 2 (a), (b) はともに同一サンプル中の別の位置をスキャンしたものである. (c), (d) はこれらのスキャン画像中の拡大図である. (a) には(c) で示す, HTPB/Al 粉末の予捏和スラリ (以下, 予捏和スラリ) が AP 粒子を捕捉して粉塊を所々で形成していることが分かる. また一方で図 2 (d) のように粒子が連続的に凝集している部分も複数確認できる. (b) に関しても, 予捏和スラリによる粉塊や粒子凝集体がみられる上に, 全体的に大きな粉塊に分かれている. AP 捏和 I 30 分では, 混合物は全体的に粉体系ペンデュラ域にあり, 混合物内の成分分散も空隙, 粉塊や凝集体が多いため, 偏りが大きくなっている.

This document is provided by JAXA.

AP 捏和 I 終了時の推進薬混合物 X 線 CT スキャン画像を図 3 に示す．(a) では，図 2 でも見られたような予捏和スラリを捕捉する粉塊・粒子が連続的な凝集体が確認され，全体的に空隙も分散している．粉塊・凝集体以外の部分に関しては，粒子間隙は空隙と予捏和バインダが埋めており，ファニキュラ域練り土系を形成している．(b) では粉塊は確認されず，空隙が少ない部分が増え，AP 粒子間隙を予捏和バインダが連続的に存在している領域，キャピラリ域練り土系もしくはスラリ域スラリ系を形成している部分が存在する．400 – 50 μm の 3 つの粒度分布を持つ AP 粒子に関しては，大粒径のものが局在化しているなど，混合が十分ではないものの，図 2 と比較して確実に予捏和バインダの濡れは進行しており，ペンデュラ域からスラリ域まで様々な粒子充填状態が混在している．

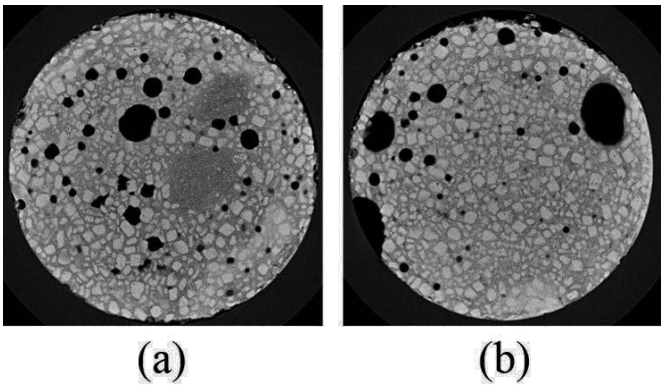


図 3 AP 捏和 I 終了時の推進薬混合物の X 線 CT スキャン画像

図 4 では脱気処理まで行った推進薬混合物の X 線 CT スキャン画像である．(a) が蠕動運動型人工筋肉混合器を用いて捏和した推進薬であり，(b) がプラネタリミキサで捏和した推進薬である．(a) には，AP 粒子の粉塊も凝集体も確認されず，予捏和スラリは全体的に連続的に分散している．分散状態もプラネタリミキサのものと似ている．表 3 で示しているように，AP 捏和Ⅱ段階を終えた時点で流動性のある推進薬スラリを得ることができているため，(a) の粒子充填状態はスラリ域スラリ系である．

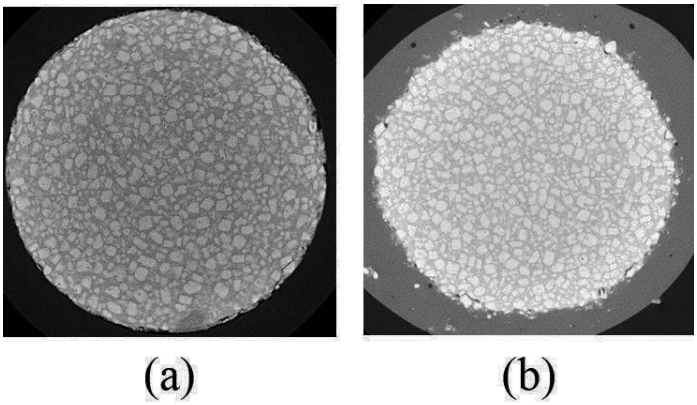


図 4 全捏和および脱気処理後の推進薬混合物比較
(a: 蠕動運動型人工筋肉混合器，b: プラネタリミキサ)

5.2 推進薬の燃焼速度

推進薬の燃焼速度は表 4 のようになった．10 回燃焼速度測定を行い，その平均値と分散値を示している．蠕動運動型混合器とプラネタリミキサで平均燃焼速度$\bar{r}_p$の差は 0.05 mm/s である．燃焼速度の偏差はどちらも平均燃焼速度に対して約 3 %であり，双方の差も 0.16 x 10^{-1} と小さい．すなわち，本混合器で捏和した推進薬はプラネタリミキサで捏和した推進薬

This document is provided by JAXA.

と燃焼速度は同等である．

表 4　5 MPa における推進薬の燃焼速度

サンプル	平均燃焼速度$\bar{r}_p$ [mm/s]	燃焼速度偏差σ_r [mm/s]
蠕動運動型混合器	6.95	2.21×10^{-1}
プラネタリミキサ	6.90	2.37×10^{-1}

6.　考察

AP 捏和 I 段階で予捏和バインダと AP 粒子によって形成されるペンデュラ域粉体系の凝集塊は捏和操作における遮蔽効果を生む．AP 捏和 I 段階終了時にはこの遮蔽効果を乗り越えて，キャピラリ域・スラリ域の粒子充填状態を取っていることから，蠕動運動型人工筋肉混合器は，捏和不可能ともなりうるペンデュラ域粉体系の遮蔽効果を乗り越えて捏和を進めることができる．また，キャピラリ域に関しても予捏和スラリを膜液内部に捕捉して遮蔽効果を生むが, AP 捏和 I 段階終了時に確認されたキャピラリ域も最終的には解消され, 流動性のあるスラリとなっている．推進薬混合物が液性を持った後の捏和進行，粒子分散均一化に関しては，推進薬の燃焼速度比較から考察することができる．推進薬の燃焼速度偏差が既存のプラネタリミキサで捏和したものと同等であることから，成分分散は同等とみなすことができる．蠕動運動による圧縮流動捏和が進行し，良好な粒子成分の分散が得られたためである．

燃焼速度に関してもプラネタリミキサと比較して差が小さい．これは AP 粒子の粒度分布が既存の推進薬と同等であることを示している．捏和操作や粉体投入において，せん断・摩擦によって大粒径の AP 粒子が解砕され小粒径の AP 粒子となると，推進薬中における酸化剤粒子成分の比表面積が大きくなるため，燃焼速度が増大する．この現象は，大量の推進薬混合物に対してスクリューニーダ等を用いる，既存の押し出し式連続捏和方式では問題となっている [2)]．一方，蠕動運動型人工筋肉混合器の場合，AP 捏和段階 I においては，混合物はペンデュラ域粉体系であり粒子同士の接触も確認されているが，AP 粒子の濡れと分散を進行させ，粒度分布を損ねること無くスラリを得ることができている．本捏和方式では大量の乾式 AP 粒子を取り扱うにも関わらず, 小さい粒度分布への影響と高いスラリ捏和性能も両立させていることが示されている．

7.　まとめ

蠕動運動型人工筋肉混合器で AP 系コンポジット推進薬の捏和を行った．推進薬混合物をサンプリングし，X 線 CT スキャンして，AP 粒子充填状態に着目して考察を行った．予捏和スラリを捕捉して AP 粒子が粉塊を形成する遮蔽効果が確認されたが, その遮蔽効果を乗

This document is provided by JAXA.

り越えてスラリとなるまで，混合物を捏和することができた．また捏和の際に過度に AP 粒子の分散を損ねる粒子への強いせん断や摩擦も少なく，プラネタリミキサと同等の燃焼速度とその偏差を持つ推進薬が得られた．本混合器は捏和効率が良くせん断や摩擦は少ないため，推進薬連続捏和装置として有用な候補である．

8. 今後の計画

本研究で明らかになった凝集状態の遷移を元に，粒子充填状態に関する定量的な考察を進め，コンポジット推進薬スラリ連続捏和に適したシステムと操作手法を検討していく．並行して，本知見に基づいて，来年度には推進薬スラリの捏和・搬送の同時操作を実行して連続捏和達成へ進めていく計画である．

謝辞

コンポジット推進薬の 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) A. Davenas, “Development of Modern Solid Propellants”, Journal of Propulsion and Power 2003, 19, pp.1108-1128
2) C. A. Cervenka, “The Development of a Continuous Mix Process for ASRM Propellant Production”, AIAA/SAE/ASME 29th Joint Propulsion Conference and Exhibit, 93-2056
3) Y. Levy, C. Bonnal, L. Bouaziz, J. Lonchard, D. Vuillamy, F. Wahl, D. Boury, P. Greco, “A Perspective on New Generation of Launcher Work in Europe: the Expendable Alternative”, The proceedings of 55th International Astronautical Congress, 2004, IAC-04-V.4.01
4) J. Guery, G. Chounet, M. Gaudre, J. Tauzia, P. Greco, “A New Continuous Mixing Facility for the Demonstration of Solid Propulsion Technologies of Future ELV”, The proceedings of 56th International Astronautical Congress, 2005 IAC-05-C4.2.02
5) J. Guery, I. Chang, T. Shimada, M. Glick, D. Boury, E. Robert, J. Napior, R. Wardle, C. Pérut, M. Calabro, R. Glick, H. Habu, N. Sekino, G. Vigier, B. d'Andrea, “Solid propulsion for space applications: An updated roadmap”, Acta Astronautica, 2010, 66, 201-219
6) 岩崎 祥大, 吉浜 舜, 松本 幸太郎, 中村 太郎, 羽生 宏人, “蠕動運動ポンプを用いた固体推進薬連続捏和に関する研究”, 宇宙航空研究開発機構開発報告書高エネルギー物質研究会平成 27 年度研究成果報告, 2016, JAXA-RR-15-004, 41-48
7) R. Ban, Y. Kimura, T. Nakamura, “Development of insertion-type peristalsis pump using pneumatic artificial muscles”, Advanced Robotics, 2015, 29, 877-888
8) K. Umeya, “The Role of Rheology on the Shaping Technology of Ceramic Materials”, Journal of the Society of Rheology, Japan, 1985, 13, 145-165

This document is provided by JAXA.