

固体推進薬連続捏和システムの各要素研究概況

岩崎 祥大^{*1}, 吉浜 舜^{*2}, 大竹 可那^{*3}, 細見 直正^{*4}, 上垣 那津世^{*4}, 松本 幸太郎^{*5},
山田 泰之^{*6}, 山口 聡一郎^{*4}, 中村 太郎^{*6}, 寺嶋 隆史^{*7}, 小島 明寛^{*7}, 羽生 宏人^{*5}

Overview of Elemental Studies for Solid Propellant Continuous Mixing

Akihiro IWASAKI^{*1}, Shun YOSHIHAMA^{*2}, Kana OTAKE^{*3}, Naomasa HOSOMI^{*4},
Natsuyo UEGAKI^{*4}, Kotaro MATSUMOTO^{*5}, Yasuyuki YAMADA^{*6}, Soichiro YAMAGUCHI^{*4},
Taro NAKAMURA^{*6}, Takashi TERAJIMA^{*7}, Akihiro KOJIMA^{*7}, Hiroto HABU^{*5}

Keywords: Solid Propellant, Continuous Mixing, Peristaltic Pump, X-ray CT

概要

本研究はコンポジット推進薬の連続捏和システムによって固体ロケットモータ製造における新たな信頼性担保方法に基づいた抜本的な高効率化と低コスト化を目指している。連続捏和装置には蠕動運動型混合器・X線CTスキャンを用いた推進薬スラリの捏和度定量評価を並行して研究し、制御可能な推進薬スラリー連続捏和システムに取り組んでいる。これら要素研究に関する研究概況を示した上で、現状の推進薬連続捏和システム試設計を示す。

今後はさらに各要素研究とそれらを組み合わせたシステム検討を進めていく。

1. 緒言

人工衛星を用いた宇宙利用が必須となった今、ロケットによる宇宙輸送システムの更なる充実が急務である。具体的には高頻度な打ち上げへの対応・輸送正確性向上・エンジン性能向上が挙げられる。特に、高頻度打ち上げに向けては産学が連携した大きなブレイクスルーが必要となる。液体ロケットの場合、今では世界中で高頻度打ち上げに対応するた

*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)

*2 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)

*3 関西大学 理工学研究科 システム理工学専攻

(Kansai University, Graduate School of Science and Engineering, System Science and Engineering)

*4 関西大学 システム理工学部 物理・応用物理学科

(Kansai University, Faculty of Engineering Science, Department of Pure and Applied Physics)

*5 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)

*6 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)

*7 明治ゴム化成 (Meiji Rubber and Chemical Co., LTD)

めに再使用型ロケットが精力的に開発されている一方で、固体ロケットはそのような新しい概念を具現化することができていない。固体ロケットモータの特徴としては、推進薬と一体型のモータ機構が挙げられる。そのため、推進薬量・推進薬組成・グレイン形状の加工など推進薬・モータ製造がモータ性能に直結する。そこで、推進薬製造プロセスの根本的な概念変更及び抜本的な効率化・低コスト化に着目した。世界の主流であるコンポジット推進薬の製造プロセスはバッチプロセスとなっている。このプロセスを連続プロセスに変更する、特にプロセスの根幹を担っている推進薬スラリの捏和操作を連続化することは単なる概念変更に止まらず、固体ロケットモータ性能信頼保証の新たな形を生み出す。プロセス操作に基づくバッチ式保証からスラリの性状・混合度を定量的に評価しプロセス制御を行う連続式保証が製造効率を更に高める。

我々は推進薬スラリ連続捏和がもたらす製造効率向上と低コスト化を更に高める、蠕動運動型混合器を軸とした連続捏和システムを提案している¹⁾。

2. 目的

研究の目的は蠕動運動型混合器を用いた推進薬スラリ捏和システムの連続化である。この研究目的を達成できるよう、複数分野から導入した最先端の研究を産学連携の元、要素包括的に進めている。連続捏和システムとして成立させるためには、装置自体の連続化・スラリ捏和度の正確な定量評価手法・システム全体の設計検討が必要となる。今回は各要素研究の現状とこれらを元にした連続捏和システムの試設計を述べる。

3. 蠕動運動型混合器

蠕動運動型混合器(Fig. 3.1)はセグメントを複数連結させることで複雑な蠕動運動模擬を可能にしている。セグメントはゴムチューブと人工筋肉、フランジから構成される。チューブと人工筋肉の間のチャンバに作動ガスを印加することでチューブ内流体を混合する。作動ガスが印加されると、チャンバが膨張しチューブ内を閉口する。一方で、人工筋肉はチャンバの膨張に従い、半径方向の伸張は制限され軸方向に収縮する。このチューブ内閉口と人工筋肉による軸方向収縮が同時に行われることで蠕動運動の模擬を可能としている。本混合器は高いスラリ搬送性能²⁾とスラリ混合性能を持つことが示されている^{3,4)}。火薬取り扱いの安全性を高める本混合器の混合メカニズムと構造が更に安全面に貢献する。

現在、蠕動運動型混合器によって実推進薬組成のスラリ捏和に成功し、燃焼速度に関しても実推進薬レベルで

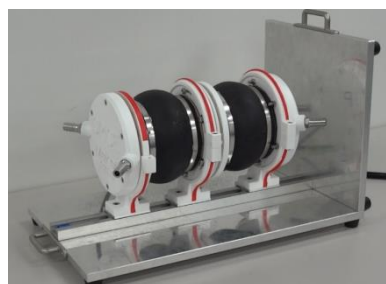


Fig. 3.1 蠕動運動型混合器



Fig. 3.2 蠕動運動型混合器で捏和した推進薬スラリ

あった。推進薬スラリにはバインダに末端水酸基ポリブタジエン (HTPB) プレポリマ、金属燃料にアルミニウム粉末 (Al)、酸化剤に過塩素酸アンモニウム (AP) 粒子を用いた。更に、可塑剤としてアジピン酸ジオクチル (DOA) と硬化剤としてイソホロンジイソシアネート (IPDI) を用いた。組成は HTPB: DOA: IPDI: Al: AP = 12: 1: 1: 16: 68 とした。

4. 捏和度定量評価

推進薬製造プロセスの場合、プロセス検討における推進薬スラリのパラメータはレオロジー特性、その中でも粘度が一般的であった。しかし粘度はスラリの物理的物性値であり、推進薬スラリの品質を定量評価する関数として適切とはいえない。バインダの粘度-温度相関⁵⁾や AP の粒子体積分率、粒径⁶⁾ が推進薬スラリの粘度に影響している。

コンジット推進薬の燃焼を考えると品質評価には推進薬内の粒子分散が重要である。推進薬中のボイド分散も固体ロケットモータ中の推進薬異常燃焼や燃焼振動の原因となる⁷⁾。そのため、推進薬の品質を評価する関数は、推進薬内の粒子成分 (特に酸化剤) の分散とボイドの分散をそれぞれ定量評価できるものが適切である。可視光で伺い知ることのできない推進薬内部を把握するためには、化学種や密度に依存して物体を透過する X 線を用いた X 線 CT (Computed Tomography) スキャンが有効である。実効分解能 10 μm の X 線 CT (nano3DX, リガク) で推進薬の内部を撮像したところ、Fig. 4.1 のような画像が得られた。この画像の輝度は X 線の吸収によって定量的に定まる。そのため、この輝度を利用した画像解析によって粒子・ボイド分散を統計的に評価できる。画像内の領域を指定し、輝度ヒストグラムを取得したところ、Fig. 4.2 のようになった。ヒストグラム形状が AP 粒子の粗密、ボイドの有無によって変化することが確認できた。今後

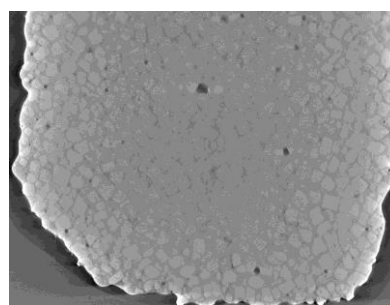


Fig. 4.1 推進薬の X 線 CT スキャン画像

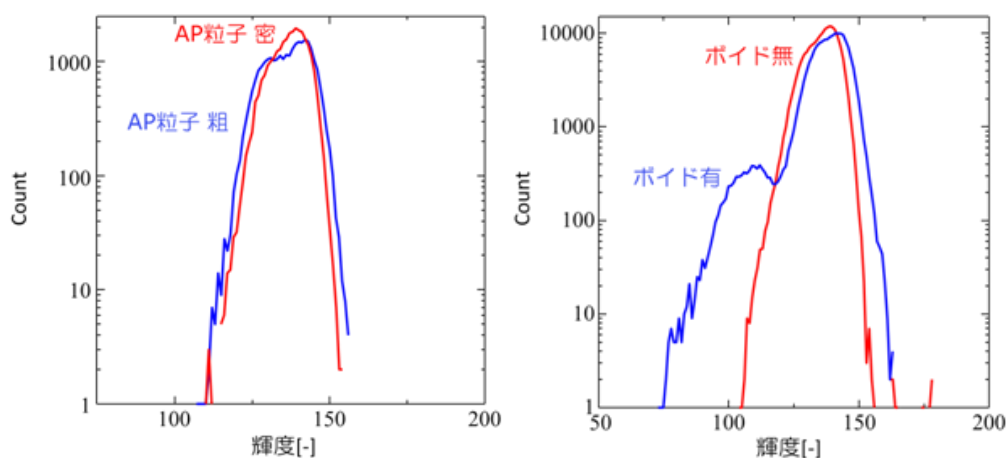


Fig. 4.2 推進薬内部 X 線 CT 画像の輝度ヒストグラムによる分散評価

は画像再構成技術における部分体積効果を利用し、分解能を調整しながら推進薬の混合度評価を行っていく。

また推進薬内部構造の X 線 CT 撮像を利用して、蠕動運動型混合器内における推進薬スラリ捏和過程を平衡論的に捉える研究も進めていく計画である。

5. 提案する連続捏和システム

我々は Fig. 5.1 に示す連続捏和システムを現在構想している。AP 以外の HTPB・AI 他添加物を予捏和する部分と AP を捏和し推進薬を製造する部分とに分かれる。AI・AP などの粉体成分はサイロを用いて供給する。推進薬スラリ捏和装置出口には、X 線 CT を据え、スラリ捏和度を検査する。システム効率向上のため、捏和装置にはリサイクルフローを取り付けている。

現時点では蠕動運動型混合器は捏和性能評価のためにバッチ操作をしているが、2 セグメントを連結させ、現行設計で捏和時間 40 分を要し、約 400 g の推進薬が製造できる。蠕動運動型混合器の運動方法によって単純に連続化することができる²⁾ ため、現時点での実験結果を利用すると、一年間の推進薬スラリ捏和予定量は 29.4 t となる。これは SRB-A 約 0.5 本分となり、捏和システムのスケールアップ・ライン数増加によって将来需要に対して十分な推進薬製造を行うことができる。

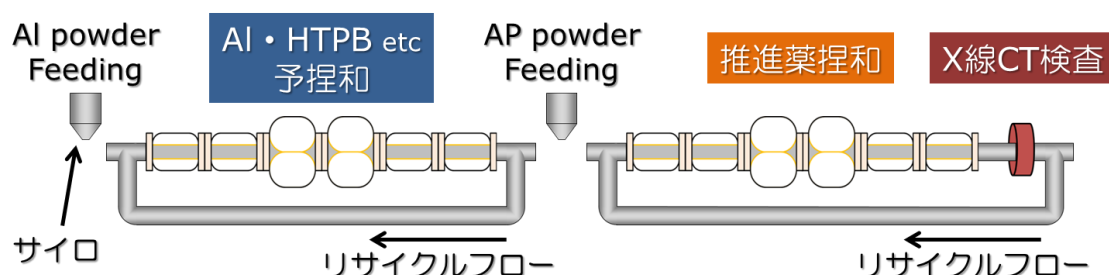


Fig. 5.1 蠕動運動型混合器を用いた連続捏和システム

6. まとめと今後の展開

蠕動運動型混合器を用いた連続捏和システムイメージを提示し、また本システムの核となる捏和装置と捏和度評価手法に関して研究の概況を述べた。実組成推進薬の捏和に成功した蠕動運動型混合器・X 線 CT による内部構造イメージングを利用した捏和度評価手法共に、有効かつ良好な研究成果を残しており、提案する連続捏和システムは数年以内に十分実現可能である。今後も混合器の連続化と部分体積効果を積極的に用いた統計的捏和度評価手法を研究の軸として進めていく。本研究は粉体・非破壊検査など一般工業技術や学術に幅広く貢献できるポテンシャルを大いに有しており、ロケットを題材とした本研究を具現化できるよう計画を進めていく。

参考文献

- 1) 岩崎 祥大, 伴 遼介, 吉浜 舜, 中村 太郎, 羽生 宏人: “蠕動運動ポンプを用いた固体推進薬の連続捏和プロセス”, 平成 26 年度宇宙輸送シンポジウム講演集, STCP-2014-004
- 2) Ryosuke Ban, Yoshiki Kimura, Taro Nakamura: “Development of insertion-type peristalsis pump using pneumatic artificial muscles”, *Advanced Robotics*, 2015, 29, 877-888
- 3) Shun Yoshihama, Ryosuke Ban, Akihiro Iwasaki, Hiroto Habu and Taro Nakamura: “Mixing of Solid Propellant by Peristaltic Pump Based on Bowel Peristalsis”, *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2015, WeFT8.1
- 4) Akihiro Iwasaki, Ryosuke Ban, Shun Yoshihama, Taro Nakamura and Hiroto Habu: “The Continuous Mixing Process of Composite Solid Propellant Slurry by the Artificial Muscle Actuator”, *Proceedings of The 30th International Symposium on Space Technology and Science*, 2015, 2015-a-03
- 5) Muhammad Mazhar Iqbal, Wang Liang: “Modeling of Composite Propellant Properties based on Polymer Rheology”, 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2006, AIAA-2006-5252
- 6) プロペラント専門部会: “プロペラント・ハンドブック”, 火薬学会 (2005)
- 7) Stany Gallier, Michel Prevost, Jouke Hijlkema: “Effects of Cavity on Thrust Oscillations in Subscale Solid Rocket Motors”, 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2009, AIAA-2009-5253