

# 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

## Mixing solid propellant by peristaltic pump with warming function

○吉浜 舜(中央大学), 岩崎 祥大(総研大), 松本 幸太郎(JAXA),  
山田 泰之(中央大学), 羽生 宏人(JAXA), 中村 太郎(中央大学)

### 要旨

近年, 人工衛星を用いた社会インフラ等の宇宙利用の重要性が高まり, 低コストで高頻度なロケット打ち上げが望まれている。著者らは小型で安価な固体燃料ロケットの固体推進薬の製造プロセスに着目し, 高粘度スラリーである固体推進薬スラリーの連続捏和による製造プロセスの抜本的な変更により大幅な低コスト化が可能であると考えた。固体推進薬製造プロセスをバッチプロセスから連続プロセスへと転換し, 安全性の高い高粘性流体の捏和を実現する装置として, 著者らは蠕動運動型ポンプを見出した。これまでに, 著者らは固体推進薬模擬スラリーを用いてポンプによる捏和システムの要素検討を進めてきた。本報告ではポンプに加温機能を追加し, 実際の推進薬スラリーの捏和を行った。推進薬スラリーの粘度を測定することでポンプによる捏和特性を取得し, さらに燃焼試験を行なうことで捏和された推進薬の燃焼速度を示す。

### 1. 緒言

近年, 人工衛星を用いた社会インフラ等の宇宙利用の重要性が高まり, 低コストで高頻度なロケット打ち上げが望まれている。固体燃料ロケットは小型で安価さらに取り扱いが容易という特徴があり, 様々なロケットの高性能・低コスト化が取り組まれている。我々は高粘度スラリーである固体推進薬スラリーの連続捏和による製造プロセスの抜本的な変更により大幅な低コスト化が可能であると考えた。

現在の固体推進薬製造方法はバッチプロセスとなっており, 設備・運用コストがかかる。さらに, 捏和には, 高いせん断力を用いた捏和を行っており, 発火の危険性のため, 推進薬製造の自動化, 大量製造が困難となっている。

著者らは連続プロセスへの転換することで, 効率的な設備設計による設備コストの低減, 自動化による運用コストや廃棄物の低減につながると考えた。さらに, 安全性の高い高粘性流体捏和装置であれば, 同時に多量の取り扱いが可能となり, 連続プロセスへの組み込みが容易であると考えた。これ

らの要求を満たすのは安全な捏和と搬送を両立する連続捏和装置として蠕動運動型ポンプに着目した[1]。

著者らはこれまでに蠕動運動型ポンプによる捏和動作の優位性を検討し[2], 固体推進薬模擬スラリーを用いてポンプによる捏和システムの要素検討を進めてきた[3]。本報告ではポンプに加温機能を追加し, 実際の推進薬スラリーの捏和を行った。推進薬スラリーの粘度を測定することでポンプによる捏和特性を取得し, さらに燃焼試験を行なうことで蠕動運動型ポンプにより捏和された推進薬の燃焼速度を示す。

### 2. 蠕動運動型ポンプ

図1に蠕動運動型ポンプの6ユニット連結時の全体図を示す。蠕動運動型ポンプは空気圧印加によるゴム膨張と軸方向繊維強化型人工筋肉(以下, 人口筋肉)による収縮を利用して腸管を模擬したポンプである。本ポンプは人工筋肉とラテックス製の閉口チューブ, そしてフランジによって構成される。人工筋肉と閉口チューブ間のチャンバに空気圧を印加すると, 四方から膨らんだ閉口チューブが流体を押し出すことで搬送を実現する。本ポンプへの空気圧印加はそれぞれ独立しており, 動作時間等を自由に変更することが可能である。また, 管路は閉口チューブで構成されており, 大きなせん断力が生じにくく, 柔軟な動作を実現可能である。

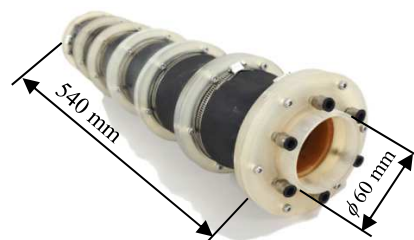


図1. 蠕動運動型ポンプ

### 3. 固体推進薬捏和実験

#### 3.1 実験概要

本実験では実際の固体推進薬の捏和を行う。蠕動運動型ポンプ2ユニットを使用し, 両端には加温装置を設置する。実験時には水平状態で交互に膨らまし, 管内で捏和を行う。

### 3.2 実験装置

図2に実験装置概要を示す。加温装置には温水(80°C)を循環させることで管内両端を加温する。本ポンプへの印加圧力は70 kPaとする。本実験で捏和する推進薬スラリ(HTPB: Al: AP: DOA:IPDI = 12: 18: 68: 1: 1: 1) は約360 gとし、AP粒子の比率は $\phi 400:\phi 200:\phi 50=60:15:25$ とする。

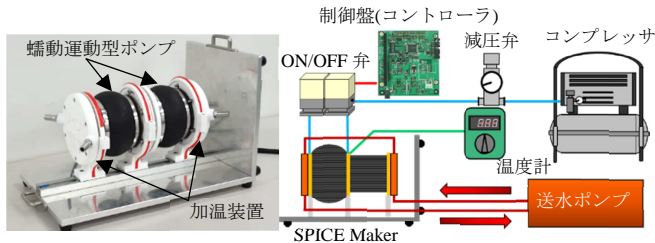


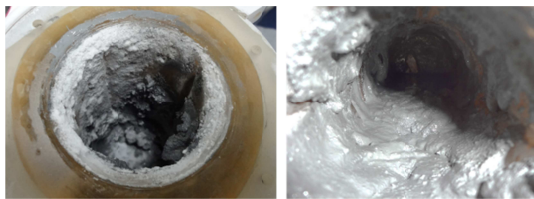
図2. 実験装置概要

### 3.3 実験手順

- (1). 蠕動運動型ポンプにHTPB, DOA, IPDIを投入し、次にAlを一度に全て投入し、予捏和を16分(1000秒)行う。
- (2). 管内を確認し、APを一度に全て投入し、捏和を行う。
- (3). 捏和を確認後、推進薬スラリを取り出して温度を60°C付近に調整して粘度を測定する(中央:3点, 端部:3点)

### 3.4 実験結果

図3に捏和後の管内の様子を示す。捏和時間16分では管内壁面に多くの白色の粉末(AP)が残留しており、捏和は不十分であると考えられる。捏和時間33分では管内で粉末が残留しておらず、蠕動運動型ポンプによる推進薬スラリの捏和に成功したと考える。



(a)16分(1000秒) (b)33分(2000秒)

図3. 捏和後の管内の様子

#### 3.4.1 粘度計測

図4に捏和後の推進薬スラリの粘度を示す。本ポンプのユニット間を中央部とし、加温装置付近を端部とする。図4より、中央部より端部の平均粘度は小さい。これは加温装置によって推進薬スラリが温められ、捏和が進んだためと考える。

本ポンプによる推進薬捏和が可能な理由として閉口チューブによる押し出しにより推進薬スラリが圧縮され、管内の流体が粉末粒子間に浸透したためと考える。

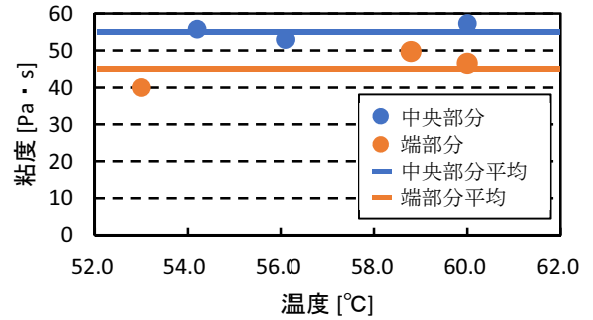


図4. 捏和後の推進薬スラリ粘度

#### 3.4.2 燃焼試験

捏和した推進薬スラリの燃焼試験を行う。燃焼室の圧力を5 MPaとし、ワイヤブレイク法を用いる。

実験結果を図5に示す。バッチ捏和での燃焼速度(5MPa)は6.51 mm/sである。本ポンプにより捏和された推進薬の燃焼速度には、ばらつきはあるが、推進薬として十分な燃焼速度が得られた。

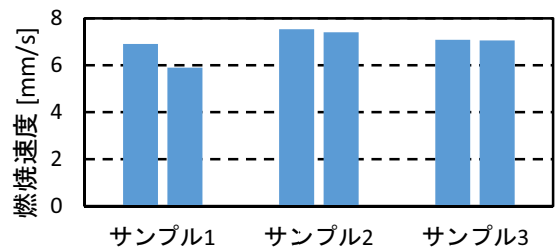


図5. 推進薬燃焼速度

### 4. 結言

- ・ 蠕動運動型ポンプにより固体推進薬スラリを捏和した。
- ・ 捏和した推進薬スラリの粘度を測定した。
- ・ 捏和し、硬化させた推進薬の燃焼速度を測定した。

### 5. 今後の展望

- ・ 蠕動運動型ポンプの操作パラメータを変化させ、推進薬スラリの捏和度と燃焼性能の依存性を調べる。
- ・ 連続的に固体推進薬の捏和を行うシステムを構築する。

### 6. 参考文献

- [1] K. Suzuki and T. Nakamura, "Development of a peristaltic pump based on bowel peristalsis using for artificial rubber muscle," 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, WeCT3.4 pp. 3085-3090
- [2] 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
- [3] Akihiro Iwasaki, Kotaro Matsumoto, Ryosuke Ban, Shun Yoshihama, Hiroto Habu and Taro Nakamura: "The Continuous Mixing Process of Composite Solid Propellant Slurry by the Artificial Muscle Actuator", The ISTS Special Issue of Transactions of JSASS Aerospace Technology Japan, The Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, 2015