固体ロケット推力制御のためのジメチルエーテルを空圧源とするジェル状推進薬供給装置の開発

北九州工業高等専門学校　生産デザイン工学科機械創造システムコース
山本　洋司

１．はじめに

近年、世界中で小型衛星が打ち上げられ、そのミッションも多様化している。これら推進系には比推力（燃費）が高い電気推進機が用いられているが、推力が小さいので迅速性が求められるミッションには不向きである。一方、固体推進薬を用いる固体ロケットは推力が高く、構造が単純で信頼性も高いが、固体推進薬は一度着火すると無くなるまで燃え続け、途中での燃焼停止や再着火が困難なので人工衛星の推力制御用としては対象外とされてきた。そこで我々研究グループでは固体推進薬をジェル状とし、オリフィスプレートを用いて燃焼の ON/OFF を可能とする燃焼制御法を提案した。これを実現させるための技術問題の一つに、燃焼室へのジェル状推進薬の供給方法がある。

そこで本研究では、宇宙空間での利用に適したジメチルエーテルを空圧源とする単純で信頼性の高いジェル状推進薬要求装置を開発し、供給方法を確立する。

２．固体推進薬の燃焼制御方法

これまで固体推進薬の燃焼の中断／再着火を行う方法として、負触媒を添加した固体推進薬の燃焼室内圧力による制御方法、非自燃推進薬への外部インパクト付加による制御方法および追加酸化剤供給による制御方法などが研究されてきた。

燃焼室内圧力による制御方法は、燃焼負触媒を添加した推進薬を用い、燃焼室圧力を減圧することで自燃領域から非自燃領域に移行させ停止を行う方法である[1)]。燃焼室内の圧力を低下させることで燃焼が停止するが、推進薬が着火源から後退しているため、再着火するためには着火装置位置まで推進薬を供給する必要がある。外部インパクト付加による制御方法では燃料成分と酸化剤成分の配合を低圧力下では自燃しない割合とし、アーク放電やレーザー照射の外部インパクトを与えることにより燃焼制御を行う方法である[2-4)]。外部熱源の作動により燃焼の ON/OFF 制御が可能であるが、別途外部電源を搭載する必要があること、作動中は外部電源を与え続けなければならないこと、固体推進薬は理想混合比ではないため、理論値より比推力が低下するなどの問題がある。追加酸化剤供給による制御方法は非自燃推進薬に外部から追加酸化剤を供給し、その供給流量によって燃料の ON/OFF や推力制御を行う方法である[5)]。不足分の酸化剤を供給しながら燃焼するので理想状態での燃焼が可能なり、着火源も電熱線などでよいため大電力装置も必要がないが、これも燃焼室内圧力による制御方法と同様に着火装置位置まで推進薬を供給する必要がある。

そこで我々研究グループでは推進薬をジェル状化し、オリフィスプレートを介して燃焼室に送りながら燃焼させ、供給を止めるとオリフィスプレートの消炎効果により燃焼が停止し、再度燃焼室にジェル状推進薬を送ることで再着火させることのできる新たな燃焼制御方法を考

案した[6]。図 1 に示すように着火–燃焼–停止のサイクルを繰り返すが、この方式の核となる項目にジェル状推進薬の供給制御装置の開発がある。推進薬の燃焼時に燃焼速度に合わせて燃焼室に推進薬を供給し、オリフィスプレート上面に維持する必要がある。供給機構の動力源にサーボモータ等を使えば制御は行いやすいが、機構が複雑になり、機構が単純で信頼性が高い固体ロケットの特徴が失われる。空気圧によるピストン–シリンダ機構を用いた供給方法が単純で望ましいが、圧力発生源となるコンプレッサを搭載するのはペイロードの関係からも好ましくない。そこで、空圧源としてジメチルエーテル（DME : CH_3OCH_3）に着目した。DME は飽和蒸気圧が 0.6MPa と低く液化しやすいため、スプレーの噴射剤として広く用いられている。また、凝固点が−142℃と低いので、宇宙空間においても凍ることがない。液化して宇宙空間に持ち込めるので場所も取らず、飽和蒸気圧が 0.6MPa なので，アクチュエータの空圧源としても最適である．また、そのままコールドガスとして噴射させて推力を得ることや、化学推進機および電気推進機の推進剤として用いることも可能である。

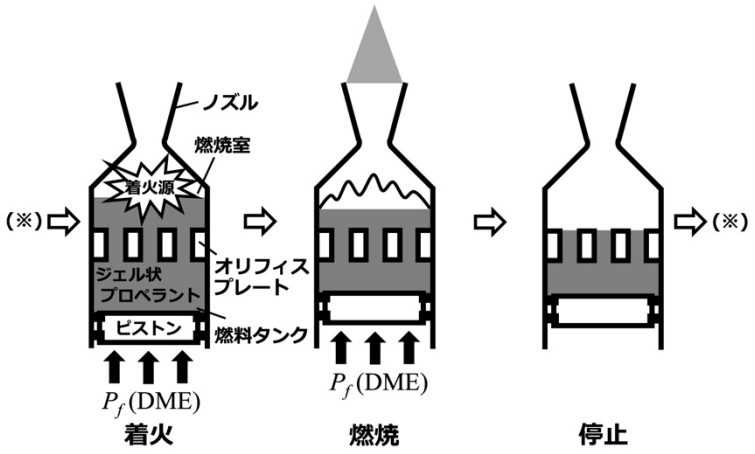

図 1　固体ロケット燃焼 ON/OFF サイクル

3．推進薬供給装置の開発

図 2 にジェル状推進薬供給装置の概略図を示す。空圧源である DME はスプレー缶を用いた。レギュレータにて減圧し、防爆用 3 ポート電磁バルブにより DME 供給の ON/OFF を行った。DME はスプレー缶内では液体として貯蔵されているが、バルブを開放することで気化し、気体で配管内に供給される。しかし、使用頻度が高くなると気化熱によりスプレー缶が冷却され、液体のまま配管に流れ込む（図 2）。また、無重力の宇宙空間では地上のように気化 DME が常にタンクの出口側にあるとは限らず、気体と液体が混合分散して配管内に流れる可能性がある。そこで、スプレー缶および配管をヒーターで保温することで、レギュレータ手前までで必ず気化するようにした。液化 DME は樹脂を膨潤させるが、フッ素樹脂はその影響を受けにくいとされている[7]。配管の容易さも考慮し軟質フッ素樹脂チューブを用いていたが、数時間液化 DME にさらされると軟化し破損した。そこで、硬質フッ素樹脂に変更したところ、長時間液化 DME さらされても破損しないことを確認した。しかし、実機に用いる場合は配管にはステンレスなどの金属を用いることが望ましい。

本研究で用いるジェル状推進薬は両末端水酸基ポリブタジエン（HTPB）／過塩素酸アンモニウム（AP）であるが、粘着性があるため、ピストン–シリンダ機構のピストンにはポリエチレン製のスクレーパ付きプランジャを、シリンダにはステンレス製のシリンジを改造して用いた。また、推進薬の温度調節ができるよう、シリンダにヒータを取り付けた。オリフィスの消炎効果はこれまでの消炎実験結果から厚さはあまり影響せず、孔直径に依存していることがわかっている。今回用いたジェル状推進薬は厚さが 5 mm 以上、孔直径が 1.8 mm 以下のオリフィスであれば確実に消炎するので、材質が SUS303 製、厚さ 5 mm、直径 1.8 mm の孔が 16 個配置されているオリフィスを使用した（図 3)。オリフィス上部には推進機の燃焼室を模したパイプを取り付け、供給の観察ができるよう一部をガラス製としている。ピストン–シリンダ機構、オリフィスおよび上部パイプが一体となったものを以降本体と呼ぶ。

実験はシリンダにジェル状推進薬を充填した本体を 300 mm 角の立方体の真空容器内に設置し、真空ポンプにより真空にする。シリンダに取り付けたヒータにより推進薬を所定の温度にする。DME の供給圧力はレギュレータで調整する。電磁バルブを切り替えることでシリンダ内に DME を供給することでピストンを押し、オリフィスを介して推進薬を送り込む。ビデオ撮影により供給の様子の観察や供給速度を測定する。

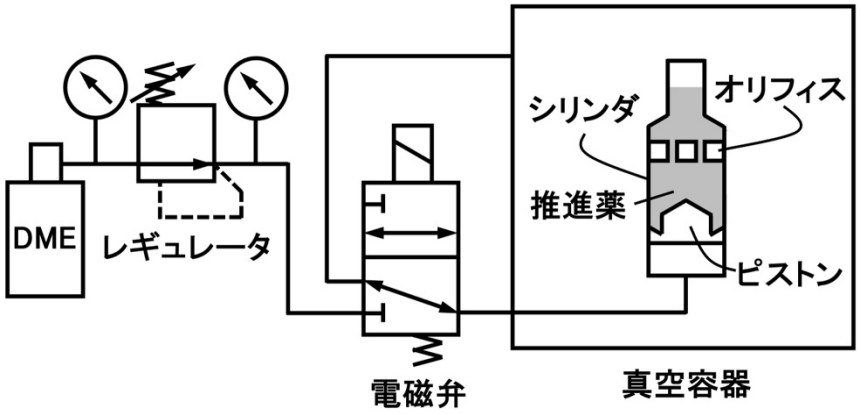

図 2　ジェル状推進薬供給装置概略図

図 2　配管内の液化 DME

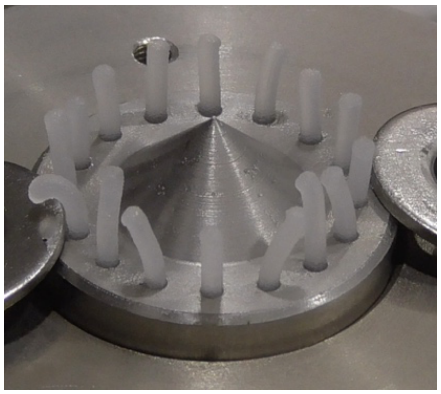

図 3　オリフィス
（厚さ 5 mm、孔直径 1.8 mm、孔数 16 個）

4. 実験結果

供給装置動作確認のため、大気圧下において推進薬供給実験を行ったので、その結果を図 4 に示す。また、表 1 に回転粘度計により測定したジェル状推進薬の粘度と温度の関係を示す。ジェル状推進薬の温度が高いほど供給速度は増加するが、特に 40℃を超えると急激に速くなる。また、40℃付近まではピストンへの供給圧力の違いによる供給速度の差は殆どないが、40 度を超えると差が大きくなる。このジェル状推進薬は製作から 6 ヶ月経過しても粘度が変わらず、実験結果は製作直後の推進薬とほぼ変わらなかった。

次に真空下において供給実験を行った。ジェル状推進薬の燃焼時の後退速度（燃焼速度）と供給速度が釣り合う必要がある。推進薬の後退速度は 0.8 mm/s 程度なので、DME 供給圧力と推進薬温度を変更し供給速度が 0.8 mm/s 程度になる条件を求めた。その結果を表 1 に示す。供給圧力 0.2 MPa、推進薬温度 40℃の場合は推進薬がスムーズに供給され、ガラス管に隙間なく充填されるが、供給圧力 0.5 MPa、推進薬温度 24℃の場合は供給速度のばらつきが大きい上、ガラス管内に隙間ができ、密に充填されないことが多かった。推進薬の温度を高くすることで粘度を低下させて流動性を向上させる必要があるが、あまり高くしすぎると供給速度の調整が難しくなることと、推進薬が変質してしまうので、本研究で用いる HTPB/AP のジェル状推進薬の最適な供給条件は、ピストン供給圧力 0.2 MPa、推進薬温度 40℃である。

真空下においては大気圧下に比べ供給速度は供給圧力、推進薬温度に対して非常に敏感であることがわかった。今後は制御回路付きのレギュレータによる供給圧力調節と温調器による推進薬温度調整を行うこととする。また、推進薬を燃焼させた場合、本体が高温度となることが予想されるので、シリンダと燃焼室の断熱構造も検討する必要がある。

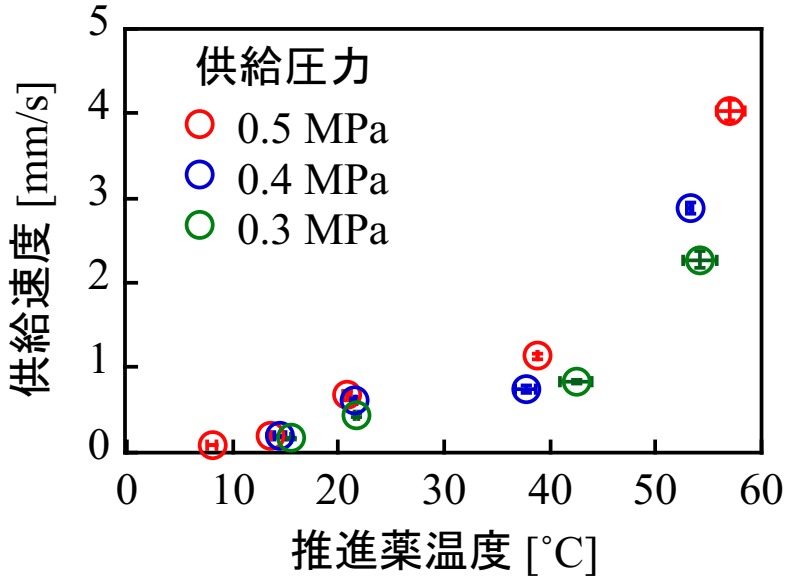

図 4　大気圧下における推進薬温度における供給速度

表 1　ジェル状推進薬の温度による粘度

推進薬温度 [℃]	粘度 [Pa･s]
25.4	1390
41.0	670

表 2　真空下における供給圧力、推進薬温度と供給速度

供給圧力 [MPa]	推進薬温度 [℃]	供給速度 [mm/s]
0.5	24	0.91
0.2	40	0.81

5. まとめ

オリフィスを用いた固体推進薬の燃焼制御方法を確立させるため、DME を空圧源としたピストン–シリンダ機構によるジェル状推進薬供給装置を開発し、実証実験を行った。その結果、DME が液体のまま配管内に流れ込む問題は、DME スプレー缶および配管をヒーターで保温することで解消することができた。また、ピストンへの DME の供給圧力を 0.2 MPa、推進薬温度を 40℃と設定することで、ジェル状推進薬の燃焼速度 0.8 mm/s と同じ供給速度にすることができた。以上の結果より、DME を空圧源とするジェル状推進薬の供給が可能であることを実証した。今後は、圧力や温度制御の精度を高めることで、供給速度の制御精度を高めることとする。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、公益財団法人 天野工業技術研究所から多大なご支援を頂きました。ここに記して謝意を示します。

参考文献

1) Tachibana, T., and Kuribayashi, H., “A Model of Transient Combustion of Solid-Propellants,” TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES, Vol. 34, 1991, pp. 131-138.
2) Tachibana, T., and Kimura, I., “DC Arc Discharge Ignition and Combustion Control of Solid Propellants,” Journal of Propulsion and Power, Vol. 4, No. 1, 1988, pp. 41−46.
3) Kakami, A., Hiyamizu, R., Shuzenji, K., and Tachibana, T., “Laser-Assisted Combustion of Solid Propellants at Low Pressure,” Journal of Propulsion and Power, Vol. 24, No. 6, 2008, pp. 1355−1360.

4) Duan, B., Zhang, H., Wu, L., Hua, Z., Bao, Z., Guo, N., Ye Y., and Shen, R., “Controllable Combustion Behaviors of the Laser-Controlled Solid Propellant,” Defence Technology, Vol. 18, No. 1, 2002, pp. 38−48.
5) Fukuda, K., Yamamoto, Y., and Tachibana, T., “Strand Test Characteristics of Non-Self-Combustible Solid Propellants in Burning Control with N_2O Supply,” Science and Technology of Energetic Materials, Vol. 80, No. 5, 2019, pp. 179−182.
6) Yamamoto, Y., and Tachibana, T., “Microthrusters’ Combustion Control Using Jellied Propellant Flowing Through an Orifice Plate,” Journal of Propulsion and Power, Vol. 39, No. 2, 2023, pp. 294−296.
7) 橋本欣郎, 松澤充, 原澤延幸, 渡邉祐司, “ジメチルエーテル (DME) とそのシール材,” 日本ゴム協会誌, Vol. 78, No. 3, 2005, pp. 111-118.