

ハイブリッドロケットの爆風圧力伝播特性についての研究  
 ハイブリッドロケット数理モデルの妥当性の検証  
 Study on the Blast Pressure Propagation Characteristics of Hybrid Rockets  
 Verification of the Validity of a Mathematical Model for Hybrid Rockets

○北原匠真<sup>1</sup>, 高橋晶世<sup>2</sup>

\*Shoma Kitahara<sup>1</sup>, Akiyo Takahashi<sup>2</sup>

Hybrid rockets are currently being researched, and in order to put them into practical use, it is necessary to evaluate the safety of the fuels used. Therefore, in this study, we use a mathematical model to analyze the safety distances for various fuel-oxygen combinations that have been investigated in recent hybrid rocket research and development. In addition to the results obtained in previous studies, we also analyze new experimental data and verify the mathematical model by comparing its output with the experimental results.

1. 研究背景

ハイブリッドロケットエンジンは従来の固体ロケットや液体ロケットに比べて高い安全性を持つとされているが、事故によって固体燃料が粉じん化し燃焼を起こす場合を考慮すると、安全性を定量的に評価する必要がある。先行研究<sup>[1]</sup>では数理モデルを用いて爆風に対する保安距離の評価が行われ、複数の推進薬の組合せに適用されたが、実験による検証は限られていた。Figure 1 に先行研究<sup>[1]</sup>による数理モデルの構成を示す。

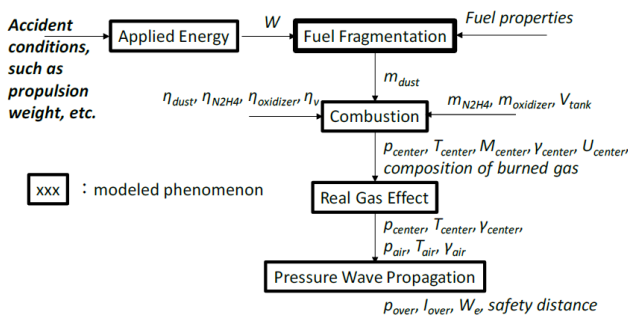


Figure 1. Mathematical Model<sup>[1]</sup>

そこで、気体酸化剤雰囲気下や液体酸化剤を用いた破碎実験に基づき爆風圧力伝播特性の解析が行われたものの、数理モデルとの間には乖離が確認され、その要因は十分に特定されていない<sup>[2]</sup>。このような背景を受け、本研究ではモデルと実験結果の差異の原因解明を目的とし、さらなる安全評価方法の精緻化に取り組む。

2. 研究目的

本研究では、ハイブリッドロケットの研究開発に多く採用されているワックス系燃料と酸素の組合せに対する保安距離の評価を行う。実験データを基に、実際の実験を再現した様々な条件下で数値解析を実施し、

過去の結果<sup>[2]</sup>においてモデルと乖離が生じた原因や、今年度の結果について評価モデルの妥当性を検証する。

3. 再現対象の実験

本研究では、主として二種類の実験の再現を行う。第一に、気体酸化剤雰囲気下における破碎実験<sup>[3]</sup>では、マイクロクリスタリンワックスが気体酸化剤といかなる挙動を示し、その際に圧力がどのように伝播するかが着目された。第二に、液体酸化剤を用いた破碎実験<sup>[4]</sup>では、マイクロクリスタリンワックスと液体酸素の組合せにおける圧力伝播特性が明らかにされた。本紙では液体酸素を用いた実験の再現結果を示す。

4. 印加エネルギーおよび燃料破碎

数理モデルで用いる印加エネルギーは、今回、火薬・爆薬によるエネルギーであり、(1)式に示されるようにTNT換算を意味するRE係数を用いて評価される。この方法により、どの程度のエネルギーが系に加わるかを見積もることができる。

$$W = RE \times m_{\text{explosive}} \times 4184 \quad (1)$$

ここで、RE[-]は相対効果係数(TNT比)、 $m_{\text{explosive}}[\text{g}]$ は爆薬質量である。この式を用いると、液体酸素実験の印加エネルギーは383.7 kJである。

燃料へのエネルギー印加により発生した粉じん質量を、Figure 2 から導かれた破碎モデル(7)式<sup>[5]</sup>により求める。なお、代表長 500 μm 以下を粉じんとみなす。

$$\Pi_1 = 3 \times 10^{-6} \times \Pi_2^{1.6633} \quad (7)$$

ここで $\Pi_1$ は破碎前の質量と発生した粉じんの質量比を、 $\Pi_2$ は印加エネルギーと、破碎までに供試体が吸収したエネルギーの比を示す。この式によれば液体酸素実験におけるマイクロクリスタリンワックスの粉じん質量

1 : 日大理工・学部・航宇 2 : 日大理工・教員・航宇

は 5820 g であるが、これでは破砕前の質量を超過してしまうので、破砕前の供試体がすべて粉じんになったとする。ここでは 20 g である。

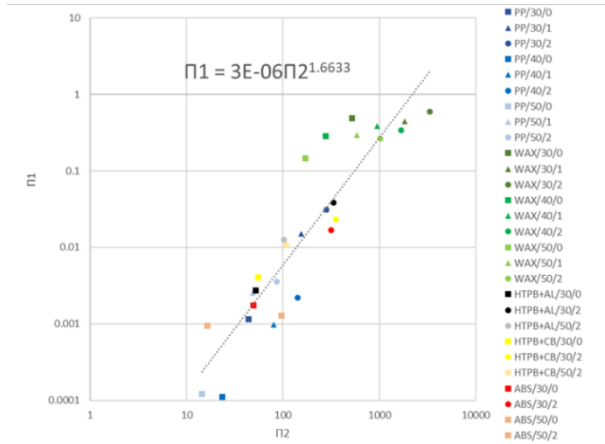


Figure 2. Fracture Model (Approximation)<sup>[5]</sup>

### 5. 燃焼および圧力伝播のモデリング

発生した粉じんが液体酸素の気化ガスと混合・燃焼して、爆風発生の源となる高温高压の燃焼ガスを生成すると考える。マイクロクリスタリンワックス (C<sub>44</sub>H<sub>90</sub>) 20 g と液体酸素 30 g が、O/F1.5、密度 210 kg/m<sup>3</sup>にて定容定エネルギーで燃焼したとする。NASA-CEA による化学平衡計算を用いると、燃焼圧は 313.2 MPa、燃焼温度は 3123.8 K である。

爆風に対する保安距離を評価するために、二流体球対称一次元非定常圧縮性流体力学に基づく四つの保存則を解くことで、圧力伝播の計算を行う。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial(r^2 \rho u_r)}{\partial r} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho u_r}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial(r^2 \rho u_r u_r)}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial r} + Loss_{mom} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial(r^2 \rho H u_r)}{\partial r} = Loss_{heat} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho Y}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial(r^2 \rho Y u_r)}{\partial r} = 0 \quad (6)$$

ここで、 $\rho$ [kg/m<sup>3</sup>]は混合気密度、 $r$ [m]は半径方向の距離、 $u_r$ [m/s]は半径方向の混合気の数値、 $p$ [Pa]は混合気圧力、 $E$ [J/kg]は混合気的全エネルギー、 $H$ [J/kg]は混合気的全エンタルピー、 $Loss_{mom}$  は地面効果による運動量損失、 $Loss_{heat}$  は同エネルギー損失を示す。

液体酸素実験における圧力分布の時間変化を Figure 3 に示す。圧力不連続面および負圧が発生していることから、爆風を再現できていることがわかる。

ただし現段階では、Figure 3 の結果を実験結果と比較することは不適切である。実験で取得された圧力値

は地面の影響を受けていないため、 $Loss$  項を削除した形で計算を実行する必要がある。この圧力計算を適切に実行できれば、圧力伝播に伴うピーク過圧値（圧力不連続面の最大値）の減少により、保安距離を評価できるようになる。

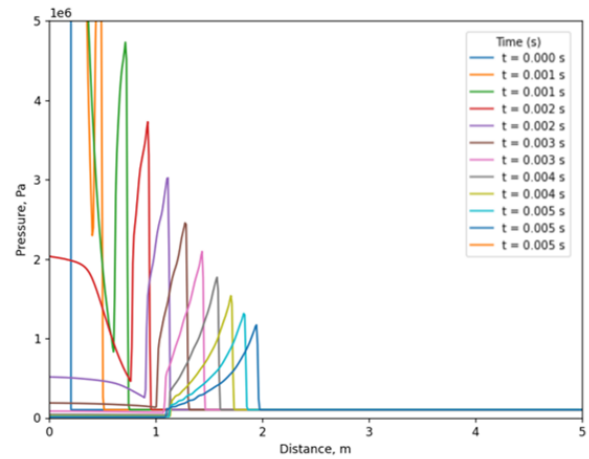


Figure 3. Pressure Propagation Characteristics

### 6. 結論

数値モデルを元に、先行研究の圧力伝播特性を解析する方法に則り、実際に解析を行った。特定条件下での圧力伝播特性を示したが、要修正点が明らかになった。今後は、まず必要な修正を行うほか、他の実験条件下で解析を実施・比較し、数値モデルの妥当性について検証する。

### 参考文献

- [1] Akiyo Takahashi et al.: “Evaluation of Safety Distance for Blast of Hybrid Rocket Propellants”, AIAA 2019-3917, 2019.
- [2] 鈴木祥央: 「マイクロクリスタリンワックスと酸素を用いた破砕時の爆風圧力伝播特性についての研究」, 日本大学理工学部卒業論文, 2025.
- [3] Akiyo Takahashi et al.: “ASSESSING FUEL FRAGMENTATION IN AN OXIDIZING ATMOSPHERE FOR HYBRID ROCKET PROPELLANT SAFETY COMPREHENSION”, Int. Jour. of Energetic Materials and Chemical Propulsion, Vol.23, No.1, pp27-37, 2024.
- [4] 新國航希: 「ハイブリッドロケット推進薬の安全評価推進薬破砕の圧力伝播特性」, 日本大学理工学部卒業論文, 2025.
- [5] 品田千羽: 「ハイブリッドロケット固体燃料の安全評価の安全評価のための破砕モデル作成」, 日本大学理工学部卒業論文, 2025.