

K-43

ハイブリッドロケットエンジンの固体燃料の安全評価に関する研究  
 固体燃料の粉じんにおける爆発下限濃度の予測  
 Study on Safety Evaluation of Solid Fuels for Hybrid Rocket Engines  
 Prediction of lower explosion limits for solid fuel dust

○藤野凌<sup>1</sup>, 高橋晶世<sup>2</sup>  
 Ryo Fujino<sup>1</sup>, Akiyo Takahashi<sup>2</sup>

Dust generated from solid fuel used in hybrid rockets can cause explosions. In order to evaluate this safety issue, calculations were made to predict the range of flammable concentrations. The time required for the dust to reach pyrolysis temperature at each position from the heat source was investigated.

1. 研究背景と目的

ハイブリッドロケットとは固体燃料と液体酸化剤で相の異なる推進剤を搭載したロケットである。そして燃料と酸化剤は互いに親和性がなく、混合しても爆発する危険性が低い。そのため他の化学ロケットと比較して安全性が高いことがメリットとしてあげられている。しかし実際はハイブリッドロケット打ち上げの際に必要な安全評価基準が定まっていない。また固体燃料から粉じんが発生することで、空気中の粉じんが次々と燃焼し爆発が起こる可能性があるため、安全性にも大きく影響することが分かる。

先行研究ではマイクロクリスタリンワックスを供試体とし、粉じんサイズをパラメータとして、爆発下限濃度測定試験を実施し、可燃粉じん粒度と粉じん濃度を予測できるような簡易的なモデルの検討を行った。結果粒径 $212,53\mu\text{m}$ のWAX粉じんについて爆発下限を測定した。また数値解析に関しては各条件における気化温度到達時間の傾向を確認することができ気化温度到達時間から粉じん着火の成否を予測することが可能であったが、精度の高い物とはならなかった。

そこで本研究では先行研究よりもより精度の高いシミュレーションを作成し可燃濃度範囲を予測できるようにすることが目的である。そのために先行研究のモデルをより現実的なモデルに変更する。

2. 解析モデル

先行研究では粉じんが中心にその周囲を熱源が囲むように位置しているが、実際そのような状況は考えずらい。そこで本研究では先行研究とは逆に熱源が中心に、その周囲を粉じんが囲むように位置づけた。そして周囲に位置する無数の粉じんの内の一に着目し、気化温度到達時間の長短を確認する。

ここで熱源は参考資料より<sup>[1]</sup>  $2000\text{K}$ 、融解した状態からのシミュレーションのため空気温度は $374\text{K}$ 、熱源から粉じんの距離は数密度を用いた計算より $1.7\text{mm}$ である。

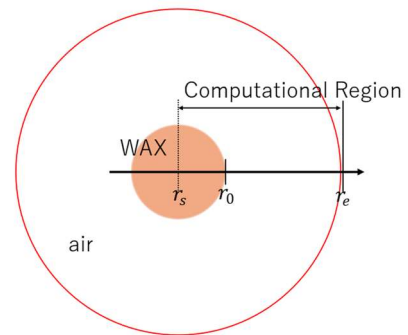


Figure1. Models in previous studies

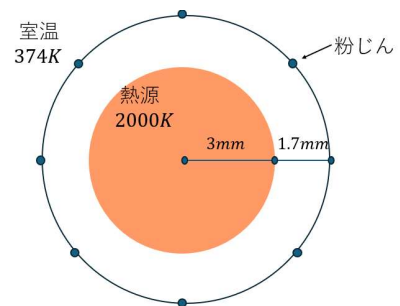


Figure2. Model in this study

3. 熱源

熱源は放電により生じるものと想定した。また熱源の温度を $2000\text{K}$ と想定したがこれが妥当であるか確かめる必要がある。そこで熱源の仕様による放電出力から求められる熱エネルギーと、空気特性や熱源の半径のように設定した各条件から求められる熱エネルギーを比較した結果妥当な数値であることが確認できた。そのため熱源は $2000\text{K}$ 、熱源の半径は $3\text{mm}$ と決定した。

1:日大理工・学部・航空 2:日大理工・教員・航空

Table 1. Specifications for Blowing Dust Explosion Tester

放電出力	15 kV, 20 mA
放電開始時間	0.1 ~ 0.5 Sec.
電極間隔	4 ~ 6 mm
爆発筒内容積	約1200 cm <sup>3</sup>
エアータンク容積	約1300 cm <sup>3</sup>
本体電源	AC 100 V / 50 Hz / 5 A
本体重量	35 Kg
本体寸法	幅610mm×奥行360mm×高さ1300mm

4. 計算式

本研究では参考資料<sup>[2]</sup>より熱伝導が支配的だと想定しているため、熱伝導方程式の球対象一次元を用いる。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (1)$$

ここで熱伝導方程式の球対象一次元式(1)を $r_1 = r_{i-\frac{1}{2}}$ か

ら $r_2 = r_{i+\frac{1}{2}}$ までを体積積分し離散化する。これにより有

限体積法の式となる。有限体積法は保存則が成り立った式であるため、今回のように熱のやり取りが重要となる場合効果的な離散化方法となり以下ようになる。

$$T_i^n = \frac{4\pi\alpha\Delta t}{Vol_i} \left[ r_2^2 \frac{T_{i+1}^{n-1} - T_i^{n-1}}{\Delta r} - r_1^2 \frac{T_i^{n-1} - T_{i-1}^{n-1}}{\Delta r} \right] + T_i^{n-1} \quad (2)$$

ここで $r_1 = \frac{r_{i-1}+r_i}{2}$ ,  $r_2 = \frac{r_i+r_{i+1}}{2}$ ,  $Vol_i = \frac{4}{3}\pi(r_2^3 - r_1^3)$ である。

5. メッシュ

はじめに気化温度到達時間を調べる位置は熱源の中心から4.7mmであるが、計算領域を狭くしてしまうと熱がこもり結果に影響を与えてしまう。そこで結果に影響が出ないほど遠くまで計算を行う必要がある。しかし計算領域を長くすると計算の数が膨大になってしまうためメッシュを利用する。全長100mm、分割数100、初項を10<sup>-4</sup>と設定するとメッシュは以下ようになる。

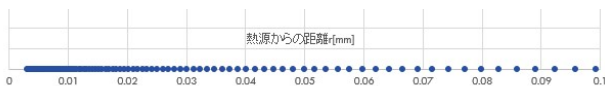


Figure 3. Unequally spaced mesh

6. 計算結果と考察

これまでの計算から WAX の熱分解温度 673K に達するまでの時間は図のようになった。また今回は比較を行えるよう、熱源からの距離4.7mm以外にも3.5mm,8.0mmにおいても温度の変化を確認した。計算より熱源から離れるほど温度の上がり方が緩やかとなり、気化温度到達時間に達する時間は遅くなる。このことからこのモデルでの計算において、熱源からの距離によって温度の上がり方に変化があり気化温度到達時間の長短で着火の成否を考察できると思われる。

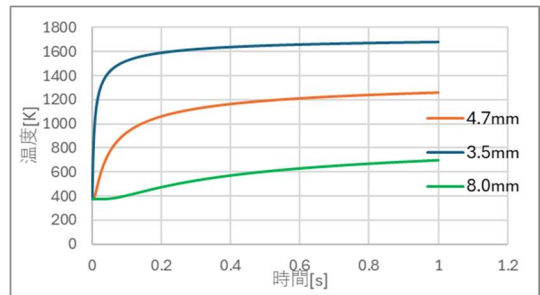


Figure 4. Variation of temperature at distance from each heat source center

Table 2. Time to reach pyrolysis temperature at each position

r[mm]	3.5	4.7	8.0
t[s]	0.0030	0.0354	0.8300

7. 結論

先行研究とは異なるモデルを用いたが、熱源からの距離の違いによる温度の変化の仕方の違いを確認することができた。そのため気化温度到達時間の長短により着火の成否を確認することができると思われるため、可燃濃度範囲を予測することができることが確認できた。

参考文献

[1]Ootani, H, Kondou, S. :”Shock wave generated at the time of ignition by electric spark”, safety engineering, 1990, pp.27-32  
 [2]Matuda,T. :” Explosion Hazard Assessment Technology for Combustible Dust”, Industrial Safety Research Institute Safety Data,1990, pp.7