

K-14

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

A study on the Safety Evaluation of Solid Fuels for Hybrid Rocket Engines Prediction of the Lower Explosion Limit of Solid Fuel Dust

○加藤享佑¹, 高橋晶世²*Kyosuke Kato¹, Akiyo Takahashi²

Dust generated from solid fuels used in hybrid rocket engines poses a potential risk of explosion. Previous studies have conducted calculations to predict the flammable concentration range and to investigate the time required for the dust to reach the pyrolysis temperature at various distances from a heat source. In the present study, these approaches were refined to improve their accuracy, and an enhanced analytical framework was developed for a more reliable safety evaluation of solid fuel dust in hybrid rocket systems.

1. 研究背景と目的

ハイブリッドロケットエンジンとは固体燃料と液体酸化剤を用いた推進剤を搭載したロケットである。固体燃料と液体酸化剤は親和性がなく、混合したときに爆発をする可能性が低く、他の推進剤を用いたロケットと比較すると安全性が高いことがメリットとして挙げられている。しかし、事故などによって固体燃料の粉じん化が起これば、空気中の粉じんが周りのエネルギー源によって着火し爆発が起こる可能性がある。そこで先行研究^[1]では、固体燃料粉じんの爆発特性実験（爆発下限濃度測定）を実施し、その実験結果である着火不着火判定を再現できるような解析を実施した。しかしながら、全ての結果の再現には至らなかった。そこで先行研究^[2]では、解析モデルをより現実的なものに近づけ、数値解析を行い、更に厳密解との比較を通して解析モデルと数値解析の妥当性を調べた。しかし、刻み幅の変更や、熱伝達に対してのふく射の影響、さらに実験動画との比較を実施していないためにモデルの妥当性が不明という課題が残っていた。

そこで本研究では、先行研究^[2]解析モデルを踏襲し、残された課題の解決を目的として数値解析を実施し、モデルの妥当性を検証する。

2. 解析モデル

これまでの先行研究^[1]では、解析モデルとして粉じんを中心とし、その周囲を熱が球状で囲うようなモデルを採用していた（Figure 1 参照）。しかし、先行研究^[2]では、その解析モデルでは加熱が過多であると考え、モデルの変更を実施した。実験の放電熱源を中心とし、その周囲を粉じんが囲うようにした（Figure 2 参照）。

本研究でも先行研究^[2]を踏襲し、熱源を中心としその周りを粉じんが囲むモデルを採用する。このモデルの中心から任意の位置の粉じんを囲む空気の温度が気化温度に到達する時間を求める。

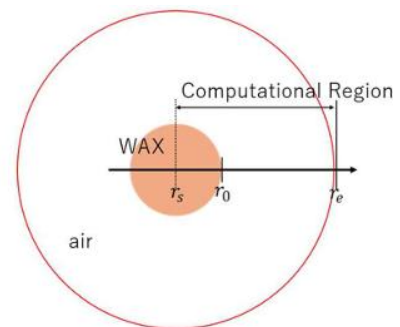


Figure 1. Model in Previous Study^[1]

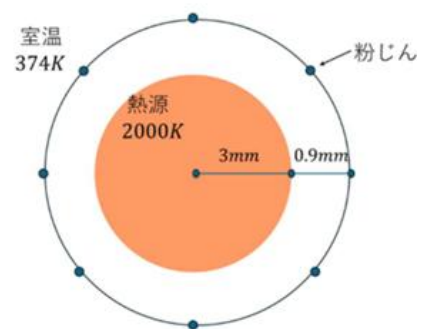


Figure 2. Model in This and Previous Study^[2]

3. 熱源

熱源の温度 2000 K が妥当かを確認する。Table 1 の放電出力、放電開始時間より放電のエネルギーは以下のようなになる。

$$Q = 15 \times 20 \times (0.1 \sim 0.5) = 30 \sim 150 [J] \quad (1)$$

1: 日大理工・学部・航宇 2: 日大理工・教員・航宇

これに対し 2000 K の半径 3 mm の熱源が持つエネルギーは 72 J であるから、これを満たす。

Table 1. Specifications for Blowing Dust Explosion Tester^[3]

放電出力	15kV, 20mA
放電開始時間	0.1-0.5s
電極間隔	4-6mm
爆発時内容積	約 1200cm ³
エアタンク容積	約 1300cm ³
本体電源	AC100V/50Hz/5A
本体重量	35kg
本体寸法	幅 610mm×奥行 360mm×高さ 1300mm

4. 計算式

本研究では、空気の昇温および空気から粉じんへの熱伝導と、熱源から粉じんへの熱ふく射を解析する。

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

$$Q_1 = A_1 \sigma \varepsilon_1 F_{12} (T_1^4 - T_2^4) \quad (3)$$

空気の昇温は熱伝導方程式の厳密解とした。熱ふく射は式(3)で表され、 A は熱源表面積、 σ はステファン・ボルツマン定数、 F は形態係数である。

5. 境界条件

今回は断熱条件としていて、気化温度到達時間を調べる位置を 3.3mm としているが、付近の一部だけを抜粋して調べてしまうと、こもった熱が結果に影響を与えてしまうことから、影響が出ないほど遠くまで計算する必要がある。そこで対数領域のメッシュを利用し、全長 100mm、分割数 100、初項を 10⁻⁴ に設定している。

6. 計算結果と考察

熱源中心から 3.3 mm の位置の粉じんが気化する温度である 673 K に到達する時間を調べた。最初に粉じんサイズによる気化温度到達時間の変化を調べた。調べるにあたって、熱伝達に対してふく射の影響がどれほどあるのかを知るために、熱伝達を考慮した場合とそうでない場合に分けて考えている。Table2 から粉じんのサイズによって気化温度到達時間が長くなる傾向が表れていることがわかる。さらに、熱伝導の無い方が気化温度到達時間が長くなっていることも見て取れ

る。さらに、Figure 3 から熱伝導ありなしに関わらず、あまり影響が出なかったことから、どちらで考えても問題ないことが見て取れる。

Table 2. Time to Reach Pyrolysis Temperature at Each Size

粉じんサイズ[μ m]	53	212	500	850
気化温度到達時間熱伝導あり[s]	0.0308	0.1284	0.3060	0.5210
気化温度到達時間熱伝導なし[s]	0.0328	0.1310	0.3090	0.5250

さらに、粉じんの大きさが大きくなるほど熱伝導ありなしのグラフが重なることも確認でき、このことからサイズが大きければそれだけふく射の影響をより受けるということも考えられた。

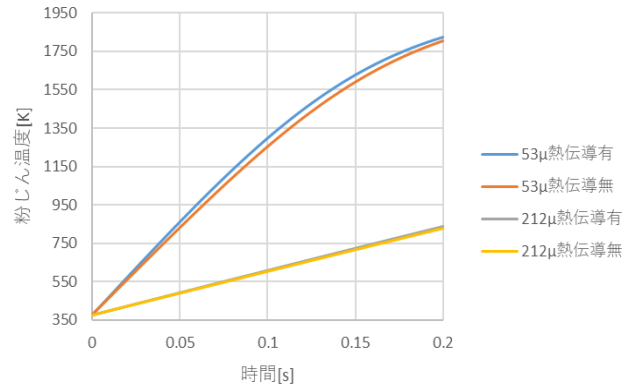


Figure 3 The temporal evolution of dust temperature

7. 結論

熱源を中心としたモデルの数値解析から、その中心からの距離に変化がないとき、気化温度到達時間は粉じんのサイズによって変化することを確認できた。さらに、どのサイズでも熱伝導の有無による変化が明確でなかった。したがって、熱伝導による加熱はふく射によるそれに比べて小さいと考えられた。

参考文献

- [1] 坪倉 慧昂：「ハイブリッドロケットエンジン用固体燃料の安全評価における粉じんの爆発下限濃度に関する研究」, 日本大学理工学部修士論文, 2024
- [2] 藤野 凌：「ハイブリッドロケットに使用される固体燃料の粉じん爆発下限濃度の予測」, 日本大学理工学部卒業論文, 2025
- [3] セイシン企業：Dust Explosion Testing Machine KH-1000