

K-17

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
 固体燃料の粉じんの着火試験による爆発下限濃度の予測

Study on the Safety Evaluation of Solid Fuel for Hybrid Rocket Engines
 Prediction of Minimum Explosible Concentrations through Ignition Tests of Solid Fuel Dust

○水田勝也¹, 高橋晶世²

*Mizuta Katsuya¹, Akiyo Takahashi²

To evaluate the safety of materials used in solid fuel for hybrid rocket engines, measurements of the minimum explosive concentration of solid fuel dust were conducted. The results revealed that for microcrystalline wax particles with a diameter of 212 μm, the lower explosive limit concentration exists within the range of 400 to 1600 g/m³.

1. 研究背景と目的

ハイブリッドロケットエンジンは液体ロケット、固体ロケットと比較し安全性が高いとされるが、現状として我が国では打ち上げに関する安全評価基準が定められていない。ハイブリッドロケットエンジンに想定されるインシデントの一つとして、事故発生時の衝撃により発生した固体燃料の粉じんと酸化剤が混合することによる粉じん爆発が挙げられるため、粉じん爆発の発生リスクの定量的評価を行えるようにすることで、安全評価基準を定める一助とする。

先行研究^[1]で坪倉はマイクロクリスタリンワックス(以下 WAX)粉じんを供試体として爆発下限濃度測定を実施し、53 μm, 212 μm, 500 μm, 850 μm の粒子径の WAX 粉じんについて爆発下限濃度を得た。先行研究^[1]で使用された WAX 粉じんの粒径範囲の表記は Table 1 に示すように改められる。

Table 1 Particle Size Ranges in Dust in Prior Research^[1]

Actual particle size	Apparent particle size
850 μm>R≥500 μm	850 μm
500 μm>R≥212 μm	500 μm
212 μm>R≥53 μm	212 μm
53 μm>R	53 μm

Figure 1 に坪倉による大気雰囲気下における 212 μm の粉じん爆発下限濃度を示す。横軸は試験回数、縦軸は粉じん濃度を示す。Go は着火、NoGo は不着火を示し、No.7 の粉じん濃度は 355 g/m³, No.8 の粉じん濃度は 310 g/m³ である。No.8 から No.12 まで 5 回連続で不着火であるから当該粉じん濃度では不着火と見なされる。従って Figure 1 においては爆発下限濃度の存在範

囲は 310~355 g/m³ であると特定される。

本研究ではより細かい爆発下限濃度及び粒度範囲の取得を目的とする。

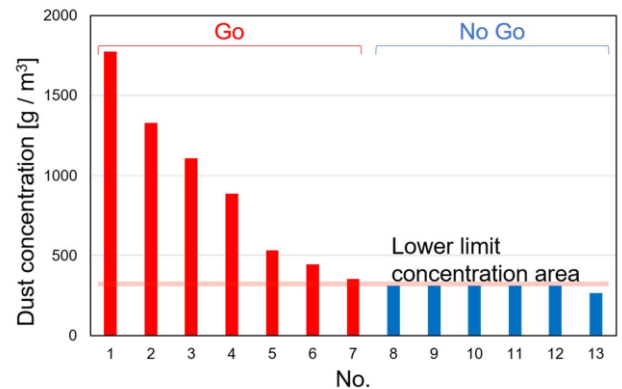


Figure 1 Test Conditions and Results for Air, 212 μm^[1]

2. 爆発下限濃度測定試験

2. 1. 試験方法

爆発下限濃度測定は JIS 8818:2002 に基づいて実施された。Figure 2 に使用した試験装置を示す。本実験で使用されたのは産業技術総合研究所所有のハートマン型粉じん爆発試験装置(セイシン企業, KH-1000)であり、0.40 kPa で写真左側のガラス製爆発筒内で粉じんを吹き上げ、所定時間後に電極から放電を行い、着火の可否を確認した。写真右が試験装置の制御盤である。

本試験では爆発筒内における粉じんの分散及び爆発火炎を観測するため、高速度カメラを用いた爆発筒内の撮影を実施した。撮像からは着火判定の他、爆発筒内の粉じんが最も均一に分散していると判断されるタイミングを定め、吹き上げ開始から均一に分散するまでの時間(分散遅れ時間)を得た。このときは放電を実施せず、分散タイミングを目視で判断した。試験当

1: 日大理工・研究生・航宇 2: 日大理工・教員・航宇

初は分散遅れ時間を元に、吹き上げから放電開始までの時間（放電遅れ時間）を設定することで分散性の影響を調査する予定だったが、これはハートマン型粉じん爆発試験装置による爆発下限濃度測定 of 趣旨と反すると判断し、それ以降は放電遅れ時間を 0.1 s に固定して試験を実施した。



Figure 2 Hartman-type Explosion Tube Apparatus

2. 2. 試験条件

これまでに爆発下限濃度測定試験を計 20 回実施した。そのうち放電を実施したのは 11 回である。供試体とした WAX 粉じんの粒径範囲の表記を Table 2 に示す。WAX は先行研究^[1]と同じものである。

Table 2 Particle Size Ranges in Dust

Actual particle size	Apparent particle size
$R \geq 300 \mu\text{m}$	300 μm
$300 \mu\text{m} > R \geq 212 \mu\text{m}$	212 μm
$212 \mu\text{m} > R \geq 125 \mu\text{m}$	125 μm

2. 3. 試験結果及び考察

放電を行わずに分散遅れ時間を評価した結果は、粒子径 300 μm の分散遅れ時間は 0.5 s、粒子径 212 μm の分散遅れ時間は 0.7 s、粒子径 125 μm の分散遅れ時間は 0.8 s であり、粉じん濃度の変化による分散遅れ時間の有意な変化は見られなかった。また粒子径が小さいほど分散遅れ時間は長くなる傾向が得られた。分散遅れ時間が長いほど分散性が悪い、すなわち局所的な粉じん濃度が高くなりやすいため、粒子径の縮小による分散性の鈍化は着火性の上昇に寄与していると考えられる。

放電を実施して着火判定を実施した結果を Table 3 に示す。ただし、Table 3 に示される粉じん濃度は供試体質量と爆発筒の容積 (0.0125 m^3) の比であり、見かけの粉じん濃度として扱われる。×は不着火、○は着火を表す。

Table 3 Test Results

No	Diameter[μm]	Dust concentration [g/m^3]	Discharge delay[s]	Ignition
1	212	400.9	0.7	×
2	212	396.6	0.7	×
3	212	402.0	0.7	×
4	212	395.3	0.3	×
5	212	400.3	-0.02	×
6	212	3998.8	-0.02	○
7	212	3997.0	0.7	○
8	212	3214.9	0.1	○
9	212	2405.0	0.1	○
10	212	1600.5	0.1	○
11	212	798.8	0.1	×

Table 3 より、爆発下限濃度範囲は 400 ~ 1600 g/m^3 であると特定された。尚、これは先行研究^[1]の粒子径 500 $\mu\text{m} > R \geq 212 \mu\text{m}$ における爆発下限濃度範囲より大幅に低い。先行研究では粒径範囲が広がったために粒子径が大きい粉じんの影響を大きく受けたことや、放電遅れ時間が異なったためと考えられる。

3. 結論

爆発下限濃度測定により粒子径と分散性の関係の傾向が確認できた。また大気雰囲気下における粒子径 212 μm の WAX 粉じんの爆発下限濃度範囲は 400 ~ 1600 g/m^3 であると特定された。今後は粒子径や粉じん濃度を変更した追加試験、特に 212 μm 以下の粒子径における詳細な爆発下限濃度範囲を得る。そのデータを元に粉じん爆発の燃焼モデルを作成し、より高精度な可燃濃度範囲の推定を可能にすることを旨とする。

4. 参考文献

[1] Tsubokura, S. et al. : “MINIMUM EXPLOSIBLE CONCENTRATION MEASUREMENTS OF HYBRID ROCKET SOLID FUEL DUST”, IJEMCP, Vol.23, No.1, pp39-51, 2024.