

法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2024-09-08

数値解析による固体ロケットモータースラッグの空隙形状と衝突痕形状の関連性

外山, 紘大 / SOTOYAMA, Kodai

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学研究科編

(巻 / Volume)

65

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

7

(発行年 / Year)

2024-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00030633>

数値解析による固体ロケットモータースラグの空隙形状と衝突痕形状の関連性

RELATIONSHIP BETWEEN VOID SHAPE AND IMPACT SCAR SHAPE OF SOLID ROCKET MOTOR SLUGS BY NUMERICAL ANALYSIS

外山 紘大

Kodai SOTOYAMA

指導教員 東出真澄

法政大学大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程

Space debris generated by the combustion of solid rocket motor fuel has voids inside due to combustion gases. Through hypervelocity impacts experiments and numerical analysis, we are investigating the impact scar shape and penetration depth of slag depending on the arrangement of the voids.

Key Words : Space Debris, Slag, Voids

1. 緒言

スペースデブリは年々増加しており、衛星打上げ頻度の高い地球低高度軌道に、特に多く存在している。デブリは超高速で衝突するため、運用中の宇宙構造物に衝突すると甚大な被害を与え得る。直径数 mm の微小デブリであっても、衝突箇所によってはミッション遂行を妨げる損傷となる。低高度軌道に存在する代表的な微小デブリには、流星物質、宇宙機へのデブリ衝突で生じたイジェクタ、固体ロケットモータのスラグ等がある¹⁾。本研究では固体ロケットモータのスラグに着目した。

一般的な固体ロケットモータには、燃焼を安定させるため、燃料にアルミ粉末が含まれている。これが燃焼の過程で酸化アルミとなり、宇宙空間に放出されることが知られている。定常燃焼で放出される酸化アルミは直径数 μm の非常に微小な粒子で、宇宙機へ衝突した際の損傷リスクは高くない。しかしながら、燃焼末期には数 mm サイズの酸化アルミが放出される場合があることがわかっている²⁾。ESA のデブリ環境モデル MASTER に倣い、本研究では、燃焼末期に生成される後者をスラグ (SRM) と呼ぶ。スラグは空隙を有していることが、固体ロケットモータの地上燃焼試験によってわかっている (図 1)。この空隙は、燃焼終了時に熔融アルミナ内に溶け込んでいる燃焼ガスが膨張することで生成されると考えられている。現在 JAXA では、スラグを減らす固体ロケットモータの研究も進められている³⁾。

微小デブリ内部に空隙が含まれる場合に宇宙機に生じ

る損傷については、未だ十分に調べられていない。過去に、球殻形状の酸化アルミ飛翔体がアルミ合金板に衝突した場合に生じる衝突痕形状について、数値解析によって調べている⁴⁾。その結果、衝突速度 15 km/s 程度においては、空隙率に関わらず、衝突エネルギーと衝突痕体積が比例するが、衝突速度 2 km/s では、空隙率が大きいと、衝突痕体積が減少する傾向が見られた。このため、本研究では、衝突速度 2 km/s の SRM スラグ試験結果と解析結果の比較を行い、衝突痕体積とスラグの空隙率について着目した。

本研究の目的は、飛翔体内部の空隙分布が衝突痕形状に与える影響について調べることである。本研究では、JAXA で実施した小型固体ロケットモータの地上燃焼試験で回収したスラグ³⁾から直径約 1 mm で空隙率を有する球形状の粒を用いて、九州工業大学にて高速衝突実験を実施した。その結果と数値解析を比較する。更に、スラグ内部の空隙形状を変化させた数値解析を行った。

2. 超高速衝突試験

(1) 実験したスラグ

小型固体ロケットモータの低真空燃焼試験で、モーターケース内よりスラグを回収した。回収したスラグの中から、球形状に近く、直径 1 mm 程度のものを衝突試験サンプルとして選んだ (図 2)。本スラグの重量は 0.7 mg で、代表径は 1.0 mm である。密度 3.95 g/cm³ の直径 1 mm 球と比較して空隙率を算出すると、空隙率は 59.2% とな

った。

(2) 衝突試験

本スラグは脆く、加速中に壊れてしまう可能性が高いため、九州工業大学でリバーインパクト法を使った実衝突試験を実施した⁵⁾。装置概要を図3に示す。構造物を模擬したアルミ円柱(図4)を二段式軽ガス銃で加速する。図4(b)に示すように、円柱の片側は凹形状に加工されており、この底部にスラグを衝突させる。図3の Impact Position に、図5に示すレール状に設置した発泡スチレン前方に供試体である SRM スラグを固定しておく。Launch Tube 出口にはガイドレールが接続されている。二段式軽ガス銃によって加速された円柱は、レールの中を通過する。レールによって円柱の姿勢をコントロールし、スラグと衝突させる。Impact Position より下流側では、ガイドレールの内径は緩やかに小さくなっており、円柱は摩擦によって減速される。最終的に、チャンバ内に発泡率の異なるスチレンシートの積層物によって、円柱は軟回収される。本試験では速度計測にピックアップコイルは使用せず、Impact Position 直後に設置されたワイヤーによって速度計測を行った。

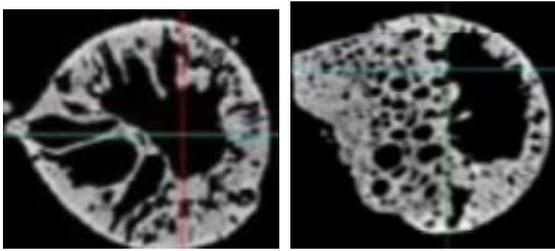


図1 スラグ内部³⁾



(a) ロケットモータの内部 (b) SRM スラグ

図2 衝突実験で使用された SRM スラグ

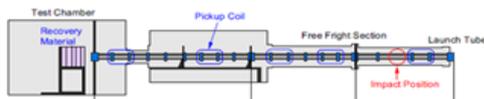
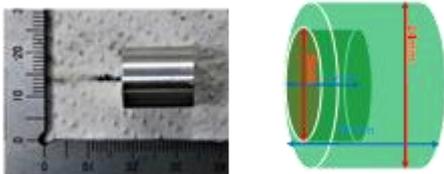


図3 リバーインパクト試験⁵⁾



(a) 外側 (b) 構図

図4 アルミ円柱

(3) 試験結果

リバーインパクト法の実験にて回収されたアルミ円柱を図6に示す。青丸は衝突痕を示している。衝突速度は2.13 km/sであった。衝突痕をX線CTで観察した結果を図7に示す。衝突痕は、中央部分が盛り上がった形状をしていた。衝突痕直径は1.40 mmで、衝突痕深さは最大0.58 mm、最小0.28 mmと、0.3mmほどの違いが見られた。

3. Lagrange 法による数値解析

(1) 解析モデル

数値解析には ANSYS AUTODYN ver.2022R2 を用いた。リバーインパクト法の実験を再現するために、作製したモデルを図8に示す。ソルバーは3D ラグランジェの1/4対称を使用した。スラグは、中央に空隙が集中している酸化アルミの球殻を仮定した。状態方程式はPolynomial、構成則と破壊則はJohnson Holmquistを適用し、最大引張強度は29 MPaとした。アルミ円柱は厚さ2 mmの板でモデル化し、状態方程式はTillotson、構成則はStainberg Guinan、破壊則はPlastic Strainを適用し、破壊ひずみは0.4とした。また、解析ではスラグの方を加速して衝突させた。



(a) 側面 (b) 正面、上面

図5 スラグ固定



図6 アルミ円柱のクレーター⁶⁾

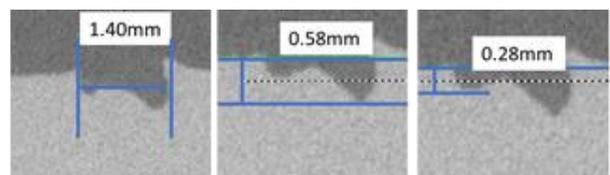


図7 アルミ円柱のX線CT衝突痕写真⁶⁾

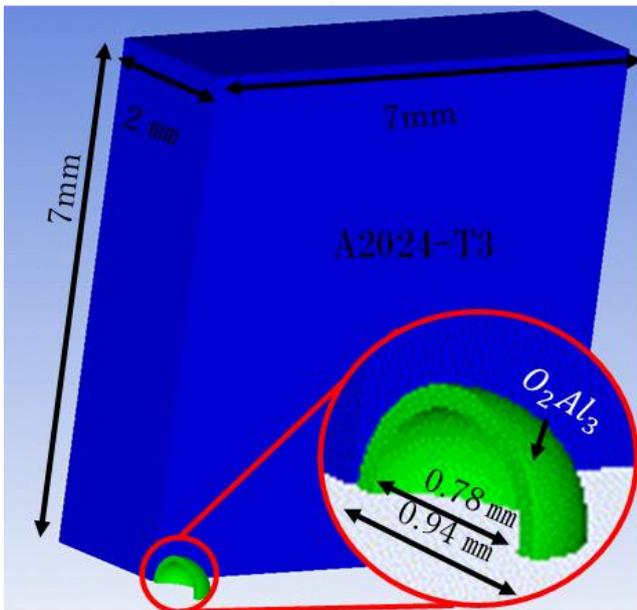


図 8 数値解析モデル

表 1 解析条件

| スラグ形状 | 球殻 | 中実 |
|----------|------|-----|
| 空隙 | あり | なし |
| 直径[mm] | 0.94 | |
| 重量[mg] | 0.7 | 1.7 |
| 速度[km/s] | 2.13 | |

(2) 解析結果と考察

a) 結果

解析結果を図 9 に示す。緑は弾性域、水色は塑性域、赤は破壊領域である。矢印は X 線 CT から測定した実験値を示す。衝突痕直径は実験と解析がおおよそ一致した。衝突痕深さも、実験値の範囲が広いが、おおよそ一致していると言える。中央の盛り上がりについても、実験値とおおよそ一致した。

b) 中実モデルと比較

空隙の影響について考察するために、スラグを中実にした解析を実施した。解析条件を表 1 に示す。中実スラグの解析では、中央の盛り上がりは見られなかった。貫入中の様子を図 10 に示す。中実の場合は、貫入面が一様に変形しているが、球殻の場合、空隙部分に圧縮力が加わらないため、アルミ板が球殻内部に入り込むように変形していることがわかる。

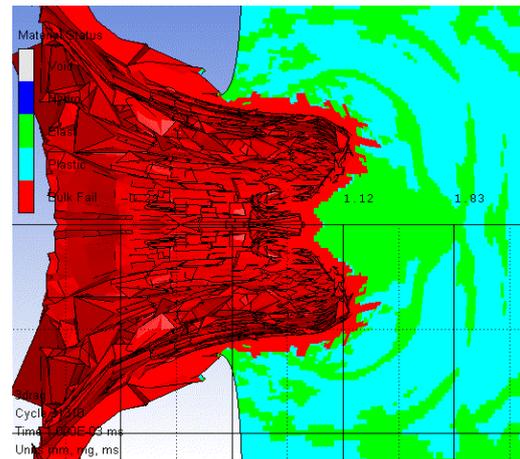
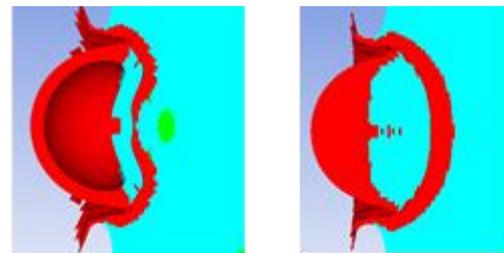


図 9 数値解析結果



(a)球殻モデル (b)中実モデル

図 10 材料状態図比較

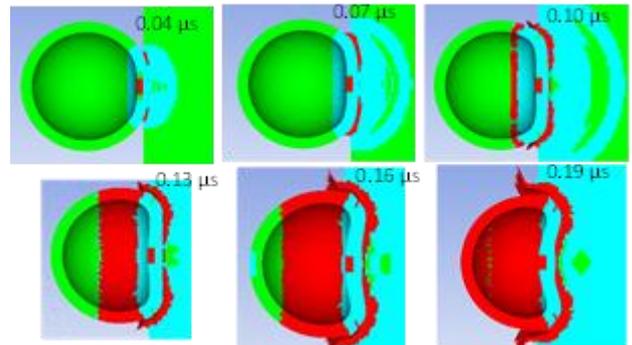


図 11 球殻モデルの状態図変化

球殻について、衝突から 0.04~0.10 μs までの材料状態図を図 11 に示す。衝突してから 0.1 μs までは、球殻の陥入に伴って外側に破壊領域が広がった。0.13 μs 以降はアルミ内部の破壊領域が面内方向に繋がり、中央部の盛り上がりが発生していた。これが、アルミ板にリング状の凹みが生じた原因と考えられる。

c) 空隙分割モデルの解析

空隙を 2 分割し、形状の影響を評価した。空隙を衝突軸に対して平行方向に分割したモデルと、垂直方向に分割したモデルを作製した (図 12)。仕切りを製作したため、3 章のモデルよりも球殻厚さが減少している。解析結果を図 13 に示す。空隙を分割したモデルの衝突痕深さは、分割前よりも浅くなった。これは球殻の厚さが薄くなった影響と考えられる。また、空隙分割モデルでは、中央の盛り上がり部分の内側に、凹部が見られた。

空隙が衝突軸に平行に分布する場合には、軸上に存在している仕切りの衝突によって、中央に大きな陥入が発生した。球殻と仕切りの陥入が同時に起こるため、盛り上がり部分の断面は三角形になったと考えられる。空隙が衝突軸に垂直に分布する場合について、貫入過程を図14に示す。衝突してから0.22 μs までは球殻と同様に破壊が進み、中央部の盛り上がりが生成された。0.28 μs 以降は盛り上がり部分に仕切りが衝突し、衝突軸上に凹部が生成された。仕切りの衝突が終わると凹部は広がらなかったため、空隙が平行に分布する場合と異なり、盛り上がり部分の断面形状は三角形にならなかった。

d) 実験で使用したスラグの空隙分布推測

X線CTで観察された衝突痕形状から、衝突試験で使用されたスラグの空隙分布を推測する。衝突痕がリング状であることから、スラグは球殻形状であると考えられる。衝突痕深さは不均一であることから、球殻厚さは不均一

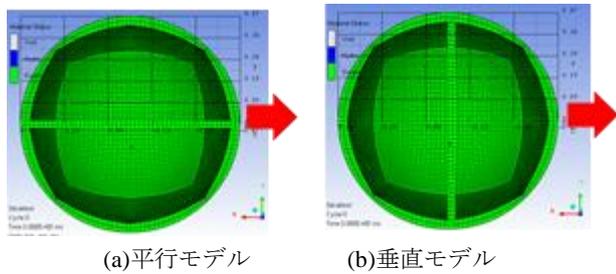


図12 空隙分割モデル

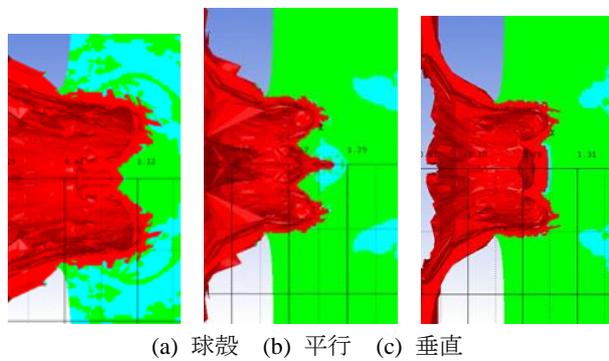


図13 空隙形状の影響

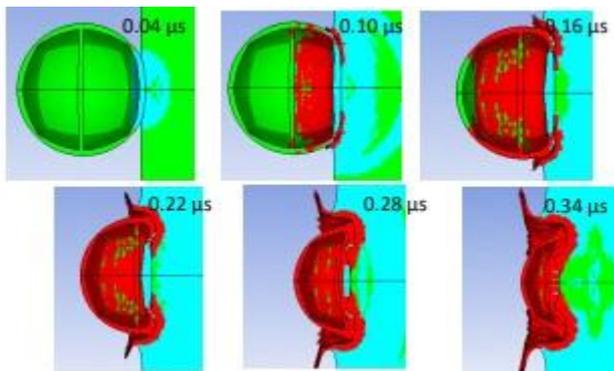


図14 垂直分布の陥入過程

であると考えられる。中央の盛り上がり部分に凹部がほとんど見られなかったことから、空隙は中央に集中しているか、垂直方向に分布していると考えられる。したがって、実験で使用したスラグは、空隙が中央に集中した球殻で、その厚さが不均一であったと推測される。

(3) 衝突速度の影響

内部形状の与える影響の速度の範囲を考察する。そのために球殻モデルと衝突軸に対して空隙が水平に分布する垂直モデルを用いて、速度を2~10 km/sの範囲で変化させた解析を行った。衝突速度10 km/sの結果を図15に示す。内部形状による衝突痕形状の差はほとんどなくなっていることがわかる。垂直モデルの衝突痕形状を球殻モデルの衝突痕形状で除した値を図16に示す。

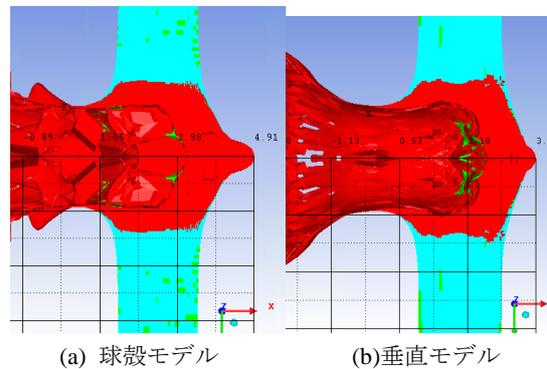


図15 10km/s 時の衝突痕比較

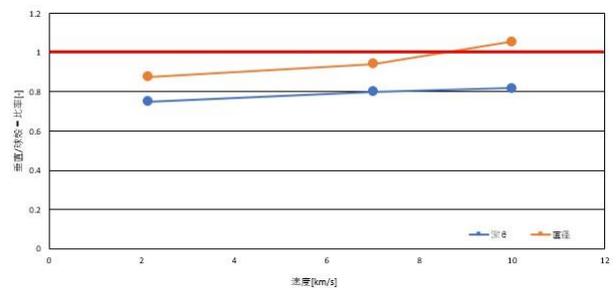


図16 衝突痕比率

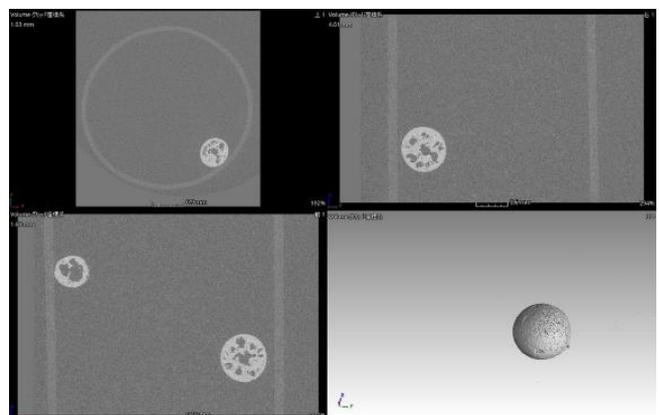


図17 Slag04のX線CT画像⁴⁾

縦軸は 1 に近いほど、飛翔体内部形状の差による衝突痕の違いがないと判断できる。図 16 より、衝突速度が上昇すること縦軸の値が 1 に近づいて、衝突痕差異が減ることがわかった。また、衝突痕直径より深さの値に、内部形状の影響が表れることがわかった。

4. SPH 法による数値解析

(1) 解析モデルの製作手順

低真空燃焼試験で回収されたスラグのうち、2 章で使用したサンプルと近い大きさのスラグについて、X 線 CT による内部構造の観察を行った。観察したスラグの直径は 0.8mm、空隙率が 28.7% であり、密度は 3.95 g/cm³ である。観察結果を図 17 に示す。この結果、スラグの内部では、空隙が複数に分かれた様子が見られ、3 章で製作したモデルよりも形状が複雑であることがわかった。

形状が複雑になると Lagrange 法でのモデル製作が困難になるため、Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法で製作した。複雑化な SPH モデルを製作するため、Solidworks でモデルを作製し、LS-Prepost でモデルの外殻を作製、Autodyn 上に出だし SPH 粒子を外殻に流し込む手順を確立した(図 18)。

(2) 解析モデル

内部の空隙配置の違いを見るために空隙を分布したモデルと、空隙を中央部に集めたモデル(球殻モデル)を制作し比較した。(図 19)

図 19(a)の空隙を分布させたモデルの空隙配置より、衝突後の衝突痕形状を 3 章の結果を用いり推測する。図 20 の分布モデル内にある 2 つの仕切りに注目して推測をした。予測結果を図 21 に示す。図 20 に含まれる 2 つの仕切りは多少傾きがあるものの、①は平行分布、②は垂直分布の仕切りと同じ役割を果たすと仮定できる。平行方向に分割したモデルは図 13(b)のように中央部の仕切りに

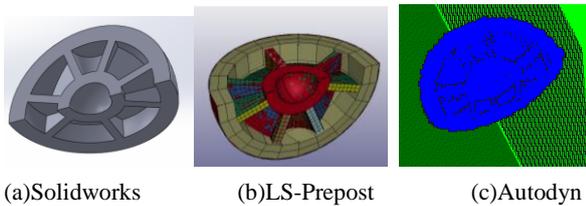
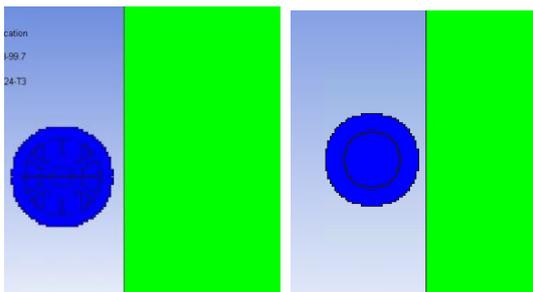


図 18 モデル製作手順



(a) 空隙分布 (b) 空隙集中

図 19 空隙分布比較

より局所的に集中的な損傷が発生し、盛り上がり部分の断面が三角形状となった。したがって衝突軸と①との間の空隙部分には三角形の陥入が発生すると推測される。軸の反対方向にも①と同じ仕切りがあるため、両サイドからの仕切りの衝突により、より鋭角な三角形の陥入が発生すると考える(図 21 の A)。また、垂直方向に分割したモデルでは図 16(c)のように中央にある仕切りにより広い面積に損傷を与えるため、平べったい台形型の陥入が発生した。①と②の間の空隙部には①と②の両方の仕切りの影響が与えられるため、衝突中心側が三角形の陥入、外側に行くにつれ平べったい陥入になると考えられる(図 21 の B)。更に、③の仕切りがこの部分に衝突するため、段差のような形状が生成されると推測できる(図 21 の C)。これらを統合すると、図 21 のような大きさの違う 3 つの陥入が発生すると考えられる。

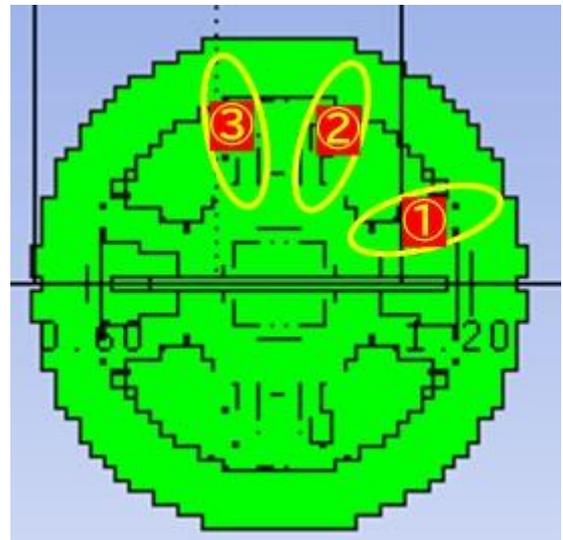


図 20 空隙分布の仕切りの位置

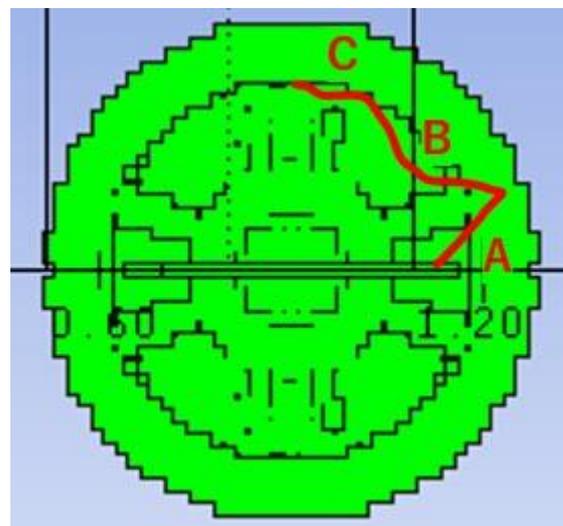
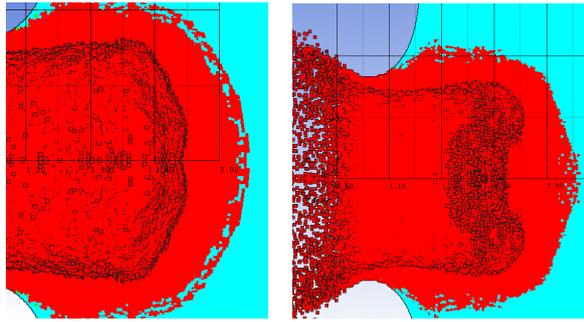
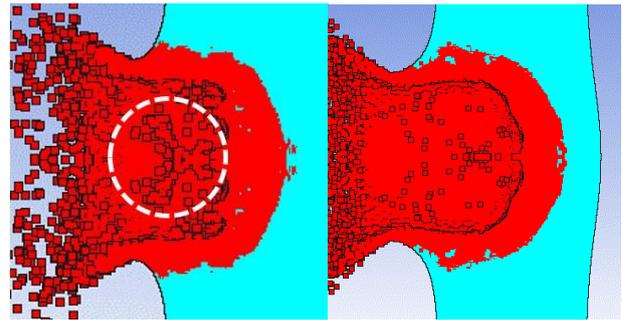


図 21 予想衝突痕形状



(a)空隙分布 (b)空隙集中

図 22 SPH 解析結果



(a) $t = 0.4463 \mu s$ (b) $t = 1.0 \mu s$

図 24 放射状に散布している様子

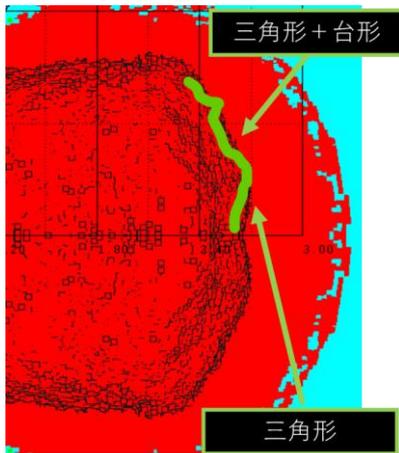


図 23 解析結果の衝突痕

(3) 解析結果と考察

解析結果の比較を比較するため、図 22 に空隙分布モデルと空隙集中モデル（球殻モデル）の解析結果を示す。

(a)の空隙分布モデルの衝突痕は小さい陥入が複数連なり出現し、(b)の空隙集中モデルは中央部の陥入と周囲のリング状の凹みが発生した。

また、3章の予測結果を用いり予測した飛翔体内部形状による衝突痕形状と解析の衝突痕を比較した。解析の衝突痕を図 23 に示す。

推測した程の凹凸は観られなかったが、三角形状のもの、三角形と台形を合わせたような形状ものと、平べったい形状の大きさの違う 3 つの陥入が発生したため、推測は正しかったと言える。

凹凸が推測よりも現れなかった原因に関して、図 24(a)に示すように衝突時中盤には、予想した衝突痕形状が生成されていた。しかし、ここから時間が経過すると、白い破線部で示す部分が衝突痕内部に放射状に衝突するため、散布した飛翔体部分が全体の凹凸を減らし、最終的に図 24(b)の形状になったと考える。

5. 結言

飛翔体内部に存在する空隙分布が衝突痕形状に与える影響を調べるためにスラグの衝突試験と数値解析を行った。

地上燃焼試験で回収したスラグを使用した衝突実験をし、数値解析を実施した。その際、スラグを球殻と仮定しモデル化した結果、衝突痕直径、深さ、中央部の盛り上がりの高さが実験の値とおおよそ一致した。

より再現性を上げるためにスラグ内部の空隙分布を変化させ数値解析を実施した。その結果、球殻の厚さと衝突痕の深さに相関がある事がわかった。また、空隙が衝突軸に対して平行に分割されている場合、中央に大きな陥入が発生することがわかった。

空隙分布を変化させた結果を元に衝突したスラグの内部空隙分布を推測した。衝突痕形状より、空隙が中央に集中した球殻状で上側の球殻が厚く、下側が薄い形状になっていると推測することができた。

衝突速度を変化させた内部空隙の同じ飛翔体同士を比較した結果、速度が上るにつれ内部空隙の影響が減少することが推測できた。また、衝突痕直径よりも深さの値の方が内部空隙の影響を受けていることがわかった。そのため、速度が上昇しても内部形状の影響を考慮した方がいいことがわかる。今後は他の空隙率の場合の速度による影響を調べようとする。

内部形状の判明しているモデルの数値解析を実施した結果、衝突痕から飛翔体内部の様子を確認できることがわかった。

謝辞

本研究を行うにあたり法政大学の東出真澄専任講師にご指導いただき、実験では JAXA の仁田工美様、酒見慶太様、池田博英様は大変お世話になりました。心より御礼申し上げます。

参考文献

- 1) S. Flegel, J. Gelhaus, and M. Möckel. Maintenance of the ESA MASTER model. Final Report, ESA contract 21705/08/D/HK, 2011.
- 2) Horstman, M., Mulrooney, M., An Analysis of the Orbital Distribution of Solid Rocket Motor Slag, Acta Astronautica, Vol. 64, pp. 230-235, 2009.
- 3) 木下昌洋, 他, 固体ロケットモータから発生するスラグ低減に向けた国内の取り組みについて, 第10回スペースデブリワークショップ, pp. 41-52, 2023年.
- 4) Fujii, M., et al., Study on Hypervelocity Impact of SRM Slag with Voids, 16th Hypervelocity Impact Symposium, 2022.
- 5) 赤星保浩, 他, 模擬 SRM スラグ飛翔体を用いた超高速衝突実験計画, 第8回スペースデブリワークショップ, pp. 383-404, 2019年.
- 6) 関谷翔琉, 固体ロケットモータスラグを模擬した空隙を有するデブリの衝突シミュレーション, 法政大学 2021年度卒業論文, 2022.