

## Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>の微粒子高速衝突損傷の数値シミュレーション

### Numerical Simulation of Failure Behavior of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> by Hypervelocity Impact of a Small Particle

小川 靖博<sup>1)</sup> 新井 和吉<sup>2)</sup> 佐藤 英一<sup>3)</sup> 長谷川 直<sup>3)</sup>  
Yasuhiro Ogawa, Kazuyoshi Arai, Eiichi Sato, Sunao Hasegawa

<sup>1)</sup> 法政大学大学院工学研究科機械工学専攻

<sup>2)</sup> 法政大学理工学部機械工学科

<sup>3)</sup> 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部

The silicon nitride (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) will be used for the thruster for the Venus probe and is expected to encounter meteoroid impacts in outer space. Meteoroids and debris environment play an important role in the reduction of the lifespan of a spacecraft. However, as meteoroid impacts on the thruster cannot be recreated in the present experiment facilities on the earth, it is necessary to evaluate the hypervelocity impact phenomenon by numerical simulation. In this study, the failure behavior of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> in case of hypervelocity impact of a small particle was evaluated by numerical simulation to obtain the basic data for verifying the validity of the simulation method. In addition, impact morphology of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> at different projectile diameters was also investigated.

**Keywords:** Silicon nitride, Aluminum oxide, Hypervelocity impact, Numerical simulation

#### 1. はじめに

近年、宇宙開発が活発に行われている中、惑星探査機などのスラスタ部材として窒化珪素 (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) などのセラミックス材料を用いる研究が進められている<sup>[1]</sup>。実際に宇宙空間で使用する場合には、運用期間中にメテオロイドとの衝突が問題となり、その衝突速度は約 15~20km/s におよぶ。PLANET-C の衝突確率としては、1.6J 以上のメテオロイドが 1% の確率で、0.13J 以上のメテオロイドが 10% の確率で衝突する<sup>[2]</sup>。地上ではこの衝突現象を再現することができないため、数値シミュレーションによるセラミックス材料に対する微粒子衝突時の損傷評価が必要となる。しかし、現在まで Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> などのセラミックス材料全般に対して高速衝突の数値シミュレーションに関する研究はほとんど行われていない。

そこで本研究では、セラミックス材料に微粒子が高速衝突した場合の損傷挙動の数値シミュレーション手法を

確立する目的で、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> に対する微粒子高速衝突損傷の数値シミュレーションを行い、それぞれの材料の損傷挙動について検討を行った。さらに、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> に衝突する微粒子の直径を変化させて数値シミュレーションを行い、損傷形態と損傷プロセスの検討を行った。

#### 2. 数値シミュレーション

##### 2.1 材料および解析コード

メテオロイドを模擬した衝突材には SUS304 を用いた。衝突現象の数値シミュレーションには、衝撃解析コード AUTODYN-2D (伊藤忠テクノソリューションズ株) を使用し、解析手法には SPH 法を使用した。

##### 2.2 状態方程式と材料構成則および破壊モデル

状態方程式は、被衝突材の Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> に Polynomial モデルを用い、衝突材の SUS304 に Mie-Gruneisen 型 Shock Hugoniot

モデルを用いた。Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>の材料構成則，材料破壊モデルはガラス，セラミックス等に適用性の高い Johnson-Holmquist モデル (JH-2) <sup>[3]</sup>を用い，破断ひずみ値を超えた場合に破壊が生じると想定した。SUS304 の構成則には加工硬化，温度依存性を考慮した Steinberg Guinan モデルを，破壊モデルには衝突圧により生じる相当塑性ひずみが限界に達することによる破壊を想定し Plastic Strain モデルを用い，限界相当塑性ひずみを 0.5 とした <sup>[4]</sup>。

### 2.3 解析条件

被衝突材の Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> は直径 20mm，板厚 1.5mm～2.5mm の円板とした。衝突材の SUS304 は直径 100μm～1000μm の球体とした。Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> の境界条件としては，周囲を完全拘束とした。ただし，実際の衝突実験では，試験片の寸法は 30×50mm であり，境界条件も自由端固定としているが，衝突点から離れた部分では衝突による影響がないものと判断し，数値シミュレーションにおける寸法は上記のものとした。

## 3. 結果および考察

### 3.1 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> の高速衝突

Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> に直径 φ 500μm の SUS304 球を衝突速度 1.94km/s(0.97J)で衝突させた場合の数値シミュレーション結果を Fig.1(a)に示す。同図は衝突後 5.0μs における結果である。前面クレータの大きさは直径約 1.6mm，深さ約 250μm となり，背面には直径約 2.2mm，最大深さ約 710μm のスポール破壊が生じていた。(独)宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部(ISAS/JAXA)で行われた衝突速度 1.94km/s(0.97J)の高速衝突実験結果を Fig.1(b)に示す<sup>[1]</sup>。Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> の前面に平均直径が約 3.4mm，最大深さが約 250μm の非円形のクレータが形成されており，背面に円錐状に入る亀裂とスポーリング亀裂の結合によって直径約 5.0mm，最大深さ約 750μm のスポール破壊が生じていた。

数値シミュレーションと実験では，平均深さはほぼ一致しているが，平均直径に差異がある。これは，衝突実験では材料内部の不純物によって非円形で非対称な損傷が発生したものと考えられる。

### 3.2 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> の板厚による損傷形態の変化

Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> の板厚を 1.5，2.0，2.5mm と変化させ，かつ衝突材の SUS304 の衝突速度，すなわち衝突エネルギーを変化させて数値解析を行った。その結果，飛翔体の付着，クレータ，クレータ&スポール，ピンホールの4つの損傷形態が存在することがわかった。板厚 2mm における各損傷形態のシミュレーション結果の一例を Fig.2 に示す。同図(a)の低衝突エネルギーでは飛翔体が付着し，衝突エネルギーが増加するとともにクレータ(b)，クレータ&スポール(c)，ピンホール(d)と変化している。板厚 1.5mm から 2.5mm と衝突エネルギーを変化させた数値シミュレーションの結果を Fig.3 に示したところ，4つの損傷形態の領域が存在することがわかった。(I)は飛翔体付着領域，(II)

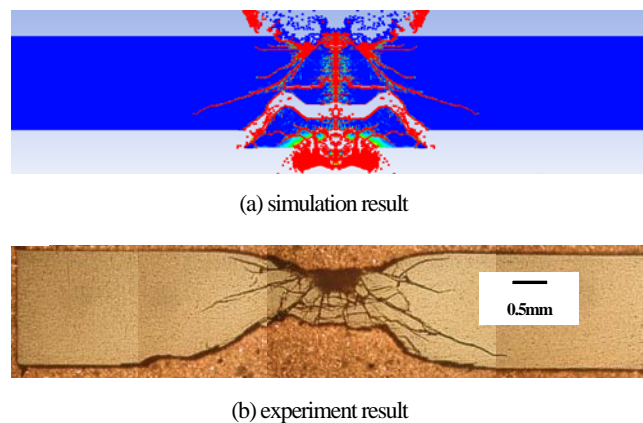


Fig.1 Comparison of simulation and experiment result of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (Impact velocity = 1.94km/s)

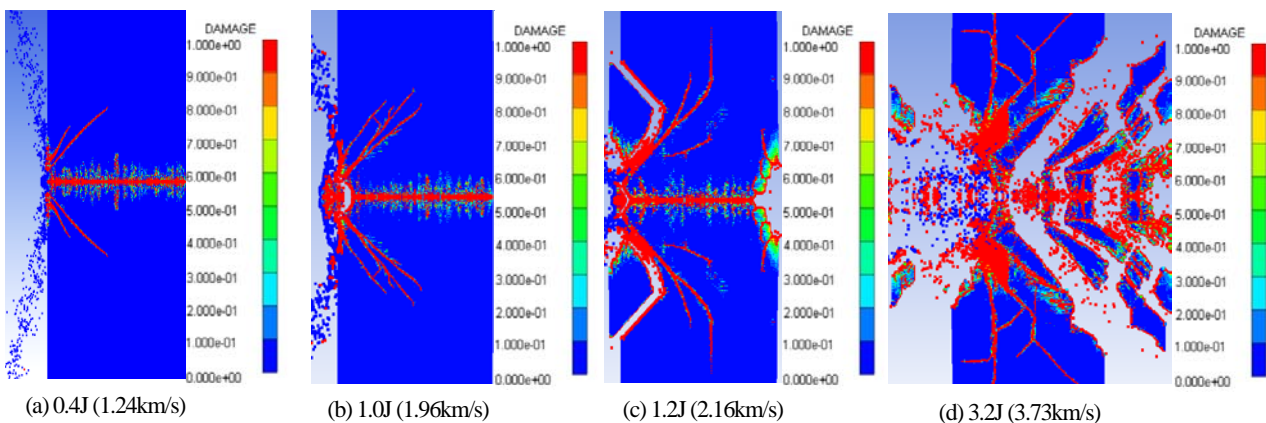


Fig.2 Simulation results of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (Target thickness = 2.0mm) Animation [Fig.2\(a\)](#) [Fig.2\(b\)](#) [Fig.2\(c\)](#) [Fig.2\(d\)](#)

はクレータ領域, (III)はクレータ&スポール領域, (IV)はピンホール領域となっている。Fig.3 には ISAS/JAXA での高速衝突実験の結果もプロットした。高速衝突実験による損傷形態の領域は数値シミュレーション結果とよく一致していることがわかる。ISAS/JAXA での実験は高速であるため、低速における(I)の領域の存在が数値シミュレーションにより確認できた。

### 3.3 低速衝突実験

低速における上記の飛翔体付着領域(I)を確認するため、低速衝突実験を行った。試験片の寸法は 30×50×t2mm であり、飛翔体の直径は 500μm とし、衝突速度は 1000m/s(0.26J), 1241m/s(0.4J)とした。衝突実験装置には作動流体にヘリウム(He)を用いた軽ガスガン方式の飛翔体発射装置を使用した。衝突実験では、飛翔体の直径が極めて小さいため、飛翔体の発射にはサボとサボストッパーを使用した。また、衝突時の速度測定には高速度ビデオカメラ(㈱フォトン, FASTCAM-APX RS)を使用した。飛翔体が極小であることから、サボの速度を測定しプロジェクトイルの速度とした。衝突速度 1000m/s で

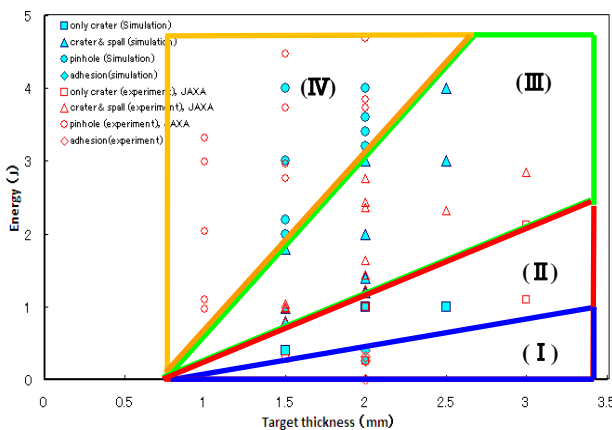


Fig.3 Failure patterns depending on the target thicknesses and the impact energies

衝突実験を行った試験片の形状測定結果と数値シミュレーション結果を Fig.4 に示す。同図から試験片の表面に飛翔体が付着していることが確認できた。

### 3.4 飛翔体直径による影響

飛翔体直径が損傷形態に及ぼす影響を検討するため、直径を φ100μm, φ250μm, φ500μm, φ1000μm と変化させ衝突エネルギー 3.0J で衝突させた場合の数値シミュレーションを行った。その結果を Fig.5 に示す。飛翔体直径の増加にしたがい円錐状のコーンクラックの進展が増加し、コーンクラックの進展によりスポール破壊量が増加していることがわかる。また、直径 φ1000μm ではコーンクラックが背面まで到達し、貫通していることが確認できる。これは、飛翔体が破碎しきれず衝突直後に生じたコーンクラックの進展に飛翔体の運動エネルギーが費やされたためと考えられる。そこで、直径を φ100μm から φ1000μm まで変化させ数値シミュレーションを行った。その結果を Fig.6 に示す。飛翔体直径 φ700μm 未満の領域では、飛翔体の運動エネルギーが増加するにしたがい、付着およびクレータ領域(I, II)から、クレータ&スポール領域(III), ピンホール領域(IV)と移行することがわかった。一方、直径 φ700μm 以上では、クレータ&スポール

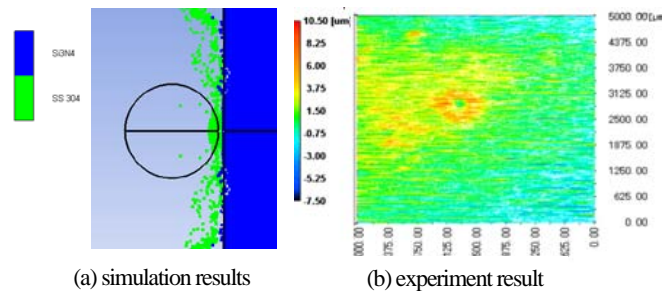


Fig.4 Comparison of simulation and experiment result (1.0km/s)

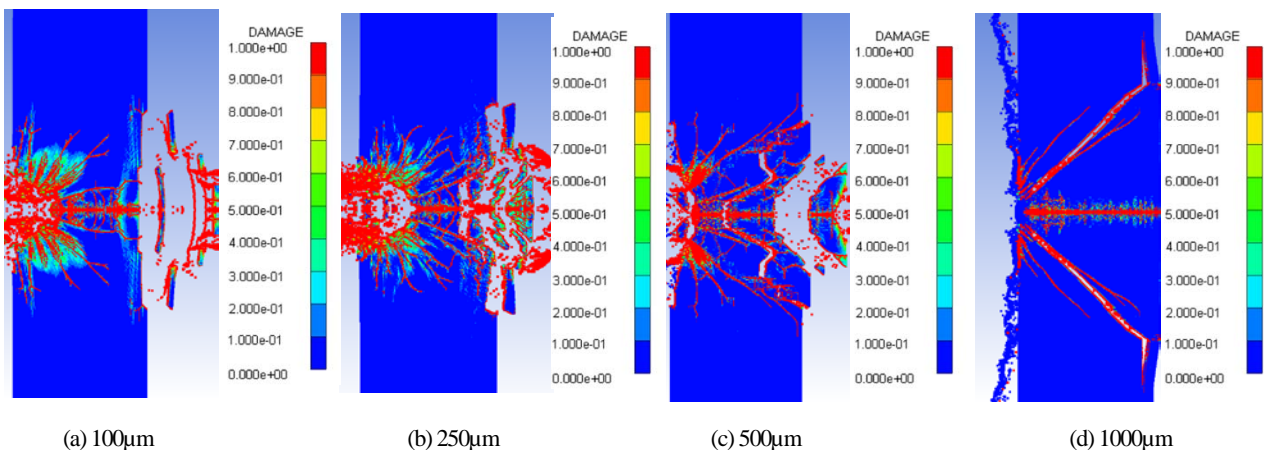


Fig.5 Simulation results of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> for different projectile diameters (Impact energy = 3.0J) Animation [Fig.5\(a\)](#) [Fig.5\(b\)](#) [Fig.5\(c\)](#) [Fig.5\(d\)](#)

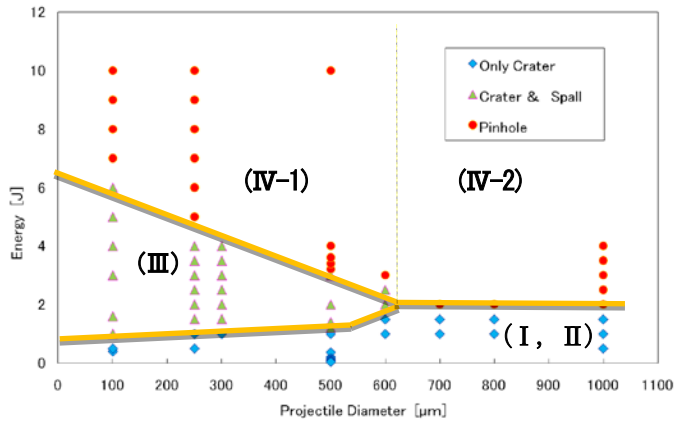


Fig.6 Failure patterns depending on the projectile diameters and the projectile energies

ール領域(III)がなく、付着およびクレータ領域(I, II)からピンホール領域(IV)に損傷形態が直接移行することがわかった。さらに、ピンホール領域(IV)は、直径 $\phi 700\mu\text{m}$ 未満では、クレータとスポールの結合によるもの(IV-1)であるが、直径 $\phi 700\mu\text{m}$ 以上の貫通は飛翔体衝突直後に生じた円錐状のコーンクラックの進展によるもの(IV-2)であり、直径 $\phi 700\mu\text{m}$ を境に貫通に至るまでの損傷プロセスが異なることがわかった。また、PLANET-Cの運用期間中に、球相当直径 $\phi 700\mu\text{m}$ 以上のメテオロイド(密度 $2.5\text{g/cm}^3$ )が衝突する確率は $0.000416\%$ <sup>[2]</sup>であるため、スラスタ材料としてマイクロメテオロイド衝突による構造体の破壊が生じる可能性は極めて低いことがわかった。

#### 4. 結言

$\text{Si}_3\text{N}_4$  および  $\text{Al}_2\text{O}_3$  の SUS304 微粒子高速衝突損傷の数

値解析を行い、JAXAで行われた高速衝突実験結果および低速衝突実験結果と良い一致を示したことから、検討した数値シミュレーションの信頼性を確認できた。数値シミュレーションと衝突実験の結果、低速度域において、飛翔体が試験片に付着する領域があることがわかった。また、 $\text{Si}_3\text{N}_4$ の微粒子高速衝突現象は飛翔体直径 $\phi 700\mu\text{m}$ 以下とそれ以上の場合で貫通に至る損傷プロセスが異なることがわかった。

#### 謝辞

本研究の数値解析は、法政大学情報メディア教育研究センターの2007・2008・2009年度研究プロジェクトとして遂行したものであり、同センターに感謝の辞を表す。

#### 参考文献

- [1] 進藤大典, 元屋敷靖子, 長谷川直, 佐藤英一, "PLANET-C用セラミックスラスタに対する高速衝突破壊の検討" スペースプラズマ研究会(2007)
- [2] Y. Motoyashiki, S. Hasegawa, K. Okudaira, E. Sato, "Micrometeoroid impact on ceramic thin components for interplanetary probe", International Journal of Impact Engineering
- [3] G. R. Johnson, T. J. Holmquist, "An Improved Computational Constitutive Model for Brittle Materials", American Institute of Physics(1994)
- [4] 中神正智, 片山雅英, 新井和吉, "スペースデブリシールド構成材料の積層順序の検討", 法政大学計算科学研究センター研究報告第20巻(2007)