

## Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の微粒子高速衝突損傷挙動

### Failure Behavior of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> by Hypervelocity Impact of Small Particle

美濃輪 秀明<sup>1)</sup> 新井 和吉<sup>2)</sup> 佐藤 英一<sup>3)</sup> 元屋敷 靖子<sup>3)</sup> 長谷川 直<sup>3)</sup>  
Hideaki Minowa, Kazuyoshi Arai, Eiichi Sato, Yasuko Motoyashiki, 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 efficiency of a numerical simulation method for elucidating failure behavior of aluminum oxide (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) caused by a hypervelocity impact of a small particle was investigated. High-velocity impact tests at 1.0 km/s or less using a light gas gun and a hypervelocity impact test at 1.91 km/s using a two-stage light gas gun were conducted. The numerical simulation result of the failure behavior of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> was compared with the result of the impact test.

**Keyword** : 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、惑星探査機などの部材として窒化珪素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。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る。そのときの衝突条件として、100 μm の粒子が20km/s で衝突する可能性がある<sup>[1]</sup>と想定される<sup>[1]</sup>が、地上ではこの衝突現象を再現することができない。そこで、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、現在までの高速衝突の数値シミュレーションに関する研究は、窒化珪素やアルミナ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) などのセラミックス材料全般に対して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を解明する目的で、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を対象とした数値シミュレーション手法の検討を行った。衝突速度 1.0km/s 以下および 1.91km/s における高速衝突を行

い、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の損傷挙動について数値シミュレーションと衝突実験の比較、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

セラミックス材料は Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> とし、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 Lagrange 法および SPH 法の 2 種類を使用した。

##### 2.2 状態方程式, 材料構成則および破壊モデル

状態方程式は、衝突材の SUS304 には Mie-Gruneisen 型 Shock Hugoniot モデルを、被衝突材の Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> には Polynomial モデルを用いた。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 モデルを用いた<sup>[2]-[4]</sup>。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の構成則および破壊モデルにはガラス、セラミックス等に適用性の高い Johnson-Holmquist モデル<sup>[5]</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

原稿受付 2008 年 2 月 29 日

発行 2008 年 3 月 31 日

法政大学情報メディア教育研究センター

定した。

### 2.3 解析条件

衝突材の SUS304 は直径 500  $\mu\text{m}$  の球体とした。被衝突材の  $\text{Al}_2\text{O}_3$  は、直径 16mm の円板とし、板厚を 2.0mm とした。境界条件としては、周囲を完全拘束とした。ただし、SPH 法を用いたモデルでは拘束境界条件を設定することができないため、SPH 法の円板外側の部分に、Lagrange 法を用いた部分を追加し、直径 20mm の円板とした。実際の衝突実験では、試験片の寸法は 30  $\times$  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。

### 2.4 高速衝突試験

数値シミュレーションとの比較のために、高速衝突実験を行った。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(株)フォトロン, FASTCAM-APX RS)を使用した。飛翔体が極小であること、およびサボとサボストッパーの衝突の際にプラズマが発生し、飛翔体を直接撮影することができないことから、サボの速度を測定しプロジェクタイルの速度とした。

## 3. 結果および考察

### 3.1 衝突速度 1.0km/s 以下の高速衝突

衝突速度を 410m/s、508m/s、595m/s、705m/s の速度とし、衝突実験および数値シミュレーションを行った。衝突実験では、衝突後の  $\text{Al}_2\text{O}_3$  に飛翔体である SUS304 が融解、付着し衝突部に凸部が存在していた。そこで、塩酸を用いて溶解したところ、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  の表面に損傷は確認でき

なかった。

$\text{Al}_2\text{O}_3$  に SUS304 球を衝突速度 705m/s で衝突させた場合の数値シミュレーション結果を Fig.1 に示す。同図は衝突時間 0.25  $\mu\text{s}$ 、0.35  $\mu\text{s}$  および 0.40  $\mu\text{s}$  における応力の変化である。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  の内部に応力が伝播し、徐々に材料全体に広がっていく様子が見える。さらに、Fig.2 には衝突時間 10  $\mu\text{s}$  および 20  $\mu\text{s}$  における損傷の数値シミュレーション結果を示す。同図において Damage 値が 1 を超えた場合に破壊が発生することになるが、いずれも破壊は生じておらず、衝突時の  $\text{Al}_2\text{O}_3$  は、実験結果と同様に数値シミュレーションでも損傷が発生しないことが確認できた。しかし、衝突した飛翔体は実験結果とは異なり  $\text{Al}_2\text{O}_3$  に付着することはなく、反発していることがわかる。これは、Lagrange 法を用いた本解析手法では、メッシュのひずみが著しい部分は削除されてしまうため、飛翔体の融解が起こる程の大きい変形ではメッシュが削除され、融解して付着する飛翔体の挙動は再現することはできなかった。また、反発した飛翔体の体積を求めたところ、衝突前の約 13% となった。これは、衝突した飛翔体の大部分は破砕あるいは液化するのではないかと考えられる。

さらに、衝突速度を 780m/s および 790m/s とした場合の衝突時間 10  $\mu\text{s}$  における数値シミュレーション結果を Fig.3 に示す。780m/s では Damage 値が 1 に達していないため、材料内部に損傷の蓄積はあるが破壊には至っていない。一方、790m/s では衝突部の Damage 値が 1 に達しており破壊が生じている。つまり、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  は、衝突速度 780m/s と 790m/s の間に破壊の境界速度があるものと考えられる。

### 3.2 衝突速度 1.0km/s 以上の超高速衝突

衝突速度 1.0km/s 以上における  $\text{Al}_2\text{O}_3$  の衝突数値シミュレーション手法の検討を行うために、数値解析手法に Lagrange 法および SPH 法を用い、(独)宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部(ISAS/JAXA)で行われた高速衝突実験の結果との比較を行った。衝突速度 1.91km/s で衝突

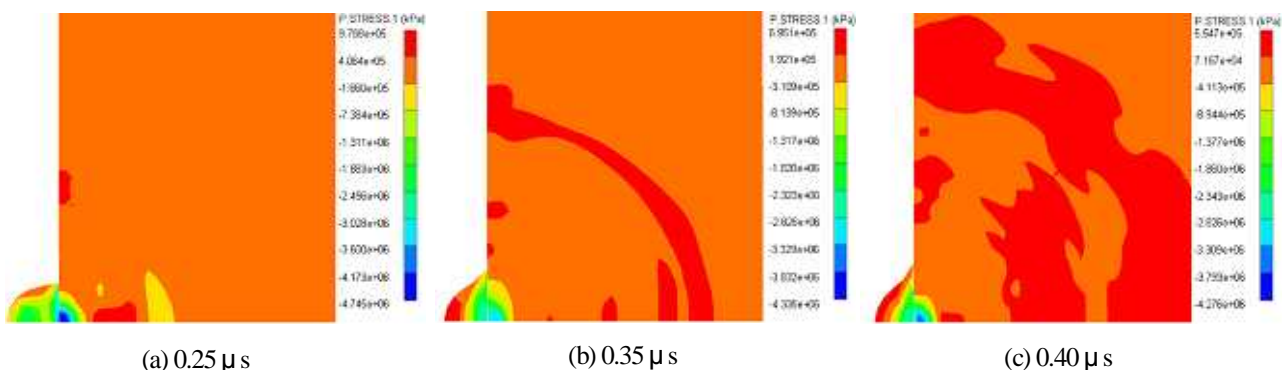


Fig.1 Stress distribution of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (impact velocity=705m/s)

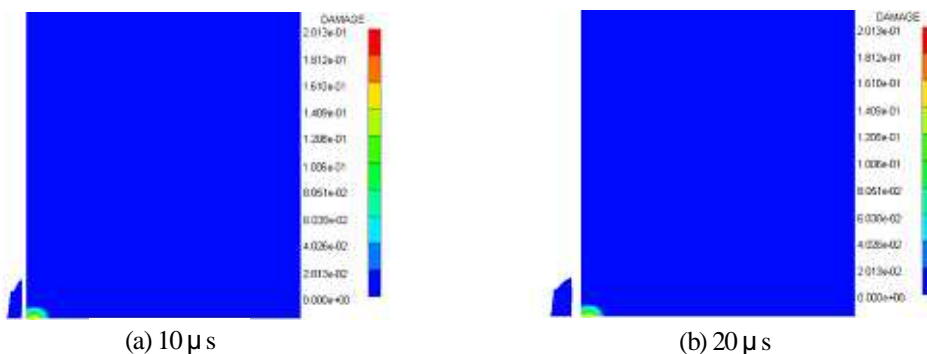


Fig.2 Damage of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (impact velocity=705m/s)

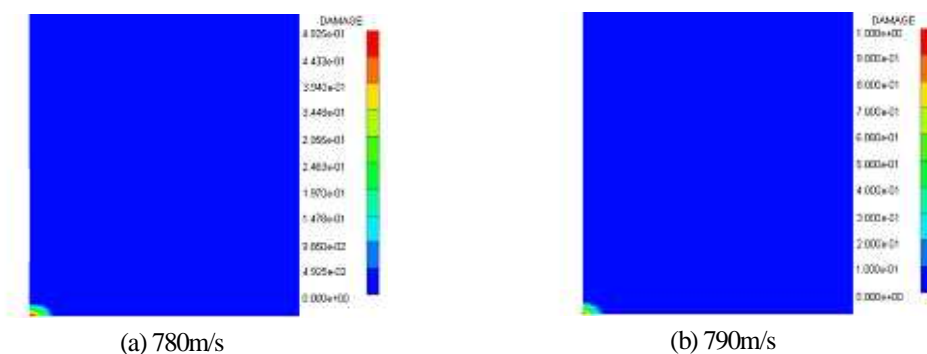


Fig.3 Damage of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (impact velocity=780m/s,790m/s, elapsed time=10 μs)

させた場合の高速衝突実験結果は、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の前面に直径約4.00mm、深さ約370 μmのクレータが形成されており、背面には、直径約4.00mmの亀裂が生じていた。

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>にSUS304球を衝突速度1.91km/sで衝突させた場合の衝突時間10 μsにおけるLagrange法およびSPH法の数値シミュレーション結果をFig.4に示す。Lagrange法を用いた場合(a)では、前面クレータの大きさは半径約450 μm、深さ約350 μmとなり、背面には破壊を生じていなかった。一方、SPH法を用いた場合(b)では、前面クレータの大きさは半径約430 μm、深さ約660 μmとなり、背面まで破壊が進行していた。

そこで、Lagrange法およびSPH法を用いた衝突時間0.4 μs, 0.8 μs, および1.2 μsにおける応力分布の結果をFig.5

およびFig.6に示す。Lagrange法の場合には、材料背面方向に応力が伝播していないが、SPH法の場合には材料背面方向まで応力が伝播している。そのため、SPH法では材料背面まで破壊が生じていたものと考えられる。

以上の結果より、数値シミュレーションではAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>前面のクレータの半径および深さについては実験結果より大きい結果となり、背面の亀裂の大きさについては実験結果よりも小さいものとなった。今後のより詳細な検討が必要であるが、衝突速度1.91km/sと非常に高速な衝突現象の数値シミュレーションにはSPH法を用いることが有効であると考えられる。また、前節の結果より、衝突速度1.0km/s以下の高速衝突現象の数値シミュレーションにはLagrange法を用いることが有効であると考えられる。

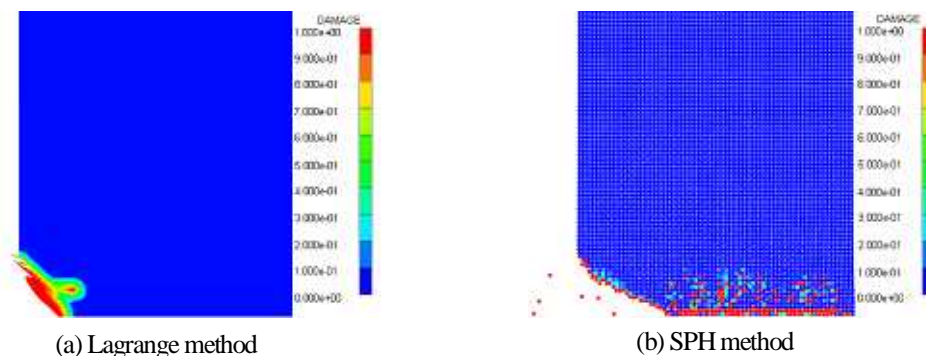
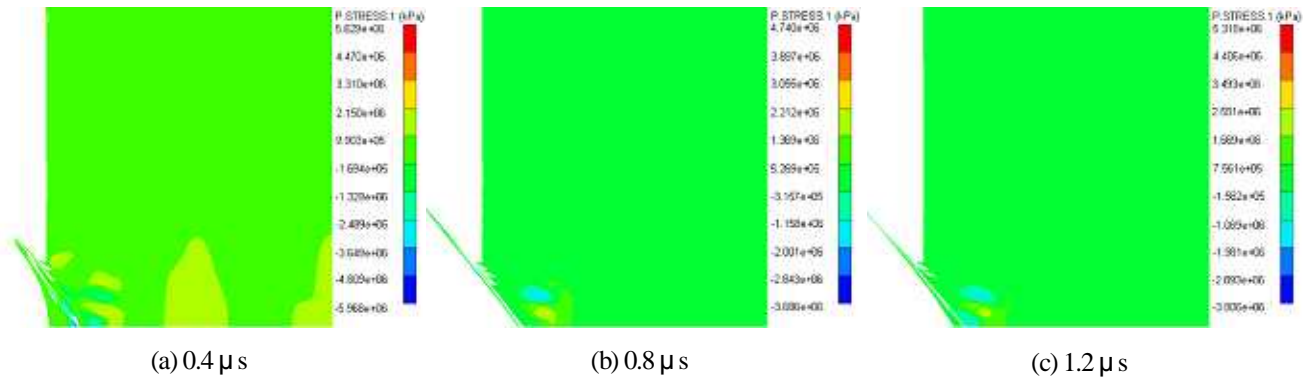
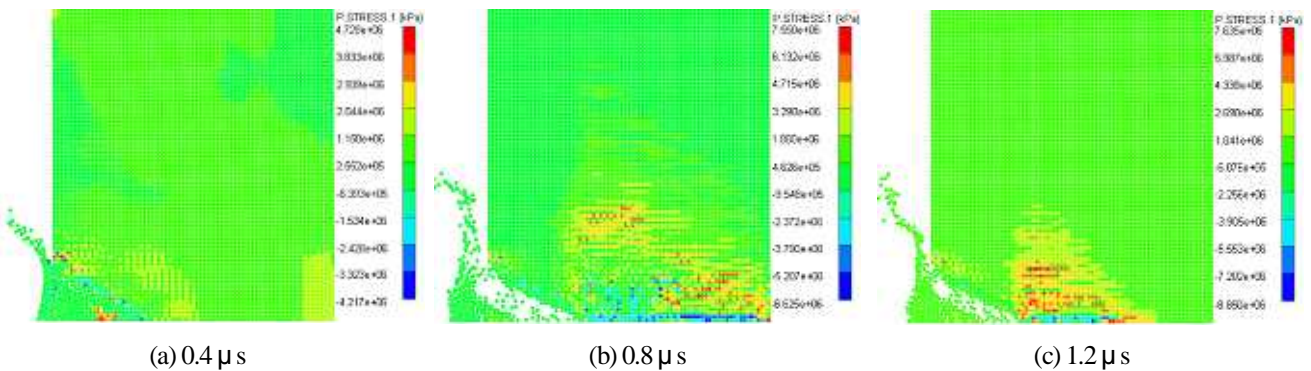


Fig.4 Simulation results of Lagrange and SPH method

Animation [Fig.4\(a\)](#) [Fig.4\(b\)](#)

Fig.5 Stress distribution of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Lagrange method, impact velocity=1.91km/s)Animation [Fig.5](#)Fig.6 Stress distribution of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (SPH method, impact velocity=1.91km/s)Animation [Fig.6](#)

#### 4. おわりに

Lagrange 法を用いた  $\text{Al}_2\text{O}_3$  の高速衝突数値シミュレーションを行った結果、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  は実験結果と同様に損傷は見られなかった。融解して付着する飛翔体の挙動を再現することができなかったのは Lagrange 法を用いた本解析手法では、飛翔体の融解が起こる程の大きい変形ではメッシュが削除されてしまうためと考えられる。また、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  は衝突速度 780m/s と 790m/s の間に破壊の境界速度があることがわかった。

SPH 法を用いた衝突速度 1.91km/s の超高速衝突数値シミュレーションを行った結果、クレータの大きさは実験結果とは一致しなかったが、応力伝播により  $\text{Al}_2\text{O}_3$  の背面にまで亀裂が生じることがわかった。また、衝突速度 1.0km/s 以下の高速衝突現象の数値シミュレーションには Lagrange 法を用いることが有効であり、衝突速度 1.91km/s と非常に高速な衝突現象の数値シミュレーションには SPH 法を用いることが有効であると考えられる。

【謝辞】本研究は法政大学情報メディア教育研究センターの 2006・2007 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します。

#### 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", 平成 18 年度スペースプラズマ研究会, 2007 年
- [2] 安田雄治, 増田望, 福島恵太, 片山雅英, 新井和吉, 田中豊, "静止軌道上におけるスペースデブリ衝突の数値シミュレーションと高速衝突試験", 法政大学計算科学研究センター研究報告, 第 16 巻, 2003 年
- [3] 中神正智, 片山雅英, 新井和吉, "耐スペースデブリ用バンパ構成材料の高速衝突数値シミュレーション-デブリの衝突角度とバンパの材質による影響-", 法政大学計算科学研究センター研究報告, 第 19 巻, 2006 年
- [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 年
- [5] G. R. Johnson, T. J. Holmquist, "An Improved Computational Constitutive Model for Brittle Materials", American Institute of Physics, 1994