

Al2O3の微粒子高速衝突損傷の数値シミュレーション

ARAI, Kazuyoshi / HASEGAWA, Sunao / SATO, Eiichi / 長谷川, 直 / OGAWA, Yasuhiro / 小川, 靖博 / 新井, 和吉 / 佐藤, 英一

(出版者 / Publisher)

法政大学情報メディア教育研究センター

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学情報メディア教育研究センター研究報告

(巻 / Volume)

22

(開始ページ / Start Page)

73

(終了ページ / End Page)

76

(発行年 / Year)

2009-03-31

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00003995>

Al₂O₃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 Al₂O₃ by Hypervelocity Impact of Small Particle

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

¹⁾ 法政大学大学院工学研究科機械工学専攻

²⁾ 法政大学理工学部機械工学科

³⁾ 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部

Hypervelocity impact tests of aluminum oxide (Al₂O₃) at 1.0km/s or less km/s were conducted, and failure behaviors were examined for the purpose of obtaining the basic data for verifying the validity of a numerical simulation method. In addition, the numerical simulation results of the hypervelocity impact at more than 1.0km/s were compared with impact tests results using two stage light gas gun.

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^[1]。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。衝突確率としては、1.6J (7.1μg) のメテオロイドが1%の確率で、0.13J (0.68μg) のメテオロイドが10%の確率で衝突する^[2]。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、現在まで窒化珪素やアルミナ (Al₂O₃) 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、Al₂O₃に対する微粒子高速衝突損傷の

数値シミュレーションの検討を行った。衝突速度1.0km/s以下および1.91km/sにおける高速衝突実験を行い、数値シミュレーション結果の妥当性の検討を行った。

2. 数値シミュレーション

2.1 材料および解析コード

セラミックス材料は Al₂O₃ 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 SPH 法を使用した。

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 Mie-Gruneisen 型 Shock Hugoniot モデルを、被衝突材の Al₂O₃ に 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、限界相当塑性ひずみを 0.5 とした^{[3],[4],[5]}。Al₂O₃ 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^[7]を用い、破断ひずみ値を超えた

原稿受付 2009年3月9日

発行 2009年3月31日

法政大学情報メディア教育研究センター

場合に破壊が生じると想定した。

2.3 解析条件

衝突材の SUS304 は直径 500 μ m の球体とした。被衝突材の Al₂O₃ は、直径 12mm、板厚 2.0mm の円板とし、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 \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。試験片の寸法は 30mm \times 50mm \times t2mm であり、メテオロイドを模擬した飛翔体には SUS304 球を使用し、その直径を 500 μ m 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（楕フォトロン，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。

3. 結果および考察

3.1 衝突速度 1.0km/s 以上の超高速衝突

(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 1.91km/s の高速衝突実

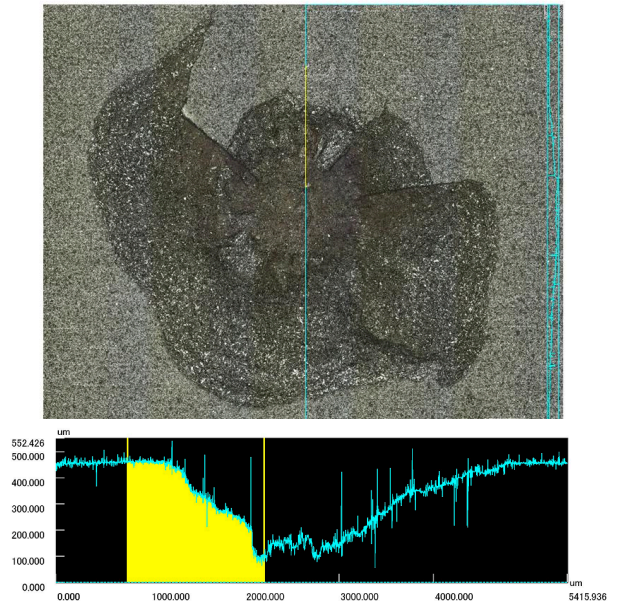


Fig.1 Laser microscope observation results of Al₂O₃ (Impact velocity=1.91km/s)

験結果を Fig.1 に示す^[1]。Al₂O₃ の前面に平均直径が約 4.00mm、最大深さが約 370 μ m の非円形のクレータが形成されており、背面には直径約 4.0mm の亀裂が生じていた。Al₂O₃ に SUS304 球を衝突速度 1.91km/s で衝突させた場合の衝突数値シミュレーション結果を Fig.2 に示す。同図は衝突時間 1.5 μ s、5.0 μ s および 15.0 μ s における損傷の変化である。Damage 値が 1 を超えた場合に破壊が発生することになり、円周状に伝播するクラックがあることがわかる。前面クレータの大きさは直径約 2.5mm、深さ約 360 μ m となり、背面まで破壊が進行していた。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。しかし、衝突部中心からの損傷半

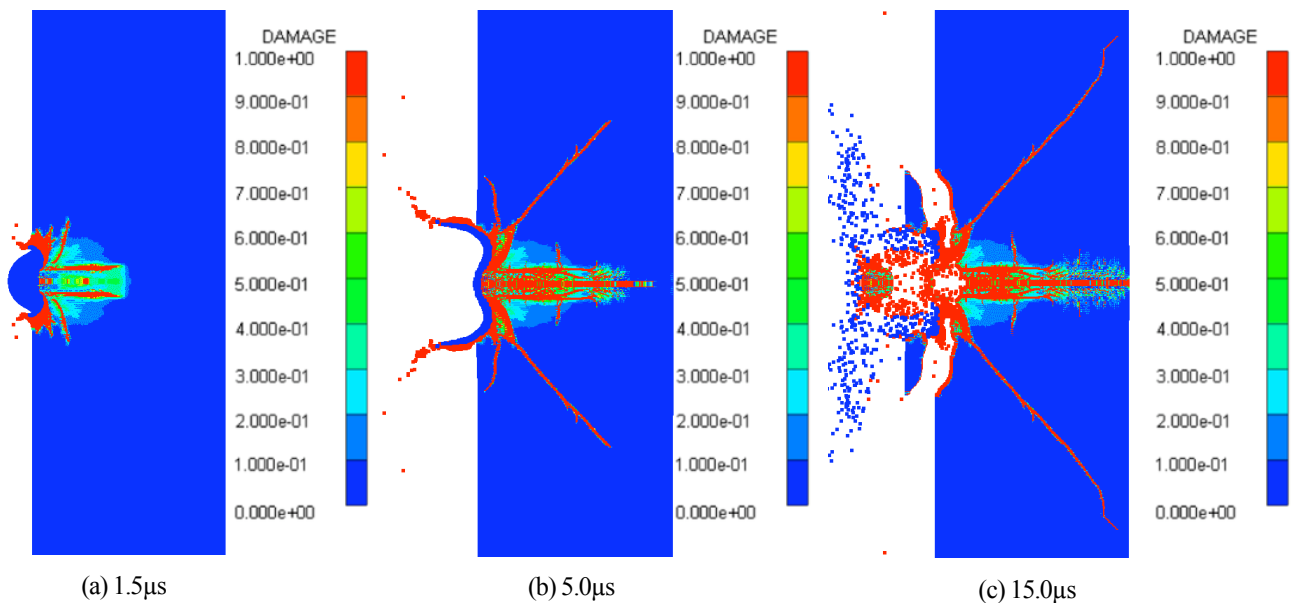


Fig.2 Damage distribution of Al₂O₃ (impact velocity=1.91km/s) Animation Fig.2

径が一致している部分が存在しており、このことから衝突実験では、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 衝突速度 1.0km/s 以下の高速衝突

衝突速度を 807m/s、910m/s、964m/s 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 Al_2O_3 に飛翔体である SUS304 が付着し衝突部に凸部が存在し、この凸部は、昨年度の研究より飛翔体である SUS304 球が付着したものであることがわかっている^[6]。また、片側だけに凸部があるのは斜めに飛翔体が衝突したためと思われる。さらに、塩酸により付着した飛翔体を溶解し、再び衝突部の形状を測定したところ、凸部が存在した。 Al_2O_3 に SUS304 球を衝突速度 807m/s、910m/s、964m/s で衝突させた場合の衝突後 50 μs における損傷の数値シミュレーション結果を Fig.3 に示す。圧縮された飛翔体が破碎し円周方向に飛散していることがわかる。また、

Al_2O_3 内部にマイクロクラックが発生し、表面が凸状に隆起している。衝突速度 807m/s、910m/s、964m/s で衝突させた場合の衝突後 50 μs における数値シミュレーション結果を Fig.4 に示す。実験結果と同様に Al_2O_3 に飛翔体である SUS304 が付着し衝突部に凸部が存在していることがわかる。衝突速度 964m/s で衝突させた場合の衝突後 0.2 μs 、0.5 μs 、1.7 μs における数値シミュレーション結果を Fig.5 に示す。圧縮された飛翔体が破碎し円周方向に破碎することにより、 Al_2O_3 表面がリング状に切削破損していることがわかる。解析および実験における、直径と深さの比較を Table1 に示す。衝突痕の直径は数値シミュレーションと実験結果でほぼ良い一致を示しているが、深さは実験結果が数値シミュレーション結果よりも浅くなっている。これは、実験では、飛翔体の付着量が多く、すなわち飛翔体の破碎量が少なく、飛散した破片による切削が少ないためと考えられる。

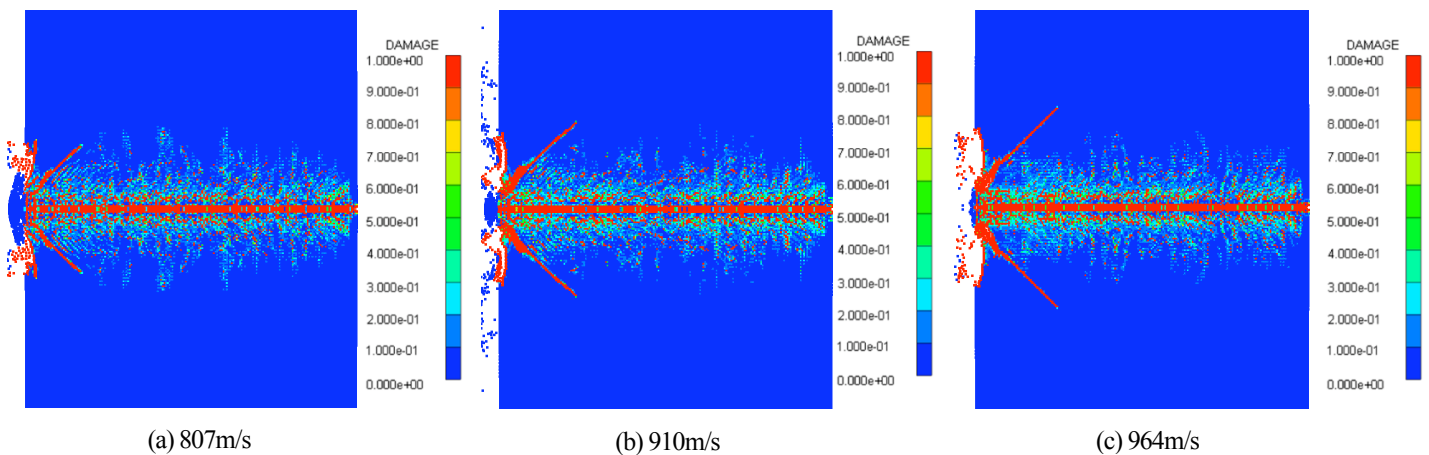


Fig.3 Damage distribution of Al_2O_3

Animation [Fig.3\(a\)](#) [Fig.3\(b\)](#) [Fig.3\(c\)](#)

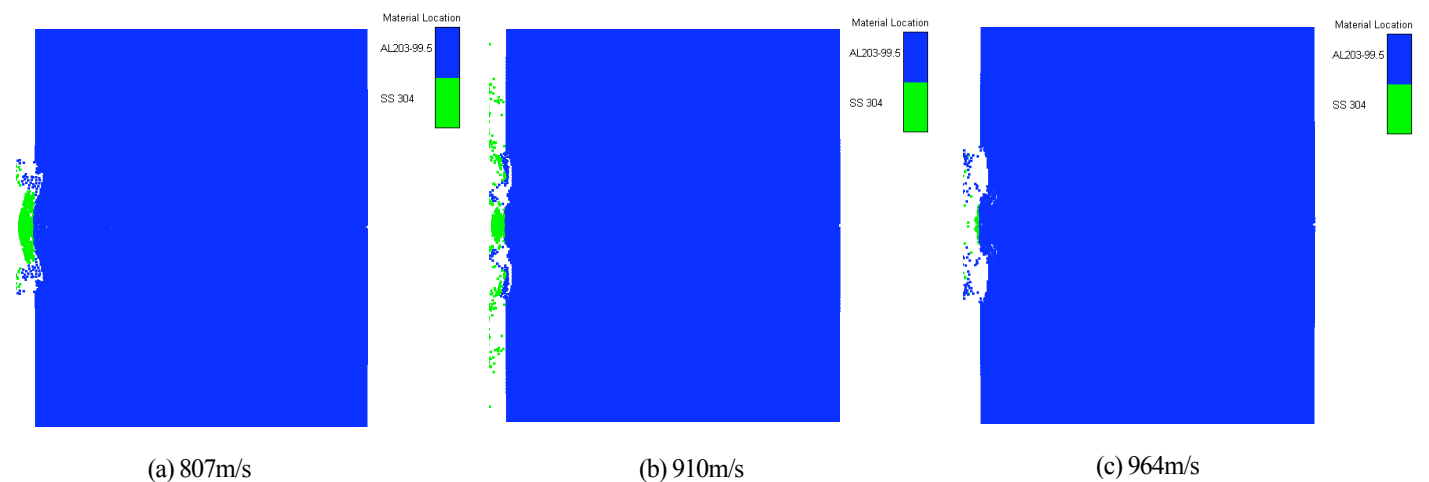


Fig.4 Simulation results of Al_2O_3 (Material Location)

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

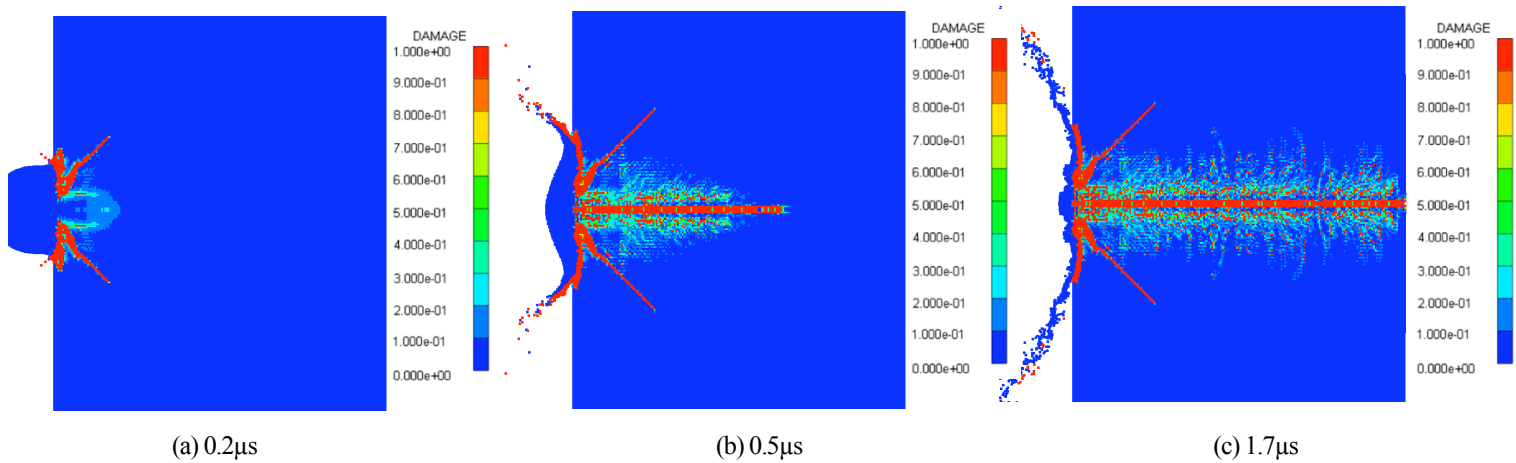


Fig.5 Damage distribution of Al₂O₃ (impact velocity=964m/s)

Animation [Fig.5](#)

Table 1 Failure diameter and depth of Al₂O₃

	Cal.	Exp.	Cal.	Exp.	Cal.	Exp.
Velocity(m/s)	807		910		964	
Diameter(μm)	813	842	932	960	953	972
depth(μm)	46.3	9.01	34.8	12.1	34.8	15.0

4. おわりに

Al₂O₃ の微粒子高速衝突に対する数値シミュレーション手法の確立を目的に、数値シミュレーションと衝突実験の比較を行った結果、衝突速度 1.0km/s 以下では、衝突痕の直径はほぼ一致したものの、深さには差異があった。

衝突速度 1.91km/s の数値シミュレーションでは、損傷深さは一致したが、損傷直径の平均値は一致しなかった。しかし、一部損傷半径が一致している部分は確認できた。

これらのことより Al₂O₃ の数値シミュレーションの妥当性を確認できた。

【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・2008 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] Y. Motoyashiki, S. Hasegawa, K. Okudaira, E. Sato "Micrometeoroid impact on ceramic thin components for interplanetary probe", International Journal of Impact Engineering

[3] 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

[4] 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

[5] 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

[6] 美濃輪秀明, 新井和吉, 佐藤英一, 元屋敷靖子, 長谷川直 "Al₂O₃ の微粒子高速衝突損傷挙動" 法政大学情報メディア教育研究センター研究報告第 21 巻、2008 年

[7] G. R. Johnson, T. J. Holmquist, " An Improved Computational Constitutive Model for Brittle Materials" , American Institute of Physics, 1994