法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-02-05

Al203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

Al₂0₃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

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 (Al_2O_3) at 1.0km/s or less km/s were conducted, and failure behaviors were examined for the purpose of obtaining the basic date 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

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

Copyright © 2009 Hosei University

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㈱)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

²⁾ 法政大学理工学部機械工学科

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 µm 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 30×50mm 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×50mm×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500µm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タイルの速度と した。

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370µm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。 AbO₃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 1.5µs、5.0µs および 15.0µs 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360µm 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)

法政大学情報メディア教育研究センター研究報告 Vol.22

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Al₂O₃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。Al₂O₃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50µs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砕し円周方向に飛散していることがわかる。また、

Al₂O₃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 50µs 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Al₂O₃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0.2µs、 0.5µs、1.7µs 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砕し円周方向に破砕する ことにより、Al₂O₃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 ち飛翔体の破砕量が少なく、飛散した破片による切削が 少ないためと考えられる。



76



Fig.5 Damage distribution of Al_2O_3 (impact velocity=964m/s)

Animation Fig.5

$\mathbf{r} = 2 - 3$						
	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

Table 1 Failure diameter and depth of Al₂O₃

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