

# スペースデブリ衝突の数値シミュレーションと可視化 低速度衝突における解析と検証実験

杉原 健司 安田 雄治  
法政大学大学院工学研究科機械工学専攻

新井 和吉 田中 豊  
法政大学工学部機械工学科

近年、宇宙開発が進むにつれて、使用済み人工衛星の破片などの宇宙ゴミ(スペースデブリ)が増加し、スペースデブリと宇宙構造物との衝突が重要な問題となっている。本研究では、スペースデブリ衝突時における宇宙構造物構成材料の損傷機構を解明し、その防止策と設計指針を最終目的としている。研究の第一歩として、スペースデブリと宇宙構造物の構成材料をそれぞれ模擬した衝突材と被衝突材を用いて、これらが低速度域で衝突した際の、衝突材の運動挙動および被衝突材の損傷挙動の数値シミュレーションを行った。また、解析結果の妥当性を検討するため、衝突現象の可視化実験および損傷実験を行った。

## 1. はじめに

現在、宇宙空間で使用済みの人工衛星などの破片、微小なメテオロイド等が宇宙構造物に衝突し多大なダメージを受けるスペースデブリ衝突現象が問題となっている。スペースデブリが宇宙構造物に衝突した際の材料の損傷挙動やその防止策を検討するために、実験および数値解析により多くの研究が行われている<sup>[1]~[4]</sup>。

宇宙構造物とスペースデブリとの相対衝突速度は、0km/s から約16km/s と低速から超高速の広範囲な速度での衝突となる。そこで本研究では、広衝突速度範囲でのスペースデブリ衝突現象とそれによる宇宙構造物構成材料の損傷機構を解明し、その防止策と設計指針を最終目的としている。その第一歩として、まず低速度域においてスペースデブリの宇宙構造物への衝突を模擬した数値シミュレーションを行った。また、衝突現象の可視化実験および損傷実験を行い、解析結果の妥当性を検討した。スペースデブリを模擬した衝突材としてはステンレス鋼を、また、被衝突材としてはアルミニウム板を用いた。

## 2. 数値解析法

### 2.1 解析法および基礎方程式

衝突現象のシミュレーションには衝撃解析ソフト(AUTODYN-2D (株)CRC ソリューションズ)を用いた。基礎方程式の立て方にはLagrangeの方法を使用した。Lagrangeの方法は、空間座標を時間の関数として記述し、あたかもその座標系の上に乗って移動するかのように扱うモデルである。この方法を離散化後、模式図的に示したのがFig.1である。この方法の場合には、物質の変形と共に座標系も変化する。

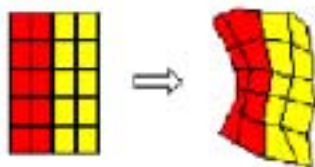


Fig.1 Lagrange 手法

衝突現象の数値解析においては連続体力学に基づき、質量、運動量、エネルギーの3つの保存則を表す基礎方程式と、物質の熱力学的特性を規定する状態方程式を連立させる。さらに、物質の強度を規定する構成則も連立させる。基礎方程式を式(1)~(3)にそれぞれ示す。

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{mass}) \quad (1)$$

$$\frac{Du_i}{Dt} = f_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{ji}}{\partial x_j} \quad (\text{momentum}) \quad (2)$$

$$\frac{De}{Dt} = f_i u_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (\sigma_{ij} u_i) \quad (\text{energy}) \quad (3)$$

### 2.2 状態方程式および構成則

スペースデブリおよび宇宙構造物構成材料を模擬した衝突材および被衝突材としては、それぞれステンレス鋼およびアルミニウムを想定した。

状態方程式には、高速衝突を想定しているため Mie-Gruneisen 型 Shock Hugoniot モデル<sup>[5]</sup>を用いた。Shock Hugoniot モデルは、衝突時に材料内部に発生する圧力  $P$  を材料の密度  $\rho$  と、内部エネルギー  $e$  の関数としたものであり、衝撃波を考慮した圧力である Hugoniot 圧力  $P_h$  および Gruneisen 係数  $\Gamma$  を用いて次式により表すことができる。これを式(4)に示す。

$$P = P_h \left( 1 - \frac{\Gamma}{2} \mu \right) + \Gamma \rho e \quad (4)$$

ここで、 $\mu$  は圧縮率である。

構成則には、予備計算において、一般的な延性材料の降伏条件である Von Mises モデルを用いて解析を行った結果、実験とのよい一致が得られなかった。この理由として、Von Mises モデルは弾完全塑性体モデルであり、加工硬化の影響等が含まれていないためであると考えられる。そこで構成則には、Steinberg-Guinan モデル<sup>[6]</sup>を用いた。このモデルは、材料の横弾性係数  $G$  および降伏応力  $\gamma$  に加工硬化、歪み速度依存性および温度依存性を考慮したモデルである。これらをそれぞれ式(5)~(7)に示す。

す。

$$G = G_0 \left\{ 1 + \left( \frac{G'_p}{G_0} \right) \frac{P}{\eta^{1/3}} + \left[ \frac{G'_T}{G_0} \right] (T - 300) \right\} \quad (5)$$

$$Y = Y_0 \left\{ 1 + \left( \frac{Y'_p}{Y_0} \right) \frac{P}{\eta^{1/3}} + \left[ \frac{G'_T}{G_0} \right] (T - 300) (1 + \varepsilon)^n \right\} \quad (6)$$

$$Y_0 [1 + \varepsilon]^n \leq Y_{MAX} \quad (7)$$

### 2.3 解析条件

衝突材のステンレス鋼は SUS304、直径 6mm の球体とした。被衝突材であるアルミニウムは AL1100-O、長さ 100mm の板材とし、厚さを 1.0mm と 0.5mm の 2 種類に変化させた。衝突速度はスペースデブリ衝突の中でも比較的低速な 40m/s ~ 500m/s の範囲とし、衝突角度は垂直衝突とした。境界条件としてはアルミニウム板の両端を完全拘束とし、2次元軸対象解析により、衝突材が被衝突材に衝突する際の衝突材の運動挙動および被衝突材の変形・破壊挙動の解析を行った。解析に使用した各材料の物性値を Table1 に示す。

Table 1 各材料の諸物性値

	SUS304	Al-1100-O
Density(g/cm)	7.9	2.707
Parameter C1(m/s)	4.57 x10 <sup>5</sup>	5.386 x10 <sup>5</sup>
Parameter S1	1.49	1.339
Gruneisen coefficient	1.93	1.97
Reference Temperature(K)	300	300
Specific Heat(c.K)(J/KgK)	4.23 x10 <sup>2</sup>	8.84 x10 <sup>2</sup>
Shear Modulus(kPa)	7.70 x10 <sup>7</sup>	2.71 x10 <sup>7</sup>
Yield stress(kPa)	3.4 x10 <sup>5</sup>	4.0 x10 <sup>4</sup>
Maximum Yield stress(kPa), Y <sub>MAX</sub>	2.5 x10 <sup>6</sup>	4.8 x10 <sup>5</sup>
Hardening Constant,	4.3 x10 <sup>1</sup>	4.0 x10 <sup>2</sup>
Hardening Exponent, n	3.5 x10 <sup>-1</sup>	2.7 x10 <sup>-1</sup>

### 3. 検証実験

数値解析結果の妥当性を検討するために、数値解析と同一の材料を使用し、ほぼ同一衝突速度範囲において衝突実験を行い、同時に衝突時の衝突材の運動挙動および被衝突材の変形挙動を高速ビデオカメラにより撮影した。評価指標としては、衝突時における衝突材の速度変化と被衝突材の損傷挙動、および衝突後の被衝突材の変形・破損量を用いた。

衝突実験装置には、圧縮空気を利用した噴流型粒子衝突試験機と、当研究室で試作中の飛翔体発射装置を用いた。噴流型粒子衝突試験機は固体粒子をコンプレッサーからの圧縮空気により助走管内で加速した後に噴射させ、助走管直後においた試験材料に衝突させるものである。衝突現象の可視化には、高速ビデオカメラ(株)島津製作所・KS-100(最大毎秒 100 万フレーム)、および(株)フロン・FASTCAM-ultima(最大毎秒 40,500 フレーム)を使用した。被衝突材であるアルミニウム板は一辺が 170mm の正方形試験片を、Fig.2 に示すように中央に直径 100mm の穴の空いた 2 枚のホルダーに挟み 8 個のボルトを用いて固定し、さらにこれを上記衝突実験装置の助走管直

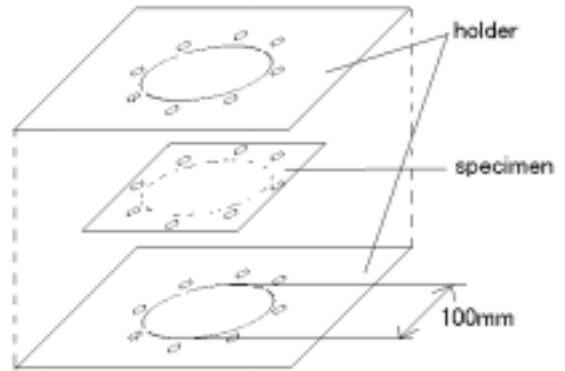


Fig.2 試験片の固定方法

後に固定し、衝突材を衝突させた。なお、実験は大気中、室温にて行った。

### 4. 結果及び考察

ステンレス鋼球をアルミニウム板に約 100m/s 以下の速度で衝突させた場合の解析結果の一例として、Fig.3 に衝突速度 60m/s における衝突前後の解析画像を示す。この速度領域ではステンレス鋼球は反発し、アルミニウム板に塑性変形が生じた。反発現象における解析値と実験値の比較として Figs.4 および 5 に、アルミニウム板の厚さがそれぞれ 0.5mm および 1.0mm における、衝突材衝突速度とアルミニウム板中央の最大損傷深さとの関係を示す。解析値と実験値はほぼ良い一致を示すことがわかった。また、衝突速度が増加するにつれ最大損傷深さも増加し、さらに試験片が厚いものほど最大損傷深さが減少している。Figs.6, 7 には、上記と同様の衝突条件における衝突材の衝突速度と反発速度との関係を示す。実験値の反発速度が解析値よりも低い値となっている。これは、実験において反発後に衝突材が圧縮空気の影響を受け減速されたためであり、解析においても圧縮空気の流動の影響を組み込めれば、さらに解析値が実験値に近づくものと考えられる。

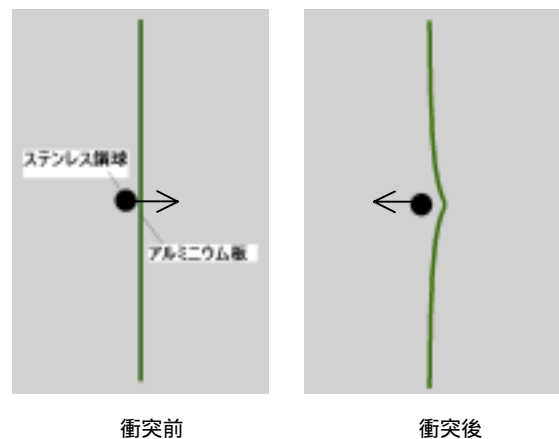


Fig.3 反発現象の数値解析結果の一例  
(衝突速度 60m/s, t=1.0mm)

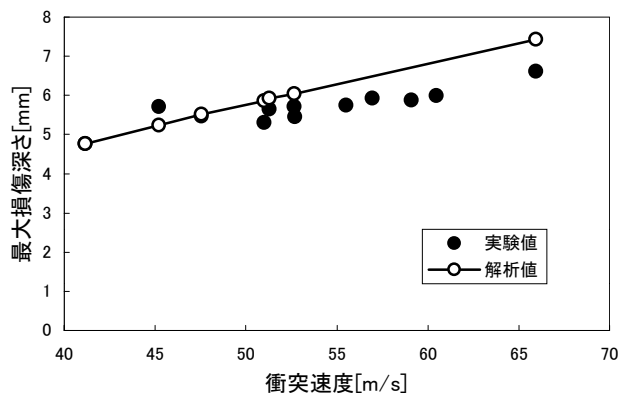


Fig. 4 衝突速度と最大損傷深さの関係 (t=0.5mm)

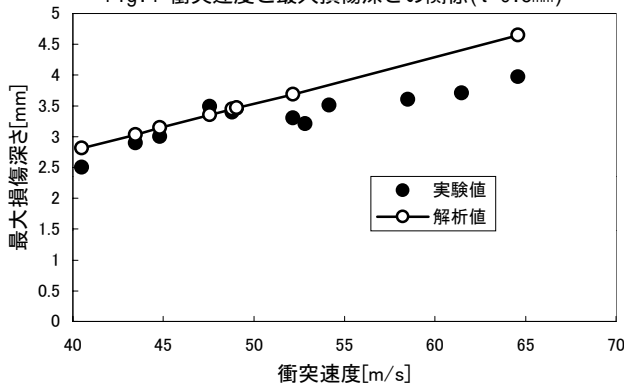


Fig. 5 衝突速度と最大損傷深さの関係 (t=1.0mm)

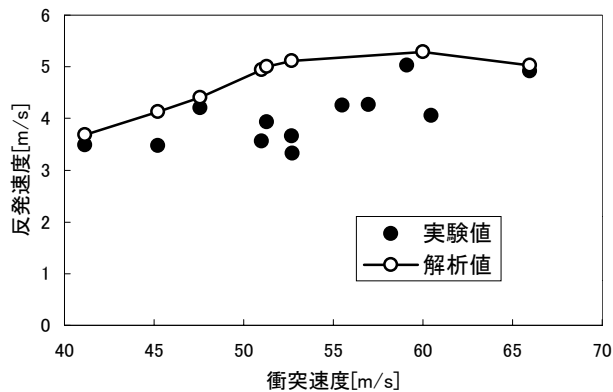


Fig. 6 衝突速度と反発速度の関係 (t=0.5mm)

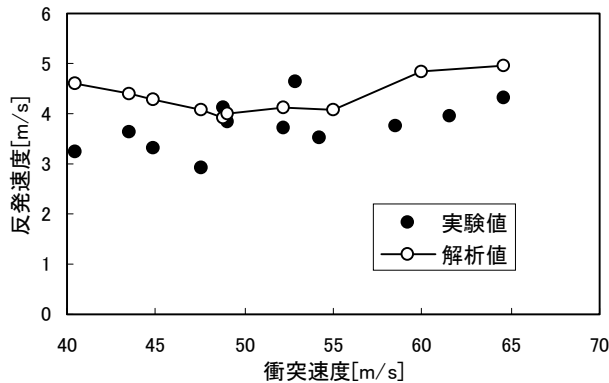


Fig. 7 衝突速度と反発速度の関係 (t=1.0mm)

次に、ステンレス鋼球の衝突速度を上げると、ステンレス鋼球がアルミニウム板を貫通する現象が生じた。厚さ0.5mmのアルミニウム板に衝突材を速度216m/sで衝突させた場合の解析画像の一例を Fig.8 に、また、高速ビデオカメラによる衝突前後の撮影画像を Fig.9 に示す。解析画像および撮影画像ともに、貫通後の衝突材の前方に、カップ状のアルミニウム板の破片が存在することがわかる。貫通現象における解析値と実験値の比較として、Table 2 に衝突速度 216m/s における衝突材の貫通後速度、アルミニウム板の貫通痕の直径、およびカップ状に引き剥がされた破片直径の比較を示す。実験値と解析値は良い一致を示していることがわかる。破片の直径で多少差違が見られるのは、実験において衝突材が試験片の中心から少しずれて衝突していたためと考えられる。

以上の結果より、ステンレス鋼球とアルミニウム板の衝突において、反発現象および貫通現象ともに、解析値と実験値が良い一致を示し、解析結果の妥当性が検証された。

そこで、解析により反発現象から貫通現象へ変化する衝突遷移速度を求めた。その結果を Fig.10 に示す。衝突速度を徐々に増加させていくと 127m/s において貫通現象が生ずることがわかった。

Fig.11 には、厚さ 0.5mm のアルミニウム板における衝突速度と運動エネルギー損失の関係の解析結果を示す。ここで、運動エネルギー損失とは、衝突材の衝突前後の運動エネルギーの差である。衝突速度が増加するに伴い運動エネルギー損失は増加するが、127m/s 付近で変曲点が現れている。この速度は衝突遷移速度であることがわかる。さらに貫通現象の速度域である約 180m/s で 2 番目の変曲点が現れている。最初の変曲点と 2 番目の変曲点との間の速度域では、アルミニウム板がステンレス鋼球の接触中央から破断しているのに対し、2 番目の変曲点以降の速度域では、Figs.8 および 9 に示したように、アルミニウム板がステンレス鋼球の接触周辺から破断してカップ状に引き剥がされた破片が生じていることがわかった。衝突時におけるアルミニウム板の応力分布を検討した結果、最初の変曲点と 2 番目の変曲点の間では、ステンレス鋼球とアルミニウム板の接触中心部で応力集中が起こり、クラックが生じて破断しているのに対し、2 番目の変曲点以降では、ステンレス鋼球とアルミニウム板の接触周辺部分の応力が高まり、せん断破断していることが確認された。以上のことより、運動エネルギー損失に変曲点が現れるのは、アルミニウム板の損傷メカニズムが変化したためであることがわかった。

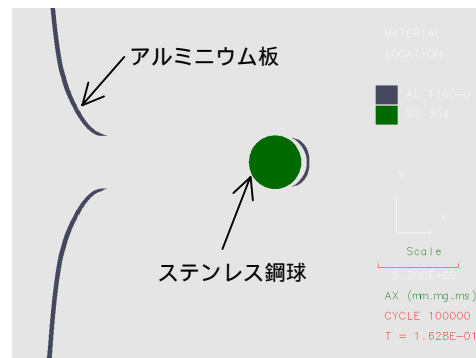


Fig. 8 貫通後の解析画像 (衝突速度 216m/s, t=0.5mm)

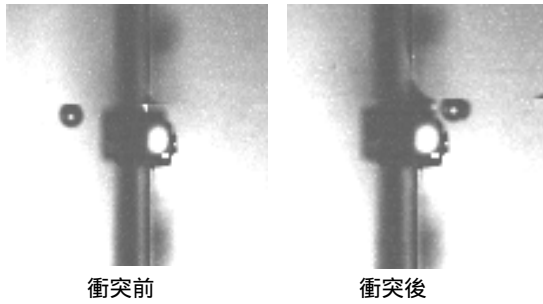


Fig.9 衝突前後の高速度ビデオカメラ画像  
(衝突速度 216m/s, t=0.5mm, ㈱島津製作所・KS-100(毎秒 10 万フレーム))

Table 2 貫通現象での解析値と実験値の比較

	衝突速度	貫通後速度	貫通痕の直径	破片の直径
解析値	216m/s	187m/s	5.98mm	5.50mm
実験値		181m/s	5.90mm	4.86mm

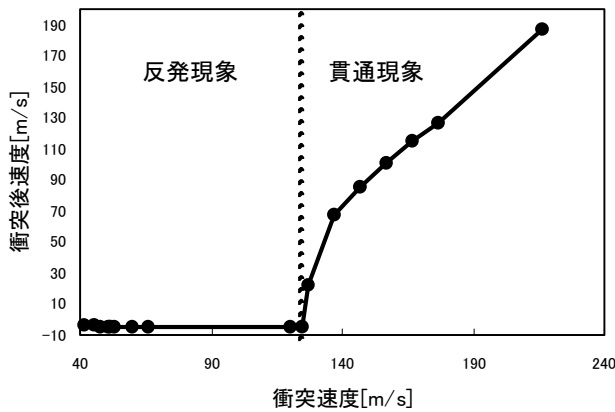


Fig.10 衝突速度と衝突後速度の関係(t=0.5)

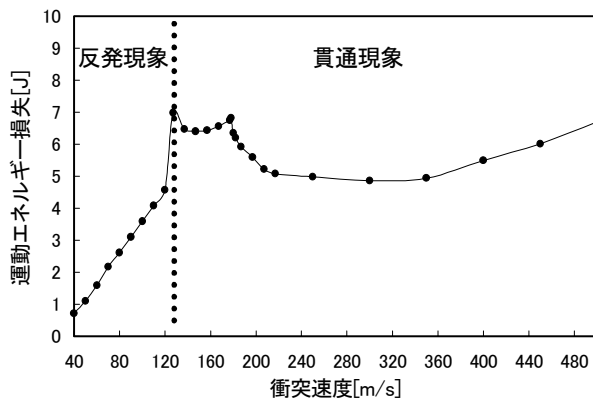


Fig.11 衝突速度と運動エネルギー損失の関係(t=0.5)

## 5. おわりに

スペースデブリの宇宙構造物への衝突を模擬したステンレス鋼球とアルミニウム板の低速度域における衝突、破壊現象の数値シミュレーションを行い、実験との比較検討を行った。その結果、反発現象および貫通現象とも解析結果は実験値と良い一致を示し、低速度域で金属

などの延性材料の衝突現象を解析する場合には、状態方程式に Shock Hugoniot モデルが、構成則には Steinberg-Guinan モデルが適していることがわかった。また、数値解析により反発現象から貫通現象へ変化する衝突遷移速度が求められ、さらにアルミニウム板の損傷メカニズムが変化する衝突速度において、衝突材の運動エネルギー損失が変化することがわかった。

【謝辞】本研究は、法政大学計算科学研究センター、2001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。また、解析を行うにあたり御協力戴いた㈱CRC ソリューションズの片山雅英氏、高速度ビデオカメラ撮影において御協力戴いた㈱島津製作所の諸氏、および㈱フォトロンの藺部広氏に厚く感謝いたします。

## 使用記号

$u$ : velocity components,  $x$ : x-coordinate,  $f$ : force components,  $\sigma$ : stress tensor,  $\epsilon$ : strain,  $\Delta$ : compression(volume),  $T$ : temperature(degrees K),  $p$  and  $T$ : pressure and temperature at the reference state ( $T = 300$  K,  $p = 0$ ,  $e = 0$ ),  $C$ : bulk sound speed,  $S$ : specific entropy

## 参考文献

- [1] Ronald P. Bernhard, Eric L. Christiansen, James Hyde, Jeanne L. Crews, "HYPERVELOCITY IMPACT DAMAGE INTO SPACE SHUTTLE SURFACES", *Int. J. Impact Engng. Vol.17, pp57-68, 1995*
- [2] ROBERTO DESTEFANIS, MORENO FARAUD, and MARCO TRUCCHI, "COLUMBUS DEBRIS SHIELDING EXPERIMENTS AND BALLISTIC LIMIT CURVES", *Int. J. Impact Engng. Vol.23, pp181-192, 1999*
- [3] 片山雅英, "Hydrocode による超高速現象の数値シミュレーション", スペースデブリ・ワークショップ, 平成3年11月, 文部省宇宙科学研究所
- [4] 片山雅英, "流体と固体の衝撃シミュレーション", 高圧力の科学と技術 第8巻 第4号別刷り, 1998
- [5] Cowler, "Gruneisen Forms Of Equations Of State.", Unpublished memo
- [6] Steinberg, Cochran & Guinan, "A Constitutive Model For Metals Applicable At High-strain Rates.", *J. Appl. Phys.* 51(3), March 1980
- [7] Century Dynamics, Inc., "AUTODYN users manual"

キーワード.

スペースデブリ衝突、数値シミュレーション、可視化、低速衝突

-----

Summary.

**Numerical simulation and visualization of space debris impact  
- Analysis in the low speed impact and verification by experiment-**

Kenji Sugihara Yuji Yasuda  
Graduate school , Hosei University

Kazuyoshi Arai Yutaka Tanaka  
Department of Mechanical Engineering, Hosei University

In recent years, as space development proceeds, the space debris such as a flake of the artificial satellite that has been used has increased markedly in the cosmic space. The speed of space debris is the ultra high-speed of about 8km/s, and the phenomenon that the space debris collides to the space structure causes a serious problem. The purpose of this research is to clear the damage mechanism of the composition material when the space debris collides to the space structure. As the first step, the impact phenomenon in low speed region was simulated numerically. Furthermore, the visualization experiment of the impact phenomenon and the damage experiment were investigated to examine the validity of the results of numerical analysis.

Keywords.

space debris impact, numerical simulation, visualization, low speed impact