

A17 不規則セル構造体を持つ衝撃吸収用オープンセル型

ポーラス金属の FEM 解析

高玉怜史 (首都大・院), 濱口拓也 (首都大・院), 関根将弘 (首都大・学), 北菌幸一 (首都大)
Satoshi Takatama, Takuya Hamaguchi, Masahiro Sekine, Koichi Kitazono (Tokyo Metropolitan University)

1. 諸元

本研究室は火星衛星探査計画, 通称 MMX(Martian Moons eXploration)と呼ばれるプロジェクトに関わっている。2024 年の探査機打ち上げに向けた構想が練られている, この計画の主な目的は, 火星の形成明らかにし, 火星および地球型惑星の形成過程に対する新たな知見を得ることである。火星衛星および火星表層の変遷をもたらすメカニズムを明らかにすることによって, 火星衛星を含めた”火星圏”の進化史に新たな知見を与えることがこの計画の目標である¹⁾。

MMX は, 地球から出てサンプルを回収するまでにいくつかのシーケンスに分割されるが, 本研究室では, 着陸シーケンスの, 「着陸」の際の衝撃吸収材の検討を行っている。この計画において重要視されているのが「おりたいところに降りる」というピンポイント着陸であるため, 従来のようなスラスターを使った軟着陸やエアバックを利用した着陸方法とは異なる着陸方法によって落下時の衝撃を消散させる必要がある。このピンポイント着陸を実現させるために考えられている方法が, 着陸脚内部に衝撃吸収材を装填することである。現段階で想定されている衝撃吸収材の候補として挙げられているのが, 3D 積層造形によって作製された, オープンセル型ポーラス金属である。オープンセル型ポーラス金属の利点として挙げられているのは, 今までの衝撃吸収機構よりも軽量であり, 設計自由度が高く, 衝撃吸収特性が優れているということである。オープンセル型ポーラス金属の中でも, かつて Kelvin が提唱した, 同じサイズの物体で空間充填するための最小面積で最も良い形状であるとされる, 切頂八面体を用いたモデルがフォーム構造の最適な形状であると注目されてきた²⁾。実際に今回の惑星着陸シーケンスにおいても, このモデルが採用されることが想定されている。しかし, 切頂八面体をユニットセルにもつような, 規則的なセル構造体には異常な機械的特性が存在しており, 圧縮方向によってせん断帯が発生し, 応力が急激に低下する³⁾。これはボルダーや斜面への着陸の可能性のある惑星着陸において, 衝撃吸収が不十分となる恐れがある。

これらの問題を解決するためにオープンセル型の不規則セル構造体の考察を本研究では行っている。乱数発生による母点配置によって作製された不規則セル構造体はせん断帯の抑制はできたものの, 衝撃吸収特性の低下がみられた。そこで, ランダム球充填法を用いた母点配置を使うことで, 母点の間隔を制御しながら, 不規則セル構造を作製する方法を提案する。ランダム球充填法によって得られた母点配置を Voronoi 分割することによって不規則セル構造体を作製した。作製された不規則セル構造体の中で衝撃吸収材として優れている構造を見つけ出し, FEM 解析を行うことによって圧縮特性を評価する。

2. 実験方法および数値解析設定

2.1 モデル作成

三次元空間内における球の充填方法はいくつかあるが、その中でも、小さく軽い粒子を緩やかに充填することで得られる、疎充填と呼ばれる充填方法を用いた²⁾。この方法で作製される球の充填率は59%から60%である。母点配置をした後、3D-Voronoi 分割を行い、分割線を直径 t mm の円柱に拡張することによってモデルを作製する。その時の概要を Fig. 1 に示す。

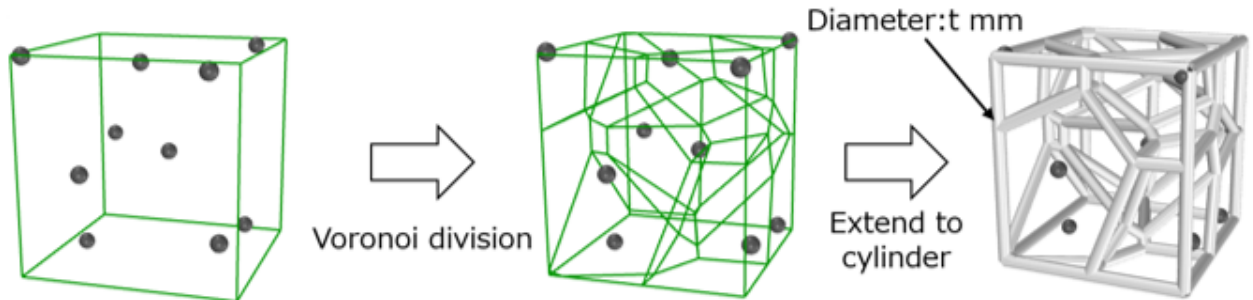


Fig. 1 Production method of porous model by 3D-Voronoi division of point arrangement.

球の体積が等しい場合、式(1)で示すような無次元母点密度(Dimensionless Seeding Density, ρ_d)と相対密度(Relative Density)の関係を用いることができる。その時の遷移曲線を Fig. 2 に示す³⁾。

$$\rho_d = \frac{Nt^3}{L^3} \quad (1)$$

ここで、 N は母点の数、 L は充填する立方体の1辺の長さ、 ρ^* はモデルの密度、 ρ_s は緻密体の密度である。

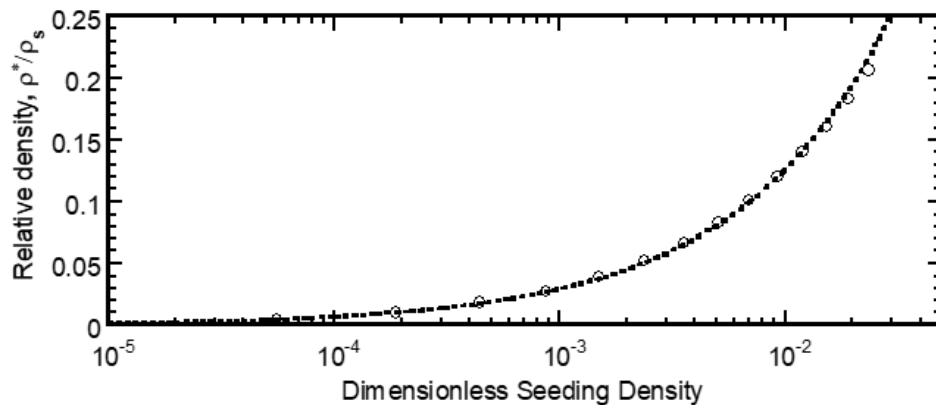


Fig. 2 Relation of relative density to the dimensionless seeding density.

Fig.2 から $L=30$ mm, $t=1$ mm で気孔率 90 %のモデルを作製するためには、 N は 200 個となる。よって、200 個の母点を決められた領域内にランダムに配置し、その母点を球に拡張させ、球同士が重なっていたら反発させることで安定する位置に球を移動させる。最後に球の中心を母点とした Voronoi 分割を行い不規則セル構造体を作製した。

圧縮特性の評価には式(2)で示すエネルギー吸収量 W と式(3)に示すエネルギー吸収効率 W_e を用いた。ここで、 σ_0 はひずみ ε_0 までの最大応力、 ε_0 は積分範囲の上限値を表している。今回は、50%ひずみを上限値としている。

$$W = \frac{1}{100} \int_0^{\varepsilon_0} \sigma \, d\varepsilon \quad (2)$$

$$W_e = \frac{W}{\sigma_0 \varepsilon_0} \times 10^4 \quad (3)$$

2.2 解析設定

今回の解析では、積層時の欠陥や材料の内部欠陥は考慮せず、等方的な弾塑性モデルとして計算を行う。ポアラス金属の材料モデルとして、べき乗則の等方硬化則を使用した。Table 1 に示した材料パラメータは 803K, 2h で焼きなましを施した Al-10%Si-0.3%Mg 合金を参照した⁴⁾。

Table 1 Material parameters of Al-10Si-0.3Mg alloy.

Material density, ρ /(kg/m^3)	2670
Young's modulus, E_s /GPa	70
Poisson ratio, ν	0.33
Yield stress, A /MPa	72.1
Hardening modulus, B /MPa	144.2
Hardening exponent, n	0.1
D_1	0.01
D_2	0.73
D_3	-0.25

材料の破壊則は、Johnson-Cook 破壊則を導入した。このモデルでは、材料の応力状態ごとに損傷度を定義することで圧縮や引張、多軸応力状態で異なる破壊ひずみを定義できる。Johnson-Cook 破壊則の構成式は要素が削除される際のひずみを表す、破壊ひずみ ε_f と静水圧応力成分の影響を表す指標である応力三軸度 σ^* を用いて式(4)のように示される。

$$\varepsilon_f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)] \quad (4)$$

FEM 解析は ANSYS ver. 19.0 を用い、LS-DYNA による陽解法動解析を行った。試験モデルの上下を $\phi 50 \times 1$ mm の剛体板で摩擦なし接触をさせ、圧縮解析を行った。モデル全体の接触条件は単一面接触とし、モデル側面は自由拘束とした。下部の板は固定し、上部の板は z 方向にのみ変位するように境界条件を設けた。ひずみ速度は、板の z 方向の速度を制御することで、 1000 s^{-1} とした。

メッシング方法は、四面体要素を導入し、パッチインディペンデント機能を使用した。パッチインディペンデントとは、最大要素サイズや無視するジオメトリのパラメータを設定することで、微小領域を無視しつつメッシングする手法である。メッシュの最大サイズを 0.5 mm とし、今回作製した不規則モデルの要素数は約 300,000 となった。

3. 実験結果および考察

不規則セル構造体は、3D-CAD ソフトウェア Rhinoceros 6 と Grasshopper を用いて作製された。球の体積が等しい場合のランダム球充填モデルのほかに、球の半径を標準偏差(Standard Deviation,SD)をもとにそれぞれ 0.2 mm, 0.4mm 変化させた 2 種類のモデルを作製した。その時のヒストグラムを Fig. 3 に示す。このようにして、球のサイズにばらつきを持たせた、一辺 30 mm の立方体の不規則モデルを 3 種類作製した[Fig. 4].

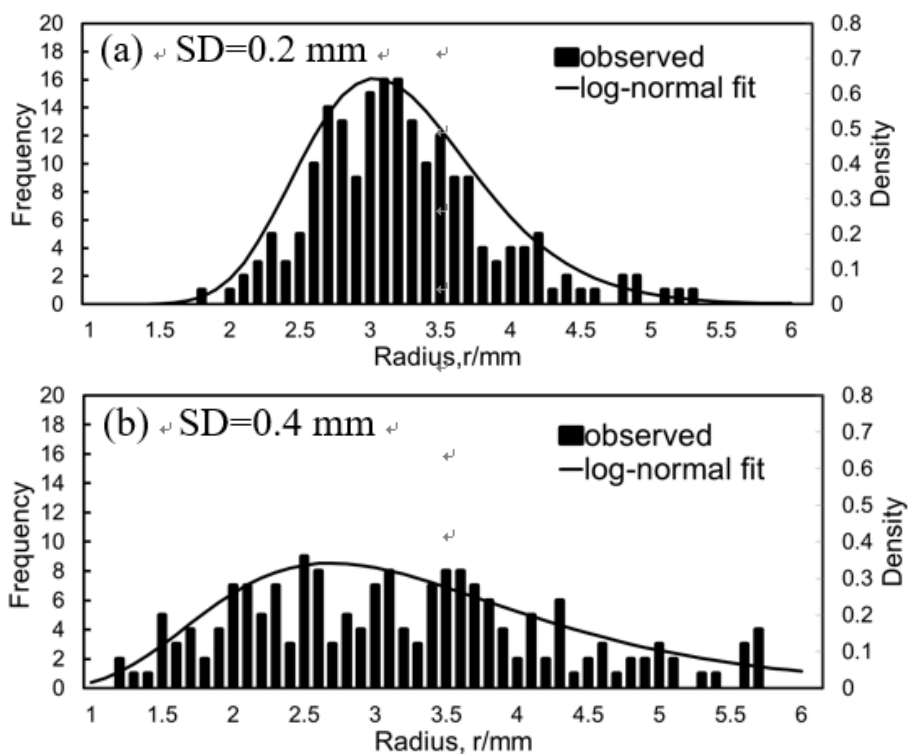


Fig. 3 Histogram when the standard deviation of the sphere radius is (a) 0.2 and (b) 0.4.

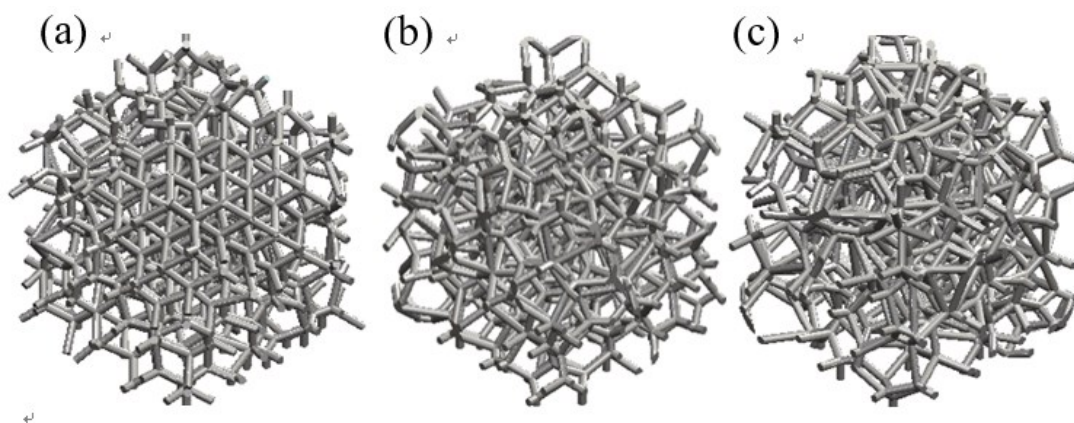


Fig.4 Images of random sphere packing model. Standard deviation of sphere radius is (a)0, (b)0.2, (c) 0.4

ランダム球充填法によって作製された3種類のモデルの圧縮ひずみ5%, 10%のときの相当応力分布のコンター図を **Fig. 5** に, 応力-ひずみ曲線, エネルギー吸収特性の評価をそれぞれ **Fig. 6** に示す. モデル全体に共通して, せん断帯はみられなかった. SD0.4-model について, 5%から10%ひずみの間で応力低下が起こった. それは応力が他の2つのモデルと比べて下部にほとんど伝わらず, 局所的な座屈が発生することが原因である. SD0-model は SD0.2-model と比較すると, 15 から20%ひずみにおいて, 応力低下が小さくなっており, 結果的にエネルギー吸収効率が高くなっている. これは全体的に母点間距離ばらつきが小さいことでセルサイズのばらつきが小さくなり, 局所的な破壊が発生しないことによるものである.

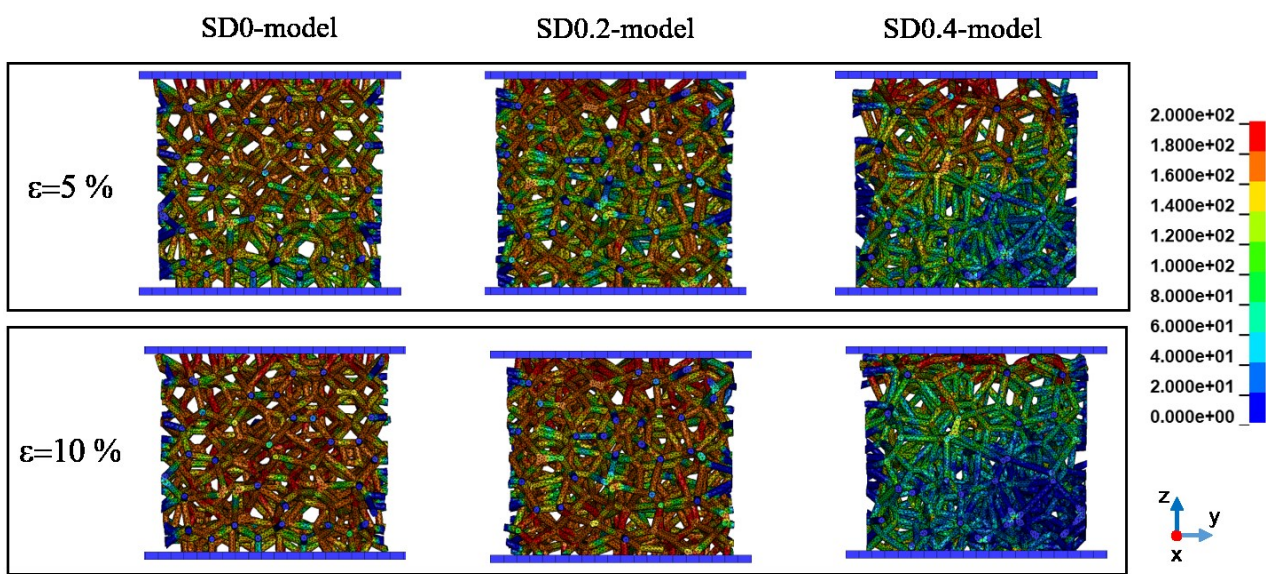


Fig. 5 Equivalent stress distribution of S0-model, S0.2-model and S0.4-model at 5% & 10% strain.

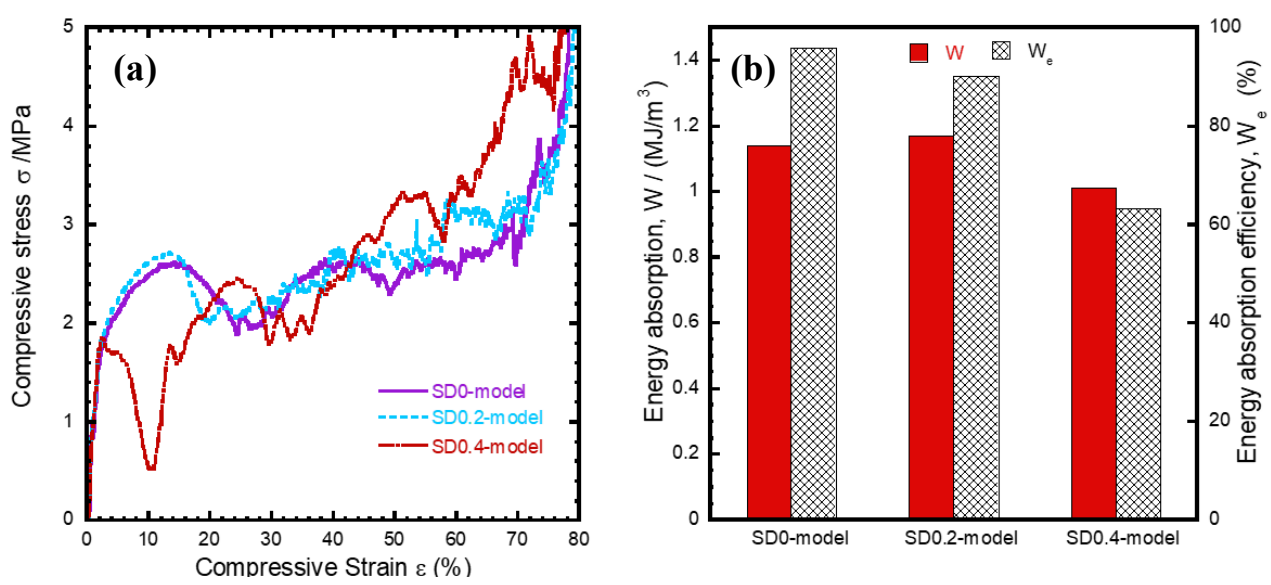


Fig. 6 Compressive stress Compressive strain curve, (b) energy absorption and energy absorption efficiency of random sphere packing model.

4. 結言

Voronoi 分割により作製された不規則セル構造体の圧縮変形を FEM 解析したことで以下の知見を得た.

- ・ランダム球充填法により作製された不規則セル構造体には、せん断帯は発生しない.
- ・標準偏差が小さいモデルほうがエネルギー吸収量, エネルギー吸収効率ともに優れていた.
- ・標準偏差が大きいモデルの場合, 局所的な座屈が発生し, 応力低下が起こる.

本研究の一部は宇宙航空研究機構の SLIM および MMX プロジェクトの協力により実施された.

参考文献

- 1) 川勝康弘, 倉本圭, 大嶽久志, 今田高峰, 馬場肇: 宇宙科学技術連合講演会講演集, **57**, 2018, 1C01
- 2) L. J. Gibson M. F. Ashby: Cellular solids, 第2版, (1997), Cambridge University Press
- 3) Xue-Zheng Yue, Keiji Matsuo, Koichi Kitazono: Materials Transactions, **58**, (2017), pp.1587-1592
- 4) 山田修二, 菅野仁子, 宮内美樹: IPSJ SIG Technical Report, **85**, (2011), 18
- 5) Feng.Xiao, Xiaolong Yin: Computers & Mathematics with Applications, **72-2**, (2016), pp328-348
- 6) 三浦汀桜子, 大森健司, 北菌幸一: 軽金属, **69-6**, (2019), pp309-311