

A16 不規則セル構造を有する 3D 積層造形ポーラス金属の圧縮変形

濱口 拓也 (首都大・院), 高玉 怜史 (首都大・院), 関根 将弘 (首都大), 北菌 幸一 (首都大)

Takuya Hamaguchi (Tokyo Metropolitan University), Satoshi Takatama (Tokyo Metropolitan University),

Msahiro sekine (Tokyo Metropolitan University), Koichi Kitazono (Tokyo Metropolitan University)

1. 研究背景

JAXA では月面着陸探査プロジェクトである SLIM (Smart Lander for Investigating Moon) の開発が進められている^{1),2)}. SLIM では将来の惑星探査に必要とされるピンポイント着陸技術および機体の小型・軽量化が目的であり, そのためには様々な要素技術の実証試験を行う必要がある. 我々はその中で着陸時の衝撃を緩和するための衝撃吸収機構の開発に注目した. SLIM ではポーラス金属を用いた衝撃吸収機構の採用が決定している. この衝撃吸収機構を採用することにより, 小型・軽量の機体で従来の「降りやすいところに降りる」着陸ではなく, 「降りたいところに降りる」ことが可能になる. この目的を達成するためには, 優れた衝撃吸収特性を有するポーラス金属の開発が求められる.

ポーラス金属は材料内部に多数の気孔を有し, 緻密体より材料特性の範囲を大幅に拡大できるため, 近年まで多くの研究が行われた. 本研究はポーラス金属の持つ優れた衝撃吸収特性に着目した. ポーラス金属の代表的な製造法として発泡法がある³⁾⁻⁵⁾. このポーラス金属は安定した圧縮挙動を示し, 高いエネルギー吸収特性を有する. しかし, 相対密度やセル形態の制御が困難であるという欠点がある. そのため, 本研究ではポーラス金属の作製方法の一つである 3D 積層造形法を用いた⁶⁾. これは 3D-CAD データを基にモデルを作製する方法である. そのため, 他のポーラス金属の作製手法よりも複雑な構造を製作でき, 気孔率やセル形態の制御が可能である. この手法では 3D-CAD の設計が必要であり, 空間充填多面体などの規則的な多面体をセル形態としたモデルは設計が容易なため, 規則セル構造の圧縮特性に関する研究が行われた. 規則セルを有するポーラス金属はマクロな破壊で生じるせん断帯による応力の低下という問題が生じた⁷⁾⁻⁹⁾. 応力の低下は衝撃吸収材としての性能を著しく減少させるため, 設計する際に障害となる. 一方で, 3D 積層造形法で作製された不規則セルをもつポーラス金属はモデルの作成・設計が難しく, 研究があまりされていない.

本研究ではこれらを解決するために Voronoi 分割法による不規則セル構造を有するポーラス金属を考案した. Voronoi 分割とは空間上に複数の母点を配置し, その母点に対して隣り合う母点の垂直二等分線で領域分割を行う手法である. Voronoi 分割で作製したモデルの圧縮解析を有限要素法(Finite Element Method)で行い, 衝撃吸収特性を評価する. その結果を規則セル構造モデルと比較し, セル構造の規則度が圧縮特性に及ぼす影響を調査した.

2. 不規則セルの設計

不規則セル構造を有するポーラス金属は 3D-CAD ソフトウェアである Rhinoceros6 と Grasshopper を使い, Voronoi 分割法で設計した. Voronoi 分割法の領域分割は母点の配置に依存するため, 規則から不規則すべての構造を設計できる. 例えば, 規則セル構造の場合 Voronoi 分割法の母点配置が体心立方(bcc)格子構造では切頂八面体(bcc-Voronoi)が形成される¹⁰⁾. 本研究ではこの特性を利用し, bcc 構造の母点を任意の距離動かすことで不規則セル構造を有するポーラス金属を作成した. Fig.1 に設計方法の模式図を示す. 母点を bcc 構造に配置, その母点を任意の距離で再配置する (Fig.1a). 小さい点が初期の母点配置 M^0 (bcc 構造配置)であり, 大きい点が再配置点 M^r である. Fig.1b は Fig.1a の円で囲った部分を拡大した図である. 再配置点 M^r は初期に配置した母点 M^0 を任意のベクトル \mathbf{r}_n で 3 次元空間を移動させることで再配置する. この操作は(1)式で定義される.

$$M_n^0(m_x^0, m_y^0, m_z^0) + \mathbf{r}_n = M_n^r(m_x^r, m_y^r, m_z^r) \quad (1)$$

この操作を n 個すべての母点に対し行った. また, ベクトル \mathbf{r}_n の大きさは $0 < |\mathbf{r}_n| < 0.5d$ の範囲で設定し, 値が大きいほど不規則な構造を形成する. ここで d は bcc 構造配置の再隣接母点間距離である. その後, 再配置した母点に Voronoi 分割を行い, 不規則セルを作製した(Fig.1c).

本研究では規則及び不規則セル構造を有するポーラス金属を設計した. これらのモデルを設計する際に, 規則と不規則の両方を同様の基準で比較するための設計パラメータを定義する必要がある. 本研究

ではこのパラメータとしてセル構造のランダム性を表す規則度 R を(2)式で定義した.

$$R = \frac{\bar{\delta}}{\bar{d}} \quad (2)$$

\bar{d} は隣接する m 個の母点の平均距離, $\bar{\delta}$ は m 個の母点の最小距離の平均である. Fig.1(d)に示すように距離を決定していく. 以下に一連の操作を具体的に示す.

(i)再配置母点 M_1^r に対して隣接する m 個の点に対して d_1^1 から d_1^m までの距離を取得する. (ii) d_1^1 から d_1^m の距離データの中から最小距離 δ_1 を抽出する. (iii) M_1^r から M_n^r までの n 個すべての母点に対して(i), (ii)の操作を行う. (iv) mn 個の距離から平均距離 \bar{d} を, n 個の距離から最小距離の平均 $\bar{\delta}$ を算出する. また, \bar{d} と $\bar{\delta}$ は以下の式で定義される.

$$\bar{d} = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m d_j^i \quad (3)$$

$$\bar{\delta} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \delta^k \quad (4)$$

ここで m は生成される Voronoi セルの面数であり, bcc-Voronoi は $m=14$ となる. R は $0 < R \leq 1$ の範囲をとり, $R=1$ で完全な規則セル構造を生成する. また, この値が小さいほど不規則セル構造を形成し, 生成されるセルのサイズや形状のばらつきが大きくなる.

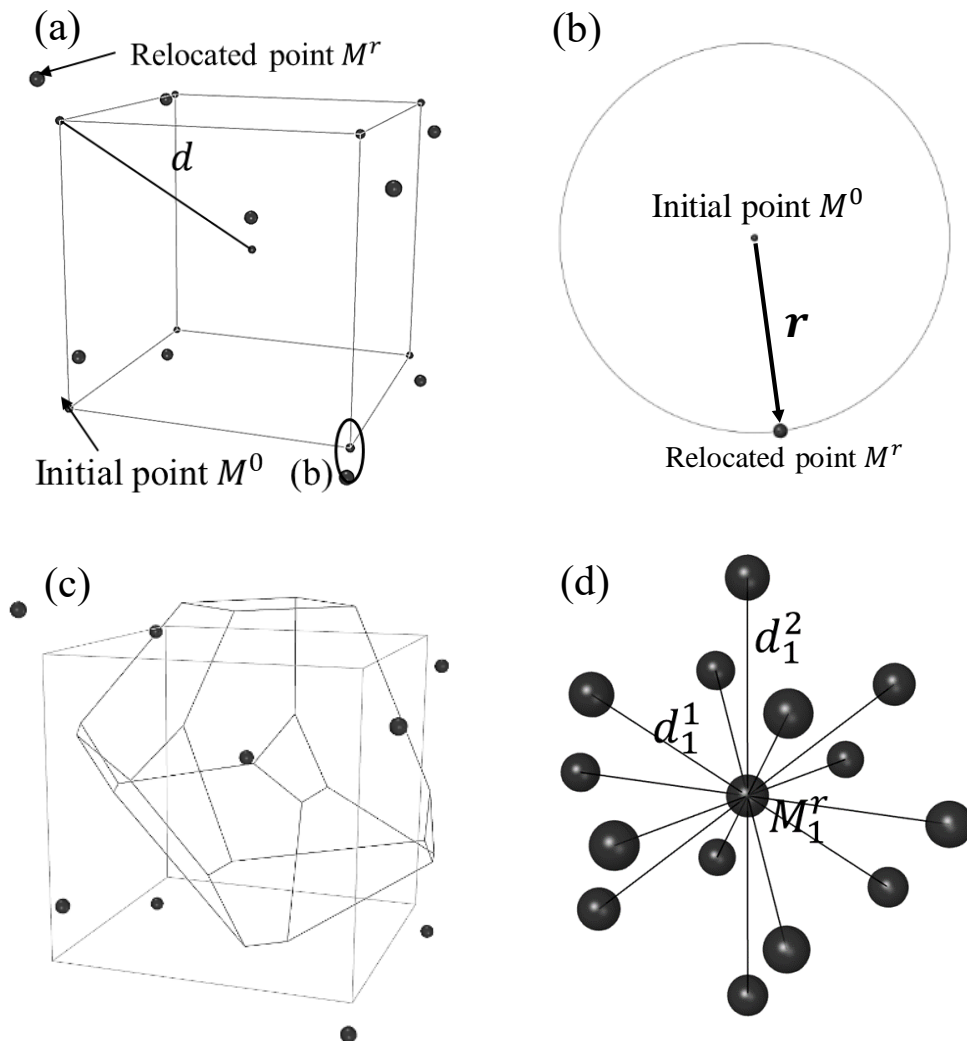


Fig. 1 Image of bcc-Voronoi of (a) rearrangement of seed points and (b) 2D-offset diagram and (c) Voronoi division of relocated seed points and (d) Explanation of definition of regularity

3. FEM 解析および実験方法

解析モデルは公称気孔率 90%, Strut 直径 1 mm, 30 mm の立方体, セル構造 bcc-Voronoi-001, $R = 0.7, 0.8, 0.9, 1$ のパラメータで計 4 個作製した. 解析ソフトは ANSYS ver.18.0, ソルバーは LS-DYNA で陽解法動解析を行った. 解析条件は作製したモデルの上下に板を設置し, 下部の板を固定, 上部の板を圧縮方向に速度を与えて圧縮解析を行った. 接触は上部と下部の板ともにモデルと摩擦無し接触, モデル全体には相互接触とした. 板の速度を調整して, ひずみ速度を 1000 s^{-1} で行った. 材料特性は Table 1 に示す Al-10Si-0.3Mg の値を使用した. 実験の挙動を再現するために Johnson-Cook の破壊則を適用した⁴⁾. ポーラスモデルを四面体一次要素で離散化し, 要素数は約 6.4 個/mm^3 で解析を行った.

また, 供試材は CAD データの中で $R=1, 0.9$ のモデルを株式会社コイワイにて 3D 積層造形法により作製した. これらの供試材に対シアズワン製小型プログラム電気炉で 523K, 2h の焼なまし処理をした後, クロスヘッド速度 10 mm/min で準静的圧縮試験を行い, 圧縮応力ひずみ曲線を取得した.

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

Density $\rho_s / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2670
Modulus of elasticity E_s / GPa	70
Poisson's ratio ν	0.33
Yield strength A / MPa	72.1
Strain hardening parameter B / MPa	144.2
Strain hardening exponent n	0.1
Johnson-Cook parameter	
D_1	0.01
D_2	0.73
D_3	-0.25

4. 解析結果

FEM 解析を行い, 全モデルでひずみ 80%まで解析を行うことが出来た. Fig. 2 に規則度 $R = 0.7, 0.8, 0.9, 1$ モデルのそれぞれの応力ひずみ曲線および, ひずみ 25%における変形挙動を示す.

それぞれの応力ひずみ曲線に注目すると $R = 1$ ではひずみ 25%付近で急激な応力の低下が発生している. 一方で $R = 0.7, 0.8, 0.9$ では応力の減少が $R = 1$ と比べて小さくなった. これはそれぞれのモデルの変形挙動からわかるように, 規則モデルで発生していた斜め方向のマクロな破壊が, 不規則モデルでは発生しないためである. 変形挙動を見ると $R = 1$ のひずみ 25%では連続的な破壊による 45 度方向のマクロ破壊が観察された. それ以外のモデルでは斜め方向に破壊されずに, 層状に圧縮が行われている. 規則モデルでは斜めの Strut に応力が集中し, それによる破壊が連続的に発生することでマクロ破壊が生じている. 不規則モデルでも応力の集中による破壊が生じるが, その破壊は連続的ではなく局所的に生じるため, マクロな破壊を抑制することができた.

5. 考察

この項では設計したポーラス金属の実験及び解析結果を比較することで解析の有用性について述べる. 3D 積層造形で作製した実験試料の気孔率は積層誤差によって 91.3%であり, 設計の気孔率と 1.6%のずれが生じた. そのため, 本項の解析モデルの Strut 直径を 1 mm から 0.88 mm に変更することで気孔率を実験試料と一致させた. Fig. 3 の(a)に $R=1$, (b)に $R=0.9$ の実験と解析の応力ひずみ曲線を示す.

はじめに, Fig.3 (a)の完全規則モデルについて述べる. Johnson-Cook 破壊を導入したことで, 実験で発生したせん断破壊による応力低下を解析で再現できた. せん断破壊で応力低下が発生するひずみが, 実験では 10, 30%であるのに対し, 解析は 15, 40%と 5%ずれており, 応力の値も解析値の方が実験値よりも高いが, 概ね解析で実験の圧縮挙動を再現できた. これらの差は様々な誤差から発生していると考え

えられるが、主要な要因としてはモデル化誤差と数値解析誤差が影響している。前者の誤差は実験試料と解析モデルの誤差である。本研究では気孔率を実験試料に合わせることでこれを軽減しているが、実際の試料は **Strut** 直径が一樣ではなく、表面粗さが存在する。そのため、実際の圧縮試験ではその粗さからセルの破壊が解析よりも低い応力で発生するため、ひずみのずれが発生すると考えられる。後者の差はシミュレーションと実験条件の誤差である。本研究ではメッシュサイズを小さくすることでこの誤差を小さくしている。しかし、本研究では四面体要素を用いているがより精度の高い六面体要素を使用することでより実験値に近づけることができる。

次に Fig.3 の (b)の R=0.9 の不規則セル構造について述べる。この応力ひずみ曲線から、応力値は近い値となっているが、解析では小さい応力低下が発生した。これは R=1 と同様で実験試料の表面粗さによる誤差及び、数値解析誤差が原因である。

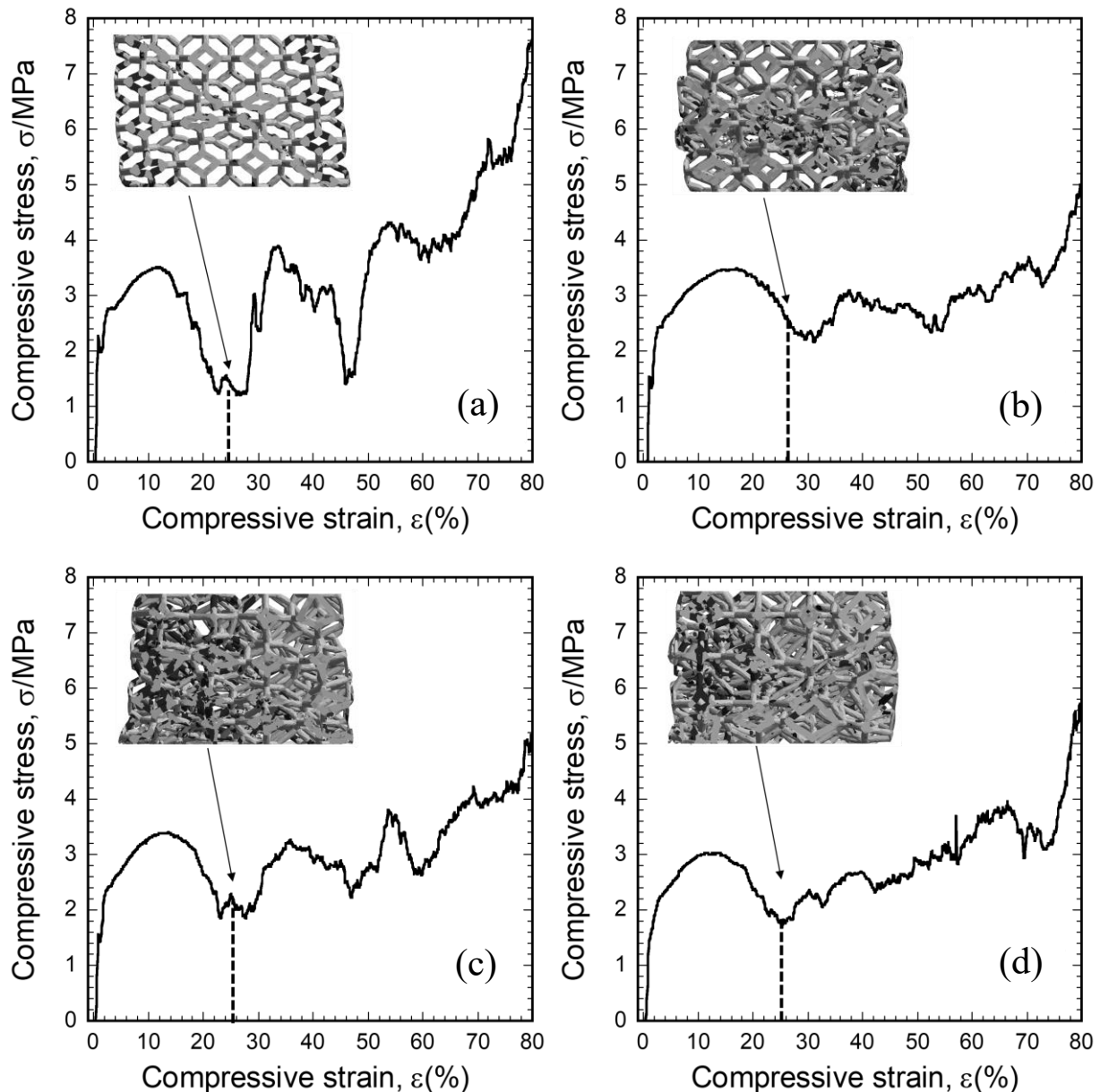


Fig. 2 Stress-Strain curves and Equivalent stress distribution at strain 25% of (a) R=1 ,(b) R=0.9 ,(c) R=0.8 ,(d) R=0.7.

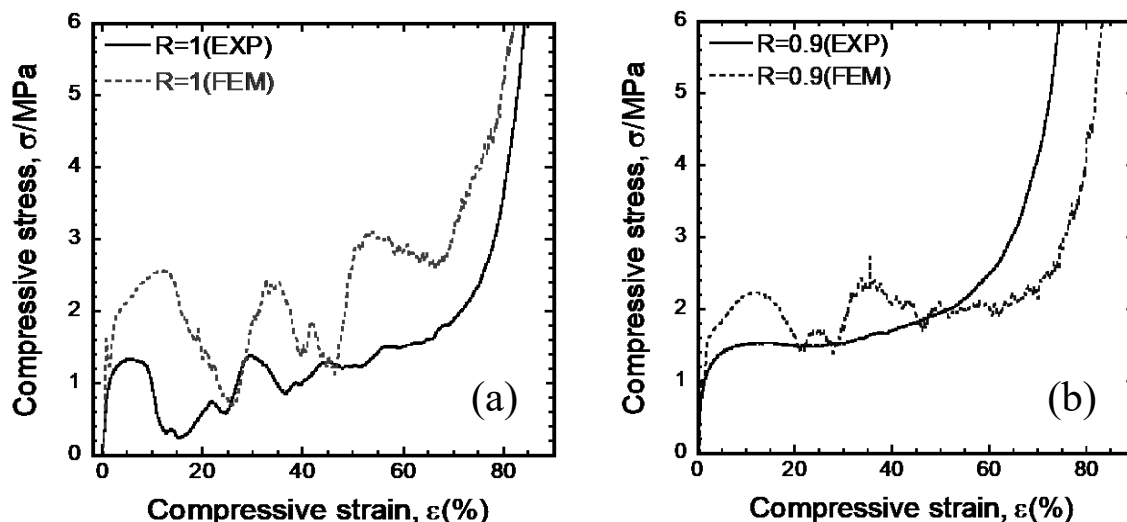


Fig.3 Comparison between analysis and experiment of (a) R=1 and (b) R=0.9.

6. 結言

Voronoi 分割法で設計した規則から不規則なセル構造を有するポーラス金属の FEM 解析, 実験を行い, 以下の知見を得た.

- ・Voronoi 分割法を用い, 規則セルを基とした不規則セル構造ポーラス金属の設計方法を確立した
- ・規則度が低いポーラス金属では完全規則モデルで発生したマクロな破壊を抑制できた
- ・陽解法動解析ソフト LS-DYNA を用い, Johnson-Cook 破壊則を導入することでは実験の圧縮挙動を模擬することができた.

謝 辞

本研究の一部は, 公益財団法人軽金属奨学会の課題研究および宇宙航空研究開発機構の 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) 澤井秀次郎, 福田盛介, 坂井真一郎, 榎木賢一, 荒川哲人, 佐藤英一, 富木淳史, 道上啓亮, 河野太郎, 岡崎峻, 久木田明夫, 宮澤優, 植田聡史, 戸部裕史, 丸祐介, 下地治彦, 清水康弘, 芝崎裕介, 島田貞憲, 横井貴弘, 藪下剛, 佐藤賢一郎, 中村和行, 久原隆博, 高見剛史, 田中伸彦, 古川克己: 航空宇宙技術, **17** (2018) 35-43.
- 2) 荒川 哲人, 坂井 真一郎, 榎木 賢一, 澤井 秀次郎, 福田 盛介, 下地 治彦, 芝崎 祐介, 横井 貴弘: 小型月着陸実証機 SLIM のシステム概要, 第 62 回宇宙科学技術連合講演会講演集, JSASS-2018-4080.
- 3) Liqun, M., Zhenlun, S. : Scr. Mater., **39**-11 (1998), 1523-1528.
- 4) Yang, C. C., Nakae, H. : J. Alloy. Compd., **313**-1-2 (2000), 188-191.
- 5) Gergely, V., Curran, D.C., Clyne, T.W. : Compos. Sci. Technol., **63**-16(2003), 2301-2310.
- 6) Xiao, D., Chen, X., Li, Y., Wu, W., Fang, D. : Mater.Des., **176** (2019), 107840.
- 7) Maskery, I., Aboulkhair, N. T., Aremu, A. O., Tuck, C. J., Ashcroft, I. A., Wildman, R. D., Hague, R. J. M. : Mater. Sci. Eng., A **670** (2016), 264-274.
- 8) Liu, L., Kamm, P., Moreno, F. G., Banhart, J., Pasini, D. : J. Mech. Phys. Solids., **107** (2017), 160-184.
- 9) Yue, X. Z., Matsuo, K., Kitazono, K. : Mater. Trans., **58**-11 (2017), 1587-1592.
- 10) Wei, Y. D., Peng, P., Yan, Z. Z., Kong, L. T. : Comput.Mater.Sci., **123** (2016), 214-223.