

X線CT法を用いた構造異方性ポラスポリマー材料の変形特性評価

Evaluation of Deformation Behavior of Anisotropic Porous Polymer Materials Using X-ray CT Method

精密工学専攻 46号 伏見脩吾
Shugo Fushimi

1. 緒言

低密度なポラス材料は、軽量かつ細孔を無数に有しており、比表面積が大きいことから衝撃吸収特性や吸音特性、断熱特性など、様々な特性を有している材料である。その中でもポラスポリマー（高分子）材料は、鉄やアルミニウムなどのポラス金属材料と比較して、強度が劣るのに対して非常に軽量であるため、車両用シートや冷凍、冷蔵庫の断熱材、建築用断熱材、自動車部品など、幅広く利用されている⁽¹⁾。最近では、ロータス型ポラス金属のように、空孔構造に異方性を持たせることで、通常の等方的な空孔を有するポラス材料と異なり、特定の方向に材料機能を発揮できるため、自己的な機能性の制御といった高い性能を発現する可能性を有している⁽²⁾。以上のようなポラス材料を使用するうえでは、微視的変形挙動と巨視的変形挙動の関係を把握することが重要である。

一般的に、ポラスポリマー材料の巨視的な変形挙動は空孔（セル）構造や骨格を構成する母材の機械的性質、周囲の温度、ひずみ速度（変形速度）に依存する。既往研究では、理論解により巨視的なセル構造体の剛性や強度を求めるものがあるが⁽³⁾、ポリマー骨格の場合、理論解が適用できない問題がある。また、微視的変形挙動の解明や、衝撃緩衝材として利用するうえで重要なプラトー領域についての検討などが行われていない。それらを解明するためには、様々な速度域における圧縮負荷による検討や、その場観察試験の実施、数値解析モデルの構築が必要である。そこで本研究では、X線CT法を用いたその場観察圧縮試験や数値解析モデルの構築を行うことで、ポラスポリマー材料の微視的変形挙動と巨視的変形挙動の関係を明らかにする。

2. 供試材

供試材は、空孔形状に異方性があるモデル材として、市販のポリプロピレン（PP）ポラス材料（ゼットロン®）を用いた。発泡倍率により厚さが異なり、今回使用したものは発泡倍率10倍、12倍、15倍の三種類であり、それぞれの試験片厚さは、5.5 mm、10 mm、12 mmである。供試材の質量と体積から見かけの密度を算出し、PP素材自身の密度（0.95 g/cm³）と比較して求めた空孔率は、93%、95%、96%である。サブミリサイズの独立気泡を無数に有しているボード材であり、そこから各試験片を切り出した。空孔構造を調べるために、X線CT装置（Bruker microCT 社製：Skyscan1172）を用いて観察を行った。Fig. 1に試験片断面を二方向から観察した結果と、空孔のイメージ図を示すが、観察結果よりイメージ図のように空孔構造に異方性を有するポラス材料であることがわかる。本研究では、厚さ方向をLD（longitudinal direction）、表面方向をTD（transverse direction）と定義した。X線CT装置による撮影から得られた断層像より、空孔の高さ、体積、アスペクト比を測定した。本研究では、空孔を楕円体と仮定して各値を測定している。測定結果をFig. 2に示すが、ランダム性および高いアスペクト比を有している材料

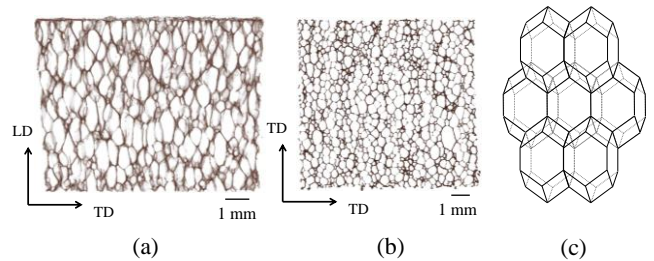


Fig. 1 Configuration and microstructure of the low-density foam: (a) side view, (b) top view, and (c) schematic image.

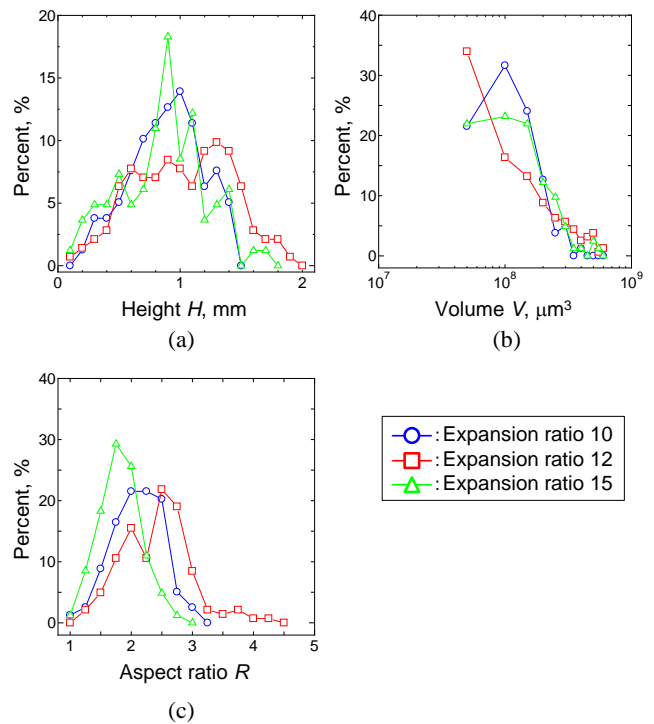


Fig. 2 Distributions of (a) pore height, (b) volume and (c) aspect ratio.

であることがわかる。

3. 静的圧縮負荷における変形特性評価

3.1 単軸圧縮試験

精密万能試験機島津オートグラフ AG-1 を用いて単軸圧縮試験を実施した。試験片と接する部分が完全に平面の圧縮治具を用いて、変位制御にて単軸圧縮試験を実施した。圧縮試験はLD、TDの二方向から実施しており、変位速度は各方向ともにひずみ速度が $1.67 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ となるように設定した。荷重は試験機に設置されているロードセルを用いて測定し、変位はビデオ式非接触伸び計を用いて測定した。

Fig. 3に、単軸圧縮試験の結果を示す。LDから圧縮負荷を

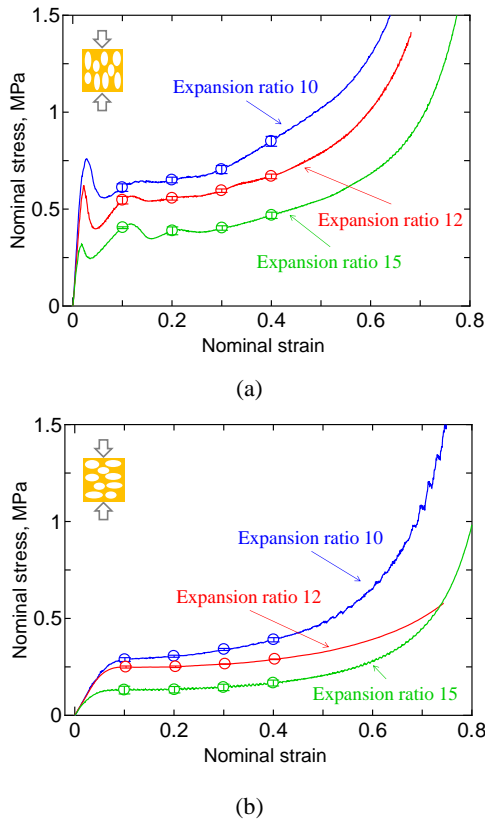


Fig. 3 Nominal stress-strain curves of three specimens for (a) LD and (b) TD.

加えたとき、TD から圧縮負荷を加えたときに比べて高い強度を示していることがわかる。LD から圧縮負荷を加えたとき、線形的に応力が上昇していき、ひずみ 0.05 付近で応力のドロップ（軟化現象）が発生する。さらに圧縮負荷を加えると再び応力が上昇していき、その後応力が一定となるプラトー領域が現れる。最終的には再び応力が上昇する傾向がみられた。一方、TD から圧縮負荷を加えたとき、線形的に応力が上昇していき、LD から圧縮負荷を加えたときとは異なり、軟化現象はみられずプラトー領域が現れた。以上の結果より、本供試材が変形異方性を発現していることわかる。変形異方性を発現している原因として、Fig. 1 に示すように、空孔が構造異方性を有するためであると考えられる。

3.2 X線CT法を用いたその場観察圧縮試験

微視的変形挙動（空孔構造の変形）を調べるために、X線CT法を用いたその場観察圧縮試験を実施した。試験には、X線CT装置内で負荷試験を行うことができるステージ（Bruker microCT 社製：Material Testing Stage）を用いており、任意のひずみにおける内部構造の観察を実施した。このステージは下側の治具が上下する仕組みになっており、荷重および変位は試験機に設置されているロードセルおよび変位センサを用いて測定した。

発泡倍率 12 倍の試験片に対して、LD から圧縮負荷を加えたときのその場観察試験の結果を Fig. 4 に示す。点(1)はピーク応力に達したときの内部構造であり、材料中央付近に座屈が発生していることがわかった。この座屈が発生することにより、巨視的な応力において軟化現象が発生していると考えられる。さらに圧縮負荷を加えていくと（点(2)）、中央付近のセル構造が崩壊していることがわかる。その後、点(3)に示すように、座屈領域が試験片の厚さ方向に伝播していく。最終的には点(4)に示すように、空孔構造が完全に崩壊して緻密

化が発生する。緻密化が発生することにより、巨視的な公称応力が再び上昇していくと考えられる。

つぎに、TD から圧縮負荷を加えたときのその場観察試験の結果を Fig. 5 に示す。点(1)および(2)に示すように、空孔構造が厚さ方向に沿って一様に変形していることがわかる。また、LD から圧縮負荷を加えたときのように座屈が発生していない。このような一様変形は、さらに圧縮負荷を加えていった際も続き、最終的には点(3)に示すように、空孔構造が完全につぶれて緻密化が発生した。以上の結果をまとめると、LD から圧縮負荷を加えたとき、中央付近の空孔構造において座屈が発生し、座屈領域が上下に伝播する。一方、TD から圧縮負荷を加えたとき、空孔構造が一様に変形することがわかった。したがって、LD と TD との微視的変形挙動の相違が、巨視的変形挙動で発生していた変形異方性を発現する要因であると考えられる。他の二つの試験片（発泡倍率 10 倍および 15 倍）においても、X線CT法を用いたその場観察圧縮試験を行った結果、LD と TD との両方向ともに、Fig. 4 および Fig. 5 と同様の微視的変形挙動が観察された。

3.3 ユニットセルモデルを用いたFEM解析

構造異方性を有するポーラス材料の圧縮変形挙動と空孔構造との関係を明らかにするために、有限要素法（FEM）を用いた解析を実施した。供試材の空孔構造を周期構造と仮定し、長菱形十二面体と呼ばれる空間構造体によってモデル化

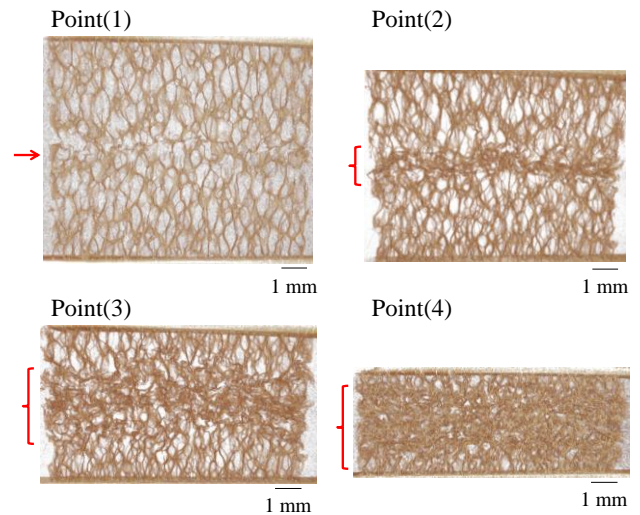


Fig. 4 In-situ observations using X-ray CT method for the compression test in the LD.

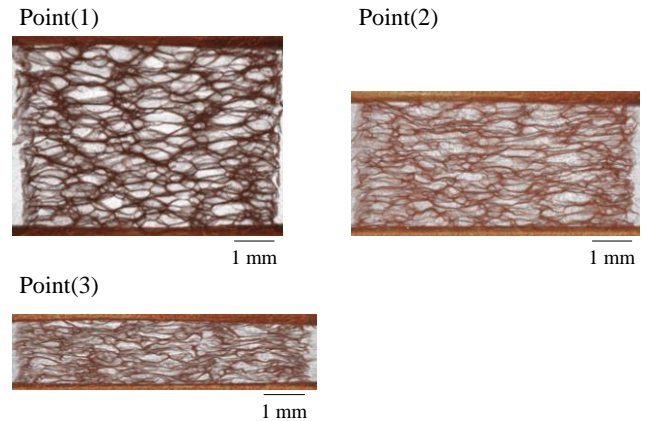


Fig. 5 In-situ observations using X-ray CT method for the compression test in the TD.

した。長菱形十二面体の特徴は、単独で空間を充填することができる凸面体であり、元の形状自体に高いアスペクト比を有している。また、本供試材はセル壁が非常に薄い材料であるため、荷重を受け持つのは骨格であると考え、セル壁を組み込まずに空孔構造のモデルを作成した。

長菱形十二面体を用いて作成した空孔構造モデルを Fig. 6 に示す。集合体モデルから抽出したユニットセルモデルを用いて単軸圧縮解析を行う。モデル化の条件は、各発泡倍率における①空孔率、②空孔の高さの平均値、③空孔のアスペクト比の平均値の三種類とした。このモデルに実験と同様に LD と TD の二方向から単軸圧縮解析を実施した。境界条件として、周期構造からユニットセルを抽出しているため、周期境界条件を適用している。また、Fig. 3 で示したように、本供試材は弾性および塑性変形することが確認されているため、弾塑性解析を行った。既往研究より PP 母材の弾塑性特性は明らかになっており、弾性変形はフックの法則に従い、塑性変形は以下の構成則により表した⁽⁴⁾。

$$\sigma = \sigma_Y + K \varepsilon_p^n \quad (1)$$

ここで σ_Y は降伏応力、 K は加工硬化係数、 n は加工硬化指数であり、 $E = 2350 \text{ MPa}$ 、 $\sigma_Y = 47 \text{ MPa}$ 、 $K = 40 \text{ MPa}$ 、 $n = 0.5$ である。一般的な高分子材料はひずみ速度依存性を示すが、準静的な負荷条件を想定しているため、ひずみ速度依存性を考慮していない。

発泡倍率 12 倍に関する FEM の解析結果について実験結果 (Fig. 3) と合わせて Fig. 7 に示す。実験結果を実線で、解析結果を Δ で示している。実験結果と解析結果を比較すると、弾塑性変形挙動が LD, TD の両方向ともに概ね一致していることがわかる。また、実験と FEM 解析により得られたヤング率と降伏応力について、両方向の値をまとめたものを Table 1 に示す。さらに、他の発泡倍率の試験片 (発泡倍率 10 倍および 15 倍) についても FEM 解析も実施している。各発泡倍率に対する降伏応力 (ピーク応力) の関係を Fig. 8 に示す。実験結果を \circ で、解析結果を \times で示している。それぞれの結果を比較すると、各発泡倍率について概ね一致する結果が得られていることがわかる。

3.4 ランダムモデルを用いた FEM 解析

3.3 節で述べたユニットセルモデルは、供試材の空孔構造を周期構造と仮定しているが、実際はランダム性を有する材料である。そこで、ランダム性を考慮した三次元有限要素モデルの作成を試みた。ランダム性を有する発泡構造を作成するために、フリーソフトウェア Surface Evolver を使用した。Surface Evolver は、泡の構造解析ソフトウェアであり、表面エネルギーと機械的な力のバランスが最小限となるように計算を行うプログラムである。つまり、発泡体の作成過程と非常に類似した構造のモデリングが可能であると考えられる。一般的に、材料を発泡させてポーラス材料のような空孔を持つフォームを作成したとき、その空孔形状は多面体となることが多い。そこで、本研究では、切頂八面体 (ケルビン構造体) をベースにランダムモデルを作成した。まず、Surface Evolver 内でケルビン構造を配置するが、本供試材は高さ方向に伸長した空孔を有するため、高さ方向に伸長したケルビン構造を x, y, z 方向に同数配置した。ここで、発泡させるときに各対称面に周期境界条件を付与して発泡させることで、内部でランダム性を有していて、かつそのランダムモデルが各対称面で周期的となるようにした。モデル化の条件として、①空孔率、②空孔の体積の分布、③アスペクト比の分布が一致するようにモデルを作成している。

本供試材はクローズドセル構造であるが、3.3 節で述べた

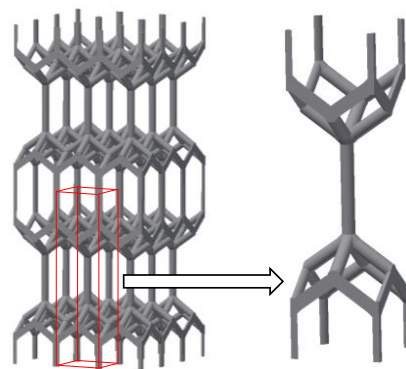


Fig. 6 Simplified FEM model of porous structure.

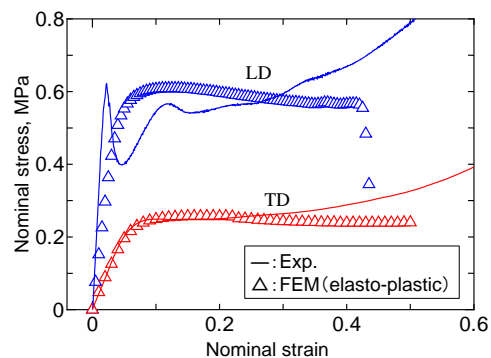


Fig. 7 Nominal stress-strain curves for the LD and TD, to compare between the experiment and FEM.

Table 1 Mechanical properties (Young's modulus and yield stress) obtained from the experimental stress-strain curves and FEM computational curves.

	Young's modulus, MPa		Yield stress, MPa	
	LD	TD	LD	TD
Exp.	34.4	4.30	0.62 (peak stress)	0.23
FEM	16.3	4.18	0.59 (0.2% proof stress)	0.22

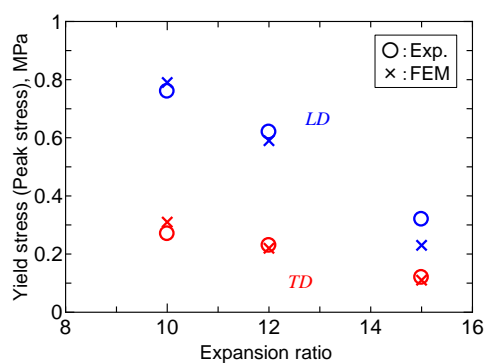


Fig. 8 Experimental setup of impact testing machine

ようにセル壁が非常に薄い材料であるため、セル壁を考慮せず、作成した構造の頂点と骨格部分 (面を構成する辺) を用いて FEM 解析を実施した。解析コストが非常にかかることが予想されるため、骨格を線要素によってモデル化した。骨格太さについてはモデル化の条件である空孔率 95% になるように設定した。Fig. 9 に、作成した FEM モデルを示す。境界条件については、上面を x, z 方向に、下面を x, y, z 方

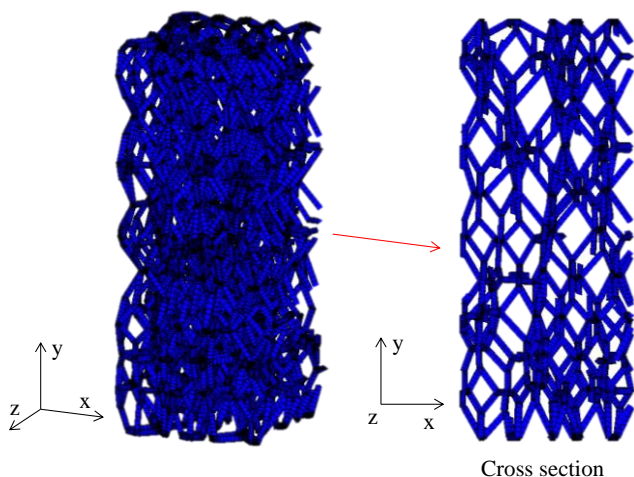


Fig. 9 FEM model of random cell structure.

向に完全固定したが、これは供試材の上下面に融着している不織布を想定している。また、モデルの前後面 (x-y 平面) および左右面 (y-z 平面) に周期境界条件を適用した。

発泡倍率 12 倍に関する FEM の解析結果を実験結果 (Fig. 3) と合わせて Fig. 10 に示す。実験結果を実線で、解析結果を Δ で示している。実験結果と解析結果を比較すると、弾塑性変形挙動が概ね一致していることがわかる。特に、ピーク応力後に応力がドロップし、その後プラトー応力が現れるという巨視的変形挙動を再現できていることがわかる。また、微視的変形挙動についても、中央部から座屈が発生し、それが上下に伝播する挙動が FEM 解析においてもみられた。

4. 衝撃圧縮負荷における変形特性評価

つぎに、衝撃圧縮負荷における高分子ポラス材料の変形挙動について検討した。実験を行うにあたって、落錘型衝撃試験機を開発した。その外観と概要図を Fig. 11 に示す。上部にレバー付きのリニアブッシュを取り付けており、任意の高さで打撃部を固定して落下させることができる。打撃部側と試験片固定部側にロードセルを取り付けることで、荷重を測定した。また、変位を測定するために、レーザ式変位センサを用いており、打撃部のテーパ部分を利用して測定を行った。また、試験片の微視的変形挙動を観察するために、ハイスピードカメラを使用し、衝撃試験中の材料表面を撮影することで、その場観察試験を行った。本試験では、発泡倍率 12 倍のものを対象材料としている。

作成した試験機を用いて様々な高さから衝撃圧縮試験実施した。衝撃試験の結果と 3.2 節の静的圧縮試験の結果と比較すると、衝撃試験時のピーク応力が上昇していることがわかった。これは、ひずみ速度依存性の影響によって、降伏応力が上昇したことが原因であると考えられる。さらに、ハイスピードカメラを用いたその場観察試験の結果は、Fig. 4 および Fig. 5 と同様の傾向を示していた。

5. 結言

本研究では、構造異方性を有するポラスポリマー材料の様々な速度域における圧縮変形挙動について、実験および FEM 解析を行った。以下に得られた結果を示す。

- 1) 単軸圧縮試験および、X 線 CT 法を用いたその場観察圧縮試験を行うことで、微視的および巨視的変形挙動について調べた。その結果、微視的変形挙動の相違により、巨視的な変形異方性を発現している。
- 2) 長菱形十二面体を用いて構造異方性を有するユニット

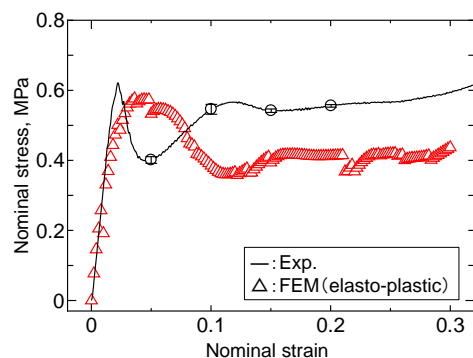


Fig. 10 Nominal stress-strain curves from experiment and FEM (solid line: experiment, triangle: elasto-plastic analysis).

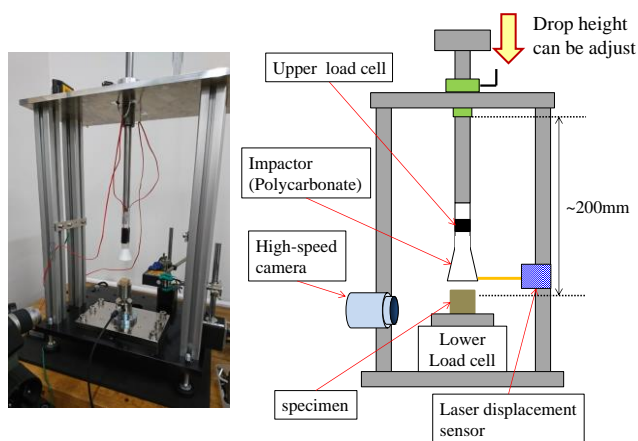


Fig. 11 Experimental setup of falling weight impact testing machine.

セルモデルを構築し、FEM 解析を行うことで、巨視的な圧縮変形 (ヤング率および降伏応力) を推定することが可能となった。

- 3) Surface Evolver を用いてランダム性を有する三次元有限要素モデルを構築した。このモデルを用いて弾塑性解析を行うことで、微視的および巨視的変形挙動のシミュレーションを行うことが可能となった。
- 4) 落錘型衝撃試験装置を開発し、ポラス材料の衝撃圧縮特性について調べたところ、ひずみ速度依存性の影響により、ピーク応力が上昇していることがわかった。

以上のように、本研究で構築した数値計算モデルを利用することで、様々な分野で活躍するポラスポリマー材料の最適なセル形態の力学設計のための指針となり、用途に応じた強度や剛性を有する材料の創製に貢献すると予想される。

参考文献

- (1) 増子善昭, 原料の違いによる発泡体の特性, 日本義肢装具学会誌, **20** (2004) pp.130-132.
- (2) H. Nakajima et al., Fabrication of porous copper by unidirectional solidification under hydrogen and its properties, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, **179**-2-3 (2001) pp.209-214.
- (3) L. J. Gibson et al., Cellular Solids: Structure and Properties, Cambridge University Press, Cambridge (1997).
- (4) M. Jerabek et al, Uniaxial compression testing of polymeric materials, Polymer Testing **29** (2010) pp.302-309.