

X線CTを用いた圧縮変形下におけるポリマーフォームのセル構造観察 Observation of Polymer Foam Cell Structure under Compressive Deformation by Using X-ray Computed Tomography

立石純一郎, 山出貴士, 北山裕教, 山田佳祐
J. Tateishi, T. Yamade, H. Kitayama, K. Yamada

株式会社アシックス スポーツ工学研究所
ASICS Corporation Institute of Sport Science

概要: 圧縮変形下におけるポリマーフォームのセル構造をX線CTにより観察した。ポリマーフォームの圧縮変形に伴うセル壁の座屈変形を確認し、その変形は薄いセル壁から優先的に進行することが観察された。ポリマーフォームが高空隙率化するとセル壁は薄肉化するため、同一圧縮応力下ではセル壁の座屈変形が促進された。これら微視的なセル壁の変形挙動は、巨視的な応力-ひずみ特性における力学的非線形性の原因となるものと考えられ、セル構造と力学的性質との関連性が示唆された。

キーワード: X線CT, ポリマーフォーム, セル構造, 応力-ひずみ特性

背景と研究目的

シューズソール（靴底）には、使用者を怪我から守り、且つ、着用者の能力を最大限に引き出すため、衝撃緩衝性や軽量性、耐久性等を付与する設計がなされている [1]。現状、これらの性能をバランス良く同時に満たすため、シューズソールの主材料にはポリマーフォームが汎用される。この材料は、架橋されたポリマーを壁とし、気体を内包する多数のセルが三次元的に連結された軟質な多孔質材料である。

シューズ実用時に頻出するようなポリマーフォームの圧縮変形下において、その力学的性質は非線形性を有することが知られている [2]。先の研究から、この力学的非線形性はセル構造に影響されるものと考えられている [3]。一般的にセル構造の観察は、顕微鏡を用いたポリマーフォーム表面の二次元観察により行われる。しかしながら、ポリマーフォームの力学的性質とセル構造との関係を理解し、それを元にした材料設計を行う上では、ポリマーフォーム表面ではなく材料内部において三次元的なセル構造を評価する必要がある。これまで著者らは、BL08B2を用いてX線CTによるポリマーフォームの内部構造観察を行ってきた [4,5]。本研究では、空隙率が異なるポリマーフォームを供試体とし、実用時に頻出する圧縮変形下におけるポリマー

フォーム内部のセル構造をX線CTにより観察した。加えて、セル構造と圧縮変形下における応力-ひずみ特性との関係を評価した。

実験

供試材には、エチレン-酢酸ビニルコポリマー (EVA) をメインポリマーとし、空隙率を変化させた2種のポリマーフォームを用いた。供試材の性質を Table 1 に示す。空隙率 P_f は Eq. 1 にて算出される値である。この時、それぞれ ρ_p はメインポリマーの、 ρ_f はポリマーフォームの密度を示す。空隙率が異なるため、供試体のヤング率にも差異が生じていることがわかる。

Table 1. Specimen properties used in this study.

	density [g/cm ³]	porosity [%]	Young's modulus [MPa]
foam-A	0.18	80	3.4
foam-B	0.09	90	1.1

$$P_f = \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_p}\right) \times 100 \quad (1)$$

X線CT観察を行う供試体の形状は、縦5 mm×横5 mm×高さ10 mmの角柱とし、あらかじめシート状に発泡成形したポリマーフォームから切り出した。X線CT装置の概要をFig. 1に示す。装置は既報 [5] のものと同様である。ローテーションステージ上に固定したアクリルチューブ内に供試体を静置し、ボルトのねじ込みによって圧縮ひずみを付与した。このとき、供試体にねじれは生じていない。透過像はP43蛍光体を用いリレーレンズを介して冷却 CCD により撮像した。CCD のピクセル数は 4008 pix×2672 pix、実効ピクセルサイズは 1.75 μm である。X線のエネルギーは 12.4 keV、露光時間は 0.1 秒、投影枚数は 1000 枚/180°とした。供試体-蛍光体間の距離は 100 mm である。1 回の測定に要した時間は 90 分程度であった。透過像を Back Projection 法により再構成し断層像を得た。

圧縮変形下におけるポリマーフォームの力学的性質は CT 実験とは別途、一軸圧縮試験により評価した。このときの供試体形状は直径 10 mm、高さ 10 mm の円柱状とし、クロスヘッド速度 0.1 mm/s にて圧縮ひずみを付与し、サンプリングタイム 50 ms で荷重及び変位を計測した。

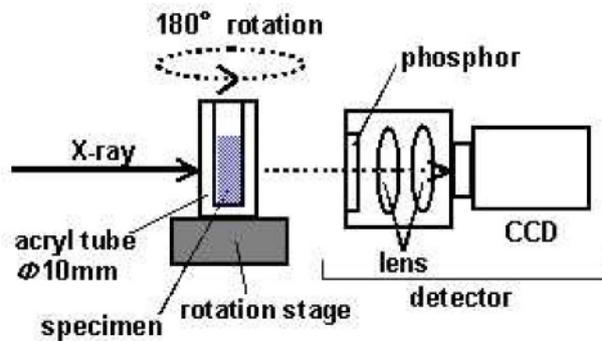


Fig. 1. X-ray CT system for cell structure of polymer foam.

結果および考察

Fig. 2(a)(b) に圧縮変形下における供試体の応力-ひずみ曲線と、接線弾性係数のひずみ依存性をそれぞれ示す。Fig. 2(a) によれば、既報 [4] のように供試体の圧縮応力 σ と圧縮ひずみ ϵ の関係は ϵ の増大に伴い 3 つの領域 (stage 1-3) を示した。つまり、圧縮初期において σ と ϵ がほぼ直線関係にある stage 1 を経た

後、 ϵ の増大に対して σ の増大が小さい stage 2 に移行し、その後急激に σ が増大する stage 3 に達する。図によれば、空隙率が大きくなることで、stage 1 での傾きは低下し、stage 2 での応力も低下する。さらに stage 3 に移行する ϵ も大きくなった。Fig. 2(b) によれば接線弾性係数のひずみ変化は U 字型の曲線を示し、空隙率の大きい foam-B は U 字の幅が広がったように見える。これは既述した stage 3 に移行する ϵ の増大に対応するものであると思われる。

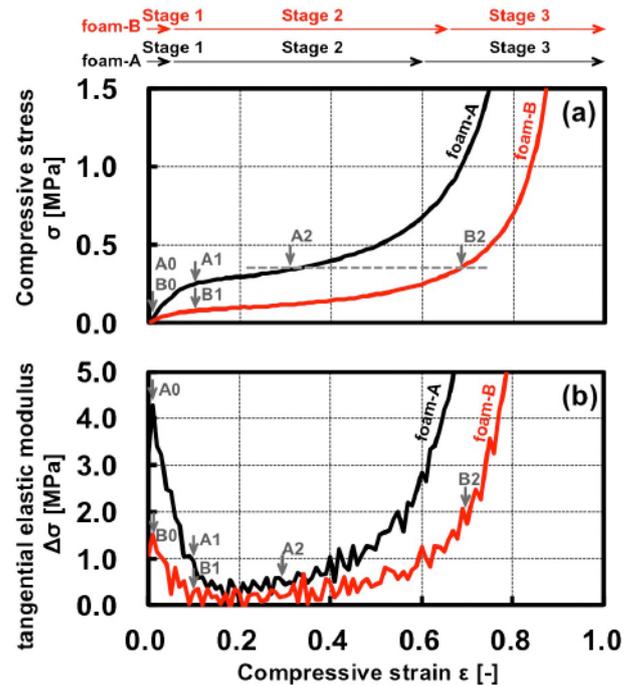


Fig. 2. (a) Stress-strain curves of specimens with different porosity. Arrows denote strain values corresponding to CT images. (b) Tangential elastic modulus histories of specimens.

それぞれの供試体で、Fig. 2 中の矢印で示すひずみ (A0, A1, A2, B0, B1, B2) においてセル構造の X 線 CT 観察を実施した。A0 および B0 での ϵ は 0, A1 および B1 での ϵ は 0.1 である。また A2 での ϵ は 0.3, σ は 0.4, 一方 B2 での ϵ は 0.3, σ は 0.7 であり、ひずみは異なるが、同程度の応力を示している。つまり、A2 と B2 とを比較することで、空隙率が圧縮応力によるセル構造変化に及ぼす影響を評価することができる。

Fig. 3 に各ひずみにおける CT 像をそれぞれ示す。像は圧縮方向と平行面のものであり、白色部はポリマー、黒色部は空隙を表している。図中の A0, B0 に

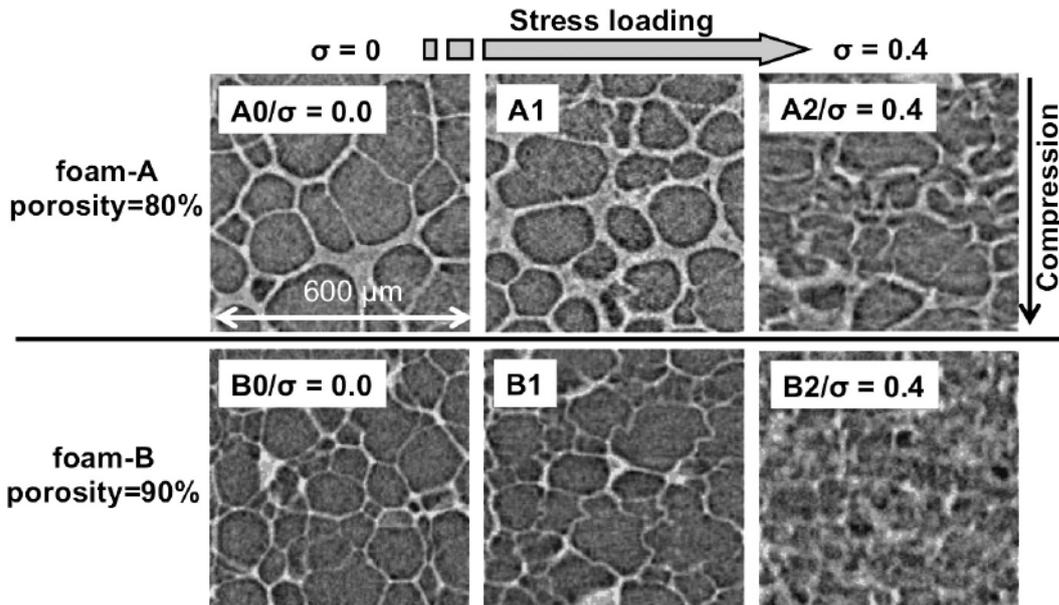


Fig. 3. CT images of different porosity specimens.

よれば、いずれの供試材においても $\varepsilon = 0$ にてセルは等方的な形状を有していることが確認できた。併せて、高空隙率である B0 ではセル壁が薄肉化していることも観察され、これは foam-B における初期剛性の低さの一因であると考えられる。

巨視的なひずみが $\varepsilon = 0.1$ となったとき、A1 では薄いセル壁から優先的に座屈変形した。B1 では、図中の多くのセル壁で座屈変形が生じており、セル壁の薄さが座屈変形を促進させるものと思われた。foam-B の stage2 における応力レベルの低さはこのセル構造の変化を反映したものであると考えられる。

$\sigma = 0.4$ MPa でのセル構造の比較において、A2 ではセル壁の座屈変形が進行し、セルが扁平している様子が観察された。一方 B2 ではセルの存在が確認できなかった。これは、高空隙率である foam-B では、圧縮応力によりセル壁の座屈変形が進行し、上下のセル壁が接触したものである。その結果、セルが消滅し、中実化ように観察されたものと推察される。このとき foam-B は foam-A と比較して、高い接線弾性係数を有しており、セルが消失し中実化した内部の微視的構造を反映したものである。

まとめと今後の課題

本研究では、微視的なセル構造と圧縮変形下におけるポリマーフォームの応力-ひずみ特性との関係を評

価すべく、空隙率が異なるポリマーフォームを用いて X 線 CT によるセル構造観察を行った。その結果以下の知見が得られた。

- 空隙率によらず、圧縮変形下におけるポリマーフォームの応力-ひずみ特性は 3 つの特徴的な stage を有する。
- ポリマーフォームを高空隙率化することで、セル壁は薄肉化した。
- 巨視的な圧縮変形に対して薄肉化したセル壁は優先的に座屈変形した。
- 高空隙率化に伴う stage1 での初期剛性の低さ、stage 2 での応力レベルの低さは、薄肉化したセル壁の座屈変形挙動に起因するものと考えられた。
- 高空隙率化により座屈変形が進行しやすくなるため、より小さな応力で中実化することがわかった。

事業への貢献

本研究で得られた成果は、新規シューズ材料開発において有用なデータとなった。これにより、衝撃吸収性、軽量性、耐久性等のシューズ性能向上が実現された。

参考文献

- [1] T. Nishiwaki: *Sports Technology* **76**, 1 (2008).
- [2] 立石純一郎：日本機械学会ジョイント・シンポジウム 2009 講演論文集.
- [3] L. J. Gibson & M. F. Ashby: セル構造体, 内田老鶴圃 (1993).
- [4] J. Tateishi: *SPring-8 Research Frontiers* 2011, 132 (2011).
- [5] 立石純一郎, 北山裕教, 山田佳祐：兵庫県ビームライン年報・成果集 **1**, 41-43 (2012).