

令和元年6月4日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03868

研究課題名(和文) 多様な変形下の力学測定とX線CTによるエラストマー発泡体の特異な大変形挙動の解明

研究課題名(英文) Peculiar stress-strain behavior of elastomer foams revealed by X-ray CT and mechanical measurements with various deformations

研究代表者

浦山 健治 (Urayama, Kenji)

京都工芸繊維大学・材料化学系・教授

研究者番号：20263147

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,290,000円

研究成果の概要(和文)：気泡形態が異なる(独立気泡または連続気泡)発泡エラストマーの大変形挙動を多様な変形下で調べた。気泡形態に関係なく、伸長と圧縮では著しい差異がみられ、非発泡エラストマーとは異なり、ひずみエネルギー関数で統一的に記述できないことが明確になった。ポアソン比は気泡形態によらず、伸長変形では約0.25であるのに対し、圧縮変形では連続気泡ではゼロであった。X線CT観察により、連続気泡の場合は、圧縮時にセルの座屈が生じていることが明確になった。伸長変形では、一軸、二軸に関係なく、ひずみエネルギー関数で記述することができた。その関数形は気泡形態に依存せず、ひずみの交叉効果を変数として含まないことがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

発泡エラストマーは軽量かつ高圧縮性のために様々な工業用途に用いられている。用途に応じて、独立気泡や連続気泡など気泡の分散形態が異なるエラストマーが用いられている。気泡の分散形態と圧縮挙動についてはよく調べられているが、伸長挙動についてはほとんど調べられていない。本研究結果は、発泡エラストマーは伸長と圧縮では、気泡セルの座屈挙動の有無があるために、その挙動が著しく異なることを明確に示した。対照的に気泡を含まないエラストマーの場合、伸長側のひずみエネルギー密度関数が信頼性に足るものであれば、圧縮挙動は高精度で予測できる。

研究成果の概要(英文)：Large deformation behavior of elastomer foams with different cell-types (closed- or open cells) is investigated by various types of deformation. Independently of cell type, the stress-strain behavior in tension and compression can not be commonly expressed by a strain energy function, unlike incompressible elastomers. Poisson's ratio in tension is estimated to be ca. 0.25 regardless of cell type, while Poisson's ratio in compression is almost zero for open cells. X-ray CT observation reveals the occurrence of the buckling deformation of constitutive cells under compression. The stress-strain data in uniaxial and biaxial tension are well described by the strain energy function without cross-effect of strains, independently of cell type.

研究分野：高分子物性

キーワード：エラストマー 発泡 大変形

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

発泡エラストマーは軽量、高圧縮性などの物性によって工業的に多岐に用いられている。発泡エラストマーの力学特性は主に圧縮によって調べられているが、圧縮性(ポアソン比が  $1/2$  ではない)に目を向けると伸長特性は通常のエラストマー(ポアソン比  $1/2$ )とかなり異なっていることが予想される。また、発泡エラストマーは連続気泡および独立気泡のモルフォロジーおよび空隙率によってその物性が大きく影響をうけることが知られている。しかし、発泡エラストマーの伸長特性はほとんど調べられておらず、そのひずみエネルギー関数は評価されていない。また、モルフォロジーによる大変形挙動の差異、および充填率効果についてもよくわかっていない。

### 2. 研究の目的

発泡エラストマーの大変形挙動を様々な二軸伸長、一軸伸長挙動で圧縮挙動とともに調べ、全変形の力学応答を記述するひずみエネルギー関数(W)について検討する。また、W におよぼす気泡モルフォロジーおよび充填率の効果について明らかにする。変形中の気泡モルフォロジーを観察し、マクロな力学挙動との相関を解明する。

### 3. 研究の方法

二軸伸長測定には現有の二軸伸長装置を用いた。試料の各変形状態の軸比の変化をレーザー寸法測定器によって測定し、ポアソン比を求めた。また、試料の気泡モルフォロジーは X 線 CT 観察により特徴づけた。

### 4. 研究成果

試料として、(a)連続気泡および(b)独立気泡の発泡エラストマーを用いた。基剤は前者はポリウレタン、後者はカーボンブラック配合の天然ゴムである。空隙率はそれぞれ 6.3%と 9.0%である。(a)および(b)の X 線 CT 像を図 1 に示す。

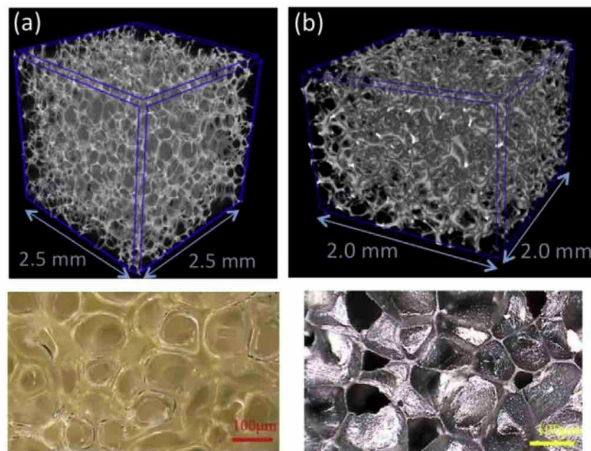


図 1. (a)連続気泡、(b)独立気泡の発泡エラストマー試料の X-ray CT 像。

連続気泡および独立気泡の試料のポアソン比を求めたところ、それぞれ、伸びの大きさによらず、0.256 と 0.232 であり、非圧縮性の 0.5 よりもかなり小さな値となったが、モルフォロジーの違いによるポアソン比の差はほとんどみられなかった。

図 1 の 2 種の発泡エラストマーの様々な二軸伸長の応力-伸び曲線を図 2 に示す。用いた二軸伸長は均等二軸伸長および平面伸長(一軸拘束二軸伸長)である。2 種の発泡エラストマーに共通の特徴として、非発泡エラストマーに比べて、平面伸長時の拘束方向と伸長方向の応力比がかなり小さいことが挙げられる。これは、両エラストマーともにポアソン比が 0.5 よりも小さいことによって説明できる。すなわち、非圧縮性の場合に比べて、伸長と垂直方向の収縮が小さく拘束方向の張力が小さくなるためである。

図 2 の平面伸長の応力-ひずみデータから、W のひずみテンソルの第一不変量  $I_1$ 、第二不変量  $I_2$ 、第三不変量  $I_3$  に関する偏微分量を求めた。各偏微分量の  $I_1$  依存性を図 3 に示す。どちらのエラストマーにも特徴的なことは、 $I_2$  に関する偏微分量がほぼゼロであることである。これは W に対する  $I_2$  の寄与が無視できるほど小さいことを示している。 $I_2$  は異なる軸間のひずみの交叉効果を表す。ポアソン比が小さいことと  $I_2$  の効果が小さいことが相関していることは理論的には自明ではないが、測定結果としてはそのような相関がみられる。

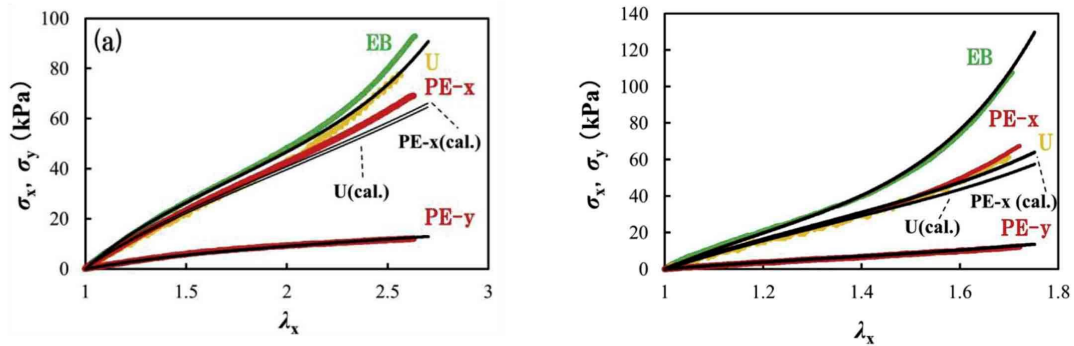


図 2. (左)連続気泡,(右)独立気泡の発泡エラストマーの種々の伸長モードの応力-伸び曲線。EB:均等二軸伸長,PE:平面伸長,U:一軸伸長。実線は求めたひずみエネルギー密度関数からの計算値。

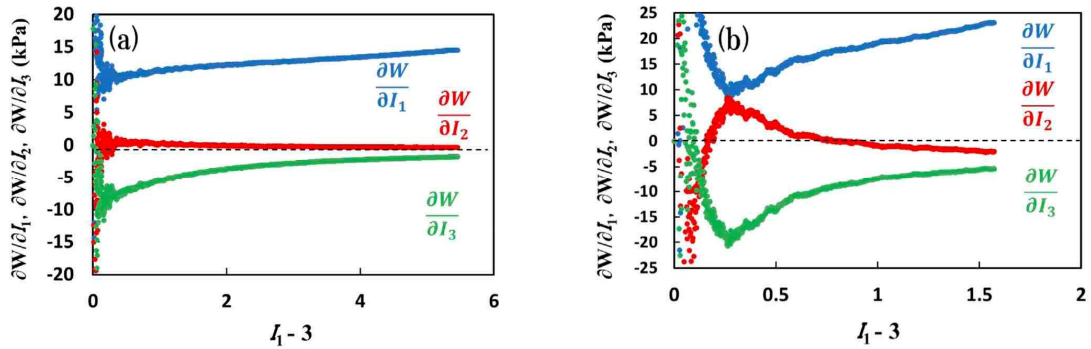


図 3. (左)連続気泡,(右)独立気泡の発泡エラストマーのWの偏微分量のI1依存性。

具体的に求めた(I2を含まない)W関数は次式のようにになった。

$$W = \sum_{n=1}^m C_n (I_1 - 3)^n + \phi(I_3)$$

m=4 の4次までの展開項を用いると、図2の実線のように全伸長モードのデータをうまく記述することができた。なお、I3項の関数形は一軸・二軸変形に着目する限り、境界条件で消失するため、未定形のままで扱うことができる。意外なことに、W関数にはモルフォロジーによる差異、つまり連続気泡および独立気泡の差異はみられなかった。これは伸長変形では一軸、二軸にかかわらず、気泡のモルフォロジーの効果はほとんどみられないことを意味する。

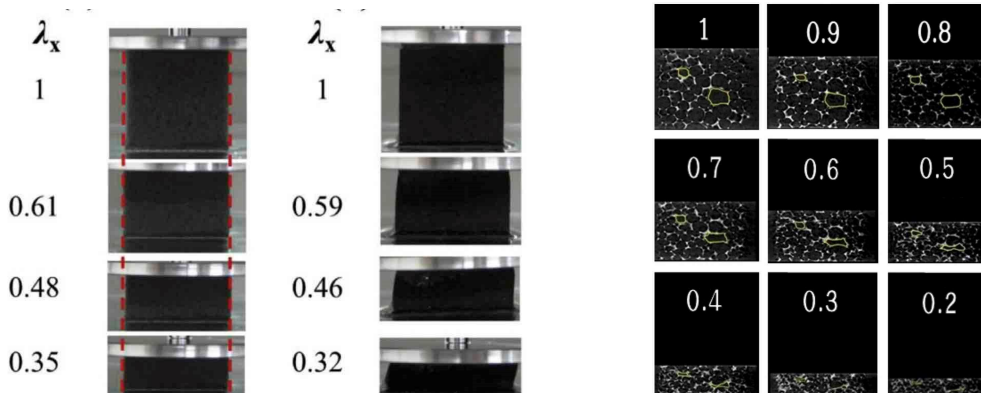


図 4. (左)連続気泡,(中央)独立気泡の試料の圧縮時の外観。(右)連続気泡試料の圧縮時のX線CT像。セルの変形の様子を示すため、ある特定の気泡セルの輪郭を示している。

一方、圧縮挙動ではモルフォロジーによる差異が顕著に現れた。連続気泡の場合、幅方向の変化はないまま圧縮されていく(図4左)。これはポアソン比がゼロであることに相当する。伸長時のポアソン比は0.25であることから、発泡エラストマーでは伸長と圧縮では変形機構が全く異なることがわかる。X線CT像からわかるように構成セルの座屈変形が生じており、ポアソン比がゼロの圧縮過程の原因であることがわかる。伸長変形では原理的にセルの座屈変形は生じないことから、伸長・圧縮時のポアソン比の違いは、セルの座屈変形の有無によって説明できる。

独立気泡の場合、圧縮変形では幅方向の膨張が起こり、マクロに不均一な変形を示した(図4,中央)。これは独立した気泡が圧縮変形をうけるためである。また、独立気泡試料の圧縮-ひずみ挙動は、ボイル則、つまり内包する気体の圧縮挙動としておおよそ説明できることがわかった。

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計3件)

(1) Urayama, K., "New Aspects of Nonlinear Elasticity of Polymer Gels and Elastomers Revealed by Stretching Experiments in Various Geometries" (Review)  
Polym. Int., 66, 195-206 (2017). DOI:10.1002/pi.5153.

(2) Iba, H., Nishikawa, Y., Urayama, K., "Nonlinear Stress-Strain Behavior of Elastomer Foams Investigated by Various Types of Deformation", Polymer, 83, 190-198 (2016). DOI: 10.1016/j.polymer.2015.12.021.

(3) 浦山健治, "二軸変形測定によるゲルの大変形挙動の解析", ネットワークポリマー, 37, 12-19 (2016). DOI:10.11364/networkpolymer.37.12

### 〔学会発表〕(計3件)

(1) Urayama, K., "Cross-effect of strains in rubber elasticity revealed by unequal biaxial deformation"  
International Conference on Deformation, Yielding, and Fracture of Polymers,  
Mar. 29-Apr. 2, 2015, Kerkrade, Netherlands

(2) Urayama, K., "Novel Aspects of Nonlinear Elasticity in Elastomers and Gels Revealed by Biaxial Deformation"  
The 5th International Symposium on Advanced Polymer Materials and Fiber Science  
Nov. 24-25, 2015, Kyoto, Japan

(3) Urayama, K., "Characterization of Large Deformation Behavior of Elastomers and Gels: Why Biaxial?"  
The 11th SPSJ International Polymer Conference (IPC2016)  
Dec. 13-16, 2016, Fukuoka, Japan

### 〔図書〕(計0件)

### 〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

### 〔その他〕

ホームページ: [http://www.cis.kit.ac.jp/~urayama/Kenji\\_Urayama.html](http://www.cis.kit.ac.jp/~urayama/Kenji_Urayama.html)

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名: 西川幸宏

ローマ字氏名: Yukihiro Nishikawa

所属研究機関名: 京都工芸繊維大学

部局名: 材料化学系

職名：准教授

研究者番号（8桁）：60332285

(2)研究協力者

研究協力者氏名： なし

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。