

# 形状記憶ポリマーフォームにおける回復特性と密度の関係

[研究代表者] 武田亘平 (工学部機械学科)

## 研究成果の概要

アクチュエータへの応用が期待されているスマート材料の中に形状記憶ポリマー (Shape memory polymer; 以下 SMP) がある。SMP は、ガラス転移温度  $T_g$  を境に大きく力学的特性が異なることから形状固定性や形状回復性といったユニークな特性を発現する。また、この SMP のフォーム材 (SMP foam, 以下 SMPF) は大きな体積変化を利用できるため、航空宇宙分野では衛星探査機への応用が検討されている。しかし、これまでに SMPF における密度とその回復力や形状変化との関係は明らかにされていない。そこで本研究では、異なる密度の SMPF における形状回復に伴う回復応力を実験的に明らかにした。得られた結果は次の通りである。(1) 密度が低い場合、回復応力は温度上昇に対して比例的に増加する。(2) 回復応力は、密度の増加とともに増加し、その関係は  $1.4 \text{ kPa}/(\text{kg}/\text{m}^3)$  である。この値はアクチュエータなどの設計における発生力の設定に有用である。

**研究分野:** 機能材料, 高分子材料

**キーワード:** 形状記憶ポリマー, 回復特性, アクチュエータ

## 1. 研究開始当初の背景

温度変化によって回復力や形状変化を発現するスマート材料の中に形状記憶ポリマー (Shape memory polymer, 以下 SMP) がある。中でもポリウレタン系 SMP はガラス転移温度  $T_g$  を室温近傍に設定でき、シート、フィルム、およびフォーム等様々な形態で使用できる。その形態の中でも、本研究で調査している SMP フォーム (SMP foam, 以下 SMPF) の特徴として、軽量で大きな体積変化を利用できるため、航空宇宙分野では衛星探査機への応用が検討されている。しかし、SMPF の回復特性についての調査は少なく、特に異なる密度での SMPF の回復力は過去に調査されていなかった。SMPF の回復特性を航空宇宙分野やアクチュエータなどへ応用するためには、物性値の変化によって回復特性にどのように影響するのかを調査する必要がある。

## 2. 研究の目的

SMP は高温で変形した後冷却し、変形を保持したまま加熱することで大きな回復力を得ることができる。この回復力を応用すれば、新規な SMP のアクチュエータを開発することができる。前述のように SMPF は大きな体積変化

が可能であり、またその回復特性を利用すれば航空宇宙分野やアクチュエータなどへの応用が期待できるため、本研究では密度の異なる SMPF の回復力試験を行い、SMPF の回復特性を理解するとともに、SMPF の回復特性とその密度との関係を調査した。

## 3. 研究の方法

### (1) 材料および試験片

試験片は株式会社 SMP テクノロジーズ製の SMPF であった。使用した SMPF は全 3 種類であり、 $T_g = 343 \text{ K}$  の SMPF を 1 種 (密度  $\rho = 46 \text{ kg}/\text{m}^3$ , 厚さ  $t = 9 \text{ mm}$ )、 $T_g = 353 \text{ K}$  の SMPF を 2 種 (密度  $\rho = 34 \text{ kg}/\text{m}^3$ , 厚さ  $t = 8 \text{ mm}$  および密度  $\rho = 27 \text{ kg}/\text{m}^3$ , 厚さ  $t = 8 \text{ mm}$ ) 用意した。すべての試験片の幅および長さはそれぞれ  $20 \text{ mm}$  とした。また、変形の過程を計測しやすくするため、試験片は 3 つ重ねて水系接着剤ダイヤボンド DW246W で接着したものを使用した。

### (2) 試験条件および方法

本研究では、先端にアクリル板を付けた圧縮試験治具を使用し、最大圧縮応力およびひずみ速度を設定し、負荷および保持を行った。回復力試験の様子を図 1 に示す。ア

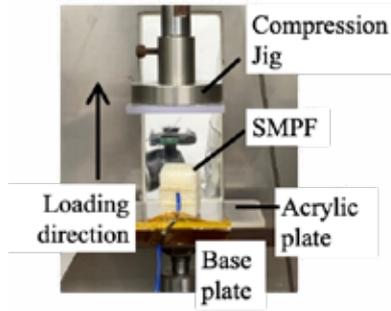


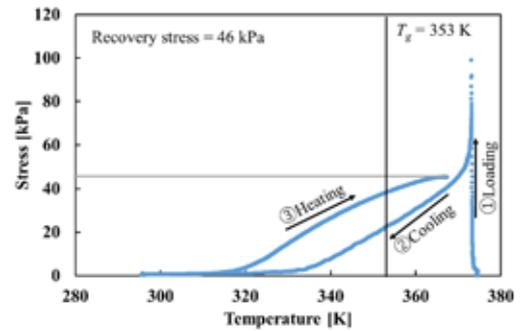
図1 回復力試験の様子

クリル板を敷いた台の上に試験片を配置し、台を上げることで試験片を圧縮する。試験は試験機に取り付けてある恒温槽内で行い、周囲温度を制御した。

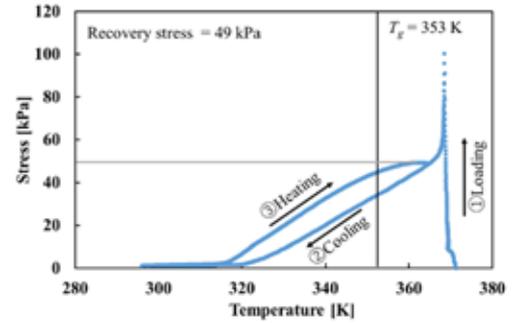
本研究で行った回復力試験の試験手順は次の通りである。①試験片を  $T_g + 20$  K まで加熱し、最大圧縮応力 100 kPa を与える。②最大圧縮応力での圧縮ひずみを保持したまま試験片を室温まで冷却する。③圧縮ひずみを維持したまま  $T_g + 20$  K まで加熱する。④  $T_g + 20$  K で 10 分間保持する。また、加熱途中で回復応力が最大まで上がった場合、その時点で試験を終了する。以上①から④の過程を行った。試験時のひずみ速度は  $de/dt = 20\%/min$  であった。また、加熱速度は 5 K/min に設定した。

#### 4. 研究成果

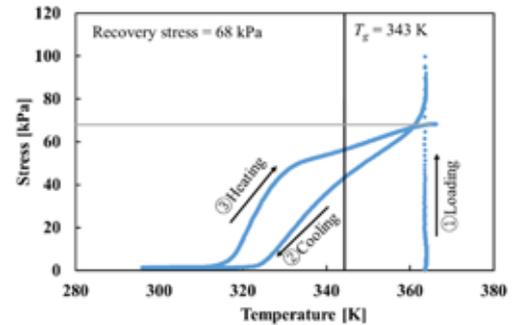
回復力試験で得られた各密度における応力-温度曲線を図 2 (a), (b) および (c) にそれぞれ示す。冷却過程である②の過程において、冷却開始直後では高温での応力緩和により応力は減少し、その後温度低下による熱収縮のため、さらに応力は減少した。加熱過程である③の過程において、加熱することで回復力が発生するため応力は増加する。 $\rho = 27 \text{ kg/m}^3$  の SMPF の回復応力は最大になるまで比例的に増加した。それに対し、 $\rho = 46 \text{ kg/m}^3$  の SMPF の回復応力は 50 から 60 kPa まで急激に上がり、その後、回復応力は緩やかに増加した。これら結果から、回復特性は密度による影響があることがわかる。また、複数回行った回復力試験で発生した回復応力の平均値を密度ごとで比較した。SMPF の密度と回復応力の関係を図 3 に示す。 $\rho = 27 \text{ kg/m}^3$  の SMPF の回復応力は平均で 42.0 kPa、 $\rho = 34 \text{ kg/m}^3$  は 45.2 kPa、 $\rho = 46 \text{ kg/m}^3$  は 60.8 kPa であった。図 3 からわかるように、回復応力は、密度の増加とともに増加することがわかり、その関係は  $1.4 \text{ kPa}/(\text{kg/m}^3)$  であった。この値は、アクチュエータなどの発生力を制御する際に有用である。



(a)  $27 \text{ kg/m}^3$



(b)  $34 \text{ kg/m}^3$



(c)  $46 \text{ kg/m}^3$

図2 各密度における回復応力

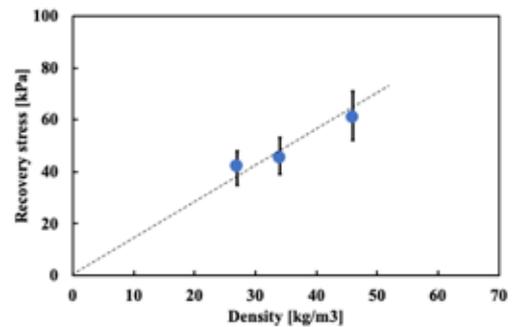


図3 回復応力と密度の関係

密度の異なる SMPF の回復力試験を行い、SMPF の回復特性とその密度との関係性を調査した。得られた主な結果を次に示す。(1) 密度が低い場合、回復応力は温度上昇に対して比例的に増加する。(2) 回復応力は、密度の増加とともに増加し、その関係は  $1.4 \text{ kPa}/(\text{kg/m}^3)$  である。この値はアクチュエータなど設計における発生力の設定に有用である。