

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23760759

 研究課題名（和文） 高信頼性宇宙展開構造材としての機能性ポリマー複合材料の  
メソスケール力学の研究

 研究課題名（英文） Research on Mesoscale Mechanics of Functional Polymer Composites  
for Highly Reliable Space Deployable Structures

研究代表者

西川 雅章（NISHIKAWA MASAOKI）

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：60512085

研究成果の概要（和文）：

本研究では、宇宙展開構造応用のための新規材料として期待されている形状記憶ポリマー（SMP）複合材料が機能性（形状固定性・形状回復性）を発揮するメカニズムを、実験とマイクロメカニクス解析との対比により検証した。特に、熱サイクル付与の展開試験により、繊維強化形態と展開性能の関係を明らかとし、最適な機能性を有する材料のメソスケール構造の設計につながる知見を得た。また、機能性の発現は繊維の弾性力やポリマーの特徴的な温度依存特性に起因しており、その観点から得られる微視力学的メカニズムについて熱力学有限要素法を用いて明らかとした。

研究成果の概要（英文）：

The present study investigated the mechanism for enhancing the functionality (shape fixity and shape recovery) of shape memory polymer (SMP) composites, as potential candidates for new structural materials applied to space deployable structures, using experiments and micromechanical analyses. Especially, through deployment tests under a thermomechanical cycle, the relationship between fiber architecture and deployment performance was clarified, and basic knowledge was obtained for mesoscale material design of optimal functionality. Since the functionality is closely related to fiber elasticity and temperature-dependent characteristics of the polymer, the micromechanical mechanism gained from the aspect was also clarified using thermomechanical finite element analyses.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：自己展開材料，機能性ポリマー，マイクロメカニクス，熱力学特性，形状回復性・形状固定性

## 1. 研究開始当初の背景

科学衛星や通信衛星等の高性能化に伴い、搭載機器への電源供給・排熱要求が高まっている。一方で、打ち上げコスト削減のため、衛星小型化への要求は高く、電源供給用太陽電池パドルや放熱用ラジエータ、通信用アンテナなどには展開構造が利用されている。展

開構造の形式には、アクチュエータ機構やガス圧によるインフレーション構造等があるが、現在、機能性ポリマー複合材料を利用した展開構造が検討されている。機能性ポリマーの一つとして、室温付近で熱力学的特性が顕著に変化する熱誘起形状記憶ポリマー（Shape Memory Polymer, SMP）が利用されてい

る。SMP は材料固有のガラス転移温度を境に、温度によって弾性率が大きく変化し、形状固定性・形状回復性が現れる。したがって、ロケット搭載時に SMP の形状固定性を利用してコンパクトに折り畳み、宇宙空間で加熱するだけで展開可能となる。実際に、米国航空宇宙局 NASA の次世代気象レーダー衛星 (NEXRAD) プロジェクトでは、SMP を用いたトラス・膜からなる展開構造が検討された。直径 35 m にも及ぶアンテナを軽量化して打ち上げるための新規材料の候補として挙げられた。近年では、国内の宇宙航空研究開発機構 JAXA で連続繊維強化形状記憶ポリマーを用いた展開構造が検討された他、宇宙ステーションを用いた軌道上展開実験にも成功している。ただし、ポリマー自体の剛性は小さく、展開後の剛性向上のための一つの手段として、繊維強化の方法が課題である。

繊維強化 SMP 複合材料を用いた展開構造において、展開は繊維の弾性回復変形を用いるため比較的容易であるが、重要なことは、展開後の形状精度や形状固定性である。従来のガス圧によるインフレーター構造は膜面に形成されるしわや展開後の硬化方法について単独のシステムとしては課題があった。この SMP 複合材料を併用して、宇宙空間における展開後の形状固定性に対する信頼性およびロケット搭載時の形状固定性を改善できれば、材料と熱源のみが必要という、極めて単純な展開構造システムとなりうる。したがって、衛星や大型宇宙建造物のさらなる小型・軽量化を促進する有望な機能性材料として期待される。

一方で、SMP 複合材料の発現する形状固定・形状回復性のメカニズムはあまり理解されていない。SMP 単体の高分子特性の研究が進んでいる一方で、複合材料とした場合の力学研究は国内外を見ても限られている。著者らは、SMP を基材として短繊維を埋め込んだ供試材に対する熱サイクル試験を実施し、繊維強化による形状回復の阻害効果を検証し、温度依存型粘弾性モデルを用いた熱力学解析により、繊維端のひずみ集中が形状回復の阻害の一因であることを明らかにした。

つまり、繊維はその弾性力によって形状回復力を与える一方で、元のポリマーが有していた形状固定性・形状回復性を阻害する。また、繊維強化したことにより、新たな損傷形態が発生し、材料の強度や破壊特性に影響を与えることが知られている。例えば炭素繊維強化の場合には、曲げ破断ひずみが 0.1~2.5 % 程度と報告されている。また曲げ負荷下において、微視的には、圧縮側で繊維座屈が 0.06~0.19 % 程度で起きることや、層間など繊維・母材の界面で剥がれが起きることも報告されている。

本研究では特に、SMP の短繊維強化によつ

て剛性や変形性能および機能性（形状固定性・形状回復性）を両立させることに着眼を置き、繊維強化形態が SMP 複合材料の力学的特性や機能特性に及ぼす影響をメゾスケール力学の立場から明らかとし、最適設計のための指針を得ることを目的としている。短繊維での強化形態は、大変形でも繊維の破断が少なく、小型で複雑な形状の成形を可能にする。また繊維の長さ、分布を調整することにより材料の性質に変化を与えることができ、目的に応じた材料の設計が期待できる。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、宇宙展開構造用途が検討されている形状記憶ポリマー複合材料が機能性を発揮するメカニズムを、実験とマイクロメカニクス解析との対比により、学術的な立場から調べるとともに、剛性や変形性能の観点から最適な内部構造を有する材料のメゾスケール構造設計につながる知見を確立することである。特に、SMP 複合材料の機能発現の特徴を微視的観点から検討することを目的とした。

## 3. 研究の方法

本研究では、繊維基材にスリットを導入することで意図的に繊維端の位置を操作した SMP 複合材料を作製し、その材料を用いた展開試験を通して、繊維とポリマーからなる微視的構造が展開特性に与える影響を評価した。繊維基材へのスリットの導入は、成形時の樹脂の含浸特性を向上するとともに、力学特性を調節できるようにする一つの方法として先進複合材料分野で提案されている手法である。スリットの導入によって、作製された SMP 複合材料の機能性をどのように設計できるか、という観点で検討した。

また、同様に繊維端分布に変化をつけた SMP 複合材料の引張試験により、剛性や変形性能（その指標として、破断ひずみ）という観点から SMP 複合材料の力学特性について調べた。これらの実験的検証から、曲げ変形に対して優れた展開特性を発揮する、形状記憶複合材料の有効な内部構造設計について検討するとともに、機能性のみならず力学特性を両立するための設計方法についても検討した。

さらに、形状記憶複合材料が形状回復性を示す熱サイクルを再現した熱力学有限要素解析により、繊維と SMP からなる材料の内部構造が、巨視的な機能性に及ぼす影響について理論的に検証した。以下に、実験方法と解析方法について述べる。

### (1) 実験方法

#### ①材料および試験片

母材樹脂にはポリウレタン系 SMP (ダイアリイ MM5520), 強化材にはランダム配向ガラス繊維マット (サーフェシングマット SM3600E) を使用した. ポリウレタン系 SMP は, 他の形状記憶材料と比較して形状回復量が大きいこと, 成形性が良いこと, 軽量であることなどに加え,  $T_g$  を広範囲にわたって自由に設定できるという特徴を有している. ここで母材樹脂に用いた SMP の  $T_g$  は約 328K (55°C) である.

ペレットからの押出成形により製作した厚さ 47 $\mu$ m の SMP フィルム 9 枚とガラスマット 8 枚を長さ 180mm, 幅 50mm に切り出した上で, 交互に積層し, ホットプレスを用いて形状記憶複合材料を作製した. この材料を中心部より長さ 100mm, 幅 30mm の長方形型に切り出し, 試験片とした. なお, この製法では繊維基材中の繊維間への樹脂含浸が難しいことに注意されたい. 熱可塑性ポリウレタン樹脂は高温にすると, 熔融し, 粘度が低下するが, 一方で熱分解により黄変する. したがって, 温度は熱分解が起きない程度の温度とする必要があるため, 含浸特性の改良が難しい. 実際に製作した材料中には発泡材料のように気泡がある程度均一に分散した状態で含まれており, これらは機械的特性には影響しているものと考えられる. このボイド低減の方法については今後の課題である.

積層するガラスマットに切り込み (スリット) を入れて, 繊維端を意図的に作り出し, そのスリットの位置により繊維端の分布に変化をつけた 4 種類の試験片を作製した. それぞれのスリットの位置を図 1 に示す.

## ②展開試験

以下の手順で試験を行い, 曲げ変形に関する形状固定性, 形状回復性を評価した. 試験

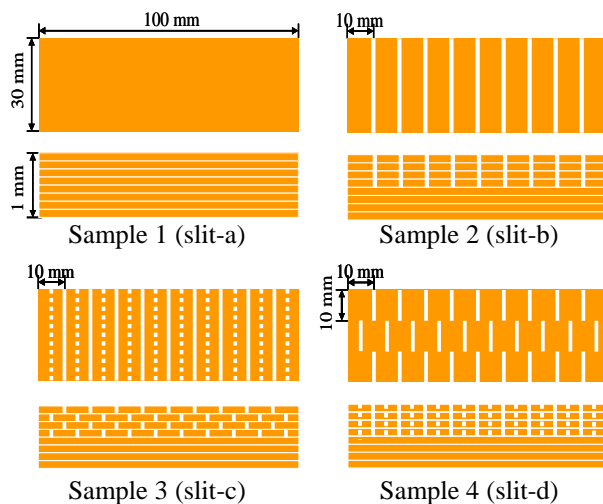


図 1 スリット位置の模式図  
片の加熱および冷却は, 一定温度に保たれた水中につけて行なった. それぞれ水温は,

$T_h=343K(T_g+15K)$ ,  $T_l=290K(T_g-38K)$ とした.

- 高温  $T_h$  の下で, 半径 32mm の円弧状に変形.
- 変形を拘束して低温  $T_l$  まで冷却. 2 分間保持.
- $T_l$  の下で除荷.
- 無負荷状態で  $T_l$  から  $T_h$  まで加熱.

手順(a)での曲率半径  $R_0(=32 \text{ mm})$ , 手順(c)の後無負荷状態での曲率半径  $R_1$ , 手順(d)の形状回復後の曲率半径  $R_2$  を用いて, 形状固定率  $R_f$  および形状回復率  $R_r$  を以下のように定義して, 各試験片について評価した.  $\varepsilon_i$  は各過程におけるひずみを表す. 曲率半径  $R_i$  は, 計測した試験片の両端の距離とそりから導いた.

$$\varepsilon_i = \frac{t}{2R_i} \quad (1)$$

$$R_f = \frac{\varepsilon_0 - (\varepsilon_0 - \varepsilon_1)}{\varepsilon_0} = \frac{R_0}{R_1} \quad (2)$$

$$R_r = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1} = 1 - \frac{R_1}{R_2} \quad (3)$$

## ③引張試験

次に, 引張試験に用いた試験片について述べる. SMP フィルム 12 枚とガラスマット 9 枚を積層し, ホットプレスを用いて形状記憶複合材料を作製した. このとき, SMP フィルムとガラスマットは交互に積層し, 中心にあたる 5 枚目のガラスマットの上下にのみ SMP フィルムを 2 枚積層した. 試験片は短冊型で全長 170 mm, 試験部 (つかみ部間) 長さ 120 mm, 幅 20 mm とした.

スリットの位置により繊維端の分布に変化をつけた 4 種類の試験片を作製した. それぞれのスリットの位置は図 1 と同様である (間隔は 10mm, slit-d の幅方向は幅に合わせて 3 等分した) が, 厚さ方向にはすべての繊維基材にスリットを導入した.

上述の試験片を用い, 単軸引張試験を行った. 変位速度 0.1mm/min とし, 試験片の長手方向に変位制御で負荷を加えた. 試験部のひずみはクロスヘッドの変位により測定した.

## (2) 解析方法

本解析では, 熱力学的有限要素解析を用いて, 材料の不均質性 (繊維基材やスリットの位置) が, 曲げ負荷下での熱誘起形状記憶複合材料の形状固定性および形状回復性に及ぼす影響について検討した. 曲げ負荷は自己展開構造の応用において材料が受けると考えられる荷重形態である. 曲げ負荷の場合には局所的応力分布が生じ, 材料の微視構造が形状固定性や形状回復性に与える影響がより顕著になるものと考えられる. この点について, 繊維の弾性力やスリットの配置と関係づけて検討した.

本有限要素解析では、不連続ガラス繊維基材と SMP 母材からなる微視力学モデルを用いた。モデルは平面ひずみ状態を仮定している。ガラス基材は長方形領域としてモデル化し、等方弾性体を仮定した。弾性率は、配向係数 0.33 を考慮して  $E = 23 \text{ GPa}$  とし、ポアソン比は  $\nu = 0.3$  とした。ガラス繊維基材の厚さは  $50 \mu\text{m}$ 、熱膨張係数は  $5 \times 10^{-6} / \text{K}$  とした。SMP 母材の材料定数は、戸伏らによって提案された温度依存粘弾性モデルによって扱った。ここで、SMP 母材は等方線形粘弾性体とし、モデルでは弾性変形、応力緩和、クリープ変形、熱膨張ひずみが考慮されている。また、この SMP 母材の構成則には 2 つの特徴がある。(1)材料定数の温度依存特性がアレニウス型の変化を示すと仮定し、ガラス転移温度  $T_g$  近傍での熱誘起 SMP の熱力学的特性の大きな変化を記述している。SMP は  $T_g$  を境にガラス状態からゴム状態に遷移する。この現象はガラス状態における形状固定性、および加熱時のゴム状態への遷移過程における形状回復性と密接に関係する。本解析では、ガラス転移温度を  $T_g = 55 \text{ }^\circ\text{C}$  とした。(2) このポリマーの特徴的なクリープ変形挙動を考慮し、非回復クリープひずみ  $\varepsilon_s$  を導入している。非回復ひずみは与えられたクリープひずみ  $\varepsilon_c$  に比例するとした。

図 2 に本解析で用いた有限要素モデルを示す。モデル寸法は、 $10.1 \text{ mm}$  (長手方向)  $\times$   $0.4 \text{ mm}$  (厚さ方向)。繊維は 9 節点アイソパラメトリック四辺形要素に分割し、SMP の領域は 6 節点三角形要素に分割した。ガラス基材に導入したスリット位置を変化させた 5 つのパターンの解析を行った。

(A) 全てのスリットが厚さ方向に揃っており、ガラス基材にスリットが 1 か所あるパターン (基材部長さ  $100 \mu\text{m}$ )。

(B) スリットが互い違いに位置しており、各ガラス基材にスリットが 1 か所あるパターン (基材部長さの平均  $100 \mu\text{m}$ )。

(C) 全てのスリットが厚さ方向に揃っており、ガラス基材にスリットが 2 か所あるパターン (基材部長さ  $50 \mu\text{m}$ )。

(D) B の互い違いパターンのまま、ガラス基材を中央面に寄せたパターン

(E) B の互い違いパターンのまま、ガラス基材を上下面に離れたパターン

パターン D と E については、ガラス基材の厚さ方向間隔を  $25 \mu\text{m}$  とし、他の場合は  $50 \mu\text{m}$  とした。

この有限要素モデルを利用し、曲げ負荷による熱サイクルを以下のステップで与えた。

(a)  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  にて曲げひずみを最大ひずみ  $\varepsilon_{b,\text{max}}$  まで  $1 \text{ } \%/ \text{min}$  のひずみ速度で与える。

(b) 曲げひずみを一定に保ち、温度を  $35 \text{ }^\circ\text{C}$

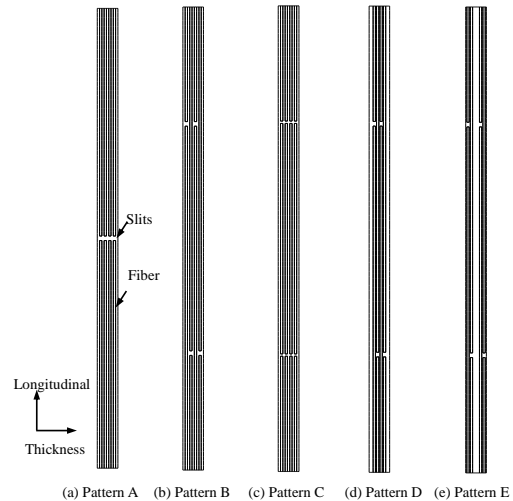


図 2 微視構造を再現した有限要素モデル

まで冷却速度  $0.1 \text{ K/min}$  で低下させる。

(c)  $35 \text{ }^\circ\text{C}$  にて、ひずみ速度  $-1 \text{ } \%/ \text{min}$  で曲げ負荷を除荷する。

(d) 除荷した状態を保ち、昇温速度  $3 \text{ K/min}$  にて温度を  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  まで上昇させる。

この熱サイクルにおいて、ステップ(a)から(c)が形状固定、ステップ(d)が形状回復の過程に相当する。本解析では、最大曲げひずみを  $\varepsilon_{b,\text{max}} = 1 \text{ } \%$  とした。曲げひずみはモデル両端に変位境界条件を与えることで制御した。

なお、ステップ(c)の除荷は長手方向応力の平均値 (全要素の垂直応力の体積平均) を参照して行った。ステップ(d)における無負荷条件は、数値安定化を施したひずみ制御により与えた。

## 4. 研究成果

### (1) 実験結果

#### ①形状固定性

展開試験における手順(c)後の各試験片の形状を図 3 に、形状固定性に関する実験結果を表 1 に示す。Sample1 と Sample2,3,4 の比較より、曲げの外側に位置する繊維マットにスリットを入れることで材料の形状固定性が向上していることがわかる。今回作製した材料では、変形時に生じる繊維の弾性力が材料の形状を回復させる方向にはたらき、形状固定性を低下させると考えられる。そこで変形時に繊維とポリマーがつくる各試験片の内部構造を推測し、材料に働く繊維の弾性力の大きさに着目する。

繊維マットのスリット部からは材料に弾性力は働かず、手順(c)での形状回復量が減少するため、局所的に形状固定性が高まると考えられる。このことがスリットを導入した試験片の形状固定性の向上させている。次に Sample2,3,4 を比較する。Sample3,4 では、スリットの入った繊維マットが試験片よりも小さな曲率をとることが可能である。このと

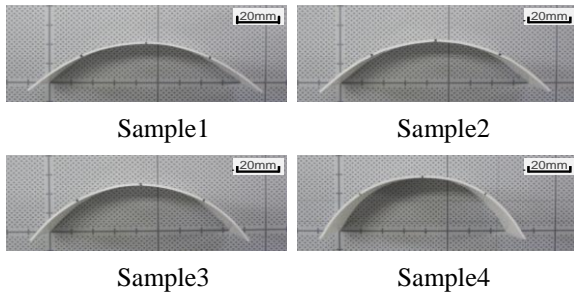


図3 形状固定後の試験片

表1 形状固定試験の結果

	$R_1$ (mm)	$\epsilon_1$ (%)	$R_f$ (%)
Sample1	58	0.80	55
Sample2	55	0.89	58
Sample3	47	1.05	68
Sample4	43	1.16	74

き材料の形状回復方向に働く繊維の弾性力は小さくなり、この2種類の試験片のより高い形状固定性につながったと推測される。

### ②形状回復性

展開試験における手順(d)後の各試験片の形状を図4に、形状回復性に関する実験結果を表2に示す。Sample2において、スリットを入れたことによる形状回復性の低下が見られる。この試験片については変形時にスリット部に大きなひずみが集中しており、その大ひずみが形状回復後の永久ひずみにつながっていると考えられる。Sample2においてスリット部にひずみが集中していることは、変形時の表面を撮影した図5からもわかる。

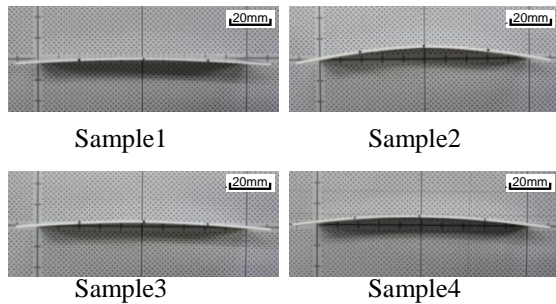


図4 形状回復後の試験片

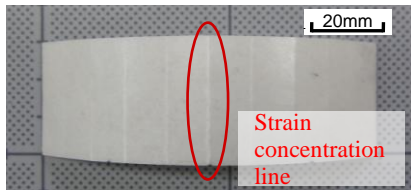


図5 局所的ひずみ集中の様子 (Sample 2)

表2 形状回復試験の結果

	$R_2$ (mm)	$\epsilon_2$ (%)	$R_f$ (%)
Sample1	418	0.11	86
Sample2	203	0.24	73
Sample3	418	0.12	89
Sample4	315	0.16	86

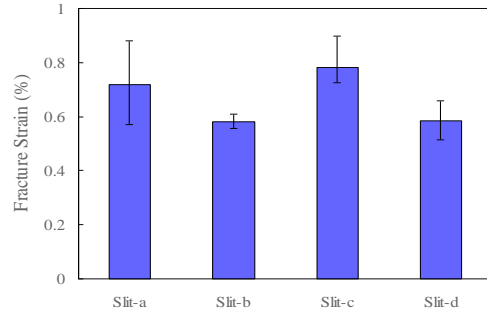


図6 破断ひずみの比較

また、上述の通り繊維の弾性力は変形を回復させる方向に働くが、スリットが集中しているSample2ではこの大ひずみに働く繊維の弾性力が小さく、このことも形状回復性の低下をもたらす一因になったと思われる。

### ③引張試験結果 (破断ひずみ)

本実験により得られた各試験片の破断ひずみの平均値を図6に示す。エラーバーは計測値の範囲を示している。また、最大応力を示したときのひずみを破断ひずみとした。

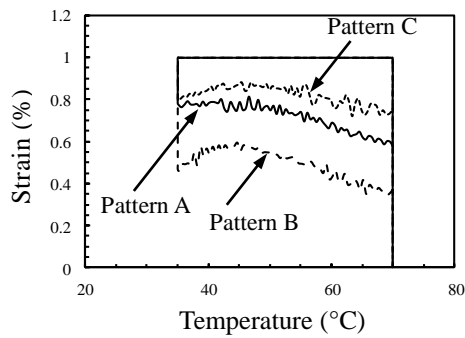
スリットを導入していない材料 (Slit-a) が材料全体を通して均一に変形するのに対して、スリットを導入した材料においてはスリット部にひずみが集中する。その結果、Slit-b,d のスリット部が局所的に大変形した状態となり、材料全体で見ると小さなひずみ値で破断に至ったと考えられる。他のスリットタイプと比較すると、Slit-c ではひずみ集中部が約二倍存在しており、そのことが材料全体で見たときにより大きな変形を可能にしたと考えられる。

### (2) 解析結果

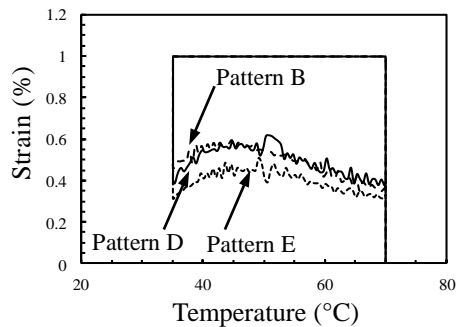
スリット分布の影響に関して、互い違いパターン (パターンB) の場合、パターンAおよびCと比較して形状固定性が良くないことが分かる。スリットの数を増やしたパターンCの場合は形状回復性が劣化している。これは、スリット周囲の母材が曲げ変形を吸収し、繊維の弾性力が十分に発揮されていないためである。ここで、パターンBの最終的な形状回復率が高いのは単に形状固定性が良くないためである。実質の形状回復率で比較すると、パターンAが最も形状回復性に優れる。

ただし、互い違いパターンが機能性に与える影響に関する上記の結果は、実験結果と対





(a) スリット分布の影響



(b) 繊維基材位置の影響

図7 熱サイクル中の曲げひずみ-温度関係

比すると必ずしも同じ結果ではない。本解析モデルでは繊維基材を均質体として表現したため、繊維基材内の繊維の変形挙動を十分に捉えていない可能性がある。つまり、巨視的な議論だけでは機能性発現機構を十分に説明できない可能性を示唆している。

繊維基材位置の影響については、パターンBとDと比較した場合にほとんど変化が見られない。繊維基材が中央に寄った場合でもその影響は小さいことが分かる。一方、パターンEについて、残留ひずみが小さくなる理由は、繊維基材が表面近くにあるために曲げ剛性が高く、形状固定性が良くないためである。

### (3) 考察および課題

最後に、形状記憶複合材料の内部構造設計という観点で考察を加える。実験を通して、形状を回復させる方向に働く繊維の弾性力が小さく、繊維自体の変形が小さい複合材料ほど高い形状固定性を示すことがわかった。また繊維端付近のポリマーに集中するひずみに対して、周辺の繊維から働く弾性力が大きいほど形状回復性は高くなることがわかった。これらの結果により、曲げの外側に多くの繊維端を配置し、繊維端が特定の箇所に集中しないように分散させることが、形状固定性と形状回復性と両性質の向上を実現する有効な材料設計であることが分かった。

展開特性、引張特性の双方の観点を見ると、ひずみ集中部が受ける荷重を隣接する繊維が受け持つようにスリットを配置するか

否かが変形性能に影響することが分かった。破断ひずみを増加させるためには、ひずみ集中部の数を増やすことが有効であり、すべてのスリットに均等にひずみを分散させることが大変形を可能にする有効な手段である。ただし、本研究で扱った材料は、すでに述べたとおり、ポイドや含浸不良の影響により剛性・強度が低下している可能性があり、改良の余地がある。一方、どの程度の材料性能が必要かを議論する観点では、より実用を想定した剛性および変形性能の最適設計が今後必要である。

数値解析による検討では、定性的なメカニズムについて一定の洞察は得られているが、実験で見られたような機能性発現に及ぼす三次元的な繊維の変形特性を十分には再現できていない。三次元モデルの開発による定量化も今後の重要な課題である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

(1) Masaaki Nishikawa, Ken Wakatsuki, Akinori Yoshimura, Nobuo Takeda, Effect of Fiber Arrangement on Shape Fixity and Shape Recovery Process in Thermally-Activated Shape-Memory-Polymer Based Composites, Composites A, 43, (2012) 165-173, 査読有。

DOI:10.1016/j.compositesa.2011.10.005

〔学会発表〕(計3件)

(1) 関谷優太, 西川雅章, 北條正樹, 形状記憶複合材料の内部構造が破断ひずみに及ぼす影響, 第4回日本複合材料合同会議, 平成25年3月9日, 東京都文京区。

(2) 関谷優太, 西川雅章, 北條正樹, スリット導入型形状記憶複合材料の形状回復性評価, 第54回構造強度に関する講演会, 平成24年8月3日, 熊本市。

(3) Masaaki Nishikawa, Masaki Hojo, Analysis of the Shape-Recovery Performance of Thermally-Activated Shape-Memory Polymer Composite with Microstructural Heterogeneities, 2012 SPIE Smart Structures/NDE Conferences, 平成24年3月14日, San Diego, USA。

DOI:10.1117/12.913035

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

西川 雅章 (NISHIKAWA MASAOKI)  
京都大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 60512085

### (2) 研究分担者 なし

### (3) 連携研究者 なし