

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：15201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03838

研究課題名(和文)印刷プロセスで固有ひずみ場を形成した4Dプログラマブル・シートの逆問題解析

研究課題名(英文)Inverse design of 4D programmable sheets with eigenstrain

研究代表者

森本 卓也 (Morimoto, Takuya)

島根大学・学術研究院理工学系・准教授

研究者番号：30451660

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、印刷により着色された領域が吸光によって熱収縮するSMPを用いた「切り紙シート」、およびこのSMPを厚紙で挟み込んだサンドイッチ構造の「コンポジットシート」において、曲率と収縮量の相関を定量化することで所望の面外変形を誘起するための設計原理を構築した。いずれのシートにおいても、収縮により生じる面外変形の形状と曲率は、理論と実験でよい一致を示し、さらに漸近展開による簡便な近似式を提案した。コンポジットシートでは、切り紙シートに比べて2倍程度大きな曲率を実現できることを示した。曲率と収縮量の時間変化に線形関係があることがわかったが、その時間依存の理論予測は今後の課題として残った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

外部刺激により2次元の平面シートから3次元の曲面を生み出すモーフィング技術は、折りたたみ/展開構造やフレキシブルエレクトロニクスなどへの広い応用が期待されている。より現実的で複雑な印刷パターンを施したシートに対するモーフィングの予測にはシミュレーションを必要とするが、幾何と弾性にもとづいて本研究で提案したシートの平均曲率を予測する近似式は、これらの設計に基礎的な知見と有用なツールを提供するものである。

研究成果の概要(英文)：We report two sheets to morph from a flat sheet to an out-of-plane bending using a shape memory polymer (SMP) that respond to heat. We prepared a Kirigami sheet by introducing slits and a composite sheet in which the SMP sheet is used as a core and thick papers as the faces. In both sheets, we predicted the curvature based on the elastica model and determined an approximate formula to describe the relationship between curvature and shrinkage. We showed that the theoretical predictions agree well with the experimental results, and the composite sheet can morph two times larger than the Kirigami sheet in the out-of-plane direction. Theoretical development is needed to predict the time dependence of curvatures in further work.

研究分野：材料力学

キーワード：座屈 シート 形状記憶ポリマー

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、外部刺激に反応するアクティブマテリアルを利用したモーフィング技術の研究が活況である。特に、アクティブマテリアルとして形状記憶ポリマー (Shape Memory Polymer: SMP) を活性材料として用いた方法が提案されている。SMP の性質を利用して 2 次元平面シートから 3 次元曲面形状への変形応答を予測・制御することができれば、プリンタブルデバイスの立体構造アセンブリ等、汎用性の高い基盤技術の提供が期待できる。そのためには、形状記憶ポリマー (SMP) シート上に黒色パターンを印刷した局所部分の吸光により生じる熱ひずみでプログラムされた固有ひずみ場と、それによって誘起されるシートの面外変形の曲率変化との相関を見出すことが必要であった。

2. 研究の目的

本研究では(1)着色を施した領域が吸光によって熱収縮する SMP を用いた切り紙シート、および(2)SMP を厚紙で挟み込んだサンドイッチ構造のコンポジットシートの 2 つの構造によるモーフィング技術を提案し、面外変形を誘起して曲率と収縮量の相関を定量化することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) SMP を用いた切り紙シート

実験で用いた SMP シートの形状と着色パターンを図 1 に示す。SMP シートは長時間の露光により熱が伝搬し非着色部へ伝わるため、短時間でガラス転移温度に達するようホットプレート (CHP-170DF, AS ONE) を 90°C に予加熱した。ここでプレート上での温度分布を一樣とするためアルミ板を、SMP シート底部での熱流束を抑えるため厚さ 1mm の PDMS シートを設置し、PDMS シート上に SMP シートを設置する。その後 SMP シートの温度が安定するように 10 分程度放置し、赤外線ランプ (IR100/110V250WRH, IWASAKI ELECTRIC) を照射した。着色部のみ吸光により加熱され収縮し、SMP シートの面外変形が誘起される。変形中のシートの連続画像を CCD カメラ (acA1300-uc, BASLER) で撮影し、収縮領域内の最高温度を赤外線カメラ (A325SC, FLIR) で測定した。CCD カメラによって得られた画像から、画像処理ソフトウェア (ImageJ, NIH) を用いてシート長さ L 、収縮量 ΔL 、中心部の高さ H を測定し、非収縮部の曲率を近似式により求めた。

(2) サンドイッチ構造のコンポジットシート

実験に用いたサンドイッチシートの形状を図 2 に示す。SMP シートを挟み込んで拘束するために、厚さ 0.23mm の厚紙 (502A, SEKIREI) を用いた。SMP シートの片面には、両端部の 2 箇所を厚さ 0.085mm のシリコンベースの両面テープ (7082 #25, TERAOKA) で厚紙を接合し、もう片面には、モーフィングの構造要素として全面を厚紙で覆い両端部のみ接合した。このように作製したサンドイッチシートを、200°C に予加熱したコンベクションオープン (PFC-D15A, IRIS OHYAMA) 内に入れ、サンドイッチシート内の SMP シート全体を収縮させた。なお、サンドイッチシートをオープン内に入れた後にオープンの蓋を開放した状態で、CCD カメラを用いて、側面形状を測定した。

4. 研究成果

(1) SMP を用いた切り紙シート

図 3a は、実験による画像のアーチ部分の形状を理論予測との比較を示している。両者の形状は一致しており、理論により求めた漸近解 $\kappa \approx H/L^2$ は正しい曲率を算出していることがわかる。収縮ひずみ $\Delta L/L_0$ の関数として、収縮後の長さ L 、アーチ部の高さ H 、曲率 κ を、理論解析と実験から得られた結果を比較したものを図 4 に示す。実験により得られた結果は 5 回分のうち、外れ値の大きい 2 回分を除いた 3 回分を用いている。実線は楕円関数による理論解の数値解、破線は

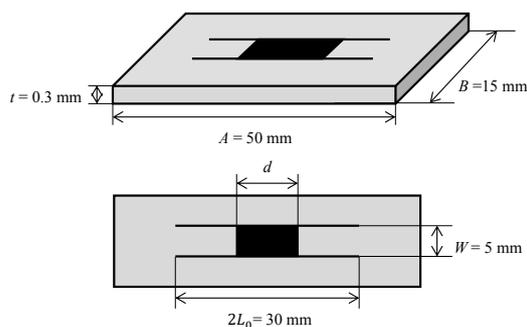


図 1

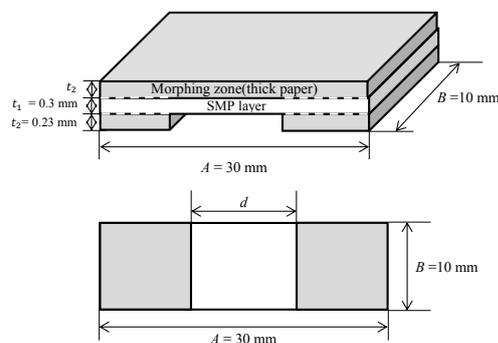


図 2

それらの漸近解を示している. 図 4 (c) から, ΔL が小さいところでは曲率 κ の実験値は負になっており, 理論値との差異が見受けられるが, ΔL が 0.02 を超えるとほとんど一致していることがわかる. 実験では温度の上昇過程で熱膨張が起こり, 一時的に ΔL が減少 (負値) してしまう. このため, ガラス転移温度 T_g に達せず, 収縮が開始されていない点で理論値と差異が生じてしまったと考えられる. 図 4 (b) からは AB 間の長さ L は ΔL の一次関数として減少していることがわかる. また, プロットは 1 秒毎に算出したものについて行っているため, 単位時間あたりの変化量 ΔL が次第に大きくなり, 変形の終盤では小さくなっている. 図 4 (c) より実験値が $\Delta L = 0$ から 0.01 付近までの値にばらつきが確認, 特に $d = 20\text{mm}$ では顕著である. これは CCD カメラによる 1 ピクセル当たりのサイズが約 0.037mm であるのに対して, $H < 0.1\text{mm}$ と変形量が非常に小さいため, 画像解析で誤差が生じたものと考えられる. また, 収縮領域を大きくするほど着色領域を加熱した際に均一に加熱することが難しくなるため, 変形様式にばらつきが生じたことが考えられる. そのため, 着色領域を拡大することでより大きな曲率を引き起こすことは難しいものと考えられる.

図 4 は温度上昇に伴う (a) 収縮量 $\Delta L/L_0$ の変化と, (b) 曲率 $\kappa \approx H/L^2$ の変化を示している. エラーバーは標準偏差を表している. 曲率が収縮領域の大きさ d に関わらず正の値をとり, 上面に凸となる方向へ変形している. また, 変形開始時間が異なるにも関わらず, 曲率が収束する時間はほぼ等しい. これは, 変形開始時間が遅い場合でも変形開始後に急激に収縮が進むためだと考えられる. 赤外線照射後 10~15 秒程度で急激に変形が開始され, 赤外線の照射後約 20 秒で一定の曲率へ収束する. これは着色部全体がガラス転移温度を超えると急激に収縮が開始され, シート全体に曲げが起こった後, 非収縮部から受ける引張応力と着色部の収縮力が平衡状態となった時点で収縮が停止するためであると考えられる. d の値によらず $110\sim 120^\circ\text{C}$ 付近で変形が開始して, 約 140°C 付近で曲率の値が収束していることが分かる. この変形開始以前に微小な曲率の変化が画像観察で確認できた. SMP シートは下面に凸となる方向へ変形した後, 再度平面形状へと戻るような変形が生じている. この間, 長さ L はほとんど変化しておらず, 収縮領域の温度上昇による熱膨張によって非収縮部が中心部からの力を受けことが原因であると考えられる. これより, 変形開始以降の収縮量の増加に線形性が確認でき, 曲率の時間応答の予測が可能となる.

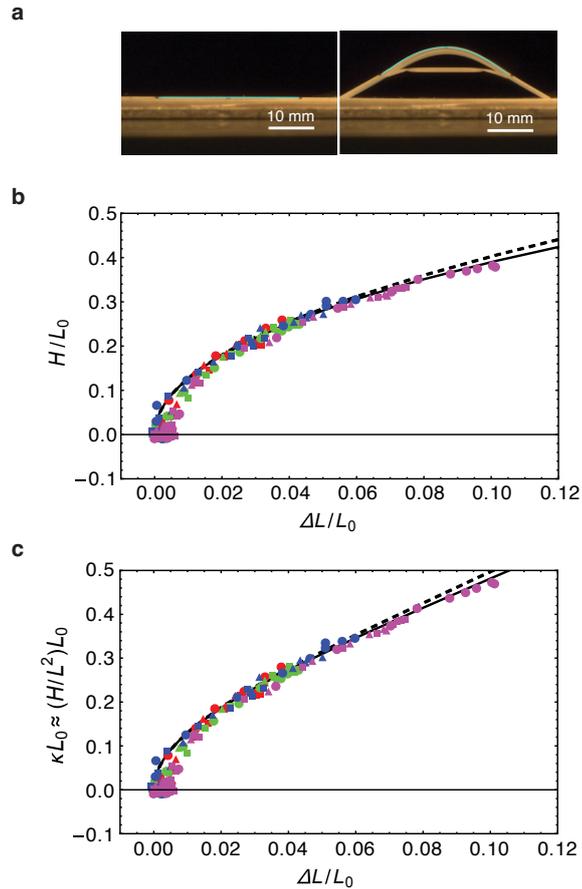


図 3 切り紙シートの面外変形応答に対する理論と実験の比較. (a) 形状, (b) アスペクト比 H/L_0 , (c) 無次元曲率 κL_0 .

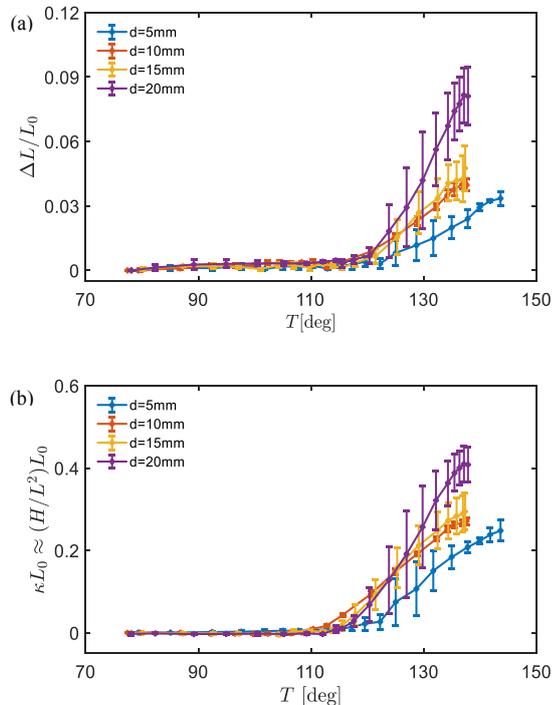


図 4 切り紙シートの温度履歴応答. エラーバーは標準偏差を表す. (a) 収縮ひずみ $\Delta L/L_0$, (b) 無次元曲率 κL_0 .

(2) サンドイッチ構造のコンポジットシート

図5は収縮後の長さ L , アーチ部の高さ H , 曲率 κ を収縮量 $\Delta L/L_0$ の関数としてプロットし, 理論と実験値を比較している. 実線は楕円関数による理論解の数値解, 破線はそれらの漸近解を示している. ΔL が 0.03 を超えると実験値と理論値がほぼ一致し, 収縮量 ΔL は(1)SMPを用いた切り紙シートによるアプローチと比べておよそ2.5倍大きくなっている. その結果, 2倍程度大きな曲率を得ることができた.

図6は収縮量 $\Delta L/L_0$ と曲率 κL_0 の時間履歴応答を示している. $d = 12 \text{ mm}$ と 18 mm では秒程度で収縮量, 曲率共に完全に収束している. また $d = 18 \text{ mm}$ についても22.5秒程度で収縮量と曲率が一定の値に収束していくことがわかる. $d = 24 \text{ mm}$ は, 15秒程度でシート両端の接合部分が乖離してしまうため, 曲率を求めることができなかった. 観測できた範囲では, 他のパラメータより曲率が大きくなっており, d の値が大きいくほど, 大きな曲率を生じることがわかる. 収縮開始点は d の値によらずほぼ一致しており, 切り紙シートのアプローチよりもロバストであることがわかる.

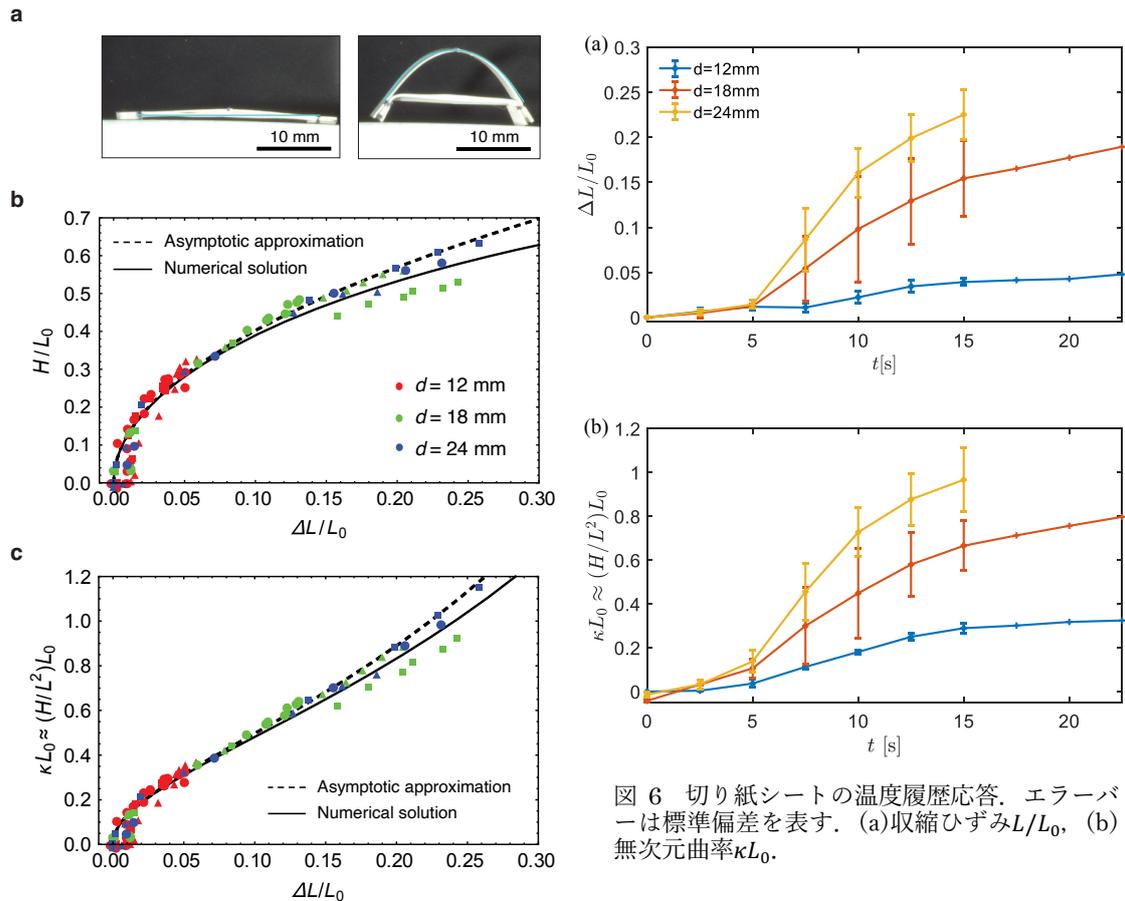


図5 コンポジットシートの面外変形応答に対する理論と実験の比較. (a)形状, (b)アスペクト比 H/L_0 , (c)無次元曲率 κL_0 .

図6 切り紙シートの温度履歴応答. エラーバーは標準偏差を表す. (a)収縮ひずみ L/L_0 , (b)無次元曲率 κL_0 .

※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。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Morimoto Takuya, Ashida Fumihito, Tomita Takahiro	4. 巻 177
2. 論文標題 Elastic buckling of a free-standing annulus subjected to partial shrinkage	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Mechanical Sciences	6. 最初と最後の頁 105610 ~ 105610
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijmecsci.2020.105610	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 森本 卓也, 芦田 文博
2. 発表標題 部分収縮による薄膜シートの弾性不安定性問題
3. 学会等名 日本機械学会2019年度年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 林 亮太, 森本 卓也, 芦田 文博
2. 発表標題 形状記憶ポリマーを用いたサンドイッチシートのモーフィング
3. 学会等名 日本機械学会中国四国支部第58期総会・講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Tomita, T. Morimoto, F. Ashida
2. 発表標題 Buckling of an annular sheet via in-plane misfit strains
3. 学会等名 The 6th Asian Conference on Mechanics of Functional Materials and Structures (ACMFMS 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 井上直哉, 森本卓也, 芦田文博
2. 発表標題 形状記憶ポリマーシートの収縮に伴う面外変形の誘起
3. 学会等名 日本機械学会 M&M2018 材料力学カンファレンス
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 林亮太, 森本卓也, 芦田文博
2. 発表標題 吸光による形状記憶ポリマーシートの変形応答
3. 学会等名 日本機械学会中国四国支部学生会第47回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryota Hayashi, Takuya Morimoto, Fumihiro Ashida
2. 発表標題 Curvature in shape memory polymer sheet with slits responding to selective light absorption
3. 学会等名 The 7th Asian Conference on Mechanics of Functional Materials and Structures (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------