

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K15339

研究課題名（和文）コレステリック液晶による湾曲ソフトマテリアルの内部ひずみ解明と高性能フィルム創製

研究課題名（英文）Internal strain analysis in bent soft material by a cholesteric liquid crystal elastomer

研究代表者

赤松 範久（Akamatsu, Norihisa）

東京工業大学・科学技術創成研究院・助教

研究者番号：50806734

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：湾曲に伴う膜厚方向のひずみを検出できるコレステリック液晶（CLC）センサーを開発し、汎用的なソフトマテリアルであるポリジメチルシロキサン（PDMS）フィルム内部にCLCひずみセンサーを導入した。得られたフィルムの湾曲に伴う反射光波長変化から、フィルム内部の局所的なひずみを検出した。この結果に基づき、湾曲に伴う中立面移動を定量解析することに成功した。湾曲によりひずみが生じないとされる中立面（膜厚中間）に注目すると、湾曲に伴い面外方向に収縮していることが明らかとなった。これらの内部ひずみ分布を考慮したフィルムデバイスを作製し、湾曲に対してより高耐久なフィルムデバイスを作製した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在のフレキシブルデバイス開発のアプローチは、湾曲に伴うひずみに追従する高伸縮な物質材料の開発と薄型化によるひずみ軽減の2つに大きく分類される。本研究では、湾曲によって生じる内部ひずみの定量解析に着目し、ひずみの分布を明らかにした。さらに、湾曲に伴う中立面の移動を追跡することで、ひずみ分布に応じた性能劣化しないフィルムデバイスの創製に成功した。このように、内部ひずみの実測に基づく高耐久フィルムデバイス開発は、学術的にも意義深い。内部のひずみ分布から中立面の移動挙動を詳細に理解し、高性能フィルムデバイスを設計できれば、エレクトロニクスのみならずソフトロボティクス、生体材料への波及効果も大きい。

研究成果の概要（英文）：In this work, the author quantified internal strain in a bending soft material using a cholesteric liquid crystal (CLC) sensor to identify the neutral mechanical plane (NMP) position. CLC has a helical molecular structure and exhibits selective reflection according to the helical pitch. By utilizing the reflection wavelength shift with the change in the helical pitch of CLC, the author measured the internal strain of a polydimethylsiloxane (PDMS) film, which is a soft material commonly used in flexible devices. Specifically, the CLC sensor was embedded in various positions of PDMS films to measure the internal strain distribution. Furthermore, mechanically durable device was designed by considering the NMP shift.

研究分野：高分子材料工学

キーワード：コレステリック液晶 フィルムデバイス 湾曲 中立面

1. 研究開始当初の背景

ソフトロボットやフレキシブルデバイスの実現に向けて、低環境負荷かつ安全なソフトマテリアル（高分子材料、エラストマー、液晶等）が大変注目されている。しかしながら、現状では大きな湾曲に対応できず性能が劣化する。一般的に湾曲は、材料の膜厚中間に位置するひずみ（伸び縮み）が生じない面（中立面）を境に膜厚方向において外面で収縮、内面で膨張すると解釈されている（図1）。一見解釈が容易であると思える湾曲であるが、ソフトマテリアルの湾曲では巨視的な

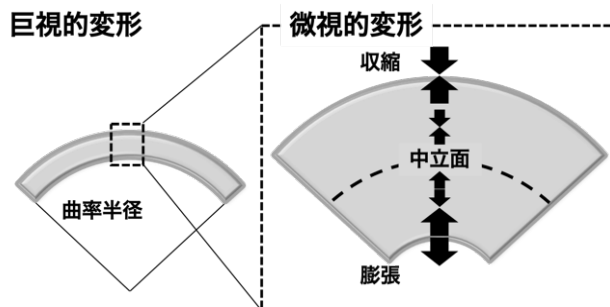


図1. ソフトマテリアルの湾曲挙動

曲率半径を評価するに留まっている。このような湾曲による性能劣化を解決するために、理論上ひずみの生じない膜厚中間に電子回路を配置する研究が報告されている。この材料設計により耐久性は向上したが、繰り返し大きく湾曲した際の性能維持には課題が残る。これは湾曲に伴う中立面の移動によりひずみが発生したことに起因する。中立面は湾曲に伴い材料の膜厚中間から移動することが経験的に知られているものの、簡便に中立面近傍のひずみを直接解析した例はわずかである。したがって、ソフトマテリアル内部、特に中立面近傍の局所的な湾曲ひずみを定量解析することが性能向上への重要な鍵となる。

より安全で柔軟な動きを実現できるソフトロボットや自由自在に変形するフレキシブルデバイスの研究開発が加速する今こそ、定性的な湾曲の理解に加えて定量的指標である内部ひずみの分布に着目し、ソフトマテリアルの湾曲挙動を体系的に説明できる新たな学理を構築する必要がある。

2. 研究の目的

本研究課題では、ソフトマテリアルの湾曲現象の鍵となる内部のひずみ分布を定量解析し、理論構築と高性能フィルムデバイスの設計を目的とする。あらゆる外部刺激により色が変化するコレステリック液晶（CLC）を用いて湾曲したソフトマテリアル内部のひずみ分布を解明することにより、高性能な電子部材等を適正に配置できる。高信頼性でありながら低伸縮性ゆえに適応困難であった無機半導体や金属材料を実装でき、学理構築から産業界への発展的波及効果が期待できる。

3. 研究の方法

図2に示す化合物を用いて、大きな湾曲に対応できる高伸縮な CLC ひずみセンサーを作製した。ソフトマテリアルの変形に影響を及ぼさない柔軟な CLC センサーを作製するために、ガラス転移点が 0 °C 以下になるように化合物・組成比を選定した。ホスト液晶 E7 とアクリレートモノマー A6CB、架橋剤 HDDMA とカイラル剤 S811、光重合開始剤 Irgacure651 を調製して重合用試料とした。次に、ラビング処理を施したガラスセルに重合用試料を浸透させた後、液晶相温度にて波長 365 nm、光強度 70 mW/cm² の紫外光を照射することにより CLC センサーを作製した。

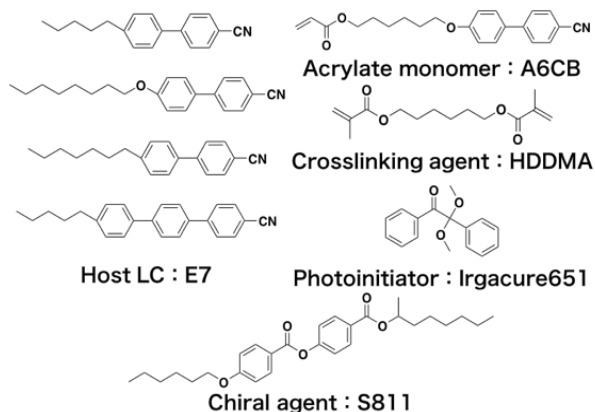


図2. CLC センサー作製に用いた化合物

その後、CLC センサーを膜厚 1.5 mm のポリジメチルシロキサン（PDMS）フィルム内部の様々な位置に導入した。このフィルムを両端から押し込むことで精密に湾曲を制

御しながら反射スペクトルを測定し、選択反射波長変化から面外方向のひずみを算出した。さらに、PDMS の引張試験と圧縮試験から得られる引張応力と圧縮応力を用いた理論解析および、画像相関法を用いた PDMS フィルム断面観察による中立面移動の解析を実施した。

これらの内部ひずみ解析結果に基づき、湾曲による性能劣化が起こらないフィルムデバイスを設計・構築した。PDMS フィルムの膜厚中間および内面側に Au 層を配置し、LED ライトを接続した。湾曲に伴う点灯、消灯の様子から Au 層の亀裂を観察した。

4. 研究成果

平坦な状態の PDMS 内部に導入した CLC センサーは緑色を呈していた。はじめに、CLC センサーを PDMS の湾曲内面表層部に導入したフィルムの湾曲状態における反射スペクトルを測定した。その結果、選択反射波長は湾曲の増大に伴い長波長側にシフトした。一方、湾曲外面表層部に CLC センサーを導入したフィルムでは短波長側にシフトした。また、膜厚中間部に導入したフィルムでは、わずかに短波長側へシフトした。湾曲に伴うこれらの波長シフトは 20 回以上の可逆性を示した。得られた選択反射波長シフトの結果から面外方向へのひずみを算出すると、湾曲内表面では 18%の膨張、外表面では 19%の収縮、膜厚中間では 7%の収縮が誘起されることが明らかとなった。

特に、ひずみが生じない中立面が存在する膜厚中間の 750 μm の位置において、湾曲に伴い面外収縮が生じることがわかった。より詳細に中立面の位置を調べたところ、押し込み量 50%において、湾曲に伴い中立面が湾曲内面側へ 162 μm 移動することを初めて定量化することに成功した (図 3)。以上の結果から、PDMS の弾性的で大きな湾曲により中立面が大きく移動することが明らかとなった。

一般的に湾曲は、材料膜厚中間のひずみが生じない中立面を境に、面外方向において対称的に外面で収縮、内面で膨張すると解釈されている。しかしながら、今回の測定結果から湾曲外面表層部と内面表層部では非対称なひずみ挙動を示し、さらに中立面においても大きな湾曲ではひずみが発生することがわかった。この大きな湾曲における特異なひずみ挙動は、PDMS の引張と圧縮の弾性率が異なるために生じたと考えている。

また、シリカ粒子を利用した画像相関法により、湾曲した PDMS フィルム断面の面内方向のひずみを解析した。その結果、フィルムの湾曲に伴い、外面では粒子間距離が大きくなり、内面側では小さくなった。この粒子間の距離の変化は、面内の引張と圧縮に起因するものである。また、フィルムの膜厚中間においても、粒子間距離がわずかに大きくなったため、湾曲に伴いフィルムの中に引張が発生することがわかった。したがって、湾曲によって中立面がフィルムの膜厚中間から内面に向かってシフトすることがわかった。

従来のフィルムデバイス設計においては、湾曲による性能劣化を防ぐために中立面が存在する膜厚中間に導電性材料等が配置されてきた。しかしながら、本研究において湾曲に伴い中立面が内面に移動することが定量解析できたため、これらを考慮する必要がある。そこで、膜厚中間および内面側に Au 層を配置した PDMS フィルムを作製した。膜厚中間に配置した場合、湾曲ひずみにより Au 層に亀裂が生じ、LED ライトが消灯した。一方、内面側に配置した場合、Au 層に明確な亀裂が生じず、デバイスが大きく曲がった状態でも LED ライトは点灯し続けた。したがって、中性面移動を考慮した設計により、フィルムデバイスの耐久性向上に成功した。

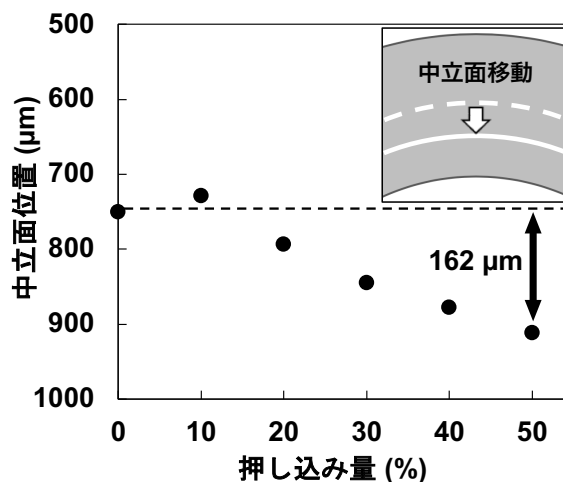


図 3. 湾曲に伴う中立面移動

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ando Nao, Hyodo Kei, Sasaki Hisao, Ota Yoshihito, Terasaki Nao, Sasayama Tomoki, Yokoi Yusuke, Shishido Atsushi, Akamatsu Norihisa, Taguchi Ryo	4. 巻 51
2. 論文標題 Analysis of Dynamic Strain on Foldable Devices	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 SID Symposium Digest of Technical Papers	6. 最初と最後の頁 417 ~ 420
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/sdtp.13893	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 -
1. 著者名 Taguchi Ryo, Akamatsu Norihisa, Kuwahara Kohei, Tokumitsu Kayoko, Kobayashi Yoshiaki, Kishino Masayuki, Yaegashi Keita, Takeya Jun, Shishido Atsushi	4. 巻 8
2. 論文標題 Nanoscale Analysis of Surface Bending Strain in Film Substrates for Preventing Fracture in Flexible Electronic Devices	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advanced Materials Interfaces	6. 最初と最後の頁 2001662 ~ 2001662
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/admi.202001662	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Taguchi Ryo, Kuwahara Kohei, Akamatsu Norihisa, Shishido Atsushi	4. 巻 17
2. 論文標題 Quantitative analysis of bending hysteresis by real-time monitoring of curvature in flexible polymeric films	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Soft Matter	6. 最初と最後の頁 4040 ~ 4046
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d0sm02233k	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 -
1. 著者名 赤松 範久	4. 巻 75
2. 論文標題 皮膚の色が変わるカメレオンのような材料	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 化学	6. 最初と最後の頁 63 ~ 64
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 田口諒, 赤松範久, 梶谷孝, 福島孝典, 宍戸厚
2. 発表標題 ポリエチレンナフタレートフィルムの繰返し湾曲に伴う表面ひずみの定量評価
3. 学会等名 プラスチック成形加工学会第31回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岸野真之, 赤松範久, 田口諒, 久保祥一, 久野恭平, 堤治, 宍戸厚
2. 発表標題 コレステリック液晶センサーによるソフトマテリアル内部の湾曲ひずみ分布解析
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金原優里奈, 田口諒, 赤松範久, 久保祥一, 宍戸厚
2. 発表標題 ひずみ定量解析による配向性高分子フィルムの湾曲挙動
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 新井悠馬, 赤松範久, 久保祥一, 宍戸厚
2. 発表標題 動的光重合により作製した配向性高分子フィルムの力学物性評価
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 新井悠馬, 赤松範久, 久保祥一, 宍戸厚
2. 発表標題 光重合による配向性高分子フィルムの作製と力学物性評価
3. 学会等名 第69回高分子討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金原優里奈, 田口諒, 赤松範久, 久保祥一, 宍戸厚
2. 発表標題 一軸延伸高分子フィルムの湾曲ひずみにおける分子配向方向の効果
3. 学会等名 第69回高分子討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金原優里奈, 田口諒, 赤松範久, 久保祥一, 宍戸厚
2. 発表標題 表面力学解析法を利用した一軸延伸高分子フィルムの湾曲解析
3. 学会等名 第10回CSJ化学フェスタ2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 新井悠馬, 赤松範久, 久保祥一, 宍戸厚
2. 発表標題 動的な光重合により配向した液晶高分子フィルムの力学挙動
3. 学会等名 第10回CSJ化学フェスタ2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岸野真之, 赤松範久, 田口諒, 久保祥一, 久野恭平, 堤治, 宍戸厚
2. 発表標題 コレステリック液晶を利用したひずみ分布測定によるソフトマテリアルの湾曲挙動解析
3. 学会等名 第10回CSJ化学フェスタ2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岸野真之, 赤松範久, 田口諒, 久保祥一, 久野恭平, 堤治, 宍戸厚
2. 発表標題 コレステリック液晶ひずみセンサーを用いたシリコンエラストマーの湾曲挙動解析
3. 学会等名 2020年日本液晶学会オンライン研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 張鈺昊, 金原優里奈, 岸野真之, 田口諒, 赤松範久, 宍戸厚
2. 発表標題 湾曲したポリエチレンテレフタレートフィルムの表面ひずみ経時変化解析
3. 学会等名 日本化学会第101春季年会
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
---------	---------