

# 博士論文要旨

## 論文題名：コレステリック液晶エラストマーの機械- 光学応答を利用したひずみセンシング

立命館大学大学院生命科学研究科  
生命科学専攻博士課程後期課程

ク キョスン

KU Kyosun

本論文は、機械刺激に応答して光学物性が変化するコレステリック液晶エラストマー (ChLCE) を実デバイスにおけるひずみセンシング材料へと応用することを指向し、機械物性および光学物性を制御するための材料設計指針を提案することを目的としている。ChLCE の材料組成に関わらず、外部に異種材料を積層することで、光学物性から機械物性を分離して自在に設計できることを明らかにした。さらに、分子構造を制御することにより、ひずみセンシングの精度劣化に繋がりうる熱刺激・溶媒暴露による光学物性変化を抑制することに成功した。

第一章では、外部刺激センシング材料におけるコレステリック液晶材料の重要性と、エラストマー化による機械刺激センシングへの応用と課題について概説し、本研究の目的を述べた。

第二章では、異種材料積層による機械物性制御という新たな刺激応答性材料の設計概念を立証するための実験を行なった。合成した ChLCE 単層材料では、一般的なクリープ回復を示したのに対し、弾性変形材料であるシリコンゴムを外層に積層した材料では弾性応答 ChLCE として振る舞い、塑性変形材料であるポリメチルペンテンを外層に積層した材料では塑性応答 ChLCE として機能することを初めて明らかにした。また、積層材料にかかわらず、コレステリック液晶の分子配向構造に基づく明確な反射色および反射色変化を示した。Voigt モデルを基礎とし理論解析したところ、理論的な応答速度は実験値と極めてよく一致した。さらに、開発した積層 ChLCE の光学物性変化は、ひずみに一意に対応しており一般的なカメラおよび肉眼でも容易に解析可能であった。用途に応じて、高速もしくは超低速な機械刺激応答を示すひずみセンシング材料としての応用できる。

第三章では、エラストマーにおける架橋剤の分子構造が ChLCE の機械特性に与える影響を検討することで、ひずみセンシング可能なひずみ範囲の制御を試みた。アルキレン鎖を有する架橋剤とメソゲン基が導入された架橋剤を用いて ChLCE を合成した。メソゲン基の導入により、ヤング率および破断強度、破断ひずみが増加することが明らかとなり、積層構造のみでは制御困難な内層材料の破断点も制御可能な材料設計指針を見出した。

第四章では、異種材料積層による応答速度制御において重要な因子となる ChLCE 単層材料の異種材料に対する接着特性について検討した。ガラス基板やアルミニウム薄膜、皮膚、凹

凸塗装面にも圧力印加により良好な接着を示した。異種材料の変形に追従した反射色変化を示すことから、あらゆる材料のひずみセンシングへと応用できる。

第五章では、ChLCE を用いたひずみセンシングにおける精度劣化へと繋がりうる熱刺激・溶媒曝露などの外部刺激による反射波長変化について検討した。一般的に架橋剤濃度を増加することで、熱刺激や溶媒曝露下における反射波長変化は抑制できる。しかしながら、共有結合性架橋の増加に伴い ChLCE の柔軟性や機械刺激応答性も劣化するため好ましくない。著者は、シアノピフェニル基間の静電的相互作用を利用した非共有結合性架橋点を導入することで、ChLCE の機械刺激応答性を損なうことなく熱刺激・溶媒に対する安定性が向上できることを明らかにした。

第六章では、本論文の要点を総括して述べた。本論文では、ChLCE の刺激除去時の戻り速度を自在制御可能な異種材料積層という新たな材料設計指針を提案し、実用可能なひずみセンシング材料の開発に成功した。ChLCE 自体の戻り速度によらず、外部に積層する材料により戻り速度を制御できた。さらに光学特性は、用いる材料の分子構造や分子配向により制御できるため、ひずみセンシングのみならずあらゆる機能性ソフト材料への応用が期待できる。

## **Abstract of Doctoral Dissertation**

### **Title: Strain Sensing by Means of Mechano-optical Response of Cholesteric Liquid Crystal Elastomers**

Doctoral Program in Advanced Life Sciences

Graduate School of Life Sciences

ク キョスン

KU Kyosun

This dissertation presents the development of flexible, stretchable strain sensing applications based on a cholesteric liquid crystal elastomer (ChLCE), changing its optical properties depending on an applied mechanical strain. Here, the author proposed a concept of multilayered system, enabling to tune the mechano-responsive behavior of ChLCE regardless of mechanical properties of ChLCEs by using layering materials with desired mechano-responsive behavior. Furthermore, a slight modification of chemical structure for synthesizing the ChLCEs allows to enhance the optical stability under other external stimuli such as excessive heating and solvent exposure.

In Chapter 1, the author presents the importance of cholesteric liquid crystals in the field of stimuli-sensing applications, basic knowledge of ChLCEs for realizing strain-sensors, and describes the purpose of this dissertation.

In Chapter 2, the author explored the multilayered concept for tuning the mechano-responsive behavior of ChLCEs. The synthesized ChLCEs showed a rapid mechano-responsive behavior when a mechanical strain is applied but a relatively slow recovery response after strain removal, which typical behavior due to creep recovery process of polymeric systems. By contrast, the multilayered ChLCEs exhibited drastic change of recovery response; when the elastically-responsive film of silicone rubber was layered, the recovery response was fast (<1 s); and when the plastically-responsive film of polymethyl pentene was layered, the recovery response was ultraslow (> 6 months). The author has found that the layered materials never affected the optical property of ChLCE where the reflection color and the reflection peak wavelength changed under applied strain due to the molecular orientation change in ChLCEs. Theoretical investigation of recovery response of multilayered ChLCE systems using Voight model had a good agreement with the experimental results. Of particular interest here is that the optical property change was independent of the stress and depended only on the applied strain, and could be quantified even by a commercially available camera and naked eyes. These findings suggest that the ChLCE system with arbitrary recovery response behavior has significant potential for use in practical high-performance strain sensing applications.

In Chapter 3, the author investigated the effect of chemical structure of crosslinkers on mechanical

properties of ChLCE for extending its strain sensing capability. The author synthesized different type of ChLCEs with an alkylene crosslinkers or a mesogenic crosslinker. Tensile test of the synthesized ChLCEs revealed that the introduce of mesogenic crosslinker improved the mechanical properties of ChLCE where Young's modulus, breaking stress and breaking strain were increased. This allows us to control the mechanical durability of internal layer of ChLCE and extend the strain sensing capability that is difficult to be tuned by external layers.

In Chapter 4, the author discussed the pressure sensitive adhesive (PSA) properties of a bare ChLCE film that is an important factor for using multilayered system in practical strain sensing applications. The ChLCE synthesized here showed good PSA properties onto various substrates, e.g. of a glass, a thin aluminum, a human skin, and a roughened painted surface. According to the multilayered ChLCEs changing the reflection color, the proposed system enables to be used in the strain sensing of various substrates.

In Chapter 5, the author focused on enhancing environmental stability of color change of ChLCE for minimizing the degradation of precision in strain sensing. Generally, the environmental stability can be enhanced by introducing a large portion of crosslinking sites; however, the increase of covalent crosslinking site deteriorates the flexibility and stretchability of ChLCE. Here the author introduced noncovalent cross-linking sites *via* intermolecular interactions between cyanobiphenyl derivatives bonded to the polymer network. ChLCE with a cyanobiphenyl derivative as a side-chain mesogen exhibited mechano-optical responsive behavior, and showed high resistance to harsh environments, including excessive heating and various solvent exposure.

In Chapter 6 the author provided the general conclusion for this dissertation. The design concept of multilayered materials enables to arbitrary tune the recovery response of ChLCEs, and realized to develop a practical strain sensing application with fast and ultraslow recovery response regardless of the original mechanical property of a bare ChLCE layer. Considering that the optical properties of LCEs can be designed by controlling chemical structure of compounds and molecular orientation patterns, the proposed multilayered concept with potential to provide a pathway for developing not only a strain sensing application but also various LCE-based applications.