Development of Orientation-Birefringence-Controlled Optical Polymers via Synthesis and Combination of Bottlebrush Polymers

January 2025

Masaki Tamura

別表5
(3)

主　論　文　要　旨

No.1

報告番号	(甲) 乙　第　　号	氏　名	田村　正樹

主論文題名：

Development of Orientation-Birefringence-Controlled Optical Polymers via Synthesis and Combination of Bottlebrush Polymers

（ボトルブラシポリマーの合成と複合化による光学ポリマーの配向複屈折制御とその応用）

（内容の要旨）

高性能なスマートフォンのカメラでは，高解像度の画像を得るために，配向複屈折が極めて小さな光学ポリマーが必要とされる．本論文では，ボトルブラシポリマー (BBP) を用いて光学ポリマーの配向複屈折を制御して補正する手法を研究し，この手法を通して開発された複屈折の小さな光学ポリマーについて，実際の光学設計に適用してその利点を検証した．

第 1 章では，光学ポリマーの定義・種類・開発の歴史について述べ，その課題である複屈折について提起した．そして，複屈折の現状とそれを克服する新たな手法を紹介し，本研究の目的を述べた．第 2 章では，線状ポリメチルメタクリレート (PMMA) と PMMA 側鎖からなる BBP (PMMA-BBP) をさまざまな割合で混合し，その PMMA ブレンドの配向複屈折を分析することで本手法の有効性を検証した．その結果，線状 PMMA の負の複屈折は，PMMA-BBP の正の複屈折で相殺できることがわかった．特に，線状 PMMA と PMMA-BBP のブレンド比が 73：27 の場合，その PMMA ブレンドサンプルの配向複屈折は，配向度に依存せず完全に補正されることを見出した．さらに，その補正の機構について考察した．第 3 章では，本手法を色分散性の大きなポリスチレン (PS) に適用し，線状 PS と PS 側鎖からなる BBP (PS-BBP) を混合することにより，PS の配向複屈折制御を検討した．PMMA と同様，線状 PS の負の複屈折は PS-BBP の正の複屈折によって相殺できることがわかった．特に，線状 PS と PS-BBP のブレンド比が 30:70 の場合，PS ブレンドサンプルは 120%のひずみ下でも極めて低い配向複屈折 $|\Delta n| \sim 3.9 \times 10^{-4}$ を示した．以上から，この PS ブレンドは高い色分散性と低複屈折性を合わせ持つ光学ポリマーの有望な制御手法になり得ることが示された．さらに，その PS ブレンドの光学特性および熱特性を分析した結果，線状 PS とほぼ同等の特性を有することが確認された．第 4 章では，上記 PS ブレンド (LB-PS) の有効性を評価するため，LB-PS の配向複屈折を高性能スマートフォンカメラのレンズ系で最も使用されている光学ポリマーの配向複屈折と比較した．その結果，LB-PS の複屈折はその光学ポリマーと同等かそれ以下になることがわかった．また，LB-PS をレンズ系に使用する優位性について，光学設計ソフトウェア上で設計したレンズ系の解像性能の比較により検証した．結果，LB-PS をレンズ材料として用いたレンズ系は，複屈折を考慮するしないにかかわらず，いずれにおいても高解像度を有することがわかった．以上より，LB-PS はレンズ系の色収差を補正しつつ，実用的な解像性能を向上させることが可能な優れた光学材料であることが示された．第 5 章では，各章で得られた結果を総括し，本論文の結論を述べた．

別表６
（３）

Keio University

Thesis Abstract

No.

Registration Number	□ “KOU” □ “OTSU” No. *Office use only	Name	Masaki Tamura

Thesis Title

Development of Orientation-Birefringence-Controlled Optical Polymers via Synthesis and Combination of Bottlebrush Polymers

Thesis Summary

Flagship smartphone cameras require optical polymers with extremely low orientation birefringence to produce high-resolution images. Although some proposals to decrease birefringence have been made, there have not been effective and practical methods to compensate for the birefringence of optical polymers without changing the optical and thermal properties of the original linear polymers. In this thesis, practical compensation for orientation birefringence of optical polymers using a bottlebrush polymer (BBP) was investigated, verifying the advantages of the developed optical polymers by applying them to actual optical designs.

In Chapter 1, the background and the development history of optical polymers were described, and the issues of birefringence were explained. Details of birefringence and an effective approach to overcome the issues were introduced, and the objective of this thesis was clarified. In Chapter 2, the developed method was verified by controlling the orientation birefringence of poly(methyl methacrylate) (PMMA) through blending linear PMMA and BBPs composed of PMMA side chains (PMMA-BBP). The negative birefringence of elongated linear PMMA was found to be offset by the positive birefringence of elongated PMMA-BBP. When the blending ratio of linear PMMA to PMMA-BBP was 73:27, the PMMA blend demonstrated complete compensation for orientation birefringence under any mechanical strain. The mechanism of the compensation for orientation birefringence was discussed. In Chapter 3, this approach was extended to polystyrene (PS) with high chromatic dispersion: compensating for the orientation birefringence of PS by mixing linear PS and BBPs with PS side chains (PS-BBP). Similar to PMMA, the negative birefringence of elongated linear PS was cancelled by the positive birefringence of elongated PS-BBP. Also, when the blending ratio of linear PS to PS-BBP was 30:70, the PS blend demonstrated extremely low orientation birefringence of $|\Delta n| \sim 3.9 \times 10^{-4}$ even under 120% strain. The results indicated that the PS blend is a promising optical polymer with high chromatic dispersion and low birefringence. Furthermore, the optical and thermal properties of the PS blend were found to be almost the same as those of linear PS. In Chapter 4, the orientation birefringence of the PS blend with the lowest birefringence (LB-PS) was compared with that of the most widely used commercial optical polymers in the lens systems of flagship smartphone cameras, confirming the effectiveness of LB-PS. The birefringence of LB-PS was found to be equal to or even lower than that of the commercial optical polymers. Moreover, the advantage of utilizing LB-PS in an optical lens system as a lens material was evaluated computationally and verified by analyzing the resolution performance of the lens system designed using optical design software. The lens system using LB-PS as a lens material was found to maintain high resolution even when birefringence was considered. It was concluded that LB-PS could be an excellent optical material, enhancing practical resolution performance while compensating for chromatic aberration of lens systems. In Chapter 5, all the findings presented in this thesis were summarized.