研究助成研究成果報告書

令和　8年　9月　16日

公益財団法人江野科学振興財団
理事長　　江野眞一郎　　殿

貴財団より助成のありました研究の成果について下記のとおり報告します。

申請者名

東原　知哉　　印

記

1.研究課題名

和 文 ヒンジ構造を導入した半導体高分子の合成と伸縮性有機エレクトロニクス材料への応用
英 文 Synthesis of Semiconducting Polymers with Hinge Structures and Their Application to Stretchable Organic Electronics

2.申請者名(代表研究者)

氏 名 東原　知哉	ローマ字表記 HIGASHIHARA,　TOMOYA
所属大学・機関名 山形大学大学院有機材料システム研究科	英訳表記 Graduate School of Organic Materials Science, Yamagata University
学部・部課名 有機材料システム専攻	英訳表記 Department of Organic Materials Science
役職名 教授	英訳表記 Professor

3.共同研究者（下段　英訳表記）

氏　　名	所属機関名・学部名・役職
(氏　名) 髙橋　汰一 (英訳表記) Takahashi, Taichi	山形大学大学院有機材料システム研究科・博士前期課程2年 (英訳表記) Yamagata University, Graduate School of Organic Materials Science, Master 2nd grade student
(氏　名) 林 彦丞 (英訳表記) Lin, Yan-Cheng	国立成功大学・化学工学科・准教授 (英訳表記) National Cheng-Kung University, Department of Chemical Engineering, Associate Professor
(氏　名) (英訳表記)	 (英訳表記)

4.英文抄録（300 語以内）

The development of intrinsically stretchable semiconducting polymers is essential for next-generation wearable and skin-conformable electronics; however, achieving both efficient charge transport and mechanical stretchability remains a fundamental challenge. In this research, we proposed a new molecular design strategy based on the incorporation of thianthrene units with a hinge-like conformation into the backbone of semiconducting polymers. We hypothesized that the bent thianthrene units could undergo strain-induced conformational changes, thereby dissipating mechanical stress while preserving charge-transport pathways.

To demonstrate this concept, a series of *n*-type semiconducting polymers based on naphthalene diimide were synthesized by statistical terpolymerization with different amounts of thianthrene as a hinge-type conjugation-break spacer. Rigid and planar dioxin-containing polymers were also prepared as control materials. Incorporation of the thianthrene units substantially enhanced the mechanical tolerance of the polymer films, increasing the crack-onset strain from 20% for the parent polymer to as high as 50%. Spectroscopic and structural analyses revealed strain-induced conformational reorganization of the thianthrene-containing backbones, accompanied by partially reversible changes in molecular packing.

Importantly, the optimized thianthrene-containing polymer maintained nearly isotropic electron transport even at 60% tensile strain, with electron mobilities comparable to that of the unstretched film. Moreover, the electron mobility was maintained and even enhanced after 1,000 stretch–release cycles, demonstrating excellent electromechanical durability. These results validate our original hinge-based molecular design concept and establish hinge-type backbone engineering as a promising molecular design principle for intrinsically stretchable semiconducting polymers.

5.研究目的

近年、ウェアラブル・フレキシブルデバイスの発展に伴い、皮膚などの柔軟な表面に密着し、変形や伸縮を繰り返しても安定して動作する有機エレクトロニクス材料が求められている。なかでも半導体高分子は、軽量性、溶液加工性、分子構造の多様性などの利点を有する一方、高い電荷輸送特性を得るためには一般に剛直で平面性の高いπ共役主鎖が必要となる。このような分子構造は薄膜を硬く脆くするため、半導体特性と伸縮性の両立が本質的な課題となっている。

本研究では、このトレードオフを克服する新たな分子設計として、外力に応答して構造変化できる「ヒンジ構造」を半導体高分子主鎖に導入する手法を提案した。具体的には、折れ曲がった立体構造を有するチアンスレンを共役切断スペーサーとしてπ共役主鎖に導入し、伸長時の局所的なコンフォメーション変化によって応力を緩和するとともに、電荷輸送経路を維持することを目指した。さらに、剛直で平面性の高い比較構造を導入した高分子との比較を通じて、ヒンジ構造特有の効果を明らかにすることとした。

以上により、伸長変形に適応して分子構造・分子パッキングを再編成できる半導体高分子を創製し、「高い半導体特性」と「高い伸縮性」を両立するための新しい分子設計指針を確立することを本研究の目的とした。

6.研究内容及び成果の本文

別紙に作成添付してください。（冒頭に所属、氏名、研究課題を記載ください）

7.今後の研究の見通し

本研究により、半導体高分子主鎖へのヒンジ型チアンスレン構造の導入が、伸長時の局所的なコンフォメーション変化と応力緩和を可能とし、機械的変形下においても安定した電荷輸送経路を維持するために有効であることを明らかにした。特に、最適化したチアンスレン含有高分子は 60%の伸長歪み下でも未伸長時と同程度の電子移動度を維持し、さらに 1,000 回の伸縮後にも安定した電子輸送特性を示したことから、「変形に適応して分子構造を変化させる」という新たな伸縮性半導体高分子の設計概念を提示することができた。

一方、ヒンジ構造の導入はπ共役の部分的な切断を伴うため、未伸長状態における電子移動度の絶対値にはさらなる向上の余地がある。今後は、チアンスレンの導入量、導入位置、分子量および主鎖構造を精密に制御し、伸縮性・繰り返し耐久性を維持しながら、より高い電荷移動度を実現する分子設計へ発展させる。また、本研究で得られたヒンジ型分子設計を、NDI 系 *n* 型半導体に限定せず、他の *n* 型および *p* 型半導体高分子へ展開し、その一般性を検証する。

さらに、伸長・回復過程における分子構造および高次構造の変化を詳細に解析し、ヒンジ構造、応力緩和、分子パッキング、電荷輸送の相関を明確化する。これらを通じて、高い電気特性と機械的耐久性を兼ね備えた本質的伸縮性半導体材料の設計指針を確立し、将来的にはウェアラブルセンサー等の伸縮性有機電子デバイスへの応用につなげる。

8.本助成金による主な発表論文、著書名

T. Takahashi, M.-H. Chen, Y.-C. Kan, J.-Y. Chen, H. Sun, Y.-C. Lin, **T. Higashihara**,* “Design and Synthesis of Naphthalene-Diimide-Based N-type Semiconducting Polymers with Hinged Thianthrene Units Suited for Stretchable Organic Electronics”, ***ACS Appl. Polym. Mater.***, 8(15), 12424–12439 (2026).
https://doi.org/10.1021/acsapm.6c01520

［注１］本報告書は、助成金を受けた翌年９月末までに必ず提出してください。

［注２］**（お願い）印刷物の郵送と電子媒体の添付ご提供をお願いします。インターネットメールでの送付を歓迎します。**〈E-Mail：enozaidan@kokoku-intech.com〉

［注３］**この報告書を当財団のﾎｰﾑﾍﾟｰｼﾞに掲載させていただきますので、予めご了承ください。**

※当財団へのご意見・ご要望がございましたら、下記へご記入ください。
お寄せいただいたご意見・ご要望は今後の参考にさせていただきます。

特にございません。改めて多大なるご支援を賜り、御礼もうし上げます。

アンケートへのご協力ありがとうございました。

以 上