研究助成研究成果報告書

令和８年９月２８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
井改　知幸　印

記

1.研究課題名

和 文 三次元分子設計で実現するラダー型フィラーによるゴム物性の自在チューニング
英 文 Versatile Tuning of Rubber Properties with Ladder-Type Fillers Realized by 3D Molecular Design

2.申請者名(代表研究者)

氏 名 井改 知幸	ローマ字表記 Tomoyuki Ikai
所属大学・機関名 名古屋大学	英訳表記 Nagoya University
学部・部課名 大学院工学研究科 有機・高分子化学専攻	英訳表記 Department of Molecular and Macromolecular Chemistry Graduate School of Engineering
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) 吉田 真也 (英訳表記) Masaya Yoshida	名古屋大学・大学院工学研究科・助教 (英訳表記) Nagoya University, Department of Molecular and Macromolecular Chemistry, Graduate School of Engineering, Assistant Professor
(氏　名) 上野 陸 (英訳表記) Riku Ueno	名古屋大学・大学院工学研究科・博士課程前期課程学生 (英訳表記) Nagoya University, Department of Molecular and Macromolecular Chemistry, Graduate School of Engineering, Master's Student
(氏　名) 林 幹大 (英訳表記) Mikihiro Hayashi	東京科学大学・物質理工学院・応用化学系・准教授 (英訳表記) Institute of Science Tokyo, School of Materials and Chemical Technology, Department of Chemical Science and Engineering, Associate Professor

4.英文抄録（300 語以内）

Molecularly defined ladder polymers provide a unique platform for investigating how filler architecture influences the mechanical properties of rubber materials. In this study, helical ladder polymers were investigated as reactive fillers and multifunctional crosslinkers for acrylate elastomers. Linear precursor polymers bearing pendant acrylate groups were synthesized and subsequently converted into helical ladder polymers through trifluoroacetic acid-induced intramolecular cyclization. Both homopolymer and copolymer systems were examined, and structural changes associated with ladderization were characterized by ^{1}H NMR and FT-IR spectroscopy. Acrylate elastomers were prepared by UV-induced radical polymerization of benzyl acrylate in the presence of the polymeric crosslinkers and a photoinitiator at room temperature. Tensile tests suggested that the stress–strain behavior of the resulting elastomers was influenced by the structure and content of the polymeric crosslinkers as well as by the tensile conditions. Dynamic viscoelastic measurements also indicated that ladderization may affect the temperature-dependent relaxation behavior of the elastomer networks.

These results suggest that ladder polymers can be incorporated into acrylate elastomer networks as crosslinking components and that their molecular architecture may influence the resulting mechanical and viscoelastic properties. This study provides a basis for further investigating the relationship between ladder-polymer structure and elastomer properties toward the development of molecularly designed polymeric fillers.

5.研究目的

ゴム材料の高性能化は、省エネルギー化や長寿命化、安全性の向上に直結する重要な課題である。従来、ゴムの補強にはカーボンブラックやシリカなどのフィラーが広く用いられてきたが、その補強機構には未解明な点も多く、材料開発は依然として経験的な試行錯誤に依存する部分が大きい。

本研究では、構造が明確で、剛直かつ多様な三次元骨格を分子レベルで設計できるラダーポリマーに着目し、これを新たな分子性フィラーとして活用することで、ゴム物性を分子構造に基づいて合理的に制御するための設計指針を確立することを目的とする。具体的には、申請者が確立してきた無欠陥ラダー化の方法論を基盤として、骨格構造や三次元形状の異なるラダーポリマーを合成し、これらを導入したゴム材料を創製する。さらに、ラダーポリマーの分子構造、ゴム中での分散状態、力学特性、耐熱性および動的粘弾性の関係を系統的に解析し、フィラーによる補強効果を分子レベルで明らかにする。

特に、ラダー化に伴う主鎖の剛直化と三次元形状の固定が、ゴム分子鎖の運動性やフィラー―マトリックス間の相互作用、さらには応力伝達やエネルギー散逸に及ぼす影響に着目する。分子構造を精密に制御したフィラーを用いることで、従来のカーボンブラックやシリカなどのバルクフィラーでは検証が困難であった「フィラー構造とゴム物性との関係」を分子レベルで明確化する。

これらの研究を通じて、ラダーポリマーのフィラーとしての有用性を実証するとともに、分子構造の設計によって強度、柔軟性、耐熱性、動的粘弾性およびエネルギー散逸特性を制御できる「ラダー型フィラー充填ゴム」という新たな材料設計概念の確立を目指す。さらに、用途に応じたゴム物性の合理的な最適化を可能とする基盤を構築し、経験に依存した材料探索の効率化と、資源・エネルギー消費の低減に資する高性能ゴム材料の創出、さらには将来的な産業応用へとつなげる。

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

本研究では、ラダーポリマーを架橋成分として導入したアクリレートエラストマーを作製し、線状前駆体を用いた場合とは異なる力学特性および動的粘弾性を示すことを明らかにした。今後は、その要因を明らかにするため、ラダー骨格の構造や分子量、側鎖構造、架橋に関与する官能基の導入率を系統的に変化させ、分子構造と材料物性との相関を検討する。特に、ラダー化そのものの効果と架橋密度の影響を個別に評価するため、反応性官能基量や重合条件を揃えた比較実験を進める。

また、膨潤試験等による網目構造の評価や、材料内部におけるラダーポリマーの分散状態の解析を、引張試験および動的粘弾性測定と組み合わせることで、ラダー主鎖の剛直性や三次元的な分子形状が、材料中の応力伝達や分子鎖の緩和挙動にどのような影響を及ぼすかを明らかにする。

さらに、繰返し変形に対する耐久性、エネルギー散逸特性、熱安定性などについても評価し、強度と柔軟性を両立する最適な組成・構造の探索を進める。加えて、他のエラストマーマトリックスへの適用や従来型フィラーとの比較を行い、ラダーポリマーを用いることの特徴と有効性を明確にする。これらの検討を通じて、ラダーポリマーの分子構造に基づいてエラストマーの物性を合理的に制御するための設計指針を構築し、将来的な実用材料への展開につなげる。

8.本助成金による主な発表論文、著書名

学会発表

(1) 剛直ラダーポリマーをフィラーとして用いた新規エラストマーの設計と合成
上野陸・吉田真也・井改知幸
IRCCS 成果報告会・産学ワークショップ（名古屋）、2026 年 1 月 30 日

(2) ラダーポリマーフィラーを用いた新規アクリレートエラストマーの開発
上野陸・吉田真也・林幹大・井改知幸
第 36 回基礎有機化学討論会（金沢）、2026 年 9 月 10～12 日

［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。

このたびは、本研究に対して多大なるご支援を賜り、心より御礼申し上げます。貴財団からの研究助成により、研究を着実に進めることができました。また、江野科学振興財団賞を賜りましたこと、重ねて厚く御礼申し上げます。今回の受賞を大きな励みとし、今後も研究の発展と成果の社会還元に努めてまいります。

アンケートへのご協力ありがとうございました。

以 上