# 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
中西　洋平　　印

記

1.研究課題名

| |
|---|
| 和 文<br>先端量子ビーム分析に基づくフィラー充填ゴムの階層構造と力学特性との相関解明 |
| 英 文<br>Understanding the correlation between the hierarchical structure and mechanical properties of filler-filled rubber based on advanced quantum beam analysis |

2.申請者名(代表研究者)

| | |
|---|---|
| 氏 名<br>中西　洋平 | ローマ字表記<br>Yohei Nakanishi |
| 所属大学・機関名<br>京都大学 | 英訳表記<br>Kyoto University |
| 学部・部課名<br>化学研究所 | 英訳表記<br>Institute for Chemical Research |
| 役職名<br>助教 | 英訳表記<br>Assistant 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)<br>竹中　幹人<br>(英訳表記)<br>Mikihito Takenaka | 京都大学化学研究所　教授<br>(英訳表記)<br>Professor,<br>Institute for Chemical Research, Kyoto University |
| (氏　名)<br>澤田　諭<br>(英訳表記)<br>Satoshi Sawada | 化学物質評価研究機構　主任研究員<br>(英訳表記)<br>Senior Researcher,<br>Chemicals Evaluation and Research Institute, Japan |
| (氏　名)<br>近藤　寛朗<br>(英訳表記)<br>Hiroaki Kondo | 化学物質評価研究機構　高分子技術部　部長<br>(英訳表記)<br>Director, Polymer Technology Department,<br>Chemicals Evaluation and Research Institute, Japan |
| (氏　名)<br><br>(英訳表記) | <br>(英訳表記) |

4.英文抄録（300 語以内）

This study investigated the relationship between hierarchical structure and mechanical properties in silica-filled styrene–butadiene rubber (SBR), focusing on the effects of silane coupling agents. Contrast-variation small-angle neutron scattering (CV-SANS) was applied to SBR containing silica modified with either an aminosilane, en-APTAS, or a methacrylate-functionalized silane, TMSPMA. Analysis of the partial scattering functions enabled the evaluation of silica dispersion, interfacial layers, and polymer network structure. In the en-APTAS system, silica particles were predominantly isolated, and no distinct polymer adsorption layer was detected. In contrast, the TMSPMA system exhibited silica aggregation and a mixed interfacial layer comprising polymer and silane, with an estimated thickness of approximately 1.1 nm. The TMSPMA system showed a lower initial elastic modulus but higher fracture stress. These results indicate that filler dispersion, interfacial structure, and polymer network structure must be considered together to understand the mechanical response.

As a related study of polymer interfaces, scanning transmission X-ray microscopy (STXM) was used to investigate polyethylene/polyamide 6 multilayer films containing a maleic anhydride-modified polyethylene interlayer. The mixed interfacial layer became thicker with increasing maleic anhydride content, and its thickness correlated with peel strength. Oxygen K-edge spectral analysis further visualized the localization of imide-related reaction products within the interface. Together, these studies demonstrate the value of quantum beam analysis for relating internal and interfacial structures to the mechanical performance of polymer materials.

5.研究目的

フィラー充填ゴムの力学特性は、フィラーの分散・凝集状態に加え、粒子表面に形成される高分子吸着層やゴムの網目構造に影響される。シランカップリング剤はこれらの構造を制御するために広く用いられているが、その種類や反応性による力学特性の変化を、内部構造と対応付けて理解することは十分には進んでいない。本研究では、シリカ充填スチレンーブタジエンゴム（SBR）をモデル系とし、放射光 X 線および中性子を用いた先端量子ビーム分析法により、シランカップリング剤による表面処理がフィラーの分散状態、界面層およびゴム網目構造に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。特に、コントラスト変調小角中性子散乱法（CV-SANS）による構造解析と引張試験とを組み合わせ、これらの構造的特徴と力学特性との関係を検討し、フィラー充填ゴムの合理的な材料設計に資する知見の獲得を目指した。また、高分子材料の界面構造と力学特性との関係を調べる関連研究として、走査型透過 X 線顕微鏡（STXM）を用いた異種高分子接着界面の解析に取り組んだ。ポリエチレン／ポリアミド 6 多層膜を対象に、界面における成分分布と化学状態を可視化し、混合界面層の形成および界面での化学反応と接着強度との関係を明らかにすることを目指した。

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

今後は、シランカップリング剤の種類・添加量および混練・架橋条件を変化させ、フィラーの分散・凝集状態、界面層およびゴム網目構造が力学特性に及ぼす影響を系統的に検討する。特に、より小粒径のシリカを高濃度に配合した実用材料に近い系へ解析を展開し、今回のモデル系で得られた知見の適用範囲を明らかにする。また、時分割異常小角 X 線散乱法を用いた加硫過程の構造解析を進め、最終的な階層構造とその形成過程を関連付ける。さらに、STXM による界面の組成・化学状態の可視化をフィラー充填ゴムの系へ展開する可能性を検討し、散乱法による構造情報と組み合わせることで、フィラー充填系における補強機構の理解と材料設計指針の具体化を目指す。

8.本助成金による主な発表論文、著書名

[1] Nakanishi, Y.; Sawada, S.; Shibata, M.; Miyazaki, T.; Kondo, H.; Motokawa, R.; Kumada, T.; Ueda, Y.; Mita, K.; Yamamoto, K.; Takenaka, M.
"Analyses of hierarchical structures in SBR rubber by using contrast-variation SANS: 2. Difference between various silane coupling agents."
*Polymer* **2026**, *354*, 129969. DOI: 10.1016/j.polymer.2026.129969

[2] Nakanishi, Y.; Mita, K.; Sando, M.; Shibayama, M.; Takenaka, M.
"Structural Analysis of the Adhesive Interface between Polyethylene and Polyamide 6 Using Scanning Transmission X-ray Microscopy."
*Langmuir* **2026**, *42*, 24719–24728. DOI: 10.1021/acs.langmuir.6c01895

［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ページ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。

| |
|---|
| このたびの研究助成により、量子ビームを用いた高分子材料の構造解析を進め、成果を学術論文として公表することができました。基礎的な構造解析から材料の力学特性の理解につなげる研究をご支援いただきましたことに、厚く御礼申し上げます。 |

アンケートへのご協力ありがとうございました。

以 上