

	サラ シルタン アワド シルタン
氏 名	SARAH SULTAN AWAD SULTAN
学位(専攻分野)	博士 (工学)
学 位 記 番 号	博 1 1 9 9 号
学 位 授 与 の 日 付	令和 7 年 3 月 21 日
学 位 授 与 の 要 件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専 攻	工芸科学研究科 バイオベースマテリアル学専攻
学 位 論 文 題 目	Structural and Functional Studies of Alginate Films and Nanofibers アルギン酸フィルムおよびナノファイバーの構造的および機能的研究
審 査 委 員	(主査)教授 山田 和志 教授 奥林 里子 准教授 XU HUAIZHONG

論文内容の要旨

本論文は、持続可能な社会の実現に向けて注目される海藻由来のバイオポリマーであるアルギン酸を基盤とし、その構造制御と高機能化を目指した基礎的研究である。アルギン酸は生分解性に優れ、既に食品・医薬分野等で幅広く利用されている。しかし、分子間水素結合や強いゲル化能の存在により、ナノファイバー化などの高次構造体の精密成形や物性制御には未解決の技術的課題が存在する。本論文では、アルギン酸とカチオン性界面活性剤とのイオンコンプレックス形成による構造制御手法を提案し、機能性フィルムおよびナノファイバーへの応用可能性について詳細に検討したものである。本論文は 4 章から構成されており、以下に各章の概要を示す。

第 1 章では、本論文の背景として、地球規模で高まる環境意識とプラスチック資源循環の要請、バイオベース材料の現状と課題、ならびにアルギン酸の特徴や機能性材料への展開について概説し、本研究の目的および構成について述べている。第 2 章では、アルギン酸と 2 種類のカチオン性界面活性剤（ヘキサデシルピリジニウム塩化物およびヘキサデシルトリメチルアンモニウム臭化物）からなるイオンコンプレックスを合成し、透明フィルム化した上で、SEM、TGA、DSC、SAXS、引張試験等により詳細に構造と物性を評価している。本章では、カチオン基の違いによるイオン対形成やバルク構造、熱的・機械的特性、抗菌機能の差異を明らかにし、イオンコンプレックス設計による高機能性アルギン酸フィルムの創製指針を示している。第 3 章では、イオンコンプレックス形成によるアルギン酸分子間の水素結合制御とゲル化抑制の原理を活用し、電界紡糸法による高純度アルギン酸ナノファイバーの作製に世界で初めて成功した。溶液のレオロジー特性、AFM 觀察、SEM、FT-IR、SAXS、引張試験等を通じて、ファイバー構造および機械特性の詳細な解析を行い、分子設計に基づくナノファイバー機能化のメカニズムを解明している。特に、ピリジニウム基を有するイオンコンプレックスは高い延伸性を示し、トリメチルアンモニウム基では相対的に高強度のマットが得られるなど、分子構造と物性・機能発現の相関性を実証している。第 4 章では、本論文で得られた知見を総括し、アルギン酸イオンコンプレックスの構造制御技術がもたらすバイオベース機能性材料開発への学術的・産業的意義、ならびに今後の展望についてまとめている。

論文審査の結果の要旨

近年、地球環境保全や持続可能な産業発展への関心の高まりを背景に、石油化学由来プラスチックの代替となるバイオベース材料の開発が世界的に急務となっている。中でも、海藻由來の多糖類であるアルギン酸は、環境にやさしく、生分解性などを有することから、フィルムやファイバーなど多様な先端機能材料への応用が期待されている。しかし、アルギン酸の分子間水素結合やゲル化特性が、ナノファイバー化や物性制御の観点から課題となっており、その高機能化や加工技術の確立が求められている。本論文は、アルギン酸とカチオン性界面活性剤のイオンコンプレックス形成を基盤とし、バルク構造・物性・機能性を自在に制御した新規フィルムおよびナノファイバーの創製と、そのメカニズム解明に関する研究成果をまとめたものである。まず、アルギン酸と 2 種類のカチオン性界面活性剤（ヘキサデシルピリジニウム塩化物およびヘキサデシルトリメチルアンモニウム臭化物）からなるイオンコンプレックスを調製し、得られた透明フィルムについて、SEM、TGA、DSC、FT-IR、SAXS、WAXD、引張試験により詳細な構造解析と物性評価を行った。その結果、同一アルギン酸および同一アルキル鎖を有しながら、極性カチオン基の違いによって、イオン対形成、粒子構造、熱特性、機械特性、抗菌機能などに顕著な差異が生じることを明らかにし、カチオン基の選択により機能性フィルムの特性制御が可能であることを示した。さらに、イオンコンプレックス形成によるアルギン酸の分子間水素結合制御およびゲル化抑制を活用し、電界紡糸法による高純度アルギン酸ナノファイバーの作製に世界で初めて成功した。溶液のレオロジー特性や電界紡糸条件の最適化により、従来困難であったナノファイバー化を実現し、得られたファイバーの構造や機械特性が、イオンコンプレックスの構造制御に強く依存することを明らかにした。特に、ピリジニウム基を有するイオンコンプレックスは優れた延伸性を示し、一方でトリメチルアンモニウム基を有するものは相対的に高い強度のマットを形成するなど、分子構造に基づく機能発現を実証している。

以上、申請者はアルギン酸イオンコンプレックスの構造設計と機能制御に関する基礎的かつ独創的な研究を展開し、関連分野の発展と環境調和型高分子材料の新規開発に大きく貢献した。本論文の成果は、査読付国際学術雑誌に申請者を筆頭著者とする論文 1 報、共著連名著者として 1 報ずつ掲載された基礎論文 2 報から構成されており、研究者倫理上の問題も一切認められない。なお、2025 年 3 月までは青木隆史准教授が主任指導を行い、同年 4 月からは山田和志教授に主任指導が引き継がれたため、基礎論文 2 報の著者には主査は含まれていない。

(学術論文)

1. "Comparison of the Structural and Physical Properties of Two Alginate Ion Complexes with Different Cationic Surfactants", Diaa Hamed Abdelshafy Abdelsalam, Sarah Sultan Awad Sultan, and Takashi Aoki, Journal of Fiber Science and Technology, Vol.81, No.5, pp.64-75 (2025). (DOI: 10.2115/fiberst.2025-0009)
2. "Nanofiber Fabrication of Alginate Ion Complexes with Different Cationic Surfactants", Sarah Sultan Awad Sultan, Diaa Hamed Abdelshafy Abdelsalam, Yoshito Asai, Huaizhong Xu, and Takashi Aoki, Journal of Fiber Science and Technology, Vol.81, No.7, pp.100-109 (2025). (DOI: 10.2115/fiberst.2025-0010)

以上の結果より、本論文の内容には新規性と独創性、学術的な意義があると審査員全員が認めた。