

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	原子間力顕微鏡を用いたエラストマーの微視的な接触や摩擦に対する粘弾性影響の研究
Title(English)	
著者(和文)	小野塚 頌人
Author(English)	Nobuhito Onozuka
出典(和文)	学位:博士(理学), 学位授与機関:東京科学大学, 報告番号:甲第226号, 授与年月日:2025年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:中嶋 健,芹澤 武,戸木田 雅利,石毛 亮平,梁 晓斌,桃園 聡
Citation(English)	Degree:Doctor (Science), Conferring organization: Institute of Science Tokyo, Report number:甲第226号, Conferred date:2025/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

(博士課程)

Doctoral Program

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	応用化学 応用化学	系 コース	申請学位(専攻分野)： 博士 Academic Degree Requested Doctor of	(理学)
学生氏名： Student's Name	小野塚 頌人		審査員主査： Chief Examiner	中嶋 健

要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

本論文は、「原子間力顕微鏡を用いたエラストマーの微視的な接触や摩擦に対する粘弾性影響の研究」と題し、全5章から構成されている。

第1章「序論」では、エラストマーの微視的な接触や摩擦を扱うことの本質的な難しさを紹介し、その理解に向けての従来研究の現状を説明した上で、本研究の着眼点と目的および目指す姿を記載している。接触に対する粘弾性と凝着の交絡、あるいは微視的な摩擦に対する寄与因子の不透明性といった課題に対し、本研究が取ったアプローチを明確化している。

第2章「装置と理論」では、本研究を進めるにあたって必要な技術と理論に触れている。技術の観点では、本研究で使用した原子間力顕微鏡について詳細に説明している。理論の観点では、粘弾性体の振る舞いを表すための線形粘弾性に基づく粘弾性モデル、および接触や摩擦を理論的に解析するための各種接触力学モデルについて記している。さらに、摩擦を扱う学問としてのトライボロジーについて触れ、本研究のトライボロジーにおける位置付けを述べている。

第3章「粘弾性を考慮したエラストマーのフォースカーブ解析」では、凝着を伴う接触に対して粘弾性が与える影響を明確化することを目指した研究を行っている。接触解析の手法として、原子間力顕微鏡スケールの接触を扱う上で有用なフォースカーブ解析に着目し、接触力学モデルを活用したエラストマーのフォースカーブ解析を行った結果を示している。従来の研究では、粘弾性を示すエラストマーであっても弾性接触モデルを用いて解析することが一般的だったのに対し、本研究では粘弾性を正しく考慮したモデル(Barthel モデル)に着目し、Barthel モデルに基づいた厳密なフォースカーブ解析を、最適化手法を駆使して初めて実現したことを説明している。その上で、エラストマーとしてポリジメチルシロキサン(PDMS)を準備し、その粘弾性が接触に与える影響をフォースカーブの速度依存性調査から議論している。その中で、接触領域内部および接触線近傍の粘弾性的な振る舞いが、いずれも接触状態に影響を与えていると結論づけており、その程度を定量的に表している。さらに、粘弾性の振る舞いを表すモデルとして、標準線形固体粘弾性(SLS)モデルおよび非整数階微分粘弾性モデルの比較を行い、非整数階微分粘弾性モデルを用いることで、より現実のエラストマーに即した解析が可能となることを示唆している。

第4章「LFMを用いたエラストマーの微視的な摩擦特性評価」では、エラストマーの微視的な摩擦に対する寄与因子の分離を目指し、原子間力顕微鏡スケールの摩擦を測定する手法であるLFMを用いて、PDMSの摩擦解析を行っている。微視的な摩擦が接触面積に比例するというBowden-Tabor則について、この法則が硬質材料に関するものであるにもかかわらずエラストマーでも前提とされることが多いことを問題視し、これに対して接触面積推定精度の向上に基づく妥当性検証を進めている。接触面積推定に際しては、これまで十分な考慮がなされてこなかった粗さ・接線力・粘弾性の影響を定量することを試みている。粗さに対しては、粗さが接触面積に与える影響を見積もる新しい接触モデル(rough-JKR モデル)を構築し、それを活用した粗さ影響の推定を実現している。接線力に対しては、既存の接触モデルを活用した考察を行っている。粘弾性に対しては、第3章で実現したBarthel 解析に基づく議論がなされている。これらをもとにLFM中の接触面積推定の理論的な確度を高めたことで、LFMで得られる摩擦には、接触面積比例成分だけでなく、接触状態の非対称性やエネルギー損失に由来する別の摩擦成分が存在すると結論づけている。

第5章「総括」では、本論文の内容について総括し、今後の展望を記載している。接触に対する粘弾性影響の観点では、今回扱っているPDMSは比較的弾性体に近い振る舞いを示すことから、より一般的なエラストマーにおいては、粘弾性の考慮がより重要になることを述べている。エラストマーの摩擦の観点では、従来一般的だったBowden-Tabor 則を前提とした議論が妥当ではないことが示唆されたことをうけ、微視的な摩擦に影響する別の摩擦成分の要因調査が、摩擦の本質的な理解に向けて極めて重要であることを記している。

これを要するに、本論文はエラストマーの微視的な接触や摩擦を詳細に扱うための解析手法の構築、並びにそれに基づく厳密な議論に根差した摩擦メカニズムの深耕に関して述べられたものである。その成果は、トライボロジーの学理的な側面に対する貢献が大きいのみならず、接触や摩擦のスケール依存性の根源的な解明や、エラストマーの表面物性のさらなる理解にもつながることが期待できる。よって本論文は博士(理学)の学位論文として十分な価値があるものと認められる。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東京科学大学リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Science Tokyo Research Repository Website (T2R2).

(博士課程)
Doctoral Program

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	応用化学 応用化学	系 コース	申請学位 (専攻分野)： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	(理学)
学生氏名： Student's Name	小野塚 頌人		審査員主査： Chief Examiner	中嶋 健	

要旨 (英文 300 語程度)

Thesis Summary (approx.300 English Words)

This dissertation, titled “Study on the Viscoelastic Effects on Microscopic Contact and Friction of Elastomers Using Atomic Force Microscopy,” is structured into five chapters.

Chapter 1 introduces the challenges in analyzing microscopic contact and friction in elastomers. It highlights the intertwined effects of viscoelasticity and adhesion on contact, as well as the unclear factors contributing to friction, setting the stage for the research objectives and approach.

Chapter 2 describes the technical and theoretical foundation for the study. Technologically, it explains the Atomic Force Microscopy (AFM) system used. Theoretically, it explores linear viscoelastic models and contact mechanics models. The role of tribology in analyzing friction is also discussed.

Chapter 3 focuses on analyzing AFM force curves to understand the viscoelastic effects on adhesive contact. While conventional studies often used elastic contact models, this research adopts a more accurate viscoelastic model (Barthel model). Through optimization techniques, force curve analysis for polydimethylsiloxane (PDMS) elastomers reveals how viscoelastic behavior in the contact area and near the contact line affects contact conditions. Additionally, a comparative evaluation of viscoelastic models shows that fractional viscoelastic models offer more realistic insights than standard linear solid (SLS) models.

Chapter 4 investigates the microscopic friction of elastomers using lateral force microscopy (LFM). The research challenges the applicability of the Bowden-Tabor law for elastomers. The study quantifies the effects of roughness, tangential forces, and viscoelasticity on contact area, using a newly developed contact model and conventional contact models. It concludes that LFM friction contains not only area-proportional components but also other components arising from contact asymmetry and energy dissipation.

Chapter 5 summarizes the findings and discusses future directions. It emphasizes the importance of viscoelastic considerations for more general elastomers and the need to explore alternative friction mechanisms for a deeper understanding of microscopic friction.

These contributions provide valuable insights into both tribology and the fundamental behavior of elastomer surfaces.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東京科学大学リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Science Tokyo Research Repository Website (T2R2).