

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02771

研究課題名（和文）ナノレオロジー原子間力顕微鏡を用いたナノスケール温度時間換算則の検証

研究課題名（英文）Time-temperature Superposition Principle at Nano-scale Verified by Nanorheological Atomic Force Microscopy

研究代表者

中嶋 健（Nakajima, Ken）

東京工業大学・物質理工学院・教授

研究者番号：90301770

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では研究代表者が開発してきたナノレオロジー-AFMを用いて、高分子物理学における基礎法則である温度時間換算則がナノスケールで成立するのかを調べることを目的に研究を行った。そのために必要な装置開発も行った。制御系を見直すことで、測定時間短縮および測定精度向上を達成し、最大6桁に及ぶ広帯域測定が可能な温度可変ナノレオロジー-AFM第三世代を開発できた。また、伸長下にあるゴム材料、動的不均一性を有する試料、フィラー充てんゴムなどを対象に研究を行い、論文発表へ展開することができた。さらに解析に利用する接触力学理論を一から見直すことで定量性を向上させ、バルクDMAと完全一致する結果を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

粘弾性はほぼすべての高分子材料がもつ特性であり、その性質を上手に使うことでさまざまな応用が展開される。一方、高分子材料は例えばタイヤの材料などを考えても、アロイやブレンドといった形で作成され、根本的に内部に不均一性を内在する。バルクの粘弾性測定はその全体からの応答のみが得られるため、構成要素の働きは想像するしかない。一方、ナノレオロジー-AFMはナノメートルスケールで粘弾性測定を行うことができるため、それらの働きを必要な分解能で調べることができる。今回の課題で開発した、定量性がさらに向上したナノレオロジー-AFMは、したがって幅広い材料科学の分野で有用な測定手段となる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study was to investigate whether the time-temperature superposition principle, a fundamental law in polymer physics, holds true at the nanoscale using the nanorheological AFM that has been developed by myself. The necessary apparatus for this purpose has been also developed. For example, by renewing the control system, it becomes possible to shorten the measurement time and to improve the measurement accuracy, which resulted in the development of the third-generation temperature-tunable nanorheological AFM that can measure a wide bandwidth of up to six orders of magnitude. In addition, researches were conducted on rubber materials under elongation, samples with dynamic heterogeneity, and filler-reinforced rubbers, and these results were published. Furthermore, by reviewing the contact mechanics theory used in the analysis, the improvement of the measurement quantitiveness was achieved so that the obtained results were in perfect agreement with bulk DMA.

研究分野：高分子物理学

キーワード：ナノレオロジー原子間力顕微鏡 温度時間換算則 動的不均一性 粘弾性測定 フィラー充てんゴム

1. 研究開始当初の背景

研究代表者はポリマーナノアロイやポリマーナノコンポジットといった高分子ナノ材料に焦点を置いて研究を行っている。これらは基本的に **nm** スケールで不均一であるから、評価手段も **nm** の分解能をもち、かつ不均一構造を可視化できるものでなければならない。さらに構造の可視化のみでは複雑な相構造をもつこれらの材料が発現する巨視的力学物性を予言することは難しく、**nm** スケールの構造の各部分に特化した物性測定がなされなければならないと考えている。そこでこれまでの研究ではヤング率や凝着エネルギーなどの静的力学物性をマッピングできる技術として、原子間力顕微鏡 (**AFM**) をベースにナノ触診技法とも呼ぶべき手法を開発してきた¹⁾。**AFM** の微小な探針が試料の表面に直接接触することで表面形状・特性を評価するというまさにその点に着目し、定量的な力学計測を可能としたものである。この方法では試料の凹凸情報に加え、弾性率・凝着エネルギーなどの定量評価ができる。この際、**AFM** 探針を試料に垂直に動かし、試料に探針を押し込み、そして引き離すというフォースディスタンスカーブ (**FC**) 解析が基本となる。さらに試料の局所的な物性を取得するために多点で **FC** 測定を行うフォースボリューム (**FV**) 測定というモードを利用し、弾性率などの二次元像を得ることができる。その際、試料変形量と負荷の間に最も簡単な力学モデルである **Hertz** モデル (弾性変形凝着なし) **DMT** モデル、**JKR** モデル (弾性変形凝着あり) などを採用し解析を行ってきた。

静的ナノ力学物性マッピング手法の応用範囲は広く、これまでさまざまな系に應用を重ねてきた。しかしながら、より一般的に高分子材料の真の姿を明らかにするためには、従来の静的弾性率測定を乗り越え、ナノスケール粘弾性測定技術を確立することが重要になってくる。研究代表者はこれまでもその最終目的に向かって研究を続けてきており、平成 **26-28** 年度に採択して頂いた基盤研究 (**B**) 「ナノ触診原子間力顕微鏡のナノスケール粘弾性計測への発展的拡張 (課題番号 **26288097**)」では、ナノレオロジー **AFM** とも呼ぶべき装置の第一世代を開発し、最大 6 桁に及び周波数帯域での動的弾性率 (貯蔵弾性率・損失弾性率・損失正接) 測定を実現した²⁾。具体的には **FC** 測定において、押し込み・引離し両過程の間で試料上にカンチレバーが押込まれたままの状態を確保し、その時間内に粘弾性計測さらにはその空間マッピングができるよう装置開発を行った。それによってゴムのガラス転移温度を含む領域で測定を行い、高分子鎖のセグメントダイナミクスナノスケールでの解明に糸口をつけた。また内閣府 **ImPACT** 伊藤プログラムの支援を受け、平成 **30** 年度までに第二世代を開発し、温度可変性も備えた装置の開発に成功している³⁾。本課題ではこれらの装置をさらに改良し、マクロな粘弾性計測装置でも実現が困難な広帯域のナノスケール粘弾性計測手法の確立を目論んだ。また、それによって研究課題の核心をなす学術的「問い」として、真の「分散地図」を作成することを狙いとした。文献 **3** で明らかにしたように、例えばそれが単一の高分子からなるシンプルな系でも場所によってガラス転移温度が異なる可能性がある。また本手法なら経験則でありながら高分子物理学の根底を支える温度時間換算則にミスを入れられる可能性がある。実際、予備的な検討では例えば換算周波数と同じでも、単に周波数を高めただけの場合と温度を実際に低温にもっていった場合に、ナノスケールでは全く異なる挙動が見られていた。

2. 研究の目的

ナノ触診 **AFM** そしてナノレオロジー **AFM** の利点は、その高い定量性にある。おおよそ **10 kPa** から **5 GPa** 程度の弾性率 (静的・動的) の定量測定が可能である。実際、単純な系であればナノ触診 **AFM** の与える静的弾性率は巨視的な引張り試験で得られるヤング率にほぼ一致する結果が得られるし、ナノレオロジー **AFM** も巨視的なマスターカーブを広い周波数帯で「ほぼ」再現できる。類似の手法が苦手とする **1 MPa** 程度以下の軟らかい材料からの応答を正確に算出できるのは、より正確に接触面積を定量できているからである。市販の装置でも動的弾性率を画像化できるとうたっているものがあるが、それらには重大なミスがある。そのため軟らかい材料への応用が利かない。実際、我々のナノレオロジー **AFM** 第一世代については、業界最大手の **Bruker** 社が目をつけ、現在市販装置のオプションとして、**2019** 年から上市されている。このような技術的バックグラウンドを武器に、本研究では 2 つの目的を設定した。すなわちナノレオロジー **AFM** 第三世代の開発と温度時間換算則のナノスケールでの検証を通じて高分子にとって最も重要な概念である「粘弾性」の本質に迫ることを目的とした。

3. 研究の方法

ナノレオロジー **AFM** 第三世代の開発において最も重要であったのが、カンチレバーを加振する制御系の更新と定量性の向上であった。前者については、自作プログラム全体を見直し、また加振源を新規購入し、制御方法を旧式の **GPIB** から **USB** に変更することで対応した。これによって安定な加振 (それによってカンチレバーの摩耗を抑えることができた) を実現し、加振周波数領域を拡大し、かつ計測時間を大幅に短縮することに成功した。

後者については、接触理論を改めて見直す必要があった。上述のように、(そして研究成果の節で説明するように) 第二世代までのナノレオロジー **AFM** にも十分な定量性があった。しかし、

バルク物性と若干ずれがあり、それは接触面積の定量に関係していることが予想された。例えば、凝着が大きな軟らかい試料で、静的な測定では **JKR** 接触理論が妥当な試料でも、振動的な接触の場合には状況が異なるのである。**JKR** 理論を拡張した **Greenwood** 理論では試料の、特にその探針との接触界面での粘弾性挙動が考慮されており、接触界面 - それは破壊力学的なクラックの開閉になぞらえられる - において、ある一定以上の周波数では接触界面積が変化しないと見なせるとされている⁴⁾。すなわち例えば球状のプロブを用いても見かけ上パンチプロブのような応答をするというのである。本研究では、この理論を検証することから始め、そしてナノレオロジー-AFM の定量性を向上させる新たな手法に繋がった。その成果については次の節で説明する。

4. 研究成果

研究期間中を通じて、特にその初期はナノレオロジー-AFM 第三世代の開発と並行して、第二世代を活用した応用研究を行った。そこで得られた結果を中心に研究成果について述べる。第三世代における定量性の向上については最後に述べる。

文献 5 では伸長下にあるゴム試料でのナノレオロジー-AFM によるマイクロな動的粘弾性測定と **DMA** によるマクロな動的粘弾性測定を行うことに成功した結果を報告している。架橋イソプレングム (**IR**) を伸長 **AFM** と伸長 **DMA** で測定した結果はほぼ一致し、マイクロ・マクロそれぞれの測定結果からゴムの伸長挙動についての新たな知見を得ることができた。伸長 **DMA** では伸長に伴い貯蔵弾性率 (E') がゴム状平坦領域で増大し、損失弾性率 (E'') では低伸長では大きな差異はないものの高伸長において周波数分散の傾きが小さかった。これは分子鎖が伸長によって伸長方向と垂直方向に圧縮されて集合することによって摩擦が増加したためと考えられる。伸長 **AFM** でも高伸長率で変化が大きい点が共通して観測されたが、さらには「空間不均一性」によって生じた高弾性率相で「内部不均一性」が増大していた (図 1 参照)。AFM 測定において伸長率の見積もりが完全でなかったために、2つの測定法の完全な相関が取れたとは言い難い。しかしそれは今後の課題とし、今回の定性的な比較によって、フィラーなどを充填していない架橋 **IR** のような単純な系でもアフィン性を仮定することの難しさ、そして「空間不均一性」を議論できるナノレオロジー法の利点が十分に示されたと考えている。

しかし、まだまだゴムの伸長メカニズムが解明できたといえる段階ではない。AFM では「空間不均一性」「内部不均一性」のどちらを議論するにしても、どの場所がどのように変化したのかを追いかけることでよりメカニズム解明に肉薄できるはずである。そのために必要な **in situ** での伸長実験は今後の大きな課題である。また今回の測定では室温のみでの測定であり換算周波数の範囲は狭いため、温度制御下での測定も今後の課題である。またマイクロ・マクロによらず伸長下での動的粘弾性測定そのものの先行研究が少なく、理論的取り扱いもほとんどないのが現状である。伸長下にあるゴムのレオロジーの精密かつ多角的な測定データに基づく議論はゴムの物理に新しい展開をもたらすことが期待される。

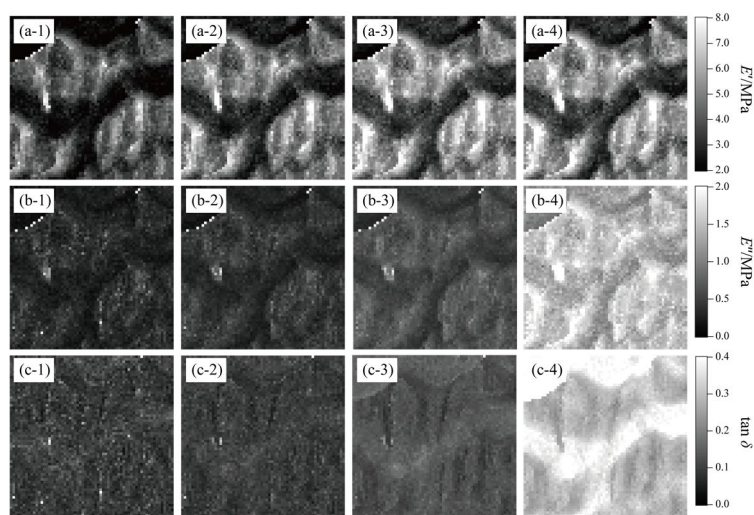


図 1 伸長率 300%で伸長させた加硫 **IR** のナノレオロジー-AFM 像。走査範囲は $1.0 \mu\text{m}$ 。(a-i), (b-i), (c-i) はそれぞれ E' , E'' , $\tan \delta$ 像で、 $i = 1, 2, 3, 4$ はそれぞれ周波数 10 Hz, 100 Hz, 1.0 kHz, 10 kHz に対応する。

文献 6 では動的不均一性についての研究を行った。二種類の高分子の間の相溶性は、科学的な観点だけでなく、工業的な観点からも重要である。その混合状態を理解するためには、モルフォロジーの情報だけでは不十分であり、サブミクロンオーダーの材料特性を明らかにする必要がある。この研究では、ナノレオロジー-AFM を活用して、スチレンブタジエンゴム (**SBR**)/ブタジエンゴム (**BR**) 部分相溶ブレンドの性質を調査した。走査型透過電子顕微鏡および従来の AFM 技術では、ブレンドは非相溶であるように見えた。しかし、ナノレオロジー-AFM を用いてブレ

ンドの E' および E'' をホモポリマーのものと比較したところ、**SBR** リッチ領域および **BR** リッチ領域の両方において、特に高周波数側で純成分の値と一致しないことが判明した。図 2 はその様子を示したもので、**BR** リッチ相と **BR** ホモポリマーを比較している。低周波数領域では両者の粘弾特性はほぼ同じであるが、高周波数側でずれが見えてくる。これは、**BR** リッチ相中の **SBR** がガラス転位を起こすためだと考えられる。このように相溶性というのは周波数によるということがこの研究で分かったことである。

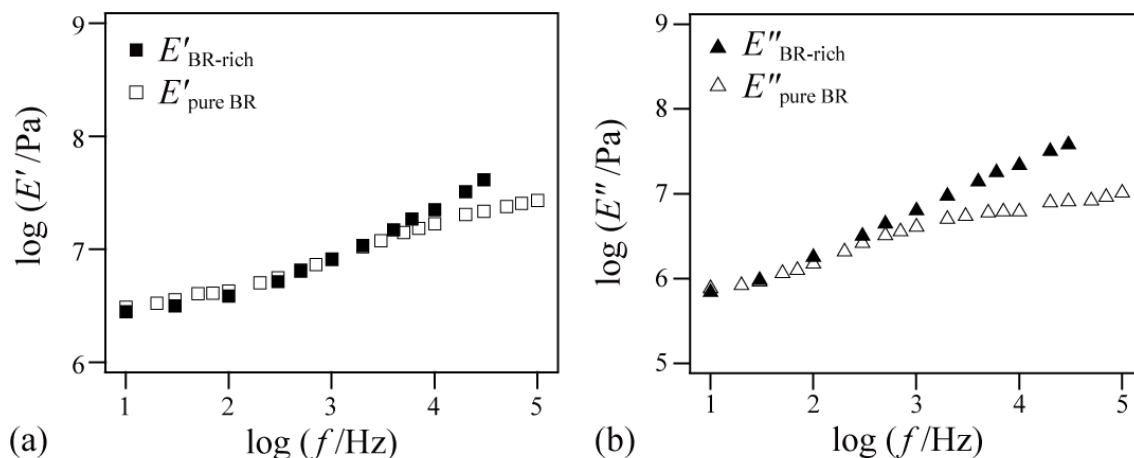


図 2 ナノレオロジー-AFM で求めた **SBR/BR** ブレンドの(a) E' , (b) E'' の周波数応答。

最後に示すのは、第三世代における定量性の向上についてである。従来、ナノレオロジー-AFM の測定において、スチフネスの計算には接触が **JKR** 理論に基づく仮定し以下の式を利用してきた（プリファクターが **Hertz** 理論に基づく場合）。

$$\bar{s} = \frac{3\bar{a}}{2} \cdot \frac{\bar{a}^{3/2} - 1/\sqrt{2}}{\bar{a}^{3/2} - 1/(3\sqrt{2})}$$

しかし、図 3 に示したように **Hertz** 式でも **JKR** 式でもバルクの粘弾性とは明らかなずれがあった。そこで文献 4 から着想を得て、独自に

$$\bar{s} = \frac{3\bar{a}}{2} \cdot \frac{\bar{a}^{3/2} - 1/(C\sqrt{2})}{\bar{a}^{3/2} - 1/(3\sqrt{2})}$$

という式を導入した。 C が 1 のときは **JKR** 式に、 C が 3 のときは **Hertz** 式にそれぞれ漸近するものである。また C 値は測定周波数に依存すると仮定し、各周波数での応答から C 値を定めた。

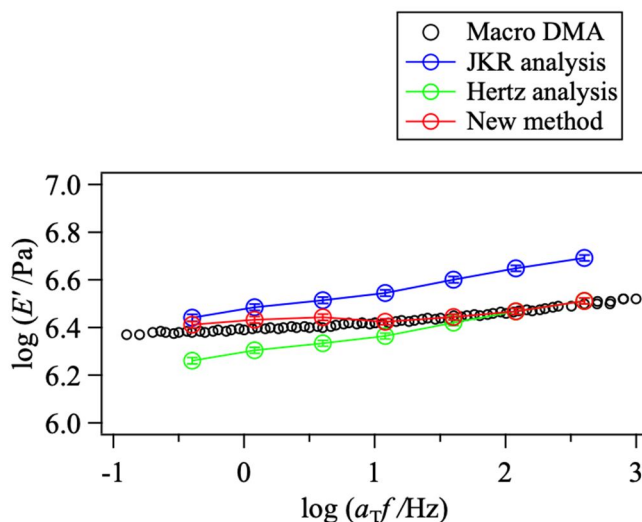


図 3 ナノレオロジー-AFM で求めた **PDMS** の E' の周波数応答。

その結果が図 3 中の赤線でバルク **DMA** の結果と完全に一致する結果となったのである。現在この成果については論文としてまとめているところであるため、これ以上の詳細の記述は差し控えさせていただくが、この内容は 2022 年 5 月に開催された日本ゴム協会 2022 年年次大会研究発表講演会にて若手優秀発表賞受賞に繋がったことを付記しておく。

- 1) Ken Nakajima, Makiko Ito, Dong Wang, Hao Liu, Hung Kim Nguyen, Xiaobin Liang, Akemi Kumagai and So Fujinami, "Nano-palpatation AFM and its quantitative mechanical property mapping," *Microscopy*, **63**, 193-208 (2014).
- 2) Ken Nakajima, Makiko Ito, Hung Kim Nguyen and Xiaobin Liang, "Nanomechanics of the rubber-filler interface," *Rubber Chem. Technol.*, **90**, 272-284 (2017).
- 3) Masaru Arai, Eijun Ueda, Xiaobin Liang, Makiko Ito, Sungmin Kang and Ken Nakajima, "Viscoelastic maps obtained by nanorheological atomic force microscopy with two different driving systems," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **57**, 08NB08 (2018).
- 4) J. A. Greenwood and K. L. Johnson, "Oscillatory loading of a viscoelastic adhesive contact," *J. Colloid Interface Sci.*, **296**, 284-291 (2006).
- 5) Ryusei Nomura, Xiaobin Liang, Hitoshi Iwabuki, Takuma Aoyama, Makiko Ito, Kenji Urayama and Ken Nakajima, "Heterogeneous Viscoelasticity under Uniaxial Elongation of Isoprene Rubber Vulcanizate Investigated by Nanorheological Atomic Force Microscope and Dynamic Mechanical Analysis," *Nihon Reoroji Gakkaishi*, **48**, 85-90 (2020).
- 6) Eijun Ueda and Ken Nakajima, "Dynamic Moduli Mapping of Rubber Blends by Nanorheological Atomic Force Microscopy," *Nihon Reoroji Gakkaishi*, **48**, 91-99 (2020).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Nomura Ryusei, Liang Xiaobin, Iwabuki Hitoshi, Aoyama Takuma, Ito Makiko, Urayama Kenji, Nakajima Ken	4. 巻 48
2. 論文標題 Heterogeneous Viscoelasticity under Uniaxial Elongation of Isoprene Rubber Vulcanizate Investigated by Nanorheological Atomic Force Microscope and Dynamic Mechanical Analysis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nihon Reoroji Gakkaishi	6. 最初と最後の頁 85 ~ 90
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1678/rheology.48.85	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ueda Eijun, Nakajima Ken	4. 巻 48
2. 論文標題 Dynamic Moduli Mapping of Rubber Blends by Nanorheological Atomic Force Microscopy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nihon Reoroji Gakkaishi	6. 最初と最後の頁 91 ~ 99
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1678/rheology.48.91	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 NAKAJIMA Ken, SEKINE Kei, MOGI Kaede, ITO Makiko, LIANG Xiaobin	4. 巻 93
2. 論文標題 Atomic Force Microscopy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Japan Society of Colour Material	6. 最初と最後の頁 321 ~ 328
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4011/shikizai.93.321	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Liang Xiaobin, Ito Makiko, Nakajima Ken	4. 巻 13
2. 論文標題 Reinforcement Mechanism of Carbon Black-Filled Rubber Nanocomposite as Revealed by Atomic Force Microscopy Nanomechanics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Polymers	6. 最初と最後の頁 3922 ~ 3922
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/polym13223922	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ito Makiko, Liu Haonan, Kumagai Akemi, Liang Xiaobin, Nakajima Ken, Jinnai Hiroshi	4. 巻 38
2. 論文標題 Direct Visualization of Interfacial Regions between Fillers and Matrix in Rubber Composites Observed by Atomic Force Microscopy-Based Nanomechanics Assisted by Electron Tomography	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Langmuir	6. 最初と最後の頁 777 ~ 785
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.langmuir.1c02788	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 中嶋 健、伊藤万喜子、梁 晓斌	4. 巻 56
2. 論文標題 原子間力顕微鏡を用いた高分子ナノ力学物性解析とそのゴムナノコンポジットへの応用	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 塗装工学	6. 最初と最後の頁 18-28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計21件 (うち招待講演 13件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Ken Nakajima
2. 発表標題 Nanorheological AFM for Basic Polymer Science
3. 学会等名 2020 NanoScientific Forum Europe (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ken Nakajima
2. 発表標題 Nano-scale viscoelastic measurement on heterogeneous polymeric materials
3. 学会等名 28th international Colloquium on Scanning Probe Microscopy(ICSPM28) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中嶋 健
2. 発表標題 高分子ナノメカニクスの現状と展望
3. 学会等名 第69回高分子討論会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中嶋 健
2. 発表標題 ナノ触診原子間力顕微鏡による高分子ナノ力学物性評価
3. 学会等名 高分子学会Webinar（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中嶋 健
2. 発表標題 マイクロからナノレベルのレオロジー・トライボロジー
3. 学会等名 MRM Forum 2020（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中嶋 健、野村竜生、伊藤万喜子、梁 晧斌、青山拓磨、浦山健治、岩路 仁
2. 発表標題 一軸伸長下にある架橋イソブレンゴムの不均一粘弾性
3. 学会等名 日本ゴム協会 2020年年次大会研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中嶋健、植田英順、梁暁斌
2. 発表標題 原子間力顕微鏡で調べたゴムブレンドのナノレオロジー
3. 学会等名 日本レオロジー学会第47年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ken Nakajima and Xiaobin Liang
2. 発表標題 Hierarchic Heterogeneity in Rubbery Materials
3. 学会等名 RubberCon 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ken Nakajima
2. 発表標題 AFM Nanomechanics for Viscoelastic Contact
3. 学会等名 ACS Rubber Division 195th Technical Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ken Nakajima
2. 発表標題 Viscoelastic heterogeneity of rubbery materials investigated by nanorheological AFM
3. 学会等名 The International Rubber Conference 2019 (IRC 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ken Nakajima
2. 発表標題 AFM Nanomechanics on Polymeric Materials
3. 学会等名 13th China-Japan Seminar on Advanced Engineering Plastics, Polymer Alloys, Blends and Composites (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中嶋 健
2. 発表標題 ナノレオロジー-AFMによるフィラー・ゴム界面の粘弾性挙動
3. 学会等名 日本ゴム協会 第54回夏期講座「確かな未来を築くゴム・エラストマーの最新技術」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中嶋 健
2. 発表標題 AFM ナノメカニクスによるソフトマター物性解析
3. 学会等名 日本顕微鏡学会 ソフトマテリアル研究部会 第6 回講演会(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野村 竜生、梁 晞斌、岩路 仁、伊藤 万喜子、中嶋 健
2. 発表標題 イソプレンゴムの伸長下における不均一性および伸長結晶化の研究 2
3. 学会等名 第68回高分子討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ken Nakajima
2. 発表標題 AFM Nanomechanics for Rubber Science and Technology
3. 学会等名 ACS Rubber Division, 199th Technical Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ken Nakajima
2. 発表標題 Nano-scale viscoelastic measurement on heterogeneous polymeric materials
3. 学会等名 2021 International Scanning Probe Microscopy+Scanning Probe Microscopy on Soft & Polymeric Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中嶋 健
2. 発表標題 原子間力顕微鏡を用いた高分子ナノメカニクスの現状と展望
3. 学会等名 21-2高分子学会講演会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中嶋 健、佐川大輝、伊藤万喜子、梁 曉斌
2. 発表標題 ナノ触診原子間力顕微鏡を用いた伸長下におけるフィラー充てんゴムの力学挙動に関する研究
3. 学会等名 日本ゴム協会 2021年年次大会研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 榎森 康晴、伊藤 万喜子、梁 晓斌、中嶋 健
2. 発表標題 ナノレオロジー原子間力顕微鏡による高分子粘弾性測定の定量性向上に関する研究
3. 学会等名 第70回高分子学会年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 榎森康晴、伊藤万喜子、梁晓斌、中嶋 健
2. 発表標題 ナノレオロジー原子間力顕微鏡による高分子粘弾性測定の定量性向上に関する研究
3. 学会等名 第69回レオロジー討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 榎森康晴、伊藤万喜子、梁 晓斌、中嶋 健
2. 発表標題 ナノレオロジー原子間力顕微鏡によるナノ粘弾性測定の定量性向上に関する研究
3. 学会等名 日本ゴム協会 2022年年次大会 研究発表講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 中嶋 健、植田英順、榎森康晴	4. 発行年 2021年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 589
3. 書名 動的粘弾性測定とそのデータ解釈事例：ナノレオロジー-AFMによる複合材料の粘弾性挙動解析	

〔産業財産権〕

〔その他〕

2021年日本表面真空学会にて、中嶋健が「原子間力顕微鏡による高分子ナノメカニクスの研究」というタイトルで学会賞を受賞した。
日本ゴム協会 2022年年次大会 研究発表講演会にて、櫻森康晴が若手優秀発表賞を受賞した。

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------