

令和 5 年 4 月 26 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K15330

研究課題名（和文）原子分解能電子顕微鏡によるバルク中高分子鎖構造の直接観察およびダイナミクスの解明

研究課題名（英文）Direct observation of polymer chain structures and dynamics inside bulk by atomic-resolution electron microscopy

研究代表者

宮田 智衆（Miyata, Tomohiro）

東北大学・多元物質科学研究所・助教

研究者番号：10838949

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：従来困難であった原子レベルでの単一高分子鎖の構造・動的挙動観察を行うため、高分子鎖を重元素修飾し、その重元素原子の空間分布を原子分解能電子顕微鏡により直接観察する手法を確立した。この観察像に分子力学法や機械学習を組み合わせることで、単一高分子鎖の原子レベル3次元構造を推定することに成功した。また、高分子鎖が変形する様子をその場観察した。さらに、高分子フィルム内部における単一高分子鎖の無機ナノ粒子への吸着形態を直接観察により明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで直接観察による解析が困難であった高分子鎖の一次構造（立体配置）および局所二次構造（立体配座）を直接観察に基づき推定する手法を構築した点や、高分子材料中の高分子鎖を直接観察する手法を確立した点に学術的意義がある。

また、高分子ナノコンポジットの材料特性に大きく関わる無機ナノ粒子への高分子鎖吸着構造を直接観察により明らかにしたことは、産業的に大きな意義がある。

研究成果の概要（英文）：We have developed a technique for directly observing the heavy atoms in polymer chains with atomic-resolution electron microscopy to reveal the structures and dynamic behaviors of single polymer chains at the atomic level. By combining the observed images with molecular mechanics simulations and a machine learning technique, we speculated the atomic-scale 3D structures of single polymer chains. The deformation behaviors of polymer chains were also observed. Furthermore, the morphology of individual polymer chains adsorbed on inorganic nanoparticles inside a polymer film was clarified by direct observation.

研究分野：高分子材料の電子顕微鏡観察

キーワード：高分子 単一分子鎖 走査透過型電子顕微鏡 原子分解能観察 立体配置 立体配座 吸着構造

1. 研究開始当初の背景

産業基盤材料である高分子の物性は、高分子鎖の一次構造（モノマー構造、立体配置）、二次構造（立体配座：形態）、高次構造（絡み合い構造、分子スケール以上の構造）に起因している。すなわち、高分子材料を高精度に設計・制御するには、高分子のバルク内部における高分子鎖の構造および動的挙動を原子・分子レベルから詳細に把握する必要がある。しかし、従来の手法では高分子鎖を原子・モノマー構造レベルで観察することができていなかった。

2. 研究の目的

環状暗視野-走査透過型電子顕微鏡法(ADF-STEM)を用いると、有機系試料中の重元素原子分布を可視化することができる。本研究では、ADF-STEMを用いて高分子バルク中の単一高分子鎖の構造を原子・モノマーレベルで直接観察する手法を構築する。さらに、この手法により観察された高分子鎖の微視的構造や動的挙動を、従来の理論やシミュレーション結果と比較・検証することで、高分子の微視的な構造形成機構や運動機構について明らかにする。

3. 研究の方法

上記の目的を達成するため、下記の3項目に取り組んだ。

(1) 基板上における高分子鎖構造の原子スケール観察および解析

高分子鎖の各モノマー単位を重元素原子で修飾すると、その重元素原子の空間分布を ADF-STEM により明るく結像できる。さらに、この重元素原子分布を基に、高分子鎖の分子構造を可視化できると期待される(図1)。本研究では、電子線耐性の大きい polystyrene (PS) を重元素であるヨウ素原子(原子番号: 53)で修飾した poly(4-iodostyrene) (P4IS) (図2)を用意した。まずこの P4IS 分子鎖に含まれるヨウ素原子の空間分布を ADF-STEM 観察により特定できることを示すため、P4IS 分子鎖をグラフェン支持膜上に分散させて ADF-STEM 観察を行った。

(2) 高分子母相中における高分子鎖の原子スケール観察およびナノ粒子への吸着構造の解析

基板(支持膜)上ではなく、高分子母相内部に存在する高分子鎖の構造観察を行うため、極少量の P4IS を含む PS 薄膜をグラフェン支持膜上にスピコートで作製した。ここで、高分子鎖の形態解析の一例として、上記 PS 膜中における金ナノ粒子への P4IS 吸着構造を ADF-STEM 観察し、構造解析を行った。金ナノ粒子は予め支持膜上に分散させておき、その上に高分子膜を形成した。さらに、観察の前に加熱により高分子膜の構造緩和を行った。

(3) 高分子鎖ダイナミクスの観察

高分子鎖ダイナミクスの原子分解能観察手法を確立するため、上記項目(1)で使用した試料における P4IS 分子鎖の運動を ADF-STEM により連続観察した。

4. 研究成果

(1) 基板上における高分子鎖構造の原子スケール観察および解析

P4IS の分子鎖をグラフェンの上に分散させた試料について ADF-STEM 観察を行った。まず、一般に販売されている透過型電子顕微鏡(TEM)向けグラフェン支持膜上への P4IS 分子鎖の分散を試みたところ、グラフェン支持膜に付着した不純物に P4IS が凝集して吸着する結果となり、P4IS の単一分子鎖観察が困難であることがわかった。そこで、本研究課題を進めるための第一ステップとして、非常に清浄な支持膜が得られる一方で作製が極めて難しいと言われてきたスコッチテープ法(高配向グラファイトからスコッチテープでグラフェンを剥離し、TEM 用試料グリッドに転写する方法)を改良し、非常に簡便で大量にグラフェンを TEM グリッドに転写する方法を開発した。この支持膜に P4IS 分子鎖を散布し ADF-STEM 観察を行ったところ、比較的まばらに広がった輝点分布を観察することができた(図3(a))。これらの輝点は単一原子のサイズであり、明るく観察されていることから重元素原子であることがわかった。さらに、これらの輝点について電子エネルギー損失分光法を用いて元素分析を行ったところ、

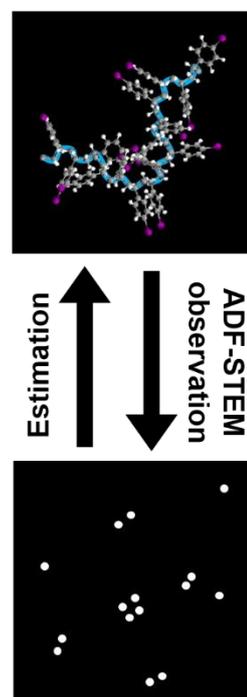
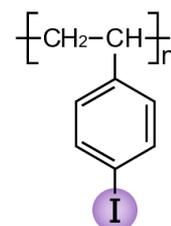


図1 ヨウ素修飾高分子の ADF-STEM 観察および構造推定の模式図。



Poly(4-iodostyrene)

図2 重元素修飾高分子の分子構造。

ヨウ素が検出された。以上より、観察された輝点はほぼ全て単一のヨウ素原子であることが事実となった。

研究開始当初は、これらの輝点分布（ヨウ素原子の分布）をつなぐことで P4IS 分子鎖の大きな形態のみを特定することを計画していた。しかし、輝点分布を解析している過程で、分子構造モデルを当てはめることで、従来法では観察困難であった高分子鎖の原子レベル立体構造（立体配置および立体配座）を推定できる可能性に気がついた。そこで当初の計画を変更し、観察像（輝点分布）に分子シミュレーションと機械学習を組み合わせた分子構造推定手法の開発に重点的に取り組むこととした。

分子構造推定においては、分子モデル中のヨウ素原子の座標を ADF-STEM 像の輝点位置に固定するように P4IS 分子鎖の初期構造を多数かつ無作為に用意し、分子力学法による構造最適化を行うことで形成した最終構造のうちエネルギー的に最も安定な構造を選択することで高分子鎖の妥当な立体構造を推定した。さらに、この処理過程に遺伝的アルゴリズムを適用することで、計算コストの点から困難であった長い高分子鎖の構造推定も高速に行うことが可能となった(図 3(b))。以上の高分子鎖構造推定手法は本研究で初めて確立されたものであり、今後の原子・分子レベル高分子構造解析の基盤となる結果である。

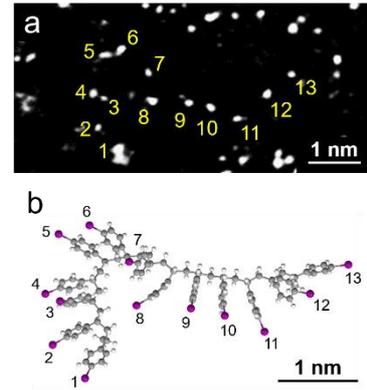


図3 (a)P4IS分子鎖のADF-STEM像. (b)(a)を基に推定したP4IS分子鎖立体構造.

(2) 高分子母相中における高分子鎖の原子スケール観察およびナノ粒子への吸着構造の解析

P4IS を微量含む PS 薄膜をグラフェン支持膜上に作製し、ADF-STEM 観察を行った。その結果、P4IS がグラフェン支持膜上の不純物に吸着してしまい、PS 母相中における P4IS 分子鎖形態を観察できないという問題に直面した。そこで、あえて高分子膜にナノ粒子を混合することで、高分子母相中におけるナノ粒子への単一高分子鎖吸着形態の可視化に取り組んだ。金ナノ粒子を予めグラフェン支持膜上に散布し、その上に P4IS 含有 PS 薄膜を作製したところ、期待どおり金ナノ粒子に P4IS 分子鎖が吸着した形態を ADF-STEM により観察することに成功した(図 4)。

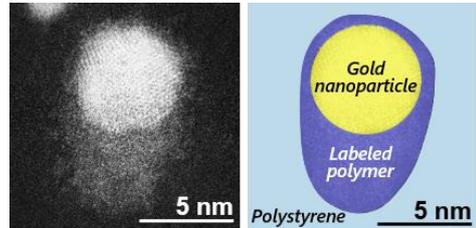


図4 金ナノ粒子にP4IS分子鎖が吸着した構造のADF-STEM像および模式図.

P4IS は金ナノ粒子に凝集体として吸着していたが、この凝集体はそのサイズが P4IS (数平均分子量: 1.06×10^5) の単一分子鎖とほぼ対応することがわかった。さらに、金ナノ粒子に吸着した P4IS 分子鎖は、一部が 1, 2 層の薄い膜状構造を形成しナノ粒子を取り囲み、余った残りの部分がナノ粒子の側面に凝集するという独特な形態をとることが明らかとなった。分子動力学シミュレーションを行い、PS 母相中において P4IS が金ナノ粒子を取り囲む構造がエネルギー的に有利であることを示した。さらに、高分子鎖の形態エントロピーの観点から、この観察された吸着構造が形成されるメカニズムを説明した。

本研究で明らかになった無機ナノ粒子に吸着した高分子鎖の構造や特性は、高分子ナノコンポジット材料の性能を分子レベルで制御するために不可欠なものである。さらに、本研究は高分子材料中に存在する高分子鎖形態の原子分解能直接観察に初めて成功したものである。

[1] T. Miyata et al., Polym. J. 54, 1297-1306 (2022).

(3) 高分子鎖ダイナミクスの観察

高分子鎖ダイナミクスの原子分解能観察手法を開発することを目的に、上記項目(1)の試料の P4IS 分子鎖を ADF-STEM により連続観察した。その結果、グラフェン支持膜上で高分子鎖が凝集したり広がったりする様子を連続観察することに成功した。1 フレームあたりの撮影時間が高分子鎖の移動・変形時間に対して長い(数秒~20 秒程度)ことから、各輝点を対応づけて追跡することはできなかったものの、試料観察条件を調整することで、輝点を追跡し、さらには高分子鎖の局所立体構造の変形挙動を原子レベルで可視化できる可能性を示した。

3 年の研究期間を通じて、基板上および高分子フィルム中に存在する重元素修飾高分子鎖に含まれる重元素原子の空間分布を原子分解能で可視化する手法を確立した。さらに、観察した重元素原子分布と分子力学シミュレーションを組み合わせることで、高分子鎖の 3 次元的な立体構造（立体配置、立体配座）を原子レベルで明らかにした。本手法により、高分子鎖が無機基板やナノ粒子等に吸着した構造や、高分子材料中に含有されている際の構造などを直接観察によ

り原子レベルで明らかにできる基盤を構築することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 11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 Miyata Tomohiro, Shimizu Katsunori, Sato Yohei K., Jinnai Hiroshi	4. 巻 265
2. 論文標題 Atomic-scale analysis on a rubber-brass adhesive interface using scanning transmission electron microscopy	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Polymer	6. 最初と最後の頁 125602 ~ 125602
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.polymer.2022.125602	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 Yoshida Kaname, Huang Hsin-Hui, Miyata Tomohiro, Sato Yohei K., Jinnai Hiroshi	4. 巻 published
2. 論文標題 Electron irradiation damage of amorphous epoxy resin at low electron doses	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Microscopy	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/jmicro/dfac068	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 Miyata Tomohiro, Wang Hsiao-Fang, Suenaga Takafumi, Watanabe Daisuke, Marubayashi Hironori, Jinnai Hiroshi	4. 巻 55
2. 論文標題 Dislocation-Induced Defect Formation in a Double-Gyroid Network	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Macromolecules	6. 最初と最後の頁 8143 ~ 8149
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.macromol.2c01298	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 Miyata Tomohiro, Kawagoe Yoshiaki, Okabe Tomonaga, Jinnai Hiroshi	4. 巻 54
2. 論文標題 Morphologies of polymer chains adsorbed on inorganic nanoparticles in a polymer composite as revealed by atomic-resolution electron microscopy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Polymer Journal	6. 最初と最後の頁 1297 ~ 1306
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41428-022-00690-4	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 Miyata Tomohiro, Sato Yohei, Yoshida Kaname, Huang Hsin-Hui, Mizoguchi Teruyasu, Hagita Katsumi, Mizukami Masashi, Jinnai Hiroshi	4. 巻 28
2. 論文標題 Compositional Analysis on Epoxy-resin/inorganic Interfaces using Scanning Transmission Electron Microscopy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Microscopy and Microanalysis	6. 最初と最後の頁 2522 ~ 2524
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/s1431927622009643	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 Tomohiro Miyata, Tomohiko Nagao, Daisuke Watanabe, Akemi Kumagai, Keizo Akutagawa, Hiroshi Morita, Hiroshi Jinnai	4. 巻 4
2. 論文標題 Nanoscale Stress Distribution in Silica-Nanoparticle-Filled Rubber as Observed by Transmission Electron Microscopy: Implications for Tire Application	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Applied Nano Materials	6. 最初と最後の頁 4452-4461
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnm.1c00009	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 Shusuke Kanomi, Hironori Marubayashi, Tomohiro Miyata, Kenji Tsuda, Hiroshi Jinnai	4. 巻 54
2. 論文標題 Nano-diffraction Imaging of Polymer Crystals	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Macromolecules	6. 最初と最後の頁 6028-6037
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.macromol.1c00683	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 Daisuke Watanabe, Tomohiro Miyata, Tomohiko Nagao, Akemi Kumagai, Hiroshi Jinnai	4. 巻 60
2. 論文標題 Crack propagation behaviors in a nanoparticle filled rubber studied by in situ tensile electron microscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Polymer Science	6. 最初と最後の頁 1277-1284
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pol.20210269	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 Miyata Tomohiro, Nagao Tomohiko, Watanabe Daisuke, Kumagai Akemi, Akutagawa Keizo, Morita Hiroshi, Jinnai Hiroshi	4. 巻 -
2. 論文標題 Nanoscale Stress Distribution in Silica-Nanoparticle-Filled Rubber as Observed by Transmission Electron Microscopy: Implications for Tire Application	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Applied Nano Materials	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnm.1c00009	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 Miyata Tomohiro, Goseki Raita, Ishizone Takashi, Jinnai Hiroshi	4. 巻 26
2. 論文標題 Atomic-scale Observation of Polymer-chain Conformations Using Scanning Transmission Electron Microscopy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Microscopy and Microanalysis	6. 最初と最後の頁 3016 ~ 3017
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/s1431927620023545	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 清水克典、宮田智衆、陣内浩司	4. 巻 56
2. 論文標題 黄銅接着界面における破壊機構観察のための電子顕微鏡技術	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本接着学会誌	6. 最初と最後の頁 34-40
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 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 宮田智衆、上杉文彦	4. 巻 13
2. 論文標題 イオン液体中の微細構造解析	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nanotech Japan Bulletin	6. 最初と最後の頁 1-8
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31件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 12件）

1. 発表者名 Tomohiro Miyata, Yohei Sato, Kaname Yoshida, Hsin-Hui Huang, Teruyasu Mizoguchi, Katsumi Hagita, Masashi Mizukami, Hiroshi Jinnai
2. 発表標題 Compositional Changes at Epoxy-resin/inorganic Interfaces Revealed by 1-nm Resolution Electron Spectroscopy
3. 学会等名 2022 MRS Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomohiro Miyata, Yohei Sato, Kaname Yoshida, Hsin-Hui Huang, Teruyasu Mizoguchi, Katsumi Hagita, Masashi Mizukami, Hiroshi Jinnai
2. 発表標題 Compositional Analysis on Epoxy-resin/inorganic Interfaces using Scanning Transmission Electron Microcopy
3. 学会等名 Microscopy and microanalysis 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomohiro Miyata, Katsunori Shimizu, Yohei Sato, Kaname Yoshida, Hiroshi Jinnai
2. 発表標題 Structural analysis of an adhesive interface between rubber and brass using high-resolution transmission electron microscopy
3. 学会等名 The 2021 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Miyata, R. Goseki, T. Ishizone, H. Jinnai
2. 発表標題 Visualization of polymer-chain conformation using atomic-resolution electron microscopy
3. 学会等名 The 2021 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shusuke Kanomi, Hironori Marubayashi, Tomohiro Miyata, Hiroshi Jinnai
2. 発表標題 The 2021 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (Pacifichem 2021)
3. 学会等名 The 2021 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Daisuke Watanabe, Tomohiko Nagao, Tomohiro Miyata, Wang Hsiao-Fang, Hironori Marubayashi, Hiroshi Jinnai
2. 発表標題 Deformation mechanisms of a rubber composite containing silica nanoparticle studied by transmission electron microscopy
3. 学会等名 The 2021 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryosuke Senga, Kazu Suenaga, Hsiao-Fang Wang, Tomohiro Miyata, Hiroshi Jinnai
2. 発表標題 Nanoscale molecular vibration spectroscopy of polymers
3. 学会等名 The Material Research Meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Katsumi Hagita, Tomohiro Miyata, Yohei Sato, Hiroshi Jinnai
2. 発表標題 Multi-scale MD Simulations of Extremely Slow Cooperative Diffusion of Epoxy Resin Molecules at Naturally Oxidized Si Substrates
3. 学会等名 The Material Research Meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Miyata, R. Goseki, T. Ishizone, H. Jinnai
2. 発表標題 Atomic-scale analysis on polymer-chain structures using scanning transmission electron microscopy
3. 学会等名 Microscopy Conference 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮田智衆, 後関頼太, 石曾根隆, 陣内浩司
2. 発表標題 電子顕微鏡を用いた高分子鎖の原子レベル立体構造解析
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 宮田智衆, 王孝方, 陣内浩司
2. 発表標題 位相差透過型電子顕微鏡法を用いた高分子材料の高コントラスト観察
3. 学会等名 第70回高分子討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮田智衆, 後関頼太, 石曾根隆, 陣内浩司
2. 発表標題 電子顕微鏡観察に基づく高分子鎖の原子レベル立体構造解析
3. 学会等名 日本顕微鏡学会第77回学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomohiro Miyata, Raita Goseki, Takashi Ishizone, Hiroshi Jinnai
2. 発表標題 Atomic-scale observation of polymer-chain conformations using scanning transmission electron microscopy
3. 学会等名 Microscopy & Microanalysis 2020 Meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Katsunori Shimizu, Tomohiro Miyata, Hiroshi Jinnai
2. 発表標題 Atomic-resolution analysis of rubber/brass adhesive interfaces using transmission electron microscopy
3. 学会等名 International elastomer conference(American chemical society rubber divission) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tomohiro Miyata, Raita Goseki, Takashi Ishizone, Hiroshi Jinnai
2. 発表標題 Atomic-resolution analysis of rubber/brass adhesive interfaces using transmission electron microscopy
3. 学会等名 3rd G'L'owing Polymer Symposium in KANTO (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮田智衆
2. 発表標題 液体・高分子の原子分解能観察
3. 学会等名 日本顕微鏡学会第45回関東支部講演会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮田智衆
2. 発表標題 原子分解能電子顕微鏡による高分子鎖の形態および固体表面接着状態の直接観察
3. 学会等名 第3回Nanotech CUPAL若手研究員との交流会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮田智衆、後関頼太、石曾根隆、陣内浩司
2. 発表標題 原子分解能電子顕微鏡による高分子鎖局所形態の解析
3. 学会等名 第69回高分子討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 清水克典, 宮田智衆, 陣内浩司
2. 発表標題 透過型電子顕微鏡を用いたゴム / 黄銅接着界面の破壊面の特定
3. 学会等名 日本ゴム協会 2020年年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 清水克典, 宮田智衆, 陣内浩司
2. 発表標題 ゴム / 黄銅接着界面の引張破壊挙動観察
3. 学会等名 顕微鏡学会第76回学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 清水克典, 宮田智衆, 陣内浩司
2. 発表標題 透過型電子顕微鏡を用いたゴム/黄銅接着界面の引張破壊挙動の可視化
3. 学会等名 第69回高分子学会年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 清水克典, 宮田智衆, 陣内浩司
2. 発表標題 電子顕微鏡技術を用いたゴム/黄銅接着界面の破壊機構観察
3. 学会等名 第58回日本接着学会年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮田智衆, 後関頼太, 石曾根隆, 陣内浩司
2. 発表標題 走査透過型電子顕微鏡法を用いた高分子鎖立体構造の原子レベル解析
3. 学会等名 MRM Forum 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡邉大介, 長尾知彦, 宮田智衆, 王孝方, 丸林弘典, 陣内浩司
2. 発表標題 透過型電子顕微鏡を用いたシリカナノ粒子分散ゴム延伸過程の解析
3. 学会等名 第69回高分子学会年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡邊大介、長尾知彦、宮田智衆、王孝方、丸林弘典、陣内浩司
2. 発表標題 透過型電子顕微鏡を用いたシリカナノ粒子分散架橋ゴムにおける亀裂進展過程の解析
3. 学会等名 第69回高分子討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡邊大介、長尾知彦、宮田智衆、王孝方、丸林弘典、陣内浩司
2. 発表標題 透過型電子顕微鏡を用いたシリカナノ粒子分散ゴム変形過程の観察
3. 学会等名 顕微鏡学会第76回学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 狩野見秀輔、丸林弘典、宮田智衆、陣内浩司
2. 発表標題 ナノ回折イメージングに向けた結晶性高分子の電子線ダメージの評価
3. 学会等名 顕微鏡学会第76回学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 狩野見秀輔、丸林弘典、宮田智衆、陣内浩司
2. 発表標題 電子顕微鏡を用いた結晶性高分子のナノ回折イメージング
3. 学会等名 第69回高分子討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 末永崇文、渡邊大介、宮田智衆、丸林弘典、陣内浩司
2. 発表標題 ブロック共重合体試料の分子量・組成分布がダブルジャイロイド構造の形態に与える影響
3. 学会等名 顕微鏡学会第76回学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 末永崇文、渡邊大介、宮田智衆、丸林弘典、陣内浩司
2. 発表標題 ブロック共重合体の分子量・組成分布が ダブルジャイロイド構造の欠陥に及ぼす影響
3. 学会等名 第69回高分子討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 丸林弘典、狩野見秀輔、宮田智衆、陣内浩司
2. 発表標題 ナノ回折イメージングによる高分子の結晶高次構造のナノマッピング
3. 学会等名 MRM Forum 2020
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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		
米国	NIST	The University of Maryland	