慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	高分子破壊現象プローブのための動的テラヘルツ劣化観察装置の開発
Sub Title	Development of time-dependent stain observation system for macromolecular destruction phenomenon probed by terahertz spectroscopy
Author	渡邉, 紳一(Watanabe, Shin'ichi)
Publisher	
Publication year	2021
Jtitle	科学研究費補助金研究成果報告書 (2020.)
JaLC DOI	
Abstract	プラスチックの結晶化やゴムの応力軟化など、高分子材料の物性変化を動的に捉えることができるテラヘルツ分光計測装置を開発した。同装置を用いて高分子ポリ乳酸薄膜試料の加熱実験をおこない、ガラス転移や結晶化前後におけるテラヘルツ誘電応答の時間変化を捉えることに成功した。また、黒色ゴム試料の延伸に伴うテラヘルツ周波数領域の誘電応答の変化を調べ、試料内部に含有されているカーボンブラック凝集体の形状変化を推測することにも成功した。 We have developed a terahertz spectroscopy system to dynamically capture the changes in physical properties of polymeric materials, such as crystallization of plastics and stress softening of rubber. We succeeded in capturing temporal changes of terahertz dielectric responses of polylactic acid film sample before and after the glass transition and crystallization after heating the sample. We also succeeded in inferring the shape change of carbon black aggregates contained in a rubber sample from a dielectric response change in terahertz frequency region caused by stretching the sample.
Notes	研究種目：基盤研究 (B) (一般) 研究期間：2018～2020 課題番号：18H02040 研究分野：光物性物理学
Genre	Research Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_18H02040seika

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　３ 年　６ 月　４ 日現在

機関番号：３２６１２
研究種目：基盤研究(B)（一般）
研究期間：2018～2020
課題番号：１８Ｈ０２０４０

研究課題名（和文）高分子破壊現象プローブのための動的テラヘルツ劣化観察装置の開発

研究課題名（英文）Development of time-dependent stain observation system for macromolecular destruction phenomenon probed by terahertz spectroscopy

研究代表者
渡邉　紳一（Watanabe, Shinichi）

慶應義塾大学・理工学部（矢上）・教授

研究者番号：１０３７６５３５

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　13,600,000円

研究成果の概要（和文）：プラスチックの結晶化やゴムの応力軟化など、高分子材料の物性変化を動的に捉えることができるテラヘルツ分光計測装置を開発した。同装置を用いて高分子ポリ乳酸薄膜試料の加熱実験をおこない、ガラス転移や結晶化前後におけるテラヘルツ誘電応答の時間変化を捉えることに成功した。また、黒色ゴム試料の延伸に伴うテラヘルツ周波数領域の誘電応答の変化を調べ、試料内部に含有されているカーボンブラック凝集体の形状変化を推測することにも成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義
実用化が進む高分子材料の信頼性を向上させるためには、高分子材料物性の時間変化をプローブすることが非常に重要である。特に、材料の結晶化や応力軟化はその力学的特性に大きな影響を与えるため、これらを非破壊でプローブする技術開発は重要である。本プロジェクトにより、非破壊計測であるテラヘルツ分光法を用いて高分子材料の結晶化や、応力軟化に伴う材料内部の構造変化を検出できたことは、大きな社会的意義がある。また温度変化に伴う高分子鎖の熱運動の変化や、結晶化に伴う化学結合の変化をテラヘルツ分光でプローブできることを示し、学術的にも大きな進展を与えた。

研究成果の概要（英文）：We have developed a terahertz spectroscopy system to dynamically capture the changes in physical properties of polymeric materials, such as crystallization of plastics and stress softening of rubber. We succeeded in capturing temporal changes of terahertz dielectric responses of polylactic acid film sample before and after the glass transition and crystallization after heating the sample. We also succeeded in inferring the shape change of carbon black aggregates contained in a rubber sample from a dielectric response change in terahertz frequency region caused by stretching the sample.

研究分野：光物性物理学

キーワード：テラヘルツ分光　黒色ゴム材料　ポリ乳酸

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

１．研究開始当初の背景

高分子材料における応力の蓄積や亀裂の進行による破壊メカニズムの研究は、実用化が進む同材料の信頼性を向上させるために重要である。その破壊にいたるまでの複雑な動力学過程を理解するには、高分子材料内部の「歪み」や「結晶化」の様子を実験的に空間・時間分解してイメージング計測する技術開発を行うことが必要である。その目的を実現するために、高分子材料に透過性を持つテラヘルツ光を用いた高速偏光イメージング装置を開発することを目標に研究を開始した。本研究開始時期までの研究代表者のグループの研究で、同計測によって、これまで難しかった高分子材料・ゴム材料内部の歪みや延伸結晶化がプローブできることが示されていた。例えば、延伸高分子ポリ乳酸材料の研究では、アモルファス高分子相の異方性計測に成功していた[1]。また、高分子ゴム材料の研究では、内部に含まれるカーボンブラック粒子をプローブとした歪みイメージングに成功していた[2]。

２．研究の目的

テラヘルツスペクトル計測によって、繰り返し延伸に伴うミクロな高分子構造変化の解釈を進めるとともに、更なる計測高速化によるマクロな破壊現象の観察を実施することを目的に研究を開始した。本研究により、実験的な視点から総合的な高分子材料の破壊メカニズムの理解を目指した。

３．研究の方法

本研究課題では下記の３項目で研究を実施した。

（１）　高分子ポリ乳酸薄膜のテラヘルツ分光計測

高分子材料の結晶化に伴う構造変化をプローブするために、主としてテラヘルツ時間領域分光計測を用いてスペクトル評価を行った。特に試料を加熱・延伸しながらテラヘルツスペクトル評価を行うことができるように実験光学系を組み立てた。材料としては、これまでにスペクトル計測の知見が蓄積されていた高分子ポリ乳酸試料の評価を精力的に行った。市販の PLA 試料、および共同研究により入手したステレオコンプレックス型ポリ乳酸試料をそれぞれ薄膜状に成形して測定対象試料とした。またテラヘルツ分光計測以外にも、広角 X 線回折実験や赤外分光計測と組み合わせ、総合的な計測スペクトルの理解を進めた。

（２）　高分子ゴムの繰り返し延伸に伴うテラヘルツスペクトル変化の観測

繰り返し延伸に伴う高分子ゴムの劣化過程をプローブするため、試料を延伸あるいは加熱しながらテラヘルツ偏光スペクトル計測を実施し、材料の誘電率異方性の経時変化を評価した。

（３）　テラヘルツ時間領域分光計測装置の開発

高分子計測のさらなる高速化を目指し、光周波数コム技術を援用した高速テラヘルツ時間領域スペクトル計測装置を開発した。また、計測汎用性を高めるため、反射型のテラヘルツ偏光スペクトル計測装置を開発した。

４．研究成果

本章では、本研究課題における主要な研究成果について詳しく説明する。

（１）　高分子ポリ乳酸材料における結晶化進行のその場テラヘルツ分光計測[3]

加熱に伴う高分子材料の結晶化進行過程を詳細に調べるため、アモルファス状の高分子ポリ乳酸試料を加熱ステージ上（顕微用延伸ステージ、LINKAM 社製 10073B)に設置し、加熱しながらテラヘルツ分光計測を行った。ポリ乳酸は環境温度 140℃近傍において、アモルファス相からα型結晶相への結晶化が進むことが知られている。そこで、試料を設置した状態で環境温度を室温から 140℃に上げ、その温度に保った状態で、どのような時間スケールで結晶化が進行するかを調査した。図１は、温度上昇後の各経過時刻における、試料のテラヘルツ誘電率スペクトルの(a)実部(ε’)および(b)虚部(ε”)を示したものである。時間の経過に伴い、スペクトル虚部の 1.7 THz 近傍にピークが現れることがわかった。これはα型結晶に特有の振動モードの吸収

に起因するものであり[1]、このことから試料の結晶化が進行したことがわかる。さらに、誘電率実部のスペクトルに着目すると、結晶化に伴って低周波数側の誘電率の周波数変化が小さくなることが分かった。我々は、この低周波数側誘電率の周波数変化に着目し、その周波数微分の絶対値(|Δε'|)を指標として、|Δε'|の時間変化をプロットした(図 1(c))。その結果、温度上昇後 10～20 分で|Δε'|が緩やかに小さくなることがわかり、この時間内で結晶化が進行していると判断した。

さらに我々は、異なる温度においても同様の計測を行い、|Δε'|の変化が大きい時間を見積もることで、各温度において結晶成長が進行する時間を推測した。その結果、環境温度 150℃において、最も結晶化進行速度が速いことが分かった。なお、環境温度は装置の熱電対の場所での温度で見積もっているため、実際の試料の温度は数十℃ほど小さい。このように、テラヘルツ時間領域分光法が高分子材料の結晶化過程をプローブするのに適した光源であることを示した。

また、誘電率と共に試料の厚さを正確に計測できるテラヘルツ時間領域分光法の利点を活かし、ポリ乳酸試料を加熱した際のガラス転移温度(T_g)近傍での試料の厚さ計測と誘電率計測を同時に行った。T_g 前後での熱膨張率の違いを反映し、T_g 以上の温度では、温度上昇に伴う試料の厚さの増加率が増すことが確認された。さらに、T_g 以上では|Δε'|も増加することが確認された。これは、T_g 以上における高分子鎖のミクロブラウン運動に伴って一つの高分子鎖が他の高分子鎖と衝突する確率が高くなり、その結果として緩和時間が速くなったことで、アモルファス相の振動モードスペクトル幅が増加したものと解釈した。

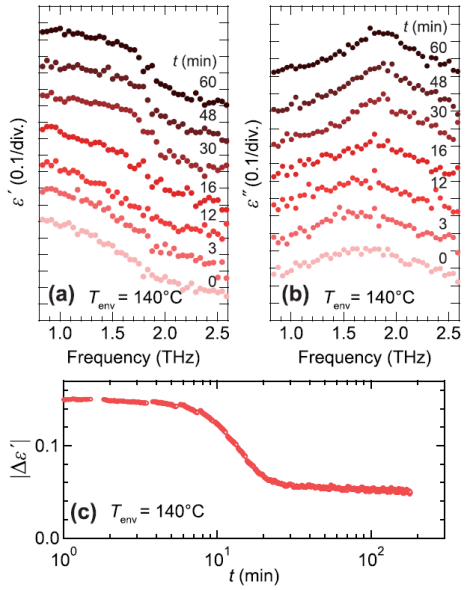

図 1 ：140℃に温度上昇させた後の、ポリ乳酸薄膜試料の誘電率(a)実部(ε')および(b)虚部(ε")スペクトル。(c)誘電率実部(|Δε'|)の傾き絶対値の時間変化 (Reprinted with permission from Ref. [3]. Copyright (2021) American Chemical Society.)。

（２） ステレオコンプレックス型ポリ乳酸試料の結晶化過程におけるスペクトル変化の発見とその解釈[4]

高分子ポリ乳酸は、互いに鏡像異性体である L 体のポリ乳酸(PLLA)と D 体のポリ乳酸(PDLA)が対をなしてステレオコンプレックス(sc)型結晶を形成すると、融点が上昇したり力学特性が向上したりするなど、他の結晶相とは著しく異なる性質を示すことが知られている。また、先行研究により、sc 型ポリ乳酸結晶相のテラヘルツ帯振動モードは、他の結晶相の振動モードとはピークエネルギーが著しく異なることも示されている(H. Li, *et al.*, Polymer Testing **57**, 52 (2017))。さらに、sc 型ポリ乳酸結合の高分子鎖結合は、分子側鎖の O 原子と H 原子が弱い水素結合を形成した結果、安定に存在することが指摘されており(J. M. Zhang, *et al.*, Macromolecules **38**, 1822 (2005))、大変興味深い研究対象となっている。そこで我々は、sc 型ポリ乳酸の結晶化に伴い、テラヘルツ分光スペクトルがどのように変化するかを詳細に調べた。

我々は、PLLA/PDLA 重量比や加熱条件を変えた結晶化度の異なる 16 種類のポリ乳酸薄膜試料を準備した。その 16 種類の薄膜試料についてテラヘルツ時間領域分光計測を行い、テラヘルツ誘電率スペクトルを調べた。図 2 は、測定の結果得られた 16 種類の試料の誘電率スペクトルの虚部(ε")を示したものである。興味深い発見としては、結晶化度の高いサンプルになるほど 1.4 THz のピークが低周波数側にシフトする一方で、2.1 THz のピークにはシフトが見られなかった点である。赤外吸収スペクトルとの比較から、1.4 THz のピークシフトは、水素結合の形成に伴って現れた周波数シフトであることが推測された。詳細な考察の結果、1.4 THz のピークは sc

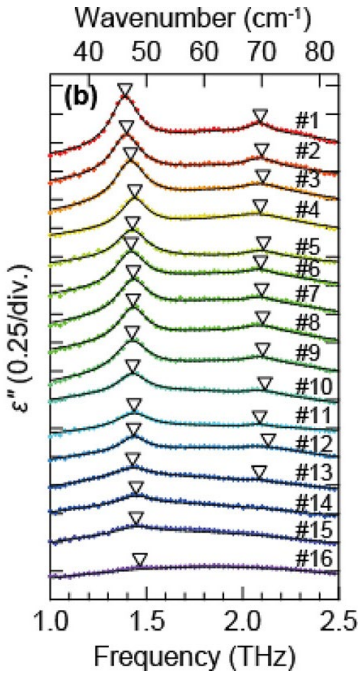

図 2 :結晶化度の異なる 16 種類の sc 型ポリ乳酸結晶のテラヘルツ誘電率スペクトル虚部 Reprinted with permission from Ref. [4]. Copyright (2021) American Chemical Society.

結晶を構成する高分子の秤動運動が大きな割合を占める分子振動モードであり、その結果（秤動運動の割合が小さい 2.1 THz の分子振動モードよりも）水素結合の影響を受けやすいものと推測した。また、水素結合形成に伴ってピークが低エネルギーシフトする理由は、分子振動ポテンシャルの非調和性の増加から分子振動の高準位間遷移エネルギーが小さくなるためであると推測した。このように、高分子の結晶化に伴う微弱な化学結合状態の変化がテラヘルツスペクトルに大きな影響を与えることを示した。

（３） 高分子ゴム材料の繰り返し伸縮過程におけるテラヘルツ帯の複屈折変化とその解釈[5,6]

黒色ゴムは延伸することで応力が低下し、柔らかくなることが古くから知られている。一方で、この応力軟化現象に関するミクロスケールでの解釈には諸説あり、明確ではない。我々の先行研究によって、テラヘルツ帯の複屈折は、内部に含まれるカーボンブラック凝集体の配向状態に強く依存することが判明している。そこで我々は、応力軟化とテラヘルツ帯の複屈折変化との相関を調べることで、黒色ゴム内での力学的性質の変化とカーボンブラックの挙動との関係を解明することを目指した。

図３は、黒色ゴムを延伸、再圧縮したときの応力変化と、同時に計測したテラヘルツ帯の複屈折を図示したものである[5]。両者の変化には相関が見られ、応力軟化にはカーボンブラックの挙動が深く関連していることが示唆された。

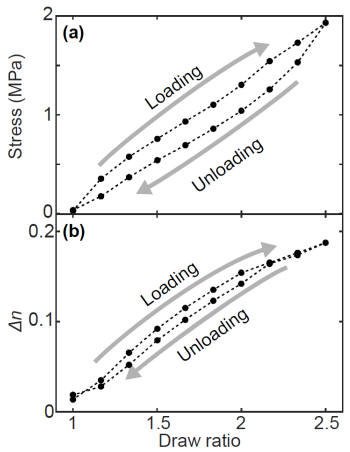

図３：延伸・再圧縮時の黒色ゴムの(a)応力変化と(b)テラヘルツ周波数帯の複屈折変化© [2021] IEEE. Reprinted, with permission, from Ref. [5].

応力軟化現象のさらなるミクロな物理の解明のために、黒色ゴムの延伸・再圧縮時のテラヘルツ周波数帯の誘電率変化も合わせて調査した[6]。その結果、延伸に伴いカーボンブラック凝集体の誘電率が等方的になる結果が示唆され、凝集体が力学的に延伸されたことによって破壊され、その結果、誘電率が変化したものと推定した。カーボンブラック凝集体の破壊は、黒色ゴムの応力軟化の要因の一つとして考えられており、今回の実験は、同現象が黒色ゴムの応力軟化に深く関連することが示唆される結果となった。

（４）黒色ゴムの応力緩和に伴うテラヘルツ周波数帯複屈折変化の温度依存性[7,8]

黒色ゴムの応力軟化現象に関連し、応力緩和現象の温度依存性計測にも取り組んだ。計測の結果、ガラス転移温度 T_g に近く高分子鎖の流動性が低い温度領域と、T_g から離れた高分子鎖の流動性が高い温度領域で、明確な複屈折緩和時間の違いが見られた。

（５）テラヘルツ基盤計測技術開発[9-12]

本研究課題では、基盤計測技術であるテラヘルツ時間領域分光法の汎用化・高速化に向けた取り組みも実施した。装置の汎用化については、図４に示す反射型テラヘルツ偏光計測装置を開発した[9]。テラヘルツ放射素子(Transmitter)から放射された直線偏光のテラヘルツ光は試料を反射し、テラヘルツ検出器（Receiver）へと導かれる。検出器では、試料の表面から反射したテラヘルツ光と、試料内部を通過して試料の裏面で反射したテラヘルツ光が検出される。テラヘルツ時間領域分光法を用いることで、表面からの反射と裏面からの反射は時間領域で分離できる。延伸した黒色ゴムを試料として用いた場合、試料の複屈折が原因で、試料裏面から反射したテラヘルツ光の偏光状態は楕円偏光となる。従って、表面反射成分と裏面反射成分の偏光状態を比較することで、ゴムの光学異方性軸が判明し、その結果、どの方向に歪みがかかっているかを調査できる。我々は同装置を用いて、延伸黒色ゴム試料の異方性空間マッピングを行うことに成功した。

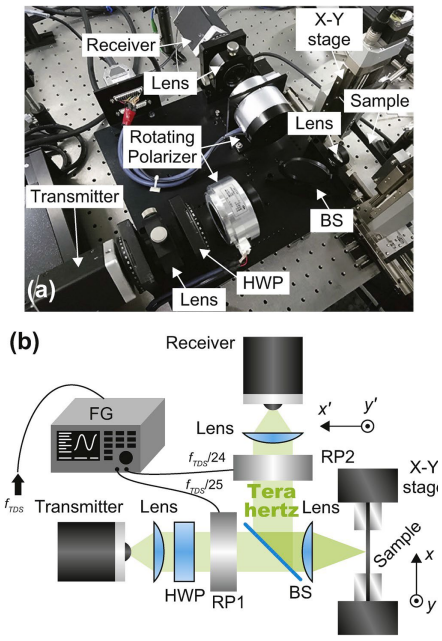

図４：反射型テラヘルツ偏光計測装置の (a) 写真と (b) 測定概念図。"Reprinted from Ref. [9] with permission from Elsevier.

テラヘルツ時間領域分光法の高速化に向けた取り組みとしては、二台のファイバーレーザーを同期させた非同期サンプリング計測法を利用したテラヘルツ偏光計測装置の開発を進めた[10]。またCMOSカメラを用いたテラヘルツ偏光イメージング装置開発を進めた[11]。さらに、非同期サンプリング計測法の高精度化に向けて、同技術の基盤技術となる近赤外周波数領域のデュアルコム計測技術の開発を進め、偏光計測による材料の複屈折計測応用を試みた[12]。さらに将来、光励起にともなう高分子劣化を診断できる測定系に拡張するために、光ポンプ・光プローブ計測系の開発を進めた[13]。

（６）テラヘルツ計測技術および高分子材料研究に関連した解説記事・レビュー論文等の執筆[14-19]

テラヘルツ偏光計測技術ならびにその高分子科学への応用について、複数のレビュー論文[14-16]、解説記事[17,18]、ならびに教科書のコラム執筆[19]を行い、本成果を広く社会に普及させる活動を行った。

[参考文献]

[1] H. Iwasaki, M. Nakamura, N. Komatsubara, M. Okano, M. Nakasako, H. Sato, and S. Watanabe, The Journal of Physical Chemistry B **121**, 6951 (2017).
[2] A. Moriwaki, M. Okano, and S. Watanabe, APL Photonics **2**, 106101 (2017).
[3] M. Nakamura, M. Okano, and S. Watanabe, ACS Applied Polymer Materials **1**, 3008 (2019).
[4] J. Hirata, N. Kurokawa, M. Okano, A. Hotta, and S. Watanabe, Macromolecules **53**, 7171 (2020).
[5] T. Tsujimoto, A. Moriwaki, M. Fujii, M. Okano, and S. Watanabe, Proceedings of the 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (2018).
[6] 水田圭祐, 岡野真人, 森本崇宏, 阿多誠介, 渡邉紳一,日本物理学会 2020 年秋季大会, PSE-18 (2020).
[7] 森脇淳仁, 岡野真人, 渡邉紳一,日本物理学会第74回年次大会 14aK208-5 (2019).
[8] 神田龍星, 岡野真人, 渡邉紳一,日本物理学会第76回年次大会 PSE-28 (2021).
[9] M. Okano and S. Watanabe, Polym. Test. **72**, 196 (2018).
[10] 中川真由莉, 岡野真人, 渡邉紳一,テラヘルツ科学の最先端VII Con5(2020).
[11] K. Suzuki, K. Oguchi, Y. Monnai, M. Okano, and S. Watanabe, Appl. Phys. Express **12**, 052010 (2019).
[12] K. A. Sumihara, S. Okubo, K. Oguchi, M. Okano, H. Inaba, and S. Watanabe, Opt. Express **27**, 378482 (2019).
[13] M. Okano, T. Takahashi, and S. Watanabe, Appl. Phys. Lett. **117**, 082407 (2020).
[14] S. Watanabe, Photonics **5** (4), 58 (2018).
[15] M. Okano, and S. Watanabe, Polymers **11** (1), 9 (2019).
[16] K. Oguchi, M. Okano, and S. Watanabe, Particles **2** (1), 70 (2019).
[17] 渡邉紳一,岡野真人,中迫雅由,レーザー研究,Vol. 47,2019年1月号,21-26ページ(2019).
[18] 渡邉紳一,岡野真人,応用物理、Vol. 88,2019年2月号,91-95ページ(2019).
[19] 高分子学会 編「基礎高分子科学（第２版)」東京化学同人(2020)(分担執筆).

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕　計11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　4件）

１．著者名 Okano Makoto、Takahashi Tomohiro、Watanabe Shinichi	４．巻 117
２．論文標題 Ultrafast coherent control of higher-order spin waves in a NiFe thin film by double-pulse excitation	５．発行年 2020年
３．雑誌名 Applied Physics Letters	６．最初と最後の頁 82407
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0016340	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 Hirata Junya、Kurokawa Naruki、Okano Makoto、Hotta Atsushi、Watanabe Shinichi	４．巻 53
２．論文標題 Evaluation of Crystallinity and Hydrogen Bond Formation in Stereocomplex Poly(lactic acid) Films by Terahertz Time-Domain Spectroscopy	５．発行年 2020年
３．雑誌名 Macromolecules	６．最初と最後の頁 7171-7177
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acs.macromol.0c00237	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 Suzuki Kenta、Oguchi Kenichi、Monnai Yasuaki、Okano Makoto、Watanabe Shinichi	４．巻 12
２．論文標題 Spatio-temporal imaging of terahertz electric-field vectors: observation of polarization-dependent knife-edge diffraction	５．発行年 2019年
３．雑誌名 Applied Physics Express	６．最初と最後の頁 52010
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7567/1882-0786/ab12fc	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 Nakamura Madoka、Okano Makoto、Watanabe Shinichi	４．巻 1
２．論文標題 Real-Time Monitoring of Structural Changes in Poly(lactic acid) during Thermal Treatment by High-Speed Terahertz Time-Domain Spectroscopy for Nondestructive Inspection	５．発行年 2019年
３．雑誌名 ACS Applied Polymer Materials	６．最初と最後の頁 3008～3016
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acsapm.9b00703	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 Sumihara Kana A.、Okubo Sho、Oguchi Kenichi、Okano Makoto、Inaba Hajime、Watanabe Shinichi	4．巻 27
2．論文標題 Polarization-sensitive dual-comb spectroscopy with an electro-optic modulator for determination of anisotropic optical responses of materials	5．発行年 2019年
3．雑誌名 Optics Express	6．最初と最後の頁 35141～35165
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.27.035141	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 －

1．著者名 Oguchi Kenichi、Okano Makoto、Watanabe Shinichi	4．巻 2
2．論文標題 Polarization-Sensitive Electro-Optic Sampling of Elliptically-Polarized Terahertz Pulses: Theoretical Description and Experimental Demonstration	5．発行年 2019年
3．雑誌名 Particles	6．最初と最後の頁 70～89
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/particles2010006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 －

1．著者名 Okano Makoto、Watanabe Shinichi	4．巻 11
2．論文標題 Internal Status of Visibly Opaque Black Rubbers Investigated by Terahertz Polarization Spectroscopy: Fundamentals and Applications	5．発行年 2018年
3．雑誌名 Polymers	6．最初と最後の頁 9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/polym11010009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 －

1．著者名 Watanabe Shinichi	4．巻 5
2．論文標題 Terahertz Polarization Imaging and Its Applications	5．発行年 2018年
3．雑誌名 Photonics	6．最初と最後の頁 58
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/photonics5040058	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 －

1．著者名 Okano Makoto、Watanabe Shinichi	4．巻 72
2．論文標題 Inspection of internal filler alignment in visibly opaque carbon-black?rubber composites by terahertz polarization spectroscopy in reflection mode	5．発行年 2018年
3．雑誌名 Polymer Testing	6．最初と最後の頁 196～201
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.polymertesting.2018.10.020	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 渡邉紳一、岡野真人	4．巻 88
2．論文標題 テラヘルツ偏光分光法を用いた黒色ゴム材料の非破壊検査技術と応用展開	5．発行年 2019年
3．雑誌名 応用物理	6．最初と最後の頁 91～95
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11470/oubutsu.88.2_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 渡邉紳一、岡野 真人、中迫 雅由	4．巻 47
2．論文標題 高分子材料における異方性のテラヘルツセンシング	5．発行年 2019年
3．雑誌名 レーザー研究	6．最初と最後の頁 21～26
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 －

〔学会発表〕　計39件（うち招待講演　8件／うち国際学会　10件）

1．発表者名 J. Hirata, N. Kurokawa, M. Okano, A. Hotta, and S. Watanabe
2．発表標題 Evaluation The Hydrogen Bonding in Stereocomplex Poly(lactic acid) by Terahertz Spectroscopy
3．学会等名 APS March Meeting 2021（国際学会）
4．発表年 2021年

１．発表者名 M. Okano, T. Takahashi, and S. Watanabe
２．発表標題 Coherent control of higher-order spin precession modes in ferromagnetic permalloy thin films by double pulse excitation
３．学会等名 CLEO 2020（国際学会）
４．発表年 2020年

１．発表者名 神田龍星，岡野真人，渡邉紳一
２．発表標題 黒色ゴムの応力緩和に伴うテラヘルツ周波数帯複屈折変化の温度依存性
３．学会等名 日本物理学会第76回年次大会
４．発表年 2021年

１．発表者名 中川真由莉，岡野真人，渡邉紳一
２．発表標題 非同期サンプリング法によるテラヘルツ偏光分光測定装置の開発
３．学会等名 テラヘルツ科学の最先端VII
４．発表年 2020年

１．発表者名 岡野真人，中村円香，渡邉紳一
２．発表標題 複素誘電率スペクトル解析によるポリ乳酸薄膜の熱誘起状態変化の観測
３．学会等名 テラヘルツ科学の最先端VII
４．発表年 2020年

１．発表者名 水田圭祐，岡野真人，森本崇宏，阿多誠介，渡邉紳一
２．発表標題 テラヘルツ偏光計測によるゴム伸縮過程における内部カーボンナノフィラー構造変化の推定
３．学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
４．発表年 2020年

１．発表者名 渡邉紳一，岡野真人
２．発表標題 金属磁性体におけるスピン歳差運動の光コヒーレント制御
３．学会等名 Spin-RNJ 2020年度年次報告会
４．発表年 2021年

１．発表者名 岡野真人，高橋知宏，渡邉紳一
２．発表標題 ダブル光パルス励起による金属強磁性薄膜中の高次スピン波モードの制御
３．学会等名 Spin-RNJ 若手オンライン研究発表会
４．発表年 2020年

１．発表者名 K.A. Sumihara, S. Okubo, K. Oguchi, H. Inaba, and S. Watanabe,
２．発表標題 Development of polarization-sensitive dual-comb spectroscopy for anisotropic materials
３．学会等名 2019 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference（国際学会）
４．発表年 2019年

１．発表者名 渡邉紳一
２．発表標題 テラヘルツ偏光センシングと計測応用
３．学会等名 第36回センシングフォーラム 計測部門大会（招待講演）
４．発表年 2019年

１．発表者名 渡邉紳一
２．発表標題 最先端光計測による高分子材料の光物性研究
３．学会等名 第18回 関東光科学若手研究会（招待講演）
４．発表年 2019年

１．発表者名 渡邉紳一
２．発表標題 電子デバイスを用いたテラヘルツ時間領域分光法（THz-TDS）の開発動向と展望
３．学会等名 テラヘルツビジネスセミナー（招待講演）
４．発表年 2020年

１．発表者名 渡邉紳一
２．発表標題 テラヘルツ分光装置の社会実装に向けた研究開発動向
３．学会等名 第107回テレコム技術情報セミナー（招待講演）
４．発表年 2020年

１．発表者名 今井 優理子，岡野 真人，渡邉 紳一
２．発表標題 Yb添加ファイバーアンプを用いたEr添加ファイバーをベースとした光周波数コム光源の高出力化
３．学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
４．発表年 2019年

１．発表者名 中川 真由莉，岡野 真人，渡邉 紳一
２．発表標題 デュアルコム光源を利用した非同期サンプリング法によるテラヘルツ時間領域分光装置の開発
３．学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
４．発表年 2019年

１．発表者名 田渕 稜介，住原 花奈，岡野 真人，大久保 章，稲場 肇，渡邉 紳一
２．発表標題 電歪素子を用いた高速ビート周波数制御によるデュアルコム分光装置の開発と応用
３．学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
４．発表年 2019年

１．発表者名 福田 達博，渡邉 紳一，岡野 真人
２．発表標題 デュアルコム分光法を用いた非ドープおよびドープシリコンの光学特性評価
３．学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
４．発表年 2019年

１．発表者名 岡野 真人，中村 円香，渡邉 紳一
２．発表標題 高速テラヘルツ時間領域分光装置によるポリ乳酸の熱誘起構造変化の実時間観測
３．学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
４．発表年 2019年

１．発表者名 住原 花奈，大久保 章，小口 研一，岡野 真人，稲場 肇，渡邉 紳一
２．発表標題 物性計測に向けた電気光学変調器を用いた偏光デュアルコム分光法の開発
３．学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
４．発表年 2019年

１．発表者名 平田 純也，黒川 成貴，岡野 真人，堀田 篤，渡邉 紳一
２．発表標題 テラヘルツ時間領域分光法を用いたステレオコンプレックス型ポリ乳酸の結晶化度の評価
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 岡野真人，渡邉紳一
２．発表標題 テラヘルツ偏光計測を用いたゴム複合材料内部のゴム-フィラー間相互作用の研究
３．学会等名 第30回エラストマー討論会
４．発表年 2019年

１．発表者名 水田圭祐，岡野真人，森本崇宏，阿多誠介，渡邉紳一
２．発表標題 伸縮過程にともなう黒色ゴムのテラヘルツ光学伝導度の不可逆変化
３．学会等名 日本物理学会第75回年次大会
４．発表年 2020年

１．発表者名 M. Nakamura, M. Okano, and S. Watanabe
２．発表標題 Real-Time Observation of Thermally-Induced Structural Changes of Poly(Lactic Acid) Thin Film by Terahertz Spectroscopy
３．学会等名 2018 MRS Fall Meeting（国際学会）
４．発表年 2018年

１．発表者名 T. Tsujimoto, A. Moriwaki, M. Fujii, M. Okano, and S. Watanabe
２．発表標題 Optical Response Change Of Black Rubbers Under Cyclic Deformation Investigated By Terahertz Polarization Spectroscopy
３．学会等名 43th Int. Conf. on Infrared, Millimeter, and THz Waves（国際学会）
４．発表年 2018年

１．発表者名 A. Moriwaki, M. Okano, and S. Watanabe
２．発表標題 Internal strain imaging of visibly-opaque black rubbers by terahertz polarization spectroscopy
３．学会等名 The 13th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO PR)（国際学会）
４．発表年 2018年

１．発表者名 K. Suzuki, K. Oguchi, M. Okano, and S. Watanabe
２．発表標題 Electric-field vector imaging of terhertz surface waves on an indium tin oxide thin film
３．学会等名 The 13th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO PR) 2018（国際学会）
４．発表年 2018年

１．発表者名 M. Okano and S. Watanabe
２．発表標題 Observation of strain-induced anisotropic percolative conduction in rubber-filler composites by terahertz polarization spectroscopy
３．学会等名 The 12th International Conference on Excitonic and Photonic Processes in Condensed Matter and Nano Materials (EXCON 2018)（国際学会）
４．発表年 2018年

１．発表者名 S. Watanabe
２．発表標題 Terahertz optical response of polymer composites and its application
３．学会等名 The 11th Asia-Pacific Laser Symposium（招待講演）（国際学会）
４．発表年 2018年

１．発表者名 S. Watanabe
２．発表標題 Terahertz polarization spectroscopy as a novel tool for non-destructive internal strain sensing of rubber and polymeric materials
３．学会等名 International Conference on Plastics and Rubber Technology (ICPRT 2018)（招待講演）（国際学会）
４．発表年 2018年

１．発表者名 辻本敬斗，森脇淳仁，藤井美佐子，岡野真人，渡邉紳一
２．発表標題 テラヘルツ偏光計測による繰り返し伸縮に伴う黒色ゴム内部構造変化の研究
３．学会等名 日本物理学会第74回年次大会
４．発表年 2019年

１．発表者名 森脇淳仁，岡野真人，渡邉紳一
２．発表標題 テラヘルツ偏光測定を用いた黒色ゴムの応力緩和現象の観察
３．学会等名 日本物理学会第74回年次大会
４．発表年 2019年

１．発表者名 岡野真人，渡邉紳一
２．発表標題 テラヘルツ光学伝導度測定を通じた黒色ゴムの内部伝導ネットワーク構造の推定
３．学会等名 日本物理学会第74回年次大会
４．発表年 2019年

１．発表者名 住原花奈，大久保章，小口研一，稲場肇，渡邉紳一
２．発表標題 デュアルコム分光法による複素屈折率の異方性計測
３．学会等名 日本物理学会第74回年次大会
４．発表年 2019年

１．発表者名 岡野 真人，渡邉 紳一
２．発表標題 反射型テラヘルツ偏光分光装置を用いた黒色ゴム複合材料の内部フィラー配向状態の観測
３．学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
４．発表年 2019年

１．発表者名 渡邉紳一
２．発表標題 偏光分解テラヘルツ分光法による高分子材料の異方性イメージング技術
３．学会等名 レーザー学会学術講演会第39回年次大会（招待講演）
４．発表年 2019年

１．発表者名 西川 大智，住原 花奈，田渕 稜介，大久保 章，稲場 肇，渡邉 紳一
２．発表標題 ファイバコムにおける圧電素子による高速ビート位相同期
３．学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
４．発表年 2018年

１．発表者名 住原 花奈，大久保 章，小口 研一，稲場 肇，渡邉 紳一
２．発表標題 デュアルコム分光法を用いた偏光計測装置の高速化
３．学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
４．発表年 2018年

１．発表者名 渡邉 紳一，岡野 真人,森脇 淳仁
２．発表標題 テラヘルツ偏光計測を用いたゴム材料内部の非破壊検査
３．学会等名 日本ゴム協会２０１８年年次大会
４．発表年 2018年

１．発表者名 渡邉紳一
２．発表標題 テラヘルツ波を用いた高分子材料の非破壊検査技術
３．学会等名 第52回センサ＆アクチュエータ技術シンポジウム（招待講演）
４．発表年 2018年

〔図書〕　計1件

１．著者名 高分子学会	４．発行年 2020年
２．出版社 東京化学同人	５．総ページ数 (441)
３．書名 基礎高分子科学　第２版（分担執筆）	

〔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