

令和 6 年 6 月 24 日現在

機関番号：32619  
研究種目：基盤研究(B) (一般)  
研究期間：2020～2023  
課題番号：20H02406  
研究課題名(和文) 火災現場の安全な活動に必要なガス検知機能を有するテラヘルツリモートセンサの開発

研究課題名(英文) THz Remote Sensor of Molecules in Fire

研究代表者  
田邊 匡生 (Tanabe, Tadao)  
芝浦工業大学・デザイン工学部・教授

研究者番号：10333840  
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,400,000円

研究成果の概要(和文)：壁紙(クロス材)、コンパネ板をはじめとする建築材料を300～800度まで燃焼させることにより発生したガスを火災模擬チャンバーにガスを導入し、広帯域のテラヘルツ帯における吸収ピークを測定した。発生したガスは検知管検査だけでなく、ガスクロマトグラフィー及びイオンクロマトグラフィーにより分析した。燃焼中に発生したガスに含まれる微粒子による散乱にあわせてシアン化水素ならびに一酸化炭素、臭素化合物による吸収ピークを確認した。これらは180秒の平均値として測定したものであるが、特定のガスによる吸収ピークの周波数に着目することでリアルタイムにガス成分を特定できるレベルであることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義  
火災時の有毒ガス検知は現在「検知管式ガス測定器」を用いるが、1本の検知管が測定できるガスは1種類である。本研究は新たなガスセンサとして、複数種類の有毒ガスを同時に識別するだけでなく、火炎や煙に近づかなくとも、遠隔で検出できる有毒ガス検知法として、テラヘルツ分光測定に着目した。各気体の回転エネルギー準位に基づき分子それぞれを個別に検出可能なテラヘルツ分光による火災時の迅速な救出・救助、消火に必要な有害ガスと引火性液体の識別・検出ができる新たなセンシングシステムを提案するとともにその可能性を実証した。

研究成果の概要(英文)：Building materials, including wallpaper (cloth material) and composite boards, were burned to 300-800 °C. The generated gases were introduced into a fire chamber and the absorption peaks in the broad THz band were measured. The gas was analyzed by gas chromatography and ion chromatography as well as by detector tube testing. Absorption peaks due to hydrogen cyanide, carbon monoxide, and bromine compounds were identified along with scattering by particulates in the gas generated during burning. These were measured as averaged values over 180 seconds, and by focusing on the frequency of the absorption peaks due to specific gases, it was confirmed that the gas components could be identified in In-situ measurement.

研究分野：電磁波材料工学

キーワード：テラヘルツ 災害モニタリング 分光センシング 防災・減災 ガスセンシング

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

平成 30 年消防白書によると建物火災の死因別死者の 37.8 %は一酸化炭素中毒・窒息によるもので火災時の有害ガスの検知は喫緊の課題である(平成 30 年消防白書)。現状使用されている有毒ガス検知器は「検知管式ガス測定器」である。ガス自体を採取して、薬剤と反応させて検知する機構であるために測定する場所まで近づき、反応を待たなければならない。さらに 1 本の検知管が測定できるガスは 1 種類であり、測定対象とするガスの種類に制限がある。それゆえ、様々な有毒ガスを識別でき、かつ遠隔で検出できる新たな有毒ガス検知器の開発が待望されている。

本研究ではその新たな有毒ガス検知器システムにテラヘルツ光を利用する。テラヘルツ光は電波と光波の性質を併せ持ち、波長が長いため、粉塵が多い火災現場でも散乱することなく測定できる。室内に照射して壁などで反射して戻ってくるテラヘルツ光の周波数を解析することでガス成分の遠隔検出が可能である。気体分子の回転エネルギー準位はテラヘルツ帯にあり、さらに気体は分子間の相互作用は無視できるほど小さいので、各気体のテラヘルツ帯に示す吸収線からガス分子をそれぞれ個別に検出することができる。また、液体に照射すると、その液体に固有の誘電率に応じて反射することから液体の成分を知ることができる。テラヘルツ光のエネルギーは 1 THz で約  $4.1 \times 10^{-3}$  eV、絶対温度では約 48 K に相当し、6 THz ほどで室温(300K)程度の熱エネルギーに相当する。これは X 線のエネルギーと比較すると 10 万分の 1 程度と小さいため、細胞や体液成分をイオン化する恐れが無く、人体に安全である。

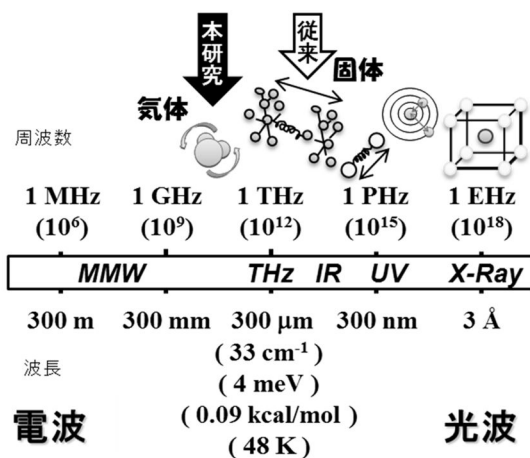


図 1 テラヘルツの周波数帯域

### 2. 研究の目的

本研究は広帯域におけるテラヘルツ分光により、火災時の迅速な救出・救助、消火に必要な有害ガスと引火性液体の識別・検出できる新たなセンシングシステムを開発することを目的とした。具体的には、火災時に発生する一酸化炭素や二酸化炭素、シアン化水素、臭素化合物といった毒性・可燃性の高いガス、液体は生活に身近なグルコースや塩化ナトリウム、次亜塩素酸ナトリウムの水溶液をはじめ、エチレングリコールおよびグリセロールの引火性・可燃性液体を測定した。原理的にテラヘルツ帯のエネルギーはガス分子の回転運動、液体分子の極性に相当するので、いずれの検出もテラヘルツ光は優位であるだけでなく、粉塵が多い火災現場でも特に低周波数のテラヘルツ光は波長が長いので散乱することなく計測できる。

### 3. 研究の方法

各種ガスに対する広帯域のテラヘルツスペクトル測定を安全に行うために、ガス漏れなどを考慮した火災模擬チャンバーとして光学距離を 4 m から 360 mm に設定したガスセルチャンバーを整備した。チューブからのガス漏れ防止のために O リングを利用したチューブフィッティングを準備した。袋はガスバリア性が高い素材によるものとし、コック付にすることで安全性をさらに高めた。そして、ボンベから供給できるガスに対してはレギュレータにより、ガスの放出量の調節を可能とした。なお、ガス収集用袋の素材を調査するために内部全反射配置の赤外分光測定を利用し素材分析を行った。また、液体試料については測定するテラヘルツ周波数帯における透過特性を確保できるセルとして、ポリスチレンもしくは石英によるものを使用するとともに液体の膜厚を制御した。

#### 4. 研究成果

4 m の光路長を有する火災模擬チャンバーを使用して、有害ガスとしての一酸化炭素にあわせて二酸化炭素のほか、標準ガスとして水蒸気ならびにエタノールのテラヘルツ吸収スペクトルを大気圧化だけでなく、減圧条件でも測定した。一酸化炭素のスペクトルにおいて、33 GHz と 44 GHz 付近での吸収ピークを検出した。二酸化炭素に対しては 20 THz 付近に特徴的な 5 つの吸収ピークを検出している。測定周波数は分子の回転運動に相当するエネルギー帯であり、一酸化炭素分子の回転エネルギー準位による吸収であると考えられる。39.92 GHz に観測された吸収線もあるが、透過率の減少とともに吸収強度が急激に減少しており、分子の二量体もしくは三量体を形成しているのではないかと考えている。火災現場における粉塵によるテラヘルツ波の散乱を考慮する必要が小さい低周波数のテラヘルツ波による火災検知の原理を確認でき、測定に使用したセンシングシステムのダイナミックレンジは周波数によっては 5 桁を確認している。

さらに、光学距離が 360 mm の火災模擬チャンバーを使用して、火災発生ガスの充填部と計測器類の位置関係について、低ノイズで安定に測定可能な条件を検討することで、チャンパー外壁（アクリル板厚：20mm）でそれらを接触させる条件とした計測光学系を図 1 に示す。

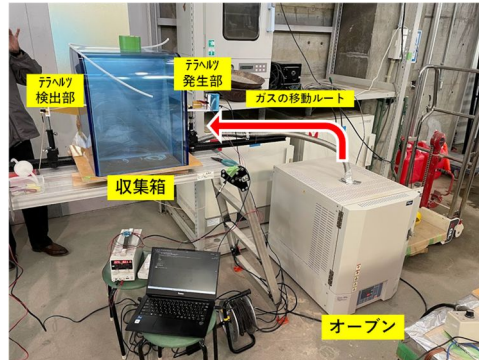


図 2 火災模擬チャンパーとテラヘルツ測定光学系の外観

測定手順としては、燃焼させる建築材料のサンプルをオープンで所定温度まで加熱し、ガスを発生させた。その後、ダクトを通してチャンパーにガスを導入し、対象とするガスに対する透過率を測定するプロセスとした。サンプル（図 2）はクリ材のほか、断熱材としてスタイロフォーム、壁紙（クロス材）、型枠用合板であるコンパネ板を選択し、燃焼温度は 300 ~ 800 °C とした。発生したガスの種類については現場での検知管検査だけでなく、回収したガスに対してガスクロマトグラフィー及びバイオンクロマトグラフィーにより分析した（表 1）。

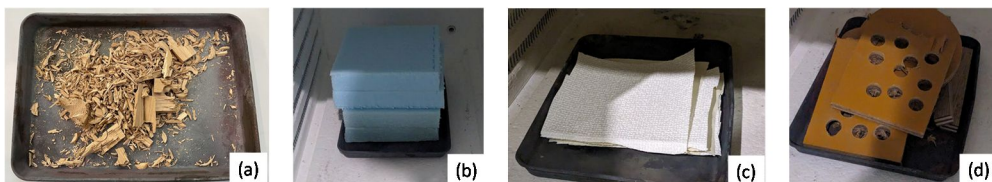


図 3 燃焼させた建築材料

(a)クリ材 (b)スタイロフォーム (c)壁紙（クロス材） (d)型枠用合板（コンパネ板）

表 1 検知管検査・ガスクロ・イオンクロによる発生ガスの分析結果

|        | 検知管 |        |        |        | ガスクロ |      |      |      | イオンクロ |      |      |      |
|--------|-----|--------|--------|--------|------|------|------|------|-------|------|------|------|
|        | クリ材 | スタイロ   | クロス材   | コンパネ   | クリ材  | スタイロ | クロス材 | コンパネ | クリ材   | スタイロ | クロス材 | コンパネ |
| 一酸化炭素  |     | 0.1%未満 | 0.05%  | 1.60%  | あり   | あり   | あり   | あり   |       |      |      |      |
| 二酸化炭素  |     | 0.10%  | 0.50%  | 3.0%超  | あり   | あり   | あり   | あり   |       |      |      |      |
| 窒素酸化物  |     | 0.5ppm | 1.0ppm | 3.5ppm |      |      |      |      |       |      |      | NO2  |
| 硫黄酸化物  |     |        |        |        |      |      |      |      |       |      | SO4  | SO4  |
| 塩化水素   |     |        |        |        |      |      |      |      |       |      |      |      |
| シアン化水素 |     |        |        | 5ppm超  |      |      |      | あり   |       |      |      |      |
| 窒素     |     |        |        |        | あり   | あり   | あり   | あり   |       |      |      |      |
| 酸素     |     |        |        |        | あり   | あり   | あり   | あり   |       |      |      |      |
| 水      |     |        |        |        | あり   | あり   | あり   | あり   |       |      |      |      |
| 炭化水素   |     |        |        |        | あり   | あり   | あり   | あり   |       |      |      |      |
| 塩素     |     |        |        |        |      |      |      |      | あり    | あり   | あり   | あり   |
| 臭素     |     |        |        |        |      |      |      |      | 未検出   | あり   | あり   | 未検出  |

リファレンスとした空気の透過強度と比較して、燃焼中に発生するガスに含まれる微粒子によるものだと想定される散乱がいくつかの周波数帯において確認された。発生するガスとして、コンパネ板からはシアン化水素ならびに一酸化炭素、スタイロフォームと壁紙からは臭素化合物の発生を確認している。透過特性はいずれもサンプルに特有であり、分子の大きさによる吸収ピークの周波数帯についても議論した。本測定は 180 秒の平均値として実施しているが、特定のガスによる吸収ピークの周波数に着目することでリアルタイムにガス成分を特定できるレベルであることを確認した。

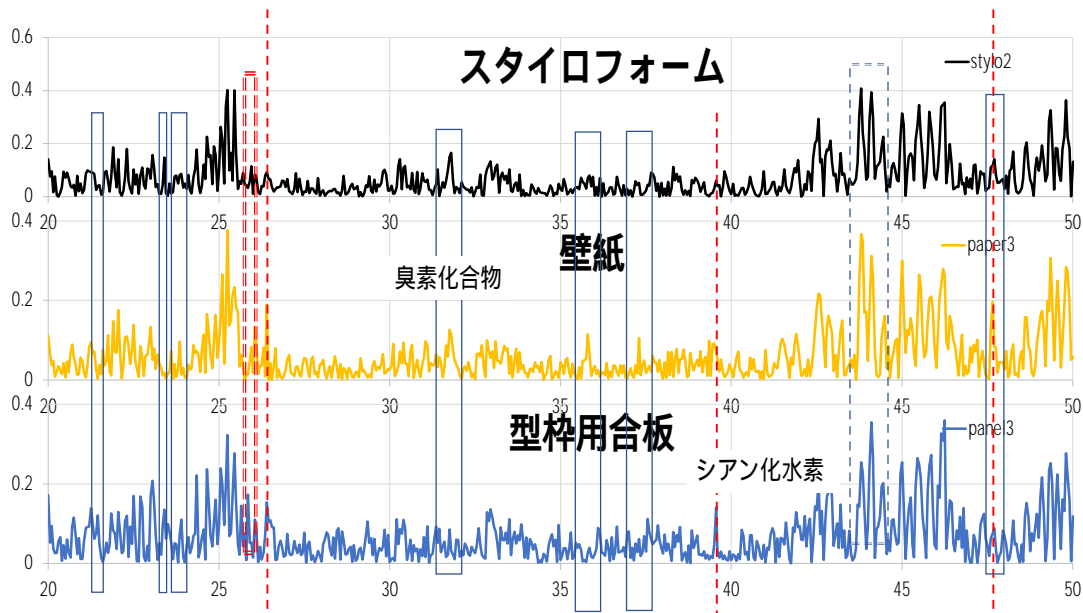


図 4 燃焼で発生したガスのテラヘルツスペクトル（横軸単位：GHz）

液体サンプルについてはグルコースならびに塩化ナトリウムの水溶液は濃度として 0.25 から 0.5 mol/L において測定した。次亜塩素酸ナトリウムは 12 % の原液を希釈して使用した。溶質が解離しない場合（グルコース）は反射率が減少（テラヘルツの吸収が大きい水の割合が減少）し、解離する場合（塩化ナトリウム）は反射率が増加（テラヘルツの吸収が大きい電荷の数が増加）する挙動を確認した。透過率は反射率と逆の挙動を示すので、溶媒に対して、溶質が解離しない場合（グルコース）は透過率が上昇し（水の割合が減少）、解離する場合（塩化ナトリウム）は透過率が減少（電荷の数が増加）する。次亜塩素酸ナトリウムは高濃度において透過率が下がる傾向を示した。

エチレングリコールおよびグリセロールの水溶液は厚さ 0.2 mm セルを用いて、室温環境下で 0.15 ~ 0.4 THz の周波数帯における透過測定を行い、テラヘルツスペクトルの濃度依存性を評価した。吸光度スペクトルの吸収ピークについてはピーク分離を行い、濃度変化によるピーク位置の変化を比較した結果、最も低周波に位置する 0.17 THz 付近のピークに関して、エチレングリコールとグリセロールのどちらのサンプルにおいても、濃度の上昇に伴いピーク位置が低周波方向へシフトする傾向を確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 3件）

|                                                                                                                                        |                          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| 1. 著者名<br>Nishiwaki Tomoya, Shimizu Koshi, Tanabe Tadao, Gardner Diane, Maddalena Riccardo                                             | 4. 巻<br>21               |
| 2. 論文標題<br>Terahertz (THz) Wave Imaging in Civil Engineering to Assess Self-Healing of Fiber-Reinforced Cementitious Composites (FRCC) | 5. 発行年<br>2023年          |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Advanced Concrete Technology                                                                                      | 6. 最初と最後の頁<br>58-75      |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3151/jact.21.58                                                                                         | 査読の有無<br>有               |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する             |
| 1. 著者名<br>Yu Jeongsoo, Liu Xiaoyue, Manago Gaku, Tanabe Tadao, Osanai Shiori, Okubo Kazuaki                                            | 4. 巻<br>7                |
| 2. 論文標題<br>New Terahertz Wave Sorting Technology to Improve Plastic Containers and Packaging Waste Recycling in Japan                  | 5. 発行年<br>2022年          |
| 3. 雑誌名<br>Recycling                                                                                                                    | 6. 最初と最後の頁<br>66-66      |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3390/recycling7050066                                                                                   | 査読の有無<br>有               |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する             |
| 1. 著者名<br>Tadao Tanabe, Junya Osaki, Makoto Miyajima, Kazuyuki Kitamura, Yutaka Oyama                                                  | 4. 巻<br>561              |
| 2. 論文標題<br>Raman and TEM characterization of 2D layered MoS2 crystals grown on non-metal surfaces by friction-induced synthesis        | 5. 発行年<br>2021年          |
| 3. 雑誌名<br>Applied Surface Science                                                                                                      | 6. 最初と最後の頁<br>150016 1-4 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.apsusc.2021.150016                                                                               | 査読の有無<br>有               |
| オープンアクセス<br>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<br>-                |
| 1. 著者名<br>田邊匡生                                                                                                                         | 4. 巻<br>585              |
| 2. 論文標題<br>テラヘルツ波を用いるプラスチック材料の識別                                                                                                       | 5. 発行年<br>2021年          |
| 3. 雑誌名<br>コンパーテック                                                                                                                      | 6. 最初と最後の頁<br>34-37      |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし                                                                                                         | 査読の有無<br>無               |
| オープンアクセス<br>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<br>-                |

|                                                                                                                     |                          |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| 1. 著者名<br>Chao Tang, Yohei Sato, Katsuya Watanabe, Tadao Tanabe, Yutaka Oyama                                       | 4. 巻<br>13               |
| 2. 論文標題<br>Selective crystal growth of indium selenide compounds from saturated solutions grown in a selenium vapor | 5. 発行年<br>2022年          |
| 3. 雑誌名<br>Results in Materials                                                                                      | 6. 最初と最後の頁<br>100253 1-7 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.rinma.2022.100253                                                             | 査読の有無<br>有               |
| オープンアクセス<br>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<br>-                |

|                                        |                    |
|----------------------------------------|--------------------|
| 1. 著者名<br>安齋正博、岩崎宗将、佐藤茜音、林匠、田邊匡生       | 4. 巻<br>12         |
| 2. 論文標題<br>3Dプリンターによる樹脂型作製と問題点の実験的検証   | 5. 発行年<br>2022年    |
| 3. 雑誌名<br>機械と工具                        | 6. 最初と最後の頁<br>8-15 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし         | 査読の有無<br>無         |
| オープンアクセス<br>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<br>-          |

|                                                                                                                                 |                           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| 1. 著者名<br>Yohei Sato, Mayu Nakajima, Chao Tang, Katsuya Watanabe, Tadao Tanabe and Yutaka Oyama                                 | 4. 巻<br>28                |
| 2. 論文標題<br>Phase matching condition for THz wave generation via difference frequency generation using InxGa1-xSe mixed crystals | 5. 発行年<br>2020年           |
| 3. 雑誌名<br>Optics Express                                                                                                        | 6. 最初と最後の頁<br>20888-20897 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1364/OE.393948                                                                                   | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>-                 |

|                                                                                                 |                          |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| 1. 著者名<br>Shutaro Karube, Daichi Sugawara, Chao Tang, Tadao Tanabe, Yutaka Oyama, Junsaku Nitta | 4. 巻<br>516              |
| 2. 論文標題<br>Enhancement of spin-charge current interconversion by oxidation of rhenium           | 5. 発行年<br>2020年          |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Magnetism and Magnetic Materials                                           | 6. 最初と最後の頁<br>167298 1-6 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.jmmm.2020.167298                                          | 査読の有無<br>無               |
| オープンアクセス<br>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<br>-                |

|                                                                                                                                                          |                         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Yohei Sato, Chao Tang, Katsuya Watanabe, Mayu Nakajima, Takuya Yamamoto, Nobuki Tezuka, Tadao Tanabe, Yutaka Oyama                             | 4. 巻<br>50              |
| 2. 論文標題<br>Optical and electrical properties of In <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> Se mixed crystal grown from indium flux by the traveling heater method | 5. 発行年<br>2021年         |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Electronic Materials                                                                                                                | 6. 最初と最後の頁<br>2649-2655 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1007/s11664-020-08689-4                                                                                                   | 査読の有無<br>無              |
| オープンアクセス<br>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<br>-               |

〔学会発表〕 計4件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件)

|                             |
|-----------------------------|
| 1. 発表者名<br>田邊匡生             |
| 2. 発表標題<br>紫外からテラヘルツまでの 光制御 |
| 3. 学会等名<br>日本金属学会 (招待講演)    |
| 4. 発表年<br>2022年 ~ 2023年     |

|                                                                    |
|--------------------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>田邊匡生                                                    |
| 2. 発表標題<br>持続可能な社会実現における 光科学の活用                                    |
| 3. 学会等名<br>Practicing Japanese Studies in Poznan and Krakow (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2022年                                                    |

|                                                      |
|------------------------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>清水耕史、西脇智哉、Riccardo Maddalena、田邊匡生         |
| 2. 発表標題<br>テラヘルツ透過計測および吸水試験による繊維補強セメント系複合材料の自己治癒性能評価 |
| 3. 学会等名<br>コンクリート工学年次論文集                             |
| 4. 発表年<br>2020年                                      |

|                                                 |
|-------------------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>田邊匡生                                 |
| 2. 発表標題<br>深紫外からミリ波をつなぐ超広帯域半導体光源とそのアプリケーションデザイン |
| 3. 学会等名<br>日本金属学会第167回講演大会（招待講演）                |
| 4. 発表年<br>2020年                                 |

〔図書〕 計2件

|                                                                                                                                                                |                 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| 1. 著者名<br>Jeongsoo Yu, Shiori Osanai, Kosuke Toshiki, Xiaoyue Liu, Tadao Tanabe, Gaku Manago, Shuoyao Wang, Kevin Roy B. Serrona, Kazuaki Okubo, and Ryo Ikeda | 4. 発行年<br>2022年 |
| 2. 出版社<br>CRC Press                                                                                                                                            | 5. 総ページ数<br>18  |
| 3. 書名<br>Global Blue Economy -Analysis, Developments, and Challenges-                                                                                          |                 |

|                                             |                 |
|---------------------------------------------|-----------------|
| 1. 著者名<br>田邊匡生                              | 4. 発行年<br>2021年 |
| 2. 出版社<br>日本化学会カレントレビュー                     | 5. 総ページ数<br>8   |
| 3. 書名<br>テラヘルツ分光応用：インフラ非破壊検査からプラスチックリサイクルまで |                 |

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                         | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                 | 備考 |
|-------|---------------------------------------------------|---------------------------------------|----|
| 研究分担者 | 西脇 智哉<br><br>(Nishiwaki Tomoya)<br><br>(60400529) | 東北大学・工学研究科・准教授<br><br><br><br>(11301) |    |



6. 研究組織（つづき）

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)      | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|-------|--------------------------------|-----------------------|----|
| 研究協力者 | 渡邊 武<br><br>(Watanabe Takeshi) |                       |    |

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 |
|---------|---------|
|         |         |