

令和 6 年 5 月 27 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01392

研究課題名(和文) 高感度テラヘルツ  $\mu$ TASの開発とナノバイオ分析への応用

研究課題名(英文) Development of highly sensitive terahertz micro-TAS and its applications to the nanobioanalysis

研究代表者

芹田 和則 (Serita, Kazunori)

大阪大学・経営企画オフィス・准教授

研究者番号：00748014

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：テラヘルツ(THz)バイオ分析のためのマイクロタス(THz- $\mu$ TAS)チップを開発した。本チップの基本構造は、メタアトムアレイ、マイクロ流路、THz波点光源で構成され、共振応答を利用してセンシングを行う。センサー部は毛髪断面約5個分で集積センサーとしても利用可能である。また、電気泳動の分離分析技術を初めてTHz計測に導入し、混合溶液の微量THz計測を可能にした。水中のミネラル析出、ヒト血液中のグルコース濃度の経時変化、1本鎖&2本鎖DNAの評価など様々なバイオ試料の微量での評価が可能であることを示した。本研究による成果が、今後のTHzバイオセンシングの普及に貢献することを期待している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

テラヘルツ(THz)バイオセンシングでは生体高分子の機能発現や3次元構造変化に起因する重要な情報を、非侵襲且つ非標識で計測し、抽出することができる。しかし、THz波の回折限界と水への強い吸収の影響で、コンパクトで高感度なバイオチップ開発が難しかった。本研究ではこれら問題を同時に解決し、多機能なマイクロタス(THz microTAS)としての新しいTHzセンサーとセンシング手法を提案・開発した。本成果により、様々なバイオサンプルのTHz領域における振る舞いを観測できるようになり、実際の疾患や生命機能発現などとの関連を詳細に調べていくことで、医療分野や分析化学分野の発展に貢献できると期待している。

研究成果の概要(英文)：We have developed a micro total analysis system for terahertz (THz) bioanalysis. The chip, THz micro-TAS, consists of a few arrays of meta-atoms, a microfluidic channel, and THz point sources, and performs sensing using resonance response. The sensor section, approximately the size of five hair cross-sections, can also be used as an integrated sensor. Furthermore, we introduced electrophoretic separation analysis technology to THz measurement for the first time, enabling the THz measurement of minute amounts of mixed solutions. The THz micro-TAS allows for the evaluation of various bio-samples in small quantities, such as mineral precipitation in water, time-dependent changes in blood glucose level in human blood, and the assessment of single-stranded and double-stranded DNA. We hope that the results of this research will contribute to the spread of THz biosensing in the future.

研究分野：テラヘルツ

キーワード：テラヘルツ 非線形光学 メタマテリアル 微量分析 DNA 血液 マイクロタス

## 様式 C-19、F-19-1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、生体組織検査を微量な体液中で低侵襲的に行うリキッドバイオプシーが注目されており、様々なバイオチップの開発が行われている。特に1つのチップ上で様々な分析が可能なマイクロタス開発はリキッドバイオプシーに欠かせない技術と成り得るため、急速に開発が進んでいる<sup>[1,2]</sup>。一方で、テラヘルツ波は波長  $30\ \mu\text{m}\sim 3\ \text{mm}$ 、周波数  $0.1\ \text{THz}\sim 10\ \text{THz}$  の電磁波であり、その低エネルギー ( $1\ \text{THz} \simeq 4\ \text{meV}$ ) の素励起モードは、生体高分子の機能発現や3次元構造変化と深く関係していることから、分子レベルでの生体反応ダイナミクスを明らかにする上で重要な情報を与える<sup>[3]</sup>。また、非侵襲且つ非標識で測定・分析できる点もテラヘルツバイオセンシングの大きな強みである。テラヘルツ帯においてもバイオチップやマイクロタスの開発が切望されるが、テラヘルツ波の回折限界によりチップのコンパクト化が難しく、また水への強い吸収の影響で低感度となることから計測が難しく、チップ開発とその普及が進んでいない。

この問題解決に向けて、我々は、非線形効果を利用した光-テラヘルツ波変換に注目した。波長変換の起点では、光とテラヘルツ波の2つの波長成分が混在する。そのため、ここで発生するテラヘルツ波のスポットサイズは光の波長で決定され、且つ高輝度なテラヘルツ波点光源として機能する<sup>[4]</sup>。これを利用することで、コンパクトで高感度なテラヘルツバイオセンシングが可能なマイクロタス開発ができるという着想に至った。

### 2. 研究の目的

テラヘルツバイオ分析のための高感度テラヘルツマイクロタス (THz- $\mu$ TAS) チップを開発し、微量での生体関連試料のテラヘルツ分光分析を通して、新たな生化学分析基盤技術の創製とバイオメディカル応用にご貢献することを目的とする。テラヘルツバイオセンシングは、生体高分子の機能発現に起因した重要な情報を非侵襲かつ非標識で取得できる技術として注目されているが、生理環境下 (溶液中) でのテラヘルツ信号の減衰と回折限界による低分解能が計測の大きな障害となっている。本 THz- $\mu$ TAS では、非線形結晶中の2次の非線形効果で生成される極微小・高輝度 THz 点光源と試料とを近接相互作用させることでこの問題を克服する。

### 3. 研究の方法

図 1(a)に THz- $\mu$ TAS チップの基本構造を示す。本チップは、非線形光学結晶 GaAs 製で、ここで生成されるテラヘルツ波点光源と、その表面に作製したマイクロ流路、および数アレイのメタアトムから構成される。メタアトムはメタマテリアルを構成する基本素子であり、サンプルが付着していない場合と付着した場合との共振周波数のシフト量を調べることでサンプルの有無や濃度変化などのセンシングが可能である。計測では、まず、マイクロ流路内を溶液で満たし、テラヘルツ波点光源と近接相互作用させ、その透過したテラヘルツ波または反射したテラヘルツ波の時間波形を取得する。図 1 では透過測定を示している。血液など粘性や経時変化の大きいサンプルに対しては反射測定をとることで安定した計測が可能となる。得られた時間波形から透過率/反射率スペクトルを算出し、サンプル投入前後での共振周波数のシフト量を算出する。一方、混合溶液など夾雑物中のサンプルの計測では電気泳動による分離分析技術をはじめてテラヘルツ分析に導入した (図 1(c))。混合溶液に高電圧をかけて電界印加すると、溶液中の分子量に応じて計測点 (テラヘルツ波点光源) に到達する時間が異なる。テラヘルツ波の強度をモニターしておくことで、エレクトロフェログラムにおいて各分子の到達がピークとなって出現する。

本研究では、まずテラヘルツ波点光源で励起したメタアトムの共振応答特性について検討を行い、コンパクト且つ高感度な THz- $\mu$ TAS チップのベースとなるプロトタイプチップを開発した。これを利用して、ミネラル分、糖、アルコール、血液、DNA など様々な溶液の微量センシングを行い、チップの有用性について検証した。

### 4. 研究成果

#### (1) メタアトムの共振応答特性

テラヘルツ波点光源で1つのメタアトムを励起すると、その共振応答は励起した周辺のメタアトムの配列アレイ数や配列周期に依存する。図 1 のチップで利用したメタアトム (I 型構造<sup>[5]</sup>)

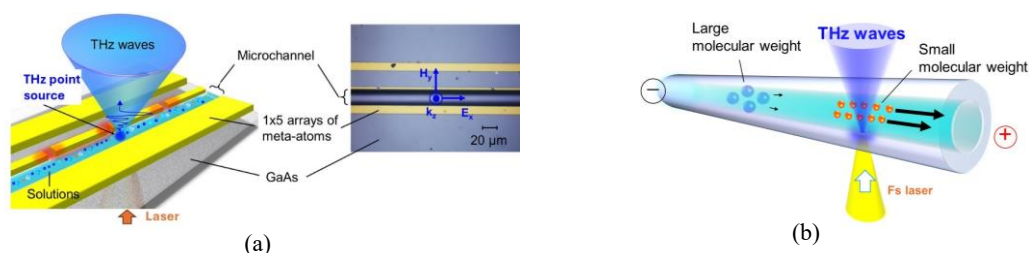


図 1. (a) テラヘルツマイクロタス (THz- $\mu$ TAS) のイメージ (b) 混合溶液分離技術とテラヘルツ波点光源によるセンシングのイメージ

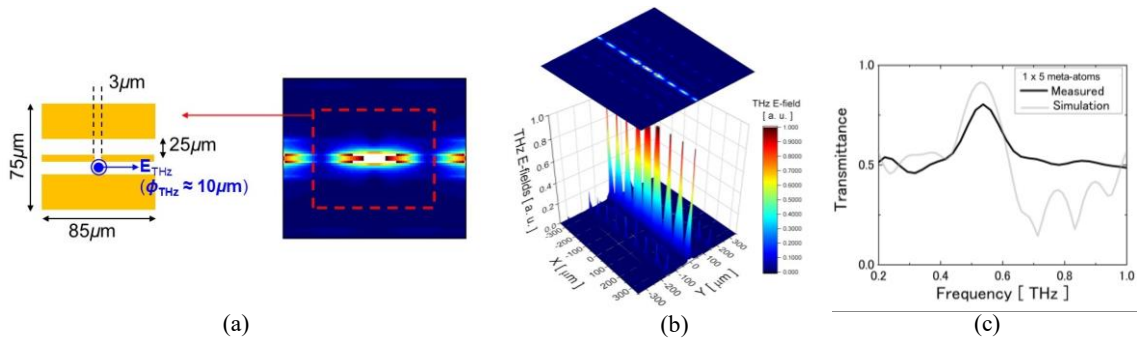


図 2. (a)メタアトム構造とギャップ付近およびのテラヘルツ電界分布  
(b)1×5アレイセンサーのテラヘルツ電界分布と(c)その共振特性

の場合、中央のマイクロギャップと平行な偏光方向のテラヘルツ波で照射すると、ギャップ間において顕著な電界増強が起こり、共振応答が発現することを確認した (図 2(a))。また、この共振応答に寄与するメタアトムはテラヘルツ波の偏光方向に沿ったメタアトムのみであることが分かった (図 2(b))。1×5アレイ (センサーサイズ： $0.057 \lambda_{\text{THz}}^2$ ) のメタセンサーの共振特性を図 2(c)に示す。0.55 THz において共振ピークを持つことが分かる。これまでのメタアトムの配列では四方に隣接するメタアトムが共振応答に不可欠であったため、この構造を用いると大幅なコンパクト化が期待でき、また少ないメタアトム数で顕著な共振応答を得られることが分かった。

### (2) 微量センシング

図 3(a)は、グルコース水溶液に対して行い、グルコース濃度 (mg/L) と共振周波数のシフト量の関係をプロットしたものである。流路内がカラの時、0.55 THz 付近に共振ピークがあることが分かる。次に、流路内に水 (0 mg/L) をフローさせるとその共振ピークは 0.45 THz 付近へシフトすることが分かる。流路内を流れるサンプル量は体積換算でおよそ 85 ピコリットルであることから、本チップがピコリットルオーダーの微量溶液を高感度に検出できていることが分かる。グルコース濃度を大きくしていくと共振周波数が高周波へとシフトしていく。その差異を 1mg/L の感度で識別できている。グルコース分子量と流路内をフローするサンプルの体積から見積もったグルコースの検出量は 472 アトモルであり、微量で高感度なセンシングが行えていることを確認した。これを応用すると、血中グルコース濃度の変化を極低侵襲で検出できる。図 3(b)は反射型のチップを利用して、ヒト血液をサンプルとして、食前食後の血中グルコース濃度の経時変化を共振周波数のシフト量を計測しプロットしたものである。食後、血中血糖値が急激に上昇し、時間経過とともに減少する傾向をセンシングできている。各計測時にグルコメータで測った結果と比較すると、その傾向が一致することを確認した。この他、ミネラルウォーター中のミネラル分の析出量の評価や、1 本鎖 DNA と 2 本鎖 DNA のラベルフリー評価などを行い、テラヘルツ微量センシング用のチップとしての動作を確認した。

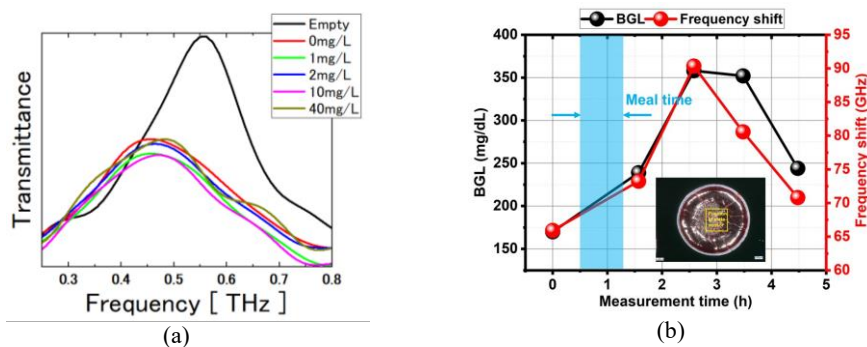


図 3. (a)グルコース水溶液および(b)食前食後の血中グルコース濃度変化のセンシング例

### (3) 混合溶液中の溶質の微量センシング

図 4 は、酢酸 ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ 、分子量 60.05) とプロピオン酸 ( $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH}$ 、分子量 74.08) の混合溶液のテラヘルツエレクトロフェログラムである。これより 2つの顕著なピークが観測できている。これは混合溶液中に含まれる溶質の分子量の違いにより、これらがテラヘルツ波点光源までに到達する時間に差異が生じるためである。市販の電気伝導度キャピラリー電気泳動システムで同じサンプルを測定したところ、同様のエレクトロフェログラムを取得することができたことから、混合溶液中の酢酸とプロピオン酸を選択的に検出できていることが分かった。また、これらより求めた移動度もテラヘルツ計測と電気伝導度システムでほぼ同じ値であること

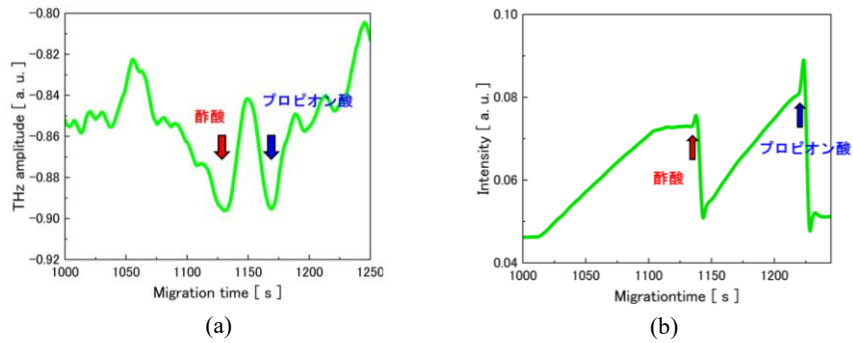


図 4. 混合溶液の計測例. (a)テラヘルツ計測 (b)電気伝導度システム計測

を確認した。したがって、本チップは溶液分離技術と組み合わせることが可能であり、混合溶液においても事前の処理を行うことなくラベルフリー且つ選択的な溶質情報の検出と分析ができることが分かった。

#### (4) 研究成果のまとめ

テラヘルツ波点光源を利用した THz- $\mu$ TAS チップの開発とその応用に関する研究を行った。チップは、わずか5個のメタアトムを利用したコンパクトな設計ながら、ピコリットルオーダーのサンプル量でアトモルオーダーの検出感度を誇る高感度な性能に仕上げた。これは、これまで我々のグループが開発してきたテラヘルツバイオチップのチャンピオンデータをさらに1桁上回る性能である。本チップを利用することで、実際のヒト血液を使った血中グルコース濃度の評価やDNAの評価などに応用できることを示した。コンパクト化が可能で様々な周波数に合わせたセンサーを1つのチップ上に置くことができることから多次元分析にも対応している。また、電気泳動の分離分析技術を導入した新しいテラヘルツバイオ分析手法を提案した。これにより、これまでテラヘルツ計測が難しかった混合溶液中の溶質情報の選択的な検出が可能であることを示した。本チップは、これまでのテラヘルツバイオチップ開発において課題とされてきた空間分解能と感度の問題を同時に解決することができる。また1つのチップ上に様々なセンサーや分析領域を設計できることから、新しいバイオチップとして有効利用できると考えている。本チップにより、これまで観測できなかった様々なバイオサンプルのテラヘルツ領域における興味深い振る舞いを観測できるようになり、続々とデータが取れ始めている。今後、これらテラヘルツデータが実際の疾患や生命機能発現にどのように関連しているか詳細に調べていくことで、テラヘルツバイオセンシング技術が飛躍的に普及していくと考えている。

#### <引用文献>

- ① 東レリサーチセンター調査研究部, 「マイクロ流路」, 黎明社 (2014)
- ② 落合孝広監修, 「リキッドバイオプシー—体液中腫瘍マーカーの検出・解析技術—」, シーエムシー出版 (2017)
- ③ J.-H. Son ed., “Terahertz Biomedical Science and Technology,” CRC Press (2014).
- ④ K. Serita et al., *Opt. Express* **20**, 12959 (2012).
- ⑤ M. Gupta, and R. Singh, *Adv. Opt. Mater.* **8**, 1902025 (2020).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Kitagishi Keiko, Kawai Takayuki, Tonouchi Masayoshi, Serita Kazunori	4. 巻 14
2. 論文標題 Terahertz-capillary electrophoresis (THz-CE) for direct detection of separated substances in solutions	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Optical Materials Express	6. 最初と最後の頁 472 ~ 482
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OME.500594	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 Kitagishi Keiko, Kawai Takayuki, Tonouchi Masayoshi, Serita Kazunori	4. 巻 1710
2. 論文標題 An innovative detection technique for capillary electrophoresis: Localized terahertz emission-time domain spectroscopy	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Chromatography A	6. 最初と最後の頁 464384
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.chroma.2023.464384	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 芹田和則	4. 巻 42
2. 論文標題 走査テラヘルツ波点光源顕微鏡によるがん病理診断	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 OPTORONICS	6. 最初と最後の頁 101 ~ 106
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 -

1. 著者名 芹田和則	4. 巻 6
2. 論文標題 高空間分解能テラヘルツ顕微鏡の開発 ~ テラヘルツ領域での細胞観察への1歩 ~	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Precision Medicine	6. 最初と最後の頁 74 ~ 78
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 -



1. 著者名 芹田和則	4. 巻 18
2. 論文標題 テラヘルツバイオケミカルセンサと微量センシング	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 オプトニューズ	6. 最初と最後の頁 18-22
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 -

1. 著者名 Serita Kazunori, Kobatake Satoshi, Tonouchi Masayoshi	4. 巻 4
2. 論文標題 I-design terahertz microfluidic chip for attomole-level sensing	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Photonics	6. 最初と最後の頁 034005 ~ 034005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2515-7647/ac691d	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 芹田和則, 斗内政吉	4. 巻 60
2. 論文標題 テラヘルツ点光源技術が拓くテラヘルツバイオフォトリクスの新展開	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 光技術コンタクト誌	6. 最初と最後の頁 31-38
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11370/isj.61.600	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 -

1. 著者名 Mannan Abdul, Inoue Ryotaro, Murakami Fumikazu, Serita Kazunori, Murakami Hironaru, Tonouchi Masayoshi	4. 巻 11
2. 論文標題 A better understanding of terahertz emission from semiconductor surfaces with a phased-array effect	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 125021 ~ 125021
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0077054	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 -

〔学会発表〕 計25件（うち招待講演 11件 / うち国際学会 17件）

1. 発表者名 L. Zheng, M. Tonouchi, K. Serita
2. 発表標題 Reflective properties of a THz meta-sensor and its bio-sensing application
3. 学会等名 The 6th International Symposium on Microwave/Terahertz Science and Applications (MTSA 2024) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 L. Zheng, M. Tonouchi, K. Serita
2. 発表標題 A Terahertz Reflected Meta-Sensor For Blood Glucose Level Measurements
3. 学会等名 The 10th International Conference on Optical Terahertz Science and Technology (OTST 2024) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 K. Serita, M. Tonouchi
2. 発表標題 Design of a Meta-Atom for Ultrasensitive Terahertz Microfluidic Chips
3. 学会等名 URSI GASS 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Serita, L. Zheng, K. Hara, M. Tonouchi
2. 発表標題 Meta-Atom design for a Highly-Sensitive Liquid Sensor
3. 学会等名 13th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META 2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1 . 発表者名 K. Serita
2 . 発表標題 Biosensing with Point Terahertz Sources
3 . 学会等名 11th International Conference on Materials for Advanced Technologies (ICMAT 2023) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 [L. Zheng, K. Hara, M. Tonouchi, K. Serita
2 . 発表標題 Evaluation of Reflective Characteristics of Meta-atoms Employing Point Terahertz Sources and Its Application
3 . 学会等名 The 84th JSAP Autumn Meeting (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 K. Kitagishi, T. Kawai, M. Tonouchi, K. Serita
2 . 発表標題 Terahertz-capillary electrophoresis (THz-CE) for direct detection of separated substances in solutions
3 . 学会等名 48th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2023) (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 L. Zheng, K. Hara, M. Tonouchi, K. Serita
2 . 発表標題 Evaluation of Reflective Properties of Meta-atoms using Point Terahertz Sources and Its Application in Microfluidics
3 . 学会等名 48th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2023) (国際学会)
4 . 発表年 2023年



1. 発表者名 L. Zheng, K. Hara, M. Tonouchi, K. Serita
2. 発表標題 The Assessment of Reflective Characteristics of Meta-atoms Exploiting Point Terahertz Sources and Its Application in Microfluidics
3. 学会等名 The TeraTech 2023 International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 芹田和則
2. 発表標題 テラヘルツ波点光源によるバイオイメージング
3. 学会等名 A Series meetings on Advanced Key Engineering (SAKE2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 北岸恵子, 斗内政吉, 芹田和則
2. 発表標題 テラヘルツ時間領域分光法による脂肪酸の物性評価
3. 学会等名 日本生物高分子学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Serita
2. 発表標題 Scanning Point Terahertz Source Microscope for Biological Applications
3. 学会等名 10th International workshop on terahertz technology and applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Tonouchi, K. Serita
2. 発表標題 Sensitivity Enhancement of Terahertz Microfluidic Chip using Natural Evolutional Resonance in a Few Arrays of Meta-atoms
3. 学会等名 Photonics West 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Serita
2. 発表標題 New development in THz biophotonics pioneered by THz point light sources
3. 学会等名 International Workshop on Terahertz Nanoscience (TeraNano 2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Serita
2. 発表標題 Terahertz Microfluidics For Attomole- And Picoliter-level Sensing
3. 学会等名 47th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 北岸恵子, 川井隆之, 斗内政吉, 芹田和則
2. 発表標題 テラヘルツ分光によるキャピラリー電気泳動オンライン検出: 低分子有機酸の分離と高感度化の試み
3. 学会等名 日本生物高分子学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 芹田和則
2. 発表標題 走査型テラヘルツ波点光源顕微鏡によるバイオイメージング・センシング技術
3. 学会等名 レーザー学会 学術講演会第42回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 芹田和則
2. 発表標題 微量テラヘルツバイオセンシング技術が切り拓く新しいバイオメディカル応用
3. 学会等名 マイクロウェーブ展2021（MWE 2021 - 2021 Microwave Workshops and Exhibition -）（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Tonouchi, and K. Serita
2. 発表標題 Meta-atoms for Terahertz Microfluidic Chips
3. 学会等名 The 2021 Frontiers in Optics / Laser Science Conference (the FiO LS 2021)（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 芹田和則
2. 発表標題 走査型テラヘルツ波点光源顕微鏡の開発と非侵襲・非標識がん診断応用への挑戦
3. 学会等名 光・量子ビーム科学合同シンポジウム2021（OPT02021）（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 F. Murakami, Z. Li, K. Serita, H. Murakami, and M. Tonouchi
2. 発表標題 High resolution laser terahertz emission microscopy using near-field light excitation
3. 学会等名 5th Symposium for the JSPS Core-to-Core Program Global Nanophotonics 2022 (GNP2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Serita, S. Kobatake and M. Tonouchi
2. 発表標題 Optimization of metasurface design in terahertz microfluidic chips
3. 学会等名 The 82th Autumn Meeting, JSAP-OSA Joint Symposia 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 A. Mannan, F. Murakami, K. Serita, H. Murakami, M. Tonouchi
2. 発表標題 Visualization of phase array effect in a terahertz radiation pattern from the semiconductor surface in free space
3. 学会等名 The 82th Autumn Meeting, JSAP-OSA Joint Symposia 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 李 治賢, 芹田和則, 村上博成, 斗内政吉
2. 発表標題 ナノ開口付きカンチレバーチップと近接場THz検出器によるレーザーテラヘルツ放射顕微鏡の開発
3. 学会等名 The 82th Autumn Meeting, JSAP-OSA Joint Symposia 2021
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小島敏嗣, 村上博成, 斗内政吉, 芹田和則
2. 発表標題 I-design型メタマテリアルを用いた高感度THzマイクロ流路チップの開発と微量分析
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計4件

1. 著者名 K. Serita, G. Chen, M. Tonouchi (edited by Giancarlo Righini and Luigi Sirleto)	4. 発行年 2023年
2. 出版社 Elsevier	5. 総ページ数 562
3. 書名 “Nonlinear Terahertz Photonics,” Chapter 5, pp.113-148, in “Advances in Nonlinear Photonics ”	

1. 著者名 芹田和則、他執筆者、技術情報協会	4. 発行年 2024年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 -
3. 書名 テラヘルツ波の発生、検出、制御技術と応用展開（第7章，テラヘルツ波点光源を応用したテラヘルツパイオチップの開発）	

1. 著者名 斗内政吉監修	4. 発行年 2022年
2. 出版社 シーエムシー出版	5. 総ページ数 317
3. 書名 テラヘルツ波産業創成の課題と展望（第6章，第4節，走査型テラヘルツ点光源による非染色早期がん検査システムとマイクロ流路チップ）	

1. 著者名 芹田和則、他執筆者：54名、技術情報協会	4. 発行年 2022年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 508
3. 書名 メタマテリアルの設計、作製と新材料、デバイス開発への応用（第4章，第7節，テラヘルツマイクロ流路チップのメタマテリアル構造と微量センシングへの応用）	

〔産業財産権〕

〔その他〕

従来比1万倍！超高感度でコンパクトな テラヘルツバイオケミカルセンサーチップを開発  
[https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2022/20220628\\_2](https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2022/20220628_2)

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
---------	---------