

# メタサーフェスによる平面アンテナとテラヘルツ光源の融合に向けて

鈴木 健仁<sup>†</sup>

<sup>†</sup>東京農工大学 工学研究院 〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16 5 号館 405 室

E-mail: [takehito@go.tuat.ac.jp](mailto:takehito@go.tuat.ac.jp)

**あらまし** 本チュートリアル講演の原稿では、著者がこれまで進めてきたメタサーフェスによる平面アンテナとテラヘルツ光源の融合に向けた研究について解説する。著者は、15 年前にミリ波帯からテラヘルツ波帯の研究に進出した。研究の過程で、メタサーフェスにより比誘電率と比透磁率の両方を同値に制御した独自の高屈折率・低反射材料を、0.3、3、50 THz 帯で偶然に生み出した。この独自材料を、集光、コリメート、光渦、エアリービームなどを生成する光学素子に応用している。コリメート機能を有するメタレンズアンテナについては、6G 通信のキャリア周波数の候補の 0.3 THz で発振する共鳴トンネルダイオードとの融合の研究を進めている。独自材料を様々な光源へ搭載することを目指して、6G 通信の候補の 0.3 THz 帯、さらに 7G 通信の可能性のある 0.85 THz 帯での標準的な実験法の構築も進めている。さらに熱輻射領域での高屈折率・低反射材料の応用の研究も進めている。

**キーワード** メタサーフェス、高屈折率・低反射材料、集光、コリメート、光渦、エアリービーム、熱輻射

## Integration of Metasurface-Based Planar Antennas with Terahertz Sources

Takehito SUZUKI<sup>†</sup>

<sup>†</sup>Institute of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology  
#405, Building 5, 2-24-16 Naka-cho, Koganei-shi, Tokyo, 184-8588 Japan

E-mail: [takehito@go.tuat.ac.jp](mailto:takehito@go.tuat.ac.jp)

**Abstract** The manuscript of this tutorial lecture explains my research on the integration of metasurface-based planar antennas with terahertz sources. The author began conducting research in the terahertz waveband 15 years ago, following earlier work in the millimeter waveband. We have developed original materials with a high refractive index and low reflection in the 0.3, 3, and 50-THz bands, in which metasurfaces are utilized to control both the relative permittivity and relative permeability with similar values. These original materials have been applied to optical elements that generate various beams, including focusing, collimating, optical vortex, and Airy beams. A collimating metalens antenna has been integrated with a resonant tunneling diode oscillating at 0.3 THz, the candidate carrier frequency for 6G communications. Standard experimental techniques of the original collimating metalens antennas have been developed to be integrated with various terahertz sources in the 0.3-THz band for 6G communications and the 0.85-THz band for the possibility of 7G communications. Further, a material with a high refractive index and low reflectance has been applied in the thermal radiation region.

**Keywords** Metasurface, Material with a high refractive index and low reflection, Focusing, Collimating, Optical vortex, Airy beam, Thermal radiation

### 1. まえがき

本チュートリアル講演の原稿では、主に著者の 15 年間のテラヘルツ分野の研究の全体像[1]-[4]をまとめている。[1]-[4]ではそれぞれ、ジャーナル論文[1]、ジャーナル論文化前の学会原稿[2]、発明に至る流れ[3]、テラヘルツ分野に飛び込んだ流れ[4]について横櫛の形で解説している。本原稿ではこれを縦櫛の形で解説するとともに、著者の最新の参考文献についても追加して解説している。本原稿を読むことで、研究の全体像の流れをつかむことができるようになることを意識している。また、本原稿を読んだ学部、修士、社会人の

方々が、研究とは夢と冒険の旅のようであると感じ、研究者や博士号の取得を目指すきっかけとなれば幸いである。独自の研究分野を開拓することを常に意識しながら、様々な出会いやめぐりあわせも通して、研究を推進させていただいてきた。20、30 年後の日本、そして世界に何かを残すことができれば幸いである。本原稿は 2019 年度より開講し始めた東京農工大学の博士後期課程向けの大学院講義[5]を要約した内容となっており、専門外の研究者や大学院生が本内容を把握して、研究に役立てられることを意識している。なお、本チュートリアル講演の発表では、ジャーナル論

文とジャーナル論文文化前の学会原稿の内容について発表し、発明に至る流れとテラヘルツ分野に飛び込んだ流れは省く。

## 2. ミリ波帯での研究

著者は学部・修士・博士課程時代、東京工業大学でご指導をいただき、ミリ波帯の研究を行った。具体的には、ミリ波帯の平面構造の導波管スロットアレーアンテナについて、スペクトル領域法による解析法の構築に取り組んだ[6],[7]。その後、ミリ波帯の平面構造の導波管スロットアレーアンテナについて、繰り返し補正が不要な設計法を見出した[8]。「独自の発見[8]」をする喜びをご指導いただいたことは忘れ得ぬ経験となった。また、博士課程時代の2006年4月から2007年3月の1年間、早稲田大学の大隈塾ネクストリーダープログラムに通う機会に恵まれ、ハーバード・ビジネス・レビューのイノベーションのジレンマの論文[9]に触れる機会があった。その中で、“破壊的イノベーション[9]”について見聞きする経験を得た。2023年4月から2030年3月で進めているJST創発的支援事業は、破壊的イノベーションにつながるシーズの創出を目指す事業であり、10年以上後につながる事となった[10]。

## 3. ミリ波帯からテラヘルツ波帯への進出

博士号取得後、茨城大学に着任をさせていただき、2010年に開始された文部科学省新学術領域研究電磁メタマテリアルの公募研究に2011年に採択していただいた[11]。これが著者が博士号取得後に最初に獲得できた科研費の1つであった。著者が初めてメタマテリアルという言葉聞いたのは2005年春先の修士課程時のある企業での就職説明の際であった。その後、博士課程に進学することを決め、博士課程時に参加した国際会議やUCLAへの見学の際にメタマテリアルという言葉に触れる機会もあったが、その後に本格的に研究に取り組むことになるとは思ってもいなかった。

博士号取得後、テラヘルツ波帯のメタマテリアルについて研究を進めるにあたり、新学術領域研究で一緒にさせていただいた研究者の方々のもとに勉強のために見学にうかがった際、部屋や机が読みあさった論文の山々で埋め尽くされているのを見て、見よう見まねで多くの論文を読みあさった。また、日立市の日製の方々が築き上げてきた文化でもある小平浪平氏の“開拓者の心意気[12]”にも大きく感化された。2章と3章を通して、「何か独自の発見はできないものか？」が研究の原点となった。一方で、博士号取得後からしばらくは独自の研究を目指してもがくこととなったが、破壊的イノベーションの論文を読んだこともあり、失敗

を“経験の学校[9]”として楽しむことができた。また、この際の失敗の経験が、後々にJST さきがけ(熱制御)に採択していただき、熱輻射の研究に取り組む際に大いに役立った[13]。

次章以降より、メタサーフェスによる平面アンテナとテラヘルツ光源の融合に向けた研究の流れを解説していく。

## 4. テラヘルツ波帯での研究の開始

テラヘルツ波帯は、ミリ波帯と比較して、様々な技術が成長段階である。テラヘルツ波帯の抱える課題については、著者もインタビューに参加させていただき、2022年3月に発表されたJST CRDSの戦略プロポーザル[14]で詳細にまとめられている。JST CRDSの戦略プロポーザルは、毎年春前後に発表される文部科学省の戦略目標の基礎となっている。文部科学省の戦略目標ももとに、JST さきがけやJST CRESTなどのプログラムが立ち上がっている。

2010年に本格的にテラヘルツ波帯の研究を始めた際、テラヘルツ波帯のコミュニティーにはアンテナの専門家がほとんど参加していなかった。まずは、テラヘルツ波帯の基礎となる技術を習得するべく、マイクロ波帯の人工誘電体をお手本にしてテラヘルツ波帯で同様のことができないか研究を進めた。マイクロ波帯の人工誘電体では、先行研究として1948年のベル研究所の報告書[15]と1949年のNatureの論文[16]などある。これらは分野を超えた所では知られていないことがあまりに多く、先行研究への敬意が必要である。一方で、マイクロ波帯の人工誘電体をテラヘルツ波帯へそのままスケールダウンすれば、研究が完了できるかというところまでそうではない。テラヘルツ波帯では、母材となる材料評価法、材料特性を考慮した解析と設計、素子の作製法、作製した素子の実験評価法、どれもが15年前は発展途上であった。マイクロ波帯の人工誘電体をテラヘルツ波帯で試していった内容は電気学会誌で詳しく紹介している[17]。

## 5. 独自材料の発見

次に4章の過程を通して偶然に発見した独自の高屈折率・低反射材料[18]について説明する。ジャーナル論文は2017年に6G通信のキャリア周波数帯の候補の0.3 THz帯で発表している[19]。分光技術の1種であり、振幅と位相の両方を測定可能なテラヘルツ時間領域分光法により、比誘電率と比透磁率の実部と虚部を測定している。先行研究で報告されていた高屈折率材料は比誘電率の制御のみで、比透磁率の制御をしておらず、非常に大きな反射が起きる。先行研究との詳細な比較は、[20]で丁寧に表にまとめている。その後、0.3 THz

帯で無偏光な高屈折率・低反射材料[21]、超高・ゼロ・負の幅広い屈折率の低反射材料[22]、電波法の再上限の 3 THz 帯の高屈折率・低反射材料[23],[24]などを実現している。独自に発見した材料であるため、これでテラヘルツ波帯の分野で 1 つ仕事をできたと思っていたが、「「材料」とはすなわち、「物質の中で、人間の生活に直接役立つもの」という言葉[25]を目にして、応用について探し始めることとなる。この際にも 2 章で触れたイノベーションのジレンマの論文[9]が役立つこととなった。

## 6. 独自材料の応用

まずは手始めにテラヘルツ波を集光する集光メタレンズへの応用を進めた[26]。ところが、指向性を有するとは、集光することではなく、平行光にすることである。集光レンズでは、通信分野ではあまり産業応用の広がりを持たない。そこで、共鳴トンネルダイオードや量子カスケードレーザなどのテラヘルツ光源から放射される放射状のテラヘルツ波を、指向性を有する平行光にするコリメート機能を有するメタレンズへの応用に取り組んだ。トランスミッタレーとしてとらえることができる。5 章の通り、比誘電率と比透磁率の両方を同値となるように制御できている点に新しさがある。また、並行して専門分野の方々に発明の 1 つとして認めていただくことを意識して、アイデアについて専門分野でのジャーナル論文文化に取り組んだ[27]。その後、3 THz 帯で金属の導電率にドルーデ・モデルを用いた解析結果も報告した[28]。

次に独自の高屈折率・低反射材料を積層することで何か面白いことができないかに取り組んだ。積層することでより高利得なアンテナが実現できることは、既に 2017 年時点で[27]で触れている。まずはテラヘルツ時間領域分光法による位相の測定で、積層構造により 360 度の位相遅れを確認した[34]。また、積層構造によるメタレンズアンテナの解析について発表時に報告した[35]。360 度の位相遅れの実現は、おおよそ様々な光学素子を独自材料で置き換えられることを意味している。そこで、光渦の生成に応用できることに気付き、解析結果について報告した[36]。また、コリメートメタレンズと光渦素子の 2 つの機能を 1 つの素子として設計した解析結果も報告している[37]。さらに 2025 年現在、エアリービームの生成を試み、解析結果について報告している[38]。メタサーフェスによる高屈折率・低反射材料が、テラヘルツフラットオブティクスにおいて相当に万能的であることを示唆しつつある。

## 7. 独自材料の社会実装に向けて

次はやはり実験である。まずは作製するためには母

材が必要となるが、ミリ波帯で使用される材料はテラヘルツ波帯では損失が大きく使いづらい部分がある。そこで、テラヘルツ波帯で低損失なシクロオレフィンポリマーに金属を成膜する必要があった。成膜には失敗することもあったが、その失敗を“経験の学校”としてとらえることで、-50 dB(0.00001)以下の非常に高い消光比の新たな偏光子の実現につなげることができた[29],[30]。銅成膜シクロオレフィンポリマーフィルムは、片面成膜も両面成膜も進みつつあるが、後工程を考えた耐熱性の向上など、今なお技術の開拓が非常に重要である。テラヘルツ光源もなかなか入手することが難しいが、共同研究による協力を得て、0.3 THz 帯の共鳴トンネルダイオードを使った実験を行った。さらに 2017 年に東京農工大学に着任をさせていただき、より実験による証明が加速していった。[31]では、コリメートメタレンズと共鳴トンネルダイオードの距離を 10 mm(10 $\lambda$ )で、0.312 THz で発振する共鳴トンネルダイオードの指向性を 4.2 倍高めている。さらにコリメートメタレンズと共鳴トンネルダイオードの一体化に向けて、[32]では距離 1 mm(1 $\lambda$ )での実験結果を報告している。世界トップ級の極短焦点なメタサーフェスによる平面レンズを実現しており、F/D 比は 0.5、開口数 NA は 0.7 である[33]。

光渦の実験は、[39]の発表時に初めて報告し、[40]で実験結果をまとめている。2024 年にテラヘルツ分野で最大級の国際会議 IRMMW-THz の基調講演で、複数のトポロジカルチャージをテラヘルツ光源アレーに搭載する構想に向けた進捗を報告している[41]。また、光渦の設計で、機械学習をアシストに活用した最適化を試している[42]。

円偏波の実験では、独自のコリメートメタレンズと先行研究のマイクロ波帯での円偏波生成素子により、共鳴トンネルダイオードから放射されたテラヘルツ波を、指向性を有する平面波に変換し、さらに円偏波に変換する実験を報告している[43]。4 章で述べたことにも関連し、研究室で電波暗室を構築するなど実験系の整備にも時間をかけてきた。この過程で、ミリ波帯で使用されている複数の電波吸収体についてテラヘルツ時間領域分光法で測定し、丁寧にデータ整理した。構築した実験系により、[43]では遠方界での 2 次元の電界振幅分布を測定して報告している[44]。

ここまでは共鳴トンネルダイオードを用いた実験を進めきた。様々なテラヘルツ光源に独自材料を搭載してテラヘルツ波産業に貢献していくためには、独自のコリメートメタレンズの標準的な実験系の構築が必要となる。そこでまずは、テラヘルツ光源からの放射状のテラヘルツ波の放射を模擬するために、虹彩絞りをを用いた実験系を試した[45]。より精密に実験するた

めに、プローブホーンを用いた 0.3 THz 帯の実験系を構築し[46]、独自のコリメートメタレンズアンテナの帯域も測定できる所まで至っている[47]。さらに、6G 通信の次の 7G 通信のキャリア周波数の可能性のある 0.85 THz 帯[48]の実験系の構築も進めている[49]。

## 8. 独自材料の他分野での応用

6 章で紹介したメタサーフェスにより比誘電率と比透磁率の両方を制御して高屈率と低反射を両立した独自材料は、熱輻射領域の 50 THz 帯でも研究を進めている[50]。2018 年 10 月に開始して 2022 年 3 月に卒業した JST さきがけ(熱制御)で多大なご指導をいただいた。実験評価のため、フーリエ変換赤外分光計で測定した透過と反射の振幅から、クラマース・クローニツヒの関係式により、比誘電率と比透磁率の実部と虚部を導出する方法を整備した[51]。50 THz 帯での高屈折率・低反射材料の実現には、100 nm の誘電体メンブレンの両面に金属微細構造を作製する作製法の構築が必要であった。この作製法の模索の過程[52]で、100 nm の誘電体メンブレンの表面には金属微細構造を設け、裏面には金属膜を設けた、非常に薄い赤外域の吸収体も実現している[53]。現在、厚い基板上であるが、200 THz 帯での基礎検討も進めている[54]。

## 9. まとめ

本チュートリアル講演の原稿では、メタサーフェスによる高屈折率・低反射材料について、発見に至る歴史、材料の説明、材料の応用、社会実装に向けた取り組み、他分野への応用について解説した。本原稿のもととなった東京農工大学の博士後期課程向けの大学院講義[5]は 2020 年度から企業からの参加も可能な体制が整った。テラヘルツ分野やメタサーフェス分野を専門としない人が、修士号程度の背景知識やノウハウを習得して研究に取り組めるようにすることを意図した構成となっている。詳細は[55]の通りである。今後も独自材料の基礎研究、応用研究、そして社会実装を進めていきたい。

## 謝 辞

本研究の一部は、JST 創発的研究(JPMJFR222I)、JSPS 科研費基盤研究(B)(24K01376)、挑戦的研究(萌芽)(24K21617)の助成を受けたものである。本研究の一部は、ローム株式会社との共同研究として実施されました。研究を推進してくれている研究室の学生、修了生、卒業生、スタッフの皆様に深く感謝いたします。

## 文 献

- [1] 鈴木 健仁, 2022 年第 69 回応用物理学春季学術講演会, 24p-E201-5, Mar. 2022. (オンライン時代の機能性マテリアル ~beyond5G/6G に向けて~ 招待講演)
- [2] 鈴木 健仁, 2022 年第 83 回応用物理学秋季学術講演会, 20p-C200-8, Sep.2022. (次世代テラヘルツ通信に向けた無線・光融合のデバイス・材料技術 招待講演)
- [3] 鈴木 健仁, “高屈折率低反射メタサーフェスの開拓と応用,” 2024 年第 85 回応用物理学秋季学術講演会, 20p-A34-1, 朱鷺メッセ, Sep. 2024. (第 45 回応用物理学優秀論文賞記念講演 招待講演)
- [4] さきがける科学人, “テラヘルツ波を制御する人工構造開発 超高効率通信デバイスの実現を夢見る,” JST news, vol.143, pp.16, Sep. 2024. [https://www.jst.go.jp/pr/jst-news/backnumber/2024/202409/pdf/2024\\_09.pdf](https://www.jst.go.jp/pr/jst-news/backnumber/2024/202409/pdf/2024_09.pdf)
- [5] 鈴木 健仁, “通信工学特論,” 東京農工大学 大学院博士後期課程講義.
- [6] T. Suzuki, J. Hirokawa, M. Ando, IEICE Trans. Commun., vol.E92-B, no.01, pp.150-158, Jan. 2009.
- [7] T. Suzuki, J. Hirokawa, M. Ando, IEICE Trans. Commun., vol.E92-B, no10, pp.3236-3242, Oct. 2009.
- [8] T. Suzuki, J. Hirokawa, M. Ando, IEEE Trans. Antennas and Propagation, vol.58, no.12, pp.3891-3897, Dec. 2010.
- [9] J. L. Bower and M. Christensen, p.43-53, Jan.-Feb. 1995.
- [10] JST 創発的研究支援事業, “テラヘルツギャップを切り拓く人工構造材料の深化と 7G 通信への展開,” [https://www.jst.go.jp/souhatsu/research/panel\\_imura.html#1-348](https://www.jst.go.jp/souhatsu/research/panel_imura.html#1-348)
- [11] 新学術領域研究電磁メタマテリアル, “任意屈折率設計のための 2 次元スペクトル界を用いた金属周期スリット構造解析,” <http://www.metamaterials187.org/>
- [12] 茨城大学 工学部 平成生まれの会主催 講演会, “日本のモノづくりの心,” [https://www.youtube.com/watch?v=HzVb\\_5o5V6M](https://www.youtube.com/watch?v=HzVb_5o5V6M)
- [13] JST さきがけ熱制御, “極限屈折率材料の深化と熱輻射アクティブ制御デバイスの開拓,” [https://www.jst.go.jp/kisoken/presto/project/1112082/1112082\\_2018.html](https://www.jst.go.jp/kisoken/presto/project/1112082/1112082_2018.html)
- [14] JST 研究開発戦略センター, “無線・光融合基盤技術の研究開発～次世代通信技術の高度化に向けて～,” Mar. 2022.
- [15] W. E. Kock, Bell Syst. Tech. J. vol. 27, no.1, pp.58-82, Jan. 1948.
- [16] S. S. D. Jones and J. Brown, Nature, vol. 163, no.4139, pp.324-325, Feb. 1949.
- [17] 鈴木 健仁, 電気学会誌, vol.137, no.6, pp.350-353, Jun 2017.
- [18] 日本特許第 6596748 号, 米国特許第 10686255 号
- [19] K. Ishihara and T. Suzuki, J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves, vol.38, no.9, pp.1130-1139, Sep. 2017.
- [20] T. Suzuki, K. Endo, J. Kim, K. Tsuruda, and M. Sekiya, Opt. Express, vol.29, no.12, pp.18988-19000, Jun 2021.
- [21] K. Sato and T. Suzuki. Nanophotonics, vol.12, no.13, pp.2537-2544, May 2023.

- [22] K. Sato, K. Watai, K. Ishihara, R. Ohuchi, S. Kondoh, T. Sato, and T. Suzuki, *Applied Physics A*, 2024.
- [23] H. Asada, K. Endo, and T. Suzuki, *Opt. Express* 29(10), 14513–14524 (2021).
- [24] S. Hayashi, T. Suzuki, K. Tanaka, K. Horita, H. Fujiwara, and K. Fujita, *IRMMW-THz 2019*, Paris, Sep. 2019.
- [25] Close up “材料科学”が面白い!, *JST news*, vol.5, no.2, pp.6-9, May 2008.  
[https://www.jst.go.jp/pr/jst-news/backnumber/2008/200805/pdf/2008\\_05.pdf](https://www.jst.go.jp/pr/jst-news/backnumber/2008/200805/pdf/2008_05.pdf)
- [26] 鈴木, 大内, 石原, 佐藤, 富樫, 古謝, レーザー研究, vol.44, no.2, pp.116-120, Feb. 2016.
- [27] 大内, 石原, 佐藤, 富樫, 鈴木, 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J100-B, no.3, pp.235-244, Mar. 2017.
- [28] T. Suzuki, K. Endo, and S. Kondoh, *Opt. Express* vol.28, no.15, pp.22165–22178 (2020).
- [29] Y. Kishi, M. Nagai, J. C. Young, K. Takano, M. Hangyo, and T. Suzuki, *App. Phys. Express*, vol.8, no.3, pp.032201-1-4, Feb. 2015.
- [30] T. Suzuki, M. Nagai, and Y. Kishi, *Opt. Lett.*, vol.41, no.2, pp.325-328, Jan. 2016.
- [31] T. Suzuki, K. Endo, J. Kim, K. Tsuruda, and M. Sekiya, *Opt. Express*, vol.29, no.12, pp.18988-19000, Jun. 2021.
- [32] K. Endo, M. Sekiya, J. Kim, K. Sato, and T. Suzuki, *Appl. Phys. Express* vol.14, no.8, pp.082001, July, 2021.
- [33] [https://www.tuat.ac.jp/outline/disclosure/pressrelease/2021/20210706\\_01.html](https://www.tuat.ac.jp/outline/disclosure/pressrelease/2021/20210706_01.html)
- [34] 中尾, 鈴木, 2018 年第 79 回応用物理学秋季学術講演会, 20a-PB3-8, 名古屋国際会議場, Sep. 2018.
- [35] H. Nakao and T. Suzuki, *IRMMW-THz 2019*, Tu-AM-6-2, Paris, Sep. 2019.
- [36] 中尾, 鈴木, 2020 年第 67 回応用物理学春季学術講演会, 13a-B508-5, 上智大学, Mar. 2020.
- [37] 落合, 山森, 安川, 鈴木 健仁, 2024 年第 71 回応用物理学春季学術講演会, 25p-11E-3, ハイブリッド開催(東京都市大学 世田谷キャンパス+オンライン), Mar. 2024.
- [38] 田中, 東京農工大学 卒業論文 予稿, Mar. 2025.
- [39] 安川, 山森, 鈴木, 電子情報通信学会 東京支部学生会研究発表会 第 28 回, pp.31, オンライン開催, Mar. 2023.
- [40] 安川, 山森, 鈴木, 2023 年第 84 回応用物理学秋季学術講演会, 19a-B203-6, 熊本市民会館, Sep. 2023.
- [41] T. Yasukawa, S. Yamamori, H. Asada, and T. Suzuki, *IRMMW-THz2024*, 10.1109/IRMMW-THz60956.2024.10697631, Perth, Sep. 2024.
- [42] 山森, 佐藤, 劉, 池本, 鈴木, 電子情報通信学会 東京支部学生会研究発表会 第 27 回, pp.31, オンライン開催, Mar. 2022.
- [43] T. Suzuki, K. Endo, T. Haruishi, K. Tsuruda, K. Urashima and S. Yamamori, *Applied Physics Express*, vol.17, no.8, pp.082001-1-6, Aug. 2024.
- [44] <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20240805/index.html>
- [45] N. Nakata, K. Urashima, H. Asada, and T. Suzuki, *IRMMW-THz 2022*, Tu-P-64, Hybrid (Delft and Virtual Conference), Aug. 2022.
- [46] 中田, 朝田, 鈴木, 2024 年第 71 回応用物理学春季学術講演会, 25p-11E-9, ハイブリッド開催(東京都市大学 世田谷キャンパス+オンライン), Mar. 2024.
- [47] 落合, 安川, 朝田, 鈴木, 2025 年第 72 回応用物理学春季学術講演会, 14p-K504-12, ハイブリッド開催(東京理科大学 野田キャンパス+オンライン), Mar. 2025.
- [48] 永妻, 電子情報通信学会誌, vol.106, no.6, p470-478 Jun 2023.
- [49] 宇野, 安川, 蛭澤, 鈴木, 第 72 回応用物理学春季学術講演会, 14p-K504-13, ハイブリッド開催(東京理科大学 野田キャンパス+オンライン), Mar. 2025.
- [50] H. Asada and T. Suzuki, "Reflectionless metasurface with high refractive index in the 50-THz band for directivity control of thermal radiation," *IRMMW-THz 2022*, Tu-P-43, Hybrid (Delft and Virtual Conference), Aug. 2022.
- [51] H. Asada and T. Suzuki, *The Third International Symposium on Frontiers in THz Technology*, Fr1-4, Fukui, Nov. 2022.
- [52] <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20240305-2/index.html>
- [53] H. Asada and T. Suzuki, *Opt. Letters*, vol.49, no.6, pp.1409-1412, Mar. 2024.
- [54] H. Asada, K. Ryu, and T. Suzuki, *Session 4A6, SP26*, pp.1318-1319, Toyama International Conference Center, July META2024.
- [55] <https://web.tuat.ac.jp/~suzuki-lab/sangaku.html>