

# 高密度信号のテラヘルツ波送信を高温超伝導体で実現

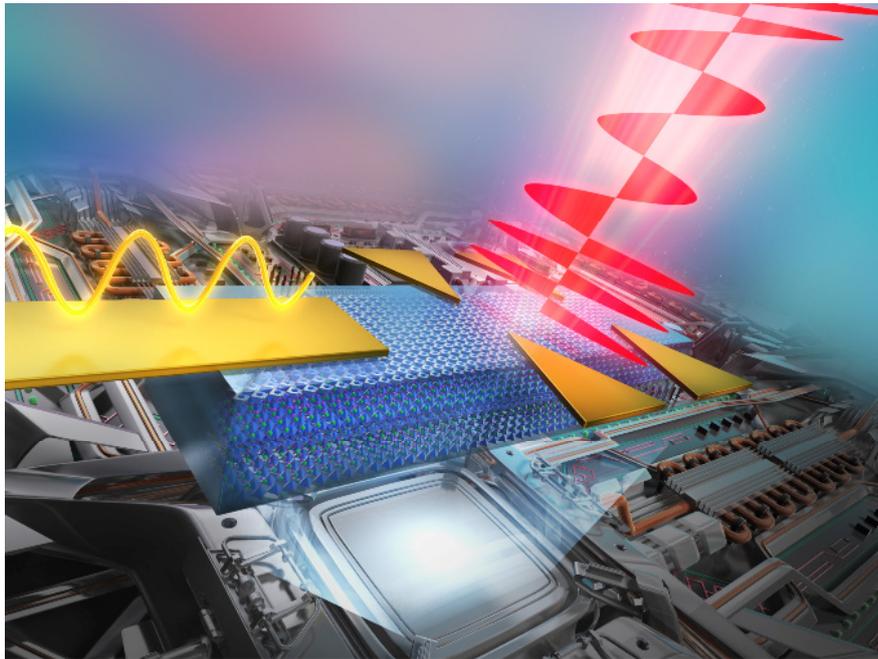
## 一次世代 Beyond 5G/6G 通信や革新的計測のための重要技術

### 概要

京都大学大学院工学研究科の掛谷一弘准教授、宮本将志修士課程院生ら、産業技術総合研究所量子・AI 融合技術ビジネス開発グローバル研究センターの辻本学主任研究員らの研究グループは、ビスマス系高温超伝導体を用いた超伝導テラヘルツ光源からエフエム（周波数変調）電磁波の空間への放射を実現しました。

空間を飛ぶ電波・光を用いて大量のデータをやりとりする高速無線通信の要望が、コロナ禍を経てますます高まっています。その世界的な需要に対応するために、さらに進化した無線ネットワーク、Beyond 5G/6G 技術の開発が急ピッチで進んでいます。こうした無線通信に必要な電磁波の周波数帯であるテラヘルツ帯の光源のひとつとして、超伝導テラヘルツ光源が研究されています。本研究グループは、超伝導だけが持つ性質であるジョセフソン効果を利用することで、市販の信号発生器から発生する 3 ギガヘルツのマイクロ波信号をテラヘルツ波に乗せて送信する、テラヘルツ波エフエム技術の開発に成功しました。実験の結果、現行の光ファイバーインターネットサービスの 100 分の 1 以下の時間で 4K 動画などの大きなデータを、無線で送れる能力を持つことが示されました。

本成果は、2024 年 1 月 10 日に英国の国際科学学術雑誌 *Nature Photonics* 誌にオンライン公開されました。



高温超伝導体から周波数変調テラヘルツ波が放射されるイメージ。左手前にある金色の電極から高密度ギガヘルツ信号（黄色波線）を導入すると、放射されるテラヘルツ波（赤色）の周波数が瞬時電圧の変化に伴って変調する。

## 1. 背景

近年、テラヘルツ帯の電磁波<sup>(1)</sup>の発生と検出に関する技術開発が広範な研究分野で進展しています。テラヘルツ帯の電磁波技術は、超高精細な次世代映像規格である「8K」などの大容量データを高速かつ低遅延で伝送できる第6世代の無線ネットワーク通信、いわゆる Beyond 5G/6G 通信システム<sup>(2)</sup>において不可欠な技術と考えられています。通信インフラの基幹技術として十分な性能を示すテラヘルツ発振デバイスを実現するためには、伝送信号とテラヘルツ波を合成して送受信できる最適な信号変調方式<sup>(3)</sup>の開発が求められます。しかし、安定なテラヘルツ発振と高速変調の両立は原理的に難しく、多くの技術的な課題が残されています。現在、テラヘルツ通信の実証実験で使われている共鳴トンネルダイオード発振器の場合、振幅変調 (AM) を用いたモノビットデジタル通信という方式が採用されています。周波数変調 (FM) 方式は AM と比較して伝送信号に戻す (復調) 時にノイズに強い\*という利点がありますが、テラヘルツ帯の FM 技術は開発があまり進んでいません。

## 2. 研究手法・成果

研究グループは、小型で安定な性能を有するテラヘルツ発振デバイスとして、高温超伝導体材料<sup>(4)</sup>を用いた超伝導テラヘルツ光源<sup>†</sup>の機能開発を進めてきました。超伝導体ジョセフソン接合<sup>(5)</sup>にみられる特有のジョセフソン効果は、直流信号と交流信号を高精度に変換できる変換器としての利用や、直流電圧と交流周波数の関係性に着目した電圧標準器としての応用が実現されています。高温超伝導体材料の結晶には、こうした超伝導体ジョセフソン接合が高密度かつ均一に存在していることが知られており、個々の接合で生じた交流振動が重なり合うことで、強力なテラヘルツ波が放射されます。本研究では、図1 (左) に示す回路を用いて、超伝導テラヘルツ光源を駆動する電圧に最大 3.5 ギガヘルツの信号を合成することで、テラヘルツ波を高速周波数変調する技術の実証に成功しました。設計したデバイスから放射される電磁波を独自開発した高分解能フーリエ変換式分光計で解析すると、図1 (右) に示す特徴的な楕状の周波数分布 (コムスペクトル) が得られます。この結果から推定されるデータ転送速度は、130 Gbps<sup>‡</sup>に相当することがわかりました。この性能は、

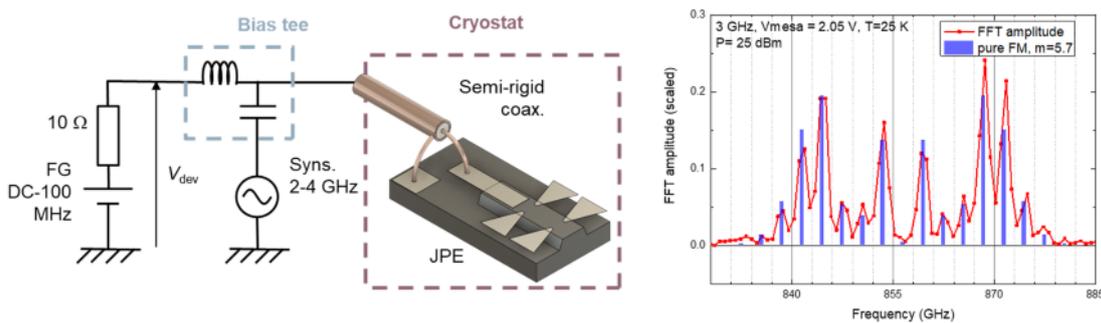


図1：(左) 変調に用いた回路。バイアスティーと呼ばれる回路素子を使って直流電圧にマイクロ波を重畳した信号をデバイスに加えている。(右) 得られた楕状のスペクトル。赤線が実験結果で一連の青棒が理想的周波数スペクトルを示す。ピークの間隔が変調周波数の3 GHzに一致している。

\* FM 放送の音質が AM 放送と比較して高い理由のひとつ

† 論文ではジョセフソンプラズマエミッター (Josephson Plasma Emitter, JPE) と呼称

‡ 1 時間の 4K 動画 (61 ギガバイト) を 3.8 秒で送ることができるデータ転送速度

デバイス設計や復調技術を最適化することでさらに向上できます。さらに、FM 時には発振周波数領域そのものが拡大することを明らかにしました。これらの特徴は、原子時計や GPS などの周波数標準器として利用される光コム<sup>(6)</sup>とは異なる変調方式であることに由来しており、単純な製造方法で作製できる超伝導テラヘルツ源の優位性を表しています。

### 3. 波及効果、今後の予定

超伝導テラヘルツ光源は小型で安定に動作する固体デバイスであり、単色テラヘルツ発振、広帯域チューニング性能、アレイ化による高出力発振、高い放射効率、円偏光テラヘルツ電磁波の発生など、他の技術にはないユニークな特徴を備えています。本研究で新たに実現した FM 方式は、従来の複雑かつ特殊な光学機器を使用する方式よりも単純でありながら、高い精度で周波数や帯域を制御できる点で優れています。これまでに報告された超伝導テラヘルツ光源の周波数範囲は 0.15 テラヘルツから 2 テラヘルツの領域であり、Beyond 5G/6G 通信のターゲットとなる周波数領域が含まれます。また、本方式を応用して実現可能な FM 連続波 (CW) テラヘルツレーダーは、人体計測や高速移動体計測などへの実装研究が進んでいる FMCW ミリ波レーダーの精度を向上させるだけでなく、たんぱく質の高次構造特定などのテラヘルツ帯特有の機能を伴って、ヘルスケア応用への可能性も示されています。さらに、超伝導テラヘルツ光源は、電波望遠鏡、観測衛星、量子コンピューティング<sup>(7)</sup>などで利用されている既存の超伝導デバイスと相性が良く、これらの先端技術と本研究で確立した技術を融合させることで、革新的な性能を持つ次世代の超伝導デバイスの創製が期待されます。

### 4. 研究プロジェクトについて

本研究は、日本学術振興会科研費の基盤研究(B)JP20H02606 および JP19H02540 の支援を受けて行われました。また、京都大学学術研究展開センター「いしずえ」、および産業技術総合研究所の課題解決融合チャレンジ研究「高周波 (サブ THz) アナログデバイス, 集積回路に関する技術開発」として実施されました。

### 5. 研究機関別の貢献内容について

京都大学の研究者らが計測を実施し、得られたデータの分析と解析を行いました。産業技術総合研究所の研究者が中心となり超伝導テラヘルツ光源の設計と製作を行いました。双方の研究者が議論し、論文を執筆しました。

#### <用語解説>

##### (1) テラヘルツ帯の電磁波 (テラヘルツ波)

テラヘルツ波は電磁波の一種で、周波数がテラヘルツ (1 テラヘルツ =  $10^{12}$  ヘルツ = 1 兆ヘルツ) 程度の電磁波を指します。テラヘルツ波は物質に損傷を与えずに透過するため、生体組織や非金属材料に対して安全に利用できます。また、紙やプラスチックなどの物質を良く透過し、高い空間分解能を持つことから、材料の内部構造を非破壊で観察する手段として用いられます。さらに、高分子の高次構造特定や機能の異なる化学異性体の分別に適した電磁波として利用されています。これらの特性を活かして、医療、材料科学、通信、セキュリティなど、様々な分野での応用が期待されています。

##### (2) Beyond 5G/6G 通信システム

現行の第 5 世代通信 (5G) を超えた第 6 世代の通信システムを指し、より高速なデータ転送、低遅延通信、多重デバイス接続など、多岐にわたる性能の向上が期待されています。低遅延なりリアルタイム通

信が身近なものとなり、自動運転や遠隔医療などの分野の顕著な発展が見込まれます。

### (3) 信号変調方式

通信で用いる電磁波（搬送波）に伝送信号を合成する方式として、電磁波の振幅、周波数、位相で情報を表す振幅変調（AM）、周波数変調（FM）、位相変調（PM）があります。FMの例としては、エフエム放送やアマチュア無線が挙げられます。Bluetoothではデジタル化されたFM通信が利用されています。現在のデジタルテレビジョン放送や携帯電話の通信では、PMを高度化した変調方式によるデジタル通信が採用されています。FMとPMは正弦関数の角度部分に信号を載せるという意味で、技術的な連続性を持ちます。

### (4) 超伝導体、高温超伝導体

低温で電気抵抗がゼロになり、磁場を完全に排除する性質を超伝導と呼びます。超伝導が発現する温度が液体窒素の沸点よりも高い高温超伝導体を用いれば、液体ヘリウムを用いることなく超伝導が実現できるため、低コストで超伝導の恩恵を利用できます。この利点を生かした電力伝送やリニア中央新幹線、小型加速器などへの社会実装が研究されています。

### (5) ジョセフソン接合

2つの超伝導体で薄い絶縁体を挟んだ時に、超伝導体間に抵抗がゼロの超伝導トンネル電流が流れることを（直流）ジョセフソン効果、その仕組みをジョセフソン接合と呼びます。ジョセフソン接合に電圧を加えたとき、電圧に比例する周波数の交流電流がゼロ抵抗で流れ、その係数は物理定数だけで決まります（交流ジョセフソン効果）。

### (6) 光コム

周波数スペクトルの均等で離散的なコム（＝櫛）を用いた非常に精密な周波数標準技術です。光コムの構築と維持には高精度な技術と設備が必要であることが実用上の課題です。

### (7) 量子コンピューティング

量子ビットと呼ばれる量子力学の原理に基づいた情報の最小単位を使用して計算を行う技術です。量子ビットは古典的なビットとは異なり、重ね合わせの原理ともつれ合いによって高速の計算が可能になります。一方で、量子ビットはノイズやエラーに対して非常に敏感であり、量子ビットの純粋な状態は短時間で劣化するうえに、超低温、かつ外部からの影響が極めて小さい特殊な環境でのみ動作します。そのため、低温で動作しノイズを発生しにくい、多様な機能を持つ電子デバイスの開発が喫緊の課題です。

<研究者のコメント>

氏名	掛谷 一弘	
所属・職名	京都大学 大学院工学研究科 准教授	
コメント	<p>メインの実験結果が得られる1年余り前、複数のピークが等間隔に並ぶ櫛状（コム）スペクトルを思いがけず観測しました。その実験を担当した院生（本論文共著者）の定量的な解析の結果、実験環境による偶然と分かりました。しかし、「半導体テラヘルツ光源分野ではコムが激アツ」という数年前の滞仏時のホスト研究者の言葉が頭から離れず、本研究の設計が始まりました。したがって本成果は、冷静なデータ分析と学際共同研究が主成分です。</p>	

氏名	宮本 将志	
所属・職名	京都大学 大学院工学研究科 修士課程	
コメント	<p>自分が卒業研究で取り組んだテーマを論文という形で発表でき、非常に嬉しいです。一年前、研究を始めて間もない自分が、右も左も分からず、がむしゃらに実験に取り組みはじめたときのことを懐かしく思います。初めてテラヘルツ FM スペクトルを観測できた日には掛谷先生と二人で大興奮し、連日深夜までデータをとり続けました。またこのような成果が得られるよう、今後もより一層研究に励みたいと思います。</p>	

氏名	辻本 学	
所属・職名	<p>産業技術総合研究所 量子・AI 融合技術ビジネス開発グローバル研究センター 主任研究員</p>	
コメント	<p>共同研究者との熟考の末にたどり着いたアイデアが形になり、論文発表に繋がったことを嬉しく思います。私が担当した超伝導テラヘルツ光源の設計と作製に関しては、アメリカ留学での経験や苦悩、試行錯誤した日々の思い出が詰まっています。本研究の成果は、最近注目されている 6G 通信などへの応用が期待されるだけでなく、高温超伝導体という材料が持つ潜在的な能力と、研究対象としての神秘性を大いに感じさせるものでした。</p>	

<論文タイトルと著者>

タイトル： Wide-band frequency modulation of a terahertz intrinsic Josephson junction emitter of a cuprate superconductor

著者： M. Miyamoto<sup>1</sup>, R. Kobayashi<sup>1</sup>, G. Kuwano<sup>2</sup>, M. Tsujimoto<sup>2,3</sup>, and I. Kakeya<sup>1</sup>

所属： <sup>1</sup>Department of Electronic Science and Engineering, Kyoto University

<sup>2</sup>Graduate School of Science and Technology, University of Tsukuba

<sup>3</sup>Global Research and Development Center for Business by Quantum-AI Technology (G-QuAT),  
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

掲載誌： *Nature Photonics*

DOI： 10.1038/s41566-023-01348-0