安全保障技術研究推進制度　令和６年度終了課題　終了評価結果

1.　評価対象研究課題

（１）研究課題名：超小型ロバストテラヘルツ波イメージング装置の研究開発

（２）研究代表者：理化学研究所　南出　泰亜

（３）研究期間　：令和２年度～令和６年度

2.　終了評価の実施概要

日時　　：令和７年１０月２７日

場所　　：ＴＫＰ新橋カンファレンスセンター

評価委員：未来工学研究所　理事長、上席研究員

東京大学　名誉教授

平澤　泠（委員長）

長岡技術科学大学　名誉教授、特任教授

井原　郁夫

東京科学大学　工学院　電気電子系　教授

梶川　浩太郎

慶應義塾大学　名誉教授

神成　文彦

大阪大学　大学院工学研究科　教授

近藤　正彦

東京農工大学　名誉教授

佐藤　勝昭

豊橋技術科学大学　シニア研究員、名誉教授

長岡技術科学大学　学長アドバイザ

中野　裕美

科学技術振興機構　研究開発戦略センター　戦略総括監

中山　智弘

量子科学技術研究開発機構　高崎量子技術基盤研究所　先端機能材料研究部長

八巻　徹也

情報通信研究機構　電磁波研究所　総括研究員

山本　真之

（委員長以外は五十音順・敬称略）

3.　研究と成果の概要

研究の概要

本研究では、ロボット搭載可能なテラヘルツ波イメージングの達成を最終目的とし、バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振[*1]を基軸とした、超小型非線形光学テラヘルツ波光源、テラヘルツ波・アップコンバージョン検出、テラヘルツ波・イメージング計測、テラヘルツ波用周期分極反転非線形光学結晶、ロボット搭載に関する研究を実施し、最終的には試作した超小型ロバストテラヘルツ装置をロボット等に搭載した実証機の仮作を行うことで、ロボット搭載テラヘルツ波イメージングに関する知見を得ることを目指す。

成果の概要

本研究では、バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振における効率的な相互作用について研究を行い、高出力化・低閾値化・超小型化・連続周波数可変範囲の広帯域化・アップコンバージョン検出の高感度化を達成した。特に、超小型化については、手のひらサイズの励起光源一体型バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振器の開発に成功し、テラヘルツ波非破壊検査技術の実用化に進展を与えた。また、開発したテラヘルツ波光源を搭載したイメージング用自走式ロボット装置を試作し、ロボット搭載テラヘルツ波イメージングを実証した。

4.　終了評価の評点

S　想定の域をはるかに超える成果をあげた。

5.　総合コメント

際立った独自分野の種を包摂している。興味深い現象を発見できたので、それらを体系的に整理していただきたい。

また、研究成果はメーカを通して確実に社会実装していただきたい。成果の実用化に向けて、検出器を含めたさらなる研究発展を期待する。

6.　評価の観点ごとの評価結果と個々の委員によるコメント

6-1.　研究開始時に設定した研究目標の達成度（主題的成果）

世界初のバックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振の詳細を研究し、その実用光源としての確立まで当初設定していた研究目標を達成した。具体的には、共振器を要しないミラーレス発振として、独自設計の斜周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶に励起光を入射するだけでバックワード発振が得られることを示し、手のひらサイズの励起光源一体型テラヘルツ波光源の開発に成功した。また、光源の可能性と有効性の検証のため、三菱重工／山本・梶川グループ（分担者）と連携してライ

ニング配管および熱バリアコート付タービン翼などの非破壊検査における欠陥検出など有効性の実証に成功した。さらに、提案アイディアの具現化のため、開発したテラヘルツ波光源を用いたロボット搭載イメージング機の試作に成功した。

バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振は、サブテラヘルツ波領域をほぼフルカバーする周波数可変性、高い機械的安定性、高効率変換を併せ持つ革新的光源である。本研究において、カスケード・テラヘルツ波パラメトリック発振を発見して高効率化を達成し、光注入により発振閾値を約6割低減する低閾発振を実現し、一般的なテラヘルツ波光源に比べ3～4桁大きい約200Wのピーク出力を得た。加えて、理研／平等グループ（分担者）との連携により周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶の大型化に成功し、将来のさらなる高出力化に道筋をつけた。また、広帯域周波数可変性を活かし、周波数掃引型テラヘルツ波コヒーレント・トモグラフィーによる3次元計測に成功した。このときの奥行分解能は、物理的な分解能として約800μmが得られ、理研／大谷グループ（分担者）と連携した信号処理により最高13μmの高分解能化を達成した。

このように、新しい原理に基づく独創的なテラヘルツ波光源とその応用について詳細な研究を実施し、革新的なテラヘルツ波光源と非破壊検査性能を実現し、科学技術上価値のある成果が得られた。

達成した内容を以下の4つの研究項目に分け、それぞれ目標と得られた結果をまとめる。

（1）超小型非線形光学テラヘルツ波光源

- ピーク出力100 W以上の目標に対して、約200 Wを達成した。
- 発振閾値1 GW/cm^{2}以下の目標に対して、0.8 GW/cm^{2}を達成した。
- 連続周波数可変性0.3～0.8 THz（可変幅500 GHz）の目標に対して、周波数範囲0.245～1.008 THz（可変幅763 GHz)をモードホップフリーで達成した。
- テラヘルツ波光源のサイズとして、励起光発生部とテラヘルツ発生部併せて両手のひら程度（20 cm平方程度）の目標にして、より小さい約14 cm×5.5 cmの片手のひら程度のフットプリントサイズに納めることに成功した。
- 開発したテラヘルツ波光源装置を用いてロボット搭載を実証した。

（2）テラヘルツ波・アップコンバージョン検出

- テラヘルツ波検出エネルギー1 pJ/pulse以下の目標に対して、極めて高感度な約50 aJ/pulseと5桁程度さらに向上させることに成功した。
- 検出可能周波数範囲0.3～0.8 THzの目標に対して、同周波数範囲のアップコンバージョン検出に成功した。
- パルス応答時間500 ps以下の目標に対して、パルス幅273 psのアップコンバージョン信号光が得られた。

（３）テラヘルツ波イメージング計測

・深さ分解能 500 μm 以下を目標に対して、コンピュータ・トモグラフィー（CT）方式で奥行き分解能 300 μm、段差計測での奥行き分解能 20 μm の超高分解能を達成した。

（４）テラヘルツ波用周期分極反転非線形光学結晶

・結晶の長さおよび幅 50 mm × 50 mm、結晶の厚み 5 mm、周期分極反転の周期長さ 35 μm の大型分極反転ニオブ酸リチウム結晶の製作に目標通りに成功した。

【個々の委員によるコメント】（主題的成果）

・新しい原理に基づく独創的なテラヘルツ波光源とその応用について先駆的な研究が着実に遂行されており、その成果として革新的なテラヘルツ波光源が開発されるとともに、それを駆使した非破壊イメージング手法としての革新性が実証されている。所期目標は全て達成されていることから、当該研究は高く評価される。
・新しい光量子相互作用場を用いて、非常に高出力なテラヘルツ波光源を実現し、それを用いた、様々な応用に取り組んで、提案時よりもさらに進展させたところは高く評価できる。
・ロボット搭載イメージング装置への応用に対し、独自技術によるテラヘルツ波光源の性能目標をすべて達成した点は高く評価できる。

6-2.　計画時に想定していなかった成果（副次的成果）

（１）テラヘルツ波・アップコンバージョン検出

テラヘルツ波を光波にアップコンバージョン変換してテラヘルツ波検出を行う研究において、計画当初は、小さい非線形光学結晶を使用することから変換効率も格段に悪いことが予想され、最小検出感度を一般的なテラヘルツ波検出器と同程度の 1 pJ/pulse を想定していた。しかし結果は、この想定をはるかに超え、約 50 aJ/pulse と 5 桁程度も目標を更新する結果が得られた。この成果は、極低温動作の優秀なテラヘルツ波検出器より 3 桁以上優れていて、将来のテラヘルツ波センシングにおいて極めて重要な結果である。

物理的な考察からコヒーレンスを最大限利用した検出であり、また非古典的な動作も関係していることがわかってきた。元々、2 次の非線形光学効果を利用した光量子変換であるため、もつれ光子対の発生になっていることは推論できる。そのため、光量子干渉として、従来のビームスプリッタを用いた干渉系でなく、非線形光学結晶をビームスプリッタの代わりに使用する SU(1,1)系の新しい光量子干渉を実現できるのではないかと、テラヘルツ波に量子研究への展開が見えてきた。

（２）メタマテリアルデバイス

バックワード・テラヘルツ波パラメトリック光源を用いたテラヘルツ波応用を検討するなかで、テラヘルツ波領域で使用可能な機能性光学素子が少ないことが分かった。しかも、従来からある自然材料の多くはテラヘルツ波に対する吸収が大きく、またテラヘルツ波の波長が光波と比べて格段に長いため、素子自体が厚くなり実用性が乏しいことが判明した。そのため、本研究では基本的な光学素子であるフレネルゾーンプレートレンズや偏光分離素子を開発すべく、独自のメタマテリアル・メタサーフェス技術を用いて上記のテラヘルツ波光学素子の開発に成功した。

（３）マイクロコイル吸収体

本研究のテラヘルツ波イメージング実験において、位相乱雑化の機能を有するマイクロコイル吸収体に関する研究開発に成功した。従来の標準的なテラヘルツ波吸収体である Eccosorb®（市販品）と比較して、1 桁程度低い低反射性能が確認されるとともに、その反射信号の位相を乱雑化する特性を明らかにした。この機能性の発見をもとに、特許申請を行った。また、この吸収体は、情報通信研究機構（NICT）が研究開発を進めている人工衛星搭載機器の吸収体の候補としても新たに検討されることとなった。本件は企業との共同研究に展開した。

（４）300 GHz 帯テラヘルツ波光源の応用展開

本研究のテラヘルツ波イメージング実験において、300 GHz 帯の光源開発を実施してきたが、その光源の応用展開として、新たに理研と企業で光学系を構築し、今後、共同して装置開発に向けた実験を進めることとなった。

（５）非線形光学結晶に対して高精度な光学パラメータ計測

周期分極反転素子の開発において、コリメート光を用いた新たなテラヘルツ波時間領域分光測定系（THz-cTDS）を構築した結果、従来の集光型光学系では困難であった厚い試料の測定が可能となった。これにより、ニオブ酸リチウム結晶、チタン酸リチウム結晶などの非線形光学結晶に対して高精度な光学パラメータ計測が実現し、これまでに報告されている文献値より真値に近いと思われる計測結果を得た。この結果は、既存の文献値の正確性や測定限界に疑問を投げかけるものであり、テラヘルツ波分光における基礎物性値の見直しを促す重要な成果を得た。

【個々の委員によるコメント】(副次的成果)

・テラヘルツ波・アップコンバージョン検出、メタマテリアルデバイス、マイクロコイル吸収体、300 GHz 帯テラヘルツ波光源の応用展開および非線形光学結晶に対する高精度な光学パラメータ計測、等に関しても深く研究されており、今後の新展開に繋がる有益な知見が多く得られている。これらの点も高く評価される。

・シードの効果、カスケード変換はパワーの増強が必要な際には有効な技術である。ポアンカレ球上で偏光特性をマップできる技術ができたのもすばらしい。

・副次効果として、量子カスケード波長変換により、200W を達成している。偏向制御デバイスの開発により、効率の良いビームの生成に成功している。

・カスケード波長変換・テラヘルツ波から光への光量子変換につき、当初計画にない優れた成果を得た。

6-3.　他の者により派生した成果（間接的成果）

日頃から情報交換および共同研究を行っていた東北大／工学研究科／金森・岡谷研究室と連携して、アンテナと導波路が結合した新しいプレーナー型テラヘルツ波デバイスについて、バックワード・テラヘルツ波パラメトリック光源を用いた性能評価を行った。具体的には、バックワード・テラヘルツ波パラメトリック光源の高輝度特性を活用して、ブルズアイアンテナとそのアンテナ開口直上にシリコン導波路を接合した独自デバイスにおいて、アンテナで捕集され導波路を伝搬するテラヘルツ波の位相と伝搬方向を制御可能であることを実証し、理論予想（S. Ohno *et al.*,URSI Radio Science Letters 2, 1-4 (2020).）と一致した結果が得られた。得られた成果をまとめて論文発表（T. Okatani *et al.*, IEEE Trans. on Terahertz Sci. Technol., 14(4), pp. 519-530 (2024).）を行うとともに、2025 年度より JSPS 科研費/基盤 B（25K00930）に採択されたため、継続して研究を実施している。

【個々の委員によるコメント】(間接的成果)

・多様な応用分野が想定されるが、このプロジェクトでは、まだ限られている。期待されるとともにもどかしさも感じた。

・他大学の研究グループと連携して、アンテナと導波路が結合した新しいプレーナー型テラヘルツ波デバイスについて、バックワード・テラヘルツ波パラメトリック光源を用いた性能評価を行い、そこで得られた結果を論文投稿するとともに、その知見を基に新たな研究（科研費獲得）に繋げている点は評価できる。

・通信応用をもう少し具体化できるマイクロ回路化の予備研究があればさらに良かった。これまでの大口径 PPLN 製造技術からのブレークスルーは、ほとんど分からなかった。

6-4.　科学技術上特筆すべき成果

バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振は、我が国の技術として我々が世界で初めて単色近赤外レーザー光からテラヘルツ波とアイドラー近赤外光を発振させた独自技術である。Society5.0 で新しいサービスを提供するインフラ技術として光電融合デバイス（通信やセンシング）や技術の研究開発が注目されているが、本研究の技術はまさに光波とテラヘルツ波を直接相互変換する重要な技術である。本研究計画時には、光波とテラヘルツ波が対向して発生して伝搬するこの新しい発振現象に対して多くの部分が不明であったが、本研究の推進に伴い想定していなかった副次的成果も多く得られ、社会的インパクトのある研究となった。

最も特筆すべき点は、手のひらサイズの励起光一体型テラヘルツ波光源を実現できたことにある。このテラヘルツ光源はロボット搭載が可能で、人の立ち入れない場所などで活躍する新しい非破壊検査計測で使用可能である。ジャイロトロン級のピークパワー15 W を発生できる超小型テラヘルツ波光源は非常に明るく、コンパクトなテラヘルツ波光源では世界トップレベルの輝度を誇り、テラヘルツ波を用いた非破壊検査応用の道を切り開いたことは顕著な成果である。

【個々の委員によるコメント】（科学技術上特筆すべき成果）

・バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振を駆使して、手のひらサイズの励起光一体型テラヘルツ波光源を実現したことにより、非破壊検査応用の新しい道を切り開いたことは顕著な成果である。
・後方発生と発振効果、検出における感度の高さは学術的に貴重である。
・発展性がすばらしい。チップ化ができれば、さらに応用が広がる。
・シンプルな構成で高出力と波長可変性を両立する新たなデバイスの技術を確立した。
・特筆すべき成果は多様で、かつ量も十分ある。今後、様々な将来展開が想定される価値ある成果である。

6-5.　論文（投稿中のものも含む），学会発表等

学術論文１３件　　招待講演５９件　　学会等での一般講演７８件

6-6.　特許（出願中のものも含む）

国内６件　　外国５件

【個々の委員によるコメント】（論文、特許、学会発表等の研究成果）

・内外の多数の成果物が公表されている点は高く評価される。
・すばらしい成果が公刊されている。国際会議での招待講演からも注目度がわかる。

・論文・学会発表（特にプレナリー講演・キーノート講演・招待講演）など、学術的な成果公表を高いレベルで達成した。
・１１件の特許出願が行われており、産業競争力の確保も確実に行ったと考えている。

6-7.　科学技術への波及効果

本研究で着目したサブテラヘルツ波領域は物質への透過性が良く、イメージング計測を行った場合の空間分解能がマイクロ波やミリ波よりも格段に向上するため、様々な非破壊検査対象への適用が予想され、当該技術の展開は高く期待されている。特に、安心安全な社会を持続させるためには、新材料や複雑な構造体などの積極的な利用が進んでいる高度化する社会において保守管理なども重要な要素である。これまでの非破壊検査技術に加えて新しいテラヘルツ波非破壊検査技術を普及させるには、やはり輝度の高い光源を簡単に使えることが重要である。本成果では、最大ピーク出力(200 W)、モードホップフリーの広帯域連続周波数可変性(0.245 から 1.008 THz)、そして手のひらサイズの約 14 cm×5.5 cm のフットプリントサイズの励起光源一体型テラヘルツ波光源など、世界トップの性能を実現している。ロボット搭載に限らず、幅広いテラヘルツ波非破壊検査応用への利用が期待される。

また、励起光源一体型テラヘルツ波光源の開発には、必要な部品を独自に開発できる日本の企業と共に実施してきた。オールジャパンの装置であることも重要なポイントであり、かつ成果の技術移転や発展・普及が容易にできることも配慮して実施した。

今後の発展として、開発したテラヘルツ波光源などの技術は、今後、Beyond5G/6G でデバイス開発の研究を行うグループなどと共同して、検出器、増幅器、光学素子、高機能デバイスなどの特性評価などに利用することを見込んでいる。

【個々の委員によるコメント】（発展性と波及効果）
・波及効果を高めるためには、検出器を含めた開発が必要である。可能であればその研究を含めることを期待する。
・開発したテラヘルツ波光源などの技術は、広範囲なテラヘルツ波非破壊検査応用への展開が期待されるのみならず、Beyond5G/6G でのデバイス開発の研究グループなどと連携することで、検出器、増幅器、光学素子、高機能デバイスなどの特性評価などに利用されることも期待される。
・周波数はこれ以上は上がらないのか、この波長の空間分解能でイメージング応用がそこまで広がるのか、インフラ計測の展開デモを検討いただきたい。
・チップ化とセンシング技術への展開については十分な発展性がある。
・テラヘルツ吸収体や配管検査で有望な結果を得ている。非破壊検査の大きな発展が期待できる。

6-8.　効率的な研究実施体制とマネジメント

本研究期間は、まさに新型コロナウィルスによるパンデミックとそこから回復し５類感染症に移行するまでの期間に相当した。確りとした研究運営を実施するために、限られた選択肢の中で WEB 会議ツールによる会議は有効であった。そのような状況のなかで、効率的な研究実施のため、ひと月に 1 度ペースで運営会議を実施し、本研究に関わる研究者も参加して互いの研究進捗について理解と議論を行ってきた。また、運営会議と合わせて適宜、各研究拠点に訪問して現場説明を受け、実際の研究環境や実施体制についても互いに視察して情報共有を図った。結果としては良い成果につながったと考えている。

【個々の委員によるコメント】（効率的な研究実施体制とマネジメント）

・研究マネジメントは良好で、ポストコロナ禍において、効率的な研究実施体制が維持され、研究者間の円滑な情報共有がなされ、優れた成果の創出に繋がった点は高く評価される。
・優れた成果が得られたことは、研究実施体制とマネジメントが高いレベルで行われた結果であると考える。

6-9.　研究推進時に生じた問題への対応

運営会議を月 1 回程度で全 46 回実施し、頻度の高い進捗確認によって本委託業務が確実に進展することができた。その結果、成功を互いに分かち合い理解し、問題になる前に対応できたことで、効率よく研究を実施できた。このため、特段の問題は生じなかった。

【個々の委員によるコメント】（研究推進時に生じた問題への対応）

・研究者間の連携を密にすることで特段の問題が顕在化しないように努めている点は評価できる。
・適切に把握し、解決のみならずさらなる成果の創出につなげている。

6-10.　経費の効率的な執行

本研究では、購入した設備等を有効に活用し基礎研究で、多くの成果を挙げることに成功した。一方、基礎研究とその実用化として手のひらサイズのテラヘルツ波光源の開発を並行して実施することで、時間的効率を上げると同時に最終目標を見据えた計画を効率よく実施した。ロボット搭載可能な励起光源一体型テラヘルツ波光源の実現は非破壊検査応用においてインパクトの大きな成果となるだけに、基礎研究だけに偏らず、応用に際して必要な開発を毎年の研究進捗に合わせ調整し、結果として必要な経費の執行に無駄がないように取り組んだ。

【個々の委員によるコメント】（経費の効率的な執行）

・研究費に見合う成果は十分に得られている。

・高出力レーザー光源を効率的に活用いただきたい。

---

*1　バックワード・光（テラヘルツ波）パラメトリック発振

光パラメトリック発振の特殊な形態である。一般的な光パラメトリック発振では、共振器内に非線形結晶を配置し、外部から励起光を共振器に入射することで、内部で励起光の伝搬と同じ方向にシグナル光とアイドラー光が発生し、共振器ミラーを介して外部に取り出される。一方、バックワード光パラメトリック発振では、特殊な条件を満たしてシグナル光またはアイドラー光のどちらかが、励起光の伝搬方向とは逆方向に発生する。このバックワード光が正帰還となり自立的に発振に至る。このため、共振器（共振器ミラー）を必要とせず、ミラーレス光パラメトリック発振とも言われる。テラヘルツ波帯でのバックワード光パラメトリック発振は、本研究の成果が初めてである。