

研 究 報 告 書

「超高強度サブテラヘルツ表面波フォトンクス」

研究タイプ： 通常型

研究期間： 2015 年 12 月～2019 年 3 月

研 究 者： 時田 茂樹

1. 研究のねらい

ピコ秒～フェムト秒で変化する高速現象を探求・応用する超高速フォトンクスは、超短パルスレーザー技術の進展とともに発展を続けており、物理学・化学・生物学等の基礎科学の発展や、ものづくり・情報通信・医療等の分野を通じて社会の発展に大きく寄与してきた。例えば、超高速分光、バイオイメーシング、テラヘルツフォトンクス、プラズマ物理、高エネルギー密度科学等、相互に関連しながら進展している多数の学術分野があり、レーザー加工、光通信、眼科治療、マイクロ・ナノ手術等、幅広い応用例がある。テラヘルツフォトンクスでは、当初、微弱なテラヘルツ波の発生・検出技術を利用した計測応用が主であったが、近年、テラヘルツ波源の高出力化が進んだことで、物質の非線形応答を発現したり、物質に非可逆的な変化を与えたりすることが可能になった。例えば、従来のポンプ・プローブ計測において、専らプローブパルスとして用いられてきたテラヘルツ波を、ポンプパルスとして利用できるようになった。これはパラダイムシフトとも呼ぶべき大きな変化であり、テラヘルツ波源の高出力化はテラヘルツフォトンクスの新時代を拓くキーテクノロジーである。

提案者らは、集光強度がおよそ 10^{18} W/cm² 以上の高強度フェムト秒レーザーを細い金属ワイヤーに照射することにより、非常に強いサブテラヘルツ表面波が高いエネルギー変換効率で発生できることを見出した。細い金属ワイヤーは低損失・低分散のテラヘルツ導波路であることが知られている。ワイヤーに導波されたテラヘルツ波（表面波）は、光ファイバ中に導波された光波のように柔軟に伝送できるだけでなく、テーパ形状の針先等を用いて容易に波長以下の空間に収束させることができる。この特徴は様々な応用に利用できると考えられる。これまでワイヤー導波路上に非常に強いテラヘルツ表面波を発生させる技術なく、提案者らが初めて実現した。しかしながら、本手法によるテラヘルツ発生法はまだまだ確立したものではなく、パワースケーリングおよび高効率化の可能性を明らかにする必要がある。本研究を通して、テラヘルツフォトンクスの新たなスキームである、「超高強度サブテラヘルツ表面波フォトンクス」の創生をねらう。

2. 研究成果

(1) 概要

金属ワイヤーに高強度超短パルスレーザーを照射した際に生じるテラヘルツ表面波について、実験的な調査を行い、その特性を明らかにした。研究成果の概要は以下の通りである。

研究テーマ A 「テラヘルツ電場波形の測定」

電気光学サンプリング法により、テラヘルツ表面波の電場の時間波形を正確に測定し、パルス幅を決定した。テラヘルツ表面波の電場の空間強度分布を正確に測定し、理論値と一致することを確認した。また、レーザー強度に対するテラヘルツ表面波のピーク強度のスケーリ

ング則を実験的に推定した。(論文2)

研究テーマ B「テラヘルツ磁場波形の測定」

磁気旋光効果(ファラデー効果)を利用したテラヘルツ波の磁場の時間波形のシングルショット測定法を提案・実証した。電気光学サンプリング法による測定とは異なる実験配置が可能になり、感度範囲が異なるため、大型レーザーでの実験に適していることが示唆された。(学会発表4)

研究テーマ C「金属箔を利用したテラヘルツ表面波の繰り返し発生」

本手法によるテラヘルツ波発生の欠点として、レーザーを照射する度に導波路であるワイヤーが損傷を受けてしまう点が挙げられる。この欠点は、固体表面に超高強度レーザーを照射した際のプラズマ生成を原理とする本手法において根本的な特性であるが、プラズマ生成部とテラヘルツ導波部を分離することは可能である。これを実証するため、プラズマ生成部に金属薄膜、テラヘルツ導波部に金属ワイヤーを用いる方法を提案・実証した。(論文3)

研究テーマ D「100J 級レーザーによるテラヘルツ発生」

大阪大学の LFEX ペタワットレーザーを用い、我々の知る限り世界初となる 100J 級レーザーによるテラヘルツ発生実験を行った。この実験を行うため、LFEX レーザーと光学的に同期したプローブレーザーシステムを構築し、空間デコーディング法によるシングルショット・テラヘルツ波形計測技術を開発した。観測されたテラヘルツ波の強度は予想より低かったが、レーザーパルスエネルギーが 100J の領域でも、レーザー強度とともにテラヘルツ波の強度が増大することを実証した。

(2) 詳細

研究テーマ A「テラヘルツ電場波形の測定」

京都大学の T6 レーザー(論文1、パルス幅 40 fs、波長 810 nm)を用いて、電気光学サンプリング法により、テラヘルツ波電場強度のワイヤー直径依存性とレーザーパルスエネルギー依存性を定量的に測定した。このような詳細な依存性の測定には多数のデータポイントが必要になるため、長尺のワイヤーを長手方向に自動で送りながら真空中でレーザーを照射する装置を開発し、実験を実施した。図1に示すように、テラヘルツ波の電場パルス波形はパルス幅 2 ps 程度の半周期の波形となっており、0.5 ps 以下の急峻な立ち上がりを有することがわかった。テラヘルツ波電場の空間分布は理論解(Hankel 関数)と一致し、観測したテラヘルツ波が表面波であることを確認した。直径 0.3~0.9 mm の銅ワイヤーを用いて同様の実験を行ったが、強い依存性は見られなかった。テラヘルツ波のピーク電場強度は、レーザー光のパルスエネルギーとともに増加し、約 0.67 乗に比例して大きくなることがわかった。

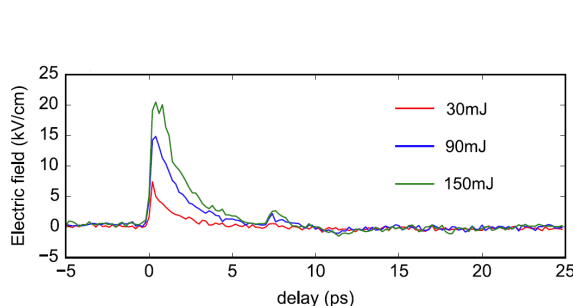


図 1 テラヘルツ表面波の電場波形

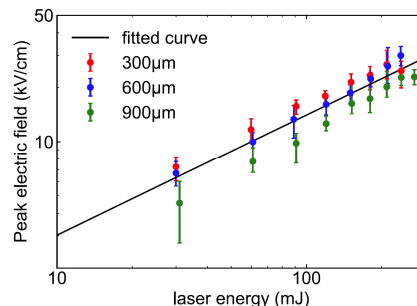


図 2 レーザーパルスエネルギー依存性

研究テーマ B 「テラヘルツ磁場波形の測定」

テラヘルツ波の磁場強度を直接測定したという報告はほとんどない。これは、磁気光学 (MO) 効果が電気光学 (EO) 効果と比べ低速応答もしくは低感度であることに起因すると考えられる。しかし、テラヘルツ波の強度が非常に強くなった場合、EO 効果より感度の低い MO 効果が有利になる場合がある。また、磁場のみを増強させるような系の場合、磁場の直接測定が不可欠となる。MO 効果によるテラヘルツ波形の時間・空間分解測定技術確立するため、常磁性体である TGG ($\text{Tb}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$) セラミックスを用いてテラヘルツ表面波の MO サンプルング計測を試みた。図 3 に示すように、ワイヤーの直近に TGG を配置し、ワイヤーに沿って伝播するテラヘルツ表面波と垂直にフェムト秒プローブを入射し、TGG 内に入り込んだテラヘルツ波の磁場強度分布を可視化した。図 4 に測定例を示す。テラヘルツ表面波が屈折して TGG 内を伝播するため、斜めに伝播するテラヘルツ波が観測された。この画像を解析することにより、テラヘルツ波のパルス幅は約 2.7ps とわかり、EO 測定の結果とほぼ一致した。

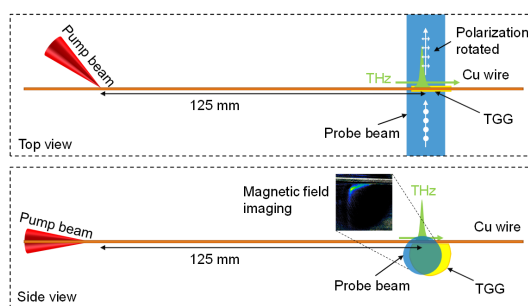


図 3 磁気光学測定の実験配置図

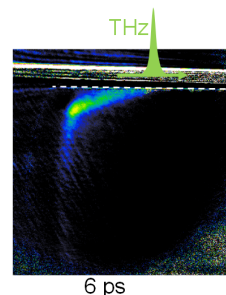


図 4 磁気光学信号

研究テーマ C 「金属箔を利用したテラヘルツ表面波の繰り返し発生」

一本のワイヤーでテラヘルツの発生と導波を兼ねる本手法はシンプルであるが、ワイヤーを固定しながら繰り返しテラヘルツ波を発生させる必要がある応用用途には不向きである。そこで、テラヘルツ波の発生と導波を分離させた手法を提案・検証した。図 5 に示すように 10 μm 程度の薄い金属箔に超高強度レーザーを照射し、その後方から出た高速電子が作る電場をワイヤーに導波させる方法である。実験とシミュレーションの双方により、金属箔とワイヤーの隙間の距離が狭いほどテラヘルツ波の発生効率が高くなることが示された。ワイヤーにレーザーを直接照射する場合と比べ、テラヘルツ表面波の強度は一桁以上低く、発生効率が著しく低いことが課題である。

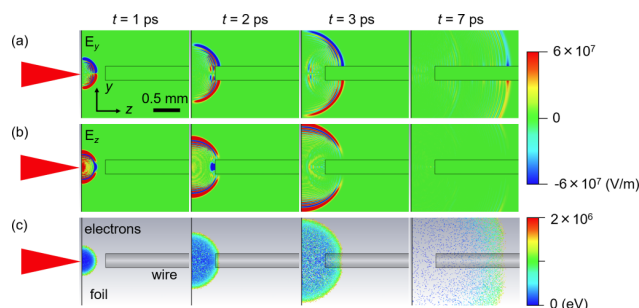


図 5 数値シミュレーション

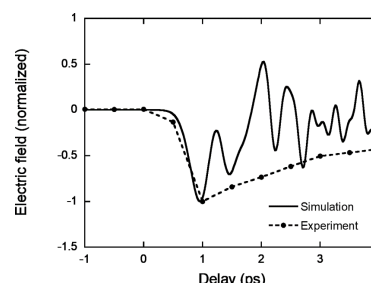


図 6 電場波形のシミュレーションと実験結果

研究テーマ D 「100J 級レーザーによるテラヘルツ発生」

LFEX ベタワットレーザーを用いて、高強度テラヘルツ発生実験を実施した。LFEX レーザー

システムにはピコ秒分解能で時間分解計測を行う光学装置がなかったため、本さがけ研究でプローブレーザー装置を開発した。装置の写真を図1に示す。LFEXレーザーの主発振器から約 10%のパワーの種パルスを分岐し、120m の偏波保持ファイバにて実験室へ伝送した後、Yb:CaF₂ チャープパルス増幅システムにより、1mJ までレーザー増幅を行うシステムとなっている。圧縮後のパルス幅は 500fs 以下、繰り返し周波数は 6Hz である。4 日間に 10 ショットを実施し、およそ 10J~200J のレーザーパルスエネルギー範囲にて、7 つのテラヘルツ電場波形の取得に成功した。しかし、一部の結果で信号が飽和するなどしたため、有用な波形データは 2 ショットのみであった。パルスエネルギー100J にて観測されたテラヘルツ波形を図 8 に示す。パルス幅は約 5ps であり、ワイヤー表面での推定電場強度は約 8MV/cm に達した。テラヘルツのパルスエネルギーに換算すると 15mJ 程度である。入力 が 100J であることから変換効率は 1.5×10^{-4} と低いが、まだまだ改善の余地があると考えている。

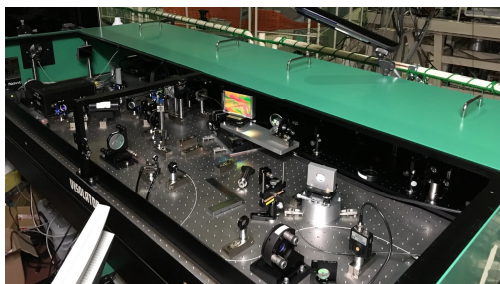


図 7 LFEX プローブレーザー装置

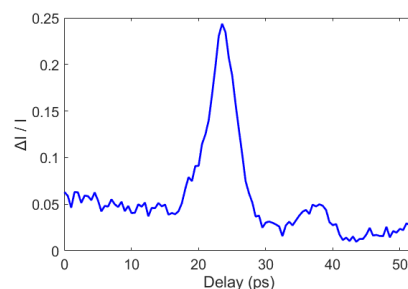


図 8 テラヘルツ電場波形

3. 今後の展開

本研究の最も大きな目的であったテラヘルツ光源としての「スケーラビリティ」の評価について、サブジュール～100 ジュールの入力に対する実験結果が得られたことで、少なくとも 100J 級のレーザーを使った場合でも、テラヘルツ強度の飽和が生じないことが実証された。本手法によるテラヘルツ光源はパワースケーラブルな光源として有望である。しかし、100J 級レーザーでは効率が低下し、テラヘルツ強度は予想より低くなった。LFEXレーザーのパルス幅が 1ps と比較的長かったこと、集光強度が低かったことがこの原因として挙げられる。したがって本研究の目的であった「高効率化」については、今後の課題として残っている。今後、大型レーザーによる実験を再度行い、ジュール級のテラヘルツ発生を目指したい。

4. 自己評価

今後の展開で述べた通り、一番の目的であったスケーラビリティの実証については、テラヘルツフォトンクスやプラズマ物理の分野にとって重要な知見が得られたと評価できる。実験構想から実験準備、実験実施に至るまで長い年月と多大な労力を要する大型装置利用実験において、わずか一回の実験で成果が得られたことは、多数の研究者・技術者のご協力により綿密な計画と準備を円滑に進んだことで成し得えた結果である。一方で、本研究の主な目的の一つであった高効率化について、十分な成果が得られていない。数値シミュレーションなどによる現象の解析の進捗が不十分で、現象の理解が進まなかったことが要因の一つである。理論やシミュレーションを専門とする研究者との連携が不足していたと考えている。

本研究はまだまだ途中段階であり、現象を理解し制御するに至るには引き続き基礎研究が必

要である。今後、テラヘルツ波の発生効率を一桁程度向上させる余地があると推測している。高効率化が実現できれば、テラヘルツフォトニクス及びその関連分野への波及が期待される。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

1. S. Inoue, K. Maeda, S. Tokita, K. Mori, K. Teramoto, M. Hashida, and S. Sakabe, “Single plasma mirror providing 10^4 contrast enhancement and 70% reflectivity for intense femtosecond lasers,” *Applied Optics*, Vol. 55, Iss. 21, 6435–6435 (2016).
2. K. Teramoto, S. Inoue, S. Tokita, R. Yasuhara, Y. Nakamiya, T. Nagashima, K. Mori, M. Hashida, and S. Sakabe, “Induction of subterahertz surface waves on a metal wire by intense laser interaction with a foil,” *Physical Review E*, Vol. 97, Iss. 2, 023204 1–4 (2018).
3. K. Teramoto, S. Tokita, T. Terao, S. Inoue, R. Yasuhara, Y. Nakamiya, T. Nagashima, S. Kojima, J. Kawanaka, K. Mori, M. Hashida, and S. Sakabe, “Half-cycle terahertz surface waves with MV/cm field strengths generated on metal wires,” *Applied Physics Letters*, Vol. 113, Iss. 5, 051101 1–4 (2018).

(2) 特許出願

研究期間累積件数:0 件

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

- | 主要な学会発表 |
|--|
| 1. S. Tokita, S. Inoue, R. Yasuhara, K. Teramoto, T. Nagashima, M. Hashida, and S. Sakabe, “Strong sub-terahertz surface waves generated by relativistic laser pulses”, SPIE Photonics West 2016 (サンフランシスコ、2016 年 2 月 16 日～18 日、招待講演) |
| 2. S. Tokita, K. Teramoto, S. Inoue, R. Yasuhara, T. Nagashima, M. Hashida, J. Kawanaka, N. Miyanaga, and S. Sakabe, “Strong sub-terahertz surface waves generated on metal wires by relativistic-intensity laser pulses”, 41st International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (コペンハーゲン、2016 年 9 月 25 日～30 日、招待講演) |
| 3. K. Teramoto, S. Inoue, S. Tokita, R. Yasuhara, T. Nagashima, Y. Nakamiya, K. Mori, M. Hashida, and S. Sakabe, “Generation of sub-THz surface wave on a metal wire by intense laser interaction with a foil target”, Conference on Lasers and Electro-Optics 2017 (サンノゼ、5 月 14 日～19 日) |
| 4. S. Tokita, K. Teramoto, T. Terao, S. Inoue, R. Yasuhara, T. Nagashima, J. Kawanaka, N. Miyanaga, M. Hashida, and S. Sakabe, “Observation of Faraday rotation induced in TGG by strong THz surface waves propagating along a wire”, CLEO/Europe-EQEC 2017 (ミュンヘン、2017 年 6 月 25 日～29 日) |
| 5. S. Tokita, K. Teramoto, T. Terao, S. Inoue, R. Yasuhara, T. Nagashima, M. Hashida, J. Kawanaka, N. Miyanaga, and S. Sakabe, “Generation of strong terahertz surface waves on metal wires by relativistic-intensity laser pulses”, International Symposium Topical |

Problems of Nonlinear Wave Physics 2017 (モスクワ-サンクトペテルブルク、2017 年 7 月
22 日～28 日、招待講演)

解説論文

1. 時田茂樹, “テラヘルツ帯のパワーフォトンクスへ向けた超高強度テラヘルツ光源”, フォト
ニクスニュース, 第 4 巻, 第 2 号, 2018 年, pp. 47-51.