

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：16101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04928

研究課題名（和文）テラヘルツ渦を用いた三次元計測

研究課題名（英文）Topography using THz vortex

研究代表者

時実 悠（TOKIZANE, Yu）

徳島大学・ポストLEDフォトリクス研究所・講師

研究者番号：80648931

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：らせん状の波面を持つTHz渦を用いた三次元計測における基礎検討を行い、近赤外CWレーザーを用いて、共軸光渦干渉計による螺旋渦位相の測定に成功した。測定可能な高さ範囲が光の波長程度に制限されるため、二波長の可視光のレーザーを用いた光渦干渉計を行い合成波長を生成することで、光渦位相計測における測定可能高さ範囲を拡大した。また、THz渦位相計測光学系を構築し集光THz渦(4THz, チャージ2)の発生に成功した。さらにコリメート光学系に変更しTHz渦発生の実験を行ったが、THz渦は測定されなかった。より強度の強いTHz光源が必要である。以上によりTHz渦位相計測光学系設計の足がかりを得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究ではらせん状の波面を持つテラヘルツ(THz)渦を用いた三次元計測の実現を目的とした。基礎検討の結果、近赤外および可視領域の光で光渦干渉計を実現し、二波長光による測定範囲の拡大を実現した。またテラヘルツ波による渦発生も実現した。THz渦による三次元計測光学系の設計に必要なパラメータや基礎技術を得ることができたため、これらを応用したTHz渦計測の実現が見込まれる。これにより大型なレーザーや分割型の干渉計を必要とせず、簡便な測定系で不透明材料の内部応力分布を可視化が期待される。

研究成果の概要（英文）：We conducted a basic study to realize three-dimensional measurement using a THz vortex with a spiral wavefront. We have (1) succeeded in measuring the helical vortex phase using a coaxial spiral interferometer using a near-infrared CW laser. Since the measurable axial range(MAR) is limited by the wavelength of light, (2) measurement in optical vortex phase measurement was conducted in the spiral interferometer using a two-wavelength visible light laser to generate a synthesized wavelength, which extended the possible MAR. We also constructed a system to generate THz vortex and succeeded in (3) generating a focused THz vortex (4 THz, charge 2). We also assemble the collimating optical system and conducted experiments to generate THz vortices, but no THz vortices were measured on the camera. In the future, it will be necessary to use a THz light source with higher power. As a result, we obtained a foothold for designing an optical system for THz spiral interferometer.

研究分野：テラヘルツ光学

キーワード：非線形光学 テラヘルツ波 干渉計測

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

光を用いた三次元計測は、白色干渉計、光干渉断層計(OCT)、デジタルホログラフィ(DH)など、様々な手法が提案されている。これらの手法は光の位相を巧みに利用して、光の波長オーダー以下の非接触三次元画像計測が可能であり、工業、医療分野等で実用化が目覚ましい。しかし、これらの手法は測定対象が光に透明または散乱の少ない物体に限られる。一方で光と電波の中間の周波数に位置するテラヘルツ (THz)波は光と電波の両者の利点を活かした計測が可能である。THz 波は光に似た直進性を有するため従来のレーザーの様な取り扱いが可能である。また、THz 波は非金属材料に対して電波の様な透過性・低散乱性を有し、光に不透明・散乱のある材料にも計測を可能とする。同様に物質透過性を有する X 線と比べると THz 波 の光子エネルギーは小さいため、空間分解能は劣るが、生体に対する侵襲性が小さく、安全な利用が可能である。これらの特徴は THz 三次元計測に応用され、豊富な提案が行われている。例えば、絵画や書籍の三次元計測[Nat. Comm., 7, 12665(2016)., Opt. Express, 21, 17800(2013).]においては、触れる事のできない貴重な遺物に低侵襲、非接触、三次元的な計測が可能なが報告されており、外見からでは分からない中身の構造を三次元的に明らかにしている。また、THz 三次元計測を応用した応力計測[Opt. Express, 27, 33854(2019).]では、白色のポリマーなど不透明な樹脂材料の内部応力分布を、非接触に可視化している。

THz 波三次元計測の応用利用可能性は幅広いが、THz 帯固有の問題も存在し、光領域の計測とは利用のしやすさの開きがある。上述の三次元計測では THz 波の位相を計測するため、多くの場合フェムト秒レーザーベースの広帯域 THz 光源を利用し、装置が大型化、複雑化、高価格化し、技術的ハードルが高い。一方で、共鳴トンネルダイオードや IMPATT ダイオードなどの単色の連続波(CW)THz 光源は比較的取り扱いが容易であるため、レーザーのような利用ができる。したがって三次元計測技術に単色 CW-THz 波を活用する事が技術革新への近道である。三次元計測に単色 CW-THz 波を用いた例は THz デジタル・ホログラフィ(THz-DH)であるが、THz 波の位相を読み出すために THz 干渉計の構築、光路長の変調機構、複数回の測定などが必要であり装置および取り扱いが複雑化する。

### 2. 研究の目的

THz 渦位相計測に基づく単色 CW-THz 波三次元計測を提案・実証する。渦位相計測[Opt. Lett., 30, 1953(2005).]は空間的に位相の回転する光渦[Phys. Rev. A, 45, 8185(1992).](図 2)を用いた三次元計測であり、らせん状の縞から凹凸の判定及び凹凸の高さ空間分布を計測可能である。これらの原理を単色 CW-THz 波三次元計測において実現・検証する。THz 渦の空間位相を三次元計測に積極的に活用する独自の研究であり、極めてシンプルで汎用性の高い THz 波三次元計測手法を創造する。

### 3. 研究の方法

#### (1)光領域における光渦位相測定の実験原理検証

初めに、近赤外 CW レーザーを用いて、THz 渦三次元計測のための基礎検討を行った。1.5  $\mu\text{m}$  帯の近赤外レーザーを用いて光渦を発生し、共軸光渦干渉系を構築した。また、らせん干渉縞から位相分布を再現するアルゴリズムを構築した。アルゴリズムでは得られた強度分布を円筒座

標系に変換し、一つの方位角度における軸方向の一次元データを一次元フーリエ変換する。変換したデータの回折成分のみを逆フーリエ変換することで位相成分を取り出す。DHの位相解析手法を一次元に適用したものである。変換した一次元データは複素数であり、振幅と位相を持つ。偏角成分が位相である。これにより動径方向の位相成分を取り出すことができる。上記の操作を方位角度ごとに行い位相の二次元分布を得る。

## (2)光領域における合成波長光渦位相測定

共軸光渦干渉計から得られる位相情報は、サンプルの三次元形状の情報を含む一方で、位相折り返しと呼ばれる測定データの飛びを含む。位相ラッピングは光の位相折り返しに起因し、復元可能な高さ範囲を測定波長程度に制限する要因となる。位相折り返しを解消するため、二波長の可視光のレーザーを用いて光渦を発生し共軸光渦干渉系を構築した。使用するレーザー光の波長はそれぞれ 633 nm と 532 nm である。サンプルに油浸レンズ用の油滴を用い、サンプル形状に由来した光渦干渉縞の二波長計測を行った。

## (3)テラヘルツ渦発生を検証

THz 渦干渉計の設計のため、初めに THz 渦発生を行なった。Tsurupica 樹脂を用いた螺旋位相板を発生用素子として用いた。周波数 4THz の量子カスケードレーザーと非冷却ポロメータアレイを用いて、集光 THz 渦の観測を行った。さらに本提案で用いるコリメート光学系に変更し THz 渦発生の実験を行った。

# 4 . 研究成果

## (1)光領域における光渦位相測定の原理検証

サンプルから得られる位相遅れ分布の再現に成功した。光渦による三次元形状測定手法を確立したことにより、近赤外領域における測定可能なサンプル形状や、測定に必要な光学系のパラメータ取得が可能となった。これにより今後実施する THz 渦三次元計測の光学系設計の手掛かりを得た。

原理検証のための実験系は図 1(a)の通りである。光源に 1570 nm の近赤外レーザーを用いた。サンプルには油浸レンズ用のオイルを用いた。図 1(b)に得られた実験結果を示す。螺旋状の干渉縞を観測した。光渦と球面波を干渉させた場合に生じる干渉縞に類似する。サンプルの高さによって生じた光学遅延によって生じた干渉縞のプロファイルは、サンプルの三次元構造の情報を含む。干渉縞から位相を回復するために、デジタルホログラフィ(DH)の解析手法に類似したアルゴリズムを用いた。図 1(c)は上記の手法によって得られた位相分布である。動径方向に位相折り返しが見られる。これは、油滴の高さが波長/ $\Delta n$  以上であるため生じている。 $\Delta n$  は油滴と空気の屈折率差である。この回数から油滴の高さは波長/ $\Delta n$  の 4 倍程度であることが読み取れる。以上より、1570 nm を用いた本手法によって高さ 10  $\mu\text{m}$  程度の構造が測定可能であることがわかった。

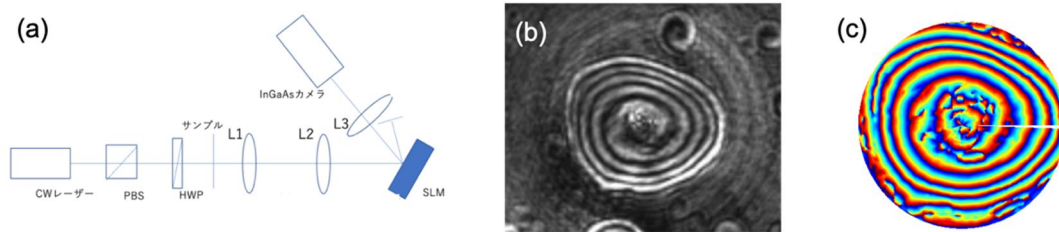


図 1 (a)光渦干渉計における実験光学系 (b)測定された螺旋干渉縞 (c)解析によって復元した位相分布

## (2)光領域における合成波長光渦位相測定

光渦位相測定で得られた位相分布は動径方向に多数の位相折り返し(ラッピング)を生じている。位相折り返しはアンラップ処理と呼ばれるデジタル処理によって、取り除くことができるが、処理による解析エラーを伴う。またアンラップ処理を行わない場合、測定できる構造の高さが波長/ $\Delta n$ に限定される。これらの制限を取り除くため、合成波長を用いた光渦位相計測を試みた。合成波長位相計測は DH で用いられる手法である。この手法では、波長の異なる光で別々に測定した位相分布の差を取ることで、仮想的に合成波長で測定した位相分布を求める手法である。合成波長 $\lambda_{synth}$ は用いたレーザー光の二波長 $\lambda_1, \lambda_2$ を用いて下記のように表せる。

$$\lambda_{synth} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}$$

合成波長を用いることで、アンラップ回数の低減や測定可能な構造高さの制限を緩和できる。本研究では波長 633 nm と 532 nm のレーザー光を同軸に配置し、これらの光を切り替えることでそれぞれ光渦位相測定を行った。

異なる波長により光渦位相計測を行い求めた位相分布を図 2(a)(b)に示す。動径方向の位相分布を調べると、同じ範囲で進む位相シフトが 532 nm の結果では 633 nm の結果に比べて 1.26 倍に拡大されていることが分かった。これは二波長の比 1.19 に近い値であり、二波長による位相計測が正しく行われていることを示す。また図 2(c)は二つの位相分布の差である。合成波長 3.3  $\mu\text{m}$  で計測した結果に等しい。このため、合成波長の位相分布は位相折り返しの回数が低減されている。このことは最大測定可能な高さが拡大されていることを意味する。

以上により、合成波長の光渦位相計測を実現し、光渦位相計測における測定可能高さの拡大を実現した。

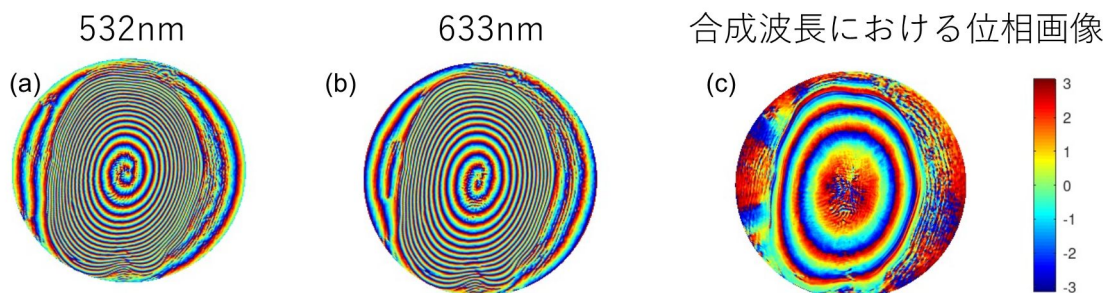


図 2 測定された螺旋位相分布(a)波長 532 nm のレーザー光を用いた場合(b)波長 632 nm のレーザー光を用いた場合。(c)二波長の測定結果から解析した合成波長における位相分布

### (3)テラヘルツ渦発生の検証

Tsurupica 樹脂を用いた螺旋位相板をテラヘルツ波発生用素子として用いた。テラヘルツ波には数 THz 付近で比較的高出力な CW-THz 波の発生が可能な量子カスケードレーザー(QCL)を用いた。THz 波の周波数は 4.0 THz である。出力は  $4\mu\text{W}$  である。受光には NEC 社製の非冷却ポロメータレイ(THz カメラ)を利用した。

QCL から発生した THz 波、および螺旋位相板を挿入した THz 波の二次元プロファイルを観察した。THz カメラ上では THz 波を集光して観測を行った。図 3 に測定された THz 波のプロファイルを示す。QCL から発生した THz 波において、ガウス状のプロファイルが測定された。螺旋位相板を挿入した場合は、ドーナツ状のプロファイルを観測した。さらにテラヘルツ渦の発生を確認するため、レンズを傾けた光学系によってトポロジカルチャージの観測を行った。

この方法でビームパターンが  $m+1$  個( $m$  はトポロジカルチャージ)に分裂するため、チャージを測定できる。位相板なしとありの場合でビームパターンは 2 個、3 個に分裂したことから、それぞれガウス光( $m=1$ )および、 $m=2$  のテラヘルツ渦が発生したといえる。螺旋位相板は 2.0THz で  $m=1$  の THz 渦を発生させる設計であるため、矛盾のない結果であった。

本研究で提案する共軸型のテラヘルツ波干渉計は、サンプルにコリメート THz 波を照射し、カメラ面でもコリメート THz 波を受光する必要がある。このため光学系をコリメート光に変更し実験を行ったが THz 波はカメラ上で測定されなかった。これは THz 波の強度が不十分なためである。コリメート化によって THz 波のビーム径が拡大され、強度が低下するためと考えられる。今後は、より強度の強い THz 光源やより感度の高い THz カメラを用いる必要がある。

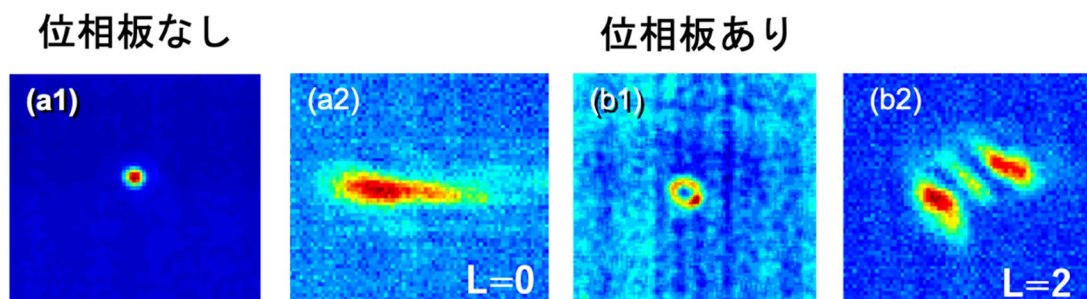


図3 THz 波の二次元プロファイル (a1)位相板がない場合(b1)位相板がある場合の THz 波二次元プロファイル。傾けたレンズ通過後における(a2)位相板がある場合(b2)無い場合の二次元プロファイル

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Tokizane Yu, Takashima Ayato, Hase Eiji, Yasui Takeshi	4. 巻 49
2. 論文標題 Dual-wavelength spiral interferometry	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 3516 ~ 3519
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OL.525588	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 Hase Eiji, Tokizane Yu, Sadahiro Kazuki, Minamikawa Takeo, Morohashi Isao, Yasui Takeshi	4. 巻 31
2. 論文標題 Nanometer-precision surface metrology of millimeter-sized stepped objects using full-cascade-linked synthetic-wavelength digital holography using a line-by-line full-mode-extracted optical frequency comb	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 18088 ~ 18088
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.483408	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 Tokizane Yu, Yamaguchi Takayoshi, Minamikawa Takeo, Hase Eiji, Yamaguchi Kenzo, Suzuki Akihiro, Ueda Takao, Yasui Takeshi	4. 巻 30
2. 論文標題 Ultralow-frequency ultranarrow-bandwidth coherent terahertz imaging for nondestructive testing of mortar material	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 4392 ~ 4392
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.449092	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7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 高島 綾人、時実 悠、長谷 栄治、安井 武史
2. 発表標題 可視光の合成波長を用いた光渦位相計測
3. 学会等名 50周年記念レーザー学会 学術講演会 第44回年次大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 高島綾人, 時実悠, 長谷栄治, 安井武史
2. 発表標題 複数波長を用いた光渦位相計測の検討(2)
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高島綾人, 時実悠, 長谷栄治, 安井武史
2. 発表標題 複数波長を用いた光渦位相計測の検討
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yu Tokizane, Ayato Takashima, Eiji Hase and Takeshi Yasui
2. 発表標題 Evaluation of measurable axial range in optical vortex interferometer
3. 学会等名 Optics&photonics international congresss ( 国際学会 )
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 貞廣 知輝, 時実 悠, 長谷 栄治, 南川 丈夫, 安井 武史
2. 発表標題 光コムを用いた高速波長走査型デジタル・ホログラフィーに向けた基礎検討
3. 学会等名 日本光学会年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 貞廣 知輝, 時実 悠, 長谷 栄治, 南川 丈夫, 安井 武史
2. 発表標題 マイクロ光コムを用いた波長走査型デジタル・ホログラフィーに関する基礎研究
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

1. 発表者名 貞廣 知輝, 時実 悠, 長谷 栄治, 南川 丈夫, 諸橋 功, 安井 武史
2. 発表標題 光コムを用いた波長走査型デジタル・ホログラフィーに関する基礎研究(2) モード抽出10GHz光コムの基礎検討
3. 学会等名 第69回応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究協力者	安井 武史  (YASUI Takeshi)		

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