

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：82626

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26620021

研究課題名(和文)テラヘルツ領域における世界初の円二色性スペクトル計測への挑戦

研究課題名(英文)Trial to measurement of circular dichroism spectrum in the terahertz region

研究代表者

田中 真人(Tanaka, Masahito)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・企画主幹

研究者番号：30386643

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではテラヘルツ帯の波長領域における円二色性や光学活性(旋光性)などに代表される円偏光を用いた分析手法の構築のための偏光度評価法、偏光素子評価法などの要素技術の開発などを行った。テラヘルツ光源として、主に産業技術総合研究所所有のS-band小型電子加速器を用いた。テラヘルツカメラや面内回転可能な位相子などで構成される偏光度評価システム等を構築し、加速器から発生するラジアル偏光したテラヘルツ光の強度や偏光成分(直線偏光、円偏光)の二次元分布の観測に成功した。また1/4波長板の挿入による左右円偏光の発生と二次元分布の観測にも成功した。

研究成果の概要(英文)：In the terahertz wavelength region, spectroscopic technique by using circular polarization, such as circular dichroism and optical rotation, has not been established yet. In this work, for establishing the circularly polarized spectroscopy in the terahertz region, we have developed the component technologies for the polarization analysis and evaluation of polarized optics, by using the strong coherent terahertz radiation emitted from a linear accelerator. The polarization analysis system composes of a terahertz camera as a detector, phase shifter, and linear polarizer. We succeeded in observing the two-dimensional distributions of light intensity and linear and circular polarizations of radially polarized light. Moreover, we also observed the occurrence and distribution of left and right circularly polarized light by inserting a quarter wave plate.

研究分野：化学

キーワード：化学物理 加速器 テラヘルツ/赤外材料・素子 計測工学 物性実験

### 1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ領域における分光計測はセキュリティ(爆薬・不正薬物検査)、医療・バイオテクノロジー、半導体、非破壊検査など多種多様な分野への応用が進められている。その関連市場は2015年度予測で7000億円以上、波及効果は2兆円にも達すると予測され、産業・学術双方において今後の大きな発展が期待されている。

テラヘルツ分光計測技術は近年進歩を遂げているが、まだ他の波長領域と比べて大きく立ち遅れている点がある。それは偏光、特に円偏光を用いた分光計測手法である。円偏光を用いた分光計測手法として、左右円偏光間の吸収の差である円二色性、屈折率の差である光学活性が挙げられる。これらは赤外～X線といった殆どの光領域において計測装置が開発・市販されている。しかしテラヘルツ領域での開発は、その信号の微弱さも相まって殆ど進んでいないのが現状である。

テラヘルツ領域において円偏光を用いた分光手法は上記の内、特に不正薬物(特に麻薬)検査、医療・バイオテクノロジー分野の発展に多大な寄与を及ぼす。例えば麻薬検査では容器の種類や厚さ、湿度などの計測環境の変化などの影響をゼロに出来ることから、大幅な検査精度の向上が可能になると期待されている。

### 2. 研究の目的

本研究課題では上述のようにテラヘルツ領域において、円二色性や光学活性などに代表される円偏光を用いた分析手法の構築のための偏光度評価法、偏光素子評価法、検出器安定化技術など基盤技術の開発、ならびに計測手法確立のための指針を明らかにすることを最終目的として、研究開発を進めてきた。特に光学活性・円二色性の信号は非常に弱く、かつ光学素子などの光学系や試料の異方性に起因する偽の信号成分(直線二色性など)が重畳してくることが知られているため、各光学素子や検出器の高度化や、円偏光発生手法や偏光度評価、光学素子評価手法は非常に重要な基盤技術である。

### 3. 研究の方法

テラヘルツ (THz とも記述) 光源として、主に産業技術総合研究所所有の S-band 小型電子加速器ならびに Extended Interaction クライストロン(EIK)光源を研究内容に応じて選択して用いた。EIK 光源からは主に高強度な 0.1 THz の単色光が得られ、電子加速器からは主に 0.1 ~ 5 THz 間の高ピーク強度の連続テラヘルツ光が得られる。電子加速器利用時は、短パルス(1ピコ秒以下)に圧縮した電子ビームを Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> やタンゲステンなどのターゲットに衝突させ、その際に発生するコヒ

ーレント遷移放射によるテラヘルツ光を主に利用して実験を行った。

図1には電子加速器を光源として開発した偏光度評価および光学素子評価のためのコヒーレント遷移放射テラヘルツ光の偏光分布観測システムの概要を示す。

### 偏光分布観測システムの概略

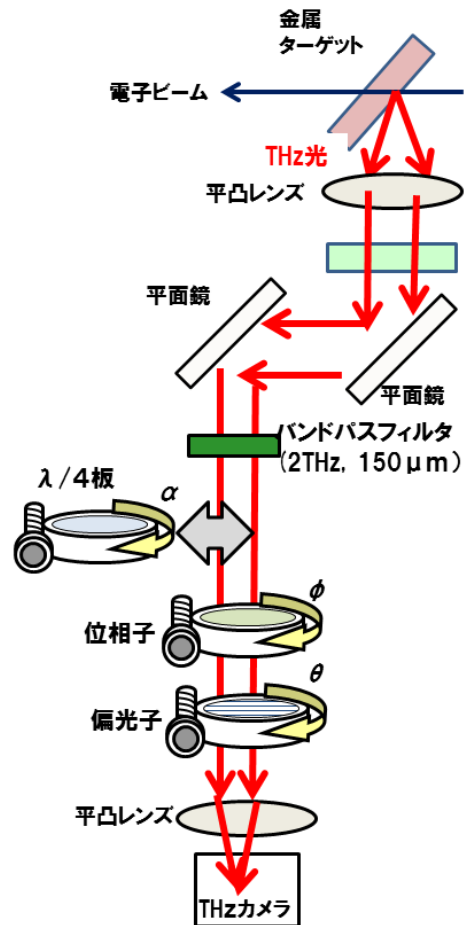


図1 開発したテラヘルツ光の偏光分布観測システムの概要

金属ターゲットは電子ビームに対して 45° 方向に置かれているため、電子ビーム照射によりターゲットから発生するテラヘルツ光は 90° 方向に伝播する。そのテラヘルツ光は平凸レンズにより準平行光にされた後、加速器の窓とミラー二枚により、偏光分布システムまで伝播される。さらに位相子と直線偏光子を通過させた後、テラヘルツカメラを用いてテラヘルツ強度の二次元分布を観測した。

そのテラヘルツ光は連続光であるため、まずバンドパスフィルタで単色化した。位相子と直線偏光子それぞれの面内回転角度(それぞれ図中φとθ)を変えた光強度の二次元分布を計測することで偏光度解析を行った。またそのための計測・解析プログラムを構築した。さらに 1/4 波長板もしくは 1/2 波長板の挿入による偏光度の二次元分布の変化を観測した。

本実験では中心帯域 2 THz のバンドパスフィルタおよびその波長に対応した位相子、偏

光子、1/4 波長板、1/2 波長板を用いて実験を行った。位相子は水晶製で位相差  $\Delta$  が 2 THz で  $\sin\Delta = 0.89$  のものを、偏光子はワイヤグリッド型直線偏光子、1/4 波長板、1/2 波長板は波長 148  $\mu\text{m}$  ( $\sim 2$  THz) に対応した厚さに切り出した水晶製のものを用いた。テラヘルツカメラとして、NEC 製 IRV-T0831 に赤外線カットフィルタを搭載したものを用いた。

#### 4. 研究成果

図 2 にコヒーレント遷移放射テラヘルツ光の強度、 $0^\circ$ — $90^\circ$  直線偏光成分、 $45^\circ$ — $135^\circ$  直線偏光成分、左右円偏光成分の 4 成分、すなわち Stokes ベクトルの二次元分布観測結果を示す。

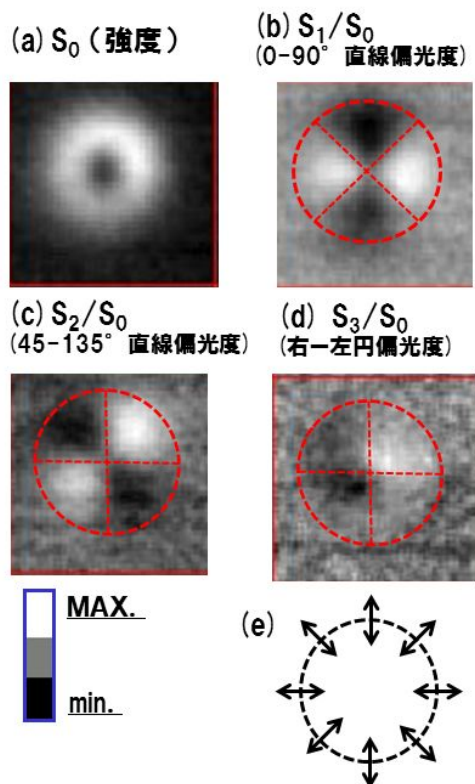


図 2 コヒーレント遷移放射テラヘルツ光の (a) 強度、(b)  $0^\circ$ — $90^\circ$  直線偏光成分、(c)  $45^\circ$ — $135^\circ$  直線偏光成分、(d) 左右円偏光成分の二次元分布観測結果、(e) 観測から得られた偏光分布の概要図。

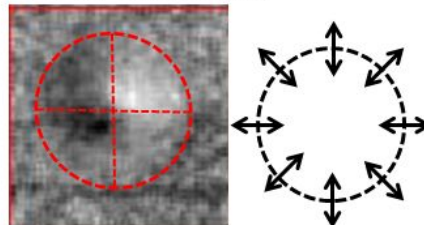
遷移放射テラヘルツ光は、ラジアル偏光と呼ばれる中心から放射状に直線偏光成分を有する偏光を発生することが知られている。図 2 の結果では、まず図 2(a)に見られるように、強度がドーナツ型に分布している。これは中心部分では偏光成分が互いに打ち消しあっているためであり、ラジアル偏光の特徴の一つである。また図 2 (b),(c)で分かるように、直線偏光成分が場所によって放射状に分布しており、かつ図 2 (d)で示すように円偏光成分は明瞭には観測されなかった。これらと統合すると図 2 (e)のような偏光分布をして

いるとわかり、この結果はまさにラジアル偏光の偏光成分の二次元分布を計測することに成功したと言える。

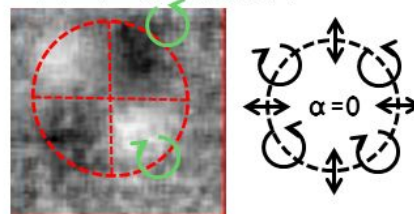
さらに図 1 に示すように位相子の入流に 1/4 波長板を入れた場合の左右円偏光成分の二次元分布観測結果を図 3 に示す。

#### $S_3/S_0$ (右-左円偏光度) の変化

##### (a) 1/4 波長板無し



##### (b) 1/4 波長板有り、 $\alpha = 0^\circ$



##### (c) 1/4 波長板有り、 $\alpha = 45^\circ$

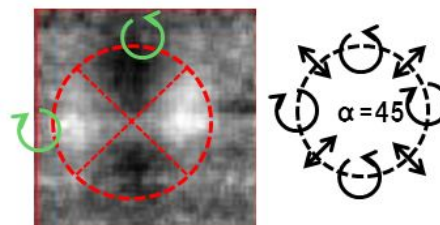


図 3 1/4 波長板を入れた場合の左右円偏光成分の変化。(a) 波長板が無い場合、(b) 角度  $0^\circ$  で 1/4 波長板を入れた場合、(c) 角度  $45^\circ$  で 1/4 波長板を入れた場合の結果。右図はそれぞれ観測から得られた偏光分布の概要図。

図 3 で分かるように、1/4 波長板無しでは明瞭ではなかった円偏光成分が、1/4 波長板を入れることによって、明確な白黒のコントラストが見られるようになった。これは 1/4 波長板の挿入による円偏光の発生と、円偏光の左右が二次元分布していることを示している。さらにその分布が 1/4 波長板の角度を回転させることで変化することも確認した。またこれにより波長板が正確に動作していることも確認することに成功した。

またテラヘルツ検出器の安定化方法の確立に成功した。用いているテラヘルツ検出器はボロメータなど熱を検出して、強度を計測するものであるため、検出器近くに人など温度を発生するものがあるだけで、偽の信号を検出してしまう。またテラヘルツ光は水に強く吸収されるため、周囲の温度変化による湿

度の変化によってもテラヘルツ光強度が変化する可能性が高い。そこでできる限り不要な熱・光成分を遮ることのできる検出器システムを開発した。これにより検出器信号のドリフトや人など由来のノイズ成分を大きく削減することに成功した。さらに遮光かつ雰囲気温度を 0.1 の精度で制御できる光学システムも構築した。

このように将来的な光学活性・円二色性の計測に不可欠な基盤技術の開発に成功した。特に左右円偏光の発生と切り替えは、光学活性・円二色性の計測において最も重要であるが、その基礎となる偏光観測・制御技術を開発し、その二次元分布の観測手法まで構築できたことは今後の計測手法の発展に大きく寄与するものであると言える。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

##### [雑誌論文](計 1 件)

平 義隆、坂上 和之、黒田 隆之助、田中 真人、豊川 弘之、富澤 宏光、  
Development of Non-Invasive Electron Beam Position Monitor Based on Coherent Diffraction Radiation from a Slit ,  
Proceedings of IBIC2014 , pp.442-446、  
2015/04、査読無

##### [学会発表](計 9 件)

田中 真人、小川 博嗣、乙川 光平、豊川 弘之、円偏光を用いた磁性体・キラル物質の分析技術の開発、2015年度計量標準総合センター成果発表会、産総研(茨城県つくば市)、2016/02/09

豊川 弘之、黒田 隆之助、平 義隆、田中 真人、(他13名)、産総研電子加速器施設の現状(招待講演)、第29回日本放射光学会年回、東京大学柏の葉キャンパス(千葉県柏市)、2016/01/10

田中 真人、中川 和道、Conformational analysis of chiral molecules by vacuum ultraviolet circular dichroism (招待講演)、TSRP2016 & APSRC2016、ムンバイ(インド)、2016/01/06

黒田 隆之助、田中 真人、平 義隆、豊川 弘之、坂上 和之、D.K. Palit、Development of the high-power THz spectroscopy and imaging systems on the basis of an ultra-short electron linac (招待講演)、TSRP2016 & APSRC2016、ムンバイ(インド)、2016/01/06

平 義隆、坂上 和之、黒田 隆之助、田中 真人、豊川 弘之、富澤 宏光、  
Measurement of polarized coherent diffraction radiation from a slit and an edge ,  
XI International Symposium Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures ,  
サンクトペテルブルク(ロシア)、

2015/09/09

田中 真人、平 義隆、黒田 隆之助、坂上 和之、豊川 弘之、Polarization imaging of coherent transition terahertz radiation with S-band compact electron linac at AIST , The 3rd International Symposium on Microwave/Terahertz Science and Applications (MTSA 2015)、沖縄科学技術大学院大学(沖縄県国頭郡)、2015/07/01

平 義隆、黒田 隆之助、田中 真人、豊川 弘之、富澤 宏光、テラヘルツ領域におけるコヒーレント遷移放射及び回折放射の偏光状態の測定、日本物理学会第70回年次大会、早稲田大学(東京都新宿区)、2015/03/24

田中 真人、平 義隆、黒田 隆之助、坂上 和之、豊川 弘之、産総研Sバンド小型リニアックからのコヒーレントテラヘルツ放射の偏光度二次元マッピング、第28回日本放射光学会年会、立命館大学(滋賀県草津市)、2015/01/12

平 義隆、坂上 和之、黒田 隆之助、田中 真人、豊川 弘之、富澤 宏光、  
Development of Non-Invasive Electron Beam Position Monitor Based on Coherent Diffraction Radiation from a Slit ,  
International Beam Instrumentation Conference 2014 ,モントレイ(アメリカ)、  
2014/09/16

##### [その他]

ホームページ等

Masahito Tanaka の研究紹介

<https://staff.aist.go.jp/masahito-tanaka/>

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

田中 真人 (TANAKA, Masahito)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・企画主幹

研究者番号：30386643

##### (2)研究分担者

平 義隆 (TAIRA, Yoshitaka)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・分析計測標準研究部門・研究員

研究者番号：60635803

##### (3)研究分担者

黒田 隆之助 (KURODA, Ryunosuke)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・分析計測標準研究部門・主任研究員

研究者番号：70350428