

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：82626

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24655022

研究課題名(和文)テラヘルツ領域での先駆的な円二色性・光学活性計測手法の構築と検出への挑戦

研究課題名(英文)Challenge to development of circular dichroism and optical activity detection system in the terahertz region

研究代表者

田中 真人(Tanaka, Masahito)

独立行政法人産業技術総合研究所・計測フロンティア研究部門・主任研究員

研究者番号：30386643

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：本課題はテラヘルツ領域における光学活性もしくは円二色性の計測システムの構築とその検出を最終目標とした。まずその基礎となる円偏光の発生・制御システムと偏光度解析システムの開発を行い、加速器光源からのテラヘルツ光の水平直線偏光状態、右円偏光状態の制御と確認に成功した。これを基として発振器光源を用いてテラヘルツ領域の光学活性計測システムを構築し、水晶を試料として端緒の光学活性計測を波長0.1THzで行った。

研究成果の概要(英文)：Our aim is to develop the observation system for optical activity and/or circular dichroism in the terahertz region and its detection. At first, we developed the polarization control system and the polarization analysis system in the terahertz region. These systems were composed of wire-grid type linear polarizers and phase shifters made of x-cut quartz crystal. The intense coherent terahertz radiation from the S-band linac was used as a light source. It was confirmed that horizontally linear polarization and right elliptical polarization was generated from polarization control system. Based on these systems, we developed optical activity measurement system. We preliminary measured the rotation angle of z-cut quartz crystal at frequency of about 0.1 THz from the terahertz oscillator.

研究分野：化学

科研費の分科・細目：基礎化学・物理化学

キーワード：化学物理 加速器 テラヘルツ 計測工学 物性実験 キラリティ

### 1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ光を用いた分光計測は様々な分野への応用が期待されている。例えば、医療・バイオテクノロジー、爆薬・禁止薬物検査などのセキュリティ分野、半導体などその範囲は多種多様を極める。

テラヘルツ領域における分光計測技術は近年進歩しており、一般的な可視紫外領域と同様にその吸収や屈折率スペクトルの計測が簡便に行えるようになりつつある。しかし未だ円偏光を用いた分光手法の開発は他と比べて遅れている。

円偏光を用いた分光計測手法として、左右円偏光間の屈折率の差である光学活性（もしくは円複屈折とも呼ぶ）や吸収の差である円二色性が挙げられる。これらは赤外～可視紫外域といった波長領域のほとんどで計測装置が開発・市販されており、近年は放射光を用いて真空紫外域からX線域においても研究開発が進められている。

しかしながらテラヘルツ領域でのこれら計測手法の開発は殆ど進んでいないのが現状である。Xuらはテラヘルツ領域における生体分子の円二色性計測装置のプロトタイプ構築や理論計算を行い、らせん状物質やタンパク質水溶液の円二色性計測を試みた(Xu et al., Proc. SPIE, **5268**, 2004, 19)が、大きい計測誤差や計測点数の少なさなどからまだ正確な円二色性計測に成功したとは言えず、物質のキラリティ由来のテラヘルツ領域における円二色性、光学活性計測例は殆どないと言える。

その原因として、分子のキラリティ（分子構造）由来の光学活性もしくは円二色性の信号強度が非常に微弱であることが考えられる。例えば可視紫外域では円二色性強度は光吸収の0.1～1%が一般的であり、赤外域ではさらに桁小さいことが知られている。さらに円二色性信号等よりはるかに強い光学系・試料に由来する“偽”の信号成分の影響やテラヘルツ光自体の強度の弱さなど多くの技術的課題も残されている。

### 2. 研究の目的

本研究課題は上述した困難さを解決して、テラヘルツ域における光学活性もしくは円二色性の計測システムの構築とその検出、およびその基礎となる円偏光の発生・制御システムと偏光度解析システムの開発を加速器もしくは発振器といった高強度テラヘルツ光源を用いて目指すものである。また併せて上記光源の最適化も行う。

上記計測手法の確立によって、特に医療・バイオテクノロジーやセキュリティ分野において、より高精度な分析が可能になるなど多大な寄与が期待される。

研究代表者の田中は今までに極紫外域や軟X線領域において世界初のキラリティ由来の円二色性スペクトルの検出とその計測システムの開発に成功してきた実績を有してい

る。また研究分担者らは加速器ベースの高強度テラヘルツ光の発生に成功している。これら研究グループの知見を融合させることで、上記目標の達成に挑戦した。

### 3. 研究の方法

まず加速器からのテラヘルツ光を用いて、円偏光を制御させるシステムならびにその偏光度を計測するシステムの構築を行った。これらシステムは面内回転機構を有するテラヘルツ領域に対応した直線偏光子、位相子で主に構成した(図1参照)。

光源として、産業技術総合研究所つくばセンターに整備しているSバンド小型加速器を用いた。本加速器は電子源であるレーザーフォトカソードRF電子銃と磁気パルス圧縮を行うアクロマティックアーク部により、1ps以下の超短パルス電子ビーム(電子エネルギー約40MeV)を発生させることができる。この超短パルス電子ビームを偏向電磁石で曲げることによって発生するコヒーレントシンクロトロン放射を用いて、円偏光制御・解析実験を遂行した。

図1に示すように偏光制御システムは直線偏光子(図1のP1)硬化ポリエチレン製、ワイヤグリッドタイプ)と位相子(図1のQ1)(x-cut水晶波長板)およびそれらを面内回転させることができる自動回転ホルダーで構成されている。ここで位相子は波長約1mm(0.3THz)の1/4波長板を使用した。また偏光解析システムも同様の光学素子を用いて、直線偏光子と位相子の配置を逆(図1のP2、Q2に対応)したものを構築した。

小型加速器からのテラヘルツ光を導波管とレンズを用いて、疑似平行光にした後、偏光制御システム、偏光解析システムを通過させ、再びレンズを用いて集光し、検出器に入射させた。ここで検出器として、0.3THzに共振周波数をもつ検波器を用いた。そのため本実験では主に波長0.3THzでの偏光制御と解析を行ったと言える。

偏光状態を記述する手法としてミュラー行列とストークスベクトルを本研究では用いた。ストークスベクトルとは $S = (S_0, S_1, S_2, S_3)$ という四つのベクトル量を用いて光の偏光状態を表すものであり、 $S_0, S_1, S_2, S_3$ はそれぞれ、光の強度、水平鉛直方向の直線偏光度、45度135度方向の直線偏光度、右左円偏光度を表す。それぞれ最初に記述した方向が正である。

偏光制御システムはP1、Q1の角度(それぞれ、)で光の偏光状態を変えることができる。偏光解析システムではQ2、P2の角度(それぞれ、)を変えて光強度を計測することで、偏光制御システム出射光のストークスベクトル $S_1, S_2, S_3$ を $S_0$ で規格化した値である $S_1/S_0, S_2/S_0, S_3/S_0$ を決定できる。

またテラヘルツ光検出システムとしてショットキーダイオードならびにボックスカー積分器による高精度なパルス光強度計測

システムも構築した。

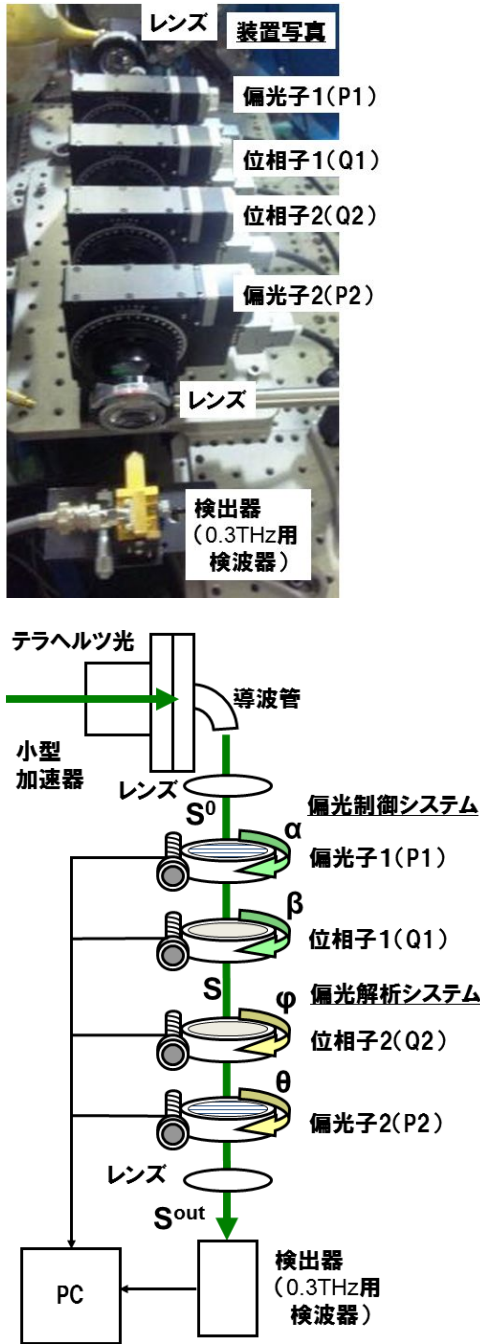


図1 構築したテラヘルツ光に対応した偏光制御システムと偏光解析システムの写真(上)と模式図(下)

#### 4. 研究成果

上記の偏光制御、偏光解析システムを用いて、水平直線偏光配置 ( $\alpha = 0^\circ$ ) と右円偏光配置 ( $\alpha = 0^\circ, \beta = 45^\circ$ ) と予測される状態での偏光計測を行った。この時、偏光解析システムでは  $\alpha$  と  $\beta$  をそれぞれ  $0^\circ$  から  $135^\circ$  まで  $45^\circ$  ずつ回転させ、計 16 点の角度での光強度を計測し、偏光度を決定した。この時各偏光素子は理想条件であり、レンズや検出器の特性を無視できると仮定した。また本実験では検波器からの信号強度を

二乗することで、光強度の値とした。

水平直線偏光配置では  $(S_1/S_0, S_2/S_0, S_3/S_0) = (1.11, -0.30, 0.17)$  と予想通り水平偏光成分が主成分である偏光状態の発生・確認に成功した。また右円偏光配置では  $(S_1/S_0, S_2/S_0, S_3/S_0) = (0.83, -0.11, 0.67)$  の値が得られ、円偏光成分である  $S_3$  の強度が大きく増加した結果が得られた。これは水平偏光配置よりも円偏光度が大幅に増大しており、右楕円偏光状態であることを示している。得られた偏光状態を図2に図示した。水平配置の結果では1を超えるベクトル値が得られているが、これは計測誤差ならびに各光学素子の性能の理想的条件からの差異によるものと推察される。

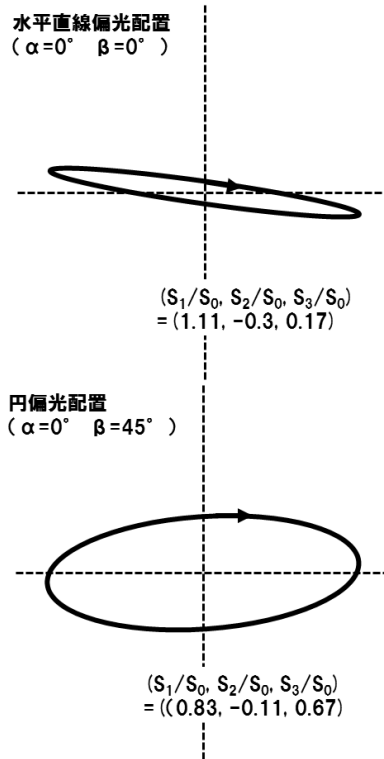


図2 水平直線偏光配置(上)と右円偏光配置(下)で得られた偏光度の結果(波長 = 0.3THz)

また上記システムを基礎として、端緒の光学活性計測システムの構築を行った。そのシステムの概要を図4に示す。光学活性システムは2つの直線偏光子(図4のP1、P2に対応)とその間に試料を配置している。それぞれが自動回転ステージで面内回転できる。

テラヘルツ光源として発振器を用いた。この光源は発振器、プリアンプ、減衰器およびクライストロンで構成されており、約0.1THzのテラヘルツ光を高強度で発生できる。

クライストロンにより増幅されたテラヘルツ光はホーンアンテナとレンズを通して、疑似平行光になり、光学活性計測システムに入射される。その後検出器(パワーメータ)で光強度を検出した。この時光スポット径は直径約10-15mm程度であった。

一枚目の直線偏光子の面内角度(図4、 $\alpha$ )を固定し、二枚目の直線偏光子の面内回転角度(図4、 $\beta$ )を変えて、光強度を計測した。この時二枚の直線偏光子は基本的にクロスニコル状態にあり、最も光強度が小さい角度(消光角)の試料有無での変化を計測することで、試料の旋光角度の検出を試みた。光学活性は左右円偏光での屈折率の差であるが、直線偏光が試料を透過した際の偏光面の回転角度によって計測されるのが一般的である。またこの時試料の面内角度(図4、 $\theta$ )を $22.5^\circ$ 刻みで変えて、光学系のミスアライメントによって生じる直線複屈折の影響を検討した。試料として厚さ47mm、20mm角のz-cut水晶を用いた。

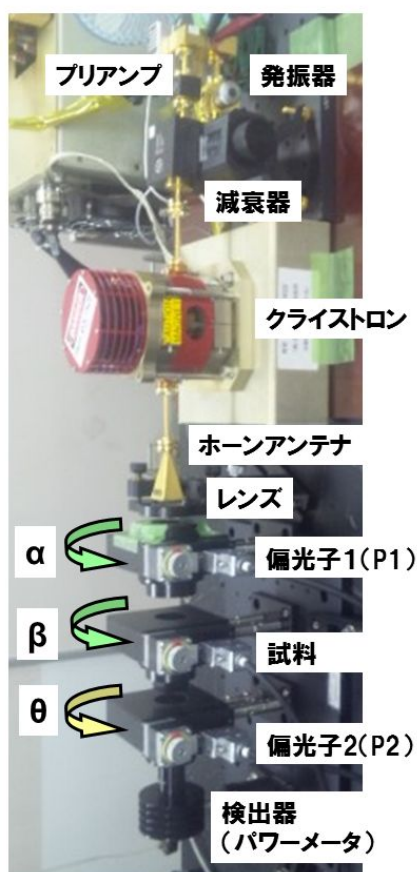


図4 端緒の光学活性計測システムの写真

その結果約 $3^\circ$ (約 $0.06^\circ/\text{mm}$ )の偏光面の回転を観測した。現在再現性や波長変化等の実験を進めている。この値は可視光領域の約 $20^\circ/\text{mm}$ の値と比べて $1/300$ 程度であり、テラヘルツ領域での光学活性は可視光領域と比較して非常に弱いと推測される。

本実験から計測精度をより向上させるためには、より高性能な直線偏光子や位相子などの光学素子が必須であると考えられる。

そこで本成果を更に展開させて、光学活性・円二色性スペクトルを今後計測するために必須である広帯域のテラヘルツ領域に対応した位相子の設計も行った。

今後、本課題で得られた端緒の光学活性計

測結果とシステム開発の知見を更に発展させて、より高精度の計測手法として確立させていきたい。

#### 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)

黒田 隆之助、平 義隆、熊木 雅史、豊川 弘之、山田 家和勝、産総研Sバンド小型リニアックを用いたコヒーレント・テラヘルツ光源の開発と利用、Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan、査読無、1巻、2012、222-224.

[学会発表](計12件)

平 義隆、新規量子ビーム源(テラヘルツ波、短パルスX線)の開発と応用、SATテクノロジー・ショーケース2014、2014/01/24、つくば国際会議場(茨城県)

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、第27回日本放射光学学会年会・放射光科学合同シンポジウム、2014/01/11、広島国際会議場(広島県)

平 義隆、黒田 隆之助、田中 真人、豊川 弘之、富澤 宏光、Measurement of radially polarized terahertz radiation profile using a terahertz camera、BEAM PHYSICS YOUTH WORKSHOP、2013/11/19、沖縄科学技術大学(沖縄県)

平 義隆、黒田 隆之助、田中 真人、豊川 弘之、富澤 宏光、Measurement of radially polarized terahertz radiation using a terahertz camera、7th International Workshop on Infrared Microscopy and Spectroscopy with Accelerator Based Sources、2013/11/12、The Mantra Erskine Beach Resort (Lorne, Australia)

平 義隆、黒田 隆之助、田中 真人、豊川 弘之、高出力テラヘルツ波発生のための小型電子銃開発、計測フロンティア研究部門第10回シンポジウム、2013/09/06、幕張メッセ(千葉県)

黒田 隆之助、Development of quantum radiation sources using S-band compact electron linac at AIST、Asian Core Workshop 2013(招待講演)、2013/03/08、KAERI(デジョン、韓国)

黒田 隆之助、Applications of Short-pulse electron linac at AIST、AFAD-2013(招待講演)、2013/02/25、BINP(ノボシビルスク、ロシア)

豊川 弘之、黒田 隆之助、田中 真人、平 義隆、他二名、電子加速器を用いた高出力テラヘルツ波の発生と利用、テラヘル

ツ波科学技術と産業開拓第 182 委員会、  
2013/01/30、大阪産業大学（大阪府）

平 義隆、新規光源(テラヘルツ波～X線  
～ガンマ線)の開発とイメージング応用、  
産総研本格研究ワークショップ in 四国、  
2013/01/29、サンメッセ香川（香川県）

大島 永康、黒田 隆之助、田中 真人、  
平 義隆、他 15 名、産総研電子加速器施設  
の現状、第 26 回日本放射光学会年会・放  
射光科学合同シンポジウム、2013/01/13、  
名古屋大学(愛知県)

平 義隆、安全安心・医療のための超短  
パルス電子ビームを用いた新規光源(テラ  
ヘルツ～X線～線)の開発と応用、産総研  
本格研究ワークショップ in 名古屋、  
2012/12/10、メルパルク NAGOYA(愛知県)

黒田 隆之助、コヒーレント THz 光の発  
生応用、未来エネルギーシンポジウム(招  
待講演)、2012/07/02、早稲田大学(東京  
都)

〔その他〕

ホームページ

Masahito Tanaka の研究紹介

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

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

田中 真人 (TANAKA, Masahito)

独立行政法人産業技術総合研究所・計測フ  
ロンティア研究部門・主任研究員

研究者番号：30386643

### (2)研究分担者

黒田 隆之助 (KURODA, Ryunosuke)

独立行政法人産業技術総合研究所・計測フ  
ロンティア研究部門・主任研究員

研究者番号：70350428

平 義隆 (TAIRA, Yoshitaka)

独立行政法人産業技術総合研究所・計測フ  
ロンティア研究部門・研究員

研究者番号：60635803