

# コヒーレントチェレンコフ放射を用いたテラヘルツ透過イメージング STUDY ON THZ IMAGING BY USING A COHERENT CHERENKOV RADIATION

西田万里子<sup>#,A)</sup>, 水柿将貴<sup>A)</sup>, 鷲尾方一<sup>A)</sup>, 坂上和之<sup>B)</sup>, 黒田隆之助<sup>C)</sup>, 平義隆<sup>C)</sup>  
Mariko Nishida<sup>#,A)</sup>, Masataka Mizugaki<sup>A)</sup>, Masakazu Washio<sup>A)</sup>, Kazuyuki Sakaue<sup>B)</sup>,  
Ryunosuke Kuroda<sup>C)</sup>, Yoshitaka Taira<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> Research Institute for Science and Engineering, Waseda University

<sup>B)</sup> Waseda Institute for Advanced Study, Waseda University

<sup>C)</sup> National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

## Abstract

THz frequency is a special electromagnetic wave which is categorized between a radio wave and a light wave. It can pass through the various materials like a radio wave and can be transported with optical components like a light wave. Thus, it's suitable for imaging application of materials. Moreover, there exist some materials which have absorption spectra in the THz frequency range. Therefore, THz light is expected as an industrial tool to identify drugs and to detect explosives. At Waseda University, it's possible to generate a high-quality electron beam using Cs-Te photocathode RF-Gun and the electron beam is applied to several application researches. As an application of this electron beam, we generate a coherent Cherenkov radiation, and succeed in observing a high power THz light. As this THz light can be obtained as an extremely wideband THz pulse, we can not only apply it to imaging but also observe the difference in transmittance of THz frequency. As THz imaging, we attempt scan imaging and direct imaging with THz camera. In this conference, we report the outline of generating a THz Cherenkov radiation, results of the THz imaging of materials and future prospects.

## 1. はじめに

近年の急速な技術革新によりテラヘルツ光を用いた応用研究が進められており、その応用分野は工業・医療・バイオ・農業・セキュリティーなど多岐にわたる<sup>[1]</sup>。テラヘルツ光は電波と光波の両方の性質を兼ね備えている特殊な電磁波である。そのため、電波のように紙・プラスチック・セラミック・木材・脂肪など様々な物質を透過するとともに、光波のようにレンズやミラーといった光学素子によって自由に輸送することができ、新たなイメージングツールとして期待されている<sup>[2]</sup>。イメージングツールとしては、レントゲン検査や空港の手荷物検査などで用いられている X 線がよく知られている。対象物の透過強度分布を測定し、非破壊で透視画像を取得するという点では X 線もテラヘルツ光も同じであるが、新たにテラヘルツ光を用いるメリットとして、主にその安全性が挙げられる。テラヘルツ光の周波数は 0.1THz~10THz 程度であるため、X 線に比べて極めてエネルギーが低い。そのため、人体への害が非常に少ないことから人体に照射し、隠し持っている刃物や拳銃などの凶器を検知することが可能となる。さらに、透過イメージングだけでなく、光波の性質を利用した反射イメージングで透視画像を取得することもできる。これにより、壁紙で見えない部分のコンクリートのひび割れや塗装で見えない部分の車体の錆などを検知することが可能である。

我々は早稲田大学が所有する Cs-Te フォトカソード

RF-gun を用いて電子ビームからコヒーレントなチェレンコフ放射光を生成し、高強度のテラヘルツ光を観測することに成功した。本発表では、このテラヘルツ光を用いた物質の透過イメージングおよび反射イメージングの試験結果について報告する。

## 2. テラヘルツ光生成

### 2.1 コヒーレントチェレンコフ放射

チェレンコフ放射は、荷電粒子が誘電体を通過する際、電場によって誘電体が分極をおこし、その荷電粒子が通り過ぎた後、誘電体の分極が元に戻る時に電磁波を放射するという仕組みである。放射条件は、電子の速度  $v$  が屈折率  $n$  の誘電体物質中を進む光の速度  $c/n$  よりも速いとき、すなわち、

$$\beta n > 1 \quad (1)$$

と表される。また、このときの放射角度は、

$$\cos \theta = \frac{1}{n\beta} \quad (2)$$

と定義される<sup>[3]</sup>。

さらに、放射光のコヒーレンスの程度は電子ビームのパンチ長のみならず、エミッタンスやビームサイズにも依存するが、総じてコヒーレントな放射である場合、全放射強度  $P$  は 1 電子あたりの放射強度  $P_0$  に対して電子ビームに含まれる電子の数  $N$  の二乗に比例することが知られている<sup>[4]</sup>。

<sup>#</sup> m-nishida.mari@ruri.waseda.jp

## 2.2 早稲田大学における実験装置

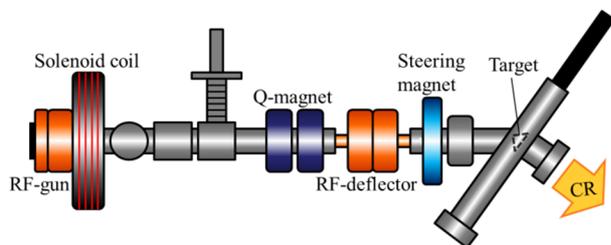


Figure 1: Schematic of electron beam line layout.

本実験では、テラヘルツ光に対してほぼ透明な誘電体である TOPAS<sup>[5]</sup>をターゲットとし、電子ビームを通過させることでチェレンコフ放射を発生させる。図 1 に本研究でのビームラインの概要図を示す。我々の加速器システムは全長約 3m と非常にコンパクトである。RF-gun の直下にあるソレノイド電磁石で電子ビームのエミッタンスを補正し、その後、2つの四重極電磁石によって収束、ステアリング電磁石によって位置の補正を行ない、ターゲットに照射している。RF-Deflector で電子ビームを傾けることで、傾けない状態よりも放射方向から見た電子の進行方向の長さにあたる距離を短くすることができ、よりコヒーレントなテラヘルツ光が得られることが期待できる<sup>[6]</sup>。ターゲットとして用いている TOPAS はテラヘルツ帯で屈折率がほとんど変化しないという性質があり、その値は約 1.52 である<sup>[7]</sup>。したがって、式(2)よりテラヘルツ帯におけるチェレンコフ放射角はおよそ  $48.9^\circ$  とわかる。ターゲットの形状を三角形にし、一つの角を  $48.9^\circ$  とすることで観測角もチェレンコフ放射角と同じくおよそ  $48.9^\circ$  となる。テラヘルツ光の観測には広帯域の準光学的検波器 (QOD: Quasi-Optical schottky Diode detector)<sup>[8]</sup>を用いた。

## 2.3 テラヘルツ光の観測

QOD で観測されたテラヘルツ光がチェレンコフ放射光によるものであるのか、かつコヒーレントであるのか、ということを確認した。

本実験における、TOPAS からの放射の原理を図 2 に示す。ここでのチェレンコフ放射は、理論的には電子ビームの軌道に対しておよそ  $48.9^\circ$  の角度で円環状に放出されることがわかっている。また、観測用の真空管は電子ビームの進行方向に対して  $45^\circ$  の角度でついている。したがって、TOPAS から放出されたチェレンコフ放射の一部を大気中に取り出し、

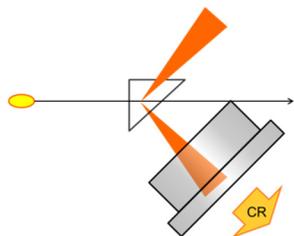


Figure 2: Diagram of radiation from electron beam and TOPAS.

QODによって観測しているということになる。まず、偏光の計測を行い、ほぼ直線偏光であることを確認している。これはチェレンコフ放射の一部を取り出していることを示しており、遷移放射などではなく、確実にチェレンコフ放射であることを確認した。

前節で述べたように、コヒーレントな放射光である場合、放射強度は電子数の二乗に比例する。QOD の手前にバンドパスフィルターを設置し、特定の波長における電子ビームの電荷量と放射強度の関係をグラフに表したものが図 3 である。本実験では、0.5THz と 1.5THz のバンドパスフィルターを用いた。測定結果のプロットは二乗でフィッティングすることができ、これより、放射強度は電子ビームの電荷量の二乗に比例していることがわかる。したがって、コヒーレント放射光であるといつてよい。

以上のことから、コヒーレントチェレンコフ放射によるテラヘルツ光を観測していることが確かめられた。

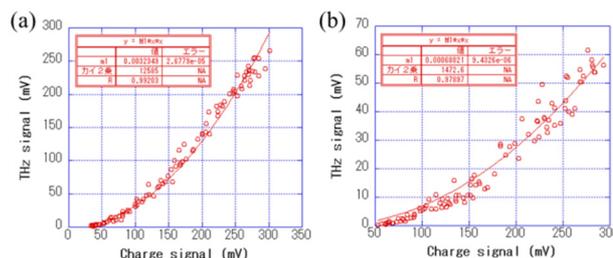


Figure 3: The relation between the intensity of (a) 0.5THz, (b) 1.5THz and the beam current.

## 3. テラヘルツイメージング

### 3.1 透過イメージング

コヒーレントチェレンコフ放射から得られたテラヘルツ光を用いて、まずは物質の透過イメージング画像の取得を試みた。透過イメージングは対象となる sample にテラヘルツ光を照射し、透過してきた光の強度を QOD で測定する。テラヘルツ光は金属や水分を含む部分は透過せず、プラスチックや紙部分は透過するという特性を利用し、sample を 2 次元で走査することで透過光の強度のコントラストを画像化するという仕組みである。本実験におけるセットアップを図 4 に示す。まずは大気中に取り出したテラヘルツ光を sample に広範囲に照射する。QOD は sample にほぼ密着し、かつ  $\Phi 0.8\text{mm}$  の穴を開けたア

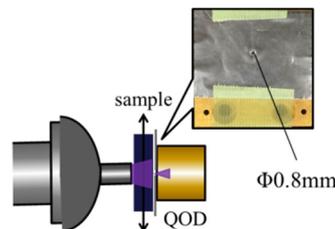


Figure 4: Schematic setup of transmission imaging.

ルミニウム箔を貼り、QODにはこの穴を通った光し

か観測できないようにしてある。これにより、強度を測定する範囲を小さくすることができ、最終的には分解能の高いイメージング画像を取得することができる。なお、測定時は sample を 1mm 間隔で動かした。

sample として pasmo を用い、実際に透過イメージング画像を取得した結果を図 5 に示す。外形に関して比較すると、取得画像の大きさは実物よりも 1mm 大きい程度であり、ほぼ実物と相違なく画像として見えているといつてよい。pasmo の表面はプラスチックであるためテラヘルツ光が透過することから、普段目には見えていない、内部の IC チップやその周辺の回路などの構造が確認できた。実際の内部構造を把握するため、産業技術総合研究所にて pasmo の X 線透視画像の撮影を行なった。比較するとやや分解能は劣るものの、IC チップやその他の部品、周りを囲む回路などの位置や大きさが X 線の画像と相違なく見えていることも確認できた。

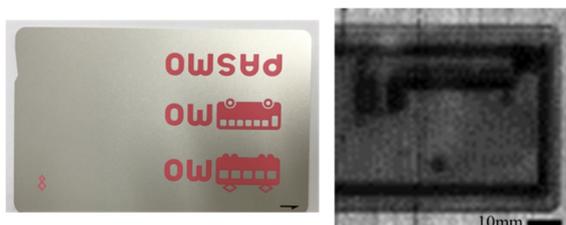


Figure 5: THz transmission image of pasmo.

### 3.2 反射イメージング

透過において実物と相違ないイメージング画像が取得できたので、さらに物質の反射イメージング画像の取得を試みた。反射イメージングは透過イメージングとは異なり、対象となる sample にテラヘルツ光を照射し、反射してきた光の強度を QOD で測定する。テラヘルツ光は金属で反射するという事を利用し、sample を 2 次元で動かすことで反射光の強度のコントラストを画像化するという仕組みである。もし金属の表面に凹凸があれば、テラヘルツ光は異なった方向に反射または散乱するため、平面の部分と凹凸がある部分では測定される強度の違いが生じる。したがって、その凹凸をイメージング画像として再現できるはずである。本実験におけるセッ

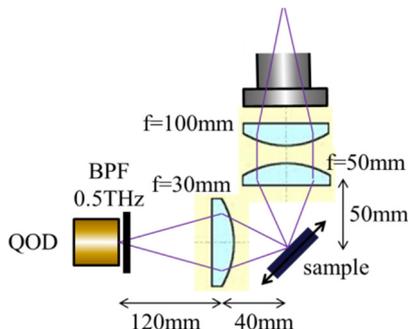


Figure 6: Schematic setup of reflection imaging.

トアップを図 6 に示す。大気中に広がって出てきたテラヘルツ光をレンズによって平行に、さらに集光させ、集光点付近に sample を設置する。反射光は再びレンズによって集光され、QOD に入るように光路を組んだ。sample となる金属の平面の部分に光が当たっているときに最終的に光が QOD まで輸送されるよう、あらかじめレーザーを用いてアライメントをとり、sample の位置も調整した。また、今回は QOD の手前に 0.5THz のバンドパスフィルター(BPF)を設置し、0.5THz の光でイメージング画像の取得を試みた。なお、測定時は sample を 0.5mm 間隔で動かした。

sample として 10 円玉を用い、この 10 円玉の表面の凹凸をイメージング画像として取得することを目標に、測定を行なった。実際に反射イメージング画像を取得した結果を図 7 に示す。取得画像から、10 円玉の表面の『10』の文字が浮かび上がって見えることが確認できた。実際の 10 円玉の大きさは  $\Phi 23.5\text{mm}$  であるのに対し、取得画像の大きさは縦  $23.5\text{mm} \times$  横  $22.5\text{mm}$  であった。縦方向は実物と同じ大きさであったのに対し、横方向は実物よりも小さいということについて、sample を置いた角度と走査する方向が完全に一致していないことに起因していると考えている。また、浮かび上がった文字の大きさに関しては、実物よりも  $0.2 \sim 0.3\text{mm}$  大きい程度であり、ほぼ実物と相違なく画像として見えていることも確認できた。今回、1.0THz や 1.5THz のバンドパスフィルターを使って同様の測定を試みたが、反射光の強度のコントラストを測定するのに十分な強度が得られなかったために画像を取得することはできなかった。1.0THz や 1.5THz でも十分な強度が得られれば、周波数による取得画像の分解能の違いやコントラストの違いを見ることができるとと思われる<sup>[9]</sup>。



Figure 7: THz reflection imaging of 10 yen.

## 4. まとめと今後の展望

加速させた電子ビームから得られたコヒーレントなチェレンコフ放射光を生成し、取り出したテラヘルツ光を用いて物質の透過イメージング画像、さらには反射イメージング画像を取得することに成功した。両者は共に、実物とほぼ相違ない、分解能も比較的高い画像が得られた。

今後は、より強度の高いテラヘルツ光の生成を目指し、反射イメージングにおいて周波数ごとの取得画像の分解能やコントラストの違いを確認する。さらには、壁紙で覆われた部分のコンクリートのひび割れの検査、塗装で隠れた部分の金属の錆の検知な

どの産業応用に向けた実験や、3次元画像取得に向けた断面画像測定による物理的な内部構造の把握に取り組んでいく予定である。

### 参考文献

- [1] [www1.mlit.go.jp/road/tech/jigo/h22/pdf/report22-4.pdf](http://www1.mlit.go.jp/road/tech/jigo/h22/pdf/report22-4.pdf)
- [2] 工業調査会, 西澤潤一, テラヘルツ波の基礎と応用, 2005.
- [3] A.P.Potylitsyn, et al., Proc of IPAC'10, MOPE046 (2010).
- [4] T.Takahashi, et al., Phys. Rev. E 62, 8606 (2000).
- [5] <http://www.polyplastics.com/jp/product/lines/topas/>
- [6] K.Sakaue et al., Proc. of this conference WEP097.
- [7] Paul D. Cunningham, et al., J.Appl.Phys. 109, 043505 (2011).
- [8] <http://www.vadiodes.com/index.php/en/>
- [9] [pioneer.jp/en/crdl\\_design/crdl/rd/pdf/2014-1.pdf](http://pioneer.jp/en/crdl_design/crdl/rd/pdf/2014-1.pdf)