

## 狭帯域チェレンコフ回折放射の研究

### STUDY OF NARROW-BAND CHERENKOV DIFFRACTION RADIATION

熊谷航平<sup>#</sup>, 南部健一, 武藤俊哉, 柏木茂, 鹿又健, Anjali B. Kavar, 工藤滉大, 柴田晃太郎, 高橋健,  
長澤育郎, 日出富士雄, 山田悠樹, 濱広幸

Kohei Kumagai<sup>#</sup>, Kenichi Nanbu, Toshiya Muto, Shigeru Kashiwagi, Ken Kanomata, Anjali B. Kavar, Kodai Kudo,  
Kotaro Shibata, Ken Takahashi, Ikuro Nagasawa, Fujio Hinode, Hiroki Yamada, Hiroyuki Hama  
Research Center for Electron Photon Science, Tohoku University

#### Abstract

We have started to study narrow-band Cherenkov diffraction radiation (NBChDR) at the test accelerator as a coherent terahertz source (t-ACTS) at the Research Center for Electron Photon Science (ELPH), Tohoku University. Cherenkov diffraction radiation (ChDR), which is emitted when an electron beam passes in the vicinity of a dielectric radiator. Usually spectrum of ChDR is broadband. However, it is assumed that ChDR will be narrowed by interference effects when a radiator with a periodic structure is used as the radiator. This NBChDR is expected to be one of candidate for narrowband terahertz light sources. At t-ACTS, the proof of principle experiments were conducted using a high-density polyethylene (HDPE) radiator with a period length of 0.8 mm and number of periods of 40. We observed angular distribution and impact parameter dependence of NBChDR and confirmed that ChDR has narrowed the bandwidth by performing spectroscopic measurements at the Cherenkov angle.

#### 1. はじめに

東北大学電子光物理学研究センターでは、試験加速器 t-ACTS を使用し様々な THz 放射についての開発及び研究を行ってきた[1-3]。ここで一般に狭帯域の THz 光源は種類が少ないことから狭帯域の THz 光源としてチェレンコフ回折放射を用いることを考えた。チェレンコフ回折放射は荷電粒子が誘電体近傍を通過する時、発生する放射でよく知られるチェレンコフ放射と似た特性を持つが荷電粒子と誘電体が直接相互作用しないためにビームロスが起こらない。しかしながら、チェレンコフ回折放射は通常の場合、広帯域である。そこでスミス=パーセル放射[4]から着想を得て、周期構造を持つ誘電体ラジエータを使用することで、通常は広帯域であるチェレンコフ放射を狭帯域化するアプローチを考え、今回その原理実証実験を行った。チェレンコフ放射の狭帯域化が可能ならば、ラジエータの周期長を変更することで様々な波長が使える新たな THz 光源の開発に繋がり、今後、様々な物理分野の実験において利用が期待される。今回、当センターの t-ACTS が生成するバンチ長 100 fs 以下の極短バンチから発生するコヒーレントチェレンコフ回折放射の狭帯域化を行い、THz 光源開発に向けての原理実証実験を行ったので報告する。

#### 2. 狭帯域チェレンコフ回折放射

##### 2.1 チェレンコフ放射

チェレンコフ放射とは、荷電粒子が誘電体中を運動するときに、荷電粒子の速度が誘電体中の光の位相速度を超えるとときに光が放射される現象である[5]。

チェレンコフ放射の放射角度 $\theta_c$ は

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

で表される。ここで、 $\theta_c$ はチェレンコフ角、 $n$ は誘電体の屈折率、 $\beta$ は荷電粒子の相対速度と光速との比である。

##### 2.2 チェレンコフ回折放射

荷電粒子が誘電体近傍を通過する際に、誘電体内の電場の伝搬速度よりも、荷電粒子の速度が大きい場合は、チェレンコフ光の放射条件を満たすことから、チェレンコフ放射と同様に光が放射される。その放射はチェレンコフ回折放射と呼ばれている。またチェレンコフ回折放射の放射強度は電子ビームによって誘電体内に生じる電場強度に依存するため、通常のチェレンコフ放射の放射強度と次式の Coupling factor :  $K$  に従い減衰する[6]。

$$K = \exp\left(-2\frac{h\omega}{\beta\gamma c}\right) \quad (2)$$

ここで $\gamma$ はローレンツ因子、 $\omega$ はチェレンコフ放射の角周波数、 $h$ はインパクトパラメータと呼ばれ、ビームと誘電体の距離を表す。チェレンコフ回折放射の放射強度の式を次式に示す。

$$\left.\frac{d^2W}{d\omega d\Omega}\right|_{ChDR} = \left.\frac{d^2W}{d\omega d\Omega}\right|_{ChR} \times K \quad (3)$$

Equation (2)からインパクトパラメータが大きいほど減衰が大きくなる一方、放射波長が長いほど減衰が小さくなることがわかる。したがってチェレンコフ回折放射の放射強度は放射波長とビームと誘電体の距離であるインパクトパラメータに大きく依存することがわかる。

<sup>#</sup>k\_kumaga@lms.tohoku.ac.jp

### 2.3 狭帯域チェレンコフ回折放射

荷電粒子が周期構造を持つラジエータ近傍を通過する場合を考えると、個々のラジエータから発生するチェレンコフ回折放射は干渉を起こし、ラジエータの周期性から特定の周波数のみが強め合うことが期待される。したがって一般に広帯域であるチェレンコフ回折放射を狭帯域化できるのではと考えた。その放射波長 $\lambda$ は

$$\lambda = \frac{d}{m} \left( \frac{1}{\beta} - \cos \theta \right) \quad (4)$$

と表される。ここで $d$ はラジエータの周期長、 $m$ は放射の次数、 $\theta$ は観測角である。Figure 1 に狭帯域チェレンコフ回折放射の概略図を示す。

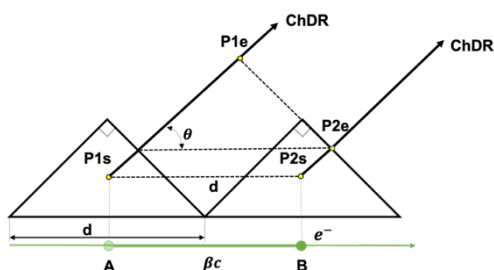


Figure 1: Schematic view of narrow-band Cherenkov diffraction radiation. Charged particle moves under the dielectric radiator. Compare the ChDR emitted from P1s and P2s as the charged particle passes from A to B of the dielectric radiator.

## 3. 実験

### 3.1 コヒーレントチェレンコフ回折放射

原理実証実験は東北大学電子光学研究センターの試験加速 t-ACTS の電子ビームを用いて行った。t-ACTS のビームエネルギーは 22 MeV である。一般によく知られているように、電子ビームのバンチ長が放射波長より短い場合、その放射はコヒーレント放射となり、その放射強度は電子数の 2 乗に比例し増加する。t-ACTS では 100 fs 以下の極短電子ビームを安定的に生成することが可能であり、THz 領域でのチェレンコフ放射波長に比べ十分短い。従ってコヒーレント放射となり、十分な強度のコヒーレントチェレンコフ回折放射を得ることが可能である。本実験ではコヒーレントチェレンコフ回折放射を利用しその放射の狭帯域化を目指す。

### 3.2 ラジエータ

本実験で使用するラジエータの材料として、周期構造を作るために加工がしやすく、THz 領域において高い透過率と屈折率が必要である。そこで本研究グループで既に使用実績のある THz 領域で高い透過率と屈折率を持つ高密度ポリエチレン(HDPE)を採用した。

過去に行った THz 領域での ChDR 測定実験[7]で使用した HDPE の屈折率は $n=1.536\pm 0.003$  であった。チェレンコフ角は $n = 1.536$ 、t-ACTS のビームエネルギー

ギーである $\gamma=43$  として計算すると $\theta_c=49.3^\circ$ であった。チェレンコフ角 $\theta_c$ に放出される光の周波数を 1 THz 近辺にするためにラジエータの周期長を 0.8mm とし、周期数はチェンバーの大きさなどを考慮して 40 周期にした。ラジエータの断面形状は三角形とした。ラジエータの角度をチェレンコフ角 $\theta_c$ にとることで、チェレンコフ角 $\theta_c$ に発生したチェレンコフ回折放射がラジエータ境界面に対して垂直に入射するため、媒質から真空中に出る際の屈折を無視できるように設計した。最終的に Fig. 2 上に示すような底辺 0.8 mm、高さ 0.4 mm、奥行き 14 mm の三角形のラジエータを設計した。HDPE でこのような小さなラジエータを機械加工で製作するのは難しいと考え今回ラジエータの製作には射出成形を用いた。その一周期分のラジエータをホルダーに 40 個並べて実験に用いるラジエータを作成した。Figure 2 に作成した三角形のラジエータ 1 周期の断面図と実際に使用するラジエータを示す。また Table 1 に三角形のラジエータの設計値と実際に作成したものの実測値を示す。加工精度としてはバラつきも少なく、概ね満足することができるものであった。またラジエータを射出成形する際に生じる HDPE の一部を使用し THz-TDS システム(Advantest 社製、TAS7500TS)で屈折率を測定した。その結果は $n=1.524\pm 0.008$ であった。またこの屈折率( $n=1.524$ )を使用し計算したチェレンコフ角は $\theta_c=49^\circ$ であった。以前使用した HDPE( $n=1.536\pm 0.003$ ) に比べ、屈折率が若干低く、バラつきが大きいことがわかった。その理由として、以前の実験の HDPE は機械加工で製作したため同一の母材を使っているのに均一性があつたが今回のラジエータは射出成形で製作したために射出成型時に一度材料を加熱溶融して冷却固化させるために射出ごとに若干のバラつきが生じたのではないかと考えている。

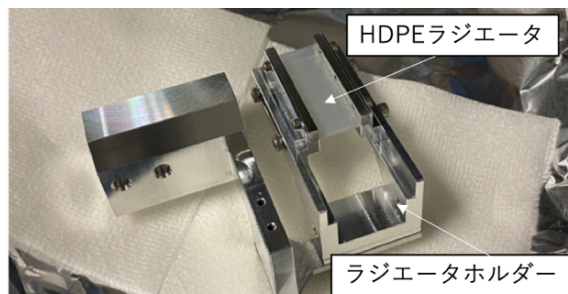
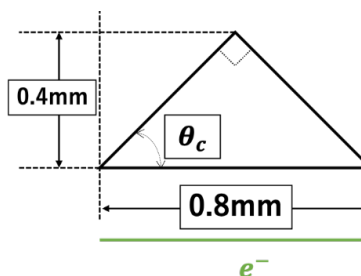


Figure 2: Cross section view of the HDPE radiator (upper) and the HDPE Radiator (lower).

Table 1: Design and Measured Values of HDPE Radiator

	period length	Cherenkov angle
Design	0.8 mm	49.3 °
Measurement	0.816±0.002 mm	48.7 °±0.15 °

### 3.3 角度分布測定セットアップ

角度分布測定のセットアップを Fig. 3 に示す。ビーム進行方向を z 軸に取った。狭帯域チェレンコフ回折放射は厚み 4 mm、有効径 100 mm の z-cut 水晶窓を用いて真空容器から取り出した。検出器はパイロ検出器(Sensor und Lasertechnik GmbH, THz10)を使用した。また水蒸気の吸収を防ぐために真空窓と検出器間をポリエチレン製のシートで囲い、その中に露点-20°C以下の乾燥空気を常時 20 L/min 供給して測定を行った。検出器は yz 自動ステージと回転系ステージを使用し、常に立体角とビーム軸上を取った原点から検出器までの距離が同じになるように配置した。この時、ビーム軸上を取った原点と検出器の距離は 190.6 mm とした。ビーム軸からの角度 $\theta$ を変えながらスキャンを行い、 $\theta$ 方向の角度分布測定を行った。ラジエータ入り口のビームサイズ及びビーム位置はプロファイルモニターを使用し調整及び測定を行った。ビームサイズは常に $\sigma_x \sigma_y$ ともに 100  $\mu\text{m}$  以下になるように調整を行った。バンチ長はプロファイルモニターで発生したコヒーレント遷移放射(CTR)の干渉パターンを取得することで確認している。電子バンチがガウス分布していると仮定すると、ラジエータ入口でのバンチ長はおおよそ 80 fs 程度であると測定された。

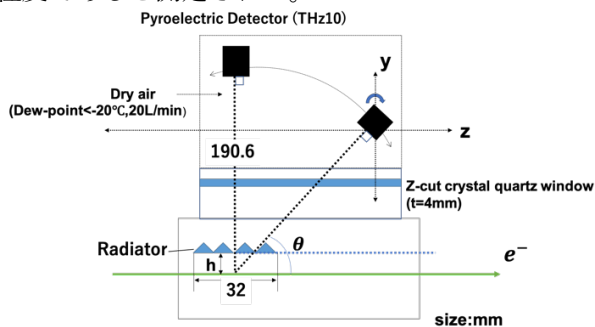


Figure 3 : Experimental setup for Angular distribution measurement.  $\theta$  is observation angle and h is impact parameter (distance between the beam and the HDPE radiator).

### 3.4 角度分布測定結果

インパクトパラメータを 2.0 mm から 0.5 mm まで変化した角度分布と  $\theta = 50^\circ$  の際のインパクトパラメータ依存性を測定した結果をそれぞれ Fig. 4, Fig. 5 に示す。ビームがプロファイルモニターの中心を通る際のインパクトパラメータは 2.0 mm である。Fig. 4 よりチェレンコフ角( $\theta_c = 49^\circ$ )付近に強い放射強度を持つことがわかる。またチェレンコフ角以外の角度にも有意な放射強度を持つことがわかる。また Fig. 5 よりインパクトパラメータが大きくなるこ

とに従い放射強度が指数関数的に減少していることがわかる。インパクトパラメータ依存性は Eq. (2) の Coupling factor K で表されるのでこの関数でフィットすると測定周波数 f は  $f=1.02\pm 0.06\text{THz}$  と求めた。これは Eq. (4) の共鳴条件から導かれる周波数  $f=1.03\text{ THz}$  にほぼ等しい。

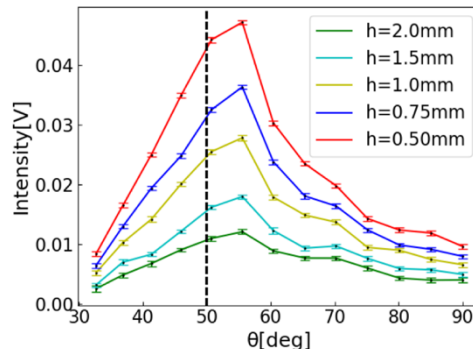


Figure 4: Angular distribution for various impact parameters from 2 mm to 0.5 mm. Dotted line indicates the Cherenkov angle.

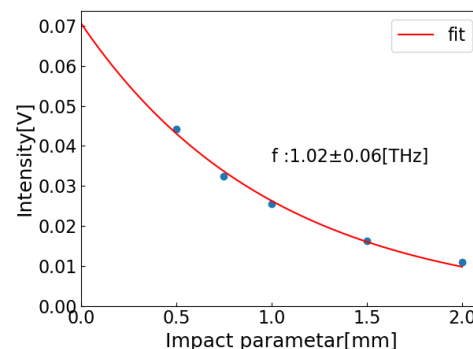


Figure 5 : Impact parameter dependence at  $\theta = 50^\circ$  fitted with coupling factor K. f is the resonance frequency obtained by fitting.

### 3.5 分光測定セットアップ

マイケルソン干渉計を用いてチェレンコフ角における分光測定を行った。分光測定のセットアップを Fig. 6 に示す。狭帯域チェレンコフ回折放射を非軸放物面鏡で集光し、干渉計に導入した。使用した非軸放物面鏡の焦点距離は 190.6 mm である。また角度分布測定と同様に水蒸気の吸収を防ぐため、光路全体をポリエチレン製のシートや樹脂パネルで囲い、その中に露点-20°C以下の乾燥空気を常時 20 L/min 供給して測定を行った。検出器も同様に THz10 を使用した。なお CTR を使用しバンチ長を測定した際にもこの干渉計を使用し分光測定を行っている。可動平面鏡はリニアステージ上に設置され、5  $\mu\text{m}$  ステップで移動し、移動距離は 2000  $\mu\text{m}$  に設定し干渉パターンの取得を行った。また光路長は 0.8 m である。

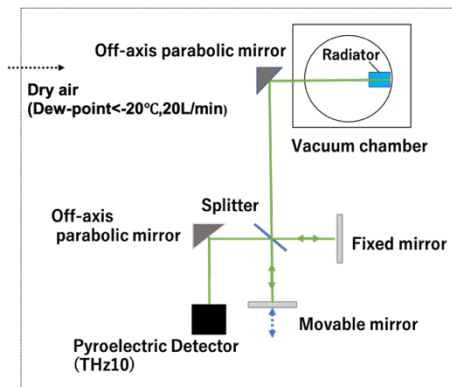


Figure 6: Schematic view of the measurement system using the Michelson interferometer.

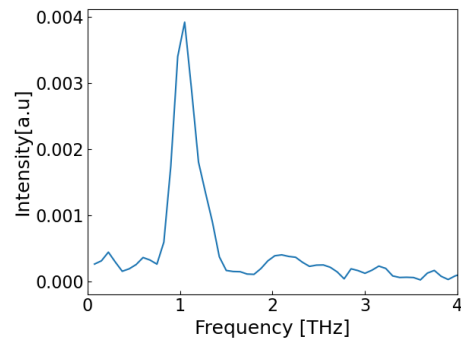


Figure 8: Frequency spectrum of NBChDR.

### 3.6 分光測定結果

干渉計で測定した干渉パターンと干渉パターンから得られた狭帯域チェレンコフ回折放射のスペクトルをそれぞれ Fig. 7, Fig. 8 に示す。Figure 7 からわかるように 10~13 個程度の干渉縞が見える。また周期長  $816\ \mu\text{m}$  として、eq. (4) で見積もられた周波数は  $1.03\ \text{THz}$  に対し、Fig. 8 より、得られたスペクトルのピークは  $1.04\ \text{THz}$ 、スペクトル幅は  $0.28\ \text{THz}$  (FWHM) であった。ここで周期長は製作したラジエータの実測値を使用した。測定された周波数は予測値とほぼ一致しており狭帯域チェレンコフ回折放射を観測できたと言えるのではないかと考えている。しかし、設定した周期数(40 周期)に対し干渉縞の数が少なく、このことが原因で測定されたスペクトル幅が広がっている。これは前述のとおり射出成形によって製作したラジエータのバラつきやラジエータを構成する時の設置精度によって十分な干渉効果が得られていないのではないかと考えている。

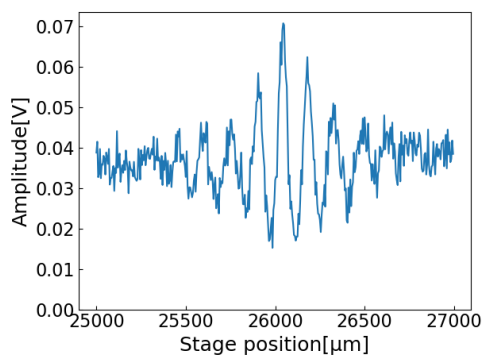


Figure 7: Interferogram of NBChDR measured by a Michelson interferometer.

## 4. まとめ

東北大学電子光理学研究センターでは、狭帯域チェレンコフ回折放射の研究を始めた。チェレンコフ回折放射を狭帯域化することができれば周期長を変えることで様々な波長が使える新たな THz 光源としてさまざまな実験に役立つ可能性を秘めている。今回、狭帯域チェレンコフ回折放射の角度分布、インパクトパラメータ依存性、チェレンコフ角における分光測定に成功した。しかし、分光測定においてはラジエータの周期数(40 周期)に対し、干渉縞の数が少ないという問題点が浮上した。その原因をラジエータの材質のバラつきや設置精度に問題があると考えているため、今後は HDPE を射出成形したラジエータの他に HDPE の平板を機械加工して作成したラジエータを準備して測定を行う予定である。また角度分布測定において、チェレンコフ角以外の角度にも有意な放射強度を持つことがわかったためチェレンコフ角以外でも分光測定を行い、NBChDR の特性を確認していく。

## 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 18K119154 及び 22K12660 の助成を受けたものです。

## 参考文献

- [1] K. Nanbu *et al.*, Proc.of PASJ2022, Kitakyusyu (Online meeting), Japan, Oct. 2022, pp. 761-763.
- [2] H. Yamada *et al.*, Proc.of PASJ2020, Online, Sep, 2020, pp. 853-856.
- [3] S. Kashiwagi *et al.*, Proc of PASJ2017, Sapporo, Japan, Aug. 2017, pp. 122-125.
- [4] S. J. Smith and E. M. Purcell, Phys. Rev. 92, 1069 (1953).
- [5] P. Čerenkov, "Visible radiation produced by electrons moving in a medium with velocities exceeding that of light", Phys. Rev. 52, 378 (1937).
- [6] J. D. Jackson, "Classical Electrodynamics".
- [7] D. Yamamoto, "Basic study of beam diagnostics employing coherent Cherenkov diffraction radiation", Master Thesis, Tohoku University (2022).