PASJ2020 THPP16

# チェレンコフ放射を用いたビーム位置モニターの開発

# DEVELOPMENT OF BEAM MONITOR UTILIZING CHERENKOV RADIATION

南部 健一,日出 富士雄,柏木 茂,武藤 俊哉,齊藤 寛峻,山田 悠樹, 寺田 健人,石附 勇人,山本 大喜, 鹿又 健,髙橋 健,長澤 育郎,柴田 晃太朗,三浦 禎雄,濱 広幸

Ken-ichi Nanbu, Fujio Hinode, Shigeru Kashiwagi, Toshiya Muto, Hirotoshi Saito, Hiroki Yamada, Kento Terada, Yuto Ishizuki, Daiki Yamamoto, Ken Kanomata, Ken Takahashi, Ikuro Nagasawa, Koutaro Shibata, Sadao Miura,

Hiroyuki Hama

ELPH, Tohoku University

#### Abstract

Laser-wake field accelerator (LWFA) have attracted much attention and have been developed actively towards practical applications worldwide. LWFA can accelerate electrons to high energies within a very short distance. The recent development of plasma micro optics technology has dramatically improved their beam quality. However, their beam pointing stability is still low compared to conventional RF accelerators. In addition, their beam repetition rate is very low, thus a beam pulse has to be diagnosed simultaneously with its application. Therefore the non-invasive beam monitor using Cherenkov diffraction radiation (ChDR) will contribute to the practical applications of LWFA. We have been conducting a basic study of a beam position monitor using ChDR. Here we report the hole diameter considering attenuation constant in the hollow radiator and estimated accuracy of the beam position monitor.

# 1. はじめに

近年、テーブルトップサイズの超小型加速器実現に向け、従来の高周波型加速器に比べて加速勾配が大きいレーザープラズマ加速器の研究が世界中で行われている。現時点において、電子ビームのポインティングスタビリティーには改善の余地があり[1]、シングルショットかつ非破壊でビーム位置測定ができれば、レーザープラズマ加速器の実用化に貢献することができる。東北大学電子光理学研究センターでは、電子ビームが誘電体近傍を通過する際に放射するチェレンコフ光を用いた非破壊ビーム位置モニターの開発を行っている。誘電体の形状や測定精度などについて検討を行ったので報告する。

# 2. 中空誘電体からのチェレンコフ光

チェレンコフ光とは、荷電粒子が誘電体中を通過する際に、荷電粒子の速度が誘電体中における光の位相速度を超えることで発生する光のことである[2]。チェレンコフ光の放射角度は以下の Eq. (1)で表される。

$$\cos\theta_c = \frac{1}{n\beta} \tag{1}$$

ここで、θ<sub>c</sub>,n,βはそれぞれ、チェレンコフ角、誘電体の 屈折率、荷電粒子の速度である。また荷電粒子が誘電 体中を通過するときに放出するチェレンコフ光の光子数 N<sub>0</sub> は次の Eq. (2)で表される。

$$\frac{d^2 N_0}{d\lambda dl} = \frac{2\pi\alpha Z_e^2}{\lambda^2} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right) \tag{2}$$

ここで、λ,α、Z。はそれぞれチェレンコフ光の波長、微 細構造定数、荷電粒子の電荷である[2]。荷電粒子が誘 電体近傍を通過した際の放射強度は、誘電体中を通過 するときと比べ小さくなり Coupling factor: K と呼ばれる係数を、Eq. (2)に乗ずることで得ることができる。

$$K = \exp\left(-4\pi \frac{d}{\gamma\beta\lambda}\right) \tag{3}$$

ここで、d は荷電粒子と誘電体間の距離、γ はローレンツ ファクター、λ は観測波長である[3, 4]。 Equation 3 から荷 電粒子と誘電体表面の距離が近いほど減衰が小さく、観 測する波長が長いほど減衰が小さいことがわかる。 Figure 1 にビームと誘電体間の距離を 3.5mm としたとき の、ビームエネルギーの違いによる Coupling factor の変 化を示す。レーザープラズマ加速器の到達目標である1 GeV では赤外線領域から Coupling factor が立ち上がる ことがわかる。一方 100MeV ではテラヘルツ領域、 10MeV ではミリ波領域で Coupling factor が立ち上がり、 同じセットアップでもビームエネルギーに応じて観測波 長領域が大きく異なる。



Figure 1: Solid lines show the variation of Coupling factor (K) for different electron beam energy. The distance from beam to dielectric medium is set to 3.5mm.

<sup>#</sup> nanbu@lns.tohoku.ac.jp

### PASJ2020 THPP16

# 3. ビーム位置モニターの検討

### 3.1 チェレンコフ光の方位角分布

Coupling factor は、荷電粒子と誘電体表面からの距離 に応じて値が大きく変化する。このことから、チェレンコフ 光の放射強度は誘電体からの距離、すなわち電子ビー ム通過位置に強く依存することを示唆している。電子 ビームが中空誘電体中を通過する際、ビームの通過位 置と中空誘電体間の距離 1 は次の Eq. (4)で表すことが できる。

$$l = \sqrt{R^2 + r_0^2 - 2r_0R\cos(\varphi - \varphi_0)}$$
(4)

ここで、R は誘電体にあけた穴の半径、 $\theta$  は穴の中心から観測方向を見たときの方位角、 $r_0 \ge \theta_0$  はビームの通過 位置の極座標表示である。Eq. (3)および Eq. (4)から Coupling factor の方位角分布 K( $r_0, \varphi_0, \varphi$ )を得る事がで きる。

$$K(r_0, \varphi_0, \varphi) = exp\left(-4\pi \frac{\sqrt{R^2 + r_0^2 - 2r_0R\cos(\varphi - \varphi_0)}}{\beta\gamma\lambda}\right)$$
(5)

電子が中空誘電体の中央を通る場合、ビームと誘電体 間の距離は方位角によらず変化しないため、Fig. 2(右) の赤線で示すように Coupling factor は方位角によらず一 定の値となる。一方ビームが中空誘電体の中心を通過し ない場合は、ビームと誘電体間の距離が変化するため、 Fig. 2(右)の青・緑線のように Coupling factor の値も大き く変化することがわかる。



Figure 2: (Left) Schematic view of the positional relationship between the beam and the hollow dielectric. The blue and the red dots indicate the beam position and the intersection point of the observation direction with the inner surface of the dielectric, respectively. (Right) Plot of the coupling factor as a function of the azimuthal angle for different  $r_0$  at  $\phi_0 = 110^\circ$ ; here, the inner radius of the hollow dielectric medium is set to 2.5 mm. The solid red line shows the coupling factor when the beam passes through the center of the hollow dielectric.

#### 3.2 中空誘電体の厚み

Equation (2)からわかるように、チェレンコフ光の強度 は誘電体の厚みに比例する。しかしながら誘電体中での 吸収が大きい場合、その強度は吸収係数で制限される ため、頭打ちとなる。減衰を考慮した時のチェレンコフ光 の強度  $I(r_0, \varphi_0, \varphi)$ を Eq. (6)に示す。

$$I(r_{0},\varphi_{0},\varphi) = \frac{\eta}{A} (1 - e^{-AL}) \cdot K(r_{0},\varphi_{0},\varphi)$$
(6)

ここで A は誘電体の減衰係数、L は誘電体の厚み、η は減衰が無い場合のチェレンコフ光の強度である。 Figure 3 に減衰係数を 0.05 から 1.6 まで変化させたとき の強度変化を示す。このことから誘電体の減衰係数に応 じて厚みを調整する必要があることがわかる。



Figure 3: Plot of the intensity as a function of the dielectric thickness. Solid lines shows variation of attenuation constant.

### 3.3 中空誘電体の穴の大きさ

ビームから誘電体まで最も遠い点を  $K_1$ 、最も近い点を  $K_2$ とすると、2 点間のチェレンコフ光の強度比 Lr は各々 の Coupling factor の比で表すことができる。強度比が最 も高くなるのは、Fig. 4 に示すように、この 2 点と電子が 中空誘電体の中心を通る直線上にあるときである。この とき  $K_1$ , $K_2$ 点の強度比 Lr は次の Eq. (7)で表すことがで きる。

$$Lr = \frac{K_2}{K_1} = \exp(B(l_2 - l_1))$$
(7)



Figure 4: Schematic view of the positional relationship between the beam and observation points. The green dots indicate the beam position.

PASJ2020 THPP16



Figure 5: Dependence of the intrinsic position error on the beam size.  $\sigma_b$  is the beam size at the hollow dielectric position.

ここで B=-4π/βγλ である。Equation (7)を用いて検出器の ダイナミックレンジ、観測波長、ビームエネルギーから中 空誘電体の穴径を見積もることができる。たとえば検出 器のダイナミックレンジを 10dB とし、ビームと誘電体間の 最小距離を 0.1mm、ビームエネルギーが1GeV、観測波 長が 10µm のとき、中空誘電体の穴の直径は約 7mm と なる。

#### 3.4 ビーム位置の算出

電子ビームが中空誘電体中を通過する際に放射する チェレンコフ光の方位角方向の強度分布(Eq.(6))は、誘 電体中での吸収や厚みに依存せず、Coupling factor に のみ依存する。すなわちチェレンコフ光の方位角分布か ら中空誘電体中のビーム通過位置を Coupling factor を 用いて導出することができることを示唆している。チェレ ンコフリング全体を観測し、それを方位角積分して得られ るチェレンコフ光の方位角分布に Coupling factor を当て はめることで、ビーム位置を導出することができる。

#### 3.5 ビームサイズの影響

ビームサイズの影響を調べるために、3.3節で見積もっ たセットアップでビーム位置とビームサイズを各々変えて シミュレーションを行った。ここで電子ビームが中空誘電 体の中心を通過するときの Coupling factor は 0.11 であっ た。Figure 5 にシミュレーション結果を示す。これらの結 果からビームサイズが大きくなると位置精度が悪化する ため、ビームサイズは小さいほうが望ましいことが示唆さ れた。仮に穴の直径が 7mm、観測波長が 10µm、ビーム エネルギーが1GeV とすると、5µm 以下の位置分解能を 達成するためには、少なくてもビームサイズ σь を 100µm 以下に制限しなければならないことがわかった。

# 4. 実験計画

中空誘電体からのチェレンコフ光の観測実験は東北 大学電子光理学研究センターの試験加速器 t-ACTS の ビーム診断部で行われた[5]。実験では、中空誘電体と してシリカエアロゲル(穴径: 直径 5mm、厚さ: 25mm、屈 折率: 1.03)を用い、1THz 程度のコヒーレントチェレンコ フ光の観測に成功するとともに、ビーム位置によるチェレ ンコフ光の強度変化すなわち Coupling factor 依存性を 確認することができた。一方、光取り出し窓での吸収に 起因する測定精度の課題が残った。そこで窓材にテラへ ルツ帯域での吸収が極めて小さいポリメチルペンテン (PMP)[6]を採用した真空窓を設計・製作し、これを用い て中空輻射体からのチェレンコフ光の観測実験を計画し ている。現在真空耐用試験の準備を進めている。

### 5. まとめ

東北大学電子光理学研究センターでは、電子ビーム が中空誘電体中を通過したときに放射するチェレンコフ 光を用いた非破壊ビーム位置モニターの開発を行って いる。チェレンコフ光リングの強度はビーム位置による Coupling factor の方位角依存性にのみ支配されるため、 Coupling factor を用いて中空誘電体中のビーム位置を 導出することが可能である。検出器のダイナミックレンジ や誘電体の吸収特性などから中空誘電体の穴の大きさ や厚さを見積もり可能であることがわかった。また測定精 度はビームサイズに影響されるが、その影響は限定的で あることが示唆された。現在、原理実証実験に向け、中 空誘電体からのチェレンコフ光の特性を明らかにするた めに、新たに開発した PMP 真空窓を用いた ChRD 観測 実験を計画している。

### 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 18K11915 の助成を 受けたものです。

### 参考文献

- André, T., Andriyash, I.A., Loulergue, A. *et al.*, Control of laser plasma accelerated electrons for light sources. Nat Commun 9, 1334 (2018).; https://doi.org/10.1038/s41467-018-03776-x
- [2] I. M. Frank and I. E. Tamm, Compt. Rend. Acad. Sci. URSS
  144 100 (114) (127)
- 14, pp.109–114 (1937). [3] R. Ulrich, Z. Phys. 194, 180 (1966).
- [4] T. Takahashi *et al.*, Phys. Rev. E62 (2000) 8606.
- [5] S. Ninomiya *et al.*, in Proc. 10th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'19), Melbourne, Australia, May, 2019, pp. 2536-2538.
- [6] https://jp.mitsuichemicals.com