

LFC カメラ用チェレンコフラジエーターのビーム試験

BEAM TEST OF AEROGEL AS CHERENKOV RADIATOR FOR LFC CAMERA

南部健一[#], 柏木茂, 日出富士雄, 武藤俊哉, 長澤育郎, 高橋健, 齊藤寛峻, 阿部太郎, 齊藤悠樹, 濱広幸
Kenichi Nanbu[#], Shigeru Kashiwagi, Fujio Hinode, Toshiya Muto, Ikuro Nagasawa, Ken Takahashi, Hirotooshi Saito,
Taro Abe, Yuki Saito and Hiroyuki Hama

Research Center for Electron Photon Science (ELPH), Tohoku University

Abstract

Beam test of the Cherenkov radiator for Linear focal Cherenkov ring camera (LFC-Camera) was performed at the beam diagnosis section of test Accelerator as a Coherent THz Source (t-ACTS). We observed the clear Cherenkov ring without any distortion in shape from the Cherenkov radiator, and the diameter of the Cherenkov ring on the screen was almost consistent with the expected diameter. It is confirmed that the thin silica aerogel has sufficient performance for the Cherenkov radiator of the LFC-camera through this beam test.

1. はじめに

東北大学電子光物理学研究センターでは、薄いチェレンコフラジエーターから放射されるチェレンコフ光を計測することで、シングルショット縦方向位相空間分布測定を目指す Linear focal Cherenkov ring camera (LFC-Camera) の開発を行っている。今回、試験加速器 test Accelerator as a Coherent THz Source (t-ACTS) のビーム診断部で、チェレンコフラジエーターとして使用する疎水性シリカエアロゲルのビーム試験を行ったので報告する。

2. LFC カメラ

2.1 LFC カメラの開発背景

東北大学電子光物理学研究センターでは数百フェムト秒程度の極短バンチを用いた加速器ベースのコヒーレントテラヘルツ光源の研究開発を行っている[1]。t-ACTS では加速管中での速度圧縮法を用いて、このような極短バンチ電子ビームを生成するが、最終的なバンチ長は加速管に入射するビーム、すなわち電子銃から引き出された電子ビームの縦方向位相空間分布に強く依存する[2,3]。そこで速度圧縮に適した縦方向位相空間分布を有する電子ビームが電子銃で生成されているか確認するために LFC カメラの開発を行ってきた[4-6]。Figure 1 に LFC カメラの概略図を示す。

2.2 チェレンコフラジエーター

チェレンコフラジエーターには、高い透過率、十分な機械的強度、低い屈折率が要求される。この中でも屈折率は電子ビームエネルギーの決定に大きく影響するパラメータである。電子ビームのエネルギー分解能向上には、チェレンコフ角 θ_c を電子のエネルギー E で微分した値 $d\theta_c/dE$ が大きいもの、すなわち屈折率が小さいものが望ましい。一方屈折率が小さくなると、機械的強度とチェレンコフ光の光量が低下するという別問題もあ

る。そこで LFC カメラでは測定対象の電子ビームのエネルギーが 1.7 MeV 程度であることから、我々はこのエネルギー領域で比較的大きな $d\theta_c/dE$ を持ち、原子核実験等で多数の採用実績があり、製造方法も確立されている屈折率が 1.05 の疎水性シリカエアロゲル[7,8]を採用することにした。

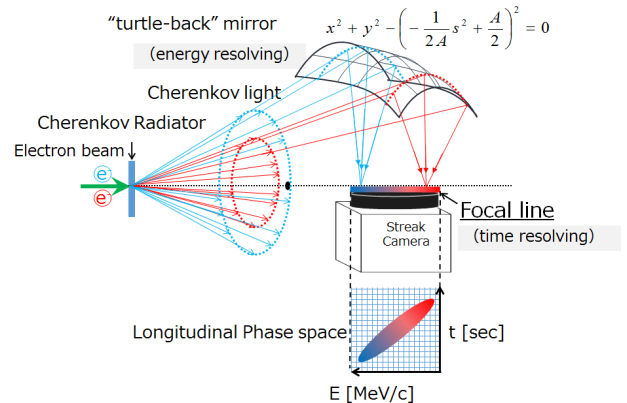


Figure 1: Conceptual drawing of the LFC-Camera. The Cherenkov light is emitted by an electron beam when it passes through in the radiator medium, and contains time and energy information of electron beam. The longitudinal phase space distribution in the electron beam is observed using a streak camera that measures the Cherenkov light on the focal line.

3. チェレンコフラジエーターのビーム試験

3.1 ビーム試験のセットアップ

LFCカメラでは、歪みがないチェレンコフ光を期待している。そこでチェレンコフ光の全体像の確認や、その曲率半径の把握を目的として、t-ACTS のビーム診断部にチェレンコフラジエーター試験系を設置し、チェレンコフラジエーターのビーム試験を行った。試験系の概略図を Figure 2 に示す。疎水性シリカエアロゲルは、ビーム位置測定用の蛍光スクリーン (デマルケスト製、 $t = 0.1\text{mm}$) を有するホルダーにセットされている。このホルダーは直線導入器を介して真空容器中を移動可能な構造とし、

[#] nanbu@lms.tohoku.ac.jp

他の実験との両立を図った。電子ビームから放射されたチェレンコフ光は、真空窓を介して大気中に取り出される。

これらの位置調整は、ガイドレーザーを用いて行われた。また同様にガイドレーザーを用いて光学系の調整も行った。チェレンコフ光の測定にはゲート付き CCD カメラを用いた。使用したカメラ (BASLER acA1300-30g) は 1296(H) × 966(V) ピクセルの画素を持ち、チェレンコフ光観測面での分解能は水平、垂直共に 0.1mm 程度であった。チェレンコフラジエーターのビーム試験時の t-ACTS の電子ビームのパラメータは、エネルギーが 50 MeV、マクロパルスのピーク電流が 8 mA、ビーム繰り返しが 1 pps で、チェレンコフラジエーター上での電子ビームの大きさは、 $\sigma_x = 0.23$ mm, $\sigma_y = 0.35$ mm である。

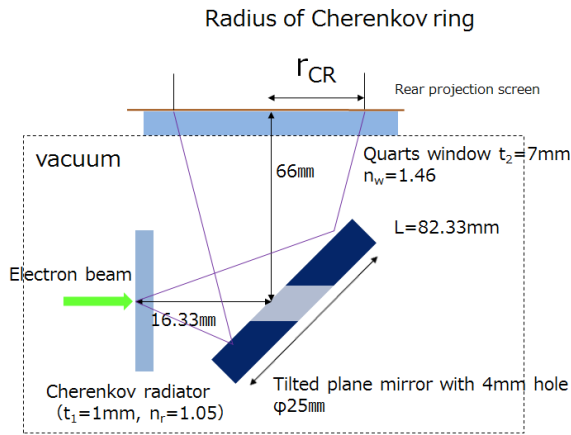


Figure 2: Schematic view of the beam test setup for Cherenkov radiator. Silica aerogel radiator is installed to the special holder with the fluorescent screen. The tilted flat mirror with 4 mm hole along the beam axis is placed behind the Cherenkov radiator to transport the Cherenkov light. The Cherenkov ring on the screen is observed using the gated CCD-camera. The vacuum chamber is evacuated through an ion pump.

3.2 ビーム試験結果

Figure 3 に試験加速器のビームを用いて観測されたリアプロジェクションスクリーン上でのチェレンコフリングを示す。そのままではデータ点数が多くて解析が困難であったため、1280 ピクセル × 960 ピクセルの画像データを 10 ピクセル × 10 ピクセル毎にセグメント化し、データ点数の削減を図った。セグメント毎に、水平および垂直の輝度が最も高い位置をそのセグメントの重心位置とし、その輝度を重みとした。測定データには放射線に起因するショットノイズが重畳しており、チェレンコフリングを解析する上で問題となったため、リング状の Region of interest (ROI)を設定した。ROI の直径は理想的な実験セットアップでのチェレンコフリングの直径に設定した。またチェレンコフリングの幅は $\sigma_{Rw} = 0.72 \pm 0.1$ [mm] であったので、ROI の半径方向の幅は $\pm 3\sigma_{Rw}$ と設定した。

このようにして得られたものに楕円を当てはめ、スクリーン上でのチェレンコフリングの歪の程度と大きさを評価した。その結果、水平方向の半径は 27.4 mm、垂直方向の半径は 27.6 mm となり、ほぼ同じ値となった。このことから観測されたチェレンコフ光は円環状で、チェレンコフラジエーターであるシリカエアロゲルはほぼ均一であることを示唆していると思われる。

スクリーン上でのチェレンコフリングの半径 r_{cr} は、次の式(1)で見積もることができ、式(1)から理想的な条件ではスクリーン上でのチェレンコフリングの半径は 27.2 mm となる。

$$r_{cr} = t_1 \tan \theta_c + (L - t_1 - t_2) \cdot \frac{n_r \sin \theta_c}{\sqrt{1 - (n_r \sin \theta_c)^2}} + t_2 \cdot \frac{n_r \sin \theta_c}{n_w \sqrt{1 - \left(\frac{n_r}{n_w} \sin \theta_c\right)^2}} \quad (1)$$

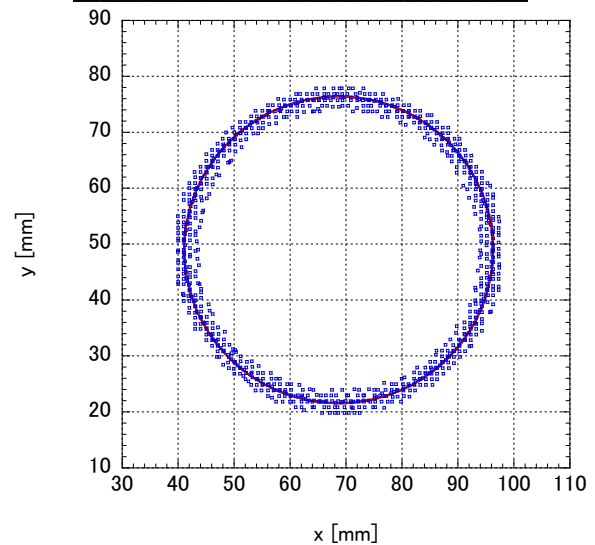
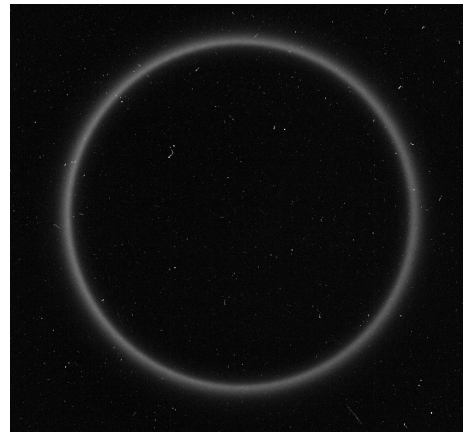


Figure 3: (upper) Spatial image of observed Cherenkov ring on the screen. (lower) Blue dots show the center of gravity of each segmented image. Red line shows fitting result using ellipse equation.

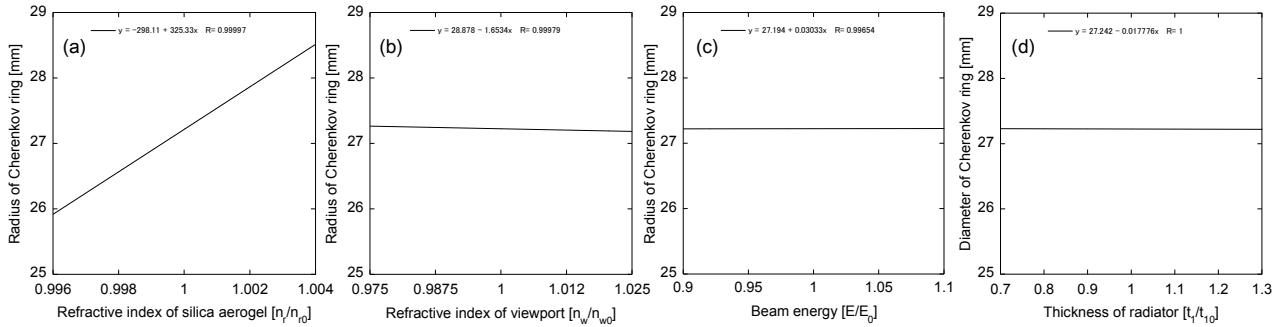


Figure 4: Solid lines denote variation of the Cherenkov ring diameter on the screen for different parameters where $n_{r0} = 1.05$, $n_{w0} = 1.46$, $E_0 = 50$ [MeV] and $t_0 = 1$ [mm].

ここで θ_c はチェレンコフ角、 L はチェレンコフラジエーターからスクリーンまでの距離、 t_l はチェレンコフラジエーターの厚み、 t_2 は真空窓の厚み、 n_r はチェレンコフラジエーターの屈折率、 n_w は真空窓の屈折率である。

Figure 4 から明らかなようにチェレンコフリングの半径に最も大きな影響を与えるものはチェレンコフラジエーターの屈折率である。もし測定値と期待値との間の差分がすべてチェレンコフラジエーターの屈折率に起因していると仮定すると、屈折率が想定値よりも 0.1 % 程度大きいことに相当し、これは LFC カメラにおけるエネルギー絶対値が 50 KeV 程度シフトすることを意味する。屈折率が 0.1 % 程度変化してもビームエネルギーの相対値への影響すなわちエネルギー分解能に及ぼす影響は小さいが、絶対値の測定精度には大きく影響するため、測定精度向上にはチェレンコフラジエーターの屈折率の把握および校正が必要不可欠である。

一般的にシリカエアロゲルの屈折率は、屈折角を測定するフ라운ホーファー法を用いて測定されているが、今回使用したチェレンコフラジエーターのような、薄く小さいものは測定が困難である。またよく知られているように、エアロゲルの屈折率と密度との間には (2) 式の関係がある。

$$n = 1 + \alpha\rho, \quad (2)$$

ここで α は定数、 ρ は密度である。チェレンコフラジエーターのような薄く小さなシリカエアロゲルの場合、密度の測定が難しくなるため、式(2)を用いて屈折率を求めることも困難である。一方、電子ビームのエネルギーに着目すると、Figure 4 から明らかなようにエネルギーが 50 MeV 程度になると、チェレンコフ角はほぼ一定となるため、スクリーン上のチェレンコフリングの大きさはほとんど変化しない、この性質を用いてチェレンコフラジエーターのような薄く小型のシリカエアロゲルの屈折率測定への展開も期待できると考えられ、今後検討していきたい。

4. まとめ

東北大学電子光理学研究センターの t-ACTS において、LFC カメラ用チェレンコフラジエーターのビーム試験を行った。これまでは真空容器の制限から、一部のチェレンコフ光しか取り出すことが出来ず、全体像の把握が困難であったが、今回チェレンコフリングの全体像を把握することが出来た。今回観測されたチェレンコフリングに明確な歪等は確認されなかったが、屈折率が想定値よりわずかに大きいことが示唆された。

LFC カメラにおいてはチェレンコフラジエーターの屈折率変化が電子ビームのエネルギー分解能に与える影響は限定的である。しかしながらエネルギーの絶対精度に関しては大きな影響を及ぼすことから、チェレンコフラジエーターの屈折率測定が、エネルギーの絶対値校正に必要な不可欠であることが明確になった。また現在測定対象としている電子ビームのエネルギーは 2 MeV 程度であるが、今後、それを 4 MeV 程度まで拡張するために、屈折率が 1.03 程度のシリカエアロゲルを用いたチェレンコフラジエーターの開発を進めていく予定である。

謝辞

チェレンコフラジエーターとして使用した疎水性シリカエアロゲルは千葉大学の河合准教授と田端誠博士に提供していただきました。また本研究の一部は、JSPS 科研費 15K13394, 15K17486 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] H. Hama *et al.*, New J. Phys. 8 (2006) 292.
- [2] L. Serafini, and M. Ferrario, AIP Conf. Proc. 581, 87.
- [3] S. Kashiwagi *et al.*, Proc. of LINAC2014. 1178.
- [4] H. Hama *et al.*, Proc of BIW10 (2010) 79.
- [5] K. Nanbu *et al.*, Proc. of IBIC2014 (2014) 385.
- [6] A. Lucangaramwong, "Development of Linear Focal Cherenkov-ring Camera for Direct Observation of Longitudinal Phase Space of Non-relativistic Electron Beam", Master's thesis, Tohoku University, 2014.
- [7] M. Tabata *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A 668 (2012) 64.
- [8] M. Tabata *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A 623 (2010) 339.