

令和 4 年 6 月 7 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K11915

研究課題名(和文) チェレンコフ光計測による非破壊ビームモニターの原理実証

研究課題名(英文) Development of non-destructive beam monitor using Cherenkov radiation

研究代表者

南部 健一 (Nanbu, Kenichi)

東北大学・電子光物理学研究センター・技術専門職員

研究者番号：00422072

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：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回折放射は、非破壊ビームモニターへの応用が期待されている。誘電体中をビームが直接通過するチェレンコフ放射と比べ、チェレンコフ回折放射は誘電体内にビームが作り出す電場が弱くなることから、放射強度が弱くなる。本研究では、この性質に着目しビームモニターに応用するための基礎的な放射特性の把握とビーム位置導出方法及び測定精度の検討などを行った。放射特性については、屈折率の異なる2種類の誘電体を用いて、チェレンコフ回折放射の観測を行うとともに、その波長分布の測定を行った。得られた波長分布は予測と異なり、より詳細な調査が必要であることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

チェレンコフ回折放射の強度分布からビーム位置を測定する手法の検討を行うとともに、テラヘルツ帯域でのチェレンコフ回折放射の観測に成功し、その波長分布を得る事に成功した。これは実用化に向けた最初の足掛かりであるといえる。ビームモニターはビームダイナミクスの理解などはもとより加速器の運転に必要な不可欠なツールである。チェレンコフ回折放射を用いたビームモニターは、非破壊で設置場所を選ばず、構造が簡単で安価に製作可能であると考えられる。実用化に成功すれば、医療用加速器をはじめとする加速器のリアルタイムビームパラメータ確認が可能となり、加速器の安定な運転に貢献できると考える。

研究成果の概要(英文)：Cherenkov diffraction radiation (ChDR), which is generated when electrons pass near dielectric mediums, is expected to be a tool for non-destructive beam diagnostics. The intensity of Cherenkov radiation is lower when a charged particle passes in the vicinity of a dielectric than when it passes through the dielectric. The intensity of ChDR is strongly dependent on the charged particles' position with respect to the dielectric. In this study, we exploited this dependence to estimate the beam position and evaluated the effect of beam size on the intrinsic position error. Moreover, we observed ChDR in THz-region using two types of radiators having different refractive indexes at t-ACTS. The measured spectra were different from the estimated spectra, hence we will conduct a detailed study of spectra and impact parameter dependence of ChDR.

研究分野：ビーム診断

キーワード：チェレンコフ放射 チェレンコフ回折放射 非破壊ビーム診断 ビームモニター

1. 研究開始当初の背景

ビームモニターは加速器の運転はもとより、ビームダイナミクスの理解などに必要不可欠なツールである。特に近年、オンライン測定が可能となることから、測定時にビームを壊さない非破壊型ビームモニターの需要が高まっていた。そこで申請者は、電子ビームが屈折率を有する中空媒質を通過するときに放射するチェレンコフ回折放射リングに着目し、これをビームモニターに応用することを考えた。これまで、チェレンコフ回折放射をビームモニターに応用した例はあったものの、チェレンコフ回折放射の特徴ともいえるリングイメージを応用したビームモニターの報告例は無かった。

2. 研究の目的

本研究は、電子ビームが誘電体近傍を通過するときに放射する、チェレンコフ回折放射に着目し、これをビームモニターに応用するために必要不可欠な、チェレンコフ回折放射の基礎的な特性や、チェレンコフラジエーター(誘電体媒質)の要求仕様などを明らかにすると共に、ビームモニターに応用するための放射特性の確認と測定に必要な基盤技術の確立を目標とした。

3. 研究の方法

荷電粒子が媒質中を運動するとき、荷電粒子の速度が、媒質中の光の位相速度よりも大きい場合に光を放出する現象は、チェレンコフ放射と呼ばれ広く知られている。一方、荷電粒子が媒質近傍を通過する際に放射するチェレンコフ光は、チェレンコフ回折放射と呼ばれている。チェレンコフ回折放射の強度は、チェレンコフ光と比べて、荷電粒子が媒質内につくりだす横方向電場が弱くなることから減衰し、その減衰を表す指標(結合係数)は横方向電場のフーリエ成分と荷電粒子と媒質間の距離(インパクトパラメータ)の関数となることが知られている[1-2]。ビームの位置に応じて、チェレンコフ回折放射の強度が変化することから、その強度分布からビーム位置を導出する手法の検討や、測定精度、ビームサイズ等の制約条件などの見積を行う。またチェレンコフ回折放射をビームモニターに応用するためには、結合係数のインパクトパラメータ依存性が本質的であり、その特性を明らかにすることは必要不可欠である。しかしながら、現実的に達成可能なインパクトパラメータと検出器の周波数帯域を考慮すると、観測波長域は数百 μm 程度のテラヘルツ帯域となることから、チェレンコフ回折放射の強度は極めて小さくなり、このままでは計測が困難である。そこで電子ビームのパンチ長が放射波長と同程度またはそれよりも短くしたときに得られる、放射強度が電荷数の2乗に比例する非常に強力なコヒーレント放射を利用して、チェレンコフ回折放射の計測を行い、結合係数のインパクトパラメータ依存性を確認するとともに、周波数スペクトルを取得しその放射特性を明らかにする。

4. 研究成果

(1) ビーム位置決定方法及び測定精度について

チェレンコフ回折放射の放射強度は誘電体媒質からの距離、すなわち誘電体に対するビーム通過位置に強く依存する。図1に中空誘電体中のビーム位置による、方位角方向の結合係数の変化を示す。ビームが中空誘電体の中心を通る場合、ビームと誘電体間の距離は変化しないため、図1の実線で示すように結合係数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、図1の破線及び点線のようにビームの位置に応じて結合係数の値が大きく変化することがわかる。ビームの位置によって結合係数が変化することから、これはチェレンコフ回折放射の方位角強度分布が変化することを意味し、方位角方向の強度分布を解析することで、ビーム位置の導出が可能となることがわかった。実際に測定を行う場合、方位角方向の測定点は3点以上必要である。位置測定精度に関して検討を行った結果、ビームサイズが大きいと、測定精度が悪化するため、ラジエーター通過時のビームサイズを概ね水平垂直共に $100\mu\text{m}$ 以下にする必要があることがわかった。また、検出器のダイナミックレンジや、測定に用いる周波数帯域などから、中空誘

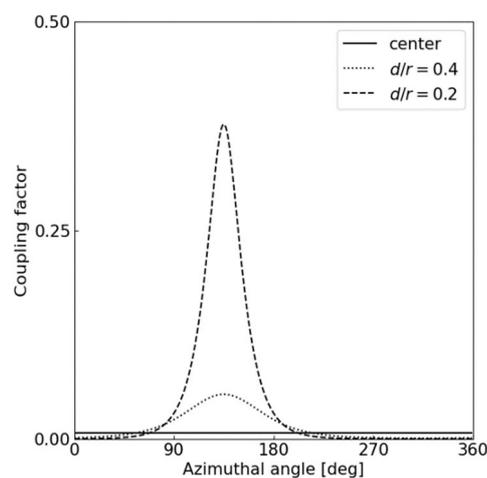


図1: ビーム位置による結合係数の変化。dは中心からビームまでの距離、中空誘電体の穴径(半径)はrである。ビーム位置が中心から離れるに従い、結合係数の値は急激に増加し1に近づく。

電体の穴径を見積もり可能であることを見出した。本測定手法は、ビームと誘電体間の距離の関数となる結合係数を利用するため、結合係数をはじめとするチェレンコフ回折放射の基礎的な放射特性の把握と理解が必要となる。そこで次に述べるチェレンコフ回折放射の測定実験を行い、放射特性を実験的に確認することとした。

(2) チェレンコフ回折放射の測定実験

中空誘電体(ラジエーター)からのチェレンコフ光の測定実験は試験加速器 t-ACTS のビーム診断部で行った。t-ACTS のビーム条件(エネルギー: 22MeV、パンチ長: ~100 フェムト秒)から、放射されるチェレンコフ回折放射の主要な周波数は 1THz 程度であると見積もられた。チェレンコフ回折放射リング全体を観測するために、屈折率が 1.03 と非常に小さなシリカエアロゲル製のラジエーター(穴径: 5mm、厚さ: 25mm)を用いて実験を行った。ラジエーター入口でのビーム位置は遷移放射(OTR)を用いたプロファイルモニターで確認し、ビームサイズは水平・垂直方向ともに 100 μm 程度になるように調整した。チェレンコフ回折放射の計測には焦電検出器(SLT Sensor- und Lasertechnik GmbH 社製の THz10)を用い、自動ステージを用いて、焦電検出器を移動させて測定を行った。THz 帯域は主に水蒸気による吸収の影響が大きいため、測定光学系全体を露点 -20 程度の乾燥空気で連続的に置換しながら測定を行った。実験の結果、チェレンコフ回折放射の観測には成功したものの、放射強度が十分ではなかったことと、チェレンコフ回折放射と、光取り出し用ミラーからの回折放射(DR)の分離が困難であったため、チェレンコフ回折放射全体の観測は断念し、一部のみの取り出しとなるものの、シリカエアロゲルの約 10 倍の放射強度が期待できる、高密度ポリエチレン(HDPE)製のラジエーターを用いた実験セットアップを新たに構築し測定実験を行った。使用する HDPE は、THz-TDS システムで屈折率及び透過率などを測定し、その結果に基づきラジエーターを設計した。使用した HDPE の屈折率は 1.536 ± 0.003 (1~4THz) であり、1THz での減衰係数は 0.24 であった。図 2 に実験に用いた実験セットアップと HDPE ラジエーターを示す。シリカエアロゲルと同様に、焦電検出器には THz10 を用い、自

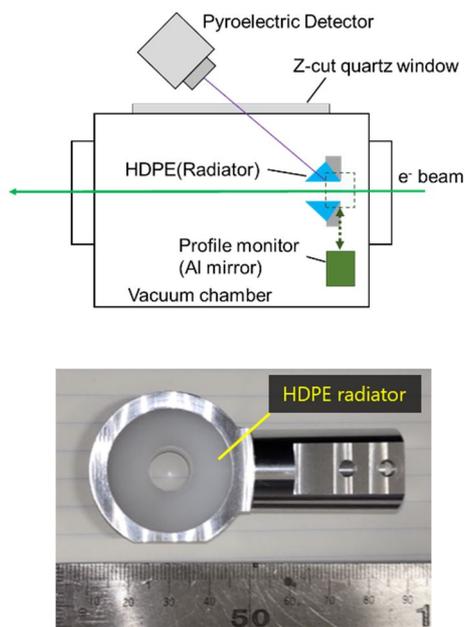


図 2: 測定セットアップ(上)と実験に使用した HDPE ラジエーター(下) 穴径は 10mm 屈折率は 1.536 である。

と、光取り出し用ミラーからの回折放射(DR)の分離が困難であったため、チェレンコフ回折放射全体の観測は断念し、一部のみの取り出しとなるものの、シリカエアロゲルの約 10 倍の放射強度が期待できる、高密度ポリエチレン(HDPE)製のラジエーターを用いた実験セットアップを新たに構築し測定実験を行った。使用する HDPE は、THz-TDS システムで屈折率及び透過率などを測定し、その結果に基づきラジエーターを設計した。使用した HDPE の屈折率は 1.536 ± 0.003 (1~4THz) であり、1THz での減衰係数は 0.24 であった。図 2 に実験に用いた実験セットアップと HDPE ラジエーターを示す。シリカエアロゲルと同様に、焦電検出器には THz10 を用い、自

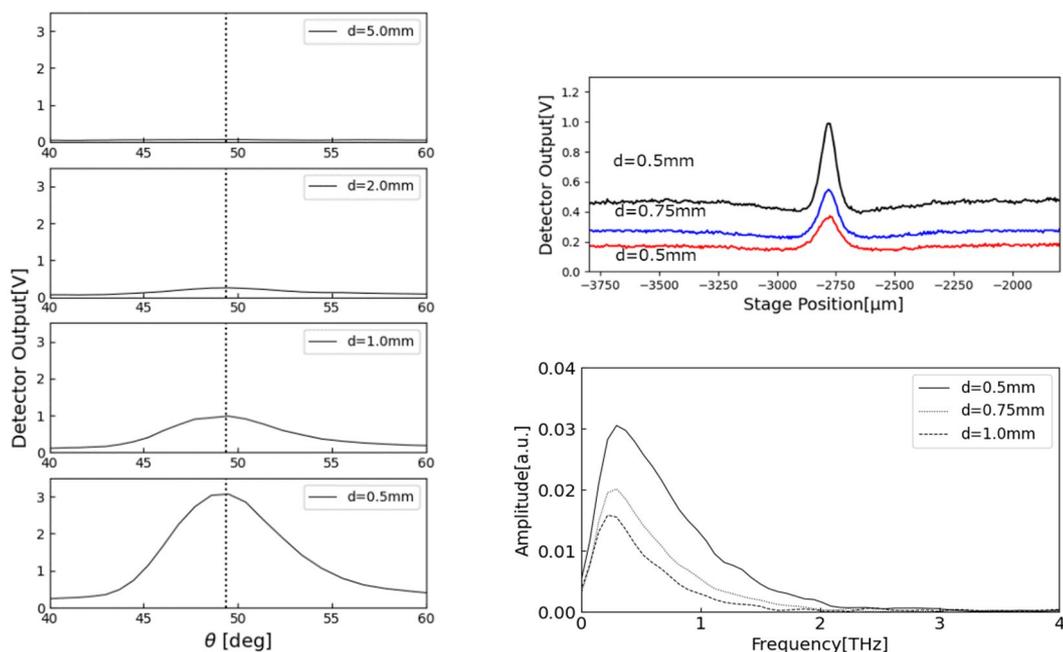


図 3: (左)インパクトパラメーターを変えた時のチェレンコフ回折放射強度の変化。点線はチェレンコフ角(49.4度)を示す。
(右上)マイケルソン干渉計で取得したチェレンコフ回折放射のインターフェログラム
(右下)チェレンコフ回折放射の周波数スペクトル

動ステージを用いて 1 次元スキャンを行った。放射強度はシリカエアロゲルと比べて概ね 8 倍程度大きくなった。また図 3 左に示すように測定されたチェレンコフ回折放射の強度分布のピーク位置は、予想された位置とよく一致していた。しかしながら、その強度分布は見積より広がった。またビームと誘電体間の距離、すなわちインパクトパラメーターを変えると、それに応じてチェレンコフ回折放射の強度が変化することは確認できたが、これについても理論的な振る舞いとは大きく異なった結果が得られた。

次にマイケルソン干渉計を用いて周波数スペクトルを測定した。取得したインターフェログラムとそれから得られた周波数スペクトルを図 3 右に示す。インパクトパラメーターを変えて測定したスペクトルから、インパクトパラメーターが大きいと、高周波成分の減衰が大きくなることが確認された。これは理論的に予測される応答と矛盾しない。一方測定されたチェレンコフ回折放射の主要な周波数は、予測された値と異なった。これについては、チェレンコフ回折放射に、HDPE を固定する金属製ホルダーに起因する回折放射等が重畳したことが原因となっている可能性が示唆され、詳細な調査を行っている。またこれらの実験結果から結合係数についてもより詳細な調査が必要であることが明らかとなった。

本研究期間内には、非破壊ビームモニターの原理実証に向けた、チェレンコフ回折放射の基礎的な特性や、チェレンコフラジエーター（誘電体媒質）の要求仕様、ビーム位置導出手法の検討などを行った。100 フェムト秒以下の極短バンチ電子ビームを安定に生成できる試験加速器 t-ACTS で、開発したチェレンコフラジエーターを用いてチェレンコフ回折放射の測定実験を行った。予測とは異なった結果が得られたものの、チェレンコフ回折放射の強度のインパクトパラメーター依存性や周波数スペクトルなど、基礎的な放射特性の理解に必要な情報が得られた。今後は、シミュレーションとの比較などを行い、実験で得られた放射特性の理解を進める。

< 引用文献 >

- [1] R. Ulrich, Z. Phys. 194, 180 1966.
- [2] T. Takahashi, PHYSICAL REVIEW E (2000), 62(6): 8606-8611

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 S. Ninomiya, H. Hama, F. Hinode, K. Kanomata, S. Kashiwagi, S. Miura, N. M. Morita, T. Muto, I. Nagasawa, K. Nanbu, H. Saito, K. Takahashi, H. Yamada	4. 巻 -
2. 論文標題 Measurement of Cherenkov Diffraction Radiation from a Short Electron Bunches at t-ACTS	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. 10th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'19)	6. 最初と最後の頁 2536-2538
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18429/JACoW-IPAC2019-WEPGW031	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 K. Nanbu, Y. Saito, H. Saito, S. Kashiwagi, F. Hinode, T. Muto and H. Hama	4. 巻 1
2. 論文標題 Bunch Length Measurement Employing Cherenkov Radiation from a Thin Silica Aerogel	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Particles	6. 最初と最後の頁 305-314
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/particles1010025	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 南部健一、他
2. 発表標題 チェレンコフ放射を用いたビーム位置モニターの開発
3. 学会等名 第17回日本加速器学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Nanbu, H. Hama, F. Hinode, S. Kashiwagi, and T. Muto
2. 発表標題 Development of Beam Position Monitor Using Cherenkov Diffraction Radiation
3. 学会等名 8th Int. Beam Instrumentation Conf. (IBIC'19) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 南部 健一, 日出 富士雄, 柏木 茂, 武藤 俊哉, 齊藤 寛峻, 森田 希望, 山田 悠樹, 鹿又 健, 高橋 健, 長澤 育郎, 柴田 晃太郎, 三浦 禎雄, 濱 広幸
2. 発表標題 t-ACTS における中空誘電体からのチェレンコフ光の測定
3. 学会等名 第16回日本加速器学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Ninomiya, H. Hama, F. Hinode, K. Kanomata, S. Kashiwagi, S. Miura, N. M. Morita, T. Muto, I. Nagasawa, K. Nanbu, H. Saito, K. Takahashi, H. Yamada
2. 発表標題 Measurement of Cherenkov Diffraction Radiation from Short Electron Bunches at t-ACTS
3. 学会等名 10th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'19) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 二宮 慎吾, 柏木 茂, 鹿又 健, 齊藤 寛峻, 高橋 健, 長澤 育郎, 南部 健一, 日出 富士雄, 三浦 禎雄, 武藤 俊哉, 濱 広幸
2. 発表標題 チェレンコフ光リングを用いた非破壊型ビームモニターの検討
3. 学会等名 第15回日本加速器学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ken-ichi Nanbu
2. 発表標題 CHERENKOV LIGHT FROM HOLLOW SILICA AEROGEL OF HAVING LOW REFRACTIVE INDEX
3. 学会等名 International Conference on Radiation and Emission in Materials. (ICREM-2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

東北大学電子光物理学研究センター加速器ビーム物理研究部
<https://www.ins.tohoku.ac.jp/research/abpg/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------