

## 科学研究費補助金研究成果報告書

平成 25 年 4 月 17 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2009～2012

課題番号：21540298

研究課題名 (和文) 高時間分解スライスエミッタンス測定手法の開発

研究課題名 (英文) Development of the transverse slice emittance measurement system

研究代表者

加藤 龍好 (KATO RYUKOU)

大阪大学・産業科学研究所・准教授

研究者番号：20273708

研究成果の概要 (和文)：高輝度電子ビームの横方向スライスエミッタンスをより簡便に、高時間分解で測定するための新たな手法として、コンパクトなチェレンコフ・モニターを開発した。チェレンコフ光発生部の光発生媒質には疎水性エアロジェルを使用し、光発生部での時間、空間分解の劣化を防ぐために可能な限り薄いエアロジェルを製作した。最小限のスペースでモニターの設置ができるよう、チェレンコフ光発生部はコンパクト化し、エアロジェルのサポートと最初の反射鏡を一体化した設計を行った。このチェレンコフ・モニターを大阪大学産業科学研究所の L バンド電子ライナックのビームラインにある四極電磁石の下流側に組み込み、光輸送系の構築、エミッタンス測定システムの開発をおこなった。

研究成果の概要 (英文)：In order to measure the transverse slice emittances of the electron beam, we have developed the compact measurement system consisting of the Cherenkov radiator and the streak camera. The Cherenkov radiator with the aerogel was installed on the downstream side of the quadruple magnet on the straight beam transport line of the L-band electron linac at ISIR, Osaka University.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究代表者の専門分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：加速器、量子ビーム、位相空間、スライスエミッタンス、ビーム診断、FEL、SASE

## 1. 研究開始当初の背景

第4世代光源と呼ばれる X 線領域での波長可変レーザーを実現する最も有力な候補と考えられている単一通過型自由電子レーザー

ー (SASE-FEL: Self-Amplified Spontaneous Emission Free-Electron Laser) では、高輝度大電流 (～数 kA) の電子バンチを長尺のアンジュレータ (～数 100m) に入射し、アンジ

ューレータ入り口で放射されるノイズレベルの自発光を、電子バンチとの相互作用により飽和レベルまで増幅する。このX線FELでは数kAにも達する高ピーク電流を有しながらも、なお且つ高品質の電子バンチが要求される。ここで要求される高品質とは、X線の光を有限のアンジュレータ長内で出力飽和レベルに増幅できるだけの利得が得られるくらいに、大電流電子ビームのエミッタンスとエネルギー拡がり十分小さいことである。通常我々がエミッタンスとして評価しているものは投影エミッタンスと呼ばれ、電子バンチ全体のエミッタンスである。現時点で、電子バンチ全体のエミッタンスをX線FELで要求されるレベルに低減させることはできていない。しかし、SASE-FELで発生されるX線光パルスは、コオペレーション長程度のコヒーレントな光パルスが複数連なった構造をしており、接続するコヒーレント・パルス間での位相の関係はランダムである。したがって、光の成長に必要なコオペレーション長程度の領域で低エミッタンスが実現されていけば、十分にコヒーレントX線の増幅が可能となる。そのためには電子バンチ全体の投影エミッタンスのみならず、時間分解されたエミッタンス、すなわちスライスエミッタンスの評価が重要となる。また近年の小型加速器でも高品質ビームの発生が求められている。より低エミッタンスのビームを発生させるためには、電子バンチ内のスライスエミッタンスを評価し、それを制御することが必要となる。

本研究と同種の研究は、米国とドイツで行われていた。米国のブルックヘブン国立研究所(BNL)では、電子ビームをRF空洞でエネルギーチャープし、時間軸方向の分布をエネルギー軸方向の分布に置換したのち、分散のある場所でビームスリットを用いてその一部を切り出した後、上流側の4極電磁石を用いたQスキャン法によりスライスエミッタンスを評価する手法が開発された。(X. Qiu, et al., "Demonstration of Emittance Compensation through the Measurement of the Slice Emittance of a 10-ps Electron Bunch", Phys. Rev. Lett. 73, 3723-3726, 1996.) また、米国のSLACではBNLと同様にエネルギーチャープにより時間軸方向の分布をエネルギー軸方向の分布に置換した電子ビームを偏向電磁石で曲げて、時間軸方向の分布を水平方向分布に変換して、横方向が時間分布、縦方向が空間分布のプロファイルを得て、それを上流側の4極電磁石でQスキャンすることでスライスエミッタンスを評価している。(D.H. Dowell, et al., "Slice emittance measurements at the SLAC gun test facility", Nucl. Instrum. Meth. A 507, 327-330, 2003.) 両者ともエネルギー

ーチャープによって時間軸方向の分布をエネルギー軸方向の分布に置換するため測定可能なビーム条件が制限される。他方、ドイツのDESYでは、直線部にキッカーと偏向加速空洞、Off-AxisのOTRスクリーンを設置し、偏向電場のゼロクロス位相で電子ビームを入射したときのビームサイズを求め、上流側の4極電磁石でQスキャンすることでスライスエミッタンスを評価している。(M. Roehrs, et al., "Slice Emittance Measurements at FLASH", Proc. of FEL 2005, Stanford, California, Aug. 21 - 26, 2005, pp. 541 - 544.) この手法はBNLやSLACの手法と違って、ビームをエネルギーチャープさせる必要が無く、より直接的な評価が可能となる。しかし、測定箇所ごとにRF空洞を設置し、導波管回路によりRF源と接続した上で、位相器によりRF位相を適宜調整する必要があるため、測定箇所を簡単に増設することは困難である。また、これらの手法はその規模の大きさから小型加速器での利用は難しいと考えられ、よりコンパクトで簡便なスライスエミッタンス測定手法の開発が求められる。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、スライスエミッタンスをより簡便に、高時間分解で測定するための新たな手法を開発することである。従来のスライスエミッタンス測定手法は、いずれも専用の加速空洞とそのRFシステムが必要となるため大型の加速器施設でないと運用が困難であった。それを克服するために光の発生源としてよりコンパクトで従来のプロファイルモニターと置き換え可能なチェレンコフ光発生部を開発する。次にエミッタンス測定対象となる方向の空間分布を保存するように測定系まで輸送する光学系を構築する。測定装置としてストリークカメラを用いることで時間分解を実現し、装置のコンパクト化を図る。時間分解はストリークカメラの性能によって決まるため、最高性能のストリークカメラを用いても200fsが時間分解の限界となるが、小型加速器や大型加速器でも入射部では十分な時間分解と考えられる。この手法が実用化できれば、小型加速器や大型加速器の入射部など従来の方法ではスライスエミッタンスを評価することが難しかったところでの測定が可能になる。

## 3. 研究の方法

本研究では、スライスエミッタンスをより簡便に、高時間分解で測定するための新たな手法を開発する。4極電磁石の下流側に放射媒体としてエアロジェルを用いたプロファイルモニターを設置し、そこを通過する電子ビームにチェレンコフ光を発生させる。発生

した光の測定対象となる方向を光学系により、ストリークカメラの入射光学系スリットの水平方向に適合させる。電子ビームの横方向空間分布をストリークカメラにより垂直方向に時間掃引することで、電子ビームのスライスエミッタンスの直接評価をできるようになる。ここで提案する手法では、ストリークカメラを用いて時間掃引することでシステムを大幅に単純化しており、4極電磁石の下流側であれば、どこでもスライスエミッタンスを評価できるようになる。

#### 4. 研究成果

##### (1) チェレンコフ・モニターの開発

可能な限りコンパクトなチェレンコフ発生部を製作するために、図1に示されているように、金属鏡で支持された簡便でコンパクトなチェレンコフ発生部を設計した。このチェレンコフ発生部では、疎水性シリカエアロジェル(SP-50、松下電工製)を使用している。44x44 mm<sup>2</sup>で厚さ1.0mmの薄いエアロジェルはアルミニウム金属鏡に取り付けられている。このエアロジェルの屈折率と密度は各々1.05と0.19g/cm<sup>3</sup>である。この屈折率のエアロジェル中でのチェレンコフ放射角は、10 MeVの以上のエネルギーの電子に対して、放射角度はほぼ一定の35.5°である。放射されたすべての光を集光するには、この角度拡がりが大きすぎるので、我々はチェレンコフ光の一部を切り出して使用することにした。エアロジェルの中で放射されたチェレンコフ光は、1度金属鏡で反射され、再びエアロジェルの中を通過して、真空との境界面で屈折される。エアロジェルの中で上向きに放たれたチェレンコフ放射が真空中でビーム軌道面に対し垂直方向に放射されるように、図2に示すようにチェレンコフ発生部は55.8°の傾き角で取り付けられている。これにより、エアロジェルの実効的な厚さは1.8 mmとなる。

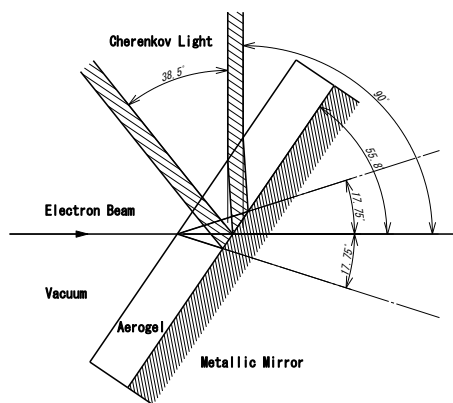


図1 チェレンコフ光発生部の設計

エミッタンス測定は水平方向、垂直方向を独立に行う必要があるため、水平方向、垂直方向ともにエアロジェルを55.8°の傾き角で取り付けられるフォルダーを製作し、これを2段式のアクチュエータでビームライン上に出し入れできるようにした。これを図2に示す。

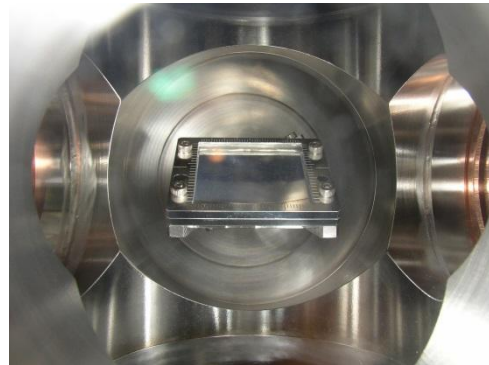


図2 ビーム軌道面に対して55.8°の角度で取り付けられたチェレンコフ光発生部

##### (2) 光輸送路の構築

加速器室にあるLバンド電子ライナックの直線部、4極電磁石の下流側に設置されたチェレンコフ光発生部からの測定室に設置されたストリークカメラシステムまでの光輸送路の構築を行った。プロファイルモニターの設置角度誤差とエアロジェル屈折率の経年変化を考慮して、チェレンコフ光を受ける最初のミラーは角度と光軸方向の位置が遠隔調節できるようにした。このミラーによって平行光束化された光を複数の平面ミラーによりストリークカメラまで輸送している。ストリークカメラの入射スリットの直前でレンズにより集光する。最初のミラーと直前のレンズの焦点距離の比によって、像倍比が決まる。40 mm幅のエアロジェル全体をストリークの入射スリットの有効幅10 mmに変換するため、増倍比は4:1が理想的であるが、最終のレンズを交換することである程度調整できるようにした。

##### (3) 測定システムの構築

LabVIEWを用いてエミッタンス測定システムを構築した。予備実験として、最初のミラーの位置にトリガー付CCDカメラを設置し、投影エミッタンスの測定を行い、大強度単バンチ電子ビームの投影規格化エミッタンスが水平方向、垂直方向ともに $100\pi\text{ mm}\cdot\text{mrad}$ であることを確認した。続いて、ストリークカメラの測定レンジごとに変化する内部トリガー遅延を調整するための遅延調整機構を構築した。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① R. Kato, S. Kashiwagi, Y. Morio, K. Furuhashi, Y. Terasawa, G. Isoyama、Longitudinal phase-space and transverse slice emittance measurements of high-brightness electron beams at ISIR, Osaka University、Nuclear Instruments and Methods Physics Research A、査読有、637、2011、S80-S82
- ② R. Kato, S. Kashiwagi, Y. Morio, K. Furuhashi, Y. Terasawa, G. Isoyama、Longitudinal phase-space and transverse slice emittance measurements of high-brightness electron beams、Proceedings of the 31st International Free-Electron Laser Conference、査読無、2010、293-296

[学会発表] (計3件)

- ① R. Kato、Longitudinal Phase-Space and Transverse Slice Emittance Measurements of High-Brightness Electron Beams at ISIR, Osaka University、2009 International Workshop on Ultrashort Electron & Photon Beams: Techniques and Applications、7 September 2009、Xi'an International Conference Center (西安・中国)

- ② R. Kato、Longitudinal Phase-space and Transverse Slice Emittance Measurements of High-brightness Electron Beams、The 31st International Free-Electron Laser Conference、25 August 2009、BT Convention Centre (リバプール・英国)
- ③ 加藤龍好、高輝度電子ビームの縦方向および時間分解横方向位相空間分布測定、日本加速器学会年会、2009年8月5日、日本原子力研究開発機構 (茨城県那珂郡東海村)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

加藤 龍好 (KATO RYUKOU)  
大阪大学・産業科学研究所・准教授  
研究者番号：20273708

### (2) 研究分担者

該当なし

### (3) 連携研究者

柏木 茂 (KASHIWAGI SHIGERU)  
東北大学・電子光理学研究センター・准教授  
研究者番号：60329133  
(平成21年度まで分担者、平成22年度から連携研究者として参画)