

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2006～2008

課題番号：18540273

研究課題名(和文) 高輝度電子ビームの縦方向位相空間分布測定手法の開発

研究課題名(英文) Development of the longitudinal phase-space monitor for high-brightness electron beams

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：

電子ビームの縦方向位相空間分布を測定するためにチェレンコフ放射によるプロファイル・モニターと偏向電磁石、ストリークカメラから構成される測定システムを開発した。電子ビームの検出感度を上げるために、チェレンコフ・モニターの放射媒質として疎水性エアロゲルを用いた。この縦方向位相空間測定システムは、これまで困難であった縦方向位相空間内の電子分布の評価を、より簡便な手法で実現した。また、このシステムは高い検出感度を有するため、これまで観測できなかった電子密度の低いパンチの裾野の部分を確認できるようになった。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	2,100,000	0	2,100,000
2007年度	800,000	240,000	1,040,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	420,000	3,920,000

研究分野：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、縦方向位相空間、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(SASE-FEL: Self-Amplified Spontaneous Emission Free-Electron Laser)では、高輝度大電流(～数kA)の電子パンチを長尺のアンジュレータ(～数100m)に入射し、アンジュレータ入り口で放射されるノイズレベルの自発光を、電子パンチとの相互作用により

飽和レベルまで増幅する。

このSASE発生で重要なのは数kAにも達する高ピーク電流の電子パンチをいかにして発生させるかという点である。このような電子ビームは電子銃で直接発生することができず、一度電子銃で発生した電子ビームを縦方向に圧縮することでピーク電流を高めている。電子ビームを圧縮するためには、低エネルギー領域では速度変調、高エネルギー領域ではエネルギー変調した後に磁場による

航路差を用いた圧縮が用いられる。

これらの手法により圧縮された電子バンチでは、ピーク電流は高くなるが、エネルギー方向には広がり、かつ複雑な時間 - エネルギー構造を持つようになる。このような縦方向位相空間内での電子分布は、SASE の光増幅過程での利得や、飽和強度等に影響を与える。そのため、SASE の光増幅過程の動力的な研究と、X線領域での SASE の高性能化のためには、縦方向位相空間内での電子分布を評価し、それを高精度に制御していくことが不可欠となる。これまでのところ、縦方向位相空間を直接観測する手段はなく、電子バンチの時間プロファイルとエネルギー分布は独立に評価されてきた。最近、縦方向位相空間を評価するために、いくつか手法が提案され研究が進められている。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、縦方向位相空間内での電子分布を評価するためのより簡便な手法を開発することである。

これまでに電子ビームの縦方向位相空間を評価するために、電子ビームが偏向電磁石を通過してエネルギー分布が水平方向分布に置換された後に、RF 空洞で進行方向と垂直に電場を与え、時間軸方向の分布を垂直軸方向の分布に置換して、ビーム・プロファイルという形で、時間 - エネルギー空間分布を評価する手法が提案されて、実際にそれを用いた測定が試みられている。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。一方、本研究で提案される手法では、時間軸方向の掃引をストリークカメラを用いることで単純化しており、偏向電磁石の下流側であれば、どこでもビームの縦方向位相空間分布を評価できるようになる。

この手法により、電子ビームの時間 - エネルギー位相空間分布が評価できるようになるため、通常行われているエミッタンス測定（横方向位相空間分布の評価）と併用することにより、電子ビームの六次元的な評価が可能となる。また、測定がバンチごとに可能になるため、電子ビームの時間ジッターとエネルギージッターの相関評価が可能になり、加速器の安定性をより、高い精度で評価できるようになる。

## 3. 研究の方法

本研究では縦方向位相空間分布を測定するために、運動量分散の大きな場所に電子分布を光に置き換える装置を設置することで、電子ビームのエネルギー分布を発生した光の水平方向分布に反映させ、その光をストリ

ークカメラにより垂直方向に時間掃引することで、電子ビームの縦方向位相空間（時間 - エネルギー）分布を直接測定する。

予備実験では可視遷移放射(OTR)モニタを用いて、ビーム・プロファイルを測定した。OTR プロファイルからビーム・エネルギーを評価した結果、通常使用している運動量分析電磁石とスリット、ファラデーカップを用いたエネルギー評価システムよりも高い運動量分解が得られた。しかし、OTR による発生光子数が少ないことに加えて、我々が行っている THz 領域での SASE や FEL 実験で使用する 10-20 MeV の電子ビーム・エネルギーでは OTR の角度分布拡がりが大きく、縦方向位相空間分布を評価するのに十分な光量を得ることができなかった。光子数を増加させるために PIZ での実験結果を参考に、プロファイル・モニターとしてシリカ・エアロジェルからのチェレンコフ光を用いることにした。

設置場所の物理的な制限のため、私たちは複雑なメカニズムを真空中に構築することができなかったので、金属鏡で支持された簡単なチェレンコフ発光部を設計した。このチェレンコフ発光部では、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。45x30mm<sup>2</sup>で厚さ 1.5mm 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。図 1 は、チェレンコフ発光部を取り付けたスクリーンフォルダーの写真を示している。同じ位置でビーム・プロファイルを測定するために、0.1 mm の厚さの蛍光セラミック・スクリーン(AF995R、Desmarquest社製)がビーム軌道面に対し 45° 傾けてエアロジェルの横に取り付けられている。



図 1 チェレンコフ発光部。左はビームプロファイルモニター用の厚さ 0.1mm の蛍光セラミックで、ビーム軸に対して 45° に取付けている。右は 55.8° の角度で取り付けられた疎水性エアロジェルで、背面からアルミミラーでサポートされている。

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であり、その開き角は  $35.5^\circ$  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、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水平面に対し垂直方向に放射されるように、チェレンコフ発光部は  $55.8^\circ$  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  $2.7\text{mm}$  になる。チェレンコフ光円錐の一部が、サファイア真空窓を通して真空槽から大気中に取り出され、反射鏡によりストリークカメラまで輸送される。最初の凹面鏡によって輸送される光は、およそ全放射の  $10\%$  と見積もられる。エアロジェルの  $400\text{nm}$  から  $800\text{nm}$  までの波長範囲の平均透過率が  $85\%$  であると仮定すると、最初の反射鏡が受け取る光子数は  $1$  入射電子あたり  $1.2$  個と推定される。チェレンコフ放射により発生する光子数は、OTR のそれよりも  $2$  桁以上大きい。

チェレンコフ・プロファイルモニターは、ライナックから FEL システムまでビーム輸送路に設置された。プロファイル・モニターと偏向電磁石の間の距離は  $320\text{mm}$  で、この位置における分散関数は  $0.4\text{m}$  である。エアロジェルの実際の可視幅が  $40\text{mm}$  であるので、エネルギーアクセプタンスとエネルギー分解能は各々  $10\%$  と  $0.25\%/\text{mm}$  であると見積もられる。

エアロジェルで発生する光は、約  $15\text{m}$  の光輸送路のより大気中を加速器室から測定室まで輸送され、ストリークカメラにより測定される。ストリークカメラは入射スリット上での光パルス像を、空間情報を水平軸に、時間情報を縦軸もつストリーク像に変換する。ストリークカメラとしては C5680-11 (浜松ホトニクス社製) が使用される。C5680-11 は High Speed Streak Unit C5676 との組み合わせで  $1.57\text{ps}$  の時間分解を持っている。ストリークカメラの有効面積はスクリーン上で  $11(\text{H}) \times 8.25(\text{V}) \text{mm}^2$  である。そこで、エアロジェル上での発光像がその領域に適合するように光輸送システムを用いて調整する必要がある。構築した光輸送路はいくつかの制約から、像の増倍率と輸送路の輸送効率はずしも最適化されてはいない。そのためストリークカメラから見込めるエアロジェルの水平サイズは  $4.4\text{mm}$  に制限される。(この幅は、 $1.1\%$  のエネルギーアクセプタンスに対応する)。したがって、縦方向位相空間内の電子分布の全体像を  $1$  度に取得することが出来ず、 $1.1\%$  のエネルギー幅でスライスされた像が

得られる。そのため、偏向電磁石の磁場を掃引することにより得られる複数のエネルギー・スライスされたイメージを結合させることにより、縦方向位相空間像を再構成した。

#### 4. 研究成果

実験に使用された単バンチ電子ビームは、 $2$  台の  $108\text{MHz}$  空洞と  $1$  台の  $216\text{MHz}$  空洞で構成されるサブハーモニックバンチャー (SHB) システムを備えた  $1.3\text{GHz}$  L バンド電子ライナックで加速された。この SHB システムにより、最大  $90\text{nC}$  以上の電荷量をもつ高輝度電子バンチの発生が可能になる。他方、この SHB システムを用いて発生した単バンチビームは縦方向の電子位置とそれらのエネルギーとの間により複雑な相関関係を持つことになる予想される。

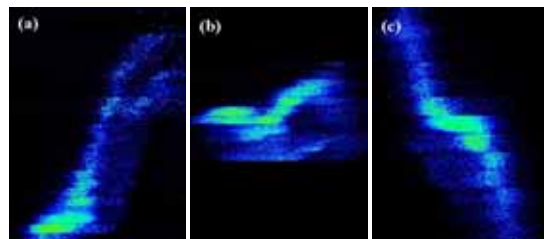


図 2 再構成された単バンチ電子ビームの縦方向位相空間プロファイル。プロファイル像は横軸が時間 ( $150\text{ps}/\text{full scale}$ )、縦軸がエネルギー ( $2.6\text{MeV}/\text{full scale}$ ) となる。図中左側が電子バンチの先頭である。

図 2 は、 $3$  つの異なる加速位相の場合に、電磁石電流を  $0.05\text{A}$  または  $0.1\text{A}$  ステップで変えながら測定されたスライスイメージから復元された縦方向位相空間を示している。図中のプロファイルは、水平軸として時間情報を縦軸としてエネルギー情報をもっている。左側が電子バンチの先頭を示している。電子ビームのエネルギー拡がり狭くなるように調整された状態は、図 2 (b) に対応している。図 2 の (a) と (c) は、(b) を基準にして  $-10^\circ$  と  $+10^\circ$  の加速位相で測定された。(a) と (c) のプロファイルでは、先頭からテールまで単調なエネルギー増加か、エネルギー減少の傾向がある。しかし (b) では、電子は縦方向位相空間内で、より複雑な分布をしている。この原因としては、電子バンチが加速管中に誘起するウェーク場によるものと考えられる。ウェーク場を考慮にいたした電子ビームの縦方向位相空間分布の計算は、これら  $3$  つのプロファイル変化と良い一致を示した。

また図 2 (a) と (b) では、電子バンチのテール部で同一位相に異なるエネルギーの電子が存在していることが確認された。これはサブハーモニックバンチャー、プリバンチャー、バンチャーでのバンチングの過程で、オーバー・バンチングにより電子が位相空間内で折

りたたまれていることを示している。この縦方向位相空間測定装置は電子の検出感度が高く、これまで測定されなかった電子密度の低いテール部をかなり詳細に捉えることができる。

本研究で開発した縦方向位相空間測定システムは、これまで困難であった縦方向位相空間内での電子分布の評価を、より簡便な手法で実現した。また、このシステムは高い検出感度を有するため、これまで観測できなかった電子密度の低いパンチの裾野の部分を確認できるようになった。

## 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 3件)

R. Kato, S. Kashiwagi, T. Igo, Y. Morio, G. Isoyama, Study on Longitudinal Phase-space of High-brightness Electron Beams at ISIR, Osaka University, Proceedings of the 11th European Particle Accelerator Conference (EPAC'08), 1161-1163, 2008, 査読無

R. Kato, S. Kashiwagi, T. Igo, Y. Morio, G. Isoyama., Development of the Longitudinal Phase-Space Monitor for the L-Band Electron Linac at ISIR, Osaka University, Proceedings of the 29th International Free Electron Laser Conference, 409-412, 2008, 査読無

R. Kato, T. Igo, G. Isoyama, S. Kashiwagi, Y. Kon, Longitudinal Phase-Space Measurements of a High-Brightness Single-Bunch Beam, Proceedings of the 28th International Free Electron Laser Conference, 676-679, 2006, 査読無

[学会発表](計 5件)

加藤龍好、柏木 茂、森尾 豊、寺沢賢和、古橋建一郎、磯山悟朗、高輝度電子パンチ内の縦方向位相空間分布測定、日本加速器学会年会、2008年8月7日、東広島市

加藤龍好、柏木 茂、井合哲也、森尾 豊、磯山悟朗、高輝度電子ビームの縦方向位相空間分布の測定、日本物理学会年次大会、2008年3月23日、東大阪市

加藤龍好、柏木 茂、井合哲也、森尾 豊、磯山悟朗、高輝度電子ビームの縦方向位相空間分布測定手法の開発、日本加速器学会年会、2007年8月1日、和光市

加藤龍好、柏木 茂、井合哲也、森尾 豊、磯

山悟朗、高輝度電子ビームの縦方向位相空間モニターの開発、日本放射光学会年会、2008年1月13日、草津市

加藤龍好、柏木 茂、井合哲也、今 教禎、磯山悟朗、縦方向位相空間分布測定手法の開発、日本加速器学会年会、2006年8月3日、仙台市

## 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

柏木 茂 (KASHIWAGI SHIGERU)  
大阪大学・産業科学研究所・助教  
研究者番号：60329133

### (3)連携研究者