

あいちシンクロトロン光センターにおけるエミッタンス測定 MEASUREMENT OF BEAM EMITTANCE IN AICHI SYNCHROTRON RADIATION CENTER STORAGE RING

Ryo Kawakami ^{#,A)}, Atsushi Mano ^{B)}, Masahito Hosaka ^{B)}, Naoto Yamamoto ^{B)}

Masahiro Kato ^{C)}, Yoshifumi Takashima ^{A,B)}, Takumi Takano ^{B)}

^{A)} Graduate School of Engineering Nagoya University

^{B)} Nagoya University Synchrotron Radiation Research Center

^{C)} UVSOR Facility, Institute for Molecular Science

Abstract

We have constructed a diagnostic beamline in the Aichi synchrotron radiation center (Aichi SR) storage ring for measurement of electron beam property. Visible synchrotron radiation is extracted from a bending magnet and transported to an optical lab. We observed a beam image using a CCD camera and deduced horizontal beam size. For the vertical direction we designed an interferometer using the double slit in order to obtain a sufficient resolution.

In order to reduce the beam vertical dispersion, we designed skew quadrupole magnets and introduce to the storage ring. Apparent reduction of the vertical dispersion was observed.

1. はじめに

電子蓄積リングにおいて、ビームエミッタンスの測定は最も重要な診断要素の一つである。ビームエミッタンスを測定するために最も簡便な方法は、可視放射光のイメージングを用いたビームプロファイルモニターである。

愛知県瀬戸市にナノレベルの先端計測分析施設としてあいちシンクロトロン光センター（あいちSR）が建設され、2013年3月より稼働を始めている^[1]。本研究では、エミッタンス測定のための第一段階として、あいちSRの電子蓄積リングにおいて、ビーム診断用可視光取り出しビームラインを設計・建設し、放射光を CCD カメラに取り込むことで、水平方向、垂直方向についてそれぞれビームサイズを測定した。垂直方向については、ビームサイズが小さいため、CCD カメラから取り込んだ画像イメージを解析することでは十分な分解能が得られない。そこで、ダブルスリットを用いた干渉系^[2]を構築した。ダブルスリットによって作られる干渉縞から干渉度を測定し、そこからビームエミッタンスを得る事が出来た。

また加速器性能向上のため、鉛直方向分散関数の補正や垂直方向のビームエミッタンス極小化、蓄積リング建設時の設置誤差や磁場誤差などによるビームの傾きを補正する必要がある。本稿ではスキュー電磁石の設計を行い、実際に蓄積リングに設置し、鉛直方向分散関数の補正を行った結果についても報告する。

2. 可視光取り出しビームラインの構築

図1はあいちSRの蓄積リング構成図である。あいちSRの蓄積リングはビームエネルギー1.2GeV 周長72m である^[1]。取り出す可視光は図中の赤丸で示した常伝導偏向電磁石からの放射光を利用する。

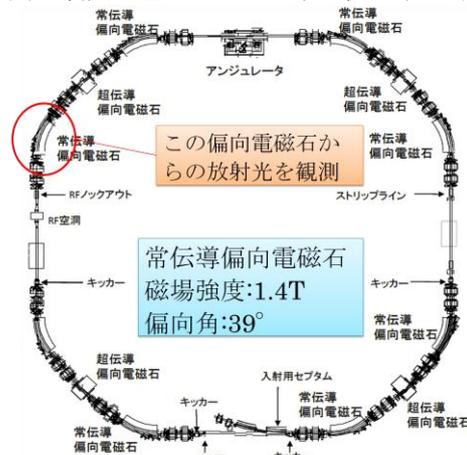


Figure 1: Storage ring in Aichi SR.

また放射光縦方向発散角は以下の式で表される。

$$\sigma_y = 0.41 \left(\frac{\lambda}{\theta} \right)^{\frac{1}{3}}$$

測定波長を500nm とし、偏向電磁石の曲率半径が2.7m であることから、縦方向発散角は2.3mrad となる。したがって、ビームプロファイルモニターが十分に放射光を受けるには取り込み角は $\pm 2\sigma_y$ 必要なので若干の余裕を持たせ、 $\pm 5\text{mrad}$ 取り込んでいる。またこの取り込み角に合わせ、以下に記述する金コート銅ミラーやアルミミラーのサイズは放射光を十分に受けることのできるサイズを選択した。図2に構築した可視光取り出しビームラインの概略図を示す。

kawakami.ryo@h.mbox.nagoya-u.ac.jp

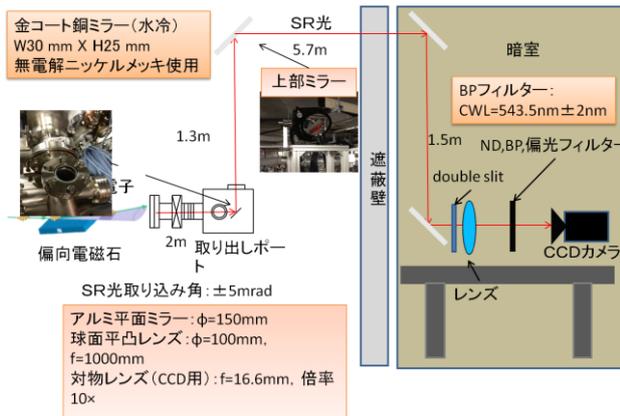


Figure 2: Schematic drawing of a diagnostic beamline for measurement of electron beam property.

超高真空中に保たれた取り出しポート内の金コート銅ミラーにより放射光は鉛直方向に跳ね上げられ、合成石英窓を通して大気中に取り出される。大気中に取り出された放射光はアルミミラーにより遮蔽壁外に取り出される。

遮蔽壁外に取り出された放射光は暗室内に設置された光学架台上のレンズやフィルター等を通り、CCDカメラに取り込まれる。

3. ビームサイズの測定

3.1 CCDカメラのピクセルサイズ較正

2章で述べた可視光取り出しビームラインを用いて実際にビームサイズ測定を行うに当たり、CCDカメラ上で観測するビームイメージの1ピクセルが偏向電磁石中の発光点で実際にどれくらいの長さであるかを較正する必要がある。蓄積リング中に設置されているステアリング電磁石を用い、蓄積ビームを鉛直方向または水平方向に振り、その時のビームイメージをCCDカメラから取り込む。また発光点前後に設置されているビーム位置モニター（以下BPM）によりビーム位置を観測、発光点での実際のビームの移動量を計算し、CCDカメラ上での移動量と比較していくことでピクセルサイズの較正を行った。図3に水平方向の較正実験の結果を示す。グラフの横軸は発光点の前後に設置されているBPMから計算した発光点でのビーム位置、縦軸がCCDカメラに取り込んだビームイメージから解析したビーム位置である。このグラフの傾きから発光点での1ピクセルの長さを求める事が出来る。

較正の結果、水平方向では $5.22\mu\text{m}/\text{pixel}$ 、垂直方向では $5.18\mu\text{m}/\text{pixel}$ となった。

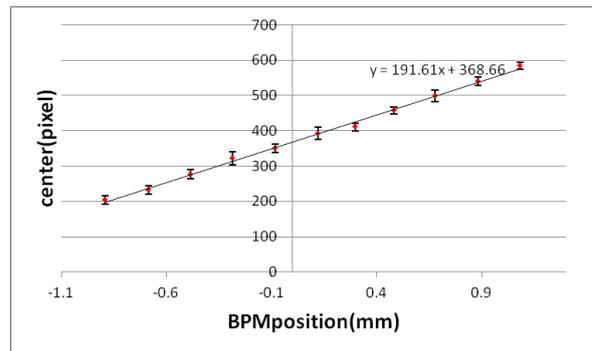


Figure 3: Calibration result (horizontal).

3.2 水平方向ビームサイズ測定

CCDカメラから取り込んだ放射光画像イメージを解析することで水平方向ビームサイズを求める事が出来た。解析方法としてはビームイメージを縦方向にプロジェクションし、強度分布グラフを作成する。それをガウスフィットすることでビームサイズを求める事が出来る。またビームイメージはある角度を持って傾いている。この傾きに関しては後の4章で記述する。

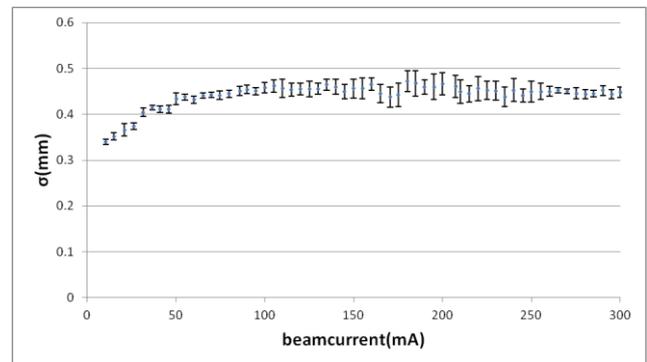


Figure 4: Horizontal beamsize as a function of beam current.

図4に測定された水平方向ビームサイズの蓄積電流値依存性を示す。この時、光学系の振動によりビームイメージが大きく揺れてしまい、実際のビームイメージより大きく見えてしまうことを避けるため、CCDカメラの露光時間はビームイメージの振動の周波数約39Hzより十分小さい0.1msecとしている。グラフに示されているように0mAから70mAにかけてビームサイズが大きくなっている。これは電子ビームの縦方向の結合型不安定性の影響であると考えられる。実際その傾向はビームのスペクトル測定結果とよく一致している。

3.3 ダブルスリットを用いた垂直方向ビームサイズ測定

垂直方向に関しては水平方向に比べて非常にビームサイズが小さく、3.2で述べた方法では十分な分解能が得られないことが予想される。そこでダブルスリットを用いたビームサイズ測定を行った^[2]。ダ

ブルスリットとは取り出してきた放射光を二つのスリットを通し、レンズで集光することで干渉縞を作るものである。CCD カメラ上で観測される干渉縞の強度分布理論式^[2]は以下ようになる。

$$I(y_0) \propto 1 + |\gamma| \cos\left(\frac{2\pi D}{\lambda R} y_0\right)$$

ここで、 λ は波長、 D はダブルスリットのスリット間隔、 R はダブルスリットから干渉縞までの距離を表している。この式における γ が干渉度と呼ばれ、干渉縞のコントラストを表すパラメータである。光源の大きさが大きいほど干渉縞のコントラストは低下し、 γ は0に近づいていく。この干渉度 γ から以下の式^[2]を用いて光源の大きさを求める事が出来る。

$$\sigma_y = \frac{\lambda L}{\pi D} \sqrt{\frac{1}{2} \ln\left(\frac{1}{\gamma}\right)}$$

ここで L は光源からダブルスリットまでの距離を表している。測定方法としては、一枚目レンズの直前にダブルスリットを設置し、干渉縞を CCD カメラ上に集光することで測定を行う。図5に実際にダブルスリットを用いて観測した干渉縞イメージを示す。

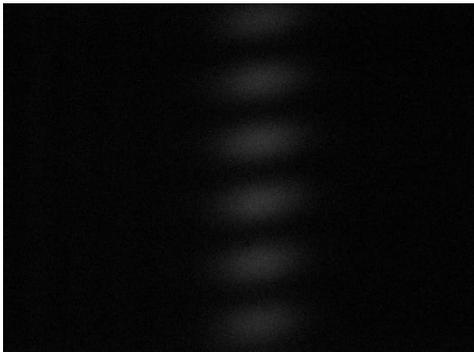


Figure 5: Double slit interferogram image taken by a CCD camera.

ダブルスリットを用いてスリット間隔を変えながら測定した垂直方向ビームサイズの結果を図6に示す。

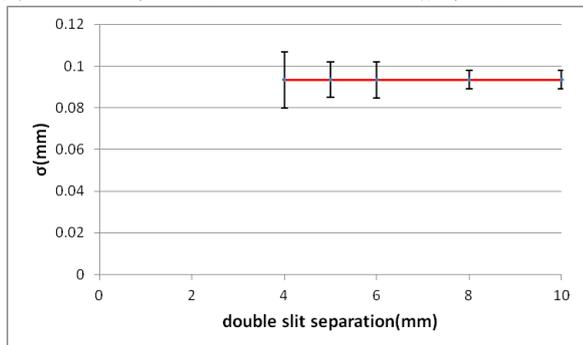


Figure 6: Vertical beamsizes as a function of double slit separation

この時、蓄積ビーム電流値は20mA であり、露光時間は2msec である。グラフからも分かるようにダブルスリットのスリット間隔が小さくなるほどエラーが大きくなっている。これは スリット間隔が小さくなるほど干渉度 γ が高くなり、干渉度 γ が高いと

ころではビームサイズによる干渉度の変化が小さくなるので、測定エラー (CCD ノイズ) がより強調されるからである。蓄積ビーム電流毎にダブルスリットを用いて測定した垂直方向ビームサイズの結果を図7に示す。

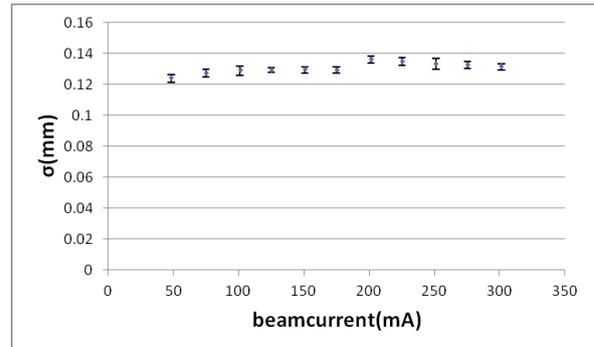


Figure 7: Vertical beamsizes as a function of beam current.

この時用いたダブルスリットのスリット間隔は10mm であり、CCDカメラの露光時間は2msec である。

4. スキュー4極電磁石によるビームの傾き補正

4.1 スキュー4極電磁石の設計

実際の蓄積リングでは建設時の設置誤差や磁場誤差などにより、鉛直方向のビームの広がりや傾きが生じてしまう。今回、これらを補正するためのスキュー電磁石の設計を行った。まず二次元電磁場計算コード poisson を用いてシミュレーションを行った。蓄積リング中に32台設置されている6極電磁石の上下磁極にコイルを巻くことでスキュー磁場を発生させる。シミュレーションの結果を図8に示す。

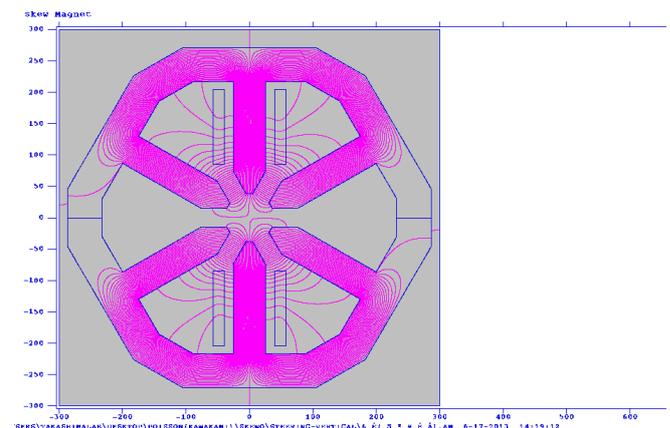


Figure 8: Design of a skew quadrupole magnet using a sextupole magnet.

コイルの巻き数は20回巻、電流は20A の電源を使用している。図8からも分かるように6極電磁石の上下磁極にコイルを巻き、電流を流すことで、スキュー磁場が発生している。次に実際に蓄積リング中の6極電磁石にコイルを巻き、スキュー4極電磁石の導入を行った。巻いたコイルは太さ60mm、一周当た

り360mm程度の大きさとなった。スキュー電磁石を導入するに当たり、設置場所を検討する必要がある。より少ない数で効果を得るため、蓄積リング中でベータatron関数 $\beta_{x,y}$ が比較的大きい場所を選択した。

またスキュー4極電磁石用のコイルを巻きつける際、電流を流した際の温度上昇も考慮する必要がある。図9に実際に設置したスキュー4極電磁石用コイルと、その上に取り付けた熱電対の写真を示す。

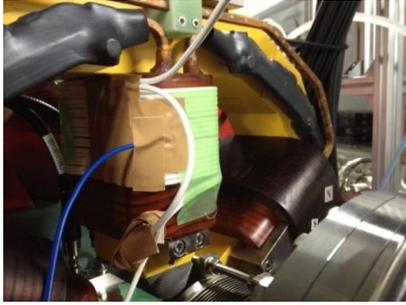


Figure 9: Skew quadrupole magnet using a sextupole magnet and thermocouple.

熱電対は計三か所取り付けました。熱電対による温度測定の結果、コイルに20Aの電流を流した時の最高温度は50度以下となり、コイルの発熱によるケーブル被覆の溶解や発火の危険性はないことを確認した。

4.2 スキュー4極電磁石による鉛直方向分散関数補正

導入した三つのスキュー4極電磁石のコイル電流を変えながら鉛直方向分散関数の補正を試みた。図10にスキュー4極電磁石を用いた鉛直方向分散関数の補正結果を示す。スキュー4極電磁石に任意の電流を流した状態でRF周波数を変え、BPMにより軌道の変化を測定した。

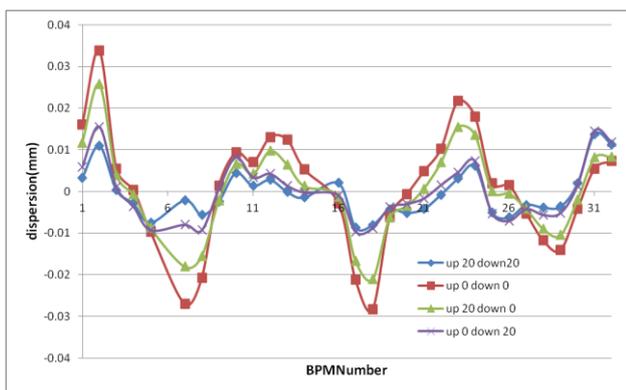


Figure 10: Revision result of vertical dispersion.

図の凡例における up,down はそれぞれ上下流に設置したスキュー四極電磁石を指す。その後の数字はコイルに流した電流値(A)である。図から分かるように、スキュー4極電磁石を導入することによって鉛直方向分散関数を小さくすることに成功した。また図11に鉛直方向分散関数の補正前と補正後のビームイメージを示す。図から明らかにビームの傾きが改善されていることが分かる。



Figure 11: Beam image measured by a CCD camera after revision of vertical dispersion it with before revision.

また測定した導入したスキュー四極電磁石の電流値を変えることによる鉛直方向ビームサイズの変化を図12に示す。グラフから分かるように、二つのスキュー4極電磁石を用いて、最大で約11%ビームサイズを小さくすることに成功した。

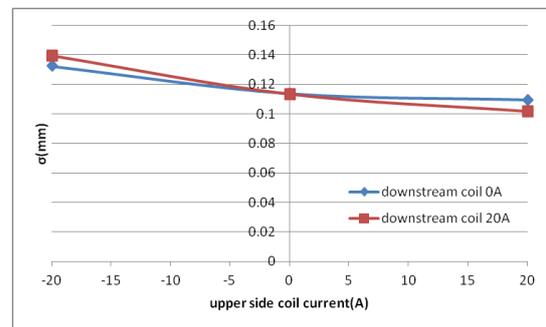


Figure 12: Coil current dependence of vertical beamsize.

5. まとめ

あいちシンクロトン光センターの蓄積リングにおいて、可視放射光を用いたビームプロファイルモニターを構築した。構築したビームプロファイルモニターを用いて、水平方向、鉛直方向のビームサイズを測定した。蓄積リングに設置されている6極電磁石にコイルを巻くことでスキュー4極電磁石を導入し、蓄積ビームの鉛直方向分散関数を補正することに成功した。また、今後は LOCO を用いた計算を行い、それをもとにスキュー4極電磁石によって vertical emittance を小さくすることを進める予定である。

参考文献

- [1] Naoto Yamamoto, Masahito Hosaka, Kiyoshi Takami, Takumi Takano, Atsushi Mano, Hiroyuki MORIMOTO, Yoshifumi TAKASHIMA, and Masahiro Katoh. Beam commissioning of central japan synchrotron radiation facility. 加速器, 9(4):223-228, 2012.
- [2] T. Mitsuhashi, Proceedings DIPAC 2001 – ESRF, Grenoble, France
- [3] T.Naito and T.mitsuhashi, Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (August 4-6, 2010, Himeji, Japan)