

可視光ビームモニターライン初段ミラーの熱変形補償 CANCELLATION OF THERMAL DEFORMATION EFFECT OF THE INITIAL MIRROR ON THE BEAM PROFILE MONITOR LINE

松本卓也^{*A)}、小林花繪^{A)}、庄司善彦^{A)}、皆川康幸^{B)}、竹村育浩^{B)}

Takuya Matsumoto^{*A)}, Karin Kobayashi^{A)}, Yoshihiko Shoji^{A)}, Yasuyuki Minagawa^{B)}, Yasuhiro Takemura^{B)}

^{A)}Laboratory of Advanced Science and Technology for Industry, University of Hyogo

^{B)}Japan Synchrotron Radiation Research Institute

Abstract

The electron storage ring NewSUBARU has a visible light beam monitor line SR5. The two dimensional beam image obtained on this line is used in various beam diagnostics, such as a streak camera and a gated ICCD camera. One problem of this line was a stored current dependence of its imaging property. This was due to the mirror deformation produced by a heat load of synchrotron radiation. The effect of this deformation is approximated by a defocusing function in the lowest order. A simple defocusing can be handled by an adjustment of the assumed beam image position. However, the deformation was different for the horizontal and vertical directions. We installed a weak cylindrical lens to eliminate this difference. The current dependent imbalance of the deformation was cancelled by changing location of the lens according to the prediction. We succeeded to obtain a good two dimensional beam image at any electron beam energy and stored current.

1. はじめに

NewSUBARUの可視光ビームプロファイルモニターラインSR5で使われている初段ミラーは、KEKの基本設計によるベリリウムミラーである。ミラー面の大きさは96 mm × 30 mmで、背面には銅の冷却水パイプが一面に銀ロウづけされた構造である[1]。このラインには放射光マスクが設置されておらず、放射光の熱負荷によってミラーが変形する。ベリリウムミラーが吸収する放射光の分布は垂直方向に不均一であり中央に集中しているため、ミラー面の中央部の熱膨張が大きい。以前のハルトマンマスクを使った測定によれば、この変形の影響は、ほぼ defocusing で表現出来る。電子エネルギー1.5 GeV、蓄積電流200 mAの電子ビームに対する熱変形は、焦点距離がそれぞれ水平200 m、垂直40 mの凸面鏡相当であった[2]。実際にこの変形によって、ビームプロファイルの結像位置が蓄積電流依存をもち、2次元プロファイル測定時の問題となっている。このラインには通常のCCDカメラの他に、ICCDゲートカメラやストリークカメラが設置されて、様々な用途のビームプロファイルモニターとして使われており[3, 4]、簡単なミラー変形の補償が望まれていた。

我々は、補正レンズとしてラインに弱い($f = 1$ m)垂直方向シリンドリカル凸レンズを設置することで垂直方向の集束を調整し、この結像位置のズレを修正することにした。利用運転エネルギーである1.5 GeVと1.0 GeVでビームイメージ結像位置の蓄積電流依存を予め計測しておき、これを補償する補正レンズの位置を計算した。蓄積リングの電子エネルギーと蓄積電流に応じて、予め計算された位置に補正レンズを移動させることで、どのような状況でも水平と垂直の結像位置を一致させる事ができるはずである。この考えに基づき、SR5の光学レンズ系の調整を行った結果について報告する。

2. ビーム集束点の測定

Figure 1にビームラインSR5の光学設計を示す。偏向電磁石からの光はまずベリリウムミラーで反射され、石英窓を通して大気中に導かれる。さらに焦点距離 $f = 1.8$ mの石英凸レンズで集束され、放射線遮蔽外へと導かれる。各種モニターカメラは、遮蔽外の光学定盤上に設置されている。補正レンズはこの定盤上に置く。このレポートでは、ライン上の位置を表す座標を ℓ とし、石英凸レンズの位置を原点にとる。 ℓ 軸上の要素間の距離を表すパラメーターとして以下を扱う。

- ℓ_{SB} : 光源 - ベリリウムミラー 間の距離。
- ℓ_{BL} : ベリリウムミラー - 石英凸レンズ 間の距離。
- ℓ_{LF} : 石英凸レンズ - 集束点 間の距離。
- ℓ_{LC} : 石英凸レンズ - 補正レンズ 間の距離。
- ℓ_{CF} : 補正レンズ - 集束点 間の距離。

更に、集束力を表す焦点距離として以下を使う。

- f_B : ベリリウムミラーの熱変形を近似した defocusing の焦点距離。
- f_L : 石英凸レンズの焦点距離。
- f_C : 補正レンズの焦点距離。

熱負荷の無い場合、設計上のビーム集束点は5.11 mである。電子ビーム像をCCDカメラの位置を変えながら撮影し、ビームの水平、及び、垂直方向のFWHM(半値幅)を計測した。以上の測定を電子エネルギーと蓄積電流を変えて行った結果をFigure 2とFigure 3に示す。測定されたビームのFWHMに対して $FWHM = A(\ell - \ell_{LF})^2 + w_{min}$ という関数を使い、 A, ℓ_{LF}, w_{min} をパラメーターとしてフィッティングを行い、FWHMが最小となる位置、つまり、集束点 ℓ_{LF} を決定する。ここでAは2次系数、 w_{min} はFWHMの最小値である。フィッティングの結果をFigure 2とFigure 3に実線で得られたパラメーターを水平方向に対してはTable 1、垂直方向に対してはTable 2に示す。

*1.618@lasti.u-hyogo.ac.jp

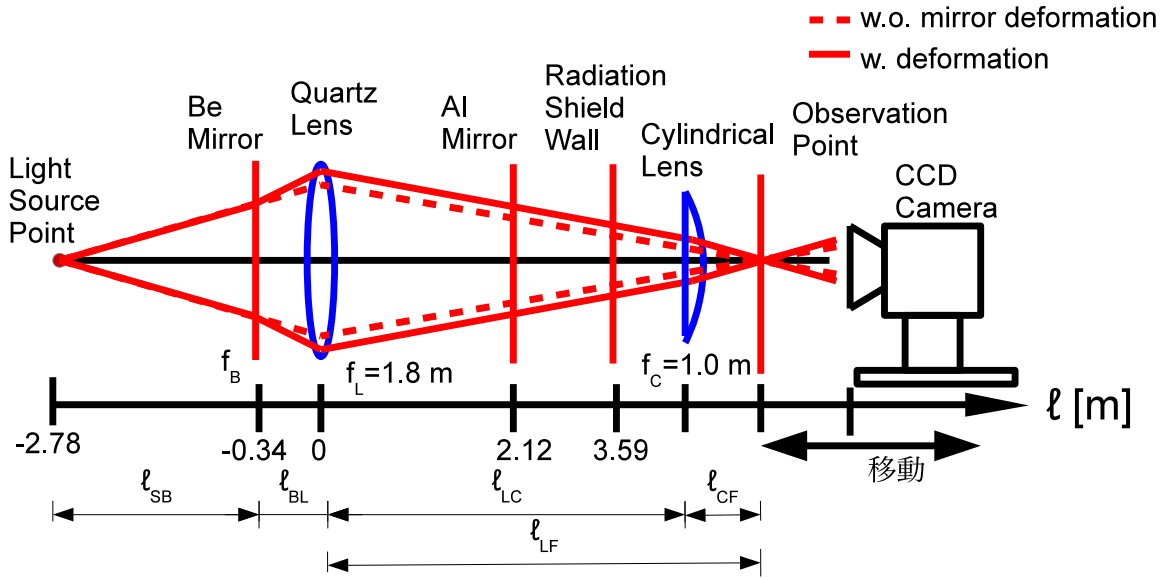


Figure 1: ビームライン SR5 の光学設計図

Table 1: フィッティングによって得られたパラメーター (水平方向)

加速器状態	A	ℓ_{LF}	w_{min}
1.0GeV-42mA	15.1 ± 2.1	5.255 ± 0.018	0.95 ± 0.06
1.0GeV-300mA	11.2 ± 1.0	5.266 ± 0.017	1.06 ± 0.05
1.5GeV-169mA	12.4 ± 0.7	5.354 ± 0.008	1.95 ± 0.04
1.5GeV-284mA	12.8 ± 1.1	5.409 ± 0.015	1.95 ± 0.06

Table 2: フィッティングによって得られたパラメーター (垂直方向)

加速器状態	A	ℓ_{LF}	w_{min}
1.0GeV-42mA	5.7 ± 0.5	5.404 ± 0.007	0.60 ± 0.02
1.0GeV-300mA	5.9 ± 0.3	5.468 ± 0.004	0.54 ± 0.01
1.5GeV-169mA	5.4 ± 0.3	5.607 ± 0.011	1.01 ± 0.02
1.5GeV-284mA	4.9 ± 0.3	5.770 ± 0.022	1.00 ± 0.02

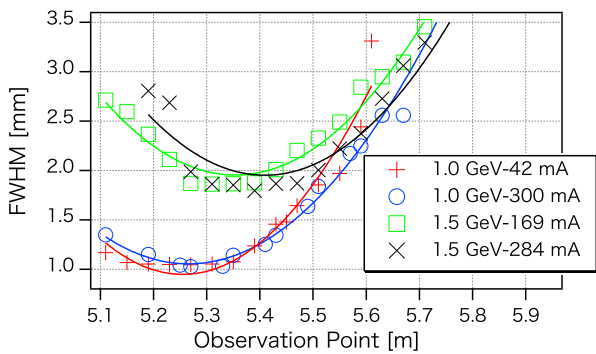


Figure 2: 水平方向 FWHM の ℓ 依存 (実線は 2 次関数フィッティングの結果)

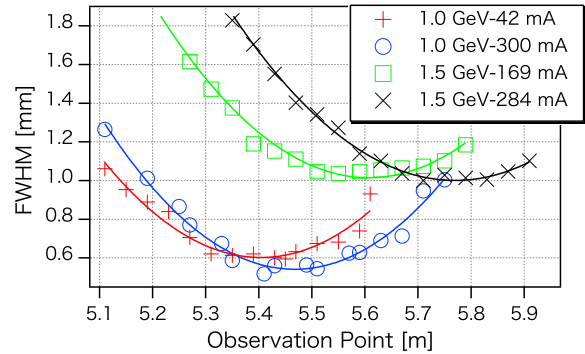


Figure 3: 垂直方向 FWHM の ℓ 依存 (実線は 2 次関数フィッティングの結果)

3. 集束点の蓄積電流依存

集束点 ℓ_{LF} の蓄積電流依存を Figure 4 に示す。熱負荷がない場合の蓄積電流 0 mA での集束点を ℓ_{LF0} とし、これを外挿から求めることができる。1.0 GeV での測定結果から得た ℓ_{LF0} と 1.5 GeV での測定結果から得た ℓ_{LF0} は測定誤差の範囲で一致させることができた。しかし、水平方向と垂直方向の ℓ_{LF0} は一致せず、ともに設計値 $\ell_{LF0} = 5.11$ m より長い。ミラー製作時の平面度

測定によれば、水平方向はほぼ平面 ($f = 1000$ m くらいの凹面)、垂直方向は $f = 100 \sim 150$ m くらいの凸面になっていた [1]。垂直方向の ℓ_{LF0} と水平方向の ℓ_{LF0} の差は $f = 160$ m の垂直方向の発散力で説明できるので、製作時の平面度が原因であると考えられる。一方、水平方向と設計値の差を集束用レンズの焦点距離 f_L 、もしくは、設計上の光源からベリリウムミラーまでの距離 ℓ_{SB} で説明しようとする、 f_L なら約 1%、 ℓ_{SB} なら約 4 cm の誤差が必要となる。どちらも極端に不自然な

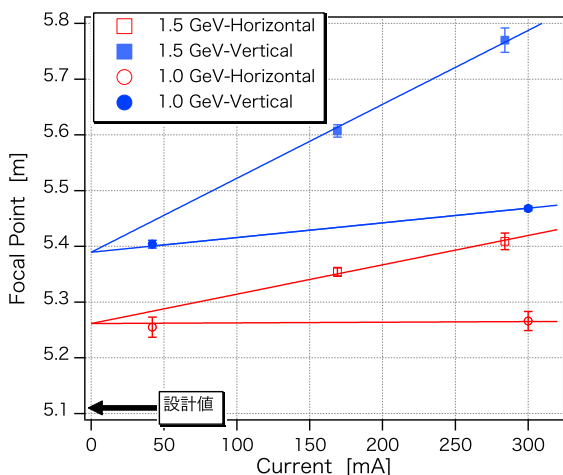


Figure 4: 集束点 ℓ_{LF} の蓄積電流依存

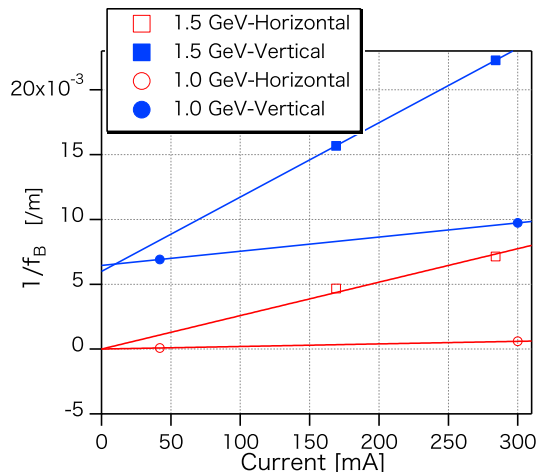


Figure 5: $1/f_B$ の蓄積電流依存

量とは言えないがここでは f_L に誤差があると仮定し、 $f_L = 1.818$ m として以降の計算を行う。

4. 熱変形の解析

熱変形の程度を defocusing の焦点距離の逆数 $1/f_B$ として求める。光源でのビームの幅と傾きを x_1, x'_1 、観測点でのビームの幅と傾き x_2, x'_2 とすると、これらの関係は 2 行 2 列のトランスファー行列

$$M = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \quad (1)$$

を用いて以下の式で表すことができる。

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ x'_2 \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} x_1 \\ x'_1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Figure 1 より、光源点から測定点までのトランスファー行列 M は

$$M = \begin{pmatrix} 1 & \ell & 1 & 0 & 1 & \ell_{BL} \\ 0 & 1 & -\frac{1}{f_L} & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & \ell_{SB} \\ \frac{1}{f_B} & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

となる。測定点でのビーム幅は

$$x_2 = a_{11}x_1 + a_{12}x'_1 \quad (4)$$

である。ビームの幅 x_2 は $a_{12} = 0$ で最小になり、このとき $\ell = \ell_{LF}$ である。 $a_{12} = 0$ を $1/f_B$ について解くと、

$$\frac{1}{f_B} = \frac{f_L(\ell_{SB} + \ell_{BL} + \ell_{LF}) - \ell_{LF}(\ell_{SB} + \ell_{BL})}{\ell_{SB}\ell_{BL}\ell_{LF} - f_L\ell_{SB}(\ell_{BL} + \ell_{LF})} \quad (5)$$

が得られ、Table 1,2 の ℓ_{LF} を式 (5) に代入して熱変形の程度を $1/f_B$ として求めることができる。次に、熱変形の程度 $1/f_B$ が蓄積電流に線形に比例していると仮定して、その方程式を測定値から求める。これを Figure 5 に示す。この結果をハルトマンマスクを使った測定結果と比較すると、水平方向はほぼ一致し、垂直方向はハルトマンマスクを使った測定結果の約半分であった。

5. 補正レンズ

5.1 設置位置の推定

水平方向の集束点の変化はカメラの移動により集束点を合わせることが可能である。一方、水平方向と垂直方向の集束点の一致には垂直方向のみに集束を与える垂直方向シリンダカル凸レンズ ($f_C = 1$ m) を用いる。設置位置は石英凸レンズ - 集束点間とする。光源点から集束点までのトランスファー行列 M は

$$M = \begin{pmatrix} 1 & \ell_{CF} & 1 & 0 & 1 & \ell_{LC} \\ 0 & 1 & -\frac{1}{f_C} & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & \ell_{BL} \\ -\frac{1}{f_L} & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & \ell_{SB} \\ \frac{1}{f_B} & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

である。前章と同様に $a_{12} = 0$ として補正レンズの位置 ℓ_{LC} を求める。 $f_L = 1.818$ m とし、Figure 5 で示した垂直方向の $1/f_B$ と Figure 4 で示した水平方向の集束点 $\ell_{LF} = \ell_{LC} + \ell_{CF}$ を代入して ℓ_{LC} について解くと、 ℓ_{LC} は蓄積電流 I の関数として得られる。これを Figure 6 に示す。

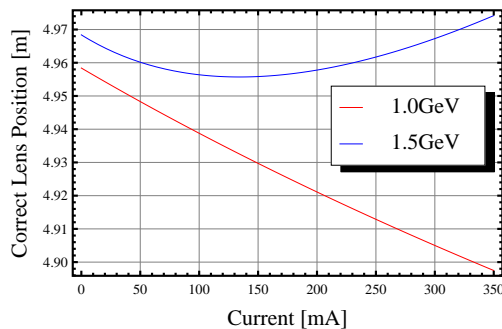


Figure 6: 補正レンズの設置位置 ℓ_{LC}

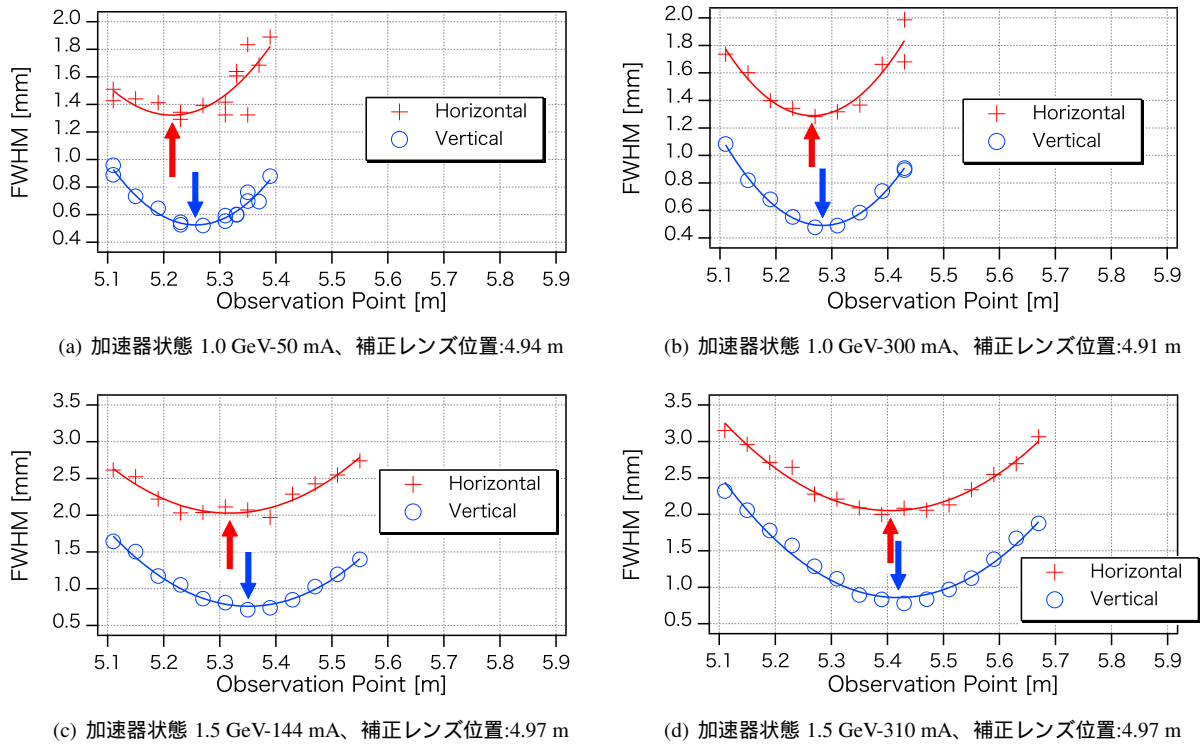


Figure 7: 補正レンズ設置後のビーム集束点 (矢印は集束点)

5.2 集束点の補正

それぞれ 2 種類の電子エネルギーおよび蓄積電流において、予測した設置位置に補正レンズを設置し、集束点の測定を行った結果を Figure 7 に示す。水平と垂直の集束点が完全に一致するまでには至っていないが、実用上、問題にならない程度にすることができた。

集束力の変更により、集束点のビームの倍率が計算上 Table 3 に示すように変化する。0 mA では垂直方向の倍率は水平方向の倍率の 71 % となり、実際のビーム形状より、やや扁平の形状で観測される。熱負荷がある場合、水平の倍率変化は数%程度だが、1.5 GeV-300 mA では垂直方向の倍率は水平方向の倍率の 58 % までになるので注意が必要である。

Table 3: 倍率の変化

加速器状態	水平	垂直	垂直/水平
0 mA	-1.894	-1.349	0.71
1.0 GeV-300 mA	-1.893	-1.255	0.66
1.5 GeV-300 mA	-1.944	-1.134	0.58

6. まとめ

我々は、NewSUBARU のビームライン SR5 で使われているベリリウムミラーに生じた熱変形の影響を垂直方向の defocusing で近似し、この量の測定を行った。この測定により、水平方向、および、垂直方向の結像位置に蓄積電流依存があることをハルトマンマスクを使った測定と同様に確認できた。

水平方向と垂直方向の結像位置のずれを補正するため、ビームライン上にシリンダカル凸レンズを設置した。その測定結果から各加速器状態で水平方向の結像位置、および、ミラーの垂直方向の熱変形の影響を予測し、最適な補正レンズ位置を与える関数を得た。その結果、約 15 cm ~ 35 cm の結像位置のずれを約 1 cm ~ 4 cm 程度まで補正することに成功した。測定点を増やすことにより正確な補正レンズの設置位置を計算し、結像位置のずれを減少させることが可能であると考えている。

参考文献

- [1] 庄司善彦、竹田幸二、「ニュースバルの可視放射光を使ったビームモニター用ベリリウムミラー」、第 5 回日本加速器学会 (2008)、TP043.
- [2] 庄司善彦、竹田幸二、皆川康之、篠本孝秀「ニュースバル BL1b 可視放射光ビーム診断ライン」、第 6 回日本加速器学会 (2009)、WPBDA25.
- [3] 竹田幸二、庄司善彦、「New SUBARU のビーム診断 蓄積リングでの入射ミスマッチ」、第 6 回日本加速器学会 (2009)、WOBDA01.
- [4] Y. Shoji, K. Takeda, Y. Minagawa, Y. Takemura, S. Suzuki, T. Asaka, "ELECTRON STORAGE RING AS A SINGLE SHOT LINAC BEAM MONITOR", Proceedings of IBIC2012, TUCC01.