

# SuperKEKB用X線ビームプロファイルモニタの検討

## Design Considerations for X-ray Beam Profile Monitor for SuperKEKB

John W. Flanagan <sup>#A)</sup>, Mitsuhiro Arinaga<sup>A)</sup>, Hitomi Ikeda<sup>A)</sup>, Hitoshi Fukuma<sup>A)</sup>,  
Ken-ichi Kanazawa<sup>A)</sup>, Toshiyuki Mitsuhashi<sup>A)</sup>, Gary S. Varner<sup>B)</sup>

A) KEK, Accelerator Laboratory, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

B) University of Hawaii, Dept. of Physics and Astronomy, 2505 Correa Rd., Honolulu, HI, 96822 USA

# john.flanagan@kek.jp

SuperKEKB is a planned upgrade to the KEKB accelerator, with a design luminosity of  $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . The design of SuperKEKB is based on the "nano-beam scheme," a low-emittance lattice. The beam size in the arc sections is expected to be as low as  $10^{-15} \mu\text{m}$  in the vertical direction, which will be right around the resolution limit of the SR interferometers in use currently at KEKB. In addition, the increased beam currents mean that mirror heating distortion is expected to be a more severe problem than they are now. To solve these problems, an x-ray beam profile monitor system based on coded aperture imaging is being designed with the goal of being able to measure single-bunch, turn-by-turn beam sizes at the required resolution. An x-ray beam size monitor of this type is under development and testing in collaboration with the CsrTA project, and has already demonstrated the ability to measure beam sizes down to  $\sim 10 \mu\text{m}$  on a bunch-by-bunch, turn-by-turn basis. The system for SuperKEKB needs to be re-optimized for the much higher beam currents and x-ray energies expected there. Design parameters for the system, and expected resolutions, are presented.

### Coded Aperture Imaging (CAI)法

Coded aperture imaging(CAI)とは、もともとX線天文学の分野で開発された結像法である[2]。CAIでは入射光子があるパターンをマスクを通った後の画像の重なりをマスクのパターンの位置情報をもとに解く(deconvolutionする)ことで元の画像を得ようとするものである。

CAIで良く使用されているマスクのパターンの一つにUniformly Redundant Array(URA)がある[3]。このマスクのパターンは擬似乱数に基づいて作られており、利点として開口部が50%と大きく入射光子を効率的に使えるということがあげられる。モノクロメータが不要なのでピンホールカメラと同程度かそれよりもやや良い分解能で単発(単バンチ、単ターン)の測定が可能になることが期待される。URAマスクのもう一つの利点は空間分解能が比較的良好なことである。

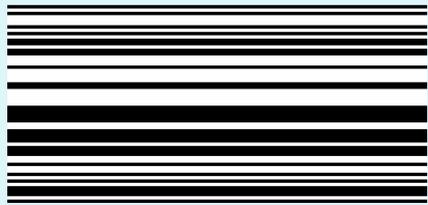


図1: 59要素のURAマスク。

現在KEKBの放射光モニターグループがCsrTAと共同でこのCAI法のビームサイズ測定への応用を検討・開発している[4][5]。

**CsrTAでは1バンチ単発測定で約10 μm程度の垂直ビームサイズの測定に成功し、この方法の有効性を証明した[6]。**

### X線検出器、読み出し回路

CsrTAで使われているX線検出器はFermionics社のInGaAs検出要素を線形配列型のものである。この検出器のピクセルの幅及び間隔(pitch)は50 μmとなっている。この検出器は時間定数が $< 2 \text{ ns}$ と短いことからバンチ毎の信号を区別し検出できるというメリットがある。しかしながらInGaAsの層が3.5 μmと薄いため高エネルギー(10 keV以上)のX線の検出効率が低いというデメリットもある。このような検出器についてはメリット・デメリットの両面を考慮した検討を進めている。検討中の検出器にハワイ大学とSLACで開発中のdeep-pixel検出器がある[7]。Siのピクセル幅が25 μmであるが、奥行き(深さ)が約200 μm程度なので、高エネルギーX線の検出効率が期待される。

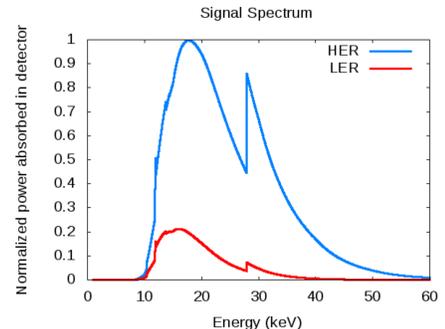


図4: HERとLERで検出されるパワースペクトル。(厚さ625 μmのSi基盤に厚さ10 μmのAuマスクを付けたハイパワー用マスクとFermionics社の厚さ3.5 μmのInGaAs検出器を使った場合。)

検出器のデジタイザーと読み出し回路についてはハワイ大学で設計され開発中である。高速広バンド幅のデジタイザーは最低2 ns間隔のバンチ毎測定を目標とする。それに、検出器とデジタイザーのアナログバンド幅が10 GHz以上のものであればビーム不安定性スタディ用のバンチ内のビーム特性測定も可能になる。

### SuperKEKB用X線モニター的设计

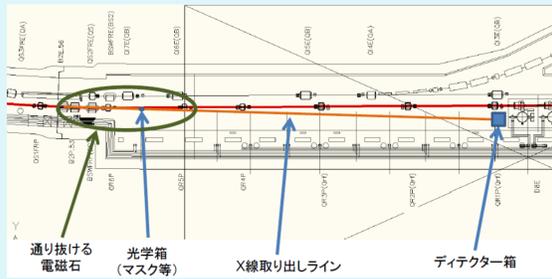


図2: LER(富士直線部)のX線取り出しラインの概要。

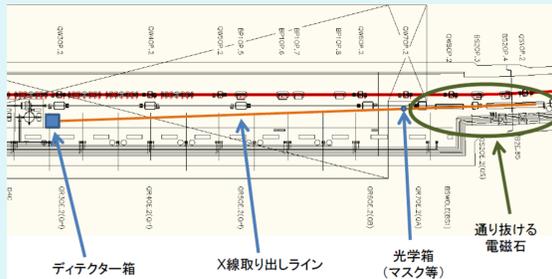


図3: HER(大穂直線部)のX線取り出しラインの概要。

LER及びHERともX線源として曲線部の最下流に位置する偏向電磁石を使う。LERの取り出しラインは富士直線部に設置され、長さは約40mである。HERについては大穂直線部に設置予定で取り出しラインの長さは45mとなる。

SuperKEKBではHERの曲線部の電磁石の入れ替えはない。従ってX線源偏向電磁石は現KEKBと同じ曲率半径の105.6mのものになる。一方LERについては曲線部の偏向電磁石を現行のものより約4倍長いものへ入れ替えることにより低エミッタンス化を図る。磁極長が4倍に伸びる場合についてシミュレーションを行ったところ、偏向電磁石の磁場がX線源としては弱すぎる事が判明した。そこでこの取り出し部分には現KEKB LER偏向電磁石2台を並べそれぞれを半分にして使用することにした。

表1: X線源のパラメータ

パラメータ	LER	HER	単位
水平エミッタンス $\epsilon_x$	3.2	5.1	nm-rad
Coupling $\kappa$	0.25	0.25	%
垂直エミッタンス $\epsilon_y$	8.0	1.3	pm-rad
$\beta_y$	35.3	12.5	m
$\sigma_y$	16.8	12.6	μm
Beam Energy	4	7	GeV
磁極長	0.89	5.9	m
曲げ角	28.0	55.7	mrad
曲率半径 $\rho$	31.74	105.9	m
Critical Energy	4.4	7.1	keV
ビーム電流	3.6	2.6	A
バンチ電流 (バンチ数 = 2500)	1.44	1.04	mA
放射光パワー	111	313	W/mrad/A

検出器用チェンバーの真空度は加速器側の真空度に比べて悪いことが予想されるが、その境界に厚さ4 μmのダイヤモンド窓を入れることを検討している。実際このような窓はCsrTAで使用されている。この窓を採用する場合は広角散乱(Compton, Rayleigh)の影響をできるだけ小さくすることが重要で、このためには検出器から出来る限り上流に、すなわちマスクの直下流に窓を設置するようになる。

分解能を上げるための有効なパラメータの一つに拡大倍率、即ちマスクから検出器への距離と光源点からマスクへの距離の比率、がある。つまりマスクを出来る限り光源点に寄せて置いた方が有利である。しかし、実際の偏向電磁石の曲げ角、ビームパイプの幅、光源点の下流にすでに設置されている電磁石を考慮すると、現実的には光源点とマスクの最短距離はLERとHERでそれぞれ約8mと約14mになる。この場合、マスクから検出器への距離がLERとHERでそれぞれ約32m、31mになる。

#### 熱負荷

LER、HERの放射光パワーはそれぞれ111 W/mrad/A、313 W/mrad/A程度となる。マスクの直前に幅600 μmの銅の開口を設置した場合のマスクへの入射パワーはLERで計30 W、HERで計35 Wとなる。これだけのパワーにマスクが耐えられるようにするにはマスクの基盤を通常の構造のものより厚くしなければならぬ。一般的なフレネルゾーンプレートの基盤は厚さ2.5 μmのSiやSiCで作られている。CST Particle Studioを用いて計算してみるとこのようなゾーンプレートへ1 Wの放射光が当たった場合の温度上昇は約200°Cになる。これではSuperKEKBの大電流運転ではマスクが溶けてしまい使用できない。ところが基盤を厚さ625 μmのSiにして計算すると、1 W当たりの温度上昇が約5.5°Cにまで抑えられ、トータルの熱上昇が200°C以下となる。

**現在厚さ625 μmのSi基盤に厚さ10 μmのAuマスクを付けたハイパワー用マスクを試作し、CsrTA加速器で試験中である。**

### 検出される画像

マスクパターンとしては図1に示された59要素のURA型を用い、要素の幅を10 mmと仮定した。検出画像のビームサイズ依存性を図5に示す。計算方法は別の文献(例えば[5]と[6])で詳しく説明されているが、基本的には放射光の波面をマスク上でKirchhoff積分する計算である[8][9]。今回の計算では各波長で原点の角度分布、マスク及び検出器の材質による減衰及び屈折の効果も考慮した。

$$\begin{bmatrix} A_\sigma \\ A_\pi \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \gamma \frac{\omega}{\omega_c} (1 + X^2) (-i) \begin{bmatrix} K_{2/3}(\eta) \\ \frac{iX}{\sqrt{1+X^2}} K_{1/3}(\eta) \end{bmatrix}$$

$$A_{\sigma,\pi}(y_d) = \frac{iA_{\sigma,\pi}(\text{source})}{\lambda} \int_{\text{mask}} \frac{t(y_m)}{r_1 r_2} e^{i\frac{2\pi}{\lambda}(r_1+r_2)} \times \left( \frac{\cos\theta_1 + \cos\theta_2}{2} \right) dy_m$$

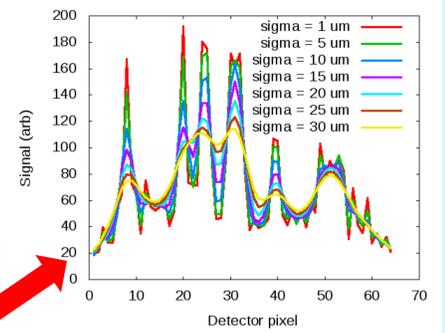


図5: LER検出信号とビームサイズの関係。(図1のURAマスクパターンのハイパワー用マスクを使う場合。)

### バンチ毎・ターン毎の分解能

**バンチ毎・ターン毎の分解能は光子の数で制限される。**

Fermionicsの検出器を使う場合はLERのバンチ毎・ターン毎の各ピクセルの光子数が最大蓄積電流時(1.44 mA/bunch)の場合でもせいぜい200程度である。但し、計算上ではInGaAsを厚さ200 μmにすれば、検出効率が96%になり検出される光子数が10倍増えて約2000個になる。

統計的分解能を評価するにあたり以下の方法を用いた。まず、あるビームサイズについて画像パターンを作る。つまり64個のピクセルについて信号を作る。実際の測定では画像パターン(ピクセル信号)から正しいビームサイズを得ることができるかが問題になる。これは作った画像パターンをビームサイズの異なる場合に対応する画像パターンと比較することで評価出来る。正しいビームサイズから出来る画像とそれとは違うビームサイズから出来る画像との差を64個の各ピクセルについて求め、 $\chi^2/\nu$ を計算する。計算時は各ピクセルの重みとしてピクセルの平均光子数が200個に対するピクセル毎の統計的不確定性 $s_i$ とする:

$$\chi^2 = \frac{1}{N-n-1} \sum \frac{[y_i - y(x_i)]^2}{\sigma_i^2}; \quad \sigma_i = \sqrt{y(x_i)}$$

ここではピクセルの番号( $i=1 \sim 64$ )、 $x_i$ はピクセルの位置、 $y(x_i)$ はそのピクセルの位置 $x_i$ での正しい信号レベル(光子数に対応)、 $y_i$ は実際に測定された信号レベル、 $N$ はピクセルの数(この場合64)、 $n$ は規格化乗数で今回は $n=1$ となる。

次に $\chi^2/\nu$ の70% confidence interval( $\sim 1$ s)を評価し図6に示す。赤い点はFermionics社の検出器を使う場合、(即ちピクセル毎の平均光子数が200個)の1sの confidence intervalに対応する。

**ビームサイズが10 μmのバンチの場合には統計的分解能が $\pm 2 \mu\text{m}$ となる。**

厚さ200 μmのInGaAs検出器を使う場合(即ちピクセル毎の平均光子数が2000個)、緑点で表わされるように分解能がさらに良くなる。しかしながら現実には検出器のノイズが分解能を制限することになってしまうだろう。

HERの場合はピクセル毎の平均光子数がLERより5倍高いが、ビームラインの拡大率が低く結果的には分解能がLERと同程度になる。

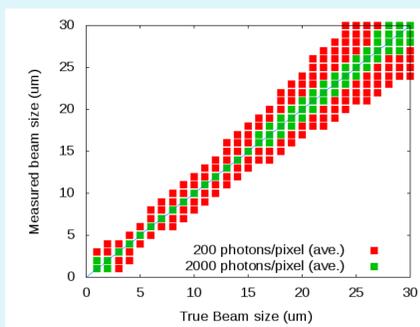


図6: LERで期待されるバンチ毎ターン毎分解能。赤い点はFermionics社の厚さ3.5 μmのInGaAs検出器の場合を表わし、緑点は厚さ約200 μmのInGaAs検出器の場合を表わす。

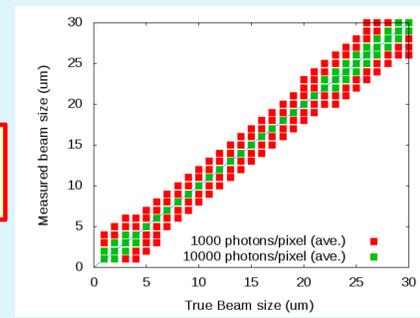


図7: HERで期待されるバンチ毎ターン毎分解能。

#### 参考文献

- [1] M. Masuzawa, "Next Generation B-factories", Proc. IPAC10, Kyoto, May 2010.
- [2] R.H. Dicke, Astrophys. Journ., 153, L101, (1968).
- [3] E.E. Fenimore and T.M. Cannon, Appl. Optics, V17, No. 3, p. 337 (1978).
- [4] J.W. Flanagan, et al., TUOC02, Proc. EPAC08, Genoa, 1029 (2008).
- [5] J.W. Flanagan, et al., TH5RFP, Proc. PAC09, Vancouver, (2009).
- [6] J.W. Flanagan, et al., MOPE007, Proc. IPAC10, Kyoto, May 2010.
- [7] S. Parker, private communication.
- [8] J.D. Jackson, "Classical Electrodynamics," (2nd Ed.), J. Wiley & Sons, NY (1975).
- [9] K.J. Kim, AIP Conf. Proc 184 (1989).

### まとめ

現在SuperKEKB用X線ビームサイズモニターの検討を進めている。本稿で述べたシミュレーション等に依るとCAI法の新型X線モニターを使うことにより十分なバンチ毎・ターン毎の分解能が期待出来ることがわかった。今後さらにCAI法を使う光学系の詳細検討及び検出器と読み出し回路の開発を進める予定である。