

Design Considerations for X-ray Beam Profile Monitor for SuperKEKB

John W. Flanagan ^{#,A)}, Mitsuhiro Arinaga ^{A)}, Hitomi Ikeda ^{A)}, Hitoshi Fukuma ^{A)},

Ken-ichi Kanazawa ^{A)}, Toshiyuki Mitsuhashi ^{A)}, Gary S. Varner ^{B)}

^{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

Abstract

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 μm 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.

SuperKEKB 用 X 線ビームプロファイルモニタの検討

1. はじめに

SuperKEKB は KEKB で達成したピークルミノシティの約 40 倍に相当する $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ をデザインルミノシティとする次世代 B ファクトリーであり、現在オプティクス及びハードウェアの設計が進められている[1]。SuperKEKB ではルミノシティを上げるために低エミッタンスラティスが採用されるがこの低エミッタンスラティスでは、曲線部の垂直方向のビームサイズが 10-15 μm と KEKB で使用した放射光モニタの検出限界に近づき、また熱によるミラー変形がより深刻になる、という問題点が出て来る。本稿ではこのような低エミッタンス、大蓄積電流から生じる問題の解決策として現在検討中の X 線ビームプロファイルモニタについて記述する。

2. Coded Aperture Imaging 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 にマスクパターンの一例 (一次元の 59 要素の URA マスクパターン) を示す。

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]。

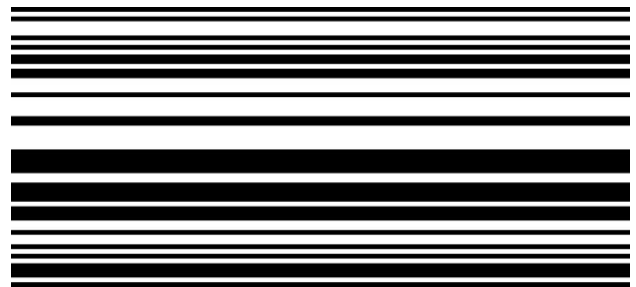


図 1 : 59 要素の URA マスク。

3. SuperKEKB 用 X 線モニタの設計

3.1 X 線源偏向電磁石

SuperKEKB は KEKB トンネルを再利用して建設される。このトンネルには 4 つの曲線部と 4 つの直線部があり、ビームサイズ測定用に長い X 線取り出しラインを適当な場所に設けなければならない。現在検討中の取り出しラインを LER、HER の場合についてそれぞれ図 2、図 3 に示す。

[#] john.flanagan@kek.jp

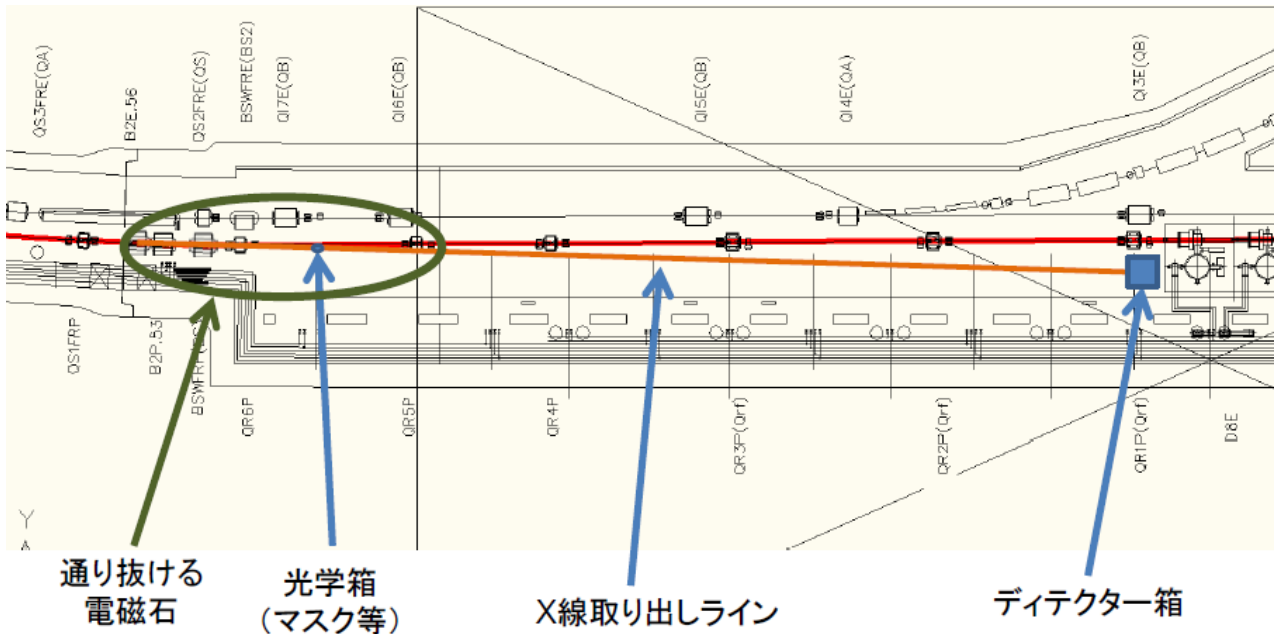


図 2 : LER (富士直線部) の X 線取り出しラインの概要。

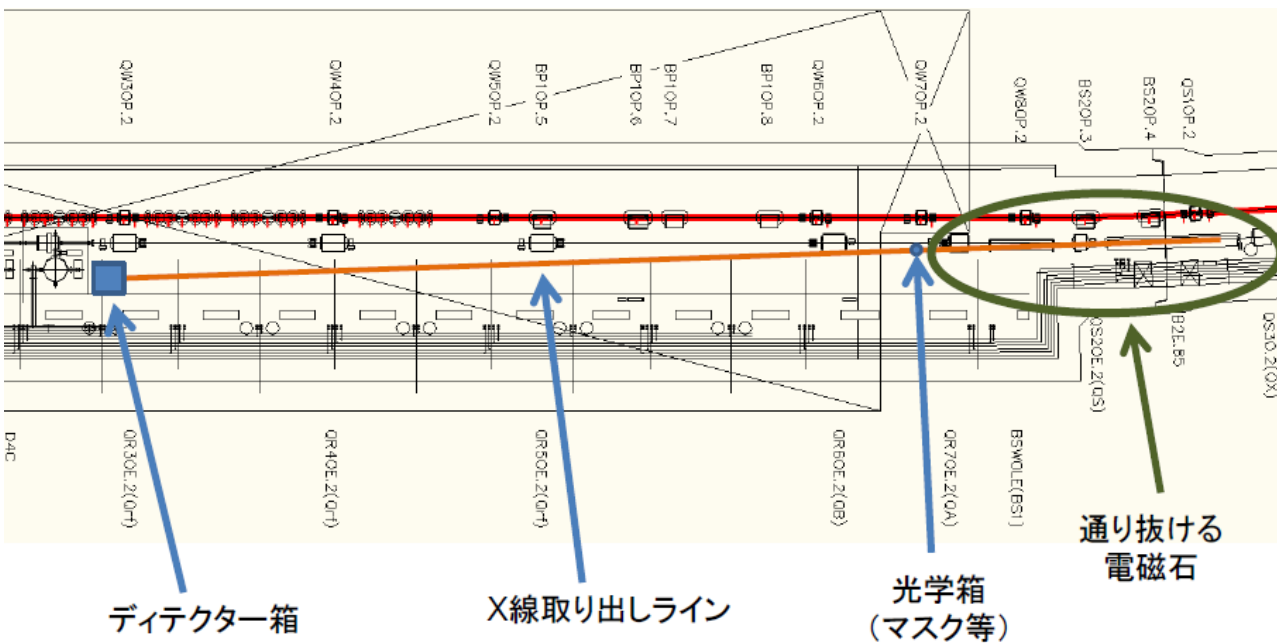


図 3 : HER (大穂直線部) の X 線取り出しラインの概要。

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 40 m 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 4.5 m 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 台を並べそれぞれの磁場を半分にして使用することにした。表 1 に SuperKEKB の主なマシンパラメータと X 線用偏向電磁石のパラメータを示す。

3.2 ビームライン、マスク、熱負荷

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 8 m と約 14 m 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 3.2 m、3.1 m になる。

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 ϵ_x	3.2	5.1	nm-rad
Coupling κ	0.25	0.25	%
垂直エミッタンス ϵ_y	8.0	1.3	pm-rad
β_y	35.3	12.5	m
σ_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 ρ	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

取り出しビームラインでのビームの吸収、散乱を避けるため、ビームライン全長に渡って真空に引く。こうした場合 Be 等の窓は不要になるが、その代わりマスクで放射光パワーを全て受けなければならない。表 1 にあるように 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ない。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、CesrTA 加速器で試験中である。

検出器用チャ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 CesrTA 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する。

3.3 X 線検出器、読み出し回路

CesrTA 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 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 と薄いので高エネルギー (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 線の検出効率が高いことが期待される。

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 間隔のバンチ毎ターン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 以上のものを作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。

4. バンチ毎・ターン毎の分解能

4.1 検出されるスペクトル、画像

上記のハイパワー用マスク (厚さ 625 μm の Si に厚さ 10 μm の Au のマスクパターン) を用いた場合の検出されるパワースペクトルの計算結果を図 4 に示す。検出器としては現在使用中の Fermionics 社の厚さ 3.5 μm 、幅 50 μm 、64 ピクセルの InGaAs を使った。HER と LER のスペクトルのピークがそれぞれ 16 keV と 18 keV にある。最大蓄積電流時は HER のパワーピークは LER の約 5 倍になる。

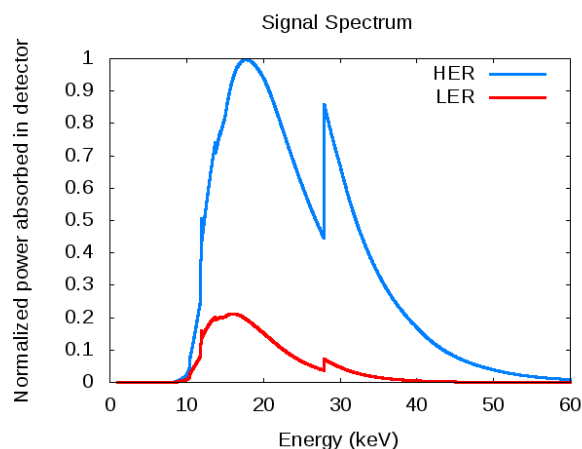


図 4: HER と LER で検出されるパワースペクトル。(厚さ 625 μm の Si 基盤に厚さ 10 μm の Au マスクを付けたハイパワー用マスクと Fermionics 社の厚さ 3.5 μm の InGaAs 検出器を使った場合。)

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 μm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。

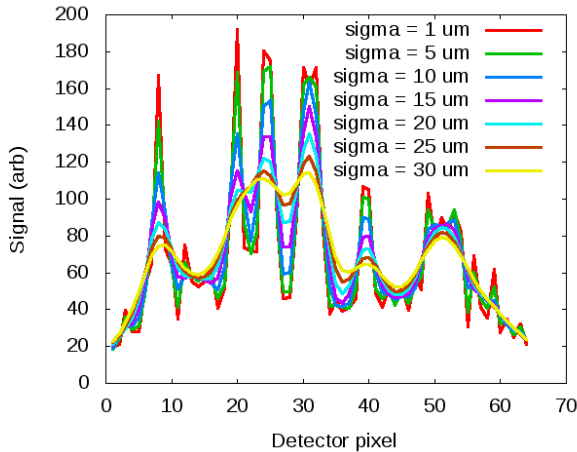


図5：LER 検出信号とビームサイズの関係。(図1のURAマスクパターンのハイパワー用マスクとFermionics社のInGaAs検出器を使う場合。)

4.2 光子数による統計分解能

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個程度である。これは吸収スペクトルのピークが比較的高いエネルギーにあるからである(図4参照)。但し、計算上ではInGaAsを厚さ200 μmにすれば、検出効率率が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かねるが問題になる。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、 χ^2/ν 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 σ_i とする：

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

$$\sigma_i = \sqrt{y(x_i)}$$

ここでiはピクセルの番号(i=1~64)、 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 χ^2/ν の70% confidence interval (~1σ)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1σの confidence interval に対応する。例えば、ビームサイズが10 μmのバンチの場合統計的分解能が±2 μm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。

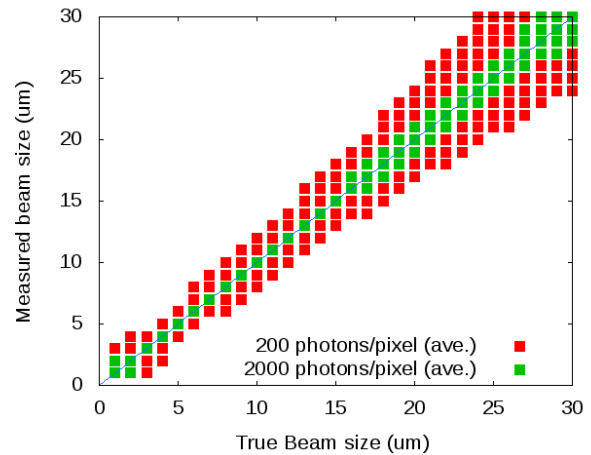


図6：LERで期待されるバンチ毎ターン毎分解能。赤い点はFermionics社の厚さ3.5 μmのInGaAs検出器の場合を表わし、緑点は厚さ約200 μmのInGaAs検出器の場合を表わす。

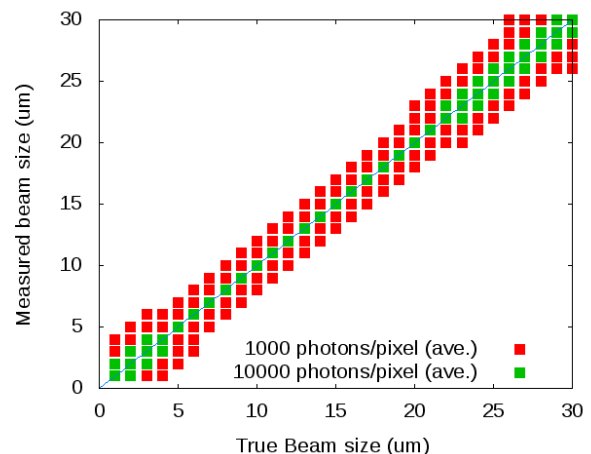


図7：HERで期待されるバンチ毎ターン毎分解能。

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。HER の分解能を図 7 に示す。

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。

参考文献

- [1] M. Masuzawa, "Next Generation B-factories", Proceedings of the 1st International Particle Accelerator Conference (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., "X-RAY MONITOR BASED ON CODED-APERTURE IMAGING FOR KEKB UPGRADE AND ILC DAMPING RING," Proc. EPAC08, Genoa, 1029 (2008).
- [5] J.W. Flanagan et al., "PERFORMANCE OF CODED APERTURE X-RAY OPTICS WITH LOW EMITTANCE BEAM AT CESR TA," Proc. PAC09, Vancouver, (2009).
- [6] J.W. Flanagan, et al., "MEASUREMENT OF LOW-EMITTANCE BEAM WITH CODED APERTURE X RAY OPTICS AT CESR TA," Proceedings of the 1st International Particle Accelerator Conference (IPAC10), Kyoto, May 2010.
- [7] S. Parker, private communication.
- [8] J.D. Jackson, "Classical Electrodynamics," (Second Edition), John Wiley & Sons, New York (1975).
- [9] K.J. Kim, AIP Conf. Proc 184 (1989).