

BL40XU の 40cmミラーのスタディ

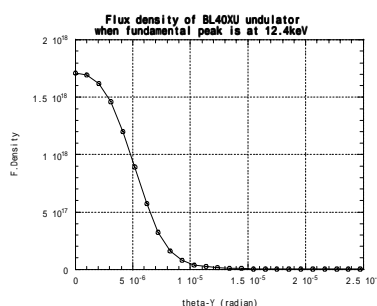
2000年3月
文責は八木

序章 基礎データ

1 BL40XU の光学素子の配置

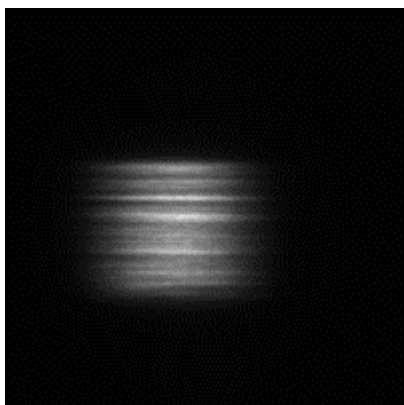
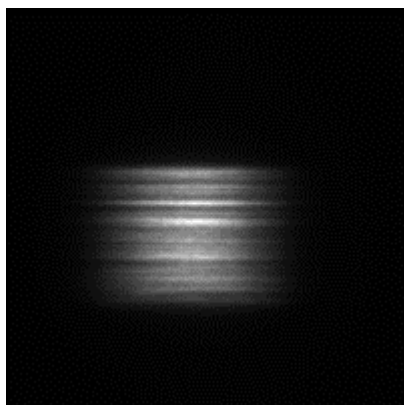
- FE スリット 33m
- 水平偏向 70cm ミラー 39.5m 傾き 3mrad
- 垂直偏向 40cm ミラー 41.0m 傾き 4mrad
- 検出器(ビームモニタ) 49m

2 アンジュレーター次光の垂直方向の発散 約 10 μ rad(FWHM)



光源サイズは 10-20 μ m(V) \times 数 100 μ m(H)

第1章 ビームの縞模様の原因



BL40XU でダイレクトビームを観察すると、たいていこんな縞模様が見える。

図1。アンジュレーターギャップは 14.3mm (一次光ピークが 12.4keV)。FE スリット開口 1.0(V) \times 1.0(H)mm。ミラーのベンドは水平集光 (70cm) 垂直集光(40cm)ともに数値上では 0 にしてある。検出器はビームモニタ 1 改。強度を 3/1000 に落とす回転シャッターとアルミ板 2mm が入っている。露出時間は 500 ミリ秒(アパーチャ不明)。左の絵は 1 辺が 200 ピクセル、つまり 2.4mm である。ミラーは 2 枚ともいつも使っている位置から 2mm ずれた位置に X 線が当たるように並進移動した。ビームサイズは、水平約 1.2mm、垂直約 0.85mm。 [beam03.img LUT:0-14000 (360,360)-(559,559)]

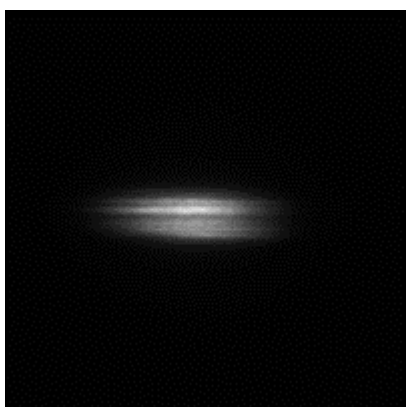
アルミ 2mm の 12.4keV の透過率は約 1/1000 なので、この強度分布には 2 次高調波の寄与が有意にあるが、ア

アルミ板を抜いても強度分布が変わるわけではない。左の図 2 はアルミ板を 1mm にして露出時間 40 ミリ秒で撮影したもので、垂直方向の強度分布にはほとんど変化がないことがわかる。

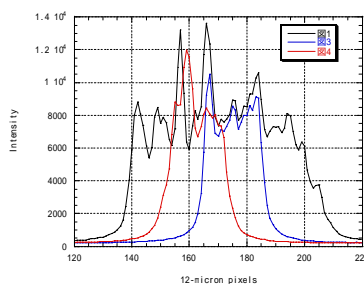


縞模様の原因を調べるために、FE スリットの垂直開口を 0.3mm にして、垂直(40cm)ミラーを上下方向に動かして反射ビームの位置と強度分布を調べた。

左の図 3 は垂直ミラー垂直位置 0.6mm のビーム。上のビーム全体のうちのほぼ中央が見えている。ビームサイズは、水平約 1.2mm、垂直約 0.26mm。[beam04.img LUT:0-14000 (360,360)-(559,559)]



ここで垂直ミラーの位置を 0.6mm から 0.7mm に変えたのが、左下の図 4。図 4 では、図 3 で上端に見えていた明るい縞が上から 1/3 程度の場所に来ている。



上のグラフ 1 は、図 1、3、4 の関係を示したもので、縞の中央を垂直方向に幅 11 ピクセルで切った断面である。黒線は図 1 で、FE スリットが広い場合である。図 3 (青) は図 1 のビーム幅を狭めただけであり、同じ場所に縞が見える。図 4 (赤) ではミラーを動かしているが、縞の位置が変わっている。ビームは全体として 13-14 ピクセル上方向に動いているが、縞は 7-8 ピクセル上方向に動いているだけである(そのために縞の見えている範囲が違っている)。

垂直偏向ミラーを上下に動かしたときの、ビームの動きと縞の動きをまとめると次のようになる。特記しない限り、単位はピクセル。

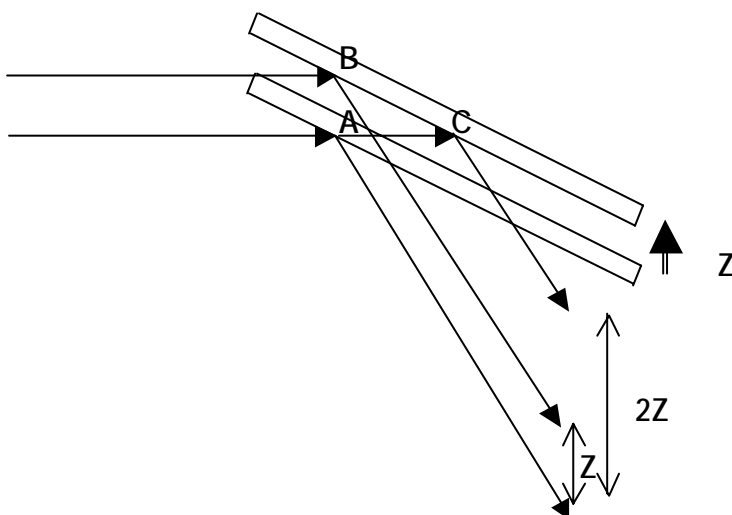
ファイル名	ミラーの高さ (mm)	ビームの上端の位置	一番強い縞の位置	その縞の図 1 での位置	ミラーの高さのずれ (mm)	ビームの位置のずれ	縞のずれ
beam11	1.3	381			0.7	-84	

beam10	1.2	387			0.6	-78	
beam09	1.1	402	411	447	0.5	-63	36
beam08	1.0	412	418	447	0.4	-53	29
beam07	0.9	427	440	460	0.3	-38	20
beam06	0.8	438	445	460	0.2	-27	15
beam05	0.7	453	463	470	0.1	-12	7
beam04/beam12	0.6	465	476	476	0	0	0
beam13	0.5	474	489	487	-0.1	9	-2
beam14	0.4	487	496	487	-0.2	22	-9
beam15	0.3	498			-0.3	33	
beam16	0.2	511			-0.4	46	
beam17	0.1	524			-0.5	59	
beam18	0	537			-0.6	72	

実験ではミラーを上げてから元の位置(0.6)に戻し、そこから下げていったが、0.6に戻したときに画像が4ピクセルずれていた(ミラーの高さ調節機構のバックラッシュ)。そのため0.6を挟んで上下で少し値がずれている。

平均すると、ミラーを0.1mm動かしたとき、ビーム位置は13ピクセル、縞の位置は7ピクセル動いている。これらはそれぞれ160ミクロンと86ミクロンに相当する(ビームモニター1改は1ピクセル12.3ミクロン)。

ミラーを動かただけで縞模様が変わるという事は、縞の原因がミラーにあることを意味する。以下でそれを詳細に検討する。



ミラーでの反射角が小さい場合、理論的にはミラーを Z だけ上げたときには、検出器でのビーム位置は $2Z$ 上がるはずである。上の図ではミラー上での X 線の反射位置は A から

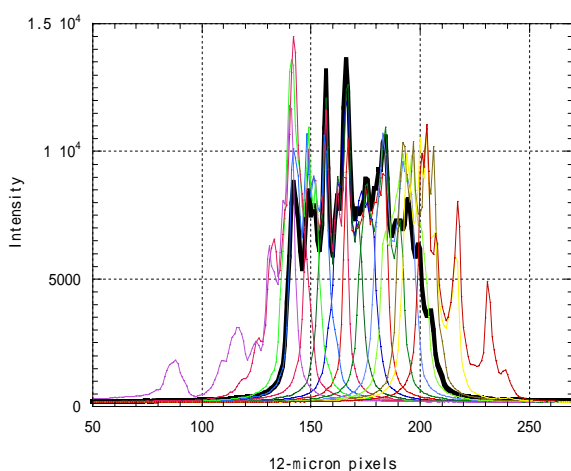
C へと変化する。もし縞模様の原因がミラーに照射されている X 線ビームの側にあれば、縞模様も 2Z だけ移動するはずである。

これに対して、ミラーを Z だけ上げるとミラー上の点 A は B へと移動する。これらの点（ミラー上では同一の点）で反射された X 線は検出器上では Z だけ離れる（上の図で Z と 2Z が 2 倍ではないのは、ミラーでの反射角を実際の 4 ミリラジアンよりもずっと大きく描いているからである）。

上の実験結果では、縞模様の移動量はビーム全体の移動量の半分である。したがって、縞模様の原因はミラーにあると考えられる。

ミラーの移動量 100 ミクロンに対してビームや縞模様から見た実際のミラーの移動量は 80-90 ミクロンに過ぎない。この原因はよくわからない。ミラーの垂直軸の並進の絶対値の校正は行っていない。

FE スリットの開口を 0.3mm にしてミラーを 0.1mm ずつずらしながら得た強度分布を、図 1 の強度分布と比較したのが下の図である。開口 0.3mm の時のプロファイルは、縦にミラーを 0.1mm 動かすと縞が 7 ピクセル動くことを考慮して、ずらしてから重ねてある。



上のグラフ 2 でわかるようにミラーに起因する縞模様は 8 ピクセル程度の周期を持っている。これはミラー上の距離にすると $8 \times 12 / 0.004 = 24000 \mu\text{m}$ すなわち 2.4cm 程度の周期である。これはミラーのグローバルなスロープエラー（ミラーの波打ち）に起因すると思われる。

ただし縞の端から端までは 170 ピクセルもあり、ミラーは 50cm 以上もあることになるが、実際には 40cm しかない。端のほうに見える反射はミラーによるものではないのかも知れない。

スロープエラーの大きさの目安としては、8 m の距離で $8 \times 12 \approx 100 \mu\text{m}$ の縞を作るには、

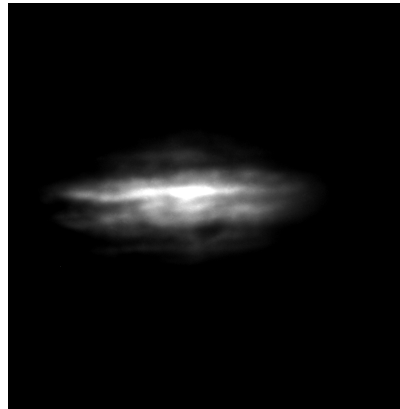
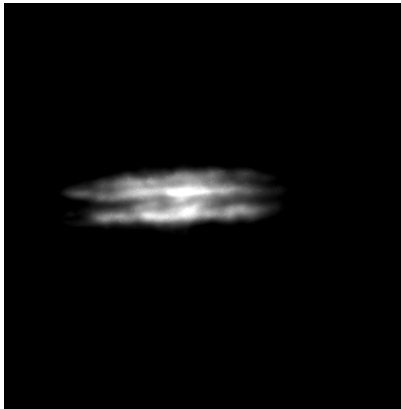
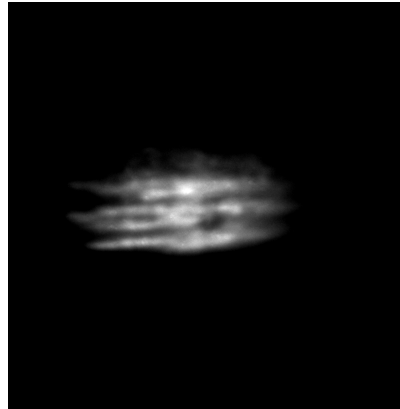
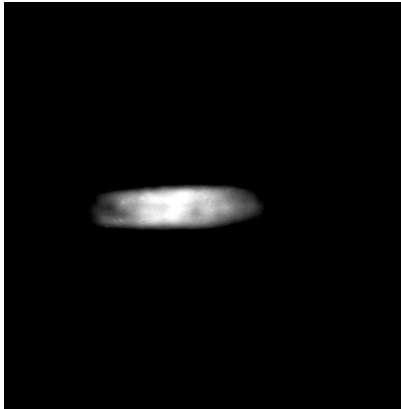
ミラーによって 8 m の間にビームの位置が $50\mu\text{m}$ 程度変位する必要があり、 $6\mu\text{rad}$ 程度のスロープエラーがあると考えられる。スロープエラーの定義の仕方によっては、この半分の $3\mu\text{rad}$ あたりが正しい値かもしれないし、RMS ではもっと小さくなるかもしれない。

水平偏向 70cm ミラーについても、上下位置をずらしてみたが、縞模様の変化は見られなかった。したがって、ミラーの長軸と直角の方向については大きなスロープエラーは認められない。また、水平方向については放射光のエミッタンスが大きすぎる（ミラーのスロープエラーよりも放射光の発散角の方が大きい）ために、ここで行った方法ではスロープエラーの検証は困難であると考えられる。が、図 1 の縞の水平方向の均一を見ると、あまり大きなスロープエラーはなさそうである。

上のグラフ 2 を見ると、図 1 のビームの垂直方向の大きさはミラーの長さではなく光源からの放射光の発散で決まっていることがわかる。強度分布が凸凹なので正確には求まらないが、ビームの垂直方向の半値幅はだいたい 50 ~ 60 ピクセル、つまり $600 \sim 700\mu\text{m}$ である。検出器は光源から 49m の距離にあるので、発散は $12 \sim 15\mu\text{rad}$ 程度である。序章に述べたとうりアンジュレータ一次光の垂直方向の発散の半値幅は計算上 $10\mu\text{rad}$ 程度であるから、計算よりも実測がやや広い。原因は不明だが、高調波の寄与は図 2 から考えてあまり重要ではないだろう。

第 2 章 ミラーの局所的なスロープエラーについて

FE スリットの垂直の開口を 0.02mm として、ビームモニタ 3（1 ピクセル約 $0.5 \mu\text{m}$ ）でビームを見た。ミラーはビームを集光するように曲げてある。下の図はどれも視野は 0.5mm 角である。



左上の図5は、FEスリットの垂直の開口が0.165mm、水平方向の開口が0.5mmのとき。BM3はフォーカス位置よりも2mほど上流にあるので集束は完全ではないが、それでも垂直方向の幅は50ミクロン程度である[mesh27]。

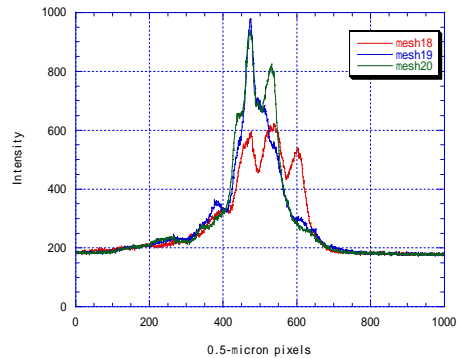
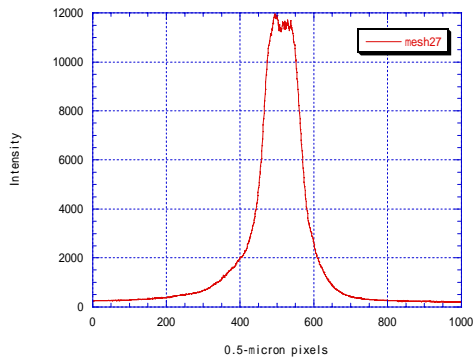
右上の図6はFEスリットの垂直開口を20ミクロンにしたときで、FEスロットが20ミクロンしかないにもかかわらず検出器位置での強度分布

は垂直方向に100ミクロン以上ある[mesh18]。FEスリットの垂直開口をこれより数ミクロン閉めるとビーム強度がゼロになるので、おそらく実際の開口は20ミクロンよりも狭く、しかもFEスリットのブレードのエッジは並行ではないので0.5mmの水平開口の端でのみ開いていると思われる。

左下の図7は、フロントエンドスリットの垂直方向の開口位置を0.05mm下げたとき。強度分布は大きく変化している[mesh19]。

さらに右下の図8は、図7から垂直偏向ミラーをY方向に0.5mmずらしたもの。これも強度分布が変わっている。

下は、上の4つのイメージの中央部分を垂直に切った強度分布。図6と図7はフロントエンドスリットの垂直方向の位置を変えただけ。図7と図8は2枚目のミラーのビームの当たる位置を変えただけなのに強度分布は大きく変わっている。ただ、図5でピークになる部分にはどの場合でもピークはあり、これらが重なって図5の強度分布が作られていると思われる。

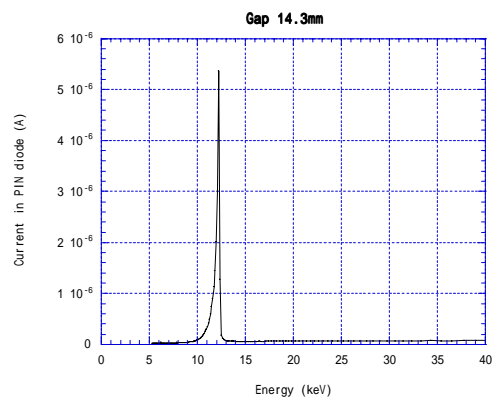
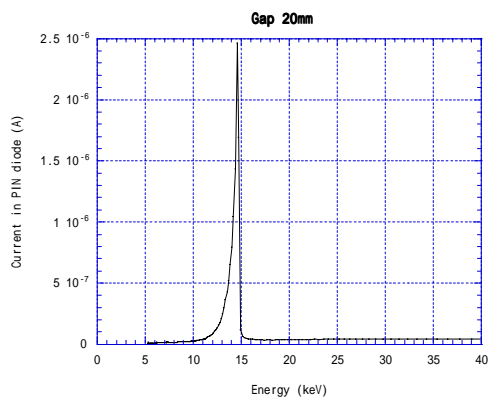


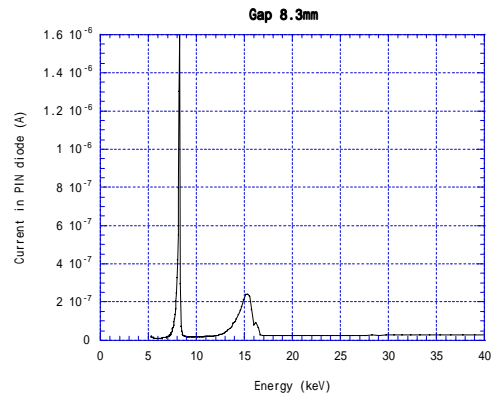
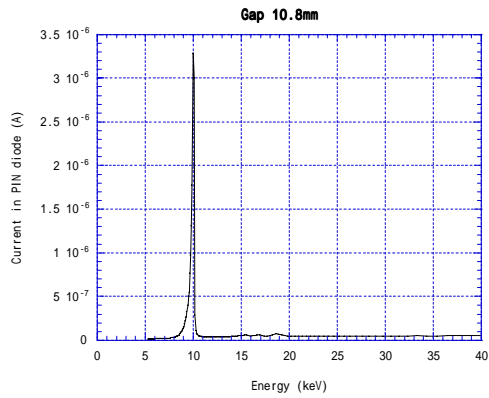
ここで観察されているビームの広がり方は、8mの距離で100ピクセル程度つまり50 μ m程度なので、第1章の議論と一緒にスロープエラー（ミラーの波打ち）は、3~6 μ radと考えられる。

第3章 高調波除去

下の4つの図はBL40XUの集光したビームをSi(111)結晶を用いて分光して測定したスペクトルである。FEスリットの開口は0.165(V) \times 0.5(H)mm。3/1000に強度を下げるチョッパーを使っているが、アブソーバーなどは入れていない。ただし空気パスが長いので、低エネルギーでは空気の吸収の影響がある。

基本波のエネルギーが12keV以下になると高調波の寄与が大きいく（ただし低エネルギーのX線ほど空気による吸収が大きいため高調波の寄与は過大評価されている）。このビームラインでは水平偏向ミラーは3mrad、垂直偏向ミラーは4mradに置かれており、高調波の除去はもっぱら垂直偏向ミラーで行われている。Rhの17.5keVのX線に対する臨界角が4mradであるから、基本波のエネルギーがこの半分になれば高調波の除去が出来なくなることは当然である。





ミラーのコーティングを例えば Cr にすると，13keV の臨界角が 4mrad になるので，基本波が 8keV (現状での BL40XU のミニマムギャップ 8.3mm での基本波の波長) においても高調波を効率良く除去できると考えられる。したがって，垂直偏向ミラーは Rh と Cr あたりの金属の 2 種類のコーティングを持つことが望ましい。