

実験技術

X線ビーム位置モニター

佐々木 聡、三橋 利行

高エネルギー物理学研究所放射光実験施設

1. はじめに

放射光利用という面で加速器をながめてみれば、(陽)電子蓄積リングの低エミッタンス化を推し進めることが時代の要請となってきている。しかし逆に、低エミッタンス化を進めていくと、今までは問題にならなかった外部要因の微弱な変化で、ビーム位置が大きく変動することがわかっている。又、挿入光源の普及で電子軌道を制御するパラメータが増え、光軸の安定したX線ビームをリング全周にわたって求めることも困難になってきている。このため光軸変動を抑える対策として、(1)電子軌道内の補正電磁石にフィードバックをかけたり、(2)分光器や装置をビーム変動に対応させ、入射ビーム位置を相対的に実験ステーション内で制御することが研究されている。これらの制御の第一歩はビーム位置の検出であり、性能の良いビーム位置モニターが益々必要となってきている。

一方、ビーム位置モニターというと、放射光施設のビームラインに固定されて電子蓄積リングの運転に情報を与えているとのイメージが強いが、単にビーム位置を見るものと考えればもっと身近な存在である。モニター自身は単にX線ビームの位置を決めるもので、大学等の実験室で使用できるし、各種測定装置の光軸調整用部品としても大いに役立つ。

2. 背景

電子蓄積リングは入射X線強度が時間と共に減衰していくことから、強度変動は放射光実験が始

まる前から対策が検討されていた。ところが、光軸が変動し実験に支障をきたすという現象は注目されていなかった。放射光であれば良いという実験内容から精度が要求される実験が多くなるにつれ、ビーム位置が安定していることの重要さが認識され出してきたのである。

電子蓄積リングには電子軌道を制御するのに必要なボタン電極型モニターが設置されており、電子軌道の変動を $100\mu\text{m}$ 程度に抑え込んでいる。しかし、ビームは単純に軌道面に平行に平行移動するだけではない。電子軌道上での数 μm の動きや微小な角度の傾きの変化が拡大され、発光点から数 10m 離れた実験ステーションでは数 $100\mu\text{m}$ 以上のビームの動きとなってくるのである。従って、ビームラインで見える細かな変動を電子軌道上のモニターで検知制御することは期待できない。このため、実験ステーションの近くで放射光の位置を直接観察する光ビーム位置モニターが必要となってきた。当初、このような光位置モニターはCHESSやSSRLで電子ビームのハンドリング用モニターとして作られた¹⁾。更に進んで、ビーム位置変動を抑え込む試みが始まったのは、高エネルギー物理実験との共存で激しくビームが動いていたSSRLであった。2分割型電離箱と電子軌道上の補正電磁石へのアナログフィードバックで、光軸安定化のシステムが開発された²⁾。

我国では、高エネ研PFでの運転が開始されて間もなくビーム位置変動が注目され、例えば、BL-10のピンホールやBL-15の蛍光板モニターで、

冷却水システムのON/OFFや挿入光源に起因するビームの動きが観察された。これらのビーム位置変動は変動量が小さいこともあって、当時は一部の実験ステーションでのみ問題となっていた。それがPF全体で深刻な問題となったのは、PFリングが低エミッタンス化された1987年2月以降であった。実験ステーションによっては垂直ビーム位置の日較変動が最大数mmにのぼった。COD (Closed Orbit Distortion) を補正するデジタルフィードバックが開発され、この大きなビーム位置変動は0.2mm程度以下に抑えられてきている^{3) 4)}。しかし、利用者からは、もっと安定したビームを供給して欲しいという要求が出されているのが現状である。

3. X線ビーム位置モニター

X線ビーム位置を簡単にモニターするには、(1)蛍光板をのぞいたり、(2)PSPCのような位置敏感型検出器内で空間位置を直接観察したり、(3)上下のハーフスリットで強度比をとったり、(4)検出器との間にピンホールやスリットを入れて位置変動や位相空間での電子軌道のプロフィール⁵⁾を観察したりする方法がある。しかし、これらの方法でモニターしようとする実験ステーションに入ってくるX線を遮ってしまう。放射光利用の場合には常時X線位置をモニターすることが必要なもので、主目的の実験に不都合が生じるものは使えない。このため、後方で使用中のビームを遮らないか遮ってもごく一部で実用上差しかええない共存タイプの位置モニターが開発されてきた。ここでは放射光X線利用を想定して、実験と共存できるタイプの位置モニターに的を絞って紹介する。ただ、これらのモニターが放射光利用に限られないことは前述の通りである。

以上の条件を満たすとするとモニターの種類が限られてくる。ここでは、信号の取り出し方で次の2つに大別する。すなわち、(1)信号を直接観測するモニターと(2)電気的信号を取り出し、上下あ

るいは左右で差をとって位置の情報に直すタイプにである。(1)の代表は、蛍光板を入射X線ビームの端に当てる方法であり、(2)としては、電離箱や外部光電効果を利用したスプリット型があげられる。以下にこれらのモニターについて順次述べていく。

4. 蛍光板モニター

(1) 蛍光板モニター

この方法ではX線ビームの端に蛍光板を挿入し、その時光っているビームスポットを鉛ガラス越しにTVカメラで観察する。モニター上の画像を画像処理でデジタル化した後ビーム位置を探す。同時にピーク強度や半値幅も観測出来る上、長時間安定度が高いことが長所としてあげられる。図1に実際の測定例を示す。ウイグラーのヘリウム供給に伴うビーム位置変動を捕らえている(その後、この変動は解消された)。

このモニターは画像処理時間で制約されるため、速い測定にはむいていない。最近では10回/秒ぐらゐの測定が可能だが、図の例では30秒に1回の取り込みとなっている。又、分解能がTVカメラやデジタイザーの解像度で決まるため、実用的には100 μ m以下のビーム変動をみるのは難しい。

(2) チョッパー型モニター

ZnS(Ag)やZnO 蛍光体を塗ったリードを高速(60-200Hz)で振動させて位置をみるモニターである⁶⁾。ビームの端を5mm程度使用する。蛍光板モニターと同様、当たったX線を光信号に変換するが、スキャン時間が短いという特徴を持つ。このモニターでは、ビーム位置が中心からずれた時に、リードの振動数と入ってくる信号との間でフェーズがずれることでビーム位置を求めている。現状ではビームラインに恒久的に設置されているのではなく、NSLS, SSRL, PF等の放射光施設に持ち込んでビーム変動の観察やフィードバック実験に利用されているようである。

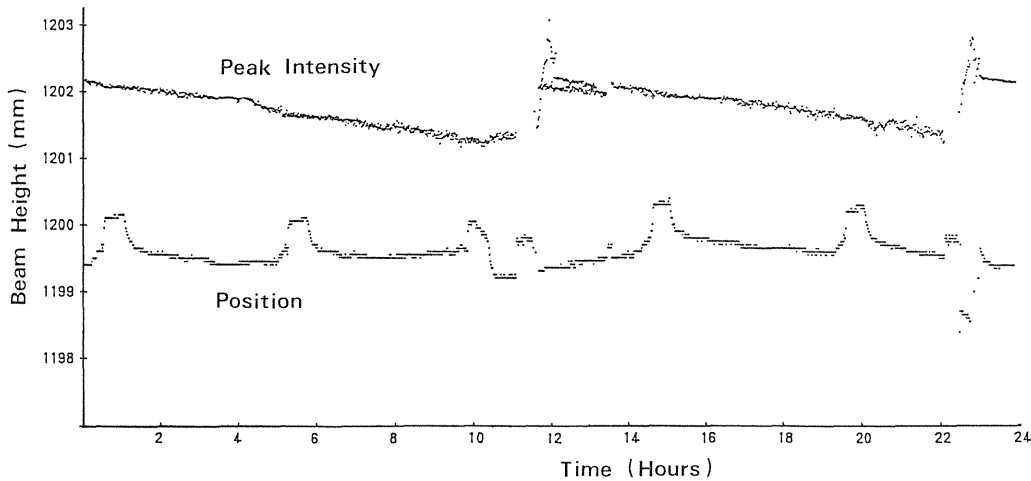


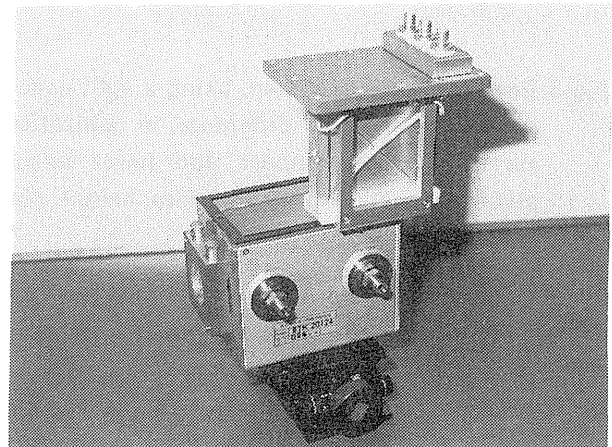
Fig.1. Variation of the vertical position and peak intensity of x-ray beam observed by using the fluorescent screen and TV image processor system. The measurement at BL-21 started at 23 : 40 on March 5, 1985.

5. 2分割型電離箱 (Split Anode Ion Chamber)

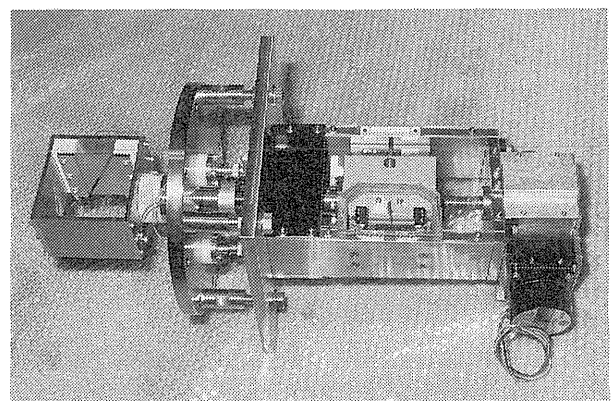
このX線位置モニター^{1) 2) 7)}は、図2(a)のような電離箱である。その電離箱の陰極側は対角線に沿って三角形に2分割してある。X線が電極間を通過する時に生じるイオン電流を上下の分割電極間で独立に測定する。増幅及び電圧変換後、電極間で差をとりビーム位置として検出する。モニターの基本的特徴は電離箱そのものであるため、その部分については本誌前号に記載されたI₀モニターの解説に譲る⁸⁾。

このモニターは光源から10~30m離れた地点で、ヘリウム置換のビームラインに電極がむきだしで設置されている。電極間距離は取り出すビームサイズに合わせて、5~40mmの範囲で決められる。ダイナミックレンジと感度は三角電極の縦横比と相関を持つ。又、ビームライン設置型の電極の大きさは、設置スペースと見たい変動量や分解能で決定される。この型のモニターは、その他に、図2(a)のようなポータブルタイプも製作されている。写真の例では電極板は一辺110mmで、モニターは±25mmのダイナミックレンジと1 μ m以下の分解能を持つ。

図3にシステムの概要を示す。三角電極の高さ



(a)



(b)

Fig.2. Beam position monitors : (a) split anode ion chamber and (b) split electrode photoemission monitor.

を h 、上下の電極での電圧を V_t 、 V_b とした時、垂直方向のビーム位置のずれは、

$$d = \frac{h(V_t - V_b)}{2(V_t + V_b)}$$

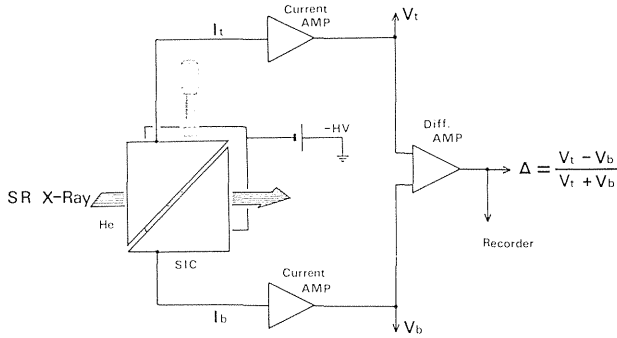


Fig.3. Position monitor system using a split anode ion chamber. The difference in ionization currents between upper and lower anode plates is proportional to beam height displacement.

で与えられる。蓄積電流値の変化は、この式の分母で規格化されている。このモニターは、信号系のアナログ処理で演算を行っているため速いビーム変動を捕ることが出来る。その他の特徴として、良い線形性、 $1\mu\text{m}$ 以下の分解能、 cm オーダーのダイナミックレンジを持っている。欠点の1つは、幅の広いビームを取り込もうとすると電極間距離が広がり、長時間測定時の安定性に疑問が出てくることである。これは印加電圧に関して平衡状態まで電圧を上げられないことを意味する。又、ガスの種類や流れ方にも敏感で、特にガス圧の変化には注意を要する。ビームラインのヘリウム配管の出口にバブル式流量モニターをつけたら、数 μm の周期的な位置変動となって現われたこともあった。信号の差をとるタイプのモニターに共通なことは、微弱な変化量を測定していることである。そのため、普通の電離箱と比べて条件設定やノイズ対策に細心さが要求される。

図4中のBL-10Aと示されたのが、ヘリウム雰囲気中のモニター内を通過する放射光白色X線

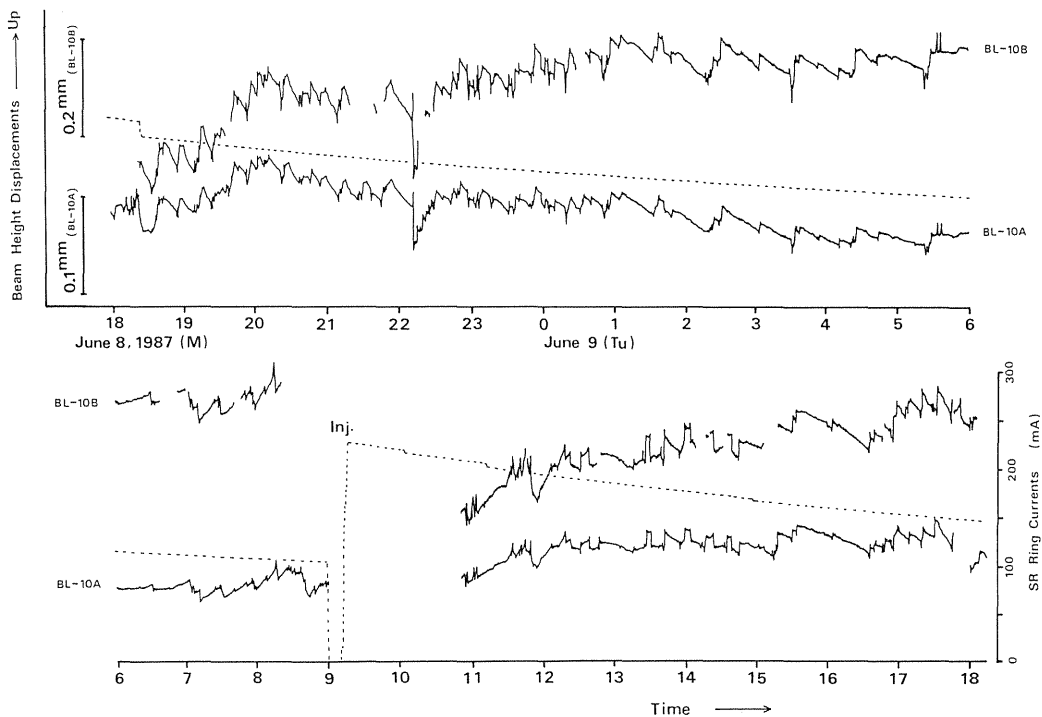


Fig.4. Vertical beam position displacements measured by (1) split anode helium ion chamber at BL-10A and (2) slit-type monitor at BL-10B.

の垂直位置変動である。単色X線ビームで位置計測が必要な場合には、この2分割電離箱がHe(70)/N₂やAr(15)N₂等のガスで満たされれば良い。

6. 外部光電効果を利用したモニター

(1) スリット型モニター

X線領域での光電子放出の断面積は一般に小さいが、このモニターでは光電面の面積を大きくすることで必要な強度を得ている。X線ビームを観測するため、後述のワイヤー型モニターのようにVUV光をみる必要はない。このモニターはPFで開発されたものだが⁹⁾、ベリリウム窓の下流に設置できることで既設のX線スリットが利用されている。

X線ビームラインは 10^{-6} から 10^{-2} Torr程度の真空の中、モノクロメータの直前に入射ビームを整形するスリットが設置されている場合が多い。このモニターはそのスリットに組み込まれている上下2枚の刃(通常タンタル製)を利用する。X線ビームが刃に当たり光電子が放出される時、周りから流れこむ電子の量を電流値として測定している。電流値は μ Aのオーダーのため増幅を必要とし、電圧変換後、第5章と同じ演算でビーム位置変動量に直している。分解能は $1\mu\text{m}$ 以下であり、通常使用するスリット幅では線形性が3mm程度の範囲で保たれる。このモニターは光電子放出を利用するため、電離箱型モニターのようにガス圧に左右されることはなく安定度は良い。ただし、スリットでビームの上下を切ってしまう為、それが問題となる時には使えない。又、後方で行われている実験の都合でスリット幅が変わると継続的な測定が出来なくなる。スリットの刃を使うので線形性はあまり良くなく、横方向に広いビームを当てたとき、熱負荷が大きくなり冷却が必要となる。

図4にPFのビームラインBL-10で1日間のビーム位置変動を記録した例を示す。その中で

BL-10Bと示されたのが、光源点から24m離れたスリット型モニターで測定されたものである。この前後2週間分の記録では、垂直位置が1mmの範囲内で小刻みな変動を繰り返していた。同じ偏向電磁石からの光で光源点から12mにあるBL-10Aでの測定と比べて、その変動の振幅が約2倍である。これは放射光X線ビームの位置変動の要素として、傾きの効果が利いている為である。即ち、電子軌道面の部分的な傾斜が放射光の出射方向に影響を与えているわけである。話は戻るが、このスリット型モニターはPF内の数ヶ所に設置されており、収集されたデータからみても信頼性の高いモニターの1つと言える。

(2) 2分割光電子型モニター

このモニターは上述のスリット型モニターの長所を生かしながら、熱負荷や線形性について改良し、ビームラインのエレメントと独立させることを目的にPFで開発された。

図2(b)及び図5にモニターの概要を示す。モニターはフィールドチェンバーの中に一对の直角三角形の読み出し電極を配置した構造である¹⁰⁾。読み出し電極を直角三角形にしたのは線形性を良くするためである。それ以外に線形性は電極加工

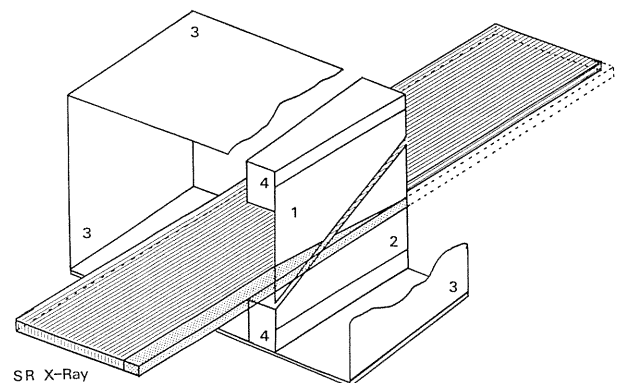


Fig.5. Schematic drawing of split electrode photoemission monitor. It consists of (1) upper copper electrode, (2) lower electrode, (3) guard electrode as collector, and (4) insulator made of glass molded epoxy resin.

精度でも決まる。現在PFで使用されているモニターは、ダイナミックレンジとして ± 1 cmを持ち、その範囲で線形からのずれは1%程度である。図5に示すようにビーム端を2~3 mm切って使用する。効率を上げるため電極は放射光X線ビームに対し電極面が 2° 弱傾いている。ビームの断面積が小さいから熱負荷も小さく、横幅の広いビームがきてもその影響は変わらない。X線ビームが当たった時に放出光電子に比例して流れこむ電子の量は、第5章で述べた方法で増幅演算され、ビーム位置変動量に換算される。分解能は $1 \mu\text{m}$ 以下である。

(3) ワイヤ型モニター

入射ビームの上下の裾野部分に2本のタングステン線を張り、放出される光電子の量を測定するもので歴史は古い^{11)・7)}。X線ビームラインの上流でX線の周りに広がって入ってくるUV光を観察している例¹¹⁾もあるが、軟X線領域あるいはもっとエネルギーの低い領域でのみ感度があるのでここではこれ以上触れない。

7. あとがき

以上述べてきた位置モニターは、放射光を安定に供給するためにはビーム位置変動を知らなければならないという必要性から開発されてきた。そのため、この種のモニターはビームライン内に恒久的に設置され、リング運転中、ビーム位置の連

続測定に使用されている。又、蓄積リングの電子軌道にフィードバックをかける時の光軸モニターとしても利用されている^{2)・3)}。このような初期の目的以外にも、ポータブル化されたモニターは実験ステーションに持ち込まれている。モノクロメータを通った後の単色X線の位置(又は位置変動)を観察したり、装置自身の光軸調整のようなアライメントにも使用されている。もう一步進んで、ビーム位置変動を測定装置内の閉じた系で追従させるフィードバックシステムの開発にも利用されている¹²⁾。

以上述べた例では、位置モニターを使ったビーム位置の相対的なずれを測定している。最近、6.(1)で述べたように、光源から異なる距離に設置した2つのモニターで同時測定することで、放射光の垂直位置と傾きが求められるようになった。位置モニター自身は絶対位置の検出ができるので、次のステップとして、絶対的なビームの水平度を測るとか、共通基準に対するビーム位置変動をリング一周にわたって測定するとかが研究テーマになってきている。

ビーム位置モニターについての世界の趨勢は、すでに偏向電磁石の光から離れて、挿入光源の光を如何にうまくモニターするかに移ってきている。この場合、ビームサイズが小さく輝度が高い上、偏向電磁石からの連続光が重なるという困難な問題がある。又、激しくビームが動くであろう次世代リングからの期待も大きい。

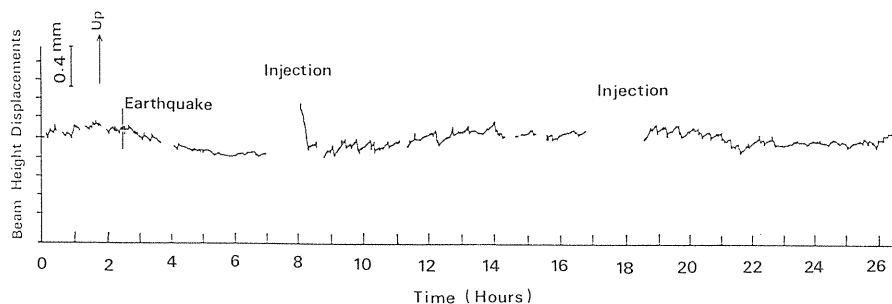


Fig.6. Vertical beam position displacement observed using the split emission monitor at BL-4C.

参考文献

- 1) J.Tichler and P.C.Hartman:Nucl.Instr. and Meth., 172, 67 (1980).
- 2) R.O.Hettel:IEEE Trans.on Nucl.Sci.NS-30, 4, 2228-2230 (1983).
- 3) T.Katsura, Y.Kamiya, K.Haga, and T.Mitsuhashi: IEEE Particle Accelerator Conference, Washington , 538-540 (1987).
- 4) T.Katsura, Y.Kamiya, K.Haga, T.Mitsuhashi, N.Nakamura, M.Katoh, and I.Abe:Rev.Sci. Instrum., 60, 7, 1507-1512 (1989).
- 5) A.Ogata, T.Mitsuhashi, T.Katsura, N.Yamamoto, and T.Kawamoto:IEEE Particle Accelerator Conference, Chicago (1989), to be published.
- 6) B.Chance, S.Khalid, M.Zhang, J.Sorge, and L.Thomas:Synchrotron Radiation News , 2, 25-29 (1989).
- 7) T.Katsura et al. :Photon Factory Activity Report, No.4, 67 (1986).
- 8) 野村昌治 : 日本放射光学会誌, 第2卷第3号, 63-67 (1989).
- 9) 小山篤, 野村昌治 : 技術研究会報告集 (分子研), 71-74 (1987).
- 10) T.Mitsuhashi, K.Haga, and T.Katsura :IEEE Particle Accelerator Conference, Washington, 576-578 (1987).
- 11) S.M.Heald:Nucl.Instr.and Meth., A246, 411-412 (1986).
- 12) A.Koyama, S.Sasaki, and T.Ishikawa :Rev. Sci. Instrum., 60 (7), 1953-1956 (1989).

