

2007年度 博士論文

フィードバックシステムを用いた  
高輝度放射光X線ビームの精密制御の研究

2008年5月30日

総合研究大学院大学  
高エネルギー加速器科学研究科  
物質構造科学専攻

工藤 統吾



# 目次

第1章	序論	1
1.1	はじめに	1
1.2	背景	1
1.3	本論文の目的および構成	4
第2章	試料点におけるビーム不安定性の要素解析とその解決方針	5
2.1	はじめに	5
2.2	光源と分光器について	5
2.3	試料点におけるビーム不安定性の要素解析	9
2.3.1	ビームラインのレイアウトと光線追跡	9
2.3.2	光源の角度変動	12
2.3.3	分光結晶の熱変形	13
2.3.4	分光結晶の角度変動	18
2.4	試料点におけるビーム不安定性の解決方針	25
2.5	まとめ	31
第3章	分光器フィードバックによる 放射光 X 線ビームの安定化	33
3.1	はじめに	33
3.2	測定システム	33
3.3	測定結果	35
3.4	考察	41
3.5	まとめ	43
第4章	ビーム位置安定化システムの 実用化	45
4.1	はじめに	45
4.2	フィードバック制御	45
4.3	ビーム位置モニター	48
4.4	DSP 搭載型フィードバック調節器	52
4.5	制御ソフトウェア	55
4.6	基本的な制御成績	61
4.7	ビームの安定化試験	62
4.7.1	I0 モードによるビーム強度の安定化	62
4.7.2	I0/RC モードによるビーム強度の安定化	64
4.7.3	BPM モードによるビーム位置の安定化	65
4.8	実用化の現状	68

4.9	まとめ	68
<b>第5章</b>	<b>分光器フィードバックによる 放射光 X 線ビーム強度の 最大化システムの開発</b>	<b>70</b>
5.1	はじめに	70
5.2	位相敏感検出回路	71
5.3	測定システム	76
5.4	測定結果	77
5.5	考察	78
5.6	まとめ	83
<b>第6章</b>	<b>結論</b>	<b>84</b>
6.1	本研究の成果	84
6.2	展望	85

# 第1章 序論

## 1.1 はじめに

SPring-8(Super Photon ring 8 GeV : 1997 年供与開始) は第 3 世代シンクロトロン放射光 (以下放射光と略記) 施設であり、アンジュレータを主体とする光源専用リング型加速器として建設された。アンジュレータは X 線管に比較して  $10^6$  倍以上の輝度を持つ高輝度光源である。これまで SPring-8 の高輝度光は、生命科学、物質科学、地球科学、環境科学といった学術研究をはじめ、ナノテクノロジー研究開発や産業利用などの様々な分野に利用されて多くの成果を上げている。アンジュレータの光ビームは目的とするエネルギーの光子フラックスを光軸付近に集中させることで高い輝度を生む。このため試料上でのビーム位置変動を最小限にしなくてはならない。特に近年の放射光利用研究では、微小試料の解析や、試料の微小領域のマイクロビームによる解析などが頻繁に行われる。そのためビーム位置安定性に対する厳しい要求がある。こうしたビーム位置変動は光源加速器の電子軌道変動に起因するとともに、光学素子の振動やドリフトにも起因する。特に単色 X 線を得るための結晶分光器の安定性は極めて重要である。X 線領域の結晶分光器は秒角で表現される狭い回折角度幅を持ち、結晶の精密な角度制御を必要とする。結晶の角度設定が不安定であれば、試料点での単色 X 線ビームの位置、強度、エネルギーが不安定となり実験誤差の増大につながる。SP ring-8 では、1997 年の共同利用実験供与開始以来、放射光利用の進展に伴い放射光利用実験ステーションにおけるビームの安定性に関する要求水準が徐々に上がってきた。このため蓄積リング加速器の電子軌道の安定化の努力がなされたほか、結晶分光器を中心とする光学素子の安定化の努力もなされた。本研究は、この光学素子の安定化の一連の努力の中の分光器のフィードバック制御手法の開発である。本手法は硬 X 線領域の放射光ビームラインにおける共通基盤技術となり、多くのビームラインに導入されて成果を上げている。また本手法の開発を通じて、光源や光学系の安定性に関する診断において光ビームモニターを用いるフィードバックシステムそのものが重要な情報をもたらすことが初めて示された。本論文では、本手法の原理と応用、次世代光源への応用を含む今後の展望などについてまとめる。

## 1.2 背景

第三世代放射光施設は低エミッタンス電子ビーム蓄積リング型加速器の直線部に配置された多数のアンジュレータ [1] から得る高輝度かつ高平行なシンクロトロン放射を利用するこ

とを特徴とする。SPRING-8 標準型真空封止アンジュレータの場合、1 次光エネルギー  $E=12.4$  keV での実効的な光源サイズ及び角度発散は、水平方向  $\Sigma_{x0}=280\mu\text{m}$ 、 $\Sigma_{x0}'=13\mu\text{rad}$ 、垂直方向  $\Sigma_{y0}=7\mu\text{m}$ 、 $\Sigma_{y0}'=3.5\mu\text{rad}$  と小さなものとなる。(SPECTRA[60] による計算値。光の空間分布及び角度分布を Gaussian で近似した場合の標準偏差として示した。) この光源サイズと発散角のため、光源から約 50 メートル下流の実験ステーションでのビームスポットサイズも  $\Sigma_x=630\mu\text{m}$ 、 $\Sigma_y=180\mu\text{m}$  と小さなものになる。試料点におけるビームプロファイルは特に垂直方向に鋭いピークを持つため、ビーム位置の垂直方向の変動はスリットを抜けるビーム強度を有意に変動させる。例えば試料前に置かれた開口  $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$  のスリット中心からビーム位置が垂直方向に  $100\mu\text{m}$  移動すると試料に届くビーム強度は約 15 % 減少する。ビーム位置変動による強度のロスには光源で発生した光子フラックスを未利用のまま無駄に捨てることであり、高輝度光源の意味を半減させる。ビーム位置安定化はビームスポットサイズの小さな第三世代放射光の重要な技術的課題となる [62][63] [64][65][66]。上記のようなスリットによるビーム整形では、垂直方向ビーム位置変動を  $10\mu\text{m}$  以下に抑制すれば、ビーム強度変動は 0.1 % となり、SPRING-8 の Top-up 運転で維持される蓄積リング電流値の変動幅と同程度に安定となる [2][3]。一方、ビーム位置の安定度を重視する蛍光分光 XAFS[4]、微小角入射を用いる種々の研究 [5] などの分野で求められる具体的なビーム位置安定度も概ね変動幅  $10\mu\text{m}$  以下とされる。しかしながら現実的にはビームラインにおいて試料点でのビーム位置は  $100\mu\text{m}$  近い変動が観測される場合がある。第三世代放射光を「使い切ってゆく」上では、試料点でのビーム位置変動を  $10\mu\text{m}$  以下に抑制しビーム強度のロスを最小限にすることは重要な課題である。

試料点でのビーム位置変動の原因の一つは光源加速器の電子ビーム軌道変動と考えられる。電子ビーム軌道角度変動は微小であっても、50 メートル離れた試料点において有意なビーム位置変動を引き起こす。ビーム不安定性の原因を特定し考察する上で、光ビーム位置モニタリングは重要な技術である。ところで分光器上流ビームラインフロントエンド部の X 線ビーム位置モニター (Front-end X-ray beam position monitor:以降 FE-XBPM[6]) で計測した光ビーム位置変動と、試料点において位置敏感電離箱 (Position Sensitive Ion Chamber:PSIC[7]) などで計測したビーム位置変動は正確には一致しないことがある。その理由の一つは FE-XBPM の計測値にはアンジュレータ G A P 値に対する依存性が大きくあるためである [6]。もう一つの理由は、FE-XBPM は光源の不安定性によるビーム位置変動を主に検出するのに対し、PSIC は光学系特に二結晶分光器の不安定性に起因するビーム位置変動を検出するからである。このことからこれら光位置モニターだけでは試料点のビーム不安定の原因を評価する情報が不十分である。

試料点でのビームを不安定にする光源の変動以外の原因として二結晶分光器が考えられる。第 3 世代のアンジュレータ光は前置光学系を用いずに二結晶分光器のみにより高い平行度と単色性を得ることができる。しかしこの場合二結晶分光器の第一結晶は光軸上の  $300\text{W}/\text{mm}^2$  にも及ぶ直入射パワーを受ける最初の光学素子となる。この時、分光結晶の熱変形を引き起こす直接熱負荷や、分光結晶からの散乱光が結晶自身や結晶を支持するステージ部分の温度変動を引き起こす間接熱負荷が問題となる [8]。これらは試料点での

ビーム位置変動につながるだけでなくビーム強度とエネルギーにも影響を及ぼす。位置、強度及びエネルギー全てが安定なビームを得る上では、光源、分光器などビーム不安定の原因それぞれの特性の考察に基づいて適切な対策を検討しなくてはならない。

ビーム強度について注目すると、これを一定にするために分光結晶の相対角度をフィードバック制御で自動調整する方法が従来から知られている。これは DESY(Deutsches Elektronen-Synchrotron(独)) において第二世代放射光施設のビーム強度とエネルギーの安定化のために開発された mono chromator stabilization (MOSTAB) と呼ばれる手法である [9][10]。この手法は動作点が二結晶平行配置からずれているために、ビーム強度を最大限に使うことができない。即ち高輝度光源の特性を生かしきることができない。またビームスポットサイズの小さい第三世代のアンジュレータ光ではビーム強度だけではなくビーム位置の安定化が重要であることは上述の通りである。

ところで「フィードバックは、制御対象に関する我々の知識の不完全さに対処するただ一つの方策であり、同時に知識の不完全さを補い得る有効な方策である」と言われる [11]。つまりフィードバックシステムは、問題とするパラメータの不安定性の原因を特定できなくても、制御量として選んだパラメータを選択的に目標値に安定化できるという特徴を持つ。では制御量として選ばれなかったパラメータは全く安定化されないのであろうか。これは制御対象がどのような伝達関数を持っているかに依存し、同時に安定化される場合、逆に不安定になる場合、影響を受けない場合があると考えられる。そこで「制御対象に対する我々の知識」をより完全に近づけ、それぞれのパラメータの因果関係や原因を明らかにすれば、複数のパラメータを同時に安定化できる条件が見出される可能性がある。また逆に様々な条件でフィードバック制御を行いその制御成績を評価することは、制御対象に対する我々の知識の不完全さを補う情報をもたらすことになる。上述の MOSTAB はビーム強度を制御量として選ぶ。ビーム位置とエネルギーをも同時に安定化するためには、制御対象である光源、分光器を含むシステムの挙動についての情報を解析し知識を深め、そのことに基づいて新しい制御方法を考える必要がある。制御対象について得られる情報を不完全にしている原因の一つは、上に述べた光ビーム位置モニター系の問題である。しかし様々なフィードバック制御実験を通じてシステムに対する理解を深めることで、光位置モニター系の問題から来る制御対象に対する知識の不完全さを補うことができる。

本論文においては、光ビーム位置モニターやビーム強度モニターと、これらにより検出される情報を組み込んだフィードバックシステムを用い、ビーム位置や強度の安定化試験を行う。これにより、ビーム位置、強度及びエネルギーの同時安定化のために必要な制御方法についての知見を得るとともに、実用化につながるシステムの技術開発を行う。放射光ビームラインの輸送系につき、このようなフィードバックシステムの振る舞いを用いて考察することは新しい試みである。これにより安定なビーム供給が実現し実用化されただけでなく、これまで光学素子の変動にマスクされて見えなかった光源の挙動を、ビームラインにおける光モニタリングから論じることが可能であることが示された。

### 1.3 本論文の目的および構成

本研究では、第三世代放射光 X 線ビームを分光器のフィードバックシステムにより安定化するための理論的考察を行う。これをもとにビーム安定化の方針をたてる。更にフィードバック制御下で得られるビームパラメータの解析から、光源と分光器を含むシステム全体の挙動についての情報を得、フィードバックシステムがどのようにビームを安定化したかを考察する。これらをもとにフィードバックシステムを構成する装置群を開発し、動作試験を通じフィードバック制御手法を確立する。このことを通じて放射光ビームの質的向上に貢献し、放射光 X 線を用いた科学技術全般をより高精度高感度な手法として発展させることを目的とする。またより厳しい光ビーム制御が重要となる将来光源において本研究の成果が貢献し得る点についても考察する。

本論文の構成は以下の通りである。はじめに第 2 章で、試料点におけるビーム不安定性の要素解析を行う。ここではビーム不安定性を引き起こす要素を、光源の変動、二結晶分光器分光結晶の熱変形および、分光結晶の配置の変動に分けて取り扱う。考察にあたり、レイトレース（光線追跡）を用いて、光源及び分光器の角度や位置変動が分光器からの出射ビームにどのような影響を及ぼすかを考察する。その結果、試料点でのビーム強度と位置の時間変動に相関が見られる場合は、分光結晶の角度変動がビーム不安定の主要原因であることを示す。これに基づきフィードバックシステムを用いたビーム安定化のための方針を提案する。次に第 3 章で、第 2 章に述べたビーム安定化の方針に則り、SPRING-8 標準型アンジュレータのビームラインにおいて、試料点でのビーム位置と強度の時間変動の相関を解析する。解析結果を受けて、分光器の回折強度が最大となるように分光結晶の角度を調整した状態で出射ビーム位置を一定にするようにフィードバックを施した結果、システムはビーム位置変動を  $\sim 10^{-1} \mu\text{m}$  まで安定化し、ビーム強度に関しては回折強度曲線の極大値を  $\sim 10^{-3}$  で安定化することに成功した。一方、ビーム強度を制御量としてフィードバックをおこなった場合は、光源の変動に起因するビーム位置変動が分光器下流で観測された。これにより光位置モニターだけでは十分に得られなかった光源の挙動に関する情報が明らかになった。本論文で提案するビーム位置フィードバックシステムは、光源変動に起因する試料点でのビーム位置を補正することで、ビームエネルギーを変動させる。しかしその変動は  $\sim 10^{-3}\text{eV}$  であり、微小であることを示した。第 4 章では、ビーム位置安定化フィードバックを実用化するための、光ビーム位置モニター、及び DSP 搭載型フィードバック調節器の開発につき述べる。DSP 搭載型フィードバック調節器は、運用上の問題となるフィードバックパラメータ調整作業の自動化を可能とした。これらの装置を導入した SPRING-8 ビームラインの実績についても述べる。第 5 章では、変法として、ビーム位置モニターを用いずに分光器の回折強度を最大化するフィードバック制御方法について述べる。分光結晶に摂動を与える本法は、偏向部放射ビームラインにおける分光器のエネルギースキャンを効率化し、XFAS 測定に応用された。最後に第 6 章において本研究の総括と現状及び今後の展望を述べる。



## 第2章 試料点におけるビーム不安定性の要素解析とその解決方針

### 2.1 はじめに

放射光ビームラインの実験ステーション試料点における、ビーム位置、強度及びエネルギーに影響を及ぼす要素を考察する。考察の対象は、光源加速器の電子ビーム軌道の角度変動と、二結晶分光器第一結晶の熱変形、及び分光結晶の角度配置である。アンジュレータの設置された蓄積リングの直線部で電子ビーム軌道の角度が変動する場合がある。これは、ごくわずかな変動量でも光源から距離のある試料点のビーム位置に有意に影響を与える。またアンジュレータの強力なビームは二結晶分光器の第一結晶を熱変形させることで試料点のビームを不安定にする(直接熱負荷)。更に第一結晶からの散乱光は、第一及び第二結晶を支持するステージ部などの温度上昇を招き、これが特に結晶の角度配置に影響を与える。その結果試料点でのビームを不安定にする(間接熱負荷)。

ここでは SPring-8 標準型アンジュレータを光源とし、光源と試料の間にフロントエンドスリットと二結晶分光器だけが存在するビームラインをモデルとして考察を行う。考察の中で必要な場合は光線追跡法を用いる。これらにより、安定なビームを得るために、分光結晶の角度配置の安定度が特に重要であることを示す。最後に解析結果に基づきビーム安定化の方針を提案する。

### 2.2 光源と分光器について

本章での考察の前提となる光源と分光器につき述べる。

挿入光源は電子ビーム加速器の直線部にN極、S極の磁石を交互に配列して周期的磁場を作り出し、この中を通る電子を蛇行運動させることにより放射光の輝度を高める。また

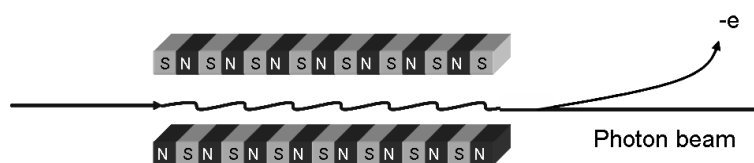


図 2.1: 挿入光源の模式図

磁場強度を変化させることで放射光の波長を変化させる [12]。

垂直方向に正弦波磁場を発生する挿入光源内では、電子は水平面内に正弦波軌道を描いて蛇行する。垂直方向の周期的磁場を利用する挿入光源は偏向定数  $K$  (deflection parameter) [8] によりその特性が変化する。

$$K = \frac{eB_0\lambda_u}{2\pi mc} \quad (2.1)$$

但しここで、 $e$  は素電荷 ( $1.6021773349 \times 10^{-19} \text{C}$ )、 $B_0$  は周期磁場の最大磁束密度 (T)、 $\lambda_u$  は磁石列の周期長 (m)、 $m$  は電子質量 ( $9.109389754 \times 10^{-31} \text{kg}$ )、 $c$  は真空中の光速 ( $2.99792458 \times 10^8 \text{m/s}$ ) である [53]。

SPring-8 標準型真空封止アンジュレータの場合は磁石列上下の間隔 (GAP) を変化させることで  $B_0$  が  $0.845 \sim 0.01 \text{(T)}$  で調整でき、それに伴い  $K$  は  $2.5 \sim 0.04$  の間で変化する。 $K \gg 1$  となる挿入光源はウィグラーと呼ばれアンジュレータと区別される。アンジュレータでは、光軸上に (2.2) に示す 1 次光ピーク波長  $\lambda$  を持つ準単色光を得る。

$$\lambda = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2}\right) \quad (2.2)$$

但しここで  $\gamma$  はローレンツ因子であり、電子加速エネルギー  $8 \text{GeV}$  の SPring-8 では  $15655.60592$  となる [53]。(2.1)(2.2) より  $B_0=0.345 \text{(T)}$  のとき、 $K=1.03118$  となり  $\lambda=1 \text{(nm)}$  ( $E=12.4 \text{keV}$ ) を得る。1 次光波長  $\lambda$  とアンジュレータの磁石列の長さ  $L$  から、電子ビームのエミッタンスがゼロの場合の光源の自然サイズ  $\sigma_r$  と自然角度発散  $\sigma_{r'}$  が (2.3)(2.4) のように求められる [53]。

$$\sigma_r = \frac{\sqrt{2\lambda_u L}}{4\pi} \quad (2.3)$$

$$\sigma_{r'} = \sqrt{\frac{\lambda_u}{2L}} \quad (2.4)$$

SPring-8 標準型真空封止アンジュレータは  $L=4.5 \text{ m}$  であり、ピーク波長  $\lambda=1 \text{ nm}$  の 1 次光の場合  $\sigma_r=2.39 \mu\text{m}$ 、 $\sigma_{r'}=3.33 \mu\text{rad}$  を得る。実際には電子ビームが有限のサイズ (水平方向:  $\sigma_x$ , 垂直方向:  $\sigma_y$ ) と角度発散 (水平方向:  $\sigma_{x'}$ , 垂直方向:  $\sigma_{y'}$ ) を持つ。そのために実効的な光源サイズ ( $\Sigma_{x0}$ ,  $\Sigma_{y0}$ ) と角度発散 ( $\Sigma_{x0'}$ ,  $\Sigma_{y0'}$ ) は、光源の自然サイズ及び角度発散と、電子ビームサイズ及び角度発散のコンボリューションとなる (2.5)(2.6) [53]。

$$\Sigma_{x0,y0} = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_{x,y}^2} \quad (2.5)$$

$$\Sigma_{x0',y0'} = \sqrt{\sigma_{r'}^2 + \sigma_{x',y'}^2} \quad (2.6)$$

SPring-8 蓄積リングのアンジュレータ設置位置である直線部の電子ビームは  $\sigma_x=276.8 \mu\text{m}$ 、 $\sigma_y=6.17 \mu\text{m}$ 、 $\sigma_{x'}=12.26 \mu\text{rad}$ 、 $\sigma_{y'}=1.10 \mu\text{rad}$  である。従ってピーク波長  $\lambda=1 \text{ nm}$  の 1 次光の場合、 $\Sigma_{x0} = 276.8 \mu\text{m}$ 、 $\Sigma_{y0} = 6.62 \mu\text{m}$ 、 $\Sigma_{x0'} = 12.7 \mu\text{rad}$ 、 $\Sigma_{y0'} = 3.51 \mu\text{rad}$  を得る。さ

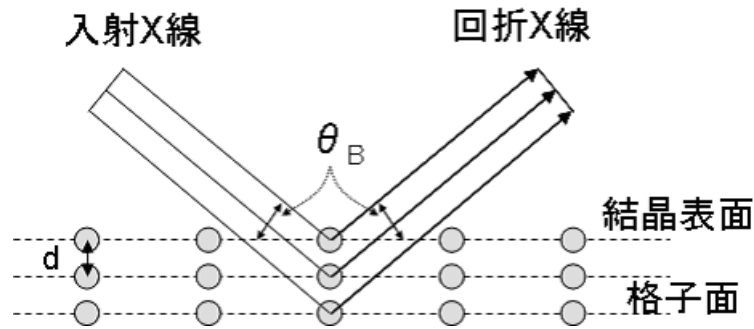


図 2.2: Bragg 反射における入射波・回折波、および結晶格子面の配置

らに光源から距離  $D$  だけ離れた試料点におけるビームスポットサイズは、水平方及び垂直方向につき (2.7) となる [53]。

$$\Sigma_{x,y} = \sqrt{\Sigma_{x_0,y_0}^2 + D^2 \Sigma_{x_0',y_0'}^2} \quad (2.7)$$

$D$  を  $50 \text{ m}$  とすると、(2.7) より  $x=630\mu\text{m}$ ,  $y=176\mu\text{m}$  を得る。試料点ビームサイズは垂直方向が水平方向の 4 分の 1 となる。たとえばビームのフラックス重心を開口  $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$  程度のスリットで切り出して用いる場合、水平方向のビーム位置変動よりも垂直方向のビーム位置変動に対してビーム強度変動が敏感となる。

アンジュレータ光は準単色であり様々な放射光実験に用いるにはエネルギー帯域が広すぎる。そこで完全結晶のブラッグ反射を利用した分光器を用いて単色化してビームを用いる。X 線領域での分光素子としては古くから結晶が用いられてきた。これは、結晶格子間隔が X 線の波長と同程度であり、理想的な回折格子となるためである。放射光施設の多くの分光器 [54] では、分光結晶として Si の単結晶が用いられる。これは半導体産業において Si が主材料であることと大きく関連しており、完全で大きな単結晶が安価に得られること、切断や研磨などの加工技術が確立していることがその理由である。

図 2.2 のような配置で単結晶に視斜角  $\theta_B$  で波長  $\lambda$  の X 線が入射したとき Bragg の条件、

$$2d \sin \theta_B = n\lambda \quad (2.8)$$

が成立した場合は Bragg 反射が起こる。ここで  $d$  は格子面の面間隔である。また  $n$  は整数で基本波長  $\lambda$  の  $n$  次光が反射されることを示す。結晶分光器では  $\theta_B$  を回転させることにより、回折する単色光波長を選び出すことができる。

結晶に単色で平行な X 線を入射させ、結晶をブラッグ角のまわりで連続的に回転させながら回折波強度を測定するとき得られる曲線を回折強度曲線という。回折強度曲線の半値幅 (ダーウィン幅) の近似値は (2.9) で計算することができる。ここで、 $r_e$  は古典電子半径 (classical electron radius= $2.8179 \times 10^{-15}[\text{m}]$ )、 $\lambda$  は波長、 $\theta_B$  はブラッグ角、 $V_c$  は単位格子体積、 $F_g$  は結晶構造因子、 $P$  は偏光因子である。例えば、Si(111) 面では、 $n=1$ ,  $d=3.135 \text{ \AA}$ ,  $r_e=2.8179 \times 10^{-15} \text{ m}$ ,  $V_c=3.91 \times 10^{-29} \text{ m}^3$ ,  $F_g=1$ ,  $P=1$  [69]、 $|F_g|=60.13$  [8]、 $|P|=1$  として計算すると回折強度曲線の半値幅  $4.41 \text{ arcsec}$  を得る [55]。

$$\omega = \frac{2\gamma_e}{\pi v_c} |Fg| \lambda^2 \frac{|P|}{\sin 2\theta_B} \lambda \quad (2.9)$$

今、(2.8)の条件から分光結晶へのビーム入射角が $\Delta\theta$ だけ変化した場合の、一次光回折波長を $\lambda'$ とすると、エネルギーの変化量 $\Delta E$ は、

$$\Delta E = hc \left( \frac{1}{\lambda'} - \frac{1}{\lambda} \right) = \frac{hc}{2d} \left( \frac{1}{\sin(\theta_B + \Delta\theta)} - \frac{1}{\sin \theta_B} \right) \lambda \quad (2.10)$$

となるが、 $\Delta\theta$ が微小角の場合にはこれを $\Delta\theta$ の関数と見てマクローリン展開し1階微分の項までを取ることにより、

$$\Delta E \sim -\frac{hc \cos \theta_B}{2d \sin^2 \theta_B} \Delta\theta = -E \Delta\theta \cot \theta_B \quad (2.11)$$

と近似することができる。但し、ここで $h$ はプランク定数、 $c$ は光速である。従ってブラッグ条件から入射角が微小角 $\Delta\theta$ だけ増えると、分光エネルギーは $\Delta\theta$ に比例して減少する。これは本論文において分光結晶の微小な角度調整を取り扱うために重要である。

(2.11)は完全平行なビームが結晶に入射する場合のエネルギーと角度の関係である。実際に入射するX線は完全平行ではなく一定の角度発散を持つ。また結晶は回折角度幅を持つ。これにより結晶分光器のエネルギー分解能は、

$$\frac{\Delta E}{E} = \cot \theta_B \sqrt{\Omega^2 + \omega^2} \quad (2.12)$$

となる[54]。これは(2.11)の $\Delta\theta$ にビームの発散 $\Omega$ と回折角度幅 $\omega$ のコンボリューションを代入して整理し絶対値をとることで得られる。ここで $E$ はビームエネルギー $E=12.4\text{keV}$ とした場合にはSPring-8標準型真空封止アンジュレータでは $3.51\mu\text{rad}$ 、ブラッグ角 $\theta_B$ はSi 111で $9.18^\circ$ 、 $\omega$ は $4.41 \text{ arcsec}(21\mu\text{rad})$ である。これらを用いるとエネルギー分解能として $1.4 \times 10^{-4}$ を得る。これは $1.73 \text{ eV}$ である。

放射光実験で用いられる二結晶分光器では、平行二結晶配置が多用される。この場合二枚の結晶の回折網平面を平行に配置して、二回のブラッグ反射を起こさせる。結晶表面が回折網平面と平行な対称反射の場合には、二枚の結晶表面が完全平行であれば、最初の結晶でブラッグ条件を満たしたX線は、第二の結晶でもブラッグ条件を満足する。このため単色化されたX線ビームは方向を変えずに二枚目の結晶から出射する(図2.3)。平行配置二結晶分光器において結晶の平行が保たれたまま、光源角度変動などによりビーム入射角が変動した場合の分光エネルギーの変化は一結晶での場合と同じく(2.11)により計算できる。同様に平行配置二結晶分光器のエネルギー分解能も一結晶での場合と同じく(2.12)により与えられる。



図 2.3: 平行二結晶配置



図 2.4: モデルビームライン。光源は SPring-8 標準型真空封止アンジュレータ。光源アンジュレータ一次光ピークエネルギーは 12.4 keV。分光結晶は Si(111) の平板型結晶とし  $E=12.4$  keV。フロントエンドスリット [61] サイズは  $0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$  である。

## 2.3 試料点におけるビーム不安定性の要素解析

### 2.3.1 ビームラインのレイアウトと光線追跡

光源と分光器を含むビームラインにおけるビーム不安定の原因について考察する。ビームラインは典型的な SPring-8 のアンジュレータビームラインのレイアウトに従い (図 2.4)、光線追跡 (ray trace: レイトレース) 法によりビームラインの光輸送をシミュレーションする。レイトレースは光源から発生する光を複数の光線として表現し、これらが光学素子を通じてどのように観測点にたどり着くかを模擬する手法である。放射光 X 線ビームを扱う分光器を含むビームラインをレイトレースで解析するためには回折強度曲線の情報を経晶分光器に与えねばならない。Cerrina らが開発した SHADOW [56] は広く用いられている放射光用のレイトレースコードであり、本研究の目的に合致する。ここでは ESRF (European Synchrotron Radiation Facility) [13] から提供されている XOP (X-ray Oriented Program) [14] の拡張機能として搭載されている SHADOWVUI (Visual user interface for the SHADOW ray-tracing code) を用いる。

図 2.5 は SHADOW の光源発生プログラム SOURCE で作り出した SPring-8 標準型真

空封止アンジュレータ光である。磁石列周期長さ 3.2 cm、周期数 140、蓄積リング電子ビームエネルギー 8GeV、蓄積リング電流 100mA、電子ビームサイズ  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  はそれぞれ  $276.8\mu\text{m}$ 、 $6.17\mu\text{m}$  とした。電子ビームエミッタンス  $\epsilon_x$ 、 $\epsilon_y$  をそれぞれ  $3.393 \times 10^{-9}\text{mrad}$ 、 $6.786 \times 10^{-12}\text{mrad}$  とした。また 12.4keV に 1 次光エネルギーピークを得るために K 値 1.0311 を与えた。アンジュレータのスペクトルのうち 12380eV から 12420eV までを切り出したものを光源とした。これは結晶分光器のエネルギー分解能を論じる上で十分なエネルギー帯域である。このエネルギー範囲の光線をアンジュレータのスペクトルに対応する頻度分布で 25000 本発生させた。光の発散とサイズは (2.5)(2.6) による計算と概ね一致する。

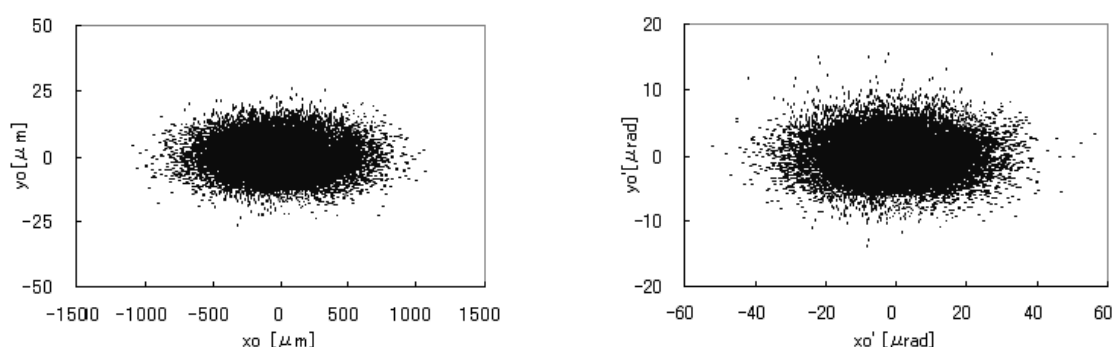
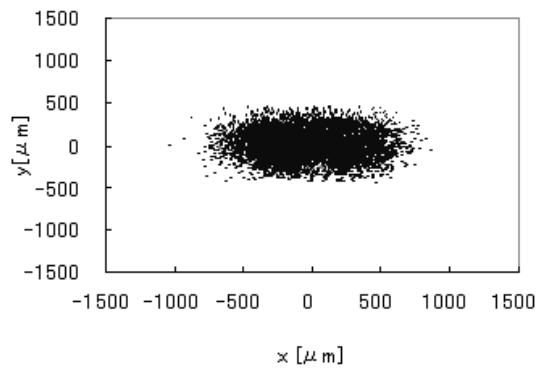


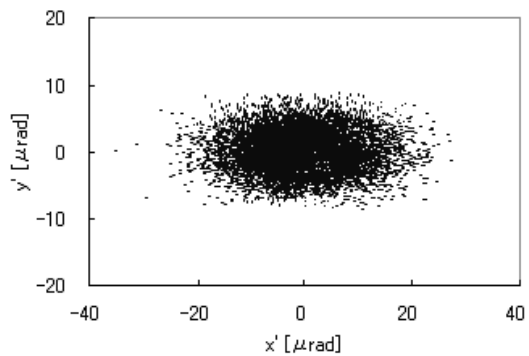
図 2.5: SHADOW により発生した SPring-8 標準型アンジュレータ光 (K=1.0311, E=12.4keV @1st)。光線数は 25000 本。光源サイズは  $\Sigma_{x0} = 274\mu\text{m}$ 、 $\Sigma_{y0} = 6.0\mu\text{m}$ 、発散角は  $\Sigma_{x0'} = 12.7\mu\text{rad}$ 、 $\Sigma_{y0'} = 3.07\mu\text{rad}$  となる。

光源からフロントエンドスリットまでの距離は 30m、第一結晶までの距離を 43m、第一結晶のビーム入射点と第二結晶のビーム入射点間の距離を 9.53cm、第二結晶のビーム入射点から試料点までの距離を 10 m として光線追跡を行い試料点でのビームスポットと角度分布を得た (図 2.6)。ブラッグ角は Si(111) 結晶においてエネルギー 12.4keV を与える角度を SHADOW 内部で計算最適化し  $9.1756834^\circ$  を得た。得られたビームスポットサイズは、 $\Sigma_x = 325\mu\text{m}$ 、 $\Sigma_z = 175\mu\text{m}$  となった。 $\Sigma_x$  はフロントエンドスリットによる制限を受けるため、発散角から計算した試料点でのビームサイズ (約  $730\mu\text{m}$ ) よりも小さくなる。一方試料点で得られるビームエネルギーのスペクトル (図 2.6(c)) の FWHM は 1.61 eV であり、分光器のエネルギー分解能は  $1.3 \times 10^{-4}$  となる。これは (2.7)(2.12) による計算と概ね一致する。

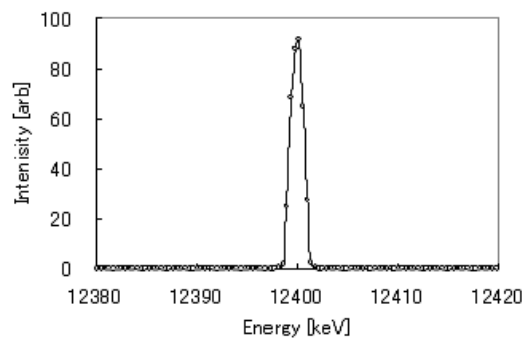
試料点 (光源から 50 m) でのレイトレース結果は 1,2,3...25000 番目まで番号が付けられた素光線で構成される。ここで添字  $n$  により  $n$  番目の素光線を表す。素光線の位置は、 $x_n$ 、 $y_n$ 、角度は  $x'_n$ 、 $y'_n$ 、強度は  $I_n$ 、エネルギーは  $E_n$  で表す。また、フロントエンドスリットにより光線が失われたことを示すフラグは  $F_n$  とする。ビーム強度  $I$ 、ビーム重心位置  $X$  及び  $Y$ 、ビームエネルギー  $E$  は式 (2.13) ~ (2.16) のように計算できる。ここで、結晶による吸収を考慮しているので素光線強度  $I_n$  はそれぞれ 1 以下の数字を持つ。 $x$ 、 $y$ 、 $x'$ 、



(a)



(b)



(c)

図 2.6: SHADOW による SPring-8 標準型アンジュレータ光の資料位置での光線。(a) ビームスポットサイズは  $\Sigma_x=325\mu m$ 、 $\Sigma_z=175\mu m$ 、(b) ビーム角度分布は  $\Sigma_{x'}=7.9\mu rad$ 、 $\Sigma_{z'}=2.9\mu rad$  となる。(c) ビームエネルギー分布のピークは  $12.4\text{keV}$  であり、FWHM は  $1.61\text{eV}$  となる。

$y'$ 、 $E$  については素光線の強度による重み付けを行い、総強度  $I$  で規格化する。更にフラグ  $F_n$  は、素光線がスリットにより失われれば 0、スリットの開口を通過した素光線は 1 である。また  $N$  は総光線数であり、ここでは 25000 本となる。これ以降本章では、ビーム強度として (2.13) を、水平及び垂直方向のビーム位置として (2.14)(2.15) を、ビームエネルギーとして (2.16) を評価に用いる。これら諸量について、光源、結晶の角度や位置などのパラメータを微小に変動させて繰り返し計算を行うマクロを IDL (Interactive Data Language) で開発し、各パラメータのビームに与える影響を調べる。

$$I = \sum_{k=1}^N I_n F_n \quad (2.13)$$

$$X = \frac{\sum_{k=1}^N x_n I_n F_n}{I} \quad (2.14)$$

$$Y = \frac{\sum_{k=1}^N y_n I_n F_n}{I} \quad (2.15)$$

$$E = \frac{\sum_{k=1}^N E_n I_n F_n}{I} \quad (2.16)$$

### 2.3.2 光源の角度変動

光源の角度変動、位置変動は試料点でのビームに影響を与える。特に角度変動は光源点から距離の離れた試料点においては大きなビーム位置変動を引き起こす。図 2.7 は、SPring-8 の BL29XU のアンジュレータ (ID29) 中心部での電子ビーム角度変動である。これは ID29 の両側に配置された 2 つの電子ビーム位置モニター (168 cell 及び 169 cell: これらの間隔 7.74m の中心が ID29 の中心に一致) の測定データから計算したものである。水平垂直方向につき標準偏差で  $0.042\mu rad$ 、 $0.045\mu rad$  と微小である。Peak to peak では水平垂直ともに  $0.26\mu rad$  である。

この軌道角度変動は光源から 50m 下流の試料点において水平垂直にそれぞれ標準偏差で  $2.1\mu m$ 、 $2.2\mu m$  のビーム位置変動を与える。Peak to peak では水平垂直ともに  $13\mu m$  である。本研究では試料点でのビーム位置安定性の目標を  $10\mu m$  と設定している。従って光源の角度変動に起因する試料点でのビーム位置変動は有意と言える。特に垂直方向のビームプロファイルが鋭いため、垂直方向のビーム位置変動は水平方向のビーム位置変動に比べ実効輝度の低下に寄与する度合いが大きくなる。

光源の垂直方向の角度が変動すると、二結晶分光器分光結晶への光ビームの入射角が変動することになる。これは分光器からの出射ビームエネルギーと強度に影響を与える。平行配置の分光結晶へのビーム入射角が  $\Delta$  だけ変化したときの出射ビームエネルギー変化  $\Delta E$  は (2.11) で計算できる。 $E=12.4$  keV、 $\theta_B=9.18^\circ$  とすると、上記の電子ビーム軌道変動は、分光器の出射ビームエネルギー変動として、標準偏差で  $0.003$  eV (peak to peak で  $0.02$  eV) を引き起こす。これは極めて小さい値でしかない。アンジュレータスペクトルの 1 次光ピーク (12.4 keV として) はこの変化量に比較すると十分にブロードであ



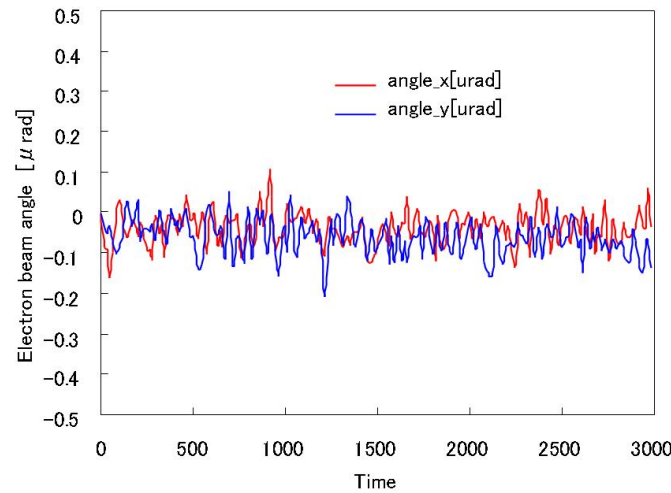


図 2.7: SPring-8 蓄積リング 168 cell 及び 169 cell の BPM により測定された BL29XU のアンジュレータ中心部の電子ビーム軌道変動。水平、垂直方向の角度変動の標準偏差はそれぞれ  $0.045\mu\text{rad}$ 、 $0.042\mu\text{rad}$  である。

る。従って、ここで予想される程度のわずかな分光器出射エネルギー変動では、ビーム強度の変動もほとんど無視できる。

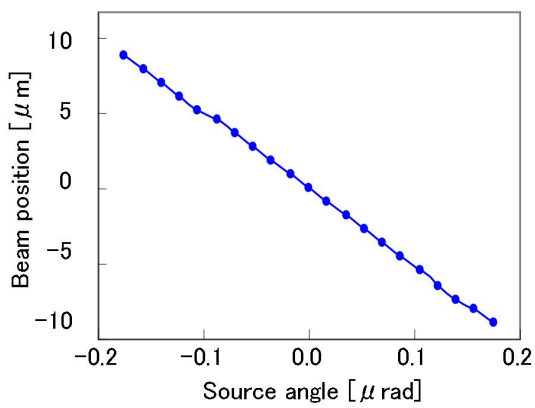
図 2.8 は、光源点角度を垂直方向に動かしながら、試料点でのビーム位置、ビーム強度及びエネルギーを SHADOW により計算したものである。光源の角度変動は試料点のビーム位置変動を生む。一方、光源の角度変動が引き起こすビームエネルギーの変動は (2.11) に従う。この値は分光器のエネルギー分解能より十分に小さいものである。ビーム強度の変動もこれに伴い微小となる。

以上をまとめると、光源の角度変動は、試料点のビーム位置に影響を与えるが、ビーム強度やエネルギーに与える影響は少ない。ということになる。

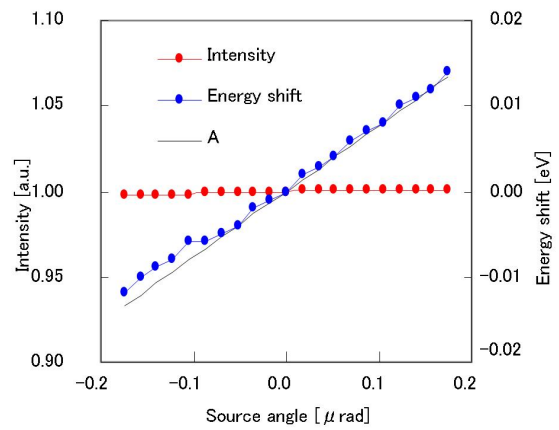
### 2.3.3 分光結晶の熱変形

次に、ビームを不安定化する要素として分光器の分光結晶の熱変形につき考察する。二結晶分光器の第一結晶は強力な熱負荷にさらされ、これが二結晶分光器の出射ビームの質を悪化させる。この現象は 3 つの部分に分けて考えられている [15]。第一は熱せられている表面と冷却されている裏面の間の温度勾配により第一結晶全体が歪むことである (Bending)。第二はビームの当たる部分の局所的なこぶの形成 (Thermal bump)、第三は第一結晶の熱膨張による結晶格子定数の変化 (Lattice expansion) であり、これが第二結晶と異なる値になることで問題を引き起こす。この様子を図 2.9 に示す。

Bending と Thermal bump は入射ビームパワー密度  $Q$  及び結晶線膨張係数  $\alpha$  に比例し、



(a)



(b)

図 2.8: 光源からの出射光軸角度が垂直方向に変動した場合の試料点のビーム位置変動 (a)、ビーム強度及びエネルギー変動 (b)。(b) の線 A は (2.11) により計算したビームエネルギーシフトである。

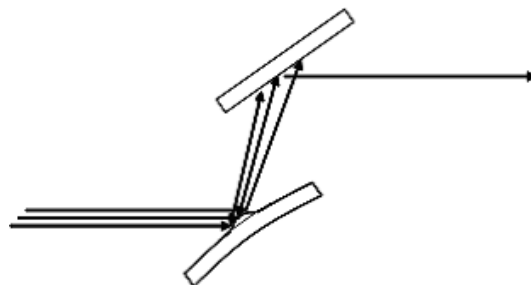


図 2.9: 分光結晶の熱変形とそのビームへの影響

結晶の熱伝導度  $\kappa$  に反比例する [15]。Lattice expansion は  $\alpha$  と温度変化に比例する。これらに対処するために工夫されている方法は主として2つある。一つは結晶の非対称反射を用いることでビームの結晶面における照射面積 (foot print) を大きく取り、このことで  $Q$  を減じ結晶の熱変形を抑制する [16]。もう一つの方式は液体窒素冷却によるものである [17][18]。液体窒素温度では、結晶の  $\kappa$  が小さくなるとともに  $\alpha$  が大きくなる (表 2.1)。これにより温度変化に応じた結晶の変形が微量になる。このことにより結晶の安定性を格段に高めることができる。本章で考察の対象としている平板型の分光結晶を用いるアンジュレータ用分光器は SPring-8 では液体窒素冷却されている。

表 2.1 Si 結晶の  $\kappa$  及び  $\alpha$  の温度依存性

	Si (300K)	Si (80K)
$\kappa$ (W/m/K)	$1.5 \times 10^2$	$1 \times 10^3$
$\alpha$ (1/K)	$2.5 \times 10^{-6}$	$-5 \times 10^{-7}$

結晶熱変形のうちの2つである Bending と Thermal bump を比較した場合、小さなビームサイズに熱負荷が集中するアンジュレータ光では特に Thermal bump の影響が大きい。Thermal bump は局所的な結晶の角度の変化 (slope error) を生み、これが出射光軸角度、エネルギーおよび強度を変化させる。またビームの発散角を広げることで分光器のエネルギー分解能の悪化と、試料点でのビームサイズの増大を引き起こす。Thermal bump の形状の数値的な予測についての研究 [15][19] が諸々なされているが、正確な予測は難しい。実用的には測定された回折強度曲線の半値幅 (FWHM) の理想値からのずれを測定することで、Bending、Thermal bump 及び Lattice expansion すべてが結晶に与える影響を評価する。熱変形した結晶の回折強度曲線の半値幅を  $\delta$ 、Intrinsic な回折強度曲線の半値幅  $\omega_0$  とすると、熱変形に起因する slope error  $\omega$  は

$$\delta = \sqrt{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (2.17)$$

となる。SPring-8 BL29XU の液体窒素冷却型分光器の熱負荷を最大 112 W とした場合、Si333 第一結晶 (ビームエネルギー=18.7 keV) の回折角度巾の理論値 (0.86 arcsec) からのずれは 0.01arcsec 以下であることが確認されている [17]。この場合熱変形による slope error は式 (2.17) から 0.13 arcsec 以下となる。SPring-8 標準型アンジュレーの 1 次光ピークを 12.4 keV に調整した場合、通常のビームライン運転に使用されているフロントエンドスリット 0.5 mm × 0.5 mm での分光結晶への熱負荷は約 50 W となる。この場合結晶の変形は極めて小さい。

ここで SHADOW のマクロである SURFACE を用いて Thermal bump がビームに与える影響につきシミュレーションする。SURFACE は、結晶面を任意の形状に仮想的に加工することができる。図 2. 10 は本節でのシミュレーションで取り扱っているビームの第一結晶表面での foot print である。ビームによる熱負荷でこの foot print の上に gauss 型の Thermal bump が形成されると仮定して SURFACE による結晶面の加工を行う。結晶上

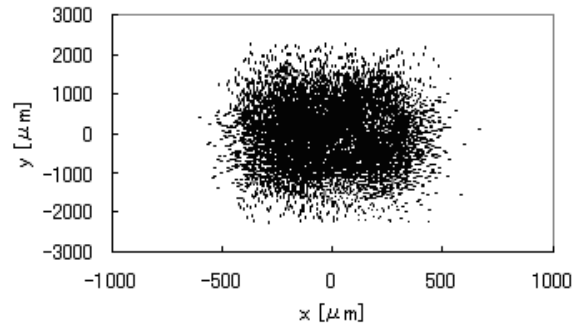


図 2.10: 分光器第一結晶状に形成されるビームのフットプリント。X 方向 FWHM =  $554\mu\text{m}$ 、Y 方向 FWHM= $1984\mu\text{m}$ 。但し X 方向とは結晶上表面上に形成されるビームの射影に対し、結晶表面上で垂直な方向。Y 方向とは射影に平行な方向である。

のビームの foot print の Y 軸方向の FWHM を  $l$ 、Thermal bump の高さを  $H$  とすると、slope error は、

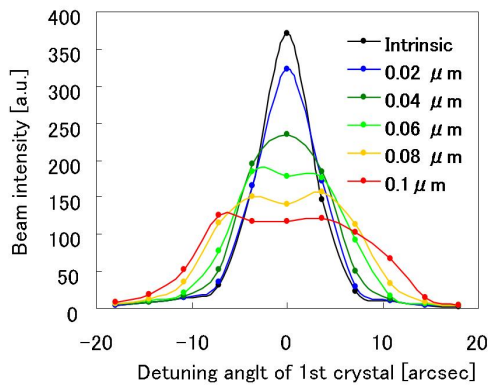
$$\delta = \frac{1.43H}{l} \quad (2.18)$$

と近似できる [20]。(2.18) によると、BL29XU 液体窒素冷却分光器において経験されている  $0.13\text{arcsec}$  の slope error を引き起こす Thermal bump の高さは約  $0.001\mu\text{m}$  となる。

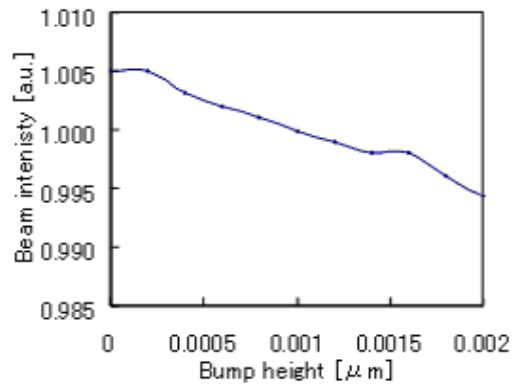
図 2.11(a) は、Thermal bump の高さを変えながら、第一結晶を回転させて得る回折強度曲線を計算したものである。図 2.11(b)(c) は、Thermal bump の高さを変えながら、二結晶平行配置での出射ビーム強度、位置及びエネルギーを計算したものである。高さ  $0.001\mu\text{m}$  の Thermal bump はビーム強度を Intrinsic に比較して  $0.5\%$  減少させ、ビーム位置を  $1\mu\text{m}$  の上に移動させる。ビームエネルギーの変動はシミュレーション精度限界以下である。

ビームシャッターを開き、結晶への熱負荷がゼロから急激に立ち上がると Thermal bump が形成される。その後の Thermal bump 高さの変化は入射ビームパワー密度  $Q$  変化に比例する [20]。蓄積電流の減少に伴う  $Q$  変化により Thermal bump は時間とともに小さくなる。液体窒素冷却分光器の冷却系が適切に機能していれば、 $112\text{W}$  程度の熱負荷においてビーム強度変動  $0.5\%$ 、ビーム位置変動  $1\mu\text{m}$  を超えることは無い。更に Top-up 運転 [2][3] によりこの熱負荷が一定であれば Thermal bump の高さも変動しなくなり、ビーム強度や位置の変動はほとんど無視できる。

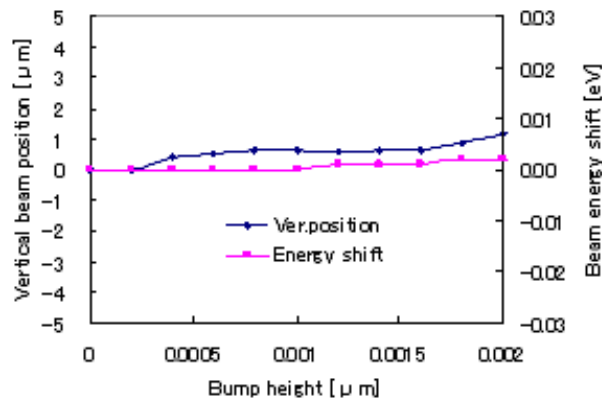
最後に第 3 の熱変形として Lattice expansion につき述べる。図 2.12 は、SHADOW のマクロである BRAGG により第一結晶の Si の格子定数を変化させたものを、X 軸周りに結晶を回転させて得た回折強度曲線のシミュレーションである。第一結晶の格子定数が第二結晶 ( $=5.4309$ ) と一致する場合に二結晶平行の位置 (Crystal angle=0) で回折強度が極大となる。第一結晶の格子定数が変化すると回折強度極大を与える結晶の角度が変化する。一方、回折強度曲線の FWHM は各格子定数において大きく変動していない。図 2.13 に二結晶を平行配置に保ち、格子定数を様々に変化させた場合のビーム強度及びエネルギー



(a)



(b)



(c)

図 2.11: (a) Thermal bump の高さによる回折強度曲線の変化。第一結晶を回転させたときの出射ビーム強度の相対値として示す。二結晶平行配置での出射ビーム強度変化 (b)、位置及びエネルギー変化 (c)。ビーム強度は Bump 無しの値を 1 として規格化して示す。E=12.4 keV Si(111)。

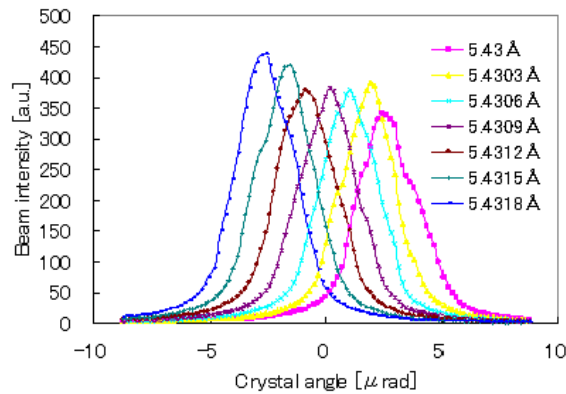


図 2.12: 格子定数と回折強度曲線の関係

ギーを示す。格子定数が 5.4309 から離れるとビーム強度が減少する。またビームエネルギーは格子定数が増えたと低エネルギー側にシフトする。図 2.14 は様々な格子定数の第一結晶を X 軸周りに回転させながら計算した試料点でのビーム位置である。格子定数の変化はビーム位置を変化させない。

BL29XU の液体窒素冷却分光器について有限要素法により計算された結果 [21] では、熱負荷 465W (アンジュレータ GAP=9.6mm) の条件において、第一結晶上のビームの footprint の中央と辺縁での温度差は約 10K である。またビームの当たっていない結晶部分とビームの中心部分があたる部分との温度差は 40K である。40K の温度差での格子定数の変化は  $10^{-5}$  以下となる。これは図 2.13 のデータをもとに計算するとエネルギーシフト  $10^{-2}$ eV 以下、ビーム強度変動 1% 以下となる。ビームシャッターを開くことで結晶への熱負荷が急激に上昇する。これに伴い急激に結晶格子定数膨張が起こる。一定時間後、結晶の温度はある温度分布を呈してはいるが、液体窒素冷却分光器の場合は温度変化が  $\sim 1$ K に制御される [22]。格子定数変化は線膨張係数を比例定数にして温度変化に対して比例の関係となるので、表 2.1 より  $10^{-7}$  程度となり、ビームエネルギーや強度の変動は極めて微小となる。

### 2.3.4 分光結晶の角度変動

もう一つの結晶分光器の不安定性として、結晶格子面配置が理想的な平行配置からずれる場合を考える。例えば液体窒素冷却された結晶をクランプしているホルダーの冷配管の圧力変動などは、容易に格子面の角度を不安定化する [23]。また第一結晶からのコンプトン散乱が結晶ステージを発熱させることで、結晶の設定角度が変化することがある [8]。分光器のエネルギー設定を変更した場合の荷重の変化も結晶の角度変動につながる。第 3 世代放射光の結晶分光器の結晶冷却系は、熱変形による分光能の劣化を防ぐように工夫がこらされている [16-18]。一方、結晶を支持するステージ類なども 0.1K 程度の変動範

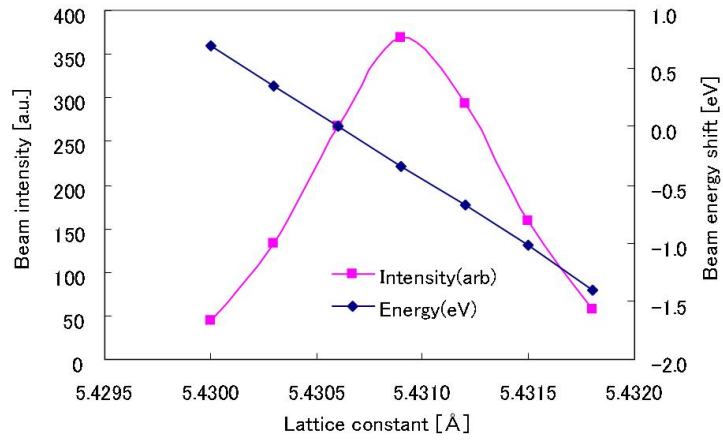


図 2.13: 格子定数とビーム強度及びエネルギーの関係 (但し結晶は平行配置を保った場合。)

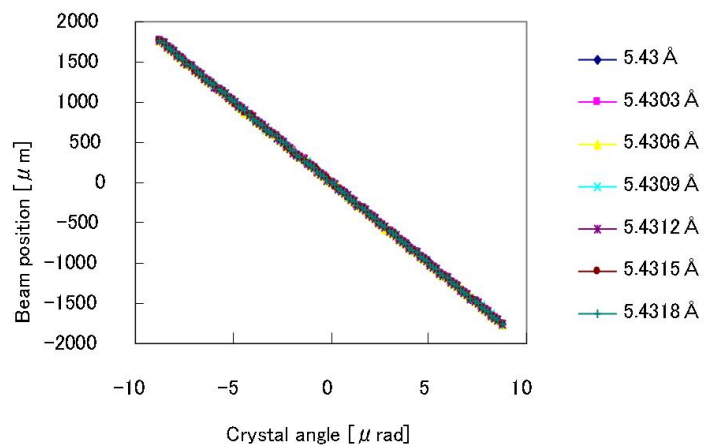


図 2.14: 格子定数とビーム位置の関係

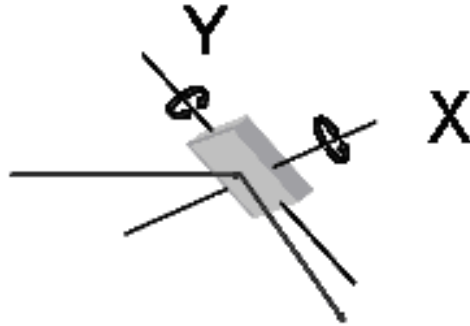


図 2.15: 結晶の角度変動の方向に関する定義

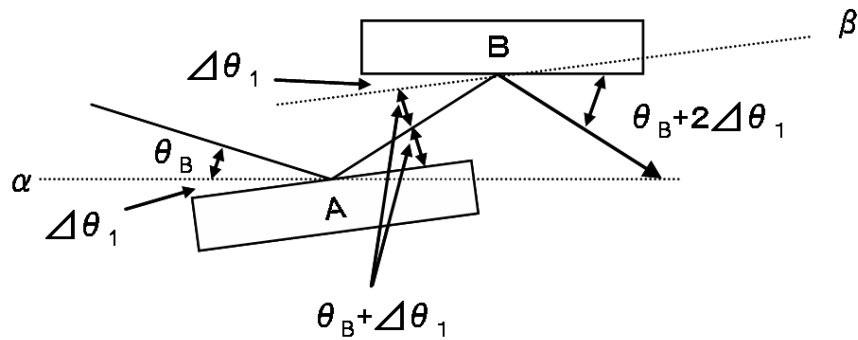


図 2.16:  $\Delta\theta_1$  を回転させるときの出射ビーム角度

囲に温度が安定化される [21]。ステージ類の材質として常温 (293K) での線膨張係数が Si の約 10 倍の  $2.3 \times 10^{-5}/\text{K}$  となるアルミニウムなどが用いられる。ステージの大きさを 20cm とすると、0.1K の温度変化でも  $0.5\mu\text{m}$  程度の線膨張が残存し得る。温度変化に伴う膨張が均一でない場合はこれが結晶の角度を変化させる。例えば分光結晶の長さ 10cm とすれば傾斜として最大  $5\mu\text{rad}$  の slope error となる。結晶が傾く方向についての自由度は均等であるが、有意に出射ビームに影響を与え得るのは図 2.15 に示す X, Y 軸周りの回転である。結晶の面内回転はブラッグ条件を変化させないため出射ビームに影響を与えない。そこで X 軸周り、Y 軸周りの回転だけを取り上げる。

二結晶分光器の第一結晶あるいは第二結晶を X 軸の周りに  $\Delta$  だけ回転させるときの出射ビーム角度は、 $2\Delta$  だけ変化する。また分光器から距離  $L$  だけ下流の試料点のビーム位置  $P$  は式 (2.19) のごとく垂直方向に変動する。

$$P = 2L\Delta\theta \tag{2.19}$$

一方 X 軸周りの回転が出射ビームエネルギーに及ぼす影響は、第一結晶の場合と第二結晶の場合で異なる。図 2.16 は第一結晶の X 軸周りの回転  $\Delta\theta_1$  を示す。第一結晶で Bragg の条件から  $\Delta\theta_1$  だけのずれが生じ、第二結晶で  $2\Delta\theta_1$  だけのずれが生じることになる。第



一結晶へのビーム入射角が  $\Delta\theta_1$  増えると回折波長は  $\lambda_1 = 2d \sin(\theta_B + \Delta\theta_1)$  となる。また第二結晶へのビーム入射角度は  $2\Delta\theta_1$  増えて回折波長は  $\lambda_2 = 2d \sin(\theta_B + 2\Delta\theta_1)$  となる。 $\Delta\theta_1$  が微小であればこの波長変化は  $\Delta\theta_1$  の変化に対し線形となる。これらはそれぞれ回折角度幅を持つので、結局出射ビームの波長が  $\Delta\theta_1$  と  $2\Delta\theta_1$  の平均値  $1.5\Delta\theta_1$  だけブラッグ角からずれた、

$$\lambda' = 2d \sin(\theta_B + 1.5\Delta\theta_1) \quad (2.20)$$

において回折強度のピークが得られる。(2.11) の関係を用いることで、出射ビームエネルギーの変化量  $\Delta E$  として

$$\Delta E = -1.5E\Delta\theta_1 \cot \theta_B \quad (2.21)$$

を得る。

同様の議論で、第二結晶が  $\Delta\theta_2$  だけ Bragg の条件からずれた場合は以下のようになる。第一結晶での回折波長は  $\lambda = 2d \sin \theta_B$  のままである。第二結晶へのビーム入射角度は  $\Delta\theta_2$  ずれて回折波長は  $\lambda_2 = 2d \sin(\theta_B + \Delta\theta_2)$  となる。 $\Delta\theta_2$  が微小であればこの波長変化は  $\Delta\theta_2$  の変化に対し線形となる。これらはそれぞれ回折角度幅を持つので、結局  $\Delta\theta_2$  と  $2\Delta\theta_2$  の平均値  $0.5\Delta\theta_2$  だけブラッグ角からずれた条件での出射ビームの波長  $\lambda'$ 、

$$\lambda' = 2d \sin(\theta_B + 0.5\Delta\theta_2) \quad (2.22)$$

において回折強度のピークが得られる。(2.11) の関係を用いることで、出射ビームエネルギーの変化量  $\Delta E$  として

$$\Delta E = -0.5E\Delta\theta_2 \cot \theta_B \quad (2.23)$$

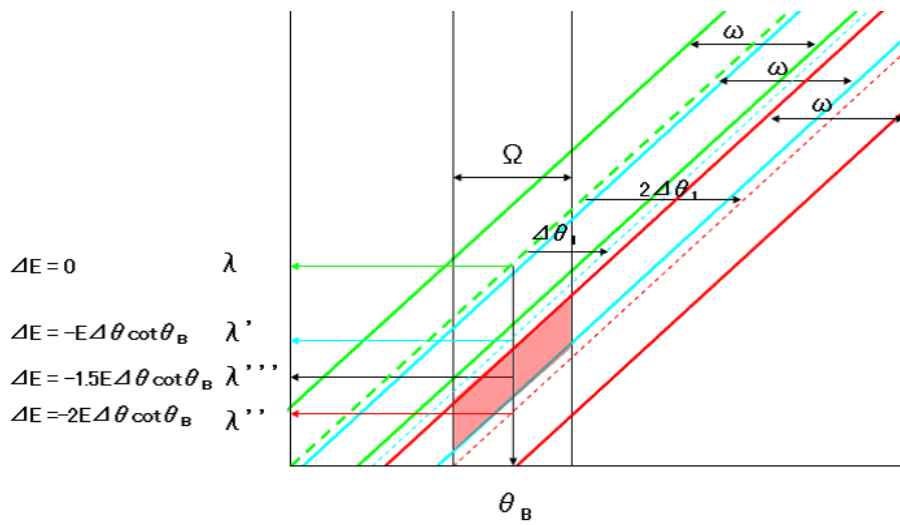
を得る。式 (2.21) 及び (2.23) から、第一結晶の X 軸周りの回転のほうが第二結晶の同様の回転よりもエネルギー変化率が 3 倍となることがわかる。これらの関係を DuMond 図 [8] により図 2.17(a)(b) に示す。

一方、ビーム強度は、X 軸周りの結晶の回転により回折強度曲線を描く。この場合 2 枚の結晶の相対角度がゼロとなる平行の配置においてビーム強度極大となる。ビーム位置、エネルギー、強度と X 軸周りの結晶の回転関係を SHADOW により計算したものを図 2.18 に示す。ビーム位置とエネルギーの結晶回転角に対する変化量は (2.19)(2.21)(2.23) で予想される傾斜とよく一致する。但し出射ビーム位置及びエネルギーの傾斜が (2.21)(2.23) と逆なのは SHADOW における座標系の定義によるものである。

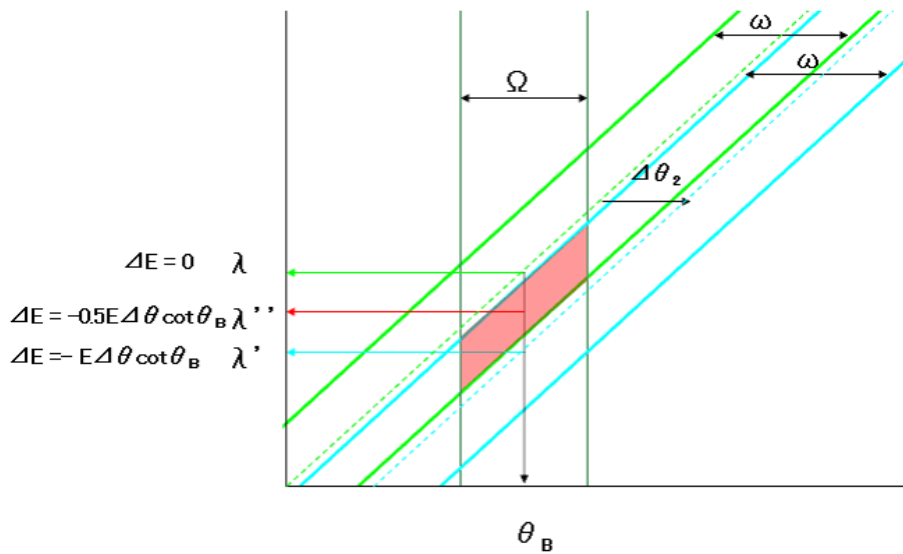
分光結晶を Y 軸の周りに  $\Delta\theta$  だけ回転させる時の出射ビームについては図 2.19 により考察する。結晶格子面は Y 軸周りの回転  $\Delta\theta$  により面 1 から面 2 に移る。S0 は面 1 にブラッグ条件を満たす角  $\theta_B$  で入射するビームを示す単位ベクトルとする。図の関係に従い、S0 は面 2 に対して  $\theta_{B'}$  で入射する。このとき結晶格子定数を  $d$  とすると、回折波長  $\lambda$  は、

$$\lambda = 2d \sin \theta_{B'} = 2d \sin \theta_B \cos \Delta\theta \quad (2.24)$$

となる。この回折波長変化は  $\Delta\theta$  が小さいときは極めて小さい。例えば  $\Delta\theta$  が  $100\mu\text{rad}$  の場合では、 $5 \times 10^{-9}$  しか変化しない。このことにより分光器からの出射ビームエネルギー

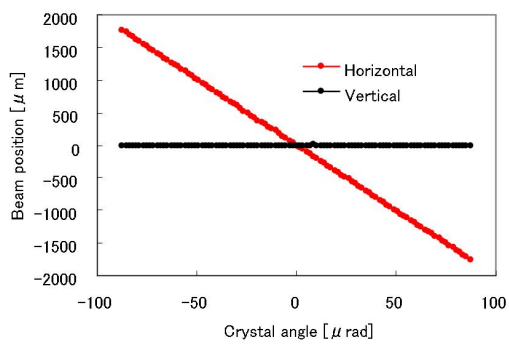


(a)

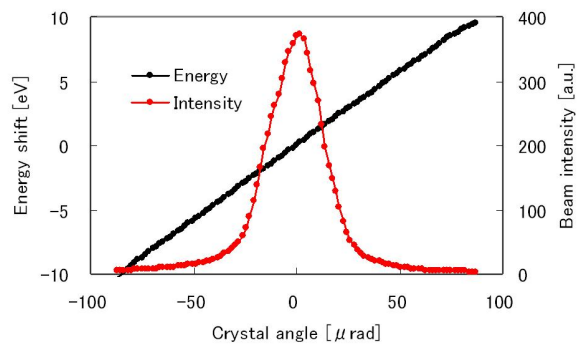


(b)

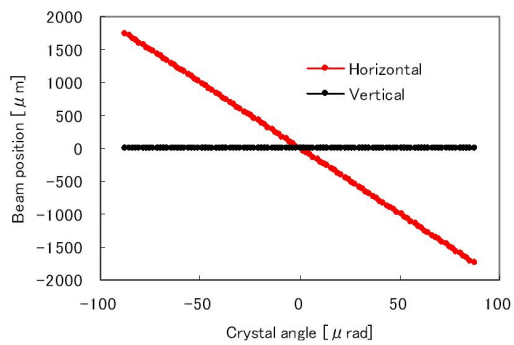
図 2.17: (a) 第一結晶の X 軸周りの回転  $\Delta\theta_1$  又は (b) 第二結晶の X 軸周りの回転  $\Delta\theta_2$  が分光器からの出射ビームエネルギーに及ぼす影響。  $\Omega$  : 入射ビーム角度発散、  $\omega$  : 回折角度幅、  $\lambda$  : 二結晶平行配置での分光器からの出射ビーム波長。(a)  $\lambda$  : 第一結晶からの出射ビーム波長、  $\lambda''$  : 第一結晶が  $\Delta\theta_1$  回転した場合の第二結晶のブラッグ条件から決まるビーム波長、  $\lambda'''$  : 二枚の結晶のブラッグ反射により最終的に得るビーム波長。(b)  $\lambda'$  : 第二結晶が  $\Delta\theta_2$  回転した場合の第二結晶からの出射ビーム波長、  $\lambda''$  : 二枚の結晶のブラッグ反射により最終的に得るビーム波長。



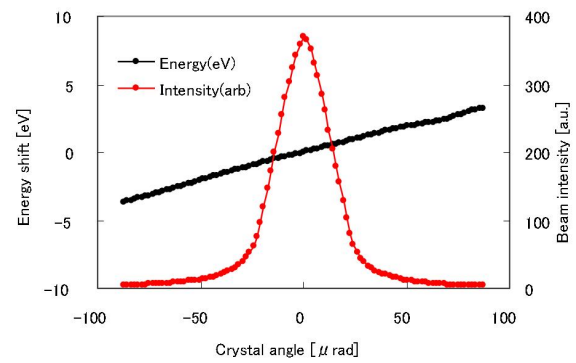
(a)



(b)



(c)



(d)

図 2.18: 第一結晶を X 軸の周りに回転させた場合の試料点でのビーム位置変動 (a)、ビームエネルギー及び強度変動 (b)、第二結晶を X 軸の周りに回転させた場合の試料点でのビーム位置変動 (c)、ビームエネルギー及び強度変動 (d)。

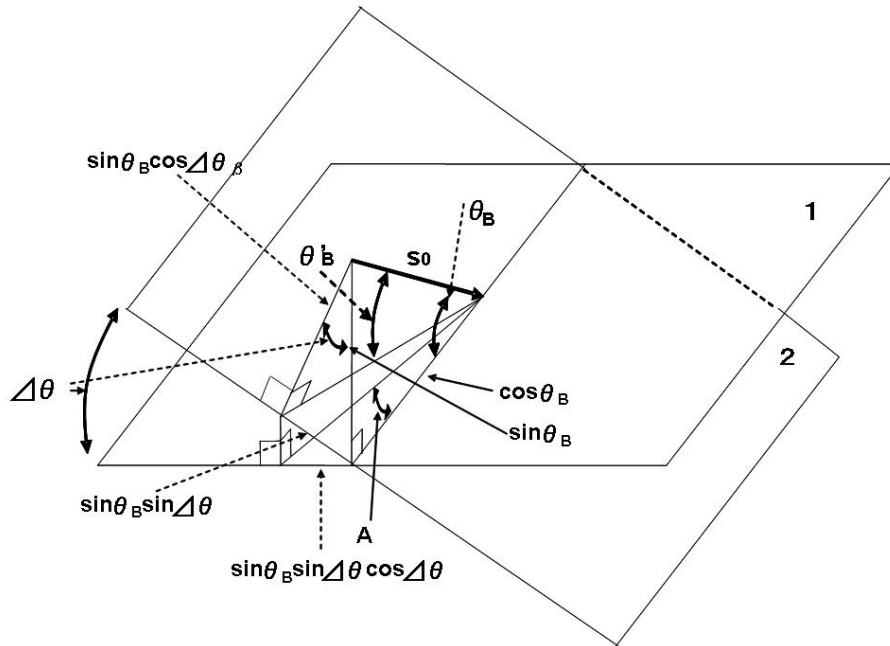


図 2.19: 結晶の Y 軸周りの回転がブラッグ条件と出射ビーム角度に与える影響

の変動は極めて少ない。また分光器のエネルギー分解能に対して微小のエネルギー変化量でしかないので、出射ビーム強度変動も微小となる。

Y 軸周りの回転に伴うビーム位置変動については図 2.19 の角 A について考察することで見積ることができる。A は、

$$\tan A = \frac{\sin \theta_B \sin \Delta \theta \cos \Delta \theta}{\cos \theta_B} = \sin \theta \cos \Delta \theta \tan \theta_B \quad (2.25)$$

の関係を満たす、 $\Delta \theta$  が小さいときは

$$A \sim \Delta \theta \tan \theta_B \quad (2.26)$$

となる。これにより、分光器から試料点までの距離を L とすると、2 つの結晶のうちの片方のみが Y 軸周りに回転する場合の出射ビーム位置は、

$$P' = 2L\Delta \theta \tan \theta_B \quad (2.27)$$

だけ水平方向に移動する。E = 12.4keV を与えるブラッグ角は 9.18 ° であり  $\tan 9.18^\circ$  は 0.16 となる。結晶の Y 軸周りの回転は X 軸周りの回転に比べて 0.16 倍の影響しか与えない。

ビーム位置、エネルギー、強度と Y 軸周りの結晶の回転の関係を SHADOW により計算したものを図 2.20 に示す。ビーム位置の変化は (2.27) とよい一致を示す。ビーム強度・エネルギーについては (2.24) の関係に基づき極めて微小な変化量となる。

以上を総合的にみると、ビーム位置、ビーム強度、エネルギーに影響を与える分光結晶の回転は X 軸周りの回転である。

先述の通り、間接熱負荷その他の影響により  $5 \mu\text{rad}$  程度の結晶の角度変動が起こり得る。この時、分光器 試料間を  $10 \text{ m}$  とすれば、(2.19) に従い  $100 \mu\text{m}$  のビーム位置垂直方向変動が引き起こされる。これはビーム位置  $10 \mu\text{m}$  以下の安定度を旨とする本研究においては致命的である。またこの角度変動が例えば第一結晶において発生した場合、ビームエネルギーは (2.21) に従い  $0.6 \text{ eV}$  の変動となる。これは  $\text{Si } 111(E=12.4\text{keV})$  のエネルギー分解能  $1.61\text{eV}$  からすると有意である。またビーム強度は回折強度のピークと比較して  $10\%$  のロスとなる。これらは光源の角度変動、結晶の熱変形が与えるビームへの影響と比較して有意に大きい。

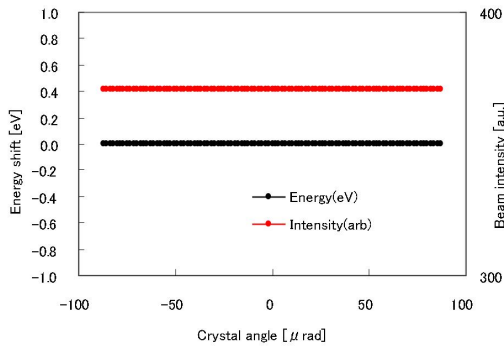
更に付け加えると、ビーム位置、強度、エネルギーは、すべて二結晶の相対角度  $\Delta\theta$  の関数である。従って、結晶の角度不安定により引き起こされるビーム位置、強度、エネルギーの変動には互いに相関があると考えられる。逆に考えると、この相関が存在すれば、ビーム不安定性の主原因は結晶の角度配置の不安定性である。

## 2.4 試料点におけるビーム不安定性の解決方針

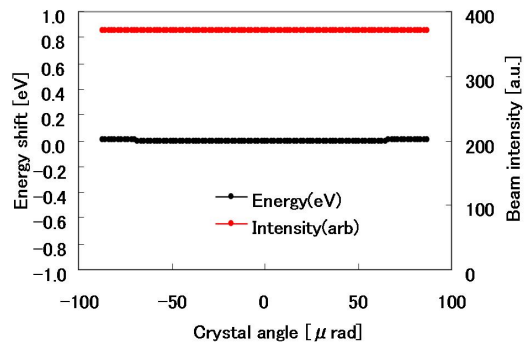
前節までの議論をまとめる。光源と分光結晶の角度は試料点のビーム位置に影響を与える。その影響は、分光結晶の角度によるもののほうが有意に大きい。この分光結晶の角度はビーム位置だけでなく、ビーム強度とエネルギーにも有意な影響を及ぼす。一方、結晶の熱変形は熱負荷対策が十分であればビームに与える影響が微小である。従って、分光結晶の角度変動が試料点のビーム不安定性の最大の要素であると考えられる。このことを裏付けるためには、試料点において測定されるビーム位置、強度、エネルギーに相関が見られることを確認する必要がある。

以上をもとにビーム安定化の方針を考える。まず試料点でのビーム位置、強度及びエネルギーの相互関係を計測する。ここではまずビーム位置と強度の変動の相関に着目する。ビームエネルギーをここでの目的に合致するように精密に測定しようとするれば高分解能のアナライザ結晶などを用いることになり、実用的ではない。ビーム強度と位置の相関測定を行う場合、分光器の回折強度をピークの  $50\%$  ほどに detuning する。回折強度のピークよりも回折強度曲線の傾斜が大きい detuning のほうが、結晶角度変動にともなうビーム強度変動が感度よく検出できる。同時測定されたビーム位置垂直方向変動とビーム強度変動に相関がみられた場合、前述の議論に基づき、ビーム不安定性の主要原因は分光結晶の角度変動であると予想される。次に、ビーム位置または強度を安定にするように分光結晶の X 軸周りの角度制御を行う。その結果、ビーム強度と位置が同時に安定化するならば、仮定の正しさが証明される。もしも、ビーム位置と強度の変動に有意な相関が見られなかった場合は、分光結晶の角度変動に次いでビーム位置に影響を与えられ光源の動きについて考慮する必要がある。

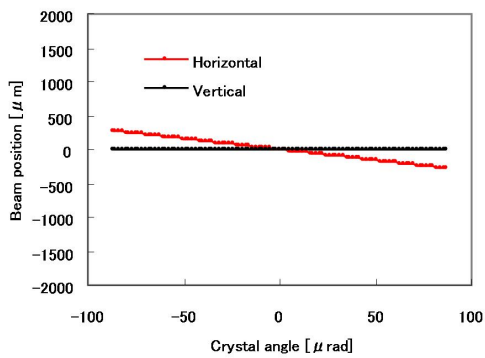
さて、ビーム強度と位置に相関が見られた場合には分光結晶の角度制御を行うと述べた。従来から利用されてきた分光結晶の角度制御方法として、ネガティブフィードバッ



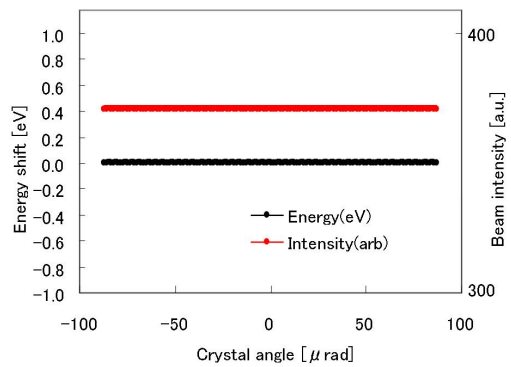
(a)



(b)



(c)



(d)

図 2.20: Y 軸の周りに第一結晶を回転させた場合の試料点でのビーム強度、及びエネルギーシフト (a)、Y 軸の周りに回転させた場合の試料点でのビーム強度及びエネルギーシフト (b)。同様の操作を第二結晶について施した場合 (c)(d)。但し (a)(c) で回転角度に依存した出射ビームの水平方向移動の向きが逆なのは、S HADOW における座標系の定義によるものである。

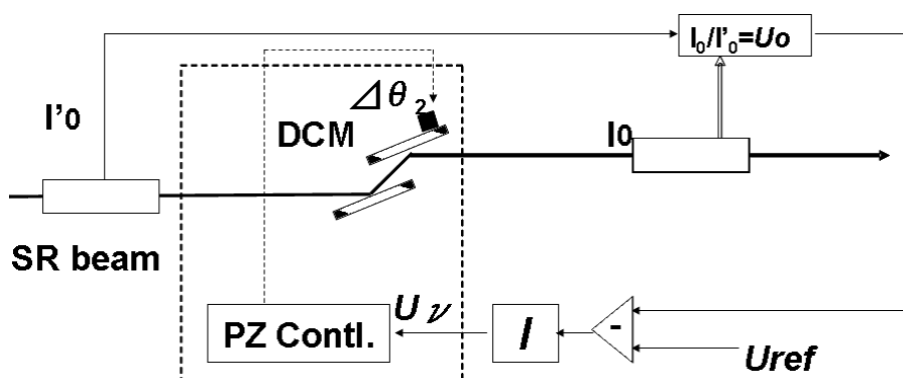


図 2.21: 分光器フィードバック制御によるビーム強度の安定化

グループを利用するものがある [24][25]。ビーム強度を制御量とし、これを目標値に安定化するように工夫されたフィードバック制御の一つとして Krolzig(1983 年)らにより報告された、分光器下流の放射光 X 線ビーム強度の安定化手法 monochromator stabilization (MOSTAB) [9][10] と呼ばれる方法がある (図 2.21)。

この手法は第二世代放射光リングで偏向部の放射光利用において開発されたものであり、二結晶分光器を detuning して高次光の割合を減らす場合に、二結晶の相対角度を安定化することが主目的である。これは先ず、分光器上流と下流の X 線ビーム強度  $I'_0$  及び  $I_0$  を測定し、 $I_0/I'_0$  が一定になるように分光器の第二結晶の  $\Delta\theta$  をフィードバック制御する。図 2.21 の I で示された部分は積分器でありこの出力  $U_\nu$  は、

$$U_\nu(t) = \frac{1}{T_i} \int_{-\infty}^t (U_{ref} - U_0(t')) dt' \quad (2.28)$$

で与えられる。ここで  $T_i$  は積分回路時定数、 $U_{ref}$  は X 線ビーム強度目標値、 $U_0(t')$  は時刻  $t'$  の X 線ビーム強度である。出力  $U_\nu$  を piezoelectric アクチュエータに与えると、分光器第二結晶のブラッグ角が piezoelectric アクチュエータにより微調整される。これにより分光器のエネルギー設定が detuning された一点 (図 2.22) に安定化する。こうすることでビームエネルギーの安定化とともに、ビーム強度の安定化が実現される。MOSTAB は X 線定在波、高分解能二結晶トポグラフィー、EXAFS および XANES などの測定に適用された [10]。

この方法はいくつか欠点を持っている。線形フィードバックシステムでは、制御対象の伝達関数に傾斜が存在しない極大点に系を安定化することができない。そこで必ず MSOTAB では結晶を detuning しなくてはならない。分光器を detuning するとビーム強度を最大にして用いることができない。これは高輝度を特徴とする第三世代アンジュレータ光を生かして使い切ろうとする立場に反する。さらに、フィードバック制御がエネルギースキャンの全範囲で成立するためには、図 2.23 の B つまり  $I_0$  検出感度の低部分に目標値を設定する必要がある。その結果、エネルギースキャン範囲全体での積分ビーム強度が著しく損なわれる。更に図 2.23A 点と B 点ではビーム強度一定を与える detuning angle:  $\Delta\theta$  が異なる。従ってエネルギースキャンの間に  $\Delta\theta$  がシフトし、それに応じてビーム位置及びエネルギーが (2.19)(2.21)(2.23) に従って変動する。広いエネルギー範囲をスキャンする

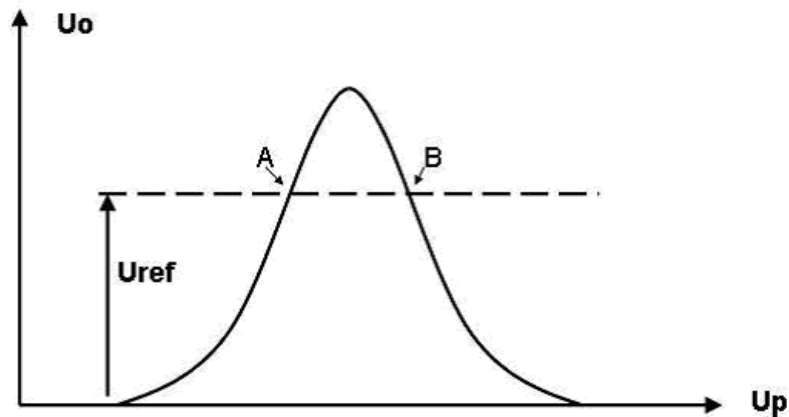


図 2.22: ピエゾ制御電圧  $U_p$  をスキャンして得られる回折強度  $U_o$  曲線の模式図。MOSTAB は A か B の点のどちらかにビーム強度を安定化させて目標値  $U_{ref}$  を実現する。

EXAFS 測定などでは、エネルギー設定、ビーム位置が大きくシフトしてしまう。

もう一つの問題として、ビームが高真空のビームパイプを通過するビームライン輸送チャンネル部には、分光器上流の強度  $I_0$  を測定する透過型ビーム強度モニターの設置が困難である。放射光 X 線ビーム強度測定に頻繁に用いられる気体電離箱はここでは用いることができない。つまり、この部位にビーム強度モニターを必要としないシステムが望まれる。

更に MOSTAB では第二結晶の角度を調整することで第一結晶に平行を合わせているが、(2.21) (2.23) から分かるように二結晶分光器では第二結晶の微小な角度変動は第一結晶の微小な角度変動よりも出射ビームエネルギーを変動させにくい。つまり結晶の平行度の調整においてはむしろエネルギーの基準とすべきは第二結晶である。第一結晶の角度を、固定された第二結晶を基準として調整するほうが妥当である。

以上の議論から MOSTAB の問題点を克服できる制御方式として、ここではビーム位置を制御量とするフィードバックシステムを提案する。図 2.24 はビーム位置、ビーム強度と二結晶平行度の関係の SHADOW によるシミュレーションである。ここでは分光結晶 Si 111 ( $E=12.4$  keV) に SPri ng-8 標準型アンジュレータ光を入射した場合の、分光器から 10 メートル下流でのビーム位置、強度を計算した。ビーム強度は二結晶平行配置において極大となるが、この点を目標値することが、MOSTAB によるフィードバック制御では不可能であることを上に述べた。一方、ビーム位置に着目すると結晶の detuning angle が  $-100\mu\text{rad} \sim +100\mu\text{rad}$  の間で常に一定の傾斜をもっている。線形フィードバックは系の伝達関数が傾斜を持つところであれば目標値を設定して安定化することができる。即ちビーム位置を制御量とした場合、目標値の選択の自由度は高い。図 2.24 の矢印で示すように、回折強度の最大を与えるように二結晶を平行にした状態で、その時の出射ビーム位置を一定にするようにフィードバック制御を行うことも可能である。分光器の角度変動が



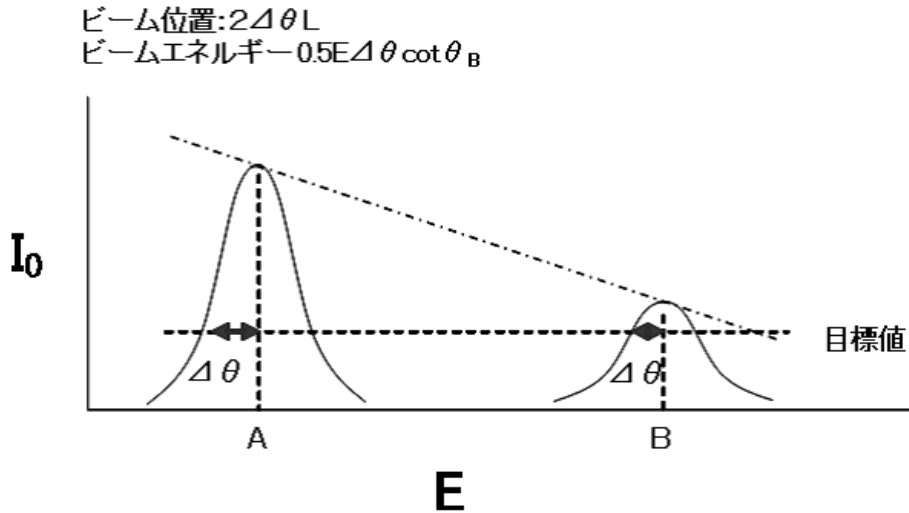


図 2.23: ビーム強度 ( $I_0$ ) を一定にするタイプのフィードバック制御の問題点。

ビーム不安定の最大原因であるならば、ビーム位置を制御量とするフィードバックはビーム強度を同時に安定化することになる。しかもビーム強度を回折強度の極大に保ち、光源の高輝度を最大限に生かすことができる。その上、回折強度曲線の極大は傾斜ゼロであるため、多少の結晶の角度変動が残ってもビーム強度変動が少ない。更に二結晶が平行配置であるため、MOSTABに見られたビームエネルギー及び位置のシフトが無くなる。つまり分光器のエネルギースキャンに非常に都合が良い。このようにビーム位置を安定化するフィードバック制御を用いると数多くのメリットがある。

表 2.2 にビーム強度を制御量とする MOSTAB とビーム位置を制御量とするフィードバック制御の比較をまとめる。MOSTAB は回折強度曲線のピークでフィードバックをかけられないとはいえ、でくりだけビーム強度のピーク値付近に目標値を設定することは可能である。しかしこの場合、ノイズなどの外乱により極大の反対側の傾斜に動作点が一時的に移ることがあると系が発散する。その結果ピエゾアクチュエータは最大限に伸張もしくは短縮し、二結晶は平行配置から大きく離れた角度まで非平行化しビーム強度がゼロとなってしまう。これにより利用実験が中断し、ピエゾアクチュエータに負担をかけ素子寿命を短縮することにつながる。そこで MOSTAB では、例えばビーム強度を回折強度極大の 80 % 以下に detuning で減じた点を実用的動作点とする、といった運用が必要となる。この値 80 % は一つの目安であり、実験ステーションのノイズ環境の状態に応じて適当に調整する必要がある。ビーム位置フィードバックの場合はこの問題から自由になり、回折強度の極大値を得ることができる。ビームエネルギーと位置は MOSTAB では第二結晶の detuning により (2.19) (2.23) に従いシフトする。しかしビーム位置フィードバックでは、このシフトは無くなる。また MOSTAB ではビーム強度を分光器前後でモニターする必要があり、特に真空中に設置する必要がある分光器前のビーム強度モニターの取り扱いが難しい。しかし、ビーム位置フィードバックではこの真空中のビーム強度モニター

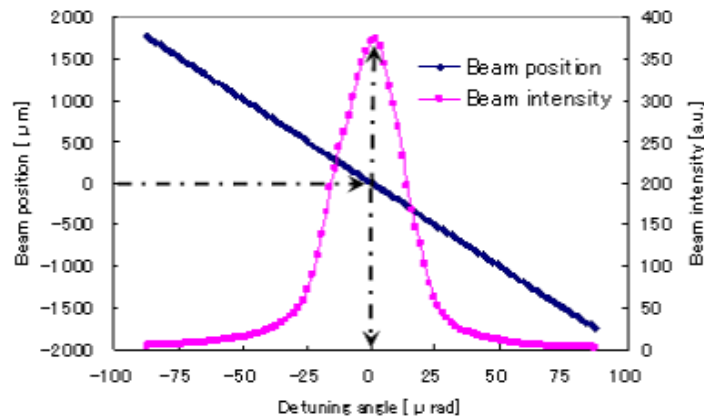


図 2.24: ビーム位置、ビーム強度と二結晶平行度の関係。第一結晶を X 軸周りに回転させた場合のビーム位置、強度を SHADOW によりシミュレーションした。Si 111。E=12.4 keV。

を用いずに構成することができる。ただし、この代わりにビーム位置モニターが必要となる。ビーム位置モニターは分光器の角度変動を感度よく検出するため分光器から 10 メートル程度距離をとって設置する必要がある。また  $\mu\text{m}$  オーダーのビーム位置安定性を実現する上では、ビーム位置モニターの位置分解能としてサブミクロンが必要となる。

表2.2 MOSTAB とビーム位置フィードバックの比較

	ビーム強度フィードバック (MOSTAB)	ビーム位置フィードバック
結晶の配置	Detuning	平行
ビーム強度	less than 80 % of max.	Max.
ビーム位置	$2 \Delta\theta L$	定位置
エネルギーシフト	$0.5E\Delta\theta \cot \theta_B$	0
ビーム強度モニター	光器前後)	-
ビーム位置モニター	-	分光器下流 ~ 10m
エネルギースキャン	ビーム位置・エネルギーがシフト	OK (定位置出射精度に依存)

これらフィードバックシステムを運用する上で重要な点を最後に付け加える。2.3.3 述べたとおり、結晶温度が平衡に達すると熱変形に伴うビーム不安定性は無視できる。しかしビームシャッター開直後の急激な熱負荷の増大、あるいはアンジュレータのエネルギー設定を大きく動かした場合などには、熱平衡からずれることになる。この場合には結晶温度の急激な変動があり図 2.12 に見るように格子定数の増減に伴い回折強度曲線が変化する。この過渡状態において分光器の出射ビーム位置を一定に保つフィードバックをかけても、ビーム強度の同時安定化は実現できない。一定時間後熱平衡に達したあとで、回折強

度を測定し、そのピークを与える二結晶相対角に設定したうえで、出射ビーム位置を安定化するという運用を行う必要がある。

## 2.5 まとめ

第3世代放射光のアンジュレータビームの位置、強度及びエネルギーを不安定にする要素として、光源の角度変動、二結晶分光器分光結晶の熱変形、及び分光結晶の角度変動について検討した。

電子ビーム軌道のデータより SPring-8 では水平、垂直方向の光源の角度変動は  $\sim 0.04\mu rad$  である。この角度変動は光源から 50m 下流の試料点において水平垂直に  $\sim 2\mu m$  のビーム位置変動を与える (peak to peak で  $\sim 10\mu m$ )。光源角度変動は二結晶分光器分光結晶へのビーム入射角変動となるが、これにより引きこされる分光器出射ビームエネルギー変動は、Si111、 $E=12.4$  keV において標準偏差で 0.003 eV (peak to peak で 0.02eV) と極めて小さい。アンジュレータスペクトルの1次光はこの変化量に比較すると十分にブロードである。従って分光器出射エネルギー変動による、光源のスペクトルから切り出されるビーム強度の変動は無視できる。

二結晶分光器の熱変形である、Thermal bump と Lattice expansion によるビーム位置、強度及びエネルギーの変化は、急激に熱負荷が上昇する結晶へのビーム導入直後に集中する。この変化量は液体窒素冷却などにより結晶熱負荷対策が十分に施されている場合は小さく抑制される。その上、結晶が温度平衡に達して温度変化が 1K 程度に維持される条件ではビーム位置、強度及びエネルギー時間変動は更に微小となり無視できるものとなる。

分光結晶の角度変動は、結晶を支持するステージ類などのメカニカルな不安定性によるものと考えられる。これは冷却配管の圧力変動、間接熱負荷、分光器の駆動に伴う荷重の変動その他により引き起こされる。この角度変動は  $5\mu rad$  程度にもなり得る。この角度変動が結晶のブラッグ角周りで発生すると、Si111、 $E=12.4$  keV の条件において試料点で  $100\mu m$  のビーム位置変動、10%のビーム強度変動、0.6eV のビームエネルギー変動を引き起こし得る。更に強度、位置およびエネルギーの変動は二結晶の平行配置からのずれ角を通じて互いに相関がある。

以上の考察により試料点のビーム不安定性を引き起こす最大の原因は二結晶平行配置のメカニカルな不安定性であると予想した。これにより、ビーム不安定の解決のための方針を以下のように提案する。

まず試料点においてビーム強度とビーム位置の同時測定を行い、これらの時間変動に相関があるかどうかを調べる。相関が見られた場合、主要なビーム不安定の原因は分光結晶のメカニカルな角度変動と結論する。この場合、ビーム強度もしくはビーム位置を制御量として、このどちらかを一定にするようにフィードバック制御を通じて分光結晶角度を調整する。このことによりビーム位置、強度及びエネルギーがすべて安定化する。

ビーム強度を制御量としたフィードバック制御として従来から知られた MOSTAB があ

る。この方法は二結晶平行配置を動作点とすることができないため、出射ビーム強度のロス、ビームエネルギーとビーム位置の設定値からのシフト(特に分光器のエネルギースキャン中の出射ビームエネルギー及び位置の連続的な変位)などの問題がある。一方、ビーム位置を制御量とするフィードバックはこれらの問題を克服できる。本研究ではビーム位置を制御量とするフィードバックシステムの実用化を行うことにする。ビーム位置を制御量とするフィードバックシステムを構成するには、ビーム位置をサブミクロンで測定するビーム位置モニターの開発が必要となる。

分光器フィードバックによるビーム位置の安定化は、ビーム入射などに伴い分光結晶温度が急激に変動する間はビーム強度の同時安定化をもたらさないと考えられる。結晶が熱平衡に達した後に制御を開始することでこの問題を回避できる。

試料点におけるビーム強度とビーム位置の同時測定で、これらに相関が見られない場合は、試料点ビーム位置に影響を与えうるもう一つの要素である光源の角度変動につき調べていく必要がある。

# 第3章 分光器フィードバックによる 放射光 X 線ビームの安定化

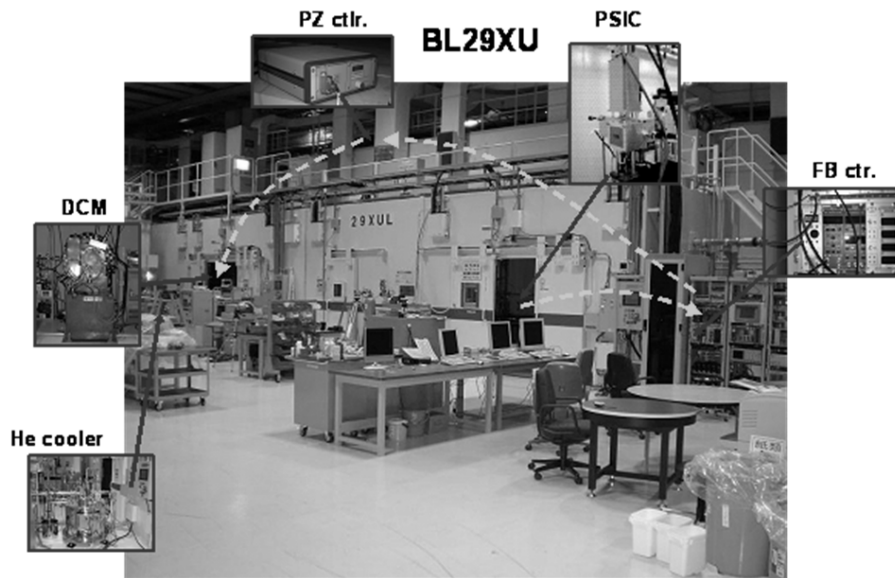
## 3.1 はじめに

第2章で論じたビーム安定化の方針に則り、アンジュレーを光源とするビームラインの分光器下流試料点においてビーム強度とビーム位置の同時測定を行う。結果の解析に基づき、ビーム位置を制御量とするフィードバック制御を行う。これによりビーム位置とビーム強度同時安定化が実現することを確認する。更に、光源の角度変動を敏感に検出するフロントエンドのXBPMを用いて、光源とフィードバックシステムの制御成績の関係につき検討する。得られた結果を総合して、本研究で開発した分光器フィードバックシステムのビーム安定化の性能を示す。

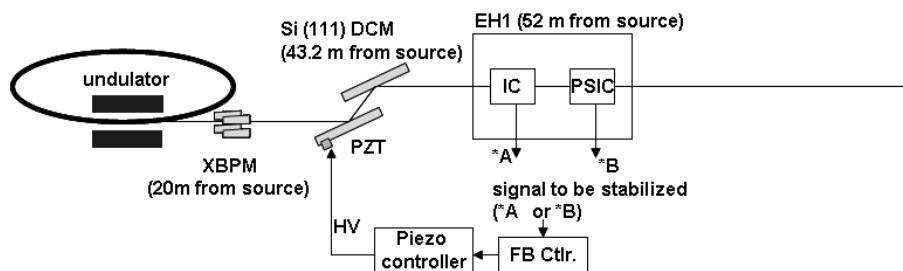
## 3.2 測定システム

測定は理化学研究所の専用ビームライン BL29XU[42]で行った。光源は SPring-8 標準真空封止アンジュレータである。フロントエンドスリットは光源から 28.9 m に位置し、その開口は  $0.5 \times 0.5 \text{ mm}^2$  である。SPring-8 標準型分光器が光源から 43.2 m の光学ハッチにあり、対称配置 Si(111) 結晶を用いる。分光結晶は三つの 250 W ヘリウム冷凍機を用いた閉ループ液体窒素で間接冷却されている。このビームラインは通常の実験ハッチ (EH1、EH2) 以外に、光源から 1km 離れた別棟に実験ハッチ 3 (EH3) が存在することである。ここでは EH1 を用いた測定を行う。

図 3.1 に BL29XU に構成したフィードバックシステムを示す。フィードバック調節器 (FB ctr.) は EH1 の前に設置し、必要に応じて EH1 内の電離箱 (IC)、位置敏感方電離箱 (PSIC) 信号を制御量として、フィードバックシステムの構成を変えた。分光器二結晶の平行配置のからのずれはビーム位置の垂直方向の変動を引き起こすので、PSIC は垂直方向のビーム位置を測定するように設置した。IC と PSIC は光源から約 52 m に設置した。ビーム強度を安定化する場合は、IC の信号を制御量とし (I o モード)、ビーム位置を安定化する場合は PSIC の 2 つの電極からの信号をビーム位置演算処理 (4.2) によりビーム位置信号としたものを制御量として (BPM モード) 用いた。フィードバック調節器は、制御量と目標値との差 (偏差) をもとに P I D 制御演算 [28] を行い、分光器第一結晶の  $\Delta\theta_1$  を調整するための Piezo 素子制御電圧を発生する。この電圧は Piezo controller :



(a)



(b)

図 3.1: BL29XU におけるフィードバックシステム。(a) 現場の様子、(b) システム図

E-507(PI-polytec.) に印加され、Piezo stack : P-410.K010(PI-polytec.) を駆動する。印加電圧と  $\Delta\theta_1$  駆動角度の関係は、 $2.4 \text{ arcsec}/1\text{V}$  である。フィードバック調節器についての詳細は第 4 章に述べる。

第一結晶の角度を微調整する piezo 素子の取り付け点につき模式的に示しておく (図 3.2)。ここで提唱するフィードバック手法は第一結晶のブラッグ角周りの回転を調整する。SPring-8 標準型分光器は、第一、二結晶ともに、パルスモータによるブラッグ角周りの角度微調整機構を有する。パルスモータの回転をボールネジによりステージを押しす力に変換し、これにより結晶のビーム入射点を回転中心としてステージごと駆動する。このボールネジ先端のステージを押し込む部分に piezo スタックを取り付けることで、ブラッグ角の piezo 素子による微調整が可能となる。

図 3.1 のとおりこの測定では二結晶分光器だけが唯一の光学素子である。従ってビーム不安定性の原因としては二結晶分光器と電子ビーム (光源) だけがあり得る。分光器上流

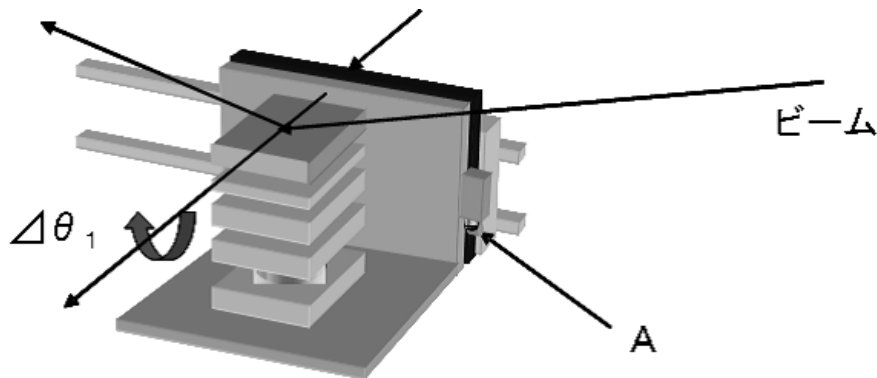


図 3.2: SPring-8 標準型二結晶分光器における第一結晶のブラッグ角の微調整 ( $\Delta\theta_1$ ) 機構の模式図。赤で示された結晶表面のビームスポット部を回転中心としてブラッグ角の微調整を行う。緑で示されたステージの端 A 部にパルスモータが取り付けられ、その回転が褐色で示されたボールネジに伝えられる。ボールネジは青で示すステージを押すことで、相対的に緑で示すステージが回転する仕組みとなる。この褐色で示すボールネジ先端 (青のステージの内部) にピエゾスタックを取り付けることで  $\Delta\theta_1$  の調整をピエゾ素子駆動により行うことができる。

の光源の動きを観察するために基幹チャンネル部の X 線ビーム位置モニター (Front-end x-ray beam position monitor: FE-XBPM)[6] の信号をモニターした。FE-XBPM は光源から 20m 下流の基幹チャンネル (front-end) 部に設置されている。アンジュレータと FE-XBPM の間には X 線ビーム位置に影響を与える装置は何も介在しないので、FE - XBPM の信号は光源の動きを反映すると考えられる。FE-XBPM は GAP 依存性のためにその測定値の絶対値についての信頼性が低い、本測定のごとくアンジュレータ GAP 値を固定で用いる場合においてビーム位置の相対的な動きの指標とはなり得る。

光源アンジュレータの 1 次光エネルギーと二結晶分光器のエネルギーは 10 keV とした。この実験は蓄積リングが Top up 運転を行っている状態で行われた。SPring-8 の Top-up 運転では、蓄積電流の時間変動は 0.1 % 以下となる。

### 3.3 測定結果

図 3.3 は EH のビーム位置垂直方向と強度を 1500 秒間同時測定した結果である。ここではフィードバック制御は行わず、図 3.1 の A や B の信号はフィードバック調節器に入力されない。またピエゾコントローラには一定電圧が入力され、ピエゾアクチュエータは一定の長さを保っている。二結晶分光器の  $\Delta\theta_1$  を出射ビーム強度の最大の 50 % を与えるように detuning し、 $\Delta\theta_1$  の不安定性に伴うビーム強度変動が大きくなる条件で測定を行った。測定されたビーム位置と強度は同期して変化し、明らかな相関を示す。図 3.4 にこれらのデータを相関図として示した。結合係数  $R^2=0.7015$  の強い相関が得られた。こ

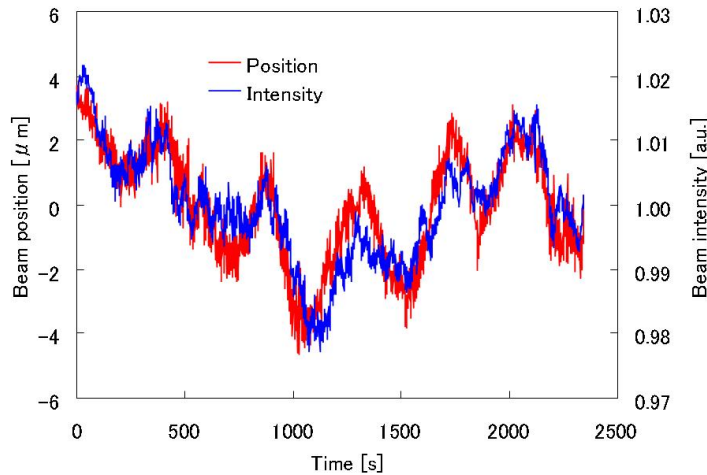


図 3.3: ビーム位置変動と強度変動の同時測定。BL29XU。アンジュレータ 1 次光ピークエネルギー 10keV。分光器設定エネルギー  $E=10$  keV, Si111。ビーム強度  $=8.8 \times 10^{-3}$ 、ビーム位置  $=1.74\mu m$

これは、測定された試料点のビーム位置変動とビーム強度変動は共通の原因により引き起こされていることを意味する。ここでビーム強度変動は  $=8.8 \times 10^{-3}$ 、ビーム位置変動は  $=1.74\mu m$  である。

第 2 章での議論から、分光結晶の X 軸周りの角度変動は図 3.3, 3.4 のようなビーム位置と強度の変動の相関を引きこす可能性が高い。そこでビーム位置を制御量とし、ビーム位置を目標値に安定化させるべくフィードバック制御を行うことでこれらを同時に安定化することを試みる。図 3.1 の B 信号をフィードバック調節器に入力し BPM モードで用いる。分光器は回折強度の最大の 50 % に detune し、その時の出射ビーム位置を一定にするようにフィードバック制御を行った。図 3.5 に結果を示す。

ビーム位置変動は  $=1.74\mu m$  から  $0.18\mu m$  に抑制された。このビーム位置フィードバック下でのビーム位置とビーム強度の相関を図 3.6 に示す。フィードバック無しではビーム強度  $=8.8 \times 10^{-3}$ 、ビーム位置  $=1.74\mu m$  の範囲で点が分布 (黒) していた。ビーム位置フィードバックによりビーム強度  $=4.9 \times 10^{-3}$ 、ビーム位置  $=0.18\mu m$  となり (赤) 図の中央部に点の分布が集中し、ビーム位置・強度の同時安定化が実現された。同図 3.6 に回折強度が最大になるように分光結晶を平行配置に調整したときの出射ビーム位置を安定化するフィードバックを行った場合の結果 (青) も重ねて示した。ビーム強度  $=2.0 \times 10^{-3}$ 、ビーム位置  $=0.14\mu m$  を得、ビーム強度の安定度が更に向上した。回折強度曲線の極大は傾斜ゼロとなり分光結晶の角度変動に対するビーム強度変動が少ない。従って、50 % detuning に比べフィードバック制御の強度変動の抑制効果が高くなる。しかも得られるビーム強度は最大となり光源輝度を損なうことなく最大限に生かしている。



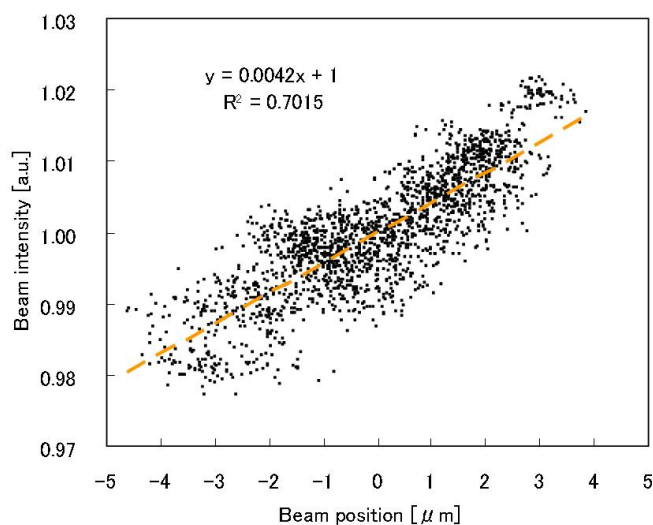


図 3.4: ビーム位置変動と強度変動の相関 BL29XU。ビーム強度  $=8.8 \times 10^{-3}$ 、ビーム位置  $=1.74\mu\text{m}$ 。アンジュレータ 1 次光ピークエネルギー 10keV。分光器設定エネルギー  $E=10\text{ keV, Si111}$ 。50 % detuning。

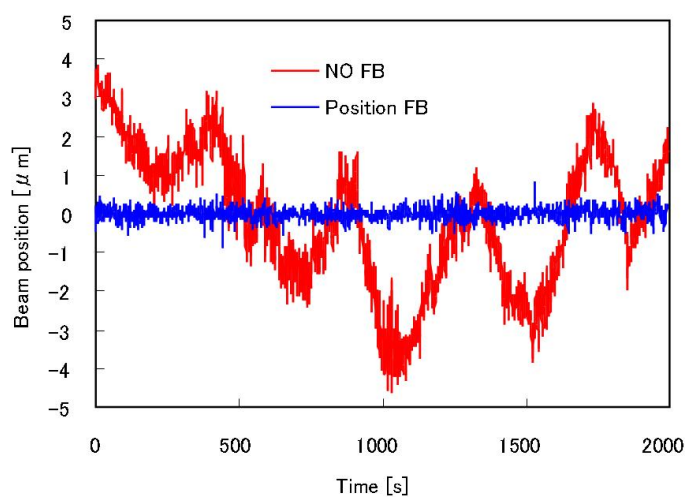


図 3.5: ビーム位置フィードバック。  $\sigma=1.74\mu\text{m}$  から  $0.18\mu\text{m}$  に抑制された。BL29XU。アンジュレータ 1 次光ピークエネルギー 10keV。分光器設定エネルギー  $E=10\text{ keV}$  , Si 111、50 % detuning

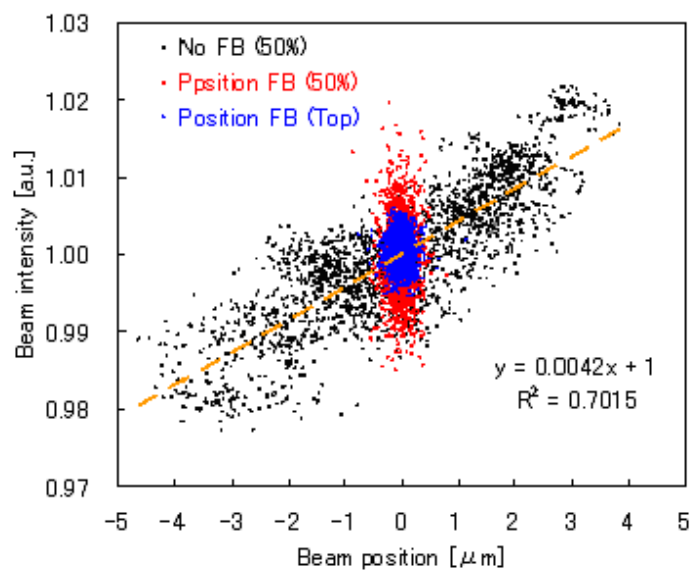


図 3.6: ビーム位置変動と強度変動の相関。分光器を 50 % detuning とした場合のビーム位置フィードバックによりビーム強度  $=4.9 \times 10^{-3}$ 、ビーム位置  $=0.18\mu\text{m}$  (赤)、分光結晶を平行に調整した状態でのビーム位置フィードバックによりビーム強度  $=2.0 \times 10^{-3}$ 、ビーム位置  $=0.14\mu\text{m}$  (青)を得た。( BL29XU。アンジュレータ 1 次光ピークエネルギー 10keV。分光器設定エネルギー  $E=10 \text{ keV, Si111}$ 。)

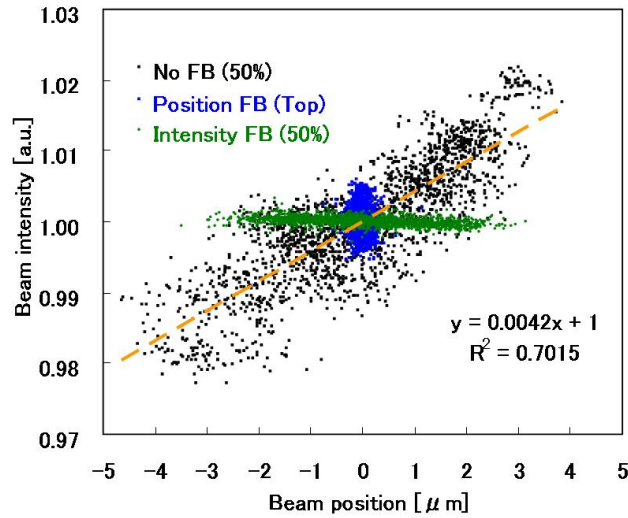


図 3.7: ビーム位置変動と強度変動の相関。分光結晶を平行に調整した状態でのビーム位置フィードバックによりビーム強度  $= 2.0 \times 10^{-3}$ 、ビーム位置  $= 0.14 \mu\text{m}$  (青) 分光器を 50 % detuning とした場合のビーム強度フィードバックによりビーム強度変動  $5.9 \times 10^{-4}$  へと一桁以上減少し、ビーム位置変動もフィードバック無しの  $= 1.15 \mu\text{m}$  へと減少傾向を示した (緑)。( BL29XU。アンジュレータ 1 次光ピークエネルギー 10keV。分光器設定エネルギー  $E = 10\text{keV}$ , Si 111。)

更に比較のためにビーム強度を制御量とし、ビーム強度を安定化するようにフィードバック制御を行う。ビーム強度フィードバックの場合図 3.1 の A 信号をフィードバック調節器に入力し  $I_0$  モードによりフィードバック調節器を用いる。図 3.7 に結果を示す。分光器は回折強度最大から 50 % の出射ビーム強度を与えるように detuning した。フィードバック無し (50 % detuning) の場合 (黒)、及びビーム位置フィードバック (回折強度曲線の極大を動作点として) の場合 (青) のビーム位置・強度の相関とともに示す。ビーム強度変動は  $= 8.8 \times 10^{-3}$  から  $5.9 \times 10^{-4}$  へと一桁以上減少し、ビーム位置変動もフィードバック無しの  $= 1.74 \mu\text{m}$  から  $1.15 \mu\text{m}$  へと減少傾向を示した (緑)。ビーム強度を制御量とした場合、Detuning の状態でしかフィードバックをかけられないため回折強度の最大値を得られない。ビーム位置の安定化傾向は、ビーム位置を制御対象とした場合 (青) に比較し非常に効果が少ない。

第 2 章の議論で、分光結晶の角度変動に次いで試料点でのビーム位置に影響を与えるものは光源の角度変動と考えられた。光源の角度変動は分光結晶への入射角度変動としては極めて小さいためビーム強度やエネルギー変動には寄与しない。しかし、光源から試料点まで距離のために試料点でのビーム位置変動には寄与する。これらのことから、試料点でのビーム強度と、光源の角度変動は相関が低いと考えられる。つまりビーム強度フィードバックは光源の角度変動に起因するビーム位置変動を同時に安定化しないことが予想さ

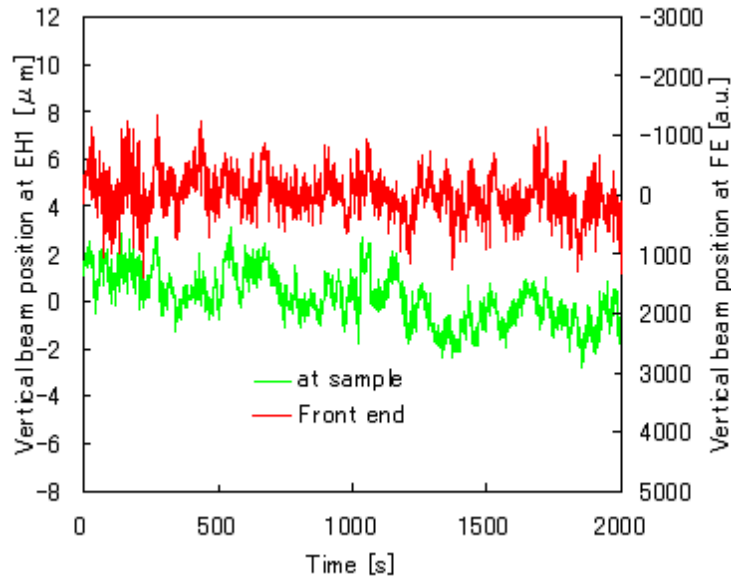


図 3.8: 試料点でのビーム位置垂直方向の変動 (PSIC) と光源のフロントエンド部でのビーム位置垂直方向の変動。アンジュレータビームエネルギー = 12.4 keV@1st. 分光器 Si 111(E=12.4 keV) に対し、試料位置でのビーム強度を一定にするように第一結晶角度をフィードバックにより調節した。Front-end 部のビーム位置は FE-XBPM にて測定。試料点でのビーム位置は PSIC により測定。

れる。逆に考えると、ビーム強度フィードバックで分光器の結晶角度を安定化したにもかかわらず見られるビーム位置変動は、光源の角度変動に起因するものと考えられる。そこでビーム強度フィードバック下で残ったビーム位置変動 (図 3.7 緑) につき、光源の角度変動との関係を調べる。図 3.8 は図 3.7 のデータおよび、これと同時に測定された FE-XBPM による垂直方向ビーム位置の時間変動の比較である。双方の動きを見ると細かい部分がよく似ている。図 3.9 に同じデータにつき時間軸を拡大しスムージングのために 10 点ごとに移動平均 (10 秒間の時間平均) したものを示す。双方の動きの類似点が強調されている。但しここで FE-XBPM の測定値は定点観測の条件 (GAP=9.6mm) 以外では絶対値として取り扱えないので、arbitrary unit として相対的な変動のみを取り扱う。

ビーム強度フィードバックの場合、原理的に二結晶は平行配置とすることができない。しかしながら二結晶の相対的な角度配置は安定化する。その結果、分光結晶の角度変動にマスクされて見えていなかった光源の変動分が試料点の PSIC により観測されるようになったと考えられる。一方、ビーム位置フィードバックは、光源と分光器の角度変動の両方に起因するビーム位置変動を一緒に抑制していることになる。

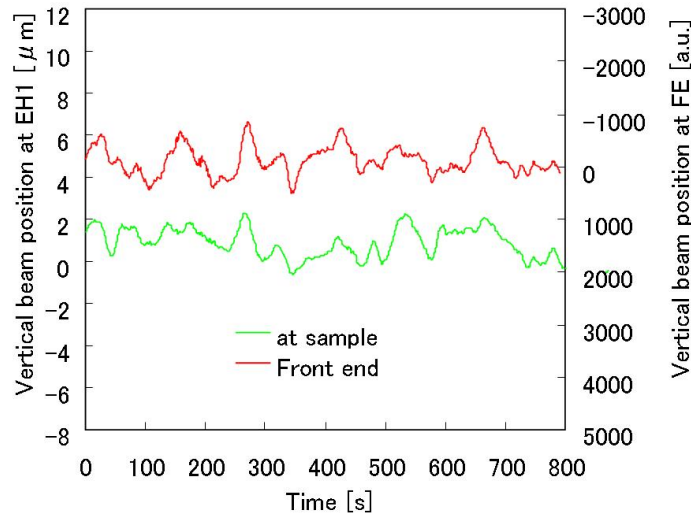


図 3.9: 試料点でのビーム位置垂直方向の変動 (PSIC) と光源のフロントエンド部でのビーム位置垂直方向の変動。図 3 . 8 の時間軸を拡大し 10 点ごとの平均 (10 秒間平均) によりスムージングして示す。

### 3.4 考察

回折強度曲線極大の半値を与える  $\Delta\theta_1$  に分光結晶を detuning すると、回折強度曲線の傾斜が大きいため  $\Delta\theta_1$  の変動によるビーム強度の変動が増幅される。この状態で測定したビーム位置と強度の変動には相関 (決定係数  $R^2 = 0.7$ ) が見られた。このことからビーム位置とビーム強度の変動の原因がともに結晶の配置誤差変動によると考えた。この場合、2 章の議論により  $\Delta\theta_1$  補正が効果的にビーム強度と位置を同時に安定化する。ビーム位置フィードバックによる  $\Delta\theta_1$  補正は二結晶平行配置を動作点とし、ビーム位置の安定化とともにビーム強度を最大値に安定化した。一方、ビーム強度フィードバックは、ビーム位置安定化の効果が得にくい。ビーム位置や強度の影響を及ぼすものが分光器の他に存在し、その影響が強い場合はビーム位置と強度の同時安定化は不完全となる。2 章に論じたように、ビーム位置に有意に影響を与える分光器以外の要素として他に、光源の角度不安定性があり得る。FE-XBPM によるビーム位置測定から、ビーム強度フィードバック下において残ったビーム位置変動 ( $\sigma = 1.15\mu m$ ) において、光源の角度変動の寄与が大きいことが明らかになった。これまで光源と試料点でのビーム位置変動の関係は十分に確認されていなかった。これは分光結晶の角度変動によりマスクされてしまうという面と、FE-XBPM では絶対精度が得られないという問題によるものである。しかし分光器のフィードバック制御と FE-XBPM や試料点の XBPM(PSIC) を総合的に用いると、試料点でのビーム位置に光源の動きがどのように影響しているか観察することができた。ここに見られたビーム位置変動は光源の角度変動として  $\sigma = 0.023\mu rad$  (peak to peak で  $0.14\mu rad$ ) となる。

分光器のビーム位置フィードバックは、光源の変動と分光器の角度不安定に起因する

ビーム位置変動を両方あわせて抑制し、ビーム位置安定性を  $\sigma = 0.14\mu\text{m}$  まで向上させた。しかし、光源の角度変動によるビーム位置のシフトを第一結晶の角度調整により抑制することは、出射ビームエネルギーに影響を及ぼす。どの程度の影響があるか、試算検討しておく必要がある。

光源の角度が今  $\Delta\theta$  だけ変動したとする。このとき光源-試料間距離を  $D$ 、分光器-試料間距離を  $L$  とする。試料点におけるビーム位置変動  $D\Delta\theta$  を補正するために、分光器第一結晶は、 $(D/2L)\Delta\theta$  の角度補正を行うことになる。光源の角度変動  $\Delta\theta$  は分光器出射エネルギーシフト  $|\Delta E| = E\Delta\theta \cot\theta_B$  (2.11) を引き起こす。ここで  $E$  は分光器の設定エネルギー、 $\theta_B$  は  $E$  を与えるブラッグ角である。光源の角度が上向きに変動した場合を正の方向にとれば、上向きの光源角度変動は分光結晶への入射角を小さくする方向に働く。つまり回折波長は短くなり、出射ビームエネルギーは高くなる。このとき (2.11) から、出射ビームエネルギーを  $E'$  として、

$$E' = E(1 + \Delta\theta \cot\theta_B) \quad (3.1)$$

となる。

このとき、ビーム位置フィードバックは分光器の第一結晶を、 $(D/2L)\Delta\theta$  だけ detuning して試料点のビーム位置を補正する。この時、分光器の出射ビームエネルギーは (2.21) から、

$$\Delta E' = -1.5E' \frac{D}{2L} \Delta\theta \cot\theta_B = -\frac{1.5D}{2L} E(1 + \Delta\theta \cot\theta_B) \Delta\theta \cot\theta_B \quad (3.2)$$

だけ  $E'$  からシフトする。但しここで、光源の角度変動を打ち消す向きに結晶を回転させるために変化量の符号を負とした。従って、もとのエネルギー  $E$  からの変化は  $\Delta E + \Delta E'$  であり、(2.11)(3.1) (3.2) から、

$$\Delta E + \Delta E' = E\Delta\theta \cot\theta_B - \frac{1.5D}{2L} E(1 + \Delta\theta \cot\theta_B) \Delta\theta \cot\theta_B \quad (3.3)$$

となる。

本章での測定は  $D=52\text{m}$ 、 $L=8.5\text{m}$  であり、 $\Delta\theta$  は  $\sigma = 0.023\mu\text{rad}$  (Peak to peak で  $0.14\mu\text{rad}$ ) であるから、ビームエネルギーのシフト量は  $\sigma = 6.6 \times 10^{-3}\text{eV}$  (Peak to Peak で  $4.0 \times 10^{-2}\text{eV}$ ) となる。 $E=10\text{keV}$  であるので  $(\Delta E + \Delta E')/E$  で現すと、 $\sigma = 5.4 \times 10^{-7}$  (Peak to peak で  $3.3 \times 10^{-6}$ ) となる。これらは Si 111 の結晶分光器における  $E=12.4\text{keV}$  でのエネルギーバンド幅 FWHM =  $1.6\text{eV}$  (エネルギー分解能  $\sim 10^{-4}$ ) に比較して極めて小さい。

分光結晶の角度変動に伴う試料点でのビーム位置変動は  $100\mu\text{m}$  レベルに達する可能性があることを 2 章に述べた。実際に SPring-8 のビームラインにおいてフィードバック制御を行わない状態ではこの程度のビーム不安定性が観測される場合がある。光源の角度変動では、このような大きなビーム位置変動は生じない。つまりこれは分光結晶の角度不安定に起因するものであると考えられ、結晶の角度変動として  $5\mu\text{rad}$  レベルとなる。この程度の結晶角度変動は、 $E \sim 10\text{keV}$  (Si111) ではビーム強度変動  $\sim 10\%$ 、エネルギー変動  $\sim 0.4\text{eV}$  を生じる。本章で実現された方法は、これらの状態を効果的に改善し安定なビームを与えるものである。

本章のビーム位置フィードバックで得られたビーム位置安定性は  $\sim 0.1\mu m$  程度である。これは4章で示す XBPM の位置分解能と一致する。このことから実現できるビーム位置安定度を制限するものは XBPM の精度と考えられる。ここでいう精度は信号処理回路、伝送ケーブルなども含めたシステムとしての XBPM の精度である。つまり XBPM の精度の向上には、検出素子の改良に加え、処理回路系のローノイズ化なども含めた技術開発を進める必要がある。

本章で示したことは、光源の安定性の診断系としても応用可能である。例えば、結晶分光器の  $\Delta\theta_1$  を意図的に既知の微小角で周期的駆動しながらビーム位置と強度を同時測定する。測定されたビーム位置と強度に完全な相関が見られる場合、光源は安定である。相関が不完全であれば光源に不安定性が存在する。その不安定性の程度をフィードバック制御成績により解析する、といった具合である。

### 3.5 まとめ

SPring-8 標準型アンジュレータを光源とし、液体窒素冷却型二結晶分光を持つビームライン BL29XU で、試料点におけるビーム強度とビーム位置の同時測定を行ったところ、双方の時間変動には強い相関があった。これにより第2章で考察したように、試料点でのビーム不安定性に、分光結晶の角度変動が大きな影響を与えていると考えられた。試料点でのビーム位置を安定化するフィードバックシステムにより分光第一結晶角度を制御したところ、ビーム位置変動が10分の1に抑制されただけでなく、ビーム強度変動も約5分の1に抑制された。しかも従来の分光器フィードバックにおいて必須であった結晶平行配置からの detuning を行わず、ビーム強度を最大にして用いることができた。得られたビーム位置安定度は変動幅  $=0.14\mu m$ 、ビーム強度は変動幅  $=2.0 \times 10^{-3}$  である。得られたビーム位置安定度は用いる XBPM の位置分解能と同程度である。実現できる位置安定度を左右するものは XBPM の精度であると考えられる。更なる位置安定度の追求には XBPM の高精度化が重要である。

試料点でのビーム強度を一定にする分光器フィードバックは、結晶を平行配置から detuning させて角度を安定させる。この方式ではビームの最大強度を得ることができないなどのデメリットがある。この方式は分光器の角度変動に起因するビーム強度だけを選択的に安定化し、光源の角度変動を抑制することはできない。しかしこのことにより、それまで分光器の角度変動によりマスクされて観測できなかった光源の変動を試料点において観測することを可能とした。観測された光源の変動に起因する試料点でのビーム位置変動は、 $=1.15\mu m$  であり光源の角度変動に換算すると  $=0.023\mu rad$  (Peak to peak で  $0.14\mu rad$ ) となる。この角度変動をビーム位置フィードバックにおいて補正した場合に引き起こされる分光器の出射ビームエネルギー変動は、 $E=10$  keV(Si111) の場合  $=5.41 \times 10^{-7}$  (Peak to peak で  $3.3 \times 10^{-6}$ ) となる。これは微小であり、かつエネルギー変動の主要原因が結晶の角度変動であるため、多くの場合フィードバックを何も施さない状態に

比較してむしろエネルギー的に安定である。以上のように Si111 分光結晶を用いる分光器の出射ビームエネルギー  $E=10$  keV 程度の条件では、ビーム位置フィードバックはビーム位置・強度・エネルギーすべてを近似的に安定化することができる。これらのことは、フィードバック制御、試料位置とフロントエンドでのビーム位置モニタリングの技術を総合することで明らかとなった。またここで示したシステムの応用として光源の診断系を構築することが可能と考えられる。



# 第4章 ビーム位置安定化システムの実用化

## 4.1 はじめに

第3章ですでに、ビーム位置安定化によるフィードバックシステムが、ビーム位置のみならずビーム強度の安定化においても有用であることを示してきた。一方、SPring-8のような放射光研究施設においては、そのシステムが多くの研究者に(多くのビームラインに)向けた基盤的なシステムとして導入できる実用化も重要な開発項目である。本分光器のフィードバック制御によるビーム位置安定化システムを実用化するためには、放射光 X 線ビーム位置をサブミクロンの分解能で検出するビーム位置モニター、及びビーム位置信号を制御量として取り扱うことのできるフィードバック調節器が必要となる。

本章では先ず、フィードバック制御に関する一般論を述べる。次に、ビーム位置モニターとして用いる位置敏感電離箱、及び Ti 薄膜型 X 線ビーム位置モニターの位置分解能とそれぞれの特徴を述べる。更に、近年画期的な進歩をとげている Digital Signal Processing (DSP) [26] を用いたフィードバック調節器の開発につき述べる。本フィードバック調節器はビーム位置安定化を行うための演算機能を持つ PID 補償器である。また本調節器を用いたフィードバックパラメータの自動調整について述べる。更に開発した DSP 搭載型フィードバック調節器を用いた制御成績の評価を行う。基本的な制御成績として、外乱に対する整定時間、周波数応答、及びステップ状の目標値変化に対する追従特性と整定時間を中心に検討する。また本システムの各種モードを用いたビーム安定化試験の結果を示す。更に SPring-8 における本システムの実用状況につき述べる。

## 4.2 フィードバック制御

種々の予測しない原因によって生じた、好ましい状況からのずれを、そのずれに応じたしかるべき判断と処置によって修正することをフィードバック制御という [27]。一般にフィードバック制御では、制御対象に属するうちで制御目的を代表するものを「制御量」、その望ましい値を「目標値」、制御量を支配するために制御対象に加える量を「操作量」、制御量に影響を及ぼす外的作用を「外乱」という。制御量を検知するセンサーを「検出部」、検出部がとらえた信号に環境ノイズが加わったものが「観測量」である。観測量と目標値との差(偏差)から操作量を計算する部分を「調節部」と呼ぶ。調節部での計算方

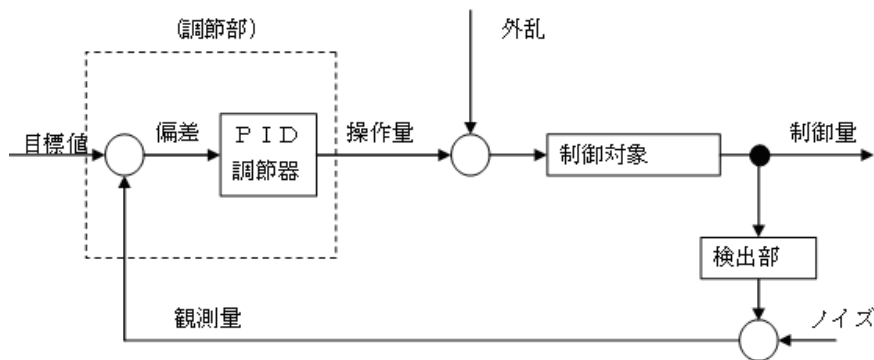


図 4.1: P I D制御系の基本形 [27]

式に PID 調節器 [28] を用いるフィードバック制御を PID 制御という。これらの関係を図 4.1 に示す。調節器内部の演算様式には PID 以外にも多数存在するが、PID 調節器はその実用性において群を抜いており、現代様々な分野で用いられているフィードバック制御のほとんどは PID 制御である [29]。本研究では分光器を含む制御対象に対して PID 制御を施すことで放射光 X 線ビームの安定化を行う。

図 4.1 における PID 調節器部分について、偏差を入力、操作量を出力とするシステムと見れば、その伝達関数をラプラス変換形で書くと、

$$C(s) = K_P \left( 1 + \frac{1}{T_I s + T_D s} \right) \quad (4.1)$$

である [27]。ここで  $K_P$  は比例ゲイン、 $T_I$  は積分時間、 $T_D$  は微分時間であり、 $s$  はラプラス変数である。 $K_P$ 、 $T_I$ 、 $T_D$  を PID パラメータと呼び、これらは制御系の特性に従って最適値が決定される。このように伝達関数が比例 (Proportional : P) 成分、積分 (Integral:I) 成分及び微分 (Differential:D) 成分から構成されていることから、それぞれの頭文字をとってこれを PID 調節器と呼ぶ。変形として、P 成分だけによる制御 (P 制御)、PI 成分だけによる制御 (PI 制御)、I 成分だけによる制御 (I 制御) など、それぞれの制御系の特性に応じて用いられることがある。

フィードバックシステムを P 制御で行うと、目標値近傍の一定値に制御量を近づけることしかできず、最終的に一定の偏差が残ってしまう。これを定常偏差という。定常偏差は、PI 制御とすることで除去することができる。更に、D 成分を加え、PID 制御とすることで、制御特性の改善が図られる。

二結晶分光器を制御対象として考えるために、図 4.1 に示した PID 制御のシステムの中に二結晶分光器を置いて見る (図 4.2)。このシステムの中の二結晶分光器は、 $\Delta\theta_1$  を駆動するピエゾ制御電圧を入力とし、ビーム位置を出力とする。

図 4.2 に示した制御対象としての二結晶分光器には、PID 調節器から出力されるピエゾ制御電圧を受け取って増幅するアンプモジュール、アンプモジュールの出力を受け取って伸縮するピエゾアクチュエータ、ピエゾアクチュエータにより調整される二結晶分光器が含まれる。この様子を図 4.3 に示す。ピエゾアクチュエータの伸縮は入力電圧に

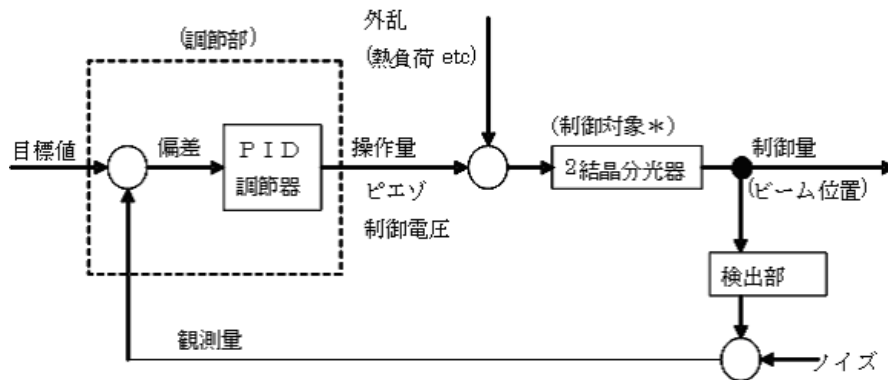


図 4.2: 二結晶分光器を含むフィードバックシステム

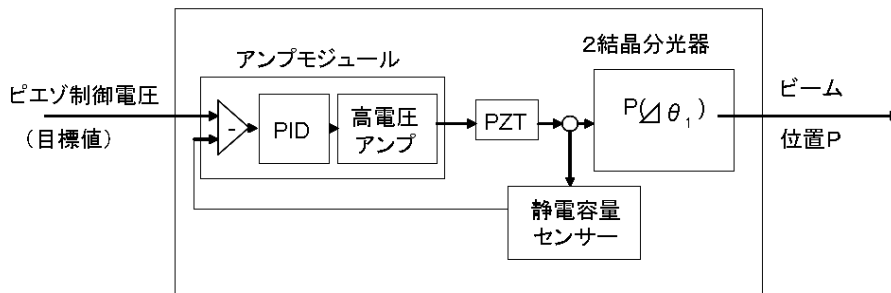


図 4.3: 制御対象としての 2 結晶分光器。ピエゾ制御電圧を入力、ビーム強度や位置を出力として示した。2 結晶分光器部は回折強度曲線  $I(\Delta\theta_1)$  と (2.13) を伝達関数とする。

対してヒステリシス特性を持つため [30]、そのままではナノポジショニングを行うのに適していない。そのため 図 4.3 に示す通り、アンプモジュールは通常、静電容量センサーを検出部とするフォードバック制御器を兼ねている。この制御器は静電容量センサーによりナノメートルオーダーで測定されるピエゾアクチュエータ長が目標値を実現するように PID 制御を行う。従って図 4.3 のシステムの入力であるピエゾ制御電圧は、ピエゾアクチュエータ長の目標値を表すアナログ電圧に対応する。また図 4.2 の二結晶分光器の伝達関数はビーム位置  $P(\Delta\theta_1)$  に、結晶駆動機能の特性等を含む伝達関数を掛け合わせたものとなる。この伝達関数の形の完全な解析は困難である。しかしアンプモジュールへ適当な電圧を入力し、ビーム位置の応答を測定することで、アンプモジュールと二結晶分光器を一体としたシステムの伝達関数の様子を実験的に知ることができる。ただし測定される伝達関数は、検出器と検出器用信号処理回路の伝達関数を含むことになる。

図 4.4 に BL38B1 の二結晶分光器においてシステムの伝達関数を調べるために、アンプモジュールに周波数を連続的に変えながら微小振幅の正弦波電圧を加え、出射ビーム強度を測定したものを示す。ここでは DC 電圧により正弦波駆動動作点を回折強度曲線の半値とした。駆動振幅が微小なので、駆動振幅に対してビーム強度変動振幅は線形となる。本

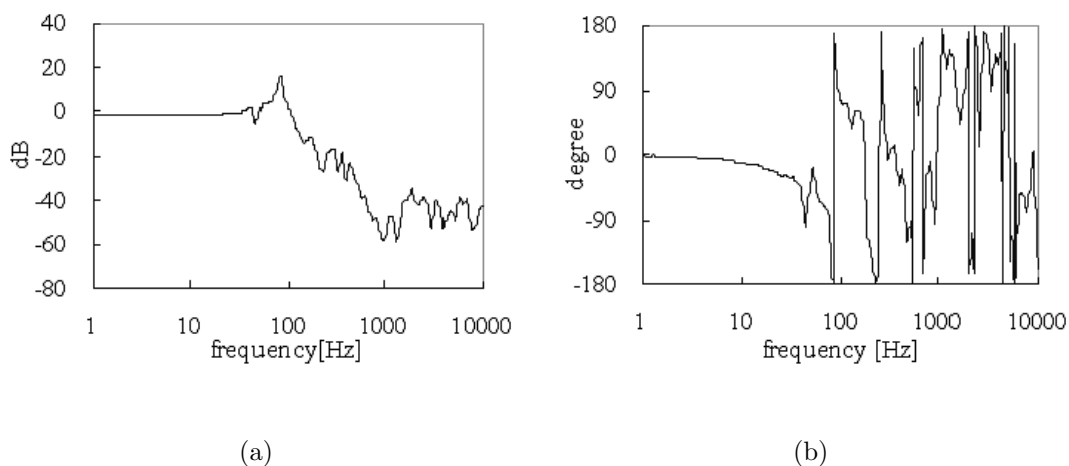


図 4.4: BL38B1 の 2 結晶分光器 (Si(111),  $E=12.3981$  keV) において、アンプモジュールに振幅 0.1V の正弦波電圧を周波数掃引して印加し、出射ビーム強度を測定した。(上)は振幅応答、(下)は位相応答である。

研究で用いたアンプモジュール (Physik Instrumente GmbH & Co. の E-507.00) は、静電容量センサー (E-509.C1) で測定する piezoelectric アクチュエータ (P-410E) 長を制御量として閉ループフィードバックを構成し、入力電圧に対し piezoelectric アクチュエータが線形に伸縮するよう調整している。システムが理想的に調整された場合、無負荷の piezoelectric アクチュエータの周波数振幅応答は 80Hz までフラットである [30]。しかし分光器に組み込んだ状態では結晶ホルダーの重量が負荷となり、ビーム強度変動振幅は 60Hz 付近までフラットであるが、80Hz 付近で極を形成する。入力電圧に対する位相は、80Hz の極で 180 度遅れる。フィードバック系には共振による装置破損の予防のため、80Hz 付近の周波数成分が系に入り込まないように適切なフィルタを用いる必要がある。尚、ここで簡単に測定するためにビーム強度を電離箱で観測した。ビーム位置を位置敏感電離箱で観測した場合での応答も伝達関数のゲインのみが異なる他は同じものが得られると考えられる。

### 4.3 ビーム位置モニター

フィードバックシステムにおいて得られるビーム位置の安定度は、ビーム位置モニターにより検出されるビーム位置計測精度により制限される。本研究では  $10 \mu\text{m}$  以下のビーム位置安定度を目指すのであるから、ビーム位置モニターの分解能として例えば  $10 \mu\text{m}$  の 10 分の 1 以下が求められる。即ちサブミクロンレベルの分解能のビーム位置モニターを必要とする。次節においてこの要求を満たすビーム位置モニターにつき述べる。

分光下流のビーム位置観測手段として位置敏感型電離箱 [31] と、蛍光検出型放射光 X 線ビーム位置モニター [32][33][58] につき述べる。これらを総称して x-ray beam position monitor (XBPM) と呼ぶ。

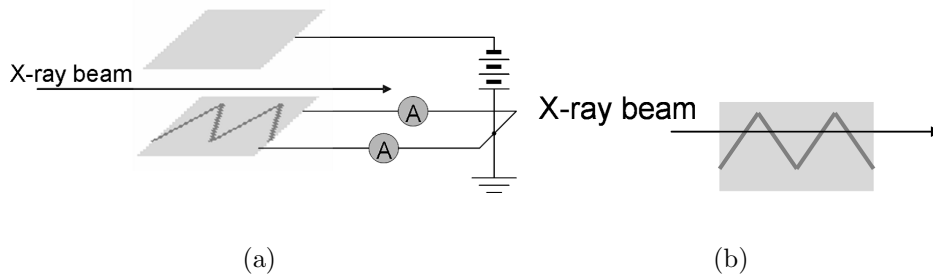


図 4.5: 位置敏感電離箱

位置敏感電離箱 (Position sensitive ion chamber) は図 4.5 左に示すように、片側が 2 つのパーツに分離した電極を持ち、おののおから出力される電流を読み出すものである。図 4.5 の場合は図解しやすいように水平方向ビーム位置を計測する場合を示す。分離電極を上から見たところを図 4.5 右に示す。電離箱の中では充填ガスによりビームが吸収されてゆくので、生成されるイオンはビームの進行方向に向かってなだらかではあるが対数的に減少する。またビームのエネルギーによりその電流量は変わる。しかし 2 電極からの出力電流の比率は、ビームの通過位置の関数であり、他のパラメータの影響を受けない。ここでビームの水平方向の位置を得るために、2 つの電極から得られる電流を  $i_1$  及び  $i_2$  とし (4.2) の計算を行う。k は実験的に求める係数である。この XBPM の優れたところは、(4.2) の成立する範囲が広いということである。SPRING-8 で用いられているものは 8mm の範囲で (4.2) に基づくビーム位置計算が行える。

$$x = k \frac{i_1 - i_2}{i_1 + i_2} \quad (4.2)$$

PSIC は電離箱の一種であるから、大強度 X 線ビームを計測する場合の電離箱の制限がそのまま当てはまる [59]。ビームの進行方向に沿ってのイオンの生成量は正確には対数減少しなくなり、(4.2) の k 値は一定ではなくなる。従って定量的なビーム位置計算は困難になる。とはいえ、信号量はジグザグの電極上でビームが通過する長さに関連しているので、位置感度そのものは大強度ビームでもかなり保持される。ビームエネルギーに依存してこの対数減少のプロファイルが変化するが、ジグザグの数を増やすことによりこのことに起因する位置信号の誤差は減ずることが出来る。ところがアンジュレータビームを用いた実際の測定では、図 4.7 に示すとおり大強度ビームの位置計測で、ビーム位置計算値の SN が悪化することがある。この時、電極のそれぞれの信号の時間変動を確認すると、片側の出力がビーム強度の速い動き (10 秒ほどの時間変動) に対して鈍感になる場合が見られる。2 つの電極で同じ頻度でこの現象が見られ、互いに同期はしない。ビーム位置の算出は 2 つの電極出力の差を計算するため、2 つの電極の感度の差がノイズとなって現れることになる。この鈍感になる理由は、空間電荷による極板間の誘電率の増加に伴う時定数の変化であると考えられる [34]。

もう一つの挿入光源用の XBPM として、金属箔に X 線ビームが透過して発生する蛍光

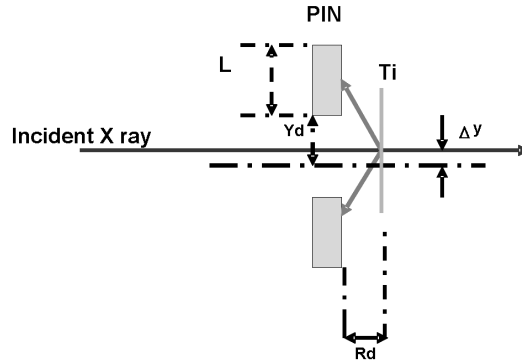


図 4.6: Ti-XBPM の配置図。 Yd: PIN フォトダイオードの底部と、二個のダイオードの隙間の中央との距離。 L: PIN フォトダイオードの有効長。 Rd: Ti 箔と PIN フォトダイオードの水平距離。 Δy: Ti-XBPM 原点からのビームシフト距離。

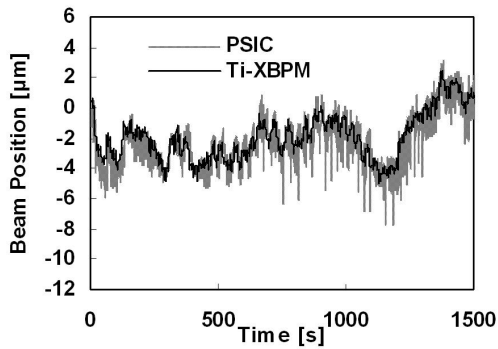
X線を複数のPINフォトダイオードで検出してビーム位置を算出するものにつき述べる。このXBPMは広ダイナミックレンジの高輝度放射光用ビーム強度モニター [35] の発展型であり、挿入光源光のビーム位置計測に有利である。すなわちPSICに見られる大強度ビームの計測におけるSNの悪化が少ない。蛍光検出型放射光X線ビーム位置モニターはX線を透過させる金属箔(ここではチタン箔)と、チタン箔から発生する蛍光X線の検出器(PINフォトダイオード)からなる(図4.6)。図の左側からTiのK吸収端4.966 keV以上のX線ビームがチタン箔に入射すると、箔上のビーム入射点から蛍光X線(K線:4.51 keV)が等方的に発生する。この蛍光X線を、チタン箔からみてビームライン上流側に配置した二個のPINフォトダイオードが検出する。PINフォトダイオードを箔の上流に配置する理由は、下流配置の場合チタン箔から発生する回折X線が形成する powder (Debye-Sherrer) ringの影響が大きく、位置精度が悪化するからである[35]。チタン箔を蛍光体として用いるX線ビーム位置モニター(X-ray beam position monitor: XBPM)であることから、以下このモニターをTi-XBPMと略記する。

チタン箔上のビーム入射点の位置が変わると、二つのPINフォトダイオードが検出する蛍光X線の強度比が変わる。ここで二つのPINフォトダイオードの信号強度を  $i_1$  および  $i_2$  とすると、ビームが二つのPINフォトダイオードから等距離の位置を通過する時は  $i_1=i_2$  となる。この時のビーム位置をTi-XBPMの原点とする。但しここで二つのPINフォトダイオードの検出効率は等しいとする。原点からの光軸のずれ量  $y$  が小さい場合は、 $i_1, i_2$  及び  $y$  の間には式(4.3)の関係が成り立つ。

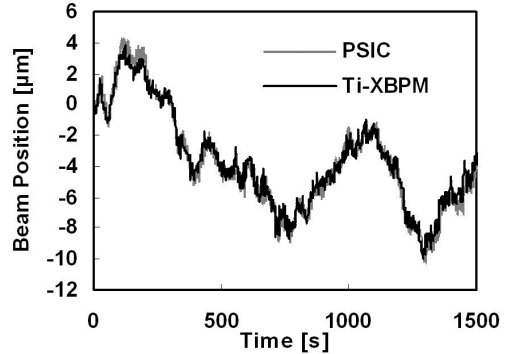
$$\Delta y = k \frac{i_1 - i_2}{i_1 + i_2} \quad (4.3)$$

ここで  $k$  は実験的に求める比例定数である。この式はまたPSICの2つの電極の信号からビーム位置を求めるのにも用いられる(4.2)。

図4.7はBL29XU実験ハッチにおいて、PSICとTi-XBPMをタンデムに配置し、垂直方向ビーム位置を同時測定したものである。(a)は二結晶分光器の分光結晶を完全平行



(a)



(b)

図 4.7: 図 4.7 B129XU 実験ハッチにおいて PSIC と Ti-XBPM をタンデムに配置して測定した 1500 秒間の垂直方向のビーム位置変動。各測定点は 1 秒間の平均値である。ビームは Si 111 2 結晶分光器によりビームエネルギーに単色化した。(a) 2 結晶分光器を回折強度曲線の極大を与えるように調整した場合、(b) 2 結晶分光器を回折強度曲線の極大の 50 % を与えるように調整し、PSIC の線形性を回復させた場合。位置敏感電離箱

としてビーム強度を最大化した場合、(b) は第一結晶を detuning してビーム強度を最大の 50 % とした場合である。ビーム強度最大の場合 (a) は PSIC での測定値の S/N が悪化した。ビーム強度を 50 % とした場合 (b) は PSIC と Ti-XBPM の測定値がよく一致した。(b) において測定時間 1500 秒間における各時刻の PSIC と Ti-XBPM の測定値の差の標準偏差は  $\approx 0.2\mu\text{m}$  であった。ここで PSIC と Ti-XBPM の測定値の真の値との差の標準偏差を PSIC 及び Ti-XBPM とすると、(4.4) の関係がある。もしも PSIC のほうが理想的なビーム位置モニターであって、その測定値と真の値との差が常に 0 であった場合、 $Ti-XBPM = 0.2\mu\text{m}$  となる。逆に Ti-XBPM が理想的なビーム位置モニターであれば  $PSIC = 0.2\mu\text{m}$  となる。この議論に基づき Ti-XBPM および PSIC ビーム位置測定精度はいずれも  $0.2\mu\text{m}$  以下と考えられる。

$$\sigma = \sqrt{(\sigma_{PSIC})^2 + (\sigma_{Ti-XBPM})^2} = 0.2\mu\text{m} \quad (4.4)$$

位置分解能の面で考えると、PSIC と TiXBPM はともに分光器の出射ビーム位置フィードバックシステムに用いることができる。しかし大強度ビームでの PSIC の SN 悪化は用いる吸収体の流量設定や、電界強度の調節により防ぐ必要がある。一方 TiXBPM の PIN フォトダイオードが検出する信号には、散乱 X 線からのものと蛍光 X 線からのものが混在している。散乱線は偏光の影響で等法的ではないプロファイルを持つ。更に蛍光と散乱の強度の比率や、それぞれの PIN フォトダイオードによる検出感度が入射ビームエネルギーにより変化する。従って (4.3) の k 値は入射ビームエネルギーに依存して変化する。従ってビーム位置の数値的な精度を必要とする時はエネルギー変更ごとにキャリブレーション

ションによる k 値の設定が必要となる。この場合はエネルギー設定ごとにフィードバック調節器の PID パラメータを変える必要がある。PSIC の場合、ビーム位置と信号の関係は電極の形状により決まり、このエネルギー依存性は少ない [31]。

## 4.4 DSP 搭載型フィードバック調節器

4.2 に述べたフィードバックシステムを 4.3 のビーム位置モニターを用いて実用化する上で、専用のフィードバック調節器を用いることが有効である。図 4. 8 は本研究のために開発したフィードバック調節器 (回路モジュール) のブロック図である。本回路は IN1 と IN2 の二つの入力を有する。これらの入力からの信号は 16 ビット 10ks/s で AD 変換された後 DSP により処理される。DSP では信号が全てデジタル化された数値データで処理されるため制御目標値他のパラメータ設定が正確となり、システムパフォーマンスの再現性が向上する。また外部コンピュータとのデータ通信を可能とするインターフェースを備えることで、ユーザーアプリケーションソフトウェアによるコントロールが可能となる。これはソフトウェアによるフィードバックパラメータ調整の自動化につながる。

信号入力直後に行われる処理は表 4.1 の演算である。その後 Selector 1 により 4 つの演算結果 S1 ~ S4 の一つが制御量 S5 として選択される。4 つの演算は次に述べる制御目的に応じた 4 モードに対応する。本研究で提案するビーム位置フィードバック以外に従来の MOSTAB でのビーム強度フィードバックにも使用可能である。

表4.1 DSP 搭載型フィードバック調節器のモード

モード	I0 モード	IN1/IN2 モード	I0/RC モード	BPM モード
制御量 (演算式)	IN1	$NORMG \frac{IN1}{IN2}$	$RCG \frac{IN1}{IN2}$	$BPMG \frac{IN1-IN2}{IN1+IN2}$
制御目的	ビーム強度安定化	$\Delta\theta_1$ 安定化	$\Delta\theta_1$ 安定化	ビーム位置安定化

I0 モードでは IN 1 に分光器下流のビーム強度モニター出力を入力し、何も演算を行わずに次のブロックに出力する。これはビーム強度の安定化に用いられる。このモードでは蓄積リング電流の減衰にかかわらず分光器後のビーム強度が一定になる。ビームエネルギー及びビーム位置に関しては、蓄積リング電流の減衰に伴いドリフトする。蓄積リングのトップアップ運転が施されるとこのドリフトは解消する。

IN1/IN2 モードでは分光器の上流に設置したビーム強度モニター出力を IN2 に入力し、分光器下流のビーム強度モニター出力を IN1 に入力し、IN1 を IN2 で規格化した値を安定化させる。これは蓄積電流の減衰に伴うビーム強度の減衰を補正し、分光器の d etuning 角を一定に保つのに用いる。NORMG(規格化ゲイン) は IN1,IN2 の比に応じて演算結果が制御量として扱いやすい値になるように与える。高真空の輸送チャンネルに設置された SPring-8 標準型 2 結晶分光器では分光器上流のビーム強度測定が難しい。しかしながら、実験ハッチで用いる高分解能分光器が大気中に設置される場合にはこのモードが可能であり、また必要とされる場合がある [36]。



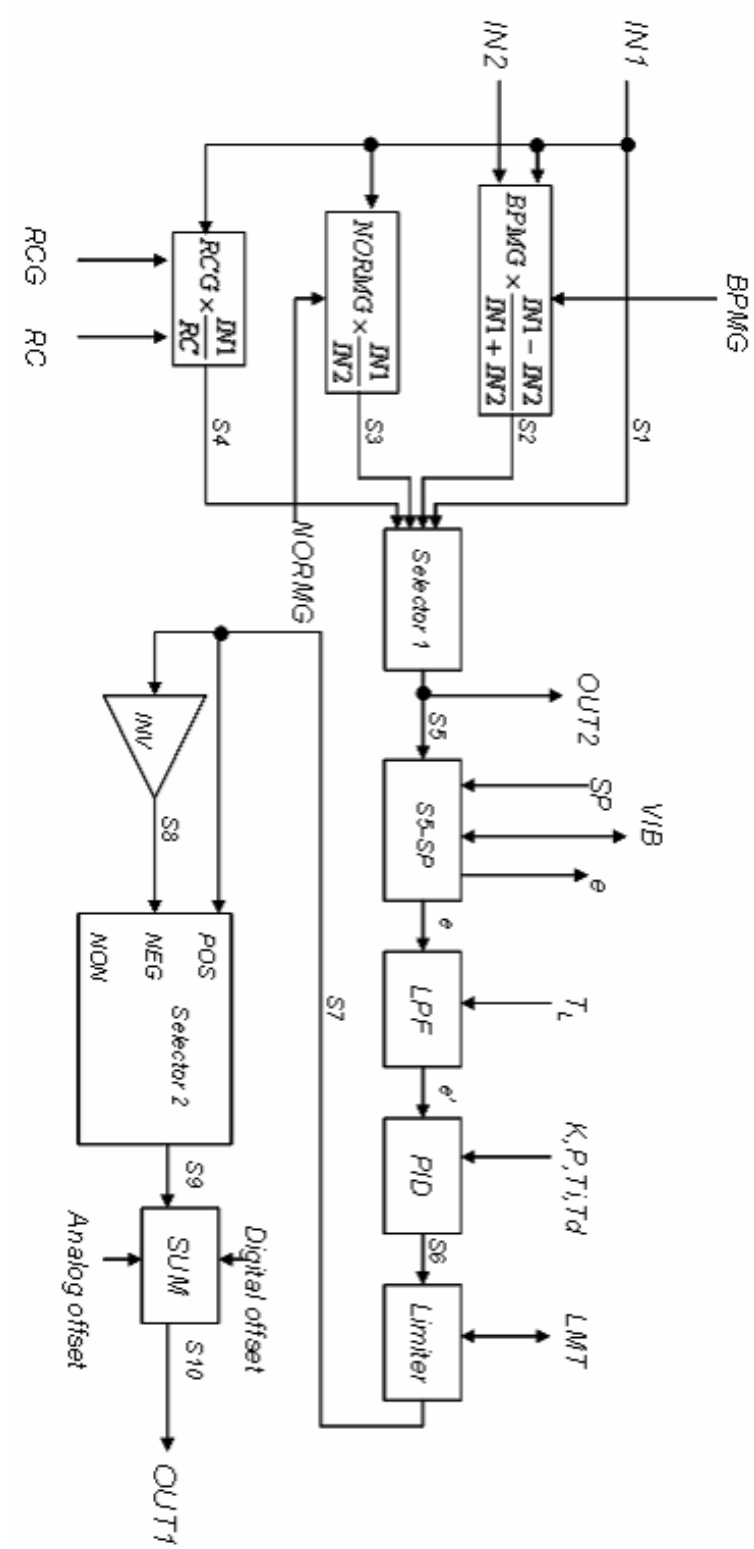


図 4.8: DSP 搭載型フィードバック調節器のブロック図

I0/RC モードでは IN1 に入力される分光器下流のビーム強度モニター出力を、DC current transformer (Bergoz Instrumentation)[37] で測定した蓄積リング電流値 RC で規格化した値を安定化させる。RC 値は加速器のデータベース [38] から定期的に読み出して PC またはワークステーションから与える。これも IN1/IN2 モードと同じく、蓄積電流の減衰に伴うビーム強度の減衰を補正し、分光器の detuning 角を一定に保つのに用いられる。RCG(リング電流ゲイン) は制御量が扱いやすい数値になるように与える。

BPM モードでは IN 1、IN2 に XBPM からの 2 つ出力を入力し、ビーム位置を演算し、これを安定化する。ここで用いられる演算方式は複数の検出器を用いてビームの重心を計算する方式のビーム位置モニターにおいて頻繁に用いられている。BPMG(ビーム位置モニターゲイン) は、ビーム位置モニターの感度に応じて与える。

Selector 1 により選択された制御量 S5 は OUT 2 からアナログモニター信号として出力されるとともに、次段の  $S6 = S5 - SP$  により偏差  $e$  が演算される。SP は目標値であり、外部コンピュータから設定する。 $e$  が、外部コンピュータから設定した適当な値 VIB を超えた時すなわち、 $|e| \geq VIB$  では、本回路は制御系が発振していると認識し振動状態を示す VIB ステータスが立つ。このステータスは外部コンピュータから読み出し可能である。

$e$  は次に 1 次のローパスフィルタ (LPF) に入る。LPF の演算式は差分方程式 (4.5) である。ここで、 $T_L$  はフィルタの時定数であり外部から設定できる。また  $\delta$  はサンプリング周期、 $e_n$  は  $n$  番目の偏差、 $e'_n$  は  $n$  番目のフィルタリングされた結果である。この LPF は、図 4.4 のような極を持つ制御対象の伝達関数を補償して発振を抑制し、安定な制御を実現する。

$$e'_n = \frac{2T_L - \delta}{2T_L + \delta} e_{n-1} + \frac{\delta}{2T_L + \delta} (e_n + e_{n-1}) \quad (4.5)$$

ローパスフィルタに処理された信号  $e'_n$  は、差分方程式 (3.6) により PID 演算され信号  $S6_n$  を得る。 $S6_n$  は  $n$  番目の  $S6$  (図 4.8) 信号の意味である。 $K$  (比例ゲイン)、 $P$  (比例要素)、 $T_I$  (積分時間)、 $T_D$  (微分時間) は外部コンピュータより設定できる。(4.6) は  $P=1$  とすれば、(4.1) の PID 制御器の伝達関数と同じ意味になる。

$$S6_n = K \left( P e'_n + \frac{\delta}{2T_I} \sum_{i=1}^n (e'_i + e'_{i-1}) \right) + \frac{T_D}{\delta} (e'_n - e'_{n-1}) \quad (4.6)$$

次段の limiter において、 $S6$  が外部コンピュータにより適当に設定された LMT に対して  $|S6| \geq LMT$  となる場合は、ビームシャッター閉などの理由で制御がからなくなった場合であると判断され、LMT ステータスが立つ。このステータスは外部コンピュータから読み出し可能である。

次に Selector 2 は、リミッター出力信号  $S7$ 、または  $S7$  の符号を INV 演算により反転させた  $S8$ 、あるいは“ゼロ値”の三者のうちいずれかを選択して  $S9$  とし、次段の加算回路に与える。加算回路は、外部コンピュータから設定する offset 値 (デジタル値) あるいはフロントパネルから与える offset (アナログ値) を  $S9$  に加算することで  $S10$  とし、OUT 1 から出力する。ここで  $S9$  として“ゼロ値”が選択されていると、 $S10$  は制御演算結果を含ま

ないDC(直流)成分だけの出力となる。この状態はフィードバックループが開となった状態であり、制御が停止する。この状態をNONの状態と呼ぶことにする。また、S9にS7もしくはS8が選択されている状態はそれぞれPOSの状態、NEGの状態と呼ぶことにする。POSとNEGの切り替えにより、I0、IN1/IN2、I0/RCモードでは図2.20に示した回折強度曲線のどちらのサイドに制御量を安定化させるかを選択することができる。またBPMモードの場合は、用いるビーム位置モニターの検出器配置などに応じてPOS/NEGを切り替えることが必要となる。

NONが選択されると、フィードバックループ開で制御が停止するとともに、式(4.6)の括弧内第二項(積分項)がゼロに初期化される。その後POSまたはNEGが選択されてフィードバックが再開される時、積分が再開される。このプロセスはフィードバックの中断再開をスムーズにする働きがある。これを省略するとフィードバック再開時に急激に制御量が目標値から大きく外れ、静定時間を経て目標値に達するという動作が見られる。

以上が制御演算の全てである。これらの機能を持つDSP搭載型フィードバック調節器をNIM規格二幅回路モジュールとして設計製作した(図4.9)[39]。この回路モジュールでは数値演算処理は150 MHz clock動作の浮動小数点32-bit DSP (TMS320 C6711, Texas Instruments Co. Ltd.)で行われ、外部コンピュータ及びフロントパネルインターフェースとDSPとの接続はCPU (SH2/7045:日立)が担う。CPUからもたらされる情報に従ってDSP内のSelector 1とSelector 2の状態や各種定数設定は変化するが、基本的にはDSPは図4.8に示された演算を無限に繰り返す。外部コンピュータからの本回路へのアクセスはFTPにより行う。コマンドとしてはFTPのSITEコマンドを用いる。外部コンピュータからのコントロール無しにスタンドアロンで用いる場合は、フロントパネルのプッシュスイッチとローラリーエンコーダにより液晶パネルを見ながらからの操作を行うことができる。

## 4.5 制御ソフトウェア

図4.10は、本章で開発したフィードバック調節器を用いて構成した、一般的なSP ring-8硬X線ビームラインにおける分光器フィードバックシステムの図である。フィードバック調節器はLANによりパーソナルコンピュータ(PC)と結ばれる。PCはLAN経由で加速器データベース[38]から蓄積リング電流値を読み出してフィードバック調節器にRC値として与える。更にPCはビームラインProgrammable logic controller (BL-PLC)[40]のシャッターのステータスを読んでフィードバック調節器のNON/POS/NEGの切り替えを行って制御の開始中断を行う。二結晶分光器(double crystal monochromator:2結晶分光器)により単色化されたX線ビームは、X線光位置モニター(X-ray beam position monitor:XBPM)または電離箱により、そのビーム位置もしくはビーム強度(I0)が測定される。これら検出器出力の電流信号は、高速電流アンプにより電流電圧変換される。XBPMの場合は、フィードバック調節器のIN1、IN2に信号を入力してBPMモードで運

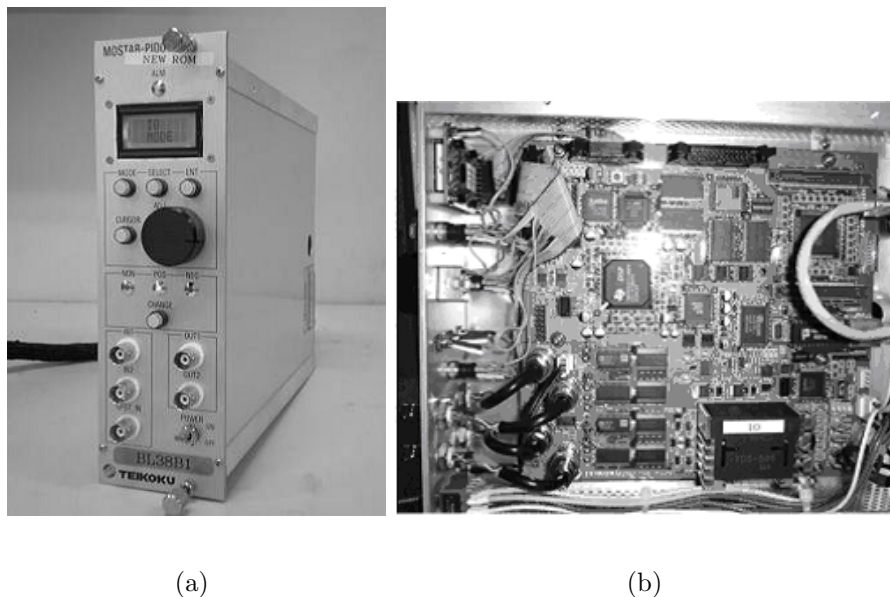


図 4.9: DSP 搭載フィードバック調節器の外観 (a) 及び内部回路基板 (b)。フロントパネルの液晶に表示される数値を見てロータリーエンコーダで各種の設定を行うことができる。背面パネルは LAN コネクタを持ち、施設内 LAN を通じてデータ通信可能である。

転する。電離箱の場合は IN1 に信号を入力して I0/RC モードで運転する。いずれのモードで運転する場合も、フィードバック調節器の OUT2 を HV アンプで増幅した電圧がピエゾアクチュエータに印加される。

図 4.11 は、PC 上に Labview(National Instruments.Co.) により作成された本システムの制御ソフトウェアの GUI を示す。この GUI からフィードバック調節器にコマンドシーケンスが送られ、フィードバックの開始中断、パラメータの決定、動作点の設定などが行われる。

図 4.11 のプログラムによるビーム位置のフィードバック制御開始は以下の手順で行う。まず GUI 上の NON ボタンをクリックすることで、回路モジュールの状態を NON とし、アクティブなフィードバックを停止しておく。次に digital offset 電圧をアンプモジュールへの入力許容電圧範囲の中央に設定する。このことにより、ピエゾ電圧を増減どちらの方向に変化させる場合にも余裕が均等になる。次に分光器の  $\Delta\theta_1$  をパルスモータ駆動して、電離箱出力が最大になるようにする。これにより二結晶は平行になる。実験装置と試料のアラインメントを終了した後 GUI 上の Auto Lock Start ボタンを押すことで、現在のビーム位置が制御目標値としてフィードバック調節器に与えられる。更にこの detuning 位置において、PID 制御パラメータの自動調整が行われ、POS もしくは NEG が自動的に選択されてピエゾコントローラへの出力極性が決まり閉フィードバックループが形成される。現在のビーム位置がそのまま目標値となるので、フィードバック開始に伴うビーム強度、 $\Delta\theta_1$  及びビーム位置の急激な変動は無い。このため Auto lock Start ボタンを押した際の感覚的な動作はビーム強度と位置が現在値に固定 (lock) されたように見える。これら一

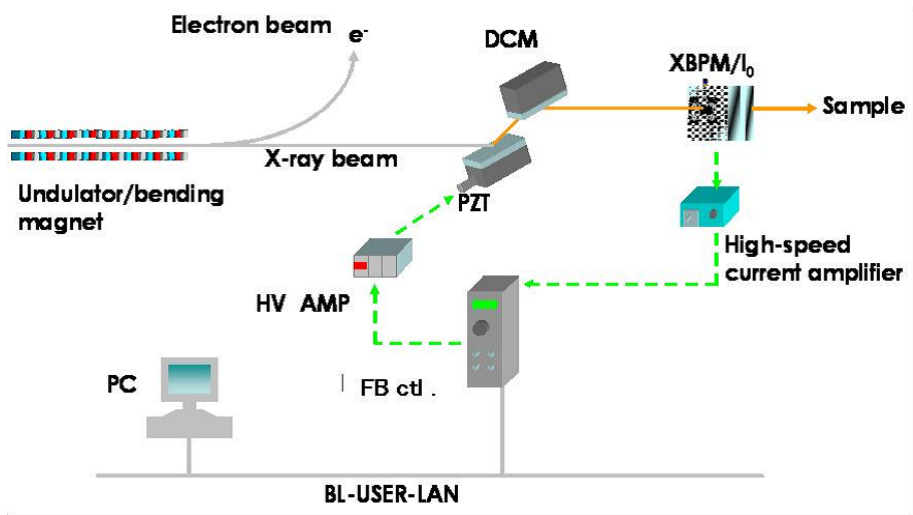


図 4.10: DSP 搭載型フィードバック調節器を含む分光器フィードバックシステム [16]。

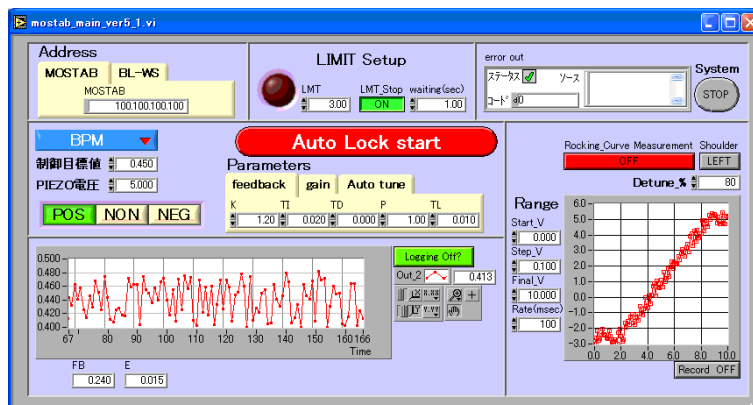


図 4.11: Labview により作成した制御用プログラムの GUI。

連の操作は Labview でプログラミングされ、操作の要所々々で GUI 上のボタンをクリックしてゆくことで進められる。制御を中断するには GUI 上で NON を選択し、制御を再開するには GUI 上で N EG また POS を選択する。

Auto Lock Start ボタンで動作開始する PID 制御パラメータの自動調整については Ziegler and Nichols の限界感度法 [41] をベースに作られたアルゴリズムにより行われる。自動調整の必要は、分光器のフィードバック制御における制御対象の伝達関数が、ビームエネルギー設定に応じて大きく変わることに対応するためである。ビーム位置フィードバックの場合は、XBPM のエネルギー依存性により、(3.3) の  $k$  の値がビームエネルギーを変えると変化する。またビーム強度フィードバックを行う場合も、分光器のエネルギー設定に応じて回折強度曲線の傾斜が変化する。この場合エネルギー変更ごとに PID 制御パラメータを A uto Lock Start ボタン操作で再調整する。

限界感度法は閉ループ状態で PID パラメータのうち比例成分だけを徐々に増加させてゆき、発振が始まる限界 ( 限界感度:  $K_c$  ) とその時の発振周期 ( 限界周期:  $T_c$  ) を見つけるものである。得られた  $K_c$  と  $T_c$  から Ziegler and Nichols が実験例を通じて得た表 3.2 を元に [41]、PID パラメータを決める。この表では PID 制御だけでなく、PI 制御及び P 制御の場合の調整法も示されている。

表4.2 限界感度法によるパラメータ調整 [41]

制御形	比例ゲイン	積分時間	微分時間
P	$0.5K_c$	-	-
P I	$0.45K_c$	$0.833T_c$	-
P I D	$0.6K_c$	$0.5T_c$	$0.125T_c$

限界感度法では、検出器の信号をオシロスコープで観測しながら、マニュアル操作で限界感度を探ることになる。分光器のエネルギー変更ごとに、このような操作を行うことは限られた時間のシフト数の中で大きなロスとなる。そこでこの限界感度を見つけるプロセスにおけるオシロスコープ波形観測を省略することを以下のように考えた。

結晶分光器では分光エネルギーを変更した場合、結晶の角度が変わる。SPring-8 標準型二結晶分光器はブラッグ角が  $3^\circ \sim 27^\circ$  の範囲で変化する [10]。 piezoアクチュエータは、数十キログラムの重量を有する結晶ホルダーごと結晶の微小角を調整している。エネルギー変更にもなう結晶ホルダーの角度変化により、piezoアクチュエータが支えている重量負荷が変化する。このため図 4.4 に示した制御対象の周波数応答は、エネルギー変更毎に変化する可能性がある。この様子を調べるために、BL38B1 でビームエネルギー  $12\text{keV} \sim 30\text{keV}$  の範囲で分光器を設定した場合において、piezoアクチュエータの周波数応答を検討した (図 4.12)。それぞれのエネルギーで piezo制御電圧 (DC offset) を適当に調整して回折強度曲線の極大値の 50% のビーム強度とした状態で、DC offset に  $0.1\text{V}_{pp}$  の正弦波電圧を加えた。フィードバックループは開とし、フィードバック調節器は介在しない状態で測定した。

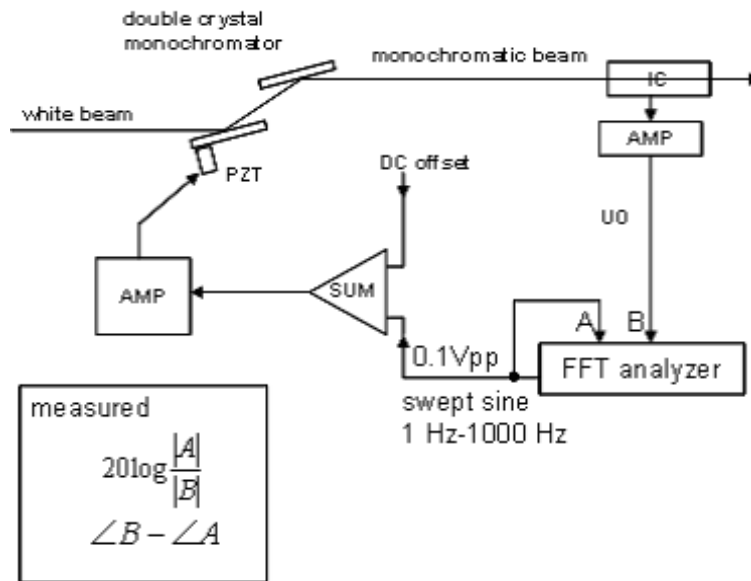


図 4.12: 分光器の周波数応答の測定

図 4.13(a)(b) に結果を示す。振幅応答は図 4.13(a) の通りエネルギーの変更に依って 20 dB 程度の範囲で上下にシフトしている。これは (1) ビームエネルギー変更で電離箱の出力電流量が変わり、それに依って電流アンプのゲインを適当に調整したこと、(2) エネルギー変更により回折角度幅が変わり、それに伴い回折強度曲線の傾斜が変わること、の 2 点が影響している。一方、位相応答は 200 Hz 未満ではエネルギーに依存せず一定である (図 4.13(b))。また位相差  $180^\circ$  となる位相交点  $\omega_1$  もエネルギー設定に関わらず一定である。つまり制御対象の伝達関数  $P(j\omega)$  の位相応答は分光器エネルギー変更により変化しない。

周波數位相応答と  $\omega_1$  が分光器のエネルギー設定に依存しない場合、限界周期  $T_c$  もエネルギー設定に依存しない。従って  $T_c$  は適当なエネルギー設定において一度だけ限界感度法で求めれば、システムの定数として扱うことができる。一方、限界感度  $K_c$  については、図 4.13(a) の周波数振幅応答がエネルギー設定依存的に縦軸上を移動した分を線形に補正しなくてはならない。

$K_c$  をどのように補正すればよいかを調べるため、(1) 分光器エネルギーを様々な値に設定にする、(2) 回折強度曲線の様々な位置に目標値を設定する、(3) 電流アンプのゲインを変化させる、という条件を様々な組み合わせの上で限界感度法により  $K_c$  を決定した。図 4.14 に結果を示す。 $K_c$  の逆数は制御対象のゲイン  $\Delta I / \Delta V$  に対して線形となり、(4.7) の関係が見られた。ここで  $\Delta V$  は piezo 制御電圧の微小変化、 $\Delta I$  は電離箱出力の微小変化 (電流アンプ出力の変化)、 $A$  は図 4.14 のグラフの傾きである。

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} = A \frac{1}{K_c} \quad (4.7)$$

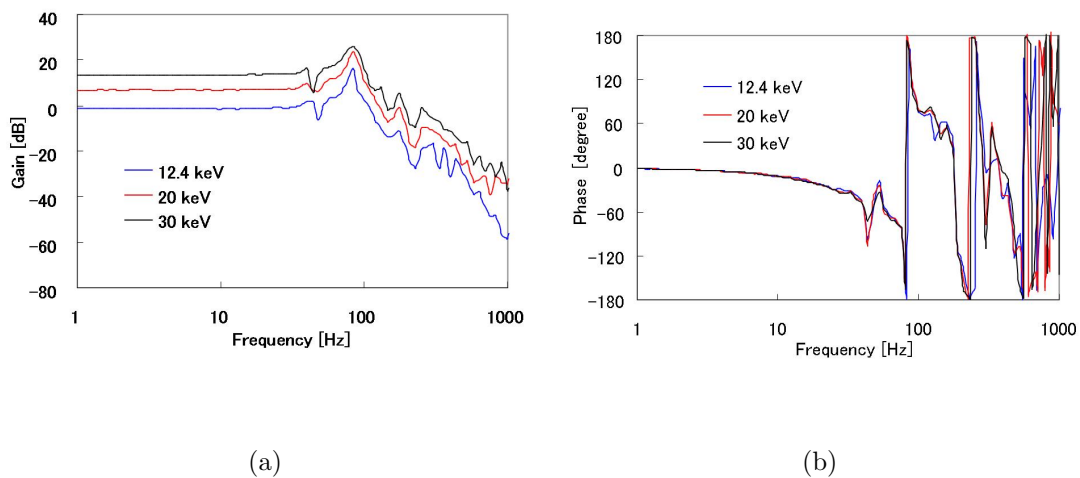


図 4.13: (a) 周波数振幅応答 (b) 周波數位相応答種々のエネルギー設定において、アンプモジュール正弦波電圧 (0.1V<sub>pp</sub>) を入力した場合の、電離箱の出力における (a) 振幅 (b) 位相応答。BL38B1 で測定。2 結晶分光器 (Si111) を用いた。

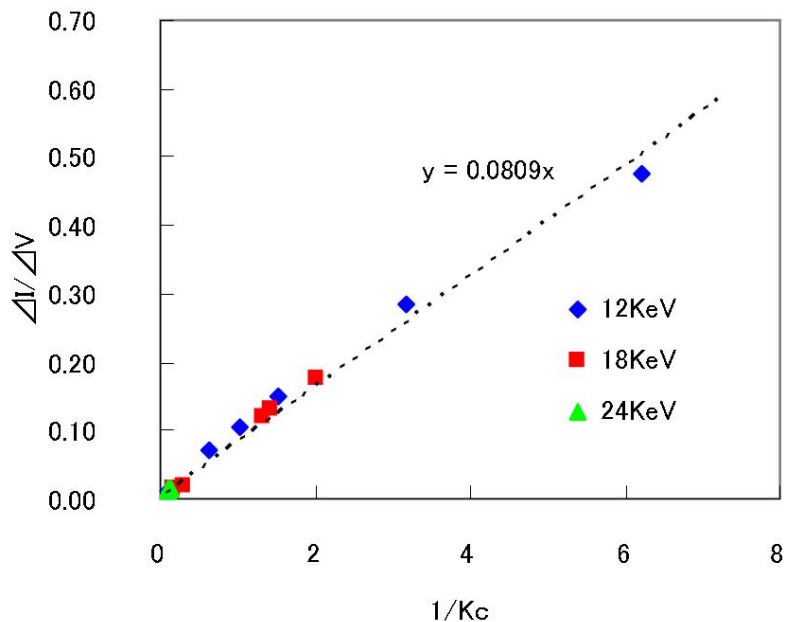


図 4.14: 分光器のエネルギー設定、電流アンプのゲイン、を変えてマニュアル操作で得た限界感度の逆数と、 $\Delta I / \Delta V$  の関係。 $\Delta I / \Delta V$  は、ピエゾ制御電圧  $V$  の微小量変化  $\Delta V$  に対する、電離箱出力 (電流アンプ出力)  $I$  の変化  $\Delta I$  の割合を表し、制御対象の伝達関数の周波数 0 におけるゲインに対応する。測定は BL46XU にて行った。



上記のことから予め  $A$  がわかっているならば、どのようなエネルギー設定でも  $\Delta I / \Delta V$  を測定しさえすれば  $K_c$  は式 (4.7) から求められることになる。 $\Delta I / \Delta V$  は Piezo 制御電圧をステップ状に微小量変化させて電離箱出力応答を測定して得られる。 $\Delta I / \Delta V$  の測定は遅いサンプリングの DC 的な測定で充分であり、オシロスコープによる詳細な波形観測は不要である。オシロスコープによる波形観測は、最初に定数  $A$  と  $T_c$  を決定する時にだけ必要となる。 $T_c$  は適当なエネルギーで限界感度法により決定する。 $A$  は図 4.14 のような測定で決定する。

この考えに基づく PID パラメータの自動調整を順に操作するシーケンスを PC 上のプログラムに組み込んだ。これにより通常のビームライン使用者はオシロスコープ観測を行わず、GUI 上のボタンのクリックだけでパラメータ調整を極めて短時間に終わらせることができる。

## 4.6 基本的な制御成績

開発されたフィードバック調節器により実現されるフィードバックシステムに外乱を与えた場合の制御成績を調べた。フィードバックシステムは図 4.10 のように構成した。ここではシステムの基本動作確認が主目的なので、簡単なビーム強度モニターとして電離箱を用いる I0 モードでビーム強度を安定化させた。またビームラインとしては SPring-8 偏向電磁石ビームライン BL38B1 を用いた。図 4.8 の analog offset 部に適当な波形を入力することで模擬的な外乱とした。この外乱は、操作量である Piezo 制御電圧に加算される。理想的な条件でこのような評価を行うには、結晶ホルダーにもう一つ別の Piezo 素子を取り付けて外乱を与える方法があるが [9]、分光器の改造を伴う試験となるので、ここでは簡易的な試験にとどめる。図 4.15 はビーム強度安定化のフィードバック制御が有り無しの状態、外乱として 0.4V ステップ電圧 (結晶の角度変化として 0.96 arcsec) を analog offset として与えた場合である。フィードバック無しの場合、ビーム強度がステップ状に変化し、かつ変化後約 0.3 秒間に高い周波数のリングングが見られる。フィードバック有りの場合、ステップ状の外乱が入った直後からやはり 0.3 秒ほど周波数約 0.1 Hz のリングングが見られるが、やがて静定されもとのビーム強度に戻る。ビーム強度を一定にするフィードバックが働き、結晶の角度 0.96 arcsec 分の外乱を抑制していることになる。

図 4.16 はビーム強度安定化のフィードバック制御が有り無しの状態、外乱として 0.1Vpp の正弦波 1 Hz ~ 10 KHz を (結晶の角度変化として 0.24 arcsec) を analog offset として与えた場合である。フィードバック無しの場合、ビーム強度変動は低周波側ではフラットで、80Hz 付近で極となり、更に高周波側では減衰する。フィードバック有りの場合、4Hz 以下では 10 分の 1 以下まで、10Hz 以下では 2 分の 1 以下まで外乱が抑制されている。

外乱抑制以外に、制御目標変化への追従特性を評価しておく必要がある。図 4.17 はフィードバック制御によりビーム強度を安定化した状態で、制御目標値 (図 4.8 の SP) をステッ

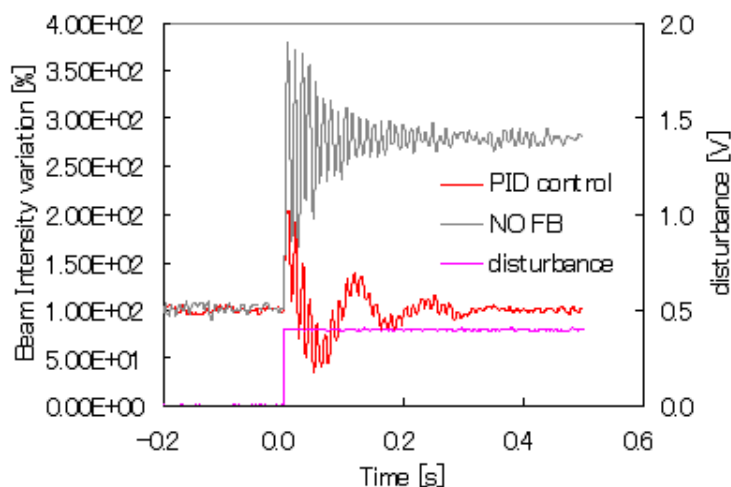


図 4.15: ステップ状の外乱に対する抑制効果。BL38B1にて観測。2結晶分光器 S i111 でビームエネルギー 30.5 keV で測定。ビーム強度を回折強度曲線の極大の 50 % になるように detuning した点で測定した。

ブ状に変化させた時のビーム強度の変化である。ビーム強度は変動幅の 10 % ~ 90 % を約 30 ms で立ち上がり、リングングは 0.15 秒で静定された。

## 4.7 ビームの安定化試験

開発したフィードバック制御器を用いて I0、I0/RC、BPM モードの分光器のフィードバックによるビームの安定化試験を行った。本試験は BL47XU で行った。BL 47XU の光源は SPring-8 標準型の真空封止アンジュレータであり、ビームラインの分光器は SPring-8 標準型の二結晶分光器である。分光結晶の冷却には間接型液体窒素 (liquid nitrogen:LN) 冷却が用いられ、LN 蒸発型冷却システムにより熱交換が行われる。このシステムは、閉鎖系を循環し結晶を間接冷却する LN を、開放系の LN の蒸発熱により冷却する。開放系の LN 量が減少すると冷却効率が下がるので、LN の追加が行われる。このときにビーム強度と位置が大きく変動することが知られている。

### 4.7.1 I0 モードによるビーム強度の安定化

二結晶分光器下流の放射光 X 線ビームを、空気を吸収体とした電離箱に入射した。出力を Keithley 428 電流アンプにより電流電圧変換後フィードバック制御器に入力し、I0 モードでフィードバック演算を行わせた。フィードバック電圧はクイーンズゲート社 Piezo コントローラ (静電容量センサー付アンプモジュール) に、外部アナログ制御電圧として与えた。分光器エネルギーは 14.5keV とした。電離箱の線形性を維持するために挿入光源を

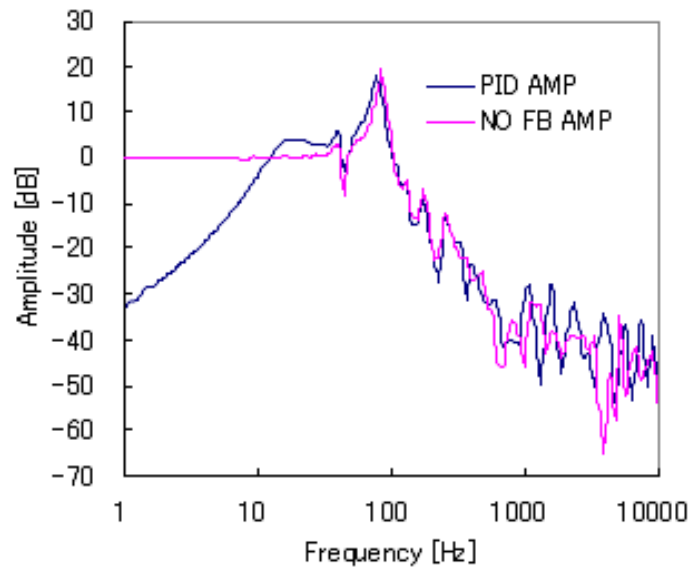


図 4.16: 正弦波外乱に対する抑制効果。BL38B1 にて観測。2 結晶分光器 Si111 でビームエネルギー 30 keV で測定。ビーム強度を回折強度曲線の極大の 50 % になるように detuning した点で測定した。

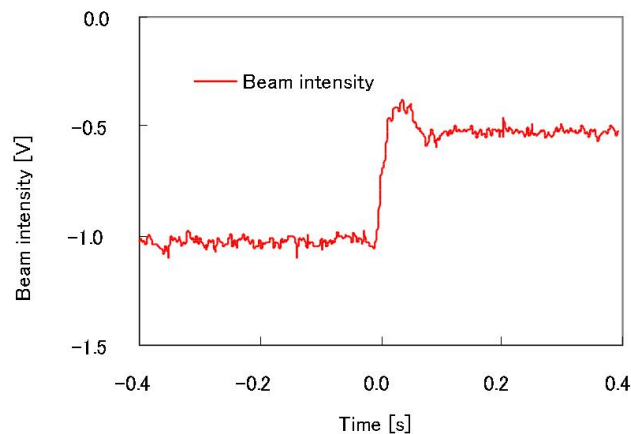


図 4.17: 目標値への追従と整定時間。BL38B1 にて観測。2 結晶分光器 Si311 でビームエネルギー 12.4 keV で測定。ビーム強度を回折強度曲線の極大の 80 % になるように detuning した点で測定した。フィードバック制御を施した状態で、時刻 0 において制御目標値を -1.0V から -0.5V にステップ状に変化させた。ビーム強度は、制御目標値変化に追従している。電離箱の信号処理回路である電流アンプ出力が負なので、本図の縦軸はマイナスとなっている。

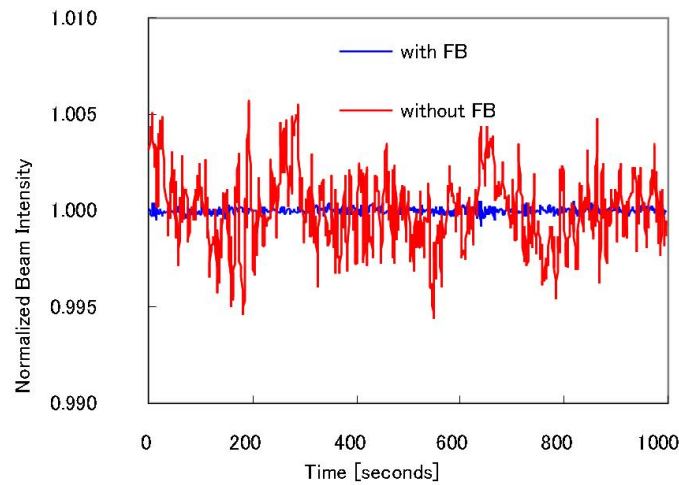


図 4.18: フィードバック制御器によるビーム強度安定化 ( 1 )

detuning してビーム強度を full tune 時の約 10 % に減少させた。分光器は回折強度曲線の極大から 80 % に  $\Delta\theta_1$  を detuning した状態でビーム強度を安定化した。

図 4.18 は、フィードバックによるビーム強度安定化の結果である。フィードバックを行わない場合のビーム強度変動は 1000 秒間で  $= 2 \times 10^{-3}$ 、フィードバックを行った場合は  $= 2 \times 10^{-4}$  となった。図 4.19 は、430 秒から 1000 秒まで LN を手動で追加した場合の、フィードバックによるビーム強度安定化の結果である。フィードバックを行わない場合、ビーム強度は LN の追加開始 (430 秒) から減少し、約 70 % まで減少した (1000 秒)。フィードバックを行うと、このビーム強度変動は消失した。このように LN の追加は、ゆっくりとしたビーム強度の大きな変動を生むが、これをフィードバックが補正していることがわかる。以上のことから I0 モードの動作が確認された。

#### 4.7.2 I0/RC モードによるビーム強度の安定化

放射光 X 線ビームのカプトン膜散乱光を、PIN フォトダイオード (S3590-09:浜松ホトニクス) により、光軸から約 5cm 離れた後方 45 度方向から観測した。PIN フォトダイオードは Photovoltaic mode とした。PIN フォトダイオードの出力を電流電圧変換後フィードバック制御器に入力し、I0/RC モードでフィードバック演算を行わせた。フィードバック電圧はクイーンズゲート社 piezo コントローラ (静電容量センサー付アンプモジュール) に、外部アナログ制御電圧として与えた。空気散乱を PIN フォトダイオードで見た場合、電離箱よりも広いダイナミックレンジの線形性が得られると期待できる。挿入光源はフルチューンとして輝度を最大化した。分光器エネルギーは 14.5keV とした。分光器第一結晶の  $\Delta\theta_1$  を調整して、回折強度曲線の極大から 80 % に detuning し、この時のビーム強度を

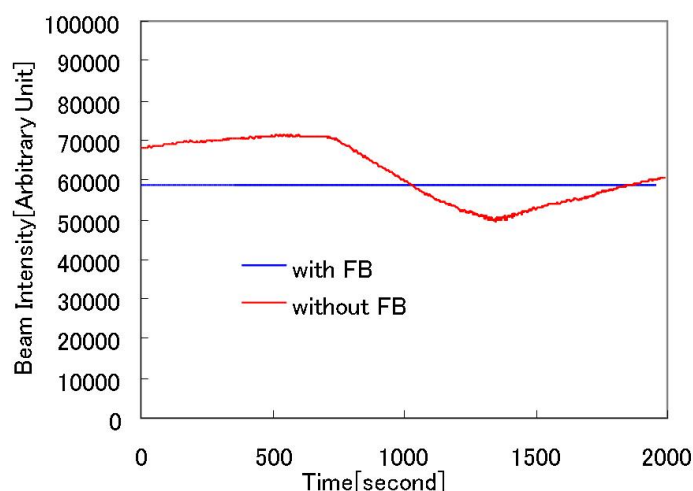


図 4.19: フィードバック制御器によるビーム強度安定化 ( 2 )

安定化した。PIN フォトダイオードの上流に空気を吸収体とした電離箱を設置してビーム強度測定を行った。毎秒の蓄積電流値を、ビームラインワークステーション経由で加速器のデータベースから取得しネットワーク上の PC からフィードバック制御器に与えた。

図 4.20 に、PIN フォトダイオードを用いた I0/RC モードのフィードバックによるビーム強度安定化の結果を示す。縦軸は測定されたビーム強度を蓄積電流値で規格化した値 (I0/RC) である。電離箱と PIN フォトダイオードで測定した I0/RC を比較するため、それぞれ平均値で規格化してある。測定開始後 0.5 時間目まではフィードバックを行わず、0.5 時間目からフィードバックを開始した。LN 追加は約 3 時間毎に自動的に行われた。フィードバックを行っていない 0 ~ 0.5 時間に LN 追加による I0/RC の変動が見られた。0.5 時間目以降はこの変動が無くなり安定化した。電離箱から得た I0/RC はフィードバックを行っている間に増大していった。この増大は蓄積リング電流が減少する程度よりも、電離箱出力が減少する程度が少ないことを示している。即ち電離箱出力が大強度放射光ビームに対して線形性を失っていることを示す。以上のことから I0/RC モードの動作が確認された。

#### 4.7.3 BPM モードによるビーム位置の安定化

二結晶分光器下流の放射光 X 線ビームを、空気を吸収体とした位置敏感型電離箱 (PSIC) で計測した。PSIC は分光器から約 8.5m 下流に設置した。PSIC の上下の電極から得られる二つの出力を電流電圧変換後フィードバック制御器の IN1 と IN2 それぞれに入力し、BPM モードでフィードバック演算を行わせた。フィードバック電圧はピエゾコントローラ (静電容量センサー付アンプモジュール: クイーンズゲート社) に、外部アナログ制御電

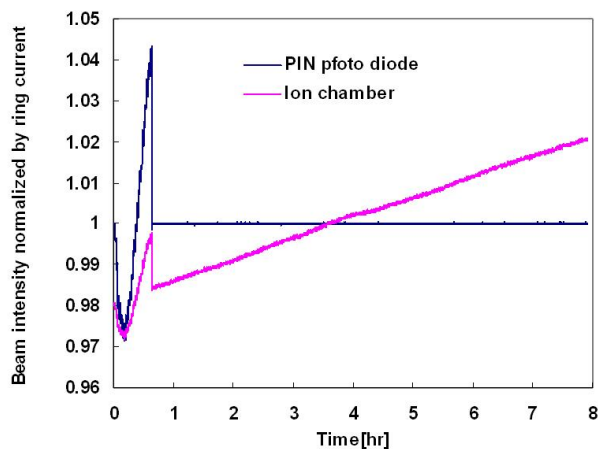


図 4.20: PIN フォトダイオードを用いたフィードバックによるビーム強度 ( $I_0/R_C$ ) 安定化。ビーム強度を PIN フォトダイオード (S3590-9) 及び電離箱で測定し、この値を蓄積電流値で除算した値を縦軸に示した。但し、比較のためそれぞれの平均値で更に規格化して示してある。

圧として与えた。分光器 Si(111) のエネルギーは 14.5keV とした。PSIC と電離箱の線形性を維持するために挿入光源を detuning してビーム強度をフルチューン時の約 10 % に減少させた。PSIC の下流に空気を吸収体とした電離箱を設置してビーム強度の測定を行った。回折強度曲線の極大を与えるように分光器第一結晶の  $\Delta\theta_1$  を調整した、この時のビーム位置を安定化させるように制御目標値を設定した。

図 4.21 は分光器フィードバックによるビーム位置安定化の結果である。1500 秒から 2230 秒まで手動で液体窒素 (LN) を LN リザーバーに供給した。フィードバックを行わない場合、ビーム位置は LN の供給開始 (1500 秒) からドリフトし始め、最大  $90 \mu\text{m}$  垂直方向に移動した (2230 秒)。フィードバック制御器でビーム位置安定化を行うと、LN 供給中のビーム位置ドリフトは消失した。図 4.22 は、図 4.21 と同時に測定したビーム強度である。フィードバックを行わない場合、ビーム強度は LN の供給開始 (1500 秒) から減少し始め、85 % まで減少した (2230 秒)。フィードバックを行うと、LN 供給中のビーム強度減少は消失した。ここでビーム位置の安定化がビーム強度の安定化を同時にもたらしているが、これは分光器の LN 追加時のビーム位置と強度の変動がともに結晶配置のずれに起因することを示している。LN 追加時ではない 0 秒から 1000 秒のビーム位置変動は、フィードバックを行った場合は  $=1.3 \mu\text{m}$ 、行わない場合は  $=0.2 \mu\text{m}$  であった。以上のことから BPM モードの動作が確認された。

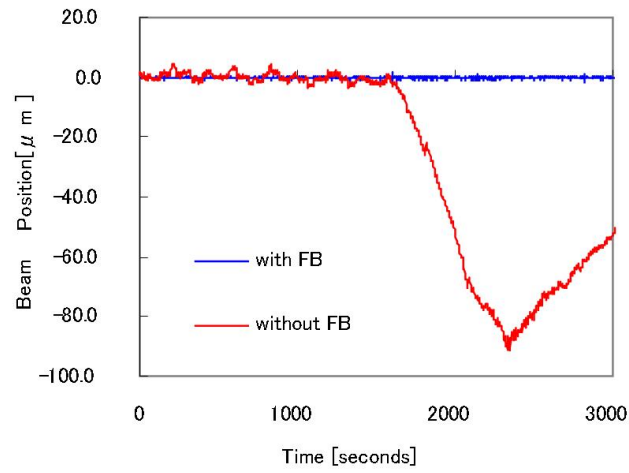


図 4.21: フィードバック制御器によるによるビーム位置安定化

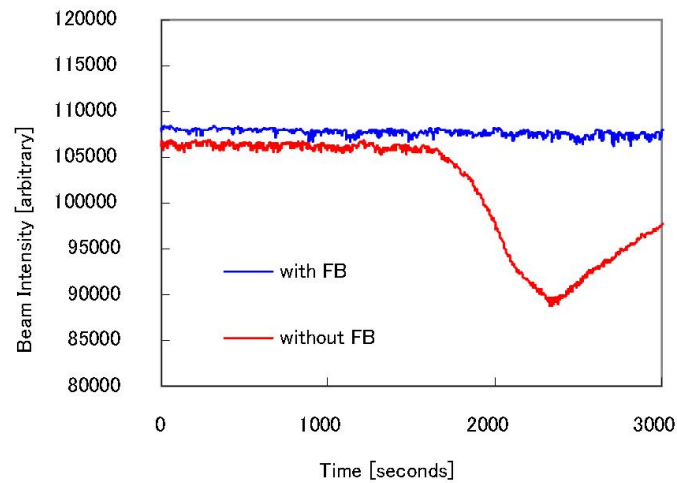


図 4.22: フィードバック制御器によるビーム位置安定化のビーム強度に及ぼす影響

## 4.8 実用化の現状

表4.3は、SPring-8において実用化されている分光器のフィードバックシステムである。この表に示したものは以外にもフィードバックシステムを使用した実績あるビームラインとして、BL12XU(非共鳴X線非弾性散乱)、BL29XU(1kmビームライン)、BL38B1(R & D後に構造生物学)、BL39XU(磁性材料)、BL41XU(構造生物学)、BL47XU(R & D後に光電子分光 & マイクロCT)がある。国内放射光施設であるPF及びPF-ARにおいて2007年現在までに、合計4ビームラインが試験的利用も含めて本フィードバックシステムを用いた実績がある。

表4.3に示すように、本フィードバックシステムは利用者の目的に応じて、ビーム強度、ビーム位置の安定化、もしくは回折強度の最大化の3種の使い方がある。ビーム強度を制御量として選択しているビームラインは、高エネルギービーム利用時の狭い回折角度幅の分光器の設定で利益を得ている。回折角度幅の狭い条件では、分光器の角度変動は容易に回折強度の低下をまねく。このためフィードバックによるビーム強度の安定化無しでは実験の条件が極めて不安定となる。ビーム位置を制御量としているビームラインは試料点でのビーム位置変動の抑制とビーム強度の最大化を重視している。回折強度の最大化は次章に述べる位相敏感検出回路を用いるものである。これは主に偏向電磁石ビームラインにおける分光器のエネルギースキンの効率化に寄与している。

表4.3 2007年現在のSPring-8での分光器フィードバック

ビームライン	主な研究分野	フィードバックの目的
BL10XU	高圧構造物性	ビーム強度安定化
BL11XU	量子ダイナミクス	ビーム位置強度安定化併用
BL13XU	表面界面構造解析	ビーム位置安定化
BL19LXU	コヒーレントX線光学	ビーム強度安定化
BL22XU	量子構造物性	ビーム位置強度安定化併用
BL35XU	高分解能非弾性散乱	ビーム位置安定化
BL37XU	分光分析	ビーム位置安定化
BL46XU	R & D	ビーム位置安定化
BL16B2	産業界	ビーム強度安定化
BL14B2	産業界	ビーム強度最大化
BL08B2	兵庫県	ビーム強度最大化

## 4.9 まとめ

分光器フィードバックでのビーム位置安定化を実現するためにX線ビーム位置モニター(XBPM)が必要である。XBPMとしては位置敏感型電離箱(PSIC)とTi箔ビーム位置モニター(TiXBPM)を用いる。位置敏感電離箱はビームエネルギー依存的な測値誤差が少



なく、TiXBPMは大強度ビームにおけるSNが良好という利点がある。ともにサブミクロンの位置分解能を持つ。

分光器のフィードバックシステムを、放射光施設での円滑な運用を念頭において実現するためには専用のフィードバック調節器を用いることが有効である。そこでDSPによる高速演算を用いてフィードバック調節器を開発した。この調節器は、全演算をデジタル処理とし、各種パラメータの設定精度や再現性にすぐれ、安定した制御成績を与えることができる。またビーム位置を制御対象とする演算モードを持つ。更にネットワーク上に存在する調節器をコンピュータ制御することで、現実の放射光実験の流れに即してオートメーション化した運用を行うことができる。

放射光実験の現場での円滑な運用を実現すべく、DSP搭載型フィードバック調節器をコントロールするソフトウェアをLabviewにより開発した。本ソフトウェアは分光器フィードバックをより使いやすいものにするために、PIDパラメータの自動調整機能を持つ。

DSP搭載型フィードバック調節器を用い、分光器フィードバックによるビーム強度安定化を行ったところ、4 Hz以下の外乱を10分の1以下に抑制した。ステップ状小振幅外乱抑制の静定時間として約0.4秒、ステップ状目標値変動静定時間として約0.15秒を得た。更にこのフィードバック調節器につき、制御量の異なるI0モード、I0/RCモード、BPMモードの動作を確認した。

本章で述べた装置群を含むフィードバックシステムは、SPring-8ビームラインにおいて実用化し、ユーザー運転におけるビーム安定化に寄与している。ビーム位置安定化フィードバックを用いる場合が最も多いが、高エネルギー領域ではビーム強度安定化フィードバック(MOSTAB)として用いる場合が一部含まれる。偏向電磁石ビームラインでは次章に述べる位相敏感検出回路を用いる回折強度を常に最大化するフィードバックシステムが利用されている。

# 第5章 分光器フィードバックによる 放射光 X 線ビーム強度の 最大化システムの開発

## 5.1 はじめに

Extended x-ray absorption fine structure spectroscopy (EXAFS)[46] (図 5.1) 測定は、標的原子の吸収係数の小さな振動を計測しなければならないため高品質の X 線ビームを必要とする。シンクロトロン放射光の硬 X 線光源を用いた EXAFS 測定では、正確な X 線のエネルギーチューニング ( $<0.1$  eV) と、ビーム位置と強度の安定性が、広いエネルギースキャン範囲 ( $\sim 1.5$ - $2$  keV) にわたって必要である。それ故、ビームエネルギーは通常定位置出射型二結晶分光器 [43] により調整される。SPring-8 標準型 2 結晶分光器はこのタイプである。コンピュータ及びカムリンクにより実現される定位置出射が理想的に行われた場合、エネルギースキャン中の 2 結晶は平行に保たれ、かつ出射ビーム位置は安定となる。しかしながらこの二結晶分光器ではエネルギースキャン中の第一第二結晶の平行を厳密に保つことが難しい。平行度はカムステージの加工精度に依存するからである。エネルギースキャン中の二結晶平行が安定でない場合、二結晶分光器から出射されるビームのエネルギー、強度および出射位置が不安定になる。そこで二結晶分光器を用いる EXAFS 測定では、測定データの質を改善するために、 piezoelectric (PZT) またはステッピングモーターを用いて、スキャンの間の各測定エネルギー点において  $\Delta\theta_1$  をゼロになるように精密に調整することがある [44]。この場合、数千点ものエネルギー設定を必要とする EXAFS の測定時間が著しく長時間化してしまう。

ビーム強度を制御量とした MOSTAB[9] によるフィードバックは二結晶の相対的角度を安定化させるものであり、エネルギースキャン中の分光器の精密調整にも用いることができると考えられる。しかしこの動作点は分光結晶の回折強度曲線の肩の部分であり、この部分では二つの結晶は平行ではない。これは出射ビームからの高調波除去には有利であるが、X 線のエネルギーが結晶のブラッグ角で規定される設定値から微妙にずれてしまう。そのため、ビーム強度安定化の MOSTAB を用いて測定した EXAFS スペクトルはエネルギー値がずれたものになる。更に、高調波除去は MOSTAB ではなく X 線ミラーシステムにより除去することもできる [45][67]。従って高調波除去の目的に敢えて MOSTAB を用いる必要は無い。

XBPM によるビーム位置測定値を制御量とするフィードバックは回折強度曲線の最大

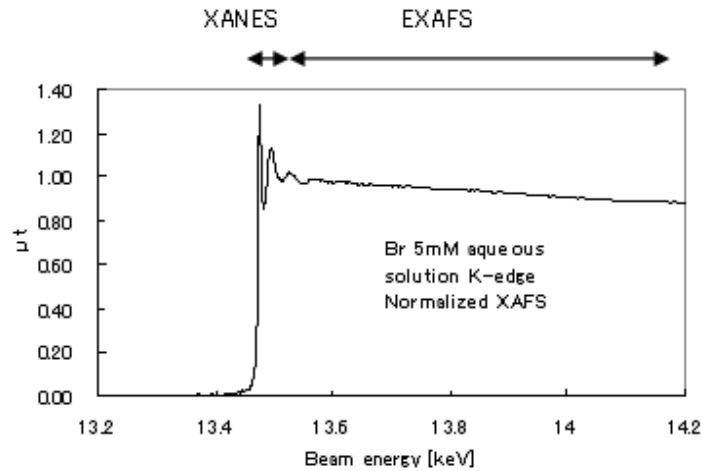


図 5.1: Br 5mM 水溶液の XAFS (BL38B1 にて測定)。X 線エネルギーをスキャンしながら試料の X 線吸収量を測定すると、標的原子の電子結合エネルギーの両側で X 線吸収量の急激な変化 (吸収端) が観測される。吸収端近傍のスペクトルを x-ray absorption near edge structure (XANES) と呼び、吸収端よりも高エネルギーの広い領域において小振幅の振動が見られる部分を EXAFS と呼ぶ。

値にビーム強度を安定化できる。しかし分光器と XBPM の間に集光ミラーを配置した場合には、 $\Delta\theta_1$  の回転量に対する分光器下流のビーム位置変動量が縮小されてしまいフィードバックがうまく機能しない。

以上の問題を克服するために、ビーム位置や強度以外の  $\Delta\theta_1$  の関数を用いるフィードバックを考える。この関数は回折強度の極大を与える  $\Delta\theta_1=0$  において連続であって極値をとらないという条件がある。このような関数の一つは回折強度曲線の微分である。微分曲線を得る方法として、ここでは位相敏感検出回路 (Phase sensitive detector:PSD) を用いる。位相敏感検出回路出力をビーム強度やビーム位置の代わりに制御量とし、フィードバック演算を行うことで、回折強度のピークを維持し二結晶平行を保ったまま分光器のエネルギーをスキャンを行う EXAFS 測定ができると考えられる。

## 5.2 位相敏感検出回路

第二章で示したように、フィードバックでビーム強度の安定化を実現するには、必ず結晶を平行からずらさねばならない。回折強度曲線の極大には制御目標値を設定できない。回折強度曲線は  $\Delta\theta_1 = 0$  では傾斜がゼロとなり、フィードバックがかけられない。そこで  $\Delta\theta_1 = 0$  の位置で傾斜がゼロとならない関数を作りだし、これにフィードバックをかければよい。その一つの方法は回折強度曲線の微分をとってフィードバックする方法である。この微分曲線の傾斜は、 $\Delta\theta_1 = 0$  でゼロにはならない。回折強度曲線の微分を得るためには位相敏感検出回路 (Phase sensitive detector:PSD) を用いる。

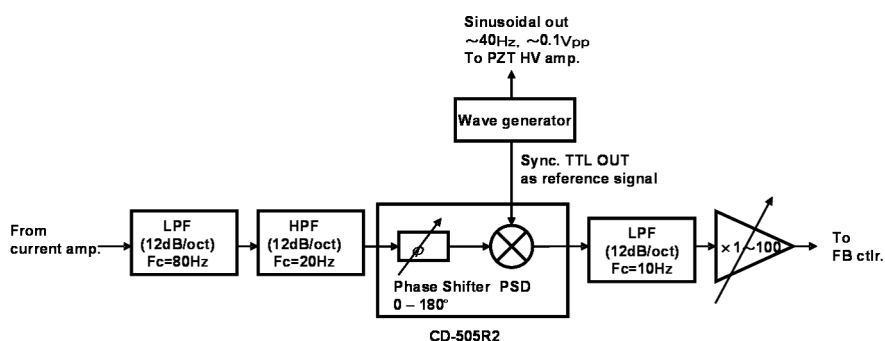


図 5.2: PSD のシステム図



図 5.3: PSD の写真。19inch ラックマウント型 EIA3U の回路として製作した。

図 5.2 は PSD のシステム図である。入力電圧は先ず、カットオフ周波数 80Hz の低域通過フィルタ (LPF) を通過後、カットオフ周波数 20 Hz の高域通過フィルタを通過させる。これら 2つのフィルタは広いバンド幅のバンドパスフィルタを形成することになる。これにより変調周波数以外の周数成分を取除く。バンド幅を広くすることで、PSD は高速に 응답し、エネルギースキャン中の分光器の機械的振動を迅速に減衰させることができる。フィルタされた信号はハイブリッド IC CD-505R2 (NF Co. Ltd) に入力される。CD-505R2 は 2つの回路ブロックをもち、位相シフトと位相敏感検波を行う。位相シフターは 0 – 180° の間の適当な位相に信号の位相を調整する。位相調整された信号は位相敏感検波回路の中で  $\pm 1$  V<sub>pp</sub> の矩形波と乗算させられる。得られた信号をカットオフ周波数 10 Hz の低域通過フィルタを通してフィードバック調節器に入れる。CD-505R2 の中の  $\pm 1$  V<sub>pp</sub> 矩形波は、図 5.2 の波形発生器 (wave generator) から出力される 40 Hz の TTL 参照信号と同期している。図 5.3 は PSD の写真である。正弦波の周波数 40Hz は、二結晶分光器と PZT を含むシステムの周波数特性に基づいて決めた (図 5.4)。図 5.5 は PSD の回路図である。

図 5.6 は PSD 出力と  $I_0$  の  $\Delta\theta_1$  に対する関係を示したものである。ここではフィードバック調節器出力を HV アンプに接続せず、HV アンプには DC オフセット電圧と正弦波の和だけが入力された状態で測定した。即ちオープンループでの測定となる。PSD 出力  $\Delta\theta_1=0$  でゼロクロスし、ここで二結晶分光器の結晶は平行になり  $I_0$  は最大化する。従っ

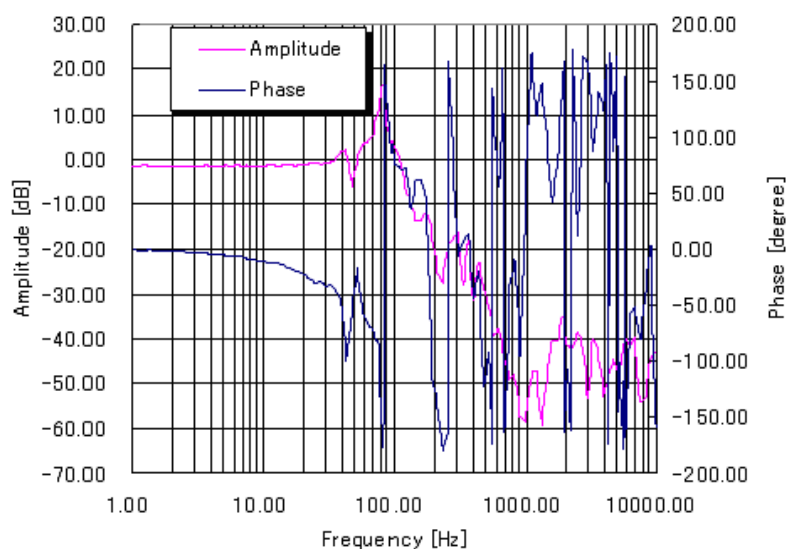


図 5.4: BL38B12 結晶分光器の周波数応答。0.1 V<sub>pp</sub> の正弦波電圧を PZT HV アンプに加え、二結晶分光器の  $\Delta\theta_1$  を周期的に駆動しながら、出射ビーム強度を電離箱で測定した。正弦波の周波数は 1 Hz から 10000Hz まで変化させた。垂直軸と水平軸はそれぞれ、振動振幅と位相、及び PZT を駆動した周波数である。振幅は 30 Hz まではフラットな特性を持ち、80Hz において共鳴点を持つ。100 Hz 以上では振幅は減衰した。我々は PSD の変調周波数を 40Hz とした。40Hz は共鳴周波数よりも低く、制御ループにおいて必要な応答を得るためには十分に高い周波数である。



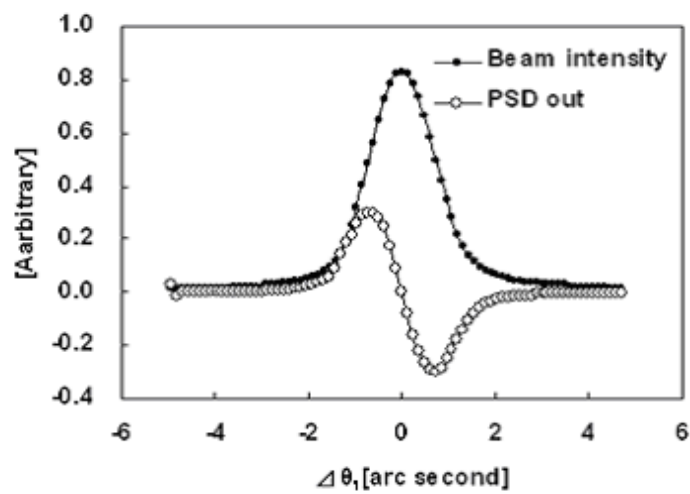


図 5.6: Si(311) 分光器における回折強度曲線と PSD の出力信号。ビームエネルギーは 20 keV。DC オフセット電圧と正弦波電圧 0.1 V<sub>pp</sub> を加算して PZT HV アンプに加えた。DC 電圧をスキャンして  $\Delta\theta_1$  を変化させながら電離箱で出射ビーム強度を測定することで回折強度曲線を得た。同時に PSD 出力を測定した。PSD 出力は回折強度曲線の傾斜に比例するものとなる。回折強度曲線の傾斜は  $\Delta\theta_1 = 0$  においてゼロクロスする。その点において、二結晶は平行となり、回折強度曲線はピークとなる。この点を制御目標値とすることで、本章のフィードバックシステムは 2 結晶を平行に保つことができる。

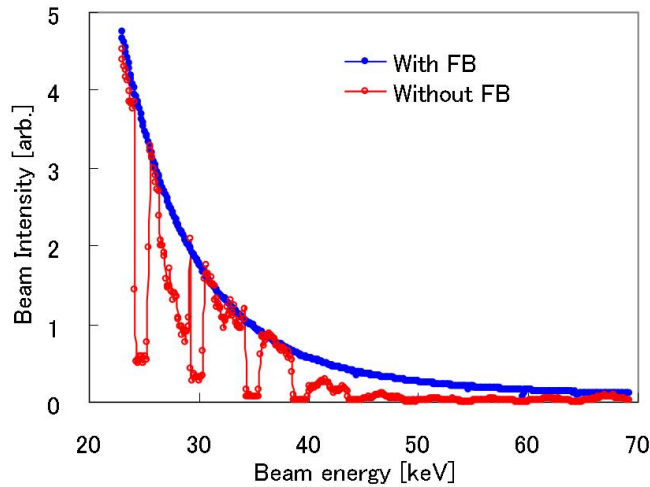


図 5.7: Si(311) 二結晶分光器 の 23 keV-79keV エネルギースキャンを行いながら行われた電離箱によるビーム強度測定結果。フィードバック有の場合に比較し、フィードバック無しではビーム強度変化が滑らかさを失い不連続となる。ビーム強度測定は自由空気電離箱を用い、BL38B1 で行った。

てフィードバック目標値をゼロにした上で、フィードバック調節器出力を HV アンプにつながるクロードループとすることで、システムは結晶を平行に保つ。

図 5.7 は、Si(311) 二結晶分光器で上記の制御を行いながら 23 -70 keV のエネルギースキャンを行い、電離箱で測定したビーム強度である。本測定は SPring-8 BL38B1 で行われた。PSD 出力をフィードバック調節器の IN1 に入力した。フィードバック調節器は I0 モードで運転し、PSD 出力ゼロを目標値として  $\Delta\theta_1$  調整を行った。フィードバックが無い場合、ビーム強度曲線は平滑さを失い不連続に乱れている。これはスキャンの間二結晶が平行を維持できないことを示す。Si(311) の回折強度曲線の半値幅 (FWHM) はこのエネルギー範囲で極めて小さく ( $\sim 1$  arcsec)、二結晶の平行を保つのは難しい。これに対しフィードバックを用いると、ビーム強度はエネルギースキャン中も滑らかに変化する。これはフィードバックシステムが適切に機能していることを示す。

### 5.3 測定システム

分光器の平行度を保つことはビーム強度と位置の安定化につながる。 $\Delta\theta_1$  の補正により第一結晶を第二結晶に対して平行に保つことは、エネルギー安定度を 3 倍高める効果がある。位相敏感検出回路を用いて、分光器を detuning せずにフィードバックを行う方法につき検討する。本方法は XBPM を用いないで回折強度曲線の極大にビーム強度を安定化することができる。しかも分光器のエネルギースキャン中、この状態を保つことができ



る。この方法を EXAFS 測定の効率化に応用する。

図 5.8 は位相敏感検出回路を用いる EXAFS 測定の全システムであり、SPring-8 の R & D ビームライン BL38B1[47](但し 2007 年現在では蛋白結晶解析ビームラインとなっている)に組み上げた。BL38B1 は偏向電磁石を光源し、その磁場は 0.679 T、臨界エネルギーは 28.9 keV である。このビームラインでは偏向部放射 X 線を SPring-8 偏向電磁石ビームライン標準の定位置出射型 Si 二結晶分光器 (神津精機株式会社) により単色化する。この二結晶分光器の分光結晶は回転傾斜配置 [43] であり、Si(311) を基本的な分光表面として用い、必要に応じて分光表面は Si(111), Si(511) に切り替えることができる。第 1 結晶のマウントは piezo 素子 (PZT) により傾けることができ、 $\Delta\theta_1$  を精密に制御する。分光後のビームは、実験ハッチにおいて、ロジウム (Rh)-コーティングの 1 m-長尺ミラーを 3~4mrad の視斜角で用いて集光するとともに、22 - 17 keV より上のエネルギーの X 線がカットされる。試料前後のビーム強度すなわち  $I_0$  と  $I_1$  を二つの電離箱で測定する。電離箱緒からの出力信号電流は二台の電流アンプ (Keithley 428) で電圧信号に変換し、更に電圧周波数 (VF) コンバーター (DS-VFC2 : SEIKO EG & G) により TTL 信号 (10 V/1 MHz) に変換される。周波数密度変調された TTL 信号は 994 二回路カウンター (ORTEC) で数値化し、GPIB 通信にて PC に取り込む。本測定を二結晶分光器のエネルギースキャンとともに行うことで EXAFS スペクトルを得る。 $I_0$  の電流アンプの電圧出力は分岐して、位相敏感検出回路 (PSD) に入力する。PSD からの出力は  $I_0$  モードのフィードバック調節器に入力する。フィードバック調節器の出力と、波形発生器から得られる正弦波 0.1 V<sub>pp</sub> を足し合わせた電圧を、静電容量センサー E-509.C1 (Physik Instrumente GmbH & Co.) を搭載した PZT 用高電圧 (HV) アンプ E-507.00 により 50 倍に増幅する。HV アンプ出力は PZT P410 (Physik Instrumente GmbH & Co.) に印加する。PZT は二結晶分光器の第一結晶を周期的に駆動する。この周期的駆動は振幅 0.24 arcsec となる。電離箱出力電流は、微小な正弦波成分を含む。PSD によりこの微小な正弦波成分を検出する。このシステムはフィードバックループを形成し、 $\Delta\theta_1$  を目標値に安定させることができる。本システムではビーム強度モニターとして電離箱を用いているが、SPring-8 の偏向電磁石からの放射の輝度では電離箱の線形性の破綻の問題は考慮する必要が無い。

## 5.4 測定結果

図 5.9 は、フィードバックを用いたエネルギースキャンの間の  $I_0$  信号の電流アンプ出力波形である。 $I_0$ (黄 : ch1) の波形が乱れる部分は、パルスモータによる分光器の駆動中である。ゲート信号 (赤紫 : ch4) が H レベルの間の 1 秒間に計測が行われる。 $I_0$  の乱れは、ゲート信号 H の立ち上がり以前に整定されて測定に影響を与えない。

図 5.10 は Si(511) 二結晶分光器 を用いた  $K_2MoO_4$  粉末の EXAFS スペクトルである。(A) :  $\Delta\theta_1$  調整を一切行わない、(B) : 各エネルギー点で  $\Delta\theta_1$  調整を PZT の直流電圧スキャンにより行う、(C) : 二結晶をフィードバックにより平行配置に安定させて測定する、の

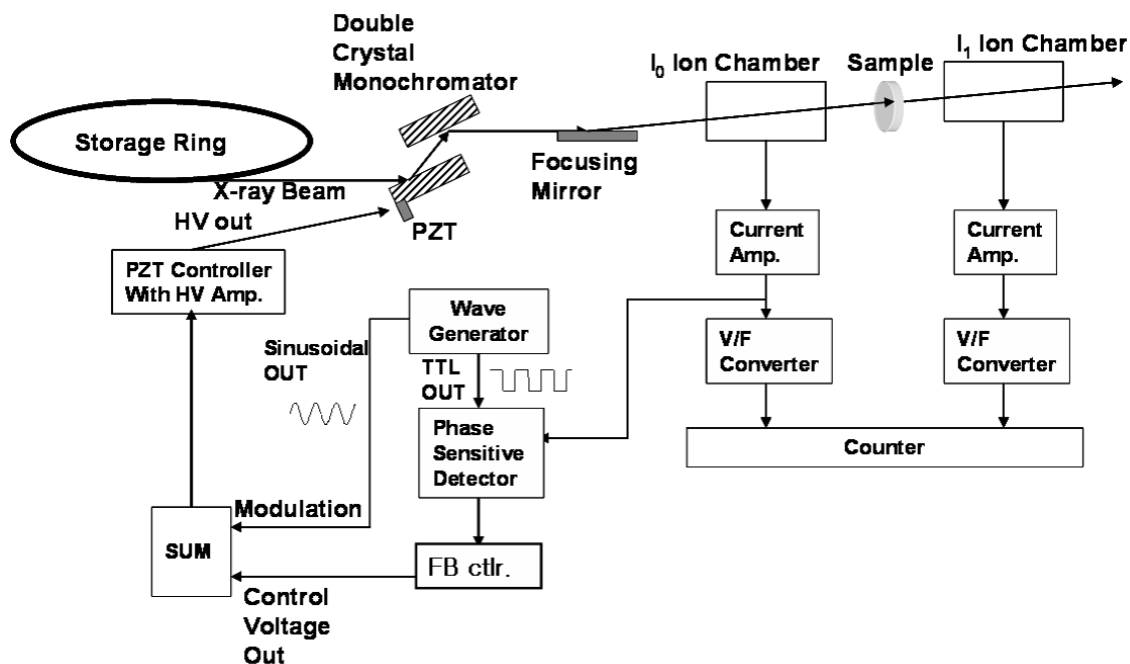


図 5.8: フィードバックシステムと PSD, 集光ミラー及定位置出射型 2 結晶分光器を用いた EXAFS 測定システム

3 方法で測定した。モリブデン M<sub>o</sub> の K-吸収端 EXAFS スペクトルを得るために、エネルギーは 19.6 から 21.6 keV までスキャンした。測定 (B) は 33 分間を要した。一方 (A)、(C) は 22 分間で測定された。(A) に比べると、(B) と (C) は高エネルギー側において滑らかなスペクトルが得られた。図 5.11 は高エネルギー側でのスペクトルの違いを強調するために図 5.10 のデータを スペクトルとして示したものである。(B)(C) は (A) に比較して、高エネルギー側の SN が良い。特に (C) では最も高エネルギー側まで良好な SN を得た。

## 5.5 考察

位相敏感検出回路を用いた回折強度の最大化は、エネルギー スキャン中のビーム強度を安定化した。この手法はビーム強度を一定にするタイプの MOSTAB に比べてエネルギー スキャンにおける利点がある。ビーム強度を一定にする方式の MOSTAB は DSEY において XFAS 測定で用いられたが、この方式は光源のスペクトル構造と検出器感度に応じてエネルギーごとに变化すべきビーム強度を、一定の目標値に強制的に安定化する。従って MOSTAB を働せた状態で分光器のエネルギー スキャンを行うと、二結晶の相対的角度は変化し、式 (2.21) によりビームエネルギーが変動する。EXAFS(Extended x-ray absorption



図 5.9: エネルギースキャン中の I0 信号 (ch1:黄) とゲート信号 (ch4 : 赤紫) の波形。ch2 : 緑は HV アンプに与えている周期的駆動電圧である。

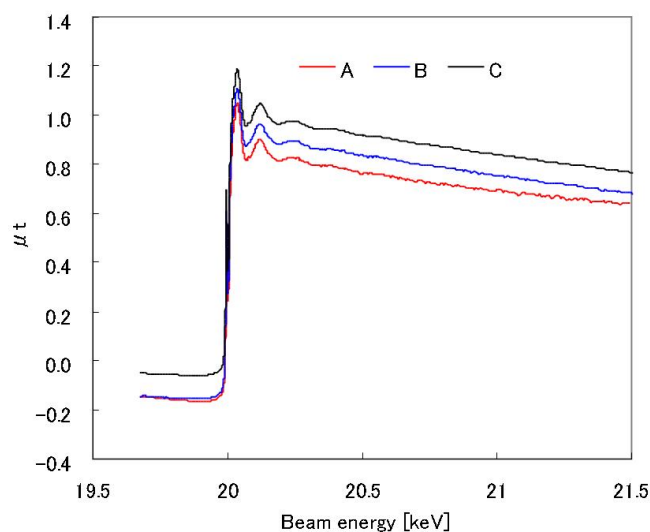


図 5.10: Si(511) 二結晶分光器を用いて各種条件で測定された  $K_2MoO_4$  粉末の K 吸収端 EXAFS。(A)  $\Delta\theta_1$  調整を行わない、(B) 各エネルギー点で PZT の DC 電圧スキャンにより回折強度曲線を測定しながら  $\Delta\theta_1$  調整を行う、及び (C) 結晶の平行配置を PSD によるフィードバックループにより維持する、の 3 つの方法を施しながら EXAFS を測定した。各測定点は 1 秒積算し SN を改善した。データ点数はそれぞれ 622 点である。 $K_2MoO_4$  粉末試料は Boron nitride (BN) を binder としてペレットにした。ペレットは直径 5 mm の円板状とした。BN 粉末中の  $K_2MoO_4$  粉末含有比率を考慮し、吸収係数が 1 となるように円板の厚さを決めた。

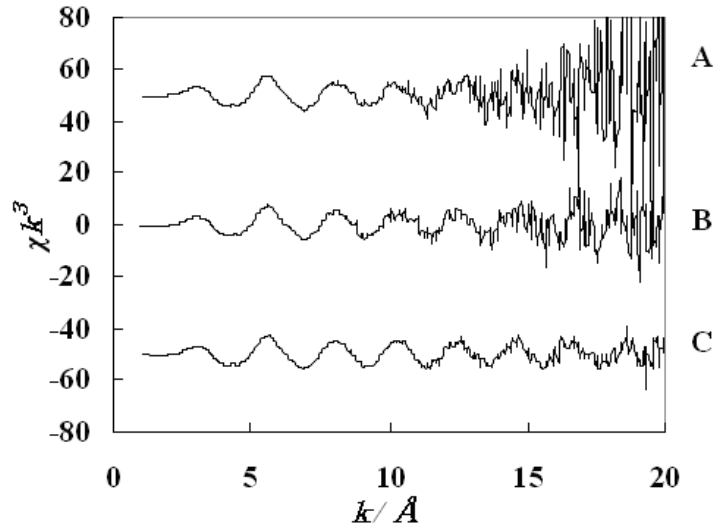


図 5.11: 図 5.10 の結果の スペクトル

fine structure) のような広いエネルギーレンジの測定では、分光器スキャンに伴いエネルギーシフトが蓄積してスペクトルの横軸がずれてゆく結果となる。一方、本章で示した位相敏感検出回路による方法は、回折強度の微分をゼロに保ち、分光器は二結晶平行配置を保つ。従って本方法は EXAFS 測定において、結晶平行の微調整作業を効率化し、ビームエネルギー設定精度を向上させる強力なツールとなる。

図 5.11 の (C) は動的なフィードバックループで測定中の二結晶平行を維持する。一方 (B) は PZT に DC 電圧スキャンで、二結晶平行を再調整しており、各エネルギーで数秒の時間を余計に消費する。これにより (C) の測定時間は従来方法 (B) の 60 % に短縮された。大量のデータ測定点を要する EXAFS 測定は長時間にわたる。統計精度を稼ぐための繰り返し測定により、全測定時間は更に増える。測定時間を 60 % に短縮することは、EXAFS 測定を効率的に実行する上で大きな利点である。

第一結晶が  $\Delta\theta_1$  で振動している状態での分光器のエネルギー分解能は (5.1) で示される。ここで  $\theta_B$  はビームの発散角、 $\Delta\theta_1$  は結晶の回折角度幅である。これは結晶分光器のエネルギー分解能 (2.12) と、(2.21) の  $\Delta\theta_1$  による結晶分光器のエネルギーシフトのコンボリューションにより得られる。

$$\frac{\Delta E}{E} = \cot \theta_B \sqrt{\Omega^2 + \omega^2 + (1.5\Delta\theta_1)^2} \quad (5.1)$$

本測定では  $\Delta\theta_1$  振幅は  $0.24 \text{ arcsec}$  ( $1.16 \mu\text{rad}$ ) である。また  $\theta_B$  は spectra[1] から  $62 \mu\text{rad}$ 、回折幅  $\Delta\theta_1$  は (2.14) によりエネルギースキャンの幅  $20\text{keV} \sim 21.5\text{keV}$  において約  $0.5 \text{ arcsec}$  ( $2.5 \mu\text{rad}$ ) となる。これらを用いて (5.1) により  $\Delta\theta_1$  を振動させた場合の結晶分光器のエネルギー分解能として  $2 \times 10^{-4}$  を得る。(5.1) における  $\Delta\theta_1$  の項の寄与は小さく、 $\Delta\theta_1=0$  として計算した場合に比較してエネルギー分解能は約 0.01 % しか悪化しない。偏向部放

射は大きなビーム発散角を持ち、この発散角に比して充分小さい結晶の摂動はエネルギーにほとんど影響を与えない。

図 5.11 の (C) は二結晶の平均的な位置が平行であるとはいえ、 $\Delta\theta_1$  が 40 Hz で振動することで、ビーム位置、強度が小振幅で周期的に変動することになる。0.24 arcsec の周期的駆動は 10m 下流の試料点において  $20\mu\text{m}$  の周期的ビーム位置変動、数十%の周期的強度変動を生む。ビーム位置変動は一般に粉末試料中の標的物質の吸収スペクトルを劣化させる要因になる。しかしこれらの変動は  $\Delta\theta_1$  駆動周期の 0.025 秒に同期し、各測定点の積分時間 1 秒より十分に短い時間での変動である。しかもその平均値自体はフィードバックループにより安定化される。従って、ビームパラメータの変動は積算により平滑化されスペクトルの質的劣化が防がれる。

更に図 5.11 (c) の SN は、PZT の DC スキャンでロッキングカーブのピークに毎回あわせている (B) と比較しても良好である。この理由は明らかでないが、ビーム位置の微量の周期的変動によりビームプロファイルの持つ不均一性の影響が減じられる可能性がある。これは粉末などの不均一試料の EXAFS 測定において有利である。本章での piezoelectric アクチュエータによる高速の  $\Delta\theta_1$  駆動振幅は小さく、この振幅は冷却水などにより見られる通常の分光結晶の振動振幅と同等程度である。従って周期的駆動が分光器自体に損傷を与えることはない。しかし SPring-8 標準型二結晶分光器の場合、 $\Delta\theta_1$  の調整では約 50 kg[49] の結晶ホルダー全体が回転させる。本章の EXAFS 測定は二結晶分光器の  $\Delta\theta_1$  を長時間にわたり高速振動させる。piezoelectric アクチュエータは 50 kg の重量負荷を長時間振動させることになる。この場合むしろ piezoelectric アクチュエータの耐久性について検討しておく必要がある。本章の R & D を行った BL38B1 の SPring-8 標準型二結晶分光器に装備された piezoelectric アクチュエータ (Physik Instrumente GmbH & Co. : P-410.C30) の仕様は表 6. 1 の通りである。また piezoelectric アクチュエータ駆動用アンプ (E-507.00 HVPZT アンプ : Physik Instrumente GmbH & Co. ) の増幅率は 50 倍である。

まず piezoelectric アクチュエータの発生する熱について考察する。piezoelectric アクチュエータの周期的駆動では、負荷とは無関係に式 (5.2) [50] に示される熱が発生する。

$$P \sim \frac{1}{4}\pi f C U_{pp}^2 \tan \delta \quad (5.2)$$

ここで、P は発生する熱エネルギー (W)。 $\tan \delta$  は誘電正接であり、小振幅駆動なら 1 ~ 2 % である。f は周波数 (Hz)、C は piezoelectric 素子電気容量 (F) である、U は piezoelectric 素子への印加電圧振幅 (V) である。また我々は piezoelectric コントローラに与える変調信号として周波数 40Hz、振幅 0.1V<sub>pp</sub> を採用したが、この変調信号は E507 アンプにより増幅され 40Hz、5V<sub>pp</sub> の駆動電圧として piezoelectric 素子へ印加される。これらと表 5. 1 に示した値から P を計算すると、2.36  $\mu\text{W}$  となり発生する熱量は極めて微少である。従って周期的駆動による発熱については無視してよい。

表5.1 BL38B1 ピエゾアクチュエータのスペック [50]

(1)	分解能	0.2nm
(2)	総駆動範囲	30 $\mu$ m
(3)	剛性 (Stiffness)	100N/ $\mu$ m
(4)	Blocked Force Generation	2700 N
(5)	Push pull force capacity	1000/50 N
(6)	電気容量	150nF
(7)	無負荷共鳴周波数	9 k Hz
(8)	標準操作温度範囲	-20 to +80 度
(9)	長さ	69 mm
(10)	実際に駆動する推定重量	約 50kg *1

次に、表 5.1 Push pull force capacity について考察する。一般にピエゾ素子は、圧縮されるよりも引っ張られる場合のほうが破壊されやすい。例えば表 5.1(5) のように圧縮に関しては 1000 N まで、引っ張りに対して 50 N までが最大値として耐えられる力である。SPring-8 標準型二結晶分光器では、主回転軸を 30 度に設定した場合、ピエゾアクチュエータにかかる負荷は最大となる。この時の負荷重量は表 6.1 の推定重量の 50 % 即ち 25 kg ほどになる。これに重力加速度を乗じた値約 250 N が定常的な圧力としてピエゾアクチュエータに負荷される。表 5.1(5) の Push force capacity (押しもどし力) は 1000N であり、250 N に比べて十分に余裕がある。更に周波数 40Hz、振幅 0.1V<sub>pp</sub> の変調信号で高速駆動を行う場合は、定常的な重力負荷 250N に式 (5.3) で計算されるピーク負荷 (F<sub>d</sub>) が加算される。

$$F_d = MA(2\pi f)^2 \quad (5.3)$$

ここで M は負荷質量 (50 kg)、A は駆動振幅、f は駆動周波数 (40 Hz) である。ピエゾコントローラへの外部制御電圧入力フルスケール 10V (駆動範囲 30  $\mu$ m) のうちの 0.1V で周期的駆動する場合駆動振幅 A は 0.3 $\mu$ m となる。これらから計算すると、F<sub>d</sub> として 0.95 N を得る。これに定常負荷 250N を加算しても表 5. 1 (5) の Push force capacity : 1000N に比べて十分に小さい。また F<sub>d</sub> は、ピエゾが収縮する際には定常負荷 250N を軽減するほうに働く。引張力は通常の使用方法では発生しない。従って表 5.1(5) Pull force capacity : 50N については問題にする必要がない。以上のことから、本章の分光器の小振幅駆動はピエゾアクチュエータにとって安全である。ただしピエゾアクチュエータの周期的駆動において、システムの機械的共鳴周波数での駆動はピエゾ素子を破壊するとされる [50]。BL38B1 において測定された分光器の周波数応答図 5.5 から 80 Hz に共鳴点があることがわかる。我々の用いている変調周波数 40Hz は共鳴周波数の半分弱である。

以上のことから本章で扱った  $\Delta\theta_1$  の周期的駆動を伴うフィードバックシステムは、安全に運転することができ、かつ EXAFS 測定を効率化することができる。本手法は最近 Quick XAFS 測定にも取り入れられ始めている。Quick XAFS では本章で述べたよりも更に高速に数十秒の時間で EXAFS を測定する。この場合結晶平行を保つための機構をス

テッピングモーター駆動やピエゾアクチュエータの DC 電圧でのスキャンニングに頼ることができない。このため本章に述べたフィードバックシステムが大きな力を発揮する。

## 5.6 まとめ

位相敏感検波器によるフィードバックを用いることにより、分光器のエネルギーを高速化した。本手法は MOSTAB によるビーム強度のフィードバックにおいて必須であった分光器の detuning を必要とせずに回折強度のピークにビーム強度を安定化させたままエネルギーをスキャンを行う。detuning は結晶の平行をずらすことでビームエネルギーをブラッグの条件からシフトさせる。位相敏感検出回路による方法は結晶の平行を厳密に保つことができ、フラックスの最大を利用できるとともにエネルギー設定の正確さを保証する。このことによりスペクトルデータの質を向上させる。本手法では、分光器の  $\Delta\theta_1$  を周期的に駆動することで、結晶の時間平均的な配置を平行に保つものである。この周期的駆動の角度を回折角度幅に比較して十分に小さい角度に設定することで、分光器のエネルギー分解能を損なうことなくエネルギーをスキャンを行うことができる。また周期的駆動に伴うピエゾ素子の機械的な損傷も、問題とならない範囲にすることができる。

位相敏感検出回路を用いた回折強度の最大化フィードバックは、エネルギーをスキャン中のビーム強度を安定化した。この手法は単純にビーム強度を一定にするタイプのフィードバックに比較して、エネルギーをスキャン測定における利点がある。ビーム強度を一定にする方式の MOSTAB は DSEY において XFAS 測定で用いられたが、この方式は光源のスペクトル構造と検出器感度に応じてエネルギーごとに变化すべきビーム強度を、一定の目標値に強制的に安定化する。従って MOSTAB を働せた状態で分光器のエネルギーをスキャンを行うと、二結晶の相対的角度は変化し、式 (2.23) によりビームエネルギーが変動する。EXAFS(Extended x-ray absorption fine structure) のような広いエネルギーレンジの測定では、分光器をスキャンに伴いエネルギーシフトが蓄積してスペクトルの横軸がずれてゆく結果となる。一方、本章で示した位相敏感検出回路による方法は、回折強度の微分をゼロに保ち、分光器は二結晶平行配置を保つ。従って本方法は EXAFS 測定において、結晶平行の微調整作業を効率化し、ビームエネルギー設定精度を向上させる強力なツールとなる。

## 第6章 結論

### 6.1 本研究の成果

第3世代放射光の光源輝度を生かすため、またビームラインでの様々な実験目的から $\sim 10\mu\text{m}$ 以下のビーム位置安定性と、ビーム強度ロスの最小化が必要である。本研究では、光源、スリット、分光器を設定したモデルビームラインにおいて、光線追跡と、ビーム位置・強度の実測データなどを併用して、試料点でのビーム位置、強度及びエネルギーを不安定化する要素につき解析を行った。

ビーム不安定性要素として着目したのは、(1)蓄積リング電子軌道の光源点における角度変動、(2)ビームによる直接熱負荷による分光結晶の熱変形、(3)間接熱負荷その他による分光結晶の角度変動、の3つである。(1)の電子軌道の角度変動は、SPring-8では光源から50m下流の試料点において最大 $\sim 10\mu\text{m}$ のビーム位置変動を与えるが、ビーム強度やエネルギーに与える影響は無視できる。(2)の分光結晶の熱変形は液体窒素冷却などにより結晶熱負荷対策が十分に施されている場合は小さく抑制される。またビーム導入後温度平衡に達して温度変化が1K程度に維持される条件ではビーム位置、強度及びエネルギー時間変動は更に微小となる。(3)の分光結晶の角度変動は、冷却配管の圧力変動、間接熱負荷、分光器の駆動に伴う荷重の変動その他により引き起こされる。この角度変動は $E=12.4\text{ keV}(\text{Si } 111)$ では試料点での $\sim 100\mu\text{m}$ のビーム位置変動、 $\sim 10\%$ のビーム強度変動、 $\sim 0.6\text{ eV}$ のビーム位置変動を引き起こし得る。以上のことによりビーム位置、強度及びエネルギー変動の主原因が、分光結晶の角度変動であると考えた。更にビーム位置、強度の変動は二結晶の平行配置からのずれ角を通じて互いに相関があると予想した。この事に基づき、ビーム強度もしくはビーム位置を制御量として、このどちらかを一定にするようにフィードバック制御で分光結晶角度を調整することでビーム位置、強度及びエネルギーがすべて安定化すると仮説を立てた。但しこの方法での安定化は、分光器へのビーム導入直後は(2)の結晶熱変形が大きいため成立しない。結晶が熱平衡にあることを条件とする。

以上のことを検証するために、試料点におけるビーム強度とビーム位置時間変動の実測データを用い相関解析を行い、これらに明らかな相関があることを見出した。これによりビーム位置、強度及びエネルギー変動の主原因が、分光結晶の角度変動であることを確認した。さらにビーム位置を制御量とし、分光第一結晶を動作点とするフィードバックシステムを開発しビーム位置変動を $\sim 0.1\mu\text{m}$ に抑制し、ビーム強度は変動幅 $\sim 10^{-3}$ で回折強度の極大に安定化した。このシステムを実現するために、サブミクロンオーダの位置



分解能を持つ XBPM である位置敏感電離箱及びチタン薄膜型 XBPM を導入した。またビーム位置演算機能を有する DSP 搭載型フィードバック調節器を開発した。またシステムの実用化を念頭に制御パラメータの自動調整機能を考案した。実現されたビーム位置安定度はビーム位置検出器である XBPM の精度に依存し、更なる高安定化には XBPM システムの技術開発が重要であることがわかった。

開発したシステムのモード切替えによりビーム強度を安定化するフィードバックの試験も行った。このビーム強度フィードバックの成績と上述ビーム位置フィードバックの成績、及びビームラインフロントエンド部の F E-XBPM のデータを比較することで、従来不明であった光源の変動が試料点ビームに与える影響をが明らかになった。このことを通じビーム不安定性への光源と分光器の寄与を論じることができるようになった。つまり、ここで開発したビーム安定化のための分光器フィードバックは各種ビーム位置モニターの情報と照らし合わせることで、光源の安定度の診断系として応用することができる。

ビーム位置フィードバックは分光結晶の角度変動だけでなく光源に起因するビーム位置変動も含めて補正する。そのことで生じるビームエネルギー変動は Si 111 分光結晶の出射ビームエネルギー  $E=10$  keV 程度の条件では  $\sim 10^{-3}$  eV と極めて少ないことが分かった。従ってこの条件ではビーム位置フィードバックはビーム位置・強度・エネルギー全てを実用上問題ない程度に安定化することが示された。

結晶の平行配置を維持するためにビーム位置モニターを用いる方法以外に、位相敏感検出回路を用いる方法を開発した。本法は微小振幅で分光第一結晶のビーム入射角を周期的駆動しながら、結晶の配置の時間平均値を平行に維持するものである。微小角摂動による分光器のエネルギー分解能の劣化は、ビーム発散角がアンジュレータに比較して大きい偏向電磁石ビームラインでは問題とならない。本法は偏向電磁石ビームラインにおいてエネルギースキンの効率化を必要とする XAFS 測定で実用され、測定時間の短縮と測定データの質的向上に貢献した。

## 6.2 展望

本研究のシステムは 10Hz 以下の周波数帯域において有効である。得られた安定度は多くの放射光実験の要求する水準を満たすものであり、第 4 章に示したとおり数多くのビームラインにおいて本システムが導入実用化され成果を上げている。より高周波の領域は、 piezo 素子とその駆動回路により制限を受ける。熱負荷対策に冷却系を必要とする分光結晶ステージの重量が大きく、 piezo 素子による高速駆動には限界がある。しかしながら、ビーム安定化を更に高周波数領域に拡大することには大きな意義がある。放射光利用実験における時分割測定はより短い時間領域でのビームの安定性を必要とするものが数多くある [70]。FFT アナライザーを用いた計測で [71]、光源及び分光器それぞれに起因する高い周波数のビーム位置や強度の振動の存在を観測することができる。分光器後でミラーなどによる高速駆動可能な補正用光学素子を開発するという方向を検討してゆくことも重要で

ある。一方周期的な高周波の変動は、周期の合う振動源を特定し振動源ごとに対策を行っていくことが効果的である [79]。振動しにくい構造設計 [72] やダンパーの検討も重要である。これらを複合的に用いて広い帯域の不安定性を取り除いてゆくことが求められる。

本研究のビーム位置フィードバックでは光源に起因するビーム位置変動を(分光器に起因するビーム位置変動とともに)分光結晶の角度で補正したことになるが、補正角が微小であるため、分光器射出ビームの大きなエネルギー変動や強度変動を招かない。これは光源加速器の軌道の安定化が十分に進められていることを前提としている。ところで、KBミラーなどを用いたマイクロビーム形成において、光源点をアンジュレータの中心部とする光学設計を行った場合、光源の角度変動よりもむしろ位置変動が集光点位置の安定性に影響を及ぼす。アンジュレータ上下流のBPMの実測データから判断した場合、SPring-8蓄積リングでの光源点の位置安定度はサブミクロンレベルであり、光源サイズより充分小さい。従って電子ビーム軌道の安定性はマイクロビーム形成に問題がないレベルである。光源の角度変動は同じように小さいが、試料位置までの距離が50m程度あることで無視できないビーム位置変動に変換される。このビーム位置変動を分光器で補正すると、仮想的に光源点を動かしたと同じである。例えば第3章で、光源の角度変動を補正するために分光器を  $\sim 0.024\mu\text{rad}$  動かしている。これは分光器から40m上流の光源点を垂直方向に  $\sim 1\mu\text{m}$  動かすことに対応する。この仮想的な移動量は光源点ビームサイズ  $\Sigma_{y0}=6.0\mu\text{m}$  に比べるとしきしまだ小さい。一方、分光器のフィードバックを行わない場合、分光結晶の角度変動に起因する試料点のビーム位置変動は  $100\mu\text{m}_{pp}$  ( $\sim 15\mu\text{m}$ ) ほどになる場合がある。この場合の分光結晶の角度変動は  $\sim 1\mu\text{rad}$  程度である。これは光源点の仮想的な移動距離として  $\sim 40\mu\text{m}$  であり、光原点ビームサイズより大きくなってしまう。従って総合的に見たときには分光器フィードバックを行うことが集光点ビームの安定化につながる。こうした状況により本システムはKBミラーを用いるマイクロビーム形成を行うビームラインにおいてもメリットがある [73]。それでは次世代光源 [74][75][76] で、より小さなビームサイズの集光を行う場合に、本研究のシステムにどのようなことが期待できるであろうか。

次世代光源XFELの様々な利用研究においては、微小領域計測と高密度光子利用の2つの観点から、高度なX線集光技術の確立が求められる。ここでは、ナノメートル領域でのX線集光を可能とする光学設計が必要である。波長の短いX線レーザーのための光学素子製作にあたっては、波長と同程度(ナノメートル以下)の精度での、形状制御や平坦性が確保されなければならない。製作技術の確立とともに評価技術の確立と評価結果に基づく形状修正技術の確立が求められている [77]。更に、理想的な光学素子が完成したとしても、所定の性能を発揮するためには、高精度での位置・角度制御が必要となることが予想される [78]。到達した微小集光ビームを実際の応用研究に利用していくためには、位置・角度制御のための調整機構に長時間安定性が求められ、その安定性を確保するためのフィードバックシステムの開発が必要となる [74]。以下に、必要となるフィードバックシステムについて考察する。

XFELにおいては完全コヒーレントな光を用いることにより超高輝度の回折限界集光

ビームを得ることが期待される。SPring-8の1km長尺ビームライン [42] のコヒーレント光と超精密加工によるK-Bミラー [77] により、36 nm (V) × 48 nm(H)の回折限界集光ビームが得られている。このビームによる走査型X線顕微鏡が、ナノスケールの分解能を持つ精密ステージにより実現され [78]、XFELの回折限界集光ビームを用いた研究への発展が期待されている。このシステムで回折限界集光の条件を保つには、K-Bミラーの視斜角をサブ  $\mu rad$  の安定度で維持する必要がある。視斜角はビームと光学素子の相対的な配置により決まる。ビーム位置モニターを用いるフィードバックシステムはこの条件の安定化の制御に力を発揮するであろう。また、試料点のビーム位置はサブナノスケールで安定でなければならない。ナノスケールのビームを扱う場合、試料点ビーム位置が実際に変動しているのか、あるいは試料を載せて精密に動かすためのステージに変動が生じているのか、それともその両方であるのかを判断することは非常に難しい。光学素子に対するフィードバックという面以外に、サンプルのトラッキングでナノビームを追跡するという方向も考えにいてゆく必要がある。どのような方向を選択するにせよ、X線光ビーム位置モニターは重要な役割を担うと考える。集光ビームの位置計測も必要とする場合、これはナノ集光後の狭いワーキングディスタンスの中で、他の装置との干渉を避けて配置されねばならない。これまでに無い新しいビーム位置モニターを考えてゆく必要がある。試料透過後のビームを診断に用いることでワーキングディスタンスの狭さを克服するという考え方が提案されている [75]。

一方、集光点ビーム位置の不安定性の原因は集光素子上流のビーム不安定からも発生する。計画されているXFELのビームラインでは光軸に含まれる線を実験ステーションにもたらさないためにダブルミラーや結晶分光器をビーム輸送途上に介在させて光軸とシフトさせる必要がある。シフトさせたビームを下流に導き、直進して光学素子を透過した線はストッパーに吸収させる [76]。もちろん分光器の目的はこれだけではなく、エネルギー 12.4keVでのバンド幅が10eV程度のXFELの単色性を更に上げるためでもある。これらダブルミラーや二結晶分光器もサブ  $\mu rad$  の角度安定性を持つ必要がある。これは2つの面から重要である。一つは、上に述べた集光素子の視斜角をサブ  $\mu rad$  以下に安定化し、回折限界集光条件を保つためである。いかに集光素子が安定であっても、集光素子に入射するビームが角度変動してしまうとせっかく作られた高精密集光素子の特性が生かされないことになる。もう一つ重要なことは、二結晶分光器やダブルミラーの角度変動がビーム位置変動を招き、下流集光素子の開口からビームが外れてしまうのを防ぐためである。斜入射型の集光素子の開口を大きくとれば集光素子サイズ全体が大型化するが、これは加工精度の面で不利である。有限サイズの開口に対して入射ビーム位置を安定化させる必要がある。ビーム位置不安定は開口から外れる光子フラックスの無駄であり、実効輝度の低下である。これらの場合に重要なことが、集光素子上流に配置されるミラーや二結晶分光器の安定化であることは言うまでもない。従って本研究に述べてきた光学系の安定化手法はここにも貢献し得るものである。しかし、ここにおいて大きな問題となるのが光源の変動と光学素子の変動の切り分けである。本研究で行ったように光学素子からの出射ビーム位置を制御量としてフィードバックを行う方法は、光源の変動を補正することで

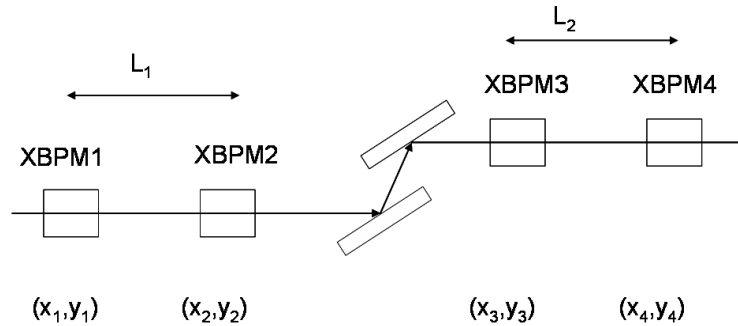


図 6.1: 分光器上下流のビーム位置モニタリング

新たなビームの角度変動や分光エネルギーの変動を生み出す。しかしこれらが微小であるという前提において、本研究に示した方法は実用性を持つことを上に述べた。ところが回折限界集光ではサブ  $\mu\text{rad}$  のビーム角度変動を抑制しなくてはならない。この場合、光源と光学系のそれぞれの角度変動を正確に把握し、適切な方法でビームを安定化しなくてはならない。そこでダブルミラーや二結晶分光器の上下流のビーム位置モニタリングによりビーム不安定要因の切り分けに取り組む必要がある。

第3世代アンジュレータ光の分光器上流の準単色光位置モニターは、偏向部放射の混入により定量的なビーム位置情報を得るのが難しいとされてきた [6]。XFEL の場合では偏向電磁石はアンジュレータ下流のビームダンプ前に配置される。ここからの放射は光軸のレーザー光に比較して極めて微弱となる。またアンジュレータの自然放射もレーザー光に比較し同様に微弱である。即ち XFEL は第3世代のアンジュレータ光に比較してバックラウンドノイズが少なく光軸の計測を行いやすいと考えられる。既に光ビーム位置モニターとして有望なものが提案されている [75]。

図 6.1 は二結晶分光器 (またはダブルミラー) の安定化のために考え得る光ビーム位置モニターの配置である。二結晶分子機上下流にそれぞれ2台の光ビーム位置モニターが配置され、上下流のビーム位置を計測する。ここで結晶分光器のビーム入射角と出射角が常に同一であることを指標に二結晶平行を制御するようにフィードバック制御を行うことを考える。そのためには (6.1)(6.2) の関係が満たされていけばよい。(6.1) は本研究で行ったように第一結晶の  $\Delta\theta_1$  を調整することで制御する。(6.2) は同じく第一結晶を第二章の図 2.13 に示す Y 方向に回転させて調整する。XFEL では水平方向のビームサイズも垂直方向のビームサイズと同様に小さくなるため、水平方向のビーム位置調整を行うことも必要となるであろう。L1, L2 は感度よく角度検出を行うために 10 m 以上とするのがよいと考えられる。この方法は光源の変動分を抑制せず、分光器の角度変動による仮想的な光源点の移動を選択的に除去する。光源の変動は分光器下流に残るビーム位置変動として観測される。これは本来光源加速器の安定化の努力により改善されてゆくべき部分となる。こうして、より厳密にビーム不安定の原因を切り分けて対策を行ってゆくことが可能となる。

$$\frac{y_1 - y_2}{L_1} - \frac{y_3 - y_4}{L_2} = 0 \quad (6.1)$$

$$\frac{x_1 - x_2}{L_1} - \frac{x_3 - x_4}{L_2} = 0 \quad (6.2)$$

上にも述べたが、XFELにおいて得られる光のエネルギーバンド巾は波長1 において10eVほどとなる。つまり光源のバンド幅が第3世代のアンジュレータよりも格段に狭く、分光器からの出射強度は結晶角度設定の安定度に強く依存し、したがって分光器の安定度は更に重要となる。また、光源の安定度が蓄積リングと比べると劣るため、分光器の安定性は状況を混乱させないために非常に重要である。つまり光源の不安定により分光結晶のエネルギー設定と発振エネルギーがずれるとビーム強度が激減する。当然加速器側における十分なエネルギーの安定化が望まれるが、分光器の不安定要素を取り除くことは重要である。上述の方法は第二結晶を基準として第一結晶の角度を補正するのであるから、エネルギー安定化のためには第二結晶の安定度を向上させる努力は別途必要である。第二章に述べたとおり、結晶平行度がずれる場合、第一結晶の角度変動のほうが第二結晶の角度変動よりもエネルギー変動を3倍も生む。分光結晶の回折巾が2eVに対して、入射光のバンド巾が10eVと狭く、分光器のエネルギー変動をできるだけ抑制しないとビーム強度のロスを生む。同じ角度変動でエネルギー変化が3分の1ですむ第二結晶をエネルギーの基準とすることが妥当である。

以上のように、本研究で示し実用化したシステムと、その考え方は次世代光源の光学系を考えていく上で重要な点を多く含んでいる。SPring-8の建設段階においては光学素子の安定度について、分光結晶の熱負荷を中心にその対策を考え設計がおこなれてきた。結晶の熱変形は輝度の大幅な低下を招き、第3世代の意味を失わせる。回転傾斜配置のピンポスト水冷方式結晶や、液体窒素冷却などはこの技術的問題を見事に解決した。建設期を経て利用研究が活発化するなかで今度は、結晶の熱負荷対策が成功して高輝度高平行が実現された「そのビーム」の位置や強度の高精度の安定性ということが叫ばれ出したのであった。こうして本研究のような光学素子のフィードバック制御や光位置モニターという技術に実用的な価値が見出されることとなった。高輝度高平行を特徴とするアンジュレータ光は利用技術の成熟に伴い高安定度を追求する宿命にあった。さらなる高輝度高平行を求める次世代光源の建設においては、その初期段階から光学素子のフィードバック制御やビーム位置検出器の活用を念頭におくことが必要である。

## 謝 辞

学位論文をまとめるにあたり、主査として丁寧なご指導を賜りました、高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所の河田洋教授に感謝いたします。また副査を引き受けて下さり、数多くの貴重なコメントをいただきました、飯田厚夫教授、野村昌治教授、伊藤健二教授、足立伸一准教授、ならびに東京工業大学の佐々木聡教授に感謝いたします。伊藤健二教授には、総合研究大学院大学学位論文博士審査への紹介者としてもお世話になりました。

高輝度光科学研究センター（現：理化学研究所）の浅野芳弘氏には、本研究での博士論文執筆を勧めていただき、学位論文の意義など細かい点までご指導いただきました。後藤俊治氏には X 線光学とビームラインコンポーネント等本研究の全般にわたりご指導いただきました。望月哲郎氏は液体窒素冷却分光器につき忍耐強く教えて下さいました。高輝度光科学研究センター参与、菊田惺志氏は本研究に初期のうちから興味をお持ち下さり励まして下さいました。田中良太郎氏、増田剛正氏から、職場環境面でのご配慮と励ましをいただきました。

本研究は理化学研究所の西野吉則氏の DESY 留学中の筆者宛の E メールから始まりました。そこに DESY ではビーム安定化に MOSTAB というものを用いるとありました。西野氏の帰国後、DESY の MOSTAB を参考にアナログ回路フィードバック制御器を製作し SPring-8 理化学研究所ビームライン BL29XU で動作試験を始めました。この試験は、西野氏に加え、理化学研究所の玉作賢治氏、高輝度光科学研究センターの鈴木基寛氏、矢橋牧名氏らの協力で行われました。これに高輝度光科学研究センターの佐藤一道氏が開発を進めていた位置敏感型電離箱を組み合わせ、ビーム位置と強度が同時安定化する条件を見出しました。これをもとに本方法の第 3 世代放射光施設への実用化を模索し始めました。この共同作業は理化学研究所放射光科学総合研究センター長、石川哲也氏の指導の下に行われました。石川氏からは、熱負荷の問題など、本手法の第 3 世代放射光への適用時に危惧される点を種々ご指摘いただきました。

本システムの最適化は様々な放射光利用実験に共通の問題を解決することを意図し、SPring-8 ビームライン利用支援にたずさわる多くのの方々との作業により行われました。高輝度光科学研究センターの谷田肇氏とともに SPring-8 R & D ビームライン BL38B1 で行った多くの作業の中から、DSP 搭載型フィードバック回路、制御用 GUI、フィードバックパラメータの自動調整法、位相敏感検出回路など多数のものが開発されました。これらは理化学研究所の井上忍氏、高輝度光科学研究センターの広野等子氏、古川行人氏、大端通氏らによるソフトウェア開発の多大な助力で成し遂げられました。チタン薄膜型 XBPM と信号処理回路の検討は、SPring-8 R & D ビームライン BL46XU を中心に行い、高輝度光科学研究センターの水牧仁一朗氏、木村滋氏からご支援をいただきました。この XBPM は高輝度光科学研究センターの川瀬守弘氏により設計されました。高輝度光科学研究センターの宇留賀朋哉氏、坂田修身氏、高垣昌史氏、河村直巳氏、寺田靖子氏、大石泰生氏、本間徹生氏、Alfred.Q.R. Baron 氏（現：理化学研究所へ出向）、日本原子力研究開

発機構の塩飽秀啓氏、菖蒲敬久氏、理化学研究所の田中義人氏からは、このシステムの運用中に得たデータやご意見などを多数いただきました。位置敏感型電離箱等 X 線検出器につき高輝度光科学研究センターの鈴木昌世氏、豊川秀訓氏より様々な教えを受けました。蓄積リング軌道について高輝度光科学研究センターの早乙女光一氏からデータの提供を受け、また教えていただきました。高輝度光科学研究センターの岡田京子氏、松下智弘氏には本論文の構成を考える上で貴重なご意見をいただきました。基幹チャンネル部の光位置モニターについては高輝度光科学研究センターの青柳秀樹氏から多くを学びました。フロントエンドスリットをはじめ様々な基幹チャンネル部コンポーネントにつき高輝度光科学研究センターの高橋直氏に種々教えていただきました。光線追跡プログラム SHADOW につき高輝度光科学研究センターの大橋治彦氏、仙波泰徳氏に教えていただきました。アンジュレータ放射について理化学研究所の田中隆次氏、原徹氏に多くのことを教えていただきました。本研究を遂行する礎となった回路開発技術はツジ電子代表取締役社長、辻信行氏、植松弘之氏をはじめとする皆様から教えを受けました。

位置敏感電離箱の高速信号処理回路は高崎大輔氏(元スプリングエイトサービス(株)):(現)三菱電気システムサービス(株))と試作試験を進め、クリアパルス株式会社の協力で実用化しました。チタン薄膜型 XBPM の信号処理回路と位相敏感検出回路は株式会社アイデンの協力で実用化されました。DSP 搭載型フィードバック回路は、株式会社帝国電機製作所と、三菱電機エンジニアリング株式会社の協力で実用化されました。

これらすべての皆様に感謝の意を表し謝辞とさせていただきます。

## 参考文献

- [1] Hideo Kitamura, "Insertion devices for Third-generation light source", Review of Scientific Instruments, Vol.66, No.2 (1995) 2007-2010
- [2] H.Tanaka et al., "Top-up Operation at SPring-8 - Towards Maximizing the Potential of a 3rd Generation Light Source", 9th European Particle Accelerator Conference, 5-6 July, 2004 Lucerne.
- [3] H.Tanaka et.al., "Stable top-up operation at SPring-8", Journal of Synchrotron Radiation, Vol.13 (2006) 378-391
- [4] 宇留賀 朋哉、高橋 嘉夫、谷田 肇、寺田 靖子、"希薄試料に対する蛍光分光器を用いた高感度 XAFS 測定"、第 19 回日本放射光学会年会、2006 年 1 月 7 日～9 日、於 名古屋大学
- [5] Shigeru KIMURA, "Development of anomalous x-ray diffraction measurements using a beam position stabilized MOSTAB", SPring-8 user experimental report, BL46XU R04B46XU-0022N KIMURA, 315(2004)
- [6] H.Aoyagi, T. Kudo and H. Kitamura, "Blade-type X-ray beam position monitors for SPring-8 undulator beamlines", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 467-478 (2001) 252-255
- [7] K. Sato, H.Toyokawa, Y.Kohmura, T.Ishikawa and M. Suzuki, "A Position -Sensitive Ionization Chamber for Diffraction Studies at Synchrotron Sources", Proc.SPICE Vol.3774, (1999) 115-121
- [8] 大柳宏之編 「シンクロトロン放射光の基礎」丸善株式会社、(1996) など
- [9] A.Krolzig, G.Materlik, M.Swars, and J.Zegenhagen, "A feedback control system for synchrotron radiation double crystal instruments, ", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Vol.219 (1984) 430-434.
- [10] A.Krolzig, G.Materlik, and J.Zegenhagen, "A dynamic control and measuring system for synchrotron x-ray rocking curves", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Vol.208 (1983) 613-619
- [11] 計測自動制御学会, 「自動制御ハンドブック」, p.465、オーム社 (1983)
- [12] 田中隆次, "特別企画 放射光源シリーズ (10) 挿入光源", 放射光、Vol.17, No.5 (2004), 298-302
- [13] <http://www.esrf.eu/>



- [14] Roger J. Dejus and Manuel Sanchez del Rio, "XOP: A graphical user interface for spectral calculations and x-ray optics utilities", *Rev. Sci. Instrum.* 67(9) 1996
- [15] Robert K. Smither, "Summary of a workshop on high heat load x-ray optics held at Argonne national laboratory", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 291(1990)286-299
- [16] T. Ishikawa, H. Yamazaki, K. Tamasaku, M. Yabashi, M. Kuroda, and S. Goto, "Water cooled first crystal as a solution for high-heat-load problem at the SPring-8 undulator beamlines", *Proceedings of SPIE*, Vol.3448 (1998) 2-10
- [17] K. Tamasaku, M. Yabashi, D. Miwa, T. Mochizuki, and T. Ishikawa, "Performance of cryogenically cooled monochromators at SPring-8", *Proceedings of SPIE*, Vol.4782 (2002) 132-142.
- [18] 玉作賢治、矢橋牧名、望月哲郎、石川哲也、"BL29XUL/BL19LXU に於ける標準型 2 結晶分光器の液体窒素冷却化"、SPring-8 利用者情報/2001 年 9 月 390-395
- [19] Lonny Bernan, "Recent crystal cooling experiments at NSLS", *Thermal problems of synchrotron radiation optics*, Satellite meeting to SRI91,20, July,1991,Chester College, UK.
- [20] R.K.Smither et al., "Liquid gallium cooling of silicon crystals in high intensity photon beams", *Review of Scientific Instruments*, Volume 60, Issue 7, pp.1486-1492(1989)
- [21] 淡路晃弘、香村芳樹、鈴木芳夫、望月哲朗、「モノクロメータの液体窒素冷却」、第 3 回 Spring-8 シンポジウム、1999、10/14、SPring-8
- [22] T. Mochizuki, Y.Kohmura, A. Awaji, Y.Suzuki, A. Baron, K.Tamasaku, M. Yabashi, H. Yamazaki and T.Ishikawa, "Cryogenic cooling monochromators for the SPring-8 undulator beamlines", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, Vol.467-468 (2001)647-649
- [23] E. M. Dufresne, D. A. Arms, S. B. Dierker, R. Clarke, Y. Yacoby, Bob MacHarrie, and Ron Pindak, "Design and performance of a stable first crystal mount for a cryogenically cooled Si monochromator at the Advanced Photon Source", *Review of Scientific Instruments*,(2002),Vol.73, Issue 3, pp. 1511-1513
- [24] J.A.Golovchenko, R.A.Levesque and P.L.Cowan,"X-ray monochromator system for use with synchrotron radiation source", *Review of Scientific Instruments*, Vol.52, No.4, (1981)509-516

- [25] D.Mills and V.Pollock,"Stabilizing feedback system for synchro tron radiation monochromators", Review of.Scientific.Instruments, Vol.51, No.12,(19 80)1664-1668
- [26] C.Marven & G.Ewers,"A simple approach to DIGITAL SIGNAL PROCE SS-ING",Texas Insturments (1994) など
- [27] 須田信英,「制御工学」, 機械系 大学講義シリーズ 29、コロナ社、(1987)
- [28] 須田信英,「PID 制御」システム制御情報学会編, 朝倉書店、(1992)
- [29] 古田勝久、富田武彦、"先端技術の動向報告"、計測と制御、Vol.29,No .10(1990) 953-958,
- [30] PI catalog,"Micropositioning, Nanopositionig, Nanaoautomation"(2001)
- [31] K. Sato, H.Toyokoawa, Y.Kohmura, T.Ishikawa and M. Suzuki," A Position-Sensitive Ionization Chamber for Diffraction Studies at Synchrotron So urces", Proc.SPICE Vol.3774, (1999) 115-121
- [32] 工藤統吾、西野吉則、井上忍、石川哲也、"蛍光線検出形X線ビーム位置モニター"、放射光 Vo. 18, No.16 (2005) 373-377
- [33] R. W. Alkire, G. Rosenbaum, and G. Evans,"Design of a vacuum- compatible high-precision monochromatic beam-position monitor for use with synchr otron radiation from 5 to 25 keV", Journal of Synchrotron Radiation, Vol.7, (2000) 61-68
- [34] Earl W. McDaniel,"Atomic collisions",Wiley Interscience,(1989)
- [35] R. W. Alkire, and F.J Rotella," An Incident-Beam Monitor for U se in Protein Crys- tallography at a Synchrotron Source", Journal of Applied Crystall ography, Vol.30 (1997) 327-332
- [36] SPring-8 年報"BL13XU 表面構造解析", (2002)70-71
- [37] <http://www.bergoz.com/products/NPCT/PCT-downloads/files/Unser-PCT.pdf>  
[
- [38] A.Yamashita,T.Fukui,K.Kobayashi,T.Masuda,A.Takeuchi,R.Tanaka a nd T.Wada,"The Database System for the Spring-8 Stprage Ring Con- trol",ICALPCS'97 , Nov.3-7 (1997),IHEP, Beijing, China
- [39] 株式会社帝国電機製作所：〒 679-4395 兵庫県たつの市新宮町平野 60 番地)

- [40] T. Matsushita, T. Nakatani, Y. Ishizawa, T. Ohata, Y. Furukawa, M. Takeuchi, M. Ishii, H. Kimura, S. Goto, K. Takeshita, T. Kudo, T. Takagi, T. Ishikawa, "Beamline Interlock System and rfBPM Interlock System in SPring-8", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Vol.467-468, No.1(2001)816-819
- [41] J.G. Ziegler and N.B.Nichols,"Optimum Setting of Automatic Controllers", Trans. ASME, Vol. 64(1942)759-768
- [42] K. Tamasaku, Y. Tanaka, M. Yabashi, H. Yamazaki, N.Kawamura, M. Suzuki and T. Ishikawa,"SPring-8 RIKEN beamline III for coherent X-ray optics", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Vol. 467-468 (2001) 686-689
- [43] M.Yabashi, H. Yamazaki, K. Tamasaku, S. Goto, K. Takeshita, T. Mochizuki, Y. Yoneda, Y. Furukawa, and T.Ishikawa, Proceedings of SPIE, "SPring-8 standard x-ray monochromators", Vol.3773 (1999) 2-13
- [44] H. Tanida and M. Ishii, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 467-468, (2001) 1564
- [45] T.Uruga, H. Tanida, Y. Yoneda, K. Takeshita, S. Goto and T. Ishikawa, "Standard X-ray Mirror System for Spring-8 Beamlines", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research section A, Vol.467-468 (2001) 782-784
- [46] 宇田川康夫編、"X線吸収微細構造-XAFSの測定と実際", 日本分光学会 測定法シリーズ 26, 第3版 (1999)
- [47] H. Tanida, A. Kikuchi, K. Miura, K. Takeshita, S. Goto, Y. Shiro, and T. Ishikawa, AIP Conf. Proceedings, Vol.705 (2004) 486
- [48] 神津精機株式会社小島氏による私信
- [49] MicroPositioning, NanoPositioning, Nanoutomation: Solutions for Cutting-Edge Technologies," Data Book of Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. (2001).
- [50] Atsushi Koyama, Satoshi Sasaki, Tetsuya Ishikawa, "Closed feedback system on the vertical beam position", Review of Scientific Instruments, Volume 60, Issue 7, pp.1953-1956
- [51] Togo Kudo, Sunao Takahashi, Nobuteru nariyama, Takeshi Tachibana and Hideo Kitamura,"Synchrotron radiation x-ray beam profile monitoring using CVD diamond film", Review of Scientific Instruments, Vol.77, (2006) 123105 (1-4)
- [52] 北村英男：挿入光源ハンドブック'96 財団法人高輝度光科学研究センター版

- [53] 後藤俊治、石川哲也、”放射光利用におけるX線光学素子”, 日本結晶学会誌、Vol.47 (2005) 171-179
- [54] 菊田惺志 「X線回折・散乱技術」東京大学出版会、物理工学実験 1 5 (1992)
- [55] B. Lai and F.Cerrina,” SHADOW: A synchrotron radiation ray tracing program”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Volume 246, Issue 1-3, p. 337-34
- [56] T.Kudo and H.Tanida,” A feedback system for improving the performance of EXAFS measurements”, Review of Scientific Instruments, Vol.78,(2007)033104(1-4)
- [57] E. M. Dufresne, J.A. Guzman, S.B. Dierker, R. Clarke, D. A. Arms, and D.A. Walko, ”Experience with a fluorescence-based beam position monitor at the APS”: AIP conference proceedings 705, 679 (2004)
- [58] 佐藤一道,”大強度 X 線ビーム入射時における電離箱の挙動”SPring-8 利用者情報 / 1998 年 11 月 34
- [59] T.Tanaka and H.Kitamura, J.Synchrotron Radiation,8 (2001)1221
- [60] M. Oura, Y. Sakurai and H. Kitamura,”Front-End XY-Slits Assembly for the SPring-8 Undulator Beamlines”, Journal of Synchrotron Radiation, 5 (1998) 606-608
- [61] 2nd Workshop on Beam Orbit Stabilization, SPring-8, Japan, December 4-6, 2002 etc.
- [62] G.M. Müllerhaupt,”Beam stability in the third-generation SR source”, Review of Scientific Instruments, Vol.66, No.2 (1995) 2000-2005
- [63] R.O.Hettel,”Beam stability at light source”, Review of Scientific Instruments, Vol.73, No.3, (2002) 1396-1401
- [64] Sakuo Matsui, Masaya Oishi, Hitoshi Tanaka, Tetsuhiko Yorita, Koji Tsumaki, Noritaka Kumagai and Toshiharu Nakazato,”Orbit fluctuation of electron beam due to vibration of vacuum chamber in quadrupole magnets”, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.42 (2003) L338-L341
- [65] 田中均,”特別企画:放射光源シリーズ(7):ビーム安定化に向けて(1)”,放射光, Vol.17, NO.2,72 (2004)
- [66] 宇留賀朋哉、野村昌治、”特別企画:ビームライン光学技術シリーズ(7):光の形を整形する(反射鏡編)”,放射光、Vol.19, No.4(2006)248-257

- [67] Charles Kittel, "Introduction to Solid State Physics", (第6版 キittel固体物理学入門(上) 丸善株式会社 (1988))
- [68] 尾嶋正治編、"極限状態を見る放射光アナリシス"、学会出版センター、3章
- [69] Y. Nishino, T. Kudo, M. Suzuki, and T. Ishikawa, "Stability issues in the use of coherent x-rays" Proceedings of SPIE , Vol.5195 (2003) 94
- [70] 青山光輝、福居知樹、上杉健太郎、鈴木芳夫、"SPring-8 標準型分光器の振動抑制", 第18回日本放射光学会年会、放射光科学合同シンポジウム
- [71] Spring-8 年報 2005,80
- [72] Stanford Linear Accelerator Center, "Linac Coherence Light Source Conceptual Design Report", SLAC-R-593, April 2002 UC-414
- [73] DESY XFEL Project group, European XFEL Project team, Deutsches Elektronen-Synchrotron, Member of the Helmholtz Association, "The European X-Ray Free Electron Laser Technical design report", DESY 2006-097 (JULY 2007)
- [74] RIKEN Harima Institute, Coherent X-Ray Optics Laboratory, Coherent Synchrotron Light Source Physics Laboratory and Advanced Electron Beam Physics Laboratory, "SCSS XFEL Conceptual design report" (MAY 2005)
- [75] H. Mimura, H. Yumoto, S. Matsuyama, Y. Sano, K. Yamamura, Y. Mori, M. Yabashi, Y. Nishino, K. Tamasaku, T. Ishikawa, K. Yamauchi, "Efficient focusing of hard x rays to 25 nm by a total reflection mirror", Applied Physics Letters 90, 051903 (2007)
- [76] Satoshi Matsuyama, Hidekazu Mimura, Hirokatsu Yumoto, Hideyuki Hara, Kazuya Yamamura, Yasuhisa Sano, Katsuyoshi Endo, Yuzo Mori, Makina Yabashi, Yoshinori Nishino, Kenji Tamasaku, Tetsuya Ishikawa and Kazuto Yamauchi, "Scanning Hard-X-ray Microscope with Spatial Resolution Better than 50 nm Using K-B Mirror Optics", Proc. 8th Int. Conf. X-ray Microscopy, IPAP Conf. Series 7 pp.59-61
- [77] Koji Kiriya, Hideaki Shiwa, Tetsuri Mochizuki, Takahisa Shobu and Kazukiyo Tozawa, "Stabilizing Methods for Mechanical Vibrations on Cryogenically Cooled Monochromator on BL11XU at SPring-8", Nippon Genshiryoku Kenkyujo JAERI, L2148A, p41 (2005)

## 研究業績

### 論文

1. T.Kudo, H.Aoyagi, H.Shiwaku, Y. Sakurai and H. Kitamura, "Electronics for SPring-8 X-ray beam monitors", Journal of Synchrotron Radiation, Vol.5 (1998) 630-631
2. T.P.Kudo, H.Aoyagi, K.Sato, S.Wu, H.Tanaka, S.Sasaki, T. Nakatani, M. Takeuchi, T. Shimada, Y.Hiramatsu, A. Yokoya, A. Agui, A.Yoshigoe, H.Ohkuma, Y.Miyahara, T. Ishikawa and H. Kitamura, "Synchronous beam diagnostic system using cordless telephones at SPring-8", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 467-478 (2001) 239-243
3. T.Kudo and H.Tanida, "A feedback system for improving the performance of EXAFS measurements", Review of Scientific Instruments, Vol.78,(2007)033104(1-4)
4. Togo Kudo, Sunao Takahashi, Nobuteru nariyama, Takeshi Tachibana and Hideo Kitamura, "Synchrotron radiation x-ray beam profile monitoring using CVD diamond film", Review of Scientific Instruments, Vol.77, (2006) 123105 ( 1-4 )

### 会議録その他

1. Y. Nishino, T. Kudo, M. Suzuki, and T. Ishikawa, "Stability issues in the use of coherent x-rays" Proceedings of SPIE , Vol.5195 (2003) 94
2. T. Kudo, H.Aoyagi, M Awaji, T.Kobayashi and H.Kitamura, "Development of a high-speed X-ray beam monitor using a detector head with low electrical capacitance", AIP conference proceedings of SRI2003, CP705 (2004) 521-524
3. Togo Kudo, Hajime Tanida, Shinobu Inoue, Toko Hirono, Yukito Furukawa, Yoshinori Nishino, Motohiro Suzuki and Tetsuya Ishikawa, "Monochromator Stabilization System at SPring-8", AIP conference proceedings of SRI2006, CP879 (2007) 954-958
4. 工藤統吾, 西野吉則, 鈴木基寛, 谷田肇, 古川行人, 広野等子, 石川哲也, "MOSTABによる放射光 X 線ビームの安定化", 放射光, Vol.16, NO.3 (2003) 173-177
5. 工藤統吾, 西野吉則, 井上忍, 石川哲也, "蛍光線検出形 X 線ビーム位置モニター", 放射光, Vo. 18, No. 16 (2005) 373-377
6. 特願 2000-193817 号「無線電話を用いて、複数測定器を同時に動作させる方法」

## 本論文以外の業績

1. H.Aoyagi, T. Kudo and H. Kitamura, "Blade-type X-ray beam position monitors for SPring-8 undulator beamlines", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 467-478 (2001) 252-255
2. Y. Sakurai, M. Oura, S. Takahashi, Y. Hayashi, H. Aoyagi, H. Shiwaku, T. Kudo, T. Mochizuki, Y. Oikawa, M. Takahashi, K. Yoshii, H. Kitamura "Present Status and Performance of SPring-8 Front Ends", Journal of Synchrotron Radiation, Vol.5 (1998) 1195-1198
3. T. Matsushita, T. Nakatani, Y. Ishizawa, T. Ohata, Y. Furukawa, M. Takeuchi, M. Ishii, H. Kimura, S. Goto, K. Takeshita, T. Kudo, T. Takagi, T. Ishikawa," Beamline Interlock System and rfBPM Interlock System in SPring-8", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Vol. 467-468, No.1 ( 2001 ) ,816-819
4. H. Tanaka, H. Aoyagi, S. Date, K. Fukami, T. Fukui, T. Kudo, N. Kuamgai, S. Matsui, T. Nakatani, T. Nakazato, M. Oishi, H. Ohkuma, T. Oshima, S. Sasaki, M. Shoji, K. Soutome, M. Takao, T. Takashima, H. Takebe, K. Tsumaki, H. Yonehara, T. Yorita, C. Zhang," Beam orbit stabilization at the SPring-8 storage ring", Proceeding of the 7th International Workshop on Accelerator Alignment (2003)
5. K. Hirota, H. Toyokawa, M. Suzuki, T. Kudo, M. Nomachi, Y. Sugaya, M. Yosoi," A fast position encoding system for a high-energy X-Ray YAP imager", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Vol.513(2003)187-192
6. K. Hirota, H. Toyokawa, M. Suzuki, T. Kudo, M. Nomachi, Y. Sugaya, M. Yosoi, A. Gorin, I. Manuolov, A. Riazantsev and K Kuroda, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Vol.510(2003)83-91
7. H.Aoyagi, T.Kudo, S.Wu, K.Sato, S.Sasaki, H.Tanaka, T.Ishikawa, and H.Kitamura," High-speed and simultaneous photon beam diagnostic system using optical cables at SPring-8", AIP Conference Proceedings ,Vol.705(2004) 593-596
8. H.Aoyagi, T.Kudo, H.Tanida and H. Kitamura, "New Configuration of Photoconductive-Type Diamond Detector Head for X-ray Beam Position Monitors", AIP Conference Proceedings, Vol.705 (2004) 933-936
9. A. Agui, A. Yoshigoe, T. Nakatani, T. Matsushita, Y. Saitoh, A. Yokoya, H. Tanaka, Y. Miyahara, T. Shimada, M. Takeuchi, T. Bizen, S. Sasaki, M. Takao, H. Aoyagi, T. P. Kudo, K. Satoh, S. Wu, Y. Hiramatsu, H. Ohkuma, " First Operation of Circular Dichroism Measurements with Periodic Photon-Helicity Switching by a Variably

Polarizing Undulator at BL23SU at SPring-8". *Review of Scientific Instruments*, Vol.72, No.8 (2001) 3191-3197

10. 安居院あかね, 吉越章隆, 中谷健, 松下智裕, 斎藤裕児, 水牧仁一郎, 横谷明德, 田中均, 宮原義一, 島田太平, 竹内政雄, 高雄勝, 佐々木茂樹, 青柳秀樹, 工藤統吾, 佐藤一道, 吳樹桂, 大熊春夫, "APPLE-2型アンジュレータの高速位相変調を用いた高分解能円二色性実験", *放射光*, Vol.14, No.5 (2001) 339-348
11. T. Muro, Y. Saitoh, H. Kimura, T. Matsushita, T. Nakatani, M. Takeuchi, T. Hirono, T. Kudo, T. Nakamura, T. Wakita, K. Kobayashi, T. Hara, K. Shirasawa, and H. Kitamura, "A Measurement System for Magnetic Circular Dichroism of Soft X-Ray Absorption using Photon Helicity Switching", *AIP conference proceedings of SRI2003, CP705* (2004) 1051-1054
12. Takashi Yamaoka, Tohgo Kudo, Yoh Takuwa, Yasushi Kawakami, Mitsuo Itakura, Kamejiro Yamashita, "Hereditary Adrenocortical Unresponsiveness to ACTH with a Post-Receptor Defect", *Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism*, Vol.75, No.1 (1992) 270-274