

二結晶分光器を用いた  
直線偏光単色 X 線ビームラインの構築

大阪大学大学院理学研究科  
宇宙地球科学専攻 博士前期課程

橋本 康明

## 概要

我々のグループでは天体からの X 線の検出を念頭において、浜松ホトニクス社、京都大学などの共同研究で X 線 CCD の研究及び性能評価を行なっている。X 線 CCD は X 線を放射する天体の画像やエネルギースペクトルを得るのに非常に有効な検出器である。また、X 線 CCD を用いて X 線の偏光を検出する研究も行なわれている。X 線 CCD の性能を評価するには、エネルギー分解能や検出効率のエネルギー特性を調べる必要があり、様々なエネルギーでの単色 X 線が必要である。また、X 線偏光検出器として X 線 CCD の性能を評価するには、偏光度が分かっている X 線源が必要である。シンクロトロン放射光施設の利用も考えられるが、マシンタイムに制約があり、測定結果を開発にフィードバックするのが困難である。そこで、実験室で X 線 CCD の性能評価に必要な単色 X 線や偏光 X 線を作り出すことが必要である。

本研究では、X 線 CCD の性能評価に必要な単色 X 線や偏光 X 線を実験室で作り出すことを目的として、二結晶分光器を用いた直線偏光単色 X 線ビームラインを構築し、その性能評価として分光 X 線の単色性の評価や偏光度の測定を行なった。また、X 線ビームラインを使った個々の実験を行う際、分光 X 線の強度をあらかじめ見積もることが出来れば大変有益である。そこで比較的容易に測定できるダイレクト X 線の強度から分光 X 線の強度を見積もることを想定し、X 線発生装置からの特性 X 線と連続 X 線のそれぞれに対して、分光 X 線とダイレクト X 線の強度比を調べた。

強度比については、分光 X 線の強度がダイレクト X 線の強度に対して特性 X 線では 10% 程度であり、連続 X 線では  $10[keV] \sim 40[keV]$  で等価幅 (equivalent width) が  $30[eV] \sim 60[eV]$  であることが分かった。単色性については、二結晶分光器によるエネルギー分散の幅を幾何学的に計算で求め、その値を実験で確認した。また、Mn-K $\alpha$  と Ag-K $\alpha$  のエネルギーで、密封線源と分光 X 線で CCD のエネルギー分解能を比較し、分光 X 線は CCD の性能評価において十分単色であることを示した。偏光度については、今回の実験で初めて X 線発生装置からの連続 X 線を二結晶分光器に通した後の分光 X 線の偏光度を直接測定することが出来た。その結果、実用的な偏光度 (18%~25%) の単色 X 線 (少なくとも  $16[keV] \sim 40[keV]$  のエネルギー範囲) を X 線発生装置と二結晶分光器を組み合わせたシステムで作り出せた。これにより、実験室内で偏光検出器の開発を始めとした偏光実験を行える較正システムを確立した。

# 目次

<b>1 二結晶分光器を用いたビームラインの設計</b>	<b>4</b>
1.1 二結晶分光器を用いたビームラインの構築の概要	4
1.2 二結晶分光器	4
1.3 分光 X 線のエネルギー	6
1.4 分光 X 線のエネルギー分散	6
1.5 二結晶分光器のエネルギー分解能	9
1.6 直線偏光素子としての二結晶分光器	10
1.7 スリットの設定	10
1.8 ビームライン末端での分光 X 線のビームサイズの見積もり	11
1.9 結晶の長さ	11
1.10 ダイレクト X 線と分光 X 線の間隔	12
1.11 各軸の精度	13
1.12 二結晶分光器の各ステージの操作方法	13
1.12.1 コントロールソフトによる遠隔操作	13
1.12.2 パルスステージコントローラによる手動操作	13
<b>2 二結晶分光器の各軸の alignment のずれに関する考察</b>	<b>15</b>
2.1 各軸の alignment のずれによる影響の見積もりの概要	15
2.2 z1 軸のずれ	15
2.3 z2 軸のずれ	18
2.4 y 軸のずれ	19
2.5 $\theta_1$ 軸のずれ	21
2.6 各軸の Zero 点のずれに対する考察のまとめ	24
<b>3 二結晶分光器を用いた X 線ビームラインの alignment</b>	<b>26</b>
3.1 alignment の概要	26
3.2 レーザーの調整	27
3.3 二結晶分光器の台座の調整	29
3.4 二結晶分光器の可動スリットの調整 (その 1)	29
3.5 二結晶分光器の各軸の Zero 点調整	30
3.5.1 あおり軸の Zero 点調整	30
3.5.2 $\theta_1$ 軸の Zero 点調整	30
3.5.3 z1 軸の Zero 点調整	32
3.5.4 y 軸の Zero 点調整	32

3.6	二結晶分光器の可動スリットの調整(その2) . . . . .	32
3.6.1	$\theta_2$ 軸のZero点調整(その1)と $z_2$ 軸のZero点調整 . . . . .	33
3.6.2	$\theta_2$ 軸のZero点調整(その2) . . . . .	34
3.6.3	結晶の光軸回りの回転の傾きの補正 . . . . .	35
3.7	ビームライン末端で分光X線を捕まえる . . . . .	35
3.8	alignmentの評価 . . . . .	36
4	alignmentの評価実験及び分光X線とダイレクトX線の強度比 . . . . .	37
4.1	alignmentの評価実験 . . . . .	37
4.1.1	分光X線のエネルギースペクトル . . . . .	37
4.1.2	alignmentの評価 . . . . .	41
4.1.3	まとめ . . . . .	43
4.2	ダイレクトX線と分光X線の強度比 . . . . .	43
4.2.1	特性X線Mo-K $\alpha$ のダイレクトX線と分光X線の強度比 . . . . .	43
4.2.2	連続成分のダイレクトX線と分光X線の強度比 . . . . .	43
4.2.3	まとめ . . . . .	46
5	ビームライン末端での単色性の測定 . . . . .	47
5.1	分光X線のエネルギー分散と単色性 . . . . .	47
5.2	実験 . . . . .	47
5.2.1	実験システム . . . . .	47
5.2.2	分光X線のエネルギー分散の幅の測定 . . . . .	48
5.3	結果と考察 . . . . .	48
5.3.1	二結晶分光器による分光X線のエネルギー分散 . . . . .	48
5.3.2	分光X線の単色性 . . . . .	50
6	二結晶分光器通過後の偏光度の測定 . . . . .	53
6.1	X線発生装置からの連続X線の偏光 . . . . .	53
6.2	Thomson散乱計を用いた偏光度測定 . . . . .	53
6.2.1	Thomson散乱 . . . . .	53
6.2.2	X線の偏光度 . . . . .	55
6.2.3	Modulation Factor $M$ . . . . .	55
6.2.4	X線発生装置からの連続X線の偏光度 . . . . .	55
6.3	実験 . . . . .	56
6.3.1	実験システム . . . . .	56
6.3.2	modulation factor $M$ の値 . . . . .	57
6.4	結果 . . . . .	58
6.4.1	分光X線の偏光度 . . . . .	58
6.4.2	ダイレクトX線の偏光度 . . . . .	61
6.5	考察 . . . . .	63
7	まとめ . . . . .	65
A	X線の第一結晶への入射角と分光X線エネルギーの関係 . . . . .	68

B 分光 X 線のエネルギー分散の幅	71
C 二結晶分光器のエネルギー分解能(第 1.5 節参照)	74
D 分光 X 線のビームライン末端での広がり	78

# 第 1 章

## 二結晶分光器を用いたビームラインの設計

### 1.1 二結晶分光器を用いたビームラインの構築の概要

我々のグループでは、天体からの X 線の検出器として X 線 CCD の開発と性能評価を行なっている。天体から来る X 線で得られる情報には、X 線を発している天体の位置、エネルギースペクトル、時間変動、偏光等がある。X 線 CCD は優れた位置分解能と、エネルギー分解能の両方を兼ね備えた検出器である。また X 線 CCD を用いて X 線の偏光を測定する研究も行なわれている。

X 線 CCD の性能評価では様々なエネルギーで単色の X 線を利用したい。また、偏光検出器として X 線 CCD の性能を評価するには偏光度の分かっている X 線源が必要である。シンクロトロン放射光施設を利用すればほぼ完全偏光の X 線を使用することができるが、マシンタイムに制約があり、測定結果を開発にフィードバックすることが困難である。そのため実験室で単色 X 線や偏光 X 線を作り出し CCD の性能評価を行ないたい。

我々の実験室にある X 線発生装置からの連続 X 線は、制動輻射によって放射され直線偏光している<sup>1</sup>。これにブラッグ反射を利用して二結晶分光器を組み合わせることにより高偏光の X 線を実験室で作り出すことを考えた。そこで二結晶分光器を用いた直線偏光単色 X 線ビームラインを構築した。さらに、その性能評価として分光 X 線の単色性や二結晶分光器を通した後の偏光度の測定を行なった。

本章では我々の二結晶分光器を用いたビームラインの特徴や設計上の性能等について説明する。第 2、3 章ではビームラインの構築における alignment の方法とその精度の見積もりについて述べる。第 4~6 では二結晶分光器を用いたビームラインの性能評価として行なった、ダイレクト X 線と分光 X 線の強度比や分光 X 線の単色性、二結晶分光器通過後の X 線の偏光度測定などについて述べる。

### 1.2 二結晶分光器

二結晶分光器は結晶のブラッグ反射を利用して分光する。ブラッグ反射の条件は次のような回折条件で表される。

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (1.1)$$

ただし

---

<sup>1</sup>S.Tanaka et al. [1]

- $d$  : 結晶の格子定数  
 $\theta$  : X線の結晶への入射角  
 $\lambda$  : X線の波長  
 $n$  : 整数

図 1.1は結晶によるブラッグ反射の概念図である。結晶に入射角  $\theta$  で入射した X 線は、ブラッグ反射の条件を満たす波長の X 線だけ反射角  $\theta$  で反射される。したがって X 線の結晶への入射角を変えることにより、反射する X 線の波長を選択することができる。しかし、図 1.1からも分かるように、X 線の入射角によって反射後の X 線の光路は変化する。

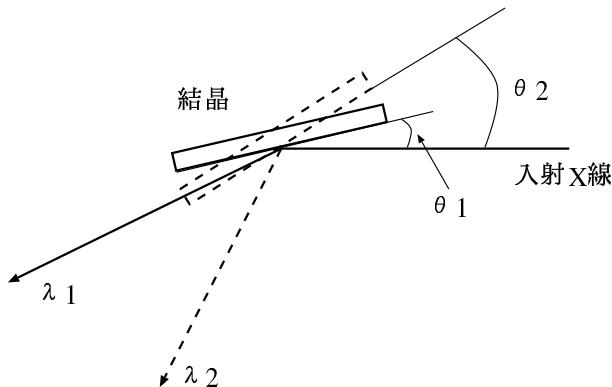


図 1.1: 結晶によるブラッグ反射の概念図

そこで X 線をもう一度結晶で反射させ、X 線の光路を一定になるように分光するのが二結晶分光器である。図 1.2は二結晶分光器の概念図である。入射角  $\theta$  で第一結晶に入射した X 線のうち、ブラッグ反射の条件を満たす波長の X 線だけが反射される。反射した X 線を第二結晶に入射角  $\theta$  で入射させると、第二結晶においてもブラッグ反射の条件を満たし反射角  $\theta$  で反射される。その結果第二結晶で反射された X 線の光路は、図 1.2のように第一結晶に入射する X 線の光路と平行になる。

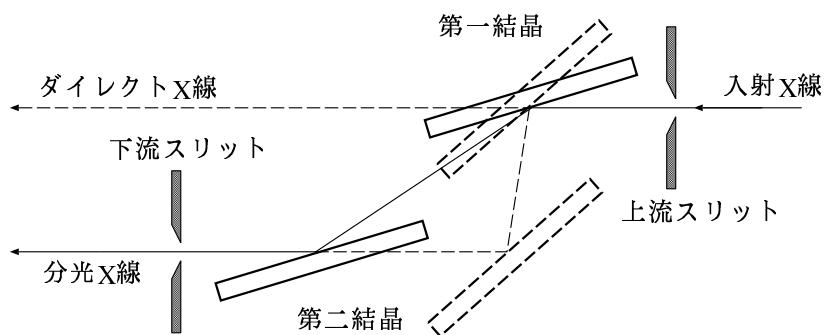


図 1.2: 二結晶分光器の概念図

他の波長の X 線を分光するときは、第一結晶を回転させ入射 X 線の入射角を変えて、ブラッ

グ反射の条件を満たす波長を変える。さらに第二結晶も回転させ、また光軸方向に動かすことにより、第二結晶を反射した X 線の光路を入射 X 線の光路と平行にする。このようにして、どのような波長の X 線を選択しても分光 X 線の光路は一定で、入射 X 線の光路と平行にすることができる。

X 線発生装置からの X 線を分光せず直接使うには、第一結晶を光軸から上にはずして X 線が第一結晶に当らないようにし、X 線発生装置からの X 線を直接二結晶分光器の下流のビームラインで使用することが出来る設計になっている。

### 1.3 分光 X 線のエネルギー

分光 X 線のエネルギーは、第一結晶に入射する X 線の入射角によって決められる。入射角は設計上  $3^\circ \sim 45^\circ$  となっている。入射角が  $45^\circ$  のとき、入射 X 線の  $\sigma$  偏光の成分だけを取り出すことができ、完全偏光の X 線を作り出すことができる。そのため、入射角の最大値を  $45^\circ$  とした。また、我々の X 線発生装置の管電圧の最大値は  $60[\text{kV}]$  であり、その管電圧では X 線発生装置で発生する X 線の最大のエネルギーは  $60[\text{keV}]$  である。Si(220) 結晶を用いて入射角が  $3^\circ$  になるように設定すると X 線発生装置で発生する最大のエネルギーの  $60[\text{keV}]$  の X 線を分光することができる。そのため、入射角の最小値を  $3^\circ$  とした。

また、ブレッガ反射の条件から反射に用いる結晶の格子定数によって分光 X 線のエネルギーは異なる。我々のビームラインでは表 1.1 に示すように、結晶は Si(111) と Si(220) の 2 種類を用意している。結晶を交換するときは二結晶分光器を大気圧に戻さなければならない。

結晶	格子定数 [ $\text{\AA}$ ]	サイズ (縦 × 横 × 長さ)
Si(111)	6.26	50mm × 30mm × 10mm
Si(220)	3.825	50mm × 30mm × 10mm

表 1.1: 結晶の種類と大きさ

表 A.1、A.2 にそれぞれの結晶の場合について、入射角と分光 X 線のエネルギーの関係を示す。

### 1.4 分光 X 線のエネルギー分散

X 線発生装置で発生する X 線は発散光であるため、図 1.3 に示すように結晶への入射角はその位置によって異なる。入射角の違いは反射する X 線の波長の違い、すなわち分光 X 線のエネルギーの違いとなって現われる。その結果分光 X 線のエネルギーは場所によって異なる、つまりエネルギーが分散することになる。

図 1.4 に分光 X 線のエネルギー分散の概念図を示す。ビームライン末端で得られる分光 X 線は上下方向にエネルギーが分散し、光軸より上方向に低エネルギー、下方向に高エネルギーが分光していくことが分かる。

図 1.5 はビームライン末端 (X 線発生装置から  $21[\text{m}]$ ) で Mo-K $\beta_1$  を分光したときの CCD のイメージである。Mo-K $\beta_1(19.618[\text{keV}])$  と Mo-K $\beta_3(19.587[\text{keV}])$  の特性 X 線が分光されているの

が分かる。また、図 1.6 は  $15[keV]$ (X 線発生装置からの連続 X 線成分) の分光 X 線で、CCD 上に一様な強度で分光されている。どちらも CCD のサイズは  $1/2$  インチサイズの CCD である。

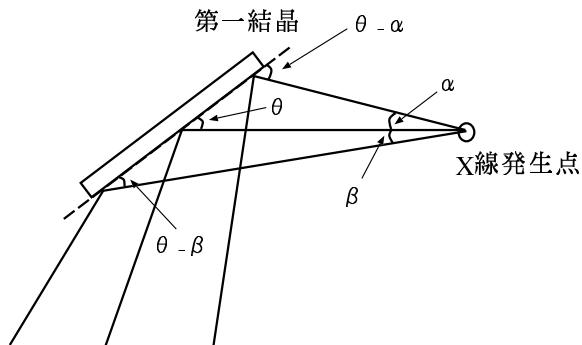


図 1.3: X 線発生装置からの X 線(発散光)の第一結晶への入射角の違い

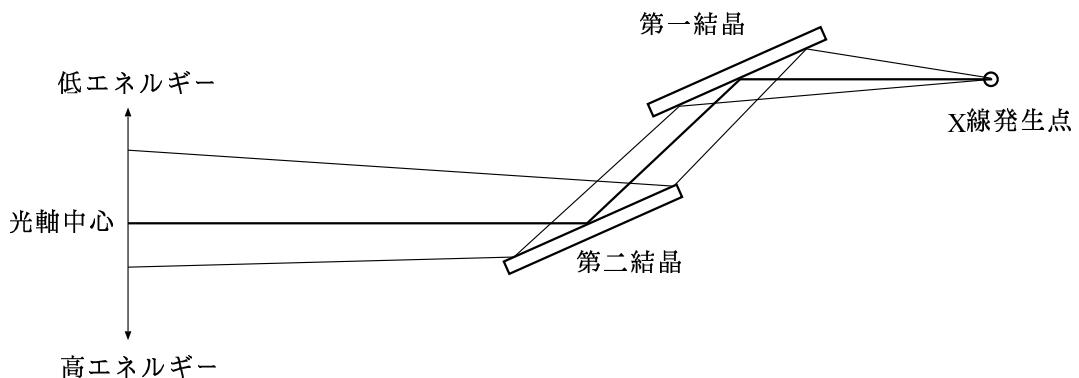


図 1.4: 分光 X 線のエネルギー分散の概念図

ここでは結晶への入射角の違いによる分光 X 線のエネルギー分散の幅  $\Delta E$ (分散)について見積もる。CCD チップのサイズは 1 インチであるとしてエネルギー分散の幅を計算する。計算方法は次の通りである。

1. X 線は点源から発生するものとし、X 線発生点から  $21[m]$  先(ビームライン末端)で分光 X 線が 1 インチの広がり幅になるように、二結晶分光器の可変スリットの幅を設定しているとする。
2. X 線発生点からビームライン末端で 1 インチに広がる発散角を計算する。
3. その発散角の光路を通る X 線の結晶への入射角を計算する。
4. 結晶への入射角からブラッグ反射の条件より、反射される波長(エネルギー)を求める。
5. 1 インチの上端と下端で分光されてくるエネルギー分散の幅  $\Delta E$ (分散)を計算する。

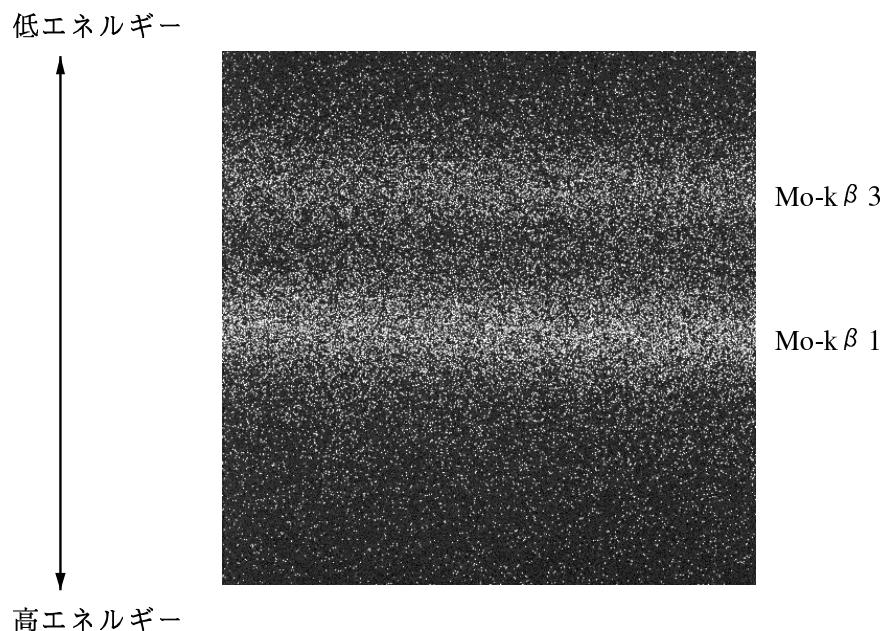


図 1.5: ビームライン末端で Mo-K $\beta_1$  を分光したときの CCD のイメージ。Mo-K $\beta_1$  と Mo-K $\beta_3$  の特性 X 線が分光されているのが分かる。CCD チップのサイズは 1/2 インチである。

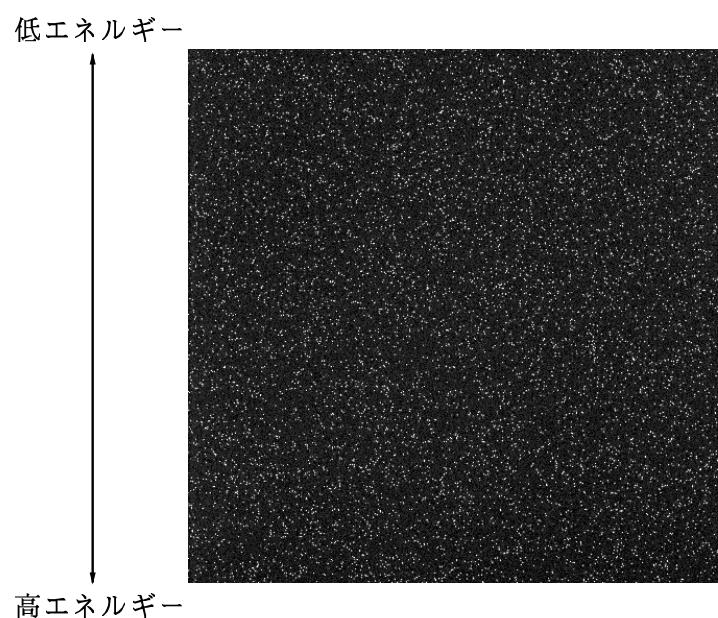


図 1.6: ビームライン末端で 15[keV] を分光したときの CCD のイメージ。連続 X 線の分光 X 線が一様な強度で CCD チップ上に分光されていることが分かる。CCD チップのサイズは 1/2 インチである。

計算結果を表 B.1~B.2に示す。分光 X 線のエネルギーは光軸中心に分光されてくる X 線のエネルギーで、 $\Delta E$ (分散) はビームライン末端で 1 インチの間のエネルギー分散の幅、つまり CCD の上端と下端のエネルギーの差を計算したものである。

このように、分光 X 線のエネルギー分散により検出器の面積が大きくなる程エネルギー分散の幅が大きくなり、分光 X 線の単色性の低下につながる。しかし CCD には位置分解能があり、また CCD 上の特定の位置に分光されてくる分光 X 線のエネルギーは幾何学的に知ることが出来る。従って、分光 X 線のエネルギー分散の幅が広いことは、CCD の性能評価に利用できるエネルギーの幅が広くなることにはかならない。

## 1.5 二結晶分光器のエネルギー分解能

第 1.4 節では X 線発生装置の発光源を点源として見積もりをしたが、実際にはある面積を持っている。そのため図 1.7 のようにビームライン末端のある一点に分光されてくる分光 X 線にはエネルギーの幅がある。このエネルギーの幅を二結晶分光器のエネルギー分解能  $\Delta E(DCM)$  と定義する。

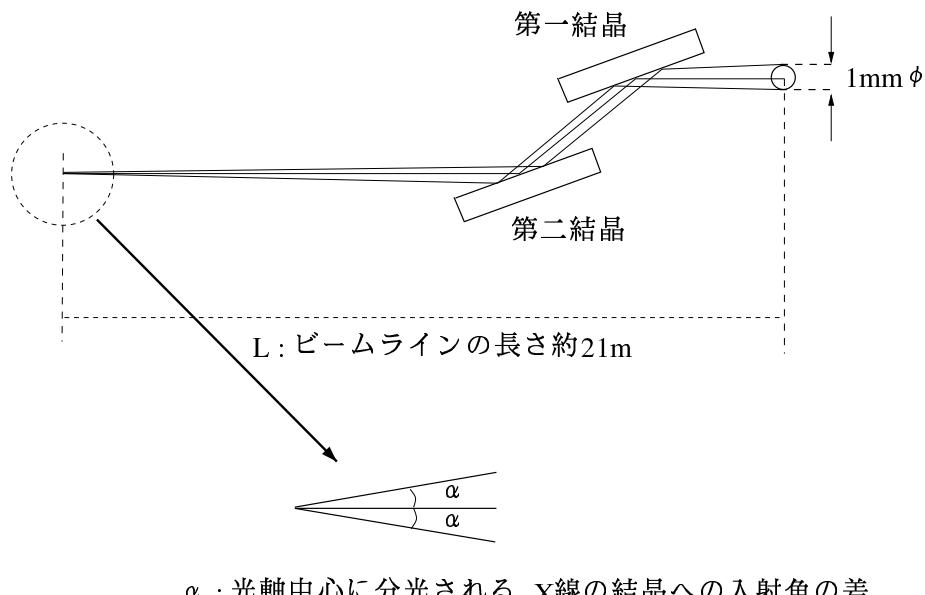


図 1.7: 二結晶分光器のエネルギー分解能の概念図。X 線発生装置の発光源の大きさを  $1\text{mm} \phi$  とした。

二結晶分光器を用いて CCD の性能評価を行なうには、この二結晶分光器のエネルギー分解能  $\Delta E(DCM)$  が理想的な CCD のエネルギー分解能  $\Delta E(CCD)$  に比べて十分小さいことが必要である。ここで二結晶分光器のエネルギー分解能  $\Delta E$  を見積もり、理想的な CCD のエネルギー分解能と比較する。

二結晶分光器のエネルギー分解能は X 線の結晶への入射角や発光源の大きさに依存する。発光源の面積を  $1\text{mm} \phi$  として、二結晶分光器のエネルギー分解能  $\Delta E(DCM)$  を見積もった。その結果を表 C.1、C.2 に示す。これによると、Si(220) を用いたときの Mn-K $\alpha$  の特性 X 線のエ

エネルギー  $5.9 [keV]$  のエネルギーでは、二結晶分光器のエネルギー分解能  $\Delta E(DCM)$  は理想的な CCD のエネルギー分解能  $\Delta E(CCD)$  の高々  $0.4\%$  である。

## 1.6 直線偏光素子としての二結晶分光器

結晶の回折現象を利用して、X線の偏光状態を変えることができる。そのような機能をもつものを偏光素子と呼ぶ。二結晶分光器ではブラング反射を利用して分光しているが、ブラング反射は回折現象であるため、分光後のX線の偏光状態を変化させる。これはX線の $\sigma$ 偏光成分と $\pi$ 偏光成分の反射率が異なるためである。結晶がモザイク結晶のときの反射率は $\sigma$ 偏光と $\pi$ 偏光に対してそれぞれ1対 $\cos^2 2\theta_B$ に比例する( $\theta_B$ はX線の結晶への入射角)。また完全結晶のときの反射率は1対 $\cos 2\theta_B$ に比例する。二結晶分光器では結晶で二回反射させるので、この効果は2乗で効くことになる。モザイク結晶、完全結晶のいずれの場合も $\theta_B \cong 45^\circ$ の回折を用いれば $\cos 2\theta_B \cong 0$ となり、 $\sigma$ 偏光成分だけが残り完全偏光のX線となる。

我々の二結晶分光器を用いたビームラインでは、X線発生装置からのX線がもともと偏光している。その偏光方向は結晶でのX線の反射面(入射X線の進行方向と反射X線の進行方向を作る平面)に対して垂直な方向で、 $\sigma$ 偏光の方向と一致する。そのため、二結晶分光器を通すことで入射X線の偏光度をさらに上げることが出来る。このように、二結晶分光器を高偏光のX線を作る用途で使用することも出来る。

## 1.7 スリットの設定

二結晶分光器には入口と出口に可変スリットがある(図1.2を参照)。上流スリットは主にビームの上下方向の幅を決める目的で、下流スリットは実験に必要なビームサイズに絞る目的で設置されている。上流スリットで決めるビームの幅としてはビームライン末端で1インチになるサイズを標準的な設定値として用いているが、実験によっては単色度を向上させる等の目的でビームサイズ1インチよりさらに小さく絞る必要がある場合も考えられる。その場合 下流スリットで必要なビームサイズに絞ればよい。

スリット	ストローク
上流 上	$\pm 6mm$
上流 下	$\pm 6mm$
下流 上	$\pm 13mm$
下流 下	$\pm 6mm$

表 1.2: 可変スリットのストローク

また、ビームの水平方向の幅を決めるのに上流可変スリットのすぐ後ろ、第一結晶入射前に固定スリット(プレート)を入れられるようになっている。これは結晶以外の場所でのX線の散乱を防ぐ目的で使われる。表1.3のような種類がある。

縦	横
$16mm$	$\times$
$25mm$	
$16mm$	$\times$
$22mm$	
$16mm$	$\times$
$20mm$	
$16mm$	$\times$
$10mm$	

表 1.3: 固定スリットのサイズ

## 1.8 ビームライン末端での分光 X 線のビームサイズの見積もり

ビームライン末端での分光 X 線の上下方向のビームサイズは二結晶分光器の上流または下流スリットで決めている。しかし、実験によっては光軸中心に検出器を設置しない場合もあるので、二結晶分光器のスリットを使用しない場合の分光 X 線の上下方向のビームサイズを見積もっておく。この場合、X 線が発散光であることから第二結晶の長さによってビームサイズが決まることがある。X 線発生装置から第一結晶の  $\theta_1$  軸の回転軸までの距離を  $1[m]$ 、結晶の反射面の長さを  $50[mm]$  として、X 線の結晶への入射角とビームライン末端 (X 線発生装置から  $21[m]$ ) でのビームサイズを見積もった。表 D.1 に示す。

## 1.9 結晶の長さ

表 1.1 に示したように結晶の長さは  $50[mm]$  である。この長さは次のようにして決めた。図 1.8 のように、ビームライン末端 (約  $21[m]$ ) で 1 インチに広がる発散光が第二結晶のところ (約  $1.5[m]$ ) で  $y[mm]$  に広がっているとすると、

$$\frac{25.4[mm]}{21[m]} = \frac{y}{1.5[m]} \quad (1.2)$$

より、 $y \simeq 1.8[mm]$  である。ただし、発光点を点源と考えている。第 1.8 節でも述べたように、ビームライン末端での分光 X 線の広がり幅は第二結晶の長さで決まっている。ビームライン末端で 1 インチの広がり幅を得るために条件から結晶の長さが決まる。結晶の長さを  $x$  とすると、入射角  $3^\circ$  のときにビームラインで 1 インチの広がり幅を得るために

$$x \sin 3^\circ > y$$

$$x > \frac{y}{\sin 3^\circ} = \frac{1.8[mm]}{\sin 3^\circ} \simeq 34[mm] \quad (1.3)$$

従って結晶の長さは  $34[mm]$  以上必要である。実際には結晶の位置が多少ずれてもかまわないように余裕をもって、使用する結晶の長さを  $50[mm]$  とした。

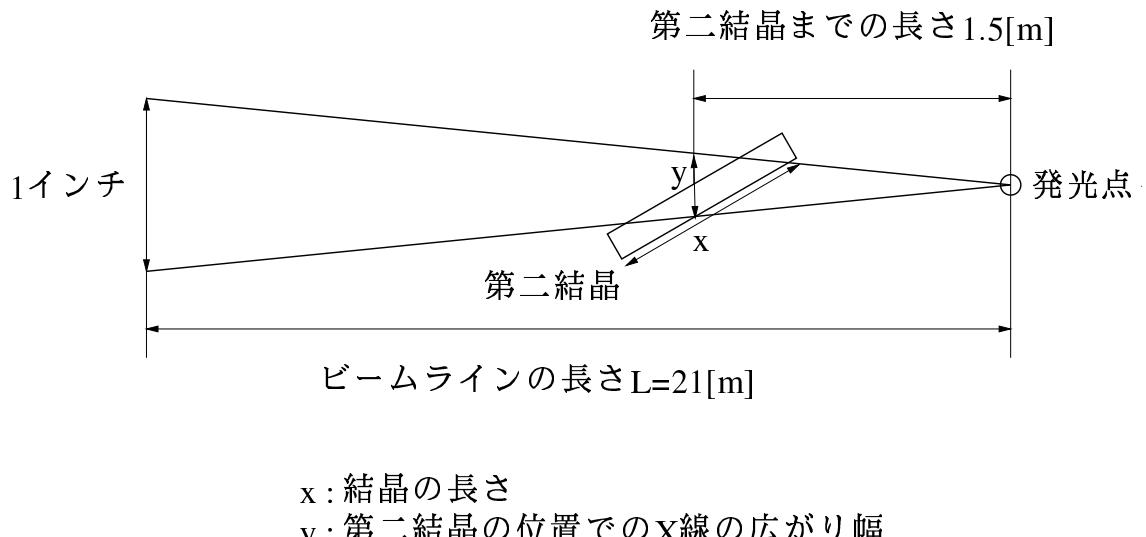


図 1.8: 結晶の長さを決める条件

## 1.10 ダイレクト X 線と分光 X 線の間隔

ダイレクト X 線と分光 X 線の間隔の設計値は  $20[\text{mm}]$  である。図 1.9に  $45^\circ$  と  $3^\circ$  入射のときの設計上の結晶の位置と X 線の光軸の関係を示す。

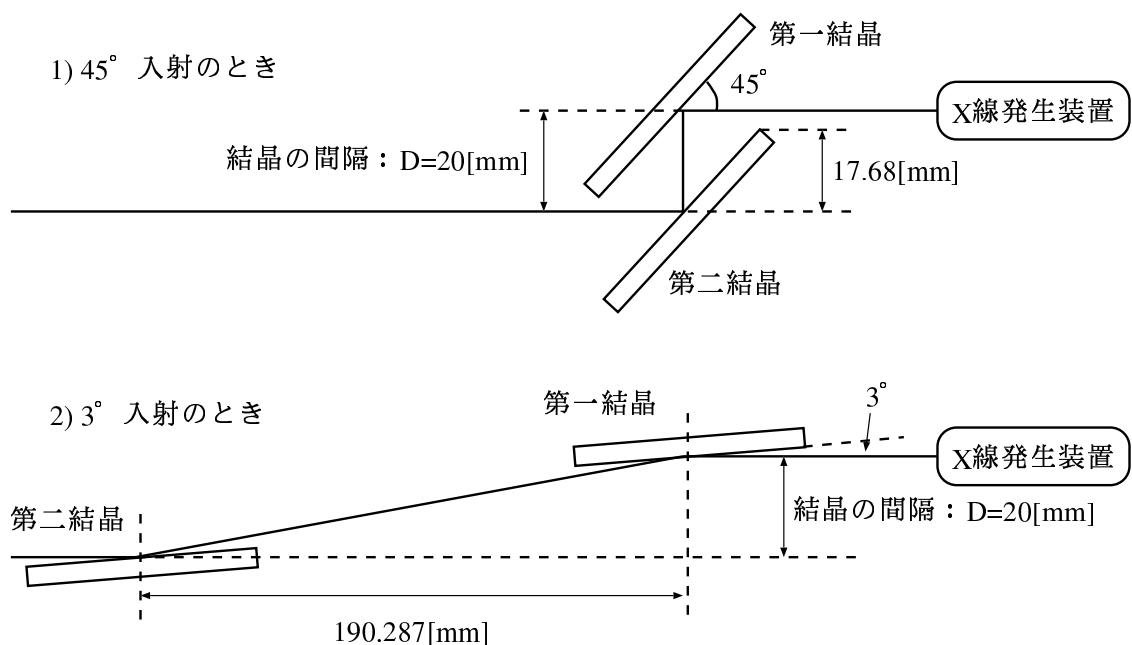


図 1.9: ダイレクト X 線と分光 X 線の間隔

第1.9節で決めたように、結晶の長さを  $50[\text{mm}]$  とする。ダイレクトX線と分光X線の間隔は以下のようにして決まる。図1.9の  $45^\circ$  入射の図で二つの結晶の間隔が近すぎると第二結晶が入射X線を隠してしまう。従って、図1.9より結晶の間隔  $D$  は  $D > 17.68[\text{mm}]$  でなければならぬ。このようにしてダイレクトX線と分光X線の間隔の最小値が  $17.68[\text{mm}]$  と決まる。逆にダイレクトX線と分光X線の間隔が離れすぎると、ダイレクトX線と分光X線の両方を使う実験が困難になる。従って我々のビームラインではダイレクトX線と分光X線の間隔を  $20[\text{mm}]$  とした。

## 1.11 各軸の精度

分光結晶は真空中に設置されているため、各軸の設定はチャンバー外部からのコントロールによって行う。各軸の駆動にはパルスステッピングモーターが使われているため、各軸の再現性の精度はモーターの精度に依存する。各軸の精度を表1.4にまとめる。

軸	ストローク	精度	1pulseあたり
y 軸	$200\text{mm}$	$10\mu\text{m}$	$0.1\mu\text{m}$
$\theta$ 軸	$45^\circ$	$0.01^\circ$	$0.72''$
z 軸	$10\text{mm}$	$5\mu\text{m}$	$0.2\mu\text{m}$
あおり軸	$1^\circ$	$1''$	$0.0756''$

表1.4: 各軸のストロークと精度

## 1.12 二結晶分光器の各ステージの操作方法

二結晶分光器の各ステージの操作方法には、コンピューターからコントロールソフトを使って遠隔操作する方法と、二結晶分光器の台座部分に取り付けてあるパルスステージコントローラで手動操作する方法がある。

### 1.12.1 コントロールソフトによる遠隔操作

二結晶分光器は UNIX からコントロールソフトを使って遠隔操作することができる。コントロールソフトによる操作では、各軸を個々に動かす (Alignment Mode) ほかに、分光したいエネルギーを設定するだけで各軸を自動的にそのエネルギーを分光できるように設定する (Normal Mode) ことができる。コントロールソフトでは、各軸のパルスステッピングモーターの制御を GP-IB で、エンコーダの読み取りを RS-232C で行っていて、どちらもインターフェースサーバを経てネットワークにつながっている。コントロールソフトの使い方についてはコントロールソフトのヘルプメニューからマニュアルを参照できる。

### 1.12.2 パルスステージコントローラによる手動操作

各軸のステージはパルスステージコントローラによって手動で操作することができる。動かしたいパルス分を設定し、CW(時計回り)またはCCW(反時計回り)のボタンを押して動かす。

また、モータの駆動中に強制的に停止させるためのストップ(STOP)ボタンが付いている。

各軸の現在のパルス数をカウンタで表示するようになっていて、CW方向がパルス数が増える方向で、CCW方向がパルス数が減る方向である。クリア(CLR)ボタンを押すと現在のパルス数をクリアすることが出来る。

各軸(あおり1軸、あおり2軸以外)にはマグネスイッチが付いていて、機械的に決められた原点がある。オリジナル(ORG)ボタンを押すと原点に戻る。

また、y軸とθ1軸にはエンコーダが付いていて、現在の位置を表示することが出来る。

図1.10に二結晶分光器の各軸の名前と方向の正負の定義を示す。また各軸の正負の方向とCW、CCWのボタンとの対応関係を表1.5に示す。

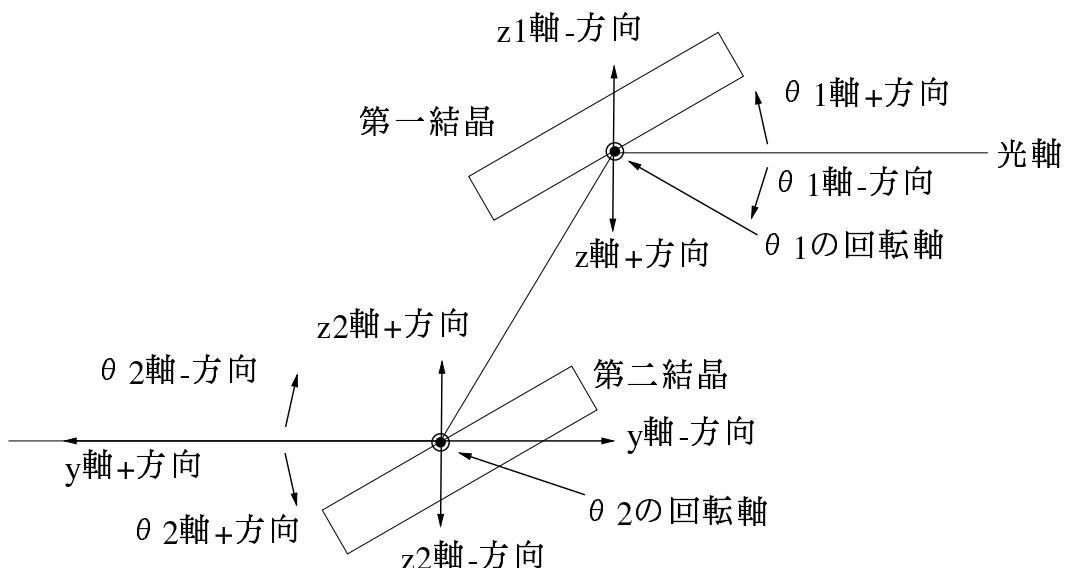


図1.10: 二結晶分光器の各軸の名前と方向。あおり軸の正負の方向はθ軸と同じ方向である。

軸	CCW(-pulse)	CW(+pulse)
y	- 方向	+ 方向
θ1	+ 方向	- 方向
θ2	+ 方向	- 方向
あおり1	+ 方向	- 方向
あおり2	- 方向	+ 方向
z1	- 方向	+ 方向
z2	- 方向	+ 方向

表1.5: 各軸のpulseの正負と動く方向の対応関係

## 第 2 章

### 二結晶分光器の各軸の alignment のずれに関する考察

#### 2.1 各軸の alignment のずれによる影響の見積もりの概要

二結晶分光器の alignment において各軸の Zero 点調整がずれていると、ねらったエネルギーの X 線が光軸中心に分光されない。この章では各軸の Zero 点調整における精度を考慮して、ねらったエネルギーの分光 X 線がビームライン末端で光軸中心からずれる大きさ ( $z$  で表す) と、光軸中心に分光される X 線のエネルギーとねらった分光 X 線のエネルギーとの差 ( $\Delta E$  で表す) を見積もる。見積もりを簡明にするために、次のような仮定のもとに見積もりを行うこととする。

- X 線の光源は点源である。
- 分光 X 線の強度は、第一結晶と第二結晶が平行のときもっとも強くなる。

$\theta_2$  軸は alignment において最強の強度を探すために 1pulse の精度で決めているので、 $\theta_2$  軸のずれは考えなくてよいものとする。また、あおり軸についても、Zero 点のずれによる影響はないので考えなくてよい。

#### 2.2 z1 軸のずれ

$z1$  軸の Zero 点は  $\theta_1$  の回転軸と第一結晶の反射面が一致するところである。図 2.1 のように  $z1$  軸の Zero 点が  $x$  だけ下にずれていたとすると、ねらった分光 X 線は第二結晶の中心より上方で反射され、分光 X 線は全体的に上にシフトすることになる。逆に Zero 点が上にずれていたとすると、分光 X 線は全体的に下にシフトする。また、 $z1$  軸の Zero 点のずれが大きいと第二結晶にねらった分光 X 線が当たらなくなる。したがって  $z1$  軸の Zero 点のずれ  $x$  の上限値としては、ねらったエネルギーの X 線が第二結晶に当るという条件で決まる。ここではまず、 $z1$  軸の Zero 点のずれの上限値を求める。

第二結晶上での X 線のずれ  $y$  は X 線の入射角  $\theta$  と  $z1$  軸の Zero 点のずれ  $x$  を用いて、

$$y = \frac{2x}{\tan \theta} \quad (2.1)$$

と表され、 $\theta$  が小さいほど(高エネルギーほど)第二結晶上での X 線のずれ  $y$  は大きくなる。入射角  $3^\circ$  の X 線が第二結晶にあたるために、 $y$  が結晶の長さの半分  $25[mm]$  より小さくなければならない。

$$y = \frac{2x}{\tan \alpha} < 25[mm] \quad (2.2)$$

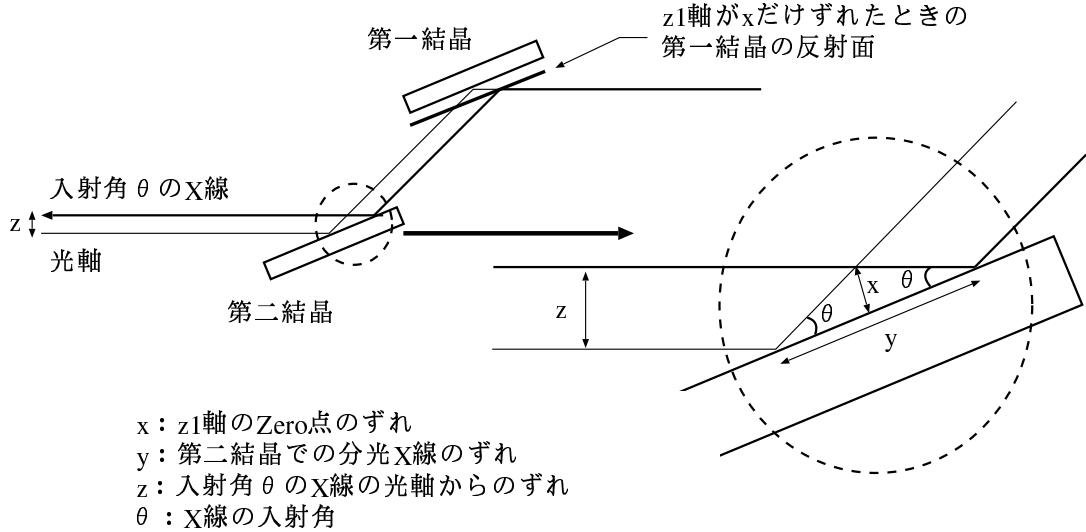


図 2.1:  $z_1$  軸の Zero 点のずれによる分光 X 線の光軸からのずれを表す概念図

$\alpha$  : 入射角  $3^\circ$

したがって  $z_1$  軸の Zero 点のずれ  $x$  は

$$x < 0.66[\text{mm}] \quad (2.3)$$

でなければならない。これが  $z$  軸の Zero 点のずれの上限値である。

次にビームライン末端で、ねらった分光 X 線がどの程度上下方向にシフトするか計算で見積もる。図 2.1において、ビームライン末端での分光 X 線の光軸からのずれ  $z$  は Zero 点のずれ  $x$  を用いて、

$$z = y \sin \theta = 2x \cos \theta \quad (2.4)$$

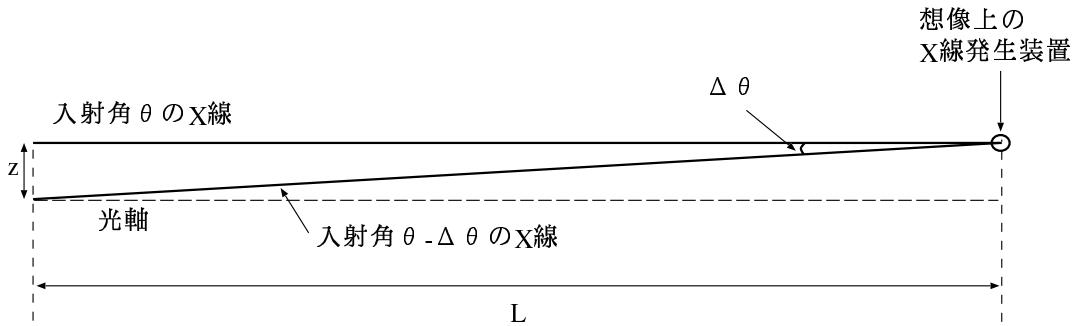
となり、入射角が小さいほど(高エネルギーほど)上下にシフトする大きさが大きくなることがわかる。最も大きくシフトするのは X 線の入射角が  $3^\circ$  のときで、 $x < 0.66[\text{mm}]$  であるとすると分光 X 線の光軸中心からのずれの最大値は、

$$z = 1.32[\text{mm}] \quad (2.5)$$

となる。

また、図 2.1のように Zero 点が下にずれていた場合、ビームライン末端で光軸中心に分光されてくるエネルギーは高エネルギー側にシフトする。逆に Zero 点が上にずれていたなら、低エネルギー側にシフトする。そのように、光軸中心に分光される X 線のエネルギーはねらったエネルギーからずれることになる。ここではそのエネルギーのずれについて見積もる。図 2.2のように、ビームライン末端で光軸中心に分光されてくる X 線の第一結晶への入射角が、ねらった分光 X 線の入射角から  $\Delta\theta$ だけずれているとすると、

$$\begin{aligned} \Delta\theta &= \arctan \frac{z}{L} \\ &= \arctan \frac{2x \cos \theta}{L} \end{aligned} \quad (2.6)$$



$z$ : 入射角  $\theta$  の X 線の光軸からのずれ  
 $\Delta\theta$  : 光軸中心に分光される X 線の入射角  $\theta$  からのずれ  
 $L$  : ビームラインの長さ

図 2.2:  $z_1$  軸の Zero 点のずれによる分光 X 線のエネルギーのずれを表す概念図

と表される。したがって光軸中心に分光される X 線のエネルギーとねらった分光 X 線のエネルギーのずれ  $\Delta E$  は  $\Delta\theta$  を用いて、

$$\begin{aligned}
 \Delta E &= \frac{hc}{2d} \Delta \left( \frac{1}{\sin \theta} \right) \\
 &= \frac{hc \cos \theta}{2d \sin^2 \theta} \Delta\theta
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

ただし

$h$  : プランク定数

$c$  : 光速度

$d$  : 結晶の格子定数

となる。ねらった分光 X 線のエネルギーからのずれ  $\Delta E$  とねらった分光 X 線のエネルギーとの比  $\Delta E/E$  は

$$\begin{aligned}
 \Delta E/E &= \frac{hc}{2d} \left( \frac{\cos \theta}{\sin^2 \theta} \right) \Delta\theta \div \frac{hc}{2d \sin \theta} \frac{1}{\sin \theta} \\
 &= \frac{\Delta\theta}{\tan \theta}
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

と表され、第一結晶への入射角  $\theta$  と  $\Delta\theta$  にのみ依存することが分かる。

図 2.3(左図)に第一結晶への X 線の入射角とねらったエネルギーの分光 X 線が光軸からずれる大きさ  $z$  との関係を示す。横軸が第一結晶への X 線の入射角、縦軸がねらった分光 X 線の光軸からのずれの大きさ  $z$  である。  $z_1$  軸の Zero 点のずれを最大の  $x = 0.66[\text{mm}]$  として見積もっている。また、図 2.3(右図)に第一結晶への X 線の入射角とそのときの分光 X 線のエネルギーのずれの割合  $\Delta E/E$  の関係を示す。横軸が第一結晶への X 線の入射角、縦軸がエネルギーのずれ  $\Delta E$  とねらった分光 X 線のエネルギー  $E$  との比である。どちらも  $z_1$  軸の Zero 点ずれを上限値の  $x = 0.66[\text{mm}]$  として見積もっているが、エネルギーのずれ  $\Delta E$  はねらったエネルギー  $E$  の 0.1% 程度以下である。

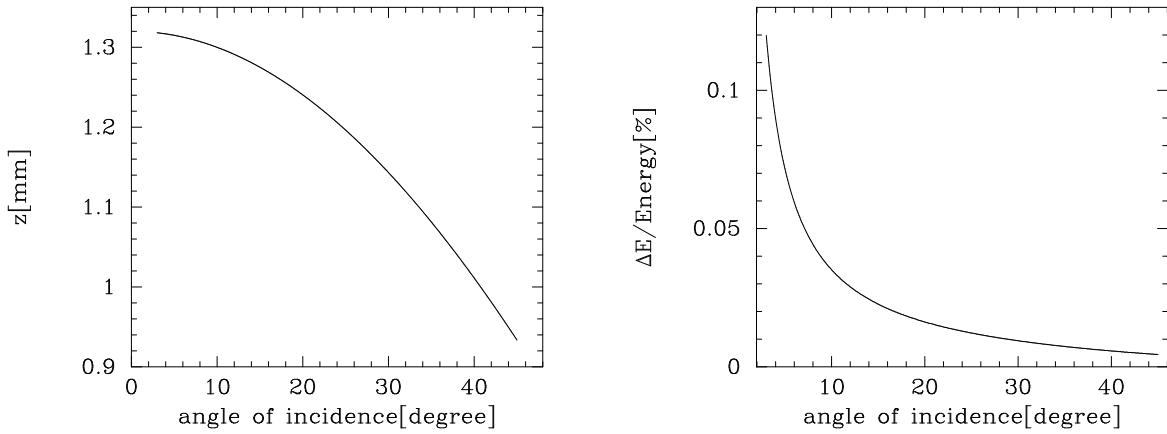


図 2.3:  $z_1$  軸の Zero 点のずれが最大であるときの分光 X 線の光軸からのずれ  $z$ (左図) と分光 X 線のエネルギーのずれの割合  $\Delta E/E$ (右図)

Zero 点のずれが上限値  $x = 0.66[\text{mm}]$  として、ねらった分光 X 線の光軸からのずれの大きさ  $z$  と、分光 X 線のエネルギーのずれの割合  $\Delta E/E$  を表 2.1 にまとめる。

	ずれ	第一結晶への入射角
分光 X 線の光軸からのずれ $z$	1.32[mm]	3[°]
分光 X 線のエネルギーのずれの割合 $\Delta E/E$	0.12%	3[°]

表 2.1:  $z_1$  軸の Zero 点のずれによる影響の最大値

### 2.3 $z_2$ 軸のずれ

$z_2$  軸の Zero 点のずれの上限値も、 $z_1$  軸と同じく  $x < 0.66[\text{mm}]$  とする。図 2.4 よりビームライン末端でのねらった分光 X 線の光軸からのずれの大きさは

$$z = 2x \cos \theta \quad (2.9)$$

で、分光 X 線のエネルギーのずれ  $\Delta E$  は

$$\Delta E = \frac{hc}{2d} \frac{\cos \theta}{\sin^2 \theta} \Delta \theta \quad (2.10)$$

ただし

$$\Delta \theta = \arctan \frac{2x \cos \theta}{L} \quad (2.11)$$

となる。これらは  $z_1$  軸の Zero 点のずれによる効果と同じ値である。したがって、第一結晶への X 線の入射角とねらった分光 X 線の光軸からのずれ  $z$  との関係は図 2.3(左図) と、第一結晶への

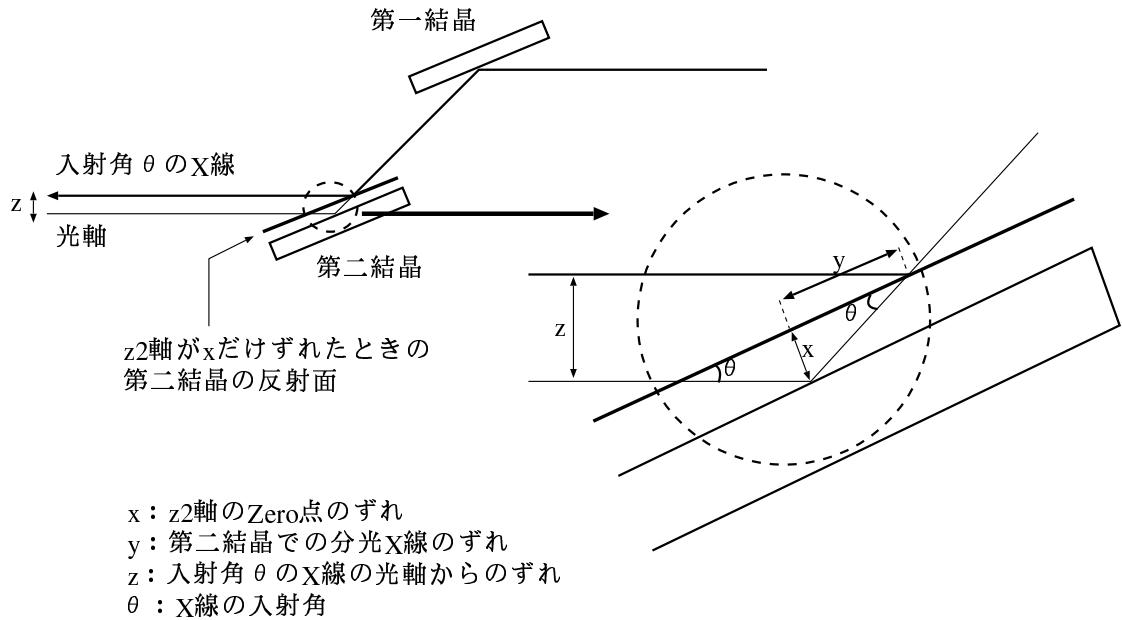


図 2.4: z2 軸の Zero 点のずれによる分光 X 線の光軸からのずれを表す概念図

X 線の入射角とそのときのエネルギーのずれの割合  $\Delta E/E$  との関係は図 2.3(右図)と同じになる。ただし、どちらも z2 軸の Zero 点のずれを上限値の  $x = 0.66[\text{mm}]$  としたときである。

また、第二結晶上の X 線のずれ  $y$  は

$$y = \frac{x}{\tan \theta} \quad (2.12)$$

となり、z2 軸の Zero 点のずれが  $x < 0.66[\text{mm}]$  という条件では

$$y < 12.6[\text{mm}] \quad (2.13)$$

であるので、X 線は第二結晶に確実に当っていることが確かめられる。

## 2.4 y 軸のずれ

y 軸の Zero 点は第一結晶の真下に第二結晶が位置するところである。y 軸の Zero 点の精度は alignment の方法により、 $1[\text{mm}]$  以下の精度で行なえる。従って、y 軸の Zero 点のずれを  $1[\text{mm}]$  以下であるとする。y 軸の Zero 点が下流側にずれるとねらった X 線が第二結晶で反射される場所は上方にシフトすることになる。その結果分光 X 線も上方にシフトし、光軸中心に分光されてくるエネルギーは高エネルギー側にシフトすることになる。Zero 点が上流側にシフトしているときはその逆である。ここでは Zero 点が下流側に  $x$  ずれていたときのねらった分光 X 線の光軸からのずれ  $z$  とエネルギーのずれ  $\Delta E$  を見積もる。

分光 X 線の光軸からのずれ  $z$  は Zero 点のずれ  $x$  と X 線の入射角  $\theta$  を用いて、

$$\begin{aligned}
 z &= y \sin \theta \\
 &= 2 \times x \cos \theta \times \sin \theta \\
 &= x \sin 2\theta
 \end{aligned} \quad (2.14)$$

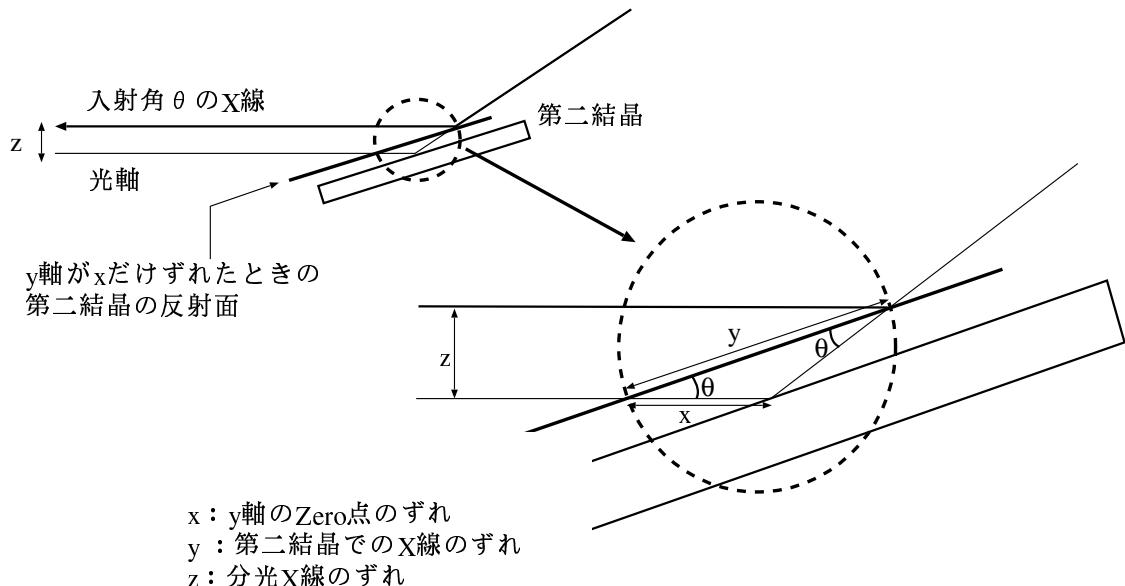


図 2.5: y 軸の Zero 点のずれによる分光 X 線の光軸からのずれを表す概念図

で、 $45^\circ$  入射で最大のずれとなり、

$$z = x \sin(2 \times 45^\circ) = x \quad (2.15)$$

である。

また、第二結晶での X 線のずれ  $y[mm]$  は、

$$y = 2x \cos \theta \quad (2.16)$$

であり、入射角が小さいほど(高エネルギーほど)大きくずれる。 $x < 1[mm]$  であるとして、最大のずれになるのは入射角  $3^\circ$  のときであるが、そのときでも第二結晶上での X 線のずれは、 $y < 2.0[mm]$  であるから X 線は第二結晶にあたっている。

さらに、分光 X 線のエネルギーのずれ  $\Delta E$  を見積もる。光軸中心に分光されてくる X 線の結晶への入射角が、ねらった X 線の入射角から  $\Delta\theta$  だけずれているとすると、

$$\begin{aligned} \Delta\theta &= \arctan \frac{z}{L} \\ &= \arctan \frac{2x \cos \theta}{L} \end{aligned} \quad (2.17)$$

と表され、分光 X 線のエネルギーのずれ  $\Delta E$  は  $\Delta\theta$  を用いて

$$\Delta E = \frac{hc}{2d} \frac{\cos \theta}{\sin^2 \theta} \Delta\theta \quad (2.18)$$

となる。

第一結晶への X 線の入射角とねらった分光 X 線の光軸からのずれの大きさ  $z$  の関係を図 2.6(左図)に示す。また、第一結晶への X 線の入射角とそのときのエネルギーのずれの割合  $\Delta E/E$  の

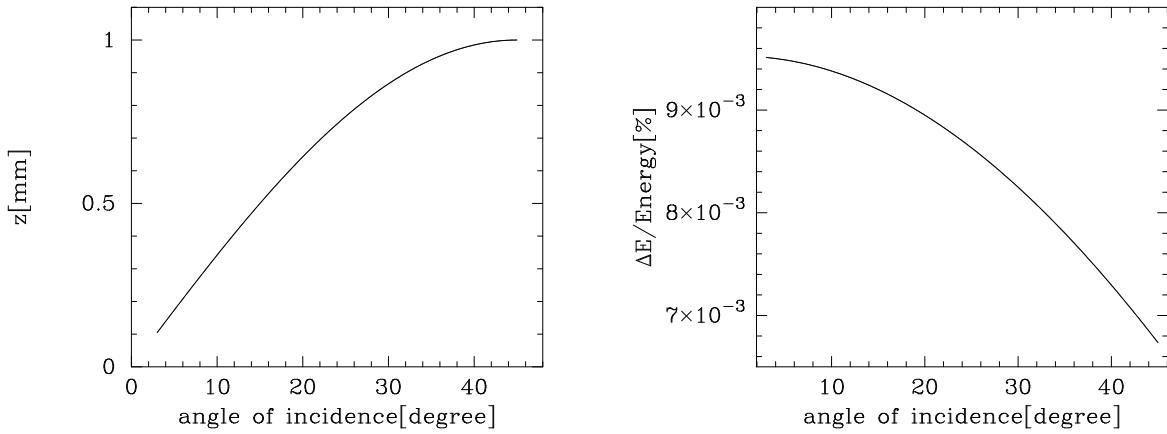


図 2.6: y 軸の Zero 点のずれが最大であるときの分光 X 線の光軸からのずれ  $z$ (左図) とエネルギーのずれの割合  $\Delta E/E$ (右図)

関係を図 2.6(右図)に示す。y 軸の Zero 点のずれはどちらも上限値の  $1[mm]$  としている。分光 X 線のエネルギーのずれの割合  $\Delta E/E$  はねらったエネルギーの  $0.01\%$  以下であることが分かる。

それが最大の値  $x = 1[mm]$  として、ねらった分光 X 線の光軸からのずれの大きさ  $z$  と、エネルギーのずれ  $\Delta E$  とねらった分光 X 線のエネルギーとの比の最大値を表 2.2 にまとめる。

	ずれ	第一結晶への入射角
分光 X 線の光軸からのずれ $z$	$1[mm]$	$45[^{\circ}]$
分光 X 線のエネルギーのずれの割合 $\Delta E/E$	$0.095\%$	$3[^{\circ}]$

表 2.2: y 軸の Zero 点のずれによる影響の最大値

## 2.5 $\theta_1$ 軸のずれ

$\theta_1$  軸の Zero 点のずれは  $\theta_1$  軸のモーターの精度で決まっていて  $\pm 10\text{pulse}$  程度の精度である。そこで  $\theta_1$  軸の Zero 点のずれによる分光 X 線のエネルギーのずれについて考察する。 $\theta$  軸の  $1\text{pulse}$  は  $0.72''$  に相当するので、 $10\text{pulse}$  では  $7.2'' = 0.002^\circ$  に相当する。図 2.7 は  $\theta_1$  の Zero 点が角度  $\alpha$  だけ負の方向にずれたときの分光 X 線の位置のずれを示した概念図である。

これによると、ビームライン末端でねらったエネルギーの X 線の来る位置が、光軸からずれる大きさ  $z$  は

$$\begin{aligned}
 z &= s - r \\
 &= L \tan \alpha - 2c \cos(\theta - \alpha) \sin(\theta - \alpha) \\
 &= L \tan \alpha - c \sin 2(\theta - \alpha)
 \end{aligned} \tag{2.19}$$

ただし

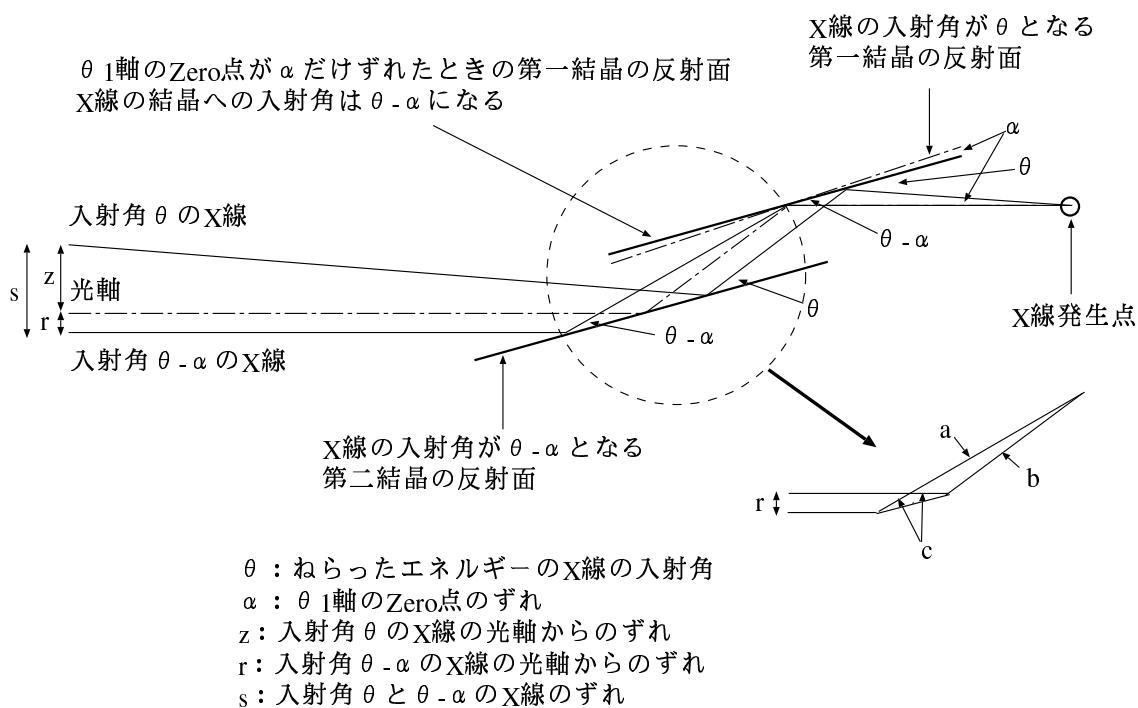


図 2.7:  $\theta_1$  軸の Zero 点のずれによる分光 X 線の光軸からのずれを表す概念図

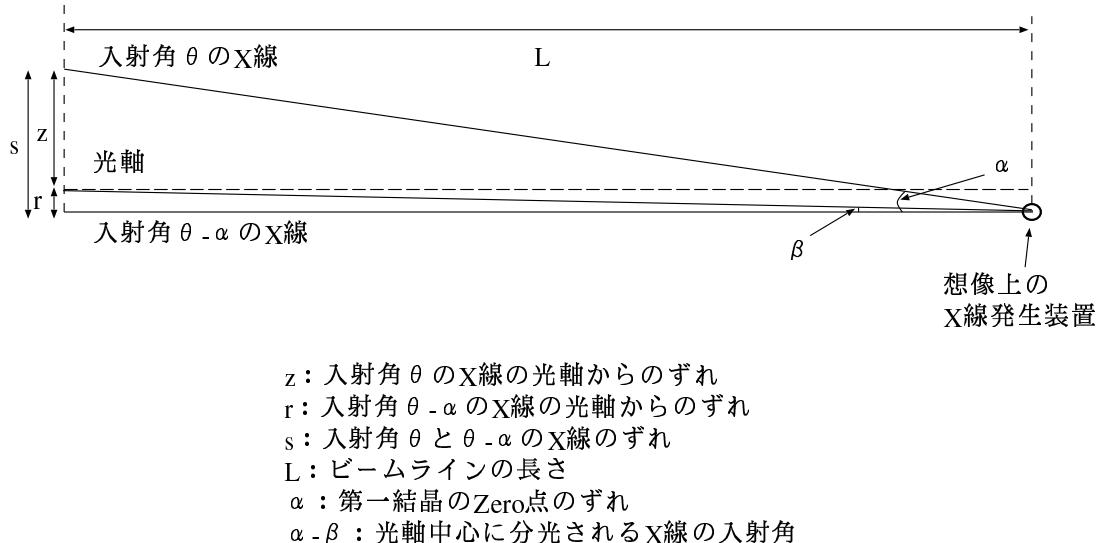


図 2.8:  $\theta_1$  軸の Zero 点のずれによる分光 X 線の入射角のずれを表す概念図

$$\begin{aligned}
c &= \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos 2\alpha} \\
a &= \frac{D}{\sin 2(\theta - \alpha)} \\
b &= \frac{D}{\sin 2\theta}
\end{aligned}$$

となる。ただし、 $D$  は第一結晶と第二結晶の間隔である。

また、光軸中心に分光されてくる X 線の第一結晶への入射角が  $\Delta\theta = \alpha - \beta$  だけずれることになるので、それによるねらった分光 X 線のエネルギーからのずれ  $\Delta E$  は

$$\begin{aligned}
\Delta E &= \frac{hc \cos \theta}{2d \sin^2 \theta} \Delta\theta \\
&= \frac{hc \cos \theta}{2d \sin^2 \theta} (\alpha - \beta)
\end{aligned} \tag{2.20}$$

ただし

$$\begin{aligned}
\alpha &: \theta_1 \text{軸の Zero 点のずれ} \\
\beta &= \arctan \frac{r}{L}
\end{aligned}$$

と表せる。

第一結晶への X 線の入射角とねらった分光 X 線の光軸からのずれの大きさ  $z$  の関係を図 2.9(左図)に示す。また図 2.9(右図)は第一結晶への X 線の入射角とそのときのエネルギーのずれの割合  $\Delta E/E$  を表したものである。どちらも  $\theta_1$  軸の Zero 点のずれが 10pulse であるとしている。 $\theta_1$  軸の Zero 点のずれが 10pulse あるときでも、分光 X 線のエネルギーのずれの割合  $\Delta E/E$  はねらったエネルギーの 0.1% 以内であることがわかる。

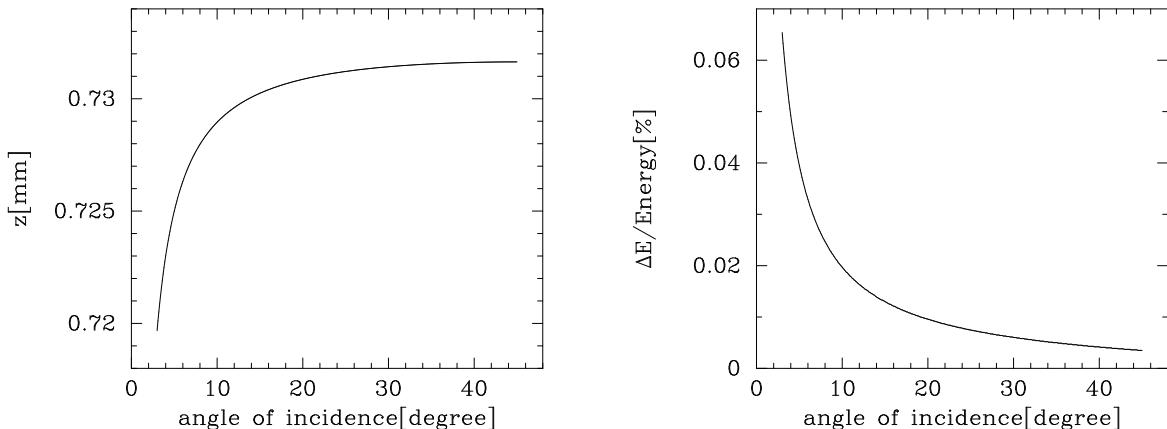


図 2.9:  $\theta_1$  軸の Zero 点のずれが最大であるときの分光 X 線のエネルギーのずれ  $z$ (左図)とエネルギーのずれの割合  $\Delta E/E$ (右図)

	ずれ	第一結晶への入射角
分光 X 線の光軸からのずれ $z$	0.732[mm]	45[°]
分光 X 線のエネルギーのずれの割合 $\Delta E/E$	0.065%	3[°]

表 2.3:  $\theta_1$  軸の Zero 点のずれによる影響の最大値

## 2.6 各軸の Zero 点のずれに対する考察のまとめ

実際の alignment の調整においては、各軸のずれは複合されている。ここでは  $\theta_1$  軸、  $z_1$  軸、  $z_2$  軸、  $y$  軸の Zero 点のずれが複合されている場合を考える。各軸の Zero 点のずれによるねらったエネルギーの分光 X 線の位置の光軸中心からのずれは、それぞれの位置のずれの和になって

$$z = z_{\theta_1} + z_{z_1} + z_{z_2} + z_y \quad (2.21)$$

となる。

また、光軸中心に分光される X 線のとねらったエネルギーの X 線の入射角のずれは、  $z_1$  軸、  $z_2$  軸、  $y$  軸の Zero 点のずれによる入射角のずれの成分と、  $\theta_1$  軸の Zero 点のずれによる入射角のずれの成分の和になっていて、

$$\begin{aligned} \Delta\theta &= \Delta\theta_{z_1,z_2,y} + \Delta\theta_{\theta_1} \\ \Delta\theta_{z_1,z_2,y} &= \arctan \frac{2x_{z_1}\cos\theta + 2x_{z_2}\cos\theta + x_y\sin 2\theta}{L} \\ \Delta\theta_{\theta_1} &= (\alpha - \beta) \end{aligned} \quad (2.22)$$

と表せる。したがって分光 X 線のエネルギーのずれ  $\Delta E$  は  $\Delta\theta$  を用いて

$$\Delta E = \frac{hc}{2d} \frac{\cos\theta}{\sin^2\theta} \Delta\theta \quad (2.23)$$

と表せる。

図 2.10(左図)に第一結晶への X 線の入射角とねらった分光 X 線の光軸からのずれの大きさ  $z$  の関係を示す。また、図 2.10(右図)に第一結晶への X 線の入射角とそのときの分光 X 線のエネルギーのずれの割合  $\Delta E/E$  の関係を示す。

	ずれ	第一結晶への入射角
分光 X 線の光軸からのずれ $z$	3.16[mm]	26.8[°]
分光 X 線のエネルギーのずれの割合 $\Delta E/E$	0.32%	3[°]

表 2.4: 各軸の Zero 点のずれによる影響の最大値

以上の結果より、分光 X 線のエネルギーのずれは最大でもねらったエネルギーの 0.3% 程度である。また、ねらったエネルギーの分光 X 線の光軸からのずれの見積もりから、ねらったエネルギーの X 線はビームライン末端で 1 インチの CCD 上に確実にあたっていることが分かる。

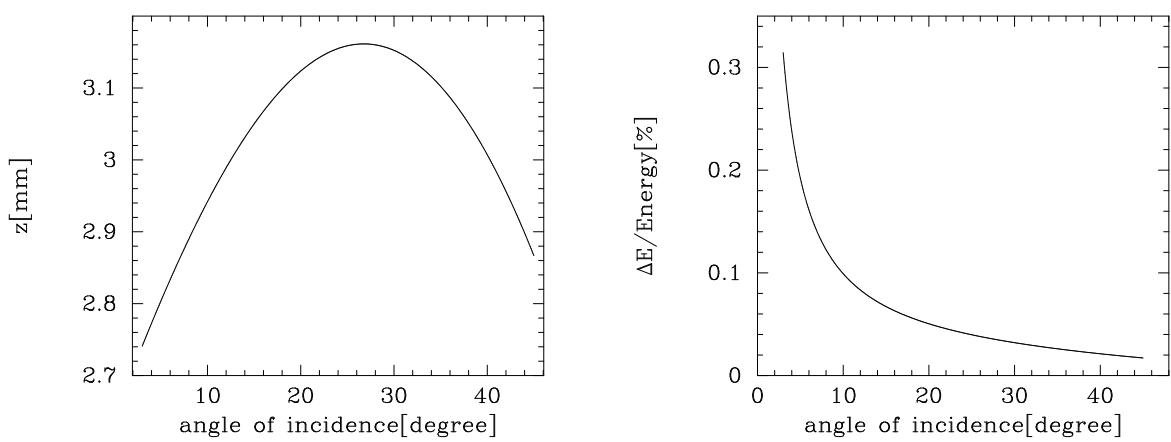


図 2.10: 各軸の Zero 点のずれが最大であるときの分光 X 線の光軸からのずれ  $z$ (左図) と分光 X 線のエネルギーのずれの割合  $\Delta E/E$ (右図)

## 第 3 章

### 二結晶分光器を用いた X 線ビームラインの alignment

#### 3.1 alignment の概要

二結晶分光器の alignment について、その手順と alignment の評価の方法についてまとめた。図 3.1 はビームラインの概念図である。分光 X 線は大 Chamber 下流側フランジの中心に、ダイレクト光は大 Chamber 下流側フランジの中心から 20[mm] 上に来るよう設計されている。

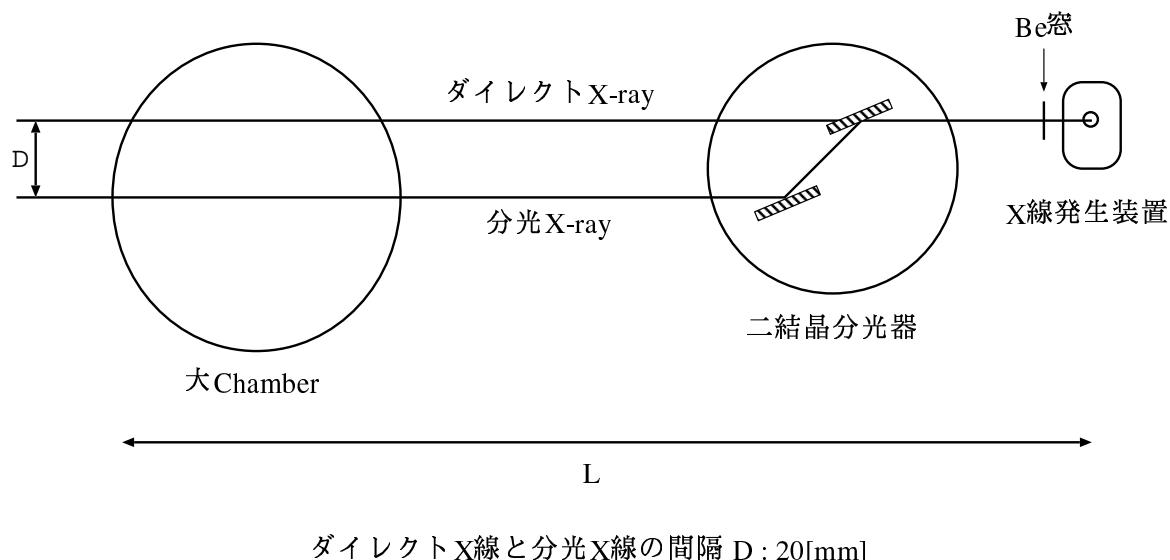


図 3.1: 21[m] ビームラインの概念図

alignment の手順を次の順に説明する。

1. 大 Chamber の下流側フランジの中心から 20[mm] 上の点と X 線発生装置の Be 窓の中心をレーザーで結び、基準とする。これはダイレクト X 線の位置に相当する。
2. 基準となるレーザーに対して、二結晶分光器の台座の位置と足の高さを調整する。
3. 二結晶分光器の各軸を調整する。

- 正しく alignment 出来ているか評価を行う。

### 3.2 レーザーの調整

alignment の基準となるレーザーを通すことから始める。図 3.2 のように、レーザーは大 Chamber の下流側フランジから入射させて、大 Chamber の下流側フランジの中心から 20[mm] 上と X 線発生装置の Be 窓の中心とを結ぶように通す (ダイレクト X 線の位置)。本来、レーザーは X 線発生装置のターゲットに当っていることを確認するべきであるが、X 線発生装置をリークする必要があり、また X 線発生装置の Be 窓の中心にレーザーが当っていれば、ターゲットにも確実に当っていると考えて良いので、レーザーは Be 窓の中心に当っていればよいものとする。

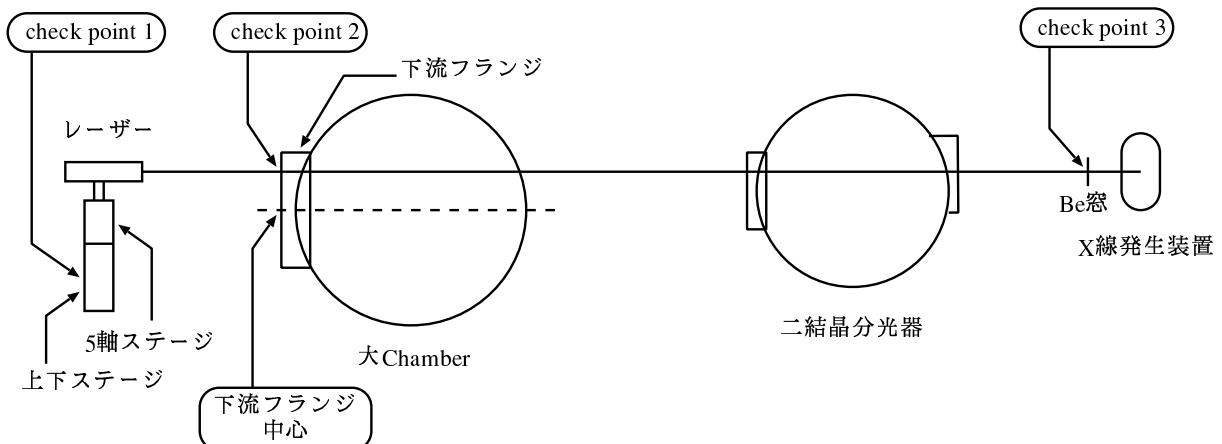


図 3.2: レーザーの調整

- レーザーの上部の 5 軸ステージの各軸 (図 3.3 を参照) をそれぞれ可動範囲の中心に設定する。これは後で微調整するときの可動範囲を確保するためである。
- レーザーの下部の上下可動ステージをダイレクト X 線の位置 (中心より 10[mm] 上、図 3.2 の check point 1) に設定する。
- 二結晶分光器の下流側出口の径が小さいので、いきなり二結晶分光器までレーザーを通すのは困難である。そこで二結晶分光器のすぐ下流のビームラインのパイプを 1 本はずして、レーザーが途中のパイプ等で蹴られないようにこの位置まで通す。この時のレーザーの方向の調整は  $\alpha$  軸、 $\theta$  軸とレーザーの台座を動かすことによって行う。ここで  $x$ 、 $y$ 、 $z$  軸を使うと、後で微調整するときに可動範囲外になってしまう可能性があるので注意する。また、後からこの位置で CCD を使って分光 X 線を探す作業を行うので、パイプを外す作業は無駄にはならない。
- 二結晶分光器の上流スリットをレーザーが通るようにする。レーザーを途中で蹴らないように二結晶分光器の上流、下流スリットと共に全開にし、さらに  $z_1$  軸のステージを上端まで上げておく。この段階ではまだ二結晶分光器の台座の alignment を行っていないので、厳密にスリットの中心を通す必要はない。ここまででの作業でレーザーは二結晶分光器を通

過し、Be 窓近くに来ているはずである。また、この段階でもレーザーの方向の調整はレーザーの 5 軸ステージ(図 3.3、表 3.1[9])の  $\alpha$  軸、 $\theta$  軸とレーザーの台座だけで調整するようする。

5. 最終段階として、大 Chamber の下流側フランジ中心の 20[mm] 上(図 3.2 の checkpoint 2)と Be 窓の中心(図 3.2 の check point 3)を通るように調整する。Be 窓のところではレーザーの中心が分かりにくいので、差動排気の上流側フランジのところでレーザーの中心にクロスゲージ(alignment 用に OHP に印刷して作った的で、数種類用意している)の中心を当ててその影でレーザーの中心を判断すると良い。最終段階なので 5 軸ステージの全ての軸を微調整を使って、Be 窓の上で 1[mm] 以内の精度でレーザーの微調整を追い込むようにする。

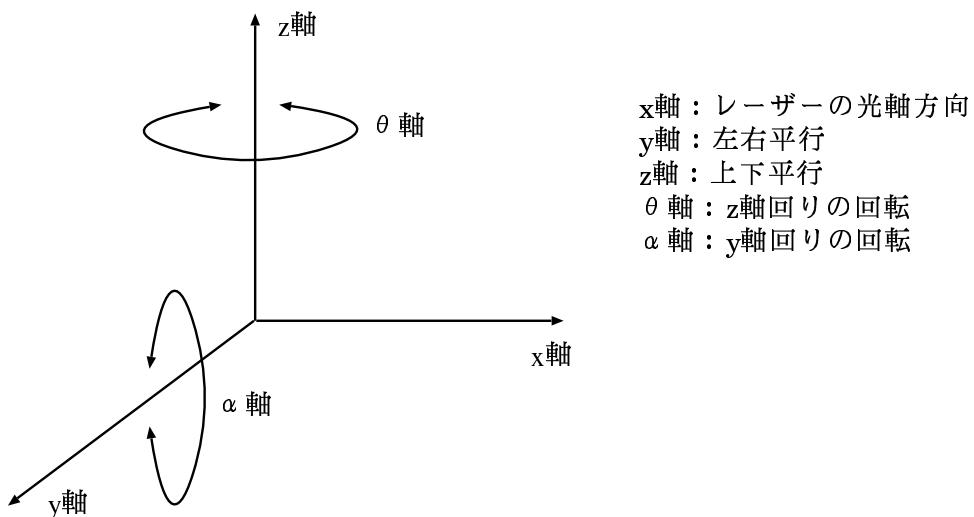


図 3.3: 5 軸ステージの軸の名前

ステージ	軸	ストローク	表示分解能	位置分解能
上部ステージ	x 軸	$\pm 6.5\text{mm}$	0.01mm	0.003mm
	y 軸	$\pm 6.5\text{mm}$	0.01mm	0.003mm
	z 軸	$\pm 3\text{mm}$	0.01mm	0.003mm
	$\theta$ 軸	粗動 $360^\circ$ , 微動 $\pm 5^\circ$	$2^\circ$	$1'$
	$\alpha$ 軸	$\pm 15^\circ$	$12'$	$2'$
下部ステージ		$\pm 15\text{mm}$	0.1mm	0.1mm

表 3.1: レーザーのステージの各軸のストローク

### 3.3 二結晶分光器の台座の調整

二結晶分光器の台座の位置と高さの調整をする。二結晶分光器の台座は、台座を固定するための板の上に乗っている。台座の板の位置の調整は、一度決めればビームラインの配置を大きく変更しない限り調整の必要はないし、高い精度を必要とするものでもないので、ここでは省略する。

1. 二結晶分光器の下流側フランジの中心の  $10[mm]$  上(図 3.4 の check point 1) と上流側スリット(図 3.4 の check point 2) の中心をレーザーが通るように、二結晶分光器の台座の位置と高さを調整する。それぞれのフランジの部分にクロスゲージ(的)を貼り目安とする。それぞれ  $1[mm]$  以内のずれになるように追い込む。
2. 二結晶分光器の台座の水平の調整は、床に対して台座の各足の高さがほぼ同じくらいの高さになっていれば良い。台座の足は六角のボルトで高さを調整するようになっている。ボルトのピッチは  $3[mm]/1\text{周}$  であり、ボルトの頭が六角であるのを利用すると、およそ  $1/6$  周 ( $0.5[mm]$ ) の精度で高さを調節することが出来る。最終的には結晶のステージに手動の調整ネジがついているので、そこで結晶の水平を微調整することもできる。

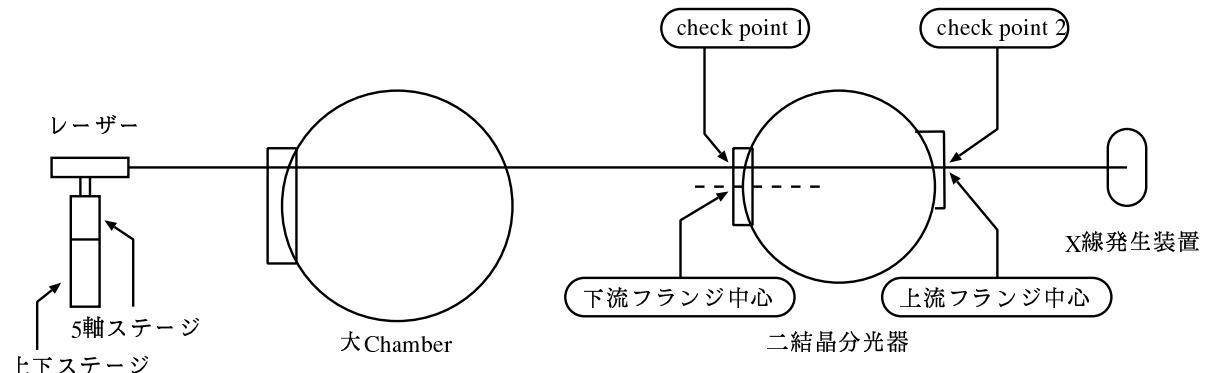


図 3.4: 二結晶分光器の台座の調整

### 3.4 二結晶分光器の可動スリットの調整 (その 1)

二結晶分光器の可動スリットは分光 X 線の上下方向の幅を決めるのに使用するもので、可動スリットがダイレクト X 線と分光 X 線を遮る位置を調べる必要がある。それゆえ、alignment の段階でその位置を調べておくことが望ましい。この段階ではレーザーはダイレクト X 線の位置にあるので、各スリットがそれぞれダイレクト X 線の位置にあるレーザーを切る位置を調べる。ただし、二結晶分光器の下流側下スリットは設計上、ダイレクト X 線の位置にあるレーザーを遮ることはない。

1. この段階では、レーザーはダイレクト X 線の位置であるとする。もしそうでなければダイレクト X 線の位置に設定する。

2. 上流の上下のスリットと、下流の上のスリットがそれぞれレーザーの中心を切る位置を探し、その位置での各スリットの目盛を調べ記録する。

### 3.5 二結晶分光器の各軸の Zero 点調整

これより各軸の Zero 点の位置を決め、オリジナル (ORG) からの pulse 数を調べる。オリジナル (ORG) の位置はマグネスイッチによって精度良く決められているので、Zero 点の再現性から言って ORG からの pulse 数を調べるのがよい。ただし、あおり軸にはどちらもマグネスイッチが付いていないのでオリジナル (ORG) がない。したがって CW(時計回り) あるいは CCW(反時計回り) 方向に可動範囲の端からの pulse 数を調べることにする。

各軸の Zero 点調整において CCD を使用する場合、基本的には浜松フォトニクス社の C4880 の CCD カメラシステムを使うこと想定している。このシステムにおける CCD カメラのコントロールは、MS-Windows 上で動作する HiPic で行う<sup>1</sup>。また alignment において特にことわりがない場合、CCD のデータ取得モードはライブモードで行う。

#### 3.5.1 あおり軸の Zero 点調整

あおり軸は、 $\theta$  軸で決められる精度より高い精度で調整が必要な場合を想定して設置したものである。今のところ二結晶分光器の使用に際して、そこまでの精度を必要としていないので、あおり軸を使うことは考えていない。あおり軸の Zero 点の位置は、あおりの台座のステージと結晶フォルダが付いているステージが見ためでほぼ平行になるように決めればよい。あおり 1 軸、あおり 2 軸とともに次の手順で Zero 点調整をする。

1. ステージを可動範囲の端まで動かす。動かす方向は CW、CCW いずれでも良い。そこで pulse 数をクリア (CLR) ボタンを押してゼロにする。
2. あおりの台座のステージと結晶フォルダのステージが見ためでほぼ平行になる所を探し pulse 数を調べる。pulse 数は可動範囲の端からの pulse 数を表示している。この位置を Zero 点とする。
3. Zero 点を決めたらその位置で pulse 数をクリア (CLR) する。
4. あおり軸の Zero 点調整におけるずれとしては、モータの精度、ステージの可動範囲の端を決める精度、見ためで平行になるところを決める精度などが考えられる。しかし、あおり軸の使用目的は  $\theta$  軸の微調整であるから、絶対的な Zero 点があるわけではない。したがって、あおり軸の Zero 点調整のずれについては考えなくてよい。

#### 3.5.2 $\theta_1$ 軸の Zero 点調整

$\theta_1$  軸の Zero 点は、結晶の反射面がダイレクト X 線に対して平行になるところである。そのとき、ダイレクト X 線が第一結晶で遮られる部分は最も小さくなる。CCD を用いて第一結晶の影を見ながら  $\theta_1$  軸を振り、CCD のイメージ上でダイレクト X 線の領域が最も広くなるところを探す。この方法では精度が良くないので、最終的にはビームライン末端で X 線発生装置のターゲットの特性 X 線を利用してさらに精度を上げる必要がある。

---

<sup>1</sup>C4880 の CCD カメラシステム [7] および Hipic の操作 [8] についてはそれぞれのマニュアルを参照。

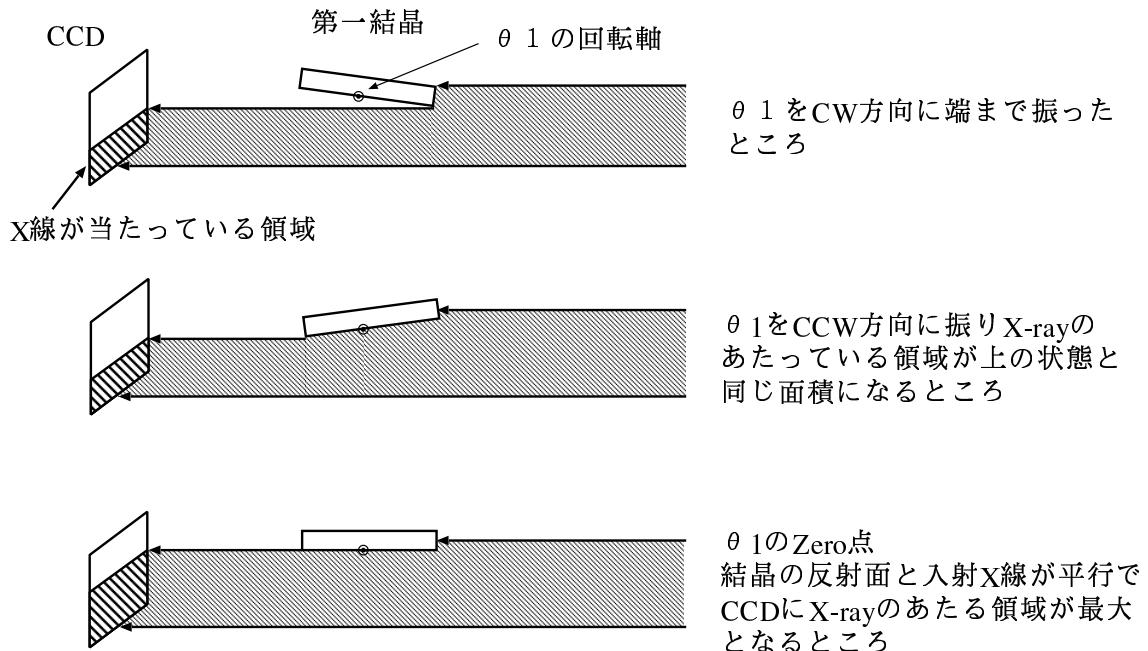


図 3.5:  $\theta_1$  の Zero 点調整

1. レーザーの alignment の時にパイプを 1 本はずしたところに CCD を設置する。CCD の高さはダイレクト X 線の位置にレーザーを目安に設定する。この時 CCD の位置の精度は alignment の精度に影響しないので気にしなくて良い。
2. 第一結晶と第二結晶の接触をさけるため、y 軸をオリジナル (ORG) に戻す。y 軸のオリジナル (ORG) の位置は y ステージの下流側の端の方にある。
3.  $\theta_1$  軸をオリジナル (ORG) の位置で pulse 数をクリア (CLR) する。 $\theta_1$  を CW 方向に可動範囲の端まで振って、オリジナル (ORG) からの pulse 数を調べる。
4. この位置で再び pulse 数をクリア (CLR) する。
5. X 線に対する第一結晶の影が、CCD のイメージ上でダイレクト X 線を半分ほどかくす高さまで z1 軸を使って第一結晶を下ろす。
6. CCW 方向に  $\theta_1$  を振り、結晶の影の位置が CW 方向の端まで  $\theta_1$  を振った時の影の位置と同じ位置になる所を探し pulse 数を調べる。pulse 数は CW 方向の端からの pulse 数である。この段階で  $\pm 500$  pulse の所までは追い込んでおく。
7. CW 方向の端と上で調べた位置のちょうど半分の位置が Zero 点にあたる。 $\theta_1$  を上で調べた Zero 点の位置に設定し、さらに  $\theta_1$  を振って結晶の影がもっとも小さくなるところ（言いかえると、CCD のイメージ上で X 線がもっとも広くあたるところ）を探し、CW 方向の端から Zero 点までの pulse 数を調べる。この段階で  $\pm 100$  pulse まで追い込む。
8. オリジナル (ORG) から CW 方向の端までの pulse 数と CW 方向の端から Zero 点までの pulse 数の差を求めて、この段階でのオリジナル (ORG) から Zero 点までの pulse 数とする。

9. Zero 点で pulse 数をクリア (CLR) し、さらに  $\theta_1$  軸のエンコーダをリセットする。
10. この段階では  $\theta_1$  の Zero 点は  $\pm 100\text{pulse}$ ( $0.02^\circ$  に相当) 程度のずれがある。最終的には、X 線発生装置のターゲットの特性 X 線を使ってさらに精度を上げる。

### 3.5.3 z1 軸の Zero 点調整

$z_1$  軸の Zero 点は結晶の反射面が  $\theta_1$  の回転軸と一致するように調整する。調整の方法としては、 $\theta_1$  の回転軸を通り水平になるように直線を引いた OHP をはり、その線に結晶反射面が一致するように調整する。 $z$  軸の Zero 点のずれは  $0.68[\text{mm}]$  以上あると  $60[\text{keV}]$  を分光したとき、第二結晶に X 線が当らなくなる<sup>2</sup>ので、ねらったエネルギーの X 線を分光するには、Zero 点のずれはそれより小さくなければならない。また、 $z_1$  軸の可動範囲は  $10[\text{mm}]$  であるが、設計上はこの真ん中が  $\theta_1$  の回転軸と一致するようになっている。ここから大きくずれているなら問題があるので調べる必要がある。

1. オリジナル (ORG) で pulse 数をクリア (CLR) する。
2. Zero 点を探し、オリジナル (ORG) から Zero 点までの pulse 数を調べる。
3. ダイレクト X 線の位置に設定したレーザーと第一結晶の反射面とのずれの大きさをチェックする。グラフ用紙や定規を利用してずれの大きさを測る。レーザーの alignment のずれもあるので、 $1[\text{mm}]$  程度のずれならばよいものとする。

### 3.5.4 y 軸の Zero 点調整

$y$  軸の Zero 点は第二結晶が第一結晶のちょうど真下に来るところである。調整の方法としては第一結晶と第二結晶の結晶フォルダに定規 (あるいはグラフ用紙) などをあてて真下に来るところを探す。 $1[\text{mm}]$  以内のずれならば十分な精度である<sup>3</sup>。

1. オリジナル (ORG) で pulse 数をクリア (CLR) する。さらに  $y$  軸のエンコーダーもリセットする。
2. 第二結晶が第一結晶の真下に来るところを探しそこを Zero 点とし、オリジナル (ORG) からの pulse 数を調べる。
3. Zero 点で pulse 数をクリア (CLR) する。エンコーダーは負の方向の表示に限界がある<sup>4</sup>ので、リセットしないでオリジナル (ORG) からの値を表示させる。

## 3.6 二結晶分光器の可動スリットの調整 (その 2)

実験によっては、二結晶分光器の下流側の可動スリットで分光 X 線の上下方向の幅を絞る必要性がある場合も考えられる。そこで、二結晶分光器の下流側の可動スリットが、分光 X 線の位置にあるレーザーを遮る位置を調べる。

---

<sup>2</sup> $z_1$  軸のずれを参照

<sup>3</sup> $y$  軸のずれ参照

<sup>4</sup>-99.99[mm] まで

1. レーザーを分光 X 線の位置に合わせる。ダイレクト X 線の位置より 20[mm] 下 (レーザーの下部の上下可動ステージの中心から 10[mm] 下) の位置に合わせる。
2. 二結晶分光器の下流側の上下のスリットがレーザーの中心を切る位置を探し、その位置での各スリットの目盛を調べ記録する。

### 3.6.1 $\theta_2$ 軸の Zero 点調整 (その 1) と z2 軸の Zero 点調整

$z_2$  軸の Zero 点の調整は  $z_1$  軸の Zero 点の調整と同様に、結晶反射面と  $\theta_2$  の回転軸が一致するように調整する。第二結晶の反射面がある程度レーザーに対して平行になっていないと  $z_2$  軸の Zero 点調整は行いづらいのだが、  $z_1$  軸のときと違って<sup>5</sup>  $\theta_2$  軸の Zero 点調整をまだ行っていない。したがって、  $\theta_2$  軸の調整もレーザーを使ってある程度までここで同時に行う。 $\theta_2$  軸の Zero 点調整は、最終的にはビームライン末端で行うことになる。

1. レーザーは分光 X 線の位置 (ダイレクト X 線の 20[mm] 下) に設定されているとする。もしそうでなければ、分光 X 線の位置に合わせる。
2.  $z_2$  軸、  $\theta_2$  軸を動かすので第一結晶と第二結晶がぶつからないように  $y$  軸を 800,000pulse 程度 CW 方向に動かしておく。
3.  $z_2$  軸、  $\theta_2$  軸ともにオリジナル (ORG) に戻して、 pulse 数をクリア (CLR) しておく。
4.  $\theta_2$  軸を振って、結晶の反射面が目で見てレーザーと平行になるように調整する。また第二結晶の反射面がレーザーの中心を通るように  $z_2$  軸を調整する。
5. さらに、  $\theta_2$  軸を振って結晶反射面でレーザーを反射しないように、また結晶の下流側の端でレーザーを切って影を作らないように結晶反射面とレーザーの平行を出来るだけ追い込む。
6.  $\theta_2$  軸の pulse 数を調べてクリア (CLR) しておく。この pulse 数がとりあえずこの段階での  $\theta_2$  軸のオリジナル (ORG) から Zero 点までの pulse 数である。 $\theta_2$  軸の Zero 点は後でさらに補正することになる。
7. あとは  $z_1$  軸の Zero 点調整と同様にして結晶反射面と  $\theta_2$  の回転軸を一致させるように調整し、オリジナル (ORG) から Zero 点までの pulse 数を調べる。Zero 点に対するずれの上限も  $z_1$  軸と同じ程度にまで追いかけておきたい。さらに、  $z_2$  軸の pulse 数をクリア (CLR) しておく。
8.  $y$  軸を Zero 点の位置に戻し、第一結晶と第二結晶の間隔を定規 (あるいはグラフ用紙等) で調べる。設計値は 20[mm] であるが、その値からずれている場合がある。 $z_1$  軸、  $z_2$  軸の Zero 点調整が間違っているければ、機械の製作段階でのずれと考えられるので、ダイレクト X 線と分光 X 線の間隔を変更することで対応する。
  - (a) まず、二結晶分光器コントロールソフトの結晶の間隔の値をここで調べた結晶の間隔の値に変更する。

---

<sup>5</sup> $z_1$  軸の Zero 点調整の前に  $\theta_1$  軸の Zero 点調整を行っている。

- (b) さらにレーザーの分光 X 線の位置を第二結晶の結晶反射面に一致するように変更する。つまり、ダイレクト X 線の位置からここで調べた結晶の間隔の分だけ下の位置を分光 X 線の位置とすればよい。

### 3.6.2 $\theta_2$ 軸の Zero 点調整 (その 2)

$\theta_2$  軸の Zero 点調整は最終的にはビームライン末端で X 線発生装置のターゲットの特性 X 線を分光して決めるのだが、いきなりビームライン末端で分光 X 線を得るのは困難である。そこで二結晶分光器のすぐ下流で分光 X 線を探し、この段階での  $\theta_2$  軸の Zero 点を決める。 $\theta_2$  軸の Zero 点の調整は大きく 2 段階に分けられる。まずレーザーを結晶で反射させ X 線発生装置の Be 窓の中心に当るように調整し、次に実際に X 線を分光してこの段階での Zero 点を決め補正する。

#### レーザーを使った調整

$\theta_2$  軸を調整するときに  $\theta_2$  軸の Zero 点はある程度追い込んでいる。ここではさらに結晶で二回反射させてレーザーが Be 窓中心に当っていることを確認する。

1. コントロールソフトで任意のあるエネルギーを分光するように結晶を設定する。
2. レーザーを下流側から入れて結晶で 2 回反射させ、Be 窓にあたるように  $\theta_2$  を補正し、補正した分の pulse 数を調べる。
3. コントロールソフトで設定するエネルギーを変えて、レーザーが Be 窓にあたっていることを確認する。そのとき大きくずれていいくようならば、ここまで Alignment がすでに狂っていると考えられる。
4. 補正した Zero 点で pulse 数をクリア (CLR) する。また、補正した分の pulse 数を含めたオリジナル (ORG) から Zero 点までの pulse 数を求める。

#### X 線を使った調整

レーザーの反射面と結晶の格子面は完全に一致しているとはかぎらないので、実際に X 線を分光して  $\theta_2$  の Zero 点の補正を行う。

1. 二結晶分光器のすぐ下流で、CCD を分光 X 線の位置に設置する。
2. X 線発生装置からの特性 X 線を分光するようにコントロールソフトで設定する。Target が Cu または Mo などであれば特性 X 線の  $K\alpha_1$  はエネルギーもそれなりに高いので、ビームラインを真空引きしなくても大気による吸収の影響は小さい。
3. コントロールソフトのサイクルモードで  $\theta_2$  を振って分光 X 線を捕まえる。
4. 分光 X 線の強度が最も強くなる  $\theta_2$  を 1pulse の精度まで追い込み、その点を  $\theta_2$  軸の Zero 点とし、補正した pulse 数を調べる。
5.  $\theta_2$  の補正した Zero 点で pulse 数をクリア (CLR) する。また、ここでも補正した pulse 数を含めたオリジナル (ORG) から Zero 点までの pulse 数を調べる。
6.  $K\alpha_2$ 、 $K\beta_1$  に対しても、分光 X 線が来ることを確かめる。

### 3.6.3 結晶の光軸回りの回転の傾きの補正

図 3.6 のように、2つの結晶が光軸回りに回転の傾きがあるとき、 $\theta_1$  軸を固定しておき  $\theta_2$  軸だけを振っていくと、CCD のイメージ上で強度分布の偏りが生じる。手動のネジでこの傾きを調整できるようになっている。ネジが手動なので、調整作業は二結晶分光器をリークして大気中で行うことになる。目で見て気にならない程度まで調整すればよい。

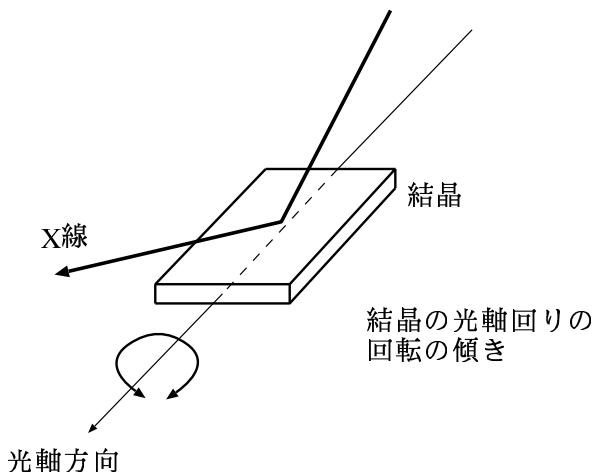


図 3.6: 結晶の光軸回りの回転の傾きの調整

### 3.7 ビームライン末端で分光 X 線を捕まえる

ビームライン末端、大 Chamber の下流側フランジに CCD を取り付け、分光 X 線を捕まる。ここでも特性 X 線を分光して探すと強度が強くて見付けやすい。また、特性 X 線が CCD 上に分光されてくる位置から  $\theta_1$  軸と  $\theta_2$  軸の Zero 点調整の最終的な追い込みをする。

1. X 線発生装置のターゲットの特性 X 線を分光するように、コントロールソフトで設定する。特性 X 線のうち  $K\alpha_1$  が最も強度が強いのでこれを使うのがよい。
2.  $\theta_2$  軸を振って分光 X 線を探す。このとき、特性 X 線が CCD 上に分光されてくるとは限らない。 $\theta_1$  軸の Zero 点のずれの大きさによっては連続 X 線の成分が分光されている場合も考えられる。
3.  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  軸を同時に振りながら特性 X 線を探す。特性 X 線は強度が強いので、CCD のイメージ上で連続 X 線と区別できる。特性 X 線が出来るだけ CCD のイメージで真中に来るようとする。 $\theta$  軸のモーターの再現性が  $\pm 10$  pulse なので、ここでは  $\pm 10$  pulse の精度まで追い込む。
4. 他のエネルギーの特性 X 線も分光し、CCD 上に分光されていることを確かめておく。特性 X 線が CCD の中心に分光されていない場合もある。これは  $\theta_1$  軸のモーターの再現性や他の軸の alignment における Zero 点のずれによる影響と考えられる。

5. 任意のいくつかのエネルギーで連続成分も分光し、分光 X 線が CCD 上に来ていることを確認しておく。特に分光するエネルギーが高エネルギーであるほど、各軸の Zero 点調整におけるずれの影響が大きいので、高エネルギーを分光できることを確かめておく。

### 3.8 alignment の評価

ねらったエネルギーの X 線が分光されているか評価する。あらかじめ封入線源をあてて Gain を調べてある SSD を用いて分光 X 線のエネルギーを調べ、要求する精度を満たしているか調べる。

1. あらかじめ、 $^{55}\text{Fe}$  と  $^{109}\text{Cd}$  線源を用いて SSD の Gain を調べておく。
2. 任意のいくつかのエネルギーで X 線を分光し、そのスペクトルから分光 X 線のエネルギーを調べ、ねらったエネルギーと分光 X 線のエネルギーを比較する。分光する X 線のエネルギーにもよるが、各軸の Zero 点調整の精度から言って、最大で分光 X 線のエネルギーの 0.3% 程度のずれがあると考えられる<sup>6</sup>。それ以上のエネルギーのずれがある場合は、要求する精度を満たしていないと考えられるので、もう一度 alignment を見直す必要がある。

第 4 章で、実際に行なった alignment の評価実験について述べ、今回の alignment の精度の評価と alignment 方法について議論する。

---

<sup>6</sup> 第 2.6 節参照

## 第 4 章

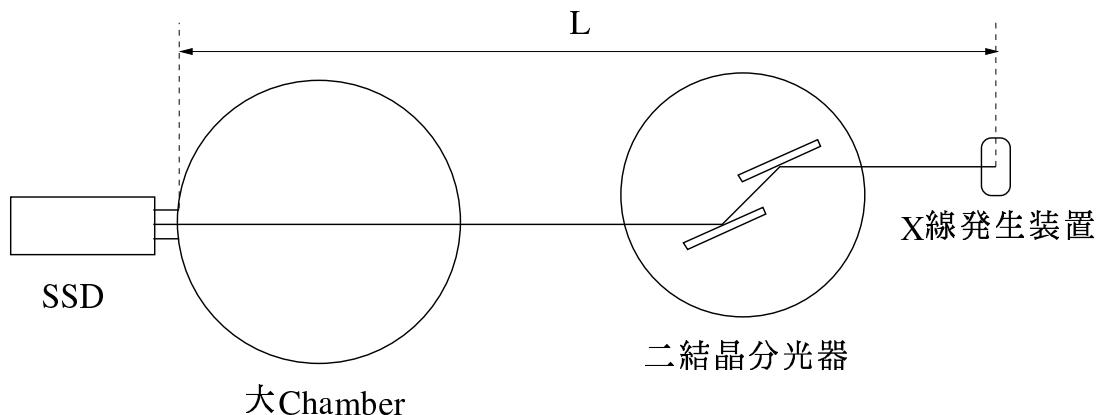
### alignment の評価実験及び分光 X 線とダイレクト X 線の強度比

第 3 章で説明した方法で二結晶分光器及びビームラインの alignment を行なった。本章以降では、ビームラインの性能評価として行なった分光 X 線の単色性の評価や、二結晶分光器通過後の X 線の偏光度等について述べる。本章ではビームライン末端で得られた分光 X 線のスペクトルから、今回行なった alignment について評価する。また、ビームライン末端で分光 X 線の強度を見積もるために、ダイレクト X 線と分光 X 線の強度比について調べた。

#### 4.1 alignment の評価実験

##### 4.1.1 分光 X 線のエネルギースペクトル

二結晶分光器で X 線発生装置からの連続 X 線を分光し、ビームライン末端で SSD を用いて分光 X 線のエネルギースペクトルを測定した。図 4.1 に実験システムの概略図を示す。



L : ビームラインの長さ(約21[m])

図 4.1: 分光 X 線のエネルギースペクトルの測定システムの概略図

分光 X 線のエネルギースペクトルを図 4.2~4.5 に示す。各分光 X 線のエネルギースペクトルは、X 線発生装置を管電圧 50[kV]、管電流 10[mA]、ターゲットに Mo を用いて積分時間 1000[sec]

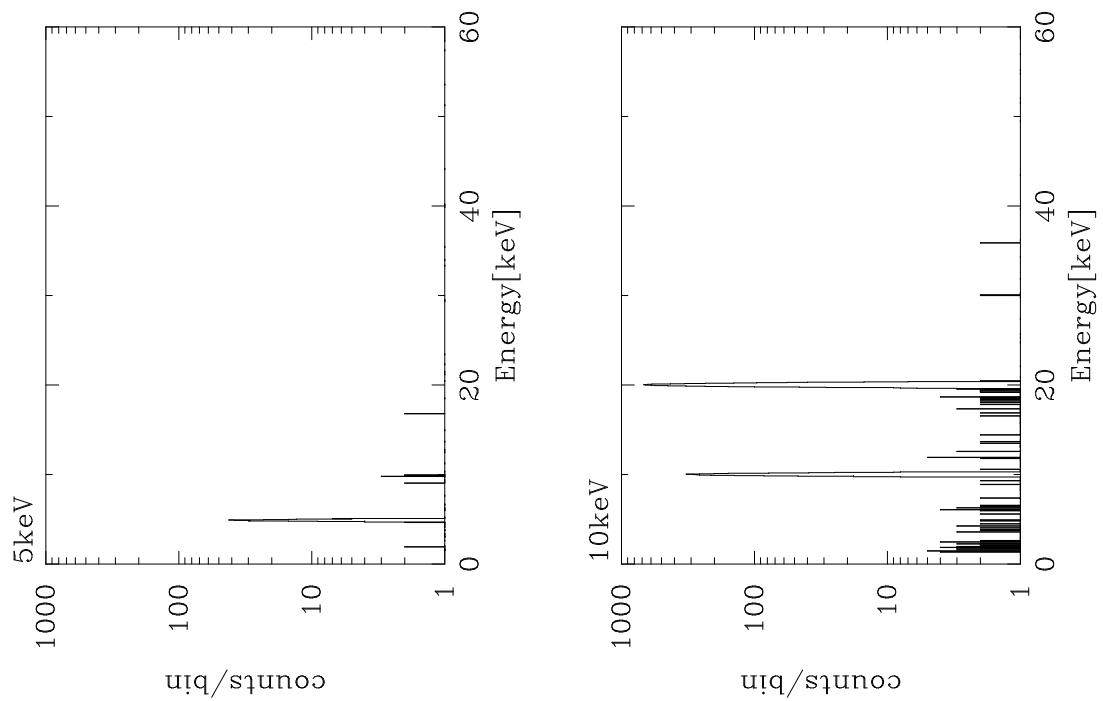


図 4.2: 5[keV](左図) と 10[keV](右図) の分光 X 線のスペクトル

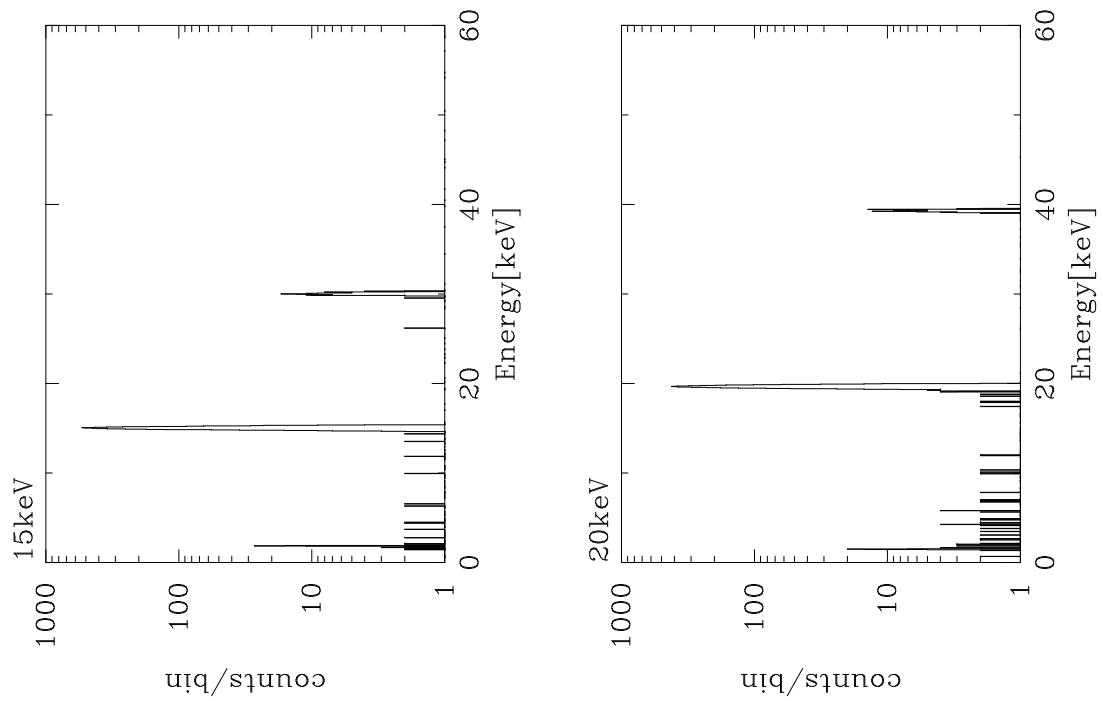


図 4.3: 15[keV](左図) と 20[keV](右図) の分光 X 線のスペクトル

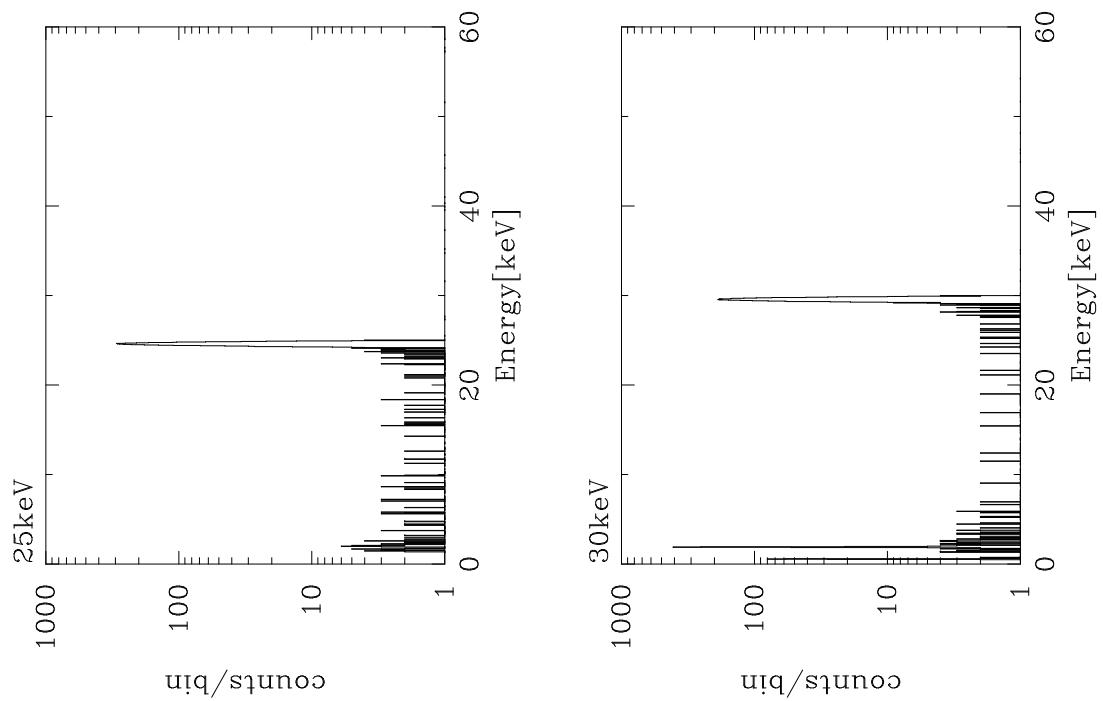


図 4.4: 25[keV](左図) と 30[keV](右図) の分光 X 線のスペクトル

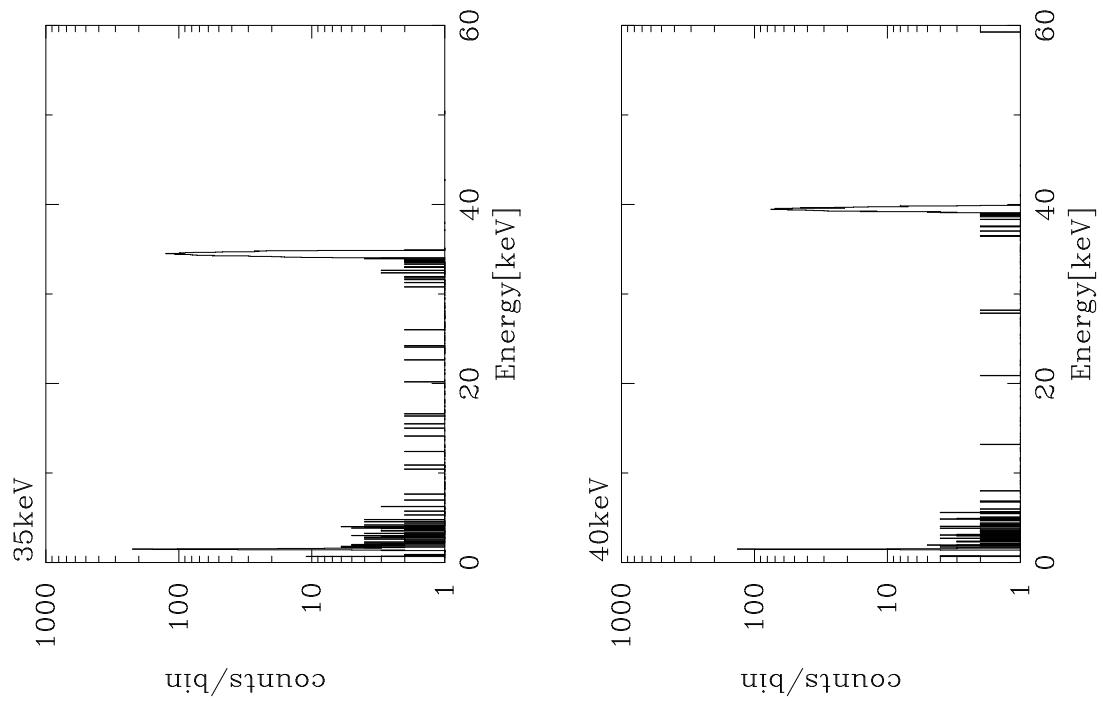


図 4.5: 35[keV](左図) と 40[keV](右図) の分光 X 線のスペクトル

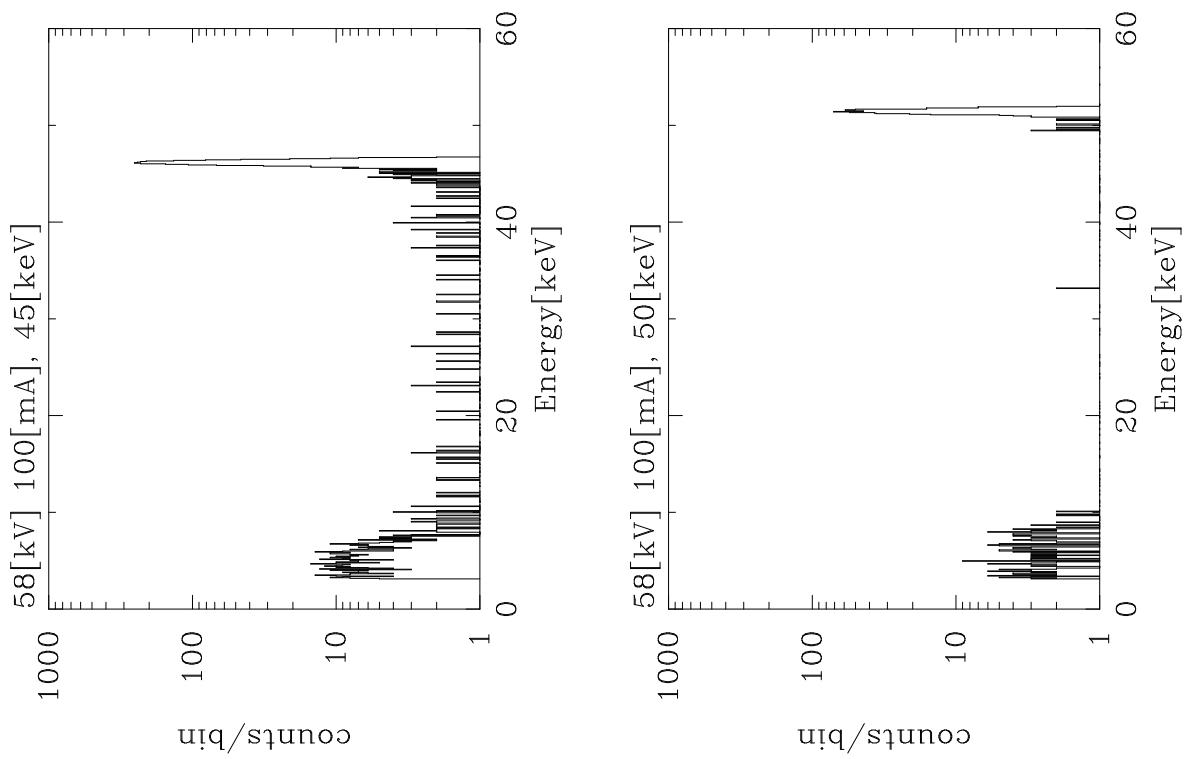


図 4.6:  $45[keV]$ (左図) と  $50[keV]$ (右図) の分光 X 線のスペクトル。X 線発生装置の設定は管電圧  $58[kV]$ 、管電流  $100[mA]$ 、積分時間  $600[sec]$  の条件で得られたものである。二結晶分光器で用いた結晶は Si(220) である。

の条件で得られたものである。二結晶分光器で用いた結晶は Si(220) である。また、X 線発生装置等の設定は違うが、45[keV] と 50[keV] の分光 X 線のエネルギースペクトルも図 4.6 に示す。

5、10、15、20[keV] については高次光が来ていることがわかる。実験によっては高次光をカットしたい場合も考えられる。その場合は X 線発生装置の管電圧の値を二次光のエネルギーの値より小さくする、あるいは一次光と二次光の間のエネルギーに吸収端を持つような物質を用いたフィルターを使う等して、高次光を取り除く工夫が必要となる。SSD を用いて測定した各エネルギーの分光 X 線の  $\Delta E(FWHM)$  と強度を次の表に示す。ただし、強度については SSD の検出効率を考慮していない。また、10[keV] では 2 次光のほうが 1 次光より強度が強くなっているが、これは Mo-K $\beta_2$ (19.965[keV]) の特性 X 線の影響で強度が強くなっていると考えられる。

分光 X 線の エネルギー [keV]	スペクトルピークから 求めたエネルギー [keV]	$\Delta E(FWHM)$ [eV]	1 次光の強度 [counts/sec/cm <sup>2</sup> ]	2 次光の強度 [counts/sec/cm <sup>2</sup> ]
5	4.888±0.016	186.2 ± 39.9	1.48	
10	10.010±0.006	220.6 ± 10.4	15.18	40.41
15	15.041±0.005	238.3 ± 9.2	26.54	4.26
20	19.665±0.005	264.7 ± 9.8	23.13	0.51
25	24.605±0.007	285.6 ± 12.5	18.26	
30	29.570±0.009	307.7 ± 16.3	12.76	
35	34.500±0.012	341.8 ± 21.0	8.25	
40	39.468±0.015	345.4 ± 34.5	4.54	
45	46.16±0.011	394.4 ± 21.3	3.12	
50	51.24±0.024	431.2 ± 50.6	0.84	

表 4.1: SSD で得られた各エネルギーの分光 X 線のスペクトルピークから求めたエネルギーと半値幅

#### 4.1.2 alignment の評価

ここで今回行なった alignment の評価をする。分光 X 線のねらったエネルギーからのずれ  $\Delta E$  とねらったエネルギー  $E$  の関係を表に示す。

第 2 章での見積もりでは分光 X 線のねらったエネルギーからのずれ  $\Delta E$  は、分光 X 線のエネルギー  $E$  に対して最大でも 0.3% 程度であった。しかし、表 4.2 によると今回の alignment はその精度に達していないことが分かる。考えられる原因としては次のようなことがある。

- 第 2 章で行なった見積もりが厳しすぎる。例えば  $\theta$  軸のずれはモーターの再現性から見積もったが、ステージなどの荷重のために期待しているほどの再現性がないことも考えられる。
- 第 2 章で考察した以外のところのずれ、例えば二結晶分光器の台座の傾きなどの効果が効いている。

いずれの場合もずれの見積もりが良くないことを意味する。従ってずれに関する考察をさらに進めることが必要である。一方 alignment に精度に関していうと、ずれの見積もりを改善して

ねらった分光 X 線の エネルギー E[keV]	スペクトルピークから 求めたエネルギー [keV]	エネルギーのずれ $\Delta E[eV]$	$\Delta E/E$ [%]
5	4.888±0.016	112±0.016	2.24±0.32
10	10.010±0.006	10±0.006	0.10±0.06
15	15.041±0.005	41±0.005	0.27±0.03
20	19.665±0.005	335±0.005	1.78±0.03
25	24.605±0.007	395±0.007	1.58±0.03
30	29.570±0.009	430±0.009	1.43±0.03
35	34.500±0.012	500±0.012	1.43±0.03
40	39.468±0.015	532±0.015	1.33±0.04

表 4.2: 分光 X 線のねらったエネルギーからのずれとねらったエネルギーの関係

も alignment の方法を改善しないかぎり精度は良くならない。そこで今回の alignment の精度について考察する。

表 4.2に示したように、分光 X 線のエネルギーの決定精度は 2% 程度である。そのため、分光 X 線を使ったエネルギーの較正にはその程度の誤差を含むことになる。しかし、我々のビームラインは主に CCD の性能評価を目的として構築されたものであり、例えば CCD の性能評価としてエネルギー分解能を評価することを考える。読み出しノイズを無視できる高エネルギーの領域で、CCD のエネルギー分解能  $\epsilon$  はエネルギー  $E$  の関数として

$$\epsilon \approx 2.35 \times \sqrt{F \times W \times E} \quad (4.1)$$

で表すことができる [3]。ただし、 $F$  はファノ因子、 $W$  は平均解離エネルギーである。分光 X 線を使って様々なエネルギーでエネルギー分解能を評価する場合、分光 X 線のエネルギーがねらったエネルギーからずれると、その分だけエネルギー分解能の評価も誤ることになる。分光 X 線のエネルギーがねらったエネルギーから  $\Delta E$  だけずれていたとすると、エネルギー分解能のずれ  $\Delta\epsilon$  は

$$\begin{aligned} \Delta\epsilon &= \frac{\partial\epsilon}{\partial E} \Delta E \\ &= \frac{2.35}{2} \times \sqrt{\frac{F \times W}{E}} \times \Delta E \end{aligned} \quad (4.2)$$

となる。分光 X 線のエネルギーのずれ  $\Delta E$  がねらったエネルギー  $E$  の  $a\%$  とすると  $\Delta\epsilon$  は

$$\begin{aligned} \Delta\epsilon &= \frac{2.35}{2} \times \sqrt{\frac{F \times W}{E}} \times \frac{a}{100} E \\ &= \frac{a}{200} \times 2.35 \times \sqrt{F \times W \times E} \\ &= \frac{a}{200} \epsilon \end{aligned} \quad (4.3)$$

となる。今回の alignment ではねらったエネルギー E に対する分光 X 線のエネルギーのずれ  $\Delta E$  が 2% であることから、 $\Delta\epsilon$  は  $\epsilon$  の 1% で評価できる。これはエネルギー分解能の評価としては十分な精度である。したがって、今回の alignment の精度は CCD の性能評価を行なう上では十分な精度があるといえる。

### 4.1.3 まとめ

今回の alignment に対して行なった評価実験についてまとめる。

- 今回の alignment の精度は第 2 章で行なったずれの見積もりの精度に達していなかった。
- 一方、alignment の精度は CCD の性能評価を行なう目的では十分な精度である。
- 今回行なった alignment の方法で、我々が要求する alignment の精度を満たしているので、 alignment 方法に関しては今回的方法で十分であることを実証した。一方、 alignment のずれを正しく見積もることが今後の課題である。

## 4.2 ダイレクト X 線と分光 X 線の強度比

ビームライン末端での X 線の強度をあらかじめ調べておくことは、実験を計画するときに有益である。しかしビームライン末端での X 線の強度は、ダイレクト X 線、分光 X 線とともに X 線発生装置の管電圧、管電流、用いるターゲットの種類などに依存する。また、二結晶分光器を使用するならスリットの幅や結晶の種類、分光するエネルギーにも依存するので実験条件に大きく依存する。したがって、ここでは実験計画においての強度をオーダーで見積もることを目的としてダイレクト X 線と分光 X 線の強度比を求めておく。つまり、ダイレクト X 線のスペクトルと強度から分光 X 線の強度をオーダーで見積もることを目的としている。

### 4.2.1 特性 X 線 Mo-K $\alpha$ のダイレクト X 線と分光 X 線の強度比

X 線発生装置で発生する X 線は、制動輻射による連続 X 線の他に一次ターゲットからの特性 X 線も発生する。図 4.7 に X 線発生装置からの直接の X 線(ダイレクト X 線)のスペクトルを示す。X 線発生装置は管電圧 50[kV]、管電流 10[mA]、ターゲットに Mo を使用している。また、ダイレクト X 線は強度が非常に強いため二結晶分光器のスリットを絞り、さらに SSD の前に直径 0.5mm のピンホールで強度を制限している。

ダイレクト X 線と同じ条件で特性 X 線 Mo-K $\alpha 1$  を分光した。スペクトルを図 4.8 に示す。ダイレクト X 線のスペクトルの Mo-K $\alpha$  のピークをガウシアンでフィティングして求めた強度と、Mo-K $\alpha 1$  の分光 X 線のスペクトルから求めた強度の比は  $(\text{分光 X 線}) / (\text{ダイレクト X 線}) = 9.52 \times 10^{-2}$  であった。以上のことから、特性 X 線に対して分光 X 線はダイレクト X 線の 10% 程度の強度であることが分かった。

### 4.2.2 連続成分のダイレクト X 線と分光 X 線の強度比

第 4.1 節で SSD で測定した分光 X 線の強度を示した。ここでは、その分光 X 線と同じエネルギーである適当なエネルギー幅のダイレクト X 線の強度を調べ分光 X 線との強度の比を求めた。ダイレクト X 線のエネルギー幅は、本来二結晶分光器のロッキングカーブの幅で決まるエネル

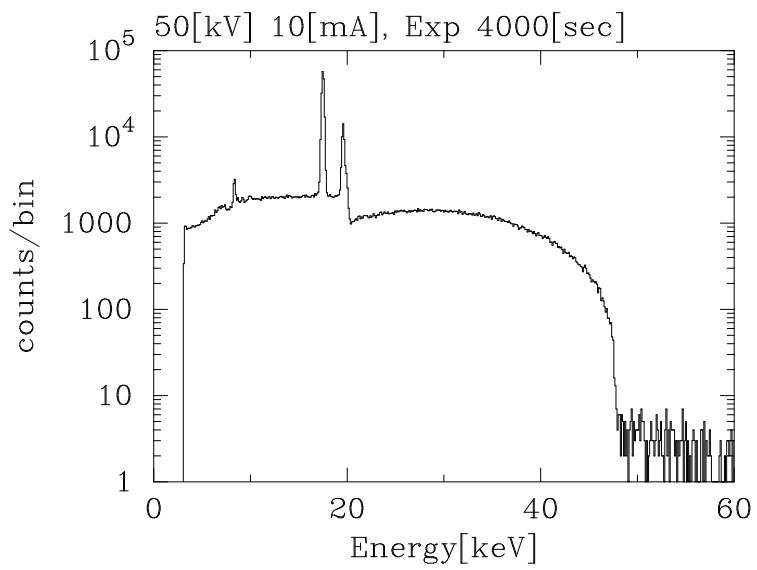


図 4.7: X 線発生装置からのダイレクト X 線のエネルギースペクトル。ターゲットは Mo を使用している。連続的な X 線の他に特性 X 線である Mo- $K\alpha$ (17.48[keV]) と Mo- $K\beta$ (19.61[keV]) と Cu- $K\alpha$ (8.04[keV]) のピークが見られる。

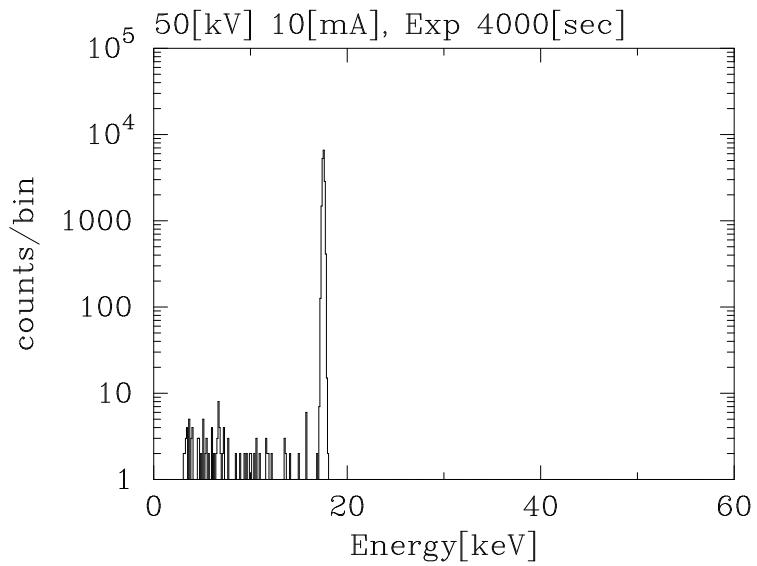


図 4.8: 特性 X 線  $Mo-K\alpha_1$  を分光したスペクトル

ギーの幅にするのが適切と考えられるが、今回は分光 X 線のスペクトルをガウシアンでフィーティングしたときの  $\sigma$  に対して、エネルギー幅を  $3\sigma$  に相当するエネルギー幅にした。また、分光 X 線とダイレクト X 線の強度を測定した条件は二結晶分光器のスリットの幅やピンホールの大きさなどが異なるが、その分の強度の補正は行なっている。表 4.3 に結果を示す。この結果から、X 線の連続成分に対して分光 X 線の強度はダイレクト X 線に対して 3 倍程度弱くなっていることがわかる。

分光 X 線のエネルギー [keV]	3 $\sigma$ に相当する エネルギー幅 [eV]	強度比 (分光 X 線 / ダイレクト X 線)
5	237.2	$7.93 \times 10^{-4}$
10	281.0	$3.55 \times 10^{-3}$
15	303.6	$5.70 \times 10^{-3}$
20	337.3	$3.06 \times 10^{-3}$
25	363.9	$4.87 \times 10^{-3}$
30	392.0	$3.08 \times 10^{-3}$
35	435.4	$2.11 \times 10^{-3}$
40	440.1	$1.87 \times 10^{-3}$

表 4.3: 連続成分に対する分光 X 線とダイレクト X 線の強度比

また、分光 X 線のスペクトルピークをガウス関数でフィッティングして求めたスペクトルピークの面積を求め、同じエネルギーに相当するダイレクト X 線のスペクトルに対して等価幅 (equivalent width) を求めた。表 4.4 に示す。連続 X 線では、分光 X 線はダイレクト X 線に対して等価幅 (equivalent width) が  $10[\text{keV}] \sim 40[\text{keV}]$  で  $30[\text{eV}] \sim 60[\text{eV}]$  であることが分かった。

分光 X 線のエネルギー [keV]	等価幅 [eV]
5	6.8
10	36.3
15	63.8
20	43.9
25	65.8
30	45.5
35	33.8
40	31.0

表 4.4: 連続成分における分光 X 線のダイレクト X 線に対する等価幅

#### 4.2.3 まとめ

既に述べたように分光 X 線の強度は X 線発生装置のターゲットの種類や管電圧、管電流に依存し、また二結晶分光器のスリットの幅や結晶の種類、分光するエネルギー等に依存する。そのため、個々の実験条件での正確な強度はその条件で測定する必要がある。ここでは実験を計画するときの強度の見積もりを目的として、ダイレクト X 線と分光 X 線の強度比を特性 X 線と連続 X 線に対して調べた。

ダイレクト X 線の強度も X 線発生装置のターゲットの種類、管電圧、管電流に依存するが、強度が管電流に比例するとすれば、個々の実験条件でのターゲットの種類と管電圧を決めればダイレクト X 線の強度から分光 X 線の強度をオーダーで容易に見積もることが出来る。

## 第 5 章

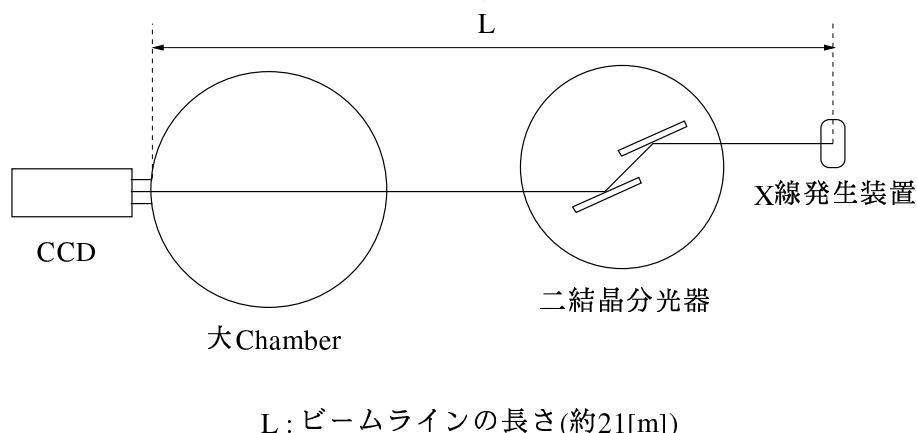
### ビームライン末端での単色性の測定

#### 5.1 分光 X 線のエネルギー分散と単色性

第 1.4 節でも述べたように、二結晶分光器による分光 X 線は上下方向にエネルギーが分散される(図 1.4 参照)。従って、検出器の面積が大きいほどエネルギー分散の幅  $\Delta E$ (分散) が大きくなる。検出器上の特定の位置に分光されてくる X 線のエネルギーは幾何学的に知ることができるので、CCD のような位置分解能をもつ検出器ではエネルギー分散の幅  $\Delta E$ (分散) が大きいことは性能評価に利用できるエネルギーの幅が広がることになる。逆に位置分解能をもたない検出器や CCD でも全面に単色 X 線を照射したい場合などでは、 $\Delta E$ (分散) が大きいことは分光 X 線の単色性の低下にほかならない。我々のビームラインで性能評価を行う CCD としては 1 インチサイズのものを考えているが、本章では 1/2 インチサイズの CCD を用いてビームライン末端におけるエネルギー分散の幅  $\Delta E$ (分散) を調べ、さらに単色性の評価も行なった。

#### 5.2 実験

##### 5.2.1 実験システム



L : ビームラインの長さ(約21[m])

図 5.1: 単色度測定システムの概略図

実験システムの概略図を図 5.1 に示す。X 線発生装置からの X 線を二結晶分光器で分光し、

CCDに当てる。CCDの測定システムは浜松ホトニクス社(C4880)を使用した。また、実験で用いたCCDチップは浜松ホトニクス社のL1 5-10A2L-2で1/2インチサイズのCCDチップである。

CCDチップ名	L1 5-10A2L-2
チップサイズ	1/2インチ角
ピクセル数	1024 × 1024
1pixelのサイズ	12 $\mu m$

表 5.1: 実験に用いたCCD

### 5.2.2 分光X線のエネルギー分散の幅の測定

単色度の測定方法は図5.2に示すように有効画素領域をエネルギーの分散方向に上下で2分割して、それぞれの領域でエネルギースペクトルを作る。各領域でのエネルギースペクトルのピークの中心チャンネルはそれぞれの領域での分光X線の平均のパルスハイトであるから、各領域のエネルギー分散方向の中心に分光されてくるX線のエネルギーのパルスハイトに相当すると考えられる。すなわち、それぞれの領域のエネルギースペクトルの中心チャンネルの差は、今回の実験で使用した1/2インチサイズのCCDでは、エネルギーの分散方向に1/4インチの間での分光X線のパルスハイトの差に相当する。

$$\begin{aligned} \text{エネルギーの差} \Delta E(DCM) &= (\text{peakchannel(領域2)} - \text{peakchannel(領域1)}) \\ &\times (1\text{チャンネルあたりのエネルギー}[eV/ch]) \end{aligned} \quad (5.1)$$

CCDのパラレル転送方向<sup>1</sup>と分光X線のエネルギーの分散方向が平行のとき、パラレル転送中に違うエネルギーが載ることになるので、図5.2のようにCCDはパラレル転送方向と分光X線のエネルギーの分散方向が90°になるように設置した。

## 5.3 結果と考察

### 5.3.1 二結晶分光器による分光X線のエネルギー分散

シングルイベント<sup>2</sup>のみを使ってスペクトルを作り、その中心チャンネルの差から分光X線のエネルギーの分散方向の1/4インチの間でのエネルギーの差を求めた。また、その結果と計算上の1/4インチの間でのエネルギーの差も表5.2に示す。

5[keV]に関しては必要な統計量を集めることが困難であったため統計が良くないが、10[keV]、15[keV]、20[keV]に関しては計算による見積もりと誤差の範囲内で良くあっている。われわれが知りたいのは1インチでのエネルギーの差であるが、この今回の実験方法では1インチサイズ

<sup>1</sup>[1, pp. 5-8] 参照

<sup>2</sup>[3, pp. 44] 参照

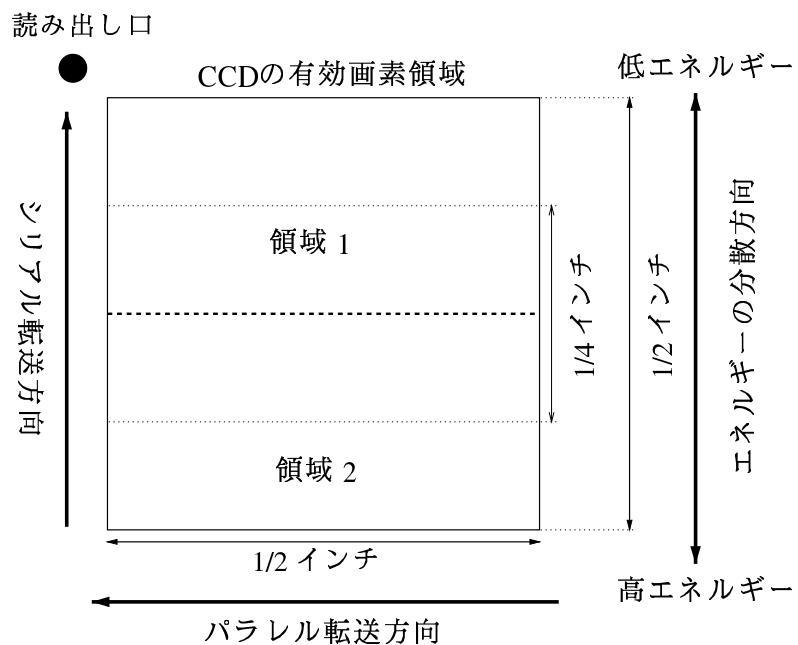


図 5.2: 分光 X 線のエネルギーの分散方向と CCD の転送方向

ねらった分光 X 線のエネルギー	$\Delta E$ (分散)	計算による $\Delta E$ (分散)
5[keV]	$1.05 \pm 1.21[eV]$	1.76[eV]
10[keV]	$8.24 \pm 0.96[eV]$	8.79[eV]
15[keV]	$20.89 \pm 2.17[eV]$	20.40[eV]
20[keV]	$38.54 \pm 4.98[eV]$	36.65[eV]

表 5.2: 分光 X 線のエネルギーの分散方向の 1/4 インチの間でのエネルギーの差

のチップを用いても、測定できるのは 1/2 インチでのエネルギーの差である。しかし、今回の実験によって測定値が計算値と良く一致していることが分かったので、1 インチでのエネルギーの差は計算値を用いてもよいと結論できる。

表 B.1~B.2 に CCD のサイズが 1 インチのときの CCD の上端と下端でのエネルギーの差、すなわち 1 インチの間のエネルギー分散の幅  $\Delta E$ (分散) の計算値を示す。

### 5.3.2 分光 X 線の単色性

分光 X 線はエネルギーの分散により上下方向にエネルギーの幅がある。これを単色として用いると、検出器の面積が大きいほど単色性の低下につながる。また、エネルギーの分散の幅は分光する X 線のエネルギーが高エネルギーであるほど大きくなる。実際に X 線 CCD の性能評価に用いる X 線としては、20[keV] 以下のエネルギーで CCD の性能評価に使用する X 線として十分単色であればよいと考えている。

分光 X 線の単色性を評価するには二結晶分光器によるエネルギー分散  $\Delta E$ (分散) の効果が CCD のエネルギー分解能  $\Delta E(FWHM)$  に影響するか調べるとよい。そこで今回の実験では、密封線源 ( $^{55}\text{Fe}$ 、 $^{109}\text{Cd}$ ) を使って調べた CCD のエネルギー分解能  $\Delta E(FWHM_{\text{線源}})$  と密封線源と同じエネルギーを分光した分光 X 線で調べた CCD のエネルギー分解能  $\Delta E(FWHM_{\text{分光}})$  の違いを調べる比較実験を行なった。それぞれのエネルギースペクトルを図 5.3、5.4 に示す。さらに、それぞれのスペクトルピークをガウシアンでフィッティングし、エネルギー分解能を求めた。表 5.3 に示す。

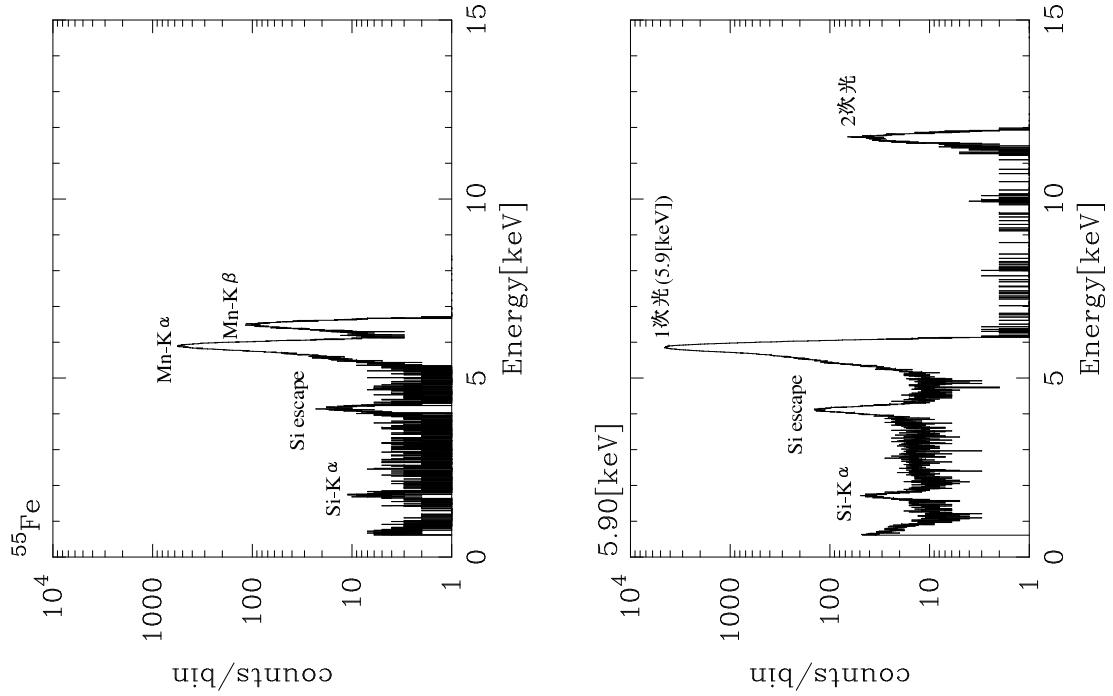


図 5.3: 密封線源 ( $^{55}\text{Fe}$ ) と 5.9[keV] のスペクトル

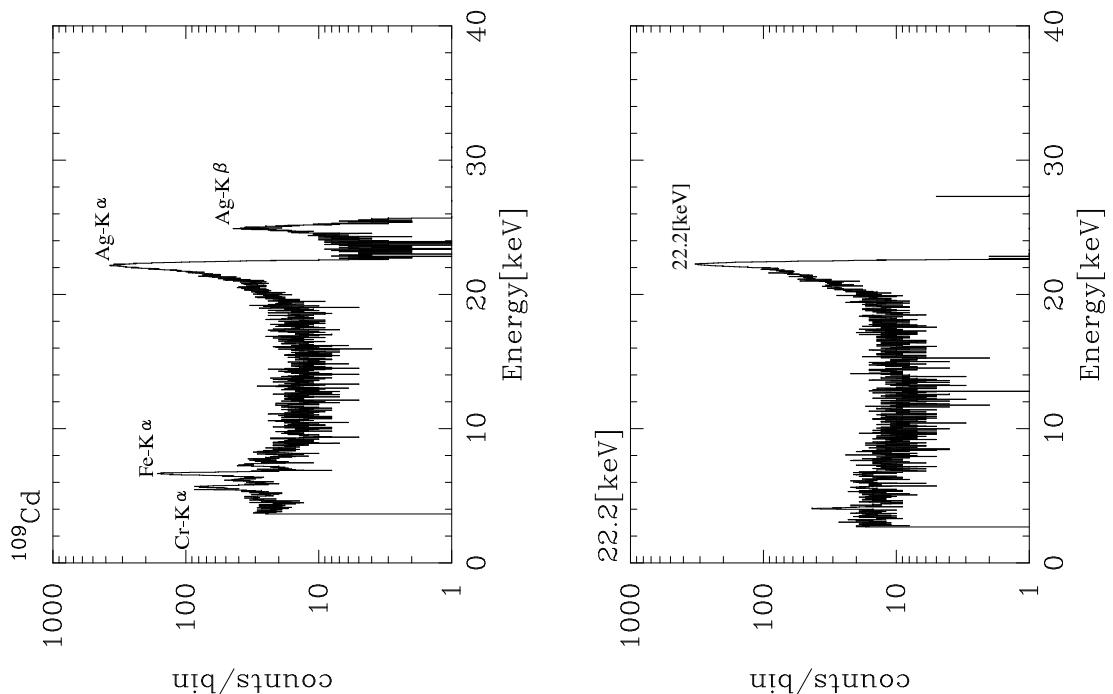


図 5.4: 密封線源 ( $^{109}\text{Cd}$ ) と 22.2[keV] のスペクトル

線源	エネルギー	CCD のエネルギー分解能 $\Delta E(FWHM)$
密封線源 $^{55}\text{Fe}$	Mn-K $\alpha$	$157.47 \pm 2.64[\text{eV}]$
分光 X 線	5.90[keV]	$160.03 \pm 1.33[\text{eV}]$
密封線源 $^{109}\text{Cd}$	Ag-K $\alpha$	$377.29 \pm 15.87[\text{eV}]$
分光 X 線	22.2[keV]	$332.38 \pm 20.18[\text{eV}]$

表 5.3: 密封線源と分光 X 線の CCD のエネルギー分解能の比較

$^{55}\text{Fe}$  線源と  $5.9[\text{keV}]$  の分光 X 線では CCD のエネルギー分解能は誤差の範囲で一致している。 $^{109}\text{Cd}$  線源と  $22.2[\text{keV}]$  の分光 X 線では、予想とは反対に  $^{109}\text{Cd}$  線源の方がエネルギー分解能の値が大きくなっている。その原因としては、 $^{109}\text{Cd}$  線源では Ag-K $\alpha$  のスペクトルピークに Ag-K $\beta$  の低エネルギー側の tail 成分が重なっているためにガウシアンの幅が広くなつたと考えられる。そこで Ag-K $\alpha$ (22.16[keV]) と Ag-K $\beta$ (24.94[keV]) の間に吸収端をもつ Pd(吸収端:24.40[keV]) のフィルターを使って Ag-K $\beta$  を取り除いた。図 5.5 にスペクトルを示す。

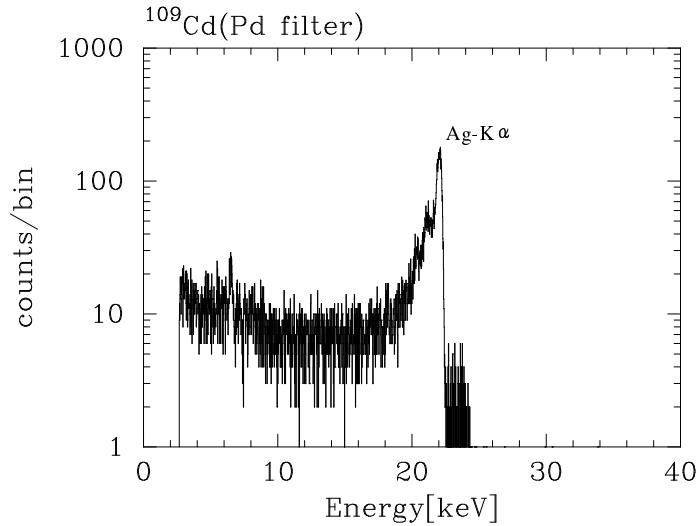


図 5.5: 密封線源 ( $^{109}\text{Cd}$ ) の Pd フィルターを通したときのスペクトル

Ag-K $\alpha$  のスペクトルピークをガウシアンでフィッティングして、分光 X 線のエネルギー分解能と比較すると、誤差の範囲で一致した。

線源	エネルギー	CCD のエネルギー分解能 $\Delta E(FWHM)$
密封線源 $^{109}\text{Cd}$ (Pd フィルター使用)	Ag-K $\alpha$	$328.67 \pm 12.85[\text{eV}]$
分光 X 線	$22.2[\text{keV}]$	$332.38 \pm 20.18[\text{eV}]$

表 5.4: Pd フィルターを使用したときの  $^{109}\text{Cd}$  と分光 X 線の CCD のエネルギー分解能の比較

このように、密封線源で調べた CCD のエネルギー分解能に比べて、同じエネルギーの分光 X 線で調べた CCD のエネルギー分解能は悪くなつてない。従って、 $1/2$  インチサイズの CCD チップでは、 $20[\text{keV}]$  以下のエネルギーの分光 X 線は CCD の性能評価に用いる X 線として十分に単色であるといえる。

## 第 6 章

### 二結晶分光器通過後の偏光度の測定

X線発生装置自体からの連続X線の偏光度は S. Tanaka et al. [1] により測定されており、偏光度とX線のエネルギーの関係を(定数)+(exponential)という形で近似する実験式も見出されている。一方、Adachi[4]はX線発生装置のターゲット(Cu、Ti)の特性X線  $K\alpha$  を分光して、本来偏光していないと考えられる特性X線の二結晶分光器通過後の偏光度を測定し、二結晶分光器によって高い偏光が生じることを確かめた。しかしながら、連続X線を二結晶分光器に通した後の単色X線の偏光度を直接測定するには至らなかった。本章ではその偏光度の直接測定を行ない、(X線発生装置) + (二結晶分光器) のシステムが単色、偏光X線源として働くことを実証する。

第1.6節で既に述べたように、もともと偏光しているX線発生装置からのX線を二結晶分光器を通すことでさらに偏光度を大きくすることが出来ると期待される方向に結晶を設置するように二結晶分光器は設計されている。今回の実験で二結晶分光器を通すことにより偏光度が大きくなっていることを確認することが出来た。

#### 6.1 X線発生装置からの連続X線の偏光

X線発生装置では図6.1のように、フィラメントに電流を流して加熱し熱電子を放射させる。電子を高電圧(管電圧)で加速して金属ターゲットに当てる。そこで電子はターゲット物質の原子からクーロン力で加速度を受けるので制動輻射が起りX線が放射される。

制動輻射を原子の作る電場から力を受けたときの電気双極子放射であると考えると、放射されるX線は電子の減速方向とX線が放射される方向とのなす平面内で直線偏光しているということが理解できる。放射されたX線のうち、高エネルギーのものはターゲット物質の原子から一度だけ力を受けた結果生じたものが多いと考えられるので、その偏光方向は電子の入射方向に沿っており高偏光なX線となる。一方低エネルギーのX線はターゲット物質内で何度も衝突を繰り返しエネルギーを失ったものが多いと考えられ偏光方向は沿わず、偏光度は小さくなると考えられる。

#### 6.2 Thomson散乱計を用いた偏光度測定

##### 6.2.1 Thomson散乱

Thomson散乱とは自由電子による光子の弹性散乱であり、散乱の前後で光子のエネルギーは変わらない。Thomson散乱の微分散乱断面積は、図6.2の散乱角 $\Theta$ と方位角 $\Phi$ を用いて

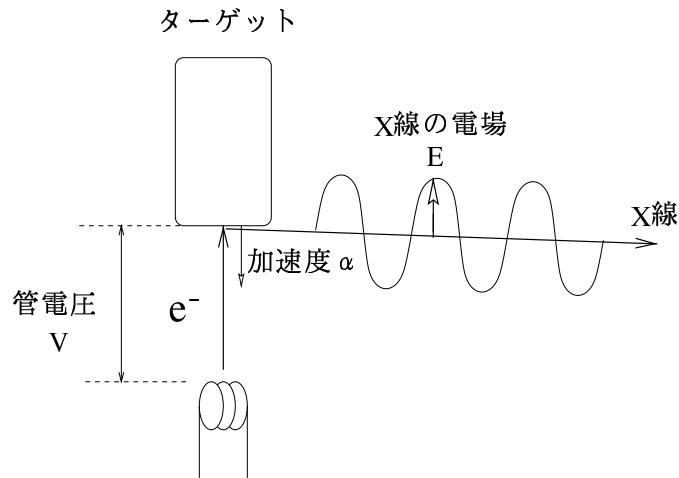


図 6.1: X 線発生装置の概念図

$$\frac{d\sigma_T}{d\Omega} \propto 1 - \sin^2 \Theta \cos^2 \Phi \quad (6.1)$$

と表せる。従って、Thomson 散乱においては散乱 X 線は入射 X 線の電場の方向によって散乱強度の偏りが生じ、入射 X 線の方向と入射 X 線の電場の方向とのなす平面に垂直な方向 ( $\Phi = 90^\circ$  方向) に散乱されやすく、入射 X 線の電場に平行な方向 ( $\Phi = 0^\circ$  方向) には散乱されにくいうことが分かる。

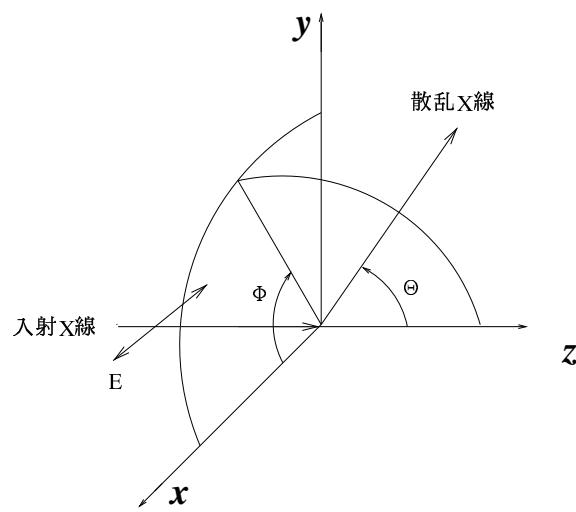


図 6.2: 入射 X 線の電場方向  $E$  と Thomson 散乱の散乱角  $\Theta$  と方位角  $\Phi$  の関係

### 6.2.2 X 線の偏光度

この論文では扱う X 線の偏光は直線偏光であり、 X 線の電場ベクトルの方向を X 線の偏光方向とする。

S. Tanaka et al. に従って、 X 線の偏光度  $P$  を次式で定義する。

$$P = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (6.2)$$

ただし  $I_{max}$ 、  $I_{min}$  は X 線の強度を電場ベクトルの方向の関数としたときの最大値と最小値である。今回の実験の場合、 X 線発生装置からの X 線は水平方向に偏光していると考えられる。従って、  $I_{max}$  とは水平方向に電場ベクトルを持つ X 線の強度で、  $I_{min}$  とは垂直方向に電場ベクトルを持つ X 線の強度である。

### 6.2.3 Modulation Factor $M$

Thomson 散乱偏光計を使って X 線の偏光を測定した場合、散乱前の入射 X 線の偏光度  $P$  は散乱 X 線の強度から求められる。ここで

$$R = \frac{N_{\Phi=90^\circ} - N_{\Phi=0^\circ}}{N_{\Phi=90^\circ} + N_{\Phi=0^\circ}} \quad (6.3)$$

という量を定義する。  $R$  は測定によって求められる量で、今回の実験システムでは鉛直上方 ( $\Phi = 90^\circ$  方向) で測定したときの計数が  $N_{\Phi=90^\circ}$ 、 水平方向 ( $\Phi = 0^\circ$  方向) で測定したときの計数が  $N_{\Phi=0^\circ}$  となる。

偏光検出器の性能を表すパラメータの一つである modulation factor  $M$  は、 100% 偏光 (完全偏光) した X 線が入射したときの  $R$  で定義される。今回利用した Thomson 散乱計の場合は散乱体と検出器の位置関係から幾何学的に計算で求められる。その方法については第 6.3.2節で述べる。

散乱前の入射 X 線の偏光度  $P$  は、 modulation factor  $M$  と測定によって求められる量  $R$  を用いて、

$$P = \frac{R}{M} \quad (6.4)$$

という式で表すことができる。

### 6.2.4 X 線発生装置からの連続 X 線の偏光度

S. Tanaka et al. [1] では X 線発生装置からの連続 X 線の偏光度を測定している。ここではその結果を引用する。

管電圧 10、 15、 20、 30、 40、 50、 60[kV] について  $\Phi = 0^\circ$ 、  $90^\circ$  のときのスペクトルから  $R$  を計算し、 X 線のエネルギーをそのときに印加した管電圧の値で割った量との関係を調べた。その結果どの管電圧でも低エネルギーであるほど  $R$  は小さく、 高エネルギーであるほど  $R$  は大きくなつた。これは高エネルギーの X 線は、 X 線発生装置のターゲット物質の原子から一度しか力を受けてないので、 偏光度が高くなるということを裏付けている。さらに  $R$  と X 線のエネルギーをそのときに印加した管電圧の値で割った量との関係が次の式で良くフィットした。

$$R = C + A \exp\left(\frac{E_n - 1}{E_w}\right) \quad (6.5)$$

ここで、 $C$ 、 $A$ 、 $E_w$ 、はパラメータで  $E_n$  は X 線のエネルギーの値 ( $E[keV]$ ) をそのときの X 線発生装置の管電圧の値 ( $V[kV]$ ) で割ったもので  $E_n = E/V$  である。各管電圧に対するベストフィットのパラメータは表 6.1 のようになった。

管電圧 [kV]	$C$	$A$	$E_w$
20	$0.065 \pm 0.002$	$0.75 \pm 0.01$	$0.122 \pm 0.002$
30	$0.017 \pm 0.001$	$0.86 \pm 0.01$	$0.137 \pm 0.002$
40	$0.041 \pm 0.001$	$0.84 \pm 0.01$	$0.151 \pm 0.002$
50	$0.010 \pm 0.001$	$0.99 \pm 0.02$	$0.148 \pm 0.002$
60	$0.066 \pm 0.001$	$0.73 \pm 0.02$	$0.191 \pm 0.003$

表 6.1: 各管電圧に対する  $R$  と  $E_n$  との関係式のパラメータ (S. Tanaka et al. より引用)

また、この実験における modulation factor  $M$  は  $M = 0.99$  であり、測定値である  $R$  はほぼ散乱前の入射 X 線の偏光度  $P$  を表していると考えて良い。

## 6.3 実験

### 6.3.1 実験システム

図 6.3 に偏光度測定の実験システムの概略図を示す。検出器として使用した CZT は真空中で使用することが出来ないため、X 線発生装置の Be 窓よりビームラインの下流は大気圧で実験を行なった。散乱体は直径が  $11[mm]$ 、長さが  $30[mm]$  の円柱形のポリエチレンである。ただし、入射側の先端は  $45^\circ$  の角度でカットしてある。散乱体から検出器 (CZT) までの距離は  $30[mm]$  で、CZT の有効面積は  $3mm$  角である。検出器と散乱体は同じ支持機構に固定され、一体となって  $z$  軸まわりに回転できる。

第 1.6 節で述べたように、X 線の結晶への入射角が大きいほど、つまり低エネルギーの X 線ほど入射 X 線の偏光度は、二結晶分光器を通して大きくなる。しかし、低エネルギーであるほど大気による X 線の吸収の効果が効いてくるので、今回用いた実験システムでは強度的に困難である。そこで今回の実験では大気による X 線の吸収の効果が小さい高エネルギーの連続 X 線に対して、ダイレクト X 線と分光 X 線の偏光度を測定した。

ここで、実験で測定した管電圧と分光 X 線のエネルギーについてまとめておく。S. Tanaka et al. より X 線のエネルギー  $E[keV]$  と X 線発生装置の管電圧に対して得られる最大の X 線のエネルギー  $V[keV]$  の比  $E_n (= E/V)$  (Normalized Energy) が大きいほどそのエネルギーの X 線の偏光度が大きくなるが、逆に X 線の強度は弱くなる。今回の実験では Normalized Energy が  $E_n = 0.8$  となる X 線のエネルギーを選んだ。すなわち、管電圧が  $20$ 、 $30$ 、 $40$ 、 $50[kV]$  に対して  $16$ 、 $24$ 、 $32$ 、 $40[keV]$  のエネルギーの X 線を分光し偏光度を測定した。

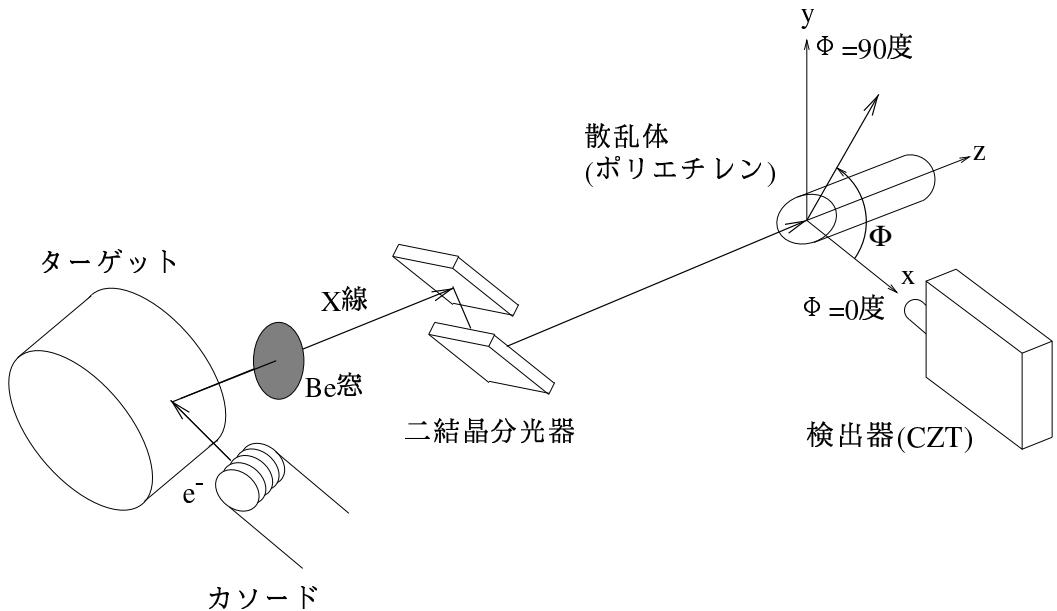


図 6.3: 偏光度測定の実験システムの概略図。X 線発生装置からの X 線は x 軸方向に直線偏光している。

### 6.3.2 modulation factor $M$ の値

今回の実験システムでの modulation factor  $M$  を計算で求める。計算は以下のように行なった。いま、100%(完全)偏光した X 線が円柱形の散乱体に入射し、ある確率で散乱体に吸収されつつ散乱体の内部のある点で Thomson 散乱されたとする。Thomson 散乱の微分散乱断面積から検出器の方向に散乱される確率を求める。それを散乱体の長さ方向に積分し、各方位角で期待される計数率  $n_{90^\circ}$ 、 $n_0^\circ$  を計算し最終的に  $M$  を求めた。散乱体での吸収係数 ( $\lambda(E)$ ) は入射 X 線のエネルギーに依存するので、今回実験を行なうエネルギーに対してそれぞれ求めた。ここでは、散乱体の大きさを考慮していない。

$$\begin{aligned}
 n_{90^\circ}(E) &= A \int_0^{\text{散乱体の長さ}} e^{-\lambda(E)x} \sin \Theta dx \\
 n_0^\circ(E) &= A \int_0^{\text{散乱体の長さ}} e^{-\lambda(E)x} \cos^2 \Theta \sin \Theta dx \\
 M(E) &= \frac{n_{90^\circ}(E) - n_0^\circ(E)}{n_{90^\circ}(E) + n_0^\circ(E)}
 \end{aligned} \tag{6.6}$$

ここで  $E$  は X 線のエネルギー、 $\Theta$  は X 線の散乱角、 $A$  は比例定数である。 $\sin \Theta$  は散乱点から見込んだ CZT 検出器の実行面積を表すファクタである。表 6.2 に結果を示す。S. Tanaka et al. とは検出器と散乱体の間をコリメートしていない等の実験条件に違いがあるため、modulation factor  $M$  の値が異なっている。

管電圧 [kV]	実験を行なったエネルギー [keV]	$M$
20	16	0.771
30	24	0.728
40	32	0.719
50	40	0.716

表 6.2: 実験を行なった各 X 線のエネルギーに対する modulation factor  $M$  の値

## 6.4 結果

### 6.4.1 分光 X 線の偏光度

X 線発生装置の管電圧が 20、 30、 40、 50[kV] に対して  $E_n = 0.8$  となるエネルギーの X 線を分光し、 分光 X 線を散乱体で散乱させて偏光度を測定した。実験で使用した X 線発生装置のターゲットは Mo である。また、 X 線発生装置の時間変動の影響を軽減するため、 各々 500[sec] ずつの積分時間で  $\Phi = 0^\circ$  と  $\Phi = 90^\circ$  のデータを取得し、 それを 20 回繰り返す測定を行なった。

散乱 X 線のエネルギースペクトルを図 6.4~6.7 に示す。また、 各散乱 X 線のスペクトルのピークをガウシアンでフィッティングし、 散乱 X 線のエネルギーとガウシアンの幅  $\sigma[eV]$  を求めた。表 6.3 に示す。散乱 X 線のスペクトルから得られたエネルギーは分光 X 線のエネルギーより有意に小さくなっていることがわかる。このエネルギーのずれは Compton 効果によるものと考えられる。

管電圧 [kV]	分光 X 線のエネルギー [keV]	散乱後の X 線のエネルギー [keV]	$\sigma[eV]$
20	16	$15.49 \pm 0.01$	$384.76 \pm 14.44$
30	24	$22.66 \pm 0.01$	$426.30 \pm 38.46$
40	32	$29.81 \pm 0.02$	$564.19 \pm 21.39$
50	40	$36.64 \pm 0.02$	$685.78 \pm 33.13$

表 6.3: 散乱 X 線のエネルギー

Compton 効果による散乱前後での X 線の波長のずれ  $\Delta\lambda$  は入射 X 線のエネルギーに依存せず、 X 線の散乱角  $\theta$  を用いて

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta) \quad (6.7)$$

と表すことができる。ここで  $h$  はプランク定数、  $m_e$  は電子の質量、  $c$  は光速度である。この  $\Delta\lambda$  を用いて散乱前後でのエネルギーのずれ  $\Delta E$  は

$$\Delta E = E \left( 1 - \frac{\lambda}{\lambda + \Delta\lambda} \right) \quad (6.8)$$

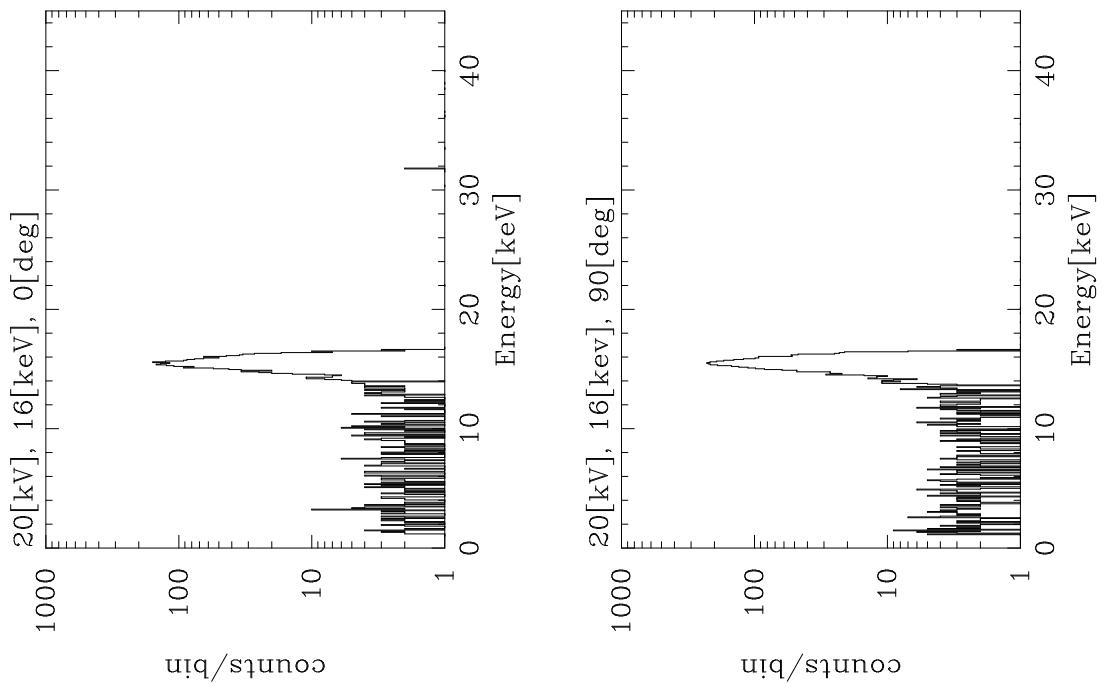


図 6.4: 管電圧  $20[kV]$ 、 $16[keV]$  を分光したときの散乱 X 線のエネルギースペクトル

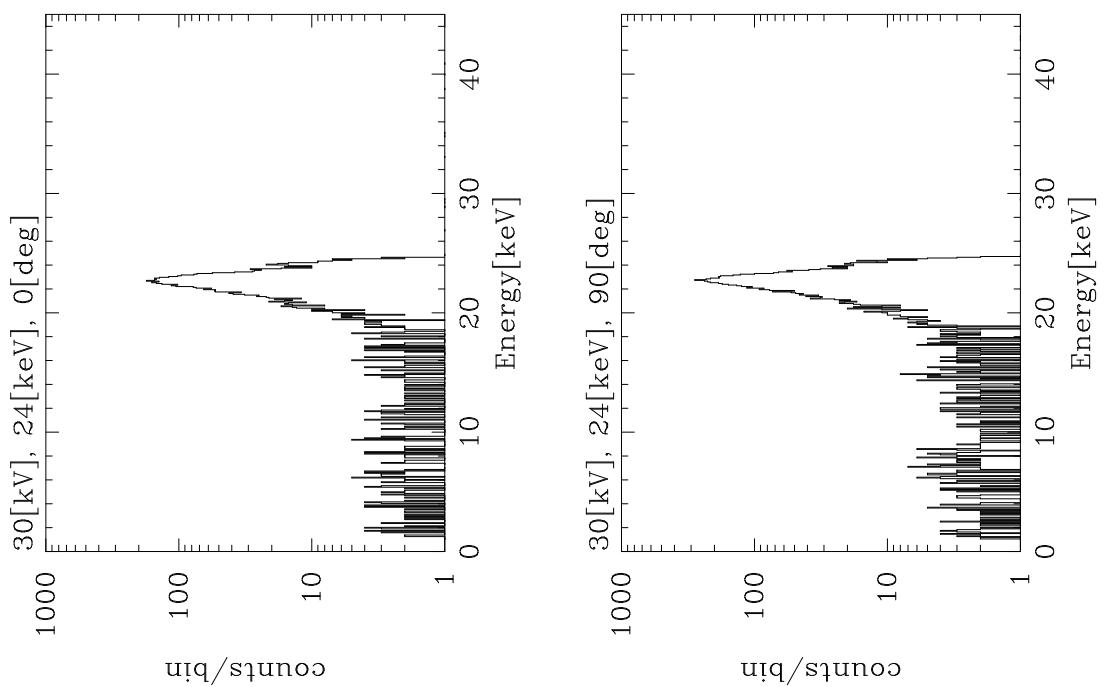


図 6.5: 管電圧  $30[kV]$ 、 $24[keV]$  を分光したときの散乱 X 線のエネルギースペクトル

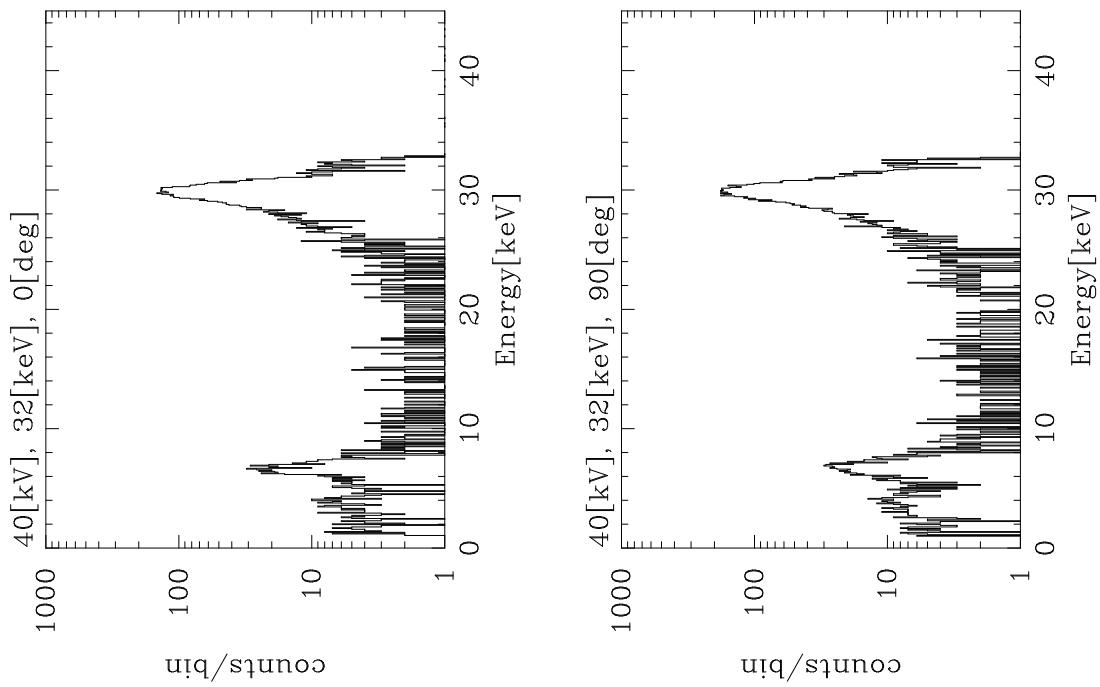


図 6.6: 管電圧  $40[kV]$ 、 $32[keV]$  を分光したときの散乱 X 線のエネルギースペクトル

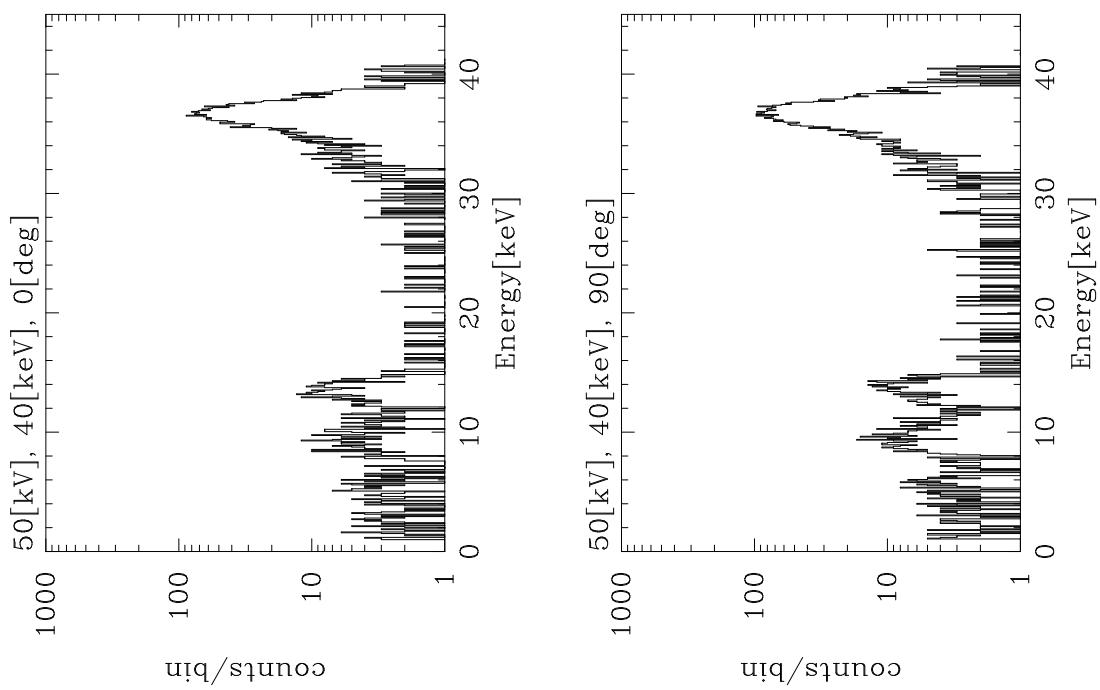


図 6.7: 管電圧  $50[kV]$ 、 $40[keV]$  を分光したときの散乱 X 線のエネルギースペクトル

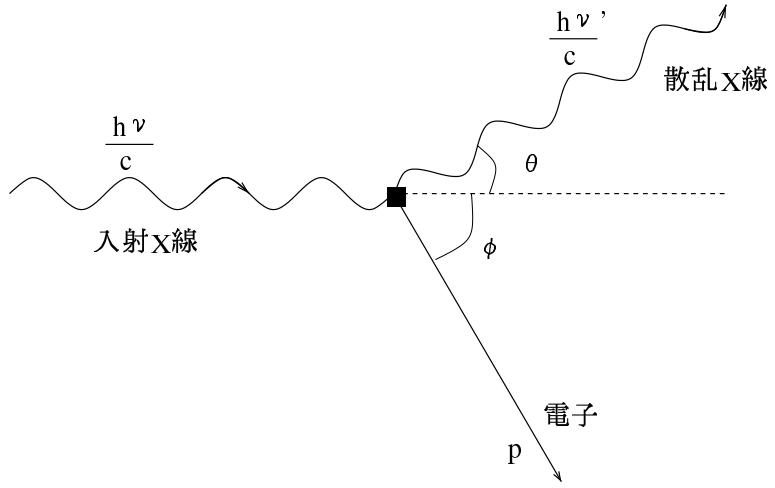


図 6.8: Compton 散乱の概念図。運動量  $h\nu/c$  の入射 X 線が電子で散乱され、エネルギーの一部を失う。電子は運動量  $p$  を得る。

と表せる。各分光 X 線のエネルギーについて散乱角  $90^\circ$  で散乱したときの Compton 効果による散乱後のエネルギーのずれと実験値のずれを比較する。

管電圧 [kV]	分光 X 線の エネルギー [keV]	測定されたエネルギー のずれ $\Delta E$ [keV]	散乱角を $90^\circ$ としたときの Compton 効果 によるエネルギーのずれ [keV]
20	16	$0.51 \pm 0.01$	0.49
30	24	$1.35 \pm 0.01$	1.08
40	32	$2.20 \pm 0.02$	1.86
50	40	$3.36 \pm 0.02$	2.90

表 6.4: 散乱前後での X 線のエネルギーのずれ

測定された散乱前後でのエネルギーのずれの値は、散乱角を  $90^\circ$  として計算したときの Compton 効果によるエネルギーのずれの値より大きいことがわかる。このことは平均的な散乱角が  $90^\circ$  より大きいことを意味すると考えられる。

$\Phi = 90^\circ$  方向と  $\Phi = 0^\circ$  方向での計数から、X 線発生装置からの連続 X 線の二結晶分光器を通した後の偏光度  $P_{DCM}$  を求めた。計数  $N_{0^\circ}$ 、 $N_{90^\circ}$  は対象となる X 線のエネルギーのピークをガウス関数でフィットして求めた値である。表 6.5に結果を示す。

#### 6.4.2 ダイレクト X 線の偏光度

今回の実験の目的の一つは、二結晶分光器を通して X 線発生装置からの連続 X 線の偏光度が大きくなっていることを確かめることである。そこで、二結晶分光器で分光していないダイレクト X 線を散乱体で散乱させてダイレクト X 線の偏光度を測定し、分光 X 線の偏光度と比較を行なった。また、S. Tanaka et al. の結果との比較を行なった。分光 X 線の偏光度測定のとき

管電圧 [kV]	分光 X 線のエネルギー [keV]	積分時間 T[sec]	$\Phi = 0^\circ$ 方向の 計数 $N_{0^\circ}$	$\Phi = 90^\circ$ 方向の 計数 $N_{90^\circ}$	偏光度 $P_{DCM}$
20	16	10000	1994±45	2937±54	0.25±0.02
30	24	10000	2881±54	4073±64	0.23±0.02
40	32	10000	3050±55	4162±65	0.21±0.02
50	40	10000	2031±45	2649±51	0.18±0.02

表 6.5: 二結晶分光器通過後の測定した偏光度  $P_{DCM}$ 。積分時間は各々の方向での値である。

と同じく、X線発生装置のターゲットには Mo を用いた。積分時間は各方位角において 500[sec] である。

既に述べたように、X線発生装置からの連続 X 線の偏光度は管電圧の値に対する X 線のエネルギーの値に依存する。従って分光 X 線の偏光度とダイレクト X 線の偏光度を比較するには、分光 X 線と同じエネルギーの部分の偏光度と比較する必要がある。そこでダイレクト X 線の散乱後のスペクトルに対して、分光 X 線と同じ波高の領域を取り、 $\Phi = 90^\circ$  と  $\Phi = 0^\circ$  の計数率を調べて、ダイレクト X 線の偏光度  $P_{direct}$  を求めた。ダイレクト X 線に対しても Compton 効果により、散乱 X 線のエネルギーは入射 X 線のエネルギーより小さくなっていると考えられる。それゆえ比較するべきダイレクト X 線の偏光度  $P_{direct}$  は、分光 X 線の散乱後のエネルギーと同じエネルギーのところを取って求めた値である。切り取った幅は分光 X 線の散乱後のスペクトルのピークをガウシアンでフィッティングして得られる幅  $\sigma$  に対して  $3\sigma$  の幅とした。表 6.6 に各エネルギーに対するダイレクト X 線の偏光度  $P_{direct}$  を示す。また、比較のために再度分光 X 線の偏光度  $P_{DCM}$  を示しておく。

管電圧 [kV]	エネルギー [keV]	ダイレクト X 線の 偏光度 $P_{direct}$	分光 X 線の 偏光度 $P_{DCM}$	分光 X 線の偏光度とダイレクト X 線 の偏光度の比 $P_{DCM}/P_{direct}$
20	16	0.211±0.005	0.25±0.02	1.18±0.09
30	24	0.191±0.004	0.23±0.02	1.20±0.10
40	32	0.157±0.001	0.21±0.02	1.34±0.13
50	40	0.110±0.001	0.18±0.02	1.64±0.18

表 6.6: ダイレクト X 線の偏光度  $P_{direct}$  と分光 X 線の偏光度  $P_{DCM}$

これによると、どの管電圧に対しても分光 X 線の偏光度  $P_{DCM}$  がダイレクト X 線の偏光度  $P_{direct}$  よりも大きくなっていて、その factor は 1.2~1.6 倍程度という結果が得られた。つぎに第 1.6 節で述べた  $\sigma$  偏光と  $\pi$  偏光に対するブレッカ反射の反射率の違いの効果をダイレクト X 線の偏光度  $P_{direct}$  に対して考慮し、二結晶分光器を通したときに期待される偏光度の理論値  $P_{theo}$  を計算で求めた。その値と分光 X 線の偏光度  $P_{DCM}$  とを比較する。結晶の反射率は完全結晶とモザイク結晶で異なるため、それぞれの値と比較する。

表 6.7 のように分光 X 線の偏光度  $P_{DCM}$  は、管電圧が 50[kV] のときは計算値より 32%~46% 大きく、逆に 20[kV] のときは 14%~32% 小さくなっているが、他の点では理論値により近い値

管電圧 [kV]	ダイレクト X 線の偏光度 $P_{direct}$	完全結晶 $P_{theo}$ (完全結晶)	モザイク結晶 $P_{theo}$ (モザイク結晶)	分光 X 線の偏光度 $P_{DCM}$
20	0.211±0.005	0.291	0.368	0.25±0.02
30	0.191±0.004	0.227	0.262	0.23±0.02
40	0.157±0.001	0.192	0.197	0.21±0.02
50	0.110±0.001	0.123	0.136	0.18±0.02

表 6.7: 結晶を完全結晶、モザイク結晶と仮定したときの二結晶分光器通過後の偏光度の理論値  $P_{theo}$  と分光 X 線の偏光度  $P_{DCM}$

であった。

今回の実験で得られたダイレクト X 線の偏光度  $P_{direct}$  と S. Tanaka et al. のダイレクト X 線の偏光度  $P$  との比較をする。今回の実験と S. Tanaka et al. では X 線発生装置からのビームの取り出し方向が逆である。S. Tanaka et al. では X 線発生装置のターゲットとして Cu を使用した。従って、Cu のターゲットに対してもダイレクト X 線の偏光度を測定した。

管電圧 [kV]	エネルギー [keV]	ダイレクト X 線の 偏光度 $P_{direct}$ (Mo)	ダイレクト X 線の 偏光度 $P_{direct}$ (Cu)	S. Tanaka et al. の結果 $P$
20	16	0.211±0.005	0.245±0.004	0.183
30	24	0.191±0.004	0.238±0.007	0.161
40	32	0.157±0.001	0.200±0.006	0.196
50	40	0.110±0.001	0.166±0.004	0.173

表 6.8: 今回の結果と S. Tanaka et al. の結果の比較

表 6.8 のようにターゲットが同じ Cu の場合、今回測定したダイレクト X 線の偏光度  $P_{direct}$  は、管電圧が 40[kV]、50[kV] では S. Tanaka et al. の結果と良く合っているが、低い管電圧では今回測定した  $P_{direct}$  のほうが 34%~48% 大きいという結果になった。

## 6.5 考察

今回の実験によって、X 線発生装置の連続 X 線を二結晶分光器に通した後の单色 X 線の偏光度を直接測定することに成功した。X 線発生装置からの連続 X 線の偏光度  $P_{direct}$  に比べて、二結晶分光器を通すことにより偏光度  $P_{DCM}$  が大きくなっていることを確かめることができた。実験で得られたダイレクト X 線の偏光度  $P_{direct}$  に対して、完全結晶とモザイク結晶のそれぞれの場合について二結晶分光器通過後の偏光度  $P_{theo}$  の計算を行ない、実験で得られた分光 X 線の偏光度  $P_{DCM}$  と比較した。その結果、分光 X 線の偏光度  $P_{DCM}$  は、管電圧が 50[kV] のときは計算値より 32%~46% 大きく、逆に 20[kV] のときは 14%~32% 小さくなっているが、他の点では理論値により近い値であった。

我々の二結晶分光器を用いたビームラインの構築の目的は、実験室で高偏光の单色 X 線ビームを作り出すことである。S. Tanaka et al. と今回の実験の結果にから次のことが言える。

1. X線発生装置からの連続X線は、管電圧に対して高エネルギーの成分ほど高偏光なX線である。偏光度とX線のエネルギーの関係は(定数)+(exponential)という形で近似できる。
2. 連続X線を二結晶分光器に通すことによって、もとのX線より高偏光の単色X線を作り出すことが出来る。

今回の実験結果より、実用的な偏光度(18%~25%)の単色X線(少なくとも16~40[keV])をX線発生装置と二結晶分光器の組合せで作り出すことに成功した。これにより、実験室内で偏光検出器の開発を始めとした偏光実験を行なうシステムを確立した。より低エネルギー側の連続X線を二結晶分光器に通した後の偏光度の測定、より高い偏光度の得られる領域( $E > HV$ (管電圧の値)×0.8)についての測定は今後の課題である。

## 第 7 章

### まとめ

- 二結晶分光器を用いた直線偏光単色 X 線ビームラインの構築を行ない、 alignment の方法を確立した。 X 線ビームラインの alignment を行ない精度の評価を行なったところ、必要な精度が得られた。

分光 X 線のエネルギーはねらったエネルギーに対して 2% 程度のずれで alignment が出来た。このずれは CCD のエネルギー分解能を評価する上では問題にならない程度のずれであり、われわれのビームラインの使用目的からすると、十分な精度で alignment を行なうことが出来たと言える。従って、要求する精度での alignment の方法を確立できた。

- X 線発生装置のターゲットの特性 X 線 Mo-K $\alpha$  と連続 X 線に対して、ダイレクト X 線と分光 X 線の強度比を測定した。

特性 X 線 Mo-K $\alpha$  に対しては分光 X 線はダイレクト X 線の約 10% の強度であった。

また、連続 X 線に対しては分光 X 線はダイレクト X 線に対して等価幅 (equivalent width) が  $10[keV] \sim 40[keV]$  で  $30[eV] \sim 60[eV]$  であることが分かった。

- ビームライン末端での分光 X 線のエネルギー分散の幅と単色性を調べ、幾何学的な計算による値と良く合うことを実証した。

1/2 インチサイズの CCD を使って、CCD の領域をエネルギーの分散方向に 2 分割しそれぞれでスペクトルを作り、そのピークチャンネルの差から平均のエネルギーの差を調べた。その結果幾何学的に計算したエネルギー分散の幅  $\Delta E$ (分散) と良く合った。1 インチサイズの CCD に対してのエネルギー分散の幅も計算値を用いて良いと言える。

また、分光 X 線を 1/2 インチサイズの CCD に全面照射し、そのエネルギー分解能と密封線源を用いて調べた CCD のエネルギー分解能とを比較した。その結果 Mn-K $\alpha$ (5.90[keV]) と Ag-K $\alpha$ (22.2[keV]) のエネルギーではエネルギー分解能は誤差の範囲で一致した。これにより、1/2 インチサイズの CCD チップでは、 $20[keV]$  以下のエネルギーの分光 X 線は CCD の性能評価に用いる X 線として十分単色であると言える。

- X線発生装置からの連続X線を二結晶分光器で分光し、Thomson散乱計を用いて直接偏光を測定し偏光を確認した。

X線発生装置の連続X線を二結晶分光器を通した後の単色X線の偏光度を直接測ることに成功した。ダイレクトX線の偏光度 $P_{direct}$ より分光X線の偏光度 $P_{DCM}$ の方が1.2~1.6倍程度大きくなっていることを確認した。

また、ダイレクトX線の偏光度 $P_{direct}$ に対して、完全結晶とモザイク結晶の場合についての $\sigma$ 偏光、 $\pi$ 偏光の結晶の反射率の違いの効果を考慮して計算した二結晶分光器通過後の偏光度の理論値 $P_{theo}$ (完全結晶)、 $P_{theo}$ (モザイク結晶)と $P_{DCM}$ を比較した。その結果、分光X線の偏光度 $P_{DCM}$ は、管電圧が50[kV]のときは計算値より32%~46%大きく、逆に20[kV]のときは14%~32%小さくなっているが、他の点では理論値により近い値であった。

今回の実験により実用的な偏光度(18%~25%)の単色X線をX線発生装置と二結晶分光器を組み合わせたシステムで作り出せた。これによって、実験室内で偏光検出器の較正を始めとした偏光実験を行なえるシステムを確立した。

## 参考文献

- [1] S. Tanaka, H. Tsunemi, K. Hayashida, Jpn. J. Appl. Phys. 36 (1997) 5770
- [2] 大谷 正之, 二結晶分光器の設計 (1996)
- [3] 今吉 拓哉, 修士論文 「X線 CCD の雑音低減と検出効率についての研究」 (大阪大学, 1997)
- [4] 安達 省泰, 卒業論文 「半導体検出器による単色 X 線の偏光度測定」 (大阪大学, 1998)
- [5] G. F. Knoll, 放射線計測ハンドブック 第 2 版 (日刊工業新聞社, 1991)
- [6] 菊田 健志, X 線回折・散乱技術 上 (東京大学出版会, 1992)
- [7] 液体窒素冷却 CCD カメラ C4880 取扱説明書, (浜松フォトニクス社 1997)
- [8] HiPic 取扱説明書, (浜松フォトニクス社 1995)
- [9] 総合カタログ 6-A <レーザー用光学基本機器>, (シグマ光機株式会社)

## 付録 A

### X 線の第一結晶への入射角と分光 X 線エネルギーの関係

プラッタ反射の条件より、 Si(111) と Si(220) 結晶について X 線の結晶への入射角と分光 X 線のエネルギーの関係について示す。 (第 1.3 節参照)

X 線の入射角 [度]	分光 X 線の Energy[keV] Si(111) 結晶のとき	分光 X 線の Energy[keV] Si(220) 結晶のとき	X 線の入射角 [度]	分光 X 線の Energy[keV] Si(111) 結晶のとき	分光 X 線の Energy[keV] Si(220) 結晶のとき
3	37.848	61.943	25	4.687	7.671
4	28.396	46.474	26	4.519	7.395
5	22.727	37.196	27	4.363	7.141
6	18.950	31.014	28	4.219	6.905
7	16.254	26.601	29	4.086	6.687
8	14.233	23.294	30	3.962	6.484
9	12.662	20.723	31	3.846	6.294
10	11.407	18.669	32	3.738	6.118
11	10.381	16.990	33	3.637	5.952
12	9.527	15.592	34	3.542	5.797
13	8.806	14.411	35	3.453	5.652
14	8.188	13.400	36	3.370	5.515
15	7.653	12.525	37	3.291	5.387
16	7.186	11.761	38	3.217	5.266
17	6.775	11.088	39	3.148	5.151
18	6.410	10.491	40	3.082	5.043
19	6.084	9.957	41	3.019	4.941
20	5.792	9.478	42	2.960	4.845
21	5.527	9.046	43	2.904	4.753
22	5.288	8.654	44	2.852	4.667
23	5.070	8.297	45	2.801	4.585
24	4.870	7.970	46	2.754	4.507

表 A.1: X 線の結晶への入射角と分光 X 線のエネルギーの関係

分光 X 線の Energy [keV]	X 線の入射角 [度] Si(111) 結晶のとき	X 線の入射角 [度] Si(220) 結晶のとき	分光 X 線の Energy [keV]	X 線の入射角 [度] Si(111) 結晶のとき	X 線の入射角 [度] Si(220) 結晶のとき
3	41.321		32	3.549	5.814
4	29.683	54.141	33	3.441	5.638
5	23.339	40.419	34	3.340	5.471
6	19.277	32.704	35	3.244	5.315
7	16.438	27.589	36	3.154	5.167
8	14.336	23.905	37	3.069	5.027
9	12.714	21.113	38	2.988	4.894
10	11.425	18.916	39		4.768
11	10.374	17.140	40		4.649
12	9.501	15.673	41		4.535
13	8.764	14.440	42		4.427
14	8.134	13.389	43		4.324
15	7.588	12.481	44		4.225
16	7.112	11.690	45		4.131
17	6.691	10.993	46		4.041
18	6.318	10.376	47		3.955
19	5.984	9.824	48		3.873
20	5.684	9.328	49		3.793
21	5.412	8.880	50		3.717
22	5.166	8.474	51		3.644
23	4.941	8.103	52		3.574
24	4.734	7.763	53		3.507
25	4.544	7.451	54		3.442
26	4.369	7.163	55		3.379
27	4.207	6.896	56		3.319
28	4.057	6.649	57		3.260
29	3.917	6.418	58		3.204
30	3.786	6.204	59		3.150
31	3.664	6.003	60		3.097

表 A.2: 分光 X 線のエネルギーと結晶への入射角の関係

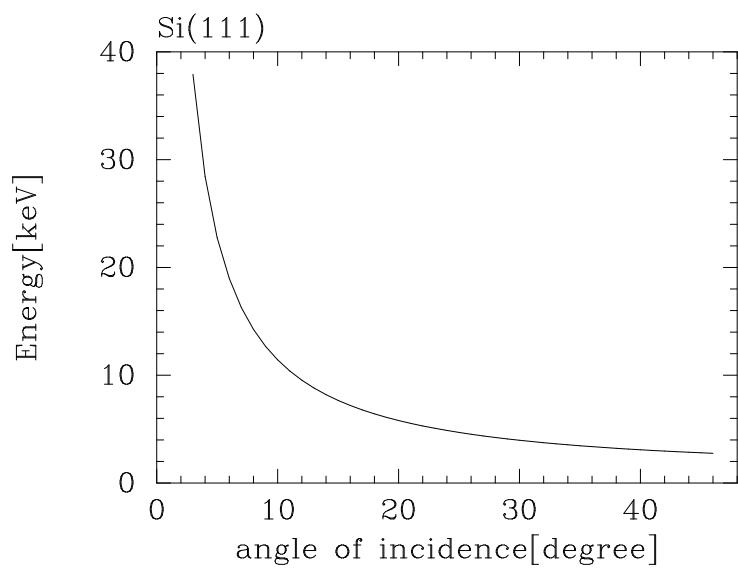


図 A.1: 入射角と分光 X 線のエネルギーの関係 (Si(111) 結晶のとき)

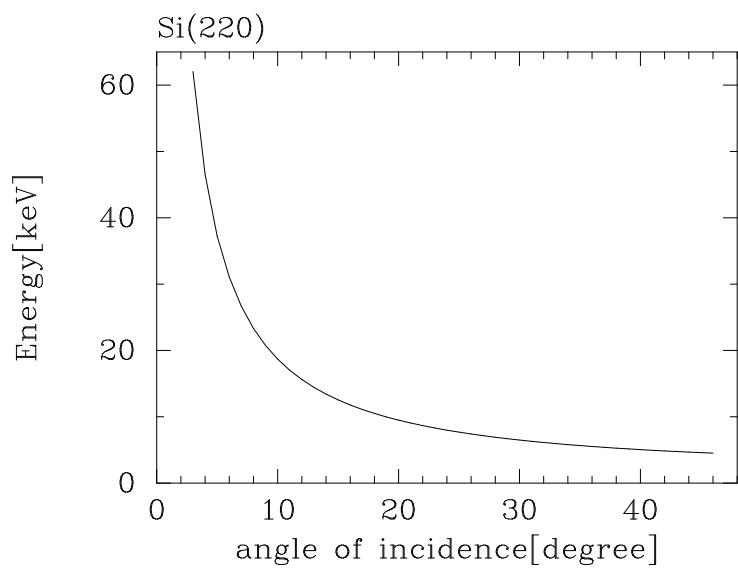


図 A.2: 入射角と分光 X 線のエネルギーの関係 (Si(220) 結晶のとき)

## 付録 B

### 分光 X 線のエネルギー分散の幅

結晶への入射角の違いによる分光 X 線のエネルギー分散の幅  $\Delta E$ (分散)について見積もる。計算は以下のように行った。CCDチップのサイズは 1 インチであるとしてエネルギー分散の幅を計算する。X 線は点源から発生する発散光であるとし、X 線発生点からビームライン末端で 1 インチに広がる発散角を計算する。その発散角の光路を通る X 線の結晶への入射角を計算する。結晶への入射角から布拉ッグ反射の条件より、反射される波長(エネルギー)を求める。1 インチの上端と下端で分光されてくるエネルギー分散の幅  $\Delta E$ (分散)を計算する。表 B.1、B.2に Si(111) と Si(220) 結晶を用いた場合について示す。(第 1.4 節参照)

X 線の入射角 [度]	$\Delta E$ (分散)[eV] Si(111) 結晶のとき	$\Delta E$ (分散)[eV] Si(220) 結晶のとき	X 線の入射角 [度]	$\Delta E$ (分散)[eV] Si(111) 結晶のとき	$\Delta E$ (分散)[eV] Si(220) 結晶のとき
3	874.915	1431.887	25	12.177	19.929
4	491.964	805.149	26	11.224	18.369
5	314.712	515.059	27	10.374	16.978
6	218.427	357.478	28	9.613	15.733
7	160.370	262.462	29	8.930	14.614
8	122.688	200.792	30	8.313	13.605
9	96.854	158.511	31	7.754	12.691
10	78.374	128.267	32	7.247	11.861
11	64.701	105.890	33	6.785	11.104
12	54.301	88.869	34	6.362	10.413
13	46.207	75.623	35	5.975	9.779
14	39.785	65.112	36	5.619	9.197
15	34.603	56.631	37	5.292	8.660
16	30.362	49.690	38	4.989	8.165
17	26.846	43.937	39	4.709	7.707
18	23.900	39.115	40	4.449	7.282
19	21.407	35.034	41	4.208	6.887
20	19.277	31.549	42	3.983	6.519
21	17.444	28.549	43	3.773	6.175
22	15.855	25.949	44	3.577	5.855
23	14.469	23.680	45	3.394	5.554
24	13.252	21.687	46	3.222	5.272

表 B.1: X 線の結晶への入射角に対するエネルギー分散の幅  $\Delta E$ (分散)

分光 X 線の Energy [keV]	$\Delta E$ (分散)[eV] Si(111) 結晶のとき	$\Delta E$ (分散)[eV] Si(220) のとき	分光 X 線の Energy [keV]	$\Delta E$ (分散)[eV] Si(111) 結晶のとき	$\Delta E$ (分散)[eV] Si(220) のとき
3	4.115		32	623.061	379.469
4	8.470	3.481	33	662.687	403.682
5	13.990	7.082	34	703.532	428.640
6	20.712	11.277	35	745.597	454.342
7	28.647	16.170	36	788.881	480.790
8	37.797	21.788	37	833.384	507.982
9	48.165	28.140	38	879.106	535.920
10	59.751	35.231	39		564.602
11	72.556	43.064	40		594.030
12	86.579	51.639	41		624.203
13	101.821	60.957	42		655.120
14	118.282	71.019	43		686.782
15	135.962	81.825	44		719.190
16	154.861	93.375	45		752.342
17	174.979	105.670	46		786.240
18	196.317	118.709	47		820.882
19	218.874	132.494	48		856.270
20	242.650	147.022	49		892.402
21	267.645	162.296	50		929.279
22	293.859	178.315	51		966.902
23	321.293	195.078	52		1005.269
24	349.945	212.586	53		1044.382
25	379.818	230.839	54		1084.239
26	410.909	249.837	55		1124.841
27	443.219	269.580	56		1166.189
28	476.749	290.068	57		1208.281
29	511.498	311.301	58		1251.118
30	547.467	333.279	59		1294.701
31	584.654	356.002	60		1339.028

表 B.2: 分光 X 線のエネルギーに対するエネルギー分散の幅  $\Delta E$ (分散)

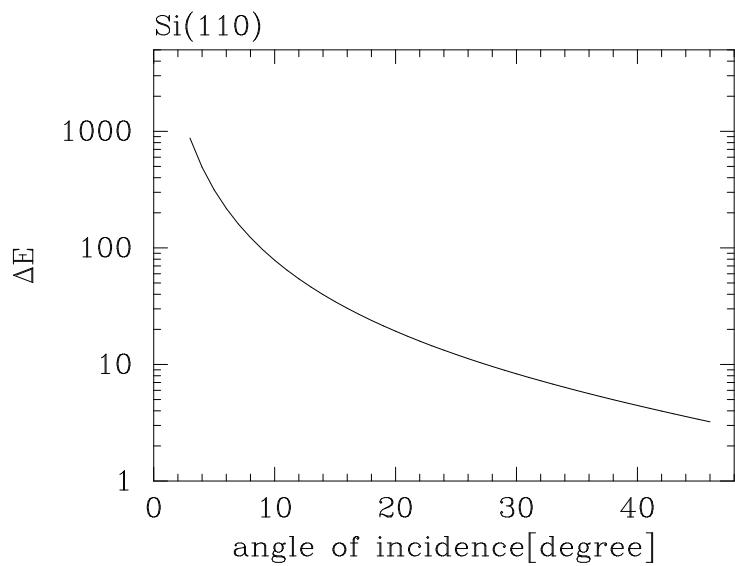


図 B.1: 分光 X 線のエネルギー分散の幅 (Si(111) 結晶のとき)

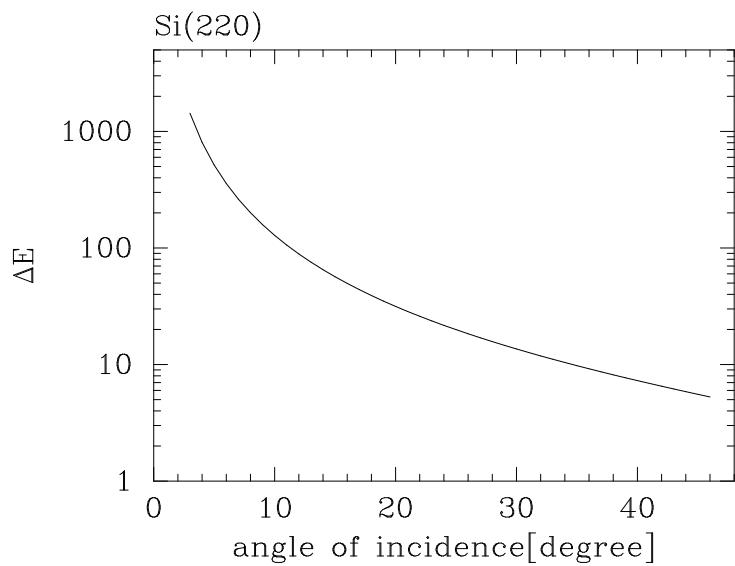


図 B.2: 分光 X 線のエネルギー分散の幅 (Si(220) 結晶のとき)

## 付録 C

### 二結晶分光器のエネルギー分解能(第 1.5 節参照)

X 線の入射角 [度]	Si(111) 結晶のとき			Si(220) 結晶のとき		
	$\Delta E(DCM)$ [eV]	$\Delta E(CCD)$ [eV]	$\Delta E(DCM)/\Delta E(CCD)$ [%]	$\Delta E(DCM)$ [eV]	$\Delta E(CCD)$ [eV] [eV]	$\Delta E(DCM)/\Delta E(CCD)$ [%]
3	34.390	303.216	11.342	56.283	387.903	14.509
4	19.337	262.639	7.363	31.648	335.993	9.419
5	12.370	234.965	5.265	20.245	300.590	6.735
6	8.586	214.553	4.002	14.051	274.477	5.119
7	6.304	198.703	3.172	10.317	254.200	4.058
8	4.822	185.941	2.594	7.892	237.873	3.318
9	3.807	175.382	2.171	6.231	224.366	2.777
10	3.081	166.463	1.851	5.042	212.955	2.368
11	2.543	158.801	1.601	4.162	203.153	2.049
12	2.134	152.129	1.403	3.493	194.618	1.795
13	1.816	146.254	1.242	2.972	187.102	1.589
14	1.564	141.031	1.109	2.559	180.420	1.419
15	1.360	136.350	0.998	2.226	174.432	1.276
16	1.193	132.124	0.903	1.953	169.026	1.156
17	1.055	128.287	0.823	1.727	164.118	1.052
18	0.939	124.784	0.753	1.537	159.636	0.963
19	0.841	121.571	0.692	1.377	155.526	0.885
20	0.758	118.611	0.639	1.240	151.739	0.817
21	0.686	115.874	0.592	1.122	148.238	0.757
22	0.623	113.335	0.550	1.020	144.989	0.703
23	0.569	110.972	0.512	0.931	141.966	0.656
24	0.521	108.766	0.479	0.852	139.145	0.613
25	0.479	106.703	0.449	0.783	136.505	0.574
26	0.441	104.768	0.421	0.722	134.030	0.539
27	0.408	102.950	0.396	0.667	131.704	0.507
28	0.378	101.239	0.373	0.618	129.515	0.477
29	0.351	99.624	0.352	0.574	127.449	0.451
30	0.327	98.099	0.333	0.535	125.498	0.426
31	0.305	96.657	0.315	0.499	123.653	0.403
32	0.285	95.290	0.299	0.466	121.904	0.382
33	0.267	93.993	0.284	0.436	120.245	0.363
34	0.250	92.762	0.270	0.409	118.670	0.345
35	0.235	91.592	0.256	0.384	117.173	0.328
36	0.221	90.478	0.244	0.361	115.748	0.312
37	0.208	89.417	0.233	0.340	114.391	0.298
38	0.196	88.406	0.222	0.321	113.097	0.284
39	0.185	87.441	0.212	0.303	111.863	0.271
40	0.175	86.520	0.202	0.286	110.685	0.259
41	0.165	85.641	0.193	0.271	109.560	0.247
42	0.157	84.800	0.185	0.256	108.484	0.236
43	0.148	83.996	0.177	0.243	107.456	0.226
44	0.141	83.227	0.169	0.230	106.473	0.216
45	0.133	82.491	0.162	0.218	105.531	0.207
46	0.127	81.787	0.155	0.207	104.630	0.198

表 C.1: X 線の入射角に対する二結晶分光器のエネルギー分解能と CCD のエネルギー分解能

分光 X 線のエネルギー [keV]	$\Delta E(CCD)$ [eV]	Si(111) 結晶のとき		Si(220) 結晶のとき	
		$\Delta E(DCM)$ [eV]	$\Delta E(DCM)/\Delta E(CCD)$ [%]	$\Delta E(DCM)$ [eV]	$\Delta E(DCM)/\Delta E(CCD)$ [%]
3	85.367	0.162	0.190	0.138	0.140
4	98.573	0.334	0.339	0.280	0.254
5	110.208	0.552	0.501	0.445	0.369
6	120.727	0.817	0.677	0.638	0.489
7	130.400	1.130	0.866	0.859	0.617
8	139.403	1.491	1.069	1.110	0.751
9	147.859	1.899	1.285	1.390	0.892
10	155.858	2.356	1.512	1.698	1.039
11	163.465	2.861	1.750	2.037	1.193
12	170.733	3.414	2.000	2.404	1.353
13	177.705	4.015	2.260	2.801	1.519
14	184.413	4.664	2.529	3.227	1.690
15	190.886	5.362	2.809	3.682	1.868
16	197.146	6.107	3.098	4.167	2.051
17	203.213	6.900	3.396	4.681	2.239
18	209.105	7.742	3.702	5.225	2.432
19	214.835	8.631	4.018	5.798	2.630
20	220.416	9.569	4.341	6.400	2.834
21	225.859	10.554	4.673	7.032	3.042
22	231.174	11.588	5.013	7.693	3.255
23	236.370	12.670	5.360	8.383	3.472
24	241.454	13.800	5.715	9.103	3.694
25	246.432	14.978	6.078	10.631	4.151
26	251.313	16.204	6.448	9.852	3.920
27	256.100	17.478	6.825	11.439	4.386
28	260.800	18.800	7.209	12.276	4.625
29	265.416	20.170	7.600	13.143	4.868
30	269.953	21.589	7.997	14.039	5.116
31	274.416	23.055	8.402	14.964	5.367
32	278.807	24.570	8.812	15.919	5.622
33	283.129	26.132	9.230	16.903	5.882
34	287.387	27.743	9.654	17.917	6.145
35	291.583	29.402	10.083	18.960	6.411
36	295.719	31.109	10.520	20.032	6.682
37	299.798	32.863	10.962	21.134	6.956
38	303.822	34.666	11.410	22.265	7.234
39	307.794			23.425	7.515
40	311.715			24.615	7.800
41	315.588			25.834	8.088
42	319.413			27.083	8.380
43	323.193			28.360	8.675
44	326.930			29.668	8.973
45	330.624			31.005	9.275
46	334.277			32.371	9.580
47	337.891			33.766	9.889
48	341.467			35.191	10.200
49	345.005			36.645	10.515
50	348.508			38.129	10.833
51	351.976			39.642	11.154
52	355.410			41.184	11.478
53	358.811			42.756	11.805
54	362.180			44.357	12.135
55	365.518			45.987	12.469
56	368.826			47.647	12.805
57	372.105			49.336	13.144
58	375.355			51.055	13.486
59	378.577			52.803	13.831
60	381.772				

表 C.2: 分光 X 線のエネルギーに対する二結晶分光器のエネルギー分解能と CCD のエネルギー分解能

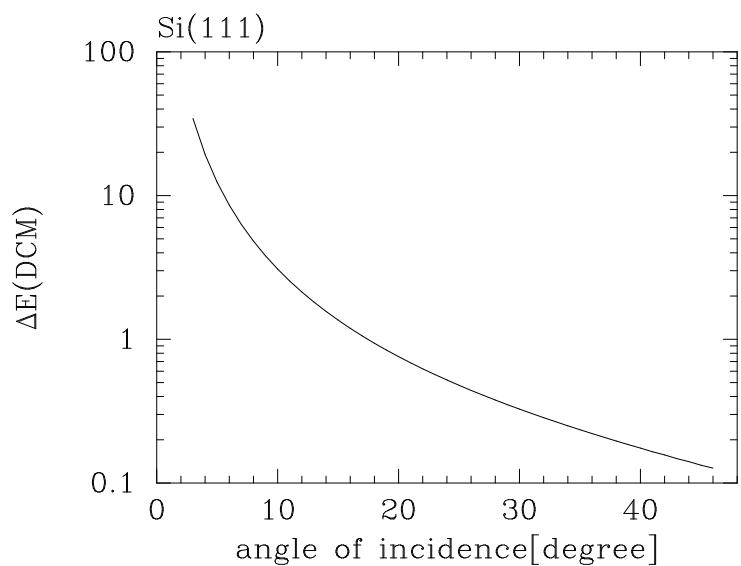


図 C.1: X 線の入射角に対する二結晶分光器のエネルギー分解能 (Si(111) 結晶のとき)

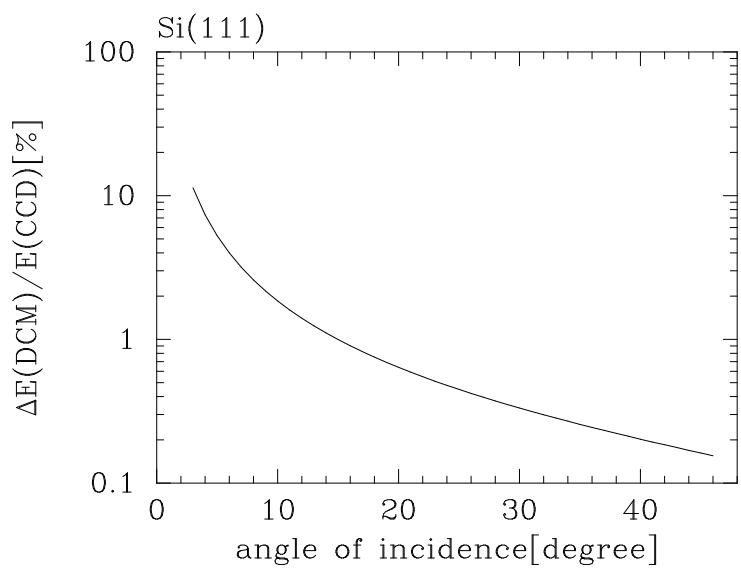


図 C.2: 二結晶分光器のエネルギー分解能と CCD のエネルギー分解能の比 (Si(111) 結晶のとき)

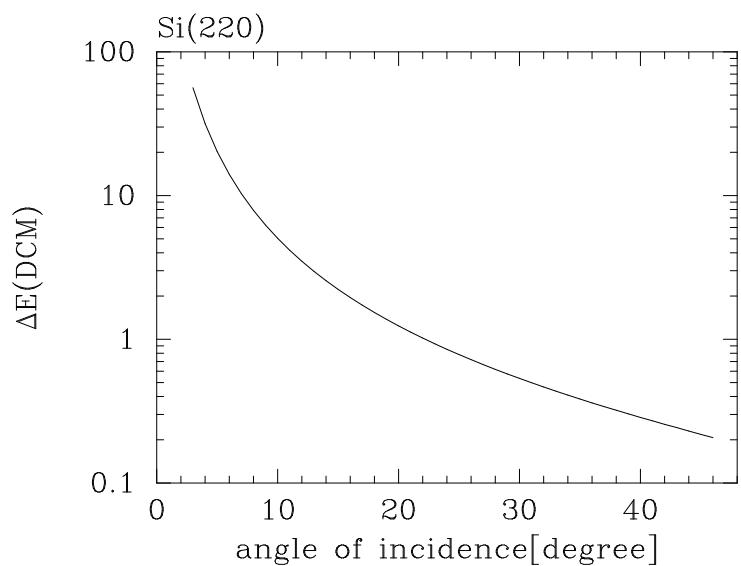


図 C.3: X 線の入射角に対する二結晶分光器のエネルギー分解能 (Si(220) 結晶のとき)

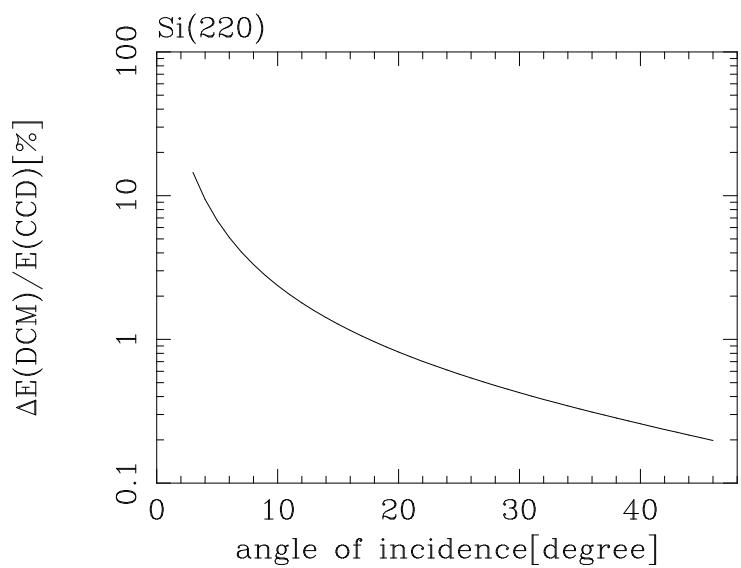


図 C.4: 二結晶分光器のエネルギー分解能と CCD のエネルギー分解能の比 (Si(220) 結晶のとき)

## 付録 D

### 分光 X 線のビームライン末端での広がり

二結晶分光器のスリットを使用しない場合の分光 X 線の上下方向のビームサイズを見積もる。この場合第二結晶の結晶の長さによってビームサイズが決まる。X 線発生装置から第一結晶の  $\theta_1$  軸の回転軸までの距離を  $1[mm]$ 、結晶反射面の長さを  $50[mm]$  として X 線の結晶への入射角とビームライン末端でのビームサイズを見積もった。(第 1.8 節参照)

X 線の入射角 [度]	上 [mm]	下 [mm]	ビームの幅 [mm]	X 線の入射角 [度]	上 [mm]	下 [mm]	ビームの幅 [mm]
3	23.6	22.6	46.2	25	223.2	213.5	436.6
4	32.8	31.4	64.2	26	231.7	221.7	453.4
5	42.0	40.2	82.2	27	240.2	229.9	470.1
6	51.3	49.0	100.4	28	248.6	238.0	486.6
7	60.6	57.9	118.5	29	256.9	246.1	503.0
8	69.9	66.8	136.7	30	265.2	254.1	519.2
9	79.2	75.6	154.8	31	273.3	262.0	535.3
10	88.5	84.4	172.9	32	281.4	269.9	551.3
11	97.7	93.3	191.0	33	289.4	277.6	567.1
12	107.0	102.1	209.0	34	297.3	285.4	582.7
13	116.2	110.9	227.0	35	305.2	293.0	598.2
14	125.3	119.6	244.9	36	312.9	300.6	613.4
15	134.5	128.3	262.8	37	320.5	308.0	628.6
16	143.6	137.0	280.6	38	328.0	315.4	643.5
17	152.6	145.7	298.3	39	335.5	322.8	658.2
18	161.6	154.3	315.9	40	342.8	330.0	672.8
19	170.6	162.9	333.5	41	350.1	337.1	687.2
20	179.5	171.4	350.9	42	357.2	344.2	701.4
21	188.4	179.9	368.3	43	364.2	351.1	715.3
22	197.2	188.4	385.6	44	371.1	358.0	729.1
23	205.9	196.8	402.7	45	377.9	364.8	742.7
24	214.6	205.2	419.7	46	384.6	371.5	756.1

表 D.1: X 線の結晶への入射角とビームライン末端での分光 X 線の広がり

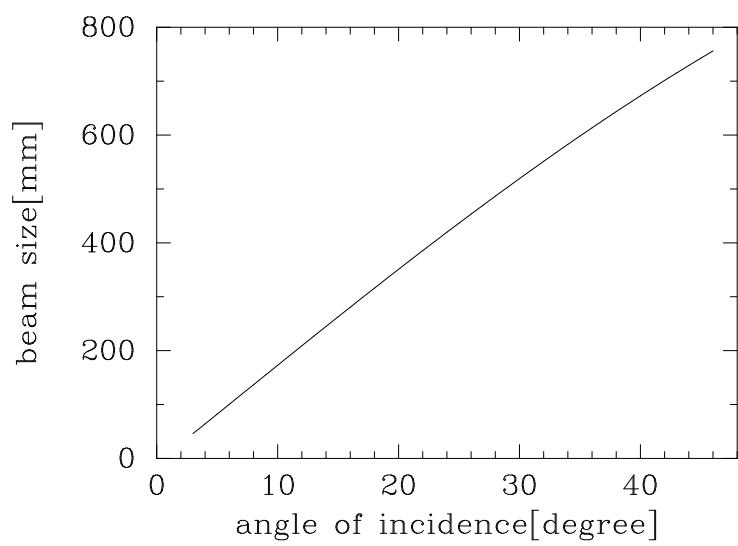


図 D.1: 分光 X 線のビームライン末端での広がり