

修士論文

可動式X線発生装置による  
X線望遠鏡性能評価システムの構築

指導教官 大橋 隆哉

首都大学東京 理工学研究科 物理学専攻 修士課程  
宇宙物理実験研究室

大澤 武幸

2008年1月10日

## 概要

1978年に初めて人工衛星にX線望遠鏡が搭載されてからX線天文学は大きな進歩を遂げた。以来、X線望遠鏡は宇宙の進化を説き明かす上で欠かせない観測機器となっている。天体からのX線を結像することで観測天体の位置、大きさ、空間構造を把握することができ、また着目する天体からのX線だけを抽出することが可能になった。そしてX線や光子を集光することで焦点面検出器の小型化にもつながり、検出感度が格段に向上した。これらX線望遠鏡の性能を軌道上で最大限に引き出すためには、その特性を十分把握しておく必要がある。そこで望遠鏡単体の性能評価を衛星搭載前に予め地上にて行うことが重要になる。

従来のX線望遠鏡の性能評価システムでは、位置の可変機構を持たない固定式X線発生装置が一般的に用いられ、例えば望遠鏡と検出器を同期させて動かすことで擬似的に望遠鏡全面に一樣な平行X線が入射している状況を作り出していた。しかし、これからの望遠鏡の大型化に対応するためには、望遠鏡と検出器を高い精度で同期させるステージなどシステム全体に大型化が要求される。そこで、私は新たに可動式のX線発生装置を導入し、比較的小さなスペースで望遠鏡、検出器を固定したまま性能評価を行うことが可能なシステムの構築を行った。望遠鏡と検出器を動かさずに評価できるため、焦点距離を自由に選びやすい、フライト品やカロリメーターなど大型の焦点面検出器の導入が比較的容易などのメリットがある。可動式の手法は気球実験 InFOCuS の硬X線望遠鏡で、20 keV以上の硬X線領域においてすでに実用化されている(Okajima et al. 2001)。我々のシステムでは、20 keV以下の軟X線領域をカバーするため、システム全体を真空槽に入れている。

望遠鏡の特性は入射するX線のエネルギーにより異なるため、小型二結晶分光器による4 keV~20 keVについてX線の単色化を行った。並進方向、回転方向の2つの小型ステージを組み合わせ、50 mm (X)×150 mm (Y)×100 mm (Z)という小スペースで実装することができた。そして可動式X線発生装置と望遠鏡との間の3ヶ所に発生装置と同期して動くピンホールカロリメーターを配置することにより、拡散角を実測値で22 arcsec(水平方向)、24 arcsec(高さ方向)という値にまでおさえることができた(@8.4keV)。水平方向と高さ方向で拡散角が異なるのは二結晶分光器の寄与によるものかもしれない。これらのピンホールは望遠鏡の性能評価をする上で問題となる散乱光を抑える役割も担っている。ここで言う散乱光とは可動式発生装置から出たX線が発生装置の出口もしくはチェンバ内で散乱し、ピンホールカロリメーターで抑えきれずに望遠鏡に入射してくる光のことで、一般に軟X線領域ほどその影響が無視できない。本研究ではこの3つのピンホールの精密なアラインメントを行い、散乱光を検出器のノイズレベル(ダイレクト光の強度の6桁下)以下まで軽減させることに成功した。

また、X線発生装置とピンホールカロリメーターの2つを同時に駆動させるラスターキャンシステムを構築した。そして従来の固定式発生装置を用いたシステムで測定された結像性能1.4 arcminのサンプルについて当システムにおいても測定を行い、矛盾のない性能が得られることがわかった。これにより1 arcmin程度の分解能の望遠鏡であれば、直径600 mmの大きさのものまで結像性能の評価が可能になったことになる。

本論文では、この可動式発生装置を用いたX線望遠鏡の性能評価システムの構築とその評価についてまとめる。

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>X 線天文学と X 線望遠鏡</b>	<b>1</b>
1.1	X 線天文学	1
1.2	X 線天文学と X 線望遠鏡	1
1.3	X 線望遠鏡に用いられる光学系—斜入射光学系	4
1.4	X 線望遠鏡の種類	4
1.4.1	多重薄板型	5
1.4.2	直接研磨型	5
1.5	X 線望遠鏡の性能	6
1.5.1	集光力(有効面積)	6
1.5.2	結像性能 (HPD、PSF、EEF)	7
<b>第 2 章</b>	<b>X 線望遠鏡性能評価システム</b>	<b>11</b>
2.1	地上での X 線望遠鏡性能評価の目的	11
2.2	システムに求められる機能	11
2.3	宇宙科学研究本部 30m ビームライン	12
2.3.1	30m ビームライン概要	12
2.3.2	固定式 X 線発生装置	16
2.3.3	フィルター	17
2.3.4	30m ビームライン搭載 DCM	18
2.3.5	四極スリット	23
2.3.6	焦点面検出器	24
2.3.7	駆動ステージ	25
2.3.8	真空装置	28
2.3.9	30m ビームラインにおける X 線望遠鏡測定方法	30
2.3.10	有効面積の算出方法	31
<b>第 3 章</b>	<b>宇宙科学研究本部 10m ビームライン</b>	<b>33</b>
3.1	10m ビームライン概要	33
3.2	10m ビームラインの構成	37
3.2.1	可動式 X 線発生装置	37
3.2.2	10m ビームライン搭載 DCM	37
3.2.3	ピンホールコリメーター	37
3.2.4	駆動ステージ	43
3.2.5	真空装置	46
3.3	10m ビームラインにおける X 線望遠鏡測定方法	47

<b>第4章</b>	<b>X線の単色化</b>	<b>49</b>
4.1	10m ビームライン搭載 DCM 概要	49
4.1.1	ステージ構成	49
4.1.2	回転中心	50
4.2	X線の単色化	54
<b>第5章</b>	<b>散乱光の抑制</b>	<b>55</b>
5.1	目的	55
5.1.1	軽減目標値の見積もり	55
5.2	第2ピンホール直径10mm時における散乱光の測定	56
5.2.1	測定方法	56
5.2.2	解析方法	59
5.2.3	測定結果	59
5.2.4	考察	60
5.3	第2ピンホール直径1.0mm時における散乱光の測定	60
5.3.1	測定、解析方法	61
5.3.2	測定結果	61
5.3.3	考察	62
5.4	第2ピンホール直径0.5mm時における散乱光の測定	62
5.4.1	測定、解析方法	62
5.4.2	測定結果	62
5.4.3	考察	63
5.5	散乱光測定のまとめ	64
<b>第6章</b>	<b>ラスタースキャンシステムの確立</b>	<b>65</b>
6.1	ステージの同期性	65
6.2	ステージ同期性の測定	66
6.2.1	サンプル XRT	66
6.2.2	測定項目	66
6.2.3	測定方法	67
6.2.4	解析方法	67
6.2.5	測定結果	69
6.3	可動式発生装置と第3ピンホールの同期性についての考察とまとめ	81
<b>第7章</b>	<b>10m ビームラインにおける X 線望遠鏡の性能評価測定</b>	<b>83</b>
7.1	結像性能	83
7.1.1	測定方法	83
7.1.2	測定結果	84
7.1.3	30m ビームラインでの測定結果との比較	87
7.2	有効面積	89
7.2.1	理想的な有効面積の算出	89
7.2.2	理論値と測定値との比較	91
7.2.3	解析方法	92

第 8 章	まとめと展望	95
8.1	まとめ . . . . .	95
8.2	今後の課題と展望 . . . . .	96
付録 A	10m ビームライン搭載 DCM 設計図	97
関連図書		103



# 目次

1.1	X線天文衛星の性能の変遷	3
1.2	X線で用いられる結像光学系	4
1.3	XRTの断面図	4
1.4	「多重薄板型」X線望遠鏡	5
1.5	「直接研磨型」X線望遠鏡	6
1.6	様々な衛星に搭載されるXRTの有効面積	7
1.7	焦点面のイメージ	8
1.8	Point Spread Function	9
1.9	PSF、EEF、HPDの関係	9
2.1	ラスタースキャン概念図 — 測定は Full Telescope または Quadrant 単位で行われる。図は Full Telescope を測定する場合。	12
2.2	30m ビームラインのチェンバ 構成 — 焦点距離 4.75 m の XRT の場合を例として示す。	14
2.3	30m ビームライン模式図 — 青い矢印はステージの可動方向を示す。	15
2.4	固定式 X線発生装置の構成図	16
2.5	大気チェンバ 内のフィルターの配置図	17
2.6	各フィルターの透過率	18
2.7	30m ビームライン搭載 DCM の結晶配置図	19
2.8	Cu-K $\alpha$ (8.04 keV) 付近のロッキングカーブ — DCM を回転させ、入射角度を変えていったときの光量変化を表している。30m ビームライン搭載 DCM は Cu-K $\alpha_1, \alpha_2$ を区別することができる。	19
2.9	DCM での 2 回反射	20
2.10	DCM のアラインメント手順	22
2.11	四極スリット	23
2.12	背面照射型 CCD カメラの原理	25
2.13	サンプル、ディテクターチェンバ 内のステージ全体図	27
2.14	30m ビームライン真空、排気装置全体図	29
2.15	Quadrant ラスタースキャン概念図 — ビームの相対位置を、S-Y 軸、D-Y 軸ステージを動かすことで Quadrant の開口部より 5 mm ほど外側に移動させる。その位置で検出器の露光を開始すると同時に S-Y 軸、D-Y 軸を動かし、ビームに Quadrant 開口部を横切らせ、さらにその 5 mm ほど外側まで移動させる。そしてその位置でビームの縦幅だけ S-Z と D-Z を移動する。以上の操作を Quadrant 全面を走査するまで繰り返す。	31
3.1	10m ビームラインのチェンバ 構成 — 焦点距離 4.75 m の XRT の場合を例として示す。10m ビームラインで使用するチェンバ は全て 30m ビームラインの中に組み込まれている。また、サンプル、ディテクターチェンバ、検出器等は 30m ビームラインのものを併用している。座標軸については 30m ビームラインと同じものを用いる。	35
3.2	10m ビームライン模式図 — 青い矢印はステージの可動方向を示す。	36
3.3	第 1 ピンホール — 右側の写真の白い長方形の領域を拡大したのが左の写真である。	38

3.4	第2ピンホール — 右側の写真の白い長方形の領域を拡大したのが左の写真である。真鍮の板はネジ止めされており、交換が可能である。 . . . . .	38
3.5	第2ピンホール周辺模式図 — DCMの周囲を鉛で覆い、散乱光の遮断を行っている。 . . . . .	39
3.6	第2ピンホール拡大写真 — 自作した直径0.5 mmの第2ピンホール拡大写真。上流から下流を見たときのものである。カメラの視野にピンホールの全景がおさまらなかったため、Y軸方向とZ軸方向との2枚に分けた。 . . . . .	39
3.7	第3ピンホール — 右は上流側から、左は下流側から見たときの様子。 . . . . .	40
3.8	第3ピンホール周辺模式図 — 左は-X方向から、右は+Y方向から見たときの様子。 . . . . .	40
3.9	10mビームラインビーム平行度概念図 — ビーム平行度を $\theta$ 、第2ピンホールの直径を $D_{2nd}$ 、第3ピンホールの直径を $D_{3rd}$ 、第2ピンホールから第3ピンホールまでの距離を $L$ 、第2ピンホールから2直線の交点までの距離を $l$ とする。 . . . . .	41
3.10	ビームイメージ — 第3ピンホール直径1.0 mm使用時のビームイメージ。このときのビーム平行度はY軸方向で24 arcsec、Z方向軸では26 arcsec。 . . . . .	42
3.11	10mビームラインステージ配置図 — ステージの可動方向を青い矢印で示した。 . . . . .	45
3.12	10mビームラインにおける真空、排気装置の全体図 . . . . .	46
4.1	10mビームライン搭載DCM及びステージ . . . . .	49
4.2	10mビームライン搭載DCM周辺模式図 — DCM-Y軸ステージはmXG-Z軸ステージに固定されている。そのためビームとDCMの相対位置を崩すことなく可動式発生装置の移動が可能である。 . . . . .	50
4.3	第1結晶面に回転中心を配置した場合のアライメント手順 . . . . .	51
4.4	第2結晶面に回転中心を配置した場合のアライメント手順 . . . . .	53
4.5	ロッキングカーブ — DCM- $\theta_z$ を0.002 degreeピッチで回転させ、ディテクターチェンバ内のPCにより測定を行った。強度比、エネルギーの差から左の輝線が $W-L_{\alpha 1}$ (8.40 keV)、右の輝線が $W-L_{\alpha 2}$ (8.34 keV)と判断することができる。 . . . . .	54
4.6	単色化後のスペクトル — このスペクトルは第5章にて述べる散乱光の測定時のもので、コリメーターステージにCdZnTe検出器を設置して取得した。 . . . . .	54
5.1	ダイレクト光、散乱光概念図 — XRTの開口面積を $S_{XRT}$ 、ダイレクト光の面積を $S_{direct}$ とする。 . . . . .	55
5.2	散乱光測定概念図 . . . . .	57
5.3	コリメーターステージに設置したCZT — 先端に取り付けられている赤い保護キャップは測定の際には取り外す。 . . . . .	57
5.4	CZT測定経路図 — 上流側から見たときの図である。コリメーターステージのストローク限界である600×600 mmの領域を60×60 mmの100マスに分割し、各マスの中央にてデータを取得した。縦軸、横軸ともにX線照射位置を中心にとっている。また、測定は第3ピンホール上流の鉛板を取り外して行ったが、参考のために図の中に書き入れた。各マスの左下に記載した数字は便宜的につけた測定番号であり、1番のマスから順に測定を行った。 . . . . .	58
5.5	バックグラウンドのスペクトル — X線を止めた状態で図5.4と同様の経路でCZTを移動させ、バックグラウンドを取得した。露光時間は1点につき1000 sec。上に示したスペクトルは100マス分のデータを足し合わせ、トータルの露光時間で規格化したものである。 . . . . .	59
5.6	第2ピンホール直径10 mm時の散乱光のスペクトル — 図5.4にある鉛板に覆われる部分を除いた70マス分のデータを足し合わせたときの散乱光のスペクトルである。 $W-L_{\alpha 1}$ の8.40 keV付近に大きなスペクトルの盛り上がりが見られる。 . . . . .	60
5.7	第2ピンホール直径1.0 mm時の散乱光のスペクトル — 5.4にある鉛板に覆われる部分を除いた70マス分のデータを足し合わせたときの散乱光のスペクトルである。8.40 keV付近の散乱光については軽減に成功した。しかし、5 keV~7 keV付近に優位な盛り上がりが見られる。 . . . . .	61

5.8	第2ピンホール直径0.5 mm時の散乱光のスペクトル — 5.4にある鉛板に覆われる部分を除いた70マス分のデータを足し合わせた散乱光のスペクトルである。第2ピンホール直径1.0 mmのときに見られていた5 keV~7 keVの散乱光の軽減に成功し、検出器のノイズレベル以下にまで散乱光を軽減することができた。	63
5.9	鉛板内外での散乱光の強度変化 — 鉛板周辺のマスに対しビームラインの座標系でY軸方向(左図)、Z軸方向(右図)にそれぞれプロジェクションをとり、鉛板内外での散乱光の強度変化を調べた。どちらの方向においても内外で優位な差がないことが分かる。	64
6.1	同期性についての概念図 — 赤色で書かれているものが+Y軸方向に移動させたとき、青色でかかれているものが-Y軸方向に移動させたときを表している。しかし、必ずしも図のような方向にステージのずれが生じるわけではない。	65
6.2	サンプルXRT反射鏡 — 母線方向の両端10mmには金がレプリカされておらずアルミ基板が剥き出しの状態になっている。	66
6.3	ステージ同期性の測定模式図	68
6.4	DサイドでのCCDイメージ — DサイドにXRTを設置したときのCCDイメージ。Y軸方向への像の広がりが小さい。	68
6.5	ステージ速度2 mm/sec時+Y軸方向スキンの各ラインの投影結果 — ステージ速度2 mm/secで+Y軸方向にスキンを行った際の結果。CCDにより撮像した像を1ラインごとにY軸方向に向かって投影した。それをガウシアンでフィットし、CCD面上で光量がピークになる位置を求めた。各データ点の統計誤差はポアソンエラーでつけている。	69
6.6	ステージ速度2 mm/sec時+Y軸方向スキンの各ラインの光量ピーク位置 — ステージ速度2 mm/sec+Y軸方向スキンの各ラインごとの光量ピーク位置のプロット。縦軸にカウント数、横軸にライン番号をとっている。	70
6.7	ステージ速度2 mm/sec時+Y軸方向スキンの11ラインを足し合わせた結果	70
6.8	ステージ速度2 mm/sec時-Y軸方向スキンの各ラインの投影結果 — ステージ速度2 mm/secで-Y軸方向にスキンを行った際の結果。CCDにより撮像した像を1ラインごとにY軸方向に向かって投影した。それをガウシアンでフィットし、光量がピークになる検出器面上での位置を求めた。各データ点の統計誤差はポアソンエラーでつけている。	71
6.9	ステージ速度2 mm/sec時-Y軸方向スキンの各ラインの光量ピーク位置 — ステージ速度2 mm/sec時-Y軸方向スキンの各ラインの光量ピーク位置をプロットした。縦軸にカウント数、横軸にライン番号をとっている。	72
6.10	ステージ速度2 mm/sec時-Y軸方向スキンの11ラインを足し合わせた結果	72
6.11	ステージ速度2 mm/sec時の+Y軸方向と-Y軸方向の各ラインにおける光量ピーク位置についての比較	73
6.12	ステージ速度2 mm/sec時の+Y軸方向と-Y軸方向の全ラインの足し合わせにおける比較	73
6.13	ステージ速度10 mm/sec時+Y方向スキンの各ラインの投影結果 — ステージ速度10 mm/secで+Y方向にスキンを行った際の結果。CCDにより撮像した像を1ラインごとにY軸方向に向かって投影した。それをガウシアンでフィットし、光量がピークになる検出器面上での位置を求めた。各データ点の統計誤差はポアソンエラーでつけている。	75
6.14	ステージ速度10 mm/sec時+Y方向スキンの各ラインの光量ピーク位置 — ステージ速度10 mm/sec+Y方向スキンの各ラインの光量ピーク位置をプロットした。縦軸にカウント数、横軸にライン番号をとっている。	76
6.15	ステージ速度10 mm/sec時+Y方向スキンの21ラインを足し合わせた結果	76

6.16	ステージ速度 10 mm/sec 時-Y 方向スキャンの各ラインの投影結果 — ステージ速度 10 mm/sec で-Y 方向にスキャンを行った際の結果。CCD により撮像した像を 1 ラインごとに Y 軸方向に向かって投影した。それをガウシアンでフィットし、光量がピークになる検出器面上での位置を求めた。各データ点の統計誤差はポアソンエラーでつけている。 . . . . .	78
6.17	ステージ速度 10 mm/sec 時-Y 方向スキャンの各ラインの光量ピーク位置 — ステージ速度 10 mm/sec-Y 方向スキャンの各ラインの光量ピーク位置をプロットした。縦軸にカウント数、横軸にライン番号をとっている。 . . . . .	79
6.18	ステージ速度 10 mm/sec 時-Y 方向スキャンの 21 ラインを足し合わせた結果 . . . . .	79
6.19	ステージ速度 10 mm/sec 時の+Y 方向と-Y 方向の各ラインにおける光量ピーク位置についての比較 . . . . .	80
6.20	ステージ速度 10 mm/sec 時の+Y 方向と-Y 方向の全ラインの足し合わせにおける比較 . . . . .	80
7.1	+Y 方向のスキャンのみを足し合わせた QT イメージ . . . . .	84
7.2	+Y 方向のスキャンのみを足し合わせた EEF (左) と PSF (右) . . . . .	84
7.3	-Y 方向のスキャンのみを足し合わせた QT イメージ . . . . .	85
7.4	-Y 方向のスキャンのみを足し合わせた EEF (左) と PSF (右) . . . . .	85
7.5	両方向を足し合わせた QT イメージ . . . . .	86
7.6	両方向を足し合わせた EEF (左) と PSF (右) . . . . .	86
7.7	30 m ビームラインでの QT イメージ . . . . .	87
7.8	10 m ビームラインと 30 m ビームラインでの EEF の比較 . . . . .	88
7.9	10 m ビームラインと 30 m ビームラインでの PSF の比較 . . . . .	88
7.10	反射率シミュレーション . . . . .	91
7.11	バックグラウンドを差し引いた反射光のスペクトル . . . . .	92
7.12	ダイレクト、反射光のスペクトルの比較 . . . . .	93
A.1	10m ビームライン搭載 DCM 設計図 . . . . .	97

# 表目次

2.1	固定式 X 線発生装置の仕様	16
2.2	特性 X 線と対応するフィルター	17
2.3	エネルギーとブラッグ角との関係と測定時の電圧、電流値	21
2.4	ガスフロー型比例計数管の仕様	24
2.5	各ステージの仕様	26
3.1	可動式 X 線発生装置の仕様	37
3.2	10m ビームライン各ステージの仕様	44
5.1	第 2 ピンホール直径 10 mm 時の散乱光測定パラメーター	58
5.2	第 2 ピンホール直径 10 mm 時の散乱光測定結果	60
5.3	第 2 ピンホール直径 1.0 mm 時の散乱光測定パラメーター	61
5.4	第 2 ピンホール直径 1.0 mm 時の散乱光測定結果	62
5.5	第 2 ピンホール直径 0.5 mm 時の散乱光測定パラメーター	62
5.6	第 2 ピンホール直径 0.5 mm 時の散乱光測定結果	63
5.7	各第 2 ピンホールの直径における $F_{\text{scatter}} / F_{\text{direct}}$	64
6.1	サンプル XRT の仕様	66
6.2	ステージ速度 2 mm/sec 時の +Y 軸方向と -Y 軸方向の全ラインの足し合わせにおける光量ピーク位置	74
6.3	ステージ速度 10 mm/sec 時の +Y 方向と -Y 方向の全ラインの足し合わせにおける光量ピーク位置	81
6.4	各ステージ速度における結像位置のずれ量	81
7.1	全面スキャン時の測定条件	83
7.2	プラス方向、マイナス方向、両方向での結像中心と HPD	87
7.3	10 m ビームラインと 30 m ビームラインでの HPD についての比較	89
7.4	primary 反射鏡と理論値	90
7.5	シミュレーションパラメーター	90

# 第1章 X線天文学とX線望遠鏡

## 1.1 X線天文学

自分達の住む宇宙の果てがどうなっているのか、また、その形成はどのように為されたのか。これらを追い求め、理解することが天文学の目的である。そのためには天体の物理状態を知ることが必要不可欠である。

天体が放つ光即ち電磁波は天体からの多くの情報を持っており、これを観測することで我々は遠方の天体の物理状態を知ることができる。この電磁波は波長によって電波、赤外線、可視光、紫外線、X線、ガンマ線に分類することができ、X線領域を観測し、X線放射の起源やそのダイナミクスについて研究するのがX線天文学である。では、X線の波長域(0.1~100 keV)の天体からの電磁波を観測することはどのような物理を解明していくことに継るのであろうか。

X線の一つの特徴はエネルギーが高いことである。例えば、可視光と比べるとそのエネルギーは3桁も高い。これ程の高エネルギーは、1千万度~1億度の高温プラズマ領域や中性子星やブラックホール近傍の強い重力場、超新星爆発などの強い衝撃波による電子の加速など、物質の極限状態で生み出される。また、X線はもう一つの特徴として透過率が大きく、これにより、可視光領域では観測できない暗黒星雲や厚いガス雲の中に隠された天体を観測することが可能である。

しかし、X線は大気に吸収されてしまうため、観測機器を飛行体に搭載し大気圏外に出て観測する必要がある。このことがX線天文学を阻み、1962年のジャッコーニとロッシによるサウンディングロケットを用いた観測が行なわれるまで、太陽起源以外のX線を観測することはできなかった。しかし、それ以後の気球実験、さらには1970年の「*Uhuru*」衛星以降は数々のX線天文衛星が打ち上げられ、観測が行なわれてきた。その結果、現在の観測対象は、恒星のコロナから白色わい星、中性子星、ブラックホール候補天体、活動銀河核などの高密度天体、また超新星残骸、銀河団などの高温プラズマ天体などの多岐にわたる。

さらに、近年では地上の加速器では再現できない高エネルギーを生み出す、X線放射領域は、高エネルギー物理の検証の場として用いられるようになってきている。

## 1.2 X線天文学とX線望遠鏡

天体が放つX線の強度は最も明るいX線天体の1つである蟹星雲からでさえ、1 photon/cm<sup>2</sup>/sしかなく、地上の実験室でのX線強度から数桁から十数桁微弱なものである。観測される典型的なフォトンのカウントレートは1 counts/s程度であり、このため1つ1つのフォトンについて、その入射時刻、進行方向、エネルギー等の詳細な情報を測定する。このため1部例外はあるが、X線天文衛星には(X線望遠鏡またはコリメーター) + (エネルギー、時間分解能を持つ検出器)という組み合わせで観測機器が搭載されてきた。

1962年以降、数々のX線天文衛星が打ち上げられ、X線天文学は衛星の技術的進化と共に発展してきた。1970年代前半はコリメータ + ガス比例計数管といった組合せで、主な衛星として、「*Uhuru*」「*Ariel-5*」「*OSO-8*」「*HEAO-1*」がある。この世代の天文衛星は広い有効面積の観測器による検出限界の向上を図り、典型的な感度は1 mClab程度であった。その中でも、スダレコリメータを搭載した「*SAS3*」は、

その位置分解能により、銀河系内にあるX線源の位置を正確に決め、光学天体との同定を行なった。

しかし、1978年に打ち上げられた「*Einstein*」衛星によってX線天文学は劇的な進化を遂げることになる。これまでのコリメーター+検出器という組合せでは、検出器の開口面積を大きくすれば、目的の天体からのフォトンを開口面積に比例して多く集めることができるが、それと同時にバックグラウンドとなる、宇宙X線背景放射(CXB)も同じように増える。さらには、もう1つのバックグラウンドである荷電粒子等の宇宙線は、検出器の体積に比例して増えるため、検出器を大きくしても検出感度には限界があった。これに対して、「*Einstein*」衛星は、X線望遠鏡(以下XRT<sup>1</sup>と呼ぶ)+マイクロチャンネルプレートという組合せを初めて搭載し、この限界を打ち破ることに成功した。XRTによる角分解能を得ることで目的の天体以外の方向からのX線を除去でき、さらには小さな開口面積を持った検出器で多くのフォトンを集めることができるため検出感度(シグナルノイズ比:S/N比)が激的に改善され、検出感度0.1  $\mu\text{Clab}$ を達成したのである。

さらにその後、XRTは持たないが特徴的な検出器を持つ衛星として、日本の打ち上げた、9.5%@6 keVというこれまでの比例計数管の倍のエネルギー分解能を持つ、蛍光比例計数管を搭載した「てんま」、低いノイズを持つ4000  $\text{cm}^2$ という大面積の比例計数管を搭載した「ぎんが」などがある。

XRTを搭載した衛星として登場したのが、3秒角という高い角分解能を持った「*ROSAT*」である。この衛星は望遠鏡を搭載した衛星で初めて全天観測を行ない「*Uhuru*」衛星で観測したX線天体の200倍以上の10万個もの天体を発見することに成功した。さらに、90時間という長い周期の軌道を持つため、長時間の観測が可能だった「*EXOSAT*」がある。

また、撮像型蛍光比例計数管と共に、2%@6 keVという半導体検出器としては限界に近いエネルギー分解能を持つX線CCDを初めて焦点面に搭載し、0.1~10 keVのX線領域で世界初の撮像分光観測を可能にした「あすか」がある。この衛星の登場によって、銀河系中心付近からの蛍光鉄輝線の発見や超新星残骸や銀河団の重元素組成の測定に基づく、宇宙の化学進化の研究などの天文学上の成果が得られた。

さらに「*XMM*」「*Chandra*」などといった最新のX線天文衛星では、(秒角単位の角分解能を持つXRT)+(X線CCDとGrating等の分散型高分解能分光素子)という組合せになってきている。これにより、離角が秒角程度の重力レンズによるクローバーリーフの発見、Jetの加速機構の解明などX線天文学上重要な発見が為されている。

一方、2005年に打ち上げが成功した日本で5番目のX線天文衛星「すざく」はこれらとは異なり、高い集光力と優れたエネルギー分解能を持たせるという方向性をとっている。また、2013年には6番目のX線天文衛星「*NeXT*」の打ち上げが予定されており、従来の10 keV以下のX線に対応する軟X線望遠鏡に加え、80 keVまでのX線を集光、結像する硬X線望遠鏡が搭載される。これにより高エネルギー天体現象、即ち非熱的宇宙の全容の解明が期待されている。

図1.1に検出感度、角分解能、エネルギー分解能の進化を示す。

<sup>1</sup>X Ray Telescope の略。

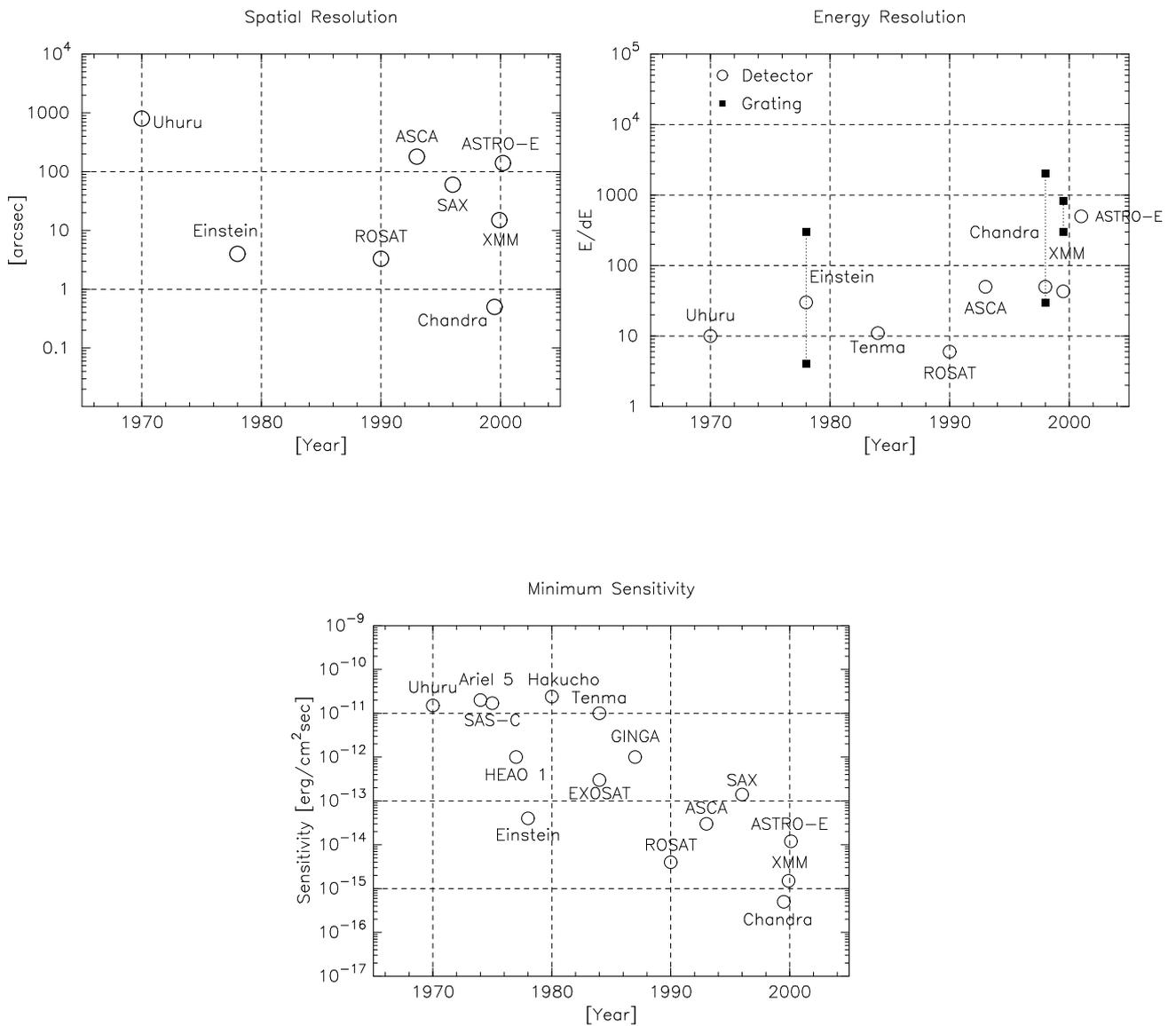


図 1.1: X線天文衛星の性能の変遷 (左上: 空間分解能、右上: エネルギー分解能、下: 検出感度)

### 1.3 X線望遠鏡に用いられる光学系—斜入射光学系

可視光で像をつくるには、レンズを利用した屈折光学系を用いるのが普通である。しかし、X線領域では、ほとんどの物質の屈折率が1に極めて近く、X線をほとんど屈折しない。そこで、X線領域では、鏡を用いた反射光学系を用いる。しかし、X線の直入射の反射率は非常に小さいので、X線を臨界角以下 (~1 degree 以下) の小さい角度で全反射させて集光する、斜入射光学系を用いる。

斜入射光学系の例(ウォルターI型)を、図1.2に示す。図1.2に示すように、ウォルターI型斜入射光学系では、回転放物面と回転双曲面の内面で入射X線を2回反射させ、焦点に集光させる。これにより、焦点距離(二つの曲面の接合部から焦点までの距離)を短くすることができる。

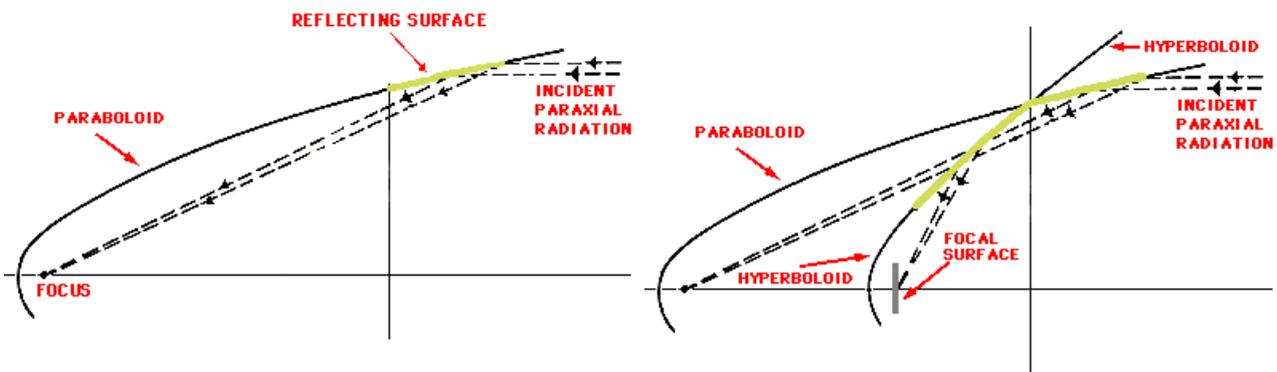


図 1.2: (左) : 回転放物面反射鏡、(右) : ウォルターI型反射鏡

### 1.4 X線望遠鏡の種類

斜入射光学系では、X線入射方向から見た鏡の見込む面積は小さくなり、鏡の実面積の 1/100 以下になる。そのため、集光力を増すには、鏡は1枚ではなく、図1.3に示すように、多数の鏡を同心円上に配置することが必要になる。

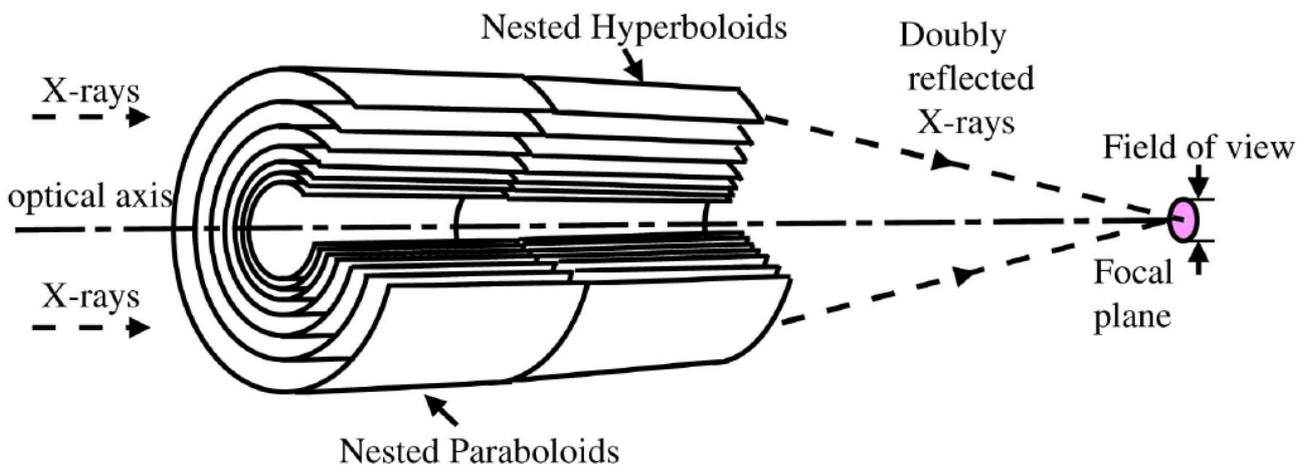


図 1.3: XRT の断面図—(複数の反射鏡を同心円共焦点配置に組み込んだ、斜入射型(Wolter-I)XRT の断面図)

### 1.4.1 「多重薄板型」

集光力をできるだけ大きくするため考案された望遠鏡として、「多重薄板型」X線望遠鏡がある。これは、基板の厚さを  $\sim 0.2\text{ mm}$  と極力薄くし、非常に多数 ( $\sim 200$  枚) の反射鏡を同心円状に並べたもので、軽量でありながら高い開口効率を実現する。鏡面基板は直接研磨せず、アルミニウム薄板に金のレプリカをとる方法 (レプリカ法) によって、平滑な鏡面を実現している。ただし、反射鏡は2次曲面ではなく、円錐面に近似して製作している。我が国では、あすか衛星をはじめ、Astro-E/E2 衛星と、このタイプの望遠鏡の開発を進めてきた。

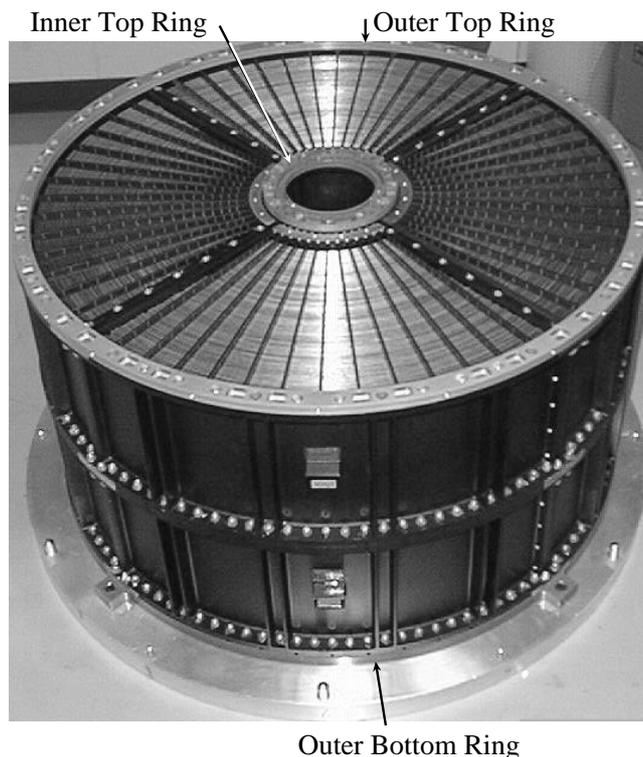


図 1.4: 「多重薄板型」X線望遠鏡—写真は Astro-E の XRT である。 $\sim 180\ \mu\text{m}$  という薄さの反射鏡 (基板: アルミニウム) が  $0.5\sim 1.2\text{ mm}$  間隔で 175 枚も並べられている。1 台  $20\text{ kg}$  という軽さで大有効面積を実現する。

### 1.4.2 「直接研磨型」

一方、望遠鏡の結像性能を重視した「直接研磨型」X線望遠鏡がある。これは、鏡面を直接切削、研磨し、正確な非球面 (放物面又は双曲面) 加工を行う。具体的には、ゼロデュアーガラス<sup>2</sup>を、小型工具を走査させ部分的に工具の滞留時間をコンピュータ制御することで、非球面形状に加工する。さらにその表面に金などを蒸着し、反射率を稼ぐ。

この方法で製作された反射鏡は、鏡面を正確な理想2次曲面に加工することができるため、非常に高い結像性能を実現することができる。実際に「直接研磨型」X線望遠鏡を搭載した *Chandra* では結像性能  $0.5$  秒角を達成している。しかし、加工のため、基板として用いるガラスの厚さを数  $\text{cm}$  程度必要とするため開口効率は非常に悪く、またその重量は非常に大きくなる。「*Chandra*」では XRT だけで  $1.5$  トンもの重さになる。

<sup>2</sup>熱膨張率が非常に小さく、宇宙空間のような苛酷な状況下でも安定して高分解能の結像性能を保つことができる。

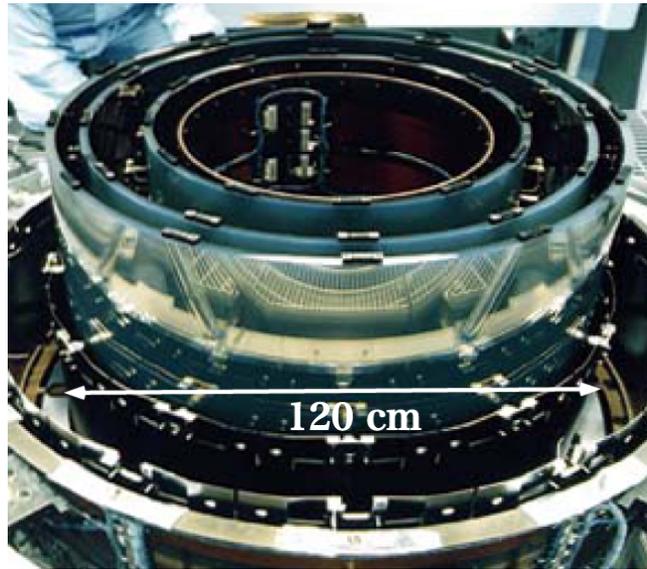


図 1.5: 「直接研磨型」X線望遠鏡— 写真は *Chandra* の XRT である。数 cm の厚さの反射鏡 (基板: ガラス) が 4 枚並べられている。鏡面を直接研磨しているため、結像性能が非常に良い。しかし、重さは 1 台で 1 トンもある。

## 1.5 X線望遠鏡の性能

XRT の性能は、大きく、集光力と結像性能によって表される。ここでは、この 2 つの性能を評価するために必要な物理量を定義する。

### 1.5.1 集光力 (有効面積)

XRT の集光力は、光軸方向から見た反射面の面積 (開口面積) に、反射率を掛けた有効面積と呼ばれる量で表す。有効面積  $S_{eff}$  は次の式で定義される。

$$S_{eff}(E) = \int S(\theta)R^2(\theta, E) \quad (1.1)$$

ここで、 $S(\theta)$  は一段目の反射鏡に入射角が  $\theta \sim \theta + d\theta$  の間にある開口面積で、 $R(\theta, E)$  は入射角  $\theta$ , エネルギー  $E$  の時の鏡面の反射率である。

ここで、有効面積を増大させるためには、光学望遠鏡の様に、焦点距離を一定にして口径を大きくしただけでは、外側ほど反射鏡への入射角が大きくなるので、反射率が落ち実質的な光量の増加は望めない。つまり、焦点距離を一定にした場合、臨界角を越えるほど口径を大きくすれば、それ以上口径を大きくしても有効面積が増えることはない。

そこで、XRT の口径とともに重要となるのが、口径内に占める反射面の割合 (開口効率) である。開口効率を上げるためには、鏡面基板の厚さをできるだけ薄くし積層枚数を上げればよい。

最後に、様々な衛星の有効面積の比較を図 1.6 に示す。

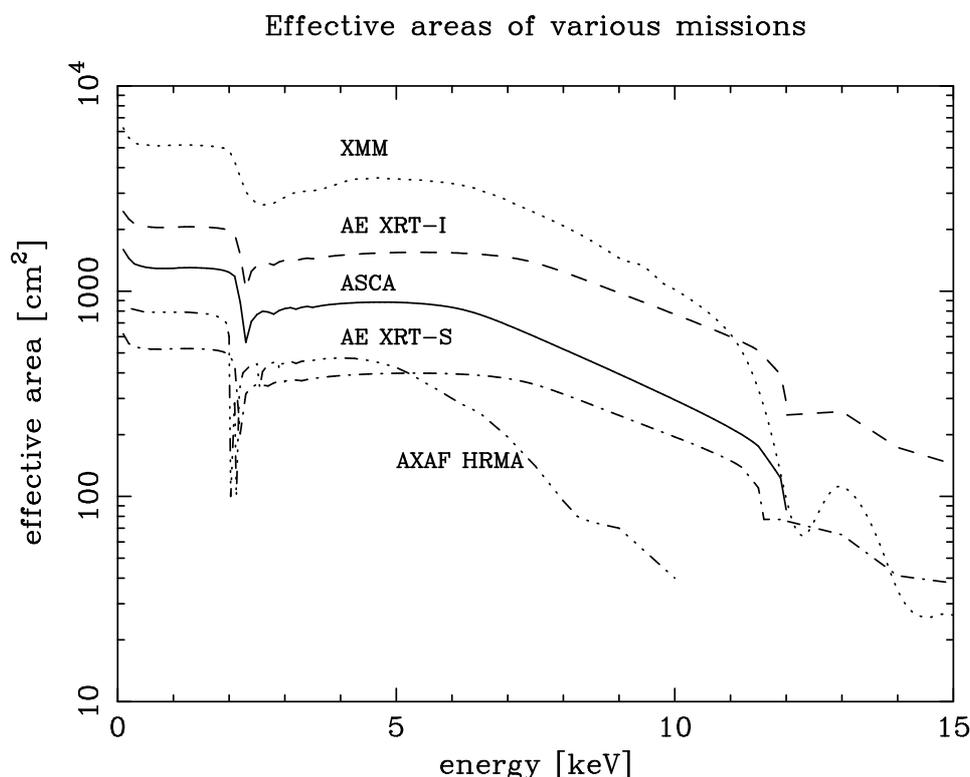


図 1.6: 様々な衛星に搭載される XRT の有効面積 (XRT-S は望遠鏡 1 台の有効面積、その他は mission 全体の有効面積である。) – AE は Astro-E の略である。

## 1.5.2 結像性能 (HPD、PSF、EEF)

結像性能の評価には、以下のような 3 つの物理量が用いられる。

### 1. HPD (Half Power Diameter)—全光量の 50% が含まれる円の直径

平行な X 線が XRT に入射し、焦点面上に作るイメージの例を図 1.7 に示す。理想的には、イメージは 1 点に結像するが、実際には、図 1.7 のように、広がりを持ったイメージとなり、この広がり的大小で結像性能 (角分解能) が決まる。この広がり的大小を表すのに、HPD(Half Power Diameter) が用いられる。これは、全光量の 50% が含まれる円の直径である<sup>3</sup>。HPD の値が小さいほど、結像性能が良い。

### 2. PSF (Point Spread Function)—半径 $r$ の円周上に含まれる単位面積当りの光量

焦点面に作られる 2 次元のイメージ上で、半径  $r$  の円周上に含まれる単位面積当りの光量を PSF と呼ぶ (図 1.8)。これは、無限遠にある点源から放射された X 線が、XRT の焦点面に作る輝度分布であり、

<sup>3</sup>一般に、分解能を表すのに FWHM(Full Width at Half Maximum) が使われる。しかし、斜入射光学系の XRT の輝度分布は中心部に鋭いピークを持ち、中心付近の強度分布については ガウス分布/半径の関数型で表すことができる。すると、半径が小さくなると、ピークの輝度は  $1/r$  で高くなる。これは位置分解能がより良い焦点面検出器を使えば、検出器の 1 画素あたりの面積とともに  $r$  がさらに小さくなるので、ピークの高さはより高くなることになる。つまり使用する検出器の位置分解能によって、FWHM の値が異なってしまう。これでは斜入射光学系の結像性能を評価することはできない。一方、HPD は全光量の 50% を含む円の直径であり、全光量にのみ依存した値なので、検出器の位置分解能に依存しない。このため、斜入射光学系の望遠鏡を評価するには HPD が適している。

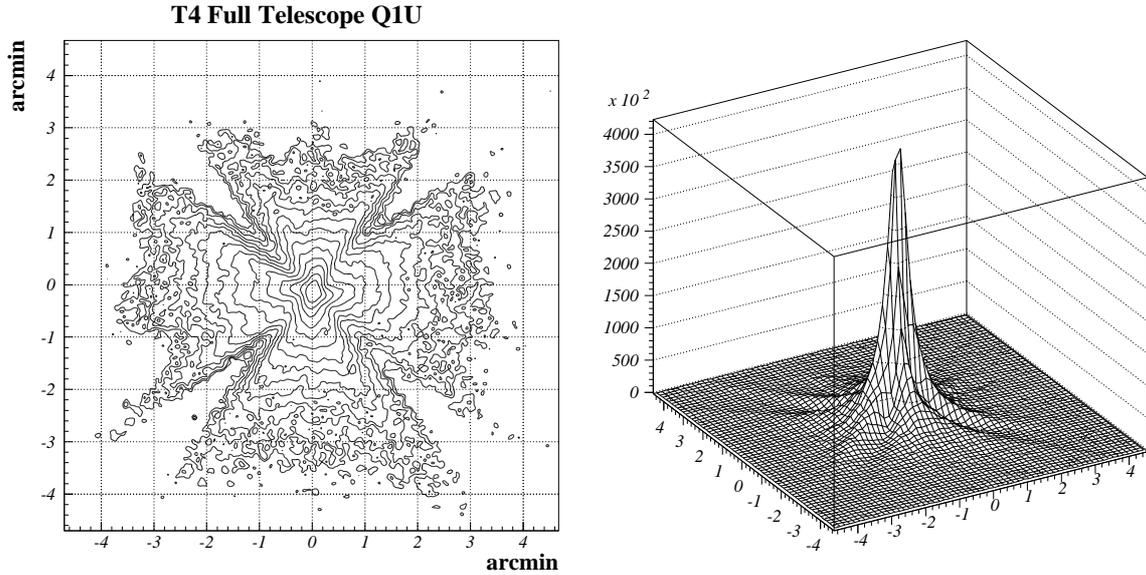


図 1.7: 焦点面のイメージ。等高線で表したものの(左)と、3次元的に表したものの(右)。

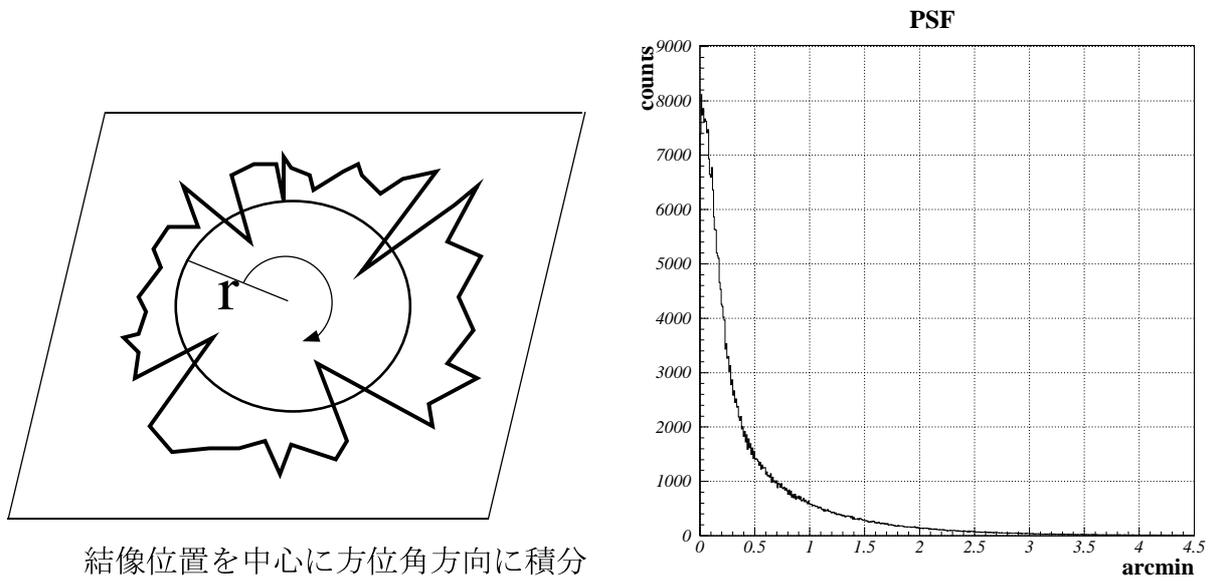
PSFのコアの部分が鋭いピークを持つほど、結像性能が良いといえる。

## 2. EEF (Encircled Energy Function)—半径 $r$ の円内に含まれる光量

結像中心から半径  $r$  の円内に含まれる光量を、EEF と呼ぶ。EEF は以下の関係式に示したように PSF の積分形となっている。

$$EEF(r) = \int_0^r 2\pi r PSF(r) dr \quad (1.2)$$

EEFのプロットにおいて、縦軸が50%の時の横軸の値(半径)を2倍した値がHPDに相当する。最後に、PSF、EEF、HPDの関係について図1.9にまとめる。図1.9は、入射したX線の全光量を1と規格化した時の、PSF、EEFの $r$ 依存性を表している。PSFのピークが鋭いもの、EEFの立ち上がりが鋭いものが結像性能が良いといえるが、これを定量的に表すためにHPDを用いている。図1.9の場合では、EEFが0.97 arcminの時に全光量の50%になっているので、HPDはその2倍の1.94 [arcmin]となる。



結像位置を中心に方位角方向に積分

図 1.8: Point Spread Function (1次元)。焦点面のイメージを動径方向に積分し(左),1次元の PSF を作る(右)。

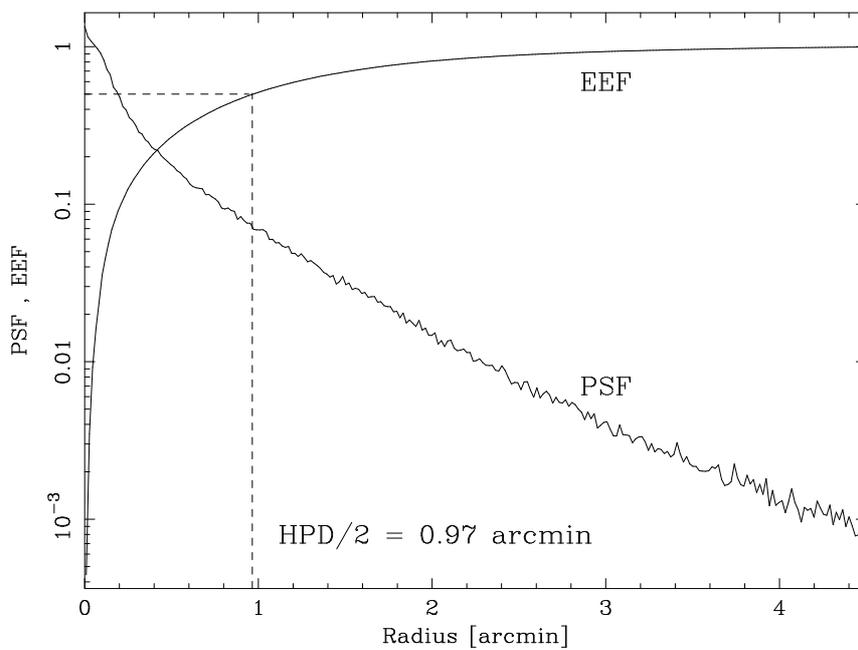


図 1.9: PSF、EEF、HPD の関係



## 第2章 X線望遠鏡性能評価システム

本章では、地上での XRT の性能評価方法と使用される測定システムについて説明する。その後、現在宇宙科学研究本部にて実際に使用されている測定システムについて解説を行う。

### 2.1 地上での X線望遠鏡性能評価の目的

XRT の性能を軌道上で最大限に引き出すためには、その特性を十分把握しておく必要がある。そこで XRT 単体の性能評価を衛星搭載前に予め地上にて行うことが重要になる。

### 2.2 システムに求められる機能

XRT の性能評価をする上で測定対象となるのは、1.5 節で述べた結像性能と有効面積であり、使用される測定システムは以下に示す 3 点の項目を満たしていることが必要である。

#### 高い平行度の確保

観測時、天体からは平行 X 線が XRT の全面に入射してくる。しかし、地上ではそのように大きな平行 X 線を作り出すことが困難である。そこで細く絞り、平行度を高めたペンシルビームで XRT の全面を隙間なく走査することによって、望遠鏡全面に平行 X 線が入射している状態を擬似的に作り出す。この測定方法をラスタースキャンと呼び、結像性能と有効面積どちらも基本的にはラスタースキャンにより測定される。

図 2.1 にラスタースキャンの概念図を示す。

#### X線の単色化

既知のエネルギーで測定を行うことができることは、地上において XRT の性能評価を行うことの大きなメリットである。それは XRT の特性が入射する X 線のエネルギーにより変化するためである。したがって測定に使用する X 線はできる限り単色なものであることが望ましい。

#### 散乱光の抑制

20 keV 以下の軟 X 線領域で性能評価を行う際、散乱光<sup>1</sup>による影響が無視できなくなる。したがって軟 X 線領域での測定を視野に入れている場合、測定システムの中に散乱光を抑制する機能を備えていることが必要である。

<sup>1</sup>本研究ではペンシルビームとなって XRT に入射してくる X 線をダイレクト光、それ以外のものを散乱光と定義する。

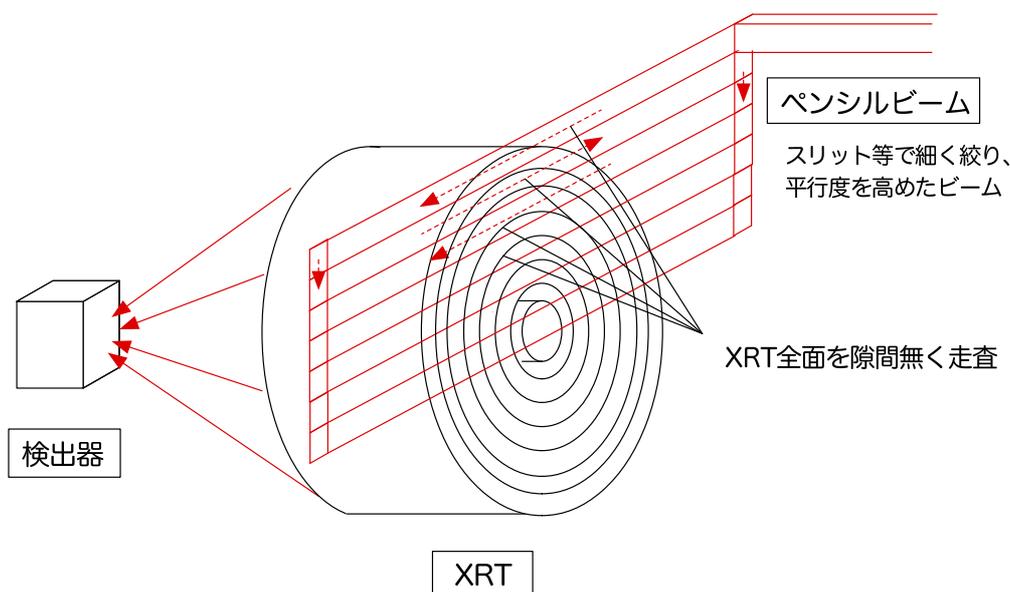


図 2.1: ラスタースキャン概念図 — 測定は Full Telescope または Quadrant 単位で行われる。図は Full Telescope を測定する場合。

## 2.3 宇宙科学研究本部 30m ビームライン

### 2.3.1 30m ビームライン概要

従来、宇宙科学研究本部では XRT の性能評価に同敷地内に設置されている 30m ビームラインを用いてきた。XRT の性能評価に使用するエネルギー領域 ( $\sim 10$  keV) では、大気中の分子による吸収や散乱のために、X 線は 30m もの距離を進むことができない。そこでシステム全体を真空槽の中に入れていた。詳しくは 2.3.8 で述べる。X 線源には位置の可変機構を持たない固定式の発生装置を採用しており、ラスタースキャンを行う際には XRT と検出器を同時に移動させる。30m ビームラインでの XRT の測定方法については 2.3.9 にて詳しく述べる。座標軸については以下のように定義されている。X 線の上流 (固定式発生装置側) から下流 (検出器側) 方向に X 軸、地面から鉛直方向上向きに Z 軸を定義する。右手系を採用するために、Y 軸方向は上流から下流側を見て、水平方向に右から左に向かう向きになる。回転系については右ねじが進む向きに回転させる方向を正の向きと定義する。また、図 2.3 のように各 Quadrant の位置を U、W、D、C という 4 つのサイドで定義している。

そして、30m ビームラインでは 2.2 節で述べた XRT の性能評価を行うシステムとして必要な 3 項目を以下の方法で満たしている。

#### 高い平行度の確保

固定式発生装置からのビームは、陰極ターゲット面の数 mm 角の領域<sup>2</sup>を焦点として発生する。従って、例えば数 m 先で口径の大きな X 線ビームを得ようとするとき、完全な平行光にはならず拡散光になってしまう。そこで、30m ビームラインでは平行光を得るために以下の 2 通りの方法を用いている。

1 つ目は四極スリットによって細く絞ったペンシルビームである。固定式発生装置から出射されたビームは 30m 先の四極スリットによって典型的には  $2 \times 2$  mm<sup>2</sup> 角まで絞られ、XRT に入射する。この場合、

<sup>2</sup>宇宙科学研究本部 30m ビームラインの固定式 X 線発生装置の実効焦点の大きさは、 $0.1 \times 0.1$  mm<sup>2</sup> である。

ビーム平行度は固定式発生装置の実効焦点を点源と見なすと、約 14 arcsec の平行度が達成される。詳しくは 2.3.5 項にて述べる。

2 つ目は逆望遠鏡によって作られる口径 20 cm の一様光である。一様光では Quadrant (XRT の 1/4) の約 1/3 を一度に照射することが可能となる。但し逆望遠鏡はカセグレン式直入射反射鏡なので、エネルギーの低い C-K X 線に対してしか使用することができない。

### X 線の単色化

30m ビームラインには数種類のフィルターと二結晶分光器（以下 DCM<sup>3</sup>）が設置されており、用途により使い分け、単色化を行っている。それぞれについての詳細な説明は 2.3.3 項、2.3.4 項で述べる。

### 散乱光の抑制

30m ビームラインは主に軟 X 線領域での測定が行われるため、散乱光を抑制する必要があるが、これについても四極スリットがその役割を担っている。四極スリットによりビームを絞る際、ダクトのダイレクト光パス以外の部分は遮蔽されるため、これにより XRT へ散乱光が入射するのを防ぐことができる。

図 2.2 に 30m ビームラインの各チェンバの構成を、図 2.3 に全体の模式図を示す。

---

<sup>3</sup>Double Crystal Monochromater

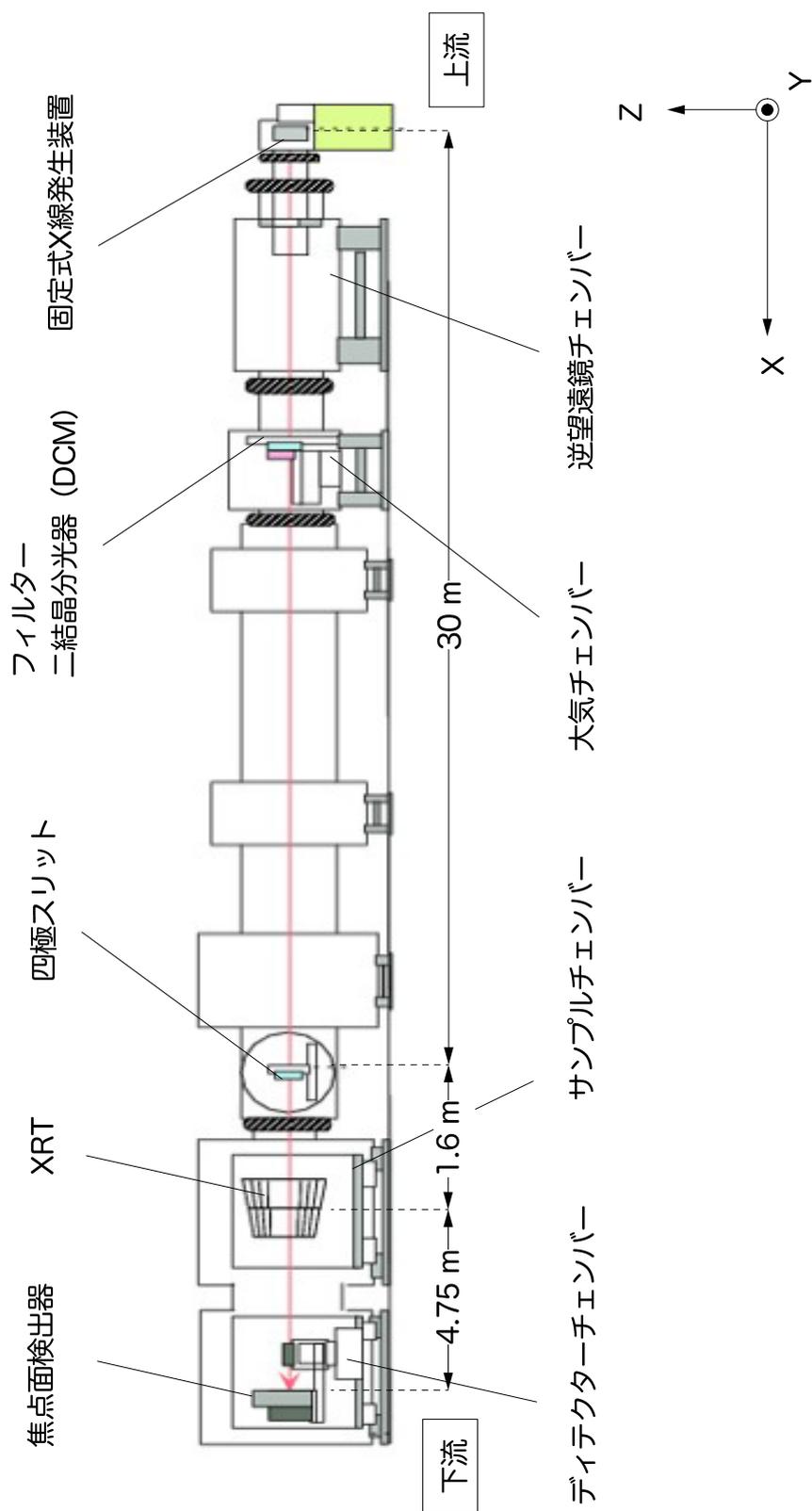


図 2.2: 30m ビームラインのチェンバ構成 — 焦点距離 4.75 m の XRT の場合を例として示す。

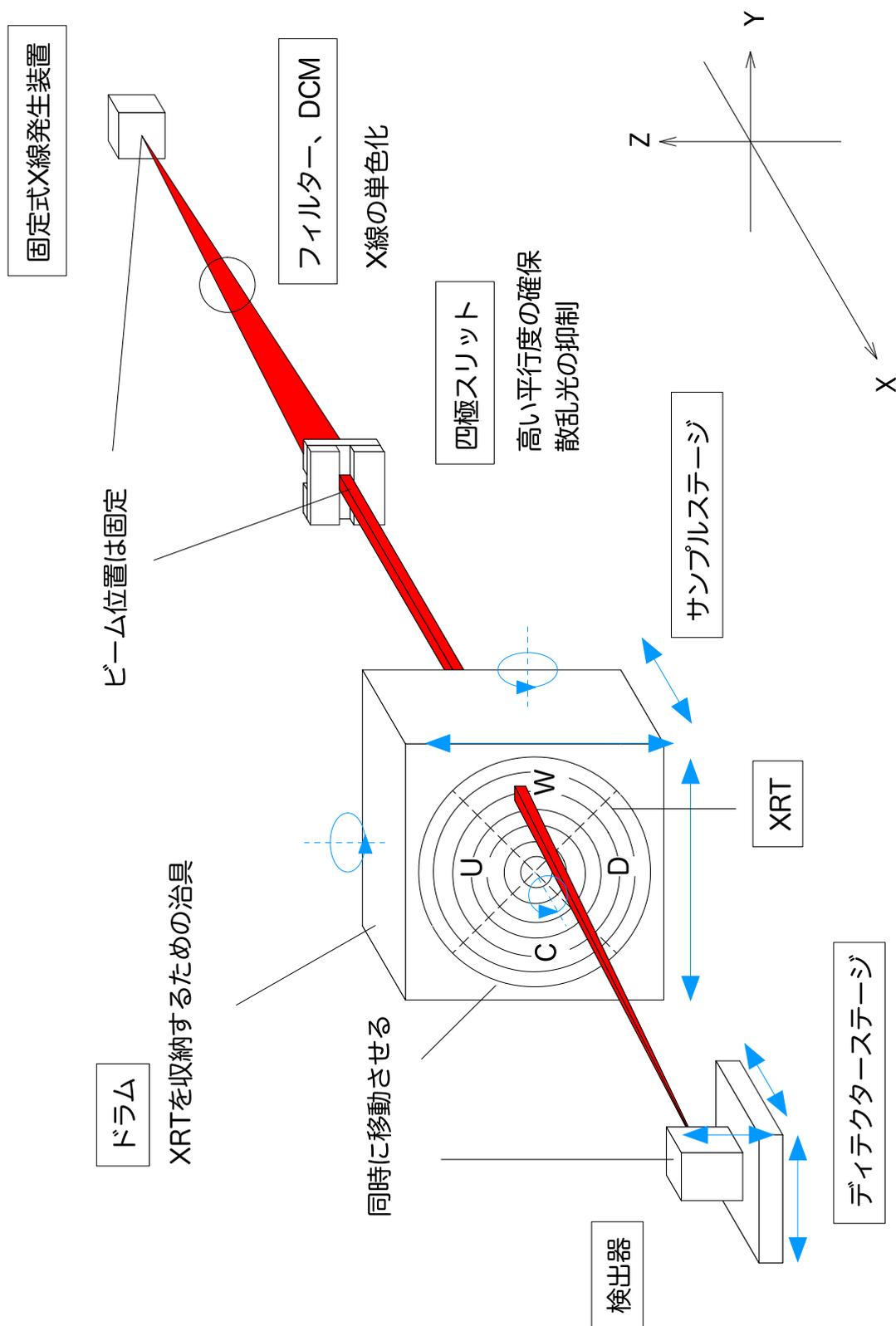


図 2.3: 30m ビームライン模式図 — 青い矢印はステージの可動方向を示す。

## 2.3.2 固定式 X 線発生装置

30m ビームラインに採用している固定式発生装置は、水冷式回転対陰極型の理学電機製ロータフレックス (RU-200) である。X 線発生の原理は次のようになっている (図 2.4)。まず陽極であるフィラメントを加熱することによって熱電子を発生させる。この熱電子は、回転する陰極ターゲットとの間にかげられた管電圧によって加速され、ターゲットに衝突する。この時制動放射のメカニズムによって電子の受けた加速度と垂直方向に電磁波が発生する。管電圧は kV のオーダーなので、発生する電磁波は X 線領域が主となる。一方でターゲットに蒸着された金属の内殻電子を弾き飛ばしめるので、外殻電子のエネルギー準位との差にしたがった特性 X 線も発生する。

30m ビームラインでの測定に用いるターゲット物質としては、C-K $\alpha$ (0.282 keV)、Al-K $\alpha$ (1.49 keV)、Ti-K $\alpha$ (4.51 keV)、Cu-K $\alpha$ (8.04 keV)、Pt-L(9.44 keV) の 5 種類である。照射された熱電子のターゲット上でのスポットサイズは 10 $\times$ 1.0 mm であるが、X 線の出射方向 (X 軸) に対してターゲットの回転軸は 6 $^\circ$  傾けて取り付けられているために、下流側から見込むビームの実効焦点サイズは 1.0 $\times$ 1.0 mm になる。また X 線ビームの強度とエネルギー領域は、フィラメント電流と管電圧を調整することで制御している。固定式発生装置のスペックを表 2.1 に示す。

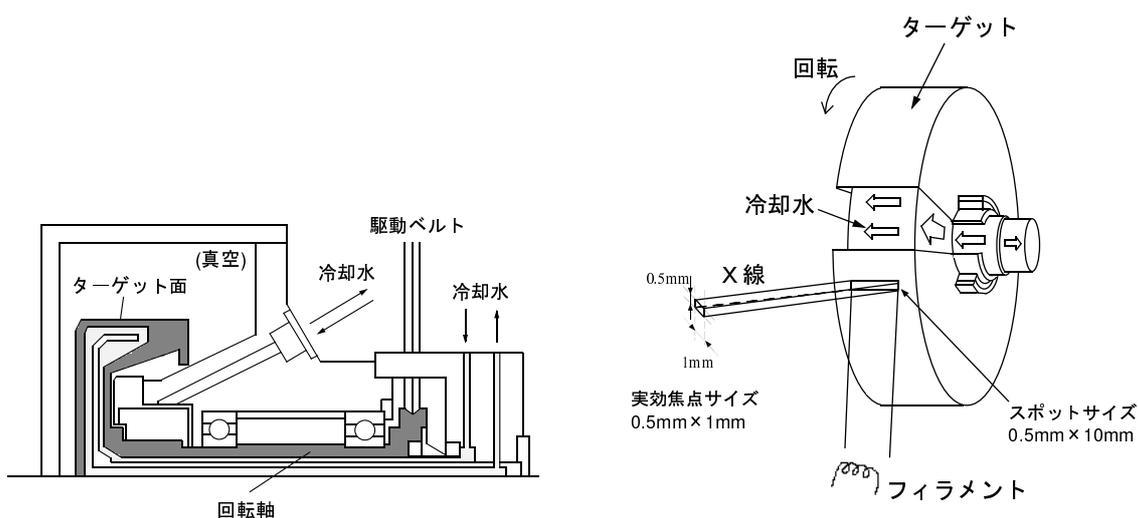


図 2.4: 固定式 X 線発生装置の構成図

表 2.1: 固定式 X 線発生装置の仕様

最大定格出力	60kV 200mA
管電圧設定	5 ~ 60kV
管電流設定	10 ~ 200 mA
ターゲット回転数	6000 rpm
X 線源サイズ	0.5 (Z) $\times$ 10 (Y) mm <sup>2</sup>
実効焦点サイズ	0.5 (Z) $\times$ 1.0 (Y) mm <sup>2</sup>
X 線ビーム強度の安定性	< 3% (立ち上げから 1 時間後)

2.3.3 フィルター

固定式発生装置からの X 線は、前述したように特性 X 線と制動放射による連続 X 線からなるが、X 線の正反射及び散乱成分は強いエネルギー依存性を持っているために、測定にはできる限り単色な X 線を用いる方が良い。このために大気チェンバ 内には数種類のフィルターが設置されており、目的とする特性 X 線以外のエネルギーの連続 X 線をフィルターで取り除くことによって単色化を行なっている。フィルターの構成を図 2.5 に示す。

透過型フィルターは物質の吸収端における吸収係数の急激な変化を利用した、最も簡単な分光素子である。各フィルターの K 吸収端が、目的とする特性 K-X 線のエネルギーのすぐ上に来ていることを利用して、特性 X 線より高エネルギー側の連続 X 線を取り除くことができる。しかし低エネルギー側の連続 X 線及び Kβ 線は除去することができない。XRT の性能評価に用いられる特性 X 線とその際に使用するフィルターの種類を表 2.2 に示す。また各フィルターの透過率を図 2.6 に示す。

表 2.2: 特性 X 線と対応するフィルター

特性 X 線	フィルター物質	フィルターの厚さ [μm]
Al-Kα(1.49keV)	Al	15
Ti-Kα(4.51keV)	Ti	50
Cu-Kα(8.04keV)	Ni	40
Pt-L(9.44keV)	Ni	40

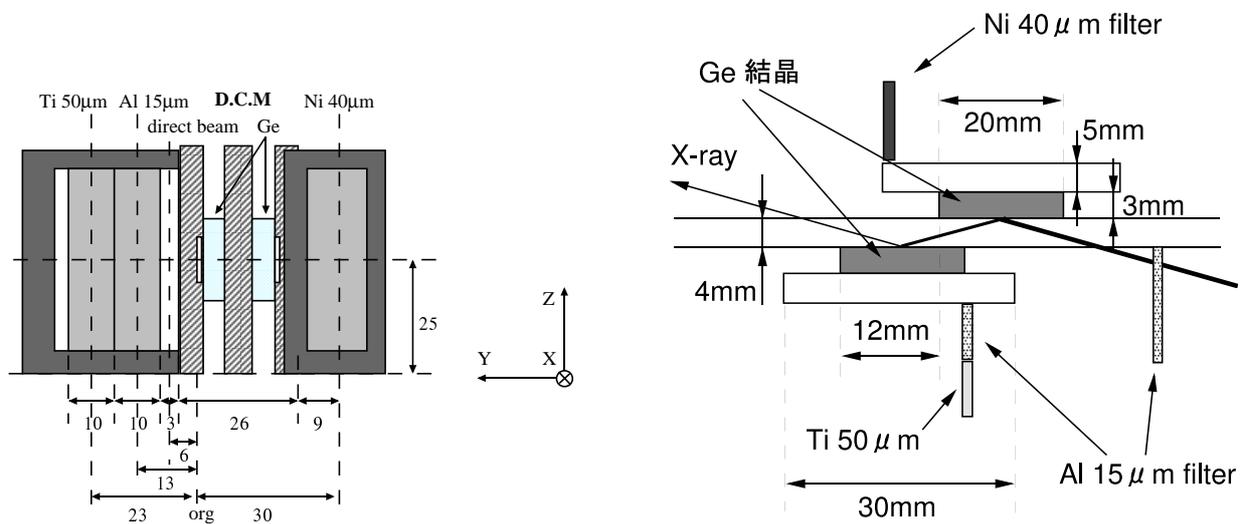


図 2.5: 大気チェンバ 内のフィルターの配置図 — 固定式発生装置側からディテクターチェンバ を見た時の様子 (左)、上 (+Z 方向) から見た様子 (右)。

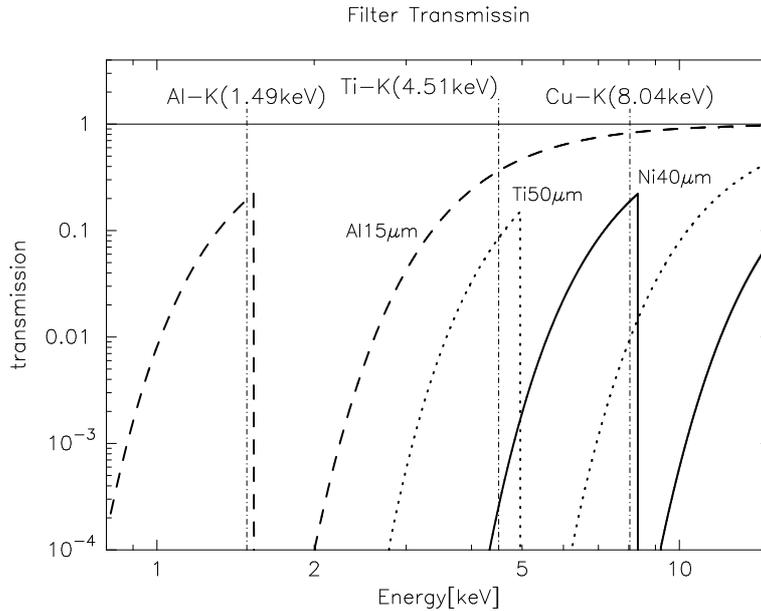


図 2.6: 各フィルターの透過率

### 2.3.4 30m ビームライン搭載 DCM

大気チェンバには DCM が設置されている。これはブラッグ反射 ( $\lambda = 2d\sin\theta$ ) を利用した分光器である。1999 年 7 月に DCM が 30m ビームラインに設置され、以降 Pt の蛍光 X 線を用いた測定が可能となった。DCM は他の波長においても、フィルターでは混入の防げない吸収端より低エネルギー側の連続成分をカットすることができる。特に XRT の有効面積が急激に減少していく  $E = 10$  keV 付近の測定を行なえることは重要であり、さらに詳細な応答関数の作成が可能となる。

#### 30m ビームライン搭載 DCM の構造

DCM は一体加工された厚さ 3 mm の Ge(220) の結晶面を平行に向かい合わせた形をしており、入射した X 線は 2 回のブラッグ反射によって単色化される。この一對の結晶が回転ステージ (A- $\theta$  軸ステージ) の上に乗っており、さらにこのステージが並進ステージ (A-Y 軸ステージ) に乗っている。並進ステージによって、金属フィルターと DCM との切替えを行ない、回転ステージによって入射エネルギーに対応した角度に結晶面を制御する。また、図 2.7 のように回転ステージの中心に第 1 結晶面<sup>4</sup>が配置されており、固定式発生装置から入射してくる X 線が常に第 1 結晶面の同じ位置に当るよう設計されている。回転ステージの最小ピッチは 7.2 arcsec である。これは、図 2.8 に示したように Cu-K $\alpha_1, \alpha_2$  を区別することができる。

<sup>4</sup>2 つの結晶の内、1 回目のブラッグ反射を起こす結晶のことを言う。同様に 2 回目に起こす結晶のことを第 2 結晶と言う。

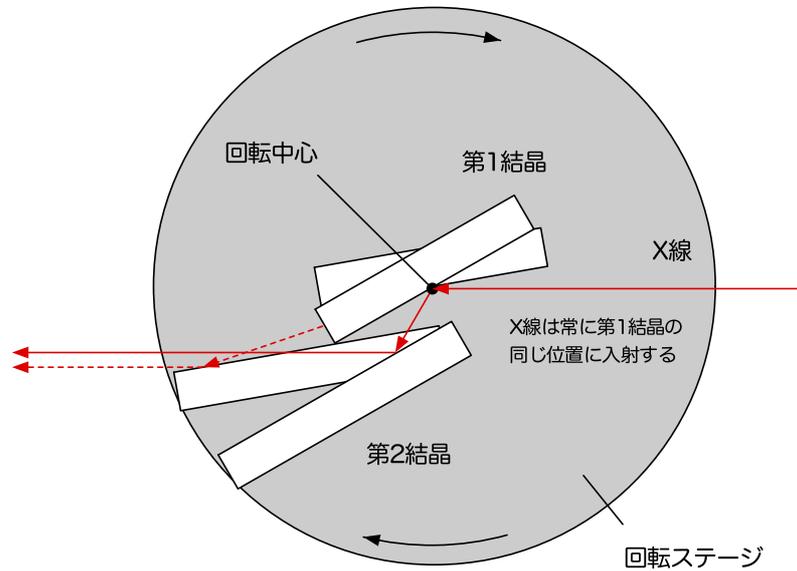


図 2.7: 30m ビームライン搭載 DCM の結晶配置図 — A- $\theta$  軸ステージの中心に第 1 結晶面が置かれており、X 線は常に第 1 結晶の同じ位置に入射する。

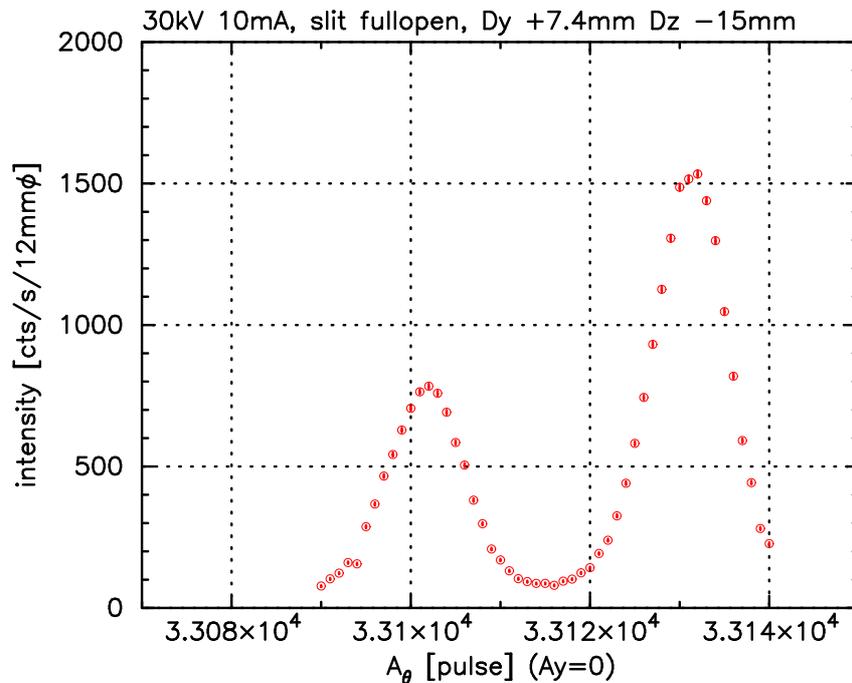


図 2.8: Cu-K $\alpha$ (8.04 keV) 付近のロックンクカーブ — DCM を回転させ、入射角度を変えていったときの光量変化を表している。30m ビームライン搭載 DCM は Cu-K $\alpha_1, \alpha_2$  を区別することができる。

## X 線の出射位置

DCM に入射した X 線は 2 回反射のため、図 2.9 のようにある距離  $\Delta x$  だけずれた位置に出射されることになる。この  $\Delta x$  は図 2.9 のように X 線と第 1 結晶との交点を A、第 2 結晶との交点を B とし、線分 AB の距離を  $a$ 、入射角度を  $\theta$ 、第 1 結晶と第 2 結晶間の距離を  $b$  とすると次のように表される。

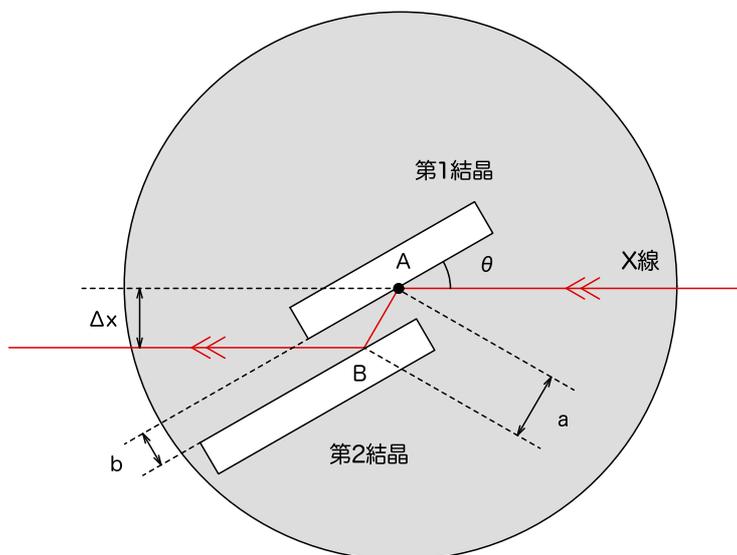


図 2.9: DCM での 2 回反射 — DCM に入射した X 線は DCM 前後で  $\Delta x$  ビームと垂直な方向にずれる。

$$\Delta x = a \times 2 \sin \theta \cos \theta \quad (2.1)$$

また、

$$a = \frac{b}{\sin \theta} \quad (2.2)$$

であるので、これを式 2.1 に代入すると

$$\Delta x = \frac{b \times 2 \sin \theta \cos \theta}{\sin \theta} = 2b \cos \theta \quad (2.3)$$

となる。したがって DCM に入射した X 線は入射位置から  $2b \cos \theta$  離れた位置に出射される。

## DCM のアラインメント手順

DCM を使用する際には以下の手順でアラインメントを行う (図 2.10 参照)。

1. DCM を固定式発生装置からの X 線に対して平行になるようアラインメントをとる。そのために第 1 結晶 (回転中心にある結晶) に X 線を当てた状態で DCM の角度を変化させ、光量が最も高くなる角度を求める。
2. DCM を 180 degree 回転させた後、再度角度を変化させ、光量が最も高くなる角度を求める。(1 の確認)

3. 再びDCMを180 degree回転させる。その後第1結晶(回転中心にある結晶)がビームを半分に切る位置を求める。そのためにDCMを並進方向に移動させていき、光量が全体の1/2になる位置を求める。
4. 目的とするエネルギーのブラッグ角を算出し、DCMの角度を合わせる。
5. 検出器をX線出射位置に合わせる。その後、ロッキングカーブについての測定を行い、精密にブラッグ角を求める。

DCMを導入することによって、99%という非常に優れた単色化率を得ることができる。しかし、2回のブラッグ反射によって得られる特性X線の強度が低下するため固定式発生装置の電流・電圧を上げてX線のビーム強度を高くする必要がある。各エネルギーに対応するブラッグ角と、測定時の固定式発生装置の電圧、電流値を表2.3にまとめる。また、Geの結晶格子間隔(0.2 nm)が1.49 keVのX線波長(約0.8 nm)の1/2よりも小さいためブラッグ反射を起こさず、1.49 keVの特性X線は利用できない。

表 2.3: エネルギーとブラッグ角との関係と測定時の電圧、電流値

	エネルギー [keV]	ブラッグ角 [degree]	電圧 [kV]	電流 [mA]
Ti-K	4.51	43.4	20	50
Cu-K	8.04	22.6	30	50
Pt-L	9.44	19.2	40	100

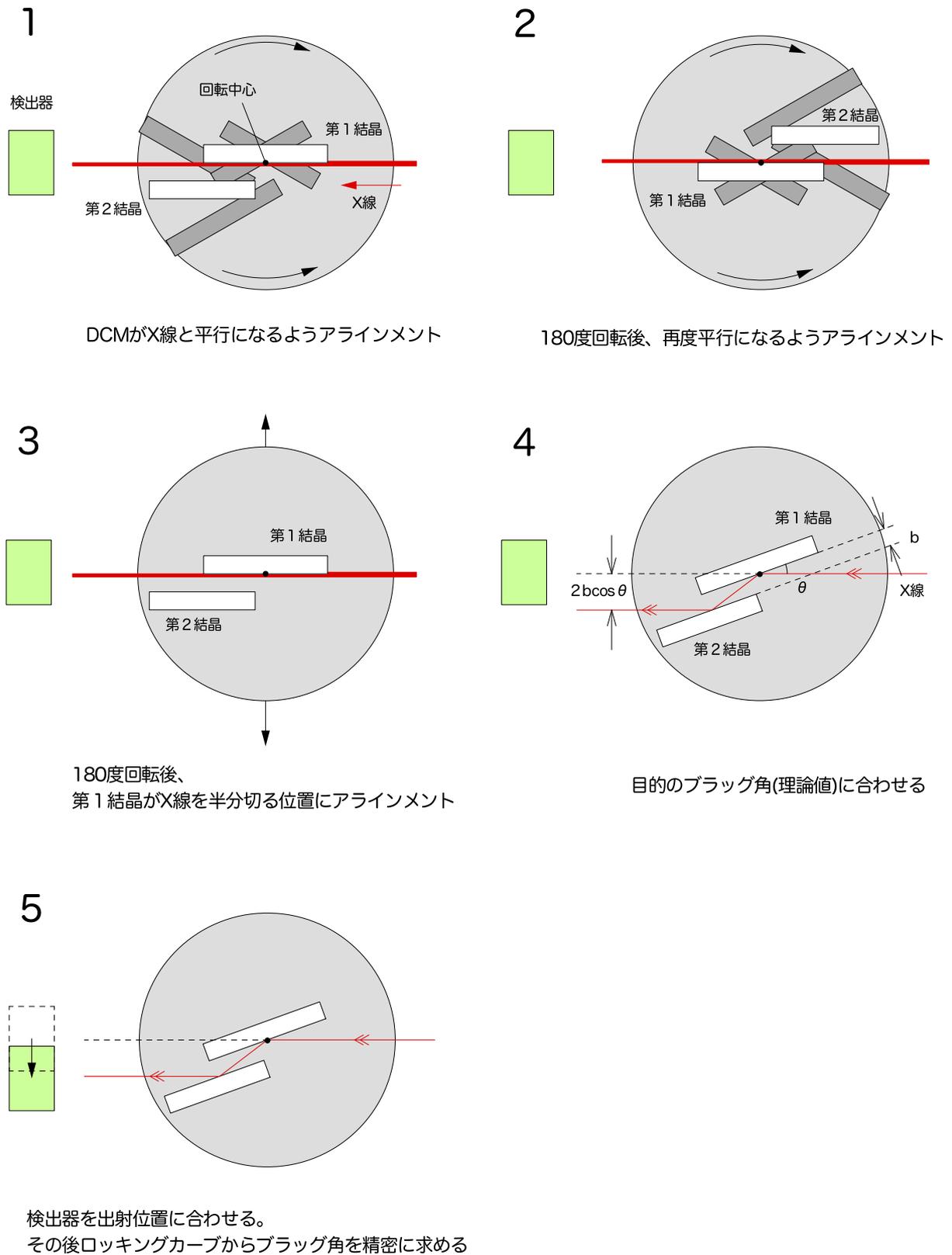


図 2.10: DCM のアラインメント手順

## 2.3.5 四極スリット

固定式発生装置からの X 線ビームは、点源から発生するので厳密に言えば拡散光となる。そこで、固定式発生装置から 30m 先に設置されている四極スリットで X 線ビームを絞り、高い平行度を確保する。四極スリットの大きさは測定内容によって適当に選択する。例えば、 $2 \times 2 \text{ mm}^2$  角に X 線ビームを絞った場合には、その平行度は、

$$2 \times \tan^{-1} \left( \frac{W_{slit} \times 0.5}{D_{30}} \right) = 2 \times \tan^{-1} \left( \frac{1}{30000} \right) = 13.75 [\text{arcsec}] \quad (2.4)$$

となる。ここで、 $W_{slit}$  は四極スリットの幅、 $D_{30}$  は X 線発生装置と四極スリット間の距離 (30m) である。特に XRT の結像性能を測定する場合には、有効面積や迷光の測定の時よりも X 線ビームを小さく絞る必要がある。四極スリットの全体図を図 2.11 に示す。四極スリットは上下・左右の 2 組のプレートから成り、縦横独立にモーターで稼働させることができる。さらに、四極スリット全体を左右方向に移動することができるが、固定式発生装置からの X 線ビームパスは変化しないので、ビームラインの系に四極スリットの軸を合わせた後は動かさない。逆望遠鏡を用いた C-K X 線による測定では、四極スリットを一様光のパス上から外すことができないので、四極スリット全体を取り外す必要がある。上下・左右方向のスリットの移動範囲は共に 0.2~10 mm で、再現性は十分にある。

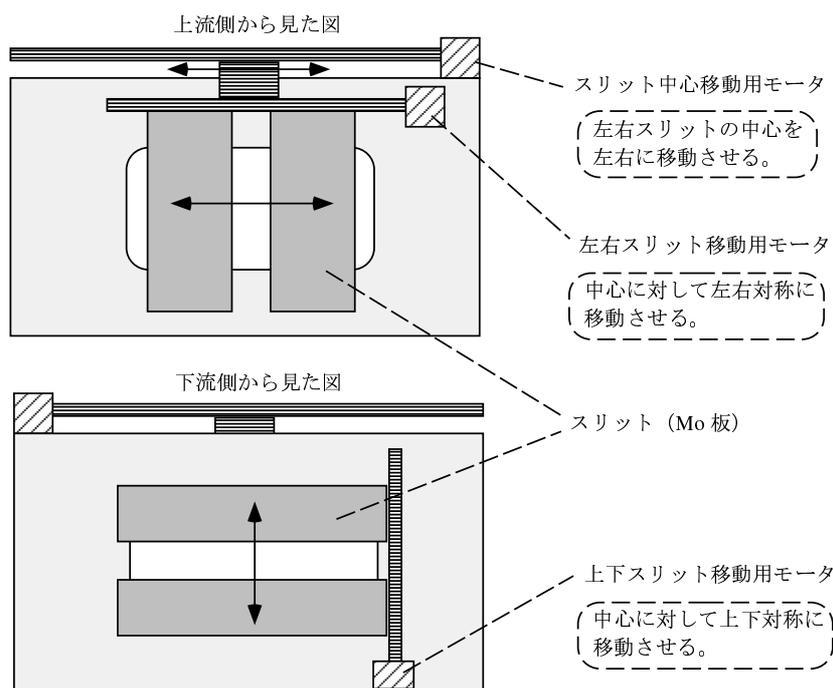


図 2.11: 四極スリット

### 2.3.6 焦点面検出器

#### ガスフロー型比例計数管 (PC)

30m ビームラインにおいて使用されている比例計数管はガスフロー型であり、P10 ガス (Ar: 90 %、CH<sub>4</sub>:10 %) を大気圧で使用する。比例計数管は位置撮像能力はないが、分光測定が可能である。表 2.4 に比例計数管の仕様をまとめる。

表 2.4: ガスフロー型比例計数管の仕様

使用ガス	P10 ガス (Ar:90%、CH <sub>4</sub> :10%) 大気圧で使用
ガス深さ	20 mm
X 線入射窓	厚さ 15[ $\mu$ m] アルミナイズドマイラー 直径 12.0 mm
陽極芯線	直径 50 $\mu$ m タングステン
印加電圧	2100 V (C-K $\alpha$ の場合は 2200 V、Ti,Cu の場合は 2000 V)
エネルギー範囲	~12.3 keV (検出効率 10%以上)
エネルギー分解能	~45% (Al:1.49keV) ~30% (Ti:4.51keV) ~20% (Cu:8.04keV)
線形増幅器の増幅率設定	Al : 100 $\times$ 0.5, Ti : 50 $\times$ 0.5, Cu : 50 $\times$ 0.5

#### 背面照射型 CCD カメラ (CCD)

CCD とは Charge Coupled Device (電荷結合素子) の略であり、本来は電荷を移動させるためのデバイスを意味する。現在 30m ビームラインには浜松ホトニクス製背面照射型 X 線 CCD カメラシステムが搭載されている。この CCD カメラは受光領域と電荷転送部が同じフルフレーム転送方式である。一辺 24  $\mu$ m の正方形ピクセル 1024 $\times$ 1024 個からなっていて、X 線望遠鏡に対して 19 $\times$ 19 arcmin<sup>2</sup> の立体角をカバーしている。CCD は 1.1 arcsec の位置分解能をもった撮像能力があるために、サンプルのアラインメントやサンプルからの反射 X 線の Specular 位置を確認するのに使われる。また暗電流を減らすために、ペルチェ素子を用いて -70 C° まで冷却して使用する。図 2.12 に前面照射型と背面照射型 CCD の断面図及び電荷転送方式の概念図を示す。

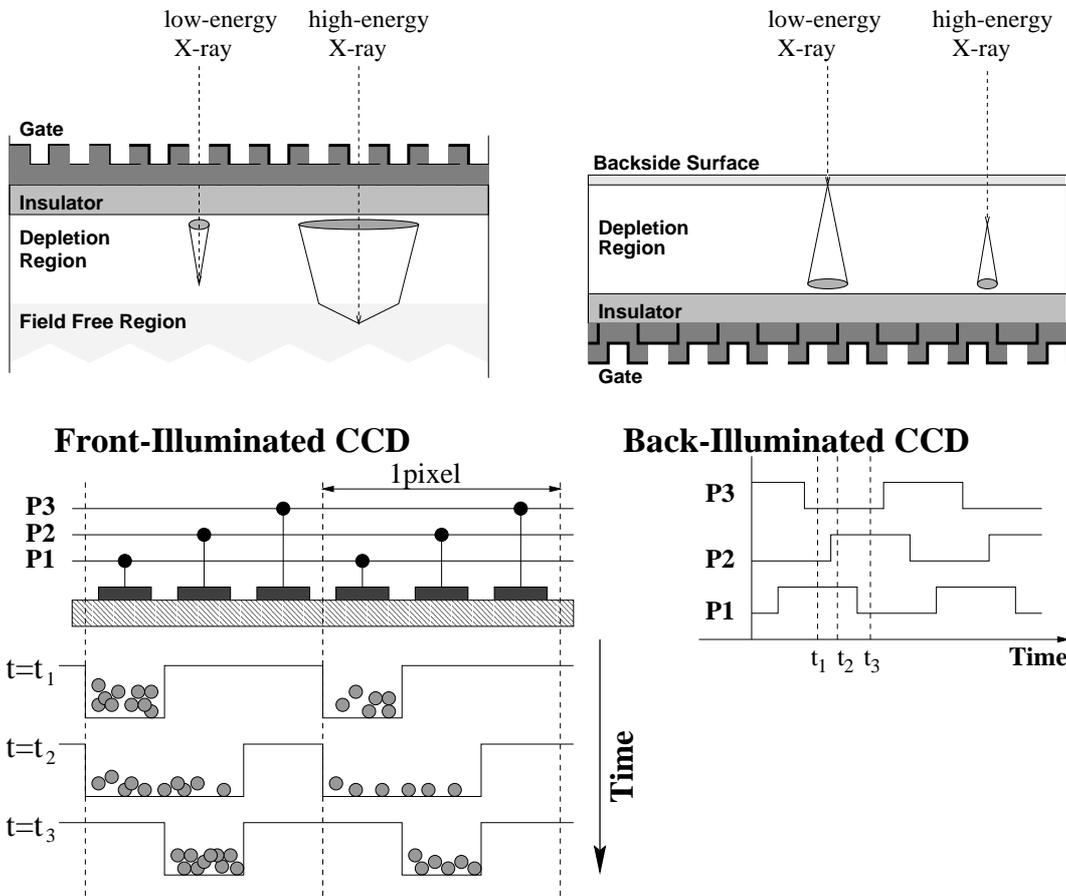


図 2.12: 背面照射型 CCD カメラの原理 — 前面照射型と背面照射型の断面図 (上)、電荷転送の概念図 (下)。

### 2.3.7 駆動ステージ

サンプルチェンバ、ディテクターチェンバ 内にはそれぞれ測定対象の XRT と XRT からの X 線ビームを受ける検出器を任意の位置、方向に移動させるために駆動ステージが設置されている。これらのステージの必要性は 2 つに分けられる。1 つは XRT のアライメントをとる際に必要で、XRT を新たにチェンバ 内にセットした時に XRT の位置、方向を微調節してビームラインの系と XRT 本体の系の光軸を合わせるためである。もう一つは XRT の性能評価をする際に必要で、XRT に任意の入射角度で X 線を照射するためや、XRT 全面に X 線を照射する必要があるときに XRT と検出器を同期させて移動させるためである。同期精度については  $\pm 0.1$  mm 程度の精度での移動が可能である。サンプルチェンバ、ディテクターチェンバ 内に設置されているステージの全体図を図 2.13 に載せる。

また、これら各ステージへ 1 pulse の信号を送った際の移動量と移動可能範囲を表 2.5 にまとめる。これらの駆動ステージは、サンプルチェンバ の X 軸 (S-X 軸) を除いて全てワークステーションによって制御することが可能になっている。その再現性は良く、移動精度はステージ駆動モーターのギアの遊びや滑りで決まる。

## サンプルステージ

S-X 軸ステージ —— ドラムを XRT の焦点距離に合わせて光軸方向に沿った二ヶ所の位置に移動 (手動)

S-Y 軸ステージ —— ドラムを光軸に対して垂直な水平方向に移動

S-Z 軸ステージ —— ドラムを鉛直方向に移動

S- $\theta_x$  軸ステージ —— ドラムをその中心に対して光軸回りに回転

S- $\theta_y$  軸ステージ —— ドラムをその中心に対して光軸と垂直な水平方向回りに回転

S- $\theta_z$  軸ステージ —— ドラムをその中心に対して鉛直方向回りに回転

## ディテクターステージ

D-X 軸ステージ —— 検出器を光軸方向に移動

D-Y 軸ステージ —— 検出器を光軸に対して垂直な水平方向に移動

D-Z 軸ステージ —— 検出器を鉛直方向に移動

表 2.5: 各ステージの仕様

サンプルステージ			
軸	移動量 [mm,deg/pulse]	移動可能範囲 <sup>a</sup> [mm,arcmin] (total)	移動速度 [mm,arcmin/sec]
S-X	— <sup>b</sup>	0 or +25	— <sup>b</sup>
S-Y	0.01	-206.5 ~ +426.6 (633.1)	4
S-Z	0.000125	-192.6 ~ +228.8 (421.4)	0.25
S- $\theta_x$	0.001	— <sup>c</sup>	20
S- $\theta_y$	0.0005	-331.8 ~ +292.9 (624.7)	20
S- $\theta_z$	0.0005	-250.0 ~ +284.4 (534.4)	20

ディテクターステージ			
軸	移動量 [mm/pulse]	移動可能範囲 <sup>a</sup> [mm] (total)	移動速度 [mm/sec]
D-X	0.0005	-111.5 ~ +97.3 (208.8)	1.5
D-Y	0.0005	-231.0 ~ +429.7 (660.7)	4
D-Z	0.0005	-207.5 ~ +213.0 (420.5)	0.25

a: 機械原点を  $\pm 0$  とする。誤差は  $\pm 0.5$  mm。

b: 手動でステージを動かすことが可能。

c: 機械原点、リミッターは無し。 $\pm 360^\circ$  回転が可能。

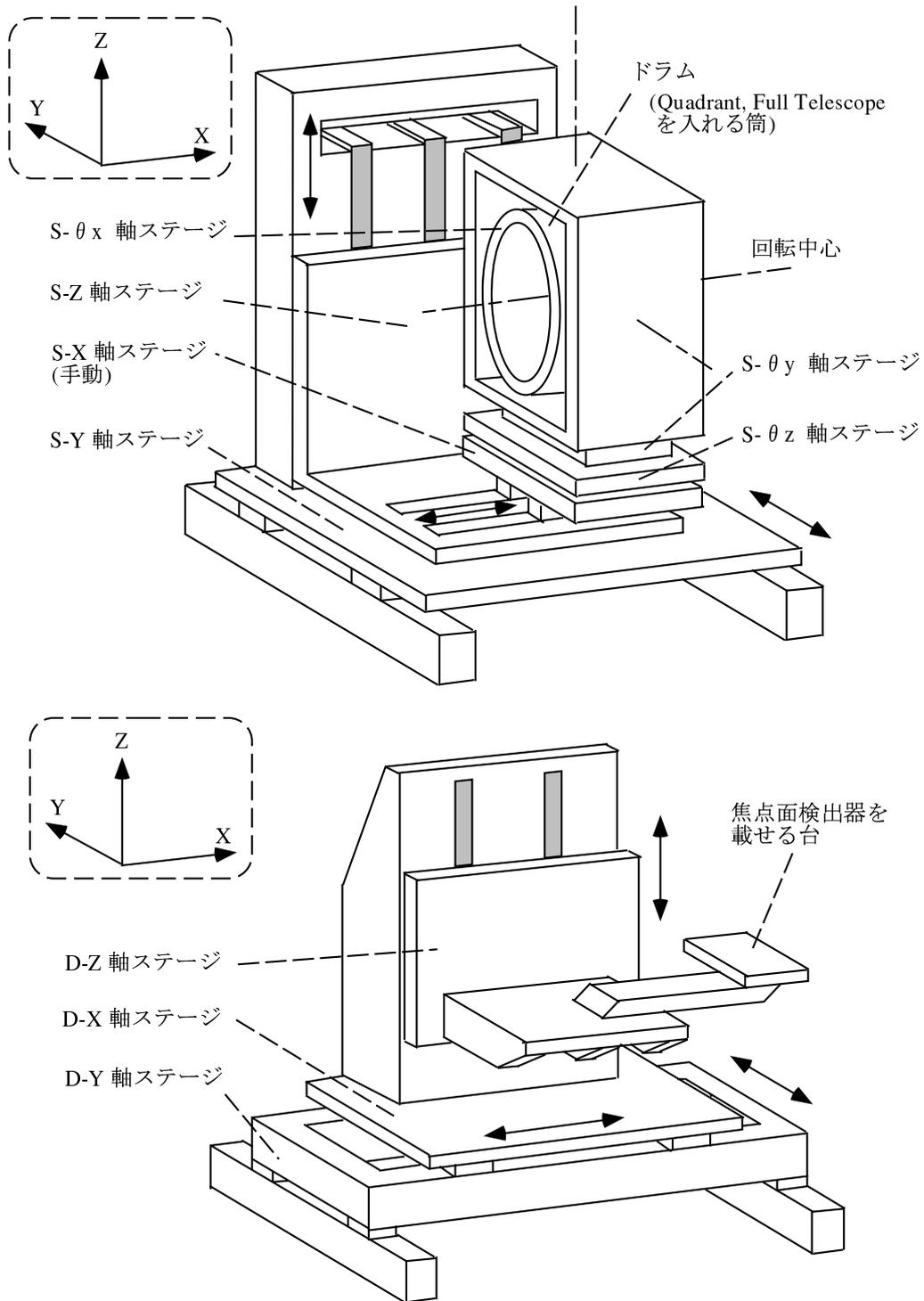


図 2.13: サンプル、ディテクターチェンバ 内のステージ全体図 — 上図がサンプルチェンバ 内ステージ、下図がディテクターチェンバ 内のステージ。X線ビームは X 軸上をプラス方向に進む。

### 2.3.8 真空装置

30m ビームラインはゲートバルブ (V2、V4、V6、V10、V12) により 6 つのエリアに分けられており、各エリアごとにロータリーポンプとターボ分子ポンプの組が設置されている。これらのポンプを用いて各ダクト内の真空引きを行う。ロータリーポンプは大気圧から  $\sim 10^{-1}$  torr 程度までの低真空を粗引きし、 $10^{-1}$  torr 以上の高真空では、ターボ分子ポンプと背圧用補助ポンプとしてロータリーポンプを同時に使用して真空引きを行なっている。また、V10 から V12 間、V12 以降のエリアには真空に引かれるべき容積が他のエリアに比べて非常に大きいため、ロータリーポンプとメカニカルブースターポンプがさらに取り付けられている。到達真空度は  $10^{-5}$  torr 前半である。真空度はピラニゲージ (測定範囲:  $7.6 \times 10^2 \sim 1.0 \times 10^{-3}$  torr) と、イオンゲージ (測定範囲:  $1.0 \times 10^{-1} \sim 1.0 \times 10^{-7}$  torr) でモニターしており、通常大気圧  $\sim 10^{-3}$  torr まではピラニゲージ、 $10^{-3} \sim 10^{-7}$  torr まではイオンゲージを使用している。

図 2.14 に 30m ビームラインに設置されている真空、排気装置の全体図を示す。V はゲートバルブ、LV はリークバルブ、RP はロータリーポンプ、IG はイオンゲージ、PG はピラニゲージを指す。

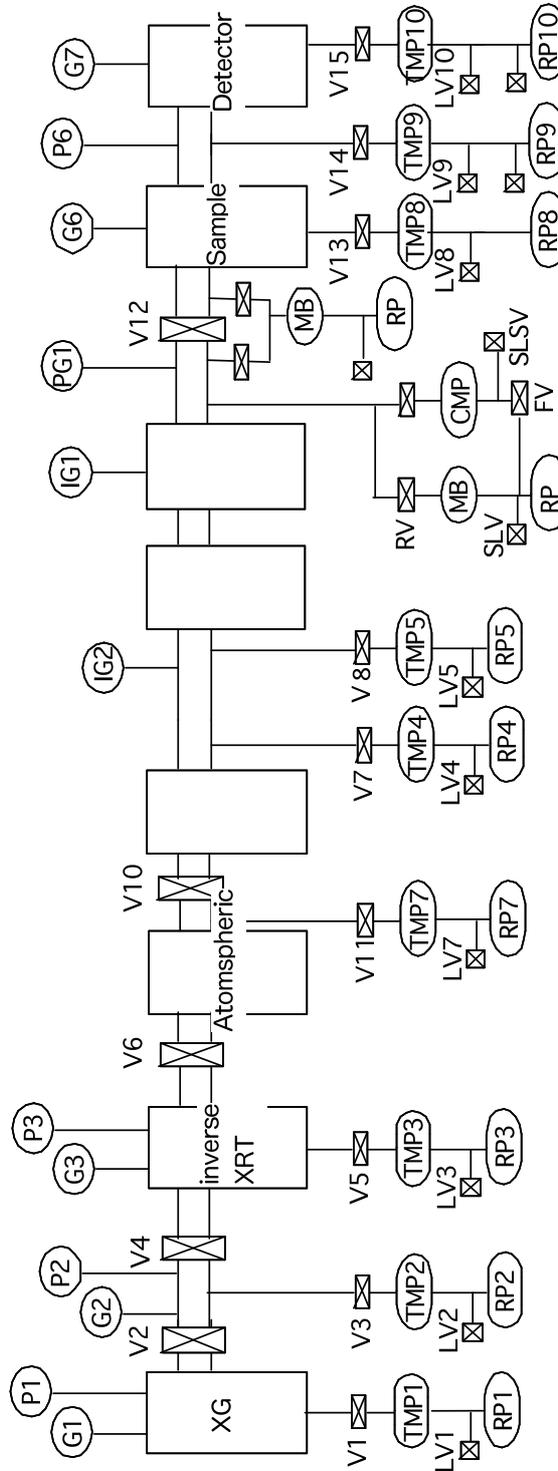


図 2.14: 30m ビームライン真空、排気装置全体図

### 2.3.9 30m ビームラインにおける X 線望遠鏡測定方法

30m ビームラインにおける XRT の結像性能、有効面積の測定方法について説明する。両者の測定には、用いる検出器の違いを除けば基本的に同じ方法をとる<sup>5</sup>。また、測定は Full Telescope か Quadrant 単位で行われるが、ここでは例として Quadrant を測定する場合の測定方法について述べる。

#### 1. Quadrant のドラムへの取り付け

まず Quadrant をサンプルチェンバ 内のドラムに取り付ける。基本的に測定は W サイドで行なう。これは U、D サイドではフォイルが自重でたわんでしまうのに対し、W サイドではフォイルが立っているため、重力による影響が小さいからである。

#### 2. XRT のアラインメント

レーザー光を用いてビームラインの系と Quadrant の系の光軸を合わせる。その後、Quadrant を通過したペンシルビームの強度が最大になるよう S- $\theta_y$  軸、S- $\theta_z$  軸、S-Y 軸、S-Z 軸を適当に調整し、さらに厳密に各軸のアラインメントを行う。

#### 3. 四極スリットの調整

30m ビームラインでは、CCD による結像性能の測定の場合は  $2 \times 2$  mm、PC による有効面積の測定の場合は  $1 \times 4$  mm の方形になるように四極スリットを調整する。基本的には CCD と PC による測定で X 線の入射強度が一定になるよう、スリットが見込む面積を合わせている。これによりほぼ一定した統計誤差を目指している。

#### 4. ラスタースキャン

先述した通り 30m ビームラインではビーム位置を固定したまま XRT、検出器を移動させることでラスタースキャンを行う。以下にその際の手順を示す。

1. 検出器を Quadrant の焦点位置に置く。
2. 図 2.15 に示したように Y 軸方向に  $v_y$  (Y 軸方向への移動速度) = 4.0 mm/sec で S-Y 軸、D-Y 軸ステージを移動させて集光する X 線を計測していく。  
その際、測定の始点と終点は X 線が反射鏡にかかる位置よりも  $\sim 5$  mm 遠方にとった場所までとする。
3. Y 軸方向の移動が終了したら、ビームの縦幅だけ S-Z 軸、D-Z 軸ステージを移動する。
4. 項目 2、3 をビームが Quadrant 全面を掃き終わるまで繰り返す。
5. ダイレクト光の強度を測定しておく。ダイレクト光の測定は、Quadrant 全面を走査する前後や途中にも測定し、光源の強度揺らぎを除去する。

<sup>5</sup>結像性能の測定には CCD、有効面積の測定には PC が用いられる。

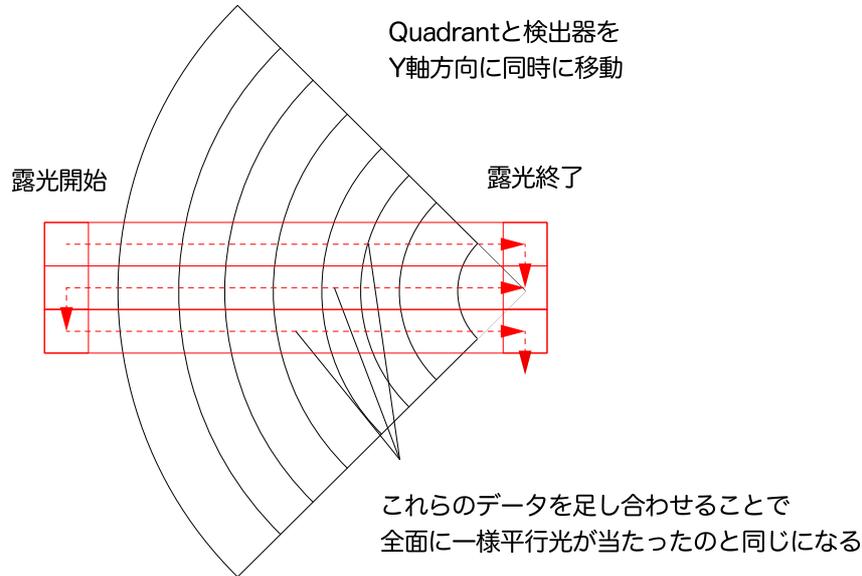


図 2.15: Quadrant ラスタースキャン概念図 — ビームの相対位置を、S-Y 軸、D-Y 軸ステージを動かすことで Quadrant の開口部より 5 mm ほど外側に移動させる。その位置で検出器の露光を開始すると同時に S-Y 軸、D-Y 軸を動かす、ビームに Quadrant 開口部を横切らせ、さらにその 5 mm ほど外側まで移動させる。そしてその位置でビームの縦幅だけ S-Z と D-Z を移動する。以上の操作を Quadrant 全面を走査するまで繰り返す。

以上の操作はワークステーションで制御することができ、ほとんどがプログラムによって自動化されている。PC による測定では W、C サイドの測定は 68 ライン、D サイドでは 40 ライン、U サイドでは 34 ラインの走査で Quadrant 全面を掃く。CCD による測定では W、C サイドの測定では 136 ライン、D サイドでは 80 ライン、U サイドでは 68 ラインの走査で Quadrant 全面を掃く。U サイドの測定では、X 線望遠鏡を乗せるステージの可動限界のため Quadrant 全面を掃くことができない。

### 2.3.10 有効面積の算出方法

測定から XRT の有効面積は次のように求められる。

今、求める有効面積を  $S_{eff}$ 、反射鏡に入射した光子数を  $C_{in}$ 、検出器に集光した光子数を  $C_{out}$ 、XRT の幾何学的面積を  $S_{geo}$  とすると、

$$S_{eff} = \frac{C_{out}}{C_{in}} \times S_{geo} \tag{2.5}$$

となる。ここで、幾何学的面積  $S_{geo}$  は、ステージ移動速度を  $v_y$  mm/sec、 $S_{geo}$  の走査に必要な時間を  $\delta t$  sec、ビームの縦幅を  $h$  mm とすると、

$$S_{geo} = v_y \times \delta t \times h \tag{2.6}$$

また、入射光子数  $C_{in}$  は、ビーム強度を  $I$  cts/sec とすると、

$$C_{in} = I \times \delta t \tag{2.7}$$

式 2.6、2.7 を式 2.5 へ代入すると最終的に有効面積  $S_{eff}$  は、

$$S_{eff} = \frac{C_{out} \times v_y \times h}{I} \quad (2.8)$$

移動速度  $v_y$ 、ビーム幅  $h$  は定数であるので、ダイレクト光強度  $I$  と集光した光子数  $C_{out}$  を測定することのみにより、有効面積を求めることができる。

## 第3章 宇宙科学研究本部10m ビームライン

30m ビームラインを使用しての XRT の性能評価は、将来的に XRT の大型化により困難になることが予想されている。本章では、30m ビームラインの問題点とその解決策として本研究にて新たに立ち上げた 10m ビームラインの概要、構成、使用方法等について述べる。

### 3.1 10m ビームライン概要

2.3 節にて 30m ビームラインでは、ビーム位置を固定し XRT と検出器を移動させることでラスタースキャンを行うことを述べた。しかし将来的に XRT の大型化に対応するためには、XRT と検出器を高い精度で同期させるステージなどシステム全体に大型化が要求される。

そこで、本研究において新たに可動式の X 線発生装置を導入し、比較的小スペースで XRT、検出器を固定したまま性能評価を行うシステム（以下 10m ビームラインと呼ぶ）の構築を行った。10m ビームラインを使用するメリットには大型、大質量の XRT の性能評価を可能する他、XRT と検出器を動かさずに評価できるため、焦点距離を自由に選びやすい、フライト品やカロリメーターなど大型の焦点面検出器の導入が比較的容易などが挙げられる。可動式の手法は気球実験 InFOCuS の硬 X 線望遠鏡で、20 keV 以上の硬 X 線領域においてすでに実用化されている (Okajima et al. 2001) が、10m ビームラインでは 20 keV 以下の軟 X 線領域での運用を目指した。

10m ビームラインのシステム全体は 30m ビームラインの中に組み込む形で設置されており、30m ビームラインと同様真空槽の中で使用する。座標軸についても 30m ビームラインと同じものを使用する。また、回転ステージのみを設置したサンプルチェンバ（可動式用サンプルチェンバ）を可動式発生装置から ~14.8 m 下流位置に設置しており、30m ビームラインで使用しているサンプルチェンバの双方に XRT の収納が可能である<sup>1</sup>。本研究では共同利用のため 30m ビームラインで使用しているチェンバにて実験を行った。検出器、及びディテクターチェンバについては 30m ビームラインのものと同じものを使用する。

10m ビームラインの立ち上げにあたっては、2.2 節で述べた XRT の性能評価を行うシステムとして必要な 3 項目の確立を中心に行った。以下にその方法について述べる。

#### 高い平行度の確保

ピンホールコリメーターを設置することで平行度の確保を行った。ピンホールコリメーターを可動式発生装置と XRT との間に 3 つ配置し、上流のものから第 1、第 2、第 3 ピンホールと呼んでいる。第 1、第 2 ピンホールの直径はそれぞれ 1.0 mm、0.5 mm であり、第 3 ピンホールについてはビームサイズ切替ステージにより 1.0 mm、0.5 mm、0.2 mm の 3 種類から選択することができる。第 3 ピンホールに直径 1.0 mm のものを使用した際、実測値で 24 arcsec (Y)、26 arcsec (Z) という平行度を得ることができた。詳しくは 3.2.3 項にて述べる。

<sup>1</sup>10m ビームラインでサンプルの移動が必要になるのは、回転方向のアラインメントのときのみであるため。

### X 線の単色化

30m ビームラインで使用している DCM とは別に新たに DCM を設置し、X 線の単色化を行った。詳細については第 4 章にて述べる。

### 散乱光の抑制

10m ビームラインにおいて散乱光が比較的起こりやすいと思われる場所は 3ヶ所ある。1ヶ所目は発生装置の X 線出射口である。ここでの抑制を第 1 ピンホールに担わせた。2ヶ所目は DCM の底面及びその周辺である。これについては第 2 ピンホールにその役割を担わせた。また、DCM の周囲を鉛でカバーした。3ヶ所目は第 3 ピンホールの外側から漏れ込んでくる X 線である。これについては、第 3 ピンホールの上流にチェンバ の壁と干渉を起こさないぎりぎりの大きさの鉛板を配置し、第 2 ピンホールの大きさを調節し、ビームを鉛板の大きさよりも小さくすることで混入を防いだ。

散乱光の抑制については第 5 章にて詳しく述べる。

10m ビームラインを使用する際には、可動式発生装置と可動式発生装置から独立したステージに設置されている第 3 ピンホールを同時に移動させ、測定を行う。測定方法の詳細については 3.3 節で述べる。

図 3.1 に 10m ビームラインの各チェンバ の構成を、図 3.2 に全体の模式図を示す。

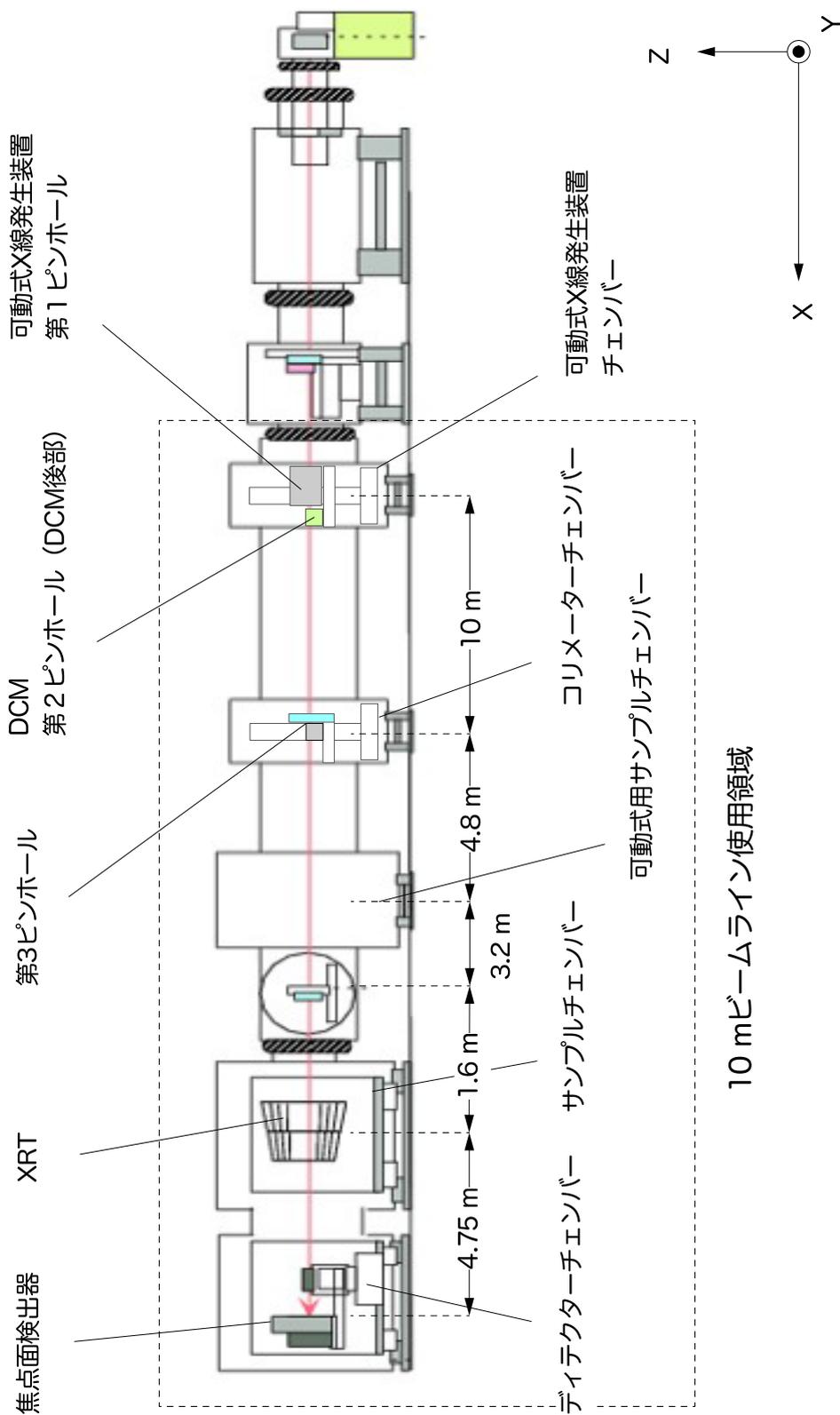


図 3.1: 10m ビームラインのチェンバ構成 — 焦点距離 4.75 m の XRT の場合を例として示す。10m ビームラインで使用するチェンバは全て 30m ビームラインの中に組み込まれている。また、サンプル、ディテクターチェンバ、検出器等は 30m ビームラインのものを併用している。座標軸については 30m ビームラインと同じものを用いる。

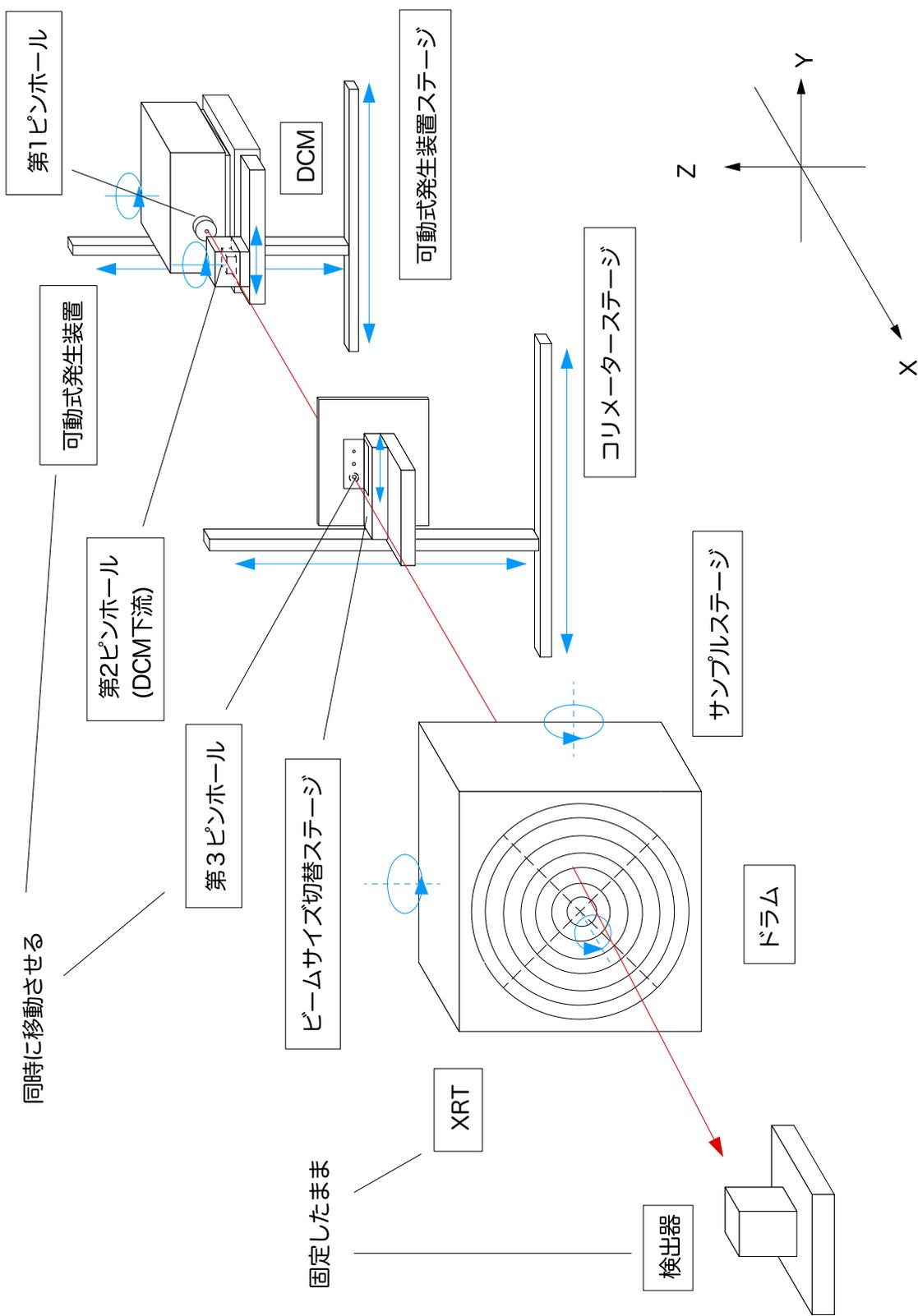


図 3.2: 10m ビームライン模式図 — 青い矢印はステージの可動方向を示す。

## 3.2 10m ビームラインの構成

10m ビームラインを構成している各サブシステムについて述べる。

### 3.2.1 可動式 X 線発生装置

可動式発生装置には、水冷式の Oxford 5020LC を採用している。大気ジャケットで覆うことで、発生装置自体は大気環境で動作するようになっている。最高電圧は 50 kV、最大電流は 2 mA である。発生装置の前に取りつけたシャッターの前面に直径 1.0 mm の Be の窓をつけ、真空装置内へと X 線が出射される仕組みになっている。また、発生装置の出口には 127  $\mu\text{m}$  の Be 窓が装着されている。その前面にはシャッターがついており、さらに 400  $\mu\text{m}$  厚の Be を介して真空槽内部と接している。したがって可動式発生装置から出射された X 線は、トータルで 527  $\mu\text{m}$  の Be の吸収を受けるため、典型的に 5 keV 以上の X 線でのみ利用可能である。ジャケットを含めた重量は 15 kg、大きさは 150 mm (X)×200 mm (Y)×300 mm (Z) であり、可動式にするためにこのような軽量かつコンパクトな設計になっている。現在までに W と Cu の管球を購入済みであり、本研究では W のターゲットを用いている。

表 3.1 に可動式 X 線発生装置の仕様をまとめる。

表 3.1: 可動式 X 線発生装置の仕様

最大定格出力	50 kV, 2 mA
管電圧設定	4~50 kV
管電流設定	0~2 mA
X 線源サイズ	0.4 mm×0.9 mm
所有ターゲット	W, Cu

### 3.2.2 10m ビームライン搭載 DCM

結晶には 30m ビームラインと同じ Ge (220) を一体加工したものを使用した。ステージ構成についても同様に並進ステージ (DCM-Y 軸ステージ) 上に回転ステージ (DCM- $\theta_z$  軸ステージ) を組み合わせ、その上に Ge 結晶を設置した。また、4 keV (Ti) ~ 20 keV (Mo) について単色化が行えるよう設計した。詳細は第 4 章にて述べる。

### 3.2.3 ピンホールコリメーター

以下に第 1、第 2、第 3 ピンホールと 10m ビームラインのビーム平行度について述べる。

#### 第 1 ピンホール

第 1 ピンホールの担う役割は主に可動式発生装置の出口付近で生じる散乱光のブロックである。そのため直径 1.0 mm のピンホールを開けたタングステンの板を可動式発生装置の X 線出射口に取り付けている。図 3.3 に第 1 ピンホールの写真を載せる。

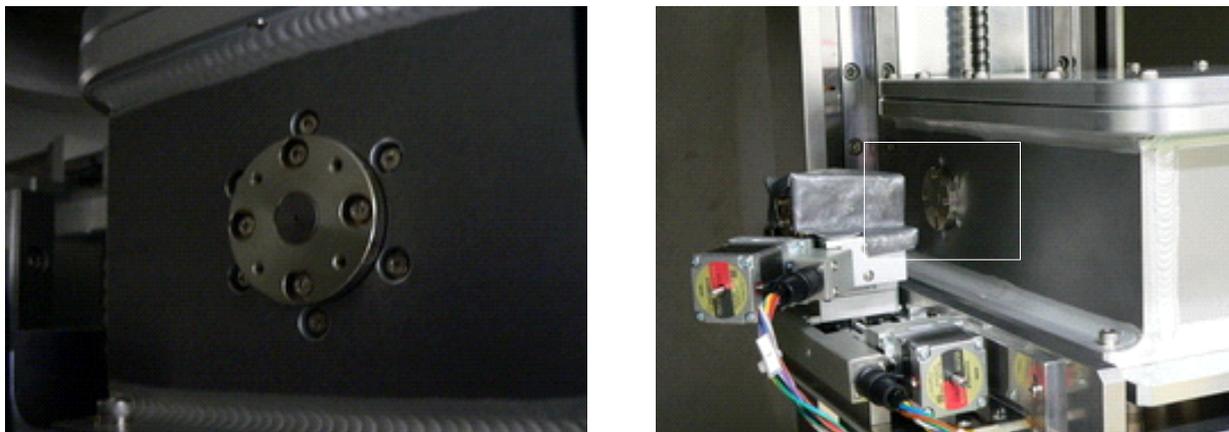


図 3.3: 第 1 ピンホール — 右側の写真の白い長方形の領域を拡大したのが左の写真である。

### 第 2 ピンホール

第 2 ピンホールの担う役割は 2 つある。1 つ目は平行度の確保、もう 1 つは DCM の底面及びその周辺で生じる散乱光の遮断である。

厚さ 1 mm の真鍮の板に直径 0.5 mm のピンホールを開け、図 3.5 のように DCM-Y 軸ステージに取りつけた (可動式発生装置から ~100 mm 下流位置)。これによりビームと第 2 ピンホールの相対的な位置関係を崩すことなく、可動式発生装置の移動を行うことができる。真鍮の板は直径 10 mm の穴の開いた治具の上にネジにより固定されている。そのため取り替えが可能であり、ピンホールの径を自由に変更することができる。0.5 mm という直径は散乱光の測定結果により決定した。散乱光の測定については第 5 章で述べる。

図 3.4 に第 2 ピンホールの写真を、図 3.6 に自作した直径 0.5 mm の第 2 ピンホールの拡大写真を載せる。

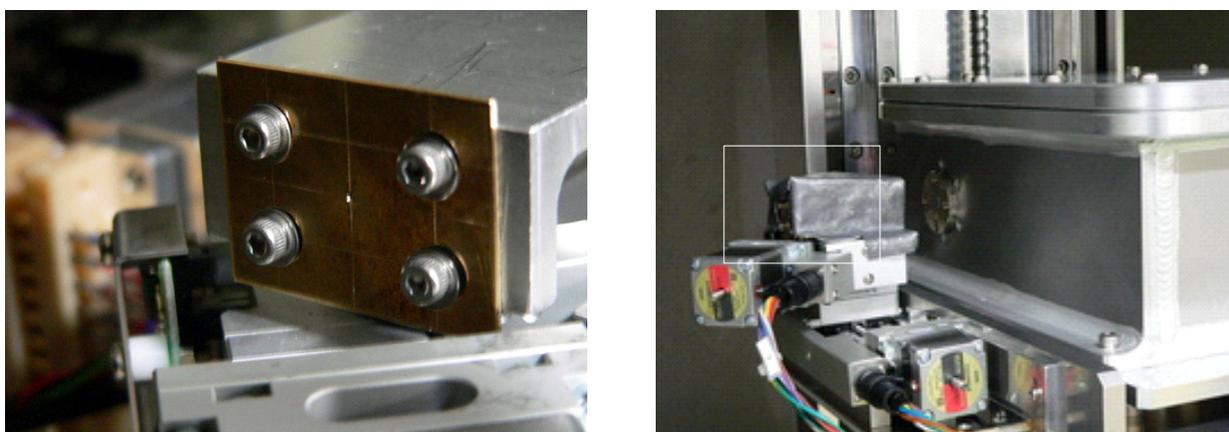


図 3.4: 第 2 ピンホール — 右側の写真の白い長方形の領域を拡大したのが左の写真である。真鍮の板はネジ止めされており、交換が可能である。

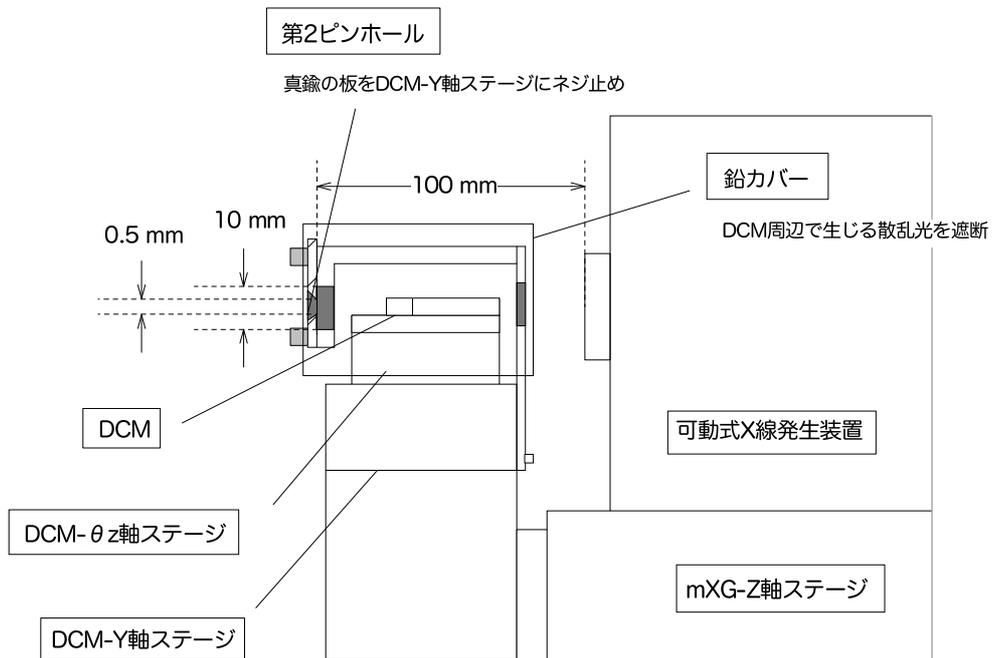


図 3.5: 第 2 ピンホール周辺模式図 — DCM の周囲を鉛で覆い、散乱光の遮断を行っている。

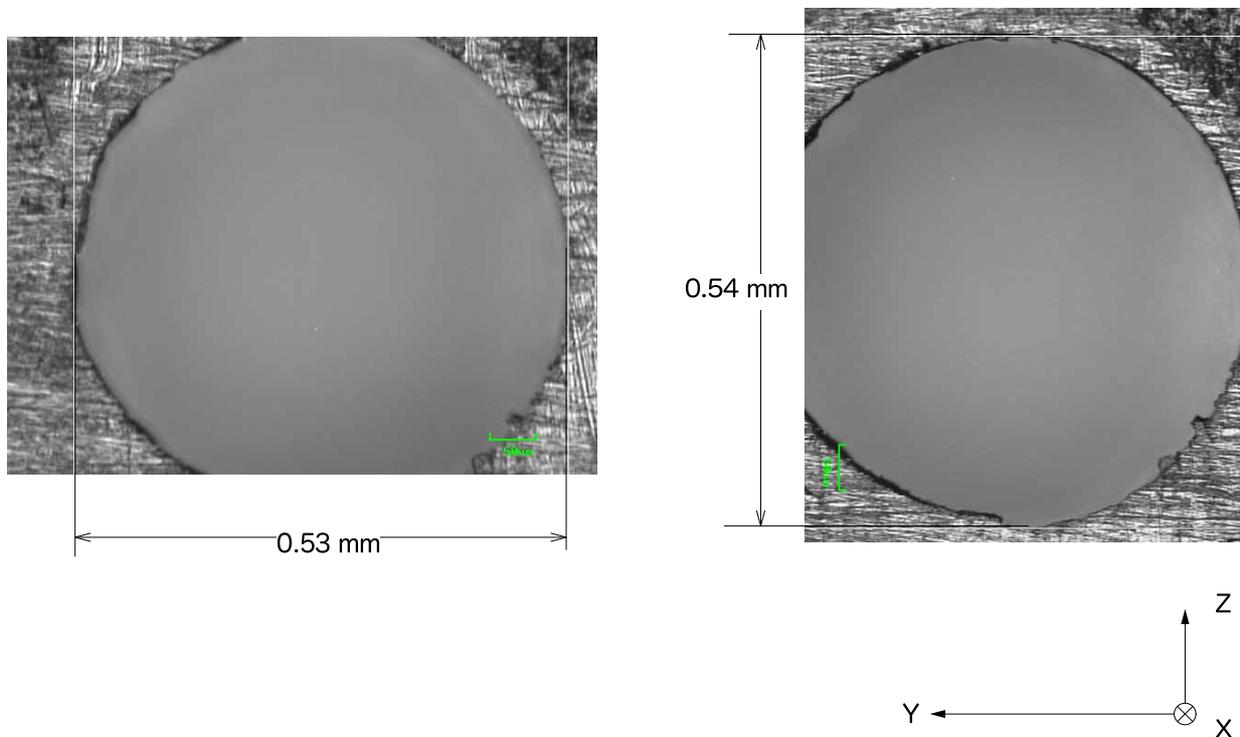


図 3.6: 第 2 ピンホール拡大写真 — 自作した直径 0.5 mm の第 2 ピンホール拡大写真。上流から下流を見たときのものである。カメラの視野にピンホールの全景がおさまらなかったため、Y 軸方向と Z 軸方向との 2 枚に分けた。

## 第 3 ピンホール

可動式発生装置から 10 m 下流位置に設置し、直径 1.0 mm、0.5 mm、0.2 mm の 3 種類の異なる径の穴をビームサイズ切替ステージで選択することができる。これにより XRT へ照射するビームのサイズを変更する。これら 3 つの穴は厚さ 1 mm のタンタルの板に水平方向に 10 mm 間隔で開けられており、名古屋大学装置開発室で製作された。上流側には 345 mm (Y)×295 mm (Z) の大きさの鉛を張ったアルミ板がタンタルの板を覆うように付けられている。そのアルミ板に開けられている直径 5 mm の穴に、3 種類の径のピンホールをステージで位置合わせすることで、第 3 ピンホールの径の切り替えを行う。鉛板は散乱光が下流の XRT へ混入するのを防ぐためであり、コリメータステージの 2 軸をストロークのリミット値まで移動させたときにチェンバの天井や床と干渉を起こさないぎりぎりの大きさに設計した。

図 3.7 に第 3 ピンホール周辺の写真を、図 3.8 に模式図を示す。

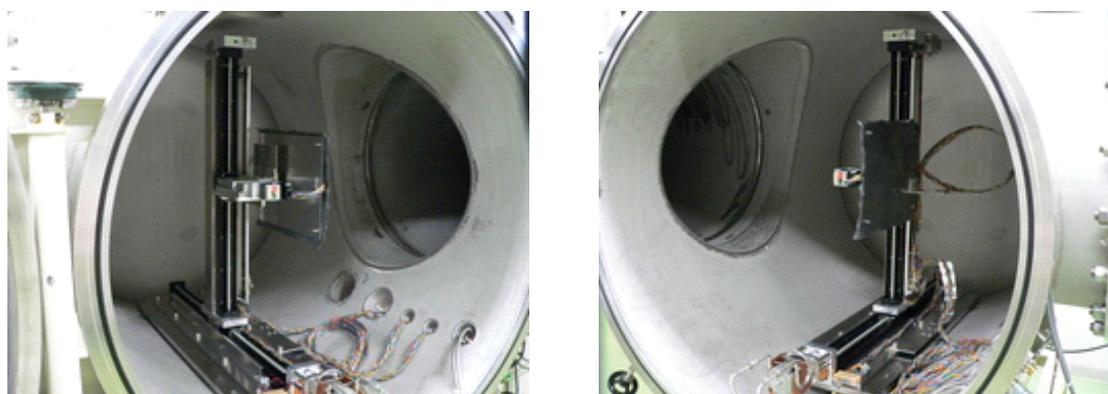


図 3.7: 第 3 ピンホール — 右は上流側から、左は下流側から見たときの様子。

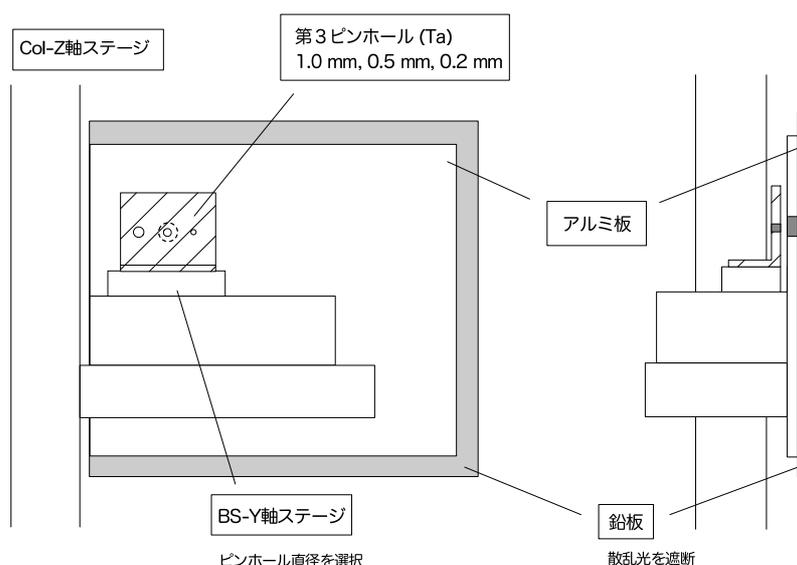


図 3.8: 第 3 ピンホール周辺模式図 — 左は -X 方向から、右は +Y 方向から見たときの様子。

## ビーム平行度

10m ビームラインにおけるビーム平行度は第 2 ピンホール径が第 1 ピンホール径より小さいため、第 2、第 3 ピンホールの大きさにより決定される。平行度を理論計算により求めた後、実測した。

## 1. ビーム平行度理論値

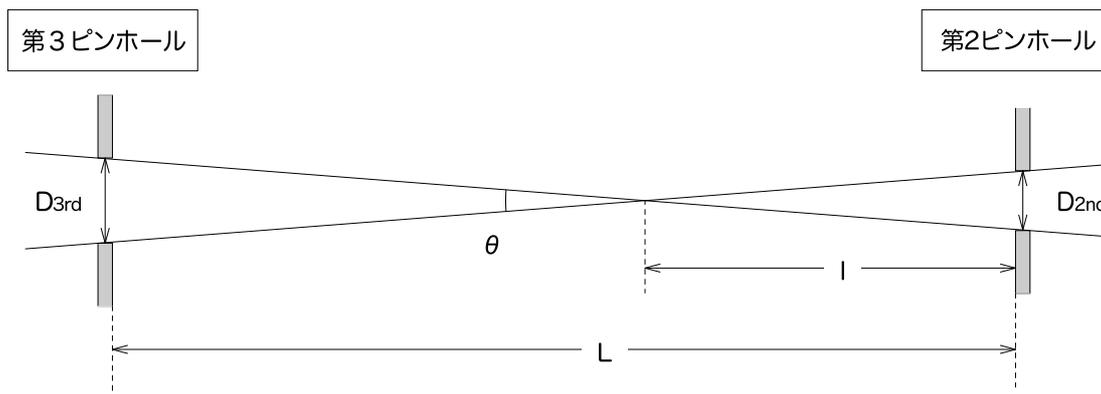


図 3.9: 10m ビームラインビーム平行度概念図 — ビーム平行度を  $\theta$ 、第 2 ピンホールの直径を  $D_{2nd}$ 、第 3 ピンホールの直径を  $D_{3rd}$ 、第 2 ピンホールから第 3 ピンホールまでの距離を  $L$ 、第 2 ピンホールから 2 直線の交点までの距離を  $l$  とする。

図 3.9 の様にビーム平行度を  $\theta$ 、第 2 ピンホールの直径を  $D_{2nd}$ 、第 3 ピンホールの直径を  $D_{3rd}$ 、第 2 ピンホールから第 3 ピンホールまでの距離を  $L$ 、第 2 ピンホールから 2 直線の交点までの距離を  $l$  とする。このとき平行度  $\theta$  は

$$\theta = 2 \times \tan^{-1} \left( \frac{D_{2nd}}{2 \times l} \right) \quad (3.1)$$

と表される。ここで  $l$  は

$$l = L \times \left( \frac{D_{2nd}}{D_{2nd} + D_{3rd}} \right) \quad (3.2)$$

である。したがって最終的に  $\theta$  は

$$\theta = 2 \times \tan^{-1} \left( \frac{D_{2nd} + D_{3rd}}{2 \times L} \right) \quad (3.3)$$

と表すことができる。

ここから第 3 ピンホールの直径を 1.0 mm に設定した場合の平行度  $\theta$  を求めると、 $L = 9900$ 、 $D_{2nd} = 0.5$ 、 $D_{3rd} = 1$  を式 3.3 へ代入し

$$\theta = 2 \times \tan^{-1} \left( \frac{0.5 + 1}{2 \times 9900} \right) = 31.25 \text{ [arcsec]} \quad (3.4)$$

となる。同様に第 3 ピンホールの直径が 0.2 mm の場合では  $\theta = 14.58 \text{ arcsec}$  である。

2. ビーム平行度実測値

CCD を用いてダイレクト光を撮像し、ビーム平行度を実測した。第 3 ピンホールには直径 1.0 mm のものを使用した。そして Y 軸方向では 24 arcsec、Z 軸方向では 26 arcsec という結果を得ることができた。したがって、現行の結像性能 1 arcmin 程度の XRT の性能評価を考える場合、高い平行度を確保することができたと言える。Y、Z ともに理論値よりも小さくおさまっている。Y 軸方向についてはこの理由の一つに DCM の寄与による可能性が考えられる。しかしながら Z 軸方向については原因は不明である。

図 3.10 にこのとき撮像したビームのイメージと Y 軸方向、Z 軸方向へ像を投影したときの様子を示す。

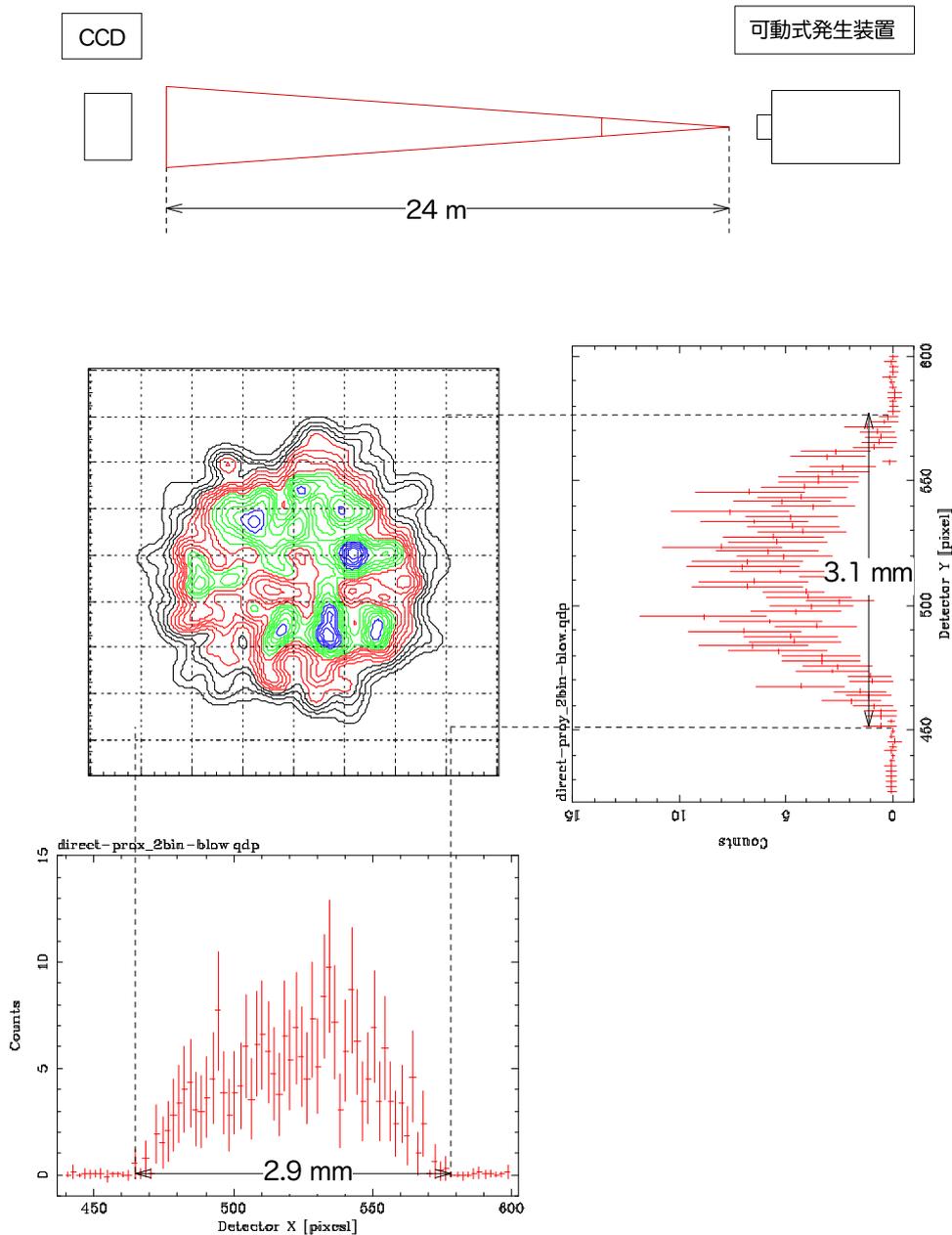


図 3.10: ビームイメージ — 第 3 ピンホール直径 1.0 mm 使用時のビームイメージ。このときのビーム平行度は Y 軸方向で 24 arcsec、Z 方向軸では 26 arcsec。

### 3.2.4 駆動ステージ

以下に 10m ビームラインに設置されている各駆動ステージについて述べる。表 3.2 に各ステージの仕様をまとめる。また、図 3.11 にこれらの配置図を示す。ただし、30m ビームラインでも使用されているサンプル、ディテクターステージについては本項では説明を省略する (2.3.7 項参照)。

#### 可動式 X 線発生装置ステージ

mXG- $\theta_z$  軸ステージ —— 可動式発生装置及び第 1 ピンホールを鉛直軸回りに回転

mXG-Y 軸ステージ —— 可動式発生装置、DCM 及び第 1、第 2 ピンホールを水平方向に移動

mXG-Z 軸ステージ —— 可動式発生装置、DCM 及び第 1、第 2 ピンホールを鉛直方向に移動

#### DCM ステージ

DCM- $\theta_z$  軸ステージ —— DCM を鉛直軸回りに回転

DCM-Y 軸ステージ —— DCM、及び第 2 ピンホールを水平方向に移動

#### コリメーターステージ

Col-Y 軸ステージ —— 第 3 ピンホールを水平方向に移動

Col-Z 軸ステージ —— 第 3 ピンホールを鉛直方向に移動

BS<sup>2</sup>-Y 軸ステージ —— 直径 1 mm、0.5 mm、0.2 mm の穴が開けられているタンタル板を水平方向に移動

#### 可動式用サンプルステージ

mS- $\theta_x$  軸ステージ —— ドラムをその中心に対して光軸回りに回転

mS- $\theta_y$  軸ステージ —— ドラムをその中心に対して光軸と垂直な水平方向回りに回転

mS- $\theta_z$  軸ステージ —— ドラムをその中心に対して鉛直方向回りに回転

ステージの平行度は mXG-Y、Z 軸、Col-Y、Z 軸それぞれにおいて 1 arcmin 以下である。したがって 2 つのステージを同時に動かした場合、5 arcsec 以内でビームの向きがそろっていることになる。これは 3.2.3 項にて述べるビーム平行度  $\sim 25$  arcsec よりも十分小さい。mXG-Y、Z 軸周りの首振りも 600 mm のストロークの中で、30 arcsec 以内に抑えられている。これは 10 m 離れたコリメーターチェンバにおいてビームの到達位置が最大 1.5 mm ずれることを意味する。ただしビームの広がり角がこれに対し大きいことからステージの場所によって強度が変わることは実質的にはない。

また、10m ビームラインに設置されているこれらのステージも 30m ビームライン同様、全てワークステーションでのリモートコントロールが可能である。

<sup>2</sup>Beam Size の略。

表 3.2: 10m ビームライン各ステージの仕様

可動式 X 線発生装置ステージ			
軸	移動量 [mm,deg/pulse]	移動可能範囲 <sup>a</sup> [mm,deg] (total)	移動速度 <sup>c</sup> [mm,deg/sec]
mXG- $\theta_z$	0.0005	-1.5 ~ +1.5 (3)	0.5
mXG-Y	0.002	-307 ~ +316 (623)	2
mXG-Z	0.0002	-305 ~ +308 (613)	0.2
DCM ステージ			
軸	移動量	移動可能範囲 <sup>a</sup>	移動速度 <sup>c</sup>
DCM- $\theta_z$	0.002	— <sup>b</sup>	2
DCM-Y <sup>d</sup>	0.0005	-25 ~ +25 (50)	0.5
コリメーターステージ			
軸	移動量 [mm/pulse]	移動可能範囲 <sup>a</sup> [mm] (total)	移動速度 <sup>c</sup> [mm/sec]
Col-Y	0.002	-309 ~ +314 (623)	2
Col-Z	0.0002	-305 ~ +305 (610)	0.2
BS-Y <sup>d</sup>	0.0005	-12.5 ~ +12.5 (25)	0.5
可動式用サンプルステージ			
軸	移動量 [deg/pulse]	移動可能範囲 <sup>a</sup> [deg] (total)	移動速度 <sup>c</sup> [deg/sec]
mS- $\theta_x$	0.00002	360	0.02
mS- $\theta_z$	0.00002	-5.2 ~ 5.2 (10.4)	0.02
mS- $\theta_y$	0.00002	-3.2 ~ 3.2 (6.4)	0.02

a: 機械原点を  $\pm 0$  とする。誤差は  $\pm 0.1$  mm。

b: 機械原点、リミッターは無し。 $\pm 360$  °回転が可能。

c: 1000 pulse/sec 時。速度は 1000 pulse/sec から 1000 pulse/sec ごとに 10 段階で設定が可能。

d: ビームラインの座標系とステージ座標系の符合が異なる。

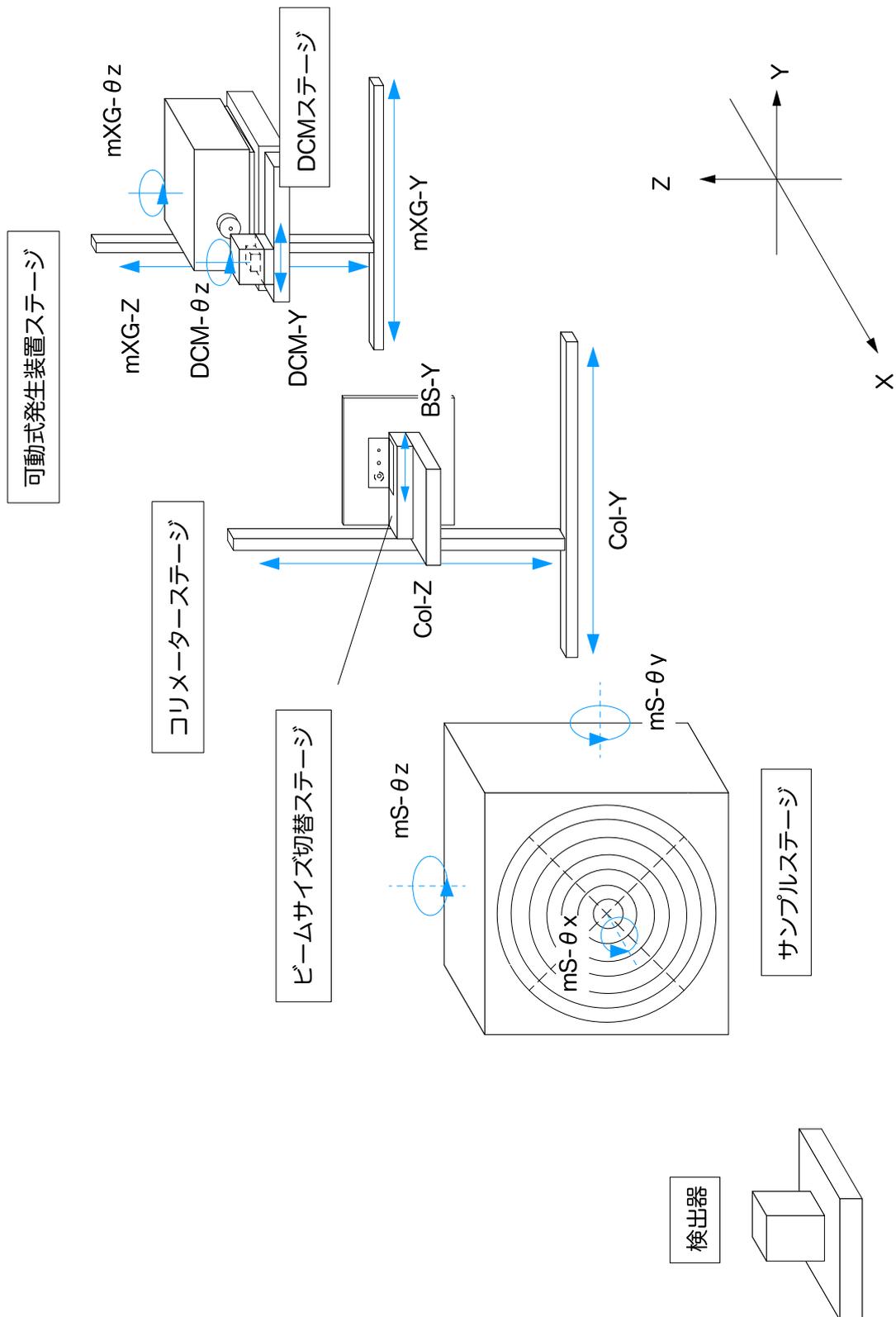


図 3.11: 10m ビームラインステージ配置図 — ステージの可動方向を青い矢印で示した。

3.2.5 真空装置

10m ビームラインはシステム全体が 30m ビームラインの中に組み込まれているため、真空系についても 30m ビームラインのものを併用する。真空装置についての詳細は 2.3.8 項にて説明しているためここでは省略する。図 3.12 に 10m ビームラインにおける真空、排気装置の全体図を載せる。

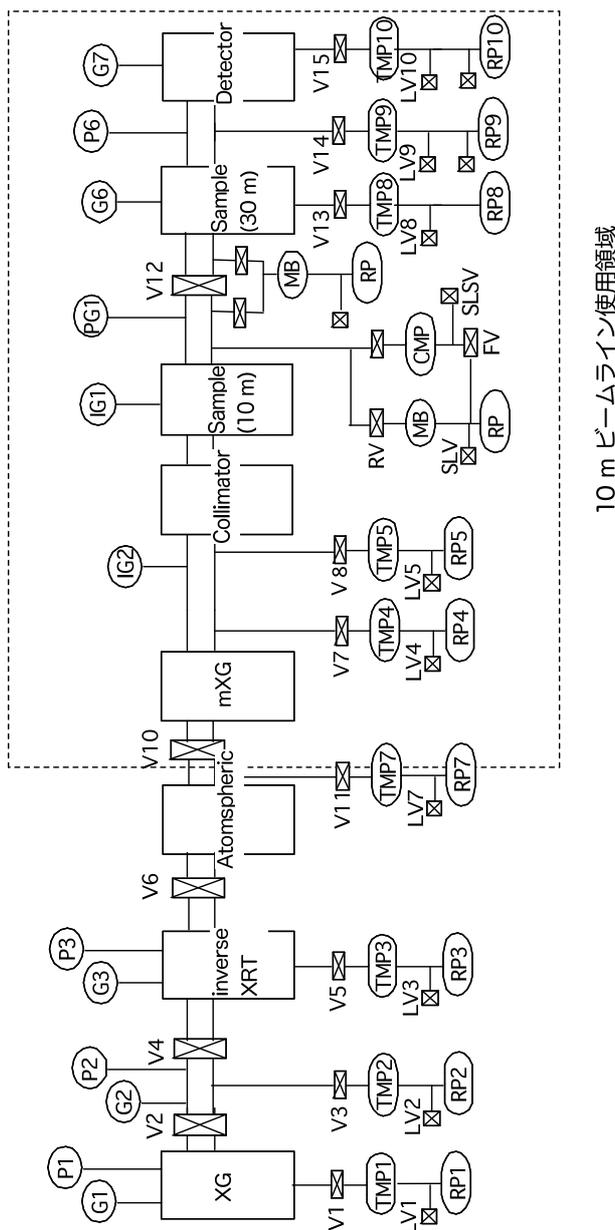


図 3.12: 10m ビームラインにおける真空、排気装置の全体図 — V はゲートバルブ、LV はリークバルブ、RP はロータリーポンプ、IG はイオンゲージ、PG はピラニゲージを指す。点線で囲まれた V10 以降が 10m ビームラインにおいて使用される部分である。

### 3.3 10m ビームラインにおける X 線望遠鏡測定方法

10m ビームラインを使用した XRT の測定方法について述べる。10m ビームラインを使用する場合、30m ビームラインの場合と大きく異なるのは、XRT は最初に回転方向のアラインメントを行う以外は基本的に位置を固定し、検出器についても焦点位置にアラインメントをとった後は位置の移動がないということである。また、ピンホールを使用しているためビームの形は丸くなる。

以下に測定手順を示す。2.3.9 節と同様に Quadrant を測定する場合について述べる。

#### 1. Quadrant のドラムへの取り付け

10m ビームラインにおいても基本的に Quadrant の測定の際は W サイドで行う。

#### 2. XRT のアラインメント

2.3.9 節を参照。

#### 3. 第 3 ピンホールの大きさを選択

BS-Y 軸ステージにより第 3 ピンホールの大きさを選択する。

#### 4. ラスタースキャン

1. 検出器を Quadrant の焦点位置に置く。
2. Y 軸方向に可動式発生装置、第 3 ピンホールを同時に移動させて集光する X 線を計測していく。その際、測定の始点と終点は X 線が反射鏡にかかる位置よりも ~5 mm 遠方にとった場所までとる。
3. Y 軸方向の移動が終了したら、ビームの縦幅だけ可動式発生装置、第 3 ピンホールを Z 軸方向に移動する。
4. 項目 2、3 をビームが Quadrant 全面を掃き終わるまで繰り返す。
5. ダイレクト光の強度を測定しておく。ダイレクト光の測定は、Quadrant 全面を走査する前後や途中にも測定し、光源の強度揺らぎを除去する。



## 第4章 X線の単色化

本章では、10 m ビームラインに搭載した DCM についての解説と、その DCM を使用して実際に行った  $W-L_{\alpha 1}$  の単色化についてまとめる。

### 4.1 10m ビームライン搭載 DCM 概要

結晶には 30m ビームラインと同じ Ge (220) を一体加工したものを使用し、4 keV (Ti) ~ 20 keV (Mo) の領域において単色化が行えるよう設計した (図 A.1 参照)。本研究では可動式発生装置のターゲットとして W を使用しているため、 $W-L_{\alpha 1}$  (8.04 keV) について単色化を行った。

#### 4.1.1 ステージ構成

10m ビームラインにおいても 30m ビームラインと同様に並進ステージ (DCM-Y 軸ステージ) 上に回転ステージ (DCM- $\theta$ z 軸ステージ) を組み合わせ、その上に Ge 結晶を設置した。これにより 50 mm (X) × 150 mm (Y) × 100 mm (Z) という小スペースで実装することができた。また、3.2.3 項でも触れたが DCM-Y 軸ステージは mXG-Z 軸ステージに固定されている。そのためビームと DCM の相対位置を崩すことなく可動式発生装置の移動が可能である。

図 4.1 に実際に 10m ビームラインに設置した DCM 及びステージの写真を、図 4.2 に DCM 周辺の模式図を示す。

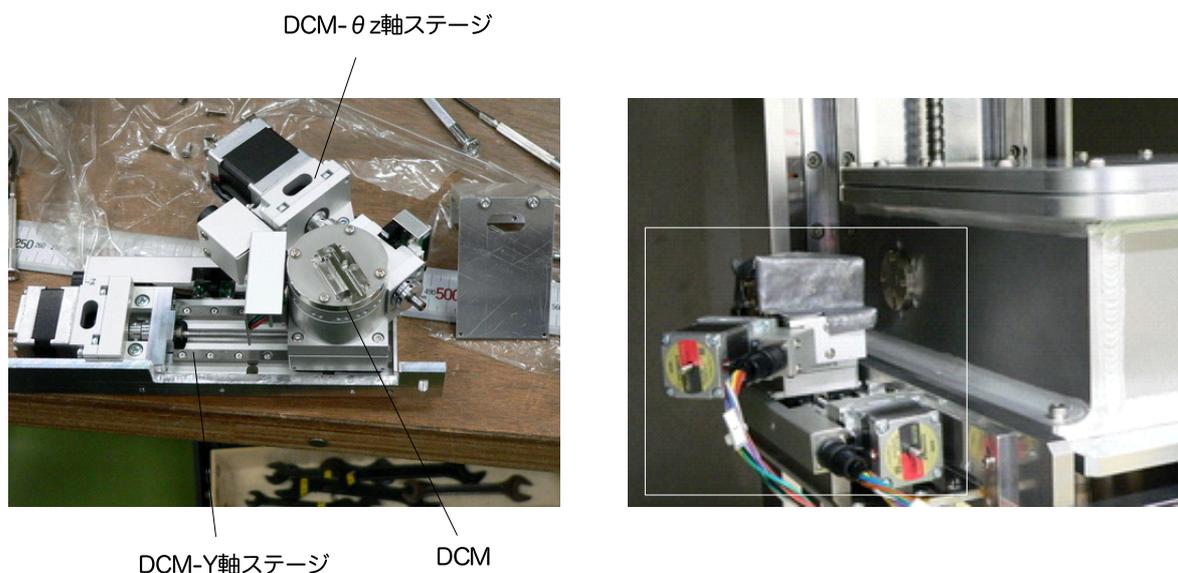


図 4.1: 10m ビームライン搭載 DCM 及びステージ

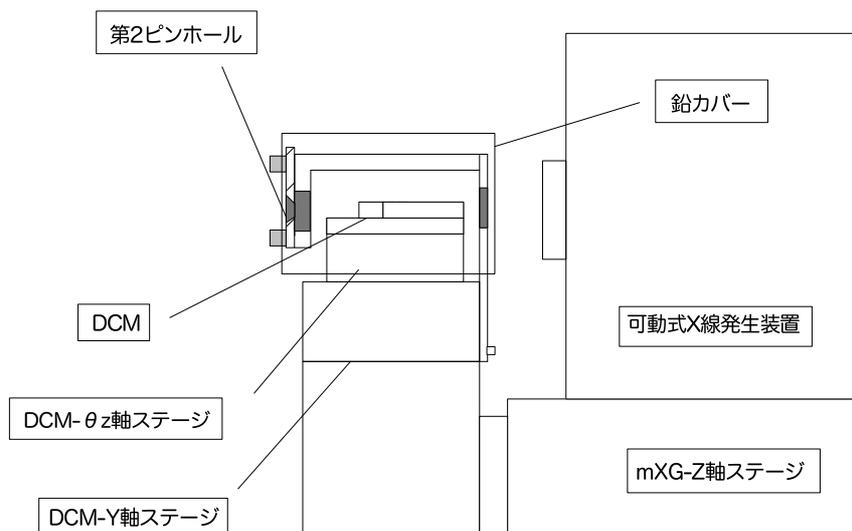


図 4.2: 10m ビームライン搭載 DCM 周辺模式図 — DCM-Y 軸ステージは mXG-Z 軸ステージに固定されている。そのためビームと DCM の相対位置を崩すことなく可動式発生装置の移動が可能である。

#### 4.1.2 回転中心

30m ビームラインでは第 1 結晶面に回転中心が置かれているのに対し、10m ビームラインでは第 2 結晶面に配置した。第 2 ピンホールが開けられている真鍮の板は、DCM のアラインメント後取り付けを行うが、第 2 結晶面に回転中心を配置することでこの取り付けの作業を単純化することができる。以下に第 1 結晶面、第 2 結晶面それぞれに回転中心を置いた場合の第 2 ピンホール取り付け手順について述べる。

##### 第 1 結晶面に回転中心を配置した場合

第 1 結晶面に回転中心を配置した場合の手順を示す (図 4.3 参照)。2.3.4 項に示した手順で DCM のアラインメントを行った後、以下の手順で第 2 ピンホールの取り付けを行う。

1. 可動式発生装置からの X 線と第 1 結晶面が平行になるようアラインメントをとる。
2. DCM-Y 軸ステージで結晶間距離  $b$  だけ DCM を移動させ、第 2 結晶が X 線を半分に切る状態にする。
3. チェンバ をリークし、下流側から X 線と同軌道をたどるレーザー光を照射し、第 2 結晶がレーザー光の半分を切っていることを確認する。
4. X 軸方向で第 2 ピンホールの中心と第 2 結晶面の位置が一致するよう第 2 ピンホールを微調整しながら取り付ける。
5. 真空引きを行い、DCM を目的のエネルギーのブラッグ角に回転させる。
6. 第 2 ピンホールの位置を X 線の出射位置と合わせるため、 $2b\cos\theta$  だけ DCM-Y 軸ステージにより DCM を移動させる。その後、可動式発生装置もしくは検出器の位置を合わせる。

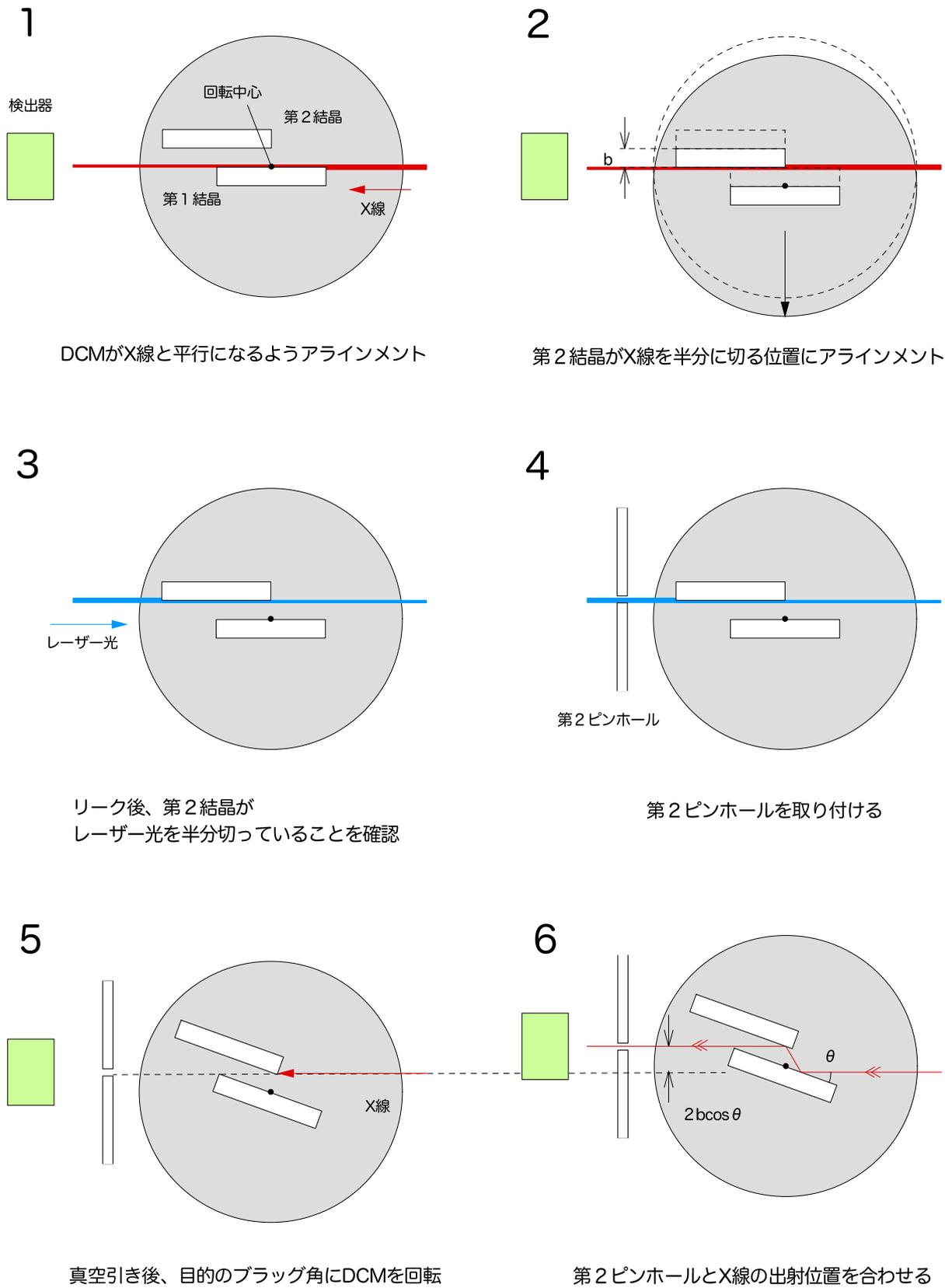


図 4.3: 第 1 結晶面に回転中心を配置した場合のアライメント手順

## 第 2 結晶面に回転中心を配置した場合

第 2 結晶面に回転中心を配置した場合の手順を示す (図 4.4 参照)。2.3.4 項に示した手順で DCM のアラインメントを行った後、以下の手順で第 2 ピンホールの取り付けを行う。第 1 結晶面に回転中心を配置したときよりも 1 行程分作業を短縮することができる。

1. 可動式発生装置からの X 線と第 2 結晶面が平行になるようアラインメントをとる。
2. チェンバ をリークし、下流側から X 線と同軌道をたどるレーザー光を照射し、第 2 結晶がレーザー光の半分を切っていることを確認する。
3. X 軸方向で第 2 ピンホールの中心と第 2 結晶面の位置が一致するよう第 2 ピンホールを微調整しながら取り付ける。
4. 真空引きを行い、DCM を目的のエネルギーのブラッグ角に回転させる。
5. 第 2 ピンホールの位置を X 線の出射位置と合わせるため、 $2b\cos\theta$  だけ DCM-Y 軸ステージにより DCM を移動させる。その後、可動式発生装置もしくは検出器の位置を合わせる。

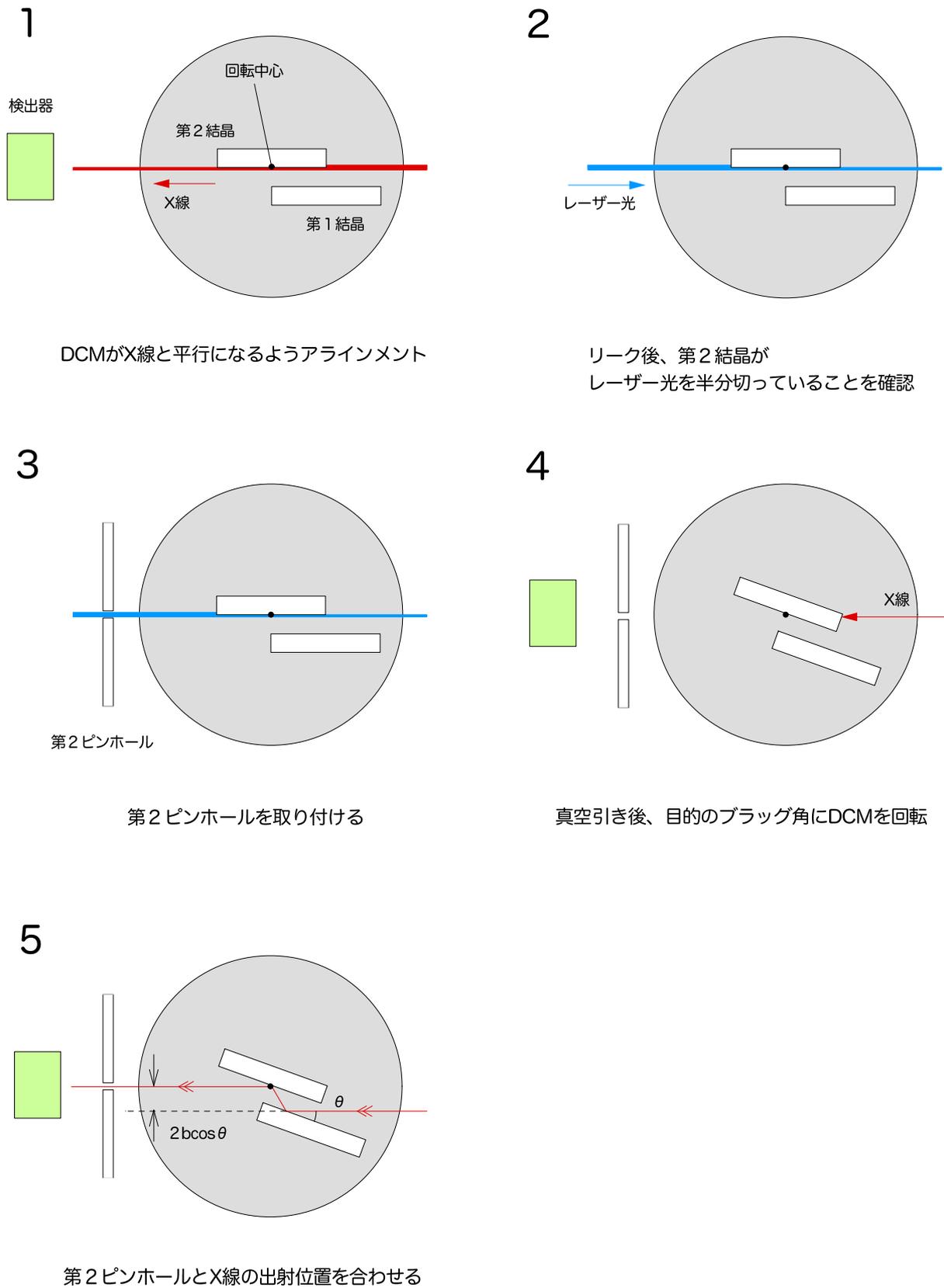


図 4.4: 第 2 結晶面に回転中心を配置した場合のアラインメント手順

## 4.2 X線の単色化

2.3.4 項に示した DCM のアラインメント手順に従い、 $W-L_{\alpha 1}$  (8.04 keV) について単色化を行った。図 4.5 にその際得られたロッキングカーブを示す。ロッキングカーブでは 2 本の輝線が得られ、強度比、エネルギーの差から左の輝線が  $W-L_{\alpha 1}$  (8.40 keV)、右の輝線が  $W-L_{\alpha 2}$  (8.34 keV) と判断することができる。また、単色化後に得られたスペクトルを図 4.6 に示す。スペクトルから 8.40 keV 以外のエネルギーにも光子が分布していることが分かるが、これらの強度が十分低いことから単色化に成功したとすることができる。なお、このスペクトルは第 5 章にて述べる散乱光の測定時のもので、コリメータステージに CdZnTe 検出器を設置して取得した。

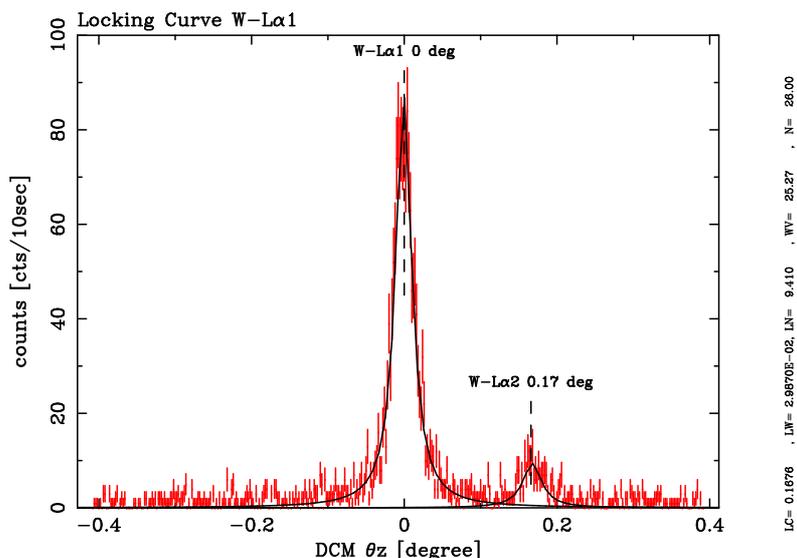


図 4.5: ロッキングカーブ — DCM- $\theta_z$  を 0.002 degree ピッチで回転させ、ディテクターチェンバ 内の PC により測定を行った。強度比、エネルギーの差から左の輝線が  $W-L_{\alpha 1}$  (8.40 keV)、右の輝線が  $W-L_{\alpha 2}$  (8.34 keV) と判断することができる。

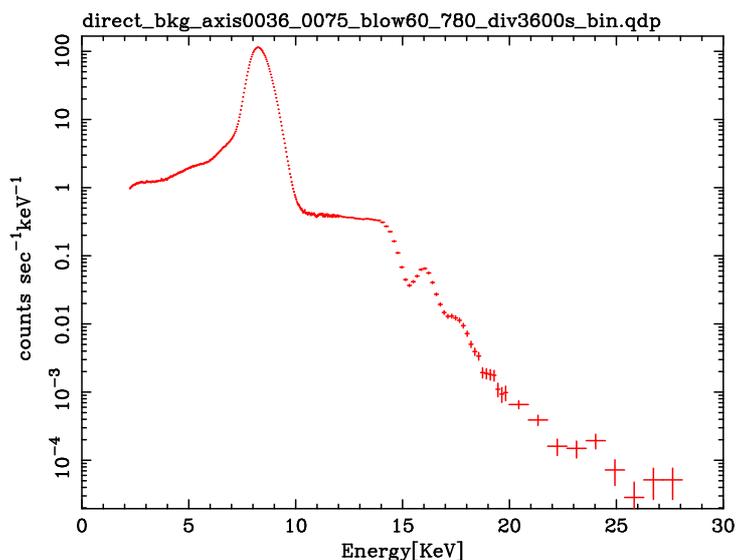


図 4.6: 単色化後のスペクトル — このスペクトルは第 5 章にて述べる散乱光の測定時のもので、コリメータステージに CdZnTe 検出器を設置して取得した。

## 第5章 散乱光の抑制

本章では、10m ビームラインにおける散乱光の抑制について述べる。まず、XRT の性能評価が可能となる散乱光レベルを見積った。そして、実際に散乱光を測定し、第2 ピンホールの径を小さくすることで軽減を行った。

### 5.1 目的

散乱光の XRT への混入は、軟 X 線領域での性能評価を視野に入れている 10m ビームラインにおいて無視することができない。したがって、XRT の性能評価が可能なレベルまで散乱光を軽減する必要がある。

#### 5.1.1 軽減目標値の見積もり

10m ビームラインにおいて、散乱光とダイレクト光との強度比がどの程度であれば、XRT の性能評価を行うことができるのかを見積もる。

図 5.1.1 にダイレクト光と散乱光の概念図を示す。

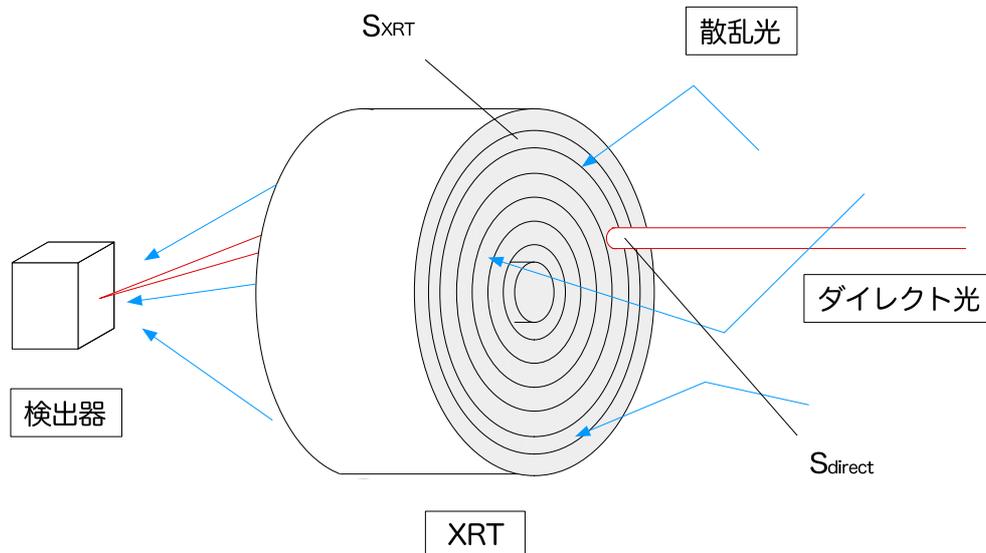


図 5.1: ダイレクト光、散乱光概念図 — XRT の開口面積を  $S_{XRT}$ 、ダイレクト光の面積を  $S_{direct}$  とする。

今、散乱光とダイレクト光との強度比が 1 : 1 より十分小さくなる場合を考える。XRT の開口面積を  $S_{XRT}$ 、XRT へ入射する散乱光のフラックスを  $F_{scatter}$ 、散乱光の反射率を  $R_{scatter}$ 、ダイレクト光の面積を  $S_{direct}$ 、ダイレクト光のフラックスを  $F_{direct}$ 、ダイレクト光の反射率を  $R_{direct}$  とする。このときダイレク

ト光と散乱光の強度比が 1 : 1 より十分小さくなるときの条件は次式で表すことができる。

$$\frac{S_{\text{XRT}} \times F_{\text{scatter}} \times R_{\text{scatter}}}{S_{\text{direct}} \times F_{\text{direct}} \times R_{\text{direct}}} \ll 1 \quad (5.1)$$

ここで、 $R_{\text{direct}}$  は 1 である。また、より厳しい制限をつけるため、 $R_{\text{scatter}}$  についても 1 とする。そして、10m ビームラインにおいて測定が可能な XRT の最大直径 600 mm、第3ピンホールには直径 1.0 mm のものを仮定する。すると

$$\frac{S_{\text{XRT}}}{S_{\text{direct}}} = \frac{300 \times 300 \times \pi}{0.5 \times 0.5 \times \pi} = 3.6 \times 10^5 \quad (5.2)$$

式 5.2 を式 5.1 に代入すると

$$\frac{F_{\text{scatter}}}{F_{\text{direct}}} \ll 2.8 \times 10^{-6} \quad (5.3)$$

したがって、式 5.3 が XRT の性能評価を行うために必要な条件となる。

## 5.2 第2ピンホール直径 10 mm 時における散乱光の測定

第2ピンホールの直径を 10 mm とし、そのときの散乱光を測定した。

### 5.2.1 測定方法

可動式 X 線発生装置を X 線を出射している状態で可動式発生装置チェンバ 中心位置に固定し、検出器を移動させモザイク状に散乱光のデータを取得した。検出器には CdZnTe 半導体検出器（以下 CZT）を用い、コリメータステージに設置して測定を行った。これはディテクタステージにより本測定を行うよりも、コリメータステージを用いて行った方がステージの可動範囲から、より広範囲のデータを取得することができるためである。コリメータステージのストローク限界である 600×600 mm の領域を 60×60 mm の 100 マスに分割し、各マスの中央にて露光時間 180 sec でデータを取得した（図 5.4）。

また、測定の際第3ピンホール、鉛板等については取り外して測定を行った。これは CZT の検出面は直径 4.5 mm であり、第3ピンホールの最大直径 1.0 mm よりも大きいことから、第3ピンホールを外した状態の方が測定を効率よく進めることができるからである。

図 5.2 に測定方法についての概念図を、図 5.3 に実装した CZT の様子を載せる。また、表 5.1 に本測定に関する各パラメーターをまとめる。

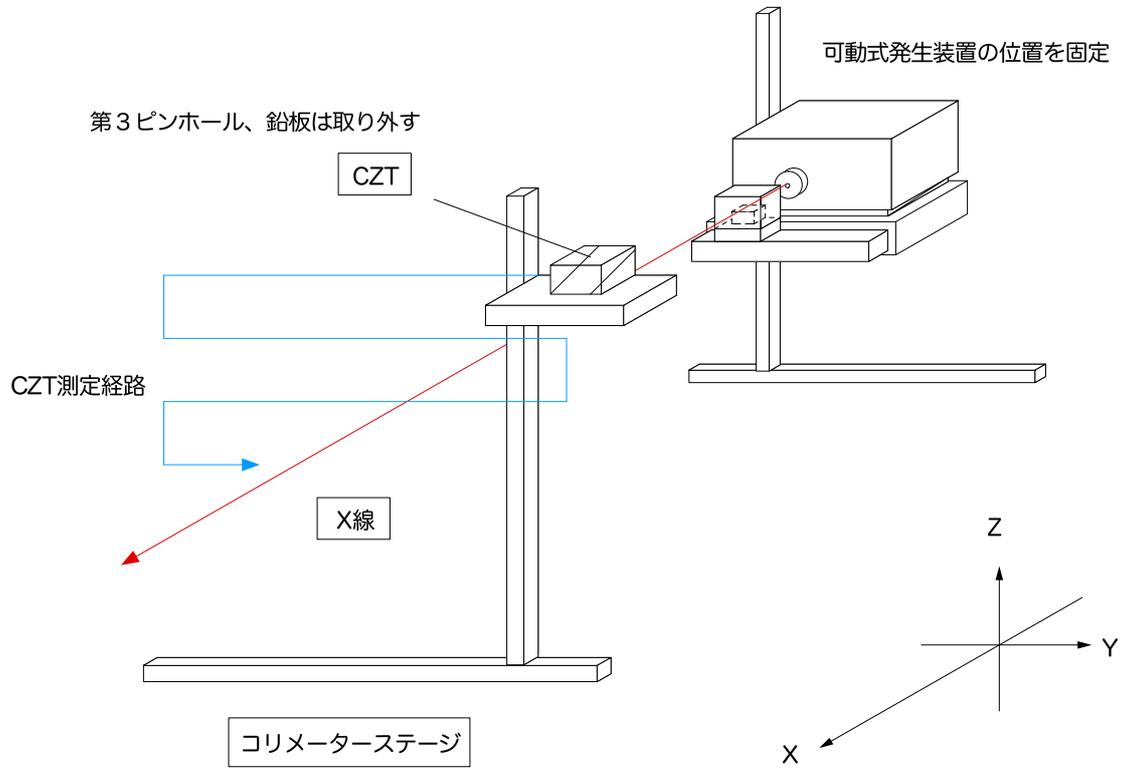


図 5.2: 散乱光測定概念図

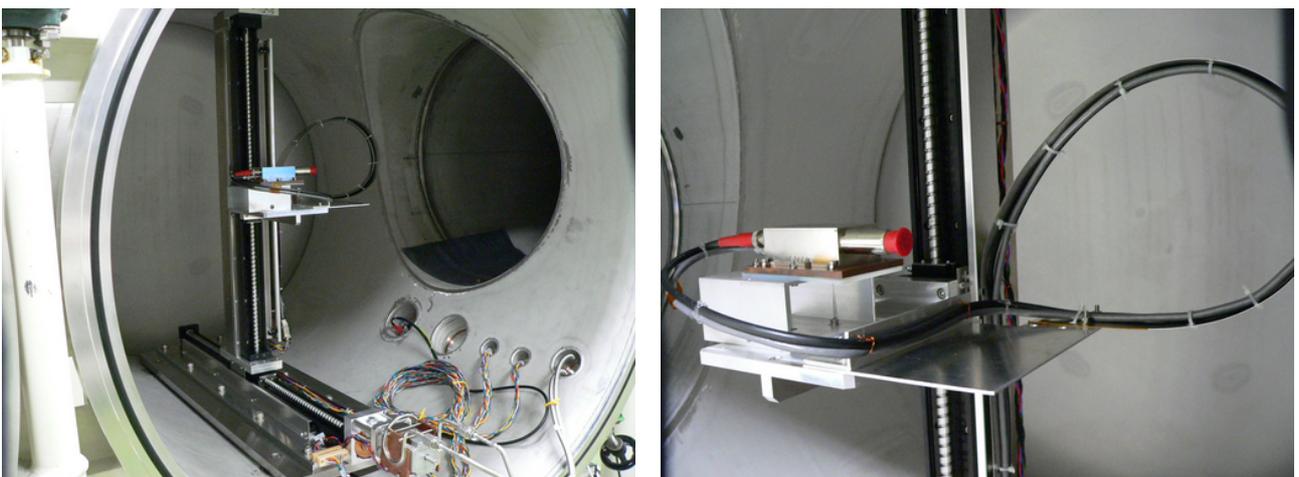


図 5.3: コリメータステージに設置した CZT — 先端に取り付けられている赤い保護キャップは測定の際には取り外す。

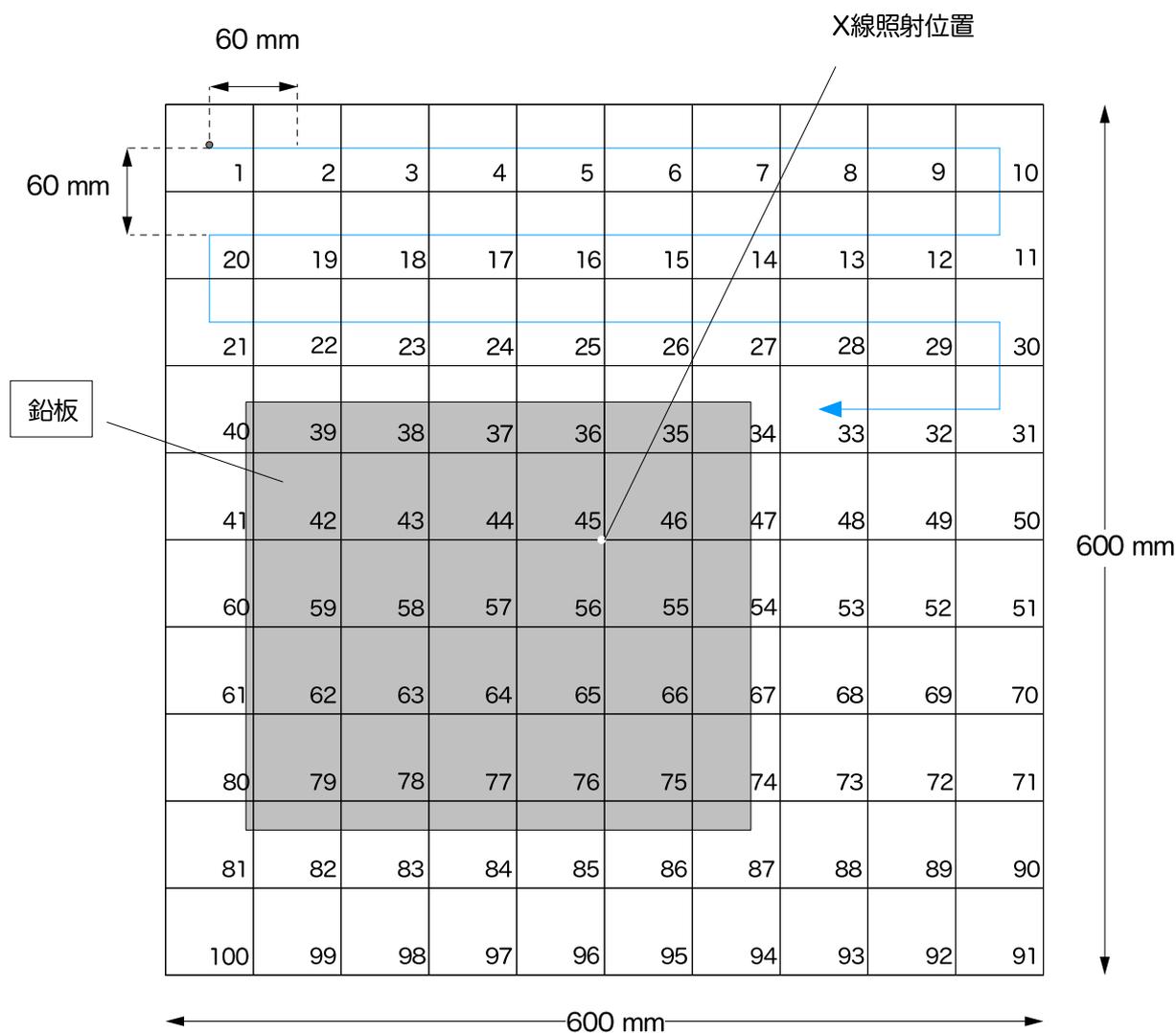


図 5.4: CZT 測定経路図— 上流側から見たときの図である。コリメータステージのストローク限界である 60×60 mm の領域を 60×60 mm の 100 マスに分割し、各マスの中央にてデータを取得した。縦軸、横軸ともに X 線照射位置を中心にとっている。また、測定は第 3 ピンホール上流の鉛板を取り外して行ったが、参考のために図の中に書き入れた。各マスの左下に記載した数字は便宜的につけた測定番号であり、1 番のマスから順に測定を行った。

表 5.1: 第 2 ピンホール直径 10 mm 時の散乱光測定パラメーター

第 2 ピンホール直径	10 mm
測定点数	100 点
1 点あたりの露光時間	180 sec

## 5.2.2 解析方法

取得した散乱光のデータについての解析は以下の方法で行った。

1. 図 5.4 にあるように第 3 ピンホール上流にある鉛板で覆われることになる 34~39 番、42~47 番、54~59 番、62~67 番、74~79 番のマスデータを除き、残りの 70 マス分を足し合わせた。
2. X 線を止めた状態で図 5.4 と同様の経路で CZT を移動させ、1 点につき露光時間 1000 sec でバックグラウンドを取得した。バックグラウンドについては全マスについて足し合わせ、適切な重みをつけた上で 1 のデータから差し引いた。
3. CZT の検出効率を考慮して約 2~30 keV のバンドを積分領域とし、2 のデータから  $F_{\text{scatter}}$ 、 $F_{\text{direct}}$  を算出した。
4.  $F_{\text{scatter}} / F_{\text{direct}}$  を算出し、式 5.3 と比較する。

また、2 で取得したバックグラウンドのスペクトルを図 5.2.2 に示す。

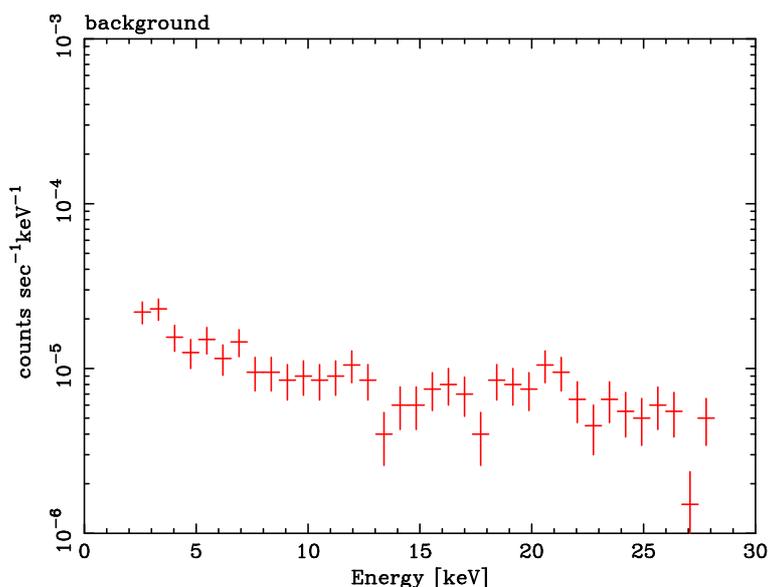


図 5.5: バックグラウンドのスペクトル — X 線を止めた状態で図 5.4 と同様の経路で CZT を移動させ、バックグラウンドを取得した。露光時間は 1 点につき 1000 sec。上に示したスペクトルは 100 マス分のデータを足し合わせ、トータルの露光時間で規格化したものである。

## 5.2.3 測定結果

第 2 ピンホール直径 10 mm 時における散乱光の測定結果について述べる。図 5.6 に鉛板に覆われる部分を除いた 70 マス分の散乱光のデータを足し合わせたスペクトルを、表 5.2 に  $F_{\text{scatter}}$ 、 $F_{\text{direct}}$ 、 $F_{\text{scatter}} / F_{\text{direct}}$  の値についてまとめる。

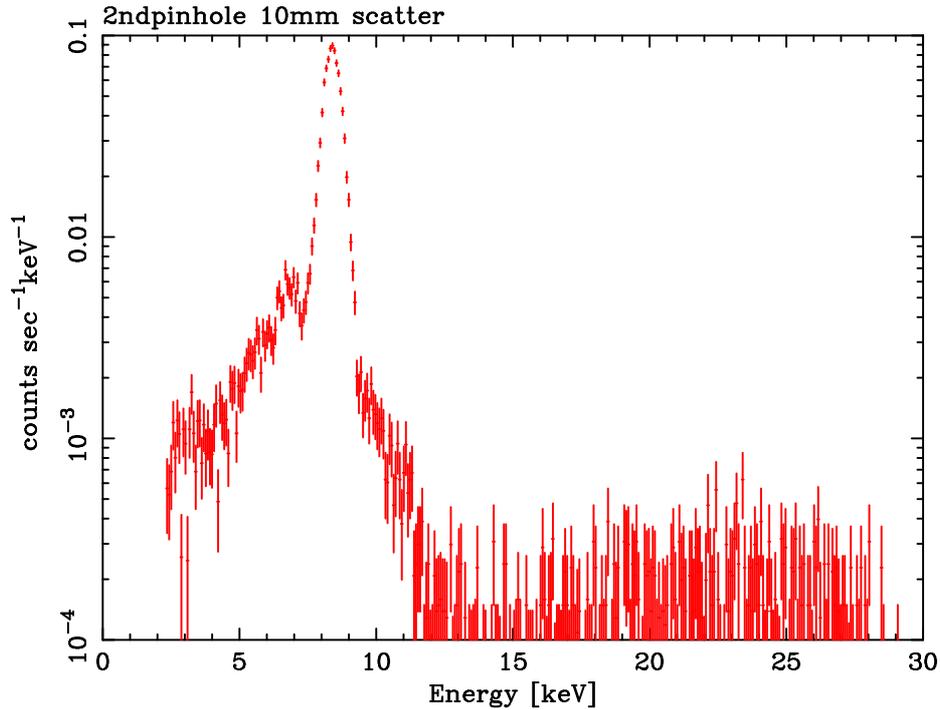


図 5.6: 第2ピンホール直径 10 mm 時の散乱光のスペクトル — 図 5.4 にある鉛板に覆われる部分を除いた 70 マスのデータを足し合わせたときの散乱光のスペクトルである。W-L $\alpha$ 1 の 8.40 keV 付近に大きなスペクトルの盛り上がりが見られる。

表 5.2: 第2ピンホール直径 10 mm 時の散乱光測定結果

$F_{\text{scatter}}$	$1.15 \pm 0.01$
$F_{\text{direct}}$	$(3.67 \pm 0.001) \times 10^3$
$F_{\text{scatter}} / F_{\text{direct}}$	$3.13 \times 10^{-4}$

#### 5.2.4 考察

表 5.2 から第2ピンホール直径 10 mm の時は条件式 5.3 を満たしていないことが分かる。このような結果を引き起こしている最大の要因は、図 5.6 から 8.40 keV 付近の散乱光であると言える。これは可動式発生装置からのビームが鉛板の大きさを上回り、もれ込んできていることを表している。したがって、ビーム拡散角を抑えることが必要である。

### 5.3 第2ピンホール直径 1.0 mm 時における散乱光の測定

第2ピンホールを直径 1.0 mm のものにし、5.2 節と同様に散乱光の測定を行う。

## 5.3.1 測定、解析方法

CZT の測定経路等基本的には第 2 ピンホール直径 10 mm のときと同様に測定、解析を行った。しかし、第 2 ピンホールの径を小さくしたことで全体的な光量が減少していると思われたため、露光時間を変更し 1 点につき 1000 sec として測定を行った。

表 5.3 に測定パラメーターをまとめる。

表 5.3: 第 2 ピンホール直径 1.0 mm 時の散乱光測定パラメーター

第 2 ピンホール直径	1.0 mm
測定点数	100 点
1 点あたりの露光時間	1000 sec

## 5.3.2 測定結果

第 2 ピンホール直径 1.0 mm 時における散乱光の測定結果について述べる。図 5.7 に鉛板に覆われる部分を除いた 70 マス分の散乱光のデータを足し合わせたスペクトルを、表 5.4 に  $F_{\text{scatter}}$ 、 $F_{\text{direct}}$ 、 $F_{\text{scatter}} / F_{\text{direct}}$  の値についてまとめる。

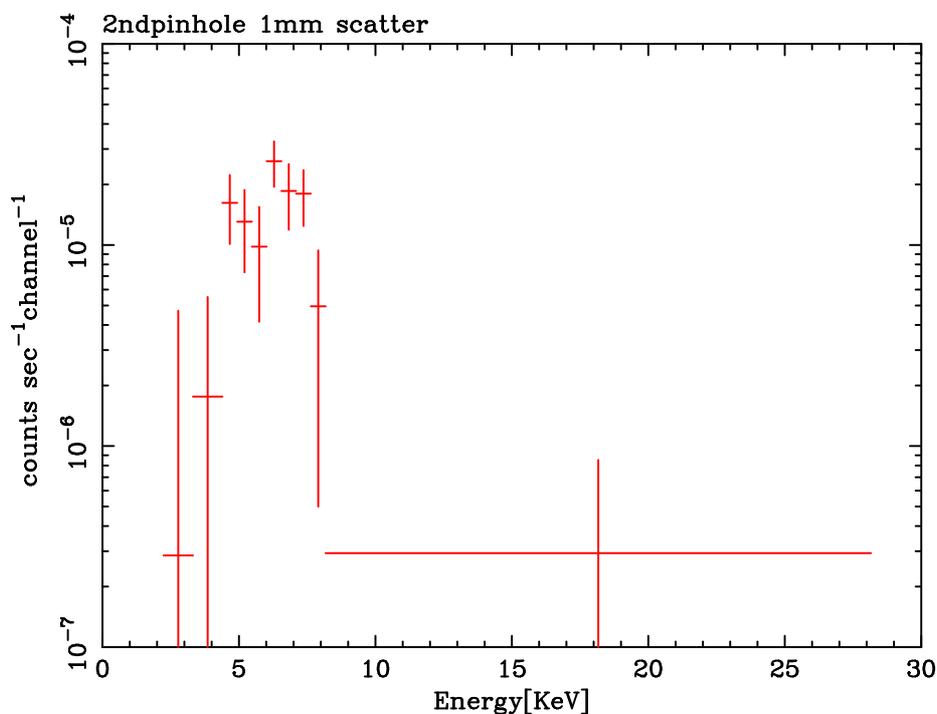


図 5.7: 第 2 ピンホール直径 1.0 mm 時の散乱光のスペクトル — 5.4 にある鉛板に覆われる部分を除いた 70 マス分のデータを足し合わせたときの散乱光のスペクトルである。8.40 keV 付近の散乱光については軽減に成功した。しかし、5 keV~7 keV 付近に優位な盛り上がりが見られる。

表 5.4: 第2ピンホール直径 1.0 mm 時の散乱光測定結果

$F_{\text{scatter}}$	$(1.82 \pm 0.43) \times 10^{-3}$
$F_{\text{direct}}$	$(3.021 \pm 0.006) \times 10^3$
$F_{\text{scatter}} / F_{\text{direct}}$	$6.0 \times 10^{-7}$

### 5.3.3 考察

表 5.4 から  $F_{\text{scatter}} / F_{\text{direct}} = 6.0 \times 10^{-7}$  であり、条件式 5.3 を満たしていることが分かる。これより、第2ピンホールの直径を 1.0 mm にすることで XRT に入射する散乱光のフラックスをダイレクト光の  $\sim 10\%$  という値にまで軽減することに成功したと言える。この一番の要因は図 5.7 を見て分かるように、第2ピンホール 10 mm 時に問題となっていた 8.40 keV 付近の散乱光を軽減することができたからである。

しかしながら、5 keV  $\sim$  7 keV 付近に優位な盛り上がりが見られる。これは 5 keV  $\sim$  7 keV の散乱光の存在を意味している。この成分の位置依存性について調べたが、この成分は特定の場所に集中しておらず、チェンバ 内のいたるところに散らばって存在していることが分かった。10m ビームラインでは主に軟 X 線領域での運用を目指しているため、この 5 keV  $\sim$  7 keV の散乱光による影響が少なからず XRT の性能評価に影響すると考えられる。したがって第2ピンホールの径をさらに小さくし、この 5 keV  $\sim$  7 keV の散乱光の軽減を試みた。

## 5.4 第2ピンホール直径 0.5 mm 時における散乱光の測定

第2ピンホールの直径 0.5 mm にし、散乱光の測定を行った。

### 5.4.1 測定、解析方法

第2ピンホール直径 1.0 mm 時と同様の手法により行った。露光時間についても 1.0 mm 時と同様に 1 点につき 1000 sec で行った。

表 5.5 に測定パラメーターをまとめる。

表 5.5: 第2ピンホール直径 0.5 mm 時の散乱光測定パラメーター

第2ピンホール直径	0.5 mm
測定点数	100 点
1 点あたりの露光時間	1000 sec

### 5.4.2 測定結果

第2ピンホール直径 0.5 mm 時における散乱光の測定結果について述べる。図 5.8 に鉛板に覆われる部分を除いた 70 マス分の散乱光のデータを足し合わせたスペクトルを、表 5.6 に  $F_{\text{scatter}}$ 、 $F_{\text{direct}}$ 、 $F_{\text{scatter}} / F_{\text{direct}}$  の値についてまとめる。

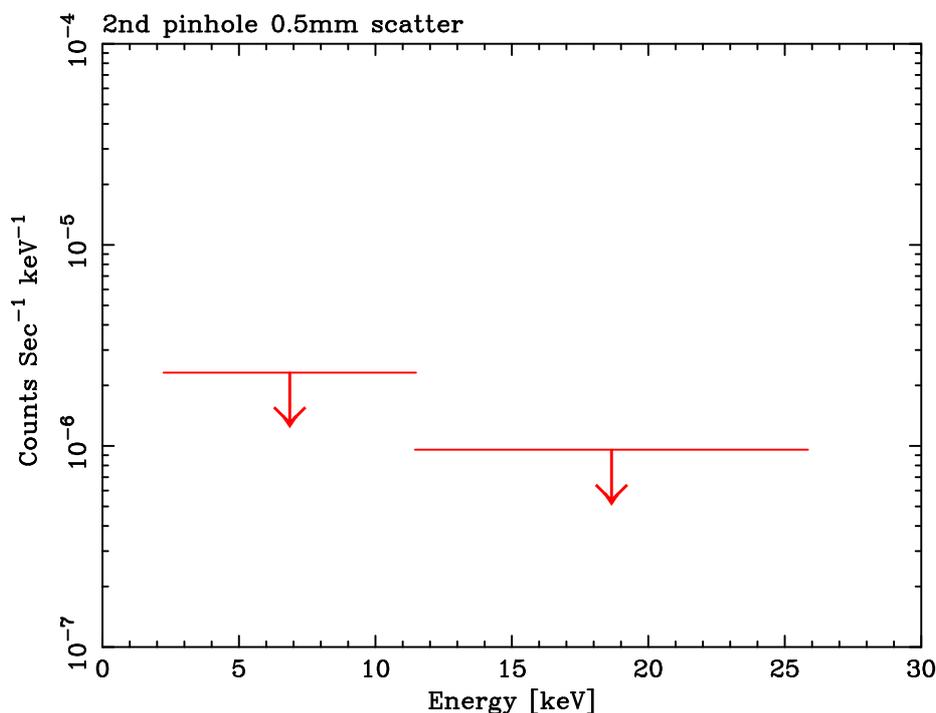


図 5.8: 第 2 ピンホール直径 0.5 mm 時の散乱光のスペクトル — 5.4 にある鉛板に覆われる部分を除いた 70 マス分のデータを足し合わせた散乱光のスペクトルである。第 2 ピンホール直径 1.0 mm のときに見られていた 5 keV~7 keV の散乱光の軽減に成功し、検出器のノイズレベル以下にまで散乱光を軽減することができた。

表 5.6: 第 2 ピンホール直径 0.5 mm 時の散乱光測定結果

$F_{\text{scatter}}$	$< 8 \times 10^{-4} a$
$F_{\text{direct}}$	$(1.94 \pm 0.02) \times 10^3$
$F_{\text{scatter}} / F_{\text{direct}}$	$< 4 \times 10^{-7}$

a:  $1\sigma$  エラーの上限値

### 5.4.3 考察

表 5.6 から  $F_{\text{scatter}} / F_{\text{direct}} < 4 \times 10^{-7}$  であり条件式 5.3 を満たしていることが分かる。また、図 5.8 から第 2 ピンホール直径 1.0 mm のときに見られていた 5 keV~7 keV の散乱光の軽減に成功し、検出器のノイズレベル以下にまで散乱光を軽減することができたことが分かる。

そして、確認のため鉛板の内側と外側とで散乱光の強度に優位な差がないかを調べた。鉛板周辺のマスに対しビームラインの座標系で Y 軸方向、Z 軸方向にそれぞれプロジェクションをとり、鉛板内外での散乱光の強度変化を調べた。その結果、どちらの方向においても鉛板内側と外側とで散乱光の強度に優位な差は見られなかった。結果を図 5.9 に示す。

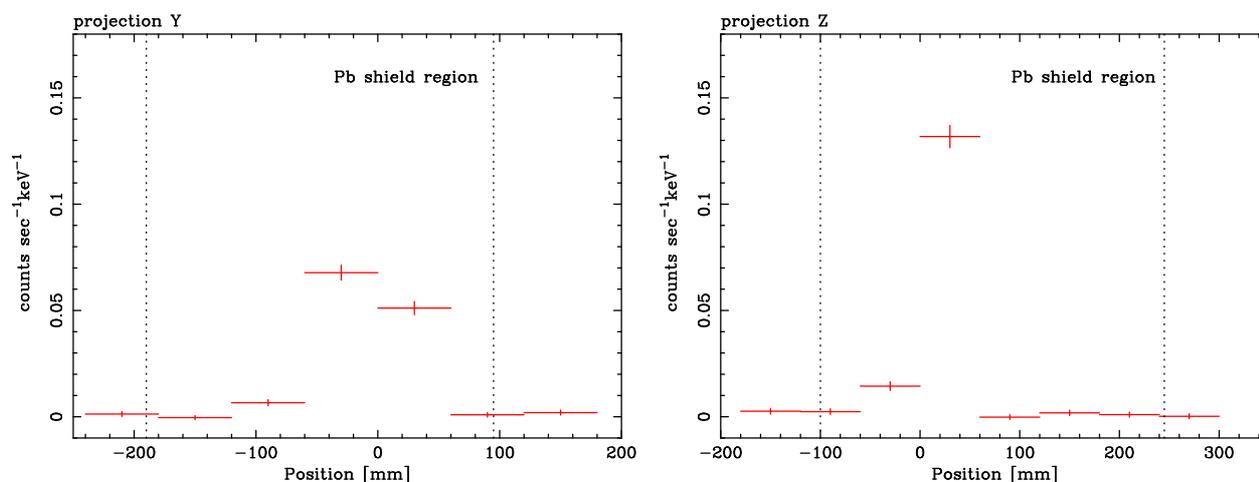


図 5.9: 鉛板内外での散乱光の強度変化 — 鉛板周辺のマスに対しビームラインの座標系で Y 軸方向 (左図)、Z 軸方向 (右図) にそれぞれプロジェクションをとり、鉛板内外での散乱光の強度変化を調べた。どちらの方向においても内外で優位な差がないことが分かる。

## 5.5 散乱光測定のみとめ

5.2~5.4 節において第 2 ピンホールの直径を 10 mm、1.0 mm、0.5 mm と変え、散乱光の測定を行った。測定にはコリメータステージ上に設置した CZT 検出器を用い、60 mm ピッチで CZT を移動させ 600 mm×600 mm の領域について行った。

各第 2 ピンホール直径における  $F_{\text{scatter}} / F_{\text{direct}}$  の値を表 5.7 にまとめる。

表 5.7: 各第 2 ピンホールの直径における  $F_{\text{scatter}} / F_{\text{direct}}$

第 2 ピンホール直径 [mm]	$F_{\text{scatter}} / F_{\text{direct}}$
10	$3.13 \times 10^{-4}$
1.0	$6.0 \times 10^{-7}$
0.5	$< 4 \times 10^{-7}$

表 5.7 から分かるように第 2 ピンホールの直径が 1.0 mm、0.5 mm のときの散乱光とダイレクト光の強度比はともに条件式 5.3 を満たし、XRT に入射する散乱光のフラックスをダイレクト光の ~10 % 以下という値にまで軽減することに成功した。第 2 ピンホール 0.5 mm 時においては、1.0 mm 時に生じていた 5 keV~7 keV 付近の散乱光を軽減し、検出器のノイズレベル以下にまで散乱光を落とすことに成功した。以上の結果から第 2 ピンホールには直径 0.5 mm のものを採用した。

また、本章では  $R_{\text{scatter}}$  を 1 と仮定し、条件式を見積もったが、実際の XRT の性能評価の際には第 3 ピンホール上流にある鉛板のために XRT に入射する散乱光はある程度角度を持って入射することになる。したがって検出器上に到達する実際の散乱光レベルは、本測定結果のダイレクト光の ~10 % という値よりもさらに低いレベルでることが予想される。実際、後日行った 10 m ビームラインでの XRT の性能評価測定の際、ダイレクト光と反射光のスペクトルにおいてその形状に優位な差は見られず、散乱光の影響は見られなかった。詳しくは第 7 章にて述べる。

## 第6章 ラスタースキャンシステムの確立

### 6.1 ステージの同期性

10m ビームラインにおいてラスタースキャンを行う際、可動式 X 線発生装置ステージとコリメーターステージとを同期させて動かす。ラスタースキャンは一般に、+Y 軸方向と -Y 軸方向に向かってスキャンした結果を足し合わせる。そのため 10m ビームラインでは、両方向での可動式発生装置ステージとコリメーターステージの相対的な位置関係が重要になってくる。これは図 6.1 に示すように、両ステージの位置関係によりビームが XRT へ入射する際の入射角度が異なるためである。そこで、±Y 軸方向の両ステージの同期精度について把握し<sup>1</sup>、それが XRT の性能評価に影響を及ぼさないかどうかを把握しておく必要がある。

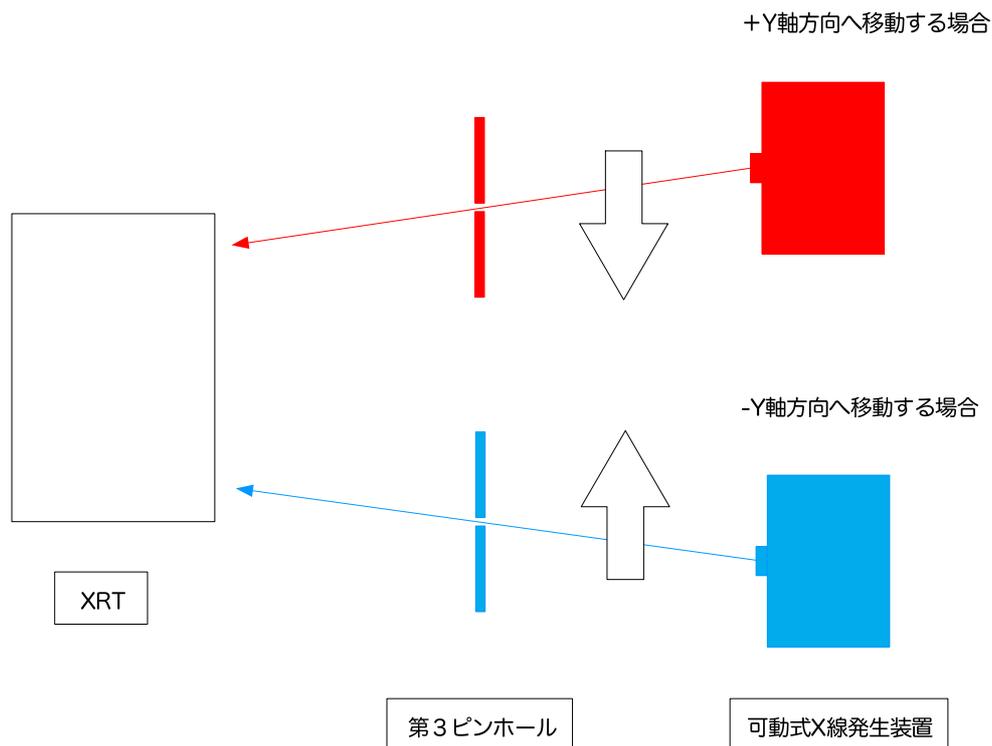


図 6.1: 同期性についての概念図 — 赤色で書かれているものが +Y 軸方向に移動させたとき、青色で書かれているものが -Y 軸方向に移動させたときを表している。しかし、必ずしも図のような方向にステージのずれが生じるわけではない。

<sup>1</sup>ラスタースキャンでは Z 軸方向の同期性は問題とならない。

## 6.2 ステージ同期性の測定

可動式 X 線発生装置とコリメーターステージを同時に移動させ、サンプルの XRT をスキャンした。そして 6.2.2 項に示す測定項目について CCD 面上での結像位置から同期性を見積もる。

### 6.2.1 サンプル XRT

本測定ではサンプル XRT として 2008 年に首都大学東京理工学研究科 鈴木により製作されたテスト Quadrant を使用した。仕様を表 6.1 にまとめる。また、位置決め誤差の改善を図り、アラインメントプレートで支持されている部分である、反射鏡母線方向の両端 10mm には金がレプリカされておらずアルミ基板が剥き出しの状態になっている。図 6.2 にこの反射鏡の写真を載せる。

表 6.1: サンプル XRT の仕様

口径	400 mm
反射鏡枚数	10 ペア (71 番 ~73 番、90 番 ~96 番)
結像性能 <sup>2</sup>	1.47 arcmin

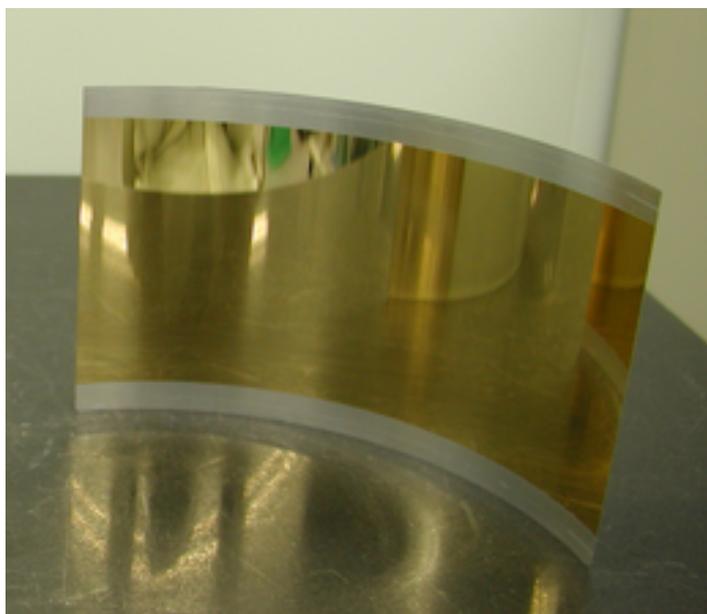


図 6.2: サンプル XRT 反射鏡 — 母線方向の両端 10mm には金がレプリカされておらずアルミ基板が剥き出しの状態になっている。

### 6.2.2 測定項目

以下の 4 つの項目について測定を行った。

- ステージ速度 2 mm/sec(1000 pulse/sec) 時における +Y 軸方向へのスキャン

- ステージ速度 2 mm/sec(1000 pulse/sec) 時における -Y 軸方向へのスキャン
- ステージ速度 10 mm/sec(5000 pulse/sec) 時における +Y 軸方向へのスキャン
- ステージ速度 10 mm/sec(5000 pulse/sec) 時における -Y 軸方向へのスキャン

### 6.2.3 測定方法

本測定では Y 軸方向の結像位置の変化を知りたいため、Y 軸方向への集光像の広がり小さい D サイドにサンプル XRT を設置して測定を行った。具体的な測定手順を以下に示す。また、図 6.3 に模式図を、図 6.4 に D サイドに XRT を設置したときの CCD イメージを示す。

1. D サイドにサンプル XRT を設置する。
2. 90 番台の反射鏡に X 線が当るよう可動式発生装置ステージとコリメーターステージを移動させる。(サンプル XRT の中心を原点として Z 軸方向に  $\sim$ -115 mm)
3. ビームが反射鏡から外れる位置まで、Y 軸方向に両ステージを移動させる。(Y 軸方向に  $\sim$ 180 mm)
4. CCD カメラの露光を開始し、Y 軸方向に 360 mm 両ステージを移動させる。( +Y 軸方向スキャン )
5. ステージの移動が終わったら、CCD カメラの露光を終了する。
6. 同様に CCD カメラの露光を開始し、今度は Y 軸方向に -360 mm、両ステージを移動させる。( -Y 軸方向スキャン )
7. ステージの移動が終わったら、CCD カメラの露光を終了する。
8. 2~7 を繰り返す。ステージ速度 2 mm/sec の測定については 11 往復、ステージ速度 10 mm/sec の測定については 21 往復測定を行った。

### 6.2.4 解析方法

取得したデータは以下の方法で解析した。

1. 個々の 1 ラインごとのデータが同じ母集団からのサンプルであるかを評価するために、Y 軸上に向かって像を投影し、ガウシアンフィットにより求めたピーク位置について比較する。このときの統計誤差には、カウント数が非常に少ないため、ポアソン統計を用いた。
2. 同速度、同方向の個々の 1 ラインごとのデータについて、1 で求めたピークに優位な差がなければ、全て同じ母集団からのサンプルであると考えられることができるため、同速度、同方向のデータについて足し合わせる。
3. 足し合わせたデータをガウシアンでフィットし、ピーク位置の比較を行う。

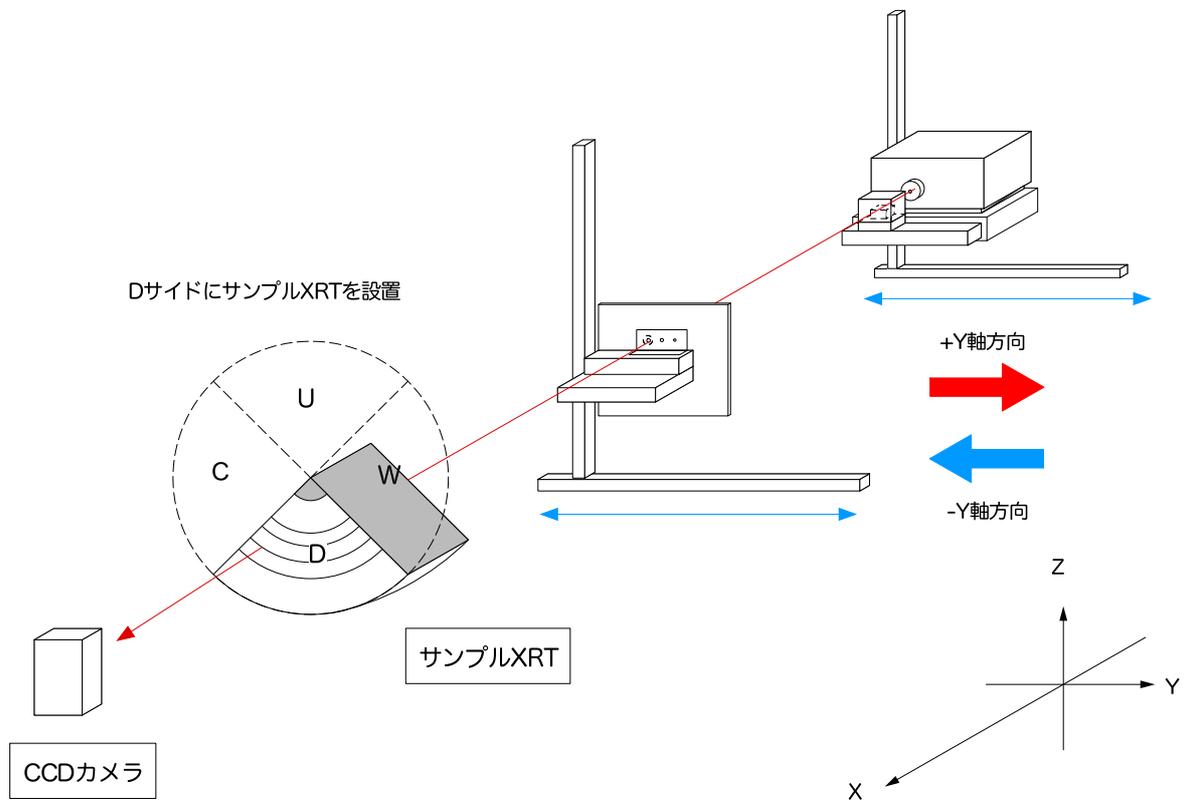


図 6.3: ステージ同期性の測定模式図

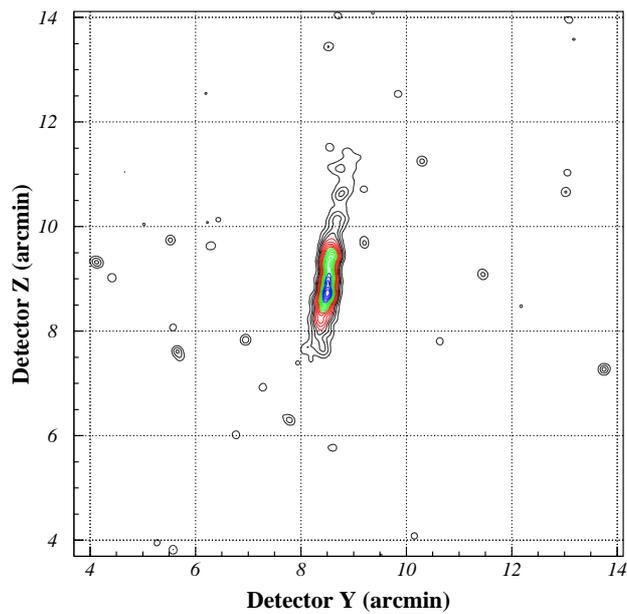


図 6.4: D サイドでの CCD イメージ — D サイドに XRT を設置したときの CCD イメージ。Y 軸方向への像の広がりが小さい。

6.2.5 測定結果

ステージ速度 2 mm/sec 時 +Y 軸方向についての測定結果

ステージ速度 2 mm/sec で +Y 軸方向にスキャンを行ったときの測定結果について示す。

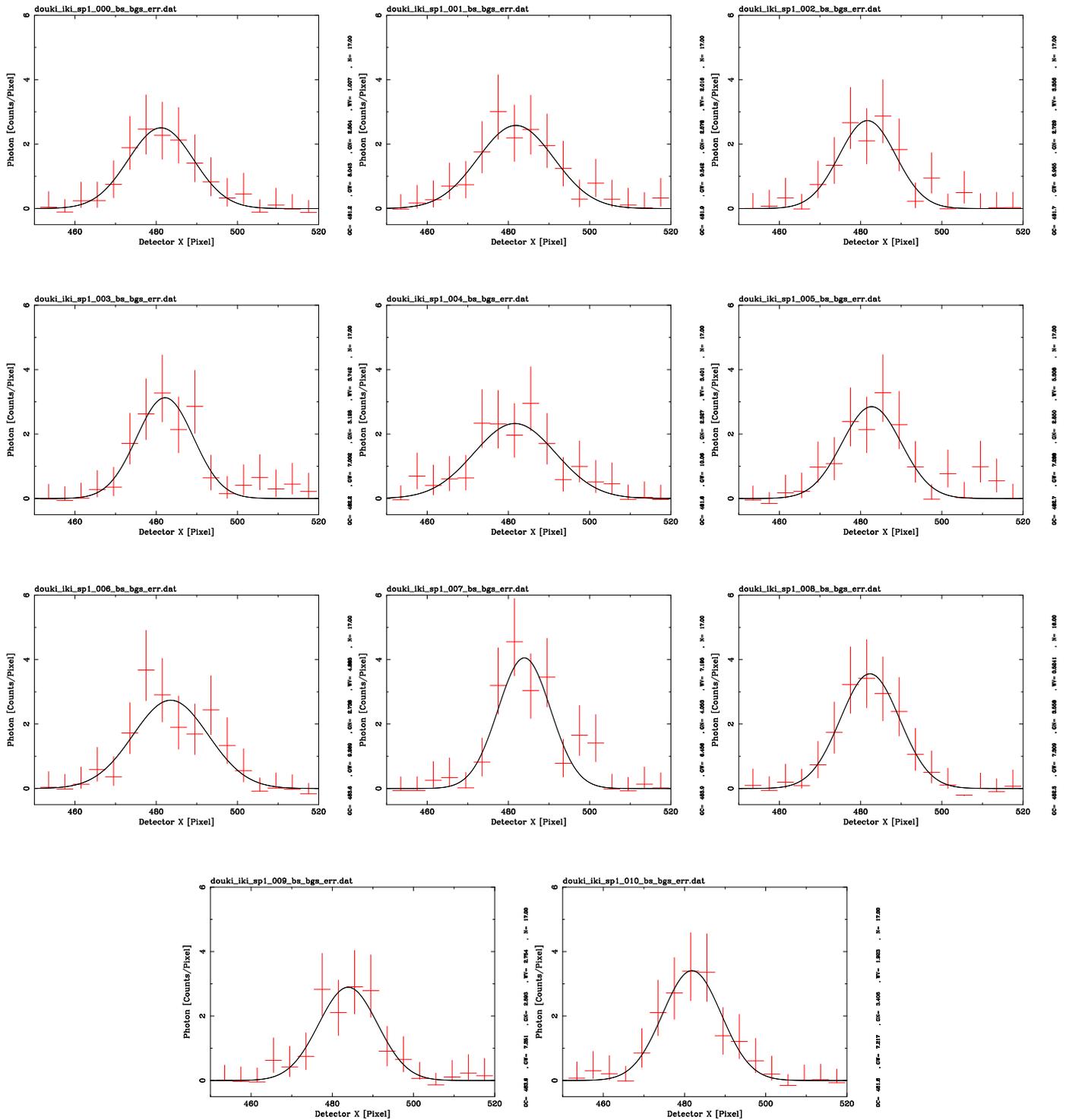


図 6.5: ステージ速度 2 mm/sec 時 +Y 軸方向スキャンの各ラインの投影結果— ステージ速度 2 mm/sec で +Y 軸方向にスキャンを行った際の結果。CCD により撮像した像を 1 ラインごとに Y 軸方向に向かって投影した。それをガウシアンでフィットし、CCD 面上で光量がピークになる位置を求めた。各データ点の統計誤差はポアソンエラーでつけている。

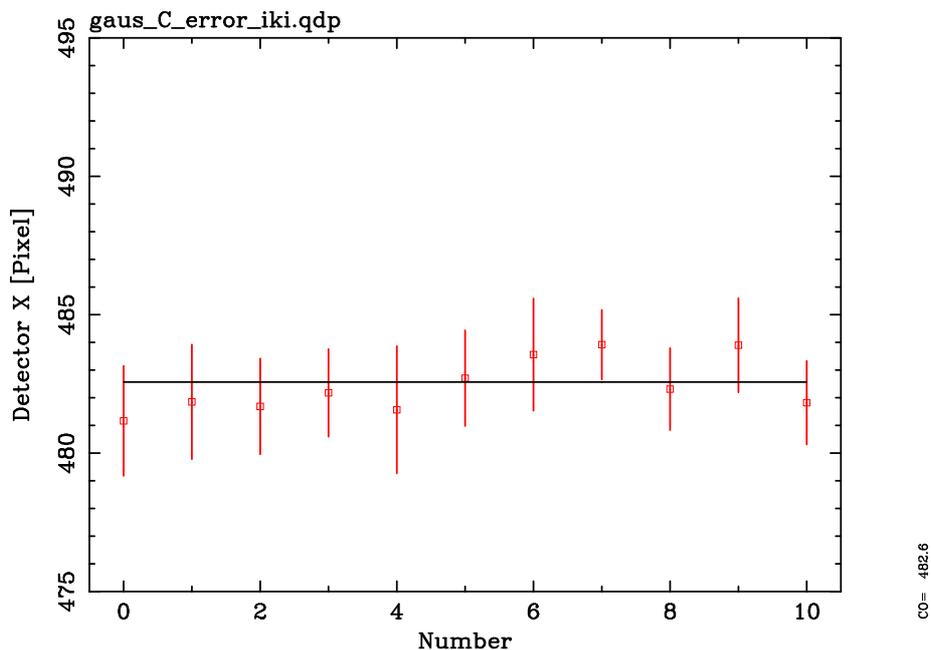


図 6.6: ステージ速度 2 mm/sec 時 +Y 軸方向スキャンの各ラインの光量ピーク位置— ステージ速度 2 mm/sec +Y 軸方向スキャンの各ラインごとの光量ピーク位置のプロット。縦軸にカウント数、横軸にライン番号をとっている。

図 6.6 から各データについて優位な差は見られないため、これらを足し合わせる。足し合わせたものを図 6.7 に示す。

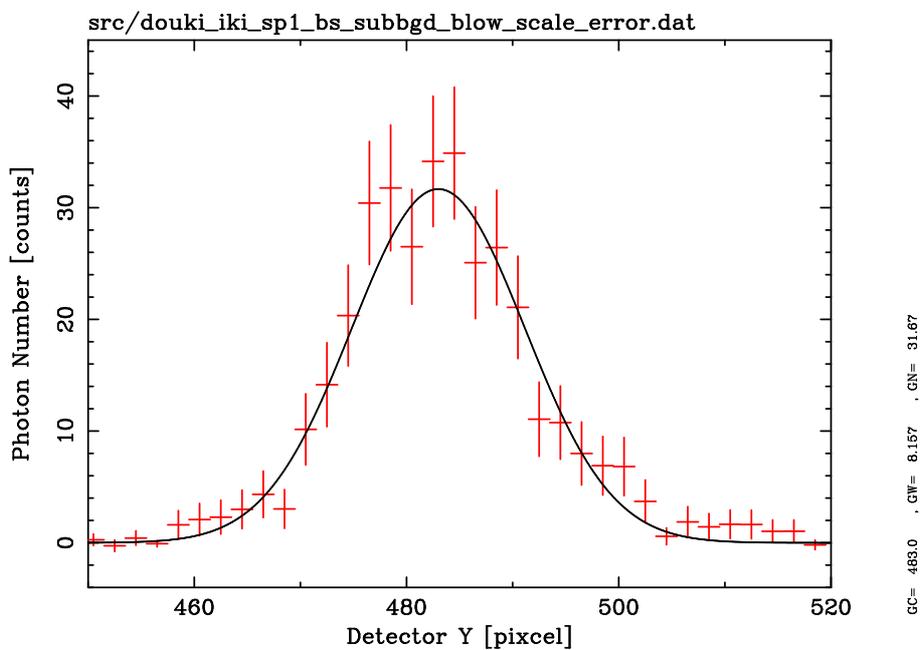


図 6.7: ステージ速度 2 mm/sec 時 +Y 軸方向スキャンの 11 ラインを足し合わせた結果

ステージ速度 2 mm/sec 時 -Y 方向についての測定結果

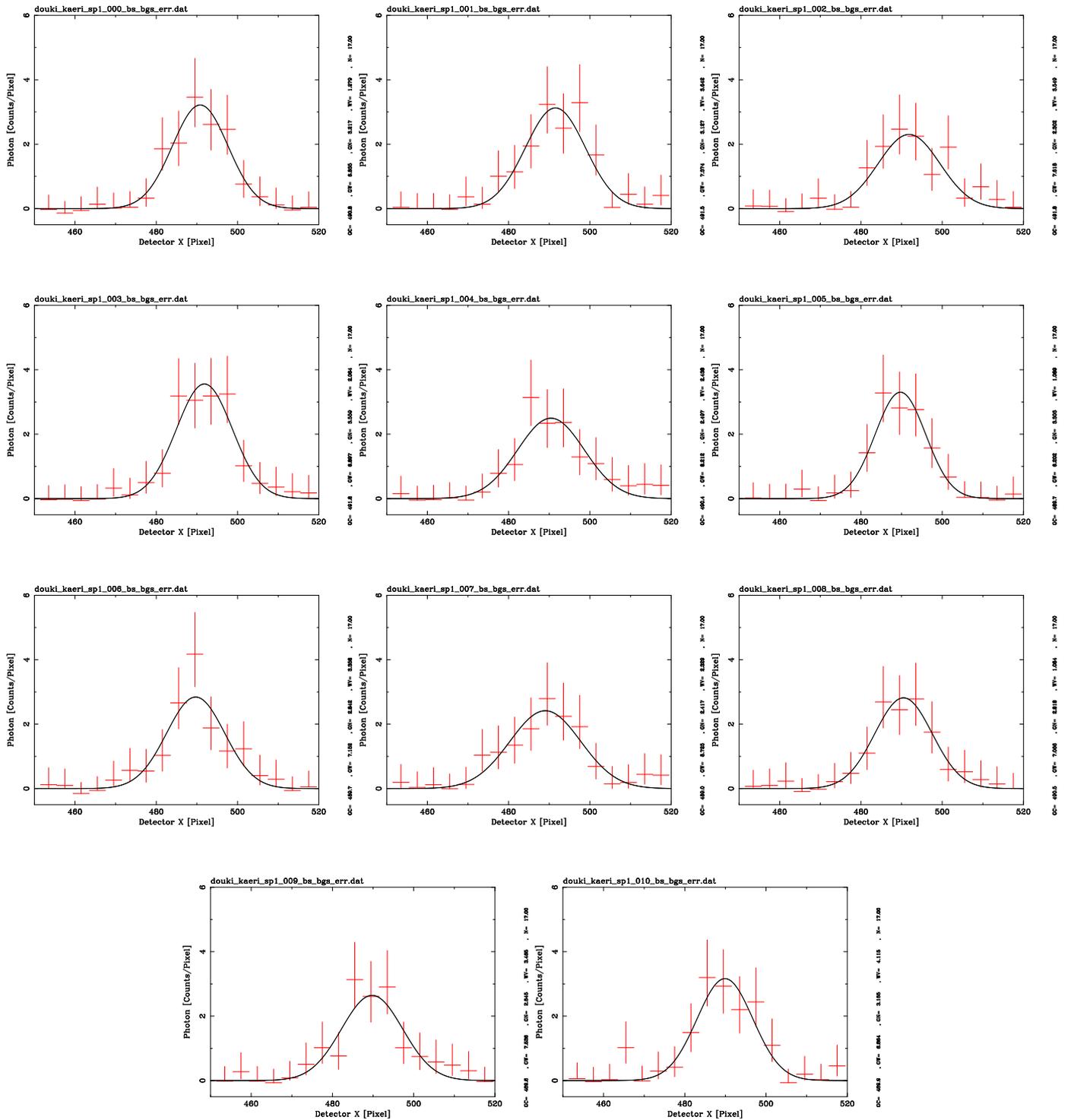


図 6.8: ステージ速度 2 mm/sec 時 -Y 軸方向スキャンの各ラインの投影結果 — ステージ速度 2 mm/sec で -Y 軸方向にスキャンを行った際の結果。CCD により撮像した像を 1 ラインごとに Y 軸方向に向かって投影した。それをガウシアンでフィットし、光量がピークになる検出器面上での位置を求めた。各データ点の統計誤差はポアソンエラーでつけている。

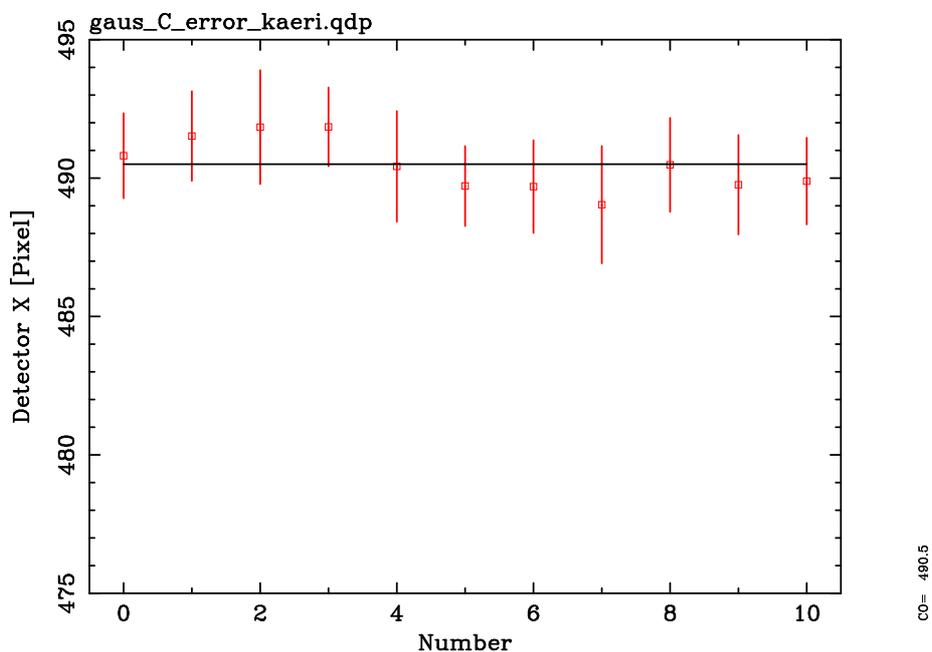


図 6.9: ステージ速度 2 mm/sec 時 -Y 軸方向スキャンの各ラインの光量ピーク位置— ステージ速度 2 mm/sec 時 -Y 軸方向スキャンの各ラインの光量ピーク位置をプロットした。縦軸にカウント数、横軸にライン番号をとっている。

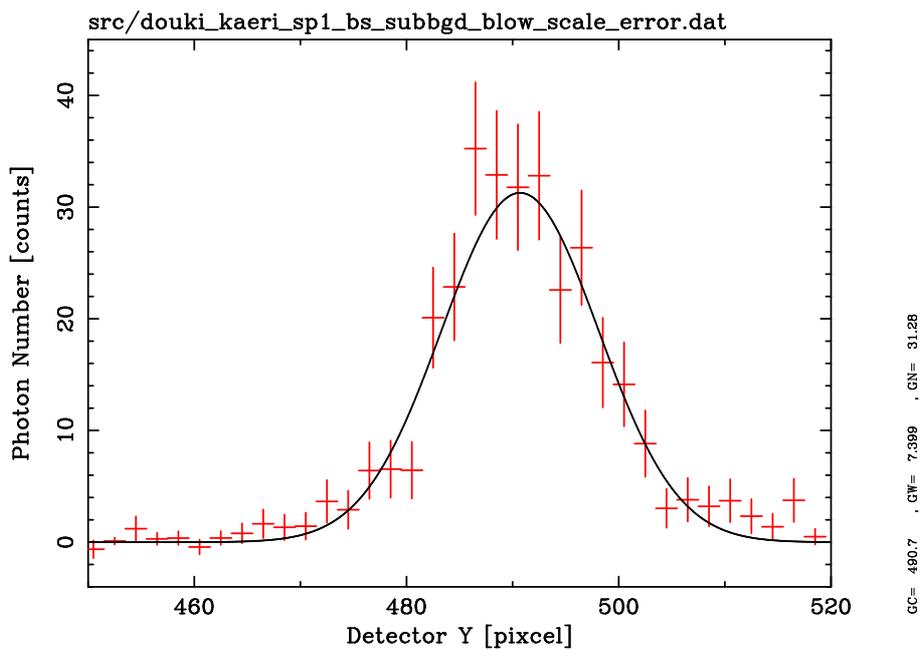


図 6.10: ステージ速度 2 mm/sec 時 -Y 軸方向スキャンの 11 ラインを足し合わせた結果

ステージ速度 2 mm/sec 時の +Y 軸方向と -Y 軸方向との比較

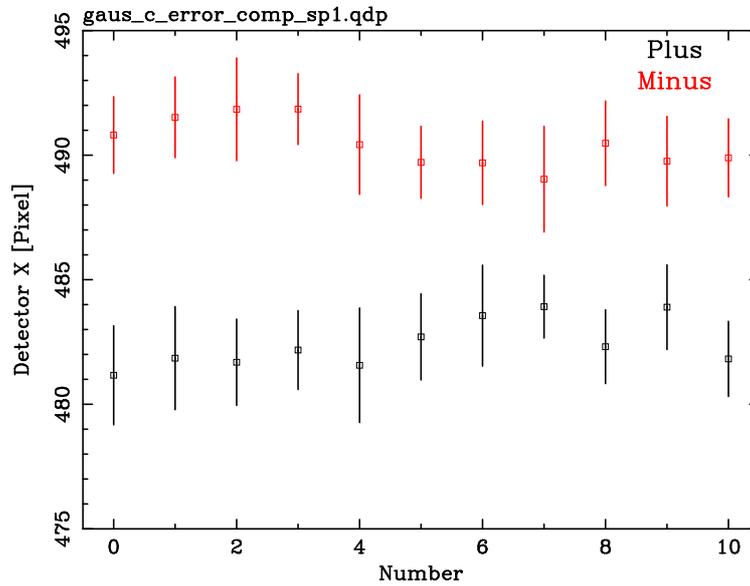


図 6.11: ステージ速度 2 mm/sec 時の +Y 軸方向と -Y 軸方向の各ラインにおける光量ピーク位置についての比較

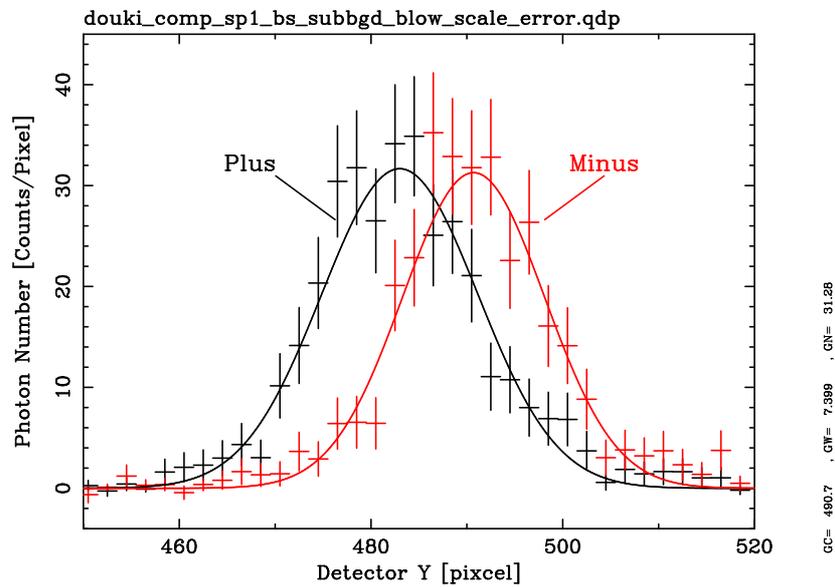


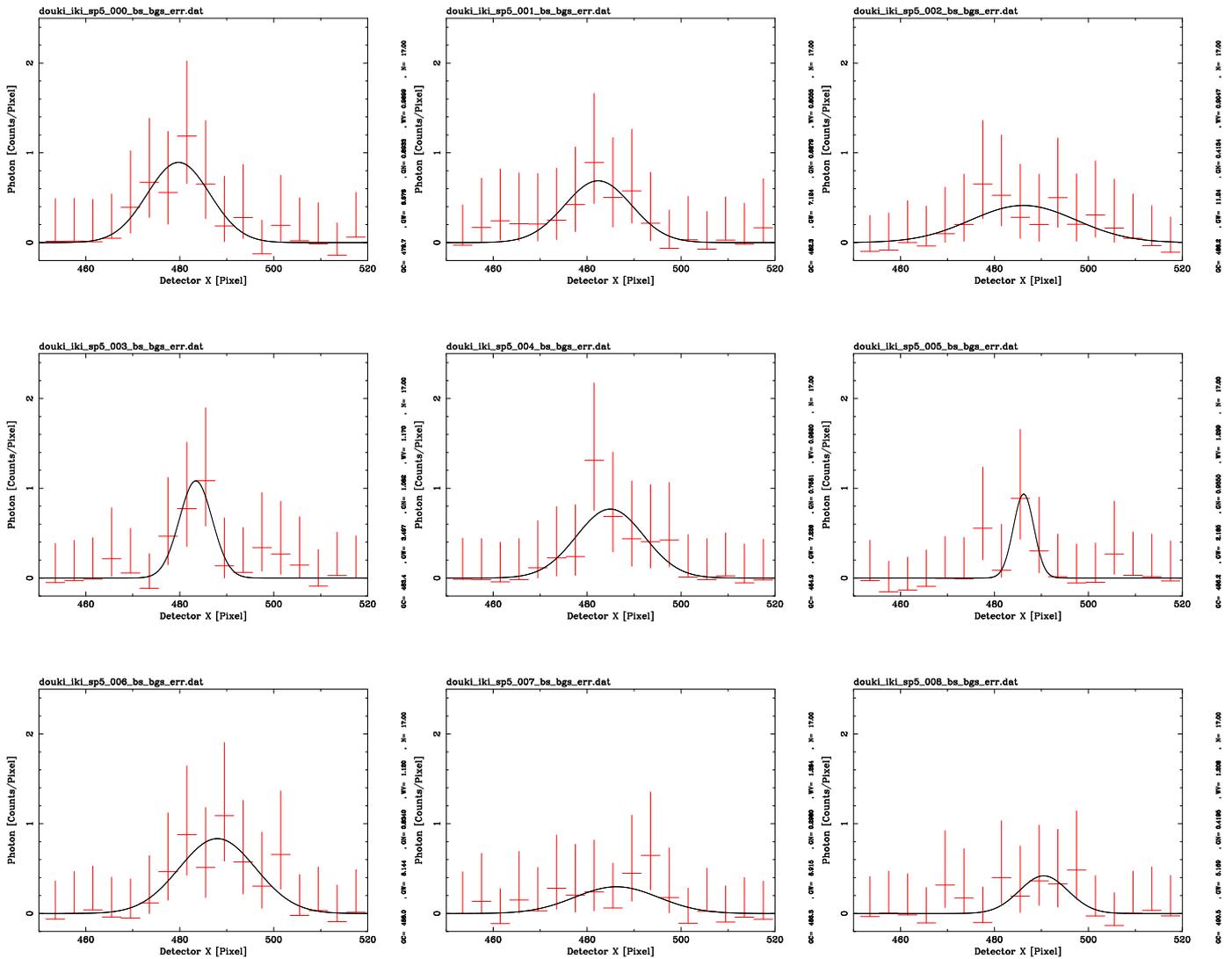
図 6.12: ステージ速度 2 mm/sec 時の +Y 軸方向と -Y 軸方向の全ラインの足し合わせにおける比較

表 6.2: ステージ速度 2 mm/sec 時の +Y 軸方向と -Y 軸方向の全ラインの足し合わせにおける光量ピーク位置

スキャン方向	ピーク位置 [pixel]
+Y 方向	$483 \pm 1$
-Y 方向	$491 \pm 1$

表 6.2 からステージ速度 2 mm/sec 時では+Y 方向と- Y 方向とで結像位置に最大で 10 pix のずれが生じることが分かる。すなわち 0.17 arcmin のずれが生じる。

ステージ速度 10 mm/sec 時+Y 方向についての測定結果



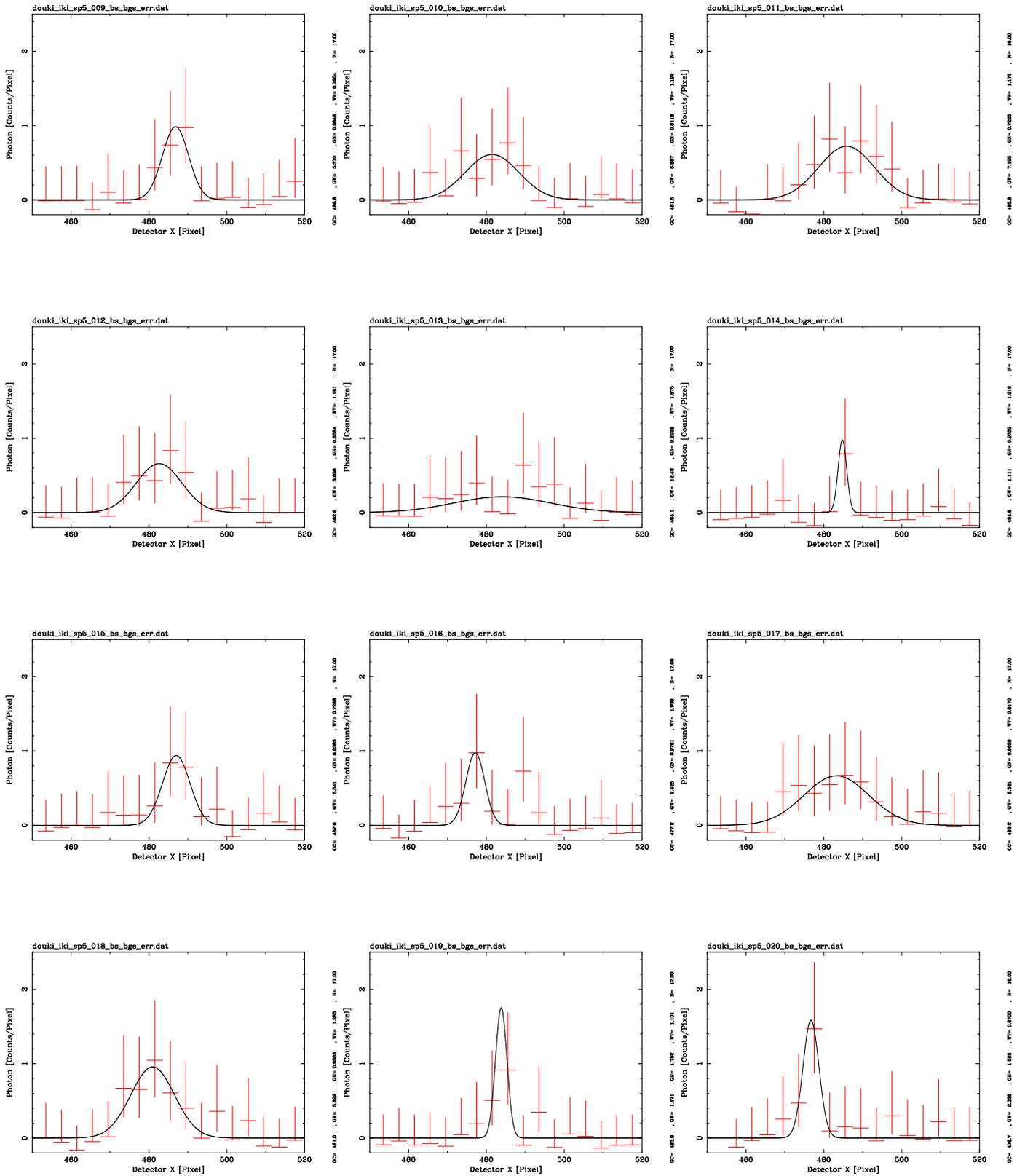


図 6.13: ステージ速度 10 mm/sec 時+Y 方向スキャンの各ラインの投影結果 — ステージ速度 10 mm/sec で+Y 方向にスキャンを行った際の結果。CCD により撮像した像を 1 ラインごとに Y 軸方向に向かって投影した。それをガウシアンでフィットし、光量がピークになる検出器面上での位置を求めた。各データ点の統計誤差はポアソンエラーでつけている。

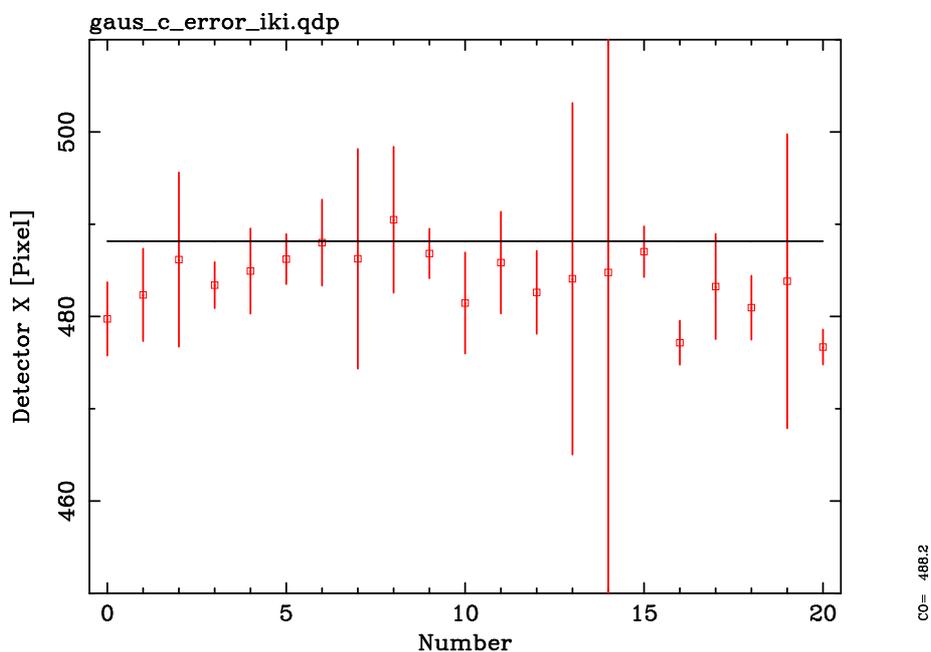


図 6.14: ステージ速度 10 mm/sec 時+Y 方向スキャンの各ラインの光量ピーク位置— ステージ速度 10 mm/sec+Y 方向スキャンの各ラインの光量ピーク位置をプロットした。縦軸にカウント数、横軸にライン番号をとっている。

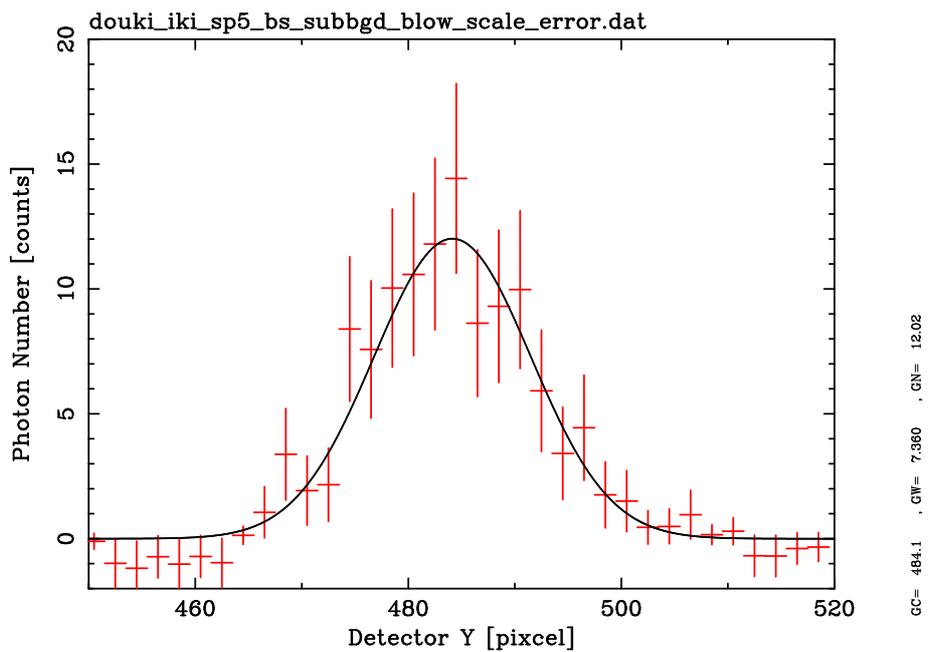
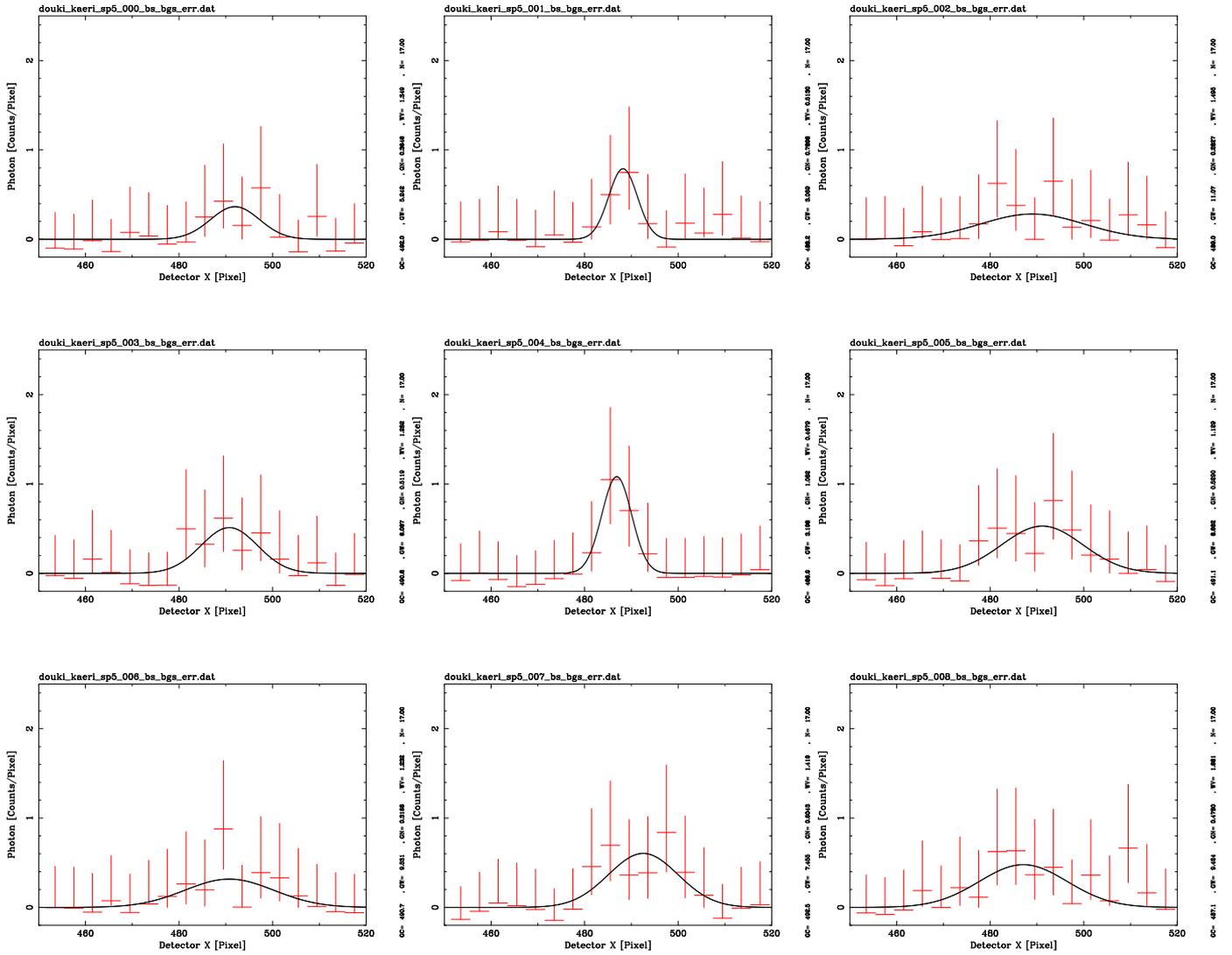


図 6.15: ステージ速度 10 mm/sec 時+Y 方向スキャンの 21 ラインを足し合わせた結果

ステージ速度 10 mm/sec 時-Y 方向についての測定結果



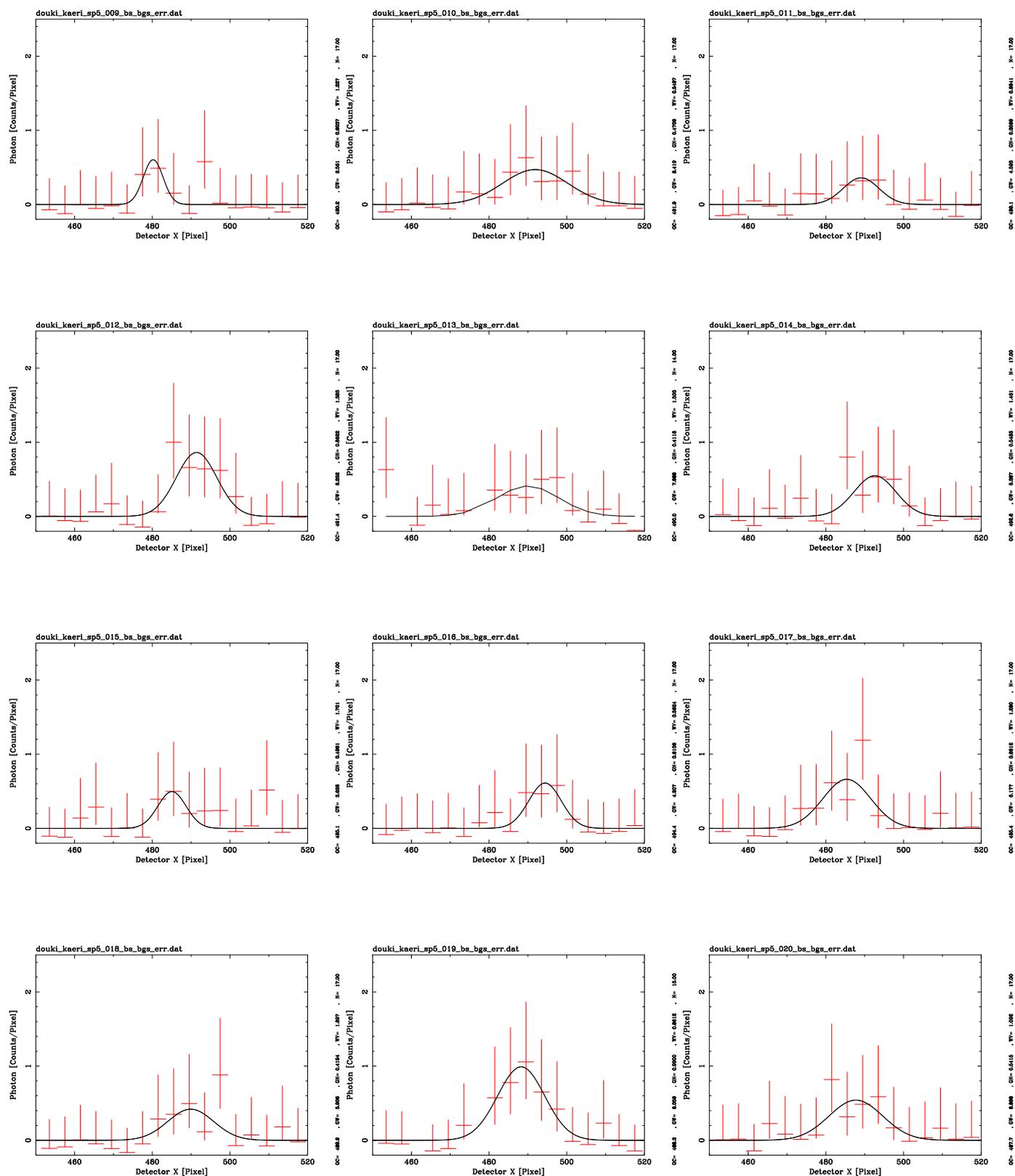


図 6.16: ステージ速度 10 mm/sec 時-Y 方向スキャンの各ラインの投影結果 — ステージ速度 10 mm/sec で-Y 方向にスキャンを行った際の結果。CCD により撮像した像を 1 ラインごとに Y 軸方向に向かって投影した。それをガウシアンでフィットし、光量がピークになる検出器面上での位置を求めた。各データ点の統計誤差はポアソンエラーでつけている。

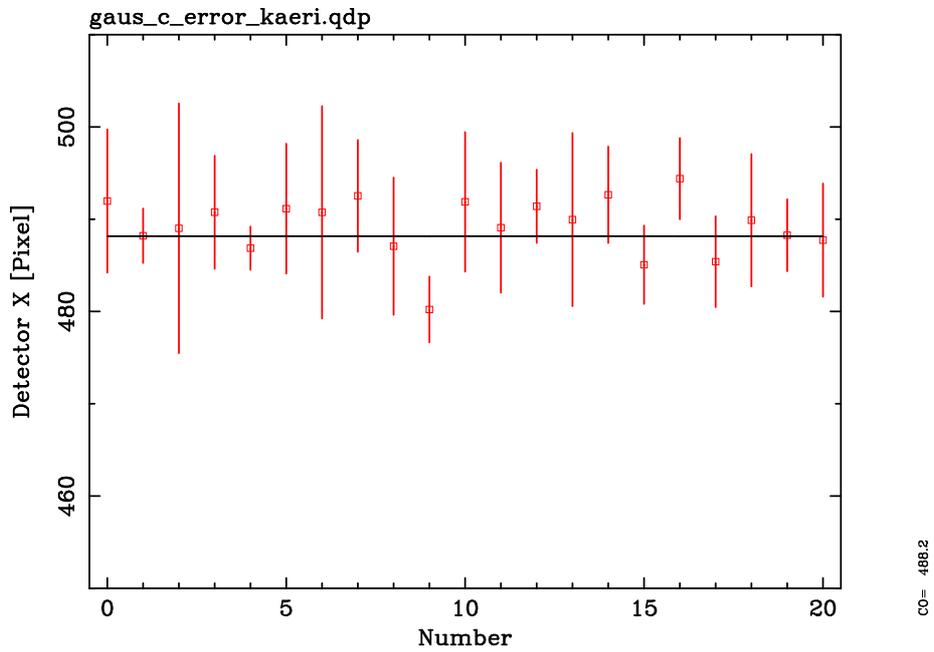


図 6.17: ステージ速度 10 mm/sec 時-Y 方向スキャンの各ラインの光量ピーク位置— ステージ速度 10 mm/sec-Y 方向スキャンの各ラインの光量ピーク位置をプロットした。縦軸にカウント数、横軸にライン番号をとっている。

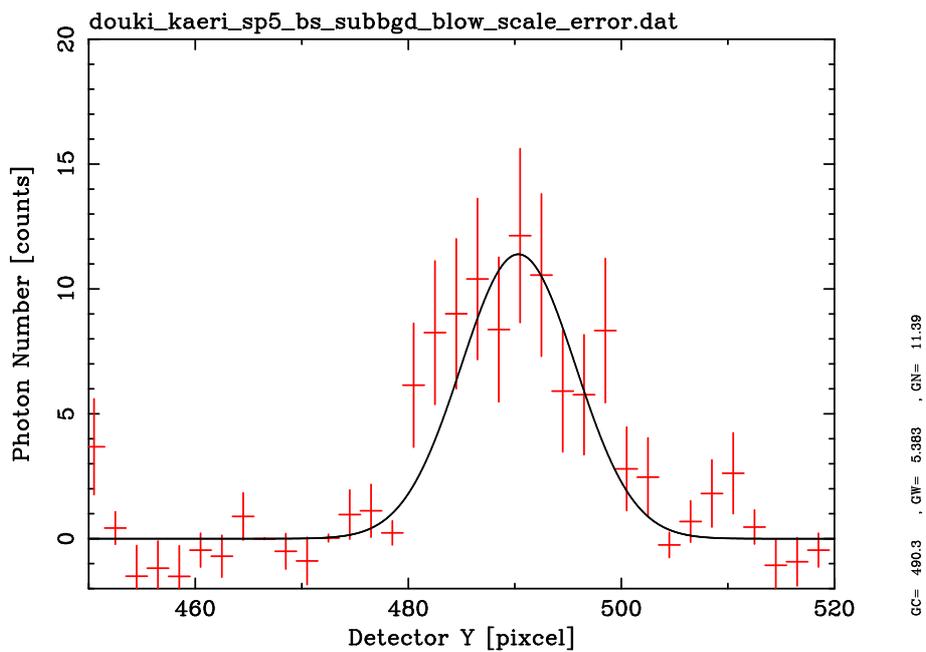


図 6.18: ステージ速度 10 mm/sec 時-Y 方向スキャンの 21 ラインを足し合わせた結果

ステージ速度 10 mm/sec 時+Y 方向、-Y 方向についての比較

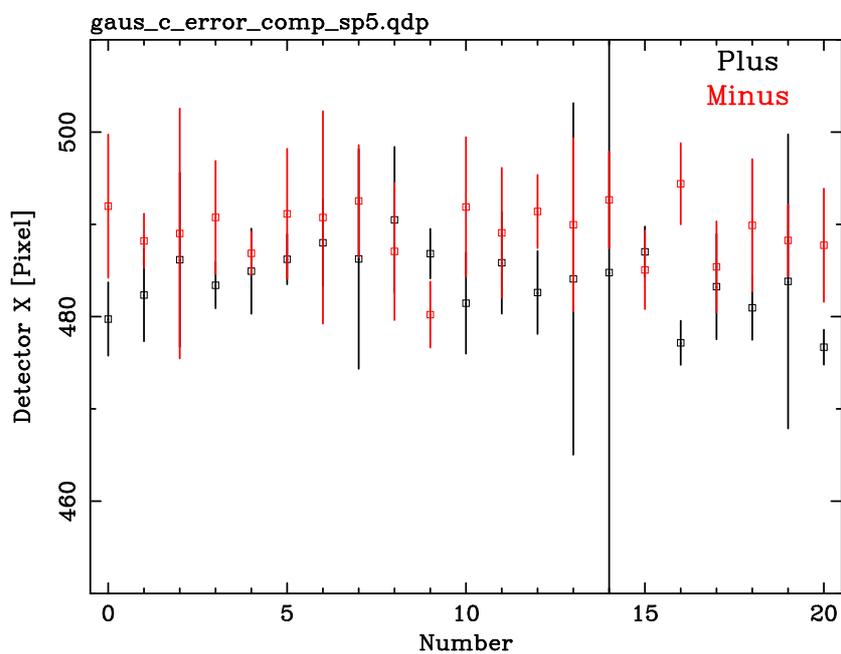


図 6.19: ステージ速度 10 mm/sec 時の+Y 方向と-Y 方向の各ラインにおける光量ピーク位置についての比較

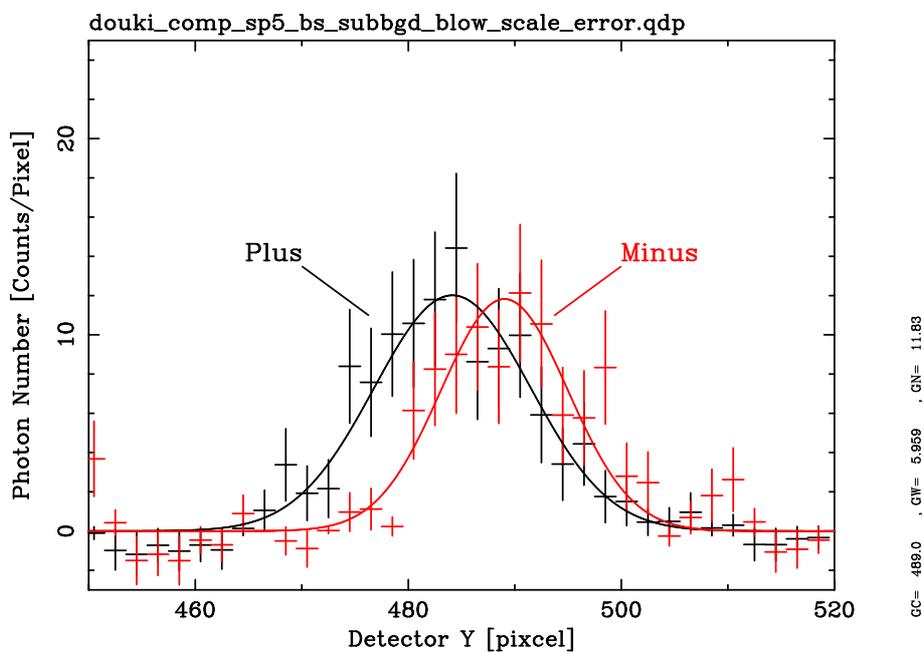


図 6.20: ステージ速度 10 mm/sec 時の+Y 方向と-Y 方向の全ラインの足し合わせにおける比較

## 第 6. ラスタースキャンシステムの可動式発生装置と第 3 ピンホールの同期性についての考察とまとめ

表 6.3: ステージ速度 10 mm/sec 時の+Y 方向と-Y 方向の全ラインの足し合わせにおける光量ピーク位置

スキャン方向	ピーク位置 [pixel]
+Y 方向	484 ± 1
-Y 方向	490 ± 1

表 6.3 からステージ速度 10 mm/sec 時では+Y 方向と- Y 方向とで結像位置に最大で 7 pix のずれが生じることが分かる。すなわち 0.12 arcmin のずれが生じる。

### 6.3 可動式発生装置と第 3 ピンホールの同期性についての考察とまとめ

ステージ速度 2 mm/sec と 10 mm/sec の+Y 方向と-Y 方向それぞれについての CCD 面上での結像位置を表 6.4 にまとめる。

表 6.4: 各ステージ速度における結像位置のずれ量

ステージ速度 mm/sec	+Y 方向 結像位置 [pixel]	-Y 方向 結像位置 [pixel]	±Y 方向での 最大ずれ量 [pixel]
2	483 ± 1	491 ± 1	10 (0.17 arcmin)
10	484 ± 1	490 ± 1	6 (0.12 arcmin)

表 6.4 から、ステージ速度 2 mm/sec、10 mm/sec のどちらにおいても+Y 方向、-Y 方向でピーク位置が優位に違っている。そしてその違いはステージ速度 2 mm/sec のときほど大きく、最大で 0.17 arcmin である。しかし、この値は 6.1 にて述べた 0.44 arcmin という値よりは小さい。したがって、可動式発生装置と第 3 ピンホールの同期性は 1 arcmin 程度の XRT の性能評価測定では無視することができる。実際に 0.17 arcmin 同期性により ±Y 方向に結像位置がずれたときに結像性能がどれほど変わってくるのかということを見積もると、それは約 1% である。したがって同期性については 1 arcmin の XRT の場合には十分であると言える。

後日、mXG Y ステージに停止する前に動作していた方向と異なる方向に動作させようとする、ステージが動作命令を受け取ってからの数百パルスには反応がないことが分かった。±Y 方向で結像位置が一致しないことの原因はこの mXG Y ステージのヒステリシスである可能性が高い。これについては今後さらに詳しい定量的な調査が必要だと思われる。

しかしながら、速度の低い 2 mm/sec のときの方が同期性が悪いことに関しては、原因は今のところよく分かっていない。



## 第7章 10 m ビームラインにおける X 線望遠鏡の性能評価測定

同期性の測定時に使用したサンプル XRT の結像性能についての測定を 10 m ビームラインにおいて行い、30 m ビームラインでの測定結果と比較を行う。これにより 10 m ビームラインが 30 m ビームラインに対し、XRT の性能評価システムとして成立するものであるかを確認した。

また、有効面積についての測定も行い、こちらは 30 m ビームラインでの測定結果がないため、理論値との比較を行った。

### 7.1 結像性能

#### 7.1.1 測定方法

W サイドに XRT を置きラスタースキャンにより測定を行った。しかし、可動式発生装置は全体的にコンパクトに造られているため固定式のものに比べて X 線強度が低い。したがって今回の測定では + Y 方向、-Y 方向で同じラインを往復し、その後 1 段下のラインに移り、同様のことを行う。これをサンプル XRT の全面を走査するまで繰り返した。これにより、プラス方向、マイナス方向それぞれについての結像性能についても評価することができ、ステージの同期性が性能評価測定において影響を及ぼすのかどうかについても判断することができきる。

表 7.1 にこのときの測定条件を示す。

表 7.1: 全面スキャン時の測定条件

ターゲット	W (8.4 keV)
管電圧値	30 keV
管電流値	1.99 mA
XRT 設置場所	W
第 3 ピンホール直径	1.0 mm
スキャン速度	2 mm/sec

## 7.1.2 測定結果

プラス方向

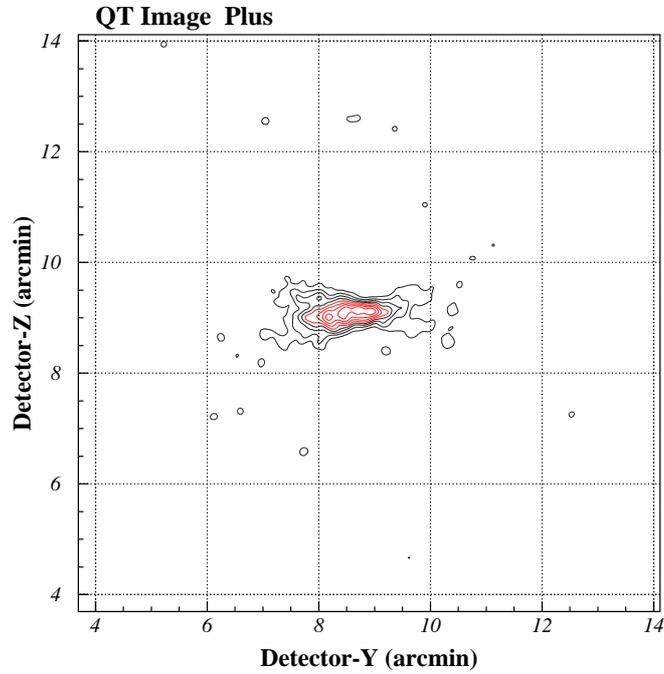


図 7.1: +Y 方向のスキャンのみを足し合わせた QT イメージ

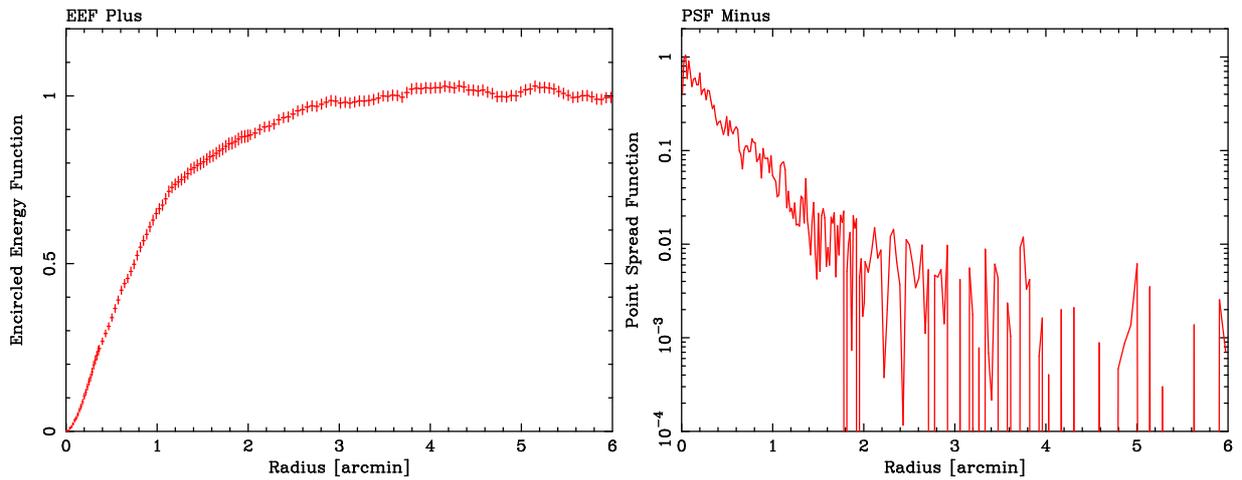


図 7.2: +Y 方向のスキャンのみを足し合わせた EEF (左) と PSF (右)

マイナス方向

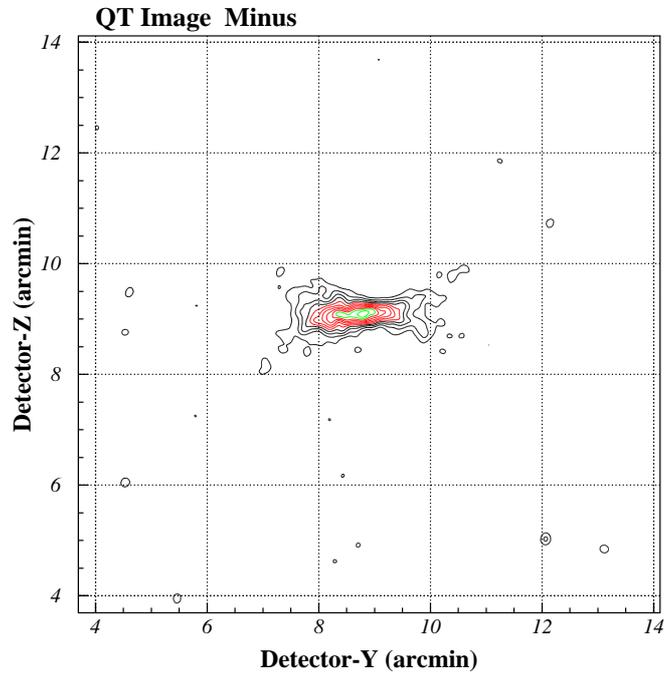


図 7.3: -Y 方向のスキャンのみを足し合わせた QT イメージ

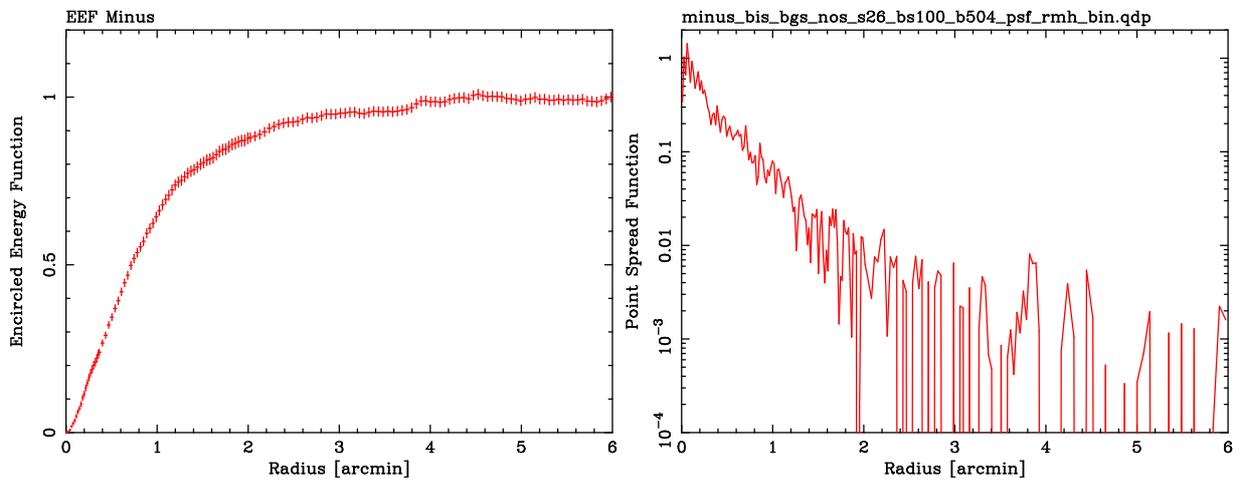


図 7.4: -Y 方向のスキャンのみを足し合わせた EEF (左) と PSF (右)

両方向での和

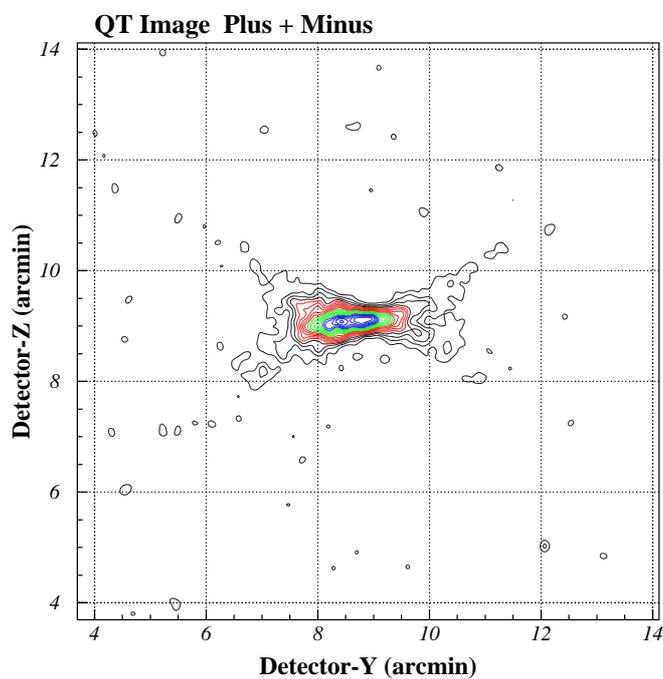


図 7.5: 両方向を足し合わせた QT イメージ

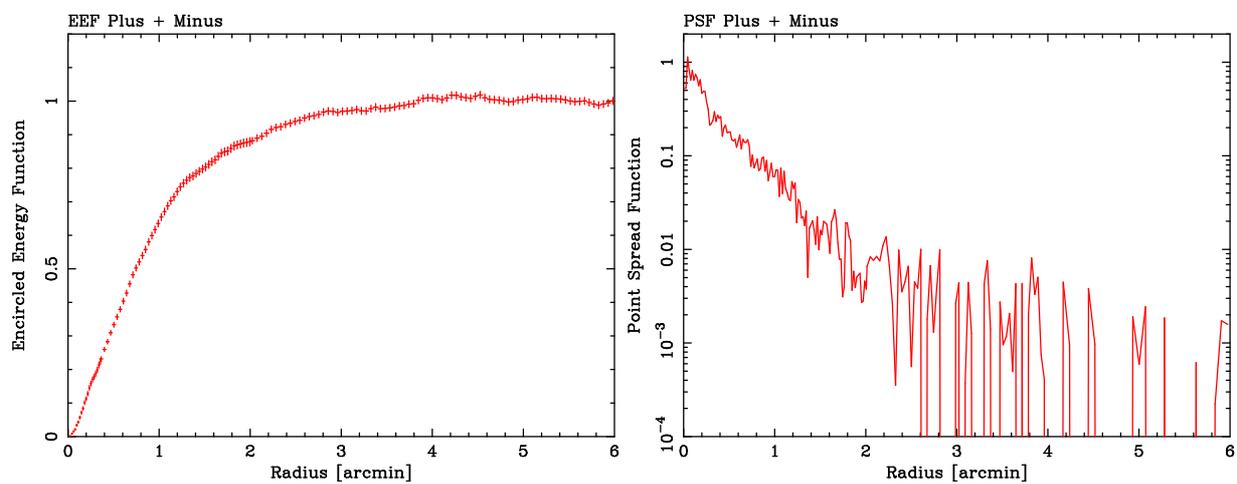


図 7.6: 両方向を足し合わせた EEF (左) と PSF (右)

表 7.2: プラス方向、マイナス方向、両方向での結像中心と HPD

スキャン方向	結像中心 [pixel]	HPD [arcmin]
プラス	501,526	1.49±0.035
マイナス	506,523	1.44±0.026
両方向	507,524	1.48±0.026

これらの結果から+Y 方向と-Y 方向とで優位な差はなく両方向を足し合わせた結果を最終的なサンプル XRT についての測定結果とする。

### 7.1.3 30 m ビームラインでの測定結果との比較

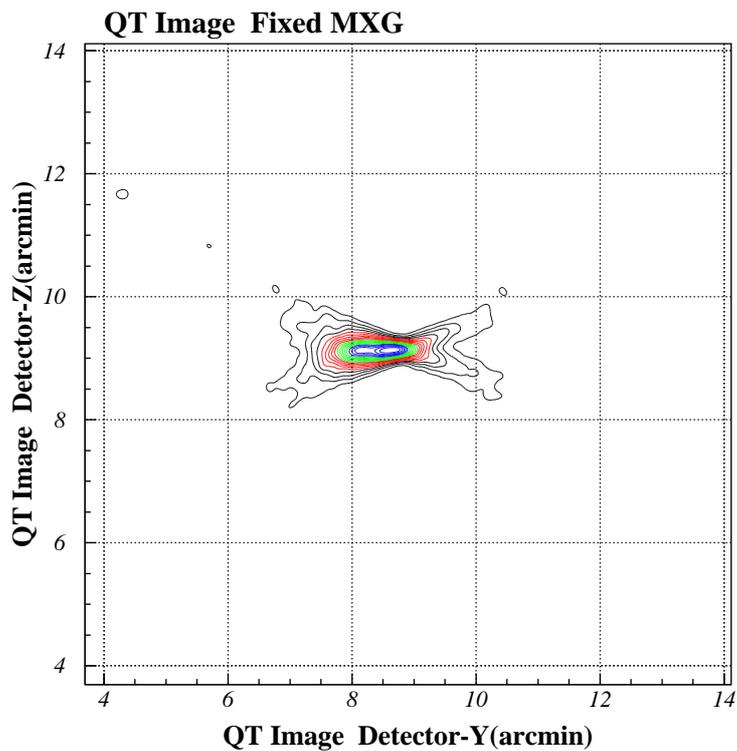


図 7.7: 30 m ビームラインでの QT イメージ

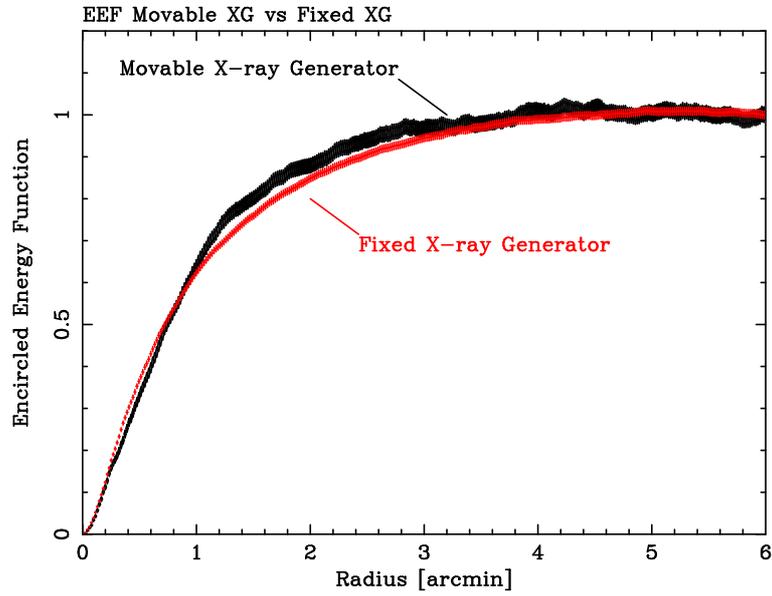


図 7.8: 10 m ビームラインと 30 m ビームラインでの EEF の比較

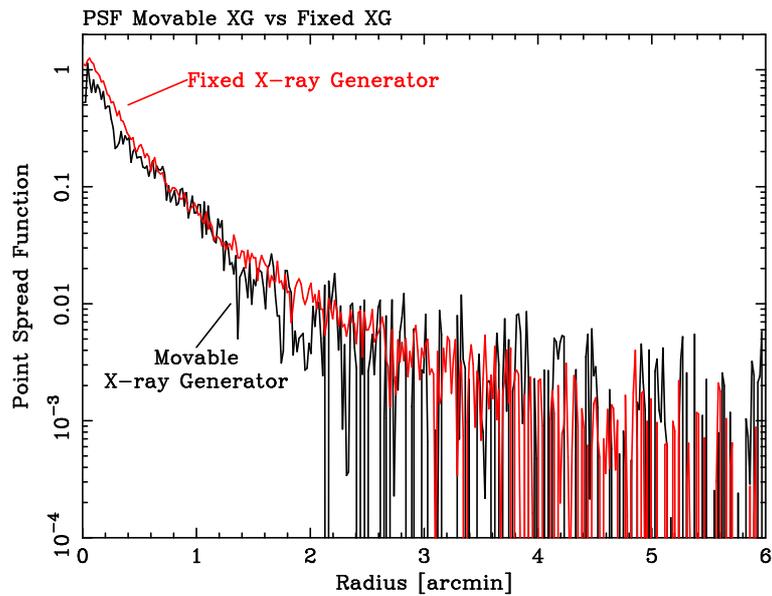


図 7.9: 10 m ビームラインと 30 m ビームラインでの PSF の比較

表 7.3: 10 m ビームラインと 30 m ビームラインでの HPD についての比較

システム	HPD [arcmin]
30 m	1.47±0.02
10 m	1.48±0.03

EEF については 30 m ビームラインと 10 m ビームラインでの結果で多少のずれが見られるが、これは両システムのビーム平行度の違いではないと思われる。

HPD については両者に優位な差は見られずほぼ 1.5 arcmin で一致した結果が得られた。これにより 10 m ビームラインにおいては結像性能 1 arcmin 程度の望遠鏡であれば、直径 600 mm の大きさのものまで評価が可能であるということがいえる。

しかしながら、ビーム強度が弱くシグナルノイズ比が非常に悪い。これにより、CCD の熱ノイズやバイアス等のバックグラウンドが正しく引けないことが大きく望遠鏡の性能評価に影響を与えてしまうと思われる。さらに、統計を稼ぐために露光時間を長く取っているのもそれに比例し宇宙線によるホットピクセルが増えてしまった。これらは今後解決していかなければならない大きな問題である。

## 7.2 有効面積

### 7.2.1 理想的な有効面積の算出

各反射鏡毎に幾何学的な面積  $S_{\text{geo}}$  は、反射鏡の top までの半径を  $R$ 、反射鏡の傾きを  $\theta$ 、反射鏡の母線長を  $h$ 、マスクされている母線方向の長さを  $m$  とし、

$$S_{\text{geo}} = 2\pi R \times (h - m) \sin \theta \quad (7.1)$$

で表される。サンプル XRT は Full telescope の 1/4 個の Quadrant であり、14 セクターの内、反射鏡が解放端のため結像性能が極度に落ちる両端の 2 セクターにはカバーがされている状態であることを考えると、

$$S_{\text{geo}} = 2\pi R \times \frac{1}{4} \times \frac{10}{14} \times (h - m) \sin \theta \quad (7.2)$$

となる。ここに  $h = 10 \text{ cm}$ 、 $m = 2 \text{ cm}$  を代入し、

$$S_{\text{geo}} = 2\pi R \times \frac{1}{4} \times \frac{10}{14} \times (10[\text{cm}] - 2[\text{cm}]) \sin \theta \quad (7.3)$$

となる。

また、アラインメントプレートで隠されている面積は、プレートの枚数を  $b$ 、プレートの厚さを  $c$  とすると

$$b \times c \times (h - m) \sin \theta = 10 \times 0.15[\text{cm}] \times 8 \sin \theta \quad (7.4)$$

で表される。

表 7.4 に反射鏡の各種パラメータとその見込む面積を示す。これから理論的な幾何的面积は  $5.268[\text{cm}^2]$  となる。

表 7.4: primary 反射鏡と理論値

反射鏡 number	傾き [deg]	半径 (top)[cm]	幾何学的な面積 [cm <sup>2</sup> ]	プレートで隠される面積 [cm <sup>2</sup> ]
71 primary	0.30224	10.05948	0.47631	0.06330
72 primary	0.30438	10.13061	0.48307	0.06375
73 primary	0.30653	10.20212	0.48999	0.06420
90 primary	0.34491	11.47869	0.62023	0.07223
91 primary	0.34727	11.55749	0.62878	0.07273
92 primary	0.34966	11.63672	0.63743	0.07323
93 primary	0.35205	11.71637	0.64619	0.07273
94 primary	0.35446	11.79646	0.65505	0.07423
95 primary	0.35688	11.87698	0.66403	0.07474
96 primary	0.35931	11.95793	0.67311	0.07525
合計			5.974	0.706

次に理想的な有効面積を求めるために反射率についてのシミュレーションを行なう。そのパラメーターを下の表にまとめた。

表 7.5: シミュレーションパラメーター

	金の密度	粗さ	入射角度
パラメータ	19.3[g/cm <sup>3</sup> ]	0.49nm@(71~73)	0.3~0.35[deg]
	同上	0.42nm@(90~96)	同上

ここで、粗さは Nevot Crose モデルを利用し、その値は Suzaku と同じ値を採用した。粗さにエネルギー依存性が見られるが、反射率に影響が無かったので 0.49 nm を利用する。また入射角度は 0.3 deg~0.35 deg で反射率は約 2 % ほど変わるが、今回は簡単のために 0.3 deg を採用する。

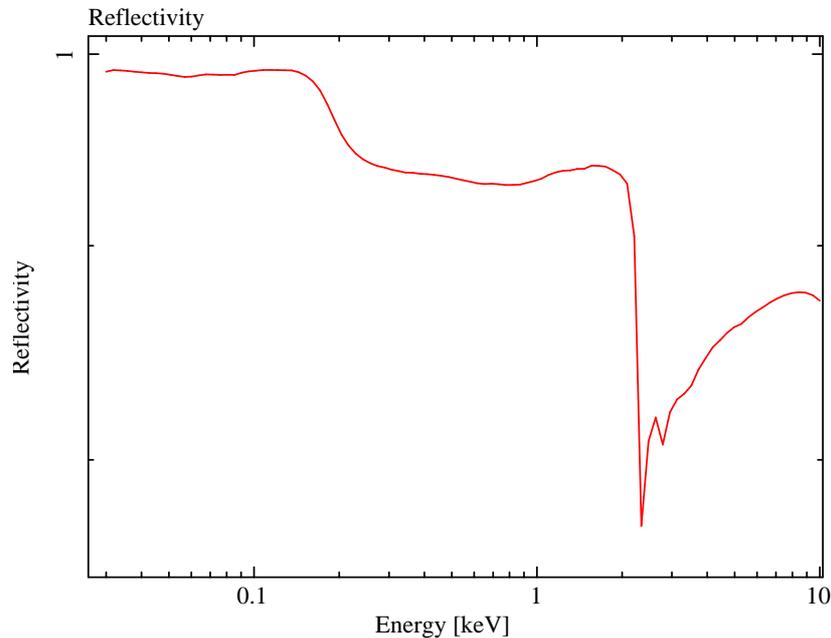


図 7.10: 反射率シミュレーション

図 7.10 から反射率  $r$  が 87 % @ 8.4keV という事が分かる。したがって理想的な有効面積  $S_a$  は、2 回反射を考慮に入れて、

$$S_a = S_{\text{geo}} \times r \times r = 5.268[\text{cm}^2] \times 0.87 \times 0.87 = 3.987[\text{cm}^2] \quad (7.5)$$

となる。

### 7.2.2 理論値と測定値との比較

測定結果から算出される有効面積

測定値から有効面積を求める場合、式 2.8 より、

$$S_{\text{eff}} = \frac{C_{\text{out}} v h}{I} \quad (7.6)$$

で求めることができる。これに  $C_{\text{out}}=3502$  [cts]、 $v=0.2$  [cm/sec]、 $h=0.1$  [cm] を代入すると、有効面積は、

$$S_{\text{eff}} = \frac{3502[\text{cts}] \times 0.2[\text{cm}/\text{sec}] \times 0.1[\text{cm}]}{24[\text{cts}/\text{sec}]} = 2.918[\text{cm}^2] \quad (7.7)$$

となる。

測定値と理論値との比較

$$\frac{S_{\text{eff}}}{S_a} = \frac{2.918}{3.987} = 0.74 \quad (7.8)$$

したがって、実際に測定された有効面積は理論値の 74 % になる事が分かる。測定値と理論値とで値が異なる原因は反射鏡の位置決めにおける幾何的な反射鏡の見込む面積の減少などが考えられる。

## 7.2.3 解析方法

有効面積を求めるために可動式発生装置によるラスタースキャンを行なった。検出器面に届いた、スペクトルを以下の図に載せる。

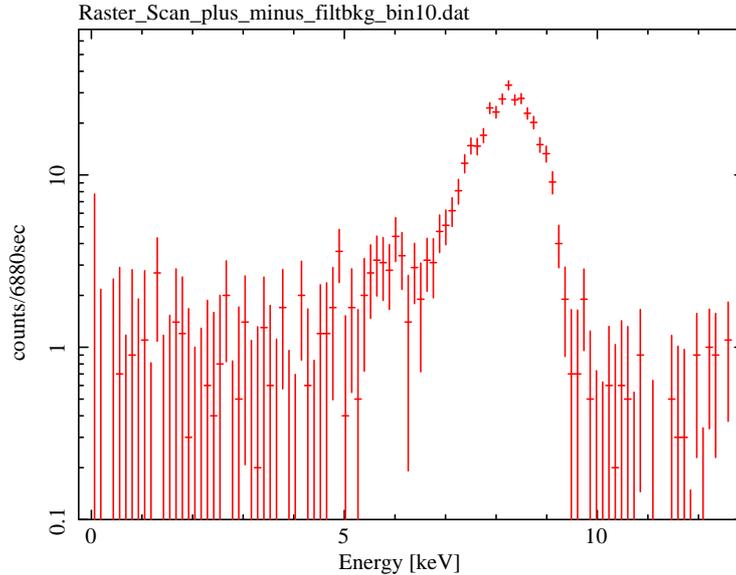


図 7.11: バックグラウンドを差し引いた反射光のスペクトル

PC のエネルギー分解能を考慮して、5~10keV の band で入射光子数を数えると 3502cts である事が分かった。また反射光のスペクトルとダイレクト光のスペクトルを比較したものを図 7.12 に載せる。反射光とダイレクト光のスペクトルに違いが見られなければ、良く単色化出来ている一つの証拠となる。ここで反射光のスペクトルはバックグラウンドを引いたが、ダイレクト光に対しては十分な統計があるためにバックグラウンドを引いてはない。

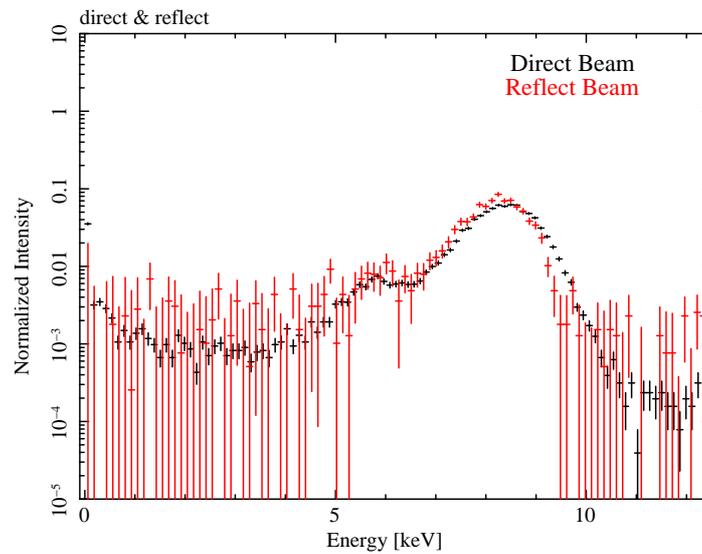


図 7.12: ダイレクト、反射光のスペクトルの比較

規格化は、全体の強度が1となるように行なった。上の図 7.12 を見ると、ダイレクト光と反射光のスペクトルは良く似ている事が分かる。ダイレクト光の方がスペクトルの形が広がっているように見えるが、PC のゲインの揺らぎ (約 20 % @ 8keV) の範囲だと思われる。また、散乱光の出やすい 8 keV 以下のエネルギーバンドにおいても、優位な X 線イベントががきていない。従って、8.4keV の  $W-L_{\alpha}$  のみが望遠鏡に入射しており、第 3 ピンポールの鉛板の外側を通過する散乱成分は無視出来ていると考えられる。また、5.5 keV 付近の peak はエスケープピークと呼ばれるものであり、検出器の応答特性である。



## 第8章 まとめと展望

### 8.1 まとめ

我々は、これからの望遠鏡の大型化に向け、望遠鏡、検出器を固定したまま性能評価が可能なシステムの構築を行った。以下に本研究で得られた成果と今後の展望についてまとめる。

#### 1. 小スペースでのDCMによるX線の単色化

本研究において使用したWのターゲットに対し、DCMを用いて単色化することに成功した。そしてDCM下流にピンホールを配置しながら、50 mm(X)×150 mm(Y)×100 mm(Z)という比較的小スペースでDCMを実装することができた。また、第2結晶面を回転ステージの中心に配置することで、アラインメント作業の効率化を図ることもできた。

#### 2. 散乱光の軽減

発生装置出口付近、Chamber内で生じる散乱光を検出器のノイズレベル以下まで軽減することができた。直径600 mmの望遠鏡測定を仮想した場合、望遠鏡に入射する散乱光の強度は、ダイレクト光強度の10%以下となった。

#### 3. ラスタースキャンシステムの構築

X線発生装置と第3ピンホールの2つを同時に駆動させるラスタースキャンシステムを構築した。望遠鏡に2つのステージを同時に動かしながらX線を照射し、ステージ速度2 mm/sec時と10 mm/sec時においてそれぞれ±Y方向で結像位置にずれが生じるかを測定した。ずれが最も大きくなったのは2 mm/sec時であり最大で0.17 arcminという結果であった。このずれ量はビームの拡散角~25 arcsecより十分小さく、結像性能1 arcmin程度の望遠鏡の測定には支障がないことを証明することができた。これにより望遠鏡測定に必要なラスタースキャンを行うことが可能となった。

#### 4. 従来の測定システムと同等の性能を確保

従来の30 mビームラインでの測定にて結像性能1.4 arcminという結果が示されているサンプルに対し、10 mビームラインにおいても測定を行い、矛盾のない結果を得ることができた。これにより10 mビームラインにおいて結像性能1 arcmin程度の望遠鏡であれば直径600 mmの望遠鏡まで性能評価が可能であることを示すことができた。また、それとともに散乱光、ステージの同期性についても十分な性能を達成していると考えて矛盾がない。

## 8.2 今後の課題と展望

### 1. ビーム強度の向上

本研究の中でこれは非常に大きな問題であった。発生装置を最大管電流値である 2.0 mA で使用し、第 3 ピンホールに最大直径の 1.0 mm のものを使用した場合においても、ダイレクト光のカウントレートは 40 counts/sec 程度であった。これは望遠鏡測定等に支障をきたし、1 回の測定に多くの時間を必要とすることはもちろん、シグナルノイズ比の悪化につながり、CCD の熱ノイズやバイアス等のバックグラウンドが正しく引くことができないことが大きく望遠鏡の性能評価に影響を与えてしまう。

しかし、可動式発生装置はコンパクトな設計であるため、固定式発生装置に比べ発生装置から出射される X 線強度の面で劣ってしまうことは避けられない。したがって、システム構成の観点からの改善を考え、発生装置から出された X 線を効率よく検出器まで届けるような構成を検討する必要がある。

### 2. mXG Y ステージのヒステリシス

mXG Y ステージに停止する前に動作していた方向と異なる方向に動作させようとする、ステージが動作命令を受け取ってからの数百パルスには反応がないことが分かった。望遠鏡測定には支障が出ないものの、Collimator ステージとの同期性にずれが生じていることは事実である。その原因がこの mXG Y ステージのヒステリシスである。したがって、ステージの改修を行い、ヒステリシスを無くすべきである。

## 付録A 10m ビームライン搭載DCM設計図

本研究にて10m ビームラインに設置したDCMの設計図面を図A.1に示す。

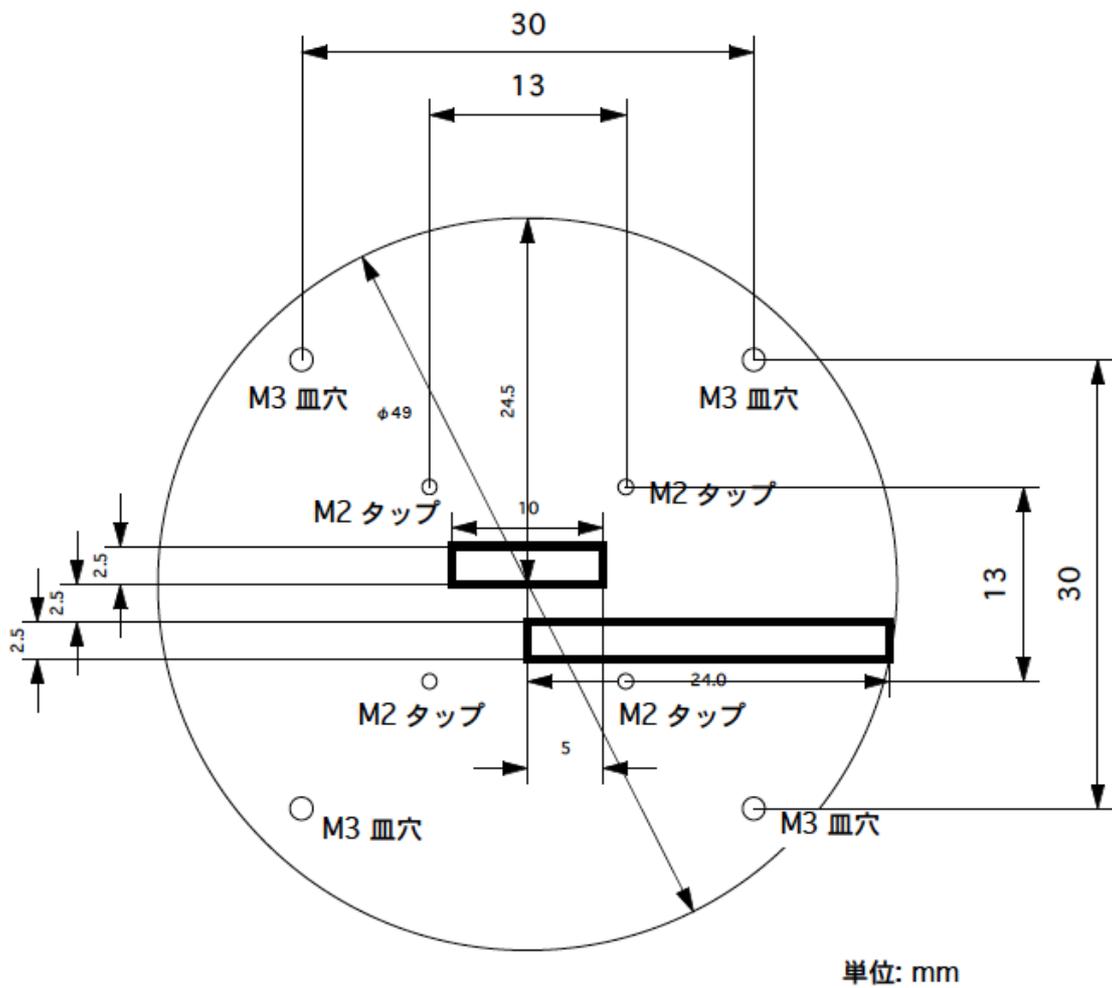


図 A.1: 10m ビームライン搭載 DCM 設計図



## 謝辞

本論文を完成させるにあたり、非常に多くの方にお世話になりました。

石田學先生には、宇宙科学研究本部において研究をする機会を与えて頂きました。また修論の執筆において多くのご指導を頂きました。基本的な物理や衛星のお話から、サイエンスに対し誠実に取り組む姿勢など多くのことを学ばせて頂きました。大橋隆哉先生には、指導教官としてご指導頂きました。ミーティングやゼミのときなどには、天文学のことについて非常に分かりやすく教えて頂きました。また、研究室の一員として迎え入れて頂いたことに何より深く感謝致します。石崎欣尚さんには、パソコンの設定やトラブルなどの際、お世話になりました。またミーティングのときなどに、実験のことに關して非常に的確なアドバイスを頂き参考にさせて頂きました。前田良知さんには、実験の手法に關してとてもユニークなアイデアを頂いたり、お忙しいにも関わらず一緒に実験をしてくださったりと本当にお世話になりました。また、健康面や精神面にもとても親身になって頂いたことをよく覚えています。クリスマスに前田さんに差し入れて頂いたワッフルの味は一生忘れません。井上裕彦さんには、実験手法等について多くのアドバイスを頂きました。博士論文をかかえ大変お忙しい身でありながら、私が実験に行き詰まったときなど快く相談にのってくださり、また励ましていただいたりとその優しさに幾度となく感動しました。ありがとうございました。岡田俊策さんには、実験全般について、特に実験機器関連や制御系における問題が発生したときには大変お世話になりました。また、井上さんと同じように、ご自身も博士論文で大変な時期であるにも関わらず、幾度となく励まして頂きました。岡田さんの人生観、女性観には共感する部分が多くそのような面についても大変勉強させて頂きました。ありがとうございました。中村良子さんには、実験を手伝って頂くとともにスケジュールを組む際にもお世話になりました。また、XRT チームの名ムードメーカーでした。関口晶子さんとは実験をする事は有りませんでした。中村さんとともに後輩の助けになってあげてください。同期の鈴木真樹君は、同じ修士論文を抱える身としてとても大きな存在でした。実験に關して幅広い知識で相談にのってもらい、またしっかりと順をおって研究を進めていく姿勢など、僕に欠けているものをたくさん持っている人だと感じていました。もし鈴木くんがいなかったら、今年の初日のを拝むことはできませんでした。ありがとうございました。後輩の林多佳由君、白田渉雪君、染谷謙太郎君たちには実験を手伝ってもらい、とても多くの時間を一緒に過ごしました。年末、年始などは殺人的なスケジュールになってしまい、とても申し訳なかったと思っています。でもお陰ですばらしい結果を得ることができました。来年は修論生として自分の実験を存分に楽しんでください。鈴木健介君と一緒に実験することはありませんでしたが、鈴木君のいつもにこやかな表情にとても癒されていました。ありがとうございました。首都大の星野晶夫には、あらゆる面で限りなくお世話になりました。星野さんは僕のほぼ冗談半分の発言をいつも現実のものに変えて下さいました。親しみやすく面倒見がいいとても素晴らしい先輩だと思っています。ありがとうございました。同期の床井和世さんには、実験と関係のない話をする事の方が多かったようにも思いますが、とてもいい息抜きになっていました。斬新な料理の数々を口にできたことを幸せに思います。首都大の後輩の赤松君は、素晴らしい個性と15周年パーティーでの名司会者っぷりが印象的でした。また、直接一緒に実験することはありませんでしたが、赤松君のがんばっている姿には背筋を伸ばされることもありました。最後に経済面、そして精神面で支えてくれた家族に感謝します。本当にありがとうございました。







## 関連図書

- [1] 波岡武, 山下広順. 「X線結像光学」. 培風館, 1999.
- [2] 柴田亮. 「ASTRO-E 衛星搭載用 X線望遠鏡地上較正実験システムの確立」. 修士論文, 学習院大学, 1997.
- [3] 井上裕彦. 「高精度アラインメントによる X線望遠鏡の高解像化の研究」. 修士論文, 東京工業大学, 2005.
- [4] 岡田俊策. 「硬 X線領域での反射率向上を目指した多層膜成膜法の研究開発」. 修士論文, 東京工業大学, 2005.