

全天X線監視装置MAXIのコリメータ特性試験

田中 識史

卒業論文

東京工業大学 理学部 物理学科

2006年 3月

目次

第1章 Introduction	1
1.1 国際宇宙ステーション計画	1
1.1.1 計画概要	1
1.1.2 『きぼう』	1
1.1.3 船外実験プラットフォーム	2
1.2 MAXI 計画	3
1.2.1 計画提案	3
1.2.2 全天監視の必要性	3
1.2.3 MAXI の目的	3
1.2.4 現状	4
1.3 本論文の主旨	4
第2章 MAXI の諸元	5
2.1 X線観測装置	5
2.2 全天走査の原理	7
2.2.1 GSC の視野構成	7
2.2.2 全天走査	8
第3章 Gas Slit Camera	9
3.1 構成	9
3.2 GSC カウンタ	11
3.2.1 カウンタの仕様	11
3.2.2 前段信号処理回路	13
3.2.3 一次元位置検出型ガス比例計数管	14
3.3 コリメータ	19
3.3.1 X線入射角度の定義	19
3.3.2 コリメータの形状	19

3.3.3	コリメータシート	21
3.3.4	コリメータ座標系の定義	23
3.3.5	コリメータ有効面積の入射角度依存性	24
第4章	実験	27
4.1	目的	27
4.2	実験セットアップ	28
4.2.1	X線ビームライン及びステージ	28
4.2.2	X線発生装置	30
4.2.3	データ取得系	31
4.3	測定	33
4.3.1	Scan	33
4.3.2	Scanの手順	33
4.3.3	測定パラメータ	33
第5章	実験結果	35
5.1	X線光子計数グラフ	35
5.2	カウンタ栈の影響	38
5.3	透過応答	40
第6章	解析と考察	44
6.1	コリメータシートの座標決定	45
6.1.1	ピークのエッジとコリメータシートの座標の関係	45
6.1.2	計数グラフの分割	47
6.1.3	フィッティング	47
6.1.4	座標の修正	49
6.2	座標リストによる透過応答の再現	52
6.2.1	設計値の透過応答との比較	53
6.2.2	求めた座標リストの透過応答との比較	54
第7章	まとめ	59
付録A	カウンタ栈の影響を受けたシート座標の扱い	60

目 次

1.1	JEM	2
2.1	MAXIの概観	5
2.2	Gus Slit Camera	6
2.3	Solid-state Slit CameraのX線 CCD 素子	6
2.4	GSCの視野	7
2.5	MAXIの観測視野	8
3.1	GSC内部の概略図	10
3.2	GSCカウンタ	12
3.3	前段信号処理回路図	13
3.4	円筒型比例計数管の構造	16
3.5	一次元位置検出のしくみ	18
3.6	芯線上の検出位置とPMの関係	18
3.7	X線入射角度の定義	19
3.8	コリメータの形状	20
3.9	コリメータユニット詳細	22
3.10	コリメータユニット取付部詳細	22
3.11	コリメータ座標系	23
3.12	有効面積とX線入射角度の関係	25
3.13	有効面積の入射角度依存性	26
4.1	ビームラインとGSCの配置	28
4.2	セットアップ図	29
4.3	セットアップ図(上から)	29
4.4	X線発生装置	30
4.5	データ取得系のブロック図	32

5.1	計数グラフ ($\phi_{col} = +5^\circ$ $\theta_{col} = -1.1^\circ$)	36
5.2	計数グラフ ($\phi_{col} = +5^\circ$ $\theta_{col} = -1.1^\circ$) の詳細	37
5.3	計数グラフ ($\phi_{col} = +5^\circ$ $\theta_{col} = 0.0^\circ$) の詳細	37
5.4	計数グラフ ($\phi_{col} = +5^\circ$ $\theta_{col} = -1.1^\circ$) へのカウンタ栈の影響	38
5.5	カウンタ栈による計数グラフへの影響	39
5.6	($\theta_{col}, N(\theta)$) のグラフ	40
5.7	透過応答 ($\phi_{col} = +5^\circ$)	41
5.8	透過応答 ($\phi_{col} = -5^\circ$)	41
5.9	透過応答 ($\phi_{col} = +10^\circ$)	42
5.10	透過応答 ($\phi_{col} = -10^\circ$)	42
5.11	透過応答 ($\phi_{col} = +15^\circ$)	42
5.12	透過応答 ($\phi_{col} = -15^\circ$)	42
5.13	透過応答 ($\phi_{col} = +20^\circ$)	42
5.14	透過応答 ($\phi_{col} = -20^\circ$)	42
5.15	透過応答 ($\phi_{col} = +25^\circ$)	43
5.16	透過応答 ($\phi_{col} = -25^\circ$)	43
5.17	透過応答 ($\phi_{col} = +30^\circ$)	43
5.18	透過応答 ($\phi_{col} = -30^\circ$)	43
5.19	透過応答 ($\phi_{col} = +35^\circ$)	43
5.20	透過応答 ($\phi_{col} = -35^\circ$)	43
6.1	エッジとコリメータシート座標との関係	46
6.2	分割した計数グラフ	48
6.3	ピークにおける時刻とカウント積分値の関係	48
6.4	コリメータシート上側の座標の修正	49
6.5	カウンタ栈とコリメータシート座標の関係	51
6.6	実際の透過応答と設計値を基に算出した透過応答の比較	53
6.7	($\phi_{col} = +5^\circ, \theta_{col} = -1.1^\circ$) の計数グラフを基に算出した透過応答による比較 検証 ($\phi = +5^\circ$)	54
6.8	($\phi_{col} = +5^\circ, \theta_{col} = -1.1^\circ$) の計数グラフを基に算出した透過応答による比較 検証 ($\phi = +20^\circ$)	55

6.9	$(\phi_{col} = +5^\circ, \theta_{col} = -1.1^\circ)$ の計数グラフを基に算出した透過応答による比較検証 ($\phi = +35^\circ$)	55
6.10	$\phi_{col} = +20^\circ, \theta_{col} = -1.0^\circ$ のときの計数グラフを基に算出した透過応答 . . .	57
6.11	$\phi_{col} = +35^\circ, \theta_{col} = +1.0^\circ$ のときの計数グラフを基に算出した透過応答 . . .	57
6.12	コリメータシートの歪みによる有効長さの減少	58
A.1	ライトカーブより作成した座標リストに対するフィッティングの様子 . . .	61

表 目 次

2.1	MAXI 検出器性能表	6
3.1	コリメータの寸法	20

概要

MAXIは2008年に国際宇宙ステーションに搭載される予定である。MAXIの主な運用目的は全天にわたるX線源の強度変化の監視であり、X線源の観測に主検出器となるのが6台のガス・スリットカメラ(GSC)である。このGSCのX線光路は大きく分けて3つの構造部に分かれる。X線の入射口であるタンゲステンスリット、X線検出器であるGSCカウンタ、そしてその両者の間に位置するコリメータである。

コリメータは128枚の薄い金属板が3mm間隔で平行に並べられた構造をもつ。これによりスリットに入射するX線のうち金属板に平行に近い角度のX線束しか検出器に届かないため、入射X線の到来方向は天球上のごく一部の領域に制限される。この領域がMAXIの観測視野であり、視野にX線源が出入りした時刻からX線源の位置を特定する。従って、コリメータの構造特性はMAXIのX線源位置決定能力に大きく関わっている。

実際、GSCの試作機に対して行われたX線照射実験の結果得られた透過応答は、コリメータが理想的な構造している場合の透過応答とは有意に異なっていた。これは各金属板の位置や傾き等が設計された値からずれていることが原因であると考えられる。本研究ではGSCの実機に対してさまざまな入射角と入射位置についてX線照射実験を実施し、コリメータが実際に示す透過応答を計測した。さらにX線照射実験のデータからコリメータを構成する各金属板の相対的位置関係を求め、その座標リストに基いてさまざまな入射角に対する透過応答を算出し、実験で得た透過応答を再現できるかを検証した。

その結果、部分的には実際の透過応答を再現できたものの、入射角の大きさが小さい領域において、座標リストから算出した透過応答は実験で得た透過応答よりも10%ほど高い値を示した。このことから、各コリメータシートが平面状ではなく撓(たわ)みや皺(しわ)などの無視できない歪みをもち、それが透過応答に影響している可能性が高いことが分かった。

第1章 Introduction

1.1 国際宇宙ステーション計画

1.1.1 計画概要

国際宇宙ステーション計画 (ISS:International Space Station) は米国、ヨーロッパ、ロシア、カナダ、そして日本の世界 16 カ国が参加している国際協力プロジェクトで、宇宙空間に恒久的な大型有人施設を建設することが目標である。科学技術開発や新たな知見獲得のために、微小重力などの宇宙環境を利用した様々な実験、研究を行う機会を広く提供することを目的としている。

ISSは、建設完了時には全長約 110 m、太陽電池の長さ約 75 m、総質量が約 450 トンの大型構造物となり、高度約 400 km の軌道上を 1 周約 90 分で地球を周回している。1988 年に国際宇宙ステーション計画が正式にスタートし、1998 年 11 月に最初のモジュールが打ち上げられた。完成は 2010 年を予定している。我が国では現在、日本の実験モジュール (JEM:Japanese Experiment Module) 『きぼう』を製作しており、2008 年春に『きぼう』船外実験プラットフォームがスペースシャトルで打ち上げられる予定である。

1.1.2 『きぼう』

『きぼう』は多目的な微小重力実験施設で、微小重力や真空などの宇宙環境を利用した微小重力実験、地球及び天頂方向の視野を必要とする観測実験、理工学実験などを行うことが出来る。『きぼう』は主に以下の 5 つの要素から構成される。

1. 与圧部、または『船内実験室』
2. 曝露部、または『船外実験プラットフォーム』
3. マニピュレータ、または『ロボットアーム』
4. 補給部与圧区、または『船内保管室』

5. 補給部曝露区、または『船外パレット』

以上の各部は計3回のシャトル打ち上げによってISSまで運ばれ、ISS本体に取り付け後、10～15年間実験装置を運用する予定である。

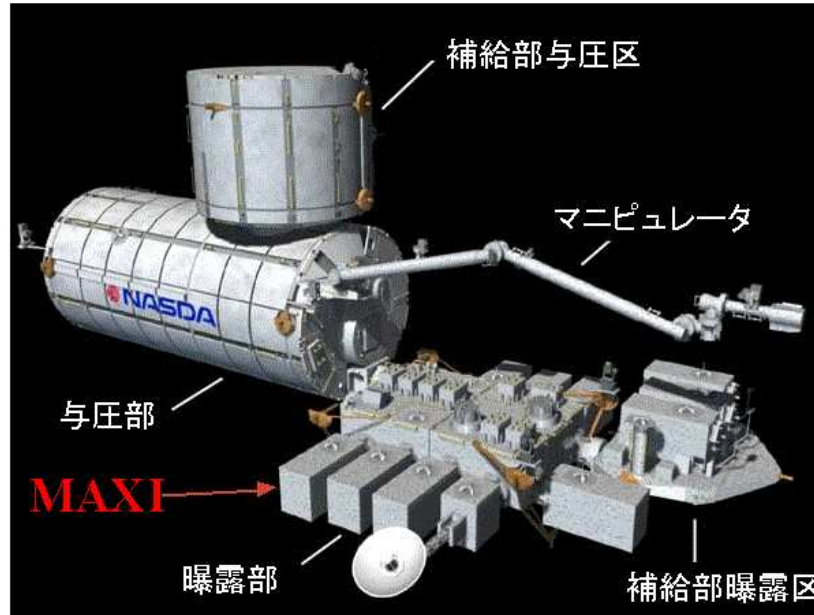


図 1.1: JEM

1.1.3 船外実験プラットフォーム

『きぼう』の一区画である船外実験プラットフォームは船内実験室の先端に取り付けられる。外形寸法が5.7m×5.0m×3.8mの箱型で、アルミ合金製のフレーム/パネル構造を採用している。プラットフォーム全体が宇宙空間に曝露されており、宇宙環境をそのまま利用した実験用設備である。科学観測、地球観測、通信・理工学実験、材料実験などの種々の実験装置を取り付けることが可能である。船外実験プラットフォームには最大10個の曝露実験ペイロードを取り付けることができ、MAXIもこの船外実験プラットフォームに取り付けられる。

1.2 MAXI計画

1.2.1 計画提案

全天X線監視装置 (MAXI:Monitor of All-sky X-ray Image) は理化学研究所と宇宙航空研究開発機構 (JAXA)、青山学院大学、大阪大学、東京工業大学、日本大学などの研究者の共同研究プロジェクトであり、ISSの『きぼう』船外実験プラットフォームの初期利用ミッションとして1996年に提案された。

1.2.2 全天監視の必要性

X線は中性子星やブラックホールの連星、活動銀河核など、激しい活動を行う天体から主に放射され、その多くは変動している。したがって、X線で観測することにより宇宙のより活動的な姿を捉えることができる。しかし、X線は大気に吸収されてしまい地上では観測できないため、宇宙空間に観測装置を持っていき観測しなければならない。

既知のX線天体はそのX線強度変化をより長期的に監視することで、より詳細なデータが得られる。また突発的にX線を発する天体现象については、その現象を早期から捉えることにより、その活動の全貌を捉えることができる。これまでにいくつものX線観測衛星が打ち上げられ現在も活躍しているが、その多くはポインティング観測を主目的としており、全天を捉えることは出来ない。以上のことなどから全天X線監視を目的とした衛星の必要性が生じる。

1.2.3 MAXIの目的

MAXIの主な目的は、全天のX線強度変化の監視と、突発的なX線天体现象の早期発見である。

これまでも全天をX線で監視する衛星はあったが、いずれも感度に制約があり、捉えられる天体もごく少数の例外を除けば銀河系内の明るいX線連星に限られていた。MAXIはこれまでの全天X線監視装置の中では最高の感度を有しており、活動銀河核などの銀河系外のX線天体も含めた全天の強度監視を実現することが見込まれている。

またMAXIは、1周約90分のISSの周回運動とともに全天をサーベイするので連続的な全天監視が可能であり、突発的なX線天体现象の早期発見の実現が期待されている。

1.2.4 現状

現在、2008年のISSへの搭載を目標にMAXIの各種機能の性能試験等が行われている。MAXIの主検出器であり本研究対象でもあるGas Slit Camera(GSC)に対しては、その中心部である比例計数管が製造元のOxford社から納入後に理化学研究所又は青山学院大学で受入試験、特性試験を行ったのち、GSCのエレクトロニクス関係を製造している明星電気より前段回路を組み上げられ検査を終えたものから順次JAXAに搬送され、JAXA施設内のクリーンルームでコリメータ応答の測定を主とするX線照射実験を行っている。2月22日現在で全6台のうち4台目までの照射実験が終了しており、既に照射実験を終えたGSCに関しては取得したデータの解析が進められている。

1.3 本論文の主旨

GSC 1台にはX線を検出するカウンタが2台組み込まれており、それぞれに識別番号がふられ区別されている。本研究ではまず、JAXAで行われているX線照射実験のデータを基にGSCカウンタ(No.010)に対応するコリメータの構造特性を評価する。さらに、その求めた構造特性からシミュレーションによって透過応答を算出し、照射実験で得られた透過応答を再現できるか検証を行った。以下の本論文は、それら構造特性評価と透過応答再現の検証の結果をまとめたものである。

第2章 MAXIの諸元

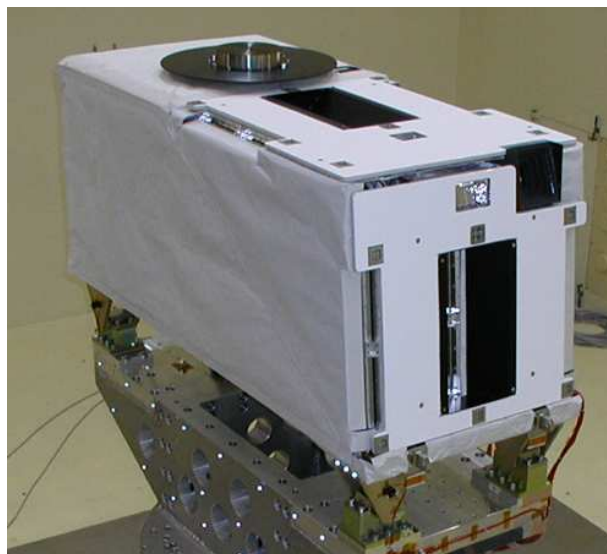


図 2.1: MAXI の概観(白い直方体)。大きさは約 $2\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$ である。

2.1 X線観測装置

MAXIには、6台の Gas Slit Camera(GSC)と2台の Solid-state Slit Camera(SSC)の2種類のX線検出器が搭載される。表 2.1 に各検出器の諸元を示す。

GSC(図 2.2)は1台につき2台の GSC カウンタが組み込まれており、この GSC カウンタには大面積のガス比例計数管が用いられている。この比例計数管はカーボン繊維の芯線を用いた一次元位置検出型の比例計数管で、理化学研究所で開発されたガンマ線バースト探査衛星 HETE-2 に搭載されたものを大型化したものである。GSC カウンタ 1 台が持つ有効面積は入射窓の Be 膜を支える枠を除くと 445 cm^2 であり、全 12 台で計 5340 cm^2 の大有効面積となる。観測可能なエネルギー領域は $2\sim 30\text{ keV}$ であり、軟 X 線領域から硬 X 線領域までと幅広い範囲をカバーしている。また天体の位置分解能は、検出器面に取り付けたタングステンスリットに垂直な方向と平行な方向ともに 1.5° に設計されている。

SSCは、1インチ角のX線 CCD 素子(浜松ホトニクス製)を16枚並べたものである。(図2.3) GSCに比べ有効面積は小さい(2台で計200 cm²)ものの、エネルギー分解能に優れている。また観測可能エネルギー領域が0.5~10 keVとGSCが検出できない低エネルギー側を補完する形になっている。

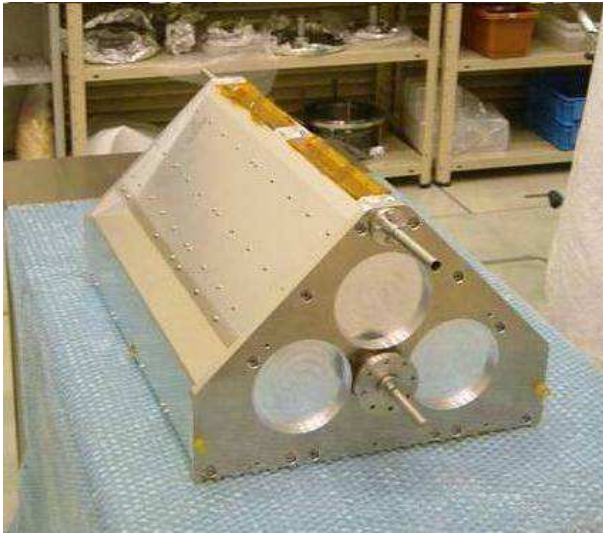


図 2.2: GSC。上部にX線が入射するタングステンスリットがある。

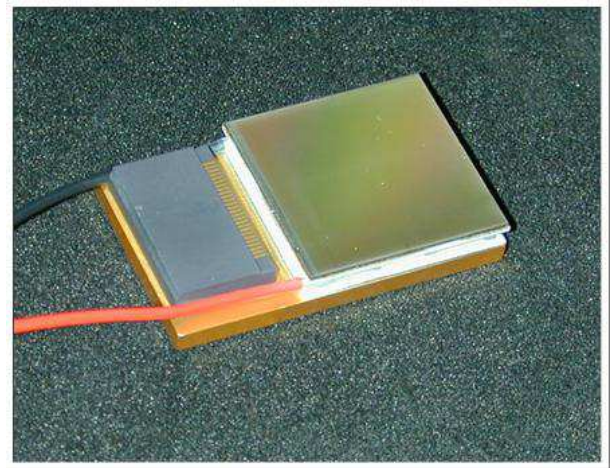


図 2.3: SSCを構成するX線 CCD 素子

表 2.1: MAXIに搭載される主要検出器の諸元。

	GSC (Gas Slit Camera)	SSC (Slid-state Slit Camera)
検出器	比例計数管	X線 CCD
全面積	5,340 cm ²	200 cm ²
視野	160° × 1.5° × 2 方向	90° × 1.5° × 2 方向
観測エネルギー範囲	2-30 keV	0.5-10 keV
エネルギー分解能	18 % (@ 6 keV)	2 % (@ 6 keV)
位置分解能	1.5 mm (@ 6 keV)	24 μm
検出限界	1 mCrab ^a	3 mCrab

^a : 1 mCrab はかに星雲のX線強度の1/1000 (2-10 keVにおいて、 $\approx 2 \times 10^{-11} \text{ erg}^{-1} \text{ cm}^{-2}$)。

また検出限界とは一週間観測を続けた場合の値。

2.2 全天走査の原理

2.2.1 GSCの視野構成

MAXIにおいてX線源の位置を決定する主要な検出器となるのが6台のGSCである。GSCは個々に $80^{\circ} \times 1.5^{\circ}$ の視野をもち、それらを横に3台並べて $160^{\circ} \times 1.5^{\circ}$ の視野を作る(図2.4)。上記の $160^{\circ} \times 1.5^{\circ}$ の視野は2台だけでも達成できるが、2つの視野の間(天頂方向)は視野を掃く速度が速いため、X線源が視野内に入っている時間が短い。そのため、それを補う意味で3台目のGSCを2台の中心に置き、一定の感度を確保できるようにしている。

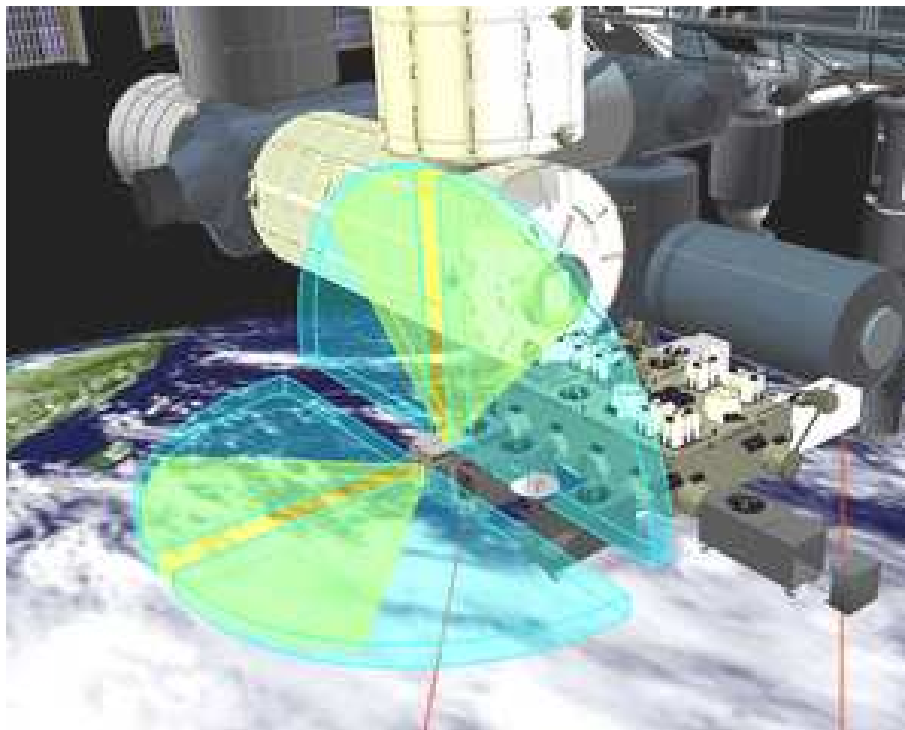


図 2.4: GSC の視野。図中の 6 つの扇形それぞれが GSC1 台の視野を表す。

2.2.2 全天走査

水平方向に3台、天頂方向に3台並べるので、MAXIは天球上に2本の細長い半円弧上の視野領域を持つことになる。ISSが地球を1周すると、その視野領域が縄跳の縄のように天球上を動き全天を走査する(図2.5)。X線源の、視野の長手方向の位置はGSCカウンタの一次元位置検知能力によって決定する。それに垂直な方向の位置は、X線源が視野に出入りした時刻から決定する。

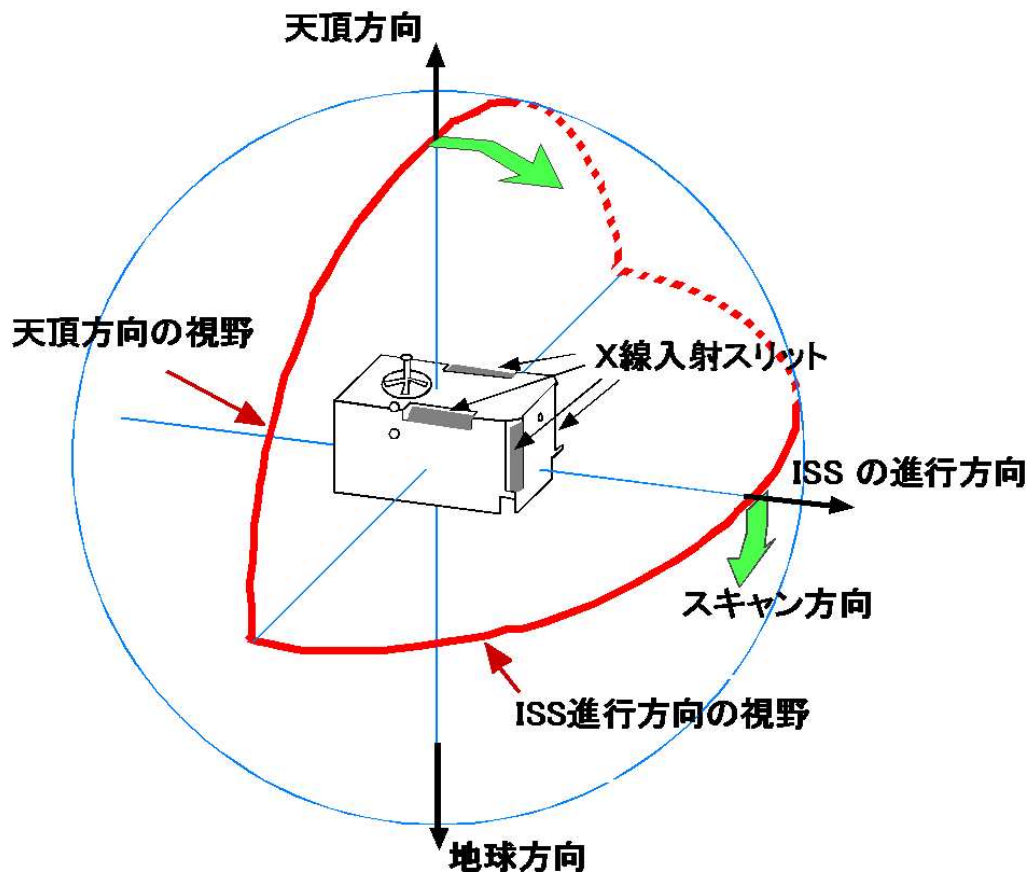


図 2.5: MAXIの観測視野。水平方向と天頂方向の2本のラインが視野を表す。ISSが地球を1周すると縄跳びの縄のように視野が全天を掃く。

第3章 Gas Slit Camera

3.1 構成

Gas Slit Camera(GSC)はX線検出部となる GSC カウンタ 2 台と、128 枚のコリメータシート (またはスラット) とタングステンスリットから構成されている。また、GSC カウンタは比例計数管と前置増幅器、高圧電源部からなる。

2 台の GSC カウンタはそれぞれ A 系, B 系と呼ばれる。A 系と B 系は電気的には独立に動作し、互いに影響を与えることはない。そのため、電力の制限が必要になった場合などは、片方の系のみでも動作可能である。GSC カウンタは、後述する比例計数管の検出位置決定方法のために方向性をもっており、一次元位置検出の方向の両端を L 側, R 側としている。GSC 内部で 2 台の GSC カウンタは、一次元位置検出方向が平行かつ互いに LR 逆向きとなるように横に並べられており (図 3.1)、それぞれに 64 枚ずつコリメータシートが対応している。またタングステンスリットは中央で仕切られており、入射 X 線が A 系と B 系のどちらのカウンタに届くかはスリットを通過した時点で決定している。したがってスリットの片側、64 枚のコリメータシート、GSC カウンタ 1 台を合わせて 1 組の観測系とすれば、GSC 1 台には互いに独立な 2 組の観測系が組み込まれていると考えることができる。

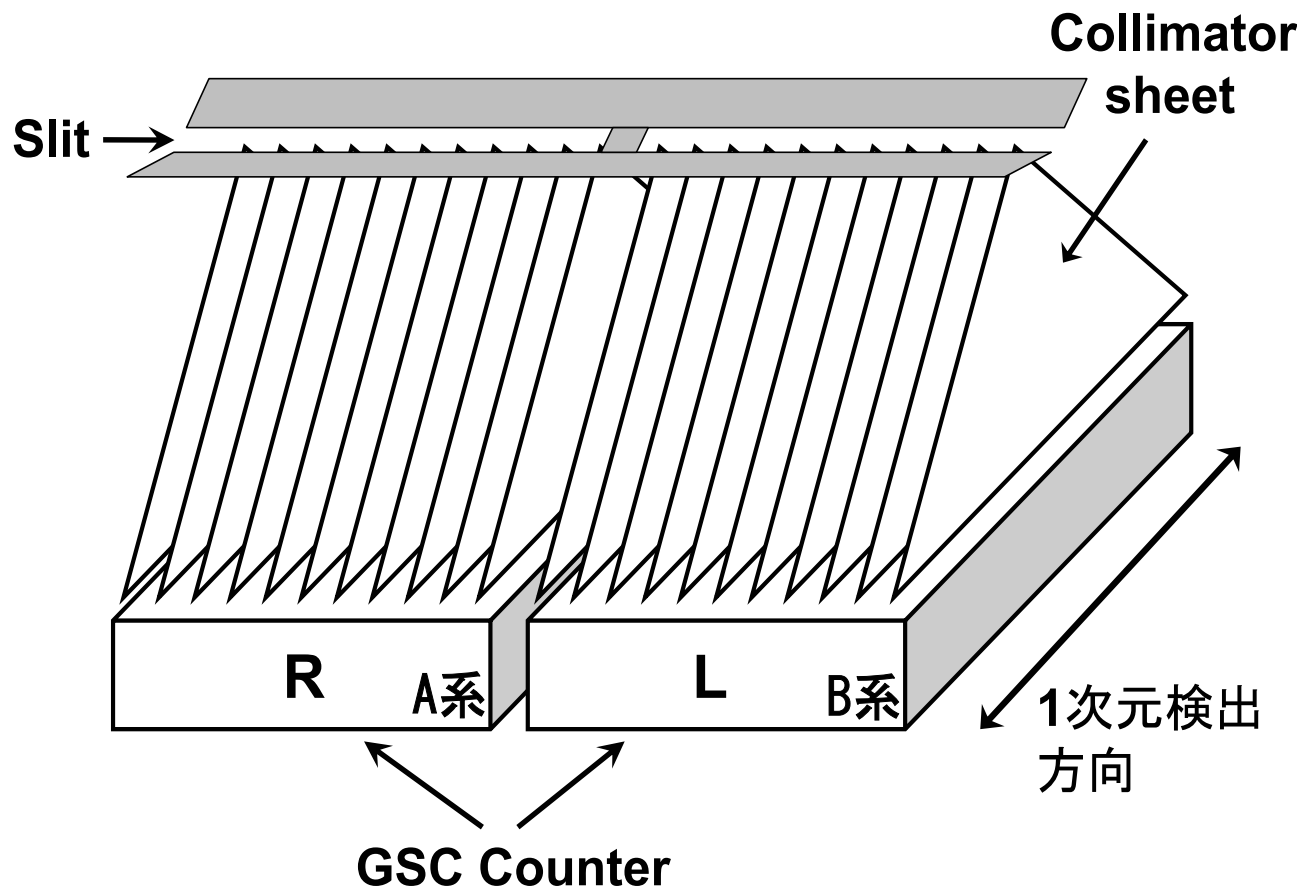


図 3.1: GSC 内部の概略図。コリメータシートと2台の GSC カウンタの配置を示す。図中右側の両矢印は比例計数管の一次元位置検出方向を表している。

3.2 GSC カウンタ

3.2.1 カウンタの仕様

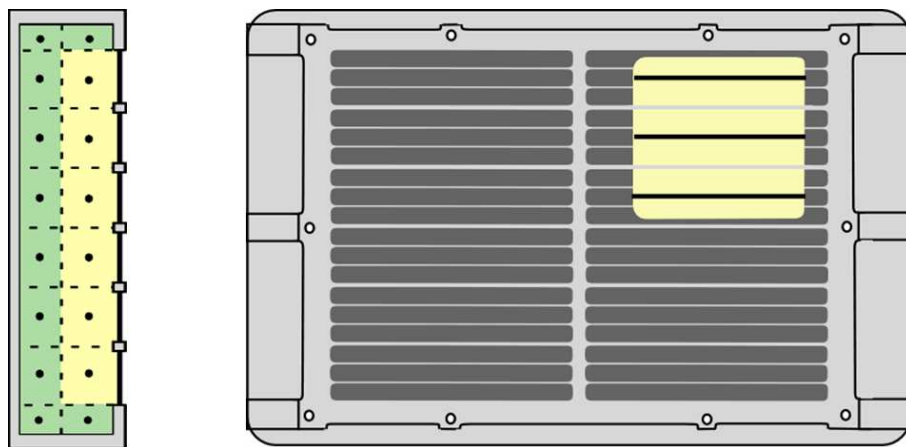
GSC カウンタは MAXI チームによって設計され、フィンランドの Metorex 社 (現 Oxford Instruments) で製造されたものを使用する。GSC カウンタの外寸は $236 \times 358 \times 86 \text{ mm}^3$ で、重量は約 5390 g である。また Be 入射窓の形状は $272 \times 190.5 \text{ mm}^3$ で、A4 サイズとほぼ同じ大きさである。

カウンタ内部にある 6 本の位置検出用カーボン繊維芯線は直径が $10 \mu\text{m}$ 、長さが 333 mm であり、それぞれに C0 から C5 までの番号がふられている。6 本のカーボン芯線の周囲には、スリットからの入射以外のイベントを落とすために Veto 芯線が設けられている。Veto 芯線は金メッキタングステン線で直径 $18 \mu\text{m}$ であり、カーボン芯線の両脇に側面 Veto 芯線 2 本ずつと、カーボン芯線の下側に下層 Veto 芯線 6 本の計 10 本でスリットからの入射以外のイベントを除去する仕組みになっている。またカーボン芯線の端の面から入射するイベントに関しては、芯線の位置検出機能により除くことが出来る。各セルは GND ワイヤによって区切られている (4 mm ピッチ)。GND ワイヤは金メッキタングステン線で直径が $50 \mu\text{m}$ である。カーボン芯線と Veto 芯線、及び GND ワイヤの配置を図 3.2.1 に示す。

カーボン芯線は左右両端から読み出すので信号線は $2 \times 6 = 12$ 本、下層 Veto が一系統にまとめられて 1 本、側面 Veto も一系統にまとめられて 1 本、よって合計 14 本の信号線となる。



図 3.2: GSC カウンタの概観。受光面となる Be 膜を支えるため棧が設けられている。



caption[GSC の各芯線の位置]GSC の各芯線の位置。左側の図で黄色の領域がカーボン芯線で、緑色の領域が Veto 芯線。各セルの間にあるのは GND ワイヤ。

3.2.2 前段信号処理回路

GSCは前置増幅器としてAMPTEK社のチャージアンプ A225 を用いている。このA225の増幅率は外付けの抵抗の値で変更可能である。またカップリングコンデンサの電気容量は6800 pFである。前置増幅器の回路図を図 3.3 に示す。比例計数管内の6本のカーボン繊維芯線の両端と Veto 芯線2系統から出た信号は前置増幅器で増幅され、計14本の信号線となって後段信号処理部(図 4.5 参照)に渡される。

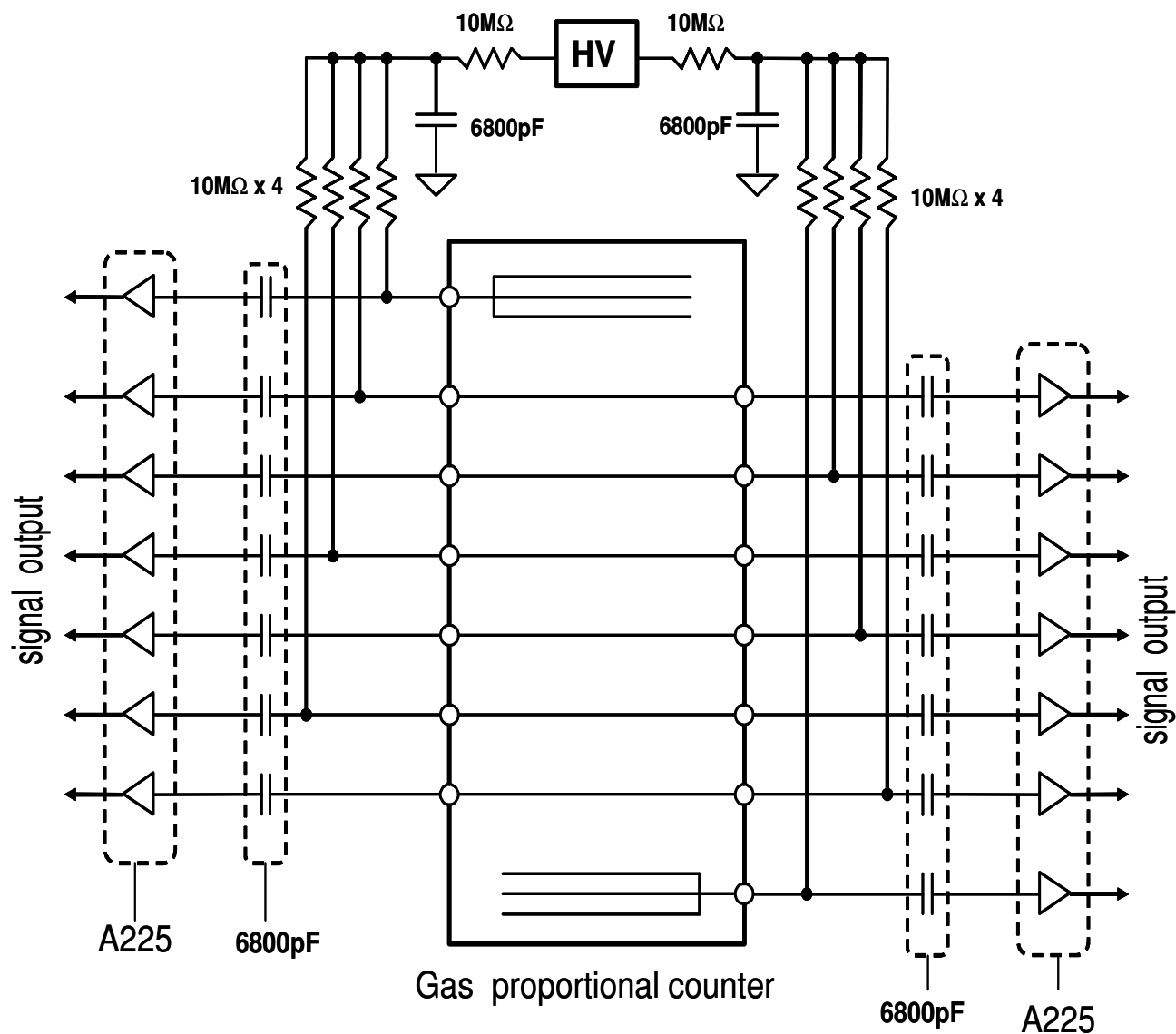


図 3.3: 前段信号処理回路図。前置増幅器には AMPTEK 社のチャージアンプ A225 を、カップリングコンデンサには 6800 pF のものを使用。図中央のガス比例計数管内の各線は図中上下(三又) 2本が Veto 芯線、中6本がカーボン繊維芯線を表す。

3.2.3 一次元位置検出型ガス比例計数管

ガス比例計数管は検出器内部に希ガスを充填し、高電圧を印加した2つの電極により構成される。放射線(光子)がガス中の原子に吸収されたり荷電粒子がガス中を通過すると、電離相互作用によってガス中にイオン対が生成される。これが一次電離であり放出された電子を一次電子という。ガス比例計数管はこの一次電子をガス電子なだれによって増幅して電気信号として取り出し、放射線を検出するものである。

GSC カウンタでは、カーボン芯線と Veto 芯線が陽極、GND ワイヤが陰極となる。また本実験で GSC カウンタにかけた電圧は 1650 V である。

比例計数管内における相互作用

GSC はガス比例計数管で、封入してあるガスは Xe 99%, CO₂ 1%、0 °C で 1.4 atm である。管内では入射した光子が以下のような相互作用をしている。

光電吸収過程においては、入射光子はガス中の吸収物質原子と相互作用して完全に消失する。このとき入射光子によってエネルギーを与えられた光電子(一次電子)が原子の殻から放出される。X線が十分に大きなエネルギーを持っていると、原子中で最も強く結合している K 殻電子が光電子として放出される確率が最も大きくなる。光電子が放出される前にいた殻の束縛エネルギーを E_{bind} とすると、この光電子は以下のようなエネルギーを持つ。

$$E_{elec} = h\nu - E_{bind}$$

この相互作用では光電子の他に、束縛殻の1つに空孔を持つ吸収物質のイオンも生成される。この空孔は電子との再結合や原子内電子の再配列によってすぐに満たされ、同時に多数の特性X線光子が生成される。

なだれ増幅の原理

ガス比例計数管に電場をかけると、上述の相互作用で放出された一次電子は中性ガス分子と衝突を繰り返しながら陽極方向に移動していく(ドリフト)。ガス比例計数管に十分な高電圧が印加されていれば、電子は衝突後に容易に加速され、次に衝突時には中性ガス分子を電離できる程に大きな運動エネルギーを持つことができる。比例計数管の形状が図 3.4 のような円筒型ならば、放出された電子は動径方向の電気力線に沿って中心軸まで移動する。この場合、半径 r における電場の強さは $E(r)$ は、

$$E(r) = \frac{V}{r \ln(b/a)}$$

V = 陽極と陰極との電位差

a = 陽極芯線の半径

b = 陰極の内側の半径

と表わせる。電子がガス分子に衝突してから次に衝突するまでの間に、電場に加速されて得られる運動エネルギー ΔT_k は、

$$\Delta T_k = e \int_{r_1}^{r_2} E(r) dr$$

であり、この ΔT_k が中性ガス分子の電離エネルギーよりも大きいと二次電離が起き、電子の数がさらに増える。このように電子数をガス中で増幅する方法をガス増幅という。

1 atm の通常的气体では電場の強さが 10^6 V/m 程度以上でなければ、二次電離は起きない。GSC に用いられている比例計数管の陽極線(カーボン芯線の方)の直径は $10 \mu\text{m}$ だから、 $a=5 \times 10^{-4}$ cm である。また GSC のセルは実際は直方体だが円筒形とみなすと $b=1.25$ cm となる。これに印加電圧(本実験では 1650 V)をかけると、陽極線表面付近ではこの電場の閾値を超えるので二次電離が起きる。二次電離で放出された電子が加速されてガス分子との衝突を繰り返してさらに電離を起こす。こうして電子なだれが発生し、電子数を増幅する。なだれによる増幅は陽極線のごく近傍(芯線の直径程度)で起こるので、入射光子の相互作用によって放出された各電子は、最初に発生した場所がどこであっても同じ増幅過程を経るため、その増幅率は同じになる。ちなみに GSC では電子なだれによるガス増幅率を 5000 程度で使用している。

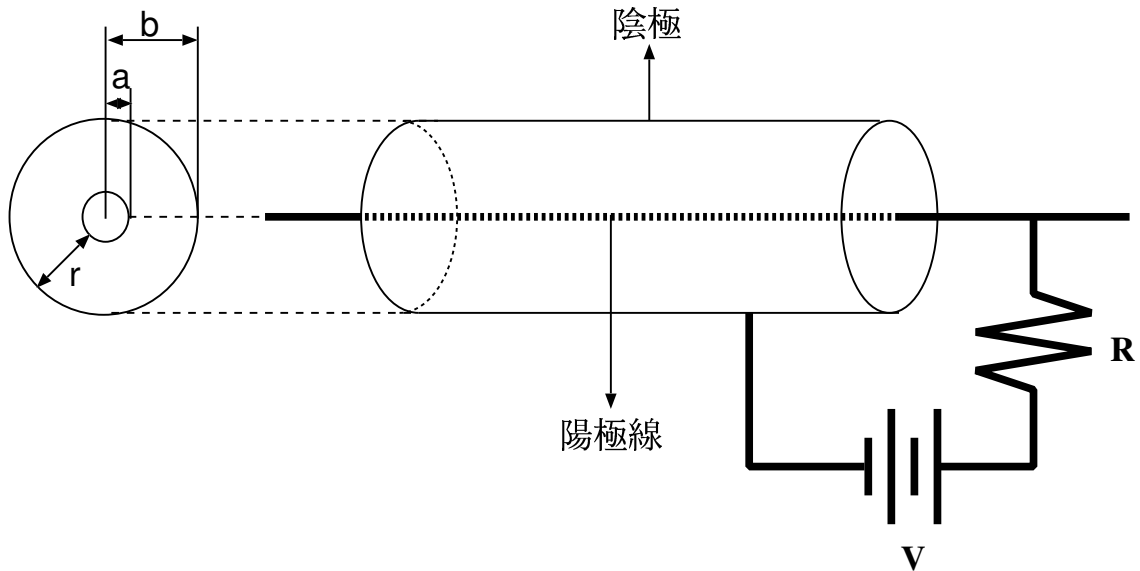


図 3.4: 円筒型比例計数管の構造

一次元位置検出の方法

次に一次元の位置検出方法について述べる。GSC 内のセルを円筒型とみなした場合、入射 X 線によって最初に発生した一次電子はカーボン芯線に向かって垂直に移動するので、電子なだれが起きた位置から X 線が吸収された位置が分かる。GSC では位置決定手段として抵抗芯線を用いている。芯線を単位長さ当たりの抵抗値がかなり高くなるように製作し、その両端に前置増幅器をつけておくと、芯線に集まった電荷はその場所から両端までの間の抵抗値 R にほぼ反比例した割合で分割される (図 3.5)。

電子なだれによって増幅された結果、全電荷 Q_0 が芯線に集められ、その両端にある理想的な (入力インピーダンス無限小、時定数無限大) 前置増幅器で電荷を読み出すとする。ここで芯線の両端をそれぞれ L 側, R 側と定義する。電荷が集められた位置から左右両端までの芯線の抵抗値をそれぞれ R_L , R_R とし, L 側, R 側の増幅器に入力される電荷量をそれぞれ Q_L , Q_R とする。このとき、

$$Q_0 = Q_L + Q_R$$

$$R_0 = R_L + R_R$$

の関係にある。両側の増幅器で増幅された電荷のパルス波高をそれぞれ PH_L , PH_R とすると、

$$\begin{aligned}
Q_L &= Q_0 \times (R_R/R_0) \\
PH_L &= Q_L/C_f \\
&= (Q_0/C_f) \times (R_R/R_0)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Q_R &= Q_0 \times (R_L/R_0) \\
PH_R &= Q_R/C_f \\
&= (Q_0/C_f) \times (R_L/R_0)
\end{aligned}$$

となる。ただし C_f は電荷感応型前置増幅器の帰還容量である。このとき、

$$(PH_L + PH_R) \propto Q_0$$

したがって、X線入射位置 X は、

$$\begin{aligned}
X &= L \times (R_R/R_0) \\
&= L \times (Q_L/Q_0) \\
&\propto Q_L/Q_0 \\
&\propto PH_L/(PH_L + PH_R)
\end{aligned}$$

以上より、X線入射の一次元位置は次式のように左右両端から読み出されるパルス波高の比 PM (Position Measure)

$$PM = \frac{PH_R - PH_L}{PH_R + PH_L}$$

によって表すことができ、これがX線入射の一次元位置の指標になりうる。この PM は芯線の左端から右端までX線を当てたとき、理想的には上式より -1 から 1 まで直線的に変化するはずである。だが実際の電荷分割法式の比例計数管では、芯線の端にX線が当たっていても PM は -1 や 1 にならない。これは、X線が当たっている側に溜まった電荷が全て増幅器で読み込まれるよりも早く電荷の逆流が生じ、反対側の増幅器に電荷が流れてしまうために起きる。このとき、 PM とX線が検出された芯線の位置の関係をグラフに表すと図3.6のようになり、その形状からS字カーブと呼んでいる。GSCカウンタ内の各芯線のS字カーブについては、本実験とは別途に実験及び解析が行われている。

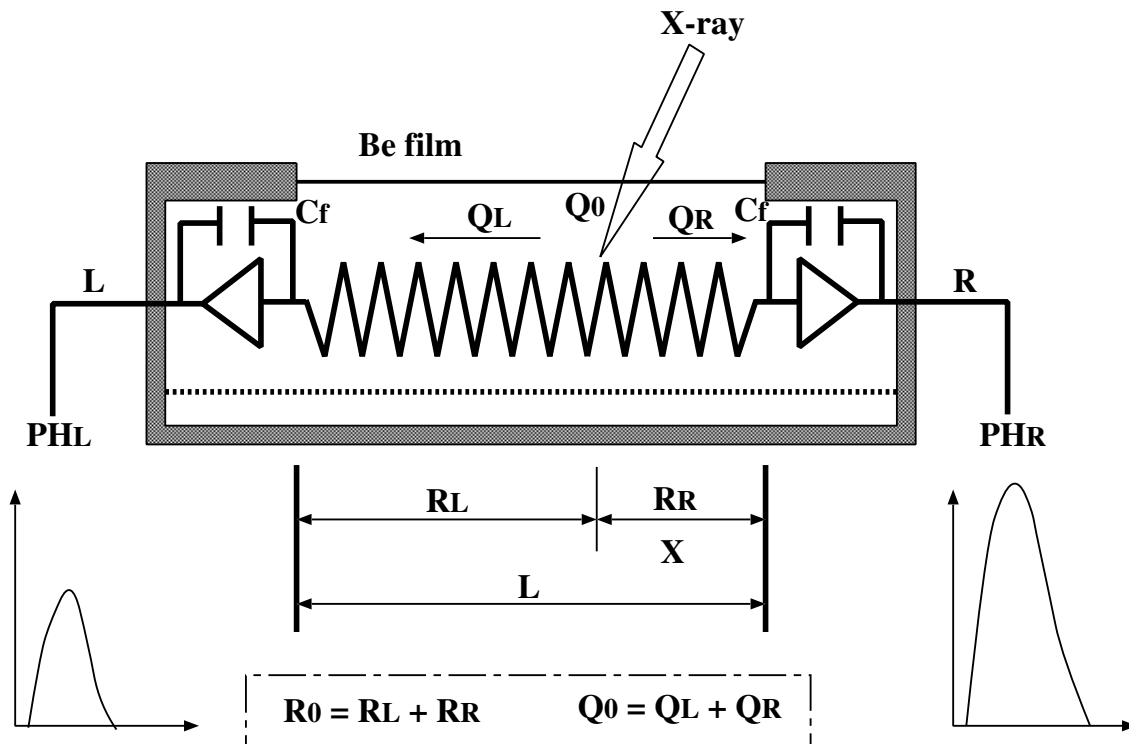


図 3.5: 一次元位置検出のしくみ。芯線両端にある前置増幅器より出力されるパルス波高の比から検出位置を求める。

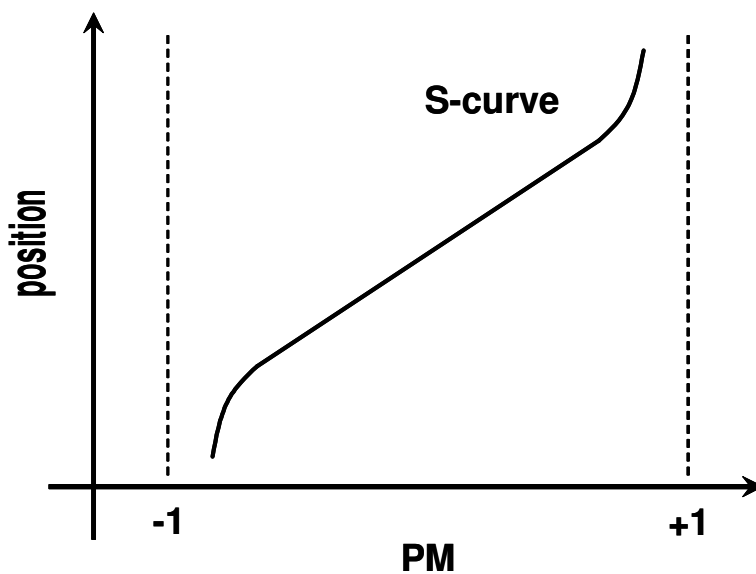


図 3.6: 芯線上の検出位置と PM の関係。横軸が Position Measure、縦軸が入射 X 線の芯線上での検出位置を表す。芯線の端に X 線が当たっても PM は -1 や 1 にならない。

3.3 コリメータ

本研究のテーマとなっているコリメータ部について述べる。コリメータ部は GSC カウンタに届く X 線の到来方向を制限する働きがあり、MAXI が X 線源の位置を決定する上で重要な構造部である。

3.3.1 X線入射角度の定義

ここではコリメータに入射する X 線の入射角度 (θ_{col} , ϕ_{col}) を定義する。 θ_{col} は X 線の進行方向とコリメータシートに平行な平面がなす角度 (図 3.7 左側)、 ϕ_{col} はコリメータシートに平行な平面上で後述する z_{col} 軸となす角度 (図 3.7 右側) である。

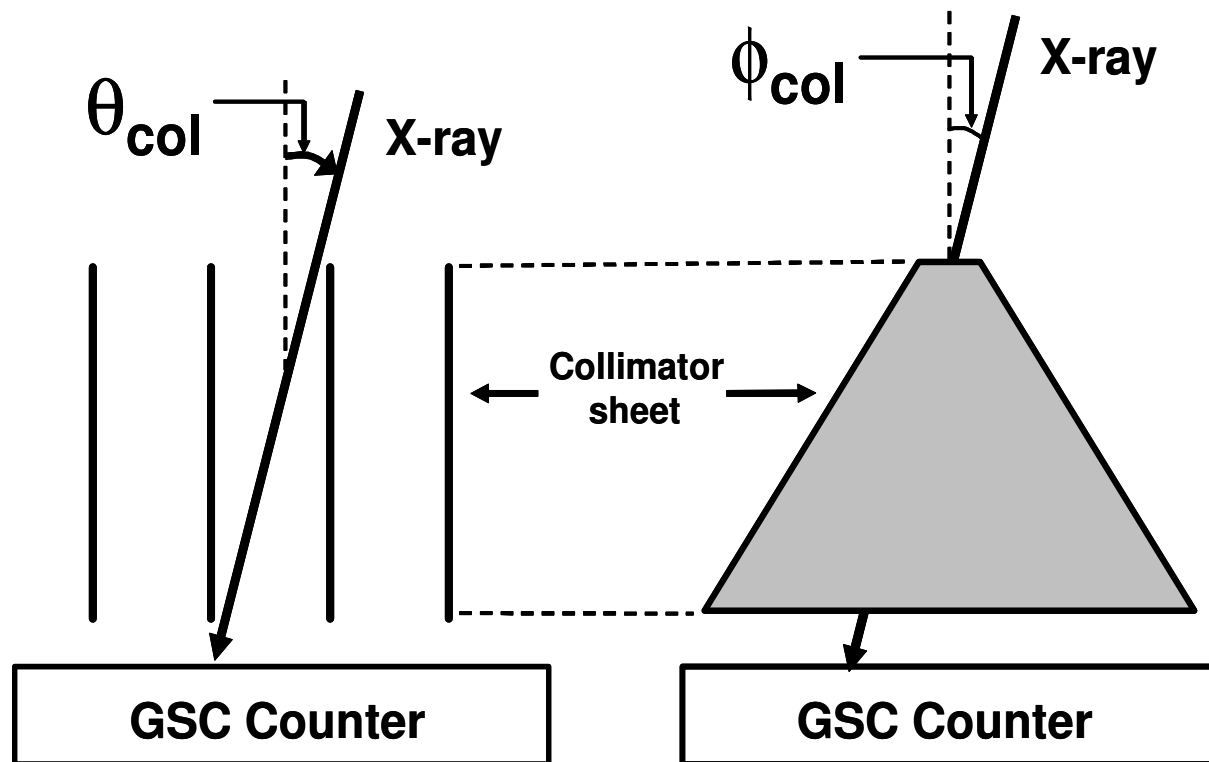


図 3.7: X 線入射角度 (θ_{col} , ϕ_{col}) の定義。左はコリメータシートに平行な方向から見た図、右はコリメータシートと平行な平面に垂直な方向から見た図である。

3.3.2 コリメータの形状

前述したように、コリメータ部はタングステンスリットと GSC カウンタの間に位置し、お互いに平行かつカウンタに垂直に並べられた 128 枚のコリメータシート (スラット) で構成される。表 3.1 にコリメータの各寸法を記す。

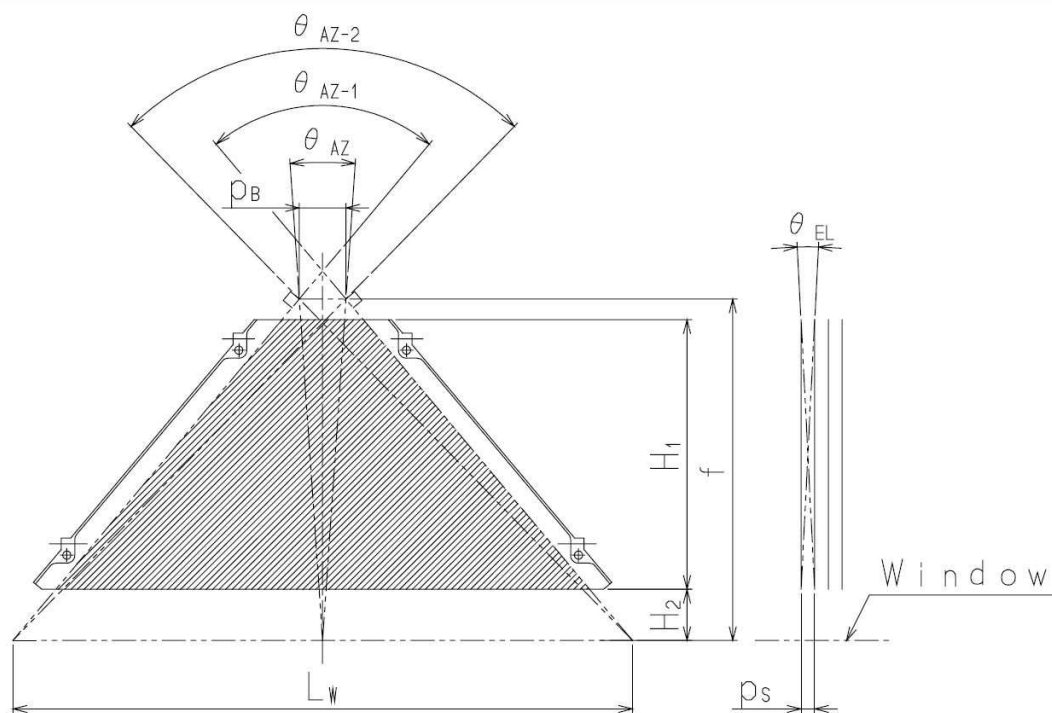


図 3.8: コリメータの形状。左はコリメータをコリメータシートに垂直な方向から見た図。右はシートに平行な方向から見た図。Window は GSC カウンタの受光面を指す。

表 3.1: コリメータの寸法

高低角方向視野角	θ_{EL}	3.0°
	$\theta_{EL(MIN)}$	2.3°
方位角方向視野角	θ_{AZ}	1.3°
	θ_{AZ-1}	80°
	θ_{AZ-2}	81.5°
タンゲステンスリット位置	f	160 [mm]
	p_B	3.7 [mm]
燐青銅シート端部位置	H_1	118.4 [mm]
	H_2	22.5 [mm]
燐青銅シートピッチ	p_s	3.1 [mm]
受光面長さ	L_w	272 [mm]

3.3.3 コリメータシート

材質と形状

コリメータシートは材質に燐青銅が用いられており、シートの厚さは 0.1 mm である。燐青銅は、Sn 3～9 %、Cu 91～97 % の組成に脱酸剤として、P 0.03～0.035 % を添加した合金であり、硬度が高く弾性に富むといった性質をもつ。また、X線阻止能の観点から考えると厚さは 0.05 mm で十分だが、0.05 mm 厚のシートでは容易に歪みが生じてしまう。厚さが 0.1 mm になると、シートはほぼ板状になり容易には歪みが生じない。このことから、シートの厚さは 0.1 mm が採用された。

またコリメータシートの形状は、図 3.8 にあるようにほぼ二等辺三角形 (正確には台形) であり、その高さは $H_1=118.4$ mm である。GSC カウンタの窓の長さが既に決まっており、方位角方向視野角は $\theta_{AZ-1} = 80^\circ$ が要求された。さらには GSC カウンタの位置分解能 1.1 mm ($\sim 0.5^\circ$ FWHM) を考慮し、カウンタ中心での点源の角度分解能が 1.5° となるように $\theta_{AZ} = 1.5^\circ$ と決められた。以上の三点を満たすように、コリメータシートの高さは $H_1=118.4$ mm となった。

表面処理

入射 X 線はコリメータシートに対してほぼ平行な角度で入射してくる。そのため、コリメータシートの表面で X 線が全反射しやすくなる。コリメータシート表面で全反射が起ると、視野の外側近傍に明るい X 線源がある場合に全反射によってその X 線が洩れ込んでしまう可能性がある。これを防ぐためにコリメータシートには、表面を粗くして X 線の反射率を低減する加工が施されている。具体的には、油性インキを噴霧した後第二塩化鉄に数秒間浸すというエッチング処理が用いられた。

組み立て方法

コリメータ部は計 128 枚のコリメータシートで構成されている。これらコリメータシートは一枚一枚独立に取り付けられているわけではなく、実際には図 3.9 にあるようにコリメータシートを 4 枚 1 組にしたコリメータユニットが 32 組並べられている。このコリメータユニットは GSC 本体への取付部をバネで引っ張ることにより、コリメータシートの平面度を保つようにしている。(図 3.10)

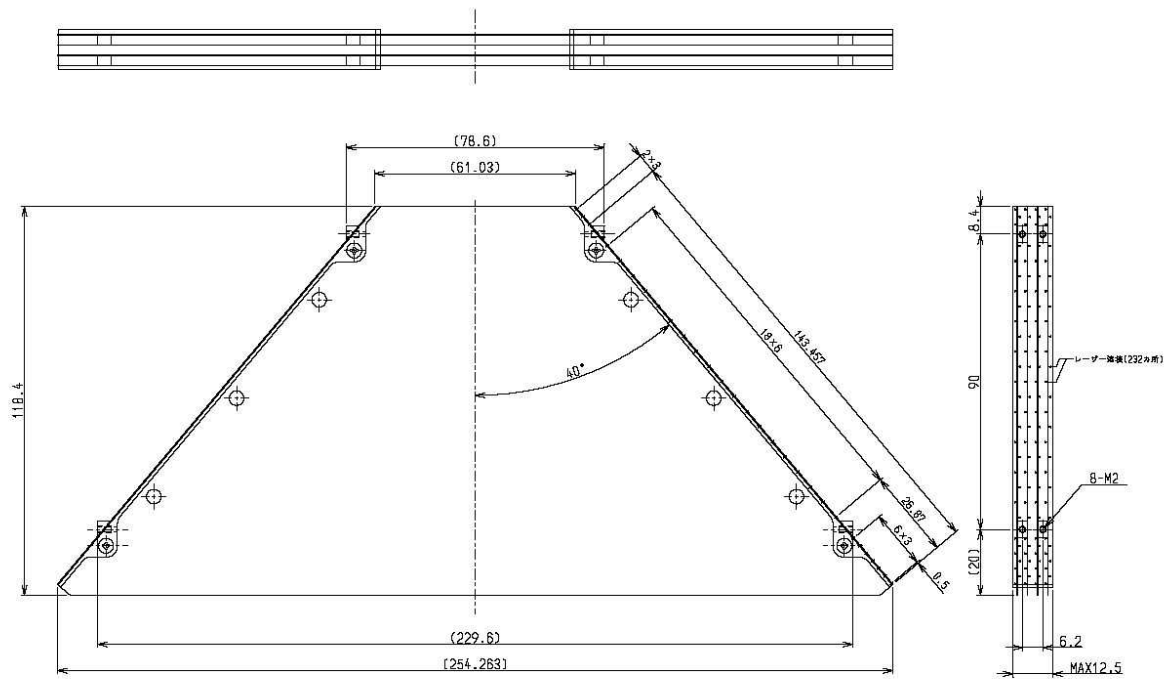


図 3.9: コリメータユニットの取り付け。左はコリメータシートに垂直な方向から見た図。計4ヵ所で GSC 本体に取り付けられている。右はコリメータユニットをシートに平行な方向から見た図。シートは4枚1組で取り付けられる。

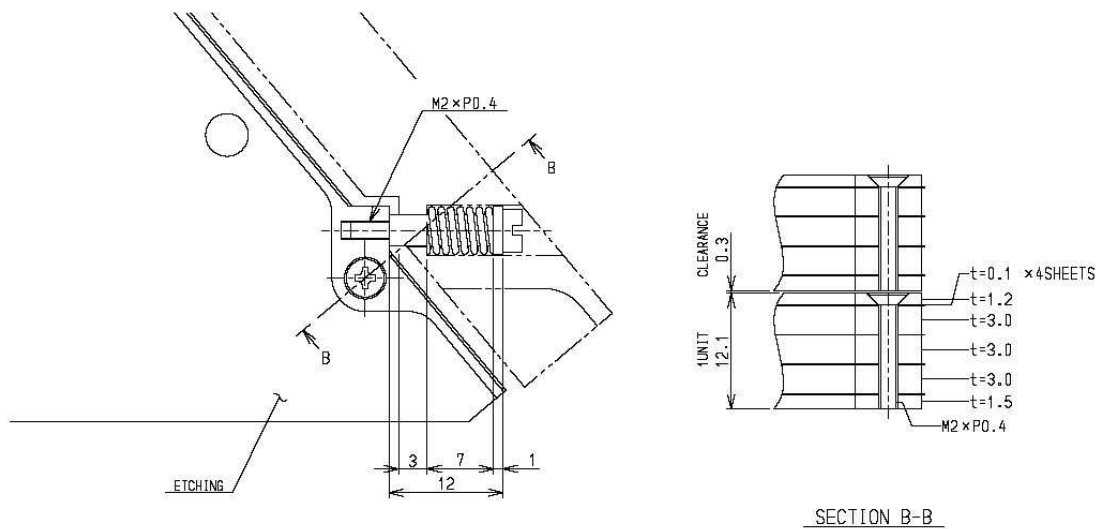


図 3.10: コリメータユニット取付部の詳細。計4ヵ所の取付部のネジに付けられたバネによってコリメータシートは外向きに引っ張られ、たるみが出ないようにになっている。右図はシートが4枚ずつまとめて取り付けられてる様子を示している。

3.3.4 コリメータ座標系の定義

Collimator Sheet ID

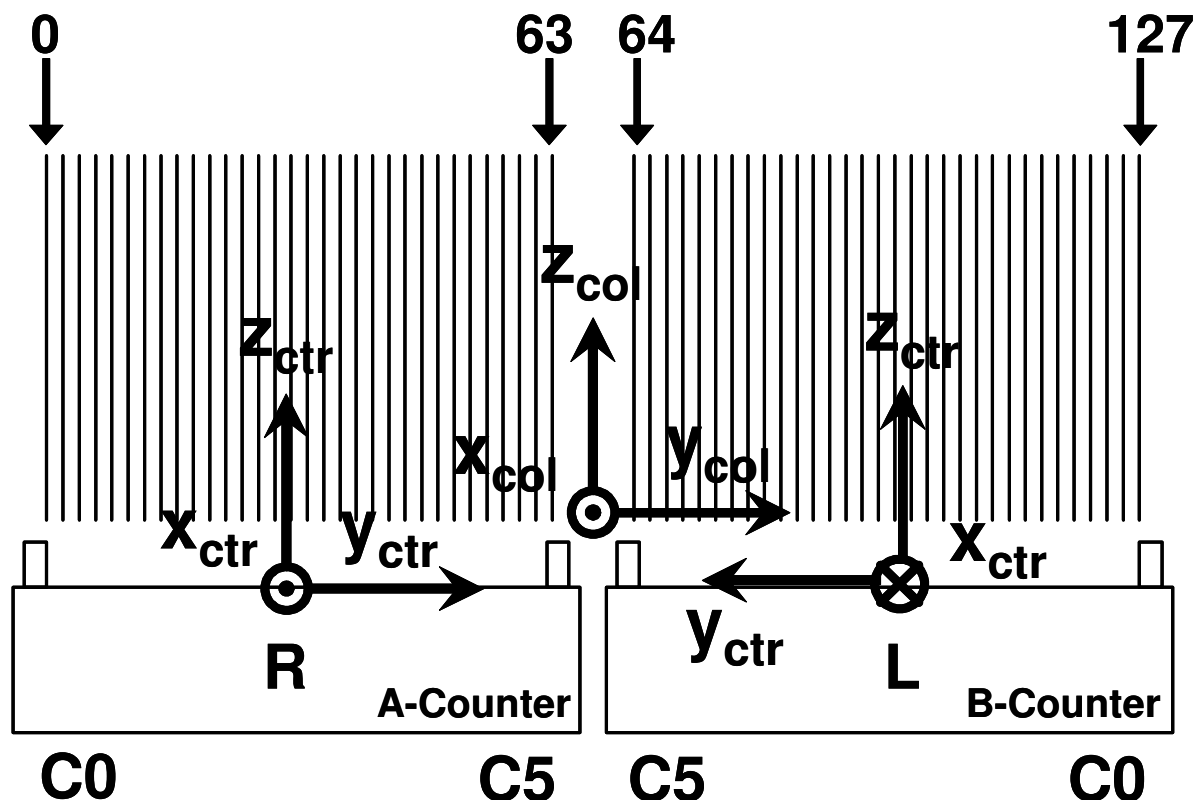


図 3.11: コリメータ及びカウンタ座標系の定義。図において A 系カウンタは R 側が、B 系カウンタは L 側が手前に向いており、それぞれのカウンタの上部に 64 枚のコリメータシートが並ぶ。各シートには A 系側の外側のシートから順に 0~127 の ID がふられている。コリメータ座標系の原点は 2 台のカウンタの間で、カウンタ座標系の原点はそれぞれのカウンタの中央である。ただし、カウンタ座標系の x , y 方向は互いに逆向きにとる。

ここでは、各コリメータシートの位置関係を表すためにコリメータ座標系及びカウンタ座標系を定義する。まずコリメータ座標系 $(x_{col}, y_{col}, z_{col})$ を定義する。この座標系の原点は 2 台のカウンタの間とし、A 系カウンタが y_{col} のマイナス側、B 系カウンタが y_{col} のプラス側となるように y_{col} 軸をとる。またコリメータシートの下端を $z_{col}=0$ として、 z_{col} 軸をカウンタ側が負となるようにとる。

次にカウンタ座標系 $(x_{ctr}, y_{ctr}, z_{ctr})$ を定義する。カウンタ座標系は 2 台のカウンタで別々にとり、それぞれのカウンタの中心を原点とする。 z_{ctr} 軸は z_{col} 軸と同じ方向にとる。ま

た y_{ctr} の向きはカーボン芯線の C0 から C5 に向かう方向を正とする。したがって、2 台のカウンタの y_{ctr} 軸は互いに平行かつ逆向きとなる。

3.3.5 コリメータ有効面積の入射角度依存性

ある角度をもって入射した平行 X 線の、検出器における受光面積を有効面積と呼ぶ。コリメータの有効面積は平行 X 線の入射角度 $(\theta_{col}, \phi_{col})$ に依存している。ここではカウンタ機やカウンタの影響は考慮せず、スリットとコリメータシートの配置と形状による効果のみを考える。まず 2 枚のコリメータシートに挟まれた一つのコリメータ間隙について考える。角度 $(\theta_{col}, \phi_{col})$ でスリットに入射した平行 X 線が、このコリメータ間隙を通過して GSC カウンタの受光面に到達したとする。このとき GSC カウンタの受光面上において平行 X 線を受光した領域は長方形となる。その長方形の各辺は x 軸, y 軸に平行であり、それぞれの長さは、 x 方向が $p_B = 3.7 \text{ mm}$, y 方向が $d_0 = d_{slat} - L|\tan \theta_{col}|$ となる。ここで、 $d_{slat} = p_s - d_s = 3.0 \text{ mm}$ はコリメータ間隙の幅で、 $L = H_1 / \cos \phi_{col}$ は平行 X 線がコリメータ間隙領域を通過する距離である。したがって、GSC カウンタ受光面の長方形の面積は $S_{rec} = p_B \times d_0$ である。

有効面積はこの GSC カウンタ受光面を貫く X 線束に垂直な平面の断面積であるから、 z_{col} 軸と X 線入射方向とのなす角を考慮に入れて、

$$\begin{aligned}
 S_{eff} &= S_{rec} \times \cos \theta_{col} \cos \phi_{col} \\
 &= p_B \times d_0 \times \cos \theta_{col} \cos \phi_{col} \\
 &= (d_{slat} - L|\tan \theta_{col}|) \times p_B \times \cos \theta_{col} \cos \phi_{col} \\
 &= \left(d_{slat} - \frac{H_1|\tan \theta_{col}|}{\cos \phi_{col}}\right) \times p_B \times \cos \theta_{col} \cos \phi_{col} \\
 &= (d_{slat} \cos \theta_{col} \cos \phi_{col} - H_1|\sin \theta_{col}|) \times p_B
 \end{aligned}$$

θ_{col} は微小であるから、 $\cos \theta_{col} \approx 1$, $\sin \theta_{col} \approx \theta_{col}$ として、

$$S_{eff} \approx (d_{slat} \cos \phi_{col} - H_1|\theta_{col}|) \times p_B$$

となる。2 枚のコリメータシートに挟まれた一つのコリメータ間隙について、入射角 θ_{col} と有効面積 S_{eff} との関係をグラフに表すと図 3.13 のような三角形になる。この入射角 θ_{col} に対する透過応答関数を三角 (山) レスポンスと呼ぶことにした。また、有効長さ L_{eff} を

$$S_{eff} = L_{eff} \times p_B \times \cos \theta_{col}$$

によって定義しておく。この有効長さ L_{eff} と入射角 θ_{col} の関係を図 3.12 で見てみる。図 3.12 の上側にある図はタンゲステンスリットを通過した X 線束がコリメータによってどれだけ制限されるかを表している。コリメータシートに対する X 線の入射角度が大きいと左側の図のようにカウンタに届く X 線束の面積は小さくなる。X 線の入射角度が小さいと右側の図のように X 線束の面積は大きくなる。また下側のグラフは上側の左右の図に対応しており、X 線の入射角度が小さいほどカウンタ受光面において X 線が届く範囲が大きいことを示している。グラフ中のピークの幅はそのままだけ 1 つのコリメータ間隙あたりの有効長さ L_{eff} を表す。

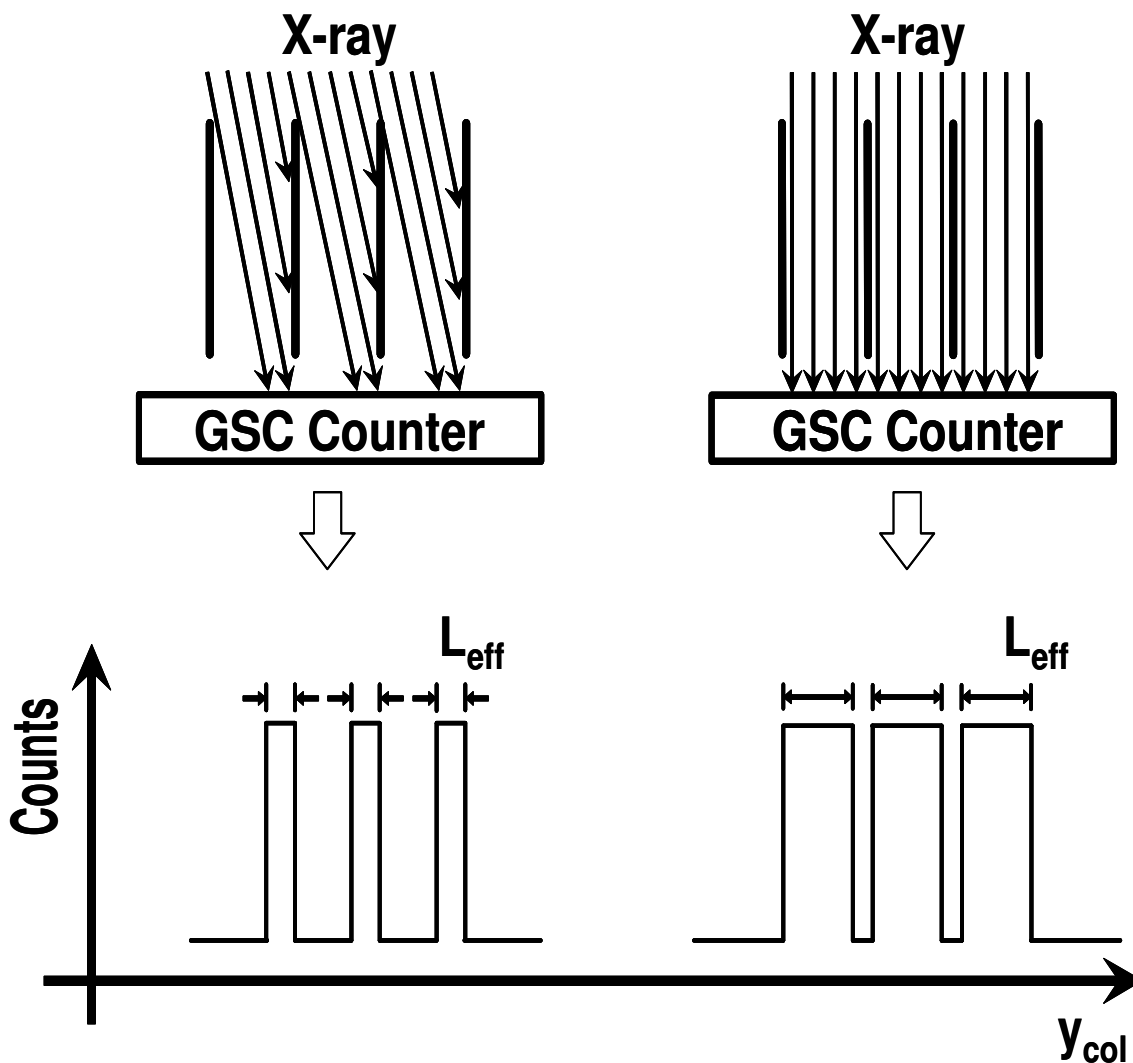


図 3.12: 有効面積と X 線入射角度の関係。グラフの縦軸は単位時間あたりの光子のカウン
ト数、横軸は GSC カウンタの受光面上の位置を表す。図中で X 線入射の図とグラフは上
下で対応している。

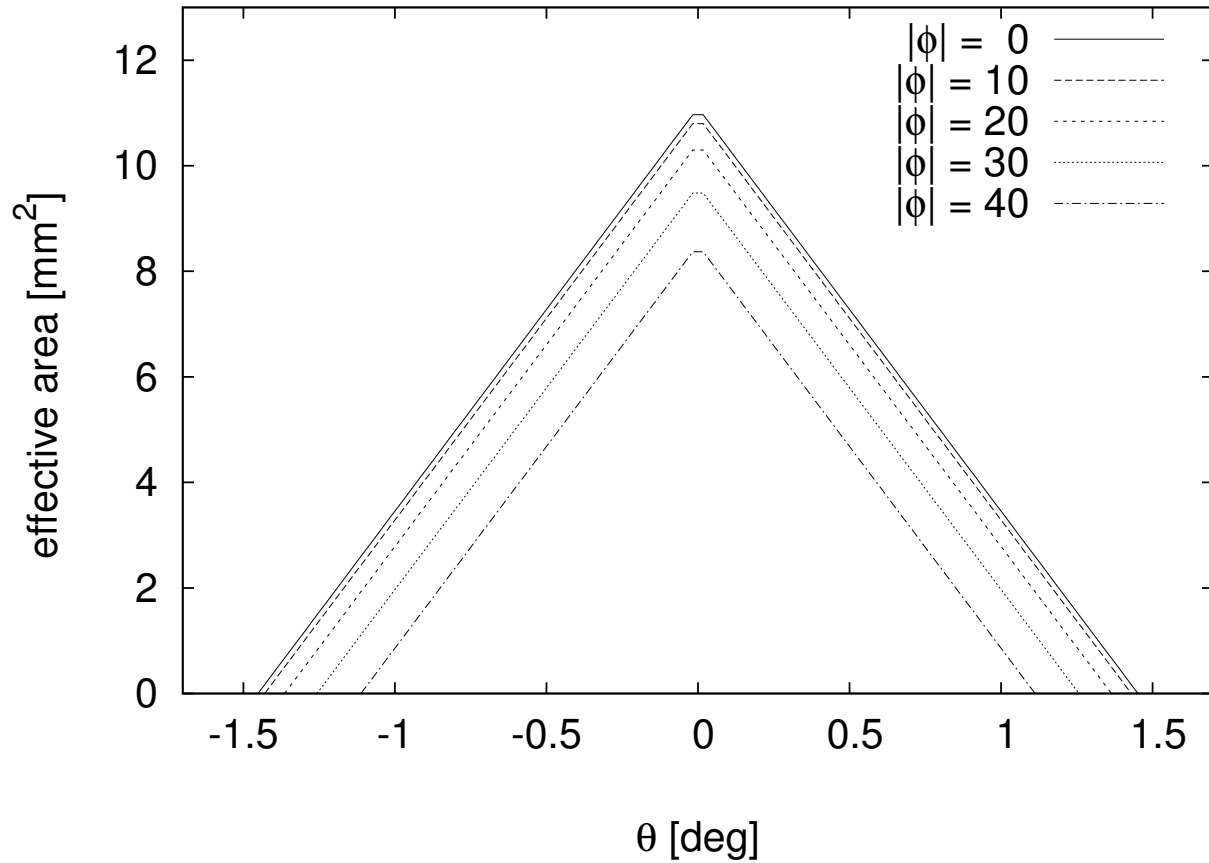


図 3.13: 一つのコリメータ間隙の有効面積の入射角度依存性。 $\theta=0$ を頂点とした二等辺三角形となる。 θ_{col} が小さい(図3.12の左側)と有効面積は大きくなり、 θ_{col} が大きい(図3.12の右側)と有効面積は小さくなる。また ϕ_{col} によっても変化する。 ϕ_{col} が大きいほど、有効面積は小さくなる。これはスリットを通過するX線束の断面積が変化することと、 ϕ_{col} が大きいとX線がコリメータ間隙を通過する距離が長くなり、X線束がカウンタに届く θ_{col} の最大値が小さくなるためである。

第4章 実験

4.1 目的

MAXIが全天監視を行うためには、検出したX線が宇宙のどの方向から到来したかを要求される精度をもって決定できなければならない。取得したデータより求めた透過応答から到来方向を決定するのだが、そのためには、ある方向から到来した平行X線からどのような透過応答が得られるかを、予め知っておく必要がある。

もしGSCが設計値どおりの理想的な構造をしているのであれば、コリメータの設計値などから幾何学的計算で求めた透過応答から到来方向を決定すればよい。しかしエンジニアリングモデルに対して、今回と同様の方法で行われたX線照射実験の結果から求めた透過応答は、設計値から求めた透過応答とは有意に異っていた。これはコリメータを構成する128枚のスラット板のカウンタに対する相対的な座標が、設計位置から僅かにずれていることが主な原因と考えられる。

本実験は実際に宇宙ステーションに搭載するGSCフライトモデルの、カウンタ(No.010)1台と64枚のコリメータシートに対して、様々な角度から平行X線を照射する事によってGSCコリメータの構造特性を評価する事を目的とする。

4.2 実験セットアップ

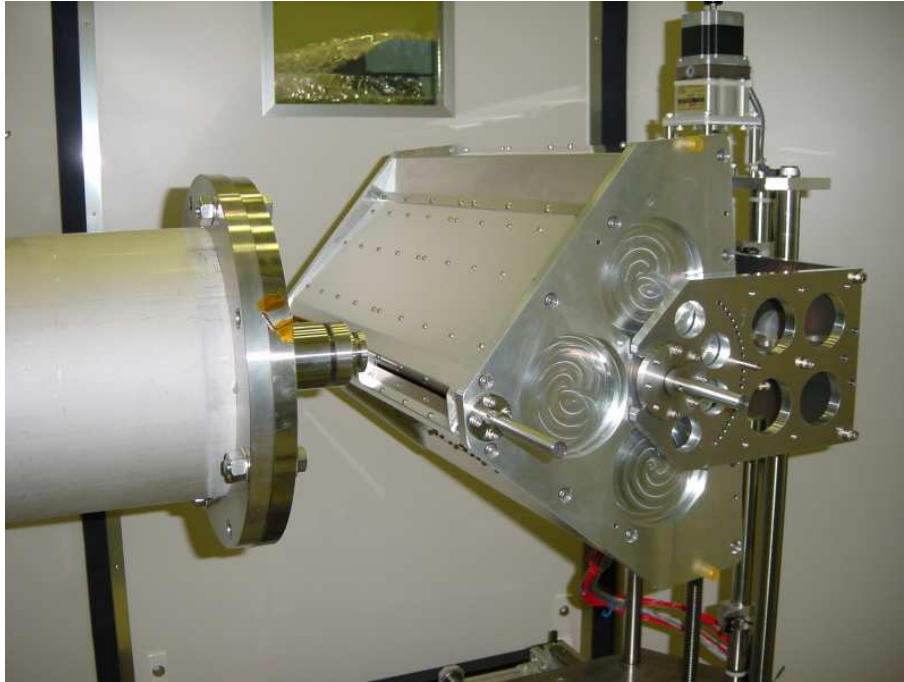


図 4.1: X線ビームライン (左) と GSC(中央)

4.2.1 X線ビームライン及びステージ

茨城県つくば市にある JAXA(筑波宇宙センター) の曝露ミッション実験棟クリーンルーム内で本X線照射試験を行った。

ここに全長約 17m の X線ビームラインと、その前方にステージを設置した。このステージに取り付けた GSC はビームラインの傍にある PC からステージにコマンドを送ることで、ビームラインに垂直かつ水平な方向 (x 方向、図 4.1 中で奥→手前の方向が正) と、鉛直方向 (z 方向) に自由に移動させることが出来る。さらに GSC は治具に設けられた回転軸によって ϕ_{col} 方向に上下 50 度まで 5 度刻みで回転させる事が出来る。また θ ステージにより θ_{col} 方向にも回転が可能である。

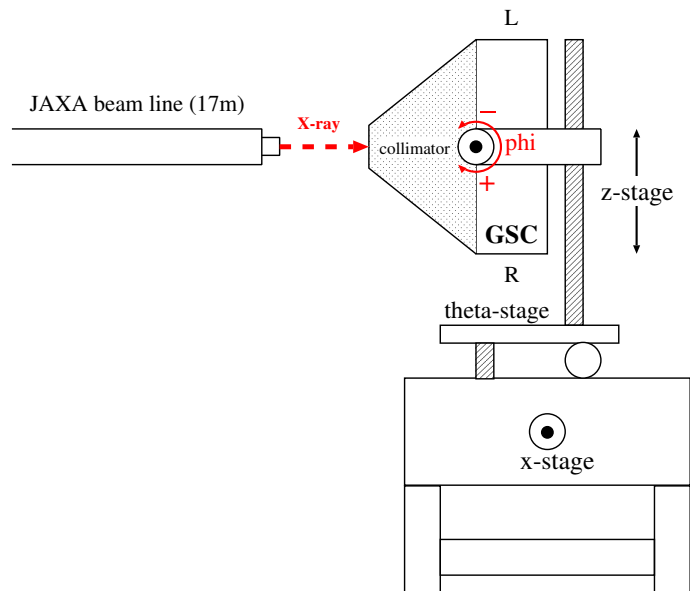


図 4.2: セットアップ図。GSCは治具に取り付けられた回転軸によって ϕ_{col} 方向に可変(手動)である。またスリットにX線ビームが入射するように z 方向にも可変である。

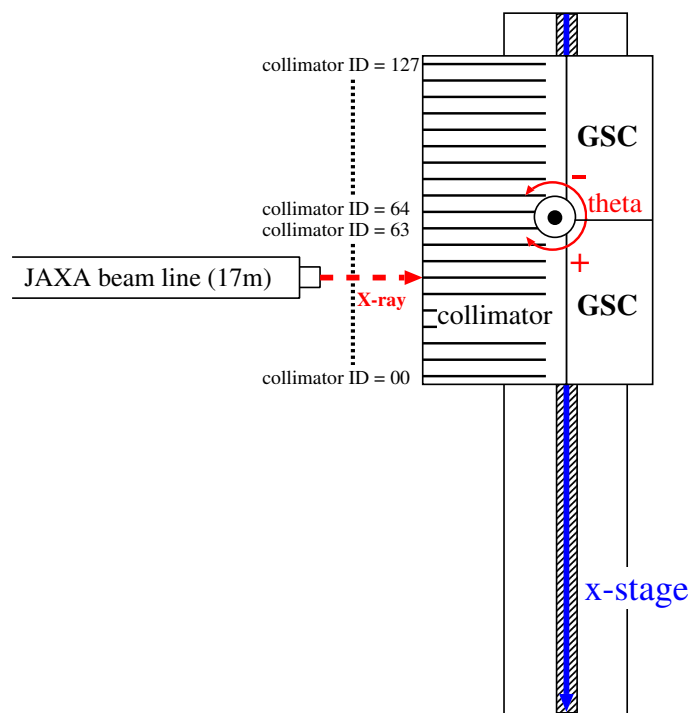


図 4.3: セットアップ図(上から見たとき)。GSCは θ_{col} 方向に可変である。またX線ビームラインに垂直な x 方向にも可変である。X線ビームをスリットに入射させたままこの x 方向にそって Scan することで平行X線と同様の効果を得る。

4.2.2 X線発生装置

X線発生装置は、本実験を行ったクリーンルームに隣接した MAXI 実験室にある RIGAKU 製の 18kW 回転体陰極式 X 線発生装置を使用している。本実験では一次ターゲットとして Cu を用いた。この X 線発生装置から出た一次 X 線はまず 2 系統に別れ、一方はスリットを通過し長さが約 17m のビームライン (内部は真空) を通りマルチピンホールと Be 膜を通過して大気に出る。これを一次ビームラインとする。もう一方は前者に対し垂直な方向に一次 X 線を出して、スリットを通過し二次ターゲットに当たる。ここで発生した二次 X 線はピンホールと Be 膜を通過して大気に出る。こちらの方を二次ビームラインとする。一次ビームラインのピンホールは直径 0.1 mm であり、3 mm ピッチ間隔で合計 $3 \times 4 = 12$ 個のホールがある。平行度は 0.2 秒角で、本実験では十分な平行度である。本実験では二次ビームラインは使用せず、一次ビームラインのみを使用した。

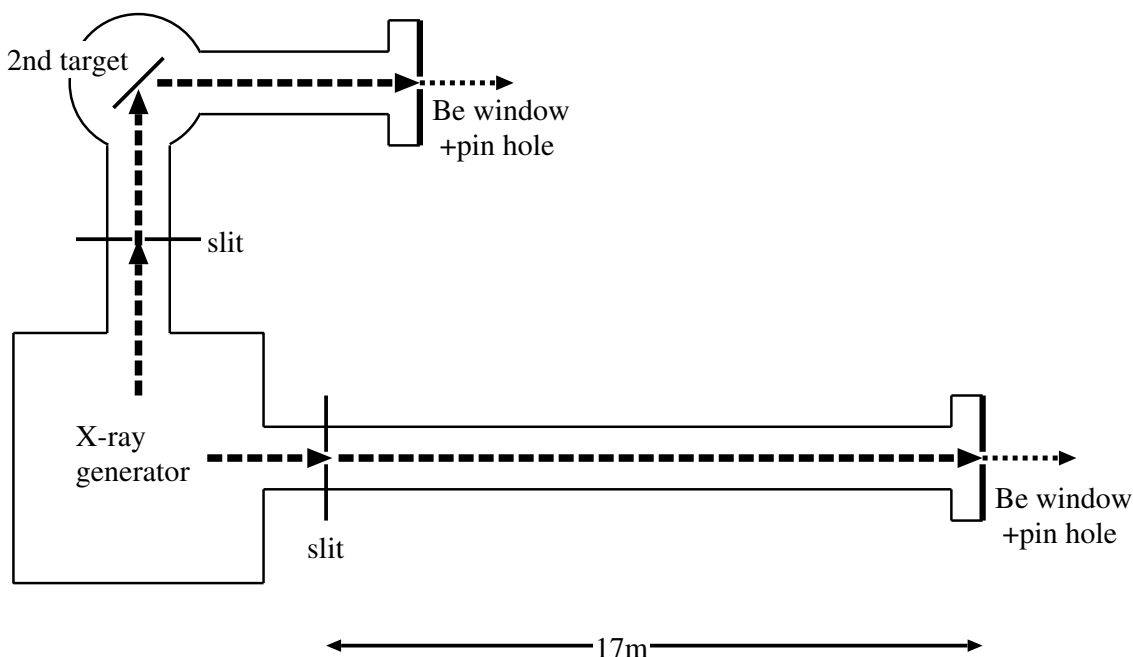


図 4.4: X線発生装置

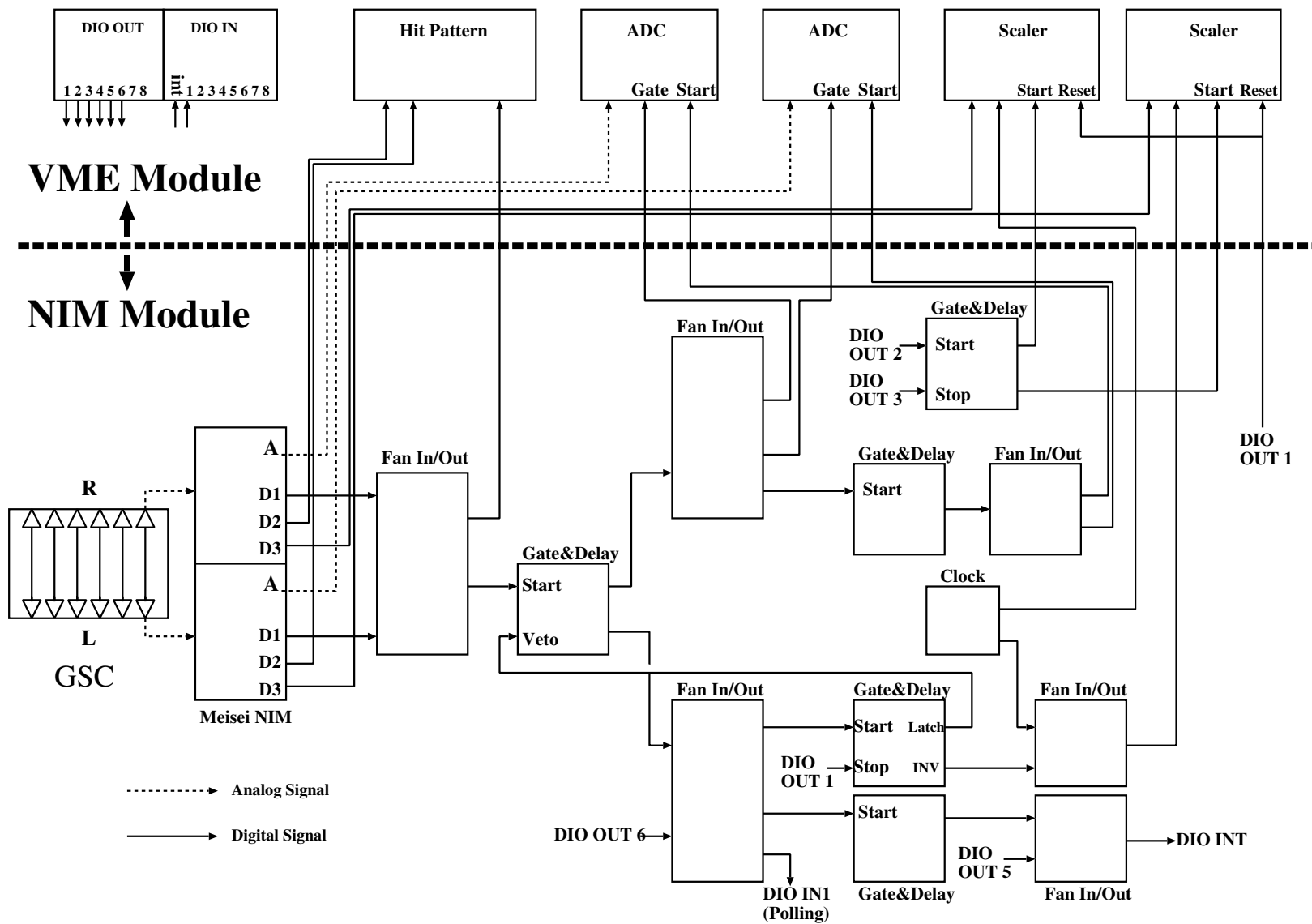
4.2.3 データ取得系

GSC カウンタが光子を検出すると、ステージの背後に設置したデータ取得系にケーブルを通して信号が送られる。

データ取得系は図4.5のように、高エネルギー物理で一般に用いられる NIM モジュールと VME を組み合わせて構築されている。GSC から出力されたプリアンプ信号を MAXI/GSC 用 GAIN AMP (明星電気製) に入力し、増幅および波形整形を行い、アナログ信号一つ (A) とデジタル信号 3 つ (D1, D2, D3) を出力する。ただしデジタル信号についてはプリアンプ信号の波高が設定したスレッシュホールドを越えた場合のみ出力される。スレッシュホールドはジョンソンノイズを拾わないように設定される。

アナログ信号は ADC (波高分析器) に入力され、AD 変換されてパルスハイトを得る。ただし AD 変換にはこのアナログ信号の他に Gate 信号、AD 変換スタート信号の 2 つのロジック信号が必要である。それら 2 つのロジック信号は D1 系統で Gate&Delay モジュールを用いて、パルス幅と信号の遅延時間を調整して作る。D2 系統については Hit Pattern に入力され、Hit Pattern 情報を得る事が出来る。左のスケーラーにはクロックから 1KHz の周期のパルス信号が入力されており、この積算カウントが時間の情報となる。右のスケーラーにはクロックのパルスと、CPU が処理を受け付けない期間の Gate との OR を取ったものが積算され、これが不感時間 (dead time) となる。またこのスケーラーには映像出力がありテレビモニタに接続されている。従って測定中に D3 系統からの積算カウントや積算時間等を視覚的に、かつリアルタイムで確認する事が出来る。図 4.5 にデータ取得系のブロック図を示す。

図 4.5: データ取得系(後段信号処理回路)のブロック図



4.3 測定

4.3.1 Scan

遙か宇宙の彼方から到来したX線は、GSCのスリット全体に平行X線として入射する。しかしながら、地上で試験を行う上で、幅の広い(1つのGSCカウンタの長さは約20 cm)平行X線を照射することは技術的に困難である。そこで平行X線を照射する代わりに、スリットに対して直径約0.1 mmの平行X線を照射しながら、GSCをビームラインに垂直な方向に一定速度で移動させることで、平行X線と同様の効果を得ることにした(図4.3)。

4.3.2 Scanの手順

まずGSCをある角度 ϕ_{col} に固定し、さらに角度 θ_{col} は 0° に固定する。この状態でピンホールから射出されるX線がスリットのおよそ中央に当たるように z 座標を調整する。次にGSCをスリットに照射X線が入射しない程度まで x 方向のマイナス側に移動させ、 θ_{col} をある角度に固定する。その状態でGSCを x 方向のプラス側に一定速度で移動させながらScanを行う。(図4.3) Scanが一つ終わったらGSCの位置を先程のマイナス側の位置に戻し、 θ_{col} を少し変えて再びScanする。これを繰り返して一つの角度 ϕ_{col} のデータを取得し、同様の作業をそれぞれの角度 ϕ_{col} で行う。

4.3.3 測定パラメータ

Target=Cu (8.05keV)

X線発生装置： 管電圧 30 kV, 管電流 300 mA

フィルタ： Ni $10\ \mu\text{m}$ ×3枚

$\theta_{col} = -1.7^\circ \sim 1.7^\circ$ (最大)

$\phi_{col} = -35^\circ \sim 35^\circ$ (5° step)

ステージ(x 方向)移動速度： 1.6 mm/sec

θ_{col} の step について

角度 θ_{col} の測定 step は θ_{col} の大きさによって変える。透過応答の形状を考察する上でより細密に解析すべきであるのは、透過応答の裾野の領域と頂上付近である。直線となる両斜辺の領域では粗く 0.2° step で測定する。裾野の領域では細かく 0.1° step で、頂上付近ではさらに細かく 0.05° step で測定する。また角度 θ_{col} の測定 step は角度 ϕ_{col} の大きさによっても変わる。これは角度 ϕ_{col} の大きさによって透過応答の大きさが変わり、斜辺領域にあたる θ_{col} の幅が変化するためである。

ϕ_{col} の step について

角度 ϕ_{col} の step は -50° から 50° まで手動で 5° ずつ変えることが出来る。Scan は $\phi_{col} = 0^\circ$ を除く -35° から 35° までの 5° おき、すなわち、 $\phi_{col} = \pm 5, \pm 10, \pm 15, \pm 20, \pm 25, \pm 30, \pm 35^\circ$ において行った。ただし $\phi_{col} = \pm 10, \pm 15, \pm 25, \pm 30^\circ$ においては、 θ_{col} が -1.2° から 1.2° までを 0.4° step で Scan した。

第5章 実験結果

5.1 X線光子計数グラフ

様々な入射角度 (ϕ_{col}, θ_{col}) でX線ビームをスリットに照射しつつ GSCを移動させて Scan を行った。そして、各 Scan を始めてからのある時刻における単位時間あたりの光子のカウント数をデータとして取得した。図 5.1 は $\phi_{col} = +5^\circ, \theta_{col} = -1.1^\circ$ のときの Scan データを基に作成した X線光子計数グラフで、横軸が時間 sec、縦軸が光子のカウント数である。GSC カウンタに X線ビームが当たっている時刻ではカウント数が著しく増加している。また計数グラフを見ると序盤と終盤にピークが無いことに気付く。これは X線ビームがカウンタ受光面の外側に当たっているためである。ヒストグラムの 1bin 当たりの時間幅は 50 msec なので、GSC カウンタに X線ビームが当たっているときの 1 sec あたりのイベント検出数はおよそ 880 Counts/sec である。また、バックグラウンドは 40 Counts/sec ほど検出されている。

図 5.2 は図 5.1 の一部を拡大したものである。ほぼ等間隔で X線ビーム光子の検出によるピークが現われていることが分かる。また、図 5.3 は $\phi_{col} = +5^\circ, \theta_{col} = 0^\circ$ のときの計数グラフの一部を拡大したものである。上下のグラフを比較すると、 $\theta_{col} = 0^\circ$ に比べ $\theta_{col} = -1.1^\circ$ のグラフのピークの幅が狭い。これは図 3.12 にあるように入射角度 θ_{col} が大きいほどコリメータによって入射 X線の有効長さが小さくなることを示している。

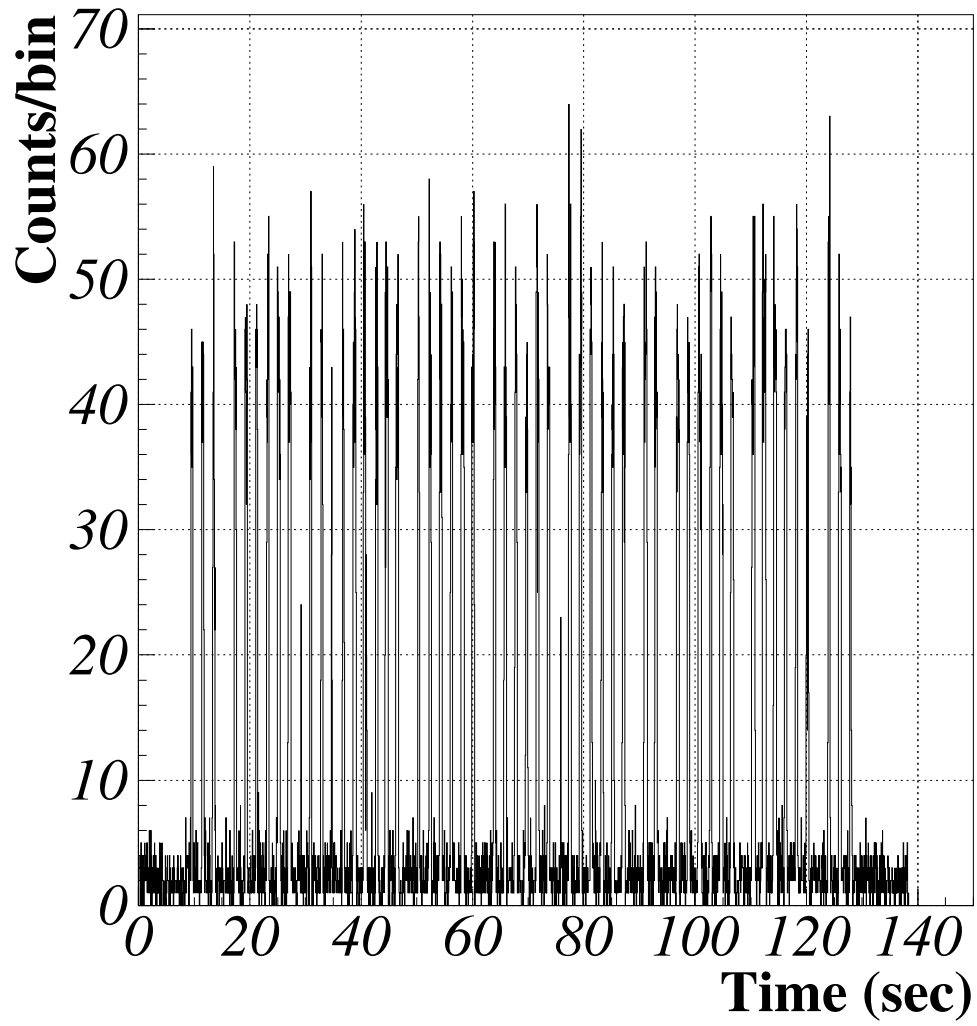


図 5.1: Scan のデータから作成した計数グラフ ($\phi_{col} = +5^\circ$, $\theta_{col} = -1.1^\circ$ のとき)。横軸は Scan を始めてからの時間 sec、縦軸は 50 msec あたりのカウント数。

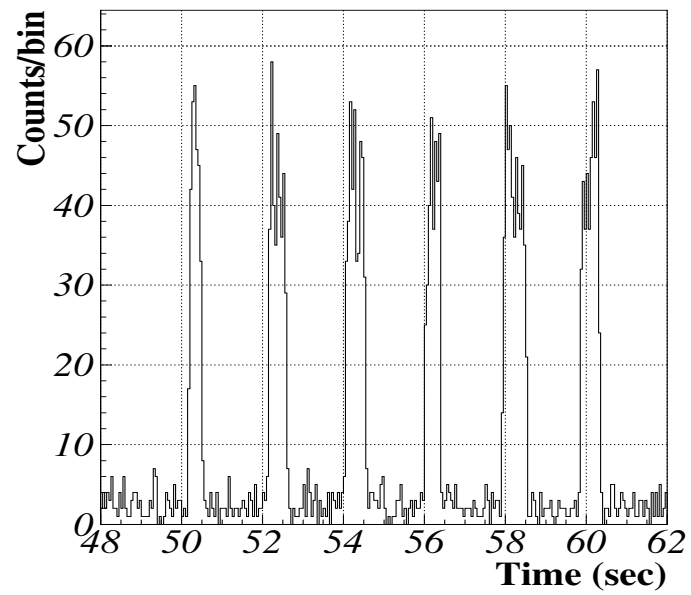


図 5.2: 計数グラフ ($\phi_{col} = +5^\circ$, $\theta_{col} = -1.1^\circ$ のとき) の 48 sec から 62 sec までを拡大した
もの。

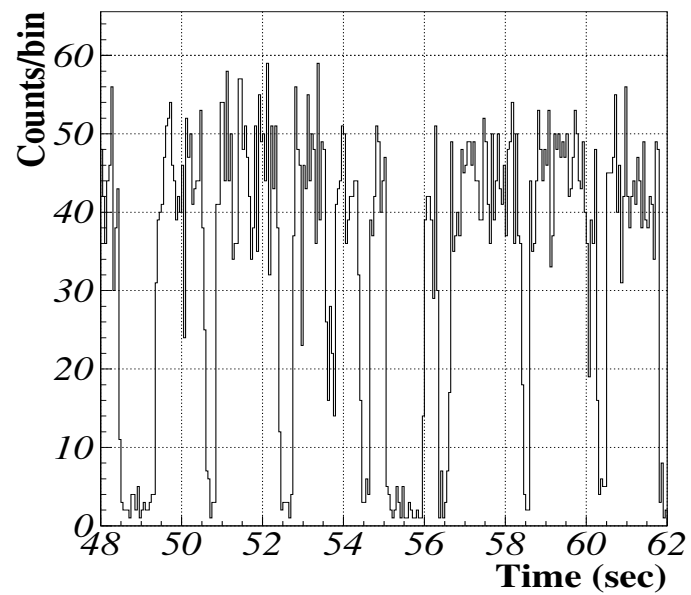


図 5.3: 計数グラフ ($\phi_{col} = +5^\circ$, $\theta_{col} = 0.0^\circ$ のとき) の 48 sec から 62 sec までを拡大した
もの。

5.2 カウンタ機の影響

GSCカウンタの受光面にはBe膜が張られており、そのBe膜を支えるためにカウンタには複数の金属製の棧が設けられている。入射したX線ビーム光子がコリメータを通過してきたとしても、このカウンタ棧に当たっている場合はイベントが検出されない。図5.4を見ると、 $t = 29, 35$ sec 辺りにあるピークはその他のピークに比べて幅が小さい。コリメータシートの配置のずれによってもピーク幅は増減するが、図5.4ほど大きな影響を与えるような配置のずれは考え難い。これは、コリメータを通過したX線ビームがカウンタ棧に当たってしまっているために起きたものと考えられる。

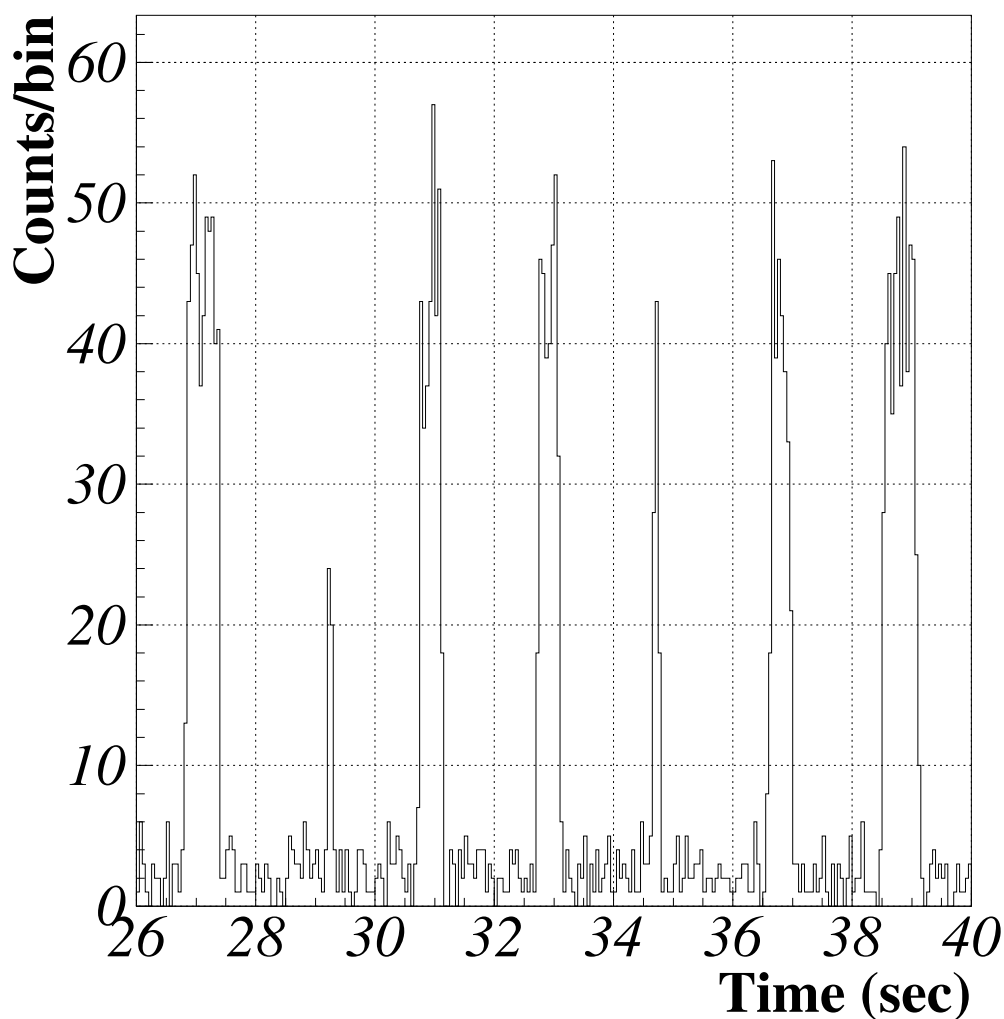


図 5.4: 計数グラフ ($\phi_{col} = +5^\circ$, $\theta_{col} = -1.1^\circ$) の一部を拡大したもの。。横軸は時間 sec、縦軸は 50 msec あたりのカウント数。カウンタ棧の影響でピークが削れてしまっている。

図5.5はカウンタ機によるピーク幅の減少を模式的に表したものである。上側の図において、中央のコリメータ間隙を通過したX線束のうち一部はカウンタ機(出っばった部分)によって受光面に到達できない。このとき得られる計数グラフは下側の図のように一部が削れたようになってしまう。影響の形はコリメータシートとカウンタ機の相対的な位置関係やX線の入射角度によって、ピークの中央が削れたりピーク全体が消失したりと様々である。幸い、計数グラフと設計図を見比べることでどのピークがどのカウンタ機の影響を受けたかを識別することが出来た。後述する計数グラフからコリメータシートの座標を求める場合には、このカウンタ機による影響を考慮する必要がある。

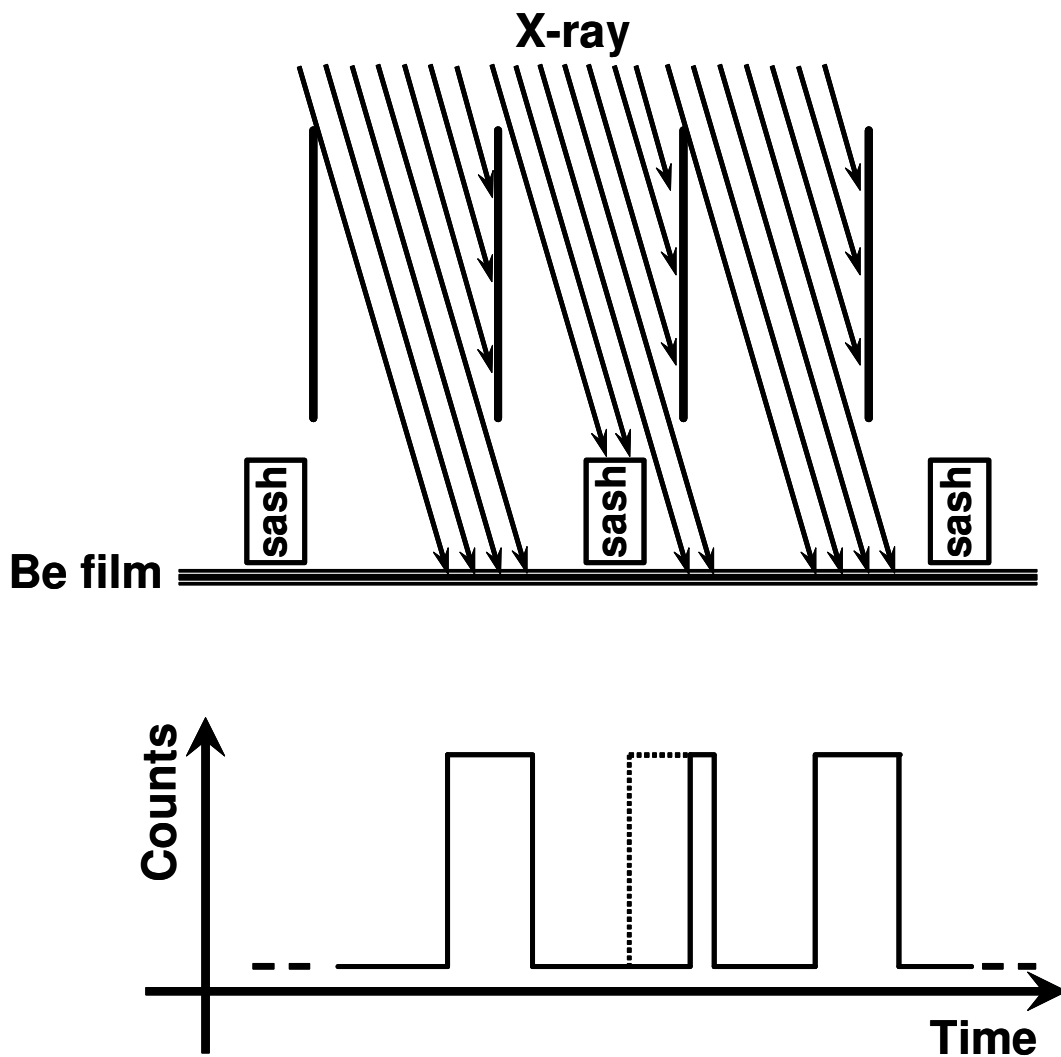


図 5.5: カウンタ機による計数グラフ(下図)への影響。カウンタ機(図中で sash と記した長方形)にX線ビームが当たっているときはカウント数が増加しない。

5.3 透過応答

ある一組の入射角度 ϕ_{col} , θ_{col} で Scan すると図 5.1 のような計数グラフが一つ作成される。この計数グラフを Scan 時間で積分した値、すなわち一度の Scan で検出した光子の総カウント数 $N(\theta_{col})$ を求めて一つのデータ点 $(\theta_{col}, N(\theta_{col}))$ とする。ある一つの角度 ϕ_{col} において、 θ_{col} を少しずつ変えて Scan するので複数のデータ点 $(\theta_{col}, N(\theta_{col}))$ が得られる。この $(\theta_{col}, N(\theta_{col}))$ をプロットしたものが図 5.6 である。

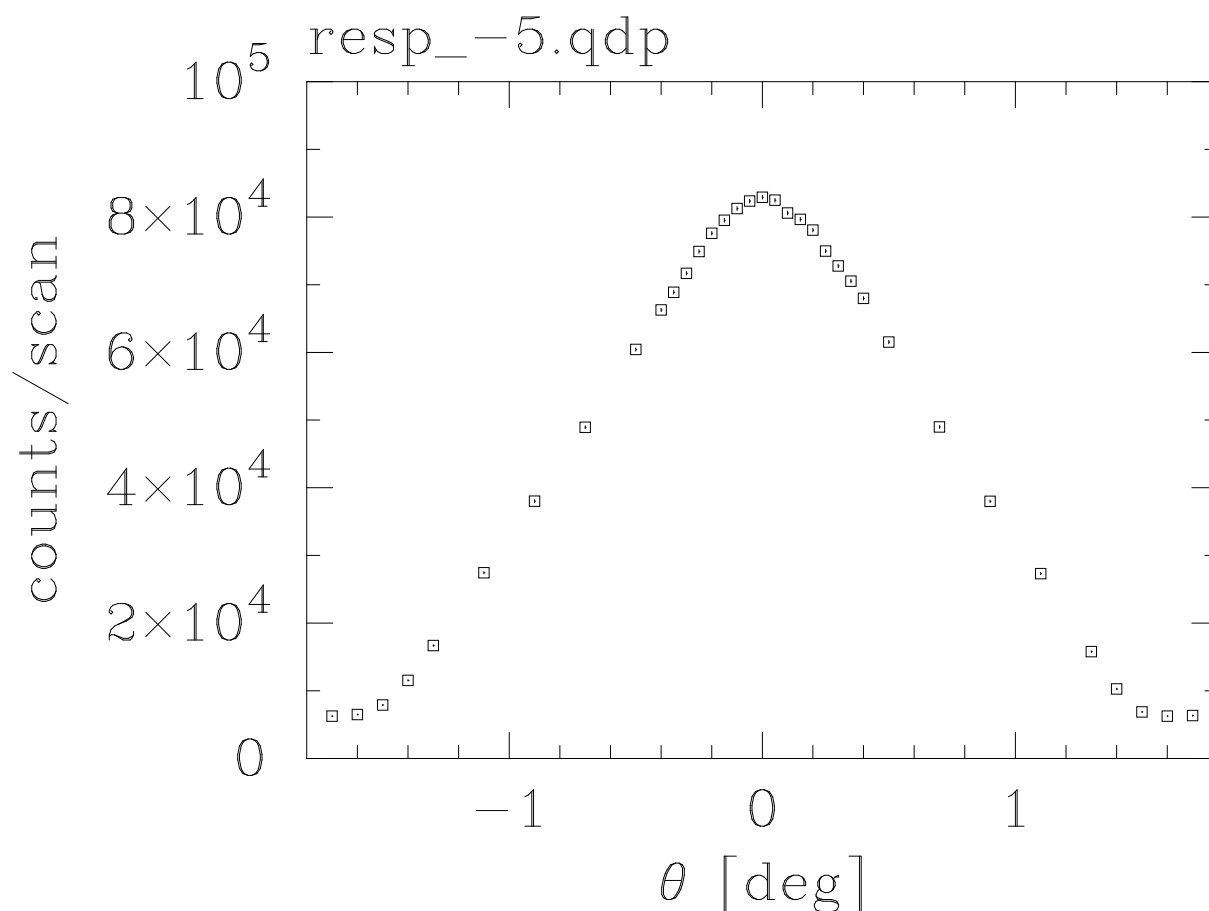


図 5.6: $\phi_{col} = -5^\circ$ のときの $(\theta_{col}, N(\theta))$ をプロットしたグラフ。透過応答と形状が似ているが、バックグラウンドがあるため θ_{col} が十分大きいときでも $N(\theta)$ は 0 にはならない。

ここで注意しなければならないのが、 $N(\theta_{col})$ にはバックグラウンドも含まれていることである。図 3.13 の理想的な透過応答の作成においてバックグラウンドは考慮されていない。従って、実験で得た透過応答と理想的な透過応答を比較するためには、このバックグラウンドを差し引いて考えなければならない。

理想的な透過応答と比較するために図 5.6 の縦軸を有効長さ L_{eff} に変換したい。そのために今一度、視点を計数グラフに戻して考える。Scan の速度 v_{scan} は 1.6 [mm/sec] で一定であるとする。計数グラフにおいてピークが現われている時間の合計を t_{peak} とすると、有効長さ L_{eff} は単純に、

$$L_{eff} = v_{scan} \times t_{peak}$$

と表される。各ピークの幅はある閾値よりカウント数が多い bin の合計をとって求めた。こうして得た新たなデータ点 (θ_{col}, L_{eff}) を各 ϕ_{col} ごとにプロットしたものを図 5.7 から図 5.20 に示す。

$\phi_{col} = \pm 5, \pm 20, \pm 35^\circ$ のグラフを見ると、透過応答の形状が理想的な透過応答より丸みを帯びて変形していることがよく分かる。また最も有効面積が大きくなるのは理想形では $\theta_{col} = 0^\circ$ のときであるが、各グラフを見ると頂点の θ_{col} 座標は 0 からややずれていることが見てとれる。

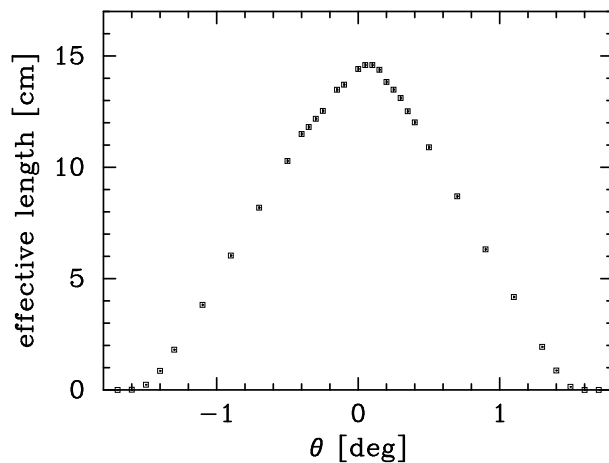


図 5.7: 透過応答 ($\phi_{col} = +5^\circ$)

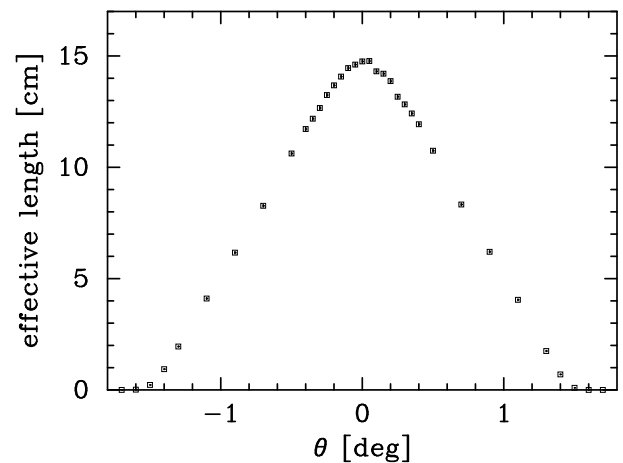


図 5.8: 透過応答 ($\phi_{col} = -5^\circ$)

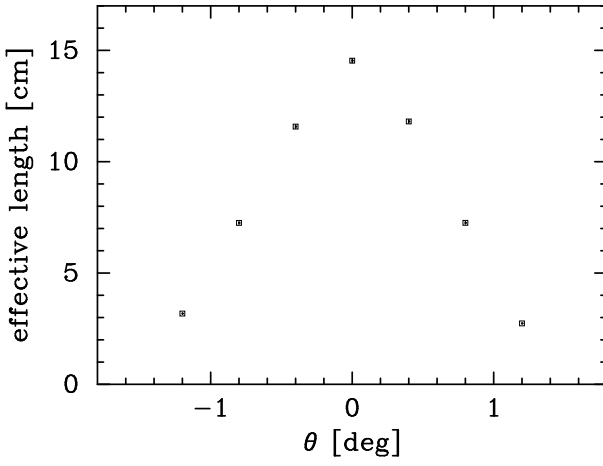


图 5.9: 透過応答 ($\phi_{col} = +10^\circ$)

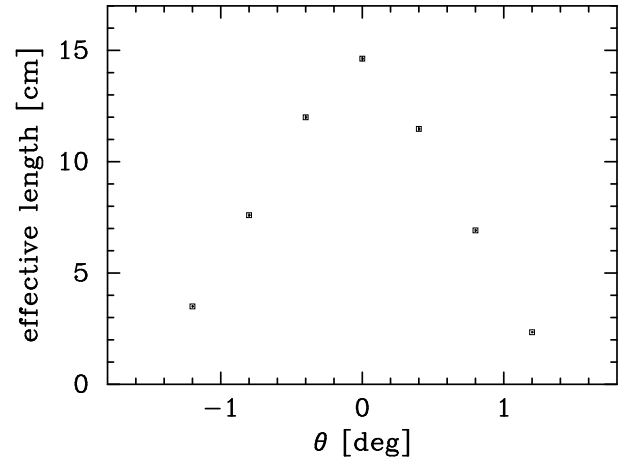


图 5.10: 透過応答 ($\phi_{col} = -10^\circ$)

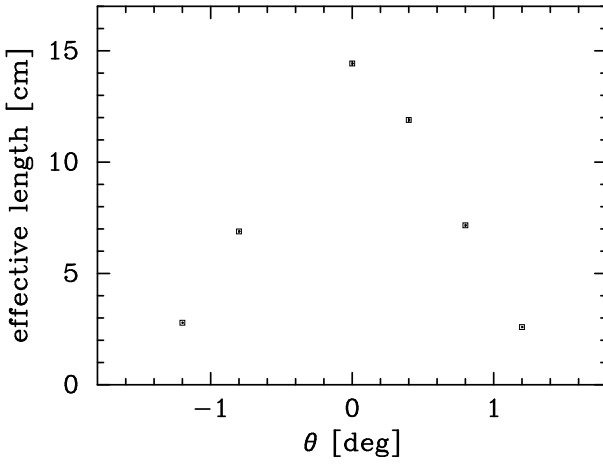


图 5.11: 透過応答 ($\phi_{col} = +15^\circ$)

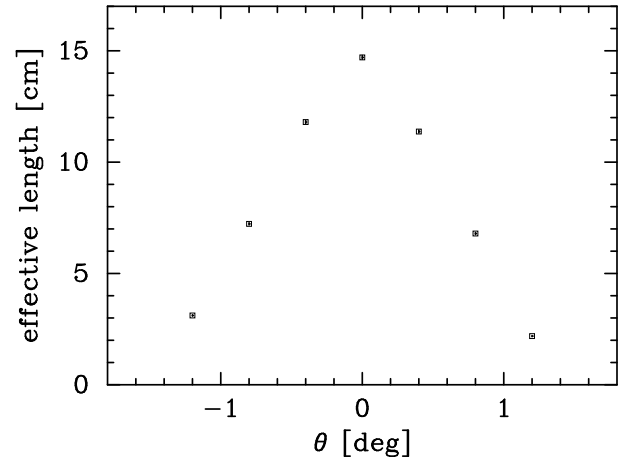


图 5.12: 透過応答 ($\phi_{col} = -15^\circ$)

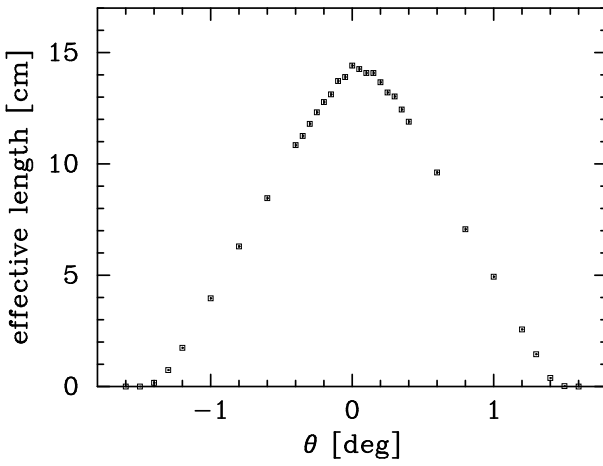


图 5.13: 透過応答 ($\phi_{col} = +20^\circ$)

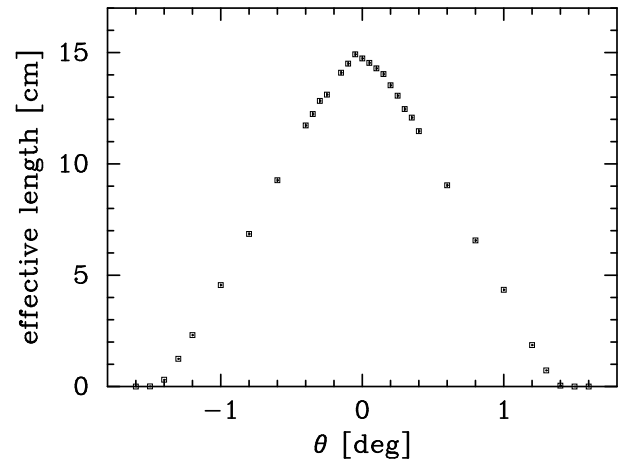


图 5.14: 透過応答 ($\phi_{col} = -20^\circ$)

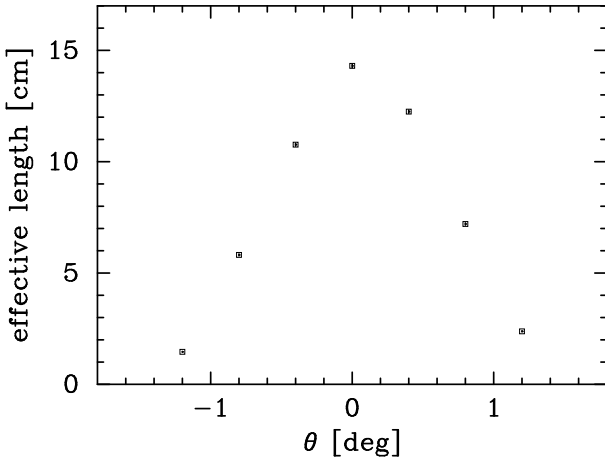


图 5.15: 透過応答 ($\phi_{col} = +25^\circ$)

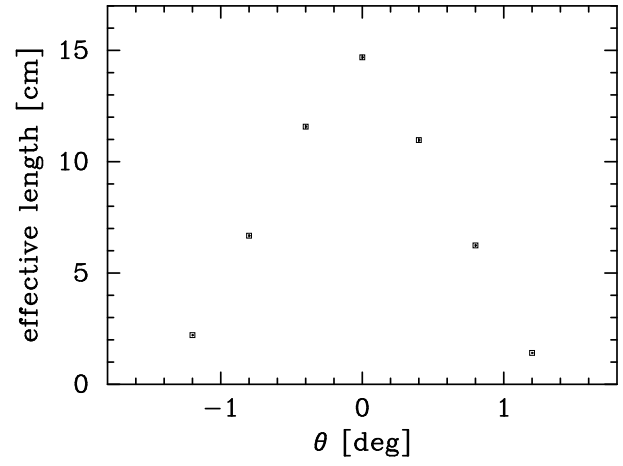


图 5.16: 透過応答 ($\phi_{col} = -25^\circ$)

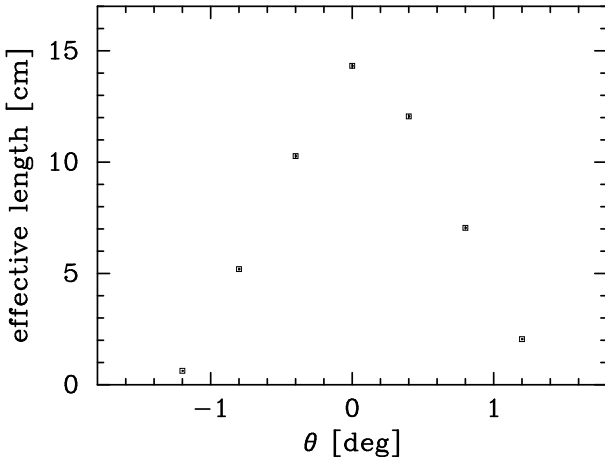


图 5.17: 透過応答 ($\phi_{col} = +30^\circ$)

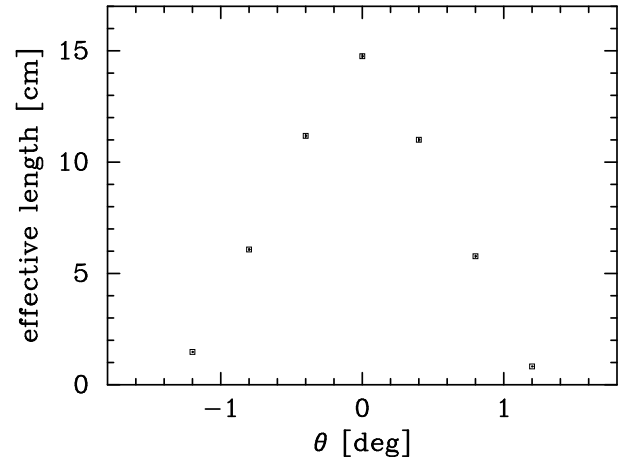


图 5.18: 透過応答 ($\phi_{col} = -30^\circ$)

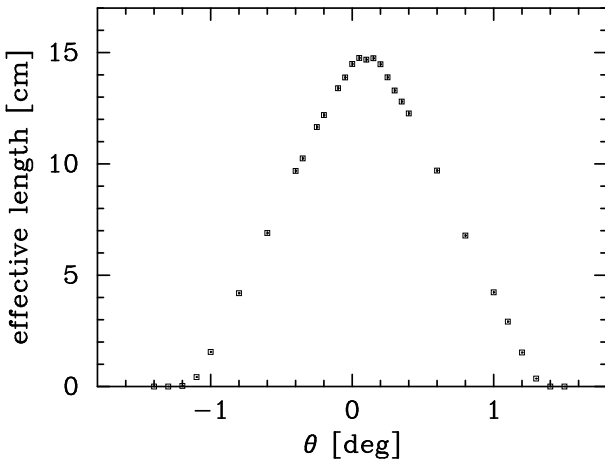


图 5.19: 透過応答 ($\phi_{col} = +35^\circ$)

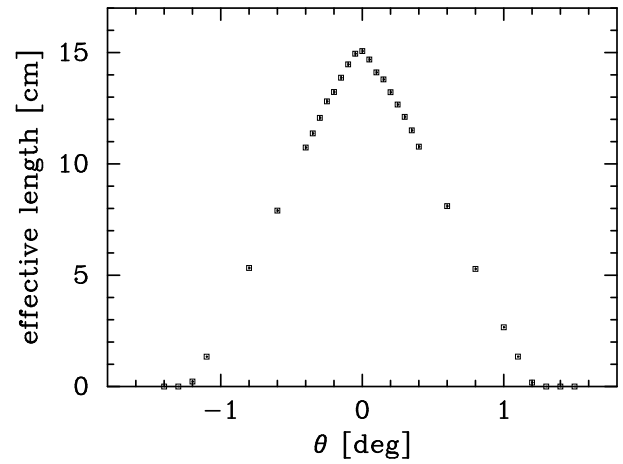


图 5.20: 透過応答 ($\phi_{col} = -35^\circ$)

第6章 解析と考察

実験結果の三角レスポンスが理想的な三角レスポンスと有意に異なる原因として、コリメータシートとカウンタ、及びコリメータシートどうしの相対的位置関係が設計値から僅かにずれていることが考えられる。ここからはこの相対的位置関係のずれのみで透過応答が変形しているとみなし、各コリメータシートのカウンタに対する相対位置のみで実験結果の透過応答が再現できるかを検証する。

6.1 コリメータシートの座標決定

透過応答を算出するために、X線光子計数グラフからコリメータシートの座標リストを作成する。リスト作成のおおまかな流れは以下のようなものである。

1. 計数グラフを各ピーク毎の領域に分割する。
2. カウント値を時間で積分し、関数フィッティングする。
3. 各ピークの立上り、立下がりの位置を決定する。
4. コリメータ座標 y_{col} に変換する。

またコリメータシートの座標を決定するにあたって、以下の事柄を仮定する。

- コリメータシートに歪みはなく、表面は滑らかで平面状である。
- コリメータシートの厚さは 0.1 mm で一定である。
- GSC カウンタの形状は設計値どおりである。
- コリメータ座標系 $(x_{col}, y_{col}, z_{col})$ において、GSC カウンタの位置は設計値どおりである。
- コリメータシートの下部とカウンタ栈との距離は設計値どおりの 5.5 mm である。

6.1.1 ピークのエッジとコリメータシートの座標の関係

計数グラフの各ピークのエッジ、すなわち立上りと立下がりの時刻はX線ビームが一つのコリメータ間隙を抜けてGSCカウンタの受光面に届く始めと終りの時刻を表しており、そしてこの時刻は各コリメータシートの上端と下端の座標に依存している。図 6.1 は θ_{col} を二つの場合に分けて考えている。

まず $\theta_{col} < 0$ の場合を考える。GSC に対して相対的に平行移動しているX線ビームは、図中の左のコリメータシートの上端右側をかすめてカウンタに届き始める。すなわち、このときのピークの立上り時刻は左側のシートの上端右側の座標を示していることになる。しばらくすると今度は、X線ビームが右側のシートに下端左側からあたり始め再びカウンタには届かなくなる。よって、このときのピークの立下がり時刻は右側シートの下端左側の座標を示している。

$\theta_{col} > 0$ の場合同様にして考えることが出来て、このときのピークの立上り時刻は左側のシートの下端右側の座標を、立下がり時刻は右側のシートの上端左側の座標をそれぞれ示している。

ここで留意すべきことは、例えば $\theta_{col} < 0$ で、かつ θ_{col} の大きさが左側のシートの傾きよりも小さいような場合である。このとき X 線ビームは左側のシートの下端右側をかすめて届き始めるようになり、ピークの立上り時刻は先程とは異なる箇所の座標を示すことになる。これを避けるには、シートの傾きよりも十分大きいと思われる θ_{col} の計数グラフを選択すればよい。これを踏まえて、以降の座標リスト作成の際には $\theta_{col} = \pm 1.0^\circ$ 程度の計数グラフを用いた。このように、計数グラフの各ピークのエッジの時刻を求めることで各コリメータシートの上端と下端の座標情報を得ることが出来るのである。

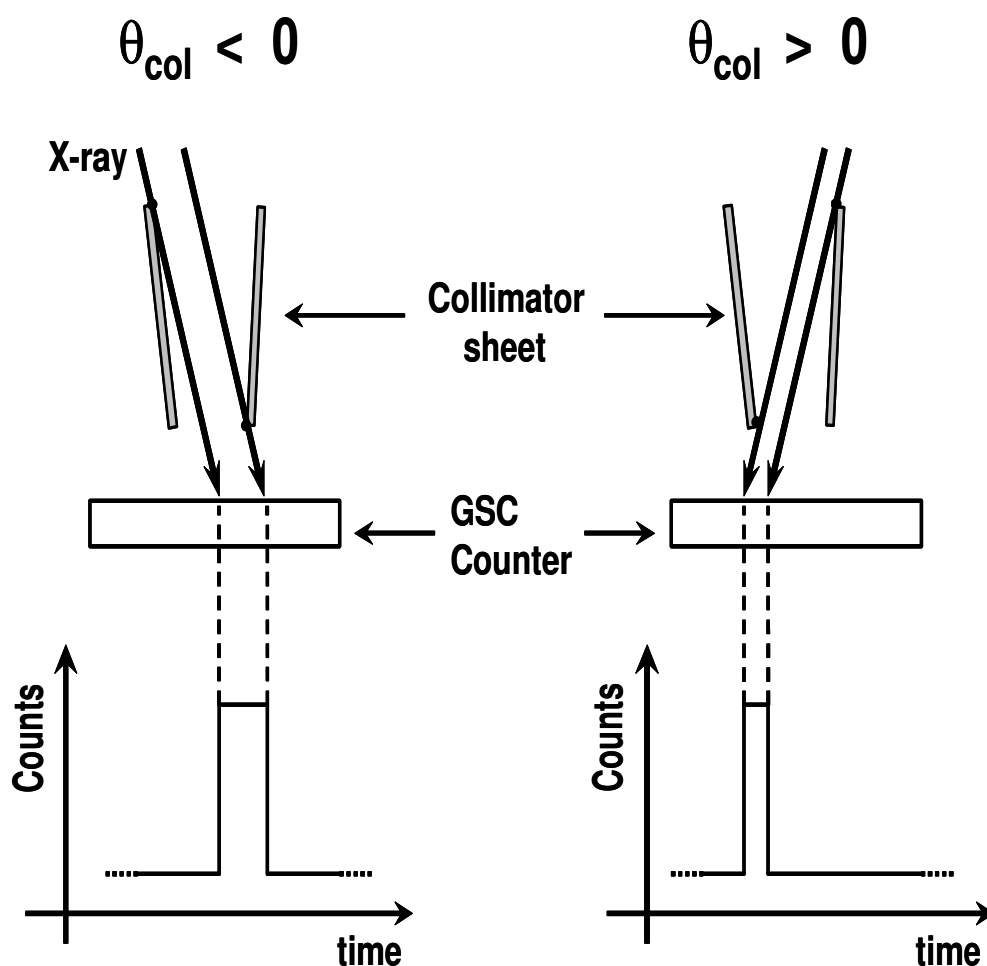


図 6.1: エッジとコリメータシートの座標との関係。左側が $\theta_{col} < 0$ のとき、右側が $\theta_{col} > 0$ のときの様子を表す。それぞれの場合において立上りと立下がりの時刻はシートに付けられた黒丸の箇所の座標を示す。

6.1.2 計数グラフの分割

計数グラフの各ピークの立上り、立下がりの位置から求めるために、各ピークを一つだけ含むように等間隔に計数グラフを分割する。設計値では各コリメータ間隙の幅は3.0 mmであり、シートの厚みを考慮するとコリメータシートのピッチは3.1 mmである。各コリメータシートの設計値からのずれの大きさはこのシートピッチに比べると小さいと考えられるので、計数グラフを3.1 mmごとに分割しても問題はない。ただし計数グラフの横軸は時刻であるので3.1 mmを時間に換算しなければならない。GSCのステージ(x方向)上での移動速度は1.6 mm/secであるから、X線の入射角度が θ_{col} のときの y_{col} 方向のScan速度 v_{scan} mm/secは、

$$v_{scan} = 1.6 / \cos \theta_{col}$$

となる。よって3.1 mmピッチを時間 t_{pitch} secに換算すると、

$$t_{pitch} = 3.1 / v_{scan}$$

である。この t_{pitch} でもって計数グラフを分割する。

6.1.3 フィットティング

次に分割されたそれぞれのピークに対して関数フィッティングを行う。しかし計数グラフはヒストグラムであり、時間が有限の幅に区切られているため不定性を持ち、そのまま関数フィッティングを行うのは好ましくない。そこで、計数グラフを分割領域の始めの時刻からある時刻 t まで積分してから関数フィッティングを行うことにした。

図6.2は計数グラフを t_{pitch} で分割したもの、そして図6.3は図6.2をある時刻 t までのカウント数を積分したものである。図6.3は3つの直線領域に分かれており、中間の傾きが大きい直線領域が図6.2のピークの領域に相当する。つまりピークのエッジは中間の直線領域と左右の直線領域との接続点である。3つの直線領域をそれぞれ別の一次関数でフィッティングし、2直線の交点を求めてこれをピークのエッジとする。

図6.3をよく見ると、中間の直線領域と左右の直線領域との接続領域が滑らかな丸みを帯びていることが分かる。これはX線ビームの断面積が有限の大きさをもつことに起因している。ピークのエッジを正確に求めるためには、この滑らかな領域を除いて直線となる領域のみに対してフィッティングを行う必要がある。実際には、まず計数グラフに閾値を設けて閾値をまたぐ2つの時刻を求め、その時刻を中心とするある幅(マージン)をもった領域を除外した。

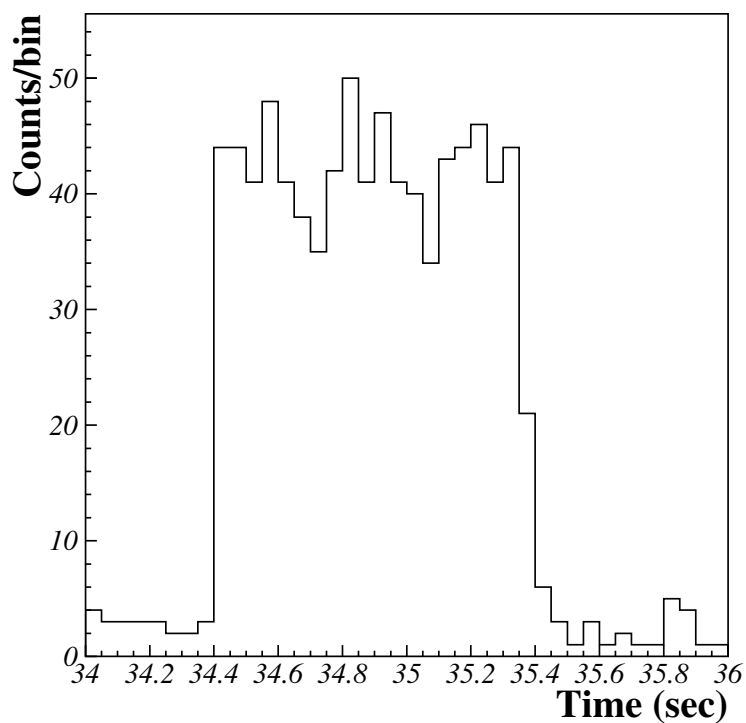


図 6.2: t_{pitch} で分割した計数グラフ。

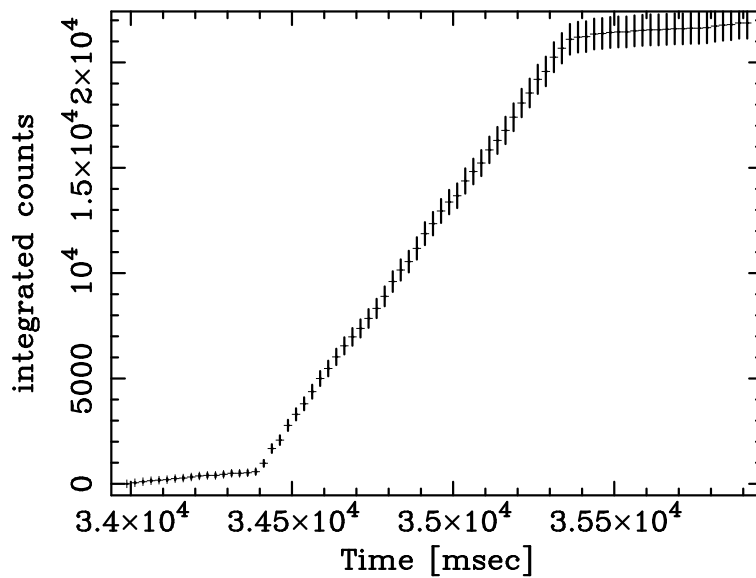


図 6.3: 図 6.2 のピークの、時刻 t とその時刻 t までの総カウント数 (積分値) の関係。ただし積分の始点は $t = 0$ ではなく、各ピーク毎に区切られた領域の最初の t の値とする。

6.1.4 座標の修正

フィッティングで求めたピークエッジの時刻の値に v_{scan} を掛けると時刻のリストは座標のリストに変換される。しかしこの座標リストはまだ、コリメータシートの座標リストとして正しい形ではない。したがって透過応答の算出に使用するためにいくつかの修正を加える必要がある。

コリメータシートの上端と下端の相対位置

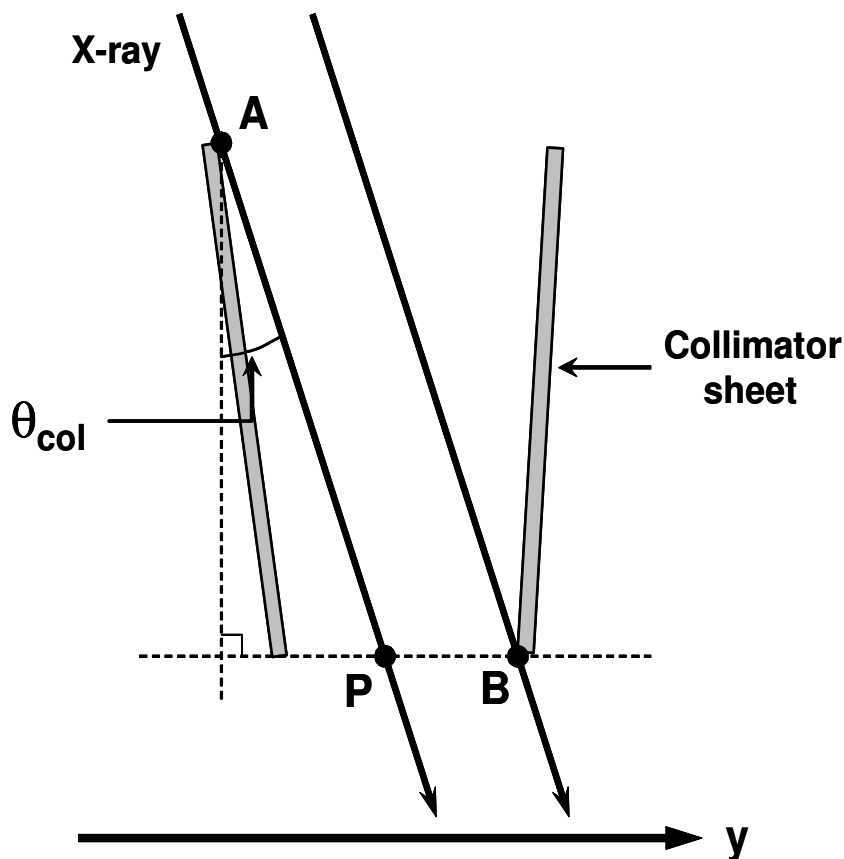


図 6.4: コリメータシート上側の座標の修正

ピークエッジのリストの値には、確かにコリメータシートの上端と下端の位置情報が反映されている。しかし実際にピークエッジの座標リストの値が示しているのは、言うなれば GSC カウンタの受光面に投影されたシートの影の位置であり、シートの上端か下端かの『奥行』の情報は失われている。この上端と下端の関係を値に反映させるためにピークエッジの座標リストに対して以下の修正を施す。

図 6.4 は $\theta_{col} < 0$ のときの Scan で得られるシートの上端と下端の位置関係を表してい

る。今欲しい情報は図中の A 点と B 点の y 方向の座標である。しかし、シートの下端の位置を基準とすると、今ピークエッジの座標リストが示しているのは B 点と P 点の y 座標である。この P 点の y 座標を A 点の y 座標に変換するためには、P 点の座標に $H_1 \times \tan \theta_{col}$ だけ足し加えればよい。ここで $H_1 = 118.4 \text{ mm}$ である (表 3.1)。シートは傾いているが、傾きの大きさは微小であるので A 点と P 点の高低差を H_1 と近似した。図 6.4 では $\theta_{col} < 0$ であるので A 点の y 座標は P 点の y 座標よりマイナス側にあることになる。また $\theta_{col} > 0$ のときは、A 点 (右のシートの上端左側) の y 座標は P 点の y 座標よりもプラス側にあることになる。

GSC カウンタとの相対位置

GSC カウンタの表面には棧があり、このカウンタ棧と各コリメータシートとの相対的な位置関係は有効長さに大きく影響する。ピークエッジ座標リストの値の原点は $t = 0$ 、すなわち Scan を開始した時刻 (座標) である。このピークエッジ座標リストの原点を GSC カウンタの座標原点、つまり $y_{col} = 0$ (仮定より) に合わせたい。そのためにカウンタ棧によって欠けてしまったピークを利用する。図 6.5 はピークがカウンタ棧の影響を受けている場合の主要な点の位置関係を表したものである。今ピークエッジ座標リストが持っているのは図中の B 点と P 点の y 座標で、こちらが欲しい情報は A 点と B 点の y 座標であるが、カウンタ棧の影響によって A 点の位置情報はリストの値に全く反映されていない。しかし A 点の位置情報の代わりに、P 点はカウンタ棧上の Q 点の位置情報をもっている。

仮定より、P 点と Q 点の高低差は 5.5 mm である。このとき Q 点の y 座標はピークエッジ座標リストの P 点の値から $5.5 \times \tan \theta_{col}$ だけ差し引いたものである。図 6.5 では $\theta_{col} < 0$ であるので、Q 点の y 座標は P 点の y 座標よりプラス側にあることになる。

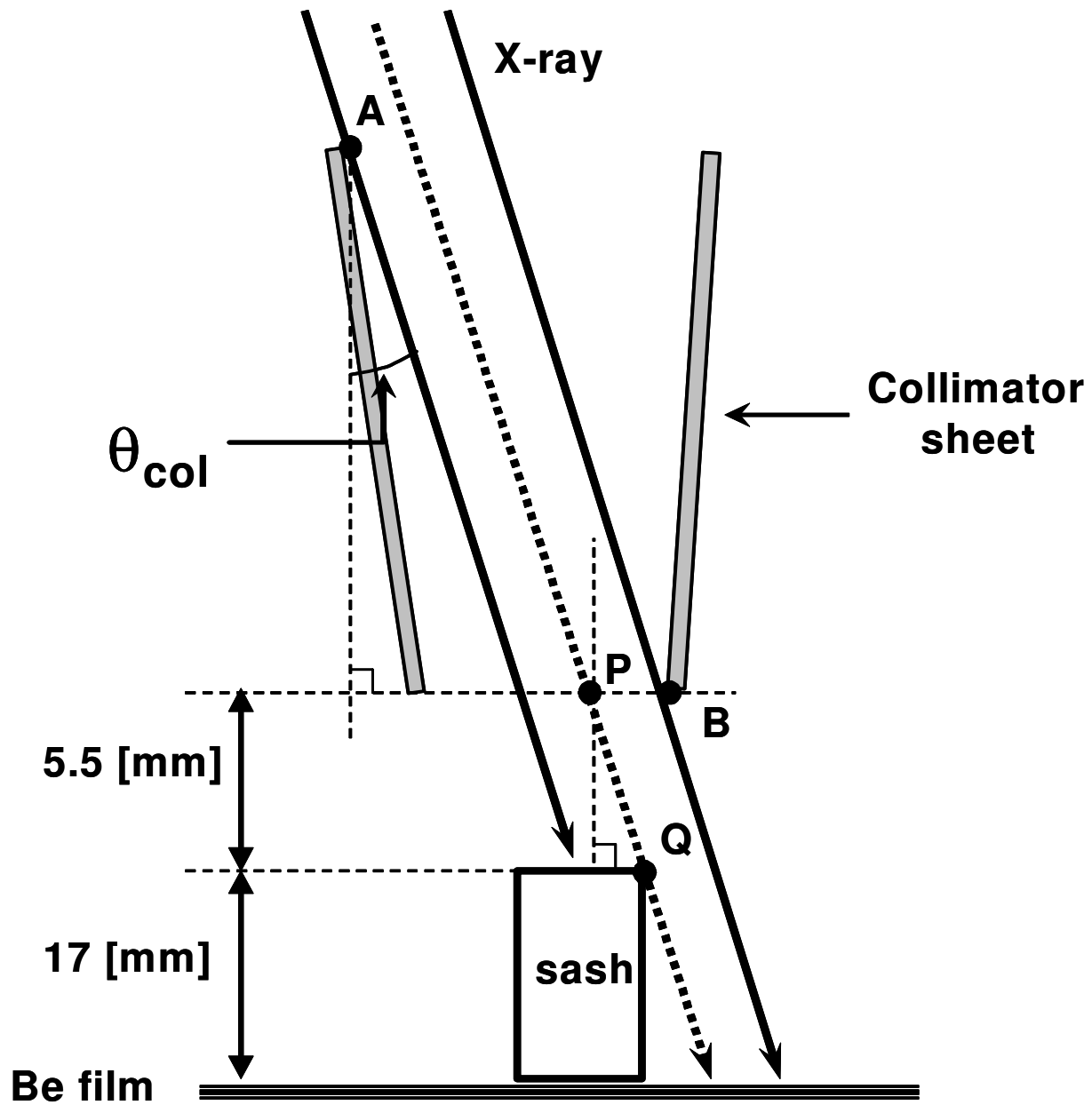


図 6.5: カウンタ棧とコリメータシート座標の関係。図中の sash と書かれた長方形がカウンタ棧を表す。A 点の位置情報をもった X 線ビームはカウンタ棧に阻まれて受光面に届かない。しかし Q 点の位置情報をもった X 線ビーム (点線矢印) が受光面に届く。

6.2 座標リストによる透過応答の再現

前述した種々の変換と修正によって、64枚のコリメータシートの上端と下端の座標リストを作成した。この座標リストを基に透過応答を算出する。

透過応答作成の手法を簡単に述べると次のようである。タングステンスリットの外の一点からX線光子が入射角度 $(\phi_{col}, \theta_{col})$ でスリットに入射したとする。入射光子の光路の途中にはスリット、コリメータの上部、同下部、カウンタ検出器とといったいくつかのチェックポイントがあり、各ポイントにおいて幾何学的に計算してX線光子が通過可能なら1を、不可能なら0を帰すようになっている。最後のGSCカウンタ受光面(Be膜)においてそれまでのポイントでの返り値の積をとり、1ならばX線光子が検出されたとして有効長さに単位長さ(ここでは0.05 mm)を足し加え、0ならば検出されなかったとして有効長さはそのままとする。ここで1つのループが終了し、最初に戻る。今度はX線光子の出発点を先程の出発点の y 座標に単位長さを足し加えた位置としてスタートし、再び同様の手順で検出判定を行う。

以上のことを繰り返すと最終的にある入射角度 $(\phi_{col}, \theta_{col})$ のときの有効長さ $S_{eff}(\phi_{col}, \theta_{col})$ が得られ、各 ϕ_{col} 毎にデータ点 $(\theta_{col}, S_{eff}(\phi_{col}, \theta_{col}))$ をプロットすることで透過応答を得る。

6.2.1 設計値の透過応答との比較

透過応答再現の第一歩として、設計値を入れた座標リストを基に作成した透過応答と実際の透過応答を比較してみた。その結果を図 6.6 に示す。直線状の斜辺では比較的よく一致しているが裾野の拡がりや頂点付近の丸みは全く再現されていない。特に頂点付近の相異は著しいが、これは次のように考えることができる。例えば $\theta = 0$ の場合を考えると、設計値どおりの配置であるとき GSC カウンタのもつ全有効長さは GSC カウンタの受光面の全長から各シートの厚さとカウンタ棧の幅の分だけ差し引いた値となる。しかしコリメータシートが傾いているとシートのみかけの厚さが増し、GSC カウンタの受光面において影となる領域が増え、その結果設計値どおりの配置のときよりも有効長さが小さくなるのである。

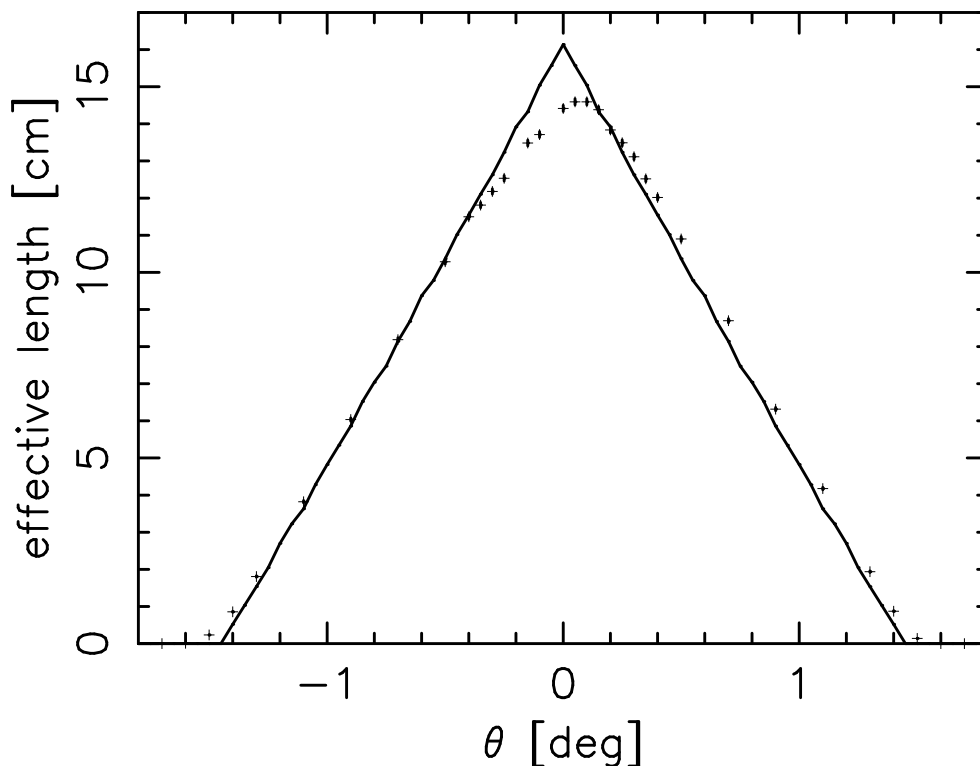


図 6.6: $\phi_{col} = +5^\circ$ のときの、実験で得た実際の透過応答と設計値を基に算出した透過応答 (実線) の比較。斜辺部分に大きな違いは見られないが、裾野の部分と頂点付近は大きく異っている。

6.2.2 求めた座標リストの透過応答との比較

一つの計数グラフの透過応答による検証

ここからは、計数グラフから求めた座標リストを基に算出した透過応答を実際の透過応答と比較する。

もしも各コリメータシートの上辺と下辺が共に x_{col} 軸に平行であるならば、コリメータシートの配置は上辺の y_{col} 座標と下辺の y_{col} 座標のみで一意に決まる。この場合、ある入射角度 $(\phi_{col}, \theta_{col})$ での計数グラフから得られる座標リストのみで任意の入射角度で示す実際の透過応答を再現できるはずである。

以下の図は、 $\phi_{col} = +5^\circ$, $\theta_{col} = -1.1^\circ$ のときの計数グラフから得た座標リストを基に、角度 $\phi_{col} = +5^\circ, +20^\circ, +35^\circ$ で得られるであろう透過応答を算出し、それぞれ実際の透過応答と比較したものである。 $\phi_{col} = +5^\circ, +20^\circ$ の場合は、頂点付近を除けばおおよそ一致しているように思われるが、 $\phi_{col} = +35^\circ$ のときは θ_{col} 方向に明らかにずれている。これは主に、入射角度が $\phi_{col} = +35^\circ$ のときにX線光子が通過するコリメータシートの下端の位置が、 $\phi_{col} = +5^\circ, \theta_{col} = -1.1^\circ$ の計数グラフから得た座標リストの値とは異なるために生じたものと考えられる。よって、各コリメータシートの上辺と下辺が共に x_{col} 軸に平行であるという仮定は成り立たないと言える。

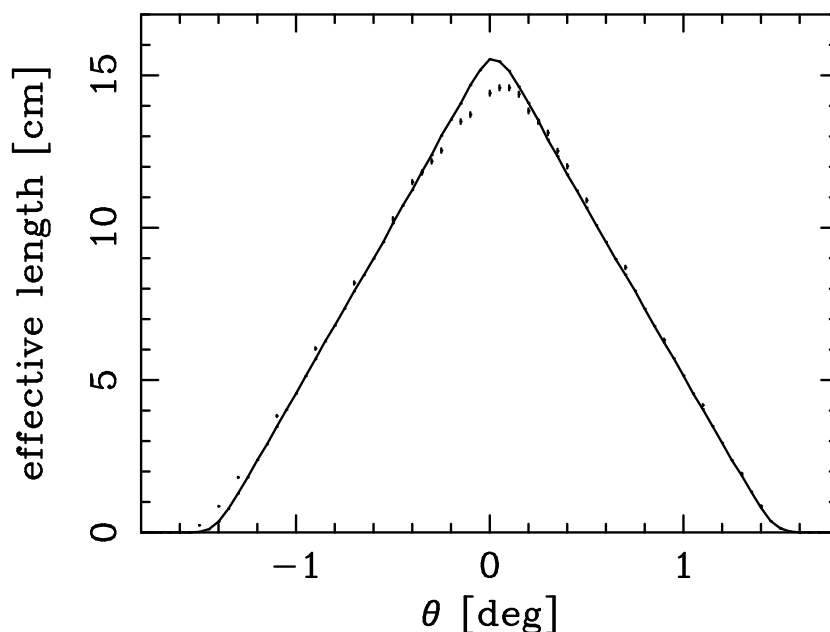


図 6.7: 実際の透過応答 ($\phi_{col} = +5^\circ$) と、($\phi_{col} = +5^\circ, \theta_{col} = -1.1^\circ$) の計数グラフを基に算出した透過応答 (実線) の比較。

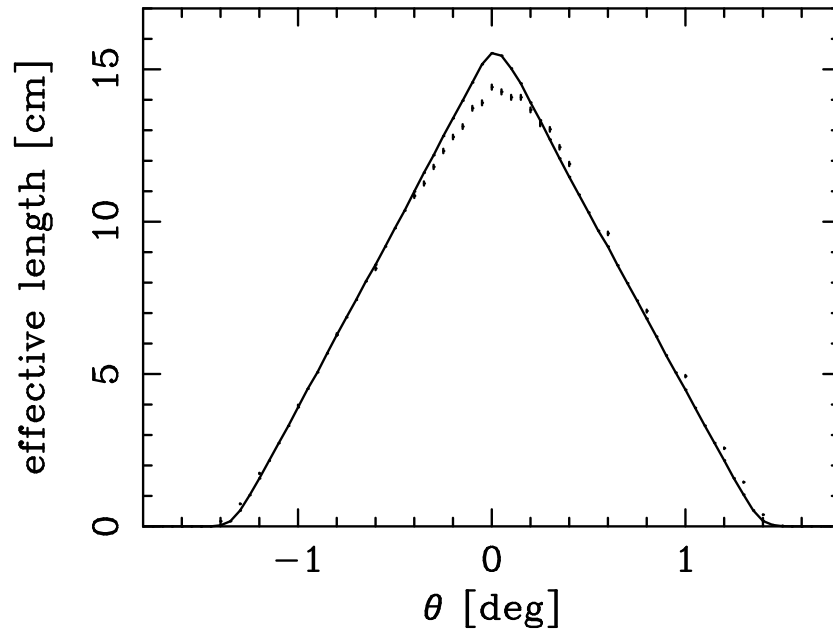


図 6.8: 実際の透過応答 ($\phi_{col}=+20^\circ$) と、 $\phi_{col} = +5^\circ, \theta_{col} = -1.1^\circ$ の計数グラフを基に算出した透過応答 (実線) の比較。

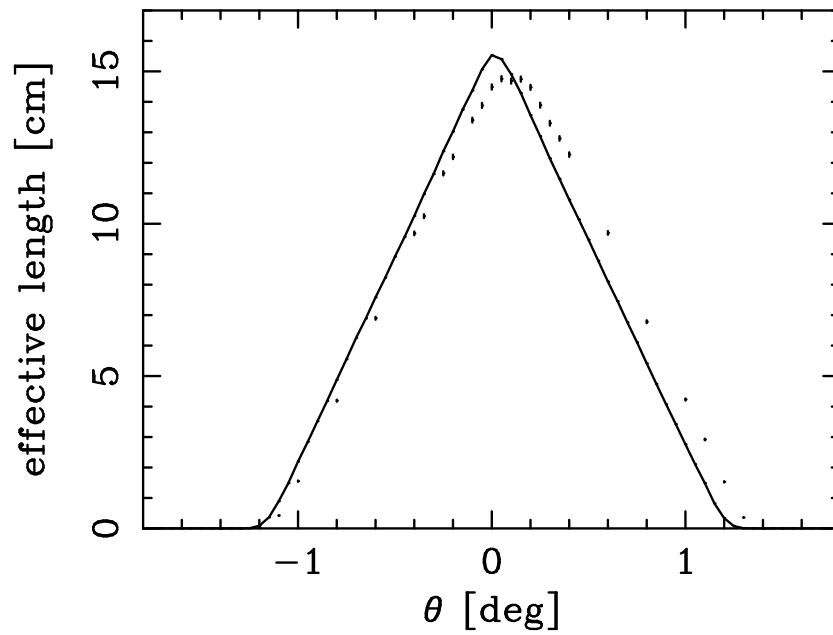


図 6.9: 実際の透過応答 ($\phi_{col}=+35^\circ$) と、($\phi_{col} = +5^\circ, \theta_{col} = -1.1^\circ$) の計数グラフを基に算出した透過応答 (実線) の比較。

角度 ϕ_{col} 毎の計数グラフの透過応答による検証

前述の結果より、コリメータシートの座標には各々の角度 ϕ_{col} で得た計数グラフを基にリストを作成する必要があると考えられる。

図 6.7 は $\phi_{col} = +5^\circ$ のときの実際の透過応答と、 $(\phi_{col} = +5^\circ, \theta_{col} = -1.1^\circ)$ の計数グラフより求めた座標リストから算出した透過応答を比較している。これと同様にして、 $\phi_{col} = +20^\circ$ のときの実際の透過応答には $(\phi_{col} = +20^\circ, \theta_{col} = -1.0^\circ)$ の、 $\phi_{col} = +35^\circ$ のときの実際の透過応答には $(\phi_{col} = +35^\circ, \theta_{col} = +1.0^\circ)$ の、計数グラフより求めた座標リストから算出した透過応答をそれぞれ比較の対象とした。図 6.10 をみると、 $\phi_{col} = +20^\circ$ のときは頂点付近を除けばおおよそ一致しているように思われる。しかし図 6.11 をみると、 $\phi_{col} = +35^\circ$ のときはまたしても θ_{col} 方向に明らかにずれていることが分かる。この θ_{col} 方向のずれは、GSC を支える治具とステージのアラインメントがずれていることが原因ではないかと考えている。もしも設定している角度 θ_{col} の値と実際の θ_{col} の値がずれていると、座標リストから算出した透過応答と実際の透過応答とは θ_{col} 方向に平行移動させたようなずれが生じる。このずれの大きさが ϕ_{col} によって変化するとすれば、 $\phi_{col} = +35^\circ$ のときのみ図 6.11 のような θ_{col} 方向の顕著なずれが現われたことにも説明が付くと考えている。

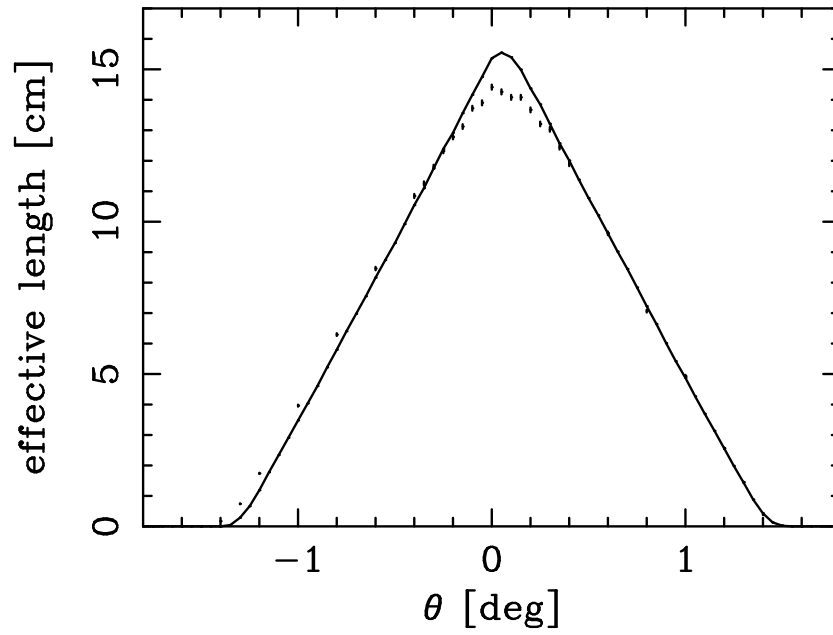


図 6.10: 実験で得た実際の透過応答 ($\phi_{col} = +20^\circ$) と、 $\phi_{col} = +20^\circ, \theta_{col} = -1.0^\circ$ のときの
計数グラフを基に算出した透過応答 (実線) の比較。

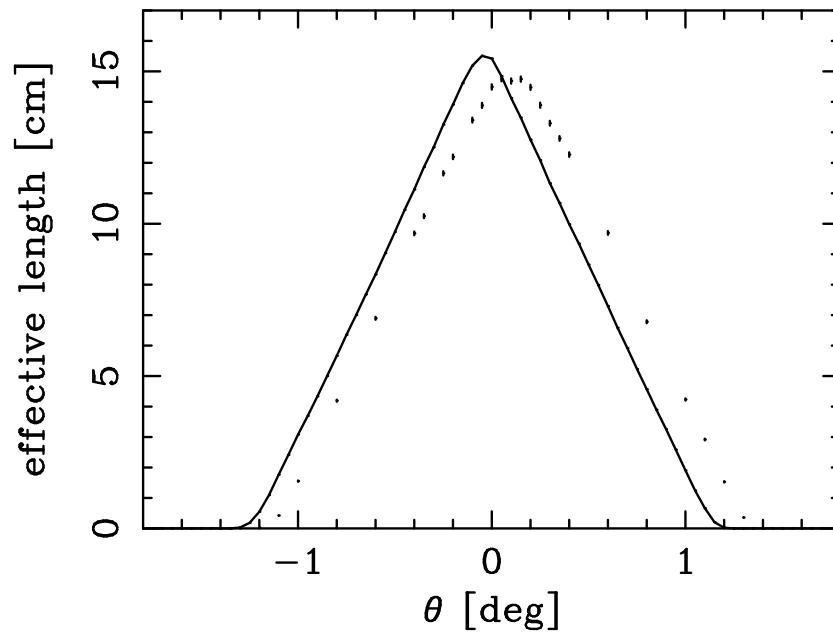


図 6.11: 実験で得た実際の透過応答 ($\phi_{col} = +35^\circ$) と、 $\phi_{col} = +35^\circ, \theta_{col} = +1.0^\circ$ のときの
計数グラフを基に算出した透過応答 (実線) の比較。

頂点付近のずれ

実際の透過応答と座標リストから算出した透過応答を比較したどの図を見ても、実際の透過応答の頂点付近が潰れたようになっていることが分かる。頂点が低いということは、 θ_{col} の値が 0° の付近では実際に得られる有効長さが小さいということである。これは何が原因であろうか。

考えられる原因の一つとしてコリメータシートの撓みや皺といった歪みの影響が挙げられる。本研究では、第6章冒頭で述べたようにコリメータシートは完全な平面状としており、モデリングの段階で歪みは全く考慮されていない。コリメータシートの上端と下端の位置が同じであっても、シートが撓んでいると見かけ上の厚みが増して GSC カウンタの受光面に届く X 線束の断面積が小さくなり、その結果有効長さが減少してしまう。またこの撓みによる効果は、シートの上端と下端を通る直線の方に近いときほど大きくなると推測できる。すなわち頂点に近いときほど大きくなると考えられる。

本研究では、このシートの歪みについて定量的な解析を行うまでには至らなかった。

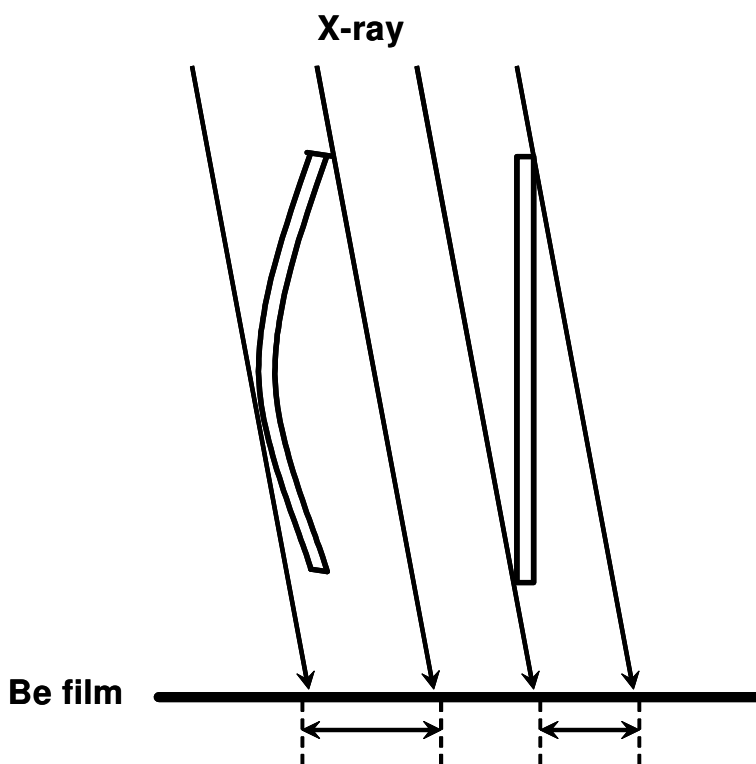


図 6.12: コリメータシートの歪みによる有効長さの減少。図のようにシートが撓んでいると GSC 受光面上にできるシートの影が大きくなり、有効長さが減少する。

第7章 まとめ

本研究では、X線ビーム照射実験を行い、GSC コリメータを構成する 64 枚のコリメータシートの構造特性を評価した。まず、X線ビーム照射実験で得た X線光子計数グラフから各コリメータシートの上端と下端の座標を求め、その座標リストを基に透過応答 (三角レスポンス) を算出し、実験で得た実際の透過応答を再現できるか検証した。

その結果、今回作成した座標リストは頂点 ($\theta_{col} = 0$) 付近において実験結果の透過応答よりも 10% ほど大きい値を示した。その主要原因としては、各コリメータシートが平面状ではなく撓 (たわ) みや皺 (しわ) などの無視できない歪みをもっており、これによって有効長さが座標リストを基に算出した透過応答の値よりも小さくなってしまふことが考えられる。

残念ながら本研究では、これらの歪みを詳細に検証することが出来なかった。しかしながら透過応答の頂点付近を除いた他の領域では、部分的ではあるが実際の透過応答を再現できたと考えている。コリメータの実際の透過応答が理想的な透過応答とは異なる形状を示す原因を特定し実際の透過応答を正確に再現するためには、本研究の再現方法をベースとしてコリメータシートの立体的な形状も考慮したモデルを作り、透過応答を再現できるかを改めて検証する必要があるだろう。

付録A カウンタ栈の影響を受けたシート座標の扱い

入射角度 θ_{col} の値によってはカウンタ栈の影響で座標情報が得られない場合がある。また 64 枚のコリメータシートの中には、カウンタ栈の影響でどの θ_{col} のライトカーブをもってしても座標が決定できない箇所がいくつかある。このような箇所の座標には、以下のようにして決定した値を代入した。

まず、カウンタ栈の影響を受けずに得られた座標にそれぞれ対応するコリメータシートの ID をふる。そして横軸をシートの ID、縦軸をシートの y_{col} 座標としてプロットする。この (ID, y_{col}) というデータ点は、ID が x であるコリメータシートの上端あるいは下端の y_{col} 座標を単に y とすると、

$$y = ax + b$$

という直線の周りに分布する。この分布に対し a を 3.1 [mm](シートのピッチ) に固定した状態で、最小二乗法を用いてフィッティングし b の値を求める。 y が設計値であるとき、 $b_0 = -217.65$ [mm](ID=0 のシートの y_{col} 座標) である。ここで $b - b_0$ をとると、これはコリメータシート 64 枚全体で見した場合における座標リストが表すコリメータの位置と設計値の位置とのずれを示している。すなわち、座標リストで与えられるコリメータシート 64 枚は設計値で与えられる位置から $b - b_0$ だけずれていると言える。よって、この $b - b_0$ を設計値の座標リストに足し加えたものを、座標リスト中のカウンタ栈の影響で空白となっている箇所に代入してリストを完成させる。

図 A.1 は入射角度 ($\phi_{col} = +5^\circ$, $\theta_{col} = -1.1^\circ$) のときのライトカーブより作成した座標リストに対して、上記のフィッティングを行ったものである。

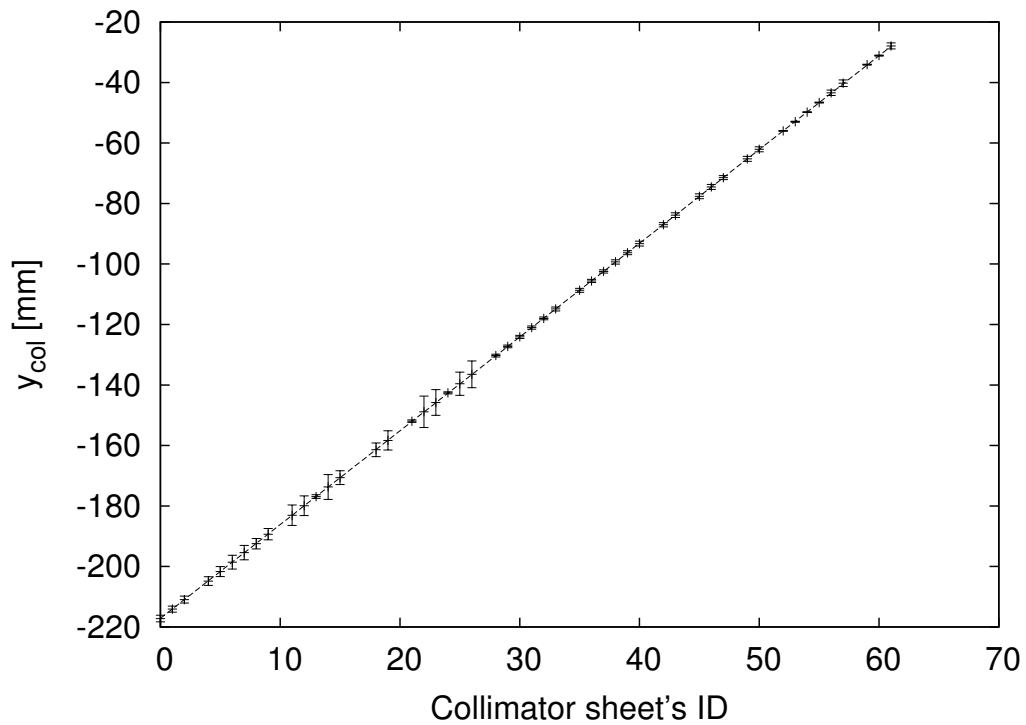


図 A.1: 入射角度 ($\phi_{col} = +5^\circ$, $\theta_{col} = -1.1^\circ$) のときのライトカーブより作成した座標リストに対するフィッティングの様子。このとき得られた b の値は -217.146 ± 0.01154 [mm] であった。

関連図書

- [1] 全天X線監視装置中間報告書
- [2] 高橋大樹著『国際宇宙ステーション搭載全天X線監視装置 MAXI/GSC 用コリメーター研究』修士論文
- [3] MAXI website : <http://www-maxi.tksc.nasda.go.jp/>

謝辞

本研究を行うにあたって、たくさんの方々に御協力頂きました。

指導教員である東京工業大学河合誠之教授には実験データ解析の方針から論文の構成にいたるまで、数多くの御助言をいただきました。

また本研究における実験を行った JAXA の職員の方々にも大変御世話になりました。MAXI グループの研究者の方々には MAXI に関する事、あるいは実験方法などについていろいろと御指南頂きました。なかでも本研究の最初から最後まで御指導、御協力頂いた森井さんには、実験室の内外を問わず大変御世話になりました。

最後になりましたが、御協力頂いた皆様に深く感謝致しますとともに、この場を借りまして厚く御礼申し上げます。ありがとうございました。