

修士論文

ASTRO-E 衛星搭載用フィルターホイールの特性評価

東京都立大学大学院
理学研究科物理学専攻
宇宙物理実験研究室
寅松 雄士
1999年3月31日

Contents

1	X 線天文学	6
1.1	歴史	6
1.2	ASCA 衛星	6
1.3	ASTRO-E 衛星	6
1.3.1	X 線反射望遠鏡 (XRT)	8
1.3.2	X 線 CCD カメラ (XIS)	9
1.3.3	硬 X 線検出器 (HXD)	10
1.4	X 線マイクロカロリメータ (XRS)	11
1.4.1	仕様	11
1.4.2	原理	11
1.4.3	エネルギー分解能	12
1.4.4	XRS によるサイエンス	12
1.5	フィルターホイールの必要性	15
2	フィルターホイール	16
2.1	概要	16
2.2	衛星での位置と精度	16
2.3	構成	16
2.4	モータ	17
2.5	位置検出機構	19
2.5.1	オプティカルエンコーダ	19
2.5.2	位置センサ	19
2.6	フィルタエレメント	21
2.6.1	Be フィルタ	21
2.6.2	ND フィルタ	21
2.7	フィルタエレメントの透過率測定	23
3	透過率測定システム	24
3.1	実験装置概要	24
3.1.1	X 線発生装置	26
3.1.2	入射口スリット θ テーブル	26
3.1.3	単色化用フィルタ X テーブル	27
3.1.4	2 結晶分光器	27

3.1.5	3 軸テーブル	27
3.1.6	比例計数管	27
3.2	透過率への幾何学影響に対する評価	29
3.2.1	X 線ビームの平行度	29
3.2.2	フィルタの面外精度	29
3.2.3	まとめ	30
3.3	X 線の分光	32
3.3.1	目的	32
3.3.2	Al ターゲットによる予備実験	33
3.3.3	七色ターゲットによる予備実験	37
4	Be フィルタの透過率測定	45
4.1	目的	45
4.1.1	膜厚測定	45
4.1.2	異なるエネルギーによる測定	46
4.2	測定原理	46
4.3	膜厚測定	47
4.3.1	測定法	47
4.3.2	スペクトル解析	48
4.3.3	結果	49
4.3.4	重量測定と透過率測定の結果の比較	57
4.4	異なるエネルギーによる測定	60
4.4.1	測定法	60
4.4.2	スペクトル解析	60
4.4.3	結果	67
4.5	まとめ	72
5	ND フィルタの透過率測定	74
5.1	目的	74
5.2	スキャン測定法	74
5.3	Mapping 測定	76
5.3.1	測定法	76
5.3.2	結果	76
5.4	異なるエネルギーによる測定	78
5.4.1	測定法	78
5.4.2	結果と考察	78
5.5	まとめ	79
6	まとめ	97
6.1	透過率測定のまとめ	97
6.2	今後の予定	97

List of Figures

1.1	ASTRO-E 衛星概観図	7
1.2	XRT 概観図	8
1.3	XIS 概観図	9
1.4	HXD 概観図	10
1.5	XRS 概観図	11
1.6	ケンタウルス座銀河団のスペクトル	14
1.7	X 線強度と各分解能レベル毎の検出効率の関係	15
2.1	FW と X 線反射鏡 (XRT)、XRS 検出器との位置関係	17
2.2	フィルターホイール本体部の図面	18
2.3	モーター回転角に対するオプティカルエンコーダ出力の変化	20
2.4	位置センサとスリットの関係	20
2.5	フィルタエレメント透過率設計値	22
2.6	ND フィルタの全体図と穴の配置パターン	22
3.1	測定システム全体図	24
3.2	真空チェンバ内上面図	25
3.3	結晶分光器上面図	28
3.4	フィルタの設置方法	30
3.5	測定システム側面図	31
3.6	Al ターゲットのスペクトル	34
3.7	2 結晶分光器による Al ターゲットの分光	35
3.8	ビームプロファイル	36
3.9	Direct Beam のスペクトル (七色ターゲット)	37
3.10	分光器への入射点による強度変化	38
3.11	2 結晶分光器による七色ターゲットの分光	39
3.12	Mo 2.293keV にたいする最適設定でのスペクトル	41
3.13	Ti 4.509keV にたいする最適設定でのスペクトル	42
3.14	Mn 5.895keV にたいする最適設定でのスペクトル	43
3.15	Fe 6.400keV にたいする最適設定でのスペクトル	44
4.1	Mapping 測定方法	47
4.2	Be100 μ m フィルタの測定に用いた Al $K\alpha$ のスペクトル	50
4.3	Be300 μ m フィルタの測定に用いた Mo $L\alpha$ のスペクトル	51

4.4	Be フィルタの膜厚に対するフィッティング結果	52
4.5	Be100 μ m フィルタ (A) に対する膜厚測定結果	53
4.6	Be100 μ m フィルタ (B) に対する膜厚測定結果	54
4.7	Be300 μ m フィルタ (A) に対する膜厚測定結果	55
4.8	Be300 μ m フィルタ (B) に対する膜厚測定結果	56
4.9	ビームサイズ内の膜厚むらに対するモデル	58
4.10	Be100 μ m フィルタの測定に用いた Mo $L\alpha$ のスペクトル	61
4.11	Be100 μ m フィルタの測定に用いた Ti $K\alpha$ のスペクトル	62
4.12	Be100 μ m フィルタの測定に用いた Mn $K\alpha$ のスペクトル	63
4.13	Be100 μ m フィルタの測定に用いた Fe $K\alpha$ のスペクトル	64
4.14	Be300 μ m フィルタの測定に用いた Ti $K\alpha$ のスペクトル	65
4.15	Be300 μ m フィルタの測定に用いた Mn $K\alpha$ のスペクトル	66
4.16	Be フィルタ中心に対する透過率測定結果 (1)	68
4.17	Be フィルタ中心に対する透過率測定結果 (2)	69
4.18	Be100 μ m フィルタの膜厚勾配	70
4.19	Be300 μ m フィルタの膜厚勾配	71
4.20	衛星搭載時フィルタエレメント設置方法	73
5.1	ND フィルタスキャン測定法	75
5.2	ND フィルタ Mapping 測定結果	77
5.3	ND フィルタに対する異なるエネルギーによる測定結果	80
5.4	ND フィルタのエネルギー依存性に対するモデル	81
5.5	ND25% フィルタの測定に用いた Al $K\alpha$ のスペクトル	82
5.6	ND25% フィルタの測定に用いた Mo $L\alpha$ のスペクトル	83
5.7	ND25% フィルタの測定に用いた Ti $K\alpha$ のスペクトル	84
5.8	ND25% フィルタの測定に用いた Mn $K\alpha$ のスペクトル	85
5.9	ND25% フィルタの測定に用いた Fe $K\alpha$ のスペクトル	86
5.10	ND5% フィルタの測定に用いた Al $K\alpha$ のスペクトル	87
5.11	ND5% フィルタの測定に用いた Mo $L\alpha$ のスペクトル	88
5.12	ND5% フィルタの測定に用いた Ti $K\alpha$ のスペクトル	89
5.13	ND5% フィルタの測定に用いた Mn $K\alpha$ のスペクトル	90
5.14	ND5% フィルタの測定に用いた Fe $K\alpha$ のスペクトル	91
5.15	ND1% フィルタの測定に用いた Al $K\alpha$ のスペクトル	92
5.16	ND1% フィルタの測定に用いた Mo $L\alpha$ のスペクトル	93
5.17	ND1% フィルタの測定に用いた Ti $K\alpha$ のスペクトル	94
5.18	ND1% フィルタの測定に用いた Mn $K\alpha$ のスペクトル	95
5.19	ND1% フィルタの測定に用いた Fe $K\alpha$ のスペクトル	96

List of Tables

2.1	アライメント誤差	17
2.2	モータの仕様	19
2.3	フィルタエレメント構成	21
3.1	七色ターゲットにより取り出せるライン	26
3.2	分光器のセットアップ (Al ターゲット)	33
3.3	分光器のセットアップ (七色ターゲット)	37
3.4	七色ターゲットから取り出した特性 X 線	40
4.1	Be フィルタに対する特性 X 線の Attenuation Length	46
4.2	Be フィルタ測定における輝線の強度 (1)	48
4.3	スペクトル解析時に仮定した各輝線に対するモデル (1)	49
4.4	異なる Attenuation Length における膜厚の算出	59
4.5	Be フィルタ測定における輝線の強度 (2)	60
4.6	スペクトル解析時に仮定した各輝線に対するモデル (2)	67
5.1	穴数による透過率の変化	75
5.2	ND フィルタ Mapping 測定における輝線の強度 (1)	76
5.3	ND フィルタ Mapping 測定における輝線の強度 (2)	78

Chapter 1

X 線天文学

1.1 歴史

1940 年代以降、科学技術の進歩により人類は観測機器を大気圏外の宇宙へ送る手段を手にした。それまで地球大気によって吸収されていた可視光以外の波長領域での天体観測が可能になったのである。そして 1962 年夏、MIT のロッシ、ジャッコニらによるさそり座 X-1 の発見により X 線天文学の歴史が始まる。1967 年に打ち上げられた Uhuru 衛星は 600 cm^2 という有効面積を持つ比例計数管を搭載しおよそ 400 個の X 線天体を発見した。またこの衛星において初めて X 線パルサーが発見された。その後 1978 年に打ち上げられた Einstein 衛星は世界ではじめて X 線反射望遠鏡を搭載し、系内の恒星、コロナの発見、超新星残骸や銀河団の詳細な観測など高い検出感度をいかして様々な天体へ観測対象を拡大していった。日本初の X 線天文衛星「はくちょう」は 1979 年に打ち上げられ、銀河系内の X 線天体の解明に成果を上げ日本の X 線天文学の基礎を築いた。その後「てんま」、「ぎんが」、「あすか」と次々に打ち上げ様々な成果をあげることとなる。

1.2 ASCA 衛星

「あすか」は 1993 年 2 月に打ち上げられたわが国で 4 番目の X 線天文観測衛星である。現在も高度 550km の軌道にあり、様々な天体に関する貴重なデータを地球に送りつづけている。日本の X 線天文衛星としては初めて X 線望遠鏡を搭載し、その焦点面には撮像型ガス蛍光比例計数管 (GIS) と X 線 CCD カメラ (SIS) をおき 0.5~10 keV までの広い範囲にわたって撮像、分光観測を行っている。

1.3 ASTRO-E 衛星

ASTRO-E 衛星は日本で 5 番目の X 線天文衛星で 2000 年 1 月に打ち上げ予定である。打ち上げには電波天文衛星「はるか」、火星探査衛星「のぞみ」の打ち上げにおいても使われた宇宙科学研究所の M-V ロケットを用いる。このミッションは日米協力のもとで行われ、宇宙科学研究所、NASA/GSFC、東大、京大、阪大、名大、都立大などによって開発が進められている。総重量は ASCA の 4 倍にあたる 1.6 トン、全長は望遠鏡 (XRT) 伸展時で 6.5m である。この衛星には 5 台の X 線反射鏡が搭載され、その焦点面に 4 台の X 線 CCD カメラ (XIS) と 1 台のマイクロ

カロリメータ (XRS) が設置される。またその他に井戸型フォスウィッチシンチレータとシリコン PIN 検出器を組み合わせた 1 台の硬 X 線検出器 (HXD) も搭載され広いエネルギー範囲にわたって天体の観測を行うことができる。

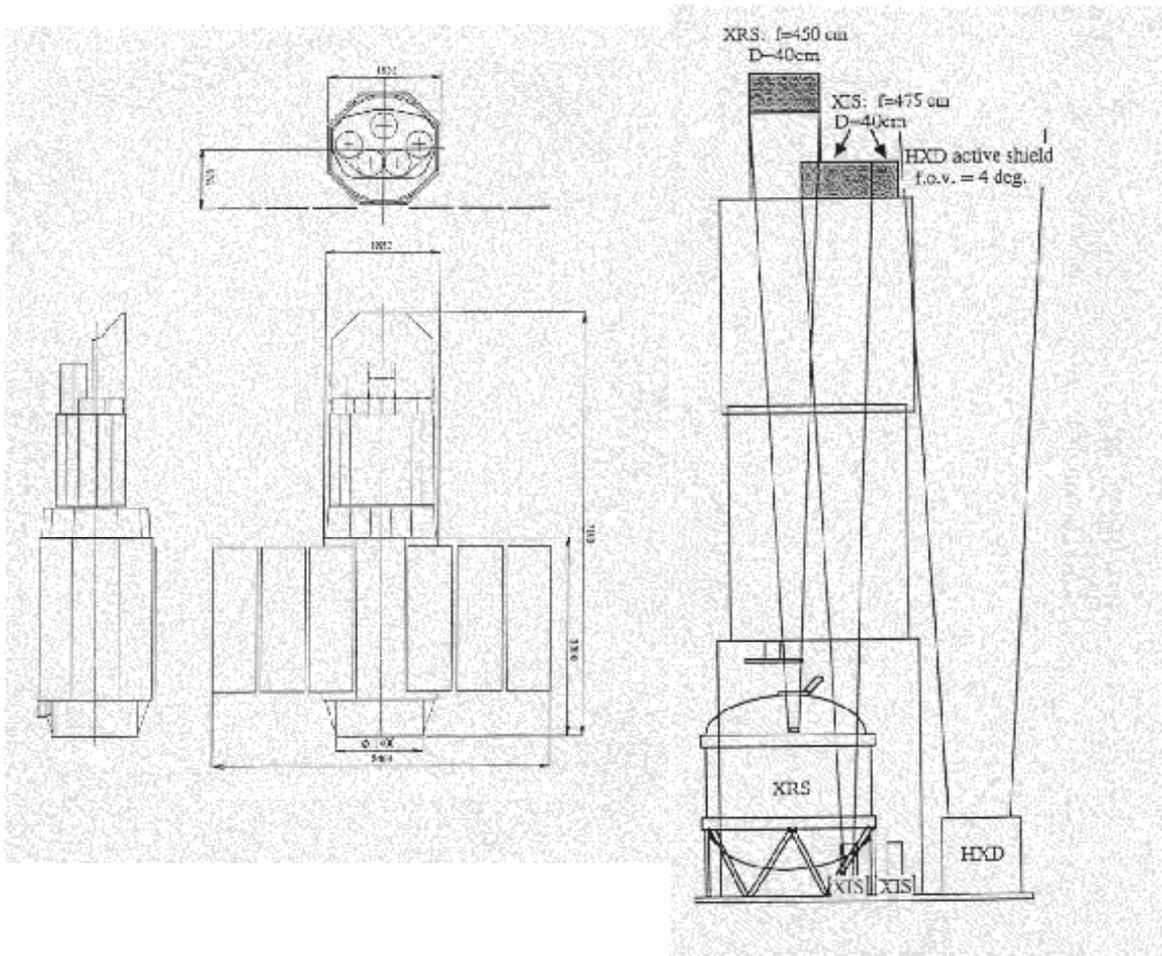


Figure 1.1: ASTRO-E 衛星概観図

1.3.1 X線反射望遠鏡 (XRT)

日本で始めて X 線望遠鏡を搭載した ASCA の XRT に改良が加えられたもので伸展式光学ベンチ (EOB) の先端に 5 台取り付けられ、4.75 m 先の焦点面に X 線 CCD カメラ 4 台、4.5 m 先の焦点面に X 線マイクロカロリメータ 1 台が設置される。平滑 X 線鏡面の製作にはレプリカ法が採用され、これによって表面形状精度が向上し ~1.5 分角という ASCA/XRT の 2 倍の角分解能を実現している。また焦点距離が ASCA の 3.5 m にくらべ長くなったため平均の斜入射角が減少し高エネルギー側での反射率が 2 倍 (@6keV) 向上しているのも特徴である。

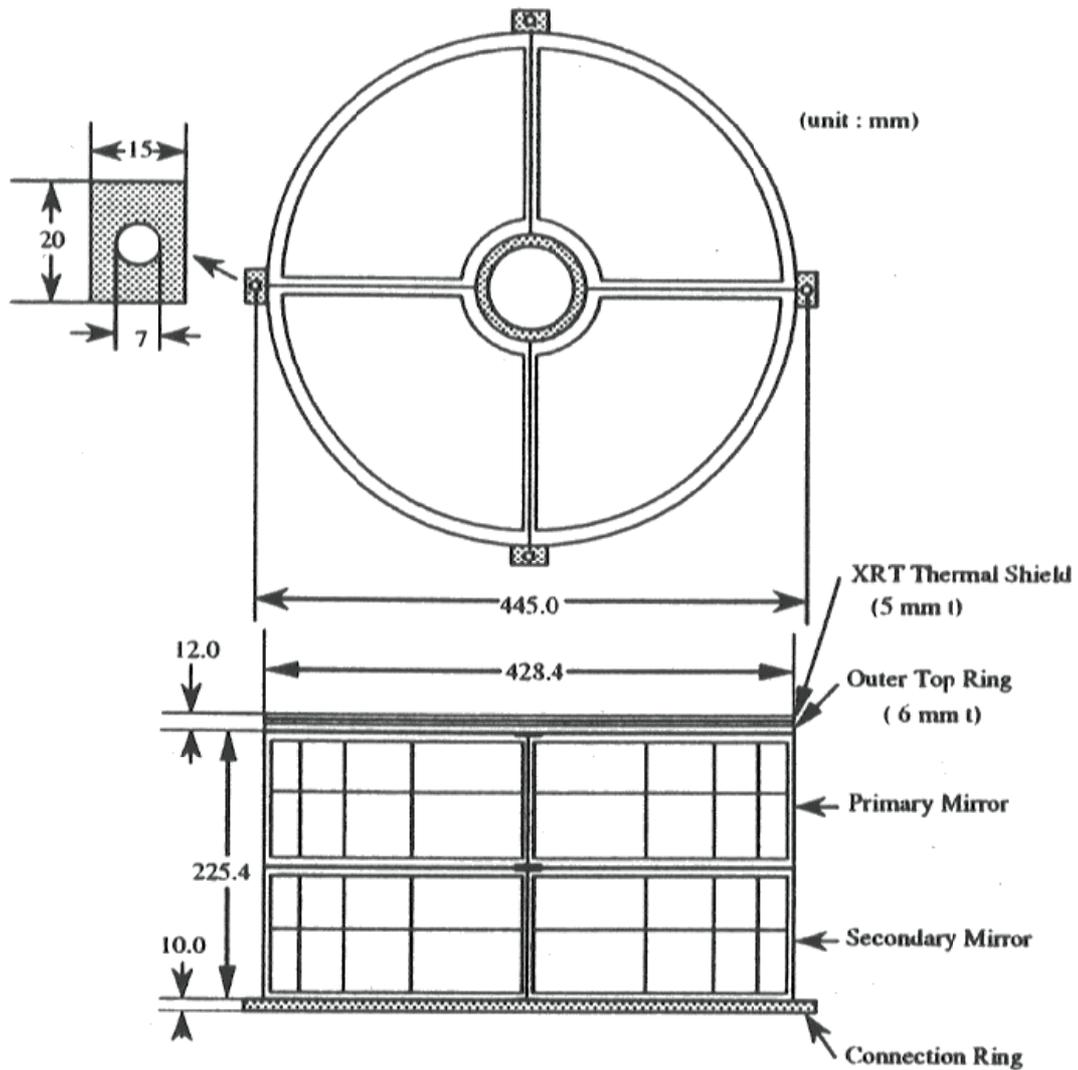


Figure 1.2: XRT 概観図

1.3.2 X線 CCD カメラ (XIS)

XIS は X 線検出用の冷却型 CCD カメラで、各 XRT 焦点面に 4 台設置され 0.4 ~ 12 keV で撮像、分光観測を行う。動作温度は放射線損傷の回復も考慮し -90°C で、エネルギー分解能は 130 eV@6 keV(FWHM) である。1 画素は $24\ \mu\text{m}$ の正方形でこの素子が 1024×1024 個並び、視野は $17.8' \times 17.8'$ となる。エネルギー分解能は 12 eV を誇る XRS に譲るものの位置分解能の高さ、視野の広さは XRS のそれよりも数段上回っている。

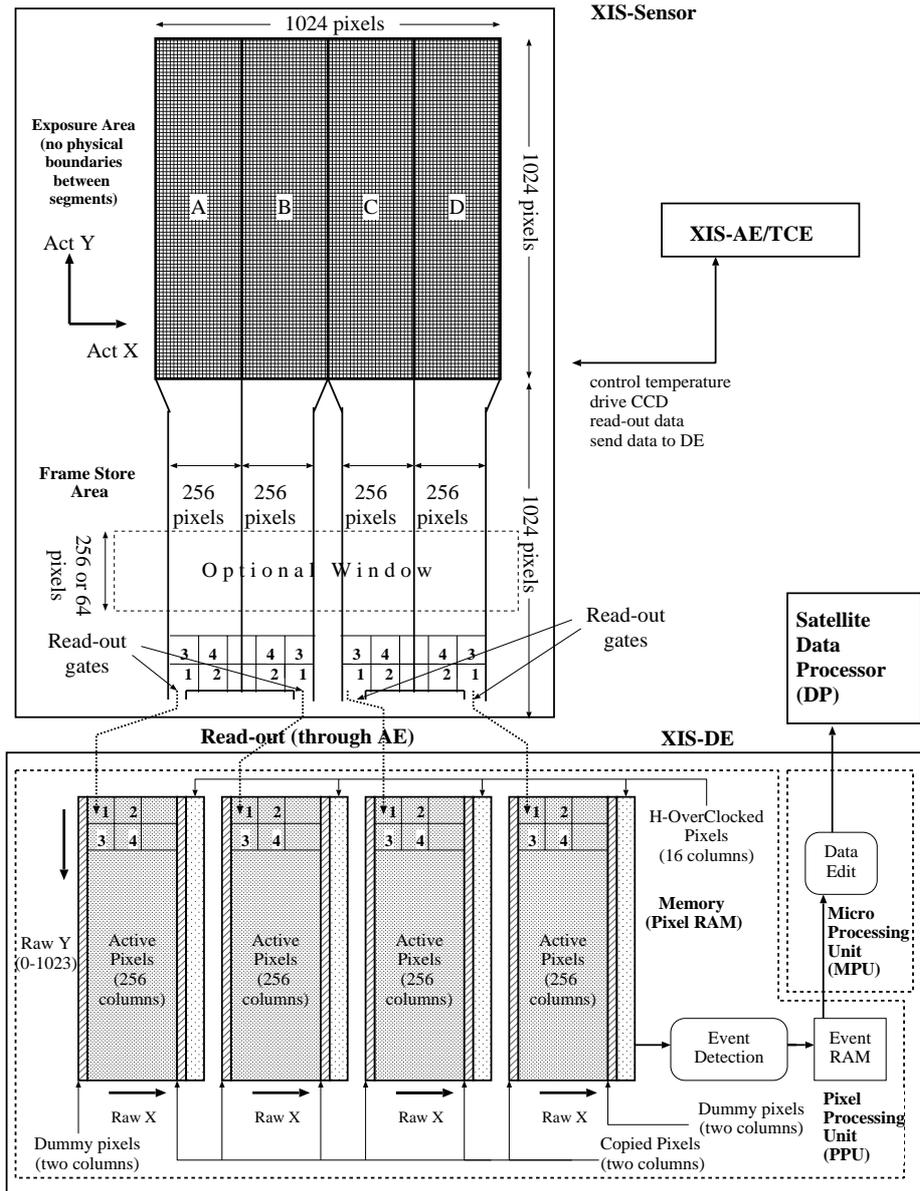


Figure 1.3: XIS 概観図

1.3.3 硬 X 線検出器 (HXD)

井戸型複眼フォスウィッチ結晶シンチレータとシリコン PIN フォトダイオードを組み合わせる事により 10~700 keV の広いエネルギー帯域をカバーする。センサー部分は 4×4 のマトリックス状に複眼配置された well 検出器とそのまわりに配置された放射線シールド用の Anti 検出器からなる。Well 検出器の底の部分にはシリコン PIN フォトダイオードと GSO 結晶シンチレータが縦積みされている。低エネルギー側 (10~100 keV) の X 線は PIN 検出器が、高エネルギー側 (40~600 keV) はその下の GSO 検出器によって測定されることになる。エネルギー分解能は PIN 検出器が 3 keV@10 keV、GSO 検出器が ~9%@662keV である。また Anti 検出器は well 検出器にたいする放射線シールドの役割を果たすとともに優れたガンマ線バースト検出器としての機能も兼ね備えている。

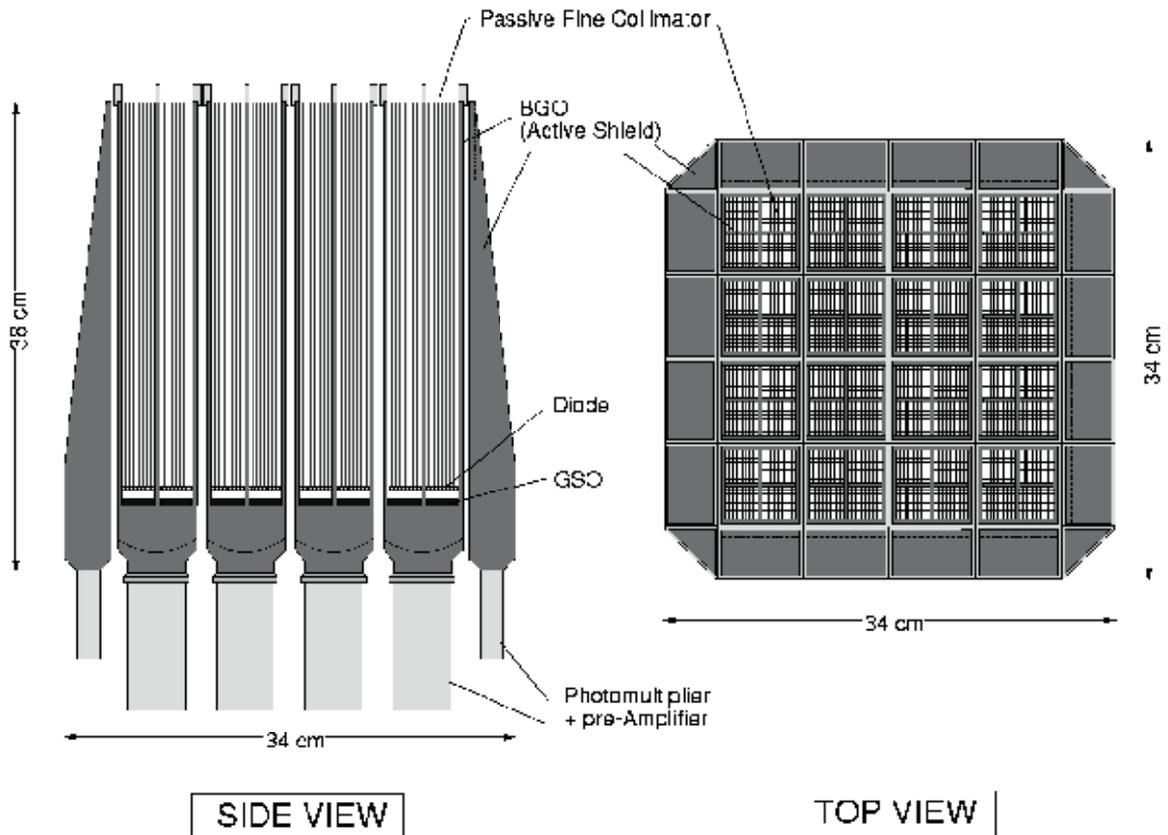


Figure 1.4: HXD 概観図

1.4 X線マイクロカロリメータ (XRS)

1.4.1 仕様

マイクロカロリメータは世界で初めて X 線検出器として人工衛星に搭載され ASTRO-E ミッションの中でも大きな役割を担っている。最大の特徴は 12 eV という「あすか」に搭載された検出器のおよそ 10 倍のエネルギー分解能を備えているところにある。吸収体には X 線吸収効率が高く、熱容量が小さく、thermalization に優れていることなどから HgTe を使用している。素子 1 つの大きさは $1.2 \times 0.3 = 0.36 \text{ mm}^2$ でこれを 2×16 の bilinear にして用いる。検出効率は 6keV で 95% で、視野は $1.9' \times 4.1'$ である。この検出器は高エネルギー分解能を実現するため極低温 65 mK で動作させるが、この冷却にもちいる冷媒を衛星に搭載できる重量が限られているため、XRS の軌道上での設計寿命はおよそ 2 年となっている。

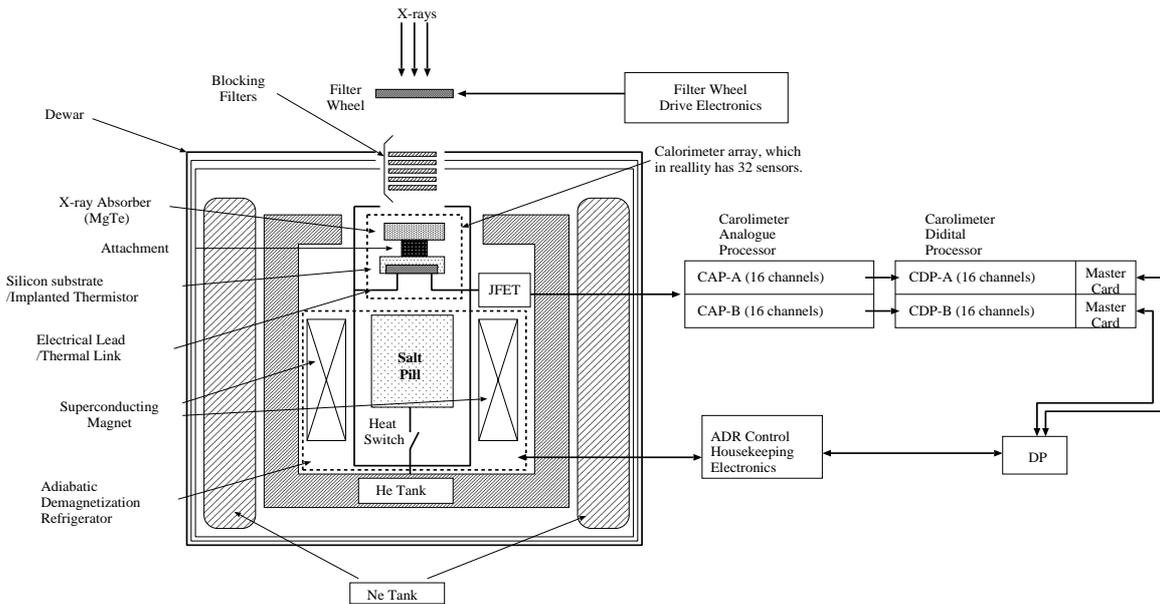


Figure 1.5: XRS 概観図

1.4.2 原理

入射した X 線光子のエネルギーは吸収体の格子振動に変わり吸収体にエネルギーに比例した温度上昇を引き起こす。この温度上昇分を吸収体に張り付けた半導体温度計で測定し電気信号に変換する。吸収体には高いエネルギーの X 線たいしても十分な検出効率を実現するため原子番号の大きいものが採用される。低温環境下温度 T における吸収体の比熱は、素子のデバイ温度を θ_D とすると

$$C = \frac{12\pi^4}{5} N k_B \left(\frac{T}{\theta_D} \right)^3 \quad (1.1)$$

$$= 1940 \frac{\rho}{A} \left(\frac{T}{\theta_D} \right)^3 (\text{JK}^{-1} \text{cm}^{-3}) \quad (1.2)$$

であらわされる。ここで N は単位体積あたりの原子数、 k_B はボルツマン定数、 ρ は比重、 A は原子の質量数を表す。XRS の動作温度 $T=65$ mK、吸収体に使われる HgTe のデバイ温度 $\theta_D = 120$ K、体積 3.36×10^{-6} cm³ を代入し 1 つの吸収体素子の熱容量 C' を計算すると $\sim 5.2 \times 10^2$ keV K⁻¹ と見積もられる。ただしここで多くの固体では比重と質量数は比例するとして $\rho/A \sim 0.08$ を用いている。この吸収体にエネルギー E keV の X 線光子が入射したとすると温度上昇 ΔT K は

$$\Delta T = \frac{\Delta E}{C} \quad (1.3)$$

で与えられるので、仮にここで $E=6.4$ keV とおくと $\Delta T \sim 12$ mK と見積もられる。

1.4.3 エネルギー分解能

カロリメータ検出器のエネルギー分解能は今までの検出器のように X 線光子が入射した時にエネルギーに比例して作られるキャリア数の統計的揺らぎによって決まるのではなく、内部エネルギーの揺らぎによって決まるためエネルギーに依存しない。実際には X 線光子が入射した時にエネルギーに依存してフォノンのモード数に揺らぎが発生するがこれは内部エネルギーの揺らぎに比べて無視できる。

熱容量 C' の吸収体が温度 T の環境下にあるとすると、フォノンのモード数 N は $CT/k_B T$ となり定常状態におけるフォノンのモード数の揺らぎは

$$\sqrt{N} = \sqrt{\frac{C'}{k_B}} \quad (1.4)$$

で与えられる。フォノン 1 個あたりの平均エネルギーが $k_B T$ で与えられることを考慮すると内部エネルギーの揺らぎ ΔE は

$$\Delta E = \sqrt{N} k_B T = \sqrt{k_B T^2 C'} \quad (1.5)$$

となる。ここで $C' \sim T^3$ となるので最終的に $\Delta E \sim T^{5/2}$ となりエネルギーの揺らぎは温度 T を下げるほど抑えることができ高エネルギー分解能を実現できる。

1.4.4 XRS によるサイエンス

XRS の高いエネルギー分解能によって可能になる重要なサイエンスとして輝線の Doppler shift を利用した高温プラズマの運動学がある。そこでまずガスの thermal な運動によるラインの broadening について考えることにする。視線方向を速度 v で遠ざかる原子からの放射の振動数 f は、Doppler 効果をうけ Δf のシフトを受けることになる。ここで $v \ll c$ (ただし c は光速) とすると

$$\Delta f = f - f_0 = -\frac{v}{c} f_0 \quad (1.6)$$

となる。ガス中の多数の原子がマクスウェル分布に従う速度分散をもっているとするならば、視線速度が $v \sim v + dv$ で運動する原子数 n は

$$n(v)dv = N \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{1/2} \exp(-mv^2/2kT) dv \quad (1.7)$$

で表される。ただしここで N は質量 m をもつ原子の数である。ここで v に先程の式を代入するとラインのプロファイル $\phi(\Delta f)$ は

$$\phi(\Delta f) \propto n(\Delta f) = (\text{constant}) \times \exp[-(\Delta f/\Delta f_D)^2] \quad (1.8)$$

となる。

ただし

$$\Delta f_D = \frac{f}{c} \sqrt{\frac{2kT}{m}} \quad (1.9)$$

であり Doppler width と呼ばれる。また

$$\int_0^\infty \phi_f df = \int_{-\infty}^\infty \phi(\Delta f) d(\Delta f) = 1 \quad (1.10)$$

で規格化を行うことによって、最終的に

$$\phi_f = \frac{1}{\sqrt{\pi}\Delta f_D} \exp[-(\Delta f/\Delta f_D)^2] \quad (1.11)$$

となる。ここで $\exp[-(\Delta f/\Delta f_D)^2]$ が $1/2$ になる時がこのプロファイルの FWHM(Full Width at Half Maximam) となり

$$FWHM = 2\sqrt{\log_e 2}\Delta f_D \quad (1.12)$$

で表される。銀河団中心領域にある温度 $T=10^8$ K の高温プラズマを考えると、Fe イオン (質量数 55) からの輝線 (6.7 keV) の FWHM は ~ 7 eV となる。XRS のエネルギー分解能をもつてすればここから直接イオンの温度を決定することができる。Figure 1.6に $z=0.011$ にあるケンタウルス座銀河団の ASCA/GIS で取得したスペクトルと XRS を用いた時に得られるシミュレーションの結果を表す。

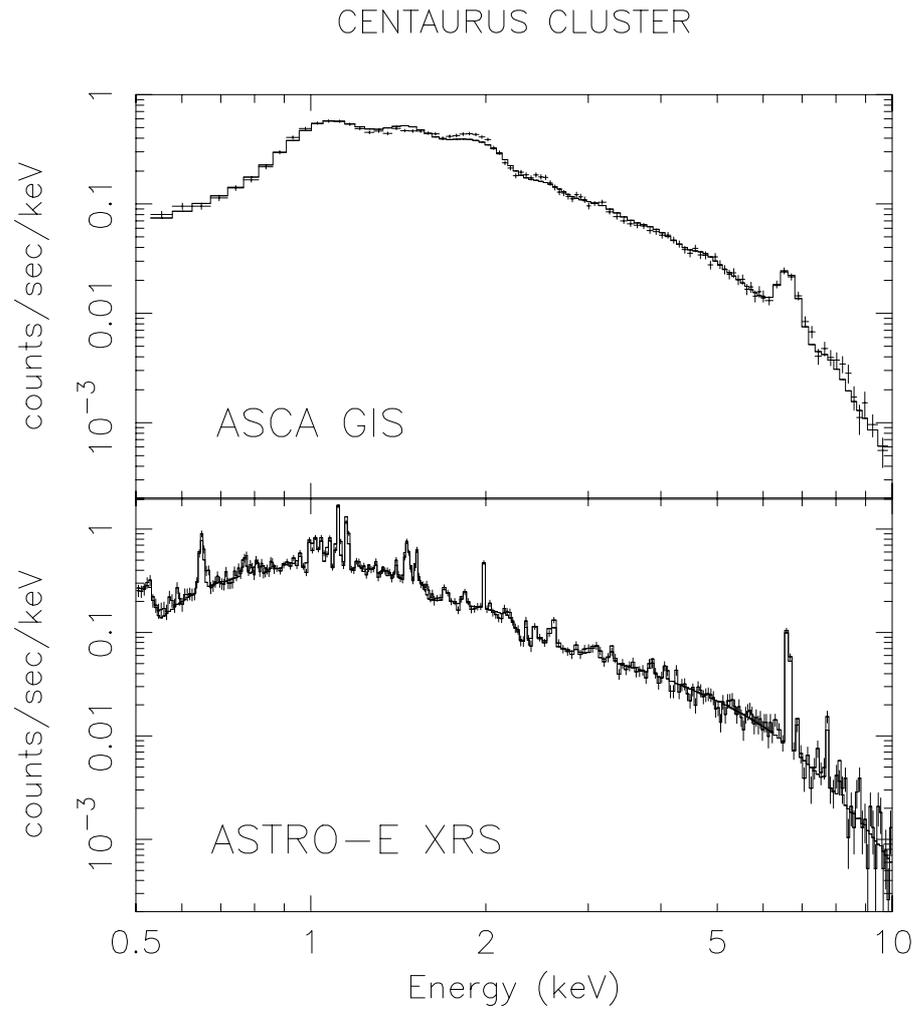


Figure 1.6: ケンタウルス座銀河団に対して ASCA/GIS により取得したスペクトル (上段) と ASTRO-E/XRS における観測のシミュレーション (下段)

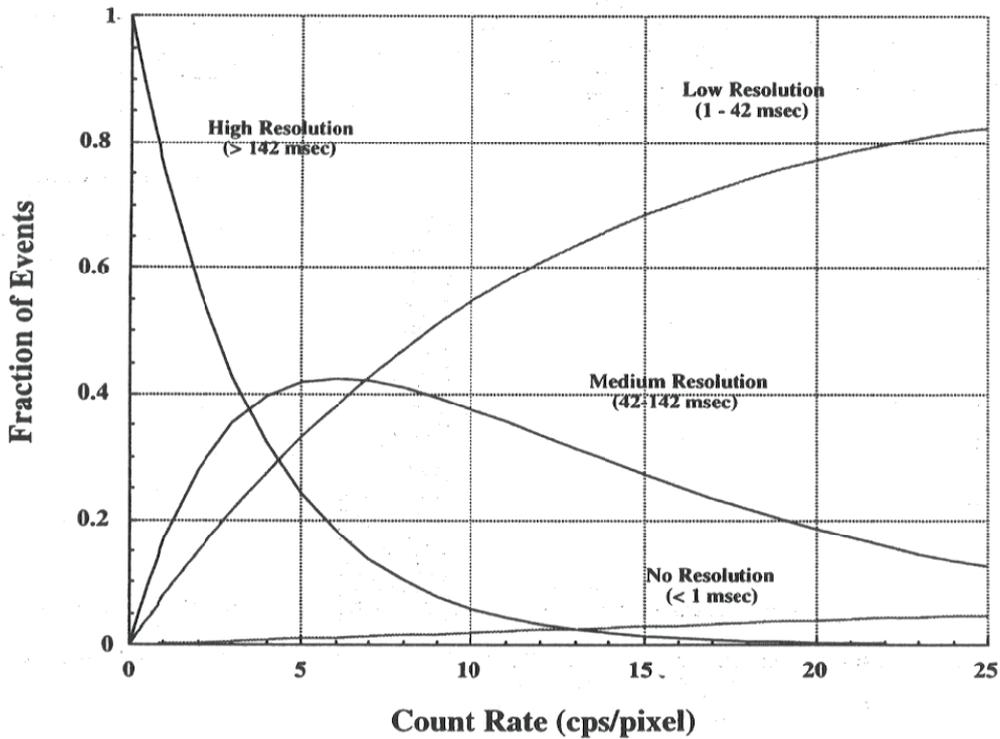


Figure 1.7: X線強度と各分解能レベル毎の検出効率の関係

1.5 フィルターホイールの必要性

吸収体で生じた熱は熱伝導度 G が適度に調節された thermal link を通して熱浴に逃げて行く。この時の減衰時間 τ は吸収体における thermalization の時間 (数 msec) より十分長くとる必要がある。吸収体の比熱を C 、thermal link の熱伝導度を G とすると $\tau=C/G$ で決まり XRS の比熱、熱伝導度では ~ 10 msec となる。したがって 1 つの素子あたりに入射する X 線強度が数 c/s よりも上がると、高いエネルギー分解能を得る信号処理モードでの検出効率が低下してしまう。Figure 1.7によると High-Resolution モードでは X 線強度の増加にしたがって指数関数的に検出効率が下がることがわかる。そこで明るい X 線源の観測においてもこの検出器の性能を引き出せるようにフィルタをもちいることで XRS に入射する X 線の強度を抑えることにする。この目的のために開発されたのがフィルターホイールである。

Chapter 2

フィルターホイール

2.1 概要

フィルターホイールは XRT と XRS の間に設置され、XRS に入射する X 線強度を調節する役割を持つ。様々な天体の観測に対応するため開放を含め 6 種類のフィルタをおくことができ、これをコマンドによって選択できるようになっている。この装置は軌道上で機械的な動きが要求され、XRS 検出器の設計寿命の 2 年間その性能が保証されなければならない。また万一軌道上でフィルターホイールに支障が出た場合、XRS 検出器の性能を大幅に損なうことになり兼ねない。以上の点からこの装置の設計には細心の注意が払われ、またその性能を評価するためプロトモデルを作製し、透過率測定試験、熱真空試験、長期ランニング試験、振動試験などを行いその開発にあたってきた (古庄 [1]1998)。現在はフライトモデルが完成がしており、これを用いて様々な較正試験が行われている。

2.2 衛星での位置と精度

できるだけ XRS 検出器に近い位置にすることで X 線通過径を小さくし FW の小型、軽量化を計れるが、XRS のデュアー内に設置することは熱的な観点からあまり望ましくない。そこで Figure 2.1 のように XRT と XRS の間のミドルプレート上に取り付けることにする。この位置での X 線通過径は 39.6 mm となり、Table 2.1 のようなアライメント誤差を考慮してフィルタの有効径を 44 mm とした。予想される面内でのアライメント誤差は FW 単体、衛星への取り付けにおける誤差をあわせると ± 1.70 mm で、許される面内誤差は $(44.0 - 39.6) / 2 = \pm 2.2$ mm であるので十分範囲内に収まることになる。また面外誤差は合計で $\pm 1.1^\circ$ となるが、最も影響のある 1% フィルタで透過率の -5% 以下と見積もられ性能的に問題はない。

2.3 構成

全体のシステムはモータ、フィルタディスク、ハウジングからなる。ハウジングの中心軸にモータが取り付けられ、このモータにステップパルスを送ることによりフィルタディスクを回転させ、6 種類のフィルタの中から観測に用いるものを選択する。全重量は 816 g、全高が 96.26 mm、ハウジング直径が 182 mm となっている。ハウジング及びフィルタディスクはアルミ合金製で光の反射による位置センサの誤動作を防ぐために黒色塗装が施されている。フィルタはディスクの

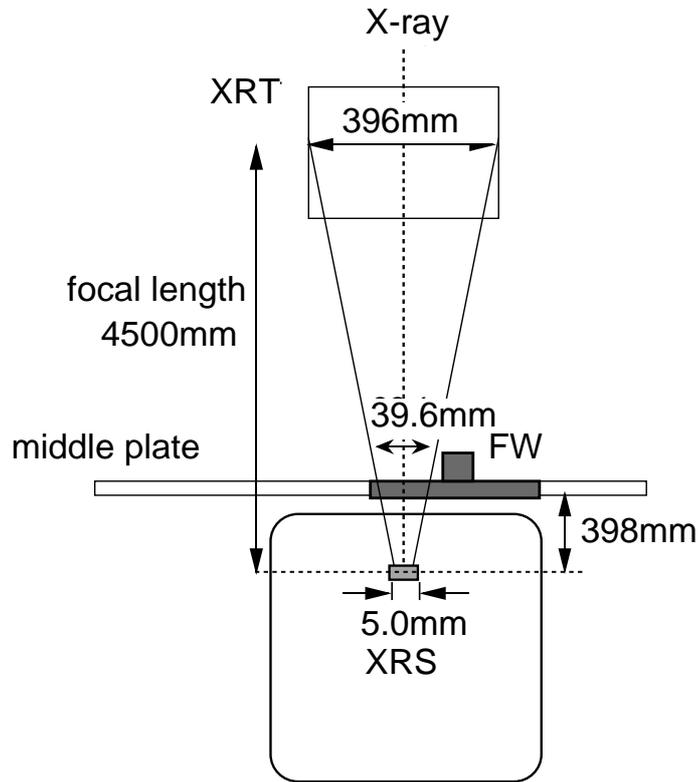


Figure 2.1: FW と X 線反射鏡 (XRT)、XRS 検出器との位置関係

		面内誤差 [mm]	面外誤差 [deg]
フィルターホイール単体での誤差	製造 / 組立誤差	± 0.40	± 0.25
	機械環境ヒステリシス	± 0.10	± 0.03
	回転再現誤差	± 0.10	± 0.02
	熱歪み誤差	± 0.10	± 0.05
衛星取り付け要求 (機械環境ヒステリシス、熱歪み誤差を含む)		±1.00	±0.75°
Total		±1.70	±1.1°

Table 2.1: アライメント誤差

外径 49 mm、深さ 1mm の設置部分に、ステンレス製のリングバネ (外径 49mm、内径 45 mm 厚さ 0.5 mm で半径方向に深さ 1.4 mm のスリットを 15° おきに 24ヶ所切ったもの) を介して挟み込むことで固定する。

2.4 モータ

ディスクの回転には電波天文衛星「はるか」において実績のある Schaeffer 社の 3 相式ステッピングモータ M8 を用いる。このモータは中心にある永久磁石回転子と、そのまわりにある 3 相のコイルの固定子からなり、コイルに電流を流し励磁することで中心の磁石を回転させモータを

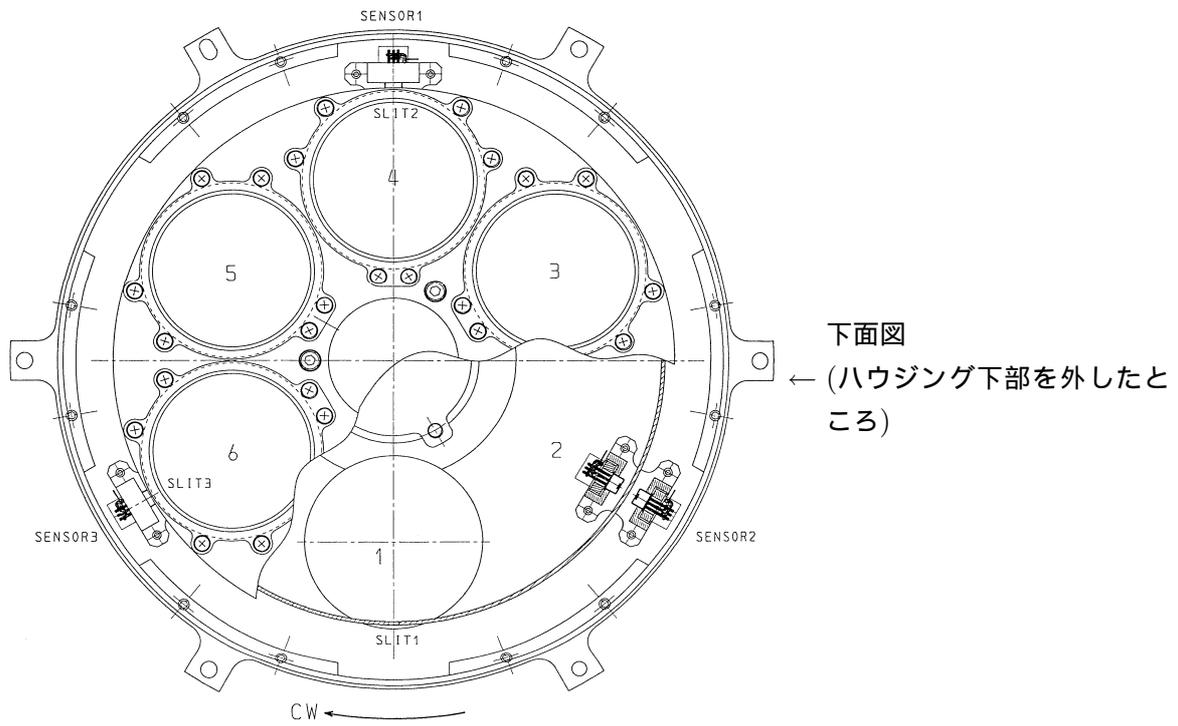
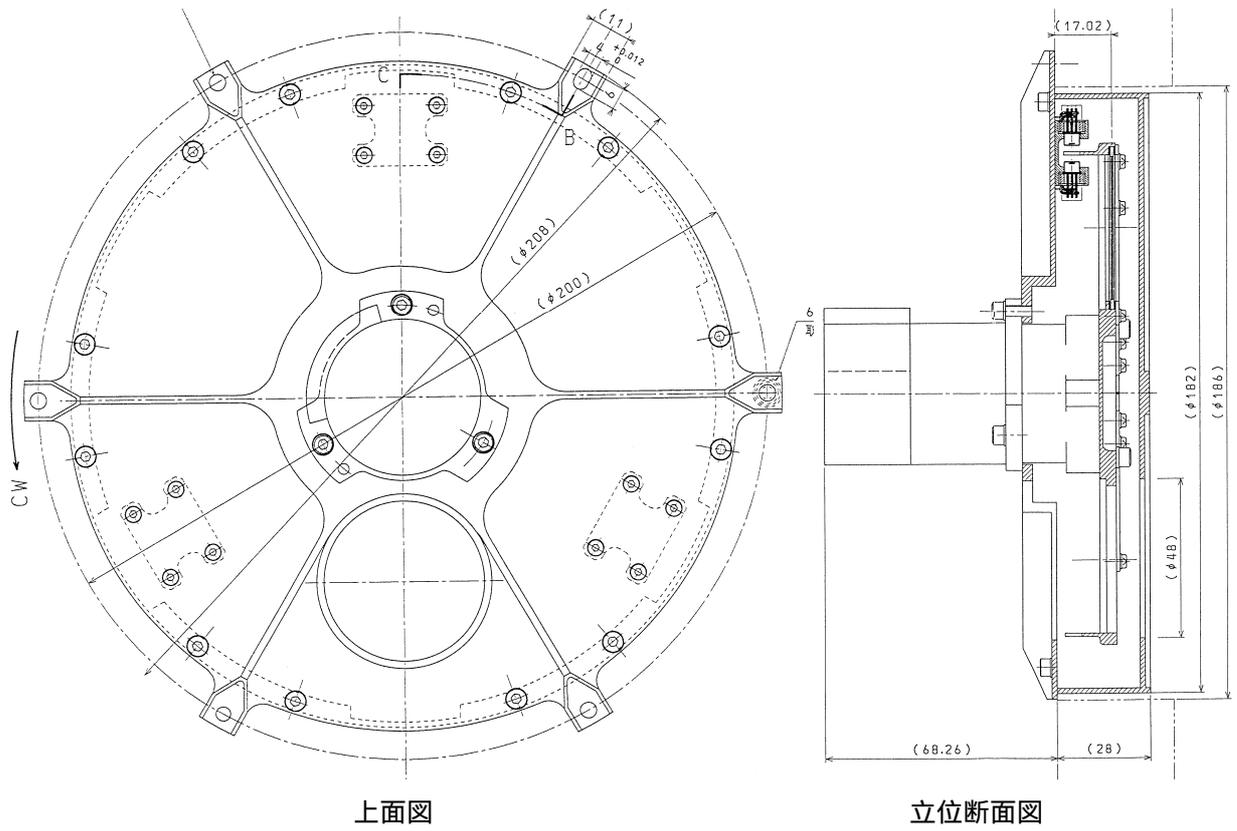


Figure 2.2: フィルターホイール本体部の図面

消費電力	4 W(常温駆動時)
保持トルク	1.1 Nm (> 0.9 Nm)
重量	345 g (< 399 g)
保存温度	- 50 ~ 80
動作温度	- 30 ~ 60
動作保障 (保存)	4 年間で 2000 回転以下
(軌道上)	3 年間で 1000 回転以下
駆動時間 (60° 回転)	9.375 秒

Table 2.2: モータの仕様

一定角度回転させる。また励磁する順番をかえることにより反対方向にも回転することが可能である。モータは 72 パルスで 1 回転するためハーモニックドライブを用いて 1/100 分周することで 1 パルスでのディスクの回転角を 0.05° となるようにする。モータの駆動に用いる周波数は 128 Hz で、 60° 回転には 9.375 秒かかる。フィルターの選択にかかる時間は反対方向への回転が可能なることを考えると最大で 28.125 秒ということになる。Table 2.2 にモータの仕様を示す。

2.5 位置検出機構

2.5.1 オプティカルエンコーダ

モータ内部にはオプティカルエンコーダが内蔵されている。モータの回転軸に 5° おきに 36 個の窓のあいた円形ディスクが 2 枚 (Ach、Bch) 取り付けられ、その窓を各々のディスクにたいして用意された位置センサ (LED/PD を組み合わせたもの) で検出することによってモータの回転角をモニターすることができるようになっている。Figure 2.3 のように 2 枚のディスクの窓は 1/4 だけ位相をずらして取り付けられており、Ach、Bch の出力は 1step ごとに (LOW、HIGH)、(HIGH、LOW) の 2 つのパターンを繰り返すようになっている。

2.5.2 位置センサ

6 種類のフィルタのうち、どのフィルタが選択されているかを確認するためにオプティカルエンコーダとは独立に位置検出機能を用意する。フィルタディスクに取り付けられた円筒状の板に幅 1.5 mm ($\sim 1.2^\circ$) のスリットを 3ヶ所開け、このスリットをハウジング側に取り付けられた位置センサ (LED、PD を組み合わせたもの) で検出する。例えば Figure 2.4 において、ディスクの回転角が 0° の時、位置センサ 1、3 がスリットを検出し、PD の出力は \cdot 、 \times 、 \cdot となる。位置センサ、スリットは十分な精度で取り付けられておりプロトモデルを用いた熱真空試験において、出力が切り替わる位置のセンサごとのずれは最大でも 4 step ($=0.2^\circ$) 程度、再現性は 1 step 以内であることが確認されている。LED には NDL4103A、PD には NDL2208 (NEC 製) を使用する。LED の点灯時には 20mA の電流が流れ、これをスリットをはさんで PD が検出するとおよそ $3\mu A$ の光電流が流れる。そしてトランジスタ 2SC2822 と $1M\Omega$ の抵抗によっておよそ $100\mu A$ に増幅し出力される。

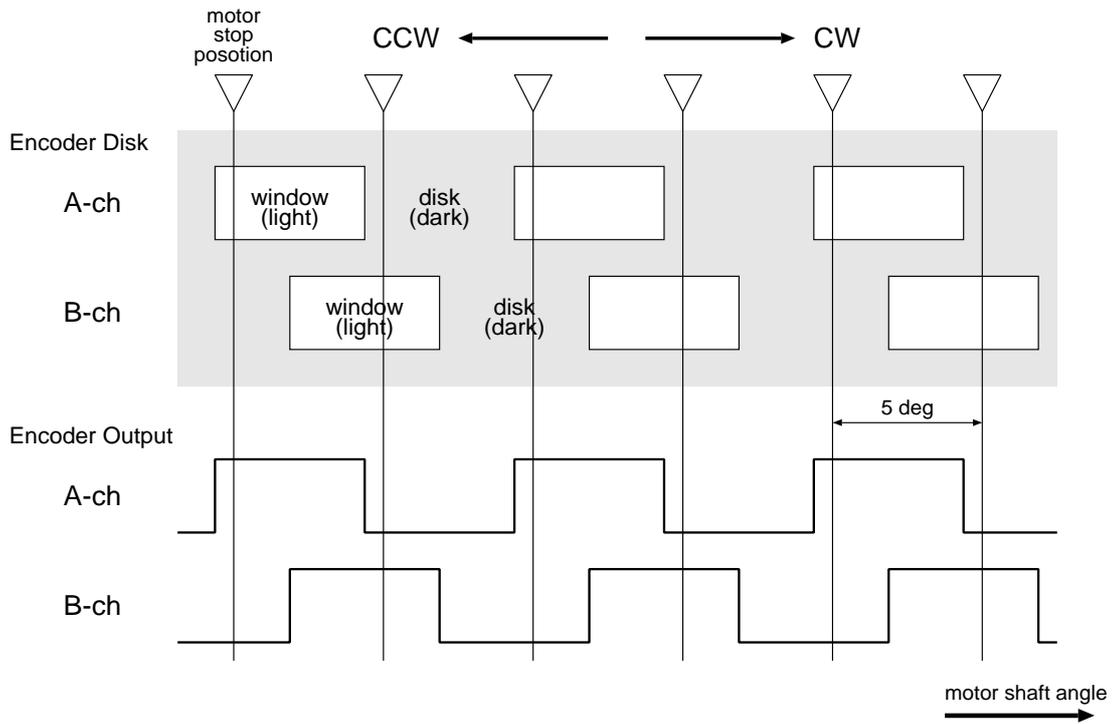


Figure 2.3: モーター回転角に対するオプティカルエンコーダ出力の変化

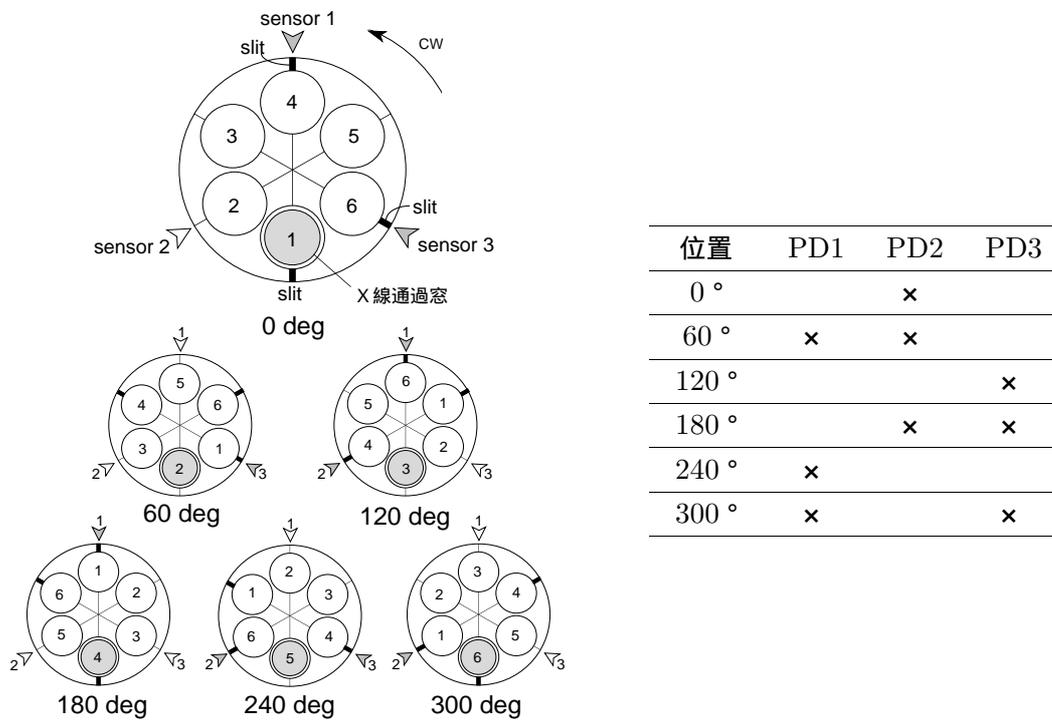


Figure 2.4: 位置センサとスリットの関係

2.6 フィルタエレメント

XRS 検出器の性能を最大限に生かし、より多くの科学的成果をあげることを目的として Table 2.3のようなフィルタ構成を採用する。エネルギーには依存せず幾何学的に透過率を制限する中性密度フィルタ (以下 ND フィルタ) とフォトン数の多い低エネルギー側をカットし高エネルギー側のラインを効率よく測定する Be フィルタである。ND フィルタは 25%、5%、1% が用意され開放を含めて 4 段階で X 線強度の制限する。XRS で観測する最も明るい X 線源は Crab Nebula で 1% フィルタを用いることによって 1 つの素子あたりおよそ 2 c/s まで強度を絞れることになる。これは Figure 1.7を参照すると High-Resolution モードで 50% の検出効率となる。1% より低い透過率のフィルタの製作は技術上困難であること、軌道上でモータに支障が生じた時、観測可能な天体が大幅に減少することなどを考慮し採用しないことにした。Be フィルタは厚さが 100 μm 、300 μm の 2 種類を採用する。透過率は Figure 2.5で表されるエネルギー依存性を持ち、100 μm フィルタは 1.7 keV で、300 μm は 2.4 keV でそれぞれ透過率 10% となる。前者は主に 2keV より高いエネルギーのラインを、後者は主に Fe K 輝線の測定をすることを目的としている。

	1	2	3	4	5	6
フィルタ	Open	ND 25%	ND5%	ND1%	Be 100 μm	Be 300 μm
材質	—	Mo	Mo	Mo	Be	Be
ホール直径	—	0.51 mm	0.23 mm	0.11 mm	—	—
重さ	0	3.11 g	3.78 g	3.82 g	0.374 g	0.980 g
厚さ	0	200 μm	200 μm	200 μm	100 μm	300 μm

Table 2.3: フィルタエレメント構成

2.6.1 Be フィルタ

低エネルギー側をカットするフィルタとして 100 μm 、300 μm 厚の Be 板 (比重 1.848g/cm³、純度 99.8% IF-1 タイプ) を用いる。製作は ASCA 衛星の撮像型ガス蛍光比例計数管 (GIS) で実績のある (株) ブラッシュウエルマンジャパンに依頼した。Be 金属を圧延する方式を取っているため製品による平均膜厚の違い、場所による膜厚むらがあることが予想される。これは検出効率の違いを生むことになるため、膜厚の平均値については、重量測定、透過率測定両方の結果を参照し、また膜厚むらについては透過率の Mapping 測定を行うことでその程度をあらかじめ評価する。

2.6.2 ND フィルタ

透過率がエネルギーに依存しない中性密度フィルタの製作は、硬 X 線に対しても十分な阻止能 (10keV で 2×10^{-7} まで減衰) を持つ厚さ 200 μm の Mo 板 (比重 10.22g/cm³) にピンホールを開けることによって行う。穴数は多いほど位置によるむらをなくすることができるが同じ透過率の設定で穴数を増やすには 1 つ 1 つのピンホール径を絞らなければならない。これは製作技術上の制限があるため、Ray-Tracing シミュレーションを行い穴数を 1802 個、穴間隔を 0.98 mm と決定した。ただし透過率は穴径を変えることで調節する (Figure 2.6を参照)。この場合 1% フィルタの穴径は 0.11 mm になり、これは Mo 板の厚さ 0.2 mm に比べ極めて小さくエッチングが困難なため (株) 東レプレシジョンに依頼し放電加工によって穴を開けることにした。以上のよ

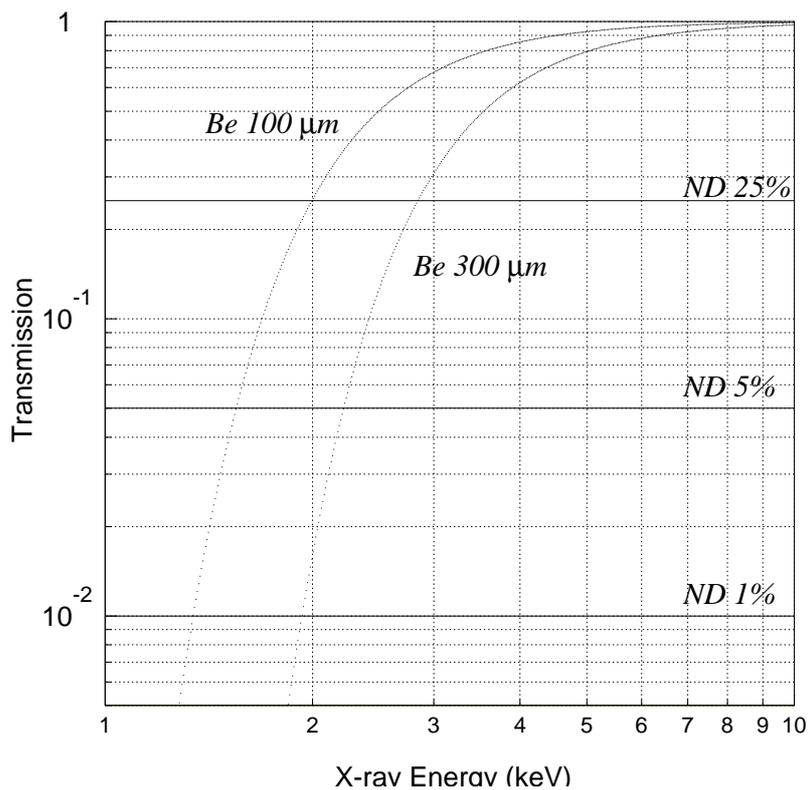


Figure 2.5: フィルタエレメント透過率設計値。横軸がX線のエネルギー (keV) で、縦軸は透過率 (100% を 1 とする) を表す。

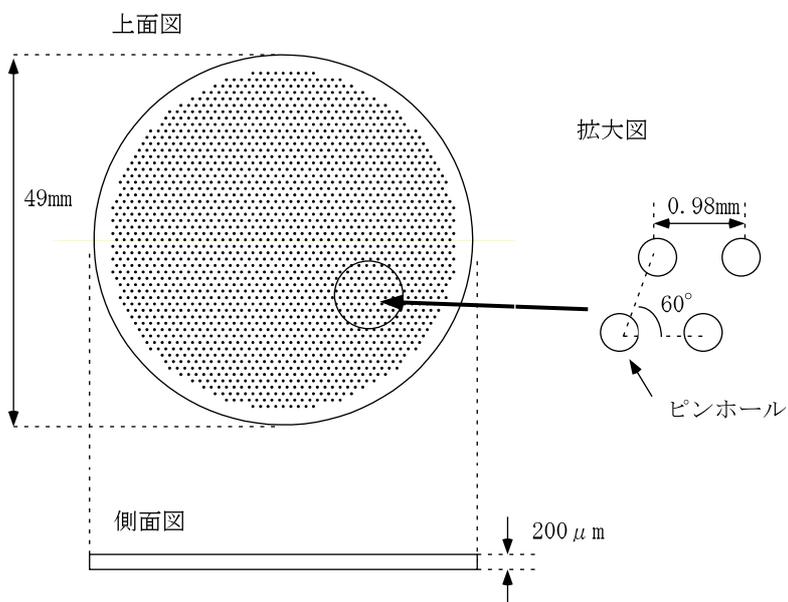


Figure 2.6: ND フィルタの全体図と穴の配置パターン

うにしてフィルタを製作するが放電加工時における穴形、穴間隔の設計値からのずれ、バリ、カエリなどによってエネルギー依存性、位置依存性が発生することが考えられ、X線による実測が必要となる。

2.7 フィルタエレメントの透過率測定

§2.6.1、§2.6.2のような理由から Be フィルタ、ND フィルタどちらのフィルタに対してもあらかじめその特性を評価する必要がある。精度の高い透過率測定を行うことで、平均透過率の算出、位置依存性、エネルギー依存性に対する評価を行う。そのために十分な強度で単色性の高いビームをあてること、フィルタ上の何点かにビームをあてられるような Mapping システムが必要となる。そこで 1998 年 9 月から 1999 年 1 月にかけて宇宙科学研究所 D 棟 4 階の X 線較正システムを用いてフライトモデルによる透過率測定実験を行った。3 章において測定に用いた実験装置の概要と、透過率測定のために行った予備実験について述べ、4 章、5 章において各々のフィルタに対する透過率測定の結果をまとめる。

Chapter 3

透過率測定システム

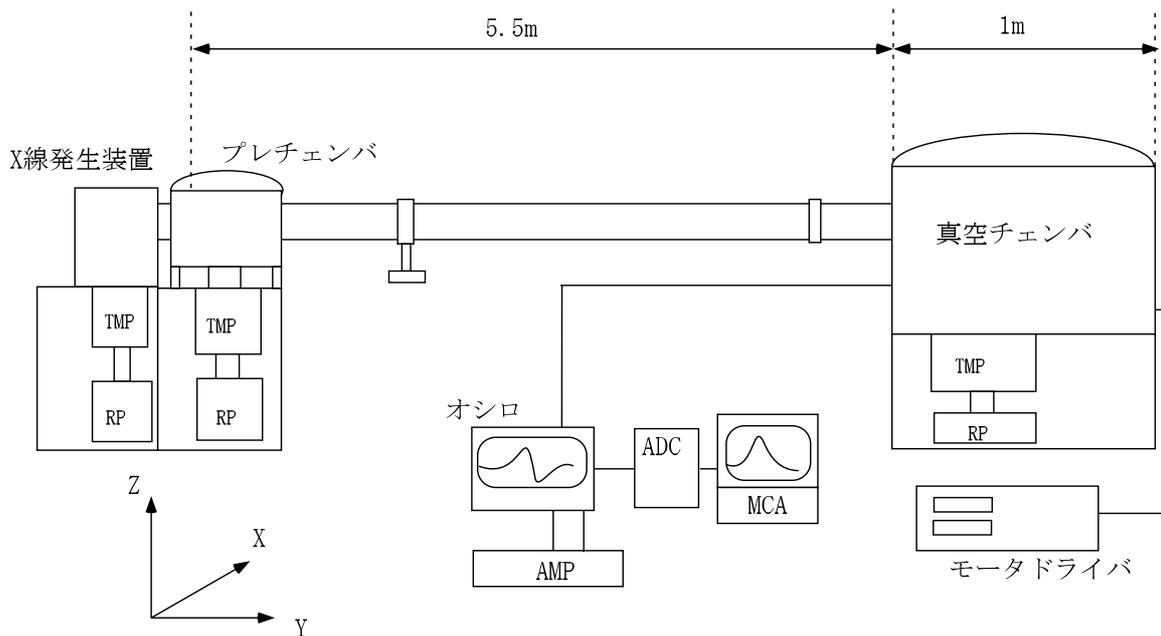
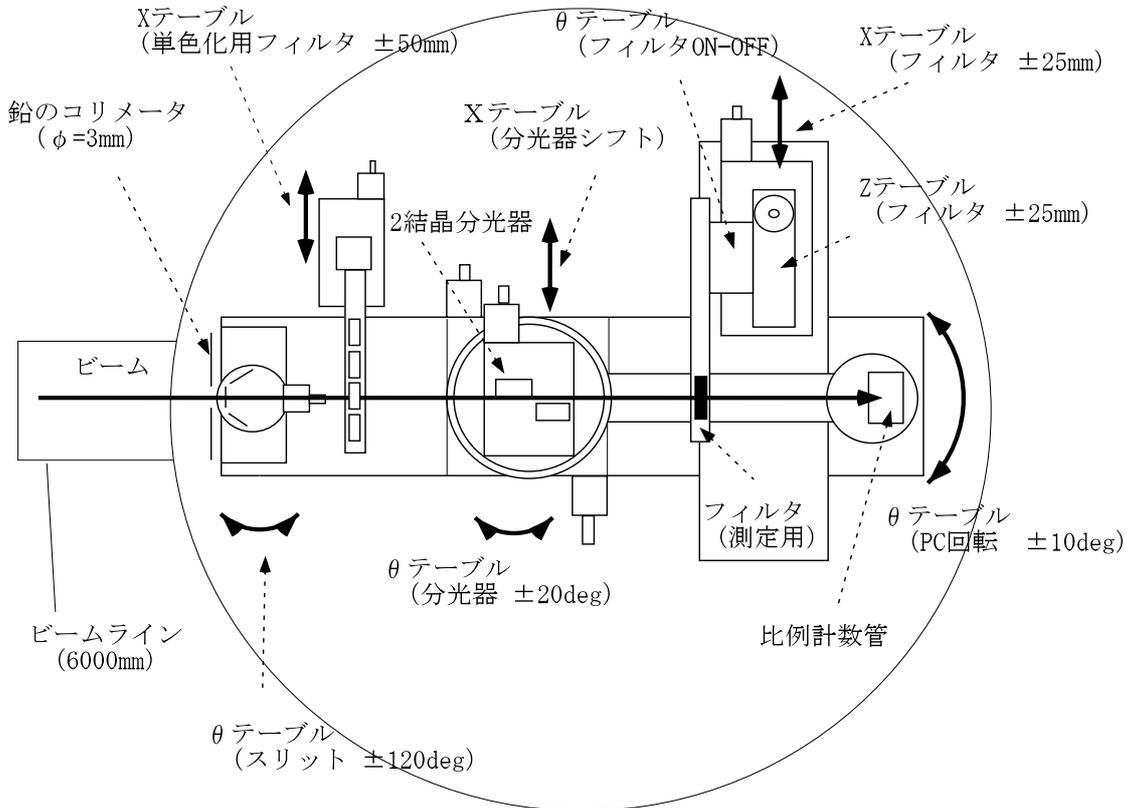


Figure 3.1: 測定システム全体図

3.1 実験装置概要

このシステムは宇宙科学研究所の X 線較正実験システムを用いて構成され、装置全体の配置は Figure 3.1 のようになっている。ここでビームの進行方向を Y 軸、鉛直上方を Z 軸、奥に向かって X 軸と定義する。最大出力 1200W の X 線発生装置から様々なエネルギーの X 線を取り出しプレチェンバ、そしてビームライン (およそ 6 m) を通過させた後、直径 1 m の真空チェンバ内に入射させる (ただし本実験においてプレチェンバは X 線通過経路としてのみ機能する)。ビームはチェンバ入口でコリメートされた後、2 結晶分光器で 2 回反射され測定するフィルタに入射する。X 線の検出には比例計数管を用い、フランジを介して取り出された信号はシェイピングアンプで増幅、整形 (全ての測定に対し Gain 1k、Shaping Time 0.5 μ sec とする) した後、ADC (Analog Digital Converter) でデジタル信号に変換され PC98 に入力される。データの取

得にはMCA(Multi Channel Analyzer)を用いる。またチェンバ内にはステッピングモータによる駆動を行えるテーブルを8系統設置しており、これをフランジを介してチェンバの外からドライバ(神津精機 PMC-2GR)で制御する。装置全体はX線の大気による吸収をさけるためロータリーポンプ(RP)、ターボ分子ポンプ(TMP)を用いて、真空度 $\sim 10^{-6}$ Torrに保っている。以下各セクションにおいて装置の詳細を述べることにする。



	稼働範囲	ステップ
入射口スリット用テーブル θ	$\pm 120^\circ$	7.2''
単色化フィルタ用テーブルX	± 25 mm	1 μ m
分光器用 θ テーブル	$\pm 20^\circ$	0.36''
分光器用Xテーブル	± 25 mm	1 μ m
フィルタスキャン用Xテーブル	± 25 mm	1 μ m
フィルタスキャン用Zテーブル	± 25 mm	1 μ m
比例計数管用 θ テーブル	$\pm 10^\circ$	0.72''

Figure 3.2: 各装置の配置とステッピングモータによるテーブルの稼働範囲

特性 X 線	α	β
Mo K	17.470	19.599
Cu K	8.040	8.903
Fe K	6.400	7.057
Mn K	5.895	6.491
Ti K	4.509	4.932
Mo L	2.293	2.429
Al K	1.487	1.548
Mg K	1.254	1.290
Cu L	0.928	0.948
Fe L	0.704	0.717
Mn L	0.636	0.647

Table 3.1: 七色ターゲットにより取り出せるライン。単位は keV で表す。

3.1.1 X 線発生装置

理学電機ロータフレックス RU-200BE(最大出力 12kW 60kV×200mA) を用いる。フィラメントからでた熱電子を高電圧で加速し、回転するターゲットにあてることにより制動放射の連続成分とターゲットの物質の蛍光 X 線を取り出す方式をとっている。電子の加速電圧は 20 ~ 60 kV の範囲を 1 kV ステップで調節することができ、測定に応じて X 線のスペクトルを変えることが可能である。X 線強度はフィラメントに流す電流を 10 ~ 200mA(1 mA ステップ) の範囲で変えることにより行う。ターゲットは直径 20 cm 深さ 5 cm の円筒上のもので、熱が一点に集中するのを防ぐため高速で回転させ、水冷して使用する。またターゲットは交換が可能であり、実験目的に応じて選択することができる。今回の透過率測定で用いたのは以下の 2 つターゲットである。

- Al ターゲット

Mo の土台に元々は Al と Cu が半分ずつ蒸着されており、Al K、Cu K、Cu L が取り出せていた。しかしその後 Cu の部分にも Al が蒸着されたため、Cu の L は表面の Al で吸収されてしまい十分な強度が得られなくなっている。

- 七色ターゲット

Mo の土台に Al、Ti、Mg、Mn、Fe、Cu の 6 種類の金属を蒸着したもので、上田修論 [2](1993) によると Table 3.1 が出せるとされている。しかし以前使用してからしばらく経ってしまっているため、金属が酸化してしまっていたり、蒸着していたものがはがれてしまっている可能性があるため本実験に入るまえに必要なとされる輝線が十分な強度で出ているかどうかを確認する必要がある。

3.1.2 入射口スリット θ テーブル

0.05、0.45、0.80 mm 幅のスリットを 3 種類用意しこれを小型の θ テーブルに 30° おきに設置してドライバでテーブルを回転をさせ必要なスリットを選択する。ここでコリメートされた幅が

ビームプロファイルの横幅を決めることになる。またビームプロファイルの高さはこのスリットの1段前に設置された直径3 mmの穴の開いた鉛コリメータによって決まっている。

3.1.3 単色化用フィルタ X テーブル

2結晶分光器における分光に加えて、更に単色性を高めるために入射口スリットと分光器の間のX線光路上にフィルタを設置し必要とされる輝線のみを取り出せるようにする。透過率測定には、いくつかの特性X線を用いるため各々に対して真空を破らずに最適なフィルタを選択できるように治具を作成しこれをXテーブルに取り付ける。そしてドライバを用いてこのテーブルを移動することで最大4種類のフィルタを選択できるようにしている。

3.1.4 2結晶分光器

ASCA衛星に搭載された検出器の較正実験時にも用いられた2結晶分光器を使用する。ブラッグ反射の式は

$$2d\sin\theta = m\lambda \quad (3.1)$$

となりビームの入射角を調節することによって、取り出すX線のエネルギーを選択する。反射面にはWとSiを組み合わせた多層膜をもちい結晶間隔 $2d=56\text{\AA}$ 、積層数 $N=100$ で波長分解能 $\lambda/\Delta\lambda=50$ (FWHM)を備えている。Figure 3.3にその上面図を示す。この分光器は単色性の高いビームが得られるのはさることながら、どの角度で入射させるにしても分光前後でビームの進行方向が水平方向にシフトするのみにとどまるため、測定システム全体をコンパクトにできるという利点がある。2回反射させることによりX線の強度の低下はさげられないが、本実験で用いるX線発生装置は1200Wと十分な出力をもっていること、X線ビームは1次ターゲットから直接取り出していることなどから分光後も十分な強度が得られるので支障はない。この分光器は真空チェンバ中央にある $X-\theta$ テーブル上に固定され、ビームの入射角は θ テーブルで、多層膜への入射位置はXテーブルで調節する。

3.1.5 3軸テーブル

3軸テーブルはフィルタのスキャンを行うためのXZテーブル(両軸とも稼働範囲 $\pm 25\text{ mm}$ 、 $1\text{ }\mu\text{m}$ ステップで調節可能)にフィルタのON/OFFを行うための θ テーブルを組み合わせたものである。 θ テーブルの先にはフィルタを設置するためのフィルタホルダが設置され、このホルダが θ テーブルによって遮断器のように回転することになる。この3軸テーブルはビームの高さに対して測定用フィルタの中心がくるように自作した台の上に置かれる。

3.1.6 比例計数管

X線ビームの検出にはエネルギー分解能20~40%の比例計数管を用いる。入射窓にポリプロピレン $1\text{ }\mu\text{m}$ 膜を用いているため、低エネルギー側のX線の検出が可能である(1.487 keVで95%の透過率)。ただしポリプロピレン膜にはガス洩れが存在するために($\text{Ar} + \text{CH}_4$)ガスをフローさせる。入射窓の大きさはおよそ $4 \times 20\text{ mm}$ あり本実験で用いたビームの大きさ($0.45 \times 3\text{ mm}$ 程度)を考慮すれば十分な大きさである。この比例計数管は真空チェンバ内で半径45 cmのアームの先端に設置され、ビームの到達点の変化にアームを θ 回転させることで対応する($0.72''$ ス

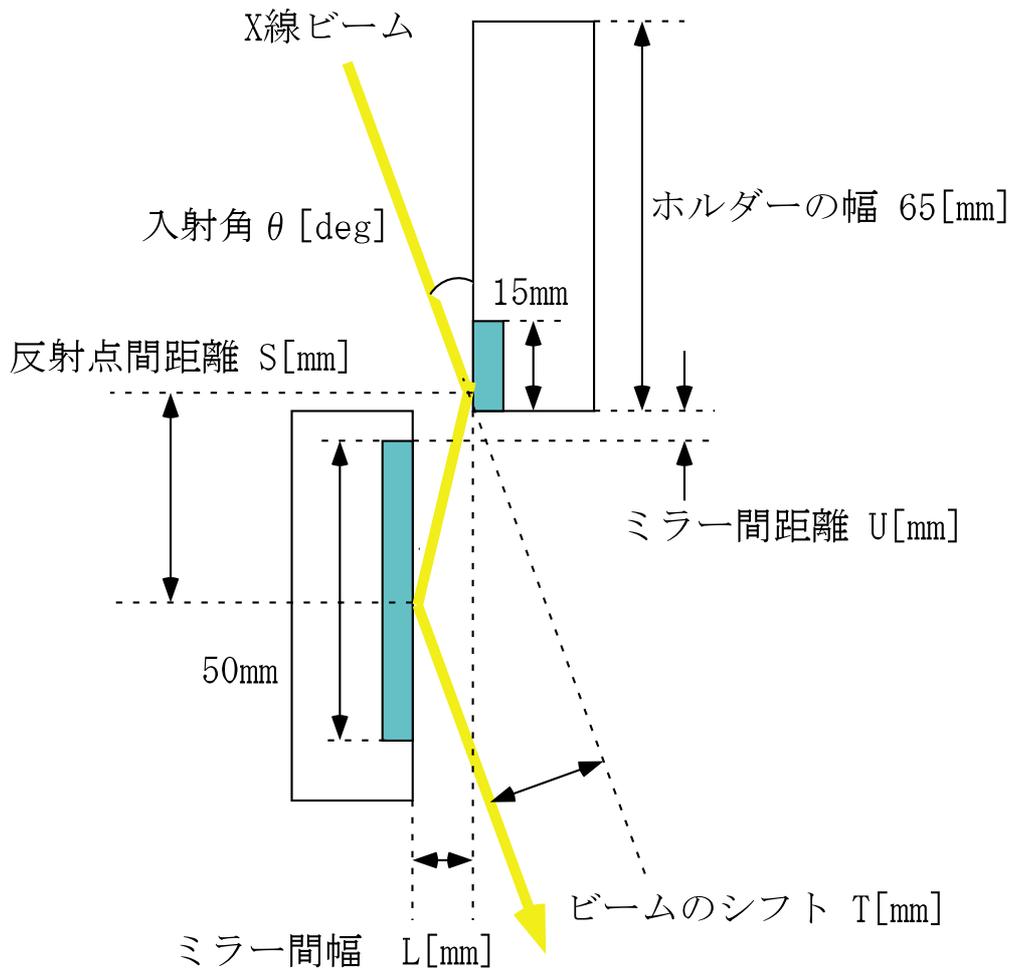


Figure 3.3: 結晶分光器上面図

トップで調節が可能)。ただし1回反射による結晶分光器とは異なり、どのエネルギー(分光器への入射角)を選択しても反射光の到達点が最大で10 mm程度X軸方向にシフトするにとどまるためアーム回転角 $\pm 2^\circ$ 程度で本実験で用いたX線を全て検出することができる。また十分な強度のビームを効率良く取り出すためにビームに対する位置の微調整が必要であり、実際にX線を発生させて最適な設定をつかまえる。また透過率測定におけるこの検出器の設定はアノード電圧は1900V、フローさせるガスの圧力 1.0 kg/cm^3 とする。

3.2 透過率への幾何学影響に対する評価

フィルタの透過率測定を高い精度で行うためには、十分な平行度を持った X 線ビームを可能な限りフィルタに対して垂直に入射させることが重要となる。特に ND フィルタはビームの入射角度が大きくなるとコリメーション効果を起こし透過率が正しい値よりも低く見積もられる。そこで測定システム全体において X 線ビームの平行度、ビームに対するフィルタの面外精度を見積もり透過率への影響を評価する。

3.2.1 X 線ビームの平行度

フィルタに入射するビームの平行度を定めるものは、ビームラインの長さ、2 結晶分光にとまなうビームの広がりである。

- ビームライン
ビームラインの長さは X 線発生装置、真空チェンバ入口のスリット間で 6 m あり、X 線ビームは平行度 0.02° 以下で 2 結晶分光器に入射する。
- 分光によるビームの広がり
2 結晶分光に伴うビームの広がり、2 枚の多層膜ミラーの平行度によって決まることになる。2 枚のミラーの平行度は上田修論 [2](1993) の方式によってレーザー光を用いて確認した。レーザー光源から 6 m ぐらい離れた位置に鏡をレーザー光にたいして垂直になるようにおき、反射スポットがもとの発射点に戻るようにする。次に鏡の直前に実際の実験を想定した角度をつけて分光器をおき 2 回反射させる。2 つミラーの平行度がでているならば反射スポットは発射点に戻るようになる。この方法によって求められる精度はおよそ 0.02° である。ただしこのようにして十分な平行度を取り出してもミラー表面に凹凸がある場合、分光後のビームは広がりを持つことになる。したがって各輝線を取り出す際にコリメータを用いてビームの大きさを確認することで 0.05° 以下と見積もった。

3.2.2 フィルタの面外精度

十分な平行度のビームが得られたならば、そのビームを可能な限りフィルタに対して垂直にあてることが必要になる。そのためにはフィルタホルダへのフィルタの取り付け誤差、また 3 軸テーブルの設置誤差を十分な程度まで抑える必要がある。

- フィルタの設置
フィルタホルダへのフィルタの固定は Figure 3.4 のように行った。ホルダには直径 50 mm、深さ 1 mm の溝が開けてありここにフィルタを設置する。そのまま設置するとフィルタの取り付け誤差として 1.2° が見込まれることになるため、厚さ 0.5 mm のゴムリングで両側から挟み込むこととした。ただしこのゴムからの汚れの付着を避けるためにゴムの表面はカプトンテープで覆っている。以上によりフィルタホルダへのフィルタの取り付け精度は面内誤差 $(50-49)/2 = \pm 0.5$ mm、面外精度 $0.1/49 = 0.1^\circ$ となる。またここで位置依存性を評価する測定を行うことを考慮し、図のように基準となるポイントに油性マジックでマーキングをした。マーキングのある方をフィルタの表側と定義し透過率測定の際にはどのフィルタに対しても表側からビームをあてることとした。

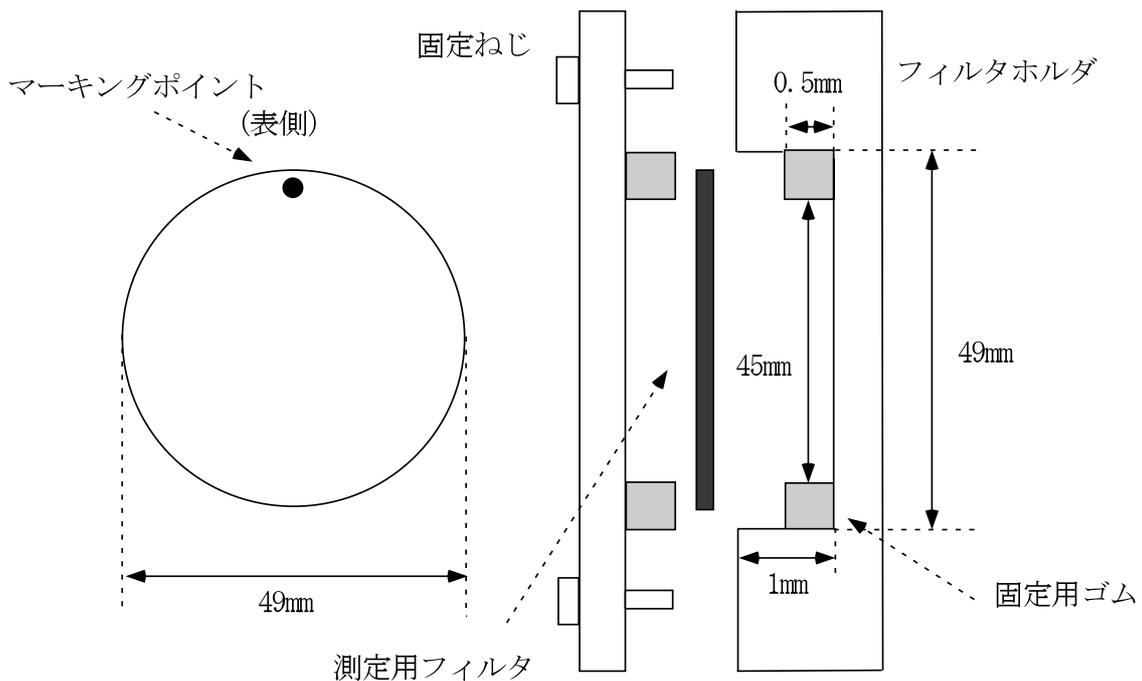


Figure 3.4: フィルタ設置方法

- 3軸テーブルの設置

3軸テーブルの設置は、Figure 3.5のようにして行う。まずビーム通過経路を捕まえるためフィルタホルダに、直径0.5mmの穴の開いた真鍮コリメータ(厚さ15mm)をとりつけ実際にX線を発生させる。そしてスリットでコリメートされたダイレクトビームに対して3軸テーブルでXZ方向にスキャンし、X線強度の変化を測定することでビームプロファイルの中心を捕まえる。これによってスリット、コリメータ間のX線通過経路がわかるため一度リークスリットとコリメータの中心を図のようにレーザー光で結ぶことでX線ビームにみたてる。そしてフィルタホルダに鏡を取り付け、レーザー光の反射スポットが発射点にくるように調節し、この3軸テーブルのX線ビームに対する垂直をとる。ひねり方向はテーブル自体を台の上で回転させることによって調節し、あおり方向はテーブルの底辺の板に4つのねじを貫通させこのねじをまわすことによって水平をだすようにする。以上のようにして3軸テーブルの垂直だしを行い、X線ビームにたいして 0.1° 以下とした。

3.2.3 まとめ

以上によりフィルタに入射するビームの平行度は $< 0.07^\circ$ ビームに対するフィルタの面外精度は $< 0.2^\circ$ となる。よって測定システム全体におけるビームのフィルタへの入射角度として $< 0.27^\circ$ が見込まれることになる。これは最も影響のあるND1%フィルタの透過率測定を行った場合、最大でも透過率の1%減が見込まれるにとどまる。

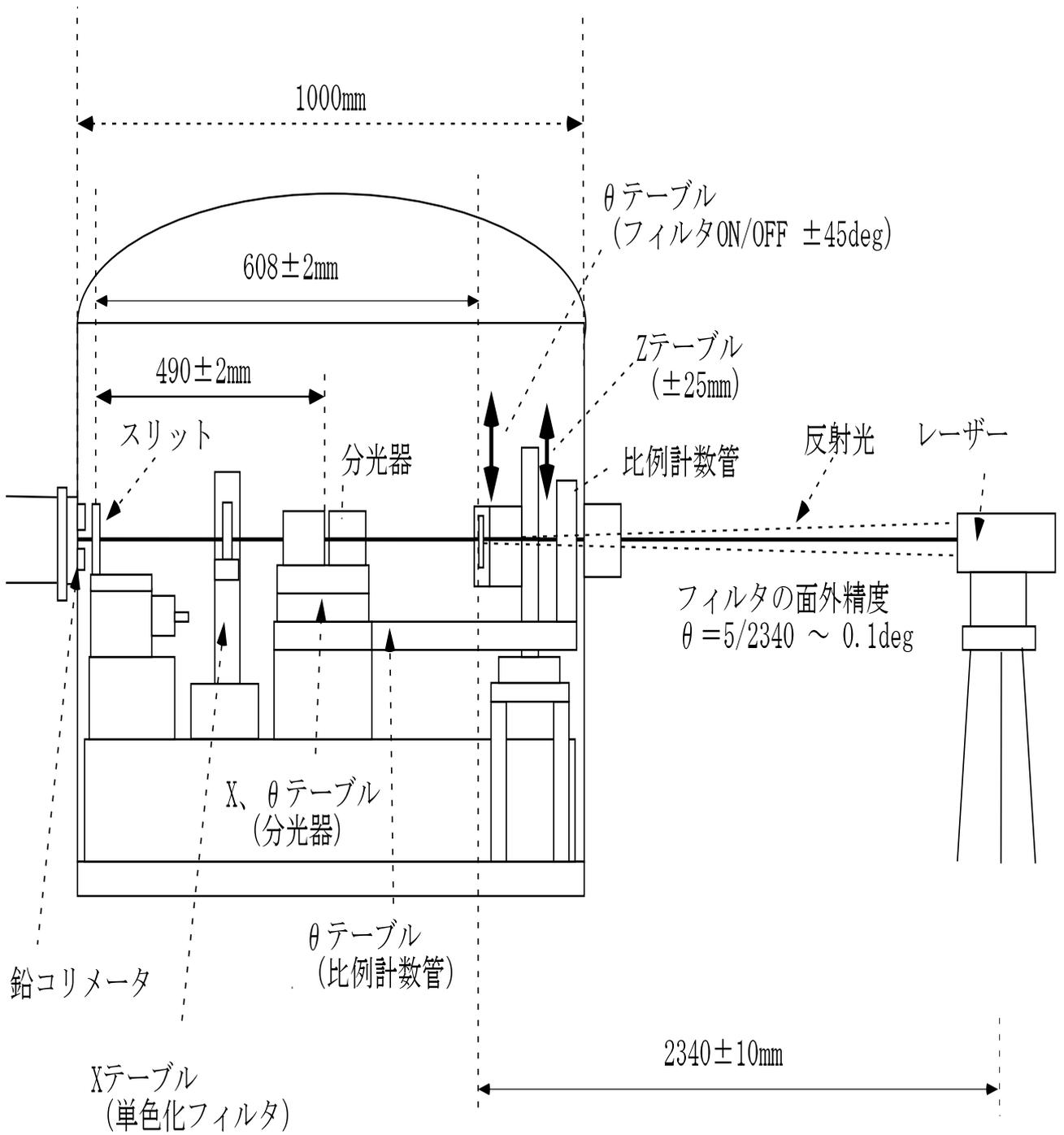


Figure 3.5: 測定システム側面図。レーザー光を用いて X 線ビームに対する 3 軸テーブルの面外精度を調節する。

3.3 X線の分光

3.3.1 目的

透過率測定に用いる X 線は Al ターゲット、七色ターゲットそれぞれから 2 結晶分光器をもちいて取り出すことにする。透過率測定を高い精度で行い、位置依存性、エネルギー依存性などを評価するためにはバックグラウンドが低く単色性の高いビームを十分な強度で取り出すことが重要である。そこで以下に強度、バックグラウンド、単色性についてまとめることにする。

- X 線強度

統計誤差を抑えるためにはカウントをためる必要がある。もし十分な強度が得られなければ測定時間を長くしなければならない。しかしあまり測定時間を長くすることは効率が悪いだけでなく X 線発生装置の時間変動などの効果を考慮しなければならず測定精度の面からもあまり望ましくない。したがって 2 結晶分光において取り出す X 線にはある程度の強度が必要になる。そこで実際にどの程度の強度の X 線を取り出せば適当な積分時間で透過率測定に必要な統計精度が得られるかを見積もることにする。ここで取り出す X 線の強度を I c/s、測定時間を t sec とし、透過率 T (100% を 1 とする) のフィルタに対する測定を考える。この時フィルタ ON 時におけるカウントレートとその統計誤差は、比例計数管のパルスハイト分布がガウス分布に従うとするならば、 $IT \pm \sqrt{IT/t}$ c/s となる。カウントレートの 1% 以下の統計誤差で測定を行うことを考えると以下の様な条件が課せられることになる。

$$\sqrt{\frac{1}{ITt}} < 0.01 \quad (3.2)$$

ここで透過率 1% フィルタの測定を考えるならばこの条件は $It > 10^6$ となる。したがって測定時間 1000 sec を仮定するならば、必要な強度は 1000 c/s となる。

- バックグラウンド

フィルタ ON 時のカウントを a c/s、フィルタ OFF 時のカウントを b c/s としバックグラウンドを D c/s とするならば測定される透過率 T は

$$T = \frac{a + D}{b + D} > \frac{a}{b} \quad (3.3)$$

となり本来の値より T が高くなる。この効果は測定に用いるフィルタの透過率が低いほど効いてくることになるため、X 線の分光においては、バックグラウンドレベルを 1% 以下に抑え、それ以下の成分についてはスペクトル解析時に除去することにする。

- 単色性

フィルタの透過率がエネルギーに依存する場合、単色性の低い輝線をもちいて測定を行うと正しい透過率を示さなくなる。測定に用いた輝線の透過率を T_α 、混入した輝線の透過率を T_β 、混入の割合を x ($0 < x < 1$) とすると算出される透過率は、 $T_\alpha(1-x) + xT_\beta$ となる。これは完全に単色である場合の透過率 T_α に対して $(T_\beta - T_\alpha)100x/T_\alpha\%$ のずれをうむことになる。この値を Be100 μ m フィルタの測定に Al K α を用いた時 K β が混入した場合に対して求めると $47.6x$ となりこれを 1% 以下に抑えるためには x が 0.021 以下となる必要がある。

以上の点を考慮し透過率測定に用いる X 線の分光を行う。Al ターゲットに対する 2 結晶分光は § 3.3.2 に、七色ターゲットに対しては § 3.3.3 にまとめた。

3.3.2 Al ターゲットによる予備実験

Cu の上に Al を蒸着したターゲットであるため Al $K\alpha$ 1.487 keV、Cu $K\alpha$ 8.040 keV、Cu $L\alpha$ 0.928 keV が取り出せるはずである。ここでは Be フィルタの膜厚測定は低エネルギーの特性 X 線を用いた方が精度、測定効率の点において有利なこと、高エネルギー側の特性 X 線の分光はエネルギーが高いほど入射角度を小さくしなければならず分光が難しいことなどを考慮し、Al $K\alpha$ 1.487 keV を取り出すことを考える。

- 分光器の設定

反射に用いる多層膜ミラーは 1 枚目が 15×15 mm、2 枚目が 15×50 mm とそれほど大きくない (Figure 3.3 参照)。したがって取り出す輝線が確実に 2 回反射するようにあらかじめ X 線通過経路を見積もり、それに合わせて分光器の設定を行うことが必要となる。そこでミラー間幅 L をパラメータとしてエネルギー (入射角 θ) に対する 2 枚のミラーでの反射点間の距離 $S=L/\tan \theta$ を見積もると Table 3.2 のようになる。Al $K\alpha$ に対しては $L=5.5$ mm で $S=36.5$ mm となりミラー間距離 $U=7.5$ mm にすることで 2 回反射させることができる。またこの設定においては Cu $L\alpha$ の分光も可能である。

	E [keV]	λ [Å]	θ [deg]	S [mm]	T [mm]
Cu $L\alpha$	0.928	13.36	13.80	4.072L	1.942L
Al $K\alpha$	1.487	8.338	8.563	6.641L	1.978L
Cu $K\alpha$	8.404	1.542	1.578	36.30L	1.999L

Table 3.2: 分光器のセットアップ (Al ターゲット)。ただし $L=5.5$ mm の設定とする。

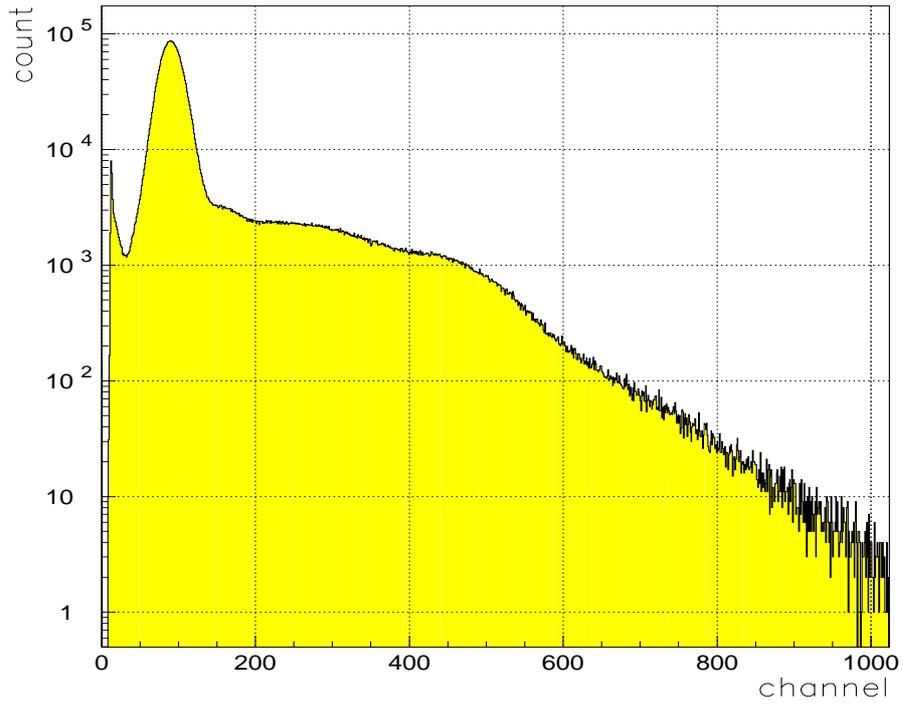
- Al $K\alpha$ に対するの設定

実際に X 線を出しながら Al $K\alpha$ 1.487 keV に対する各テーブルの最適設定を見つける。まず Al $K\alpha$ 1.487 keV に対する分光器の回転角 θ に分光器をあわせる。そしてその角度に対応するビームのシフト T を見積りそれにあわせて比例計数管の位置を調節する。次にフィルタホルダに取り付けられた真鍮コリメータを用いてビーム中心にフィルタの中心がくるように 3 軸テーブルを調節する。このようにしてそれぞれのテーブルの微調整を繰り返すことによって Al $K\alpha$ に対して最適な設定を行った。Figure 3.6 に分光器を OFF にした状態でのダイレクトビームのスペクトルと Al $K\alpha$ 1.487 keV を分光した時に得られるスペクトルを示す。この図をみると 2 結晶分光によって特に高エネルギー側の連続成分をそぎ落とすことができおり強度は 7400c/s、バックグラウンドレベルは 1% 以下が得られていることがわかる。

- 分光器回転による X 線強度の変化

この Al $K\alpha$ に対する設定を基準として、そこから分光器のみを回転させ X 線強度の変化をみる。ただし測定するエネルギー範囲は現在の分光器の設定 (ミラー間幅 $L=5.5$ mm、ミラー間距離 $U=7.5$ mm) において取り出せると予想される 0.8~2 keV とした。その結果 Figure 3.7 のように Al $K\beta$ 、Cu $L\alpha$ のエネルギーに対応するところでアクセスを確認する

(DirectBeam)



(Al K line)

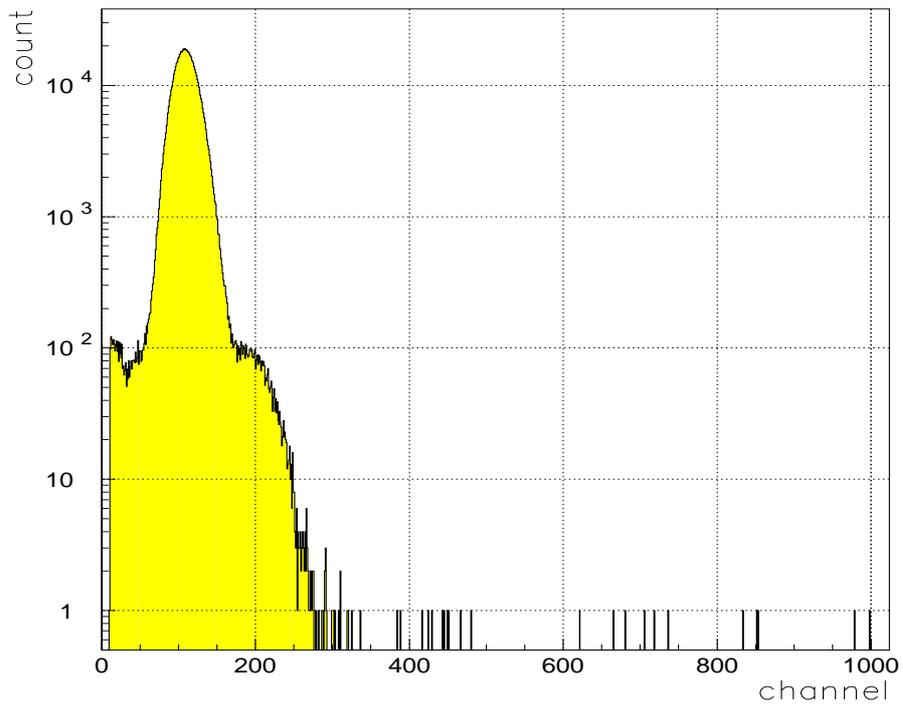


Figure 3.6: Al ターゲットのスペクトル. 上段が分光前のダイレクトビームのスペクトル、下段が2結晶分光によるAl Kのスペクトルを表す。

ことができ、またこの分光器の波長分解能は $\lambda/\Delta\lambda = 75(\text{FWHM})$ と見積もることができる。この図をみると Al $K\alpha$ 以外のエネルギー（分光器の回転角）においてある程度の強度が得られていることが確認できたため、Cu $L\alpha$ 0.928 keV、Al $K\beta$ 1.548 keV またその他のエネルギーでの連続成分を透過率測定に用いることを考えて、各々に対して Al $K\alpha$ の時と同様に各装置の設定を行った。

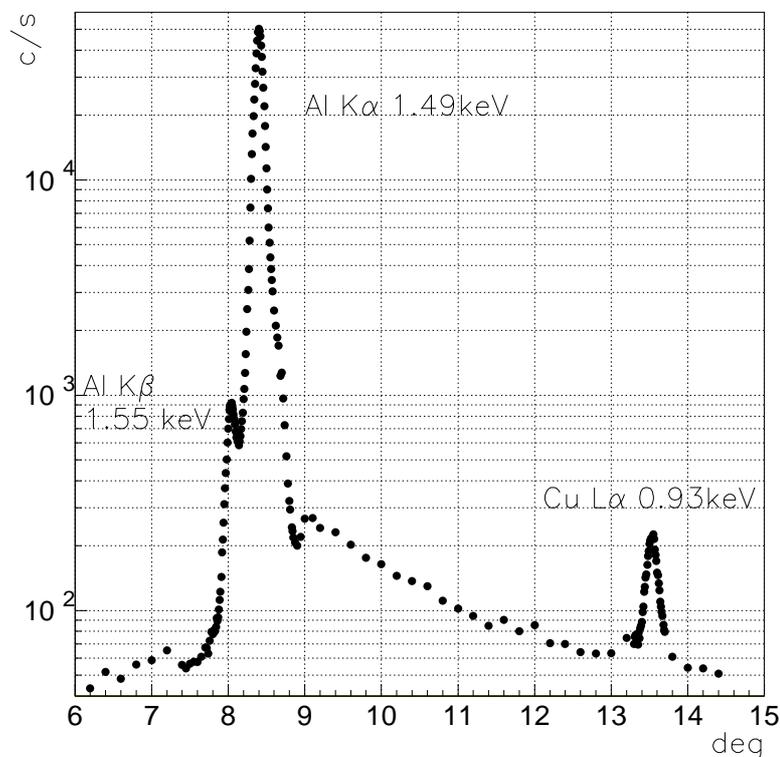


Figure 3.7: 2結晶分光器による Al ターゲットの分光。横軸は分光器回転角度（ビームの入射角度）、縦軸は X 線強度 (c/s) を表す。

- アルミ箔による透過率測定

0.8~2keV のエネルギー範囲において透過率がエネルギー依存性を示すアルミ箔 15 μm に対して、2結晶分光において取り出した Al $K\alpha$ とそれ以外のエネルギーの輝線、連続成分を実際にあて透過率の算出し測定にもちいる X 線の単色性を確かめることにする。その結果 Al $K\alpha$ 以外のエネルギーではアルミ箔 15 μm に対して予想される透過率を示していないことが分かった。各エネルギーに対する設定においてスペクトルを取得しフィッティングを行って調べた結果、Cu $L\alpha$ 、Al $K\beta$ については各々の成分が取り出せてはいるものの、Al $K\alpha$ があまりにも強いため 2結晶分光において完全にそぎ落とせずコンタミとして混ざってしまっていることが分かった。またその他の連続成分に関してはその分光器回転角に対応するエネルギー成分はほとんど取り出せておらず Al $K\alpha$ の成分が支配的であることが確認できた。よって透過率測定には Al $K\alpha$ のみを用いることにした。

- 2次元プロファイル

ビームプロファイルはZ方向は鉛コリメータの径 3mm で決まり、X方向はその時選択しているスリットの幅 (0.80、0.45、0.05 mm) によって決まる。ただし実際には2結晶分光の際にミラー表面の凹凸によってビームが広がることなども考慮しなければならず、X線ビーム分光後のプロファイルを確認する必要がある。そこでスリット幅 0.45 mm の Al $K\alpha$ に対する設定において、真鍮コリメータを3軸テーブルを用いてXZ方向にスキャンし各点においてX線強度をモニターした。その結果 Figure 3.8のようにビームの大きさは横 0.50 mm×縦 3 mm となり(ただしビームプロファイルはX線強度が半減するところまでとする)、2結晶分光による有意なビームの広がり確認されなかった。

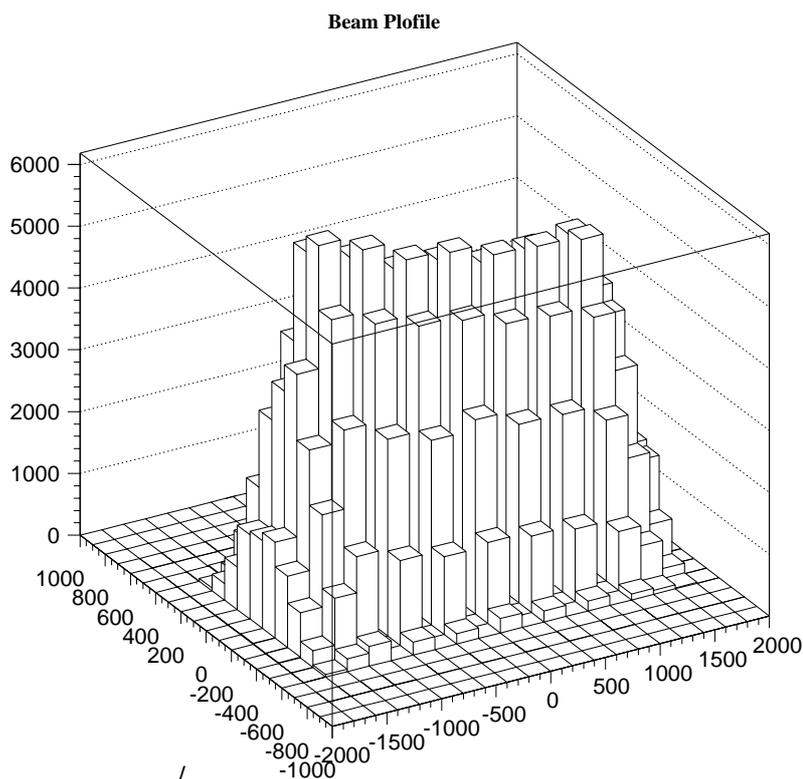


Figure 3.8: ビームプロファイル

- まとめ

Al ターゲットにおける2結晶分光において測定に用いる輝線として Al $K\alpha$ 1.487 keV を取り出すことができた。単色性は $\lambda/\Delta\lambda = 75(\text{FWHM})$ 、バックグラウンドレベルは1%以下となる。強度はX線発生装置出力 20 kV×100 mA、スリット 0.45 mm で 7400c/s を得た(この値は真鍮コリメータを用いた時のものであるため、必要であれば更に強い強度の輝線を取り出すことができる)。しかし強度が強いと比例計数管で取得するスペクトルにパイルアップがおこるため、スリットを最も細い 0.05 mm にすることで強度を落とした。フィルタ OFF 時でおおよそ 750 c/s である。

3.3.3 七色ターゲットによる予備実験

このターゲットにおいては Table 3.1にある様々なエネルギーの輝線が取り出せるが、Al ターゲットにおいて 1.487 keV を取り出すことができたため、今度はそれよりも少しエネルギーの高い Mo $L\alpha$ 2.293 keV、Ti $K\alpha$ 4.509 keV、Mn $K\alpha$ 5.895 keV、Fe $K\alpha$ 6.400 keV を取り出すことを目的とし各装置の設定を行った。

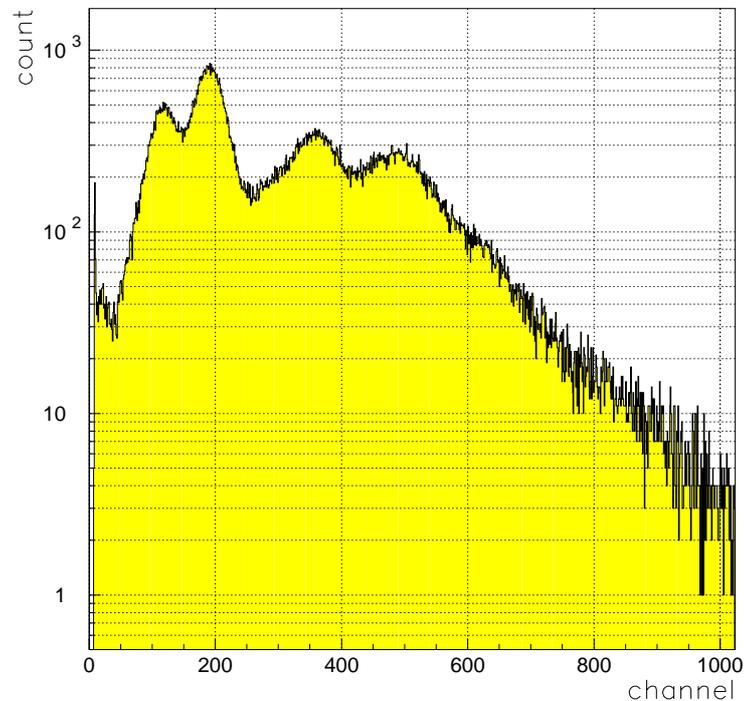


Figure 3.9: 七色ターゲットのダイレクトビームスペクトル。

- 分光器の設定

Al $K\alpha$ 1.487 keV のみを取り出すことを目的としていた Al ターゲットの時とは異なり、4 つの輝線全てが 2 回反射するような設定を考える必要がある。そこで Table 3.3のように 4 つの輝線に対して反射点間の距離 S を見積もり、全ての輝線を 2 回反射させる設定として、ミラー間幅 $L=1.5$ mm、ミラー間距離 $U=1$ mm とした。

	$E[\text{keV}]$	$\lambda[\text{\AA}]$	$\theta[\text{deg}]$	$S[\text{mm}]$	$T[\text{mm}]$
Mo $L\alpha$	2.293	5.407	5.541	10.31L	1.991L
Ti $K\alpha$	4.509	2.750	2.815	20.34L	1.998L
Mn $K\alpha$	5.895	2.103	2.152	26.61L	1.999L
Fe $K\alpha$	6.400	1.937	1.982	28.90L	1.999L

Table 3.3: 分光器のセットアップ (七色ターゲット)。ただし $L=1.5$ mm 設定とする。

- 分光器用 X テーブルの調整

Al ターゲットの時と比べて高いエネルギーの輝線を取り出すことになる。ブラッグの式に従ってエネルギーが高いほどビームの入射角度を小さくしなければならない (Table 3.3 参照)。そして 1 回目の反射に用いているミラーの大きさは 15×15 mm でこれに $\sin\theta$ をかけたものがビームに対する受光面積の X 方向成分となる。この値は Fe $K\alpha$ の分光を考えた時ビームの入射角 2° で 0.5 mm となり、スリット幅 0.45 mm で決まるビーム幅を考えるとそれほど余裕がある訳ではない。その点は Figure 3.10 のように分光器用の X テーブルをもちいて 1 枚目のミラーにビームが入射する位置を徐々に変え、各点で X 線強度をモニターすることでビームが一枚目のミラーに正しくあたる位置に調整する。左図では中央のフラットな部分、右図では中央のビームがそれに対応することになる。

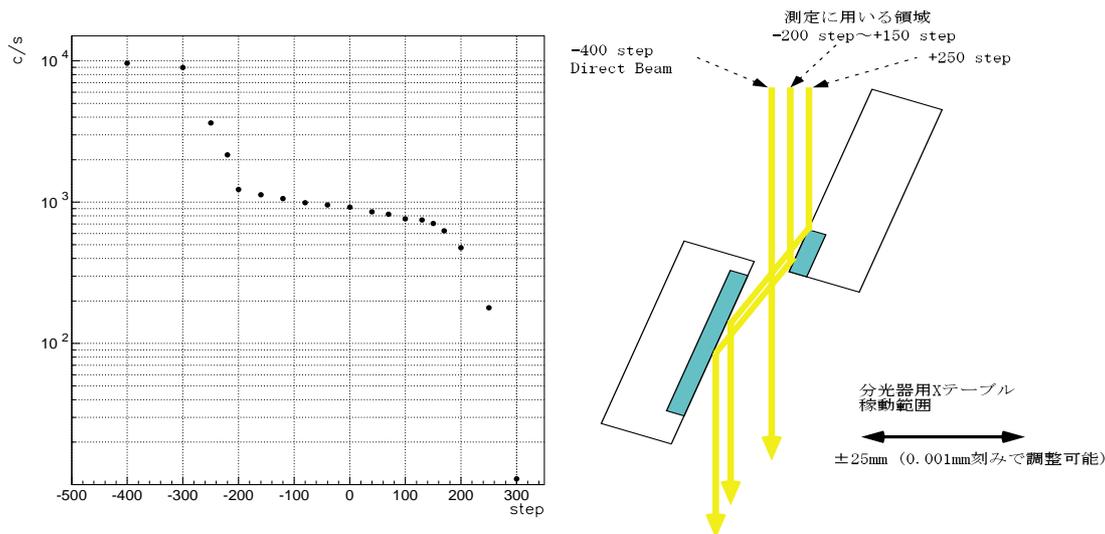


Figure 3.10: 分光器への入射点による強度変化。左図は横軸ステップドライバに入力した step 数 (ただし 100step が 0.1 mm に対応)、縦軸は X 線強度を表す。右図は 2 結晶分光器の上面図となる。

- 各輝線に対する設定

分光器 X テーブルの調整を行う以外は基本的に Al $K\alpha$ を取り出した時と同様にして各輝線に対する分光器回転角、比例計数管位置、そして 3 軸テーブルの調整を行った。Figure 3.11 に各輝線を取り出すために行った分光器回転に対する X 線強度の変化を測定した結果を示す。Mo L 輝線については $L\alpha$ 、 $L\beta$ を分光することができ波長分解能 $\lambda/\Delta\lambda$ (FWHM) はおよそ 80 である。得られた強度は Table 3.4 のように Mo $L\alpha$ 6800c/s、Ti $K\alpha$ 5300c/s、Mn $K\alpha$ 1300c/s、Fe $K\alpha$ 1400c/s となる。またこの各輝線に対する設定において比例計数管で取得したスペクトルを Figure 3.12、3.13、3.14、3.15 の上段に示す。このスペクトルを見るとどの輝線においても単色性が悪く、2 結晶分光器による分光のみでは不十分であることがわかる。そこで X 線ビームを一度フィルタに通すことによって単色性を高めることにする。それぞれの輝線に対して用意したフィルタを Table 3.4 に示す。基本的にはどのフィルタも取り出す輝線に対して原子番号が同じかそれに近いものを採用しており、K 吸収端を利用することでその輝線よりも高エネルギー側の成分を効果的にそぎ落と

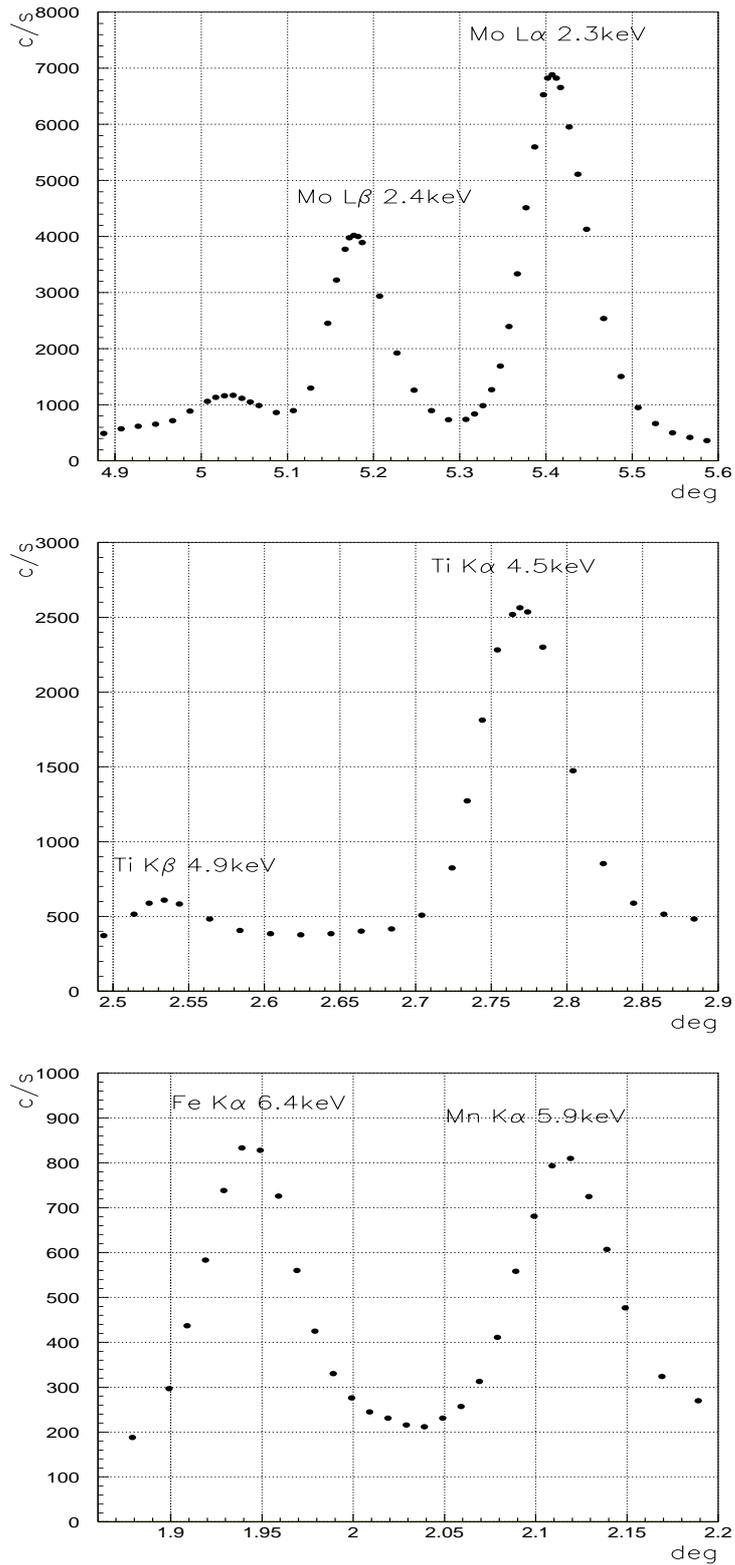


Figure 3.11: 2結晶分光器による七色ターゲットの分光。横軸は分光器回転角度(ビームの入射角度)、縦軸はX線強度(c/s)を表す。

すことができるようになっている。またフィルタの厚さはフィルタ使用後の強度の低下を考慮に入れた適切な厚さを選択した。

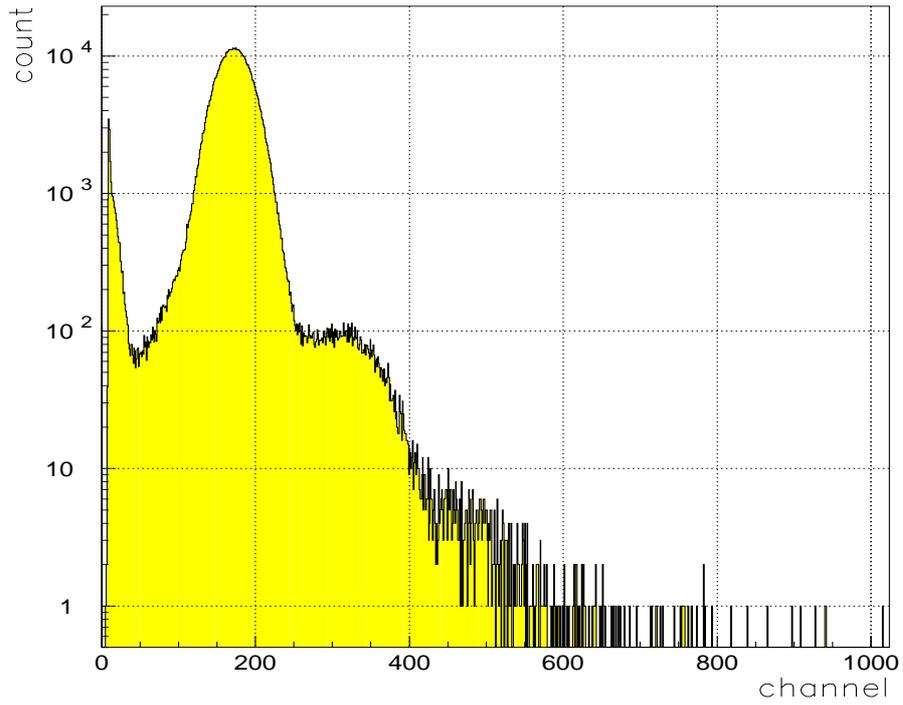
- まとめ

以上のようにして七色ターゲットから2結晶分光器、単色化用フィルタを用いて目的とする4つの輝線を取り出すことができた。その結果を Table 3.4 にまとめる。またフィルタを用いることによって得られたスペクトルを Figure 3.12、3.13、3.14、3.15の下段に示す。このスペクトルをみるとどの輝線に対してもバックグラウンドは1%以下に抑えられていることがわかる。

特性 X 線	Mo $L\alpha$	Ti $K\alpha$	Mn $K\alpha$	Fe $K\alpha$
E[keV]	2.293	4.509	5.895	6.400
単色化用フィルタ	Mo $5\mu\text{m}$	Ti $20\mu\text{m}$	ステンレス $10\mu\text{m}$	Fe $10\mu\text{m}$
単色化用フィルタの透過率	0.0256	0.374	0.506	0.585
X 線強度 [c/s](フィルタなし)	6800	5300	1300	1400
X 線強度 [c/s](フィルタあり)	260	2100	680	850
波長分解能 $\lambda/\Delta\lambda$ (FWHM)	80	40	30	20

Table 3.4: 七色ターゲットから取り出した特性 X 線。ただし X 線強度は X 線発生装置出力 20kV100mA、スリット幅 0.45 mm 設定におけるもの。

(フィルタなし)



(フィルタあり)

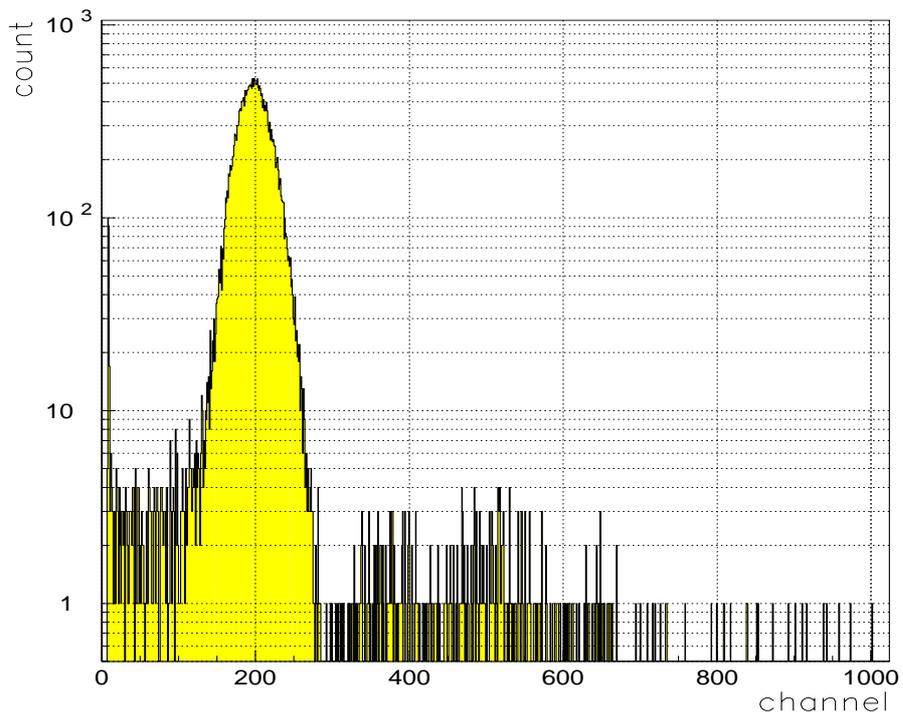


Figure 3.12: Mo 2.293keV にたいする最適設定でのスペクトル。上段が単色化フィルタあり下段が単色化フィルタなしの場合をそれぞれ表す。

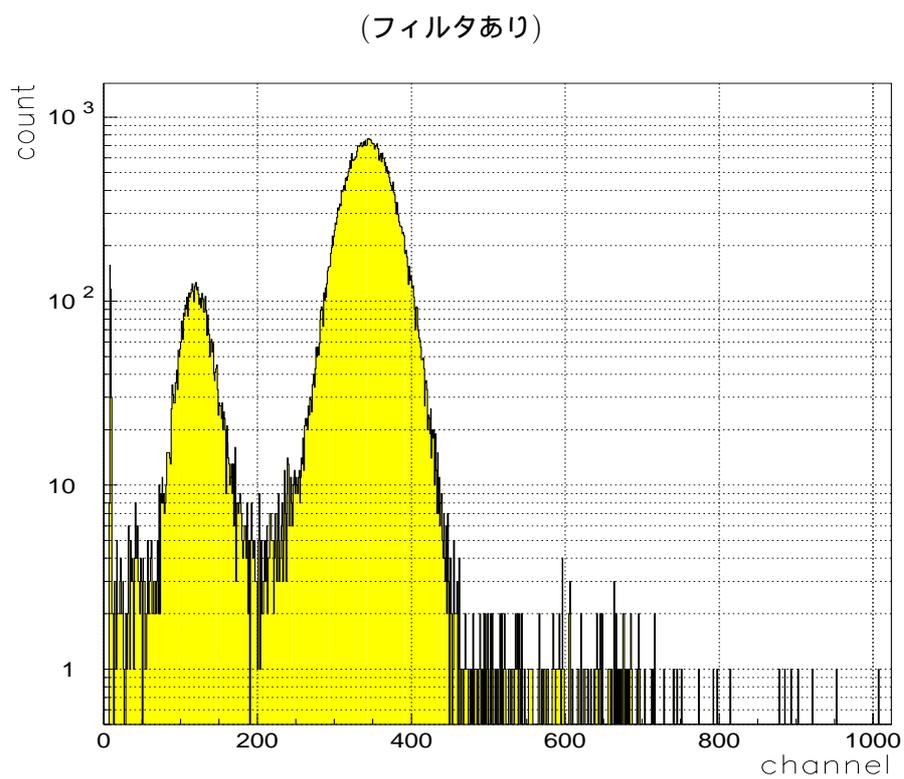
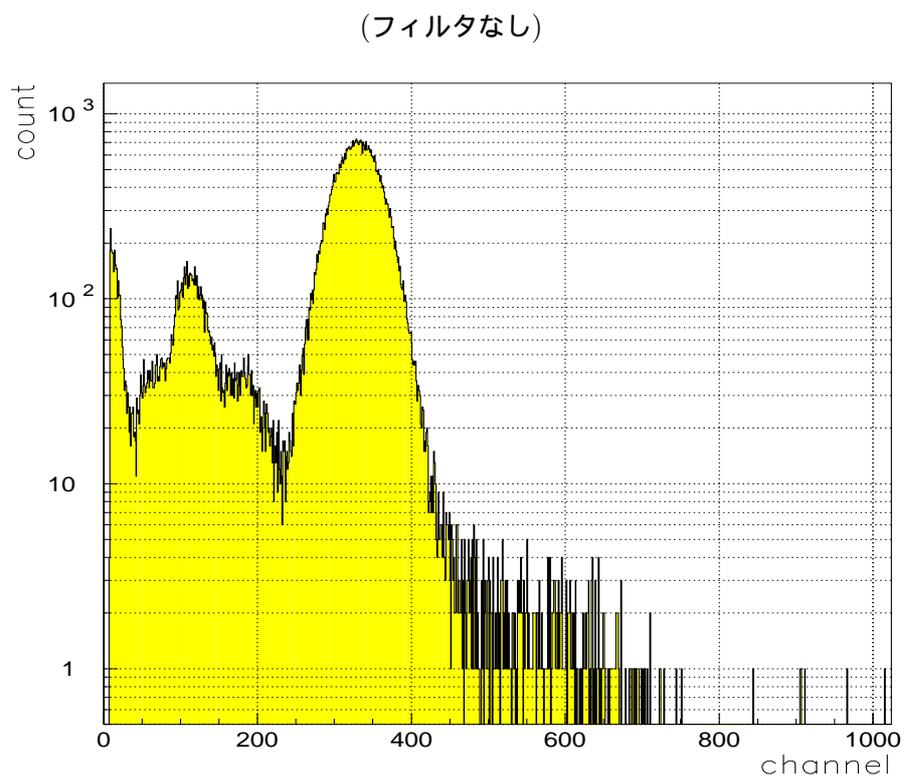
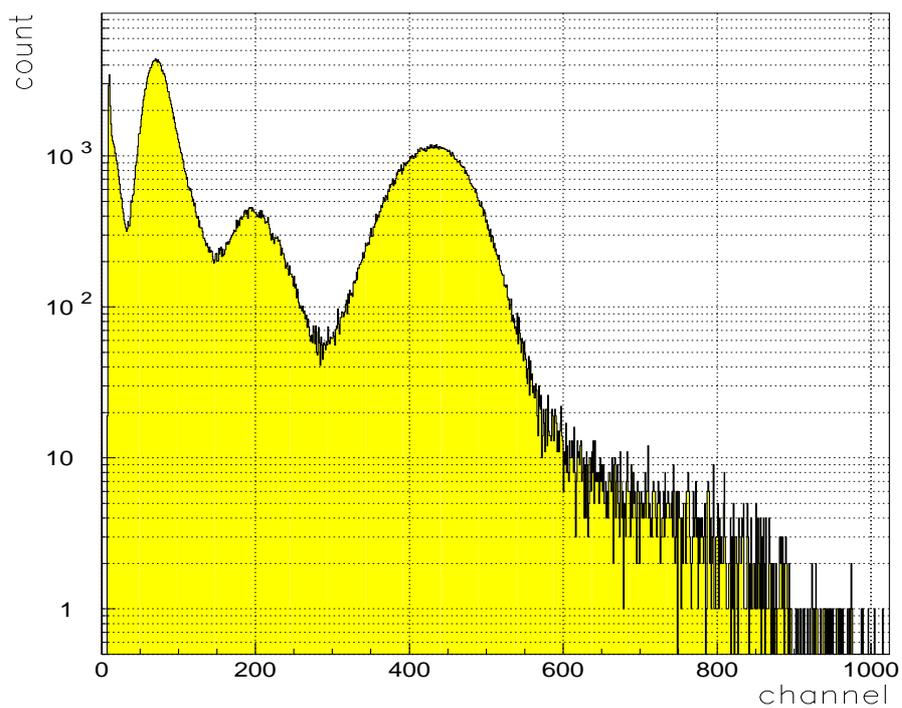


Figure 3.13: Ti 4.509keV にたいする最適設定でのスペクトル。上段が単色化フィルタあり下段が単色化フィルタなしの場合をそれぞれ表す。

(フィルタなし)



(フィルタあり)

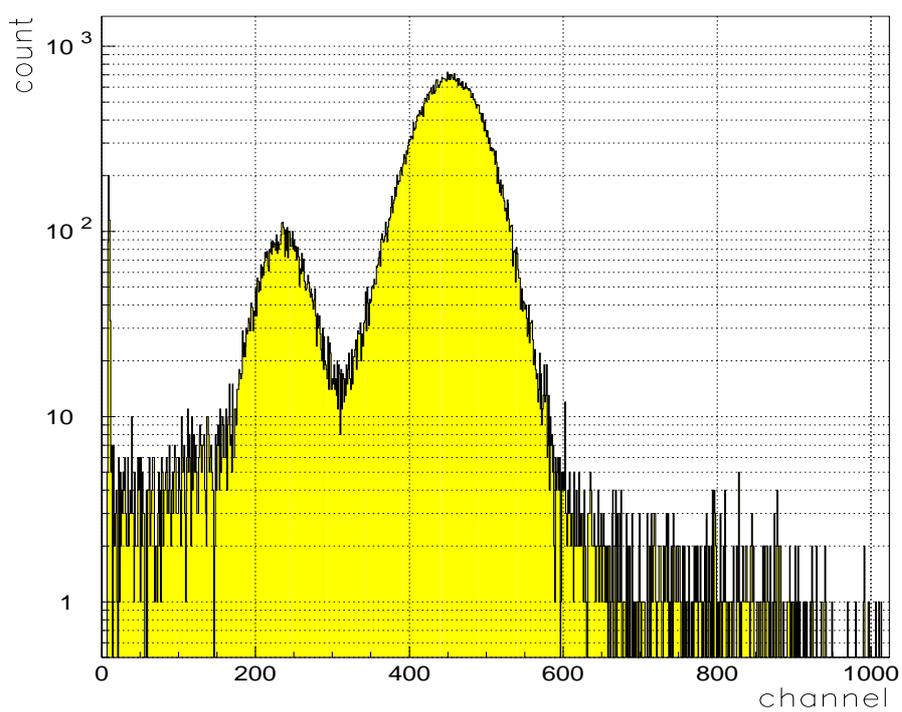
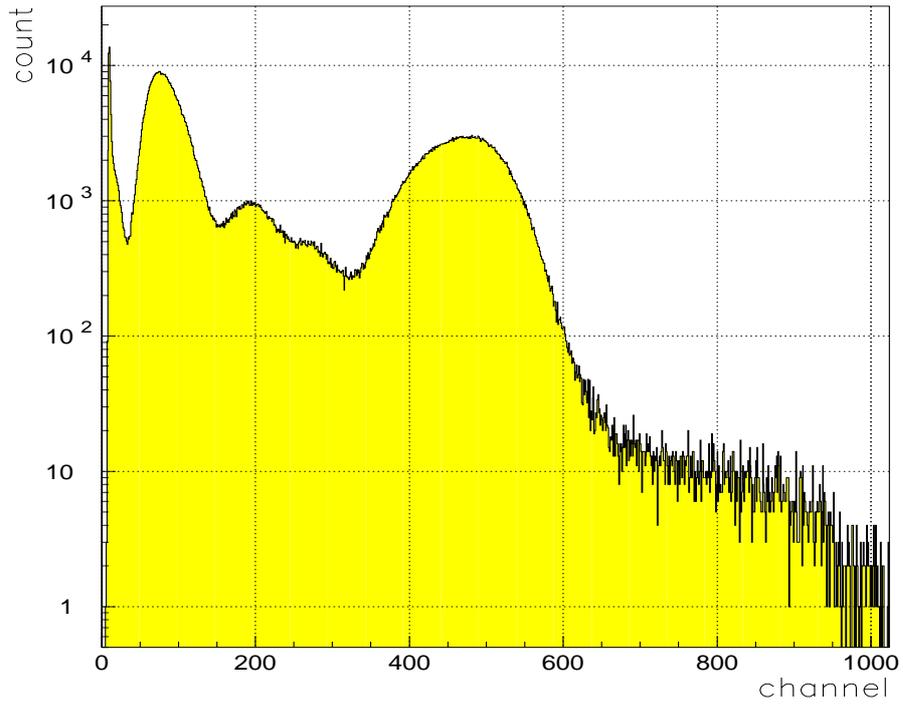


Figure 3.14: Mn 5.895keV に対する最適設定でのスペクトル。上段が単色化フィルタあり下段が単色化フィルタなしの場合をそれぞれ表す。

(フィルタなし)



(フィルタあり)

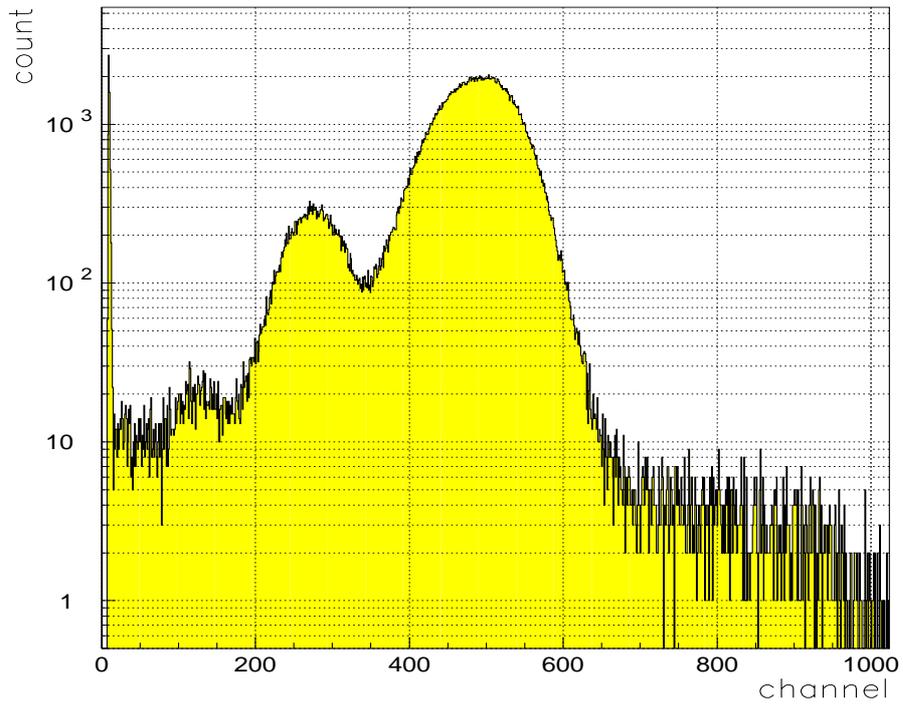


Figure 3.15: Fe 6.40keV にたいする最適設定でのスペクトル。上段が単色化フィルタあり下段がフィルタ単色化なしの場合をそれぞれ表す。

Chapter 4

Be フィルタの透過率測定

4.1 目的

Be は X 線の吸収が少ないこと化学的に安定で強度も比較的事あることなどから、「ぎんが」大面積比例計数管 (LAC)、「あすか」ガス蛍光比例計数管 (GIS) などの入射窓として活用されている。ASTRO-E 衛星には XRS 検出器の性能を引き出すために低エネルギー側のフォトンを抑える役割を果たすフィルタとして搭載される。現在 $100\mu\text{m}$ 、 $300\mu\text{m}$ 各々の厚さに対しフライトモデルが 2 つずつ完成しており (それぞれ A、B と ID をつける)、これを用いて X 線透過率測定を行った。以下のセクションにその目的をまとめる。

4.1.1 膜厚測定

Be フィルタは Be を圧延することによって製作されているため製品個々によって平均の膜厚に差があり、またフィルタの位置によって厚さにむらがあることが予想される。これは実際の観測に検出効率の違いとして影響を与えることになるため、この 2 点についてあらかじめ評価を行う必要がある。

- 平均膜厚値の算出

設計値 $100\mu\text{m}$ 、 $300\mu\text{m}$ と大幅に異なる限りは、実際の観測において支障はない。したがって設計値からのずれを評価するよりも、むしろ平均の膜厚値を精度よく決め検出器のレスポンスに組み込むことが重要となる。そこでフィルタ上の幾つかの点に対して膜厚測定を行いその平均値を求めること、フィルタ径 49 mm、Be の密度 1.848 g/cm^3 があらかじめ分かるのでそこから重量測定によって平均値を求めること、以上 2 つの方法から各々値を算出しその結果を比較検討する。

- 膜厚むらの評価

膜厚むらは、透過率の位置依存性につながり、実際の観測において天体の撮像を行う際に支障をきたすことになる。したがって衛星に搭載するフィルタはできるだけ膜厚むらの少ないものが望ましい。そこでフィルタ上の幾つかの点に対して膜厚をはかりその評価を行うとともに、2 枚のフィルタのうち膜厚むらの少ない方を衛星搭載用として採用する。

4.1.2 異なるエネルギーによる測定

Be フィルタは低エネルギー側のフォトンを抑え高エネルギー側の輝線を効率良く測定するために、Figure 2.5のように透過率がエネルギーに依存するように設計されている。したがって現在完成しているフライトモデルが設計どおりのエネルギー依存性を示すことを実際に異なるエネルギーの X 線をあてることで確認する。

4.2 測定原理

X 線ビームのフィルタ ON 時のカウントレートを $a \pm \delta a$ c/s、フィルタ OFF 時のカウントレートを $b \pm \delta b$ c/s とすると透過率 T (100% を 1 とする) とその誤差は

$$T = \frac{a}{b} \quad (4.1)$$

$$\delta T = \frac{a}{b} \sqrt{\left(\frac{\delta a}{a}\right)^2 + \left(\frac{\delta b}{b}\right)^2} \quad (4.2)$$

で定義される。ここでこのビームのエネルギーがあらかじめ分かっているならば Be に対する Attenuation Length u μm が分かり、フィルタの膜厚 D μm は

$$D = -u \times \log T \quad (4.3)$$

$$\delta D = u \times \frac{\delta T}{T} \quad (4.4)$$

となる。測定に用いる特性 X 線の Be フィルタに対する Attenuation Length の値を Table 4.2 にまとめる。また Attenuation Length が決まっているならば (4.4) 式にしたがって透過率の誤差

特性 X 線	E[keV]	Attenuation Length [μm]
Al $K\alpha$	1.487	29.4171
Mo $L\alpha$	2.293	110.752
Ti $K\alpha$	4.509	931.475
Mn $K\alpha$	5.895	2204.87
Fe $K\alpha$	6.400	2878.05

Table 4.1: Be フィルタに対する特性 X 線の Attenuation Length。
ただしこの値は文献 [9] の値を参照している。

の全体に対する割合に Attenuation Length をかけたものが厚さの誤差になる。Be100 μm の膜厚測定に Al $K\alpha$ を用いるならば $u=29.4171$ μm となり透過率を 1% の精度で求めれば膜厚に対する誤差が 0.3 μm と見積もられる。ここで測定の効率を考えた上でどの特性 X 線を用いることが望ましいかを考えるために、比例計数管のパルスハイトがガウス分布にしたがうとして膜厚の測定精度を透過率 T とカウント数 b (フィルタ OFF 時) で表すと

$$\frac{\delta D}{D} = \frac{1}{\sqrt{b}} \sqrt{\frac{1+T}{T(\log T)^2}} \quad (4.5)$$

$$= \frac{f(T)}{\sqrt{b}} \quad (4.6)$$

となる。ただし

$$f(T) = \sqrt{\frac{1+T}{T(\log T)^2}} \quad (4.7)$$

とする。カウント数 b が同じならなるべく $f(T)$ が低くなるような T を持つ特性 X 線を用いるのが望ましい。この関数は $T=0.11$ で極小値を持つため Be100 μm 、Be300 μm フィルタに対して $T=0.11$ を示すエネルギーを見積もると各々 1.7 keV、2.5 keV となる。そこで本実験では Be100 μm の測定には Al $K\alpha$ 1.487 keV、Be300 μm の測定には Mo $L\alpha$ 2.293 keV を用いた。

4.3 膜厚測定

4.3.1 測定法

フィルタの平均膜厚値の算出、膜厚むらの評価を目的として Figure 4.1 のように X、Z 方向ともに 5mm 間隔でフィルタの 45 ポイントに X 線ビームをあて各々の点で透過率を算出する。

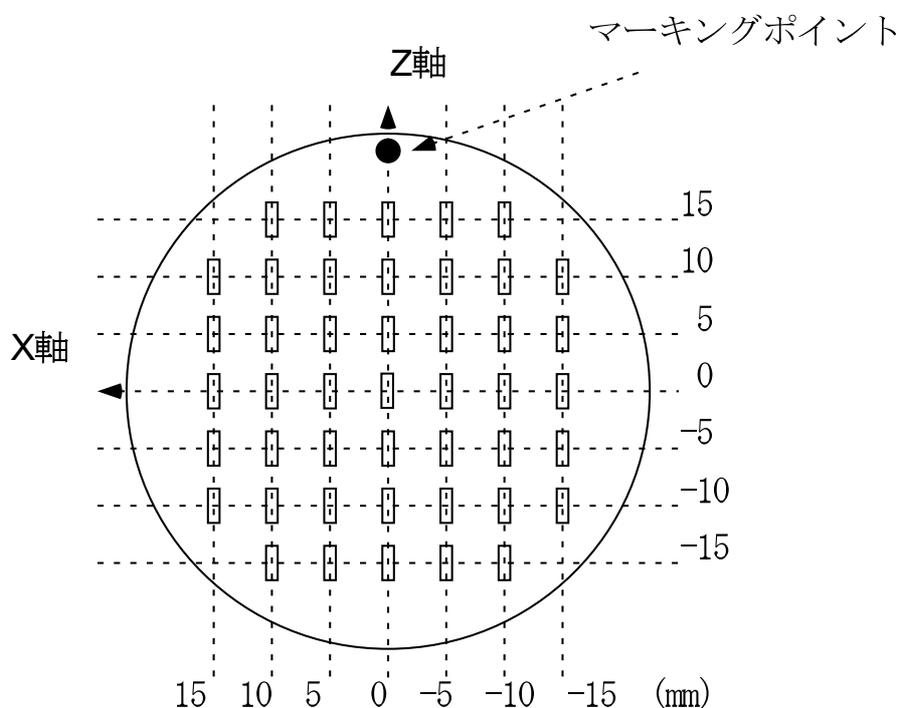


Figure 4.1: Mapping 測定方法

データの取得方法として X 線発生装置の時間変動を考慮して必ずフィルタ ON 時のスペクトル取得前後で OFF 時のスペクトルを取る事を原則とする。そしてこの測定時にはフィルタ OFF 時のスペクトルはおよそ 30 分おきぐらいに取得しその間は 1 次関数で内挿する。ただしこの X 線発生装置の時間変動による X 線強度の変化に対して透過率算出の際にカウントレートの 0.5% を系統誤差として考慮する。この測定の際の各輝線の強度、積分時間等を Table 4.2 に示す。

測定フィルタ	Be100 μ m	Be300 μ m
特性 X 線	Al K α	Mo L α
	1.487 keV	2.293 keV
X 線強度 (フィルタ OFF 時)	750 c/s	250 c/s
積分時間 (ON/OFF とも)	300sec	
X 線発生装置出力	20kV 100mA	
Attenuation Length	29.4171 μ m	110.752 μ m

Table 4.2: Be フィルタ測定における輝線の強度 (1)

4.3.2 スペクトル解析

透過率の算出は、フィルタ OFF、ON 時それぞれにおいて比例計数管でスペクトルを取得し、それを適当な関数でフィットしてその積分値をフィルタ OFF、ON 時のカウントとして用いることで行う。まずどの輝線の解析においても共通するバックグラウンドの除去と比例計数管で取得したスペクトルのパルスハイト特性についてまとめる。

- バックグラウンド

測定に用いた特性 X 線はバックグラウンドが強度の 1% 以下に抑えられているが高い精度で透過率の算出をおこなうためにフィッティングにおいてその成分を除去する必要がある。考えられるバックグラウンドとしては、宇宙放射線や環境放射線によるもの 2 結晶分光においてそぎ落とせなかった他の輝線、連続成分等が考えられる。これはバックグラウンドに対して定数、もしくは直線を仮定して除去するとともに輝線に対してはそれぞれのピークにモデルを与える。

- Polya 分布

比例計数管で起こるなだれ増幅において個々の電離プロセスが電場のみに依存し、それ以前の来歴に無関係であるならば生成する電子の分布は指数関数的になる。しかしこの検出器を動作させる高い電界では、この仮定は破れ個々の電離プロセスは独立ではなくなる。このため電子の分布は Byrne [5](1969) によって提唱された Polya 分布と呼ばれる高エネルギー側に少し裾を引いたような左右非対照な関数になる。この関数は入射 X 線によって作られる 1 次電子数の増加にしたがってガウス分布に近づくため、エネルギーの高い X 線に対してはガウス分布を仮定し、低いものに対しては Polya 分布を仮定する。

- β 輝線の効果

比例計数管のエネルギー分解能が低いため、どちらの輝線においても α 線、 β 線を分離することができない。特に透過率がエネルギーに敏感な場合この効果が測定結果に影響する。そこでターゲットから発生する輝線の強度比は K α 、K β に対しては 10:1、L α 、L β に対しては 2:1 を仮定してこの効果を見積もる。Al K α については 2 結晶分光において高い単色性が得られており K β が透過率に与える影響は透過率の 0.01% 以下と全く問題にならない。Mo L α については透過率の 1.4% 程度が見込まれる。ただし Be300 μ m フィルタに対する Mo L α を用いた測定においては測定精度は透過率の 2% 程度であるためそれ程この効果は大きくないが系統誤差として考慮する必要がある。

以上の点を考慮して解析を行う。Figure 4.2に 100 μm フィルタの測定に用いた Al K α のスペクトルを、Figure 4.3に 300 μm の測定に用いた Mo L α のスペクトルを示し、Table 4.3に仮定したモデルをまとめる。

- Al K α に対するモデル

Al K α に対するモデルを考える際には、まず Al ターゲットに蒸着されている Cu からの L α 0.928 keV の寄与を考慮しなければならない。またこの輝線をもちいた測定の際にはエネルギー較正のために ^{55}Fe の線源を比例計数管の入射窓の近くに設置している。したがって計数管内にフローさせている Ar ガスからのエスケープが 3 keV 辺りにくるためその寄与も考慮に入れる必要がある。

- Mo L α に対するモデル

Mo L α は七種類の金属が蒸着してあるターゲットから、2 結晶分光器と単色化用フィルタを用いて取り出している。したがってフィッティングは Al ターゲット以上に他の輝線の寄与を考慮しなければならない。Figure 4.3をみると低エネルギー側の成分にエクセスがあることが確認できる。これは特に 1.487 keV にある Al K α からの寄与が大きいため、その他に Cu L α からの寄与も考慮に入れる必要がある。またピークに対しては Polya 分布、ガウス分布両方のモデルでフィットを試みた。その結果 Polya 分布の $red.\chi^2$ が 2.14、ガウス分布が 2.34 となりどちらのモデルでもそれほど違いがないことが分かった。したがってピークに対しては全て Polya 分布によるフィットを採用することにした。

Al K α に対するモデル

特性 X 線	E[keV]	モデル
Al K α	1.487	Polya
Cu L α	0.928	Polya(エネルギーと幅を固定)
Fe の Ar エスケープ	2.937	Polya(エネルギーと幅を固定)

Mo L α に対するモデル

特性 X 線	E[keV]	モデル
Mo L α	2.293	Polya
Al K α	1.487	Polya(エネルギーと幅を固定)
Cu L α	0.928	Polya(エネルギーと幅を固定)

Table 4.3: スペクトル解析時に仮定した各輝線に対するモデル (1)

4.3.3 結果

Be100 μm フィルタの結果を Figure 4.5、4.6に Be300 μm フィルタの結果を Figure 4.7、4.8に示す。ヒストグラムをみるとどのフィルタの膜厚も勾配を持っていることが確認できる。そこで一定方向に勾配を持つ平面を仮定してフィッティングを行い平均膜厚値、膜厚勾配の方向、大きさを求めた。その結果を Table 4.4に示す。フィルタ中心での厚み (平均膜厚) は 100 μm フィルタについては設計値より A が 3.7 μm 、B が 1.3 μm 高い値を示し、300 μm フィルタはどちらも

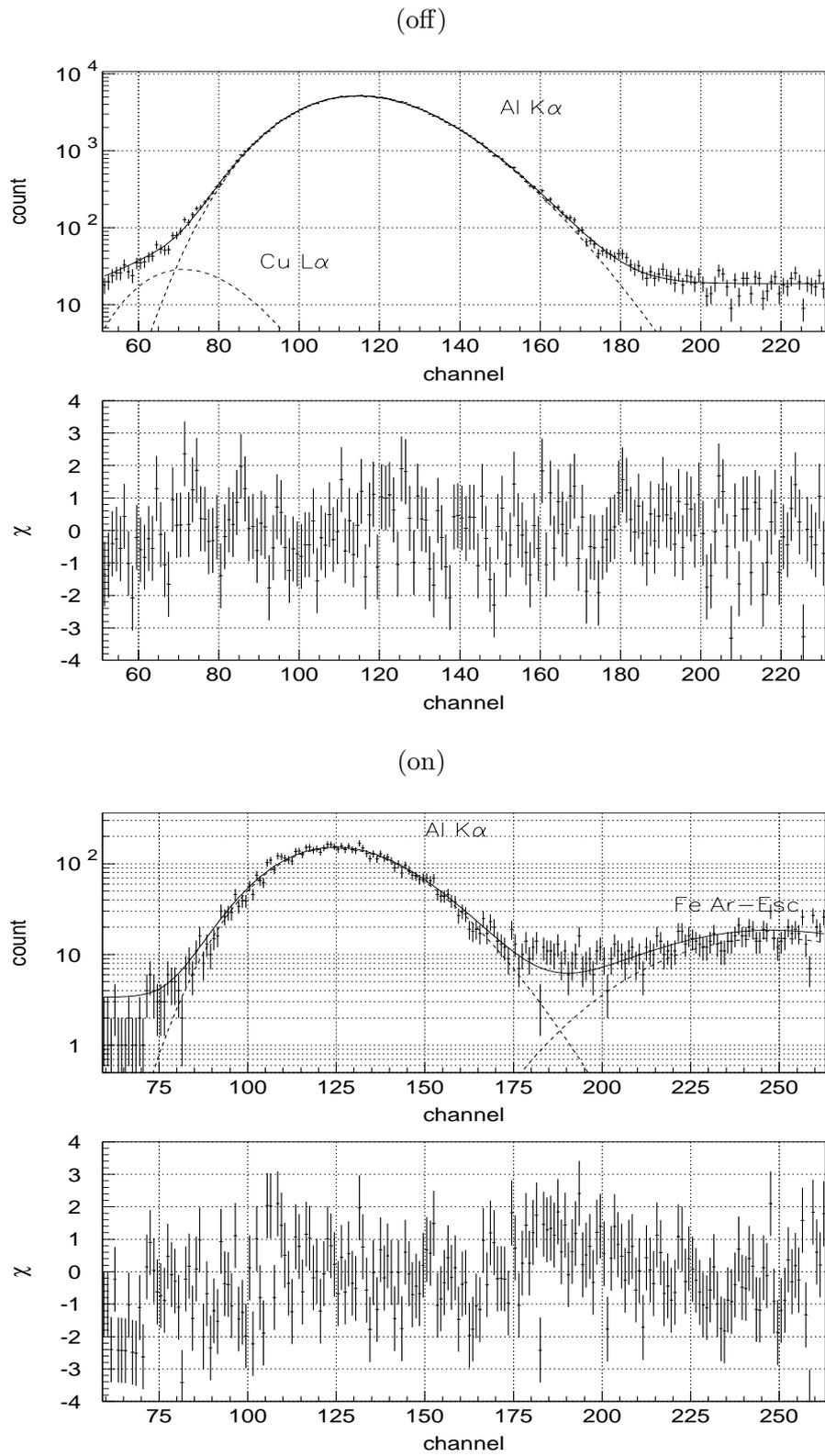
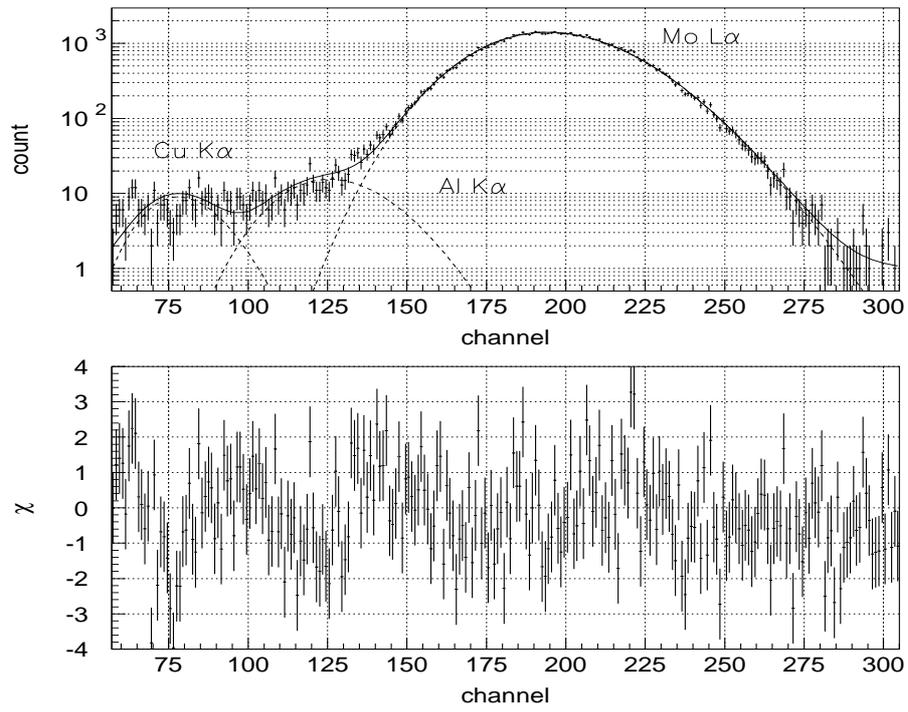


Figure 4.2: Be100 μ m フィルタの測定に用いた Al $K\alpha$ のスペクトル

(off)



(on)

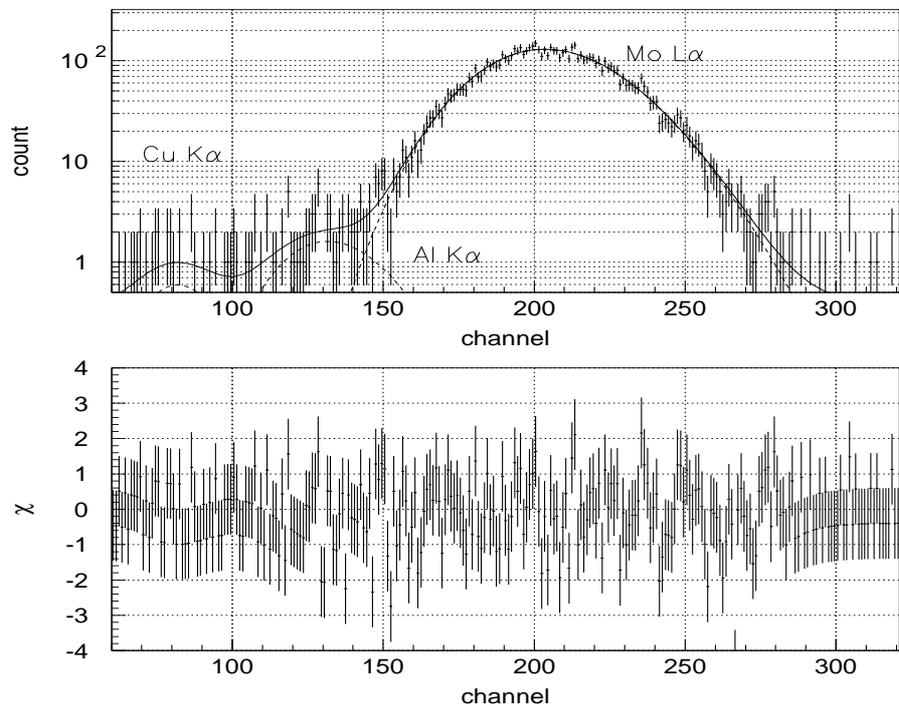
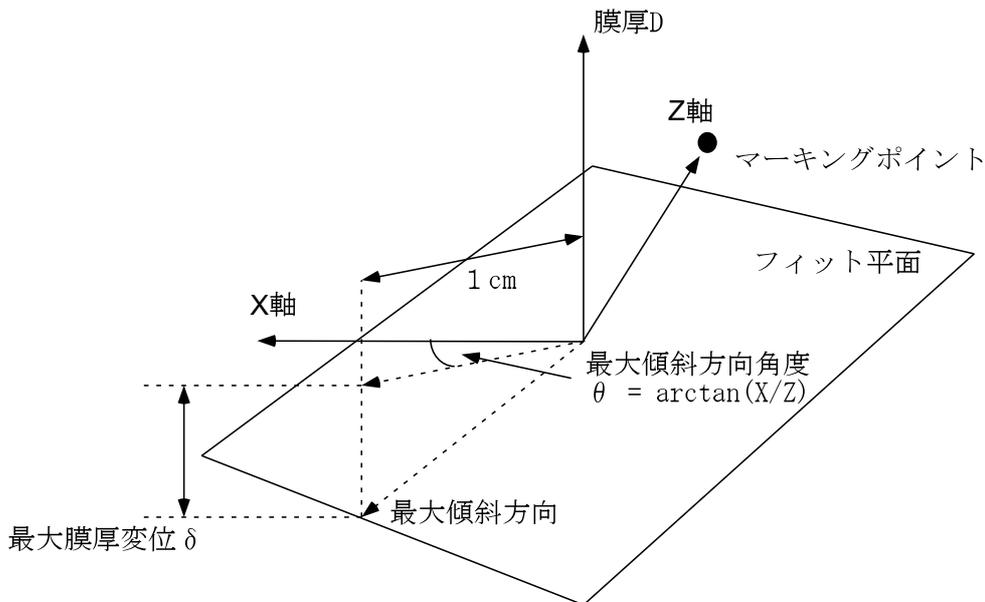


Figure 4.3: Be300 μ m フィルタの測定に用いた Mo L α のスペクトル

30 μm ほど低い値を示している。また重量測定により求めた平均と比較すると、どのフィルタも重量測定の値より 6% 程度低くでている。膜厚勾配は最大傾斜方向変位 δ $\mu\text{m}/\text{cm}$ を平均膜厚値で割った割合で比較すると 100 μm 、300 μm どちらのフィルタも A の方が勾配が大きいことが確認できる。また各フィルタに対する位置依存性の評価は、100 μm フィルタ A が <4 μm 、B が <2 μm 、300 μm フィルタ A が <9 μm 、B が <6 μm となる。



	Be100 μm (A)	Be100 μm (B)	Be300 μm (A)	Be300 μm (B)
フィルタ中心での厚み $d[\mu\text{m}]$	103.70 \pm 0.12	101.31 \pm 0.11	270.08 \pm 0.31	264.19 \pm 0.31
最大膜厚 [μm]	107.50 \pm 0.91	102.87 \pm 0.83	277.4 \pm 2.5	270.3 \pm 2.5
最小膜厚 [μm]	100.21 \pm 0.91	99.45 \pm 0.81	261.5 \pm 2.4	258.2 \pm 2.4
最大傾斜方向角度 $\theta[\text{deg}]$	-64.2 \pm 4.3	-29.1 \pm 21.8	-159.5 \pm 6.9	-7.1 \pm 8.9
最大傾斜方向変位 $\delta[\mu\text{m}/\text{cm}]$	1.70 \pm 0.12	0.35 \pm 0.13	3.04 \pm 0.36	2.25 \pm 0.35
膜厚勾配率 $\delta/d \times 100$	1.64	0.345	1.13	0.852
χ^2/ndf	0.71	0.74	1.10	0.96
フィルタ重量 [g]	0.380 \pm 0.001	0.374 \pm 0.001	1.002 \pm 0.001	0.980 \pm 0.001
重量測定による平均膜厚さ $d[\mu\text{m}]$	109.04 \pm 0.52	107.32 \pm 0.52	287.5 \pm 1.2	281.2 \pm 1.2

Figure 4.4: Be フィルタの膜厚に対するフィッティング結果。最大膜厚変位は最大傾斜方向に1cmシフトした時の膜厚の変化 $\delta\mu\text{m}$ を表す。また重量測定からの膜厚の算出には Be の比重 1.848 g/cm^3 、フィルタ径 49 ± 0.1 mm を用いている。

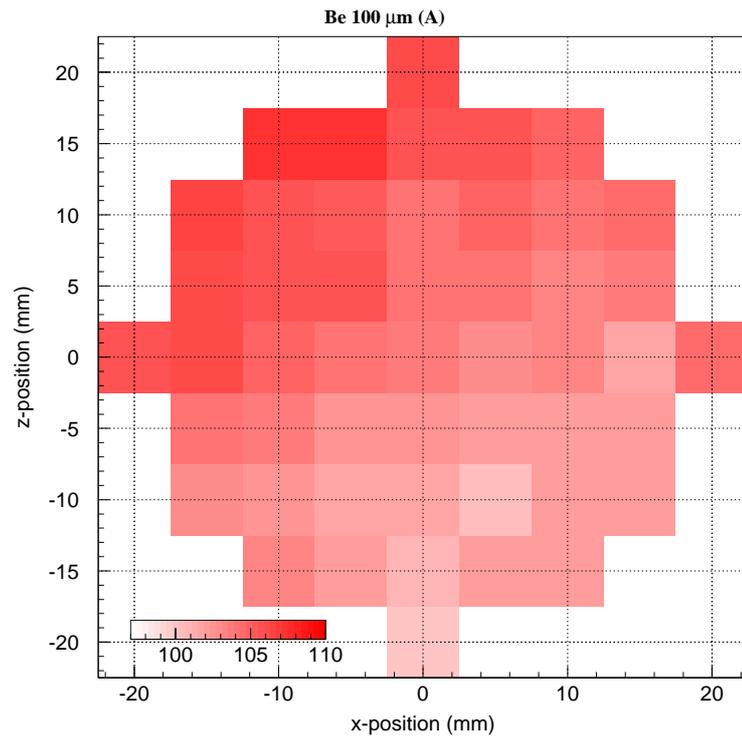
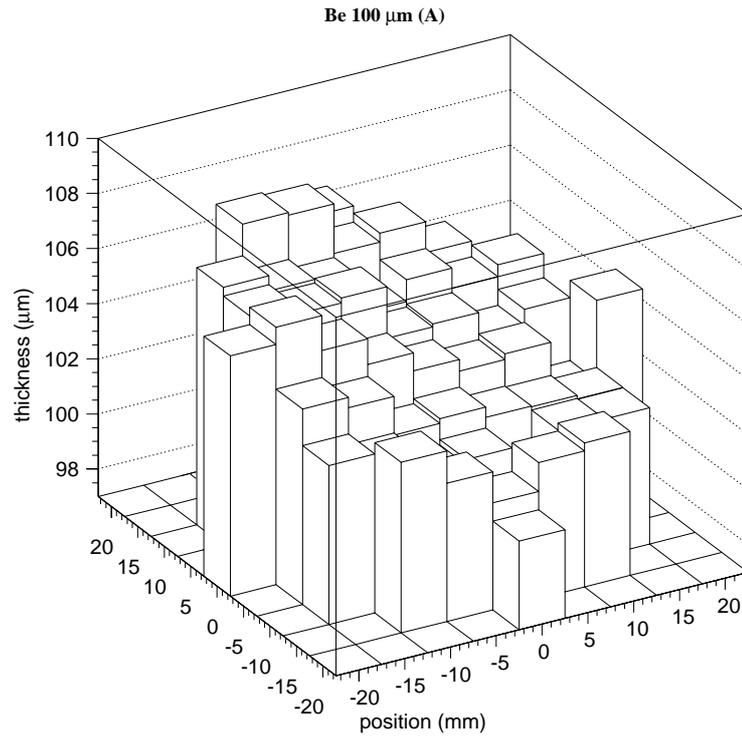


Figure 4.5: Be100 μ m フィルタ (A) に対する膜厚測定結果。Figure 4.1と X 軸の向きが逆であることに注意。

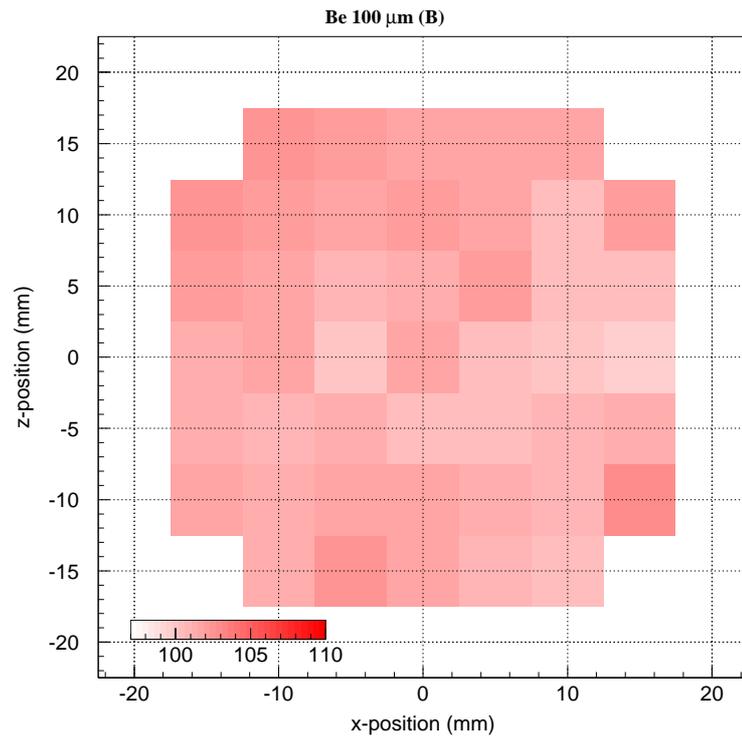
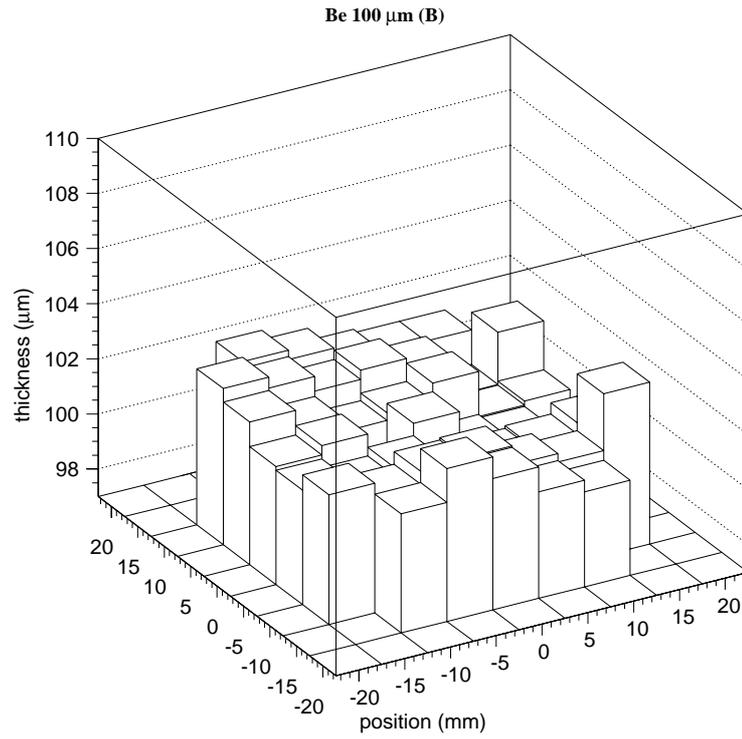


Figure 4.6: Be100 μm フィルタ (B) に対する膜厚測定結果。Figure 4.1と X 軸の向きが逆であることに注意。

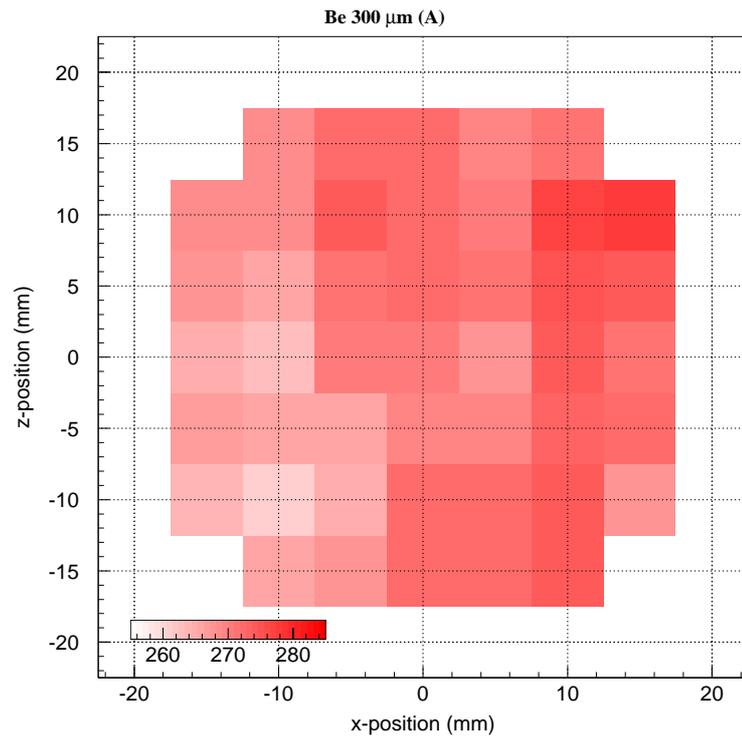
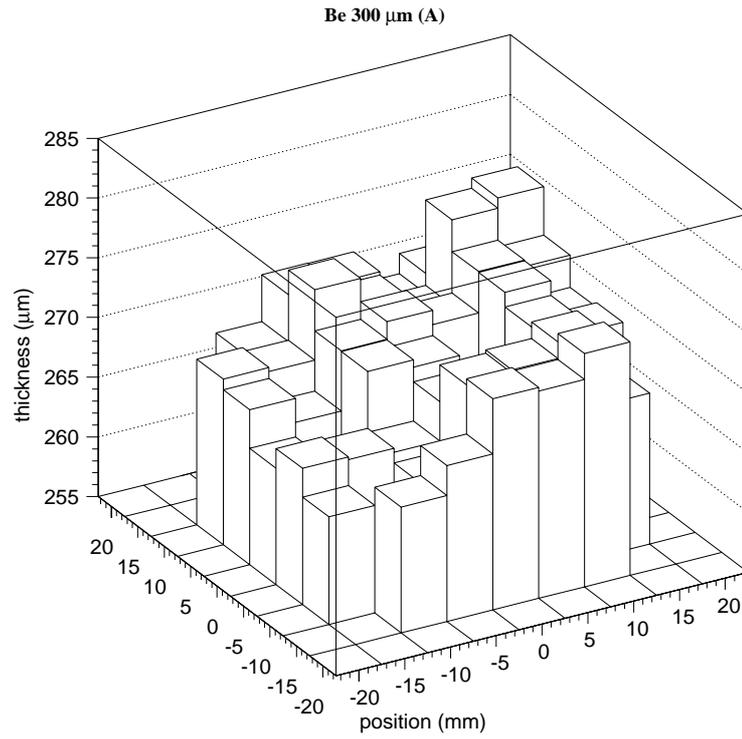


Figure 4.7: Be300 μm フィルタ (A) に対する膜厚測定結果。Figure 4.1と X 軸の向きが逆であることに注意。

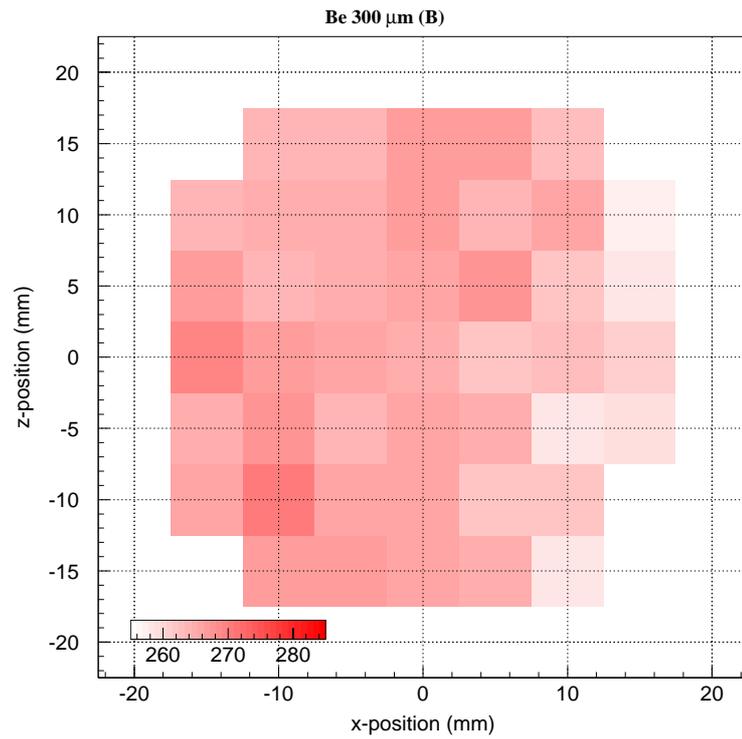
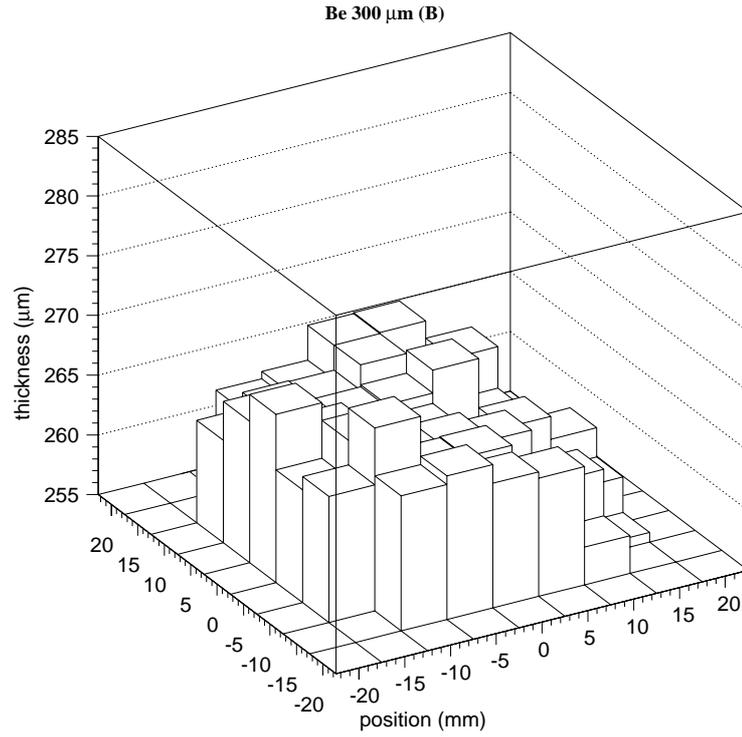


Figure 4.8: Be300 μm フィルタ (B) に対する膜厚測定結果。Figure 4.1と X 軸の向きが逆であることに注意。

4.3.4 重量測定と透過率測定の結果の比較

透過率測定から求めた平均膜厚値がどのフィルタも 6% 程度重量測定による結果より低くでている。この違いを説明するために Be100 μm (B) の結果を用いて考察する。

- ビームサイズ内の膜厚むら

ビームサイズ内に膜厚むらがある場合、透過率測定で得られる結果は膜厚むらがない場合と比較して透過率は高くなり、したがって膜厚は低くなるため定性的な説明が可能である。そこで Figure 4.9 のようなモデルを考えてみた。重量測定で求めた平均膜厚値を D_w 、透過率測定で用いた X 線のフィルタに対する Attenuation Length を u μm 、ビームサイズ内のむらの度合を ϵ μm とするとむらがある時に測定される透過率 T_t は

$$T_t = \frac{1}{2} \left\{ \exp \left[\frac{-(D_w - \epsilon)}{u} \right] + \exp \left[\frac{-(D_w + \epsilon)}{u} \right] \right\} \quad (4.8)$$

となり、膜厚 D_t は

$$D_t = -u \times \log T_t \quad (4.9)$$

で計算される。Be100 μm (B) に対して Al $K\alpha$ ($u=29.4171$ μm) を用いて測定を行った場合、 $D_w=107.32 \pm 0.52$ μm 、 $D_t=101.31 \pm 0.11$ μm であり、ここから ϵ は 20 μm という結果になる。これは 0.05 \times 3 mm のビームサイズ内で厚い部分と薄い部分の差が 40 μm となるためあまり妥当であるとは言えない。もし仮にこのような膜厚むらが存在するならば他のエネルギーをもちいて膜厚を求めた時、エネルギー依存性が顕著にみられるはずである。そこでこのフィルタに対して Mo $L\alpha$ ($u=110.752$ μm) を用いて測定を行った結果を参照すると、 $D_t=101.30 \pm 0.98$ μm となりほぼ Al $K\alpha$ を用いて求めた D_t と一致している。ここで誤差の範囲 1 μm を許容しても $\epsilon < 10$ μm となり $\epsilon=20$ μm の膜厚むらは棄却されることになる。

- 重量測定の検証

重量測定からの膜厚の算出は、フィルタ重量を W 、フィルタ径を R 、Be の比重を ρ とすると

$$D_w = \frac{W}{\pi(R/2)^2 \rho} \quad (4.10)$$

で表される。ここで $R=49 \pm 0.1$ mm、 $\rho=1.848$ g/cm³、Be100 μm (B) の重量 $W=0.374 \pm 0.001$ g を用いて Be100 μm (B) の膜厚を計算すると $D_w=107.32 \pm 0.52$ μm となる。もし仮に重量測定の結果が間違っているとすれば、フィルタ重量 W 、フィルタ径 R 、Be の比重 ρ のいずれかが異なることになる。まずフィルタ重量について検討する。この測定には AND 製上皿電子天秤 HX-400 を用いているが、この電子天秤自体に問題がないことを確認するため適当な重さの試料を用意し他の電子天秤を用いて測定結果の比較を行った。その結果測定値は 0.1% 以内で一致しこの装置自体に問題がないことがわかった。もし仮にフィルタ重量 W の値が 1% 軽かったとしても、膜厚 D_w は 106.25 ± 0.52 μm となり 6% の違いを説明することはできない。次にフィルタ径 R は ± 0.1 mm の精度で製作されているためこの値よりも R が大きくなることは考えにくい、仮に $R=49.5 \pm 0.1$ mm

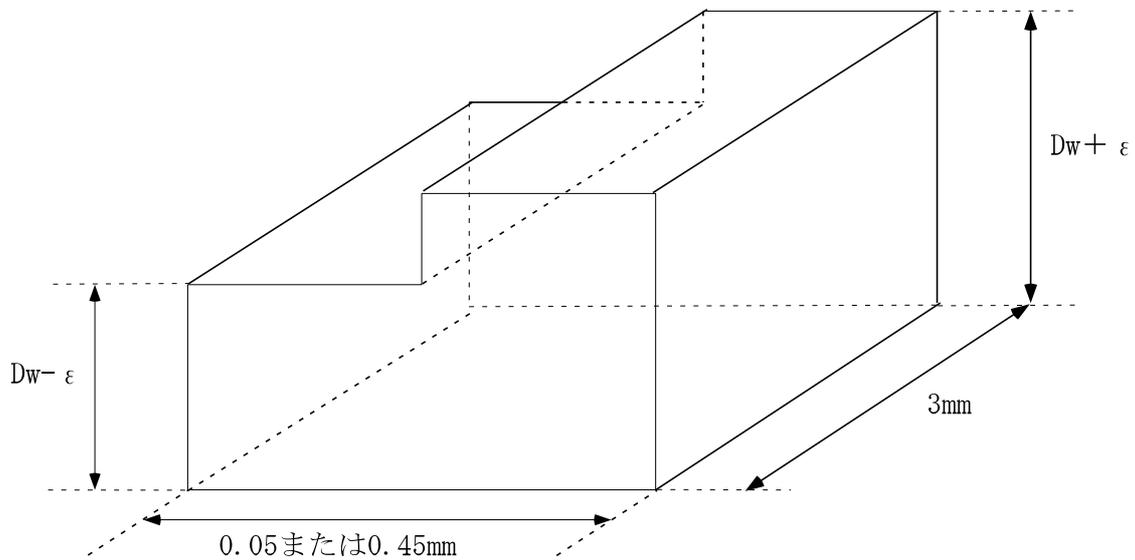


Figure 4.9: ビームサイズ内の膜厚むらに対するモデル

として膜厚を計算しても $D_w = 105.16 \pm 0.50 \mu\text{m}$ となり説明には不十分である。最後に Be の比重 ρ の値が何らかの理由で高い場合、膜厚 D_w は低く見積もられるがこの時 Attenuation Length も小さくなるため、その結果透過率から算出する膜厚 D_t も低くなり差を縮めることができない。

- Attenuation Length の違い

透過率から膜厚への変換は (4.3) 式に従い各々の輝線の Be に対する Attenuation Length は Table 4.2 の値を用いている。もしこの値が実際より低い値であるならば算出される膜厚は低くなる。そこで、いくつかの文献における Attenuation Length を参照し各々膜厚を計算する。またここでは $\text{Be}300\mu\text{m}(\text{B})$ についても同様の計算を行うことにする。その結果は Table 4.4 のようになり、文献 [10] の場合 $\text{Be}100\mu\text{m}(\text{B})$ 、 $\text{Be}300\mu\text{m}(\text{B})$ どちらの場合でも重量測定における平均膜厚値との 6% の違いが 3% 程度にまで縮まることが分かる。

- 単色性

$\text{Be}100\mu\text{m}(\text{B})$ の膜厚の測定には $\text{Al K}\alpha$ を用いて行っているが、もし十分な単色性が得られていず $\text{K}\beta$ が混入している場合、透過率が上がるため膜厚が低く見積もられる。しかしこの効果に対しては既に § 4.3.2 において見積もっており $\text{K}\beta$ の混入による透過率の増加は 1.0048 倍で、もし混入が全くないとした時の膜厚は $101.44 \pm 0.89\mu\text{m}$ となりほとんど変わらないため、この効果による説明は困難なものとなる。

- 不純物

Be フィルタには純度 99.8% IF-1 タイプのものを用いているが、もし何らかの理由で不純物が混入している場合、純度 100% で考えた時に予想される透過率と異なる値を示すことになる。例えばフィルタ表面が酸化して $1 \mu\text{m}$ の BeO (比重 3.01 g/cm^3) の層ができていたとすると、 $\text{BeO } 1 \mu\text{m}$ に対する $\text{Al K}\alpha$ の透過率は 72.1% で透過率が大きく下がるため

Be100 μm (B)				
		Henke et al.[9]	文献 [10]	Storm et al.[11]
特性 X 線	透過率	膜厚 [μm]	膜厚 [μm]	膜厚 [μm]
Al K α 1.487 keV	3.194 \pm 0.097	101.31 \pm 0.89(29.4171)	104.35 \pm 0.92(30.30)	102.28 \pm 0.90(29.7)
Mo L α 2.293 keV	40.07 \pm 0.35	101.29 \pm 0.97(110.752)	104.35 \pm 1.00(114.1)	103.34 \pm 0.99(113)
Ti K α 4.509 keV	89.65 \pm 0.59	101.8 \pm 6.1 (931.475)	104.8 \pm 6.3(959.4)	106.31 \pm 6.4(973)
Mn K α 5.895 keV	94.64 \pm 0.72	121 \pm 17 (2204.87)	121 \pm 17(2204)	122 \pm 17(2210)
Fe K α 6.400 keV	96.18 \pm 0.64	112 \pm 19 (2878.05)	109 \pm 19(2799)	106 \pm 18(2720)

Be300 μm (B)				
		Henke et al.[9]	文献 [10]	Storm et al.[11]
特性 X 線	透過率	膜厚 [μm]	膜厚 [μm]	膜厚 [μm]
Mo L α 2.293 keV	9.21 \pm 0.20	264.1 \pm 2.4(110.752)	272.1 \pm 2.5(114.1)	269.5 \pm 2.5(113)
Ti K α 4.509 keV	75.44 \pm 0.50	262.5 \pm 6.2(931.475)	270.4 \pm 6.4(959.4)	274.2 \pm 6.4(973)
Mn K α 5.895 keV	88.63 \pm 0.55	266.1 \pm 14 (2204.87)	266 \pm 14(2204)	267 \pm 14(2210)

Table 4.4: 異なる Attenuation Length における膜厚の算出。括弧内の値はテーブル左側の透過率を膜厚に換算する際に用いた Attenuation Length[μm] の値を表す。

膜厚 D_t は純度 100% の時に比べて厚くなる。これは透過率測定による膜厚が重量測定によるものより低くできることの説明としては逆の方向であるため、もし 6% の違いを埋めるための不純物を考えるならば、Be より原子番号の低い H、He などを考えなければならない。ただし H、He などの不純物が混入する可能性は低く、不純物混入による説明は難しい。

以上の点について考察してみたが重量測定、透過率測定各々から求めた平均膜厚の 6% の違いを説明するにはどれも不十分であるため、上記の点以外になにか別の原因を考えることが必要である。

4.4 異なるエネルギーによる測定

4.4.1 測定法

Be フィルタにおける透過率のエネルギー依存性を評価するために、フィルタ中心に異なるエネルギーの X 線をあて測定を行った。Be100 μm フィルタについては Al K α 、Mo L α 、Ti K α 、Mn K α 、Fe K α 、Be300 μm フィルタについては Mo L α 、Ti K α 、Mn K α を用いて評価を行う。また測定で得られた透過率を膜厚に変換することで膜厚測定で得られた結果との比較する。そのためフィルタ中心の他に膜厚が最大、最小を示す点においても測定を行った。ただしこの時 X 線のエネルギーが高いほど Attenuation Length が長くなり、膜厚を決めるのが難しくなることを考慮しなければならない。そこでエネルギーの高い X 線を用いての測定の際には積分時間を長くとることによって統計精度をあげることにする。

特性 X 線	Ti K α	Mn K α	Fe K α
	4.509 keV	5.895 keV	6.400 keV
X 線強度 (フィルタ OFF 時)	220 c/s	250 c/s	180 c/s
積分時間 (フィルタ OFF/ON 時)	3000 sec	3000 sec	3000 sec
X 線発生装置出力	20kV 10mA	20kV 30mA	20 kV 20mA
Attenuation Length	931.475 μm	2204.87 μm	2878.05 μm

Table 4.5: Be フィルタ測定における輝線の強度 (2)

4.4.2 スペクトル解析

Al K α 、Mo L α に対しては Mapping 測定時と同様のモデルを用いてフィッティングを行った。Ti K α 、Mn K α 、Fe K α については Mo L α 同様七色ターゲットから取り出しているため他の輝線の寄与を考慮する必要がある。ピークに対するフィットは Polya 分布ではモデルにあわず、ガウス分布による方が $\text{red.}\chi^2$ を小さくすることができるため全てガウス分布にしたがうとした。Be100 μm フィルタの測定に用いた輝線のスペクトルは Figure 4.10、4.11、4.12、4.13 に Be300 μm フィルタは Figure 4.14、4.15 に表してある。また各輝線に対するモデルを Table 4.6 にまとめる。Ti K α については予想されるピークにたいし 4 つのガウス分布をいれた。しかし 3keV あたりに残差が大きくでてしまい、これをあわせるために不明の混入線として更にガウス分布を加えることでフィッティング結果を改善した。ただしこれは他の要因による可能性を検討する必要がある。

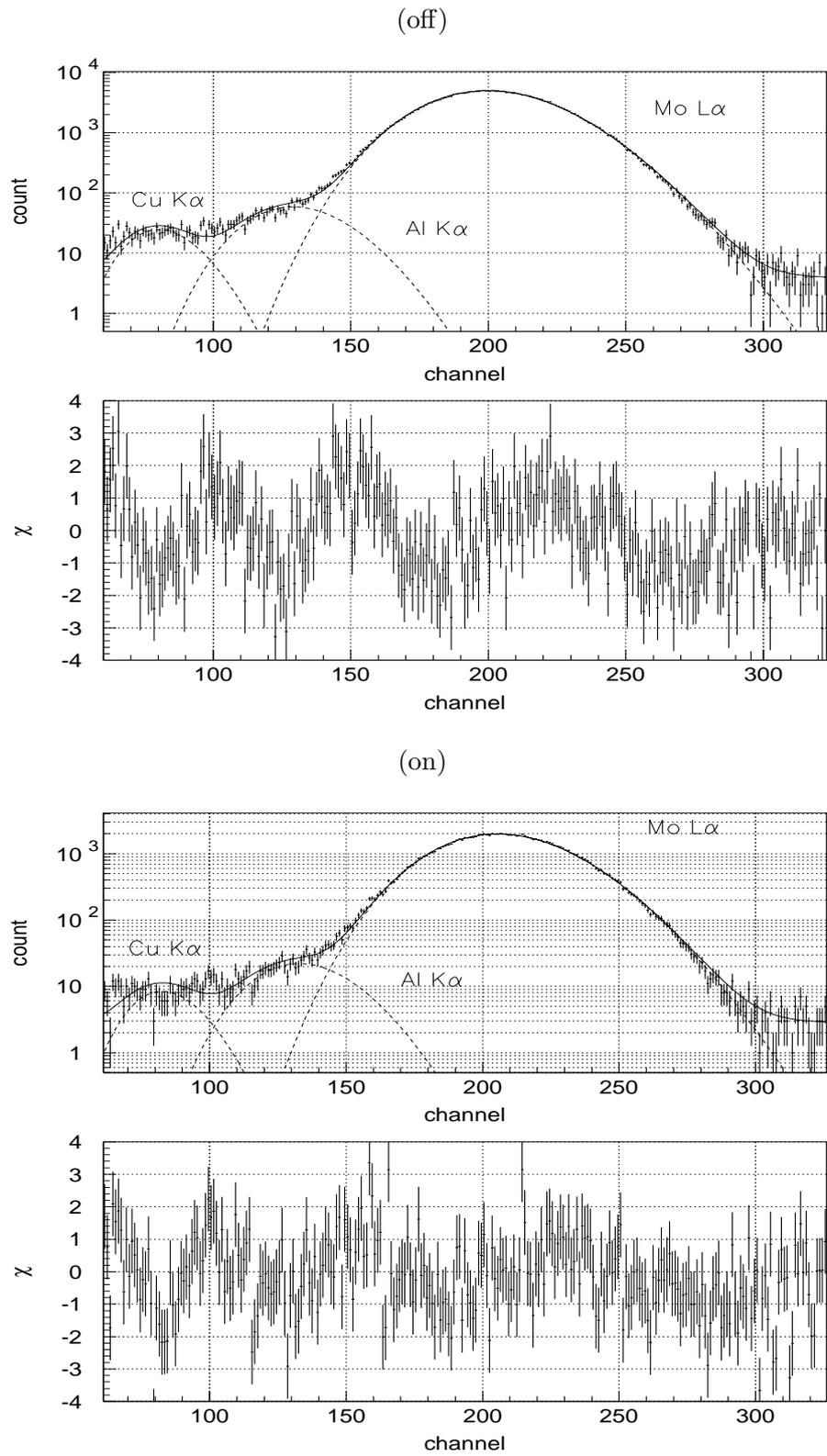


Figure 4.10: Be $100\mu\text{m}$ フィルタの測定に用いた Mo $L\alpha$ のスペクトル

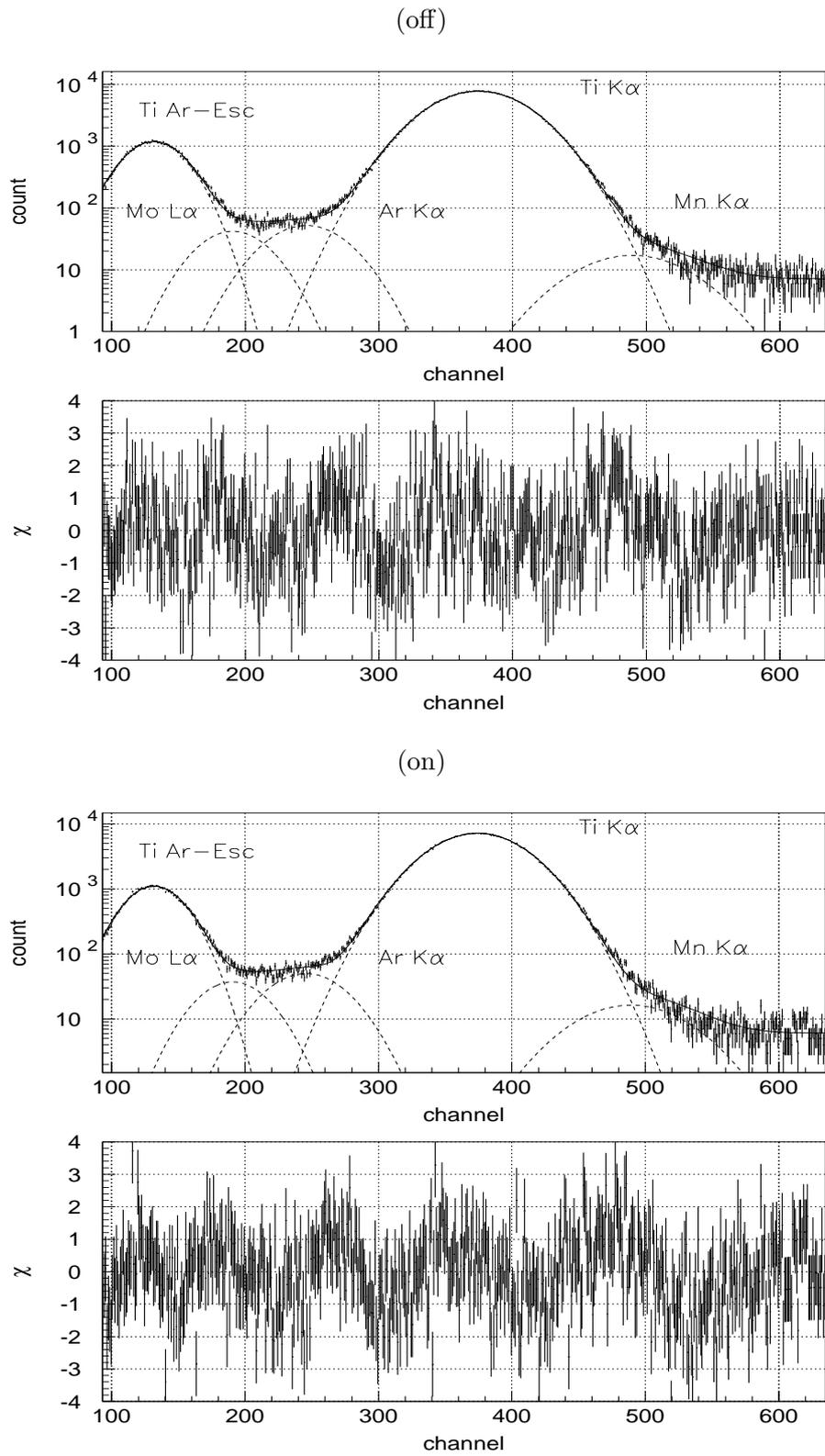
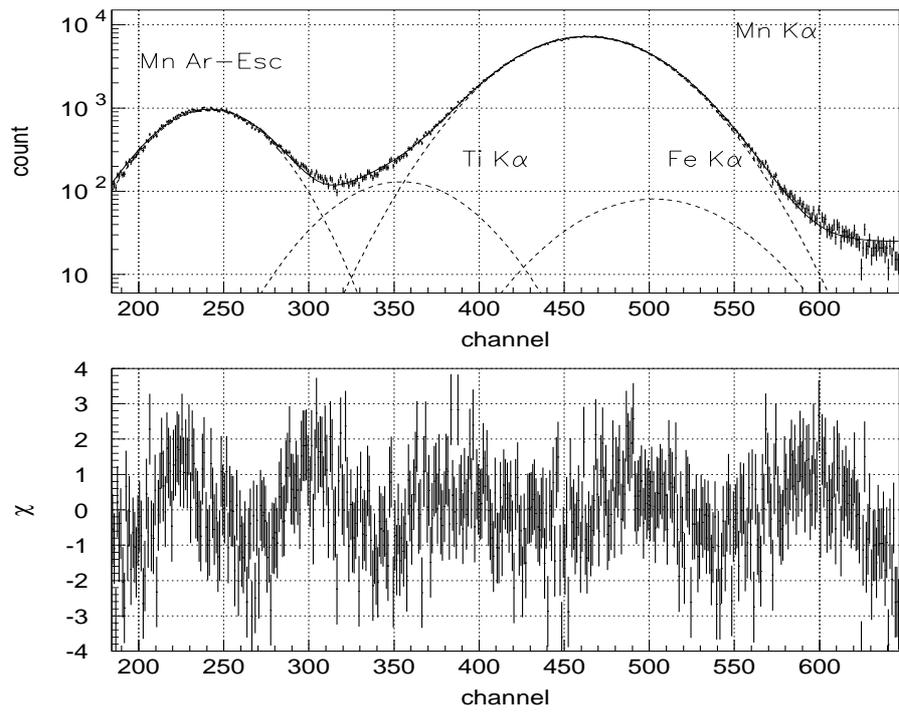


Figure 4.11: Be100 μ m フィルタの測定に用いた Ti K α のスペクトル

(off)



(on)

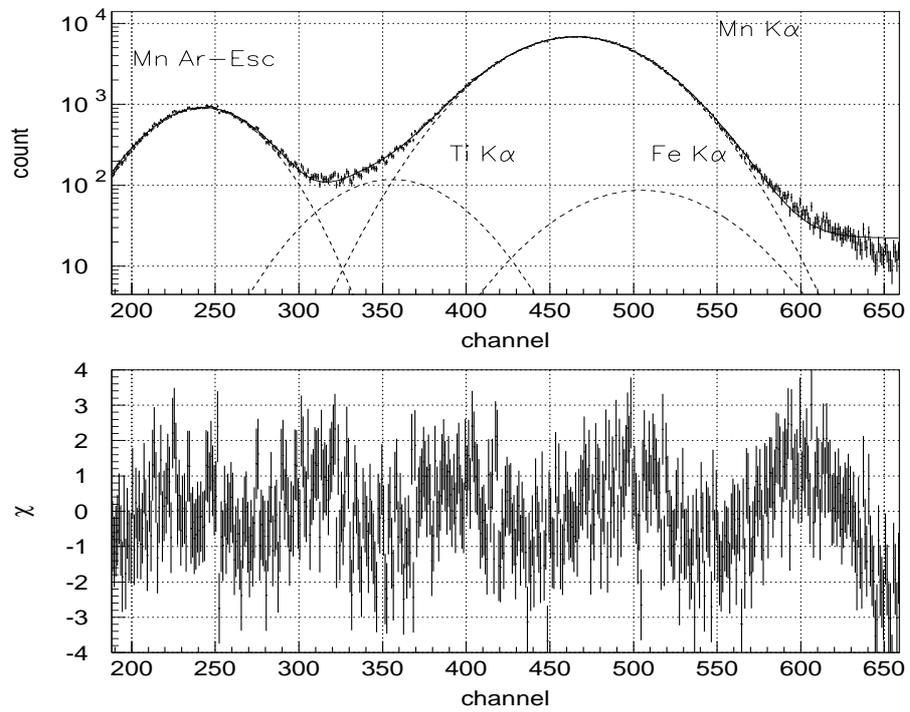


Figure 4.12: Be100 μ m フィルタの測定に用いた Mn K α のスペクトル

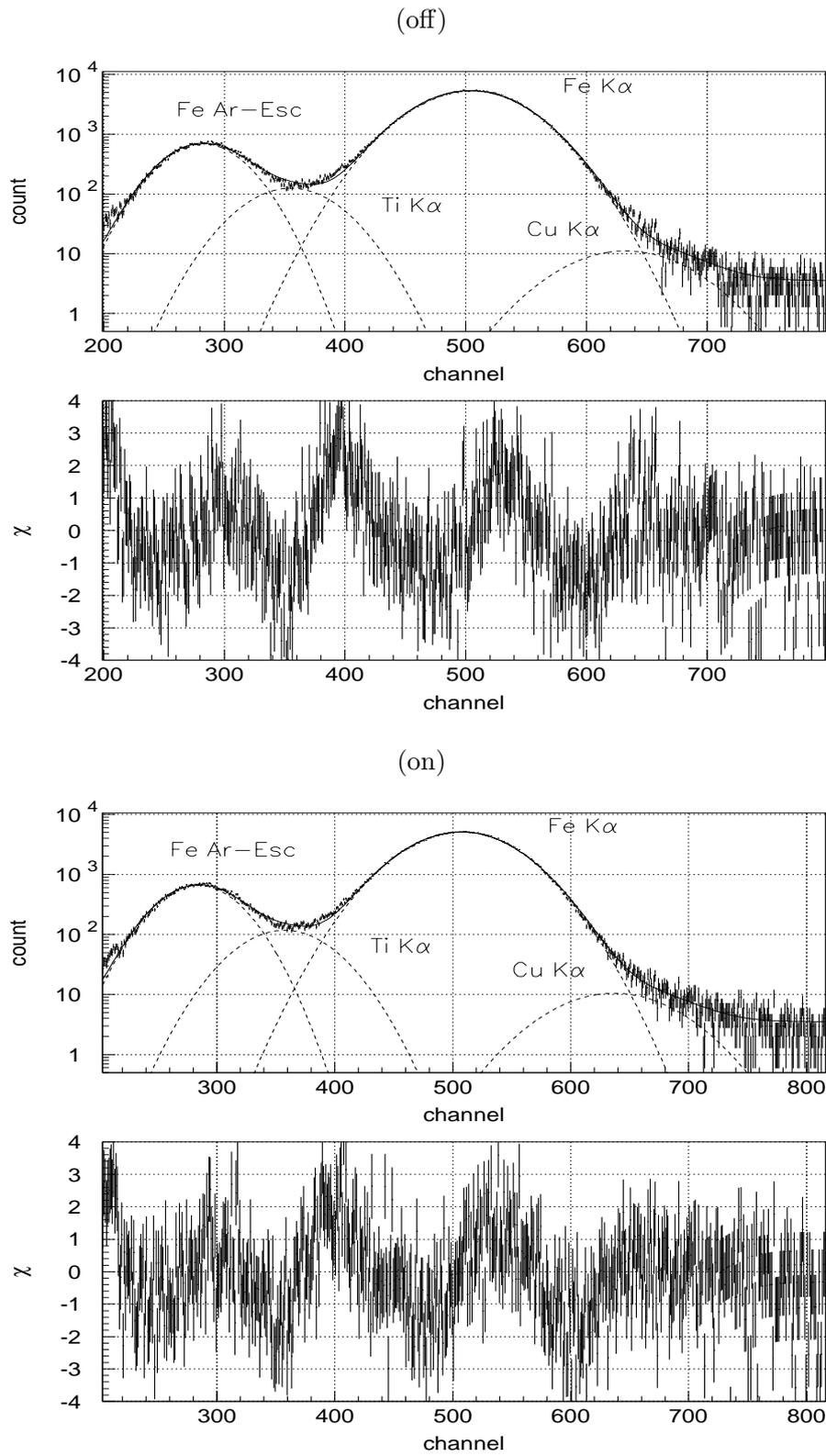


Figure 4.13: Be100 μm フィルタの測定に用いた Fe $K\alpha$ のスペクトル

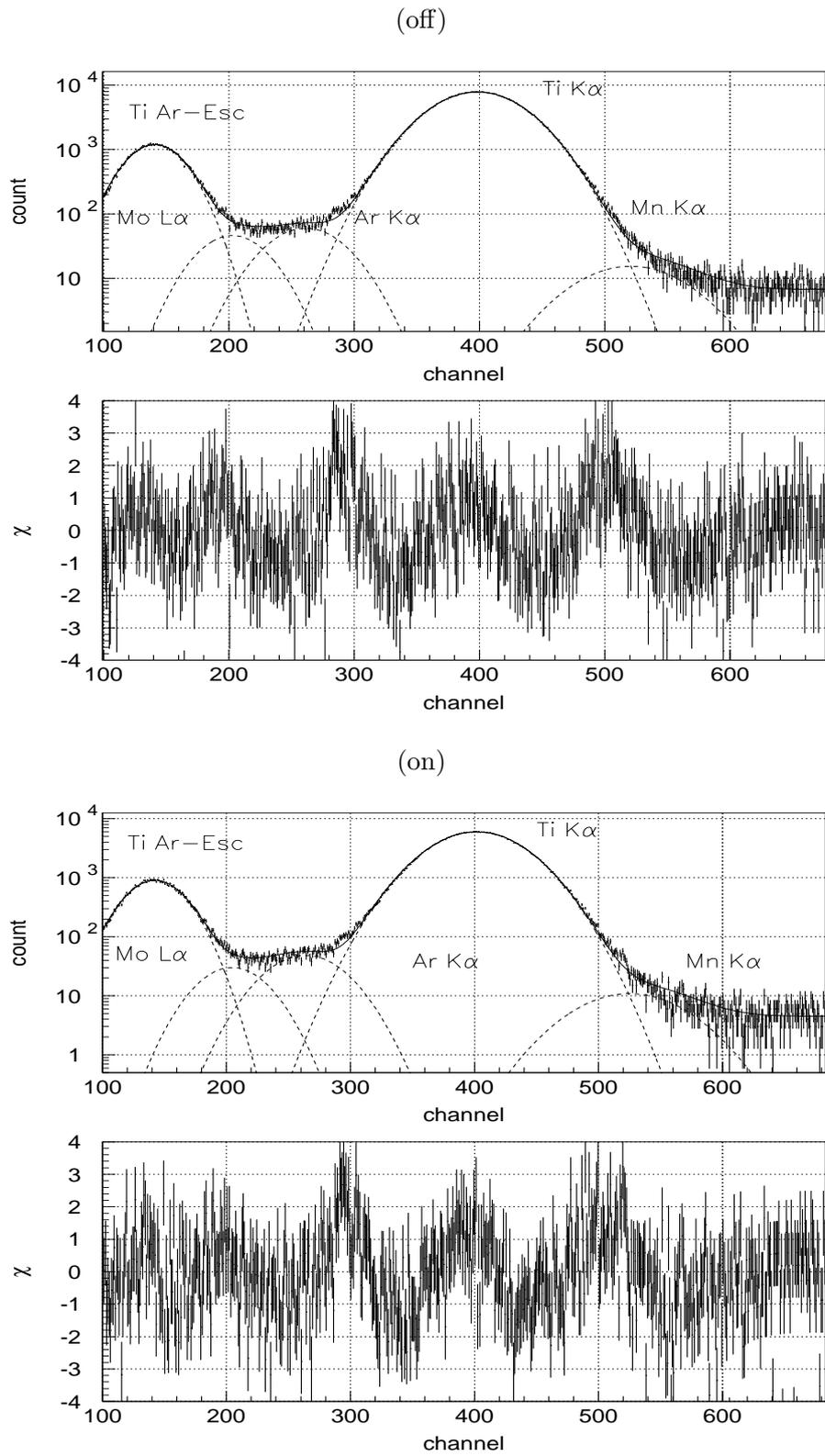
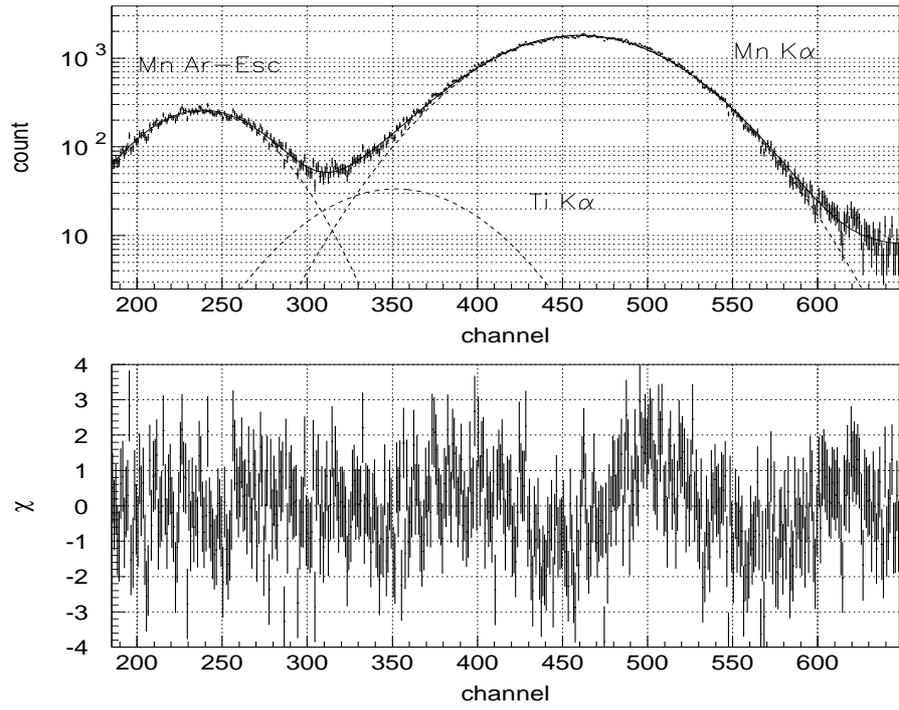


Figure 4.14: Be300 μ m フィルタの測定に用いた Ti K α のスペクトル

(off)



(on)

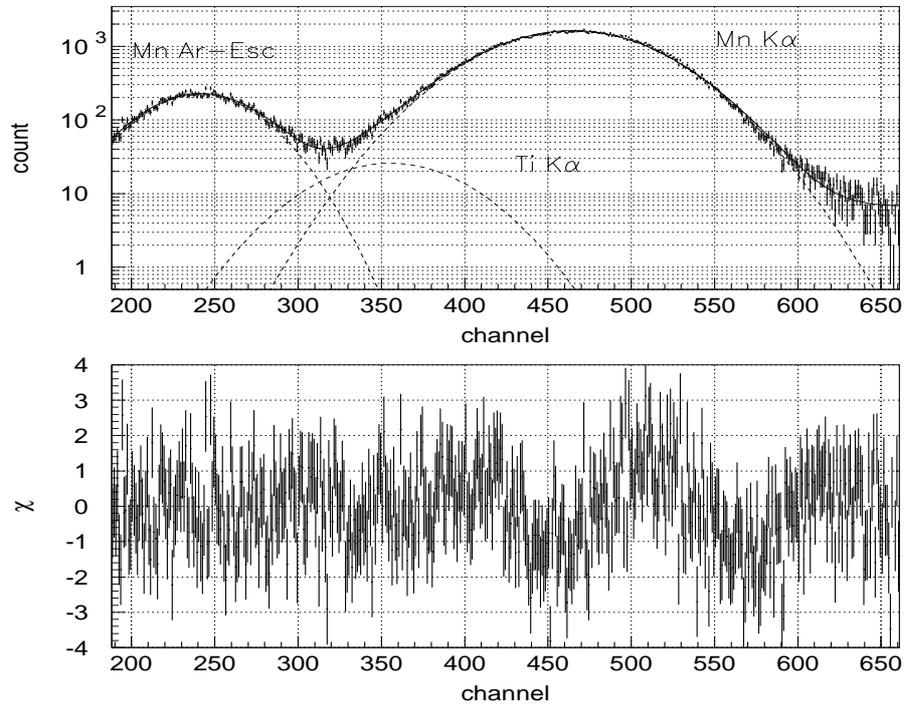


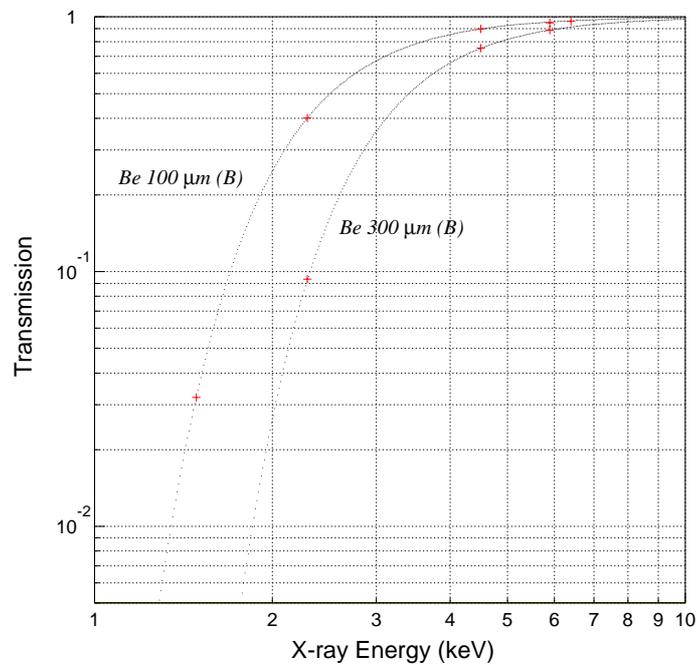
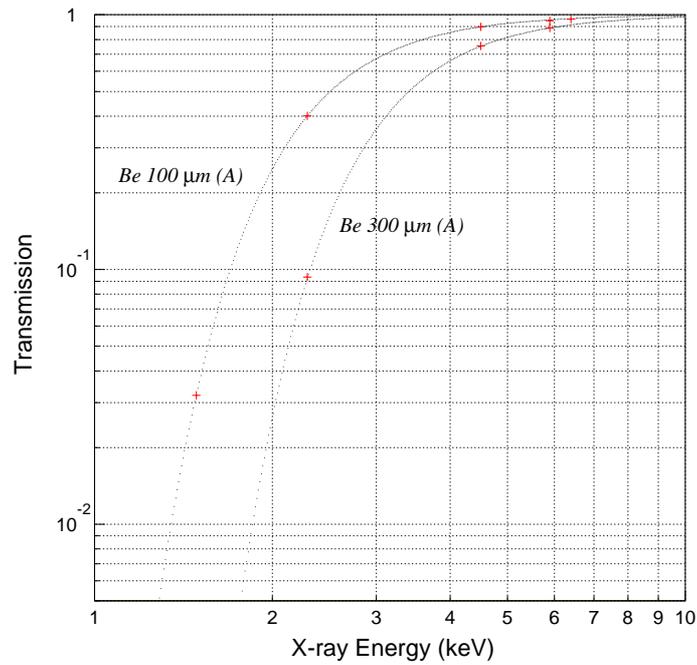
Figure 4.15: Be300 μ m フィルタの測定に用いた Mn K α のスペクトル

Ti K α に対するモデル		
特性 X 線	E[keV]	モデル
Ti K α	4.509	Gauss
Mo L α	2.293	Gauss(エネルギーと幅を固定)
Mn K α	5.895	Gauss(エネルギーと幅を固定)
Ti の Ar エスケープ	1.551	Gauss
不明の混入線	~3	Gauss (エネルギーと幅を固定)
Mn K α に対するモデル		
特性 X 線	E[keV]	モデル
Mn K α	5.895	Gauss
Ti K α	4.509	Gauss(エネルギーと幅を固定)
Fe K α	6.400	Gauss(エネルギーと幅を固定)
Mn の Ar エスケープ	2.937	Gauss
Fe K α に対するモデル		
特性 X 線	E[keV]	モデル
Fe K α	6.400	Gauss
Ti K α	4.509	Gauss(エネルギーと幅を固定)
Cu K α	8.040	Gauss(エネルギーと幅を固定)
Fe の Ar エスケープ	3.442	Gauss

Table 4.6: スペクトル解析時に仮定した各輝線に対するモデル (2)

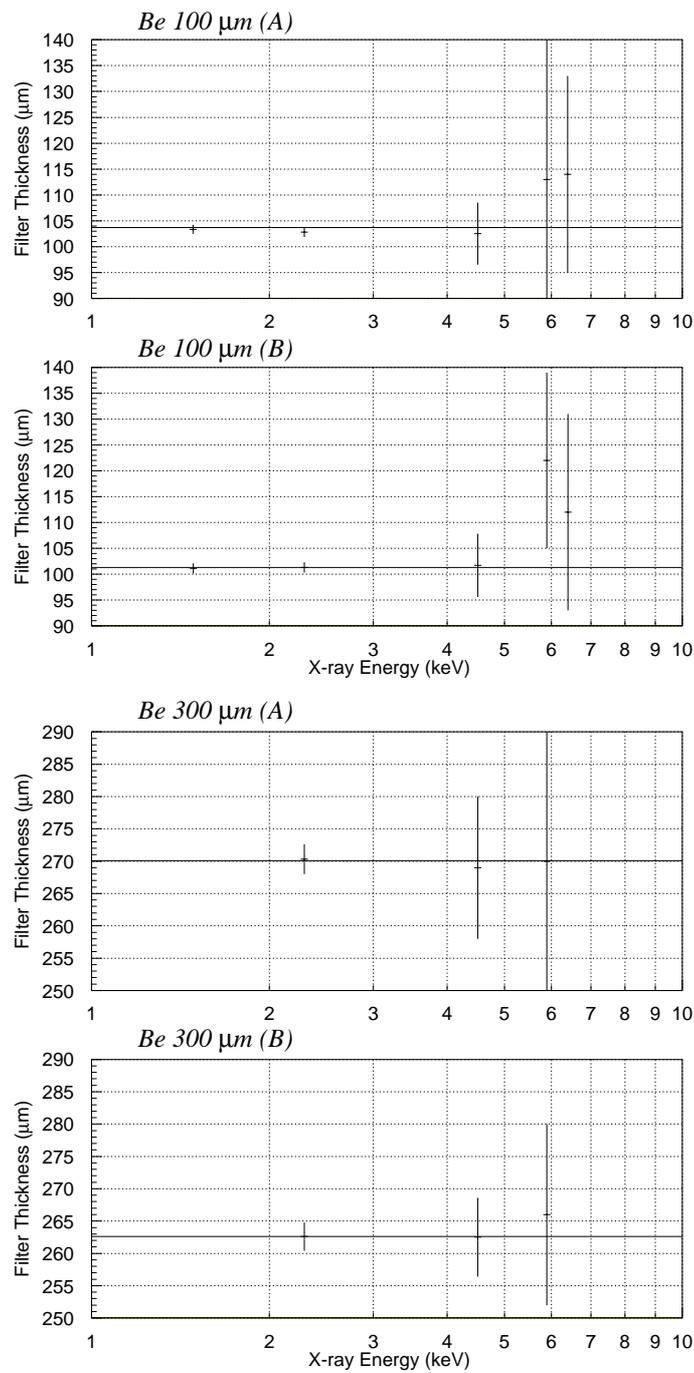
4.4.3 結果

フィルタ中心の透過率を異なるエネルギーの X 線を用いて測定した結果を Figure 4.16に、それを膜厚に換算したものを Figure 4.17に示す。ただし図における実線は平面フィットを行うことによって算出した膜厚平均値の値を参照している。これをみると、§ 4.3 で測定した平均膜厚に対して Be100 μm (B) の Mn の結果が 2σ となっている以外は誤差の範囲で一致しており、正しいエネルギー依存性を示していることがわかる。膜厚にしてみるとエネルギーが高くなるにつれ有意な判定が困難となるが Be100 μm については Al K α 、Mo L α を用いた測定結果が膜厚の 1% 以内で一致している。Be300 μm において A フィルタについては積分時間が B フィルタ測定時よりも短いため統計誤差が大きく有意な判定が難しいが、B フィルタについては Mo L α 、Ti K α の結果が 1% 以内で一致していることがわかる。Mapping 測定の結果で膜厚最大、最小を示す 2 点を選び中心も含めて 3 点において膜厚測定を行った。その結果を Figure 4.18、4.19に表す。どのフィルタに対しても全ての測定点で Mapping 測定の結果と誤差の範囲で一致している。膜厚勾配については 100 μm (A) フィルタは誤差を考慮にいれても有意な勾配が確認できた。その他フィルタでは 100 μm (B) については膜厚勾配が低いこと、また 300 μm フィルタは Ti K α による測定の誤差が大きいため有意な判定が難しい。



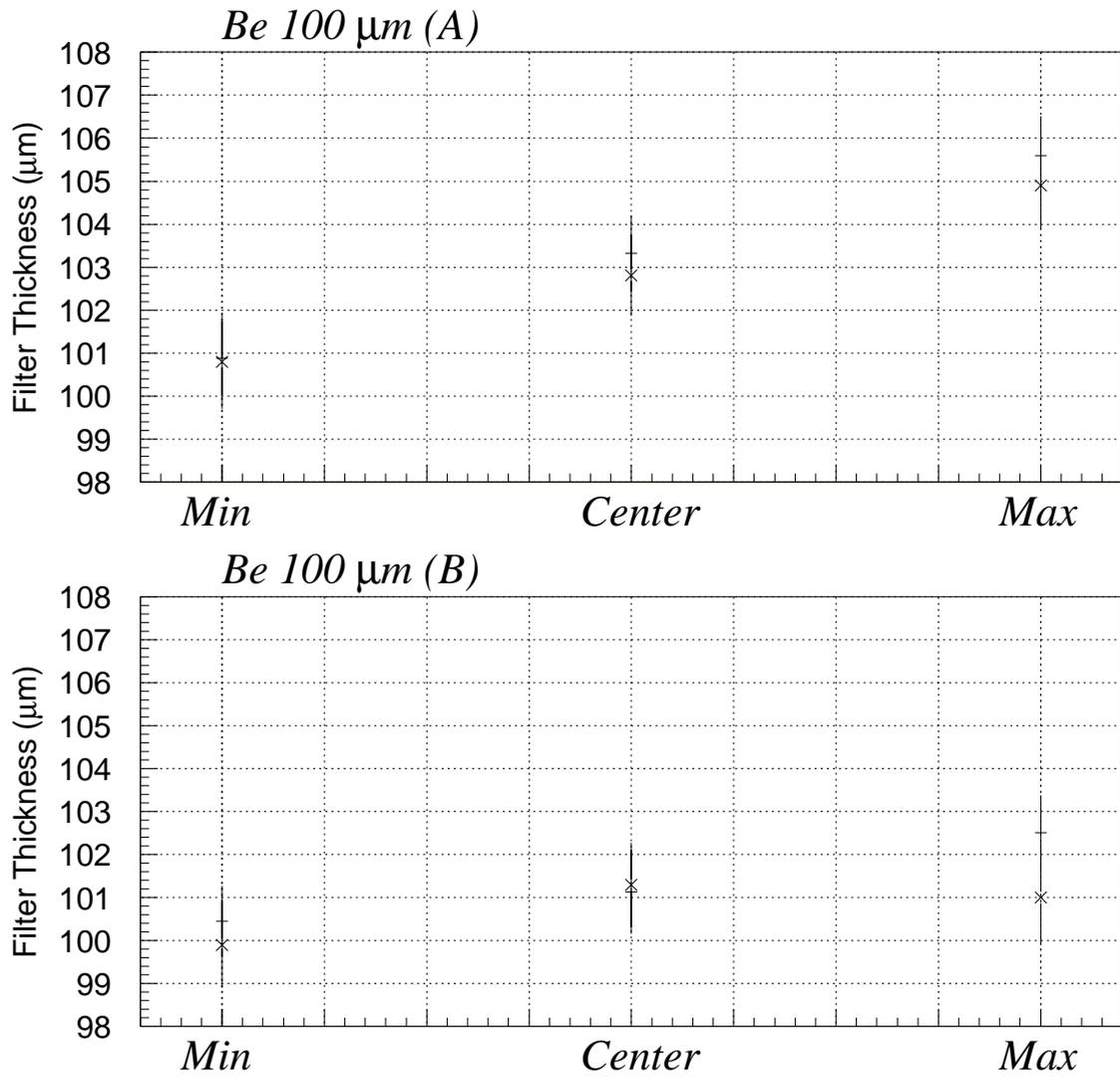
	Be100 μm (A)	Be100 μm (B)	Be300 μm (A)	Be300 μm (B)
Al K α 1.487keV	2.983 \pm 0.090	3.21 \pm 0.11	—	—
Mo K α 2.293keV	39.52 \pm 0.34	40.07 \pm 0.35	8.71 \pm 0.18	9.34 \pm 0.19
Ti K α 4.509keV	89.57 \pm 0.58	89.65 \pm 0.59	74.94 \pm 0.87	75.44 \pm 0.50
Mn K α 5.895keV	94.98 \pm 2.00	94.64 \pm 0.72	88.46 \pm 0.80	88.63 \pm 0.55
Fe K α 6.400keV	96.11 \pm 0.64	96.18 \pm 0.64	—	—

Figure 4.16: Be フィルタ中心に対する透過率測定結果 (1)。測定に用いた特性 X 線は低エネルギー側から順に Al K α 、Mo L α 、Ti K α 、Mn K α 、Fe K α である。グラフ中に示される曲線は Mapping 測定で得られた平均膜厚による透過率を表す。



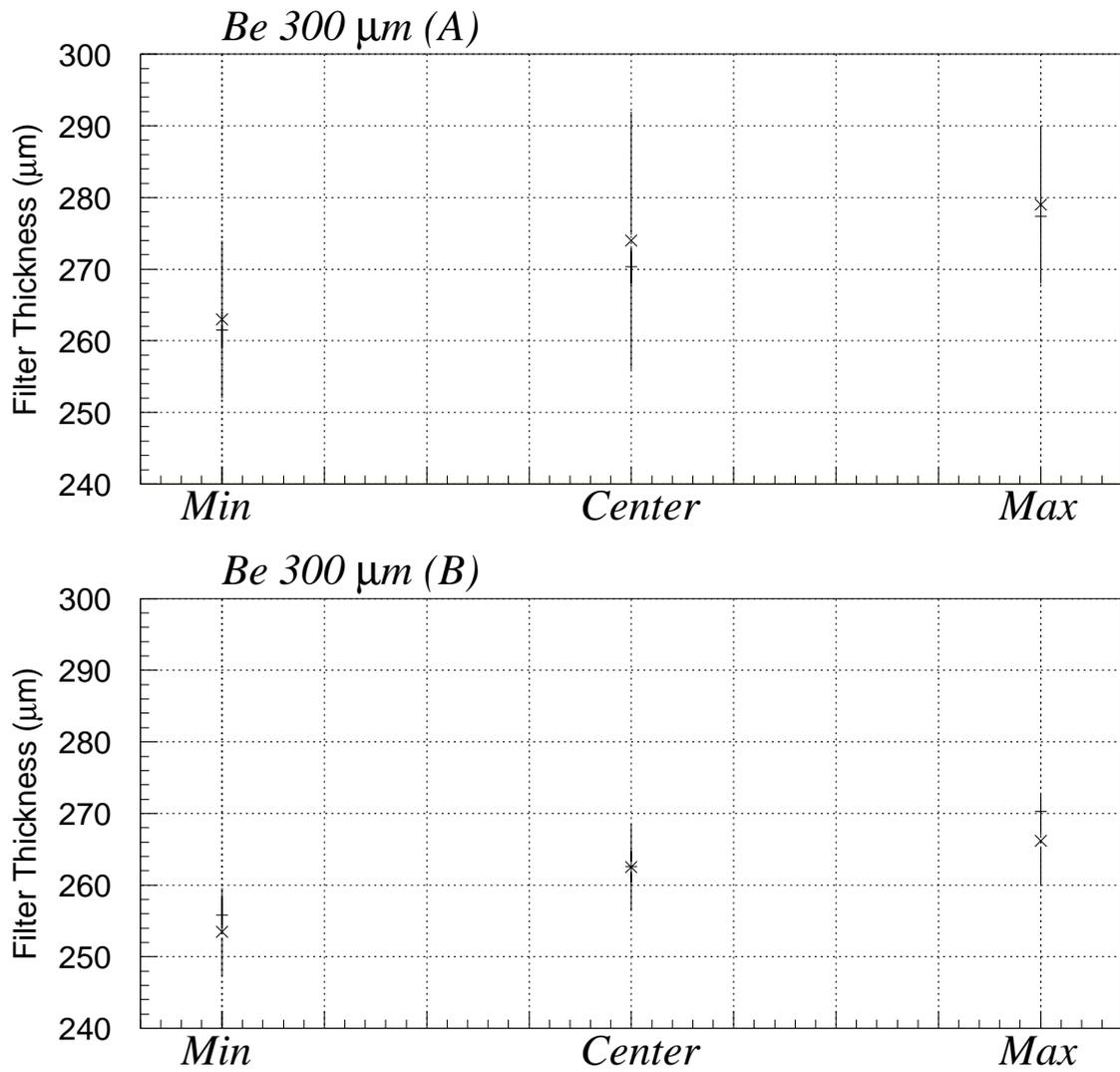
	Be100μm(A)	Be100μm(B)	Be300μm(A)	Be300μm(B)
Al Kα 1.487keV	103.32 ± 0.89	101.13 ± 0.98	—	—
Mo Kα 2.293keV	102.81 ± 0.94	101.30 ± 0.98	270.3 ± 2.3	262.6 ± 2.2
Ti Kα 4.509keV	102.5 ± 6.0	101.7 ± 6.1	269 ± 11	262.5 ± 6.1
Mn Kα 5.895keV	113 ± 46	122 ± 17	270 ± 20	266 ± 14
Fe Kα 6.400keV	114 ± 19	112 ± 19	—	—

Figure 4.17: Be フィルタ中心に対する透過率測定結果 (2)。実線は Mapping 測定で得られた平均膜厚値を表す。



		Be100μm(A)		
		(0,0)	(0,15)	(0,-15)
Al Kα		103.32 ± 0.89	105.60 ± 0.91	100.88 ± 0.86
Mo Lα		102.81 ± 0.94	104.9 ± 1.0	100.8 ± 1.1
		Be100μm(B)		
		(0,0)	(-10,15)	(10,-15)
Al Kα		101.13 ± 0.98	102.50 ± 0.88	100.45 ± 0.82
Mo Lα		101.29 ± 0.98	101.0 ± 1.1	99.9 ± 1.0

Figure 4.18: Be100μm フィルタの膜厚勾配。+ が Al Kα による Mapping 測定の結果、× が Mo Lα で得られた結果



Be300 μ m(A)			
	(0,0)	(10,10)	(-10,-10)
Mo L α	270.3 \pm 2.3	277.4 \pm 2.5	261.5 \pm 2.5
Ti K α	274 \pm 18	279 \pm 11	263 \pm 11
Be300 μ m(B)			
	(0,0)	(-10,-10)	(15,-10)
Mo L α	262.6 \pm 2.2	270.3 \pm 2.5	255.8 \pm 2.4
Ti K α	262.5 \pm 6.1	266.2 \pm 6.1	253.5 \pm 6.1

Figure 4.19: Be300 μ m フィルタの膜厚勾配。+ が Mo L α による Mapping 測定の結果、 \times が Ti K α で得られた結果

4.5 まとめ

Mapping 測定において一定方向への膜厚勾配が確認されたため平面を仮定してフィッティングを行い平均膜厚値、膜厚勾配の大きさ、方向を評価した。この透過率で求めた平均膜厚値は、重量測定から求めたものと比較するとどのフィルタに対しても 6% 程度低い値を示している。これに対してビームサイズ内の膜厚むらの効果、重量測定の検証などについて考察したが 6% の違いを説明することは難しく再度検討の必要がある。また膜厚勾配については 100 μm 、300 μm どちらのフィルタに対しても B フィルタの方が小さく、この結果を考慮してどちらも B フィルタを衛星搭載用として採用することに決定した。100 μm フィルタ (B) については平均膜厚値 $101.31 \pm 0.11 \mu\text{m}$ 、位置依存性 $< 2 \mu\text{m}$ 、300 μm フィルタ (B) は平均膜厚値 $264.19 \pm 0.31 \mu\text{m}$ 、位置依存性 $< 6 \mu\text{m}$ となる (ただし平均膜厚値は透過率測定によるもの)。フィルタの膜厚むらは検出効率に位置依存性をうむため、衛星搭載時にフィルタの設置方法を工夫することにし、この結果を検出器のレスポンスに組み込むことで対応する。Figure 4.20に衛星搭載時のフィルタの設置方法を表す。またフィルタ中心に対して異なるエネルギーの X 線をあて透過率のエネルギー依存性に対する評価を行った。その結果膜厚測定で得られた平均膜厚値に対して設計どおりのエネルギー依存性を得ることができた。

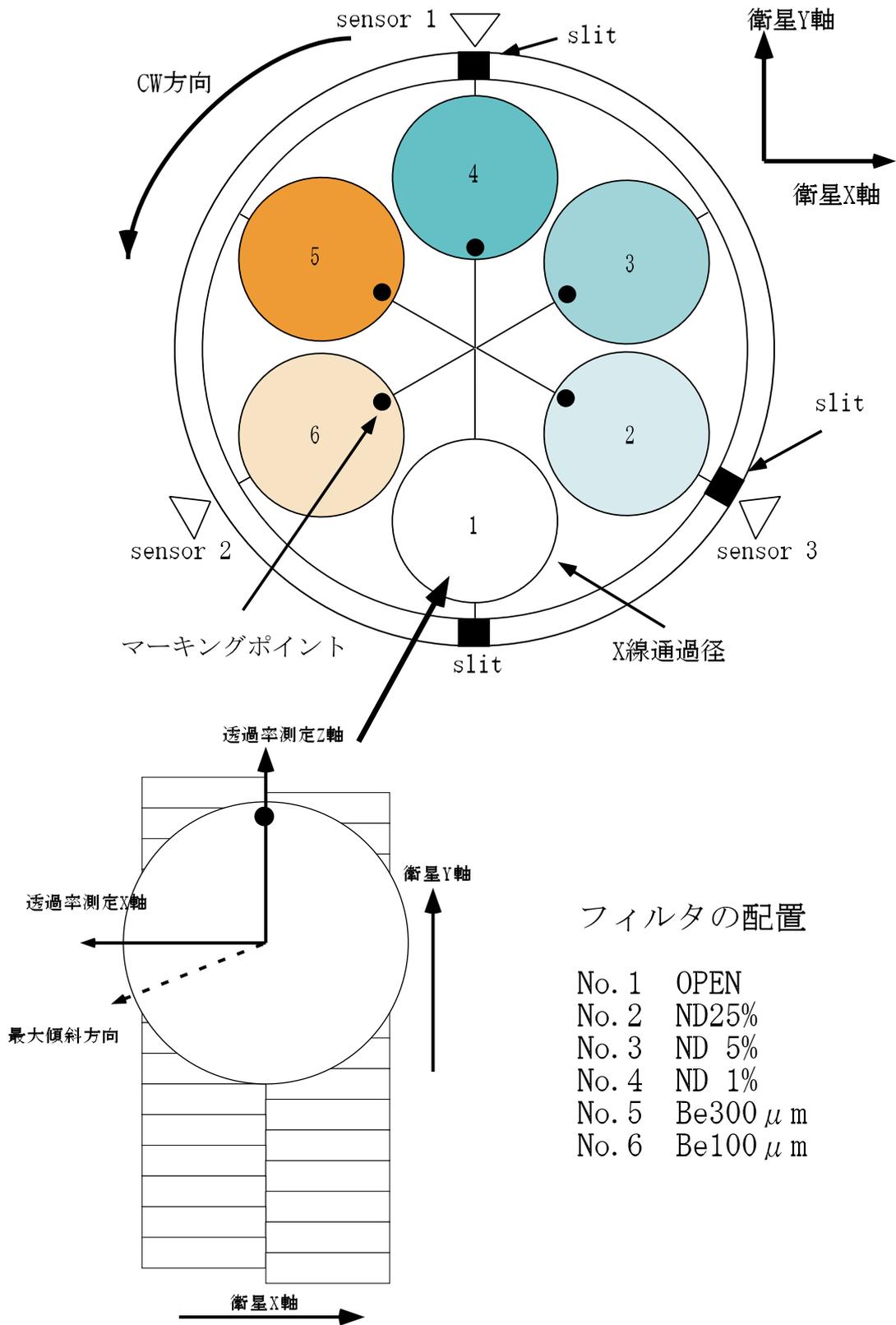


Figure 4.20: 衛星搭載時フィルタエレメント設置方法。XRT側から見たフィルタの配置を表す。これは透過率測定においてX線発生装置側(表側)に一致する。

Chapter 5

ND フィルタの透過率測定

5.1 目的

ND フィルタはどのエネルギー範囲においても高いエネルギー分解能での測定を行えるようエネルギー依存性を持たないフィルタとしてフィルターホイールに設置される。透過率は 25%、5%、1% が各 1 枚用意されフィルタなしの状態 (100%) を含めると 4 段階で入射 X 線強度を制限できる。エネルギーにも場所にも依存しないフィルタを実現するために硬 X 線の突き抜けが無視できる Mo 板 200 μm に、放電加工によって 1802 個の穴をあける。この製作時にピンホール径、ピンホール間隔の設計値からのずれ、バリ、カエリの発生が予想される。いずれも透過率に影響を与えるため、実際に X 線をあて透過率の位置依存性、エネルギー依存性にたいする評価を行う。

5.2 スキャン測定法

X 線ビームは平行度を高め、確実に 2 結晶分光器のミラーに入射させ 2 回反射させるために真空チェンバ入口で鉛コリメータ、スリットによってコリメートしている。このためビームプロファイルが Al $K\alpha$ の時で $0.05 \times 3 \text{ mm}$ 、その他の輝線では $0.45 \times 3 \text{ mm}$ となっている。この大きさはピンホールの間隔 0.98 mm に比べて小さいため、ND フィルタの測定においてはビームがフィルタにあたる位置によってビームの中に入るピンホールの数が大幅に異なり、正確な透過率の算出が困難となる。そこで X 線ビームをあてながら一定の割合でフィルタをスキャンをさせ、一定領域をビームがはく間に検出される X 線フォトン全てをフィルタ ON 時のカウントとすることで透過率を算出することにする。Figure 5.1 にこの測定方法の概要を表す。

スキャンする領域は大きいほどピンホールの入り方による透過率への影響を小さくできるため望ましいが、3 軸テーブルの各テーブルには他のテーブル、フィルタホルダの重量が負荷としてかかっており長時間のスキャン測定を行うとモータの温度が 70°C 近くまで上昇する。これはモータの動作に支障を与えるだけでなく、フィルタホルダに設置している測定用フィルタにまで熱が伝わるため望ましくない。そこでスキャン領域を $7 \times 10 \text{ mm}$ と決め、この領域の大きさに対するピンホールの入り方による透過率への影響をあらかじめ見積もることにする。Table 5.1 にこの透過率を算出する際に用いたピンホール径、予想透過率とその幾何学的誤差をまとめる。

フィルタのスキャンは、X 方向は 25 μm ステップで 7 mm、Z 方向は 50 μm ステップで 10 mm の領域をはく。したがってビームはこの領域内で合計で 56000 ポイントにあたることにな

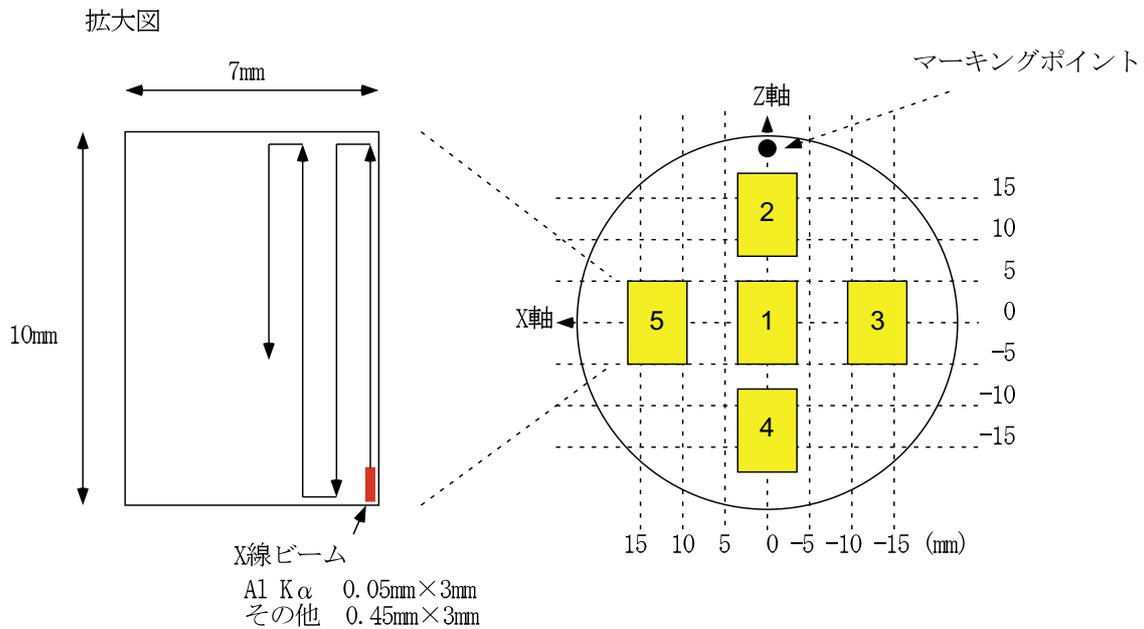


Figure 5.1: ND フィルタスキャン測定法

る。ビームのあてかたとして1つのポイントに滞在する時間は100 msec、次のポイントに移る時間は100 msec に比べて十分短い時間である。この X、Z テーブルのスキャンは神津精機 PMC-2GR の自動制御プログラムを用いた。このようにしてフィルタ ON 時の測定を行うがこのスキャンには 6000 sec の時間がかかるため、その間の X 線発生装置の時間変動を考慮しなければならない。そこでフィルタ OFF のデータは ON のデータ取得前後でとり、OFF 時のカウントは2つのデータの平均値を用いること、系統誤差としてカウントレートの0.5%を見込むことで対応する。

	ピンホール径 [mm]	予想透過率 [%]
25%	0.5064 \pm 0.0041	24.30 \pm 0.40
5%	0.2249 \pm 0.0015	4.78 \pm 0.12
1%	0.1122 \pm 0.0027	1.19 \pm 0.03

Table 5.1: スキャン領域に含まれる穴の数による透過率の変化。ピンホール径は100点ほどのサンプリングポイントに対して実測した値の平均を用いている(文献[14][15]参照)。また予想透過率に対する誤差は90%エラーとする。

5.3 Mapping 測定

5.3.1 測定法

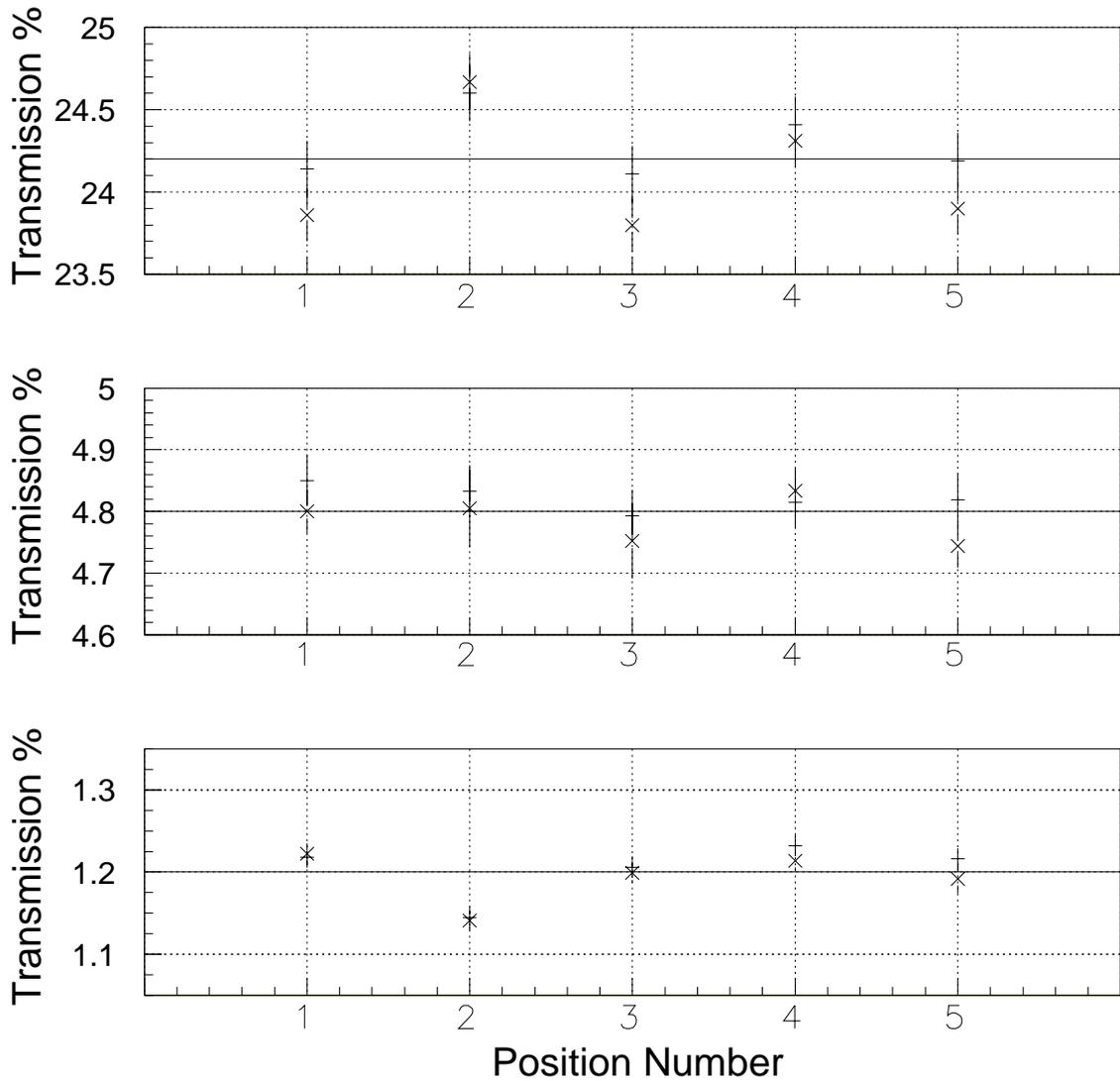
フィルタの位置依存性を評価するために Figure 5.1のように中心を含め 5 点において透過率測定を行う。ここでそれぞれの測定ポイントに対しマーキングポイントを基準として 1~5 までの position ID をつける。測定に用いた特性 X 線は Al $K\alpha$ 1.487 keV、Mo $L\alpha$ 2.293 keV で透過率を算出する際のフィッティングモデルはそれぞれ Be フィルタの透過率解析時と同一のモデルを用いている。Table 5.2に測定に用いた輝線の強度、積分時間をまとめる。ただし Mo $L\alpha$ に用いた ND 1% フィルタ測定時では統計精度をあげるため出力を 2 倍の 200mA にしたため強度は Table の値のおよそ 2 倍となる。本章末に測定に用いた輝線のスペクトルを示す。

特性 X 線	Al $K\alpha$	Mo $L\alpha$
	1.487 keV	2.293 keV
X 線強度 (フィルタ OFF 時)	850 c/s	250 c/s
積分時間 (フィルタ OFF 時)	300 sec	1500 sec
積分時間 (フィルタ ON 時)	6000 sec	6000 sec
X 線発生装置出力	20kV 100mA	20kV 100mA

Table 5.2: ND フィルタ Mapping 測定における輝線の強度 (1)

5.3.2 結果

Fig 5.2に Mapping 測定の結果を示す。どのフィルタも全ての測定点において Al $K\alpha$ 、Mo $L\alpha$ による結果は誤差の範囲で一致している。各フィルタの 5 つの点における透過率の平均値は 25% フィルタが $24.2 \pm 0.5\%$ 、5% フィルタが $4.80 \pm 0.04\%$ 、1% フィルタが $1.20 \pm 0.05\%$ となる。ただし誤差はこの平均値からの偏差を 90% エラーで表したものである。この値は各フィルタに対して Table 5.1において予想した透過率と非常に良く一致していると言える。また位置依存性は 25% フィルタが透過率の平均値に対して $<1.7\%$ 、5% フィルタが $<0.63\%$ 、1% フィルタが $<4.6\%$ となる。ビームに対するピンホールの入り方による効果を考慮すれば 25%、5% については誤差の範囲であると言える。1% フィルタについてはそれでは説明ができず、放電加工による穴径、穴間隔の違いによる効果がでてきていることになる。



25%					
	No 1	No 2	No 3	No 4	No 5
Al Kα	23.86 ± 0.16	24.67 ± 0.17	23.80 ± 0.16	24.31 ± 0.16	23.90 ± 0.16
Mo La	24.14 ± 0.17	24.60 ± 0.17	24.11 ± 0.17	24.41 ± 0.17	24.19 ± 0.17
5%					
Al Kα	4.800 ± 0.035	4.805 ± 0.063	4.752 ± 0.061	4.834 ± 0.036	4.744 ± 0.035
Mo La	4.850 ± 0.042	4.833 ± 0.042	4.793 ± 0.042	4.815 ± 0.041	4.819 ± 0.043
1%					
Al Kα	1.222 ± 0.013	1.141 ± 0.012	1.199 ± 0.012	1.214 ± 0.012	1.192 ± 0.018
Mo La	1.218 ± 0.013	1.145 ± 0.013	1.206 ± 0.013	1.232 ± 0.013	1.216 ± 0.013

Figure 5.2: ND フィルタ Mapping 測定結果。×印が Al K、+印が Mo L による測定結果を示し、実線は 5 点の平均値を表す。

5.4 異なるエネルギーによる測定

5.4.1 測定法

ND フィルタは透過率がエネルギーに依存しないフィルタとして設計されているが、実際にその特性が得られていることを確認するために異なるエネルギーの X 線をあてエネルギー依存性の評価をする。測定はフィルタ中心 (position ID=1) に対して Al $K\alpha$ 、Mo $L\alpha$ 、Ti $K\alpha$ 、Mn $K\alpha$ 、Fe $K\alpha$ の 5 つの輝線を用いて行った。Al $K\alpha$ 、Mo $L\alpha$ に対してはマッピング測定において透過率を算出しているためその値を用いた。Ti $K\alpha$ 、Mn $K\alpha$ 、Fe $K\alpha$ に対する X 線強度、積分時間を Table 5.3 にまとめる。

特性 X 線	Ti $K\alpha$	Mn $K\alpha$	Fe $K\alpha$
	4.509 keV	5.895 keV	6.400 keV
X 線強度 (フィルタ OFF 時)	220 c/s	250 c/s	180 c/s
積分時間 (フィルタ OFF 時)	1500 sec	1500 sec	1500 sec
積分時間 (フィルタ ON 時)	6000 sec	6000 sec	6000 sec
X 線発生装置出力	20kV 10mA	20kV 30mA	20 kV 20mA

Table 5.3: ND フィルタ Mapping 測定における輝線の強度 (2)

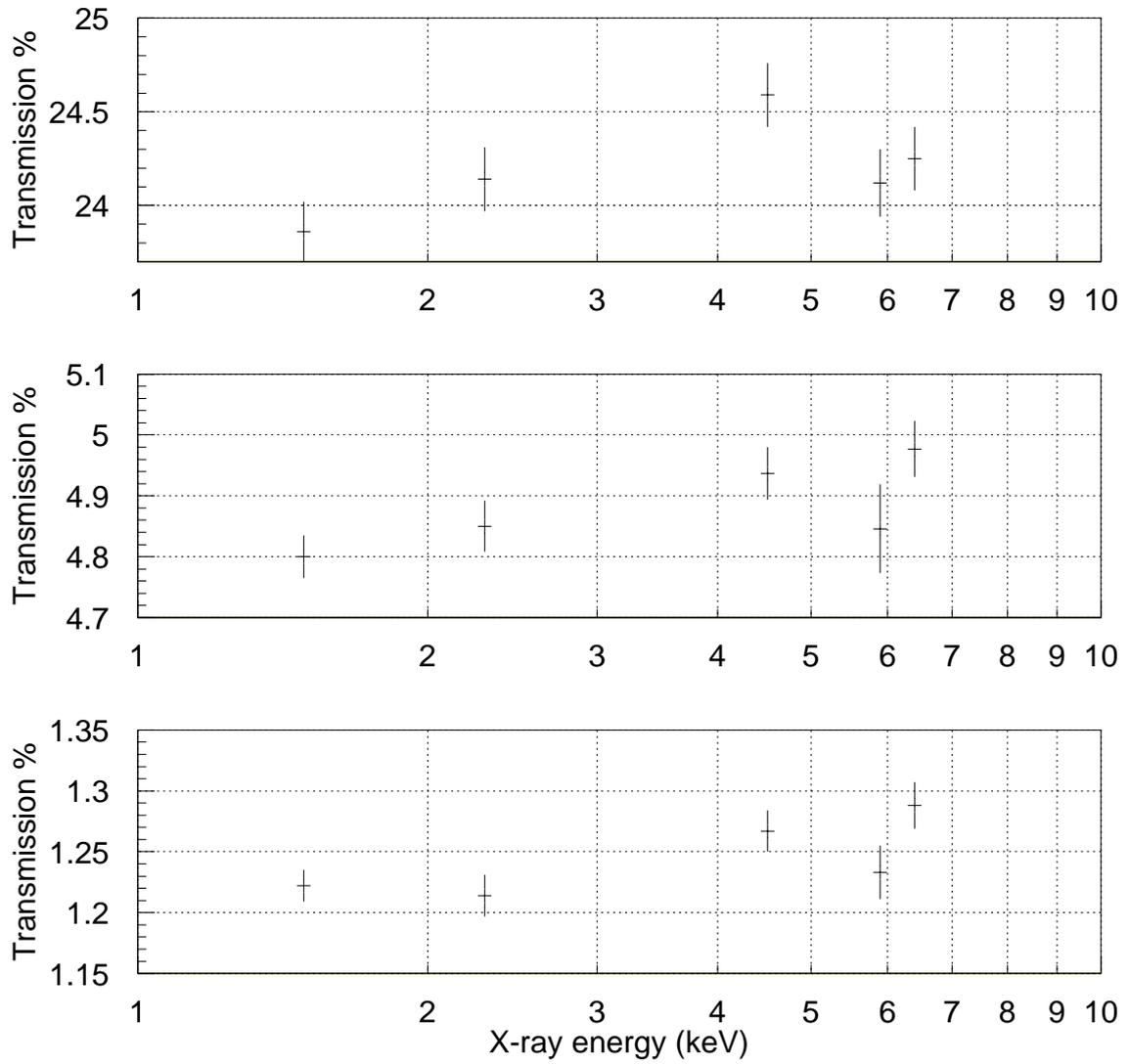
5.4.2 結果と考察

各フィルタに対しての測定結果を Fig 5.3 にまとめた。どのフィルタに対してもエネルギーが高くなると透過率が上がる傾向がみられ、この傾向はフィルタの透過率が低いほど強くなる。1% フィルタの結果をみると測定に用いる X 線のエネルギーが 1.487 keV から 6.400 keV に上がると透過率が 6% 程度上がる。このエネルギー依存性を説明するために Figure 5.4 に幾何学的モデルを示す。まず考えられるのは、ビームのフィルタに対する入射角度による透過率へ影響である。ND フィルタは硬 X 線に対しても十分な阻止能をもつ厚さ $200\mu\text{m}$ の Mo 板によって作られているため、ピンホール位置以外の場所ではエネルギーが 10 keV の場合でも強度は 10^{-3} 程度まで減衰する。しかし図のモデル 1 の様に測定に用いたビームがある角度を持って入射する場合、フィルタの厚さの薄い部分を通過することが可能で、この時エネルギーが高いほどピンホールの有効径が大きくなり、結果として透過率が上がり定性的な説明が可能になる。しかし 3 章において見積もられたビームのフィルタに対する入射角度は最大でも 0.27° で、これが透過率に与える影響は 1% 以下になり 6% のエネルギー依存性を説明するのは困難である。そこでピンホール加工時に発生するバリによる影響を考えてみた。ピンホールの側面に図のモデル 2 の様な凹凸がある場合、フィルタの厚さが位置によって変化する。これもモデル 1 同様、入射する X 線のエネルギーによって有効径が変化するため、透過率のエネルギー依存性を生むことになる。ここでフィルタの厚さ方向にある無数のバリをひとつの三角形で表し、どの程度のバリが存在すれば Al $K\alpha$ 、Fe $K\alpha$ におけるエネルギー依存性を説明することができるかを見積もる。まず 6% の透過率の違いを説明するために必要な 2 つのエネルギーにおける有効径の違いは $4\mu\text{m}$ となる。次に Attenuation Length よりフィルタの厚さが薄い時には透過しそれよりも大きい時に

は吸収、散乱されると仮定し、各々の有効径におけるバリの厚さを考えると Al $K\alpha$ が $0.47 \mu\text{m}$ Fe $K\alpha$ が $3.5 \mu\text{m}$ である。以上からバリの大きさとして底辺が $3\mu\text{m}$ 、高さが $2.3\mu\text{m}$ が見積もられ、ND フィルタの製作時に生まれるバリとしては適当な大きさであると言える。

5.5 まとめ

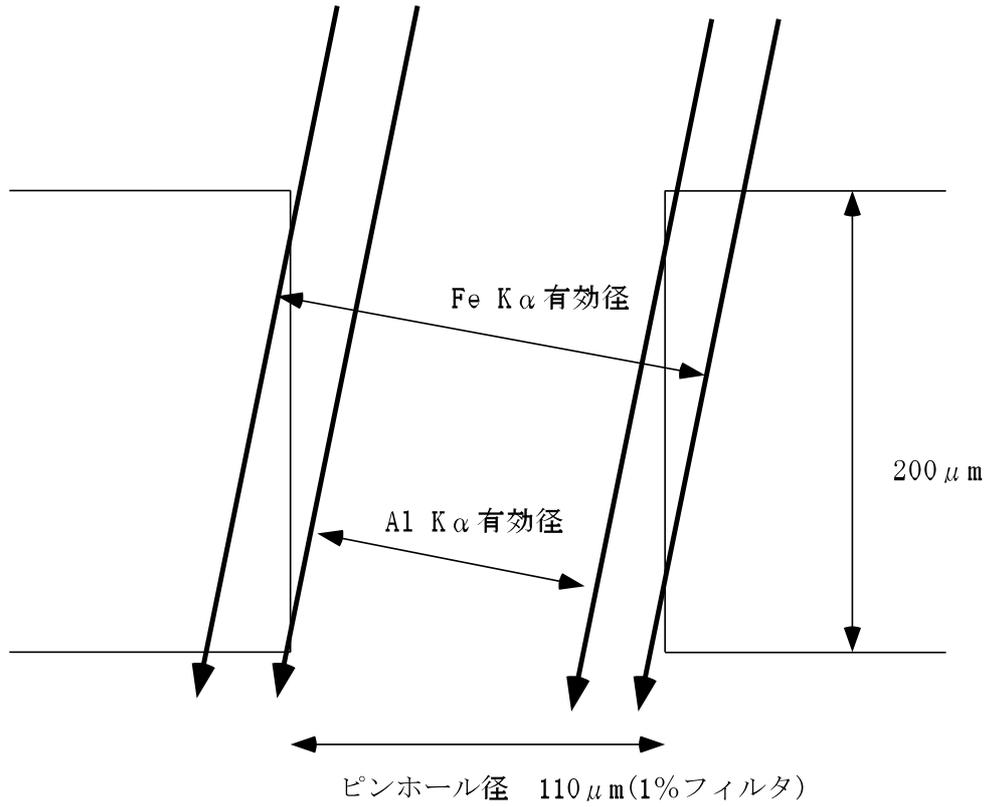
測定に用いている X 線ビームの大きさがピンホール間隔に比べて小さいため一定領域をスキャンすることによって透過率を測定した。その結果、5 点による Mapping の平均透過率はどのフィルタに対してもシミュレーションによって予想された値と非常に良く一致した。位置依存性に対する評価は 25% フィルタが透過率の $< 1.7\%$ 、5% フィルタが $< 0.63\%$ 、1% フィルタが $< 4.6\%$ となり 25%、5% フィルタについては有意な位置依存性は確認されなかったが 1% フィルタについては穴径、穴間隔による違いによる効果がでている。またフィルタ中心に異なるエネルギーの X 線をあて、エネルギー依存性に対する評価を行った。透過率の低いフィルタほどエネルギーが高くなると透過率があがる傾向が確認され、これはフィルタ製作時において生まれるバリによって説明される。ただし位置依存性、エネルギー依存性どちらに対しても実際の観測に支障のないレベルにおさまっており、設計通りの性能が得られたことになる。



	25%	5%	1%
Al $K\alpha$ 1.487 keV	23.86 ± 0.16	4.800 ± 0.035	1.222 ± 0.013
Mo $L\alpha$ 2.293 keV	24.14 ± 0.17	4.850 ± 0.042	1.214 ± 0.017
Ti $K\alpha$ 4.509 keV	24.59 ± 0.17	4.937 ± 0.043	1.267 ± 0.017
Mn $K\alpha$ 5.895 keV	24.12 ± 0.18	4.846 ± 0.073	1.233 ± 0.022
Fe $K\alpha$ 6.400 keV	24.25 ± 0.17	4.977 ± 0.046	1.288 ± 0.019

Figure 5.3: ND フィルタに対する異なるエネルギーによる測定結果

モデル 1



モデル 2

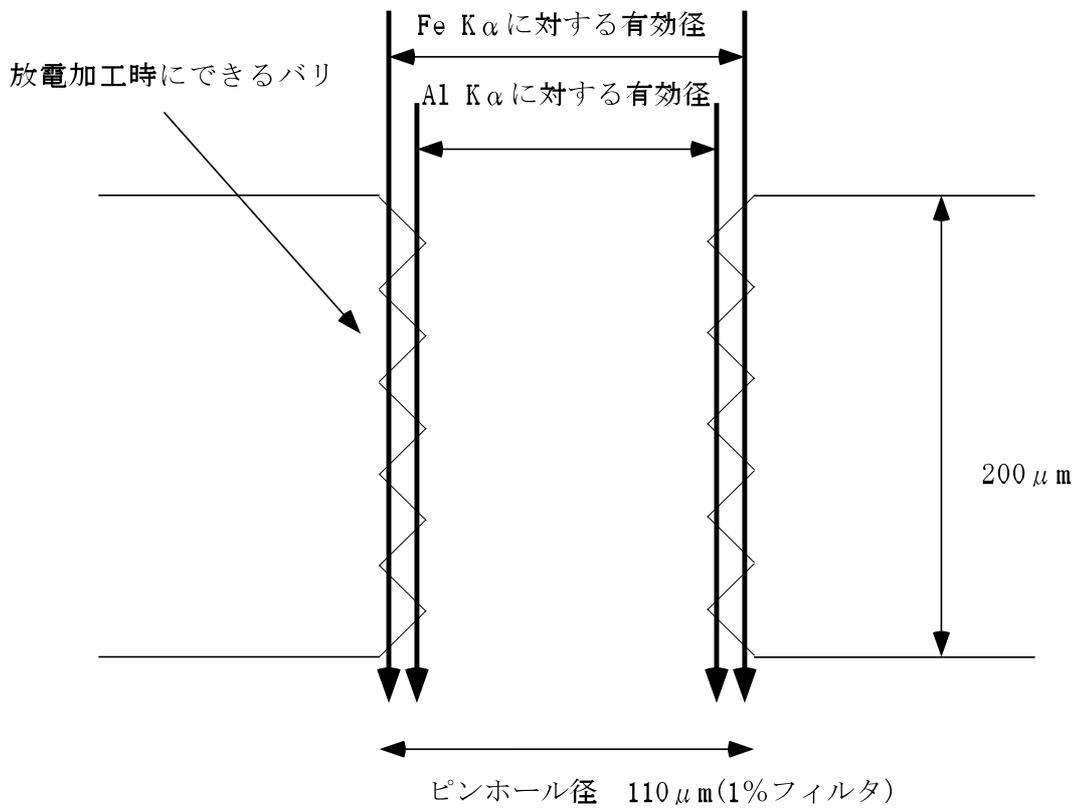
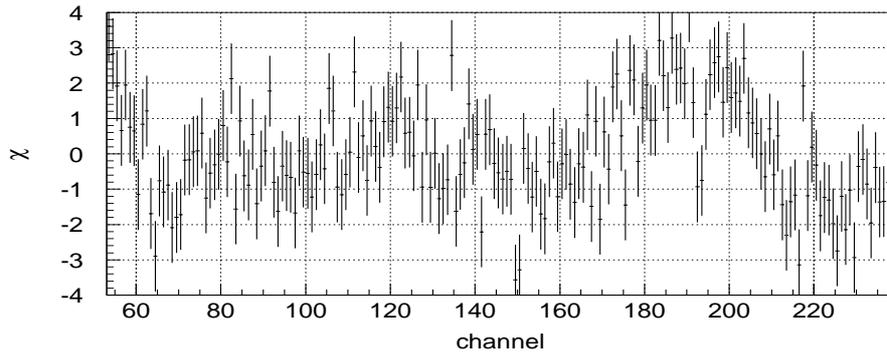
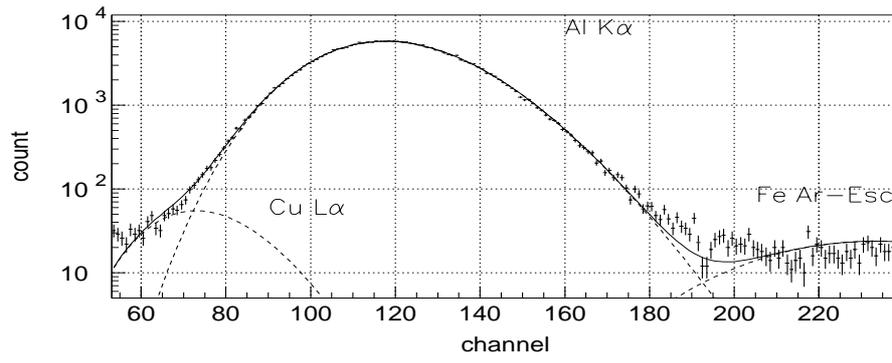


Figure 5.4: ND フィルタのエネルギー依存性に対するモデル

(off)



(on)

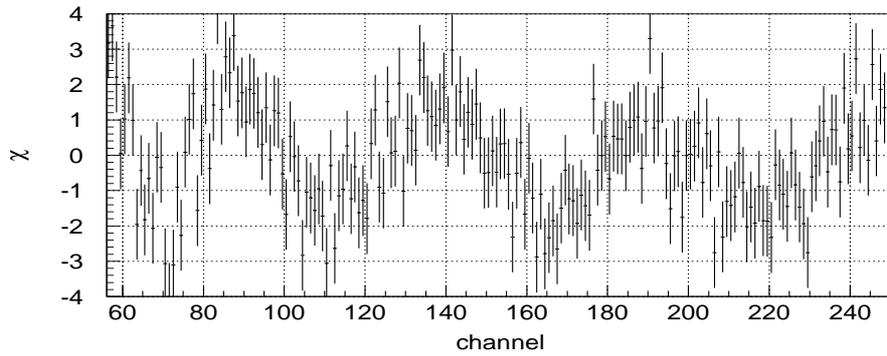
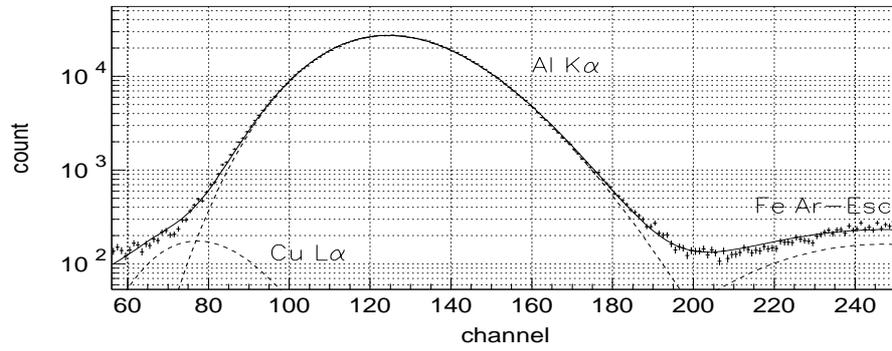


Figure 5.5: ND25% フィルタの測定に用いた Al $K\alpha$ のスペクトル

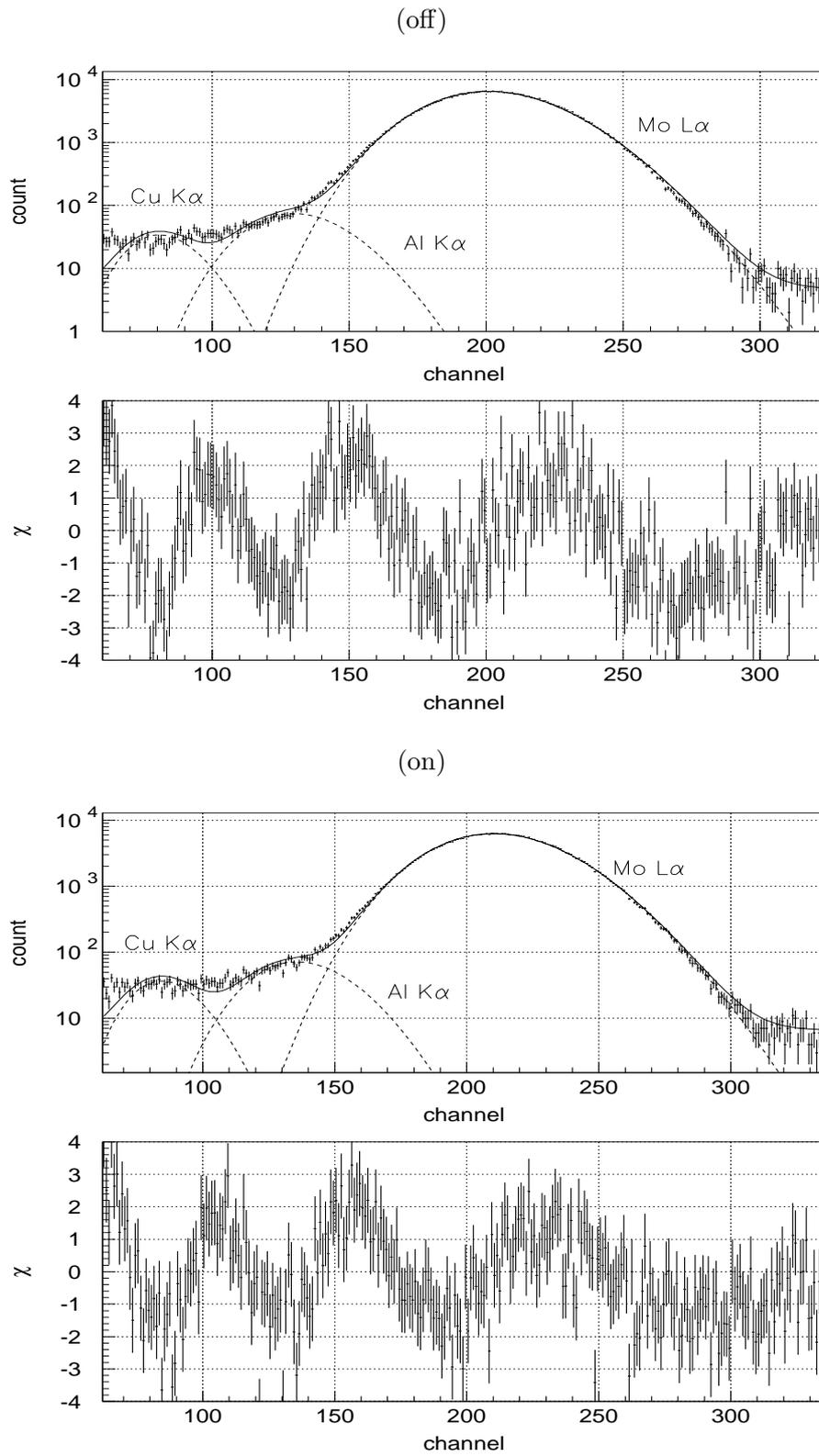


Figure 5.6: ND25% フィルタの測定に用いた Mo $L\alpha$ のスペクトル

(off)

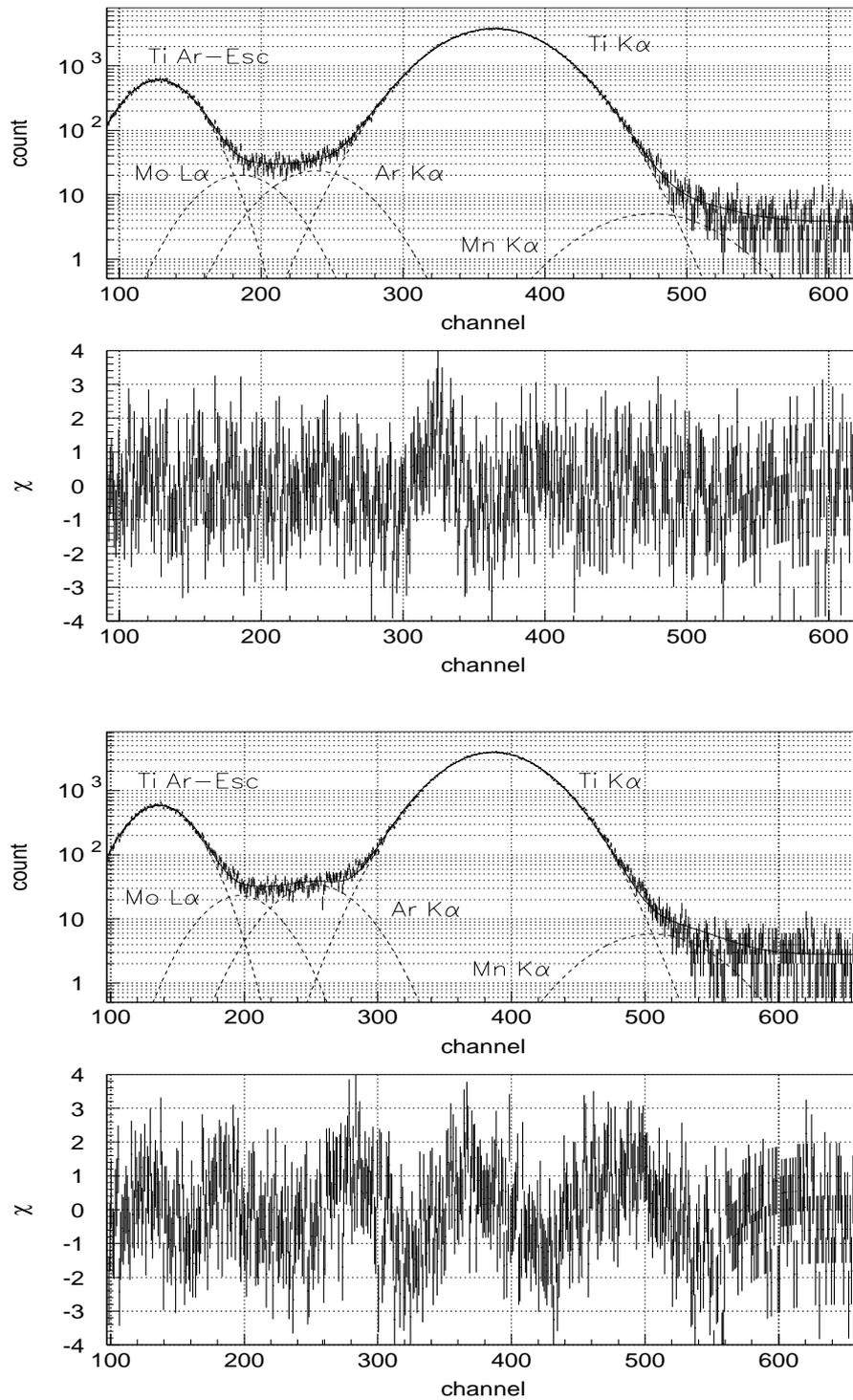
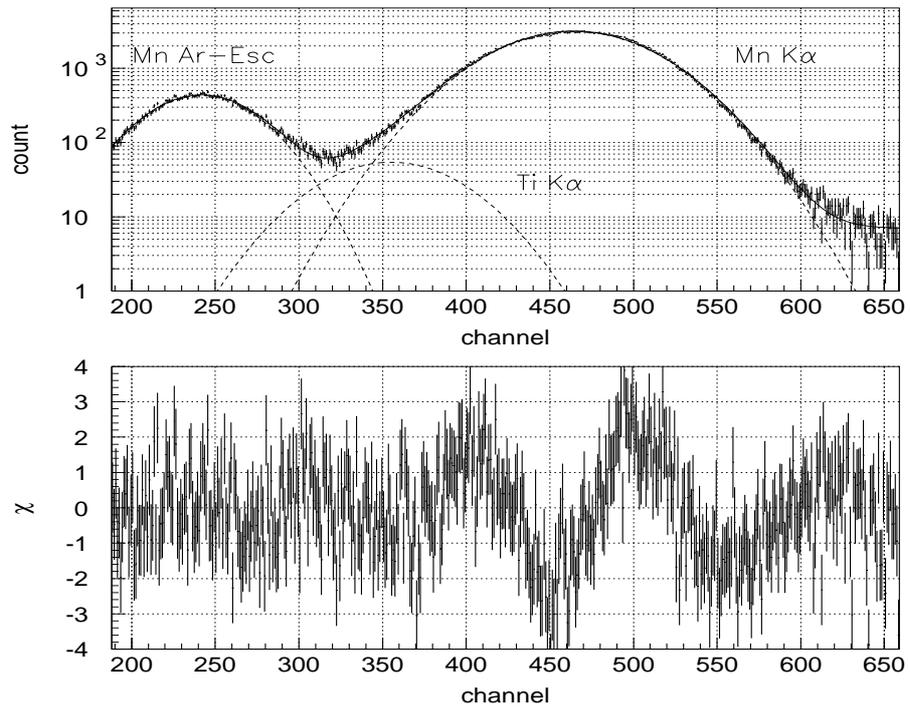


Figure 5.7: ND25% フィルタの測定に用いた Ti $K\alpha$ のスペクトル

(off)



(on)

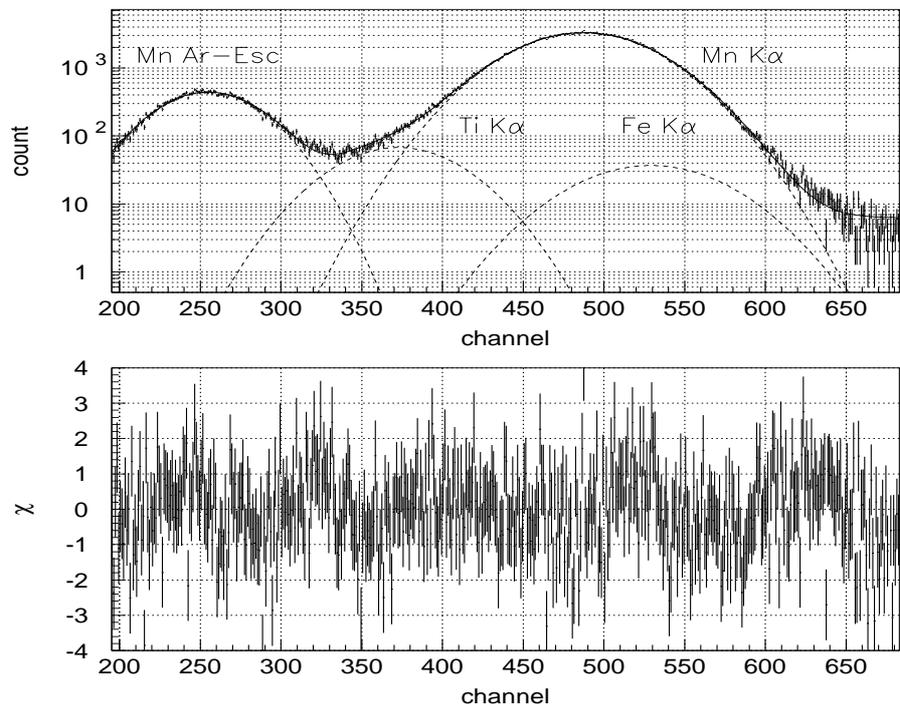
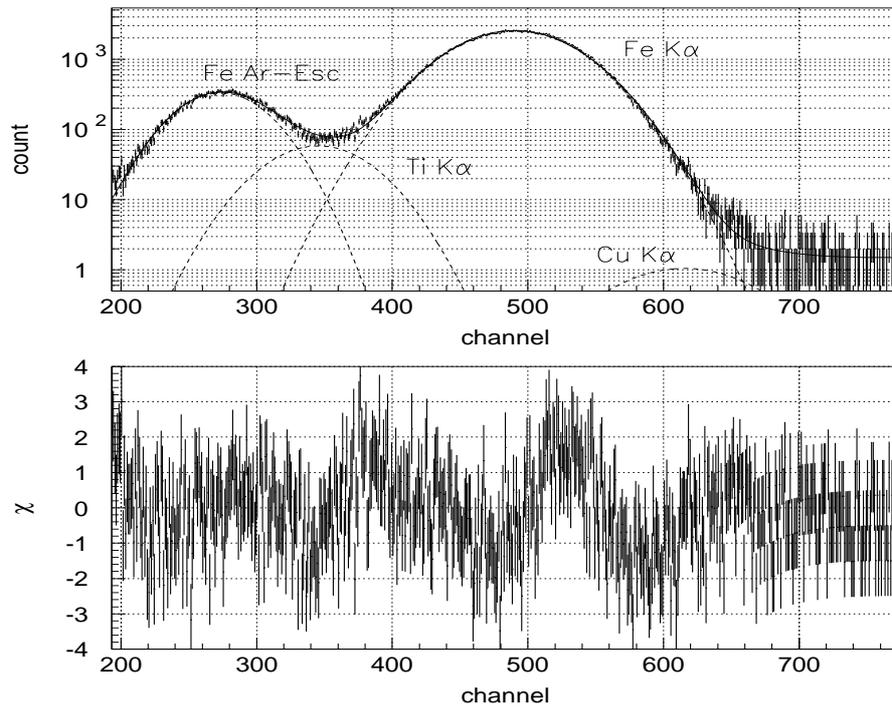


Figure 5.8: ND25% フィルタの測定に用いた Mn $K\alpha$ のスペクトル

(off)



(on)

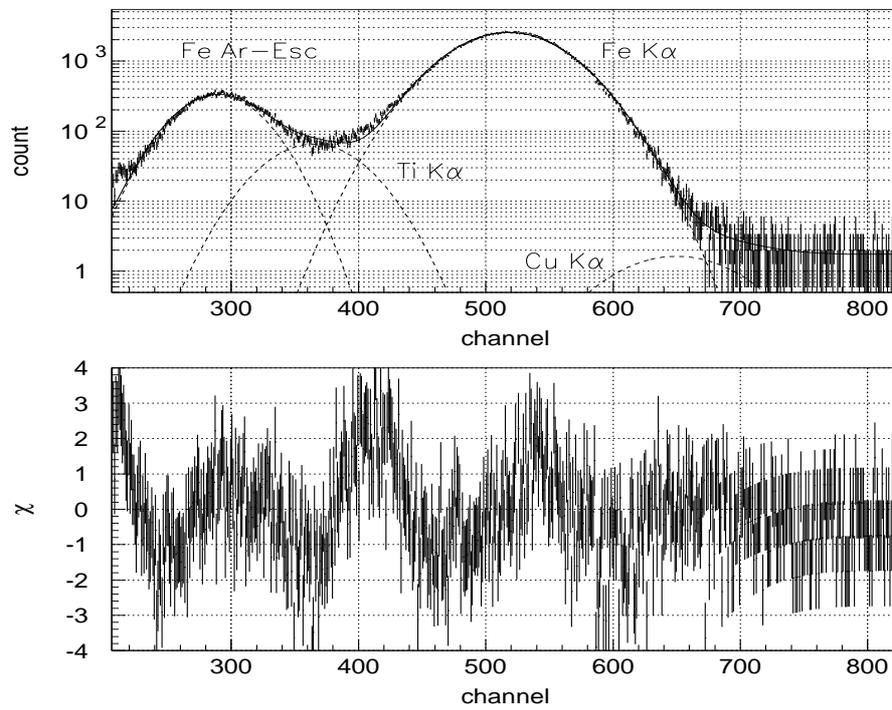
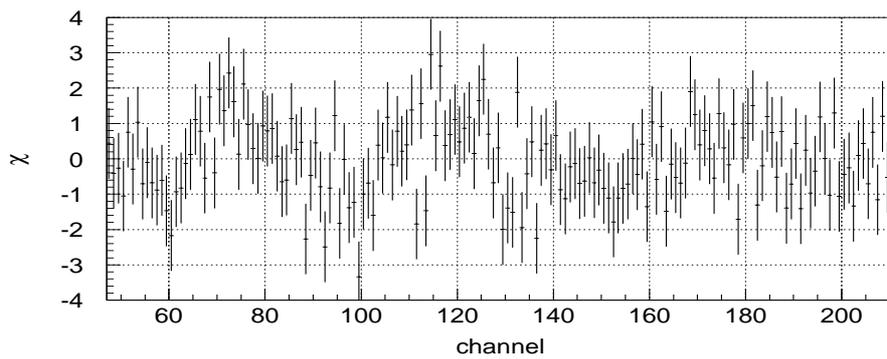
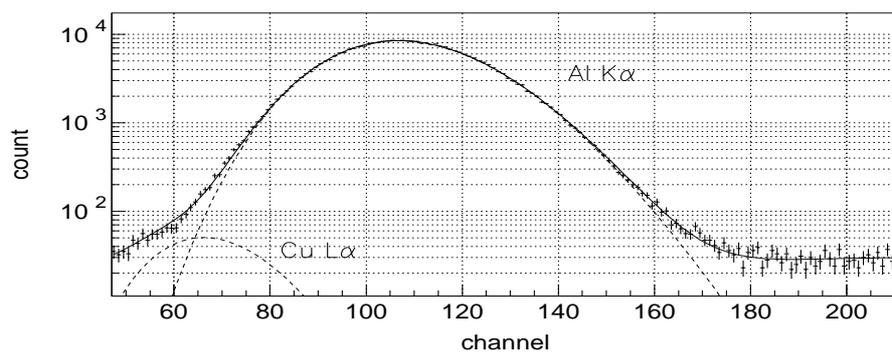


Figure 5.9: ND25% フィルタの測定に用いた Fe K α のスペクトル

(off)



(on)

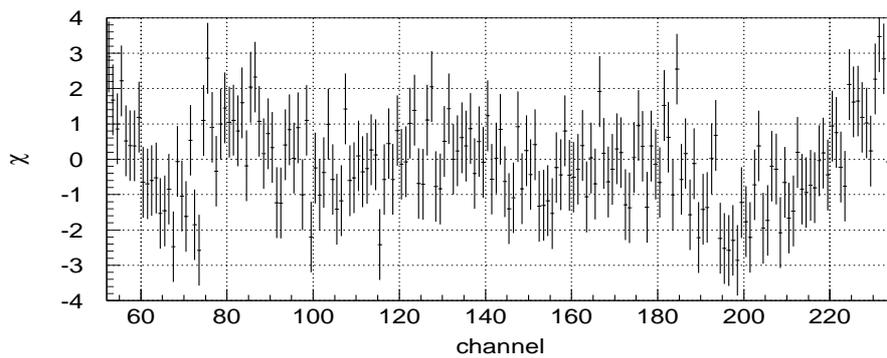
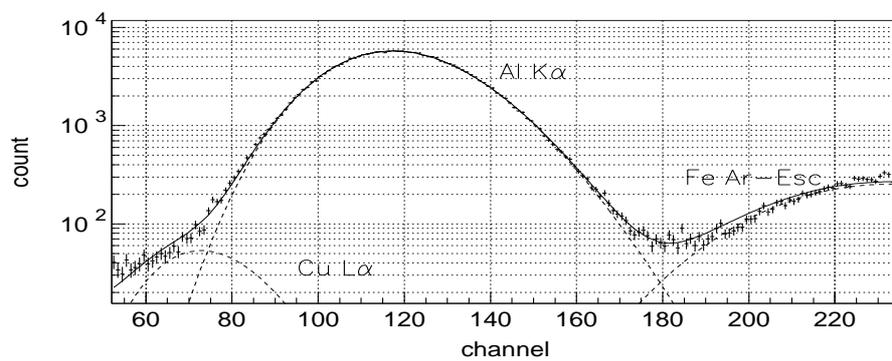


Figure 5.10: ND5% フィルタの測定に用いた $\text{Al } K\alpha$ のスペクトル

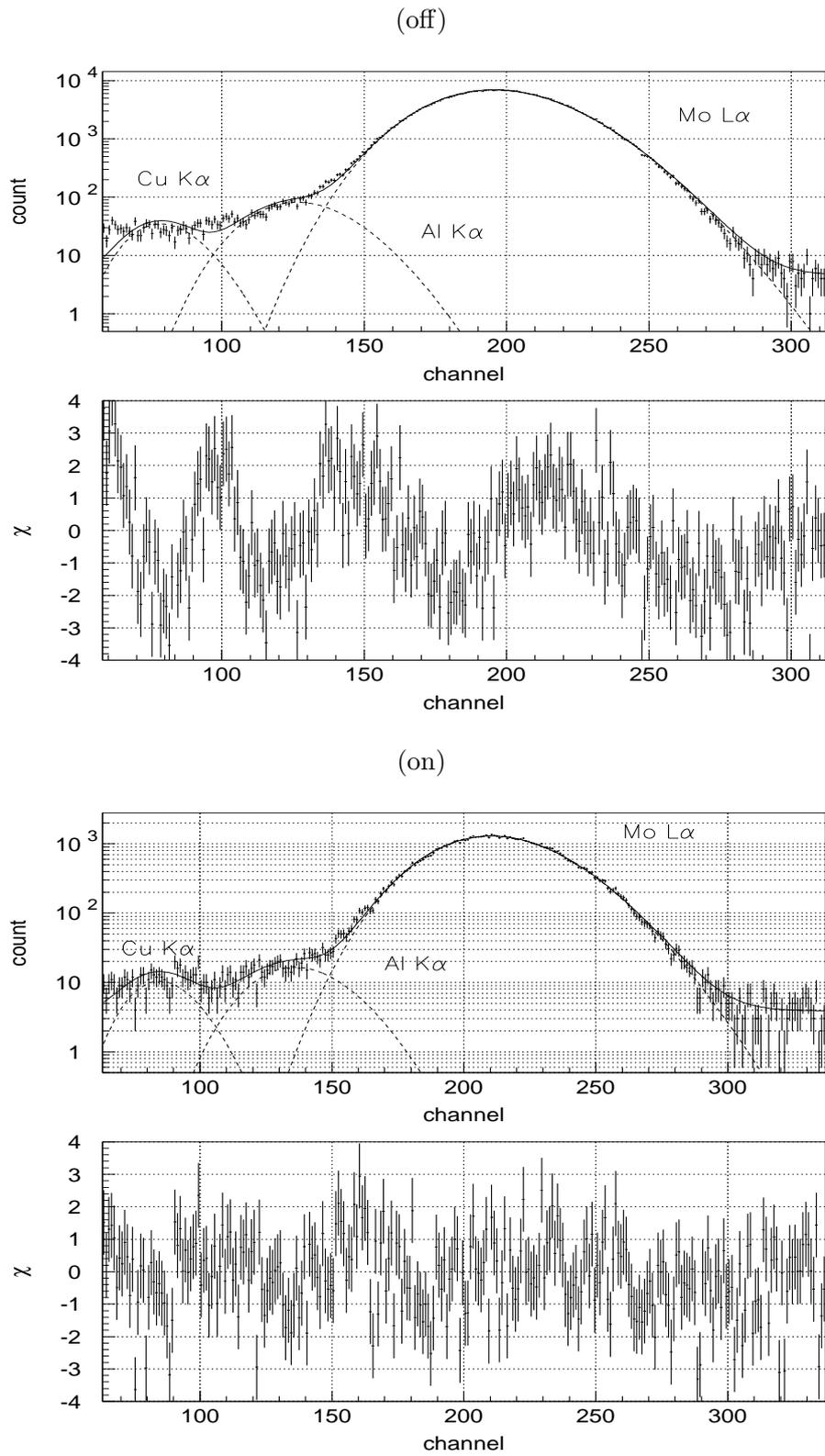


Figure 5.11: ND5% フィルタの測定に用いた Mo L α のスペクトル

(off)

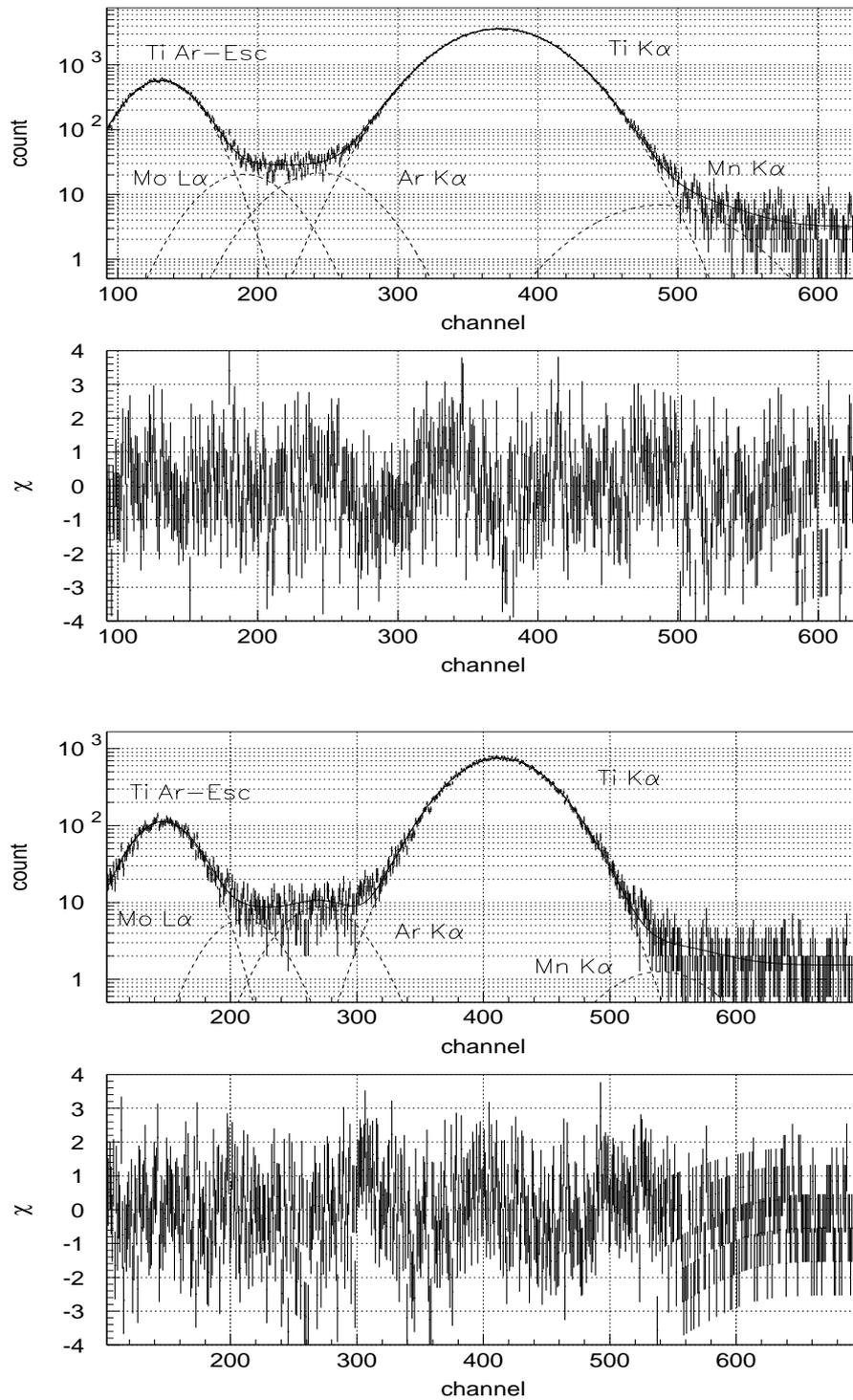
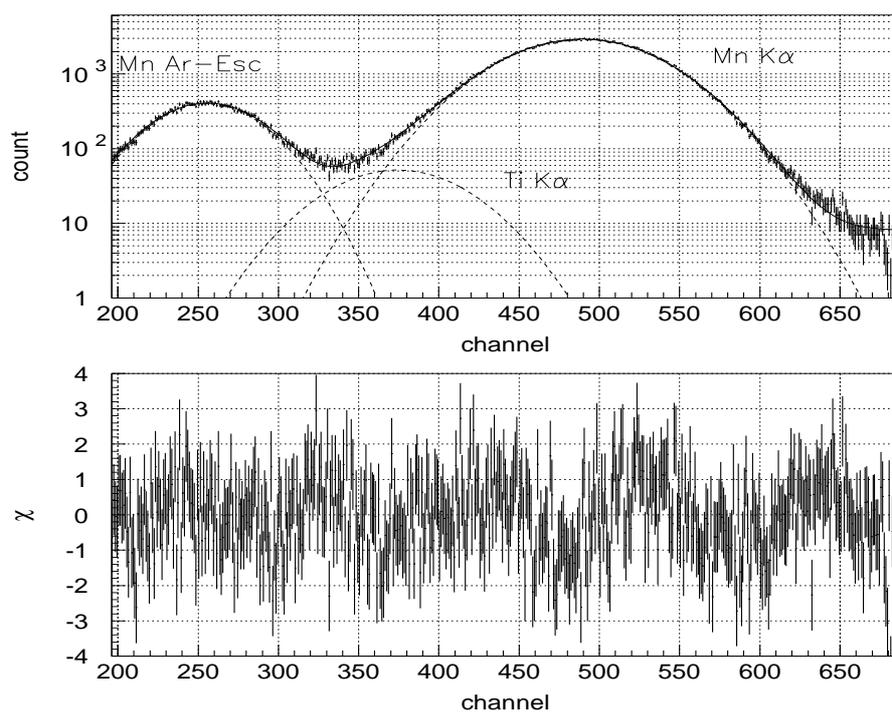


Figure 5.12: ND5% フィルタの測定に用いた Ti $K\alpha$ のスペクトル

(off)



(on)

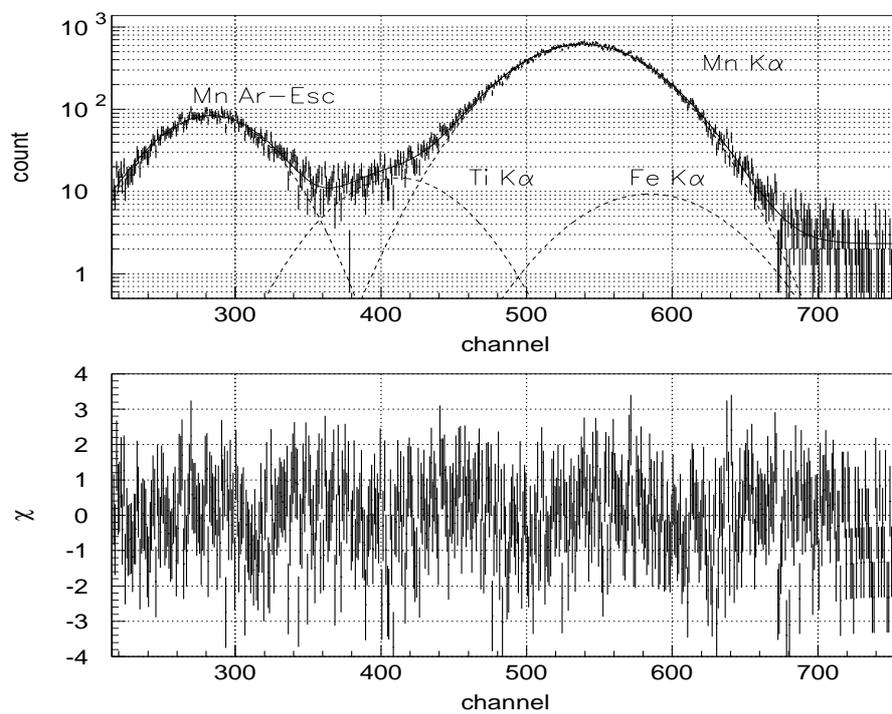
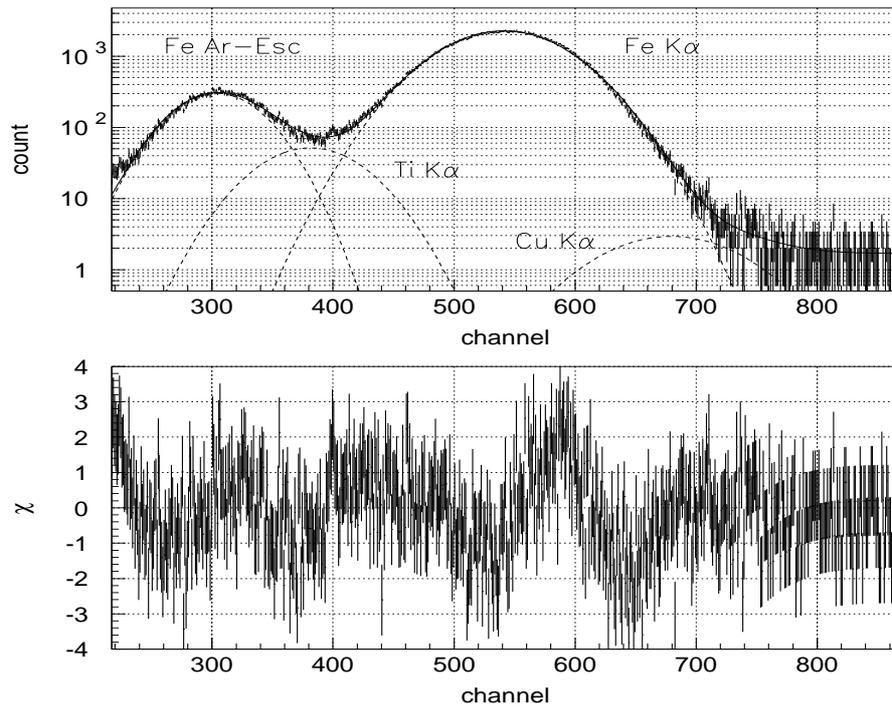


Figure 5.13: ND5% フィルタの測定に用いた Mn K α のスペクトル

(off)



(on)

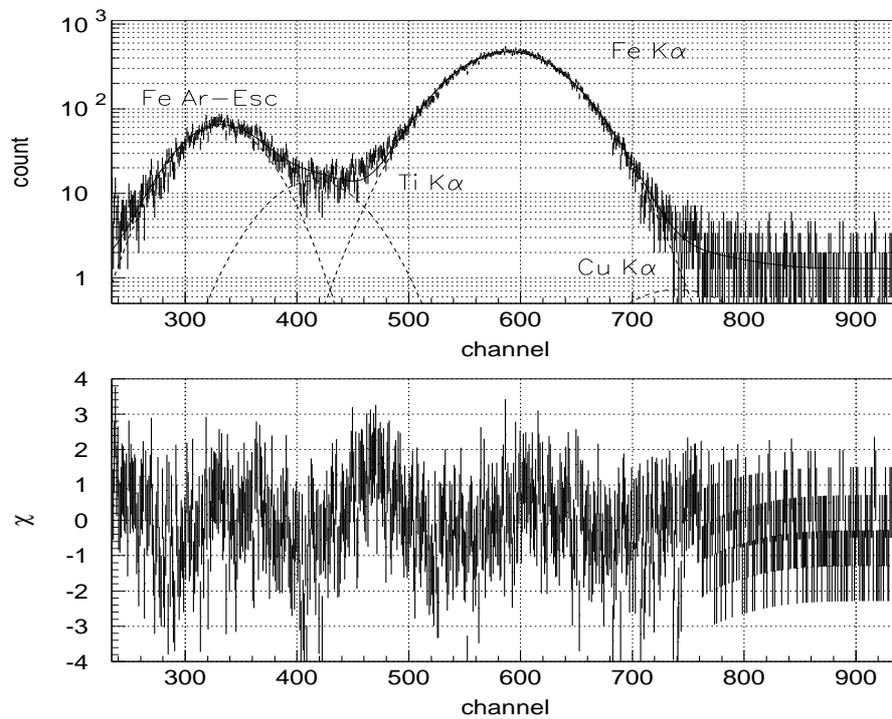


Figure 5.14: ND5% フィルタの測定に用いた Fe K α のスペクトル

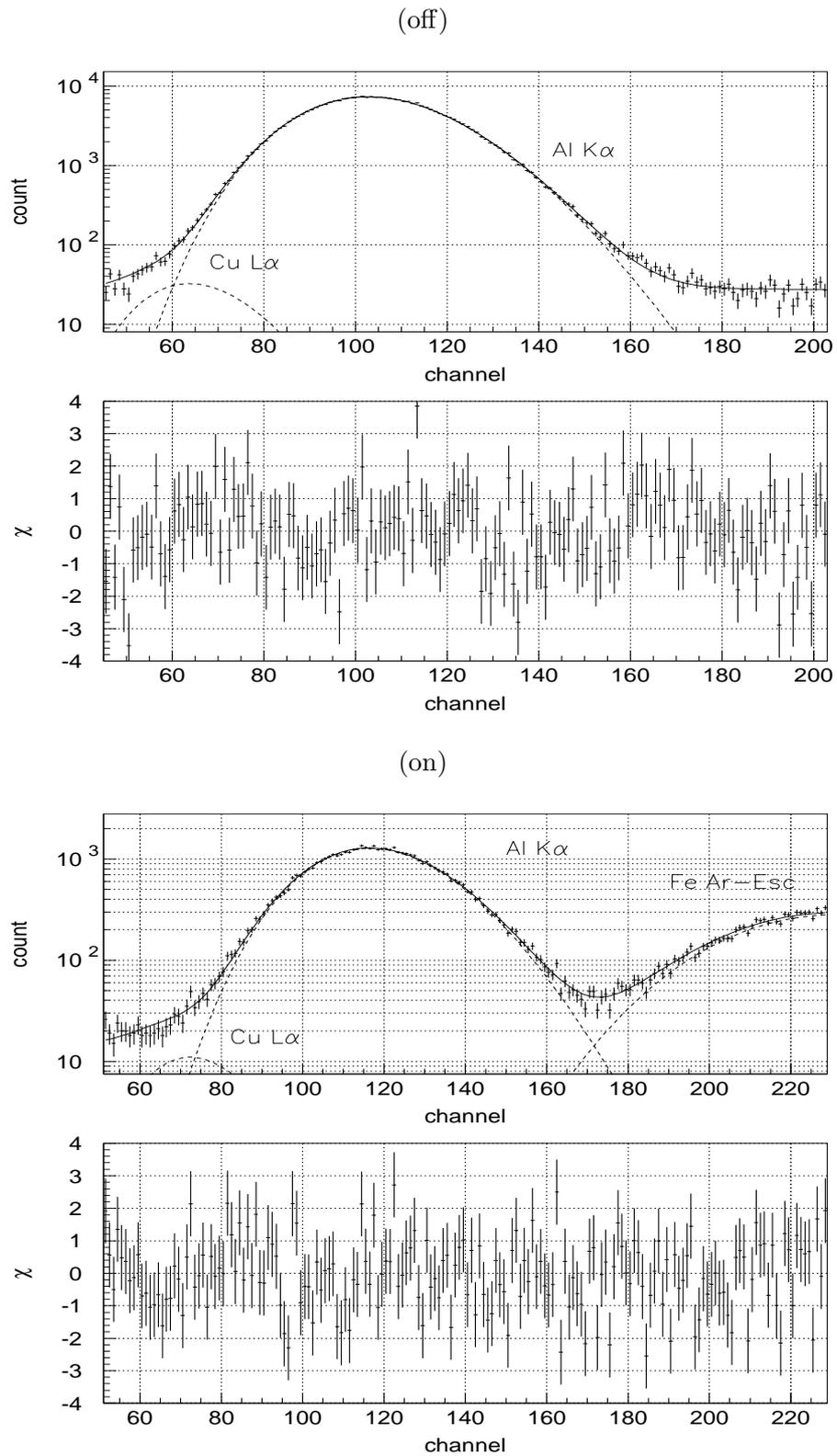


Figure 5.15: ND1% フィルタの測定に用いた Al $K\alpha$ のスペクトル

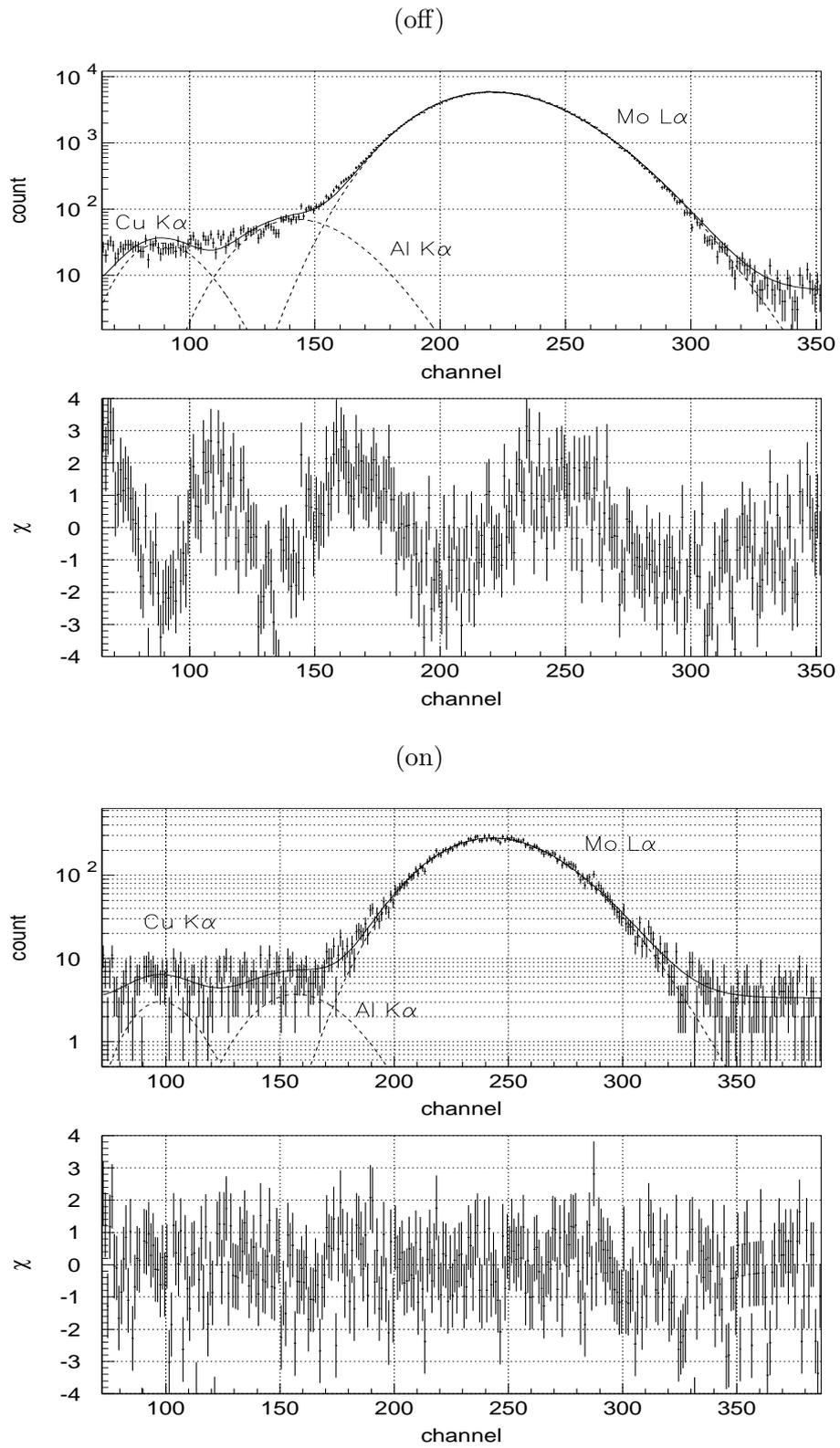


Figure 5.16: ND1% フィルタの測定に用いた Mo L α のスペクトル

(off)

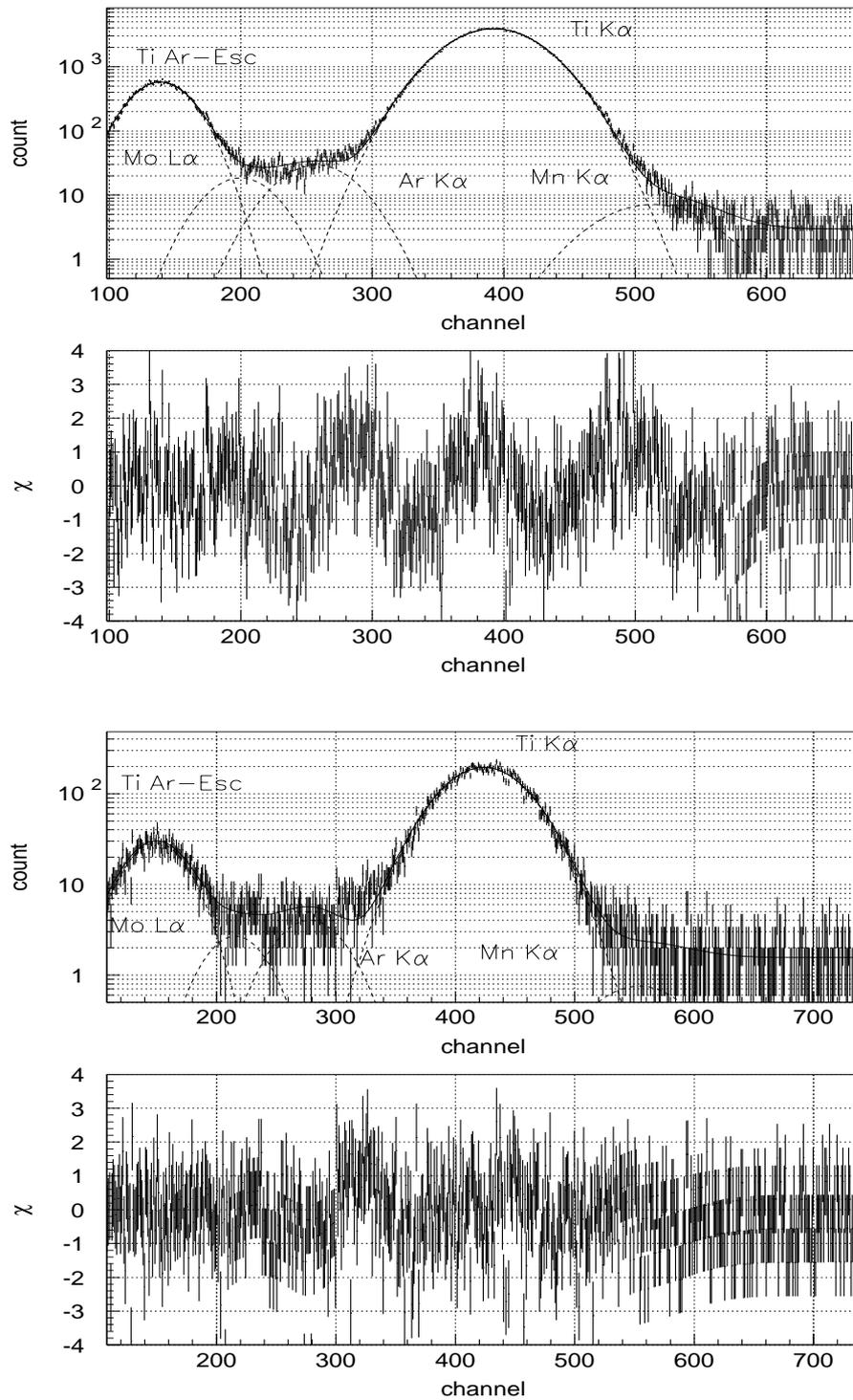
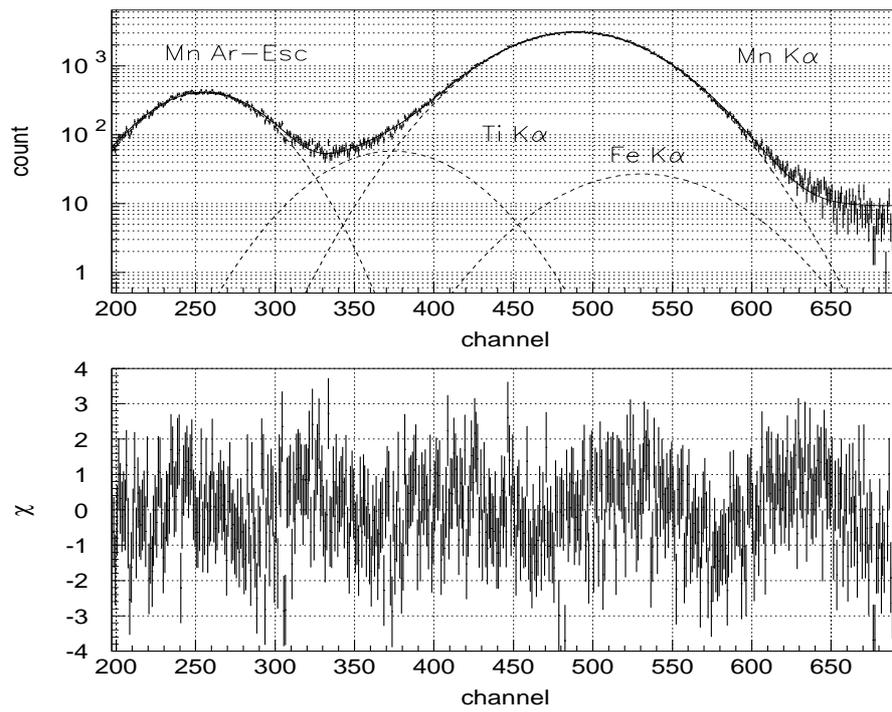


Figure 5.17: ND1% フィルタの測定に用いた Ti $K\alpha$ のスペクトル

(off)



(on)

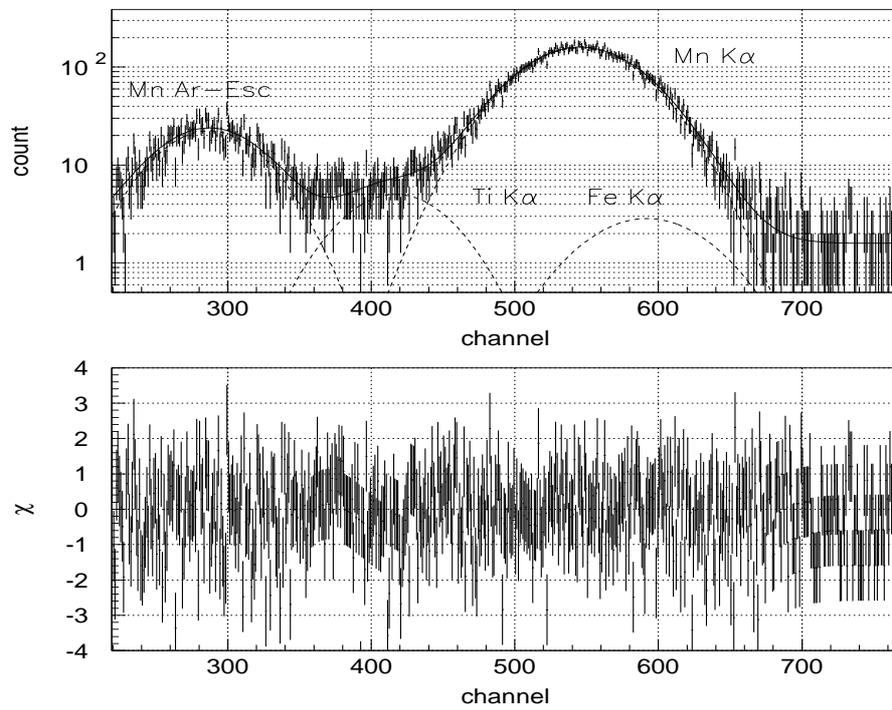
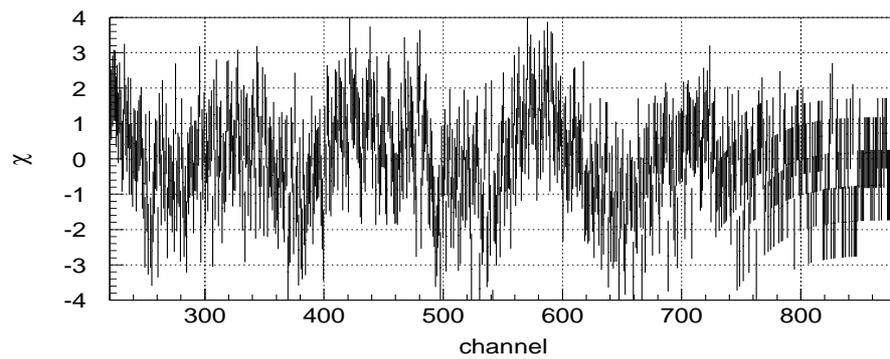
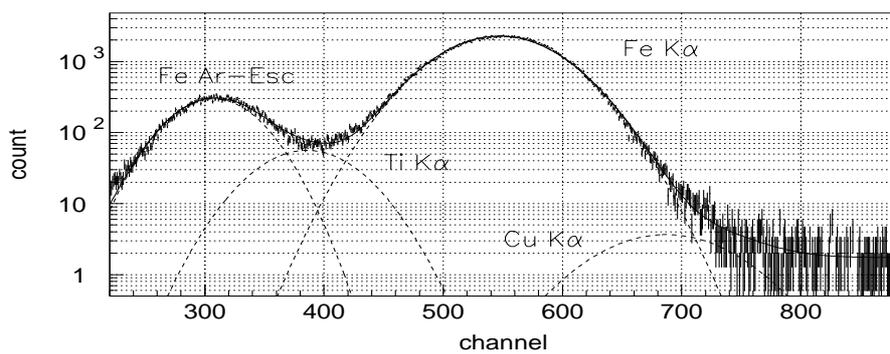


Figure 5.18: ND1% フィルタの測定に用いた Mn K α のスペクトル

(off)



(on)

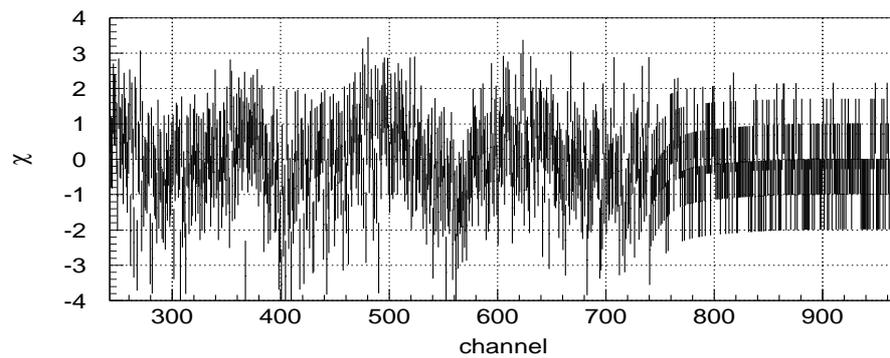
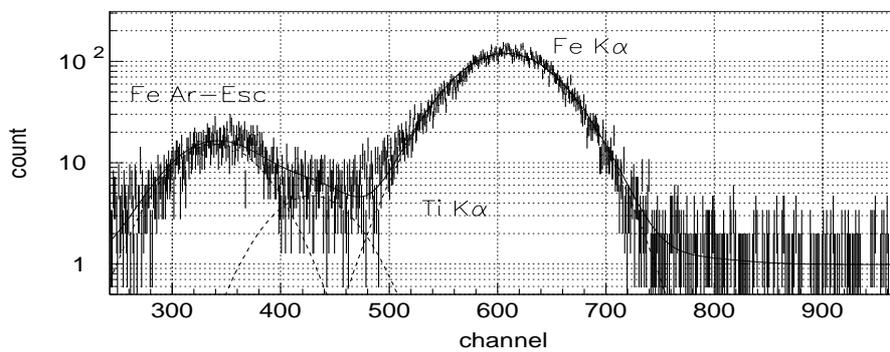


Figure 5.19: ND1% フィルタの測定に用いた Fe $K\alpha$ のスペクトル

Chapter 6

まとめ

6.1 透過率測定まとめ

フィルターホイールに設置されるフィルタの特性を評価するため 2 結晶分光法によって十分な強度で単色性の高い輝線を取り出し透過率測定実験を行った。以下に Be フィルタ、ND フィルタ対する結果をまとめる。

- Be フィルタ

平均膜厚値の算出、膜厚むらに対する評価、透過率のエネルギー依存性に対する評価を行った。膜厚勾配が確認されたが、より位置依存性の少ないフィルタを衛星搭載用に採用すること、搭載時の設置の仕方を工夫することで対応した。またエネルギー依存性については設計通りの性能が得られた。

- ND フィルタ

X 線ビームをスキャンさせることによって測定し平均透過率の算出、透過率の位置依存性、エネルギー依存性に対する評価を行った。算出した平均透過率は予想値と非常に良く一致している。位置依存性、エネルギー依存性についてはその傾向が確認されたが実際の観測において、他の誤差を考えれば問題のないレベルであり設計通りの性能が得られたといえる。

以上から Be フィルタ、ND フィルタともに衛星搭載用として採用することに決定した。この透過率測定の結果は検出器のレスポンスに組み込み、実際の観測に対応することになる。

6.2 今後の予定

今後はこの透過率測定の結果、XRT、XRS のレスポンスを考慮し実際の天体観測を想定したシミュレーションを行い定量的な評価する。また本実験に使用した衛星搭載用のフィルタは 1999 年 1/21 に (株) 日本電気に引渡し最終アセンブリを終えている。今後は 3/30 にフィルターホイール本体の振動試験、4/20 に衛星に組み込み熱真空、衝撃などの総合試験を行い、2000 年 1 月下旬に打ち上げ予定である。

Bibliography

- [1] 古庄多恵修士論文 (1998)、ASTRO-E 衛星搭載用フィルターホイールの開発
- [2] 上田佳宏修士論文 (1993)、ASTRO-D 搭載用 GIS の軟 X 線特性の研究
- [3] 宮崎利行修士論文 (1997)、マイクロカロリメータ X 線検出器の開発研究
- [4] 道川幸男修士論文 (1999)、X 線マイクロカロリメータのための低雑音信号処理の研究
- [5] J.Byrne, Nuclear Instruments and Methods in Physics Reserch 74(1969)291
- [6] G.D.Alkhozov, Nuclear Instruments and Methods in Physics Reserch 89(1970)155
- [7] 科学衛星 ASTRO-E 中間報告書、宇宙科学研究所、1998 年 7 月
- [8] B.D.Cullity、X 線回折要論、AGNE
- [9] B.L. Henke, E.M. Gullikson, and J.C. Davis. X-ray interactions: photoabsorption, scattering, transmission, and reflection at $E=50\text{-}30000$ eV, $Z=1\text{-}92$, Atomic Data and Nuclear Data Tables, July 1993, 54, (no.2):181-342 from <http://cindy.lbl.gov/>
- [10] Section II Revision 1, Conpiration of X-ray Cross Sections(1969)
- [11] E. Storm and H.I. Israel, Photon cross section from 1 keV to 100 MeV for elements $Z=1$ to $Z=100^*$, Nuclear Data Tables, A7, 565-681(1970)
- [12] 山崎典子、FW のおき方についての資料 (暫定版)、1999 年 1 月 20 日
- [13] FE 設計図、東レプレシジョン、1996 年 9 月 28 日
- [14] 検査成績書、東レプレシジョン、1997 年 1 月 9 日
- [15] 検査成績書、東レプレシジョン、1998 年 8 月 8 日
- [16] Be filter 送り状、Brush Wellman 社
- [17] FW 設計図、NEC