

衛星搭載軟ガンマ線検出器用 Fine Collimator の 開発と性能評価

M113800 木村 太輔

広島大学 理学研究科 物理学専攻
高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学グループ

2013 年 8 月 22 日

主査 水野 恒史

副査 志垣 賢太

概要

次期 X 線天文衛星 ASTRO-H には、高エネルギー光子の観測を目的として軟ガンマ線検出器 (SGD) が搭載される (図 1)。SGD の主検出部である狭視野コンプトンカメラは入射光子がコンプトンカメラ内でコンプトン散乱、光電吸収される際に検出したエネルギーと位置情報から、コンプトン再構成により光子の到来方向を測定し、視野外の信号をバックグラウンドとして除去することが出来る。主検出部は側面および底面を BGO アクティブシールドで覆われており、両者の反同時係数を取ることで視野を半値幅で約 10 度 × 10 度まで絞り、荷電粒子などによるバックグラウンドを除去する。さらに主検出部の前面に Fine Collimator (FC) と呼ばれる金属製のパッシブなコリメータが取り付けられる。FC の主構造体は $3.2 \times 3.2 \text{ mm}^2$ の正方格子が 16×16 個組み合わせさせたメッシュが長手方向に 300 mm 引き伸ばされた形状をしている。150 keV 以下の低エネルギー帯域に対し視野をさらに 35.5 分角 × 35.5 分角 (半値幅) に絞ることで宇宙背景 X 線放射 (CXB) や観測対象以外の天体の混入を防ぎ、さらなるバックグラウンドの低減を行う。これらの工夫によって 40–600 keV のエネルギー帯域で従来より 1 桁以上良い感度を目指す。ASTRO-H 衛星は従来の検出器感度では観測が困難であった高エネルギー天体の物理描像の解明につながると期待されている。

本論文では、FC の開発試験用試作品 (ブレッドボードモデル、BBM) について、X 線を用いて透過率とその角度応答を測定し、ミッションの要求性能を満たしていることを確認した。また可視光による試験 (可視光を用いた透過率とその角度応答の測定) を行い、X 線での結果と合わせることで FC の性能を評価できることを確認した (図 2)。さらに衛星組み上げ時に用いるアライメント軸の測定方法を構築し、FC を SGD に組み込むめどが立った。

また衛星打ち上げに伴う様々な機械的振動を模擬した振動試験を行った。これにより後部支持構造体と、主構造体の溶接部が機械的振動に対する耐性が弱いことが分かった。これらを改善した衛星搭載品に準じた試作品 (エンジニアリングモデル、EM) に対し、同様の振動試験と音響試験を実施し、試験前後で可視光透過率を測定することで、衛星打ち上げによって FC の性能がほとんど劣化しないことを確認した。

これらの結果をもとに、我々は衛星搭載品 (フライトモデル、FM) の製造を開始する。今後は全ての FC の FM 品に対し可視光による試験とアライメント軸測定試験を行ない、性能のランク付けを行うことで衛星に搭載する FC を選別する。

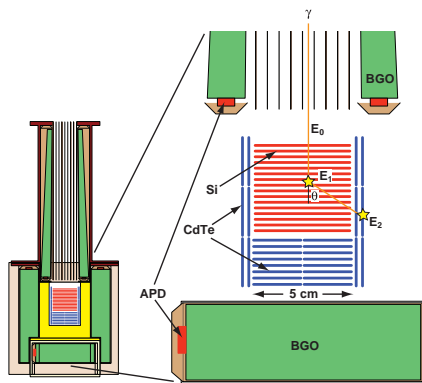


図 1: SGD の断面図

Si/CdTe 半導体でできたコンプトンカメラを
BGO シンチレータで取り囲み、またカメラの前
面に FC が導入される。

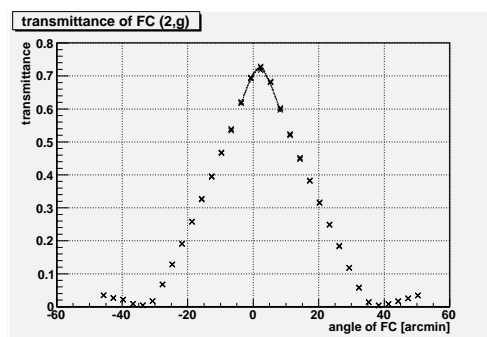


図 2: 可視光による透過率・角度応答の測定結果
縦軸は透過率、横軸は相対的な方向 (分角)

目次

第1章	次期 X 線天文衛星 ASTRO-H	6
1.1	高エネルギー天文学と次期 X 線天文衛星 ASTRO-H	6
1.2	軟ガンマ線検出器 (SGD)	7
第2章	SGD 搭載用金属コリメータ Fine Collimator	10
2.1	Fine Collimator の概要	10
2.2	Fine Collimator に要求される性能	11
2.2.1	耐震性	11
2.2.2	開口率	17
2.2.3	X 線による透過率の角度応答	17
2.3	Fine Collimator の性能評価方法	21
2.4	SGD と Fine Collimator で期待されるサイエンス	22
第3章	可視光による評価試験	24
3.1	評価項目	24
3.1.1	可視光透過率測定の必要性和概要	24
3.1.2	角度応答測定	25
3.1.3	アライメント軸測定	26
3.2	セットアップ	26
3.3	実験結果	30
第4章	X 線による評価試験	34
4.1	評価項目	34
4.2	セットアップ	34
4.3	X 線による評価測定結果	36
4.4	可視光透過率測定との比較	41
4.5	まとめ	42
第5章	耐震構造評価試験	43
5.1	基準レベルと評価項目	43

5.1.1	振動試験	43
5.1.2	音響試験	44
5.2	予備実験	46
5.2.1	静荷重試験	46
5.2.2	共振周波数測定	47
5.3	振動試験	49
5.3.1	セットアップ	49
5.3.2	振動試験結果	52
5.3.3	可視光透過率測定結果	52
5.3.4	考察	57
5.4	音響試験	57
5.4.1	セットアップ	57
5.4.2	音響試験結果	58
5.4.3	可視光透過率測定結果	59
5.4.4	考察	59
5.5	まとめ	59
第6章	まとめと今後	61

目 次

1	SGD の断面図	1
2	可視光による透過率・角度応答の測定結果	1
1.1	SGD の断面図	9
1.2	コンプトンカメラの概念図	9
2.1	FC の概形	12
2.2	FC の図面 (その 1)	13
2.3	FC の図面 (その 2)	14
2.4	FC の図面 (その 3)	14
2.5	FC の図面 (その 4)	15
2.6	FC の図面 (その 5)	16
2.7	X 線に対する Fine Collimator の透過率の計算方法	19
2.8	FC の角度応答および有効な開口角	21
2.9	CXB および NXB の SGD バックグラウンドへの寄与	22
2.10	HXI/SGD および他のミッションの感度	23
3.1	可視光透過率測定およびアライメント軸測定の概念図	25
3.2	可視光透過率測定時の写真	25
3.3	CCD の撮像イメージ	28
3.4	CCD の露出時間と測定誤差	28
3.5	三脚シムと側板の張り付け位置	29
3.6	FC 試作品 (BBM) の写真	30
3.7	可視光ビーム照射位置およびビームサイズ	31
3.8	FC 試作品 (BBM) の可視光透過率測定 (全体)	32
3.9	FC 試作品 (BBM) の可視光透過率測定 (光軸付近)	32
4.1	X 線による性能評価試験の写真	35
4.2	X 線による性能評価試験の概念図	36
4.3	X 線ビーム照射位置およびそのビームサイズ	37
4.4	みかけの板の厚み測定 (測定 1)	38

4.5	仕切り板付近の CCD イメージと読み取り値の断面図	38
4.6	pixel サイズと移動量の関係	39
4.7	FC 試作品 (BBM) における平均的なみかけの板厚とその角度応答 (測定 1)	40
4.8	FC 試作品 (BBM) における平均的なみかけの板厚とその角度応答 (測定 2、 光軸付近)	40
5.1	振動試験における Z 軸方向コンポーネントレベルの PSD	45
5.2	静荷重試験のセットアップ	47
5.3	静荷重試験における FC の変位	48
5.4	静荷重試験の実験結果	48
5.5	共振周波数測定概念図	49
5.6	共振周波数測定の結果	50
5.7	振動試験のセットアップ写真	51
5.8	振動試験におけるピックアップ	51
5.9	振動試験で得られた PSD(X 軸)	53
5.10	振動試験で得られた PSD(Y 軸)	54
5.11	振動試験で得られた PSD(Z 軸)	55
5.12	振動試験による FC の回転	56
5.13	振動試験前後での可視光透過率測定での照射位置	56
5.14	振動試験前後での可視光透過率測定結果	57
5.15	音響試験で得られた PSD	58
5.16	音響前後での可視光透過率測定	59

第1章 次期 X 線天文衛星 ASTRO-H

1.1 高エネルギー天文学と次期 X 線天文衛星 ASTRO-H

宇宙空間には無数の星や星間物質が存在しており、それらは電波からガンマ線までのさまざまな波長帯域の電磁波を放射、散乱や吸収している。その中でもブラックホール、中性子星、超新星残骸といった高エネルギー天体からは、高いエネルギーに加速された粒子によるシンクロトロン放射やコンプトン散乱によって X 線・ガンマ線にわたる非熱的放射がしばしば見られる。現代の技術ではこれらの現象を地上実験で再現することは難しく、宇宙における粒子加速機構を解明するにはさまざまな帯域で高エネルギー天体を観測することが重要である。また、これらの観測成果は宇宙物理学に限らず、素粒子物理学の観点からも有意義足り得る。

X 線・ガンマ線といった電磁波はエネルギーが高いので星間空間での吸収・散乱を受けにくく、放射の情報が損失されにくい。また高エネルギー天体から観測される光子数が比較的多いので、高エネルギー現象を探るのに適した波長帯域と言える。しかし、X 線・ガンマ線は地球大気による吸収・散乱を受けるため光子を直接観測することは困難であり、人工衛星や気球といった飛翔体を用いて光子を直接観測することが重要である。X 線天文学(従来の可視光による地上観測だけでなく X 線・ガンマ線帯域による観測も行う天文学)の歴史は 1962 年 Giacconi らが X 線で輝く Sco-X1 を発見したことを皮切りに始まった。特に人工衛星を用いた観測は 1970 年 NASA により世界初の X 線天文衛星 UHURU が打ち上げられて以降、日本でも「はくちょう(1979)」、「てんま(1983)」、「ぎんが(1987)」などの衛星が打ち上げられいるなど、宇宙 X 線の観測技術は現代に至るまで目覚ましい発展を遂げてきた。近年では日本の ASCA 衛星(1993)が X 線望遠鏡と X 線 CCD カメラによる撮像分光観測の技術を確立させ、軟 X 線(10 keV 以下)帯域にみられる熱的放射の詳細な観測を可能にした。この後も NASA の Chandra 衛星(1999)、ESA の XMM-Newton 衛星(2000)が ASCA と同様の技術を発展させてきた。GeV ガンマ線帯域では Si ストリップ検出器を用い、高い空間分解能を実現した Fermi 衛星(2008)が次々と成果を上げている。人工衛星を用いない X 線観測としては、位置分解能に優れた大気チェレンコフ望遠鏡を利用し高エネルギーガンマ線の二次粒子が作るチェレンコフ光を地上で観測する、ヨー

ロッパの H.E.S.S.¹ や MAGIC² が TeV ガンマ線観測分野で活躍している。

このようにガンマ線または軟 X 線帯域で着々と成果が上げられている一方で、硬 X 線-軟ガンマ線帯域 (数 10–数 100 keV) ではこれまで感度の低い観測しかなされていない。言い換えると、硬 X 線-軟ガンマ線帯域での放射はまだ未解明な部分が多く残されており、この帯域は宇宙物理学で大きな課題となってくる。そこで、我々は JAXA/ISAS の次期 X 線天文衛星 ASTRO-H[1] の搭載装置として、硬 X 線帯域 (5–80 keV) でのイメージング装置である硬 X 線撮像検出器 (Hard X-ray Imager、HXI) と軟ガンマ線帯域 (40–600 keV) で世界最高感度を持つ軟ガンマ線検出器 (Soft Gamma-ray Detector、SGD[2]) の開発を行っている。

1.2 軟ガンマ線検出器 (SGD)

ASTRO-H 衛星には 4 種類の検出器が搭載され、軟 X 線から軟ガンマ線までの幅広いエネルギー帯域でブラックホールや銀河団といった高エネルギー天体を観測する予定である。その中でも 40–600 keV の帯域をターゲットとするのが、軟ガンマ線検出器 SGD であり、ASTRO-H 衛星に同じく搭載される硬 X 線撮像検出器 HXI (観測帯域は 5–80 keV) と合わせて硬 X 線～軟ガンマ線帯域の広帯域・高感度観測の実現を目指す。

SGD は非撮像型検出器であるため、近傍の天体や宇宙背景 X 線放射などといった観測対象天体以外からの信号はバックグラウンドとして混入する。また衛星軌道で多く存在する大気中性子、荷電粒子やその 2 次粒子、装置の放射化由来の放射線によるイベントもまたバックグラウンドとして混入する [3][4]。非撮像型検出器でありながらこのようなバックグラウンドをできるだけ効率よく除去するため、SGD には「狭視野コンプトンカメラ」、「井戸型アクティブシールド」および「Fine Collimator」が採用されている。

SGD のコンセプトを説明するため、その断面図を図 1.1 に示す。図のうち、赤で示す Si-Pad と青で示す CdTe-Pad は狭視野コンプトンカメラであり、SGD の主検出部にあたる。また緑で示す BGO 結晶³シンチレータおよび赤で示す APD 光検出器からなる BGO アクティブシールドが主検出部の側面および底面を覆う。さらに黒の線で示す Fine Collimator は主検出部の前面に配置される。

主検出部であるコンプトンカメラは、検出器内でのコンプトン散乱を検出することで入射光子の情報を得ることが出来る (図 1.2)。これはシリコンで出来た散乱体センサー (Si-Pad) とテルル化カドミウムで出来た吸収体センサー (CdTe-Pad) の対で構成される。入射光子はまず散乱体でコンプトン散乱し、エネルギーおよび運動量の一部を散乱体内の電子に与えることで、反跳電子と散乱光に分けられる。この反跳電子は散乱体内ですぐさ

¹High Energy Stereoscopic System

²Major Atmospheric Gamma-ray Cherenkov Telescope

³化学式は Bi₄Ge₃O₁₂

ま止まり、反跳電子のエネルギー E_1 をすべて散乱体に引き渡す。一方散乱光子は吸収体で光電吸収され、散乱光子のエネルギー E_2 をすべて吸収体に引き渡す。入射光子のエネルギーが電子の束縛エネルギーを無視できるほど大きいとき、入射光子と散乱光子のなす角度であるコンプトン散乱角を θ とすると、コンプトン散乱の式

$$E_2 = \frac{E_1}{1 + \frac{E_1}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)} \quad (1.1)$$

より、散乱角 θ は

$$\cos \theta = 1 - \frac{m_e c^2}{E_1} + \frac{m_e c^2}{E_1 + E_2} \quad (1.2)$$

となる。入射光子のエネルギー E_0 は、2つのセンサーで得られたエネルギーの和 $E_0 = E_1 + E_2$ として求めることが出来る。散乱体におけるコンプトン散乱と吸収体における光電吸収の反応位置から散乱光子の方向が求まり、また式 1.2 から入射光子と散乱光子のなす角が求まる。この2つを用いて、光子の到来方向を円環に制限することが出来る。散乱角 θ で決定される円錐は光子のソース(ガンマ線源)が存在しうる領域であり、コンプトンコーン (compton cone) と呼ばれる。同一のガンマ線源から複数イベントを得ると、円環の交点からガンマ線源の位置、つまり光子の到来方向を特定することが出来る [5][6]。こうしたコンプトン再構成は測定されたエネルギーと反応位置を用いるため、到来方向の決定精度はセンサーの位置分解能とエネルギー分解能に依存する。

井戸型 BGO アクティブシールドは、2012年現在衛星軌道上で観測中の「すざく」衛星搭載硬 X 線検出器 HXD [7][8] でも使用されているバックグラウンド除去技術である。HXD は Si PIN ダイオードと GSO 結晶⁴シンチレータから成る主検出部を、井戸型 BGO 結晶シンチレータによるアクティブシールドの底に置いた構造をしている。アクティブシールドはそれ自体が検出器として動作しており主検出部とこれとで反同時係数を取る。長い筒状になっており、視野を絞ることで 4π 方向から降り注ぐ観測天体外から到来した X 線・ガンマ線イベントや、荷電粒子由来のイベントを低減することができる。このバックグラウンド除去技術により、HXD は 20–300 keV での観測において世界最高レベルの感度を達成した。SGD もまた主検出部である狭視野コンプトンカメラを井戸型 BGO 結晶シンチレータと光検出器である APD からなるアクティブシールドの底に置いた構造をしており、アクティブシールドによって視野を約 0.03 sr (約 $10^\circ \times 10^\circ$) まで絞る。

Fine Collimator は HXD でも実績のある金属で出来たパッシブなコリメータ [9][10] であり、メッシュを長手方向に引き伸ばした構造をしている。この Fine Collimator により井戸型 BGO アクティブシールドで規定される検出部の開口角は低エネルギー光子に対しさらに区切られ、視野を約 1×10^{-4} sr (約 35.5 分角 \times 35.5 分角) まで絞ることで、観測天体外からの到来した X 線・ガンマ線イベントをさらに低減することが出来る。Fine Collimator の詳しい説明は章 2.1 で述べる。

⁴化学式は Gd_2SiO_3 。HXD で使用したものは光量が増えるように Ce をドーブしている。

このように井戸型 BGO アクティブシールドと Fine Collimator によって視野を絞ることで、観測天体外から到来した X 線・ガンマ線イベント、荷電粒子由来のイベントを低減できる。一方で大気中性子や SGD 自体の放射化由来のイベントはこの視野を絞る方法では除去することができないが、主検出部にコンプトンカメラを用い視野外からのイベントを除去することで、バックグラウンドを低減することができる。このようにして SGD は硬 X 線-軟ガンマ線帯域でこれまでにない高感度の観測を実現する。

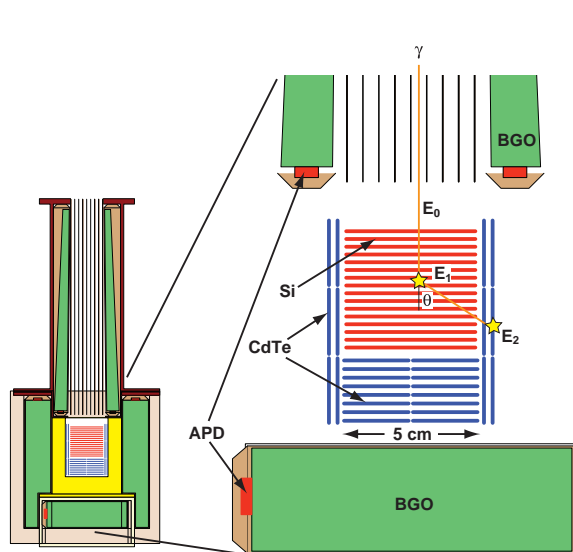


図 1.1: SGD の断面図

軟ガンマ線検出器 SGD の主検出部は狭視野コンプトンカメラ (赤で示す Si-Pad および青で示す CdTe-Pad) である。また主検出部は前面を Fine Collimator (黒で示す金属コリメータ)、側面および底面を井戸型アクティブシールド (緑で示す BGO および赤で示す APD) で覆われている。

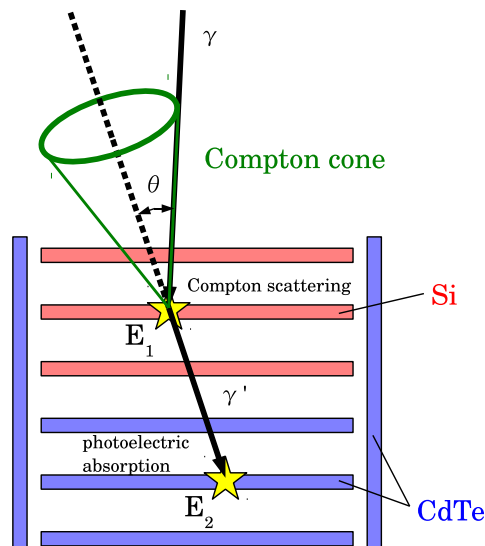


図 1.2: コンプトンカメラの概念図

入射光子 γ が主検出部に入射した時、まず散乱体センサー (赤で示す Si-Pad) でコンプトン散乱されエネルギー E_1 を落とす。その後散乱光子 γ' は吸収体センサー (青で示す CdTe-Pad) で光電吸収されエネルギー E_2 を落とす。コンプトン運動学により E_1 と E_2 から入射光と散乱光のなす角 θ が計算され、入射光子の到来方向は緑で示す円環に制限できる。

第2章 SGD搭載用金属コリメータ Fine Collimator

1章では、X線天文衛星 ASTRO-H と軟ガンマ線検出器 SGD について述べてきた。この章では本研究の対象である、SGD の構成要素の一つ Fine Collimator に関して述べる。

2.1 Fine Collimator の概要

コンプトンカメラの視野は BGO アクティブシールドによって約 $10^\circ \times 10^\circ$ (半値幅) まで絞り込まれるが、この視野ではまだ宇宙 X 線背景放射によるバックグラウンドが高く、また観測対象以外の天体からの混入雑音も無視できない。したがって SGD の高い感度を確保するためには、さらに視野を絞る必要がある。しかしこれ以上に細かい視野を持つ結晶を作ることは技術的に難しく、また全体の重量も増えてしまう。2012 年現在衛星軌道上で観測中の「すざく」衛星搭載硬 X 線検出器 HXD [7][8] では、この問題に対処するため Fine Collimator と呼ばれる金属製のパッシブなコリメータ [9][10] を BGO アクティブシールドの井戸の内側に挿入し、視野を絞ることで多くの成果を得た。これに倣い、SGD においても同様の金属コリメータを導入する。以下では Fine Collimator を FC と略称する。

HXD に搭載された FC は BGO アクティブシールドの井戸の内側を 3.0 mm 角の正方格子 8×8 個で仕切り、それを長手方向に 300 mm 伸ばすことにより、視野を約 30 分角四方 (FWHM) に区切る。そこで SGD でも視野を同程度に絞る。ただし HXD 用の FC は主検出部である GSO シンチレータに合わせた大きさ ($24 \times 24 \text{ mm}^2$) だったが、SGD 用の FC はコンプトンカメラ中で入射光子があたることになる Si-Pad の大きさ ($51.2 \times 51.2 \text{ mm}^2$) に合わせる必要がある。そこで SGD に搭載される FC は 3.2 mm 角の正方格子 16×16 個で仕切り、それを長手方向に 300 mm 伸ばすことにより、視野をおよそ $35.5 \text{ 分角} \times 35.5 \text{ 分角}$ (半値幅) に絞り込む。HXD と比べ SGD では FC の面積および質量がおよそ 4 倍に増えており、技術的に難しい物となっている。これが本研究で FC の開発を行なった大きな理由である。

FC の材質であるリン青銅 (HXD のそれと同じ) は取り扱いに優れた素材であり、その主成分である Cu は、適度な X 線阻止能を持つ。低エネルギー光子の阻止能と有効面積の損失の点から、SGD では 100 μm 厚の仕切り板を用いる。この FC を挿入することで、コ

ンプトンカメラで観測するエネルギー帯域のうち 100 keV 以下の低エネルギー領域においては、バックグラウンドとしての宇宙背景 X 線 (CXB) や、観測対象以外の天体が視野に混入する確率を、視野に比例した約 1/300 に減らすことができる。

一台のコンプトンカメラに対し FC が 1 本挿入され、その FC の下部にカメラ本体が取り付けられる。FC 主構造体は筒と格子であり、これで視野を絞る。この主構造体の天体側にはつばが付き、またコンプトンカメラ側は後部支持構造体を取り付け、これらをハウジングにネジ留めすることで SGD に固定する。FC の写真を図 2.1 に示す。また図面を図 2.2-図 2.6 に示す¹。

2.2 Fine Collimator に要求される性能

2.2.1 耐震性

人工衛星を衛星軌道上に投入する際に、人工衛星は打ち上げに起因した様々な機械的な衝撃を経験する。これは打ち上げに用いるロケットおよび衛星に起因しており、各衛星に対して適切な試験を行う必要がある。現在主力大型ロケットとして日本で用いられており、ASTRO-H 衛星の打ち上げる際に用いるのが、液体燃料を使用した日本初の純国産ロケット H-IIA ロケットである。H-IIA ロケットは液体燃料ロケットであるため、「すざく」を打ち上げた固体燃料ロケットである M-V ロケットより振動や衝撃などの環境による制限は緩いと期待される。とはいえ SGD 用の FC は「すざく」衛星搭載 HXD の FC と比べ約 4 倍の大きさを持つことから、予想される振動衝撃に十分な耐性 (耐震性) が確保されているか確認する事は重要である。

ロケットの機械的な振動衝撃は一般に、(1) 静荷重、(2) ランダム振動、(3) 音響衝撃、(4) 落下衝撃および (5) パイロ衝撃の 5 種類が挙げられる [11]。1 つめの静荷重はロケットの加速そのものである。ロケットは燃料を消費するとともに軽くなるので加速度を増し、H-IIA ロケットでは最大 4 G に達するが、静荷重であるため一般には問題とならないことが多い。2 つめのランダム振動は、ロケットの燃焼に伴うもので、打ち上げの初期に著しい。これはロケットが濃い大気によって強い動圧を受けることで激しく振動するため生じる。3 つめは音響衝撃であり、打ち上げの初期にロケットが発する激しい音響が周囲の地面で反響されロケットに到達したり、音速を超える付近で空気振動が強められることに起因する。またランダム振動の高周波成分はこの音響衝撃に由来するところが大きく、両者の切り分けは難しい。音響衝撃は空気中を伝わるため、ロケットが上昇し気圧が低下するとともに、20 秒程度で急速に弱まる。4 つめは落下衝撃であり、これはロケットの各段の燃焼が終わって切り離されるときに生じる。このとき衛星は数 G の加速度で推進軸方向

¹MHI 社提供の図面、具体的には 2017 年 1 月 10 日版の後部支持構造体の図面、2012 年 1 月 27 日版の詳細図面、および 2013 年 5 月 8 版の全体図面に基づく。

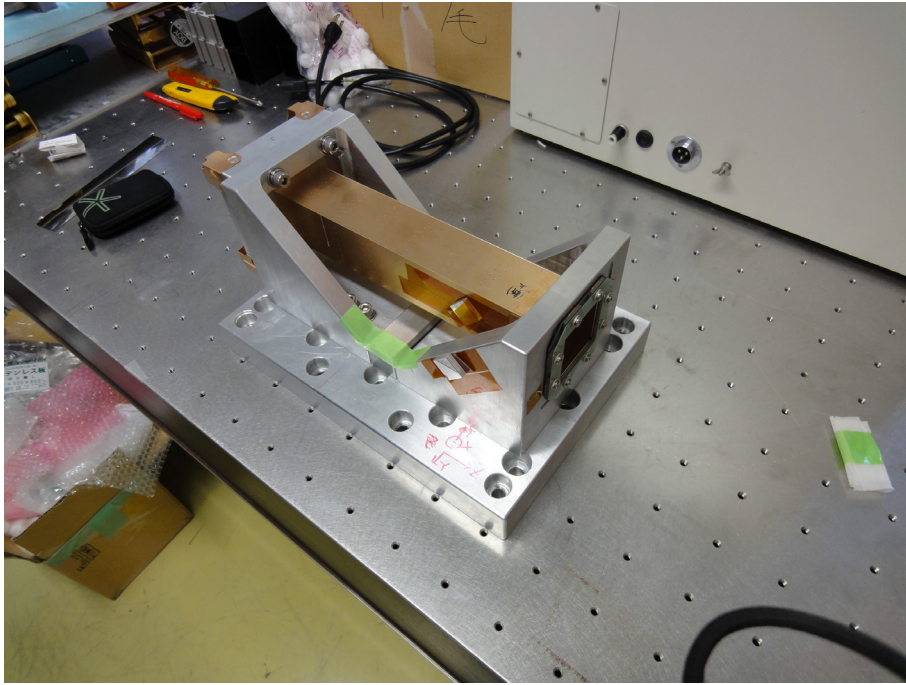


図 2.1: FC の概形。5 章で述べる振動試験の際、ハウジングを模擬した Al 製のマウントに取り付けた写真を示す。上の写真は前部 (天体側) から見たところ。下の写真は後部 (カメラ側) からみたところ。およそ 35 cm の長さの筒の前部につばが、後部に 4 本の足をもつ後部支持構造体ととりつき、これらをハウジングにネジ止めする。

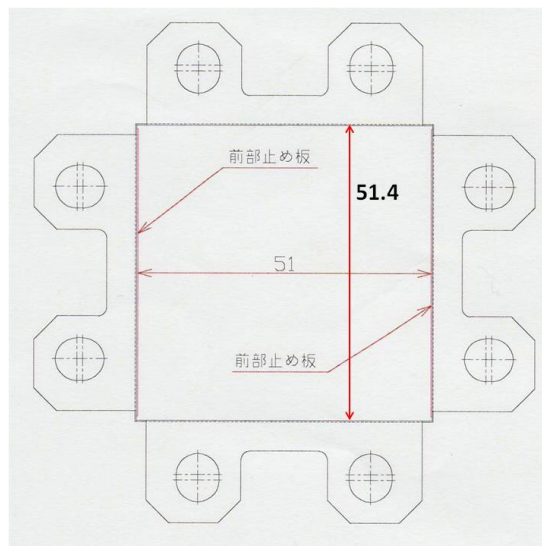
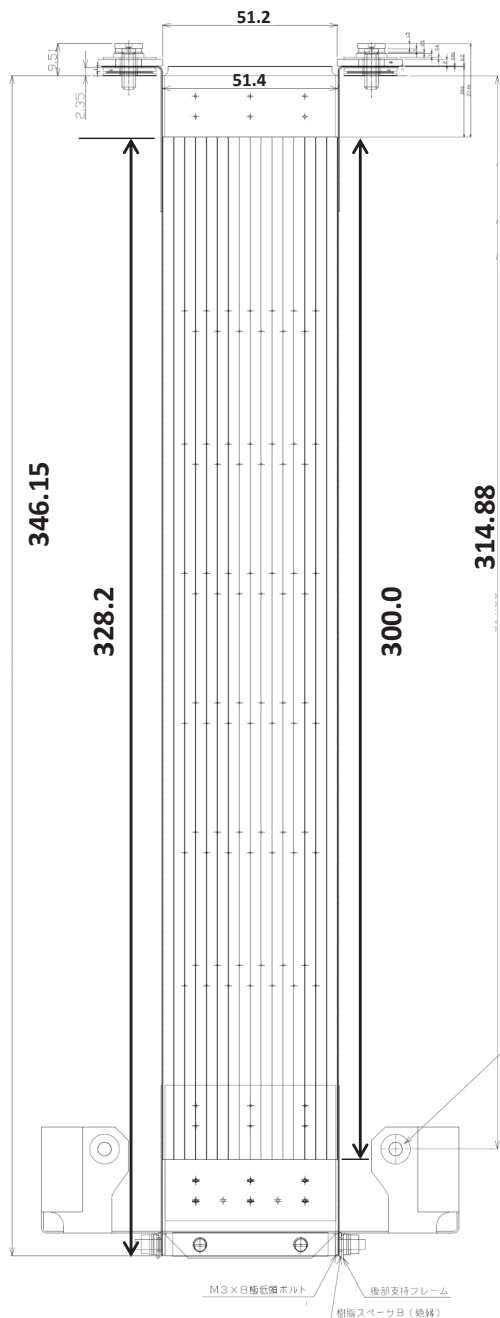


図 2.2: FCの図面(その1)。 (左図)FCの主構造体である筒 (Cu フレーム; リン青銅製) を示す。この Cu フレーム (0.2 mm 厚) の中に 30 cm 長の仕切り板を挿入し、 $16 \times 16 = 256$ 個の格子に区切る。仕切り板は 2 枚の前部止め板および 2 枚の後部止め板で止められる構造をとる。Cu フレームの前部 4 辺は折り曲げて「つば」を作り、ハウジングに取り付けられる。(右図) FC を前面から見たところ。前部止め板が 2 枚、Cu フレームの内側に付くため、縦と横とで内径が異なる。

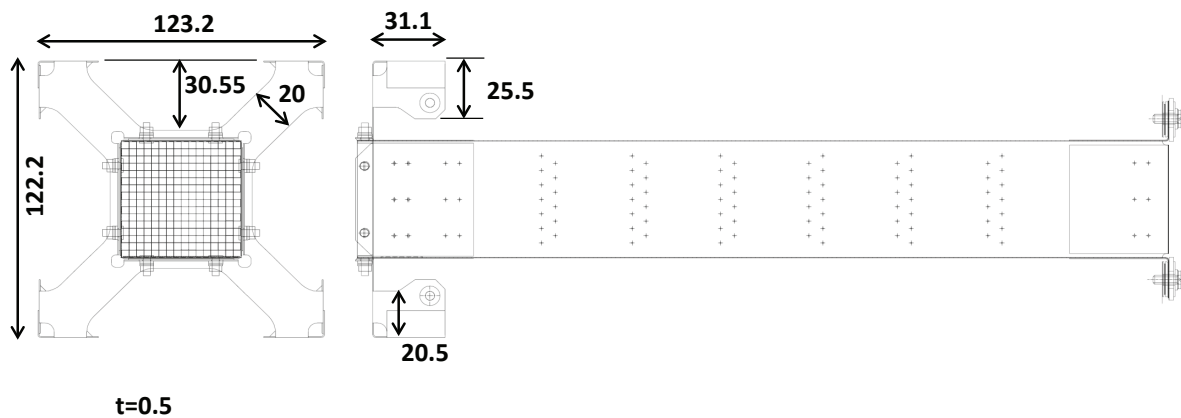


図 2.3: FCの図面(その2)。後部支持構造体の形状を示す。0.5 mm 厚のリン青銅でできており、FCのアライメントの際、向きを変えられるよう多少の柔軟性を持たせている。

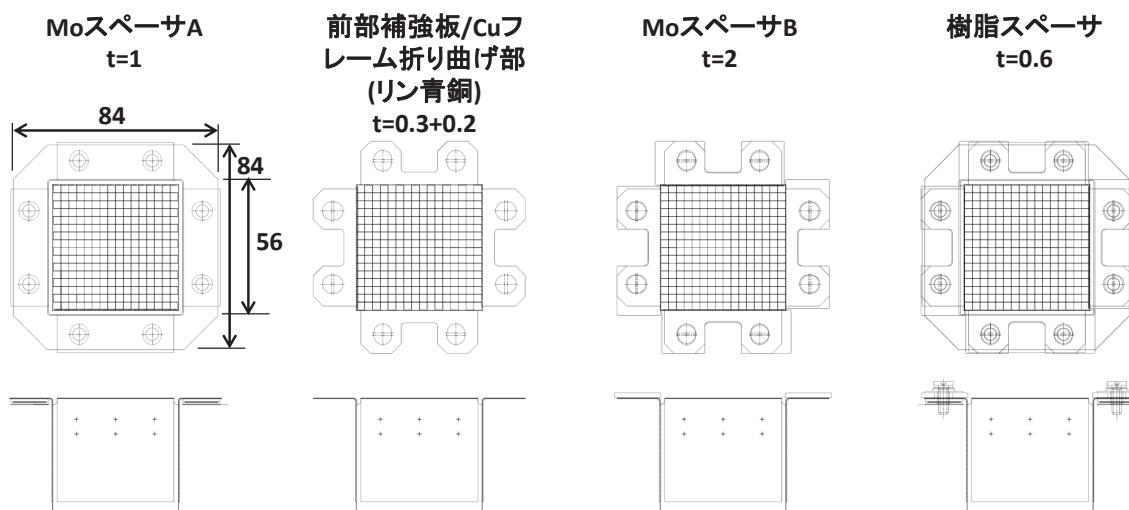


図 2.4: FCの図面(その3)。つば部の詳細を示す。左から順に、Cu フレームの折り曲げ部の下側に取り付く Mo スペース A、Cu フレームの折り曲げ部および前部補強板、それらの上に取り付く Mo スペース B、さらに上に取り付く樹脂スペースを示す。Mo スペースと Cu フレームおよび前部補強板は、CXB に対するシールドの役目を果たす。これらの他にも樹脂スペースや粘着シートがつくが、物質量としては少ない。

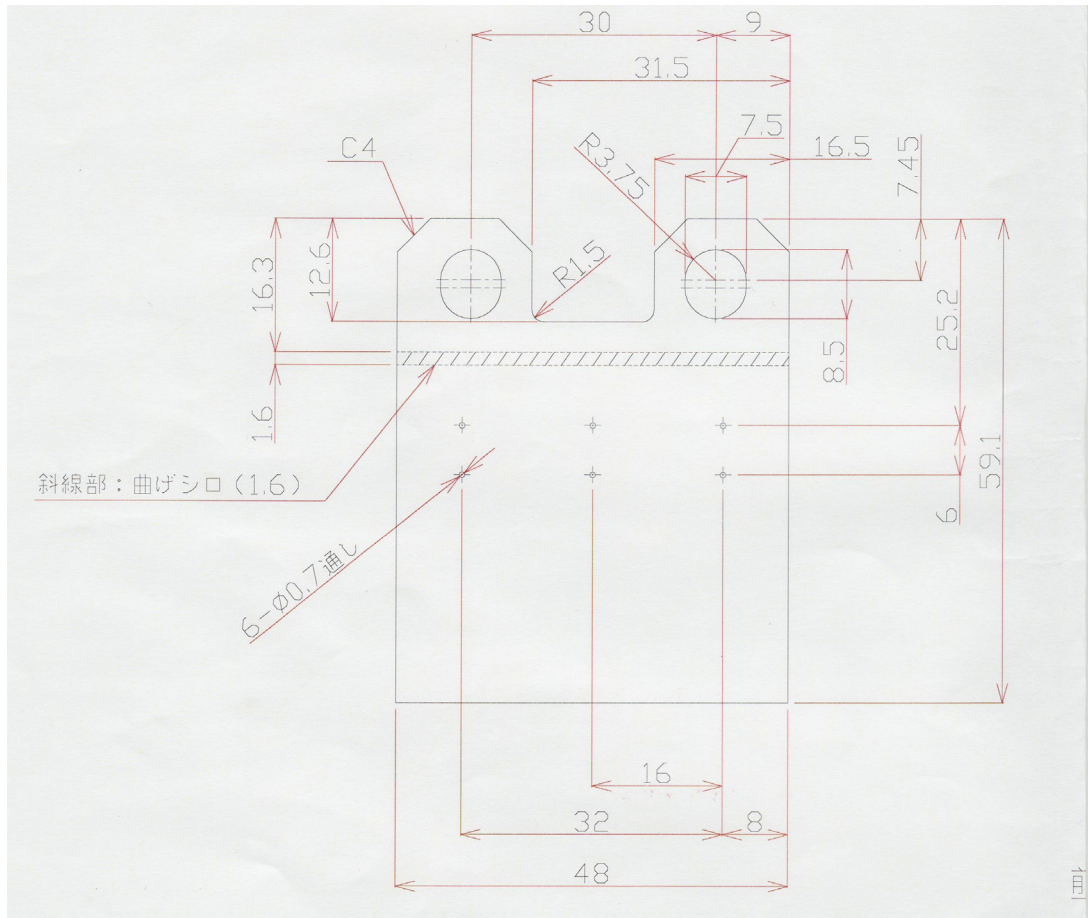


図 2.5: FCの図面(その4)。前部補強板を示す。これはCuフレームの折り曲げ部(つば部)に外側から取り付けこれを補強する。

に瞬時的(約 10 ミリ秒)に押される。5 つめはパイロ衝撃であり、衛星を包むフェアリングを火薬によって切り離すときに生じる極めて高周波(約 4000 Hz)の衝撃である。これらの機械的な振動を模擬した試験によって、予想される機械環境に対し搭載機器が打ち上げで性能劣化しないことを事前に確認しなければいけない。各機器(例えば SGD)に対する機械環境の基準レベル(衛星に搭載される各々の機器が耐えるべき基準)は「ASTRO-H 搭載機器の耐環境性設計基準書」にまとめられている。

本論文ではこれらの機械的な振動に対する FC の耐性をみるため、一般に最も厳しい試験である(2)ランダム振動試験、(3)音響衝撃試験、(4)落下衝撃および衛星/検出器全体の共振を模擬した正弦波加振試験を行なった。またこれらの予備実験として、共振周波数を見るための(1)静荷重試験も行なった。これらの試験の詳細は 5 章で述べる。

2.2.2 開口率

FC は長さ 300 mm で厚さ 100 μm の仕切り板を 3.2 mm 毎に曲げることでメッシュ構造が作られ、その開口率は、開口部 ($3.1 \times 3.1 \text{ mm}^2$) を 1 格子の大きさ ($3.2 \times 3.2 \text{ mm}^2$) で割ることで計算でき、93.8%となる。しかし現実には仕切り板の歪みによって、見かけの板の厚みは 100 μm より大きくなり、透過率はより低下する。透過率が減少するとコンプトンカメラに入射する光子が減少するため観測効率が低下する。もともとコンプトンカメラ全体の有効面積は最大でも約 20 cm^2 と小さく [2]、有効な光子が減少するのは問題となる。そこで ASTRO-H ミッションとして SGD 搭載 FC には開口率が 87%以上であることを要求している。また目標値は 90%である。

2.2.3 X 線による透過率の角度応答

「すざく」衛星搭載 HXD は 10–600 keV の帯域で観測可能であり、特に 100 keV 以下の帯域では現在運用中の衛星内で最高感度を誇る。これは HXD は FC を搭載しており、100 keV 以下の帯域で視野を絞ったためである。それゆえ「すざく」衛星は様々な成果を挙げている。さそり座の尾にある超新星残骸 RXJ1713.7-3946 の観測はその成果の 1 つである。恒星は主系列星から赤色巨星や赤色超巨星へと進化するが、質量が大きなものは重力崩壊によって超新星爆発(SN)と呼ばれる突発的な爆発現象を引き起こす。この SN によって、もとの星は 4π 方向に吹き飛ばされ超新星残骸(SNR)と呼ばれる構造を作り、また中性子星やブラックホールといったコンパクト天体を残す²。SNR は宇宙線の加速メカニズムの 1 つだと考えられている。論文 [12] では西暦 393 年に超新星爆発した RXJ1713.7-3946 に対し観測を行ない、CCD カメラである XIS 検出器と HXD を組み合わせることで、10 keV

²また比較的小質量の恒星は白色矮星となるが、この白色矮星に物が降り積もってチャンドラセカール限界質量を越え、熱核暴走 (Ia 型超新星爆発) を起こすことでやはり SNR を残すこともある。

前後に明瞭なカットオフを持つことや、その形状から Bohm 極限と呼ばれる、加速が効率的に行われる状態が実現していることを明らかにした。

このように「すざく」衛星搭載 HXD は様々な成果を挙げた。この成功を踏まえ、SGD で用いられる FC は HXD で用いられた FC と同程度の視野を目指す。これにより SNR や銀河団といった広がった天体のマッピング (場所を変えながら観測を行うことで、粗いイメージを取得する手法) や銀河面天体の観測で HXD と同様のサイエンスを、より高い感度を目指す。ただし HXD と比べ SGD で用いられる FC は面積が約 4 倍大きく、技術的に難しい。

FC の視野は 2.1 章で述べたように、格子のサイズと長さで決まり、半値幅で約 35.5 分角である。ただし角度応答は格子の数や入射光子のエネルギーに依存し、単純な三角形ではなくなる。そこで角度応答を文献 [9] にならい計算し、以下にまとめる。

まずはじめに図 2.7 のように、1 次元で X 線による Fine Collimator の透過率の角度応答を考える。入射角 θ 、エネルギー E の X 線が 1 枚の厚み d の金属薄板を斜めに入射する場合、 $d/\sin\theta$ の長さで物質を通り抜ける。また、BGO シールドの開口幅を D 、板の仕切りの数を M (板の枚数は $M+1$) とすると、板同士の間隔 a は D/M となる。ここで 1 つの格子の開口面を p と q に分け、各々で物質を通過する長さを考える。 N を $H \tan\theta/a$ を越えない最大整数としたとき、開口面 p に入る X 線は N 枚、 q に入る X 線は $N+1$ 枚の板を通過するので、各々 $Nd/\sin\theta$ 、 $(N+1)d/\sin\theta$ の物質を通る。また 1 つの格子の p 、 q の幅は $p = a - (H \tan\theta - Na)$ 、 $q = a - p$ であり、同様の領域が $M-N$ 、 $M-N-1$ 個あるので、 p の幅の総和は $((N+1)a - H \tan\theta)(M-N)$ 、 q の幅の総和は $(H \tan\theta - Na)(M-N-1)$ となる。従って p タイプの開口部に入る (N 枚の板を通過する) 確率 P 、 q タイプの開口部に入る ($N+1$ 枚の板を通過する) 確率 Q は、有効な (BGO シールドにあたらない) 開口部が $D - H \tan\theta$ であることを考えて

$$P = \frac{1}{D - H \tan\theta} ((N+1)a - H \tan\theta) \times (M-N) \quad (2.1)$$

$$Q = \frac{1}{D - H \tan\theta} (H \tan\theta - Na) \times (M-N-1) \quad (2.2)$$

となる。

角度 θ で入射した X 線の透過率を計算する際は BGO シールドの効果も考えなければならない。簡単のため完全に X 線を止めると仮定すると、 $\theta = 0^\circ$ のときと比べ $(D \cos\theta - H \sin\theta)/D$ 倍となる。板による反応確率 (密度 ρ 、反応断面積 σ の板を長さ l だけ通過すると、反応せずに通る確率は $e^{-\rho\sigma l}$) および上記 P 、 Q の確率も考えると、透過率 $T(\theta, E)$ は

$$T(\theta, E) = \left(P e^{-\rho\sigma(E) \frac{Nd}{\sin\theta}} + Q e^{-\rho\sigma(E) \frac{(N+1)d}{\sin\theta}} \right) \times \frac{D \cos\theta - H \sin\theta}{D} \quad (2.3)$$

と計算できる。

これをもとに実際のFCの角度応答を計算する。まず仕切り板の高さ H 、長さ D 、厚み d および格子間隔 a はそれぞれ 30 cm、5.12 cm、0.01 cm および 3.2 cm であり、また板の仕切りの数 $M = 16$ となる。またFCの反応断面積および密度は、簡単のために主成分である銅のみで決まると仮定する。反応断面積はNIST-XCOM[13]を参照し、光電吸収とコンプトン散乱を足しあわせた全反応断面積 σ_{total} をもとに計算する。また、リン青銅の密度は銅と同じ 8.9 g cm^{-3} とする。これを式 2.3 に代入し、様々なエネルギーの X 線に対するFCの透過率角度応答を求めたのが図 2.8(左)である。また各エネルギーの有効立体角は透過率をBGOの視野内で角度で積分すればよく、

$$\begin{aligned}\Omega(E) &= 4 \int_0^{\theta_{\max}} \int_0^{\phi_{\max}} T(\theta, E) T(\phi, E) d\theta d\phi \\ &= 4 \left(\int_0^{\theta_{\max}} d\theta T(\theta, E) \right)^2\end{aligned}\quad (2.4)$$

となる。ここで θ_{\max} および ϕ_{\max} は $\tan^{-1}(D/H)$ であり、SGDの場合は10度である。計算結果を図 2.8(右)に示す。

図 2.8(左)は天体からの光子がFCの仕切り板方向で斜めから入ったときに、透過率がどのように変化するかを示す。入射される X 線のエネルギーが 50 keV、100 keV、200 keV、500 keV のときの透過率の角度応答をそれぞれ黒、赤、マゼンタ、青でプロットしている。低エネルギー側の X 線 (50 keV) に対してFCの仕切り板は光学的に十分厚く、仕切り板に当たった X 線はほぼ全て散乱・吸収されてしまう。そのためFCの角度応答は格子1つの大きさ (内径 $3.1 \times 3.1 \text{ mm}^2$) によってのみ決められ、35.5 分角 (約 0.01 rad) の半値幅を持つ二等辺三角形のような形状になる。エネルギーが高くなるにつれ仕切り板が透けるので、光軸から 35.5 分角を超えた方向でも X 線が通過するようになる。高エネルギー側 (500 keV) の X 線に対するFCの角度応答は主にBGO井戸の大きさ ($51.2 \times 51.2 \text{ mm}^2$) で決まり、10 度 (約 0.17 rad) の半値幅を持つ二等辺三角形のような形状に近づく。

図 2.8(右)より、SGDの有効な開口角 Ω_{eff} は低エネルギー帯域では約 10^{-4} sr だが、100 keV を超えた辺りで上昇し、観測帯域の高エネルギー側である 600 keV では約 0.01 sr とBGOの視野 (0.03 sr) に近づくことが分かる。

この Ω_{eff} の上昇に伴い、観測対象天体以外からの成分 (X 線バックグラウンド) が増加する。これを定量的に見るために、CXB (宇宙背景輻射) と NXB (X 線に依存しないバックグラウンド) のエネルギー毎の寄与を考える。CXB は我々の銀河の腕の部分に当たる銀河リッジ放射領域を除き 4π 方向からほぼ一様に降り注いでいる。文献 [14] に従い、単位面積・単位エネルギー・単位立体角あたりに降り注ぐCXBのカウントレート $dR_{\text{CXB}}/d\Omega$ を $\text{c cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ keV}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ の単位で

$$\frac{dR_{\text{CXB}}}{d\Omega} = \begin{cases} 7.877(E/\text{keV})^{-1.29} \times e^{-\frac{E}{41.13 \text{ keV}}} & (3 \text{ keV} \leq E < 60 \text{ keV}) \\ 1652 \times (E/\text{keV})^{-3} + 1.754 \times (E/\text{keV})^{-1.7} & (60 \text{ keV} \leq E < 600 \text{ keV}) \end{cases} \quad (2.5)$$

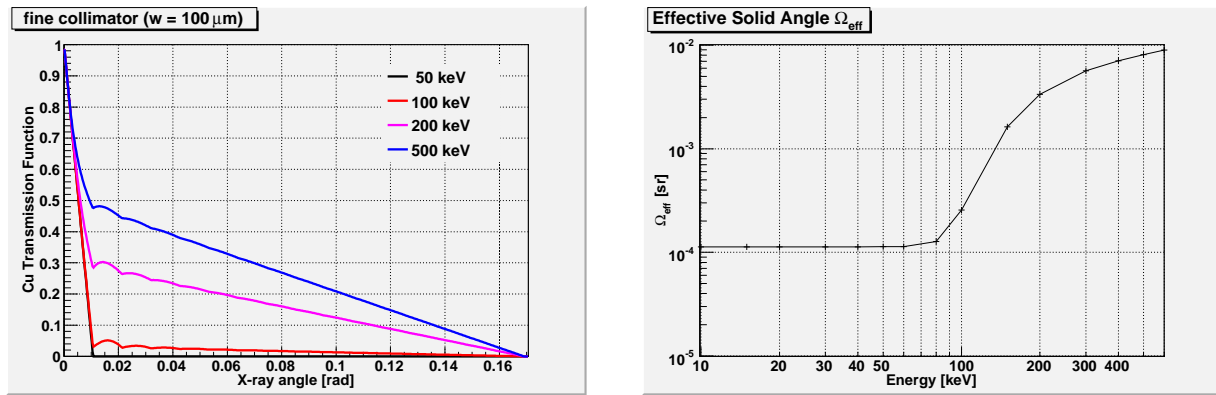


図 2.8: FC の角度応答および有効な開口角。(左)FC の透過率の角度応答。縦軸は透過率、横軸は光軸に対する角度(rad)を示す。簡単のため FC は Cu のみで構成されているとみなした。また入射光のエネルギーごとにプロットしており、黒は 50 keV、赤は 100 keV、マゼンタは 200 keV、青は 500 keV のエネルギーを持つ光子が入射した時の透過率である。(右)FC の有効な開口角。縦軸は有効な開口角 (sr)、横軸はエネルギー (keV) を示す。

とした。これに図 2.8(右)で求められる Ω_{eff} を掛けて、CXB による単位面積・単位エネルギーあたりのカウントレートを求めたものを図 2.9 に示す。ここで青線は BGO アクティブシールドのみの場合 ($\Omega_{\text{eff}} \sim 0.03$ sr)、黒の点線はエネルギーに寄らず光学的に十分厚い FC を置いた場合 ($\Omega_{\text{eff}} \sim 10^{-4}$ sr)、黒の実線は実際の FC を置いた場合をそれぞれプロットしている。図より FC によって低エネルギー側で CXB が約 1/300 に低減され、主観測帯域である 40–600 keV では約 10^{-6} c cm⁻² s⁻¹ keV⁻¹ sr⁻¹ でほぼ一定となっていることが分かる。また NXB が文献 [4] で計算されており、大気中性子と検出器 (CdTe、BGO、FC) 自身の放射化によるバックグラウンドの合計を、図中で赤でプロットした。バックグラウンドは CXB と NXB の合計で表されるので、CXB を下げれば下げるほどバックグラウンドは低下する。ただし CXB と NXB の一方がもう一方を大きく下回ったとしてもあまりバックグラウンドは低下せず技術的な困難が増加するのみなので、CXB は NXB が同程度になるようデザインすれば十分と言える。SGD は主観測帯域である 40–600 keV において CXB が NXB と同程度まで低減出来ている。

2.3 Fine Collimator の性能評価方法

FC の性能評価する上で X 線を用いて透過率とその角度応答を測定するのは難しい。一般的に 10 keV を超える X 線は反射しないので集光できず、平行な X 線ビームを作るためには被測定物と X 線源の距離を離す必要がある。このとき単位面積あたりの光子数は距離 r に対して r^{-2} で減少するので十分な測定を行うには非常に強いフラックスを持つ X 線源を用意する必要がある。このような X 線源は SPring-8 や KEK といった加速器施設で、

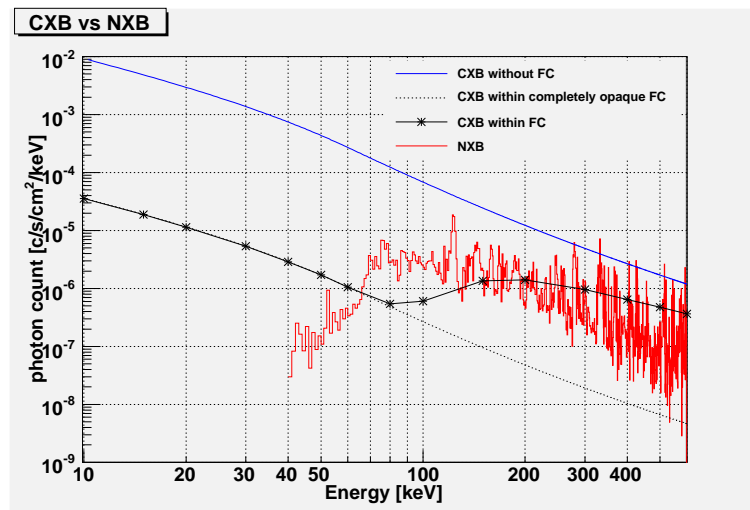


図 2.9: CXB および NXB の SGD バックグラウンドへの寄与

縦軸は単位面積・単位エネルギーあたりのカウントレート、横軸は入射光子のエネルギーを示す。青は BGO アクティブシールドのみの場合、黒の点線はエネルギーに寄らず光学的に十分厚い FC を置いた場合、黒の実線は FC を置いた場合。また NXB(non X-ray background) の寄与を赤で示す [4]。

加速粒子を曲げる際に生じる放射光で初めて達成され、必然的に大掛かりな実験となり FC 全数に対して行うには不向きである。そこで我々は FC 全数に対して比較的平行光を作りやすい可視光による透過率とその角度応答を求めることとした。可視光は回折しやすいので可視光での透過率は X 線より低くなるが、相対的な透過率が取得できる。また、角度応答の測定には問題ない。詳しい実験手法は 3 章で述べる。また衛星搭載品の製作と全数検査に先立ち、FC 試作品に対し可視光と X 線の両方を用いて試験を行ない、両方の結果を比較することで、可視光透過率から X 線の透過率を計算する変換係数を求めた。

2.4 SGD と Fine Collimator で期待されるサイエンス

文献 [15] では SGD を含めた高エネルギー宇宙の各ミッションの感度の比較が行われている (図 2.10)。図に示すように SGD は従来の検出器と比べ 1 桁程度感度が向上しており、様々な科学的な成果が期待される。特に FC が機能する SGD の低エネルギー帯域は同じ ASTRO-H 衛星に搭載される硬 X 線撮像装置 (HXI) の高エネルギー帯域とオーバーラップしており、両方で同じ天体を観測することが重要である。この HXI と SGD がカバーする 5–600 keV の帯域では、天体からの信号は非熱的な成分が卓越する。この帯域で狙うべきサイエンスとしては、銀河系内での宇宙線の加速機構、ラインガンマ線を用いた超新星の構造や中性子星のジェットの組成、巨大ブラックホールの探査とそれを用いた宇宙進

化の過程、ブラックホールや中性子星などからの偏光の検出などが挙げられる。以下に宇宙線の加速機構の解明を例に示す。

宇宙線は発見されて 100 年経つが、加速に関わる天体やプロセス、どの程度のエネルギーをつぎ込んで加速しているか不明である。銀河系内の宇宙線加速の有力候補として超新星残骸 (Supernova remnant、SNR) が挙げられる。

これまでいくつかの SNR から GeV-TeV ガンマ線が検出されており、TeV 以上まで粒子が加速されていることは確かであるが、この帯域のみのスペクトルだけではガンマ線は電子の逆コンプトン散乱や制動放射由来であるとする leptonic モデルと宇宙線と物質との相互作用で生じる中性パイオンの崩壊由来であるとする hadronic モデルの両方で説明でき、区別できない。どちらの放射プロセス由来が明らかにする 1 つの手段は電子制動放射スペクトルを捉え、電子の成分の寄与を見積もることである。その他の手段として、シンクロトロン放射の冷却による電子のカットオフエネルギーの測定がある。主に若い SNR では高いエネルギーまで粒子加速されているため、高エネルギーにカットオフが存在すると考えられているが、これまでは感度不足で検出できなかった。このカットオフが検出出来れば電子の最高エネルギーが分かり、磁場の増幅による粒子加速の証拠が得られる。また多波長のスペクトルと合わせて論議することで、可能性が示唆されていたが直接検出できなかった陽子からの放射の寄与が分かる。

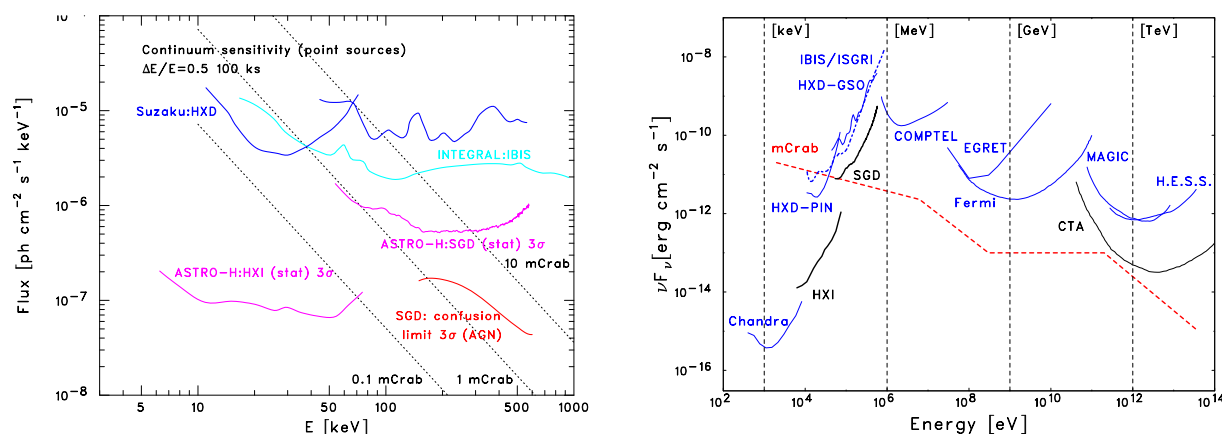


図 2.10: HXI/SGD および他のミッションの感度 [15]。 (左)HXI/SGDX の点源に対する 3σ 感度を、同じバンドの検出器の感度と比較したもの。 (右)X 線から TeV ガンマ線に至るエネルギー帯での代表的なミッションの感度曲線。比較のため赤の点線で 1 mCrab(かに星雲の 1/1000) フラックスを持つ天体を観測した場合も合わせて示す。

第3章 可視光による評価試験

FC全数の性能を精査するため、可視光平行ビームを用いてFC透過率を測定する。またSGD組み上げ時に用いるアライメント軸も測定する。この章ではこれらの可視光によるFC評価試験について述べる。

3.1 評価項目

3.1.1 可視光透過率測定の必要性和概要

FCのX線での透過率を測定するのに最も良い方法は、X線平行ビームを用意し、それによってFC全数を測定する手法である。しかし精度の良い平行度を持つX線ビームは巨大な放射光施設で行う必要があり、全数測定には不向きである。また衛星組み上げ時に用いるアライメント軸(FC端面の法線方向)の測定が出来ない。一方可視光の帯域は平行ビームを作りやすい。そこで、我々はまずFCの開発試験用試作品(ブレッドボードモデル、BBM)に対し可視光およびX線ビームの両方で透過率測定することで要求性能を満たしているか確認するとともに、X線-可視光透過率の変換係数を得ることとした。そのうえで可視光平行ビームを用いて透過率の角度応答測定およびアライメント軸測定を衛星搭載品(FM品)FC全数に対し行なう。

可視光による測定は、実績のある「すざく」衛星搭載HXD用のFCの試験方法[10]を踏襲する。そのため可視光平行ビーム光源として、HXD-FCの試験で用いたAuto Collimatorと同じNIKON社のオートコリメータ6Dを使用した。このAuto Collimatorは、電球で作成した光をレンズによって平行ビームに変え、前方から可視光を放射する。Auto Collimatorの光軸とFCの光軸(透過率が最大となる軸)をそろえた上で、FCの端面に平行ミラーを置くと、可視光ビームはAuto Collimatorに戻って来て、光軸と鏡の法線との角度のズレを測定できる。

また透過率を測定するにはFCを通過した光の強度を測定する必要がある。今回1 pixelのサイズが $24 \times 24 \mu\text{m}^2$ でpixel数が 1024×1024 あるCCDカメラ(Apogee社製のALTA U6)に、焦点距離50 mmのレンズを組み合わせて光の強度を測定する。ここで1 pixelの視角は $(1.65 \text{ 分角})^2$ である。CCDはパソコンによって制御し、撮像を行う。このAuto

Collimator と CCD との間に FC を置き、外した場合 (直接光) と比較することで可視光透過率を算出する。

3.1.2 角度応答測定

FC は見る方向によって透過率が異なり、FC の透過率を正しく測定するには、透過率が最も高い方向 (FC の光軸) に向ける必要がある。今回、FC を方位角および仰角方向に回転させるにあたって、シグマ光機社製の自動回転ステージ (SGSP-120YAM) および自動ゴニオステージ (SGSP-60A75) を用いた。それぞれの自動ステージはステージコントローラー (SHOT-204MS) を介しパソコンによって制御され、ステージ上に固定している FC を回転させる。

実験は次のように行なった。まず方位角方向に FC を回転させ、角度方向ごとの透過率をプロットすることで、FC の角度応答のうち方位角方向成分を取得する。透過率が最大になるよう調整したうえで同様に仰角方向に FC を回転させ、方位角方向成分を取得する。このようにして FC の光軸を取得し、同時に透過率と角度応答を取得する。実験の概念図を図 3.1 に、実験の写真を図 3.2 に示す。また詳しいセットアップは 3.2 章で述べる。

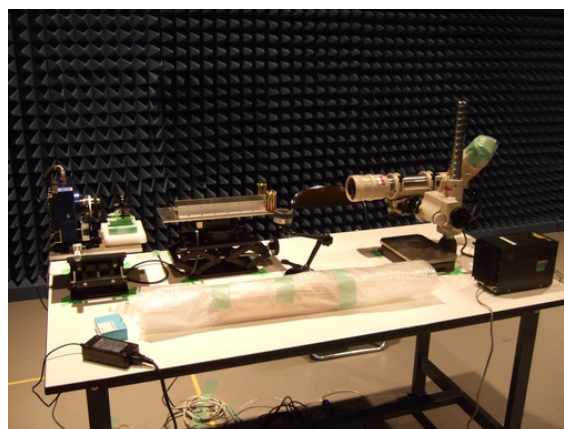
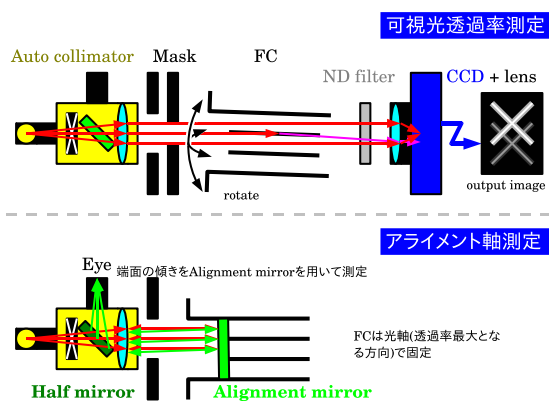


図 3.1: 可視光透過率測定およびアライメント軸測定の概念図

上に可視光透過率測定、下にアライメント軸測定の概念図を示す。

図 3.2: 可視光透過率測定時の写真

3.1.3 アライメント軸測定

製造の過程で FC の光軸と構造的な回転中心軸は必ずしも一致せず、精度よく SGD に FC を組み込むには工夫が必要である。FC の光軸向きのずれが SGD の性能にどう影響するかを、全部で 6 台ある FC が衛星の観測軸に比べ 3 分角ずれたときを例に考える。FC の視野(半値幅)は約 35 分角であり、光軸より 3 分角ずれた方向から見たとき、透過率は 3 分角/35 分角 = 約 9% 相対的に減少する。これは該当する SGD の有効面積が 9% 下がることを意味する。したがって SGD の性能を発揮するには、FC の光軸をお互いに、また衛星観測軸に対して精度よく揃える必要がある。

しかし光軸を測定しながら SGD に FC を組み込むことは出来ないので、組み上げ前に光軸とアライメント軸(端面の法線)との関係を測定し、これをレファレンスに調整する必要がある。今回平行ミラーを FC の端面に押し付け、ミラーの法線をアライメント軸と定義した。Auto Collimator から放出された可視光平行ビームがミラーによって反射され、再び Auto Collimator に戻ってきた光を見ることで、ミラーの法線方向の傾き(アライメント軸)が分かる。可視光平行ビームの放出される方向である Auto Collimator の光軸と FC の光軸を揃えた上で反射光の向きを測ることで、FC の光軸に対するアライメント軸の方向が測定できる。試験の概念図を図 3.1 下に示す。ただし、エンジニアリングモデルを用いた試験の結果、FC の端面が完全な平面になっていないことから、ミラーの方向が 1 分角以上のかたつきを持ってしまうことが分かった。そこで我々はミラーの底面に面積 $2 \times 4 \text{ mm}^2$ で厚みが $500 \mu\text{m}$ である直方体のシムを 3 脚状に張り付け、シム以外の場所に FC の端面が接しないようにすることでこのかたつきを抑えることとした。

3.2 セットアップ

図 3.1 に可視光透過率測定およびアライメント軸測定概念図を示し、また実験中の写真を図 3.2 に示す。また使用した機器を表 3.1 にまとめる。

機材名	型番	製造社名	備考
オートコリメータ	オートコリメータ 6D	Nikon	$\Phi = 70 \text{ mm}$
自動回転ステージ	SGSP-120YAM	シグマ光機	1 pulse = 0.15 分角
自動ゴニオステージ	SGSP-60A75	シグマ光機	1 pulse = 0.06 分角
レンズ	NIKKOR 50 mm F1.4	Nikon	$F = 1:1.4, f = 50 \text{ mm}, \Phi = 36 \text{ mm}$
ND filter(5%)	MFND-52-5	シグマ光機	
ND filter(50%)	MFND-52-50	シグマ光機	

表 3.1: 可視光透過率測定で使用した機器

Auto Collimator は開口部から平行光を放ち、前面に置かれた鏡の法線の位置を測定する装置である。本研究で用いた Auto Collimator の概念図は図 3.1 下を見ればよい。Auto Collimator 内の電球から出た光は十字に開口したスリットを通り、その後レンズによって可視光平行ビームにされ放射される (赤で示す矢印)。その後、鏡の法線に依存して入射光と別の方向に反射された光 (緑で示す矢印) は Auto Collimator に再び戻る。そして Half mirror で反射され目視で方向を確認できる。このとき鏡の法線の向きに依存して目で見えた十字の像の位置が変化するので、鏡の法線が分かる仕組みとなっている。本研究ではこの Auto Collimator を用いて可視光透過率測定とアライメント軸の測定を行う。

透過率を測るには、理想的には Auto Collimator から出た可視光を FC の全面に照射するのが望ましいが、Auto Collimator の口径および、CCD カメラに取り付けたレンズの口径の制約でできない。そこで実験条件 (照射位置) を一定にするため、Auto Collimator から出た可視光平行ビームを $12.8 \times 12.8 \text{ mm}^2$ の正方形に開けられたマスクで絞ることにした。このサイズは 4 章で述べる、X 線による実験のビームサイズに合わせた物である。こうしてマスクで絞られて FC に入射し、仕切り板に当たらなかった光 (つまり、FC を透過した光) が反対側から出てくることになる。ただし仕切り板に当たった光の一部は反射し、異なる角度のビームとして出てくる。これら FC から出てきた光は CCD の計測レンジにおさまるように ND フィルターによって減光され、その後レンズによって集光されることで CCD の撮像素子に像を結ぶ。この時 CCD イメージ上では、Auto Collimator 内のマスクと同じ十字の像が透過光と反射光に対応して像を結ぶ。イメージの例を図 3.3 に示す。平行光は透過光の十字の交点に対応するので、この交点の CCD ピクセルの読み取り値を FC の角度を変えながら読み取ることで角度応答が分かる。また、FC を置かない直接光の場合と比較することで、可視光に対する透過率が分かる。

実験に先立ち、CCD の露出時間を決定するため露出時間を 10~640 msec の間で変化させ、各々 90 回 Auto Collimator からの光を撮像する予備実験を行なった。露出時間を横軸、ピークとなるピクセルの読み取り値の RMS を平均値で割ったものを縦軸にとったグラフを図 3.4 に示す。縦軸が小さいほど読み取り値が安定することを意味する。図より露出時間を 160 msec にすれば測定誤差を十分抑えられ、およそ 1% にできることが分かる。また CCD 撮像素子の温度上昇に従ってノイズが増加することが知られており、これによって測定誤差が増加する。今回 CCD 撮像素子の温度を $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ で一定に保つことで測定誤差が増加することを防ぐ。

以下、具体的な実験および解析の手順について説明する。まず実験にあたり、自動ステージおよび CCD を制御しなければならない。自動ステージを動かすプログラムとしてシグマ光機社からの SGTERM というプログラムが、CCD を撮像するプログラムとして Polar Orbits Systems Integration Inc. 社からの MAXIM というプログラムがそれぞれ提供されているが、両者の間に互換性がなく、手作業で各々を動かす必要がある。すると人工的なミスが起こりやすく、また作業時間が長くなってしまいうので実験には不向きであ

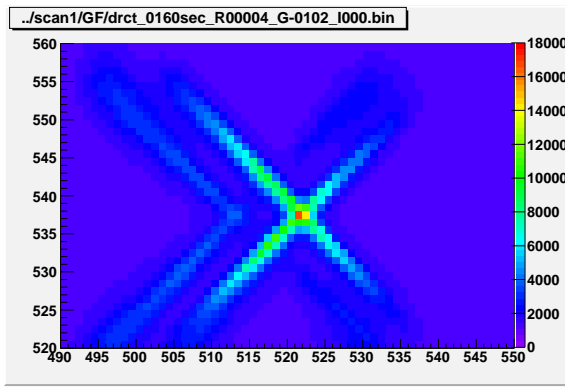


図 3.3: CCD の撮像イメージ

FCを通した光を CCD で撮像したイメージ例。各イメージ上の pixel の色はカウント数に対応し、青いほど小さく赤いほど大きい。中心に直接光、その左側に反射光がそれぞれ十字の像で表示され、両者はイメージ上で区別できる。

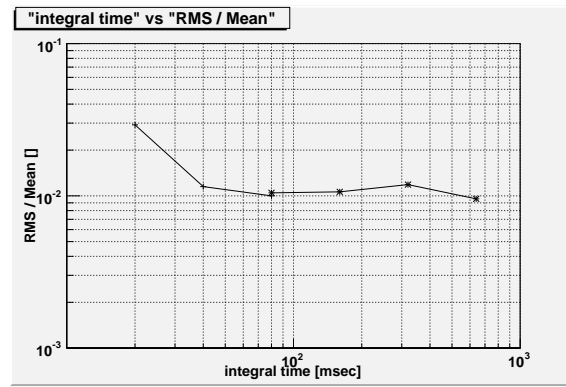


図 3.4: CCD の露出時間と測定誤差

縦軸は CCD で撮像した最も高いカウント数に対し二乗平均平方根をとり平均値で規格化した値、横軸は露出時間を示す。撮像は 10、20、40、80、160、320、640 msec の露出時間に対し、それぞれ 90 回ずつ測定を行なった。

る。そこで我々は LabVIEW ソフトウェアを使用し、新たに自動ステージの制御と CCD の撮像を同時に行う実験用プログラムを開発した。

FCを通した Auto Collimator の平行ビームによって得られた CCD イメージ例が図 3.3 に示してある。図は平行光によってできる透過光の十字が分かりやすいように拡大している。CCD イメージ上で直接光 (FC を通さない Auto Collimator の平行ビーム) によって得られる十字の中心位置 (図 3.3 では (522,538) の pixel 位置) を基準として、透過率 R_{trans} は

$$R_{trans} = \frac{C_{trans.} - C_{trans.,dark}}{C_{direct} - C_{direct,dark}} \quad (3.1)$$

と計算した。ここで $C_{trans.}$ と C_{direct} は各々直接光と透過光 (FC を Auto Collimator と CCD の間につけた場合と外した場合) の読み取り値を示す。また $C_{trans.,dark}$ および $C_{direct,dark}$ は dark frame (シャッターを閉じた状態で撮像した時のイメージ) での読み取り値であり、これは CCD の暗電流による影響を取り除くため差し引いた。

測定を行うにあたって光軸付近のデータは透過率および光軸の向きを精度よく測定するため、密に取得する必要がある。逆に光軸付近以外のデータは視野を測定するためであり、あまり密に取得する必要はない。そこで Coarse scan と呼ぶ範囲が広く粗い測定を行うこととおおよその光軸の位置を取得したのち、Fine scan と呼ばれる光軸付近の狭く密な測定を行い、光軸の方向、可視光透過率および視野を精度良く、また効率良く取得する。このようにすることで、光源の安定性による不定性も抑えることができる。各々の測定軸と測定の種類における、測定範囲および細かさを表 3.2 にまとめる。

測定軸	測定の種類	測定範囲	測定の細かさ
方位角	Coarse scan	±48 分角	3 分角刻み
方位角	Fine scan	±6 分角	0.15 分角刻み
仰角	Coarse scan	±48 分角	3 分角刻み
仰角	Fine scan	±6 分角	0.12 分角刻み

表 3.2: 測定範囲および細かさ

角度応答測定によって FC の光軸をオートコリメータの光軸に合わせたのち FC の端面に平行ミラーを取り付けることで、端面の法線方向で定義されるアライメント軸を測定する。このとき Auto Collimator と FC との光軸は揃っており、またミラーは端面と平行なので、ミラーの法線方向を Auto Collimator で測定することで FC の光軸とアライメント軸の関係が分かる。図 3.1 下にアライメント軸測定概念図を示してある。

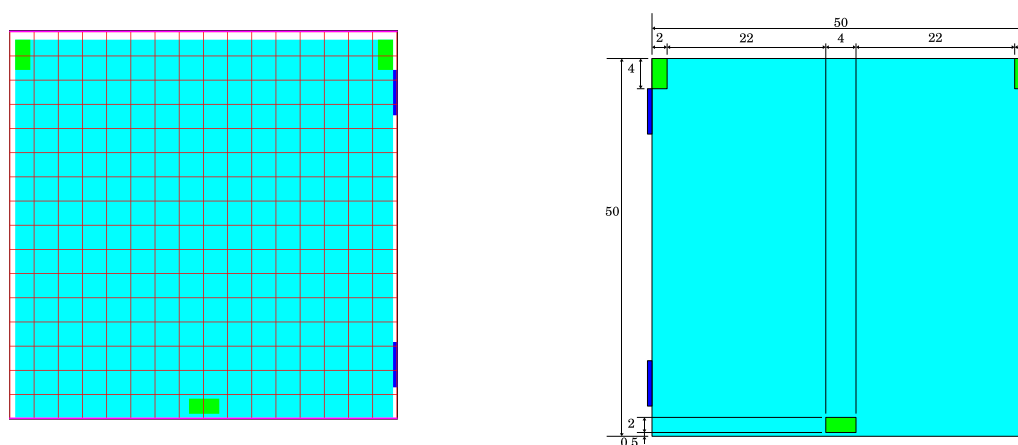


図 3.5: 三脚シムと側板の張り付け位置

水色はアライメントミラー、緑は三脚シム、青は側板、赤およびマゼンタは FC の主構造体 (仕切り板) を示す。

エンジニアリングモデルを用いた測定の結果、平面ミラー裏面に細工をせず端面に押し付けると、1 分角以上のかたつきがでた。これは FC の端面は完全な平面にならず凸凹があるためと考えられる。そこでミラーの裏面には面積が $2 \times 4 \text{ mm}^2$ で高さが $500 \mu\text{m}$ のシムを三脚状に接着剤で張り付け、FC の端面にシムの 3 点のみで接するようにし、かたつきがでないように工夫した。三脚シムの張り付け位置と FC との関係を図 3.5 に示す。FC のメッシュと外枠とは 3 辺で溶接されているためこの付近のメッシュは位置が

安定しており、三脚シムと接する場所として適当である。また、側部に位置調整のため高さが $500 \mu\text{m}$ の板を粘着シートで張り付けることで、適切な位置に三脚シムが接するよう調整している。

3.3 実験結果

可視光による評価試験の例として、FC 試作品 (BBM) に対して 2011 年 11 月 23 日に行なった評価試験とその結果について述べる。これはアクリル製のフレームに仕切り板を収めた構造をしており、仕切り板としては FM 品と同等とみなせるため可視光 (この節) と X 線 (4 章) で試験を行ない比較するのに適当である。BBM の写真を図 3.6 に示す。

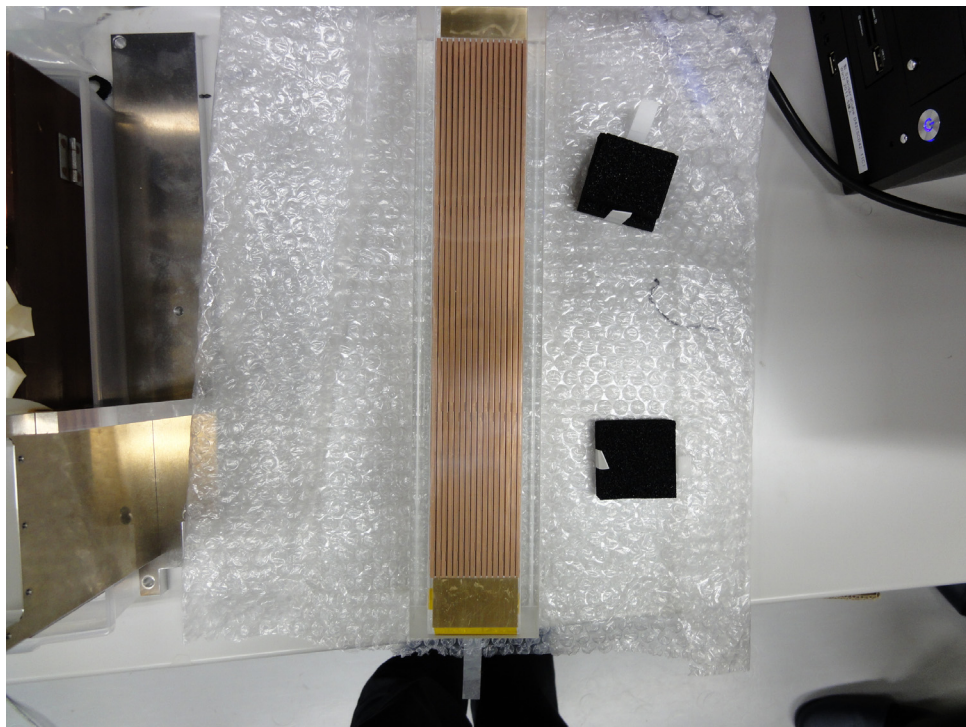


図 3.6: FC 試作品 (BBM) の写真

各試験でのビーム照射位置とビームサイズを図 3.7 に示す。試験は 3 回行い、測定 1 および 2 は図の赤で示す場所を測定し、そのビームサイズは $12.8 \times 12.8 \text{ mm}^2$ である。また測定 3 は図の青で示す場所を測定し、そのビームサイズは $20.0 \times 20.0 \text{ mm}^2$ である。特に図の赤で示す場所は、同じ FC 試作品 (BBM) を使用した X 線による評価試験の測定 2 (4 章参照) と同じ場所である。

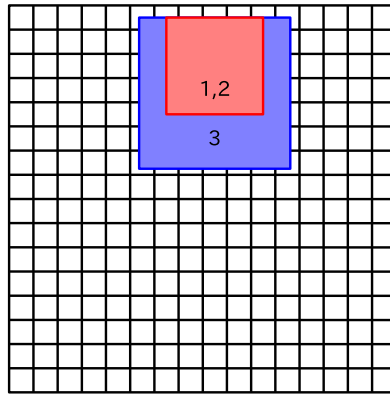


図 3.7: 可視光ビーム照射位置およびビームサイズ

黒はFCのメッシュ構造、赤と青は光源から見たときのビーム照射位置およびサイズを示す。測定1および2は赤で示す場所を測定し、測定3は青で示す場所を測定した。

角度応答測定の実験結果として、Coarse scan と Fine scan の両方の角度応答を図 3.8 に示す。縦軸は透過率、横軸はFCが向いている相対方向(分角)である。ここで角度応答測定前後で直接光を測定したとき最大で約6%読み取り値が変動していた。この影響を考慮するため、角度応答測定前後の直接光で得られた読み取り値の平均値を、角度応答測定中での直接光の読み取り値とした。低エネルギー帯域で期待されるX線透過率角度応答(図 2.8(左)の黒のプロット)が二等辺三角形の形状をしているのに対し、可視光における透過率角度応答(図 3.8)は光軸付近で回折により丸まっていることが分かる。一方可視光における視野の半値幅はおよそ35分角であり、これはX線における視野の予想値とほぼ等しい。

図 3.9 は光軸付近での可視光透過率の角度応答を拡大したものである。方位角方向の光軸を合わせたのち、縦軸を透過率、横軸を仰角方向のFCの相対方向(分角)としてプロットしている。図で黒および赤はビームサイズが $12.8 \times 12.8 \text{ mm}^2$ である測定1および2を示し、また青はビームサイズが $20 \times 20 \text{ mm}^2$ である測定3を示す。さらに光軸を求めるためデータ点をガウシアン ($C \exp(-(x - \bar{x})^2/2\sigma^2)$) に従うとしてフィットした関数も合わせて載せる。各測定における透過率とその誤差を表 3.3 にまとめた。表の測定1および2から、ビームサイズが $12.8 \times 12.8 \text{ mm}^2$ のとき、透過率は peak-peak で $72 \pm 1\%$ と分かった。これはフィットの誤差より大きいく、光源の安定性に起因する系統誤差と考えられる。ここから可視光透過率の全数検査では2回以上測定するものとした。

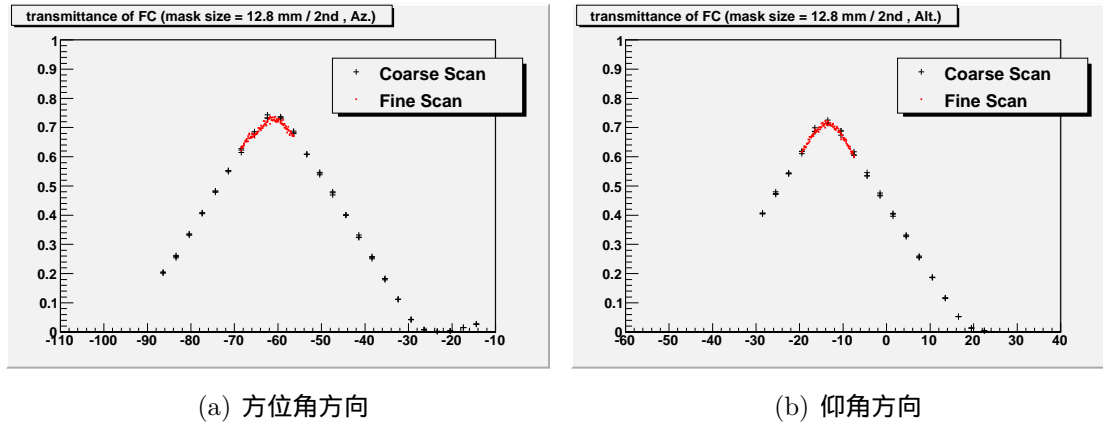


図 3.8: FC 試作品 (BBM) の可視光透過率測定 (全体)

縦軸は透過率、横軸は FC の向いている方向の相対方向 (分角) を示す。方位角方向と仰角方向に FC を回転させ、各々の結果を左図と右図に示す。また黒は Coarse scan、赤は Fine scan をそれぞれ示す。

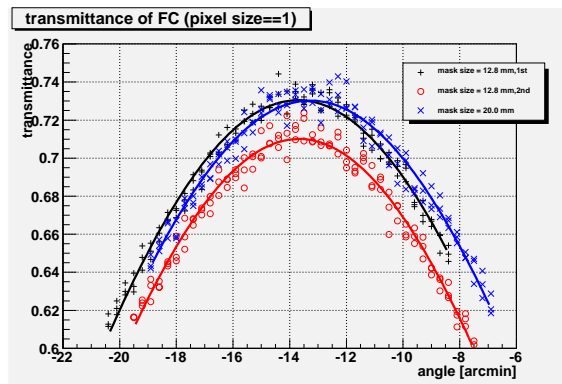


図 3.9: FC 試作品 (BBM) の可視光透過率測定 (光軸付近)

黒、赤および青はそれぞれ測定 1、2 および 3 を示す。方位角方向を合わせたのち、縦軸を透過率、横軸を仰角方向の FC の相対方向 (分角) としてプロットしている。

測定	マスクサイズ [mm ²]	プロット色	透過率 [%]
1	12.8 × 12.8	黒	73.04 ± 0.07
2	12.8 × 12.8	赤	71.00 ± 0.08
3	20.0 × 20.0	青	73.02 ± 0.09

表 3.3: FC 試作品 (BBM) の可視光透過率
各測定において、透過率とフィット時の誤差を示す。

第4章 X線による評価試験

この章ではX線によるFC試作品(BBM)の評価試験について述べる。X線でみかけの板の厚みとその角度応答を測定し、光軸でのみかけの板の厚み、すなわち有効板厚から最大開口率を算出する。また最大開口率と可視光による透過率測定結果とを比較することで、可視光透過率に対する変換係数を得る。

4.1 評価項目

可視光による試験と同様、X線を用いて開口率と角度応答を測定する。ここで開口率とはFC全体に対する格子穴の面積の比を意味し、低エネルギー帯域のX線においては透過率と同じになる。十分大きな面積の平行X線を用いれば透過率をじかに測ることは可能だが、SPring-8をもってしてもこれはできない。また透過率を測らなくてもFCを通してX線イメージを取得すれば、実効的な板厚が分かるので透過率が計算できる。そこで本実験ではFCよりも小さなサイズのビームを用い、角度を振ってみかけの板の厚みを測定し、そこからFCの開口率を計算により求める。また、この開口率が要求性能(87%)を満たしているか確認する。

4.2 セットアップ

X線による評価測定は2011年11月21日にSPring-8内のビームラインBL20B2で行なった。実験はASTRO-H衛星の硬X線ミラーの開発を担当している名古屋大学の協力を得て行なった。

SPring-8はシンクロトロン放射光(以下放射光と略称)の利用を主目的とした加速器施設である。放射光は亜光速の荷電粒子を磁力で曲げることで粒子の進行方向に発生する電磁波のことであり、X線から赤外線までさまざまな波長を含む。この放射光に分光器を用いることで特定の波長のみで構成された単色の電磁波を利用できる。本実験では30 keVのエネルギーを持つX線を用い、FC試作品(BBM)を測定した。図2.1より60 keV以下の低エネルギーのX線であれば有効立体角は変わらず、また波長が 0.41 \AA と非常に小さく有意な回折を示さないので、30 keVのX線は板厚の測定に相当である。ビームライン

の一つである BL20B2 は X 線光源である蓄積リングから約 200 m 離れており、光源から距離を離すことで高平行な X 線ビームが作成できる。ここで放射光の光源である SPring-8 の蓄積リングは高電流が流れているため出てくる放射光は高輝度であり、それゆえ距離を離しても測定に十分な光量を確保できる。X 線ビームの平行度はビームサイズに依存し、光源からビームサイズを決めるスリットまでの距離を D 、ビームサイズを d としたとき、平行度は d/D で表すことができる。SPring-8 のウェブサイト [16] よりビームサイズが 300 (水平) \times 20 (垂直) mm^2 での平行度は 1.5 mrad (水平) と 0.06 mrad (垂直) と公表されている。ビームサイズは名古屋大学チームが使用実績のある中でなるべく大きい $12.8 \times 12.8 \text{mm}^2$ と、格子 1 つと同じ $3.2 \times 3.2 \text{mm}^2$ の 2 種類の面積である。各々におけるビーム平行度はそれぞれ、 $64 \mu\text{rad}$ (水平) と $38 \mu\text{rad}$ (垂直)、および $16 \mu\text{rad}$ (水平) と $9.6 \mu\text{rad}$ (垂直) だと計算できる。これは分角の単位でそれぞれ 0.22、0.13、0.055、0.033 分角に対応し、SGD-FC に対しては十分に平行とみなせる。

実験の写真を図 4.1 に示す。また図 4.2 に実験の概略図を示す。SPring-8 の蓄積リングから出た放射光は距離の離れたスリットでビームサイズ狭めることによって高平行な X 線ビームを作る。この X 線ビームが FC を通るとき一部が仕切り板によって遮られ、みかけの板厚とほぼ等しい幅の影がビームに生じる。FC を透過した X 線ビームをシンチレータによって可視光に変換した後、CCD で撮像することで実験データを得る。みかけの板厚は、CCD のイメージ上で影になっている部分の幅を CCD pixel 数を単位として測り、これを物理的な幅に変換することで求める。ここで FC を回転させたときみかけの板厚は変化するが、このうち最小値となる板厚を有効板厚と定義する。また使用した機器を表 4.1 に示す。FC の回転移動は可視光透過率測定で使用したのと同じ自動回転ステージおよび自動ゴニオステージを使用した。

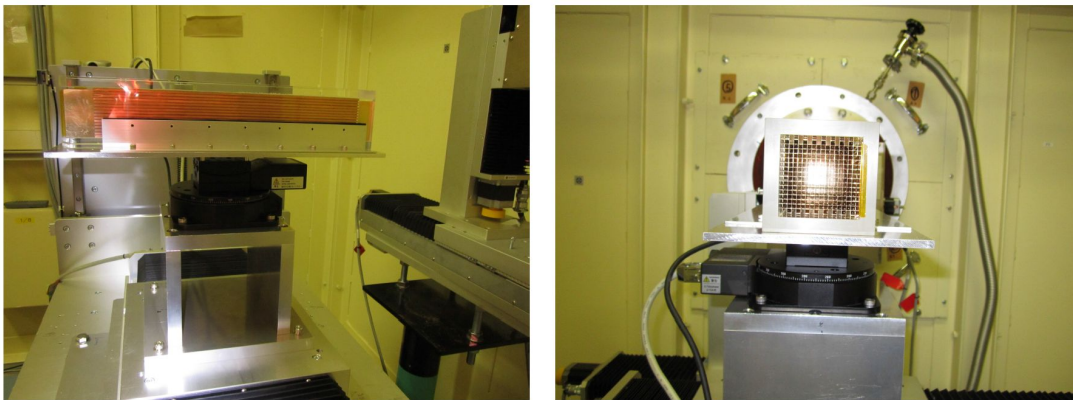


図 4.1: X 線による性能評価試験の写真

図 4.3 は、X 線照射位置とそのビームサイズを示す。図において黒は FC の主構造体

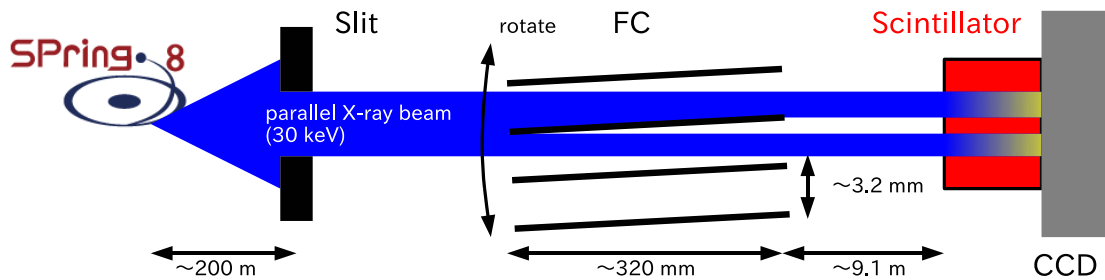


図 4.2: X 線による性能評価試験の概念図

SPring-8 の蓄積リングから出た放射光は距離の離れたスリットでビームサイズ狭めることによって高平行な X 線ビームを作る。この X 線ビームが FC を通るとき一部が仕切り板によって遮られ、遮られる幅はほぼみかけの板の厚みと等しい。FC を通過した X 線ビームはシンチレータによって可視光に変換された後、CCD で撮像される。

機材名	型番	製造社名	備考
自動回転ステージ	SGSP-120YAM	シグマ光機	1 pulse = 0.15 分角
自動ゴニオステージ	SGSP-60A75	シグマ光機	1 pulse = 0.06 分角
CCD	C4742 - 95HR	浜松ホトニクス	pixel size は $5.9 \times 5.9 \mu\text{m}$ CCD 前面に倍率が 2 のレンズ

表 4.1: X 線による評価測定で使用した機器

(メッシュ)、緑と青は光源方向から look down に見たときのビーム照射位置およびサイズを示す。ここで緑は FC を回転させることでみかけの板厚の角度応答測定を行なったものを、また青は FC を測定 1 の光軸に向けたときの有効板厚を取得する Image mapping を表す。さらに数字は測定の順番に対応している。左下は測定 11 として Image mapping を行なった後、同じ場所を測定 12 として角度応答測定を行なった。特に測定 2 は可視光による透過率および角度応答測定と同じ場所とビームサイズである。

4.3 X 線による評価測定結果

測定 1 で CCD を用いて撮像したイメージを図 4.4 に示す。比較のため光軸でのイメージ (左図) の他に、そこから仰角方向に 3 分角ずれた方向でのイメージ (右図) も合わせて示す。図の通り、FC の仕切り板によって X 線が遮られ、イメージ上では黒い十字の影が現れるので、この影の幅を測定することでみかけの板厚を求めることが出来る。ただし X 線平行ビームの直接光は範囲で一様ではなく、また影と透過光との境目ははっきりと分

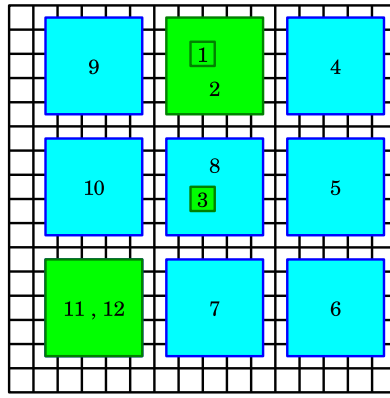


図 4.3: X 線ビーム照射位置およびそのビームサイズ

黒は FC の主構造体、緑と青はビーム上流から look down に見たときのビーム照射位置およびサイズを示す。また緑は角度応答測定測定、青は Image mapping に対応し、数字の順番で測定を行なった。

かれておらず 10 pixel 程度でなだらかに移行していた (図 4.5)。これは CCD 前面のシンチレータにより光が広がったことによる。そこで解析を行うにあたってまずビームサイズ範囲内とみなせる pixel に対し、各々の読み取り値からシャッターを閉じて撮像した dark frame の読み取り値を差し引き、その後 FC を透過しない直接光の読み取り値で割ったイメージを用意した。このイメージは X 線平行ビームの直接光が来ている pixel の読み取り値は 1、完全に遮られ影になっている pixel の読み取り値は 0 となる。そのうえで両者の中心の値を取る pixel の位置を仕切り板の境目と定める。今回仕切り板の境目を小数点以下で境目の位置を測定するため、境目付近を pixel の位置と読み取り値で線形フィットした。

pixel 単位で求めたみかけの板厚を、実際の長さに変換するとき、1 pixel あたりの長さは CCD の pixel サイズと CCD-シンチレータ間にあるレンズの倍率 (2) によって決まり、おおよそ $12 \mu\text{m}$ である。ただしレンズの倍率が正確に 2 でないなど、精度が良くないのでイメージを元に 1 pixel あたりの長さを決定した。測定 1 から 2 にかけて FC を SPring-8 BL20B2 に備え付けの高精度ステージを用いて $1600 \mu\text{m}$ ずつ動かし、撮像したものを図 4.6 に示す。CCD イメージ上での移動量はそれぞれ水平方向に 141 pixel、垂直方向に 146 pixel であった。ここから 1 pixel あたりの長さを $11.3 \mu\text{m}$ (水平方向) および $10.9 \mu\text{m}$ (垂直方向) とした。

このようにして得られたみかけの板厚を仕切り板が水平のものと垂直のもの毎に平均し、回転方向毎にプロットした結果を図 4.7 に示す。これは測定 1 の結果であり、横軸は FC の方向 (分角)、縦はみかけの板厚 (μm) とし、また黒は水平方向、赤は垂直方向のみかけの板厚をそれぞれ示す。測定は方位角方向の見かけの板厚をまず測定したのち、仰角方向の見かけの厚みを測定した。また各々の測定では Coarse scan(十字と点線で示される粗

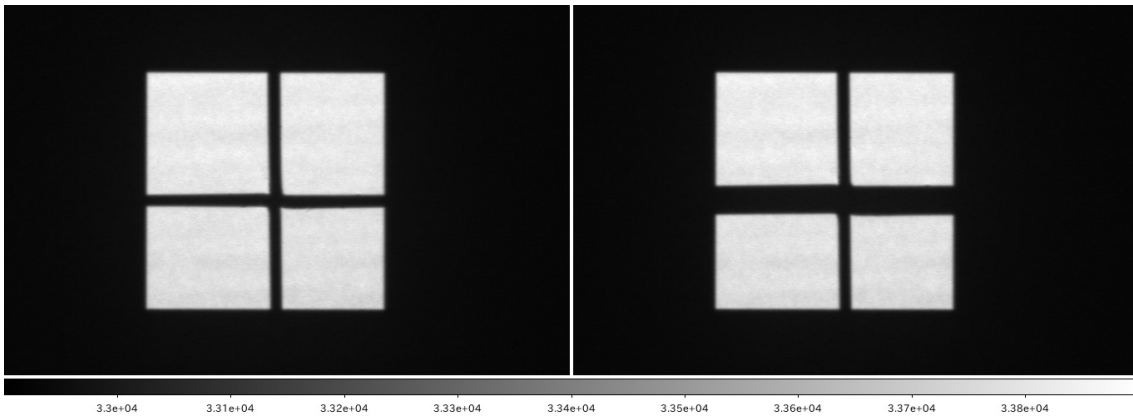


図 4.4: みかけの板の厚み測定 (測定 1)

図は測定 1 において CCD で撮像したイメージを示す。比較のため光軸方向でのイメージ (左) とそこから仰角方向に 3 分角ずれた方向でのイメージ (右) を示す。

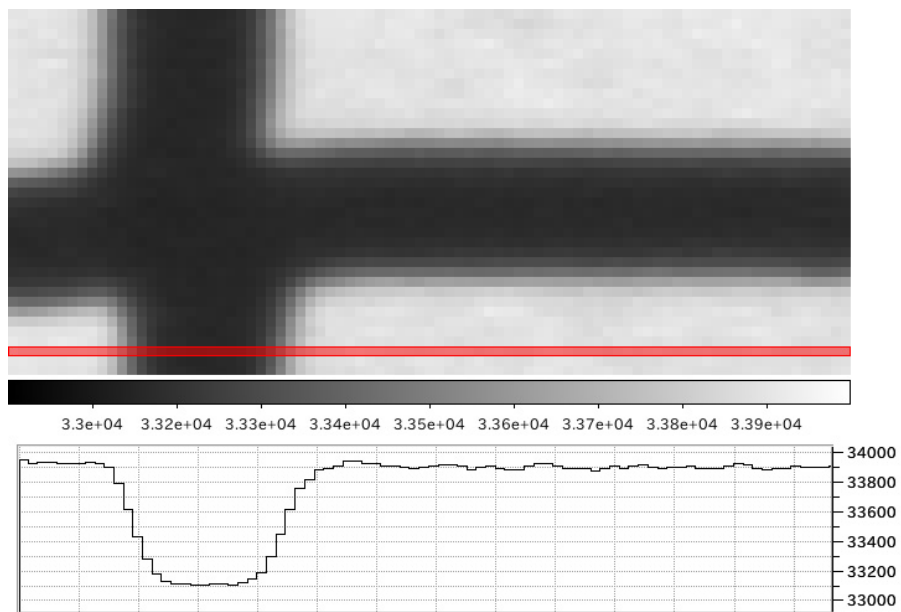


図 4.5: 仕切り板付近の CCD イメージと読み取り値の断面図

仕切り板付近の CCD イメージを上、イメージのうち赤線で示す場所における pixel 位置毎の読み取り値を下に示す。

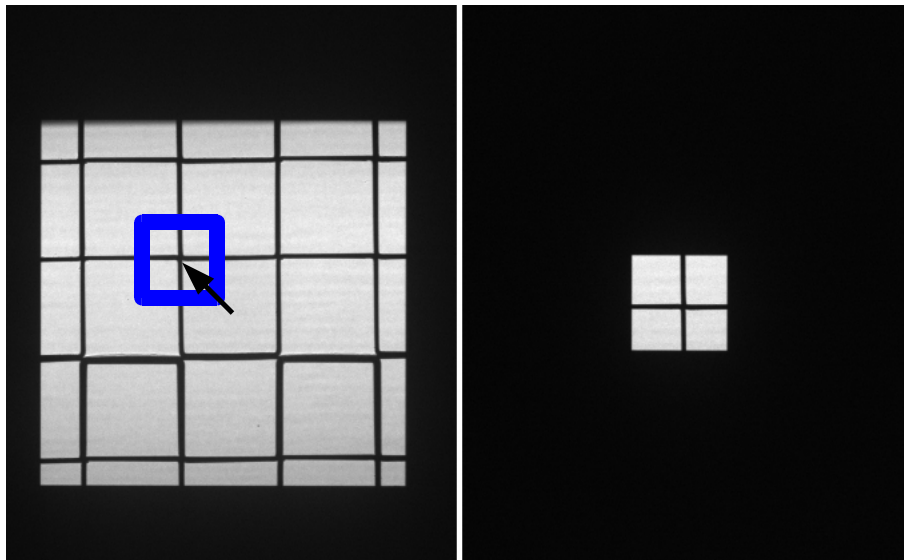


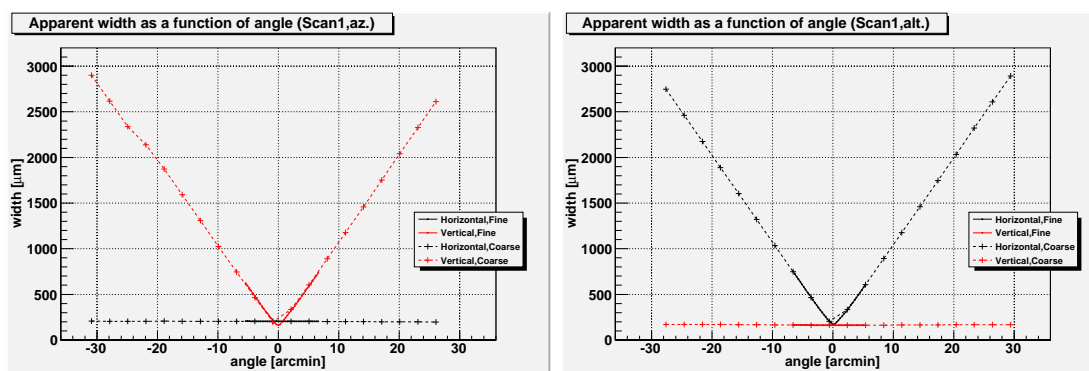
図 4.6: pixel サイズと移動量の関係

測定 2 で撮像されたイメージを左、測定 1 で撮像されたイメージを右に示す。各々 CCD 上で同じ位置・サイズに切り分けており、測定 1 と 2 の間で FC のみを動かすことで FC 上で異なる場所を撮像できる。また測定 2 において測定 1 で撮像した FC の位置・サイズと CCD 上で動いた方向を青枠と矢印で示す。

く広い測定)を行なった後、Fine scan(実線で示される光軸付近の密で狭い測定)を行なった。図から視野の半値幅を知るには開口長さである $3100 \mu\text{m}$ と有効板厚の平均値になる範囲を測定すればよい。測定 1 において方位角方向および仰角方向の視野は 35–36 分角とほぼ要求を満たしており、測定 2、3、12 でも同様の結果が得られた。

表 4.2 は測定 1、2、3、12 で得られた最小の板厚および、Image mapping(測定 4 から 11) で得られた板厚をまとめたものである。また開口率は格子間隔が $a = 3200 \mu\text{m}$ とし、平均的な板の厚みを d_x 、 d_y とした時 $(a - d_x) \times (a - d_x) / a^2$ と計算でき、これも合わせて表で示す。FC 全面の開口率をビームサイズが $12.8 \times 12.8 \text{ mm}^2$ の測定 (測定 2、4~10、12) の平均から求めると、89.6%となり、要求性能の 87%を上回り、目標性能の 90%をほぼ満たしていた。

また、角度応答測定を行なった測定 1、2、3、12 で光軸の方向を比べ、その結果を表 4.3 に示す。表より光軸方向は最小の測定間隔である 0.3 分角しかズれておらず、実際の光軸のズレはさらに小さいことが予想される。図 4.8 は測定 2 における仰角方向の角度応答であり、縦軸は板の厚み、横軸は測定 1 の光軸を原点とした時の FC の方向を示す。図中で FC の方向が光軸 (0.3 分角) と 0.6 分角の時の見た目の板厚の違いは最大でも $18 \mu\text{m}$ である。従って仮に各格子が 0.3 分角ずれているとした場合でも、開口率に換算して相対的に約 1.1%しか減少しない。



(a) 方位角方向回転

(b) 仰角方向回転

図 4.7: FC 試作品 (BBM) における平均的なみかけの板厚とその角度応答 (測定 1)

縦軸は平均的な板の厚み (μm)、横軸は FC の向き (分角) を示す。方位角方向と仰角方向に FC を回転させ、各々の結果を左図と右図に示す。また黒は水平方向の板厚、赤は垂直方向の板厚をそれぞれ示す。また十字と点線で示されるのグラフは Coarse scan、点と実線で示されるグラフは Fine scan をそれぞれ意味する。

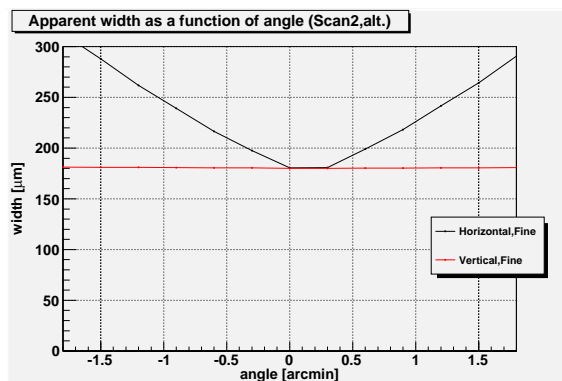


図 4.8: FC 試作品 (BBM) における平均的なみかけの板厚とその角度応答 (測定 2、光軸付近)

測定 2 において、縦軸は平均的な板の厚み (μm)、横軸は測定 1 の光軸を原点としたときの FC の仰角方向 (分角) を示す。また黒は水平方向の板厚、赤は垂直方向の板厚をそれぞれ示す。

測定	ビームサイズ [mm ²]	有効板厚 [μm]		開口率 [%]
		垂直	水平	
1	3.2 × 3.2	165	151	90.4
2	12.8 × 12.8	173	166	89.7
3	3.2 × 3.2	272	191	86.0
4	12.8 × 12.8	163	182	89.5
5	12.8 × 12.8	157	179	89.8
6	12.8 × 12.8	165	187	89.3
7	12.8 × 12.8	156	168	90.1
8	12.8 × 12.8	167	163	90.0
9	12.8 × 12.8	171	187	89.1
10	12.8 × 12.8	172	200	88.7
11	12.8 × 12.8	151	175	90.1
12	12.8 × 12.8	152	175	90.0

表 4.2: FC 試作品 (BBM) の有効板厚と開口率

4.4 可視光透過率測定との比較

3.3 章で求めた可視光透過率測定と 4.3 章で求めた開口率から可視光透過率と開口率の関係が導き出せる。同じ位置、ビームサイズ (測定 2) で FC の透過率 (開口率) を測定したとき、可視光では $72 \pm 1\%$ 、X 線では 89.6% である。両者が比例すると仮定したとき、変換係数 (可視光透過率/X 線透過率) は 0.803 ± 0.011 となる。また形状に近い HXD 搭載 FC に対しても同様に可視光透過率と X 線による開口率の測定が行われており、それぞれ 76% と 94% である [10]。ここから HXD 搭載 FC での変換係数はおよそ 0.81 と計算でき、SGD 搭載 FC の変換係数とほぼ等しい。したがってこの実験で得られた変換係数を用い

測定	光軸の方向 [分角]	
	垂直	水平
1	0	0
2	-0.3	0
3	0.3	0.3
12	0	0

表 4.3: FC 試作品 (BBM) の光軸の方向

て可視光透過率から開口率を導くことができると考えられる。衛星搭載品 FC の可視光による性能評価では、得られた可視光透過率を変換係数 (0.80) で割ることで開口率を求め、これをランク付けに反映させる。

4.5 まとめ

FC の試作品 (BBM) に対する X 線を用いた評価試験によって、視野の半値幅は 35–36 分角であり、また最大開口率の平均は最小となるみかけの板の厚みから 89.6% であると分かった。これは要求性能である視野の半値幅 35.5 分角、最大開口率 87% を満たしており、開口率の目標である 90% に迫る値となっている。光軸は測定場所によって最大でも 0.3 分角ずれていたが、これは開口率に換算して最大でも相対的に 1.1% しか影響しない。また、可視光と X 線による評価測定によって、変換係数 (可視光透過率/X 線透過率) は 0.80 だと分かり、衛星搭載品 FC の可視光による性能評価時にレファレンスとして用いることで開口率を導くことが出来るようになった。

第5章 耐震構造評価試験

人工衛星を衛星軌道上まで打ち上げる際に、人工衛星および搭載機器は様々な機械的な衝撃を経験する。これは打ち上げに用いるロケットおよび衛星に起因しており、各衛星に対して適切に試験を行う必要がある。この章ではこれらの予想される振動衝撃に対し十分な耐性が確保されているか確認するため行った、機械的衝撃を模擬した試験(振動試験、音響試験および静荷重試験)に関して述べる。振動試験および音響試験にはエンジニアリングモデルの初号機(EM1)を用いた。これらの試験に際しては、試験前後で目視により目立った破損がないかを確認するとともに、試験前後で可視光による透過率測定をしFCの性能が劣化していないかを定量評価した。また静荷重試験は主に後部支持構造体の剛性を見る試験であり、これはAl製のFCダミーと後部支持構造体という組み合わせで試験を行った。

5.1 基準レベルと評価項目

衛星打ち上げに加わるロケットの機械的な振動衝撃は一般に、(1) 静荷重、(2) ランダム振動、(3) 音響衝撃、(4) 落下衝撃および(5) パイロ衝撃の5種類が挙げられる。これらの詳しい説明は、2.2.1章に記している。以下ではFCに対する具体的な基準レベルおよび評価項目について、振動試験と音響試験に分けて述べる。

5.1.1 振動試験

打ち上げによる破損を防ぐため、予想される機械的な振動に対し、これをシュミレートした試験で搭載機器が破損しないことを確認しなければならない。「すざく」衛星と同じくASTRO-H衛星の機械的な振動の基準は、(i) システムレベル、(ii) サブシステムレベル、(iii) コンポーネントレベルの3段階に分けられている。1つめのシステムレベルは、衛星全体に加えられるレベルであり、3段階の中で最も緩い。これはフライト品の受け入れ試験としてのAT(Acceptance Test)レベルとしての正確も合わせもつ。2つめのサブシステムレベルは、システムレベルに100 Hz程度以下の衛星自体が持つ共振が上乘せされたレベルであり、搭載機器の機械的設計の確認のために行うQT(Qualification Test)レベ

ルとしての役割も兼ねる。3つめのコンポーネントレベルは、搭載機器を構成する各要素(例えばFC)に対して加えられるレベルである。これはサブシステムレベルに200 Hz程度以上の搭載機器の共振が上乘せされたレベルであり、3段階の中で最も厳しい。ただしレベルを決定するにあたって過剰な振動を加える必要はなく、システムレベルおよびサブシステムレベルを衛星全体のとりまとめを行う企業が JAXA 工学研究者と協力して策定し、コンポーネントレベルは搭載機器の構造開発グループの裁量で設定することが多い。本論文ではFCに対してコンポーネントレベルでの振動試験を実施し、その結果を述べる。

FCに対する振動試験のコンポーネントレベルは、東京大学の中澤知洋と相談し決定した。図 5.1 は Z 軸方向(長手方向)および XY 軸方向(面内方向)にコンポーネントレベルで振動させたときのパワー密度スペクトル(power spectrum density、PSD)を示し、横軸は振動数(Hz)、縦軸は単位振動数あたりの加速度(振幅に比例)の自乗(G^2/Hz)である。また、各々の軸でのコンポーネントレベルにおける PSD の数値を表 5.1 および 5.2 にまとめる。z 軸方向の加速度の実効値は 17.0 G、XY 軸は 10.4 G である。また z 軸および X 軸方向に 70 Hz, 20.8 G のサインバースト試験(1 秒間)も行った。

20 Hz	70 Hz	260 Hz	400 Hz	1000 Hz	2000 Hz
0.10	0.35	0.35	0.15	0.15	0.060

表 5.1: Z 軸方向コンポーネントレベル (G^2/Hz)

各点間は、冪乗で結ぶ。

20 Hz	100 Hz	1000 Hz	2000 Hz
0.0032	0.08	0.08	0.013

表 5.2: X・Y 軸方向コンポーネントレベル (G^2/Hz)

各点間は、冪乗で結ぶ。

5.1.2 音響試験

音響試験は衛星打ち上げ時の(3)音響衝撃にSGD全体が耐えうるか実証するため、予想される音響を与える試験である。加速度計をとりつけたSGD-EM(エンジニアリングモデル)に予想される音響(「ASTRO-H搭載機器の耐環境性能設計基準書」に従い、文書中でQTレベルと定義された音響)を加え、どのように振動したか測定する。またその前後でFCの性能が劣化しないか可視光で検証を行った。加音したレベルを表 5.3 に示す。

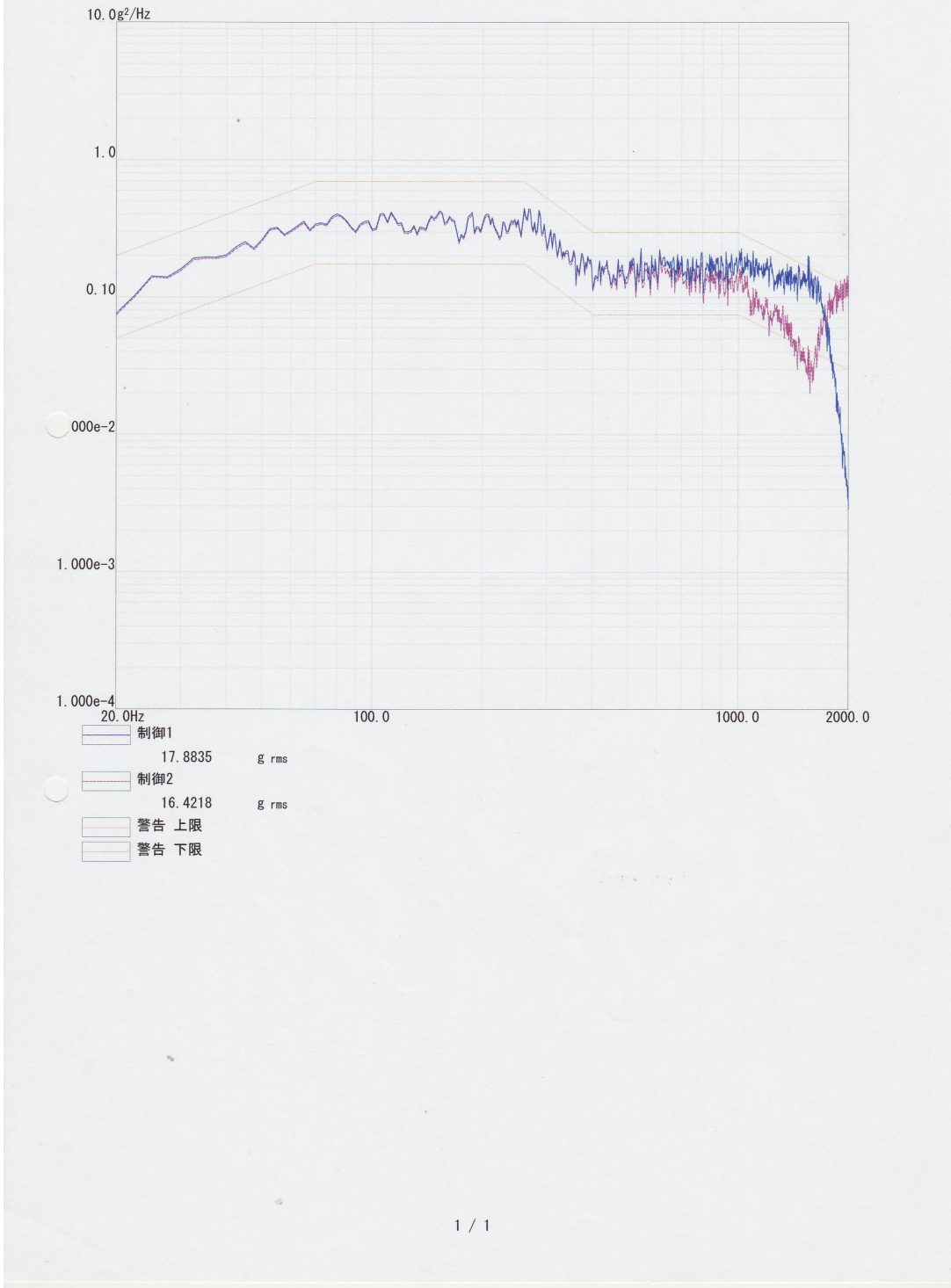


図 5.1: 振動試験における Z 軸方向コンポーネントレベルの PSD

横軸は振動数 (Hz)、縦軸は単位振動数あたりの加速度の自乗 (G^2/Hz)。赤と青の線は制御用ピックアップで測定した結果を示す。

31.5 Hz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500	1000	2000	4000	8000
128	129.5	134	136	131.5	128	123	118	116

表 5.3: 音響試験レベル (QT レベル)。圧力を $0\text{dB} = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ とし、dB で表した

5.2 予備実験

5.2.1 静荷重試験

FC の構造やハウジングに対するとめかたを考えたとき、動きやすい箇所は後部支持構造体である (図 2.1 参照)。したがって FC の上部を支持端とした回転がもっともおきうる変位の仕方と考えられる。そこで実際に FC に横向き (長手方向と垂直な方向) の静過重を加え、その変位を測定し、共振周波数を求める予備実験を行った。

セットアップを図 5.2 に示す。まず Al でできた FC ダミー品と後部支持構造体をマウントに取り付け、その後 FC ダミー品に重り (スズないしは銅板) を載せることで横向きに静過重をかける。その上で FC ダミー品が下がった移動量をレーザー変位計 (Keyence 社製の LB-080 および LB-01) で計測した。このとき図 5.3 のように、後部支持構造体はバネのように荷重に対して変形し、FC ダミー品の上部をマウントに止めているネジが支点となって FC が θ 傾く。支点から $l_{\text{power}}=180 \text{ mm}$ の場所に静荷重をかけ、またレーザー変位計は A、B (支点からそれぞれ $l_A=263 \text{ mm}$ と $l_B=374 \text{ mm}$ の場所) の 2 点を測定した。ここで後部支持構造体と FC ダミー品とは支点から $l_{\text{act.}}=374 \text{ mm}$ の場所でお互いをネジ止めしており、これは支点から B 点までの長さと同しい。

図 5.4 は、重りの重さを横軸、A 点と B 点での変位 (x_A と x_B) を縦軸にとった図である。FC ダミー品の上部とマウントは完全に固定されておらず、静過重によって FC は並進および回転する。このうち並進成分は上部の固定方法に起因するので、後部支持構造体のバネ定数を測定するには回転成分のみを抽出する必要がある。FC ダミー品が $x_{\text{trans.}}$ の並進運動をし、 θ の回転をしたとすると、 $x_i = x_{\text{trans.}} + l_i \times \theta$ ($i = A, B$) の連立方程式が成り立つ。ここで図 5.4 中で静荷重 F が $3 \text{ kgf} = 29.4 \text{ N}$ のときの A と B 点での変位 ($x_A = 380 \mu\text{m}$ 、 $x_B = 485 \mu\text{m}$) を代入して計算すると、 $130 \mu\text{m}$ 程度の並進成分があることが分かる。したがって後部支持構造体のバネ定数 k はモーメントのつり合いの式

$$F \times l_{\text{power}} = k \times (485 \mu\text{m} - 130 \mu\text{m}) \times l_{\text{act.}} \quad (5.1)$$

を解くことで求め、 $k \sim 4 \times 10^4 \text{ N/m}$ だと分かる。共振周波数 f は、理想的には上部が支持端の振り子なので

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3k}{m}} \sim 70 \text{ Hz} \quad (5.2)$$

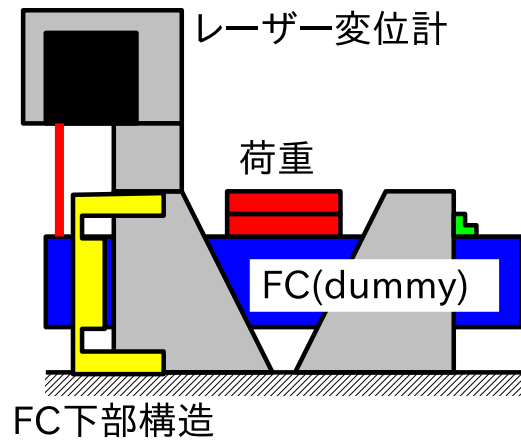


図 5.2: 静荷重試験のセットアップ。FCダミー品にスズないしは銅板をのせることで静荷重を加え、レーザー変位計で FC の変位を測定した。

であり、また厳しめに上部の並進の剛性と後部の剛性が同程度の場合は

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2k}{m}} \sim 60 \text{ Hz} \quad (5.3)$$

である。ここで FC の質量 $m = 0.6 \text{ kg}$ を用いた。これはミッションからの要求である、共振周波数が 200 Hz 以上 (予想される衛星自身や機器自身の共振周波数以上) を満たしていない。

そこで我々は後部支持構造体の剛性を強めるため、後部支持構造体の板厚を $200 \mu\text{m}$ から $500 \mu\text{m}$ に増やし、また後部支持構造体の腕にある折り曲げ (当初アライメント調整時に上部の位置を変えやすいように入れていた折り曲げ) を撤廃する改修を施した。その結果約 10.5 G 相当である 6.3 kgf ($\sim 62 \text{ N}$) の静過重を掛けてもほとんど変動を示さず、これは変位が測定限界である $10 \mu\text{m}$ 程度であることを意味する。ここから後部支持構造体のバネ定数が $4 \times 10^4 \text{ N/m}$ からおよそ $4 \times 10^6 \text{ N/m}$ が増え、また FC の共振周波数がおよそ 700 Hz になったことが分かった。ただしここで求めた共振周波数は不定性が大きいので、振動試験に進む前に別途共振周波数を測定することが望ましい。

5.2.2 共振周波数測定

衛星自体や搭載機器は 200 Hz 以下の共振を持つと予想され、また一般的に他の帯域と比べ振幅が大きいため、搭載機器の要素の 1 つである FC の共振周波数は 200 Hz 以上である必要がある。そこで振動試験や音響試験に先立ち、FC の共振周波数を取得する試験を行なった。

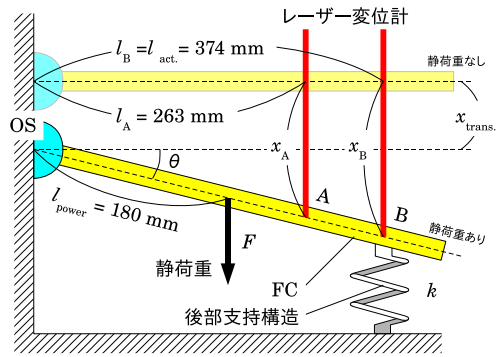


図 5.3: 静荷重試験における FC の変位

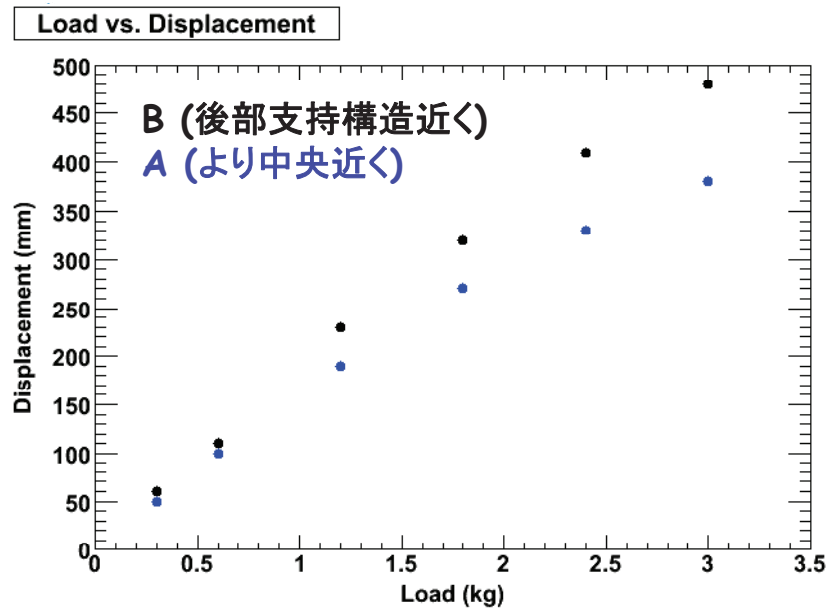


図 5.4: 静荷重試験の実験結果。横軸は重りの重さ、縦軸は A と B 点での変位を示す。

図 5.5 は共振周波数測定のご概念図である。まず FC ダミー品および後部支持構造体をマウソトに取り付け、また FC にはコンデンサマイク (audio-technica 社製の AT9903) を張り付ける。このときより振動しやういように FC ダミー品の上部は 1ヶ所のみで固定される。この FC ダミー品を爪で弾くこと以振動させ、その時に出た音を取手し、フーリエ解析すること以共振周波数を測定する。音声の取得と解析には、各々 Rocky と WaveSpectra と呼ばれる Windows 上で動くフリーソフトを使用した。

実際に解析した周波数毎の音圧レベルを図 5.6 に示す。ここで黒は FC を振動させたとき、赤はバックグラウンドレベルである。図より 360 Hz 付近に共振周波数によるピークが出ていることが分かった。これは衛星自体や搭載機器が持つと予想される共振周波数である 200 Hz を越えており、共振周波数に関する要求を満たしていることが確認できた。

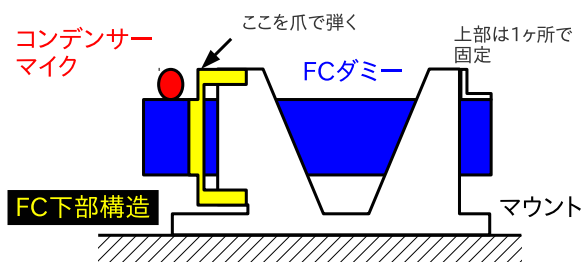


図 5.5: 共振周波数測定のご概念図。FC を振動させ、その時に発生する音を取手しフーリエ解析すること以共振周波数を測定する。

5.3 振動試験

こうして静荷重試験、共振周波数測定試験を通し、FC の後部支持構造体に必要な改修をほどこし、またそれにより十分に剛性が高められたことを確認した。その上で、衛星打ち上げ時の振動に FC が耐えうるかを「実証」するため、2012年3月15日に IMV(株) 東京テストラボで振動試験を行なった。供試体としてはエンジニアリングモデルの初号機 (FC-EM1) を用いた。

5.3.1 セットアップ

実験のセットアップの写真を図 5.7 に示す。FC の上部および後部支持構造は SGD ハウジングを模擬したマウソトに取り付ける。FC は振動台とマウソトを通して振動する。マウソトおよび FC 自身の揺れは pick up を用いて測定した。また小型の Auto Collimator(中

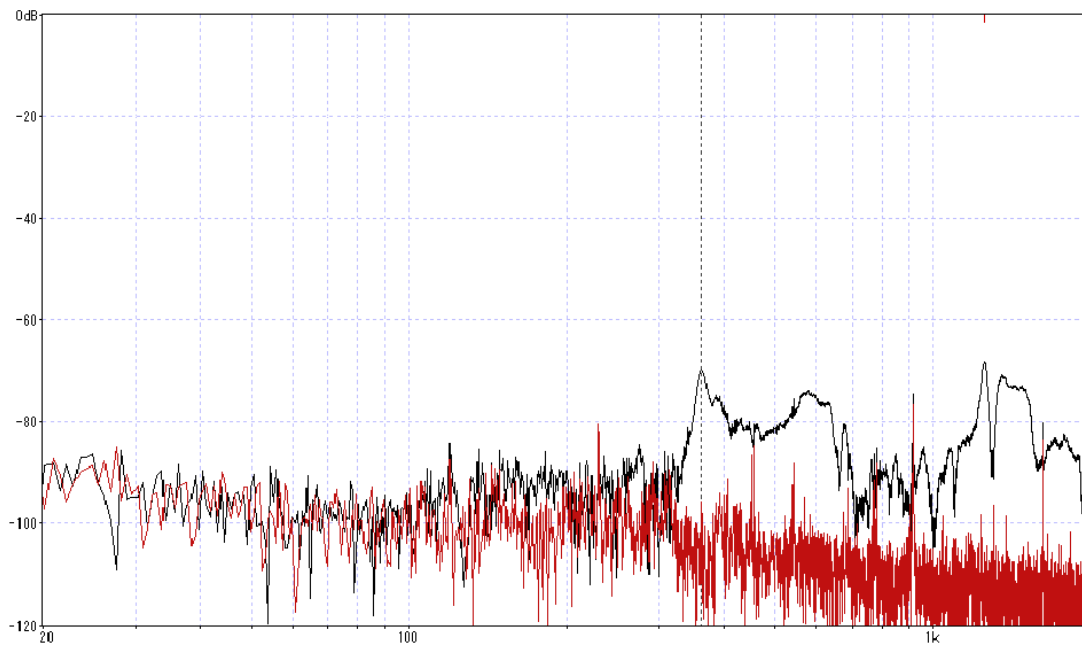


図 5.6: 共振周波数測定の結果。縦軸は音圧レベル (dB)、横軸は周波数 (Hz) をそれぞれ示す。また黒は実際に発生した音、赤はバックグラウンドレベルである。

央精機の C-60) を用いてマウントおよび FC に張り付けられた鏡の傾きを測定することで、マウント内で FC が X 軸および Z 軸まわりにどのように回転したか測定する。さらに水準器をマウントおよび FC に載せ傾きを測定することで、Y 軸まわりにどのように回転したか測定した。測定は 1 回の測定につき、2 回以上ずつ角度を測定した。また、図 5.8 は FC に張り付けたピックアップの場所、測定できる振動の方向および名称を示す。ピックアップは接着剤 (アロンアルファ) で張り付け、各場所での加速度を測定した。

X,Y,Z 軸方向それぞれに対し、以下 2 種類の振動試験を行った。

- 当初予定の -3 dB でのランダム振動試験を二回
- サインバースト試験 (1 秒間 70 Hz、20.8 G のサイン波を入力) を一回

またこれらの各加振前後でモーダル試験と呼ばれる -20 dB でのランダム振動試験を行うことで周波数特性を取得し、破損等がないか確認しつつ進めた。また FC とマウントの相対的な回転成分も適宜取得しつつ試験を行った。

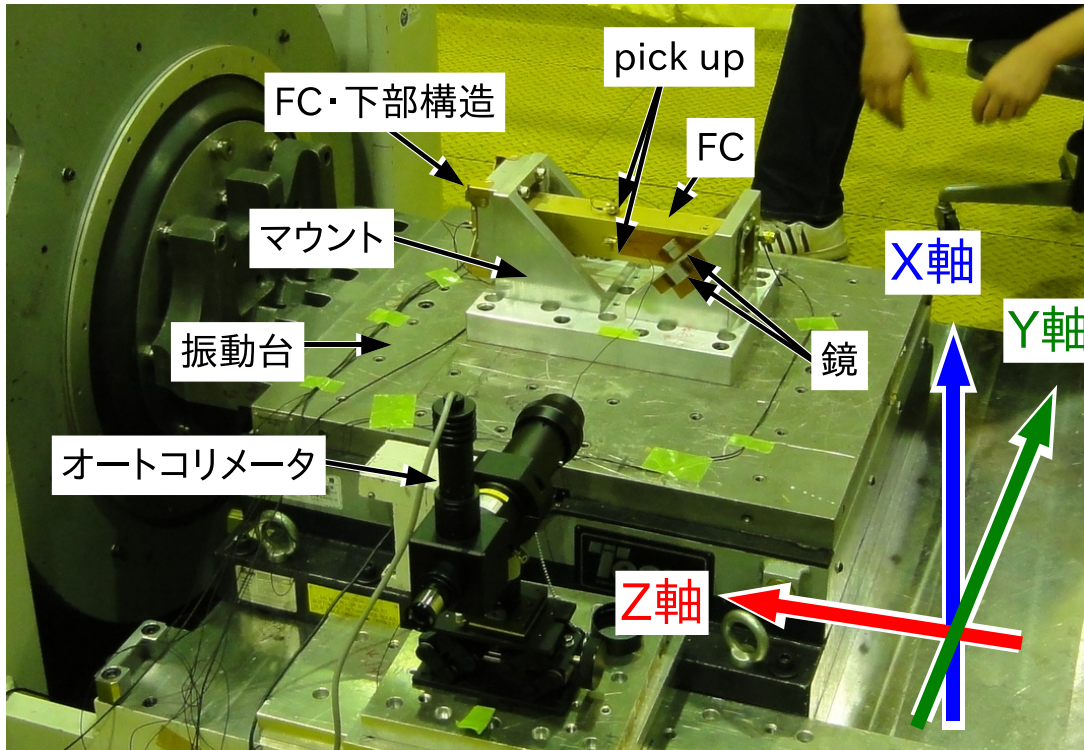


図 5.7: 振動試験のセットアップ写真。FCおよび後部支持構造はSGDを模擬したマウントに取り付けられ、振動台とマウントを通して振動する。マウントおよびFC自身の揺れはpick upを用いて測定する。またAuto Collimatorとミラーおよび水準器を用いて、マウント内でのFCの回転を測定する。

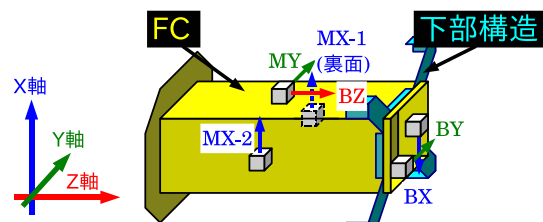


図 5.8: 振動試験におけるピックアップの位置と、測定できる振動の方向および名称。ピックアップは接着剤で張り付け、各場所での加速度を測定した。

5.3.2 振動試験結果

各々の振動試験前後で目立った共振周波数の変化は見られなかった。各軸のモーダル試験で得られた PSD を図 5.9、5.10 および 5.11 に示す。ここで縦軸は単位周波数ごとの加速度の自乗、横軸は周波数を示し、また各プロットの色は凡例で示す通りピックアップに対応している。また、Y 軸の PSD(図 5.10) で 350 Hz 近傍のピークが 2 つに分離している理由は pick up が外れかかっていたためであり、貼り直すとピークが 1 本になった。各々の軸での共振周波数は表 5.4 にまとめる。X 軸と Y 軸は構造的に似通っており、そのため共振周波数も近い。

軸	共振周波数 [Hz]	
X	373	748
Y	~355	715
Z	620	

表 5.4: 各軸での共振周波数

マウント内での FC の回転の変化を図 5.12 に示す。縦軸は FC の回転変化量、横軸は時系列を示す。塗りつぶされた領域の間で各振動試験を行い、薄い色はモーダル試験、濃い色のうち R と記述しているものはランダム振動試験、S と記述しているものはサインバースト試験である。塗りつぶされた領域およびプロットの色は振動方向および回転方向を示しており、青は X 軸、緑は Y 軸、赤は Z 軸にそれぞれ対応している。各測定点で 2 回以上角度を測定し、その再現性はいずれも peak-peak で 0.3 分角であった。回転成分は Y,Z 軸周りでは peak-peak で 0.7 分角の変化、X 軸周りでは最大で 0.4 分角の変化があった。ただし Y,Z 軸周り回転成分については振動試験中ミラー自身 (マウントにカプトンテープを、ミラーの裏面にもカプトンテープを貼り付け、カプトンテープ同士を接着) がずれて、大きくなった可能性がある。いずれにせよ、FC の回転は大きく見積もっても 0.7 分角であり、問題はないといえる。全振動試験後で目立ったネジの緩みや傷は見られなかった。

5.3.3 可視光透過率測定結果

振動試験前後で行なった、可視光透過率測定の照射位置を結果を図 5.13 に、また測定結果を図 5.14 に示す。振動試験前 (2012 年 3 月 10 日に測定) では図 5.13 の正位置で一回測定を行い、70.2% の可視光透過率であった。一方振動試験後 (2012 年 3 月 22 日に測定) では同じ照射位置で、FC を付け外しした 2 回の測定を行い、peak-peak で可視光透過率は $70.7 \pm 0.4\%$ であった。

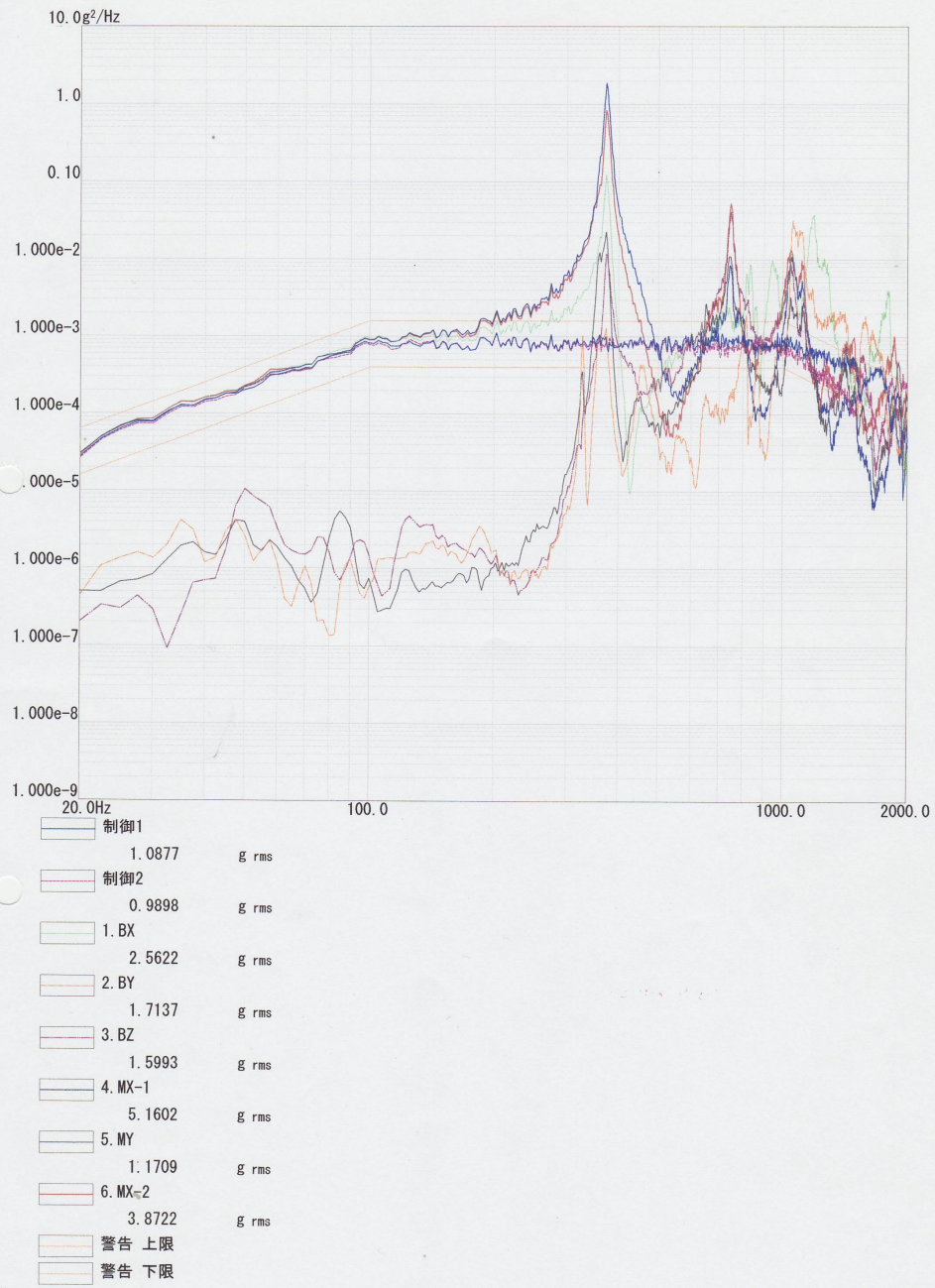


図 5.9: 振動試験で得られた PSD(X 軸)

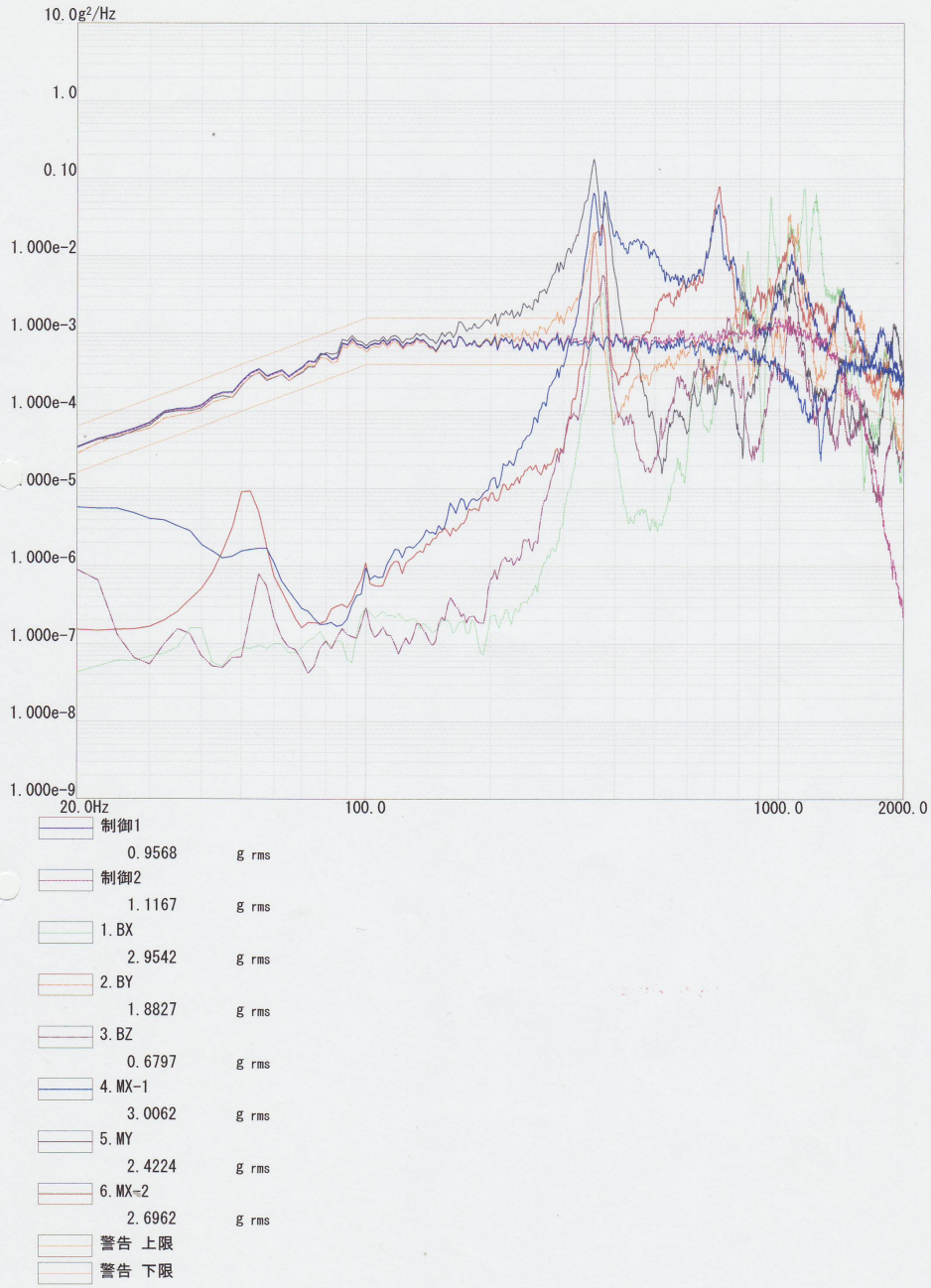


図 5.10: 振動試験で得られた PSD(Y 軸)

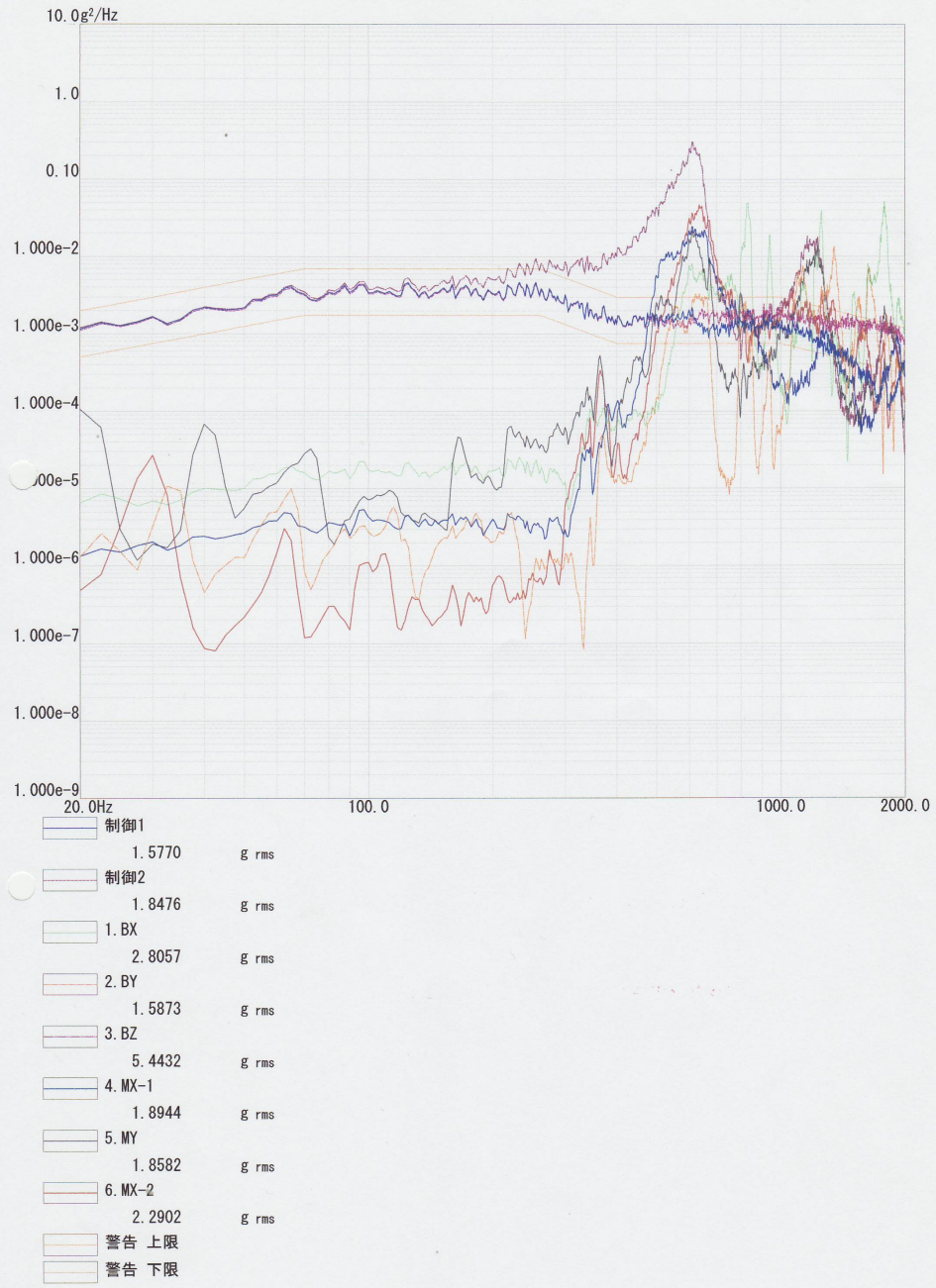


図 5.11: 振動試験で得られた PSD(Z 軸)

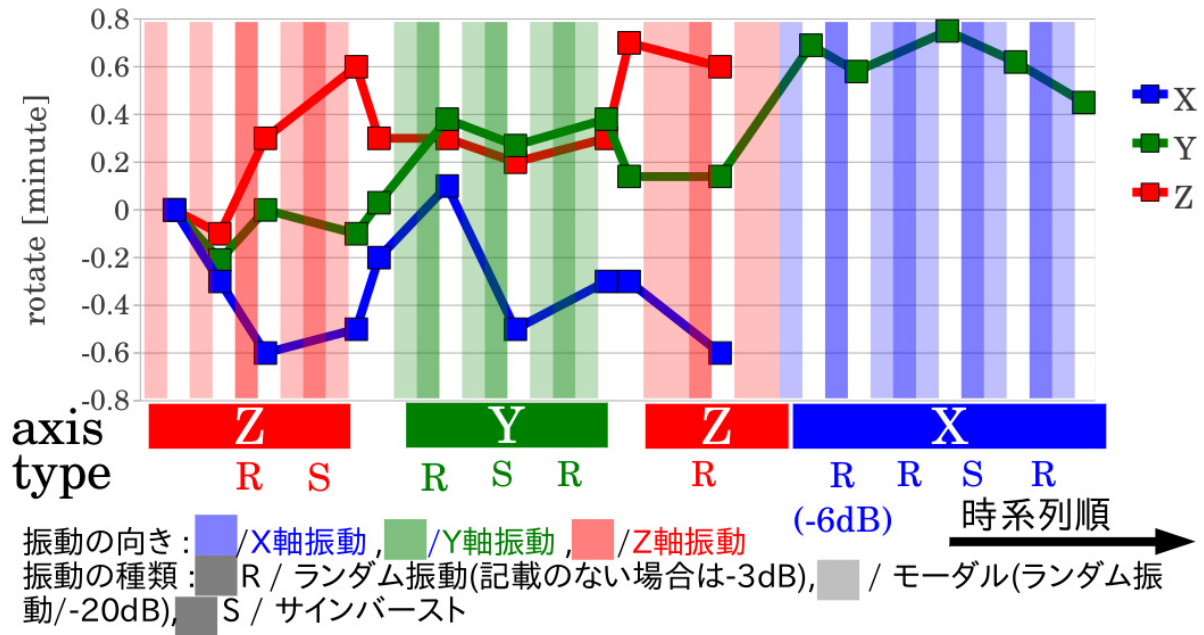


図 5.12: 振動試験による FC の回転

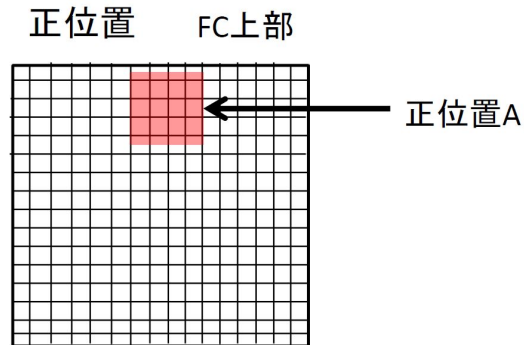
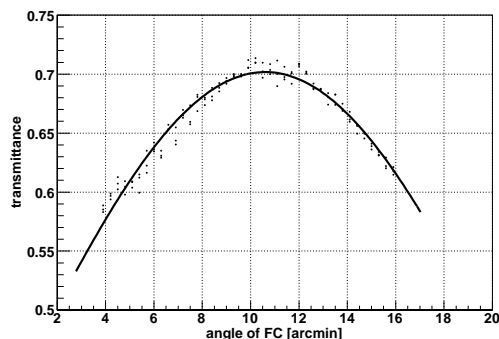
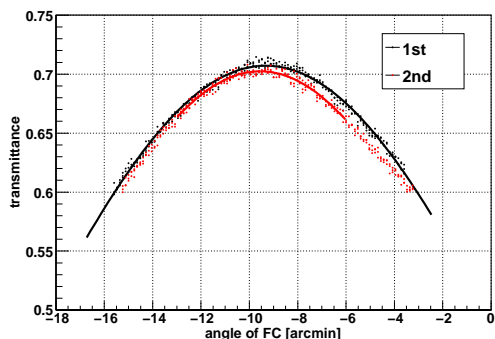


図 5.13: 振動試験前後での可視光透過率測定での照射位置



(a) 振動試験前



(b) 振動試験後

図 5.14: 振動試験前後での可視光透過率測定結果

5.3.4 考察

条件が同じである振動試験前の測定 1 および振動試験後の測定 1 と 2 における可視光透過率は、それぞれ 70.2%と $70.7 \pm 0.4\%$ であり、両者は 1%以内で一致しており、FCの透過率に劣化は見られないと結論できる。また変換係数を用いて X線透過率に換算すると振動試験前では 87.4%、試験後では $88.0 \pm 0.5\%$ である。試作品 (BBM) の X線透過率 (89.6%) よりも低いが、これは EM-1 は尻すぼみな構造 (MHI 社談) なため透過率が若干低くなったと考えられる。この点は FC の製造を担当している MHI 社に対応を依頼し、EM-2 で改善 (2012 年 8 月 2 日に測定を行い、可視光透過率で $71.85 \pm 0.85\%$ 、X線透過率に換算して約 89.5%) を確認した。

5.4 音響試験

5.4.1 セットアップ

音響試験は衛星打ち上げ時に予想される音響に SGD 全体が耐えうるかを実証する試験であり、それゆえ FC を含めた SGD を構成する各要素 (ないしはそのダミー品) を組み上げ、そこに加音することで試験する。今回は音響試験の中で FC に関してのみ考察する。供試体は EM1 である。

音響試験におけるピックアップの位置、測定軸および ID を表 5.5 にまとめる。

ID	位置	測定軸
121	上部	-X 軸
122	上部	-Y 軸
123	上部	+Z 軸
138	下部	-Y 軸
139	下部	-X 軸

表 5.5: 音響試験におけるピックアップの位置と測定軸

5.4.2 音響試験結果

音響試験で得られた PSD を図 5.15 に示す。縦軸は周波数あたりの加速度の自乗 (G^2/Hz)、横軸は周波数を示し、各ピックアップで測定された値を色ごとに示す。また、実線および点線は、振動試験のランダム振動試験で予定していた最大加振レベルおよび実際に与えた最大加振レベルを示す。

音響試験で与えられた加振は、X および Y 軸については共振周波数付近を除き振動試験で与えた加振以下であり、また Z 軸ではすべての周波数で振動試験で与えた加振以下であった。従って振動試験をパスした以上音響試験で FC が破損するとは考えにくく、実際目視で問題は認められなかった。

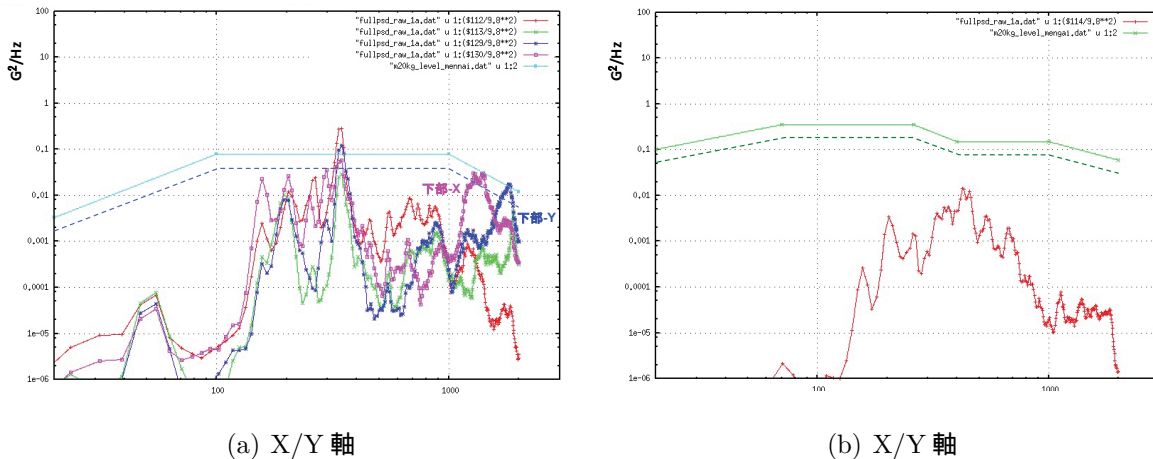


図 5.15: 音響試験で得られた PSD

5.4.3 可視光透過率測定結果

音響試験前後でFCの可視光透過率を測定することで、音響試験がFCに与えた影響を定量的に評価した。図 5.16 は音響試験前後での可視光透過率を示す。縦軸は透過率、横軸はFCの向きを示す。音響試験前(2012年3月22日に測定)は可視光透過率を2回測定し、peak-peakで $70.7 \pm 0.4\%$ であった。また、音響試験後(2012年10月16日に測定)は可視光透過率を3回測定し、peak-peakで $71.5 \pm 1.2\%$ であった。

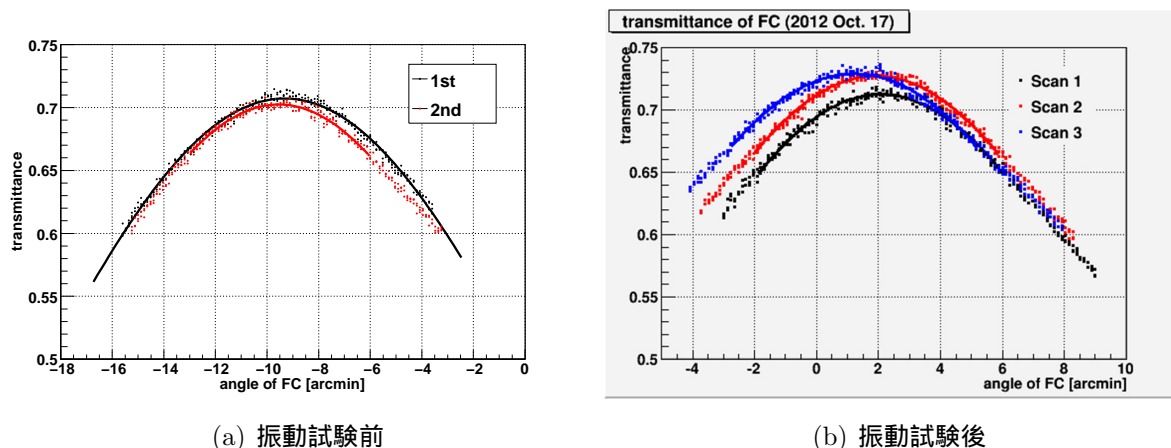


図 5.16: 音響前後での可視光透過率測定

5.4.4 考察

音響試験前後での可視光透過率は誤差の範囲で一致しており、これは音響試験によって性能劣化がみられない事を意味する。

変換係数を用いて可視光での透過率から X 線での透過率に換算すると、音響試験前の可視光透過率 70.7% および音響試験後の可視光透過率 71.5% は、X 線での透過率 88.0% および 89.0% に対応する。

5.5 まとめ

衛星打ち上げ時の振動を模擬した振動試験および音響試験を行なった。振動試験によって X/Y 軸方向の共振周波数が ~ 360 Hz であり、これは共振周波数測定の結果と一致する。また音響試験で与えられた加振レベルは X/Y 軸の共振周波数付近 (~ 360 Hz) を除いて振動試験で与えられた加振レベルを下回っていた。各試験前後で可視光透過率測定を行い、

可視光透過率は1%の減少ないしは誤差の範囲で一致していた。これはFCは振動試験および音響試験によって性能劣化がみられない事を意味する。

第6章 まとめと今後

我々はまず FC の試作品 (BBM) について、X 線を用いて透過率とその角度応答を測定した。その結果、透過率が 89.6% とミッションの要求性能 (透過率 87% 以上) を上回り、また目標性能 (90%) もほぼ満たしていることを確かめた。その上で同じ BBM を用い、FC の可視光による評価試験として可視光透過率測定と角度応答測定の手法を確立した。その結果可視光と X 線の透過率の変換係数が 0.803 ± 0.011 だと分かった。これにより可視光を用いて FC の性能評価を行う手法を確立した。

また可視光によるアライメント軸測定の手法を確立した。これにより FC を精度よく光軸を揃えて SGD に組み込むめどが立った。

さらに衛星打ち上げに伴う機械環境に対する耐性の評価試験として、振動試験および音響試験を行なった。いずれの試験でも目視で破損は認められず、また共振周波数が ~ 360 Hz で一致し、ミッションが要求する共振周波数 (200 Hz 以上) を越えていることを確認した。加えて各試験前後で可視光による評価試験を実施し、性能劣化がほとんど見られないことを実証した。これにより、FC は衛星打ち上げに伴う振動および音響に対する耐性があることが分かった。

これらの結果を元に、我々は FC の衛星搭載品 (FM) の製造を開始する。今後は全ての FC-FM に対し可視光による試験とアライメント軸測定試験を行ない、性能のランク付けを行うことで衛星に搭載する FC を選別する。

参考文献

- [1] T. Takahashi et al., "The ASTRO-H Mission," Proc. SPIE 7732, 77320Z (2010)
- [2] H. Tajima et al., "Soft Gamma-ray Detector for the ASTRO-H Mission," Proc. SPIE 7732, 773216 (2010)
- [3] 梅木勇大, モンテカルロシミュレーションによる次期 X 線衛星 ASTRO-H 搭載軟ガンマ線検出器のバックグラウンドの評価, 広島大学 修士論文 (2008)
- [4] 平木一至, モンテカルロシミュレーションによる衛星搭載軟 γ 線検出器の軌道上放射化バックグラウンドの評価, 広島大学 修士論文 (2009)
- [5] T. Takahashi, "A Si/CdTe Compton Camera for gamma-ray lens experiment," , Experimental Astronomy 20, 317 (2006)
- [6] 小高裕和, Si/CdTe 半導体コンプトンカメラ試作機の開発と性能評価, 東京大学 修士論文 (2008)
- [7] T. Takahashi et al., "Hard X-ray Detector(HXD) on Board Suzaku," PASJ 59, S35 (2007)
- [8] M. Kokubun et al., "In-Orbit Performance of the Hard X-ray Detecotr on board Suzaku," PASJ 59, S53 (2007)
- [9] 出沢恵理子, ASTRO-E 衛星搭載硬 X 線検出器用 fine collimator の開発, 東京大学 修士論文 (1996)
- [10] 松本縁, ASTRO-E 衛星硬 X 線検出器の角度レスポンスの測定および較正, 東京大学 修士論文 (1999)
- [11] 上田剛, 次期宇宙 X 線衛星 ASTRO-H に搭載する硬 X 線・軟ガンマ線検出器の機構開発, 東京大学 修士論文 (2009)
- [12] T. Tanaka et al., "Study of Nonthermal Emission from SNR RX J1713.7-3946 with Suzaku," ApJ 685, 988 (2008)

- [13] XCOM: Photon Cross Sections Database
(<http://www.nist.gov/pml/data/xcom/>)
- [14] Gruber D. E., 1992, in Barcons X., Fabian A. C., eds, The X-Ray Background.
Canbridge Univ. Press, Cambridge, p.44
- [15] T. Takahashi et al., "The ASTRO-H X-ray Observatory," Proc. SPIE 8443, 84431Z
(2012)
- [16] BL20B2 概要 - SPring-8 Web Site
(http://www.spring8.or.jp/wkg/BL20B2/instrument/lang/INS-0000000470/instrument_summary_view)