

X-RAY IMAGING OPTICS

X線結像光学ニューズレター

No. 44 2016 年 12 月発行(2017 年 1 月改訂)

サブナノ秒 Si-APD ピクセル X 線検出器によるナノ秒パルス連続測定

高エネルギー加速器研究機構・物構研 岸本俊二

シリコン・アバランシェ・フォトダイオード (Si-APD) は光センサーとして距離計など身近なと ころで利用されている。放射光利用研究では 1990 年代から X 線検出素子としても使われてきた。X 線 が入射して素子内部の空乏層で生じた電子-正孔対 のうち、シリコンの場合は電子を逆バイアス電圧の 印可によって強い電界で加速し、衝突電離によって 素子内部で電荷増幅する。これが通常のフォトダイ オードと異なる特徴である。電荷の増幅は数10倍か ら数100倍の大きさまで、ピコ秒オーダーで行われ る。出力電流パルスを電圧に変換する高速パルス増 幅器を使うと、1 個の X 線光子によるナノ秒時間幅 の高速パルスを取り出すことができる。この高速パ ルスを使えば、ナノ秒オーダーで減衰する原子核か らの放射線を時間分光によって電子散乱線から区別 して、サブナノ秒時間分解能で取り出すことができ る。そのため放射光X線による核共鳴散乱実験にお いて、Si-APD は不可欠な検出器となっている[1]。 最近、高エネルギー物理学や医学診断用 PET (陽電 子放射断層撮影)でよく使われるようになった Si-PM や MPPC も実は APD である。ただし、こちらは 増幅度が 10⁵から 10⁶で作動させる[2]。気体検出器 にならってガイガーモード APD と呼ばれることもあ る。光電子増倍管をミリサイズの半導体素子に置き 換えるものとして期待されるが、増幅度が大きい故 の問題を抱えている。雑音パルス頻度が数 100kHz 以上、素子表面の抵抗で強制的に電流を収束させる ため出力パルスの時間幅が数 10 ナノ秒以上になる

ことである。一方、ここで述べる Si-APD(比例モー ドSi-APD)は、雑音の発生頻度が極めて低く、ナノ 秒程度で自己収束するため時間幅の狭いパルス信号 が得やすい特徴がある。そのためナノ秒幅の高速パ ルスは10°s⁻¹を超える高い計数率を実現できるので、 100秒に1回程度の雑音頻度と合わせ、X線強度のダ イナミックレンジは 10 桁に及ぶ[3]。X 線回折実験 や反射率測定などX線強度のダイナミックレンジを 必要とする研究分野での測定迅速化・精密化にも役 に立つ[4]。さらに、2ナノ秒間隔の放射光X線パル スを区別する Si-APD 検出器なら、入射 X線パルスと 同じ時間間隔で試料から回折・散乱されるX線強度 を記録してナノ秒時間分解測定も可能になるだろう。 Si-APD をピクセル化したサブナノ秒応答超高速ピ クセルアレイ検出器ならば、ナノ秒間隔で発生する 放射光パルスによるX線強度分布をピクセルごとに 測定し、時系列の強度変化と空間的な強度分布を同 時に一度に記録できるはずである。

我々は、このような発想で Si-APD ピクセルアレイ 検出器の開発に着手した。ただ、ピクセル検出器を 開発することは簡単ではなかった。開発上の大きな 課題は以下の3つである。

1) Si-APD ピクセルアレイの製作

2) Si-APD ピクセルからの高速パルス信号を処理す る超高速パルス集積回路の開発

3)多くのピクセルから高速パルス信号を時系列で 記録するシステムの開発



図1: 64 ピクセル・Si-APD リニアアレイのピクセル部(上) およびチップ基板(下)の写真。

1) については、64素子のリニア(1次元)アレ イをまず製作することとした。その写真を図1に示 す。光センサーとして市販されていた Si-APD を、 1990年代前半からX線検出素子として開発する相談 に応じていただいてきた浜松ホトニクスに今回も製 作を相談した。モノリシックでピクセルアレイを製 作するときに問題になるのは Si-APD の深さ方向の 構造だけでなく、有感領域全体の大きさとピクセル 間のギャップをどこまで狭くできるかにある。我々 は時間分解能を重視して空乏層厚さが10 µm に設計 された S5343 型素子を選択した。APD でX線を直接 検出する場合、電子ー正孔対が生じる空間分布の幅が 時間分解能に影響するため、有感部(空乏層)の厚 さが薄いほど時間分解能はよくなる。厚さ10 µm は 時間分解能(半値全幅、FWHM) 100 ps に相当する。 ピクセルサイズは 100×200 µm、64 素子が 100 µm 方 向に配列するリニアアレイを製作した。ピクセル間 のギャップは50 umで有感部の長さは9.6 mmである。 ピクセル間の距離が近いと電圧印可時に表面リーク 電流が増加する恐れがあり、各ピクセルで均一な性 能を得るには有感部の寸法に限界がある。このアレ イでは比較的確実な設計値を選択した。

2) について、0.8 µm BiCMOS プロセスによる高 速 ASIC (Application Specific IC)の開発により、 半値幅で1ナノ秒以下の超高速パルスを得て10⁸ s⁻¹ に及ぶ計数率を得るための超高速パルス回路を実現 した[5]。KEK 素核研エレクトロニクス・システム開 発グループとの共同研究である。ASIC アンプ部に高 い計数率時に生じるベースラインシフトを抑制する 回路を有し、チャンネルあたり2系列のT-フリップ フロップにより最大250 MHz の論理パルス出力を可 能としている。コンパレータの閾値はASIC 外部から DAC を通して与える。4 mm 角サイズのチップに4 チ ャンネルの回路が収められている(図2)。



図2: 超高速パルスアンプ ASIC(4 チャンネル/4 mm 角)

3) については MCS (MultiChannel Scaler) を FPGA (Field Programmable Gate Array) によって 構成した。これは、ある時間幅 (dwell time)の時 間枠(time bin) ごとにメモリを並べておき、測定開 始のトリガー信号を受けてから順次、パルス入力を 受け付けてパルスのタイミングを記録する。設定し た測定時間が終了するまで、トリガー信号が来るた びにパルス入力のタイミング記録を繰り返す仕組み である。これにより、トリガー信号タイミングを基 準として計測したいパルスのタイミングに応じた、 ある測定時間内の時間スペクトルが蓄積される。連 続して記録できる時間枠の個数は限定されるが時間 枠間の不感時間はなく時間幅は可変である。時間枠 外に入力するパルスも最後のメモリに記録され数え 落とさないようになっている。我々は最小時間幅 1.0 ns、連続記録が可能な時間枠 (メモリ) 数:1024 に続いて、最小時間幅0.5 ns、時間枠: 2048のMCS システムの開発に成功した。その場合の測定原理図 を図3に示す。FPGAによってMCSシステムを構成す ることについては Open-It (計測技術に関するネッ トワーク[6]) と(株) Bee Beans Technology にお世話 になった。



図 3: MCS システムの原理。 横軸は時間。AT:05 ns ごと に連続 2048 個の時間枠でパ ルス信号 入力を記録する 場合 を示す。

上記の 64 チャンネル・ピクセルアレイ、ASIC に よるフロントエンド回路、FPGA による MCS システム が1枚の計測ボード上に搭載された検出器システム の写真を図4に示す。Si-APD リニアアレイのピクセ ルごと、時系列の計数値はギガビット・イーサネッ トを介して計測ボード上の SiTCP(TCP/IP によるイ ーサネット専用ハードウェア[7])によって高速処理 されワークステーションに送られる。次に本研究に より開発された Si-APD リニアアレイX線検出器シ ステムによる測定例を紹介する。最初の応用は放射 光核共鳴散乱測定である。この測定の場合は、放射 光X線のエネルギーを試料中の調べたい原子核励起 準位に合わせ、X線パルスによって共鳴励起、その 後、原子核励起準位の半減期に従って遅れて放出さ れる核放射線 (ア線)をX線検出器で検出する。前 方散乱法と呼ばれる観測法では前方に散乱される原 子核からのy線の「量子ビート」と呼ばれる時間構 造を時間分光により観測する。原子核周りの電子状 態によって原子核準位が微細なエネルギー準位に分 裂 (ueV 程度)、それらの準位から遷移する、エネル



図4: 64 ピクセル Si-APD リニアアレイ X 線検出器システム

ギーがわずかに異なる複数のア線が干渉することに よって時間による強弱の差、「うなり」が生じる。我々 は MCS の最小時間幅:1 ns、時間枠: 1024 のシステ ム、時間分解能(FWHM): 1.4 nsの段階で、鉄57(共 鳴エネルギー: 14.413 keV、半減期: 98 ns)の核共 鳴前方散乱法による測定を実施した。実験は核共鳴 散乱用ビームライン SPring-8 BL09XU にて行った。 高エネルギー分解能モノクロメータを使って 14.41 keV のX線ビームをエネルギー幅(FWHM) 2.5 meV まで絞り込んだ。厚さ4μmのα-Fe箔(Fe-57:90% 濃縮) 試料に照射、外部磁場を印可する場合と外部 磁場なしの両方について前方散乱時間スペクトルを 取得した。このときX線検出器をビーム軸に対して 12°に傾けることにより Si-APD リニアアレイによ る空間分解能を 30 Lm 程度まで向上させて測定を行 った。その結果、外部磁場なしの場合に鉄箔の内部 磁場の向きが磁区ごとに異なることを反映した時間 スペクトルを得ることに成功した[8]。そのときの結 果を図5に示す。図中のスペクトルをSi-APD リニア



図 5: 鉄箔の核共鳴前方散乱時間スペクトル(外部磁場なし)



図 6: リニアアレイのピクセル no.23 と no.27 の時間スペク トルの比較。放射光 X 線の磁場方向: *h*_oに対する鉄箔の内 部磁場の向き: *H_{at}*によりスペクトルが異なる様子を示す。

アレイのピクセルごとに調べると、異なる時間構造 を持つ時間スペクトルとなっていることがわかった。 これは放射光X線の垂直方向の磁場に対して鉄箔中 の磁区(数10 µm オーダーの大きさと考えられる) の内部磁場の向きにより、許容されるア線遷移が決 まり量子ビートの形状が異なるためと考えられた。 内部磁場が平行と垂直の場合を仮定したモデルに基 づいて時間スペクトルのデータをフィッティングし た結果を図6に示す。リニアアレイのピクセルno.23 は双方が垂直の場合、no.27の結果は平行な場合に 近似される。このように本検出器システムを使って 空間分解能と時間分解能を両立させて核共鳴前方散 乱測定を行うと、試料内の場所の違いによって内部 磁場の異なる状態などを一回の測定で明らかにでき ると示すことができた。リニアアレイを走査すれば 当然、2次元分布も記録できる。

もし2 ns ごとのX線パルスを区別して試料から散 乱されるX線強度を画像として時系列で記録できる と、レーザーなどで試料に刺激を与えた後のナノ秒 オーダーの構造変化などを通常の放射光リングの運 転モード(マルチバンチモード)を使ってたいへん 効率よく測定できる。我々が開発してきた Si-APD リニアアレイX線検出器システムは最小時間幅 0.5



図 7: PF リング・ハイブリッドモード運転時に測定した時間 スペクトル。(a) シングルバンチピークで測定した時間分解 能(FWHM):0.5 ns、(b)マルチバンチ部分で確認した 2 ns 間 隔 X 線ピークの分離の様子を示す。

nsのMCSによって、これを実現できるものとなった [9]。PF リングのビームラインBL-14Aにてマルチバ ンチとシングルバンチが共存するハイブリッドモー ド運転で性能を確認した。X線エネルギーは 14.41 keV、0.1 mm 径ビームとしてピクセル no.31 に照射 して得た時間スペクトルを図7に示す。図7(a)より、 シングルバンチで確認した時間分解能(FWHM)は 0.5 ±0.1 ns、図7(b)より、マルチバンチ部分のスペク トルでは2 ns間隔のX線ピークがほぼ完全に分離さ れていることがわかる。

現在、ピクセルサイズ 100×200 µm および 100×400 µm の 128 ピクセルのリニアアレイを準備し有効長 19.2 mm となったシステムのテストを行っている。 ピクセル数を倍増したことに合わせ、4 枚のサブボ ードに機能を分散して処理するものとしている。64 ピクセルのシステムと合わせて、今後、0.5 ns 時間 分解能を活かした時間分解イメージング実験や核共 鳴前方散乱実験などへの応用を進める。X線検出器 システムの仕様改善として今後、検出効率の向上を Si-APD 厚さを 30 µm とする素子の製作、および高速 シンチレータとの組み合わせにより実現したい。空 間分解能を引き上げるにはピクセル間のギャップを 数 10 µm 以下に狭めることが必要になる。試料環境 を変えながら迅速に測定するうえでデータ転送速度 を向上することも重要で、10 Gbps イーサネットお よび SiTCP の採用を急ぎたい。これらの課題を解決 しながら 1000 ピクセル規模の 2 次元 Si-APD ピクセ ルアレイ・システムを数年内に製作したいと考えて いる。

本研究は、KEK 物構研・春木理恵氏、量子研究機 構・三井隆也氏、エレクトロニクス開発では KEK 素 核研および Open-It (情報ネットワーク)の田中真 伸教授らエレクトロニクス・システム開発グループ との共同研究である。また本研究は、KEK 測定器開 発室プロジェクト「FPIX」として実施(FY2009~2013)、 科研費・基盤研究(A): JP25246040 の助成を受けて 実施された。

参考文献

[1] A. Q. Baron, et al., J. of Synch. Rad. 13
(2006) 131.
[2] D. Renker, Nucl. Instr. And Meth. A567 (2006)
48.
[3] S. Kishimoto, Rev. of Sci. Instr. 66 (2)
(1995) 2314.
[4] S. Kishimoto et al., Rev. of Sci. Instr. 69 (2)
(1998) 384.
[5] S. Kishimoto et al., Nucl. Instr. And Meth.,
A650 (2011) 98.
[6] "Open-it", http://openit.kek.jp/.
[7] T. Uchida, IEEE Transactions on Nuclear
Science 55 (2008) 1631.
[8] S. Kishimoto et al., Rev. of Sci. Instrum.
85 (2014) 113102.

[9] S. Kishimoto et al., AIP Conf. Proc. 1741 (2016) 040034.

ASTRO-H 衛星搭載 SXS (Soft X-ray Spectrometer)の開発の経緯と軌道上実績

1. X線分光観測

米国の Chandra 衛星の高空間分解能X線画像(例 えば、http://apod.nasa.gov/apod/ap020824.html) は美 しく、印象的である。画像からX線源の本質に迫る情 報を得ることは、もちろん可能である。しかし、画像に 基づく議論は定性的になりやすく任意性もある。X線 源でおきているX線放射プロセスを知るためには、X 線分光スペクトルのほうがより多くの、かつ、確実な 情報をもたらす。日本は、1984年のてんま衛星の GSPC (6 keV で半値幅約500eV のエネルギー分解能)、 1993年のあすか衛星のX線 CCD カメラ(半値幅 120 eV @ 6 keV) など世界に先駆けたX線分光観測を行 ってきた。あすか以降は、米国 Chandra と欧州の XMM Newton 衛星に搭載された波長分散型のX線分光機 器がそれまでの観測装置を凌駕するエネルギー分解 能のX線スペクトルを提供しているが、これらの装置 JAXA 宇宙科学研究所 満田和久

には、X線天体は点源でなければならない、優れた エネルギー分解能(半値幅~数 eV 以下)が得られ るエネルギー範囲は2keV 程度以下に限られる、とい う大きな制約が存在する。空間的に広がったX線放 射でも、また、10keV 程度のエネルギー範囲まで半値 幅 10 eV 以下の優れたエネルギー分解能を得ること ができる検出器がX線マイクロカロリメータである。

X線マイクロカロリメータは一つ一つのX線光子を 熱として検出する(図 1 (a))。非常に大雑把に言うと、 「厚さ5 μm、大きさ500 μm 角程度のX線吸収体を100 mK 程度以下の極低温に冷却し、熱容量を 1 pJ/K 程 度まで小さくする。それが1 keV のX線光子を吸収す ると 0.1 mK 程度の温度上昇を生じるので、その温度 上昇を 0.5 μK の精度で測定することによって、5 eV の エネルギー分解能を得る」ということになる。



図 1: マイクロカロリメータの原理(a)と, SXS の検出器と冷却系(b)-(g)



図 2: SXS 全体システムのブロックダイアグラム。図の中心付近に X 線入射経路と検出器, 冷却 Dewar を示し, その左側に冷却装置の駆動回路, 右側に X 線信号の処理システムを, さらにその下に, 衛星パスとのインターフェース装置を配した。異なる色は, 国際協力における分担を示す。

2. SXS 観測装置

X線マイクロカロリメータを用いたX線分光観測装 置 (XRS) はすざく衛星に搭載され、2005 年に軌道上 で7eVのエネルギーの分解能を確認した。しかし、そ の直後に、冷却のための液体ヘリウムを全て宇宙に 放出してしまう問題を生じ、宇宙X線の観測に至るこ とができなかった。調査の結果、XRS がヘリウムを放 出してしまった根本原因は、開発の初期に設定した日 米間のインターフェースに不整合にあったことがわか った。このような不整合を見落とさないような systems engineering をしっかりと行うこと、機械式冷凍機をより 多く導入して液体ヘリウム温度までの冷却に完全冗 長ではないが万が一の損失時に機能補うバックアッ プ手段を持たせる、といった改善策を策定した上で、 XRS の再挑戦ミッションとして ASTRO-H 衛星の SXS が認められた。その'開発は、2008年から始まり、そ の際には XRS に比べて日本の X線関係者からより多 くの研究者が参加することとなった。

SXS の全体構造を図2に示す。SXS はX線望遠鏡 を除いて11 のコンポーネントからなり、サブシステム 全体の重量が約400 kg、標準的な運用モードの消費 電力が約600 W である。加えて、ロケット打ち上げオ ペレーションと衛星総合試験において液体へリウムを 維持するために、衛星上においても SXS の地上系の みで SXS をオペレーションできる自律的な機能を持た せた。このように SXS サブシステムは小型衛星1機分 にも匹敵する規模と複雑さを持つシステムである。

SXS 開発経緯

図 2 に示すように SXS は JAXA を中心とする日本、 NASA を中心とする米国、SRON を中心とするヨーロッ パの研究者と技術者による国際協力で開発された。 日米欧の検討を開始したのは2007年1月である。約 1年間の検討で冷却系のベースライン設計とその開 発方針を決定した。5台の機械式冷凍機を使用する今 までにない複雑な冷却系であること、XRS の結果と擾 乱測定の結果から機械式冷凍機の微小振動はマイク ロカロリメータの動作に影響しないと推定したが、そ の推定には不確定性が大きいこと、の二つの理由か ら、検出器と冷凍機をフルに実装した Engineering Model (EM)を製作し、技術実証を行うことにした。た だし、本来は EM の試験が終わってから、飛翔モデル (FM)の設計を開始すべきであるが、冷却系の製作と 試験には二年半を要するため、衛星の開発期間と整 合しない。このため、最低限の確認としてX線検出器 の搭載がうまくいくのを待って、FM 設計を開始するこ



図 3: SXS 冷却系の開発年表。冷凍機駆動回路, X 線信号処理装置なども, 冷却系とほぼ同期して開発した。

とにした(図 3)。しかし、このことは、その後の擾乱問 題の対策において大きな足かせとなった。

図1(b)-(g) に、検出器および冷却系の主なコンポ ーネントを示した。検出器は地上において断熱真空を 提供する保温容器、 Dewar(図1(f))、 に収められ、2 段式の断熱消磁冷凍機(ADR、50 mK、 0.4 K)、超流動 ヘリウム(1.3)、ジュールトムソン(JT)冷凍機(4 K)、2 段スターリング冷凍機(20 K、 100 K) により冷却さ れる。これらに加えて、断熱消磁冷凍機に第3段を設 定し、超流動ヘリウムとジュールトムソン冷凍機の間 においた。これら3者は互いに機能冗長(ある種のバ ックアップ)の関係になっている。加えて、20 K/100 K の熱シールドを提供する2段スターリング冷凍機、JT 冷凍機を予冷する2段スターリング冷凍機も、それぞ れ、2台構成として機能冗長性を持たせた。

EM の機能試験(2012 年秋、図3)において、冷凍機 運転時には、要求されるX線エネルギー分解能が得 られないことがわかった。調査の結果、機械式冷凍機 の微小振動に連続的な周波数スペクトルを持つ成分 がありマイクロカロリメータがその影響を受けている ことがわかった。2008 年当時の検討を振り返ってみる と、測定装置のジグ共振の影響を当時は十分に見積 もることができておらず、結果的に、連続成分を過小 評価していた。擾乱の対策として、(a) 生じる擾乱の量 を下げる、(b) 擾乱の伝達パスを絞る、(c) 擾乱に対 する感受性を下げる、という複数の方法を検討した。 それぞれ擾乱の影響を下げることに寄与したが、根 本的な解決は(b)、すなわち機械的アイソレータにより 得られた。アイソレータは、その分野の開発に30年 の歴史を持つ米国 MOOG/CSA 社の技術で開発され た。その際、大きな制約となったのが、FM Dewarの設 計と衛星インターフェースが変更困難であり、アイソレ ータに使えるスペースと Dewar への取り付け方法が 非常に限られていることであった。その結果、通常で あればアイソレータには必須の打ち上げ時に機構を 固定する装置 (lauch-lock mechanism) をつけること ができなかった。このため、打ち上げ時の振動から冷 凍機を守るために、振れ幅を制限する bumper というメ カニズムを導入した。その設計マージンは非常に小さ い上に bumper の応答は非線形であるため、成立性を 検証するためには、ロケットと衛星の機械環境解析 (Coupled Load Analysis = CLA) の最終バージョンを反 映した6自由度の振動試験を実施する必要があった。 以上の擾乱対策を FM Dewar の製造とパラですすめ、 ぎりぎりではあったが、結果的には当初想定していた FM Dewarの製造/試験期間内でなんとか終了するこ

とができた。これは MOOG/CSA 社の技術力の高さに 負うところもあるが、それだけでなく、研究開発本部を 含めた JAXA の構造・機構の専門家の尽力によるとこ ろが大きい。

4. 軌道上動作

SXS サブシステムは 2015 年4 月に衛星試験に deliverされ、その後、衛星総合試験、約35リットルの 超流動ヘリウムの充填含む打ち上げオペレーション を経て、2016年2月17日に軌道上に投入された。図 4に打ち上げ時からの冷凍機内部の各所の温度の時 間変化を示す。打ち上げ 10 分後に、ヘリウム排気弁 を解放し超流動ヘリウムの蒸発潜熱による冷却を開 始し、2時間半後には2段スターリング冷凍機の運転 を、1日後にはジュールトムソン冷凍機の運転を開始 した。これによって打ち上げ後約2日後には、液体へ リウム温度は上昇から下降に転じた。打ち上げ4日後 には断熱消磁冷凍機の健全性試験を行った上で、そ の翌日には 50 mK の所定の温度に到達した。軌道上 での液体ヘリウムへの侵入熱は、ヘリウムの気相・液 相分離装置である porous plug の両端の温度(温度差 と液体側の温度)から高い精度で推定することができ る。ヘリウム蒸発レートは約35 µg/s、ヘリウムタンク への熱入力は約730 µWと見積もられ(設計ノミナル値 は 750µW)、機械式冷凍機の経年変化を加味しても、 液体ヘリウム寿命は、4年を超えると見積もられた。

打ち上げ後7日後の2月24日には衛星姿勢がペルセウス座銀河団中心方向に制御され、Dewarの



図 4.SXS 冷却系の各所の温度の打ち上げ後から 最後のテレメトリーデータまでの時間変化。

Gate Valveを閉じた状態で、Gate ValveのBe 窓越しで あったが、マイクロカロリメータで天体からのX線を始 めて観測した(図5)。この観測により銀河団からのX 線輝線の微細構造を初めて分解し、イオンのマクロな 運動速度(164±12 km/s)を明らかにした。この結果 は、少なくともこの銀河団についてはこれまでのX線 観測による銀河団質量推定のバイアスが十分に小さ いことを示している。今後、eROSITA により精度の高 い銀河団質量関数の赤方偏移(z)依存性が求められる と期待されるが、それによる宇宙の構造パラメータ推 定への根拠を与えるものである。



図 5: SXS によるペルセウス銀河団の観測データ (X 線イメージとX 線スペクトル) とすざく衛星によるスペクトル。 SXS は X 線入射部の Gate Valve を閉じて Be 窓を通して観測していたため, 3keV 以下の X 線が大きく減衰してい る。

5. どこまで実証できたのか

SXS サブシステムは、3 月 18 日に SXS の軌道上動 作と first light との成功を祝う会を行った。実はその裏 で、この前後の約1週間の期間、Gate valve を開いて よいのか、の議論がチーム内で行われていた。Gate valve を開いた場合に、問題になりえるのは以下の3 点である。(1) X線入射経路にある遮光フィルターへ の衛星内部からのアウトガス物質の付着、(2) 遮光フ ィルターを通した地球アルベド光の検出器への影響、 (3) 衛星からの電磁干渉の増加。Dewar の開口部の 設計としては(1)(2) は相反する要求であり、両者の折 哀案ともいうべき設計が採用された。他の機器での光 漏れの情報を受けて、再検討した結果、飛翔モデル での実績に基づく確認が不十分であることに気づい た。たとえば、(2) は理想的なフィルターであれば最 悪ケースにおいても 14 桁の余裕があるが、実際のフ ィルターにはピンホールが存在するので、その数を

	Contingency	Requirement	Goal	軌道上確認
Energy range	=right	0.3 - 12 keV	=left	
Energy resolution@5.9keV		7 eV	4 eV	4.9 eV
Array format		6 x 6		6 x 6
Field of view		2.9' x 2.9'	(3.05' x 3.05')*	3.05' x 3.05'
Effective area at 1 keV		160 cm ²	(215 cm ²)*	
at 6 keV		210 cm ²	(247 cm ²)*	
Angular resolution (HPD)		1.7'	1.3'	
Mission Lifetime	9 months#	3 years	5 years	
Time assign accuracy (rel./abs.)		80 µs/10ms		33µs/100µs
Max count rate		150 c/s/array		155 c/s/array
Energy scale cal. accuracy		2 eV	1 eV	
Energy spread func. cal. accuracy		2 eV	1 eV	

表 1:SXS の Top-level requirements と軌道上確認の状況

搭載するフィルターで確認する必要がある。搭載した フィルターの測定結果に戻って問題がないことを確認 した。このような検討結果をへて、3月29日にgate valveを開いてよいかの確認会をサブシステムで開催 する予定であったが、その前に、3月26日に衛星喪失 という事態を迎えてしまった。

このように立ち上げの道半ばであったため、多くの 未検証項目が残ってしまったことには留意しなければ ならない。表1にSXSのtoplevel要求を示すが、こ れらの中で確実に検証できたのはエネルギー分解能 と時間分解能に過ぎない。検証できていない主要な 項目を以下のようにあげることができる。(a) Gate valveを開いていないので開放機構の検証と開いた後 の冷却系と検出器の動作検証、(b)エネルギースケ ール較正用X線源である MXS (Modulated X-ray Source)を動作させていないので、MXS 自身の動作 検証と観測エネルギー範囲全体にわたるエネルギー スケール較正、画素間のばらつき、衛星軌道周期で の変動・長期的な変動、(c) micrometroid が検出器と 遮光フィルターに与える影響、(d) 機械式冷凍機の長 期的な性能変化。 6. マイクロカロリメータの今後

SXS は軌道上で正常に動作し、X線マイクロカロリ メータが拓く新しい世界を我々に垣間見せた。現在日 米で検討が進んでいるX線衛星代替機が実現すれ ば、銀河団の観測サンプルを増やすだけでなく巨大 ブラックホール周辺構造等、様々なX線天体につい て理解に貢献するであろう。X線衛星代替機では、 SXS から改良すべき点を絞り込んで基本設計を十分 に行った後、研究ではなくプロジェクト=事業として実 施することが確実な成功に必須であると考える。

SXS の grasp (集光面積と視野立体角の積)は小さく 空間分解も悪い (約1.7分角)。このため表面輝度の低 い放射に対する感度が低く、背景にある点源を区別で きないので、例えば銀河団では観測は近傍 (z < 0.1) 銀河団の中心領域に限られる。ヨーロッパ宇宙機構 (ESA) で採択され 2028 年打ち上げをめざす国際大型 衛星 Athena に搭載される X-IFU 観測装置は、>3000 画素の X線マイクロカロリメータと大型望遠鏡により SXS の約 1000 倍の grasp と5 秒角の角分解能を実現 しこの課題を解決しようとしている。最初の銀河団が 作られた z~2 から現在まで銀河団を観測し、例えば バリオン物質のフィードバックが宇宙の大規模構造形 成に与えた影響を明らかにする。Athena 衛星の観測 装置は欧日米で研究開発が進められているが、 >3000 画素の実現に必須となるのは超伝導を用いた TES (Transition Edge Sensor) 型X線マイクロカロリメ ータである。TES (Transition Edge Sensor) 型マイクロ カロリメータはすでに実用化のレベルに達しており、 今後 10 年のマイクロカロリメータの中心技術となる事 は間違いない。

SXS は著者を含む、以下の多くの人々からなる SXS チームにより研究開発された。

山崎典子、竹井洋、 辻本匡弘、 小川美奈、 小 山志勇 (ISAS/JAXA)、 杉田寛之、 佐藤洋一、 篠 崎慶亮、 岡本篤 (ADR/JAXA)、 藤本龍一 (金沢大 学)、 大橋隆哉、 石崎欣尚、 江副祐一郎、 山田真 也、 瀬田裕美 (首都大)、 田代信、 寺田幸功 (埼玉 大)、 北本俊二、 星野晶夫 (立教大)、 玉川徹 (理 研)、 佐藤浩介 (東京理科大)、 澤田真理 (青山学院 大)、野田博文 (東北大)、 三石郁之 (名古屋大)、 谷 津陽一 (東工大)、 太田直美 (奈良女子大)、 伊予本 直子 (九州大)、 村上正秀 (筑波大)、

R. L. Kelley, C. A. Kilbourne, F. S. Porter, K. R. Boyce, G. A. Sneiderman, M. J. DiPirro, P. J. Shirron, T. Bialas, M. Eckart, M. Chiao, M. Leutenegger, T. Watanabe、 K. Sakai (NASA/GSFC)、 G. Brown (LLNL)、 D. McCammon (Wisconsin 大)、 A. Szymkowiak (Yale 大)、 J.-W. den

Herder、 D. Haas、 C. de Vries、 E. Costantini、 H. Akamatsu (SRON)、 S. Paltani、 M. Pohl (Geneva 大)

以下の企業/方々の寄与に深く感謝する。

住友重機械工業株式会社 産業機器事業部(SXS 冷却系システムの開発)、株式会社 住化分析センタ ー(SXS 搭載機械式冷凍機の内部不純物測定)、株式 会社日本エイピーアイ(SXS 機械式冷凍機の内部不 純物の超高感度測定)、物質・材料研究機構 環境・エ ネルギー材料部門超伝導線材ユニット 沼澤健則氏 (ADRの磁気作業物質GLFの研究開発)、神島化学工 業(株) 詫間工場 セラミックス部 (ADRの磁気作業物 質 GLF の開発/製造)、岩谷産業株式会社(液体ヘリ ウムの供給)、三菱重工業株式会社 防衛・宇宙ドメイ ン 航空機・飛昇体事業部 (SXS PSP の開発)、 ISAS/JAXA 石村康生氏・ARD/JAXA 安田 進氏(ア イソレータの開発)、MOOG/CSA (アイソレータの開 発)'

会議報告「SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation 2016」

愛媛大学 粟木久光

2016 年 6 月 26 日~7 月1日にスコットランド・エジンバ ラの国際会議場にて、「SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation 2016」が開催された。この会議は、 毎年アメリカ・サンディエゴで行われている SPIE 会議 とは別に、天文分野の観測装置に特化して隔年で開 催している会議である。この会議の開催地は世界中 から選ばれ、今回はエジンバラ城をはじめとする多く の歴史的建造物が残されているエジンバラが開催地 となった。

私は「ひとみ」衛星に搭載された硬X線望遠鏡の衛 星軌道上での性能等を報告するために、この会議に 参加した。「ひとみ」は全観測機器の立ち上げフェーズ である初期機能確認フェーズの途中(3月26日)に異 常が発生し、その後、運用を断念することになった。多 くの人に期待していただいただけに、その期待にこた えられず、非常に残念である。「ひとみ」は異常発生ま での短い期間ではあったが、幾つかのX線天体を観 測しており、今回の会議で、その報告が行われた。

「ひとみ」には2種類の望遠鏡(軟X線望遠鏡(SXT)、 硬X線望遠鏡(HXT))と4種類の検出器(軟X線分光検出 器(SXS)、軟X線撮像検出器(SXI)、硬X線撮像検出器 (HXI)、軟ガンマ線検出器(SGD))が搭載されている[1]。 図1はSXT - SXI(左)、HXT1-HXI1(右)で捉えた G21.5-0.9と呼ばれる天体のX線画像である。予定通り



図 1:「ひとみ」衛星が捉えた X 線天体 G21.5-0.9 左:軟 X 線撮像システム[2], 右:硬 X 線撮像システ ム[3]。 左図の傾いた正方形が HXI1,2 の視野を表 す。

の検出器上の位置に天体をとらえることができている。 このデータも含めた解析より、SXT-SXIの結像性能を 全光量の50%が入る直径(Half power diameter)で表す と1.3 分角、HXT1-HXI1では1.7分角となった。集光力 も地上試験の結果と一致しており、衛星軌道上で打ち 上げ前と同じ性能が発揮できていることが確認された [3][4]。一方、「ひとみ」最大の特徴である SXS では、 軌道上でも4~5電子ボルトのエネルギー分解能を達 成したとの報告があった [5]。この分解能は「すざく」 等で使われたX線CCDカメラよりも約30倍高いもので ある。

SPIE では報告はなかったが、SXS でも性能確認の ためにX線天体(ペルセウス座銀河団)を観測している (図 2)。ペルセウス座銀河団は、約 5000 万度の高温ガ スを持ち、高温ガスからの電離輝線を多く持つ天体と して知られている。この観測結果は Nature 誌で発表さ れ、SXS が約 10 km/s の精度で高温ガスの運動を世 界で初めて明らかにしたこと、そして、その運動が想 像以上に小さかったことなどが報告された[6]。この科 学成果は観測データの一部を使って得たものであり、 今後の詳細解析で、さらなる発見が期待できるであろ う。



図 2:「ひとみ」搭載 SXS で観測したペルセウス 座銀河団からの X 線[6]。赤線は「すざく」搭載 X 線 CCD カメラ (XIS)で観測したスペクトルである。 格段に分解能が向上していることがわかる。

SPIE では、現在進行中ならびに、計画中のミッショ ンに関する報告や、将来につながる新しいアイデアや 開発についても報告された。中でも、私の興味を引い t=Critical-angle X-ray transmission (CAT) grating spectrometer」[7]について紹介したい。透過型X線回 折格子は、Chandra 衛星で使われ、CCD より高い分解 能で宇宙からのX線を分光し成功を収めた。しかし、 そのエネルギー分解能(R=E/ΔE)は 1000 程度であり、 回折格子としては決して高くない。そのため、分解能R > 3000 を目指した開発が行なわれてきた。CAT 回折 格子もその一つである。この発表は、AIの Kaの doublet の測定で、18次の回折光を使い、分解能 R> 10000の CAT 回折格子を実現したという報告である。 CAT 回折格子は、ブレーズド回析格子のように、あ る次数の回折効率を向上させるように設計可能な回 折格子である。CAT 回折格子は、図3のように、高さd、 厚さbの薄い壁が等間隔pで並んだ構造をしており、 入射X線の波長をえ、回折の次数をm、回折格子への 入射角をα、回折角をβ。とすると、次の回折格子の式 を満たす回折が生じる。

m $\lambda/p = \sin \alpha + \sin \beta_m$ 回折角が $\beta_m = \alpha$ ($\alpha < 臨界角_0$)の場合、回折角が反射 の方向と等しくなり、回折の効率がenhanceされること になる。大きいmで高い回折効率が得られるように回 折格子を設計することで、分解能の向上が可能とな る。



図3: CAT回折格子の概念図。赤はX線の軌跡を示しており、緑で経路の差が示されている。

この発表をしたHeilmannらは、Silicon-on-insulator (SOI) wafer基板からリソグラフィー技術を使って、{1、 1、1}面を側壁にするようにCAT回折格子を作成した。 回折格子の間隔 p は200 nm、壁の高さ d は4また は 6 µm であり、膜のような薄さである。さらに、臨界 角の増加や高エネルギーでの反射率向上を目的に、 壁の表面に厚さ2 nm のバッファー層(Al₂O₃層)を設け、 その上に、厚さ7 nmのプラチナ層を成膜している。ま さに、ナノテクノロジーを駆使して製作した回折格子で ある。図4はプラチナ層をつけたCAT回折格子を上か ら見た写真である。



図4: CAT回折格子。格子間隔は200 nmであり、5 µmごとにサポート(横に入っている構造)が入って いる。表面に7 nm厚のプラチナ層が作られてい る。

作成したCAT回折格子のエネルギー分解能は、 NASAマーシャル研究所の92 mビームラインを用いて 測定されている。使用した輝線はAIKα_{1,2}(1.4867、 1.4863 キロ電子ボルト)である。回折格子は望遠鏡の 下流側に設置されており、NASAゴダード研究所で開 発した焦点距離8.4 mのslumped glass望遠鏡が使用さ れた。回折格子はステージ上にマウントされ、各次数 での回折光をX線CCDカメラで測定できるようになって いる。図5は0次光(左)と18次光(右)のCCD画像である。 0次光は望遠鏡の結像性能を測定していることになり、 回折の方向(図中のdispersion axisとある方向)での広 がりは1"である。右は18次光の画像であり、0次光と 比べるとdispersion方向に広がっていることがわかる。 この画像から1次元ヒストグラムを作成し、スペクトル としたものが図6である。



図 5: 回折光の CCD 画像。 左が 0 次光を表してお り、 dispersion axis と書かれた方向に回折光が広が る。 ここでの広がりは 1"である。 右は 18 次光の画像 であり、 dispersion 方向に広がっているのがわかる。

この輝線の自然広がりは0.43電子ボルトであり、薄 灰色はKα1、2それぞれの自然広がりによる輝線プロ ファイルを、緑はそれを重ねたものを示している。濃 灰色と赤色は、それぞれR=10000とR=3000の場合で あり、測定データはR=10000のデータにほぼ等しいこ とがわかる。望遠鏡の角度分解能が1"の時の理論値 は15430であり、今回の結果は理論値に近いものであ った。また、回折効率も30%程度と従来よりも高く、理論 的には50%まで向上が期待できるとのことである。

彼らの結果は R>3000 が現実のものになってきたことを示すものとなった。2020 年代の衛星計画を目指して開発を進めており、今後の開発の進捗に期待したい。



図 6:18 次光のスペクトル(dispersion 方向へのプロ ジェクション)

おわりに

今回の会議に参加して、新規技術開発、新規ミッショ ンの話を聞くことができ、大いに刺激になった。「ひと み」は非常に残念な結果になったが、このことを心に 刻み、今後も宇宙科学分野ならびにX線光学分野に貢 献できるように技術を継承・進化させていきたいと思 う。

参考文献

[1] T. Takahashi et al. "The ASTRO-H (Hitomi) x-ray astronomy satellite ", Proc. SPIE, 9905, 99050U
(2016)

[2] H. Tsunemi et al., "Soft x-ray imager (SXI)
on-board ASTRO-H", Proc. SPIE, 9905, 990510
(2016)

[3] H. Awaki et al. "Performance of ASTRO-H hard x-ray telescope (HXT)", Proc. SPIE, 9905, 990512(2016)

[4] T. Okajima et al. "First Peek of ASTRO-H Soft
X-ray Telescope (SXT) In-orbit Performance", Proc.
SPIE, 9905, 99050Z (2016)

[5] R. Kelly、 et al.、 "The Astro-H High Resolution Soft X-Ray Spectrometer"、 Proc. SPIE、 9905、 99050V (2016)

[6] Hitomi Collaboration, "The quiescent intracluster medium in the core of the Perseus cluster", Nature, 535, 117 (2016)

[7] H.K. Heilmann et al., "Critical-angle x-ray transmission grating spectrometer with extended bandpass and resolving power > 10,000", Proc. SPIE, 9905, 99051X (2016)



本ニュースレターに満田氏、粟木氏が記事を寄せて頂いている通り、X線天文衛星「ひとみ」が本年 2 月に打ちあがりました。世界中の宇宙物理学者の期待を背負い、いまこれから本格観測を開始しよ うとした矢先に、残念ながらトラブルによってひとみ衛星は失われてしまいました。ひとみチームの 一員として、みなさまの期待に応えられなかったことは大変申し訳なく思っています。いま日本のX 線天文学者は、X線代替機の実現に向けて、必死に立ち上がろうとしております。このX線結像光学 研究会の皆様にも、少しでも応援して頂けたらと思います。今後も本誌のご支援、ご協力をよろしく お願い申し上げます。

(文責・松本浩典)

【メーリングリスト(登録メールアドレスの変更などについて)】

本ニューズレターは原則、メーリングリスト(xio-nl@prec.eng.osaka-u.ac.jp)によるメール配信と なっております。メールアドレス変更などの際には、お手数ですが、編集部(xioedit@prec. eng.osaka-u.ac.jp)までご連絡ください。メーリングリストは、研究会のお知らせなど、会員全員に 情報を配信したいときなどにも便利なので、積極的にご活用ください。

X線結像光学ニューズレター No. 44 (2016 年 12 月)

発行 X線結像光学研究会 (代表 兵庫県立大 篭島靖) 編集部 山内和人(大阪大)、齋藤彰(大阪大)、矢代航(東北大)、 松本浩典(名古屋大)、東口武史(宇都宮大) E-mail: xioedit@prec.eng.osaka-u.ac.jp

『平成28年度X線結像光学研究会運営組織』

·代表者 : 篭島 靖 (兵庫県立大)

- •事務局担当者:高山 裕貴(兵庫県立大)
- ·編集局責任者:山内 和人 (大阪大)
- ・編集局委員 : 齋藤 彰(大阪大)、 矢代 航(東北大)、 松本 浩典(名古屋大)、 東口 武史(宇都宮大)、 篭島 靖(兵庫県立大)、 豊田 光紀(東北大) • 幹事 : 伊藤敦(東海大), 太田 俊明(立命館大),大東 琢治(分子研) 篭島 靖(兵庫県立大),加道 雅孝(原研), 木下 博雄 (兵庫県立大) 國枝 秀世(名古屋大), 鈴木 芳生(東京大), 竹内 晃久 (JASRI) 田原 譲(名古屋大), 常深博(大阪大), 難波 義治 (中部大) 西野 吉則(北海道大), 西村 博明(大阪大), 羽多野 忠 (東北大) 兵藤 一行(KEK), 牧村 哲也(筑波大), 百生 敦(東北大) 森田 繁(核融合研), 矢橋 牧名(理研), 山内 和人(大阪大) 渡辺 紀生(筑波大) 特別顧問: 武(東北大名誉教授) 青木 貞雄(筑波大名誉教授) 柳原 美廣(東北大名誉教授) 波岡