

小型衛星 PolariS 搭載用 X 線撮像偏光計の開発 Development of the X-ray Imaging Polarimeter for the Small Satellite PolariS

林田 清^{1,*}, 定本真明¹, 吉永圭吾¹, 金柱鏞¹, 上司文善¹, 井出舜一郎¹,
郡司修一², 坂野光成², 片桐惇²,

岸本祐二³, 三原建弘⁴, 杉本樹梨⁴, 高木利紘⁴, 他 PolariS Working Group

¹大阪大学理学研究科, 〒560-0043 豊中市待兼山町 1-1

²山形大学理学部, 〒990-8560 山形市小白川町 1-4-12

³高エネルギー加速器研究機構, 〒305-0801 つくば市大穂 1-1

⁴理化学研究所, 〒351-0198 和光市広沢 2-1

Kiyoshi Hayashida^{1,*}, Masaaki Sadamoto¹, Fumiyoshi Kamitsukasa¹, Keigo Yoshinaga¹,

Shuichi Gunji², Mitsunari Sakano², Jun Katagiri²,

Yuji Kishimoto³, Tatehiro Mihara⁴, Juri Sugimoto⁴, Toshihiro Takagi⁴,

and the PolariS Working Group

¹Osaka University, 1-1 Machikaneyama-cho, Toyonaka, 560-0043, Japan

²Yamagata University, 1-4-12 Koshirakawa-cho, Yamagata, 990-8560, Japan

³KEK, 1-1 Oho, Tsukuba, 305-0801, Japan

⁴RIKEN, 2-1 Hirosawa, Wako, 351-0198, Japan

3 はじめに

X 線天体の偏光観測は、宇宙空間の磁場や高密度星まわりの降着円盤の構造など、直接撮像不可能な対象を探る手段として、X 線天文学の創生期から重要視されてきた。1970 年代には、超新星残骸かに星雲からの軟 X 線放射の偏光が検出され[1]、人工衛星による系統的な X 線偏光探査も実施された[2]。しかし、1980 年代以降の汎用 X 線天文衛星では、撮像、スペクトル観測に重点がおかれ、偏光観測に進展はなかった。

2000 年代に入りこの状況が大きく変化している。新しいタイプの X 線天文用偏光計が開発され、硬 X 線偏光計を搭載した気球実験 PHENEX[3]をはじめとした観測が実施されるようになった。100keV-1MeV の軟ガンマ線領域では、ヨーロッパの INTEGRAL 衛星が、かに星雲[4]、白鳥座 X-1[5]の偏光検出に成功している。日本のグループが開発した、偏光検出器 GAP[6]はソーラーセイルミッション IKAROS に搭載され、ガンマ線バーストの偏光検出に成功している[7]。このような状況の中、我々は、2010 年代後半の打ち上げを目標に、X 線ガンマ線偏光観測に特化した小型衛星 PolariS[8]の実現を目指して開発をすすめている。

4 PolariS 衛星と硬 X 線撮像偏光計

PolariS は、2013 年夏に初号機 (SPRINT-A ; ひさき) が打ち上げられた JAXA 小型衛星シリーズの 1 台として、国内を中心に海外からの参加者を含めて約 30 名のワーキンググループで、デザインを検討

している。他の SPRINT-A さらに他の小型衛星候補と同様、小型衛星標準のバスシステムの上に、PolariS 独自のミッション部を登載する形となる。PolariS の第一の目標は、かに星雲の 1/100 以上の数 10 個の天体から硬 X 線領域(10-80keV)での偏光をはじめて検出することである。このために、焦点距離 6m の硬 X 線反射望遠鏡を 3 台、伸展式光学台とともに登載する。それぞれの焦点面には、シンチレータと位置検出型光電子増倍管 (MAPMT) で構成され、コンプトン/トムソン散乱の異方性を利用する、散乱撮像偏光計を設置する。PolariS 衛星は、偏光測定のためシステム誤差を最小限におさえるために、衛星全体を 0.1RPM の速度で回転する。X 線天体の直線偏光度、偏光方向をエネルギーの関数として測定するのが目的である。

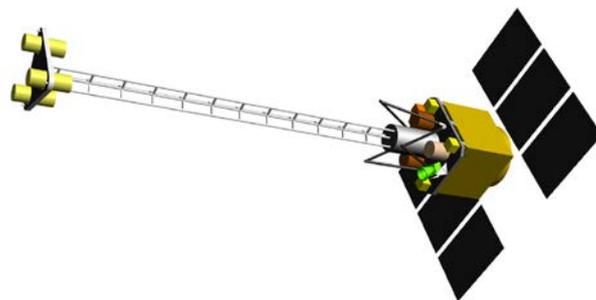


図 1 : PolariS 衛星全体図 6m 伸展式光学台を伸展した状態。

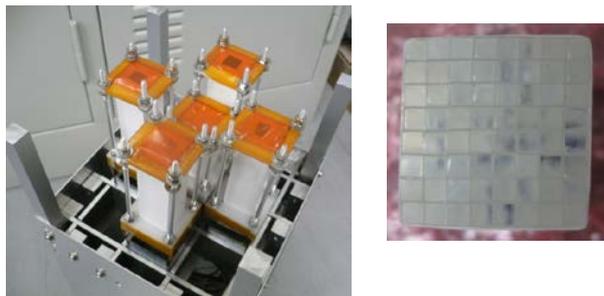


図 2 : PolariS 散乱撮像偏光計プロトモデルシンチレータブロックと MAPMT のユニット 5 台で構成している(最終的には 9 台に拡張する予定)。

PolariS 散乱撮像偏光計の中心の 1 台にはプラスチックシンチレータ柱を 8x8 個組み合わせたブロック(右図が MAPMT への接地面)が使われており、周辺の 4 台は GSO シンチレータ柱とプラスチックスペーサを 4x4 個組み合わせたブロックが使用されている。MAPMT 1 個の断面サイズは 30mmx30mm。X 線は中心ユニットのプラスチックシンチレータに入射し、ある確率で散乱、反跳電子の信号を発生するとともに、散乱 X 線が GSO シンチレータで吸収される。これによって X 線入射位置と散乱方向がわかるというのが、この偏光計の原理である。

この散乱撮像偏光計のプロトモデルの性能評価が、本実験課題 2012G733 の目的である。

5 ビーム偏光度、強度の較正

PolariS 撮像偏光計プロトモデルへの KEK PF BL14A における単色偏光 X 線照射実験は、これまで、2012 年 12 月、2013 年 6 月と 12 月に実施している。1 回めの実験の QL 結果は既報しているが[9]、ここでは最初の 2 回の実験結果を中心に報告する[10],[11],[12]。

いずれの実験でも、ビーム偏光度の測定(較正)を実施している。X 線ビームの偏光度は Be ターゲットと CdTe 検出器を回転ステージに設置して、回転し、散乱 X 線強度の角度依存性を測定することによって実施した。較正結果を表 1 にまとめる。

表 1: ビームの直線偏光度

X 線エネルギー (keV)	ビーム偏光度 (%)
10	75.86±0.16
15	78.74±0.06
18.5	69.86±0.40
20	78.46±0.21
30	88.17±1.27
40	84.93±0.45
60	87.01±0.63
80	82.94±0.17

以下の実験で表示している PolariS 撮像偏光計の Modulation Factor M は、この分野での通例に従い 100%偏光度のビームが入射した場合の modulation で記述している。具体的には、測定結果から得られた modulation を、表 1 のビーム偏光度でわっている。

PolariS 偏光計の性能指標としては、Modulation Factor M と呼ばれる量とともに、検出効率も重要である。そのため、ビーム強度をモニターするため、CdZnTe 検出器(あるいは CdTe 検出器)をビーム挿入式で用いた。このとき適切な強度(数 1000Hz 以下)になるように、W,Cu,Mo などのフィルタを使用した。ビーム強度の較正は、1 回約 30 分の PolariS 偏光計の測定の前後で実施している。

6 PolariS 撮像偏光計プロトモデルへの X 線照射

PolariS 撮像偏光計を回転ステージに取り付け、ペンシルビームを、偏光計をビーム軸まわりに 360 度回転させ、性能評価のデータを取得した。PolariS 衛星では衛星全体を視線軸まわりに 0.1RPM の速度で回転させる。今回の実験では 30 分で 1 回転の速度であるが、偏光計を回転させながらデータを取得した。X 線ビームサイズは 0.1mm 直径とした。

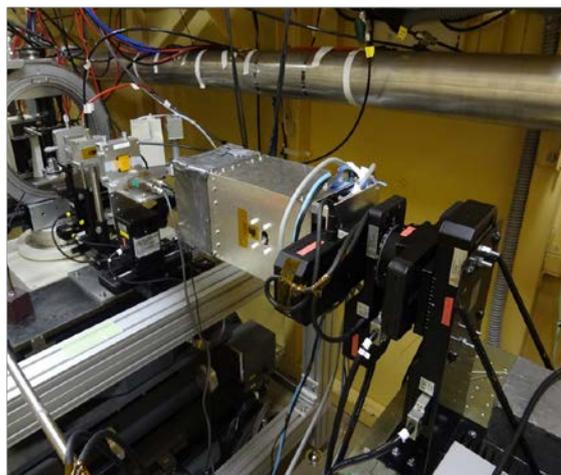


図 3 : PolariS 撮像偏光計への単色 X 線ビーム照射。偏光計は回転させながら測定する。実際の測定では偏光計全体を暗幕でおおっている。ビーム軸、入射位置、回転軸が一致するようにアライメントしている。

PolariS 撮像偏光計は、望遠鏡とくみあわせることで撮像機能も実現する。今回、偏光検出性能とともに位置検出性能の測定も行った。具体的には、ビームをプラスチックシンチレータ柱に入射し、検出された位置を調べた(図 4)。一本のプラスチックシンチレータ柱に入射させても、その中で生じたシンチレーション光子が MAPMT のピクセルに入射するときに、周囲のピクセルにも光が漏れ込んでしまう。複数のピクセルに生じた信号を使用して入射位置を推定する。これを、80keV ビームを 4 箇所位置にそれぞれ入射し、検出された多数イベントについて

頻度を集計したのが図4になる。解析の結果、FWHMで0.6ピクセル1.3mm程度の位置分解能があることがわかった。

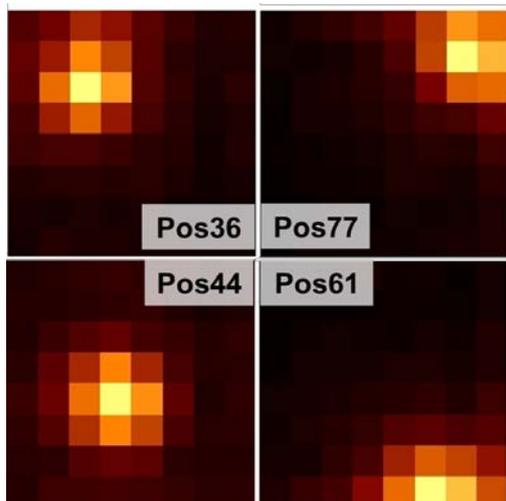


図4 : PolariS 撮像偏光計プロトモデルの入射面、プラスチックシンチレータ 8x8 マトリックスに 80keV、0.1mm 長形のビームを入射した場合の検出イベント数マップ。左上は Pos36 つまり、左から 3 番め、下から 6 番目の位置のプラスチックシンチレータの中心に入射させた場合の検出イベント位置のマップ。右上は Pos77 への入射、左下は Pos44 への入射、右下は Pos61 への入射に対応。

続いて、偏光検出性能に関しての結果を述べる。先に述べたように PolariS 撮像偏光計をモータステージにのせて 30 分で 1 回転させている間にデータを取得する。PolariS 偏光計プロトモデルの実験システムでは、各イベント毎に合計 128ch の MAPMT の信号を全てデジタル化し保存している。データ選別、再合成のアルゴリズムの改良も、2012G733 の実験課題の目的のひとつであるが、大きく二つのデータ選別モードで評価をしている。ひとつは、プラスチックシンチレータと GSO シンチレータ、それぞれに信号が生じたイベントのみ使用する Double Hit Mode で、上に示した、この撮像偏光計の基本原理に対応するモードである。ただし、散乱イベントが起こっても散乱が Coherent の場合や Incoherent でも検出限界以下の場合、プラスチックシンチレータの信号は発生しない。これを Single Hit と呼んでいる。プラスチックシンチレータ信号を参照せずにデータ選別する場合、両方の種類のイベントを使用することになるので、Single&Double Hit Mode と称している。望遠鏡とくみあわせて使用する場合、対象が X 線点源であった場合、入射位置はある範囲に特定できる。この場合に限って使用できるモードである。

具体的に 40keV ビームを Pos44 に入射させた場合の Modulation Curve (散乱角度の頻度分布) を図5

に示す。散乱撮像偏光計は回転しながらデータを取得しているので、ここでの散乱角度はビームに固定した座標系で定義されたものである。期待される角度で最大になるような明確な Modulation が観測されている。

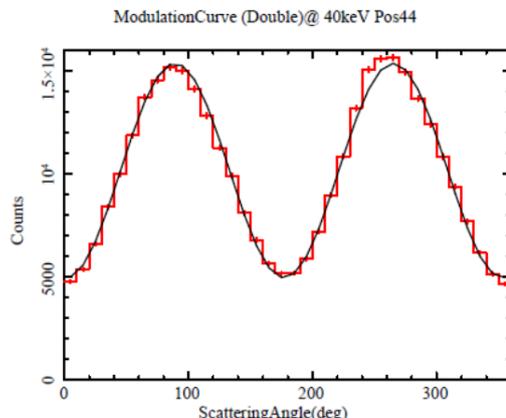


図5 : PolariS 撮像偏光計、40keV 入射の場合の Modulation Curve。ここでは Pos44 への入射した場合の Double Hit Mode の検出イベントに関して表示している。

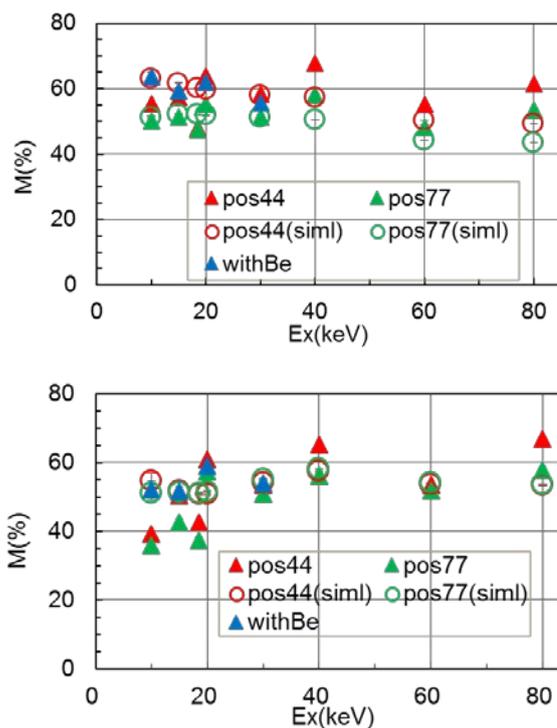


図6 : PolariS 撮像偏光計プロトモデルの Modulation Facto、M。上が Single&Double Hit モード、下が Double Hit Mode のイベント。塗つぶしマークは実験で得られた値、白抜きマークは、シミュレーションによる値。

図6をみると、Sinle&Double Hit Mode, Double Hit Mode いずれの場合も 20-80keV ではおよそ 50-60% 程度の高い M を得られていることがわかる。20keV 以下の Double Hit では、それより少し低い 40%前後の値になっている。

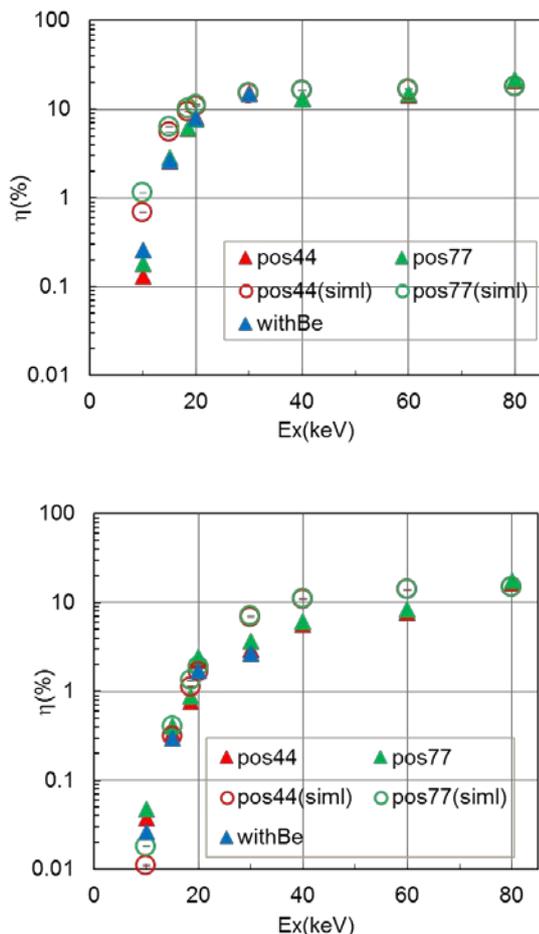


図7： PolariS 撮像偏光計プロトモデルの検出小効率、 η 。上が Single&Double Hit モード、下が Double Hit Mode のイベント。塗つぶしマークは実験で得られた値、白抜きマークは、シミュレーションによる値。GSO ユニットに数はここで使用したプロトモデルでは 4 台であるが、最終モデル 8 台にする予定である。その場合、効率は約 2 倍向上する。

検出効率の値は図7にまとめている。Single+Double Hit Mode に関しては 20keV 以上で 10-20%の検出効率を得られている。Double Hit のそれは、20keV で 2%程度である。特に Double Hit の検出効率は、アルゴリズムに敏感である。今回の実験データの解析の過程で、特に、各 MAPMT のチャンネルのペDESTALを正しく推定することが重要であることがわかった。X 線 CCD で使用しているダークアップデートと同様のアルゴリズムを導入した。20keV で約 2%の検出効率は、このアルゴリズムを

使用した値であるが、使用前に比べて一桁近く向上させることに成功した。[10],[12]。

様々な構成の X 線散乱偏光計が開発されているが、M の値 50-60%は最高レベルといえる。また、多くの場合 30keV あるいは 50keV 以上がエネルギー帯域であるのに比べ、今回 PolariS プロトモデルが Double Hit で 20keV に感度があることを実証したこと重要である。位置検出能力を有している散乱偏光計自体少数派であるが、位置分解能 2mm 以下も最高性能といえる。

5 PolariS 衛星搭載の場合の感度予測

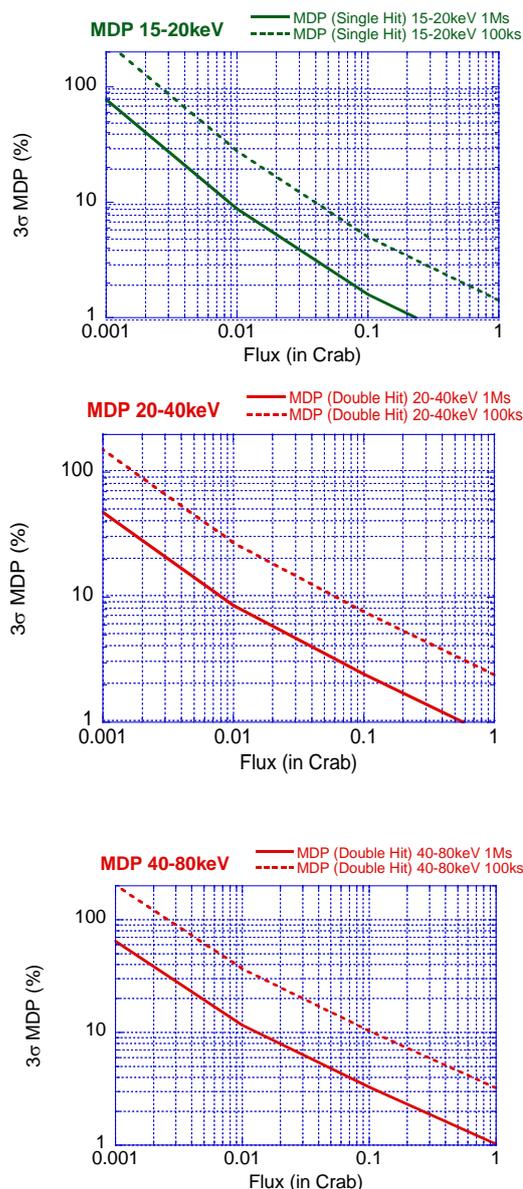


図8： PolariS 衛星の感度(MDP)予測。15-20keV のバンドは Single&Double Hit, 20-40keV, 40-80keV のバンドは Double Hit の解析を仮定している。実線は 1Ms の観測、破線は 100ks の観測。

今回の実験結果をもとに、Polaris衛星として構成した場合の感度を最小検出可能偏光度 MDP で評価する。ただし、撮像偏光計は GSO9 ユニットに増加させたモデルを計 3 台使用することを想定して計算した。バックグラウンドは GEANT4 を利用したシミュレーションベースに評価している。ただし、全体を Pb 2mm と Sn 1mm のパッシブシールドで覆うこと、GSO シンチレータピクセル間の反同時計数を利用することを想定している。

結果は図 8 にまとめた。3 個のエネルギーバンドいずれにおいても、1Ms の観測で 10% 程度の MDP となっている。超巨大ブラックホールへの降着現象、活動銀河核、うち明るい数例の観測が期待できる。より近傍にある我々の銀河系内の、恒星質量ブラックホールや、中性子星はより短時間の観測で小さな MDP が期待できる。Preliminary な観測計画では 1 年間に 30 個程度の天体を観測し、その多くで(硬)X 線バンドではじめての X 線偏光を検出することが期待される。

6 まとめ

Polaris衛星搭載を目的にした、散乱撮像偏光計のプロトモデルに対して、KEK PF BL14A にいて単色偏光 X 線を照射する実験を行った。Modulation Factor, 検出効率という指標でみたときに従来の散乱偏光計に比べて高い性能をもっていることが実証できた。

しかし、特に低エネルギー側の検出効率はデータ選別アルゴリズムにも依存し、今後も継続して検討していく必要がある。また、シミュレーションとの一致も完全ではなく課題となっている。

プロトモデルから最終的なフライトモデルには、環境試験に耐えるような改良も必要で、BL14A における継続的な評価実験を希望している。

謝辞

実験にあたっては、BL-14A 担当の岸本俊二先生はじめ PF スタッフにお世話になりました。また、山形大学、門叶冬樹氏には一部の装置をお借りしました。ここに感謝致します。

この実験に関して林田は科研費 23340071、230000040 のサポートを受けています。

参考文献

- [1] R. Novick et al., *Astrophys. J.* **174**, L1 (1972)
- [2] M.C. Weisskopf et al., *Astrophys. J.* **208**, L125 (1978)
- [3] S. Gunji et al., *Proc. of SPIE* **6686**, 18.1 (2007)
- [4] A.J. Dean et al., *Science* **321**, 1183 (2008)
- [5] P. Laurent, *Science* **332**, 1126 (2011)
- [6] D. Yonetoku et al., *Publ. Astron. Soc. Japan* **63**, 625 (2011)
- [7] D. Yonetoku et al., *Astrophys. J.* **743**, L30 (2012)
- [8] K. Hayashida et al., *Proc. of SPIE* **8443**, 84434G (2012)
- [9] 林田 清 他, KEKPF Report 2012, 379 (2013)

[10] 定本真明、平成 25 年度大阪大学理学研究科修士論文 (2014)

[11] K. Hayashida et al., *Suzaku and Maxi Conference 2014 Proc.*, in press (2014)

[12] K. Hayashida et al., *Proc. of SPIE* **9144**, in press (2014)

* hayasida@ess.sci.osaka-u.ac.jp