

# 超小型 X 線衛星 NinjaSat 搭載のガス X 線検出器の バックグラウンドシミュレーション

システム理工学専攻  
宇宙観測システム研究

MF20037  
指導教員

さとう ひろき  
佐藤 宏樹  
久保田 あや 教授  
玉川 徹 主任研究員 (理化学研究所)

## 1 NinjaSat プロジェクト

現在、理化学研究所では、超小型 X 線衛星 NinjaSat の開発を進めている。NinjaSat は明るい X 線天体の長期モニターや、全天 X 線監視装置 MAXI[1] などが発見した突発天体 (短い時間に X 線の強度が急激に増大する天体) の追観測を主な目的とした 6 U CubeSat (30 cm × 20 cm × 10 cm) である。CubeSat とは国際規格で寸法が定められた数 kg 程度の超小型人工衛星のことである。NinjaSat は 2–50 keV の観測エネルギー帯域のガス X 線検出器 (GMC: Gas Multiplier Counter) を 2 台搭載し、2023 年 4 月打ち上げ予定である。NinjaSat の 3D イメージを図 1 に示す。

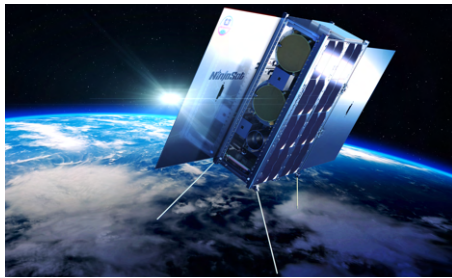


図 1: NinjaSat 3D イメージ [2]。

## 2 NinjaSat 搭載ガス X 線検出器

NinjaSat 搭載ガス X 線検出器 GMC の概要を図 2 に示す。検出器上部は X 線の入射角を制限するためのコリメータ、X 線を透過させるための Be 窓よりなる。検出器内部には X 線の検出効率を上げるために、原子番号の大きな Xe ガスが封入されている。X 線が入射すると、光電効果により Xe 原子から光電子が放出され、それがガスをイオン化し、電子雲を作り出す。電子雲は高電圧が印加されるガス電子増幅フォイル [3] の強電場により加速され、衝突により Xe ガスが電離し、電子増幅が起きる。このプロセスを繰り返し電子の数を増幅させることで、入射 X 線のエネルギーに比例する電気信号を取り出すことができる [4]。

## 3 本研究の目的

GMC の主なバックグラウンドには宇宙 X 線背景放射 (CXB: Cosmic X-ray Background) と宇宙線がある。CXB は遠方の活動銀河核に由来する、ほぼ全天から等方的に降り注ぐ X 線放射のことである [5]。宇宙線は宇宙空間を飛び交う高エネルギー放射線の総称であり、陽子や電子、原子核といった電荷を持つ粒子線 (荷電粒子) がこれに属する [6]。CXB と宇宙線はどちらも高エネルギーの放射線であるため、検出器外壁を突き抜け、Xe ガスと相互作用を起こすことで GMC のバックグラウンドとなる。

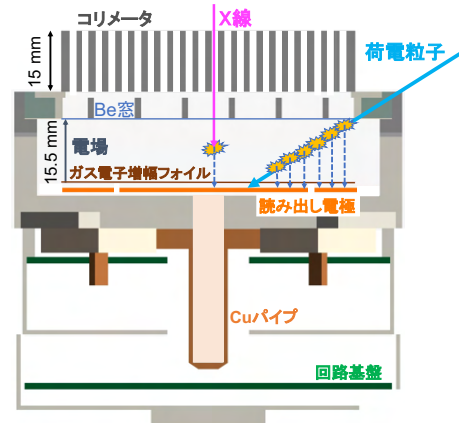


図 2: NinjaSat 搭載ガス X 線検出器 GMC の概要図。

GMC では、CXB を遮蔽するために、検出器の周りに光電吸収率の高い重金属を用いたシールドを設置する。また宇宙線除去のために、X 線光子と荷電粒子のガス中での相互作用過程の違いを利用した弁別方法を 2 つ用いる。1 つ目は、信号読み出し電極に内と外の二つの電極を用い、二つの電極で同時に反応した宇宙線イベントを除去する「反同時計数法」、2 つ目は、X 線と宇宙線の信号波形の立ち上がり時間の違いを利用する「波形弁別」である。図 3 に示すように、X 線信号の立ち上がり時間は  $\sim 200$  ns と速く、宇宙線信号の立ち上がり時間は  $\sim 1$   $\mu$ s と遅く、立ち上がり時間にスレッシュホールドを設けることで X 線と宇宙線を弁別する。

本研究はシミュレータを制作・利用し、1. CXB 減衰シールドの最適化、2. 反同時計数と波形弁別の性能評価、3. CXB と宇宙線バックグラウンド低減後のバックグラウンドレートの見積もりを行うことを目的とする。

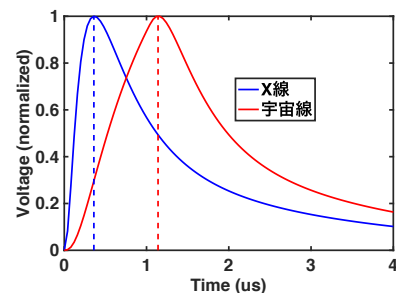


図 3: X 線と宇宙線の信号波形。

## 4 Geant4 を用いたシミュレーション

本研究では複数種の粒子を扱い、扱う粒子の到来方向やエネルギー分布も多様であるため、実測や概算でバックグラウンドを見積もるのは容易ではない。そこでツールとして Geant4[7] を用いる。Geant4 とはモンテカルロ法を用い、検出器のジオメトリを考慮した上で、放射線と物質の相互作用をシミュレートする C++

ツールキットのことである。仮想空間内に GMC のジオメトリを作成し、ジオメトリに等方的に粒子が当たるようにアルゴリズムを組み、適切な物理素過程を付与した。3D CAD の質量と Geant4 で実装したマスモデルの質量比較による、ジオメトリの再現度は 97 % である (実装していないのは計算にほぼ影響しない細かな溝やネジ穴である。 )。

## 5 CXB 減衰シールドの最適化

CubeSat には厳しい質量制限があるため、シールドの合計質量 150 g 以下という条件のもと、可能な限り CXB を低減するシールドデザインの最適化を行うことを本章の目的とする。シールドなしの場合の CXB シミュレーションを行った結果、35 keV (Xe K 殻吸収端) 以上のエネルギーを持つ CXB の影響が支配的 (20 keV 以下は検出器外壁の Al で遮蔽されるため) であることがわかった。そこでシールドの素材には、重金属の中で 35 keV 以上で X 線の遮蔽率が最も高い Sn を選択した。次に未定乗数法を用いてシールドの設置箇所ごとに、厚みの最適化を行った。それを初期値としてシールドの機械的な設置条件と、シールド素材の強度を加味した上で、シールドデザインを決定した。その結果、検出器側面は Sn 0.8 mm、その他の箇所は Sn 0.5 mm という結果になった。

シールドを仮定した場合の CXB スペクトルを図 4 に示す。かに星雲 (Crab) は安定して輝く明るい X 線標準光源である。シールドを仮定した場合の CXB スペクトルは Crab スペクトルと 50 keV で交わり、観測帯域 2–50 keV での CXB 低減率は十分であると言える。

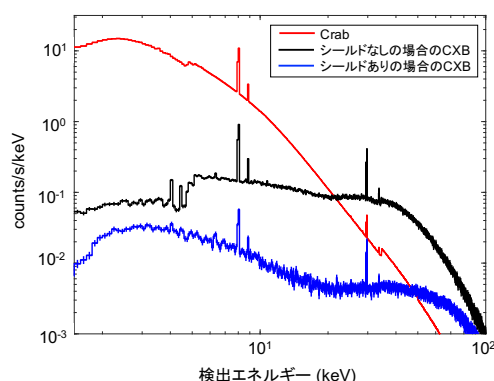


図 4: シールドを仮定した場合の CXB スペクトル。

## 6 反同時計数による宇宙線バックグラウンドの除去

宇宙線フラックスは衛星の位置 (緯度) や姿勢、高度、時期 (太陽活動周期) によって変化するため、その正確な見積もりは難しい。そこで本章では、NinjaSat 軌道で想定される宇宙線フラックスの平均値の見積もりを行った上で、Geant4 シミュレーションを行い、反同時計数の性能評価を行うことを目的とする。シミュレーションで仮定する宇宙線フラックスは、Web 上で宇宙線フラックスの計算ができる SPENVIS[8] や、文献 [9] と文献 [10] から宇宙線フラックスの式を引用し、それらを元に NinjaSat 軌道で平均化した。平均化した宇宙線フラックスを元にシミュレーションを行った結果、宇宙線合計レートは 2–50 keV で 20 cps、反同時計数による宇宙線バックグラウンド除去を仮定した場合 8.9 cps であり、約 55% の宇宙線を除去できることを確認した。

## 7 波形弁別による宇宙線バックグラウンドの除去

本章では波形弁別後の宇宙線バックグラウンドレートを見積もることを目的とする。波形弁別を模擬するために、X 線と宇宙線の波形を作成するための波形シミュレータを開発した<sup>1</sup>。波形の形状は、粒子が入射した際、検出器内部で生成される電荷の時系列と、回路の応答 (増幅・整形) により決まる。そこで Geant4 シミュレータを用いて電荷の時系列を計算し、それに回路応答を畳み込むことで波形を作成した。X 線と宇宙線それぞれイベントごとに波形を作成し、波形弁別による宇宙線除去を模擬した場合の宇宙線バックグラウンドスペクトルを図 5 の青線に示す。反同時計数と波形弁別を仮定した場合の宇宙線レートは 2–50 keV で 0.11 cps であり、反同時計数のみを仮定した場合のレートは 8.9 cps であることから、波形弁別は約 99% という非常に高い宇宙線除去率を有することがわかった (実測では 92%)。また、Crab スペクトルと宇宙線バックグラウンドスペクトルは 40 keV 辺りで交わり、2–40 keV の X 線観測に大きく影響しないことを確認した。

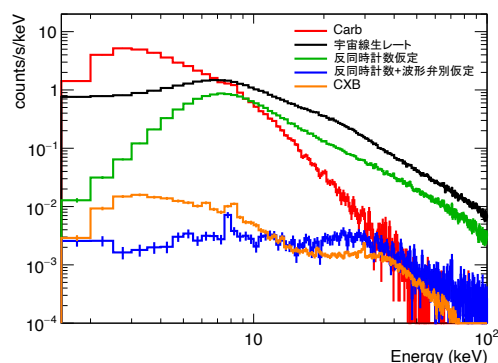


図 5: 波形弁別を模擬した場合の宇宙線バックグラウンドスペクトル。

## 8 結論

Geant4 を用いて CXB シールドを最適化した結果、CXB スペクトルは Crab スペクトルと 50 keV で交わり、2–50 keV の観測帯域に大きく影響しないことを確認した。NinjaSat 軌道で想定される宇宙線フラックスの見積もりを行い、反同時計数の性能評価を行った結果、約 55% の宇宙線を除去できることがわかった。波形シミュレータを開発し、波形弁別の性能評価を行った結果、9 割以上の宇宙線を除去できることを確認した。また Crab スペクトルと宇宙線バックグラウンドスペクトルは 40 keV で交わり、2–40 keV の観測帯域に大きく影響しないことを確認した。

## References

- [1] Matsuoka et al. 2009, PASJ 61, 999.
- [2] Enoto et al. 2020, SPIE , 11444, 114441V.
- [3] T. Tamagawa et al. 2009, Elsevier, 608, 390.
- [4] 井上 小山勝二 高橋忠幸 水本好彦 2008, 宇宙の観測 (3).
- [5] Giacconi R. et al. 1962, Phys. Rev. Letters, 9, 439.
- [6] 槇野文命, 2013, 宇宙航空研究開発機構特別資料.
- [7] AGOSTINELLI, Sea, et al. 2003, Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A, 506.3, 250.
- [8] Kruglanski, Michel, et al. 2009, EGU General Assembly Conference Abstracts, 7457.
- [9] Mizuno et al. 2004, ApJ, 614, 1113-1119.
- [10] J.F.Ormes et al. 2006, LAT-TD-08316-01, 23-24.

<sup>1</sup>シミュレータで作成した波形は波形弁別アルゴリズムを検討・設計する際にも使用された。