

手のとどく宇宙 ～ 超小型 X 線衛星 NinjaSat の挑戦と成功

理化学研究所 開拓研究所 / 仁科加速器科学研究センター

玉川 徹

tamagawa@riken.jp

2025 年 (令和 7 年) 8 月 1 日

1 はじめに

ここ 10 年ほどで民間の宇宙技術は飛躍的に進歩し、かつては国家機関が担ってきた宇宙利用を、SpaceX をはじめとする新興宇宙企業がリードする時代に突入した。高度 500 km 前後の地球低軌道は、地球観測や通信をなりわいとする民間企業によって商業圏として確立されており、その結果、宇宙への輸送コストや人工衛星の製造コストが劇的に低下し、多くのプレイヤーが参入している。

こうした千載一遇のチャンスを背景に、民間企業の力を活用すれば宇宙での実験が素早く安価に実施できるのではないかという発想が、超小型 X 線衛星 NinjaSat プロジェクトの出発点となった。実際にプロジェクト開始から 3 年半後には衛星を打ち上げ、目的とする科学観測を実現することができた。ここでご紹介するのは、実働メンバー 10 名程度の小さな宇宙実験の話であり、多くのメンバーが役割を分担して実現する素粒子実験とは異なるが、宇宙での実験が驚くほど身近になったことを、少しでも感じていただけると幸いである。

2 X 線天文学

可視光や電波と異なり、天体から降り注ぐ X 線は大気により吸収されるため、高度 100 km 以上の、いわゆる宇宙空間に出なければ観測できない。そのため X 線天文学は、検出器を宇宙に運搬する手段が確立した後の 1962 年に、リカルド＝ジャコーニやブルーノ＝ロッシらが歴史的な弾道ロケット X 線実験を実施したことにより始まった [1]。天文学の中では後発の分野である。太陽以外に X 線を出す天体が知られていなかった時代に、宇宙にはもっと明るい X 線天体が存在するに違いない¹という信念のもと新分野を切り拓いた先人達の進取の気性は、研究者として常に見習いたいと思う。

¹ 太陽からの X 線は暗く、遠方の宇宙におくと当時の技術では観測できないほどの強度しかない。

日本では小田稔らが中心となり、1970 年代から継続的に X 線天文衛星を打ち上げ、いくつもの失敗を乗り越えつつ、X 線天文学を日本のお家芸と呼ばれるまでに育てあげた。最近も XRISM 衛星が 2023 年 9 月に打ち上げられ、搭載された Resolve 検出器は、X 線の典型的な評価エネルギーである 6 keV において 5 eV 以下 (X 線 CCD より 30 倍ちかく優れている) という驚異的な分光性能で [2]、世界の X 線観測をリードしている。

宇宙ではブラックホール連星系から銀河団まで、あらゆるカテゴリーの天体が多かれ少なかれ X 線で輝いている。天体近傍の高温プラズマや粒子加速などの高エネルギー現象を見るには X 線が最適であり、宇宙を観測する上で欠かすことができない波長帯域となっている。

3 NinjaSat のはじまり

お家芸と呼ばれる X 線天文学の世界に身を置きながらも、年々進むプロジェクトの大型化や実験開始までの長期化について、漠然とした不安を感じていた。人工衛星を用いた宇宙実験は地上の加速器実験と同じで、莫大な予算を必要とする典型的なビッグサイエンスである。日本で X 線天文観測が始まった当初は、計画から 5 年程度で打ち上げられていた科学衛星が 10 年になり、15 年になり、予算も一国でカバーできる範囲を超えるようになった。さまざまなアイデアを持つ優秀な若手研究者にとって、10 年以上かかるプロジェクトに軸足を置くのは、リスクであることは間違いないであろう。

そのような漠然とした不安に解決の光がさしたのは、2019 年 3 月に東京大学で開催された第一回超小型衛星利用シンポジウムに参加し、宇宙の民間利用の現状を目の当たりにしたときであった。宇宙実験は莫大な予算が必要であるという考えは今も変わっていないが、そのうちの一部は、もっと素早く安価にできるはずであるという強い思いに取りつかれた。

CubeSat (キューブサット) と呼ばれる超小型衛星は、 $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ を 1 つのユニット (1U と呼ぶ) として、

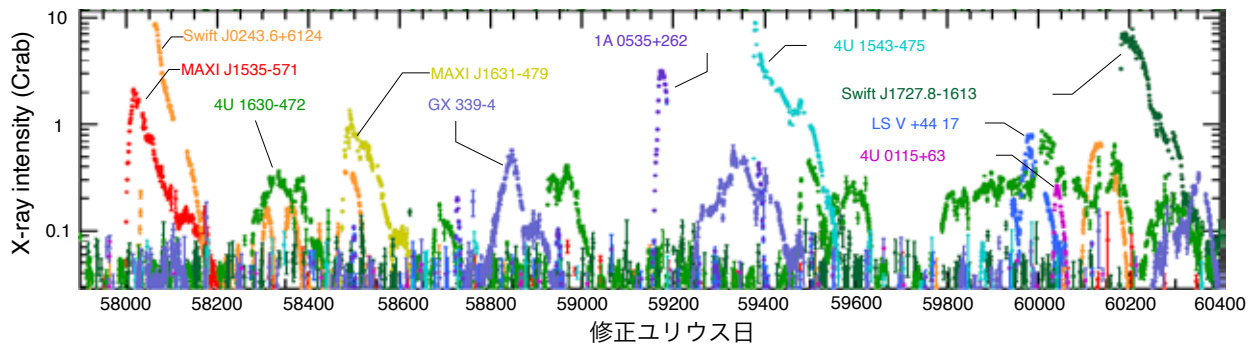


図 1: 2023 年 3 月 31 日 (修正ユリウス日 60,400) から過去 5 年半に発生した、X 線で明るい新天体の光度曲線。Crab は「かに星雲」の明るさを基準とした X 線強度の単位。NinjaSat は 0.005 Crab 程度まで観測する感度を持つ。

その倍数でサイズが決まる衛星規格である。世界初の CubeSat は、東大のグループと東工大のグループが 2003 年に打ち上げた²。この成功に触発されて、世界中の宇宙機関が超小型衛星の将来性に目を付け宇宙コンポーネントの開発を奨励したことから、特に欧米で民間企業の参入が相次ぎ、今のような宇宙空間がビジネスとして成立する世界が生まれた。日本は CubeSat の最先端にいたにも関わらず、宇宙ビジネスでは周回遅れを走っているのが現状である。

新興宇宙企業の力を借りて宇宙実験をやってみようと思いついて最初の半年は、プロジェクトの詳細検討や検出器の基礎設計に費やした。その結果、(1) 6U CubeSat (30×20×10 cm³) とすること、(2) 狙った X 線天体をポインティングして観測する能力を持たせること、(3) 単なるテスト実験ではなく、世界と戦い論文が書ける衛星にすることなど、NinjaSat の基本仕様が固まった。

衛星を作ることは我々の専門ではないので、そこにこだわることはせず、衛星本体の開発は可能な限り民間企業に委ね、科学者は搭載する観測装置の製作と科学観測に専念する方式とすることも決めた。これは実は大きな決断であった。当時日本では、CubeSat というと大学の工学系が衛星を開発し、理学系が搭載機器を製作するイメージが強かった。しかし、我々の場合は衛星が打ち上がることは成功ではなくスタート点であることを強く意識し、なるべく手間と失敗のリスクを減らす手法を取った。工学系の研究者にとっても、地球低軌道を周回する衛星そのものには大きな開発要素がなく、興味の対象になりにくいので、衛星製作の経験がある民間企業に任せるという選択は正しかったと信じている。

衛星をお願いする民間企業だが、当時はまだ日本の新興宇宙企業で我々の要求を受けてくれる会社はなく、欧米の有力企業も金額の問題から除外し、最後はリトアニア、ロシア、ブルガリアの 3 社が残った。最終的に打ち上げ実績などを考慮して、三井物産エアロスペース経由で、リトアニアのナノアビオニクス社を選定することに

なった。その後の世界情勢を考えると、ロシアの企業を選択しなくて良かったと、しみじみ思う。

4 科学目標

NinjaSat は超小型衛星なので、やりたいことを全部やる衛星にするという考えは早い段階で捨てた。衛星が小さいので搭載できる検出器も小さくなるという前提で、トランジェント (突発天体) と呼ばれる突然明るくなる X 線源、もしくは、定常的に X 線で輝く天体の X 線強度の時間変動を観測することを目標にすることとした。このような研究は時間領域天文学 (time-domain astronomy) と呼ばれ、中性子星合体による重力波観測や、超高エネルギーニュートリノの検出なども絡んで、世界的に盛んになっている。

トランジェント天体の良いところは、他の X 線衛星が同時に観測していなければ、自分たちだけのユニークなデータセットが得られること、我々の観測をトリガーとして、他の衛星が観測をどんどん膨らませてくれる可能性があることである。また、大型衛星は何百人もの研究者がプロポーザルを書いて観測時間を獲得するので、1 つの天体を観測できるのはせいぜい数日から 1 週間程度であるが、超小型衛星ではリソースの投入はメンバーの判断次第なので、めったに起きない事象を待ち受けるような長期観測も実現することができる。

宇宙は観測すればするだけ新しい事象が見つかる世界なので、時間領域天文学は超小型衛星とは非常に相性が良い。図 1 に全天 X 線監視装置 MAXI³ が観測した、2017 年 9 月から 6.5 年間の極めて明るくなった新天体の光度変化を示す。毎年数個の極めて明るい新天体 (主にブラックホールもしくは中性子星と恒星の連星系) が発見されており、暗いものも含めると数十から数百個の

² 東大の XI-IV と東工大の Cute-I である。

³ 理化学研究所が JAXA や大学と協力して、国際宇宙ステーション上で運用している観測装置。全天を掃天できるが、ある天体を観測できるのは、90 分ごとに 40 秒程度である。NinjaSat は MAXI が発見した新天体を連続的に追観測する役割も担う。

新しい天体が発生している。これらが NinjaSat の最大のターゲットである。

5 NinjaSat 衛星バス

科学衛星についてご存知ない方も多いと思うので、簡単に仕組みを説明しておく。衛星を支える基盤部分を「衛星バス」と呼ぶ。衛星バスには姿勢制御系、太陽電池パネルを含む電源系、通信系のコンポーネントが搭載されている。太陽電池もしくはバッテリーからの電力を受けて衛星全体を維持しつつ、姿勢制御系により衛星を望む方向にむけて天体観測を実施し、地上局と通信を行なってデータを地上に降ろすとともに、地上からのコマンドを受けて次の観測を行う。どの科学衛星でも大雑把には同じような機能が実装されていて、NinjaSat ではこれらの機能が全て、1L の牛乳パックわずか 6 本分の体積の筐体に詰め込まれているのである。

図 2 に NinjaSat の実物写真を示す。姿勢変更は、衛星内部に搭載されたモーメントムホイールと呼ばれる「はずみ車」の回転速度を調整することで、衛星との間で角運動量をやりとりすることで行う。よって燃料を消費することは無い。NinjaSat には 3 次元空間のどこでも自由に向けるよう XYZ の 3 台と、リダンダントな配置の 1 台を加えた 4 台が搭載されている。このサイズの衛星に 4 台のモーメントムホイールが搭載されるなど、20 年前には考えられないことであった。

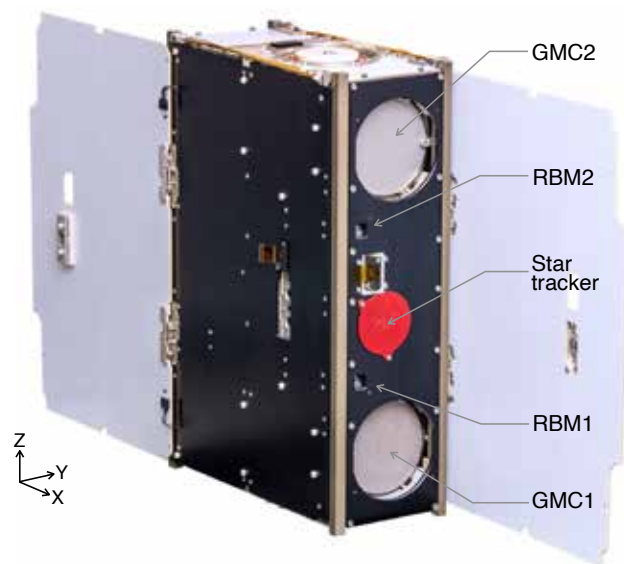


図 2: NinjaSat 衛星の写真 [4]。6U キューブサット規格に非撮像型ガス X 線検出器 (GMC) と放射線帯モニター (RBM) が 2 台ずつ搭載されている。

NinjaSat の姿勢コントロール精度は約 0.1° (95%CL) である。衛星の姿勢を知るには、加速度・角速度センサー、太陽センサーと、スタートラッカーが用いられ

る。NinjaSat のスタートラッカーは内部に星カタログを持っており、空を撮影するだけで、自分の向いている方向が 5 Hz で出力される。これらコンポーネント一つ一つが手のひらに乗るくらいに小型化されているのを見て、時代が変わったのだという印象を強く受けた。NinjaSat の諸元は表 1 の通りである。

表 1: NinjaSat 諸元

項目	数値または説明
衛星サイズ	6U (包絡域 $34 \times 24 \times 11 \text{ cm}^3$)
質量と消費電力	8.14 kg, 16.4 W (日平均)
投入軌道と高度	太陽同期極軌道, 530 km
打ち上げ日時	2023/11/11 10:49 am (PST)
天体指向精度	$< 0.1^\circ$ (95% CL)
データ量	60 MB/day 以上
主地上局	KSAT スパールバル局
搭載機器 GMC (非撮像型ガス X 線検出器)	サイズ 1U, 質量 1.2 kg 消費電力 2 W (最大) 検出帯域 2–50 keV 分解能 $\sim 20\%$ (6 keV) 有効面積 16 cm^2 (6 keV) 感度 $\sim 10^{-10} \text{ erg/cm}^2/\text{s}$ 台数 2
搭載機器 RBM (放射線帯モニター)	サイズ 0.06 U, 質量 70 g 消費電力 1 W (最大) 検出閾値 陽子 $\geq 5 \text{ MeV}$ 電子 $\geq 200 \text{ keV}$ 台数 2

6 科学ペイロードの製作

6.1 コロナ禍からのスタート

短時間の予備検討期間を経て、2020 年 4 月にいよいよ NinjaSat プロジェクトが始まったわけだが、始まった時点ですでにコロナ禍に突入しており、4 月 10 日には理化学研究所がロックダウンされてしまった。プロジェクト開始早々の大きな痛手であったが、衛星プロジェクトという特殊性を認めていただき、実験が継続できることとなった。最初の半年くらいは会議などの雑用もなく⁴、心置きなく実験室に入り浸ることができた。これだけ密に実験室に滞在して、思う存分実験ができたのは、田無にあった東大原子核研究所のプレハブ小屋で、PHENIX RICH のためのフォトマル較正システムを作った修士以来、約 30 年ぶりのことであった。

⁴zoom などの会議アプリが広がるまでの短期間であったが。

6.2 超小型ガス X 線検出器 GMC

NinjaSat の主検出器は、図 3a に示す非撮像型のガス X 線検出器 (Gas Multiplier Counter; GMC) である [3, 4]。今の宇宙 X 線観測の世界では、Si や CdTe などの半導体検出器が主流だが、有効面積を大きくするにはお金がかかったり、動作させるのに冷却が必要であったり、消費電力が高かったりするものが難点である。ガス検出器であれば、ガスセルのサイズを調整することで有効面積を大きくできるし、冷却は不要である。CubeSat は熱入出力に対してパッシブに運用されることが多いので、地球を周回する間に 15°C くらい温度がゆらぐが、ガス検出器はガスが封じ切られているので、多少の温度変化があっても観測には全く影響がない。⁵

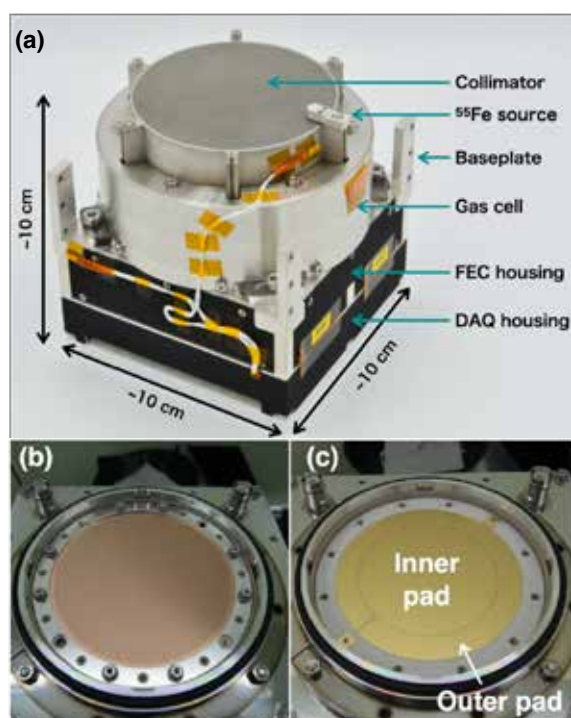


図 3: NinjaSat に搭載されたガス検出器 GMC。(a) 全体写真, (b) GEM, (c) 読み出し電極。

GMC の X 線検出原理は極めてシンプルである。天体からの X 線は GMC 上部に設置されたコリメータを通り、Be 窓を透過してガスセルに侵入する。ガスセル中で X 線の光電吸収により放出された光電子が作る電子雲を、電場をかけることで下向きにドリフトさせ、ガス電子増幅フォイル (Gas Electron Multiplier; GEM, 図 3b) で電子増幅させたのちに、最下層の電極 (図 3c) から電荷信号として読み出す。GEM は我々が 2003 年から開発を続けている、レーザー加工により製作した宇宙用のものである [5]。有効面積を稼ぐため、ガスセルは

⁵ガス検出器のガス増幅度は原子数密度のみに依存する。ガス封じきりであれば、温度が上がっても圧力も比例して上がるので、原子数密度は変化しない。

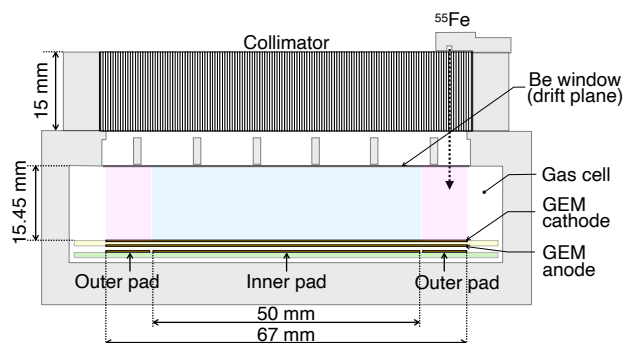


図 4: GMC の断面図。コリメータを通った X 線は、Be 窓を透過したのちに、ガスセルで光電吸収される。発生した電子雲を下方方向にドリフトし、GEM で 500 倍程度に増幅したのちに、電極から信号を取り出す。



図 5: 最終組み上げ中のデジタルボード (DAQ) と高電圧・アナログボード (FEC)。

なるべく大きくしたいが、質量を軽くするために肉薄のアルミ構造になっている。それで強度を持たせるには、円筒形にするしかないが、その形状だとガス検出器としてワイヤーを張るのは不可能である。GEM であれば円形状のものを自由に作れるので、今回はそれを採用することとした。

封入するガスは当初、原子番号が大きく光電吸収断面積を稼ぐことができる Xe と CO₂ クエンチャーの混合ガスを予定していたが、想定通りのガス増幅度が得られなかった。GMC の開発責任者である修士課程学生の武田朋志君 (現広島大) が様々なガスの混合を試験し、光電吸収断面積をなるべく維持したまま十分なガス増幅度が得られる Xe/Ar/DME (75%/24%/1%) という優れた組み合わせを見つけてくれた。これはガスのペニング効果をうまく利用して、ガス増幅度を向上させたものであった。これにより、2–50 keV の X 線に感度を持ったまま、6 keV で 16 cm² の有効面積を持つ検出器⁶が完成した。GMC の開発全般をまとめた武田君の修士論文は、第 12 回測定器開発優秀修士論文賞を受賞した。

図 4 に正確なスケールの GMC 断面図を載せる。あのところ、このサイズのガス検出器を作るのは、当初考

⁶CubeSat に搭載された X 線検出器としては、この帯域で過去最大である。

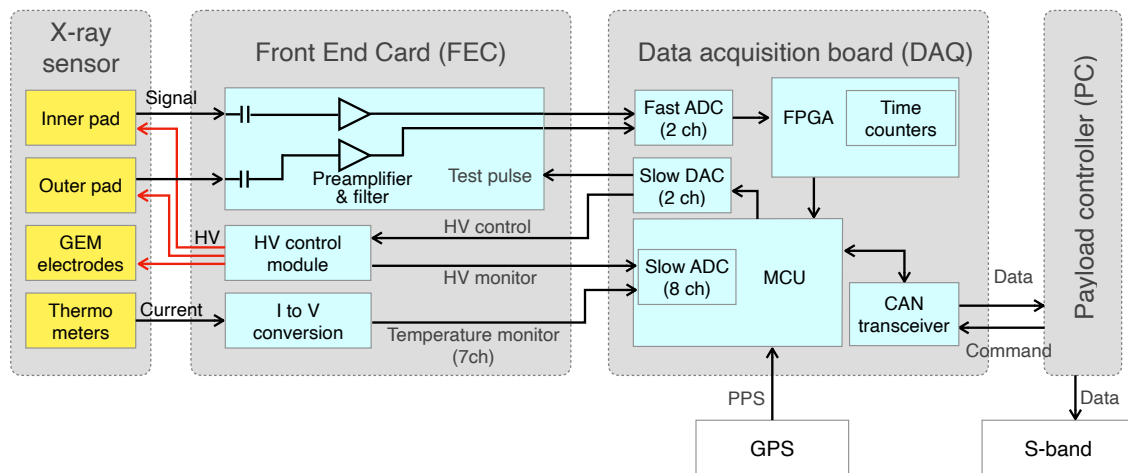


図 6: GMC の機能ブロックダイアグラム。

えていたほど甘くはなかった。まず、ガスチェンバーなのに、ボルトやガスケットを入れるスペースが無い。結局、電子溶接を多用してガスセルを製作することになった。これにより GEM と電極の封入作業は一発勝負となった。また、高電圧を導入するのに市販のフィードスルーを使うスペースが無かったので、自前で PEEK と純銅の棒を組み合わせフィードスルーを作り、低アウトガスのエポキシ系接着剤で固めることで乗り切った。解決した問題点を全て列挙すると、ページ数を優にオーバーしてしまうくらい、想定外の開発要素が多かった。

上空に行くと、荷電粒子が GMC の主なバックグラウンドになるが、これは信号の立ち上がり時間の違いで区別する。X 線はガス中の 1 点で吸収されるので、400 ns 以下の速い立ち上がりを示す。一方で荷電粒子は 1.5 cm あるガスセルを突き抜けながら電子雲を作るので、電子のドリフト時間相当の 1 μ s 程度のゆっくりとした立ち上がりとなる。さらに、読み出し電極は inner と outer の 2 つに別れており、横からくる荷電粒子は、2 つの電極のアンチコインシデンスにより落とすことができる。

他の天体からの X 線混入を防ぐため、コリメータの視野は 2° 程度に絞る必要がある。細長い穴が開いた金属コリメータが理想だが、スペースから許容される高さ (1.5 cm) を考えると、穴直径はせいぜい 600 μ m である。このような微細な長穴を金属に正確に開ける技術は存在しないので、50 μ m 厚のステンレス板に 600 μ m 幅の六角穴を蜂の巣状にエッチングして、それを 300 枚重ねて拡散接合する方法を取ることにした。

図 5 に示すように、電子基板はアナログ系とデジタル系の 2 枚に分かれており、それぞれの機能は図 6 のダイアグラムに示す通りである。高電圧 (1800 V) の抵抗チェーンがプリアンプの真横を走っているため、放電クリアランスやノイズ対策には細心の注意を払った。高電圧ケーブルは基板に半田付けしているが、そのままでは打ち上げ振動で首が折れるので、テフロン糸でボードに

固定した上で、エポキシ系接着剤で固着している。

回路部品は全て民生品だが、過去に宇宙実績があるものを利用し、それがないものは主に車載品 (AEC 規格) から選定した。全てのパーツについては、自分たちでも放射線試験を実施し、劣化具合やラッチアップによる破損が起きないかなどを丁寧に確認した。

6.3 放射線帯モニター RBM

地球近傍にはバンアレン帯と呼ばれる、荷電粒子 (陽子と電子) が磁場に巻きついた領域が存在し、衛星は頻繁にその中を通過する。GMC は荷電粒子にも感度を持つので、不要な放電を避けるため、その区間では高電圧を落とす。放射線帯は太陽活動により微妙に変化するので、GMC が運用されていない場合でも、常に軌道上の放射線環境をモニターする装置が必要である。そのような粒子線をカウントする装置として、図 7 に示すような、500 μ m 厚の Si-PIN フォトダイオードを用いた Radiation Belt Monitor (RBM) を設置している。RBM は太陽活動により突発的に放射線帯が拡大した場合でも安全に GMC を運用するため、カウントレートが閾値を超えた場合は GMC をシャットダウンする機能を持つ。

7 リトアニア点描

衛星バスを製作したナノアビオニクス社がある、リトアニアという国をご存知だろうか。旧ソビエト連邦構成国の一つで、エストニア、ラトビアと続くバルト三国の一番南に位置する国である。私も当初は名前くらいしか知らず、NinjaSat がなければ、たぶん行くことがなかった国の一つであろう。

図 8 に示す通り、地政学的な環境は非常に悪い。バルト三国から同盟国側に陸続きに移動するには、リトアニア

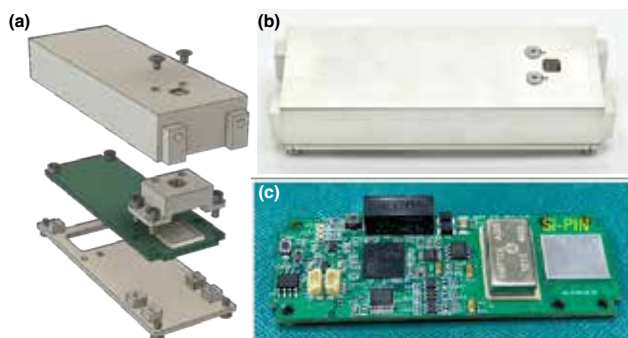


図 7: (左) RBM 展開図, (右上) RBM の写真, (右下) RBM ボード。右端に Si-PIN が実装されており、遮光用のアルミ箔が貼られている。

アとポーランドの国境にあるスバウキ回廊と呼ばれる幅 100 km ほどのボトルネックに頼らざるを得ない。特に 2022 年 2 月 24 日のロシアによるウクライナ侵攻で、周りの国際環境が一変してしまった。旧ソ連に占領されていたという経緯もあり、ロシアに対する国民感情は極めて悪く、リトアニア国旗が立っている場所には、必ずと言っていいほどウクライナの国旗が並んで立てられている。小さな国なので、IT や宇宙技術などで世界をリードして国のプレゼンスを確立しようという気概が強い。

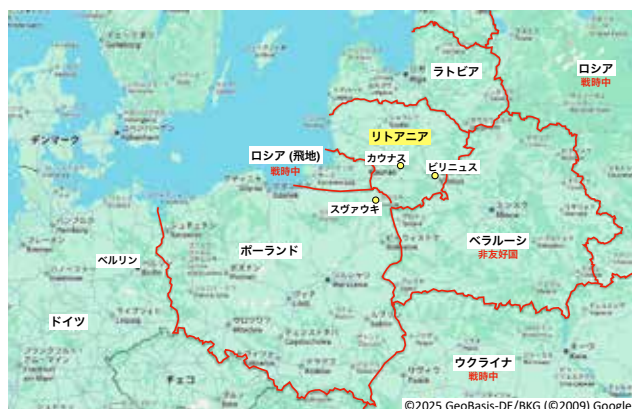


図 8: リトアニアと周辺国。非友好国ベラルーシと戦時中のロシアの飛地カリーニングラードに囲まれている。

リトアニアをご存知の方は、第二次世界大戦で多くのユダヤ人を救った「命のビザ」で知られる杉原千畝の印象が強いかもしれない。ナノアビオニクス社はリトアニアの首都ビリニュスにあり、杉原千畝が勤めていた領事館は、そこから西に 100 キロほど離れたカウナスという街にある。ビリニュスの旧市街 (図 9) は世界遺産に登録されており、ヨーロッパの他の国と同様に非常に街並みが美しい。ビリニュス駅には、モスクワからロシアの飛地であるカリーニングラードに向かう定期列車が発着する専用のホームがあるが、ここには目を背けたくなるようなウクライナ戦争の写真が掲げられている。

ビリニュス中心部は歩いて回れるほど小さいが、雪が



図 9: 上から順に、首都ビリニュス旧市街、主な移動手段 (トロリーバスと電動キックボード)、カウナスにある杉原千畝記念館。

溶けて春になると、街中に一斉にレンタル電動キックボードが出てくる。禁止地域以外であれば、どこに乗り捨てても良いので、洗濯物を積んでコインランドリーまでとか、少し移動するのにたいへん重宝した。ただし日本と同様で、「事故が多いから気をつけてね」とナノアビオニクス社の人に念を押された。中距離の移動はバスが便利だが、大半がトロリーバスで、一部のマニアには垂涎の公共交通機関かもしれない。蜂蜜酒とリネンと琥珀が、良いお土産である。

8 試験と打ち上げそして行方不明

8.1 衛星の組み立て

GMC と RBM は、2022 年 1-7 月に振動試験、熱真空試験、地上校正試験を実施した上で、2022 年 8 月によりやリトアニアに向けて送り出すことができた。2022 年末から衛星の組み立て準備が始まり、2023 年 3 月には衛星が完成した。GMC や RBM を含めた各コンポーネントの試験は、電氣的に衛星を模擬する「衛星シミュレーター」に接続して行うが、それが終わるといよいよ衛星の組み立てが始まる。大きな衛星の製作過程に慣れ

ていたせいもあるが、モニターに映し出された指示書を見ながら、エンジニアがプラモデルを組み立てるような手際でパーツを組み合わせ、ものの1週間くらいで衛星が形になったのを見てびっくりした。

衛星完成以降に行われた宇宙環境試験も、自分の経験とは全く違うスタイルで、かなり面食らうものであった。普通は目の前に検出器や衛星があって、それを自分の目で見ながら、恐る恐る試験を行うことになる。しかし NinjaSat の振動試験はベルリンで、熱真空試験はポーランドのグリヴィツェで実施した。衛星にはエンジニアが一人だけついて行って、あとは全員リモートで試験に参加した。最初は衛星についていく気満々だったのだが、「これまで十分に試験をしてきたんだろう？ここでリモートでやってうまく行かないものは、宇宙に行ってもうまく行くはずがない」と言われ妙に納得した。新興企業の効率化とリスクの取り方を学んだ。



図 10: 放出機構にインストールされる NinjaSat。

8.2 打ち上げ当日

打ち上げ手段について、当初は国際宇宙ステーション(高度約 400 km)からの放出を考えていたが、2023 年は 11 年周期の太陽活動極大期に当たっており、大気膨張の影響により高度低下が激しく、軌道寿命が希望よりもかなり短い 6ヶ月程度になる可能性が高かった。そこで急遽ロケットを変更して、図 11 に示す SpaceX の Falcon 9 ロケットによる Transporter-9 ライドシェアミッション⁷を選択することになった。

打ち上げは、米国カリフォルニア州のヴァンデンバーグ宇宙軍基地から 11 月 11 日に決まったが、当日は申し分のない快晴であった。我々はロケットの顧客として、射場から川を隔てた対岸に設けられた観覧所にいた。打ち上げは 1 秒の遅れもなく、非常にスムーズに行われた。SpaceX Falcon 9 ロケットの最大の見どころは、打ち上

げよりも、地上に帰還するロケット 1 段目の着陸である。上空を見上げていたら、ほぼ自由落下で落ちてきて、そのスピードに驚いたが、そこからの減速と着地は驚くほど滑らかであった。打ち上げの瞬間は固唾を飲んでおとなしかった見学者も、1 段目の着陸に対して拍手が起きたのは印象的だった。2 段目は順調に飛行を続け、100 機の衛星が一つ一つ放出されるたびに、スポーツ観戦しながら、チームごとに歓声が上がった。NinjaSat は 2 番目に無事放出され、ホテルに帰るバスの中では晴れ晴れした気分だった。



図 11: (左上) Transporter-9 に搭載されたライドシェア衛星群、(右上) 打ち上げ、(下) ロケット 2 段目からみた地球。左下に帰還する 1 段目が写っている (© SpaceX)。

8.3 まさかのニンジャ行方不明

衛星を打ち上げてから安定に運用ができるまでの期間を、「クリティカルフェーズ」と呼ぶ。この期間はナノアビオニクス社の受け持ちだったので、我々は何もできず彼らからのレポートを待つだけであった。低軌道の衛星は約 90 分で地球を一周するが、大型衛星では打ち上げ 1 周目に通信が確立できなければ間違いなくミッション失敗である。しかし NinjaSat は 1 周目も 2 周目も衛星捕捉ができなかった。NinjaSat プロジェクトをやっている大抵の困難はうまくさばいてきたつもりだったが、この時だけはさすがに最悪の事態が頭をよぎった。

翌朝、日本へ帰るサンタバーバラ空港で、2 日目に入っても衛星が捕捉できないという報告を受けた。その時は、チームに現状報告と元付けのメールを送るのが精一杯だった。ナノアビオニクス社の NinjaSat プロジェクトマネージャー Danas は、普段からノリの軽い 30 代半ば

⁷ 放出予定高度は 550±25 km

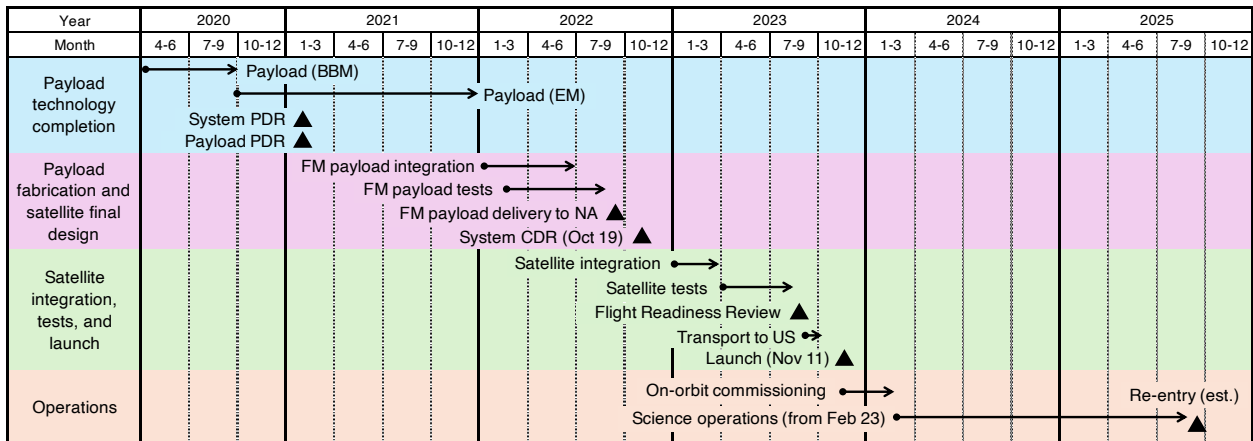


図 12: NinjaSat タイムライン。プロジェクト開始から 3 年半で打ち上げた。図中の略語は、BBM: 試作モデル, EM: 適合性確認モデル, FM: フライトモデル, PDR: 基本設計審査, CDR: 詳細設計審査, NA: ナノアビオニクス。

の若者だったが、この時ばかりは彼の「太陽電池パネルが開いていれば、コンタクトできなくても 1ヶ月は大丈夫だよ」という超楽観主義に救われた。結局のところ、ロケット側からもらった衛星の軌道情報が間違っていたらしく、試行錯誤することで 11 月 14 日ようやく衛星を探し当てた。名誉のために書いておくと、ナノアビオニクス社の衛星との通信確立成功率は 100% である。

9 衛星の運用と科学成果

9.1 コミッショニング

衛星が捕捉できてからは、順調に衛星バスのコミッショニングが進んだ。途中クリスマスで作業が滞りやきもしたが、当初の契約通りに終わり、2024 年 1 月 22 日に正式に引渡しを受けた。その後、GMC と RBM のコミッショニングも計画通りに進み、最大のイベントである GMC 高電圧の印加⁸も無事に終わった。2 月 9 日にはキャリブレーション天体である「かに星雲」を観測した。この天体は 1054 年に起きた超新星爆発の名残で、中心に 1 秒間に約 30 回転する中性子星パルサーが存在している。シンクロトロン放射により明るく輝いており、多くの衛星がキャリブレーションに使っているので、クロスチェックしやすい天体である。NinjaSat の観測データに対して、地球の公転運動などを補正したのち周期性を求め、その周期でデータを畳み込むと、図 13 に示すような特徴的な 2 つのピーク形状が得られた。GPS を使い光子一つ一つに 61 μ s の時間分解能で時刻付けしているので、観測できて当たり前なのだが、最初にこの性能を確認したときは、こんな小さな衛星で、本当に大き

な衛星と同じことができるんだと感動した。この観測成功により、NinjaSat はミニマムサクセス⁹を達成した。

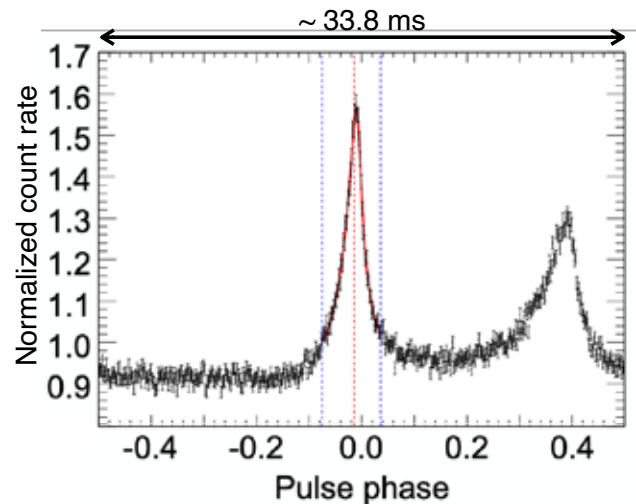


図 13: NinjaSat で取得した、かにパルサーのパルス光度曲線。データをパルサーの回転周期 (約 33.8 ms) で畳み込んだもので、特徴的な 2 つのピークが見られる。

9.2 ビギナーズラック

1ヶ月にわたる検出器の軌道上検証が終わりに近づき、2024 年 2 月 23 日から科学観測を開始することになった。当初は明るいブラックホール連星である「はくちょう座 X-1」をファーストライト天体¹⁰として観測する予定であったが、直前の 2 月 21 日に Spectrum-Roentgen-Gamma (SRG) 衛星により新しい X 線天体

⁸衛星などからアウトガスが出ていると、高電圧部はパッシェンの法則に従って、一瞬で致命的な放電を起こす。高圧電源の立ち上げは、衛星にとって常に鬼門である。

⁹衛星プロジェクトはリスクが高いので、事前にミニマム、フル、エクストラ 3 つの成功基準を設定する。NinjaSat のミニマムは、天体指向で X 線観測能力を実証すること、フルは観測成果で原著論文を 2 本以上出版することとした。既にフルサクセスも達成済みで、プロジェクトは「成功」である。

¹⁰望遠鏡の最初の観測をファーストライトと呼ぶ。我々は最初の科学観測をファーストライトと呼んでいる。

SRGA J144459.2-604207 (SRGA J1444) が発見されたという報告 [6] を受けた。チームで議論して急遽観測プランを変更し、この新天体の観測に全てを賭けることとした。

観測開始後にわかったことだが、この天体は我々が最重要ターゲットの一つと考えていた「クロックバースター」という種族の中性子星であった。クロックバースターは等時間間隔で X 線バースト¹¹を引き起こす奇妙な天体で、約 120 個知られている X 線バースト天体のうち、クロック状態を示すのは SRGA J1444 を含めて 6 天体のみである。系がシンプルなので、理論との比較がしやすい。図 14 に示すように、他の衛星をはるかに凌駕する 25 日間に渡り観測を続け、X 線放射が暗くなるにつれ X 線バーストの発生間隔が延びていくことを観測から示した。その相関から理論モデルの助けを借り、中性子星の質量が太陽質量の 2 倍よりも重いという示唆を与えた。この観測成果は武田君が論文として出版し [7]、彼の学位論文の一部となった。狙っていた天体が、奇跡的にファーストライトで観測できたことにより、ビギナーズラックというのは本当にあるんだと感心した。

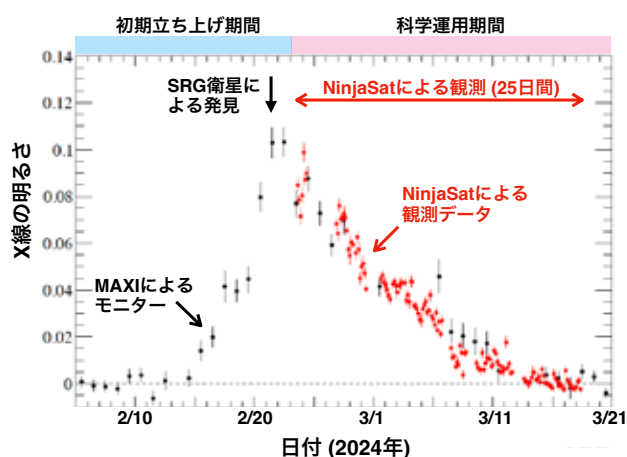


図 14: SRGA J1444 の観測。25 日間の観測の間、天体が徐々に暗くなっていることがわかる。

9.3 衛星運用と科学成果

衛星運用は加速器実験のシフトと同じで、データを収集している実感があるので楽しくもあり、トラブル対応の最先端なので苦しくもある。NinjaSat では、地上局を経由して衛星と通信する作業はナノアビオニクス社に任せ、研究者は検出器の運用と観測天体に注力する役割分担としている。衛星からダウンリンクされたデータは、Amazon Web Service クラウド上に置かれ、理研に設置したサーバーで自動的にデータを取り込んで、パイプライン処理する流れになっている。シフトメンバーは

検出器の運用コマンドと観測する天体リストの作成、ダウンリンクされたデータから衛星と検出器の健全性を確認した上で、科学観測結果の簡易解析することが仕事である。ルーチン作業は自動化を進めることで、つらさを軽減している。

2025 年 7 月末までに、NinjaSat は 31 天体を観測した。MAXI が発見した中性子星連星 MAXI J1752-457 の観測 [8] により、当初の目的だった MAXI が発見した天体の追観測も実現し、また地上の電波望遠鏡や可視赤外望遠鏡との連携観測なども実現した。大型の天文台衛星がある天体を観測している際に、NinjaSat で同じ天体を観測するいわゆる「押しかけ同時観測」や、NinjaSat が「ちょい見」して面白そうな天体を、大型衛星が追観測するなどで成果が上がっており、CubeSat の小回りの良さを実感している。現在、これらの観測データを論文化する作業が進んでいる。

9.4 バイプロダクト

NinjaSat は X 線天文観測のために設計した CubeSat だが、観測データを活用して天文学以外の分野でも成果が出始めている。図 15 に示すのは、RBM が取得した軌道上の荷電粒子強度マップである。NinjaSat は地球を南北に回る極軌道を飛んでいることもあり、数日ごとにこのような全球マップが得られる。太陽活動と荷電粒子強度の相関は、地球物理として面白いテーマである。また、ミリ秒の周期をもつ X 線パルサーを灯台として用いることで、GPS の届かない深宇宙でナビゲーションを行うことができる。我々のデモンストレーションでは、超小型 X 線検出器でも 50-100 km の精度が出ることを確認している。ここでバイプロダクトの全てを紹介することは難しいが、どんどん新しい世界に切り込んでいけるのは、超小型衛星ならではのことであろう。衛星が動いてデータが始めると、チーム内外からどんどん新しいアイデアが提案され、話がとんとん拍子に進んでいくのは興味深かった。

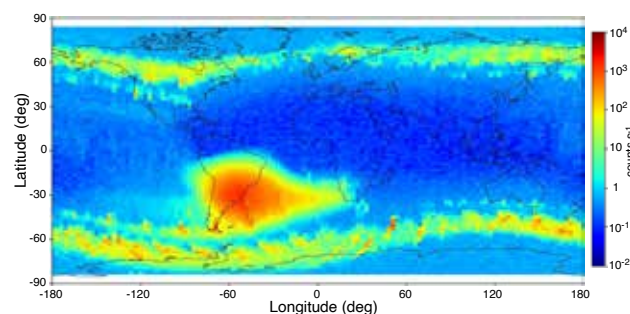


図 15: RBM で取得した、高度 530 km 付近の荷電粒子分布。

¹¹中性子星表面の核融合バースト

10 まとめと今後の見通し

NinjaSat は希薄な大気との摩擦により徐々に高度を落としており、当初の想定通り、2025 年 9 月に大気圏に再突入して消滅する。軌道上にいたのは 2 年弱であったが、我々は CubeSat を用いて科学観測を実現するという目的を達成した。時間領域天文学に天体指向型の CubeSat を導入したのは、我々が世界初であり、小さなプロジェクトながら、新しい道を切り拓くことができたと思う。どの実験でも同じであろうが、一つ一つのトラブルを解決して先に進むのは、非常に面白かった。

CubeSat は大型衛星のような一品モノの世界と違い、数や回数で勝負する。3 年に一度くらいのペースで衛星が上がると、分野が盛り上がるだろう。我々も NinjaSat に未知の天体を発見する掃天機能を付与した、NinjaSat2 を計画している。将来的には異なる軌道に CubeSat を複数機打ち上げてコンステレーションとし、間断なく宇宙を観測することも考えている。衛星運用も完全な自動化が必要になるし、天体観測についても、優先順位をつけて観測天体を指定してやれば自動的に最適な観測プランが実行されるような世界が生まれるだろう。観測データだけでなく衛星の観測時間も、世界中の研究者が自由に使えるようになるのが理想である。

11 謝辞を兼ねて

宇宙実験プロジェクトはどんなに技術が進んでも、リスクが高い事業であることは間違いありません。我々は民間技術を活用して宇宙で実験をすることを目指し、NinjaSat プロジェクトを計画・実施し、幸運にも成功をおさめることができました。コアメンバーの榎戸輝揚さん (京都大)、岩切渉さん (千葉大)、北口貴雄さん (理研)、ならびに MAXI PI の三原建弘さん (理研)、協力してくださった多くのスタッフと学生の皆さん (図 16) に感謝いたします。一人一人の活躍は紹介できませんでしたが、良いチームに恵まれたことが成功につながったのは間違いありません。本当にありがとうございました。

私は 2000 年 9 月に原子核実験で学位を取得した後、宇宙実験分野に移って四半世紀になりますが、自分が高エネルギーニュースに記事を書くことになるとは思ってもみませんでした。執筆の機会を与えてくださった編集部の皆様、ありがとうございました。自分の経験が少しでも素核実験分野にプラスに働くのであれば、望外の喜びです。おもしろアイデアをお持ちで、宇宙を使った実験を考えておられる方がいましたら、相談に乗ります。

本研究を実施するにあたり、マイクロパターンガス検出器界隈の皆様には、普段の会話や毎年の研究会で、多くの示唆や励ましをいただきました。心より感謝いたし



図 16: NinjaSat チームメンバーの一部。若手研究者と学生が中心のチームである。

ます。2024 年 5 月に亡くなられた神戸大学の越智敦彦さんには、私も学生も、本当にお世話になりました。ご冥福をお祈りいたします。

参考文献

- [1] R. Giacconi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **9**, 439 (1962).
- [2] XRISM Collaboration, Publ. Astron. Soc. Japan **76**, 1186 (2025).
- [3] T. Takeda *et al.*, J. Instrum. **18**, C06020 (2023).
- [4] T. Tamagawa *et al.*, Publ. Astron. Soc. Japan **77**, 466 (2025).
- [5] T. Tamagawa *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **608**, 390 (2009).
- [6] I. A. Mereminskiy *et al.*, ATel #16464 (2024).
- [7] T. Takeda *et al.*, Publ. Astron. Soc. Japan **77**, L24 (2025).
- [8] A. Aoyama *et al.*, Astrophys. J. Lett. **986**, L29 (2025).