

<p>著者</p>	<p>ふりがな 氏名</p>	<p>たけだ ともし 武田 朋志</p>
<p>表題</p>	<p>超小型 X 線衛星 NinjaSat に搭載するガス X 線検出器の開発と性能評価</p>	

論文概要

1. 研究の背景

ブラックホールや中性子星などの、コンパクトで重力が強い天体を含む連星系では、伴星から物質が降着することに伴い、図1に示すように降着円盤やジェットなどが形成され、X線、可視光、電波など、広い波長帯域の電磁波が放射される。これらの放射はミリ秒以下から数ヶ月のタイムスケールで激しく変動することが多く、一般に、質量降着の不安定さや、降着流ジオメトリの急激な変化、あるいは磁気エネルギーの開放

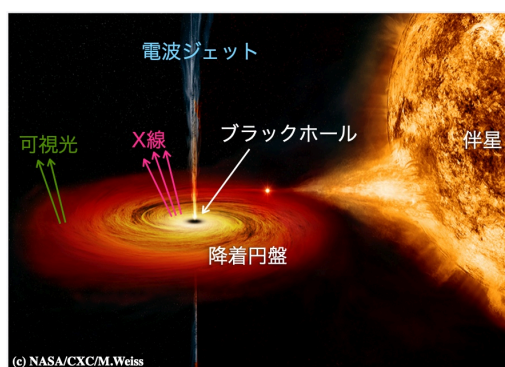


図 1: X 線連星からの電磁波放射の想像図。

などが原因と考えられている。しかし、その包括的な理解に必要不可欠な、電波からX線線までの多波長同時観測については、いくつかの例があるものの、十分には行われていないのが現状である。

数日より短いX線光度変動については、大型衛星により精力的に調べられている。しかし、現代の大型衛星は公募により観測天体を決め、数日から1週間程度の短時間に区切って多くの天体を観測するため、1つの天体を1週間以上占有観測することは現実的ではない。そこで、私の所属する理化学研究所を中心とするチームでは、図2 (a)に示す専用の超小型X線天文衛星NinjaSat (6Uサイズ:10×20×30 cm<sup>3</sup>) を打ち上げ、地上の可視光や電波望遠鏡と連携し、大型衛星には実現不可能な、数週間から数ヶ月に渡る長期的な多波長占有観測を実現することとした。NinjaSat は図2 (b)に示す 2-50 keV に感度を持つXeガス封入型X線検出器 (Gas Multiplier Counter; GMC)と、放射線帯モニターを2台ずつ搭載し、2023年に打ち上げ予定である。

NinjaSatの主検出器であるGMCは、予備3台を含むフライトモデル (衛星搭載候補品) 5台を製作し、その中から最終的に2台を選定する。私はGMCを構成するコンポーネン

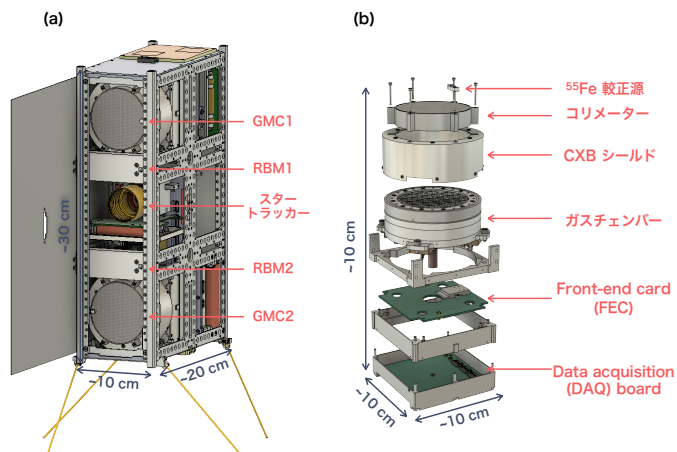


図 2:(a)NinjatSat 衛星全体の 3D モデル。(b)ガス X 線検出器 GMC の 3D モデル分解図。

ト(図2b)のうち、X線センサー部であるガスチェンバーの開発責任者として、その設計から製作、性能評価までを主導的に行った。本修士論文は、GMCフライトモデル5台の製作判断のために、ガスチェンバー並びにGMCのフライトモデル試作機1台を開発し、その性能評価を行うことを目的とする。

## 2. ガスチェンバーの開発

ガスチェンバーは、玉川研究室で開発した宇宙実績のあるガス電子増幅フォイル(Gas Electron Multiplier; GEM) を搭載する謂わば比例計数管である。図3はその断面図を示し、Be窓を透過して入射したX線は、チェンバー内のガスで光電吸収された後、ドリフト電場によりGEMまで移動し、増幅される。増幅された電子はインダクション電場により読み出し電極まで誘導され、電荷信号として読み出される。ガスチェンバーは超小型衛星特有のサイズおよび質量への厳しい要求( $10 \times 10 \times 4 \text{ cm}^3$ 以下,  $500 \text{ g}$ 以下)を満たす必要があり、さらにガスを封じ切った状態で2年以上ガスの純度を保つことも求められる。それゆえ全ての部分が新規開発となった。主な開発・試験項目としては、(1) 溶接と接着を多用したアルミチェンバーの設計・製作、(2) Be窓の透過率測定、(3) 封入ガスの最適化、(4) ドリフト電場・インダクション電場の最適化、(5) GEMの選定、(6) GEMの放電・導通耐性の評価、(7) ガスリークとガス純度の長期安定性の評価の7つが挙げられる。概要ではこれらのうち、検出器の要求性能を満たす上で特に重要であった(3), (4), (7)についてのみ得られた結果を示す。

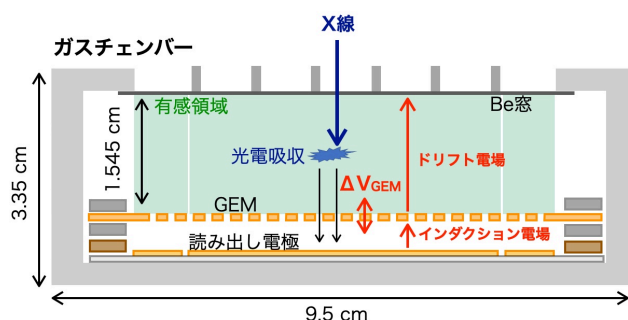


図3: ガスチェンバーの断面

ガスチェンバーは超小型衛星特有のサイズおよび質量への厳しい要求( $10 \times 10 \times 4 \text{ cm}^3$ 以下,  $500 \text{ g}$ 以下)を満たす必要があり、さらにガスを封じ切った状態で2年以上ガスの純度を保つことも求められる。それゆえ全ての部分が新規開発となった。主な開発・試験項目としては、(1) 溶接と接着を多用したアルミチェンバーの設計・製作、(2) Be窓の透過率測定、(3) 封入ガスの最適化、(4) ドリフト電場・インダクション電場の最適化、(5) GEMの選定、(6) GEMの放電・導通耐性の評価、(7) ガスリークとガス純度の長期安定性の評価の7つが挙げられる。概要ではこれらのうち、検出器の要求性能を満たす上で特に重要であった(3), (4), (7)についてのみ得られた結果を示す。

### 封入ガスの最適化

GMCはブラックホール近傍の高温ガスを観測するために、 $2\text{--}50 \text{ keV}$ という広い観測帯域を要求性能として設定している。光電吸収を利用するガス検出器では、その反応断面積が原子番号の4-5乗に比例することから、 $10 \text{ keV}$ 以上の高エネルギーX線に感度を持たせるためには、一般に原子番号の大きなXeが用いられる。しかしGEMの場合、ワイヤーチェンバーではよく使用される $\text{XeCO}_2$ ,  $\text{XeCH}_4$ などの混合ガスでは、高い電子増幅度(ゲイン)が得られないことが先行研究から知られており、 $10 \text{ keV}$ 以下のX線信号が電気ノイズに埋もれてしまうという問題が生じた。電子回路のノイズを考慮すると、 $2 \text{ keV}$ のX線の観測には最低でも200以上のゲインが必要になる。

そこで本研究では、合計9種類のXeメインの混合ガスについてゲインを実測し、最終的に、高いゲインが達成可能なArとジメチルエーテル(DME)の混合ガスを、Xeに加えて混合比の微調整を行うことでこの問題を解決した。図4はGEMの印加電圧( $\Delta V_{\text{GEM}}$ )に対するゲインの依存性を表し、選定した

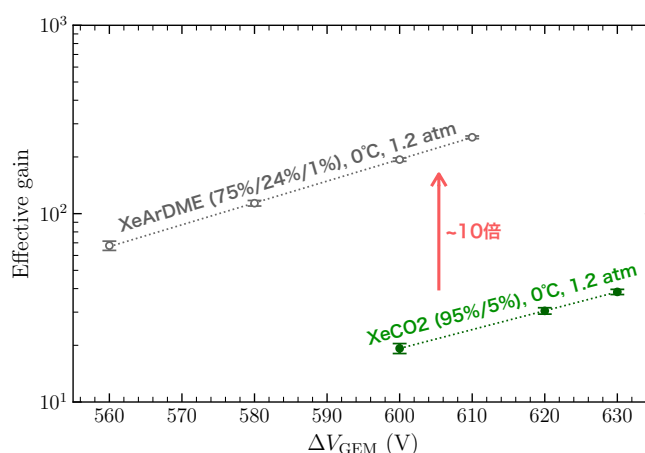


図4: 選定したXeArDME(75%/24%/1%)混合ガス中におけるGEMの電子増幅度の印加電圧依存性。

XeArDME(75%/24%/1%) はゲイン 200 以上を満たし、当初予定していた XeCO<sub>2</sub> (95%/5%)と比較しておよそ 10 倍のゲイン改善を達成した。これにより GMC における 2–50 keV の観測帯域の実現に目処を立てることができた。また、XeArDME 混合ガス中での GEM の動作は世界初の試みで、高エネルギー X 線に感度を持ちつつ高いゲインを達成できるという点で、GMC に限らず重要な成果である。

### ドリフト・インダクション電場の最適化

ドリフト電場とインダクション電場の強度は発生した電子の収集効率を決める重要なパラメータである。ドリフト電場がある値より小さいと、有感領域で発生した電子-イオン対は再結合し、信号として読み出すことができない。また、電子は周りのガスと衝突しながら GEM まで移動するため、電子のドリフト速度が遅いと、電気陰性度の高い酸素などによって電子が吸着される可能性が高まる。一方、インダクション電場が小さいと、増幅された電子の大半が GEM のアノード電極に引き寄せられるため、電荷の収集効率が低下する。そこで、5.9 keV の X 線を照射しながらこれら 2 つの電場をそれぞれ独立に変化させ、収集電荷量とエネルギー分解能を測定し、その結果をもとに電場強度を調整した。図 5, 6 にそれぞれ結果を示す。2 つの電場の調整により、封入ガスの最適化試験における設定と比較して、実効的なゲイン( $\propto$ 電荷収集量)をさらに 2 倍に改善させることに成功した。

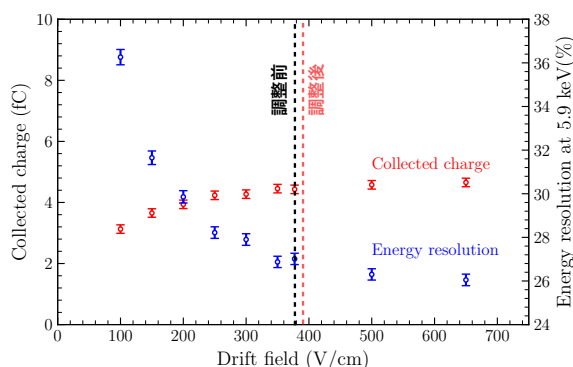


図 5: 収集電荷量とエネルギー分解能のドリフト電場依存性。

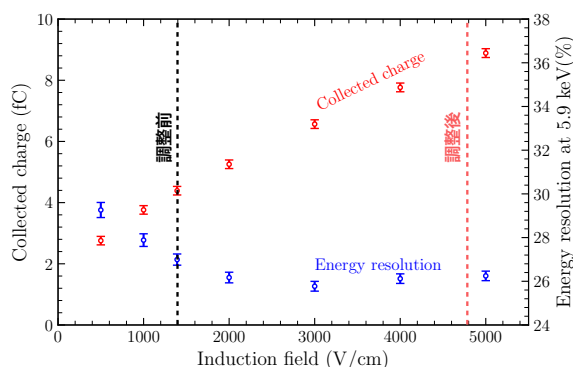


図 6: 収集電荷量とエネルギー分解能のインダクション電場依存性。

### ガスリークとガス純度の長期安定性の評価

チェンバーにガスを封入後、チェンバーの長期安定性の評価として、ガスリークとガス純度の劣化がないかどうか確認した。ガスの圧力はゲインに、ガスの純度はエネルギー分解能にそれぞれ敏感に反映されるため、およそ 5.5 ヶ月の間、5.9 keV X 線を定期的に照射して、図 7 に示すように両者をモニターした。ゲインについてはガス封入後、数ヶ月のタイムスケールで徐々に増加したが、その後安定し、ガスの封じ切り後に統計的に優位なゲインの増減は見られなかった。また、エネルギー分解能についても、およそ 5.5 ヶ月の間悪化していないことがわかる。その後も定期的にモニターを続け、ガス封入からおよそ 9 か月が経過した現時点でも変化は見られていない。以上の結果から、ガスリークと純度の長期安定性は、2 年におよぶ検出器の運用

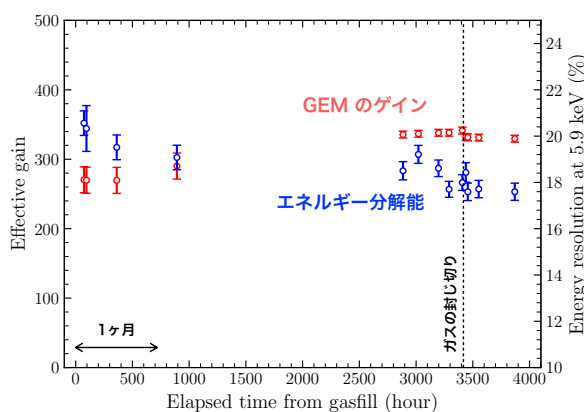


図 7: ガス封入後のゲインとエネルギー分解能の推移。

は見られていない。以上の結果から、ガスリークと純度の長期安定性は、2 年におよぶ検出器の運用

に十分耐えうると結論し、ガスチェンバーの開発が完了した。

### 3. GMC の性能評価

ガスチェンバーの開発完了後、図 8 に示すように他のコンポーネントとともに GMC を組み立てた。GMC 全体は 10 cm 立方に収まり、質量は 1.137 kg (そのうちチェンバーは 473 g) で、1.2 kg 以下という要求仕様を満たすことが確認できた。

図 9 に GMC フライトモデル試作機で取得した 5.9 keV X 線の ADC スペクトルを示す。図中には、5.9 keV のスペクトルから見積もった 1, 2 keV に相当するラインも示しており、観測帯域下限である 2 keV の X 線が電気ノイズに埋もれることなく取得可能なことが確認できた。この結果には、ガスの最適化およびチェンバー内の電場強度の最適化により、ゲインが合計およそ 20 倍改善したことが本質的な役割を果たしている。

### 4. まとめと結論

本修士論文では、超小型衛星 NinjaSat に搭載するガス X 線検出器 GMC の X 線センサー部であるガスチェンバーのフライトモデル試作機 1 台を、設計を含めて一から開発した。特に、小型のガスチェンバーで 2-50 keV という広い観測帯域を実現するために、封入ガスの最適化およびチェンバー内の電場強度の最適化を行い、およそ 20 倍の S/N 比の改善を実現した。また、およそ 9 か月におよぶガスリークとガス純度の長期安定性も確認し、2 年を想定している検出器の運用期間に十分耐えうると結論付けた。最終的には、他のコンポーネントと GMC として組み立て、フライトモデル試作機が要求性能を満たすことが確認できた。本研究の成果を受け、衛星搭載モデル 5 台の製作が決定し、当初の目的を達成した。

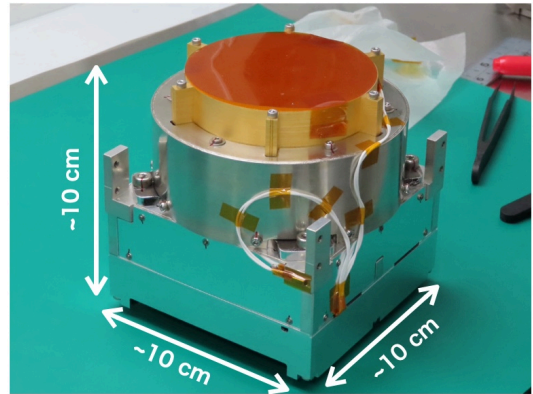


図 8: GMC フライトモデル試作機の全体写真。

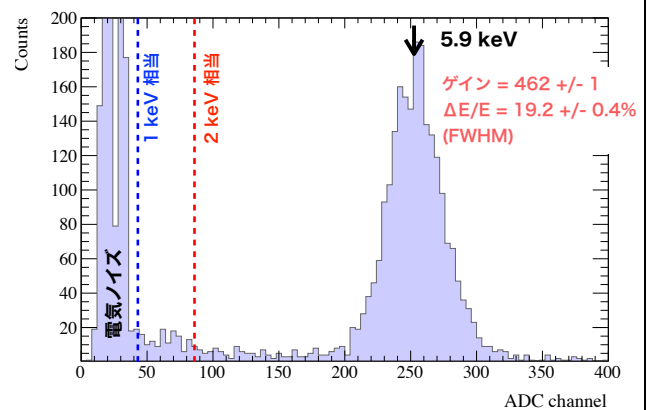


図 9: 5.9 keV X 線の ADC スペクトル。

### アピールポイント

GMC の開発は、私が学部 4 年生の頃にスタートし、私はガスチェンバーの設計段階からプロジェクトに参加した。その後、修士課程からガスチェンバーの開発責任者に任命され、本格的に開発を進めた。チェンバーの設計、製作、組み立て、性能評価まで全ての部分を主導的に行い、短期間で、最終的にフライトモデルの製作まで到達できたことは重要であると考えます。また、混合ガスの最適化では、世界で初めてとなる、XeArDME 混合ガス中で GEM を動作させ、高エネルギー X 線に感度を持ちつつ高いゲインを達成したことにより、GMC の 2-50 keV の観測帯域の実現に本質的な役割を果たした。本研究では、開発の一部ではなく、衛星搭載検出器の設計から性能評価まで、一貫して私に主導させていただいたことで、装置の隅々まで把握できたという点に大きな意味があると考えます。今後、衛星を打ち上げた後も、科学成果を出す際に、「検出器を全て知っている」ということは大きなアドバンテージになると考えています。