

著者	ふりがな氏名	くりはら みき 栗原 明稀
表題	XRISM 衛星搭載極低温検出器における電磁干渉の影響評価と低減	

論文概要 (全体で4ページに収まるようにページを増やして構いません)

◎研究背景・設計

極低温検出器は一般に、サブケルビン下で動作する熱検出器の総称であり、高い感度を実現する。測定対象の粒子が物質となんらかの相互作用をすれば、そのエネルギーは最終的に熱に変換されることから、技術の応用先は広い。しかし、検出器ノイズのマネジメントの観点では、あらゆる形態のエネルギー入力に対して応答してしまうことから、低く安定した雑音環境をつくるのが必須である。

主要な雑音源の一つに検出器外からの電磁干渉がある。電磁干渉とは、「電子機器が電磁的な相互作用を通じて他の機器に悪影響を及ぼす現象」である。実際、2000年前後以降の天文観測衛星には、多くの極低温検出器が搭載されてきたが、電磁干渉による検出器の性能劣化が多数報告されている。しかし、電磁干渉設計についての方法論は、標準化が進んでいる衛星熱設計・構造設計分野と比べ、未だ遅れている現状がある。

極低温検出器 と 電磁干渉 (S.1)

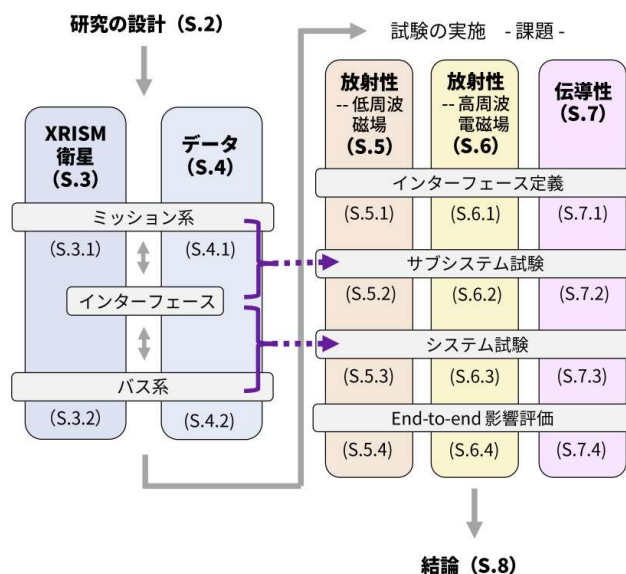


図1. 本修論の構成

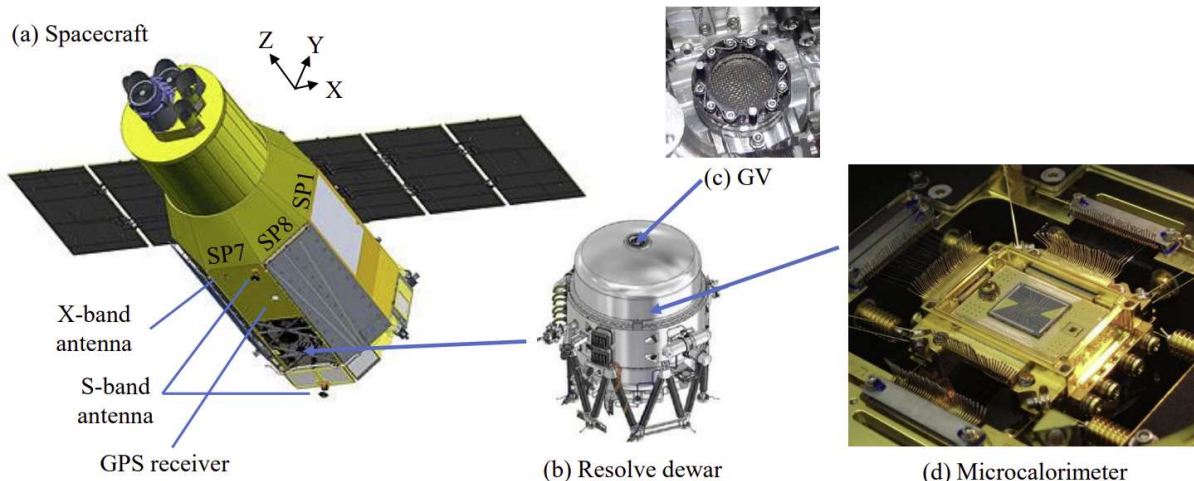


図2. XRISM 衛星、真空槽、ゲートバルブ (GV)、Resolve 検出器 (Kurihara + 2022)

2023 年打ち上げ予定の X 線撮像分光衛星 XRISM には、X 線マイクロカロリメトリに基づく極低温分光装置 Resolve が搭載される(図 2)。50 mK 下で動作し、その設計は短命に終わってしまった X 線天文衛星 ASTRO-H (2016 年打ち上げ) に搭載された軟 X 線分光装置 SXS を踏襲している。この SXS においても、衛星機器から検出器への電磁干渉が見られたが、その結合メカニズムの理解は確立せず、また一部は打ち上げ後の軌道上での評価に委ねられていた。これらの課題は SXS の後継機である Resolve 装置に引き継がれた。

本修論では以下の 2 点を達成できた。論文概要では、前者の具体的な成果を抜粋してまとめる。

- ・XRISM 衛星の機器から極低温検出器への電磁干渉について、影響評価と対策を行った
- ・XRISM 衛星を実例とし、極低温検出器搭載衛星における電磁干渉設計の方法論確立に寄与した

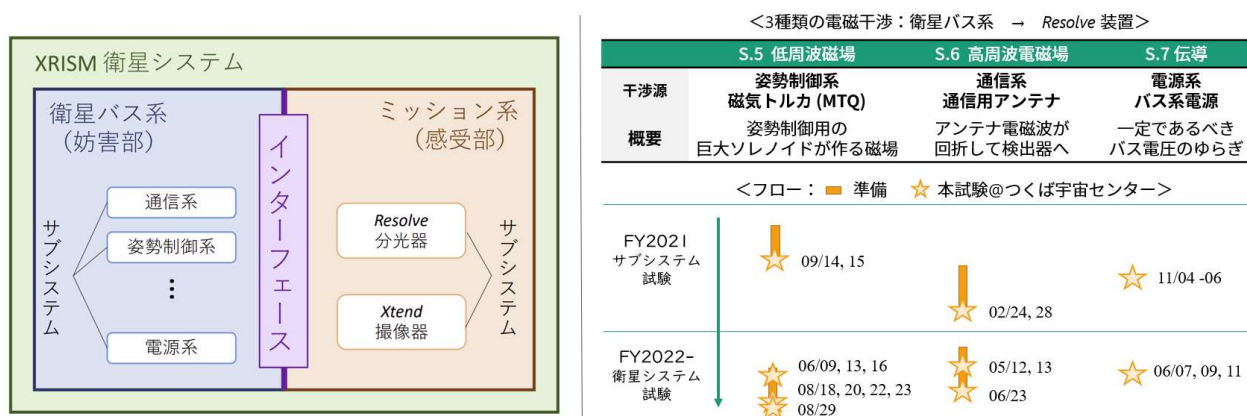


図 3. (左)XRISM 衛星システムと衛星サブシステム (右)本修論で取り組んだ 3 種類の電磁干渉

◎XRISM Resolve に対する 3 種類の電磁干渉

図 3 右上の表に示される 3 種類の電磁干渉について評価した。それぞれの課題に対して、衛星の基本機能を担うバス部と装置ミッション部の間の電磁的インターフェースを定義した上で、サブシステム (Resolve 装置) レベル、システム (衛星バス部 + Resolve 装置) レベルの試験を実施し、電磁シミュレーションと組み合わせて end-to-end の定量的評価を行った。これにより、衛星電磁干渉による Resolve 検出器の観測性能劣化のリスクを打ち上げ前に十分低減することができた。

各課題で得た具体的な成果の一部を以下にまとめる。

(S.5) 姿勢制御系由来の低周波磁場干渉：干渉源は磁気トルカ (MTQ) という巨大ソレノイドである。衛星姿勢アクチュエータの 1 つで、127 Hz のパルス幅変調駆動方式をとる。SXS ではこの 127 Hz 及びその高調波が検出器の線ノイズとして顕著に現れ、分光性能を劣化させていたものの、そのメカニズムは理解されていなかった (Eckart+2016)。そこで、MTQ が作る磁場がミッション系と結合するという仮定のもと調査した。サブシステム試験では、ASTRO-H 衛星 MTQ の予備品を条件を変えて駆動し検出器の応答を調べたところ、SXS と同じく、127 Hz およびその高調波に線ノイズが観測された (図 4 左)。更に、MTQ と検出器の距離を変更することで、磁場寄与成分が大半であることがわかった。磁場シミュレーションの結果もこれを支持する (図 4 右)。システム試験では MTQ3 軸すべてのノイズ寄与について SXS と定性的に整合する結果が得られた。得られた結果を元に、結合メカニズムを推定した。更に、軌道上での運用を想定した試験を行って、観測性能の劣化は

SXS と同程度以下であることがわかった。また、MTQ 駆動条件に応じた観測性能劣化をシミュレートするモデルも作成し、軌道上での変化にも対応できるように準備した。

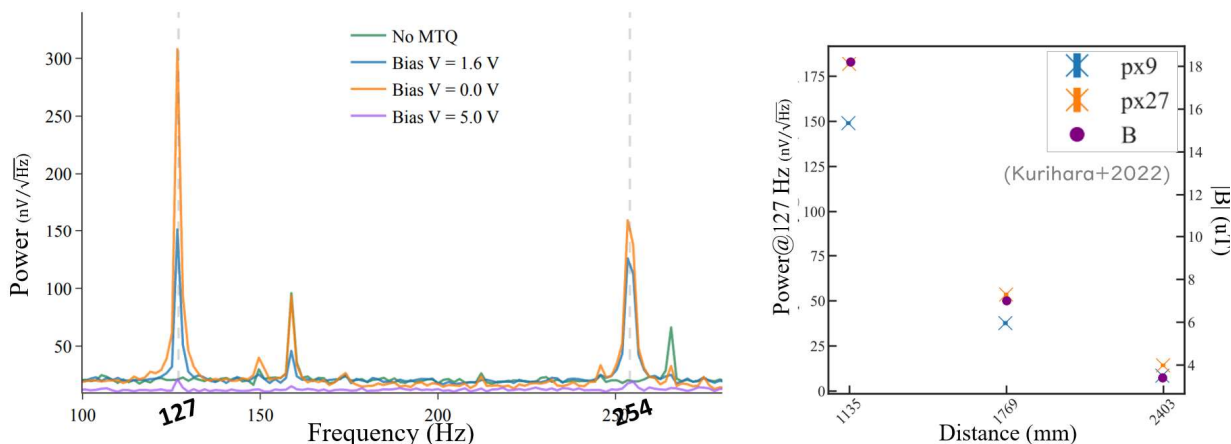


図 4. (左) 検出器で取得されたノイズスペクトル。緑の MTQ off 時にはなかった線ノイズが青、橙、紫の MTQ on 時に生じている。(右) MTQ on 時の線ノイズ強度@127 Hz(x:色はピクセル)、シミュレーションで求めた磁場強度 (紫 o) の距離依存性。似た依存性を示した。

(S.6) 通信系由来の高周波電磁場干渉: Resolve の極低温検出器が格納されている真空槽 (dewar: 図 2(b)) の上部にはゲートバルブという金属蓋がある (図 2(c))。地上では真空を保つために閉じているが、軌道上で本格観測が始まると開かれ、Faraday ケージが破れる。このときに衛星通信系の用いる高周波電波が検出器に与える影響を評価した。これは本格運用開始前に事故で失われた SXS で未評価の課題である。ゲートバルブ上にインターフェース点をおいて、通信系アンテナからの検出器までの想定干渉経路を 2 つに分け、前半(i)を電磁界シミュレーション、後半(ii)を試験で評価した。シミュレーションでは、スーパーコンピュータ富岳と衛星詳細 CAD モデルを用いて、Maxwell 方程式の数値計算をし、軌道上運用でインターフェース点に作られる電場強度の最悪ケースを見積もった (図 5 左)。試験では、その見積もり値より十分強い電波をインターフェースから真空槽内部へ入射した。検出器で有意な応答はみられなかった (図 5 右) ことから、通信系由来の高周波電磁場干渉による観測性能の劣化は無視してよいと結論付けた。

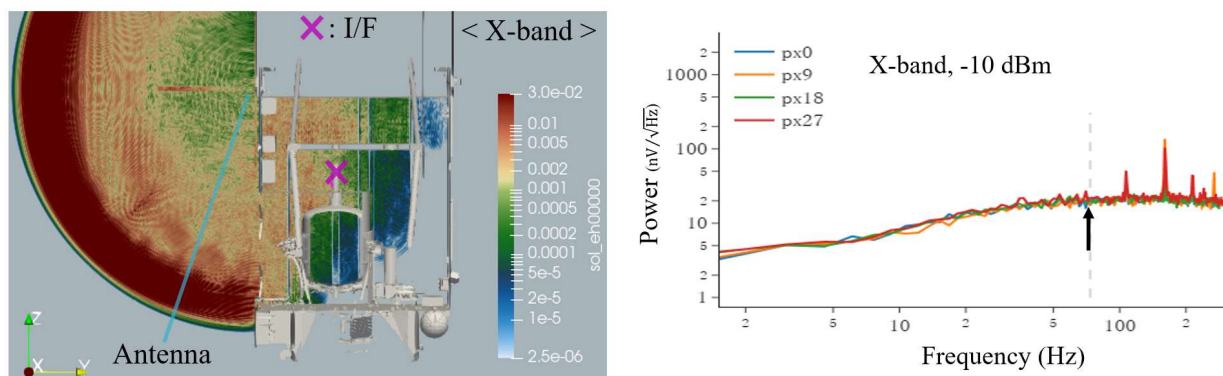


図 5. (左) 富岳を用いた電磁シミュレーション。アンテナ信号がインターフェース I/F につくる電場強度を計算した。(右) I/F から 73.5 Hz 変調信号入射時の検出器ノイズスペクトル。

(S.7) 電源系由来の伝導性干渉：

XRISM 衛星には様々な電力消費機器があり、それらが1つのバス電源を共有する。従って、各機器から発生する電磁雑音がバス給電を通して Resolve 装置へと侵入する。この伝導性干渉を評価した。まず、衛星と装置間のある点での要求雑音レベルを設定した。サブシステム試験では、要求よりも強い正弦波ゆらぎを持つバス電圧を人工的に注入することで、検出器の応答を測定した(図6)。また、システム試験では、様々な衛星運用条件で、バス機器が要求雑音レベルを満たしていることを確認し、検出器出力も測定した。これら end-to-end 評価により、定常運用の範囲内で伝導性干渉による観測性能の変化はほぼ見られないことを示した。

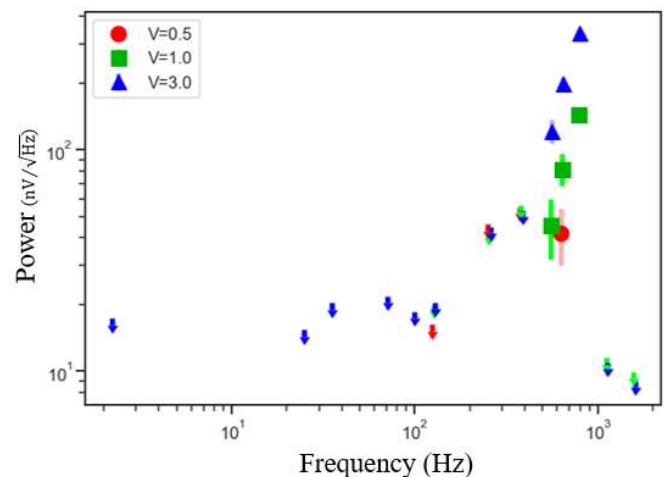


図6. 線ノイズ強度。横軸はバス電圧にのせた正弦波ゆらぎの周波数。色は正弦波振幅(値は peak-to-peak)。線ノイズ未検出点は 3σ 上限である。

アピールポイント

(本論文において特に自身が力を入れた部分や独自のアイデアがあれば記載してください。全体で4ページ以内に収まる範囲でページを増やして構いません。)

本修論で取り組んだ「バス系から Resolve への電磁干渉」は XRISM プロジェクトの3大技術リスクの一つである。2段階の地上試験と電磁シミュレーションを用いた評価を筆者が主導した。

地上試験では、大学院生ながらサブシステム試験をリードする立場で参加したのは自分を含めて2人のみである。JAXA や NEC 社などの職員、NASA (米国) や SRON (オランダ) といった海外からの研究者・技術者と意思疎通をとりながら、自らが手を動かしてフライト品の評価を行った経験は、自分の今後のキャリアの観点でも貴重に違いない。筆者のような一大学院生が Resolve チームからの信頼を得ることができたのは、指導教員の尽力に加え、筆者の試験準備(修論 Appx.B,C)に対する貢献が認められたからこそだと考えている。つくばで行う本試験は、宇宙科学研究所で行った事前測定をもとに設計した。低周波磁場干渉での自作ソレノイド、ケーブル、高周波電磁場干渉での S/X バンドアンテナ(パッチ、ダイポール)、チャンバは自分で設計から製作・評価までを行った。その際には宇宙科学研究所に所属している地の利を最大限生かし、各々の分野の専門家に教を乞うたり、測定機材を拝借したりした。筆者は修士以前にハードウェア開発の経験が乏しく、入学当時ははんだづけさえもままならなかったが、根気強く取り組むことで試験機材を納品することができた。

電磁シミュレーションでは、スーパーコンピュータ富岳を用いることで衛星の詳細なモデルを解けたことが本研究のハイライトの一つである。指導教官を通して富士通社提供の産学連携キャンペーンを利用したことから、無料使用できる期間が1か月に限られていた。富岳に慣れることにも時間がかかり、期限ぎりぎりまで計算を行って定量評価につなげた。この成果は富士通社のプレスリリースとして公開された(<https://pr.fujitsu.com/jp/news/2022/07/21.html>)。

これらに代表される Resolve への貢献を評価され、Outstanding Contribution Award (学生個人枠)として、プロジェクトから表彰を受けている。