

はじめに

本修士論文では、JAXA 宇宙科学研究所との共同研究として、国際宇宙ステーション (ISS) に搭載された全天 X 線監視装置 MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image) に関する 2 つの研究テーマに取り組んだ。そのため、本論文は第 1 部と第 2 部の 2 部構成になっている。

宇宙ミッションの成功は、衛星の開発から打ち上げまでだけでは達成されない。軌道上での観測を開始した後も、観測装置の精度を確保し、得られたデータを最大限に活用することが非常に重要である。本論文では、MAXI 観測システムの精度向上と、得られた観測データの効果的な活用という 2 つの観点から、MAXI データが持つ科学的価値を向上させることを目的としている。

第 1 部では、MAXI 観測装置の姿勢精度に関する研究を行った。ISS 外部に搭載された観測機器は、ISS という巨大な宇宙機の熱変形や振動の影響を受ける可能性があり、これが観測精度に直結する。MAXI と ISS システムの姿勢情報の相対差を詳細に解析することで、観測精度の系統的な揺らぎを定量化し、MAXI の基本性能を向上させるための知見を得た。

第 2 部では、MAXI 観測データを有効活用するための自動処理システムの開発を行った。MAXI 衛星は毎日約 15 回全天をスキャンし、膨大な X 線観測データを地上に送信している。これらの観測データを研究者に迅速に提供するため、データ到着から Web 公開までを完全に自動化するリアルタイムライトカーブ自動生成システム (MRLC システム) を開発した。

本修士論文全体を通じて、MAXI 観測装置の精度確保 (第 1 部) から、得られた観測データの効率的な処理と公開 (第 2 部) に至るまで、統合的な視点で MAXI システムの高度化に取り組んだ。本研究で実施した 2 つの研究テーマは一見異なる領域のように見えるが、いずれも MAXI からの科学的インパクトを高めるための取り組みである。本研究により、MAXI の科学的価値の最大化に貢献することが期待される。

This master's thesis addresses two research themes related to MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image), an all-sky X-ray monitoring instrument mounted on the International Space Station (ISS), conducted as a collaborative study with JAXA's Institute of Space and Astronautical Science.

Space mission success depends not only on satellite development and launch, but equally on maintaining observation accuracy and maximizing data utilization during orbital operations. This thesis enhances MAXI's scientific value by improving observation system accuracy (Part 1) and enabling effective data utilization (Part 2).

Part 1 investigates the attitude accuracy of the MAXI instrument. By analyzing attitude information differences between MAXI and the ISS system, we quantified systematic fluctuations in observation accuracy and derived insights for improving fundamental performance.

Part 2 develops an automated data processing system for MAXI observations. The MRLC (MAXI Real-time automated Light Curve generation) system completely automates the process from data arrival to web publication, enabling rapid provision of light curve data to researchers.

Although addressing different aspects of MAXI operations, both research themes work synergistically to maximize the scientific value of MAXI observations. This integrated approach is expected to enhance the scientific impact of the MAXI mission.

第1部

「きぼう」船外実験プラットフォーム搭載 MAXI が ISS の構造的歪みから受ける 影響について

概要

本研究では、国際宇宙ステーション (ISS) に搭載された全天 X 線監視装置 (MAXI) が提供する姿勢情報と、ISS システム側が提供する姿勢情報との間に生じる相対的な姿勢差に着目し、その時間変動の特性を詳細に解析した。ISS は全長 100m 級の巨大宇宙機であり、MAXI のような「きぼう」船外実験プラットフォームに搭載された観測機器は、設置位置による微小な歪みや揺れの影響を受ける可能性が考えられる。しかし、これらの影響がどの程度のかの大きさ・時間スケールで生じるのかは、これまで十分に定量化されてこなかった。

そこで本研究では、2010 年から 2017 年までのデータを対象として、MAXI と ISS システムの両者から得られる姿勢情報を比較し、その周期や振幅を解析することで、相対的な姿勢差変動を定量化した。さらに、太陽位置・月地距離・ISS 運用状況との比較を通じて、周期変動に影響を与えている外的要因を検証した。

解析の結果、姿勢差には主として 2 つの特徴的スケールが存在することが明らかとなった。第一に、ISS の公転周期 (約 92 分) と一致する短周期の変動が認められた。これは ISS の軌道運動と同期した構造的・熱的挙動、あるいは姿勢決定精度の周期的揺らぎが関与している可能性を示す。第二に、60 日程度の時間スケールで変動する長周期成分が検出され、これは ISS における太陽の照射条件の変化を表すパラメータ (太陽ベータ角) と高い相関を示した。また、これらの変動の振幅はおよそ 0.1° ~ 0.3° 程度であることが明らかになった。

以上の結果から、本研究はまず、ISS システムと MAXI の相対的な姿勢差を定量的に特徴づけることに成功したといえる。これにより、MAXI の姿勢決定における系統的な揺らぎを補正するための情報が得られ、観測データの精度向上に寄与する。また、ISS 外部に設置された観測装置は同様の構造的影響を受ける可能性が高いため、本研究で得られた周期的変動の知見は他の搭載機器の姿勢評価に対しても指針となることが期待される。さらに、長周期成分が太陽ベータ角と高い相関を示したことにより、ISS 構体が太陽光照射による加熱・冷却を周期的に受けることで微小な熱変形を繰り返し、その結果として姿勢差が生じている可能性が示唆された。これらの成果は、ISS の構造理解や、今後の宇宙機における姿勢制御の最適化に向けた検討にも寄与することが期待される。

This study investigates the temporal variation of the relative attitude between the Monitor of All-sky X-ray Image (MAXI), mounted on the Kibo Exposed Facility of the International Space Station (ISS), and the attitude provided by the ISS system. Because the ISS is a large and flexible structure, externally mounted instruments such as MAXI can experience slight distortions or motions that lead to pointing differences, yet the magnitude and timescales of these effects have not been well quantified.

Using data obtained from 2010 to 2017, we derived the attitude difference between MAXI and the ISS and analyzed its periodicity and amplitude. By comparing these variations with external factors—including the solar geometry, the Earth–Moon distance, and operational conditions of the ISS—we examined the physical origins of the detected modulations.

Two dominant timescales were identified: a short-term variation synchronized with the ISS's orbital period (92-min), and a long-term variation on 60-day scales that strongly correlates with the solar beta angle. Their amplitudes were found to be on the order of 0.1° – 0.3° . These results provide a quantitative characterization of the relative attitude drift between MAXI and the ISS, offering information that can improve MAXI's attitude determination and, more broadly, the calibration of other external ISS instruments. The correlation with the solar beta angle further suggests that periodic thermal deformation of the ISS structure, driven by solar heating and cooling, contributes to the long-term variation. This finding is expected to aid future studies of ISS structural behavior and contribute to improved attitude control strategies for spaceborne instruments.

第II部

全天×線監視装置 MAXI 観測データを用いた ライトカーブのリアルタイム更新システムの 開発

概要

本研究は、MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image) から得られる X 線観測データから、リアルタイムでライトカーブを自動生成する (MAXI Real-time automated Light Curve generation: MRLC) システムのプロトタイプを開発したものである。MAXI はブラックホールや中性子星などの高エネルギー天体の時間変動を監視している。従来の MAXI データ解析システムでは、オンデマンド解析は研究者が手動で操作をする必要があり、公開ライトカーブサイトでは 6 時間ごとの定期更新に限定されるという課題があった。本研究で開発した MRLC システムは、全天に散らばる X 線天体のライトカーブをリアルタイムで更新し、世界に向けて公開することを目的とする。

本研究では、統一解析ツール mxpipeline を基盤として、データ到着から Web 公開までの全過程を自動化するシステムを構築した。MRLC システムでは、まず補助ファイルの到着監視により新規データを検知し、次に解析期間を決定して Good Time Interval (GTI) ファイルを生成する。その後、反同時計数の値から装置の稼働期間を判定し、有効面積計算により各時刻で実際に観測された天体を特定する。観測された天体に対してのみ mxpipeline を実行することで計算負荷を最小化し、ライトカーブの統合と重複排除を行った後、最終更新時刻を記録して次の監視サイクルに進む。さらに、効率的なデータ管理のため、mxpipeline から出力される FITS 形式データを Parquet 形式に自動変換する。Parquet 形式の採用により、FITS 形式と比較して高い圧縮率を達成した。Web 公開は、Grafana によるインタラクティブなダッシュボード表示を行った。ユーザが天体一覧から対象天体を選択すると、3 層のライトカーブパネルが動的に更新される。上段は 2-6 keV、中段は 6-20 keV、下段はスペクトル比をプロットし、全パネルは統一された時間軸を共有する。

本システムにより、MAXI 観測データの利用がより拡大し、X 線天体の突発現象の速報性が大幅に向上することが期待される。さらに、研究者が即座に最新のライトカーブデータを参照できるようになることで、MAXI の科学的成果の最大化に貢献する。

This study presents the development of the MRLC (MAXI Real-time automated Light Curve generation) system, a real-time automated light curve generation system using X-ray observation data from MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image). MAXI monitors time variability of high-energy celestial objects including black holes and neutron stars. Conventional MAXI analysis systems require manual operation for on-demand analysis and limit public light curve updates to 6-hour intervals. This study overcomes these limitations by implementing a completely automated system using mxpipeline as the unified analysis tool.

The MRLC system monitors auxiliary file arrivals to detect new data, determines analysis periods through GTI files, judges observation availability from Veto-Carbon values, and identifies target objects via effective area calculations. By executing mxpipeline only for observed objects, computational load is minimized. FITS-format data is automatically converted to Parquet format, achieving high compression. An interactive Grafana dashboard enables users to select target objects and view three-layer light curve panels (2-6 keV, 6-20 keV, and spectral ratio) sharing a unified time axis.

This system is expected to significantly expand MAXI data utilization and improve the promptness of reporting X-ray transient phenomena. By providing researchers immediate access to the latest light curve data, this study contributes to maximizing the scientific achievements of the MAXI mission.