

X線天文衛星で用いる真空蓋の透過率曲線の詳細測定 Transmission curve measurement of the vacuum window for the X-ray astronomy satellite

御堂岡拓哉^{1,2*}, 辻本匡弘¹, 北本俊二³

¹宇宙航空研究開発機構(JAXA) 宇宙科学研究所(ISAS)

〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1

²東京大学, 〒113-8654 東京都文京区本郷 7-3-1

³立教大学, 〒171-8501 東京都豊島区西池袋 3-3-4-1

Takuya MIDOOKA^{1,2*}, Masahiro TSUJIMOTO¹, Shunji KITAMOTO³

¹Institute of Space and Astronautical Science (ISAS)/ Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA),

3-1-1 Yoshinodai, Chuo, Sagamihara, Kanagawa, 252-5210, Japan

²The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo, Tokyo, 113-8654, Japan

³Rikkyo University, 3-3-4-1 Nishiikebukuro, Toyoshima, Tokyo, 171-8501, Japan

1 はじめに

2016年に打ち上げられたX線天文衛星「ひとみ」に搭載された軟X線分光装置(Soft X-ray Spectrometer; SXS)は、デュワー容器内で50 mKの極低温に制御されたX線マイクロカロリメータ検出器を動作させることにより、2-12 keVの広帯域で、高エネルギー分解能($E/\Delta E \sim 1200 @ 6 \text{ keV}$)を達成した[1]。デュワー容器のX線入射部には、地上での真空保持と打ち上げ後初期の衛星内アウトガスの影響を避けるため、約3 cm径の真空蓋(=ゲートバルブ)が設置された。ゲートバルブは厚さ約270 μm のBe窓が溶接され(図1)、ステンレスメッシュでBe窓表面を保護している。



図1：真空蓋に用いられるBe窓。安全のため、ホルダーに装着されている

「ひとみ」衛星は姿勢制御の不具合により1ヶ月ほどで運用を断念したため、全ての観測がゲートバルブを通して行われた。打ち上げ前にはゲートバルブの透過率測定は行われなかったため、運用終了後にフライトスペア品のBe窓の透過率測定を行い、較正データベースファイルが作成された[2, 3]。この際、ステンレスメッシュの測定はなされていない上

に、Be窓の透過率モデルにも物理的に原因の特定できない不連続な構造が存在した。そのため、SXSで得られた「かに」星雲のスペクトルには、特に2.0-4.0 keV帯域において、ゲートバルブ由来の系統誤差が顕著に含まれており、広帯域高エネルギー分解能スペクトルを用いた天体物理学の解釈に大きな不定性が残った[4]。

2022年打ち上げ予定のX線撮像分光衛星XRISMに搭載される分光装置ResolveはSXSとほぼ同じ設計であり、高分解能X線分光で新たなサイエンスを切り拓くことが期待されている。XRISM衛星打ち上げ後3ヶ月ほど行われる初期観測のデータは全てゲートバルブを通して得られるため、これらのデータから科学成果を得るにはそのX線透過率を精密に測定しておく必要がある。科学目的から導かれる較正精度要求は、2.5-12 keV帯域で、(1)連続成分の透過率誤差<1%、(2)吸収端など構造部の誤差<5%、(3)透過率の空間非一様性<3%である[5]。これらを測定できるのはシンクロトロン放射光施設しかなく、我々はSXSフライトスペア品に続いて今回もPFを利用した。

2 実験

BL-7Cでは試料と検出器を大気下に置き、4.0-12.0 keV帯での透過率のエネルギー依存性測定を行なった。BL-11Bでは持ち込んだ真空チャンバ内に試料と検出器を置き、二結晶分光器にSi(111)結晶を用いた2.1-5.0 keV帯での透過率のエネルギー依存性測定及びInSb(111)結晶を用いた1.8-3.5 keV帯での測定を行なった。また、Si結晶を用いて2.7 keV, 3.0 keV, 3.456 keV, 4.0 keVの単色X線を試料全面にスキャンさせた位置依存性測定も行なった。試料は、X-Yステージの上に設置され、真空槽外からの操作により、

ビーム位置の調整とビームから外す操作が可能である。

3 結果および考察

BL7C, BL11B のそれぞれにおける透過率測定結果と暫定的に 250 μm 厚の Be による光電吸収を仮定したモデルとの比を図 2 に示す。

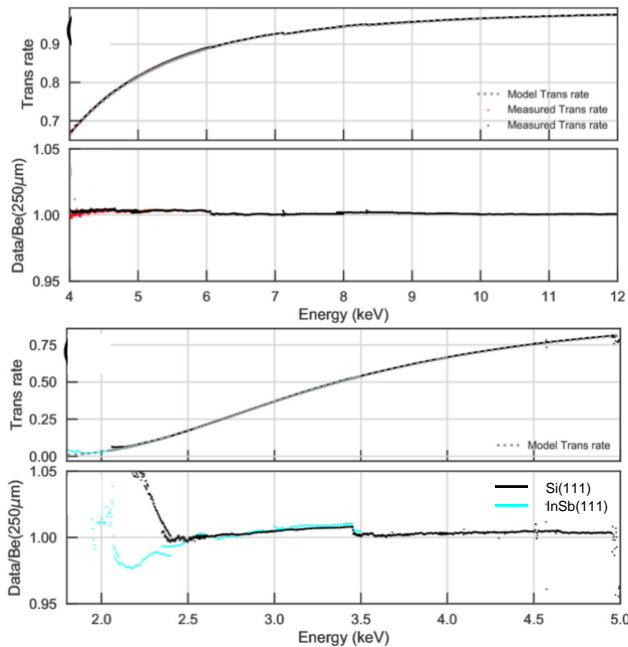


図 2 : 測定で得られた透過率カーブと 250 μm 厚の Be による光電吸収を仮定したモデル透過率カーブとの比 (上:BL7C, 下:BL11B)

2.4 keV 以下のエネルギー帯において、Si と InSb のどちらも高次光混入による影響と見られる透過率上昇が確認された。透過率上昇の原因を探るため InSb 結晶を追加で用いたのだが、結果的に Si 結晶で得られた透過率カーブとも異なる結果となった。通常時は光路から外してある追加のミラーを挿入するか、二結晶分光器の detuning を行うことで、高次光の影響を分離できると思われるが、ビームタイム中に実施することはできなかった。

そこで測定結果の考察は 2.8-12 keV 帯域を用いて行なった。まず、Be 以外に混入している可能性のある Fe, Ni, Cr, Mn, Cu の元素について、それぞれの吸収端エネルギー前後にて、Be と微小元素の厚みをパラメータにしたフィッティングを行い、含有量を決定した (表 1)。

次に、図 2 の 3.4 keV, 6.1 keV 付近に確認できる、どの元素の吸収端とも一致しない透過率不連続低下構造についての考察を行なった。SXS の Be 窓透過率測定では物理的描像を解明できず、ゲートバルブの透過率不定性の大きな一因となっていた。本研究では、結晶面(hkl)の格子間隔 d_{hkl} に対して、Bragg 条件($2d_{hkl} \sin\theta = hc/E$)を満たすエネルギー E_{hkl} で、 $\theta \sim 90^\circ$ 方向に極端な異方性を持った散乱を起こす描像

(Bragg Diffraction Features; BDFs)を考えることで説明することに成功した。つまり、各結晶面に対応するエネルギー E_{hkl} で不連続的に X 線が回折し始める、言い換えると、不連続に透過率が減少することになり、測定結果と一致する。六方晶に属する Be の格子間隔 d_{hkl} に対して、Bragg 条件を解くことによって E_{hkl} を計算し、その前後のエネルギー帯にて BDF の深さをフィッティングで算出しモデル化を行なった。

結果的に、(1) 253.5 μm 厚の Be の光電吸収、(2) 表 1 にまとめた厚みを持つ微小元素 (Cr, Mn, Fe, Ni, Cu) の光電吸収、(3) Be 結晶面(hkl)に応じた E_{hkl} で階段状に透過率低下する BDF 構造の 3 成分をモデル化することで、透過率不定性を 0.2%以下に抑えることに成功した (図 3)。本研究で得られた透過率モデルは XRISM 衛星の初期データ解析に不可欠な校正データベースファイルとして公開予定である。

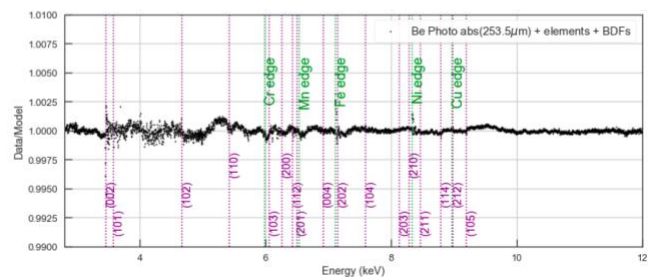


図 3 : 測定で得られた 2.8-12.0 keV 帯の透過率カーブと 3 成分を用いたベストモデル透過率カーブとの比。緑線が微小元素の吸収端を紫線が各結晶面に対応する E_{hkl} を示す。

次に、BL11B を用いた透過率の位置依存性測定についてまとめる。2.7 keV, 3.0 keV, 3.456 keV, 4.0 keV の 4 つの単色 X 線を用いてスキャン測定を行なった。代表的に 2.7 keV の X 線で得られた二次元透過率マップを図 4 に示す。左下部の透過率が他の部分より

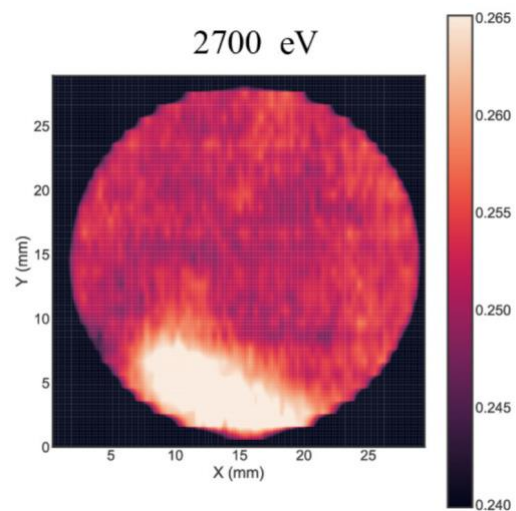


図 4 : 2.7 keV の X 線で得られた二次元透過率マップ

表 1: フィッティングで得られた微小元素の厚み

| 微小元素 | 吸収端エネルギー [eV] | フィッティング範囲 [eV] | Be の厚み [μm] | 微小元素の厚み [nm] |
|------|---------------|----------------|--------------------------|----------------|
| Cr | 5989 | 5500–6050 | 247.93 \pm 0.04 | 1.1 \pm 0.2 |
| Mn | 6539 | 6510–6900 | 253.08 \pm 0.26 | < 0.3 |
| Fe | 7112 | 7000–7500 | 251.41 \pm 0.22 | 14.5 \pm 0.2 |
| Ni | 8333 | 8200–8450 | 259.70 \pm 0.23 | 8.6 \pm 0.2 |
| Cu | 8979 | 8800–9180 | 275.63 \pm 0.07 | 0.8 \pm 0.1 |

高くなっていることがわかる。他の 3 つのエネルギーでもこの兆候が見られ、Be の圧延の際に左下部が薄くなってしまったことが考えられる。

4 まとめ

以上より、これまで未解明だった不連続な透過率低下構造について、物理的に解釈し、モデル化することに成功した。本研究で作成したゲートバルブ透過率モデルを用いて、XRISM 衛星の初期観測データから革新的な科学成果が得られることが期待される。本研究の詳細については[6]にまとめた。

参考文献

- [1] Porter F. S. et al., 2018, Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 4, 1, 011218
- [2] Yoshida Y. et al., 2017, Proc. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 103971D
- [3] Hoshino A. et al., 2017, Proc. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 103970E
- [4] Tsujimoto M. et al., 2018, Publications of the Astronomical Society of Japan, 70, 20
- [5] Eckart M. E. et al., 2018, "XARM Resolve Calibration Requirements (RESOLVE-SYS-REQ-0017)"
- [6] Midooka, T. 2020, "Ground calibration of XRISM for the initial observations -- X-ray transmission of the gate valve of the cryostat for the low-temperature detector." Master thesis, The university of Tokyo

* midooka@ac.jaxa.jp