

## A11 高精度伸展式光学架台の現状と研究課題について

石村康生(JAXA), 仙場淳彦(名城大), 秋田剛(千葉工大), 鳥阪綾子(首都大),  
田中宏明(防衛大), 山川宏, 宮下朋之(早大), 河野太郎, 馬場満久, 小川博之, 岡崎峻, 後藤健(JAXA),  
嶋田岳史(東大), 旗持天(早大), 村田泰宏, 前田良知, 石田学, 岩田直子, 柴野靖子(JAXA),  
高精度伸展式光学架台の研究開発メンバー

K. Ishimura (JAXA), A. Senba (Meijo Univ.), T. Akita (Chiba Inst. Tech.), A. Torisaka (Tokyo Metro. Univ.),  
H. Tanaka (National Defense Academy), H. Yamakawa, T. Miyashita (Waseda Univ.),  
T. Kawano, M. Baba, H. Ogawa, S. Okazaki, K. Goto (JAXA),  
T. Shimada (Univ. Tokyo), T. Hatamochi (Waseda Univ.),  
Y. Murata, T. Maeda, M. Ishida, N. Iwata, Y. Shibano (JAXA),  
R&D member of Precise Extensible Optical Bench

### 1. はじめに

光学架台に限らず, 伸展式の高剛性マストは, 宇宙ステーションの太陽電池の支持構造<sup>[1]</sup>や, 合成開口レーダーの支持構造<sup>[2]</sup>として, 幅広く利用されている. 主要な伸展式高剛性マストの打ち上げ年数とそのサイズを図1に示す. 科学観測機器の支持構造として利用される場合は高い形状精度が要求される一方で, 太陽電池などの支持構造としては軽量・高剛性が要求される. 次世代の硬X線天文衛星として検討されている FORCE (FOcusing Relative universe and Cosmic Evolution) などでは, 焦点距離 10m, 先端望遠鏡質量約 240kg に対して, 精度要求は 15 秒角であり, 10m 先の並進変位に換算すると 0.7mm に相当する<sup>[3]</sup>. このように, 用途の違いによって求められる方向性は異なるものの, 近年のターゲットとなっている伸展式高剛性マストのサイズ (伸展長) は, 5~100m といった大型構造物である. 本論文では, 昨今の伸展式高剛性マストのトレンドを背景に, 2016 年 2 月に打ち上げられた X 線天文衛星 ASTRO-H における最新の伸展式光学架台の軌道上性能の実績を示すと同時に, 今後のさらなる高性能化にむけた研究開発課題についてまとめる.

既存の伸展式高剛性マストの構造様式としては, 斜部材のスライドあるいは伸縮による剪断変

形を利用したもの<sup>[4]</sup>, ロンジロンを折りたたむことによる長手方向の圧縮に対応するもの<sup>[5]</sup>, ねじり変形に対応するもの<sup>[2]</sup>の 3 つに大別される. それぞれ特徴を有するが, 次節で述べる ASTRO-H 伸展式光学架台は, ロンジロンを折りたたむ方式であり, 剪断変形を利用した方式と比べると収納時のフットプリントが小さいという特徴がある.

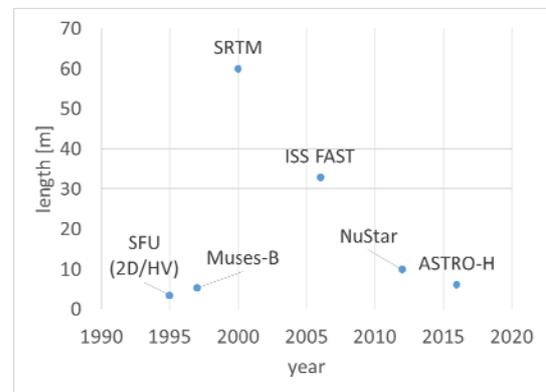
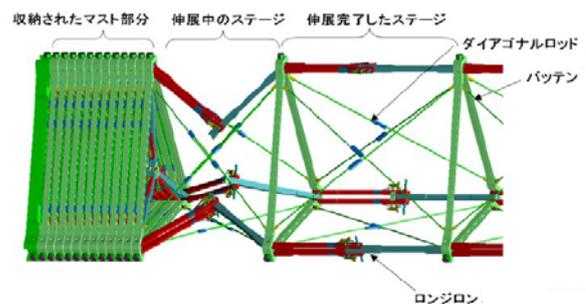


図1 伸展式高剛性マストのサイズ変遷



## 2. ASTRO-Hの伸展式光学架台の軌道上性能

X線天文衛星ASTRO-Hには、結像光学系を有する観測機器が3種類4モジュール、結像光学系を有しない検出器が1種類2モジュール搭載された。前者は、軟X線精密分光システム(SXSシステム:SXT-S及びSXT-I)、軟X線撮像分光システム(SXIシステム:SXT-I及びSXI)、硬X線撮像分光システム(HXIシステム:HXT1,2及びHXI1,2)であり、後者は、軟ガンマ線検出器(SGD1,2)である。ASTRO-Hでは、硬X線望遠鏡の12mもの長い焦点距離の要求と、ロケットのフェアリングの制約や、打ち上げ時の剛性要求から、約6mの伸展式光学架台上に2台の硬X線検出器HXI1,2を搭載した(図2)。

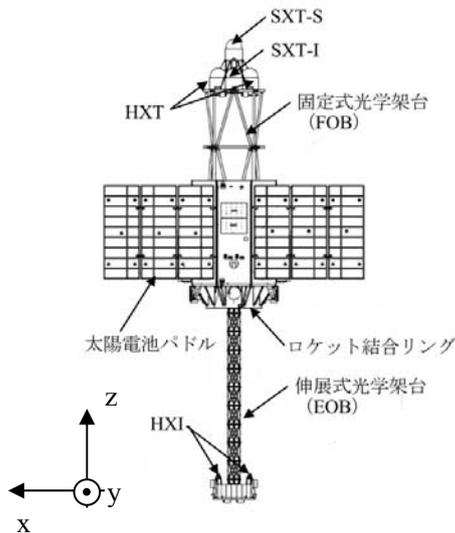


図2 ASTRO-H 外観図

軌道上における伸展式光学架台の主要な性能としては、伸展機能、剛性、形状精度の3点がある。形状精度に関しては、これら6台の観測機器の相対的なアライメントを維持するために、伸展式光学架台に対しても、高い形状精度が要求された。形状誤差の悪化要因は、その周期に応じて、固定成分と変動成分に分けられる。代表的な固定成分としては、初期の製造・調整残差に加えて、伸展再現性、打ち上げ荷重による変動などが挙げられる。一方で、変動成分としては、熱変形などが挙げられる。

このアライメント要求に対する設計・製品の妥当性は解析及び試験によって検証されたが、ASTRO-Hは全長約14mの大型構造物であり、伸展式光学架台(EOB)の先端質量(約150kg)の重力による影響を考慮すると、十分な精度かつ安全なEndToEndのアライメント評価は困難であった。そこで、下部構造における伸展式光学架台(EOB)の取付面をIFとして、打ち上げ前後で形態の変わらない固定式光学架台(FOB)と下部構造のアライメントと、EOBのアライメントを分離して評価する分割統治方式が採用された。詳細は文献6を参照されたい。

軌道上性能の実証結果を以下では述べる。まず、伸展機能としては、2016/2/28に伸展が実施され、モーターエンコーダー、ステージカウンタ等により、規定の長さの伸展がなされ、最終ラッチが完了したことが確認された。一方で、伸展途中段階において、伸展式光学架台の振動振幅および衛星姿勢変動が増大する現象が確認された。伸展式光学架台の振幅および角速度変動に対して、設定された閾値を超えた場合には、安全な伸展のために、伸展一度停止し、減衰後に再伸展を行うという運用を実施した<sup>[7]</sup>。

次に、剛性についてであるが、解析予測値の0.66Hzに対して、最終ラッチ後の自由振動時の光学架台先端の変位データから、X方向0.59Hz、Y軸方向0.63Hzであり、予測と整合することが確認された(図3,4)。

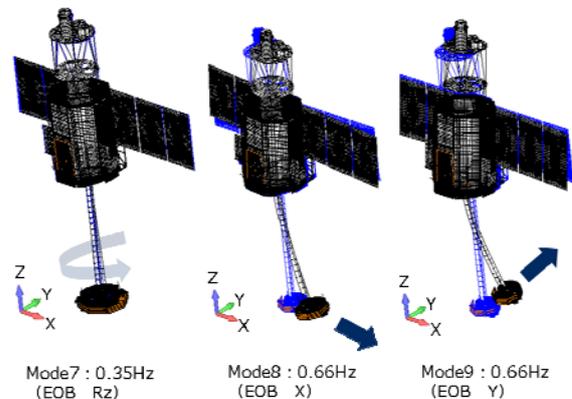


図3 軌道上での固有振動数(解析予測)

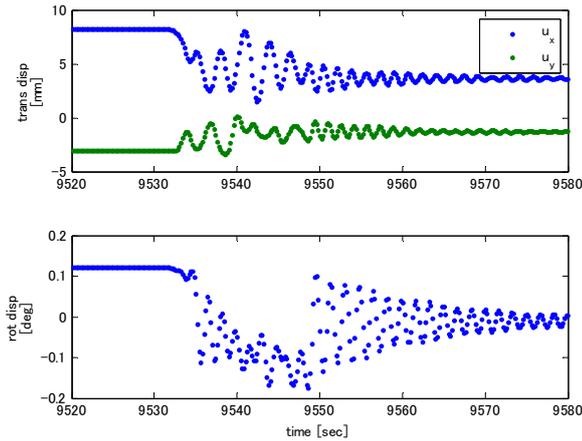


図4 ラッチ後の伸展式光学架台の並進/回転変位

伸展式光学架台の形状精度は、科学観測においては、検出器上天体の結像位置のずれに影響をあたえる。固定式光学架台の形状精度の影響も含めた精度要求は、69 秒角（12m の焦点距離に対して約 4mm の並進）であった。軌道上での観測結果として、図 5,6 および表 1 に、Crab および G21.5-0.9 観測時の検出器上の結像位置を示す。HXI1,2 と書かれているものが、伸展式光学架台の先端に搭載された硬 X 線の望遠鏡の検出器上の結像位置であるが、要求に対して十分な性能を実現できていることが分かる。

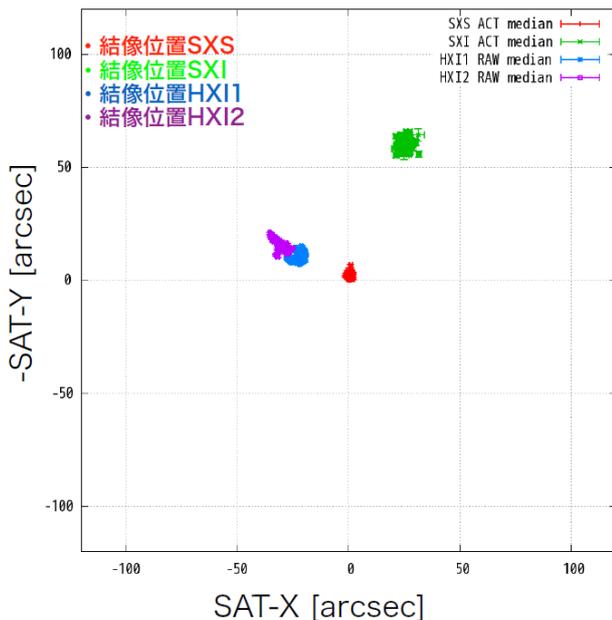


図5 Crab 観測時の結像位置

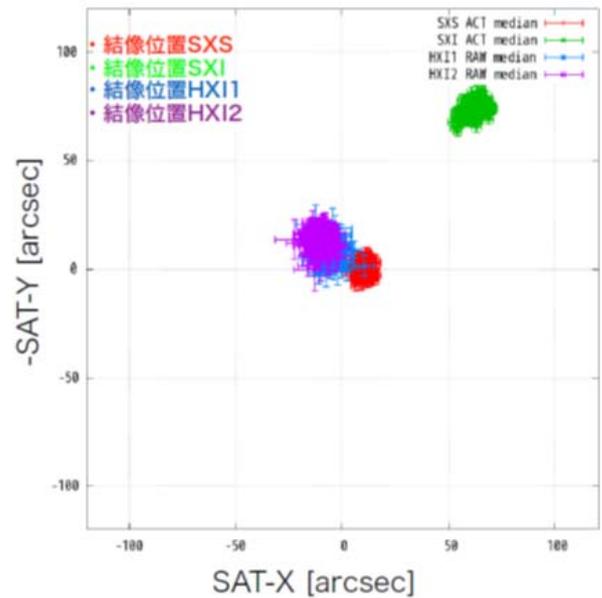


図6 G21.5-0.9 観測時の結像位置

表1 軌道上アライメント性能  
(検出器上の結像位置)

	バジェット [arcsec]	Crab 観測時 [arcsec]	G21.5-0.9 観測時 [arcsec]
HXI1	69	29.2	23.9
HXI2	69	41.0	26.0

### 3. さらなる高精度大型化に向けた研究課題と現状の研究開発

2章で述べた ASTRO-H の伸展式光学架台の軌道上性能と、1章で述べた伸展式高剛性マストのトレンドを考慮すると、さらなる高精度・大型化に向けた研究課題として、“安定した伸展挙動の実現”、“高剛性化”、“高精度化”の3つが識別される。

まず、伸展挙動についてであるが、ASTRO-H の伸展時に発生した振動のメカニズムの解明と、先端質量がさらに増加したミッションにも対応できるように、安定した伸展挙動の実現が望まれる。そこで、現在我々の研究グループでは、地上における再現性試験と同時に、伸展時のガタを有するトラス構造の振動特性の評価を実施している<sup>[8]</sup>。

次に、高剛性化であるが、さらなる大型化要求に対応しつつ、姿勢系との連成を回避するためには、必須の課題となる。マストのフットプリントを維持しつつ、剛性の向上を実施するために、各部材の剛性への感度を評価し、設計へのフィードバックを試みている。特に、部材剛性が低いジョイント部については、印可荷重によって変化する接触状況が剛性に与える影響を明らかにした<sup>[9]</sup>。

最後に高精度化については、精度悪化の主要因の一つである伸展再現性の向上と軌道上制御システムの開発の2つの取り組みを行っている。

伸展再現性の向上については、特にラッチによる位置決め再現性の理論構築と押付荷重の調整法を開発した<sup>[10-12]</sup>。これにより、ラッチ部の設計指針を得ることができ、さらに再現性の向上が見込まれる。

次に、軌道上制御システムについては、人工的な熱膨張アクチュエータを利用したポインティング制御機構の開発を実施中である。要素技術として、軌道上での変位計測装置の開発<sup>[13]</sup>、熱真空環境下での熱膨張アクチュエータの特性評価<sup>[14]</sup>を実施した。さらに、これらを統合したシステムの性能を4m規模の伸展式高剛性トラスを用いて評価し、大気中ではあるものの5秒角以下の制御性能が実現できることを確認した<sup>[15,16]</sup>。

#### 4. まとめ

伸展式高剛性マストの傾向及び、最新の軌道上性能としてX線天文衛星ASTRO-Hを例にまとめた。これらを背景として、今後のさらなる高性能化にむけた研究開発課題として、“安定した伸展挙動の実現”、“高剛性化”、“高精度化”を識別し、それぞれの課題に対する我々の研究グループの研究開発状況を示した。

#### 参考文献

- [1] Bowden, M. L. and Benton, M., “Design of Deployable-Truss Masts for Space Station,” AIAA 93-0975, AIAA/AHS/ASEE Aerospace Design Conference, 1993.
- [2] D.Gross, and D. Messner,”The Able Deployable Articulated Mast – Enabling Technology for the Shuttle Radar Topography Mission,” Proc. of the 33<sup>rd</sup> Aerospace Mechanisms Symposium, NASA/CP-1999-209259, pp.15-30.
- [3] 中澤, 森他, “軟X線から硬X線の広帯域を高感度で撮像分光する小型衛星計画FORCE,” 第17回宇宙科学シンポジウム,2017.
- [4] J.M. Mejia-Ariza, T.W. Murphey, “Ultra-Flexible Advanced Stiffness Truss (U-FAST) for Large Solar Arrays,” AIAA 2016-1496, AIAA AciTech, 2016.
- [5] T. Kitamura, M. Natori, K. Yamashiro, A. Obata, “Development of A High Stiffness Extendible and Retractable Mast “HIMAT” for Space Applications,” AIAA-90-1054-CP, 31<sup>st</sup> Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 1990.
- [6] 石村他, “ASTROH(ひとみ)搭載機器のアライメント性能,” 第25回スペース・エンジニアリング・コンファレンス, 2016.
- [7] 石村他, “高精度伸展式光学架台の軌道上伸展挙動の評価,”第60回宇宙科学技術連合講演会, 2016.
- [8] 仙場, 郁, “伸展式構造物のモデル化におけるヒステリシス特性に関して,”第32回宇宙・構造材料シンポジウム, 2016.
- [9] 馬場, 河野, 石村, “伸展式光学架台のロンジロン・シャフト部間における接触を考慮した剛性評価,”第32回宇宙・構造材料シンポジウム, 2016.
- [10] K.Takagi, H.Tanaka,” Strategy of Pressing Load Adjustment for High – Precision Positioning Mechanism Using Kinematic Coupling,” The 14th European Conference on Spacecraft Structures, Materials and Environmental Testing (ECSSMET), 2016.
- [11] 石村, 田中, 荻, 前田, 阿部, 馬場, “キネマチックカップリングのラッチ完了条件と再現性向上に向けた

考察,”第 58 回構造強度に関する講演会講演集, pp.84-86, 2016.

[12] 高木, 田中, 石村, “キネマティックカップリングを用いた高精度位置決め機構の押付荷重調整法”第 60 回宇宙科学技術連合講演会, 2016.

[13] 河野, 嶋田, 石村, “軌道上レーザー変位計測のための高指向安定光学系の開発”第 60 回宇宙科学技術連合講演会, 2016.

[14] 嶋田, 石村, 小川, 岡崎, “熱膨張アクチュエータの熱真空環境下における熱特性評価,”第 32 回宇宙・構造材料シンポジウム, 2016.

[15] T. Shimada, K. Ishimura, T. Kawano, “Demonstration of a Novel Smart Structural System for Pointing Control of Trusses,” Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, 2016.

[16] 嶋田, 石村, 河野, “大型トラス構造物の高精度ポインティング制御特性の実験的評価”第 60 回宇宙科学技術連合講演会, 2016.

## 謝辞

本研究活動は, 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所の戦略的研究開発費“大型高精度光学架台に関する研究”の支援のもと実施されました.