

A05 次世代大型高精度構造の実現に向けた軌道上変位計測機器の検討

河野太郎 (JAXA), 嶋田岳史 (東大院), 石村康生 (JAXA)

Taro Kawano (JAXA), Takeshi Shimada (University of Tokyo), Kosei Ishimura (JAXA)

1. 背景

軌道上大型高精度構造に対する要求は年々厳しさを増しており、その実現はますます困難となっている。特に近年の大型高精度構造に対する精度要求は、構造の精度に加えて地上試験における試験の精度やコストなどが課題となりつつある。そのため、単純に材料特性や幾何学形状の改善だけでは解決しきれないものとなっている。従って、今後の軌道上大型高精度構造は従来の超高精度構造にかわり補正機構を組み込んだ構造であるほうが、機構品による複雑さを加味してもコストや信頼性の観点で優位となる可能性がある。

一例として 2015 年度に打上げを目指す ASTRO-H の熱変形試験では、およそ全長 10m 程度の構造体の 20 秒角程度の指向評価に対しておよそ 1 年以上を必要とした。これは一般的な衛星でルーチンとして実施される構造試験の試験期間である 3 ヶ月の 4 倍以上であり、今後の大型高精度構造を要求する衛星に対して常に同じだけのコストや期間を期待することは難しい。従って必然的に受動的な組立構造によって実現する精度は地上検証で使用する計測機器の精度までとして、それ以上は軌道上の補正機構で形状補正を行うことが現実的な可能性となる。

そこで本研究では、次世代の大型高精度構造の実現に向け、軌道上で衛星形状を計測しアクチュエーターに補正情報を提供するセンサーの開発を行う。本稿ではそのうちセンサーが満たすべき設計要件を昨今の衛星計画を俯瞰することで導出する。また、その結果を反映し現在開発を行っている軌道上 2 点間変位計測システムの開発状況、およびその中でも耐放射線性試験についての結果も報告する。

2. 軌道上計測機器に対する要求仕様

センサーに対する精度要求を考えるにあたり、そもそもなぜ大型高精度構造が必要かという要求の源泉に立ち返ると、昨今では大別して次の二つのミッション要求が主流となっている。

一つは長焦点距離による集光面積の拡大と高分解能の実現である。この要求に対しては、星とレンズと検出器の 3 点の相対的な安定が求められる。よって本要求の実現においては望遠鏡と焦点面機器の間の距離を最大化と 3 点が規定する軸の相対的な変位が構造的な要求として定量的に規定される。もう一つはパラボラアンテナのリフレクターや平面アンテナによる高く空間分解能の獲得であり、これに対してはより大きな面積の面形状に対する安定性が求められる。これらの要求は口径および面精度、という形で定量的に規定される。

以上のように、同じアライメント要求ということであっても要求の源泉に応じて異なるものを計測し補正する必要がある。本稿では特に始めに述べた超焦点距離の望遠鏡による集光面積の拡大および構文分解能の実現に向けた変位の検出について、を中心に議論を進める。

この精度要求に関連する項目を模式的に図示したのが図 1 である。指向管理においては大まかに、構造の幾何学形状によって規定される構造指向軸と望遠鏡のスループットが最大となる光軸と目標天体が存在する真の方向を示す目標軸が定義される。これら 3 つの完全に一致している状態が理想状態である。

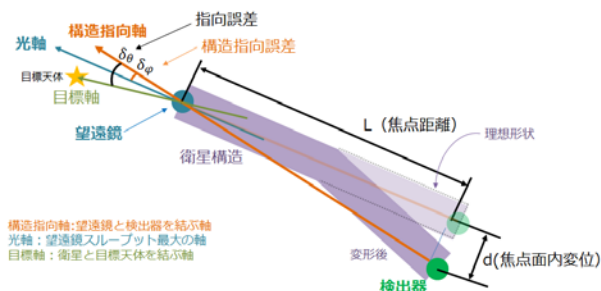


図 1 精度要求に関する各項目の模式図

理想状態からの軸相互のずれ角が指向誤差 δ_θ である。そして、各軸に対して許容できるずれ角の最大量が許容指向誤差として規定される。実際に各軸に対してどの軸を基準として指向誤差を規定するかは、各ミッションの特性に依存する。衛星主構造については構造変形による指向誤差 δ_ϕ が配分量以下となるように設計と検証を行うことが必要である。よって式(1)による焦点面での変位量 d を有意に判別できる精度がセンサーに求められる。

$$d = L \times d\theta \quad (1)$$

以上を踏まえて、昨今の衛星計画における要求精度を列挙したものが表 1 である。また、それぞれの角度精度に対して式(1)で求めた焦点面での面内の許容変位量を括弧書きで記載した。最も直近である 2015 年度打ち上げ予定の ASTRO-H¹ においては焦点距離 12m に対して 70 秒角程度となっている。ただし、ASTRO-H の場合、熱歪に配分として割り当てられているのは約 20 秒角であり、これは焦点距離 12m の焦点面変位 1.1mm に対応する。他の計画においては NGHXT² が 12m において 4.1mm 程度、編隊飛行を行う FFAST³ が焦点

距離 20m の 6mm、Polaris⁴ は焦点距離 6m の 30 μ m 程度の要求となっている。以上の数値を包絡するように今後 10 から 15 年程度のミッション全体での要求精度を規定すると、焦点距離は 20m、焦点面変位量は 30 μ m 程度となる。これを実現するために必要なセンサー分解能は概ね変位量の 1/5 程度、6 μ m と想定される。

軌道上で精密な計測を行うためには、計測センサー自体の形状と電子部品の特性の安定が大きな課題となる。形状安定性を議論するにあたっては機器の温度環境が重要であるが、表 1 に列挙した衛星はすべて地球周回軌道という想定となっている。したがって、機器が想定すべき温度環境は室温付近を中心とした日陰日照による激しい温度変動を伴う環境であり、それに向けた対策が求められる。また、電子部品の出力特性に影響を与える放射線耐性も地球周回低軌道近傍における環境程度を見込んだ検討が重要である。

これまで日本の科学衛星に提供されたアライメント補正用の機器として代表的なものを図 2 に示す。CAMS⁵ は ASTRO-H に搭載された進展マストの変形補正用の機器であり、像安定化装置⁶ は「ひので」にて擾乱をキャンセルするために搭載された装置である。どちらもサイズは 15cm 程度、重量は 1kg~3kg 程度で消費電力は 5W 程度とされている。実際の衛星開発におけるコンポーネントに対する許容包絡域や重量配分は衛星のスケールに強く依存するため一般化は困難であるものの、既開発品から開発目標値は大きさ 15cm 角、重量は最大で 3kg 程度とする。

これまでの議論を要求仕様として一覧にまと

表 1

プロジェクト	観測機器	焦点距離	精度要求	備考
ASTRO-H	硬 X 線望遠鏡	12m	70 秒角(4.1mm) うち熱歪配分 20 秒角(1.1mm)	2015 年度打ち上げ予定
NGHXT	硬 X 線望遠鏡	12m	70 秒角(4.1mm)	
FFAST	硬 X 線望遠鏡	20m	60 秒角(6mm)	編隊飛行
Polaris	WideBand X 線望遠鏡	6m	1 秒角(30 μ m)	

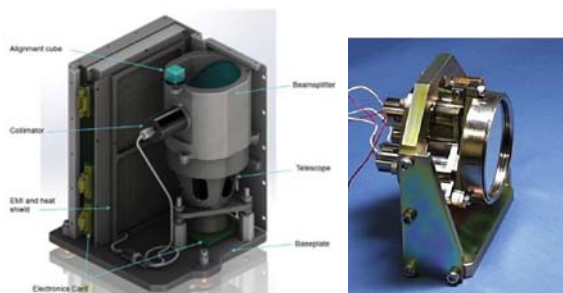


図2 The Canadian ASTRO-H Metrogy System(CAMS, 左)および像安定化装置(右)

表2 今後のミッションを想定した変位計測システムの要求仕様

検出精度要求	以下の誤差未満で 10m 先の相対的な変位を高精度に計測出来ること ・ランダム検出誤差 30 μ m/min ・バイアス誤差 50 μ m 出力レート 4Hz
耐環境要求 (LEO 想定)	・準静加速度 20G ・衝撃条件 1000H 迄 +8dB/oct 1000Hz 以降 100Gsrs (TBD) ・I/F 温度条件 動作時: -10~+30 $^{\circ}$ C, 非動作時 -30~+60 ・耐放射線環境 LEO 3 年相当 ・有害な膨潤変形無き事
	レーザー側 ・15cm \times 15cm \times 20cm の包絡域に収まること ミラー側 ・20cm \times 20cm \times 20cm の包絡域に収まること
質量	ミラー: 1kg 以下 (TBD) レーザー・受光ユニット 3kg 以下(TBD)
電力	5W 程度

めたものが表2である。環境条件等は既開発品の値をもとに定めた。

3. 軌道上変位計測機器の開発計画

現在、我々は表2の要求仕様を満たし、軌道上で支持構造両端の並進変位計測が可能である長距離間でのレーザー変位計測システム(LDL)の開発を実施している。本節ではその概要および開発計画について紹介する。

LDLの計測原理の模式図を図3に示す。計測対象となる支持構造に対して、基準となる1端にレ

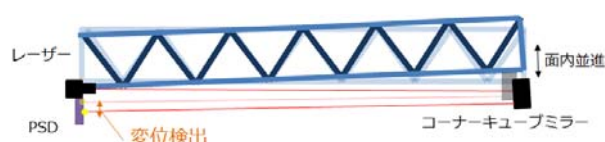


図3 LDLの計測原理概念図

ーザーおよび光位置検出素子(PSD)を固定し、逆側の端にコーナーキューブミラーを固定する。レーザーから射出された光をコーナーキューブで折り返して PSD で受光し移動量を計測することで支持構造の両端の相対的な変位量が計測される。原理が非常に単純であり部品点数が少ないことから高信頼性、軽量小型かつ低コストであることが期待できる。また、コーナーキューブ側は入射方向と平行に光を反射するコーナーキューブの特性により、取り付け面の傾きの影響を受けない。よって、レーザー側を基準とした場合逆端の並進変位のみを計測することが可能であり、指示構造の曲げ変形の評価に対して有利な計測ができる。

本機器は 2008 年ごろより石村らによる原理検証が開始されている⁷。2014 年には ASTRO-H の熱変形試験に供されることで、地上試験において十分な精度で衛星の大型高精度構造の変位計測に使用できることが実証された⁸。今後は軌道上で使用できる搭載品としてのパッケージの設計開発や検証を行い、最終的にミッションに提供することを目指し開発を継続する。

4. 耐放射線性の検証および光学系の初期検討

次に先行して検証試験を実施した PSD の対放射線性検証試験の概要とその試験結果を示す。この試験では非動作時の放射線照射による PSD の検出感度の劣化や特性の変化の有無を確認することを目的とした。線種は γ 線、線量は低軌道においてシールド無し 3 年相当の 1.0×10^6 rad とした。照射率は設備標準の 1.0×10^6 rad/h とした。供

試体はHAMAMATSU PHOTONICSの2次元PSD, S5991-01の4個とした. このPSDは計測面範囲9mm角, 分解能 $1.5\mu\text{m}$ と計測レンジが変位計測に適しており, これまで地上試験にてLDLの素子として使用されてきたものである.

照射後の健全性確認は照射済みサンプルと未照射サンプルの出力特性を比較することで実施した. 比較対象の供試体はすべて同一ロットで, 照射サンプルが4個と非照射サンプルが2個である.

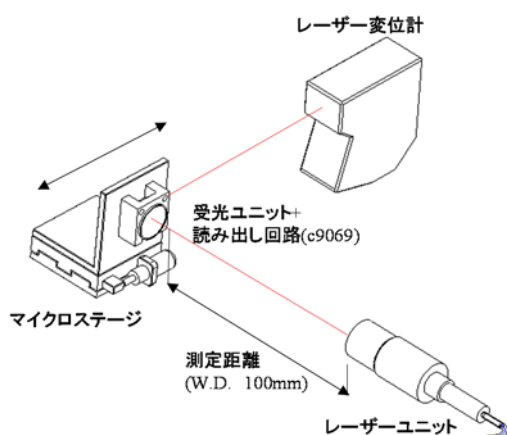


図4 放射線照射前後の特性確認試験構

確認試験の試験装置模式図を図4に示す. PSDをマイクロステージ上に設置しレーザーから照射された光点の変位量を計測した. 同時にマイクロステージの変位量をレーザー変位計によっても計測し, 式(2)に従って両者の比率S.F.を比較することで各PSDの特性を求めた.

$$S.F. = \frac{V_{LDL}}{V_{LD}} \quad (2)$$

ここで V_{LDL} はLDLによるステージの変位量の計測値であり, V_{LD} は同時刻のレーザー変位計による変位量の計測値である.

表3に照射済みのPSDと照射を行っていないPSDの結果を並べて示す. 全てのサンプルにおいてS.F.は一定であり, γ 線照射の有無による有意な特性変化は確認されなかった. したがってPSDは γ 線に対する単純な劣化という観点では低軌

表3 各サンプルに対する変位計測特性比較

Sample No.	照射有無	Scale factor (S.F.)	
		X	Y.
R001	照射有	0.97	0.97
R002	照射有	0.94	0.96
R003	照射有	0.95	0.96
R004	照射有	0.96	0.96
N001	照射無	0.95	0.96
N002	照射無	0.94	0.96

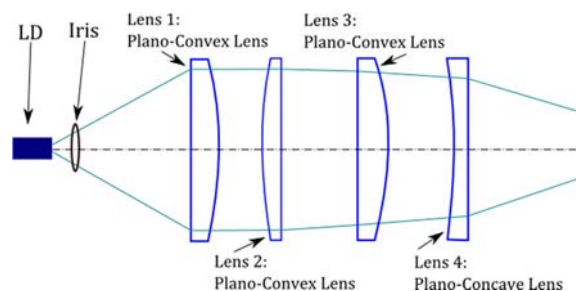


図5 計画中のレンズ配置

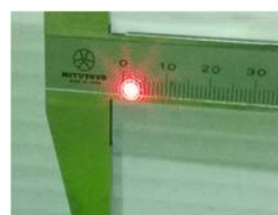


図6 計画中のレンズ配置による20m先の光点

道3年相当の運用に対して十分な耐性を有しているものと言える.

また, もう1点の先行検証項目として, 20mの距離で十分にPSDが位置検出を行えるだけのレーザー品質を維持できる光学系の検討も実施している. 最新の検討においては図5のようなレンズ配置となっている. これをもとに作成されたBBMは20mの距離で4mmの幅の光点を実現しており, 現在この状態での実計測による変位に対する出力の線形性の確認などを進めている. 今後レンズ配置が確定し次第実際にレンズ系を固定する保持構造を設計し, 熱歪みの影響を見て設計改善を進める計画である.

5. まとめ

本発表では今後の大型高精度構造で軌道上補正機構を実現するために、変位を検出するセンサー側に求められる精度および耐環境性に関する条件を導出した。変位計測センサーが達成すべき精度計測は距離 20m において軸直交方向 $30\mu\text{m}$ の計測（分解能にして $6\mu\text{m}$ ）である。想定される軌道は地球周回低軌道であることから温度環境は室温近傍を中心に周回ごとに比較的大きな温度変動が見込まれる。放射線環境は地球周回低軌道 3 年相当への対応が求められる。コンポーネントサイズや電力は先行例にならうと 15cm 四方面度、5W となる。

また、本稿で導出した条件を目指し実施している長距離間での変位計測システム(LDL)の開発状況について報告した。システムで精度を決める重要な要素となる位置検出素子に対してガンマ線照射試験を行い、照射に伴う特性変動が十分に小さいことを確認した。また、レーザー射出のレンズ光学系の検討も同時に実施しており今後レンズの保持構造などの設計検討を進める計画である。

謝辞

本研究は JAXA 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一環」として実施した。また、 γ 線照射を実施頂いた日本原子力研究所 高崎研究所の関係所員に深甚の謝意を表する。

参考文献

¹Tadayuki.T. and et al, "The ASTRO-H Mission", Proc. SPIE, Vol. 7732, 2010, pp. 77320Z-77320Z-18.

²栗木久光, 松本浩典, 古澤彰浩, 森英之, 岡島 崇, "NGHXT 搭載用高角度分解能硬 X 線望遠鏡の開発", 高エネルギー宇宙物理連絡会研究会, 広島県, 2015 年.

³常深 博, 國枝秀世, 河野 功, FFAST チーム,

NEC, "FFAST プロジェクトの準備状況", 第 3 回小型科学衛星シンポジウム, 相模原市, 神奈川県, 3 月, 2013 年.

⁴林田 清, 穴吹直久, 常深 博, 村上敏夫, 米徳大輔, and et al., "X 線ガンマ線偏光観測小型衛星 PolariS", 第 2 回小型科学衛星シンポジウム, 相模原市, 神奈川県, 3 月, 2012 年.

⁵Frédéric G., Fabien D., Louis M., Martin L., Louis-Philippe B., Sylvio L. , "ALIGNMENT MONITORING SYSTEM FOR ASTRO-H", International Conference on Space Optics, Rhodes, Greece, October, 2010,

⁶永田伸一, 清水敏文, 一本潔, 常田佐久, 松本恵一, 小林 研, "Solar-B 可視光望遠鏡の画像安定化装置の開発", SOLAR-B ニュース, "<http://hinode.nao.ac.jp/news/OldNews2002/nagata-j.pdf>", 6 月, 2002 年.

⁷Kosei I., Atsuhiko S., Takashi I., Yoshiro O., Takeshi A., Hiroshi F., Kenji M. , "Prediction, Measurement and Stabilization of Structural Deformation on Orbit", The International Astronautical Congress, IAC-10-C2.5.12, Prague, Czech Republic, September, 2010.

⁸河野太郎, 石村康生, 石田 学, 峯杉賢治, et al., "高精度大型構造物に向けた遠距離変位計測システムの開発", 宇宙科学技術連合講演会, SO11(JSASS-2012-4500), 別府市, 大分県, 11 月, 2012 年.