

高精度変位計測装置の実証計画について

石村康生(早大), 河野 太郎(JAXA), 田中 宏明(防衛大), 小木曾 望(阪府大), 宮下 朋之(早大),
土居 明広(JAXA), 福家 英之(JAXA), 鳥阪 綾子(首都大)

Demonstration Plan of Accurate Displacement Measurement System

K. Ishimura (Waseda Univ.), T. Kawano (JAXA), H. Tanaka (National Defense Academy),
N. Kogiso (Osaka Prefecture Univ.), T. Miyashita (Waseda University), A. Doi (JAXA), H. Fuke (JAXA),
A. Torisaka (Tokyo Metropolitan Univ.)

1. はじめに

次世代の科学観測を支えるための高精度構造物の重要性は増すばかりであり、その実現のためには、材料から構造に至るまでのシームレスな技術開発が必要である¹⁾。さらなる高精度化にむけて、JWSTに代表されるような軌道上調整機構への期待が高まっている²⁾。調整を行うためには、まず形状を直接/間接を問わず計測できることが前提となり、軌道上で運用可能な高精度変位計測装置が必要となる。

本研究では、大型構造物上の離れた2点間における相対角変位と2点を結ぶ軸に直交する面内変位を計測可能な高精度変位計測装置を対象とする。これは、X線天文衛星や太陽電池アレイの支持構造物として利用されている伸展マストの曲げ変形などの計測に利用可能である。上述の変位を計測可能なものとして、角度変位についてはオートコリメータがあり、並進変位についてはレーザー変位計などがある。しかしながら、共に軌道上利用に向けては大きな開発要素がある。さらに、後者は長距離の2点間の変位の計測を行おうとすると、計測レンジの関係から供試体と同程度のサイズの高精度治具が必要であり現実的ではない。そこで本研究では、長距離離れた2点間の相対角度変位、相対並進変位が計測可能な高精度変位計測装置を開発する。類似の計測原理(詳細は2節)のものとしては、Neptec社のCanadian Astro-H Metrology System (CAMS)³⁾がある。受光素子として、CAMSではCCDが用いられているが、本提案ではPosition Sensitive Detector (PSD)を用いることでシステムを簡素化し、小型化および大幅な低コスト化を目指している。

2. 計測原理

研究開発中の高精度変位計測装置の基本構成部品は、レーザーユニット、受光ユニットである(図1)。PSD上のレーザースポットの変位に比例した電流が発生することで変位計測が可能となる。光源と受光部の間に、フラットミラーやコーナーキューブリフレクタを介することで、フラットミラーやコーナーキューブリフレクタの相対角度変位、相対並進変位を計測できる(図2)。フラットミラーの場合、図2(a)の中央の図のように並進変位には感度がない。一方で、距離L離れた位置のミラーが θ 回転した時には、受光ユニット上の $2L\theta$ の変位として検出される。Lが既知であれば、この受光ユニット上の変位から角度変位 θ が算出される。図2(b)のようにコーナーキューブリフレクタを利用した場合は、コーナーキューブリフレクタの頂点周りの回転変位には感度がない(図2(b)右図)。コーナーキューブリフレクタの Δx の並進変位に対して、受光ユニット上では、 $2\Delta x$ の変位が検出される。並進変位の検出の場合はコーナーキューブリフレクタを用いずとも、受光ユニットをレーザーユニットから分離して、コーナーキューブリフレクタの位置に配置することで、並進変位を計測できる。その場合は、検出される並進変位は Δx の2倍にならずそのままの値である。コーナーキューブリフレクタを使う場合のメリットとしては、検出される変位が倍になるため精度向上が期待されることと、電源ラインが必要な機材を一体化することでシステムが簡素化されることが挙げられる。

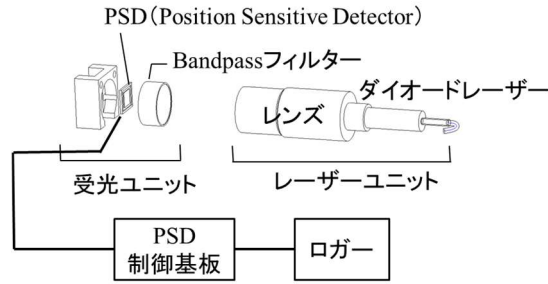


図1 高精度変位計測装置の基本構成

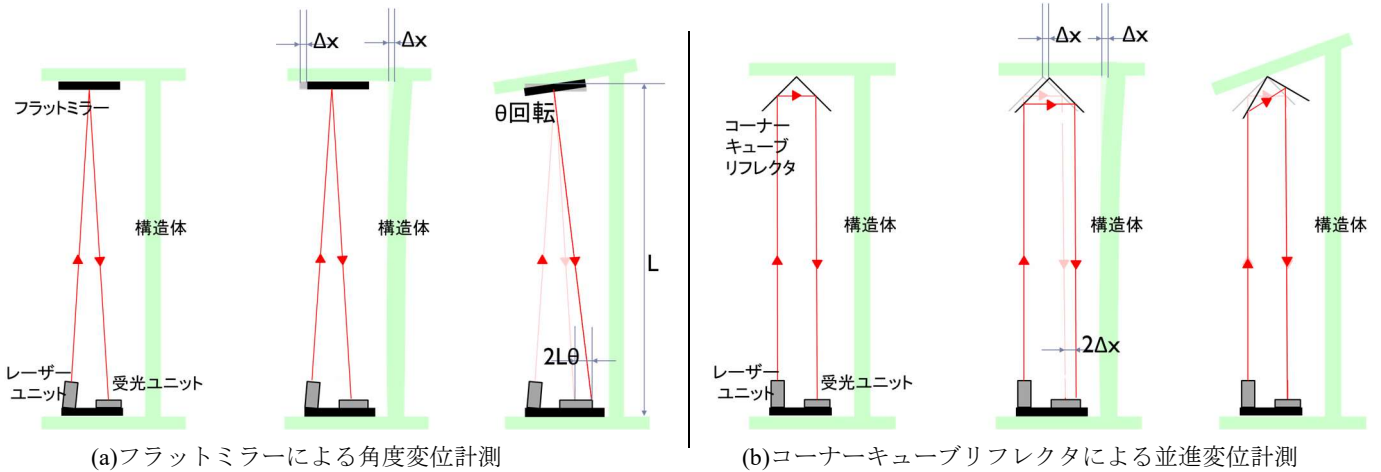
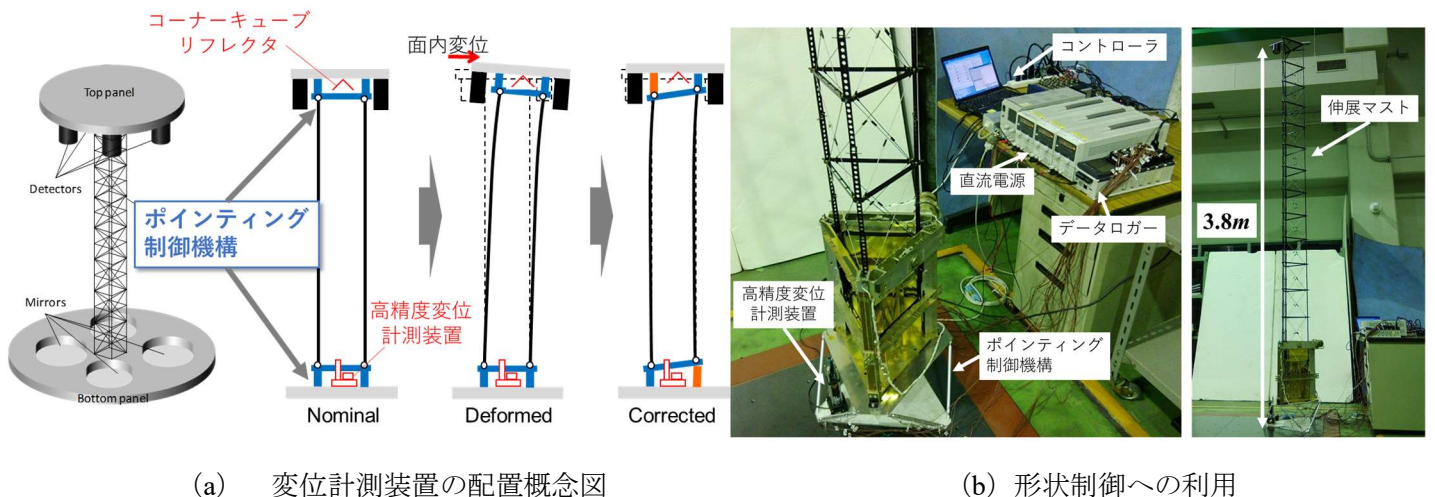


図2 高精度変位計測装置の計測原理

3. フライトに向けた開発要素

実際の利用例を図3に示す。望遠鏡のレンズ側に光源および受光部を配置し、検出器側にコーナーキューブリフレクタを配置することで、望遠鏡管体の曲げ変形を検出することができる。筆者らは、この変位計測装置によって計測された情報をもとに構造物の形状を制御し、補正する機構を開発し、大気中では4m規模のトラスの数十 μm 以下の誤差での制御できることを実証した(図3(b))。また、計測装置単体としては、ASTRO-Hの熱変形試験における変位計測にも用いられ、ロングレンジの高精度変位計測装置として大気中での性能は実証されている⁴⁾。

大気球や人工衛星においての利用を想定した場合、温度環境および低圧あるいは真空環境での性能保証と耐放射線性能の実証が重要である。現在までに、PSDの放射線耐性評価と、レーザーおよび受光ユニットの真空環境下での性能評価を終えており^{5,6)}、各要素技術としての評価実績は積み上げてきた。残された大きな課題は実環境でのトータルシステムとしての機能実証である。



(a) 変位計測装置の配置概念図

(b) 形状制御への利用

図3 コーナーキューブリフレクタを用いた高精度変位計測装置の使用例

4. 気球実験用変位計測装置

4.1 気球実験の意義

本気球実験では変形を評価するための高精度変位計測装置のシステムとしての実運用環境での機能実証を課題とする。計測システムとしては、計測対象構造物と計測機器をワンパッケージにしたものを用いる。大気球の運用環境で、計測対象構造物に人工的な変位を発生させ、その量を適切な精度で計測することで機能実証を行う。本実験の目的は、以下の2点に集約できる。

(1) 低温・低圧環境下でのシステムとしての機能実証（今後、宇宙実証へつなげる）

(2) 大気球実験において高精度変位計測を必要とするミッションに利用可能な技術としての実証

前者は、現在までに実施してきた地上大気環境下でのメートルオーダーでの性能評価、真空環境下でのサブスケールモデルによる機能実証に加えて、本提案において気球実験によるメートルオーダーでの低温・低圧環境下におけるシステム性能評価を行うことで、宇宙環境下での高精度変位計測装置の実現につなげる。本実験の後、観測ロケットやKIBO-FFの相乗り機器としての機能実証を視野に入れている。後者は、メートルオーダーの作動距離で、マイクロメートルオーダーの精度で2次元変位を計測できる装置として、気球実験用のオプション機器としての将来利用を想定している。これは、高精度大型構造物を必要とする気球実験に対する寄与に加えて、今後の多様な気球実験の利用用途の拡大にもつながると考えられる。

4.2 気球実験用変位計測装置の概要

気球実験では、ピギーを想定している。図4に気球実験用変位計測システムを示す。構成は、計測対象構造物（約1mの棒材）、コーナーキューブリフレクタ、発受光部（約0.2m x 0.2m x 0.2m）、ヒーター、ロガー兼データ処理系（必要に応じて気密容器を作成しその中に配置）、バッテリーである。（総重量（気密容器除く）は

約20kg）。変位計測装置およびデータ処理系は、ON状態で放球する。定常フライト時に計測対象構造物のヒーターをONにし、平衡状態まで待つ（30分程度）。その後、ヒーターのON/OFFを行い、温度と計測変位を記録（15分から30分程度）する。

計測対象物とゴンドラのインターフェースは、ゴンドラの変形の影響を受けないように、キネマチックマウントとする。計測対象物は伸縮部を除き低熱膨張係数材料によって構成する。計測対象物は、断熱設計とする。伸縮部にはヒーターを巻き、この部分の熱膨張を辺計測装置で計測する。フライト前に、伸縮部の温度と計測される変位のキャリブレーションを実施しておく。

発受光部の外観と光学系の構成の詳細を図5に示す。ビームスプリッターを利用することで、発射側の光路と受光側の光路を接近させることができ、発受光部の外形やコーナーキューブリフレクタを小さくすることができる。作動距離に応じて、図5中⑥の焦点距離機構でレーザー光のスポットサイズを調整する。

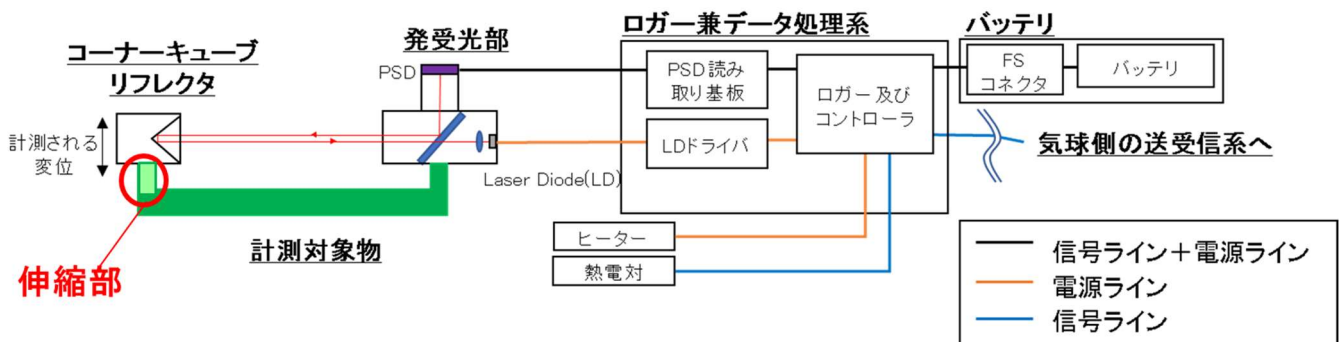


図4 気球実験用変位計測装置

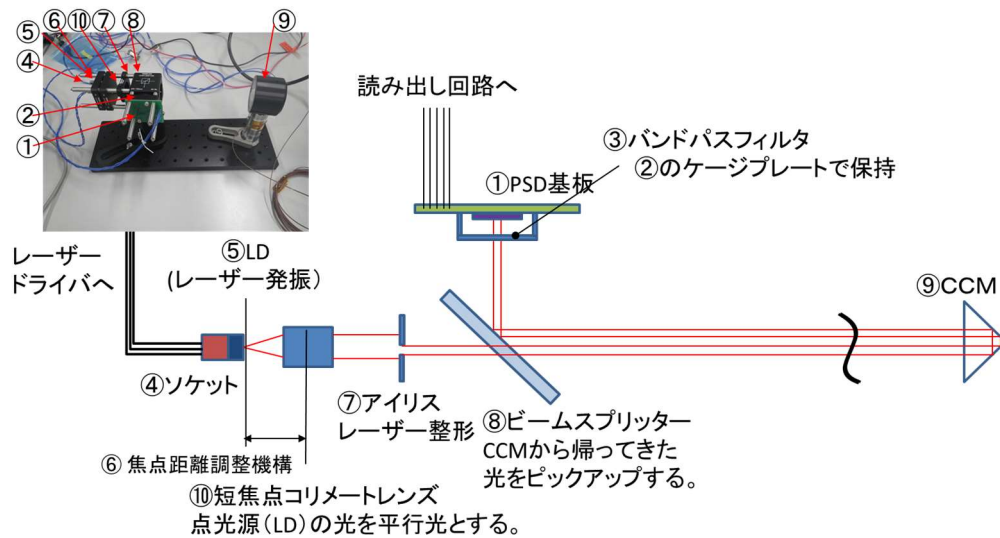


図5 発受光部の外観と光学系の構成

4.3 気球飛行条件

前述のように、本気球実験の目的は、低温・低圧環境下で機能する高精度計測装置の技術実証であり、(1)宇宙利用にむけた低温・低圧環境下での機能実証、(2)気球実験で利用可能な高精度変位計測装置の実証であった。ピギーを希望しており、最高到達点に関しては強い制約はないが、大気圧との差圧に対する機械的な強度保証という観点で、高度 20km 以上であることが望ましい。最高高度飛行時間については、熱膨張によって発生する変位を計測するため、温度環境が 15 分以上、希望としては 30 分以上安定していることが望ましい。

5. まとめ

本論文では、宇宙および大気球環境下での使用を想定した高精度変位計測装置の実証計画について述べた。変位計測は、高精度化において最も基盤的な技術であり、機能実証が達成できた暁には、気球実験で利用可能な汎用的な計測技術として整備すると同時に、宇宙利用にむけて開発研究を継続していく。さらに、ここでの成果は、現在開発中の高精度構造物の形状制御システムに取り込まれる予定である。

謝辞

本研究は、ISAS/JAXA の戦略的開発研究費「高性能科学観測にむけた高精度構造・材料の研究開発」の支援を受けて実施されたものである。

参考文献

- [1] 石村, 後藤, 田中, 水谷, 高精度大型宇宙構造システムとその基盤技術, 第 62 回宇宙科学技術連合講演会, 2018.
- [2] Matthew A. Greenhouse, et al., Status of James Webb Space Telescope integrated science instruments modules system, SPEI 7731, Space Telescopes and Instrumentation 2010 : Optical, Infrared, and Millimeter Wave, 773108.
- [3] Gallo C. Luigi, et al., In-flight performance Canadian Astro-H Metrology System, J. Astron. Telesc. Instrum. Syst. 4(2), 2018.
- [4] 河野ほか, 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, 2011, 第 56 回 宇宙科学技術連合講演会, 2012.
- [5] 河野ほか, 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, 第 31 回宇宙構造・材料シンポジウム, 2015.
- [6] 石村ほか, 高性能科学観測に向けた高精度構造・材料の研究開発, 第 18 回宇宙科学シンポジウム, 2018.