

高精度変位計測装置の実証計画について:2019年度

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, 福家 英之, 田村 誠 (JAXA), 鳥阪 綾子 (首都大), 山崎 真穂 (早大)

Demonstration Experiment of Alignment Monitor (DREAM)

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

1. はじめに

天体・地上の観測対象に関わらず、観測要求の高度化から、観測機器を支持している構造物の高精度化の傾向は、ますます高まっている。要求は多岐に渡るが、ターゲットとなるサイズ・精度の代表例をあげると、10m オーダーのサイズで 100 μ m オーダーの精度要求などがある^{1,2)}。従来の製造・組立の高精度化、形状安定性に優れた材料の採用による対応だけでは、これらの要求に応じることは困難になってきており、運用時における形状制御技術の確立が渴望されている²⁾。形状制御を行うためには、それらの要素技術として、運用環境で使用可能な変位計測センサおよびアクチュエータの開発が必要である。著者らは、このような背景のもとで、各種技術開発を行っているが、本研究では、図 1 に示すような 1 次元構造物に対する高精度変位計測を対象とする。このような 1 次元構造物は、X 線望遠鏡の支持構造物や、赤外線干渉計の支持構造物などに利用・検討されており、今後もさらなる大型化や高精度化が望まれている^{3,4)}。

本研究では、1 次元構造物の両端の相対変位計測を対象とする。この時、長手方向の距離(1dof)、面内変位(2 dofs)、傾斜角(2dofs)、ねじり角(1dof)の自由度がある。長手方向の距離については、レーザ干渉計などの利用が考えられる。ここでは、面内変位(2dofs)、傾斜角(2dof)、ねじり角(1dof)を計測可能な装置の開発を行う。著者らが提案する変位計測装置と類似の計測原理(詳細は 2 節)のものとしては、Neptec 社の Canadian Astro-H Metrology System (CAMS)⁵⁾

がある。CAMS では受光素子として 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。

本計測装置は、すでに Astro-H の熱変形試験(6m のトラスの 10 μ m オーダーの計測)やトラスの形状制御(4m を数十 μ m 以下の誤差)の実証に用いられ、大気環境下においてはその有用性が確かめられている。この計測装置を、気球の運用環境や宇宙空間においても利用可能となるよう、開発をすすめることが現在の課題である。高精度構造物を求めているユーザーに対する技術提供にむけて、まずは気球の運用環境下(低温・低圧)における機能実証をピギーとして行うものである。

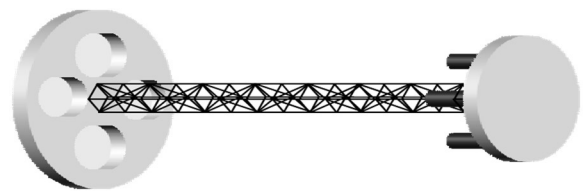


図 1 1 次元構造物.

2. 高精度変位計測装置

2.1 計測原理

本装置は、レーザ光とその受光位置に応じた電流値を出力する PSD からなる(図 2)。PSD 上のレーザ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、フラットミラーやレトロフレクタを介することで、フラットミラーやレトロフレクタの相対傾斜角、相対面内変位を計

測できる(図 3). 詳細は, 昨年度の原稿⁶⁾を参照されたい. さらに, 図 3(b)の計測装置を 2 台搭載することで, ねじり角を計測することもできる. 通常のレーザ変位計は距離計であり, 変位計を固定する大規模なジグが外部に必要となる. このジグの変形は, 計測結果に影響を与えるため, ジグの高精度化という課題が生じる. 一方で, 本提案のセンサは, 計測対象の構造体に直接取り付けることができるため, この問題を回避できるという特徴を有する.

2.2 気球実験用システム構成

気球実験用の高精度変位計測装置は, レーザユニット, PSD, レトロフレクタ, ロガー兼データ処理部, バッテリーの基本構成に加えて, 模擬構造物と伸縮部からなる(図 4, 図5). それぞれの質量およびサイズを表 1 に示す. 計測装置単体(データ処理系除く)は, 総質量約 380g であるが, データ処理系のための気密容器とバッテリーが質量の大半を占めていることがわかる. 模擬構造体は, ピギーとしての搭載性を考慮して, 0.5m とした.

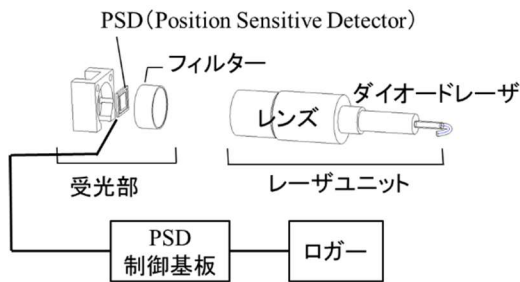


図 2 基本構成図.

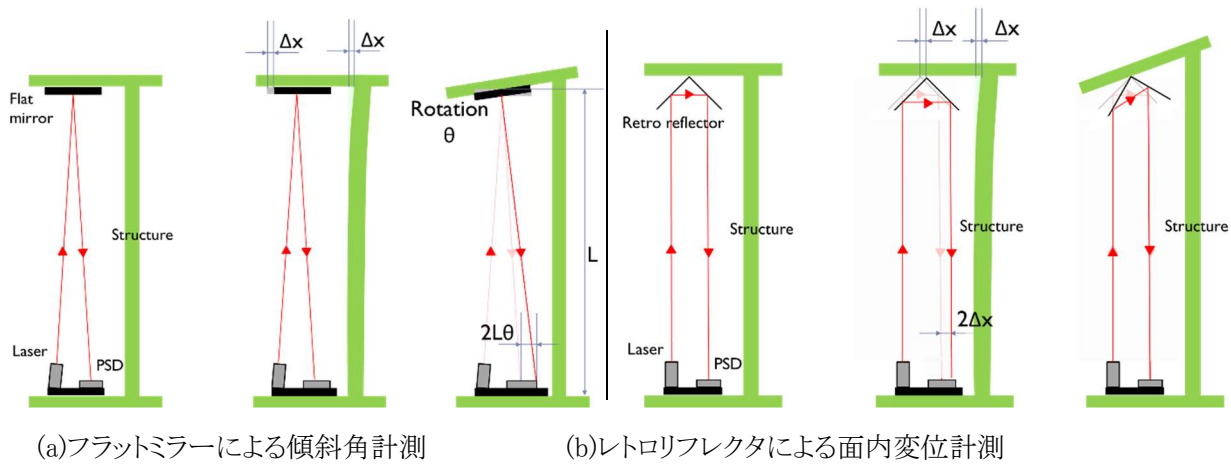


図 3 高精度変位計測装置の測定原理.

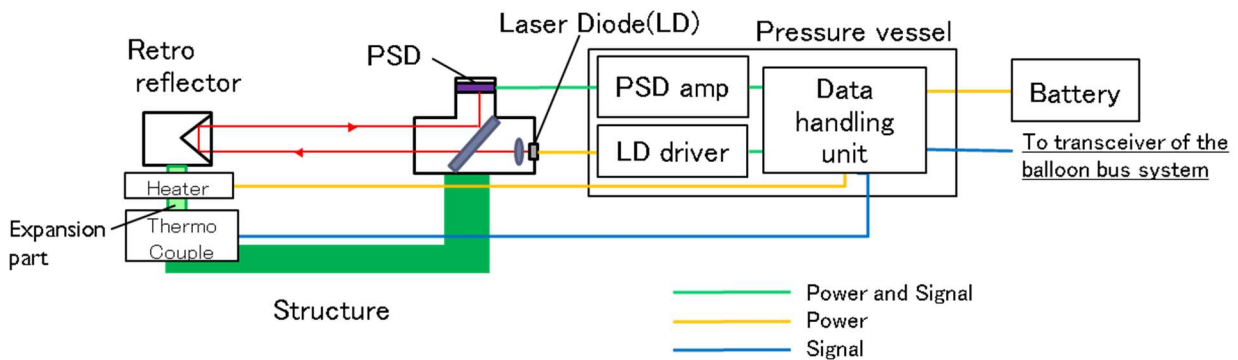


図 4 気球実験用の高精度変位計測装置のシステム構成.

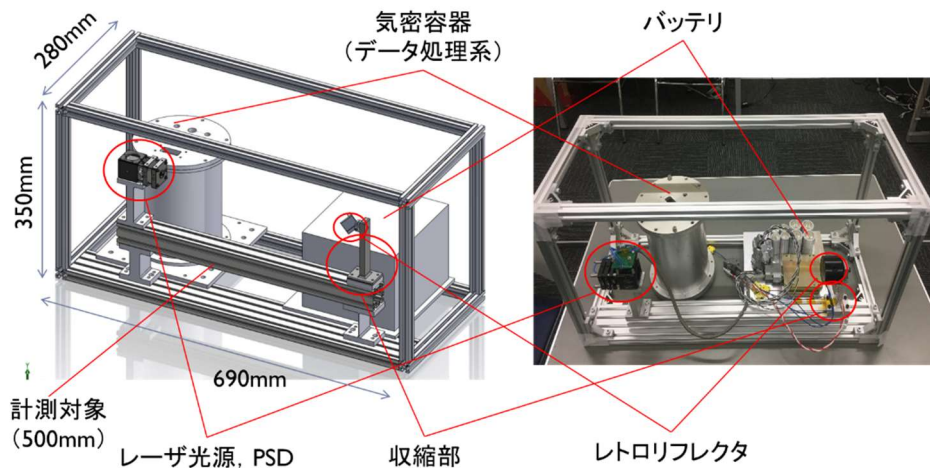


図 5 気球実験用の高精度変位計測装置の外観(外側フレームは搭載時には取り外す)

表 1 構成品一覧

名称	構成品詳細	質量[g]	サイズ[mm]
LD-PSD ユニット	Laser Diode, PSD, ビームスプリッタ	350	38x76 x89 (W D H)
レトロリフレクタ	レトロリフレクタ	30	直径 25.4
気密容器	気密容器, コネクタ, 取付プレート	3200	外径 140, 高さ 194
固定用ジグ	LD-PSD ユニット固定用, レトロリフレクタ固定用	300	高さ 135mm
データ処理系	U-TeCS, PSD アンプ, 熱電対アンプ	740	
バッテリーユニット	バッテリー, 取付プレート	2500	
模擬構造体	長さ 500mm の棒材, キネマチックマウント	1600	長さ 500
PI-IF	PI-IF, ケーブル, コネクタ	500	
取付 IF 部材		2100	長さ 650, 断面 80x40
その他	フロート, 外部 LED, ハーネス, コネクタ	2700	
合計		14020	690x280x350

2.3 気球実験の獲得目的とフライト条件

提案する変位計測装置の気球実験では、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、その量を計測することで機能実証を行う。適切な精度での計測ができることを実証することで、以下の2点の達成を狙う。

(1) 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実証

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

上記の目的のため典型的な大気球実験の運用環境(低温・低圧)での実証が望ましいが、-30度以下、0.1atm以下を一つの目安として、高度要求を20km以上として設定する。この環境下での変位計測の機能実証が実験目的である。

変位計測装置の機能実証を行うためには、計測装置で計測された変位が正しいかを判断するためのリフ

ァレンスが必要となる。リファレンスとして、規定の変位を上空で発生させることが考えられるが、電動ステージなどによる変位発生については、低圧低温環境での動作に懸念が有り、より単純なシステムで規定量の変位を発生できることが望ましい。そこで、我々はヒータによる人工的な熱膨張を発生させることで、変位を実現し、熱電対による温度データから、その変位量を推定することとした。この温度データからえられた変位量をリファレンスとして、変位計測装置の計測結果を評価する。この人工的に与えられた熱膨張以外の要因によって発生する変位との切り分けを行うために、以下の対策を行う。模擬構造体は、キネマチックマウント(板バネ部材)でゴンドラと結合し、ゴンドラの変形による構造体の伸びや曲げを抑制する。人工的な熱膨張は、周期的なものとし、温度や変位の計測データのうち、特定の周波数成分のみを扱うことで、外乱の影響を排除する。発生可能な変形量と周期との関係から、周期は 300 秒以上と設定する。2 サイクル以上の熱負荷を印加するために、フライトは 10 分以上を希望する。

3. 高精度変位計測装置の開発状況

現在までに、構造部材、変位計測装置のハードウェア開発は終了している。気密容器の気密性および耐圧性の確認も行った。気密試験では、差圧 89kPa を印加し、2 時間での圧力変動が 0.5%以下であることを確かめた。気密容器の耐圧試験では、2.5 気圧を水压で加え、1 時間保持し、圧力低下及び破損がないことを確認した。強度の評定箇所は、各部の締結部であるが、放球およびパラシュート開傘衝撃に対して、軸破断、せん断破壊、滑りに対する評価を行い、倍以上のマージンを有していることが確認された。

変位計測装置の低温・低圧環境下での特性は、2019/3/18-20 において JAXA 宇宙科学研究所相模原キャンパスにて、大気球グループ所有の低温低圧槽にて評価を試みた。槽内を-40 度、3hPa に設定し、試験を実施したが、室温から温度を低下させる途中(約 0 度付近)で PSD における受光レベルが急激に

低下するという現象が生じた。これは、レーザの中心波長が温度とともに変化した結果、PSD 前面に配置したバンドパスフィルタによって減光されたことが原因であった。バンドパスフィルタを除去したところ、これらの現象が改善されることを恒温槽試験によって確かめられている。今後、データ処理系の開発後、全系を低温・低圧槽に設置し、低温・低圧環境下での特性評価を行う予定である。

4. まとめ

高精度変位計測装置の実証計画について、装置概要から開発状況までをまとめた。変位計測は高精度構造物の実現の根幹となる技術であり、提案する気球実験による実証が達成されることによる影響は大きいと考えられる。ここでの成果は、気球搭載用の汎用変位計測装置として成熟度をあげていくとともに、宇宙用の形状制御装置の開発につながることを予定している。

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) W. K. Belvin, "Advances in Structures for Large Space Systems," *AIAA-2004-5898*, AIAA Space 2004 Conference and Exhibit, 2004.
- 2) 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," 宇宙科学技術連合講演会 2019.
- 3) K. Mori, et al., "A broadband X-ray imaging spectroscopy with high-angular resolution: the FORCE mission," 宇宙科学シンポジウム, Jan., 2018.
- 4) K. G. Carpenter, "The future of space-based interferometry," NOAO Future directions for interferometry workshop2006.
- 5) G. C. Luigi, et al., In-flight performance Canadian Astro-H Metrology System, *J. Astron. Telesc. Instrum. Syst.* 4(2), 2018.
- 6) 石村ら, 高精度変位計測装置の実証計画について, 大気球シンポジウム 2018.
- 7) T. Miyazaki, et al., "Novel Technique for Thermal Deformation Test Utilizing Periodic Heating" European Conference Spacecraft Structures, Materials and Environmental Testing, 2018.