

高精度変位計測装置の実証結果と展望 2022 年度

石村康生 (早大), 河野太郎 (JAXA), 宮下朋之 (早大), 鳥阪綾子 (都立大), 田中宏明 (防衛大), 小木曾望 (阪公大), 安田優也, 塚野達樹, 菊谷冬馬, 寺田怜央, 風間隼太郎, 二坂匠 (早大), 土居明広, 山谷昌大, 中尾達郎, 福家英之, 水村好貴 (JAXA), 定村嵐 (早大)

Demonstration Experiment of Alignment Monitor 2 (DREAM2) -FY2022-

K. Ishimura (Waseda Univ.), T. Kawano (JAXA), T. Miyashita (Waseda Univ.),
A. Torisaka (Tokyo Metropolitan Univ.), H. Tanaka (National Defense Academy),
N. Kogiso (Osaka Metropolitan Univ.), Y. Yasuda, T. Tsukano, T. Kikutani, L. Terada, S. Kazama,
S. Nisaka (Waseda Univ.), A. Doi, M. Yamatani, T. Nakao, H. Fuke, Y. Mizumura (JAXA),
and R. Jomura (Waseda Univ.)

1. はじめに

本研究開発の背景は、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である。詳細な研究背景は過去の報告¹⁻⁴⁾に譲り、論文では FY2021 年度の実験計画からの差分と、大気球実験による実証結果とそれを受けての展望について述べる。

実験装置では、レーザ光射出部とレトロリフレクタ間の距離は 603mm である。

B22-07 気球工学実験(新バラスト搭載法の飛翔試験)では、2022 年 6 月 6 日午前 3 時 44 分に放球、放球後 1 時間 20 分後に高度 27km で水平浮遊に移行し、午前 6 時 19 分に切り離された。

2. 高精度変位計測装置(DREAM2)のシステム

概要と 2022 年度の課題

本研究開発の対象となっている高精度変位計測装置は、構造物上の離れた 2 点間の相対変位(2 点を結ぶ直線の直交方向の 2 自由度)を計測するものである(図 1)。レーザ射出部、レトロリフレクタ、PSD 受光部が主要構成部品である。図 1 に示すように、PSD 受光部では、レーザ射出部に対するレトロリフレクタの相対変位の 2 倍の変位が計測される。

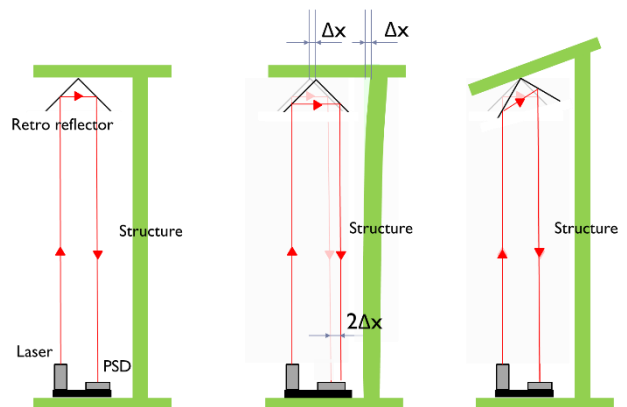
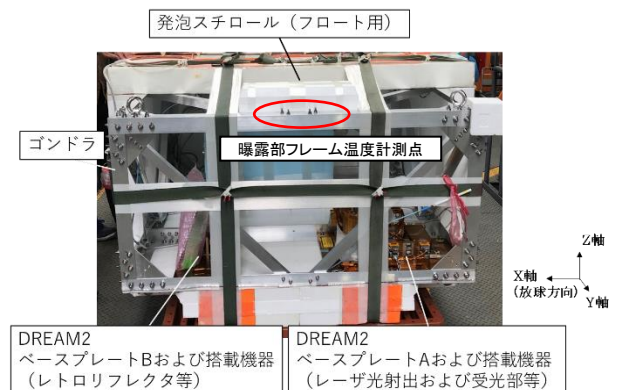
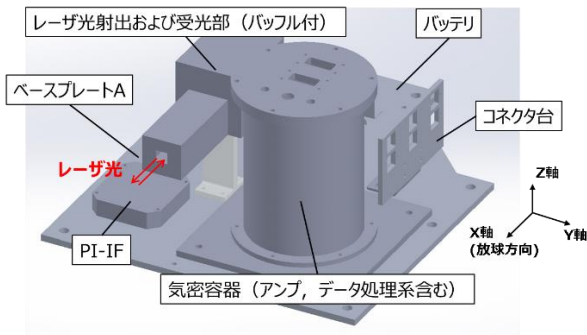


図 1 レトロリフレクタによる面内変位計測

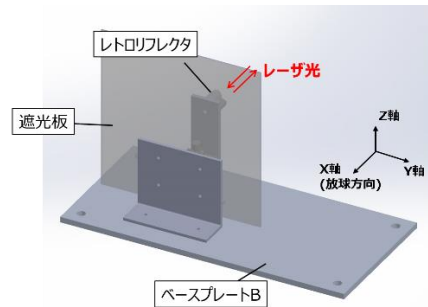
2022 年度の課題は、昨年度の積み残しである太陽光曝露環境下での機能実証と、サンプリングレートの向上(1Hz→10Hz)による低周波振動の計測の 2 点である。そのため、システムはできる限り簡素化され、B22-07 気球工学実験(新バラスト搭載法の飛翔試験)のピギーとして採用された。太陽光曝露のために、ゴンドラ(気球 G 開発)への搭載時に、我々の高精度変位計測装置(DREAM2)の搭載側では、フロートとしての発泡スチロールが外されている(図 2(a))。本



(a) フライト時の外観図



(b) ベースプレート A および搭載機器



(c) ベースプレート B および搭載機器

図2 ゴンドラ上の DREAM2 の搭載機器配置

3. 2022 年度のフライト結果

3.1 計測変位データと各部の温度データ

図3 にフライト前後に計測された相対変位データを示す。レトロフレクタのレーザ射出部に対する Y, Z 方向(図2)の相対変位(2倍されている)が計測されている。放球時が0秒であり、そのタイミングでの変位を0とした。放球前にも、ゴンドラの吊り下げや放球台車の移動、各部の温度変化があり、それに伴った変位が計測されているものと考えられる。

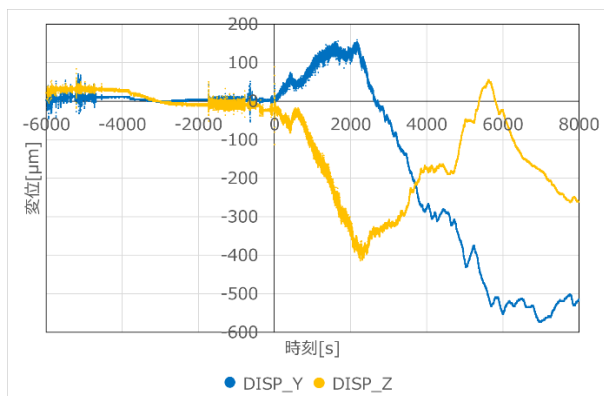


図3 計測された相対変位データ(0秒が放球)

ゴンドラの太陽光曝露部フレーム上に配置された温度計(図2)とゴンドラ上で Y 方向の逆側に配置された非曝露部フレーム上の温度計の温度履歴を 図4 に示す。ノイズが大きいので前後 20 点の移動平均をとっている。5000 秒までは、非曝露部フレームの方が、曝露部フレームに比べて、最大で 20 度近く温度が高くなっていることがわかる。全体としては、2000 秒過ぎぐらいまで温度が徐々に低下している。本温度計は JAXA 気球 G が搭載したものであり、データを提供いただいた。

上記に加えて、ベースプレート A,B 遮光板外面(+X 軸), レトロフレクタ治具, PSD 受光部, バッフル外部の温度履歴データを取得している。現在、これらの温度データをもとに熱変形解析を行い、計測された変位データを評価中である。

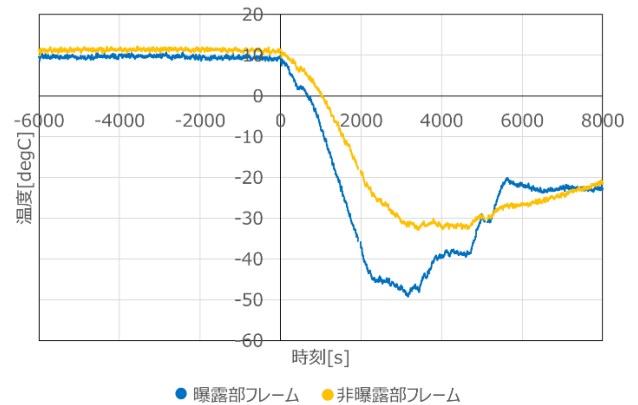


図4 ゴンドラ上のフレーム温度

3.2 太陽光曝露環境でのPSD受光量

放球時の地上気象は曇り(霧)であったが、上空では太陽光に曝露された環境が実現されていた。フライト前後における PSD 受光量に対応する電圧データを 図5 に示す。1~9V の範囲であれば正常に光源位置が計測可能である。すべての区間において、7.2~8.1V の範囲にとどまっていた。レーザは温度変化によって強度が変化するためその影響もあると考えられる。図5の結果から、2021 年度フライト前に確認された太陽光による飽和は起きていないことが確かめられた。また、図3 に示した計測データに対しても、放球前、放球の瞬間などの衝撃荷重が加わる時を除き、異常

な不連続データは確認されていない。以下では、各太陽方向に対する計測データをより精緻に評価する。

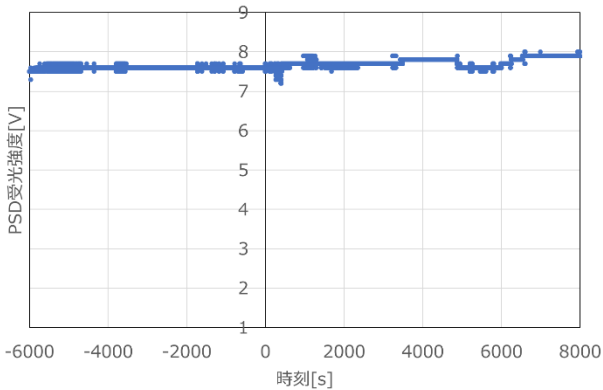


図 5 PSD 上での受光強度

JAXA がゴンドラに搭載したアクションカメラの映像(図 6)から、太陽のゴンドラに対する方位角を導出した。太陽光がゴンドラに対して 1 周している時間帯(ここでは午前 4:29:17 から 4:30:41)を切り出し、その時間帯での変位計測結果を評価した。この時の太陽高度は 6 度である。太陽方向に対応させた受光強度と変位を図 7,8 に示す。

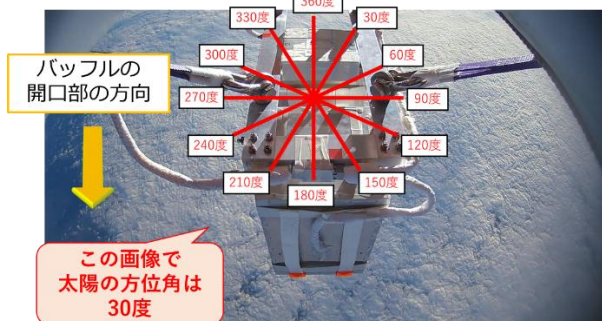


図 6 アクションカメラによるゴンドラ下部のバラスト映像

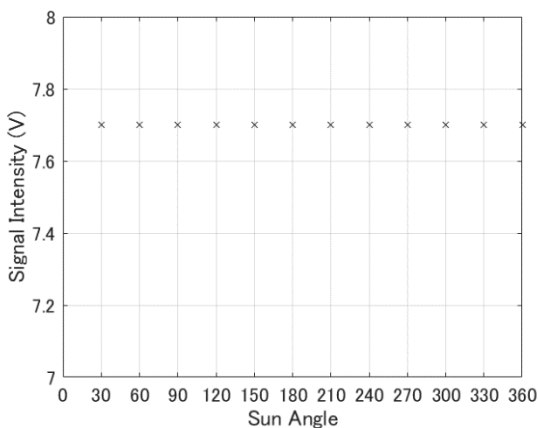


図 7 太陽方向に対する PSD 受光量

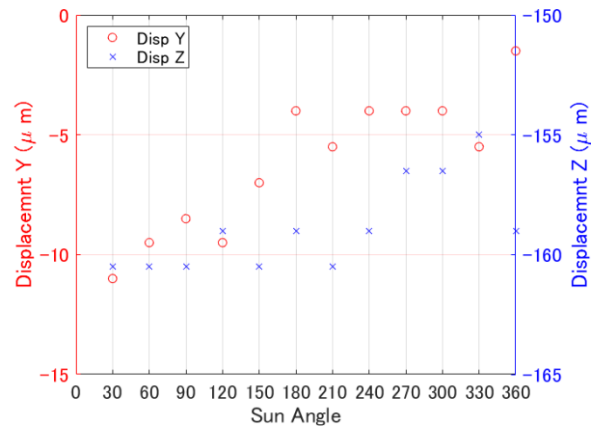


図 8 太陽方向に対するレトロリフレクタのレーザー光射出部に対する相対変位

上図の結果より、PSD 受光量は一定であり、変位についても、特定の太陽方向における異常データや太陽角に対して正弦波的なデータが計測されていないことがわかる。また、同様にゴンドラが太陽に対して一周している午前 4:48:37 からと 4:54:28 からのデータでも同様の評価を行い、異常な計測値が存在しないことを確認した。これらのことから、バッフルおよび遮光板が適切に機能し、太陽光曝露環境下での計測ができていていると考えられる。

3.3 放球時の低周波振動

放球時に PSD によって計測されたレトロリフレクタのレーザー光射出部に対する相対変位とゴンドラに取り付けられた加速度データを図 9, 10 に示す。X,Y,Z の定義は、図 2 を参照されたい。加速度計は JAXA 気球 G が搭載したものであり、データを提供いただいた。PSD は 10Hz、加速度計は 20Hz であり、同期していないことに留意されたい。

図 9 からサンプリングレートの上昇によって、当初の目的であった放球時に発生した低周波振動による変形が計測できたと考えられるが、必ずしも計測された相対変位(図 9)とゴンドラ加速度(図 10)にきれいな相関があるとはいいがたい。

より詳細な評価のために、変位と加速度の連続ウェーブレット解析を行った(図 11,12)。ウェーブレット解

析結果をより、Y,Zの両方向の変位および加速度において、1Hzと2Hz近傍の振動が確認される。

図9～12より、加速度と比べて、変位の方が複数の周波数成分を含んでおり、複雑な振動となっていることがわかる。ゴンドラの下には、図13に示すような100kg程度のバラスト(箱含む)が吊り下げられており、気球に対して、2重振り子のような構成となっている。ここで計測される変位は、ゴンドラの変形の影響を強く受けているが、この変形は、ゴンドラの加速度に加えて、ゴンドラ下に吊り下げられたバラストの運動にも依存する。このことが、変位の方が複数の周波数成分を含んだ複雑な振動となっている理由の一つであると考えられる。

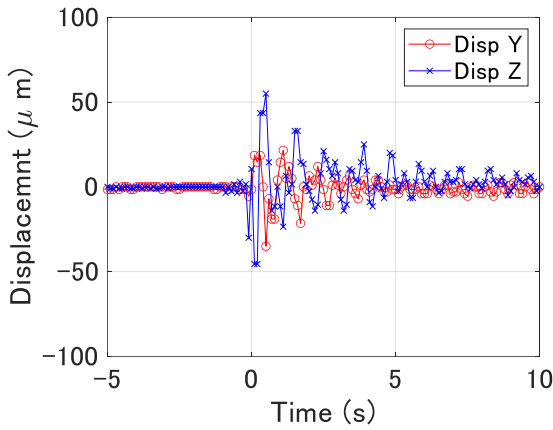


図9 レトロリフレクタのレーザ光射出部に対する相対変位(放球時)

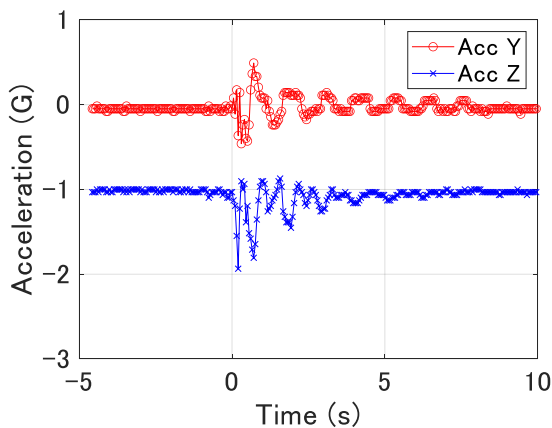


図10 ゴンドラ加速度(放球時)

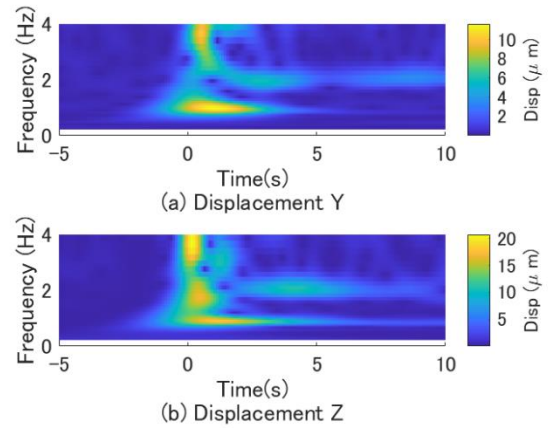


図11 レトロリフレクタのレーザ光射出部に対する相対変位(放球時)のウェーブレット解析結果

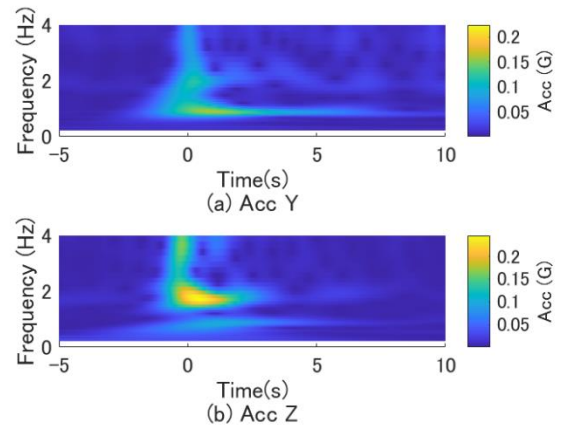


図12 ゴンドラ加速度(放球時)のウェーブレット解析結果

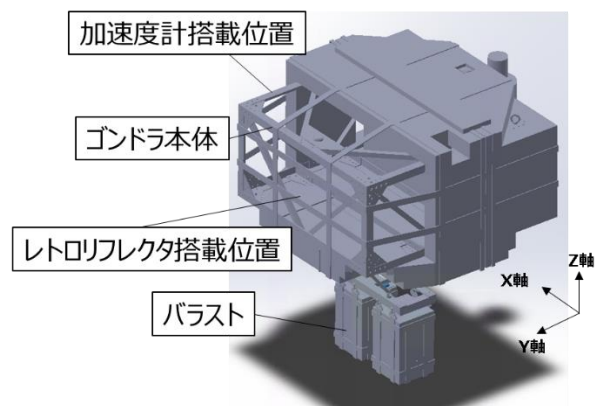


図13 ゴンドラ本体とバラストの配置

4. 今後の展望

今後は、3.1 節で示した各部の温度データから構造解析によって熱変形の評価を行う。熱変形は、気球 G 用意のゴンドラ、DREAM2 チーム用意のベースプレートおよび変位計測系計測系固定治具、計測系内部の熱変形の 3 種類が考えられる。それぞれの部位およびインタラクションによる熱変形を評価する。現在、ゴンドラについては、図 14 に示すように、各部材の温度上昇に対する変形を評価中である。

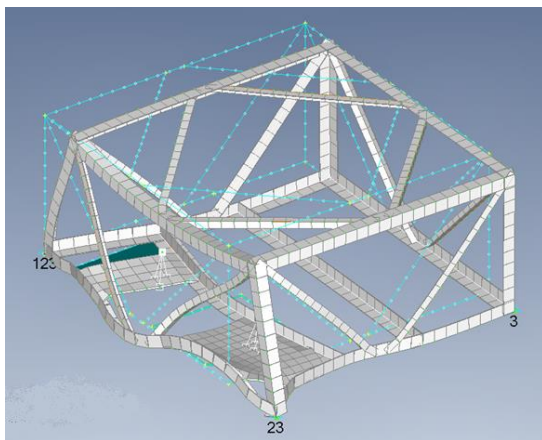


図 14 ゴンドラの熱変形解析例

その後、これらの熱変形の解析値と変位計測装置の変位計測値との整合性の評価を行う予定である。ただし、今回の実験は機能実証であったため、これらの定量的な評価は当初スコープ外であった。そのため、構造設計において、熱変形予測がしやすいような構造といったことは考慮しておらず、締結部の熱変形時の滑りなども含めて、評価が難しいと考えられる。

次年度以降は、計測系の原点ドリフトも含めた精緻な定量評価を行うことを目的とした実験系の構築し、気球実験環境下でのさらなる高精度計測実施に向けて準備を進めていく予定である。

5. まとめ

本論文では、気球実験において用いることができる高精度変位計測装置について、2022 年度の実証結

果と展望について示した。太陽光曝露環境において、異常データが検出されていないことから、適切にバッフルが機能したと考えられる。また、サンプリングレートを 1Hz→10Hz に向上させることで、低周波の振動を捉えることができた。しかしながら、さらなるサンプリングレートの高周波化が望まれることが判明した。また、実際に計測された変位の定量的な妥当性については、今後、ゴンドラも含めた熱変形解析を行う予定である。

謝辞

本研究は、宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所が提供する大気球の飛行によって実施されました。大気球 G メンバーの献身的なご協力に心より感謝いたします。また、本実験を実施するにあたって、各種部品の加工に協力いただいた早稲田大学工作実験室のメンバーに加えて、様々な技術アドバイスを頂いた気球 VLBI メンバー、火星飛行機メンバーに、深く感謝いたします。なお本研究は、宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所戦略的開発研究費および早稲田大学の特定課題の支援を受けています。ここで謝意を表します。

参考文献

- 1) 河野太郎他, “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.
- 2) 石村康生他, “高精度変位計測装置の実証計画について:2020 年度,” 大気球シンポジウム, 2020.
- 3) 石村康生他, “高精度変位計測装置の実証結果と展望 2021 年度,” 大気球シンポジウム, 2021.
- 4) 石村康生他, “高精度変位計測装置の実証実験について -2022 年度-,” 宇宙科学技術連合講演会, 2022.