

高精度機器インターフェースの実証:DREAM3

石村康生, 菊谷冬馬, 風間隼太郎, 定村嵐, 青木信篤, 小野寺隼作, 江熊信康(早大),
河野太郎 (JAXA), 宮下朋之 (早大), 田中宏明(防衛大), 鳥阪綾子(都立大),
土居明広, 山谷昌大, 中尾達郎, 福家英之, 水村好貴(JAXA)

Demonstration of highly precise interface mechanism: DREAM3

K. Ishimura, T. Kikutani, S. Kazama, R. Jomura, N. Aoki, S. Onodera, N. Eguma (Waseda Univ.),
T. Kawano (JAXA), T. Miyashita (Waseda Univ.), H. Tanaka (National Defense Academy),
A. Torisaka (Tokyo Metropolitan Univ.), A. Doi, M. Yamatani, T. Nakao, H. Fuke, Y. Mizumura (JAXA)

1. はじめに

天体/地上など、観測対象に限らず、その観測性能の向上の為に、観測機器の空間配置を高精度に維持する必要がある。我々の研究グループでは、この工学課題の一つである高精度形状維持技術の研究開発を包括的に実施している。その中でも本論文では、大気球実験において利用可能な高精度変位計測装置 (DREAM: Demonstration Experiment of Alignment Monitor) と機器の取付インターフェースの高精度化に焦点を当てる。

高精度変位計測装置の詳細な研究背景と開発経緯は過去の報告¹⁻⁵⁾に譲るが、現状までの開発・検証状況の概要を表1に示す。2022年度までの各種実験により、太陽光曝露環境下、低温低圧環境下での機能実証は実施済みである。しかしながら、高精度変位計測装置によって、大気球環境下で計測された変位について、長時間にわたっての原点ドリフトの補正も含めた精度評価は実施できていない。

表1 高精度変位計測装置の開発・検証状況

FY	検証項目	検証対象	温度	気圧	計測対象	
2014	ASTRO-H 熱変形試験	長作動距離の実証	システム全般	常温	大気圧	6mの高精度構造物 (ASTRO-H)
2015	放射線試験	PSD 放射線耐性	PSD	常温	大気圧	NA
2018	真空試験	真空環境下での性能	発受光部, リフレクタ	常温	真空	0.2mの試験用供試体
2021	大気球実験	低温・低圧環境下での機能	システム全般	低温	低圧	1mの試験用供試体
2022	大気球実験	太陽光曝露環境下での機能, 低周波振動計測	システム全般	低温	低圧	1m規模のゴンドラ

2021年度の大気球実験時に計測した変位は、人工的な特定周期の変位(該当周期成分のみを取り出

した)であり、原点ドリフトは評価対象外であった。また、2022年度の大気球実験時には、気球 G 開発の汎用ゴンドラを計測したが、検証の主目的が異なるため、温度計測点十分でなかったこと、ゴンドラの熱変形の事前評価は実施していなかったことが原因で、計測された変位の正解が不明であった⁶⁾。次節以降では、計測精度への影響要因について述べたのち、2024年度の大気球実験の課題である計測精度評価と機器インターフェースの高精度化にむけた実証についてまとめる。

2. 高精度変位計測装置(DREAM)の計測精度

2022年度の大気球実験における計測変位に対する精度評価に課題が残ることを前節で述べたが、まず計測精度に対する主要な影響要因を分析する。高精度変位計測装置は、レーザ発光系、反射系、受光系からなり、それぞれの系における計測精度への影響要因を表2に示す。これらの影響要因は大半が温度変化によるものである。

いくつかの要因をまとめて、恒温槽による実験を行い個々の温度依存性を評価した。レーザ発光部、PSD、ビームスプリッタからなる計測系に対して、恒温槽によって $\Delta T = -50^{\circ}\text{C}$ を与えた計測結果から、表2のA1.1~A1.3, A2, C1, C3の要因に対する計測変位の温度補正式を作成した。その補正を行ってもなお説明できない計測変位は、 $-34\mu\text{m} \sim +52\mu\text{m}$ であった。次に、A1.4, A1.5, C2の要因に対する評価のために、LDドライバとPSDアンプのみを恒温槽にいれ、 ΔT

= -55°Cを与えた計測結果から、計測変位の温度補正式を作成した。その補正を行ってもなお説明できない計測変位は、10μm以下であった。以上のことから、実際のフライトでの温度変化を $\Delta T = -70^\circ\text{C}$ と仮定し、実験時の計測誤差を考慮すると、補正できない計測誤差が $\pm 100\mu\text{m}$ 程度存在すると想定される。そこで、2024年度の大気球実験では、構造物の形状変形を $\pm 100\mu\text{m}$ の精度で計測することを目標とする。次節では、計測対象とする構造物について述べる。

表 2 高精度変位計測装置の計測精度への影響要因

ID	系	構成部品	計測精度への影響要因
A1.1	レーザー発光部	レーザーダイオード (LD)	LD 固定部の並進変位 (熱変形等)
A1.2			LD 固定部の回転変位 (熱変形等)
A1.3			レーザー光発散角変動 (温度依存)
A1.4			出力強度変動 (LDドライバの温度依存)
A1.5			波長変動 (LDドライバの温度依存)
A2.1	レンズ	レンズ	レンズ固定部の並進変位 (熱変形等)
A2.2			レンズ固定部の回転変位 (熱変形等)
A2.3			レンズの曲率変化 (熱変形等)
A2.4			レンズの中心厚変化 (熱変形等)
A2.5			レンズの比屈折率変化 (温度依存)
B1.1	反射部	レトロフレクタ (RR)	RR の 3 面の相対角変化 (熱変形等)
B1.2			RR 固定部の並進変位 (熱変形等)
B1.3			RR 固定部の回転変位 (熱変形等)
C1.1	受光部	PSD	PSD のサイズ変化 (温度依存)
C1.2			PSD 固定部の並進変位 (熱変形等)
C1.3			PSD 固定部の回転変位 (熱変形等)
C2.1		PSD アンブ	ノイズ (温度依存)
C2.2		スケールファクタ (温度依存)	
C2.3	原点ドリフト (温度依存)		
C3.1	ビームスプリッタ (BS)	BS	BS 固定部の並進変位 (熱変形等)
C3.2			BS 固定部の回転変位 (熱変形等)
C3.3			BS のサイズ変化 (熱変形等)

3. 計測対象と高精度機器インターフェース

2024年度の大気球実験で計測対象としている構造物は、観測機器の取付インターフェースを模した2枚の板からなる(図1)。機器の取付面の線膨張係数のミスマッチによるバイメタル変形は、古くからある課題であるが、未だに多くの観測機器で問題となっている。本実験では、インバー合金製のアッパーパネルと、アルミ製のベースパネルによるバイメタルの熱変形を対象とし、この取付インターフェースにおける応力機構 (SRM: Stress Relief Mechanism) を作成し、その性能評価も同時に行う(図2)。

変位計測と応力緩和機構の性能評価が目的であるため、ここでは、計測系を2式用意し、応力緩和機構ありの場合の変形と応力緩和機構なしの場合の変形の両方を計測する(図3)。応力緩和機構の有無に

よる計測変位の差異を表3に示す。応力緩和機構によって、ミリオーダーの変形が100μm程度まで抑制できていることがわかる。

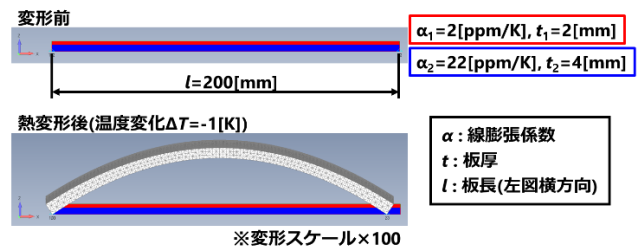


図 1 バイメタルの変形

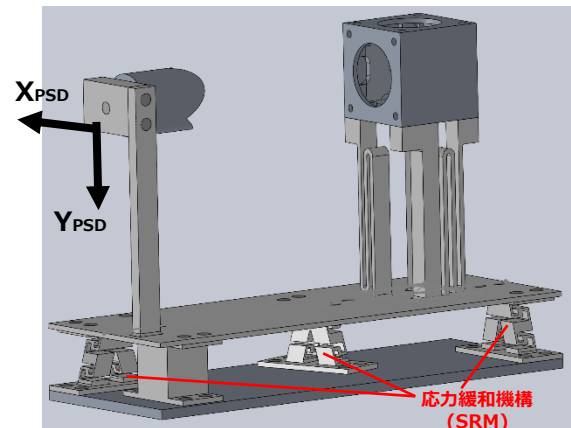


図 2 応力緩和機構 (SRM) の適用イメージ



図 3 SRM 無しと有りの場合の変形の様子 ($\Delta T = -50^\circ\text{C}$)

表 3 SRM の無しと有りの場合の計測変位 (計測予想値)

	X(mm)	Y(mm)
SRM 無し	0.36	2.99
SRM 有り	0.11	0.18

4. DREAM3 のシステム概要と期待される成果

2024年度大気球実験:DREAM3では、ピギーを想定している。図4にシステムブロック図を示す。変位計

の変位へ抑制する. この応力緩和機構の材料として, 線膨張係数が 1ppm/K のインバー合金を用い, 最新の三次元造形技術を適用することで, 高い形状安定性を実現する. このような応力緩和機構の技術は, 気球実験での各種観測機器の搭載において広く活用可能なものである.

2023.

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性能実証と観測機器のインターフェース部の応力緩和機構の実証についての計画を述べた. これらの技術は, 高精度な観測において最も基盤的な技術の一つであり, 本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技術として整備すると同時に, さらには宇宙利用にむけて開発研究を継続していく. また, 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む予定である.

謝辞

本研究を実施するにあたって, 低熱膨張率インバーの 3D 造形を日本鑄造株式会社様にご協力いただきました. また, 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 (高精度インターフェース), 早稲田大学の特定課題 (変位計測装置), JSPS 科研費 JP23K04238 (応力緩和機構) 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.
- 5) 石村康生他, “高精度変位計測装置の実証結果と展望 2022 年度,” 大気球シンポジウム, 2022.
- 6) 定村嵐他, “大気球実験用ゴンドラの変形評価について,” 日本機械学会関東支部 第 29 期総会講演会,