

A11 ステレオ画像相関法を用いた CFRP と金属の締結構造体の熱変形評価 Evaluation of Thermal Deformation of Fastening Structure of Carbon Fiber Reinforced Plastic and Metal Using Stereo Digital Image Correlation

○安部 海里, 張 月琳, 米山 聡 (青山学院大学)

石村 康生, 後藤 健 (JAXA), 鬼頭 玲, 天沼 孝仁, 阿部 和弘 (日本飛行機株式会社)

Kairi Abe, Yuelin Zhang, Satoru Yoneyama (Aoyama Gakuin University)

Kosei Ishimura, Ken Goto (JAXA), Akira Kito, Takahito Amanuma, Kazuhiro Abe (Nippi Corporation)

Abstract

This paper describes the evaluation of thermal deformation of FOB (Fixed Optical Bench) that is used in satellite structures. It must be designed to be a stable toward temperature change under space environment. Thermal deformation is measured by ground test. A stereovision is able to measure shape, displacement and strain of specimen in a wide range without contact using multiple cameras. First, thermal deformation test of steel is performed and results show the effectiveness of the stereovision. After this, thermal deformation test of the FOB is conducted and the thermal displacement and strain are measured. The result show influence for fastening.

Key Words: Space Materials, CFRP, Thermal Deformation, Thermal Strain, Stereo Digital Image Correlation

1. 緒論

CFRP は低熱膨張率、比強度・比剛性に優れており、近年宇宙構造物の主要な構造材料として用いられている。また、その宇宙構造物である人工衛星は近年、高分解能観測のため、高精度な観測性能が要求されており、構造の安定性が重要である。しかし、実際には人工衛星に設置された機器の微小振動、打ち上げ時の構造の変動誤差などの観測誤差要因がいくつかある。その中でも、軌道上の宇宙環境における日向と日陰による温度差などの温度変化に起因する構造体に発生する熱ひずみが問題となっている⁽¹⁾。温度変化によって、アンテナ、光学架台、望遠鏡などが変形することで観測機器の光軸がズレ、観測性能に影響を及ぼす。この熱ひずみは打ち上げ前の数値解析により評価されるため、解析モデルの妥当性が重要である。正確な熱ひずみを求めることが、人工衛星の熱的寸法安定性を高くすることにつながる。

解析モデルの妥当性の確認のため、人工衛星「ASTRO-H」全体の熱変形試験が実施された⁽²⁾。ASTRO-H の各部材を加熱し、変位を計測した結果、多くの箇所で解析と実験とで良い精度で合致したとされている。しかし、FOB (Fixed Optical Bench) とよばれる、望遠鏡や検出器を支える固定式光学架台において誤差が生じたことで、解析モデルの見直しが必要となった。原因として、解析モデルに用いられている FOB の線膨張係数がひずみゲージによる測定値であること、また、FOB の締結部の複雑な構造のひずみを求める事が困難であることが挙げられる。ひずみゲージでは局所的な熱ひずみしか得ることができないことから、複雑な挙動を示すと考えられる締結構造体の測定には適していないと考えられる。

そこで本研究では、非接触・全視野測定ができるステレオ画像相関法⁽³⁾を使用することで締結構造体の熱ひずみ分布を測定することで、熱変形挙動を観察する。

2. ステレオ画像相関法

本研究では 2 台のカメラで面外方向変位を測定する方法としてステレオ画像相関法を用いる。

ステレオ画像相関法は画像相関によって得られる複数の画像の同一点にステレオ法を用いることで、3 次元形状・変位を求める方法である。

Fig.1 に 2 台のカメラと測定対象物の関係図を示す。P(u_u, v_u), P(u_v, v_v) は 2 台のカメラの画像面上の点であり、P(x, y, z) は測定対象物における座標、O_H, O_L はそれぞれのカメラのレンズの中心である。画像平面上の座標系(u, v) と三次元座標系(x, y, z) の関係は次式で示すことができる。

$$u = \alpha \frac{r_{11}x + r_{12}y + r_{13}z + t_x}{r_{31}x + r_{32}y + r_{33}z + t_z} + \gamma \frac{r_{21}x + r_{22}y + r_{23}z + t_y}{r_{31}x + r_{32}y + r_{33}z + t_z} + u_0 \quad (1)$$

$$v = \beta \frac{r_{21}x + r_{22}y + r_{23}z + t_y}{r_{31}x + r_{32}y + r_{33}z + t_z} + v_0 \quad (2)$$

しかし、実際にはレンズの歪曲収差により、仮想投影面座標(u, v) は本来の位置とは異なり歪んだ画像上の点(u', v') として得られる。それらの関係式を次に示す。

$$u' = u + k_1(u - u_0)\{(u - u_0)^2 + (v - v_0)^2\} \quad (3)$$

$$v' = v + k_1(v - v_0)\{(u - u_0)^2 + (v - v_0)^2\} \quad (4)$$

ここで、u, u₀ は画像平面上の主点α, β, γ はスケールパラメータ、r₁₁~r₃₃, t_x~t_z はカメラの位置と向きを表すパラメータ、k₁ は収差係数である。これらのパラメータはカメラキャリブレーションにより求めることができる。式(1)(2)の 2 台のカメラのデータに適用して計算を行うことで x, y, z の 3 つの未知数に対し、u_u, v_u, u_v, v_v の式を得ることができ、3 次元座標(x, y, z) を求められる。

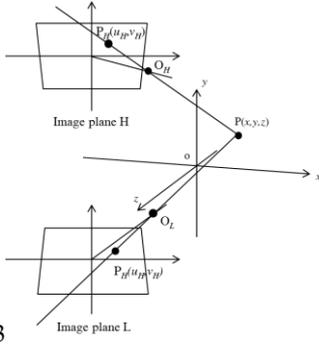


Fig.1 Relationship among two cameras object

3. ひずみ算出方法

ひずみは変位分布を空間座標に沿って微分することにより得られるため、縮結構造体の形状に沿って微分する。しかし、本研究においてはFig.2のように3次元表面上の局所的な一部分を平面とみなし、その部分における局所的な座標系を定義し、その座標系において変位を微分することによりひずみを算出する。3次元表面の一部を局所的に平面とみなしたとき、その平面は次式で近似できる。

$$ax + by + cz = 1 \quad (5)$$

ここで a, b, c は係数であり、最小二乗法などで決定できる。このとき、この平面に関する3つの直交し合う単位ベクトルである、単位法線ベクトル \mathbf{n} 、単位接線ベクトル \mathbf{t}_1 、単位接線ベクトル \mathbf{t}_2 は次式で求める事ができる。ここで \mathbf{j} は y 方向の単位ベクトルである。

$$\mathbf{n} = (n_1, n_2, n_3) = \frac{1}{(a^2 + b^2 + c^2)^{\frac{1}{2}}} (a, b, c) \quad (6)$$

$$\mathbf{t}_1 = (t_{11}, t_{12}, t_{13}) = \mathbf{j} \times \mathbf{n} = \frac{1}{(a^2 + c^2)^{\frac{1}{2}}} (c, 0, -a) \quad (7)$$

$$\mathbf{t}_2 = (t_{21}, t_{22}, t_{23}) = \mathbf{n} \times \mathbf{t}_1 = (n_2 t_{13} - n_3 t_{12}, n_3 t_{11} - n_1 t_{13}, n_1 t_{12} - n_2 t_{11}) \quad (8)$$

ベクトル $\mathbf{n}, \mathbf{t}_1, \mathbf{t}_2$ を用いると、式(9)を用いて3次元座標 x, y, z を $x'-y'$ 面内の平面 ($z' = \text{一定}$) に座標変換することができる。

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{t}_1 \\ \mathbf{t}_2 \\ \mathbf{n} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (9)$$

同様にして、3次元座標 u_x, u_y, u_z も $x'-y'$ 面内の平面 ($z' = \text{一定}$) に座標変換することができる。

$$\begin{pmatrix} u_{x'} \\ u_{y'} \\ u_{z'} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{t}_1 \\ \mathbf{t}_2 \\ \mathbf{n} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{pmatrix} \quad (10)$$

変換後の平面は2次元となり、 z を無視できるので、変位データを最小二乗法により局所座標 x', y' で平面近似すると以下の式(11)(12)に示すことができる。

$$u_{x'} = \alpha_1 x' + \alpha_2 y' + \alpha_3 \quad (11)$$

$$u_{y'} = \beta_1 x' + \beta_2 y' + \beta_3 \quad (12)$$

この変位データを局所座標 x', y' で微分することでひずみを求める。

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{x'} \\ \varepsilon_{y'} \\ \gamma_{x'y'} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial u_{x'}}{\partial x'} \\ \frac{\partial u_{y'}}{\partial y'} \\ \frac{\partial u_{x'}}{\partial y'} + \frac{\partial u_{y'}}{\partial x'} \end{pmatrix} \quad (13)$$

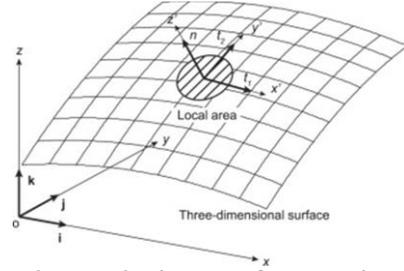


Fig.2 Local area and unit vectors for computing strains on three dimensional

4. 恒温槽の作製

熱変形試験を行うために作製した恒温槽を Fig.3 に示す。外側は木材で内側に断熱材とステンレスを貼り、ラバーヒーターで加熱する。シリコンラバーヒーターによって試験片を加熱し、槽内の温度は温度制御器によって制御される。なお、試験片とヒーターの間にスチールを挟むことでヒートスプレッダーとした。試験片の真上にガラスを貼り、CCD カメラで試験片の撮影を行う。Fig.4 に恒温槽内の任意の点における空気中の温度を測定した結果を示す。 $\Delta T = 26^\circ\text{C}$ に対して最小温度差 1.0°C と温度を一様にできているといえる。しかし、ON/OFF 制御のため温度が上下していることがわかる。よって、本試験では電圧調整器を用いることでヒーターが一定の熱を発生するようし、温度の上下を取り除いた。また、TCC 熱電対を用いて4箇所、加熱中の試験片表面の温度を測定した。さらに、試験中はガラス状の熱気により画像が歪むことを防ぐため扇風機をあて、LED ライトによりカメラの両サイドから試験片を照らすことで撮影を可能とした。また、恒温槽内にもファンを取り付けることで空気の循環を行っている。恒温槽は木でできているため、湿度によって変形するため、室温と湿度の監視を行う。

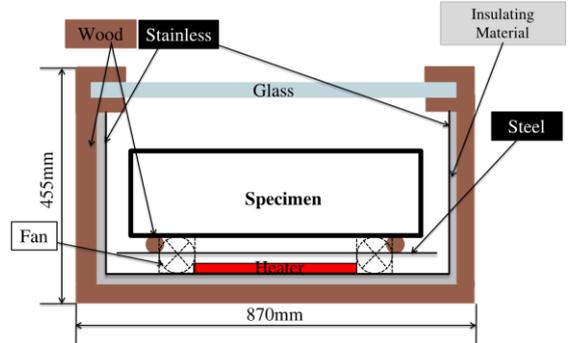


Fig.3 Thermostat chamber

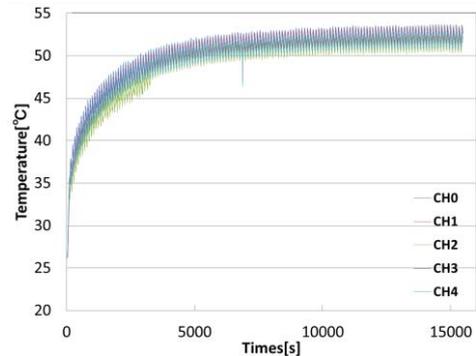


Fig.4 Temperature-time curve

5. 試験片

試験片(FOB)としてCFRPとアルミニウム合金との締結構造体を用いる。試験片をFig.5に示す。試験片の両端がアルミニウム合金、中央がCFRPとなっており、アルミニウム合金がCFRPを包むように接着されている。試験片の寸法は幅194.0mm長さ $l=661$ mm、 $\Phi=120$ mm、 $t=5.04$ mmでありCFRRの積層構成は $42\text{Ply}[0_4/15/90/-15/0_4/15/0_4/-15/0/15/0/-15]_{\text{SYM}}$ である。また $E_1 = 34600\text{kgf/mm}^2$ 、 $E_2 = 2450\text{kgf/mm}^2$ 、TUBE単体の線膨張係数は $-1.15 \times 10^{-6} 1/\text{K}$ である。また、ステレオ画像相関法を用いる際には、試験片にラッカーズプレーを用いてランダムパターンを塗布した。

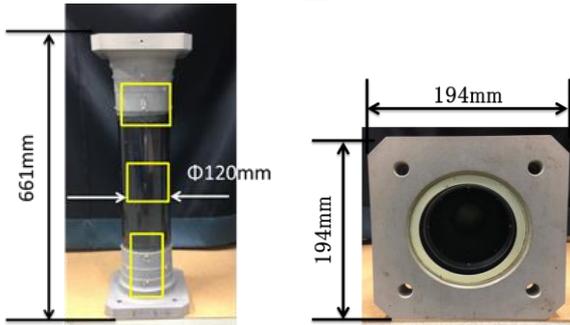


Fig.5 FOB specimen

6. 鋼の熱変形試験

FOBの熱変形試験を行う前に、線膨張係数が既知である鋼の円筒材の熱変形試験を行い、ひずみの算出を行った。

試験片は鋼で長さ $l=661$ mm、 $\Phi=110$ mm、 $t=1.6$ mmと締結構造体に近いサイズのものにした。ヒーターの電圧を約60Vに設定すると試験片は24.2°Cから96.5°Cまで($\Delta T=72.3$ °C)昇温し、この2つの温度における試験片を2台のカメラで撮影した。撮影に使用したカメラはXimera社のXiQM42MG-CM、レンズはNIKON社のMicro-NIKKORの85mmのものを使用した。カメラ間距離300mm、対象物距離950mmとする。画像サイズは2048×2048pixel、試験片全体を一枚の画像に収めることができなかったので、解析範囲は試験片の左端から約250mm付近の1000×1000pixelとした。また試験片にはステレオ画像相関法を使用するため白と黒のラッカーズプレーでパターンを塗布した。

Fig.6に測定点とその点における温度履歴を示す。その測定点の最大温度差は3.7°Cであり、温度変化に対し小さい値であるため一様に加熱できていると仮定する。撮影した画像からステレオ画像相関法を用いて算出した x, y, z 変位をFig.7に、最小主ひずみ、最大主ひずみをFig.8に示す。これらから鋼が膨張していることがわかる。鋼の線膨張係数($\alpha = 11.7 \times 10^{-6} 1/\text{K}$)を用いて、 $\Delta T=72.3$ °Cにおけるひずみを計算値($\epsilon = 845.9 \times 10^{-6}$)としたものと実験値とを比較すると、近い分布を得られていることがわかる。また、分布の平均値を計算すると $\epsilon_1 = 885.3 \times 10^{-6}$ 、 $\epsilon_2 = 748.6 \times 10^{-6}$ であり、理論値との誤差は10%以内であった。しかし、一致していない部分もある。原因としてカメラの角度が挙げられる。ステレオ画像相関法ではカメラ角度は30度付近が理想とされている。しかし、今回では試験装置上、30度より鋭角となっていることが考えられる。また、一様な自由膨張においてせん断ひずみは0となると考えられ、今回最大せん断ひずみ

の平均値は $\gamma = 68.36 \times 10^{-6}$ と0に近い値が得られた。

以上より、ステレオ画像相関法を用いて変位を測定し、ひずみを算出することができた。

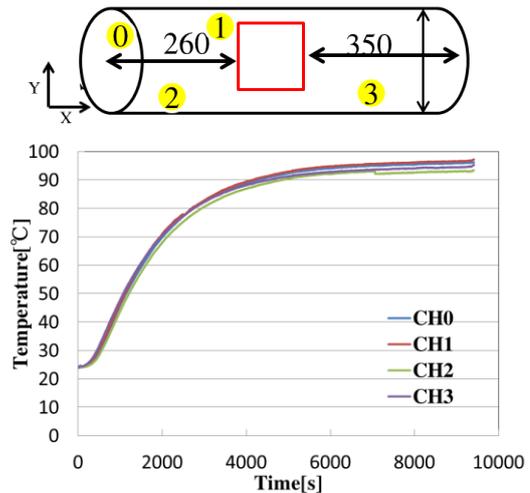


Fig.6 Temperature-time curve

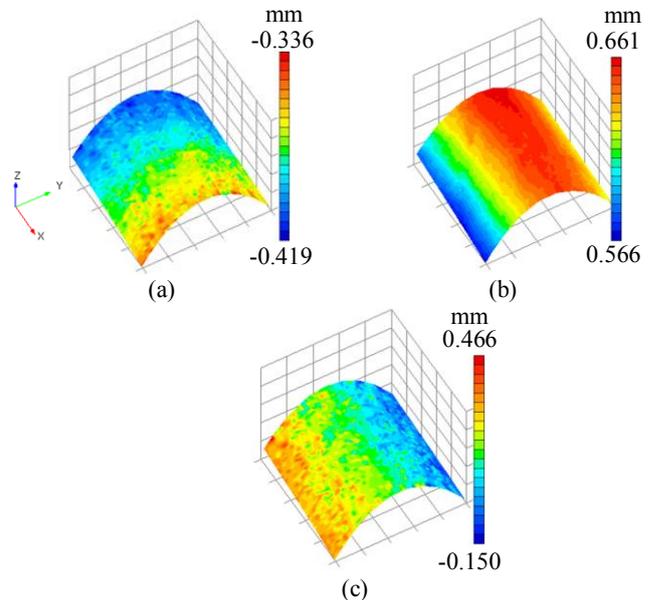


Fig.7 Displacement of steel (a) u_x (b) u_y (c) u_z

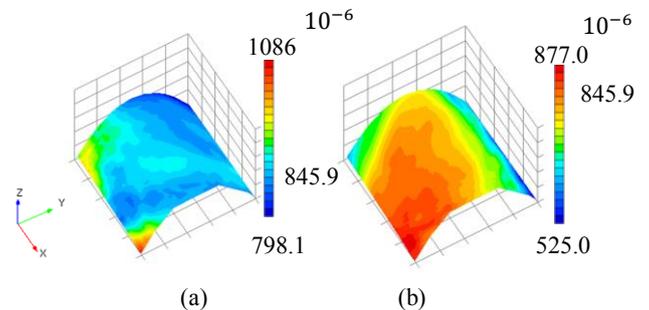


Fig.8 Strain of steel (a) ϵ_1 (b) ϵ_2

7. FOBの熱変形試験

FOBの締結構造体の熱変形試験を行った。試験片の形

状を Fig.5 に示したものである。用いたカメラや装置は4と同じである。カメラと対象物の距離は 850mm である。ヒーターを約 60V に調節して加熱すると、試験片は 25.6°C から 94.7°C まで昇温した。 ($\Delta T=69.1^\circ\text{C}$) この時、室温、湿度ともに加熱前後に変化なく、23°C、40%であった。画像サイズは 2048×2048pixel、解析範囲は試験片の端から約 200mm、他端から約 400mm の CFRP 部における 1000×900pixel、サブセットサイズは 21×21pixel とする。

Fig.9 に測定点とその点における温度履歴を示す。17500s 付近で温度が下がっている点があるが、これは恒温槽内の温度が 100°C を超えたことでヒーターが止まったことが原因である。これにより以降の任意の時刻の温度差が大きくなっているが、最大温度は 4.0°C であったが温度変化に対して小さいため一様に加熱できていると仮定する。次に、ステレオ画像相関法により得られた r, θ, z 変位を Fig.10 に最小、最大主ひずみを Fig.11 に示す。 x, y, z 方向変位のことを極座標系で座標変換した変位を算出し、それを微分することでひずみを算出した。 Z が軸方向である。変位に関してはいずれも剛体変位していることが見て取れる。変位、ひずみともに端において値がバラついていることが見て取れる。これは端のものは正面から見た場合よりもランダムパターンが小さく見えてしまうことがあること、またカメラのピントを頂点に合わせているので、頂点と比べてピントが合っていない分パターンがはっきりと撮影できていないため誤差が生じてしまうことが原因であると考えられる。また、CFRP の線膨張係数が負のため、加熱すると収縮することが考えられるが、結果では膨張していることが Fig.10 で見て取れる。これはアルミニウム合金の線膨張係数が CFRP よりも大きいため、アルミニウム合金が膨張することでそれに接着している CFRP 部が引っ張られる形で膨張したのだと考えられる。ひずみに関して、最大主ひずみは一様な分布がみとれるが最小主ひずみにおいてはバラつきがある。

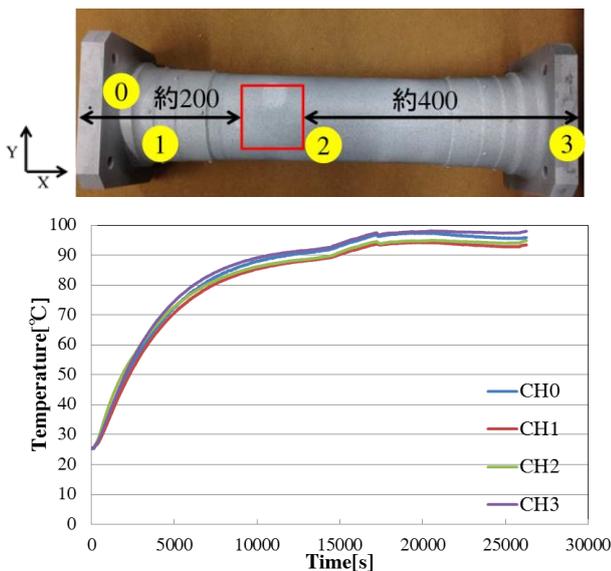


Fig.9 Temperature-time curve

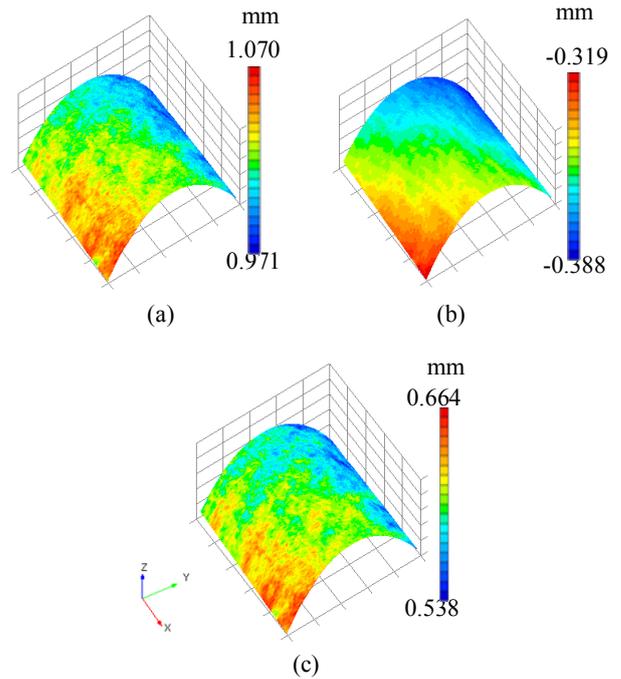


Fig.10 Displacement of CFRP (a) u_r (b) u_θ (c) u_z

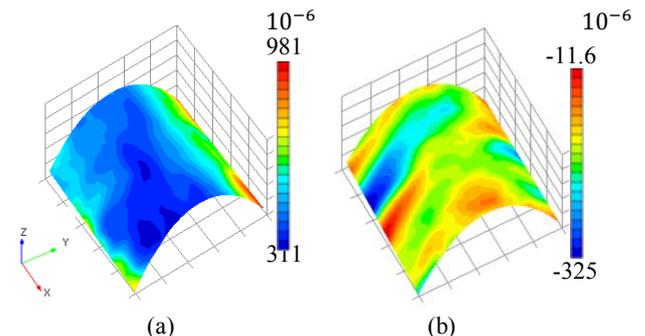


Fig.11 Strain of CFRP (a) ϵ_1 (b) ϵ_2

8. 結論

熱変形試験に用いる恒温槽の作製を行い、性能の確認を行った。次に、鋼の熱変形試験を行いステレオ画像相関法とひずみ算出の妥当性の確認を行った。計算値（理論値）と比較して近い値が得られた。その後、FOBの熱変形試験を行いステレオ画像相関法により変位・ひずみの算出を行った。その結果、締結部による影響が見取れた。

9. 今後の予定

締結構造体の他の位置においても同様の実験を行い締結部の影響を考察する、

参考文献

1. 神谷友裕, 他, 熱変形精密評価のための高精度測定系の構築, 第 58 回宇宙科学技術連合講演会, 2014
2. 石村康生, 他, ASTRO-H 高精度大型構造物の熱変形試験, 第 56 回宇宙科学技術連合講演会, 2009
3. 米山聡, 画像相関法の基本原理と面内変位・ひずみ分布測定手順, 日本複合材料学会誌, Vol.40, No.4 (2014), pp.135-145.