

A07 ステレオ画像関連法を用いた CFRP アルミニウム締結体の熱変形評価

湧上 歩夢 (青学大・学), 米山 聡 (青学大), 後藤 健 (JAXA), 石村 康生 (早大)

Ayumu Fuchigami (Aoyama Gakuin University), Satoru Yoneyama (Aoyama Gakuin University),
Ken Goto (JAXA), Kosei Ishimura (Waseda University)

1. 結論

炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は、軽量、高強度、高剛性、低線膨張係数などの特長や、積層構成によっては、0 や負の線膨張係数にすることができることからあらゆる分野で用いられている材料である。そのうちのひとつとして、人工衛星などの航空宇宙構造物が挙げられる。航空宇宙構造物は、大型になることが多いため、対象物を測定、観測する際、微小な誤差であっても重大な測定誤差となって現れることがあるので、高い寸法精度を要求されるためである。誤差要因としては、機器の振動や制御誤差などがあるが、宇宙空間では、日陰と日なたでの温度差が大きいので、主な要因として構造物材料の熱変形が挙げられる。特にアンテナ、光学架台、望遠鏡などは変形することで観測機器の光軸がずれてしまい、観測性能に影響を与えてしまう。したがって、使用材料の線膨張係数などの力学的性質を調査することや熱ひずみの解析が非常に重要視される。しかしながら、CFRP は金属などほかの材料と締結することによって、異なる性質を示すことがあるため、その都度それらの締結部の性質を調査することが必要である。

JAXA によって開発された X 線天文衛星「ASTRO-H」は、X 線望遠鏡や軟ガンマ線検出器を用いて高温・高エネルギーの天体の観測を行う人工衛星であり、高分解能観測のための高精度な観測性能が求められる。しかしながら、2009 年に行われた ASTRO-H の熱変形試験では、FOB (Fixed Optical Bench) と呼ばれる CFRP とアルミニウム合金の締結体となっている部分において、試験結果と解析結果に誤差が生じた。設計上では、CFRP がマイナスの線膨張係数を持ち、アルミニウム合金がプラスの線膨張係数を持っていることから、これら二つの材料の熱膨張が相殺されるはずであった⁽¹⁾。この FOB は、望遠鏡や検出器を支える固定式光学架台であり、この箇所にて熱変形の解析誤差が生じることは観測誤差につながるため、この熱ひずみを解析することは非常に重要である。試験結果と解析結果に誤差が生じた原因として、有限要素モデルの条件に用いている各材料の線膨張係数がひずみゲージによって得られたものであるためと考えられ、複雑な挙動を示すと考えられる締結体の熱変形挙動に関しては解析方法を検討することが必要であると考えられる。

そこで本研究では、非接触・全視野測定が可能なステレオ画像関連法を用いて CFRP とアルミニウム合金の締結体の熱ひずみ測定を行い、その実験結果を有限要素解析モデルに反映する手法を確立することで、締結部の熱変形解析を容易にすることを旨とする。

画像関連法とは、試験片表面の模様、またはランダムパターンと呼ばれる模様がついた物体の変形前後を撮影し、その後、サブセットと呼ばれる領域内のパタ

ーンがどのように変形、移動したかを追跡することでその物体の 2 次元表面の変位、ひずみを算出する。画像関連法は簡便かつ高精度であり、非接触で測定できるため、近年利用が増加している⁽²⁾。

本研究で用いるステレオ画像関連法は画像関連法を拡張したもので、カメラを二台にすることで 3 次元表面の変位ひずみ測定を可能にしたものである。その際、寸法のわかっている市松模様や格子模様のボードを撮影することで物体の座標と画像上の座標を結びつける、カメラキャリブレーションを行う⁽³⁾。

2. 実験装置

まず、熱変形評価のための恒温槽を作製した。恒温槽、実験装置の概略図を Fig. 1 に示す。恒温槽の大きさは 298 mm の立方体型で、木材によって外枠を作製した。その内側に、断熱材を敷き詰め、ステンレス板で覆った。一つの面には、画像撮影のためのガラス板をはめ込み、別の面にはガラス越しのキャリブレーションができるようにキャリブレーションボードが通るような穴を開け、蓋をもって開閉可能とした。加熱はシリコンラバーヒーターを用い、東京理工舎のスライドトランスによる電圧制御で温度制御を行った。また、空気循環のために恒温槽底面にファンを 2 台設置した。試験片はヒーターの真上に覆いかぶさるように立つ木製の台の上に立てて設置した。試験片の表面温度は K 型熱電対を耐熱テープで貼り付け、東京測器社のデータロガーを用いて取得する。また、撮影、変位算出は DANTEC DYNAMICS 社の ISTR4-4D を用いている。

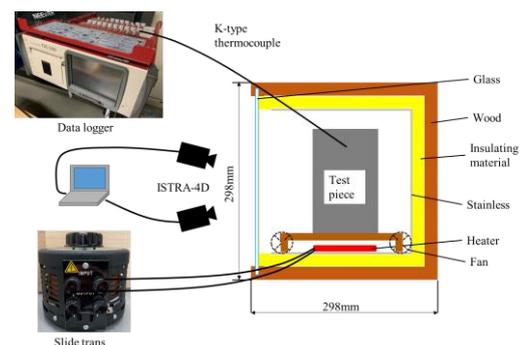


Fig. 1. Schematic drawing of thermostatic chamber

3. 恒温槽の昇温試験

次に、恒温槽の性能を確かめるための昇温試験を行い、その際試験片が一樣に加熱されるかどうかを確かめるため、実際に用いる締結体と似たような形状の試験片を作製し熱電対を取り付けることにより温度を測定した。作製した試験片は、材質は鋼で長さ 120 mm、外径 110 mm、厚さ 1.6 mm の円筒状のものである。温度測定のための熱電対は Fig. 2 に示す場所に設置し、

破線は円筒の内側を示す。試験温度は、加熱前室温、加熱後 90~100 °Cを予定した。

初めにスライドトランスの電圧値を 60 V 一定にして加熱をおこなった。その結果を Fig. 3 に示す。グラフからわかるように加熱開始から 13000 秒ほど経過しても目標温度に達せず、恒温状態にもならなかった。また、試験片表面にも最大 6 °C程度の温度勾配が発生してしまっただけのため恒温槽としての役目を果たせていないことがわかり、加熱方法の再検討を行った。

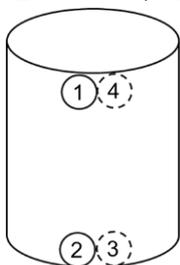


Fig. 2. Thermocouple measurement position

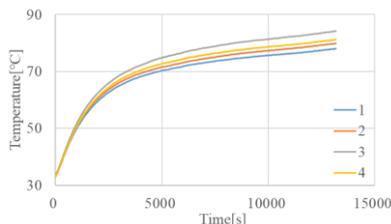


Fig. 3. Temperature-time curve (60V)

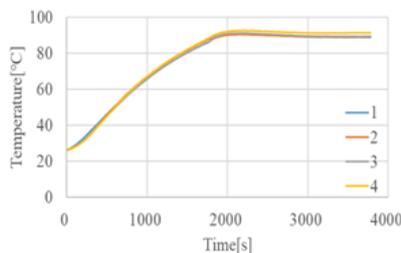


Fig. 4. Temperature-time curve (100 V → 70 V)

目標温度に達するまで時間を要したことや試験片に温度勾配が生じたことは電圧を高くして迅速に加熱を行うことで解消できると考えた。また、そのあとに電圧を下げることで恒温状態にすることができると考えた。これらを踏まえて昇温試験を行ったところ、初めに 100 V にして目標温度の 90 °C 付近に達してから 70 V か 75 V に降圧することで、Fig. 4 に示すような温度履歴が得られることがわかったので、実際の試験ではこの手法をとることに決定した。

4. 鋼の熱変形試験

次に、実際にステレオ画像相関法を用いて、線膨張係数が既知である鋼の試験片の熱変形測定を行い、本試験の妥当性を検証した。試験片は、長さ 120 mm、外径 110 mm、厚さ 1.6 mm の円筒状のものを使用し、ステレオ画像相関法のためにランダムパターンをスプレー缶を用いて塗布した。線膨張係数は 11.7 ppm/K である。また、撮影のために試験片を 2 台のライトで照射するが、正反射によって試験片表面が白飛びしないように試験片に対して斜めに設置した。さらに、撮影時の熱による揺らぎを考慮して、ファンを用いてカメラと恒温槽の間に風を通せるようにした。熱電対は Fig. 2 で示したものと同一場所に設置し、試験片温度は室温から 90°C 付近を予定し、スライドト

ランスの電圧値は 100 V から 75 V への降圧をもって制御した。

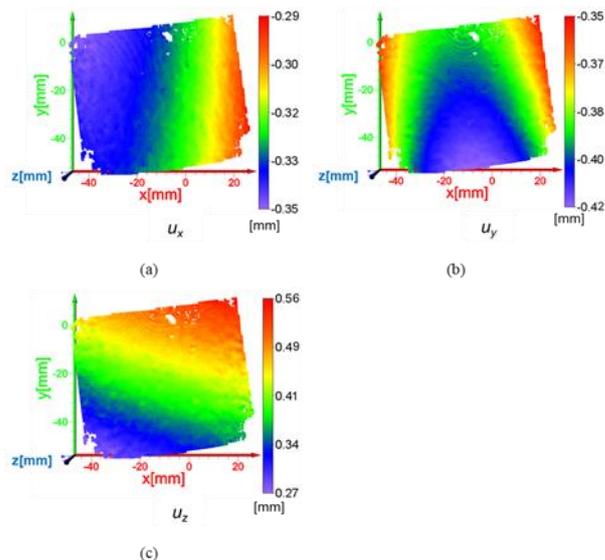


Fig. 5. Displacement of steel (a) u_x , (b) u_y , (c) u_z

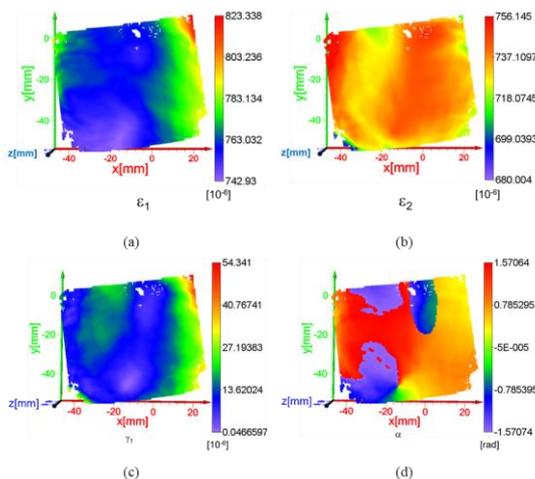


Fig. 6. Principal strain and direction of steel specimen (a) ϵ_1 , (b) ϵ_2 , (c) γ_1 , (d) α

Fig. 5 に変位分布、Fig. 6 に(a)最大主ひずみ、(b)最小主ひずみ、(c)最大せん断ひずみ、(d)主方向を示す。撮影画像サイズは 1920×1200 pixel、サブセットサイズが 31×31 pixel、1 pixel あたり 0.077 mm となった。変形前温度は 25.0 °C、変形後温度は測定 4 か所の平均をとり 90.2 °C となり、温度差 Δt は 65.2 °C となった。変形後画像は十分恒温状態下に曝され変形が完了したと思われる、降圧後 60 分の時点で撮影した。

温度分布は、加熱前は一様であり、加熱後は試験片上部と下部で 2 °C 程度であったため、おおよそ一様の加熱ができたと考えられる。

Fig. 5 より、コンター図の範囲は異なるものの中央値が約 0.3~0.4 mm となっており、各方向に一樣な変形を生じていることがわかる。y 方向変位が負になっているのは、圧縮しているのではなく鉛直下方向に膨張していることを示している。

Fig. 6 (a), (b)より、コンター図の範囲が 80 μm ほどの間に収まっており、かつひずみ分布もおおむね一様

であり、試験片上部と下部で差がないことから、加熱後の 2°C 程度の温度分布の影響は見られず、一様な加熱がなされたときとみなすことができると考えられる。また、今回の試験では試験片は自由膨張すると考えられるので、せん断ひずみは 0 に近くなる。Fig. 6 (c)を見ると、最大せん断ひずみは 0~50 μm の中に収まっており、 ϵ_1 , ϵ_2 の 10 分の 1 以下となっているため、0 に近い値が得ることができた。(d) は x 軸から見た主方向を表しているが、鉛直方向、すなわち y 方向に主方向を持っている成分が支配的であるように見える。また、 x 方向が少ないことも加味すると、試験片を立てて置いていることにより、円周方向に微少な拘束がある可能性がある。(c) で見られた微少なせん断ひずみも、この影響が出ていることが考えられる。

線膨張係数を算出するにあたって、最大主ひずみと最小主ひずみの平均値を用いた。最大主ひずみ平均値は 763.7 ppm, 最小主ひずみ平均値は 735.7 ppm であり、これらの値を $\Delta t = 65.2^\circ\text{C}$ で除すると、前者が 11.7 ppm/K, 後者が 11.3 ppm/K となった。理論値である鋼の線膨張係数は 11.7 ppm/K であり、相対誤差を算出すると前者が 0%, 後者が 3% とおおむね一致した。これらの結果をもって、恒温槽による熱ひずみ測定の妥当性を示すことができた。

5. 締結体の熱変形測定

次に、締結体試験片の熱変形測定を行い、締結部の熱変形挙動を調査した。試験片は Fig. 7 に示すように CFRP と A5056 からなっており、CFRP は前章で用いた CFRP 試験片と同様であり、A5056 は長さ 60 mm, 外径 90 mm, 厚さ 5 mm の円筒状のものを用いており、それらを Hysol EA 9396 というエポキシ接着剤で接着し、常温硬化させたものを用いている。したがって、CFRP 試験片を A5056 が包むような形となっている。また、この試験片もステレオ画像関連法のためにランダムパターンをスプレー缶を用いて塗布した。また、撮影のために試験片を 2 台のライトで照射するが、正反射によって試験片表面が白飛びしないように試験片に対して斜めに設置した。さらに、撮影時の熱による揺らぎを考慮して、ファンを用いてカメラと恒温槽の間に風を通せるようにした。熱電対は Fig. 2 で示した場所に設置し、試験片温度は室温から 90 $^\circ\text{C}$ 付近を予定し、スライドトランスの電圧値は 100 V から 75 V への降圧をもって制御した。ただしこの章では Fig. 2 の 3, 4 番はアルミニウム合金と CFRP の間ではなく CFRP の内側を表している。

Fig. 8 に変位分布、Fig. 9 に (a) 最大主ひずみ、(b) 最小主ひずみ、(c) 最大せん断ひずみ、(d) 主方向を示す。撮影画像サイズは 1920 \times 1200 pixel, サブセットサイズが 31 \times 31 pixel, 1 pixel あたり 0.0719 mm となった。変形前温度は 25.6 $^\circ\text{C}$, 変形後温度は測定 4 か所の平均をとり 94.0 $^\circ\text{C}$ となり、温度差 Δt は 68.4 $^\circ\text{C}$ となった。変形後画像は十分恒温状態下に曝され変形が完了したと思われる、降圧後 60 分の時点で撮影した。Fig. 8, 9 において上部が CFRP であり、下部の表面が A5056 で内側が CFRP である。

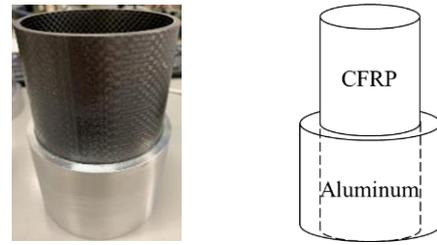


Fig. 7. Specimen of fastening structure on CFRP Aluminum

温度分布は、加熱前は一様であり、加熱後は試験片上部と下部で 3 $^\circ\text{C}$ 程度であったため、第 4 章の結果も踏まえ一様な加熱ができたといえる。

Fig. 8 より、変位分布の傾向は x 方向変位で y 軸方向に分布が出ていることや、 y 方向変位で x 軸方向に分布が出ていること、また z 方向変位から、CFRP 単体の熱変形挙動と似ており、CFRP が締結体試験片内側全体に使われているために変位分布に影響を与えたと思われる。

Fig. 9 より、(a) 最大主ひずみと (b) 最小主ひずみにおいてアルミニウム合金と CFRP の部分とで分布が二分していることや、(c) 最大せん断ひずみにおいて接着境界付近で分布が出ていることから、線膨張係数の違いが顕著に表れていると分かり、それぞれの材料内ではひずみ分布はあまり見られなかった。次に、アルミニウム合金部分を見ると最大、最小ともに 1600~1800 ppm 程度の似たようなひずみ量を算出している。アルミニウム合金の線膨張係数が 24.3 ppm/K であることから、ひずみの理論値を算出すると 1659.7 ppm となりおおむね一致している。したがって、アルミニウム合金表面には接着の影響は現れないことが分かるが、より接着界面に近いひずみ分布がどうなるのかは別に調査が必要であると思われる。

また、接着にエポキシ接着剤を用いていることからそれらの影響が見られるかと思っただ、締結体の熱変形測定ではそのような挙動は見られなかった。

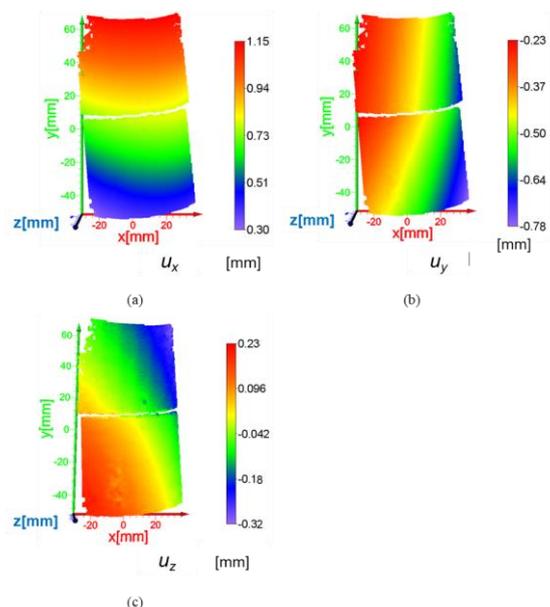


Fig. 8. Displacement of fastening structure (a) u_x , (b) u_y , (c) u_z

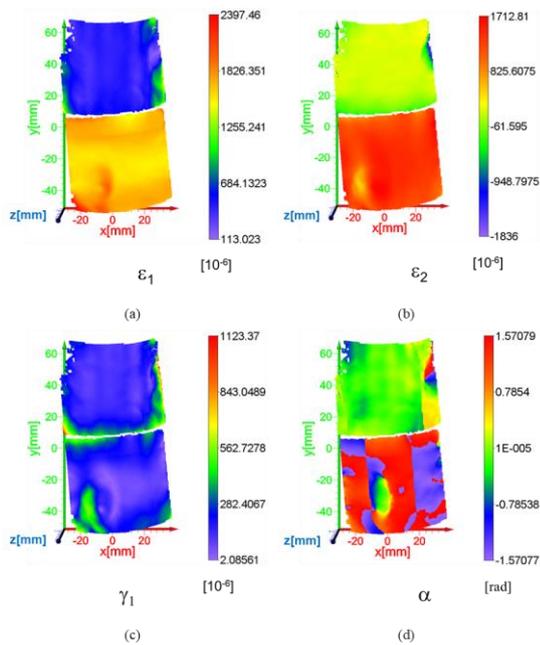


Fig. 9. Principal strain and direction of fastening structure specimen (a) ε_1 , (b) ε_2 , (c) γ_1 , (d) α

6. 結論

本研究では、ステレオ画像相関法を用いて CFRP とアルミニウム合金の締結体の熱変形挙動を評価することを目的とした。

初めに熱変形測定のために恒温槽を作製し、その中に入れた材料がどのような温度履歴を示し、どのような熱変形挙動を示すかを調査するために、線膨張係数が既知である鋼試験片を用いて熱変形測定を行い、線膨張係数から求めたひずみの理論値とおおむね一致したことから、作製した恒温槽を用いたステレオ画像相関法による熱変形測定の妥当性を示した。

また、CFRP とアルミニウム合金をエポキシ接着剤で接着した締結体の熱変形測定を行い、変位は CFRP の分布がより現れることや、CFRP の最小主ひずみが減少することがわかり締結体における接着の影響を示した。

今後は、今回の実験で得られた結果と、FEM を用いた熱ひずみ解析との結果を比較し、締結体の熱変形挙動を正確に FEM で再現する手法の確立を目指す。

参考文献

- (1) 石村康生, 峯杉賢治, 河野太郎, 和田篤始, 石田学, 夏莉権, 東海林和典, 対馬雅明, 池田瑞穂, 尾曲邦之, 隈下恭介, 立川清隆, 阿部和弘, 鬼頭玲, 飯塚亮, ASTRO-H 高精度大型構造物の熱変形試験, 宇宙科学技術連合講演会講演集, VOL. 56, 2009 年.
- (2) 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, 40 巻(4), pp. 135-145 (2014)
- (3) 米山聡, 画像相関法を用いた二次元および三次元表面の変位・ひずみ測定方法, 日本塑性加工学会, Vol. 55, No. 46, pp. 979-983 (2014)