

A07 CFRP 製多連チャンネル材の熱変形評価

○富永大夢(早稲田大学大学院創造理工学研究科), 石村康生(早稲田大学), 藤垣元治(福井大学), 中村和行(株式会社テクノソルバ), 宮崎謙一(株式会社三協製作所), 齋藤宏文(早稲田大学)

Thermal deformation evaluation of CFRP multiple channels

Hiromu Tominaga(Graduate School of Waseda, Waseda University), Kosei Ishimura(Waseda University), Motoharu Fujigaki (University of Fukui), Kazuyuki Nakamura (Technosolver Corporation), Kenichi Miyazaki (Sankyo MFG), Hirobumi Saito (Waseda University)

Space structures are becoming larger and more precise to meet the stringent demands of space observation. One of the factors affecting the shape stability of space structures during operation is thermal deformation. CFRP, which has a coefficient of thermal expansion more than one order of magnitude smaller than that of metallic materials, is an excellent material for space structures. Therefore, it is expected to be applied to various high-precision space structures such as synthetic aperture radar antennas. However, it has been difficult to verify thermal deformation of such structures with high accuracy on the ground. Therefore, in this study, thermal deformation tests and numerical analyses of CFRP multi-channel structure, which are structural members of antennas, were conducted to compare and evaluate them. The effects of manufacturing errors, such as deviations in lamination orientation angles during the manufacturing process, on thermal deformation were investigated, and qualitative agreement in thermal deformation shapes was confirmed. However, quantitative discrepancies remained.

Key words: CFRP, Thermal deformation, Synthetic aperture radar, channel structure

1. 緒言

近年の宇宙構造物において、宇宙観測の要求が高度化されている。そして、それに伴い観測機器の高精度化が進んでいる^{1,2)}。しかし、宇宙環境は一つの構造システムの中で 100°Cを超える温度差が生じる可能性のある厳しい環境である。そんな温度差の大きい環境下において、観測機器は高い形状安定性が求められている。形状安定性を高める要素の一つに熱変形の抑制が挙げられる³⁾。たとえば、2016年に打ち上げられた人工衛星「ASTRO-H」は、焦点距離 12m に対して約 1 分角の指向精度要求があった。熱変形に対しては約 30 秒角程度以下の要求があった⁴⁾。

近年、樹脂を炭素繊維で強化して製造される CFRP が宇宙構造物や飛行機のボディなど多くのものに適用されている。宇宙構造物においても、軽量性、高剛性と熱変形の抑制の観点から CFRP の需要が増えている。SAR アンテナなどに使われる導波管などにおいても同様に、軽量性の要求から CFRP の利用が期待されている⁵⁾。しかしながら CFRP の繊維を曲げて作られた成形材の熱変形は複雑であり予測が難しいという問題がある⁶⁾。

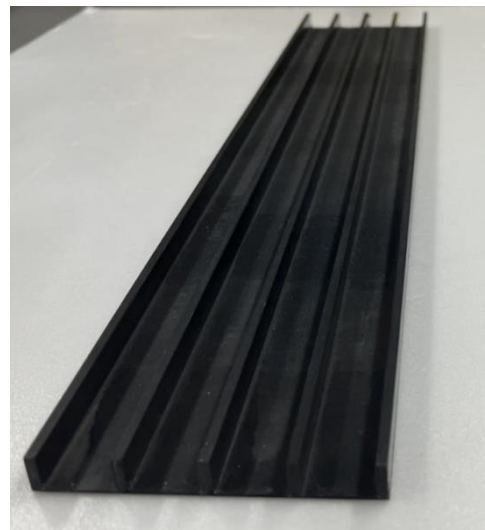


図1 CFRP 製多連チャンネル材

そこで、本研究では CFRP の繊維を曲げて作られた成形材、CFRP 製多連チャンネル材（図 1）を例として熱変形評価の確立をすることを目指す。

2. CFRP 製多連チャンネル材

本実験で用いた供試体は、複数導波管(単管の場合は図 2a)からなる構造物の一部であり、チャンネル材が 4 つ連結している形状となっている（図 2b）。この多連チャンネル材と上板(図 2c)を組み上げることで、単管が 4 つ連結した導波管を形成する。これらは、軽量性の要求から CFRP で作られており、実際の利用時には、表面をメッキしたうえで、多連チャンネル材と上板を組み上げる。本研究では、組み上げ前の素特性を確認するために端面(図 3)の面外熱変形を評価する。供試体で用いた CFRP の材料物性値を表 1 に示す。

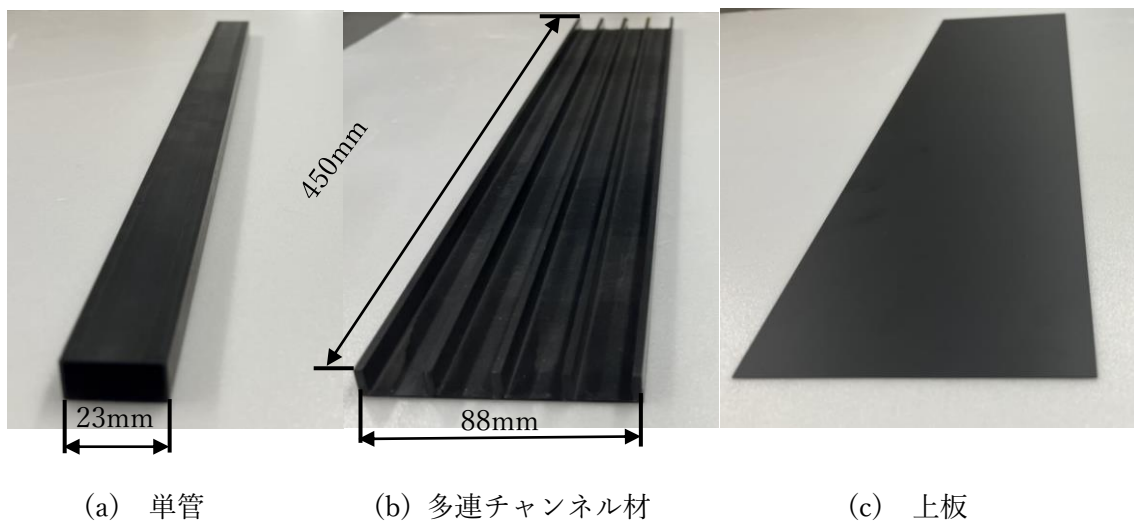


図 2 導波管部材



図 3 供試体計測面

表 1 材料物性値

	繊維方向	繊維直交方向
縦弾性係数 [GPa]	121	9.1
ポアソン比	0.30	0.023
横弾性係数 [GPa]	4.6	4.6
線膨張係数 [1/K]	5.00×10^{-7}	3.60×10^{-7}

3. 熱変形試験

3.1 試験装置

本試験の試験装置図を図 4 に示す。供試体は恒温槽の中に配置し、外部のヒータから温風を送りこんだ。温風は直接供試体に当たらないように、ヒータと供試体の間に断熱材を配置した。変位計測のためにレーザ変位計を 2 台、カメラを 1 台配置した。槽内の温度を一定にするために、断熱材で覆った。

供試体の固定において、供試体に自由な熱変形をさせるために過拘束を回避した。実際は、アルミフレームに配置した突起 4 点で下から供試体を支えた(図 5)。

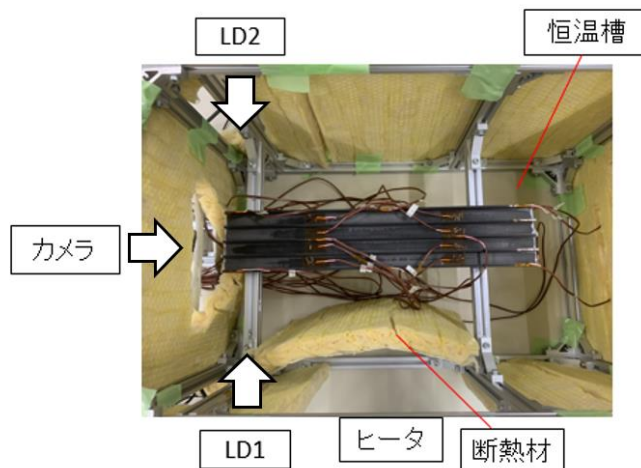


図 4 試験装置外観図 (上から)



図 5 供試体の支持位置

3.2 試験方法

温度を熱電対で計測し、変位をレーザ変位計とサンプリングモアレ法⁷⁾の 2 種類で計測した。

3.2.1 温度計測方法

温度計測方法には熱電対を用いた。表 16 ヶ所、裏 8 カ所の合計 24 ヶ所の温度を計測した。熱電対の貼付位置を図 6 に示す。(a)、(c)は表面であり、(b)は裏面である。(a)はすべて側壁の中央に貼付け、(c)はすべて溝の中央に貼付けた。データロガーは NR-500(KEYENCE)を使用し、サンプリング周期 0.1 秒で計測した。

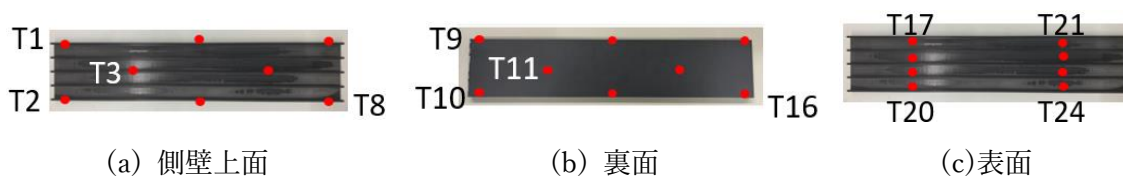


図 6 熱電対貼付位置

3.2.2 変位計測方法

変位計測方法にはレーザ変位計とサンプリングモアレ法の 2 種類を用いた。2 つのレーザ変位計で両端の側壁の上端間の変位を計測した(図 7)。サンプリングモアレ法では図 3 の面外熱変位を計測した。

レーザ変位計は、1 軸の変位を高精度に計測できる利点があるが、計測面の変位分布を確認することが

できない欠点がある．一方で，サンプリングモアレ法は計測面の変位分布を確認することができる利点があるが，広範囲を $1\mu\text{m}$ といったオーダーで高精度に計測することは難しい．そこで，本研究では 2 種類の変位計測を用いた．

本試験ではサンプリングモアレ法のカメラの画素数の関係上，供試体を左半分，右半分の 2 回に分けて計測を行った．それぞれの実験を実験 1（サンプリングモアレ左半分を撮影），実験 2（サンプリングモアレ右半分を撮影）とした．中央の壁は両試験で撮影しており，中央の壁を基準として左半分と右半分 2 つの画像を合成した．レーザ変位計は，実験 1,2 で左右両方（図 4）を測っているため，レーザ変位計のデータは，2 回取得できている．

レーザ変位計は LK-H155(KEYENCE)を使用し，移動平均 1024 回，サンプリング周期 0.1 秒で計測した．カメラは BU030(東芝テリー)を使用し，露光時間 50ms で撮影した．レンズは HF8XA-5M(Fujifilm)を使用した．本試験で用いたサンプリングモアレ法の格子は 1mm ピッチであり，1 格子当たりの画素数は 13 である．



図 7 レーザ変位計計測位置

3.3 試験結果

3.3.1 温度結果

温度上昇が $1\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 以下になった時を平衡状態と判断し，30 分間の加熱を行った．平衡状態での全体の平均温度は $35.2\text{ }^\circ\text{C}$ であった．標準偏差は $0.7\text{ }^\circ\text{C}$ であり，ほぼ均一に加熱ができたと考えられる．代表的な温度上昇の例として，T1 の温度の計測結果を図 8 に示す．

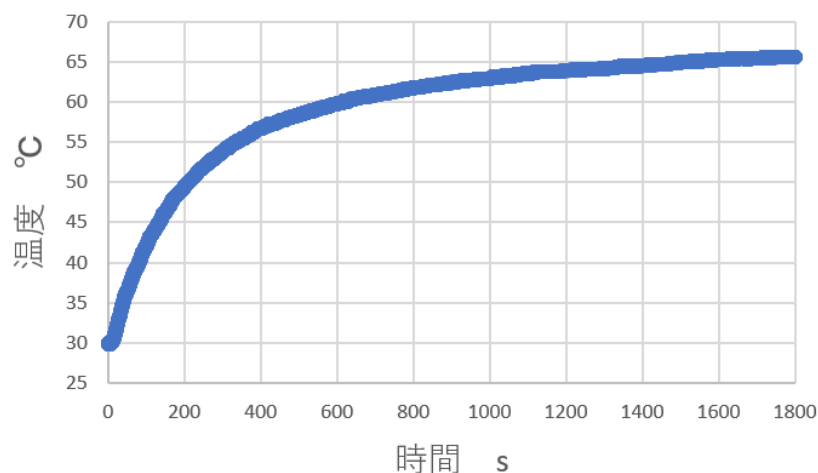
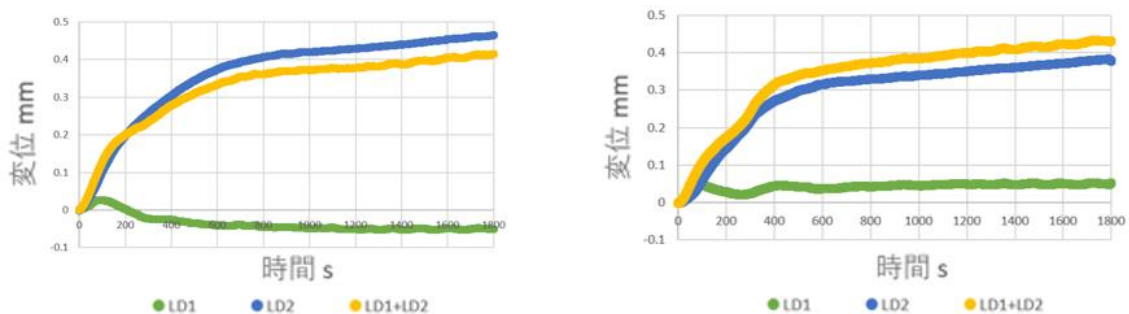


図 8 温度計測結果(T1)

3.3.2 レーザ変位計による変位計測結果

レーザ変位計の変位計測結果を図 9 に示す．レーザ変位計で得られた正の値は，レーザ変位計側に近づ

く方向である。よって、LD1 と LD2 は対向して設置されているため（図 4），供試体の幅方向の広がり、LD1 の変位と LD2 の変位を加えたものに対応する。実験 1（サンプリングモアレ法で左半分を評価）のとき、供試体の幅方向（x 方向）の広がりとして $413\mu\text{m}$ の変形が生じ、実験 2（サンプリングモアレ法で右半分を評価）のとき、供試体の幅方向の広がりとして $431\mu\text{m}$ の変位結果が生じた。

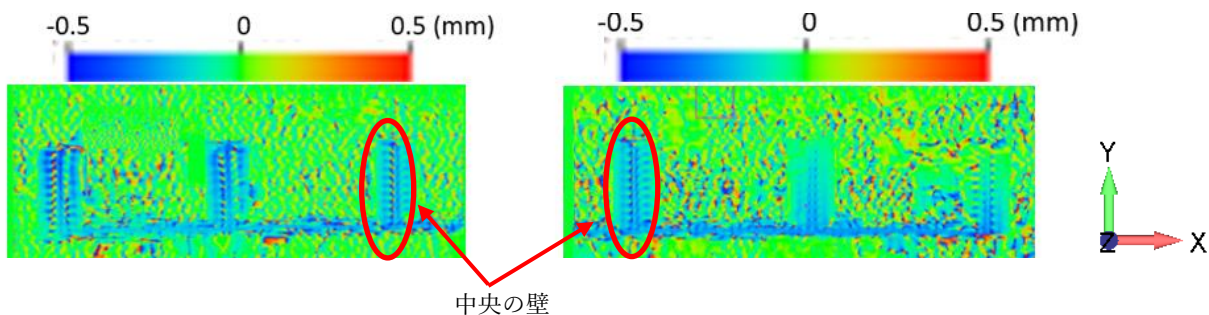


(a) 実験 1（サンプリングモアレ法左半分） (b) 実験 2（サンプリングモアレ法右半分）

図 9 変位計測結果(レーザ変位計)

3.3.3 サンプリングモアレ法による変位計測結果

サンプリングモアレ法で得られた x 方向の変位結果を図 10 に示す。変位結果のノイズを除去するために、各側壁の 8 点(図 11)周りの平均値を算出した。その後供試体全体の変位を算出するため、平均値を線形補間することで変位分布を得た。中央の壁を絶対変位 0 とし、左右を合成して導出した。導出された x 方向相対変位結果を図 12 に示す。供試体の幅方向（x 方向）の広がりとして約 $450\mu\text{m}$ の変位が生じていることがわかる。



(a) 左半分のみを評価

(b) 右半分のみを評価

図 10 x 方向変位結果(サンプリングモアレ法)

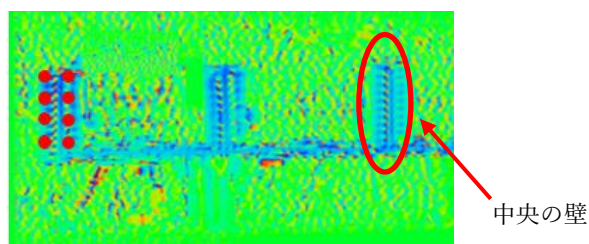


図 11 x 方向合計変位算出補足図

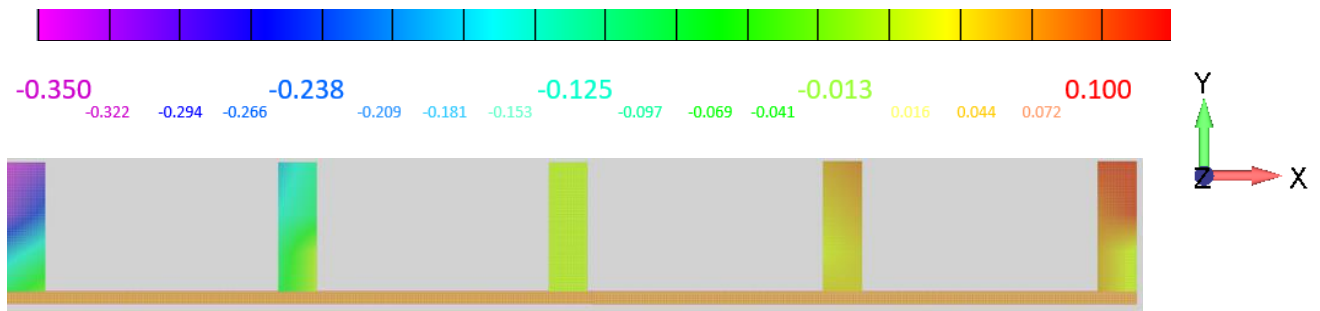


図 12 x 方向相対変位結果

次に、サンプリングモアレ法で得られた y 方向の変位結果を図 13 に示す. x 方向の試験結果と同様に、変位結果のノイズを除去するために、各側壁の 8 点(図 11)周りの平均値を算出した. その後供試体全体の変位を算出するため、平均値を線形補間することで変位分布を得た. 中央の壁を絶対変位 300 μm (基準)とし、左右を合成して導出した. 導出された y 方向相対変位結果を図 14 に示す. 中央の壁の変位結果が+300 μm に対して、左の側壁で-350 μm , 右の側壁で-430 μm の変位が生じていることがわかる.

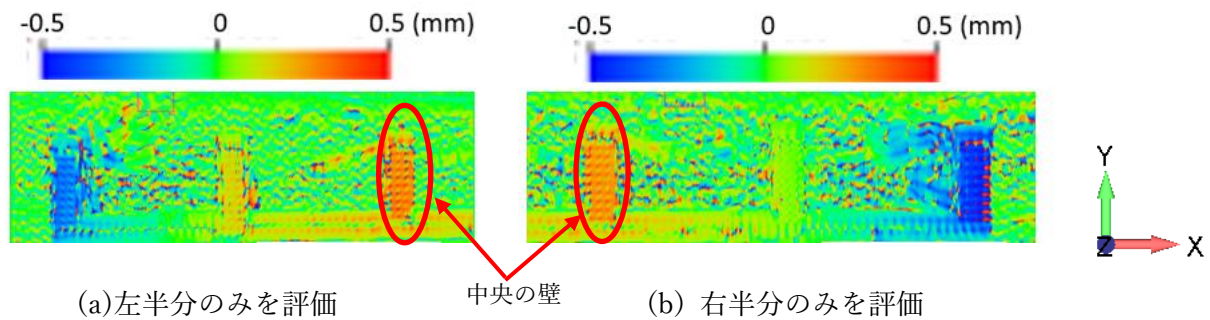


図 13 y 方向変位結果(サンプリングモアレ法)

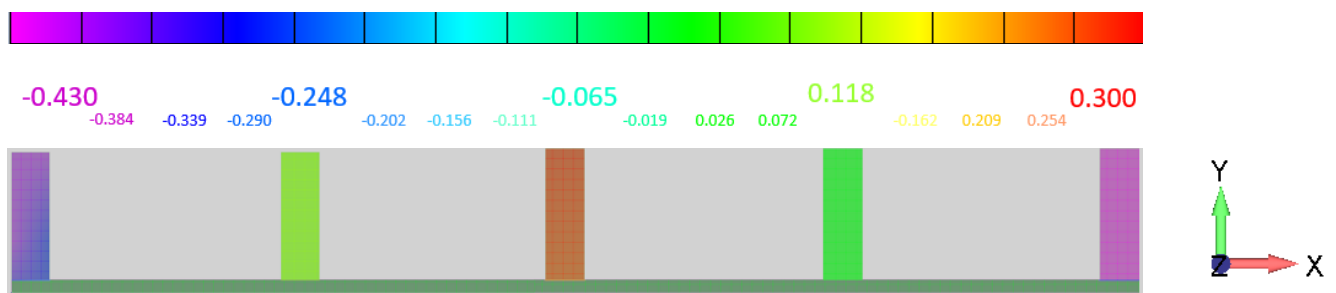


図 14 y 方向相対変位結果

4. 熱変形解析

4.1 解析モデル

モデルの単位系は SI 単位系(mm, g)を使用している. 使用要素はソリッド要素である. モデル外観を図 15 に示す. 使用した材料特性を表 2 に示す. 本解析では、1 方向を繊維方向, 2 方向を繊維直交方向, 3 方向を積層方向とする 1 つの材料特性で材料定義している. 荷重方法においては、3.3.1 節の温度実験結果より温度変化が平均 35.2 $^{\circ}\text{C}$ であったため、全体一様に 35 $^{\circ}\text{C}$ の温度変化を与えた. 拘束方法においては、面外熱変形を確認しなかったため、下面 3 点を合計 6 自由度拘束した.

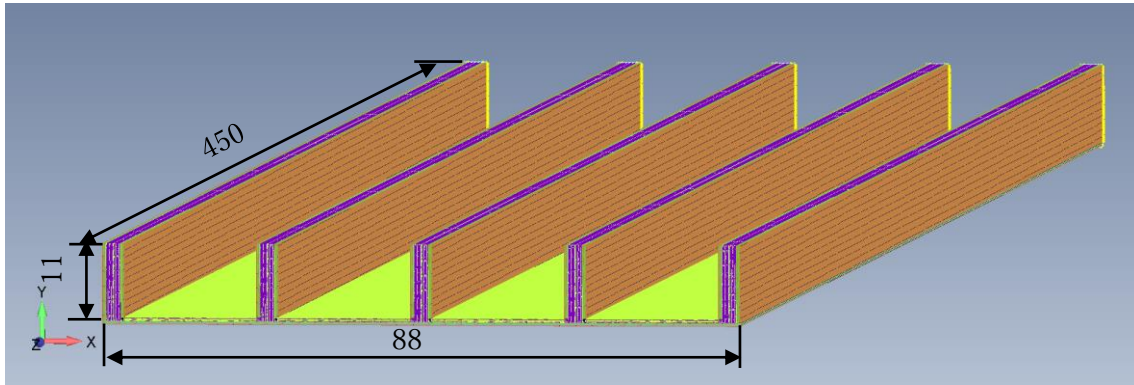


図 15 ソリッド要素解析モデル(全体図)

表 2 材料物性値

縦弾性係数 [GPa]			ポアソン比			横弾性係数 [GPa]			線膨張係数 [1/K]		
E_1	E_2	E_3	ν_{12}	ν_{23}	ν_{13}	G_{12}	G_{23}	G_{13}	α_1	α_2	α_3
121	9.1	9.1	0.3	0.023	0.023	4.6	4.6	4.6	0.5×10^{-6}	36×10^{-6}	36×10^{-6}

4.2 解析結果

全体の変形図を図 16 に示す. x 方向変位の解析結果を図 17 に, y 方向変位の解析結果を図 18 に示す. x 方向変位は, 幅方向に広がるという実験結果と同じ変形挙動がみられた. また, 幅方向の広がり, 200 μm であった. y 方向変位の解析結果は, 実験結果と同じ変形挙動をしており, 中央の壁と比べて左右両端の側壁が下がっていることがわかる. 中央の壁の変位が 0 μm に対して, 左の側壁で-192 μm , 右の側壁で-190 μm の変位結果であった.

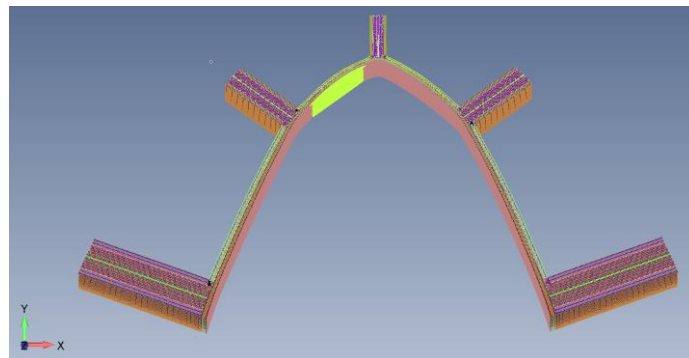


図 16 解析結果(変形図)

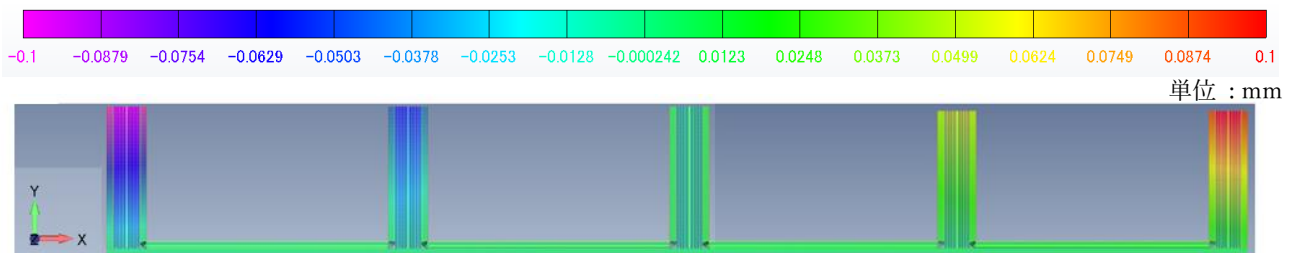


図 17 x 方向変位解析結果

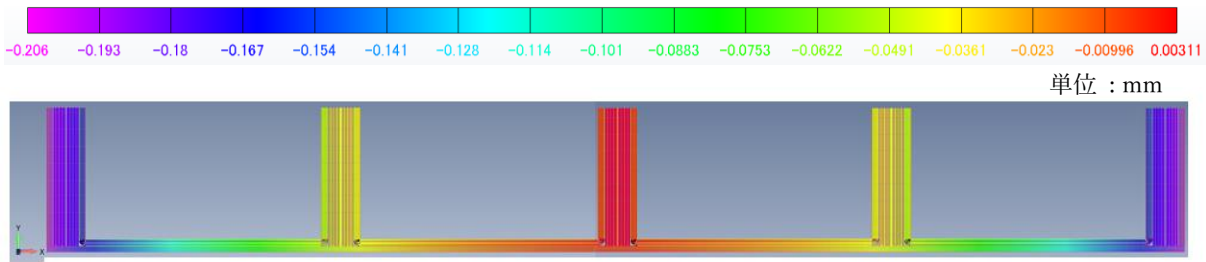


図 18 y 方向変位解析結果

5. 考察

本試験の x 方向変位において、レーザ変位計での計測結果は幅方向の広がりとして 413 μ m, 431 μ m であり、サンプリングモアレ法での計測結果は約 450 μ m であった。2 つの計測結果はサンプリングモアレ法の計測結果を真値としたときの誤差は 4%, 8% であった。しかし、解析結果は幅方向の広がりとして 200 μ m と倍程度の差があった。誤差の原因として、(1)実験系における計測誤差、(2)製造過程における樹脂漏れによる誤差、(3)製造過程における積層角度ずれによる誤差が挙げられる。以下では、(2)、(3)について論じる。

5.1 樹脂漏れによる影響

誤差の原因として、樹脂漏れによる影響を解析によって評価した。0.1mm および 0.01 mm の樹脂層(図 19)を追加して解析を行い、樹脂層を持たない元の解析モデルと比較した。比較した結果を表 3 に示す。樹脂漏れの影響により数値解析値が最大で 43% 増大することがわかったが、試験結果との倍程度の差を説明することができなかった。

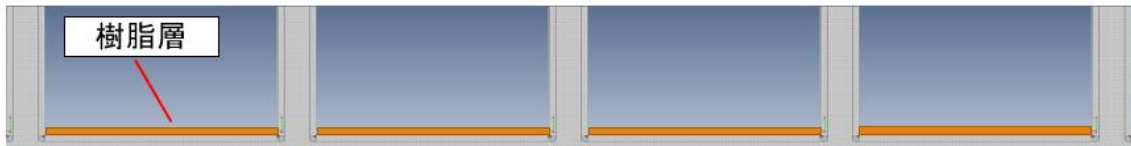


図 19 樹脂層を追加した解析モデル

表 3 樹脂漏れによる解析値への影響

変位	樹脂層の厚み [mm]	解析値への影響 [%]
X 方向変位	0.1	+43
	0.01	+4

5.2 積層角度ずれによる影響

誤差の原因として、積層角度のずれによる解析値への影響を検討した。解析モデルのチャンネル要素部材(図 20)の積層角度を $\pm 1^\circ$ ずらして解析を行い、もとの解析結果と比較した。比較した結果を表 4 に示す。積層角度のずれの影響により数値解析値が $\pm 1\%$ 増減することがわかったが、試験結果との倍程度の差を説明することができなかった。

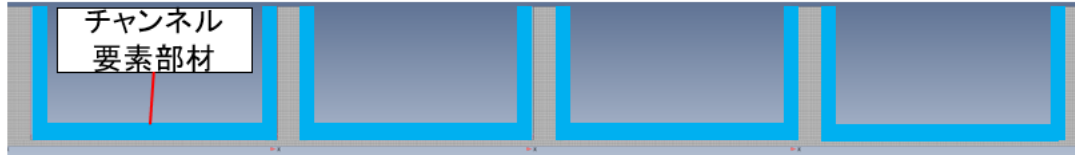


図 20 解析モデルのチャンネル要素部材

表 4 積層角度ずれによる解析値への影響

変位	積層角度ずれ	解析値への影響 [%]
X 方向変位	+1°	-1
	-1°	+1

6. 結言

本研究では、高精度な宇宙構造物の構造材料としての利用が期待されている複合材料成形材の面外熱変形を評価した。熱変形試験について、CFRP 製多連チャンネル材の熱変位をレーザ変位計とサンプリングモアレ法の 2 つの手法で計測を行った。2 つの手法での計測結果は、それぞれ 10% 以下の誤差で一致した。また、試験を通して、加熱により幅方向に広がるという面外熱変形を確認した。試験結果と解析結果の比較を行い、ソリッド要素を用いた数値解析結果と試験結果の変形挙動は定性的に一致した。しかし、試験結果と数値解析結果の値には倍程度の差があるため、誤差原因のさらなる検討が必要である。

謝辞

本研究開発は、総務省 SCOPE(受付番号 201603001)の委託を受けたものである。

参考文献

- 1) W. Keith Belvin, “Advances in Structures for Large Space Systems,” Space 2004 Conference and Exhibit, AIAA, (2004).
- 2) 水谷忠均, 神谷友祐, 北本和也, 安田進, 清水隆三, “宇宙からの高性能光学観測を支える技術 第 1 回 高性能観測衛星に必要な構造高安定化に関わる研究開発,” 日本航空宇宙学会学会誌, (2016).
- 3) 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講演集, (2012).
- 4) Ishimura, K., et al, “On Orbit Structural Performance of Hitomi (ASTRO-H) ,” AIAA SciTech Forum, (2019).
- 5) 小野寺尚人, Budhaditya Pyne, Akbar Prilando, 齊藤宏文, 田中雅人, 有坂市太郎, 小畑俊裕, 田中孝治, “小型 SAR 実証 2 号機-Strix-β-用展開型アンテナの評価試験,” 電子情報通信学会, (2021).
- 6) Shibata, T., Ishimura, K., Fujigaki, M., Nakamura, K., Nakamura, N., Miyazaki, K., “Out-of-Plane Thermal Deformation of CFRP Laminated Curved Plates,” 33rd International Symposium on Space Technology and Science, (2022).
- 7) Ri, S., Fujigaki, M., and Morimoto, Y., “Sampling Moire Method for Accurate Small Deformation Distribution Measurement”, Experimental Mechanics, Vol. 50, No. 4, (2010), pp.501-508.