

# A03 CFRP 製リフレクタに生じる熱変形に関する実験および解析

田中 駿 (名大・学), 仙場淳彦 (名大), 池田忠繁 (名大), 石川隆司 (名大)  
Shun Tanaka (Nagoya University), Atsuhiko Senba (Nagoya University),  
Tadashige Ikeda (Nagoya University), Takashi Ishikawa (Nagoya University)

## 1 序論

高精度の宇宙観測には、高解像度・高分解能の観測システムが不可欠である。このようなシステムのリフレクタには、感度向上のために大型化が、分解能向上のために高精度化がそれぞれ求められる。また、大気の影響を避けるため、軌道上で宇宙観測を行う場合、打ち上げ時の制約からリフレクタ構造に展開構造物が用いられる。しかし、展開構造物は軌道上での展開後の精度には限界がある。そこで、リフレクタ形状を能動的に制御することにより形状誤差を低減することや、それらを実現するためのアクチュエータ最適配置が検討されている<sup>1-3)</sup>。また、軌道上での温度変化による熱変形に対して形状安定性が高いリフレクタ構造を実現する材料として、積層構成により構造全体の熱変形を抑えることができる CFRP を使用することにより精度向上を目指す研究が行われている。しかしながら、CFRP の積層における僅かな配向角の誤差が熱変形に大きな影響を与えることが解析的に示されている<sup>4)</sup>。したがって、CFRP 製リフレクタの形状制御を検討するにあたり、熱変形について考察することは重要な課題である。

そこで本研究では、CFRP 製リフレクタに生じる熱変形特性について知見を得ることを目的とし、光学用アルミニウム溶射有り無しの種類のリフレクタ模型について、一様でない温度分布が与えられたときの熱変形形状を測定する実験を行った。また、同様の条件を模擬した有限要素解析も行い、実験・解析結果について考察を行った。

## 2 CFRP 製リフレクタの熱変形実験

### 2.1 実験装置

実験に用いた CFRP 製リフレクタ模型の積層構成は、 $[0/45/90/-45]_s$  である。プリプレグ材には、TMP 社製 NM6037D-12C(ピッチ系炭素繊維: XN60, マトリックス樹脂: NM31(シアネート))を用いた。リフレクタ模型は直径 300mm で、半径 1000mm の球面的一部分からなる。また、リフレクタは二種類作成し、一つの凹面表側に純アルミニウム溶射およびポリウレタン処理を施した。この処理を施していないものをリフレクタ模型 A1、施しているものを A2 と呼ぶ。リフレクタ模型の板厚は、A1 が 0.86mm、A2 が 0.98mm であった。

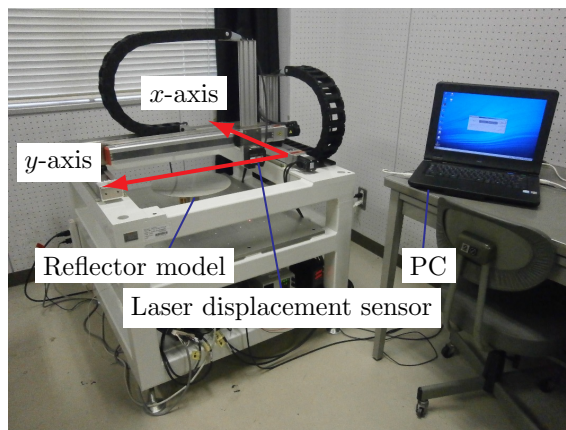


Fig. 1: Experimental setup.

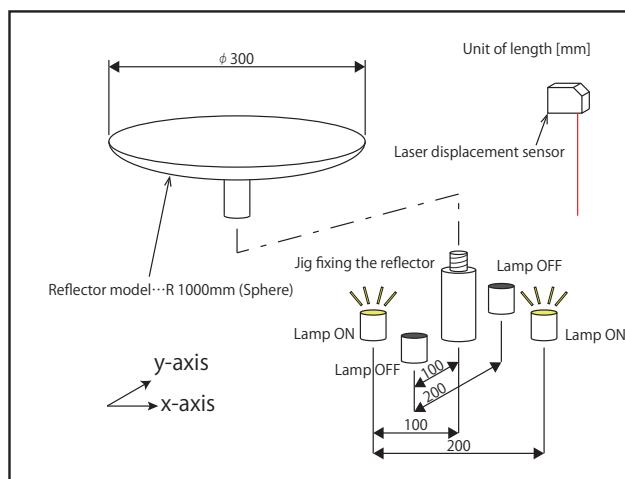


Fig. 2: The dimensions of experimental setup and heating condition.

形状計測装置を Fig. 1 に示す。形状計測装置は、リフレクタ模型固定治具、加熱用ハロゲンランプ、レーザ変位計から構成されている。リフレクタ模型は計測装置中央の固定治具にネジで固定された。このとき、A1 の積層における 0 度層は形状測定における  $x$  軸に対してほぼ平行に固定されたが、A2 については約-35 度傾いて固定された。加熱用ハロゲンランプはリフレクタ模型を固定する固定治具の中心から 100mm 離れた、 $x, y$  軸上の 4 箇所に配置することができる。ランプは固定されており、リフレクタ模型はランプの真上付近を中心に加熱される。本研究に用いた加熱方法は Fig. 2 に示すとおりで

あり、 $x$  軸上の二つのハロゲンランプを点灯させ、 $y$  軸に対して対称となる加熱を行った。

レーザ変位計（キーエンス社製、LK-H080）は、2 軸直動アクチュエータシステムに固定され、所定の位置に静止させてから鉛直方向の変位を測定した。 $x, y$  方向ともに 10mm 間隔で一辺 300mm の正方形領域内を測定し、その測定値が PC に記録される。

加熱前、加熱後におけるリフレクタ模型の形状をそれぞれ測定し、それらの差をとることによりリフレクタ模型の変形量を求めた。

形状測定値は数値解析ソフト MATLAB により処理された。このとき、模型固定治具の熱膨張によるリフレクタ模型全体の上昇を除く処理を行っている。この処理では、加熱前後のリフレクタ模型中央部における変位差が支持具の伸びに等しいと仮定し、この部分での変形量を 0 としている。

## 2.2 実験結果

実験において、ハロゲンランプによる加熱によって生じた温度分布の一例を Fig. 3 に示す。これは加熱されているリフレクタ模型 A1 を  $x$  軸の負方向の斜め上方向からサーモカメラにより撮影したものであり、リフレクタ模型が楕円形に写っている。この図において  $x$  軸は下から上の方向、 $y$  軸は右から左の方向である。この図より、温度分布はランプの真上付近を中心に不均一であること、また、実験室の気温が 23°C であったことから、最大 64°C 程度の温度上昇が生じていることが分かる。

リフレクタ模型 A1, A2 に生じた変位分布を Fig. 4, 5 に示す。前述の通り、模型中央部の変形量を 0 とする処理を行っている関係で、各図の四隅における値は 0 とならない。これらの図から、正負の変形が直交するように分布していることが分かる。また、アルミニウム溶射が行われているリフレクタ模型 A2 には、A1 に比べて 1 桁ほど大きな変形がみられる。このことから、CFRP 製リフレクタにアルミニウム溶射を行うことにより、形状安定性が損なわれる可能性が示された。

## 3 有限要素解析と考察

### 3.1 解析方法

次に、有限要素解析ソフト ANSYS を用いて熱変形を線形解析によって求め、実験結果と比較した。

実験において、加熱用ランプ真上付近を中心に温度分布が生じているが、解析においては Fig. 6 に示すように、加熱用ハロゲンランプの真上を中心とした円形領域に 50°C の温度上昇を与えることとした。

解析に用いた CFRP、アルミニウム、ポリウレタンの材料定数を Table 1 に示す。解析には Shell 要素 (shell181) を用いた。また、A1 は積層の 0 度方向が  $x$  軸と平行であるとして、A2 については積層の 0 度方向を  $x$  軸から -35 度傾いているとして解析を行った。

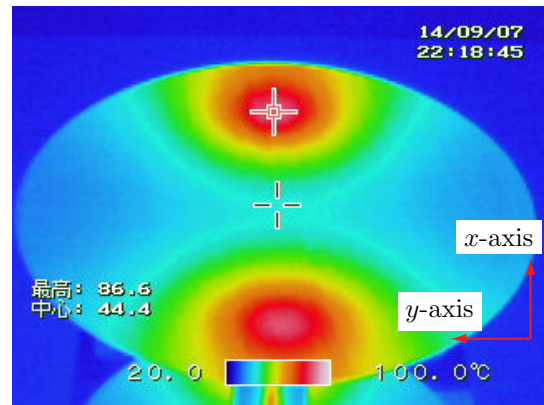


Fig. 3: Temperature distribution of the CFRP reflector model A1.

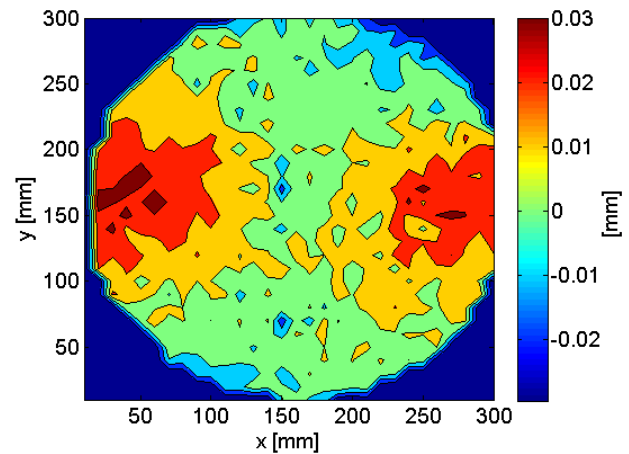


Fig. 4: Measured out-of-plane displacement of the CFRP reflector model A1.

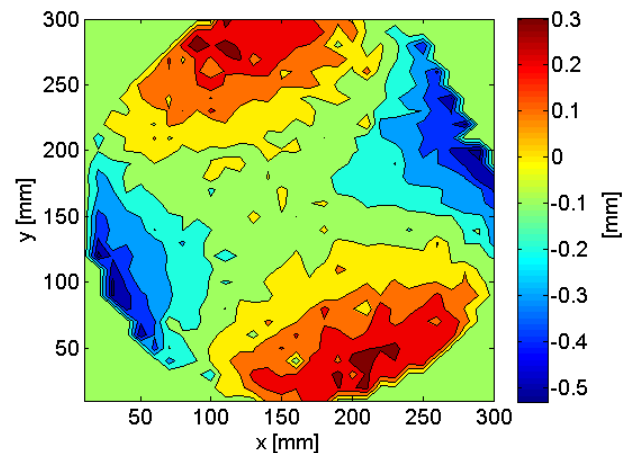


Fig. 5: Measured out-of-plane displacement of the CFRP reflector model A2.

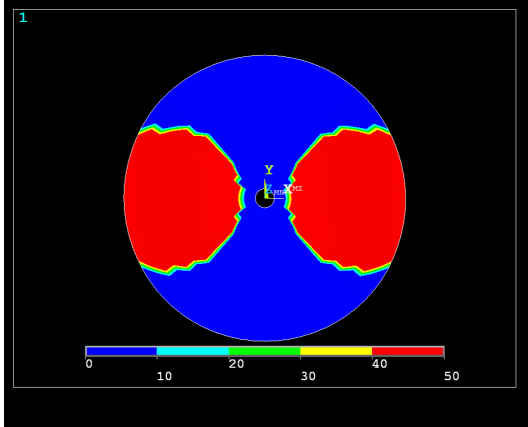


Fig. 6: Assumed temperature distribution of the CFRP reflector model.

Table 1: Material constant of the UD prepreg, aluminum layer and polyurethane layer in FE analysis.

CFRP:		
$E_{11}$	GPa	370
$E_{22}$	GPa	7
$G_{12}$	GPa	3
$\nu_{12}$		0.25
$\nu_{23}$		0.3
$\alpha_1$	1/K	$-0.3 \times 10^{-6}$
$\alpha_2$	1/K	$30 \times 10^{-6}$
Aluminum layer:		
$E$	GPa	70
$\nu$		0.3
$\alpha$	1/K	$21 \times 10^{-6}$
Polyurethane layer:		
$E$	GPa	2
$\nu$		0.4999
$\alpha$	1/K	$20 \times 10^{-5}$

### 3.2 解析結果

数値解析によって得られたリフレクタ模型の  $z$  方向変形量分布を Fig. 7, 8 に示す。これらの図より、正負の変形量が直交するように分布していることや、リフレクタ模型 A2 の変形量が A1 に比べて一桁ほど大きいということが分かる。しかし、A1 については変形量の正負が逆転している。また、A2 については熱変形の定性的な傾向は計測値と一致しているが、変形量分布の  $x$  軸、 $y$  軸に対する傾きが若干異なっており、さらに、変形量の定量的一致は見られない。

この実験・解析結果の不一致の原因として、温度分布の仮定が不十分であることが考えられる。そこで本研究ではリフレクタ模型の表裏における温度分布を検討した。

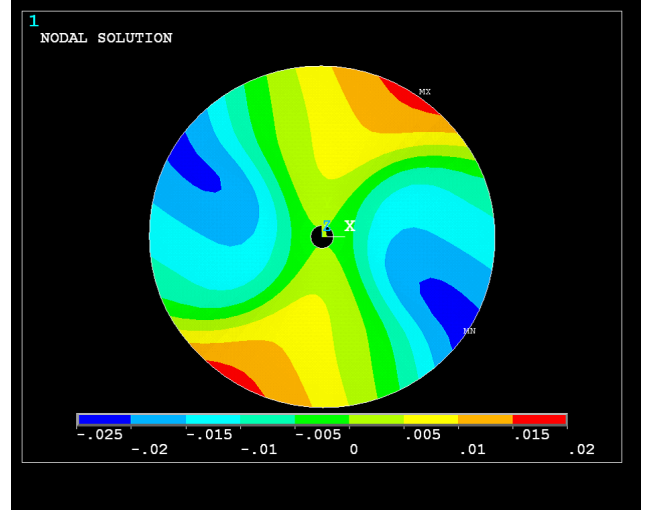


Fig. 7: Calculated out-of-plane displacement of the CFRP reflector model A1.

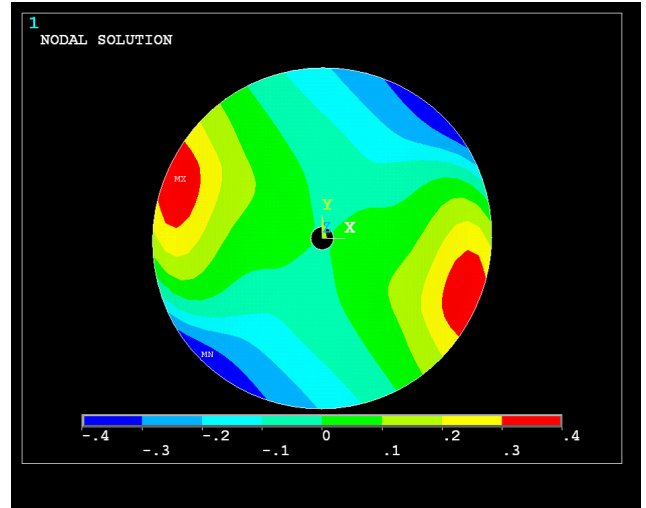


Fig. 8: Calculated out-of-plane displacement of the CFRP reflector model A2.

### 3.3 弾性率の分布を仮定した場合

加熱中のリフレクタ模型の表裏におけるランプ真上付近の表面温度を熱電対を用いて測定した結果、下側（ランプにより加熱される側）が  $88.5^\circ\text{C}$ 、上側（加熱されない側）が  $81.5^\circ\text{C}$  であり、7度の温度差が生じていることが分かった。この温度差により、弾性率や熱ひずみが変わることが考えられるが、ここではまず、弾性率の変化に注目した。

解析に用いた要素は Shell 要素であったため、温度分布を直接与えることはできない。そこで、各層の弾性率を分布させることにより温度分布を模擬することとした。温度上昇によるマトリクス材の弾性率低下を模擬するために、各層において  $E_{22}$  のみを変化させることとした。

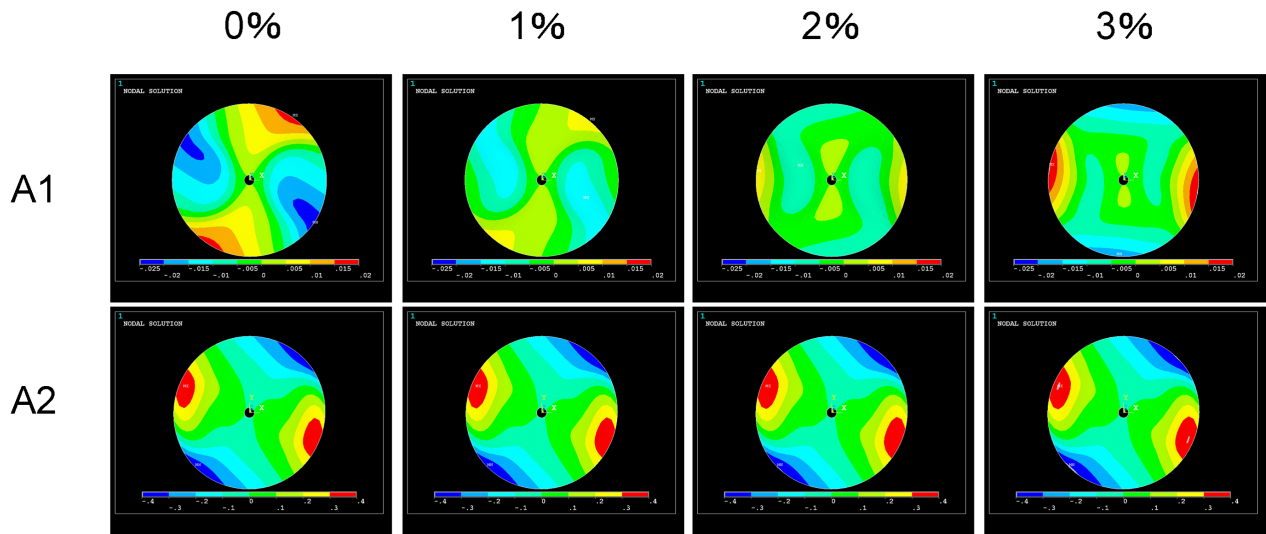


Fig. 9: Calculated out-of -plane displacement of the CFRP reflector models(Stiffness distribution considered).

$E_{11}$  は炭素繊維が支配的であり、81.5~88.5°Cでは弾性率は変化しないと考えた。また、リフレクタの上側から下側に向けて、一層ごとに、階段状の弾性率低下を与えた。このとき最上層における弾性率は、弾性率を一定と仮定した場合のものと一致している。一層ごとの変化率を1%、2%、3%の三種類として、リフレクタ模型 A1, A2 双方について解析を行った。

解析の結果を Fig. 9 に示す。この図において、0%とは、弾性率の変化を仮定しない場合における解析結果であり、Fig. 7, 8 と同様である。この結果から、リフレクタ模型 A1 について、弾性率分布を与えることにより変形量分布が回転し、正負が逆転することが分かった。また、各層で3%の変化を仮定することにより、変形分布は実験結果とより一致するようになる。また、A2 についてはほとんど変化がなく、弾性率を低下させることで変形量が若干大きくなる程度である。このことから、A2 の変形においてはアルミニウムの熱変形が支配的であり、CFRP の弾性率変化の影響は小さいと考えられる。

ただし、この解析方法には問題点がある。それは実際の温度分布は層内で一様でないにもかかわらず、弾性率の分布は一様と仮定していることである。これら問題を解決するために、温度変化を直接与えられる解析手法を検討すること、また、温度変化に対する弾性率変化を実験により求めることを予定している。

#### 4 結論

本研究では、表面のアルミニウム溶着有無による二種類のCFRP製リフレクタに生じる熱変形を、実験・解析により調べた。その結果、CFRP製リフレクタの熱変形分布はアルミニウム溶射に強く影響され、アルミニウム

溶射により形状安定性が損なわれる可能性があること、また、弾性率を層間に分布させることにより、変形の正負が容易に逆転するということが示された。また、このことは板厚方向の温度分布が熱変形に影響を及ぼすことを示唆している。

今後は、解析における変位分布を実験と定量的に一致させることを目指し、実測した材料定数を用いること、実際の温度分布を直接与えられる解析手法について検討することを予定している。

#### 謝辞

この研究は、JST 研究成果展開事業【先端計測分析技術・機器開発プログラム】「CFRPを用いた超軽量精密光学素子の開発」の一部として行われた。

#### 参考文献

- 1) J.R.Hill, K.W. Wang, H.Fang and U.Quijano, "Actuator grouping optimization on flexible space reflectors", Proc. SPIE 7977, Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems,(2011).
- 2) 小木曾望, 仲智彦, 池田忠繁, 宮崎康行, "高精度スマート構造のアクチュエータ最適配置に向けての基礎検討," 第 56 回構造強度に関する講演会講演集, 1A12, JSASS-2014-3013, pp. 31-33.
- 3) 田中宏明, 坂本啓, 稲垣章弥, 石村康生, 土居明広, 河野裕介, 小山友明, "高精度アンテナシステムに向けたスマート形状可変鏡の開発(アンテナ特性評価試験)," 第 56 回構造強度に関する講演会講演集, 1A14, JSASS-2014-3015, pp. 36-38.
- 4) 荒尾与史彦, 小柳潤, 武田真一, 宇都宮真, 川田広之, "CFRP 積層板における層の配向誤差による面外変形(積層構成の熱変形に対する影響)," 日本機械学会論文集(A編), Vol. 77, No. 776, 2014, pp. 619-628.