

A08 CFRP 製リフレクタの面外熱変形抑制におけるアクチュエータ配置に関する考察

田中 駿 (名古屋大学・院), 池田忠繁 (名古屋大学), 仙場淳彦 (名城大学)
Shun Tanaka, Tadashige Ikeda (Nagoya University), Atsuhiko Senba (Meijo University)

1 序論

高解像度・高分解能の宇宙観測には大型かつ高精度のリフレクタ (反射鏡) が不可欠である。宇宙観測は大気の影響を避けるためしばしば宇宙空間において行われる。宇宙空間において、観測システムは太陽からの激しい放射を受ける場合の高温や、逆に放射を受けない場合の低温といった極端な温度変化にさらされる。したがって、観測システムのリフレクタには温度変化に対する寸法安定性が求められる。炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は炭素繊維方向における線膨張係数が非常に小さく、宇宙観測システム全体の熱変形を軽減する材料として用いられる¹⁾。さらに、リフレクタの材料として CFRP を用いることも検討され、実用化に向けた研究が行われてきた^{2,3)}。

筆者らは、これまで CFRP 製リフレクタに生じる熱変形がどの程度であるか、また、熱変形の特徴に関する知見を得るための研究を行ってきた^{4,5)}。その結果、CFRP 層における繊維配向角誤差や、表面平滑化のためのアルミニウム溶射などが無視できない大きさの面外熱変形を引き起こすことが明らかになった。そこで本研究では、そのような熱変形を抑制するために直動アクチュエータを用いてリフレクタに直接外力を与え形状を変化させる手法に関する研究の第一段階として、先行研究において用いた CFRP 製リフレクタ模型に対し、直動アクチュエータを用いた変位拘束を行うことにより配向角誤差や表面処理により生じる面外熱変形がどの程度抑制できるかについて有限要素解析による検討を行った。

2 解析手法

2.1 CFRP 製リフレクタ模型

有限要素解析においては、先行研究における実験に用いた CFRP 製リフレクタ模型を模擬した解析モデルを使用した。先行研究において、リフレクタ模型をピッチ系炭素繊維およびシアネート系マトリクス材 [サンキコ

ンポジット社製 NM6037D-12C] の CFRP 積層板により製作した。その積層構成は $[0/-45/90/45]_s$ であり、CFRP 層全体の厚さは 0.86 mm であった。リフレクタ模型の形状は、曲率半径 1000 mm、直径 300 mm の円盤状球面であった。また、リフレクタ模型には 2 種類あり、一方は表面にアルミニウムおよびポリウレタンの層が付加された。これはリフレクタに対して行われる表面処理を模擬したものである。

2.2 解析モデル

汎用解析ソフトウェア ANSYS を用い、前節において説明したリフレクタ模型を模擬した解析モデルを作成し、これに生じる熱変形量の有限要素解析を行った。CFRP 一層の厚さは 0.1075 mm とした。また、アルミニウムおよびポリウレタン層の厚さはそれぞれ 0.02 mm, 0.1 mm とした。解析において仮定した CFRP, アルミニウムおよびポリウレタンの材料定数は Table 1 に示す通りである。なお、CFRP は直交異方性材料、アルミニウムおよびポリウレタンは等方性材料と仮定した。解析における温度変化は、 $+1^\circ\text{C}$ の温度上昇とした。なお、全ての条件において、リフレクタ模型中央の一点に対し変位を完全に 0 とする拘束を与えた。また、リフレクタ模型中央の点を原点とし、原点から見たリフレクタ模型形状の球の中心方向を z 軸、積層における 0 度方向を x 軸とする x, y, z 座標系を用いる。

Table 1: 計算に用いた各材料定数

| CFRP 層 | | アルミニウム層 | |
|------------|--------------------------------------|----------|-------------------------------------|
| E_{11} | 340 GPa | E | 70 GPa |
| E_{22} | 5.2 GPa | ν | 0.3 |
| G_{12} | 3.9 GPa | α | $21 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ |
| ν_{12} | 0.35 | ポリウレタン層 | |
| ν_{23} | 0.3 | E | 0.69 GPa |
| α_1 | $-0.7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ | ν | 0.4 |
| α_2 | $35 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ | α | $100 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ |

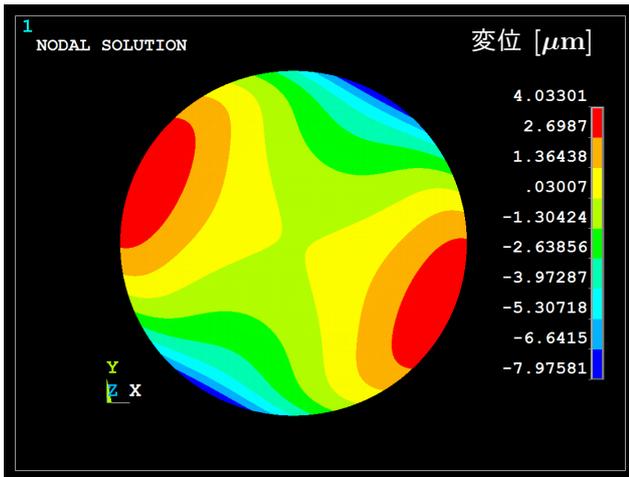


Fig. 1: 表面処理により生じる面外熱変形モード例

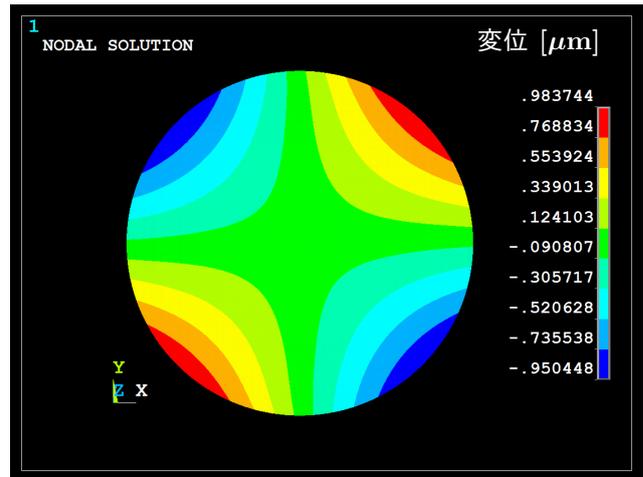


Fig. 2: 配向角誤差により生じる面外熱変形モード例

3 面外熱変形抑制効果の検証

3.1 制御対象

本研究においては、以下に示す 2 種類の原因により CFRP 製リフレクタに生じる面外熱変形を抑制する手法の効果を検証した。

- アルミニウム溶射・ポリウレタン塗布による積層の非対称性
- 配向角誤差による積層の非対称性

先行研究の結果として、前者については Fig. 1 に示す通り、CFRP 層の最外層の繊維方向 -23 度および $+61$ 度をなす方向にそれぞれ最大および最小変位を生じることが示されている⁴⁾。後者については Fig. 2 に示す通り、主として最外層の繊維方向 ± 45 度をなす方向に最大または最小の変位が生じることが示されている⁵⁾。

3.2 制御手法

面外熱変形の抑制手法として、直動アクチュエータにより面外方向に制御力または変位を与える手法を取り上げた。この手法はアルミニウム合金製リフレクタ模型に対する先行研究⁶⁾において検討された手法に類似するものである。解析においては、アクチュエータによる外力によりいくつかの点における変位を 0 とすることを考え、いくつかの節点における変位を強制的に 0 とすることによる面外熱変形抑制効果の検証を行った。

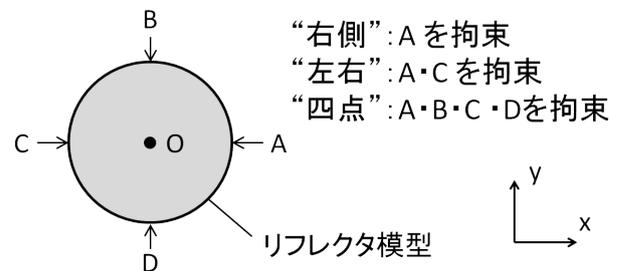


Fig. 3: 変位拘束点の配置

3.3 変位拘束点の配置

解析において、2 種類の原因により生じる面外熱変形の最大または最小変位量がリフレクタ模型の 0 度方向に生じるよう、CFRP 層の積層構成全体を回転させ、変位拘束点を Fig. 3 に示すように、リフレクタ模型外縁の上下左右 (0 度, 90 度, 180 度, 270 度方向) に配置した。図において、リフレクタ模型の中心点 O は前述の通り全ての条件において全自由度拘束されていると仮定した。変位拘束点の配置は 3 種類あり、それぞれ“右側”, “左右”, “4 点” 拘束と呼ぶこととする。右側のみを拘束する条件では、リフレクタ模型の右側の点 A に対し面外方向の変位を 0 とする拘束を与えた。左右を拘束する条件では、左右の点 A および C に対し面外変位拘束を与えた。4 点を拘束する条件では、上下左右の点 A, B, C, D に対し面外変位拘束を与えた。

3.4 熱変形抑制効果の評価基準

面外熱変形の抑制効果を検証するためのリフレクタの性能指標として、リフレクタ表面の理想的形状からの逸脱量の二乗平均 (RMS) を採用した。この値が観測対象とする電波の波長の $1/20$ 程度を超えた場合、リフレクタの性能が著しく低下するとされている。なお、この値は解析結果における各節点の x, y, z 方向の変位から計算された。

面外熱変形抑制効果を示すため、変位拘束後の RMS と変位拘束前の RMS の比を“誤差率”として定義した。この値が小さいほど面外熱変形の抑制効果が大いと言える。

3.5 検証結果

3.5.1 表面処理による変形の抑制

アルミニウム溶射およびポリウレタン塗布を行ったことにより生じる面外熱変形の抑制効果および RMS の計算結果を Fig. 4 に示す。この場合、リフレクタ模型の 0 度方向に最大変位が生じるように CFRP 層の積層構成を $[23/-22/-67/68]_s$ とした。拘束を行わない場合の変位分布を (a) に示す。この図から、(b) に示すように、右側のみを拘束した場合には拘束が行われた右側の面外熱変形量は小さくなったが、拘束が行われていない左側の変位が拘束を行わない場合よりも大きくなったこと、さらに、RMS が増大し、誤差率が 125% となったことがわかる。また、(c) に示すように、左右を拘束した場合には最大・最小ともに変位量が小さくなり、熱変形が誤差率 42% にまで抑制されたことがわかる。さらに、(d) に示すように、4 点を拘束した場合には熱変形が誤差率 29% にまで抑制されたことがわかる。

3.5.2 配向角誤差による変形の抑制

配向角誤差による面外熱変形の例として、最上層に $+1$ 度の配向角誤差が存在する場合のものを取り上げる。配向角誤差により生じる面外熱変形の抑制効果および RMS の計算結果を Fig. 5 に示す。この場合、リフレクタ模型の 0 度方向に最小変位が生じるように CFRP 層の積層構成を $[46/(0/-45/90)]_s/45$ とした。拘束を行わない場合の変位分布を (a) に示す。この図から、(b) に示すように、右側のみを拘束した場合には拘束が行わ

れた右側の面外熱変形量は小さくなったが、拘束が行われていない左側および下側の変位が拘束を行わない場合よりも大きくなったこと、さらに、RMS が増大し、誤差率が 148% となったことがわかる。また、(c) に示すように、左右を拘束した場合には最大・最小ともに変位量が小さくなり、熱変形が誤差率 14% にまで抑制されたことがわかる。この値は表面処理による熱変形の場合と同条件より小さい。さらに、(d) に示すように、4 点を拘束した場合には変位量が非常に小さくなり、熱変形が誤差率 3% にまで抑制されたことがわかる。

以上の結果から、単純な変位拘束条件・拘束点配置による CFRP 製リフレクタの面外熱変形抑制効果に関し、次の知見が得られた。

- 右側のみ拘束した場合、RMS はかえって増大する。
- 4 点を拘束する場合、RMS が最も小さくなる。
- 配向角誤差による CFRP 製リフレクタの面外熱変形は誤差率 3% にまで抑制可能である。

4 変位量抑制効果に関する考察

前節に示す通り、今回考慮した変位拘束点配置のうち、RMS を最小とするものは 4 点を拘束するものであった。この拘束条件において、表面処理による面外熱変形は誤差率 29% 、配向角誤差によるものは誤差率 3% にまで抑制可能であることが明らかになった。4 点拘束で配向角誤差に対する熱変形抑制効果がより高かった原因は、配向角誤差により生じる熱変形モードが拘束を行った 4 点に荷重を与えた場合の変形モードとより類似していたからであると考えられる。実際に解析の結果得られた各拘束点における面外方向の反力と等量の力を変位拘束点に与えた場合の変位分布を計算したところ、Fig. 6 (a) に示す通り、配向角誤差による面外熱変形モードはアクチュエータによる変位モードを正負反転したものにはよく一致しているが、(b) に示す通り、表面処理による面外熱変形モードとアクチュエータによる変形モードはあまり一致していない。このことから、表面処理による面外熱変形を適切に制御するためには、今回とは異なるアクチュエータ配置や変位量の適用を検討する必要があることが明らかになった。

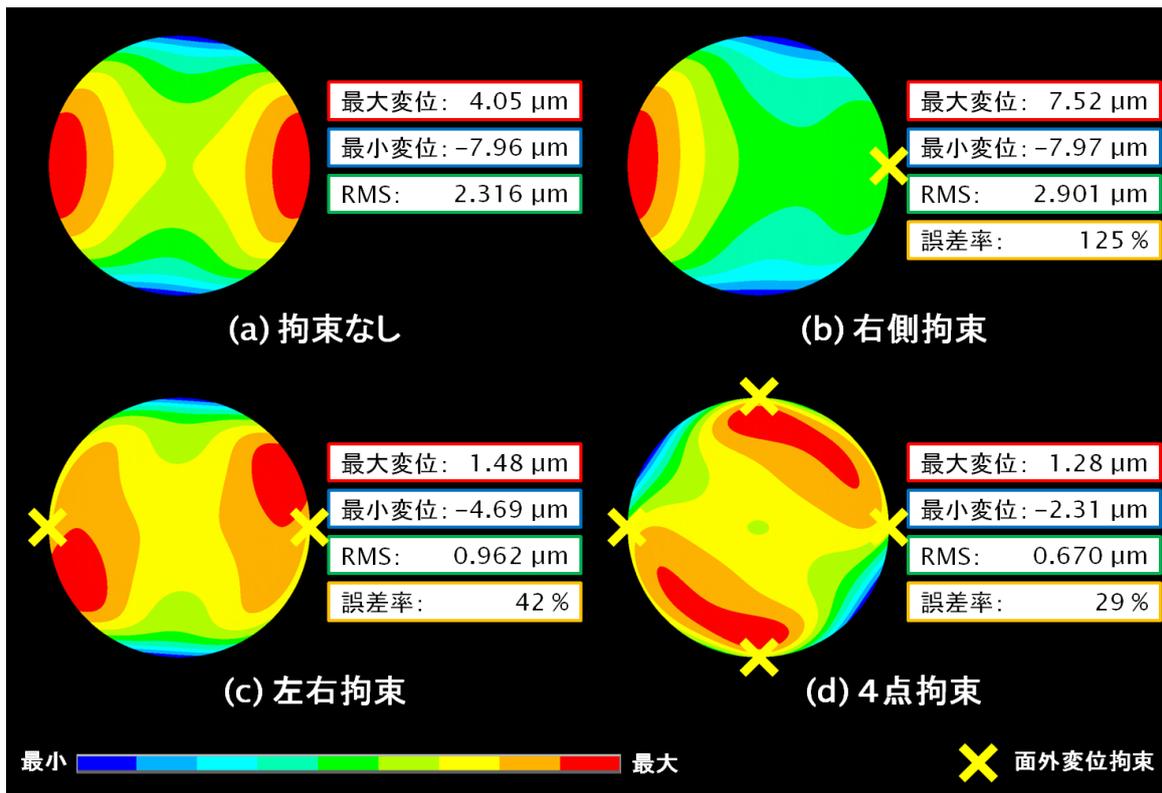


Fig. 4: 表面処理による面外熱変形抑制効果の計算結果

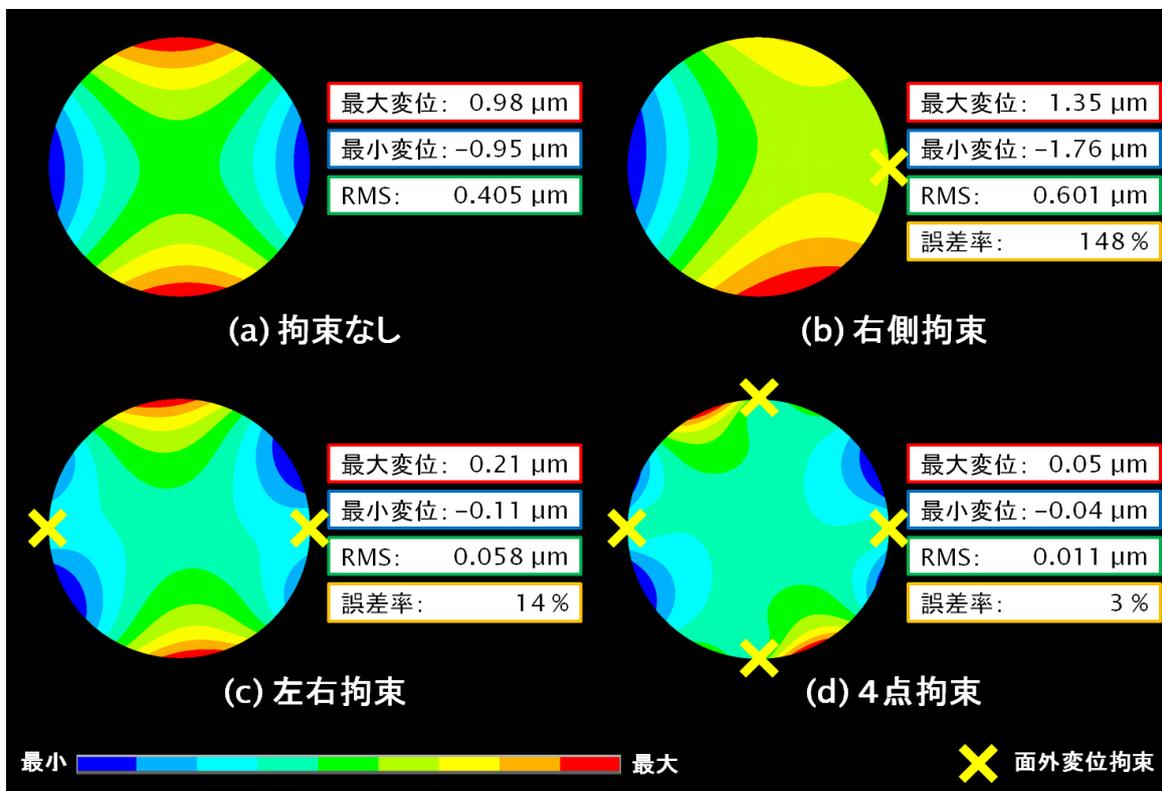


Fig. 5: 配向角誤差による面外熱変形抑制効果の計算結果

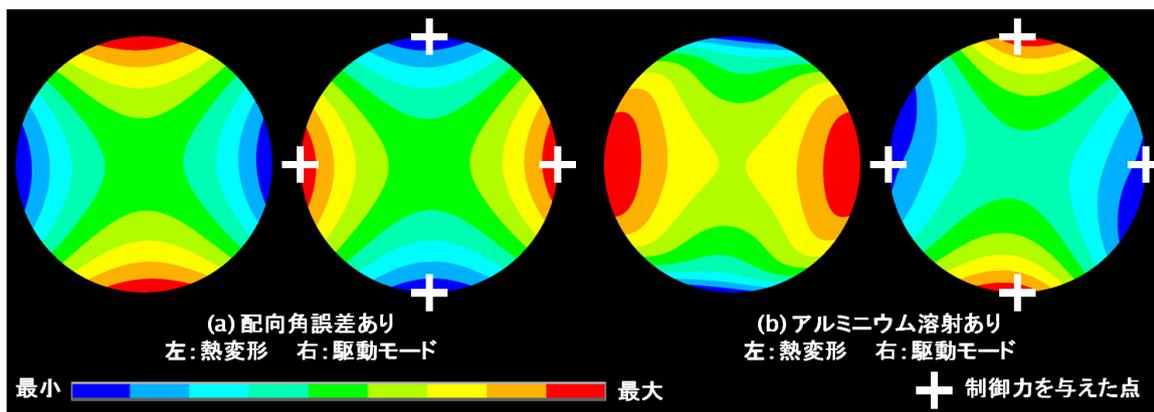


Fig. 6: 温度変化およびアクチュエータによる変位分布計算結果

また、配向角誤差による面外熱変形の RMS が、上下左右の 4 点のみの面外変位を拘束するという単純な手法により誤差率 3% にまで抑制されたことから、アクチュエータによる面外熱変形抑制を行う場合、CFRP の配向角誤差はある程度許容可能である可能性も示された。

5 結論

本研究では、アルミニウム溶射およびポリウレタン塗布による表面処理や、炭素繊維配向角誤差により生じる CFRP 製リフレクタの面外熱変形を抑制する手法の研究における第一段階として、いくつかの点における面外方向の変位を 0 に拘束する単純な手法により得られる変位抑制効果がどの程度であるかについて検証を行った。その結果、リフレクタ外側の十字状に配置された 4 点の変位を 0 に拘束することにより、熱変形量の二乗平均 (RMS) をある程度低く抑えられることが示された。特に、配向角誤差により生じる熱変形に関しては拘束を行わない場合の 3% にまで抑制可能であることが示された。このことから、高精度 CFRP 製リフレクタの実現において、アクチュエータによる面外熱変形抑制を行う場合、CFRP の積層における配向角誤差をある程度許容できる可能性が示された。

今後の課題として、今回考慮しなかったアクチュエータによる入力量や配置を最適化することや、面内力を与えるアクチュエータを用いるなど、他の制御手法を検討すること、さらにリフレクタ全体を剛体的に移動させる“リフォーカス”の効果について検討することが挙げられる。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 26249131 および平成 28 年度戦略的開発研究“大型高精度光学架台に関する研究”の一部として行われた。

参考文献

- 1) T. Ozaki, K. Naito, I. Mikami, H. Yamauchi, S. Tsuneta, “High precision composite pipes for SOLAR-B optical structures”, *Acta Astronautica*, Vol. 48 (2001), pp. 321–329.
- 2) Y. Arao, J. Koyanagi, S. Utsunomiya, S. Takeda, H. Kawada, “Analysis of time-dependent deformation of a CFRP mirror under hot and humid conditions”, *Mechanics of Time-Dependent Materials*, Vol. 13 (2009), pp. 183–197.
- 3) Y. Arao, J. Koyanagi, Y. Okudoi, M. Otsuka, H. Kawada, “Residual stress relaxation in CFRP cross-ply laminate”, *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, Vol. 4 (2010), pp. 1595–1604.
- 4) S. Tanaka, T. Ikeda, A. Senba, “Thermal deformation generated on a CFRP laminated reflector”, *Mechanical Engineering Journal*, Vol. 3 (6) (2016), 16–00296.
- 5) S. Tanaka, T. Ikeda, A. Senba, “Sensitivity analysis of thermal deformation of CFRP laminate reflector due to fiber orientation error”, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 30 (2016), pp. 4423–4426.
- 6) 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, IA14 (2014).