

CFRPサンドイッチミラーの鏡面精度の時間・温度依存性*

小柳 潤** 荒尾 与史彦*** 武田 真一****
宇都宮 真***** 川田 宏之*****

Time and Temperature Dependence of Surface Accuracy on CFRP Sandwich Mirror
by

Jun KOYANAGI,

(Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, Sagami-hara)

Yoshihiko ARAO,

(Department of Mechanical System Engineering, Doshisha University, Kyotanabe)

Shin-ichi TAKEDA, Shin UTSUNOMIYA

(Aerospace Research and Development Directorate, Japan Aerospace Exploration Agency, Chofu)

and Hiroyuki KAWADA

(Department of Applied Mechanics and Aerospace Engineering, Waseda University, Tokyo)

Mirrors of satellite are one of the heaviest parts in the satellite. The maximum weight of the satellite is determined by the launch capacity of the rocket. Of course, the weight of the main mirror is limited but larger mirror enable higher resolution observation. A specific stiffness of the mirror material is hence a key factor. Since carbon fiber reinforced polymeric composite material(CFRP)is superior to not only the specific stiffness also in-plane thermal stability, it may be suitable to use as mirror. Before applying CFRP to the mirror, several problems should be solved; one of them is long-term reliability of mirror surface accuracy. It is reported that there exist a "print-through" problem for CFRP mirror surface. To address this problem, a lot of works regarding surface coating treatment have been done for the mean time. However, the long-term assurance of the surface roughness has not been discussed nevertheless the mechanical property of CFRP is inherently time-dependent. There is a possibility that the time-dependent deformation of the material deteriorates the mirror surface accuracy. The deformation induced by physical ageing, dewater and internal stress relaxation of the matrix may change the surface accuracy. A deformation induced by temperature change is another problem. In this paper, time and temperature dependence of the surface accuracy is studied for CFRP sandwich mirror. The effect of different surface treatment on the surface accuracy is also investigated.

(Received October 31, 2011)

キー・ワード：高分子系複合材料，ハニカムサンドイッチ，鏡面精度，耐久性

Key Words : Polymer Composites, Honeycomb Sandwich, Mirror Surface Accuracy, Durability

1 緒 言

CFRPの衛星部材への適用に関して，近年CFRP製の鏡の開発が望まれている．周知の通り，ロケットの性能の面から衛星の重量は厳しく制限されている．現状，熱膨張率が小さいガラスが鏡の材料に用いられているが，ガラス製鏡を衛星に搭載すると，それに伴って制振機などが必要となり，結果的に鏡の直径は大き

く制限されてしまう．鏡の直径は観測性能にクリティカルに影響し，例えば鏡の直径が2倍になると，観測解像度は4倍，観測対象物の同定までに必要な積分時間は16分の1になる．ガラス製の鏡と比べて重量を同等とした場合，CFRP製の大型軽量鏡により観測性能は飛躍的に向上する．衛星は地球からの輻射熱とその方向が変化するため，時間の経過とともに温度が変化するが，面内の熱伝導率がCFRPはガラスよりも優れ，ミラー内温度差が抑えられるため温度変化に対しても安定した観測を行うことができる¹⁾．

一般に，鏡面精度は対称とする電磁波の波長の20分の1以下のRMS (Root mean square) が必要である．

* 原稿受付 2011年10月31日

** 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 相模原市中央区由野台

*** 同志社大学機械システム工学科 京田辺市多々羅都谷

**** 宇宙航空研究開発機構研究開発本部 調布市深大寺町

***** 早稲田大学基幹理工学部 東京都新宿区大久保

例えば、可視光線より波長が長い近赤外線（最短波長約0.7 μm ）を正確に反射させるためには、鏡面精度は35nmRMS以下でなくてはならない。しかし、現状最も正確な平面が創製できるとされているオプティカルフラットを用いた転写を利用してCFRP積層板を成型した結果、表面荒さは100nmRMSを大きく超え、可視光線を対象にした場合などを考えると、鏡面精度はまったく不十分である。この表面荒さはFig. 1の写真に示す繊維が凹凸となって表面に現れる「プリントスルー」に起因する問題であると考えられる^{1)~4)}。

Fig. 1に示すように、表面に近い炭素繊維一本一本の繊維の凹凸が、CFRP表面に現れている。このため、CFRP表面の表面荒さが悪化し、鏡に使用できない大きな理由の一つとされていた。従来、このプリントスルーの問題の対策として、「ゲルコーティング」が有効であるとされている。Fig. 2にゲルコーティング処理後のSEM写真を示すが、オプティカルフラットを用いて転写して作製したCFRP表面に樹脂の薄い層をさらに塗布する（この際にもオプティカルフラットを使用）ことで、表面のプリントスルーが解決できているように見える。しかしこのゲルコーティングの妥当性・長期持続性をナノオーダーの測定にて議論したこ

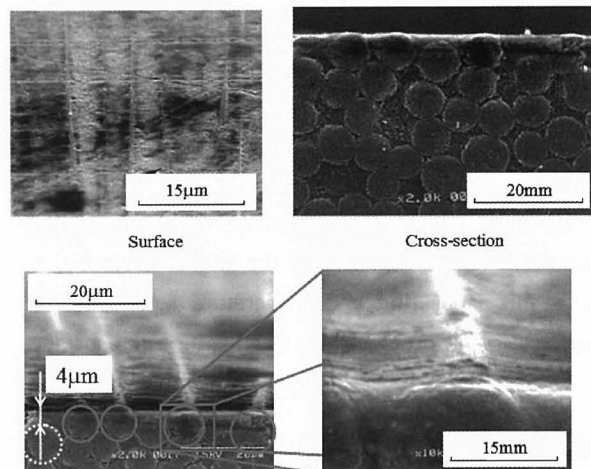


Fig.1 Fiber-print through on CFRP surface.

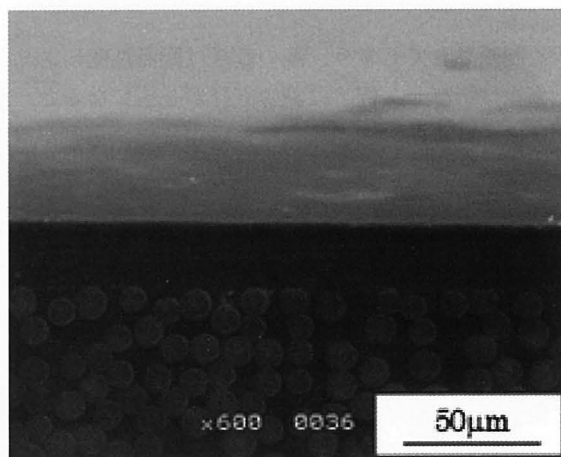


Fig.2 Gel-coated CFRP plate surface taken by SEM.

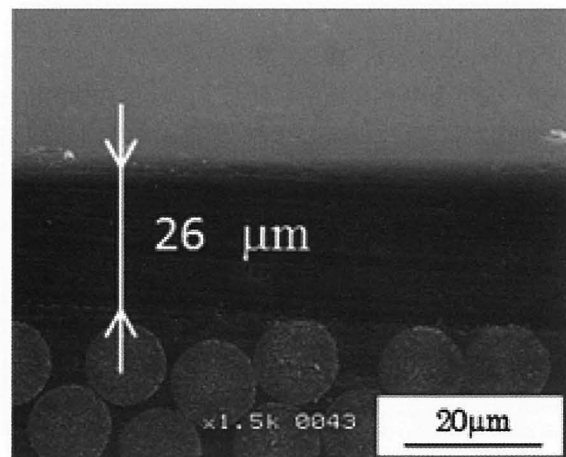
とは過去にない。

本研究ではプリントスルー対策として、表面にゲルコーティングを施したオールCFRP製サンドイッチ鏡を作製した。本論文ではその鏡面精度の経時変化、温度・時間依存性を測定した結果を述べ、考察を行う。

2 CFRPミラー作製

Fig. 3に本研究にて作製したCFRPミラーの作成方法を示す。まずオプティカルフラットをツール面として用い、サンドイッチの表皮となるCFRP積層板を作製する（Fig. 3-1）。積層構成は疑似等方、 $\{[(45/0/-45/90)]_{R90}\}_{F32}\text{ply}$ とした。この積層構成は特別な構成であり、まず8ply積層したプリプレグに同じく8plyのものを180°回転させて積み合わせて16plyとし、再びこれを2セット用意したあと、また一方を90°回転させて積層して合計32plyにする方法である。本積層手法により、繊維の配向誤差を相対的に抑えることが可能であり、これによって従来必ず発生するとされていた、積層板の面外変形を小さくすることができる。材料として炭素繊維は高弾性のビッチ系カーボン繊維を用い、マトリクスには吸湿・経時変形の小さいシアネート樹脂を使用した。成型温度は232°Cである。サンドイッチミラーの裏側の表皮については、作製費用節約のためスーパーインバーを用いて成型した（Fig. 3-2）。積層構成はFig. 3-1と同様である。これらにほぼ同様の機械的特性値を持つ構成機材からなるハニカムCFRP（ウルトラコアUCF-160-1/4-3.0（SF-YSH50A/Cyanate Resin）をシアネート接着剤を用いて張り合わせた。同じく232°Cにて接着を行った（Fig. 3-3）。

このようにサンドイッチミラーを接着してから、表面のオプティカルフラットとスーパーインバーから外した（Fig. 3-4）。次に1cm四方あたり100gのおもりを用いてゲルコーティングを行った（Fig. 3-5）。これを常温で硬化させ、型から外してオールCFRP製



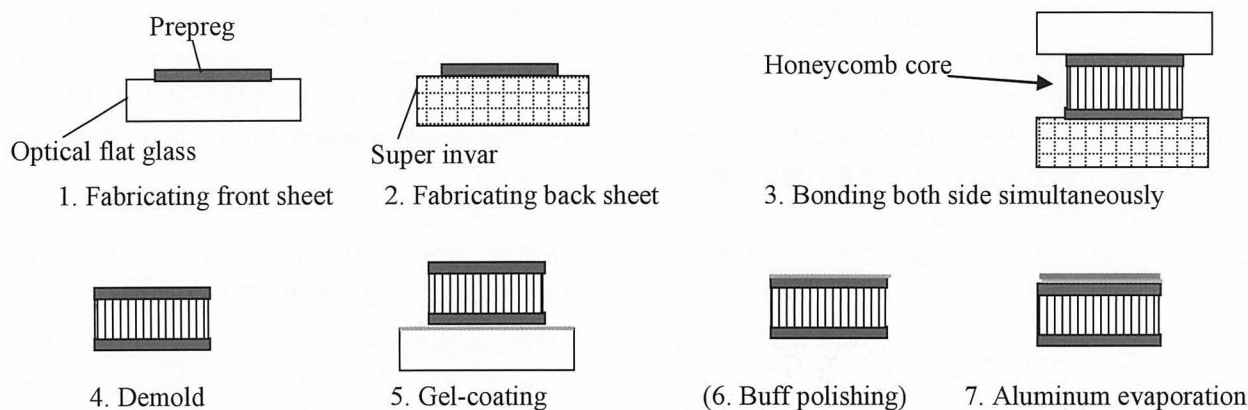


Fig.3 Fabrication flowchart for CFRP sandwich mirror.

サンドイッチ鏡を作製した。比較のために、ゲルコーティング層をバフ研磨し、コーティング層を薄くしたサンドイッチ材作製も試みた (Fig. 3-6)。その後、Zygo 干渉計にて表面精度を測るために必要な反射率を確保するために、アルミ蒸着を施した (Fig. 3-7)。これらの作業はすべて (株)TMP にておこなった。作製されたミラーの大きさは、縦横10cm、高さ3cmで、1cm 四方当たり0.9gの軽量ハニカムサンドイッチ構造材である。作製したCFRP ミラーの写真を

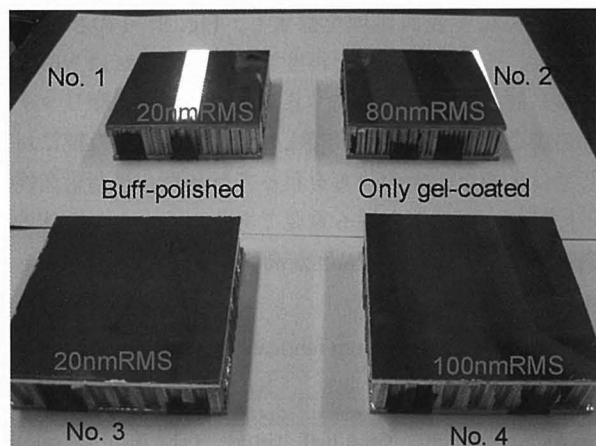


Fig.4 Gel-coated (and then buff-polished) and Al evaporated CFRP sandwich mirrors.

Fig. 4 に示す。また納入直後の測定した面精度を Fig. 4 に併記する。

3 鏡面の経時変形

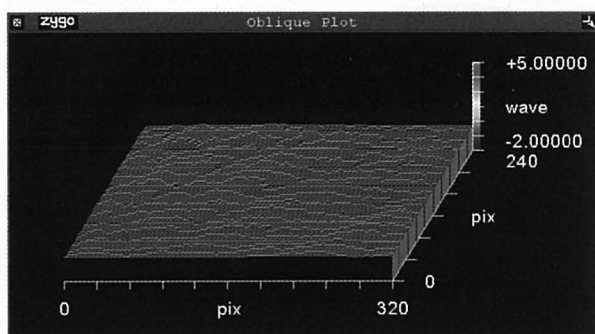
2体の鏡 (Fig. 4 における No. 1 と No. 2) を様々な環境にて静置した後の鏡面測定結果を Table I に示す。Table I に示す通り、納入直後の CFRP ミラーの表面荒さは、20~100nmRMS となっており、赤外線のみラーとしての十分な適用可能性を示している。特に、ゲルコーティング後バフ研磨を施したミラーの鏡面は納入直後の測定で20nmRMS という結果を示しており (Fig. 4)、CFRP 製鏡としては革新的に精巧な鏡面が仕上がっていた。ゲルコートのみ鏡面と比べて表面精度が良い傾向があった。次に、様々な環境にて CFRP ミラーを静置し、その都度鏡面精度を測定した。初め数日の測定では鏡面が概ね劣化していることが確認できる。この要因としては、吸湿変形・脱水変形・フィジカルエージングによる収縮、粘弾性による熱残留応力の解放に伴う変形などが挙げられるが、個別の定量的議論は難しく、ここでの議論は差し控える。ある程度の日数を経て鏡面が劣化した後は、鏡面の劣化が極めて緩やかとなり、この時間スケールでは安定し

Table I Surface roughness measurement results after various hostile condition durations.

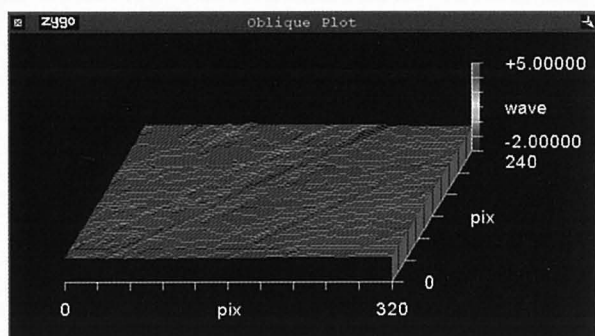
State #	Condition	Duration	Surface roughness nmRMS	
			No. 1 (Buff-polished)	No. 2 (Gel-coating only)
0	Initial	-	20	80
1	Normal room	13 days	50	100
2	Normal room	6 days	40	120
3	80°C 95%RH	1 day	60	180
4	20°C vacuumed	1 day	60	180
5	Normal room	8 days	60	180
6	80°C vacuumed	7 days	60	180

た鏡面を保っているように見える。成型から納入まで鏡面が劣化したと仮定すると、成型直後は20nmRMSより良い鏡面状態であったと予測できる。成型直後から低温環境などのシアネートの変化が起りにくい条件で保存することができれば、もっと高い精度の鏡面が得られた可能性が示唆できる。

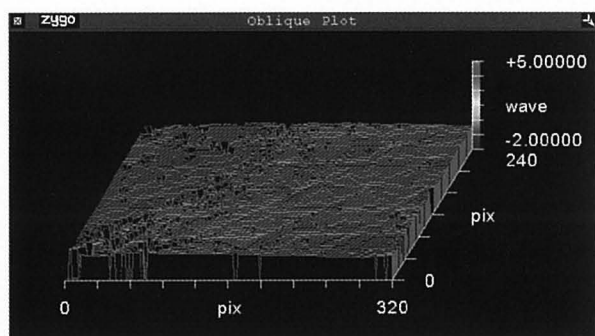
Fig. 5 には CFRP 鏡 No. 1 の鏡面の経時変化を測定



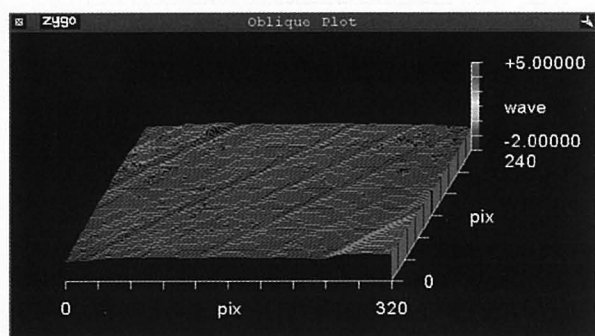
(a) Just after arrival



(b) 3weeks under room temperature



(c) 1day under 80°C, 95%RH



(d) 1day under 20°C, vacuumed condition

Fig.5 Z-displacement plot measured by Zygo in approximately 1x1 inch area.

した際の、高さ分布の結果を示す。図より、繊維一本一本のプリントスルーはゲルコーティングとバフ研磨により改善されていることが確認できたが、繊維の束レベルの相対的に大規模なプリントスルーの存在が明確になった。

すなわち、図のようにプリプレグ内の繊維の束と束の隙間に溝のような凹みが存在した。この溝は納入直後から始めは深くなる傾向を示し（図中 a→b）、吸湿後は少し溝が浅くなる傾向があった（図中 b→c）。その後真空での脱湿に伴って再び溝が深くなったように見える（図中 c→d）。これを繊維の束と束の間に存在する樹脂リッチ部と仮定する。樹脂のフィジカルエージング収縮→吸湿膨張→脱水収縮と想定すると、図の a から d までの挙動と定性的に一致するため、この「溝」のようなプリントスルーは繊維の束と束の間の樹脂リッチ部であると予想できる。

4 表面の再処理

前節の結果から、ゲルコーティングの後、バフ研磨を施した鏡面（No. 1 と No. 3）が相対的に良い鏡面状態であった。そこで、2 体の CFRP 鏡（No. 3 と No. 4）を用いて、表面の再処理を行った。すなわち、化学薬品にて表面処理を除去し、Fig. 3-4 の状態まで戻り、5～7 の工程を再度実施した。これは No. 3 の鏡に対しては前節に述べる繊維束の間の樹脂リッチ部の溝を埋める効果を期待して行い、No. 4 の鏡に対しては大幅な鏡面の改善を狙って行った。長期耐久性と同様に、温度依存性も重要であるため、この 2 体の CFRP 鏡に対しては、温度が高い状態での鏡面精度も

Table II History from fabrication to measurement.

Mirror No.	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
Fabrication	Common	Common	Common	Common
Surface treatment	Gel & Buff	Gel only	Gel & Buff	Gel only
Initial RMS (nm)	20	80	20	100
After harsh exposure	60	180	60	240
Long exposure	-	-	1 year	1 year
Re-treatment	-	-	Gel & Buff	Gel & Buff
After long exposure	-	-	0.5 year	0.5 year
Ambient temperature	-	-	53	980
Elevated temperature	-	-	54	730

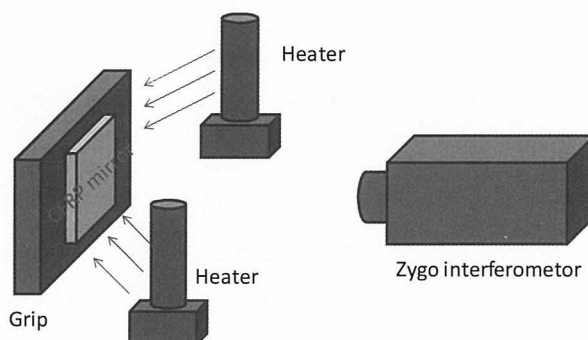
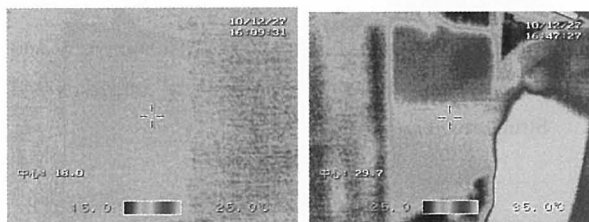


Fig.6 Schematic of measurement system.

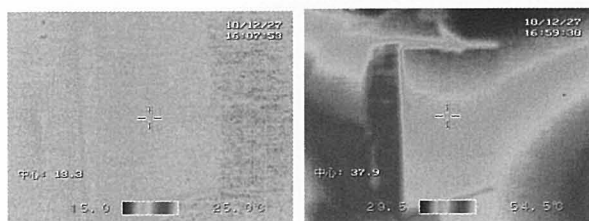
測定した。成型からの履歴、並びに再処理後の面精度測定結果、また高温状態での鏡面精度の測定結果を Table II に示す。高温環境は測定器には不適切なため、Fig. 6 に示すように、CFRP 鏡のみを直接ヒーターで暖め、その面精度を測定した。

ここで Table II の結果について詳細に述べる。Fig. 4 に示す通り、各 CFRP 鏡に番号を付けた。Table I には No. 1 と No. 2 の結果を示したが、No. 3 は前者、No. 4 は後者と類似した結果であったため割愛した。この段階で、ゲルコーティングにバフ研磨を施した鏡の方が鏡面精度は優れていた。前節に述べる試験終了後、CFRP 鏡を 1 年間常温にて静置した。しかる後 No. 3 と No. 4 の鏡面を再処理（ゲル＋バフ）し、その後（測定器の都合上）さらに半年放置してから鏡面精度を測定した。常温での測定結果は No. 3 は 53 nmRMS であった。再処理により鏡面精度が改善されたことと、半年の静置での鏡面が劣化したことにより、結果的に 60 nmRMS から少し改善されたと考えられる。一方、No. 4 は常温でかなり鏡面精度が低下しており、表面の再処理の効果があつたとは言い難い。再処理により、No. 4 も 60 nmRMS かそれ以下の面荒さを期待したが、期待とは異なる結果となった。さらに、これらの鏡の温度を上げ、面精度を測定した結果、No. 3 は変化せず、No. 4 は面精度が改善した。鏡の温度プロファイルは Fig. 7 に示す。図中 (a), (b) は No. 3 の常温、昇温、(c), (d) は No. 4 のそれらである。Fig. 6 に示す簡易的な昇温方法であるため、Fig. 7 に示すように、温度分布が生じていた。No. 3 では 25℃～35℃で分布し、No. 4 は 30℃～50℃で分布している。温度分布の存在により、鏡面精度は低下すると予測できるが、No. 3 では変化無し、No. 4 では予測と反対で多少改善された。

Fig. 8 には、Fig. 5 同様の高さの分布をそれぞれの



No.3 (a) Room temperature (b) Elevated temperature

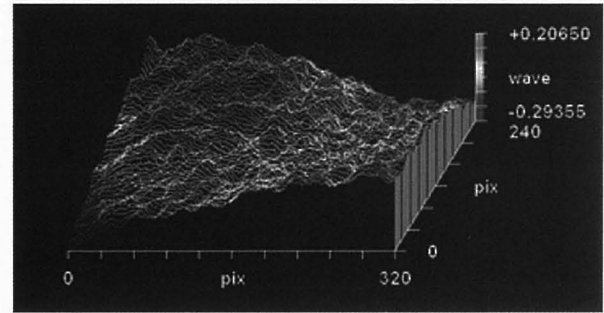


No.4 (c) Room temperature (d) Elevated temperature

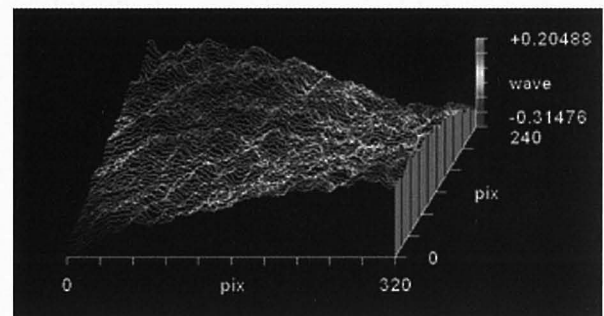
Fig.7 Temperature distributions at measurements.

測定ごとに示す。(a), (b) は No. 3 の結果で、高さが (c), (d) より 20 倍程度拡大されていることに注意されたい。再処理により、No. 3 の束単位の溝が改善されたように見える。No. 4 は精度の悪さから高さの倍率が小さく表しているため、図では表面が滑らかに見えるが、拡大すると No. 3 と同様であった。

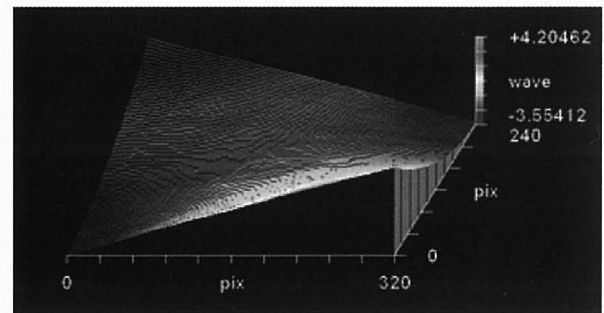
いずれの鏡面も巨視的には「鞍型」に面外変形していたことが共通の結果である。鞍型面外変形の発生メカニズムを考慮し、面精度の温度依存性、時間依存性



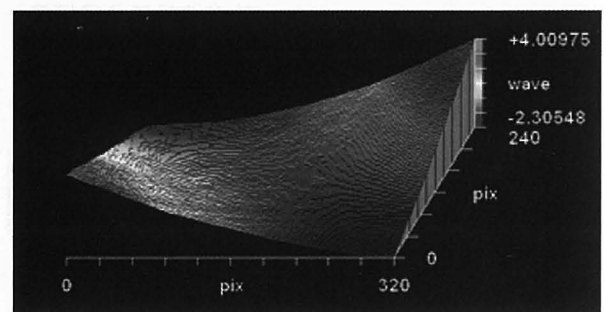
(a) No.3 at room temperature



(b) No.3 at elevated temperature



(c) No.4 at room temperature



(d) No.4 at elevated temperature

Fig.8 Measurement results by Zygo interferometer.

を次節にて考察する。

5 考 察

著者らの過去の研究により, CFRP のサンドイッチ構造物は微視的に見るとほとんどの場合, Fig. 9 に示すような鞍型面外変形が発生することが報告されている⁵⁾。

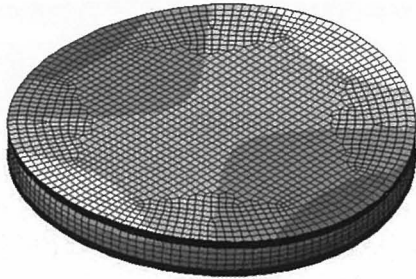


Fig.9 Out-of-plane deformation of CFRP sandwich structure⁵⁾.

CFRP 積層板内部の繊維の方向がわずかに想定と異なる場合, 熱などの外力に対して疑似等方積層板の面内での力学的アンバランスが発生し, これが面外変形に逃げるというメカニズムである。精密機器を用いて, プリプレグを正確にレイアップしても, 繊維の束は基本的に緩やかなより糸状態となっているため, 繊維方向の微少誤差が必ず発生する。その CFRP のマトリクスが膨らんだり縮んだりすることで, 成型時には完全にフラットであったとしても, CFRP は微少面外変形を生じる。面外変形が小さいか大きいかは表面処理方法とは関係なく, 繊維がいかに想定通りの角度で配置されているかに依存する。Fig. 9 の変形は Fig. 8 の結果と酷似している。下記の考察によって, 本研究の結果をよく説明することができる。面精度とマトリクスの膨張収縮には Fig. 10 の関係があると考え。すなわち, 成型時の温度では面精度は最も良く, 繊維配向誤差がなければ, マトリクスの体積変化に関係なく面精度を保てるが, 繊維配向誤差があれば, マトリクスの体積変化にともなって, 面精度が低下する。No. 4 は繊維配向誤差が相対的に大きく, フィジカルエージ

ングの進行とともにマトリクスが収縮し, 面精度が低下した。温度を上げるとマトリクスが膨張し, 面精度が回復した。さらに表面の再処理はあまり影響していない。一方で No. 3 は繊維配向誤差が相対的に小さく, マトリクスの体積変化があまり面精度に影響しなかった。

6 結 言

本研究では CFRP サンドイッチミラーの時間・温度依存性を調査した。CFRP 積層板内部の繊維配向誤差が小さければ, 時間・温度に影響されず良い鏡面を保ち, 配向誤差が大きければ時間・温度によって, 鏡面が劣化していくことが示唆された。繊維配向誤差の小さい CFRP 鏡であれば, 赤外線のみラーとして長時間使用できることがわかった。

謝 辞

本研究は, 科学研究費若手研究 B (ナノオーダー精度を有する大型軽量熱安定 CFRP 製鏡の開発) の援助により遂行された。ここに謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) Koyanagi, J., Arao, Y., Utsunomiya, S., Takeda, S. and Kawada, H., Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 4, (2010), 1540.
- 2) Massarello, J. J., Hochhalter, J. D., Fuierer, P. A. and Maji, A. K., Proceedings of SPIE, 5868, (2005), 58680.
- 3) Hochhalter, J. D., Massarello, J. J., Maji, A. K. and Fuierer, P. A., Proceedings of SPIE, 6289, (2006), 628902.
- 4) Massarello, J. J., Welsh, J. S., Hochhalter, J. D., Maji, A. K. and Fuierer, P. A., Optical Engineering, 45, (2006), 123401.
- 5) Arao, Y., Koyanagi, J., Terada, H., Utsunomiya, S. and Kawada, H., Mechanics of Advanced Materials and Structures, 17, (2010), 328.

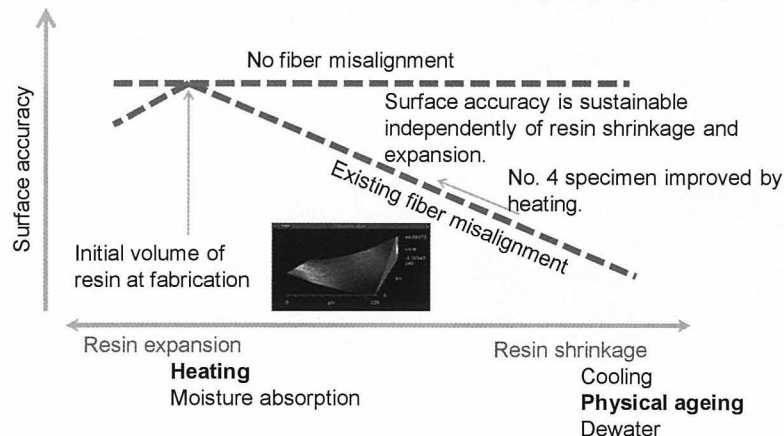


Fig.10 Relationship between surface accuracy and matrix volume change.