

平成 22 年 5 月 17 日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008～2009

課題番号：20760079

研究課題名（和文） CFRP 寸法のみクロンオーダー制御とその長期信頼性

研究課題名（英文） Micron-order dimensional control and its long-term stability for CFRP

研究代表者

小柳 潤 (Koyanagi Jun)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部・助教

研究者番号：60386604

研究成果の概要（和文）：CFRP の面外変形に最も支配的である吸湿変形を調査し、その特徴を理解した。

研究成果の概要（英文）：Out-of-plane deformation induced by moisture absorption which is the most dominant factor for that was investigated and its characteristics were understood.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
20 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
21 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,600,000	780,000	3,380,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料材料力学

キーワード：複合材料，長期寸法安定性，CFRP，形状安定性

1. 研究開始当初の背景

炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は比強度，比剛性，対熱変形に非常に大きな優位性を有する材料であり，特に耐熱変形に対しては先膨張係数をゼロに設定できる唯一の材料であるため，今後は航空宇宙分野での適用がさらに広がると期待されている。さらに近年ではガラス転移温度が 300℃程度の新規高分子マトリクスが開発されたため，これを用いた CFRP はその大きな弱点の一つとされていた高温特性も大きく改善され，国際宇宙ステーションや衛星の構造材などとしても有力な候補となっている。これにともなって，CFRP の強度を保証すべく様々な破壊に関する研究が非常に多く

なされている。しかし，「CFRP の精密さの向上およびその長期保証」については同様に研究すべき重要なテーマであるにも関わらず，ほとんどの研究者はこれを議論していない。CFRP の母材である高分子材料が時間依存性を有するため，CFRP に微視的な経時変形は「つきもの」という見解が一般的であり，現状では衛星搭載のミラーなどの非常に精密な部材への適用は想定されていない。寸法・形状の精密な CFRP を成型する手法や，その精密さが長時間保持される保証などが確立されれば，CFRP の適用範囲は飛躍的に拡大し，様々な産業分野へインパクトをもたらすと考えられる。

2. 研究の目的

炭素繊維強化プラスチック(CFRP)は比強度・比剛性などの機械的性質に優れるため、多岐にわたる工業分野で適用されている。CFRPは熱膨張係数が小さく寸法安定性に優れることも大きな特徴の一つである。そのため、精密構造材を軽量化するためにCFRPを用いて設計を行う試みがなされている。精密構造材の例として、アンテナリフレクタや望遠鏡に使用される主鏡等が挙げられる。これらの精密構造材は対象とする電磁波の波長の1/20程度のRMS波面収差に抑える必要がある。本来の性能を發揮するために、CFRPの時系列的な寸法および形状安定性を確保することが必須の技術課題となっている。

CFRPは母材が高分子で構成されているため、吸湿・脱水による変形、クリープや熱応力の解放などの粘弾性特性による変形、さらに後硬化やフィジカルエイジングなどの自己収縮が生じる。寸法変化に関しては例えば湿潤膨張現象では吸湿膨張率によって整理され、吸湿膨張率は吸湿膨張ひずみを吸湿量 M で正規化することによって得られる。これまでの研究では寸法変化に焦点をあて、吸湿膨張率が測定されてきたが、CFRP積層板の形状変化を扱った研究はほとんどない。一般的に精密構造物等では面の形状変化が問題となるため、形状変化に着目して調査を行う必要がある。また、吸湿環境下と乾燥環境下に分け、吸湿、残留応力による変形、硬化収縮による変形を個別にそれぞれ調査を行っていないため、どの現象が支配的であり、どのように設計対策を行うかわからない状況にある。

そこで本研究では、一方向材およびクロス材の平板を作製し、平板を吸湿あるいは高温乾燥環境下に置くことで生じる面形状の変化の測定を行った。また面形状を変化させる要因として、繊維分布が考えられるため、断面観察により繊維分布を求め、繊維分布を考慮した解析を行い、面形状の変化に関して考察を行った。

3. 研究の方法

試験片寸法は $280 \times 280 \times 2$ [mm]の平板とし、材料は高弾性CFRP(三菱化学K13710/AY33)を用いた。積層構成は $[0]_8$ の一方向材と、 $[0_2/90_2]_8$ のクロス材の2種類とした。成形方法はオートクレーブとし、硬化中の残留応力による反りを減らすために、上下面に同じ材質の板をあて、熱分布が対称なるようにした。

試験片はまず 140°C の真空状態で脱水処理を12時間行った。その後 20°C 環境下に30分放置し、試験片の温度が安定したのち平面度の測定を行った。平面度の測定は真直度測定器(ミツトヨSMS-800)を用いて計測した。概略図をFig.2に示す。プローブの測定精度は

$1[\mu\text{m}]$ であるため、高精度で試験片の形状を測定することができる。

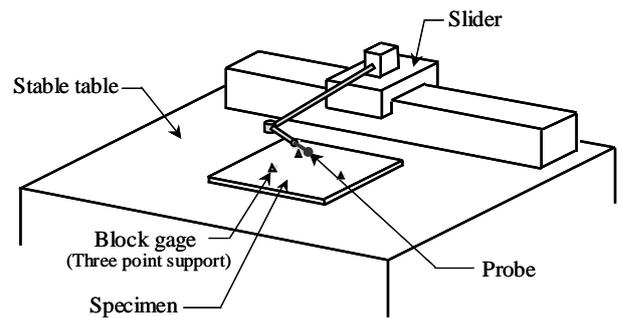


Fig.1. Schematic of measuring specimen's geometry

試験片は、吸湿前の平面形状を測定した後 80°C 、 $90\% \text{RH}$ に保った恒湿・高温槽で吸湿させ、もう一方は真空オープンを用い、真空 80°C 任意の時間経過後、再び平面度の測定を行った。

4. 研究成果

4.1 吸湿による形状変化

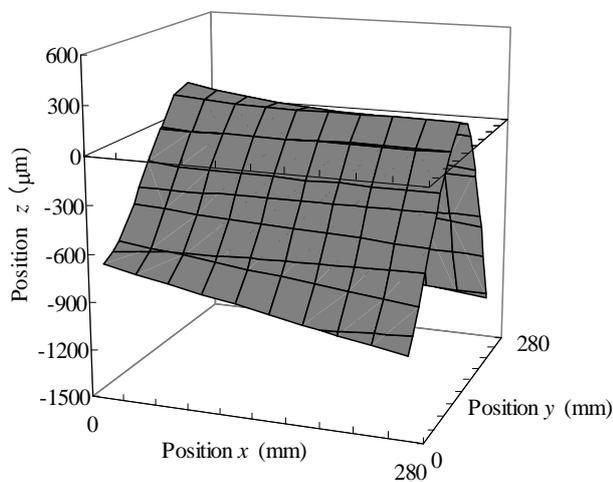
Fig.2に一方向材の試験結果を示す。Fig.2(a)は真空乾燥処理後の形状であるが、試験片は初期状態で繊維直角方向に大きな反りがみられた。この原因として、板厚方向に関して繊維体積含有率が分布していることなどが上げられる。成形時に平らであった面が、常温に冷やすことで、熱収縮が起り、板厚方向に繊維体積含有率が分布しているため、Fig.2(a)のように変形したと考えられる。樹脂と繊維の密度が異なるため繊維体積含有率の分布は、この初期形状からの形状変化量を調査した結果がFig.2(b)であるが、吸湿によって初期の形状が戻るように変形していることがわかる。熱収縮の逆で吸水膨張することで、初期形状と逆の方向に変形したものと推測される。また吸湿による変形量は非常に大きいことがわかる。Fig.3に直交積層板での初期形状及び初期形状からの変形量を示す。直交積層板では繊維が配向していない $\pm 45^\circ$ 方向に大きく変形した。初期形状は一方向材と比較して平らとなっている。吸湿させることで一方向材と同様に初期形状が平らになるように変形していることがわかる。直交積層板が対称に積層させたものの、このように変形した因子として、繊維配向の誤差及び繊維体積含有率の分布が挙げられる。

4.2 環境による形状変化

高温・多湿環境下での変形と真空環境下での変形を比較した結果をFig.4に示す。Fig.4の縦軸は変形量の最大値から最小値を引いた値とした。Fig.4より高温・多湿環境下では、真空環境下より大きく変形することがわかった。変形量は高温・多湿環境

下の方が約 10 倍形状は変化することが明らかとなった。変形因子として、吸湿膨張、後硬化およびフィジカルエイジングによる収縮、残留応力の解放などが挙げられるが、吸湿による影響が非常に大きなファクターを占めることがわかる。真空環境での変形形状は吸湿と同じ変形モードを示した。フィジカルエイジング及び後硬化による収縮が発生するならば、吸湿膨張とは逆の変形とならなければならない。そのため収縮はほとんど生じておらず、測定の際に生じる吸湿膨張の変形より小さい値であるといえる。

以上のように、CFRP 寸法安定性を議論する上で最も支配的であろう、吸湿の影響を理解することができた。



(a) Initial shape of UD laminate

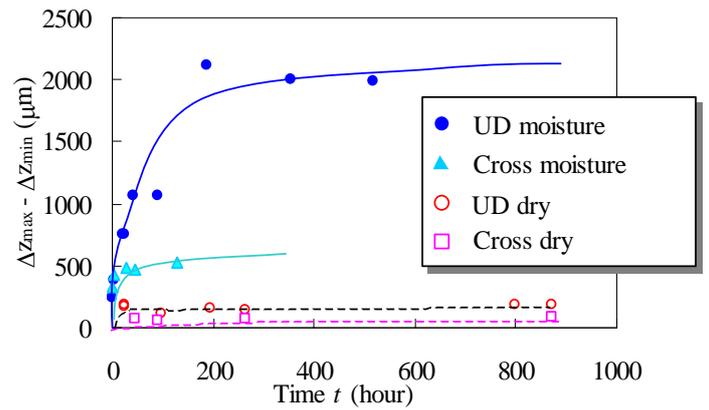
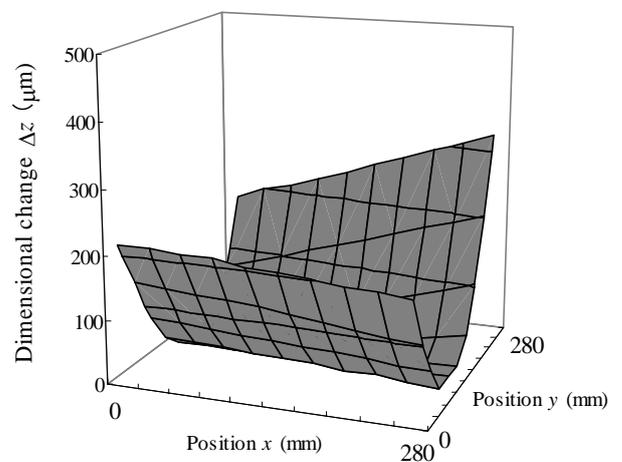
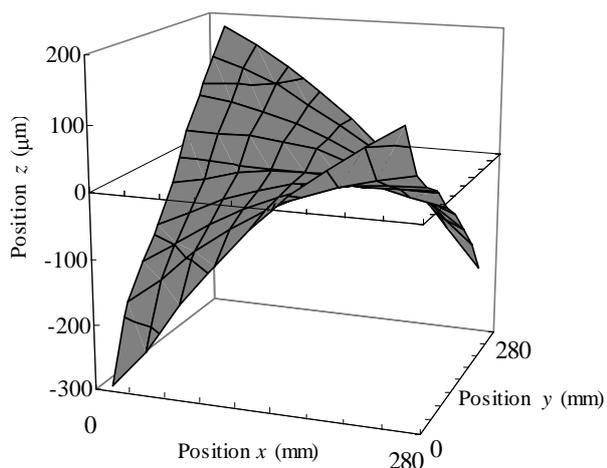


Fig.4. Dimensional change compared humidity condition and vacuum condition

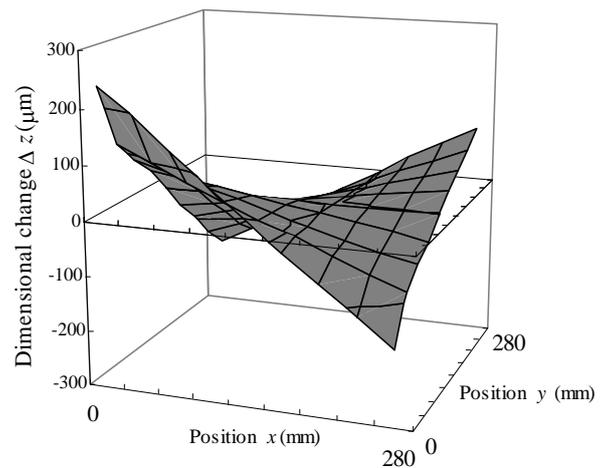


(b) Deformation of UD laminate after 3h

Fig.2. Initial shape and deformation caused by moisture absorption on UD laminate



(a) Initial shape of cross-ply laminate



(b) Deformation of cross-ply laminate after 3h

Fig.3. Initial shape and deformation caused by moisture absorption on cross-ply laminate

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 14 件)

- ① Yoshihiko Arao, Jun Koyanagi, Hiroshi Terada, Shin Utsunomiya, Hiroyuki Kawada, Analysis of thermal deformation on honeycomb sandwich CFRP mirror, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, (In press 2010)
- ② Shinji Ogihara, Yoriaki Sakamoto, Jun Koyanagi, Evaluation of interfacial tensile strength in glass fiber/epoxy resin interface using the cruciform specimen method, *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, Vol. 3 (2009), pp. 1071-1080.
- ③ Jun Koyanagi, Satoru Yoneyama, Kastuya Eri, Pranav D. Shah, Time dependency of carbon/epoxy interface strength, *Composite Structures*, Vol. 92 (2010), pp. 150-154.
- ④ Jun Koyanagi, Masaki Kotani, Hiroshi Hatta, Hiroyuki Kawada, A comprehensive model for determining tensile strengths of various unidirectional composites, *Journal of Composite Materials*, Vol. 43 (2009), pp. 1901-1914.
- ⑤ Jun Koyanagi, Comparison of a viscoelastic frictional interface theory with a Kinetic Crack Growth theory in unidirectional composites, *Composites Science and Technology*, Vol. 69 (2009), pp. 2158-2162.
- ⑥ 荒尾与史彦, 小柳潤, 宇都宮真, 寺田裕, 川田宏之, CFRP 直交積層板の高温・多湿環境下における形状変化挙動, *日本複合材料学会誌*, Vol. 35 (2009), pp. 241-247.
- ⑦ Yoshihiko Arao, Jun Koyanagi, Shin Utsunomiya, Shinichi Takeda, Hiroyuki Kawada, Analysis of time-dependent deformation of a CFRP mirror under hot and humid environment, *Mechanics of Time-Dependent Materials*, Vol. 13 (2009), pp. 183-197.
- ⑧ 小柳潤, 加藤肇, 荻原慎二, Cruciform Specimen 法による繊維/樹脂界面破壊クライテリアン確立手法の解析的検討, *材料システム*, Vol. 27 (2009), pp. 63-69.
- ⑨ Jun Koyanagi, Pranav D. Shah, Souta Kimura, Sung K Ha, Hiroyuki Kawada, Mixed-mode interfacial debonding simulation in single fiber composite under transverse load, *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, Vol. 3 (2009), pp. 796-806.
- ⑩ 荻原慎二, 坂本頼昭, 小柳潤, Cruciform Specimen 法を用いたガラス繊維強化複合材料の界面強度評価, *日本機械学会論文集A 編*, Vol. 75 (2009), pp. 49-55.
- ⑪ Yoshihiko Arao, Jun Koyanagi, Shin Utsunomiya, Hiroyuki Kawada, Time-dependent out-of-plane deformation of UD-CFRP in humid environment, *Composites Science and Technology*, Vol. 69 (2009), pp. 1720-1725.
- ⑫ 荒尾与史彦, 小柳潤, 川田宏之, 八田博志, 繊維強化プラスチックの長期寸法安定性, *材料システム*, Vol. 26 (2008), pp. 5-16.
- ⑬ Yoshihiko Arao, Jun Koyanagi, Hiroshi Hatta, Hiroyuki Kawada, Analysis of time-dependent deformation of CFRP considering the anisotropy of moisture diffusion, *Advanced Composite Materials*, Vol. 17 (2008) pp. 359-372.
- ⑭ 荒尾与史彦, 小柳潤, 八田博志, 川田宏之, CFRP の吸湿濃度を考慮した微視的寸法変化の調査, *複合材料学会誌*, Vol. 34 (2008), No. 3, pp. 95-101.

[学会発表] (計 30 件)

- ① Jun Koyanagi, Yoshihiko Arao, Hiroshi Terada, Shinichi Takeda, Shin Utsunomiya, Hiroyuki Kawada, Development of Space Telescope Mirror Made by Light and Thermally Stable CFRP, 4th International Conference on Experimental Mechanics 2009, in CD-ROM, Nov. 2009.
- ② Jun Koyanagi, Yoshihiko Arao, Shin Utsunomiya, Shin-ichi Takeda, Hiroyuki Kawada, High accurate space telescope mirror made by light and thermally stable CFRP, 2010 M&M International Symposium for Young Researchers, in CD-ROM, Mar. 2010
- ③ Jun Koyanagi, Masaki Kotani, Hiroshi Hatta, Hiroyuki Kawada, "Simultaneous fiber failure model" for determining unidirectional composite strengths, 7th Japan-Korea Joint Symposium on Composite Materials, in CD-ROM, Sep. 2009.

(中略)

[図書] (計 1 件)

- ① Jun Koyanagi, Micromechanical models approach to the time-dependent failure of off-axis (90° direction) polymer matrix composite, Chapter 11 in "Creep and fatigue in polymer matrix composites" edited by R. M. Guedes,

(Will be published in 2010 from Woodhead Publishing Limited).

〔産業財産権〕

○出願状況（計0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計◇件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

該当なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小柳 潤 (Koyanagi Jun)
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部・助教
研究者番号：60386604

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：