

熱変形を考慮した CFRP 製 FW 円筒殻に関する研究

日大生産工 ○坂田 憲泰
日大生産工 邊 吾一

1. 緒 言

熱により変形を伴わない構造は、航空宇宙分野、精密機器分野、医療分野に有用である。近年、電子回路を製造するために印刷技術が使われるようになってきている。グラビア印刷では主に Ag 粉体で作られたインキである電子回路基板作製用導電性材料を使用して、集積回路を印刷して作成することが可能となる。この方法だと特別な製造機を必要としないため、製造過程の大幅な簡略化が図ることができ、曲面印刷も可能になるなど、従来の半導体微細加工での製造法では難しかった応用も可能となる。現在は電磁波シールドやプラズマディスプレイパネル、有機 EL など多用途への展開が見られ、グラビア印刷ロールは精密機器製造機として広く活用されている。

これまで、熱変形しないとして主に使用されていた材料に、タングステン酸ジルコニウムやシリコン酸化物などが挙げられる。しかしながらこれらは加工に手間がかかる、脆性が大きいなどの問題点があった。CFRP はマイナス膨張の炭素繊維と、プラス膨張の樹脂マトリックスとの組合せで、Vf 55%-60%で、弾性率が約 600GPa の高弾性率炭素繊維を用いた場合、二次元等方的にゼロ熱膨張となることが知られているが、弾性率 600GPa は PAN 系炭素繊維では最も高弾性な繊維のため、通常は弾性率が最大で 950GPa と超高剛性なピッチ系の炭素繊維が使用されている¹⁾。

本研究では、炭素繊維には産業用途向けの汎用品であるトレカ T700 (東レ) を用いて、軸及び周方向の熱変形を可能な限り小さくしたグラビア印刷用の CFRP 円筒殻の開発を行なう事を目的とする。

2. 熱膨張係数の測定

2. 1 測定方法

熱膨張係数の測定には、アルバック理工製のレ

ーザ熱膨張計 LIX-2L を用いた。本測定装置は、二重光路式マイケルソン型レーザ干渉方式 (JIS R 3251-1995) の熱膨張計で、光の波長を基準として試験体の膨張 (収縮) 量を直接測定するため、熱膨張係数が小さい CFRP の繊維方向 (0°方向) の測定に用いられている方式である。

2. 2 測定方法

試験片には産業用途向けの汎用品炭素繊維 T700 (東レ) を使用したプリプレグ (3252S-20) を用いた。試験片は 0°, 90°に積層された CFRP 板をダイヤモンドカッタとヤスリを用いて端部の厚さ方向を楕円状に加工した。試験片の両端部を丸く加工する事で、測定時に試験片は干渉板と点接触となり、高精度な値が計測可能となる熱膨張の測定はヘリウムガス雰囲気内で行い、-20°C から 90°C まで 1°C/min で昇温させ、各試験片について 4 回測定した。

2. 3 測定結果

0°, 90°材の測定結果を Fig.1 に示す。CFRP の熱膨張係数の測定において、1 回目の測定結果はエポキシの吸湿性により、2 回目以降の計測結果と差があることが知られている^{2,3)}。そのため、Fig.1 には 2 回目以降のデータを記載した。20°C ~ 90°C の範囲の平均熱膨張係数は、0°材で 0.272×10^{-6} (°C), 90°材で 37.1×10^{-6} (°C) となった。

3. FW 製 CFRP 円筒殻の熱膨張係数

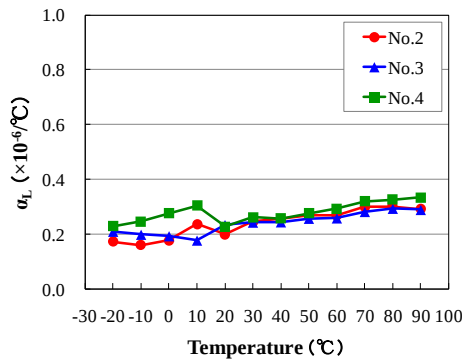
軸方向に対して角度 $\pm\theta$ で 2 プライしたフィラメント・ワインディング (FW) 製 CFRP 円筒殻の軸及び周方向の熱膨張係数 α_x, α_y は、1 層目と 2 層目間に相互のすべりはなく、各層のひずみ成分が同じであり、温度変化のみを受けるとすると、式 (1) のようになる⁴⁾。ここで、 $d_{11} \sim d_{22}$ は CFRP の弾性率とポアソン比、巻き角度から計算される値だが、紙面の都合上、ここでは省略する。

A study on FW-CFRP cylindrical shells considering heat deformation

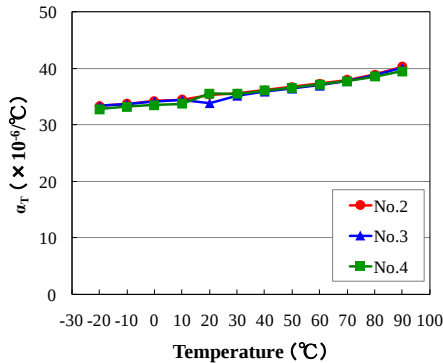
Kazuhiro SAKATA and Goichi BEN

$$\begin{Bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \end{Bmatrix} = [D] \begin{Bmatrix} \alpha_L \\ \alpha_T \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha_L \\ \alpha_T \end{Bmatrix} \quad \dots (1)$$

式(1)に 2.3 節で求めた 0°材と 90°材の熱膨張係数 α_L , α_T を代入し, 円筒部の巻き角度 θ に対する軸方向と周方向の熱膨張係数 α_x , α_y を計算した結果を Fig.2 に示す. CFRP の弾性率とポアソン比についてはカタログ値を用い, $E_L = 135\text{GPa}$, $E_T = 8.5\text{GPa}$, $G_{LT} = 4.4\text{GPa}$, $\nu_L = 0.3$ とした. Fig.2 から FW 製 CFRP 円筒殻では, 通常の均質等方性材料とは異なり, θ の変化と共に α が変化し, α_x では $\theta = 42^\circ$, α_y では $\theta = 48^\circ$ で熱膨張係数はほぼゼロとなる. $\theta = 45^\circ$ では, $\alpha_x = \alpha_y = 3.01 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ となり, 木材と同等の熱膨張係数となる.



(a) 0° direction



(b) 90° direction

Fig.1 CTE of 0° and 90° direction

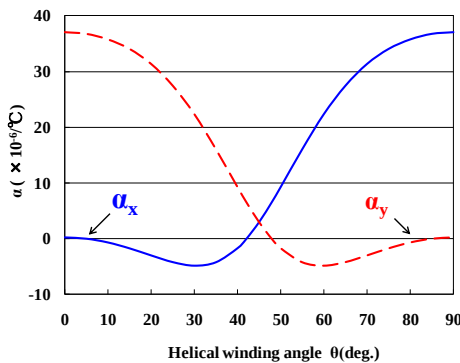


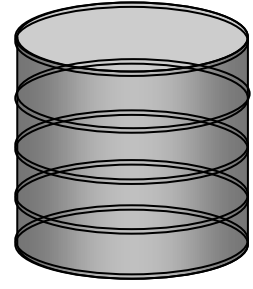
Fig.2 Relation between CTE and helical winding angle

4. 補強材を有する CFRP 円筒殻

Fig.2 において, 円筒殻への CFRP の巻き角度を変化させる事で軸もしくは周方向のどちらか一方の熱変形をほぼゼロにできることがわかった. 円筒全体で軸と周方向の熱変形を制御するためには, 円筒内部に補強材を入れる手法が考えられる. Fig.2 の $\theta = 48^\circ$ では, $\alpha_x = 6.66 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $\alpha_y \doteq 0$ となるため, 軸方向をグリッドで補強した Fig.3 (a) のアーガイルグリッドが有効となる. 一方, $\theta = 42^\circ$ では $\alpha_x \doteq 0$, $\alpha_y = 6.66 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ となるため周方向をグリッドで補強した Fig.3 (b) のリングスティフナが有効となる.



(a) Argyle grid



(b) Ring stiffener

Fig.3 Cylindrical shell reinforced with grids

5. 熱変形のつり合い方程式

5. 1 リングスティフナ補強円筒殻

リングスティフナ補強円筒殻では, 軸方向の熱変形がゼロとなるように円筒殻の巻き角度を決定し, 周方向に残った正の熱変形を周方向にリング状の補強材を入れ, 補強材の負の熱変形によって両者の熱変形を相殺させる. リングスティフナ補強円筒殻は, アイソグリッド円筒殻の成形法に用いた成形法で, 周方向に溝の入ったシリコンゴム型を用いることで可能である. さらに, アーガイルグリッドと比較して FW 成形が簡単で短時間で可能なため, リングスティフナ構造の方が成形性は良いと考えられる.

X 軸方向に対して角度 $+\theta$ の第 1 層と角度 $-\theta$ の第 2 層の一方強化材が積層された円筒をリング状のグリッドで補強した CFRP リングスティフナ構造について, 円筒殻周方向 (Y 方向) の力のつり合いは式(2)となる.

$$\begin{aligned} t \cdot l \cdot \frac{E_{yC}}{1 - \nu_x \nu_y} (\alpha_{yC} + \nu_x \alpha_{xC}) \Delta T + N b h \alpha_{yG} \cdot E_{yG} \cdot \Delta T &= 0 \\ -\frac{t \cdot l}{N b h} &= \frac{E_{yG} \cdot \alpha_{yG}}{E_{yC} \cdot \alpha_{yC}} (1 - \nu_x \nu_y) \end{aligned} \quad \dots (2)$$

FW 材の Y 方向の弾性係数の計算には植村らの式⁵⁾を用い、円筒の熱膨張係数 α_{yc} は式(1)を用いて算出した 6.66×10^{-6} ($1/^\circ\text{C}$)、円筒長さ l は 140mm とした。また、リングスティフナ構造において、グリッドの巻き角度は 90° と決定しているので角度依存のパラメータである補強材の熱膨張係数 α_{yG} も決定する。式(2)が成立するよう、形状パラメータを任意に決定した。これらの結果と使用したパラメータを Table 1 に示す。

5. 2 アーガイルグリッド補強円筒殻

円筒殻軸方向 (X 軸) に対して角度 $+\theta$ の第 1 層と角度 $-\theta$ の第 2 層の一方方向強化材が積層された円筒をアーガイルグリッドで補強した CFRP アーガイルグリッド補強円筒殻について、 X 方向の力のつり合いの式を立てた。グリッドを内部補強材として、円筒軸方向の熱膨張を制御するために、円筒の軸方向の引張力と補強材による圧縮力が等しくなればよいから、つり合い方程式は以下のようになる。

$$\begin{aligned} 2\pi r t \frac{E_{xc}}{1-\nu_x \nu_y} (\alpha_{xc} \Delta T + \nu_y \alpha_{yc} \Delta T) + N b h (E_{xG} \alpha_{xG} \Delta T) = 0 \\ - \frac{2\pi r t}{N b h} \cdot \frac{E_{xc}}{1-\nu_x \nu_y} \cdot \alpha_{xc} = \alpha_{xG} E_{xG} \quad \dots(3) \end{aligned}$$

ここで、 t と r は円筒部の厚さと半径を、 N , b , h は補強材の本数、幅、厚さを表す。また、添え字の y は円筒周方向を表し、 C , G はそれぞれ円筒殻、補強材を表す。FW 材の X 方向の弾性係数の計算には、植村らの式⁵⁾を用い、円筒の熱膨張係数 α_{xc} には式(1)を用いて算出した 6.66×10^{-6} ($1/^\circ\text{C}$) を用いた。

式(3)の右辺は α_{xG} , E_{xG} を角度 θ_{xG} の関数としてまとめられる。なお、パラメータとしてあげた r , t , h , b , N によって結果は遷移するため、ここでは今回成形した成形品の成形寸法の値を代入して θ_{xG} の大きさを求めた。式(3)の左辺は、周方向の熱膨張係数をゼロにする角度 $\theta_C = 48^\circ$ を与えると

E_{xc} と α_{xc} は定数となり、Fig.4 の点線で表せる。右辺の角度依存のパラメータである $\alpha_{xG} \cdot E_{xG}$ (実線) が点線に等しくなる巻き角度は $\theta_G = 9.6^\circ$, 38.1° となったが、FW 装置での成形性では $20^\circ \sim 50^\circ$ の範囲で選択する方が好ましい⁶⁾ ため、 $\theta_G = 38.1^\circ$ の方が適した角度と考えられる。これらの結果と計算に使用したパラメータを Table 1 に示す。

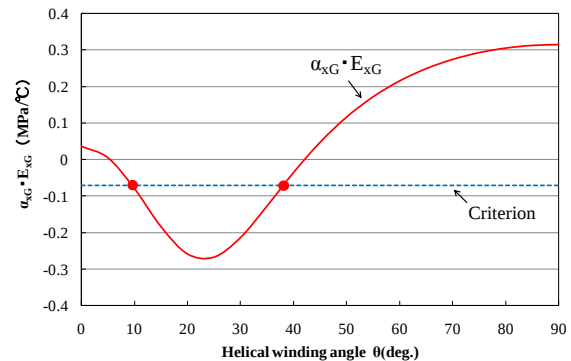


Fig.4 Calculated results of helical winding angles for zero thermal expansion

6. FEM 解析

6. 1 解析方法

5 節の計算結果を確認するために、汎用有限要素プログラム ANSYSver13.0 を用いて Table 1 のリングスティフナ補強円筒殻、アーガイルグリッド補強円筒殻の FEM 解析を行った (Fig.5)。要素には 4 接点有限ひずみシェル (SHELL181) を用い、リングスティフナ補強円筒殻では節点数 3690、要素数 2700、アーガイルグリッド補強円筒殻では節点数 7799、要素数 7062 でメッシュ分割を行った。拘束条件は、円筒端部の節点一箇所を完全固定した。Table 2 に解析で用いた材料定数を示すが、熱膨張係数については Fig.1 の実験結果を用いた。

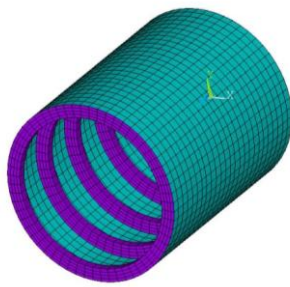
Table 1 Parameters of cylindrical shell reinforced with grid for zero thermal expansion

	Argyle grid		Ring stiffener
α_{xc} ($\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)	6.66		0
α_{yc} ($\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)	0		6.66
θ_c (deg.)	48		42
θ_G (deg.)	9.6	38.1	90
r (mm)	55		55
t (mm)	1		1
N	12		5
b (mm)	12		5.1
h (mm)	8		8

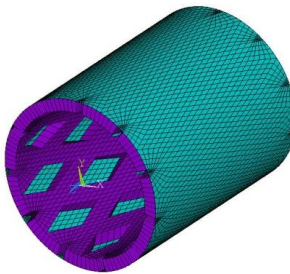
6. 2 解析結果と考察

リングスティフナ補強円筒殻、アーガイルグリッド補強円筒殻の解析結果を Table 3 と Table 4 に示す. また, 表中には比較のため補強材がない円筒殻の結果についても示している.

Table 3 より, リングスティフナ補強円筒殻の周方向では $\pm 42^\circ$ 円筒殻と比較してひずみは小さくなったが, 軸方向ではリングスティフナ部の軸方向の熱膨張係数 (α_T) の影響で, ひずみの絶対値は大きくなった. 同様に, Table 4 のアーガイルグリッド補強円筒殻についても, 繊維直角方向の熱膨張 (α_T) の影響で, $\pm 48^\circ$ 円筒殻よりひずみの絶対値は大きくなった.



(a) Ring stiffener



(b) Argyle grid

Fig.5 FEM models

Table 2 Material properties

Modulus of elasticity			
Longitudinal	E_L	135	GPa
Transverse	E_T	8.5	GPa
Shear	G_{LT}	4.4	GPa
Poisson's ratio			
Longitudinal	ν_L	0.3	
Transverse	ν_T	0.019	

Table 3 FEM results of ring stiffener

ΔT ($^\circ\text{C}$)	Cylindrical shell ($\pm 42^\circ$)		Ring stiffener		Ring stiffener (on ribs)	
	Axis ($\mu\epsilon$)	Hoop ($\mu\epsilon$)	Axis ($\mu\epsilon$)	Hoop ($\mu\epsilon$)	Axis ($\mu\epsilon$)	Hoop ($\mu\epsilon$)
10	0.851	53.4	-11.0	42.7	36.7	25.3
20	1.96	109	-22.2	86.8	74.8	51.5
30	3.02	166	-33.7	132	114	78.5
40	5.00	226	-44.9	180	156	107
50	6.37	289	-57.5	231	199	137

Table 4 FEM results of argyle grid

ΔT ($^\circ\text{C}$)	Cylindrical shell ($\pm 48^\circ$)		Argyle grid		Argyle grid (on ribs)	
	Axis ($\mu\epsilon$)	Hoop ($\mu\epsilon$)	Axis ($\mu\epsilon$)	Hoop ($\mu\epsilon$)	Axis ($\mu\epsilon$)	Hoop ($\mu\epsilon$)
10	53.0	1.36	227	-63.5	112	44.9
20	108	2.99	384	-129	227	91.4
30	164	4.59	584	-196	346	139
40	224	7.13	955	-265	471	190
50	286	9.09	1222	-339	602	243

7. 結 言

本研究では, グラビア印刷用の回転軸の軸及び周方向の熱変形を可能な限り小さくするために, 産業用途向けの汎用品であるトレカ T700 (東レ) を用いて, 熱膨張係数の計測を行い, その結果を用いて CFRP 円筒殻の設計を行なった. その結果, 以下の結論を得た.

- 1) レーザ熱膨張計を用いる事で, 熱変形を生じない円筒殻を設計する際に必要となる CFRP の 0° 材と 90° 材の熱膨張係数 α_L , α_T を精度良く計測することができた.
- 2) FEM 解析によって繊維直角方向の熱膨張 (α_T) がグリッド円筒殻に及ぼす影響を調査した.
- 3) アーガイルグリッド補強円筒殻よりリングスティフナ補強円筒殻の方が熱ひずみが小さく, 成形が簡単な構造である.

参考文献

- 1) 福田博, 邊吾一, 末益博志, 新版複合材料・技術総覧, 産業技術サービスセンター, (2011), pp.178-182.
- 2) 石川隆司, 小山一夫, 小林繁夫: 一方向繊維強化複合材料の熱膨張係数 第 2 報: CFRP 一方向材およびエポキシ樹脂に関する実験, 日本航空宇宙学会誌, 第 25 巻, 第 284 号, (1977), pp.24-25.
- 3) 石川隆司, 福永久雄, 小野幸一: 熱膨張率を制御した積層複合材の設計法, 鉄と鋼, 第 75 年, 第 9 号, (1989), pp.1446-1447.
- 4) 植村益次, 井山向史, 山口芳子: フィラメント・ワインディング CFRP 材の熱膨張係数と残留応力, 日本航空宇宙学会誌, 第 26 巻, 第 296 号, (1978), pp.474-475.
- 5) 植村益次, 井山向史, 山口芳子: フィラメント・ワインディング CFRP 材の熱膨張係数と残留応力, 日本航空宇宙学会誌, 第 26 巻, 第 296 号, (1978), pp.474-475.
- 6) 後藤卒土民: わかりやすい実践 FRP 成形, (1998), pp.73.