CFRP円筒の熱膨張に関する研究

日大生産工（院）○ 岸谷 直美
日大生産工　　邉 吾一

1. 緒言

熱により変形を伴わない構造は，航空宇宙分野の他にも，精密機器や医療の分野にも有用である．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，また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，脆性が高いなどの問題点があった．対してFRPは設計可能な材料と謳われており[1)]，中でも比強度・比剛性に優れた炭素繊維強化プラスチック(CFRP)を用いると熱膨張率を限りなく0に 設計することが可能である．

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，CFRP円筒の設計を行なうことを目的とする．そのためにCFRP材の熱変形量の測定を行ない，線膨張係数を算出し，その結果を用いて，CFRP円筒の周方向熱変形を0にする最適巻き角を求める．さらに軸方向の熱変形を抑えるため，円筒内部に一体で成形される格子状の補強材の形状寸法と巻き角度を設計する．

2. ヘリカル巻きCFRP円筒の熱変形制御

軸方向に対する角度$\pm\theta$で2プライしたヘリカル巻き材の熱膨張係数 α_x，α_y は，積層理論により，1，2層間には相互のすべりはなく，各層の諸歪成分は同じであり，温度変化のみ受けるとすると，以下のようになる[2)]．

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

ここで，　$\ell=\cos\theta$，$m=\sin\theta$

$$E_L{}'=\frac{E_L}{1-\nu_L\nu_T},\quad E_T{}'=\frac{E_T}{1-\nu_L\nu_T}$$

$$d_{11}=\left[\ell^2\left(\ell^2-m^2\right)(1-\nu_L\nu_T)E_L{}'E_T{}'+4\ell^2m^2G_{LT}\left(E_L{}'+\nu_LE_T{}'\right)\right]/\triangle$$

$$d_{12}=\left[-m^2\left(\ell^2-m^2\right)(1-\nu_L\nu_T)E_L{}'E_T{}'+4\ell^2m^2G_{LT}\left(E_T{}'+\nu_TE_L{}'\right)\right]/\triangle$$

$$d_{21}=\left[-m^2\left(\ell^2-m^2\right)(1-\nu_L\nu_T)E_L{}'E_T{}'+4\ell^2m^2G_{LT}\left(E_L{}'+\nu_LE_T{}'\right)\right]/\triangle$$

$$d_{22}=\left[\ell^2\left(\ell^2-m^2\right)(1-\nu_L\nu_T)E_L{}'E_T{}'+4\ell^2m^2G_{LT}\left(E_T{}'+\nu_TE_L{}'\right)\right]/\triangle$$

$$\triangle=\left(\ell^2-m^2\right)^2(1-\nu_L\nu_T)E_L{}'E_T{}'+4\ell^2m^2G_{LT}\left(E_L{}'+E_T{}'+2\nu_TE_L{}'\right) \qquad \cdots(2)$$

これを解いて，まず円筒部巻き角θ_C を，周方向の熱膨張係数α_{yC}が0になるように決定した．ここでは，Table 1 に示す東レ TORAYCA T300と，T700の値を用いて計算した．計算結果をFig.1 及びTable 2 に示す．Fig.1 からα_{yC}が0をとる時，軸方向の熱膨張係数α_{xC}は正となり，α_{xC}が0をとる時，周方向の熱膨張係数α_{yC}は正となる．つまり繊維に配向角を持たせれば，構造全体で軸もしくは周方向のどちらか一方向の熱変形を制御できることがわかる．

3. 補強材を有するCFRP円筒

構造全体で軸及び周方向の両方向の熱変形を制御するために，円筒内部に補強材を入れる．α_{yC}が0をとり，軸方向の熱膨張係数α_{xC}が正となり熱による変形が残る場合は，後に4節に示すアーガイルグリッド(Fig.2 (a))を用いた．またα_{xC}が0をとり，周方向の熱膨張係数α_{yC}が正となり熱による変形が残る場合は，後に5節に示すリングスティフナ(Fig.2 (b))を用いた．ここで，以降の計算にも用いるパラメータを以下に挙げる．添え字Cは円筒を，Gは補強材をそれぞれ表す．

・円筒部厚さ	：t	・補強材厚さ	：h
・円筒部半径	：r	・補強材幅	：b
・円筒巻き角	：θ_C	・補強材巻き角	：θ_G
・円筒長さ	：l	・補強材本数	：N
・円筒材質	：T700 ：T300	・補強材材質	：T700 ：T300

Study on Coefficient of Thermal Expansion of CFRP Roll

Naomi KISHITANI，Goichi BEN

4. アーガイルグリッド構造

スポーツ用品などの身近な分野に汎用されているグリッド構造は, 2方向から成るひし形が連続するアーガイル状のグリッド構造である．本研究では，このアーガイル状の補強材を有するCFRP円筒構造を対象とし, 周方向熱変形が0の時に軸方向に残った正の熱変形をアーガイルグリッドによる負の熱変形で相殺するものとした.

4.1 成形法の検討

まず，リングスティフナ構造よりも複雑な形状をしているアーガイルグリッド構造が成形可能であるかを検討した．成形には，これまでの研究で用いられていた三方向からなる正三角形で形成されたアイソグリッド構造の成形法[3)]を用いた.

最初にアーガイルグリッドの格子状に溝が彫られている金型を用意した．この金型の溝と同じ幅のプラスチック棒を溝にはめ込み，金型をオス型にし，シリコーンゴムを流して，アーガイルグリッドの溝(幅2mm, 深さ3mm)を持つシリコーンゴムのメス型を製作した.

Filament Winding （以下，FW）装置を用いて成形するため，マンドレルにシリコーンゴム型を巻きつけ，斜めの溝に沿ってシリコーンゴムを突き合わせた後ネジで固定した．材料は，あらかじめ樹脂の含浸されている一方向炭素繊維トウプレグを用いた.

まずアーガイルグリッド円筒の補強材となる部分から成形した．繊維は溝に沿って積層し6plyした．続けて表面層を成形した(Fig. 3)．表面層は，型の上から補強材と一緒に巻いて，2ply積層した.

補強材と表面層を巻き終えたら，130℃，1時間で真空引きを行ないながら加熱する真空熱成形を行なった. 硬化した後，マンドレルから硬化した補強円筒をシリコーン型ごと離型し,円筒の内側からシリコーン型を取り外す手順で脱型した.

以上の手順で，アーガイルグリッドを有する円筒構造を成形することができた．成形品の寸法はTable 3に示す.

4.2 アーガイルグリッド構造の熱膨張係数の設計

x 軸方向に対して角度+ θ の第1層と角度－θ の第2層の一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構造について，円筒軸方向(x)の力のつり合いの式を用いた.

ヘリカル巻きFW材の円筒軸 x 方向の弾性係数E_{xi}は，次のように表される[4)].

$$\frac{1}{E_{xi}} = \frac{1}{E_{x0}} - \chi_0{}^2 \quad (i = C, G) \qquad \cdots(3)$$

$$\begin{cases} \dfrac{1}{E_{x0}} = \dfrac{\cos^4\theta}{E_L} + \dfrac{\sin^4\theta}{E_T} + \left(\dfrac{1}{G_{LT}} - \dfrac{2\nu_L}{E_L}\right)\sin^2\theta\cos^2\theta \\ \chi_0 = \left(\dfrac{\sin^2\theta}{E_T} + \dfrac{\cos^2\theta}{E_L} + \dfrac{1}{2}\left(\dfrac{1}{G_{LT}} - \dfrac{2\nu_L}{E_L}\right)\cos 2\theta\right)\sin 2\theta \\ \dfrac{1}{G_{xy0}} = \left(\dfrac{1+\nu_L}{\mathrm{E}_L} + \dfrac{1+\nu_T}{\mathrm{E}_T}\right)\sin^2 2\alpha + \dfrac{1}{G_{LT}}\cos^2 2\alpha \end{cases} \qquad \cdots(4)$$

ここで，添字 0 は各層を1枚の直行異方性板とみなしたときの各層の弾性係数である. 上式 θ に θ_Cあるいは θ_Gを代入すると, 円筒の軸方向ヤング率(E_{xC})あるいは補強材の軸方向ヤング率(E_{xG})が得られる.

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を補強材による圧縮力と等しくする．円筒の熱膨張係数はTable 2の α_{xC}を用い，補強材の熱膨張係数を α_{xG}とすると，

$$2\pi rt\frac{\mathrm{E}_{xC}}{1-\nu_x\nu_y}(\alpha_{xC}\Delta T + \nu_y\alpha_{yC}\Delta T) + Nbh(E_{xG}\alpha_{xG}\Delta T) = 0$$

$$\therefore\ -\frac{2\pi rt}{Nbh}\cdot\frac{E_{xc}}{1-\nu_x\nu_y}\cdot\alpha_{xC} = \alpha_{xG}E_{xG} \qquad \cdots(5)$$

となる． (5) 式の右辺に 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を参考にした値を任意に決定し θ_{xG}の大きさを求めた． (5) 式の左辺は，円筒周方向の熱膨張係数を0にする角度 θ_C= 47.8°（T300), θ_C = 48.9°（T700)と与えるとE_{xC}と α_{xC}は定数となり，Fig.4の実線と点線で表せる．また左辺の値は，r, tに比例し，h, b, Nに反比例して上下する．右辺の角度依存のパラメータである α_{xG}, E_{xG}の値が実線と点線に等しくなる角度を求めた．T300 は θ_G = 40.2°，T700 は θ_G = 18.0°，30.6° となった．これらの結果と使用したパラメータをまとめてTable 4 に示す.

5. リングスティフナ構造

前述の通り，円筒部を形成する繊維の配向角により軸方向の熱変形を制御し，周方向に正の熱変形が起こるCFRP円筒構造において, 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するものとした.

5.1 成形法の検討

リングスティフナ構造の成形法についても検討した. リングスティフナ構造は，4.1項に用いた成形法で，周方向に溝の入ったシリコーン型を用いることで同様に成形することが可能である．さらに現段階でアーガイルグリッドを成形する際にが完全な自動化を成しえていないため，リングスティフナ構造の方がより簡易に成形することが可能であると言える.

5.2 リングスティフナ構造の熱膨張係数の設計

x 軸方向に対して角度+ θ の第1層と角度－θ の第2層の一方向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，円筒周方向(y)の力のつり合いの式を用いた．

ヘリカル巻きFW材の円筒軸 y方向の弾性係数E_{yi}は，次のように表される[4]．

$$\frac{1}{E_{yi}} = \frac{1}{E_{y0}} - \psi_0{}^2 G_{xy0} \quad (i = C, G) \qquad \cdots(6)$$

$$\begin{cases} \dfrac{1}{E_{y0}} = \dfrac{\sin^4\theta}{E_L} + \dfrac{\cos^4\theta}{E_T} + \left(\dfrac{1}{G_{LT}} - \dfrac{2\nu_L}{E_L}\right)\sin^2\theta\cos^2\theta \\ \psi_0 = \left(\dfrac{\cos^2\theta}{E_T} + \dfrac{\sin^2\theta}{E_L} - \dfrac{1}{2}\left(\dfrac{1}{G_{LT}} - \dfrac{2\nu_L}{E_L}\right)\cos 2\theta\right)\sin 2\theta \\ \dfrac{1}{G_{xy0}} = \left(\dfrac{1+\nu_L}{\mathrm{E}_L} + \dfrac{1+\nu_T}{\mathrm{E}_T}\right)\sin^2 2\alpha + \dfrac{1}{G_{LT}}\cos^2 2\alpha \end{cases} \qquad \cdots(7)$$

4.2節のアーガイルグリッドの場合と同様に，ここではTable 2 の α_{yC}を用い，補強材の熱膨張係数を α_{yG} とすると，

$$t \cdot l \cdot \frac{E_{yC}}{1-\nu_x\nu_y}\left(\alpha_{yC} + \nu_x\alpha_{xC}\right)\Delta T + Nbh\alpha_{yG} \cdot E_{yG} \cdot \Delta T = 0$$

$$\therefore \quad \frac{t \cdot l}{Nbh} = \frac{E_{yG} \cdot \alpha_{yG}}{E_{yC} \cdot \alpha_{yC}}\left(1 - \nu_x\nu_y\right) \qquad \cdots(8)$$

となり，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 α_{yG} も決定する．

(8)式が成立するよう，形状パラメータを任意に決定する．これらの結果と使用したパラメータをまとめてTable 5 に示す．

6. CFRP補強円筒の実験

ここではカタログ値を用いて計算を行なったが，一方向材の熱膨張係数を測定し，その結果を用いての計算も行った．アーガイルグリッド構造の場合，円筒部は $\theta_C = 48.0^\circ$ で積層し(Fig.5)，グリッドはTable 6に示すことで，軸及び周方向の熱変形を制御できる．

さて一方向材の熱変形を測定するためには，熱機械分析装置(Thermo Mechanical Analysis：以下TMA)を用いて測定した線膨張係数が必要となってくるが，より汎用性の高いひずみゲージを用いてTMAと同様のレベルで結果が得られるか確認することができれば，大型構造の熱変形も容易に測定することが可能となる．TMAに対してひずみゲージを用いての測定法は，接着剤やひずみゲージのベース部分の熱変形が測定結果に影響してくることが考えられる．以上のことから，今後TMAとひずみゲージの双方を用いた測定を行ない，ひずみゲージでの大型構造の熱変形の測定法を確立する必要がある．

7. 結論

従来の研究で用いた正三角形のアイソグリッド円筒殻の一体成形法を応用して，アーガイルグリッド構造並びにリングスティフナ構造も一体成形することが可能であることがわかった．

円筒構造でそれぞれ軸方向に対して，T300 は47.8°，T700 は48.9°，WDEタイプは48.0°でヘリカル巻きすることで周方向の熱膨張率を0に，またT300 は42.1°，T700 は41.1°，WDEタイプは42.0°でヘリカル巻きすることで，軸方向の熱膨張率を0にすることが出来る．

CFRP円筒内部に補強材を用いることで，軸方向にも周方向にも熱変形を生じない円筒構造を設計することが出来る．パラメータは補強材の巻き角度，円筒半径，円筒厚さ，円筒長さ，補強材断面積及び本数となる．

今後は，成形品の熱変形の測定を行ない，本設計法の妥当性を確認するが大型の構造物の熱変形を容易に実測するために，接着剤やゲージ自体の熱変形も考慮したひずみゲージによる熱変形の測定法を確立する必要がある．また，有限要素法を用いた熱応力解析も併せて行なっていく．

謝辞

線膨張係数測定に、ご指導とご助言をいただいた株式会社共和電業の方々に感謝の意を表します．また，カーボントウプレグを提供していただいた三菱レイヨン株式会社に感謝いたします．

参考文献

1) 福田博，邉吾一：複合材料の力学序説，古今書院，(1989)，pp3-5
2) 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，(1978，9 月)，pp474-475
3) 岸谷，竿尾，邉：第 49 回構造強度に関する講演会講演集，2007 年，pp157-159
4) 植村益次他：FRP 設計便覧，社団法人 強化プラスチックス技術協会，第 1 刷，pp61-62

Table 1 Mechanical Property of T300 and T700

	T300	T700
ν_L	0.34	0.34
E_L [Pa]	1.17E+11	1.25E+11
E_T [Pa]	9.80E+09	7.80E+09
G_{LT} [Pa]	4.40E+09	4.40E+09
α_L [/℃]	-5.78E-07	7.00E-07
α_T [/℃]	5.43E-05	3.75E-05

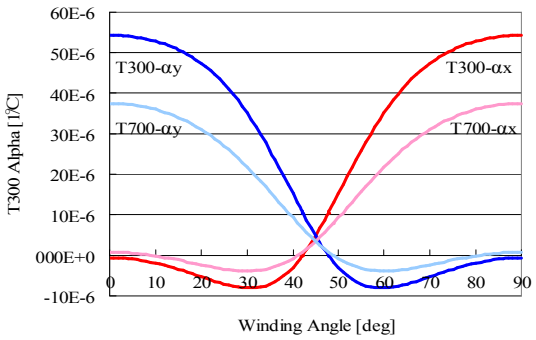
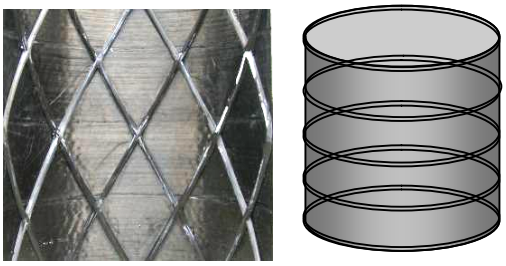


Fig.1 α_{xC}, α_{yC} - Winding Angle Curves for T300 and T700

Table 2 Winding Angle Curves for T300 and T700

	circumferential direction control		axial direction control	
	T300	T700	T300	T700
α_{xC} (/℃)	10.5E-6	7.87E-06	0	0
α_{yC} (/℃)	0	0	10.5E-6	7.87E-06
deg	47.8	48.9	42.1	41.1



(a) Argyle Grid (b) Ring Stiffener

Fig.2 Grid Stiffener

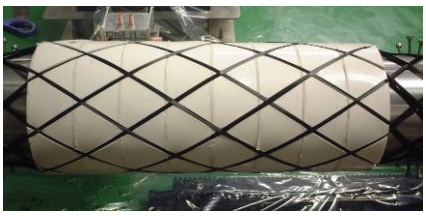


Fig.3 Filament Winding Process

Table3 Average Size for Test Specimens

Diameter / mm	108.5
Plate Thickness / mm	0.8
Stiffener Width / mm	2.0
Stiffener Height / mm	2.5

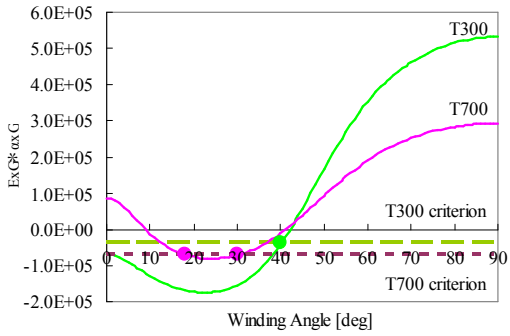


Fig.4 Product of E_{xG} and α_{xG} at the Helical Winding Angle

Table 4 Parameters for development CFRP Argyle-grid Roll without Thermal Expansion

	T300		T700	
r : radius [mm]	55.0			
t : thickness [mm]	1.0			
N : number of grids	12.0			
b : grid width [mm]	8.0			
h : grid hieht [mm]	12.0			
winding angle of grid [mr	-	40.2	18.0	30.6

Table 5 Parameters for development CFRP Roll Controlled by Ring Stiffeners without Thermal Expansion

	T300	T700
l :length [mm]	140.0	
t : thickness [mm]	1.0	
N : number of grids	5本	
b : grid width [mm]	10.2	6.1
h : grid hieht [mm]	7.0	8.0

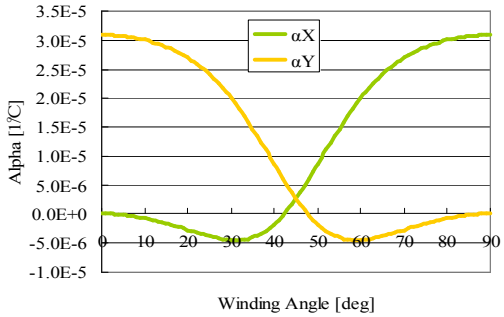


Fig.5 α_{xC}, α_{yC} - Winding Angle Curves for WDE Type

Table 6 Parameters for development CFRP Argyle-grid Roll without Thermal Expansion

	WDE-3D-1	
r :radius [mm]	55.0	
t :thickness [mm]	1.0	
N :number of grids	12	
b :grid width [mm]	8.0	
h :grid hieht [mm]	12.0	
winding angle of grid [deg]	10.6	39.0