

経年戸建住宅及び各種機械用回転軸の高耐震化技術の発展と 地下埋設パイプの健全性評価技術の確立に関する研究グループ

CFRP 製回転軸の熱変形と成形法の開発

邊 吾一 (日大生産工・教授)

重田龍男 ((株) シンクラボラトリー社長)

坂田憲泰 (日大生産工・助手)

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化合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。一方、FRP は設計可能な材料であり、比強度・比剛性に優れた炭素繊維強化プラスチック(CFRP)を用いる事で、熱膨張を限りなくゼロ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 円筒殻の設計を行なう事を目的とする。繊維には繊維方向の弾性率が 400GPa 前後の高弾性率タイプの炭素繊維を用いれば繊維方向の熱膨張係数をほぼゼロにする事は可能¹⁾だが、本研究では産業用途向けの汎用品であるトレカ T700 (東レ製) を用いた。本報では、T700 を使用し

た CFRP の熱膨張係数の測定を行い、その結果を用いて、軸及び周方向の熱変形が限りなくゼロとなる CFRP 円筒殻の設計と製造方法の検討を行った結果について報告する。

2. 熱膨張係数の測定実験

2.1 測定方法

熱膨張の測定には、アルバック理工製のレーザ熱膨張計 LIX-2L (Fig.1) 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⁾。

温度 T_k , T_{k+1} 間における熱膨張係数 α_k は式 (1) によって計算される。

$$\alpha_k = \frac{\Delta L}{L(T_k - T_{k+1})} = \frac{\lambda \{ (N_k + f_k) - (N_{k+1} + f_{k+1}) \}}{4L(T_k - T_{k+1})} \quad \dots(1)$$

ここで、 L は室温における試験片長さ、 ΔL は 2 つの温度での試験片の長さ変化、 λ はレーザ光の波長、 N_k と f_k は温度 T_k における目標点の位置の干渉じまの順次番号と端数を表す。

2.2 試験片

試験片の材料は、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



Fig.1 Measuring device.

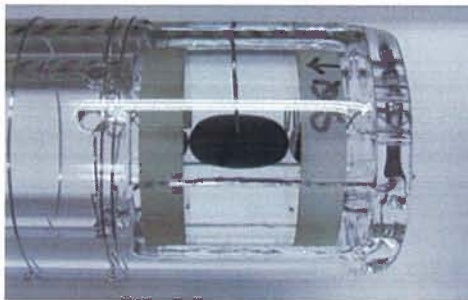


Fig.2 Test specimen.

点接触となり、高精度な値が計測可能となる。試験片を石英スペーサーにセットした状態を Fig.2 に示す。

2.3 測定条件

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 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ で昇温させた。計測は各試験片について4回行った。

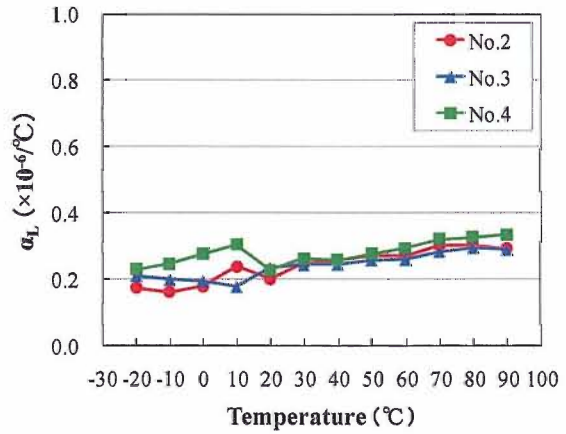
2.4 測定結果

0° 、 90° 材の測定結果を Fig.3 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^{3,4)}。そのため、Fig.3 には2回目以降のデータを記載した。実験にて3回計測した熱膨張係数の平均値を Table 1 に示す。Table 1 より $20^{\circ}\text{C}\sim 90^{\circ}\text{C}$ の範囲の平均熱膨張係数は、 0° 材で 0.272×10^{-6} ($^{\circ}\text{C}$)、 90° 材で 37.1×10^{-6} ($^{\circ}\text{C}$) となった。

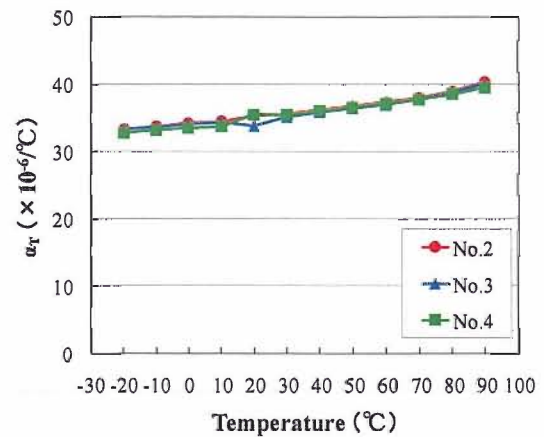
3. FW 製 CFRP 円筒殻の熱膨張係数

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 (2) のようになる⁵⁾。



(a) 0° direction



(b) 90° direction

Fig.3 Coefficients of thermal expansion of 0° and 90° direction.

Table 1 Average of Coefficients of thermal expansion.

T(°C)	Coefficients of thermal expansion ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	
	0° direction	90° direction
-20	0.2036	33.19
-10	0.2013	33.58
0	0.2158	34.00
10	0.2393	34.24
20	0.2200	34.95
30	0.2500	35.46
40	0.2525	36.07
50	0.2677	36.62
60	0.2733	37.18
70	0.3007	37.87
80	0.3071	38.75
90	0.3050	39.96

$$\begin{Bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \end{Bmatrix} = [D] \begin{Bmatrix} \alpha_L \\ \alpha_T \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha_L \\ \alpha_T \end{Bmatrix} \quad \dots(2)$$

ここで,

$$\begin{aligned} d_{11} &= \left[\ell^2(\ell^2 - m^2)(1 - \nu_L \nu_T) E_L' E_T' + 4\ell^2 m^2 G_{LT} (E_L' + \nu_L E_T') \right] / \Delta \\ d_{12} &= \left[-m^2(\ell^2 - m^2)(1 - \nu_L \nu_T) E_L' E_T' + 4\ell^2 m^2 G_{LT} (E_T' + \nu_T E_L') \right] / \Delta \\ d_{21} &= \left[-m^2(\ell^2 - m^2)(1 - \nu_L \nu_T) E_L' E_T' + 4\ell^2 m^2 G_{LT} (E_L' + \nu_L E_T') \right] / \Delta \\ d_{22} &= \left[\ell^2(\ell^2 - m^2)(1 - \nu_L \nu_T) E_L' E_T' + 4\ell^2 m^2 G_{LT} (E_T' + \nu_T E_L') \right] / \Delta \end{aligned}$$

$$\Delta = (\ell^2 - m^2)^2 (1 - \nu_L \nu_T) E_L' E_T' + 4\ell^2 m^2 G_{LT} (E_L' + E_T' + 2\nu_T E_L')$$

$$\ell = \cos \theta, \quad m = \sin \theta$$

$$E_L' = \frac{E_L}{1 - \nu_L \nu_T}, \quad E_T' = \frac{E_T}{1 - \nu_L \nu_T} \quad \dots(3)$$

式(2)に2.4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.4に示す. CFRPの弾性率と, ポアソン比については東レのカタログ値を用い, $E_L = 135\text{GPa}$, $E_T = 8.5\text{GPa}$, $\nu_L = 0.3$ とした.

Fig.4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⁶⁾となる. また, $\theta = 45^\circ$ でFW製円筒殻は最大のねじり強度⁷⁾となっており, 回転軸として実用的な解となっている.

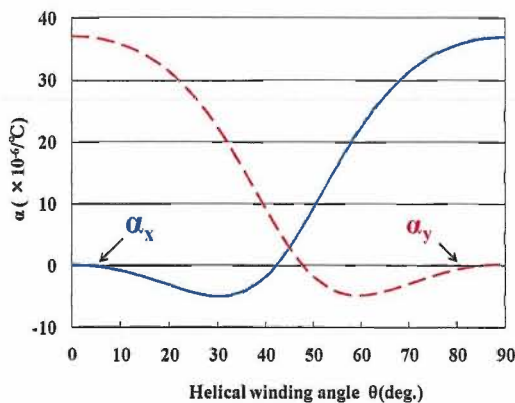


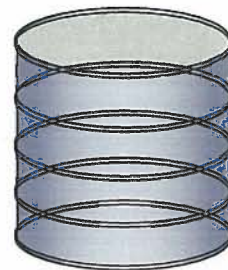
Fig.4 Relation between coefficients of thermal expansion and helical winding angle.

4. 補強材を有する CFRP 円筒殻

Fig.4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方向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.4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.5(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.5(b)のリングスティフナが有効となる.



(a) Argyle grid



(b) Ring stiffener

Fig.5 Cylindrical shell reinforced with grids.

5. アーガイルグリッド補強円筒殻

5.1 成形方法

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となっている. アーガイルグリッド補強円筒殻では, 周方向の熱変形が0となるように円筒殻の巻き角度を決定し, 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させる.

アーガイルグリッド補強円筒殻の成形には、これまでの研究で用いられていたアイソグリッド円筒殻の成形法⁸⁾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）を持つシリコンゴムのメス型を製作した。アーガイルグリッド補強円筒殻は FW 装置を用いて成形するため、マンドレルにシリコンゴム型を巻きつけ、斜めの溝に沿ってシリコンゴムを突き合わせた後、ネジで固定した。繊維の巻き付けはアーガイルグリッド円筒殻の補強材となる部分から行い、積層数は 6PLY とした (Fig.6)。補強材の積層完了後、続けて表面層を成形した。表面層は、型の上から補強材と一緒に巻いて、2PLY 積層した。FW 成形終了後、130°C、1 時間で真空引きを行ないながら樹脂を硬化させた。硬化後、マンドレルから硬化した円筒殻をシリコン型ごと離型し、最後に円筒殻の内側からシリコン型を取り外した。成形品の寸法を Table 2 に示す。



Fig.6 Filament winding process.

Table 2 Average size of CFRP cylindrical shell reinforced with argyle grid (unit : mm).

Diameter	108.5
Plate thickness	0.8
Stiffener width	2.0
Stiffener height	2.5

5.2 熱膨張係数の設計

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を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なになる。

$$2\pi r t \frac{E_{xc}}{1-\nu_x \nu_y} (\alpha_{xc} \Delta T + \nu_y \alpha_{yc} \Delta T) + Nbh (E_{xG} \alpha_{xG} \Delta T) = 0$$

$$-\frac{2\pi r t}{Nbh} \cdot \frac{E_{xc}}{1-\nu_x \nu_y} \cdot \alpha_{xc} = \alpha_{xG} E_{xG} \quad \dots(4)$$

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、式 (5) の植村らの式⁹⁾を用い、円筒の熱膨張係数 α_{xc} には 3 節で求めた $6.66 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ を用いた。

$$\frac{1}{E_{xi}} = \frac{1}{E_{x0}} - \chi_0^2 \quad (i=C, G) \quad \dots(5)$$

ここで、

$$\frac{1}{E_{x0}} = \frac{\cos^4 \theta}{E_L} + \frac{\sin^4 \theta}{E_T} + \left(\frac{1}{G_{LT}} - \frac{2\nu_L}{E_L} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta$$

$$\chi_0 = \left(\frac{\sin^2 \theta}{E_T} + \frac{\cos^2 \theta}{E_L} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{G_{LT}} - \frac{2\nu_L}{E_L} \right) \cos 2\theta \right) \sin 2\theta$$

$$\frac{1}{G_{sp0}} = \left(\frac{1+\nu_L}{E_L} + \frac{1+\nu_T}{E_T} \right) \sin^2 2\alpha + \frac{1}{G_{LT}} \cos^2 2\alpha \quad \dots(6)$$

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を表す。

式(4)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(4)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.7 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¹⁰⁾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 3 に示す.

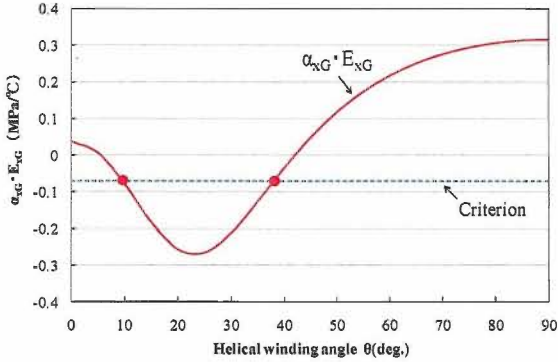


Fig.7 Calculated results of helical winding angles for zero thermal expansion.

6. リングスティフナ補強円筒殻

6.1 成形方法

リングスティフナ補強円筒殻では, 軸方向の熱変形が 0 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.

6.2 熱膨張係数の設計

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, 円筒殻周方向 (Y 方向) の力のつり合いの式を立てた.

$$t \cdot l \cdot \frac{E_{yc}}{1 - \nu_x \nu_y} (\alpha_{yc} + \nu_x \alpha_{xc}) \Delta T + Nbh \alpha_{yG} \cdot E_{yG} \cdot \Delta T = 0$$

$$-\frac{t \cdot l}{Nbh} = \frac{E_{yG} \cdot \alpha_{yG}}{E_{yc} \cdot \alpha_{yc}} (1 - \nu_x \nu_y) \quad \dots(7)$$

FW 材の Y 方向の弾性係数の計算には式 (8) の植村らの式⁹⁾を用い, アーガイルグリッドの場合と同様に, 円筒の熱膨張係数 α_{yc} には 3 節で求めた $6.66 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ を用い, 円筒長さ l は 140mm とした.

$$\frac{1}{E_{yi}} = \frac{1}{E_{y0}} - \psi_0^2 G_{xy0} \quad (i = C, G) \quad \dots(8)$$

ここで,

$$\frac{1}{E_{y0}} = \frac{\sin^4 \theta}{E_L} + \frac{\cos^4 \theta}{E_T} + \left(\frac{1}{G_{LT}} - \frac{2\nu_L}{E_L} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta$$

$$\psi_0 = \left(\frac{\cos^2 \theta}{E_T} + \frac{\sin^2 \theta}{E_L} - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{G_{LT}} - \frac{2\nu_L}{E_L} \right) \cos 2\theta \right) \sin 2\theta$$

$$\frac{1}{G_{xy0}} = \left(\frac{1 + \nu_L}{E_L} + \frac{1 + \nu_T}{E_T} \right) \sin^2 2\theta + \frac{1}{G_{LT}} \cos^2 2\theta \quad \dots(9)$$

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(7)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 3 に示す.

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 (東レ製)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) CFRP 円筒殻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殻を設計することができる.
- 2) 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出来た.

Table 3 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
r (mm)	55	55
t (mm)	1	1
N	12	5
b (mm)	12	5.1
h (mm)	8	8

- 3) アーガイルグリッド補強円筒殻，リングスティフナ補強円筒殻は，過去に開発したアイソグリッド円筒殻の成形方法を応用することで成形可能である。
- 4) 成形性を考慮した場合，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簡単かつ短時間で成形が可能である。
- 4) 今後は，FEM 解析によって繊維直角方向の熱膨張がグリッド円筒殻に及ぼす影響を調査し，その後，成形品にて確認実験を行う予定である。

参考文献

- 1) 日本複合材料学会編，複合材料活用辞典，産業調査会，(2001)，pp.651-654.
- 2) 清水隆之，長井謙宏 他，航空機用複合材料構造の試作レス製造技術の研究，日本複合材料学会誌，Vol.37 No.1，(2011)，pp.21-28.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 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) 邊吾一，藤井透，川田宏之，標準材料の力学，日刊工業，(2003)，pp.249.
- 7) 山脇弘一，植村益次，ヘリカル巻き FW 円筒の破壊強度（II ねじり強度），材料，第 21 巻，第 223 号，(1972)，pp.332-334.
- 8) 邊吾一，岸谷直美，竿尾周太郎，CFRP アイソグリッド円筒殻の一体成形法の開発と非線形軸圧縮特性評価，JCOM-36 講演論文集，(2007)，)，pp.219-222.
- 9) 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.
- 10) 後藤卒土民，わかりやすい実践 FRP 成形，工業調査会，(1998)，pp.73.