日大生産工(院) 〇小林 大志 日大生産工 邉 吾一 日大生産工 平山 紀夫 日大生産工 平林 明子

1 緒言

近年,繊維強化熱可塑性プラスチック FRTP(Fiber reinforced thermoplastics)は繊 維強化プラスチック FRP(Fiber reinforced plastics)と同様、軽量かつ比強度、比剛性に優 れているだけでなく, リユース, リサイクル出 来る材料として自動車分野での適用が検討さ れている.しかし、適用するにあたって設計上 重要な連続繊維強化FRTPの熱膨張係数 CTE (Coefficient of thermal expansion)に関する研 究はあまりされていない.

また,強化材に織物繊維を用いた織物複合材 は、一方向繊維よりも複雑な形状の型によくな じむといった利点から使用されることがあり, 解析手法の研究が多く行われている.

そこで本研究では、マトリックスに熱可塑性 樹脂,強化繊維に炭素およびガラスの連続繊維 織物を使用したCFRTPとGFRTPの熱膨張係 数の測定を行い, その実験値と繊維の織目およ び樹脂の温度依存性を考慮した理論値を比較 した結果について報告する.

2 実験方法および測定方法

2.1 供試材

本研究ではマトリックスに現場重合型ポリ アミド6(PA6)を用い,強化繊維には綾織炭素 繊維織物 CO6347B(東レ株式会社)と平織ガ ラス繊維織物 WEA22F(日東紡績株式会社) を用いた. 各強化繊維の織物構造についての値 を Table1, 綾織および平織の形態を Fig.2 に 示す.

2.2 成形

各FRTPの成形には,密閉された型内で成形 することで水分管理が可能なVaRTM法を採 用した. CFRTPの成形品は炭素繊維を11枚積 層し、成形品の板厚は 3.11mm、繊維体積含有 率(Vf)は40.1%となった. GFRTPの成形品は ガラス繊維を15枚積層し、成形品の板厚は 3.10mm, Vf は39.1%となった.

2.3 試験片

熱膨張の測定に使用した各 FRTP のサンプ

ルについて Fig.2 に示す. サンプルの形状は横 方向に12 mm,縦方向に6 mm,両端は測定 装置の設置面に点接触するようにR3mmの楕 円形状となっている.

2.4 熱膨張の測定

熱膨張の測定はレーザー干渉計方式熱膨張 計を使用し, JIS R 3251 を参考に行った. 実 験条件は、各 FRTP で 3 つずつ試験片を用意 し, 昇温スピードは2°C/min で行った. 1 つの サンプルについて2回実験を行い、その平均値 をサンプルの実験値とした.

Table 1 Catalog value of reinforcement fiber

	Carbon	Glass
	fabric	fabric
tradename	CO6347B	WEA22F
architecture	twill fabric (2/2)	plain fabric
warp density [tows/25mm]	12.5	20
weft density [tows/25mm]	12.5	20
grammage [g/sq.m]	198	134
thickness [mm]	0.22	0.21



(b) plain fabric

Fig.1 Architecture of reinforcement fiber



Fig.2 Specimens (CFRTP, GFRTP)

Study on thermal expansion of FRTP using woven fabric

Hiroshi KOBAYASHI, Goichi BEN, Norio HIRAYAMA and Akiko HIRABAYASHI

3 測定結果

3.1 PA6 の熱膨張係数

本研究で使用した現場重合型 PA6 の熱膨張 係数について測定した結果, Fig.3 のように 0℃からガラス転移温度である 60℃までは,温 度上昇に伴い,熱膨張係数も増加する温度依存 性を示した.0℃から 60℃までの平均値は 69E-6/K となった.

3.2 CFRTP および GFRTP の熱膨張係数

Fig.4 に 0℃から 60℃までの CFRTP および GFRTP の熱膨張係数の測定結果を示す. Fig.3 の樹脂単体の熱膨張係数と比較すると, 両 FRTP の熱膨張係数は小さく, 0℃から 60℃ま での熱膨張係数の温度依存性は繊維があるこ とにより, 樹脂単体よりも小さくなった.

各 FRTP の 0℃から 60℃までの全サンプルの 平均値は, CFRTP が 6.12E-6/K, GFRTP が 16.2E-6/K となった.



Fig.3 Experimental CTE of In-situ PA6



Fig.4 Experimental CTE of CFRTP,GFRTP

4 理論値の算出

CFRTPとGFRTPの熱膨張係数の理論値を 算出するにあたり、織目を考慮していないクロ スプライモデル(Fig.5)と、織目を考慮したクリ ンプモデル(Fig.6およびFig.7)を仮定し、それ ぞれのモデルについて、樹脂の温度依存性を考 慮した場合と考慮しない場合について算出した. なお、本報告ではヤング率と熱膨張係数の 温度依存性を考慮した結果について述べる.

4.1 クロスプライモデル

クロスプライモデルは Fig.5 のように織目 を考慮せず、繊維方向(0°材)と繊維直角方向 (90°材)の一方向材を積層したモデルであり、こ れを1枚の織物として近似的に算出した.

算出方法は、Table 2 に示す炭素繊維および ガラス繊維の物性値を、式(1)の複合則と式(2) の Schapery の式²⁾に代入して一方向材の熱膨 張係数を算出し(Table 3)、積層理論から式(3) および式(4)を用いて、L方向の熱膨張係数を 算出した.ただし、式(3)はヤング率および熱膨 張係数の温度依存性を考慮していない場合、式 (4)はそれらの温度依存性を考慮した場合の式 である.ここで、 α は熱膨張係数、Eはヤング 率、vはポアソン比、t は厚さ、添え字のLは 繊維方向、T は繊維直角方向、m は樹脂、f は 繊維を示す.

$$\alpha_{L}^{c} = \frac{\alpha_{m}(1 - V_{f})E_{m} + \alpha_{f}V_{f}E_{fL}}{(1 - V_{f})E_{m} + V_{f}E_{fL}}$$
(1)

$$\alpha_T^c = \alpha_m (1 - V_f)(1 + \nu_m) + \alpha_f V_f (1 + \nu_f) - \alpha_L^c \nu_{LT}^c$$
(2)

$$\alpha_{cross,1D,L} = \frac{t_m E_m \alpha_m + t_L E_L \alpha_L + t_T E_T \alpha_T}{t_m E_m + t_L E_L + t_T E_T}$$
(3)

 $\alpha_{cross,1D,L}'$

$$=\frac{t_m E_m(T) \alpha_m(T) + t_L E_L(T) \alpha_L(T) + t_T E_T(T) \alpha_T(T)}{t_m E_m(T) + t_L E_L(T) + t_T E_T(T)}$$
(4)

4.2 クリンプモデル

Fig.6に綾織のクリンプモデル, Fig.7に平織 のクリンプモデルを示す. クリンプモデルは石 川ら³の研究を参考に,繊維の織目を考慮した モデルになっている. モデルの作成には, Table 1の各繊維のカタログ値を使用した.

Fig.6およびFig.7から繊維の織目を考慮す ると、クロスプライモデルには存在しなかった 純マトリックス領域が存在し、それによりT方 向繊維領域が小さくなるため、モデルのVfと実 際のVfが異なる.そこで、試験片の実際のVfと 同等にするため、式(5)を用いて、T方向繊維の Vfを見かけ上高くした.

$$V_{f_T} = \frac{V_f}{A_T / A_L} \tag{5}$$

式(5)より, 各 FRTPのT方向繊維の見かけ 上の Vf は, CFRTPは 72.1%, GFRTPは 64.7%である.

式(1)および式(2)から求めた各 FRTP の一方 向材の物性値を使用して, x 方向に分割した各 微小領域 dx において, 1 次元の積層理論を適 用して導出した式(6)および式(7)を長さ領域で 積分し, L 方向の熱膨張係数を算出した.式(6) はヤング率および熱膨張係数の温度依存性を 考慮していない場合,式(7)はそれらの温度依 存性を考慮した場合の式である.

$$\alpha_{crimp,1D,L} = \frac{1}{a} \int \frac{t_m E_m \alpha_m + t_L E_L(\theta) \alpha_L(\theta) + h_T E_T \alpha_T}{t_m E_m + t_L E_L(\theta) + t_T E_T} dx$$
(6)

 $\alpha'_{crimp,1D,L}$

 $=\frac{1}{a}\int \frac{t_m E_m(T)\alpha_m(T) + t_L E_L(\theta, T)\alpha_L(\theta, T) + h_T E_T(T)\alpha_T(T)}{t_m E_m(T) + t_L E_L(\theta, T) + t_T E_T(T)}dx$

5 実験値と理論値の比較

Fig.8 に 0℃から 60℃までの CFRTP および GFRTP の熱膨張係数の実験値と,温度依存性 を考慮して算出したクロスプライモデルとク リンプモデルの理論値を示す.また,Fig.8 の 各値について 0℃から 60℃までの熱膨張係数 の平均値を Fig.9 に CFRTP, Fig.10 に GFRTP を示す.図に示す凡例について補足しておくと, Cross ply model 1D はクロスプライモデルで 温度依存性を考慮していない 1 次元の理論値, Cross ply model 1D (T) はクロスプライモデ ルで温度依存性を考慮した 1 次元の理論値, Crimp model 1D はクリンプモデルで温度依 存性を考慮していない 1 次元の理論値, Crimp model 1D はクリンプモデルで温度依存性 を考慮していない 1 次元の理論値,Crimp model 1D (T) はクリンプモデルで温度依存性

5.1 絶対値と温度変化に対する CTE の傾向

Fig.9 および **Fig.10** より, 各 **FRTP** の 0℃ から 60℃までの実験値と理論値の平均値を比較すると, **CFRTP** では実験値と理論値の誤差があるが, **GFRTP** は実際の繊維の形状に近い繊維の織目と樹脂の温度依存性を考慮した **Crimp model 1D (T)**の値が実験値に近い値を示した.

また, Fig.8 より各 FRTP の 0℃から 60℃ま での熱膨張係数の傾向を見ると, CFRTP はク ロスプライモデルもクリンプモデルも絶対値 の差はあるが,前者は 40℃付近で少し上昇し ている傾向があるのに対して,後者は実験値と 同じような傾向を示している. GFRTP につい てはクロスプライモデルの理論値は,実験値 に対して温度上昇に伴い,熱膨張係数も増加し ているが,クリンプモデルでは実験値と同じよ うな傾向を示し,各温度の熱膨張係数の絶対値 も近い値を示している.

5.2 CFRTP の実験値と理論値の誤差

GFRTP の実験値と繊維の織目および温度 依存性を考慮したクリンプモデルの理論値が 近い値を示したのに対し, CFRTP の実験値と 理論値では誤差が生じているが,その原因の一 つとして,成形時の繊維の撚れが考えられる. 実際に測定に使用した CFRTP の試験片の表 面に見える繊維の配向角を見ると,Fig.11(b) のように L 方向繊維が傾いていることがわか る.このように L 方向繊維が傾いたことで,傾 いていない場合の熱膨張係数よりも大きい値 になり,理論値と誤差が生じたと考えられる.



Fig.6 Crimp model of twill fabric (2/2)



Fig.7 Crimp model of plain fabric

Table 2 Materials	properties
-------------------	------------

Material	α [E-6/K]	E [GPa]	v [-]
Carbon fiber L	-0.4	230	0.30
Carbon fiber T	10	20	0.03
Glass fiber	4.9	76	0.22
PA6	67	2.8	0.38

Material	α [E-6/K]	E [GPa]	ν [-]	
CFRTP L	0.78	93.9	0.35	
CFRTP T	60.3	4.9	0.02	
GFRTP L	8.21	31.4	0.32	
GFRTP T	56.0	8.0	0.08	

Table 3 theoretical value calculated as the UD FRTP



Fig.8 Experimental and Calculated CTE of CFRTP and GFRTP











(a) front



(b) back Fig.11 Specimen of CFRTP

6 結言

マトリックスに熱可塑性樹脂である現場重 合型PA6,強化繊維に綾織炭素繊維および平 織ガラス繊維を用いたFRTPの熱膨張係数に ついて,その実験値と理論値の比較を行っ

- た.以下に,結言を示す.
- 1)繊維の織目を考慮したクリンプモデルを作成し、CFRTPとGFRTPの熱膨張係数の理論値を算出した.
- 2)繊維の織目と樹脂の温度依存性の両方を考慮した0℃から60℃までの各FRTPの理論値は、実験値に近い傾向を示した.
- 3) GFRTPの熱膨張係数の理論値は、繊維の織 目を考慮したクリンプモデルを用いて、樹脂 の温度依存性を考慮した場合が最も実験値 に近い値を示した.
- 4) CFRTPの熱膨張係数の理論値は、どちらの モデルでも、また温度依存性を考慮しても実 験値とは誤差があるが、これは実験で使用し た試験片の強化繊維が、成形時に傾いてしま ったため、理論値よりも大きい値になったと 考えられる.

参考文献

- A. Hirabayashi, M. Suzuki, G. Ben, Study on Coefficient of Thermal Expansion about Fiber Reinforced Thermoplastics, ACMA, CD-ROM, (2014)
- 村山和永,田中豊喜,炭素繊維強化複合材料の熱膨張特性,材料,第25巻,第272号
- 1) 植村益次, 邉吾一, 他 FRP 構造強度計 算の実際, 強化プラスチック協会, pp102-110, (1979)
- 4) 石川隆司,他 織布複合材料の線形および非線形挙動,日本航空宇宙学会誌, 第 32 巻 第 362 号 (1984)
- 5) 邊吾一,石川隆司,先進複合材料工学, 培風館, pp56-67 (2005)