

均質化理論を用いた CFRTP の熱膨張係数の推定

日大生産工(院) ○小林 大志
日大生産工 平山 紀夫

1. 緒言

マトリックスに熱可塑性樹脂、強化材に炭素繊維を用いた炭素繊維強化熱可塑性プラスチック(Carbon fiber reinforced thermoplastics, CFRTP)の熱膨張係数(Coefficient of thermal expansion, CTE)は、強化繊維の形態により、強い異方性を持っている。また、熱可塑性樹脂は、温度変化に伴って弾性係数や熱膨張係数が変化する温度依存性を有している。このCFRTPの温度に依存した異方性の熱膨張係数を実験から算出するためには、直交異方性を仮定しても、6方向の試験を行わなければならないため、多大な労力とコストがかかる。

そこで本研究では、均質化理論による数値材料試験を用いて、温度依存性と異方性を有する織物CFRTPの熱膨張係数を推定する方法を提案する。そして、マトリックスに熱可塑性樹脂のナイロン樹脂、強化繊維に平織炭素繊維織物を使用したCFRTPの材料主軸方向における熱膨張係数の測定を行い、均質化理論による数値材料試験で算出した値と比較・検討し、本提案の推定手法の精度の検証を行う。さらに、材料主軸方向から任意の角度に傾けた方向における、織物CFRTPの熱膨張係数を推定する方法について検討する。

2. 実験

2.1 供試材

供試材は、母材にナイロン樹脂(ダイアミロンC, 三菱樹脂)、強化材に炭素繊維(T300, 東レ(株))を使用した。Table1に、炭素繊維のカタログ値を示した。Table1より、本稿で用いる炭素繊維は、経糸と緯糸のフィラメントの数、およびそれぞれの密度が同じであることが確認できる。炭素繊維の表面には、あらかじめエポキシ系のサイジング剤が塗布されており、ナイロン樹脂との接着を阻害する可能性があるため、成形前にサイジング剤のアセトン洗浄を2時間行い、乾燥させた。

2.2 成形方法

CFRTPの成形方法は、フィルムスタッキング法を採用した。本成形法は、シート状に加工された熱可塑性樹脂フィルムと強化繊維をプレス成型機により高温に加熱、加圧して成形する方法である。炭素繊維の枚数は4枚である。プレス成形の条件は、プレス機の熱板の温度を280℃に設定し、圧力が作用していない状態で20分

間、フィルムの溶融を行った。その後、圧力5MPaで20分間加圧し、自然冷却して成形品を得た。成形品の繊維体積含有率は、燃焼法を用いて測定した結果、40.6%であった。

表1 炭素繊維のカタログ値

Tradename	CO6343
Warp	T300-3000
Weft	T300-3000
Architecture	Plain woven textile
Warp density [tows/25mm]	12.5
Weft density [tows/25mm]	12.5
Thickness [mm]	0.25

2.3 動的粘弾性試験

CFRTPのマトリックスに使用したナイロン樹脂の温度変化による弾性係数の変化を把握するため、動的粘弾性試験を実施した。試験装置は、セイコーインスツルメンツ社製のSII Exster 6100を使用した。試験条件は、両端固定曲げモードで、温度範囲は常温から140℃までとした。

2.4 熱膨張係数の測定

Fig.1に熱膨張係数を測定する方向について示す。織物CFRTPの熱膨張係数は、異方性を有するため、Fig.1(a)に示すように、材料主軸方向である繊維(x方向)および板厚方向、そしてFig.1(b)に示すように、面内において45°度傾けたときのx方向に対して測定を実施した。ナイロン樹脂単体は、面内および板厚方向で測定を行った。熱膨張係数の測定装置は、アドバンス理工社製のレーザー干渉計方式のLIX-2を使用した。繊維方向を測定するための試験片のサイズは、幅6mm、長さ12mm、厚さ1mmである。両端は装置のミラーの間に1点で固定するように加工を行っている。板厚方向の試験片は、厚さ1mmで4.6mm角である。測定は常温付近を精度よく測定するため、液体窒素を用いて-20℃まで冷却してから毎分2℃で140℃まで測定した。測定回数は1つの試験片につき3回実施しているが、1回目の測定は試験片

Presumption of coefficient of thermal expansion for CFRTP using homogenization method

Hiroshi KOBAYASHI and Norio HIRAYAMA

の脱湿や内部応力の影響で結果にばらつきがあるため、2回目と3回目の結果を採用した。

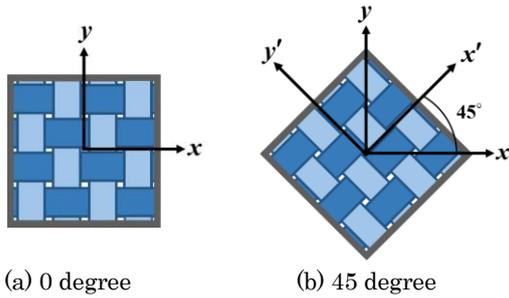


図1 測定する試験片の方向

3. 数値材料試験

3.1 解析手法

本提案の均質化理論による数値材料試験は、マトリックスのナイロン樹脂と、強化材の織物炭素繊維でモデル化したマイクロ構造（ユニットセル）に対して実施し、熱膨張係数を算出する。なお、ここでの数値材料試験は文献1で提示されている手法を用いて行い、対応するマイクロ解析には汎用有限要素法ソフトウェア ANSYS²⁾を用いた。

3.2 解析モデル

Fig.2に平織繊維を用いた織物CFRTPの解析モデルを示す。織物CFRTPは、直径7 μ 程度の炭素繊維のモノフィラメントが、数百本収束したストランドという単位で織構造が形成されている。そのため、炭素繊維の物性値をストランドに対して、直接定義してモデル化することはできない。このため、Fig.3に示すように、ストランドはフィラメントによる一方向CFRTPが周期的に配置されていると仮定し、数値材料試験を実施して、異方性のストランドの物性値を算出した。そして、数値材料試験より求めたストランドの異方性の等価材料物性値をFig.3に示す織構造の経糸と緯糸のストランドに適用し、Fig.2のモデルで数値材料試験を実施した。このように2回の数値材料試験を実施することで、織物CFRTPの異方性の物性値を算出することができる。Fig.3に示す一方向CFRTPの数値材料試験では、炭素繊維とナイロン樹脂の物性値を使用した。Fig.2に示す織物CFRTPの数値材料試験では、一方向CFRTPの数値材料試験から得られたストランドと、ナイロン樹脂の物性値を使用した。炭素繊維の物性値は一定値とし、ナイロン樹脂の物性値は、温度依存性を考慮するため、動的粘弾性試験および熱膨張係数の測定結果を使用した。ストランドの寸法は、光学顕微鏡を用いてCFRTPの成形品の断面観察を実施して得た。Fig.2およびFig.3に示すモデルの繊維体積含有率は、ストランド内部の実測が困難であるため、

測定に使用した織物CFRTPの実測値40.6%と同じになるように設定した。したがって、Fig.3に示す一方向CFRTPの数値材料試験では77.0%、Fig.2に示す織物CFRTPでは52.1%とした。さらに、本研究では織物CFRTPの温度に依存した熱膨張係数を推定するため、30℃から140℃までの範囲で、10℃ごとに数値材料試験を実施した。

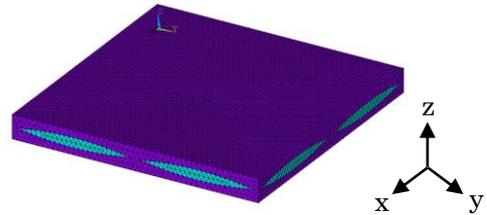


図2 平織繊維を用いた織物CFRTP

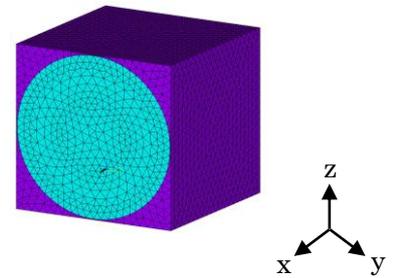


図3 一方向CFRTP



図4 ストランド

4. 任意方向の熱膨張係数の算出方法

織物CFRTPの任意方向の熱膨張係数 α'_{ij} は、(1)式に示すように、材料主軸方向の熱膨張係数 α_{ij} にひずみの座標変換マトリックスの逆行列 $[T(\epsilon)]^{-1}$ をかけることで算出することができる³⁾。材料主軸方向の熱膨張係数 α_{ij} には、数値材料試験から得られた結果を使用した。

$$\begin{Bmatrix} \alpha'_{xx} \\ \alpha'_{yy} \\ \alpha'_{zz} \\ \alpha'_{yz} \\ \alpha'_{zx} \\ \alpha'_{xy} \end{Bmatrix} = [T(\epsilon)]^{-1} \begin{Bmatrix} \alpha_{xx} \\ \alpha_{yy} \\ \alpha_{zz} \\ \alpha_{yz} \\ \alpha_{zx} \\ \alpha_{xy} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

5. 実験結果と計算結果

5.1 ナイロン樹脂の熱膨張係数とヤング率

Fig.5 にナイロン樹脂の動的粘弾性試験と熱膨張係数の測定結果を示す。動的粘弾性試験では、温度変化に伴う貯蔵弾性係数の変化率を表現することができるが、各温度における弾性係数の絶対値は、実際の値とは異なる。そこで、30℃の弾性係数は、ナイロン樹脂単体の引張試験の結果を使用し、40℃以降は動的粘弾性試験と引張試験の結果を使用して、動的粘弾性試験から得られた弾性係数の比率を乗じて算出した。

Fig.5 より、ナイロン樹脂の貯蔵弾性係数は、温度上昇に伴って減少していることがわかる。また、2本の近似線の交点はガラス転移温度を示しており、その温度は約55℃であることがわかる。一方、熱膨張係数は、温度上昇に伴い増加していることがわかる。

5.2 織物 CFRTP の測定結果

5.2.1 材料主軸方向の熱膨張係数

Fig. 6 および 7 に、織物 CFRTP とナイロン樹脂単体の繊維（面内）および板厚方向の測定値を示す。Fig. 6 より、織物 CFRTP の繊維方向の熱膨張係数は、繊維の存在により、面内方向のナイロン樹脂単体の熱膨張係数に比べ、はるかに小さい値を示していることが確認できる。また、ナイロン樹脂単体の熱膨張係数は、温度が上昇するに伴って増加しているが、織物 CFRTP は減少する傾向を示している。この理由として、ナイロン樹脂単体は、温度が上昇するに伴って弾性係数が低下し、変形しやすい状態になるため、熱膨張係数が増加する傾向を示したと考えられる。一方、織物 CFRTP は温度が上昇するに伴って、ナイロン樹脂が変形しやすくなるが、マイナスの熱膨張係数を持つ炭素繊維によって、ナイロン樹脂の膨張が抑えられたため、温度上昇に伴い、熱膨張係数が小さくなる傾向を示したと考えられる。

Fig.7 より、板厚方向の織物 CFRTP の熱膨張係数は、繊維方向に比べ、ナイロン樹脂単体に近い値を示し、温度上昇に伴って増加する傾向は同じであった。これは、本研究で用いた織物繊維は、板厚方向に繊維が配向していないため、繊維方向とは異なり、ナイロン樹脂の膨張が抑制されなかったためであると考えられる。

5.2.2 任意方向の熱膨張係数

Fig.8 に、0°方向と45°に傾けた方向の熱膨張係数の測定結果を示す。Fig.8 より、45°傾けた方向の熱膨張係数は、繊維方向である0°方向の熱膨張係数とほぼ同じ値を示していることが確認できる。

5.3 織物 CFRTP の計算結果

5.3.1 材料主軸方向の熱膨張係数

Fig.9 および 10 に、繊維および板厚方向の熱膨張係数の測定結果と、本提案の数値材料試験による温度依存性の熱膨張係数の計算値を示す。Fig.9 および 10 より、繊維方向と板厚方向における熱膨張係数の計算値は、測定値と良好な一致を示していることがわかる。

5.3.2 任意方向の熱膨張係数

Table 2 に、数値材料試験より算出した織物 CFRTP の30℃における熱膨張係数のテンソル成分を示す。Table 2 より、織物 CFRTP の面内における熱膨張係数は、材料主軸方向の2方向(X,Y方向)の熱膨張係数が同じ値であり、せん断成分の熱膨張係数は、材料主軸方向の熱膨張係数に比べて、はるかに小さい値であることが確認できる。Table 2 の値を(1)式に代入し、ひずみの座標変換マトリックスをかけて、45°傾けた方向の熱膨張係数を算出すると、Table 3 に示す結果が得られた。Table 3 より、45°傾けた場合の熱膨張係数は、0°方向である材料主軸方向の熱膨張係数と同じ値を示していることが確認できる。これは、0°方向の熱膨張係数が面内のX, Y方向に対して同じ値を示し、さらに、せん断成分が材料主軸方向に比べてはるかに小さい値であることから、XY面内では任意の角度に傾けても、熱膨張係数は変化しないと考えられる。

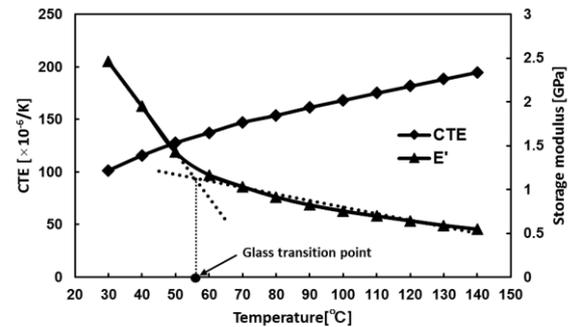


図5 ナイロン樹脂のCTEと粘弾性試験の結果

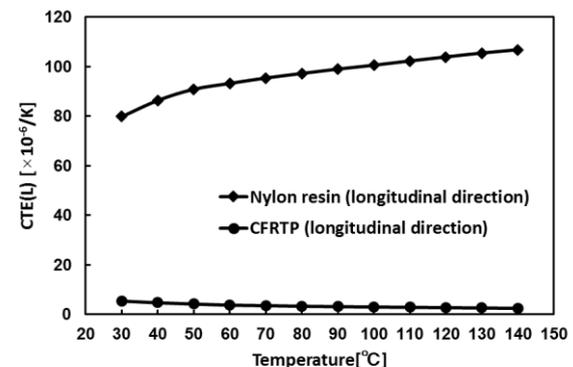


図6 繊維方向のCFRTPとナイロン樹脂の測定値

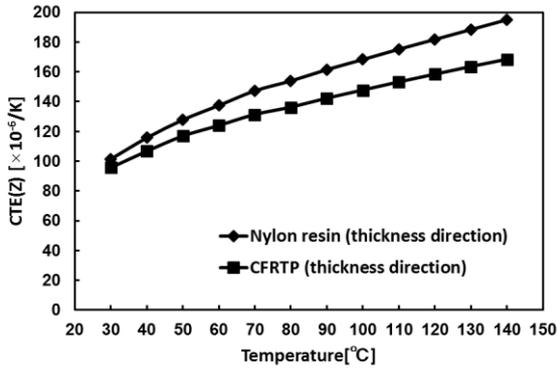


図7 板厚方向のCFRTPとナイロン樹脂の測定値

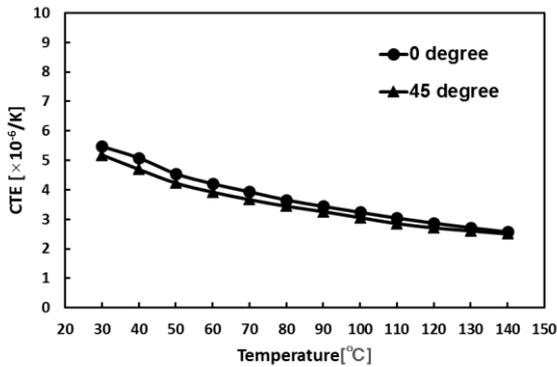


図8 0°および45°方向のCFRTPの測定値

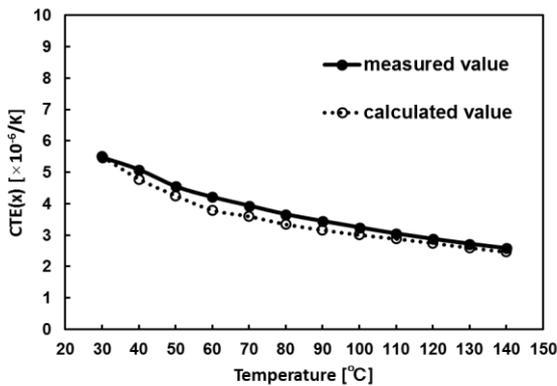


図9 繊維方向のCFRTPの測定値と計算値

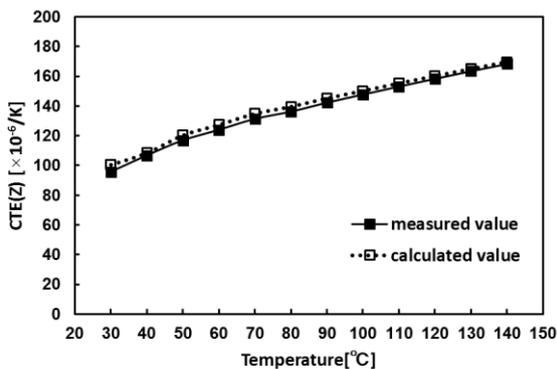


図10 板厚方向のCFRTPの測定値と計算値

表2 0°方向の織物 CFRTP の計算値

Cross CFRTP (0 degree)			
α_{xx} ($\times 10^{-6}/K$)	5.5	α_{xy} ($\times 10^{-11}/K$)	-5.9
α_{yy} ($\times 10^{-6}/K$)	5.5	α_{yz} ($\times 10^{-11}/K$)	1.0
α_{zz} ($\times 10^{-6}/K$)	1064	α_{xz} ($\times 10^{-11}/K$)	-1.7

表3 45°方向の織物 CFRTP の座標変換値

Cross CFRTP (45 degree)			
α_{xx} ($\times 10^{-6}/K$)	5.5	α_{xy} ($\times 10^{-11}/K$)	1.4
α_{yy} ($\times 10^{-6}/K$)	5.5	α_{yz} ($\times 10^{-28}/K$)	8.1
α_{zz} ($\times 10^{-6}/K$)	1064	α_{xz} ($\times 10^{-27}/K$)	2.2

6. 結言

マトリックスに熱可塑性樹脂, 強化材に織物繊維を用いたCFRTPの温度に依存した熱膨張係数について, 均質化理論を用いて推定する方法を提案した. そして, 織物CFRTPの数値材料試験, ひずみの座標変換式, 熱膨張係数の測定結果から, 以下の結論を得た.

- 1) 繊維方向における織物CFRTPの熱膨張係数の測定結果は, 繊維の存在により, ナイロン樹脂単体よりも小さい値を示した. また, 温度上昇に伴い, 小さくなることが確認された.
- 2) 板厚方向における織物CFRTPの熱膨張係数の測定結果は, ナイロン樹脂単体に近い値を示し, 温度上昇に伴って増加する傾向を示した.
- 3) 織物CFRTPの材料主軸方向である繊維方向および板厚方向に対する計算値は, スtrandの物性値の算出を含めて2ステップで実施することで, その結果は測定値と良好な一致を示した.
- 4) 織物CFRTPの45°方向における熱膨張係数の測定値は, 繊維方向の熱膨張係数と同じ測定値を示すことが確認できた. さらに, 任意方向の熱膨張係数はひずみの座標変換マトリックスを用いることで, 推定できることが確認できた.

「参考文献」

- [1] 寺田賢二郎, 犬飼壮典, 平山紀夫, "非線形マルチスケール材料解析における数値材料実験", 機械学会論文集(A編), 第74巻, 第744号 (2008), pp. 1084-1094.
- [2] ANSYS Inc., Release 16.0 Documentation for ANSYS, 2015.
- [3] 座古勝, 辻上哲也, 上辻靖智, "複合材料の三次元熱応力解析", 材料, 第43巻, 第487 (1994), pp.402-407