

透過 X 線ひずみスキャンニング法による短繊維強化樹脂複合材料の 3 軸熱ひずみ分布計測

Evaluation of the Distribution of Triaxial Thermal Strain in Short-fiber Reinforced Plastics by X-ray Diffraction using Transmission Strain Scanning Method

木村 啓二^a, 加藤 弘之^b, 鈴木 義典^b, 山田 侑輝^b, 犬飼 英人^b, 清水 憲一^b
Keiji Kimura^a, Hiroyuki Kato^b, Yoshinori Suzuki^b, Yuki Yamada^b, Hideto Inukai^b, Kenichi Shimizu^b

^a(株)デンソー, ^b名城大学
^aDENSO. CORP. ^bMeijo University

短繊維強化樹脂 (Short-Fiber Reinforced Plastics, SFRP) を製品で使用する際、繊維の配向分布により発生する内部残留熱ひずみが破壊の原因となることが知られており、今までは測定する技術がないため、大きな問題となっていた。今回は従来困難であった SFRP の内部残留ひずみを、透過 X 線ひずみスキャンニング法を用いて BL46XU において計測を行った。その結果、3 mm 厚以上の平板試験片の場合、厚さに関わらず z 軸の残留熱ひずみの大きさがほぼ変化していないことが分かった。しかし、同じ 4 mm 厚試験片でも配向の強い試験片は平板試験片よりも複雑な内部残留ひずみになっており、このことから繊維配向の状態が残留熱ひずみに大きな影響を及ぼすことが分かった。

キーワード： 短繊維強化樹脂, 結晶性熱可塑樹脂, 複合材料, その場 X 線回折, 透過法, ひずみスキャンニング法, 内部ひずみ解析

背景と研究目的：

自動車などの輸送機器において地球環境保全および製品の競争力強化のため、燃費向上が求められている。燃費向上に大きく寄与する因子が軽量化であり、軽量化達成のためのアイテムとして、近年強度と軽さを両立する短繊維強化樹脂 SFRP が多く使用されている。ただし、SFRP は射出成型時の流動速度分布によって繊維の配向分布が発生し、これが材料内部の線膨張係数分布となり、高温から常温に冷める際に残留熱ひずみとなる。また上記熱ひずみに加えて、繊維と樹脂の熱膨張係数差によってミクロな残留熱ひずみが発生し、これらの熱ひずみが部材の変形や破壊の原因となることが分かっており、これら残留熱ひずみが SFRP 活用の上で大きな問題となっている。しかし、従来は SFRP の内部残留熱ひずみを測定する技術がなかったため、成型後冷却により発生する熱ひずみの評価が困難で、樹脂の製品設計において大きな課題となっていた。

そこで本研究では従来評価困難であった SFRP の内部残留熱ひずみを、自動車用エンジン部品などで既に実用化されている熱可塑性結晶樹脂ポリフェニレンサルファイド(PPS)にガラス繊維(GF)を 40wt%混合した SFRP(PPS-GF40)の平板に対して、透過 X 線ひずみスキャンニング法を用いて母相のひずみ測定を行い、成型品の厚さの影響や成形方法の影響について検討を行った。

実験：

今回の測定対象の試験片形状は、実部品に近い厚さの 3 mm、4 mm、5 mm 厚の板材から切り出した試験片を用い、BL46XU にて Table 1 に示す条件でひずみスキャンニング法によって計測を行った。なお、4 mm 厚試験片については、より射出成型時の流速分布による繊維の配向分布が大きくなる作成方法の試験片(ダンベル試験片)も作成し、内部残留熱ひずみの計測を行った。

Fig.1(a)は、射出成形方向ひずみ ε_{MD} を測定する際の、試料と X 線入射方向の関係を示している。ひずみの測定位置は全て正方形板の中心($x=0, y=0$)である。また回折角が 8° の場合、測定領域の長軸が 1.40 mm、0.10 mm の細長い菱形になる。この状態で $\theta-2\theta$ スキャンによって、板厚方向に沿ったひずみ ε_{MD} を測定した。この測定を、ステージの z 軸を移動させ、測定を繰り返すことにより、板厚方向に沿

たひずみ分布を求めた。次に、ゴニオメーターの χ 軸を 90° 回転して θ - 2θ スキャンを行い、射出方向に対して垂直方向のひずみ ε_{TD} を測定した。同様に z 軸を動かして、板厚方向に沿ったひずみ分布を求めた (Fig.1 (b))。最後に、 ϕ 軸を 90° 回転して θ - 2θ スキャンを行い、射出方向と直行方向のひずみ ε_Z を測定した。同様に z 軸を動かして、板厚方向に沿ったひずみ分布を求めた (Fig.1 (c))。

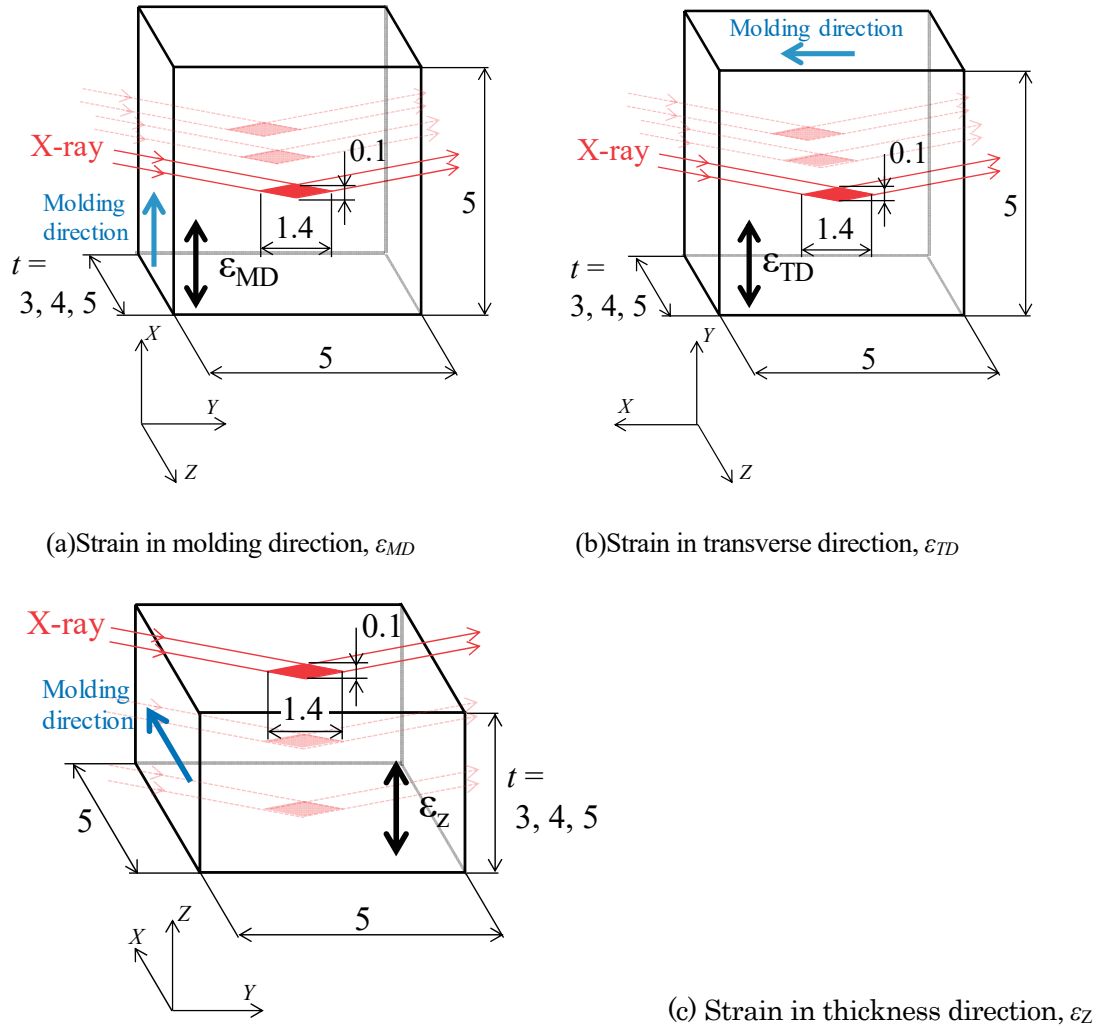


Fig.1 Measurement of strain in three directions

Table 1 X-ray conditions

Measurement material	PPS
Energy (keV)	20
Wave length	0.06199
Measurement method	Transmission strain scanning
DS-1, $h \times w$ (mm)	0.1×0.1
DS-2, $h \times w$ (mm)	0.1×2.0
RS-2, $h \times w$ (mm)	0.1×2.0
Diffraction plane	111, 200
Diffraction angle $2\theta_0$ (deg)	8.20
Scanning range 2θ	5.6 - 10.0
Preset time (s)	2
Number of partition	88
Step width (deg)	0.05

**実験結果および考察：
板材試験片の測定結果**

3 mm、4 mm、5 mm 厚試験片の熱残留ひずみを測定した結果を Fig.2、Fig.3、Fig.4 に示す。なお、今回ひずみに換算するために用いた無ひずみ時の格子面間隔 d_0 は、27°Cにおける PPS 単体の実測値 $d_0=0.43442$ nm とした^[1]。厚さに関わらず z 軸の熱ひずみの大きさがほぼ変化していないことから、厚さの影響による成型後冷却時の温度勾配よりも繊維配向の状態の影響が大きい可能性があると考えられる。以上のように、繊維配向の状態は、熱残留ひずみに大きな影響を及ぼすと考えられ、今後それぞれの配向状態と残留熱ひずみの関係について調査を行う。

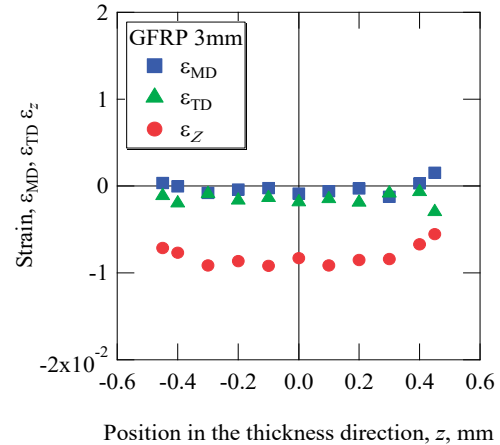


Fig.2 Strain distribution in 3 mm thickness TP.

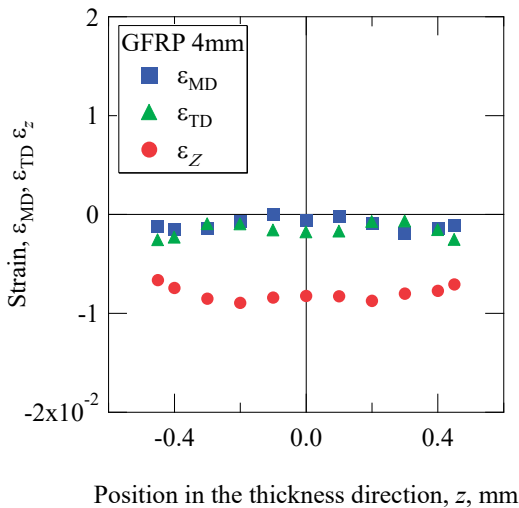


Fig.3 Strain distribution in 4 mm thickness TP.

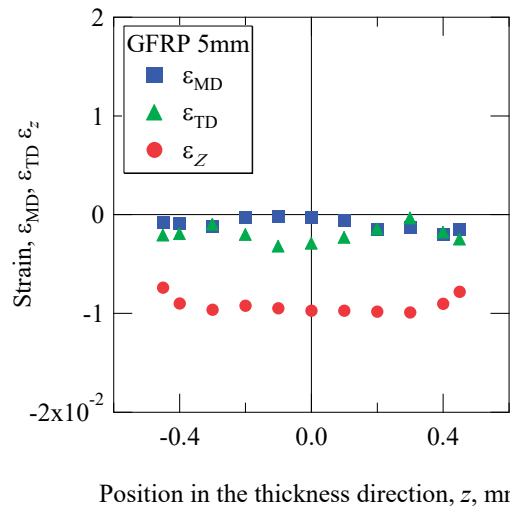


Fig.4 Strain distribution in 5 mm thickness TP.

ダンベル試験片の測定結果

繊維の配向分布が熱残留ひずみに及ぼす影響を調査するために測定した 4 mm 厚のダンベル試験片の結果を Fig.5 に示す。この結果、同じ厚さの Fig.3 の結果に比べて複雑なひずみ分布となっていることが確認され、この結果からも成形冷却時の温度分布よりも GF の配向分布が熱残留ひずみに大きな影響を及ぼしていると考えられ、Fig.3 の試験片とダンベル試験片の繊維配向状態を X 線 CT で詳細に測定し、定量的に評価する予定である。

成型時からの温度低下によって発生する熱残留ひずみの分布を予測するためには、マイクロメカニクスと有限要素解析 (FEM) を組み合わせた解析が有効であり^[1]、ダンベル試験片のように GF が複雑に配向している場合のひずみ分布について、今後、実測値と予測値の比較検討を行う予定である。

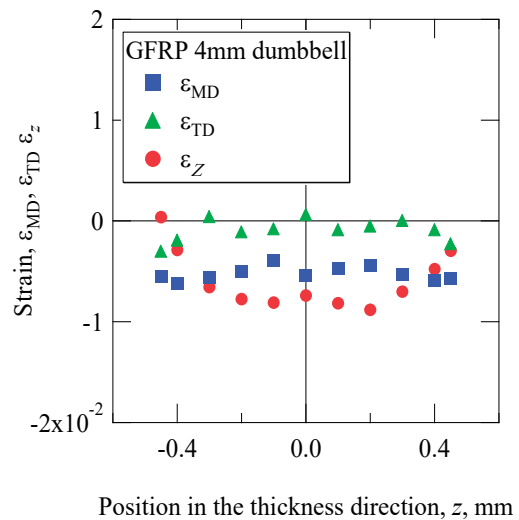


Fig.5 Strain distribution in 4mm thickness

今後の課題：

高温および低温条件下における熱残留ひずみの変化と GF 配向分布の関係性の調査を行う予定である。

参考文献

[1] 清水憲一, 岩堀恵介 他, *日本材料学会会誌「材料」*, **69**, pp.300-307 (2020)