

短繊維強化樹脂複合材料のウェルド部における  
内部応力のひずみスキニング法による評価  
**Internal Stress Measurement Using Strain Scanning Method for Weld Part  
of Short –Fiber Reinforced Plastic**

岩堀 恵介<sup>a</sup>, 清水 憲一<sup>b</sup>, 田中 啓介<sup>c</sup>, 菖蒲 敬久<sup>d</sup>, 伊賀 友一郎<sup>b</sup>, 石田 幸也<sup>b</sup>,  
佐藤 龍樹<sup>b</sup>, 土橋 広武<sup>b</sup>

Keisuke Iwahori<sup>a</sup>, Kenichi Shimizu<sup>b</sup>, Keisuke Tanaka<sup>c</sup>, Takahisa Shobu<sup>d</sup>,  
Yuichiro Iga<sup>b</sup>, Kouya Ishida<sup>b</sup>, Tatsuki Sato<sup>b</sup>, Hiromu Tsuchihashi<sup>b</sup>

<sup>a</sup>(株)デンソー, <sup>b</sup>名城大学, <sup>c</sup>名古屋産業科学研究所, <sup>d</sup>日本原子力研究開発機構

<sup>a</sup>DENSO CORPORATION, <sup>b</sup>Nagoya Industrial Science Research Institute, <sup>c</sup>Japan Atomic Energy Agency,  
<sup>d</sup>Meijo University

短繊維強化樹脂複合材料(以降 SFRP)のウェルド部に発生する内部応力を配向が既知である簡易試験片を用い, 既知応力を与えた状態でひずみスキニング法により測定した。母相応力を測定し, 初期残留応力成分と負荷応力成分を分離し, ウェルド部の破壊を支配する応力・ひずみ因子を明らかにする。測定の結果, SFRP の破壊は母相の破壊だけでなく, 繊維の破壊の影響も受けることが明らかになった。

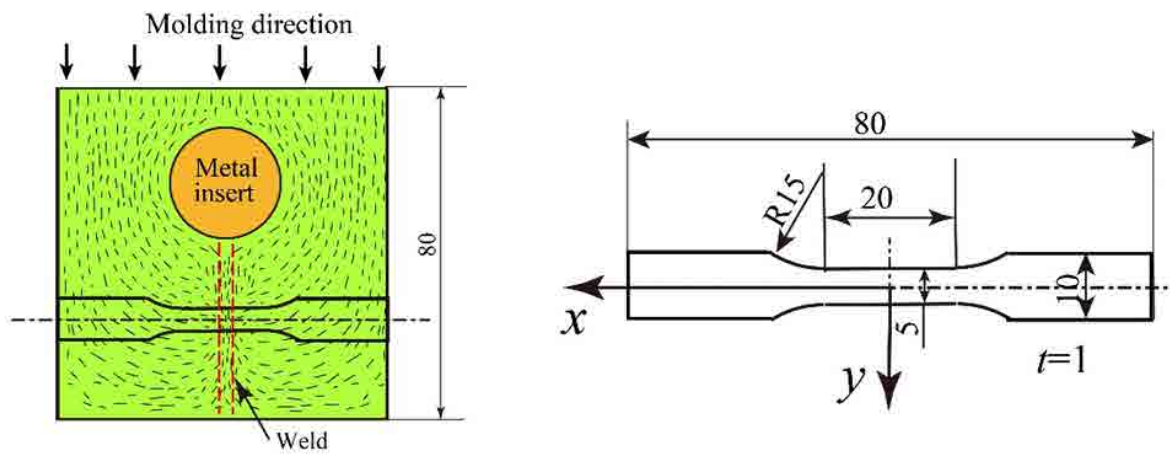
**キーワード:** 樹脂複合材料, ウェルド, ひずみスキニング法, 内部応力, 放射光

**背景と研究目的:**

SFRPは射出成形により繊維配向分布を有し, 繊維会合部にはウェルド部が形成される。そして, 金属インサートを有する場合は, 冷却時に線膨張係数差を起因とした初期内部ひずみが発生する。これまでBL46XU(課題2015B1898, 2016B1895)において, 金属インサートを有する樹脂部品のひずみ分布を測定し, 応力評価において繊維と母相の初期内部ひずみの評価が不可欠であることを認識した[1], [2], [3]。本課題では, ウェルド部を有する短冊状の試験片を製作し, 応力を負荷した状態で母相応力を測定し, 初期残留応力成分と負荷応力成分を分離し, ウェルド部の破壊を支配する応力・ひずみ因子を明らかにすることを目標とする。

**実験:**

測定材料は, PPSにガラス繊維を40wt%混合したSFRPである。図1(a)に示すように, 射出成形によりウェルド部を有する短冊状の板材試験片(板厚1 mm)を作製し, まず無負荷状態で残留応力を測定する。ついで, 引張荷重治具を用いて引張荷重を段階的に負荷した状態でウェルド部の内部ひずみ分布を測定し, 破壊荷重まで外挿することから, 破壊を支配するPPS相の応力・ひずみが評価できると考えられる。樹脂板材は図2に示すように板厚方向に繊維配向分布を有し, 射出方向に繊維が平行に配向するスキン層と, 直交方向の内部のコア層に分かれている。ウェルド部についてもスキン層とコア層を分離して測定するため, 本測定ではひずみスキニング法を採用する。試験片の板幅は評点部で5 mmとして, 側面からX線を入射して透過回折プロファイルより, 軸方向のひずみと板厚方向ひずみを測定し, ゲージ体積を板厚方向に移動させることにより分布を測定する。X線測定条件の詳細を表1に示す。ビームサイズは0.1x0.1 mmであり, 板幅5 mmを透過させるためエネルギー20 keVを使用した。



(a) 繊維配向及び切出し位置

(b) 試験片形状

図1. 射出成形板の繊維配向及び試験片形状

表 1. X線測定条件(BL46XU)

Measurement material	PPS
Energy level (keV)	20
Wave length (nm)	0.06199
Measurement method	Transmission strain scanning
DS-1, $h \times w$ (mm)	0.1 × 0.1
RS-1, $h \times w$ (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 $2\theta$ (deg)	5.6-10.0
Preset time (s)	2
Number of partition	88
Step width (deg)	0.05

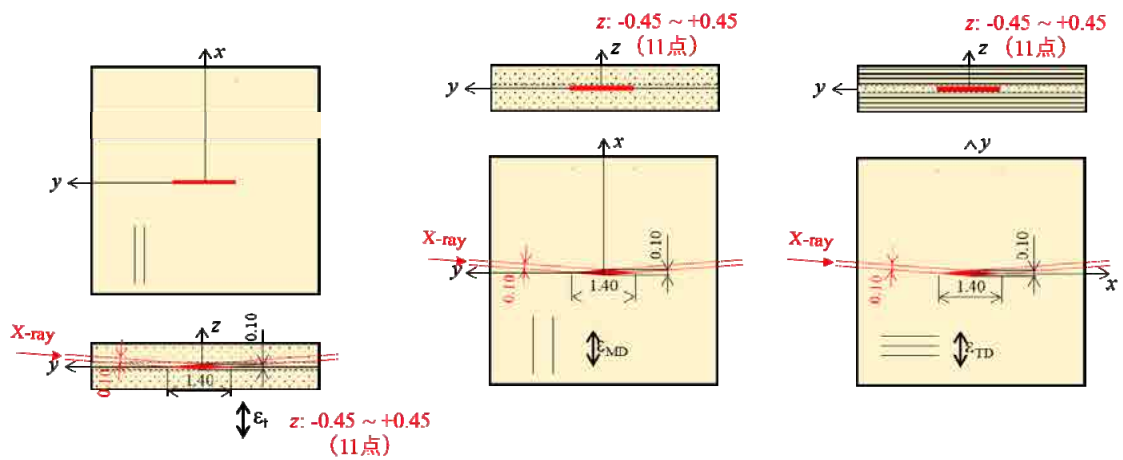


図2. 板厚方向繊維分布と測定位置

**結果および考察：**

回折プロファイルの一例を図3に示す。200, 111を一つのピークとして、110のピークと波形分離し、Gaussフィッティングした。2θ角は8°程度の位置にありPPSの回折ピークは非常に低角であることがわかる。次に、図2の板材より得られた各方向のひずみ分布を図4に示す。なお、無ひずみ時の格子面間隔 $d_0$ は、課題番号2016B1895で測定した27°CにおけるPPS単体の値( $d_0=0.43442$  nm)を用いた。MD方向のひずみは板の内部(コア層)で圧縮、表面(シェル層)で引張の値を示している。これに対して、TD方向のひずみは板の内部(コア層)で引張、表面(シェル層)で圧縮の値となっており、MD方向のひずみと逆の分布を示す。一方、板厚方向のひずみは、位置によらずほぼ一定の圧縮ひずみを示している。また、MD方向およびTD方向のひずみに比べて高い残留応力を有している。

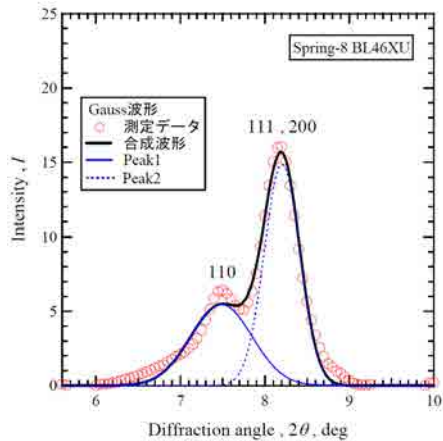


図3. 回折プロファイルの一例

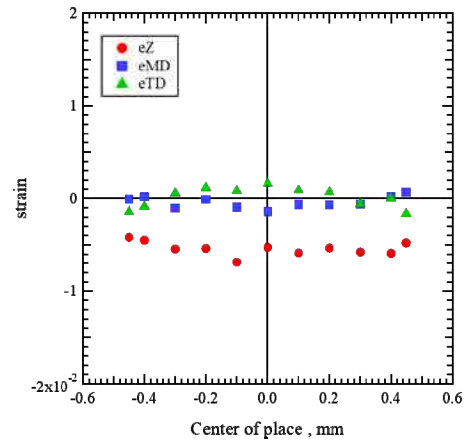
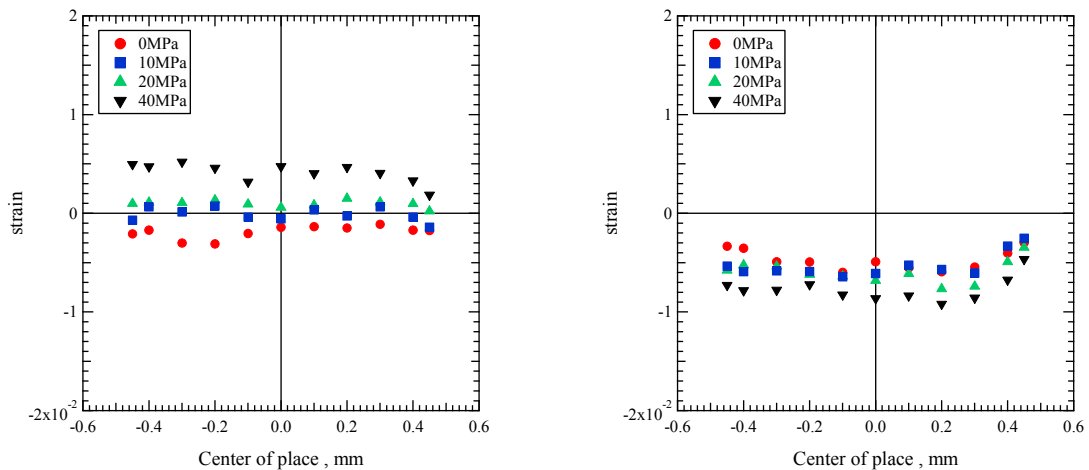


図4. 三次元ひずみ測定結果

応力負荷測定としてウェルドライン上( $x=0$  mm)とウェルドラインから上下 $x\pm 0.1$  mmの位置において測定したが、一例として $x=0$  mmの結果を図5に示す。ウェルド試験片に応力を負荷したときのひずみ変化を図5に示す。応力の増加とともに、負荷方向のひずみは増加、板厚方向のひずみは減少していることがわかる。ただし、負荷方向のひずみ増加量に比べると、板厚方向のひずみ減少量は小さい。また、負荷方向ひずみ、板厚方向ひずみ共に、板幅方向に分布を持っているが、負荷によって分布形状は大きく変化せず、上下に平行移動していることがわかる。



(a) 負荷方向ひずみ

(b) 板厚方向ひずみ

図5. 応力負荷に伴うウェルド試験片のひずみ変化(ウェルドライン上,  $x=0$ mm)

各試験片の中心から幅 $\pm 0.2$  mm ( $y\pm 0.2$  mm)のひずみ値を平均し、負荷応力に伴う変化をまとめた結果を図6に示す。いずれの試験片も、負荷応力に対して、PPS相のひずみが比例的に増加していることがわかる。ただしTD試験片、ウェルド試験片(WD)に比べると、MD試験片は応力負荷

に伴うひずみの変化が小さい。これは図 1 で示したように、MD 試験片のヤング率が高いことが原因と考えられる

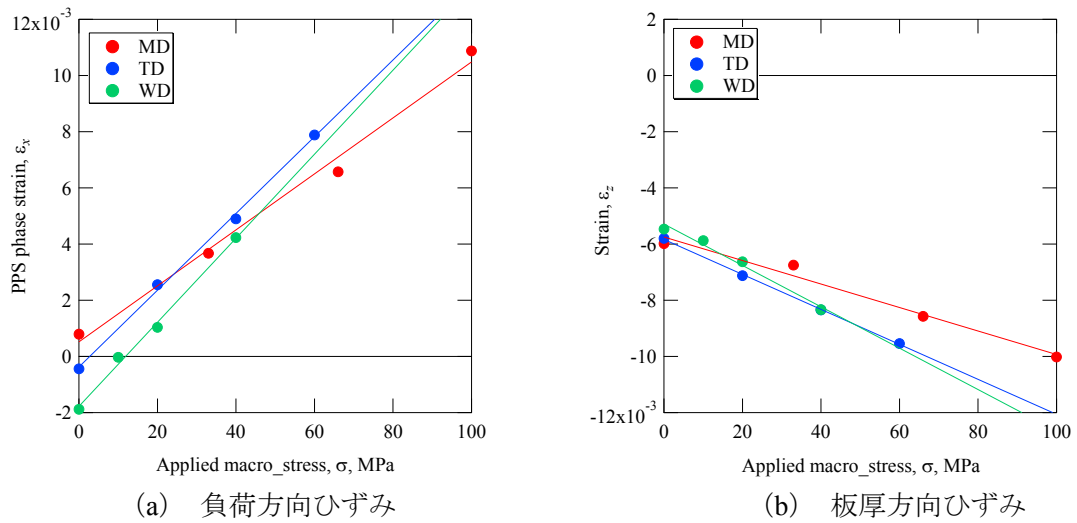


図 6. 応力負荷に伴うひずみ変化

各試験片のヤング率を用いて、図 6 の横軸をマクロひずみに変換した結果を図 7 に示す。図 6 に比べると、各試験片の傾きがほぼ等しくなっていることがわかる。これは、この材料が応力一定モデル (Reuss モデル) よりもひずみ一定モデル (Voigt モデル) に従って変形することを意味している。

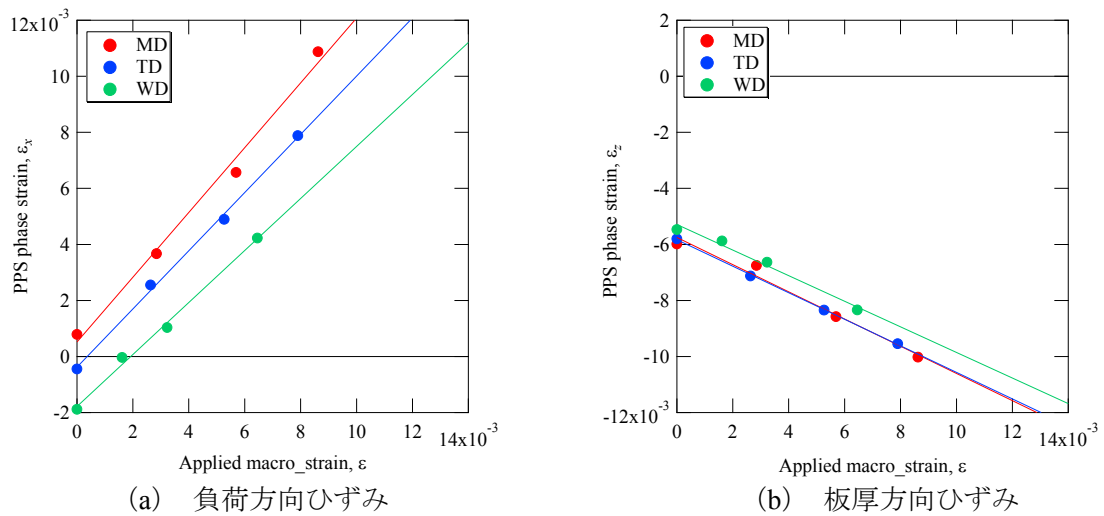


図 7. PPS 相ひずみとマクロひずみの関係

各材料の引張強さを図 6(a) の近似直線に外挿し、破断時の PPS 相ひずみを評価した結果を表 2 に示す。それぞれの試験片で破断時の PPS 相ひずみが異なっていることから、この材料の破壊は PPS 相の破壊だけでなく、繊維の破壊の影響も受けることが予想される。

表 2. 破断時の PPS 相ひずみの推定値

Material	Tensile strength	Extrapolated PPS phase strain
MD specimen	128.9	$13.4 \times 10^{-3}$
TD specimen	82.5	$10.9 \times 10^{-3}$
Weld specimen	73.7	$9.1 \times 10^{-3}$

参考文献：

[1] K. Tanaka et al., *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.63, No.7, pp.514-520

(2014).

- [2] 岩堀恵介 他, 平成 27 年度 SPring-8 産業新分野支援課題・一般課題(産業分野)実施報告書(2015B), 2015B1898.
- [3] 岩堀恵介 他, 平成 28 年度 SPring-8 産業新分野支援課題・一般課題(産業分野)実施報告書(2016B), 2016B1895.