

太径炭素繊維強化プラスチック (CFRP) の繊維揺らぎ測定と  
その場観察圧縮試験による圧縮破壊プロセスの解明  
Compressive Failure Process of a Large Diameter Carbon Fiber Reinforced  
Plastic Based on Fiber Undulation Measurement  
and In-situ Compression Test

上田 政人<sup>a</sup>, 岡村 悠司<sup>a</sup>, 山本 翔太<sup>a</sup>, 杉浦 直樹<sup>b</sup>, 梶原 堅太郎<sup>c</sup>  
Masahito Ueda<sup>a</sup>, Yuji Okamura<sup>a</sup>, Shota Yamamoto<sup>a</sup>, Naoki Sugiura<sup>b</sup>, Kentaro Kajiwara<sup>c</sup>

<sup>a</sup> 日本大学, <sup>b</sup> 三菱ケミカル, <sup>c</sup> (公財)高輝度光科学研究センター  
<sup>a</sup>Nihon University, <sup>b</sup>Mitsubishi Chemical Corp. <sup>c</sup>JASRI

一方向炭素繊維強化プラスチック (CFRP) の内部における炭素繊維のうねりは、繊維方向圧縮強度を低下させる要因になっている。近年開発された太径の炭素繊維を用いれば、一方向 CFRP の繊維うねりが抑制され、圧縮強度が向上すると考えられる。そこで本研究では、SPring-8 の X 線 CT によって太径炭素繊維を用いた一方向 CFRP の断層画像を取得し、断層画像から繊維うねりを求めて、通常径炭素繊維による一方向 CFRP の繊維うねりとの比較を行った。

キーワード：炭素繊維強化プラスチック，繊維うねり，X 線 CT

#### 背景と研究目的：

一方向炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は金属材料に比べて比剛性や比強度に優れるため、軽量化を目的として航空機構造部材に使用されており、今後は自動車構造への応用が期待されている。しかしながら、その優れた特性は引張特性に関してであり、圧縮強度は引張強度の約 50%程度しかない [1-3]。従って、一方向 CFRP を用いた構造設計においては、その圧縮強度が設計基準になることが多い。圧縮強度が低い原因は、繊維方向圧縮荷重による局所的なせん断不安定によってキンクバンドが形成されるためであり、炭素繊維及び母材樹脂の圧縮強度には直接的に起因しない。

一方向 CFRP の圧縮強度は、繊維のうねりによって低下することが示されている [4-5]。この繊維うねりを抑制するためには、繊維の太径化が有効であると考えられる。しかしながら、炭素繊維が直径数 $\mu\text{m}$  程度の細線であることから、太径化による繊維うねりの低減効果については不明である。そこで本課題では、太径炭素繊維を用いた一方向 CFRP を製作して、その繊維うねりの状況を SPring-8 を用いて取得することを目的とした。また、その場観察圧縮試験も行い、圧縮破壊の CT 撮影を行った。

#### 実験：

測定試料は強化材に炭素繊維，母材にエポキシ樹脂を用いた一方向 CFRP である。樹脂は同一として、炭素繊維は通常径と太径との 2 種類とした。これらの一方向プリプレグシートを、それぞれオートクレーブ法を用いて減圧環境下で加熱加圧することにより、2 種類の一方向 CFRP を成形した。成形後の一方向 CFRP は、ハンドカッターを用いて 0.5 mm 程度の幅になるように切断して測定試料とした。長さは 20 mm 程度である。

測定手法には X 線 CT を用いた。X 線は一方向 CFRP を透過し、シンチレータによって可視光に変換される。可視光に変換された X 線透過像は対物レンズで拡大し、CCD カメラを用いて記録した。得られた透過像を再構成して断層画像を取得した。試験片から検出器までの距離は 13 mm，測定に使用した X 線のエネルギーは 10 keV，検出器はビームモニタ 3 (10 倍対物レンズ) と CCD カメラを組み合わせて使用した。この場合の断層画像の画素サイズは 0.37  $\mu\text{m}$  である。

まず、一方向 CFRP を X 線照射位置に設置する。照射位置にある回転台に粘土を置き、そこに一方向 CFRP を突き刺すことで繊維方向が上下方向となるように設置した。撮影においては、試料を回転台で 180°回転させながら X 線を照射して 200 枚の透過像を取得し、これを繰り返し行った。取得した 200 枚の透過像の各セットから断層画像を再構成し取得した。

また、圧縮破壊を観察するために、この測定試料の両端にアクリル製のタブを接着したものを圧縮

試験片とした[6]。この圧縮試験片を専用の圧縮試験治具に装着して、圧縮負荷を行った。圧縮試験治具はアクリル円筒をベースとして、マイクロメータヘッドを使用して測定試料に圧縮負荷をする機構とした。まず、無負荷状態にて測定試料の撮影を行い、その後、荷重を負荷した状態で撮影を行った。更に荷重を増大させ、撮影を行った。この手順を測定試料が圧縮破壊するまで繰り返し行った。

### 結果および考察：

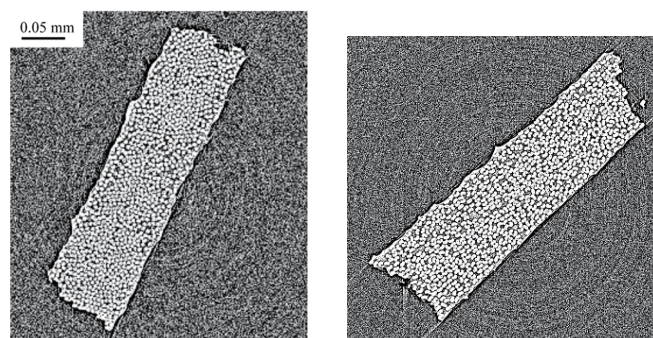
通常径と太径の炭素繊維を用いた一方向 CFRP の繊維直交方向断面の断層画像の一例を図 1(a)及び 1(b)にそれぞれ示す。いずれの試験片においても、一方向 CFRP 内部における炭素繊維部と樹脂部とを判別することができる。また、それぞれの炭素繊維の位置を判別することも可能である。産業用の X 線 CT 装置により得られる断層画像よりも、SPring-8 を用いた方が、鮮明な断層画像が得られる。また、通常径の炭素繊維は、その断面形状がほぼ円状であるが、太径の炭素繊維はキドニー形の断面形状になっている。このような断面形状についても、断層画像において判別することができる。

繊維の太径化によって繊維うねりが減少しているかを調査した。断層画像に対して、画像処理ソフトウェア (ImageJ) を用いて繊維の中心座標を取得した。この作業を繊維方向に異なる位置の断層画像で行い、繊維の中心座標を繊維方向につなげていくことにより繊維うねりを取得した。なお、断層画像の間隔は 37.3  $\mu\text{m}$  であり、合計 12 枚の断層画像を用いて繊維うねりを求めた。

一方向 CFRP 内部におけるある 1 本の繊維について、その繊維うねりを x-z 平面に投影した結果を図 2 に示す。横軸が一方向 CFRP の長手方向位置、縦軸が半径方向の位置を示す。これより 繊維径の異なる一方向 CFRP において、繊維うねりに明確な差異は得られなかった。太径の炭素繊維による一方向 CFRP において、繊維中心の取得方法などに課題があると考えられる。

### 今後の課題：

太径の炭素繊維による一方向 CFRP においては、うねりを適切に抽出するために繊維中心の取得方法について検討が必要である。また、圧縮破壊プロセスの観察では、圧縮負荷を増大させると急激に圧縮破壊 (キックバンド破壊) が生じ、破壊途中での撮影は困難であった。但し、破壊後の様子については撮影可能であったため、今後は繊維揺らぎの 3D モデルを用いて数値解析により圧縮破壊シミュレーションを行い、試験結果と比較することで破壊プロセスを検証していく予定である。



(a) 通常径炭素繊維 (b) 太径炭素繊維  
図 1 X 線 CT による一方向 CFRP の断層画像

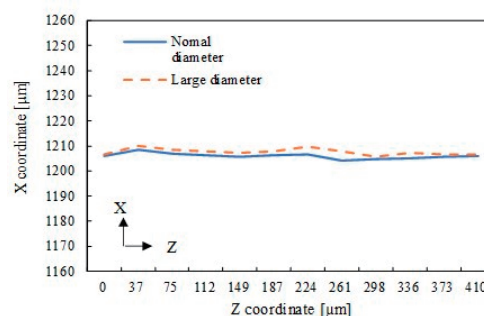


図 2 通常径と太径炭素繊維による一方向 CFRP の繊維うねり

### 参考文献：

- [1] Toray Carbon Fibers America, TORAYCA T800H, Toray Technical date sheet, No.CFA-007.
- [2] Toray Carbon Fibers America, TORAYCA T1000G, Toray Technical date sheet, No.CFA-008.
- [3] Hexcel, HexTow IM10, Product data sheet, CTA 354 FB16, (2016).
- [4] S. Pimenta, et. al., *Compos. Sci. Technol.* **69**, 956 (2009).
- [5] A. Jumahat, et. al., *Compos. Struct.* **92**, 295 (2010).
- [6] 上田政人 他, 一般課題 (産業利用分野) 課題実施報告, pp. 73-74, 2018A1580.