

## 炭素繊維強化プラスチック (CFRP) のミクروسケール不確定性を再現する三次元数値解析モデル構築とその圧縮シミュレーションによる圧縮破壊メカニズムの解明

### Development of a Three-dimensional Finite Element Model for a Unidirectional Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) with Micro-scale Uncertainty and a Study on the Compressive Failure by Means of the Numerical Simulation

上田 政人<sup>a</sup>, 高橋 拓也<sup>a</sup>, 飯塚 啓輔<sup>b</sup>, 吉村 彰記<sup>c</sup>, 杉浦 直樹<sup>d</sup>, 梶原 聖太郎<sup>e</sup>  
Masahito Ueda<sup>a</sup>, Takuya Takahashi<sup>a</sup>, Keisuke Iizuka<sup>b</sup>, Akinori Yoshimura<sup>c</sup>  
Naoki Sugiura<sup>d</sup>, Kentaro Kajiwara<sup>e</sup>

<sup>a</sup> 日本大学, <sup>b</sup> 東京工業大学, <sup>c</sup> 名古屋大学, <sup>d</sup> 三菱ケミカル(株), <sup>e</sup> (公財)高輝度光科学研究センター  
Nihon University, Tokyo Institute of Technology, Nagoya University, Mitsubishi Chemical

炭素繊維のうねりは一方向炭素繊維強化プラスチックの繊維方向圧縮強度を低下させる要因になっている。SPring-8 を用いて取得した高解像度断層画像から、ミクروسケールの不確定性を有する繊維うねりを再現した3次元モデルを構築した。その3次元数値解析モデルを用いて、有限要素法による圧縮シミュレーションを実施することにより、一方向炭素繊維強化プラスチックの圧縮破壊現象を再現した。

**キーワード：** 炭素繊維強化プラスチック, 圧縮強度, キンクバンド

#### 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、繊維方向圧縮負荷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 [4, 5]。しかしながら、炭素繊維は直径 5-7 μm 程度の細線であり、また、一方向 CFRP では非常に多くの繊維によって補強されていることから、各繊維のミクروسケールのうねり状況を取得することが難しい。

そこで本課題では、一方向 CFRP の各繊維のうねり状況を SPring-8 を用いて高解像度で取得することにより、圧縮破壊の起点と進展について調査することを目的とした。繊維方向圧縮負荷中に一方向 CFRP の内部撮影を行い、外部のみならず内部における破壊現象を明らかにする。また、取得した断層画像をもとにミクروسケールでの不確定性、すなわちそれぞれの炭素繊維のうねりを考慮に入れた 3 次元モデルを構築して、数値シミュレーションによって圧縮破壊現象を再現することを目的とする。

#### 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 の円柱である。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。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荷重を負荷する機構とした。測定試料の寸法は、直径約 0.2 mm、全長約 15 mm である。まず、無負荷状態にて測定試料の撮影を行った。次に、荷重を負荷した状態で撮影を行った。その後、荷重を少しずつ増大させて撮影を行った。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：

取得した一方向 CFRP の繊維方向断層画像の一例を Fig. 1 に示す。これより一方向 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、圧縮荷重を負荷してキンクバンド破壊した後の断層画像の例を Fig. 2 に示す。圧縮荷重に伴い一方向 CFRP の一部が折れ曲がるキンクバンド破壊となっており、また、キンクバンド破壊に伴う繊維と樹脂との界面はく離も断面像より観察できる。

各断層画像において繊維中心位置を求め、その繊維中心位置を長手方向に繋ぎ合わせ、その繊維中心位置に沿って炭素繊維の断面形状(直径 5  $\mu\text{m}$  の円形断面)を押し出すことで、炭素繊維の 3 次元モデルを構築した (Fig. 3)。3 次元繊維モデルの空隙部に樹脂をモデル化することによって、円柱状の一方向 CFRP の 3 次元モデルを構築した。この 3 次元数値解析モデルに繊維方向圧縮荷重を負荷する数値シミュレーションを実施した。その結果、実験にて生じるキンクバンド破壊が再現された。数値シミュレーションの結果より、キンクバンドに至る破壊プロセスが明らかとなった。まず、一方向 CFRP に繊維方向圧縮荷重を負荷していくと、一方向 CFRP 内部では繊維のうねりに起因して樹脂のひずみが局所的に増大する。樹脂が降伏すると繊維を支える能力が低下するため、繊維の曲げ変形が増大する。樹脂の降伏領域の拡大に伴い、複数の繊維が横倒れを生じることによって、キンクバンドが形成されていく。

### 今後の課題：

本モデル化及び数値シミュレーションの妥当性を評価する必要がある。撮影した複数の測定試料についてモデル化を行い、同様の数値シミュレーションを実施する。

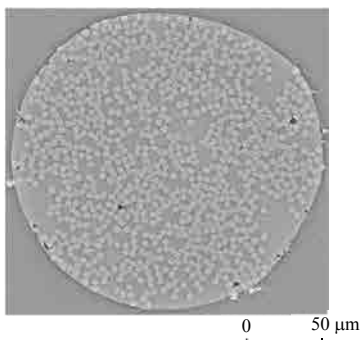
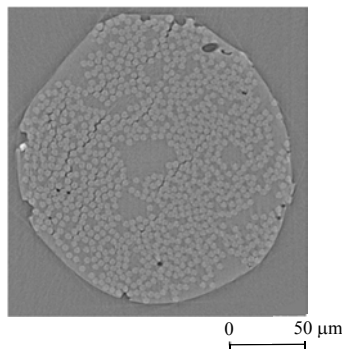
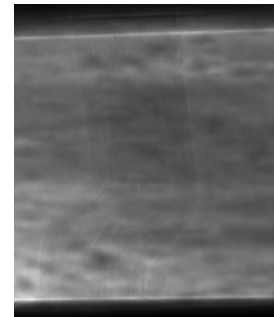


Fig. 1 X-ray CT image of an intact unidirectional CFRP



(a) Cross-sectional view



(b) Side view

Fig. 2 X-ray CT images of a damaged unidirectional CFRP

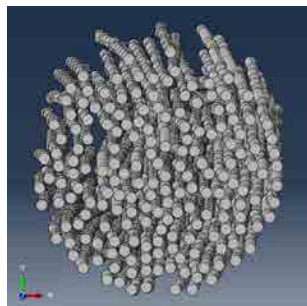


Fig. 3 Constructed 3D model of the unidirectional CFRP

### 参考文献：

- [1] Toray Carbon Fibers America, TORAYCA T800H, Toray Technical data sheet, No.CFA-007.
- [2] Toray Carbon Fibers America, TORAYCA T1000G, Toray Technical data 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).