

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 2 日現在

機関番号：32665

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820014

研究課題名(和文) X線CTによる一方向CFRPの圧縮破壊メカニズムの解明と圧縮破壊シミュレーション

研究課題名(英文) Compressive failure mechanism of a unidirectional carbon fiber reinforced plastic by means of X-ray computed tomography and the numerical simulation of longitudinal compression

研究代表者

上田 政人 (UEDA, Masahito)

日本大学・理工学部・准教授

研究者番号：80434116

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：X線CT装置を用いて一方向炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の内部観察を行った。この断層画像よりデジタル画像相関法を用いて、それぞれの繊維が有するうねりを再現した一方向CFRPの3次元有限要素法モデルを構築した。このモデルを用いて圧縮荷重を負荷する数値シミュレーションを実施した結果、炭素繊維のランダムなうねりによって、圧縮負荷に伴い一方向CFRPの内部では局所的に曲げ及びねじり変形が生じることを明らかにした。この局所的な曲げ及びねじり変形がキンクバンド破壊の起点となる可能性を示した。また、成形法に依存した繊維うねりに起因する弾性率の低減を定量的に評価することができることも示した。

研究成果の概要(英文)：A unidirectional carbon fiber reinforced plastic (CFRP) was scanned using an X-ray computed tomography (CT) system. Three-dimensional finite element model of the unidirectional CFRP was developed from the X-ray CT images by means of digital image correlation (DIC) method. The constructed three-dimensional model replicated actual random waviness of each fiber. Numerical simulation on axial compression of the constructed three-dimensional model was performed. Simulation results showed local bending and twisting in the unidirectional CFRP which could cause fiber kinking failure. It was also shown that degradation of elastic property due to fiber waviness could be evaluate quantitatively by the proposed method.

研究分野：材料力学

キーワード：繊維強化プラスチック CFRP 圧縮強度 キンクバンド X線CT デジタル画像相関法

1. 研究開始当初の背景

(1) 一方向炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は金属材料と比較して軽量かつ高剛性、高強度である。そのために軽量化を目的として輸送機器等において構造材料を金属から CFRP へ材料置換する取り組みが進められている。しかしながら、一方向炭素繊維強化プラスチックの圧縮強度は引張強度と比較して著しく低いという特徴を有している。

図1に、一方向 CFRP の引張強度と圧縮強度との比較を示す<sup>1)</sup>。一方向 CFRP の強化材である炭素繊維は高強度化が進んでおり、それに伴い一方向 CFRP の引張強度は向上しているが、圧縮強度については向上していない。航空機構造材料として使用されるハイグレード炭素繊維の場合、一方向 CFRP の圧縮強度は引張強度の 50~60 % 程度に留まっている。曲げを受ける梁構造などに CFRP を使用する場合には、圧縮側から破壊が生じるため、圧縮強度が設計基準になる。今後、炭素繊維の材料開発が進められて CFRP の引張強度が向上しても、圧縮強度の低さが構造軽量化を阻害する大きな要因となると考えられる。

(2) 一方向 CFRP の圧縮破壊は母材樹脂中の炭素繊維の微小座屈に起因したキンクバンド破壊であるため、一方向 CFRP の圧縮強度は材料本来の圧縮強度ではなく、一方向 CFRP の内部における微視的な構造不安定によって決定されている。プリプレグシートを用いて成形した一方向 CFRP の繊維配向角にはおおよそ  $\pm 3^\circ$  の初期不整があり<sup>2)</sup>、この炭素繊維の初期不整が圧縮強度に影響を与えていると考えられている。しかしながら、それぞれの繊維がランダムなうねりを有する繊維配列の場合に、どの部分からどのようにキンクバンドが形成されて破壊に至るのかについては明らかになっていない。また、キンクバンドの起点が CFRP の内部にあるか、または表面にあるかも不明である。なお、一方向 CFRP の内部においてある程度まとまった繊維群が一様にうねりを有する場合(成形不良による欠陥)では、その部分からうね

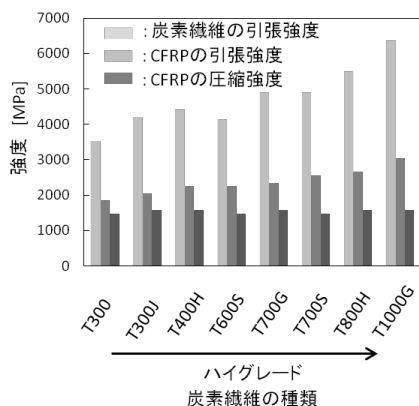


図1 一方向 CFRP の引張強度と圧縮強度との比較

りが増大して破壊に至ると考えられるが、そのような欠陥を有する場合には圧縮強度は更に低下する<sup>3)</sup>。

近年では、X線コンピュータ断層(CT)撮影装置によって、CFRP 内部の繊維配列状況が測定可能となりつつある<sup>4)</sup>。そのため、一方向 CFRP の圧縮負荷下において、その内部におけるキンクバンドの発生と進展の連続的な観察や、その断層撮影画像から実際の繊維配列を模擬した三次元有限要素法モデルを構築することができると考えられる。このようにして構築した三次元有限要素法モデルを用い、圧縮シミュレーションを実施することによって、キンクバンドがどのようにして形成されて最終破壊に至り、一方向 CFRP の圧縮強度を決定しているのかを明らかにしていくことができるものと考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、X線 CT 装置を用いて一方向 CFRP の断層撮影を行い、実物の一方向 CFRP と同一のランダムなうねりを有する三次元有限要素法モデルを構築する。その解析モデルを用いて数値シミュレーションを実施することによって、キンクバンドの発生原因について検討を行うことを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 一方向 CFRP の断層画像を撮影するための X 線 CT 装置には Xradia MicroXCT 200 (Carl Zeiss AG) を使用した。撮影視野は 0.85 mm×0.85 mm であり、分解能は 0.794 μm である。

(2) 断層画像を撮影するための一方向 CFRP の小型試験片を製作した。試験片形状は上述の撮影視野に入る寸法以下にする必要がある。

材料には一方向炭素繊維プリプレグシート (T800S / #2592、東レ) を用いた。繊維径は 5 μm である。このプリプレグシートを約 0.1 mm 程度の幅で短冊状に切り出し、恒温器に吊るした状態で昇温して硬化させた。硬化後の一方向 CFRP は表面張力により円柱状になり、その直径は約 0.25 mm であった。この円柱状の一方向 CFRP の両端部に、円筒状のタブを接着して一方向 CFRP 試験片とした。図2に製作した一方向 CFRP の小型試験片を示す。

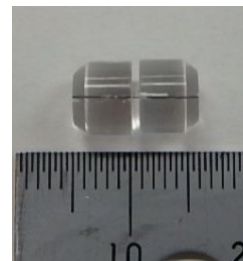


図2 一方向 CFRP の小型試験片

なお、一方向 CFRP 試験片の評点間距離は、圧縮試験において全体座屈を生じないように設定する必要がある。また、X 線 CT 装置の撮影視野の制約から、本研究では 0.7 mm とした。

(3) 一方向 CFRP 小型試験片の圧縮試験を X 線 CT 装置内で実施するため、専用の圧縮試験治具を製作した。製作した圧縮試験治具を図 3 に示す。圧縮負荷における一方向 CFRP 試験片の面外方向への変形を拘束するホルダーとなるアクリル円筒の一端に、カップリングを介してマイクロメータヘッドを取り付けた。アクリル円筒に一方向 CFRP 試験片を挿入して、マイクロメータヘッドにより圧縮荷重を負荷する機構とした。

#### 4. 研究成果

(1) 圧縮試験治具に装着した状態の一方向 CFRP 小型試験片を X 線 CT 装置内に設置して、一方向 CFRP の内部撮影を行った。得られた断層画像の内の一枚を図 4 に示す。炭素



図 3 一方向 CFRP 小型試験片のための専用圧縮治具

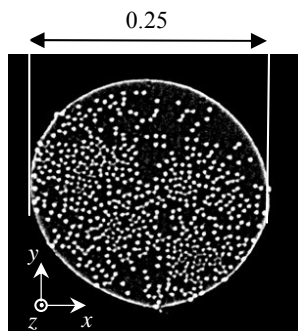


図 4 一方向 CFRP 小型試験片の断層画像 (2 値化処理後)

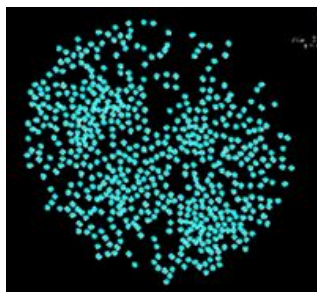


図 5 繊維位置の同定結果

繊維はエポキシ樹脂よりも X 線の吸収率が高く、断層画像では繊維が白色で、樹脂が黒色で表される。なお、図 4 の画像は 2 値化処理を施した後の画像である。

(2) 断層画像において炭素繊維とエポキシ樹脂とは濃淡の差異で表される。そこで X 線 CT 画像の輝度値に任意の閾値を決定して二分すれば、炭素繊維の領域とエポキシ樹脂の領域とを分離することが可能であると考えられる。

まず、断層画像から RGB 値とその位置情報を取り出した。その後、RGB 値を輝度値に変換して、輝度値に閾値を設定して繊維と樹脂とを判定した。この手順により断層画像より繊維位置を取得して再構築した画像を図 5 に示す。本手法による、実際の繊維本数と同定した繊維本数との誤差は 2 %程度であった。

(3) 繊維位置を同定した多数の断層画像を用いて、実際の一方向 CFRP と同じ繊維うねりを有する三次元モデルの構築を行った。まず、デジタル画像相関法 (DIC 法) を用いて繊維方向に沿う各繊維の移動量 (繊維うねり) を求めた。断層画像において、繊維領域は複数ピクセルで構成されているが、1 つの繊維から 1 ピクセルのみを抽出して、そのピクセルの位置を繊維位置とした。DIC 法のサブセットには、繊維 1 本が必ず含まれるように  $12 \times 12$  ピクセルとした。DIC 法においてサブセット中心の移動量が取得できるから、断層画像におけるある繊維を含むサブセット中心の移動量を繊維方向に沿って求めていく作業を繰り返し行うことにより、繊維の座標位置を取得して、各繊維のうねりを求めることができる。以上の方法により構築した一方向 CFRP の内部におけるそれぞれの炭素繊維のランダムなうねりを再現した三次元モデルを構築した結果を図 6 に示す。なお、図 6 では、繊維の配列状況を確認しやすくするために、樹脂部を省略している。

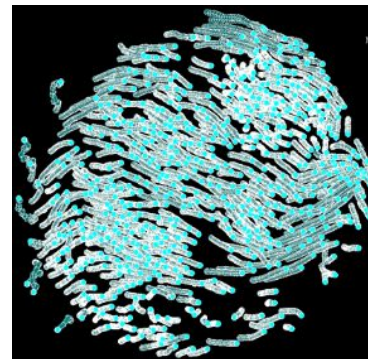


図 6 一方向 CFRP の内部におけるそれぞれの炭素繊維のランダムなうねりを再現した三次元モデル

(4) 構築した三次元モデルから、ある1本の炭素繊維を取り出して、 $x$ - $z$ 断面及び $y$ - $z$ 断面に投影したうねりの形状を図7に示す。これより繊維方向に沿って周期と振幅とが一定ではないランダムなうねりが生じていることが確認できる。

構築した三次元モデルのある断面における繊維の初期不整角の $x$ 方向及び $y$ 方向成分の分布を図8に示す。炭素繊維は $x$ 方向に平均 $1.29^\circ$ 、 $y$ 方向に平均 $-0.48^\circ$ の初期不整角を有していた。但し、これらの結果は本成形条件に基づく結果であり、成形方法や繊維及び母材の種類が異なる場合にはこれらの値も異なるが、本手法を適用することにより、同様にして求めることが可能である。

(5) 構築した三次元モデルを用いて、一方向CFRPの圧縮シミュレーションを実施した。図6に示す全繊維からなる一方向CFRPのモ

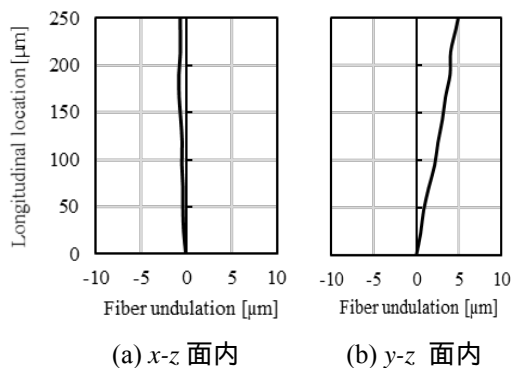
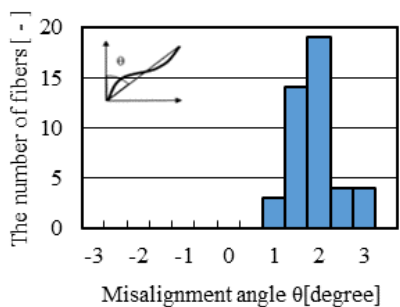
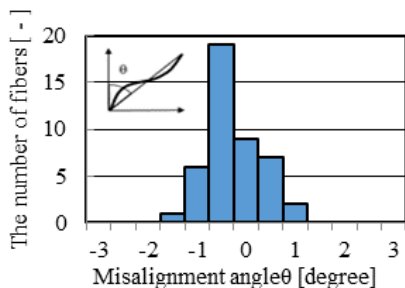


図7 一方向CFRPの内部におけるある繊維のうねり



(a)  $x$ 方向成分



(b)  $y$ 方向成分

図8 繊維の初期不整角分布

デルを要素分割する場合、節点数が膨大となるために計算が困難であるため、この中から一部分の炭素繊維を取り出した(図9)。このモデルの全繊維を覆うように樹脂部を追加して、図10に示す解析モデルとした。なお、図9において赤で示した繊維は他の繊維と重なった状態となっていた。これは、実際の繊維の中心位置と同一位置との誤差が原因である。断層画像においてアーティファクトなどによる不鮮明領域があるためであるが、X線CT装置の性能向上に伴い将来的に改善されていくものと考えられる。ここでは、この繊維同士が干渉している場合に、その片方(図9の赤色で示した炭素繊維)を削除することにした。

解析では、炭素繊維及びエポキシ樹脂は線形弾性体とし、単純圧縮となる境界条件を与えた。

数値解析により得られた変形形状及び端面における応力分布を図11に示す。圧縮負荷によって、解析モデルに曲げ変形及びねじれ変形が生じている様子が確認された。すなわち、一方向CFRPの内部での繊維のうねりによって局所的な曲げ及びねじれが生じており、このことがキンクバンドの発生に寄与しているのではないかと考えられる。

なお、繊維配置は同じであるが繊維うねりを無くしたモデルを製作して同様に数値解析を実施した場合には、負荷方向にのみ圧縮変形して曲げやねじり変形は生じない。このモデルと繊維のうねりを有するモデルとのヤング率を比較すると、理論値(前者のモデルとほぼ一致)と比較して、繊維のうねりを有するモデルではヤング率が7%ほど低下していることが明らかとなった。本手法によって、ランダムな繊維うねりを有する場合の一方

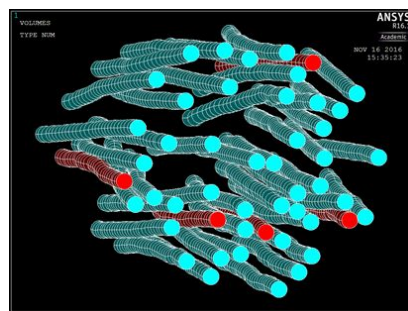


図9 抽出した炭素繊維

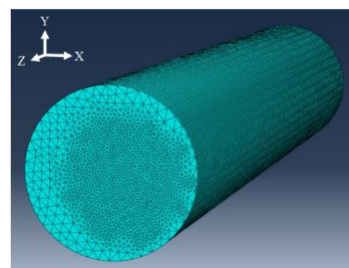


図10 それぞれの炭素繊維がランダムなうねりを有する一方向CFRPの解析モデル

向 CFRP の剛性低下も定量的に求めることが可能であることを示した。

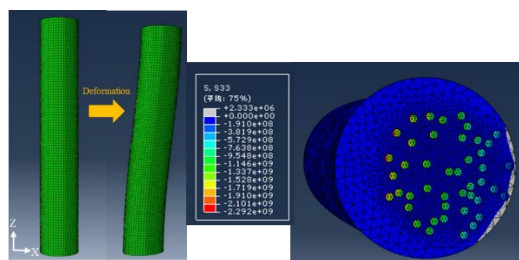


図 11 解析結果（繊維うねりによる一方向 CFRP の曲げ及びびねじれ変形）

#### < 引用文献 >

- 1) Toray Technical data sheet, No. CFA-001 (TORAYCA T300) ~ No. CFA-008 (TORAYCA T1000G).
- 2) 澤岡竜治ほか, CFRP/CFRTP の加工技術と性能評価,サイエンス & テクノロジー, 2012, pp. 49-62.
- 3) H.M. Hsiao, I.M. Daniel, Composite Science and Technology, Vol. 56, 1996, pp. 581-593.
- 4) A.E. Scott, M. Mavrogordato, P. Wright, I. Sinclair, S.M. Spearing, In situ fibre fracture measurement in carbon-epoxy laminates using high resolution computed tomography, Composite Science and Technology, Vol. 71, 2011, pp. 1471-1477.

#### 5 . 主な発表論文等

##### 〔雑誌論文〕(計 1 件)

Masahito Ueda, Kento Mimura, Tae-Kun Jeong, In situ observation of kink-band formation in a unidirectional carbon fiber reinforced plastic by X-ray computed tomography imaging, Advanced Composite Materials, 査読有, Vol. 25, No.1, 2016, pp. 31-43.  
<http://dx.doi.org/10.1080/09243046.2014.973173>

##### 〔学会発表〕(計 6 件)

Keisuke Iizuka, Masahito Ueda, Takuya Takahashi, Akinori Yoshimura, Masahiro Nakayama, Numerical simulation for longitudinal compression of a unidirectional carbon fiber reinforced plastic constructed by X-ray computed tomography, 2017 International Conference on Materials and Processing, 2017 年 6 月 4 ~ 6 月 8 日, カリフォルニア (アメリカ).

高橋拓也, 上田政人, 飯塚啓輔, 吉村彰記, 中山真広, X 線 CT を用いた一方向炭素繊維強化プラスチックの三次元有限要素モデル構築と圧縮シミュレーション, 第 8 回日本複合材料会議, 2017 年 3 月 16

日 ~ 3 月 16 日, 東京大学(東京都文京区) 飯塚啓輔, 上田政人, 吉村彰記, X 線コンピュータ断層撮影法を用いた一方向炭素繊維強化プラスチック内部の繊維位置の同定, 第 41 回複合材料シンポジウム, 2016 年 9 月 15 日 ~ 9 月 15 日, 高知工科大学 (高知県高知市)

飯塚啓輔, 上田政人, 三村健人, X 線コンピュータ断層撮影画像を用いた圧縮負荷下の一方向炭素繊維強化プラスチックの 3 次元有限要素モデルの構築, 第 7 回日本複合材料会議, 2016 年 3 月 16 日 ~ 3 月 18 日, 京都テルサ (京都府京都市).

Masahito Ueda, Keisuke Iizuka, Akinori Yoshimura, X-Ray computed tomography of a unidirectional carbon fiber reinforced plastic during longitudinal compression, 14th Japan International SAMPE symposium and exhibition, 2015 年 12 月 6 日 ~ 12 月 9 日, しいのき迎賓館 (石川県金沢市).

Masahito Ueda, Kento Mimura, Akinori Yoshimura, Observation of kink-band formation in a unidirectional carbon fiber reinforced plastic during longitudinal compression by means of X-ray computed tomography, The 14th Japanese-European Symposium on Composite Materials, 2015 年 9 月 16 ~ 9 月 18 日, 金沢工業大学 (石川県野々市市).

#### 〔その他〕

ホームページ等

<http://www.mech.cst.nihon-u.ac.jp/studies/ueda/>

#### 6 . 研究組織

##### (1) 研究代表者

上田 政人 (UEDA, Masahito)  
日本大学・理工学部・准教授  
研究者番号 : 80434116

##### (2) 研究協力者

三村 健人 (MIMURA, Kento)  
秋山 真範 (AKIYAMA, Masanori)