

## DIC 解析によるらせん積層構造を有する CFRP の曲げ変形挙動の検討

Examination of bending deformation behaviors of CFRP with helicoidally laminated structure by DIC analysis

北海道大学大学院工学院  
北海道大学大学院工学研究院  
北海道大学大学院工学研究院

○ 学生員 遠藤 祐希 (Yuki Endo)  
正 員 鄧 朋儒 (Pengru Deng)  
正 員 松本 高志 (Takashi Matsumoto)

## 1. まえがき

炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastics、以下 CFRP) は、炭素繊維と熱硬化性樹脂の複合材料である。鉄やアルミなどの金属材料と比べて、低密度で、比強度、比剛性、耐腐食性に優れているが、局部的に起こる破壊と脆性的な終局挙動が留意点とされている。

一方で、生体にも積層繊維補強構造が見られている。例えば、シャコの捕脚はキチン繊維が基質材料を補強し、その繊維方向が一定の配向角度差を保ちつつ積層されるらせん積層をなしている。これにより捕脚による打撃反力に耐えうる強靱な性質が付与されていると考えられている。

これまでに、生体を模倣したらせん積層は、直交積層に比べて特異な損傷破壊形態を示し、最大曲げ荷重後の荷重降下が小さく、脆性破壊が軽減されることが実験的に確認された<sup>1),2)</sup>。また、らせん積層の損傷と破壊に至るまでの変形機構を明らかにするために、曲げ変形を面的にとらえることのできるデジタル画像相関法 (Digital Image Correlation、以下 DIC) による検討も行ってきた<sup>3)</sup>。

しかしながら、既往の研究<sup>3)</sup>では、サブセットの剛体移動に基づく DIC 解析を用いており、曲げ変形挙動の結果と考察に保留点があった。

そこで、本研究では、サブセットの回転と変形も考慮した DIC 解析を新たに用いることで、らせん積層の曲げ変形機構の解明をさらに検討することとした。

直交積層、疑似等方性積層、らせん積層の3種類の CFRP 長方形板を製作し、四点曲げ載荷実験を行った。DIC 解析により算出された、各積層構造の直ひずみ分布及びせん断ひずみ分布を比較、検討することで、らせん積層の変形機構の解明を試みた。

## 2. 四点曲げ載荷実験

## 2.1 供試体

供試体は、プリプレグを積層することで製作する。プリプレグとは、炭素繊維基材に、着色剤や充填材等を適正な割合で混合した樹脂を含浸させた、硬化前のシート状の強化プラスチック成形材料である。本研究は、一方方向に繊維が並んでいる三菱レイヨン製の UD プリプレグを使用した。プリプレグ目付は  $188.9(\text{g}/\text{m}^2)$ 、繊維目付は  $124.8(\text{g}/\text{m}^2)$ 、繊維含有率は  $33.9(\text{wt}\%)$  である。各供試体の積層構成を表 1 に示す。配向角度は、繊維方向が供試体の長辺方向に平行な層を  $0^\circ$  の層とし、それを基準に、反時計回りに繊維がなす角度と定義する。積層構成

の [ ] 内の数字は配向角度、下付き文字は [ ] 内の積層を繰り返した回数を示す。積層構成によって名称を "CP、QI、SH9" とする。積層イメージを図 1 に示す。

供試体はオートクレーブ法を用いて製作した。積層は層間に気泡が入らないよう圧力をかけながら行われ、積層したプリプレグを、穴あきリリースフィルム、ブリーザーファブリック、バキュームバックの順に覆ったのちにシーラントテープで上下面と真空引き口の真空ホースを密着させた。次にその真空パックを上下 2 枚ずつ厚さ 2mm のステンレス板で挟み、加圧器具で全体を加圧した。加圧したプリプレグを電気炉に入れ室温から  $80$  度まで毎分  $1$  度ずつ温度を上げて  $1$  時間維持、その後さらに  $130$  度まで毎分  $1$  度ずつ温度を上げて  $2$  時間維持することで CFRP を成形した。成形した CFRP を長辺  $180\text{mm}$ 、短辺  $40\text{mm}$ 、厚さ  $5\text{mm}$  に裁断した。本研究では、各積層で 3 体ずつ製作した。供試体識別は "L、C、R" とし、供試体の名称は、(積層略称)-(供試体識別)で表す。

## 2.2 載荷条件

オートグラフ (SHIMADZU AG-1240kN) を用いて載荷を行った。載荷方法は四点曲げ載荷であり、載荷条件を図 2 に示す。供試体はそれぞれ両短辺側の単純支持とし、支間長  $150\text{mm}$ 、せん断支間長  $50\text{mm}$ 、曲げ支間長  $50\text{mm}$  となるように設置した。変位速度毎分  $2\text{mm}$  の変位制御

表 1 積層構成

略称	積層名称		枚数
	積層構成		
CP	Cross Ply	直交積層	41
	[0/90] <sub>20</sub> /0		
QI	Quasi-isotropic	疑似等方性積層	41
	[0/45/90/135] <sub>10</sub> /0		
SH9	Single Helicoidally-9	らせん積層	41
	[0/9/18/27/36/45/54/63/72/81/90/99/108/117/126/135/144/153/162/171] <sub>2</sub> /0		

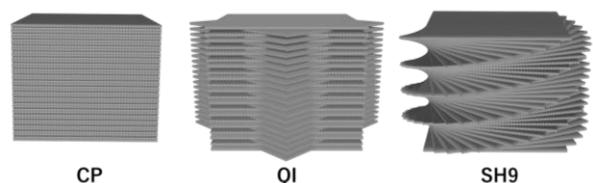


図 1 積層イメージ

の下、荷重及び変位の計測と記録を行った。荷重開始から荷重降下が生じるまで、変位約 1mm 毎に荷重を停止し、側面の画像撮影を行った。

2.3 荷重変位曲線

図3に四点曲げ荷重実験で得られた荷重変位曲線を示す。最大荷重後の平均荷重降下は、CPが2.25kN、QIが2.76kN、SH9が1.32kNである。既往の研究<sup>1)2)</sup>同様、SH9の最大荷重後の荷重降下はCPやQIに比べて小さくなることを確認された。特に、SH9-Lは変位8.84mm時点で最大荷重3.49kN、SH9-Cは変位8.94mm時点で最大荷重3.49kN、SH9-Rは変位8.47mm時点で最大荷重3.56kNとなった。

3. DIC解析

3.1 画像撮影

画像撮影にはNikonのデジタルカメラD3100を使用した。画素数は4608×3072ピクセル(約1400万画素)である。荷重前に撮影を行い、荷重開始後に変位約1mmごとに荷重を停止し画像撮影を行った。表2に撮影範囲を示す。CPはいずれの供試体でも撮影範囲は曲げ支間であるが、QI及びSH9は左側せん断支間、曲げ支間、右側のせん断支間のそれぞれで撮影を行った。また、供試体の撮影表面にはDIC解析のためにラメスプレーによりランダムパターンを付与している。

3.2 解析手法

解析には、オープンソースの2Dデジタル画像関連法のMatlabソフトウェアであるNcorrを使用した<sup>4)</sup>。Ncorrでは、変形前の画像にサブセットと呼ばれる領域を定義し、変形後のサブセットを輝度分布の相関で追跡し、変位計測を行う。Ncorrにおいてサブセットは円形状であり、Subset radiusは変位計測におけるサブセットの半径、Strain radiusはひずみ計算における変位分布の対象半径、Subset spacingは隣接サブセット同士の距離である。本研究ではSubset radiusを28ピクセル、Strain radiusを15ピクセル、Subset spacingを10ピクセルに設定した。

4. 解析結果

DIC解析はSH9の荷重降下前の撮影画像に対して行った。いずれのSH9も変位8mmから9mmの間で最大荷重をとった。撮影は変位約1mmごとに行われたので、ここでは、主に最大荷重直前である変位8mm時点での解析結果を述べる。また、SH9との比較として、CP及びQIも同様に変位8mm時点でのDIC解析を行った。CPはCP-Cの結果を述べる。まず、解析により水平方向変位と鉛直方向変位を求め、そこから各ひずみを算出した。なお、水平方向をX方向、鉛直方向をY方向と定義する(図2)。これより、供試体長軸方向であるX方向直ひずみ分布、厚さ方向であるY方向直ひずみ分布、XY面内せん断ひずみ分布について述べる。

4.1 X方向直ひずみ分布

図4に曲げ支間内、左側せん断支間内、右側せん断支間内におけるX方向直ひずみ分布を示す。カラースケールは±8000μの範囲に統一した。

曲げ支間内では、いずれの積層構成でも上側で圧縮ひずみが最大、下側で引張ひずみが最大となっており、X方向に平行に分布している。このような分布は概ね梁理論に一致する。しかしながら、積層構成により引張ひずみ、圧縮ひずみの最大値が異なる。CPは上面のひずみが約-7000μ、下面のひずみが約3500μであり、中立軸

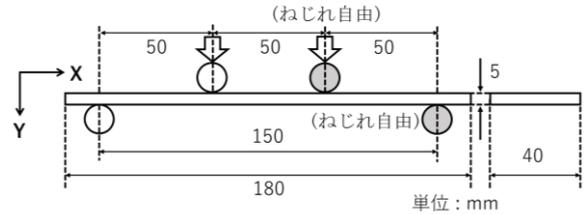


図2 供試体寸法と荷重条件

表2 撮影範囲

略称	供試体識別	撮影範囲
CP	L, C, R	曲げ支間
QI SH9	L	せん断支間(左)
	C	曲げ支間
	R	せん断支間(右)

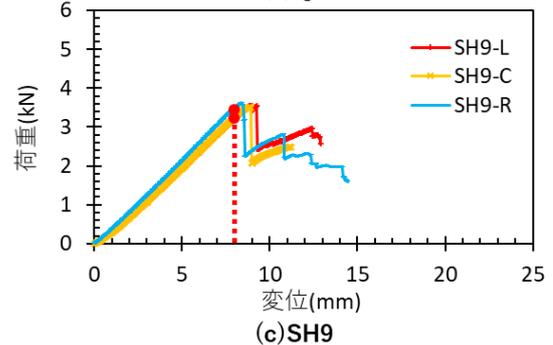
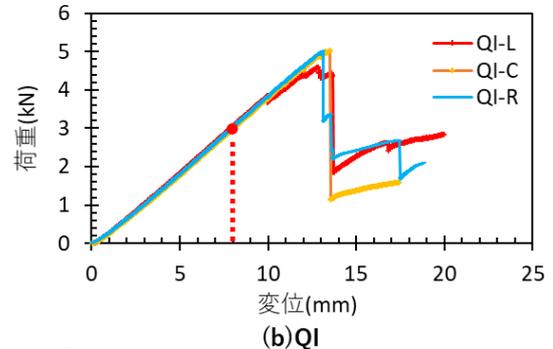
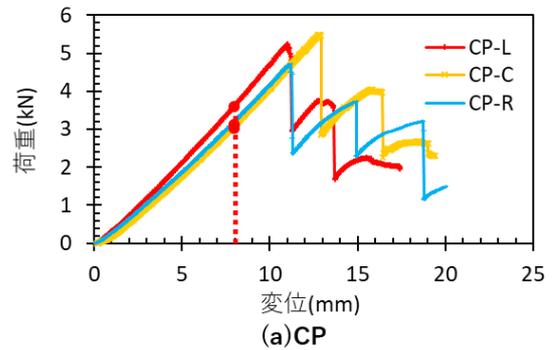


図3 荷重変位曲線

は中央よりやや下側に位置する。QI は上面のひずみが約-6000 $\mu$ 、下面のひずみが約 5500 $\mu$ であり、中立軸はほぼ中央に位置する。SH9 は上面のひずみが約-5500 $\mu$ 、下面のひずみが約 6500 $\mu$ であり、中立軸は中央より僅かながら上側に位置する。配向角度差が小さくなるにつれ、供試体上側での圧縮ひずみが小さくなり、供試体下側での引張ひずみの大きさが大きくなり、中立軸は、これに伴い上側に推移している。

せん断支間では、QI と SH9 いずれも、荷重点から中央までは、曲げ支間同様に上面で最大の圧縮ひずみ、下面で最大の引張ひずみを取り、X 方向に平行に分布している。また、中央から支点まで最大 2000 $\mu$ 程度の引張ひずみが生じている。

#### 4.2 Y 方向直ひずみ分布

図 5 に曲げ支間内、左側せん断支間内、右側せん断支間内における Y 方向直ひずみ分布を示す。カラースケールは $\pm 8000\mu$ の範囲に統一した。

曲げ支間において、CP と QI は上面で引張ひずみが最大、下面で圧縮ひずみが最大となるように平行に分布している。ただし、引張ひずみが生じているのは上面側のみなので、Y 方向直ひずみ分布が 0 をとるのは中央より上側であり、全体としては圧縮ひずみが生じている。CP の引張ひずみの最大値は 5000 $\mu$ 、圧縮ひずみの最大値は-6800 $\mu$ であり、QI の引張ひずみの最大値は 8500 $\mu$ 、圧縮ひずみの最大値は-7500 $\mu$ である。一方で、SH9 は全体的に-1000 $\mu$ から-2000 $\mu$ 程度の圧縮ひずみが生じており、CP や QI のような規則的な分布ではない。全体として、SH9 は CP や QI に比べて圧縮ひずみの大きさが小さいことから、SH9 は厚さ方向への潰れが緩和されていると考えられる。

せん断支間では、QI は X 方向直ひずみ分布と同様、

荷重点からせん断支間の中央までは曲げ支間と同様の分布を示す。一方で、SH9-L は左側荷重点付近の圧縮面及び引張面で 10000 $\mu$ 程度の局所的な引張ひずみ、SH9-R は右側荷重点下で-7000 $\mu$ 程度の局所的な圧縮ひずみ、荷重点と支点の中央下側で-5000 $\mu$ 程度の局所的な圧縮ひずみが生じている。図 6 に、変位 7mm 時点での左側せん断支間内における SH9-L と右側せん断支間内における SH9-R の Y 方向直ひずみ分布を示す。左側せん断支間内において、変位 8mm 時点で生じている荷重点下側での局所的な引張ひずみは、変位 7mm 時点では確認されず、変位 7mm から変位 8mm までで局所的に発生したと考えられる。また、その他の局所的な引張ひずみ、圧縮ひずみは変位 7mm 時点でも生じており、荷重時より局所的に応力が集中しており、荷重が進むにつれ徐々にひずみの大きさが大きくなっていると考えられる。

#### 4.3 XY 面内せん断ひずみ分布

図 7 に曲げ支間内、左側せん断支間内、右側せん断支間内における XY 面内せん断ひずみ分布を示す。カラースケールは $\pm 10000\mu$ の範囲に統一した。

曲げ支間において、CP はせん断ひずみがほぼ生じておらず、QI は全体的に-1000 $\mu$ から-2000 $\mu$ 程度のせん断ひずみが生じている。一方で、SH9 は圧縮側で最大の負のせん断ひずみ、引張側で最大の正のせん断ひずみが生じており、X 方向に等高線が平行に分布している。

左側のせん断支間において、QI-L は全体的に 2000 $\mu$ から 3000 $\mu$ 程度の正のせん断ひずみが生じており、右側のせん断支間では、QI-R は全体的に-2000 $\mu$ から-3000 $\mu$ 程度の負のせん断ひずみが生じている。このようなせん断ひずみ分布は梁理論に一致する。一方で、左側せん断支間における SH9-L は、中央より下側で最大 10000 $\mu$ 程度の正のせん断ひずみが生じており、右側せん断支間

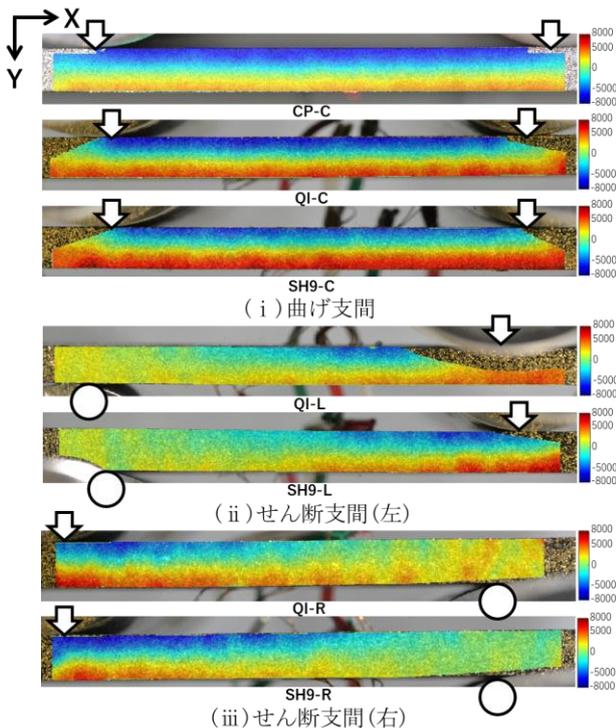


図 4 X 方向直ひずみ分布

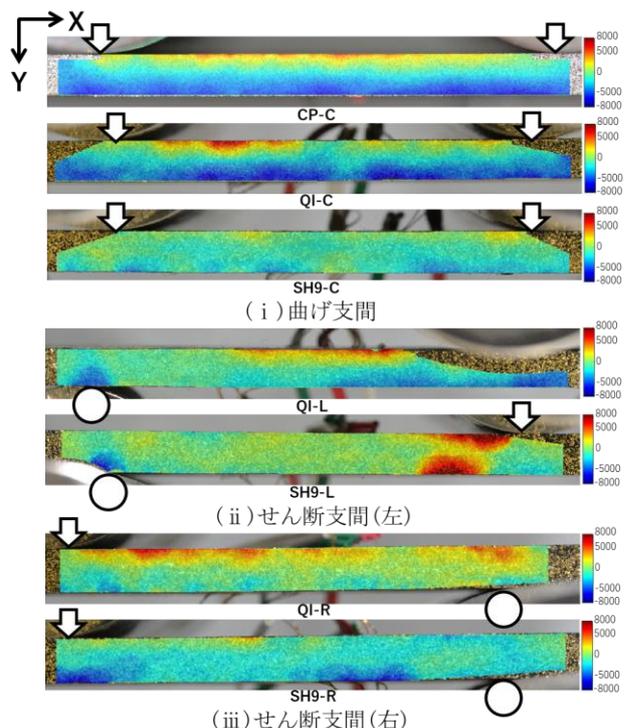


図 5 Y 方向直ひずみ分布

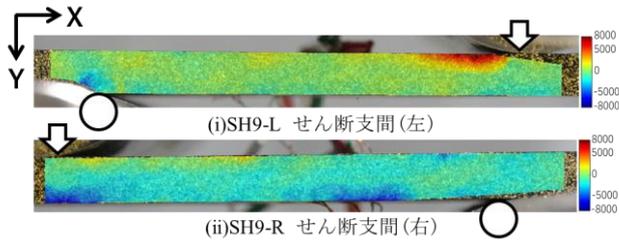


図6 Y方向直ひずみ分布(変位7mm時点)

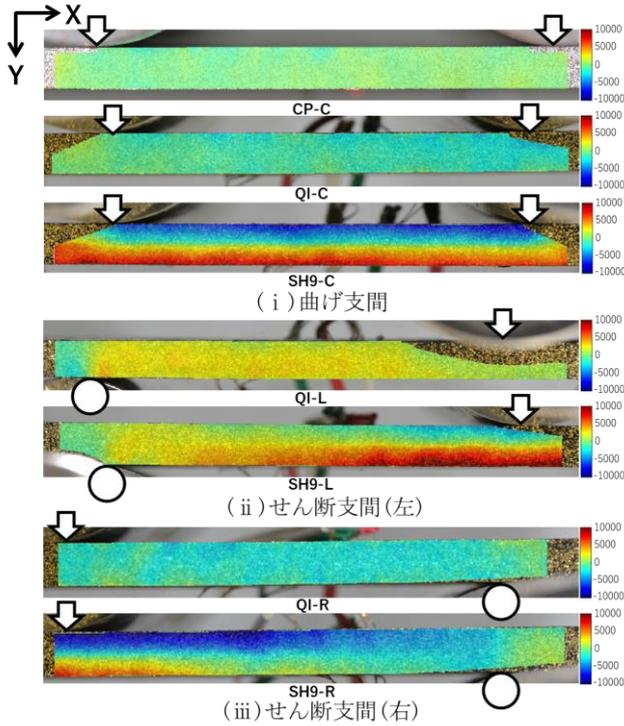


図7 XY面内せん断ひずみ分布

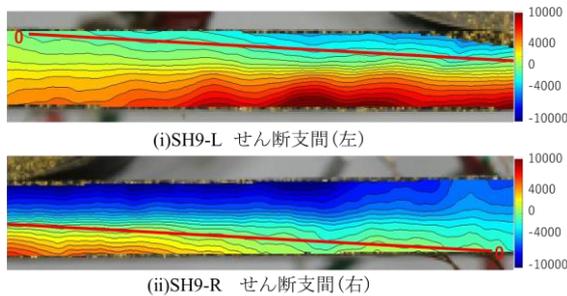


図8 XY面内せん断ひずみ分布拡大図とせん断ひずみ0位置(赤線)

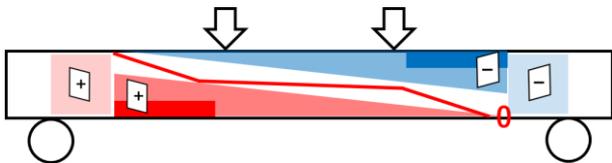


図9 せん断ひずみ分布イメージ図

における SH9-R は中央より上側で最大 $-10000\mu$ 程度の負のせん断ひずみが生じている。図8に SH9-L 及び SH9-R の XY 面内せん断ひずみ分布の拡大図を示す。左

側せん断支間では、支点と荷点の中央圧縮側から荷点の厚さ方向の中央位置まで斜めにせん断ひずみが0をとる。また、右側せん断支間では、荷点の厚さ方向中央位置から、支点と荷点の中央引張側まで斜めにせん断ひずみが0をとる。

図9に供試体側面全体のせん断ひずみ分布のイメージ図を示す。左側せん断支間中央から、右側のせん断支間中央まで斜めに0をとり、右上で最大の負のせん断ひずみ、左下で最大の正のせん断ひずみが生じるよう X 方向にほぼ平行に分布する。既往の研究での PSH9(配向角度限定らせん積層)の三点曲げ荷重実験による DIC 解析においても、似たような分布が確認されていた<sup>3)</sup>。

5. まとめ

本研究では、積層の異なる3種類の供試体を3体ずつ作製し、合計9体の供試体について四点曲げ荷重実験を行い、その際に撮影した画像を用いて DIC 解析を行った。

DIC 解析により SH9 と CP、QI との変形挙動の違いについて、以下の三点が確認された。

一点目は、供試体長軸方向の直ひずみについて、配向角度差が小さくなるにつれ中立軸は上側に推移した。

二点目は、供試体厚さ方向の直ひずみについて、SH9 は CP、QI のような長軸方向に平行な分布とはならずほぼ一様であり、全体として圧縮ひずみの大きさが CP や QI に比べて小さくなった。

三点目は、面内せん断ひずみについて、CP や QI のせん断ひずみ分布が概ね梁理論に一致したのに対して、SH9 は圧縮側で負のせん断ひずみ、引張側で正のせん断ひずみを生じ、最大で $\pm 10000\mu$ 以上と非常に大きな値を示した。

特に、SH9 のせん断ひずみ分布については、CP や QI とは大きく異なっており、供試体が面外に変形していることが考えられる。そのため、今後は2次元の DIC 解析だけでなく、面外変形にも対応した3次元の DIC 解析を行う必要がある。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 21H01411 基盤研究 (B) の助成を受けた。ここに謝意を示す。

参考文献

- 1) 在家頌一, 細目貴之, 松本高志: らせん積層 CFRP の曲げ特性に関する実験, 第72号土木学会北海道支部論文報告集, A-15, 2016.
- 2) 石澤郁馬, 細目貴之, 松本高志: らせん積層 CFRP の曲げ破壊形態, 第73号土木学会北海道支部論文報告集, A-13, 2017.
- 3) 遠藤祐希, 鄧朋儒, 松本高志: 異なる積層構造を有する CFRP の曲げ変形挙動の画像解析, 第22回応用力学シンポジウム, p02-03, 2020.
- 4) J Blaber, B Adair, and A Antoniou: Ncorr: open-source 2D digital image correlation matlab software, Experimental Mechanics, Vol.55, pp1105-1122, 2015.