

成形中の繊維応力実測に基づく CFRTP プレス成形体の残留応力低減方法の開発

岐阜大学 工学部 機械工学科

教授 三宅 卓志

(平成 27 年度 一般研究開発助成 AF-2015034)

キーワード 熱可塑性炭素繊維強化複合材料, スタンピングプレス, 繊維残留応力, 繊維切断

1. 研究の背景と目的

炭素繊維で補強した複合材料 (CFRP; Carbon Fiber Reinforced Plastics) は、高強度と軽量性を併せ持つことから、軽量化を図りたい輸送機器分野で、特に注目を集めている材料である。その一方で、成形生産性が低いことが利用拡大の大きなネックとなっている。そのため、マトリックスに熱可塑性樹脂を用いた複合材料 (CFRTP; Carbon Fiber Reinforced Thermo-Plastics) の加熱による可塑性を利用した成形加工が注目されている。特に、スタンピング成形は力学特性に優れた連続繊維強化の CFRTP の成形が可能であることからその適用拡大が望まれている⁽¹⁾。

連続繊維を強化材に用いた CFRTP は力学特性が優れる一方で、成形性が悪いという課題がある。このようなことから、CFRTP のスタンピング成形に関しては、成形性や成形精度などについて研究が行われている^{(1),(2)}。しかし最近成形性だけでなく、低い成形性に起因して成形プロセスの影響を受け、成形体が強度低下を引起こすことが明らかにされてきた⁽³⁾。これら複合材料の成形体の強度低下は、スタンピング中の変形に伴う繊維角度変化など繊維移動に起因するもの、および繊維に発生するたるみや残留応力などの繊維の応力分担能の変化に起因するものがあると考えられる⁽⁴⁾。繊維移動は、幾何学的な計算や観察による検証が可能であるが、繊維の応力分担能の変化の検証は大変困難である。しかし、CFRTP の優れた力学特性を最大限に活用するには、成形に起因する繊維の応力分担能変化の予測と抑制技術が不可欠であると言える。

繊維うねりについては、既に負荷直交断面内でのうねりの有無による繊維の負荷分担の差を明らかにしているから⁽⁵⁾、本研究では成形に伴い発生する繊維残留応力に着目し、モデル試験による発生メカニズムの検討および繊維切断⁽⁶⁾による低減効果について検討することを目的とした。

2. 半球形状スタンピングプレス成形体における繊維残留応力

絞り成形のモデルとして図 1 に示すような半径 25mm の半球形を成形し、繊維に発生している応力を顕微ラマン分光法で測定すると同時に数値計算を行い測定値と比較した⁽³⁾。

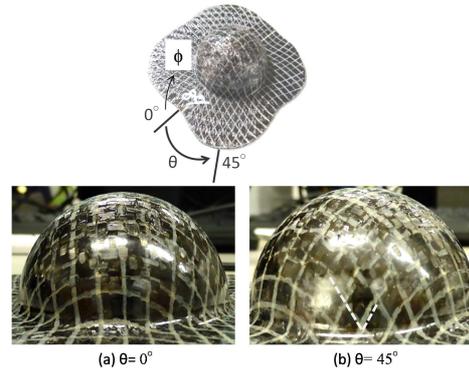


図 1 半球形 CFRTP プレス成形体

図 2 に示した数値計算結果および図 3 に示した測定結果より、経度 $\theta = 0^\circ$ 位置の繊維には、成形によりほとんど応力が発生していないのに対し、 $\theta = 45^\circ - 135^\circ$ を通る繊維には大きな応力が残留していることがわかる。特に応力測定箇所である緯度 $\phi = 5^\circ$ のしわ押えに近い周縁部の繊維に最大の応力が残留する。 0° 位置の繊維は、金型パンチに沿って移動して変形するのに対し、 45° 位置の繊維は交差角変化により伸縮方向に変形する。このように、変形様式により発生する繊維残留応力が大きく変化するから、成形による繊維残留応力の低減を検討するに当たっては、繊維位置、すなわち変形時の繊維挙動を考慮することが必要であると考えられる。そこで、本研究では、最大の残留応力が発生する繊維の交差角変化を起こす変形について、繊維切断による繊維残留応力の低減効果について検討を行った。

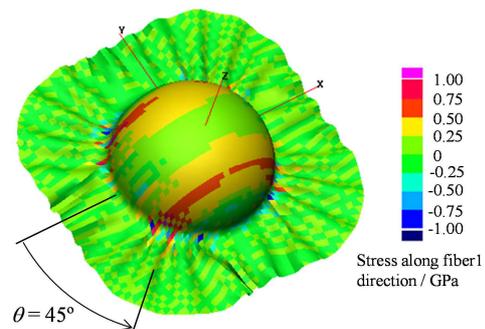


図 2 繊維方向応力数値計算結果

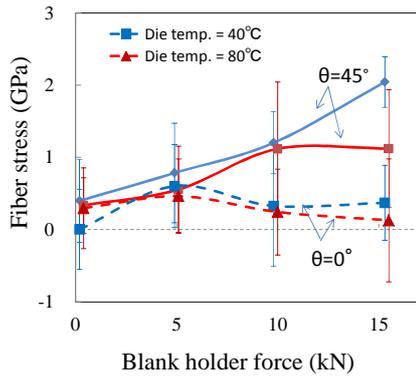


図3 成形体中の繊維応力測定結果

3. 繊維交差角変化する変形における繊維切断による繊維応力低減効果の検討

3・1 実験方法

3・1・1 試料および試験片

試験片には、直交平織の炭素繊維織物 (CO6343 東レ (株)) を用いた。この織物は、炭素繊維トウ (T300-3K 東レ (株)) をクロス材としたものである。炭素繊維織物を、後述するピックアップフレーム治具に設置するため、図4に示すような寸法の十字型の試験片に切出した。繊維にスリットを入れて繊維移動しやすくすることにより成形時に発生する繊維応力の低減が可能かどうか検討するため、十字型中央部 $\square 30\text{mm}$ 内の繊維トウを一定間隔で切断した。切断箇所は経糸、緯糸ともに同間隔とし、繊維トウの長手方向での切断箇所は、繊維切断した中央正方形領域内でランダムになるよう設定した。図4の右側に示す図は、2束ピッチで繊維切断する場合の試験片の繊維切断箇所を示す。切断ピッチの影響を調べるため、切断間隔をそれぞれ7束、4束、2束と3とおりに変化させた。繊維切断は、超音波カッター (USW-334 本田電子 (株)) を用いて実体顕微鏡下で行った。切断した繊維の外観を図5に示す。

3・1・2 ピクチャーフレーム試験

織物の繊維交差角を変化させるために図6示すようなピックアップフレーム治具を使用した。ピックアップフレームの変形は、万能試験機 (type3367 インストロン) を用いてクロスヘッド速度 $50\text{mm}/\text{min}$ で行った。2章に示した半球形成形において $\theta = 45^\circ$ 位置の繊維交差角変化は、約 30° であることから、ピックアップフレーム試験における引張りは交差角変化が 30° となるように行った。

3・1・3 繊維応力測定

変形後の繊維に発生している応力を、顕微ラマン分光法により直接測定・評価した。顕微ラマン分光測定には、図7に外観を示す顕微光学系を有する焦点距離 550mm の分光器 (iHR550 堀場製作所 (株)) を用いた。顕微光学系の $\times 100$ 対物レンズを介して、波長 514.5nm の Ar⁺レーザー光を直径 $1\ \mu\text{m}$ スポットに集光して照射することにより、直径約 $7\ \mu\text{m}$ の炭素繊維に発生している応力を直接測定した。

測定箇所は、図4に示す十字型試験片中央部の繊維切断を導入した領域内でランダムに10箇所を選んだ。ただし、本実験で使用しているドライファブリックでは、切断した繊維は応力を負担しないことから、測定は切断していない繊維に対し行った。測定は、ピックアップフレーム試験において交差角変化が 30° となるよう引張った後治具を固定して顕微ラマン分光装置の試料台に移動し、変形状態を保持したまま行った。ラマンスペクトルから繊維応力への換算は、変形に伴いラマンスペクトルのピーク波数がほぼ線形に変化することを利用して行った。すなわち、あらかじめ単繊維に負荷を加えながらラマンスペクトル測定して求めた図8に示す繊維応力とピーク波数の関係を用いて、測定されたピーク波数から繊維応力を求めた。

3・2 実験結果

繊維交差角変化を 30° とした時に繊維に発生する応力の測定結果を、図9に示す。図には、繊維切断していない試料の結果も比較のために載せてある。図には測定した10箇所の繊維応力を、負荷前の繊維応力を0として変形により発生した応力増分で示してある。10箇所の測定結果を、ピーク波数の移動量が多

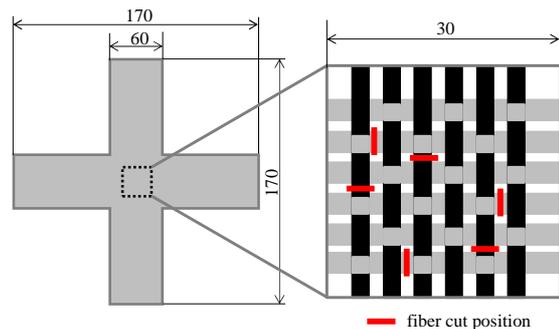


図4 ピクチャーフレーム試験

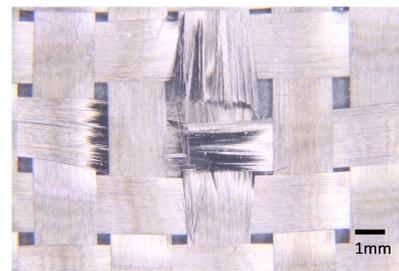


図5 繊維切断の外観



図6 ピクチャーフレーム試験

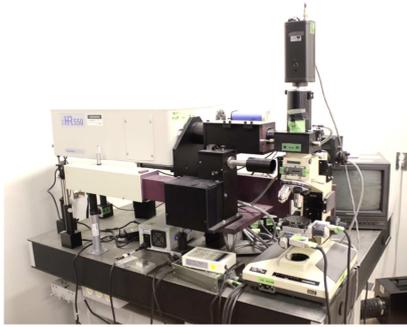


図7 顕微ラマン分光装置

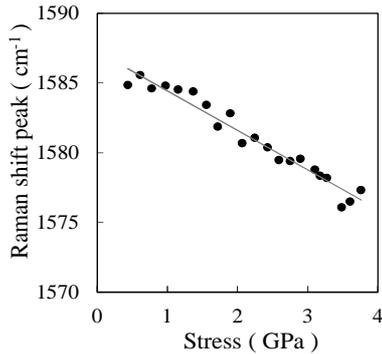


図8 ラマン散乱ピーク波数と応力の関係

いデータから降順に示してある。図より、ピクチャーフレームにより繊維交差角が変化する変形を加えた場合には、ほぼ圧縮の応力が発生することがわかる。ピクチャーフレーム試験では、交差角変化が大きくなるにつれ、試験片が面外変形することが観察されることから、繊維に圧縮応力が発生することは十分に想定される。その発生応力の大きさについては、測定箇所によりかなり差があり、大きいもので2GPaであり、小さいものはほぼ0か若干の引張りとなる。比較的変動の小さい箇所3-7での応力で繊維切断の影響を見ると、4束ピッチで切断したものは、切断しないものに比べ発生応力が小さくなっているものの、逆に7束ピッチ、2束ピッチで切断したものは、切断しないものに比べより大きな圧縮応力が発生していることがわかる。繊維切断により変形拘束が小さくなり、変形し易くなるため、変形に伴い発生する繊維応力が小さくなることが予想されたが、予想とは逆に繊維応力が大きくなるケースも観察された。この理由として、例えば2束毎に切断した場合には切断した繊維と切断していない繊維が1束ごとに交互に存在することとなり、切断した繊維が負荷を分担しない分、切断していない繊維に負荷が集中した可能性が考えられる。

3・3 検討 — 樹脂の有無による影響

半球形状成形体では、交差角変化を起こす $\theta = 45^\circ$ 位置で繊維に大きな引張りの残留応力が測定されたが、一方交差角変化変形のモデル試験であるドライファブリックを用いたピクチャーフレーム試験では、圧縮応力が観察された。この差は、樹脂の有無に起因するかどうか、樹脂含浸したCFRTP板を用いてピクチャーフレーム試験を行い、試験片中央部繊維に発生する応

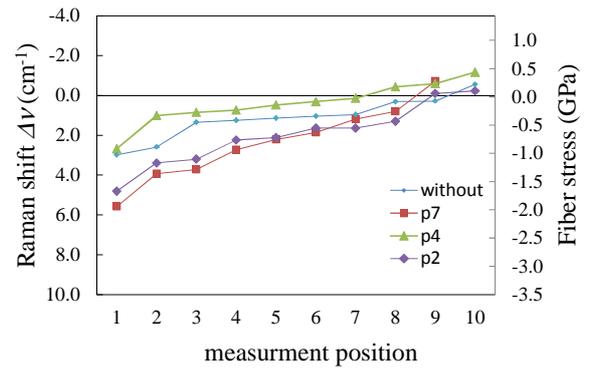


図9 ピクチャーフレーム試験時の繊維応力

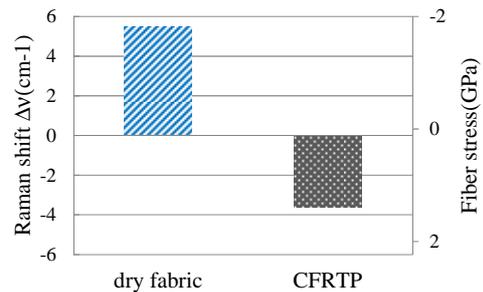


図10 樹脂の有無による変形後の繊維応力の違い

力を、顕微ラマン分光法を用いて同様に評価した。

ドライファブリックに、熱可塑性エポキシ (DENATITE 6850A ナガセケムテックス (株)) をVaRTM法により含浸させ1層の平織CFRTP試験片を作製した。CFRTP試験片をピクチャーフレームに取付け、IRヒータ (ZKB1000・175G ヘレウス (株)) で180℃に加熱しながら交差角変化させた。試験片の面外変形を避けるため、交差角変化はドライファブリックの場合の1/2 (15°) とした。冷却後、中央部の繊維に発生している応力を測定した。

図10に樹脂の有無による発生応力の差を示す。樹脂含浸させたCFRTP試験片の場合、試験片の状態ですでに残留応力が発生するから、発生応力は変形前後での差で示してある。樹脂を含浸させた場合には、ドライファブリックの場合と異なり引張りの残留応力が発生することがわかる。樹脂が存在することにより発生応力が引張りになるメカニズムについては、樹脂が繊維の面外変位を抑制しているためと予想されるが、現時点では不明である。樹脂の有無による繊維切断効果への影響とあわせ今後究明していく予定である。

4. プリプレグ圧縮成形における繊維切断による繊維応力低減効果の検討

3章で行った実験では、炭素繊維織物を使用した。織物は経糸と緯糸が交差する構造であるため、交差点の繊維拘束の影響により繊維切断の効果が発揮されにくい可能性がある。そのため、繊維交差の無い一方向プリプレグを用い、繊維切断による繊維応力低減効果について検討を行った。

4・1 実験方法

4・1・1 試料および試験片

試料には、熱硬化性エポキシをマトリックスとし連続繊維を一方方向に並べたプリプレグ (HRX350G110S 三菱レイヨン (株)) を用いた。プリプレグを $\square 80\text{mm}$ に切断し、図 11 に示すような 3 種類の異なる積層の試験片を作製した。これに対しそれぞれ繊維切断したものと同繊維切断しないものを準備した。繊維切断は、繊維に直角に導入し、切断の幅およびピッチは、図 11 に示すようである。

4・1・2 積層圧縮成形試験

開放型の平板金型を用いて熱プレスにより圧縮成形し、積層プリプレグを加熱硬化させた。面内で拡大変形する際の層の変形特性の差により繊維に残留応力を発生させるようにしたものである。熱プレス成形は、型温 180°C 、圧力 3.6MPa で 20min 保持した後型内で徐冷して行った。成形後の成形体中の繊維応力の測定は、最表面層の繊維に対して、3 章の測定と同様に行った。

4・2 実験結果

図 12 に圧縮成形後の平板中の繊維の応力を示す。それぞれ異なる 3 種類の積層に対し、繊維切断していないものと繊維切断

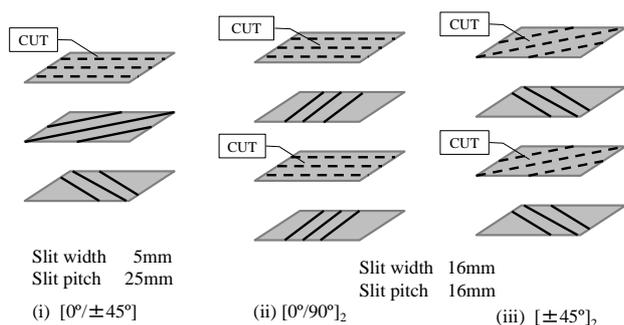


図 11 積層と繊維切断パターン

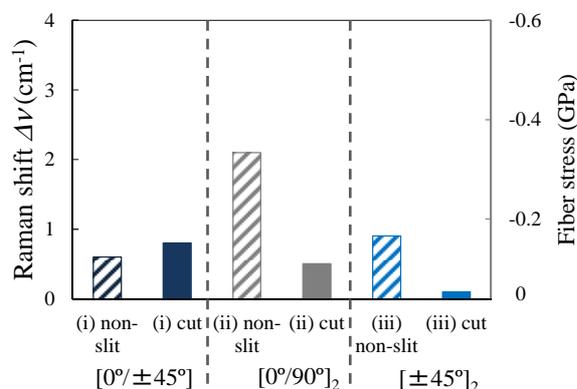


図 12 圧縮成形平板中の繊維応力

した場合のピーク移動量およびピーク移動量から換算した繊維応力を示してある。図より、試験した 3 種類の積層では、いずれも圧縮の応力が繊維に発生し、繊維切断の導入により発生する圧縮応力が概ね低減されることがわかる。詳細に見ると、 $\pm 45^\circ$ 積層である(i)および(iii)では、 $0^\circ/90^\circ$ 積層である(ii)に比べ繊維に発生する応力が小さく、また繊維切断による応力低減も小さいことがわかる。すなわち、この結果より、角度変化により伸縮する変形に対しては、繊維切断の応力低減効果が小さい可能性が示唆された。

5. 結言

連続繊維強化複合材料のスタンピング成形などにおいて成形に伴い発生する繊維応力を低減する方法としての繊維切断の導入について、顕微ラマン分光法を用いた繊維応力の直接測定による詳細な検討を行い、以下の知見が得られた。

- (1) ピクチャーフレームによる繊維交差角変化する変形では、直交平織ドライファブリックを用いた場合には、繊維に圧縮応力が発生し、その大きさは繊維切断の導入によってもほとんど低減されないが、切断パターンによっては未切断の繊維の応力が増加する場合がある。
- (2) 繊維交差の無い一方方向プリプレグを用いた積層圧縮による平板成形では、繊維切断パターンや積層構成の違いにより繊維残留応力の発生や低減効果に差が認められた。

以上のように、繊維応力の実測に基づけば、どのような積層の場合に、どこに、どのような繊維切断を導入すれば、成形時の変形により生じる繊維残留応力を低減可能か定量的に明らかにできることを示した。今後、実形状に対して本手法の適用を拡大していく予定である。

謝辞

本研究は、公益財団法人天田財団の平成 27 年度一般研究開発助成 (No.AF-2015034) を受けて実施されたものであり、厚く謝意を表す。

参考文献

- (1) 米山猛他：塑性と加工, **58**-678 (2017), 605-610.
- (2) Mohammed, U. et al.: Composites: Part A, **31**(2000), 1409-1420.
- (3) 清水隆宏他：平成 26 年度塑性加工学会春季講演会, 235-236(2014).
- (4) 三宅卓志：強化プラスチック, **60**-10 (2014), 427-433.
- (5) 加藤令馬他：第 9 回日本複合材料会議(JCCM-9), (2018.02).
- (6) Takeda, I et al.: Composites: Part A, **39**(2008), 1884-1890.