

熱可塑性不連続 CFRP シートの V 曲げ装置の開発

金沢大学 設計製造技術研究所
助教 立野 大地
(2018 年度 一般研究開発助成 AF-2018015-B2)

キーワード：炭素繊維強化熱可塑性樹脂，V 曲げ，プレスブレーキ

1. 研究の目的と背景

炭素繊維強化樹脂 (CFRP) は重量当たりの強度が高く、自動車等の輸送機器の軽量化に貢献し、稼働中の消費エネルギーの削減につながることから、量産への適用が期待されている。CFRP のなかでも母材にナイロンなどの熱可塑性樹脂を用いた CFRTP の特徴は、加熱すればやわらかくなり変形加工が可能なことである。このため従来の熱硬化性 CFRP よりも短時間で成形ができ量産に適しているとして注目されている。

一方向繊維 (UD) や織物などの連続繊維シートは強度が高い一方で、炭素繊維が伸び縮みできないため、金属のように塑性変形することができない。したがって曲げ加工の基本的な考えは、図 1(a) に示すように、シート全体を加熱して樹脂を熔融し、シート全域にわたって層間を滑らせることになる。

一方で、炭素繊維長を 10~30mm とした不連続繊維 CFRTP は、熔融状態において繊維が流動することができ、リップやカップなど複雑形状に対応することができ、実用に耐える強度を有することがわかっている¹⁾。不連続繊維 CFRTP は面内方向で繊維に切れ目があるため、図 1(b) のように、部分的な加熱による曲げ加工において外側の切れ目が広がって伸び変形ができると考えた。したがってプレスブレーキによるフレキシブルな生産が実現する可能性がある。

本研究では、不連続繊維 CFRTP シートを部分的に加熱し V 曲げ加工を実現する装置を開発することを目的とする。また実際の生産プロセスにおける検証を行うため、精密板金加工を行っている株式会社小林製作所との共同研究において、プレスブレーキに搭載する金型の開発、CFRTP シートの曲げ成形実験を行った。

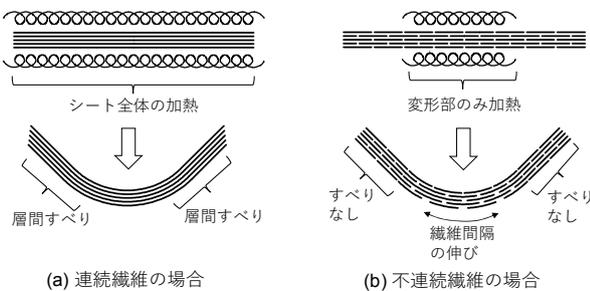


図 1 曲げ加工における繊維変形イメージ

2. V 曲げ基礎実験

2.1 基実験装置

V 曲げ成形における基本的な変形挙動を調べるため、リンク式の基礎実験装置を設計製作した²⁾。V 曲げ装置に求められる主な機能は、(1) シートを部分的に加熱することである。これは接触式ヒータを用いて必要な領域のみを加熱するようにした。(2) 曲げ変形過程で層間剥離が起きないようにする。これは、CFRTP シートをステンレス箔で挟んだまま曲げ加工することで層間剥離を防ぐことを狙った。(3) 冷却過程で圧力を保持する。このためにステンレス箔にテンションをかけることで CFRTP シートに圧力を保持することを狙った。

上記の機能を備えるものとして、V 曲げ装置の基本構造を図 2 のようにした。図 2(a) は CFRTP シートの加熱過程を示している。2 枚の上プレートと中央バーがピンで連結されている。中央バーにはカートリッジヒータが内蔵されており、この熱で上プレート中央部を加熱する。上プレートの底面はステンレス箔で覆われている。下プレートも 2 枚あるが、中央で連結していない。左右の下プレートそれぞれの先端にカートリッジヒータが内蔵してある。下プレートの上面もステンレス箔で覆われている。CFRTP シートは上下のステンレス箔の間に設置し、中央部のみを熱伝導で加熱する。図 2(b) は曲げ成形時を示している。中央バーを押し下げると上プレートが両端の軸を中心に回転し

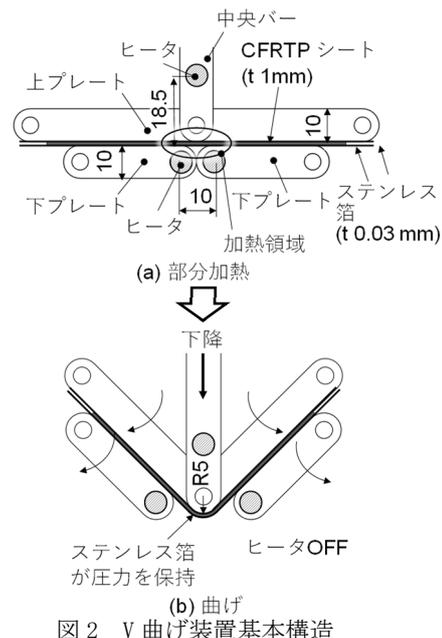


図 2 V 曲げ装置基本構造

V字型になる。下プレートも回転し、V字型になる。この動きによりCFRTPシートがV字に曲げられる。CFRTPシートの下面は支えがなくなるが、下側のステンレス箱によりある程度の圧力が保持される。ステンレス箱は両端からバネで引張られておりテンションがかかっている。この状態を保ったままヒータの電源を切り冷却を行う。

図3にV曲げ装置の全体構造を示す。中央バーを押し下げるプランジャ先端には冷却水が流れている。中央バーは加熱過程ではプランジャから離れて不要な冷却を防ぐ。変形過程でこれらは接触し中央バーが冷却される。上部のストッパはV型になった上プレートの姿勢を固定するものである。成形後に上型が上昇する過程で上プレートが水平に戻ると、曲げたCFRTPシートが再び開いてしまうが、これを防ぐ。下プレートは傾斜のついた冷却ブロックに接触して冷却される。曲げ角度はその下のストッパの位置で調整することができる。下型のバネは下プレートを水平に戻す。実際に製作した装置の写真を図4に示す。装置は島津製作所の万能試験機に取り付けて成形実験を行った。

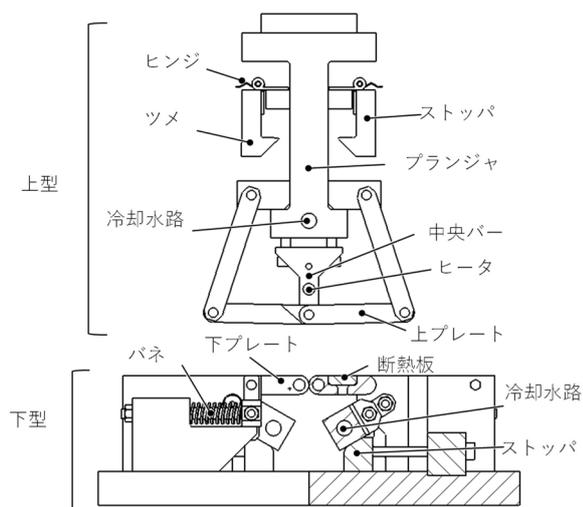
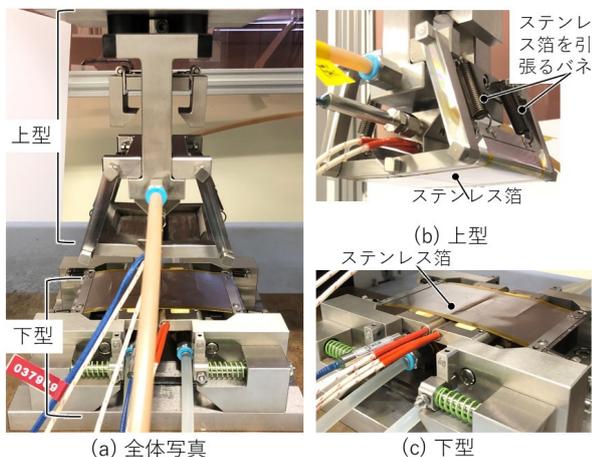


図3 V曲げ基礎実験装置全体構造



(a) 全体写真 (b) 上型 (c) 下型

図4 製作したV曲げ装置

2.2 V曲げ基礎実験プロセス

図5にV曲げ成形プロセスを示す。まずCFRTPシートを下プレートの上面に設置する。上型を降ろしてCFRTPシートを挟み、シートが所定の温度になるまで加熱する。加熱後、ヒータの電源を切り、上型をさらに降ろして曲げ加工を行う。下プレートが冷却ブロックにあたることで下降を停止する。シートが固化温度に低下するまでこの状態を維持する。冷却後、上型はその形状を維持したまま上昇する。下プレートがバネで水平に戻り、V曲げされたシートが取り出される。

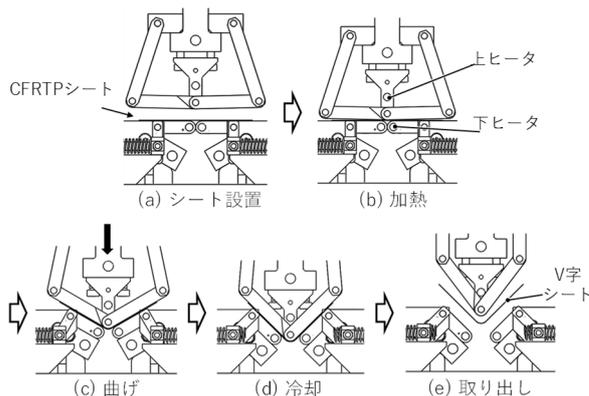


図5 V曲げ成形プロセス

2.3 試験片の作成

試験片として、一方向繊維(UD)テープを用いた(1)UDカットシート、(2)UD疑似等方シート、(3)ランダムシート、を製作した。元となるUDテープはTenCate製で、母材樹脂はPA6, Vfは50%, 板厚は0.16mmである。

UDカットシートの繊維配向を図6(a)に示す。繊維方向を45°ずつ回転しながら7層積層し、板厚を1mmにしたものである。各層において繊維に対して45°方向にカットを入れて繊維長が30mmにしてある。UDカットシートの狙いは不連続繊維にして流動性を高めつつ、繊維を規則正しく配置することである。また各層の重なりが均一なので樹脂リッチ領域を少なくする。さらに繊維をできるだけまっすぐにする。炭素繊維が曲がった状態で引張ると直線状になるまでは剛性が低いと考えられる。カットがあるため曲げ加工において切れ目が開いたり隣り合う繊維が重なったりして曲げ変形する可能性がある。加熱圧着条件は、カットを入れた各層を平板金型内に設置して260°Cに加熱し、3MPaを与えながら冷却して200×100×t1mmのプレートを製作し、そのプレートから長さ90mm、幅30mm、板厚1mmの試験片を切り出した。

UD疑似等方シートの繊維配向を図7(b)に示す。繊維の重ね方はUDカットシートと同一であるが、カットがなく繊維がすべてつながったものである。曲げ線に対して繊維が直交するのは最表面の1層目と7層目であるが、これが曲げ成形においてどのように変形するかに着目する。

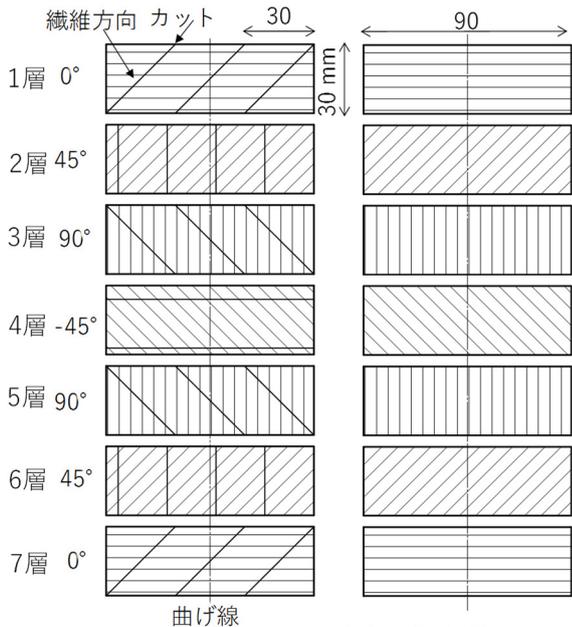


図6 UDカットおよび疑似等方シートの繊維配向

ランダムシートの製作方法を図7に示す。UDシートから長さ30mm、幅10mmのチップを切り出し、金型にランダムに散布して260℃に加熱し、3MPaを与えながら冷却してプレートを製作し、長さ90mm、幅30mm、板厚1mmのランダムシートを切り出した。このシートではチップが板厚方向に折り重なっており、繊維が水平面内でさまざまな方向に向いていた。

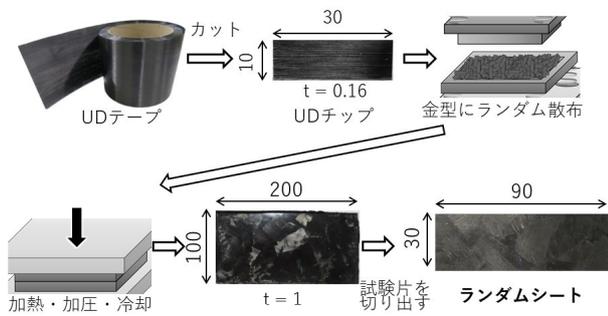


図7 ランダムシート製作過程

2.4 基礎実験条件

成形実験の条件を以下に述べる。上下のヒータをあらかじめ230℃に加熱しておく。これはPA6の融点が220℃だからである。その後試験片を上下プレートで無負荷ではさみ、60秒間加熱する。シート内の温度が定常状態になったときの分布を図8に示す。同図より、シート上面は中心から2mm弱、下面は5mm程度までの範囲が熔融状態であることがわかる。

次に中央バーを15mm/sで下死点より2mm上まで下げ、さらに0.1mm/sで下死点まで下げ、シートを90°に曲げる。この位置を80秒保持し、ヒータを切り冷却を行う。冷却時の加圧力は1MPa程度である。冷却後、中央バーを上昇させ成形品を取り出す。

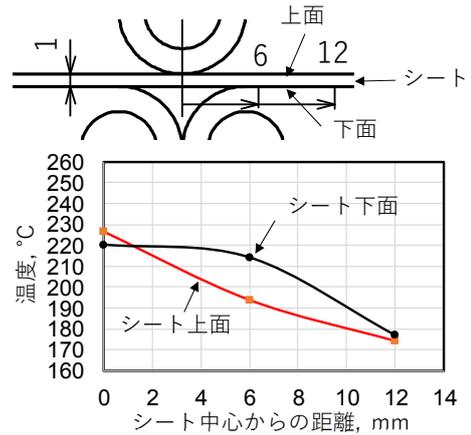


図8 成形前シート表面の温度分布

2.5 成形品外観および内部組織

成形後のUDカットシートの表面を図9に示す。曲げ内側の表面では、繊維が試験片幅方向にうねっている。このため試験片の端において繊維が押し出されている。曲げ内側では圧縮が作用するが、曲げ線に対して直交する繊維は面内で幅方向に変形することで圧縮に対応したと考えられる。外側の表面では、切れ目が広がっている。ここでは引張が作用するので、切れ目が広がることで伸び変形が可能になったと考えられる。またRとストレート部の境界において層間剥離が生じている。

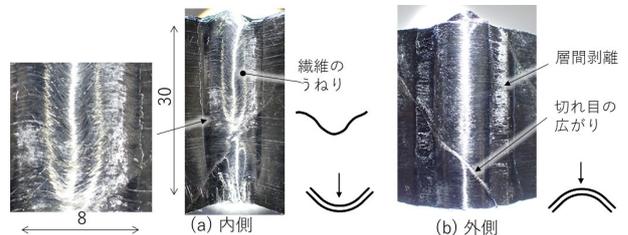


図9 成形後のUDカットシート表面の様子

成形後のUD疑似等方シートを図10に示す。当初は表面層の繊維が伸び縮みできないため、連続繊維シートの部分加熱曲げは難しいと考えていたが、実際には曲げ変形が可能であった。UDカットと同様に、内側の繊維はうねっており、幅方向に繊維を押し出すことで圧縮に対応している。繊維のうねりはUDカットに比べて顕著である。外側はカットがなく繊維が伸びないため伸び変形ができず、圧縮が曲げ内側に集中したと考えられる。

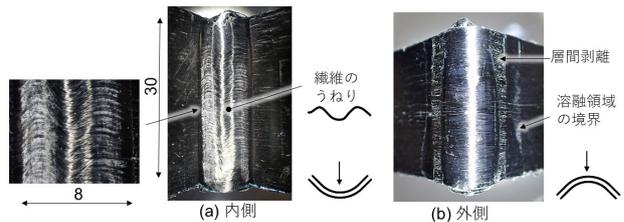


図10 成形後のUD疑似等方シート表面の様子

成形後のランダムシートの表面を図 11 に示す。ランダムシートは元の繊維配向が不規則であるため、表面状態からどのような変形が生じたかを特定することが難しい。同一面内でも繊維方向がばらばらであるため、さまざまな変形が複合している。外側では R 部とストレート部の境界で層間剥離が生じている。



図 11 成形後のランダムシート表面の様子

UD カットシートの曲げ部の断面写真を図 12 に示す。写真の白く見えるのが繊維の断面で、灰色は母材樹脂である。試験片長手方向(0°)の繊維は断面が白い線として観察される。幅方向の繊維(90°)は断面が白い丸として観察される。R 部の中心(a)では、7 層目の繊維は元の繊維方向のままである。一方で 1 層目は繊維が幅方向に向いており、うねり変形により方向が変化している。R とストレートの境界部(b)では繊維が板厚方向に波打って 6 と 7 層の間で層間剥離が生じている。これは中央バーと上プレートの連結部に隙間があるためと考えられる。中央バーで試験片が圧縮されたとき、内側の層が外側に向かって押し出されて繊維が曲がりながら中央バーとプレートの隙間に押し込まれたと考えられる。

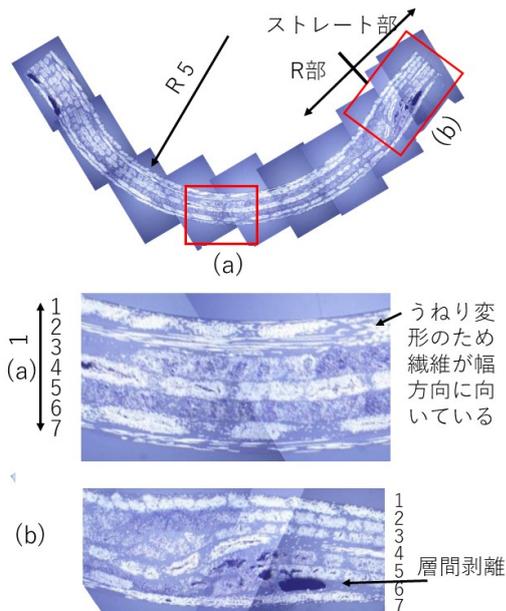


図 12 UD カットシート曲げ部の断面

UD 疑似等方シートの断面写真を図 13 に示す。UD カットシートの場合と同様に、7 層目の繊維方向は成形前と同じ

である一方で 1 層目はうねりのために幅方向に向いている。R とストレート部の境界では 5 から 7 層目の間で層間剥離がみられる。

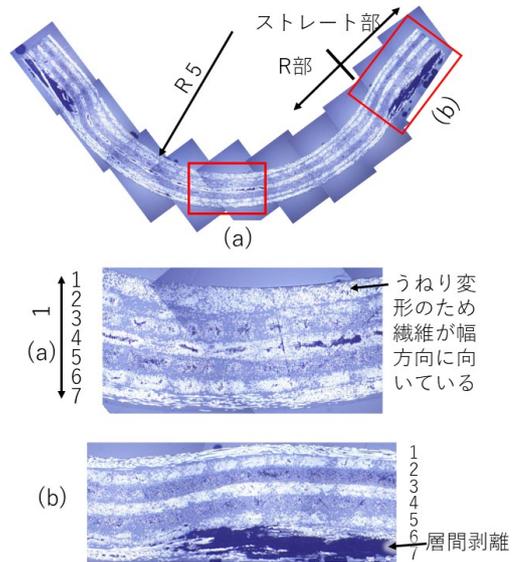


図 13 UD 疑似等方シート曲げ部の断面

ランダムシートの断面写真を図 14 に示す。R 部中心(a)では、曲げ内側の繊維層が厚くなっており、中心に向かって圧縮を受けたことが推察される。R 部とストレート部の境界にポイドがみられる。

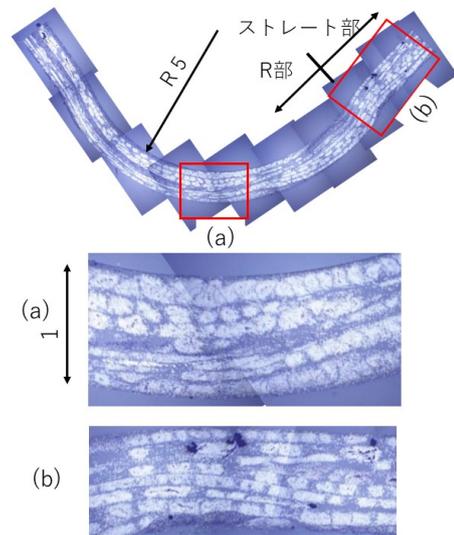


図 14 ランダムシート曲げ部の断面

2. 6 曲げ部の角度

成形品のスプリングイン角度を図 15 に示す。スプリングインは、目標の 90° に対して小さくなることを表す。3 つの成形品の平均角度とし、エラーバーはレンジを表す。スプリングインが最も大きいのは UD 疑似等方である。次いで UD カットシートである。ランダムシートの平均値が最も小さいが、ばらつきが大きい。スプリングインは板厚

方向と面内方向の熱収縮率が異なることで生じると説明されている²⁾。熱収縮率は樹脂が支配的である。これら3つのシートの板厚方向の熱収縮率は同等である一方で、面内方向については、UD 疑似等方が最も小さく、UD カット、ランダムに大きい。このため UD 疑似等方のスプリングインが最も大きかったと考えられる。ランダムのばらつきが大きいのは、面内方向で樹脂リッチ領域が偏在しているためと考えられる。

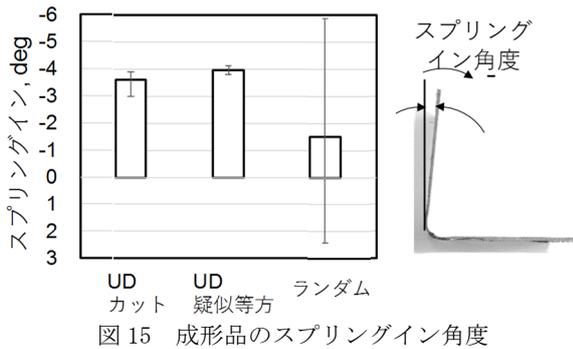


図 15 成形品のスプリングイン角度

2.7 剛性

成形品の剛性試験の方法と結果を図 16 に示す。試験片の一端を治具に固定し、40mm 離れたところを試験機で押し下げて荷重-変位波形を記録し、その傾きを剛性とした。3つの成形品の平均値とし、エラーバーはレンジである。UD 疑似等方と UD カットの剛性は同等である。これは両者にみられた繊維のうねりなどの変形に大きな違いがなかったことを示していると考えられる。ランダムシートの剛性が他より低いのは、繊維配向がばらついているためだと考えられる。

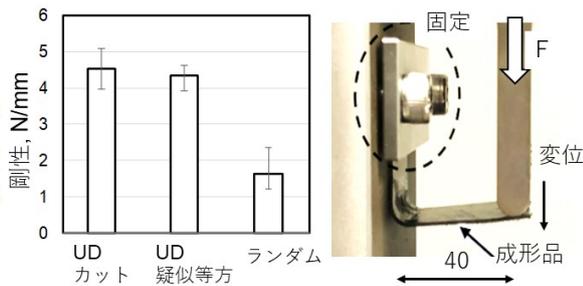


図 16 成形品の剛性

3. プレスブレーキを用いた V 曲げ成形

実際の生産における基礎的な検証としてプレスブレーキを用いた V 曲げ成形装置を開発した。実際の生産ではサイクルタイムを短くすることが重要である。この考えから、シートの加熱はあらかじめ別の装置で行い、金型は樹脂の固化温度以下にして成形と同時に積極的に冷却する方式とした。このために図 17 に示す加熱装置を製作し、シート中央の 10mm の範囲を上下のヒータプレートで加熱し、金型まで搬送するようにした。

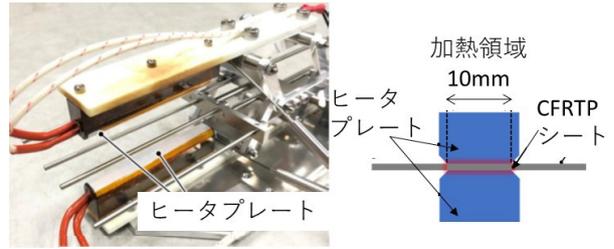


図 17 プレスブレーキ用加熱搬送装置

プレスブレーキの成形プロセスを図 18 に示す。280℃に加熱した加熱装置に CFRTTP シートを設置し、1 分間加熱する。シートを速やかに金型の板押さえ上面に設置する。パンチを押し下げると板押さえの斜面に沿ってシートが 90° に曲げられる。さらにパンチを下死点まで下げてダイの下部のバネの圧縮により圧力を付与する。下死点で 10 秒間保持した後パンチを上昇して成形品を取り出す。プレスブレーキに設置した金型を図 19 に示す。

プレスブレーキで曲げた成形品の外観を図 20 に示す。UD 疑似等方シートを 180℃の金型で曲げたものであるが、基礎実験と同様に内側の繊維が幅方向に押し出されて曲げ成形することができており、プレスブレーキを用いた加工が可能であることがわかった。

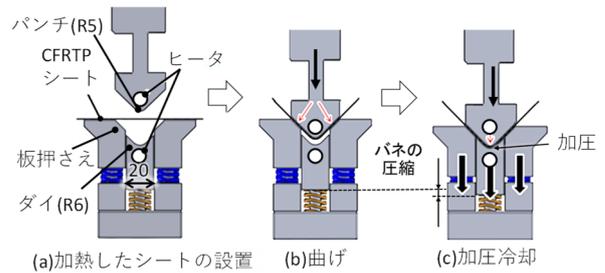


図 18 プレスブレーキによる V 曲げプロセス

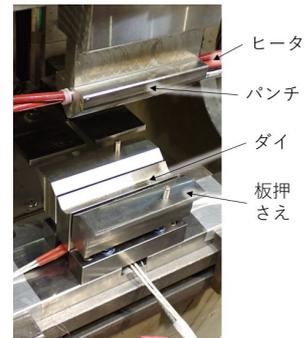


図 19 プレスブレーキに設置した金型

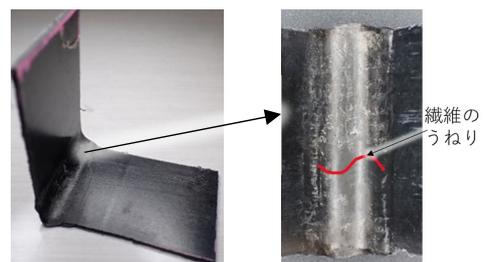


図 20 プレスブレーキによる曲げ成形品

4. 結言

CFRTPシートの部分加熱によるV曲げ成形に関する研究開発を行った。基本的な変形挙動を理解するためにリンク式の基礎実験装置を開発し、部分加熱によるV曲げ成形が可能であることを示した。UDカットシートでは曲げ外側の切れ目が広がって伸び変形しており、内側では圧縮を受けた繊維が幅方向に変形することが明らかになった。UDカットシートはランダムに比べて曲げ部の剛性が高く、繊維がまっすぐであること、配向が規則的であることの効果が確かめられた。一方で連続繊維の疑似等方シートでも内側の繊維が圧縮され幅方向にうねることで部分加熱曲げが可能である。

実生産に向けた検証として、プレスブレーキに設置するV曲げ成形金型およびシートの加熱装置を設計製作し、プレスブレーキを用いたV曲げ成形が可能であることを示した。

プレスブレーキは多品種生産に適しており本研究の手法はCFRTPの応用に貢献するものと考えられる。実生産への適用にむけて、プレスブレーキにおける金型温度や曲げR条件などの解明が課題である。

謝 辞

本研究において共同研究を推進した株式会社小林製作所に感謝を申し上げる。

本研究に対し公益財団法人天田財団より2018年度一般研究開発助成を受けた。深い感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 米山猛, 立野大地, 谷口洗紀, 丸茂康二, 吉川亮治, 伊藤雄介: 塑性と加工 61(713), 2020, 138-144
- 2) Tatsuno D, Yoneyama T, Matsumono T: The Int. J. Adv. Manu. Tech., 111(5-6), 2020, 1517-1533
- 3) Zahlan N, O'neill M: Composites 20(1), 1989, 77-81.