

熱可塑性 CFRP の鍛造成形法の開発

金沢大学 設計製造技術研究所

教授 米山 猛

(平成 28 年度 重点研究開発助成 B 課題研究 AF-2016002)

キーワード：炭素繊維強化樹脂，鍛造，不連続繊維

1. 研究の目的と背景

自動車をはじめとする輸送機器や各種の駆動機器を軽量化し、エネルギー消費を節減して、地球環境温暖化防止に役立てることは喫緊の課題である。機器の軽量化として着目されているものの一つが CFRP を用いた軽量化である。

これまで CFRP は機械のフレーム等に使用されることが主体であったが、各種強度部品へも適用できれば、軽量化が一層推進される。各種の機械部品は多様な形をしており、金属の場合は、型を用いて鍛造等で形を作ることができるが、連続繊維の CFRP では複雑な形状を作成することが困難である。しかし、連続繊維ではなく、長さ 10 mm ~ 20 mm 程度の炭素繊維を用いれば、かなりの強度を持ち、軽量化な成形品を得ることができる。これが平板の成形などでわかっている。

そこで、繊維長 10 mm ~ 20 mm の炭素繊維で、熱可塑性樹脂を用い、加熱すれば溶融して成形ができ、冷却して固化させれば取り出しができる不連続繊維熱可塑性 CFRP を用いて、複雑形状の成形品を得る方法を開発する。この方法として、成形時に炭素繊維の長さを切断しないために、スクリューを用いて注入する射出成形法ではなく、金型で変形させる鍛造法を採用する。

この目的を実現するため、本研究では、一方向熱可塑性 CFRP シートから所定の繊維長にカットした素材を元にビレットを製作し、金型を用いた鍛造によって、目的形状の成形品を得る方法を開発する。

また本研究では、できるだけ産業界で実際に使われている形状を参考にし、金属の鍛造を行っている企業との共同研究を通じて、金属の鍛造加工のノウハウを取り入れるとともに、金属加工を行ってきた企業が CFRP の成形加工にも取り組む経験を得ることを目的とした。この共同研究企業として、アルミニウム鍛造を行っている群馬精工株式会社と共同研究契約を結び、鍛造対象の選定、金型の設計・製作、CFRP 鍛造実験を行った。

2. 熱可塑性 CFRP 鍛造成形法のプロセス

本研究で想定する熱可塑性 CFRP 鍛造成形法のプロセスを図 1 に示す。あらかじめ熱可塑性樹脂 (PA6) が含浸された一方向炭素繊維 (UD) シート (TenCate 製、厚さ 0.16 mm、

Vf 50%) から、所定の長さにカットした CFRP を素材とする。UD シートから所定の繊維長のカット材を切り出して用いる理由は、繊維長のわかった材料を使うためである。また繊維がまっすぐな素材を得るためでもある。炭素繊維は繊維が引っ張られる力には強いが、曲げや座屈を起すような力には弱い。したがって、成形品においても繊維はできるだけまっすぐな状態もしくは、成形品形状に対して所定の強度を得るために適したカーブを持つなどの状態で成形されることが好ましいと考えられる。もし炭素繊維が屈曲した状態で成形されたとすると、その繊維が伸長するまでは、剛性が低い材料となると予想される。

次に UD シートからカットした素材を用いて、鍛造成形するためのビレットを作成する。鍛造成形中に樹脂の中に気泡が巻き込まれたりしないためには、ビレットの段階で材料が緻密に成形されていることが好ましいと考えられる。本研究では、所定の長さにカットした UD カット材をランダムに混ぜてビレットを作成する場合には、ビレットを圧縮成形した。一方、UD カット材を積層してビレットを作成する場合には、一定の厚さの平板を作成してからそれらを重ねたり、UD カット材を積層して仮接合したりした状態でビレットとした。

ビレットを熱可塑性樹脂 (本研究ではナイロン 6) が溶融する温度まで加熱し、金型の中に挿入して、プレスを用いて成形する。本研究ではカップ状の成形を対象として取り上げ、成形を行った。このような成形に対して「鍛造成形」という呼び方をしたのは、金属の鍛造と似たような加工法だからである。本研究のアプローチの特徴は金属加工の鍛造の手法を CFRP の成形に取り入れて、繊維長を変化させずに繊維を流動させて成形品を作るという考えをベースにしている。

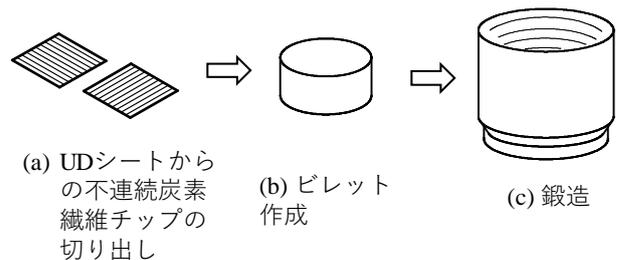


図 1 熱可塑性 CFRP 鍛造成形のプロセス

3. 成形対象と金型

成形対象として、図2のようなカップ状の部品を取り上げた。これは2輪車の部品として、群馬精工(株)がアルミニウム合金鍛造で製作しているものを参考としたものである。カップの外径は63.1mm、高さは58mmである。肉厚は底面部が4mm、側面部は2mmであるが、鍛造時にポンチが抜けやすいように1°の抜き勾配をつけた。カップには4箇所横穴が開けられ、上部には外周にそって溝が形成される。アルミニウム合金では、まず鍛造でカップを成形し、その後切削加工で所定寸法に仕上げるとともに4箇所の穴加工、上部の溝加工が行われるのであるが、CFRP成形の場合、成形後に切削加工を行うと、炭素繊維を切断してしまい、所望の強度が出ない可能性もあり、また工程を短縮するためにも、成形時に4箇所の穴と上部の溝を同時加工することを図った。

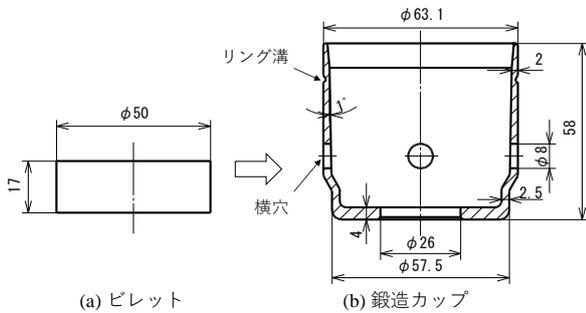


図2 鍛造成形対象

設計した金型の縦断面図を図3に示す。下型の底にピレットを挿入し、ポンチを押し込んで、後方押し出しのようなやり方でカップを成形するものであるが、大きな特徴が二つある。一つは、下方から加圧ピンで押し込む構造を持っていることである。これは、カップを成形した後の冷却過程において、樹脂が体積収縮すると考えられるため、それを補うために、下からの加圧ピンによって材料の押し込みを続けるように図ったものである。カップの寸法は上ポンチの縁が下型の上部平面部と当たることで決定される。寸法はこのような金型の当たりで決めるとともに、内部の体積収縮を小径のピンを押し込むことで補充し、冷却時の加圧を保持することを意図している。

もう一つの特徴は、横穴と溝を成形するために横穴をあけるピンと溝を成形するための押し込み板をスライド金型形状にして、ポンチの下降にしたがってピンや押し込み板が内部に押し込まれて、穴あけと溝加工を行うように図ったことである。四つ穴ピンのスライド構造と溝押し込み板のスライド構造を図4に示す。四つ穴をあけるピンは途中まで四角ピンになっていて回転を防止し、後端の平板の斜め穴にポンチの斜めバー(ツメ)を差し込んでいくようにした。溝押し込み板は4分の1リング板をそれぞれ押し込む構造となっている。

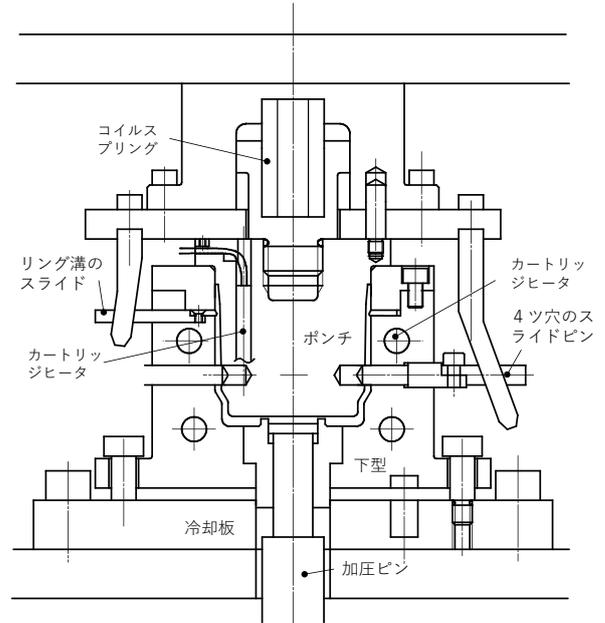


図3 鍛造金型

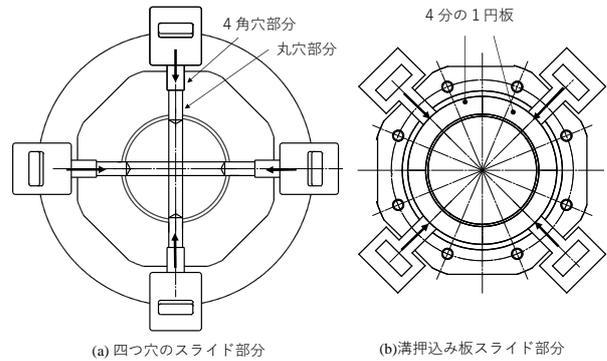


図4 スライド金型部分の構造

鍛造のプロセスを図5、図6に示す。図5はピレット挿入から、ポンチを押し込んでカップ状に材料を変形させるところまでを示している。四つ穴ピンと溝板を押し込む前にカップ状に材料を流動させることを想定した。その理由は、あらかじめ横穴ピンや溝板が押し込まれていると、繊維の流動が妨げられて、ピンの周りを回りこんで合流部ができたり、溝板に止められて、反対側に渦ができたりすると思ったからである。したがって、まずカップ状の形状を成形した上で、まだ材料が柔らかいうちに横穴ピンや溝板を挿入することを意図した。

図6は、四つ穴ピンと溝板を押し込み、その状態を保持しながら、ダイクッションを用いた加圧によって下からの加圧ピンで圧力をかけ続けながら材料を冷却させ、冷却後、ポンチを上昇させた後、スパーサをはさんで底面の広い部分を押し上げて、成形品を抜き取るプロセスを示している。

製作した金型を図7に示す。ポンチのまわりには、四つ穴ピンや溝押し込み板をスライドさせるためのツメが取り付けられている。ポンチの中にはカートリッジヒータを内蔵している。下型には四つ穴ピンと溝押し込み板がそれぞれ

四方から差し込まれている. 下型内にもカットリッジヒータが組み込まれている.

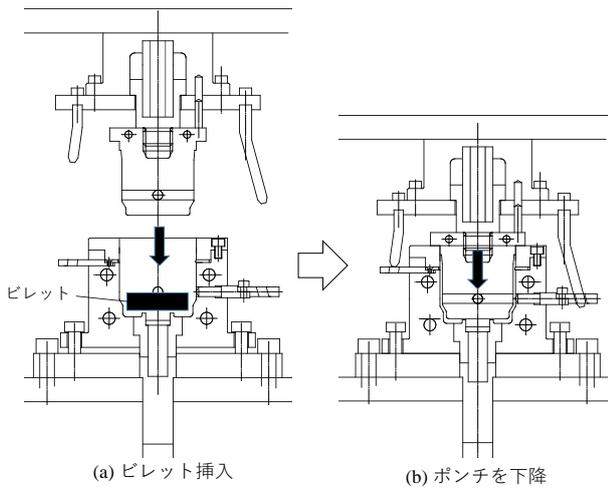


図5 鍛造プロセス (その1)

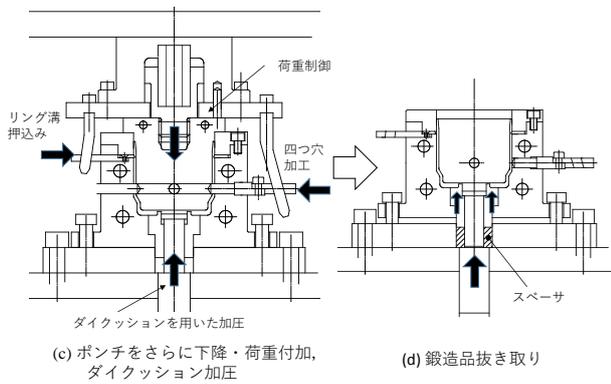


図6 鍛造プロセス (その2)

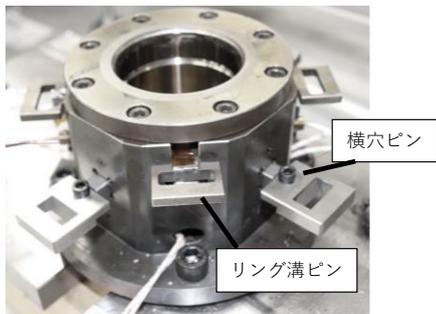
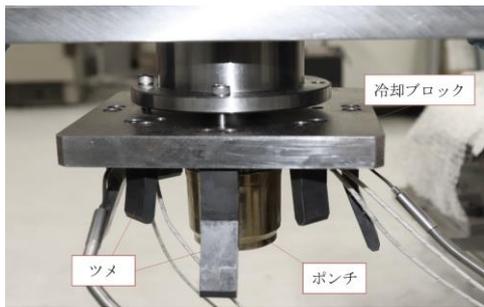
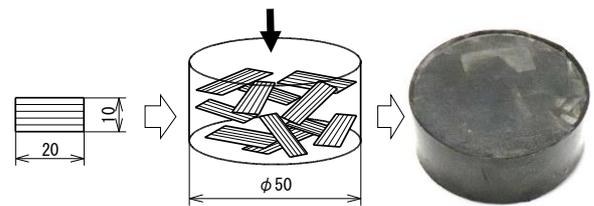


図7 製作した金型

4. ビレットの製作

UD シートから繊維長および、成形時の繊維方向を考慮して、「UD カットランダムビレット」、「UD カット積層ビレット」、「UD 配向積層ビレット」を作成した.

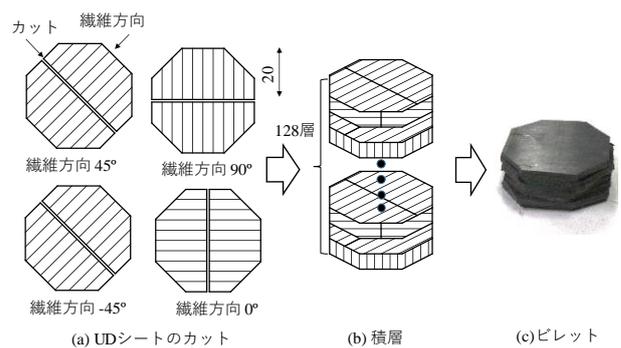
「UD カットランダムビレット」の作成法を図8に示す. UD シートから幅 10 mm, 長さ 20 mm のチップをカットし, これを直径 50 mm の円筒容器の中にランダムに挿入し, 加熱しながらプレスし, 3MPa の圧力をかけながら冷却して直径 50 mm, 高さ 17 mm, 質量 47 g の円柱ビレットを製作した. このビレットの中では, カットされたチップは折り重なりながら平面的に積層し, 繊維方向は水平面内でランダムに向いていた.



(a)UDシートからのカット (b)円筒容器の中で加熱・プレス成形 (c)ビレット

図8 UD カットランダムビレットの作成

「UD カット積層ビレット」の作成法を図9に示す. UD シートを対辺の距離が 40 mm の 8 角形に切り, 真ん中で繊維方向に垂直にカットしたものを, 繊維方向を 45° ずらしながら重ねたものとなっている. 実際には長さ 20 mm の間隔でカットを入れた UD シートを, 繊維方向を 45° 変えながら 16 枚積層した平板 (厚さ 2.2 mm) を圧着成形し, この平板から 8 角形板を切出して, 8 枚 (合計 128 層) 重ねてビレットとした.



(a) UDシートのカット (b)積層 (c)ビレット

図9 UD カット積層ビレットの作成

「UD 配向積層ビレット」の作成法を図10に示す. まず UD シートから直径 50mm, 繊維方向と±45° 方向にカットした4分の1円板を切出す. このうち, 扇の中心の繊維が円の半径方向に向いている4分の1円板を4枚組み合わせたものを疑似半径方向円板とし, 扇の中心の繊維が円の半径方向と直交している4分の1円を4枚組み合わせたもの

を疑似円周方向円板として、この2枚を45°ずらしながら128枚重ねたものをビレットとした。

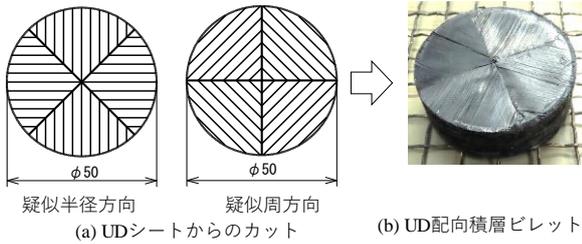


図10 UD配向積層ビレットの作成

5. 鍛造成形

鍛造成形のプロセスと条件を以下に述べる。金型温度をポンチ側160℃、下型180℃まで加熱しておく。ビレット温度が280℃になるまでマuffle炉で加熱し、下型内に挿入する。ただちにポンチを下降させて下型内に挿入し、カップを成形する。ポンチが最下点まで到達したら、ダイクッションを持ち上げて下からの加圧ピンに5kNの力をかける。金型のヒータ電源を切って、金型温度が100℃まで下がったら下からの加圧ピンを下げ、ポンチを上げ、ダイクッション上にスペーサを入れて再度ダイクッションを持ち上げ、成形品を取り出す。

鍛造成形時のポンチ変位、プレス荷重、ダイクッション変位の測定例を図11に示す。ポンチ変位は最下点からの変位として右縦軸のスケールで示されている。ポンチ変位が最下点上8mmぐらいからプレス荷重が上昇し始め、最下点で瞬間的に45kNまで上昇した後、ポンチ変位の停止とともに24kN程度まで下降している。ポンチ変位がほぼ最下点に達した時にダイクッションを持ち上げ、ダイクッション変位が12mmから13.5mmまで増加している過程が下からの加圧ピンが押し込んだ過程である。下からの加圧ピンで押し込むことによって圧力が材料内に伝わり、プレス荷重が24kNから26kNへ増加している。

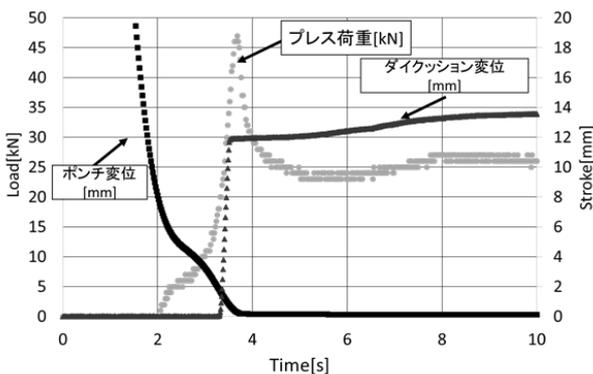


図11 鍛造成形時のプレス荷重とダイクッション変位

鍛造成形したカップの外観を図12に示す。4箇所の横穴は、バリが残っているが、ほぼ貫通させることができた。カップ上部の溝も押し込み板の隙間にバリが出たが、ほぼ所定の深さまで溝を押し込むことができた。外観の違いはあまり明確ではないが、UDカットランダムビレットからの成形品は、繊維方向がまだらな方向を持つ模様が見られた。



図12 各種ビレットからの成形品の外観

6. 強度評価

成形後の強度評価法として、カップの側面4箇所から図13に示すように、幅10mm、長さ30mmの試験片を切出し、カップの内側の面を下にして、支点間距離20mmで3点曲げ試験を行った。

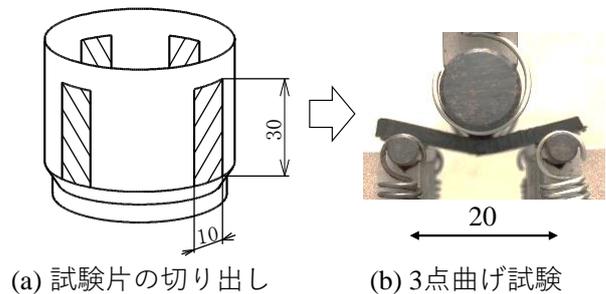


図13 カップ成形品からの試験片切出しと曲げ試験

UDカットランダムビレット材から成形したカップから切り出した4個の試験片の曲げ応力-ひずみ線図の一例を図14に示す。最大応力が300MPaのものもあれば、400MPaのものもあり、最大応力に至るまでの過程も、最大応力後の挙動も違いがある。最大応力に達した後、応力が急減しないのは、繊維方向が混ざり合っているためにいっぺんに破断しないためだと考えられる。概して高強度のものは、最大応力後急激に破断が起こって応力が急低下する傾向があるのに対し、低強度のものは、低い応力で破断が始まり、破断が進行しながらも応力を維持する場合が多い。この違いの要因はまだ明確ではないが、曲げ試験における荷重付加点裏側の表面層の繊維が試験片長手方向に配列されている(応力に対して強い)か、長手方向に垂直に配列されているか(変形しやすい)も大きな要因の一つであるように感じられる。ランダム材の場合、繊維方向がばらば

らに積み重なっているため、各場所で繊維方向がランダムであり、重なり方も様々で変形を起しやすい弱い箇所が点在する可能性が高いのではないかと考えられる。繊維長を10 mmにしたランダム材の成形も行ったが、最大曲げ応力の平均値が380MPaから310MPaに下がったものの、ばらつきの幅が小さくなった。これは繊維長が短くなって破断を起しやすい箇所が増加したものの、カットしたチップの密度が2倍になったので、場所による違いが減少したものと考えている。

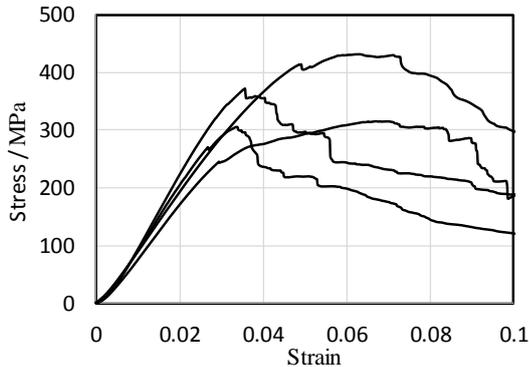


図 14 UD カットランダムビレットから成形したカップの曲げ応力-ひずみの一例

UD カット積層ビレットからのカップ成形品から切り出した4個の試験片の曲げ応力-ひずみ線図の例を図15に示す。最大曲げ応力が400MPa, 300MPa, 200MPaとばらつきが大きい。UD カット材は繊維方向を等方化して、強度のばらつきを小さくすることを意図したものであったが、平均強度はランダムビレットと同様であるが、ばらつきが大きくなる結果となった。繊維方向の等方化をめざしたが、一層ずつ方向が異なるため、円筒側面部へ流動したときに、側面の円周上に沿った各位置で、積層方向の順番が異なり、強度の高い部位と強度の低い部位が分かれた可能性があると考えている。

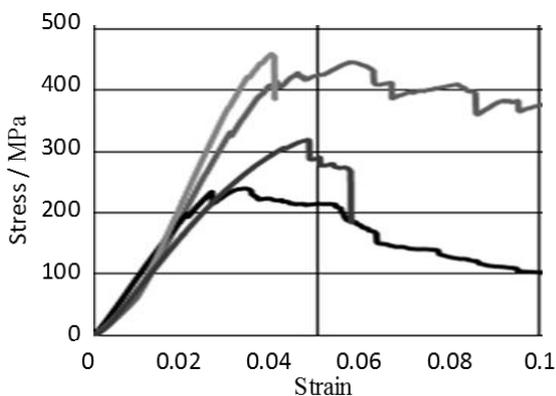


図 15 UD カット積層ビレットから成形したカップの曲げ応力-ひずみの一例

UD 配向積層ビレットからのカップ成形品から切り出した4個の試験片の曲げ応力-ひずみ線図の例を図16に示す。

最大曲げ応力が400MPa~500MPaと比較的高く、差も小さくなっている。4分の1円ごとに分割して、繊維方向を交互に変えたので、UD カット積層ビレットの場合よりも、分割がきめ細かくなり、強度の違いが平滑化したのではないかと考えている。

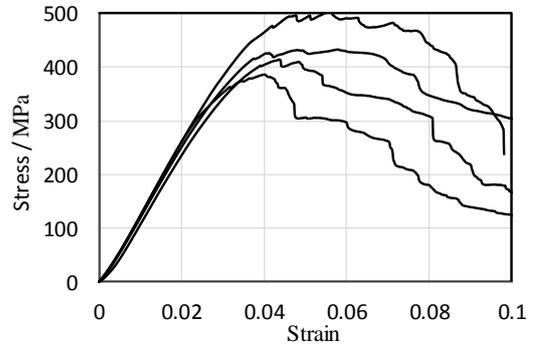


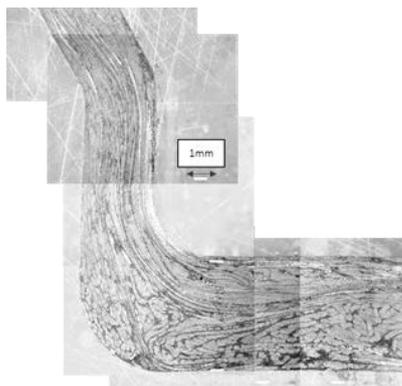
図 16 UD 配向積層ビレットから成形したカップの曲げ応力-ひずみの一例

7. 内部組織観察

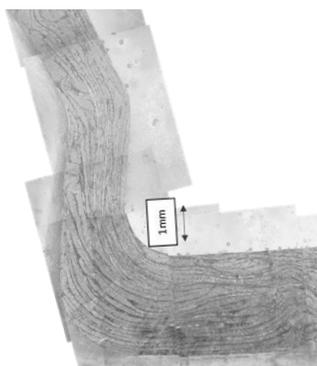
鍛造成形品の強度と内部組織との関係を検討するため、カップ成形品の断面観察を行った。底面部から側面部へ流動する断面を観察したのが図17である。これらを見ると、底面部ではポンチと接触する上部の厚さ2 mm程度の部分が圧縮されて薄くなり、側面方向へ押し出されて、側面部へ流動していることがわかる。側面部もポンチと摺動する内側側面の方が層が薄くなっている。一層の厚さは約0.1 mmとなっており、元の厚さ0.16 mmの半分近くまで薄くなっている。

カップ側面部の断面組織を比較した例を図18に示す。白い丸が炭素繊維の断面で、真円(最も小さい円)の場合、炭素繊維が紙面に垂直方向、楕円の場合は、紙面に対して斜め方向、長い楕円の場合は、紙面とほぼ同方向であることを示している。UD カットランダムビレットからの成形では、各層の繊維方向がランダムに配向しているのに対し、UD カット積層ビレットからの成形では、各層の繊維方向が比較的規則的に配列している。UD 配向積層ビレットの場合も比較的繊維配向が規則的に並んでいるように見える。

したがって、ビレットにおける繊維方向の重なりが鍛造成形後も反映していると考えられる。また各層が元の層の厚さの半分程度になったということは、各層が約2倍に平面的に広がったことを意味している。炭素繊維の長さそのものは伸びないので、この面積の広がりには、炭素繊維の束が薄くなって、繊維方向と直交する方向に広がったか、繊維方向にずれて広がったことになる。このような各層の変形と流動を明らかにして、強度向上のためにどのようにビレットにおける繊維状態を作りこむかが重要な課題である。



(a) UD カットランダムビレットからの成形



(b) UD カット積層ビレットからの成形



(c) UD 配向積層ビレットからの成形

図 17 成形品の断面（底部から側面）

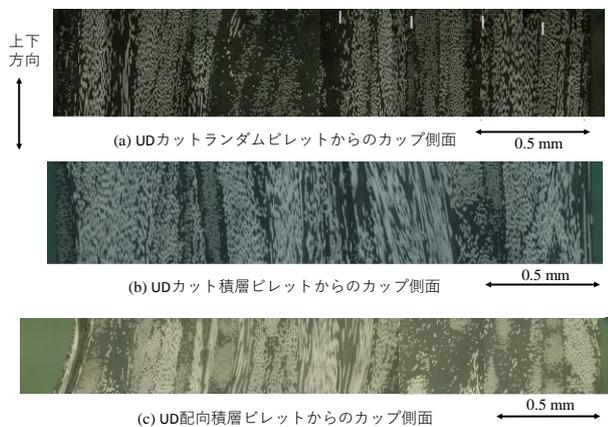


図 18 カップ成形品側面の断面組織の例

8. 結び

不連続繊維の熱可塑性 CFRP を用いた鍛造成形法の開発に関する研究を行った。成形対象を選定し、成形金型の設計と製作、成形前のビレットの製作、成形後の強度評価と内部組織観察を行った。

あらかじめ熱可塑性樹脂を含浸させた一方向炭素繊維のシートから一定の長さの素材をカットし、ランダムに配向したビレットや繊維方向を順番に変えて積層したビレットからカップ形状を鍛造した。成形したカップの側面から試験片を切出し、強度評価を行ったところ、300MPa～400MPa 程度の曲げ強度を有しているものの、ばらつきがあり、ばらつきを小さくするためには、ビレットにおける繊維配向を規則的にして、しかも緻密にすることが必要であることが示唆された。

不連続繊維 CFRP を用いて複雑形状を鍛造して成形品を得ることは、軽量で強度の高い各種部品を成形する方法として、期待されるものであり、本研究で試みたようなビレット材、金型構造によって、複雑形状の鍛造成形が可能であり、強度の高い成形品を得ることができることが明らかとなった。さらに強度の均一な成形品を得るために、ビレット材における繊維配向の工夫や鍛造成形中の繊維チップの流動・変形をさらに解明していくことが課題である。

謝 辞

本研究を進めるにあたって、共同研究を推進した群馬精工株式会社にご礼申し上げます。

本研究は公益財団法人天田財団の平成 28 年度重点研究開発助成 B の助成を受けて行ったものであり、深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 谷口洗紀, 米山猛, 立野大地, 丸茂康二, 吉川亮治, 伊藤雄介, 岡田淳一, 熱可塑性不連続 CFRP を用いた鍛造, 平成 30 年度塑性加工連合講演会講演論文集, 291-292.
- 2) 谷口洗紀, 米山猛, 立野大地, 丸茂康二, 熱可塑性 CFRP を用いたプレス成形, 型技術ワークショップ 2018. 型技術 Vol. 33, No. 13, 42-43.