

CFRTPの塑性加工入門

熱可塑性CFRPのプレス成形・鍛造・せん断加工

第1回

CFRTPの塑性加工をめざして

金沢大学名誉教授 米山 猛

はじめに

熱可塑性CFRP（CFRTP）とは、射出成形に使われているような熱可塑性樹脂（加熱すれば溶融し、冷却すれば固化するプラスチック）を炭素繊維に含浸（繊維間の隙間を樹脂で埋める）させ

た炭素繊維強化複合樹脂である。

CFRTPはこれからの軽量・高強度化の量産材料として期待されている。量産のカギとなることのひとつが、CFRTPの成形加工技術の確立である。プレス成形を始め、曲げ加工、鍛造、切断、接合などが金属加工の量産技術として使われているように、CFRTPにおいてもそうした量産技術が確

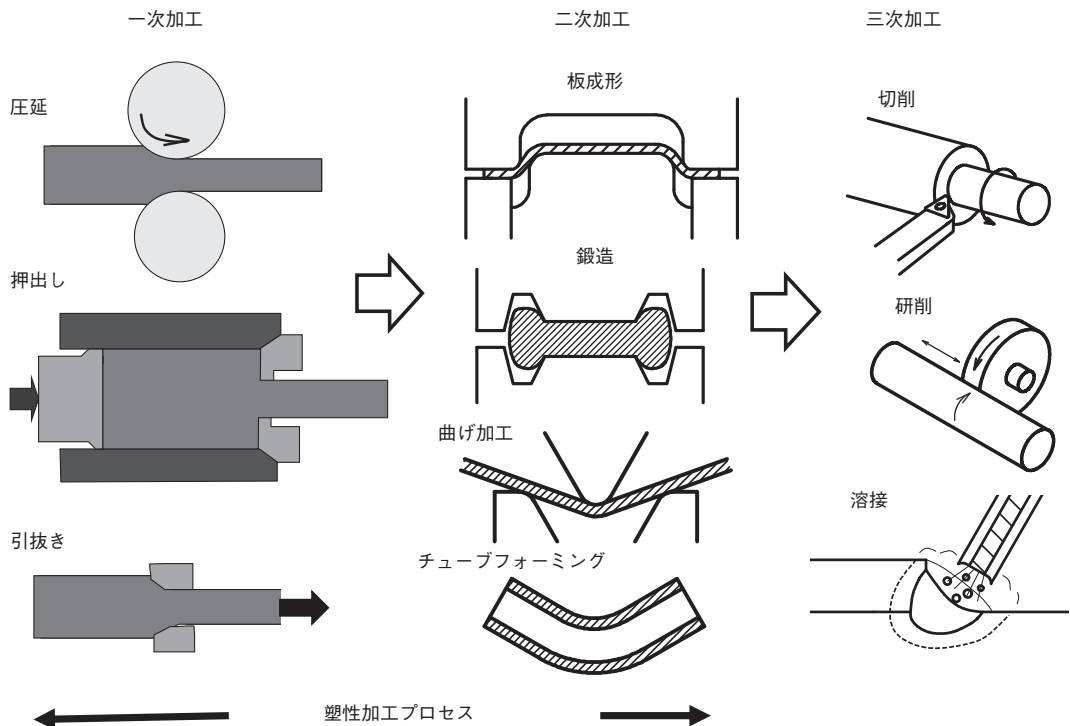


図1 金属材料を用いた量産プロセス

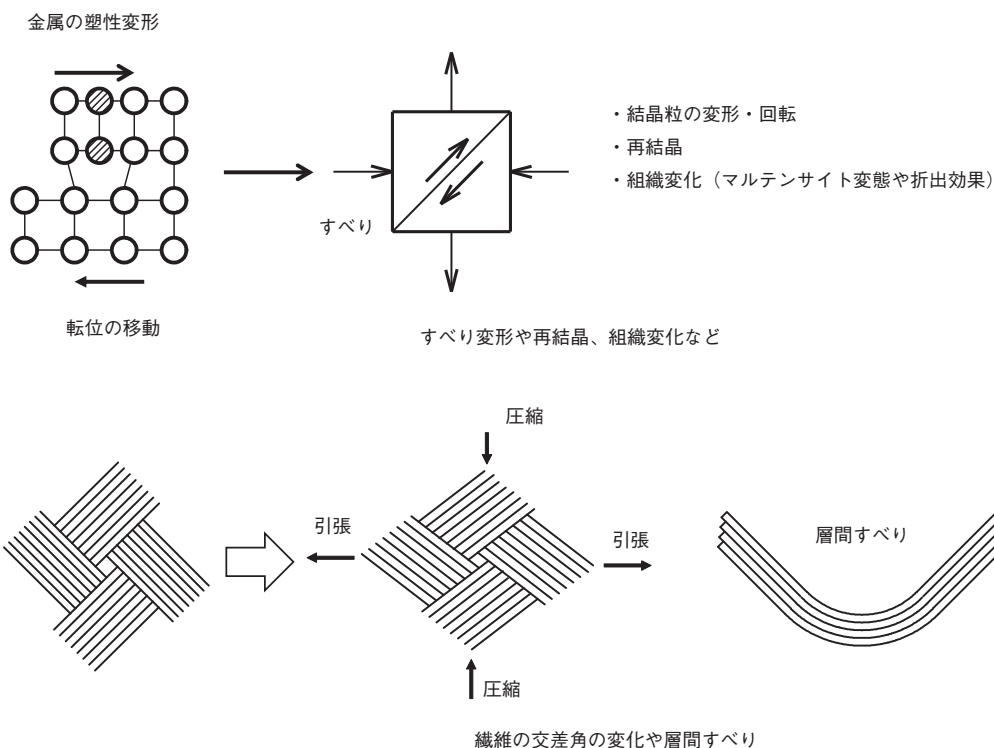


図2 金属の変形とCFRTPの変形

立することが求められる。本連載では、プレス加工など、金属の量産技術の基礎となる塑性加工の視点から、CFRTPの量産技術の確立に当たって基礎となることがらをできるだけ平易に解説していく。私たちがこれまでの研究で得てきた知識をできるだけわかりやすく解説したいと考えている。読者の皆様は、ぜひ私がこれからする知識を基にして、自らCFRTPの成形に取り組んでいただきたい。

CFRTPの塑性加工とは

まず、金属を用いた量産プロセスを図1に示す。言うまでもなく鉄をはじめとする金属材料が工業材料の主役である。金属材料は、鉄鉱石やボーキサイトなどの原材料から必要な成分の材料を作り出した後、圧延や押出、引抜などの一次加工、板成形や鍛造、曲げ加工などの二次加工、そして切削、研削、溶接などの三次加工を経て、大量生産されている。世の中に行きわたる量を生産するためには、一次加工、二次加工に見られるよ

うな、材料を変形させて形を作る「塑性加工」が不可欠である。

塑性加工とは、「材料を変形させること」と「所望の形をつくること」の二つが結合したものである。金属材料が変形する特性を活かして必要な形状を作る。この方法は、所望の形状をつくるための型（圧延ロールや押出ダイスなども含めて）を用いて、形をつくる。短時間に大量に生産することができる何が何と言っても特徴となる。この「量産」によって部品の製作コストが下がり、世の中にさまざまな機械を供給することができるようになったわけである。

そこで、「CFRTPでもこのような量産プロセスを実現できないか」というのが私たちの問題意識である。本稿では、それをこれから考えていきたい。

金属材料の変形とCFRTPの変形

金属材料の場合、「変形する」という特性がある。その一番もとになるのは、図2に示すよう

に、金属原子の配列の中に転位ができて、その転位を移動させることで変形ができるということである。転位の移動がたくさん発生して結晶粒の形も変わり、全体の形も変わっていく。変形した後の形は変わらない。さらにこのような変形とともに、加工硬化が起こったり、温度が高ければ再結晶が起こったりして特性が変化し、熱処理によって、鉄の焼入れによる効果、アルミニウムの時効硬化など、特性を変化させることができる。金属材料においては、変形するという特性と組織を変化させて特性を変えるという二つのことをいろいろと組合せて加工することができる。

それではCFRTPではどうだろうか。CFRTPは炭素繊維に熱可塑性樹脂を浸み込ませたものである。炭素繊維の1本の太さは $7\mu\text{m}$ 程度である。髪の毛の太さが $50\mu\text{m}$ 程度なので、その10分の1ぐらいである。比重は1.8。炭素繊維の強さは引張強度 $3\text{GPa}\sim 7\text{GPa}$ ある。鉄鋼材料の最高引張強さが 2GPa 程度と言われているので、それよりも高いが、金属のように塑性変形するという事はない。応力の増加とともに弾性変形して、引張強度で破断する。しかし細いので、しなやかに曲がるのである。炭素繊維で形を作るのは、この細い糸を曲げて形を作ることになる。

しかし、炭素繊維だけでは形にはならない。繊維の糸はいろいろな形に曲がってしまうので、目的の形状を維持するためには、繊維を支える基材が必要となるからである。それが樹脂の役割である。炭素繊維の隙間に浸透して炭素繊維を支える役割を果たす。炭素繊維が非常に細いので、炭素繊維1本1本の隙間に樹脂を浸み込ませるのが大きな課題である。これまでスポーツ用具や航空機などに採用されて確立してきたCFRPは、エポキシ樹脂などの熱硬化性樹脂を浸み込ませたものである。熱硬化性樹脂とは、身近なものでは接着剤である。熱硬化性樹脂が採用された理由は、樹脂の高分子同士が結合する前の状態では、粘性が低くさらさらしていて、容易に炭素繊維の隙間に浸み込むからである。炭素繊維の隙間に浸み込ませた後、加熱して高分子同士に架橋接合を作って硬化させる。こうして熱硬化性CFRPの製造法が確立してきたのだが、この熱硬化性CFRPは、樹脂が硬化した後は変形しないので、プレートな

どを作った後に変形加工をすることができない。

熱可塑性樹脂は高分子同士が絡まっているだけなので、加熱すると熔融状態になり、さまざまな形にすることができる。冷却して固化させれば、成形した形を保つことができるのである。熱可塑性樹脂を成形する代表的な方法は射出成形である。世の中に大量に普及しているプラスチック製品はほとんどすべて熱可塑性樹脂で、主に射出成形で作られている。熱可塑性樹脂に「塑性加工」が用いられない理由は、樹脂が熔融した状態では変形させるのに必要な応力（変形抵抗）が金属に比べて非常に低いので、「流動」させればよいこと、そして、金型内で冷却させれば成形品を取り出すことができるからである。また熔融温度に達していない樹脂を「塑性加工」することはできない。熔融温度に達していない樹脂を変形させようとすると、金属のような転位による移動ができないので、からまった高分子が引っ張られ、ちぎれが起こってき裂が発生したり、ボイド（空隙）が発生したりして、しまいには破断してしまう。プラスチックという名前がついていても、常温では塑性変形する特性はないからである。プラスチックのケースを床に落として割ってしまった経験は多くの方が持っているのではないだろうか。

熱可塑性樹脂の場合、溶融させても高分子の鎖そのものは既にできあがっているもので、さらさら流動するような低い粘性はなく、相当に高い粘性を持っている。たとえば「おもち」のようなイメージがそれに近いのではないだろうか。そのような粘度の高い樹脂を細い炭素繊維の隙間に浸み込ませるのは大変で、炭素繊維の束を広げた状態にして、樹脂のフィルムでサンドイッチして加熱してプレスし、炭素繊維の隙間に樹脂を浸み込ませるのが一般的である。

ともあれ、そのようにして二炭素繊維に熱可塑性樹脂が浸み込んだ熱可塑性CFRPが作られる。

さてやっと、こうしてできたCFRTPの変形の話になってくるが、先述したように炭素繊維は曲がるだけでその繊維の長さは変わらない。一方樹脂は、熔融温度にしなければ流動しない。熱可塑性樹脂の一般的な成形方法が射出成形なので、CFRTPの成形方法が射出成形になるかということそうはならないのである。射出成形の場合、スク

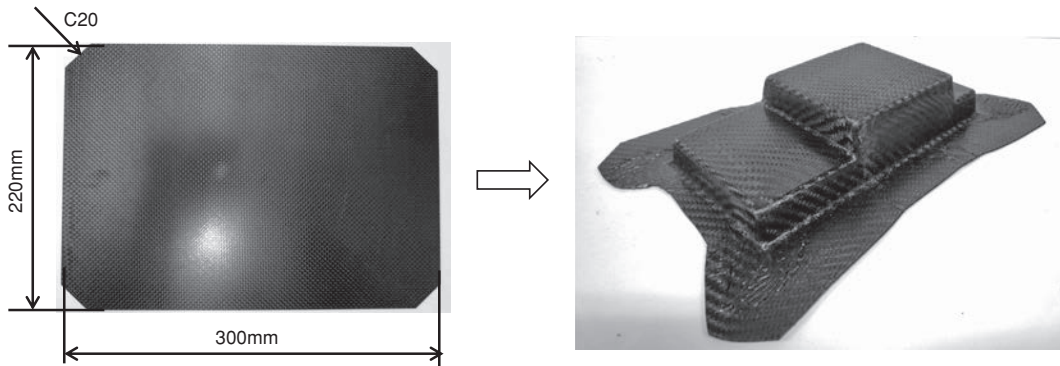


図3 CFRTP プレートから2段角筒へのプレス成形

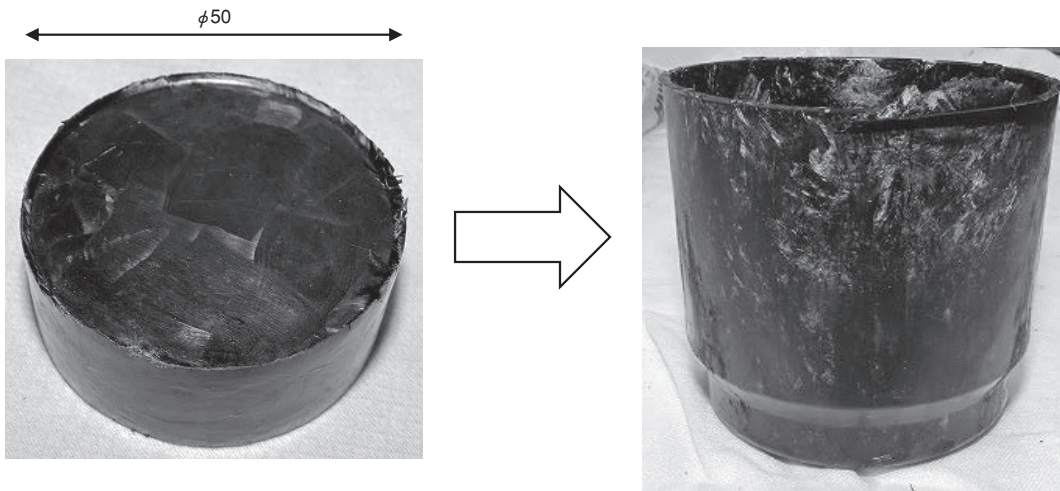


図4 CFRTP ブロックからカップへの鍛造

リユーの中で樹脂を溶融させて、ゲートと呼ばれる入口から樹脂を注入する。CFRTPをこのようなやり方で注入すると、炭素繊維がすべて短く切断されて、繊維の長さが1mmもなくなってしまふ。そうすると、炭素繊維の強度が十分発揮できないことになる。

したがって、CFRTPを加熱して樹脂を溶融状態にした状態で「変形」させるという考え方になる。このときの「変形」は、炭素繊維の弾性的な曲げ変形と溶融樹脂の流動の組合せになる。イメージとしては、「ぬれ雑巾」、あるいは「ぬらしたガーゼ」のようなものとなる。そのような「ぬれ雑巾」を目的の形に成形して、その水を凍らせて形を留めるようなイメージである。

炭素繊維は弾性変形で曲がるだけだと言ったが、炭素繊維が布のように織物になっている場合、その布は繊維方向には伸びないが、交差した45°方

向には伸びたり縮んだりする。ハンカチは4辺の方向には伸びないが、対角線方向には伸びるのと同様である。

1/4-1/4≪炭素繊維は繊維方向にしか強度がないので、プレートを作製する場合、繊維方向の異なるシートを積層する。層と層との間は樹脂だけであり、変形させると層と層とがすべる。これを「層間すべり」と言う。このことからわかるように、層同士は樹脂で接合しているだけなので、厚み方向の強度は樹脂の強度しかないのである。層と層とが剥離することを「層間剥離」と言う。層間剥離が起こると強度が低下してしまうので、起こさないように成形する必要がある。

少し話が長くなったので、織物の変形や積層したシートの変形については、次回以降に詳しく説明したいと思う。

金属の形づくりと CFRTP の形づくり

「塑性加工」とは、「変形させる」ことと「形を作る」ことが合体したものと述べた。作りたい形にはいろいろあるので、金属の塑性加工でも、板材から作る加工や鍛造のようにブロックから作る方法、またパイプ材から作る加工などがある。したがって、CFRTPでもシート材から作る方法と、ブロックから作る方法が考えられる。シート材から作るのは、長い炭素繊維の高い強度を活かして成形品を作る方法である。たとえば図3は、積層した織物シートから2段の角筒をプレス成形した例である。

ブロックから形を作る場合は、長い炭素繊維をそのまま使うことは難しいが、あまり強度が落ちない程度の長さで切った炭素繊維を使って変形加工することが考えられる。図4は繊維長20mmのCFRTPのブロックからカップを「鍛造」した例である。

このような考えで「塑性加工」する場合、どのようなことを考え、工夫しているかをこれから本連載で紹介していきたいと考えている。

おわりに

今回は、これから CFRTP の塑性加工を実現し

て量産加工を実現していこうというスローガンを説明した。量産加工を実現する方法にはさまざまなものが考えられるし、これまでになかった方法がCFRTPの加工方法として出現するかもしれない。そのような新しい発見も、量産加工を実現しようとする試みの中から出てくるものだと考える。炭素繊維複合材料の特徴は何と言っても軽く強いことである。炭素繊維の比重が1.8、樹脂の比重が1.2程度で、炭素繊維と樹脂の体積割合が同じ50%ずつであれば比重が1.5となる。まだ木より重たいではないかと言われればその通りである。しかし、アルミニウムの比重が2.7であることを考えると、だいぶ軽いことが理解できよう。CFRPの製造技術はヨーロッパが先行しているといわれているが、CFRTPを用いた量産となるとヨーロッパでも模索しているところである。つまりまだこれから多くのチャレンジができる。世界が広いのである。

次回からは連続繊維シートのプレス成形や不連続繊維の鍛造成形、その際に考慮する変形や温度・成形条件、金型の設計方法、成形に関わる周辺技術などについて述べていきたい。さらに量産加工を実現するために必要な切断技術や接合技術など塑性加工につながる技術についても解説していくつもりである。

『型技術』5月号 ★好評発売中!!

定価(本体1,400円+税)

特集 先進材料(チタン、マグネシウム、CFRP)の成形と金型技術

- 解説
- チタン合金の材料特性と加工の基礎……………東北大学 正橋直哉
 - マグネシウム合金の材料特性と室温成形性の改善……………産業技術総合研究所 千野靖正
 - マグネシウム合金のチクソモールディングの基礎……………日本製鋼所 山口 毅
 - 熱可塑性CFRP(CFRTP)の成形と金型技術の基礎……………金沢大学 米山 猛

- 事例
- 新チタン-アルミ合金の開発と成形技術……………物質・材料研究機構 鉄井利光
 - チタン合金の変形プロセスの可視化による最適成形……………シャルマン 木原武志

- 超大型タービンブレードを高精度・高品質に製造する型鍛造技術の開発と量産化……………日立金属 下平栄史、江口弘孝、青山佳祐、福井 毅、日立製作所 寺前俊哉、日本エアロフォージ 藤田啓仁、西井 健

- チタン合金の特性と生体親和性の高い生体材料の加工技術……………東海国立大学機構 吉田佳典
- サーボ駆動プレス機によるマグネシウム合金の押出加工技術……………富山高等専門学校 井上 誠
- サイドインパクトビーム一体成形CFRTPドアパネルの開発……………あいち産業科学技術総合センター 三河繊維技術センター 原田 真
- 4軸直動式デジタルサーボプレス機によるCFRP複合材料の成形技術……………放電精密加工研究所 稲田篤盛
- 連続繊維熱可塑性複合材料のハイブリッド成形……………アミノ 村井裕城
- オートクレーブ成形によるCFRPの成形と金型技術……………東京R&Dコンポジット工業 後藤新吾

◆Interview

緑々産業(株) 代表取締役社長 海藤 満氏
三菱電機(株) 名古屋製作所 放電製造部 専任 小林浩敦氏
他社の追従を許さない高精度加工を実現する微細加工技術をトータルで提案

日刊工業新聞社 出版局販売・管理部 ☎03(5644)7410