複合材料とスポーツ用品への応用

小 塚 興 治*

Composites and Their Use in Sporting Goods

KOJI KOZUKA*

Key Words . Composites, CFRP, Golf Club, Fishing Rod, Tennis Racket

スポーツ・レジャー用品業界は、炭素繊維を中心とした複合材料を積極的に導入している。本稿では、複合材料の中でもPAN系CFの物性向上と多様化について触れるとともに、スポーツ用品への応用について紹介する。

1. はじめに

スポーツ・レジャー用品業界は炭素繊維（CF）を中心とした先進複合材料（Advanced Composit Material）を積極的に導入し、軽量化、性能向上、イメージ・アップをはかり、同好者にスポーツ・レジャーをより楽しいものにさせている。本稿では、ACMの中心であるPAN系CFの物性向上と多様化について触れ、ACMがゴルフクラブ、釣竿、テニスラケットにどのように利用され、効果を発揮しているかについて紹介する。

2. PAN系CFの性能向上と多様化

1970年頃から工業生産が始まったPAN系CFは価格低減とともに需要が増大し、1990年の全世界の需要はおおよそ7千トンと推定されている。これを用途分野別にみると全世界では航空宇宙用とスポーツ用品が各40%，工業用品他が20%の比率に対し、日本では依然としてスポーツ用品が中心

で約65%，工業用品約30%，航空宇宙用他が約5%と推定されている¹⁾。

PAN系CFの代表的品種として“トレカ”T300（東レ高強度系）と“トレカ”M40（東レ高弾性系）の2品種があり、スポーツ用品にもこの2品種が中心となって開発が進められてきた。

しかし、1980年代に入ってボーイング社が民間航空機の一次構造材へCFを採用するために、より高強度（高伸度）CFの開発をCFメーカー各社に要請したことにより、CFメーカーの高強度化競争が始まり、1984年に“トレカ”T800H（T300の約1.6倍の強度）、1986年に“トレカ”T1000（T300の約2倍の強度）が開発された。一方、CF

図1 “トレカ”の品種構成³⁾

* 東レ(株) (〒520 滋賀県大津市園山1-1-1)

Toray Ind. INC. (1-1, Sonoyama 1-chome, Otsu-shi, Shiga 520)

表 1 CFの表面処理技術の分類⁴⁾

表面処理方法		内 容
酸化, エッチング	液 相 酸 化	硝酸, 過マンガン酸, クロム酸, 次亜塩素酸またはそれらの塩などの溶液による薬液酸化
	電 解 酸 化	各種電解質 (酸, アルカリ, 塩) の溶液中での陽極酸化
	気 相 酸 化	空気, オゾン, 酸素, 窒素酸化物, ハロゲンガスなどの雰囲気中での表面酸化, その他プラズマ処理など
コーティング, グラフト	有機化合物	各種ポリマによるグラフト重合およびコーティング
	無機化合物	金属めっき, CVDなど
	ウ ィ ス カ	炭素, 炭化ケイ素などのウイスカライジング

は破壊までの強度を利用するよりは変形を小さくする高弾性率を利用するケースが多く、ピッチ系高弾性率CFの開発にも刺激されて、PAN系CFの高弾性率化が進んでいる²⁾。PAN系CFの強度と弾性率のバランスの異なる品種の多様化の様子を図 1 に示す。

CFの品種の多様化は糸物性以外の面でもフィラメント数、サイジング剤の種類、撚の有無などの異なる品種があり、目的、用途によって使い分けられている。

また、樹脂を含浸したプリプレグもこれら糸の種類に加えて樹脂の種類、厚み、繊維含有率などの組み合わせで百種以上の品種がある。CFの表面は黒鉛結晶から成っているので、樹脂との接着性が良くない。そこで、通常繊維表面に何らかの処理を行って接着性を向上させるのが一般的であり、CFメーカーのノウハウとなっている。表面処理方法の例を表 1 に示す。また、CFは伸度が低く、擦過に弱い繊維であるため、織物加工、FW加工など生のCFを扱う時に毛羽が発生しやすい。そこで、毛羽の発生を防止したり、短繊維の場合は集束性を向上させる目的でサイジング剤が付与されている。サイジング剤は物性に悪影響を及ぼさないものを必要最小限付与することを基本とし、一般にはマトリックス樹脂と同類のものが用いられている。

3. ゴルフクラブ

3. 1 ゴルフシャフト

曲げ剛性（フレックス）をスチールシャフト並

図 2 ゴルフクラブシャフトの製造工程⁵⁾ (筒巻き法)

図 3 ゴルフシャフトの積層構成例

図4 0°/±45° 2層構造のCFRPシャフトの比剛性指数⁶⁾

とし、できるだけねじり剛性（トルク）もスチールシャフトに近づけ、どこまで軽量化できるかが基本となる。スチールのような均質材量の場合は、曲げ剛性が大きいシャフトはねじり剛性も大きいという相関があるが、CFRPシャフトの場合は繊維の配列によって同じ寸法でも曲げ剛性が大きくてねじり剛性が小さいシャフトが設計可能で、またその逆も可能である。

ゴルフシャフトの成形法としては筒巻き（シートワインディング）法が主として採用されている。その工程の概略と筒巻き法で成形されたシャフトの積層構成の例を図2～図3に示す。また、0°巻きと±45°巻きの2層構造にした場合の両者の比率によって曲げとねじりの比剛性（スチール

シャフトとの比）がどのように違うかを図4に示す。曲げ剛性とねじり剛性をスチール並とする設計条件では、0°巻きと±45°巻きを“トレカ”T300を使用する場合は±45°巻きの比率が60%の所が最適で約30%の軽量化が可能となる。また±45°層を高弾性率CF（“トレカ”M40）を使用すると約50%の軽量化が可能となる。

軽量化による飛距離増は衝突の式で説明されている⁷⁾。

$$v = \frac{1 + e}{1 + \frac{m}{M}} V \dots\dots\dots (2)$$

V：ボールの初速、V：ヘッドスピード
M：ヘッド質量、m：ボール質量（46g一定）
e：反発係数

すなわち、ボールの初速（飛距離）は反発係数を一定とすれば、ヘッドスピードが早いほど、またヘッドが重いほど大きくなる。ヘッドを重くするとヘッドスピードが下がるので、CFRP製シャフトを採用することにより40～60g軽くなるが、どの程度ヘッドを重くすると飛距離が最大となるかは個人差がある。

一般に飛距離の出る人は軽目のヘッドにしてヘッドスピードを上げる方が良いといわれ、逆に飛距離の出ない人は重目のヘッドにする方が効率的といわれている⁷⁾。シャフトをCFRP化することに

表3 ヘッド材料の種類（慣性二次モーメント差）による飛距離と方向のズレ⁸⁾

テストクラブのヘッド	慣性二次モーメント (g・cm ²)	芯でインパクトの飛距離	芯より15m/mトウ寄りインパクト	
			飛距離	方向のズレ
パーシモン A	2,100	196m	182m	31m
ステンレス鋼 B	2,150	198	193	15
CFRP C	2,700	207	204	9

表2 シャフト材料の種類（質量差）によるヘッドスピードおよびキャリー差の比較⁸⁾

テストクラブ	使用シャフト	シャフト重量	ヘッド重量	グリップ重量	全重量	ヘッドスピード	#1に対するキャリー差
#1	標準スチール	119g	210g	45.6g	378.6g	46.1m/s	—
#2	軽量スチール	86	210	45.6	345.6	47.6	+6m
#3	CFRP	77	210	45.6	336.6	48.1	+8m
#4	軽量CFRP	55	210	45.6	314.6	48.8	+11m

クラブ長さ：43インチ スイングマシン：TRUE TEMPER社製 スイングロボット

よる飛距離アップの実験結果を表 2 に示す。

離が増すことおよび内部を中空構造または発泡体
にすることによりパーシモン、メタルより慣性二
次モーメントを大きくすることができ、芯を外し

3. 2 ゴルフヘッド

CFRPの利点としては、反発係数が増大し飛距

表 4 ゴルフクラブ（ウッド）の成形法と構造⁶⁾

成 形 法	内 容	公開特許番号	構 造
1. 圧縮成形法 (発泡体コア)	ウレタン等の発泡体を コアにし、SMCまた は繊維・編組プリプレ グを巻き、必要に応じ てソールメタル・サイ ドメタルをインサート して圧縮成形する。	特開58-175579 59- 6073 59- 34274 59- 80266 60- 68873 61- 56670
2. 圧縮成形法 (低融点合金 コア)	低融点合金をコアにし て同上材料を巻きつけ て圧縮成形後、シャフ ト部またはソール部か らコア材を加熱溶出し 中空とする。必要に応 じてウレタン等を注入 発泡してもよい。	特開59- 2766 59- 28978 59- 57676
3. 圧縮成形法 (中空コア)	分割成形し接着で一体 化した中空コアまたは ブロー成形した中空コ アに同上材料を巻き付 け、圧縮成形する。	特開60-122581
4. 内 圧 法	コア材を中空とし内部 に袋体を収納し、コア 材の外周に上記成形材 料を巻き付け、金型内 にチャージした後袋体 の中に液体または加熱 気化剤を注入孔から高 圧注入し、内圧をかけ て成形する。	特開59- 22569 59- 22571 59- 22575 59- 22576 59-200671
5. FW/トラン スファー成 形法 (中空 または低融 点合金コア)	中空または低融点合金 コアにFW法により繊 維を巻き付けて後金型 にチャージし、隣接す るポットに固形樹脂を チャージし、加熱溶融 させ加圧注入する。樹 脂注入はレジニインジ ェクションを用いても よい。	特開59-101166 60- 63072 60-161136
6. 射出成形法 (中空または 低融点合金 コア)	中空または低融点合金 コアをインサートして、 周囲を繊維強化樹脂で 射出成形する。	特開58-195575 58-212465 59- 82873

て打った時の方向のずれが小さいこと、また飛距離のロスが小さいことが狙いであり、その実験結果を表3に示す。また、2ピースボールは糸巻きボールの1.4倍の衝撃力といわれ⁹⁾、耐久性のあるヘッドが必要になったこと、重心位置を低くすることができるため、トップ気味の打球でもボールが上がりやすいこともカーボンヘッドの特長となっている。

ゴルフヘッドの構造と成形法に関する特許、実用新案の出題は200件以上を数えるが、代表的成形法と構造を表4にまとめた。もっとも多く使用

されている方法はウレタンなどの発泡体で別途成形したコアにCFのSMCまたはクロスプリプレグ、編組プリプレグなどを巻きつけて圧縮成形する方法であるが、発泡体の耐熱性、耐圧上大きな圧力をかけられないので、ボイドが生じやすいのが難点である。

4. 釣 竿

魚が釣れた時にかかる荷重としては、先端部分はほとんど引張であるが、中間部から手元部にか

表5 釣竿の構成と特徴⁶⁾

材 料	内容および特徴	公開特許番号	構 造
1. CF織物 プリプレグ	縦横密度が一定以上の織物を使用して周方向の補強を行い、座屈強度を改善する。	特開50-151693
2. GFスクリ ムクロス付き CF一方向プ リプレグ	GF極薄スクリムクロスを貼合わせたCF一方向プリプレグを巻く。CFの目ずれ防止と座屈強度向上が狙い。	特開51- 28032
3. 織物または 0°一方向±θ 一方向スリッ ト材	CFの一方向またはアモルファス合金等をスパイラル状に巻く。座屈強度向上と意匠効果が狙い。	特開53- 86386 60- 6145 61- 8335 61- 41532
4. 短繊維系プ リプレグ	短繊維系プリプレグを単独または一方向材、織物材と組合わせて巻く。層間はく離強度、座屈強度改善が狙い。	特開58-211442 60-212333 60-212335
5. ウィスカ混 入	樹脂中にウィスカを混入させた一方向材または織物材を使用して巻く。層間はく離強度、座屈強度改善が狙い。	特開60- 38134 60- 38145 60- 63139 60-149329
6. CF極薄直 交プリプレグ	CFスクリムクロスと同重量のCF極薄一方向プリプレグを貼合わせたプリプライドプリプレグを巻く。座屈強度をさらに改善する。	特開56-162642

けては曲げの力がかかる。したがって、長手方向の剛性、強度が基本となるが、曲げ応力は十分にあっても薄肉のため座屈で破壊する場合があります、この座屈強度は次式¹⁰⁾であたえられる。

$$\sigma_{cr} = \frac{2\sqrt{2}}{9} \frac{\sqrt{E_L \cdot E_T}}{1 - \nu_L \nu_T} \cdot \frac{t}{r} \dots\dots(1)$$

E_L : 長手方向の弾性率, E_T : 周方向の弾性率
 ν_L : 長手方向のポアソン比, ν_T : 周方向のポアソン比, t : 肉厚, r : パイプ半径
すなわち、長手方向と周方向の弾性率の積の平方根に比例するので周方向の補強が重要となる。

これはパイプの寸法とも関係しており、薄肉で半径が大きいほど、すなわち、 r/t が大きいほど座屈しやすいことを意味する。したがって、長手方向の曲げ応力と座屈応力が等しくなるように必要最小限の周方向補強をするのが合理的である。

周方向の補強材としては、GFスクリムクロス付CFの一方方向プリプレグ、縦方向と横方向の材質や繊維密度を変えたCFやGFのクロス、肉厚の異なるCFの一方方向プリプレグを直交に配列して積層した直交プリプレグなども開発され、CFRP竿の軽量化に役立っている。

表 6 テニスラケットの成形法と構造⁶⁾

成 形 法	内 容	公開特許番号	構 造
1. 圧縮成形法 (外圧法)	棒状発泡体等に編組、織物等のプリプレグを被覆し、曲げながらラケット形状の型内に収め、型閉後加熱加圧成形する。	特開51－ 70031 特開52－ 72640 実開54－ 37261 特開57－ 34875	炭素繊維 表面塗装 クロスプリプレグ 発泡体コア
2. 圧縮成形法 (内圧法)	屈曲性のある中空管に編組等を被覆し、樹脂含浸後曲げながら型内に収め、型閉後中空管内に圧力をかけ、加熱加圧成形する。	特開48－ 93420 49－ 36438 53－ 27659 56－102261 56－166862	表面塗装 炭素繊維組物
3. FW/圧縮 成形法 (外圧法) (内圧法)	発泡体等の芯材または中空管にFW法により樹脂を含浸した連続繊維を巻き付け、曲げながらラケット形状の型内に収め、型閉成形する。	特開52－ 82528 52－123731 54－ 34935
4. 接 着 法 (部分補強)	木製のラケットのフレーム（フェース面、外周面、内周面）、スロート、シャフトの全表面または一部をCFRP等の硬化板で補強する。	実開49－ 51367 50－ 79562 50－ 89450 51－ 49168 52－ 99860	表面補強型 側面補強型 FRP 木製コア
5. 射出成形法 (一回成形)	予め低融点合金で成形したフレーム中心部に相当する中子を型内にインサートした後、CFRTP等を射出成形後、再加熱して低融点合金を溶出し、中空にする。	特開54－127735 56－ 34362 56－ 34363 61－ 45781 61－ 45782 61－167513	低融点合金中子

鮎竿を例にとるとCFRP竿はGFRP竿に比較して質量で約1/3、長さで2倍となって釣竿の届く範囲が広がり、長時間使用しても疲労感が少ないという利点がユーザーに認識され、80%以上がCFRP化されている。また、狙ったポイントに投げやすい、釣れた時の魚信が敏感に分かる、魚を引き寄せる時ぶれない、遠投ができる、振動減衰性が良いことも利点となっている。

釣竿は薄肉の小径のパイプであって0°巻きが主体であるため、FW法の利点が出し難く、もっぱら筒巻き法で成形されている。成形技術上重要な点は繊維乱れ防止、層間の接着強度向上、ボイド防止、曲がり防止などで、いずれも適度な圧力でしっかり巻きつけ、ラッピング張力の適正化を計り、樹脂のフロー量を調整するのがポイントとなる。

釣竿の構成は使用材料によって異なるが代表的な例を表5に示す。

5. テニスラケット

テニスラケットは必ずしも軽いほど良いといえないが、フレーム断面積を小さくしても十分な強度があることにより、質量を増やさずに打球面を大きくすることができ、オーバーサイズ（ラージフレーム、デカラケとも呼ばれる）ラケットの出現となった。打球面を大きくすることにより、ガット張力をさらに上げないとボールのコントロール性能が悪くなるため、より小さい断面積でガットの張力に耐える必要があり、比強度、比弾性率の高いCFRPが不可欠な材料となった。また、テニスラケットも振動減衰性は非常に重要な特性で、肘痛にも関係するといわれ、各社振動減衰性向上

に努力している。

テニスラケットもゴルフヘッドと同様、構造および成形に関する数多くの特許、実用新案が出願されている。主なものを表6に示す。もっとも多い成形法は圧縮成形法であり、外圧法と内圧法がある。

外圧法、内圧法ともボイド低減がキーポイントで、材料の構成、フレームの断面形状、樹脂粘度の適正化、加圧タイミングなどが影響するといわれている。英国ダンロップ社が開発した射出成形ラケットは低融点合金の中子をインサートして成形するもので、金型構造はかなり複雑であるが、高圧成形が可能であり、ガット孔を成形であけることができ、量産性の高い成形法である。

(1991-4-23 受理)

文 献

- 1) 日経ニューマテリアル, p.172 (1989.11.20)
- 2) 松井醇一; 染色工業, 36, 195 (1988)
- 3) 東レ(株)技術資料
- 4) 東レ(株)社内資料
- 5) 小塚興治; “カーボンファイバー”, 島村昭治編, p.73 (オーム社, 1984)
- 6) 小塚興治; “最新複合材料・技術総覧”, 河田幸三編, p.318 (産業技術サービスセンター, 1990)
- 7) 小田桐洋一; “科学的ゴルフ上達法”, p.126 (講談社, 1976)
- 8) 国田佳資; “FRP30年の歩み”, 強化プラスチック協会編, p.192 (1984)
- 9) 堀口維昭, 岩永 健; 工業材料, 31 [2], p.56 (1983)
- 10) 松田 滋, 奥田謙介, 大谷杉郎; “炭素繊維” p.347 (近代編集, 1983)