よくわかる炭素繊維コンポジット講座

NO1

炭素繊維概論

執筆 / 平松　徹

コガク

目　次

学習のねらい **1**

第 1 週　新たな可能性を秘める炭素繊維 **3**
1.1　炭素繊維とは 4
1.1.1　炭素繊維の定義 4
1.1.2　炭素繊維の化学組成・形態 4
1.1.3　炭素繊維の特徴 4
1.2　炭素繊維の種類と特徴 6
1.2.1　主要な炭素繊維の種類・分類と特徴 6
1.2.2　その他の炭素繊維 7
1.3　炭素繊維と炭素繊維コンポジット 9
1.3.1　炭素繊維の使われ方 9
1.4　炭素繊維の力学的特性 10
1.4.1　炭素繊維の特性試験方法 10
1.4.2　高性能繊維の種類と特徴 18
1.4.3　炭素繊維の力学的特性（他素材との比較） 19
1.5　炭素繊維の機能的特性 24
1.5.1　熱伝導率 24
1.5.2　熱膨張率 25
1.5.3　比熱 25
1.5.4　電気伝導率 26
1.5.5　耐熱性 26
1.5.6　耐熱酸化性 26
1.5.7　耐薬品性 27
1.5.8　吸水性 28
『まとめと練習問題』 **29**

第 2 週　炭素繊維の発明・開発・工業化の歴史 **31**
2.1　炭素繊維の発明・開発・工業化の概観 32

2.1.1　炭素繊維の発明から工業化開始までの概観 32
2.1.2　エジソンによる炭素繊維の発明 33
2.1.3　レーヨン系炭素繊維の生産開始から収束まで 34
2.2　PAN 系炭素繊維の発明・開発・工業化 35
2.2.1　大阪工業試験所の進藤博士による PAN 系炭素繊維の発明 35
2.2.2　英国における高性能 PAN 系炭素繊維の開発 37
2.2.3　PAN 系炭素繊維の工業化 38
2.3　ピッチ系炭素繊維の発明・開発・工業化 41
2.3.1　群馬大学の大谷博士によるピッチ系炭素繊維の発明 41
2.3.2　高性能ピッチ系炭素繊維の開発と工業化 42
2.3.3　ピッチ系炭素繊維の工業化のその後の進展 43
2.4　炭素繊維の特性と用途 45
2.4.1　炭素繊維の用途概観 45
2.4.2　炭素繊維強化熱硬化性樹脂複合材料（CFRP）としての応用例 45
2.4.3　炭素繊維強化熱可塑性樹脂複合材料（CERTP）としての応用例 47
2.4.4　その他の複合材料として使用される応用例 48
2.4.5　複合材料以外の応用例 49
2.5　炭素繊維市場の成長 50
2.5.1　炭素繊維市場拡大の歩み概観 50
2.5.2　PAN 系炭素繊維の導入期（1970 年代初期から 1980 年代前半）..... 51
2.5.3　PAN 系炭素繊維の成長期（1980 年代半ばから 1990 年代末）..... 53
2.5.4　成長期における生産能力の増大 55
『まとめと練習問題』 57

第 3 週　炭素繊維の製造方法と性能の向上 61
3.1　炭素繊維の製造方法 62
3.1.1　PAN 系炭素繊維の製造方法 62
3.1.2　ピッチ系炭素繊維の製造方法 65
3.2　炭素繊維の構造と特性 66
3.2.1　PAN 系炭素繊維の微細構造 66
3.2.2　ピッチ系炭素繊維の微細構造と特性 68
3.3　炭素繊維の理論強度・弾性率と実測値 70
3.4　炭素繊維の強度，弾性率の向上 72
3.4.1　強度の向上 72
3.4.2　弾性率の向上 74

3.4.3　樹脂接着力の向上 77
3.5　炭素繊維の強度・弾性率マップ 79
3.5.1　PAN 系炭素繊維の強度・弾性率マップ 79
3.5.2　ピッチ系炭素繊維の強度・弾性率マップ 83
『まとめと練習問題』 87

第 4 週　炭素繊維の需要量，生産能力の拡大 91
4.1　炭素繊維の中間基材の種類，使用方法 92
4.1.1　炭素繊維の中間基材の概観 92
4.1.2　炭素繊維中間基材の種類と成形方法との関係 93
4.2　炭素繊維の中間基材の作り方 100
4.2.1　炭素繊維中間基材の作り方概観 100
4.2.2　炭素繊維中間基材の作り方 100
4.2.3　炭素繊維中間基材の試験方法 108
4.3　炭素繊維の需要量の拡大 112
4.3.1　近年の炭素繊維の分野別需要量の拡大 112
4.4　炭素繊維の生産能力の増大 115
4.4.1　炭素繊維市場の拡大期（1990 年代末以降）における炭素繊維メーカーの変遷 ... 115
4.4.2　近年の炭素繊維生産能力の増大 115
4.5　炭素繊維の展望と課題 118
『まとめと練習問題』 120

STEP UP 122
参考文献 124
練習問題の解答 125
索　引 127

■ 第 1 週 ■

新たな可能性を秘める炭素繊維

【学習のポイント】

第 1 週では，炭素繊維の学習を始めるにあたって，その最も基本的な事柄について学びます。

まず，炭素繊維とは何か，その定義や他の素材と比較して特に目立った特徴について見てみます。さらに，炭素繊維は，どのような種類があり，どのような特性を有するのかを見ます。

炭素繊維は，そのままで使用されることはなく，樹脂など母材（マトリックス）に埋め込まれた状態の炭素繊維複合材料（コンポジット）として使用されますが，どのような母材と組み合わせて使用されるのかを，複合材料については第 2 分冊の「炭素繊維コンポジットの基礎」で詳しく学習しますので，第 1 分冊では「炭素繊維概論」を学習する際に必要な範囲で簡単に見てみます。

次いで，炭素繊維の最大の特徴である力学的特性について，評価方法，他素材との比較を含めて詳しく見ます。

炭素繊維は，高い力学的特性に加えて，X 線透過性が高い，耐腐食性・耐薬品性・耐熱性，熱伝導率などが高いことや熱膨張率が小さく寸法安定性に優れることなど，多くの優れた機能的特性も有しています。これらの機能的特性についても，他素材との比較を含めて学びます。

1.1　炭素繊維とは

1.1.1　炭素繊維の定義

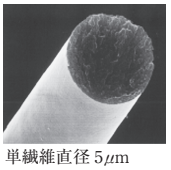
炭素繊維はゴルフクラブのシャフト，テニスラケットのフレーム，釣竿などの多くのスポーツ用具や旅客機，レーシングカー，風車の羽根などの構造材料に使われています。このように，身の回りに炭素繊維を使用した製品が増えてきていますが，炭素繊維とはどのような繊維なのでしょうか。

ISO（国際標準化機構）によると「炭素繊維」の定義は，「有機繊維を焼成して得られる炭素含有率が 90％以上の繊維」となっています。有機繊維には，炭素原子の他に水素原子や窒素原子などが含まれていますが，それを焼成（1,000℃以上の高温加熱処理）することによって，水素原子や窒素原子をガス化合物として繊維から放出して，炭素原子の組成を 90％以上とした繊維が炭素繊維です。

1.1.2　炭素繊維の化学組成・形態

炭素繊維の化学組成・形態の一例を**図 1.1** に示しましたが，直径が 5 ～ 15μm と髪の毛の 1/10 ぐらいの太さの単繊維が数千本から数万本束ねられた形態をしています。炭素繊維製品は，この繊維束を紙管の上に巻き取ったボビンの形態をしています。なお，単繊維の直径や何本の単繊維を束ねているかは製品の品種によって異なります。

化学組成	炭素（C）90％以上
単繊維直径	5～15μm
繊維束	1,000～50,000 本



単繊維直径 5μm

単繊維

単繊維 24,000 本からなる
繊維束を巻いたボビン

図 1.1　炭素繊維の化学組成・形態
（出典：西原正浩，航空技術 642，日本航空技術協会，2008）

1.1.3　炭素繊維の特徴

炭素繊維の最大の特徴は，軽くて強い，軽くて硬いということです。炭素繊維の代表的な特徴を**表 1.1** に示しましたが，比重が鉄の約 1/4 と軽く，しかも，比強度が鉄

の 10 倍以上，比弾性率が鉄の 5 倍以上と非常に高い力学的特性を有します。

表 1.1　炭素繊維の特徴

①	軽い	比重は鉄の約 1/4
②	強い	比強度は鉄の 10 倍以上
③	硬い	比弾性率は鉄の 5 倍以上
④	その他	耐腐食性（錆びない）
		耐熱性，耐薬品性
		X 線透過性，電気伝導性

比強度　：強度÷密度
比弾性率：弾性率÷密度

炭素繊維は，繊維状態のままで使用されることはなく，樹脂などの母材（マトリックス）中に埋め込まれた複合材料の形で，主として構造材料として使用されます。

構造材料として最も重要な特性は，強度や弾性率などの力学的特性ですが，同時に，同じ強度や弾性率であれば軽いほうが有利です。そのため，単位重量当たりの強度や弾性率である比強度や比弾性率が力学的特性の尺度として用いられます。炭素繊維と他素材の比強度・比弾性率の比較を**図 1.2** に示しましたが，炭素繊維は鉄（スチール）やアルミ合金に比較して比強度が 10 倍以上，比弾性率が 5 倍以上と非常に高い力学的特性を有することがわかります。

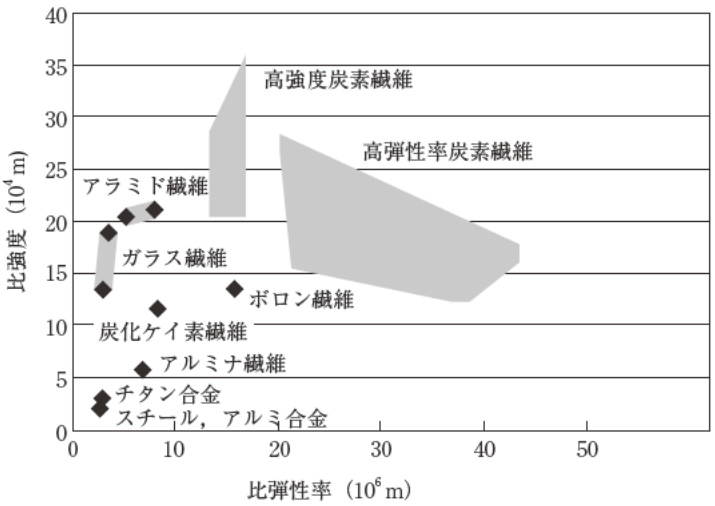


図 1.2　炭素繊維と他素材との力学的特性比較

炭素繊維は，ほぼ炭素原子だけからできているため，耐腐食性（錆びない），耐熱性，耐薬品性などが高いこと，X 線透過性や電気伝導性があるなどの優れた機能的な特徴も有します。そのため，力学的特性と機能的特性の両方を合わせて活用した用途にも多く使用されています。

1.2　炭素繊維の種類と特徴

1.2.1　主要な炭素繊維の種類・分類と特徴

炭素繊維は，原料や製造方法によって，特性の異なったものが得られます。炭素繊維の原料と種類・分類の関係を**表 1.2** に示しましたが，大きくは原料によって分類されます。

表 1.2　炭素繊維の原料と種類・分類

原料 / 種類	分類（タイプ）	グレード
PAN （ポリアクリロニトリル） /PAN 系炭素繊維	レギュラートウタイプ （1,000 ～ 24,000 本の単繊維からなる繊維束）	高性能グレード
	ラージトウタイプ （40,000 本以上の単繊維からなる繊維束）	汎用グレード
ピッチ / ピッチ系炭素繊維	等方性タイプ	低性能グレード
	異方性（メゾフェーズ）タイプ	高性能グレード
レーヨン / レーヨン系炭素繊維	最初に開発・生産されたが，現在は非常に限定された用途に極少量だけ使われている	汎用グレード 低性能グレード

PAN 系炭素繊維は，PAN（ポリアクリロニトリル）を原料とする炭素繊維で，繊維束を構成する単繊維の本数によりレギュラートウタイプとラージトウタイプがあります。

レギュラートウタイプは繊維束が 1,000 本から 24,000 本の単繊維から構成された比較的細束の炭素繊維で，力学的特性も高く取扱性にも優れ，高性能グレードに分類されます。

ラージトウタイプは，繊維束が 40,000 本以上の単繊維から構成された太束の炭素繊維で，レギュラートウタイプに比較すると力学的特性も取扱性も劣り，汎用グレードに分類されます。

ピッチ系炭素繊維は，原料ピッチの特性に対応して，等方性タイプと異方性（メゾフェーズ）タイプがあります。

等方性タイプは，石油や石炭から得られたピッチをそのまま原料に用いて製造します。黒鉛結晶構造が未発達で等方的（均質）な微細構造をしていて，力学的特性が低く，低性能グレードに分類されます。

異方性（メゾフェーズ）タイプは，ピッチを熱処理して得られる平面的なピッチ分子が層状に配列した液晶（メゾフェーズ）ピッチを原料に用いて製造します。黒鉛結晶構造が発達した異方的な微細構造をしていて，力学的特性も高く，高性能グレードに分類されます。

レーヨン系炭素繊維は，最初に開発されましたが，PAN 系炭素繊維やピッチ系炭素繊維に性能・コスト面で劣るため，現在は非常に限定された用途に極少量だけ生産されています。

なお，PAN 系炭素繊維が炭素繊維の使用量の 90% 以上を占め，ピッチ系炭素繊維は 10% 以内と推定されています。

炭素繊維を力学的特性から分類する方法が炭素繊維協会から提案されていて，広く使われています。この分類法では，主として炭素繊維の弾性率の値によって 5 種類に分類されますが，それについては，3.5 炭素繊維の強度・弾性率マップで詳しく説明します。

1.2.2　その他の炭素繊維

前述の表 1.2 のほか，**表 1.3** に示しましたように炭素繊維の仲間として気相成長炭素繊維や活性炭素繊維がありますが，構造材料としては使用されていません。

表 1.3　その他の炭素繊維の仲間

種　類	特　徴
気相成長炭素繊維（VGCF）	ベンゼンなどの炭化水素と水素の混合気体を超微粒鉄粉などの触媒存在下で 1,000℃前後で加熱して作られる数センチメートル以下の短い繊維
活性炭素繊維（ACF）	炭素繊維を賦活処理（約 800℃の水蒸気との反応）して作られる多孔質な構造の非常に比表面積の大きい繊維で，吸着剤として使用される