

## 目 次

## 第1章 炭素と炭素化の概観

1.1 炭素の構造	1
1.1.1 炭素の状態図と現実の炭素材料	1
1.1.2 炭素の微細構造	4
1.1.3 中間および高次構造	12
1.2 炭素化経路の特徴	23
1.2.1 気相経由の炭素化	23
1.2.2 液相経由の炭素化	33
1.2.2.1 原料有機物	33
1.2.2.2 液相経由の特徴と無置換芳香族の変化	37
1.2.2.3 置換基の影響	42
1.2.2.4 異種元素の影響	45
1.2.2.5 触媒の作用	48
1.2.3 炭素質メソフェーズ	50
1.2.3.1 メソフェーズの4つの側面	50
1.2.3.2 液晶構造と分子構造	52
1.2.3.3 エマルジョンとしてのメソフェーズ	56
1.2.3.4 炭素前駆体の生成	61
1.2.4 固相経由の炭素化	62
1.2.4.1 固相炭素化の初期過程	63
1.2.4.2 高温炭素化過程	72
1.3 炭素の物性	79
1.3.1 物理的性質	80
1.3.1.1 比重	80
1.3.1.2 比熱	81
1.3.1.3 熱伝導率	81
1.3.1.4 熱膨張係数	82
1.3.1.5 電気比抵抗とその他の電磁気特性	82
1.3.1.6 強度および弾性率	85

1.3.1.7	その他の物理的特性	87
1.3.2	化学的性質	88
1.3.2.1	酸化反応	88
1.3.2.2	層間化合物の生成	91
1.3.2.3	金属および金属酸化物との反応	94
	[参考文献]	95

## 第2章 炭素繊維の原料と製法

2.1	原料および製品の分類	101
2.2	製法の要点	104
2.3	製法各論	106
2.3.1	PAN系炭素繊維	106
2.3.1.1	共重合体組成	107
2.3.1.2	紡糸法	109
2.3.1.3	熱安定化と炭素化	111
2.3.1.4	安定化および炭素化過程の反応	117
2.3.1.5	その他の試み	127
2.3.1.6	緊張黒鉛化の効果	128
2.3.2	セルロース系炭素繊維	128
2.3.2.1	基本的な弱点と対策	129
2.3.2.2	炭素化反応	130
2.3.2.3	緊張炭素化の効果	134
2.3.3	ピッチ系炭素繊維	134
2.3.3.1	原料の問題点	135
2.3.3.2	各種原料ピッチ	139
2.3.3.3	ピッチ類の粘弾性的挙動	144
2.3.3.4	メソフェーズピッチの調製法	146
2.3.3.5	紡糸	151
2.3.3.6	安定化および炭素化工程	153
2.3.3.7	炭素化工程における構造変化	154
2.3.4	気相成長炭素繊維 (VGCF)	159
2.3.4.1	VGCFの特徴と製法	159
2.3.4.2	VGCFの成長機構	161
2.3.4.3	その他の試み	164
2.3.5	その他の炭素繊維	165

2.3.5.1 脱水 PVA 系炭素繊維	165
2.3.5.2 リグニンおよびガラス状炭素繊維	166
2.3.5.3 活性炭素繊維	168
[参考文献]	169

### 第3章 炭素繊維の種類，構造と物性

3.1 力学的特性と炭素繊維の種類	173
3.1.1 炭素繊維の種類	173
3.1.2 引張り強度と構造との関係	175
3.1.3 弾性率と配向性との関係	179
3.1.4 その他の力学的性質	180
3.2 炭素繊維の構造	183
3.2.1 構造の概要	183
3.2.2 PAN, レーヨン系 HPCF の構造	187
3.2.3 ピッチ系炭素繊維の構造	195
3.2.4 その他の炭素繊維と緊張黒鉛処理	198
3.3 電磁気および熱的物性	200
3.3.1 電気伝導率	200
3.3.2 熱電効果	203
3.3.3 熱的性質	203
3.3.4 化学的物性	205
3.3.4.1 化学組成と吸水率	205
3.3.4.2 耐薬品性と耐酸化性	206
3.3.4.3 層間化合物の生成	208
3.3.5 表面特性	211
3.3.6 表面処理とその効果	217
3.3.6.1 薬液酸化法	218
3.3.6.2 電解酸化法	220
3.3.6.3 気相酸化	222
3.3.6.4 ぬれ特性と接触角	223
3.3.6.5 コーティングおよびグラフト	226
3.4 市販炭素繊維の特性と他繊維との比較	229
3.4.1 繊維状物質の中における位置	229
3.4.2 市販炭素繊維の商品名と特性	229
3.4.3 関連する他種繊維	230

3.4.3.1 ガラス繊維	230
3.4.3.2 アルミナ繊維	234
3.4.3.3 SiC 繊維とホウ素繊維	236
3.4.3.4 アラミド繊維 (ArF)	236
3.4.3.5 ウィスカー繊維	237
[参考文献]	237

## 第4章 開発および市場の歴史と動向

4.1 開発小史	241
4.1.1 レーヨン系と PAN 系	241
4.1.2 ピッチ系とリグニン系	246
4.1.3 その他の炭素繊維	248
4.2 生産量と価格の変遷	248
4.3 利用分野と製品形態	251
4.4 炭素繊維産業の特色	255
4.5 生体に対する影響	257
[参考文献]	261

## 第5章 高性能 CFRP の物性

5.1 複合材料総説	263
5.2 ACM の定義	266
5.3 CFRP の物性	269
5.3.1 異方性	270
5.3.2 静的力学特性-I. (強伸度, 弾性率)	274
5.3.2.1 コンポジット物性試験法	274
5.3.2.2 一方向プリプレグからの CFRP	274
5.3.2.3 織布 (プリプレグ) からの CFRP	282
5.3.2.4 マット (プリプレグ) からの CFRP	285
5.3.3 静的力学特性-II. (疲労・クリープ)	285
5.3.3.1 疲労	285
5.3.3.2 CFRP 疲労挙動実例	286
(1) 金属との比較	286
(2) UD-CFRP の疲労挙動	287
(3) 多方向積層 CFRP 疲労挙動	287

5.3.3.3	疲労文献紹介	288
5.3.3.4	クリープ	288
5.3.4	動的力学特性—衝撃，振動特性	290
5.3.4.1	衝撃	290
5.3.4.2	振動減衰	294
5.3.5	熱的性質	295
5.3.5.1	熱膨張率，熱的寸法安定性	295
5.3.5.2	熱伝導率	297
5.3.6	電気的性質	297
5.3.6.1	電気伝導率	297
5.3.6.2	雷 撃	299
5.3.6.3	浮遊 CF による電気施設での障害	300
5.3.7	耐環境性	301
5.3.7.1	耐水性	301
5.3.7.2	耐薬品性	304
5.3.7.3	耐熱性	304
	(1) 短時間の耐熱特性	304
	(2) 長時間の耐熱特性	306
	(3) 熱サイクル時の耐熱特性	306
5.3.7.4	耐候性	307
5.3.7.5	耐宇宙空間性	307
5.4	<b>CFRTP の物性</b>	307
5.4.1	CFRTP 物性の特徴	307
5.4.2	力学的性質	310
5.4.3	疲労クリープ	311
5.4.4	摩擦，摩耗特性	314
5.4.5	熱的性質	315
5.4.6	電気的性質	315
5.4.7	耐環境性	317
5.4.7.1	耐水性	317
5.4.7.2	耐薬品性	317
5.4.7.3	耐熱性	317
5.5	<b>CF/耐熱性樹脂の物性</b>	318
5.5.1	CF/耐熱性樹脂物性の特徴	318
5.5.2	耐熱性	319
5.6	<b>CFRM の物性</b>	319

5.6.1	CFRM 物性の特徴	319
5.6.2	力学的性質	322
5.6.3	疲労, クリープ	325
5.6.4	摩擦, 摩耗特性	325
5.6.5	耐食性	327
5.7	ハイブリッド複合材料の物性	327
5.8	CF 複合材料の界面	331
	(1) 一方向引揃 (UD) 積層品, 0° 面内引張	334
	(2) UD 積層品, 0° 面内圧縮	335
	(3) 剪断	337
	(4) 板端ハク離	337
	(5) 衝撃後圧縮強度	338
	[参考文献]	339

## 第6章 高性能 CFRP の設計

6.1	CFRP 設計のフロー	343
6.2	CFRP 構造設計技法	344
6.2.1	CFRP の材料設計と設計技術	344
6.2.2	最適設計	346
6.2.3	複合材料の解析技術	349
	6.2.3.1 積層板理論	349
	6.2.3.2 層間応力	350
	6.2.3.3 マイクロメカニクス	352
6.2.4	引張	353
	6.2.4.1 応力集中	353
	6.2.4.2 継手	354
6.2.5	座屈	356
	6.2.5.1 圧縮部材の座屈	356
	6.2.5.2 曲げ座屈	357
	6.2.5.3 ねじり座屈	357
	6.2.5.4 板の座屈	357
	6.2.5.5 シェルの座屈	358
6.2.6	曲げ・せん断・ねじり	358
6.2.7	FW (Filament Winding) ・トラス・シェル構造	360
6.2.8	回転体	362

6.2.9 残留熱応力	363
6.2.10 複合機能設計	363
6.3 コンピュータによる構造設計技術	364
6.3.1 FEM による構造解析	364
6.3.2 FEM による構造解析プログラム	366
6.3.2.1 NASTRAN	366
6.3.2.2 SAP	366
6.3.2.3 ARGUS	367
6.3.3 CAD (Computer Aided Design)	367
6.3.3.1 CAD の概要	367
6.3.3.2 構造解析への CAD の応用	367
[参考文献]	369

## 第7章 高性能 CF 複合材料の成形加工

7.1 成形加工のフロー	374
7.2 基材各論	376
7.2.1 中間基材	376
7.2.1.1 一方向引揃品	376
(1) 製法	376
(2) 製品	380
(3) 製品の性状	380
7.2.1.2 織布, 編布, 組紐	380
(1) 製法	381
(2) 製品	383
7.2.1.3 不織布	384
(1) 製法	384
(2) 製品	384
7.2.1.4 モールドイング・コンパウンド	384
(1) 製法	385
(2) 製品	385
7.2.1.5 ペレット	386
(1) 製法	387
(2) 製品	387
7.2.2 マトリックス樹脂	387
7.2.2.1 熱硬化性樹脂	389

(1) エポキシ樹脂	389
(2) 不飽和ポリエステル, ビニルエステル樹脂	398
(3) フェノール樹脂	400
7.2.2.2 熱可塑性樹脂	401
7.2.2.3 耐熱性ポリマー	404
7.2.2.4 その他の樹脂	408
(1) 熱硬化性樹脂への熱可塑性樹脂の混入	408
(2) 熱可塑性樹脂末端を熱硬化型に変成	408
(3) PMMA	409
7.2.3 マトリックス金属	411
7.8 成形法各論	412
7.3.1 オープン・モールド成形	413
7.3.2 プレス成形	413
7.3.3 フィラメント・ワインディング	414
7.3.4 プルトレーション	418
7.3.5 レジン・インジェクション法	420
7.3.6 フォーム・リザーバー・モールド	422
7.3.7 リアクション・インジェクション・モールド	423
7.3.8 インジェクション・モールド	424
7.3.8.1 BMC 射出成形	424
7.3.8.2 インサート, アウトサート成形	425
7.3.8.3 ロスト・モールド法	426
7.3.9 スタンプ・モールド	426
7.3.10 CFRM の成形加工	427
7.3.10.1 CFRM 中間基材	428
(1) CFRM 製造法の変遷	428
(2) 表面被覆法	429
(3) Ti-B 被覆法	430
(4) イオン・プレーティング法	431
(5) 高圧 casting/溶湯鍛造	432
7.3.10.2 CFRM の成形法	433
7.4 機械加工と接合	434
7.4.1 機械加工	434
7.4.1.1 CFRP	434
(1) 切断加工	434
(2) 切削加工	436

a) 旋削	436
b) フライス加工	437
(3) 研削加工	437
(4) 穴あけ加工	438
(5) プレス加工	439
(6) タップ立て	439
7.4.1.2 CFRTP	439
(1) 切断加工	439
(2) 切削加工	440
a) 旋削	440
b) フライス加工	440
(3) 穴あけ加工	440
(4) 歯切り加工	440
(5) その他の加工	440
a) 仕上げ加工	441
b) ネジ切り, タップ立て	441
7.4.2 接合	441
7.4.2.1 接着接合	441
(1) 接着様式の分類と概略	441
(2) 接着剤と表面処理	444
(3) 実際の応用例	448
7.4.2.2 ボルト接合	452
(1) ボルト接合の概略	452
(2) 面圧強さにおよぼす形状の効果	453
(3) 繊維配列角の影響	454
(4) 側圧の影響	455
7.4.2.3 電気腐食	456
〔参考文献〕	457

## 第8章 高性能 CF 複合材料の用途

8.1 工業界へのインパクト	461
8.2 用途全容	465
8.3 ACM のコスト/パフォーマンス	465
8.3.1 ACM 基材, 中間基材, コスト (価格)	465
8.3.2 CFRP と他材料の C/P 比較	465

8.3.3 CFRP のコスト・ゾーン	469
8.4 用途各論	469
8.4.1 航空宇宙	469
8.4.1.1 航空機	469
(1) 歴史的概観	470
(2) 使用概念（コンセプト）と使用形態	472
(3) 成形技術	472
a) パネル材	472
b) ソリッド材	475
c) 使用現況	479
(c.1) 航空機	479
(c.2) ヘリコプター	479
(c.3) エンジン部材	480
(c.4) グライダー	480
8.4.1.2 宇宙機器	481
8.4.1.3 将来展望	485
8.4.2 スポーツ・レジャー	486
8.4.2.1 高級スポーツ用具	486
(1) 釣竿	486
(2) 釣りール	489
(3) ゴルフクラブ	490
(4) テニス・ラケット	491
(5) バドミントン・ラケット	492
(6) スキー	494
a) スキー板	494
b) スtock	494
(7) アーチェリー	494
a) リム	494
b) スタビライザー	495
c) サイト	495
d) アロー	495
(8) バット	495
(9) ボート（セイルおよびパワー）	495
8.4.2.2 オーディオ機器、楽器	498
(1) スピーカー振動板	498
(2) その他のオーディオ部品	499

(3) 楽 器	500
8.4.3 自動車	500
8.4.3.1 駆動系	504
8.4.3.2 シャーシ, 懸架系	505
(1) 板バネ	505
(2) フレーム	508
(3) トランスミッション・サポート	509
(4) エアコン・ブラケット	509
8.4.3.3 ボディ, 小部品	510
8.4.3.4 エンジン部品	510
(1) コネクティング・ロッド	511
(2) ピストン・ピン	511
(3) プッシュロッド	513
8.4.3.5 将来展望	513
8.4.4 産業機器	513
8.4.4.1 ウラン濃縮用遠心分離機	513
8.4.4.2 スーパー・フライホイール	515
8.4.4.3 風 車	518
8.4.4.4 医 療	519
(1) X線機器	519
a) CT 天板	520
b) フィルム密着板	521
c) フィルムカセット	521
(2) 補装具・車椅子	521
a) 補装具	522
b) 車椅子	522
(3) 靱帯代用	522
8.4.4.5 機 械	523
(1) 繊維機械	523
(2) 煙草製造機分配管	524
(3) バルブ	524
(4) 振動フィーダ板バネ	524
(5) 自動製図機ドラム	524
(6) 郵便物自動区分機シャトル・プレート	524
(7) 研削盤クイル, 中ぐり盤のボーリング・バー	525
(8) 遠心分離機	525

8.4.4.6 その他	525
(1) アンテナ	525
(2) 測定機器	525
8.4.4.7 将来展望	526
(1) 産業用ロボット	526
(2) 海洋構造物	526
(3) 超伝導技術関連	526
8.4.5 CFRM	527
〔参考文献〕	528

## 第9章 一般複合材料の物性

9.1 複合の効果と目的および母材	531
9.1.1 複合効果	531
9.1.2 複合の目的	533
9.2 摺動特性	533
9.2.1 摩擦・摩耗特性とその評価方法	533
9.2.2 高分子材料に対する炭素繊維の効果	536
9.2.2.1 摩擦係数	536
9.2.2.2 限界 PV 値	543
9.2.2.3 耐摩耗性	548
9.2.2.4 湿性摩擦	550
9.2.3 金属材料に対する炭素繊維の効果	556
9.2.4 摩擦材料に対する炭素繊維の効果	557
9.2.4.1 有機系合成摩擦材料	557
9.2.4.2 セミメタリック系摩擦材料の改良	564
9.2.4.3 炭素系摩擦材料	567
9.3 電磁気的特性	567
9.3.1 炭素繊維強化複合材料の導電性	567
9.3.1.1 接触伝導機構の理論	568
(1) 二次元モデル (炭素繊維系)	568
(2) 三次元モデル (炭素繊維系)	570
(3) 数値計算	570
9.3.1.2 接触伝導機構の実験と理論の対比	571
9.3.1.3 ポッピング伝導機構の可能性	573
9.3.1.4 複合系の導電性の水準	574

9.3.1.5 制電特性	577
9.3.2 電磁遮蔽特性	579
9.3.2.1 電磁遮蔽効果と測定方法	579
9.3.2.2 炭素繊維系電磁遮蔽材料の特性	583
9.4 化学的特性	587
9.5 脆性材料の補強	591
9.5.1 セメント系材料	591
9.5.1.1 長繊維補強系	592
(1) 応力一ひずみ曲線の形状	594
(2) 引張り初きれつ強度と $V_f$ との関係	594
(3) 終局引張り強度	595
(4) 変外特性およびきれつの間隔と $V_f$ との関係	597
9.5.1.2 短繊維補強系	600
9.5.1.3 繊維長および骨材の影響	607
9.5.1.4 繊維物性との関連	612
9.5.1.5 基材の形態と複合化の仕方	616
9.5.1.6 耐久性	617
9.5.1.7 電磁特性	622
9.5.2 炭素系材料	623
(参考文献)	625

## 第10章 一般複合材料の加工と用途

10.1 摺動材料	629
10.1.1 カム, 歯車	629
10.1.2 活字体	631
10.1.3 軸受, プッシュ, リングなど	633
10.2 電磁気特性を利用した材料	636
10.2.1 制電材料	636
10.2.2 導電材料	638
10.2.3 電磁遮蔽材料	638
10.3 耐食材料	640
10.4 摩擦材料	644
10.4.1 有機系合成摩擦材料	644
10.4.2 炭素系摩擦材料	646
10.5 建築土木材料	648

10.6 その他 .....	652
〔参考文献〕 .....	654

## 第11章 非強化材料としての利用

11.1 高温断熱材 .....	657
11.2 シール材 .....	661
〔参考文献〕 .....	666

## 第12章 試験方法

12.1 繊維の試験方法 .....	667
12.1.1 繊維構造の解析方法 .....	668
12.1.1.1 黒鉛化度 .....	668
12.1.1.2 配向性 .....	668
12.1.1.3 高次構造 .....	671
12.1.1.4 表面の構造と物性 .....	671
12.1.2 繊維物性の試験方法 .....	672
12.1.2.1 織度 .....	672
12.1.2.2 より数 .....	673
12.1.2.3 密度および比重 .....	673
(1) A法：液置換法 .....	673
(2) B法：密度こう配管による測定 .....	674
12.1.2.4 水分 .....	674
12.1.2.5 pH .....	675
12.1.2.6 引張り強さおよび引張り弾性率 .....	676
(1) A法：単繊維試験方法 .....	676
(2) B法：樹脂含浸ストランド試験方法 .....	679
12.1.2.7 体積抵抗率 .....	682
(1) A法：単繊維試験方法 .....	682
(2) B法：繊維束試験方法 .....	683
12.1.2.8 サイジング剤付着率 .....	685
(1) A法：2-ブタノン抽出法 .....	685
(2) B法：硫酸洗浄法 .....	686
(3) C法：熱分解法 .....	686
12.1.2.9 強さおよび弾性率の試験結果 .....	687
12.1.2.10 サイジング剤付着率の試験結果 .....	695

12.2 中間基材の試験方法 .....	697
12.2.1 炭素繊維織物試験方法 .....	697
12.2.1.1 密度 .....	697
12.2.1.2 幅, 長さおよび重さ .....	698
12.2.1.3 厚さ .....	699
(1) A 法 .....	699
(2) B 法 .....	699
(3) 試験例および留意点 .....	699
12.2.1.4 引張り強さ .....	700
12.2.2 プリプレグの試験方法 .....	701
12.2.2.1 単位面積当たりプリプレグ重さ, 単位面積当たり炭素繊維重さ, 樹脂 含有率および繊維含有率 .....	703
(1) 方法A .....	703
(2) 方法B .....	704
12.2.2.2 揮発分 .....	705
12.2.2.3 樹脂流れ .....	705
12.2.2.4 ゲルタイム (ゲル化時間).....	707
12.2.2.5 水分 .....	708
12.2.2.6 タック .....	709
12.3 複合材料の試験方法 .....	710
12.3.1 繊維含有率および空洞率 .....	710
(1) A法: 燃焼法 .....	710
(2) B法: 硝酸分解法 .....	712
(3) C法: 硫酸分解法 .....	713
12.3.2 せん断強さ .....	714
12.3.3 引張り特性 .....	717
12.3.4 曲げ特性 .....	720
A法: 3点曲げ法 .....	722
B法: 4点曲げ法 .....	723
12.3.5 圧縮特性 .....	724
12.3.6 衝撃特性 .....	729
12.3.7 その他の試験方法 .....	729
〔参考文献〕 .....	730

## 付 録

付録 1 人造黒鉛の格子定数および結晶子の大きさ測定法 (改正案).....	733
1. 試料 .....	733
2. 標準シリコン .....	733
3. X線用試料 .....	733
4. 回折線図形の測定 .....	733
5. 回折線図形の補正 .....	734
6. 格子定数の決定 .....	734
7. 結晶子の大きさの決定 .....	738
8. 測定結果の表示 .....	739
付録 2 試験回数計算図表 .....	741