



## 目 次

## I 複合材料の力学

1	基礎理論	1
1.1	概 説	1
1.2	ラミナの弾性	3
1.2.1	異方性体の弾性特性	3
1.2.2	ラミナの微視弾性	14
1.3	ラミナの強さと破壊	26
1.3.1	複合材料の破損則	26
1.3.2	ラミナの微視強度	37
1.4	積層板の弾性特性と強さ	44
1.4.1	積層板の弾性特性	44
1.4.2	積層板の強さ	55
1.4.3	複合材料と破壊力学	62
1.5	界面の力学	71
1.5.1	界面の応力分布	71
1.5.2	Pull out の力学と界面強さ	76
1.5.3	MMC の界面	82
1.6	複合材料の動力学	89
1.6.1	振 動	89
1.6.2	疲 れ	100
1.6.3	衝 撃	112
1.6.4	粘弾性, クリープ	121
2	複合構造としての力学	132
2.1	概 説	132
2.2	1次元部材の解析	133
2.2.1	引 張 り	133

2.2.2	曲 げ	136
2.2.3	座 屈	143
2.3	平板の面内問題	145
2.3.1	基礎理論	145
2.3.2	解 析	150
2.4	平板の曲げ, 座屈, 振動	167
2.4.1	平板の曲げ	167
2.4.2	平板の座屈	172
2.4.3	平板の振動	182
2.5	複合材料の接合の力学	186
2.5.1	機械的接合	186
2.5.2	接着接合	197
2.5.3	パイプの継手	207
2.5.4	サンドイッチ板の継手	214

## II 複合材料の物性

1	概 論	235
2	力学特性	238
2.1	概 説	238
2.2	基材の性質	240
2.2.1	補強用繊維	240
2.2.2	マトリックス	242
2.3	GFRP の力学特性	245
2.3.1	静的特性	245
2.3.2	クリープ特性	250
2.3.3	疲れ特性	251
2.4	CFRP の力学特性	252
2.4.1	静的強さ	253
2.4.2	疲れ強さ	259
2.4.3	衝撃強さ	261

2.4.4	次世代産業基盤技術研究開発制度における開発樹脂	262
2.5	その他の PMC	262
2.6	金属基複合材料	268
2.7	繊維強化コンクリート	272
2.7.1	連続繊維による一方向強化コンクリート	273
2.7.2	短繊維ランダム強化コンクリート	274
3	電氣的性質	276
3.1	複合超電導線	276
3.1.1	超電導材料	276
3.1.2	極細多心超電導線	276
3.1.3	超電導心線のツイスト	277
3.1.4	安定化超電導線	278
3.2	誘導および絶縁特性	280
3.2.1	誘電特性	280
3.2.2	絶縁抵抗特性	282
3.2.3	絶縁破壊特性	285
3.3	圧電特性	287
3.3.1	圧電複合材料の理論式	287
3.3.2	0-3型圧電複合材料の理論式	291
3.4	電磁波特性	294
3.5	電磁波シールド特性	302
3.6	超格子膜	304
3.6.1	ヘテロ接合と超格子	304
3.6.2	超格子の電子構造	306
3.6.3	超格子の電氣的性質	308
4	磁氣的性質	311
4.1	保磁力の複合則	311
4.2	高透磁率特性	313
4.3	高周波特性	316
4.4	磁気記録特性	319

4.5	磁性流体	321
4.5.1	複合材料としての磁性流体	321
4.5.2	磁性流体の分散安定性	322
4.5.3	磁性流体の物性	323
5	光学的性質	325
5.1	屈折率, 反射率, 吸収率	325
5.1.1	太陽光選択吸収膜	325
5.1.2	金属微粒子の分散系	327
5.1.3	半導体超格子	328
5.2	光磁気機能	329
5.2.1	磁気光学効果	329
5.2.2	磁気光学複合膜	330
5.3	光異性化反応	332
5.4	光ファイバ	338
5.4.1	光ファイバの特徴	338
5.4.2	光ファイバの原理	338
5.4.3	光ファイバの構造, 種類	338
5.4.4	構成材料による光ファイバの分類	339
5.4.5	被 覆	341
5.5	透明耐熱フィルム	341
6	熱的性質	345
6.1	熱膨張と熱ひずみ	345
6.1.1	熱膨張の原因	345
6.1.2	固体の線膨張率と体膨張率	346
6.1.3	線(体)膨張率の複合則	346
6.1.4	熱ひずみ	349
6.2	熱 応 力	350
6.2.1	粒子および繊維強化複合材料の熱応力	350
6.2.2	積層板の熱応力	352
6.3	熱伝導率	354
6.3.1	積層複合材料	354

6.3.2	粒子分散複合材料	355
6.3.3	その他の複合材料	359
6.4	断熱特性	359
6.5	遮熱特性	362
6.6	バイメタル	364
7	防振・制振	367
7.1	拘束型防振・制振材料	367
7.1.1	制振材料の機能と構成	367
7.1.2	拘束型制振材料の特性	367
7.2	非拘束型制振材料	370
7.3	摩擦・摩耗	374
7.3.1	摩擦・摩耗現象	374
7.3.2	分 類	374
7.3.3	高分子系	375
7.3.4	金属系	376
8	化学的性質	380
8.1	耐薬品性, 耐食性	380
8.1.1	樹脂の劣化	380
8.1.2	FRPの耐食性	384
8.2	電食性	388
8.3	耐酸化性	390
8.4	電極材料	392
8.5	触 媒	396
8.5.1	触媒物性と活性	396
8.5.2	複合触媒による反応例	400
8.5.3	触媒設計	400
8.6	生体適合性	401
8.6.1	生体適合性とは	401
8.6.2	生体適合性材料の表面構造	402
8.6.3	生体適合性複合材料	403
8.6.4	他の生体適合性材料	404

9	界面物性	406
9.1	吸水性	406
9.2	複合膜の透過	408
9.2.1	複合膜（ラミネート材料）における透過係数	408
9.2.2	複合膜における異常な透過性	409
9.2.3	充填材を添加した複合材料のガス透過	413
9.2.4	多孔質層のガス透過	414
9.3	浸透膜	418
9.3.1	逆透過膜	418
9.3.2	浸透気化膜	419
9.4	複合分離膜	423
9.4.1	分離膜の複合化	423
9.4.2	複合分離膜の透過係数	424
9.4.3	種々の複合分離膜	424
9.5	複合イオン交換膜	426
9.5.1	複合イオン交換膜の種類	426
9.5.2	モザイク膜	426
9.5.3	バイポーラー膜	427
9.5.4	多層膜	429
10	放射線特性	430
10.1	X線特性	430
10.1.1	X線の透過性	430
10.1.2	放射能による材料損傷と照射利用	430
10.1.3	人工多層分光格子と反射ミラー	433
10.2	電子線特性	436
10.3	中性子線特性	439
10.3.1	変位損傷	439
10.3.2	核変換損傷	441
10.3.3	複合材料の中性子に対する特性	442

## III 材料と成形法

1	概 説	459
2	素 材	463
2.1	補 強 材	463
2.1.1	無機繊維	463
2.1.2	有機繊維	472
2.1.3	金属繊維	476
2.1.4	ウイスカ	478
2.1.5	粉体（充填材）	481
2.2	マトリックス	485
2.2.1	プラスチック系マトリックス	485
2.2.2	金属系マトリックス	501
2.2.3	セラミック系マトリックス	505
2.2.4	その他のマトリックス	509
2.3	副 資 材	513
2.3.1	硬 化 剤	513
2.3.2	その他の副資材	519
3	界 面	523
3.1	プラスチック系複合材料の界面	523
3.1.1	熱硬化性プラスチック基複合材料の界面	523
3.1.2	熱可塑性プラスチック基複合材料の界面	530
3.1.3	エラストマー系複合材料の界面	533
3.2	金属基複合材料の界面	536
3.2.1	界面反応の影響	537
3.2.2	濡れ性の影響	539
3.2.3	金属基複合材料の界面における問題点	540
3.3	セラミック基複合材料の界面	543
3.3.1	金属繊維系	543
3.3.2	カーボン繊維系	544

3.3.3	セラミック繊維系	545
3.3.4	ウイスカ系	546
3.4	その他の複合材料の界面	547
3.4.1	コンクリート系複合材料	547
3.4.2	ラミネート, クラッド材	549
3.4.3	木質系複合材料の界面	551
4	予備成形材料	553
4.1	プラスチック系予備成形材料	553
4.1.1	熱硬化性プラスチック系予備成形材料	553
4.1.2	熱可塑性プラスチック系予備成形材料	561
4.1.3	エラストマー系予備成形材料	567
4.2	金属系予備成形材料	568
4.2.1	グリーンテープ	568
4.2.2	溶射テープ	569
4.2.3	イオンプレATINGシート	570
4.2.4	溶射プリフォーム	571
4.2.5	鑄造用プリフォーム	573
4.2.6	金属めっき系	574
4.3	木質系予備成形材料	574
4.3.1	積層予備材料	574
4.3.2	塗料	575
4.3.3	空隙充填用合成高分子	576
4.3.4	防腐剤, 難燃剤	577
5	成形法	578
5.1	プラスチック系複合材料の成形法	578
5.1.1	熱硬化性プラスチックの成形法	578
5.1.2	熱可塑性プラスチックの成形法	603
5.1.3	エラストマー系複合材料の成形法	615
5.2	金属基複合材料の成形法	619
5.2.1	一次成形	619
5.2.2	二次成形	629

5.3	セラミック基複合材料の成形法	633
5.3.1	繊維強化セラミック複合材料の成形法	633
5.3.2	カーボン/カーボン複合材料の成形法	638
5.4	その他の複合材料の成形法	640
5.4.1	コンクリート系複合材料の成形法	640
5.4.2	ラミネート、クラッド材の成形法	643
5.4.3	木質系複合材料の成形法	647
6	各種複合材料の特性	649
6.1	プラスチック系複合材料の特性	649
6.1.1	熱硬化性プラスチック基複合材料の特性	649
6.1.2	熱可塑性プラスチック基複合材料の特性	656
6.1.3	エラストマー系複合材料の特性	661
6.2	金属基複合材料の特性	666
6.2.1	カーボン繊維強化金属の特性	666
6.2.2	ボロン繊維強化金属の特性	668
6.2.3	炭化けい素繊維強化金属の特性	669
6.2.4	アルミナ繊維強化金属の特性	672
6.3	セラミック基複合材料の特性	673
6.3.1	セラミック基複合材料の概要	674
6.3.2	セラミック基複合材料の各種特性	675
6.4	その他の複合材料の特性	683
6.4.1	コンクリート系複合材料の特性	683
6.4.2	ラミネート、クラッド材の特性	690
6.4.3	木質系複合材料の特性	694

## IV 設 計

1	概 説	711
1.1	FRP 構造の設計	711
1.2	FRP 構造設計の問題点	713

2	設計法	715
2.1	設計条件	715
2.1.1	FRP 設計基準の現状	715
2.1.2	FRP 設計基準制定のねらい	716
2.1.3	限界応力（強さと剛性値）の求め方	717
2.1.4	安全率の決め方	720
2.1.5	想定寸法での発生応力・変形の計算	723
2.1.6	許容応力と発生応力との比較	723
2.2	信頼性と安全設計	726
2.2.1	主構造設計の観点から見た複合材料の特徴	726
2.2.2	複合材強度の信頼性	726
2.2.3	安全設計	729
2.2.4	複合材構造の信頼性試験	730
2.2.5	構造の品質保証	735
2.2.6	保全性	735
2.3	材料設計と構造設計	739
2.3.1	材料設計	739
2.3.2	構造設計	746
2.4	最適設計	758
2.4.1	最適構造設計の手法	758
2.4.2	最適設計の具体例	759
3	複合材構造の設計	764
3.1	積層材の設計	764
3.1.1	剛性設計	764
3.1.2	強度設計	777
3.1.3	耐環境設計	789
3.2	構造要素および構造物の設計	804
3.2.1	骨組構造の設計	804
3.2.2	積層板の設計	811
3.2.3	積層殻の設計	829
3.2.4	サンドイッチ板の設計	841

3.2.5	補強板の設計	852
3.2.6	圧力容器の設計	863
3.2.7	補強膜構造の設計	874
3.3	複合材料の設計/解析システム	904
3.3.1	構造要素の設計/解析システム	904
3.3.2	構造物の設計/解析システム	923

## V 試験・検査

1	試験法	949
1.1	概説	949
1.2	基材の試験法	951
1.2.1	繊維	951
1.2.2	マトリックス	954
1.3	静的試験法	961
1.3.1	引張試験	961
1.3.2	圧縮試験	968
1.3.3	曲げ試験	974
1.3.4	層間せん断試験	980
1.3.5	横せん断試験	985
1.3.6	面内せん断試験	989
1.3.7	面圧(支え)試験	995
1.3.8	破壊じん性試験	1000
1.4	光弾性試験	1012
1.4.1	基礎理論	1012
1.4.2	適用例	1014
1.5	動的試験	1020
1.5.1	疲れ試験	1020
1.5.2	衝撃試験	1030
1.5.3	クリープ試験	1046
1.6	物性試験	1054

1. 6. 1	化学的試験	1054
1. 6. 2	熱的試験	1059
1. 6. 3	耐劣化試験	1065
1. 6. 4	電気的試験	1068
1. 6. 5	物理化学的試験	1072
1. 6. 6	光学的試験	1073
2	非破壊検査法	1078
2. 1	概 説	1078
2. 2	アコースティックエミッション	1080
2. 2. 1	原 理	1080
2. 2. 2	方 法	1082
2. 2. 3	AE 試験	1083
2. 2. 4	AE 検査規定	1084
2. 3	電 磁 波	1085
2. 3. 1	原理および特徴	1085
2. 3. 2	応 用 例	1087
2. 4	超 音 波	1090
2. 4. 1	超音波検査法	1090
2. 4. 2	複合材料中のマトリックス測定	1091
2. 4. 3	複合材料中の補強材の測定	1093
2. 4. 4	複合材料中の欠陥の測定	1095
2. 5	放 射 線	1097
2. 5. 1	各種 X 線透過試験法	1097
2. 5. 2	複合材料に対する放射線透過試験	1098
2. 5. 3	X 線 CT スキャナ	1100
2. 5. 4	中性子ラジオグラフィ (NRT)	1101
2. 6	レーザホログラフィ	1102
2. 6. 1	レーザホログラフィによる非破壊検査の概要	1103
2. 6. 2	レーザホログラフィの各手法による複合材料の 内部欠陥検出例	1104

3	試験データの処理	1108
3.1	測定結果の精度	1108
3.1.1	測定器の精度	1108
3.1.2	測定誤差	1109
3.2	測定結果のまとめ方	1109
3.2.1	数値の整理	1109
3.2.2	グラフの整理	1111
3.3	統計的試験方法	1112

## VI 応用

1	FRPの用途概要	1121
1.1	GFRPの概況	1121
1.1.1	GFRPの生産量と用途別需要量	1121
1.1.2	FRTPの動向	1121
1.2	CFRPの概況	1124
1.2.1	カーボン繊維の生産量	1124
1.2.2	カーボン繊維の需要量	1126
1.2.3	用途別開発動向	1127
1.3	ArFRPの概況	1128
1.3.1	バラ系アラミド繊維の生産量	1129
1.3.2	ArFRPの用途概要	1129
1.3.3	ArFRTPの用途概要	1129
1.4	R-RIMの概況	1130
2	MMC (FRM) の概要	1134
2.1	MMCの長所と応用例	1134
2.2	分野別開発動向	1136
2.3	MMCの応用に当たっての注意	1138
3	FRC (Ceramics) の概要	1139
3.1	工具としての応用	1139
3.2	耐熱構造材料としての応用	1141

3.3	断熱材料としての応用	1142
4	FRC (Cement) の概要	1143
4.1	FRC の土木分野への適用	1143
4.2	FRC の建築分野への適用	1144
4.2.1	GRC の用途	1144
4.2.2	CFRC の用途	1144
4.2.3	SFRC の用途	1145
5	用途別各論	1147
5.1	航空機	1147
5.1.1	機体構造	1147
5.1.2	エンジン部材	1151
5.2	宇宙機器	1154
5.2.1	宇宙機器への応用の現状	1154
5.2.2	宇宙ステーション建設計画と今後の展望	1157
5.3	自動車	1159
5.3.1	実用例および検討例	1160
5.3.2	樹脂化の動向	1165
5.4	鉄道車両	1165
5.4.1	鉄道車両と FRP	1165
5.4.2	鉄道車両における FRP の長所	1165
5.4.3	鉄道車両に使用する FRP の条件	1167
5.4.4	使用例	1167
5.4.5	鉄道車両における FRP の課題	1168
5.5	舟艇・船舶	1168
5.5.1	プレジャーボート, 漁船	1168
5.5.2	実用艇	1172
5.6	建築・建設機材	1175
5.6.1	浴槽, サニタリーユニット	1175
5.6.2	波板, 平板	1180
5.7	農業・海洋・土木関連器材	1181
5.7.1	農業・海洋関連器材	1181

5.7.2	トンネル構築機材	1184
5.8	耐食機器	1188
5.8.1	耐食 FRP と樹脂ライニング	1188
5.8.2	代表的な応用事例	1188
5.9	タンク, 容器	1191
5.9.1	成形法とタンクの種類	1192
5.9.2	用 途	1192
5.9.3	規格, 基準	1194
5.9.4	タンク, 容器のニーズ	1195
5.10	電気・電子機器	1195
5.10.1	重電機器関連	1195
5.10.2	超電導・極低温機器関連	1196
5.10.3	弱電機器関連	1196
5.11	エネルギー機器	1198
5.12	フライホイール, 工作機械	1201
5.12.1	フライホイール	1201
5.12.2	工作機械	1204
5.13	スポーツ用具	1206
5.13.1	ス キ ー	1207
5.13.2	テニスラケット	1209
5.13.3	ゴルフクラブ	1210
5.14	福祉機器, 車椅子	1211
5.14.1	FW バイブの設計	1211
5.14.2	ジョイントの設計	1212
5.14.3	車椅子フレームの設計	1213
5.14.4	フィールドテストによる改良	1213
5.15	生体材料	1214
5.16	兵 器	1216
5.17	その他の用途例	1219
5.17.1	安全帽 (ヘルメット)	1219
5.17.2	FRP 浄化槽, FRP 便槽	1219

5.17.3	道路, 橋梁部材など	1219
5.17.4	ロボット構成部材	1220
5.17.5	ファニチャー類	1220
5.17.6	X線診断・治療用設備, 器具類	1220
5.17.7	遊園地設備・器具・遊具, プールなど	1220
5.17.8	マネキン, 店舗設備など	1221
5.17.9	カメラボディー, 精密機器部材・部品など	1221

## 付 録

付録1	主要記号一覧	1227
付録2	主要略号一覧	1239
付録3	単位換算表	1242
付録4	複合材料の力学特性に関する試験方法の比較	1247
付録5	複合材料関係データベース	1254

索 引		1255
-----	--	------

