

基礎からわかるFRP

— 繊維強化プラスチックの基礎から実用まで —

強化プラスチック協会 編

コロナ社

執筆者一覧 (執筆順)

まつぎ 松崎	りょうすけ 亮介 (東京理科大学)	1 章, 5.1, 5.3 節
もりもと 森本	てつや 哲也 (宇宙航空研究開発機構)	2.1.1 項
さかた 坂田	かずひろ 憲泰 (日本大学)	2.1.2, 2.1.3 項
こいずみ 小泉	ゆうすけ 雄介 (日本ユピカ株式会社)	2.2, 2.3 節
なかい 中井	くにひこ 邦彦 (中井 FRP 技術事務所)	3.1 ~ 3.17 節, 6.5 節
なかい 仲井	あさみ 朝美 (岐阜大学)	3.18 節
とどろき 轟	あきら 章 (東京工業大学)	4, 7 章
うえだ 上田	まさひと 政人 (日本大学)	5.2, 5.4, 5.5 節, 6.3, 6.4, 6.6, 6.7 節
なかだ 中田	まさゆき 政之 (金沢工業大学)	5.6 節
なかたに 中谷	はやと 隼人 (大阪市立大学)	5.7 節
ほそい 細井	あつし 厚志 (早稲田大学)	5.8 節
よこざき 横関	ともひろ 智弘 (東京大学)	6.1, 6.2 節
みずたに 水谷	よしひろ 義弘 (東京工業大学)	8 章

(2016 年 3 月現在)

はじめに

本書は強化プラスチック協会の創立 60 周年（2015 年）を記念して編集した記念出版である。加えて日本複合材料学会の創立 40 周年記念の記念出版でもある。強化プラスチック協会では、毎年繊維強化プラスチック（fiber reinforced plastics：以下 FRP と略記）の入門者向けの講習会を実施してきた。その教科書である『だれでも使える FRP — FRP 入門』（2002 年発行）を発展させて広く世の中に公開出版し、日本における FRP 産業や日本における FRP の教育に役立ててもらうために本書の作成を 60 周年記念で企画したものである。

FRP とはどのような特色を持っている素材であるのかという基礎的なことから、どのように成形するかという点に重点を置いてやさしく解説しており、FRP の市販の教科書にはない特色を持った本になっていると思う。

日本における FRP は 1950 年代の輸入原料を用いた釣竿製造が確認されている最初の国産製品となっているが、軍需部門で 1944 年頃からアメリカで開発が開始されている。1955 年頃にはアメリカのディズニールランドですでに遊具関係に利用され、民生品にも活用され始めている。1955 年 4 月 1 日に強化プラスチック協会は創立され、翌年社団法人認可されている。1960 年代以降はさまざまな民生品で FRP が活用されている。

日本のバブル景気崩壊後の経済事情の悪化と FRP 製品の廃棄の問題で一時 FRP の利用が減少したが、近年は軽量化、省エネ材料として再び脚光を浴び始め、航空機や自動車などの構造材料として適用が拡大され始めている。また土木や建築系への適用も拡大してきている。

このような情勢の中で、日本の大学教育では従来型の均質で材料特性が方向によらない金属材料を取り扱うだけで終始している例も多くあり、FRP 産業では独自に教育を必要としていたのが実情である。本書が今後の日本の産業における FRP 教育の一助になれば幸いである。

2016 年 1 月

一般社団法人強化プラスチック協会 会長 邊 吾一
情報・編集委員会 委員長 轟 章

目 次

1. FRPの利用と用途

1.1 FRP の 定 義	1
1.2 FRP の長所と短所	2
1.3 FRP の 用 途	5
1.3.1 水まわり製品	5
1.3.2 船 舶	7
1.3.3 航空宇宙機構造	7
1.3.4 自 動 車	7
1.3.5 環境, エネルギー	8
1.3.6 タ ン ク	9

2. FRP の 材 料

2.1 織 維	11
2.1.1 炭 素 織 維	11
2.1.2 ガ ラ ス 織 維	20
2.1.3 天 然 織 維	24
2.2 樹 脂	25
2.2.1 熱硬化性樹脂	26
2.2.2 熱可塑性樹脂	31
2.2.3 取り扱い注意事項	32

2.3 副 資 材	32
2.3.1 充 填 材	32
2.3.2 硬化剤, 促進剤	35
2.3.3 離 型 剤	36
2.3.4 着 色 剤	36
2.3.5 助剤 (消泡剤, 減粘剤, 紫外線吸収剤)	36
2.3.6 低 収 縮 剤	37

3. 成 形 法

3.1 成形法の基礎	38
3.1.1 概 要	38
3.1.2 成形法の選択	39
3.1.3 成形材料	39
3.1.4 成形型	41
3.1.5 成形技術	42
3.1.6 後 加 工	43
3.2 ハンドレイアップ成形法	45
3.3 スプレーアップ成形法	47
3.4 バッグ成形法	49
3.4.1 減圧バッグ成形法	49
3.4.2 加圧バッグ成形法	50
3.5 オートクレーブ成形法	51
3.6 RTM 成形法	53
3.7 インフュージョン成形法	56
3.8 MMD 成形法	58
3.9 SMC 成形法	60
3.10 BMC 成形法	63
3.11 FW 成形法	67
3.12 FRPM 管成形法	72

3.13	引抜成形法	75
3.14	連続パネル成形法	76
3.15	遠心成形法	77
3.16	人造大理石成形法	78
3.17	耐食FRP成形法	79
3.18	熱可塑性複合材料の成形法	81
3.18.1	中間材料の加熱を型外で実施するスタンピング成形法	82
3.18.2	金型の加熱・冷却時間を短縮する急速加熱冷却成形法	82
3.18.3	金型の温度勾配を利用した連続成形法(引抜成形法)	84
3.18.4	連続繊維と長繊維樹脂射出成形のハイブリッド成形法	85

4. 応力ひずみの計算

4.1	複 合 則	86
4.2	単層の力学	90
4.3	アングルプライの力学	91
4.4	積層板の力学	94
4.5	短繊維複合材料	99

5. 特 性

5.1	静的試験	100
5.2	疲労試験	105
5.3	衝撃試験	110
5.4	耐候性試験	115
5.5	耐食試験	117
5.6	クリープ試験	120
5.6.1	はじめに	120

5.6.2	高分子材料の構造と粘弾性	120
5.6.3	時間-温度換算則	124
5.6.4	樹脂のクリープコンプライアンス	126
5.6.5	CFRP のクリープコンプライアンス	127
5.6.6	お わ り に	132
5.7	継手強度試験	132
5.7.1	機 械 的 継 手	132
5.7.2	接 着 継 手	135
5.8	層間はく離試験	138

6. 設 計 法

6.1	破 壊 則	144
6.1.1	最大応力則	144
6.1.2	最大ひずみ則	146
6.1.3	Tsai-Hill 則	147
6.1.4	Hoffman 則	148
6.1.5	Tsai-Wu 則	149
6.1.6	Hashin 則	149
6.2	積層板設計	150
6.3	継手設計	154
6.4	座 屈	161
6.5	安 全 率	168
6.5.1	概 要	168
6.5.2	静的特性値および限界値	169
6.5.3	安全率に影響する要因係数	169
6.5.4	設計と安全率	175
6.5.5	流体管の内圧計算例	176
6.6	有限要素法	177
6.7	シミュレーション	179

7. 機能的性質

7.1 導電率, 誘電率と絶縁破壊	184
7.2 比熱, 熱伝導率と線膨張係数	190
7.3 密度, 融点と振動減衰	193
7.4 屈折率	194

8. 非破壊試験

8.1 はじめに	196
8.2 代表的な非破壊試験	196
8.2.1 目視試験	196
8.2.2 放射線透過試験	197
8.2.3 超音波探傷試験	197
8.2.4 アコースティックエミッション試験	199
8.2.5 赤外線サーモグラフィ試験	199
8.3 検出対象となる欠陥と非破壊試験の適用例	200
8.3.1 製造時に発生し得る欠陥	200
8.3.2 供用中に発生し得る欠陥	200
8.3.3 適用例	201
8.4 将来への課題と展望	201

引用・参考文献	203
---------	-----

強化プラスチック協会創立 60 周年記念出版のご案内	210
----------------------------	-----

索引	211
----	-----

1 FRP の利用と用途

1.1 FRP の 定 義

FRPとは、F：fiber（繊維）、R：reinforced（強化）、P：plastics（プラスチック（ス））の略語で「繊維強化プラスチック」のことを指し、図1.1に示すように繊維で補強されたプラスチック材料である。また、FRPは複合材料の一つといえる。複合材料とは、「2種類以上の材料を混合することで、単一種類の材料では達成できない特性を持ち、達成する材料の中で異種材料の間に明確な界面が存在し、たがいに固溶しない材料」という定義がされている。例えば、ガラス繊維強化プラスチックはガラス繊維とプラスチックから構成され、自動車タイヤは鋼繊維とゴム材料、鉄筋コンクリートは鋼ロッドとセメントから構成されているので、どれも複合材料である。しかしながら、合金は複数の材料（元素）から構成されているが、異種材料間で明確な界面を持ってお

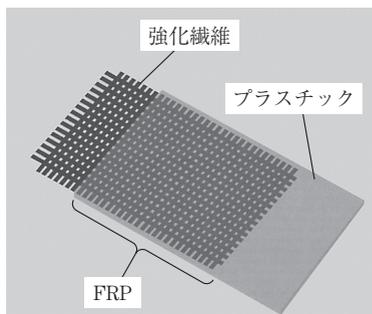


図1.1 FRPの構成【出典：J. Wanberg：Composite materials fabrication handbook #1, p. 6, Wolfgang Productions（2009）】

らず、複合材料には含めない。

FRP はおもに繊維とプラスチックから構成されており、繊維は一般的に高い引張強度と剛性を持つため、強化材と呼ばれる。しかし繊維は非常に細く、布のような柔軟性を持つため圧縮や曲げに弱く構造材料としては使用できないため、プラスチック（母材、マトリックス (matrix) と呼ばれる）で複合化することで、高強度な部材となり、圧縮や曲げにも使用できるようになる。FRP はプラスチックを繊維で強化した材料であるとともに、きわめて高い強度を持つ繊維材をプラスチックで固めた材料である。

1.2 FRP の長所と短所

FRP は、高強度・高剛性の繊維と、比較的軽量なプラスチックを複合化することで、軽くて高強度・高剛性という特徴を有する。複合材料の特性を表す指標として、強度や剛性を密度で除して求める比強度と比剛性が使われる。従来の金属材料と比較すると、**図 1.2** に示すように FRP は非常に高い比強度・比剛性を持ち、したがって、重量軽減が大きな課題である飛行機などの輸送機

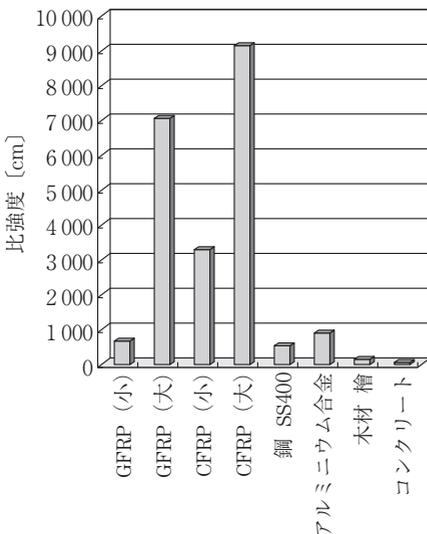


図 1.2 各種材料の比強度の比較【出典：強化プラスチック協会：だれでも使える FRP — FRP 入門, p.6 (2002)】

器やスポーツ用器具に適した材料となっている。また、FRPは破壊する際に、比較的高い衝撃吸収性能を持つ。

FRPは繊維が強く剛性が高いため、配置する繊維の方向によって材料特性が変化する異方性がある。このため、**図 1.3**に示すように設計要求に応じて材料特性を仕立てること（テーラリング）ができ、従来の金属材料のような全方位に等しい特性を有する**等方性材料**（isotropic material）ではなし得ない特徴を持つ。通常は、**図 1.4**に示すように一方向にそろった繊維層を複数重ねて積層板として使用する。積層の仕方により、例えば引っ張ると材料が曲がるといった新しい材料特性を設計することもできる。

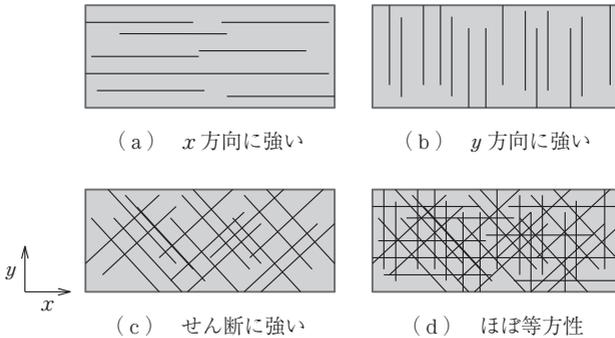


図 1.3 FRP の材料異方性

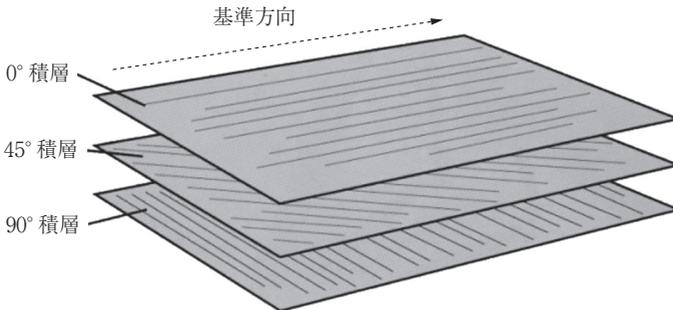


図 1.4 FRP 積層板【出典：John Wanberg：Composite materials fabrication handbook #1, p.9, Wolfgang Productions (2009)】

4 1. FRP の利用と用途

FRP は基本的にはプラスチック材料であるため、錆びにくく腐りづらい特性を持ち、タンクローリーや化学プラント用材料として使用することができる。また、繊維の種類に応じて任意の電気絶縁性や導電性を付与することもできる。例えば、強化材にガラス繊維を用いた **GFRP** (glass fiber reinforced plastics) は絶縁性を示し、炭素繊維を用いた **CFRP** (carbon fiber reinforced plastics) は導電性を示す (図 1.5)。電波の遮断や通過についても導電率と同様に制御することができる。断熱性や熱伝導特性は金属材料と比較して低いが、用いる繊維の特性や配向方向に大きく依存し要求に応じて設計することができる (図 1.6)。ガラス繊維を用いた GFRP の場合、樹脂と屈折率をほぼ等しく設計することで光透過性が高いクリア FRP も作製可能である。また、FRP のマトリックスは成形時点では液状で強化材は柔軟であり、基本的にはその場で形をつくるため、二次加工が少なく複雑な構造物を一体で成形可能である。

一方で FRP の短所としては、FRP はプラスチック材料であるため燃えやすく、表面が傷つきやすいことが挙げられる。また、繊維方向には強いが、繊維直交方向はプラスチック材料と同程度の強度や剛性を示し、強さに弱い方向が

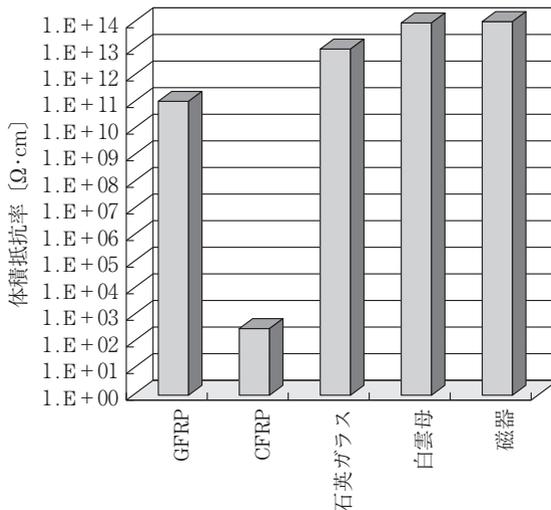


図 1.5 各種材料の体積抵抗率の比較【出典：強化プラスチック協会：だれでも使える FRP — FRP 入門, p.7 (2002)】

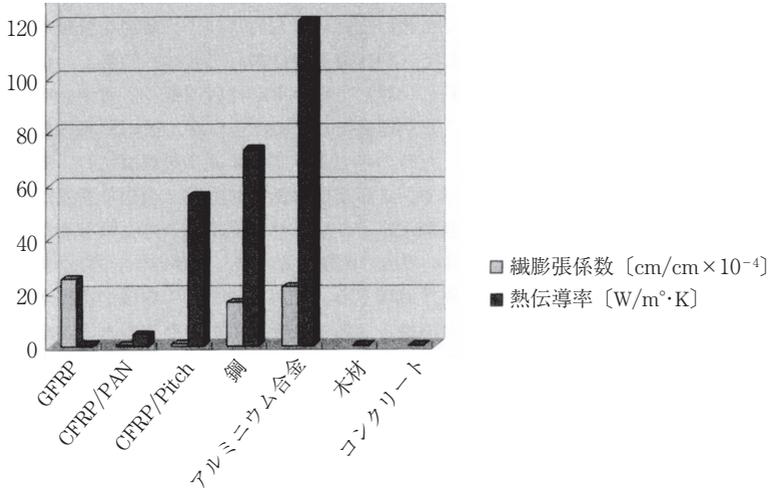


図 1.6 各種材料の熱的特性の比較【出典：強化プラスチック協会：だれでも使える FRP—FRP 入門, p.8 (2002)】

ある。さらに、材料内に界面を持つことや複数の材料で構成されるため、破壊のプロセスが複雑になりやすく、特に層間はく離など材料内部から損傷が発生する場合があります、損傷の検知が困難な問題がある。

1.3 FRP の用途

FRP は、軽さや強度に加えて、熱・電気特性、メンテナンス性、経済性、成形性などの観点から、さまざまな用途で用いられている。おもな FRP 製品の機能別用途区分一覧表を表 1.1 に示す。以下におもな用途区分で用いられている FRP 製品について説明する。

1.3.1 水まわり製品

FRP の持つ耐食性と軽量性、熱的特性から、浴槽・浴室ユニット、浄化槽に GFRP が用いられ、FRP 需要の中でも大きな割合を占めている。従来のステンレスやホーロー製浴槽よりも、軽く運搬・施工性がよく、強度耐性が高く

索 引

あ行		加飾成形法	63	厚生労働省	19
		加速試験	116	構造設計	175
アイゾット衝撃試験	110	殻構造	162	構造ヘルスマニタリング	183
アクティブ赤外線		ガラス転移点温度	123, 193	黒鉛化	16
サーモグラフィ法	199	ガラスフリット	33	古典積層理論	94
アコースティック		ガラスフレーク	33	コールドプレス成形法	60
エミッション	199	ガルバニック腐食	154	混合モード曲げ	139
アングルブライ	91	環 化	15	混織糸	84
アングルブライ積層板	101	環 境	174	コンプライアンス行列	91
安全率	168	緩和弾性係数	123	さ行	
飯島澄男	13	機械的接合	154	材料特性値	169
一体成形	154	きずエコー	197	座 屈	161
異方性	100, 144	基発第 0331013 号	19	座屈荷重	162
インピーダンスの		吸樹脂量	34	酸化マグネシウム	33
周波数依存性	189	急速加熱冷却成形法	82	紫外線吸収剤	36
インフュージョン成形法	56	吸油量	34	時間-温度移動因子	125
インモールドコーティング		境界値問題	179	時間-温度換算則	127
成形法	63	強化材	2	時間強度	107
エジソン	11	強化プラスチック複合管	72	紙管式	68
エネルギー解放率	140	凝集破壊	136, 159	時間強さ	107
エポキシアクリレート樹脂		切欠きラップせん断	139	シートモールドイング	
	30	切欠きレールシア	139	コンパウンド成形法	60
エポキシ樹脂	29	き裂開口変位	139	射出成形法	66
エンジニアリング		空中超音波法	198	シャルピー衝撃試験	110
プラスチック	31	屈折率	195	重合度	121
炎症反応	19	クリーブ	120	充填剤	32
遠心成形法	77	クリーブコンプライアンス	123	衝撃後圧縮	112
遠藤守信	13	グリーンコンポジット	24	衝撃的負荷	173
応力振幅	107	減圧樹脂含浸成形法	56	消泡剤	36
応力の変換行列	92	減圧(真空)バッグ成形法		助 剤	36
大谷杉郎	12		49	シーラーフィルム	57
オートクレーブ成形法	51	限界値	169	シングルストラップ継手	155
か行		減粘剤	36	シングルラップ継手	155
加圧バッグ成形法	50	コインタッピング	198	浸せき試験	119
カイザー効果	199	硬化剤	35	進藤昭男	12
界面破壊	136	硬化発熱曲線	35	信頼度係数	169
界面割れ	106	高強度	30	水酸化アルミニウム	32
重ね合わせ接合	44	航空機	201	水酸化マグネシウム	33
重ね合わせ継手	155	剛 性	169		

基礎からわかる FRP

— 繊維強化プラスチックの基礎から実用まで —

FRP Basics

— From Basics to Applications of Fiber Reinforced Plastics —

© 一般社団法人 強化プラスチック協会 2016

2016年4月18日 初版第1刷発行

編 者 一般社団法人
強化プラスチック協会
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 新日本印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話 (03)3941-3131(代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-04647-2 (中原) (製本：愛千製本所)

Printed in Japan



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられております。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めておりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします