

複合材料講座

FRP 構成素材入門

第2章 構成素材と種類

—ガラス繊維—

南 条 尚 志*

1. はじめに

ガラス繊維は、連続繊維として紡糸・巻き取られて製造されるガラス長繊維と、溶融ガラスを火炎や圧縮空気、遠心力で吹き飛ばしながら数十 cm 以下の繊維長で製造されるガラス短繊維に大別される。ガラス長繊維は均一な繊維径で製造（紡糸）され、樹脂、ゴム、コンクリート、石膏、紙等の強化材として使用される。一方、ガラス短繊維は繊維径が不均一で、グラスウールとも呼ばれ、主に断熱材や吸音材として用いられる。ガラス繊維の工業生産の始まりは、世界的には 1910 年代のドイツでのグラスウールの生産、及び 1930 年代後半のオーエンス・コーニング（OCF）社のガラス長繊維製造技術の確立に遡り、日本においては日東紡績が時を同じく（1939 年）してポット法と呼ばれるガラスカレットをルツボで溶かし耐火物ノズルから引き出して繊維化する方法で生産を開始したことから始まっている¹⁾。

当時の日本におけるガラス長繊維製品は、主に艦艇用の保温材カパークロスといった軍需用途に使用されていたが、戦後は重電電気絶縁体に用途を広げ、更に防水、防食、耐酸工事などの用途へと拡大した。FRP 用強化材としては、1950 年代に不飽和ポリエステル樹脂をマトリックスとする製品（釣竿、レジャーボート、ヘルメット、FRP 波板等）に使用されたことが発端となり用途を拡大した。それに伴いガラス繊維の製造方法も、当時のマーブルメルト法（高温で溶融したガラス素地を一定直径のマーブルやロッドに成形し、これを再溶融して紡糸する方法）から量産に適するダイレクトメルト法（ガラス原料を溶融炉で大量に溶融しプッシングに直接導き紡糸す

る方法）に移行し、現在のガラス繊維製造技術が確立された。

言い換えると、ガラス繊維の耐熱性、耐火性といった優れた熱的特性から工業材料として認知され、力学的特性や電気絶縁性といった特徴を有効に活用して船舶、住設部品、自動車部品、航空・宇宙関連部品、電気・電子材料、及び工業材料（産業資材）へと応用領域が拡大し、年間 40 万トンを超える出荷量に成長してきた。図 1 にガラス長繊維製品の国内出荷量の推移を示す。

本稿では、FRP に使用されるパソス繊維について概説する。

2. ガラス繊維の特徴

ガラス繊維は、工業的に生産された初めての無機繊維であり、以下の特徴から FRP 用強化材として最も多く使用されている。

- ①引張り強さ、弾性率が大きい。
- ②寸法安定性が良好である。
- ③耐熱性があり、不燃性である。
- ④吸水性が少なく、耐薬品性に優れる。
- ⑤電気絶縁性が良好で、電波透過性に優れる。
- ⑥樹脂との接着を考慮した表面処理技術が確立されている。
- ⑦工業材料として、安定した品質のものの安定供給が可能で、価格も比較的安い。

3. ガラス繊維の組成と特性

現在、強化材として市販されているガラス繊維の種類と組成を表 1²⁾ に整理する。ガラス組成は、ガラス繊維の基本物性を決める重要な要素である。

(1) E ガラス

無アルカリガラスとも呼ばれ、アルカリ成分がほとんどなく、アルカリの代わりにホウ酸を入れたホウケイ酸

* Naoshi NANJYO：日東紡績㈱グラスファイバー事業部門技術生産本部技術統括部（960-8581 福島市郷野目字東 1 番地）

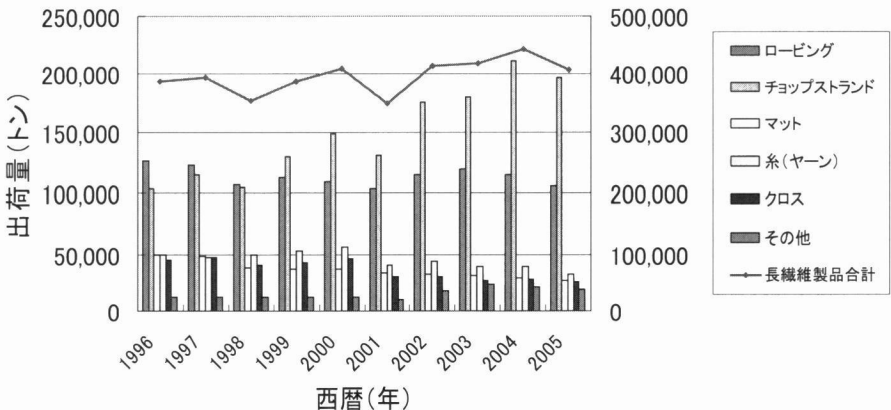


図 1 ガラス長繊維出荷量の推移 (経済産業省窯業統計年報)

表 1 ガラス繊維の種類と組成

成 分	E ガラス	S ガラス	C ガラス	D ガラス	ECR ガラス	AR ガラス
SiO ₂	52～56	65	65	74	58.2	62.5
Al ₂ O ₃	12～16	25	4	0.5	11.3	0.5
Fe ₂ O ₃	0～0.8				0.3	
B ₂ O ₃	5～10		5	22		
CaO	16～25		7	0.5	22	5.7
MgO	0～6	10	3		2.7	
Na ₂ O			11	1	0.1	14.2
K ₂ O			1	1.5	0.5	0.3
Li ₂ O			0.5	0.5		
Na ₂ O+K ₂ O	0～2					
TiO ₂	0～1.5				2.2	
ZnO			3.5		2.7	
ZrO ₂						16.8
F ₂	0～1					

ガラスの一種である。ガラス中のアルカリイオン(Na⁺, K⁺)が他のガラスに比べて極めて少なく、JIS規格ではアルカリ含有率が1%以下と定義されている。Eガラスは、電気絶縁性、耐候性に優れ、その優れたコストパフォーマンスからFRP強化材として最も汎用的に使用されている。

(2) S ガラス

高強度、高弾性を目的に開発されたガラスであり、Eガラスに比べ引張り強度が約35%、引張り弾性率が約20%大きい。強度以外でも、耐熱性が高い、熱膨張係数が小さい、誘電率が小さい、耐水・耐酸性に優れるといった特徴を有するが、熔融温度、紡糸温度が高いため、製造コストは高くなる。

Tガラスとして市販されているガラスはSガラスと

ほぼ同等な特性を有する。

(3) C ガラス

耐酸用途向けに開発された含アルカリガラスである。

(4) D ガラス

低誘電率、低誘電正接ガラスとして開発されたガラスであるが、B₂O₃を多量に含み、熔融時の揮発が激しく製造が難しい。

(5) ECR ガラス

Eガラス熔融時の揮発成分であるB₂O₃、F₂を含まないEガラス代替ガラスとして公害対策の観点からOCF社により開発されたガラスである。Eガラスの欠点である耐酸性の悪さが大きく改善されており、最近では耐酸性ガラスとしての用途が拡大しつつある。

表 2 各種ガラス繊維の特性

特	性	E ガラス	S ガラス	C ガラス	D ガラス	ECR ガラス	AR ガラス
物理特性	密度 (g/cm ³)	2.58	2.46	2.52	2.11	2.72	2.78
	引張強度 (MPa)	3,430	4,655	2,744	2,450	3,430	3,234
	引張弾性率 (GPa)	72.5	84.3	68.6	51.9	72.5	73.0
熱的特性	比熱 (cal/g・°C)	0.193	0.176	0.188	0.176	0.190	
	熱膨張係数 (×10 ⁻⁷ /°C)	55	29	73	31	60	83
	軟化点 (°C)	840	1,050	720	770	880	860
電気特性	誘電率 1 MHz	6.6	5.3	6.9	4.1	6.9	8.1
	誘電正接 1 MHz	0.0012	0.0020	0.0080	0.0009	0.0020	—
	体積抵抗率 (Ω・cm)	10 ¹⁵	10 ¹⁵	10 ¹²	10 ¹⁴	10 ¹⁵	—
	表面低効率 (Ω)	10 ¹⁴	10 ¹⁴	—	10 ¹³	10 ¹⁴	—
光学特性	屈折率	1.558	1.521	1.533	1.465	1.579	1.562
化学特性	H ₂ O : 1 日 (%)	0.7	0.5	1.1	0.7	0.6	0.7
	H ₂ O : 7 日 (%)	0.9	0.7	2.9	5.7	0.7	1.4
	10%HCl : 1 日 (%)	42	3.8	4.1	21.6	5.4	2.5
	10%HCl : 7 日 (%)	43	5.1	7.5	21.8	7.7	3.0
	10%NaCO ₃ : 1 日 (%)	2.1	2.0	24	13.6		1.3
	10%NaCO ₃ : 7 日 (%)	2.1	2.1	31	36.3	1.8	1.5

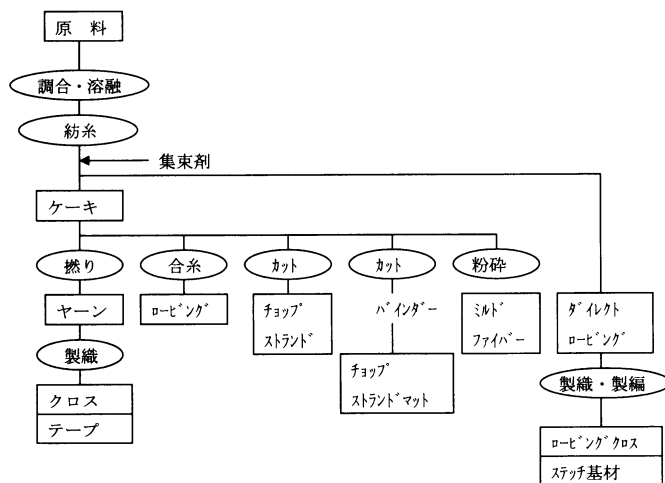


図 2 ガラス長繊維の製造フロー (DM 法)

(6) AR ガラス

イギリスの建築研究所とピルキントン社により共同開発された耐アルカリ性に優れたガラスである。ZrO₂を多く含有させることで、耐アルカリ性が向上し、セメントやコンクリート用の補強繊維として用いられている。上記の各種ガラス繊維の特性を表 2²⁾ に示す。

4. ガラス長繊維の製造方法

ガラス長繊維の製造工程は、溶融工程、繊維化工程

(紡糸工程)、加工工程の3工程で構成される。その製造フローを図2に示す。

(1) 溶融工程

溶融方法には、けい砂、粘土、石灰石、ホウ酸などの天然原料を直接溶融し繊維化する Direct Melt (DM 法) と原料を一旦マーブル状に加工し再度溶融・繊維化する Marble Melt (MM 法) があるが、現在では生産性に優れる DM 法が主流となっている。調整・混合された粉末状の原料をガラス化する溶融温度は組成によって変えら

表3 ガラス繊維形態と用途

	形態	主な用途・成形法	JIS 規格
ロービング系	ロービング	FW, 引抜成形, プリフォーム, スプレーアップ, SMC	R3412
	ロービングクロス	ハンドレイアップ, インフュージョン	R3417
	チョップド ストランドマット	ハンドレイアップ, 連続成形, プレス成形, SMC, インフュージョン	R3411
	コンティニュアス ストランドマット	プレス成形, 連続成形, インフュージョン	—
	ステッチボンド材	ハンドレイアップ, 引抜成形, インフュージョン	—
	チョップドストランド	回転成形, BMC, FRTP	R3419
	ミルドファイバー	注型樹脂の充填補強材	—
	フィラメントマット	ハンドレイアップ (表層材)	—
ヤーン系	ヤーン	樹脂成形品の被服, 電線被服	R3413
	ガラステープ	電気絶縁, パイプライニング	R3415
	ガラスクロス	電気絶縁, 補強用, フィルター, 内装用	R3414

れるが, およそ 1,500°C 以上の高温でガラス化される。

(2) 繊維化工程 (紡糸工程)

溶融されたガラスは, 紡糸温度に管理されたプッシングを通過し, 高速で引き伸ばされながら巻き取られて繊維化される。

この工程では, 繊維径, 質量 (番手) が決定され, 併せて集束剤が塗布される。繊維径はプッシングに設けられたノズルの径と巻き取り速度 (コレットの回転数) によって制御され, 現在では直径 3~23 μm の繊維が製造されているが, FRP 用強化材としては 9 μm 以上の繊維が主に用いられている。

また, 番手はテックス番手 (繊維長さ 1,000 m 当たりの質量) で表され, 繊維径と集束本数 (集められたフィラメント本数) によって決定される。フィラメントが集束されたものをストランドと呼ぶ。

この工程によってガラス繊維は, ストランドをロール状に巻き取ったケーキと呼ばれる中間製品となるが, ダイレクトロービングはこの工程で最終製品化される。

(3) 加工工程

紡糸工程で製造されたケーキは, 撚り・製織, 合糸, カット, 粉碎といった様々な加工を施されて最終製品となる。

5. ガラス繊維の製品形態

ガラス繊維は FRP 用強化材として, その用途や成形法に対応してさまざまな形態に加工される。その製品は, ロービング系とヤーン系の 2 種類に大別され, ス

ランドに撚りをかけないで作られるものをロービング系, ストランドに撚りをかけて作られるものをヤーン系と呼ぶ。表 3³⁾ にガラス繊維製品の製品形態と用途 (利用される成形法), 及び対応する JIS 規格を整理する。

(1) ロービング

ストランドを所定の本数均一に引き揃えて, 円筒状に巻いた製品である合糸ロービングと, ノズル数の多いプッシングで直接製造したダイレクトロービングがある。繊維径は 10~23 μm が多く, 番手は 500~5,000 tex の範囲で調整されている。ガラス繊維形態の中でも加工度の低い製品であるが, 様々な FRP 成形法に用いられ, 汎用的な基材の中で最も生産量が多い。ロービングはカットして使われる場合 [スプレーアップ, プリフォーム, SMC (Sheet Molding Compound) など] と連続繊維の状態で使用される場合 [FW (Filament Winding), 引抜き成形など] がある。一般には, 合糸ロービングはカットして用いる成形に, ダイレクトロービングはその引き揃え性が優れていることから連続繊維で使用される成形に用いられる。そしてその用途に応じた表面処理剤が施されている。ロービングを選択する場合に重要となる項目を表 4⁴⁾ に整理する。

(2) ロービングクロス

ロービングを経糸, 緯糸に使用して織られた厚手のクロスである。平織りが基本であるが, 縦または横のどちらか一方のロービングを多くした一方向織り (すだれ織り) ロービングクロスもある。強度を要求される FRP にチョップドストランドマットとの交互積層構成で使用さ

表 4 各種成形法におけるロービング選択のポイント

	スプレーアップ	MMD (メタルマッチドダイ) 成形		ワインディング	引抜成形
		プリフォーム	SMC		
使用本数	数本レベル	数本レベル	数十本	数十本程度	数十～数百本
速度	最大 400 m/min	最大 120 m/min	50～100 m/min	15～100 m/min	0.5～2 m/min
カット長さ	標準 25 mm	標準 50 mm	標準 25 mm	連続繊維	連続繊維
含浸性	ウェットスルー ウェットアウト	○ ○	◎ ○ ◎	◎	○ ◎
流動性					
引き揃え性				◎	◎
結束性	○	○		◎	◎
集束性		○	◎		
切断性	◎	◎	◎		
分散性	◎	◎	○		
開繊性	○	○			
帯電性	◎	◎	◎		

れる。

(3) チョップドストランドマット

50 mm の長さにカットしたストランドをランダムに分散させてバインダーで結合してシート状にしたもので、300～900 g/m² の製品がある。スチレンに溶解するタイプの集束剤が付けられているものと溶解し難いタイプの集束剤が付けられているものがあり、前者はハンドレイアップ用の基材として広く使われている。後者は RTM (Resin Transfer Molding)、SMC、引抜成形等に利用される。

(4) コンティニュアスストランドマット

連続したストランドをラウンド状に結合してシート状にしたマット材である。チョップドストランドマットに比べ嵩高で、深絞りが可能である。

(5) ミルドファイバー

ガラス繊維を 10～100 μm 程度の粉末状にしたもので、用途に応じた表面処理剤が付けられている。アスペクト比 (繊維径と繊維長さの比) をもっているため補強効果も期待でき、注型樹脂の補強等に使用される。

(6) フィラメントマット

適当な長さに切断したフィラメントをランダムに分散させバインダーで結合してシート状にしたものである。均一性が良く、樹脂保持力が大きい。そのため、FRP の表面層に樹脂リッチ層を形成することができる。

(7) チョップドストランド

ストランドを 3～25 mm の所定の長さに切断したもので、用途に応じた集束剤が付けられている。FRTP の補強材や BMC (Bulk Molding Compound) 強化材として

主に用いられる。FRTP 用ガラス繊維は、押し出し機で熱可塑性樹脂と 230～350°C の温度で混練され FRTP ペレットに加工される。一般には 3 mm のチョップドストランドが多用されるが、押し出し機での混練や射出成形時に破損して 0.2～0.7 mm 程度の長さとなる。BMC の場合もニーダーで熱硬化性樹脂、硬化剤、充填剤、低収縮化剤、増粘剤、内部離型剤、着色剤等と共に混練され、ガラス繊維は開繊、破損してしまう。

(8) ヤーン

ストランドに撚りをかけた単糸と、単糸を複数本集めて逆撚りをかけた合撚糸、単糸を複数本引き揃えた合糸がある。多くはクロス (織物) に使用され、デンプン系の集束剤が付けられている。一般にヤーンの番手はデニール (繊維長さ 9,000 m 当たりのグラム数) で表される。

(9) ガラスクロス・ガラステープ

ヤーンで織られた織物で、織り方の種類として平織り、綾織り、朱子織りがある。用途に応じた集束剤または表面処理剤が付けられている。

100 mm 幅以下のものはガラステープとなる。

(10) その他

上記以外の FRP 用基材としてステッチボンド基材がある。ロービングを任意の角度 (0°, 90°, ±45°) に引き揃えて重ねられた状態で編糸により製編されたシート状の基材である。編糸には、一般にはポリエステル糸などの有機繊維が使用されている。ロービングだけでなくチョップドガラスも同時に製編されたコンビネーション基材もある。ステッチ基材はロービングクロスなどの織物と違い、繊維の直線性が保たれているため、繊維の強度

特性がFRP特性に理想的に生かされる形態であり、最近FRP用強化材として注目されている。

6. ガラス繊維の表面処理

ガラス繊維は、用途や使用方法に合わせて適切な表面処理が施されている。その工程や成分は織物に使用されるヤーン系とそのまま複合材料として使われるロービング系で異なるが、紡糸工程でフィラメントを集めてストランドにするための結束性を与えて次工程における機械的損傷を防止することを目的とした集束剤（フィルムフォーマー）と、無機材料であるガラス繊維とマトリックスとを化学的に接着することを目的とした表面処理剤（カップリング剤）によって構成される。

6.1 集束剤

(1) ヤーン系集束剤

クロスに製織されるヤーン系は、紡糸・合燃時の撚りや製織時の整経、織布等の工程で損傷を受け易く、その損傷防止のために通常デンプンと油剤を主成分とした集束剤が塗布される。その基本的な組成を以下に示す。

部分または完全デキストリン化デンプン	7.0 wt%
水素添加植物油	2.0 wt%
カチオン界面活性剤	0.4 wt%
エマルジョン化剤	0.3 wt%
水（イオン交換水）	残余

ヤーン系集束剤には後述するロービング系集束剤の組成のように、マトリックスとガラス繊維の接着の仲立ちをする表面処理剤は通常加えないのが普通である。それゆえ、マトリックスの補強用（たとえばFRP, FRTP）に使用する場合には、クロスに織った後、上記集束剤を除去する脱油工程（一般には加熱脱油）を行い、その上で表面処理剤（カップリング剤）を付着させることが通常行われている。

(2) ロービング系集束剤

ロービング系集束剤は合燃、織布等繊維に強く損傷を与える加工工程がなく、殆どがFRPなどのマトリックスの補強用基材として使用されるため、マトリックスとの親和性の良いプラスチック系の集束剤が使用される。目的、用途、成形法により、結束度合、切断性、帯電性、マトリックスの含浸性、接着性などを考慮して、カップリング剤を混入しておく。その基本組成を以下に示す。

フィルム形成剤	3~20 wt%
(0~35 wt%の柔軟剤を含んでいる)	
カップリング剤	0.3~1.0 wt%
潤滑剤	0.1~0.5 wt%

界面活性剤	0~0.5 wt%
帯電防止剤	0~0.5 wt%
水（イオン交換水）	残余

フィルム形成剤はガラス繊維ストランドの形状保持とマトリックスとの接着増進剤の作用をする。カップリング剤は $R_1-Si(OR_2)_3$, (R_1 =有機官能基, R_2 =メチル, エチル基など) の骨格を有したシラノール基がガラス繊維と、有機官能基がフィルム形成剤もしくは相手マトリックスと化学結合する。詳細は後述する。潤滑油は繊維の損傷を防ぐ働きをする。また帯電防止剤は摩擦で発生する静電気を除去するため、吸湿性のある無機塩や第四級アンモニウムが使用される⁵⁾。

上記集束剤は繊維化工程のアプリケーターと呼ばれる処理機で処理され、ガラス繊維に対して0.5~2.0%程度付着されている。

6.2 表面処理剤（カップリング剤）

ガラス繊維がマトリックスの補強効果を発揮するためには、マトリックスとの界面における接着が良くなくてはならない。ガラス繊維の断面は円形で、その表面は平滑であるため物理的接着効果はほとんど期待できない。そこで化学的処理が必要となり、その目的で 사용되는のがカップリング剤である。ガラス繊維は無機酸化物でマトリックスの多くはプラスチック等の有機材料であるので、カップリング剤としては無機と有機の中間の化合物である有機クロム化合物或いは有機ケイ素化合物が利用される。歴史的には有機クロム化合物が早くから利用されてきたが、ケイ素化合物工業の発展と共に多くのケイ素の有機誘導体（シラン剤）が開発されカップリング剤の主流になっている。主なカップリング剤を表5²⁾に示す。

7. ガラス繊維とマトリックスの接着

ガラス繊維とマトリックスの接着を考えると、物理的接着効果（アンカー効果）として、ストランド内のフィラメント間の隙間にマトリックスが侵入することによる効果、即ちフィラメントの集束度合いによるものや、フィラメントの開織や切断によるマトリックスとの係り合い、即ちマトリックス中のフィラメントの分散度合いによるもの、更にクロスなどストランドやヤーンの隙間にマトリックスが侵入することによる効果、即ち二次的なアンカー効果によるものが考えられる。ガラス繊維は集束性が良いものほど取り扱い性が良いが、前述のような物理的接着効果が少なくなる。それゆえ、マトリックスとの親和性（ヌレ性）の良いものがガラス繊維の表面

表 5 各種シランカップリング剤

化学名	構造式	適用樹脂	
		熱硬化性	熱可塑性
ビニルトリクロシラン	$\text{CH}_2=\text{CHSiCl}_3$	ポリエステル	—
ビニルトリエトキシシラン	$\text{CH}_2=\text{CHSi}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$	ポリエステル	PE, PP
ビニルトリス (β-メトキシ エトキシ) シラン	$\text{CH}_2=\text{CHSi}(\text{OC}_2\text{H}_4\text{OCH}_3)_3$	ポリエステル エポキシ	—
γ-メタクリロキシプロピル トリメトキシシラン	$\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)-\text{C}(=\text{O})-\text{O}(\text{CH}_2)_3\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$	ポリエステル エポキシ	PS, PE, ABS 樹脂, PP ポリメタクリル酸メチル, AS 樹脂
γ-アミノプロピルトリエト キシシラン	$\text{H}_2\text{N}(\text{CH}_2)_3\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3$	エポキシ, フェノ リック, メラミン	PVC, PC, PE, PA, PP ポリメチルメタアクリレート
N-β-(アミノエチル)γアミノ プロピルトリメトキシシラン	$\text{H}_2\text{N}(\text{CH}_2)_2\text{NH}(\text{CH}_2)_3\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$	エポキシ, フェノ リック, メラミン	PP
γ-グリシドキシプロピル トリメトキシシラン	$\text{CH}(\text{O})\text{CHCH}_2\text{O}(\text{CH}_2)_3\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$	ポリエステル, エ ポキシ, フェノリ ック, メラミン	PVC, PC, PS, ABS 樹脂, PA, PP, AS 樹脂, PE
β-(3,4-エポキシシクロヘキシル) エチルトリメトキシシラン	$\text{O} \begin{array}{c} \diagup \diagdown \\ \text{S} \end{array} \text{—CH}_2\text{CH}_2\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$	ポリエステル, エ ポキシ, フェノリ ック, メラミン	PVC, PC, PS, ABS 樹脂, PA, PP, AS 樹脂, PE
γ-メルカプトプロピルピ リトリメトキシシラン	$\text{HS}(\text{CH}_2)_3\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$	—	PS, ポリサルファイド
γ-クロロプロピルトリ メトキシシラン	$\text{Cl}(\text{CH}_2)_3\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$	—	PS

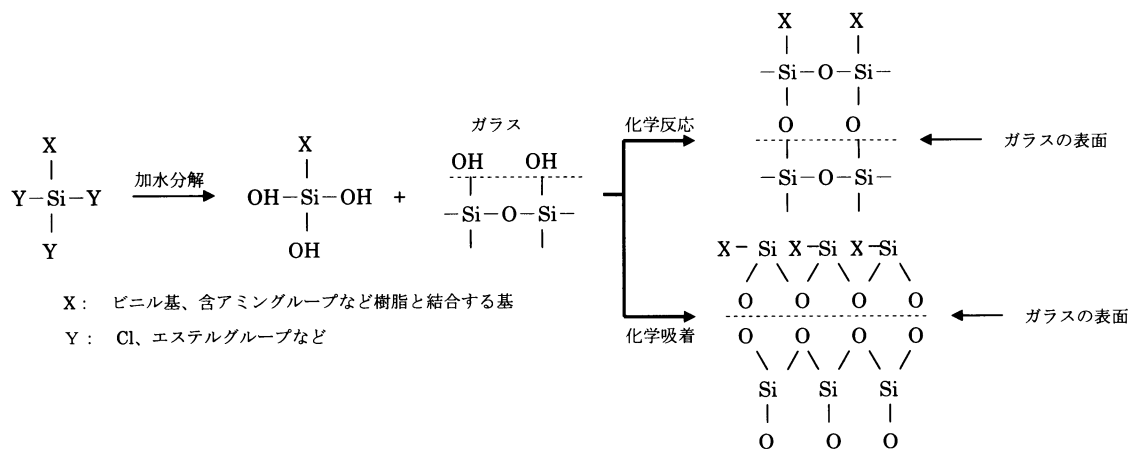


図 3 シラン系処理剤の反応機構

に施されることが重要となる。それゆえロービング系集束剤のフィルム形成剤には、マトリックスとしてのプラスチックとの親和性を考慮し、ポリ酢酸ビニル、ポリウレタン、エポキシ樹脂、アクリル樹脂などのエマルジョン等のフィルム形成剤が使用される。更にガラス繊維と

マトリックスとの化学的接着による強固な接着効果を実現化するためには、カップリング剤の助けを借りなくてはならない。カップリング剤はマトリックスへの含浸性を高め、強固な接着により成形品の外観、透明性、電気絶縁性、機械的強度を向上させる。特に湿潤状態、水中

表 6 カップリング剤の煮沸時の効果

表面処理剤の種類	曲げ強さ (MPa)	
	乾燥	8 時間煮沸後
カップリング剤を入れない場合	382	157
A-185	470	294
A-172	402	265
A-174	568	568

ガラスクロス：Type181（ヒートクリーニングしたもの、樹脂：不飽和ポリエステル樹脂。

表 8 WindStrand ロービング

製 品	平均繊維径 (μm)	フィラメント数	LOI
WindStrand300	15	630	0.65
WindStrand600	17.4	1,000	0.65
WindStrand1200	17.4	2,000	0.65
WindStrand2400	24.5	2,000	0.65

表 7 ガラスクロス積層板の曲げ特性におけるカップリング剤の効果

処理	方向	ガラス含有率 (wt%)	曲げ強さ			曲げ弾性率		
			標準 (MPa)	湿潤 (MPa)	保持率 (%)	標準 (GPa)	湿潤 (GPa)	保持率 (%)
生クロス	W	60.1	300	211	70.3	18.0	11.6	64.4
	F	59.6	265	189	71.3	16.8	10.6	63.1
ヒート クリーニング	W	60.9	337	174	51.6	19.9	11.1	55.8
	F	60.5	339	177	52.2	18.7	11.5	61.5
A-172	W	60.5	397	407	102.5	19.6	18.8	95.9
	F	60.3	423	406	96.0	19.3	18.2	94.3
A-1100	W	59.8	309	209	67.6	17.9	12.0	67.0
	F	59.4	287	204	71.1	17.5	10.8	61.7
A-174	W	60.8	465	448	96.3	21.3	20.3	95.3
	F	60.3	534	508	95.1	20.7	20.0	96.6
A-187	W	60.8	453	447	98.7	20.1	19.1	95.0
	F	60.3	446	430	96.4	19.5	18.8	96.4

基材：ガラスクロス（朱子織）12 ply，樹脂：不飽和ポリエステル，記号：W 経糸方向，F 緯糸方向。

における煮沸後の効果が大きい。カップリング剤の接着機構を図3に、カップリング剤の煮沸時の効果を表6⁶⁾に、またガラスクロス積層板の機械的強度（曲げ特性）への効果を表7に示す³⁾。

8. 最近の注目されるガラス繊維材料

(1) WindStrand ロービング⁷⁾

OCF社により開発された繊維で、新しいガラス組成、溶解、紡糸、サイジング技術等で開発されたガラス繊維で、歪エネルギーが大きいことから、耐衝撃性が必要な分野への応用が期待されている。WindStrand ロービング製品を表8に示す。

Sガラス並みの応力-歪特性を示し、多重負荷環境下での疲労特性や衝撃抵抗に優れるダイレクトロービングである。風力発電ブレードや压力容器等の高い強度特性が必要となる用途が期待される繊維である。

(2) 異形断面繊維

日東紡が製品化しているガラス繊維で断面形状が楕円状をした繊維である。まゆ型形状のタテ・ヨコ比が1:2のもの（HIS繊維）と長円形状でタテ・ヨコ比が1:4のもの（FF繊維）がある。繊維のSEM写真を図4に、断面形状の比較を表9に示す。

異形断面繊維は、FRTPの射出成形において以下のような優れた特長を発現する。

- ①溶融流動性に優れ、複雑形状品の成形やガラスの高充填に適する。
- ②耐衝撃性に優れる。
- ③成形品の異方性が緩和され、寸法安定性が向上する。
- ④成形品表面へのガラス繊維の浮き出しが少なく、表面平滑性が良い。

9. お わ り に

ガラス繊維はその優れた特性と経済性を背景にFRP

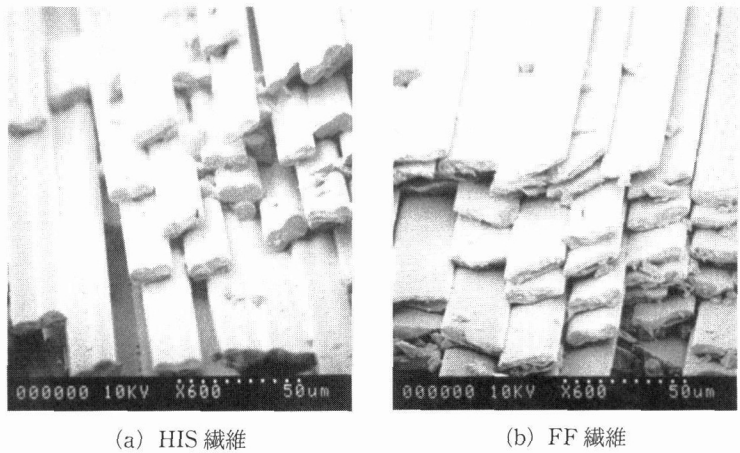


図 4 異形断面繊維

表 9 断面形状の対比

断面積 μm^2 (丸断面繊維径)	95 (11 μm 相当)	133 (13 μm 相当)	177 (15 μm 相当)	227 (17 μm 相当)
偏平比：1 丸形（通常品）				
偏平比：2 まゆ形				
偏平比：4 長円形				

や FRTP 用補強材としてさまざまな用途に利用されている。最近の橋梁や下水といったコンクリート構造物の修復事業や急速な発展をとげている IT 分野等を支えている素材のひとつは FRP 材料であり、その中で、耐酸性を向上させたガラス繊維の開発や、集積度の高いプリント配線基板用の薄物クロス、及びそのための細繊維径ガラス繊維の開発など、市場からの要求を満足させるガラス繊維製品が次々と開発されてきた。さらに地球環境への配慮を産業界も率先して考えていく時代に突入している中で、風力発電システムや自動車の軽量化による CO₂ 削減等 FRP の活躍の場はますます拡大しているといえる。ガラス繊維もその一翼を担うべく更なる進化を遂げていくことを期待したい。

参 考 文 献

- 1) 日東紡 80 年史。
- 2) 山根正之，安井 至，和田正道，国分可紀，寺井良平，近藤 敬，小川晋永編：ガラス工学ハンドブック，朝倉書店（1999），pp. 512-524。
- 3) 宮入裕夫，池上皓三，加藤晴久，加部和幸，後藤卒土民，塩田一路，安田榮一編：複合材料の事典，朝倉書店（1991）。
- 4) 後藤卒土民：わかりやすい実践 FRP 成形，工業調査会（1998）。
- 5) 北村忠則：強化プラスチック，**36**，9（1990），4-11。
- 6) 日東紡 グラスファイバー技術資料。
- 7) 呉 偉良，武田哲夫：強化プラスチック，**53**，4（2007），186-188。