

# 最近の FRP 材料について [CF/GF ハイブリッド FRP について]

コンポジットシステム研究所 百島 祐忠

## Recent development in FRP materials [CF/GF hybrid FRP]

Suketada Momoshima  
Composite Systems Corp.

### 1. はじめに

最近の FRP 材料は構成基材である繊維強化材およびマトリックス樹脂の多様化、高性能化とともに成形加工技術の進歩により極めて多様な FRP 材料が開発され実用化されている。

本稿では、これら最近の FRP 材料の中から主流となっているガラス繊維強化プラスチック：GFRP と先端複合材料：Advanced Composite Materials [ACM] の中心となっている炭素繊維とのハイブリッド FRP に的を絞って記述することとする。

### 2. GFRP の生産量の拡大と先端複合材料 [ACM] の台頭

#### 2.1 GFRP の概況

繊維強化複合材料として GFRP が開発されて以来 40 年余を経過した今日、軽量、高強度構造材料として多方面にわたる用途を開発してきており、世界各国ともに高い生産量の伸びを示し、特にわが国ではここ数年 2 桁台の増大が続いている。1989 年の実績統計では、米国：121 万トン、欧州：110 万トン、日本：53.3 万トンと示されており、実質的にはわが国は世界第 2 位の FRP 生産国となって久しい情勢にある。因に以下かなりの隔たりをもって第 3 位：フランス、第 4 位：西ドイツ、第 5 位：英国、第 6 位：イタリアの順位となっている。

#### 2.2 先端複合材料

1970 年代以降ボロン繊維、炭素繊維、アラミド繊維、炭化珪素繊維、アルミナ繊維等の高性能強化材の開発が相継ぎ、特に、航空・宇宙分野とプレミアムスポーツ器材分野の要求性能に対応する先端複合材料：ACM として脚光を浴びるに至った。Fig. 1<sup>2)</sup> に各種強化繊維の比強度(強度/密度)、比弾性率(弾性率/密度)を示す。図に示すようにこれらの高性能繊維はガラス繊維に比較すると極めて高い比強度、比弾性率繊維群であり、特に現在 ACM の主流を占める炭素繊維は注目に値する特性を持ち、我が国は世界の需要量(約 7,000 トン)の 60% 余の生産国となっているのみならず品質、開発技術とも他国の追隨を許さぬ最高レベルにある。

### 3. GFRP の炭素繊維によるハイブリッド化の意義<sup>3)</sup>

GFRP は多くの利点を保有する経済性に優れた軽量・高強度構造材として用途を拡大してきたが、金属材料との比較において、特に弾性率が低く剛性の不足が弱点とされ用途面での制約が生じている。

炭素繊維は出発原料(プリカーサ)として、ポリアクリルニトリル(PAN)系とピッチ系があり、グレードとして汎用繊維、高強度繊維、高弾性率繊維に大別されているが、後 2 者は ACM の構成

基材として優れた繊維強化材となる。しかし、ACMは概して高額材料となり、現時点では一般産業分野では経済的ネックとなる可能性が高くなる。ここで、経済性の確立されたGFRPとの組合せによる複合材料は、ハイブリッド化により大きな効果をもたらし、力学的特性のみならず物理的、化学的、機能的特性を保有する材料として、コスト/パフォーマンスが明確に把握し得る「新たな領域に位置する材料」として注目されるに至った。

現に、我が国の一般のFRP成形加工メーカーに於いても「CF/GFハイブリッドFRP」による加工が着実に普及を見ている。

CFハイブリッド化の意義と期待される効果の概要をまとめると次のようになる。

### 3.1 ハイブリッド化の意義

- (1) 各種強化繊維の特性を活かした相互補完
- (2) ACM用高性能強化繊維の高価格の緩和
- (3) 力学的ハイブリッド効果
- (4) ハイブリッド構造による軽量化等

### 3.2 CF/GFハイブリッド化に期待される効果

- (1) 力学的特性への効果
  - (a) 剛性の増加
  - (b) 耐疲労、耐クリープ性
- (2) 物理的特性への効果
  - (a) 振動減衰性
  - (b) 寸法安定性
  - (c) 耐磨耗性
- (3) 化学的特性への効果

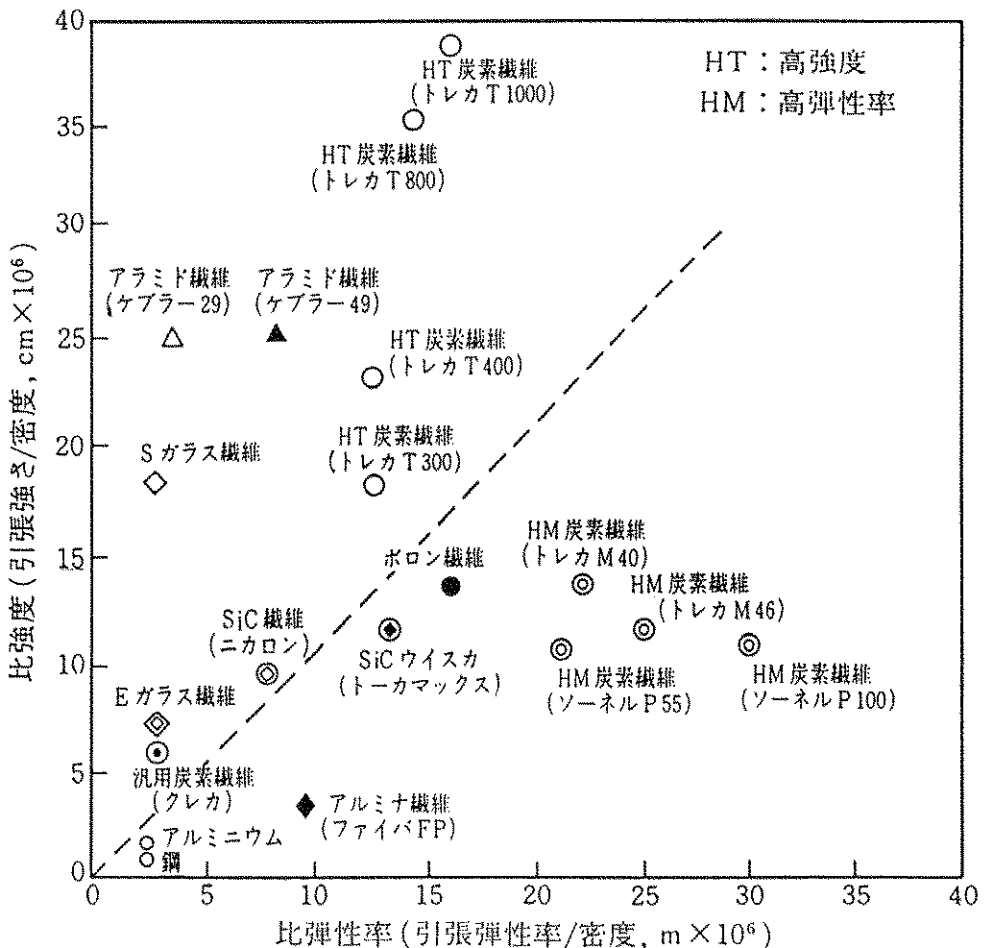


Fig. 1 各種強化繊維の比強度、比弾性率<sup>2)</sup>

Table 1 炭素繊維とガラス繊維の特性

材質	種類または製法	密度(g/mm <sup>3</sup> )	単繊維径(μm)	引張強さ(MPa)	引張弾性率(GPa)
炭素繊維	GPグレード	1.5~1.8	7~20	500~1200	50~100
	HPグレード	1.7~2.0	5~8	2000~7000	200~700
ガラス繊維	Eガラス	2.6	8~12	3500	73
	Sガラス	2.55	8~12	4500	87

(a) 耐食性

(4) 電気・電子的特性への効果

(a) 導電性, 静電気防止

(b) 電波遮断性

(c) X線透過性

### 3.3 CF/GFハイブリッド化の問題点

- (1) 破壊強度は単独GFRPより必ずしも増加しない。
- (2) CF/GF界面における残留応力
- (3) 異方性による歪み
- (4) 経済性

## 4. CF/GFハイブリッド化技術の概要

### 4.1 ハイブリッド材としての炭素繊維の特性

連続長繊維炭素繊維を強化材としたCFRPは繊維自体の高強度, 高弾性率の特性が発現して異方性材料の特性を著しく現す。

Table 1に炭素繊維とガラス繊維の機械的特性を示し, Table 2<sup>9)</sup>にCFRPの異方性材料の代表例として一方向強化材の特性を示す。表に示すように, 炭素繊維の軸方向(0°)と軸を横断する方向(90°)の特性には殆ど全ての特性値に著しい差異があることに注目する必要がある。GFRPにおいても同様な異方性があるが特にCFRPではこの特性が強く現れるので, ハイブリッド化に際してはこの異方性の制御が材料設計と成形加工上での一つの課題となる。

### 4.2 ハイブリッド積層構成

ハイブリッド化の方法としては一般的にFig. 2<sup>9)</sup>に示すように[Mixed Fiber: 混合糸], [Inter-ply: 層間ハイブリッド], [Intra-ply: 層内ハイブリッド], [サンドイッチ]等の積層構成が採られる。

### 4.3 CF/GFハイブリッドFRPの複合則

複合材料の理論的根拠となる複合則にはハイブリッドFRPの場合も当然各特性について夫々に成り立つ。

一例として, 最も単純な「一方向強化ハイブリッドFRP」の弾性率について示すと次式で与えられる。

$$E_{\text{compo}} = E_c \cdot V_c + E_g \cdot V_g + E_m \cdot V_m$$

ここで,

$E_{\text{compo}}$ : ハイブリッドFRPの弾性率

$E_c$ : CFの弾性率

$E_g$ : GFの弾性率

$E_m$ : マトリックスの弾性率

$V_c$ : CFの体積含有率

$V_g$ : GFの体積含有率

$V_m$ : マトリックスの体積含有率

### 4.4 CF/GFハイブリッドFRPの弾性率の向上と軽量化率

前記のような各種のハイブリッド構成の中から特に盤面剛性の向上に寄与する構成として, CFRP層を面材としてGFRP層を芯材とした[Inter-ply Sandwich]構成をとることが効率がよい。

Table 3<sup>9)</sup>に[Inter-ply Sandwich]構成ハイブリッドFRPの剛性の向上効果をGFRPの単独材との比較して示す。

この表の試料は夫々厚さ1, 3, 5mmのマット積層GFRPにCFハイブリッド材として, 一方向, 平織, およびCF/GF交織クロスCFRPとして厚さ約0.5mmを表裏各1プライを面材として積層したハイブリッドFRPである。その結果から等剛性のGFRPとの比較においてハイブリッド板の厚さが低減し著しい軽量化を示す。

Table 2 一方向強化 CFRP の特性<sup>1)</sup>

タイプ		T 300		M 40
フィラメント数	fil	1,000	3,000 6,000	3,000 6,000
0° 引張強度	kgf/mm <sup>2</sup> (MPa)	180 (1,765)	180 (1,765)	150 (1,471)
引張弾性率	10 <sup>3</sup> kgf/mm <sup>2</sup> (GPa)	15.0 (147)	14.5 (142)	24.0 (235)
破断伸度	%	1.2	1.2	0.5
90° 引張強度	kgf/mm <sup>2</sup> (MPa)	5 (49)	5 (49)	4 (39)
引張弾性率	10 <sup>3</sup> kgf/mm <sup>2</sup> (GPa)	1.0 (9.8)	1.0 (9.8)	0.8 (7.8)
破断伸度	%	0.5	0.5	0.5
0° 圧縮強度	kgf/mm <sup>2</sup> (MPa)	120 (1,177)	120 (1,177)	110 (1,079)
圧縮弾性率	10 <sup>3</sup> kgf/mm <sup>2</sup> (GPa)	12.5 (123)	12.5 (123)	19.0 (186)
0° 曲げ強度* <sup>1</sup>	kgf/mm <sup>2</sup> (MPa)	190 (1,863)	190 (1,863)	140 (1,373)
曲げ弾性率	10 <sup>3</sup> kgf/mm <sup>2</sup> (GPa)	13.0 (127)	13.0 (127)	20.0 (196)
0° 層間剪断強度* <sup>2</sup>	kgf/mm <sup>2</sup> (MPa)	9 (88)	9 (88)	8 (78)
0° 線膨張係数	10 <sup>-6</sup> /°C	0.2		- 0.8
90° 線膨張係数	10 <sup>-6</sup> /°C	35		35
0° 熱伝導率	kcal/m hr °C (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	3.6 (4.2)		47 (55)
90° 熱伝導率	kcal/m hr °C (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	0.6 (0.7)		1.1 (1.3)
比熱	cal/g °C (kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	0.2 (0.84)		0.2 (0.84)
0° 抵抗率	Ω cm	0.004		0.002
90° 抵抗率	Ω cm	6.6		13.0

マトリックス樹脂 エピコート 828 (100部) -BF<sub>3</sub>・MEA (5部)

硬化条件 プレスキュア 150°C, 2時間, アフタキュア 170°C, 3時間

繊維含有率 65% vol.

試験法 東レ法 (技術資料 CF04R2C)

\*<sup>1</sup> 3点曲げ  $l/d=32$  による値, \*<sup>2</sup> ショートビーム法  $l/d=4$  による値

#### 4.5 CF/GFハイブリッド化FRPの強度における問題点

炭素繊維の強度はガラス繊維よりも優れているが、CF/GFハイブリッドFRPは必ずしも強度の向上効果をもたらさない。その理由はCFとGFの破断伸度の差異(CF: 0.5~1.8%, GF: 3~4%)によるばかりでなく、積層材とした場合、相異なる繊維複合材の界面における残留応力の影響もある。Fig. 3<sup>2)</sup>に[Inter-ply]構成のCF/GFハイブリッドFRP材の引張における破断モードの一例を示す。図に示すようにGFRP層に先立ちCFRP層の破断と層間の剥離がおこっている。

#### 4.6 異方性制御に関わる問題点

CFRPの軸方向(0°)は力学的特性の最高値を示し、熱膨張率が実質的に0となり、成形収縮もまた極めて小さくなるような他材料には見られない特徴がある反面、繊維軸の配向角の僅かな振れによってこの特性が大きく崩れる短所も併せもっている。

特に、一方向強化材においては繊維軸に直角方向(90°)の強度はマトリックス樹脂の強度と繊維界面の接着強度のみに依存することになり、熱膨張率もおおきくなり繊維の持つ特性が貢献しない。Fig. 4に炭素繊維の配向角と剛性の関係を示す。図に示すように繊維の配向角が10°振れただけで剛性は65%程度まで低下し、45°迄振れると

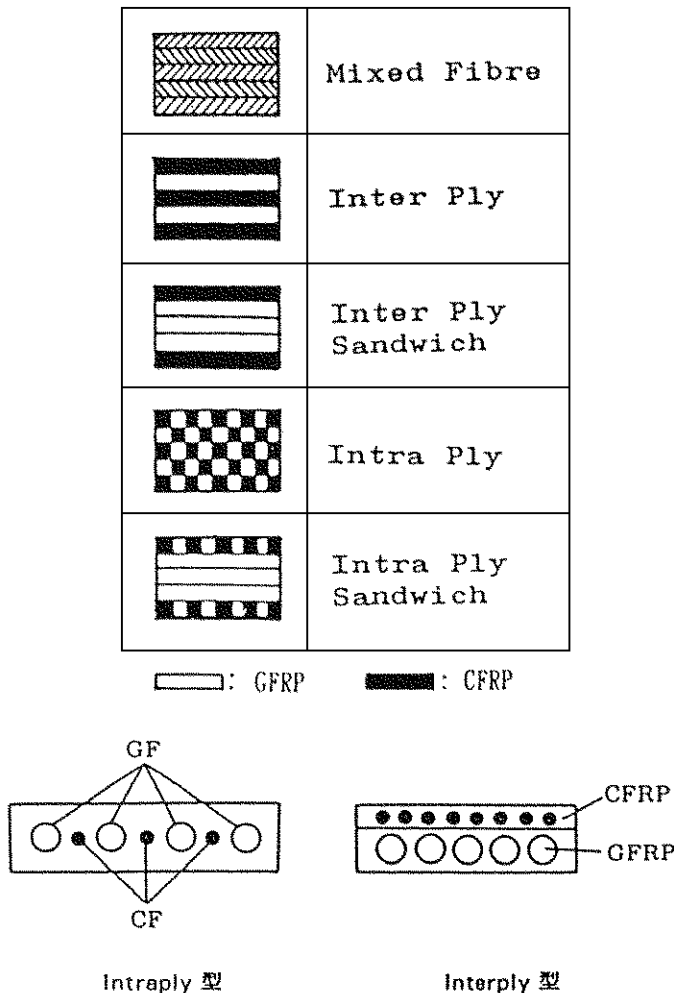


Fig. 2 ハイブリッド構成の種類<sup>2)</sup>

極めて低い剛性となってしまうことが判る。

CF/GF ハイブリッド構成においても同様な現象を現すので炭素繊維の配向角に対する設計面と成形加工上の配慮が一つの重要な技術的な要因となる。

Fig. 5<sup>8)</sup>にサンドイッチ構成 CF/GF ハイブリッド積層板の繊維配向角の影響による歪みの状態を示す。しかし、この特性を逆に利用すると、Fig. 6に示すような他材質では不可能な片持梁の特異な挙動を現出することが可能である。

## 5. CF/GF ハイブリッド FRP の用途および実績

ハイブリッド FRP は航空機の部材、宇宙機器の部材、自動車の構造部材、鉄道車両部材等に著実に応用分野を拡げているが、在来 GFRP の用途分野で、「今一步！」とされていた用途から順次普及が始まり、経済的に高性能化の手段として新たな応用開発が進められてきた。

以下これらの用途の一部を紹介しておく。

### 5.1 船舶、舟艇への応用

GFRP は小型船舶、舟艇の船殻建造材として広

Table 3 CF/GF ハイブリッドの剛性の向上と軽量化率<sup>9)</sup>

Hybrid 構成	GFRP の厚さ mm	見掛けの弾性率 kgf/mm <sup>2</sup>	Hybrid 板の厚さ mm	相当する GFRP 板の厚さ mm	軽量化率 %
 GFRP	—	650	—	—	—
TORAYCA # 1601 0.48 mm × 2 ply (表裏各 1 ply)	1	3,368	1.96	3.97	49.4
 GFRP	3	1,995	3.96	7.13	55.5
 CF 一方向織物	5	1,544	5.96	9.84	61.0
TORAYCA # 6644 0.44 mm × 2 ply (表裏各 1 ply)	1	2,011	1.88	3.33	56.5
 GFRP	3	1,327	3.88	5.99	64.8
 CF 直交平織織物	5	1,101	5.88	8.39	70.1
TORAYCA # 5642 0.48 mm × 2 ply (表裏各 1 ply)	1	1,703	1.96	3.07	63.8
 GFRP	3	1,171	3.96	5.63	70.3
 CF/GF 交織織物	5	996	5.96	7.93	75.2
<p>[註] 試料は何れも Hand-lay-up 法により成形            Matrix : Iso-phthalic UP            Vf : 各試料を約 30% に統一            TORAYCA # 1601 : CF 一方向織物 : 複合材弾性率 6,200 kgf/mm<sup>2</sup>            TORAYCA # 6644 : CF 直交平織織物 : 複合材弾性率 3,500 kgf/mm<sup>2</sup>            TORAYCA # 5342 : CF/GF 交織織物 : 複合材弾性率 2,800 kgf/mm<sup>2</sup></p>					

汎な普及を見せているが、レース艇をはじめ一般舟艇においても軽量化による高速化、省エネルギー、高性能化等を目標として炭素繊維、アラミド繊維によるハイブリッド化が進められている。Fig. 7<sup>10)</sup>に日本の代表的な外洋レースヨット [TOGO-VII号] のCF/GFハイブリッド船殻の断面図を示す。

カヌー、ロウボートなどの小型艇から数百トンに及ぶ大型FRPモーターヨットに至るまでハイブリッド化が試みられている。日本で建造されたハイブリッド船体による500トンの豪華モーター

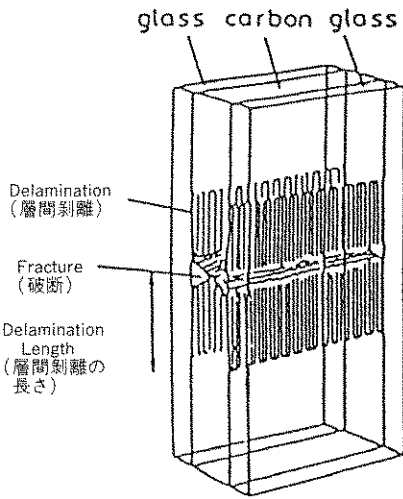


Fig. 3 CF/GFハイブリッド材の引張破壊モード<sup>11)</sup>

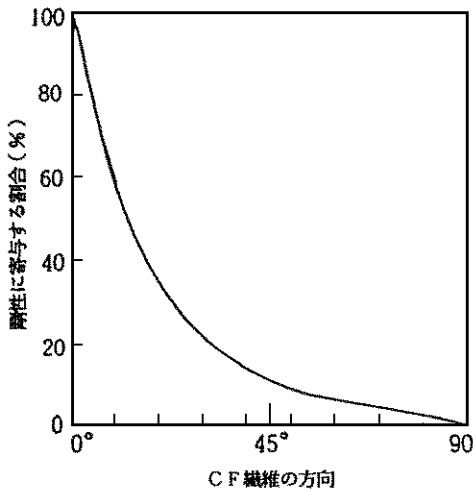


Fig. 4 炭素繊維の配向角と剛性の関係

ヨットを Fig. 8 に示す。

### 5.2 スポーツ用具への応用

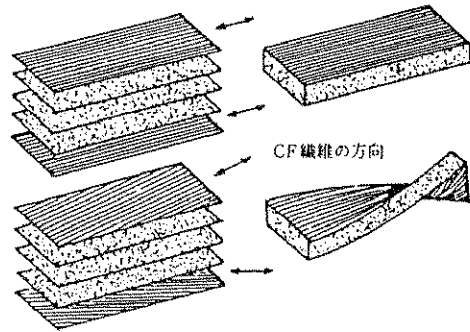
GFRP 単独では剛性の不足あるいは重量増などで目的とする性能を満足し得なかったスポーツ用具の分野でCFハイブリッド化により可能となった多くの実績がある。

Fig. 9<sup>11)</sup>にテニスラケットのフレームサイズの変遷と断面構造の一例を示し、Fig. 10<sup>12)</sup>にスキー板の断面構造の一例を示す。

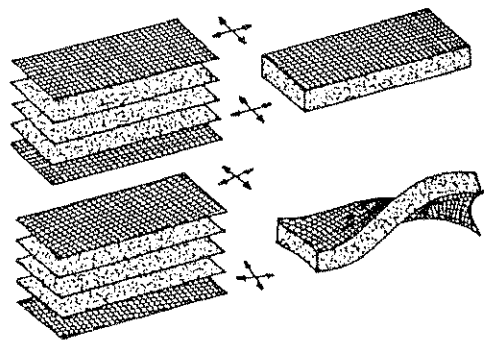
### 5.3 建設、土木関連への応用

最近ではコンクリートの補強筋として鉄筋に代わり、不銹性、耐腐食性を持ち軽量、高強度のCF/GFハイブリッド筋が脚光を浴びており用途の拡大が図られている。

また、Fig. 11<sup>13)</sup>に示す75mに及ぶ橋梁添架水



一方向CFの繊維不整による成形ひずみ



直交異方性CF繊維の不整による成形ひずみ

Fig. 5 ハイブリッド積層板の繊維配向角の影響による歪み<sup>11)</sup>

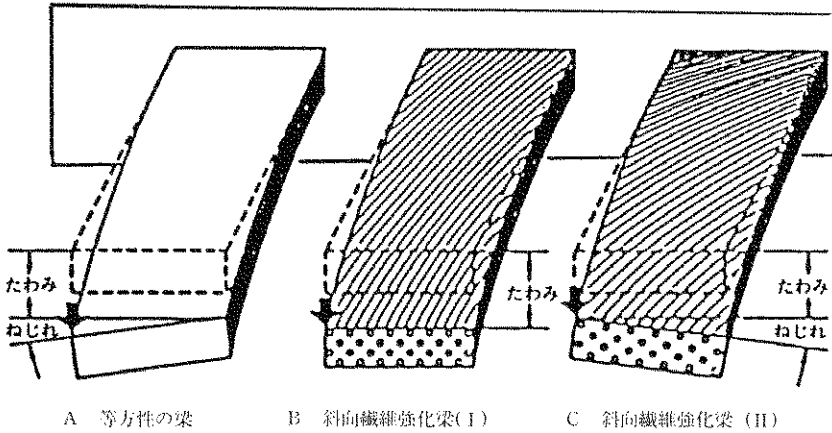


Fig. 6 強化繊維の配向による片持梁の挙動<sup>9)</sup>  
 繊維配向を適切に制御すると図に示す端部を荷重しても平均して撓む(I), さらに配向を調節すると逆の撓みとなる(II)

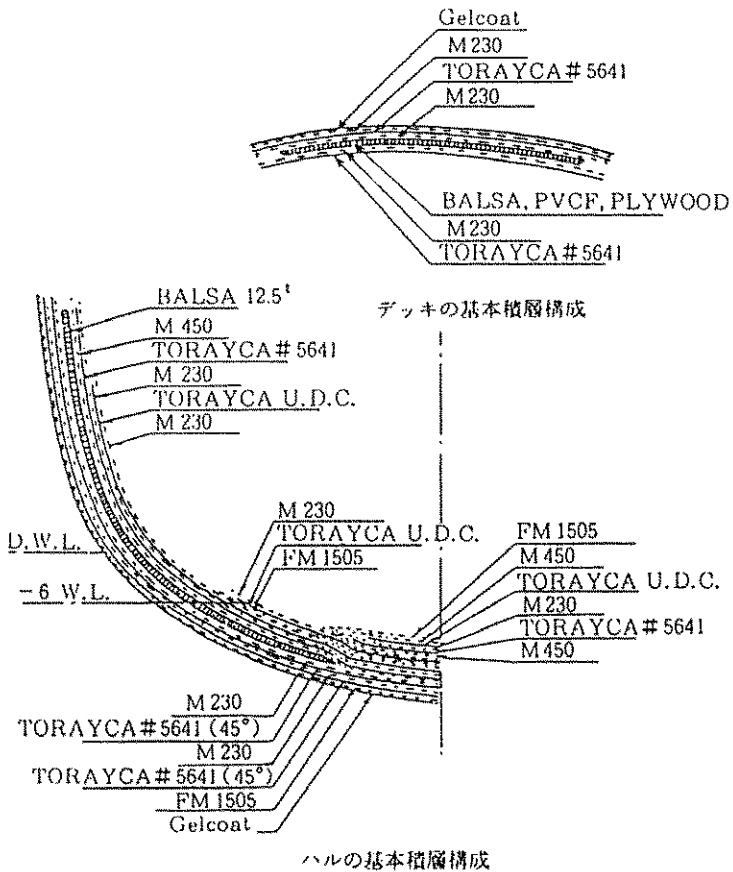


Fig. 7 [TOGO-VII号]のハイブリッド船殻構成<sup>10)</sup>  
 (図中, TORAYCA U.D.C は一方向クロス,  
 # 5641 は CF/GF 交織クロス [東レ製 CF])



道管長大トラフへの応用, Fig. 12<sup>14)</sup>に示す農業用水路のゲートへの応用等土木分野への応用開発がある。

#### 5.4 成形型, ゲージ類への応用

FRPの成形用の型として通常GFRP型が用いられるが, より高精度を要求され, 長寿命化が要求されて来ている実情からCFハイブリッドFRPによる成形型が用いられている。Fig. 13<sup>15)</sup>にレジニンジェクション成形用の成形型のハイブリッド構成を示す。

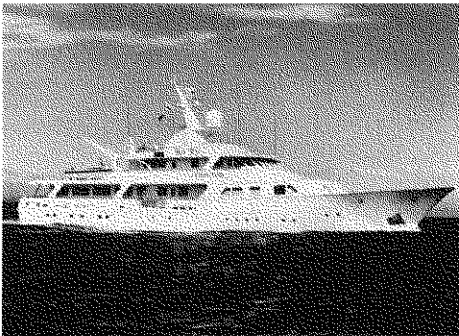


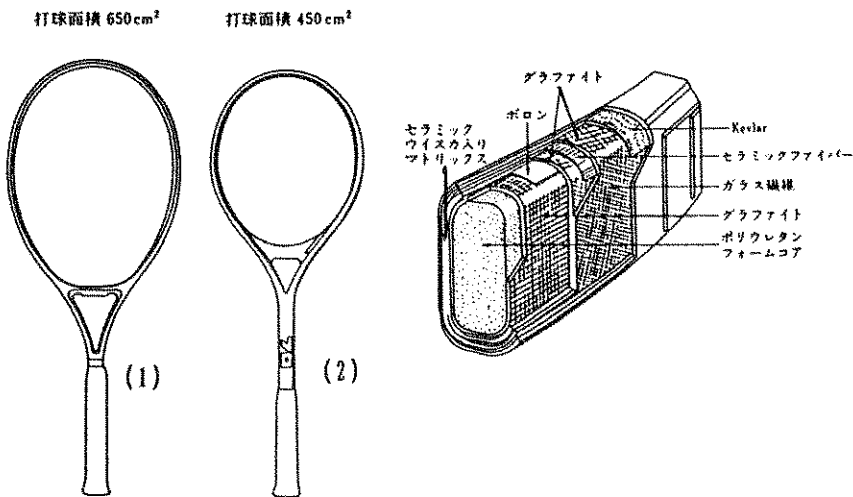
Fig. 8 ハイブリッド船殻を持つ500トンモーターヨット (西井造船所建造)

また, 高い寸法精度維持特性から複雑な形状のゲージへの応用が注目されている。

追記: CF/GFハイブリッドFRPの力学的特性については, (株)強化プラスチック協会より「ハイブリッド(GF/CF)FRP積層板の力学的特性に関する研究報告書(1984年)」にまとめられているので参照されたい。

#### 参考文献

- 1) Con Ex'89 Int. Session 資料, 1989
- 2) 東レ(株) Torayca 技術資料, 1988
- 3) 百島祐忠: 工業材料, Vol. 35, No. 13, 1987
- 4) 大谷杉郎, 奥田謙介, 松田 滋: 炭素繊維, 近代編集, p. 272, 1984
- 5) Summerscales et. al.: Composites, p. 163, July, 1978
- 6) 百島祐忠: 第2回日中複合材料セミナー予稿集, p. 66, 1987
- 7) Manders et. al.: J. Material Science, 16, p. 2240, 1981
- 8) (株)強化プラスチック協会: ハイブリッド(GF/CF)FRP積層板の力学的特性に関する



左図はテニスラケットサイズの比較, 右図は各種FRP素材をハイブリッド化した軽量高剛性構造

Fig. 9 ラージサイズラケットのハイブリッド構成<sup>14)</sup>  
(1): ラージサイズ, (2): 一般サイズ

る研究報告書, p.7-10, 1984

9) 財次世代金属・複合材料研究開発協会要覧,  
p. 17, 1984

10) 東レ(株) Torayca 技術資料, 1983

11) 棚橋良次: 日本複合材料学会編: 複合材料  
ハンドブック, p. 1209, 1989

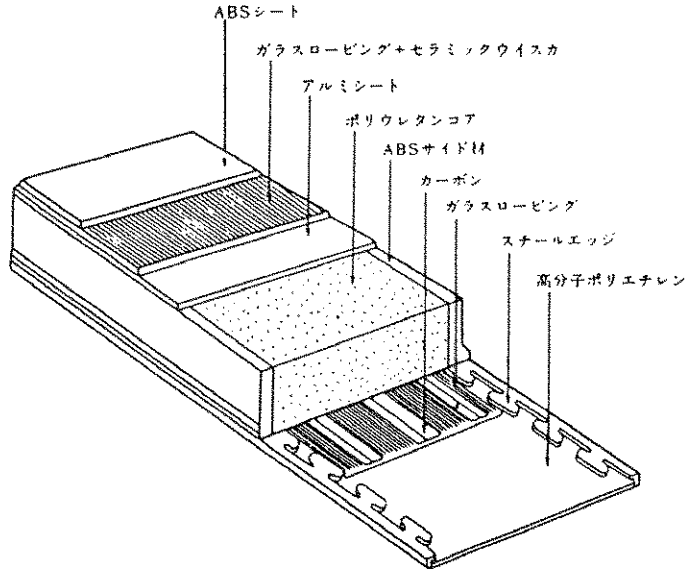


Fig. 10 スキー板のハイブリッド構成<sup>12)</sup>

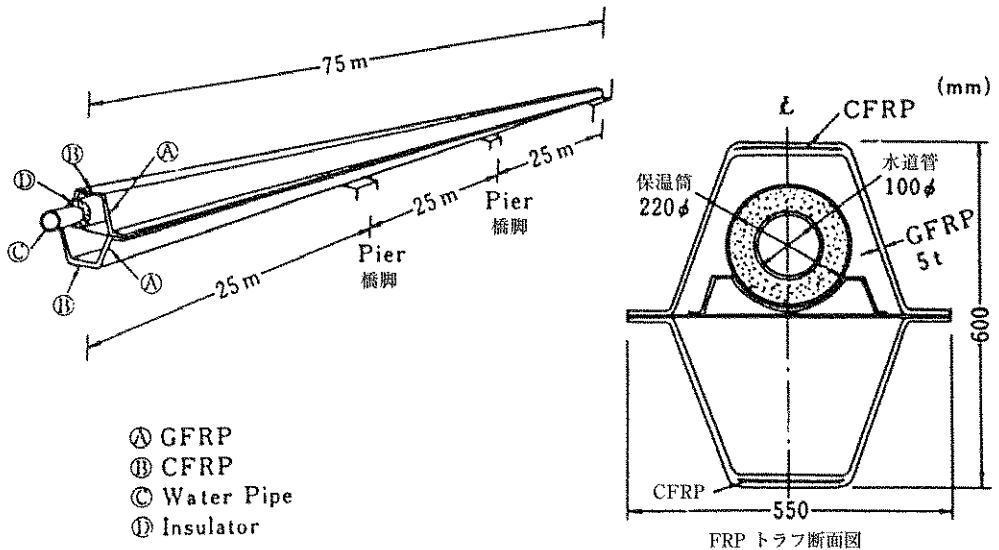


Fig. 11 75m 橋梁添架水道管ハイブリッドトラフ<sup>13)</sup>  
GFRP 構造を上面と下面に一方向CFクロスでハイブリッド化することにより、高剛性トラフとして橋桁に懸吊することなく橋脚間の長スパンを跨超することができる

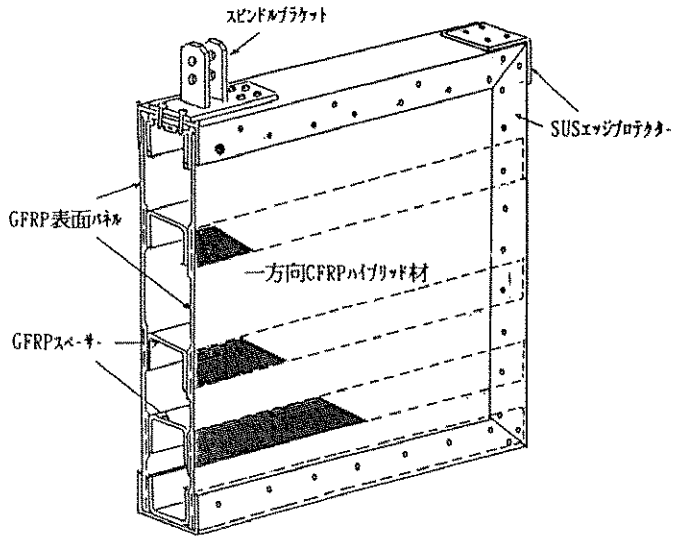


Fig. 12 CF/GF ハイブリッド FRP 水門ゲートの構造<sup>14)</sup>

在来の鋼製ゲートは 250 kg~350 kg, ハイブリッドゲートは 60 kg~70 kg となり, 開閉動力の低減, 耐腐食, メンテナンスフリーとなる。

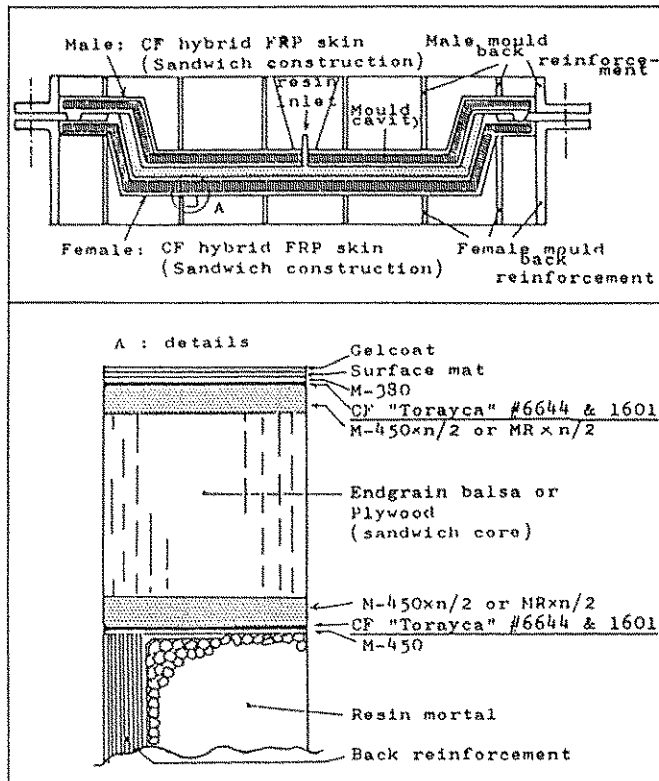


Fig. 13 レジンインジェクション用ハイブリッド成形型仕様例<sup>15)</sup>

- 12) 11)に同じ, p.1208, 1989
- 13) 百島祐忠他:強化プラスチック, Vol. 26, No. 12, p. 525~532, 1980
- 14) 百島祐忠, 吉田光則他: Con-Ex'89 講演要旨集, p. 252, 1989
- 15) 百島祐忠: 第2回日中複合材料セミナー予稿集, p. 68, 1987

**〔筆者紹介〕**



百島 祐忠 (ももしま すけただ)  
 大正12年6月7日生  
 昭和21年9月 東北帝国大学工学  
 部化学工学科卒業  
 10月 同上助手  
 昭和23年6月 東洋陶器 (現・東陶  
 機器) 株式会社入社,  
 昭和28年以降FRP  
 開発業務担当

昭和46年8月 同社退社

10月 コンポジットシステム研究所設立, 先端複合材料の応用開発を主業務として現在に至る。

平成2年3月現在 日本複合材料学会理事副会長, (社)強化プラスチック協会特別会員理事, 先端材料技術協会 (SAMPE Japan) 理事, 工学博士

**Abstract**

Since GFRP was first introduced, many efforts have been made in various industrial areas to develop applications for the new material especially as a lightweight and strong structural material.

With the introduction of carbon fibers during the 1970s, scientists focused their attention on making a new "hybrid" material consisting of GFRP and the new CFRP.

Their continued efforts substantially broadened the horizons of applications of the new composite materials.

The new industrial material, CF/GF hybrid FRP is regarded as a promising material. Coupled with the ease of calculating cost performance of the hybrid material, its carbon-fiber component is known to effectively increase modulus elasticity, dimensional stability and other physical as well as chemical properties of the glass-fiber component as a whole.