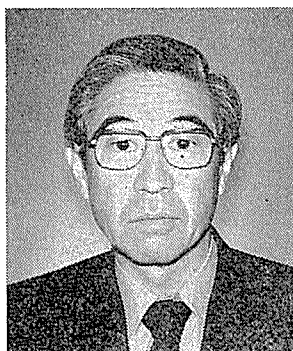


先端複合材料の進歩と応用展開

百 島 祐 忠*



* Suketada MOMOSHIMA
(株) コンポジットシステム研究所

1. はじめに

——複合材料 (Composite Materials : CM) の発展

材料の複合化によって機能向上を図る思想は有史前より存在し、エジプトにおける日干煉瓦に見られる粒子強化、動植物繊維による繊維強化された弓など原始的な武器類がある。また、自然界の竹、樹木、あるいは生体における筋肉、内臓、骨などは近代の科学技術では及びもつかぬ極めて見事で優れた複合構造を形成している。

19 世紀末にはゴムをマトリックスとした空気入りタイヤ、あるいはベークライト複合材料などが先駆的に現われている。

1940 年代、第 2 次大戦中に米国において軍用として開発されたガラス繊維 (GF) を強化材として不飽和ポリエステル樹脂と複合化したガラス繊維強化プラスチック (Glass Fiber Reinforced Plastics : GFRP) をもって近代の複合材料の出発点として認知されている。

以来 40 余年を経過した今日、GFRP は市場を拡大し産業界に横断的に用いられる重要な軽量構造材料の地歩を占めるに至り、1960 年代以降は各種の高性能強化繊維の開発とともにマトリックスも高性能樹脂、金属、セラミックスの領域へと拡大し、いわゆる先端複合材料 (Advanced Composite Materials : ACM) の開発を促進し、先端技術による各分野のプロジェクトを支え、かつナショナルセキュリティに深く関わる重要な材料として発展してきている。図-1¹⁾ に繊維強化複合材料 (FRCM) の発展経過を示す。

なお、広義の複合材料では、分子間複合材料、機能性複合材料等を含めると極めて広い範囲を網羅する材料であるが、ここでは現在構造材料分野を占める FRCM について、そのアウトラインと先端的な応用例について記述することとする。

		第 1 世代 (GFRP)		第 2 世代 (BFRP, CFRP)		第 3 世代 (FRM)	
		1940	1950	1960	1970	1980	1990
FRP	GFRP						
	BFRP						
FRM	CFRP						
	ArFRP						
	SFRP						
	AFRP						
FRM	BFRM						
	SFRM						
	AFRM						
繊維		A : アルミナ繊維, B : ボロン繊維, C : 炭素繊維, G : ガラス繊維, S : シリコンカーバイド繊維, Ar : アラミド繊維 (Kevlar 49)					
マトリックス	プラスチック	エポキシ, ポリエステル, フェノール, ポリイミド, ナイロン, PPS, PEEK 等 熱可塑性樹脂 他					
	金属	アルミニウム, マグネシウム, 銅, チタン等					

図-1¹⁾ 繊維強化複合材料の発展経過

表—1²⁾ 各種強化繊維の種類と物性

材 質	種類または製法	密 度 (g/cm ³)	単 繊 維 径 (μ m)	引 張 強 さ (MPa)	引張弾性率 (GPa)
長 繊 維 (連続繊維)	炭 素 繊 維	GP グレード	1.5~1.8	7~20	500~1 200
		HP グレード	1.7~2.0	5~8	2 000~6 100
	ガラス繊維	E ガラス	2.6	8~12	3 500
		S ガラス	2.55	8~12	4 500
	ボロン繊維	B/W (複合体)	2.57	140	3 900
	アラミド繊維	Kevlar 29	1.44	12	2 700
		Kevlar 49	1.45	12	3 500
	炭化けい素繊維	SiC/W (複合体)	3.5	100	3 500
		ニ カ ロ ン	2.55	10~15	3 000
	アルミナ繊維	単結晶 (TYCO 法)	3.99	250	2 400
		多結晶 (ICI 法)	3.4	3	1 000
		非晶質 (3M法)	2.5	10~12	1 500
		多結晶 (Du Pont 法)	3.9	20	1 400
		多結晶 (住友化学法)	3.2	9	2 500
短繊維 (ウイスキー)	金 属 繊 維	W	14.9	10	4 000
		Mo	10.2	25	2 200
		Steel	7.74	13	4 400
	セラミックス	Al ₂ O ₃	3.96	3~10	20 000
		SiC	3.18	1~3	20 000
		B ₄ C	2.52	—	2 400
	炭 素	Graphite	2.2	0.1~1	20 000
	金 属	Cr	7.2	—	9 000
		Fe	7.8	—	11 000
		Cu	8.9	—	1 700

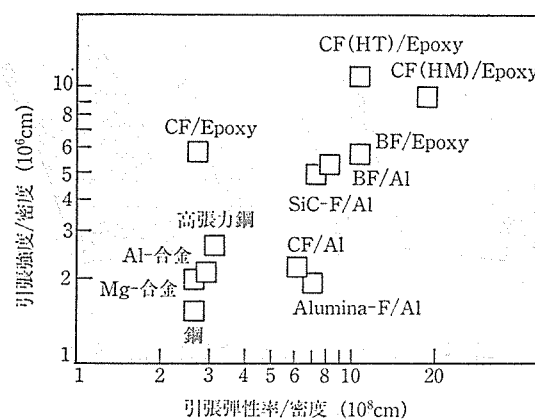
表—2³⁾ 繊維強化複合材料の保有利点

(A) 特 性

1. 高い強度と比強度
2. 高温における高い強度
3. 低 比 重
4. 高い比弾性
5. じん 性
6. 衝撃抵抗と熱衝撃抵抗
7. 改良向上される疲れ強さ
8. 改良向上されるクリープ強さ
9. 改良向上される応力破壊寿命
10. 改良向上される酸化腐食抵抗
11. 熱膨張と熱伝導性を調整可能
12. 大きい硬度と摩耗抵抗

(B) 特性を望むように調整可能なこと

(C) 上記特性の多重組合せの可能性



図—2 各種 FRCM の比強度・比弾性率

2. FRCM に用いられる強化繊維

FRCM に用いられる強化繊維は一般の衣料用繊維と異なり、いずれも高強度、高弾性率を持つ繊維群である。

表—1²⁾ に各種強化繊維の種類と物性を一覧として示す。

3. FRCM の保有利点と特有の物性の概要

表—2³⁾ に繊維強化複合材料 (FRCM) の保有利点、図

—2 に各種 FRCM の比強度、比弾性率に基づく力学的特性を示す。この図の示すように在来の金属材料等に比べると軽量でかつ高強度、高剛性であることがわかる。

FRCM は在来の均一材料 (Monolithic Materials) と著しく異なる多様な物性を持っているので、これらの特徴に対する認識を欠くと実用面での障害を招くことが往々にしておこり勝ちである。

FRCM では荷重に対し、マトリックスが応力を伝達し、繊維が荷重を分担するメカニズムになっており、均一材の荷重のメカニズムと異なり、複合別 (Rule of

Mixture : ROM) に律せられる。

また, FRCM は基本的に異方性材料であり, 材料の特性の発揮いかんは異方性制御の設計にかかることが多い。

表—3⁴⁾ に材料の異方性による特性値を示す。一方向強化 CFRP の物性を示すものであるが, 強化繊維の軸方向 (0°) と軸に直角方向 (90°) のそれぞれの物性の差異には著しい相違があることがわかる。したがって繊維を適宜に配向積層する設計技術が要求される。

図—3⁵⁾ に繊維配向の特異な挙動の一例を示す。このような独得な作用は FRCM ではじめて可能である。

4. 世界における FRCM の現況

現在, FRCM の主流を占めているのが GFRP であり, 出荷量は米国が抜きん出て第1位を占めているが, 日本が第2位にあり, 以下, 西独, 仏, 英, 伊の順序となっている。図—4 に日, 米, 欧 (東欧を除く) の用途別 GFRP の出荷量を示す。

日本と欧米の間には自動車向けの用途のシェアの割合が著しく異なることが特徴的で, また, 日本ではバスタブ, バスユニット等の住宅関連用途に大きなシェアを占めている。

さらに, 先端複合材料 (ACM) の主役となっている

炭素繊維 (CF) およびアラミド繊維 (ArF) は現在はその消費量は少ないが, 将来は大きな市場を形成することが予測されている。

表—3⁴⁾ 一方向 CFRP の物性 (異方性による特性値)

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	kg/mm ² (MPa)	180 (1 765)	180 (1 765)	150 (1 471)
引 張 弾 性 率	10 ³ kg/mm ² (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	kg/mm ² (MPa)	5 (49)	5 (49)	4 (39)
引 張 弾 性 率	10 ³ kg/mm ² (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	kg/mm ² (MPa)	120 (1 177)	120 (1 177)	110 (1 079)
圧 縮 弾 性 率	10 ³ kg/mm ² (GPa)	12.5 (123)	12.5 (123)	19.0 (186)
0° 曲 げ 強 度*1	kg/mm ² (MPa)	190 (1 863)	190 (1 863)	140 (1 373)
曲 げ 弾 性 率	10 ³ kg/mm ² (GPa)	13.0 (127)	13.0 (127)	20.0 (196)
0° 層間せん断強度*2	kg/mm ² (MPa)	9 (88)	9 (88)	8 (78)
0° 線 膨 張 係 数	10 ⁻⁶ /°C	0.2		-0.8
90° 線 膨 張 係 数	10 ⁻⁶ /°C	35		35
0° 熱 伝 導 率	kcal/m hr °C (W m ⁻¹ K ⁻¹)	3.6 (4.2)		47 (55)
90° 熱 伝 導 率	kcal/m hr °C (W m ⁻¹ K ⁻¹)	0.6 (0.7)		1.1 (1.3)
比 熱	cal/g °C (kJ kg ⁻¹ K ⁻¹)	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) -BF₃-MEA (5 部)

硬 化 条 件: プレスキュア 150°C, 2 時間

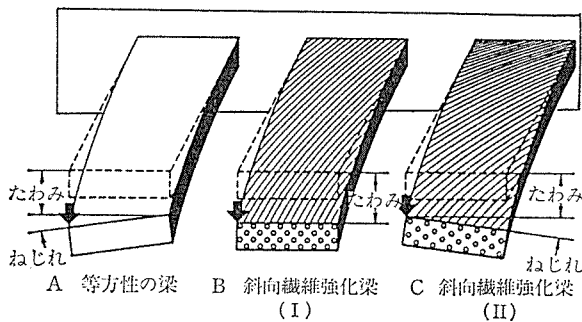
アフタキュア 170°C, 3 時間

繊 維 含 有 率: 65% vol.

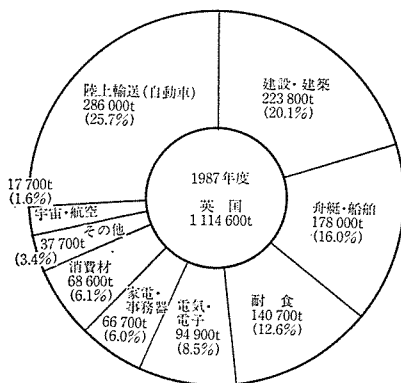
試 験 法: 東レ法 (技術資料 CF 04 R 2 C)

*1 3 点曲げ $l/d=32$ による値,

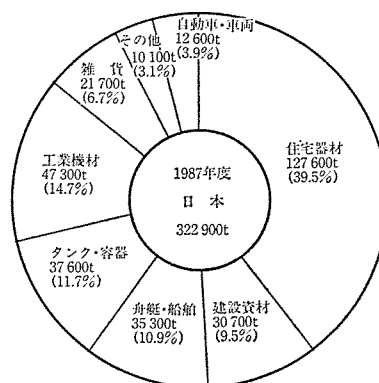
*2 ショートビーム法 $l/d=4$ による値



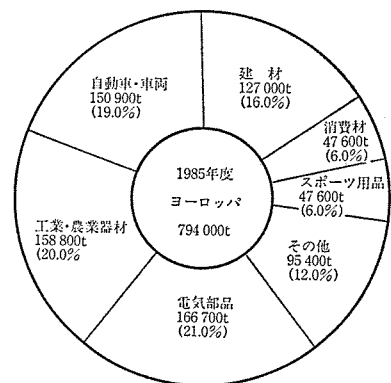
図—3⁵⁾ 強化繊維の配向による片持梁の挙動



1987年度 英国のFRP (FRTPを含む)用途別出荷統計
(SPI FRP/Composites Inst. 資料)

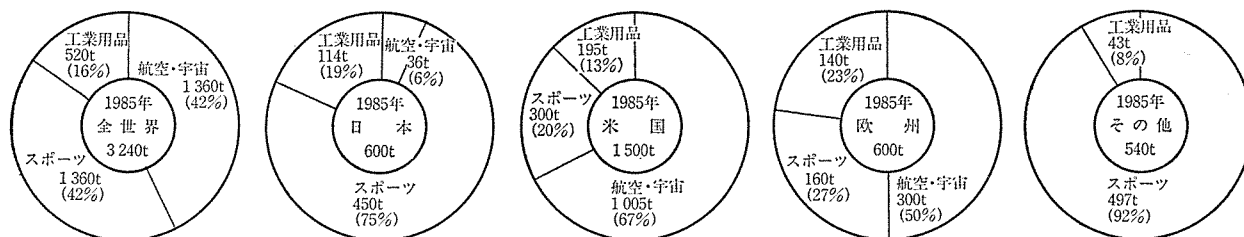


1987年度 日本のFRP (FRTPを含む)用途別出荷統計
(社)強化プラスチック協会 統計資料)

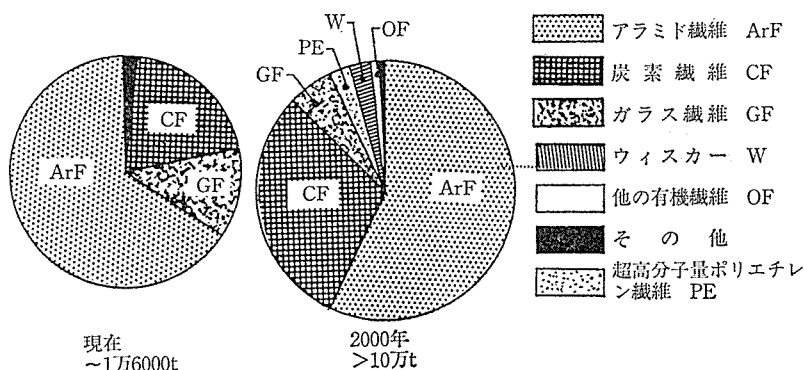


1985年度 ヨーロッパのFRP用途別出荷統計
(“Vetrotex Fiberworld” No.22, March, & No.23, Nov.,1986)

図—4 日・米・欧の GFRP 用途別出荷統計



図—5 PAN系炭素繊維の用途別需要量 (1985年)

図—6⁹⁾ 高性能繊維の全世界需要予測 (Battelle Columbus 研究所 資料)

特に、炭素繊維は現在、日本が技術的にも品質的にも極めて優れており、世界的にも全体の60%強を生産する最大の生産国となって、世界各国との提携網が構築されている。

現在のところ、アクリルニトリル (PAN) 繊維をブリーカーサ (原繊維) とした CF が主流となっているが、ピッチ系 CF の旺盛な開発が進行しており、CF の一層の高弾性率化が予測される。

図—5 に PAN 系 CF の世界における国別、用途別需要の構造を示し、図—6⁹⁾ にこれらの高性能強化繊維の将来予測を示す。

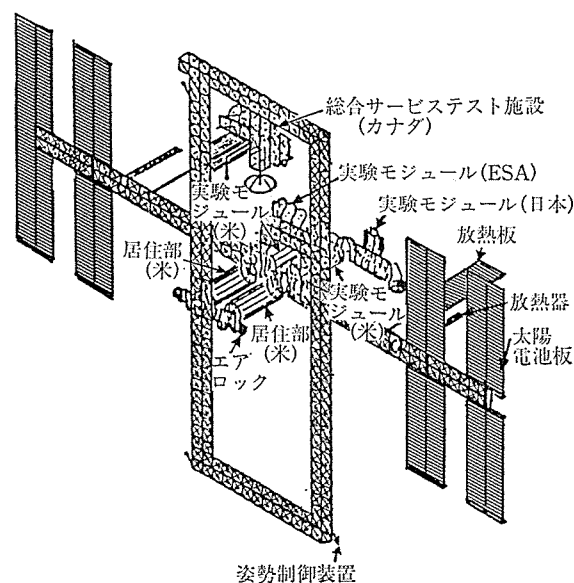
また、学術的には複合材料工学として体系づけられ、日本では「日本複合材料学会」が1975年に設立され、米、欧両地域にもそれぞれ学・協会があり、国際的な交流が図られており、複合材料国際会議 (International Conference on Composite Materials: ICCM) が開催され、日本との間には、日米、日ソ、日中、日瑞等の2国間会議が持たれている。

また業界では (社) 強化プラスチック協会が1955年に設立され精力的な活動が行われている。

5. 先端複合材料 (ACM) の用途例

現在、炭素繊維の需要構造に見られるように ACM の活躍の場は宇宙・航空分野に大きなシェアがあり、最先端の材料開発と技術開発が旺盛に行われている。

ここで開発された成果の一般産業分野への波及効果は計り知れないものがある。



図—7 デュアルキール型宇宙基地の構想図

以下これらの先端的な用途例を中心に、分野別の用途の一端を紹介する。

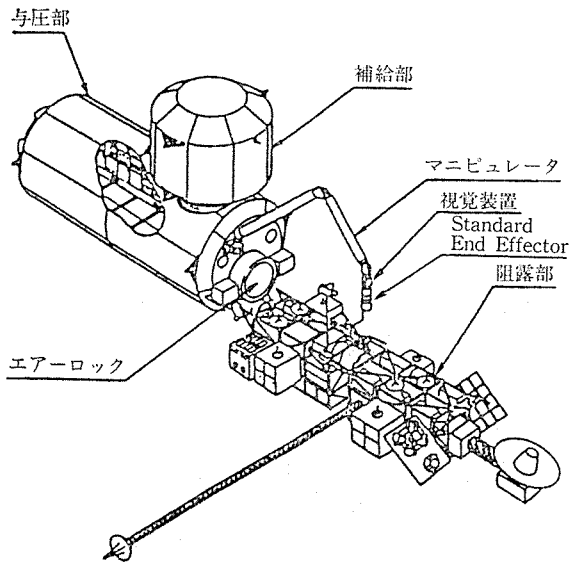
5.1 宇宙開発に活躍する ACM

現在のビッグプロジェクトの一つとしての宇宙開発に関しては、ACM 無くしては不可能と言っても過言ではない。

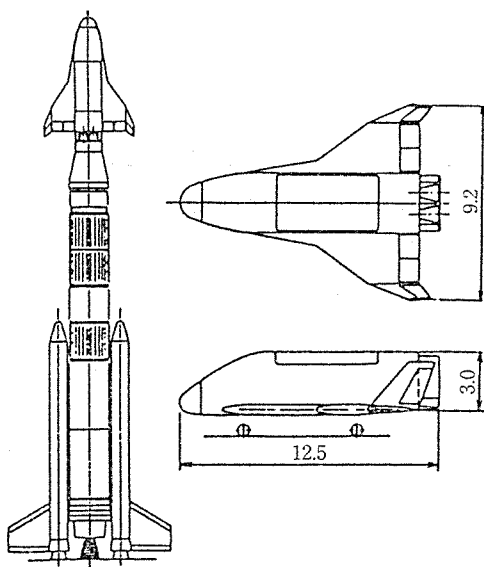
図—7 は NASA で計画している宇宙環境利用のスペースステーション計画による大規模宇宙構造物 (LSS) を示す。デュアルキール型で、米、欧、加、日の協力による国際プロジェクトとして開発が進められている。

図—8⁷⁾ に示す日本実験モジュール (JES) は1987年

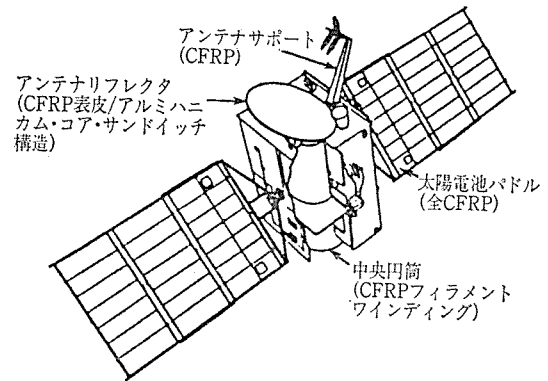
より開発に着手し、1992年の運用開始を計画している。ステーションを構成するトラス材、ソーラーパネル構造体などはその殆どが CFRP 構造部材であり、各実験モジュールのマニピュレーター部材などにも適用される。ステーションの組立て、器材の運搬には宇宙往還機（スペースシャトル）が用いられ、シャトル自体には同じく ACM の部材が多く適用されている。特に、大気圏を通過する際に機体に受ける摩擦熱に抵抗するために C/C コンポジット（炭素繊維強化炭素複合材料）をはじめ、現在研究開発が進められている傾斜機能材料等の耐熱材料が重要な材料となる。日本においても図—9⁹⁾に示す [H-II] ロケットの開発とともに 1990 年次降の日本モジュール（JES）への輸送需要に対処する往還機 [HOPE] の開発が進行している。



図—8⁷⁾ 日本実験モジュール（JES）

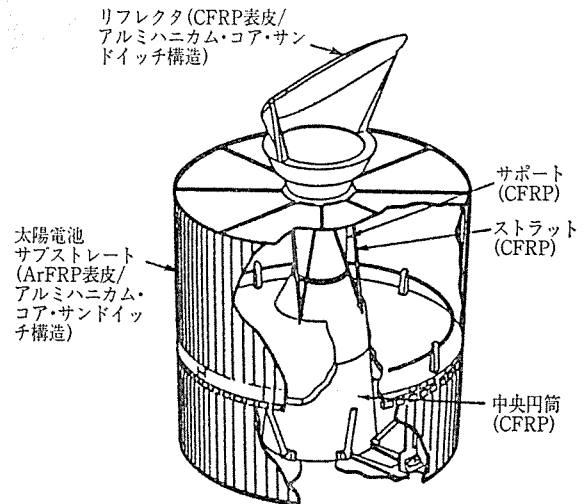


図—9⁹⁾ H-II ロケットと宇宙往還機



3 軸姿勢制御衛星での複合材料の使用例
使用される複合材料の大部分は CFRP である。面材として用いられる場合は複合材料を表皮としてアルミニウムをコアとしたサンドイッチ構造として使用することもある。

図—10⁹⁾ 静止衛星の材料構成



スピン形衛星での複合材料の使用例
絶縁または電波透過が必要な部分には ArFRP, GFRP が使用される。

図—11⁹⁾ スピン衛星の材料構成

また、各種の人工衛星の構成部材はこれまた主に ACM で構成されている。構造例として図—10⁹⁾ に放送衛星などの三軸制御静止衛星、図—11⁹⁾ に気象衛星などのスピン衛星への ACM の適用例を示す。

宇宙空間においてこれら ACM が適用される理由は、軽量、高強度、高剛性材料であるのみならず繊維配向の制御により熱膨張率が著しく小さく、真空雰囲気中での太陽熱による高温/極寒の極端な温度差においても高い精度を保つ特性によるものである。

5.2 航空機の高性能化への展開

航空機の高速、高性能化に ACM は大きな貢献を果たしている。図—12 に現在実用化されている日・米・伊共同開発による最近の旅客機 B-767 機への ACM 適用例を示す。複合材料化率は未だ小さいが今世紀末には図—13¹⁰⁾に示すように 70% にも達し、30% の軽量化を

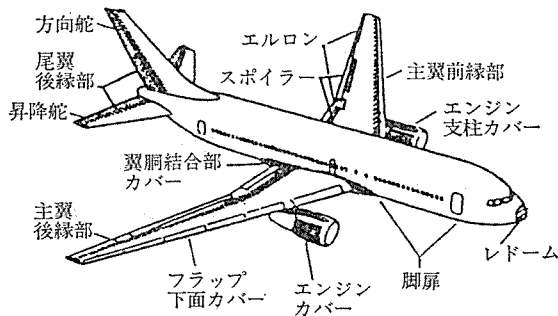
予測する向きもある。軍用機となるとさらに積極的な実用化が行われており、例えば図—14 に示す垂直離着陸戦闘機 AV-8B への適用はすでに 26% に及んでいる。図—15¹¹⁾ はグラマン X-29 前進翼戦闘機の実験機である。本機は ACM による初めての主翼における一次構造材としての試みであると同時に、材料の異方性を巧みに利用した設計により繊維を配向させた ACM 構成の前

進翼となっている。この構造は優れた運動、戦闘性能を発揮すると言われる。

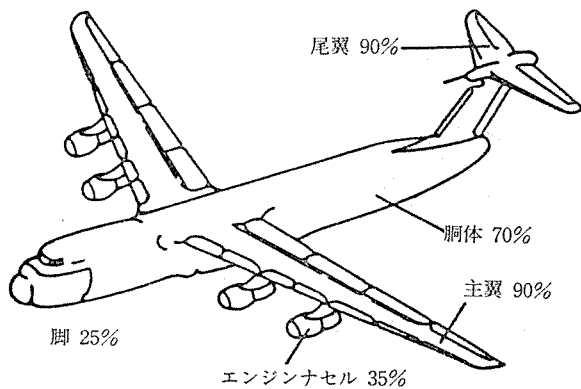
また、ArF 複合材料はヘリコプターの優れた機体構造材として適用の範囲を拡大している。

将来、超々音速機を含めて航空機の構造材の趨勢としては図—16¹²⁾ に示すように 21 世紀には複合材料は 46% のシェアを占めると予測されている。

現状ではすでに小型機、ビジネス機分野においては [Learfan 2000], [Avtek 400], [Beechcraft Starship



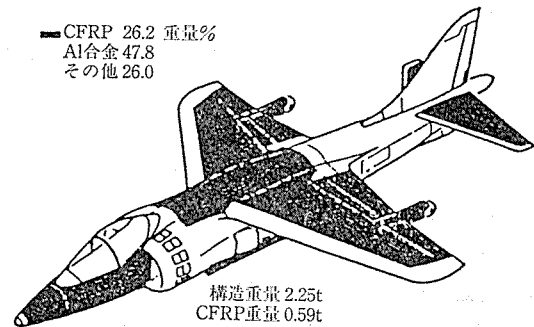
図—12 B-767 の複合材料適用箇所



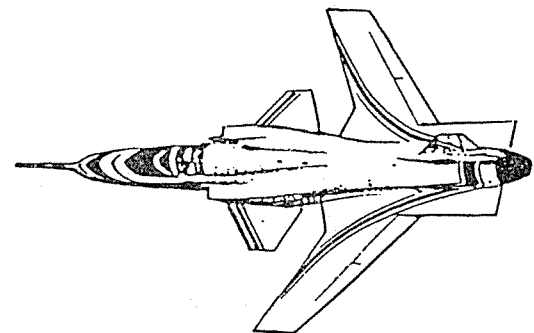
複合材化率(全体) 70%, 重量軽減効果 30%

図—13¹⁰⁾ 今世紀末における民間機の複合材料化率予測

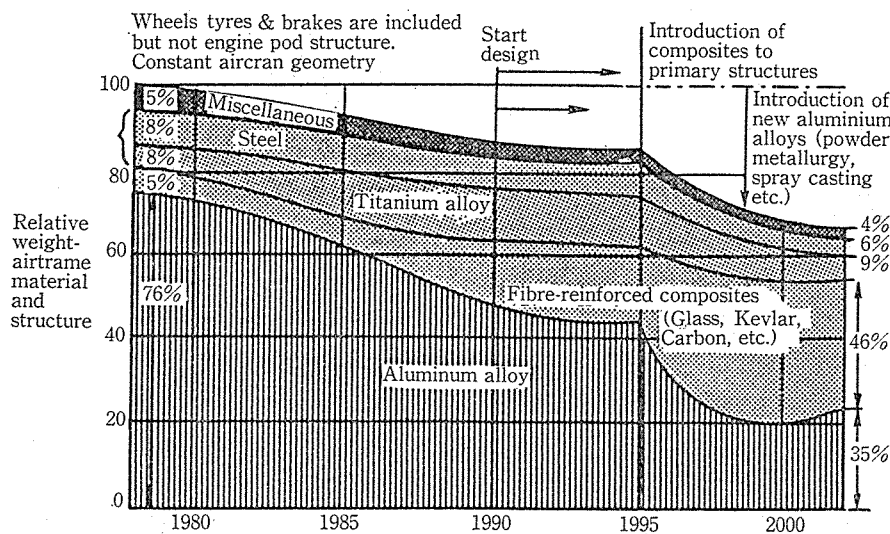
CFRP 26.2 重量%
Al合金 47.8
その他 26.0



図—14 AV-8B 機の複合材料適用箇所



図—15¹¹⁾ X-29実験機の前進翼



図—16¹²⁾ 航空機の軽量化と材料の趨勢

表—4¹³⁾ ビジネス機の性能比較

機 種	構 造 材	座 席 数	総 重 量 (kg)	翼 面 積 (m ²)	馬 力 (Hp)	空 虚 重 量 (kg)	機 部 品 数	燃 料 搭 載 量 (L)	航 続 距 離 (km)	燃 費 率
King Air : B 200	軽 合 金	8	5 670	28.15	850×2	3 419	2 500 ? 3 000	2 059	2 502	1.21
三 菱 : MU-2 B		8	5 250	16.55	715×2	3 180		1 385	1 846	1.33
Commander : AE 1000		8	5 080	25.95	820×2	3 183		1 453	2 526	1.73
Lear Fan : 2100	CFRP	9	3 334	15.13	650×2	1 860	?	946	2 687	2.84
AVTEK : 400	KFRP	6~9	2 495	13.10	680×2	1 368	56	1 092	4 183	3.83
Beechcraft : 2000	CFRP	6~7	5 670	26.09	1 000×2	3 762	?	1 928	4 860	2.52

2000] などの全複合材料機体のビジネス機が開発され実用化の域を迎えており、表—4¹³⁾ に示すように同等のビジネス機を遥かに凌駕する性能を発揮している。機体の軽量化により少ない燃料搭載量で航続距離が伸び燃費率が著しく向上するほか、特記すべきことは機体を構成する部品点数が極端に低減していることである。

先般、無給油、無着陸世界一周飛行に輝かしい成功をおさめた「Boyer 号」は全複合材料機体ではじめて可能となったものである。

5.3 自動車への ACM の展開

前記のとおり米、欧では GFRP が車体外板、バンパー、リーフスプリングなどに多用されているが、実用車への ACM はコスト面に大きなネックが存在するために適用例は極めて稀である。

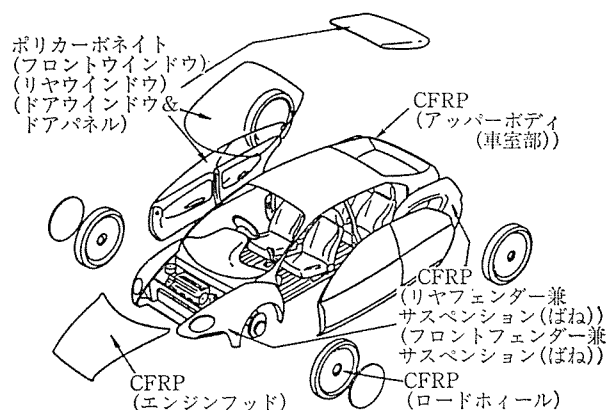
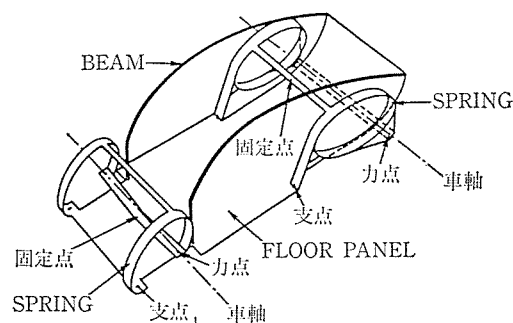
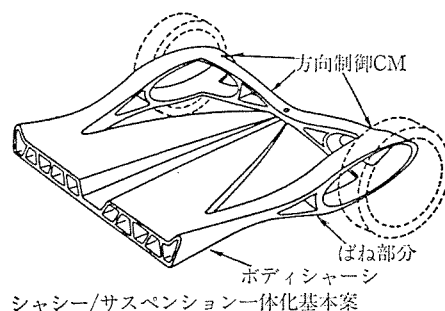
一方、レーシングマシンにおいては、F-1 レーサーをはじめとする高性能マシンは CF/ArF ハイブリッドボデー、C/C コンポジットによるブレーキアセンブルなど各種の ACM が大量に使用され、高強度、軽量性とともに振動減衰性、制動性などに大きな寄与を果たしている。

エンジン関係では米国の Polimotor 社ではコンポジットエンジンの開発があるが、日本では FRM のピストン、コンロッド等が実用化している。

(財) 次世代金属・複合材料研究開発協会では(財) 日本自動車研究所へ委嘱し、21 世紀に向けて第 3 世代における複合材料自動車構造の可能性についての調査研究を昭和 59 年より昭和 61 年にわたる 3 ケ年計画で実施した。

そのコンセプトは熱可塑性樹脂をマトリックスとした CF 長繊維強化複合材料により工業的生産を前提に図—17¹⁴⁾ に示すようにボデーシャシーとサスペンションを一体化し、ボデー構成部材点数の大幅な減少をねらい、軽量化による 1/2 の省燃費を目指したものとなっている。

特に、FRCM の異方性を最大限に利用した構造設計により一体化したサスペンション構造に楕円形スプリングを組み込んである。この繊維配向を制御した CFRTP スプリングモデルについて実験に基づいた詳細な力学的解析が加えられ、同調査研究報告書に所載されている。



図—17¹⁴⁾ 第3世代複合材料自動車構造の可能性に関するコンセプト

5.4 ACM の導入による FRP 舟艇、船舶の高性能化

GFRP は舟艇用船殻建造材料としての適性が開発当初より注目され、現在ではプレジャーボートの 90% 以上、特に日本では漁船の 70% が FRP 化している。

ACM の適用は、漕艇エイト、フォア、スカルなど CF/ArF ハイブリッド船殻が世界的に採用されて高性能となり、カヌーも ArFRP シェルが普及を見ている。

レース用のパワーボート、先端的な外洋ヨットにおい

ても CF/ArF ハイブリッド FRP 船殻を持ち、さらにスパー、リギング、ラダーストックなどが CFRP、あるいはチタン、マグネシウムをマトリックスとした FRM が用いられている。セールにも ArF クロスとポリエステルフィルムハイブリッドラミネートクロスが高性能を発揮している。

大型 FRP 船の分野でも CFRP によるハイブリッド化が実施され、500 トンに及ぶ大型モーターヨットを始めハイテク化された半没水型双胴 FRP クルーザーも建造、実用化され、昭和 62 年秋には北海道稚内の氷海航行の実用高速艇が耐衝撃性にすぐれた ArF (Kevlar 49) でハイブリッド化した船殻で建造され就航した。

なお、FRP の強度、非磁性、低振動性などの特性により各国で掃海艇が建造されているが、世界最大の FRP 船舶は英国海軍の Hunt 級掃海艇 (650 トン) で、世界最高レベルの掃海技術をもって現在ペルシャ湾海域で活躍している。

海洋開発プロジェクトにおいても [しんかい 2000] および現在開発中の [しんかい 6500] に GFRP のアウタースキン層があり、耐圧浮力材としてマイクロバルーン/エポキシ樹脂複合材：シンタクティックフォームは不可欠な部材である。

5.5 スポーツ用具は ACM の活躍の場

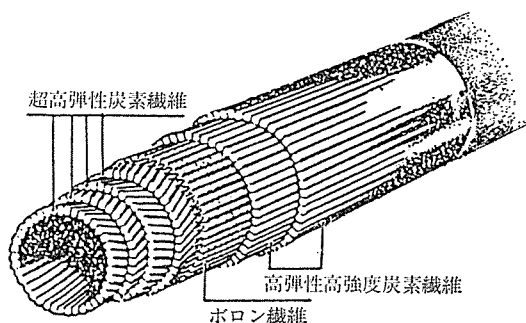
現在、航空・宇宙関連用途とスポーツ関連用途は ACM の 2 大市場を形成しており、特に CFRP のこの分野での生産量は日本と台湾が圧倒的なシェアを占め世界的な供給源となっている。

商品としては、釣竿、ゴルフクラブ、ラケット、スキー、洋弓などである。

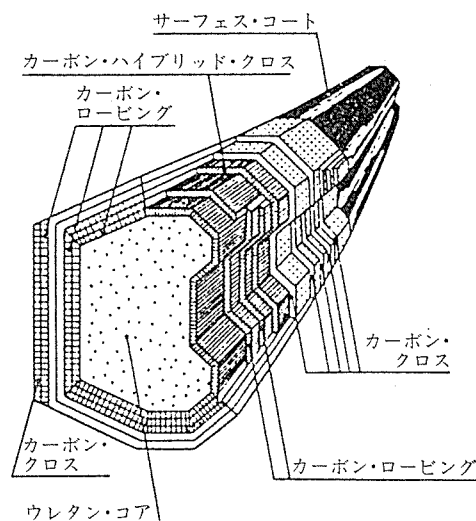
いずれも、CFRP の軽量、高強度、高弾性、振動減衰性、耐疲労性等の材料特性を利用しており、材料的、構造的なハイブリッド化により各スポーツ分野の要求性能にに応じて対処しているものである。

ここでも高性能強化繊維類の異方性を巧みに利用することにより新たな高機能を創出している。

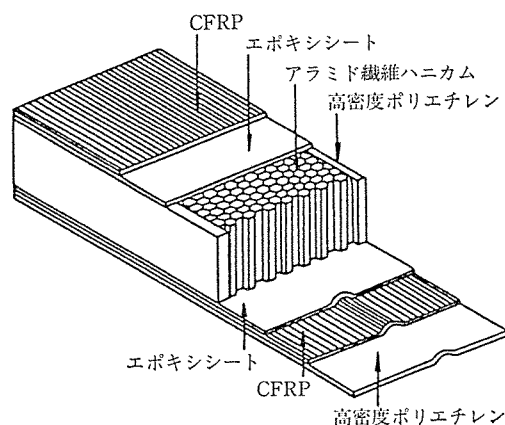
図—18¹⁵⁾にゴルフクラブシャフトの構造の模式図を示す。この図の示すように高強度 CF と高弾性 CF を配向



図—18¹⁵⁾ ACM ゴルフクラブシャフトの構造模式図



図—19¹⁶⁾ ACM テニスラケットのフレーム断面構成



図—20¹⁷⁾ クロスカントリースキーの断面構成

配置し、この場合はさらに高剛性を持つボロン繊維でハイブリッド化している。

図—19¹⁶⁾にグラファイト (CF) テニスラケットのフレームの断面構成の一例を示す。ラケットとしての剛性、振れ、撓み、バランスなど競技時におけるあらゆる条件に対し最適化をはかるべく構造設計が行われていることがわかる。

図—20¹⁷⁾に最も軽量のクロスカントリー用スキー板の断面を示す。ハニカムコアのサンドイッチ構造を採り、片方はわずか 460 g の軽量化が達成されている。複合材料によるスキー板は外観ではわからないが、繊維強化とともに内部は使用目的に応じた複合構造となっている。

競技用自転車の構造材としても ACM 化が行われ、フレーム、リムの CFRP 化、あるいはハニカムコアと ArF スキンで構成されたディスクホイールを装備した軽量、高性能車が開発されている。

スポーツ分野ではウィスカー (単結晶繊維) セラミック材料、新金属材料等の新しい機能を備えた素材を積極

的に応用した用具の開発が行われ、最も身近な ACM 商品となってきている。

5.6 建築・土木関連への ACM によるハイテク技術
コンクリートの繊維強化技術が開発され (Fiber Reinforced Concrete : FRC) として鋼繊維強化 StFRC, ガラス繊維強化 GRC など、建築、土木用の部材として成形されて用いられてきた。

さらに、炭素繊維を強化繊維とした CFRC が開発され耐塩水性、耐アルカリ性の克服と同時に高強度、軽量性を伴った新たな構造部材として注目されるに至った。

実際的には超高層ビルの外壁のカーテンウォールに施工されており、軽量化の効果によりビルの躯体を構成する鉄骨重量の低減、施工性の改善などによるコスト/パフォーマンスが明らかになったとされる。

現在の実用段階では汎用グレードの CF が用いられているが、高強度、高弾性のハイグレードの CF によればさらに高性能化が可能であるが、現状ではコスト面でのネックがある。しかし、今後は石炭、石油からのピッチをプリカーサとした高性能 CF の開発が旺盛に進められており、将来この分野への需要に応えられる状態となることを期待したい。

また、鉄筋に代わる複合材料のロッド材による補強システムの開発も進み実用化の域にある。

海洋土木の分野では、シーバース等の鋼管の腐食の防護用としての GFRP 鋼管杭カバー、あるいは耐海水性と高強度を利用した浮消波堤等の実用化がある。

ケーブルトラフの構造材として GFRP が用いられており、都市の共同溝、あるいは本四架橋のケーブルトラフにも適用されている。

特異な実施例として、橋梁添架水道管用の長大トラフが開発され施工されている。図-21¹⁸⁾は北海道の長万部川栗岡橋に添架した全長 75 m に及ぶ無懸架施工の複合材構造のトラフである。

添架された橋梁は PC 桁で各 25 m に橋脚 2 本を持っているが、PC 桁へは一切接触せず、かつ橋脚端のわずかなスペースを利用して添架し跨越する要求に応えたものである。

トラフ構造は図に示すようにダブルハット型断面を持つ CF ハイブリッド GFRP 構成材であり、ハットの頂面と底面に一方向に配向制御した CFRP が一体に積層成形された構造で、図中のシミュレーション図形の示すように予め荷重、風圧などトラフの受ける条件をもとに

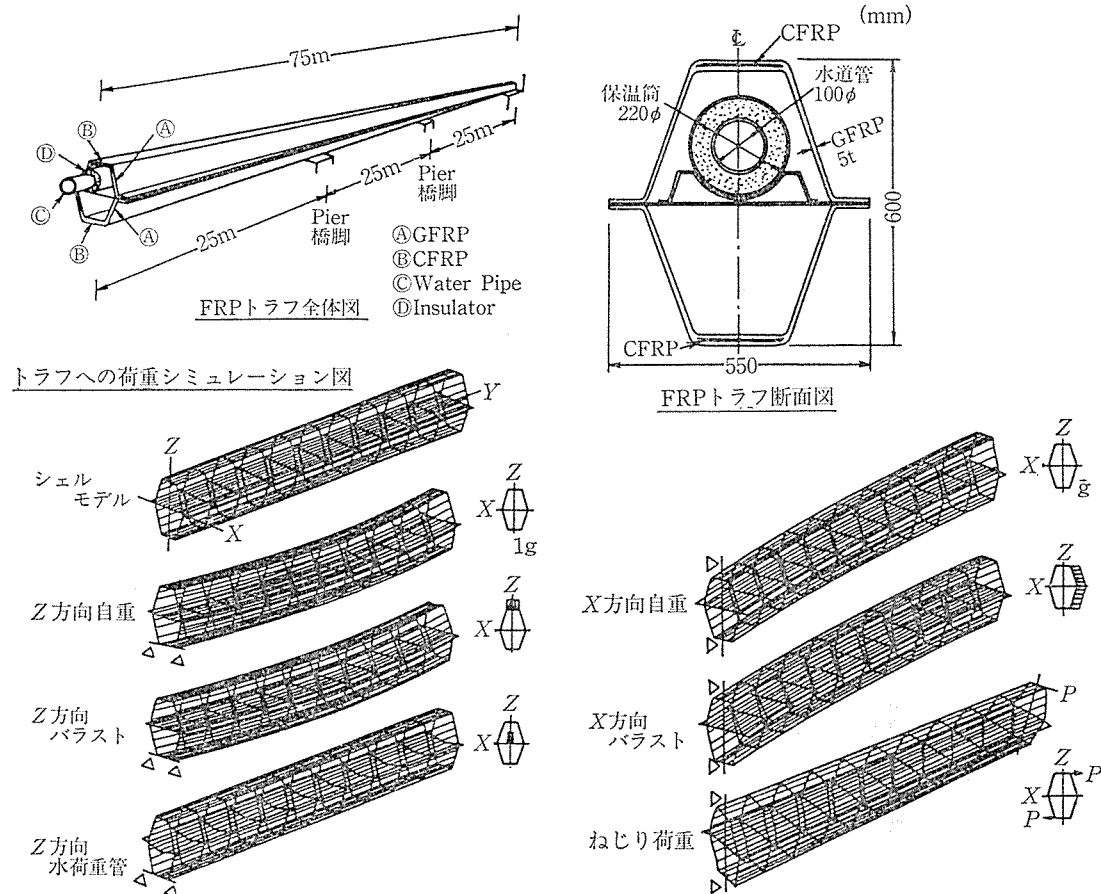
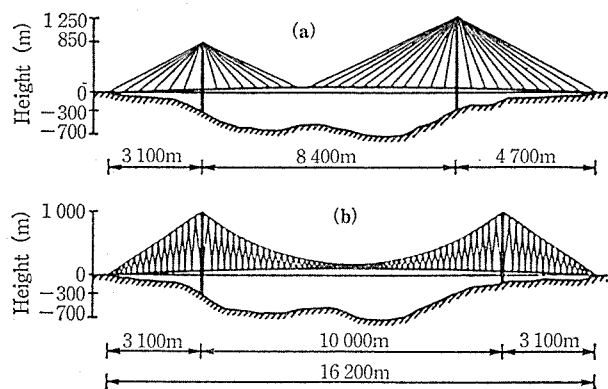
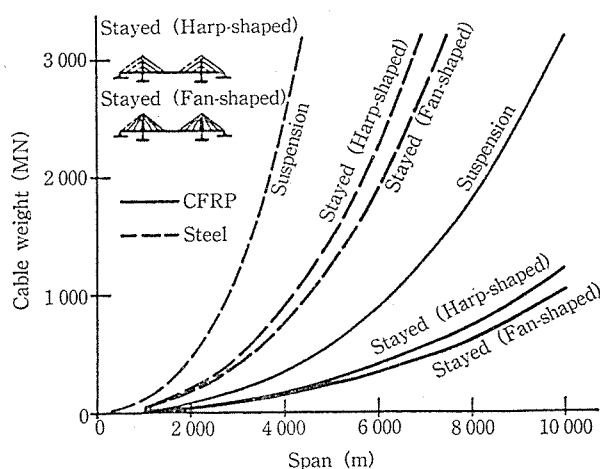


図-21¹⁸⁾ 橋梁添架長大 ACM トラフ

図—22¹⁹⁾ ジブラルタル海峡架橋計画図図—23¹⁹⁾ 鋼索と CFRP 索の比較

CF ハイブリッドの適正化がはかられている。

CF の高弾性率のみならず、著しく高い耐疲労、耐クリープ性に依存しており、トラフ本体で約 1.9 トン、管内満流で約 2.9 トンの軽量化が達成されている。

他材質ではこの場合、桁下がわずか 60 cm の空間への施工は途中の懸架なくしては材料自体の自重によりはなはだしいたわみを生じて橋脚間の無懸架施工は不可能であり、ACM によりはじめて可能となったものである。

ACM を最終的な使用材料として、巨大橋梁のプロジェクトとしてジブラルタル海峡への架橋についてのスタディーが行われている。図—22¹⁹⁾にその構想図を示す。

全長 16 km におよぶ吊橋の吊りワイヤーを炭素繊維複合材料にターゲットを合わせることで架橋の高い可能性を示している。図—23¹⁹⁾に鋼索と CFRP 索のスパン間隔にもとづく重量をグラフ化している。CFRP 索の軽量・高強度の特性が明瞭であり、夢の掛橋として ACM への大きな期待がかけられている。

5.7 先端産業分野を活性化する ACM

現在、超伝導関連の開発が著しい進展を見せているが

当面は超低温の領域の材料が必要であり、ここに FRCM は耐低温強度保持特性と低熱伝導率の特性により液体ヘリウムのデュワー、クライオスタットなどの周辺必需機器の材料として活躍の場を確保している。

核融合臨界プラズマ試験装置 [JT-60] の絶縁層にも同様の特性から FRP が用いられている。

リニアモーターカー交通システムはいよいよ実用期を迎えようとしているが、超伝導マグネット周辺機器のみならず、車輛の軽量化のために CFRP ボデーが試験車に装備されている。

ロボット部材としても ACM は軽量、高剛性と振動減衰性による高精度、省エネルギー部材として適用範囲を拡大しており、特に極限ロボットの部材として注目されてきているほか、介護ロボット用にも適用が進められている。

工業技術院機械技術研究所では蓄エネルギー用 ACM 製スーパーホイール、全複合材料製の工作機械（フライス盤）が試作され、振動減衰性に優れ研削時のビビリ現象が低減し高精度の加工が可能とされている。

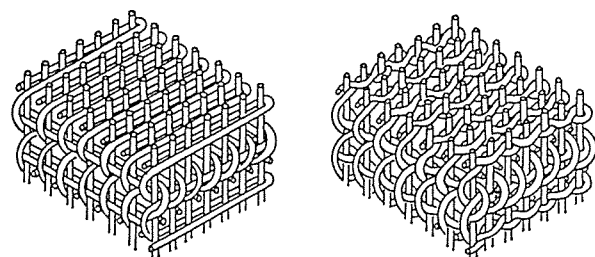
ウラン濃縮用の遠心分離回転胴も ACM の軽量・高強度材料としてのエネルギー効率が大きな貢献を果たすものとして研究開発が進められている。

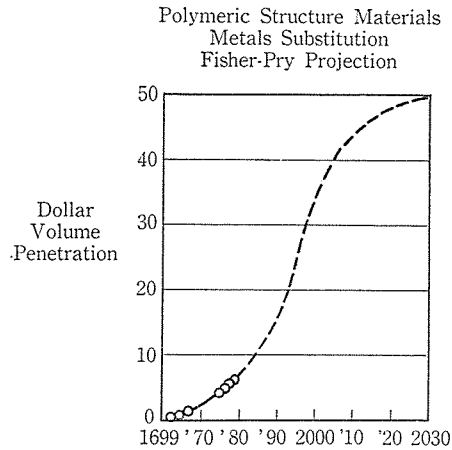
衛星通信、衛星放送受信用のアンテナ、巨大な電波望遠鏡用のパラボラアンテナの構造材としても ACM がその主材料となっている。

医療・福祉関係器材においても、CFRP の優れた X 線透過性のゆえに患者の被曝線量が少なくて済むため、X 線用ベッドテーブル、CT 装置ハウジング、フィルムカセット等が比較的大きな市場となっている。

軽量な車椅子の開発、義肢・足、義歯床にも利用されてきている。

また、積層構成による ACM 材料の弱点とされる問題点は、材料構成上 x 軸と y 軸に対しての強度は繊維の配向角の制御によって得られるが、層を貫通する z 軸方向はマトリックスの強度と、繊維界面におけるマトリックスの接着強度に依存することになり繊維の強度が寄与し難い泣き所をかかえている。

図—24²⁰⁾ 強化繊維 3 次元織物の組織例



図—25 2030 年までの複合材料の趨勢

表—5 複合材料の経済的趨勢

Economic Trends Mass production shifting to small, flexible units	
Past	Future
• Limited selection • Short life • Energy consumer • Labor base • Domestic focus • Capital intensity	- Variety and diversity - Long life - Energy conserver - Automation - International network - Knowledge

そのために、層間せん断強度が低く、層間剝離等の欠点が出易く熱衝撃抵抗性に難があり、特に設計上の配慮を要するところである。

これに対処するため繊維配向を $x/y/z$ 3 軸に配向配置した 3 次元構造を目的とした強化繊維の 3 次元織物が開発され、この問題の解決に資するところとなっている。

図—24²⁰⁾に 3 次元織物の組織例を示す。

6. ACM の将来展望

工業技術院では次世代産業基盤研究開発制度を国家プロジェクトとして 8 年前より発足させ、複合材料は新素材の一環として研究開発が進められてきており、多大の成果を挙げてきている。

複合材料に関連する学術、研究開発のテンポはますます加速してきている。

1982 年、東京で開催された〔第 4 回 複合材料国際会議：ICCM-IV Tokyo〕は日本の複合材料工学のレベルの高さを改めて世界に認識させたイベントであったが、組織委員長の林 毅東京大学名誉教授は複合材料の経済面での趨勢について表—5 に示す諸項目を挙げ、さらに 1985 年、米国サンディゴで開催された〔ICCM-V〕では Keynote Address として米国 Du Pont 社の Honey 副社長は 図—25 に示すグラフをもって、西暦 2030 年には金額面で金属構造材に変わり 50% が複合材料が占めるであろうと予測している。

参考・引用資料

- 1) 日本複合材料学会編「複合材料を知る事典」, アグネ, p. 70, 1982
- 2) 大谷・奥田・松田:「炭素繊維」, 近代編集, p. 58, 1984
- 3) 林 毅編「複合材料工学」, 日科技連, p. 16, 1971
- 4) 2) に同じ, p. 272, 1984
- 5) 「(財) 次世代金属・複合材料研究開発協会要覧」, p. 17, 1982
- 6) 「日経ニューマテリアル」, 日経マグローヒル, 36, (11-16), p. 23, 1987
- 7) 白木, 四宮他:「第 31 回 宇宙科学技術連合講演会講演集」, p. 818, 1987
- 8) 池内, 鈴木他: 7) に同じ, p. 373, 1987
- 9) 木名瀬:「日本の科学と技術」, (財) 日本科学技術振興財団, 25, (226), p. 74, 1984
- 10) R.H. Lange et al.:「AIAA」, 82-0812, 1986
- 11) 「NASA Spinoff」, 41, 37, 1982
- 12) D. Brown:「ICAO Bulletin」, May 28, 1981
- 13) 箕田:「神奈川県工業技術研修センターテキスト 先端複合材料」, p. 6, 1987
- 14) (財) 次世代金属・複合材料研究開発協会「複合材料次世代技術動向調査研究報告書」, p. 220, 226, 1987
- 15) (株) オリムピックカタログ, 1985
- 16) 国田: (社) 強化プラスチック協会編「FRP 30 年の歩み」, p. 198, 1984
- 17) 国田: 9) に同じ, p. 80, 1984
- 18) 百島他:「強化プラスチック」, 26, (12), p. 525-532, 1980
- 19) 「Reinforced Plastics」, 29, p. 41, 42, 1985
- 20) 福多健二:「強化プラスチック」, 26, (11), p. 474, 1980

【昭和 63 年 5 月 12 日受付】