● 複合材料の 20 年：教訓と将来展望

一般産業分野における高分子基複合材料

劔 持 潔*

1. はじめに

高分子基複合材料の発展の歴史を顧みるとアメリカからの本格的な技術導入が活発化した 1955 年代に遡ることができる。その時点から現在までを 10 年刻みで区別して考えると、一般産業分野における高分子基複合材料 (PMC) の 20 年前は、第 I 期 (1955~1963 年) の創成期と第 II 期 (1964~1973 年) の安定期を経て、ちょうど、第 1 次と第 2 次オイルショック (それぞれ 1974 年と 1980 年) が含まれる第 III 期 (1974~1983 年) の変動期にさしかかった時である。この第 III 期は、FRP 産業にとって、原料高の製品安となるマイナス成長の時期で、さまざまな産業分野への進出と新たな用途の開拓が積極的に行われ、需要面から他材料との競合が激化し、市場展開の多様化が図られた転換期でもあった。

第 III 期に続く現在までの第 IV 期 (1984~1993 年) では、前期に培われた素材開発、成形技術のさらなる発展に加え、製品の安全性と信頼性を付与すべく推進された幅広い評価研究の成果をもって、一般産業分野への PMC の適用が不動のものとなる一大発展期を迎えることになる。

ここでは、転換期である第 III 期の動向を踏まえ、主として第 IV 期の発展期における一般産業分野での FRP の材料研究および製品開発を概観する。また同時に、第 IV 期後半に発生してきた新しい流れとして、「人に優しい」、「ハイタッチの波」などの高性能から高品質への要求や、「地球環境保全」、「地球に優しい」などの産業廃棄物低減化への対策についても述べる。さらに、将来展望として、材料研究の終極の目標とされている知能材料 (Intelligent or Smart Materials) としての複合材料の可能性についても述べたい。

2. 他材料との競合と多分野への進出

原料および製造が石油に大きく依存する PMC は第 1 次オイルショックの影響をまともに受ける結果となり、

* Kiyoshi KEMMOCHI: 通商産業省工業技術院物質工学工業技術研究所 (305 つくば市東 1-1)

第 III 期 (1974~1983 年) の変動期には、それまで順調であった PMC 生産の伸びは、原料高の製品安によりマイナス成長となった¹⁾。そのため、“設計できる材料” “軽くて強度、剛性が高い” “燃えにくく腐りにくい” “断熱、遮音等の機能付与が比較的容易” などの PMC の特徴を最大限発揮できる分野へ積極的に進出し、適用範囲の拡大が図られた²⁾。

(1) PMC の産業分野への適用

1974 年より今日に至るまでの 20 年間で、タンク・容器類、クーリングタワーや大口径パイプなどの工業材料、ストリートファニチャーやスポーツ・レジャー用品を含めた雑貨等の一般工業材料に加え、船舶、住宅建設資材の一部について開発年度ごとに示すと表 1 の通りとなる。

この年表にある PMC 製品を写真で例示することにする。写真 1 は、世界最大級の FRP 製堅型ポンプで高さ 4.9 m、幅 1.3 m、長さ 2 m、全重量約 3 t (うち FRP 重量約 700 kgf)、製鉄所関係の酸洗浄ライン・電気モッキライン用循環ポンプや海水関連設備の海水取水・送水ポンプ用などに使われる。写真 2 は、北海道の幌向ダムのスクリーンで六角形をした取水塔の幅は 8 m、高さ 36 m もあり、幅 70 mm、肉厚 7 mm、長さ 5 m の板材をスノコ状に組んだ FRP 製の引抜き成形材が約 30 t も使われている。それまでの鉄製にとって代わったもので、軽くて施工性に優れ、メンテナンス・フリーの特性等が評価されている。写真 3 は、FRP 製灯台で、耐食性・耐候性が優れる FRP は海洋構築物としては最適な材料といえる。また、写真 4 は主要な船体外板に CFRP を始めとする各種新素材を積極的に採用したハイテク・クルーザー〈マリンウェーブ〉号である。最後の写真 5 は、あるゴルフ・カントリー・クラブで、人工岩や人工滝の FRP 延表面積は約 4 万 m² (重量約 350 t) であるプラスチック産業資材新聞社高橋義徳氏の提供による)。

(2) 従来材の代替化と問題点

この間他材料との競合は熾烈を極め、せっかく開発した製品においても、従来材料に打ち勝つことができずに

表 1 一般産業分野における高分子基複合材料の製品開発年表

1974年	・石油ショック続く。 ・FRP生産量前年比100%を大幅に超える。 ・炭素繊維に浮游炭煙製造される。 ・地下埋設500mm灯油管のついで東京消防庁より「カウズ繊維強化プラスチック」に関する通用規程」の告示通知が出される。 ・FRPが住宅公団指定品となる。 ・(社)強化プラスチック協会20周年を迎える。	1984年	・国産初の2階建ハウスにFRP部品約60個、200kg使用される。 ・衛星放送受信用アンテナラジエータにFRP採用される。 ・SNCによるハードウェア生産される(9インチ)。 ・第2期産業廃棄物処理専門委員会設置される(強化プラスチック協会)。
1975年	・プラスチック尿浄化槽構成部品JIS公布される。(JIS A 4110)。 ・日本複合材料学会発足する。 ・アメリカでCFRP採用される(日本楽器)。 ・FRP製医器が航空機機内食用ものに採用される。 ・FRP材質試験規格の検討が始められる。 ・I241-保安法成立で自動車のFRP化に関心が高まる。	1985年	・科学万博・つくば'85開催。宿泊施設としてFRP製のベッド4900台を設置。 ・炭素繊維製造およびCFRP型圧力容器を使った「カンパニオンのハート」を発表(東洋工業)。 ・CFRPを多用した「ハイウェイ・サー・マシニング」を発表(東し、三井造船)。 ・アラバキ入道大理石市販される(日本軽輝化学工業)。
1976年	・F4戦闘工乗組開発される(旭化成)。 ・RIによる水タンク生産始まる(住山製作所)。 ・住宅用浴槽「フット」JIS公布される(JIS A 4410)。 ・プラスチックを用いたバス生産始まる。 ・液晶含有プラスチック系炭素繊維の商品化に成功する(三井物産)。 ・酸洗槽用の17トンタンク開発される(日本メテック)。	1986年	・CFを使用した超軽量のFRP車椅子の試験販売開始(三井物産)。 ・鉄道車両の前頭部、天井等、ワッドなどにFRPの採用が進む。 ・引張成形品によるFRP24取水タンクを製造(剛武鉄工所)。 ・「カッパ」の設計した「カッパ」(ポリ塩化ビニル/炭素繊維強化樹脂)は9日間で約4万kmを無給油、無着陸で世界一周飛行に成功。 ・新材料の試験規格に関する国際共同研究(UANAS)制度により高分子基重合材料の産産、消費、及び耐熱破壊試験方法について先進7ヶ国の間で共同研究が進められる。
1977年	・FRPでLNGタンクの実用化研究始まる(船舶技術)。 ・アメリカの27インチのSNC封止材試験採用される(国鉄)。 ・991型かつお船建造始まる。 ・安全帽JIS公布される。(JIS T 8131)。 ・SNC製「249」量産化始まる(ワグネルシステム)。 ・「カッパ」(売店)発売される。 ・東京モーター新車種の前面鏡等にFRP採用される。	1987年	・三次元切削機を使った繊維補強コンクリートを実用化(鹿島建設有沢製作所)。 ・「H26」組立式蓄電池を発売(三菱樹脂)。 ・高さ34mのFRP観音像が完成(宇佐美)。 ・JR貨物がFRP製漁船造り工場を開業。 ・米国防衛省「コンタクト」製高圧ガス容器「コンタクト」を開発して輸入(大和)。この容器は「コンタクト」をベースにしたもので、従来の金属製容器に比べて重量が約半分である。
1978年	・「廃棄物の処理及び清掃に関する法律施行規則」改正により定期処分が定められる。 ・アメリカ・エレクトロニクス社がBMC大量生産される(ソコ)。 ・海上輸送一般試験方法JIS公布される(JIS R 3420)。 ・19700T-用FRP製タンク標準化制定される(強化プラスチック協会規格)。 ・北海道砂原町の堤防の移動式灯台本体にFRPが採用される。	1988年	・瀬戸大橋の大部分のFRP使用(大日本硝子、興和化成)。 ・千葉モノレールの内装の大部分にFRP使用(三菱重工)。 ・豊島川に世界最大のウェーブ・スライダ(NKK)。 ・小型風力発電装置を開発(東北電力)。 ・スチール・コンクリート製造技術を導入する(新日鉄、三菱油化)。 ・洗い場付浴槽生産開始(アサヒ)。 ・プラスチック系繊維で補強されたコンクリート製カーゴトラックの外壁に採用される(興羽化学、鹿島建設)。
1979年	・「カッパ」の難燃FRP製品宿泊施設の製造が行われる(コトバ)。 ・太陽温水器にFRP採用される(日立化成)。 ・「カッパ」繊維強化プラスチック洗い場付浴槽JIS公布される(JIS A 5712)。 ・住宅用太陽熱利用温水器JIS公布される(JIS A 4111)。 ・RIによる浴室ユニット生産始まる。 ・水道管製造済工事にCFRP採用される(北海道)。 ・各種FRPの極低温度特性が詳細に測定され始める。 ・地下鉄用防護門が開発される(大日本硝子)。	1989年	・6,500t級深海調査船「しんかい6500」完成 ・大型冷却塔の塔体に引張成形品を採用(IHI、日本触媒)。 ・大阪・海遊館の巨大水族館の点検歩廊用に15tの引き張り成形品(日本FRP)。 ・FRPA-16を開発(トビ・工業、全井車輪工業)。 ・横浜博覧会、世界サイエンス博覧会(若手展)で開催される。「ヘリウム」ストリート・パフォーマンスにFRPが大量に使用される。 ・連続繊維を使用したコンクリート系複合材料(CCC)研究会が発足(強化プラスチック協会)。
1980年	・スウェーデン「27」「カラン」発表される(伊索)。 ・米国ハワイ・カハラプラザ・ビルが成形品の独自の専用実施権を取得し日本企業にライセンスを許す(日本東紡織)。 ・東京都交通協(新島-式根島)にしき建造される(IHI)。 ・炭素繊維試験方法JIS公布される(JIS R 7601)。 ・住宅用浴室、便所および洗面所にJIS公布される(それぞれJIS A 4416, 4417, 4418)。	1990年	・浅海ERの技術で車用地車庫をFRP化(住友化学)。 ・関西電力・南志賀火力発電所の高さ280mの煙突に345tのCFRP製内筒を構築する(三井東洋化学、富士通、日本ホリエステル)。 ・組立式のFRPA(B)ブロックと開発(三井建設)。 ・郵政省が郵便車をFRP化する。 ・ユース・ワールドが303人乗り152tの旅客船を建造。 ・FRP製ボートの規格品(ISO1011)の生産開始(日邦、旭化成工業)。
1981年	・FRP-16変圧器の市販が開始される(重電各社)。 ・原研の境界プラスチック試験装置JT-60の各部にFRPが使われる。 ・海水淡水化プラント用FRPが大量受注する(富士化工)。 ・海洋科学技術センターから外皮にFRPを使った潜水調査船「しんかい2000」を建造する。 ・「FRP製压力容器特別委員会」発足する(日本メテック協会)。 ・CF/GFRP「FRP構造物の材料学的特性を体系的に把握する」プロジェクト「調査研究専門委員会」設置される(強化プラスチック協会)。 ・「次世代産業基盤技術研究開発」制度において複合材料が採用され、高分子系と金属系複合材料に分けて開発研究が進められる。	1991年	・CFRPを鋼筋に採用した天体建築の開発(日石)。 ・能登高島沖に「ガセツク・カントリー」に延べ約40,000㎡の人工海と人工岩を施工。 ・JR東日本が成田12712(NEX)の内装材に初めてフェノールFRP成形品を採用。 ・北海道でCF/GFRP「FRP製の農業用水路を施工」。 ・FRPのリサイクルを目指すNPH研究会が発足。 ・高分子系複合材料に関する計15件のJIS制定(JHPC)。
1992年	・炭素繊維生産能力約4,000トンと倍増される(日東紡織)。 ・GF-CFRP「基材」(ハイテク)が発売される(日東紡織)。 ・省エネルギーにFRP温室採用される。 ・東北・上越新幹線にFRP大量採用される。 ・東京・ディズニーランドにFRP大量採用される。 ・養殖場等へのFRPの実用化進む。 ・CFRP製の「カッパ」が市販される。 ・FRP製地下収納庫発売される。 ・松本大島にFRP灯台が建設されると共に、そのFRP製へが初めて施工される。	1992年	・青森「カッパ」の材料防食用にFRP引張成形品が700mを費用(旭硝子テクノ)。 ・三菱重工業が英国向け風力発電設備103基を受注。 ・電力中央研究所が地熱熱水と地下水をFRPにて一体化。 ・「カッパ」FRPA-16を使った天然ガス乗用車を大阪に納入。 ・FRP外皮を採用した10,000級深海無人探査機「かいかい」完成。 ・横浜・八景島シーパラダイスに大量のFRP引張成形品を採用(日本FRP)。 ・東京・つくば「世界建築博物館」の102の建築物にFRP製の精密模倣模型。 ・宮崎・ウツク・カントリーに延べ約10,000㎡の人工岩を施工(能登高島)。
1993年	・ハイブリッド構造FRP試験作される(機械研)。 ・レーン2輪車との主要構造にCFRP採用される(本田技研)。 ・FRP製漁船が大量に建造される。 ・RIによる浴室ユニット生産1,000単位の日を達成する(総和レゾナント)。 ・CFRP高速客船建造される(30t)(共立レゾナント)。 ・FRP設置の光通信ケーブルが発見される(東電電力)。 ・FRP製の呼吸器が発見される(川重防災工業)。 ・FRP製の風力発電機が発見される(慶応理工学工業)。 ・FRP複合材料製の小型機関開発される(AVTEK社)。	1993年

写真 1 世界最大級の FRP 製堅型ポンプ

写真 2 ダムの取水塔

写真 3 FRP 製灯台

写真 4 ハイテクルザー〈マリノウェーブ〉号

消えていったものも多い。発展を疎外する原因として以下の3点が考えられる。

- ① 新しい材料であるため安全性・信頼性が低い
- ② コスト高である
- ③ いろいろの法規，法令によるしほりがある

①の原因解消においては、1981年産官学が一体となって取り組んだ「次世代産業基盤技術研究開発」制度の高分子複合材料の研究開発が挙げられる³⁾。この研究における樹脂系複合材料では引張強度 240 kgf/mm² 以上、

耐熱温度 250℃ 以上（強度保持率 90%）の開発目標が設定されていた。併せて、信頼性の高い評価技術の開発と試験方法の整備が8年間にわたって行われた。この研究においては、当時ほとんど不可能に近いと思われた目標値を達成するため耐熱性 PMC を開発すると同時に関連産業の裾野を広くした波及効果は大きい。

この研究プロジェクトを契機とし、PMC の評価試験方法の JIS 化が進み年表にあるとおり多くの JIS が制定された。この流れは、1986 年の VAMAS「新材料の

写真 5 FRP 製人工岩や人工滝のあるゴルフ場

試験評価技術に関する国際共同研究」に受け継がれ、世界で共通の PMC に関する試験評価方法を検討し、まとまった段階で ISO の原案とする動きとなっている^{4,5)}。

②の解消のため、PAN 系より原料が安い PITCH 系炭素繊維の開発が盛んに行われるとともに、性能を落とさないで価格を下げるため、炭素繊維とガラスやアラミドなどの繊維を混ぜ合わせたハイブリッド FRP がいろいろの分野で適用された⁶⁾。

このハイブリッド FRP は、CFRP の脆性を高伸びのガラス繊維を混ぜることにより破断伸びを増大させるハイブリッド効果とコスト低減が期待でき、適用範囲の拡大が図られた。

③に関しては、PMC が進出する住宅機材、建設資材、タンク・容器類の分野において、1) 消防法に係る技術上の基準と特例、2) 毒物及び劇物取締りに係る技術上の基準と特例、3) 高压ガス取締りに係る技術上の基準と特例等々の法律があり、それに基づく多くの政令、省令、告示、通達がある。関連する分野で PMC を製品化するためには特別に認定されなければならない。例えば、地下貯蔵タンクについては、従来鋼製に限られていたが、FRP 適用の特認を得るために長年月にわたってその安全性を保証するデータの提出等が要求される。

3. もう一つの開発方向と新しい命題

(1) PMC に期待される効果

1974 年からの 10 年間に、PMC の適用範囲の拡大が図られるとともに、一方においては、次世代産業基盤技術の開発研究における高分子複合材料の目標値に代表されるように、より高強度、高剛性の強化繊維の開発、超耐熱性マトリックス樹脂の開発をとおりて航空・宇宙など特殊な分野にのみ適用できるチャンピオン PMC の開発が行われた。このことは、一般産業分野に必

要な PMC の開発、安全性・信頼性の高い評価技術の確立など裾野を広げるためにも大いに貢献したことになる。

しかし、一方向にのみ強度・剛性が高い極度の異方性を示す PMC は適用範囲が限定される。それよりも荷重方向と直交する方向の強度も適度にあり、なによりも層間強度の高い PMC の開発が重要であるとする開発見直しの考え方が出てきた。

複合材料には期待される多くの効果があり、図 1 に示すように 1 から 4 までの線形効果と、5 から 8 までの非線形効果に大別できる。一方、現在開発が盛んに行われている先進複合材料 (ACM) においては、線形効果である強度と機能の平均効果、並有効果および相補と相殺効果が研究の中心課題となっていて、構成素材の特性と複合則から求まる効果の範囲に止まっている。そして、複合材料への期待の大きい相乗効果、誘起効果、共鳴効果やシステム化効果など非線形効果の創出にまで至っていないのが現状である。この非線形効果を複合材料にもたらしするためには、理想強度や成形技術などさまざまな限界や制約のある新強化材やマトリックスの開発だけでは不十分である⁷⁾と考える。

(2) バイオニックデザインの適用

もっと身近にある生体を含めた天然自然の材料に着目し、その機能性や合目的性を工学的に応用する研究や、そのような材料が持つ親和性を人工の材料に採り入れる技術こそが新しい高性能と高機能を持った材料開発につながり、特に一般産業分野における PMC には必要な要素技術となる。例えば、耐熱性材料として開発された傾斜機能材料 (FGM : Functionally Gradient Materials) は、割れた貝殻にヒントを得、オール複合材料製の軽飛行機「アブチック 400」の設計者は歯科医の Windecker 博士で骨と筋肉をむすぶ靱帯組織をエンジンや脚の取付方法に利用している。このような考えに基づく

図1 複合材料に期待される効果

研究アプローチがバイオニックデザインで、PMC のもう一つの開発方向として注目されている。

(3) PMC のエコロジカルデザイン

1980 年代に入って急速に高まってきた課題として一つは“高性能より高品質”の波でありもう一つは“地球環境の保全”である。一般産業分野の PMC にとってどちらも大きな課題であり、この分野の PMC が将来発展を続けるためには解決しなければならない大きな命題といえる。

1) 材料研究と感性

近年、高度物質文明の次に続く心の満足を求める情緒時代が到来しつつあり、製品に向けられる差別要因が「機能品質」から「感性品質」へと移行している。また、最近の科学技術の発展により近い将来、人間の生活の場は、図2に示すとおり、宇宙、海洋、地中へと広がり、そこではコロニー生活が中心となると考えられる。人間の生活圏の拡大を可能にする材料は、地表に存在する動植物や石などではなく、地中奥深くにある石油やレアメタル類などを特別な製法により創り出した全く新しい材

料なのである。このように、地上での生活から離れれば離れるほど、また、生活環境を形成する材料が生活の場から遠く離れた所から来たものであればあるほど異和感が増大して感性的には低いものとなる。地球の自然から隔離された環境で、今まで見たこともない材料に囲まれた生活を快適なものとするためには、これからの材料研究では、強度やその他の力学的特性と同じレベルで感性に関する因子も考慮しなければならないであろう。

2) 複合材料とエコバランス

地球環境の保全という人類の存亡に係わる世界共通の課題が最重要視され、複合材料の開発に大きな見直しが迫られている。よく「どんなに優れた材料であっても地球全体の資源のバランスを崩す材料であれば早晩消え去る運命にある」といわれている。複合材料が将来にわたってさらに発展するためには、地球環境に負荷をかけない生産システム（エコファクトリー）およびリサイクル技術の開発が不可欠となる。

材料が腐食しにくい、燃えにくいということは材料にとって良い性質である場合もあるが、製品としての機能

が低下してからも永い年月そのままの形で存在することは、全地球的資源のリサイクルの点で公害問題を含めて大きなマイナスとなる。したがって、木材や鉄のようにその製品としての機能が停止した時点で速やかに原料に還元され、資源のトータルバランスを崩さないことが必須である。複合材料に関するこの概念は、図3に示すと

おりである。

また、図4は熱可塑性PMCの閉鎖型リサイクル技術の概念図である。PMCは適用分野により使用する強化繊維の長さが連続繊維（第1次構造部材など）から長繊維（自動車部品など）、短繊維（ヘルメットなど）、粒子分散（テレビキャビネットなど）へと変化する。それぞ

図2 材料由来と感性尺度の関係

図3 地球資源のリサイクル

れの繊維強化 PMC 製品が5〜20年間使用された後リサイクルされ次の繊維段階へと移行する。最後の粒子分散 PMC は乾留により樹脂分と残渣にして新たな連続繊維 PMC の原料とするこのような完全に閉じたマテリアルリサイクルが完成すれば、産業廃棄物の減量化に大いに寄与することになる⁸⁾。

4. 将来の夢、PMC は材料革命の担い手

(1) 新しい概念の導入

PMC の適用範囲の拡大を図るためには、従来常識とされている法則、原則を打ち破る新しい概念の導入が必要となろう。例えば、騒音を遮断する遮音性に対する従来の考え方は、「遮音効果は、質量則に従うため、鉛板やコンクリートが良い」とされている。しかし、図5に示す鈴構造を化学的に合成することにより遮音効果が期待できるかどうかという新しい概念がある。その鈴構造とは、気泡と気泡とが独立していて、しかもその気泡一つひとつに、ある質量を持った物質が封じ込められている多孔質体である。この軽量な多孔質体に騒音が当たると波動エネルギーを鈴玉の振動エネルギーに変え、多孔質内で消費してしまうことにより音を伝えない遮音効果が期待できる。

(2) 材料研究の終極的目標—インテリジェント材料—

これは、いわば複合材料の理想であり 21 世紀の課題であらう。例えば、山の急斜面に生育している木は、一

方向からの強風を常に受けている。そのような環境で育った木の年齢を見ると、年輪が同心円状にならず偏心している。このようにすることにより悪条件を克服し、樹を立たせ生命を維持しているのである。つまり、①外部刺激に応じて特性が適応変化し、②自己修傷(傷を治す)機能を有し、③異常を知らせ、④再生でき、⑤自分で設計し製造する能力を有する材料を智能材料という。この材料革命ともいべき智能材料の開発は、現時点では時期尚早と考えるが、複合材料こそがその革命の中心的担い手であることはいうまでもない。

インテリジェント PMC を一般工業分野のタンク・容器類に適用した場合き裂の発生進展を材料自身が知らせ、メンテナンスフリーになるとともに安全性、信頼性

図5 鈴構造と遮音効果

CLOSED-LOOP RECYCLING FOR FRTP

図4 FRTP の閉鎖型リサイクル

図 6 スマート構造材料の概念図

が飛躍的に向上する。また、製品としての性能が低下した時点で強化機構を材料自体が緩めることにより、リサイクルしやすい材料となり地球環境保全を確実なものとする事ができる。その概要は、図6に示すとおりである。

5. ま と め

人類の歴史をふりかえると、その時代時代に使われていた材料により、石器時代、青銅器時代、鉄器時代へと移り変わり、現代は、鋼時代と呼ばれることもある。しかし、現今を含めて近い将来を未来の人々は、プラスチックまたは複合材料の時代と呼ぶかもしれないほど、複合材料は、あらゆる分野に進出し、“揺り籠から墓場”まで、日常生活の中に溶け込んできている。

開発されて以来半世紀を過ぎた今日、高分子基複合材料は今なお多くの夢を持つ材料であり、将来にわたってその発展が期待されている。一方、地球環境保全という命題は、今や人類の存亡がかかった大きな課題となっている。したがって、優れた特性を持つ高分子基複合材料がさらに発展し、夢の実現を図るためには、エコロジカルな材料にならなければならない。

ここで示したそのための概念は、単なる夢ではなく実現させねばならない課題である。幸いにして、現代は、

遠い夢的な概念が現実のものとなるのにそれほど多くの時間を要しない複合材料時代なのである。

参 考 文 献

- 1) 鈷強化プラスチック協会・編集委員会編：FRP 30年の歩み，鈷強化プラスチック協会 (1984)。
- 2) 宮入裕夫編：FRP 入門，鈷強化プラスチック協会 (1987)。
- 3) 牧 廣編：次世代複合材料技術ハンドブック，日本規格協会 (1990)。
- 4) 鈷持 潔：高分子複合材料，金属，62, 9 (1992)，51-57。
- 5) 宮入裕夫：特集 I 最近の FRP 開発技術—最近の技術動向と今後の用途展開，工業材料，41, 14 (1993)，18-23。
- 6) 最新複合材料・技術総覧編集委員会編：最新複合材料・技術総覧，(株)産業技術サービスセンター (1990)。
- 7) 鈷持 潔：バイオニックデザインに基づく機能発現構造の研究，つくば研究支援センター会報，8 (1990)，pp. 11-13。
- 8) K. Kemmochi, H. Takayanagi, C. Nagasawa, H. Fukuda & R. Hayashi: A Study on Closed-Loop Recycling Technology for Fiber-Reinforced Thermoplastics, Proceedings of International Workshop on Environmentally Compatible Materials and Recycling Technology, Tsukuba, Japan (Nov. 1993)。