●複合材料の将来動向

機能性複合材料の将来動向

森 田 幹 郎*

1. 機能材料の必要性

今年は 1985 年である。第二次大戦後に生まれた人々が、日本の全人口の 6 割近くを占め、“飢え”を体験した人の記憶は、語り草になりつつある。筆者の子供の頃は、食べたいのを我慢せよといって叱られたものだが、いまの子供達は食べなさいといわれながら育ってきた。

“飢え”の時代は物が不足していたから、単一規格品でも喜んで消費していた。物が豊富になると“選択”の時代へと大きく変化してくる。価値観も変わり、隣りがカラーテレビをもっているから自分のところも同じ物をとという状態から、個人の感性をくすぐるものを要求するようになってきた。価値観の多様化であり、要求機能の分化である。

この多機能化の要求を、歴史的にみて人類の知恵の発露とみる人もいる。すなわち、「人間はあり余るものを消費することを美徳として称え、足りないものを節約する知恵者である」と。人口の多い開発途上国では、人の労働力を消費することが奨励され、勤勉が美徳となる。1970年代の日本のように物が溢れた国では、使い捨てこそ美徳とされ、足りない労働力の節減に、合理化、自動化が叫ばれた。こう考えてくると、1980年代後半では高齢化社会を迎え余っているものは知恵である。したがって知恵を使うことこそ美徳となる。そのため高級イメージ指向が強まり、多機能を有する商品が要求される。一方ではシンプル化が進むが、これはシステムアップができるという意味での単能化であり、低級化ではない。

材料においても同様なことがいえる。より小さく軽く、一味違ったものを作るために知恵を付加する必要がある。多機能性をもたせるためには、単一物質の材料(monolithic な材料)では対応しきれず、複合化という手法がとられ、機能性複合材料が生まれる。

もっとも、機能をもたない材料が存在する訳はないので、すべての材料を機能材料と呼んでも差支えはない

が、ここでは便宜上、構造的用途以外に使われる材料という意味で、機能性複合材料と呼ぶ。いろいろな物質の持つ機能を列挙した例を表 1 に示す。

複合材料はこれらの特性をより使いやすくするために多くの機能をもたせた、あるいは組み合わせることにより新たな機能を付加した材料である。紙数も限られているので詳細な説明はおもなものに絞らせていただくが、代表的な機能とその関連材料、ならびに使用される部品の例を表 2 に示す。

2. 電 気 材 料

電気を通す材料を導電材料といい、一般には銅線が使われている。この銅の耐熱性を高めるため、分散強化銅が、また銅の代替として銅クラッドアルミ線、電力線として銅心アルミ振線などが使われる。接点材料もほとんど複合材が使われている。表 2 の中で、ジュメット線というのは軟質ガラス封入用として開発されたクラッド線で、図 1 のような構造をとっており、熱膨張係数をガラスのそれに合わせた材料で、熱的機能材料ともいえる。

超電導線も複合構造をとっている。超電導現象は、合金、金属間化合物、有機物などを含め多くの物質において認められているが、この現象を示すのは、臨界温度(T_c)、臨界磁場(H_c)および臨界電流密度(J_c)の範囲のなかでなければならない。図 2 で実用になっているしこれに近い NbTi 合金、Nb₃Sn、および Nb₃Ga の例を示したように、この曲面の内側の条件でなければならない。

この超電導体を利用して、たとえば電磁石を作る場合は、安定化極細多芯線が使われる。これは使用中に何らかの原因で超電導状態が破れても、電流がバイパスできるように超電導材料を大量の Cu や Al でくるんだものである。見方をかえると、Cu または Al マトリックスの中に数百～数万本の超電導体を一方向に揃えて入れた複合体である。被覆材の量は、ここにバイパスされる電流による発熱が表面からの放熱によってつねに超電導状態を可能とする温度域に保てるよう設計して決められる。パルスマグネット用線材のように高強度が必要な場

* Mikio MORITA: 朝東芝総合研究所 (210 川崎市幸区小向東芝町 1)

表1 材料のもつ機能の例

1. 力学的機能	2. 熱的機能	3. 電気的機能	4. 磁氣的機能
剛性, 比剛性	クリープ特性	導電性	飽和磁化
強度, 比強度	耐熱性	超電導特性	透磁率
高温強度	断熱特性	半導体特性	B-H特性
振動, 防振	遮熱性	絶縁性	磁気エネルギー積
弾性, 超弾性	熱衝撃性	抵抗特性	ホール効果
塑性, 超塑性	伝熱特性	誘電性	磁気抵抗効果
摩擦, 耐摩耗	熱膨張	圧電特性	磁気弾性
疲労特性	熱変形, 熱応力	焦電特性	磁歪特性
靱性, 低温靱性	比熱	熱電子放射能	磁気バブル
耐衝撃性	発熱, 蓄熱	電子移動度	
異方性	冷媒		
5. 光学的特性	6. 化学的機能	7. 生体機能	8. 放射線機能
蛍光特性	耐酸化	組織適合性	放射性物質
感光特性	耐アルカリ性	血液適合性	耐放射線
発光特性	耐食性, 耐水性	生体内分解	中性子吸収
フォトリソミック	耐酸化性	非抽出性	中性子減速
透光性, 偏光性	触媒作用	非吸着性	X線透過
屈折, 複屈折	イオン交換		X線吸収
二次電子放出	吸着, 脱着		電磁波透過
光電効果	ガス選択透過		電磁波吸収
光磁気効果	水素吸蔵		電磁波反射
反射率	固体電解質		
選択吸収性	光反応性

図1 ジュメット線の断面

合には、応力を分担させるためにステンレス線を複合する場合もある。

電気を通さない材料、絶縁材料は GFRP の最も得意とするところである。最近では熱はよく通すが電気は通さないという材料の要求がたかまり、AlN や SiC などセラミックスが使われようとしているが、複合材料もこうした用途への候補材の一つである。

3. 磁性材料

磁性材料にも、複合材の思想が古くから取り入れられ

図2 超電導材料の臨界条件 (Gavuler *et al.*, 1975)

ている。代表的な永久磁石であったアルニコ系の磁石は形状異方性に基づく保磁力を利用するもので、強磁性相の α_1 (Fe, Co に富む相) 針状結晶が、非磁性相 α_2 (Ni, Al に富む相) マトリックスに分散している。これ

表2 機能性複合材料の例

機 能	材料部品	材 料
電 気 機 能	電 線	分散強化銅, クラッド線, 鋼心アルミ振り線, ジュメット線
	接 点	W/Cu, W/Ag, C/C, 導電性ゴム
	超電導線	NbTi/Cu, Nb ₃ Sn/Cu, NbTi/Al
	絶縁部材	GFRP, ArFRP, 紙/フェノール
	レドーム材	電波透過材料 (GFRP)
	アンテナリフレクタ	電波反射材料 (CFRP)
	電波吸収材	導電性塗料
	電磁波シールド	導電性コンパウンド, 導電性塗料
	燃料電池電極	C/C
	放電加工電極	W/Cu
	半導体	Si, GaAs, GaAlAs, GaP
磁 気 機 能	永久磁石	アルニコ磁石, ESD 磁石, ゴム磁石
	軟質磁石	けい素鋼, 磁性複合材料
	磁気記録材	γ -Fe ₂ O ₃ , Ba-フェライト, Co-Cr 焦着膜
熱 的 機 能	宇宙通信用アンテナ	寸法安定性 (CFRP, ArFRP, ハイブリッド FRP)
	プリント基板	熱膨張調整 (ArFRP)
	半導体電極	// (C/Cu)
	接合用ろう材	// (C/Cu)
	バイメタル 熱電対	
力学的機能	エンジン部品	耐摩耗性 (Al ₂ O ₃ /Al)
	摺動部品	C/Cu, C/C, C/フェノール
	高ダンピング材	ArFRP, ハイブリッド FRP
	高靱性材	FRC
化学的機能	耐食パイプ	GFRP, クラッドメタル
	電 極	C/C
	触 媒	

を材料設計により作りあげたのが ESD 磁石 (elongated single domain magnet) であるが, こちらのほうは特性がもう一歩足りないので実用にはなっていない。結晶異方性を利用した Sm-Co 磁石や Nd-Fe 磁石とともに, 減磁曲線の一例を図3に示す。

このほか Ba-フェライトなどをゴムの中に分散させた磁石も, 可撓性磁石として利用されている。また γ -Fe₂O₃ などの永久磁石微粒子を, プラスチックフィルムの上に塗布したり Co-Cr 合金を蒸着して作る磁気テープやディスクが, 記録媒体として大量に使われている。

軟質磁性材料では, 筆者らの報告した¹⁾ 磁性複合材料が設計して作られる材料の一例である。これは従来の材料が, 図4に示したごとく, 電磁鋼板のように高飽和磁気であるが周波数特性はよくない, 一方フェライトは, 周波数特性は良好であるがフェリ磁性であるため飽和磁束密度が本質的に低いという特徴を有していた。この両者の特長である高飽和磁気, 高周波特性をあわせもつ材料が磁性複合材料である。これは磁性合金粒子を相互に樹脂などで絶縁したのち結着したもので, 渦電流の発生を極力抑えているため高周波域まで使用可能である。磁

図3 代表的永久磁石の減磁曲線

性粒子の組成や、粒度や、絶縁物の量によってある程度まで、透磁率その他の磁気特性を調整できる。こうした材料は電力用リアクトル鉄心に適した材料である。

4. 電磁波シールド材料²⁾

電子機器のデジタル化に伴い、そこから発生する電磁波が他の機器に妨害を与える、あるいは外からの電磁波によって誤動作をするという、いわゆる EMI (electromagnetic interference) の問題が生じ、国際的な規制が行なわれようとしている (米国の FCC, 西独の VDE 規制参照)。

これはケースやハウジングに使われることの多いプラスチックが、電磁波に対し透明なことに原因がある。この対策としては、高い電界強度の電磁波が発生しないような回路にするとともに、プラスチックに導電性を与え発生した電磁波を反射ないし吸収することが肝要である。このため導電性の塗料を塗布したり、導電性のフィラーを混入したコンパウンドでハウジングを形成する。フィラーとしては体積固有抵抗の小さな銅繊維やアルミフレークが、あるいは表面抵抗が小さく耐食性のたかいステンレス繊維やカーボン繊維が使われる。ガラス繊維やアラミド繊維の表面に Ni メッキを施した材料の利用も考えられる。

5. 熱的機能材料

熱膨張係数は物理常数でありこれを調整することはむずかしかった。ところが表3に示すように、複合化することによって中間の値を実現できる。とくにカーボン繊維やアラミド繊維が負の熱膨張係数をもっているため、繊維の配向をうまく考えると熱変形の小さな寸法安定性の高い材料が得られる。宇宙用の大型構造物や、アンテ

図4 各種磁心材料の得意とする領域

図5 一方向強化材の平均熱膨張率 (25~80°C 加熱時) の角度依存性 (実線: 実測値, 点線: $\alpha_\theta = \alpha_\parallel \cos^2 \theta + \alpha_\perp \sin^2 \theta$)

ナリフレクターなどに CFRP やハイブリッド材料が使われる一つの理由である。ただし異方性が大きいため使用にあたっては注意を要する。図5に一方向強化 CFRP の熱膨張係数の角度依存性を、また図6³⁾には GFRP-FW 材の熱膨張係数と繊維の体積含有率の関係 (計算値) を示した。

このことはマトリックスが金属の場合にも、あてはまる。たとえば C/Cu の熱膨張をシリコンのそれと同じに調整してパワー半導体の電極素子にしたり、核融合炉炉壁のセラミックスと金属の接合用のろう材として使うことなどが提唱されている。温度が頻繁に変化するような環境で使われる場合には、熱応力に基づく粒界のラチェット変形なども気をつけなければならない要因である。

複合材料はたんに $A + B = A + B$ という加成則のみでなく、複合することによって $A + B = C$ という新しい機能を生むが、熱機能材料のなかに多くの例が見られる。異種金属を接触させ温度を変化させると生じる熱起電力 (熱電対や熱電堆として使われる) や、熱膨張率の差によって生じる熱応力あるいは変形 (サーモスタット) がセンサーあるいは調節計に使われている。

表3 物質および材料の熱膨張係数 (常温)

材 料			$\alpha (\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	材 料			$\alpha (\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C})$
織 維	ガ ラ ス	E	5.0	GFRP	一 方 向 材 $\parallel$	7	
	ガ ラ ス	C	7.2		$\perp$	20	
	グラファイト	a	-0.7~-1.5		ハンドレイアップ		
		c	28		V_f 30~40	10~20	
	カーボン (HT)	$\parallel$	-0.7	CFRP	SMC	20~50	
		$\perp$	30		一方向材 (HT) $\parallel$	-1~7	
樹 脂	ポ ロ ン		8.0		$V_f=60$ $\perp$	35~56	
	アラミド		-5~-6		一方向材 (HM) $\parallel$	-1~2	
					$V_f=60$ $\perp$	20~35	
	ポリエステル		55~100	BFRP	一 方 向 材 $\parallel$	4.5	
金 属	エポキシ		45~65	ArFRP	$\perp$	26	
	ポリイミド		40~50		一 方 向 材 $\parallel$	-2	
	Al		23.6	C/Al	$\parallel$	2~3	
	Mg		26.0		$\perp$	20~25	
	Ti		8.9	セラミック	Al_2O_3	8.7	
	Cu		17.0		SiC	4.6	
	Ni		13.3		Si_3N_4	2.6~3.3	
	Mo		5.1		SiO_2	0.5	
	W		4.5				
	軟 鋼		12.6				
	12Cr-Fe		9.9				
	18Cr-8Ni-Fe		17.3

図6 一方向強化 GFRP の α - V_f の解析解の比較 (植村ほか, 1978)

6. 力学的機能材料

強度以外の力学的特性というとき、振動吸収能と、耐摩耗性があげられる。複合材はもともと振動吸収能が高いため、吸音材料や、遮音材料、音響関連の材料として使われてきた。なかでもアラミド繊維系複合材料は衝撃吸収能にすぐれ、防弾チョッキやヘルメットなどにも使われる。これを CFRP とハイブリッドすることによって、前者のダンピング特性を改善することができる。この特性も構造に敏感なため、図7に示したように積層構成のちがいに、特性が変化する⁶⁾。

また複合材料は、軟らかいマトリックスのなかに硬い粒子や繊維が分散した構造になっているため、一般的に耐摩耗性がたかい。C/Cu で摺動電極材、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ で自動車エンジン用の耐熱耐摩耗材、C/C で航空機用ブレーキなどが使われている。FRM の耐摩耗性の一例を図8⁷⁾に示す。

図7 CFRP/ArFRP ハイブリッド FRP のダンピング特性 (10 MPa)

ACA：サンドイッチタイプ (アラミド表皮)，
CAC：サンドイッチタイプ (カーボン表皮)，
INT：interply タイプ

7. その他

構造用材料は、構造に敏感な特性を利用することを避ける傾向が強かったが、機能材料では構造そのものを利用することが多い。たとえば耐食 FRP では、表面層に耐食性の富んだ樹脂層を設けるといふ具合である。また複合層の形状、すなわち、薄膜、厚膜、超格子膜、超微粒子を利用したものも考えられる。

触媒もそれ自身は複合材料とはいえないかもしれないが、触媒担体としての多孔質材から、さらにすすんで石油のクラッキングにその例を見るように、酸化触媒 (Pt) と触媒毒 (As) を交互に配置するなど全体としてみると複合構造をとるものも多い。

8. 結びにかえて

以上まとまりがつかないまま縷々述べてきたように、価値観の多様化に伴い、材料にも多様化が求められ、より高性能化と多機能化が求められている。これまでの材料は、無機材料、金属、高分子材料といった単体の材料であったが、それだけでは対処しきれなくなり、これらを組み合わせて使う複合材料の時代になりつつある。近い将来には、さらに分子ないし原子レベルで設計して、

図8 繊維強化 Al 合金の摩耗率 (相手材：軸受鋼 (SUS J2))

天然には存在しなかったすぐれた材料を創生するという、ハイブリッド材料も夢ではなくなるであろう。

最初に述べたように機能材料というものが存在する訳ではなく、まず物質のもつ機能が使われ、それが工業材料として完成されるとそれぞれの固有名詞が使われる。たとえば超電導材料、磁気材料、軸受材料といった類である。したがって個々の材料の参考書はあるが、まとまった解説書はまだない。いくつか関連する文献 (5) ~ (10) を参考に章末に挙げておく。

参考文献

- 堀江宏道，ほか：電気学会マグネティックス研究会資料，MAG-85-48 (Apr. 1985)。
- 森田幹郎：金属産業研究所競合材料研究会資料 (June, 1984)。
- 植村益次，ほか：日本航空宇宙学会誌，26 (1978)，471。
- 逢坂達吉，ほか：第15回宇宙航空材料シンポジウム予稿集 (一般)，東大境界研 (Mar., 1985)，pp. 85-90。
- 島村昭治編著：未来を招く先端材料，工業調査会，東京 (1982)。
- 日本複合材料学会編：複合材料を知る事典，アグネ，東京 (1982)。
- 日本複合材料学会編：金属基複合材料を知る事典，アグネ，東京 (1984)。
- 日本科学技術振興財団科学技術館：日本の科学と技術，25，226 (1984)。
- D.K. Hale: *J. Mater. Sci.*, 11 (1976)，2105-2141。
- 技術予測シリーズ第5巻新素材編：日本ビジネスレポート出版 (1985)。