

© 1989 ISIJ

解 説

複 合 材 料 の 設 計

森 田 幹 郎*

Design Problem for Metal Matrix Composites

Mikio MORITA

1. 緒 言

複合材料は、材料というよりも、むしろ「異なった材料を組み合わせ、望みの方向に必要な特性を付与できるように設計し、製造した部品である」と言ったほうが、その性格を正確に伝えることができる。異種材料を複合した結果、単一材料では実現できないような新しい機能をもたせたり、相矛盾する特性を、一つの材料（部品）の中に組み込むことが可能となる。

上述の説明からもわかるように、複合材料においては、これまでの慣用材料とは異なり、まず、ニーズがあって、その要求に合致するように、各種の素材を選択し組み合わせる部品にかたちづくる技術が優先する、と言っても過言ではない。複合材料が、Needs oriented 材料の「最」たるものであり、Tailor-made の材料と呼ばれるゆえである。またシーズを指向し本性と普遍性の追及を目的とする科学（狭い意味の Science）ではなく、どちらかという組み合わせの妙を競う技術（Technology）であり、個々対応の工学（Engineering）だと言えそうである。もちろん複合材料にサイエンスがないと言っているのではない。

部品は、お客様のもとめに応じて、図 1 のような手順で設計し、供給される。設計という言葉を使っていたが、この意味するところは極めて広い。「目的を達成する（目的関数）ために、工費、用地、材料および構造上の諸点などの計画（設計変数）をたて、実行可能な方式（制約条件をクリア）を明確にし、図面その他の方法で工程を明らかにすること」が設計である。構造を設計するのみでなく、そこに用いられる材料の設計も含まれる。

しかし、複合材料は、賦形と同時にその性質も与えられてしまうので、慣用材料とは異なり、構造設計と材料設計が切り離せない。簡単な例を、板の中央に大きな穴をあける場合について示そう。従来は、図 2 (a) のよう

にまず疑似等方になるよう積層材で板を作り、これに穴を機械加工であけていた。HYER¹⁾はこれを図 2 (b) のように、穴のまわりにある曲率を持った繊維を配向させながら積層することによって、疑似等方板の 2 倍近くの強度を持たせることができるとしている。このように、慣用材料による部品の場合のように、材料設計が終わってから、その材料を用いて構造設計を進める、というように縦に時系列的に繋がっているのではなく、材料技術者、製造技術者と構造設計者が横一線に緊密な連携を保っている必要がある。さらに、板や棒材のような半製品としてではなく、製品の形でできてくるため、壊して調べるわけにはいかない。したがって、どのように検査し、品

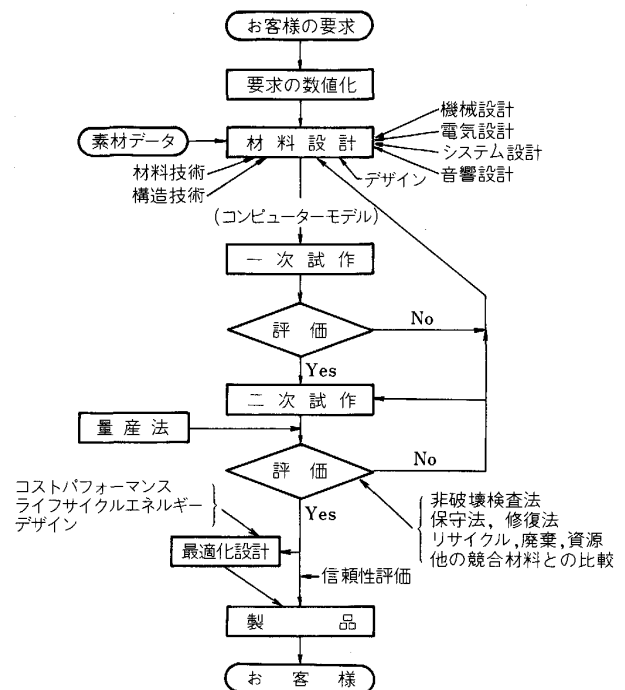


図 1 複合材料ニーズの顕在化から製品化までの流れの一例

昭和 63 年 12 月 20 日受付 (Received Dec. 20, 1988) (依頼解説)

* (株)東芝総合研究所研究主幹 工博 (Research and Development Center, Toshiba Corp., 1 Komukaitoshiba-cho Saiwai-ku Kawasaki 210)

Key words : metal matrix composites ; fiber-rein forced metals ; structural design ; aeroelastic tailoring ; thermal expansion ; thermal conductivity ; interface ; process design.

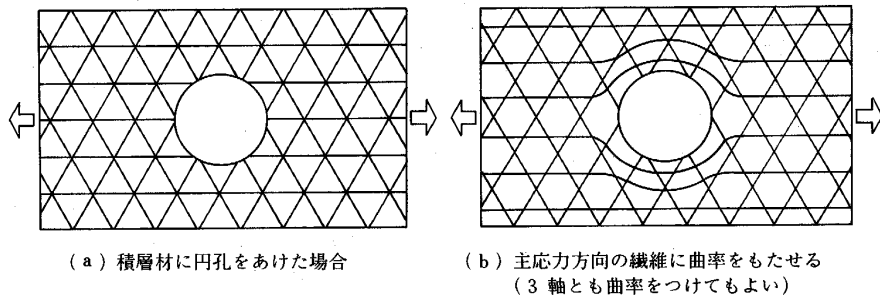


図 2 有孔板の繊維配列

表 1 複合材料の材料設計の歩み

段階	基本材料設計	構造設計
I	複合則	均質、等方性材料からのアプローチ
II	短繊維 静的破壊力学	異方性力学 積層板、サンドイッチ板
III	破壊力学, K_{IC} , J_c 導入 動的挙動	ハイブリッド構造 最適設計 信頼性設計
IV	高温強度 界面問題	コストパフォーマンス 設計基準の検討

表 2 金属基複合材料

補強材 (分散材)		複合材料の例
零次元	金属	合金
	セラミックス	分散強化合金, 自己潤滑材
一次元	金属	ステンレス鋼/Al, W/Cu, B/Al, W/ FeCrAlY, 金属間化合物/金属, 一方向凝固 共晶, 電力ケーブル, 超電導線, 磁気材料, 接点材料
	セラミックス	C/Al, C/Mg, SiC _(cvd) /Ti, Al ₂ O ₃ /Al, SiC _(w) /Al
二次元	金属	バイメタル, アモルファス/金属, クラッド材, めっき材
	セラミックス	TiC, TiN コーティング, 遮熱コーティング
	プラスチック	Al-PE シート, サンドイッチ鋼板, カラー鉄 板, 化粧鋼板, 制振鋼板
三次元	金属	サンドイッチ材
	セラミックス	サンドイッチ材
	プラスチック	サンドイッチ材
	泡	Al フォーム, メタルフォーム

質を保障するかということも、最初の部品設計の段階から決めておかねばならない。そのほか保守、修理、リサイクル、廃棄に至るまで気を配っておく必要がある。とくに廃棄に関しては、複合材料が丈夫で、耐候性や耐食性に優れているため、FRP 漁船に象徴されているように問題が生じやすい。また、複合材料は、別の見方をすると、不純物が大量に含まれている材料であるから、資源の回収も意に任せないことが多いので、あらかじめ対策を立てておかねばなるまい。

複合材料における材料設計は、藤井²⁾によれば表1のように4段階に分かれる。現状ではMMCの材料設計が始まったばかりで、FRPでようやく第II段階に到達して、積層板の力学が確立し、最適設計の手法が取り

入れ始められたところである。

2. 金属基複合材料の種類

複合材料は、さきに述べたように材料というよりも、異種材料を組み合わせで作られる部品と呼んだ方がふさわしい材料である。広義に解釈すると、異種材料を組み合わせるという意味では、ほとんどのあらゆる材料が複合材料の範疇にはいる。逆に、これは複合材料ではありませんと目くじらを立てて、自らを小さな枠の中に閉じこめる必要もあるまいと、筆者は、複合材料の定義をルーズに考えているので、びっくりするような馴染みのない複合システムも、取り扱わねばならぬことがある。

例えば、日本鉄鋼協会の鉄基複合材料部会(1988年発足)で取り上げている複合材料は、Tiクラッド材とTiNコーティング材料である。内容は複合したときの特性と、異種材料界面の構造解析に主体が置かれているが、前者はマクロな組合せ材料であり、後者は表面処理として分類されていた手法の一つである。また春秋の講演大会の萌芽境界領域で、毎回演壇を賑わしているのは、鋼板の間にプラスチックを挟んだ制振鋼板やサンドイッチ鋼板であることをみても、取り扱う人によって複合材料のもつイメージの広いことが実感されよう。

組み合わせられる基材(分散材)の種類と形態によって複合材料を分類し、その代表的な例を示すと、表2が得られる。この中で、先進複合材料(Advanced composite materials)として注目を集めているのは、カーボン繊維(CまたはCFと略す。米国ではGraphite fiberということでGrと略される)やウイスキーで補強した複合材料である。本章では、こうした繊維強化複合材料(FRM: Fiber-Reinforced Metals)に、話を絞らせていただく。

連続繊維で強化した場合は、強化プラスチック(FRP: Fiber-Reinforced Plastics)と同様、繊維の持つ特性を100%発揮させることを目標とした材料であるから、FRMと呼んで差し支えない。繊維の弾性率がマトリックスのそれよりも大きいことが必要条件で、なおかつ軽量であることを望まれるので、繊維としては無機質のものが使われることが多い。マトリックスは、Al, Mg, Tiなどのいわゆる軽合金が一般である。

ウィスカーなどの短繊維を複合した材料においては、繊維端面での応力集中や、繊維の配向などに問題があるため、繊維のもつ力学特性をそのまま発現させることは難しい。むしろ機能面を重視した使われ方をするので、FRM よりは、MMC (Metal Matrix Composites) と呼ばれることが多い。

3. 複合材料の設計に役立ついくつかの理論

3.1 構造設計

複合材料とくに FRM は、設計できることを理想とした。この材料は、従来の金属材料と比較した場合、二つの点で大きく異なる。一つは、繊維とマトリックスからなる不均質材料であり、界面 (Interface) あるいは界面層 (Interfacial layer, アナロジーで Interphase と呼びたい感じだ) の性質によって、複合材料の特性が敏感に影響を受ける。いま一つは、こうして作られる複合材料が、繊維の方向とその直角方向との特性の差が大きいため、マクロにみても異方性材料として取り扱わねばならぬ点である。

JONES³⁾ は前者の繊維が直接関与する力学問題を微視力学 (Micromechanics) と呼んでいる。それに対し、後者は、一方向に繊維を並べた薄板 (Uni-Directional 材: UD 材) を、マクロに考えれば平均的性質を有する均質材であると見なし、この UD 材の任意方向の特性を求めたり、それを積層したときの力学的挙動を求めるもので、巨視力学 (Macromechanics) と呼ばれる。構造設計には主として巨視力学の立場がとられている。

図 3 に示すように、一方向に強化した薄板を考える。繊維と平行な方向 L 、これと直角な方向 T 、およびこの面に垂直な Z 軸のまわりに、 180° 回転させても性質は変化しないので、この一方向強化板は、直交異方性体である。この板の LT 軸のひずみと応力の関係 (フックの法則) は、

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_L \\ \epsilon_T \\ \gamma_{LT} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} 1/E_L & -\nu_{TL}/E_T & 0 \\ -\nu_{LT}/E_L & 1/E_T & 0 \\ 0 & 0 & 1/G_{LT} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \tau_{LT} \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots (1)$$

となる。ここで ϵ_L 、 ϵ_T は垂直ひずみ、 γ_{LT} はせん断ひずみ、 σ_L 、 σ_T は垂直応力、 τ_{LT} はせん断応力である。また E_L 、 E_T はそれぞれ L 方向、 T 方向のヤング率、 G_{LT} は LT 座標でのせん断弾性率で、 ν_{LT} (ν_{TL}) は L (T)

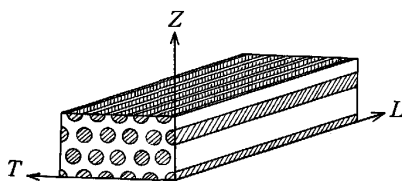


図 3 一方向強化材モデルと主軸

方向に引張ったときのポアソン比である。 ν_{LT} と ν_{TL} の間には、ベッチ (Betti) の相反定理

$$\nu_{LT}/E_L = \nu_{TL}/E_T \quad \dots\dots\dots (2)$$

があるので、薄板の場合には E_L 、 E_T 、 G_{LT} 、 ν_{LT} の四つの独立した弾性定数を求めればよい。

設計するためには、弾性率のほかに、制限条件として、許容ひずみ ϵ 、または許容強度 F (引張強さ、圧縮強さ及びせん断強さの五つの基本強度) が与えられると、設計可能となる。現実には、強度則 (Micromechanics での) がまだ明確にはなっていないため、各層の強度を経験的に求め、その値を用いて設計する。さらに表 3 のように安全率を掛けて設計するが、材料特性のばらつきが大きいほど、大きな安全率を用いる必要がある⁴⁾。

複合材料は異方性が大きいので、使用する方向に制限がある。たとえば航空機の現場の設計者たちからは、横風などの影響でどの方向から外力が加わるか予測がつかないので、異方性材料は使いにくい。むしろ、疑似等方性の得られる 0° 、 $\pm 60^\circ$ 積層材か、多少譲歩したとしてもクロスプライ材を使いたいとの声さえ、聞こえてくる。ボンベのように円筒形をした圧力容器の場合は、内圧しか加わらないので、繊維を約 $\pm 54^\circ$ の角度で巻き付けてやる (フィラメントワインディング法, Filament Winding: 以下 FW と略す。) と、周方向の強さと軸方向の強さをバランスさせることができ、最軽量設計となるが。

しかし、異方性を最大限に利用する設計も、航空機分野で試みられているのも、事実である。航空機翼の空力弾性テーラリング (Aeroelasticity tailoring) がそれで、空力荷重による翼の変形を、設計者の望むように行わせて、翼の構造重量を増大させることなく、フラッタやダイバージェンスを防止しようとする試みである。

さて、図 3 で示した一方向強化薄板の、フックの法則 (式(1)) を、コンプライアンス S_{ij} を用いて次のように書き替えておく。

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_L \\ \epsilon_T \\ \gamma_{LT} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \tau_{LT} \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots (1)$$

この板に、図 4 に示すように繊維軸 (主軸) から θ

表 3 構造設計

限界強度 = 許容応力 × 安全率
(許容応力 = 限界強度 / 安全率)

$$\text{安全率 } F_S = F_0 \times L_0 \times L_1 \times L_2 \times \dots \times L_6$$

F_0 : 基本安全率 (強度基準 or 剛性基準) (1.3~1.2)

L_1 : 材料特性信頼度 (1.0~1.2)

L_2 : 用途重要度 (0.9~1.2)

L_3 : 外力荷重の不確かさ (>1.0)

L_4 : 構造計算精度 (1.0~1.3)

L_5 : 材料特性のばらつき

L_6 : 衝撃負荷に対する係数 (1.2)

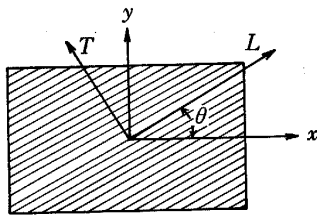


図4 一方向強化複合材料を θ だけ傾けた場合

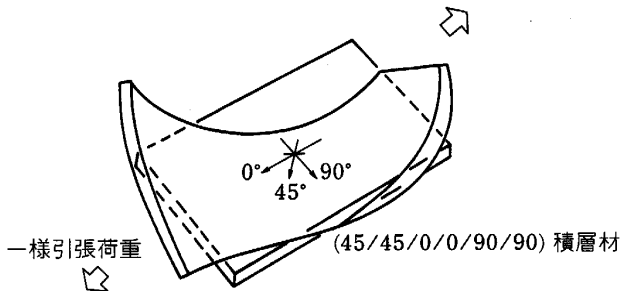


図5 曲げとねじれ変形の発生

だけ傾けて、 x, y 軸を考え、 x 方向に一樣な荷重を加えるものとする。このときフックの法則は、

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{yz} \\ S_{zx} & S_{zy} & S_{zz} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (3)$$

となる。 S_{ij} は、主軸方向のコンプライアンス $S_{11}, S_{12} (=S_{21}), S_{22}, S_{66}$ と θ との関数である。

x 方向に一樣な荷重を加え、応力 σ_x を発生させると、 $\sigma_y = \tau_{xy} = 0$ であるにもかかわらず、

$$\epsilon_x = S_{xx}\sigma_x, \epsilon_y = S_{yx}\sigma_x, \gamma_{xy} = S_{zx}\sigma_x \dots\dots\dots (4)$$

となって、 ϵ_y, γ_{xy} が 0 にならず特定の値を持つことになる。そのため、複数の一方向繊維強化材の薄板を積層したものを引張ると、図5のように、曲げやねじれ変形を発生することもある。

また同様に、せん断荷重のみを加えた場合でも、($\sigma_x = \sigma_y = 0$)

$$\epsilon_x = S_{zx}\tau_{xy}, \epsilon_y = S_{yz}\tau_{xy}, \gamma_{xy} = S_{zz}\tau_{xy} \dots\dots\dots (5)$$

となって、 x, y 方向にもひずみを生じる。

これを上手に利用すると、航空機の数度に依じて翼の形を変え、つねに最大揚力を発生させることもできる。現在、HiMAT や X-29 などの実験機で、空力弾性設計の実証が進められている⁶⁾⁷⁾ 段階である。

3.2 熱膨張係数

熱膨張係数は、物質の相と温度を決めると、一義的に定まる物質定数であり、これを変えることは難しいとされてきた。しかし、複合化することによって、限られた温度範囲ではあるが、見掛けの熱膨張を制御することができる。すなわち、組み合わせた異種材料の間に働く熱応力によって、それぞれの構成材料にひずみを与え、見

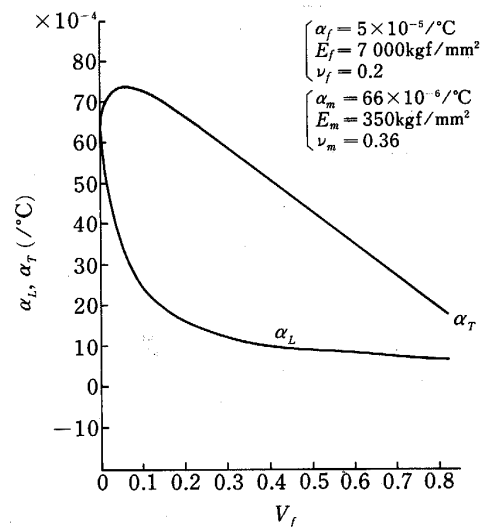


図6 一方向強化 GFRP 材の $\alpha-V_f$ の解析解

掛けの熱膨張係数を変化させる。

単純に考えると、連続繊維で強化した UD 材の熱膨張係数 α_L, α_T は、それを構成する基材に異方性がないとすれば、

$$\alpha_L = \frac{\alpha_f V_f E_f + \alpha_m (1 - V_f) E_m}{V_f E_f + (1 - V_f) E_m} \dots\dots\dots (6)$$

$$\alpha_T = \alpha_f V_f + \alpha_m (1 - V_f)$$

となる。ここで α_f, α_m はそれぞれ繊維およびマトリックスの熱膨張係数、 V_f は繊維の体積含有率である。国谷ら⁸⁾ は、カーボン繊維と銅との組合せで、熱膨張挙動を詳細に調べ、繊維の種類、体積含有率、配向度などを変えることによって、この系の熱膨張係数を $1 \sim 14 \times 10^{-6}/\text{deg C}$ の、任意の値に調整できることを示している。

図6は、植村ら⁹⁾ による GFRP-FW 材の熱膨張挙動の解析例であるが、 V_f が小さいところで、 α_T が α_f, α_m のいずれよりも大きくなることに注目したい。複合効果によって単純な相加平均ではなく、それを凌駕するものが生まれる可能性も示している。さらに、若島ら¹⁰⁾ は、複合材料の熱変形挙動も、均質体の中に回転楕円体の形状をした不純物が存在しているものと仮定して、ESHELBY の解法¹¹⁾ を用いて、論じている。

複合材料の一つの用途、というよりももし複合材料が無かったら、実現不可能であったと思われるものの一つに、人工衛星や大型宇宙構造物がある。例えば、人工衛星の、太陽に曝されている面は 370 K 以上にもなり、また反対に影の部分は 170 K 以下と、この間の温度差は $200 \sim 250^\circ\text{C}$ にもなる。こうした状況で、熱変形の影響をできるだけ小さくして、寸法精度を保つためには、熱膨張係数の小さな材料、望み得ればこれが 0 の材料で構成したい。石川¹²⁾ は、熱弾性不変量を導入して積層板の熱膨張を計算し、 $V_f = 65\%$ の特定方位に積層した CFRP 板が、かなり広い温度領域で、熱膨張係数が 0 (も

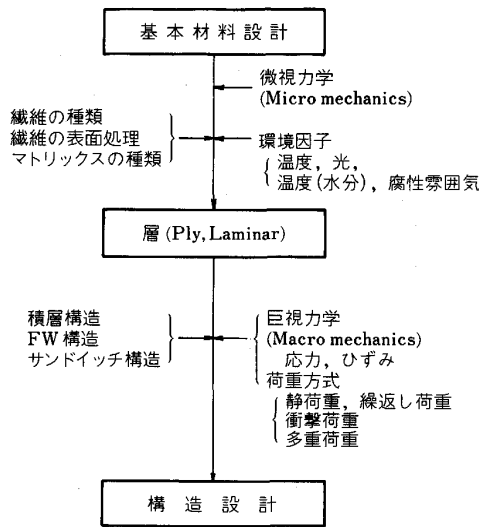


図7 FRP 構造設計における微視力学と巨視力学の分担範囲

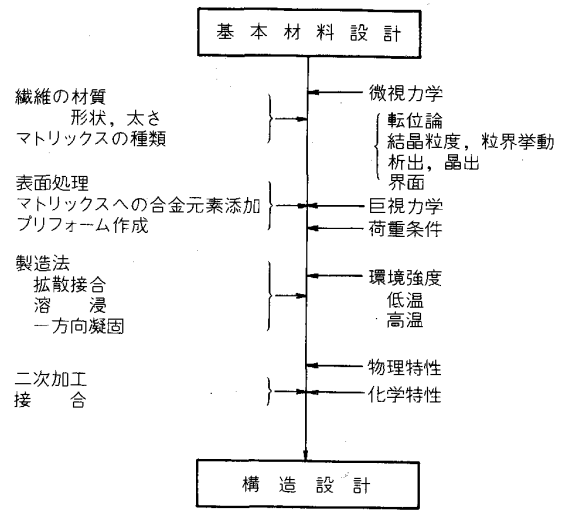


図8 MMC 設計における微視力学と巨視力学 (微視力学の範囲が大きい)

表4 各種複合材料の界面の結合機構

界面	複合材料の例
機械的結合 (アンカリング)	CFRP, 鉄筋コンクリート, ガラス繊維強化セメント, カーボン繊維, 強化セメント
水素結合 (接着)	強化プラスチック, GFRP, BFRP, CFRP
分子結合	ゴム, FRP
金属結合	一方向凝固共晶合金, W/Cu
金属結合 (反応再析出)	超硬合金 (WC/Co)
相互拡散	ガラス/金属, C/Ni
界面反応	B/Al, C/Al, SiC/Al, Al ₂ O ₃ /Ni, SiC _w /Al ₂ O ₃ , C/C, Mo/Ni, W/Ni

もちろん、特定の軸方向のみだが) になることをみいだしている。なお、石川氏の論文は本特集号の中にも発表されている。

3.3 熱伝導度

電気伝導、熱伝導などの物理的性質の混合則¹³⁾¹⁴⁾も古くから議論の対象となっている。連続繊維が一方向に並べられている場合、あるいはそれらのUD板を積層した場合については、たとえば電気抵抗の直列または並列結合の式が直感的に浮かび、第0次近似としては正しいことが多い。しかし、界面での不連続性を考えると、個々の解を求めるのは難しい。とくに、熱伝達など非定常問題を取り扱うには、注意を要する。

4. MMC 設計上の問題点

上述のように、複合材料の設計は、積層理論を中心に発達してきた。これはFRPが、図7に示すようにプリフォーム(プリプレグ)を作り、これを積層して部品にするというプロセスを取ってきたことと、密接に関係し

ている。繊維の特性のばらつきや、樹脂そのものの薄膜にしたときの性質があまりはっきりしていなくても、プリプレグとしては安定で平均化した特性を持つものが得られること; このプリプレグを積層しても、その成形過程で大きく変質するようなことが起こらないためである。FW材で、あるいはサンドイッチ構造体なども、基本的には積層構造体の一種と見なせる。そのためFRPでは、図7のように微視力学の取り扱う分野と、巨視力学の分野を明確に分けて、考えている。

これに対し、金属は樹脂と異なって水素結合する力をもっていない。このため、表4の下の方に示したように拡散ないし反応によって、繊維の原子とマトリックスの原子を共有させ、複合化が行われる。連続繊維の場合には、プリフォームワイヤーないしシートを作り、これを束ねるあるいは重ねて拡散接合して複合材料にする。短繊維の場合には、マトリックスを含まないプリフォームに、スキーズキャスト法などにより溶湯を含浸させて作るのが一般である。いずれの場合も、高温の過程を経るので、プリフォームの特性も変化する。従って、プリフォームの特性のみをいくら追及しても、それを用いて作製した複合材料部品とは、異なってくる。このため、MMCの設計にあたっては、図8に示したように、微視力学と巨視力学とを明確に分けるわけにはいかない。

たとえばC/Alの設計にあたっては、複合にともなう繊維自身の劣化や、界面での反応生成物による応力集中の影響を考慮する必要がある。ということは、設計できる材料とはいうものの、一般的な王道を見付けるのは困難で、慣用の金属材料と同じように、個々に対応していかなばならないというのが現状である。

材料は、強いだけでは安心して使えない。FRPや、

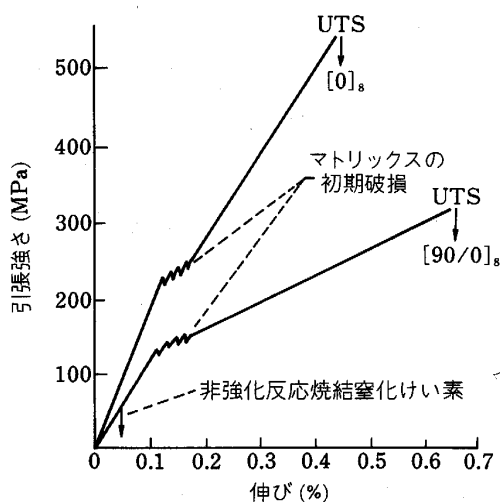


図9 連続繊維強化セラミックスの応力-ひずみ線図の例

繊維強化セラミックスでは、図9¹⁵⁾に示す応力-ひずみ曲線図の Knee-point で強さを考え、ここから先の強度やひずみは、安全率と見なす。これは、マトリックスにマイクロクラックが入り、回復不能になるためである。一方 FRM の方は、マトリックスに塑性変形が生じるので、同じような Knee に見えても、その意味するところは違ってくる。しかし、弾性設計では、ここを耐力とすることもある。

5. 結 び

西欧のように、石を建築材料とする人は、何百年とかかって一つの建造物に取り組む。そのため土台の段階から、最後の製品のイメージが設計図としてできあがっていなければならぬ。ところが、材料にかなり自由度のある木造建築では、簡単な図面さえあればよい。寸法が足りなくなれば、継ぎ足せばよいし、途中でイメージが変われば設計を変更して建築を進める。設計に対する考

え方がちがうのかもしれない。

MMC は、傾斜機能材料にその典型例がみられるように、非平衡状態で使われることが多い。寿命があることを承知で、変化しつつある途中の段階で、もっとも都合のよい状態のときのみを利用する材料である。こうした意味で農業的であり、東洋人に向けた仕事なのかもしれない。残念ながら、設計以前の段階と呼ばれても仕方があるまい。複合材料の一貫した教科書を作っていかなば新人の教育も難しいという一方で、上記のように、抽象的な理論でなく、個々対応の技術でなければ役にたたないので、上手に一般化できるのかなという危惧を抱いている。

文 献

- 1) M. W. HYER: 私信 (1988 年 12 月)
- 2) 藤井太一: 材料システム, 3 (1984), p. 25
- 3) R. M. JONES: Mechanics of Composite Materials (1975) [McGraw-Hill Kogakusha]
- 4) 植村益次: FRP 設計便覧 (1979), p. 231 [強化プラスチック協会]
- 5) 磯貝紘二: 第 3 回日本複合材料学会セミナーテキスト (1988 年 12 月), p. 13
- 6) 磯貝紘二: 第 21 回飛行機シンポジウム講演集 (1983), p. 28
- 7) M. H. SHIRK et al.: AIAA paper 84-0982-cp (1984)
- 8) 国谷啓一, 荒木英夫: 日本複合材料学会誌, 10 (1984), p. 152
- 9) 植村益次, 井山向史, 山口芳子: 日本航空宇宙学会誌, 26 (1988) 296, p. 471
- 10) K. WAKASHIMA, H. TSUKAMOTO and B. H. CHOI: Proc. Korea-Japan Metal Symp. on Comp. Mat., Seoul (1988 年 11 月), p. 102
- 11) J. D. ESHELBY: Proc. Roy. Soc. London, A241 (1957), p. 376
- 12) 石川隆司: 第 2 回日本複合材料学会セミナーテキスト (1988 年 4 月), p. 7
- 13) 井口信洋: 金属, 57(1987) 6, p. 2
- 14) 小岩昌宏, 高田 潤: 日本金属学会会報, 27 (1988), p. 525
- 15) 箕田芳郎: 日本複合材料学会誌, 14 (1988), p. 200