「天然に学ぶ—形態と機能—」特集

複合構造と力学的機能

岡 本 秀 穂

1. はじめに

繊維や粒子で力学的に強化した複合材料は、古来高強度・軽量化構造に用いられてきた¹⁾、なかでも高強度・高弾性繊維で強化した樹脂や金属などは先端(先進)複合材料として近年脚光を浴びている。この材料の特徴として、等方性の慣用構造材料(鉄、アルミなど)と比べて、(1)物性面からは、直交異方性が大であること、(2)成形面からは、材料と同時に構造をも形成してしまうことの2点が挙げられる。したがって力学的性質などの要求性能を満足する複合材料構造体を製作するには、上記の特徴を最大限に活かすように、必要な繊維を必要な量だけ必要なところに配置する(適材適所)という複合材料の設計/解析および成形(つくり方)の手法^{2,3)}を開発して

いく必要がある。

一方、われわれが現在目にしている生体あるいは天然材料の力学的機能(はたらき)からは、環境に対して最適〔たとえば最小材料・最大強度〕設計された構造(しくみ)のものが生き残っていると考えられる。しかも、生体は環境に適応して構成材料を常に成長・自己修復・再生させて形態保守をおこなっている。

本稿では、生体を複合材料構造と単純化し、力学的機能を発現する構造を設計／成形する立場から、生体模擬の(バイオミメティックな)複合構造体についてどのようなヒントが得られるか考察してみたい。

2. 構成材料・構造要素・構造システム

人工の複合材料は、構造の強化様式により繊維強化型

図1 繊維強化複合材料の設計／成形過程

Mechanical Design of Biomimetic Composites

筆者紹介 HIDEHO OKAMOTO, Sumitomo Chemical Co., Ltd., Takatsuki Research Laboratory,
住友化学工業(株)高槻研究所・主任研究員(兼)研究調査室・部長補佐, 工学博士

筆者は複合材料工学が専門で、炭素繊維、アルミナ繊維、金属基複合材料(FRM)の開発、複合材料の設計/解析に従事してこられた。趣味は乱読、古典音楽鑑賞。

本稿では、環境に対して最適構造設計されている生体材料をモデルとして不均質化複合構造などの考え方と可能性を示しておられる。

と粒子強化型に分類できる。更にそれぞれに対して構造の構成材料、この複合化(≒混合化)^{*1}によってできた基本構成要素、さらにこれを結合してできあがった複合化構造として構造システムを考えることができる³⁾。本稿では構成材料から構成要素への過程を材料設計、次いで構成要素から複合化構造システムへの過程を構造設計と呼んでおく。この繊維強化複合材料の設計と成形過程を図1に示す。

一方、生体はマクロにみれば多機能かつフェール・セーフ機構をもった柔構造になっており、ミクロにみれば分子レベルから細胞、器官、個体に至る高度な階層構造をとっている。このため生体は外界と相互作用する動的平衡の場で、下位の構造レベルの秩序を統合してさらに

上位レベルの構造要素を形成している。この過程で構造の不安定性が制御されて、新たな機能が発現する(構造機能の相即)⁵⁾。この機能のうち、生体の力学的機能を構造や形態から説明しようとする研究は D'Arcy W. Thomson⁶⁾に始まる。複合材料の観点から生体構造をとらえた解説も近年多い^{7~9)}。

いま人工複合材料の概念から、生体の基本構造を繊維強化型と粒子強化型複合材料に分け、それぞれに対して構成材料、構成要素および構造システムの相対的な枠内に分類してしまうと表1のようになると考えられる。

まず力学的構造システムとしての生体において、構成材料とは分散材(繊維または粒子)とマトリックスの両基材である。繊維強化型は大体において有機材料系であ

*1 材料設計における複合効果

構成基材から基本構成要素を材料設計(図1参照)する場合、複合効果により単に混合した以上の効果を得ることも可能である。材料設計の要点は構成材料の選択(えらび方)、複合化(くみたて方)と基材間の相互作用/界面制御(くっつけ方)である。

いま、ある複合材料が n 種の基材からできているとしよう。 i 種($i=1, 2, \dots, n$) 基材の力学的特性を A_i 、複合材料中の含有率を V_i とすると、複合材料としての特性 A_c は一般に

$$A_c(\vec{V}) = \sum_i A_i V_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n A_{ij} V_i V_j + \dots \quad (1)$$

ただし、

$$\sum_{i=1}^n V_i = 1 \quad (2)$$

とあらわされる(複合則)。(1)式で第1項しかない場合、複合材料の力学的特性は各基材の線形的な和(加成性)であらわされる。たとえば弾性率(一方向繊維強化材の繊維方向)などの構造鈍感な特性の場合には、この混合則(rule of mixture)が成立しやすい。しかし強度のような構造敏感な特性については、混合則は一般には成立しない。

付図 相互作用のある複合材料の特性(2次効果): (a) 並列モデル, (b) 直列モデル

ただし、図は、 $A_2 = 2A_1$ 、 $K=10$ であつ

(a): $A_3 = \{(A_1 + A_2)/2\} \cdot 2$

(b): $A_3 = \{(A_1 + A_2)/2\} \cdot 2$

の場合である。

ここで繊維/マトリックス系のような2成分複合材料を考えてみる。両者の界面で化学反応による相互作用より、成分1と2が等量反応して拡散層3なる界面ができたとする(図(a), (b)参照)。この2成分複合材料の特性 A_c は、(a) 並列結合、(b) 直列結合のそれぞれのモデルに対して、

$$A_c = A_1 V_1 + A_2 V_2 + k_1 V_1 V_2 \quad (3)$$

$$1/A_c = (1/A_1) V_1 + (1/A_2) V_2 + k_2 V_1 V_2 \quad (4)$$

ただし、

$$k_1 = \{A_3 - (A_1 + A_2)/2\} \cdot p \quad (5)$$

$$k_2 = \{1/A_3 - (1/A_1 + 1/A_2)/2\} \cdot p \quad (6)$$

$$p = 2K/(2+K) \quad (7)$$

とあらわすことができる。ここで、 $k_1, k_2 \leq 0$ である⁽⁴⁾および岡本未発表)。また K は、反応層3の体積分率は小さいと仮定している。 $K \gg 1$ のとき、(3)、(4)式はそれぞれ付図(a)、(b)のようになる。界面層の力学的特性が成分1、2の特性の算術平均より大きいかなにかによって、複合材料の特性が最大または最小をとることができる。したがって構成材料間の相互作用を最適に制御することによって、同じ基材から成る複合材料でもその力学的特性を最大限に発揮させることができる。生体材料における複合効果は未だ定かではないが、この観点からの解析も必要である。

表1 複合構造体としてみた生体の分類

型	基本構造型	材質	生体系複合材料例			
			構成材料 分散材 (/マトリックス)	構造要素		構造システム (複合構造体)
繊維強化型	(1次元) 一方向強化型	無機系	炭酸カルシウム / 炭酸カルシウム	繊維 / 結晶系: カルサイト		ウニの歯
			セルロース	維管束鞘		竹の稈部
	(2次元) 積層材型 <div style="display: inline-block; vertical-align: middle;"> ・クロスブライ ・アングルブライ → (フィラメント ワイン ディング(FW)) </div>	有機系	キチン / タンパク質 コラーゲン / 多糖類 アクチン-ミオシン コラーゲン コラーゲン / プロテオグリカン	クチクラ 実質層 筋線維 クチクラ		昆虫, エビ, カニの外皮 角膜 心臓, 血管 線虫 椎間板
	(3次元) 強化型		セルロース / リグニン アクチン-ミオシン 同上 + コラーゲン	仮道管 筋線維 同上 + チューニク		木材 タコの外皮 イカの外皮
	混合積層型		コラーゲン アパタイト コラーゲン リン酸カルシウム	ハバース層板 結晶系: ヒドロキシ アパタイト		骨 歯 象牙
粒子強化型	稜柱構造 真珠構造 他に葉状構造, 交叉板構造など	有機・無機系	炭酸カルシウム / コンキオリン ケイ酸	結晶系: カルサイト (方解石) アラゴナイト (あられ石)		貝殻(外殻層), サンゴ 貝殻(内殻層), 真珠 ケイソウ

る。生体にみられる“繊維”(生体系では線維といわれる)としては、コラーゲン、ケラチン、エラスチン、アクチン-ミオシンなどの繊維状タンパク質やセルロース、キチンを主成分とする集合体を挙げるができる⁶⁾。なお、無機材料系として炭酸カルシウム結晶の繊維も存在する^{8,10)}。また粒子強化型は無機/有機マトリックス系である。生体にみられる“粒子”とは、炭酸カルシウム、リン酸カルシウム、シュウ酸カルシウムなどの生体結晶¹¹⁾を主成分とする集合体とみなすことができる。

以下、生体材料の力学的特性を人工材料と比較し、ついで表1より代表的な例を選んで、複合構造と力学的機能の関連について解説する。

3. 材料指数と構造指数

材料の力学的機能を比較する場合、図2に示すような比強度(=引張強度 σ /密度 ρ)、比弾性率(=弾性率 E / ρ)という材料指数が用いられる。軽量かつ高強度・高弾性材料としてはなるべく図中、右上領域に存在していることが望ましい。生体材料の材料指数は人工材料にくらべて、かなり低いことが図2よりわかる^{12,13)}。

しかし、この生体材料は

構造効率=座屈荷重 P /構造に必要な重量 W のうち材料に依存する項、すなわち構造指数(座屈指数)においては有利になっている。構造要素が等方性材料と直交異方性材料である柱と平板のそれぞれの場合について、構造指数を表2に示した¹⁾。圧縮によりEuler座屈する場合、柱と平板の構造指数は $\sqrt{E}/\rho$ 、 $\sqrt[3]{E}/\rho$ である。図2に示したようにヒノキは高張力鋼より比強度、比弾性とも劣っているが、座屈特性は優れている^{1,15)}。

このように、最適設計された構造体とみなせる生体の材料自体の力学的機能は人工材料より優れているわけではない。したがって生体における構造システムの“複合化の設計図”を学ぶことが、新規の構造/機能材料を実現していく上で必要である。

4. 生体構造と力学的機能

4.1 繊維強化型複合構造

表1の繊維強化型複合材料の代表例について概説する。

(1) 一次元強化型

一方向強化複合材料の典型的な例は、竹の稈部である^{2,9,13)}。図3(a)において黒く見える部分が維管束鞘

図2 生体材料と人工材料の材料指数

表2 柱と平板の構造指数

(構造効率) = (座屈荷重 P) / (必要重量 W) l : 構造長, ν : ポアソン比, G : せん断弾性率〔添字〕 L : 軸方向, T : 軸に直角方向

構造材料	(a) 柱	(b) 平 板
等方性	$\frac{P}{W} \propto \left(\frac{\sqrt{E}}{\rho} \right) \left(\frac{\sqrt{P}}{l^2} \right)$	$\frac{P}{W} \propto \left(\frac{\sqrt{E}}{\rho} \right) \cdot \left(\frac{P^{2/3}}{l^{6/3}} \right)$
直交異方性	$\left(\frac{\sqrt{E_L}}{\rho} \right)$	$\left(\frac{\sqrt{E_L E_T + E_L \nu_{TL}}}{1 - \nu_{LT} \nu_{TL}} + 2 G_{LT} \right)^{1/3} / \rho$
	構造指数	

で、水や無機養分が上昇する道管と、光合成された有機養分が下降する篩管が内部にある。この場合、維管束鞘が強化繊維、柔細胞組織がマトリックスとみなせる。一方向強化型であることは、維管束にそって縦に割れることからわかる。竹の断面での維管束鞘の分布は表皮(外側)では細くかつ密に(すなわち固く)なっており、内側では逆になっている。このような繊維配列により、竹が最小の材料を用いて、風雪の曲げ荷重に対して最大の強度を発揮するようになっていていると考えられる^{15,16)}。

またウニの歯のコア部は CaCO_3 (カルサイト、方解

石) 繊維で無定形の CaCO_3 を一方向に強化したセラミック強化(FRC) の珍しい例である^{8,10)}。

(2) 二次元強化型

面を強化するには、少なくとも2種以上の配向角を有する強化繊維層を“積層”する必要がある。積層材には、クロスプライ(直交)とアングルプライ(斜交、交角)の積層材がある。円筒構造物におけるフィラメントワインディング成形法は、アングルプライの一種と考えられる。

① 積層材型

昆虫の原クチクラは、主としてキチン線維とタンパク

図3 竹(モウソウチク)の維管束分布

(a) 稈部, (b) 節部

質の複合材料である¹⁷⁾。クチクラ内薄層のキチン線維は平行に並んでおり、前の薄層に対して少しずつ線維方向を回転しながら蓄積（アングルプライ積層）されている^{7,17)}。クチクラの強靱性はこの積層板の構成による。甲虫のクチクラ構造¹⁸⁾は、 $[+45^\circ/-45^\circ]$ のクロスプライ積層板になっている。

② フィラメント・ワインディング (FW) 構造 [パイアス構造] 型

カイチュウなどの線虫のクチクラは体内膨圧の維持のために厚く、伸びの小さいコラーゲン線維が格子型結合組織を形成している¹⁹⁾。しかし移動の必要から、線維は体の軸方向に対してある角度 θ をもたせん構造でなければならない。繊維長が一定のとき、 $\theta=54^\circ$ で体積は最大になり⁷⁾ (図4)、筋収縮に伴う θ (→体積) の変化によって運動できる。この格子型合組織は、膜構造強化のFW円筒構造物の生体における例である。

図4 フィラメント・ワインディング円筒格子型構造

この円筒圧力容器の例として、サケの体表のコラーゲン線維のFW構造が挙げられる²⁰⁾。また血管、リンパ管、小腸壁、椎間板の骨組織などがFW構造とみなせる。実際、動脈や静脈の管壁の軸方向と円周方向の引張強度は異なっている²¹⁾。

さらに心臓も多層のFW構造体とみなせる。左心室の心外膜から心内膜に至る筋線維の走行方向は順次異なっている²²⁾。

③ 混合積層型

骨の網目状組織が、作用する力に依存して分布し、常に変形・修復されていることは以前から知られている。たとえば大腿骨をみると、骨頭部は多孔質の海绵骨からなり、骨幹部は硬い緻密骨でできている。骨の主成分はコラーゲン (I 型) 線維とヒドロキシアパタイト $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ 結晶である。この結晶が結合した線維は、血管の周囲を円筒層状に巻いて骨単位 (ハバース系) を形成している。したがって、骨の強度および弾性率には強い方向依存性があらわれており²³⁾、緻密骨では一方向繊維強化材の異方性とよく似た性質を示す。また、骨頭部の骨梁 (= コラーゲン線維組織の配向) パターンをみると、圧縮応力と、骨頭部の曲げによる引張応力に耐えるように骨梁群が存在している (しかしねじり荷重には弱く、骨折や捻挫をおこしやすい²³⁾)。このことは、大腿骨モデルの有限要素法による応力解析や、光弾性実験の結果ともよく対応している^{1,23)}。つまり、骨は要求される応力レベルに対して、必要な場所に最適な繊維配向、繊維含有率で複合化した積層材とみなすことができる。

(3) 三次元強化型

タコの外套は互いに直交する縦走筋、環状筋、放射状筋の線維群からなる三次元強化型である。イカでは、体長方向の縦走筋がコラーゲン線維組織に置換されており、線維配列の差により両者の行動形態が異なっている²⁴⁾。

木材は、図2からもわかるように、比弾性率の大きい材料である。しかし吸湿にともなう変形性と、力学的な異方性という短所も有している。木材の細胞壁を繊維強化複合材料としてみると、構成材料としてはセルロース(約50%)分子の集合体であるマイクロフィブリルが繊維に相当する。マトリックスに対応するものは、リグニンである。この両者とのぬれ性を改善させているのが、非セルロース性マトリックス多糖類(ヘミセルロース)である²⁵⁾。

次に木材の構造要素としては、細胞壁層を考えることができる。一般には一次壁と二次壁に区別される^{6, 26~27)}。後者では、マイクロフィブリルが一定方向に配列しており、この傾き角の差によってさらに3層(S_1 , S_2 , S_3)の壁層構成になっている。このうち S_2 層が最も厚く、マイクロフィブリル配向は細胞軸に対して 15° ²⁶⁾~ 45° 以下⁷⁾の単ヘリックス巻きになっている。これに対して、 S_1 層は、配向角が $\pm 55^\circ$ ⁷⁾~ $\pm 65^\circ$ ²⁸⁾の対称クロスファイ積層構造となっている。また一次壁にも交差積層構造が認められるものもある²⁸⁾。このような細胞壁における多層のFW構造が、木材の力学的性質を規定するひとつの因子になっている²⁷⁾。

以上は、木材の樹幹軸方向に対する強化であったが、年輪の接線方向や半径(放射)方向にも不均質構造をとっていて²⁷⁾、強度や弾性率に異方性を有している。

なおヒノキのような針葉樹では、切断後ある経過年数まで強度、弾性率ともに上昇しかつ硬くなる。これはセルロースの崩壊と同時に非晶領域における結晶化が生ずるためである。ケヤキのような広葉樹ではセルロースの崩壊速度が大きく、強度は経過年数とともに低下する²⁹⁾。

4.2 粒子強化型複合構造

この型の複合材料は組成の大部分は結晶質の無機塩であり、少量のタンパク質が接着剤(マトリックス)として存在している。したがって人工の粒子強化複合材料より、はるかに構造秩序を有している。このような硬組織体に属する代表的なものは歯、貝殻である。

歯の主要部分の象牙質は、骨と同様にコラーゲンを主成分とする繊維状物質のうえにアパタイトの結晶が成長(石灰化)した結合組織からなる複合材料構造である。

象牙も歯とよく似た成長をするが、外周部は中心部より空隙が多く、外部からの荷重も吸収しやすい構造と

なっていて、曲げ強度は低くなっている³⁰⁾。

貝殻の主たる構造材料は、炭酸カルシウム(95%以上³⁰⁾)結晶と、これを糊づけするコンキオリンとよばれるタンパク質である。これからできた構造要素の主たるものは、稜柱構造(貝殻の外殻層)と真珠構造(内殻層)であり、炭素カルシウム結晶はそれぞれカルサイトとアラゴナイトが主成分となっている^{30, 31)}。

その他、サンゴ³⁰⁾や真珠³²⁾は、炭酸カルシウムの微結晶の成長によってできる層状構造体である。胆石のなかにも層状構造が存在する³¹⁾。また水の中の宝石ともよばれているケイソウの被殻は有機-無機(ケイ酸)複合材料構造をとっている³³⁾。

4.3 複合構造化方法

以上のべた構造要素から、構造システム(複合化構造)を形成するにあたって、生体では各種の結合(接着)あるいは補強方法がとられている。たとえば、

①結合(接着)方法:放射状の靱帯組織³⁴⁾は、応力集中を低下させる接合となっている。また貝の蝶番靱帯はアラゴナイトの短繊維強化タンパク複合材料とみなせる³⁵⁾。接着方法として貝柱(コラーゲン繊維)と貝殻(CaCO_3)の接着は有機-無機系の相互作用という点で興味深い。

②補強方法:植物では中空の茎の局部座屈を防止するため、円周方向(竹)や軸方向(シソ)³⁷⁾の補強形態がみられる(図5)。更に詳しく竹の節部の繊維配列組織をみたのが図3(b)である。[円周方向/半径方向/円周方向]の繊維束の積層配列が節部にみられる。また節部はクラックアレスターの役割や、枝に対する生理学的機能をも併せもっている。

また蜂の巣(ハニカム)は軽量で剛性と圧縮およびせん断強度を向上させるセル壁結合構造であり、耐水性も良好である。

図5 植物の茎の補強方法
(a)竹、(b)シソ

5. 生体模倣の複合材料構造

さて生体を複合材料構造体とみなすことによって、どのような新規構造の発想を学べるのであろうか。

最近、外部刺激に応じて特性(たとえば硬さ)が適応変化する材料(知能材料)開発の発想⁸⁸⁾がある。しかしながら、材料/構造の設計や成形に対する新しい指導原理は未だ生体からは得られていない。筆者は生体模倣の複合構造として、(1)不均質化複合構造、(2)カップリング効果を活用した非対称積層材構造(←木)、(3)無機結晶/合成高分子系などの層状複合体構造(←硬組織)を以前提案した¹⁹⁾。たとえば(1)では、①半径方向の繊維分布が異なった円筒構造(←竹)、②FW管(らせん管⁸⁹⁾)を積層した構造(←骨、木)、③応力分布[引張-圧縮]を場所により制御した成形体(←木)などが考えられる。

また、生体内構造の形(パターン)との類似性を手がかりにして、共通の機能を有する模倣構造がありうると発想することができる⁹⁾。

更に形態形成(創生)に関して、材料特性や構造形状を外力に適応するように“生長”させて、構造体の最適設計問題が扱われている。たとえば生長変形法⁴⁰⁾を片持ちばりが曲がりなりに適用すると、それぞれ尺骨や大腿骨

に似た形状をとることが示されている。もし材料設計上これが成形可能になれば、知能材料のひとつである。

6. おわりに

生体の模倣構造としては、力学的機能以外に多機能を有することも必要である。複合材料構造において、力学的機能と他の機能を同時に有する“複合機能”と、熱的・光学的・電氣的など他の機能との“カップリング機能”をあわせて図6に示した。多機能性複合材料の分野はほとんど未開拓で、全貌は明らかではない。しかし、たとえば表1の角膜実質層の模倣として、分子構造制御により透明で膜状の構造体の実現可能性もある。

更に、貝殻にみられる結晶成長機構の解明から、層状複合体の構造制御のダイナミックスや“バイオエビタシー”についても学べると考えられる。

以上述べた生体模倣構造の工業的展開を見通すことは現時点では難しい。たとえ高性能の構造を最適設計できたとしても、その成形コストが高すぎでは使用し難い。しかし生体複合構造の観点からは、ほんの一部をわれわれは垣間見ているに過ぎない。生体機能の良さにらわれすぎなければ、まだまだ開発のヒントが学べ、かつ波及効果の極めて大きい技術が獲得できると思われる。

図6 先端複合材料の将来(多機能性複合材料)

文 献

- 1) 林 毅編, 「複合材料工学」, 日科技連, 1章 (1971)
- 2) 岡本秀穂, 辻本佳史, 住友化学, 1983-II, 56
- 3) 岡本秀穂, 材料科学, **21**, 340 (1985)
- 4) 日本化学会編, 「複合材料」, 東大出版会, 1章 (1975)
- 5) 岡本秀穂, 応用物理, **42**, 313 (1973)
- 6) D'Arcy W. Thomson (柳田友道ほか訳), 「生物のかたち」, 東大出版会, 第8章 (1973)
- 7) S. A. Wainwright, W. D. Biggs, J. D. Currey and J. M. Gosline, "Mechanical Design in Organisms", Edward Arnold (1976)
- 8) A. Kelly and Yu. N. Rabotnov, "Handbook of Composites", Vol. 4, North-Holland Chapt. IX (1983)
- 9) 岡本秀穂, 高分子, **36**, 836 (1987)
- 10) K. Brear and J. D. Currey, *J. Mater. Sci.*, **11**, 1977 (1976)
- 11) 小松 啓, 日本結晶成長学会誌, **12**, 1, 23 (1985)
- 12) R. J. Schliekelmann, *Trans. Jap. Soc. Comp. Mat.*, **8**, 1 (1982)
- 13) 岡本秀穂, 高分子学会関西支部 第7回レビュー講演会 (1984)
- 14) 上田弘一郎, 「竹と日本人」, 日本放送出版協会 (1979)
- 15) 尾田十八, 日本機械学会講演論文集, **46**, 997 (1980); **49**, 1063 (1983)
- 16) 池上皓三, 日本複合材料学会誌, **11**, 108 (1985)
- 17) W. Mordue, G. J. Goldworthy, J. Brady and W. M. Blaney, (高橋正三訳), 「昆虫生理学入門」, 弘学出版 (1983)
- 18) H. R. Hepburn and A. Ball, *J. Mat. Sci.*, **8**, 618 (1973)
- 19) M. Wells (羽田節子訳), 「動くしくみー無脊椎動物からの歩みー」, 平凡社, 第IV章 (1972)
- 20) S. A. Wainwright, F. Vosburgh and J. H. Hebrank, *Science*, **202**, 747 (1978)
- 21) 山本 博, 「人体の強度と老化」, 日本放送出版協会 (1979)
- 22) D. D. Streeter, H. M. Spotnitz, D. P. Patel, J. Ross and E. H. Sonnenblick, *Circulation Res.*, **24**, 339 (1969)
- 23) 立石哲也, 白崎芳夫, 機械技研報告, 第130号, (1984)
- 24) J. M. Gosline and M. E. DeMont, *Sci. Amer.*, **252**, 74 (1985)
- 25) 増田芳雄, 「植物の細胞壁」, 東大出版会, 1章 (1986)
- 26) J. M. Dinwoodie, *Phys. Technol.*, **9**, 185 (1978)
- 27) 原田 浩, 島地 謙, 山田 正, 材料, **28**, 540, 671, 910 (1979)
- 28) 岸 恭二, 原田 浩, 佐伯 浩, 材料, **30** (334), 673 (1981)
- 29) 西岡常一, 小原二郎, 「法隆寺を支えた木」, 日本放送出版協会, IV (1978)
- 30) 芹沢 実, 若野寛睦, 高橋高子, 日本産業技術振協技術資料, No. 122, 29 (1982); セラミックス, **17**, 183 (1982)
- 31) I. Kobayashi, *Sci. Rept. Niigata Univ. Ser. E*, No. 2, 27 (1971)
- 32) 和田浩爾, 国立真珠研報告, **16**, 1949 (1972)
- 33) 巖佐耕三, 「珪藻の生物学」, 東京大学出版会 (1976)
- 34) 小塩国次, 日本複合材料学会誌, **11**, 114 (1985)
- 35) 小野勝道, 菊地康夫, 東 清史, 田宮信雄, 高分子学会予稿集, **36** (3), 480 (1987)
- 36) 松本恒隆, 日本接着協会誌, **12**, 288 (1976); **16**, 325 (1980)
- 37) 田中基八郎, 日本機械学会誌, **86**, 230 (1983)
- 38) 島村昭二, 日本金属学会会報, **23**, 656 (1984)
- 39) J. E. Gordon and G. Jeronimidis, *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, **A294**, 545 (1980)
- 40) 梅谷陽二, 平井成興, 日本機械学会論文集 (第1部), **42**, 3754 (1976)

(昭和62年12月28日受理)