環境と高分子

4. 自然と伝統に学ぶ高分子材料[†]

武田 邦彦*

The Environment and Polymeric Materials

IV : Polymer Materials Guided by Nature and Tradition

by

Kunihiko TAKEDA*

Key words : Nature, Tradition, Sustainable, Living things, Polymer Materials, Long Life

1 緒 言

環境と材料の講座も今回で最後となる。第一講で全体を、第二講でポリ塩化ビニルを中心とした合成高分子と環境の関係を、第三講では非石油系資源を使った新しい高分子について整理をしてきた。最後の本講では「持続性」を強く意識して「自然」「伝統」「生物」をキーワードとして講座を展開する。

2 資源の持続性

「材料」の学問の対象となるものは「物質」である。その物質も元素や単独の化合物より鉄鋼材料、コンクリート、プラスチックなど「原子や分子の集合体」の場合が多く、しかも社会における使用量も多い。「材料」をこのように狭義に定義した場合、材料という学問の発展には資源が必要であることを理解することができる。

資源には、1) 化石資源のように地下に埋蔵され人間が採掘する量に限界がある資源、2) 太陽エネルギーのように永続的に供給される資源に分かれる。また一般的には「江戸時代のような文明は循環型もしくは持続性があった」と思われているが、江戸時代でも持続性はなかったことを第一講で示した。このことは単純な意味で生産量を減少させるなどの方向は持続性の構築の概念とは相反することを示している。

資源の持続性を定量的に整理する一つは、物質資源をエネルギー資源として捉え、換算して表現する方法である。第一講に示したように、1997年における日本の材料のフローとマスバランスは図1のように整理できる。

日本には気体資源として燃焼および呼吸用の酸素、農業や工業・生活に使用する水、および石油石炭、鉄鉱石、食糧飼料、砂利、石灰石、岩石などの固体資源が供給される。気体資源のほとんどは酸素であり製造および生活に使用され主として二酸化炭素に変化し大気中に放出される。水は大量に使用されることが必要に応じて処理されて自然界に放出される。この2つは自然界で太陽エネルギーをドライビング・フォースとして循環され、再利用され

図1 日本の総物質フローとバランス

る。気体および液体は移動が容易であり、拡散と重力を利用して回収再生される。固体資源は第一講に詳述したが、20億トンから5億トンの製品を作りだし、消費後2億トン強となる。現在のところ人工的に循環できる限度はせいぜい1億トンから2億トンであり、二酸化炭素に変化する石油石炭などを除き、残りの14億トン以上は日本国土に蓄積する。

このような基本的環境の中で資源の寿命について定量的な計算を試みる。自然寿命は資源の全獲得量を年間の需要量で除すことによって求めることができる。

$$\tau_{\text{expire}} = \frac{Q_{\text{ta}} (\text{資源全獲得量})}{Q_{\text{dyp}} (\text{資源年間需要量})} \quad (1)$$

資源の全獲得量は、化石資源の究極可採埋蔵量に年間の太陽エネルギーの量と人工的に発生する量を加えたものである。

$$Q_{\text{ta}} (\text{total acquisition}) = Q_{\text{resource}} + \sum_{i=1}^{\tau} Q_{\text{sun},i} + \sum_{i=1}^{\tau} Q_{\text{gen},i} \quad (2)$$

一方、年間の消費量は個別の消費をすべて合算する必要がある、その誤差が大きいため、基準となる年を決めて、その基準年に対して物質やエネルギーの消費効率を比較する方法が現実的である。

[†] 原稿受理 平成16年8月9日 Received Aug. 9, 2004

* 正会員 名古屋大学高等研究院 〒464-8603 名古屋市中千種区不老町, Inst. for Advanced Res., Nagoya Univ., Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603

$$Q_{dpy} = \frac{Q_{dpy,0}(\text{基準年の需要量})}{\prod_{j=1}^m \eta_j} \quad (3)$$

効率は物質を循環する効率、国際的な貿易による出入りの状態、技術革新による効率向上、それにライフスタイルの変化による環境負荷の変動が代表的である。

$$\prod_{j=1}^m \eta_j = \eta_{\text{recycle}} \cdot \eta_{\text{boundary}} \cdot \eta_{\text{technology}} \cdot \eta_{\text{lifestyle}} \quad (4)$$

これらの式に数値を入れることができれば持続年限を算出することができる。

式(2)の第一項は化石資源の究極埋蔵量が問題であるがすでに多くの書物にまとめられているので、本稿では割愛する。第二項は太陽エネルギーの寄与であるが、表Ⅰに示すように太陽光は現在人類が利用している他のエネルギー源に比較して動力密度が低い。このことはエネルギー発生装置が巨大になることを意味していて、現在規模のエネルギー使用量が継続する限り太陽エネルギーの利用には限界があることを示している。¹⁾

3 自然と伝統に学ぶ高分子材料

3・1 自然の防御系

人工的な材料研究で自然に学ぶ領域は広い。たとえば「生物類似機能材料」という分野では「ミメティック材料」という研究が行われている。骨は軽く丈夫で体を支える巧みな構造をしているので、それからヒントを得て優れた材料を合成する試みなどがこれに当たる。またインテリジェント材料では生物の持つ応答性に着目して、それを人工的な材料システムに応用しようとする試みである。

本稿では環境と材料という観点から生物の防御系について整理をすることによって、いかにして生物が自然との調和のもとで材料を修復し、長く使おうとしているかについて述べる。

人間のような多くの機能を持った複合体（機能複合体）は表Ⅱに示す20種類を含む防御系で外敵や環境から身

図2 確認埋蔵量によるエネルギー資源量

表Ⅰ 太陽光、風力、水力、水蒸気の理論動力

項目	密度 kg/m ³	流体速度 m/s	動力 kW/m ²
太陽光(快晴で太陽が中天)	-	-	1
風力(風速20m)	1.3	20	5.2
水力(有効落差100m)	1,000	44.3	43,500
水蒸気(主流タービン: 超臨界圧)	74	94.0	30,800
水蒸気(超々臨界圧)	74	400	2,370,000

表Ⅱ 生物の防御系

番号	防御機構	ポイント	防御
1	材料そのもの	材料選択	爪、骨、血管、心臓の弁
2	省エネルギー	代謝節約	心材、ムササギの皮膚
3		劣化因子排除	髪の毛、ツメ、腎臓、肝臓
4	外敵排除	難	抗原抗体反応
5		微生物排除	食細胞
6		毒性生物排除	イボタヒボタガ
7	DNA	非応答性受動的化学防御	マイコスポリン酸アミノ酸
8		応答性受動的化学防御	メラニン、フラボノイド
9		受動的物理防御	胃液分泌
10		能動的物理防御	チンダイマー補修
11		単純型化	細胞膜の流動性制御
12		多重型化	胃壁とアルコール
13	産業	アポトーシス	紫外線劣化腐蝕、肝臓、精子形成熱ショック応答
14		定期廃棄	樹皮、角化細胞、胃壁
15		機能停止	心材
16	代換	部分代替	内臓
17		全体代替	生殖
18	脳情報活用	危険回避	本能
19	脳	治療	病院
20	システム防衛	心	教会・寺院

を守り、それぞれの機能の維持を図っている。個別の防御システムについては次の節に整理をするが、生物は極めて多彩で多重な防御システムを作り上げて種の保存を図ってきたことが判る。²⁾

本講では生物の防御系では比較的簡単で環境と材料という視点から直接的に関係のあるものに絞って5項目だけ説明を行う。

3・1・1 防御系の材料選択 生物はその体を構成する材料を自然界から求める必要があり、利用できる材料は高分子材料、炭酸カルシウムなどに限定されている。また合成条件はほぼ常温常圧であるため、例えば鉄鋼を1700℃以上で溶解して利用することはできない。それでも体の各部分は異なる機能を求めるので、筋肉、脂肪、骨格、皮膚、毛、内臓壁などにはそれぞれに適した材料を用いる。例えば脊椎動物の体を支える骨は一般的には炭酸カルシウムで出来ているが、その構造は複雑で骨の外側がカルシウム、内側にはコラーゲン（タンパク質の一種）が筋上に入り込んで全体としては鉄筋コンクリートのような構造を取っている。骨は単に体を支える機能ばかりではなく中心部に骨髓をもち造血も司り進化の過程で主に体を支える機能に利用されたため、その材料と構造は人工的な構造材料を考える上で参考になる。³⁾

これに対して人工の材料選択は、より機能の高いものに、より高級な材料を使用するというのが基本である。人間の生活を支える基幹材料は、石、青銅、鉄、鋼、そしてステンレス鋼と進化してきたが、鉄の代わりに青銅を石で補強して使用するような方法は採用しなかった。自然界は選択できる原料に制限があるので何とか材料を組み合わせることを中心的に努力し、人間は新しい素材に活路を見出すという歴史的経過を示している。

また高分子材料では木材や皮革などの天然材料を利用していた時代が過ぎ、20世紀初頭（1907年、Bakelandが熱硬化性樹脂、1924年、Staudingerが熱可塑性樹脂を合成）から石油を原料とした合成高分子が使用されて

図3 脊椎動物の骨の構造と材料選択

きた。ポリプロピレン (PP), ポリスチレン (PS) など石油からほぼ一段の反応で合成しうる材料を汎用用途に、ポリカーボネート (PC), ポリフェニレンエーテル (PPE) のような二段の反応で製造する材料をエンジニアリング用途に、そして極めて複雑な過程を経て合成するポリエーテルケトン (PEK) などを“スーパーエンジニアリングプラスチック”として特殊用途に使用してきた。

生物の材料選択と異なり、過酷な条件下で使用する材料は過剰な性能を有し、例えば 70℃ で材料が使用されるとすると、PS, PP では 30 000 ~ 100 000 時間 (4 年から 12 年ほど) と適切な寿命が推定されるが、PEK では材料推定寿命は 10^9 時間 (約 10 万年) になる。⁴⁾ このことは人工的な空間に於いて材料が受ける条件が自然環境に比較して過酷であること、20 世紀の大量生産時代の材料選択が過剰でもあったことを示している。もし人工的な材料が複合化され、自己修復する材料の合成が可能になればこのような過剰性能の材料選択は減少していくと考えられる。

3・1・2 受動的防御 生物の防御系には受動的防御と能動的防御があるが、多くの受動的防御のうち、典型例としてここでは紫外線による DNA 損傷とその防御を整理する。

人間の皮膚は絶えず紫外線に晒されるので、皮膚を構成する細胞がさまざまなかたちで痛む。人間では真夏の太陽の光を 1 時間浴びると DNA の損傷は 10 ~ 100 万ヶに達する。皮膚は表面の角化細胞を含む表皮、真皮、皮下脂肪が層状になっており、短波長の紫外線 (UV-B) は表皮底部まで、長波長の紫外線 (UV-A) は真皮に到達する。これらの紫外線を防御するために表皮底部にメラノサイトと呼ばれる色素形成細胞があり紫外線吸収剤 (メラニン) を製造する。⁵⁾

防御系はまず角化細胞で紫外線を反射し、それを通過する紫外線をメラニンで吸収する。それでも損傷は著しいので、その生物の寿命に応じた材料寿命を保つことはできない。そこで、表皮基底層で盛んに新しい細胞を製造し、順次皮膚表面に押し上げることによって損傷した細胞を外へ廃棄する。この方式は樹木の樹皮と同じで生物は外部組織の損傷については概ね「廃棄」という防御方法を採用している。

人工的な材料の防御の多くは受動的防御であり、メラ

ニンと同様の紫外線吸収の機能を発揮するものもある。ただし、現在のところ人工的な受動的防御では材料自らが紫外線吸収剤などを合成して供給するものではなく、材料を成型するときに推定使用年数に絶えられるように濃度を調整して添加する方式が採られる。

このように受動的防御については生物が利用する材料と人工的な材料は類似しているが、その合成過程、混合過程、そして複雑さに於いてはかなりの差がある。動物が利用するメラニンは化学的構造が定まっていない。メラニンの合成原料はフェノール、インドールおよびピロロール等であり、フェノール系のチロシン、アドレナリン、インドール系のトリプトファンなど多く見られる。さらに脊椎動物では骨を、1) 体を支える機能、2) 造血機能 3) カルシウム保存 など複数の機能を分担させているのと同様に、メラニンも紫外線吸収作用ばかりではなく、例えばイカやタコの墨はメラニン微粒子の懸濁液であり、両生類・魚類や昆虫・甲殻類ではメラニンを含む細胞が伸縮することによって体色を変えているというように複数の異なった機能に利用されている。

受動的防御にはこのような化学的な防御とともに物理的空間的な防御がある。その例として胃液の分泌を挙げる。胃液はタンパク質を加水分解するための触媒として pH = 1.0 という強い酸性を示すが、胃壁もタンパク質であるから胃壁自身が消化されるはずである。それでも胃壁が消化されないのは、胃壁 (胃の粘膜) が次のような複数の保護機構で守られるからである。⁶⁾

(1) 胃の上皮細胞が粘液および重炭酸イオンを分泌し胃酸が粘液中で中和される。すなわち胃の内腔側では pH は 1.0 ~ 2.0 で、胃の上皮細胞に接する場所では pH は 7.0 である。

(2) 胃粘膜の表面には磷脂質層があり、胃液は粘膜表面から弾かれ、上皮細胞には接触し難い。

(3) 胃液の分泌方向が胃壁に対して垂直で、分泌された胃液が胃壁に接しにくい。

(4) 胃粘膜は細胞分裂が盛んで、数日以内に胃の内腔側に脱落する。

(5) 粘膜部に血流が豊富に流れ拡散して侵入する酸を血流が洗い流す。

(6) カプサイシン (唐辛子の主成分) に感受性を持つ神経が胃粘膜の防御の機能を有する。

(7) 胃粘膜は予め弱い刺激物に曝された後、強い刺激を与えた場合、あらかじめ防御機構を発動する。例えば、50 ~ 100% アルコールを投与すると胃粘膜には重症な傷害が発生するが、予め 20% アルコールを投与後、次に 100% アルコールを投与しても、胃粘膜傷害は発生しない (適応性細胞保護効果)。粘膜内のプロスタグランジンや一酸化窒素 (NO) などが関与していると推定される。

さらに詳細な胃の活動は複雑なので、ここで詳述することは避けるが、胃壁という材料の防御に複数のシステムが機能していることが判る。

人工的な材料でも物理的な受動的防御は製品の設計段階で多用される。上記 7) の「適応性保護効果」のような高

図4 人工高分子材料の熱変形温度と 70℃ における推定寿命

度な防御は少ないが、直接的には機械設計などで具体化できるからである。例えば著者の研究では従来、高分子材料を使用するときに材料の燃焼性を抑制する目的で難燃材料を使用するのが常だったが、最近では機械内部の立体配置などを考慮して着火してもそれが延焼しないような設計の研究が進むようになった。単純な防御から複合的な防御への進化の1つである。⁷⁾

3・1・3 劣化因子排除 生物の防御機構を特徴づけるものに外敵排除（抗原抗体反応、リンパ球、白血球など）がある。常に外敵から狙われる生物は絶え間ない攻撃に対して対抗する手段を有しているものが進化の過程で生き残ってきた。これらの防御機構を人工的な材料に直接利用するにはまだ時間が掛かるので、本節では紙面の都合で割愛し、表Ⅱの番号6の防御、「劣化因子排除」について簡単に触れる。

髪の毛やツメは骨と同様に脊椎動物では特別な機能を果たす。髪の毛の一般的な機能としては頭皮の保護であるが、その他に有害金属の体外排除の役目を持っている。⁸⁾

髪の毛やツメはケラチンという硬いタンパク質からできているが、ケラチンにはシスチンというイオウ原子を含んだアミノ酸が使われている。髪の毛にパーマメントをかけることが出来るのはこのシスチンのイオウの架橋を利用したものである。イオウは水銀、ヒ素などの有害元素に配位する性質を持つ。例えば毛根で新たに生成する毛母細胞は形成時に血中の有害元素を配位して取り込む。毛母細胞はやがて死んで毛となるが、すでに取り込んだ有害元素と共に徐々に体の外にでる。つまり、水銀や砒素などの有害金属を毛の細胞が出来るときに取り込み、伸びて体外に運び出し、最後に「毛やツメを切る」という手段を経て廃棄する仕組みである。もちろん、体内の肝臓や腎臓も毒物の除去機構を持っているが、その機能はかなり複雑で「生化学的」であるのに対し、毛やツメの毒物除去方法は単純で錯体の形成と元素の分配という化学的な方法を活用しているところに注目すべきであろう。

3・1・4 能動的防御 材料選択、受動的防御、さらに外敵や劣化因子の排除をしても材料を守ることが出来ない場合がある。その時、生物は「代謝」という活動を

図5 チミンダイマーの化学的補修系

通じて材料を防御する。それを本節では「能動的防御」と呼ぶが、その典型的な反応の一つとして DNA が紫外線で損傷してできるチミンダイマーの修復がある。図5の左は非哺乳動物に見られるチミンダイマーの補修系で、ダイマーという DNA 上のキズを太陽の光のエネルギーを直接的に使用してチミン間の架橋を開裂する反応であり、有機化学における記述では「選択的にチミン間架橋を切断する化学反応」と表現し得る。また、図5の右は酵素が欠陥部位の角度変化を検出して切断、補修する方法である。これも最終的には化学的な方法であるが、光を利用した補修よりかなり「生物寄り（酵素や情報の関与が多い）」であり、この方法を真似るには複雑な構造の酵素を合成したり、酵素が DNA の上を滑ってチミン間の架橋を検出するドライビング・フォースなど多くの知見と構造設計技術が必要となる。⁹⁾

生物の系統図上ではかなり離れている哺乳類（真核、多細胞）と原始的な大腸菌（原核、単細胞）でもチミンダイマーの補修系は主として5種類あり、単純な応答をする3つ（表Ⅲの上3行）の補修系と、進化との関係で応答的に補修する2つ（表Ⅲの下2行）の反応系が知られている。¹⁰⁾前者は固定的な修復で、DNA 損傷の起こる前から修復酵素が存在し、後者は損傷後に必要な量だけ酵素が発生することが知られている。¹¹⁾

一般に生物の防御系は DNA のような情報を有する反応システムであると考えられているが、進化の初期段階

表Ⅲ 大腸菌の DNA 修復機構

修復機構	可視光	準備のタイプ	修復できる損傷の種類			関与する遺伝子
			チミンダイマー	架橋構造	アルキル基	
光回復	必要	あらかじめ	+	-	-	phr
除去修復	不要	あらかじめ	+	-	-	uvrA, uvrB, uvrC, uvrD, polA, lig
組換え修復	不要	あらかじめ	+	+	+	recA, recB, recC, lig, recF, dna 遺伝子群
応答修復	不要	誘導	-	-	+	ada, alkA, alkB, aidB, polA, lig
SOS応答	不要	誘導	+	+	+	recA, lexA, SOS 遺伝子群

ホモ乳酸発酵

ヘテロ乳酸発酵

図6 原生の新陳代謝反応

に於ける初歩的な代謝によるエネルギーの獲得は硫化水素や水を直接分解して水素を作り出し、それを酸素で燃やしてエネルギーを採る方法であり、その後、より複雑な発酵へと進化したと考えられている。¹²⁾ 乳酸発酵の反応自体は必ずしも単純ではないが、図5に示すように、個々の反応自体にはなにも「生命的なもの」が含まれていないわけではなく、単純な化学反応である。

能動的防御系は見かけ上、生物活動そのもののように見える。エネルギーを要し、栄養をとり、排泄物を出す。しかし、そこには生命の息吹はない。DNAに書かれていた情報を取得して補修システムを構築するまではDNAの情報伝達という意味で生命的であるが、いったん構築されたシステム自体は生命的ではない点に注意する必要がある。

3・1・5 機能休止 機能休止による防御の典型例としてムササギの腕束や樹木の辺材・心材部の細胞を挙げることができる。ムササギの腕束には筋肉が備わっていて岩にとりつくときにはその筋肉が働いて海流で押し流されないようにする。しかし、常に筋肉を活動させているとエネルギーを消耗し、組織を劣化させることになるので、岩に取り付くと偽足内部から接着剤を放出して岩と偽足を接着し、その後は腕束の筋肉を休止させる。このときにムササギが使用する接着剤は極めて精緻な構造をしており、また接着のプロセスは、1) 偽足で岩の表目を清掃し、2) 偽足の先端で岩の窪みの空気を抜き去り、3) 粘度の低い泡状の接着剤を放出し、4) 後にそれを硬化し、5) 岩の成分が変動しても接着強度が低下しないように他種類の官能基を有する、という特徴を持つ。¹³⁾

また樹木については本節の最後に整理をするが、形成層で出来た細胞の内、樹木内部へ進んだ細胞は監視細胞を除きほとんどすべての細胞が死に絶える。これも「樹木を支える」という目的だけを考慮すると細胞は代謝をする必要はない。細胞は自ら液状の細胞質を除き、木質化して死に至る。組織的には監視細胞が外敵を排除するシステムを採用する。

生物の危険回避行動について元信州大学脳医学の大木博士は、「恐怖とは生存本能と結びついた最も根源的反応で、生きていく上で必要不可欠な感情。生物には種族維持の本能と生存本能があり、恐怖は生存本能が前提となって生まれてくるとしている。恐怖（危険情報）は、感覚神経から脳へ送られて即座に不快なストレスを感じ、危険回避行動は交感神経を通じて脳の活動を活性化させるとされる。その時必要なのが、脳内覚醒物質ノルアドレナリンである。」としている。アドレナリンを生み出すのは快感物質ドーパミンで、この快感物質から恐怖を生み出す機能は人間にしかない。恐いもの見たさとは、危機を乗り越えたときの達成感や陶酔にも似た安心感はドーパミンによるもので、満足感や幸福感を再び味わいたい為には人は恐怖に近づく。生理学研究者・八木健博士により、哺乳類の恐怖心を左右する Fyn（フィン）遺伝子の存在が明らかになっているが、¹⁴⁾ Fyn 遺伝子とは、偏

桃核や大脳皮質の神経細胞連結部分シナプスに多く存在し、細胞同志の情報伝達に重要な役割を果たす。好奇心が人独自の恐怖の制御メカニズムを作り上げてきた。「危険回避行動」も能動的防御と同じように見かけは「生物的」であるが、反応の無いような化学的、材料的であることに興味をひかれる。

より組織的な防御として、治療や心のケアなどがある。生物界での大規模補修ともいえるべき「治療」の典型的な例としてプラナリアの再生が挙げられる。プラナリアは扁形動物門渦虫綱三岐腸類の総称で進化の系統的には最初に出現した脳を持ち、三肺葉が分化した最初の動物であり、有性生殖もするし尾部が分裂して無性生殖も行う。

ここでプラナリアの再生機構について詳しく述べるのは避けるが、プラナリアの中央部を切断してもその場所に応じて盛んな組織再生が行なわれ、生存する。再生情報がどのようにしてシステム中に組み入れられているかはまだ不明であるが、大規模修復の好例である。¹⁵⁾

また「心のケア」は材料劣化を防ぐ大きなポイントであり、ストレスによる胃潰瘍などがその典型である。つまり神経などの制御のもとに材料やシステムの防御を行っている場合、制御機構そのものが不調の場合、構成材料にその影響が及ぶのは当然とも言えよう。人工的材料では生物のようにシステムが自動的に「制御機構の不調」についてケアして材料を守るという例はまだ知られていない。

3・2 伝統材料の意味づけと具体例

文明の持続性が深刻な問題になったのは300年ほど前から始まったヨーロッパの諸革命以降である。それまでの人類の文化は基本的には持続性があり、日本の伝統文化もその一つである。たとえば神社は日本文化の一面を集大成したものであり、その建築様式は現在でも受け継がれ、材料やシステム自体が環境との調和をなしている。

約40億年にわたる生物の進化の中で生物は生存方法ばかりではなく、それらの外形や使用する材料まで最適なものを選択してきた。例えば、図8の左に示す樹木は独立栄養であり、固い体を持ち、最低限のエネルギーで生存するように作られているが、図8の右、ほぼ自由に獲物を獲得する従属栄養のチーターは柔軟な細胞を持ち、内蔵も含めすべてが瞬間的に大きな出力を出せるようになっている。¹⁶⁾ このような大きな違いの中に潜む個々の情報に対する知見は今後、私たちが人工的な材料を作り出していくのに大きな力になるだろう。

図7 宮大工創作の民家（左）集大成の神社（右）

図8 独立栄養体（左）と従属栄養体（右）

4 Lifeless living materials

4・1 その概念

鉄鋼やプラスチックのように人工的に調整、もしくは合成された材料と、筋肉、樹木の辺材、ウィルスを構成する遺伝子のような生体材料は生命を有するか否かで決定的な差があると考えられている。また自動車や会社組織などとの人工的システムと人間、植物、単細胞生物のような生体システムもまた「命」の有無で超えがたい差を持つと認識されている。

それらに対して、生物や遺伝子の研究では酵素やDNAの機能を詳細に研究して生命の仕組みなどについての知見を得る活動をしているが、本研究は生命の対極となる人工的材料と人工的システムの研究によって従来「命」が関わると考えられている現象を生命とは無関係な情報系で調べ、人工的材料や機能の質的進歩の可能性を探ると共に、生命についての新しい知見を得ることも可能であろう。

4・2 情報伝達と処理

生命においてはDNAに読み出し専用情報 (ROM) が、脳を含む中枢神経系に読み書きしうる情報 (RAM) が蓄積され、それらの情報が適宜、たんぱく質に転写され、あるいは神経細胞によって伝達されている。一方、人工的な材料やシステムでは一部の例外的機器を除き“能動的 (active)”に活動するものは知られていない。しかし、両者に絶対的・質的な違いが存在するかは蓋然的に断定することはできない。すなわち図9に示したように生命情報はそれ自体が直接的に機能するのではなく、ある別の形に転写されて機能を発揮するからである。

生命体が有するDNAや脳情報の代わりに学術的・経験的信息を用いて情報が転写された材料または機能体を作れば、その材料や機能体は情報源から予め能動的に活動する仕組みが与えられていれば自的にその機能を発揮する可能性がある。

4・3 材料機能の種類と具体例

生体の材料組織や構成を真似た (mimic) 材料につい

図9 情報と転写

ての研究は既に行われており¹⁷⁾ここでは生体の機能情報を転写することに主眼を置いて研究している例を示す。現在研究を行っている機能は、1) 修復、2) 馴化、3) 呼吸、4) 運動、そして5) 複写であり、“運動”以外は石油から人工的に合成されたプラスチックを用いている。そのことによって情報の転写と能動的機能の関係を明確にすることを目的としている。

修復では polycarbonate (PC), polybutylene terephthalate (PBT), polyetherketone (PEK) などで修復が観測され、鉄鋼材料などでも自己修復の例がある。馴化では図10に示すようにPCに光を照射した時に主鎖の転位によって吸光係数が上がり、また内部へ進まない事が明らかになった。

呼吸については既に polyphenylene ether (PPE) で示しているが、酸素運搬と反応メカニズムにおいて生体との類似性が認められる¹⁸⁾

運動機能は現在、Kinesin (分子量38万のたんぱく質、生命はない) に認められている¹⁹⁾人工的材料については複写と共に研究中である。

5 環境と材料のまとめ

一般的に「環境」という用語は大気汚染や水質汚濁、廃棄物の蓄積、有害物質被害などの「狭義の環境」と「森林破壊、化石資源枯渇」などの資源枯渇との二つの異なった内容を持っている。環境を保全するというテーマはこの2つのどちらかを意味しているかで大きく異なる。すでに歴史的にはエネルギーが豊富にあれば物質資源の枯渇時期は遠くなり、エネルギーの枯渇の時期が早い場合は生産力が低下し、過渡的には環境悪化が起こるが、最終的には生産量の低下のために環境の悪化が起こ

図10 PCの馴化

図11 生体における酸素の運搬と反応

図12 人工材料における酸素の運搬と反応

らないと予想される。

すなわち、現代の環境問題は、1) エネルギー資源が豊富で、2) 生産量が増え、3) 生産量の増大に伴うひずみが解消されていない過渡的現象であることが判った。従って、環境と材料という課題を考える上での学問的課題は「資源の枯渇」であり、具体的には「化石資源に依存しないで構築される社会」を想定したものでなければならない。

これまで自然科学は社会的現象や人間の心理状態などとは一線を画してその研究を進めることができた。しかし環境問題そのものが社会現象の一つであり、それに自然科学が研究対象として認めることは自然ばかりではなく、人間社会を一つの自然現象として考えることを意味していると考えられる。アダム・スミスの「見えざる手」の成功と共産主義の失敗の歴史から、人間社会はこれまで「こうあるべき」という全体主義的な試みはいずれも失敗し、「個々人が世間体を考える程度の社会的意識を持ちながら個人が得をする」ことの集積が社会を成立させてきたことは明らかである。

資源の保全が日本一カ国の問題であれば、世間体を考慮した自己実現という「見えざる手」によって資源節約が現実的に行われる可能性がある。しかし地球上の資源は多くの国に分散しており、かつそれぞれの資源は種類によって偏在するという現実がある。また国際社会はまだ成熟しておらず、生活レベルを始め、一人当たりの資源の使用量はその国の力によって大きく異なる。人間社会はまだ、自らが属する民族や国家の利害によって多民族や他国を殺戮し軍事的に攻撃するレベルにある。

従って、自然科学的整理では現代の世界で資源の節約について統一的指導原理が誕生する可能性はきわめて薄

い。資源の枯渇が現実のものになって来た場合、世界は資源の確保のための軍事力の行使と自国の利害を優先する政策を選択すると考えるのが妥当である。従って、本講座の主たるテーマとして検討を重ねてきた「環境と材料」という課題自体が存在しないと結論できるだろう。

学問は新しい真実を見いだす努力であり、それは過去を否定するものでもある。また自らの職業や経歴を有利に保持しようとする活動でもない。真実を求める自然科学の伝統は、たとえ我々が材料を研究の対象とし、環境保全を題目に掲げようと、それが相互に矛盾して意味がないことも併せて述べなければならないのである。

学問の真髄は真実を明らかにすることだから。

本解説を執筆するに当たって名古屋大学 Nature-COE、高等研究院採択研究、および科学研究費（機能複合体の信頼性研究）の支援に深く感謝する。

参考文献

- 1) 内山洋司, 日本原子力学会誌, **45**, 481 (2003).
- 2) 武田邦彦, “21世紀の工業材料”, 超鉄鋼研究センター講演 (2003).
- 3) 神谷敏郎, “骨と骨組みのはなし” (2001) 岩波書店.
- 4) 八谷広志, 芝浦工業大学博士論文 (1999).
- 5) 西村栄美, 月刊メディカル・サイエンス・ダイジェスト, **28**, 565 (2002).
- 6) 榊原 宣, “胃がんと大腸がん” (1999) 岩波書店.
- 7) 並木英夫, 香月比呂子, 独立行政法人製品評価安全機構, 関東支部の研究.
- 8) 松崎 貴, “毛髪を科学する” (1998) 岩波書店.
- 9) 岡山繁樹, “生物科学入門”, p.64 (2001) 培風館.
- 10) 日本分子生物学会, “DNAの構造と動態”, p.31 (1989) 丸善.
- 11) 海老原熊雄, “DNA異変と修復” (1989) 丸善.
- 12) 江上不二夫, “岩波講座 現代化学 19 進化の化学” (1979) 岩波書店.
- 13) 武田邦彦, “有機材料” (1995) 芝浦工業大学.
- 14) 八木 健, 日産科学振興財団研究報告書, **19**, 143 (1996).
- 15) 岡田節人, “からだの設計図”, p.358 (1994) 岩波新書.
- 16) 武田邦彦, 応用科学学会誌, **16**, 2, 19 (2002).
- 17) 自己修復材料研究会, “ここまできた自己修復材料 (自己修復研究会編)” (2003) 工業調査会.
- 18) K.Takeda, M.Tanahashi and H.Unno, Science and Technology of Advanced Materials, **4**, 435 (2003).
- 19) M. Kawai, Invitation Lecture for the 21st Century COE Program, Nature-Guided Materials (2003).