

本田財団レポートNo.82

「生物は機械」

東京大学先端科学技術研究センター教授 藤 正 巖

講師略歴

藤 正 巖 (ふじまさ いわお)

東京大学先端科学技術研究センター 教授

■学 歴

1964年 東京大学医学部卒業
1970年 東京大学医学部医学博士

■略 歴

1965～74年 東京大学医学部医用電子研究施設助手
1975～87年 東京大学医学部医用電子研究施設助教授
1976～78年 国際応用システム解析研究所研究員
1980年～ 埼玉大学大学院政策科学研究科客員教授
1987～88年 東京大学先端科学技術研究センター助教授
1988年～ 東京大学先端科学技術研究センター教授
1989～93年 東京大学医学部医用電子研究施設教授(併任)

■出版物

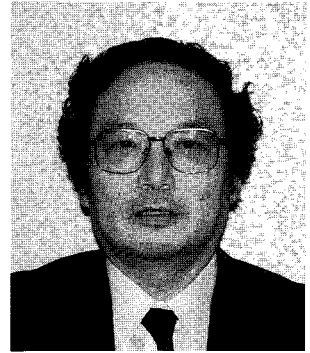
- 1) 藤正、渥美、大坪：「人工臓器工学」(講談社サイエンティフィク)
- 2) 藤正編：「生理機能画像診断サーモグラフィ」(秀潤社)
- 3) 藤正：「驚異の医療機械 マイクロマシン」(講談社 ブルーボックス)
- 4) 藤正、中島、井街、鎮西：「マイクロマシン開発ノートブック」(秀潤社)
- 5) 藤正：「見えない機械：細胞の構造とマイクロマシン」(オーム社)
- 6) Fujimasa：「Micromachines」 Oxford University Press, 1995

■研究分野

人工心臓
人工生体機構
マイクロマシン、ナノマシン
中間領域機械学
医用オプトエレクトロニクス
リモートセンシング
生理機能画像
熱画像検査
医療システム分析
マルチメディアの臨床応用
人工現実感の医用応用

このレポートは、平成7年9月25日パレスホテルにおいて行われた第71回本田財団懇談会の講演をまとめたものです。

生物は機械



東京大学先端科学技術研究センター

教授 藤 正 巖

生物とはどのような機械なのだろうか。ここでいう機械とは、人の作り得るものというほどの意味であって、生物を見て機械を作るとしたら、どのようなことが学べ、どのような設計論が登場するかを話すつもりだ。

1 生物が機械である証拠

あの極めて多様な形と大きさを持った多くの生物のどれをとってみても、そこには機械として示されるひとつのマクロな基本的な規則がある。

例えば、生物の重さを横軸に、生物の消費するエネルギー（基礎代謝量）を縦軸にとってみると、すべての生物、殊に動物は、ある比例関係を示す線上にきれいに並ぶことがわかる。象から細菌に至るまできれいにこの比例線上に乗る。

このことは、生命は同一の基本素子を組み上げて作られていることを推測させる。同じエネルギー消費を持ったある一定の大きさの素子を積み重ねて作るからこそ、大きくても小さくても、その消費するエネルギーは重さに比例してくる。この基本素子とは細胞である。しかも、細胞の中に生命の基本構造があることはまず確かなようだ。

一方、このようなあらゆる生物を機械、少なくとも運動する機械（動機械）として眺めてみると、ここにも大きさによる一定の関係が現れてくる。少なくとも、飛ぶ鳥を除いた地上や水中にいる生物は、その基本的な移動速度と体重に比例関係があると言われている。飛ぶ鳥をとりあげても、他の動物とは大幅にその関係は離れてはいるものの、鳥だけなら比例関係が成り立っている。体重と移動速度の間に比例関係が成り立つのは、体重当りに付けられたエンジンが基本的には同じ仕組みになっているからだとも推測できる。すなわち、エンジンも基本的に同じ小さな素子の集積体からできていそうだという考えだ。また、そのエネルギーの変換の方式も、共通した細胞の構造に依存していることが推測される。

しかし、移動するために要するエネルギーを基礎代謝率で割ったもの、すなわち、生物がその基本的に生きるために必要なエネルギーで、移動のために使われ

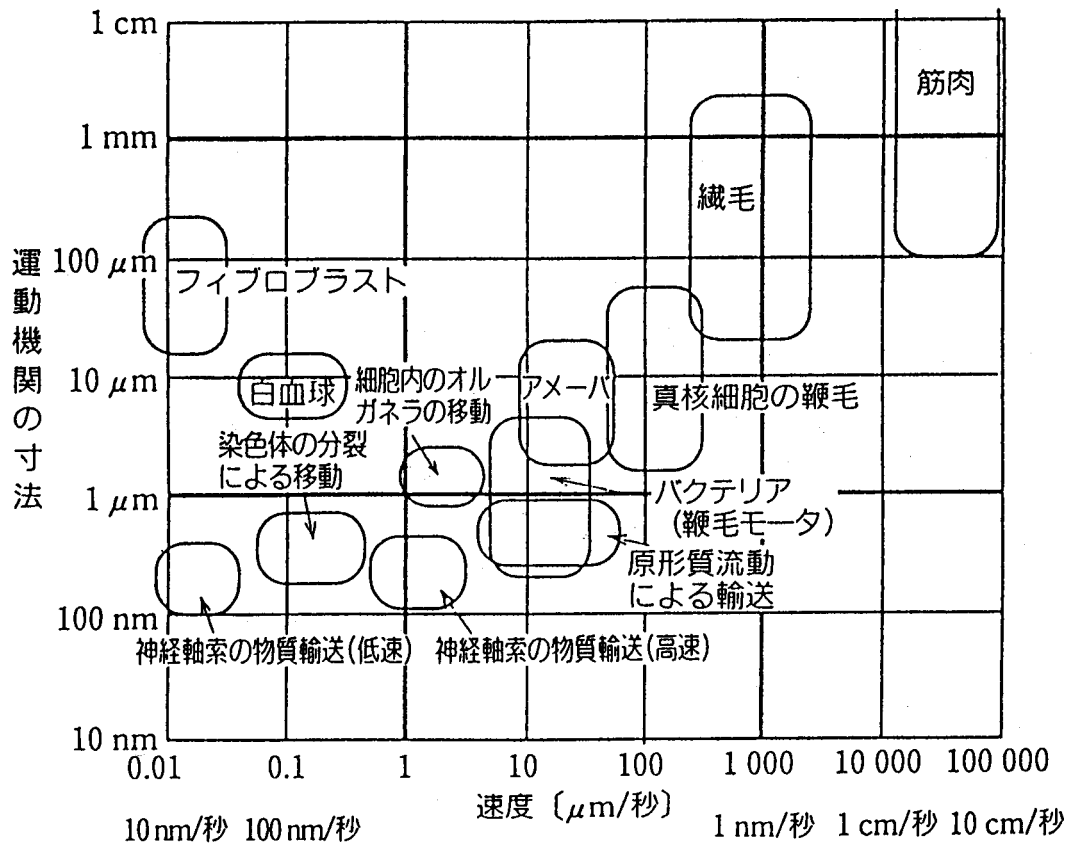


図1 生物機械の大きさと運動速度

るエネルギーを割った値と体重を比べてみると、地上の恒温動物では比例関係は成り立たない。速度と体重が比例関係にあるのなら、水中に住む多くの生物のように、基礎代謝と移動に要するエネルギーが常に一定の割合で、体重が重くなっても、軽くなっても変化をしない筈だ。しかし、陸上に住む高等動物は、丁度、車にスポーツタイプとそうでないものがあるように、速く走るためにはエネルギーを余計に使うような仕組みになっていて、大型動物になるほど移動のときに多くのエネルギーを使う仕組みになっている。すなわち、良い大馬力のエンジンの付いた大型車ということになる。

1-1 生物の持つエンジン

では、このような特性を持つ生物に、どのようなエンジンが付いているというのだろうか。

よく調べてみると、生物の移動や運動のためのエンジンはおよそ4種類に大別されることがわかる。その最も小さなものは細菌(原核細胞生物)の鞭毛である。我々人間と同類の構造の細胞を持った生物(真核細胞生物)では、精子のような単細胞生物が泳ぐための鞭毛、もう少し大きな生物が使う繊維毛、最も大きな動物まで使っている筋肉の3種類だ。4種類のエンジンは、それぞれ異なった原理によって動くエンジンのように見えるが、基本構造にまで分解して眺めてみると、

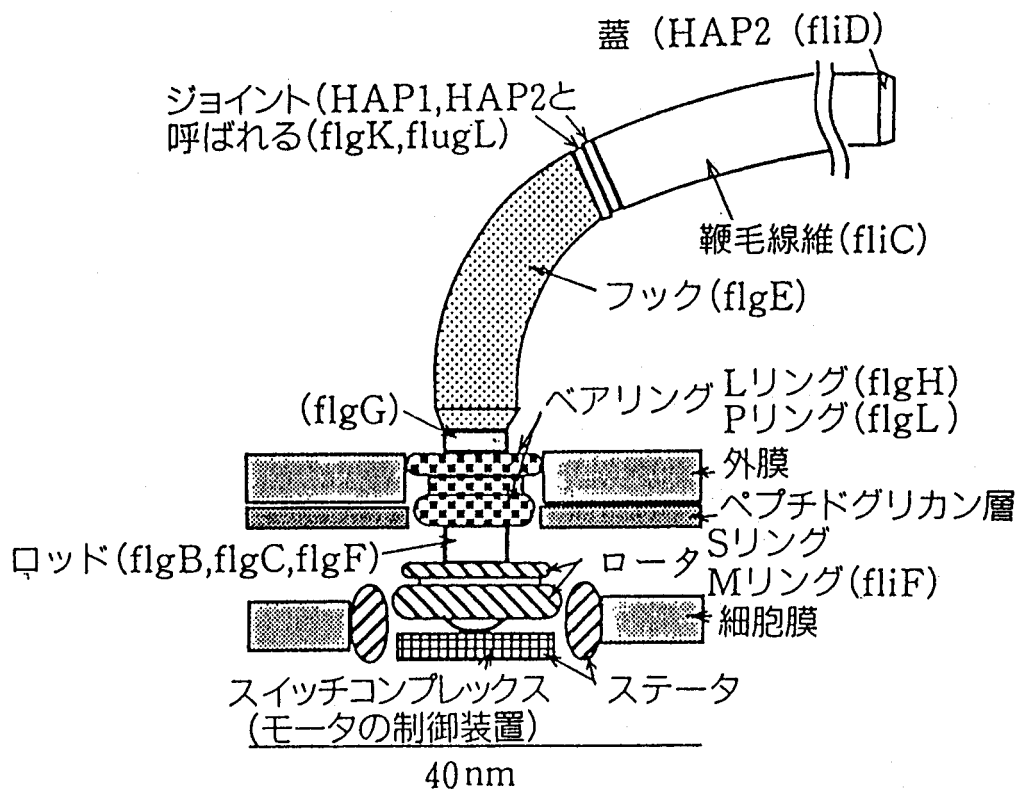


図2 細菌の細胞膜の外側に付いている鞭毛モータの構造

エネルギー変換をする基本体は、その中に入っている部品、すなわち、エンジンでのピストンとそのピストンの動力を伝える各種のクランクやシャフトに当る部品は、細菌の鞭毛を除いてはほとんど同じ構造をしていることがわかる。この構造の中に動機械としての生物の基本原理がある。もう少し詳しくみてみることにしよう。

1-2 細菌のエンジン

細菌は、体の中が液体でできている。多くの機能タンパク質は、水溶液として細胞膜に取り囲まれた中に存在している。細菌は強い外壁で覆われ、その中には構造が無いに等しい。このような細胞は、極めて原始的な生命体で、原核細胞と呼ばれている。この細胞の外壁に幾つかのモータの付いた鞭毛がみられ、このモータ付きの鞭毛が細菌の移動の原動力となっている。モータのロータの直径は僅か25nm。何しろ細菌の大きさは1 μm しかないのだから、その動力装置のモータが小さいのは頷けるところだ。この小さなモータは、20 μm にも達する長い鞭毛を毎分約15,000回転し、数本の鞭毛を束にして移動に使っている。動力源は、水素のイオンであるプロトンで、細菌は、プロトンの濃度差をエネルギー源に使って移動をしている。しかし、そのプロトンがどのような働きをしてこのモータを廻すかはわかっていない。電子顕微鏡の進歩によって、そのモータが幾種かのタ

ンパクから成り立ち、われわれの作ったモータと構造がおそろしく酷似しているといったことがわかってきた。モータの回転する側のロータは、人の作ったモータとそっくりの構造をしていて、細胞の内壁の後にステータに当る駆動装置が付いている筈だが、この部分は未だによくその構造がわかっていない。研究者たちは、小さな物体にこのようなモータを取り付ける研究を始めている。

さて、細菌くらいの大きさになると、30万倍で細菌の本体がA4の紙一枚に書き表される程度の大きさになるが、この寸法ではタンパク分子も人が書き表せる程度の大きさとなり、細胞内の断面図に入っている分子のすべてを書き込むことができることになる。細菌がタンパク質によって埋め尽くされている有様を描いた本が登場するのも当然だろう。題名は“生命の機構”と書いてある。まさに細菌を機械とみなした本の登場だ。

1-3 真核細胞生物のエンジン

しかし、細菌の鞭毛モータは、他のもっと高等な動物のモータとはならなかった。細胞に構造を持った生物、すなわち、真核細胞と呼ばれる生物の運動機構にその代わりに登場したのは、まったく異なった機構だった。

真核細胞の鞭毛や繊毛は、横断面や縦断面をとってみると、その中に何本かの微小管（チューブリン）と呼ばれる2種類の素タンパクの組み合わせで作られた外径25nm程度の中空のパイプが存在することがわかる。このような細胞内の骨組みの類を細胞骨格と呼んでいる。細胞の形を保つための梁の構造をしているからこのような呼び名が付いたのだろう。細胞骨格の間隔は、およそ100nm以下で、この骨格の間に無数の橋が掛かっているように見える。この橋の構造をよくみると、そのある橋の片側の端は付着端となっていて、もうひとつの端は、2個の頭を持った形のタンパクが取り付けられている。このようなタンパク質をモータタンパクと呼び、鞭毛や繊毛に使われているモータタンパクはダイニンと呼ばれている。長さがおおよそ100nmの分子量数10万のタンパクだ。この構造は、筋肉にも踏襲されている。筋肉は、もっと整った構造をしており、モータタンパクの束と細胞骨格の紐が丁度6角柱の組み合わせさせた結晶構造となっている。筋肉では、このモータタンパクはミオシンと呼ばれ、ミオシンの尾部は束となって纏められ、頭部は一定の間隔で螺旋構造のピッチをもった配列で並んでいる。このモータタンパクが鉛筆の芯と見立てると、その6角柱の角にアクチンと呼ばれる細胞骨格がある。球型のアクチンという意味でGアクチンと名付けられたアクチンの素分子を多数繋げた線維があり、これも螺旋構造をしていて、一定のピッチでその螺旋の長さが決められている。細胞骨格のアクチンの細い線維と、太いモータタンパク線維のミオシンを組にして全長2.5 μ mほどの1素子が出来上がる。繊毛や鞭毛は、チューブリンの細胞骨格におよそ一定間隔でモータタンパクが取り付けられている構造をしているが、筋肉では、モータタンパク自体が集合体となって細胞骨格を移動させるよう作られている。どのモータタンパクも、よく見ると頭

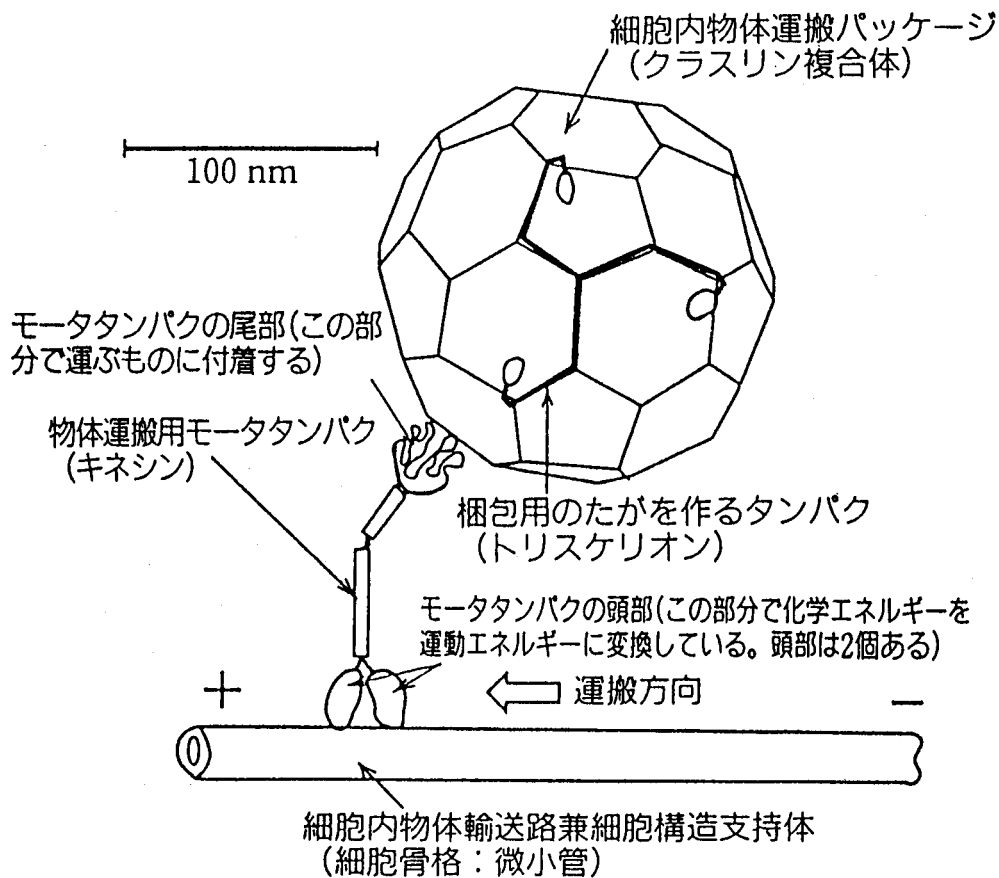


図3 細胞内で働く機械部品モータタンパクと細胞骨格の動作予想図

が2個あり、細胞骨格との間で相互作用をしてモータタンパクの固定端との間で細胞骨格の移動を生じるように作られている。

細胞の構造をもっと注意深く観察してみると、細胞の中には多数の入り組んだ細胞骨格と多数のモータタンパクが存在していることがわかる。しかも、モータタンパクは、ひとつひとつが物質の運搬機構であって、物質を組み立てるための加工用のプローブの役目もしていることもわかる。真核細胞は細胞骨格とモータタンパクで満ちている。主要な細胞骨格として、鞭毛を動かすために使われる微小管、筋肉のためのアクチン、そして、中間径線維、といった3種類の細胞骨格が知られている。

細胞を急速凍結して、タンパク以外をエッチングによって除き、金属蒸着して電子顕微鏡によって眺めると、ある種のタンパクが細胞骨格のタンパクとの間に橋を作っている。橋はモータタンパクや、同じような頭部を持った各種の類似タンパクだ。よくみると、細胞の中では、物質の運搬に梱包されたパッケージが使われていることもわかる。梱包されたパッケージの梱包に使われている材料も、あるものはクラスリンと呼ばれる3つの腕を持ち、先にモータタンパクの頭のような部位を持ったバスケットを作るタンパクでできていることがわかる。クラスリンは細胞の内貼り材料で、5角型や6角形をしていて、外部物質が細胞内に取り込まれるときには(エンドサイトーシス)これによって梱包されるため、作ら

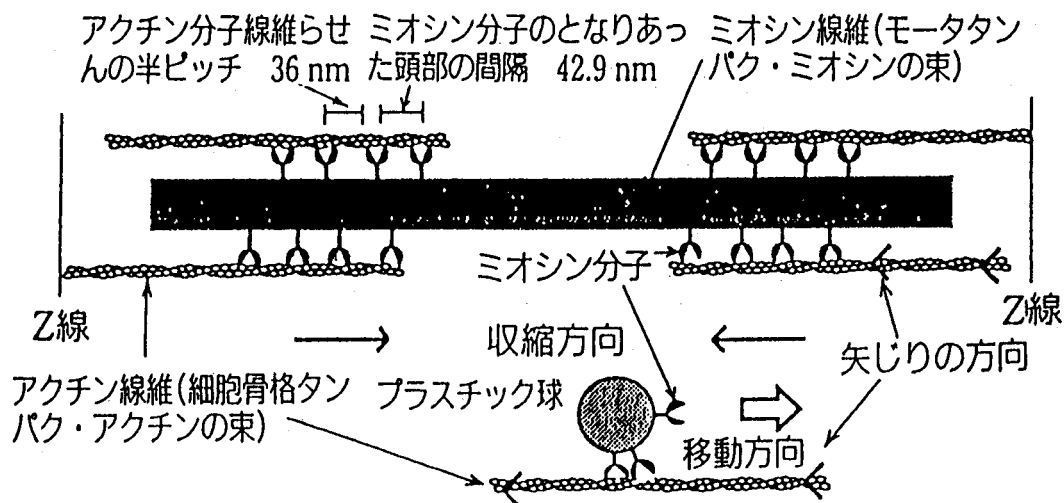


図4 横紋筋の収縮基本素子アクチン・ミオシン複合体の収縮時の相互滑りの方向

れた梱包体はサッカーボール状になり、丁度、炭素で作られたフラーレンのような構造をしている。このような梱包された物質は、モータタンパクが尾部によって付着しているのが見られ、そのモータタンパクは頭部で細胞骨格の上に乗れ、パッケージを運んでゆく様がありありとみられる。細胞の中に、人工の外径100 nm程度のビーズを入れると、同じようにモータタンパクが尾部で付着し、頭部で細胞骨格の上を移動させるのが観測される。細胞の核の方から外膜の方向へと細胞骨格に載って細胞内物質を運ぶモータタンパクは主としてキネシンで、逆方向への運搬はダイニンとキネシンが働いていると言われている。ミオシンはもっぱら、筋肉のような収縮体の運動を司どっている。ここで使われるエネルギーはATPだが、そのATPがどのようにして使われて運動を生じているかは未だにはっきりとはわかっていない。

1-4 エンジンとしての筋肉

われわれ高等動物にとって最も重要なエンジンである筋肉の構造をもう少しみてみることにしよう。筋肉は、ミオシンの線維とアクチンの線維で組み立てられた $2.5\mu\text{m}$ の長さの基本素子によってできていることは述べた。この基本素子が大量に組み付けられて数10億個組み上げられたものが人間の筋肉となっている。この部品は、体の外に取りだして単体として実験をすることもできる。例えば、アクチンの線維を細胞から取り出し、プレパラートの上に置き、小さなビーズ球にミオシンの線維を尾部で付着させたものを用意する。モータタンパクのついたビーズには蛍光色素を付けておき、このビーズをうまくアクチン線維に接触させ、その水溶液の中にATPを落としてやると、このビーズは、必ず線維の一方方向に移動を始める。生体の細胞の外に取りだされたこのような部品が、きちんと一定条件の下で動くということがわかるからには、何らかの動機構とその運動の原

理があるに違いない。現在のところ、筋肉のゆっくりとした動きや力を発生する仕組みは、化学反応で一応の説明はついている。しかし、大量に組み付けられたモータータンパクと細胞骨格の集合体が高速で一斉に位相を揃えて動くのはどうしてだろうか。色々な説明がされているが、未だにその仕組みはわかってはいない。

さらに困るのは、高速の運動をする筋肉では、入れられたエネルギーと出てきた仕事の量を測ってみると、その間にほとんど差が無い。いわゆる仕事をするときに常に増大するエントロピーが、ここでは0か負になる可能性があるのだ。したがって、今では多くの研究者が、生体は筋肉収縮の際に ATP 以外のエネルギーを使う仕組みがあるに違いないと考えている。このようにして生物を動く機械としてみるにより、一体そのエンジンの仕組みはどのように設計されているのかが大きな興味の対象となる。

2 生物はどのような手順で機械となったか

生物がどのようにして発生し、どのように進化を遂げてきたかについては、今でも謎の部分が多い。ましてや、生物が動機械になったとされる時点を探ろうというのは容易なことではない。しかし、われわれが生物のような原理で動く機械を作ろうとするときには、どのようにして生物がそのような技術を獲得してきたかを分析してみる必要もあるだろう。したがってここでは、生物がどのように進化をし、それが機械になってきたのか、機械学者の目で眺めてみることにしよう。

2-1 1000種の始原タンパク

生物は、地球の45億年の歴史のうち、35億年より前の時代にすでに存在していたと考えられる。この地上で見つかる最古の生命の痕跡は35億年前の時点だからだ。35億年前の生物というのは、単細胞のもので、おそらく原始的な生命だっただろう。しかし、われわれが知る限りでは、その時点ですでにおよそ1000種のタンパクがあり、その1000種のタンパクはすでにエンジンに火が入っていたと考えられている。タンパクはそれ以後、原種としては増えることがなく、生物は、その構造を変えることや組み合わせることで姑息に機械を作ってきたと考えられている。

生物を作り出した最初の仕組みは、おそらく ATP と呼ばれる今日生物がエネルギー源として使っているエネルギー単位と類似なものを改造して作ったに違いない。ATP は 5 炭糖と呼ばれる糖と、塩基と呼ばれる 5 角環や 6 角環の組み合わせだった窒素の入った化合物と、高エネルギーを持つリン酸 3 個がつながってできている。生物の設計図の DNA が核酸と 4 種の塩基の結合で出来上がっているのを見ると納得がゆくだろう。一方、すべての真核細胞の仲間も、この ATP の高エネルギーリン酸結合をエネルギーに使っている。その意味では、ATP は生物にとって一種のガソリンともいえるだろう。

地球ができ、海ができ、海水温が下がったときにすでに、ATP 類似の物体は

自然に化合物として海水中に存在したと言われている。生物はどのようにして今まで生きてこられたのだろうか。どのようにしてエネルギーを使い、どのように環境の変化を起こしてきたのかをみれば、今の生物が生きている理由もわかる。

2-2 酸素利用生物の誕生

地球ができ、その後の30数億年の間は、この地球上には単離した酸素ガスは少ししかなかった。最初の生物は、海水中の ATP をエネルギーとして使っていたと言われている。ATP を体に取り込み、ATP 加水分解酵素によってリン酸を外し、その高エネルギーのリン酸を使って生きていた。加水分解の結果、水素イオンが海水中に放出された。極めて長い年月の間に、これらの生物によってでも、海水は次第に酸性化を始め、強い酸性の海水を生みだし、生物の生存を難しくしていった。生物の内部環境を pH 7 程度に保つためには、どうしても自分の体の中から外へ水素イオンを排出しなければならない。この排出のためのエネルギー源に、食物としての ATP を使ったのでは大変だ。そこで、10数億年前に、電子伝達系によって ATP を使わずに水素イオンを外に排出する系が作られ始めた。それはやがて、酸素を使って ADP から ATP を作り、炭素を同化するいわゆる炭酸同化作用を持つ葉緑体を生むこととなった。酸素呼吸が始まったのは、炭酸同化作用が始まった後の、今から10数億年前で、それを境にし、大気中には酸素が大量に発生したことによっている。今から 7、8 億年前の時点に、現在と同じ20%ほどの酸素濃度になったといわれている。こうして現在の動物が生存する条件が整っていったわけだ。

2-3 生物の設計図の発生

もう一度、生命の発生のときに遡ってみよう。ATP 類似体から最初にできたのは、DNA や RNA と呼ばれる生物の設計図にあたる道具だった。現在でもウイルスは、この設計図を持ち、それだけで生命類似体として細胞内で生存している。この DNA の中にある4種類の核酸の塩基は、ATP の近似構造をしていて、5炭糖とアデニンなどの塩基を持っている。多分、生物は、ATP やその類似体から遺伝のコードを作り、そのコードが一人歩きして、いつの間にか生命を形作っていったのだろう。今日でも DNA とその転写酵素といわれるポリメラーゼを用意すると、試験管の中できちんと DNA のコピーを作ることができる。この段階は正に、機械的な設計書と自動合成装置が存在することを意味する。

このようにして生物は、設計図である DNA とそのコードによって、自然の中におそらく存在したと思われるアミノ酸からタンパクを作ることに成功した。生体の構成成分のうち、水以外の7割以上はタンパクで、タンパクは生物を構成する構造であり、機構部品となっている。さらに生物を生物らしくしたのは、膜の存在だろう。膜は、脂肪酸と呼ばれる水に不溶性の長い炭素の鎖と、水によく溶ける性質を持つ水酸基を持つ部分によってできていて、この分子が大量に使われた

石炭膜のような構造をしている。この膜構造の外と内側にタンパクの部品を巧く組合わせて生命ができあがっている。

2-4 進化の機械論

生物が機械であるのならば、神の意思とは関係なく、自動的に物が作られることを立証しなければならない。進化の機構がダーウィンによって明らかにされ、適者生存の進化論が登場したのは、ルネッサンスの後だった。その進化論は、世の中に大きな影響を与えたが、突然変異によってある優秀な形質ができ、それが後世に伝えられるという、適者生存という考えを生んだ。しかし、この仕組みは機械的進化論には向いていなかった。それは突然変異で進化がおこる確率が極めて低いと考えられたこと、進化には見えない方向性があることを確信せねばならなかったからだ。突然変異によってできる優秀な遺伝子の変化、これに真っ向から衝突したのが、国立遺伝研の木村資生だった。意味のないランダムな突然変異の積み重ねから進化が生ずるという中立進化説を称えた彼の進化論からは、分子進化学を生じ、それは、正に機械としての進化の仕組みを解き明かすものとなった。

分子進化論は、分子時計という時計機構を考えだすに至っている。これは、すべての生物の遺伝子を調べてみると、その遺伝子には配列に一定の規則がある、というもので、生物の遺伝子のうち、生命の維持に欠かすことのできないタンパクの分子時計は、多少構造が変わっても生き残ることのできるタンパクの分子時計より突然変異の生ずる時間の進み方が遅いということだ。さらに、もうひとつ重要なことは、生命と直結する分子構造の部分のアミノ酸は、どの生物でも変化が起こらず、すなわち進化が起こっていないことがわかっていることだ。例えば、酸素運搬をするためのヘムタンパクの酸素結合部位の鉄と結合するヒスチジンと呼ばれるアミノ酸は、どの種でも同じところに位置していて、これは決して変ることのない構造をしている。

これに対して、生命と直結していない遺伝子の部位は、著しく進化が速いことがわかっている。すなわち、生命と関係が無いから、いくらその部位を変えた生物が登場しても生き残ることができる、という仕組みだ。そして、この意味の無い変化を起こすDNAの変化の生起確率はかなり大きな値をとることが分かり始めた。このようにして次々と進化した新しいタンパクが生じてきて新しい種が登場した、という発想だ。このことは逆に、進化の速度を人間が自由に変え得ることも意味している。機械として生物の設計図の仕組みをみれば、われわれは、機械として新しい種さえ作ることができるかもしれないのだ。このようにして、進化論すらも機械論にくみするようになった。

3 生物機械はどのように組み立てられたか

3-1 真核細胞の機械構造の形成

複雑なタンパク複合体が1000種のタンパクの母体を使って次々と組み立てられ

てきた。やがて、酸素呼吸が始る頃になると、細胞は、現在の細胞にみられるような複雑な構造をした細胞体となっていた。この複雑な構造の細胞体は、さらに種々の細菌や藻類といった単細胞生物を寄生させることによって、より複雑な機能の中に含むことができるようになった。例えば、ミトコンドリアは、有酸素呼吸をする細菌が寄生したものだといわれている。葉緑体は、藍藻類のような光合成能力を持つ藻類の単細胞が寄生したものだといわれている。スピロヘータは、鞭毛の尾となって寄生を果し、その他にも重要な構造体が細胞に寄生することによって細胞をより高次の機能を持つものへと変えていった。その証拠には、それらの寄生した物体には、その被寄生生物の遺伝子とは別に、その部品独自の遺伝子を持っていることがわかっているからだ。

一つの細胞を分化させ複合して生物を新しく作りだすことが起こったのは、今から約5－6億年前の頃のことだった。すべての部品が整って生物を作った最初が多細胞生物は、デザインに大きな自由度を持っていた。今まで知られてきたように、最初はより下等な生物から高等な生物へと次第に進化が起こっていったと考える一種の定向進化説は、機械を作るわれわれにとっては、神の意思がそのなかに入り得るという意味で、困難な課題を含んでいた。しかし、それも、1970年の後半から登場した新しい進化論によって、機械論的な形態の進化の説明が可能となった。

3-2 多細胞生物の構造の形成

一般産業では、新しい機械の概念が登場し、何の拘束も無く機械を設計することができるときには、非常に多種の構造を持った機械ができるものだ。例えば、私が研究してきた人工心臓でも、開発を始められた最初の10年ほどの間に100近くのアイデアが生まれた。そして、そのなかから今日まで残ったものは僅か数種しかない。それと同じことが、新しい生存空間を得て、その中でまったく自由に設計した生きられた時代の最初が多細胞生物たちにも起こった。前カンブリア紀の生物の種の大爆発と呼ばれる現象が正にそれだ。

今から1世紀前に、カナダのブリティッシュ・コロンビア州のロッキー山脈にあるパージェス頁岩で大量の化石が採取された。この化石は、そのほとんどがドゥリトル・ウォルコックという初代のスミソニアン博物館の館長によってスミソニアン博物館に運び込まれた。そして、これらの化石群は、小学校しか出ていないながら希代の古生物学者だったウォルコックによってカンブリア期の生物の固有種である三葉虫、すなわち節足動物の仲間として全部分類された。このことは長い間何の疑いも抱かせなかった。しかし、1970年代の後半から80年代にかけて、この大量の化石をもう一度細かく分析したイギリスのケンブリッジのH. ウィッティントンら二人の学者は、この化石中に極めて多数の新しい動物門が含まれていることを発見した。この多種の多細胞生物の発生のことを前カンブリア紀の生物種の爆発と言っている。彼らは、化石を表面から順番に剥いで、その構造

を立体的に構成していったのだが、そこに姿を表わした生物たちは、途轍もない生物たちだった。現在ある動物の門のどこにも入らない生物が続出したのである。最初に彼らが再構成したのは、マルレラと呼ばれるそれでも節足動物の仲間に入れてもよさそうな形の生物だった。しかし、その次から登場した生物は、どれも今われわれが知っている生物とは大きく掛け離れた構造をしていた。オパビニアと呼ばれる生物は、5つの目を持ち、手足がまったく無く、鰭のような形の足で水の中を泳いでいた。オドントグリフィスと呼ばれるまったく扁平で何の付属の手足も持たない生物の化石もあった。多数の口ととがった足のような構造をした細長い生物は、余りにもその格好が奇怪なことから、妄想を起こす生物という意味でハルキゲニアと呼ばれた。そして、この時代の最大の生物といわれる数10cmの長さがあるアノマロカリスは、節足動物と多少の近似性はあるものの、鉄のような爪をもった強大な怪獣だった。

勿論、このなかにはわれわれの祖先である脊椎動物の前身の脊索動物も、軟体動物と節足動物の合の子も存在し、とても今では考えられない動物門の組み合わせの生物が発見された。進化学者のS. J. グールドはこれを使って、進化は、ほとんどの生物の種が絶滅する大事変を契機として、生き残ったものが新しい天地(ニッチェ)を求めて進化を遂げるという、断続平衡進化説をとらえ、悲運多数死と呼ばれる現象によって種の進化が起こると定義付けた。形態の進化論ですら機械論によって説明できる時代になったといえよう。

4 生物機械の設計論と人間

4-1 文明の遺伝子：ミーム

このように調べてみると、生物の機械としての性質には遺伝子が非常に大きな役割を果していることがわかる。地球上の生物は、すべて4種類の核酸の塩基で書き表されたコードを持っている。現在の人間は、30億塩基対の設計コードを持っている。無論、動物のなかでは最も長い設計コードを持った種だ。しかし、相当下等な生物でもすでに、今の生物は非常に長い塩基対を持っていて、そのうちのごく僅か一部を使っている。この設計のコードの塩基対の数を、今、人間が作りだした情報量と比較してみると面白い。米国国立国会図書館の蔵書数による情報量は、すでにこの設計の塩基対の情報量を越えてしまっているといわれている。リチャード・ドーキンスは、文明は人間の作った一種の遺伝コードとも見做せると言い、その遺伝の単位をミームと呼んでいるが、われわれの文明は後世に伝えられ、それを利用して新しい情報が発生するのだから、一種の遺伝子の形態をとっているといえなくもない。

4-2 人工生命

このように、人の持つ情報を使って、人工物を自動的に作ることができる時代が、少なくともコンピュータの中では登場し始めた。いわゆるコンピュータウイ

ルス登場した背景にはそのようなものがある。コンピュータの中では、生命体類似の形態ができることから、人工生命の研究が始った。これは、われわれに、新しい機械を作る、いわゆるオートアSEMBルの道具を提供してくれるだろう。一方、生物系の方でも、機械論的な考えが生物の設計の仕組や形態形成の仕組に反映されてゆくようになった。細胞が死に致るのは、予めプログラミングされているからだとの考えから定義されたアポトーシスという概念は、細胞死のプログラムの遺伝子の発見につながったが、これもそのような背景があつてのことだ。今までわれわれは、すべての遺伝子は物を作るためにあるのであつて、物を壊すためにあるのではないと信じていたところがある。しかし、壊す遺伝子がないと生物は任意の形を作りだすことはできない。そのための遺伝子こそがアポトーシスの遺伝子で、ニワトリに水かきが無く、アヒルには水かきがあるのは、アポトーシスが、アヒルの水かきでは働かず、ニワトリの水かきでは働いて細胞を死なせた結果、それぞれのような形を形作ったのだと考えられる。アポトーシス機能を突然変異で失った遺伝子が発癌の遺伝子となるはずだという考えも登場した。われわれの作る機械の設計図にも、いわゆる予定された死の設計コードを加えなければならないと言われている。

おわりに：生物機械の力学

機械の設計には、その背景に潜む力学的な設計論が必要となる。どうやら、この力学的な設計論にも生物機械には独特の理論があるらしい。例えばそれは、生物機械が働いている力学環境系を考えてみればすぐにわかることだ。まず第一に、生物の機械が働いている環境場は、生物の素子が、極めて熱による分子運動の影響力が大きい寸法にあるということだ。熱の擾乱に晒された分子機械は、どのような働きをするかまだ十分にはわかっていない。したがって、その結果起る生物の動作の曖昧さは、タンパク機械の存在する熱雑音場の性質を反映している。生物のエネルギー切符ATP 1分子が持つエネルギーのスケールがせいぜい熱雑音の数倍でしかないことなど考えに入れれば、生物の機械には従来の古典的なニュートンの力学系から派生した新しい力学の法則が必要だと思われることになる。

よく考えてみれば、われわれが作った機械は、大きさが $10\mu\text{m}$ より大きいものか、数nmより小さいクラスターの世界しか無かつたと言えよう。その意味では、生物の機械のエネルギー変換素子が入っているこの領域全部が、その $10\mu\text{m}$ から数nmの間にあり、この領域では、力学的設計論は新しく作りあげなければならないと言えよう。

現在、このような領域のことを中間領域と言う。したがって、生物が機械であると認識するならば、そして、その設計論を生物から学ぶには、中間領域の機械学をこれから起こさなければいけないことになると思われる。次の時代を支える新しい機械工学の世界としてわれわれの注目すべき領域のひとつと言えよう。

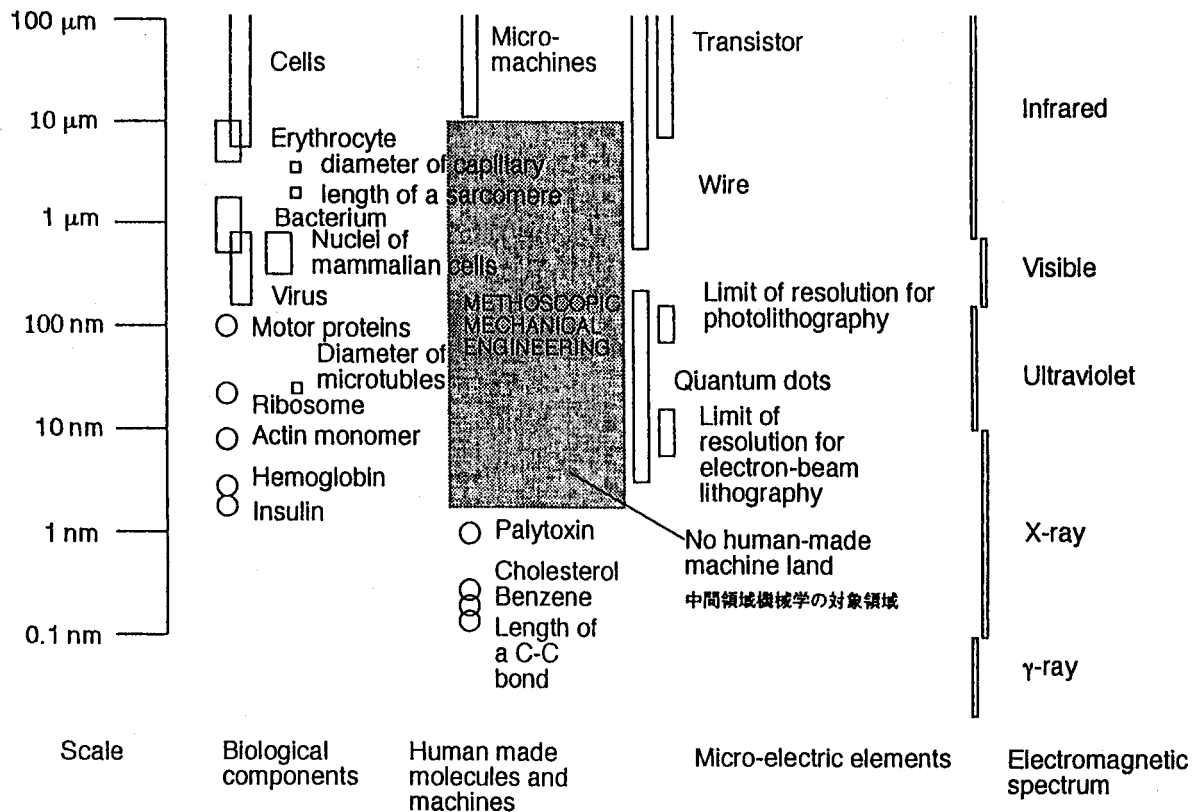


図5 中間領域機械学(mesosopic mechanical engineering)の発生

本田財団レポート

| | | | | | |
|-------|---|--------|-------|---|--------|
| No.1 | 「ディスカバリーズ国際シンポジウム ローマ1977」の報告 電気通信大学教授 合田周平 | 昭53.5 | No.43 | ベルギー「フランドル行政府産業使節団」講演会 | 昭59.7 |
| No.2 | 異文化間のコミュニケーションの問題をめぐって 東京大学教授 公文俊平 | 昭53.6 | No.44 | 「新しい情報秩序を求めて」 電気通信大学教授 小菅敏夫 | 昭59.7 |
| No.3 | 生産の時代から交流の時代へ 東京大学教授 木村尚三郎 | 昭53.8 | No.45 | 「アラブの行動原理」 国立民族学博物館教授 片倉ともこ | 昭59.10 |
| No.4 | 語り言葉としての日本語 劇団四季主宰 浅利慶太 | 昭53.10 | No.46 | 「21世紀のエネルギーを考える」 イタリア国立エネルギー研究機関総裁 ウンベルト・コロombo | 昭60.1 |
| No.5 | コミュニケーション技術の未来 電気通信科学財団理事長 白根禮吉 | 昭54.3 | No.47 | 「光のデザイン」 石井デザイン事務所 石井幹子 | 昭60.7 |
| No.6 | 「ディスカバリーズ国際シンポジウム パリ1978」の報告 電気通信大学教授 合田周平 | 昭54.4 | No.48 | 「21世紀技術社会の展望」 第43回日経ハイテクセミナー | 昭61.1 |
| No.7 | 科学は進歩するのかわる化するのかわる 東京大学助教授 村上陽一郎 | 昭54.4 | No.49 | 「星をつぶす法」 文部省宇宙科学研究所長 小田 稔 | 昭61.5 |
| No.8 | ヨーロッパから見た日本 NHK解説委員室主幹 山室英男 | 昭54.5 | No.50 | 「ひまわりVA太陽光は人間の生活にどう役立つか」 慶応義塾大学教授 森 敬 | 昭61.5 |
| No.9 | 最近の国際政治における問題について 京都大学教授 高坂正堯 | 昭54.6 | No.51 | 「エコ・テクノロジーの宇宙的観察」 コーネル大学天文学および宇宙科学教授 カール・セーガン | 昭62.2 |
| No.10 | 分散型システムについて 東京大学教授 石井威望 | 昭54.9 | No.52 | 「人間はどこまで機械か」 東京大学教授 古川俊之 | 昭62.2 |
| No.11 | 「ディスカバリーズ国際シンポジウム ストックホルム1979」の報告 電気通信大学教授 合田周平 | 昭54.11 | No.53 | 「中国人とどのようにおつきあいすべきか」 東京外国語大学教授 中嶋嶺雄 | 昭62.2 |
| No.12 | 公共政策形成の問題点 埼玉大学教授 吉村 融 | 昭55.1 | No.54 | 「舞台の奥のヨーロッパと日本」 演出家 寺崎裕則 | 昭62.5 |
| No.13 | 医学と工学の対話 東京大学教授 渥美和彦 | 昭55.1 | No.55 | 「日米関係の現状と展望」 経団連特別顧問 大河原良雄 | 昭62.5 |
| No.14 | 心の問題と工学 東京工業大学教授 寺野寿郎 | 昭55.2 | No.56 | 「私の半導体研究」 東北大学教授 西澤潤一 | 昭63.1 |
| No.15 | 最近の国際情勢から NHK解説委員室主幹 山室英男 | 昭55.4 | No.57 | 「生物学者の科学的責任」 コレージュ・ド・フランス名誉教授 ジャン・ドーセ | 昭63.4 |
| No.16 | コミュニケーション技術とその技術の進歩 MIT大学教授 イシエル・デ・ソラ・ブル | 昭55.5 | No.58 | 「最近の宇宙論をめぐって」 上智大学教授 柳瀬睦男 | 昭63.3 |
| No.17 | 寿命 東京大学教授 吉川俊之 | 昭55.5 | No.59 | 「科学・技術研究の国際的規模：その展望と考察」 ローマ大学教授 パオロ・マリア・ファゼラ | 平1.7 |
| No.18 | 日本に対する肯定と否定 東京大学教授 辻村 明 | 昭55.7 | No.60 | 「温室効果による地球環境の変動と対策」 中央大学理工学部教授 安藤淳平 | 平1.9 |
| No.19 | 自動車事故回避のノウハウ 成蹊大学教授 江守一郎 | 昭55.10 | No.61 | 「組織の進化論」—企業及び軍事組織における進化— 一橋大学商学部教授 野中郁次郎 | 平2.3 |
| No.20 | '80年代—国際経済の課題 日本短波放送専務取締役 小島章伸 | 昭55.11 | No.62 | 「ファジー理論の誕生と進化」 カリフォルニア大学バークレー校教授 ロトフィ・アスカ・ザデー | 平2.9 |
| No.21 | 技術と文化 IVA事務総長 グナー・ハンベリユース | 昭55.12 | No.63 | 「還都問題について」 通産省工業技術院 国際研究協力課長 八幡和郎 | 平2.12 |
| No.22 | 明治におけるエコ・テクノロジー 山本書店主 山本七平 | 昭56.5 | No.64 | 「クリーンエネルギーとしての水素利用」 東海大学工学部 応用物理学科教授 内田裕久 | 平2.12 |
| No.23 | 西ドイツから見た日本 電気通信大学教授 西尾幹二 | 昭56.6 | No.65 | 「地価インデックス債による土地問題の解決」 一橋大学経済学部教授 野口悠紀雄 | 平3.1 |
| No.24 | 中国の現状と将来 東京外国語大学教授 中嶋嶺雄 | 昭56.9 | No.66 | 「宇宙のひとかけら」としての人間の視座 松下技研(株)主幹研究員 佐治晴夫 | 平3.4 |
| No.25 | アメリカから見た日本及び日本式ビジネス オハイオ州立大学教授 ブラッドレイ・リチャードソン | 昭56.10 | No.67 | 「建築と自然」 シュツツガルト大学軽量建築研究所教授 フライ・オットー | 平3.5 |
| No.26 | 人々のニーズに効果的に応える技術 GE研究開発センターコンサルタント ハロルド・チェスナット | 昭57.1 | No.68 | 「先端科学技術と経済成長」 東京大学 先端科学技術研究センター教授 竹内 啓 | 平3.7 |
| No.27 | ライフサイエンス (株)三菱化成生命科学研究所人間自然研究部長 中村桂子 | 昭57.3 | No.69 | 「自然界におけるゆらぎ、フラクタルおよび秩序」 東京大学理学部教授 鈴木増雄 | 平3.9 |
| No.28 | 「錬金術 昔と今」 理化学研究所地球化学研究室 島 誠 | 昭57.4 | No.70 | 「エコ・テクノロジーと飢餓の克服」 国際マングローブ生態系協会会長 M.S.スワミナタン | 平4.4 |
| No.29 | 「産業用ロボットに対する意見」 東京工業大学教授 森 政弘 | 昭57.7 | No.71 | 「開放型の情報技術」 明治大学教授 西垣 通 | 平4.5 |
| No.30 | 「腕に技能をもった人材育成」 労働省職業訓練局海外技術協力室長 木全ミツ | 昭57.7 | No.72 | 「地球環境問題と日本の役割」 三菱化成生命科学研究所室長 米本昌平 | 平4.9 |
| No.31 | 「日本の研究開発」 総合研究開発機構(NIRA)理事長 下河辺 淳 | 昭57.10 | No.73 | 「冷戦後の日米関係」 日本経済新聞社国際第一部長 小島 明 | 平4.10 |
| No.32 | 「自由経済下での技術者の役割」 ケンブリッジ大学名誉教授 ジョン F. コールズ | 昭57.12 | No.74 | 「エネルギー技術の動向」 東京大学工学部教授 茅 陽一 | 平5.6 |
| No.33 | 「日本人と西洋人」 東京大学文学部教授 高階秀爾 | 昭58.1 | No.75 | 「シナジェティックス：自然と人類における 協同と自己組織化について」 シュツツガルト大学教授 ヘルマン・ハーケン | 平5.6 |
| No.34 | 「ディスカバリーズ国際シンポジウム コロンバスオハイオ1982」報告 電気通信大学教授 合田周平 | 昭58.2 | No.76 | 「見捨てられる東京」 東京大学工学部教授 月尾嘉男 | 平6.1 |
| No.35 | 「エネルギーと環境」 横浜国立大学環境科学研究センター教授 田川博章 | 昭58.4 | No.77 | 「生物の多様性と新しい微生物学」 日本海洋科学技術センターDeep Starプロジェクトリーダー 東洋大学工学部教授 掘越弘毅 | 平6.3 |
| No.36 | 「第3世代の建築」 (株)菊竹清訓建築設計事務所主宰 菊竹清訓 | 昭58.7 | No.78 | 「これからの暮らしと経済」 元経済企画庁長官・経済評論家 高原須美子 | 平6.9 |
| No.37 | 「日本における技術教育の実態と計画」 東京工業大学名誉教授 斎藤進六 | 昭58.8 | No.79 | 「フラクタル、認識と印象の統合」 エール大学教授、IBM名誉フェロー プノワ・B・マンデルブロー | 平7.7 |
| No.38 | 「大規模時代の終り—産業社会の地殻変動」 専修大学経済学部教授 中村秀一郎 | 昭58.8 | No.80 | 「円高の進展と中小企業の展望」 法政大学経営学部教授 清成忠男 | 平7.7 |
| No.39 | 「ディスカバリーズ国際シンポジウム ロンドン1983」の報告 電気通信大学教授 合田周平 | 昭58.9 | No.81 | 「分子の世界の右と左」 東京大学教養学部教授 黒田玲子 | 平7.8 |
| No.40 | 日本人と木の文化 千葉大学名誉教授・千葉工業大学教授 小原二郎 | 昭58.10 | No.82 | 「生物は機械」 東京大学先端科学技術研究センター教授 藤正 巖 | 平8.2 |
| No.41 | 「人間と自然との新しい対話」 ブラッセル自由大学教授 イリヤ・ブリゴジン | 昭59.2 | | | |
| No.42 | 「変化する日本社会」 大阪大学教授 山崎正和 | 昭59.3 | | | |