

組織化と老化

環境教養学科 藤原 昇

私たちの身体を組織するためには炭素、酸素、水素などの他に窒素や燐などの元素が必要である。窒素や燐は環境から直接取り入れることはできない。バクテリアにより一度生物界に取り込まれた窒素や燐は物質の分解と再組織化を通して生物界を循環している。これまでは生物個体を孤立系として生命が論じられてきた。ここでは地球の物質循環系全体が一つの生命体であり、個体はその要素であるとするいわゆる「生命一体論」について論じる。さらにその一部である個体の老化について、個体組織の完成とその要素の再組織化の観点から論じる。

1 生命・環境・物質循環

窒素は私たちの身体の5%、燐は1%と少ないが、タンパク質を合成するアミノ酸や遺伝情報の本体であるDNAの成分としてなくてはならない元素である。窒素は酸素と同様大気中に大量に存在するがほとんどの生物は気体の窒素を体内に取り入れることはできない。最初に窒素を生物界に取り入れるのはある種のバクテリアである。そのバクテリアによって固定化された窒素を植物が取り入れ、そして動物に回る。動物の死骸がバクテリアによって分解され再度植物界に回る。これが生物界における窒素の循環である。燐も同様バクテリアによる分解を通して生物界を循環する。つまり多くの元素が生物界を循環しているのである。この循環の輪のどこかが破壊されたとき、その輪につながる生物は絶滅する。

さてある組織に着目する。例えば「人間個体」である。個体の外側をその個体の「環境」と呼んでいる。私たちはこの環境から物質及びエネルギーを取り込み、個体の組織を作りそして活動している。個体は環境から物質とエネルギーを取り込むために環境の情報を得、また環境に働きかける。つまり個体とその環境との間には常に相互作用が働いている。我々はいわゆる人間社会だけで、又自分一人だけで生きているのだと思いがちだが、個体とその環境とは持ちつ持たれつの一体関係にある。

私たちの身体はタンパク質で構成されている。そのタンパク質は約20種のアミノ酸を組み合わせた高分子である。ところがその約半分のアミノ酸は人間の体内では合成することができない。大豆や肉から取り入れたタンパク質を体内でアミノ酸に分解して再合成しているのである。そもそも私たちのエネルギー源である炭水化物（糖）も植物から受け取らないと生きることができない。このように我々の身体はその環境と一体であり、物質の循環過程で「物質」が通り過ぎる「組織」の一つなのである。

我々の身体の中の細胞に着目してみよう。例えば血液細胞の一つである赤血球に着目する。この細胞は大きさ10 μ m弱で寿命は約100日である。赤血球の中のヘモグロビンが酸素と結合して身体の隅々

まで酸素を運ぶ。赤血球は骨髄で生成されるが血液中の赤血球は増殖機能をもっていない。働き蜂のような存在である。この細胞にとってその外側はやはり環境である。環境と情報のやり取り、物質やエネルギーのやり取りをして活動している。白血球は人間個体に進入した外敵と戦う。赤血球も白血球もそれ自身は人間のために働いているとは思っていないだろう。我々の身体の中の環境と相互作用して活動しているだけである。我々の身体の一部でもあり同時に独立な組織でもある。それが人間個体をも守る結果となるので「共生循環の輪」¹⁾の一部になったと考えられる。

我々の身体は実に多くの半ば独立した「生き物」より成り立っている。腸に寄生する細菌は栄養物を分解し我々に消化できる物質に変えてくれる。例えば環境より取り入れたタンパク質をアミノ酸に分解する。もとよりその細菌も人間を助けるために働いているつもりはなく、自分のために活動することが我々にも役に立っているという共生関係にある。何億年もかけて出来上がったお互いの関係つまり「共生循環の輪」を成しているのである。この共生関係がなければ人間個体も存在できない。人間の身体を構成している色々な生き物が半独立でありかつ全体が一つの組織である。

「蜂の群れ」も一つ一つの個体が独立であると同時に群れ全体が一つの生命体であると言える。ただ人間の身体のように空間的な一体組織ではない。空間的にはそれぞれバラバラであるが、機能としては全体が一つの生命体である。働き蜂は自分の意志で行動しており、女王蜂を助けるためとか群れのためを考えて働いているのではない。しかしその行動が結果として群れを支えているのである。群れの外つまり「蜂の環境」の側から視れば、その群れの行動は、群れが「一体」としての「意志」を持っているかのように見える。我々の身体全体をホルモンが制御しているように、蜂の群れ全体を制御している何等かの物質があるのだろう。

実は同じ事が生物全体についても言える。つまり「ウイルス、細菌、植物、動物」が一体となって一つの「循環共同体」を成している、と視るのである。どれが欠けても全体が成り立たない。自然は人間を含めて一つの「生命体」である。それを支えるエネルギーは太陽である。それを支える物質は、「大気」であり、地球の「水」であり「土壌」である。水や大気も太陽エネルギーの下で地球全体を舞台に循環している。体内の大腸菌が人間の身体を支えていることを意識していないのと同様に、働き蜂が群れ全体を支えていることを意識していないのと同様に、我々が特に意識しないにもかかわらず、大気、水、土壌を含めて自然は「一体の生命組織」である。

これまでの社会科学は「人間を特別視する」社会科学であった。アメリカの一部の州でダーウインの「進化論」が今だ認知されていないことからわかるように、欧米には、他の動植物に対して「人間は特別な存在」との認識が強くある。「神は人間のために羊や麦を云々」(ノアの方舟)である。「人間」を「他の生命」と区別する思想は、場合によっては人間社会の中にも区別を持ち込む思想につながる。日本の「神々」や「仏教の教え」などは実におおらかである。動物も人間も同じ「生命」として視ている。梅原猛氏が主張するように「砂漠の思想」と「森の思想」の違い(1995 梅原猛著「森の思想が人類を救う」)なのだろうか。もっとも中世以前のヨーロッパでは全てのものに精霊が宿るとされ、北欧では今でもこの風習が根強く残っている。「森の思想」を受け継いでいるのである。そもそも、生命の組織情報を次の世代に伝えるDNAはウイルスや細菌から人間に至るまで同じ言語が使われている。またその言語で綴られた文章構造も同じである。違うのは文章全体の長さだけである。つまり組織が複雑

になればなるほど新しい機能が付け加わり、文章全体が長くなる。

20世紀の科学は「要素還元論」つまり「組織の要素が解れば全体が解る」との立場から著しい発展を遂げた。物質の根源、宇宙の成り立ち等々の解明も進んだ。しかし組織が集まればその要素には還元できない新たな質（原理・法則）が生み出されることも事実である。21世紀は再度「全体を制御する新たな原理・法則」を明らかにする世紀なのではないだろうか。その中心テーマが「個体と環境との関わり」の解明である。

2 不安定な組織「生命」

オパーリン、シュレーディンガー等多くの人達が生命について議論している^{2), 3)}。オパーリンは「化学進化の結果として生命が誕生した」とし、「代謝活動を行う系が生物である」とした。シュレーディンガーは「ネグントロピー（負のエントロピー）を食べる（エントロピーを環境に放出して自らを秩序化する）のが生物である」とした。そして20世紀の生命科学が出した答えは「自己複製を行うシステム」ということであった。「それぞれの生命体つまり単細胞生物から多細胞生物及びその構成要素である細胞に至るまで、全てに寿命がありDNAの情報に基づいて自己複製して子孫を残す」と。

さて生命体は、外見は同じでも、それを構成する細胞は絶えず入れ替わっている。その細胞の構成要素であるタンパク質、タンパク質を構成するアミノ酸も分子レベルで始終入れ替わっていると言われていいる。外見上は同じに見えるが内部では分解と合成が同時進行しているのである。つまり全ての物質が「流れの中の平衡状態」にあると、福岡伸一氏は著書「生物と無生物のあいだ」⁴⁾で述べている。これによりシュレーディンガーが主張したようにエントロピー増大（無秩序の増大）に抗しているのである。福岡氏は、自己複製機能に加えて、この「動的平衡状態」にあるのが生命であと「生物」を再定義している。さらに「この物質循環の流れは不可逆である」と述べている。つまり臓器を取り替えたり、DNAの一部を取り替えたりしても、ロボットの部品を取り替えるようにはいかない。「時間の矢」は一方向にしか進まない、と述べている。

金属塊は表面の酸化などの変化つまりエントロピーの増大はあるが、その内部を構成する原子が置かれた環境の原子と入れ替わることはない。つまり物質の流れの中にはない。一方、既に述べたように、水は常に地球全体を循環している。固定した場所で観察すれば、外見上は変化がないように見えるが、水の分子は常に入れ替わっている。つまり水は太陽エネルギーの下で「動的平衡状態」にある。「動的平衡状態」を広義に解釈すると、着目した系がその「環境」と「物質及びエネルギー」のやり取りしているが外見上変化がないように見える状態である。生命を複製できるかどうかではなく、この「動的平衡状態」を生命の「源」とするのがより適切と考える。太陽エネルギーを受けて地球の表層物質は高エネルギーの状態となり、不安定な状態となる。ここに生命の営みが始まる。つまり物質の流れが生じる。地球上の自然全体が「一つの流れの中」にあるのである。

さて、ここで「動的平衡状態」が生み出される条件について触れる。大気の循環はどのようにして起こるのだろうか。太陽エネルギーが地球に注がれるとまず海や大地が暖められる。次に下層の大気が

地表の熱輻射で暖められる。そして大気は水蒸気とともに上昇する。水分を含んだ大気は上昇すればするほど高いエネルギー（高い位置エネルギー）状態になる。物質が高いエネルギー状態になるということは「不安定」な状態になることを意味している。上昇すれば大気は冷やされ重くなり、また水蒸気は液滴となり地球の引力により落下する。そして水は大地に吸収され植物を育て、最後は海に戻る。そして再び太陽エネルギーを受けて上昇する。注がれる太陽エネルギーが一定なのでこの循環が「動的平衡状態」を作る。ここで太陽がなかったらどうなるだろうか。言うまでもなく大気や水が上昇しない。この流れは止まってしまう。つまり動きのない安定な物質状態になる。「不安定」な「高いエネルギー状態」を作り続けることが「動的平衡状態」を作る条件である。

生物の場合はどうであろうか。この場合は植物が太陽エネルギーの下で「光合成」をする。つまり安定な水分子と二酸化炭素分子を合成して「不安定」な「高いエネルギー状態」の炭水化物、脂肪、タンパク質などを生成する。不安定な分子であることは乾燥した炭水化物等に火をつけると燃えて安定な水と二酸化炭素に戻ることもからも解る。石油も同様である。この炭水化物等が動物に回り、組織の部品やエネルギーとして使われ最後は水と二酸化炭素に戻る。そして太陽エネルギーの下で再び光合成される。この「物質循環」が「動的平衡状態」を作っている。生物系は太陽エネルギーの下で不安定な分子の「生成と分解」を続けることにより物質を循環させているのである。この循環はもっと時空スケールの大きい「大気と水の循環の輪」の中で行われている。ここで言う「分子の不安定」とは地球表面近傍での平均気温（およそ25度C）の下で不安定であるとの意味である。

3 折り重なった生命体 — 「生命一体論」 —

ウイルスから地球全体の自然に至るまでが「一つの生命体」である。地球自身もさらに大きな組織の一部であり、太陽系、銀河系も時間のスケールこそ違いますが物質循環の流れの中にある。この時空スケールの異なった組織が幾重にも折り重なって「物質の流れ」を作っているのが生命である。あらゆる組織はそれ自身、ある時空間でまとまった一つの組織であると同時に、より時空スケールの大きな組織の一部である。それぞれの組織がエントロピー（無秩序さ）を環境に捨て自分自身を秩序ある系に組織化する。単に安定な組織を作るだけであればその組織は単なる「物質」であり「生命」ではない。この準安定な系に外部からエネルギーが注がれ、物質循環が持続するのが「生命」である。

ある時空スケールの組織で老化が進み死に至る過程は、この物質の流れが緩慢になりやがて止まって、新しい組織と入れ替わることを意味する。アミノ酸は短い時間スケールでその中の窒素原子等が入れ替わっている。タンパク質はより長い時間スケールでそのなかのアミノ酸が入れ替わっている。筋肉はさらに長い時間スケールでその中のタンパク質が入れ替わっている。人間個体はその中の細胞が絶えず入れ替わっている。人類としてはその中の人間が始終入れ替わっている。生物全体では千年、万年の長い時間スケールでその中の「種」が入れ替わっている、といった具合である。太陽も100億年の時間スケールで寿命が尽きる。最後は爆発し、次の星の誕生を準備する。つまり次の星と入れ替わる。

私たちの身体の要素であるタンパク質やエネルギー源である炭水化物などは不安定分子である。つま

り燃えて水と二酸化炭素に分解した方が低いエネルギー状態となり安定である。しかし身体の要素は不安定なまま、より高次の複雑な組織化が進む。それが細胞であり、身体である。その部分は不安定であるがために常時分解と合成が進み「動的平衡状態」にある。脳細胞は誕生して2～3年で出来上がり、その後新しくは作られないといわれている。しかしその細胞内の分子は入れ替わっている。つまり動的平衡状態にある。タンパク質も同様である。全体に対する部分は速い速度で入れ替わる。その全体も次の階層の部分であり、より長い時間のスケールで入れ替わる。こうして時空の色々なスケールでその部分は絶えず入れ替わり全体の秩序を保っている。

システムの活動それ自身によってシステムの構造が変化し、組織化されていくようなシステムを「自己組織系」と呼んでいる。脳細胞のネットワーク化がこの例である。生物系全体は一つの自己組織系である。これまでの生命の議論では、ある個体が「物」か「生物」かとの議論であった。しかし生命をそれぞれの孤立系で考えるのは誤りである。「生命は折り重なっている」という事実を認めなければならない。また「生物の構成要素である炭素などの原子を生命体と呼ぶのかそうでないとするのか、アミノ酸はどうか、たんぱく質はどうか、たんぱく質などの生体高分子は生き物であり、プラスチックなどの人口高分子は生き物でない」などの議論もなされている⁵⁾。しかし系の一部を取り出して「生き物」か「単なる物」かの議論をしても意味が無い。ここで問題にしているのは要素が集まって構成されている「系全体」である。太陽エネルギー、大気、水、土壌という環境の下で「ウイルス、細菌、植物及び動物」が一体となって「動的平衡状態」を形成し、一つの「生命体」を構成しているのである。

4 個体の成長とその停止

組織が成長しているうちは物質の流れも元気であるが成長が止まると再組織化が進み自由度がなくなる。人間社会に例えれば、成長する組織には自由度がある。成長が止まると組織の間で色々な絡み合いができ徐々に自由度が失われていき、ついには身動きが取れなくなり崩壊する。組織が安定するとその要素間につながりができてくる。つまり再組織化が進む。

組織がどこまで成長するかはDNAの設計図で決められている。そこまで行けば後はしがらみが強まるだけである。原子が分子を作り、分子がさらに高分子へと進むのも同じである。よりエネルギー状態の低い、より安定した方向に反応は進む。安定とは自由度がなくなることを意味する。それが老化であり、死である。死は物質系としては安定な状態である。そして他の生物による分解がはじまり次の命に渡される。

ロジスティック (Logistic) 曲線というのがある。人口など生物個体数が増加してゆく様子を表す曲線である⁶⁾。成長しそれが止まり平衡状態になるまでの一般的な変化の様子と理解することができる。例えば多細胞生物の細胞の総数をNとし時間をtとすると次の一回の微分方程式に従う。

$$dN/dt = N(r-hN)$$

この解は次式で与えられる。

$$N = (r/h) / \{1+k*\exp(-rt)\}$$

但し $k = \{(r/h) - N_0\} / N_0$ 、 N_0 は初期値である。細胞総数の上限値は (r/h) である。およその形を図 1 に実線で示す。縦軸が総細胞数、横軸が年齢である。20才前には成長が止まる。この平衡状態になったところで緩慢な再組織化が進行し自由度を失っていく。図には成長の変化率つまり成長速度を破線で示してある。図の破線は年当たりの変化率を 8.8 倍にして示す。図の破線から明らかなように、10才前に最大の成長率となり、20才でほぼ成長は止まる。

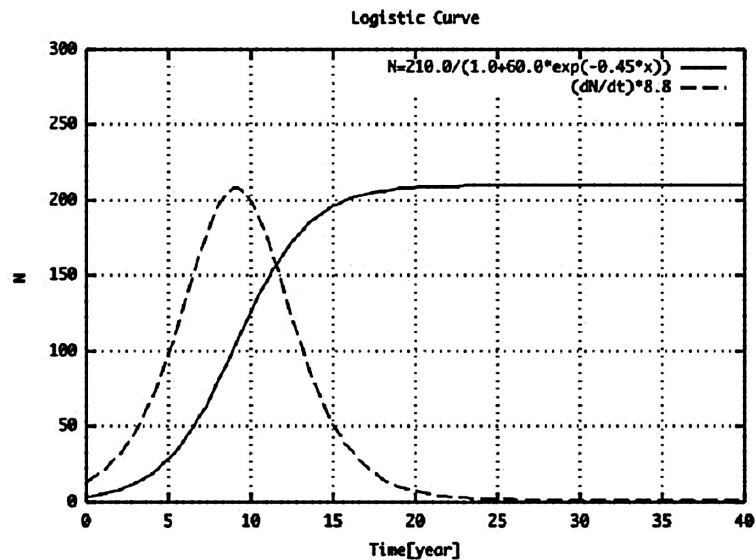


図 1 人間の成長の様子

生物組織、生物の個体数、社会組織などもその成長過程はロジスティック曲線で表現できると考えられている。成長が止まった後の様子はこの式にはそれが含まれていない。あらゆる組織には寿命があり、いずれ老化が進み崩壊する。以下ではその科学的理由について仮説を立てる。

5 老化は何故起こるのか？

古来、長寿を願い色々な努力が重ねられてきたがその願いは叶っていない。老化とはどのようなことを指すのか、寿命に関する経験則はどうなっているのか^{7) 8) 9)}、など現象の実体については色々調べられているが、「生物に何故寿命があるのか」の科学的理由についてはよく解っていない。色々な説がある。その一つが「細胞の分裂回数は遺伝子で決められている」とするものである¹⁰⁾。前もってもらった回数券を使い果たしたときが寿命であると。この説が正しいとすれば寿命を決めている部分の DNA を置き換えれば寿命はいくらでも延びることになる。しかしそうはならないだろう。参考のために触れるが、人間を急冷凍して 100 年後に元に戻すと冷凍時に残っていた寿命だけ生きられるといわれている。実際に金魚などの実験で確認されている。しかしこれを寿命が伸びたとは言わない。

言うまでもなくそれぞれの固体に寿命があって初めて生物は環境に適応して生きて行くことができる。つまり個体に寿命があることが種を存続させるための必要条件である。寿命がなければ環境変化に

適応できず滅亡してしまう。ここでの「問い」はその必然的な科学的理由である。本論文では以下何故老化が始まり何故寿命があるかについての仮説を展開する。

物質組織要素が複数集まった場合、単に集まっただけでその間に何ら相互作用が働かないかまたは反発力が働く場合は、組織要素が散在していき、エントロピー増大の原理に従ってその秩序が無くなって行く。砂の城を造った場合がこれに当たる。時間とともに風化し、形が崩れてゆく。組織要素間に何等かの引きつける相互作用があり、かつ系の温度がある値より低い場合は、新たな組織化が起こる。「温度」とは構成要素が自由に動き回る「運動エネルギー」のことである。したがってある温度とは、要素を引きつける相互作用のエネルギーより自由に動き回るエネルギーが小さくなる温度のことである。これを以下では組織化温度と呼ぶことにする。

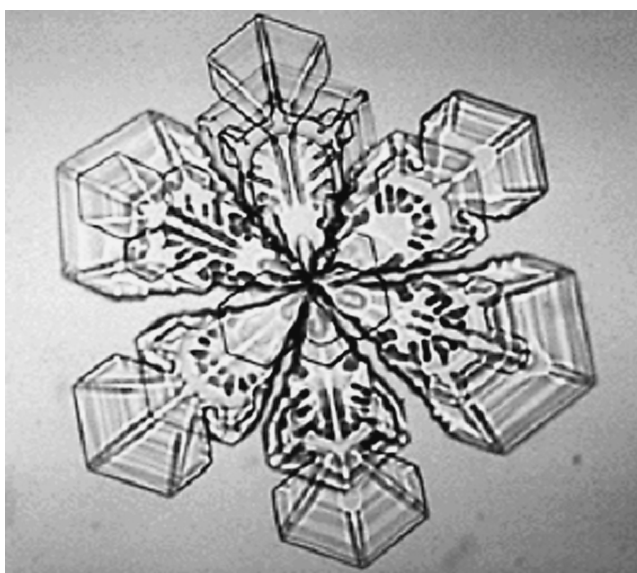


図2 雪の結晶（大雪山自然教育研究施設「大雪山の自然」より）

図2は雪の六角形結晶の写真である。大きさは1mm前後あり肉眼でもよく見える。雪の結晶は0度C以下の低温で大気中の水蒸気が直接固体になったものである。水の分子（ H_2O ）は全体として電気的に中性であるが、電荷が多少偏極している（酸素原子側が負、水素側が正）。そのために低温になると電荷の引力により分子がつながっていき（水素結合と呼びDNAの塩基の結合と同じ種類の結合である）安定な構造に向かう。酸素原子を中心に二つの水素原子が120度の角度を成してつながっていることが六角形の結晶になることと関係している。自由な水の分子は雪の結晶に「再組織化」されることにより水分子の自由度が大幅に低下する。温度が上昇し組織化温度を超えると、分子の自由運動のエネルギーが拘束の力より大きくなり再び水蒸気に戻る。

木の葉の上に散在してする水滴は次第に集まって一つの水玉になる。つまり秩序化が進み一つの組織となる。これは表面張力により水の表面積をできるだけ小さくする方向（水の分子の再組織化が最大となる方向）に組織化が進む。部屋の綿埃なども小さな一つ一つのゴミが絡み合っ綿埃に再組織化される。池に浮いた藻などもしだいに集まって集団に組織されてゆく。結果として全体の自由度が失われる。

我々の人体組織も成長している間は分解と合成（組織化）が同時進行し組織要素が大きな自由度をも

っている。しかし成長が止まると、分解と合成が緩慢となり、組織要素の合成ではなく、すでに出来上がっている組織要素と組織要素の間の再組織化が徐々に進行する。そして要素の自由度は失われていく。大人の体温は子供に比べて約 0.5度C低いのは自由度を失った事の反映である。脳細胞（神経細胞）を例にとろう。経験や教育を通して脳細胞は組織化されネットワークが出来上がっていく。このことにより五感を通して外部より入る情報の認識や判断の速度が速くなり、また認識の範囲が広がる。これは別の見方をすれば最初自由であった脳細胞が「ネットワーク」に組み込まれ、自由度を失って行くプロセスでもある。

脳細胞のネットワークが出来上がってしまうと新たな視点からの認識や判断に対するネットワークが形成されにくくなる。老いると新たな環境に適応しにくくなるのもそのためである。ただ日常使っているネットワークが何らかの理由で破壊された場合は、訓練と努力により未使用の脳細胞で新たなネットワークが形成される。脳細胞は誕生してから数年で一生分が完成し、他の細胞のように新たには作られないと言われる。つまり脳細胞の成長は子供の頃に止まっている。ネットワークを作るためには成長したら困るのである。

我々の身体組織は成長の停止とともに、組織要素の合成ではなく、細胞等の組織要素と組織要素の間の再組織化が進みその自由度が徐々に失われる。体温も下がる。細胞は動から静に移っていく。例えば皮膚の細胞は再組織化が進み、自由度を失い、瑞々しさを失い、皺が増えて行く。これが老化である。

6 終わりに

生物個体には寿命がある。寿命があって初めて生物は環境に適応しながら繁栄することができたのである。近年の環境変化の急激な変化は驚くばかりである。これまでの自然変動は千年、万年単位の変化であった。それが100年、50年単位で変化し、場所によっては10年、20年単位で変化している。それでも生物は強かに逞しく適応できるのだろうか。生物の仲間の一つである人間という「種」はどのようなのだろうか。生物は、全体として繁栄するために「種」も替えてきた。生物全体にとって人類が負の存在となれば情け容赦なく淘汰される。それは多分食糧危機であろう。さらに弱った人類に決定的なダメージを与えるのがウイルスではないだろうか。人間は地上の王者と言うが、人間を滅ぼすのは最も小さなウイルスなのかもしれない。

地球は有限である。その表面に生息している生物は有限の物質資源と太陽エネルギーで物質を循環させている一つの生命体である。一つの「種」だけがその限られた物質を独占することはできない。常に循環していないといけないのである。従って当然人類の人口も生物全体の調和が取れる範囲でないといけない。物質の流れ（循環）が緩慢になったり止まるようなことになれば人類も滅びる。自然の「物質循環の輪」の中で生かされていることを私達は再認識する必要があるのではないだろうか。限りある命を謳歌するためにも。

参 考 文 献

- 1) 「自然学」－自然の共生循環を考える－
藤原昇、池原健二、磯辺ゆう 著 (2004) 東海大学出版会
- 2) “生命の起源”
A.I.オパーリン著 石本真 訳 (1969) 岩波書店
- 3) 「生命とは何か」
E.シュレーディンガー著 岡小天、鎮目恭夫 訳 (1951) 岩波新書
- 4) 「生物と無生物のあいだ」
福岡伸一 著 (2007) 講談社現代新書
- 5) 「生命現象と物理学」
北原和夫、田中豊一 編 (1994) 朝倉書店
- 6) 「新人口論」
ジョエル・E・コーエン著 重定南奈子、瀬野浩美、高須夫悟 訳 (1998) 農文協
- 7) “Origin of the scaling rule for fundamental living organisms based on thermodynamics”
N. Fujiwara, BioSystems 70, (2003), p1-7
- 8) “The scaling rule for environmental organizing systems in a gravitational field”
N. Fujiwara, BioSystems 73, (2004), p111-116
- 9) 「現代方丈記」－環境と情報について－
藤原 昇 著 (2004) 奈良文化女子短期大学紀要 第35号 平成16年
- 10) 「生物の寿命と細胞の寿命」
高木由臣 著 (1993) 平凡社

