

環境問題・科学技術と複雑適応系

楠 菊 信

論 旨

近代における生産活動の大規模化は、世界的な規模で深刻な環境問題を惹起している。一方情報通信の発展により、大量の情報が生産・蓄積され且つ瞬時に世界を駆けめぐることから、社会の仕組みは益々複雑化されてきている。

すなわち、環境問題、科学技術(特に情報技術)、複雑適応系の三者が三つ巴の形で関連し合い、問題を複雑にしているのが現代の大きな特徴である。ここでは、これらの事象の基本要因について考察する。

1. はじめに

渡り鳥の中継基地として有名な名古屋港の藤前干潟を、ごみ埋め立て地としたいとする名古屋市の案が、環境に関する象徴的な問題としてクローズアップされた。名古屋市側は、現在の埋め立て地が3～4年で満杯になることから、一刻の猶予も許されないと主張する。市民環境団体は、長期の将来展望から、渡り鳥も来なくなるような土地には、人間も住めなくなると反論する。一方政府、企業などは、不況からの脱却はこの一両年が正念場と考え、少しでも物を買って欲しいと国民へのPRに懸命である。しかしこれは、どんどん物を買ってどんどん捨てる、ということになる。

これらは考える時間スパンの長さによって、それぞれの発言が正しいのであろう。この三者を整合させる基本は複雑であるが、過当競争、過剰生産、過剰消費を促す経済の仕組みの問題とともに、最後は我々のライフスタイルとそれを支援する社会システムをどうするかという、我々自身の選択に懸かっているように思う。以上は中央省庁を巻き込んだ議論に発展したが、この間に先ずはごみ減量が基本であるとの相互認識を得たことは、貴重な経験であったといえる。

米国のヘッジファンドLTCM(Long Term Capital Management)社が破綻に陥った。この社は100人足らずの大富豪の資金を預かり、数百兆円の資金を短期に出し入れして、開発途上国に大きなダメージを与えた。我が日本も短期間の急速な円高化で、散々振り回された苦い思い出がある。実資金の数十～数百倍にのぼる仮想マネーと、サイバーネットワークによる

瞬時・高速な情報伝達が主な原因と言われる。情報通信の優れた機能も、それを支援する社会システムの基盤が充分でないと、悪い面が倍加されてしまう。

以上に例の一端を示したが、環境問題と科学技術が相互に関連し合いながら、複雑な社会すなわち複雑適応系を構成しているのが、現代の大きな特徴である。このような複雑適応系とその制御の在り方の解明なしに、21世紀の展望は開けて来ないように思われるが、どうだろうか。

2. 環境問題

2.1 物質のごみ化

ここでは物質のごみ化をエントロピーの増大の観点から眺める。

・熱力学第1法則(エネルギー保存の法則)

『宇宙の全エネルギーは一定であり、創生・消滅することはない。』

石油を燃やせば、熱を出し 2 酸化炭素(CO_2)と水蒸気(H_2O)になる。これらは散らばるが天空を含めて地球上のどこかにあり、“無から有は生じない”の通りである。なお資源はエネルギーと等価とし、エネルギーに含めて考える。

・熱力学第2法則(エントロピー増大の法則)

『自然な過程では、エネルギーの価値は退化する方向すなわちエントロピーが増大する方向に進む。』

石油を燃やしても、上記第1法則によりエネルギーの総量は変わらないが、石油としての直接的な利用価値は消滅する。このように、エネルギーの価値は、退化する方向に進み回復されることはない。すなわち地球上の人間は、一定の食糧を携えて山に登り、道に迷っている状態に似ている。食べ方の工夫によって、生存時間は大幅に違ってくる。第2法則は応用面からは「ごみ増大の法則」と考えてもよい。

(1) 熱の拡散によるエントロピーの増大(図1)

高温物体と低温物体を接触させておくと、接触面で高温物体から低温物体に熱が移動し、中間の温度の中温物体に変わる。高温物体と低温物体が別々に存在すれば、例えばゼーベック効果を利用して電力を発生させることもできる。これはエントロピー小の状態での利用価値が高いことになる。一方中温物体になれば、このような意味での利用価値はなくなる。これはエントロピー大の状態であり、ごみ化したことになる。

西暦2000年が1900年と誤認される2000年問題におけるプログラム修正、古い規則や法律の改廃等、ソフトウェア類にもごみ化の問題がある。その処置は、目に見えないだけに却って厄介である。

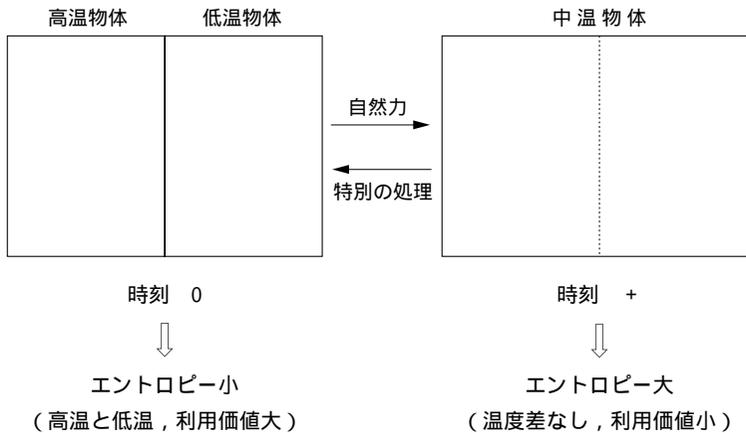


図1 熱の拡散によるエントロピーの増大

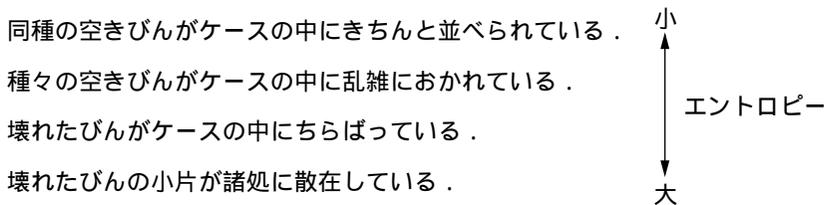


図2 拡張エントロピー

(2) 拡張エントロピー (図2)

にいくに従って利用価値が小さくなる。すなわちエントロピー大となる。例えば を にするためには一定のエネルギーが必要であり、そこに又ゴミを生じ悪循環となる。この場合には がよいことは自明であるが、環境問題の代替案の評価はそれ程簡単ではない。関連する物質連鎖を逆上り、全てのエネルギー及びゴミ量を集計して初めて優劣が判断される。

2.2 活動体の廃物

社会の動的な働きは、種々のレベルの活動体によって行われる。このときに廃物が必ず排出される。

(1) 活動体の処理モデル (図3)

活動源の投入により活動を開始し、内部循環による処理過程を経て産物が生成される。このときに必ず廃物が生ずる。この廃物の再利用率が、ゴミ問題に大きく関与する。生体系の廃物は、巧くすれば循環系に組み込まれ得る潜在能力を持つ点が、産業系廃物と大きく異なる。

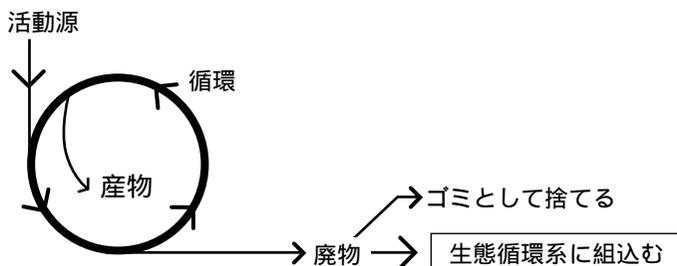


図3 活動体の処理モデル

(2) 各種活動体の諸元 (図4)

植物及び動物は循環系を形成する基本機能を持っている。すなわち、同図に示す O_2 や CO_2 のように、活動源と産物・廃物を相互に交換し得る点に特徴がある。一方、工場等の人工物の循環系は、環境問題の発生によりようやく注目されるに至った段階である。

入出力 活動体	活動源 ($t=0$)	活動体の機能 ($0 \quad t \quad \tau$)	産物 ($t=\tau$)	廃物 ($t=\tau$)
カルノーサイクル	• 高温槽の熱	• ピストンの往復	• 動力	• 低温槽へ捨てる廃熱
化学反応 (酸化の例)	• 原料 • O_2 , 熱等	• 原子間の結合の変更	• 酸化物 原子間の結合エネルギー小) • 熱	• 廃熱
工場	• 原料 • 燃料, 水	• 加工組立 • エネルギー変換	• 工業製品 • 動力	• ゴミ • 排気, 廃熱
植物	• CO_2 , 水 • 太陽光	• 自己復元 • 光合成	• O_2	• 蒸散水 • 死骸
動物	• 食物 • 太陽光 • O_2	• 自己復元 • 知的活動(人間)	• 力 • CO_2 • 知的作品(人間)	• 排泄物, 汗 • CO_2 • 死骸

図4 各種活動体の諸元

(3) 動植物間の生態循環 (図5)

動植物の排泄物、死骸等は土中の菌類、微生物等により分解され、水、 CO_2 、基本元素等に還元され、循環系が形成される。一方人工物の設計では、従来当面の利便のみを考え、システム寿命終了後の扱いについては無視してきたために、現在のごみ問題を生じるに至った(図9参照)。

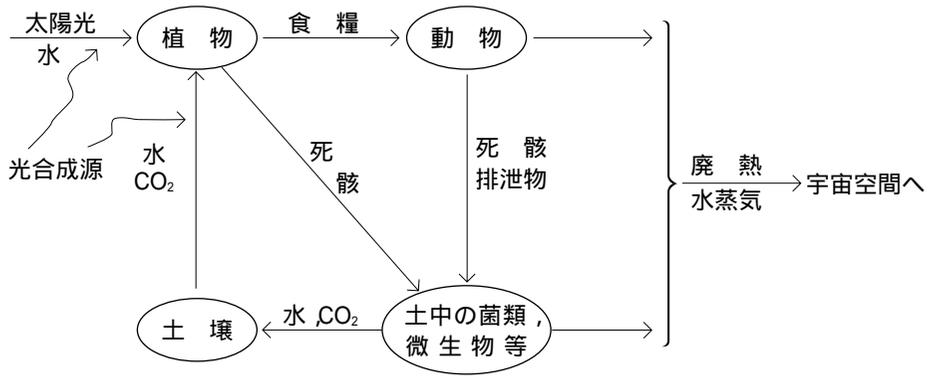
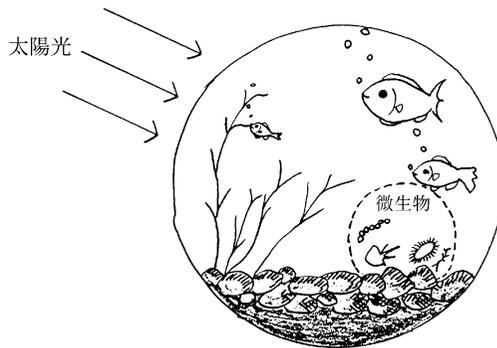


図5 動植物間の生態循環

(4) 生物循環系の確立 (図6)

3者間の互恵は、関与する物質の量に過不足がなく、物質間の変換が即時に行われるとする限られた条件においてのみ成立する。



- ・水草は太陽光を受けて酸素を発生し、魚はその酸素を吸い、水草を食べて成長する。微生物は魚の排泄物や死骸を分解し、水草に栄養を与える。水草は魚の出す2酸化炭素を吸い、微生物の作る栄養により成長する。
- ・これらの3者間に互恵が成立する。世界は『万物共生』によって成り立っている。

図6 生物循環系の確立

(5) 多種活動体における共生 (図7)

A活動体の廃物がB活動体の活動源となるためには、その間に廃物の変換・蓄積・移動が必要である。例えば、変換は微生物により、蓄積は土壌により、移動は河川により行われる。そして活動体の種類が多いほど、それらの間の互惠の成立する確率が高くなる。

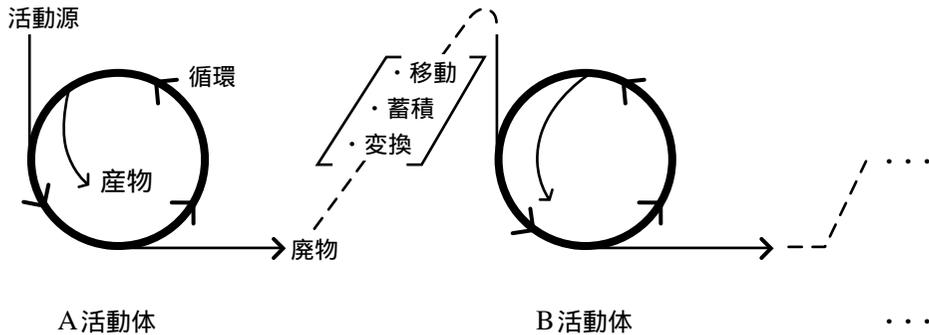
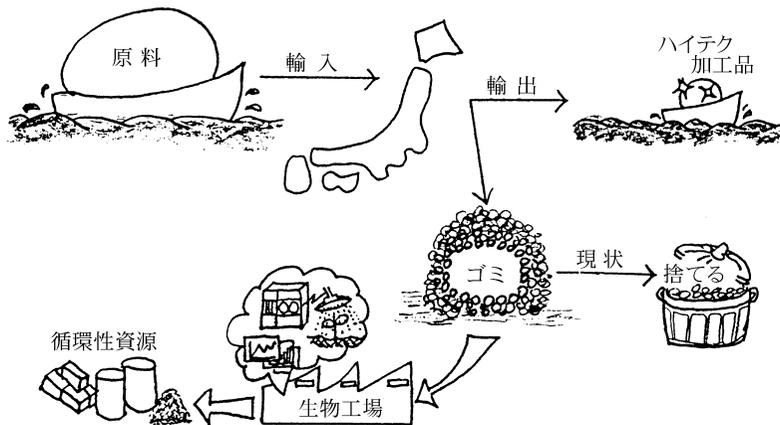


図7 多種活動体における共生

(6) 物質循環系の確立 (図8)

我が国は技術立国を旨としている。すなわち原材を輸入し、ハイテク加工により付加価値を高め、その差分で外貨を稼いでいる。従ってハイテク加工によるごみの発生と付加価値による黒字の発生は避け得ない面があるが、先ずはごみによる無駄を少なくすることが先決である。



- ・ 燃料、鉱石等の原料(年間20億トン)を輸入し、高付加価値加工品(10億トン)を輸出し、残りはゴミ(10億トン)として処分される。
- ・ ゴミは生物原理による工場で再生可能であるが、物を大切にする『環境倫理観』が基本となる。

図8 物質循環系の確立

(7) 廃棄物還元を含む製造過程 (図9)

従来は、工場と市場との間に、製品供給と顧客・製品情報の動脈系ループしか存在しなかったが、今後はこれに廃棄物還元、還元性情報の静脈系ループの追加が必要になる。自動車産業を例にとれば、我が国だけで年間約1千万台の生産を行っており、静脈系ループを通して、廃車の部品の大幅な再利用なしに、上記の生産を続けられるはずがない。

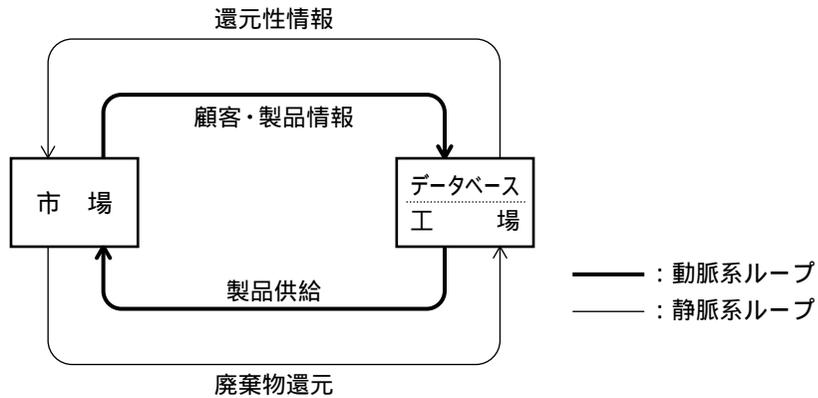


図9 廃棄物還元を含む製造過程

3. 複雑適応系

3.1 システムの複雑性

人間を含め動植物の内部構造は、微細にみるにつれて限りなく複雑さを増してくるが、これをマクロにみている限り、そのまま済ませることができる。しかし一旦細部を制御するようになると、中途半端な処理では済まなくなる。原子力産業やバイオ産業がその例である。

(1) フラクタル構造 (図10)

同図(a)はひのきの枝を、同図(b)はしだの葉を想定し、フラクタル構造としてコンピュータで合成したもので、本物と酷似している。ここでフラクタルとは、ある単純な規則による基本構造を、自己相似的に下位層に順次適用して合成される構造をいう。この構造は生物界に多く見られ、人体の中では肺における気道、血管網、神経網等がその例である。機能は複雑精緻であるが、同一形状モデルの繰り返し使用により、構成法は単純化されていることになる。これらの構造を規定する情報は、遺伝子情報のDNA上に書かれるものであり、少ない情報で複雑な構造を規定できるとともに、発生学上は全方位的な成長が可能となるために、このような形として定着したのかも知れない。

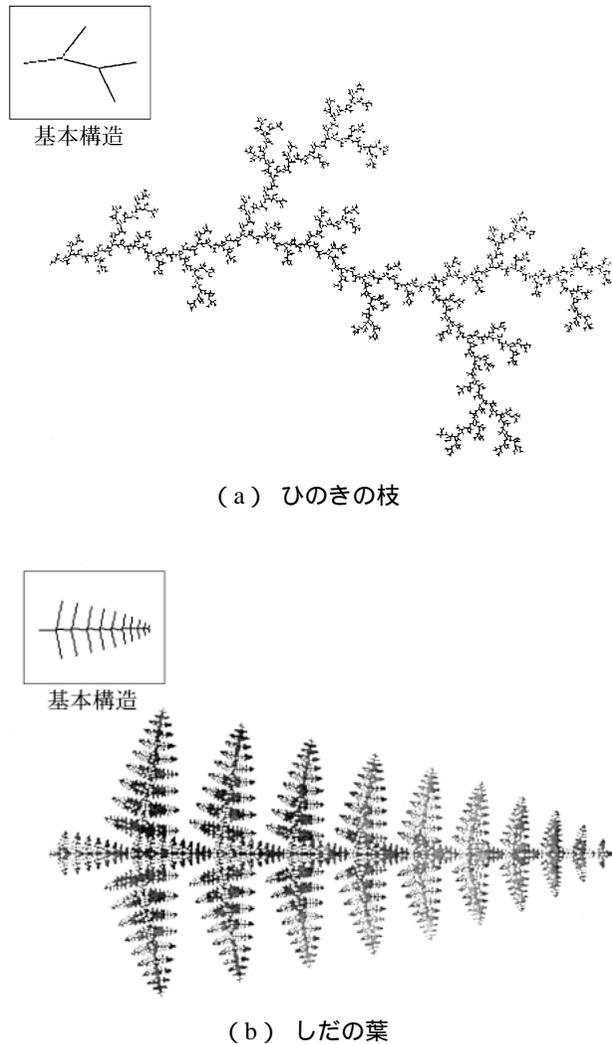


図10 フラクタル構造

〔芹沢浩 1993,「フラクタル紀行」森北出版〕

(2) バイオの情報処理 (図11)

デジタル領域(人間の左脳)における知性は、コンピュータにより補強され、近年突出する発展をみるに至った。アナログ領域(右脳)における感性は、コンピュータとの機能的ギャップが大きく、相対的に過小評価されてきた。その結果、直感力が鈍り、マニュアル人間が増えたとされる。ライフ領域では、人間を一個の生物としてみれば、種の保存は原始的且つ絶対的なものである。一方物質的な利便さの追求が環境ホルモンを生じ、衛生度の普及がアレルギー症を増やしたと言われ、人類の生命力の減退が懸念される。すなわち、この三者に大きなアンバランスを生じ、地球上の諸システムを不安定化・複雑化の方向に進めているということが出来る。

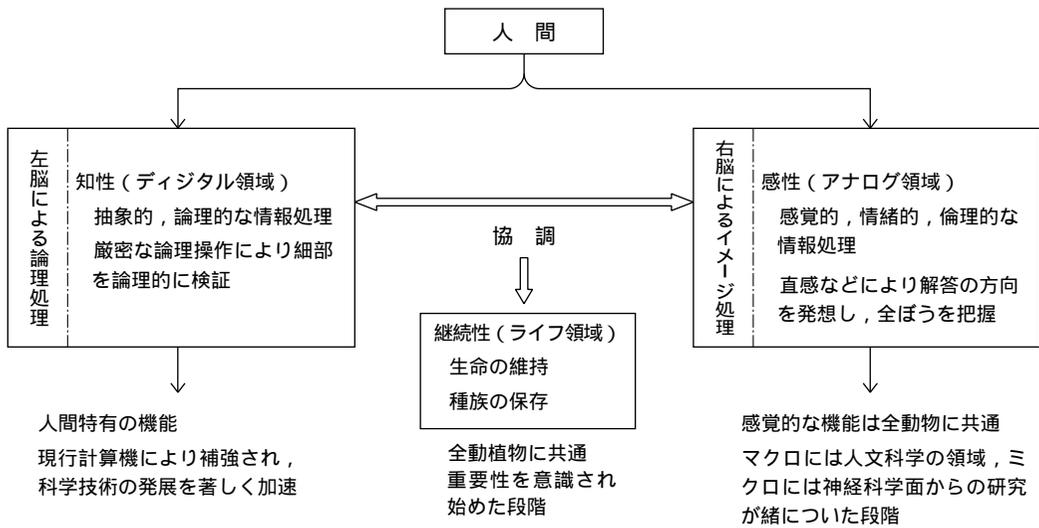


図11 バイオの情報処理

(3) 食物連鎖 (図12)

食物連鎖の代表例を図12に示す。より上位レベルが下位レベルを自分の食料とするとともに、排泄物、死骸を通して全体の循環が行われる。レベルが1つ上がる毎に量は、約 $\frac{1}{10}$ に減少すると言われている。鰯はプランクトン食魚であるが、鯉や鮪は魚食魚としてその上位にあり、量が激減する。鮪の漁獲量制限が、国際会議の議題とされるようになった所以である。この図は、全体が微妙なバランスの中にあり、人間だけの突出した繁栄はあり得ないことを示している。このような観点から、食文化の健全な在り方を考えてみる必要があると思われる。

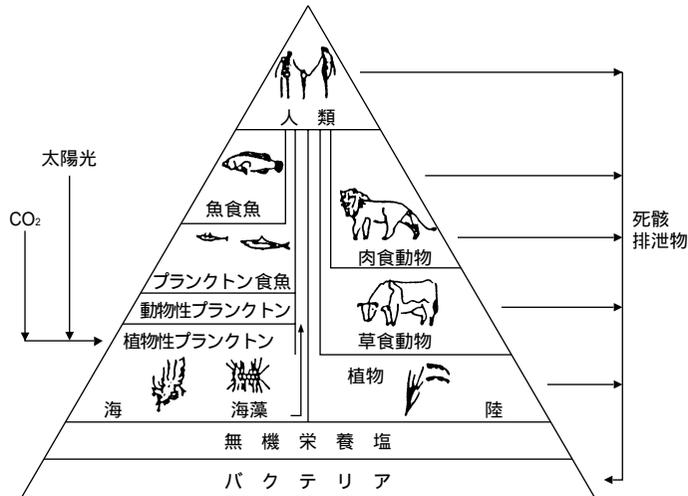


図12 食物連鎖
〔中村 充 「海の食料生産と環境保全」〕

(4) 地球環境におけるエントロピー授受の階層化 (図13)

地球は、太陽から平均1.5億km離れた軌道上にあり、太陽光を受けるとともに、宇宙へ向かって長波長を輻射して放熱することにより、熱バランスを保っている。これを図3の活動体の処理モデルに当てはめれば、太陽光という活動源を受け諸循環により地球上での活動が行われ、余った熱が廃物として宇宙に放出される1つの活動体(生き物)とみることができる。地球が外から貰える活動源は太陽光のみであり、我々の作る諸文物は全て地球上の資源のやり繰り算段に依るものであることも自明である。

一方、太陽からの距離が近すぎれば灼熱の地獄となり、遠すぎれば沈黙の氷の世界となる。このように太陽からの距離を含めて、地球全体が極めて巧妙なバランスの上に成り立っていることが分かる。昨今のCO₂による地球温暖化現象やオゾン層破壊による紫外線の過大投射現象等に対する警告が、このことを示している。

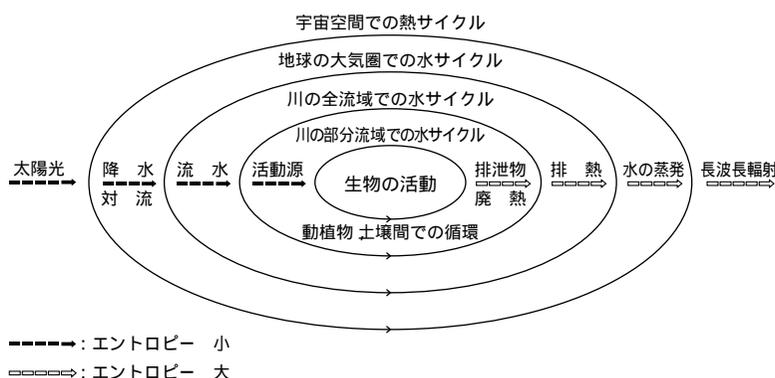


図13 地球環境におけるエントロピー授受の階層化

(5) 地球号の永存化 (図14)

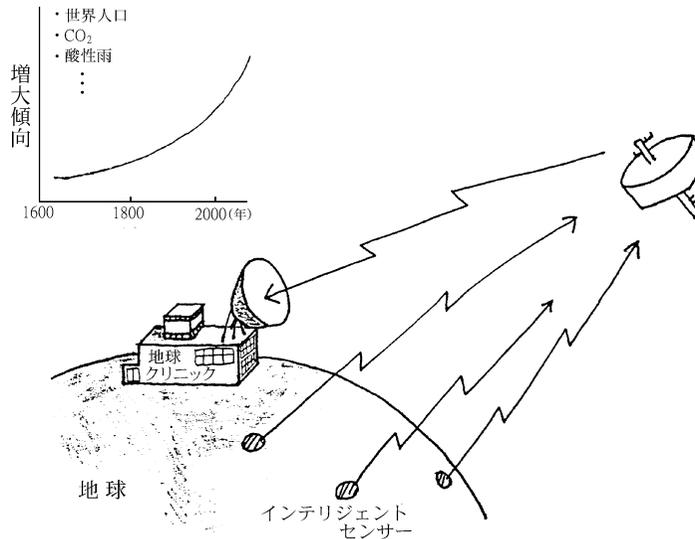
環境問題や情報通信の発展からみると、国境の壁は否応なしに低められる。一方民族、国家間の富の配分のアンバランス化が、上記により助長される傾向にあり、これらの間の調和が今後の大きな問題である。同図左上の世界人口等の急増は、有史以来の人跡未踏に類する難問であるが、これだけ重要なことが国際会議の話題にさえされない状態にある。

3.2 情報との係わり

マルチメディア等の電気通信の発達により、実物移動を伴わずに、これにほぼ等価な情報交換が行えるようになった。すなわち、最小のエネルギー消費(最小のごみ発生量)で、文化・文明を維持・発展させ得る可能性が出てきた。

ここで、情報通信網の発達を、技術的な面からみしてみる。従来の電話網は4階梯構成であった。一方安価な光ファイバケーブルの出現等により通信コストが安くなったので、近年のディ

デジタル回線網では、2階梯にした方が総合経済化が得られるようになってきた。すなわち『通信コストが安くなれば、情報収集・分配の階梯数は減少する方向に向かう』ということが出来る。これはインターネット網の普及とともに、通信のグローバル化を一層促進するに至っている。



- ・地球の汚染、資源の浪費、人口問題等を常に地球レベルで監視し、地球号の永存化に努める。
- ・子孫を含む『世界一家観』により、初めて子孫に美田を残すことができる。

図 14 地球号の永存化

(1) 電子商取引の例(図 15)

顧客からみると、通信ネットワークにより中間階梯が大幅に圧縮される。したがって小資本でバーチャルコーポレーション(仮想商店)が容易に開設可能となり、国際的レベルの分業で特化が容易になり、且つ中間段階の在庫が一切不要になる。企業組織でいえば、社長から社員に至る5~6階梯が、従来通り必要か否かという問題提起になり、見直しが始まっている。

(2) 電子スクール(図 16)

ネットワークを教育環境に取り込むことによって、常に生徒のレベルに最適な教材を入手可能となる。但し、音楽のような連続性を要する一連の情報では部分的な遅速は許されない、高精細な絵画の再現には十分な伝送帯域が必要になる、講義とそれに対する質問には双方向性とある程度の実時間性が求められる等、信頼性が高く、高性能なネットワークが必要になる。

我が国の大学進学人口は、10年後には70万人に減少して全収容定員とほぼ等しくなり、平均的には誰でも何処かに入れることになる。従って、入学学生の質のばらつきは大幅に拡大し、何らかの形の個人的な教育方法を取らざるを得なくなる。既にこの兆候が現れており、電子スクールの利用が一部始まっている。

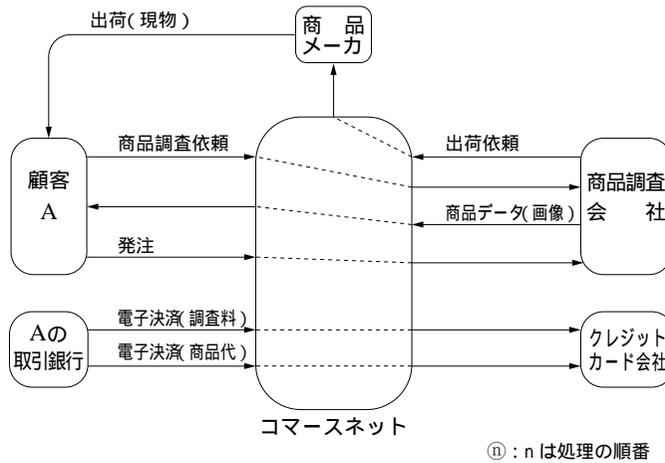


図 15 電子商取引の例

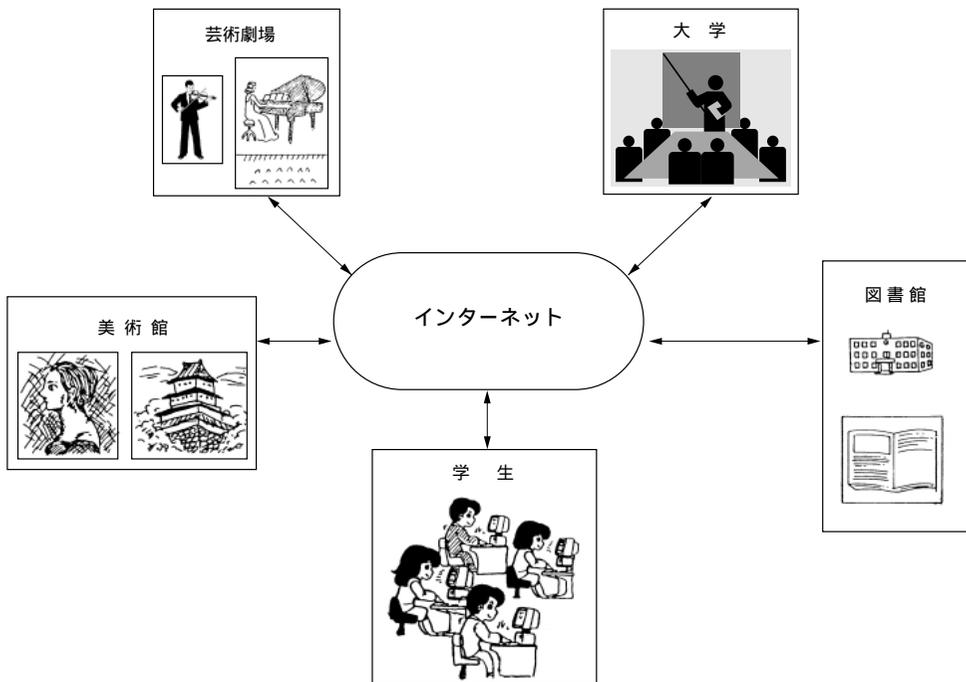


図 16 電子スクール

(3) 電子医療システムの例 (図17)

メディアの伝送条件に関しては電子スクールと全く同様であるが、人間の生命に直接係わることから、信頼性に関しては特段の配慮が必要になる。現在の医療は高価な装置と高度な技術に依存する傾向が益々強くなってきている。制度の改善に合わせて電子医療システムをうまく利用するならば、高度な大衆医療の経済的な実現が可能となろう。

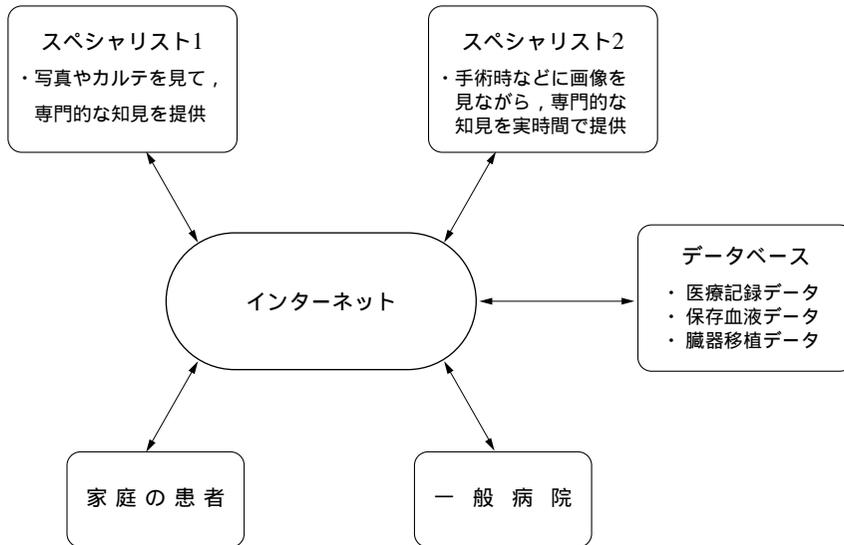


図17 電子医療システムの例

3.3 複雑適応系の制御

従来の自然現象の解析対象に単純適応系がある。人工衛星の制御を例にとれば、これは太陽、地球、月の三者を対象とし、一般相対性理論を適用することにより、その動きはほぼ完全に捉えられるようになった。これに対して近年、多くの素子が群れをなして行動する複雑適応系に興味を持たれるようになった。これは比較的小さな尺度の構造を対象とし、しかも対象個数は一般に極めて多い。生体の成り立ち、経済現象のように我々の身近な世界には複雑適応系の方が遙に多い。

ここで、上記の素子のような、系を構成し相互に影響し合う活動単位をエイジェントと名付ける。このとき複雑適応系は、多くのエイジェントが集まり群として行動することになり、エイジェント間の結合アルゴリズム及びこれと全体の動きとの関係の解明が重要となる。

(1) 対流現象 (図18)

同図(a)の水槽に水を入れ、底面の中央部を中心に加熱を続ける。対流発生の状況を同図(b)に示す。加熱の初期にまず暖かい水の塊ができ、これが徐々に成長して対流を生ずるよう

になる．ここでは，各水分子がエイジェントとなる．

このときの結合アルゴリズムは、『隣接するエイジェントは，その間の短距離力により相互調整を行う』となる．これにより秩序が自発的に形成されるのであり，全体の統治者は存在しない．

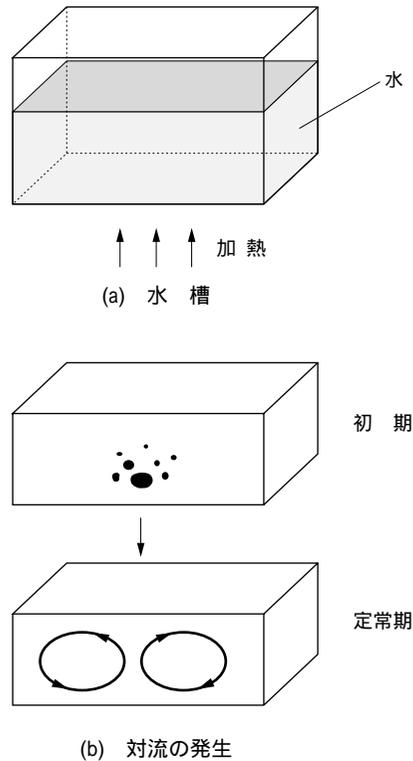


図 18 対流現象

(2) 雁行飛翔

雁の住地間の飛翔は，雁行パターンすなわち1群の雁が綺麗なV字形又は斜形パターンを形成して行われる．ここでは個々の雁がエイジェントである．このときの結合アルゴリズムは『先頭エイジェントの飛翔力が弱ったならば，次位エイジェントがこれに代わる．先頭以外のエイジェントは，最も楽に飛べる位置を選んで後続する』という単純な結合アルゴリズムに集約され，これがDNAレベルにまで昇華されたものと考えられる．この場合も各エイジェントは隣接エイジェントしか意識せず，全体を支配する統治者は存在しない．

(3) 自立経済システム

経済システムは大きく分けて，社会主義による計画経済と自由主義による自立経済の2つになる．計画経済では多量の情報の交換が必要であるが，現在のように複雑な社会ではこれ

は極めて困難になり、投資と消費のバランスを適切に決めることができなくなる。これは共産主義的経済運営の破綻により実証済みである。

一方自立経済では、代表的な例として個々の顧客が業者に、『より安く、より高性能な商品をより速く求める』という1つの原理の下に、投資と消費のバランスが適切に定まり、市場が形成される。ここでは顧客や業者がエージェントであり、上記の原理がエージェント間の結合アルゴリズムとなる。

但し現在は、前述の環境問題すなわち資源・エネルギーの枯渇と廃棄場所の枯渇という2つの大きな問題を抱えており、これに対処するために、新しい条件の付加が必要となる。すなわち上述の結合アルゴリズムを進化させ、『より安く、より高性能な且つ環境負荷のより小さい商品を、より速く求める』としなければならない。

このように市場は、これを構成する個々のエージェントの行動の結果であり、誰かが全体的に意図して計画したものではないが、それにも係わらずある1つの経済秩序が自然に形成される。これが自立経済と呼ばれる所以である。但し市場での公正な競争を保証する環境整備が前提条件となる。

(4) 政治システム

現代のように情報量が多く複雑化された社会では、経済と同様に政治においても一括統治はあり得ない。自立経済の原理を政治に当てはめれば、草の根民主主義となり、地方分権主義となる。ここでも各エージェントが主役であり、それが確かな原理のもとに行動して、初めて真の民主主義が成り立つことになる。

4. むすび

(1) 環境問題

文化・文明の発展のためには、何らかの資源・エネルギーの消費、従ってエントロピーの増大を伴うことは避け得ないが、これを恐れて原始に戻るわけにはいかない。そこで、エコロジー効率 = (文化・文明の発展量) ÷ (それに要するエントロピーの増大量)、のような評価指数が重要となる。この定量化は難しいが、感覚的な認識は市場メカニズムの中に現れ始めている。

(2) 複雑適応系

前記の複雑適応系の例において、結合アルゴリズムは極めて簡単であるが、全体の統治が巧妙に行われることを示した。ここでこのための環境整備が重要となるが、複雑なものは試行錯誤的な域を出ず、その条件の解明は今後の大きな課題である。

(3) 政治システムへの拡張

現代のように複雑化された社会を、一部の人間で統治できる時代は去り、全ての人間がそ

れぞれの立場で主役となり，知恵を働かす全員参加の時代となってきたといえることができる．
このために，情報公開は極めて重要となる．

参考文献

- 1) ジェレミー・リフキン著，竹内 均訳 1990，「エントロピーの法則」祥伝社．
- 2) 富永英義／石川 宏監修 1995，「標準ATM教科書」(株)アスキー．
- 3) 甘利直幸 1996，「標準ネットワークスペシャリスト教科書」オーム社．
- 4) 志村幸雄 1996，「日本の産業技術に未来はあるか」NTT出版(株)．
- 5) 武田 暁 1997，「形の科学」裳華房．
- 6) 楠 菊信 1998，「通信情報革命と産業社会の行方」『豊橋創造大学紀要』2号．
- 7) 楠 菊信 1998，「環境問題と複雑適応系」学際研究 11 卷2号(7月)．
- 8) 楠 菊信 1998，「環境問題と科学技術 複雑適応系の視点から」学際研究別冊 11 卷3号(11月)．
- 9) 楠 菊信 1999，「情報通信システムと社会システムのアナロジー」学際研究 11 卷4号(1月)．