

OPINION

システムの認識と統合 1

大阪医科大学生理学第1講座

今井雄介

Key words: 認識, 情報, 進化, 目的論, 環境要因—内部要因, 機能と機構, 自律性, 適応, 環境, 不均質環境, システム, 回路網熱力学, モデル, シミュレーション

はじめに

私は1960年台に微小電極法と言う細胞内電位記録の手法を習い、唾液腺の細胞内電位とその分泌刺激時の変化を調べるという生理学研究を始めた。生物組織は膜と溶液区画からできている。唾液腺の電気現象は電子の移動によるものではなく、イオンの移動に依存する。分泌現象にはイオンと水の輸送が関係する。したがって刺激時の腺の血液灌流法と電気生理学手法の研究を同時に行い、唾液腺のイオンの輸送機構と電気現象から分泌機構を検討してきた。目的は唾液腺は如何なる機構で分泌という機能を持つのかということにある。分泌神経を刺激する実験で、唾液は3.5メートル水柱以上の圧で分泌することを見出し、そのような分泌機能発現についてのいくつかの内部機構を明らかにしてきた。しかし多くの機構は不明なままに残されてきた。

実験研究は知識を整理して仮説を立て、その仮説を能動的に検証するものである。研究はやればやるほど仮説を変更する必要性が生じ、そのかわり色々と違う知識が得られる。さらに信用すべき他人の研究成果を加えるとそれこそ膨大なデータ量となる。それらは收拾が付かなくなるほどに多く収集でき、実験データは相互に矛盾するように見えたりする。或る説を立てればこちらの説が立たず、こちらを立てればあちらが立たずという事になる。その結果、生命現象は如何に複雑かということが解ったとしても、総合的な理解にはなかなか達することができなくなる。

1975年に入り、研究成果を総合的に理解するする手段としてシステム科学の一手段：回路網熱力学の

研究を始めた。回路網熱力学は分析手段として熱力学を使い、統合手段として工学的な回路理論を用いる。この手段でシステムモデルを統合し、そのシステム挙動をシミュレートすることが可能となる。唾液腺を初めとする各種の生体膜輸送システムがこうした分析と統合を介して理解できる。具体的に生体膜輸送システムを回路モデルとし、そのコンピュータシミュレーションで総合的に理解することが可能となる。この研究では熱力学的な根拠と、回路網の手段を再検討する必要があった。回路網熱力学ではエネルギーというよりは、エネルギーの流、それも仕事に使える有効エネルギーの流であるパワーを基本単位として考える。すなわち熱力学的な根拠は各種のパワー流入、パワー蓄積、パワー変換、パワー散逸(エントロピー生成過程)の4過程の釣合を考える事で得られることを示した。また回路網の手段としては上記4過程を回路素子で表現し、それらの組み合わせ法を考案することでシステムの統合ができ、シミュレーションができることを示した。

そこでシステムおよびわれわれのシステム認識とは何かということに興味が広がる。さらにそれ以前の問題として、われわれの自然についての認識とは何か、われわれは自然を正しく認識できているのか? という大昔からの問題に興味は広がる。認識について、哲学の問題としてでなく、生物学からの立場から考察する。生物は進化の過程で環境世界に適応してきた。生物の認識機構も進化してきたが、その過程で認識機構はどのように発達し、われわれにいたってどう自然を認識できるようになったかを検討する。環境世界に適応してきたわれわれの認識機構は、それでもって自然のすくなくとも一部

は正しく捉えることはでき、われわれのシステム認識に近い秩序は自然の中に存在すると結論した。またシステムは内部機構とその外部に対する機能役割の両者が解って初めて理解できるという結論をえた。

以上の興味に対する考え方の叩き台として今回の論文を提出する。私の研究経過とは逆に、生物の認識、システム認識、回路網熱力学、モデルとシミュレーションの順で述べていく。この私の意見により新しい論議がおこり、この見解が発展することがあれば幸いである。

第1章 生物の認識

1. 1 認識機構

生物は環境世界で生き残るために外界を認識する装置を獲得し、それを進化させてきたと考えることができる。従来、認識という概念は人間にだけ適用されるものとされてきた。それはまことに人間を中心とした考え方であって、他の生物の認識機構を認めなかったのである。生物は、環境の物理的、エネルギー的条件が生物の生存にとって不適当となる以前に、存在条件である環境情報を知る。すなわち生物は環境についての情報を獲得し、それらに反応することで適応してきた。情報の入力-反応過程が生物にあることを認識と呼び、そのような生物の認識とはいかなるものなのかを以下に考察する。

ここで情報とは物理的、エネルギー的条件の時間的一空間的、また定性的一定量の微小変化のパターンであって、意味を伝達するものとする。吉田民人氏は、生命登場後の「意味をもつパターンの集合」を広義の情報としている。彼は人間にとって意味を持つシンボル記号の集合を狭義の情報概念とし、自然言語を最狭義の情報概念としている。さらに生命以前にもあったと考えられる物理的、エネルギー的の時間的一空間的、また定性的一定量のパターンを最広義の情報概念の定義としている[1]。しかしパターンを差異の集合と規定すれば、差異を認識する主体の存在を必要とする。さらに意味というものも自律性を持った主体が存在して初めて成立する。したがって情報というものは自律性を持ったものにとってのみ存在することになる。少なくとも物理学の諸法則と呼ばれるものには情報概念は必要でなかった。物理的、エネルギー的条件は生命の有

無に関係なくその存在が考えられるが、生命がない世界での意味をもつ情報は考えることは困難である。以下では最広義の定義を除き、広義の、すなわち生命にとって意味がある情報を「情報」と呼ぶことにする。

環境情報は情報受容器から入り生物の状態を変化させる。まず高等動物についての認識装置をみる。環境からの入力情報は各種の感覚器を通じて動物に入る。神経生理学の教えるところでは、感覚器情報は神経線維を介して脳の1次感覚野、2次感覚野、3次感覚野、4次感覚野に達する。入力情報は脳の記憶の領野にも入る。入力情報とは別に脳内部では記憶野等での自律的で自発的な情報過程がある。夢は脳内部の自律的な情報過程であると見られる。神経細胞レベルでも自発的な放電があることが知られている。またそれを抑制する神経細胞もある。伝達情報は自発情報と組合わされる。すなわち記憶野の情報が入力情報に加わる。これら複合神経情報は運動野を経て、さらに末梢の筋反応等の効果器に引き渡される。

各段階において情報は符号化されインパルスとなり、シナプス中継で伝達物質となる。その過程で多数の神経信号が少数の神経信号に収斂し、また逆に少数が多数に発散する現象がある。このように神経信号は次々と時間的空間的に、また定性的一定量に変容しながら伝達されていく。このように入力情報と出力情報の各々は非常に複雑な処理段階を受けて動物の情報過程すなわち認識行動が成立している。こうして知覚、認識、意識はでき上がっているが、脳がそれら全体像をどうして掴むかは解っていないのが現状である。

ここで強調しておかねばならないことは、神経情報は何段階にもわたって変容して伝達され、しかも脳での自発的な情報がそれらに組み合わせられているということである。したがって物や事象に関する情報伝達は対象のままでありえない。ただしそれらは生物の生存に必要な情報を、素早く、かつできる限り有効に処理する装置になっていることには疑いはない。

スペリーやエクルズの仮説によれば、われわれ人間の認識は脳に言語野があるため他の動物とは異なっている。各種の機能は動物の脳の各所に局在しているが、人間においては左右の脳にも機能に差が

ある。左脳に言語野があり、意識に上る言語、算術、分析、演繹、反省、理論等の論理的で合理的とでもいべき処理装置を持つ。右脳は意識に上り難い非言語、絵画パターン、音楽、総合、帰納、直感等の発見的で擬合理的とでもいべき処理装置がある[2]。人間の総合認識は、左脳の意識的な合理的装置と右脳の意識下的な擬合理的装置の両者の循環的で、相互に補完する働きにより可能になるとされている。後者には感情が伴いやすいという。人によっては左右が逆転していることもあるが基本として意識に上るもの、意識に上らないものといった脳左右の機能分担がある。言語領がない動物、または言語領の未発達な乳幼児では左脳右脳の認識機能に分担があるとは認められていない。その場合は、一部は意識に上るかも知れないが、主として意識に上り難い擬合理的装置で反射的、自動的、または感情的に認識していると考えられている。そのような認識はさらに下位の脳幹、脊髄での運動、姿勢行動等の無意識の諸反応、さらに反射の情報処理装置にまで及ぶと考える。

次に大沢文夫氏の「細胞の適応を探る」[3]から、ゾウリムシの適応行動について紹介する。ゾウリムシは池に住む体長 0.3 mm くらいの単細胞生物である。単細胞生物であるが、眼点、消化系、排泄系、神経類似繊維を持つ。ゾウリムシは餌であるバクテリアを認識できる。ゾウリムシは障害物を認識し、障害物に遭うと後退し方向転換をする。ゾウリムシは 1 秒間に 2 ~ 3 mm の速さで泳ぐ。障害物がなくてもときどき自発的に方向転換をする。ゾウリムシの方向転換の信号は内部の自発的な膜電位のゆらぎによることが知られている。方向転換は鋭い角度で起こるが、角度は決まっていない。時間間隔、すなわち方向転換の頻度も一定でない。

ゾウリムシは環境温度を認識することができる。一定温で培養されていたゾウリムシはその温度を記憶し、その温度が好む適温となる。培養液に温度勾配をつけた条件ではゾウリムシは適温域のところに集まってくる。これを温度走性行動という。ゾウリムシは適温を記憶し、温度センサーを持ち、それらの温度差が行動信号になると考える。われわれがこの温度走性行動をシミュレートするときは、ランダムに動いているゾウリムシが偶然に適温域に入ると、温度を感じしそこで止まるかまたは泳ぐ速さが

遅くなると考える。そのように仮定をおいてコンピュータ上でこの温度走性行動はシミュレートすると確かに適温域に集まってくる。

ところが観察の結果、ゾウリムシは適温域のところで止まっているのでも、また遅くなっているのでもないことが解っている。むしろ活発に泳ぎ回っている。しかも方向転換はあまりしていない。適温域の方向へ進むときも方向転換の頻度が少ない。しかし適温域から逆方向へ進むときは方向転換の頻度が多くなる。記憶している適温と環境温度の差が大きくなれば、内部の膜電位のゆらぎが大きくなって、自発的な方向転換をしばしば起こす。すなわち温度情報は走性行動を直接決定するのではなく、方向転換の頻度を変化させるだけである。この行動結果は適温域の方向に泳ぎ、適温域を通過するとしても、結果として適温域近辺のところに集まることになる。

この行動もコンピュータ上でシミュレートできる。シミュレーションではゾウリムシは意志あるものの如くに適温域に集まり、その近辺に分布する。すなわち最適条件で安住するのではなく探索型の行動が促されている。環境は一般に安定なものでなく、常に変動しているものであるから、そこに安住しているよりも探索型行動の方が合理的で巧みな行動であるといえる。環境の温度情報と内部の自発的な膜電位のゆらぎという情報の両原因があって、それらの組み合わせで間接的にゾウリムシの探索的な適応行動が決められている。

ゾウリムシを異なる温度の培地に移すと初めは盛んに方向転換する。しかし 2 ~ 3 時間もすると順応して方向転換の頻度は少なくなり、その温度が適温となる。この時ゾウリムシの数が多いほど順応過程での順応時間が短くなる。すなわちゾウリムシが互いに情報を伝達しあっていると考えられている。温度情報ばかりでなくゾウリムシの互いの情報伝達があって環境に速く順応することができる。

以上ゾウリムシがある環境温のところに集まるといふ行動をみても、それは思いがけなく複雑な機構である。高等動物の認識装置においては外部からの情報と自律的な内部の情報が組合わされ反応があった。ゾウリムシにおいても環境情報と膜電位のゆらぎという自発情報があって認識行動が決定されている。

1. 2 認識の進化

ローレンツらにより創始された動物行動学は動物の行動が情報となることを明らかにした[4]。動物の行動の多くは社会生活に必要な個体間の情報伝達の機能を担うものである。動物は、生まれつき幾種かの行動様式を示すことができ、かつそれらの意味するところを認識できる。それら学習を必要としない生まれつき持っている発信、受信能力を生得的と呼ぶ。動物の多くは仲間同志の攻撃の信号や連帯の絆を強める信号を出しかつ相互に認識できる。これら生得的な行動様式には摂食、排泄、性行動から攻撃行動や育児行動がある。それら生得的な行動様式を動物社会での威嚇や連帯の信号に転用することもある。信号が発せられた状況において、信号受容者はすばやく認識し、その信号が鍵刺激となって特定の行動を解発(リリース)する[4]。それらはしばしば生得的である。

カントは時間、空間、因果関係といった人間の認識の枠組は経験から得るものでなくアприオリ(先験的)な機構であるとした。カントの説は、この世界の映像を決定している内容、つまり空間、時間、因果律といった直観の枠組は、アприオリにわれわれの精神のうちに見出される。ということは、こうしたアприオリな機構のゆえに、われわれは世界を決してあるがままに経験し得ない、とするものであった。しかし動物行動学は動物の生得的行動は進化の過程で得てきたものとする。したがってカントのいう個体の経験を経ずに生得的に持っているアприオリな機構も、進化の永い過程での期待と経験の循環を介して得てきた後天的な、すなわちアポステリオリな機構ということになる[5~7]。すなわち個体が生得的に持っている機構で環境世界の少なくとも一部は正しく経験できていたことになる。

ここでわれわれは世界の現実性に対しては疑問の余地はないとする。また生物は進化の過程で外界を認識する装置を獲得し、世界の法則性を抽出してきたと考える[4~7]。すなわち秩序ある構造を持った世界は実在し、かつそれらは生物にとって部分的には認識可能であるとする仮説的实在論の立場をとる[2,5~7]。

生物の認識装置は永い進化の時間経過の中で発展してきた。単細胞生物も環境認識装置を持ち、多細胞生物は細胞同志の情報交換もする。さらに人間と

いう分岐に至って高度な認識装置になっているとする。しかし人間といえども世界の真実を究極的に認識できるのではなく、人間に至ってより真実に近く認識できるようになってきたとする。すなわち生物の認識能力は、自然の客観的把握のためにあるのではなく、環境世界で生き残るために進化してきたと考える[5~7]。

生物は試行錯誤を通じて進化してきた。200万種の生物は30億年の進化の時間をかけて分岐し、存在している。こうしてイルカの形態は流体法則を、眼は光学法則を、環境要因と遺伝要因の両者から身につけて進化してきた。それと同じく認識を司る情報処理機構についても、環境要因と内部諸条件の両原因で試行錯誤を行い進化してきたと考える。進化の試行錯誤の過程で、生物は期待と経験を繰り返して得た知識を背景として存在している。

認識における期待とは、内部で自律的に発する知的な構成物であり、実在世界での経験に先行する判断または仮説である。そのような判断または仮説を持って外部世界の経験に当たる。判断または仮説は経験に曝すことで反駁されるかまたは確認される。仮説から演繹的に実際を期待し、批判や実際の経験から帰納的に仮説や理論を修正する。その結果仮説を棄却するか、修正するか、強化する。生物の期待と経験の繰り返しでは常に内部の自律性と環境情報が関係する。

学問の発展におけるモデルと実体、抽象と具体、理論と実際、観念と存在等の循環も、仮説と経験の反復といえる。実験科学では学習や理論から作業仮説を作り、能動的な経験の場としての実験に曝す。ポパーは科学発見において作業仮説は経験で反証可能な形に作る必要があることを強調している[2,8]。仮説は実験で反駁されるかまたは検証される。科学は能動的な仮説と経験の反復ともいえる。

フォルマーは進化からみた認識論はコペルニクスの転回であるとしている[6]。コペルニクスは地球は宇宙の一点であるとした。ダーウィンは進化からみれば人間も200万種の生物の一つに過ぎないとした。さらに動物行動学(エソロジー)では人間の行動も動物行動の進化の結果であるとした。それらは人間中心の見方から全体的世界という広い視野の中に視点を移動させてきた。進化からみた認識論も、生物の認識は進化によって獲得されてきたとして、人

間中心主義を離れて普遍的理解へと視点を転回させる。以下には実世界への適応とする生物の認識機構がいかなるものかについて考察していく。

1. 3 生物の期待枠組

生物は進化の過程で、経験に先行する期待、仮説の枠組をいくつも用意し、認識に至る手段としてきた。期待、仮説は常に経験に先行して自律的に作られ、後続する経験によって批判、修正、選択される。一般に生物は制限された情報処理機構しか持っていない。しかし生き残るため、それらでもってできるだけ正しい認識を得る必要がある。経験は情報として感覚器から入るもので期待や仮説の未来にある。過去の経験は期待や仮説に組み込まれて行く。学習において過去の自らの経験の他に、観察、実験、さらに歴史、文化、親、先生、先輩、仲間からの間接経験も期待や仮説に組み込まれてゆく。

まず生得的な期待や仮説の枠組にどのようなものがあり、それらの仮説は経験との循環により如何に変容していくものであるかを検討する。リードルは生得的な期待や仮説の枠組はいずれも迅速で確実度の高い認識を得るためのものであり、同時に省力化も目指しているとしている[7]。期待や仮説の枠組の出発点は「多分こうだろう」という蓋然性仮説である。それと「ああ、あれと同じか」という比較可能性仮説、「AなればBになる」という原因仮説、および「何かの意図で」という目的因仮説の四つの枠組を生得的に持っているとしている[7]。

(一) 蓋然性仮説の枠組とは、一度出会った経験はある蓋然性をもって繰り返されるであろうという期待である。ここでは確率の高いものを必然と推定し、低いものを偶然と推論する。すなわち明日も陽の上ることを確信し、10個のサイコロが同時に1の目を出すことは有り得ないと考える。さらに直感的、主観的な先行判断も用いる。例えばルーレットに自分の誕生日を賭けたりもする。主観的な蓋然性による先行判断は探索的であり、ときに発見、発明がある。

期待と経験、仮説と批判の螺旋状の循環において蓋然性も時間的に変化していく。新しい経験によって期待が、あるいは新しい期待によって経験が変化する。選択的な期待と経験の循環は学習であり、成果を上げれば合理的なものとなっていく。いずれにしても、これらの各種の蓋然性仮説の枠組による期

待を持って行動することは省力的であり、かつ後発経験によって仮説は強化したりまたは修正して有効なものになる。すなわち間違ふことがあるとしても、期待と経験という循環に入ることによって蓋然性仮説の枠組は能動的な意味を持つてくる。

(二) 比較可能性の仮説の枠組とは、いくつかの比較で類似性があれば、他の側面でも類似性があるであろうとする期待である。すなわち経験対象に共在する全てのものを仮説と比較するのではなく、その中の少数のものを抽象化して比較することで判定する。赤さ、丸さ、艶などからリングと判定し、味、匂いまで予測する。比較可能性の仮説の枠組により迅速で省力的な認識が可能となる。この代表はエソロジーでの生得的解発機構という遺伝的プログラムにみられる[4]。親鳥が雛に餌を与えるときのように、嘴の斑点、鳴き声等のほんの二三の特徴が解発因子となって、全体についての判断が下される。そうして親鳥の育雛行動が解発される。この生得的な先行判断は環境が異なると間違ふこともある。しかし通常環境ではまず間違ふことなく種の維持にとって意味を持つてきた。

やや複雑なレベルでの比較仮説の枠組による先行判断に、意識下で抽象化する、ゲシュタルト知覚がある。こうした期待の延長には構造期待も含まれ、草の茂みに見えたライオンの尻尾の先からライオンを予想して、ガゼルが逃げだすことを可能にする。実際、目鼻のみを見て、耳、口のみならず手、足、人体の存在を確信しない人はいない。

比較可能性の仮説の枠組は個体の学習において用いられてきた。この推論の方法は類推と呼ばれ、学習において有効な予見を与えるものである。一を聞いて十を知るという手段は省力化につながる。対象をパターン分けするステレオタイプの単純明解な解釈は、間違ふことがあるとしても、好まれるところである。比較可能性仮説の枠組も認識にとって省力的であると共に、無関心に比べるとはるかに有効性を持つてきた。この枠組により事物の類似と差異があることを知らせる。

1. 4 原因の仮説

(三) 原因の仮説の枠組とは、似た原因は同じ様な結果をもたらすであろうという期待をもつことである。原因仮説の枠組は「もしAなら、それからBが

つづく」という生命が持つ時間軸と関係した仮定である。原因仮説の枠組は高等動物の持つもので、前述の蓋然性仮説と比較可能性仮説の上に成り立つものである。結果があればそれに先立つ原因について「なぜ」と問うことができるとする。原因があつてその後結果が起これると因果的に考える。この因果性仮定の枠組を持つことも人間において生得的であると考えられてきた。

アリストテレスは結果に先立つ原因の単一性についての疑義を表明し、四つの原因に区別した。原因の一つ目はその事物の中に内在する物(質料因: material cause)であり、二つ目は外部から与える形(形相因: formal cause)とした。三つ目はその内部で働く力、エネルギー(動力因: efficient cause)とした。四つめは外部からの意図(目的因: final cause)であつて、指令、要請、選別の形でくる目的を原因とするものである。

これら四つの原因は家の建築を例にすると説明しやすい。まず質料因、すなわち建材、瓦、セメント、角材等が内在すべき原因となる。次に形相因、すなわち家としての材料の選択、仕様を決める設計図が外部からの原因となる。第三に動力因、すなわちエネルギー、金、労働力等の消費が内在すべき原因となる。そして第四に目的因、すなわち誰かが家を建てるという意図が外部からの原因となる。家ができたためにはこれら四つの原因はどれも欠かすわけにはいかない。

われわれ東洋的な多神教の立場からすると、複数の原因が一つの結果を生み、一つの原因も複数の結果を生み出すという考え方は受け入れ易い。西洋的な一神教の立場からすると、単一の結果を生む究極の原因があるとし、四つの原因のどれかが第一原因であるかを探索したくなる。アリストテレスは四原因の中から目的因(究意因)を原=原因とした。一方ガリレイとニュートンに始まる科学では動力因に原=原因を求めた。

質料因と動力因はシステムに内在しなければならぬ原因であつて、それらを纏めて内在原因または内部要因と呼ぶことにする。形相因と目的因はシステムの外部に存在する原因であつて、それらを纏めて外在原因または環境要因と呼ぶことにする。ここで内在する物(質料因)は外部から与える形(形相因)を拘束し、形相因は質料因を拘束するものであるこ

とが解る。一方動力因は目的因を拘束し、目的因は動力因を拘束する。すなわち内在原因と外在原因の関係を見ると、内在原因が外在原因を拘束し、また逆に外在原因は内在原因を拘束することが解る。したがって外在原因と内在原因はどちらが第一原因であるかと考えるより、相互の拘束またはフィードバックする両者の関係を考えることになる。

生物の形態について考える場合、イルカと魚が流線型をしているという相似がある。相似は外在原因となる環境要因からの要請の結果であると考えられている。一方イルカの前ヒレとイヌの前足が起源が同じであるという相同がある。相同は内部要因である遺伝的要請の結果であると考えられている。したがって(環境)と(遺伝)といった相互拘束またはフィードバックする2つの原因の関係を考える必要がある。さらに無生物であっても(環境要因)対(内部要因)の相互拘束を考える必要がある。この両者の内どちらが第一原因であるとはいえず、両者を共に認めることになる。

相互拘束する内外の原因項の一方の条件を固定してみる。たとえば内部要因を固定すれば内部機構の条件内において、環境要因が原因となって対象の機能が決まる。例えば潮流に対するイルカのスピードが決まる。また環境、境界条件を固定すれば環境の要請する範囲内で、内部要因を原因として機構が決まる。例えばイルカとオットセイの機構が決まる。イルカの、鯨の、またオットセイの流線型のいずれも可とする。

自然科学は境界条件が一定の、目的や意図とは関係のない対象を手がかりとして始まり、大きな成功を納めてきた。あらゆる自然現象は内在原因が結果と結ばれるものであつて、どこにも意図一目的を持ったものはないとされてきた。こうして内部要因のみの因果関係を機構とした説明、推量、法則が得られ、それらが必然的でかつ経験と矛盾しないことから自然法則と呼ばれるまでになってきた。境界条件が一定とする限りにおいて、また内部要因をほとんど下位に求めて行かない限りにおいて、内部要因を第一原因とする因果性は妥当性を持ってきた。

1. 5 目的因の仮説

(四) 最後の目的因仮説の枠組とは、似た機能は似た要請に仕えるであろうという期待である。似た機

能は似た目的があって作られてきたと判断する。われわれは、何事についても、誰かの、または何らかの意図があったに違いないと考える習性を持っていることは否定できない。すなわちある外部存在者の目的が原因となってそれが実現したと考える。人間や動物は意図、目的を持って行動しそれが原因になることがあり、目的因仮説は経験とも矛盾しない。

しかし人間や動物がもつ目的を別とすれば、自然界のどこにも意図・目的を持ったものは存在するとは考えられない。意図・目的を持ったものは存在しない場合にも目的因仮説の枠組は妥当性をもつのだろうか？ 永い間、神の持つ究極の目的が存在すると信じられてきた。19世紀には進化についても神の意図する進歩の概念と結ばれていたこともある。ティヤール・シャルダンも神の意志であり、人間の思考反省の能力等は、進化が究極のオメガ点に向かっていることを指していると考えた[7]。しかし進化は収束せずに200万種の生物に分岐し、各々が存在している。

目的とは上位または外部からの要請、制限、選別が存在することを意味する。鍵はドアを閉めるという目的のためにある。ドアは家を閉めるという目的のためにある。家は人の住むという目的のためにある。という具合に目的は上位または外部にあるものによって根拠づけられている。すなわち上位または外部条件が下位に目的を与えている様に見える。このように目的というものには目的を与える側と受け取る側がある。与える側の目的を受け取る側の機能が果たすのであって、受け取る側が同じ目的をもつと考えると混乱を起こす。機能が目的に一致しないときは、目的を与える側が一致しない要素を排除する。したがって通常、与えた側の目的と受け取る側の機能が一致する。目的因仮説といった場合、それはあくまで外部の存在が持つ目的をいう。受け取る側は単に機能または作用を持つだけで目的を持っているわけではない。

アイゲンの説得力ある目的的自然史を見ると、核酸と蛋白の相互作用を原因として生命が誕生した。核酸は遺伝情報の担い手として機能し、蛋白は生命過程の担い手となって機能する[9]。すなわち、核酸の内部機構が蛋白製造の原因であり、蛋白の内部機構が核酸製造の原因である。蛋白があるとき核酸は有機体の構造を指図するという目的をもつ。核酸

があるとき蛋白は核酸の遺伝因子を複製するという目的をもつ。かくして生命現象が目的論的に理解される。

カニは「なぜ」鉗を持っているのか？ 柑橘類は「なぜ」刺を持っているのか？ われわれは自然現象について常に何かの意図を問いたくなる。カニは餌を取るための鉗を持つ。柑橘類は実を守るために刺をもつ。岩場で産卵する海鴉の卵は一方が極端に細くなっている、また斑点を持っている。すなわち転がり難い形態を持ち、保護色になっている。クモの巣やミツバチの巣は、それぞれの行動の産物である。そしてそれらの機能は一目瞭然である。目標設定が存在すると仮定すればそれが原因になって機能が発現したと理解できる。

ここで何が目標の設定をなしたかと考えると、それは生物個体や生物種が目標を設定したのではなく、生物進化がそれを行ったことをわれわれは知っている。それらは生物の永い進化の結果であり、遺伝物質の中に保存されきた。環境要因の要請に合ったものがその適応結果として存在し、適応存在しているという結果が適応目的を与えられていたかのように見える。

適応を起こさせる環境要因は対象の機能、形態を試行して不適當なものを除外し、適當なものを維持する。外部に目的を持つものが存在するときも、やはり選別という除外機能と維持機能がある。一方内部機構をみると、進化の過程において遺伝子の形で形態と行動様式は親から受け継いできた。そこに変異という試行が挿入される。変異が生存許容範囲であればその優劣により自然淘汰を受ける。このようにして生物進化が試行し、環境要因や目的因がその錯誤を明らかにする。生物の試行をチェックするという意味で、環境要因と目的因は共通性がみられる。

生物が存在しているという結果は、数え切れない程の多数の環境要因すべてに対し適応してきたことを意味する。多数の環境要因に適応して存在しているものは、当然その一部である目的因と考えるものにも適応している。したがって、目的因をどんどんと上位に求めて行くことは、システムレベルによって変化する多数に上る環境要因の一部を選び、それを次々と上位に求めて行くことを意味し求めべくもないことが解る。

前節の因果仮説のところで述べた(環境)対(遺

伝), (境界条件) 対 (内部条件) といった外在原因と内在原因の相互作用がここでもでてくる。「どのような機能を?」という問いは外部への作用に対してであり, 外部にあると考える目的因にも共通する問いである。存在条件として環境要因を目的と読み替え, それに対する機能を考えれば, これが目的因仮説となる。機能を要請したと考えた目的因が, 実は外部の制限, 選別, 淘汰をする環境要因の一部に過ぎないことが解る。こうして目的因というものが環境要因の一部を選んで擬人的比喩的に読み替えたものであることを知る。

対象を目的論的に思考することはある意味で省力的である。生物学の理解において「どのような機能を持っているか」という科学的目的論 (teleonomy) は一定の役割を果たしてきた。また今後も果たすと期待できる。しかしそれが唯一の目的因ではないことは念頭におくべきである。環境要因の中からどのような目的も指定することができる。したがって抽象的でその実在性があいまいな形而上学的目的論 (teleology) すらも個人が信じるのが可能となる。しかしそれが集団的な「確信」になるときは危険がある。このとき与えられた目的のためには手段を選ばずといった, 悪しき原理主義者の行動もしばしば起こり得ることになる。

次章のシステム認識では「どのような内部機構が存在し, なんのために機能しているのか?」という問いが重要となることを述べる予定である。

第1章 「生物の認識」のまとめ

生物の認識は環境世界で生き残るための装置である。われわれ人間の認識能力にしても, 世界の客観的な把握のためにあるのではなく, 環境世界で生き残るために進化してきた。永い進化の過程で, 生物の認識装置は自発的な期待と現実での経験の繰り返しによってでき上がってきた。すなわち自発的情報と環境情報による修正の循環で作り上げられている。したがってこの認識装置で少なくとも世界の一部は正しく理解できていることになる。

自発的情報は期待または仮説であって, その枠組には生得的に持っているものがある。それらはいずれも迅速で, 確実度の高い認識を得るためにある。生得的な認識の仮説枠組は4つがある。まず蓋然性仮説と比較可能性の仮説がある。これらにより類似

と差異を知る。さらに生命が持つ時間軸と関係した原因仮説の枠組があり, 「A ならば B」といった因果的な認識をする。しかし原因と考えるものは認識対象の内部にあるものと外部からの要請の形でくるものの2種が区別できる。すなわち内部機構から発する原因と, 環境要因からくる原因がある。

さらに生得的な認識の枠組として目的因仮説がある。すなわちわれわれは外部の存在者の目的が原因となったと目的論的に認識する習性がある。目的をもつ存在者が存在しない場合でもそう考える。科学では原因を内部機構に求め, 目的論的な思考を極力排除してきた。しかしわれわれは原因には内部機構から発するものと, 環境要因からくるものの2種があること認めてきた。環境要因からくる原因の一部を, 擬人的比喩的に, 目的と読み替えれば目的因仮説も一部妥当性を得ることになる。実際「どのような機能を持っているか」という科学的目的論 (teleonomy) は生物学で一定の役割を果たしてきた。さらに生物に限らずシステムの理解で「どのような内部機構が存在し, どのように機能しているのか?」という問いが重要となることを第2章「システム認識」で述べる予定である。

(1章) 参考書

1. 吉田民人, 『自己組織性の情報科学, エヴォルーションニストのウィーナー的自然観』, 新曜社 1990 東京
2. カール・R・ボパー, ジョン・C・エクルズ, 西脇与作, 大村裕訳, 『自我と脳上下』思索社 1986 東京
3. 大沢文夫, 「細胞の適応を探る」, 日経サイエンス 5. 1994 p28-33
4. コンラート・ローレンツ, 日高敏隆, 久保和彦訳, 『攻撃: 悪の自然誌』上下 みすず書房 1970 東京
5. コンラート・ローレンツ, 谷口 茂訳, 『鏡の背面』上下 思索社 1974 東京
6. ゲアハルト・フォルマー, 入江重吉訳, 『認識の進化論』新思索社 1995 東京
7. ルーベルト・リードル, 鈴木達也, 鈴木 直, 鈴木洋子訳, 『認識の生物学』思索社 1990 東京
8. カール・R・ボパー, 森 博訳, 『果てしなき探求: 知的自伝』上下 岩波 1995 東京
9. マンフレート・アイゲン, ルーベルト・ヴィンクラー, 寺本 英, 伊勢典夫ほか訳, 『自然と遊戯—偶然を支配する自然法則—』東京化学同人 1981 東京

システムの認識と統合 2

第2章 システム認識

2. 1 システム認識の必要性

鴨は空を飛ぶ鳥の形、スピード、方向、距離からそれが鷲か鷹であって危険な猛禽であるのか、または鴉か鳶であって危険のない鳥かを判断する。さらに模型実験を繰り返すと、鴨はそれが現実のものであるか、実験者が行っている仮想のものかも判断できるようになる。この時は必ずしも省力的といえない高度の認識法を用いている。そこには思考と学習を踏まえたシステム判断またはシステム認識の萌芽とでもいうべきものを見る。高度で複雑な判断を必要とするときは思考と学習の上の複合的なシステム判断が必要となる。

さてシステム認識とはどういうものを指すのであろうか？ またわれわれの認識通りのシステム秩序というものが現実世界に存在するものであろうか？ 以下では経験する現実世界の秩序とわれわれのシステム認識との間の無矛盾性を問題としていく。

人間が意図・目的を持って素材と計画から作りあげた人工システムはシステムとして認識しやすい。すなわち、意図を持って要素を統合してある目的を果たすシステムに作り上げる。意図を理解すれば対象の機構と機能が理解可能となる。以下では機構(しくみ, mechanism)と機能(はたらき, function)という語は区別して用いる。複雑なシステムは、単純でない仕方で相互に関係し合う多数の部品から成り立っている。自動車、建物、コンピュータもそうして全体としての機能を意図して作られてきたものであり、かつ複雑とはいえ理解できる。そうした要素と要素の相互作用の上に出現するものをシステムと呼び、システムとして認識する。すなわち、人工システムでは人間が与えた目的を果たすことを第一義とする。

一方自己組織的に進化してきた生物を対象として、われわれはシステムとして認識する。生命科学は物理学を範とした分析的、還元論、内部因果論による機構についての研究により格段の進歩を遂げてきた。また今後もこの手段で進歩してゆくことには疑問の余地はない。しかしそこでは環境要因がしば

しば考慮の外に置かれていたことを想起しなければならない。したがって多数の環境要因のもとでの生命システムが、どのような機能を持ち、内部機構としてのどのような複雑な関係または相互作用を持って環境適応してきたのかを検討し、対象をシステムとして認識することが必要となってくる。

生物対象のみならず、物理的規模が大きくなり、複雑度の増大している自然についてもシステムとして認識する。この場合、対象を要素の関係や相互作用からまとまりのある機能を持つものとして取り出してシステムと呼ぶ。システムとして認識することで、単純でない仕方で相互に関係し合う多数の要素の関係を知り、全体としての機能を理解する手立てとしてきた。生物、物理、化学、工学、社会、経済、言語、記号、建物、都市、通信、河川、森林、地形、生態系その他諸々をシステムとして把握する。このように多種多様なシステムが考えられるが、それらは何らかの重要な特性を共有しているのであろうか？ 共通する特性または法則性といったシステムの性質を抽出することは可能であろうか？

ベルタランフィーは『一般システム理論』でシステムに共通する特性または法則性を抽出することを目指し、各種システムの同形性ことに数学的同形性を強調した[10]。『システムの科学』の著者サイモンは、複雑なシステムの階層的な概念的構造、階層性と進化の過程で形成に必要な時間との関係、動態的な特性、さらに複雑性についての理解可能な記述、ことに状態記述と過程記述の必要性を強調している。しかしベルタランフィーよりも少し懐疑的な立場から、とてもシステムの性質の一般化は期待できないように思われると述べている[11]。一方 G. M. ワインバーグはシステムとは単に思考空間における物の見方であるとしている[12]。しかし、われわれは多種多様なシステムをシステムという名で呼ぶことはできるから、システムとしての認識の仕方に共通性があり、対象にもそれに近い秩序があると考えられる。逆にいえば自然界の秩序の思考空間での考え方がシステム認識であり、われわれのシステム認識と経験する現実世界の秩序との間の無矛盾性を問題としていく。パターン認識やゲシュタルト認

識は、多くの要素を並列的に知覚し、組合わせて意識下で把握できる。統合的なシステム認識もそれらに似ていて、意識下で認識可能であるが、論理的な直列的な言語化、理論化することが困難な概念であるのかも知れない。とはいえ自然システムを理解していくために、多種多様なシステムに共通する一般性があると考え、その特性または法則性をできる限り普遍化していくことが必要である。

2. 2 システムと環境

システムをもっとも単純に定義すれば、世界の一部分を明確に限定されたシステム境界を持ってその他の残りの部分(環境)と分離したものである。物理学でシステムを考察するとき、その環境を境界条件として設定する。物質の出入りがなく、熱と仕事の出入りする閉鎖系に対して、境界条件として環境の温度と圧を設定する。物質の出入りのある開放系に対しては、境界条件として環境の温度と圧以外に、環境に存在する成分を含めたあらゆるエネルギー種を考える。成分を考える場合、数十種の原子の組み合わせからなる多数の分子種を考慮する必要がある。すなわち、各種の成分濃度、pH、イオン強度等が境界条件となる。しかし通常、単純化のため環境は均質であると仮定する。

生物は開放系であり、物質を含むエネルギーの出入り、各種情報の出入りに対して開かれている。温度、圧以外に重力、光等の電磁波およびあらゆる成分濃度等のポテンシャル変数の物理的、エネルギー的条件を環境として考える必要がある。生物にとっての現実の環境は、大気のように温度、圧、ガス分圧がほぼ均質で、かつ一定である部分もあるが、液体や物質のその他の大部分は不均質に分布している。その意味で物理学で仮定した均質な境界条件というものと、生物の現実の環境は著しく異なることは十分に強調しなければならない。生物システム自体は極度に複雑で、不均質な構造を持つものであるが、環境もそれ劣らず複雑で不均質な構造を持つ。この構造の中に構造があるという見方は、後に述べるシステムの中にシステムを見るといったシステムヒエラルキーの概念構造と共通する。不均質な構造をもつ生物と不均質な環境の両者の相互作用が生命存在にとって重要となる。

環境が如何に対称性のない不均質な構造を持って

いるかはわれわれの周辺を見渡せばすぐに理解できる。重力にもとづく上下がある。太陽光の変動にもとづく周囲という方向がある。動物に限らず植物も上下、方向を感知できる。環境の成分条件が気相か、液相かまた固相かといった相条件で異なったものになる。さらに流体では圧、流速も問題となる。このように見てくると生物にとっての環境は各種エネルギーのポテンシャル変数と共にその不均質で巨視的な条件も関係することが解る。環境中のあらゆる成分の濃度は生物に重要である。生物では気圧と共に酸素、炭酸ガス、水分の濃度が重要であるし、植物にとっては水、炭酸ガス濃度と共に日照時間は大きな要因となる。動物にとって、高分子の食物のみならず極めて多種の分子またイオンの有無は酸素の存在と共に決定的である。

多細胞動物にとっては食物はある相対的な大きさと量を必要とする。環境の物質成分が不均質に局在していることから、取り込み装置と放出装置を持っていることから、動物は栄養価の高い食物を摂取することもできるし、栄養価の低いものを排出することもできる。比較的均質な環境とみられる液体中の細胞や単細胞生物は幾種かの成分の取り込み装置と放出装置を持つことで環境に適応している。細胞は細胞膜の不均質な構造でエネルギーの流を可能としている。

環境要因は変動する。太陽光は日内変動と季節変動がある。それにより環境の温度は変動する。さらに寒帯の -30°C から熱帯砂漠の $+70^{\circ}\text{C}$ 程度の地理的変動がある。環境要因としての圧は海底の数百気圧から、平地の1気圧、高山の数分の1気圧の変動がある。生物活動が逆に環境を変化させる場合がある。植物は炭酸ガスと水から酸素を作り、動物は酸素と食物を使って炭酸ガスをつくることにより相互の環境を変化させている。生物はこのような不均質で多数にのぼる環境要因とその変動に曝され機能を獲得し適応してきた。

生物や人間の行動は他の生物の環境要因となる。200万種の生物の存在と行動は他の生物に対する環境因子群となる。育種家が行う選別は人為淘汰という環境要因になる。さらに遺伝子操作という新しい環境要因もできた。雄のクジャクの羽根の機能形態のように雌の持つ意図も環境要因となる。雌の淘汰という環境要因が遺伝物質の中の僅かな変異を永い

時間をかけて増幅させる。これは性淘汰として知られている。社会、人間、動物、微生物から無生物現象にいたるまで、それらの存在と行動が発する情報が環境要因となる。情報である家庭、対人関係、社会、教育、理論、文明や文化は人間の環境要因である。実際、文明のある環境下にいる人を文明人と呼び、野蛮な環境にある人を野蛮人と呼ぶ。ダーウィンはフェゴ島からロンドンに連れてこられた現地人が文明に順応し、またフェゴ島に連れ戻されて野蛮に順応したことを見ている。

動物も植物も移動して環境を選ぶことができる。環境に対して生物が時間的に速く反応する場合、それを適応行動 (adaptive behavior) と呼ぶ。気候風土に対する適応のように時間のかかる反応は順応 (acclimation) と呼ぶ。進化の過程のように、さらに時間軸の長い適応で、変化が遺伝子に組み込まれる場合は馴化 (acclimatization) と呼ぶ。適応行動も順応も生活の方向性といった生物側の自律性、主体性が認められる。しかし馴化については、偶発的な突然変異と環境による淘汰によるとされている。生物の自己組織化、自律性、主体性を認めるのであれば、それらが馴化の過程でなんらかの役割を持つことも期待できる。

生物世界を構成する種は、環境に働きかけると同時に環境から働きかけられるといったぐあいに生きてきて調和を持っている。個体、種のいずれのレベルにしても、生物側の試行と環境による選別、また環境からの圧力と生物側の再試行の循環が進化の過程であった考えることはできる。したがって環境が生物を選別し、環境に対して自律的にまたは偶発的に生物側が変化を採用することで適応が成立すると考えることができる。

2. 3 自己組織化と自律性

生体システムは不均質な構造を持つ。またエネルギーと情報の出入りに対して開かれている。ここでエネルギーは物質とエントロピーを含むものであり、有効に利用できる部分とできない部分がある。有効エネルギーはシステム内部で蓄積、変換さらに散逸の過程に入る。そこで何種類ものの輸送、反応等といった複雑なエネルギー相互過程がある。また情報も交錯している。すなわちサブシステム同志の間でエネルギーと情報の相互作用がある。またシス

テムと環境との間でのエネルギーの交換があり、熱力学的には非平衡の状態にある。

生物システムの内部機構は自己組織化によってできたもので、自律性または主体性を持っている [13]。自己組織化ではシステムを介するエネルギーの流を必要とする。ここでエネルギーの流について説明が必要かもしれない。エネルギーの流があるということは、そこにポテンシャル差があることを意味し、ポテンシャル差のあるところでのエネルギーの流は仕事に使えるか、またエントロピーを生成することのできるエネルギーになる。それを有効エネルギーと呼ぶ。有効エネルギーは全エネルギーから無効エネルギーを差し引いたものであって、ここで無効エネルギーとはシステムで仕事に出来ないエネルギーまたはエントロピーを生成することのできないエネルギーをいう。この熱力学的な詳細は次章に譲る。

有効エネルギーがエントロピーを生成する過程でシステムは散逸構造をもち、そのポテンシャルレベルは環境と異なるものになる。こうした散逸構造やポテンシャルレベルは環境からのゆらぎに対して安定性、柔軟性を持ち、このことを自律性と呼ぶ。自律性をもつシステムは環境のゆらぎに対しても対応できる。また生物システムでは自己再生、自己創出、自己決定をする。

生物に限らず自己組織化する開放システムは散逸構造を持つ。プリゴジンらによるブルッセレーターは概念的な振動化学反応であって、非生物の散逸構造の例として有名である [13]。ブルッセレーターは基質 A、B のある反応槽で、反応生成物である X、Y の濃度が振動する。ブルッセレーターは次のような反応機構で進行する。 $A \rightarrow X \rightarrow E$, $B + X \rightarrow Y + D$, $2X + Y \rightarrow 3X$ 。この3つの反応の中、3つめが自己触媒的な反応である。この場合、ポテンシャルの高い A、B の消費とポテンシャルの低い D、E の生成というエネルギー過程がある。X、Y はそれらの中間のポテンシャルレベルにある。この反応機構は時間経過で中間生成物 X と Y の濃度が反応槽内で振動し、自発的な自己組織化現象を作る。すなわち反応生成物である X の濃度の自乗と Y の濃度に依存する非線型反応を起こし、その結果として自発的振動現象という時間的な散逸構造が出現する。この反応は次の BASIC プログラムで再現することができる。単純化のため反応速度係数をすべて

1 としている。

```
A = 1 : B = 2.7 : dt = .02
FOR i = 0 TO 3000
  X = X + (A + X * X * Y - (X + B * X)) * dt
  Y = Y + (B * X - X * X * Y) * dt
  PSET (150 + X * 75, 400 - Y * 75)
NEXT
```

ここではXとYの濃度変化という反応結果が自己触媒的に反応へポジティブフィードバックまたはネガティブフィードバックが掛け、自己組織化的な振動が起こす。すなわちブルッセレーターの例では内部の反応機構が液槽の濃度変化を生成し、その濃度変化が逆に自発的な反応機構に変化を起こして散逸構造がでている。ここでは有効エネルギーの流を必要としているが情報は考えなくてもよい。

次に生物の自律性の由来について考察する。前章で述べたように、生物は、環境の物理的、エネルギー的条件が生物の生存にとって不適当となる以前に、その微候である環境情報を認識することで生存している。自己組織化では有効エネルギーの流が必須であるが、これに内外の情報が加わると自律性が顕著となる。ゾウリムシは適温域に集合する温度走性行動という自律的な機能を持つ。ゾウリムシが移動した局所の温度情報から、適温方向であれば方向転換の頻度を少なくし、逆方向へ進むときは頻度を多くするという機構を持つ。内部の自発的な方向転換という機能と外部情報が方向転換頻度に変化を与えるという機構から、結果的に自律的に探索的な行動が出現している。もし当初仮定したように、ランダムに動いているゾウリムシが偶然に適温域に入ると、温度を感知しそこで止まるかまたは泳ぐ速さが遅くなることを温度走性行動とすると、これは他律的な行動となる。システムが自発性を持ち、そこに環境の情報を取り込まれると自律性と見られる行動になる。

筋肉は自律的に一定の緊張状態を保つことができる。これは意識に上らない脊髄の伸張反射の結果である。遠心性の運動神経細胞の自発放電により筋が収縮していて、同時に筋内の筋紡錘からの求心性の情報が発電を制御して筋緊張が保たれる。このとき外部から筋に力が加わると、筋紡錘からの求心性放電が多くなり、新しい筋緊張状態に移る。すな

わち自発的な収縮機構に筋緊張情報のフィードバックが掛かり、自律的な筋収縮という機能がでる。

システムに有効エネルギーの流があり自己組織化がでて、環境のゆらぎや内部のゆらぎについての情報によるフィードバックがあつて自律性がでてくる。機構が機能を生み、機能が機構を変化を与えるという循環が自己組織化であり、そこに情報が加わって自律性が現れる。すなわち低レベルのシステムでは自律性に必ずしも意識の存在を必要としない。こうして各レベルの自己組織化的な試行錯誤で自律性が得られ、生物システムの進化の過程においてより大きいシステムの自律性は現れてきたものと考えられる。

2. 4 機構と機能

システムの成因としての内部要因と環境要因という2つの原因をもう一度考えていく。この2つの原因に性質の違いがあることは注意しなければならない。システムの内部要因は必然的に機構(しくみ)を決定する。したがって内部要因の変化は機構を変化させ、その結果として機能または作用を変える。これに対しシステムの環境要因は対象に機能(はたらき)を要請するものである。環境要因の変化はシステムに対して機能の変化を要請し、したがって2次的に内部機構の変化を要請する。しかし目標というものが、多くの異なった途を経て同じように到達できるように、機能も多くの異なった機構、手段で実現され得る。環境要因の要請は機能発現のための機構、手段の差異については無頓着である。外部に対する機能さえ満足できればよい。

内在原因に対してそれは「如何にして? どのような内部機構で?」という問いをだし、外在原因に対してそれは「何のために? どのような機能をもつか?」という問いを発する。すなわち自然やシステムについては「かくかくの内部機構を持って、しかじかの機能を」と考えて理解が完了する。システム認識では内部機構とその外部への機能の両面の理解が必要である。

生物学において問題を創り出すことが、時に解答を得ることより重要である。問題を見出せばいずれ解答を得ることができる。生物システムの問題も「どのような内部機構が存在し、なんのために機能しているのか?」という形で作る。ローレンツは動物の

行動についても「どのような仕組みが存在し、なんのために働いているのか?」、さらにそれらは「どのような進化の過程で得られたのか?」を考察する必要のあると述べている[4]。前章の生物の認識についても機構、機能、進化の3側面から考えてきた。

対象を固定化したシステムに「どのような内部機構が存在するか」と問いは常に正当性を持つ。したがってある研究対象について、その内部機構を実験条件下で明らかにできる可能性はある。しかしその時の実験条件が環境要因を構成しているの、その対象が自然条件に置かれた時「どのような機能をもつか?」また「どのような進化の過程で得られたのか?」という問いに、常に答えが得られるとは限らない。このことは分析的な実験研究で常に念頭に置く必要がある。

2. 5 システムとサブシステム

存在が認識できる対象について、システム境界を作り内部をシステムとする。システム境界の外を環境と呼ぶ。しかしシステム認識といった場合、単に境界で仕切られた世界の一部の認識というだけではなく、その内部の多くの要素の相互作用の結果が持つ自律性を含めた複雑な機構と、外部の多くの環境要因に対する機能を問題としなければならない。

われわれは自然システムの中に深い概念的階層構造(ヒエラルキー)を見る。どの階層レベルを選んでも、システムとして認識することが可能である。すなわちシステムは相互作用を持つサブシステムの集合に分解することができ、サブシステムはさらに下位のシステムに分解できる。そこで下位システムの相互作用は上位システムのために機能している。下位システムは他の下位システムと協同して上位のシステムのために働き、上位のシステムの目的のため下位システムが働いているように見える。すなわち相互に作用するサブシステムへの分解可能性、および上位の目的と下位の機能が繋がれた階層構造がシステムの特性的の一つとなる。この階層構造の概念は、不均質なシステムが不均質な環境の中にあるとする考え方でもある。

目的因仮説は制限、選別、淘汰といった環境要因の一部にすぎないことは述べてきた。一方われわれは似た機能は似た目的に仕えるものであり、似た意図によって作られてきたと考える習性をもつ。目的

因はそれに対する単一の機能を要求する。しかし環境要因に多くの異なる機能を要求するもので、神ならぬわれわれではそれら全てを数え上げることはできない。環境要因の一部を選んで目的因とし、対象の持つ機能を目的論的に認識することはある妥当性を持っていることを以下に述べる。

私は、私が講義または研究をしているとき大学の一要素であり、大学から目的因を受けている。しかし私が「町を美しくする運動」の清掃作業に従事したり、自治会役員の一人であるときは町内会から目的因を受けている。私が家庭にあるときは家族から目的因を受けている。このように環境が異ると目的因も異なったものを推定することが可能なる。すなわちシステムに対する唯一の目的因というものは決定することできない。しかし逆に環境要因として考えられるものは、いずれも目的因の候補になりそれに対する機能を考えてシステムを固定することは可能となる。大学教員としての私、町内会の私、家庭における私、いずれにしても私というシステムを固定することができる。

環境要因または目的因の選択が恣意的であるが、システムを選べばシステムの範囲を限定することができる。すなわち境界線を引くことができる。世界地図から日本を選ぶことができる。地図上の日本は東京その他各地を含み、東京は各区、市町村を含む。選ばれたシステムはそれより下位のシステム全てを物理的に含む。またそれ以外のものは含まない。システムの規模は常に有限であり、システムは環境との間を概念的なシステム境界で仕切ったものとなる。自然システムの全概念的構造はツリー状の階層のものでなく、システムの外部に上位システムがあり、システムの内部にサブシステムがあるといった、環境要因に対する機能と内部要因による機構が縦横の格子状に繋がれた網目を考えることになる(第1図)。上下システムレベルの縦方向の線が機能(はたらき)の繋がりを示し、サブシステム同志の横方向の線が機構(しくみ)の繋がりを示す。

ここで目的と見たものは前章で述べたように、多数にわたる外部の環境要因の一部を選んだものであることは言うまでもない。特定の河川というシステムの自然環境要因は天候、雲、湿度、地形、降水、森林、野原、動植物、人間、田畑等である。河川の一つの機能は、陸上の降水、積雪、湿原での蓄水を、

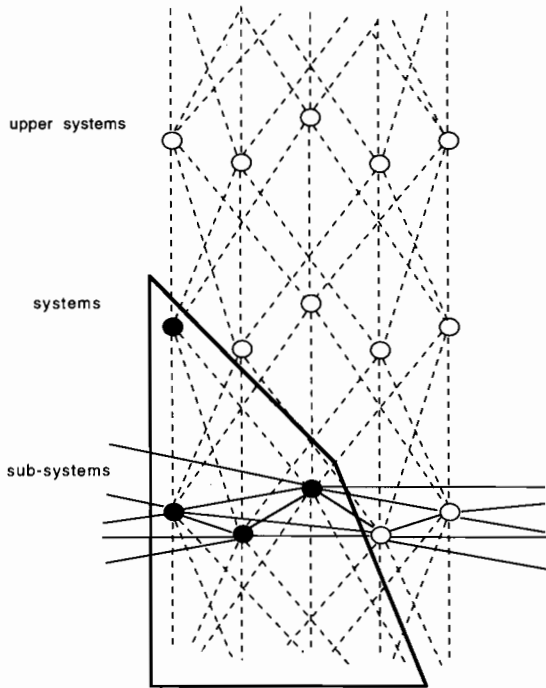


Fig. 1.

蒸発機能を持つ湖沼または海へ還流することにある。このとき河川の水に含まれるすべてものは流水と共に運ばれるため河川は土壌形成の機能も持つ。同時に陸上動植物の水資源、水性生物の生態環境系等の機能役割も持つ。人間的な目的因から見た河川の機能は治水、農業用水、工業用水、上下水道、交通、運河、観光、電力等々である。

上記各機能は、河川のサブシステムとしての山地、森林、湿原、田畑、地下水、流路、小川、堤防、滝、ダム、河川、河口およびそれらの流量、土壌、動植物相等といった内部機構の相互作用をもって実現されている。

一般に多数の環境要因の中から一つを恣意的に目的因として設定し、一つのシステムを指定する。河川の例をとれば治水、用水、水道、交通いずれを目的と考えても誤りではなく、一つの川システムを指定できる。また自然環境要因への機能のいずれかも目的となり得る。こうして特定の河川をシステムとして選ぶ。恣意的に一部の目的、機能から選んだシステムは、当然その機能でもってシステムの全体性を規定することができない。

システムの全体性を考えるときは一部の機能からではなく、内部要因を構成する内部機構を対象とす

る必要がある。自然システムの全概念的構造は網目の格子状構造のものであることを述べたが、システムを指定した場合には通常の意味での概念的ツリー構造となる。すなわち指定したシステムとは相互作用する概念的ツリー構造を形成するサブシステムの集合に与えた名前である。サブシステム以外に加わるものはない。すなわちシステムを構成するサブシステム以下の階層の全てを含むものになる。したがって、サブシステムを内部要因とする機構を考える。

サブシステムに入る外部からのエネルギーの総和がシステムに入るエネルギーとなる。サブシステムに入る外部からの情報の総和がシステムに入る情報となる。システムは環境に対して機能を持つものとしたが、それはシステム内部のエネルギーと情報の過程が自律性ある内部機構となって発現し、その結果として環境要因に適応している。したがってシステム内部機構を構成している構造、エネルギー流と情報流からシステムを考える。

2. 6 システムの概念構造

システムの環境への機能を見ると動的エネルギー側面を主とするもの、物質構造側面を主とするもの、また情報側面を主とするものがある。それぞれを人工システムに例えると自動車のように動的エネルギー機能を主とするもの、建築物のように物質構造機能を主とするもの、コンピュータのように情報機能を主とするものがある。一般にシステムはそれら3側面の機能と機構を常に併せ持つものである。生体システムについてもエネルギー、構造、情報の3つの機能と、それらに対応する内部機構を持つ。

エネルギー側面からシステム内部機構を見るときは熱力学法則であるエネルギー保存則とエントロピー生成則に従うことが期待できる。これら熱力学の因果関係を考えれば、どのようなシステムであっても、またどのシステムレベルであっても、そのシステムの全体性を熱力学で保証することが可能となる。したがって対象とするシステム内部機構については熱力学的考察からその全体性を保証し、それに物質構造側面および情報側面を付け加え、システムを考える手段とし、それら内部機構による外部への機能を検討していく。

システム認識についての以上の考察をまとめると第1図のように図式化できる。システムは少数または中程度の数のサブシステムの相互作用からなるが、第1図では単純化して3つのサブシステムから成り立つシステムとしている。各レベルのシステムを丸印で示し、システム階層を上から上位システム、システム、サブシステムと呼べば、認識上で、上位システムとシステム、システムとサブシステムの間の機能的関係といった、循環的な相互条件の構造を考えられることになる。第1図において、縦方向の細い点線で上下システム間の目的因(機能要請)―内部要因による機能といったシステム認識上の循環的格子条件を示している。縦方向の細い点線で示した目的―内部要因といったシステム認識上の循環的格子条件では、システムの全体性を保証することはできない。

網目状の横方向の実線でサブシステム間のエネルギーと情報の流の機構的な因果関係を示し、サブシステムの相互の流と開放性にもとづく外部との交流を表現している。横方向の繋がり方は概念的なシステム構造を表現している。熱力学による要請から、エネルギー流は熱力学の法則のエネルギー保存則とエントロピー生成則に拘束されているので、内部要因である横方向の網目状のエネルギー流からシステムの全体性が保証できる。

自然システムの全概念構造は、ツリー状の階層のものでなく、格子状の網目状のものである。しかし特定のシステムは、図中の太線で切り取った変形4角形の、概念的ツリー構造のものをいう。われわれがシステムとして認識するのは変形4角形内のサブシステムの集合である。すなわち概念的なツリー構造を囲む変形4角形をシステム境界として、システムの内部と環境を分ける。変形4角形の外部が環境要因となり、システムはそれに対して機能を発揮する。変形4角形のシステム内部の諸過程が内部要因、すなわち内部機構となる。

すなわちどのような機能がどのような機構で実現できるかという関係で見る。物理的な規模は上位システムになるほど大きく、下位システムになるほど小さくなる。あまりに深いシステムレベルを考えると上下に変化していく環境要因と内部要因の関係が不明瞭になる。したがってシステムを無意味なほど低い階層まで分解することはしないし、また高い階

層まで統合することもしない。システム認識のためには2～3段のシステムレベルを考える。

自然対象についてそれが存在し、外部に対して機能していることを根拠に、対象にはシステムがあると考え。「どのような機能がどのような機構で実現できるか」、すなわち環境要因(機能要請)と内部要因(機構)による機能の関係といったシステム認識は生物を理解する上で役立ってきた。対象とする自然にわれわれの認識通りの秩序があるということの絶対的な検証は不能であるとしても、対象にもシステム認識に近い秩序が実在し、そこに共通する何物かがあると考えることはできる。このようなシステム認識についても経験に曝し修正していくことで自然の理解に近付ける。

以上のシステム認識を用い、システムの分析と統合の手段を提供する回路網熱力学は次章では解説する。

第2章 「システム認識」のまとめ

第1章で、生物の生得的な認識機構で、迅速で確実度の高い認識が得られると述べてきた。しかし一方では生得的な認識機構のみでは環境変動に対する柔軟性がなく、違った条件では間違ふことが多い。高等動物では生得的な認識機構以外に、学習による認識機構を持ち、環境変化に柔軟に対応できるようになっている。すなわち思考と学習により複合的な判断ができるようになってきた。われわれ人間はさらに複雑度の高い自然についてシステムとして認識することができる。

さてシステム認識とは何か、またはシステムとは何かが問題となる。人工システムでは人間が与えた目的を果たす機能と、多くの要素の相互作用からなる機構を持ったものとしてシステムが理解できる。しかし自然システムは何ものかが目的を与えてきたものとは考えられない。自然システムは自己組織化によりできたものである。ここで自然システムとその環境を考える。自然システムは動的で不均質な構造を持つ。一方環境も、その一部である大気のような安定な環境の除けば、同じく不均質な構造を持っている。この構造の中に構造があるという見方はシステムの中にサブシステムを見るといったシステムヒエラルキーの概念構造でもある。したがってわれわれが目的と見たものは環境要請に対するシス

テムの機能の一部であることが解る。

システムと環境の両者での動的で不均質な構造は生物システムを介する有効エネルギーの流を可能として生物システムという散逸構造を維持するため役立ってきた。ここでは自己組織化するシステムの自発性と自律性が環境適応に一役を担う。システムに有効エネルギーの流があって散逸構造と自発性が生まれ、環境と内部のゆらぎについての情報によるフィードバックがあってシステムに自律性がでてくる。すなわち環境要因の要請を情報として内部の機構が感知し、それに適応した機能が発揮される。

われわれのシステム認識ではシステムを固定し、システムの機構(しくみ)と機能(はたらき)の関係で理解する。われわれが目的と見たものはシステムの機能の言い換えであることは述べた。システムを目的論的に見ることは、システムの範囲を決定することに役立つ。恣意的な目的論でシステムの全体性を保証することはできないが、システムの範囲を決定すればその内部機構から全体性が保証できることになる。

システム認識ではシステムヒエラルキーの縦方向は機能関係で理解し、サブシステム同志と環境の有効エネルギーと情報の流の横方向の内部機構の関係で理解する。すなわち機能と機構という格子状のシステム構造として世界の秩序を見る。特定のシステムといった場合は切り出したサブシステム以下のツリー状構造のものになる。このとき有限のサブシ

テムの集まりの機構が作り出し、システムが機能を発揮する。いずれのヒエラルキーレベルであっても有効エネルギーの流がサブシステムの機構を作り出すために必要となる。システムの全体性は熱力学的にサブシステムの横方向の有効エネルギーの流から保証できるものとなる。このことは次章の「回路網熱力学」で述べる。

システム認識では「システムにどのような仕組みが存在し、システムはどのような要請のために働いているのか？」を考察する。このようなシステム認識についても経験に曝し修正していくことで自然の理解に近付けると考える。さらに生物システムについては「どのような進化の過程で得られたのか？」を考察するが、システム認識についていえば、学習機能を持つ相当高度な認識装置と自律性を持つ生物の進化段階で得られたものと思われる。

(2章) 参考書

10. フォン・ベルタランフィー, 長野 敬, 太田邦昌訳, 『一般システム理論』みすず書房 1973 東京
11. ハーバート・A・サイモン, 稲葉元吉, 吉原英樹訳, 『システムの科学』パーソナルメディア株式会社 1987 東京
12. ジェラルド・M・ワインバーグ, 松田武彦監訳 増田伸爾訳, 『一般システム思考入門』紀伊国屋書店 1984 東京
13. エーリッヒ・ヤンツ, 芹沢高志, 内田美恵訳, 『自己組織化する宇宙, 自然, 生命社会の創発的, パラダイム』工作社 1986 東京

システムの認識と統合 3

第3章 システム統合

3. 1 パワー釣合則

自然科学の対象としてのシステムを認識するについては、ダイナミックな内部因果関係による機構の認識が重要となるが、さらに不均質な環境要因に対するシステムの機能を常に考える必要があることを前章までに述べてきた。環境という構造の中にシステムという構造があるという見方は、システムの中にサブシステムを見るといったシステムヒエラルキーの概念でもある。このような環境要因と内部要

因に従って存在している自然対象について、恣意的な目的論であってもシステムを設定することはできる。こうして生体システムのような極度に複雑なシステムについても、システム境界とシステムを設定することは可能である。ここでシステムの環境に対する機能とシステム内部機構の相互補完的な認識が必要不可欠となる。

システム内部機構の全体性を熱力学的因果関係から保証する手段を考える。生体システムは不均質な構造を持ち、物質、エントロピーを含むエネルギーと情報の出入りに対して開かれていて、かつ非定常

状態にある。また環境も不均質な構造を持つ。このような開放システムを理解するためには分析法、統合法共に新しい手段と根拠を必要とする。

まず熱力学を導入するため、ある安定で均質な環境と均質な開放システムを考える。こうした場合、ある環境を基準としたシステムの有効関数という熱力学関数を導入することが可能となる。環境は不均質な構造を持つとしたが、比較的安定で均質な部分もある。例えば大気という環境を基準とすれば温度、圧、気体分圧は安定で均質と見做すことができる。そうした環境を基準としてシステムの有効関数を決める。一方不均質なシステムもその微少部分を考えれば均質と見做すことが可能となる。すなわち局所平衡の仮定をおき、各局所では熱力学関数を使えるとする。そうすれば各局所で有効関数を決めることができ、そうして全体としての不均質なシステムの有効関数を決めることが可能となる[14,15]。

Gibbs は有効関数という熱力学関数を提出している[16~18]。最近にいたり有効関数の有用性が再認識されるようになり、工学でよく用いられるようになってきた[16~18]。有効関数は均質なシステムが使える有効エネルギーを規定するものであって、全エネルギーから無効エネルギーを差し引いた形で定義されている。大気のような安定な環境の温度 T_0 と環境圧 p_0 に置かれた均質なシステムの温度を T と圧を P とした場合、システムが大気環境と平衡になるまでに使用可能なエネルギー変化は、Gibbs の自由エネルギー変化、 $dG (= dU + p_0 dV - T_0 dS)$ 、以外に、圧、温度が平衡になるまで圧差と温度差による部分 $-(p - p_0) dV + (T - T_0) dS$ が利用可能なエネルギーとして加わることになる。したがってシステムの有効関数変化 dA は次になる。

$$dA = dG - (p - p_0) dV + (T - T_0) dS \\ = dU + p_0 dV - T_0 dS \quad (3-1)$$

有効関数変化の定義では安定な大気環境の温度と圧でもって定義されていて、システム自体の温度や圧に何らかの条件も課せられていない。(3-1)式の表現は、内部エネルギー変化から無効エネルギー変化であるエントロピー変化に環境温度を掛けたものと無効体積仕事を差し引いた形となっている。均質のシステムの温度と圧が環境のそれらと等しいときは、有効関数変化 dA と自由エネルギー変化 dG は同じものになる。

有効関数は環境と異なる圧、温度を持つシステムの考察で有用となる。Rant や押田はある環境下の有効関数からそれと平衡になったときの有効関数の差分を「エクセルギー」と名付けて、その有用性を示している[19,20]。エクセルギー変化と有効関数変化は同一のものであり、変化を問題とするこの論文では有効関数の変化という言い方で統一する。環境の安定な圧条件を考えて、開放システムのエネルギーの出入を成分を含むエンタルピーの出入りで評価する。環境とシステムの間を出入りするエンタルピー流は δH で、エントロピー流は $\delta_e S$ で示すことにする。以下では同様に環境とシステムの間を出入りする微少変化を記号 δ で示し、システム内部での微少変化記号 d で示して、両者を区別して用いる。

開放システムにおいても熱力学法則は成立する。熱力学の保存則である第一法則は(3-2)式に示すように、正味エンタルピー流がシステム内部エネルギー変化 dU と無効体積仕事 $p_0 dV$ の和と釣り合うという形式で示される[16,17]。

$$\delta H = \delta H_{in} - \delta H_{out} = dU + p_0 dV \quad (3-2)$$

一方プリゴジンに習って、環境との間を出入りする熱、成分に含まれるエントロピーを $\delta_e S$ とし、システム内で生成されるエントロピーを $d_i S$ とすれば、それらの和がシステム内部エントロピー変化 dS と釣り合うという(3-3)式の形式で熱力学第二法則が示される[21,22]。

$$\delta_e S + d_i S = \delta S_{in} - \delta S_{out} + d_i S = dS \quad (3-3)$$

(3-2)式で示したように、内部エネルギー変化と無効体積仕事の和は、正味のエンタルピー流入で表現できる。また(3-3)式の示したように、エントロピー変化 dS は正味のエントロピー流入と生成エントロピーの和で表現できる。したがって(3-1)式は次に書き換えることができる。

$$dA = \delta H_{in} - \delta H_{out} - T_0 (\delta S_{in} - \delta S_{out} + d_i S) \quad (3-4)$$

(3-4)式でシステムと大気環境との間を出入りするもの(δ)を左辺に、システム内部での変化(d)を右辺に別けて整理すれば次の釣合式が得られる。

$$\delta H_{in} - \delta H_{out} - T_0 (\delta S_{in} - \delta S_{out}) = dA + T_0 d_i S \quad (3-5)$$

(3-5)式左辺を見ると、環境の間を出入りするエンタルピー流から環境の間で出入りするエントロ

ピー項を差し引いた形式になっている。すなわちシステムへの正味のエネルギー流から無効エネルギーを差し引いた形で有効エネルギー流を示している。この左辺の有効エネルギー流が右辺のシステムの有効エネルギー変化と生成エントロピー項の和と釣り合う。

エントロピー生成 $d_i S$ に環境の温度 T_o を掛けたもので生成エントロピー項としているが、これは散逸過程を示すものである。散逸過程はシステムでの有効エネルギーが使えなくなっていく過程を示す。

ここで(3-1)式の有効エネルギー変化や(3-5)式の釣合式は均質なシステムに適用されるものであることに注意が必要である。しかし有効関数はシステムの温度や圧に条件を課していないから、局所平衡の成り立つ微少部分をサブシステムとして、それら各々で(3-1)式の有効関数変化を定義することができる。すなわち安定な環境を基準とした有効関数変化の総和からシステム全体の有効関数変化を定義する。局所サブシステムの内部エネルギー変化、体積変化、エントロピー変化、圧、温度が既知とすれば全体の有効関数変化が決定できる。すなわち有効関数変化と局所平衡の仮定から、不均質なシステムについても全体についても(3-5)式の釣合式も定義することができることになる。

有効エネルギー変化の釣合関係(3-5)式は局所サブシステムについても、システム全体についても成立する。動的システムでは状態というよりも状態変化を考える必要がある。したがって有効エネルギーの変化というよりはその変化速度を問題とする。以下においては有効エネルギーの流や変化速度をパワーと呼び、パワーを単位として考えていく。無効エネルギーになっていく過程は散逸と呼ぶ。開放システムへの正味の有効エネルギーの流であるパワー流 P_{ex} を流入出の差分として次で定義する。

$$P_{ex} \equiv (\delta H_{in} - T_o \delta S_{in})/dt - (\delta H_{out} - T_o \delta S_{out})/dt \\ = (\delta H_{in} - \delta H_{out})/dt - T_o (\delta S_{in} - \delta S_{out})/dt \quad (3-6)$$

このことでパワーの正味流入は、システムのパワー蓄積速度とパワー散逸の和になるという次のパワー釣合式(7)が得られる[14,15]。

$$P_{ex} = dA/dt + \Phi \quad (3-7)$$

ここで散逸関数: $\Phi = T_o d_i S/dt$ を定義している。パワー釣合式(3-7)は局所サブシステムについて

も、システム全体についても成立することについても繰り返し述べ、これが動的な生体システムを扱う基本式となることを強調しておく。

3. 2 パワー混在系

生体システムでは幾種類ものパワー過程が混在している。局所サブシステムでも同様である。すなわち局所サブシステムに含まれる全ての化学成分の各々のパワー過程、力学的過程、水力学的過程、電気的過程、熱的パワー過程等が進行している。しかもそれら幾種類ものパワー過程は内部各局所で相互に作用してパワー変換したり、散逸したり、さらに外界とシステムの間で出入りしている。動物では栄養物と酸素の化学反応のパワーは力学的な筋運動、水力学的な血液循環、電気的な神経インパルス、生体膜の物質輸送、熱等々の異なるパワーに変換されている。したがって生体システム内部の局所サブシステム毎の、またパワー各種毎の蓄積、変換伝達と散逸を考えていく必要がある。

まず環境と出入りする全てのパワーを考える必要がある。すなわち出入りする全てのエネルギー種の出入りを考える。個々のパワー種を i とし、それらの外部からの正味流入を式(3-6)にしたがって、 $P_i = (\delta H_{in} - \delta H_{out})_i/dt - T_o (\delta S_{in} - \delta S_{out})_i/dt$ とする。一方システム内部でのパワー変換伝達を考え、パワー i から j への変換を P_{ji} とすれば、個々のパワー種についての釣合式は次になる。

$$P_i = dA_i/dt + \sum_j P_{ji} + \Phi_i \quad (3-8)$$

(3-8)式はパワー種 i についての釣合式を示すものであり、局所についても全体についても成立する。全てのパワー種の局所の総和して全体についてを考えるとパワー釣合式(3-7)も一度成立する。

$$P_{ex} = \sum_i P_i = \sum_i dA_i/dt + \sum_i \sum_j P_{ji} + \sum_i \Phi_i \\ = dA/dt + \Phi \quad (3-7^*)$$

すなわち、パワーの蓄積は $\sum_i dA_i/dt = dA/dt$ 、パワー散逸は $\sum_i \Phi_i = \Phi$ であるので、変換伝達パワーの総和は零、 $\sum_i \sum_j P_{ji} = 0$ 、となる。局所の変換伝達パワーは保存的で i から出るパワーは j に入るパワーに等しく、変換パワーは $P_{ji} = P_{ij}$ となる。したがって総和も零、 $\sum_i \sum_j P_{ji} = 0$ 、と保存的な変換になる[14,23]。

パワー変換の間、パワーの蓄積も散逸もなく単にパワー種を変換し伝達する。したがって各種のパ

ワーを考えれば、システムを細分した局所に置けるパワー種の出入り、蓄積、散逸と変換伝達の4種類のパワー過程を考えることになる。動的なシステムでは有効エネルギーの変化速度または流をパワーと呼ぶことは前にも述べた。パワーをワットの単位($W = J/s$)を持つ保存的な流変数と共役する力変数の積で表現し、その量と種を明らかにする。上記4種類のパワー過程で流変数と力変数の間に、おのおの実験的な因果関係がある。後に述べるように流と力の因果律の考察は回路として組み上げるときにも重要な情報となる。また因果律の導入は回路グラフ構築時の拘束となりグラフ化を容易にする。

3. 3 回路理論

回路とは、何種類かの回路素子が網目状に繋ぎ合わせて作られた物理システムのモデルであって、そこに保存的な流とそれに共役した力が分布しているものをいう。これは回路グラフとして理論的に取り扱うことが可能となる。回路理論は電気回路の発展に負う工学の理論で、約百数十年前にオームによってオームの法則が発見された。これはパワー散逸体としての抵抗という回路素子の特性に関する法則であり、素子での流と力の因果関係を規定するものである。その後、抵抗体のみならず、パワー蓄積体である容量体と誘導体、パワー変換体である変圧器とジャイレーター等の回路素子での流と力の因果関係が求められてきた。

続いて約百五十年前にキルヒホッフによってキルヒホッフの電圧則(KVL)と電流則(KCL)が発見された。この法則は素子特性とは関係せず、接続のされ方、すなわち接続トポロジーのみに関する法則であって、力の連続性と流の保存性に関係するものである[23]。キルヒホッフの電圧則は連続の要請である。直列接続での流変数 f は単一であって、方向($\sigma_i = 1$ or -1)を考えた電圧 e_i の総和が零になるという法則を KVL という($\sum_i \sigma_i e_i = 0$)。キルヒホッフの電流則は保存の要請である。並列接続での力変数 e は単一であって、方向を考えた電流 f_i の総和は零になるという法則を KCL という($\sum_i \sigma_i f_i = 0$)。

直列接続では電流が単一であるので、その電流と各枝の電圧の積であるパワーの総和は KVL からやはり零となる($f \sum_i \sigma_i e_i = 0$)。並列接続では電圧が単一であるので、その電圧と各枝の電流の積の和であ

るパワーの和は KCL からやはり零となる($e \sum_i \sigma_i f_i = 0$) (後述 3-16, 3-17式参照)。回路は直列接続と並列接続で接続されているものであるから、任意の瞬間での回路の全ての枝の電位と電流の積の和は零となる。これを電力釣合則という。この法則の一般性と有用性を認識し、喧伝したのが B. D. H. Tellegen あり、回路での電力(電気パワー)釣合則はテレゲン定理と呼ばれている[23]。

テレゲン定理は素子特性や定常性に関するどんな仮定も必要としない。すなわち回路の繋がり方に依存し、熱力学過程の非線形性や時間依存性とは完全に独立している法則である。テレゲン定理を含む回路理論は工学技術的な理論であると共に、グラフの数理理論でもあって、電気回路のみならず各種輸送網を含む一般的な回路網の理論として発展してきた。すなわちテレゲン定理では、電気回路に限らず、一般化した保存的な流と共役する力の積がパワーの単位を持つとき、回路網のパワーは釣合うことを示し一般化が可能となる。

保存的な流変数 $f (= dn/dt)$ は KCL に従うので KCL 変数または通過変数と呼ぶ。それに共役する力変数 e は KCL に従うので KVL 変数または介在変数と呼ぶ。力変数は保存量の単位変化当たりの有効エネルギー変化の値を持つポテンシャル変数である($e = dA/dn$)。したがって、パワーは有効エネルギーの変化速度となる($ef = dA/dt$)。

パワー種によってポテンシャル変数($e = dA/dn$)は、化学ポテンシャル、電位、圧、浸透圧、力等と呼ぶ。こうしたポテンシャル変数の差分は駆動力 $X (= \Delta e)$ と呼び、駆動力 X による流は J (conductive flow) で示し、ポテンシャル変数 e と対になる流 f と区別する。 f と J は回路によっては一致することもある。各種のパワーと通過変数 f 、介在変数 e 、駆動力 X を単位を付けて第1表に示す。(第1表参照)

前節までに動的システムは熱力学的にパワー釣合が成り立つことを示してきた。また各種のパワー過程に細分し、分析することが可能となることは述べてきた。一方回路はテレゲン定理によりパワー釣合が成り立つ。すなわち熱力学と回路理論で共通するパワー釣合則から動的システムは回路理論で表現できることになる。生体システムについても各種パワー過程を回路モデルとして再構成し、再統合する

第1表 連 続 体 理 論

パワー種	保存的通過変数	介在変数 ($\delta A / \delta n$)	駆動力 (差分)
	(KCL 変数)	(KVL 変数: ポテンシャル)	
電 気 (電気量)	電流 I (A)	電位 Ψ (V)	ΔV
水力学 (体 積)	体積流 J_v (m ³ /s, L/s)	圧, 浸透圧 $p, -\pi$ (Pa, kPa)	$\Delta p, -\Delta \pi$
化 学 (物 質)	物質流 J_i (mol/s)	化学ポテンシャル μ_i (J/mol)	$\Delta \mu$
化 学 (反応量)	反応速度 J_R (mol/s)	反応親和力 A (J/mol)	
熱 (熱 量)	エントロピー流 J_S (W/K)	温度 $T - T_0$ (K)	ΔT

***力学系連続体理論ではオイラー (静止) 座標系を使用するが, 力学系ではラグランジェ (運動) 座標系を用いるので, 力と流の役割が交換される [23]. 機械的な力は保存則に従い通過 (KCL) 変数となり, 速度は介在 (KVL) 変数となる.

パワー種	保存的通過変数	介在変数
機械力学 (並進)	力 F (N : J/m)	速度 v (m/s)
機械力学 (回転)	トルク τ (J/rad)	角速度 ω (rad/s)

ことが可能となる.

生体システムのような動的システムでは, 構造上のパワー過程に加えて調節効果を持つ情報過程がある. システムの機能は, パワー過程, システム構造と情報過程の三側面の複雑で微妙な有機的統合の上に実現されている. すなわち対象とするシステムについてパワー釣合とシステムの構造 (トポロジー) を考えて回路モデルとし, それに情報側面を付け加える手段を考える. 回路網熱力学はそのような手段を提供するものとして開発されてきた [23~25].

回路網熱力学の成立によりシステムの熱力学的な分析と回路理論による統合が可能となった [14, 15, 23]. 実験的な研究成果から, システムを熱力学的に局所における単純なパワー過程にまでに分解する. すなわちシステムをサブシステムに細分する. サブシステムはそれよりさらに下位のシステムを全て含むものであり, 必要に応じてサブシステムはサブサブシステムに細分し, そこでの各パワー種の諸過程を考える. しかし限りなく細分していくことはしない. 熱力学的な基本要素として, 局所での個々のパワー種の流出入の過程に加え, 蓄積, 散逸と変換伝達の 4 種類のパワー過程で表現できるところで細分化は中止する.

局所での各パワー種の諸過程を考え, それらエネルギー過程をシステムとして再統合することが可能かどうかを回路理論により考える. そうしたサブシステムの相互作用からシステムの機能を考える. 段階的に上位システムとして再統合していく.

3. 4 結合枝グラフ法: 結合枝

パワー釣合関係から, 各局所の, 各種のパワー流入出, 蓄積, 変換および散逸の基本パワー過程にまでにシステムを細分する. 基本的パワー過程にまで分解したのち熱力学素子でそれらを表現する回路手段を考える. 多種のパワーの混在する開放系のエネルギー過程の統合表現のため, 過程と繋がり方が表現できる結合枝グラフ法という回路法を用いる [14, 15, 23~25]. 結合枝グラフ法は各種パワー混在系の表現に優れている. 結合枝グラフ法では熱力学的な多種混合のエネルギー過程が表現できると共に, 構造に由来するエネルギー過程の繋がりを示すトポロジー的拘束を表現することができる. さらに過程のパラメータを修飾するという手段で制御情報の記述も可能となる.

まず結合枝グラフ法という技術手段について紹介する [14, 15, 23~25]. 外部とのパワー輸送の流入出およびシステム内部のパワー流を半矢記号の結合枝で示し, 結合枝に流変数 (flow : f) と力変数 (effort or potential variable : e) を添えることでパワーの種類と量を明らかにする. 例えば電流と電圧であれば電気パワーを示し, 体積流と静水圧であれば水力学パワーを示す. 溶質流と化学ポテンシャルであれば化学パワーを示すものとなる. 結合枝グラフの名の由来は一般化したパワー輸送を方向を持つ半矢記号の結合枝で表現することにある. 結合枝はパワーを損失なしに瞬時に伝達する完全伝導体とみなす.

$$\frac{e}{f}$$

$$: P = ef \quad (3-9)$$

パワーの出入口をパワーポートまたは単純にポートと呼ぶ。結合枝の両端はパワーポートであり、一方からパワーが入り、矢印のある他端から保存的にパワーを出す。パワー輸送はこの結合枝で示し、外界からの輸送も、システム内の輸送もこの結合枝で示す。システム内部のパワー蓄積過程は一般化した容量体、誘導体(慣性体)を用い、結合枝を添えて可逆的なパワー蓄積と放出を表現する。動的システムの回路化ではエネルギー相互作用として現れるパワーの変換伝達過程の表現が必要となり、これに変換体を用いる。これら各種パワー過程の蓄積と変換は流変数 f と力変数 e との関係で表現する。パワー散逸過程は一般化抵抗体で表現し、抵抗体へ向かう結合枝に駆動力 X と流変数 J を添える。

熱力学素子には結合枝を付ける。このとき熱力学過程に由来する実験的因果律の考察が重要となる。すなわち結合枝を付けた熱力学素子は力が独立変数となるのか、また流が独立変数となるのかの因果関係を考える。力を独立変数とする場合は、熱力学素子に近い結合枝端に因果棒という縦棒を記入しそれを示す。因果棒のない結合枝端は流が独立変数であることを示す。

蓄積、変換、散逸の熱力学素子に添えた結合枝でポート数を表現する。1つの独立変数が1つの従属変数に関係する1変数関数は1ポートの熱力学素子を用いる。2つの独立変数が2つの従属変数に関係する2変数関数は2ポート素子を用いる。多変数関数なら多ポート素子を用いる。

3. 5 蓄積体

可逆的なパワー蓄積と放出の表現には容量体や誘導体を用いる。一般化容量体は可逆的にポテンシャルエネルギーを供給または蓄積する。容量体では流が原因となって力変数が変化する。その逆に力変数が原因となって流が起こることはない。すなわち容量体は流を独立変数とし力を従属変数とする実験的因果律を持つ。

1ポート容量体では一つの流 f の時間積分によって一つのポテンシャル変数 e が変化し決定される。流を独立とする容量体の結合枝では、その反対側が

力を独立とするポートになる。力を独立とする結合枝端には因果棒を添え、力を独立とする因果関係を明かにする。下図の結合枝方向はパワー ef の流出方向を示し、容量体のポテンシャル e は流出 f により減衰し、流入 $-f$ により増大することになる。

$$C \frac{e}{f}$$

$$: -de/dt = f/C \quad (3-10)$$

結合枝グラフで運動エネルギーを蓄積放出する表現に誘導体(または慣性体: I)を用いる。誘導体では力が独立変数となり、流の変化を起こす。1ポート誘導体の関係は次である。

$$I \frac{e}{f}$$

$$: -df/dt = e/I \quad (3-11)$$

しかしながら膜輸送システムの表現では運動エネルギーの変化は一般に無視できるので誘導体を用いることはない。

溶液は浸透圧、化学ポテンシャルといった2つの力変数変化が体積流と成分流といった2つの流によって起こる。溶液は体積流 f_v と成分流 f_i という二つの流が浸透圧 π_i と化学ポテンシャル μ_i という二つの力変数変化を決める次のような可逆的な2変数容量体素子で表現できる[14]。

$$\left| \frac{-\pi_i}{f_v} C \frac{\mu_i}{f_i} \right|$$

$$: -d\pi_i/dt = -f_v \pi_i/V + f_i RT'/V$$

$$d\mu_i/dt = f_v RT/V - f_i RT/n_i \quad (3-12)$$

この蓄積的な2ポート容量体の体積流と溶質流といった矢印方向の2つの流による自由エネルギー変化速度は $(dA/dt = f_v \pi_i - f_i \mu_i)$ である。2ポート容量体では体積流と溶質流という2つの独立変数によって2つの力変数の変化が起こり、流と力の因果律は浸透圧と化学ポテンシャルが従属変数となることを示している。全ての成分種は浸透圧物質であるので、溶液の成分種が多くなった場合、この2変数素子の組み合わせで表現する。

3. 6 パワー変換体

膜輸送系ではエネルギー連結として知られるパワーの変換伝達過程の表現が必要である。結合枝グラフ法では、この表現に変換体という2ポート素子を用意している。ここで相互作用の流と力の因果律

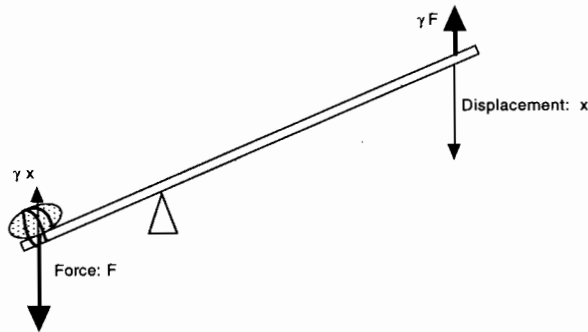


Fig. 3-1. Constitutive relation on energy transmission: Causality of "One displacement and the other force" interaction in a simple lever.

から見たエネルギー伝達の構成素関係を考える。エネルギーの伝達器の単純な例は槌子である。槌子では他端に負荷が掛かっている条件で一端を人が押すことでエネルギーが伝達される。A端の負荷力に比例した力がB端に現れ、人がこれに抗して押すとき、押す方のB端の変位に比例した変位が負荷を掛けているA端に出現する。この槌子の相互作用の因果関係から、「一端の変位と他端の力」がエネルギー伝達の構成素関係の独立変数対となることが解る。

すなわち一方の変位がある比率で他方の変位を起こし、同時に他方の力がその比率で一方の力として掛かる(図3-1)。ここで伝達されるエネルギーはいずれかの端の変位と力の積となる。変換比率を γ とし、一方の変位を x_1 、力を $F_1 (= \gamma F_2)$ とし、他方のそれらを $x_2 (= \gamma x_1)$ 、 F_2 とすれば、伝達されるエネルギーは $x_1 F_1 = x_1 \gamma F_2 = x_2 F_2$ となる。すなわち変位 x_1 と力 F_2 が独立変数対となる。

この因果関係は「一方の流と他方の力」に相互作用のある変圧器のエネルギー伝達の形式と同じである。一次の電圧がある比率で二次の電圧を決定し、二次の電流が同じ比率で一次の電流を決定する。従来、変圧器のエネルギー伝達の形式で「一方の流と他方の力」が独立変数対となる因果関係があることは多くの研究者により指摘されてきた。自然の相互作用の因果律においても、しばしば「一方の流と他方の力」のエネルギー伝達の構成素関係が見られ、このエネルギー伝達機構は変圧器型変換器で表現できることになる。

ここで槌子の例で押す人の消費するエネルギーは、伝達したエネルギーの他に、力に抗して押す人の内部エネルギー消費があることに留意しなければ

ならない。変圧器で言えば、消費電力は変換伝達パワーに二次側の内部抵抗によるエネルギー散逸が加わったものとなる。

膜輸送におけるパワー連結は、2つのパワー過程に相互作用があり、一方のパワーの一部が変換され他方に交換伝達される過程である。後述するように、膜輸送での体積流-溶質流連結におけるパワー伝達において、体積流に比例する溶質流(対流)が見られ、他方溶質流駆動力が体積流駆動力を修飾する関係がある。また膜輸送での熱浸透流においては、体積流に比例する熱流があり、他方温度差が体積流駆動力の一部になる関係がある。すなわち一方が流で作用し、他方は力で作用するという「一方の流と他方の力」の相互作用に因果関係がある。一方の流に比例した流が他方に現れ、同時に他方の力に比例した力が一方に作用するという変圧器型のパワー変換の形を取る。したがって変圧器型のパワー変換器でこの関係を表現する。

変換体はパワーを保存的に変換伝達する装置であって、入力パワーの種類を変換して出力パワーとして伝達する。変換は本質的に2変数関数であり二個の独立変数が二個の従属変数を決定する。変換過程で一方の流が他方の流に比例し、他方の力が一方の力に比例する場合、この変圧器型の変換体が用いられる。変圧器型の変換体では一方のポートの流と他方のポートの力が独立変数対になり、一方のポートの力と他方のポートの流が従属変数対になる[23]。力を独立とするポートには結合枝に因果棒を添えて示す。

$$\begin{array}{c} e_1 \\ \hline f_1 \end{array} \rightarrow \boxed{\gamma} \begin{array}{c} e_2 \\ \hline f_2 \end{array}$$

$$\begin{aligned} e_1 &= \gamma e_2 \\ f_2 &= \gamma f_1 \\ e_1 f_1 &= \gamma e_2 f_2 / \gamma = e_2 f_2 \end{aligned} \quad (3-13)$$

変換体はパワー種を変えるもので変換率 γ を添える。変換率 γ は一般に次元を持った値であって独立な流を γ 倍してパワー種を変え、他方の独立な力を γ 倍してパワー種を変えてパワーを保存的に変換伝達する。

変圧器型の変換体のほかに、変換過程で一方の流が他方の力に比例し、他方の力が一方の流に比例するジャイレーター型の変換体もある。ジャイレーター型変換体の変換コンダクタンスを g とするとその関係は次となる。

$$\begin{aligned} & \frac{e_1}{f_1} \rightarrow \boxed{g} \left| \frac{e_2}{f_2} \right. \\ f_1 &= g e_2 \\ f_2 &= g e_1 \\ e_1 f_1 &= g e_2 f_2 / g = e_2 f_2 \end{aligned} \quad (3-14)$$

しかしながら膜輸送系では一方の流が他方の力に比例するといった関係はないのでの回路表現にジャイレーター型変換体を用いることはない。

3. 7 散逸体

抵抗体は一種の変換体である。抵抗体はそこに入るパワーからエントロピーを生成して、パワー散逸を表現する。すなわち抵抗体は有効パワーを使用できない無効なパワーに変換する装置である。抵抗体はジャイレーター型変換体で表現できる。抵抗体は有効パワーを熱に変換する。このジャイレーター型変換体において変換コンダクタンスを g_s とする。ここで有効パワーを流 J と共役駆動力 X の積で表現し、変換して生成したエントロピー $d_i S/dt$ に局所温度 T の積とすると次の表現になる。

$$\frac{X}{J} \rightarrow \boxed{g_s} \left| \frac{T}{d_i S/dt} \right.$$

Haase は熱とエントロピーはエネルギー過程の進行で生成されるので、保存的な通過変数に成り難いということから Kirchhoff's 則を適用する回路化に疑義を提出した[26]。これに対して Perelson & Oster は Prigogine の関係式からエントロピーを保存的に取り扱えることができ、原理的に非等温系が回路化できるとした[27]。熱を有効エネルギーの一部として用いる非等温系のシステムにおいては生成

エントロピーを表現する 2 ポート抵抗体素子 R_s を用いる[15,24,27]。2 ポート抵抗体素子は有効パワーがエントロピー生成して熱になり、その熱放出を表現する重要な素子となる。

$$\frac{X}{J} \rightarrow R_s \left| \frac{T}{d_i S/dt} \right.$$

上記変換体表現では変換コンダクタンス $g_s = J/T$ 、したがって生成エントロピーは $d_i S/dt = JX/T$ となる。

エントロピー生成と温度の積は熱であり、熱を利用しない等温システムにとって無効パワーになる。熱を有効エネルギーとしないシステムでは散逸表現に 1 ポート抵抗体を用いる。抵抗体の結合枝には通過変数 J と共役駆動力 $X (= \Delta e)$ を添える。すなわち抵抗体は本質的にはパワー変換体であるが、一般システムでは生成したエントロピーは利用しないから散逸体の取扱になる。抵抗体への流入パワーは全てエントロピーを生成して無効エネルギーとなり、パワーが出てくることはない。したがって結合枝の方向は常に抵抗体に向ける。また無効となったエネルギーの表示はしない。

$$\frac{X}{J} \rightarrow R_s$$

$$R = X/J \quad (3-15)$$

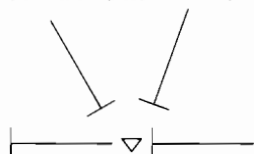
抵抗体それ自体には独立変数と従属変数といった因果律はない。抵抗体では駆動力が原因となって流を起こす場合と、抵抗体を介して流があるから力が発生する場合がある。すなわち駆動力が独立なら流が決り、流が独立なら力が決る。独立変数または従属変数は回路の接続関係により決定される。

3. 8 接続素子

結合枝グラフでは熱力学関係のみでなく、さらに熱力学素子の繋がりを示すトポロジー素子：並列接続素子と直列接続素子を導入している。接続素子は 3 つ以上の熱力学過程の組み合わせを表現する。直列接続素子として ∇ 印を、並列接続素子として $\bigcirc$ 印を用いる。 ∇ 印で示す直列回路では流変数が単一であり、Kirchhoff の電圧則が成立する。したがって直列接続素子に集まる結合枝は 1 つが流を独立変数とし、他の全ては力を独立変数とする。 $\bigcirc$ 印で示す並列回路では力変数が単一であり、Kirchhoff の電流則が成立する。したがって並列接続素子に集まる

結合枝は1つが力を独立変数とし、他の全ては流を独立変数とする。このトポロジー素子の導入でシステムの構造による熱力学過程の拘束を表現することになる。

直列素子は流が等しい直列回路を一括表現するもので、流を独立とする一つのポート以外のすべてのポートは力を独立変数とする因果律をもつ。

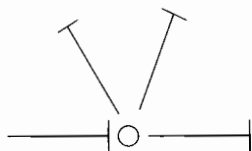


矢印方向を表現する記号として σ を用い、素子に入るときを1, 出るときを-1とすると直列素子でのパワー釣合は次となる。

$$\begin{aligned}\sum_i \sigma_i e_i f_i &= f \sum_i \sigma_i e_i = 0 \\ \sum_i \sigma_i e_i &= 0\end{aligned}\quad (3-16)$$

これはキルヒホッフの電圧則である。すなわち直列素子ではキルヒホッフの電圧則が適用できる。

並列素子では力が単一である並列回路を一括表現するもので、力を独立とする一つのポート以外のすべてのポートは流を独立変数とする因果律をもつ。



矢印方向を表現する記号として σ を用いると、並列素子でのパワー釣合は次となる。

$$\begin{aligned}\sum_i \sigma_i e_i f_i &= e \sum_i \sigma_i f_i = 0 \\ \sum_i \sigma_i f_i &= 0\end{aligned}\quad (3-17)$$

これはキルヒホッフの電流則である。すなわち並列素子ではキルヒホッフの電流則が適用できる。

以上膜輸送システムのための結合枝グラフの熱力学素子と結合枝の実験的因果律表現およびトポロジー素子について述べてきた。これらを組み合わせて基本回路のモデルを作成するときには次章で述べるようないくつかの考案が必要となる。

第3章 「システム統合」のまとめ

従来より、生体システムの熱力学的取り扱いを検討されてきたが、不均質で動的開放系であることから困難なものとされてきた[23]。今回は有効関数を導入し、局所平衡の仮定を置くことで、生体システムの熱力学的取り扱いが可能となることを示した。

局所有効関数の変化速度から生体システムのパワー釣合則が導出される。生体システムを細分して、パワーの入出力、蓄積、変換、散逸諸過程の釣合を考える。多種パワーの混在に関してはパワー変換の独立変数についての因果関係を考えたパワー連結機構を考える。一方回路理論はテレゲン定理により、全ての回路でパワー釣合が成立する。したがって熱力学的にパワー釣合のある生体システムが回路で表現できることになる。回路法として多種パワーの混在系の表現に適した結合枝グラフを紹介した。これは一般化した結合枝、蓄積体、変換体、散逸体を回路素子とするもので、さらに接続トポロジーを示す直列接続素子と並列接続素子を用いる手段である。これらを用いた回路モデルについては次の章で紹介する。

(3章) 文 献

- 14) Imai, Y (1996) Network thermodynamics: analysis and synthesis of membrane transport system. *Jpn. J. Physiol.* **46**, 187-199.
- 15) Imai, Y (1997) Network representation of thermoelectric and thermosmotic phenomena. *Int. J. Cir. Theor. Appl.* **25**, 219-228.
- 16) BEATTIE, J. A. and OPPENHEIM, I. (1979) *Principles of Thermodynamics*. Elsevier, Amsterdam.
- 17) HAYWOOD, R. W. (1992) *Equilibrium Thermodynamics ("Single Axiom" Approach) for Engineers & Scientists*. Krieger Publishing Company, Malabar, Florida.
- 18) CARRINGTON, G. (1994) *Basic Thermodynamics*. Oxford Science Publication, Oxford.
- 19) RANT, Z. (1956) Exergie, ein neues Wort für 'technische Arbeitsfähigkeit'. *Forsch.-Ing.-Wes.*, **22**, 36-37.
- 20) 押田勇雄(1986)「エクセルギー講義」, 太陽エネルギー研究所, 東京
- 21) PRIGOGINE, I and DEFAY, R. (1950) *Thermodynamique chimique*. Edition Desoer, Liege.
- 22) GLANSDORFF, P. and PRIGOGINE, I. (1971) *Thermodynamic theory of structure, stability and fluctuations*. Wiley-Interscience, London.
- 23) OSTER, G. F., PERELSON, A. S. and KATCHALSKY, A. (1973) Network thermodynamics: Dynamic modeling of biophysical systems. *Quar. Rev. Biophys.* **6**, 1-134.
- 24) KARNOPP, D. AND ROSENBERG, R. (1975) "System Dynamics: A Unified Approach", John Wiley & Sons, New York.
- 25) THOMA, J. U. (1975) "Introduction to Bond Graphs and their Application", Pergamon Press, Oxford.
- 26) HAAS, A., 1974, On the unambiguous generalization of Kirchhoff's laws. *Int. J. Cir. Theor. Appl.*, **2**, 257-259.
- 27) PERELSON, A. S. and OSTER, G. F., 1976. On the application of network theory to nonisothermal systems. *Int. J. Cir. Theor. Appl.*, **4**, 299-305.

記 号 一 覧

A	: システムの有効関数
d	: システム内部の変化
dA	: 有効エネルギー変化
dG	: ギブスの自由エネルギー変化
dQ (: TdS)	: 熱変化 T ; 局所の温度
diS	: 内部生成エントロピー
dU	: 内部エネルギー変化
δ	: 外界との輸送による流
$\delta_e H = \delta_e H_{in} + \delta_e H_{out}$	: 正味エンタルピー流
$\delta_e S = \delta_e S_{in} + \delta_e S_{out}$	: 正味エントロピー流
e = dA/dn	: ポテンシャル, 力
f = dn/dt	: 変化速度, 流
J	: 流, 抵抗流
P (= ef or JX)	: パワーまたは有効エネルギー変化速度
p ₀	: 環境圧
p ₀ dV	: 環境になす無効な体積仕事
S	: エントロピー
T ₀	: 環境温度
V	: 体積
X (= Δe , $\Delta \mu$)	: 駆動力
μ	: 化学ポテンシャル
$\pi = RTc$	: 浸透圧
$\Phi = T_0 d_i S / dt$	: 散逸関数
