

組織のゆらぎと自己組織化(1)

長谷川 光 圀

I 序

II 現代システム論研究の動向

1 システムのサイバネティクス

1-1 形態維持とファースト・サイバネティクス

1-2 形態生成とセカンド・サイバネティクス

1-3 意思決定とサード・サイバネティクス

2 システムのゆらぎと自己組織化

2-1 プリゴジンとハーケンの研究

2-2 マトゥラーナ=ヴァレラの研究

2-3 カウフマンの研究 (以上本号)

III 組織のゆらぎと自己組織化の事例

1 ゆらぎ, 自己組織化, カオス辺縁—概念の操作化—

1-1 ゆらぎの概念

1-2 自己組織化の概念

1-3 カオス辺縁の概念

2 ゆらぎ, 自己組織化, 進化の事例

2-1 ミクロの自由な振舞い

2-2 自己組織化の生成

2-3 選択の担い手と決定

IV 結

I 序

あらゆる物質, 生物, 人間社会には, 構造的ゆらぎ (structural fluctuation) が存在し, これがシステムのダイナミックな進化の契機となるということを発見したのは, 科学進歩に対するシステム科学の最大の功績である。なかでも, 私は, 生物学の世界ではウィナーのファースト・サイバネティクス (cybernetics) に始まり, 丸山のセカンド・サイバネティクスを経て, タシユジアン¹⁾のサード・サイバネティクスに至る研究系譜とマトゥラーナ=ヴァレラのオートポイエーシス論 (autopoiesis), そして物理・化学の世界ではプリゴジンの散逸構造論 (dissipative structure) や, ハーケンのシナジェティクス論 (synergetics) 等の貢献に注目したい。

然らば, この類の研究がなぜ社会システムや, 特に企業組織の研究に関係づけられるのであろうか。ヤンツは, いう。自己組織化の基本原理が単純な化学反応系や前細胞系のレベルで発見されたのは事実であるが, しかしこの原理はより高次の進化レベルに適用しようとする先取的試みに有用であるばかりでなく, 生態系や社会生物システムや社会文化システム (経済活動, 企業組織活動を含む) のダイナミクスに驚くほどリアルな記述を与える¹⁾。例えば, 企業組織過程の中の計画プロセスの事例に則して見れば, 計画の理論と実践は, 今日中期, 長期の計画に対する関心の高まりの中で, 抜本的な転換を余儀なくされている。短期計画の概念を時間的に拡大するだけでは対応できなくなっているのである。短期計画の目的は, 特定の比較的明確に認識された対象と目標を決められたプログラムに沿って効率的, 経済的に実現することにある。だが, ゆらぎ (= 自由度) を欠いた物差しでは, 長期の的を定めることは不可能であり, やがて計画は多層的概念に接近せざるをえない。即ち, 短期の戦術的あるいは作業的計画レベルを超えるものとして, 戦略的計画レベルがあり, ここでは, 非平衡構造が生成し, ゆらぎが段階的

1) Jantsch, E., *The Self-Organizing Univers*, Pergamon Press, 1989, p. 8.

に成長し、システムのダイナミックな進化のきっかけをもたらす。さらに、戦略的計画レベルの一部を成し、かつ上にくるものとして基本政策レベルがあり、ここで問題になるのは、企業組織の進化ダイナミクスが全包括的に社会経済的システム（例えば、輸送体系、通信施設、工業技術）のダイナミクスの脈絡の中で把握されるということである。マルチレベルの経営観は、一般的な思考や感情の好みからすれば、受入れにくいものである。しかし、経営者の一つの役割は、多層的レベルで同時にものごとを考え、感じ、絶えず新奇性を導入し、複雑性の増大の中に創造的活動を助長し、非創造的で、有望と思われない活動を停止させることで、この中にダイナミックな進化を求める態度にある。

この研究は、二つの課題をもっている。一つは、先ずサイバネティクスの諸研究と、マトゥラーナ＝ヴァレラのオートポイエーシス論について検討し、次にプリゴジンの散逸構造論、ハーケンのシナジェティクス論を明らかにし、そしてかつカウフマンの進化能力論 (evolvability) について言及することである。もう一つは、明らかにされたゆらぎ (fluctuation)、自己組織化 (self-organization)、そしてダイナミックな進化 (dynamic evolution) という一連のコヒーレントな過程を、企業組織の事例的実証研究、つまりデュポン社、GM社、スタンダード石油会社、そしてシアーズ・ローバック社の史的個別研究に当て嵌めて究明していくということである。

II 現代システム論研究の動向

現代のシステム論研究の重要な動きは、生物学的システム論研究と物理・化学的システム論研究とが一つの方向に融合しつつある点にみられる。先ず、生物学的システム論研究では、システムの全体と諸要素間の秩序関係（＝秩序構造）を理解する時に、逸脱を解消する相互的關係に焦点をあてる形態維持 (morphostasis) のシステム思考から、逸脱増幅 (deviation amplifying) の相互的關係を重視する形態生成 (morphogenesis) のシステム思考へ、ある

いはさらに逸脱の解消 (deviation counteracting) と逸脱の増幅がハイブリッドに生ずる相互的關係に注目する意思決定 (decision making) のシステム思考への展開が見られる。これらは、またファースト・サイバネティクス (first cybernetics), セカンド・サイバネティクス (second cybernetics), そしてサード・サイバネティクス (third cybernetics) として特徴づけられる。

だが、形態生成的あるいは意思決定的システム現象の説明は、われわれを十分に納得させるものではなかった。そのような中で、プリゴジンとハーケンは、物理・化学的システム論研究の側から、類似の現象についてそれぞれ説明の概念的枠組、つまり散逸構造論とシナジェティクス論 (= 協同現象論) を提示し、またマトゥラーナ=ヴァレラも、生物学的システム論研究の立場から、ほぼ同じ現象を取り上げ説明の概念的枠組化、つまりオートポイエーシス論の展開を試みている。そして注目すべき最近の研究者の一人、理論生物学者カウフマンは、最近になって意思決定的システム思考とプリゴジンやハーケンの研究成果に基づいて、新たにドラスティックな進化能力論を提唱している。

1 システムのサイバネティクス

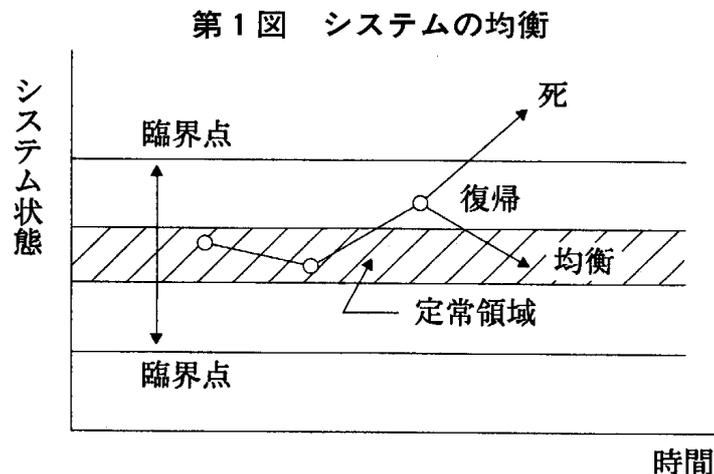
先ず、システムのサイバネティクス思考の検討から始めよう。

1-1 形態維持とファースト・サイバネティクス

形態維持という考え方は、キャノンのホメオスタシス (homeostasis) に関する研究²⁾に由来する。即ち、それは、変化する自然環境の中で、多くの動物が常にほぼ一定の体温を保持していること、換言すればその環境の変化に対応して内的状態を絶えず調整し、常にほぼ一定、つまり定常状態 (steady

2) Cannon, W. B, *The Wisdom of the Body*, W. W. Norton, 1932. 栖原六郎・大沢三千三訳『人体の叡知』, 1959年。

state)に体温を維持できる生物の持つメカニズムを意味する。また、それは、社会システムにも応用可能だとされる。そこで、システムの全体と諸要素間の秩序の相互的關係という点からみると、ホメオスタシスでは、第1図で示されるように、例えば動物の体温が 35°C という時、これは完全に 35°C をさすのではなく、 $34.5\sim 35.5^{\circ}\text{C}$ といった定常領域をさし、体温が定常領域を超えて上昇すると（逆も同様に）代謝作用を通じて、即ち逸脱を解消する相互的關係の作用を通じて定常領域に引き戻されることになることになると解釈される。



ウィーナーは、キャノンのホメオスタシスの概念をベースにサイバネティクス論、つまりファースト・サイバネティクスを展開した³⁾。サイバネティクスという言葉は、ギリシャ語のキベルネテース (kybernetes) を語源とし、哲学者プラトンが舟を操縦する操舵手に“ship of state (国という舟)”を操る政治家をなぞらえる際に、この言葉を用いたことに始まるといわれている⁴⁾。物理学者で、数理哲学者であるウィーナーは、たんに動物だけでなく、

3) Wiener, N., *Cybernetics*, M. I. T. Press, 1948. 池原止戈夫訳『サイバネティクス』岩波書店, 1962年。ウィーナーのサイバネティクス論がキャノンのホメオスタシスの概念から影響を受けているという指摘は、ベントランフィにみられる。Bertalanffy, L. von, *General System Theory*, George Braziler, 1968. p. 14. 長野敬・大田邦昌訳『一般システム理論』みすず書房, 1974年, 13頁。

4) Checkland, P. B, *Systems Thinking, Systems Practice*, John Wiley & Sons, 1981, p. 98.

人間の集団や社会システムから通信装置、自動制御機械及び神経細胞に至るまで、これらの活動や現象の中に情報のフィードバックによる制御ないし調整という性質が存在することに着目し、これを一括して動物と機械における制御と通信の理論と称し、これに広くそのサイバネティクスの意味の定義を付け加えた。このサイバネティクス論は、多方面に影響を及ぼし、大きな貢献をもたらした。特に、制御理論では、主体が既知の構造をもつシステムを対象とし、数学モデルと負のフィードバック情報 (negative feedback information) を用い、その一部の状態あるいは所与の目的からの活動の逸脱を解消し、それを最適化しようとする時に、サイバネティクスの思考が用いられた。しかも、ファースト・サイバネティクスでは、制御重視に加えて制御や情報等の新用語を積極的に活用し、システムを自己の意思下におくことを主要な目的とし、数学形式を重視する相互的關係に焦点をおくため人々の科学思想、つまり機械化社会の時代精神に訴えるところが大きく、かつコンピューターやサーボ・メカニズム等が華々しく脚光を浴びるにおよんで、この思想は多くの分野に浸透していった⁵⁾。

だが、ウィーナーのファースト・サイバネティクスには、ベントランフィの指摘するように、大きな問題が内在していた。つまり、生物は、栄養となる成分の流入と流出、生成と分解の中で自己を維持しており、生きているかぎり決して化学的、熱力学的平衡状態ではなく、それとは異なる定常状態にあると⁶⁾。換言すれば、生物は、代謝作用を通じて部分的にあるいは全体的に定常状態を維持して生命を保っている。対して、化学や熱力学の意味における平衡は、システムにとって死を意味し、生きた生物や社会システムにはなじまないということである (第1図を参照)。

5) 北原貞輔『経営進化論』有斐閣、1993年、77頁。

6) Bertalanffy, L. von, *op. cit.*, p. 39.

1-2 形態生成とセカンド・サイバネティクス

多くのサイバネティクスの研究者は、システムの全体と諸要素間の相互的関係が結果的に逸脱を増幅させるような事象にほとんど注意を払わなかった。だが、丸山は、システムの全体と諸要素間が逸脱増幅的な相互的関係を保持するケースは至る所に存在するとし、このような発想が早くから二、三の領域で効果的に用いられていると主張した⁷⁾。即ち、電子工学のラジオ発信機や経済学の経済発展論等がそれである。例えば、ミュルダールの経済発展論を引き合いに出していう。つまり、経済発展を遂げた国々では、経済的水準の地域的、社会階層的格差が減少する傾向にあるのに対し、経済発展の途上にある国々では、貧富の差は拡大する。経済発展を遂げた社会では、運輸、通信、教育、保健システム、福祉計画が社会全員の生活水準を均等化する。一方、経済発展の途上にある社会では、放任政策や自由市場の作用の下で、少数の特権的人間が多くの富や権力を蓄積し、貧しい層の生活水準は低下する傾向にある。低い生活水準、劣悪な健康、低い作業効率が互いに悪化を促進しあい、人種的、社会的差別や他の社会的、心理的、文化的要因も悪循環を強めた。同様に、国家間の関係では、世界の自由貿易は富裕な国々にとって有利となり、貧しい国々にとっては不利となっていると⁸⁾。

また、農村地帯における都市への発展も、同じ原理で説明できると。つまり、アメリカの中部の広大な平原は、当初農業の可能性に関して広く均質的な所が多かった。多くの開拓者は、西へ西へと旅を続けた。馬が一頭病気で倒れ、その持ち主はやむをえずそこで農場を開く。これが発端である。その後、いくらかの開拓者が来て、定住し、いくつかの農場が開かれ、農具店が出来る。この店が、農夫達にとって買物に来た友達と会話をする場所になる。料理屋が農具店の隣に立ち、次第に村が成長する。村は、農産物の取引を盛んにし、村の周辺には、さらに多くの農場と用品店が増える。やがて、農業

7) Maruyama, M., "The Second Cybernetics-Deviation-Amplifying Mutual Causal Processes", *American Scientist*, Vol. 51, 1963. p. 165.

8) *Ibid.*, p. 165.

活動の増加は、村の産業の発展を可能にし、村は、都市へと成長する。結果的に、当初の平原は、不均質になると⁹⁾。

もう一つの事例を岩石の風化で示しておこう。即ち、岩石の小さな裂け目に、水がたまり、その水が凍ると、氷の体積増大のため裂け目は大きくなる。裂け目が大きくなると多くの水がたまり、そこで裂け目は一層大きくなる。十分な量の水があれば、そこで小さな生物が生活でき、有機物質が蓄積され、それによって裂け目で木が成長を始めることになる。そこで、木の根は、岩石を割る程に裂け目をさらに大きくするであろうと¹⁰⁾。

丸山によれば、経済発展と貧富の拡大、農村地帯の都市への成長、そして岩石の風化作用は、初期条件や端緒の始動ではなく、むしろ逸脱を増幅する相互的關係、つまり正のフィードバック (positive feedback) 作用の結果であると。そして、彼は、システムの全体と諸要素間がそのように逸脱増幅的な相互關係をもつ場合を形態生成と呼び、またセカンド・サイバネティクスとして特徴づけた¹¹⁾。

ここで、システムの全体と諸要素間の相互的關係については、丸山に従って次のように説明されるであろう。例えば、アイゼン製鉄会社は、鉄鉱石から鉄をつくり、デクスター道具製作会社に売る。デクスター道具製作会社は、その鉄から道具をつくり、アイゼン製鉄会社に売るとしよう。そのように、デクスター道具製作会社の生産量がアイゼン製鉄会社の生産量に依存し、アイゼン製鉄会社の生産量がデクスター道具製作会社の生産量に依存するという、換言すれば一方の増加又は減少が他方の増加又は減少あるいは他方の増加又は減少が一方の増加又は減少を引き起こすという場合、相互的關係が、両社間に存在するということである。しかし、アイゼン製鉄会社が鉄をデクスター道具製作会社を含めて複数の会社に売り、道具をデクスター道具製作会社を含めて複数の会社から買う場合、対してデクスター道具製作会社が鉄

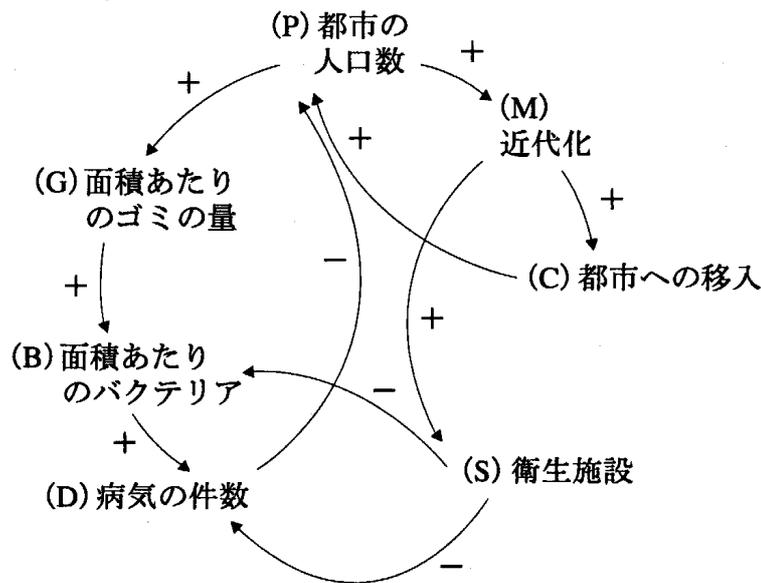
9) *Ibid.*, p. 166.

10) *Ibid.*, p. 166.

11) *Ibid.*, p. 164.

をアイゼン製鉄会社を含めて複数の会社から買い，道具をアイゼン製鉄会社を含めて複数の会社に売る場合には，相互的關係は，両社の間には存在しない。

第2図 システム諸要素間の相互的關係



(Maruyama, M., "The Second Cybernetics-Deviation-Amplifying Mutual Causal Process", *American Scientist*, 51, 1963, p. 176.)

さらに，システム内の多くの要素間の相互的關係についてふれておこう。第2図において，矢印は影響の向きを，そして+印は変化が同じ方向に起こるが，必ずしも正の変化だけではないこと，負印の変化をも示唆していることを意味している。例えば，GとBの間の+印の変化は，地域あたりのゴミの量の増加が地域あたりのバクテリアの数の増加の原因となっていることを示しているが，しかし同時に，それは地域あたりのゴミの量の減少が地域あたりのバクテリアの数の減少の原因になっていることをも示唆しているということである。同様に，SとBの間の-印の変化は，衛生施設の増加が地域あたりのバクテリアの数の減少の原因となっていることを示し，しかし同時に，それは衛生施設の減少が地域あたりのバクテリアの数の増加の原因となっていることをも示しているということである。矢印のいくつかは，相互的

関係のループを形成しており、ループにおいては、ある要素の影響は他の諸要素を経て自分自身に影響を与える。即ち、 $P \rightarrow M \rightarrow C \rightarrow P$ のループでは、人口の増加が近代化の増大をもたらすが、これが都市への移住を増加させ、都市の一層の人口増加をもたらす。他面、人口の減少は近代化の減少、都市への移住の減少、そして都市の一層の人口減少をもたらす。 $P \rightarrow G \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow P$ のループでは、 $D \rightarrow P$ で負の影響を含んでいる。つまり、人口の増加は地域あたりのゴミの量の増加をもたらし、これが地域あたりのバクテリアの数の増加を、またこれが病気の件数の増加をもたらし、都市の人口減少をもたらす。他面、人口の減少は地域あたりのゴミの量の減少、地域あたりのバクテリアの数の減少、そして病気の件数の減少をもたらし、都市の人口増加をもたらす。従って、この諸要素間の相互的關係のループは、逸脱解消的な相互的關係を示す。対して、 $P \rightarrow M \rightarrow S \rightarrow D \rightarrow P$ のループでは、 $S \rightarrow D$ と $D \rightarrow P$ で負の影響を含んでいる。つまり、人口の増加は近代化の増加をもたらし、これが衛生施設の増加を、またこれが地域あたりのバクテリアの数の減少をもたらし、病気の件数の減少と都市の一層の人口増加をもたらす。他面、人口の減少は近代化の減少、衛生施設の減少、またこれが地域あたりのバクテリアの数の増加をもたらし、病気の件数の増加と都市の一層の人口減少をもたらす。従って、この諸要素間の相互的關係のループは、逸脱増幅的な相互的關係を示す。ただ、丸山が“一般に、負の影響を偶数個もった相互的關係のループは逸脱増幅的であり、奇数個もった相互的關係のループは逸脱解消的である”¹²⁾と主張することに対しては、私は同意しかねる。

1-3 意思決定とサード・サイバネティクス

タシュジャンは、いう。正のフィードバックの導入に基づくセカンド・サイバネティクスの定式化は、丸山による。だが、負と正のフィードバックをともにもつシステムについてもまた、時間単位当りの増加量が、一定あるい

12) *Ibid.*, p. 177.

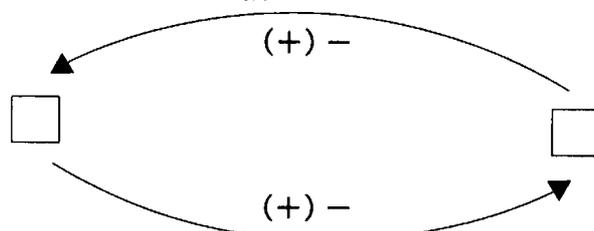
は時間不変であると仮定されている。その結果、ファースト・サイバネティクスとセカンド・サイバネティクスの共通の本質的特徴は、システム構造の安定性にあると¹³⁾。確かに、システムが安定した形態を保持している限り、それを構成しているサブシステム間のインプット—アウトプット関係は、近似的であるにしても、線型関数で記述できる。がしかし、われわれが現実合致したモデルを考えようとすれば、システムの再組織化を無視することはできず、非定常的システム (nonstationary systems) を研究せねばならないと。そして、その事例は、両生類、昆虫の変態、哺乳動物の成熟及び景気変動の浮沈等いたる所に存在するとした¹⁴⁾。例えば、両生類は、脊椎動物の一種で水中と陸上との両方にすめる、換言すれば幼生はえらで、成体は肺で呼吸するという成長の時間的経過とともに変態する動物であり、景気変動の浮沈もまた、経済活動が何十年か又は何年かに一度ずつ異常状態 (不況) に陥り、やがて回復 (好況) に向かうという長期的、中期的、短期的な複合運動を繰り返す不安定な経済環境を象徴している。

ここでは、特にタシュジアンに取り上げた事例と説明に注目しよう。先ず、船の操舵者の例にとると、ファースト・サイバネティクスでは、船の操舵者は、貯えた経験情報に基づいて一つの進路 (=目的) を決定する。そして、船が風力と波の高さという自然環境の変化によって所定の進路から逸脱するならば、操舵者は、貯えられた負のフィードバック情報による操舵によって船を所定の進路に復帰させることで、目的地に到達するということになる。しかしながら、風力と波の高さという自然環境の変化が事前に予測できない程に大きければ、操舵者は、所定の進路 (=目的) の方向に直接に船を操っても目的地に到達できない。操舵者は、目的地に到達するためには、所定の進路を繰り返し変更しなければならない。それは、彼が多数の中間目的を必

13) Taschdjian, E., "The Third Cybernetics: An Approach to Cascading System Bifurcations", in Trappl, R. (eds.) *Progress in Cybernetics and Systems Research*, Hemisphere, Vol. 4, 1978, p. 301.

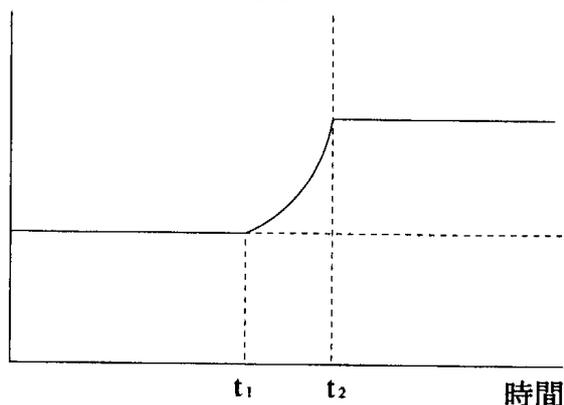
14) *Ibid.*, p. 302.

第3図 システムの負と正のフィードバックの反転



(Taschdjian, E., "The Third Cybernetics: An Approach to Cascading System Bifurcations". in Trappl, R. (eds.) *Progress in Cybernetics and Systems Research*, Hemisphere, Vol. 4, 1978. p. 302.)

第4図 意思決定の切り替えから生じた2つの分岐



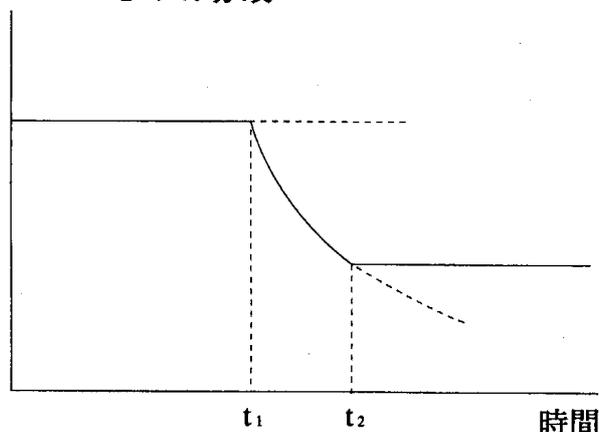
(Taschdjian, E., "The Third Cybernetics: An Approach to Cascading System Bifurcations". in Trappl, R. (eds.) *Progress in Cybernetics and Systems Research*, Hemisphere, Vol. 4, 1978, p. 303.)

要とし、その度自然情況に合った意思決定を余儀なくされることを意味する¹⁵⁾。これは、また図のようにシステムにおける負のフィードバックから正のフィードバックへの反転あるいは正のフィードバックから負のフィードバックへの反転として説明される。

さらに、そのような切り替え (switching) の効果を一層具体化するために、溶鉱炉とサーモスタットで構成される単純なサイバネティクス・システムを

15) *Ibid.*, p. 302.

第5図 意思決定の切り替えから生じた
2つの分岐



(Taschdjian, E., "The Third Cybernetics: An Approach to Cascading System Bifurcations". in Trappl, R. (eds.) *Progress in Cybernetics and Systems Research*, Hemisphere, Vol.4, 1978. p. 303.)

取り上げよう。例えば、正常なケースでは、サーモスタットは、溶鉱炉からの逸脱した熱のアウトプットに対して負のフィードバックをインプットすることで、正常な温度を維持する。仮にサーモスタットが t_1 の時点で負のフィードバックから正のフィードバックへ切り替えたとすれば、温度の急激な、不連続的な上昇曲線が描かれる(第4図を参照)。また、その制御がサーモスタットではなく、人間であると想定すると、その人間は、その問題の時点で正常な温度よりも一層高い温度への上昇を選択し、決定したことになる。換言すれば、彼は、意思決定者 (man of decisions-making) としてその時点で二つの選択枝をもち、分岐点 (bifurcation) に位置しているということである。そして、その彼が t_2 の時点で正のフィードバックから負のフィードバックへとインプットを切り替えれば、温度は、定常となるが、結果として高い水準に留まる(なお、図の中の点線は、放棄した選択枝を示す)。追加的に、逆のケースを考えてみよう。即ち、作業の一団が制御 (= 監督者) に代わって、溶鉱炉を冷却装置に変容しながら、熱の生産ではなく、冷気の生産にエ

エネルギーを投入し、制御は正のフィードバックを示すケースである。ここで、逸脱は、正のフィードバックによって増幅されるので、温度の急激な不連続の低下曲線が、結果として描かれる。そして、それは、制御が正のフィードバックから負のフィードバックへ切り替える時点 t_2 まで続き、その時点から、温度は定常となるが、低い水準に留まる(第5図を参照)。ここでもまた、再び二つの選択枝の間の意思決定と分岐点をもつことになる¹⁶⁾。

かくして、タシュジアンは、そのような状況下のシステムでは、正のフィードバックと負のフィードバックを適宜切り替える意思決定、換言すれば逸脱増幅的な相互的關係と逸脱解消的な相互的關係を適宜切り替える意思決定を必要とし、かつ時間的不変の仮定をゆるめる必要性のあることを強調し、この種の研究をサード・サイバネティクスとして特徴づけた¹⁷⁾。

2 システムのゆらぎと自己組織化

システムのサイバネティクス思考の検討に続いて、システムの形態生成と意思決定現象の説明に少なからず関係する説明の概念的枠組(つまり、理論的展開)についてみていこう。

2-1 プリゴジンとハーケンの研究

プリゴジンとハーケンの研究は、物理・化学的なシステム論研究の流れに属するが、彼等は、マトゥラーナ=ヴァレラとほぼ同時期に、システムが新しい構造へゆらぎ(fluctuations)を通じて動的に、進化し、発展するという物理・化学反応モデルをそれぞれ提示した。

まず、プリゴジンは、それを散逸構造の理論(theory of dissipative structure)¹⁸⁾として展開し、また自ら率いるブリュッセル学派にちなんでブリュッセル・モデルとも称した。

17) *Ibid.*, p. 302.

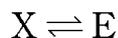
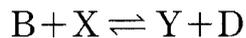
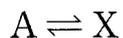
散逸構造の最初の例として、しばしば引き合いに出されるのは、1958年に発見されたベルーソフ＝ジャボチンスキー反応と呼ばれる化学反応¹⁹⁾である。この反応では、セリウムイオンが含まれる希硫酸中で、マロン酸が臭化塩によって酸化され、そして浅い皿の中で起こると、同心円状のあるいは回転する渦巻状の波が現われて干渉パターンを作り出す。また、この種の反応系では、化学時計 (chemical clocks) と呼ばれる非常に規則正しい振動現象が見られたり、特定の方向に向かって反応が周期的に突如活発化する現象や明るい色彩の競演をともなったスペクタクルが演じられたりすることもある。プリゴジンの散逸構造の理論あるいはブリュッセル・モデルは、化学反応系においてシステムが周囲の環境と交換を続けることで、エネルギーや物質の流れをゆらぎを通じて自発的に形成し、自らを長期にわたって大域的な安定構造に自己組織化していくその諸条件を明確化するものである。つまり、その条件とは、周囲の環境とのエネルギー及び物質の交換に関する開放性 (openness), 平衡から遠く離れた状態 (condition far from equilibrium) であるための各種条件、反応鎖における自己触媒的あるいは相互触媒的ステップ (autocatalytic oder crosscatalytic step in chain reactions) の存在等である。ここで、自己触媒というのは、反応に加わっている分子の中で、自分と同じ分子を作るために自分自身を必要とする化学反応、相互触媒というのは、先ず別の中間的分子を作って、これと自分自身との触媒で自分自身の分子を作ろうとする化学反応をさしている。これらの条件が満たされると、システム内部にゆらぎを自己増幅させ、散逸プロセスを特徴とする非線型的な活動 (例えば、熱の入力－出力間に比例関係を示さずに、自己組織的活動がみられるケース) が現われるということになる。サイバネティクスでは、こ

18) Prigogine, I., "Order through Fluctuation: Self-Organization and Social System", in Jantsch, E. and Waddington, C. H. (ed.), *Evolution and Consciousness: Human Systems in Transition*, Addison-Wesley, 1976. pp. 93~126.

19) 次の文献が詳しい。Tyson, J. J., The Belousov-Zhabotinsky Reaction, *Lecture Notes Biomath*, Vol. 10, Springer, 1976.

のような活動様式を逸脱の増幅あるいは正のフィードバックと呼ぶ。

ブリュッセル・モデルは、散逸構造の形成を導く反応で、最も単純なものをモデル化したものといえる。つまり、モデルは、次式で示される²⁰⁾。



ここで、A, B, D, E は、初期物質及び反応最終生成物を、X, Y は、中間生成物を表わす。問題は、X と Y の時間的な成長と空間分布にある。数値計算では、通常では式中の右から左へと向かう逆反応は無視される。システムが多様な活動をする本質的原因は、その非線型性とゆらぎにあるが、上の四つのステップから成る反応系では、特に自己触媒的な第三ステップがシステムの非線型性をもたらす（このステップで、X の三分子が作られるから、三分子モデルともいわれる）。今、X, Y の濃度を $X=A$, $Y=B/A$ であるとし、システムは、均一な定常状態にあるとしよう。この状況の下で、A, B の濃度、フィックの法則による拡散係数 D_x , D_y , さらに場合によっては D_A が一定の関係を満たすと、この定常状態は、不安定（つまり、ランダム）になり、システムは、以下のように多様な活動と進化を示すようになる。

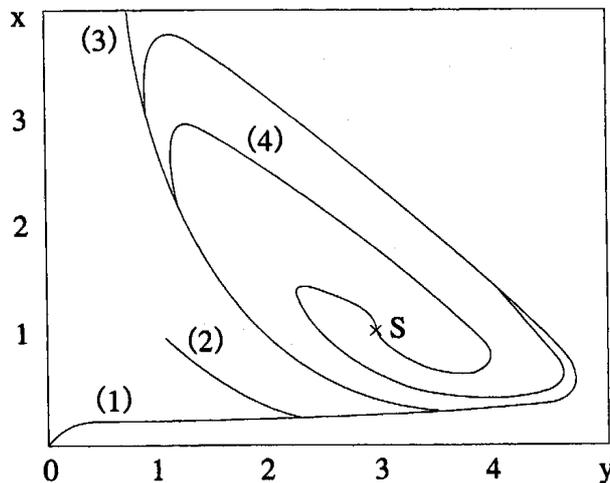
⑦ 極限サイクルの散逸構造の活動 D_x , D_y の値が大きいケースでは、システムは、ほぼ均一であるとみなせるが、極限サイクル・タイプ (limit cycle type) の活動の不安定性を示す。即ち、定常状態の周囲に X, Y の濃度の周期的振動、換言すれば不安定な極限サイクル・タイプの活動が繰り返されるということである（第6図を参照）。図の中で S 点は、不安定な定常状態 (X_s , Y_s) を表わす。また、どのような初期条件が与えられようとも、システムは、時間軸にそって一つの周期的振動解に向かう。つまり相局面のシステム進化を示す傾向のあることを表わしている。

20) Prigogine, I., *op. cit.*, p. 98.

④ 波形の時空的散逸構造の活動 D_x, D_y の値がそれほど大きくないケースでは、濃度波や波状の化学反応が広がる時間的・空間的体制が生ずる。ここでは、中央に向かって増殖する速くて険しい波（サイバネティック的には、逸脱の増幅あるいは正のフィードバック）と均一化する傾向をもつ遅くて緩い波（サイバネティック的には、逸脱の解消あるいは負のフィードバック）が現われる（第7図を参照）。

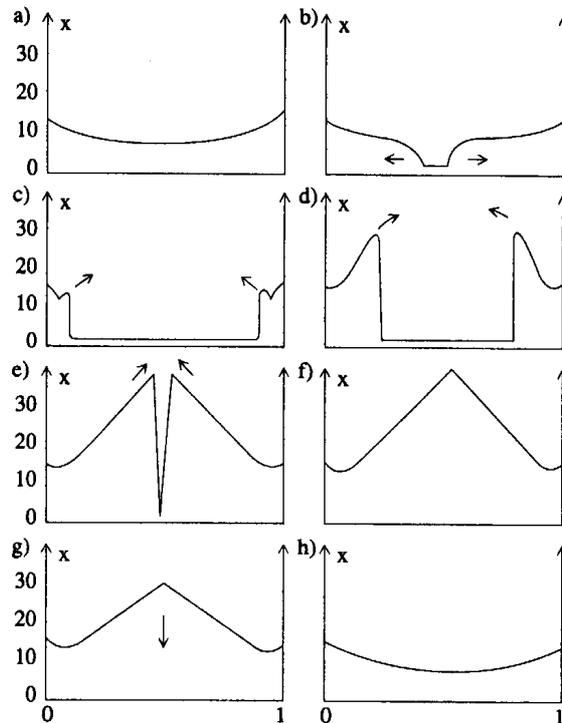
⑤ 定常的不均一の散逸構造の活動 X, Y が不均一に分布するケースでは、システムは、新しい安定的な定常状態に向かって進化し始める。第8図は、 X の不均一な分布を空間の関数として示している。ここでは、システムは不安定状態を超えると、解の特性で乱れの影響を受けて自発的に正反対の構造を生成し始める。例えば、最初の均一の卵から胚への不均一な成長は、この良い例である。

第6図 化学反応系の極限サイクル活動



いろいろな初期条件下で、積分を多数回繰り返して求める。(1), (2), (3), (4)の初期条件は、次のとおり。(1) $x=y=0$, (2) $x=y=1$, (3) $x=10 \cdot y=0$ (4) $x=1 \cdot y=3$ 。ここで、つねに $A=1$, $B=3$ とする。点Sは不安定定常状態(x_s, y_s)である。どんな初期条件が与えられても、システムは1つの周期的振動解をあらわす。(Prigogine, I., "Order through Fluctuation: Self-Organization and Social System", in Jantsch, E. and Waddington, C.H. (ed.), *Evolution and Consciousness: Human System in Transition*, Addison-Wesley, 1976, p. 100.)

第7図 化学反応系の散逸構造の進化



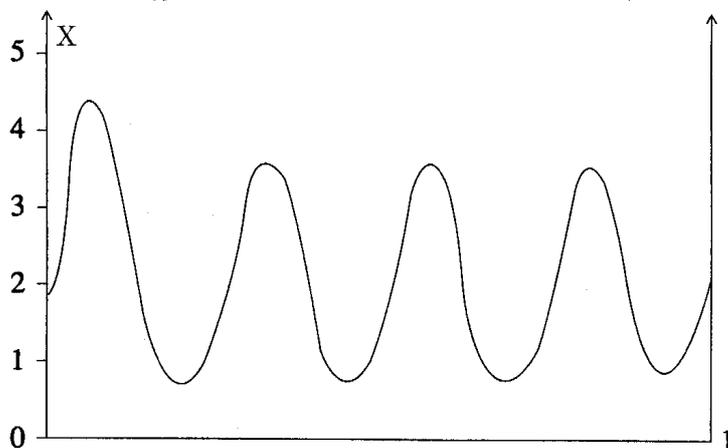
中間生成物xの時空的分布状態が、何段階にもわたって変化し、進展していく。これは次の仮定のもとに計算された例である。
 $x(0)=x(1)=14$, $B=77$, $Dx=0.00105$, $Dy=0.00066$, $DA=0.195$ 。(Prigogine, I., "Order through Fluctuation: Self-Organization and Social System", in Jantsch, E. and Waddington, C.H. (ed.), *Evolution and Consciousness: Human System in Transition*, Addison-Wesley, 1976, p. 101.)

⊕ 局所的散逸構造の活動 第9図は、定常的均一の状態がかく乱し、臨界不安定状態 (critical point of instability state) を超えると、局所的活動の中に X の定常的不均一の分布が現われることを示している。また、ここでは、X の濃度の傾斜度は、正確に最初のかく乱の局所に応じて方向づけられる。

続いて、ハーケンであるが、彼の研究対象は、プリゴジンのそれとほぼ同じである。ただ、研究対象がほぼ同じでも、取り扱う方法は、数理工学的で、プリゴジンよりもやや範囲が広い。彼は、自らの理論を特徴づけるためにシナジェティクス (synergetics), 即ち協同現象という生理学的用語を用いた。

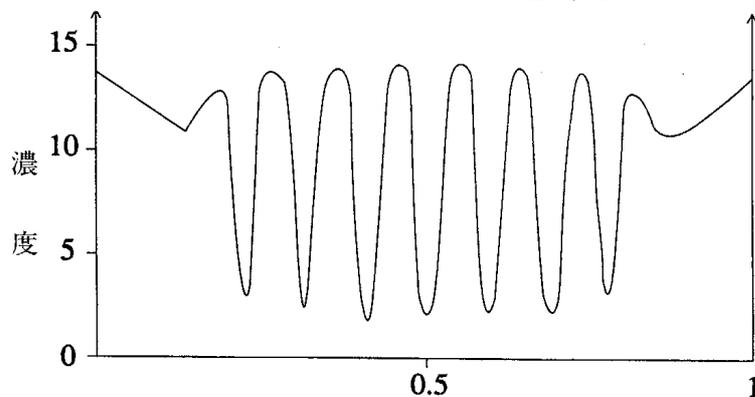
ハーケンは、いう。ここ何年かの間に、システムが巨視的な振舞いを変え

第8図 平衡から遠く離れたところでの安定的散逸構造の形成



Xの濃度は次の仮定のもとで計算されている。 $A=2$, $B=4.6$, $D_x=0.0016$, $D_y=0.0080$ 。左端でのXの高濃度が自力的分極化を示している。(Prigogine, I., "Order through Fluctuation: Self-Organization and Social System", in Jantsch, E. and Waddington, C. H. (ed.), *Evolution and Consciousness: Human System in Transition*, Addison-Wesley, 1976, p. 102.)

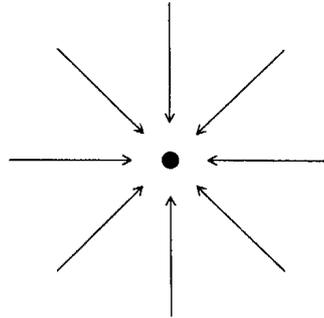
第9図 化学反応系の局所散逸構造の形成



Xの濃度は次の仮定のもとで計算された。 $B=26$, $D_A=0.197$, $D_x=0.00105$, $D_y=0.00526$ 。散逸構造の外側では、古典熱力学的秩序が支配している。(Prigogine, I., "Order through Fluctuation: Self-Organization and Social System", in Jantsch, E. and Waddington, C. H. (ed.), *Evolution and Consciousness: Human System in Transition*, Addison-Wesley, 1976, p. 103.)

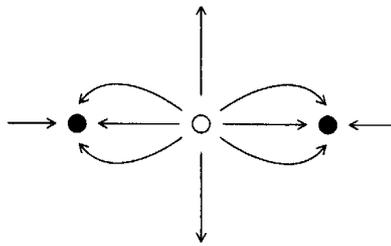
る臨界点 (critical point) のところで、ゆらぎが決定的役割を果すことが、ますます明らかになってきた。理論物理学の基本原則によれば、散逸活動が起こる時には、いつでもゆらぎが起こらなければならない。従って、物理的、化学的、生物学的、機械的、あるいは電氣的なシステムを扱う限り、少なく

第10図 安定的中心点への軌道



(Haken, H., *Advanced Synergetics : Instability Hierarchies of Self - Organizing Systems and Devices*, Springer-Verlag, 1983, p. 34.)

第11図 2つの安定的中心点と1つの不安定的中心点



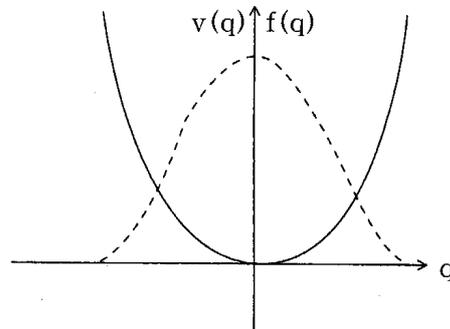
(Haken, H., *Advanced Synergetics : Instability Hierarchies of Self - Organizing Systems and Devices*, Springer-Verlag, 1983, p. 34.)

とも臨界点に近いシステムでは、ゆらぎを無視してはならないと²¹⁾。そこで、彼は、熱平衡から遠く離れた物理的、化学的システム、及びそのシステムを射程にし、かつ同程度にゆらぎが重要な役割を演じる場合を問題とする。即ち、一つの安定的中心点から、二つの安定的中心点と一つの不安定的中心点への転移のケースを取り上げ、ゆらぎが果す役割を理解せんとする（第10図と第11図を参照）。

ゆらぎが存在すると、システムの代表点 $q(t)$ は、定常状態であっても常にでたらめな順序で前後に突き動かされる（サイバネティック的には、前後に逸脱の増幅あるいは正のフィードバックと逸脱の解消あるいは負のフィードバ

21) Haken, H., *Advanced Synergetics : Instability Hierarchies of Self-Organizing Systems and Devices*, Springer-Verlag, 1983. p. 46. 齊藤信彦・小森尚志・長島知正共訳『シナジェティックの基礎』東海大学出版会, 1986年。

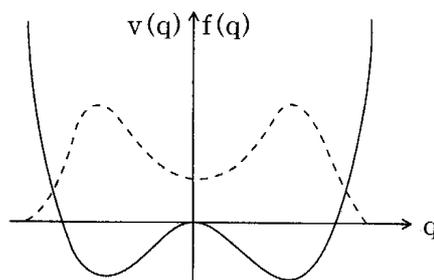
第12図 中心点に対する分布関数



中心点に対する分布関数 $f(q)$ (破線)。実線はその中で座標 q の粒子が運動するポテンシャルを表わす。

(Haken, H., *Advanced Synergetics: Instability Hierarchies of Self-Organizing Systems and Devices*, Springer-Verlag, 1983, p. 46.)

第13図 2つの中心点と1つの鞍点に対応する分布関数



2つの中心点と1つの鞍点に対応する分布関数 $f(q)$ (破線, 1次元の例)。実線はその中で粒子が運動するポテンシャルを表わす。

(Haken, H., *Advanced Synergetics: Instability Hierarchies of Self-Organizing Systems and Devices*, Springer-Verlag, 1983, p. 46.)

ックが生ずる)。従って、いえることは、ある体積要素 $dv = dq_1, dq_2 \cdots dq_n$ の中にシステムのベクトル q を見いだす確率がいくらになるか、ということだけである。この確率は、確率密度関数 $f(q, t)$ と dv の積で表わされる。この確率密度関数は、転移点 (transition points) のところで急激に形を変える (第12図と第13図を参照)。また、このような転移点の近くでは、秩序パラメータ (order parameter), 即ち, $q_2, q_3 \cdots q_n$ が q_1 に隷従 (slaving) するならば, q_1 を秩序パラメータといい, それ自体のゆらぎが最大になる。つまり, 秩序パラメータが隷従パラメータを従えながら, システム構造の変化を

決定する分岐点 (=臨界的ゆらぎ) になるということである。また、転移点からずっと遠ざかると、この新しい二重ピークが非常に鋭くなる。これは、新しい状態のどちらかにシステムが見いだされる確率が高いことを意味している。

ゆらぎにさらされたシステムのもう一つの特徴は、次のものである。仮にシステムが初期時点に状態 $q=q_0$ 、あるいはその近くにあることを知ったとしよう。ところが、このシステムは、ゆらぎによってこの状態から離れてゆくであろう (サイバネティック的には、逸脱の増幅あるいは正のフィードバック)。そこで、システムが別の注目する状態 q_1 に初めて到達するのに、どれほどの時間がかかるかという問題が生ずる。この問題は、初通過時間の問題と呼ばれ、確率的な過程を扱っているから、そのような遷移時間は、統計的にだけ決定される。

同様に、ゆらぎの衝撃の典型的効果は、焦点が不安定化して極限サイクルに置き換わる時に現われる。この時に、新たに発生する解を、つまり q とし、これを $\exp [i\omega t + i\varphi(t)] r(t)$ の形に表わすと (ω , φ , r は、実数とする)、位相 (phase) $\varphi(t)$ は、ある拡散過程をたどり、他方振幅 r は、安定値 r_0 のまわりでゆらぐ。ここでは、 r の緩和時間と、位相拡張の拡散定数が、決定されるべき重要な量となる²²⁾。

2-2 マトゥラーナ=ヴァレラの研究

マトゥラーナ=ヴァレラは、生物学的なシステム論研究、特にサイバネティクス論研究の系譜に属し、生命システムの有機的構成を統一的な本性から把握しようとする。そこで、彼等は、自らの理論的立場を明らかにするために、オートポイエーシスの理論 (theory of autopoiesis) と名づけた。

マトゥラーナ=ヴァレラは、いう。オートポイエーシス・システム (machines) は、ホメオスタシス・システムである。だが、その特性は、ホ

22) Haken, H., *op. cit.*, p. 47.

メオスタティックであるのではなく、その特性が基本的変数を一定範囲に維持しているという点にある。ここで、オートポイエーシス・システムとは、構成素 (components) が構成素を産出するという産出 (変形あるいは破壊) 過程のネットワークとして、有機的に構成 (単位体として規定) されたシステムである。それは、次の特徴をもつ。即ち、①変換と相互作用をつうじて、自己を産出するプロセス (関係) のネットワークを絶えず再生産すること。②そのようなネットワーク (システム) を空間に具体的な単位体として構成し、また空間内において構成素は、ネットワークが実現する位相的領域を特定化することによって自ら存在すること²³⁾。従って、オートポイエーシス・システムは、それ自身の構成素を産出するシステムを機能させることによって、不断に有機的構成を生みだし、特定化する。この有機的構成は、関係のネットワークを規定しながら、システムを一定範囲に維持する基本変数となる。つまり、有機的に規定されるそれぞれの単位体は、構成素やプロセス相互の静的ないし動的関係に対応して固有の有機的構成を成す。この中でオートポイエーシス・システムとは、構成素の静的な関係によってではなく、構成素を産出するプロセス (関係) のネットワーク、つまりオートポイエーシスなネットワークによって規定されるような有機的構成を備えた単位体のことである。構成素を産出する諸関係では、プロセスとして以外には与えられないので、プロセスが停止すれば産出関係も消滅する。そのため、システムがオートポイエティックであるためには、それを規定する産出関係が生産される構成素によって常に更新されなければならない。その際に、ゆらぎとやり戻しが (つまり、逸脱の増幅あるいは正のフィードバックと逸脱の解消あるいは負のフィードバックの作用) 一定範囲に繰り返されながら、構成素は果てしなく循環する。即ち、この意味でのみホメオスタティック的であるということである。

23) Maturana, H. and Verela, F. J, *Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living*, D. Reidel, 1980. pp. 78~79. 河本英夫訳『オートポイエーシス—生命システムとはなにか—』国文社, 1996年。

オートポイエーシス・システムは、他のシステムと次の点で区別される。
 ㉞物理的空間内の人工機械のシステム(例, 自動車), ㉟天然物質の単位体のシステム(例, 結晶体)。つまり, 自動車の部品は, 自動車の有機的構成とは無関係な別のプロセスによって産出され, また結晶体の有機的構成は, 部分の相対的位置を規定する空間的關係によって示され, 構成素を産出するプロセスのネットワークによって特定されるわけではない。

オートポイエーシス・システムの基本的特徴は, 次の4点である。

㊶ オートポイエーシス・システムは, 自律的である。オートポイエーシス・システムは, あらゆる変化をその有機的構成の維持へと統制する。この意味で, 自律的である。

㊷ オートポイエーシス・システムは, 個性をもっている。オートポイエーシス・システムは, 自ら絶えず構成素の産出を行い, 有機的構成を不変に保つことでシステムの同一性を保持している。

㊸ オートポイエーシス・システムは, 境界を自己決定する。オートポイエーシス・システムは, 自己産出のプロセスの中で, 自らの境界を自己決定する。

㊹ オートポイエーシス・システムには, 入力も出力もない。オートポイエーシス・システムでは, 無関係な出来事によってどのような変化が連続しようとも, これらの変化は, システムを規定する条件である有機的構成の維持に常に従属している²⁴⁾。

オートポイエーシス・システムの本当の特徴づけは, 有機体を動的平衡システムとして捉えた場合と, 同じ有機体をオートポイエーシス・システムとして捉えた場合の相違を明らかにすることによって可能となる。有機体を開放系の動的平衡システムとして環境内に置いた場合に, 有機体は, 環境からの影響をこうむりながらも, その影響による変化をシステム自体で調整し, 自己維持する。従って, このケースでも自律的である。また, 物質代謝によ

24) Maturana, H. and Verela, F. J., *op. cit.*, pp. 80~81.

って取り込んだ栄養物を自己の構成素に変換し、自己同一性を保つゆえに、個性をもつ。さらに、外界からの刺激や物質を選択的に排除したり、選択的に導入することをつうじて、自らの境界を自己決定する。このように自律性、個性、境界の自己決定は、いずれも有機体を開放系の動的平衡システムとして捉える場合には、有機体の特徴として保持されている²⁵⁾。だが、入力と出力は、開放系の動的平衡システムにおいては欠くことができない。では、マトゥラーナ=ヴァレラのいう入力も出力もない事態とは、どのような意味なのか。例えば、神経システムの作動は、神経システムの構成素を産出、再産出するだけであり、システムは、それ自体の同一性を保持するように自己内作動を反復する。たとえ感覚器表面に環境からの刺激が与えられようと、この刺激に対処するよう神経システムが作動しているわけではない。即ち、このシステムの特定の作動を引き起こす要因が、観察者から見て内的なものであろうと、外的なものであろうと、神経システムにとっては、内部も外部もない（つまり、区別されない）ということである。

さて、以上のようなオートポイエーシス・システムは、自己組織化システム (system of self-organizing) といえるであろうか。そこには、ランダムな状態下で初期のゆらぎから、触媒プロセスを経て臨界的ゆらぎに達し（又は越えて）、新しい秩序状態を引き起こすというダイナミックな進化思考がみられない。むしろ、オートポイエーシス・システムでは、一定範囲内において（閉鎖系ではない）構成素が構成素を産出するという産出過程のネットワークとして、有機体に構成されたシステムを表わす。この意味で、ホメオスタティック的であるといわれる。だが、そのシステムは、実質的に非平衡的であり、産出プロセスも触媒プロセスの特殊ケースと考えれば、自己組織化システムといえるであろう。

25) 河本英夫稿「オートポイエーシス・解題」、河本英夫訳『オートポイエーシス—生命システムとはなにか—』国文社、1996年、252頁。

2-3 カウフマンの研究

理論的生物学者カウフマンの研究は、主にプリゴジンやハーケンの研究成果をベースにして発展し、きわめて斬新的である。即ち、彼は、自己組織化論を進化論に独自の新しい方法で接合せんとする。換言すれば、生命システムの進化における秩序構造の源泉として、自己組織化と選択 (selection) を対局させ、この両者が出会う場としてカオス辺縁 (edge of chaos) を位置づけるという方法である²⁶⁾。

ここで、先ずカオス (chaos) は、次の特徴をもっている。つまり、①局所的に見ると、システムの活動に一定の規則的な繰り返し、換言すれば一定の秩序が存在しない (サイバネティック的には、正とも負とも云えないフィードバック)。つまり、同じ状態から出発しても、著しく異なる結果に行き着くのである。ところが、大域的 (global) に見ると、アトラクタ、即ち吸引範囲 (basin of attraction) が存在し、この吸引範囲では、きわめて柔軟で、かつ強靱な安定²⁷⁾が保たれ、外力に抵抗して存続する。この局所的混沌と大域的安定という性質は、ランダムの状態には決して見られないものである。②カオスの状態では、常時新しい情報を創発する。それは、厳密にはカオスに含まれるミクロ要素のランダムなゆらぎと分岐に由来し、それらは、いたるところに存在している。③カオスは、ゆらぎがなければ、いかに不規則に見えても決定論的に未来を予測し、記述できる。だが、現実のシステムには必ずゆらぎが存在し、いたるところでシステムの活動に小さなずれを生じさせ、やがてこれがシステム全体を予測できない別の活動に変えてしまう。しかも、カオスは、そのような活動上の振舞いがある意味では自由である性質をもっている。即ち、このようなカオスの性質のことを、一般に初期値への鋭敏な依存性

26) Kauffman, S. A, *The Origins of Order : Self-Organization and Selection in Evolution*, Oxford University Press, 1993.

27) アトラクタより小さく見れば無秩序だが、アトラクタよりも大きく見ると、強靱な安定が見られる。グリックは、カオスのこの奇妙な現象を“chaos と stabilization の同居”と表現している。Gleick, F., *Chaos : Making a New Science*, Penguin Books, 1987, p. 165.

(sensitive dependence on initial conditions)²⁸⁾という。

そこで、カオス辺縁であるが、これは、次のように理解される。

生命システムの進化は、従来ランダムな状態における突然変異に対する選択として説明されてきた。対して、カウフマンは、生命システムの進化にとって、選択とはカオス辺縁において直接的に自己組織化を選択することであるとされる。というのは、生命システムの生存と進化の条件は、従来のように突然変異の世界観で見られるようなランダムな状態では、いかに自然的選択力があろうとも、満たされないということである。むしろ、突然変異は、ランダムな状態に含まれるというよりも、カオスに帰属し、かつそれは、自己組織化に包含されるということである。カオスでは、いたるところでゆらぎと分岐が生じ、自己組織化が絶えず生成される。しかし、カオスをあまりに重視すると、問題が生命システムの秩序の点で生ずる。つまり、特に非線型性の強いカオスでは、生命システムの進化にとって不可欠の自己組織化を絶えず生成するのだが、生命システムの秩序にとっては、まさにカオス (= 混沌)、そして淘汰をはらむ領域でもあるということである。

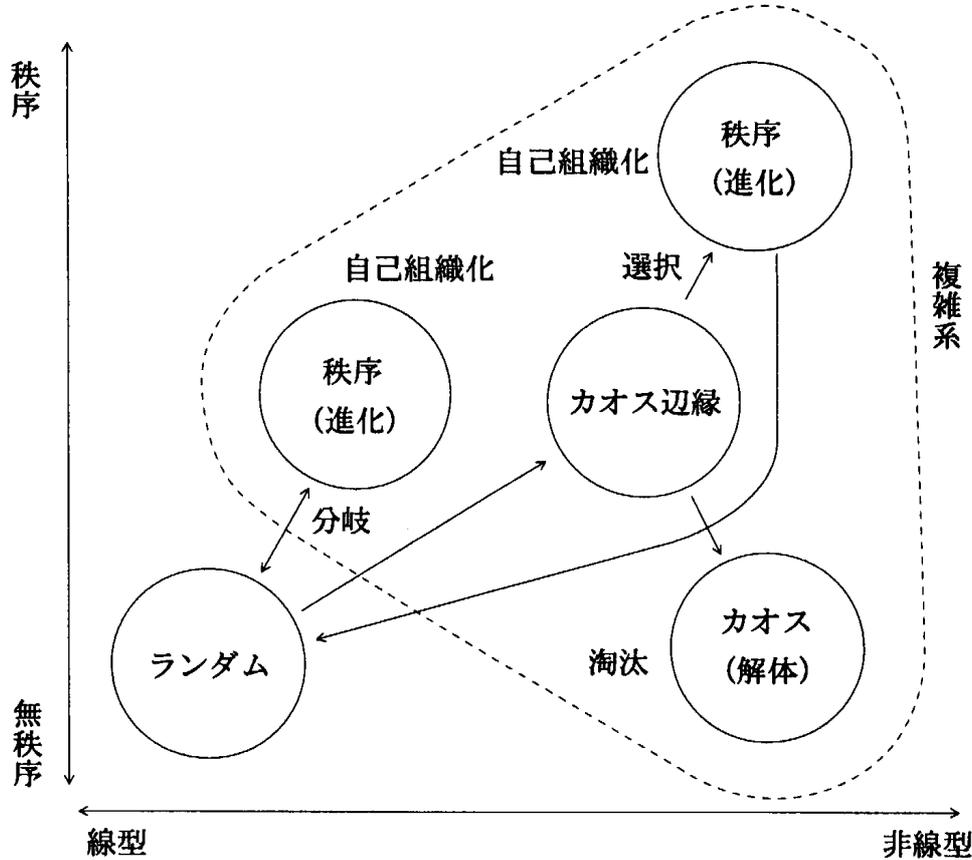
カウフマンは、いう。生命システムの生存と進化のためには、秩序の維持と自己組織化の生成という相反する二条件を同時に満たすことが必要である²⁹⁾。中程度の非線型性の特徴をもつ秩序の状態では、秩序の維持に好都合だが、自己組織化の生成には適さない。対して、強い非線型性を示すカオスは、自己組織化の生成には最適ではあるが、秩序の維持には向かない。彼は、いう。秩序の維持と自己組織化の生成という二つの条件をともに満たす場として、秩序の状態とカオスの状態との間、つまりカオス辺縁が最も重要な意味をもつと³⁰⁾。換言すれば、このカオス辺縁こそが、生命システムの進化能力

28) これは、「バタフライ効果」として知られている。Kauffman, S. A, "Antichaos and Adaptation", *Scientific American*, August, 1991. p. 64.

29) *Ibid.*, p. 68.

30) Kauffman, S. A, *The Origins of Order : Self-Organization and Selection in Evolution*, *op. cit.*, p. 181.

第14図 システムのダイナミックな進化



(evolvability) を最大にする領域なのであると³¹⁾。生命システムの生存と進化では、堅固な秩序の領域にアトラクトされ、不可変の状態に留まってはならない(つまり、進化の余地がなくなる)。また、カオスの領域に落ち入ってもならない(即ち、淘汰される)。生命システムの生存と進化では、カオスの自己組織化の生成力を用いながら、カオス自体からは逃れる必要がある。この生命システムの性質をアンチカオス (antichaos)³²⁾という。

カウフマンは、この不安定で、危険な領域の中に生命システムをバランスさせるのが、まさに選択の役割であるという。選択は、生命システムの主体において多くの自己組織化の可能態の中から、その都度現実的な自己組織化

31) *Ibid.*, pp. 174~175.

32) Kauffman, S. A, "Antichaos and Adaptation", *op. cit.*, p.68. 次の文献を参照。吉田民人・鈴木正仁編著『自己組織化とはなにか』ミネルヴァ書房, 1995年, 208~210頁。

を選びとっていくことである。それは、決して自己組織化それ自体を生み出したり、その性質を変えるものではなく、せいぜい周辺部分の修正にとどまる。彼は、かくして次の大胆な仮説を導く。即ち、“生命システムは、カオス辺縁に接する堅いシステムとして生存し、そして自然的選択は、そのような際どいバランス状態を実現し、維持する”と。彼は、イエンセンと共に、最近になってブリーアン・NK ネットワークというコンピュータ・モデルを構築し、実験を試みている。その結果、その仮説が正しいこと、つまり単純なケースから複雑なケースまで多様に振舞うブリーアン・ネットワークがもつ進化ダイナミクスがカオスと秩序の間のカオス辺縁に向かって駆動されることを、確かめるのにかなり成功している。