

複雑系思考 (Thinking in Complexity)

坂 恒 夫
(Tsuneo Ban)

1. 序論

複雑系科学(science of complex systems)の重要性が社会で再認識されている。複雑系科学は、システムを構成する要素が複雑な相互作用を持ち、解析が容易なシステムに還元し得ぬシステムについての科学である。例えば、長さ l の棒の一端に質量 m の重りがついて他端のまわりに振動する振子を考えてみよう。棒と鉛直下方の間の振動角 θ が小さいとき、運動方程式は単振動の微分方程式 $d^2 \theta / dt^2 + (m/l) \theta = 0$ となり、解が簡単に求まって角振動数 $(m/l)^{1/2}$ で振動することは、物理学の教科書に書かれている通りである。だが、これは振動角 θ が小さい場合の話である。振動角が大きくなると、運動方程式が $d^2 \theta / dt^2 + (m/l) \sin \theta = 0$ となり、解析的に解くことができなくなる。すなわち、棒・重り・重力等で構成されるシステムの相互作用が複雑になって、システムの解が容易に求まらぬ複雑系になるのである。システムを構成する要素の相互作用が複雑になって、解が容易に求まる線形微分方程式で記述されるシステムから、解が簡単に求まらぬ非線形微分方程式で記述されるシステムに、システムが変化したのである。このような非線形微分方程式で記述される複雑系の振舞を探求する科学、すなわち複雑系科学が社会に必須の物となったのである。

現代社会は、なぜ、複雑系科学を要求するのだろうか。第一に、現代社会で生起する物質・生物・社会・経済等の諸事象の中で、線形微分方程式で記述さ

れる簡単な事象についての探求がある程度終了して、簡単に解くことができぬ非線形事象が未知のまま残ってしまい、事象の本質的理解のための問題点として非線形事象を含む複雑系が浮上したからである。複雑系の振舞の理解なくしては、社会の諸事象の本質的理解が、不可能になってしまったのである。第二の原因として、パソコンの普及があるだろう¹⁾。上で述べたように、非線形微分方程式の解は、一般に数学的解析で求めることができない。すなわち、計算機による数値計算が、非線形事象の解析の中心になる。これまでの数値計算の中心であった大型計算機は、計算機センターに設置してあり、データの入力から結果の入手までかなりの時間を要求する。また、計算結果も印刷物の形で提示される。一方、パソコンは、入力を終わると直ちに計算ができて、計算結果はディスプレイ表示される。種々のパラメータの数値を変えて行う非線形現象の数値解析にはパソコンが最適なのである。第三の原因として、生物の進化、生体の形態形成、社会の経済変動などが、非線形微分方程式の分岐理論で説明できることが判ったことがあるだろう。この最後の原因を、次に考察する。

前述の棒の振子を、再度、考えることにしよう。棒と鉛直下方の角度 θ の初期値を微少な値にして振動させるとシステムは線形振動をし、比較的大きな値にして振動させると非線形振動するのだった。それでは、 θ の初期値をさらに大きくし π の値にして、すなわち垂直上方を棒の初期位置として運動させると、何が起こるだろうか。分岐理論によると、垂直上方はシステムの不安定点である。垂直上方にある棒は右にも左にも動かないが、僅かの摂動によって右あるいは左に動き、無限の時間を掛けて一回転して元の位置に戻る。すなわち、 π 以下の場合の非線形振動とは運動の様子がまったく異なるのである。初期角が π になると、右回りの運動と左回りの運動に運動が分岐するのである。このようなパラメータが変化すると突然に新しい運動が現れる現象を分岐という。分岐は、様々な分野に現れる現象である。物体に力を加えたときの弾性変形から塑性変形への転移、生体細胞の腫瘍状態から非腫瘍状態への転移、社会における

産業の生長から衰退への転移、などが分岐現象の例である²⁾。これらを解明する社会の期待が複雑系科学を要求していると言えよう。

本稿は、複雑系科学の事象把握法である複雑系思考とはいかなるものか、複雑系科学は複雑系を捉える他の手法であるシステム論・現象学といかなる関係にあるか、線形思考を事象把握法とする古典科学と複雑系科学はいかに異なるかを考察し、これらの諸科学における相互の位置関係を明確にすることを試みるものである。

2. 複雑系思考とは何か

複雑系思考とは何かの問いから、考察を始めることにしよう。序論で述べた様に複雑系思考は、非線形微分方程式で記述される系に対する事象把握法である。人間は、自らが持つ思考の枠組に事象を適合させることによって事象を理解しようとする。通常の間人は、原因を k 倍にすると結果も k 倍になるという線形関係、すなわち線形思考の枠組で事象を理解しようとする。これに対して複雑系思考は、非線形微分方程式が示す振舞を、新しい事象把握の枠組として示すのである。世界は本質的に複雑系であり、非線形微分方程式によって記述されるから、非線形微分方程式の振舞を思考の枠組にすることによってのみ、事象が理解できると主張するのである。それでは、非線形微分方程式で記述される系は、いかなる振舞を示すのであろうか。

①初期値の僅かな違いが系の振舞の大きな違いとなって結果する

非線形微分方程式が示す特異な振舞の第一のものは、この様に表現できるであろう。いま、解離反応と自己触媒反応がある反応系を考えよう。この反応系の化学種の濃度 n の時間変化は、反応速度式 $dn/dt = -an + bn^2$ (a, b : 定数) で表すことができる³⁾。この微分方程式は、 bn^2 の項があるから非線形である。この微分方程式は簡単に解けて $n = a / \{ b - (b - a/n_0) e^{-at} \}$ の解を持つ。ここで、 n_0 は初期値($t=0$ での n の値)である。 $(b - a/n_0) > 0$ を満たすとき、 n は無量大

に発散する。一方、 $(b-a/n_0)=0$ では n は変化せず、 $(b-a/n_0)<0$ では0に収束する。すなわち、初期値 n_0 が a/b の近傍で僅かに変化すると、濃度変化は大きく違った振舞を見せる。線形微分方程式では、このような現象は見られない。例えば、解離反応のみの反応系では、反応速度式は $dn/dt=-an$ となるから、線形微分方程式である。この方程式の解は $n=n_0 e^{-at}$ であるから、初期値 n_0 に比例して n が増大することが判る。すなわち、初期値が変わっても、 n は指数関数的に減少するだけで、 n の振舞の変化はないのである。この様に、系の変数の初期値が僅かに変ることによって、系の振舞が大きく変る場合があることを、非線形系は教えるのである。

非線形系は、また、カオスという振舞を示す。カオスとは、微分方程式や差分方程式に従う決定論的系が示す不規則運動のことをいう⁴⁾。方程式に従って変化するにもかかわらず、方程式が非線形の場合、周期性のないランダムな時間変化を系は示すのである。例えば、増加して飽和する生物種の現世代の量 X_n から次世代の量 X_{n+1} を与える差分方程式 $X_{n+1}=a(1-X_n)X_n$ (a :定数)を考えよう⁵⁾。この差分方程式は $a X_n X_n$ の項があるから非線形である。この差分方程式を $a=3.7$ 、 $X_0=0.9$ の値の下で解くと、 X_n の時系列として0.333、0.821…、0.541…、0.918…、0.276…、……を得る。すなわち、 X_n は不規則に増減するのである。 X_0 が僅かに異なる二つの時系列を考えると、これらの時系列は不規則に増減するから、二つの時系列の違いは n の増大と共に大きくなる。従って、非線形系では、系が方程式に従って変化するにもかかわらず、長期的な予測をすることができないのである。

この様に、非線形系では、系の振舞が初期値によって敏感に変わるのである。前回、初期値がある値を持ったとき系がある振舞を示したから、今回、初期値が前回と近い値を持つから系は前回は同じ様な振舞をするだろう、と期待することはできないのである。線形系では、原因の違いに比例して結果が異なるが、非線形系では、原因の僅かな違いによって結果が大きく異なるのである。非線

形系では、絶えず新しい事象が生じ、長期的予測ができないのである。

②時間の経過と共に軌道はアトラクターと呼ばれる点や曲線に収束する

非線形系が示す振舞の第二の特色は、この様に述べることができよう。この振舞を、生物の個体数 N が小さいときには個体数に比例して個体数が増大し、個体数が大きくなると餌不足等から個体数の2乗に比例する抑制が働くことを示す生長方程式 $dN/dt = kN - \lambda N^2$ (k, λ : 正の定数)を例として考察することにしよう⁶⁾。生長方程式は、 λN^2 の項があるから非線形微分方程式だが、簡単に解くことができ、初期値を N_0 とすると $N = kN_0 e^{kt} / \{k + \lambda N_0 (e^{kt} - 1)\}$ を解として持つ。すなわち、 t を大きくしていくと、初期値 N_0 がどのような値をとっても、 N は k/λ に近づく。

二つ目の例として非線形振動を示すことで知られているファンデルポル方程式 $d^2 X/dt^2 - \epsilon (1 - X^2) dX/dt + X = 0$ (ϵ : 正の定数)を考えよう⁷⁾。ファンデルポル方程式は、電気回路論で現れる方程式で、第二項 $\epsilon (1 - X^2) dX/dt$ によって、非線形微分方程式であることが判る。ファンデルポル方程式は、減衰振動の微分方程式 $d^2 X/dt^2 + kdX/dt + \omega^2 X = 0$ に似ている。ここで、 k は摩擦や抵抗で振動が減衰する度合を表す減衰定数で、 ω は減衰がないとき系が振舞う単振動の角振動数である。すなわち、ファンデルポル方程式は、減衰定数が $-\epsilon (1 - X^2)$ 、角振動数が1の減衰振動の微分方程式と考えることができる。従って、 $-\epsilon (1 - X^2) > 0$ すなわち $X^2 > 1$ のとき X は減衰し、 $-\epsilon (1 - X^2) < 0$ すなわち $X^2 < 1$ のとき、減衰定数が負となるから、 X は増大する。これは、運動が大きくなって $X^2 > 1$ の領域になると運動は減衰し、運動が小さくなって $X^2 < 1$ の領域になると運動が増大することを示している。すなわち、運動が $-1 < X < 1$ の領域の近傍に閉じ込められることを示している。実際、コンピュータで数値計算すると、この領域の近傍で振動することが判る。コンピュータによる数値解を、横軸を X 、縦軸を dX/dt として図示すると、時間の経過と共に数値解は一つの閉曲線に限りなく接近することが判る。

以上の二つの例から、非線形系が点や曲線で表されるアトラクターを持っていて、いかなる値の初期値から出発しても、運動が一つの点や曲線に収束する場合があることが判る。平たく言えば、原因をいかに変えても、結果は同じになるのである。望む結果を得ようとして、原因をいかに調整しようと、結果は変化しないのである。原因を変化させると、それに比例する結果の変化があると考えるのは、線形的な考えなのである。

③パラメータがある値を超えると系は突然に新しい状態に分岐する

この三つ目の特色を、増殖効果と抑制効果を含む生物の生長方程式 $dX/dt = -\alpha X(X - \beta)$ を基に考察することにしよう。ここで、 X は生物種の個体数で正の変数、 α は正の定数、 β は定数である。この生長方程式の定常解を求めてみる。定常解は、系が長時間留まり得る状態を表している。すなわち、定常解は $dX/dt = 0$ を満たす X の値だから、 $\beta < 0$ のとき $X = 0$ だけで（何故なら $X > 0$ であるから $X = \beta$ は解ではない）、 $\beta > 0$ のときは $X = 0$ と $X = \beta$ の二つがある⁸⁾。 $\beta < 0$ のときの解 $X = 0$ は、方程式から判るように、正のゆらぎに対して $dX/dt < 0$ 、負のゆらぎに対して $dX/dt > 0$ だから、系はゆらぎが減少するように機能するから、構造的に安定である。一方、 $\beta > 0$ のときの $X = 0$ と $X = \beta$ の二つ解は、同様な考察をすると、解 $X = 0$ は揺らぎが増大するように系が機能するから不安定、解 $X = \beta$ は安定であることが判る。すなわち、制御パラメータ β が負の値から増大して $X = 0$ になると、突然に安定な解 $X = 0$ が不安定になるのである。そして、新しい安定な解 $X = \beta$ が現れるのである。システム記述に使用される制御パラメータが、外部環境の変化の影響で変ると、今までの構造が不安定になり新しい構造が生まれるのである。この非線形系の振舞いを分岐 (bifurcation) という。

制御パラメータが分岐点に達したとき、安定な状態が二つある場合がある。例えば、序論で触れた長さ l の棒の先に質量 m のおもりを付けた振子を再度考察しよう。いま振子の持つエネルギー E を制御パラメータにすることにする。

$E < 2mgl$ (g : 重力加速度) を満たすときには、系は通常非線形振動をする。ところが、 $E > 2mgl$ になると、非線形振動に代って、円運動が系の運動形態となる。円運動には、右回り運動と左回り運動の2種類がある。すなわち、系の新しい状態には、二つの安定状態がある。制御パラメータ E がゆっくりと増大して、分岐点 $E = 2mgl$ に達したとき、右回りと左回りの二つの円運動のうち、どちらが現実の運動となるのだろうか。プリゴジンは、確率過程が可能な運動の中から現実の運動を選択するという⁹⁾。 $E = 2mgl$ になって、振子が最上部に位置し、右回りあるいは左回りの運動を始めようとするとき、微視的に見ると、振子は平衡点のまわりでゆらぎを持っているという。この偶然のゆらぎが、現実の運動を決定するのだという。分岐点と分岐点の間の安定状態では方程式が系の振舞を決定するが、分岐点における系の振舞の新しい形態は偶然が決定するのである。

上述のように、複雑系では、外部環境が変化して制御パラメータが変わると、次々と分岐点が現われ、新しい系の振舞すなわち新しい系の構造が発生するのである。このとき、複雑系を記述する方程式は、系の可能な新しい構造を示すだけで、現実の構造は偶然が決定するのである。生物の進化、社会の変遷、経済の変動は、この様に起こっているものと考えられる。すなわち、複雑系思考は歴史を考えるモデルを提供するのである。

④ 構造は非平衡過程に生じる散逸構造である

複雑系科学が研究の対象とするのは、生物・人間・社会等の事象である。複雑系科学は、これらの事象が持つ構造をどのようなものとして捉えるのだろうか。複雑系の典型とされるものに化学のペルーソフージャボチンスキー反応(B-Z反応)がある¹⁰⁾。このB-Z反応を基礎に、複雑系の構造について考えることにしよう。B-Z反応は、マロン酸を基質、臭素酸ナトリウムを酸化剤、4価のセリウムイオンを金属触媒、硫酸を酸として生じるマロン酸の酸化反応である¹¹⁾。B-Z反応が生じると、セリウムイオン濃度が増減して、数十秒から数分の周

期で溶液が黄色と無色の間を変化する。すなわち、B-Z反応は化学振動をする反応なのである。また、B-Z反応を深さ約1mmの浅い溶液の中で反応させると、化学種の濃度変化が空間を伝播し、同心円状あるいはらせん状の様態ができる。すなわち、B-Z反応は化学波(chemical wave)を発生させる反応なのである。B-Z反応は、中間生成物を含めると約30種もの化合物が関与する複雑な反応系であるとされている。

このB-Z反応系の特色は何であろうか。それは非平衡系であることである。B-Z反応は、全体としてはマロン酸が酸化されて二酸化炭素になる反応である。基質として加えられたマロン酸が消費されるところに生じる非平衡系の反応である。反応を継続させるためには、外部からマロン酸を補給せねばならぬ非平衡系の反応である。また、典型的な複雑系とされる気象系にしても、太陽によって絶えずエネルギーが補給される非平衡系なのである。この様に、複雑系科学は非平衡系を扱う科学であり、複雑系思考は非平衡系に対する思考法なのである。ところで、B-Z反応は、化学振動という時間構造、化学波という空間構造を持っていた。これらの構造は、いかなる特色を持つのか。これらは非平衡過程に派生する構造である。これらは、非平衡状態にあるエネルギー・物質が散逸する過程に生じる構造である。非平衡状態がなくなれば消失する構造である。従って、散逸構造(dissipative structure)と呼ばれている。複雑系科学が扱う構造は、散逸構造なのである。

複雑系科学は、生物・社会・経済等の複雑な系を対象とする。上述のことから、複雑系科学は、これらの系を非平衡系と考えねばならないのである。それらが持つ様々な構造も、散逸構造と考えねばならないのである。ある地域の諸都市の間に成り立つ構造も、各都市が特異的に産出する生産物の経済的価値を非平衡要因として生じる散逸構造であるとして、その時間的変遷が研究されるのである¹²⁾。

⑤複雑系の構造は事象そのものが生み出す自己組織系である

複雑系科学は、事象が持つ構造に対して、前述の散逸系という性格の他に、自己組織系という性格を与える。この性格を、やはり前述のB-Z反応を基に考察することにしよう。B-Z反応は、非線形振動という時間構造、化学波という空間構造を持つ反応系であった。これらの構造は、どのように形成されるのだろうか。精確には、複雑系科学は、その形成をどのように説明するのだろうか。複雑系科学は、反応速度式という微分方程式の解として時間構造を、反応速度式に拡散式を加えた偏微分方程式の解として空間構造を説明する。すなわち、事象の構造の形成は、事象を記述する微分方程式の解として、事象そのものの中から説明されるのである。換言すれば、事象自らが形成するものとして説明されるのである。これから、複雑系の事象の持つ構造は自己組織系と呼ばれることになる。

通常の科学は、事象の構造を所与のものとして、その機能と振舞を説明する。だが、複雑系科学は、構造の形成過程をも説明しようとする。複雑な構造が、簡単な構造から、いかに生まれるかを説明しようとするのである。簡単な構造から複雑な構造への移行は、様々な領域で見ることができる¹³⁾。生物事象では、受精後の胚からの形態形成、鳥・昆虫等による巣の形成、昆虫・動物等による群れの形成等に、社会事象では、都市構造の機能化、経済組織の構造化、人間知識の体系化等に見ることができる。これらにおいては、簡単な構造から複雑な構造が生まれたり、構造が不可逆的に進化発展することを示す。これらの構造の発生進化の理解は、生物・社会等の科学の本質的部分をなしている。事象の構造を自己組織系として捉える複雑系科学は、この構造の発生進化に対して、概念的で数理的なモデルを与えるのである。

生物や人間から派生する現象の説明には、物質から派生する現象への機械論的説明に対して、目的論的説明が行われるのが常であった。例えば、アリストテレスは、樹木の種が発芽して成木になるのは、樹木が樹木の最終状態を目的として成長するからだとして説明する。生物学が進歩して、分子生物学によっ

て遺伝子の詳細が、生化学によって酵素の機能が解明された今日では、生物が持つ目的という内在的目的が、遺伝子・酵素という外在的目的に置き換わるだけだという¹⁴⁾。生物が生体に生長するのは、遺伝子や酵素が存在して、生体が成長する方向を指示するからだというのである。だが、遺伝子や酵素は決して、生体構造の複雑化・組織化を、具体的かつ定量的に説明しないのである。複雑系科学は、この生体構造の進化発達を、個々の事象において具体的に、方程式を用いて定量的に考察する。物体の落下運動と同じ程度に、我々のまわりで頻繁に起こる生体の自己形成を、力学と同じ様に具体的かつ定量的に、複雑系科学は説明しようとするのである。

3. 現象学と複雑系思考

複雑系思考は、前節の考察から判るように、事象全体の構造を微分方程式で表現し、微分方程式の解の性質から、事象の振舞を説明しようとするものだった。それは決して、古典科学の様に微少部分の運動、あるいは原子・分子の運動に還元して、事象の振舞を説明しようとするものではなく、事象全体の振舞は部分の振舞に還元し得ぬとして、事象全体の機能を忠実に微分方程式で表現し、それを可能な限り近似することなく解くことによって、事象全体の振舞を説明しようとするものだった。これは一種の現象論であろう。一方、現象学は、世界にあるがままの事象を、認識主体の先入見や事象への主体の操作を排して、その全体性において捉えようとする事象把握であり、やはり一種の現象論と言えよう。ここで、この二つの現象論の関連について考察することにする。現象学の方法論的特質は、世界に存在するものは相互に密接な繋がりを持つとする事物の世界内存在、過去・未来に存在するものとも繋がりを持つとする事物の時間性、および実存主体との繋がりの下にあるとする事物の身体性の開示にあると言えよう¹⁵⁾。この順序に従って、両者の関連を考察することにする。

現象学における事物の世界内存在は、主体を含めた事物が、世界に存在する

他のものと不可分の関係にあること、意識に上らないかも知れないが、世界の事物によって形成された状況の中に置かれていることを主張している。例えば、朝食のテーブルの上にミルクを一杯に注いだカップがあるとしよう。カップはいかに存在するのか。朝食のテーブルにつく私にとって、手にとって口に注げば、渴いた喉を快く潤すものであるだろう。それは、また、多様な滋養分を含んだもの、動物の親が子に与えるもの、摂取すれば子供が丸々と育つもの、として口に運ばれるだろう。カップは、白いテーブルクロスの上であって、隣に、キツネ色に焼けたトーストをのせた皿と、野菜とトマトを一杯に盛ったサラダボールがある。また、冷たいミルクでカップに付着した水滴に、窓から差し込む透明な朝の光が輝いている。このカップを、私は、幼年時代に母が僕のために作った甘いミルクの思い出と共に眺めている。ミルクが嫌いだった私にミルクを飲ませようとして、母は、砂糖を一杯に含んだ甘いミルクを作ったのだった。また、これは牛という畜生からのもので不浄だ、特に夏は青草を食むから飲むと便が青くなる、と言ってミルクを飲まなかった祖母の姿も脳裏を過ぎる。ミルクは、これらを想起させるものとして、私の前に存在するのである。私は、ミルクを飲むとき、これらを想起させるミルクを、手に取り飲むのである。私は、世界の様々な事物と関連を持つ、すなわち世界内存在するミルクを手に取り飲むのである。

現象学の世界内存在に相当するものは、複雑系科学の事象の全体性である。複雑系科学は、事象の全体性をいかに捉えようとするのか。複雑系科学は、古典科学の様に、事象を微少部分に分割し、微少部分に一般法則を適用して、事象を説明することはない。複雑系科学は、事象の偶然的部分については無視するが、本質的部分については事象の要素の関連をできるだけ忠実に方程式で表そうとする。忠実に表現しようとする結果、方程式は非線形方程式となるのである。複雑系科学の非線形微分方程式は、事象の全体性を追求した結果と言えるのである。事象の全体性を求めないならば、容易に解を得ることができる線

形微分方程式で事象を表すことを試みるだろう。その結果、ある条件の下での事象の振舞しか把握できるに過ぎなくなろう。また、序論でも述べたように、複雑系科学は、コンピュータによる数値計算を、解析の手段としている。これも、事象の全体的振舞を希求する複雑系科学の精神の現われである。非線形微分方程式は、通常、数学的厳密解を求めることができない。それで、線形微分方程式への線形化、解が求まる方程式への近似等を行うことになる。だが、複雑系科学は、これらの手法によっては全体的振舞が見失われるとして、非線形微分方程式そのままをコンピュータで解こうとするのである。

それでは、現象学と複雑系科学の全体性は、どこが等しく、どこが異なるのだろうか。現象学は、事象の全体性を得るための哲学的方法論と言えるのに対し、複雑系科学は、このための科学的方法論と言えるのではないか。現象学は、一つの事物が、空間的にも時間的にも、他の事物や主体と、いかに不可分の関係を持つかを教えるものである。一方、複雑系科学は、科学として選択した本質的部分の間の関連を、可能な限り全体的に捉えようとする試みと言えるのではないか。複雑系科学において、事象の偶然的要素を捨象し、本質的要素だけを取り込むのは、科学としての性格である。あらゆる要素の振舞を考慮することは、方程式が複雑になり解析不能となるからである。したがって、複雑系科学は、現象学の全体的把握の、科学的試みと言えるのである。

次に、時間性と身体性について考えてみよう。時間性とは、事物が、過去・現在・未来という時間と共に存在することを表している。例えば、上の例で述べたミルクのカップについて考えよう。私の前にある朝食のミルク・カップは、現在の私の前で朝日に輝いて存在すると同時に、未来において私に飲まれるものとして存在し、また、幼年時代において私に嫌われたものとして存在する。それだけでなく、私の前にあるミルク・カップは、多様な栄養を持つ完全食品であると教える学校教育の下にあり、牛乳は動物の飲むもので人間の飲むものではないとする偏見の下にもあるのである。すなわち、ミルク・カップは、社

会的時間、民俗的時間の下にもあるのである。また、事物は身体的に存在するというのは、私の対象物として存在するということである。ミルク・カップは、私に飲まれるためにテーブルの上に存在するのである。私が手にとって口内に流し込むために存在するのである。したがって、テーブルの上のミルク・カップは、絵画に描かれたミルク・カップとか、ガラス窓で隔てられたミルク・カップとは、明らかに違う存在なのである。前者は、私に飲まれるものとして存在するが、後者は、私に眺められるものとして存在するのみである。

それでは、現象学の時間性・身体性は、複雑系科学の何に対応するのか。現象学の時間性は、複雑系科学における事象や構造の時間性に相当しよう。では、身体性は何に対応するのか。それは、事象が主体に操作されるものとしてある、事象が主体の影響下にあるということではないだろうか。この観点から、複雑系科学の時間性・身体性を考察することにしよう。複雑系科学は、事象を時間的変動として考察するだけではなく、事象を支える構造も遷移するものとして考察する。力学や電磁気学の古典科学は、事象の時間的変動を考察するのみであったが、複雑系科学は、事象の構造の時間的推移をも考察するのである。これが、複雑系科学の特色である。複雑系科学では、制御パラメータが分岐点に達すると、現在の系の構造が新しい構造に遷移するのである。新しい構造には複数の可能な構造があり、偶然がその中の一つを選択するのである。従って、複雑系科学には、構造変化の不可逆性があり、その系に固有な歴史があることになる。この事象の歴史性は、現象学が追求していたものでもある。次に、身体性について考えよう。現象学の身体性は、事象が考察主体の影響下にあるということだった。複雑系科学の身体性とは、事象が、コンピュータで解析できるものとして表現されていることではないだろうか。コンピュータで一つの仮想空間を作り、そこでの振舞として複雑系が理解されることではないか。複雑系科学の身体性とは、複雑系科学の認識が成り立つための、事象への認識主体の暗黙的操作と言えるものだからである。複雑系科学の認識では、コンピュー

タの仮想空間で事象を認識することが、事象の科学的分析の暗黙的前提になっていて、複雑系科学を性格付けるものになっているからである。このことは、複雑系科学の事象が、コンピュータの仮想空間での事象として、主体の操作が加わった事象として、把握せねばならないことを教えるのである。以上を整理すると、次のようになろう。現象学は、存在するものすべての時間性を教えるが、複雑系科学は、系の構造の過渡性、推移性、移行の不可逆性を教える。身体性については、現象学は、事物が主体の身体的操作の下にあることを教えるが、複雑系科学は、科学的的事物がコンピュータの仮想空間での振舞として把握されていることを教える。

最後に、現象学と複雑系科学の関連をまとめることにしよう。現象学と複雑系科学は、事象を分割したり近似したりせず、事象そのものに事象を語らせる現象論である点で、親近関係にある。だが、現象学が、事物の在り方を問う諸科学の基礎学として、事物の置かれた状況を根源的に明らかにするのに対し、複雑系科学は、事物を定量的・実証的に把握する科学として、付随的な要素を捨象した仮想空間で事象の全体的振舞を求める点で、両者は異なっている。しかしながら、現象学が複雑系科学に事物の根源的な在り方を教え、複雑系科学が現象学に事物の実証的な在り方を教える点で、両者は補完関係にあるのではないか。

4. システム論と複雑系科学

システム論(systems theory)は、数学・工学から派生した事象把握の方法論で、他のものに還元し得ぬ方法論として科学で重要な位置を占めている。システム論と複雑系科学は、共にシステムとして事象を扱う点で、似た性格を持っている。ここで、両者の類似と相違について考えることにする。システム論の方法論的特色は、事象の全体的把握、システム形成主体の明確化、数式を用いる定量的把握等である¹⁶⁾。これらの特色の複雑系科学との関連について考察す

ることにしよう。

事象の全体的把握は、上述から判るように、複雑系科学と現象学の特色でもあった。システム論の特色は、両者の特色といかに異なるであろうか。システム論は、事象の全体的把握をするために、まず、事象全体をその構成要素に分ける。次いで、構成要素を、一つの信号・情報を与えると新しい信号・情報に変換する機能を持つもの、すなわち、入力を与えると出力を出して応答するものとして把握する。最後に、構成要素の入力と出力を結合して、事象全体を、外界からの入力に対して出力で応答する機能を持つものとして把握するのである。これから判るように、システム論では、一つの機械のように事象を把握するのである。機械は部品から構成されている。部品は一つの機能を持っている。部品がそれぞれの機能を果たすことによって、全体としての機械の機能を果たしている。この機械のように、事象を一つの機能を持つ構成要素に分解し、構成要素を機能的に組み合わせることによって、一つの機能を持つものとしての事象の全体を把握するのである。この様に、システム論の全体的把握は、事象が機能を持つ構成要素に分解されると同時に、事象全体も一つの機能を持つものとして要素から構成されることに特色を持つと言えよう。

このシステム論の全体的把握は、複雑系科学のそれといかなる関係にあるのか。システム論の全体的把握は工学すなわち応用科学に起源を持つ全体的把握で、複雑系科学のものは基礎科学の研究態度から派生したものと言えるのではないか。世界に存在するものは、相互に深い関連を持ち、固有の機能を果たすことにより、全体としての機能を果たしている。これが、工学・技術の精神である。この観点からの事象の全体的把握が、システム論の全体的把握である。一方、複雑系科学は、事象の本質を探る基礎科学の全体的把握である。基礎科学は、事象の付随的な要素を捨象し、本質的な要素の関連を調べ、事象の振舞いを説明しようとする。この延長上に、複雑系科学は存在するのである。複雑系科学は、基礎科学として、事象の付随的と思われる要素を捨象し、本質的と思

われる要素の関連を詳細に調べる。だが、全体的把握を目指す複雑系科学は、求めた本質的要素の関連から、近似や省略を加えることなく、事象の振舞を説明しようとするのである。複雑な関係を複雑な関係そのものに語らせようとするのである。これが、両者の違いと言えよう。

システム論的事象把握の第二の特色であるシステム形成主体の明確化とは何を意味しているのか。事象を認識するときの認識主体は、認識に論理的整合性を持たせるため、あるいは認識の十全性を確保するため、一つの枠組を事象に被せて事象を認識する。すなわち、認識主体は、事象との間に一つのシステム(系)を形成して、事象を認識する。換言すれば、認識主体は、決して客観的に事象を認識するのではなく、認識主体が形成したシステムが認識し得るものを認識するのである。認識の観点を変えると老婆にも若い娘にも見える図柄があるが、これは、主体が客観的な図柄との間に老婆に見えるシステムを形成すると老婆が、若い娘に見えるシステムを形成すると若い娘が見えるからなのである。認識には、絶対的な客観性を持つものは有り得ず、必ず何らかの主体の操作が含まれるのである。物体の落下という物理事象にしても、重力による等加速度運動として認識されるのはニュートン力学という枠組を適用するときだけであり、液体・気体の落下であれば流体力学・統計力学が適用され、飛行機の落下であれば落下原因の究明という枠組でもって事象が認識されることは周知のことである。この様に事象の認識はすべて主体と客体の相互作用の下に成り立つことをシステム論は教えるのである。

なぜ、この様な事象把握法が、システム論から派生したのだろうか。それは、システム論が工学から派生した把握法であるからだ。機械はどのように作られるのであろうか。まず、機械は製作者の心の中にデザイン(設計図)として存在する。製作者は、そのデザインに基づいて部品を収集する。所望の部品がない場合は、デザインを変更して部品を準備する。こうして集めた部品でもって機械は組み立てられるのである。すなわち、機械の本質は、物理的機械そのもの

にあるのではなく、機械のデザインの中にあるのである。機械を構成する部品が変わっても、例えば金属からプラスチックに変わっても、機械としての機能が同一であれば、同じ機械なのである。同じ様に、客観的認識を志向する科学も、認識する機械として主体によって形成される、とシステム論は考えるのである。このシステム論のシステム形成主体を明確化する事象把握に対して、複雑系科学の事象把握はいかなる立場に立つのか。複雑系科学は、事象の客観性を信じる基礎科学の立場の事象把握と言えよう。複雑系科学にとって、科学が明らかにした事象は、あくまでも事象自身に属するのである。複雑系科学が明らかにする複雑系の構造も、事象自身が生む事象自身の構造として考えるのである。この事象把握の立場を、複雑系科学は、事象の構造を自己組織系と名付けて明らかにしている。この様に、システム論と複雑系科学は、同じシステムについての科学であるが、システム論のシステムは主体が形成するのに対して、複雑系科学のシステムは事象自身が産出するのである。

システム論も複雑系科学も、共に、数値で事象を説明する定量的科学と言える。両者の定量性は、どのように異なるだろうか。システム論は、上の全体的把握を論じた部分で述べたように、入力と出力を持つ要素の集まりとして事象を捉える。要素は、外部から与えられた数値の入力に対して、数値の出力を出して応答する。すなわち、要素は、入力を独立変数とし、出力を従属変数とする関数である。このことから、要素は、入力値を出力値に変換する伝達関数と呼ばれている。要素における入力と出力の関係は、高次関数や微分・積分の関係式で与えられる。従って、多数の要素の結び付きあるシステム全体も、微分・積分を含む数式関係になる。この数式が、システム全体の入力に対する出力の応答を与え、システムの振舞の定量的把握を可能にするのである。それでは、複雑系科学の定量性は、いかなる性格を持つのか。複雑系科学は、前にも述べたように、事象の付随的と思われる要素を捨象し、本質的と思われる要素の間の関係を、近似・省略等の操作を加えることなく、できるだけ忠実に数式

で表現しようとする。こうして得られた数式関係は、通常、非線形の微分方程式・偏微分方程式である。非線形の微分方程式・偏微分方程式は、数学的には解けないから、コンピュータで数値計算をする。事象の全体像を得るために、近似・省略等を加えることなく、非線形方程式そのままを数値計算して、事象の振舞を事象自身の中に探そうとするのである。

両者の定量性は、いかなる関係を持つのか。共に、事象の定量的振舞を求める手段として、コンピュータ・シミュレーション(数値計算)を重要な柱としている。また、共に、事象の深奥に潜む本質的法則を求めるのではなく、具体的な事象の振舞を説明することで足れりとする現象論である。両者の違いは、この現象論の違いにあるのではないか。システム論は、システム要素の入力と出力の関係が、例えば、サーモスタットの場合、入力である部屋の温度と出力である部屋への熱量の関数関係であることから判るように、要素の構造を考えない完全な現象論である。一方、複雑系科学は、本質的と思われる要素間の関係や構造を忠実に数式で表現しようとする現象論である。例えば、化学反応系であれば、化学反応の物理的構造や数値的關係を表現する化学反応速度式を基礎とする現象論である。複雑系科学は、こうして得られた数式(方程式)の解や性質を調べて、事象の振舞を理解しようとする。コンピュータによる数値解析によって事象の振舞を具体的に理解すると同時に、他の複雑系の解析で同じ方程式が得られたならば同じ振舞をすると考える、すなわちシステムを記述する方程式の同型性をも理解の手段にするのである。この様に、システム論がシステムの構造を考えぬ現象論であるのに対して、複雑系科学はシステムの構造を考える現象論である点に違いを持つのではないか。

5. 古典科学と複雑系思考

最後に、科学の典型とされるニュートン力学・電磁気学・量子力学等の古典科学と複雑系科学の関連について考察することにしよう。この関連については、

プリゴジンが詳しく論じていて、古典科学に対する複雑系科学の特色を、保存系科学に対する散逸系科学、還元性科学に対する非還元性科学、決定論的科学に対する偶然論的科学であるとしている¹⁷⁾。この両者の対比を、ここで考察することにしよう。

プリゴジンは、ニュートン力学を中心軸とする古典科学は保存系科学であるとする。いま、質量 m の物体が、ばね定数 k のばねの先に付いて、平衡点のまわりで振動する運動を考えよう。この運動系は、通常、ニュートン力学の記述領域に属し、運動方程式 $md^2x/dt^2 = -kx$ によって、系の振舞が判るとされる。ここで、 x は物体の位置の平衡点からのずれを表す変数である。運動方程式を解き、解を変形すると、 $(1/2)mv^2 + (1/2)kx^2 = \text{一定}$ を得る。ここで $v (=dx/dt)$ は物体の速度である。左辺の第一項は物体の運動エネルギーであり、第二項はばねの位置エネルギーであるから、上式は運動エネルギーと位置エネルギーを加えたものが一定であることを示している。すなわち、運動エネルギーと位置エネルギーの和である力学的エネルギーが保存されることを示している。ニュートン力学は、ばね振動という運動は運動エネルギーと位置エネルギーを遣り取りするエネルギー保存系の運動である、と主張するのである。原子・分子の振舞を記述する量子力学も、エネルギー保存を満たす系を対象としている。分子の調和振動を量子力学で解析すると、量子化によりエネルギー値が離散化し、波動性により物体の位置が不確定になるにもかかわらず、系のエネルギーは一定値を保つのである。

古典科学が保存系の科学であるのに対して、複雑系科学は散逸系の科学であるとプリゴジンは主張する。散逸系は、エネルギー・温度・物質等の非平衡が平衡に向かって変化する過程を含む系である。従って、散逸系が永続するためには、散逸する非平衡を一定に保持する機構がなければならない。この非平衡の保持は、通常、外界が散逸系に加える強制によって行われる。すなわち、散逸系は、外界によって強制された非平衡が散逸するところに生じる永続的な構造

や振舞を持つ系なのである。それでは、散逸系は、いかに保存系と異なるのか。太陽のまわりの地球の運動は保存系における運動である。一方、地球上の大気の運動は散逸系の運動である。地球は太陽のまわりを、何万年も何千万年も、同じ運動を続ける。これは太陽のまわりの地球の運動が、保存系の運動だからである。一方、地球上の大気の運動は、台風・雷雨・竜巻等の多様な運動となって人間を襲う。これは大気の運動が、太陽からの光エネルギーを非平衡源とする散逸系の現象であるからである。この様に、保存系では同じ運動が継続するに過ぎないが、散逸系では、非平衡を動力源として多彩な現象が生じるのである。地球上の様々な現象、例えば、生物の出現・生物の進化・社会の進歩・科学の発達は、すべて地球という散逸系で生じる現象なのである。また、散逸系は、非平衡を動力源として、自らの構造をも形成する。散逸系の構造は、非平衡の大きさが決めるのである。従って、非平衡の大きさを変えれば、散逸系の構造も変ることになる。すなわち、散逸系の解析は、系の構造の変遷をも明らかにするのである。

次に、古典科学と複雑系科学の間の第二の違いである還元性科学と非還元性科学の違いについて考えることにする。古典科学の還元性とは何を意味するのか。古典科学は、あらゆる事象に共通する普遍法則が存在すると考える科学である。すべての事象の深奥には、普遍法則は潜んでいる故、事象を微少な部分に分解し、微少な部分に普遍法則を適用して、事象を説明しようとする科学である。普遍法則の代表例がニュートン力学の法則で、古典科学はすべての事象をニュートン力学から説明しようとして試みであった。例えば、大気を伝播する音波を考えてみよう。音波の振舞は波動方程式から説明される。それでは、波動方程式は何から導出されるのか。密度変化のある大気を微少な部分に分割する。微少部分に隣接する大気の一部は、密度変化により異なった圧力を持っていて、この圧力の違いにより微少部分に力が作用する。ニュートンの運動法則を用いて、この力に対する運動方程式を作ると、波動方程式が導出される。すなわち、

音波がニュートン力学の現象として説明されるのである。音波の振舞が、ニュートン力学に還元されて説明されるのである。

複雑系科学は、非還元性科学とされる。非還元性科学とは、普遍法則に還元して事象の説明をしないこと、事象を他の事象に還元しないで事象そのものから説明しようとする事、事象を部分に還元すると全体的な意味が失われ事象の説明ができぬとすること、を標榜する科学である。換言すれば、現象論的科学のことを言うのである。還元性科学は、科学者あるいは人間の夢であった。世界のあらゆる事象が一つの法則から説明できるとする科学だから。だが、非還元性科学である複雑系科学は、事象は部分には還元できぬ、全体は部分以上の内容を持つ、事象の説明は事象の現れの中で試みねばならぬ、と主張するのである。ところで、還元性科学も非還元性科学も、科学にとって共に必要ではないか。還元性科学は、科学的成果を整理し科学間の関係を論理化するために必要である。一方、非還元性科学は、事象の現象面で法則を見つけることにより、人間による事象の操作を可能にするために、あるいは、事象の現れを見詰めることにより、事象の独自性を把握可能にするために必要である。すなわち、新しい事象は、還元性科学によっても、非還元性科学によっても、取り扱わねばならないのである。また、非還元性科学にはシステム論もあるが、前述した様に、複雑系科学はシステム論とは違った科学方法論を与えるのである。

最後に、決定論的科学と偶然論的科学という両科学の違いを考察しよう。決定論的科学は、事象の振舞が科学法則から決定されとするとする科学である。この科学の代表は、やはりニュートン力学である。物体を斜めに投げたときの運動を考えてみる。ニュートン力学は、重力を外力とする運動方程式が成立するから、物体の位置と速度の初期値を与えると、その解としてその後の物体の位置と速度が決まると主張する。すなわち、世界は物体で構成されており運動方程式に従って運動するから予め決まった展開をする、あるいは、世界のすべての物体のある時点の位置と速度が判ると、運動方程式を解くことにより、その後

の世界の振舞を決定することができる、と主張するのである。同一時点のすべての物体の位置と速度を知ることができない、すべての物体の運動方程式を立てると複雑な連立微分方程式となり解くことができない、等の理由から世界事象の展開は人間に把握できないかも知れないが、世界は人間の願望や意志を離れて予め定まった展開を見せるのみである。この様に、決定論的科学は考えるのである。

偶然論的科学である複雑系科学は、一つの方程式に従って事象が展開することはないと主張する。複雑系は、前にも述べたように、非平衡系におけるシステムであり、非平衡の大きさを動力源とするシステムである。非平衡の大きさが変化すると、非平衡が形成する系の構造も変化する。この構造の変化は、次のように起こる。非平衡が大きくなると、現在の構造が不安定になって、増大した非平衡に適合した新しい構造が発生する。この現在の構造と新しい構造の境界となる非平衡の大きさを分岐点という。系を記述する非線形微分方程式の解析から、分岐点における構造変化において、複数個の新構造が可能であることが判る。この構造変化において、複数個の可能な構造から、現実の構造は、どのように選択されるのだろうか。プリゴジンは、偶然が構造を選択すると主張する。分岐点では構造が不安定で、可能な構造がすべて等確率で存在しているから、システムの確率的なゆらぎが現実の構造を決定するというのである。すなわち、系における非平衡の大きさが変化すると、構造1→分岐点→構造2→分岐点→構造3→……といった具合に次々と構造が変化するが、系が一つの構造を持っているときには系を記述する方程式を持つから決定論的振舞をし、系が分岐点にあるときには系は不安定で構造を持たないから偶然論的振舞をするのである。この様に、複雑系科学は、決定論的科学を内に含んだ新しい偶然論的科学を提示するのである。

6. 結論

筆者は別途の論考で、現象学・システム論・古典科学の関連を考察した¹⁸⁾。この論考での結論は、事象の多面的な認識を可能にすることから、これらの事象把握法が補完関係にあるということであった。これらと複雑系科学の関係を論じる本稿の結論も、これらの科学が事象の全体的把握を得るための補完関係にあるということである。補完関係にあるのならば、それぞれの科学が、他の科学から何を補完され、他の科学に何を補完するのかの認識が重要である。ここで、古典科学・システム論・現象学・複雑系科学における事象認識の性格から、これらの科学の相互位置関係を明確にし、これらの科学の事象認識を総合することによって事象の全体的把握が可能となることを示そうと思う。

事象の全体的把握とは何を意味するのだろうか。あらゆる事象を貫く普遍法則を見つけ、すべての世界の事象を説明することだろうか。それとも、我々が体験している事象を説明し、事象の展開を予測することだろうか。世界の全事象を説明する普遍法則を発見することは、人類の歴史において科学だけではなく哲学の探求の心的動機となっていた。また、この普遍法則を知りたいという願望は、現在の科学研究や科学の学習を支える人間的動機ともなっている。これらのことから判るように、普遍法則の発見は、人間の内奥の願望に根付いているのである。さらに、普遍法則の発見が、科学研究に対する社会的要望となっていることも周知の事実である。普遍法則は、諸事象への適用によって、事象の展開の予測が可能となり、自然や社会の制御の強力な手段となるからである。この様に、普遍法則の発見は、科学研究の不可欠の要素である。だが、科学研究の目的は普遍法則の発見だけに留まらない。我々の社会があるいは個々の人間が直面する問題に対して、解答を与えるのも科学の役割であろう。人間は、置かれた状況の中で、合理的に振る舞おうとする。状況に適應して生存を確保しようとする。状況に適應するためには、置かれた状況についての、適確な知識が不可欠である。この知識は、科学が与える。科学が与えなければ、宗教・伝承・習俗が与えることになり、生存は後退を余儀なくされよう。この様に

科学は、一般事象の中に普遍法則を探るだけではなく、状況が課す問題をも解かねばならないのである。これから、科学における全体的把握には、普遍法則を知ることによる全体的把握と、問題を生み出す状況の全体的把握の二種類があることが理解されよう。

次に、科学が解かねばならぬ問題の種類について考えよう。科学が対象とする事象(問題)は、認識主体からの事象(問題)の距離をパラメータとして、次の三つに分類できるのではないか。主体から完全に離反したものとする客観的事象、社会・民族・国家等の巨視的主体を考慮する社会的事象、探求する主体の心理・願望・観念の下にあるとする人間的事象、の三つにである。客観的事象は、科学が対象とする事象は認識主体の影響外にあらねばならない、とするところに成り立つ事象である。科学は、いかなる状況においても、だれの実験の試みにおいても、成り立つ事象を扱うから、主体の影響を極力排除し、事象そのものの展開を扱わねばならない、とするところに成り立つ事象である。通常の科学は、この精神を科学の不可欠な条件として捉え、主体の排除を懸命に試みていることは論を俟たない。一方、科学の事象は社会的事象であるとする見解は、科学的行為は極めて社会的なものであり、社会的状況が課す条件を事象は不可避に被るとする見解である。例えばニュートン力学は、事象の深奥には法則がある、事象を説明する真理は一つである、等の前提の下に成り立っているが、これは西洋社会の奥底に流れるギリシア哲学とキリスト教の精神の影響であるとされている。この様な、科学が社会の中での試みである限り、必然的に社会の影響を被るとする見解が、科学事象は社会的事象であるとする見解である。最後の科学事象は人間的事象であるとする見解は、科学事象が社会の影響を受けるだけではなく、探求主体の影響を受けるとする見解である。この例として、物理学者ファラデーの電場の発見や精神病理学者フロイトの無意識の発見があろう。これらの発見は、通常、ファラデーの力の作用を生き生きと思い描く想像力、フロイト自身が苦しんでいた精神病理的兆候に帰せられている。この様

に、科学事象は探求主体を含んだ複合体であり、この複合体から科学発展が生じるとする考えが、人間的事象の見解である。これらの三つの見解は、上の説明から判るように、いずれも正しいのではないだろうか。これらは、科学事象そのものの違いではなく、科学事象を見詰める人間の眼差しの違いに過ぎないのである。科学事象は様々な眼差しで見詰めることができる。1つの科学的事象は、客観的事象・社会的事象・人間的事象のいずれの事象としても、見ることができるのである。客観的事象、社会的事象、人間的事象と、認識主体との距離が近くなるに従って、事象の全体性が増すように考えられるが、これは科学事象に対する眼差しの違いに過ぎないと考えられるのである。

以上の考察から、科学が認識対象とする種々の事象の占める位置は、事象の一般性と具体性を結ぶ軸と、認識主体からの距離を値とする軸の、二つの軸を持つ座標系で与えられることが判る。古典科学は、一般性と客観性を性格とする事象を対象とするものであることは論を俟たない。複雑系科学は、複雑な系を複雑なままで把え、系の構造変化の普遍法則を探ろうとするから、具体性と客観性を性格とする事象の科学である。一方、システム論は、工学から生まれた科学で、社会が要求するものを社会の中で実現しようとする科学だから、具体性と社会性を性格とする事象の科学である。最後に、現象学は、意識はなにものかについての意識である、という意識の志向性から、事物の世界内存在を解こうとする学説であるから、具体性と人間性を性格に持つ事象を対象としている。この様に、それぞれの科学は、社会が解決を迫る種々の事象に対して、解決の固有の位置を占めるのである。これらの科学は、決して正確・不正確の排他的関係にあるのではなく、それぞれ固有の事象を対象とするという補完的關係にあるのである。また、これらの科学の科学的成果を総合することによって、種々の姿を見せる事象の全体像を、人間は手にすることができるのである。これらの科学の中で、複雑系科学は、具体的で普遍性を持つ事象を扱うという固有の位置を持つのである。

参考文献

- 1) 吉永良正『複雑系とは何か』講談社 (1996)、51頁.
- 2) ニコリス、プリゴジン『複雑性の探求』(安孫子、北原訳) みすず書房 (1993)、241頁-266頁.
- 3) 吉川研一『非線形科学』学会出版センター (1992)、25頁.
- 4) H・ハーケン『協同現象の数理』(牧島、小森訳) 東海大学出版会 (1980)、366頁.
- 5) 山口昌哉『カオスとフラクタル』講談社 (1986)、78頁.
- 6) 吉川研一『非線形科学』学会出版センター (1992)、27頁.
- 7) 都甲、松本編著『自己組織化』朝倉書店 (1996)、28頁.
- 8) I・プリゴジン『存在から発展へ』(小出、安孫子訳) みすず書房 (1984)、113頁.
- 9) 文献8)、114頁.
- 10) クラウス・マインツァー『複雑系思考』(中村量空訳) シュプリンガー・フェアラーク東京 (1997)、18頁.
- 11) 三池、森、山口『非平衡系の科学Ⅲ』講談社 (1997)、7頁.
- 12) 文献8)、131頁.
- 13) プリゴジン、スタンジェール『混沌からの秩序』(伏見、松枝等訳) みすず書房 (1987)、第Ⅱ部複雑性の科学.
- 14) 文献13)、238頁.
- 15) 例えば
M・メルロー=ポンティ『知覚の現象学』(竹内、小木訳) みすず書房 (1967).
M・メルロー=ポンティ『人間の科学と現象学』(『眼と精神』(滝浦、木田訳) みすず書房 (1966) に収録).
- 16) 例えば
ジェラルド・M・ワインバーグ『一般システム思考入門』(松田、増田訳) 紀伊国屋書店 (1979).
T・ダウニング・パウラー『応用一般システム思考』(中野文平訳) 紀伊国屋書店

(1983).

フォン・ベルタランフィ『一般システム理論』(長野、太田訳) みすず書房 (1973).

17) プリゴジンは、以下の文献で古典科学と複雑系科学の関連を論じている。

プリゴジン、スタンジェール『混沌からの秩序』(伏見、松枝等訳) みすず書房 (1987).

I・プリゴジン『存在から発展へ』(小出、安孫子訳) みすず書房 (1984).

ニコリス、プリゴジン『複雑性の探求』(安孫子、北原訳) みすず書房 (1993).

18) 坂恒夫「現象学と実証科学」岐阜薬科大学基礎教育系紀要、第10号 (1998年)、7頁.