

# プリゴジンの複雑性 (Complexity in Prigogine)

坂 恒夫  
(Tsuneo Ban)

## 1 序論

複雑系科学が、社会の関心を集めている [1]。複雑系科学は、複雑なものの振舞を説明する科学である。複雑なものとして、これまで、科学の対象外に置かれていたものを、理解し得るものとして提示する科学である。複雑系科学が対象とする複雑なものとは何だろうか。複雑なものを把握するには、簡単なものを知らねばならない。簡単なものとは何だろうか。

簡単なものとは、人間が理解し得るものである。いかに動くか、いかに変わるか、が判るものである。簡単なものとしての物理的事物に、振動する振子、落下する物体、時を刻む時計などがある。これらは、運動方程式の解を求めれば運動の展開が予測できるし、構成部品によって全体が組織される子細が判っている。すなわち、事物の展開や動きが理解し得るものが、簡単なものなのである。

簡単なものが理解し得るものならば、複雑なものは理解し得ないものである。すなわち、複雑なものとは、事象の起因が判らないもの、事象の予測ができないもの、人間による制御ができないものである。このようなものを対象とする科学が、複雑系科学なのである。不可思議な振舞をして、これまで理解し得ないものとされていた事物を、理解し得るものとする科学が、複雑系科学なのである。

複雑系科学が対象とする事物、すなわち複雑なものとは、具体的に、どのようなものであろうか。自然事象においては、気候系・生態系が、その例である。これらの系は、構成要素が複雑な相互作用を持っており、仮に、構成要素と相互作用を特定し、系の運動を表す方程式を導いたとしても、

数学的に正確な解を得ることができない。また、生物も複雑なものの典型である。生物は、物理的事物とは異なり、生物固有の生命の原理に従って存在するとされていた。このような生氣論は、生物を複雑なもの、すなわち理解し得ぬもの、と人間が捉えていた証拠ではないだろうか。人間の意識・知能・行動も、複雑なものの例である。人間の意識は、まわりの事物に対する意識であり、単なる志向性に過ぎず、絶えず無に付きまといわれているとする実存主義の規定も、意識が人間の理解し得ぬものとされていた証拠であろう。最後の例に社会がある。社会学の根本問題に、社会と個人の問題がある。社会は個人によって形成される一方、社会も社会的意識として個人を規定している。社会の研究は、個人の探究から出発すべきか、それとも社会の探求から出発すべきか、が社会と個人の問題である。この問題も、社会が複雑なものであることから、派生したといえよう。

これらの事から、気候・生物・人間・社会という、人間にとって本質的に重要な事象が、長い間、複雑なものとして科学の外に、あるいは、簡単なものの科学方法論で把握できるものとして、置かれていたことが理解できよう。だが、これらの事象が致命的に重要であることから、人間は、これらの事象が示す複雑な振舞を、これまでの生物学・心理学・社会学のように、簡単なものの科学に還元することなく、複雑なものそのものとして捉える事象把握法を発展させてきた。このような事象把握法に、システム科学と現象学がある。システム科学は、複雑な機械を製作する過程から派生した科学で、複雑な振舞を示す事象を構成要素に分解し、構成要素間に相互作用を設定することによって、複雑なものの振舞を説明しようとする科学である。一方、現象学は、既成の科学的概念をすべからく排して、事象そのものが示す振舞の中から、事象が生起する条件を探ろうとする方法論である。この方法論により現象学は、人間事象の時間性・身体性・共主観性を発見する。

システム科学・現象学は、複雑系科学そのものではないが、複雑なものを独自の方法論で扱う科学であった。それでは、複雑なものの固有の振舞を探る科学すなわち複雑系科学には、どのようなものがあるだろうか。本稿の考察の対象となっているプリゴジンは、生物という複雑系を、非平衡化学反応系で生じる散逸構造として理解しようとする。非平衡化学反応系

を、反応速度式という非線形微分方程式で表し、非線形微分方程式の解の振舞によって、生物の発生・成長・進化を説明するのである。このプリゴジンの科学と度々対比される複雑系科学に、ハーケンのシナジェティックス (synergetics) がある。シナジェティックスは、心臓や脳は個々の細胞の協働によって心臓の拍動あるいは脳における認知という機能を果たしているが、このような協働現象が生じるメカニズムを探ろうとする科学である。プリゴジンやハーケンの複雑系科学は、複雑系の事象を微分方程式で表現し、微分方程式が示す非線形現象で、複雑系の振舞を説明するものであった。一方複雑系の要素間の複雑な相互作用を、可能な限り忠実に計算機上に表現し、計算機が示す現象で複雑系の振舞を説明しようとする複雑系科学がある。この複雑系科学は、諸事象の振舞は事象固有の計算に基づいて生起するから、事象が行う計算を計算機上に表現すれば理解可能になるとする考え方だから、計算機科学的複雑系科学と呼ぶことができよう。

本稿は、システム科学、現象学、シナジェティックスおよび計算機科学的複雑系科学等の複雑性把握をプリゴジンの複雑性把握と比較することによって、プリゴジンの複雑性把握の特色を考察し、その可能性と限界を探ろうとするものである。

## 2 複雑なものと同様なもの

理論家の作品といえども、直接的な形で、彼の全生涯と結びついている。と、プリゴジンは、1977年ノーベル化学賞を受賞したとき、発表された論文の中で語る [2]。プリゴジンにおける複雑性を考察する前に、プリゴジンの半生を、この論文の中に見てみよう。

プリゴジンは、1917年、モスクワで生まれる。父ローマン・プリゴジンは、モスクワのエコール・ポリテクニク出身の化学技師であった。プリゴジンは、ロシア革命の渦中で生まれたのである。革命による新しい体制に適応できなかったプリゴジン一家は、故郷ロシアを離れることになる。一家は、一時的にドイツに移り住んだ後、ベルギーに居を構える。父親の影響からであろう。プリゴジンは、兄と共に、ブリュッセル自由大学で化

学を専攻する。だが、プリゴジンは、この選択に戸惑いを感じたという。プリゴジンの心を惹いていたのは、歴史学、考古学、それに何よりも音楽だった。プリゴジンの母によれば、プリゴジンは、文字を読む前に、楽譜を読んでいたという。音楽は、音の時間的展開の中に、人間的意味を注入する芸術である。すなわち、時間の中に秩序を形成する芸術である。このプリゴジンの時間への執着は、彼の活動に一つの方向を与えることになる。

歴史学、考古学など、時間に関係する科学に興味を持つプリゴジンが選んだ化学領域の研究課題は、熱力学第二法則に関するものだった。第二法則は、自然現象の不可逆過程に関する法則、すなわち時間の進む方向に関する法則であり、プリゴジンの興味を引いたのだった。ベルグソンの『創造的進化』が愛読書であったプリゴジンにとって、生物の簡単な組織から複雑な組織への進化は、自然の時間の表現そのものであった。プリゴジンは、生物の進化を熱力学的に解明しようとする。だが熱力学が示す時間の方向は、生物が示す時間の方向と逆であった。すなわち、熱力学は、組織が崩壊する無秩序化の時間の方向を示すのに対し、生物は、組織が高度化する秩序化の時間を示すのである。この原因は、熱力学が、熱平衡状態にある系を扱うのに対し、生物は、非平衡状態で生存・進化するからである。これから、熱力学の非平衡系への拡張が、プリゴジンの課題となる。非平衡系の研究は、非平衡の緩和過程に構造が生れることを明らかにする。すなわち、非平衡が散逸(緩和)するときに現われ、非平衡が無くなれば消失する散逸構造が、非平衡系に現れるのである。非平衡の大きさを与えるパラメータの値を変えると、散逸構造は構造を変えることから、これが生物の進化・形態形成を説明する、とプリゴジンは考える。だが、生物を支える基礎過程は、化学反応である。プリゴジンは、化学反応の動的過程の中の散逸構造を考える。こうして生れたのが、反応速度式を基礎方程式とする散逸構造論である。プリゴジンは、この業績でノーベル化学賞を受賞することになる。

生物の進化や形態形成の謎の解明を目指すプリゴジンにとって、複雑なものは、当然、生物的なものであり、簡単なものは非生物的なものすなわち物理的なものである。ここで、プリゴジンが、これらを、いかなるものとして捉えていたかを考えることにする。

簡単なものすなわち物理的なものの持つ性格として、プリゴジンは可逆性を挙げる [3]。物理的なものとは、ニュートンの運動法則に従って変化するものである。一見、運動法則に従わないように見えるもの、例えば水の動きのようなものでも、分子の動きに還元すれば、運動法則に従って変化するから、世界に存在するかなりの部分が、運動法則に従うものとなる。ニュートンの運動法則である運動方程式 ( $md^2x/dt^2 = F$ ) は、時間反転 ( $t \rightarrow -t$ ) に対して不変である。すなわち、時間反転した事象も運動方程式の解となるから、時間反転した事象も存在し得ることになる。これから、運動法則に従って展開する事象は、事象の絶対的な変化の方向、すなわち時間の進む方向を示し得ず可逆であることが判る。簡単なものには、時間が存在しないのである。また、ニュートンの運動法則は、事象が運動法則に従って展開するとき、①全エネルギー、②全並進運動量、③全角運動量が保存されることを示す [4]。これは、運動法則の可逆性と密接に絡んでいる。事象が展開するとき、これらの物理量が保存するから、事象は可逆なのである。物理量が一定値を保つから、未来へ向かう事象変化も、過去に向かう事象変化も可能となるのである。それでは、このような性格を持つ運動法則に従う事象は、具体的にどのような展開を見せるのだろうか。時間の可逆性と物理量の保存則を満たす世界は、事象の構造が変化しない世界である。事象を記述する変数の値が時間的に変化するだけで、事象の構造、変数の性質、変数の数が変化しない世界である。太陽のまわりの惑星の運動、原子核のまわりの電子の運動のように、同じ相を永遠に見せる運動である。そこでは、空気を切り裂く稲光も、樹木をなぎ倒す暴風も、新しい生物種の誕生も、原野を切り開く都市の建設もないのである。すなわち、時間の人間的な表現である歴史がないのである。出来事の時系列である歴史のない世界が、運動法則の世界なのである。それでは、歴史のない世界は、ニュートンの運動法則に従う世界だけであろうか。プリゴジンは、量子力学もアインシュタインの相対性理論も、可逆の世界の記述であり、歴史のない世界の記述であるとする [5]。シュレディンガーの波動方程式 ( $ih/2\pi\partial\psi/\partial t = H\psi$ ) は、時間反転 ( $t \rightarrow -t$ ) に対して不変ではないが、粒子の存在確率を  $\psi\psi^*$  ( $\psi^*$ :  $\psi$  の複素共役) で計算するから、事象は可逆になるとする。 $\psi$  は未来に向かって進む事象の変化を表し、 $\psi^*$  は過去に向かっ

て進む事象の変化を表すから、これらの積である  $\psi\psi^*$  は可逆な事象の変化を表すというのである。このようにプリゴジンにとって、物理学の世界は、歴史のない可逆的世界となるのである。

それでは、プリゴジンにとって、複雑なものとは何だろうか。単純なものが可逆で歴史のないものであったから、複雑なものは非可逆で歴史のあるものとなる。非可逆で歴史のある事象は数多くあるが、プリゴジンにとって、それは生物であると言えるであろう。だが、プリゴジンは物理化学者であって単純な世界の住人である。プリゴジンは、物理化学の単純な世界と生物の複雑な世界を結び付けようとする。可逆で歴史のない物理化学の世界は、いかなる条件が加わると、非可逆で歴史のある世界に変わるのであるか。プリゴジンは、物理化学の事象に非平衡条件が加わると、非可逆で歴史のある世界が生まれると主張する。水平の置かれた二枚の平行板の間に、水などの液体が入っているとす。二枚の平行板の温度が等しいとき、系は平衡状態にあり、系には特別の事象は生じない。一方、下の平行板の温度を上の上の平行板の温度に対して高くするとき、すなわち二つの平行板の温度を非平衡状態に置くとき、次の事象が系に生じる [6]。平行板間の温度差が小さいとき、すなわち非平衡が小さいとき、熱伝導によって、熱は下の平行板から上の平行板に移動する。ところが、温度差が大きくなって非平衡が大きくなると、今度は対流によって熱が運ばれる。平行板が長方形の場合、液体は、ロール状の対流細胞となって、回転を始めるのである。すなわち、空間構造がなかった系に、構造が現われるのである。この空間構造には、二種類がある。平行板間のロール状の対流細胞は、回転方向が右回りのものと左回りのものが交互に並んでいるが、この個々の対流細胞の回転方向を逆にしたものも可能で、結局、これらの二種類がある。これを非平衡過程の分岐構造という。温度差を大きくしていったとき、この二種類の構造の内、どちらかが現れるのである。この選択は、液体の運動のゆらぎという確率過程がするとされる。すなわち、形成される構造は、現在の構造から一義的に決まらないのである。この一連の構造誕生の過程は、歴史・進化と呼ばれる現象ではないか。地球は、太陽からの高温すなわち低エントロピーの熱エネルギーの流入と、宇宙空間への低温すなわち高エントロピーの熱エネルギーの流出という非平衡状態にある。この非平

衡状態の下で一つの構造が生まれ、この構造の誕生によって、ある種の物質  
量が増え、これが新しい非平衡状態を作り、これによって再び新しい構  
造が生まれる。これが繰り返されて、次々と系は構造を複雑にしていくの  
である。これは、歴史・進化と呼ばれる現象ではないか。

化学反応においても、非平衡が非可逆な構造変化を生む、とプリゴジンは主張する。例えば、硫酸セリウム  $Ce_2(SO_4)_3$ 、マロン酸  $CH_2(COOH)_2$ 、臭素酸カリウム  $KBrO_3$  が硫酸に溶かされている反応系を考えよう。この反応系を放置すれば、平衡状態に達し、反応の進行は止まってしまう。ところが、化学反応器を用い、臭素酸イオン  $BrO_3^-$  の濃度を一定値に保ち、マロン酸の濃度をある値以上にして、反応生成物を絶えず取り除き、反応系を非平衡状態に置くと、中間生成物である臭素酸  $HBrO_2$ 、臭素イオン  $Br^-$ 、セリウムイオン  $Ce^{4+}$  の濃度が時間的に振動する [7]。Belousov-Zhabotinski 反応と呼ばれる化学振動である。Belousov-Zhabotinski 反応を、振動する三つの化学種の濃度を座標軸として表すと、閉じた曲線になる。この曲線は、アトラクターという性質を持つ。すなわち、反応系に摂動を加えて、変動を一時的に曲線から外しても、必ず元に戻るという性質を持つ。これは、心臓の拍動、肺の呼吸運動など生物リズムに見られる性質である。この化学振動系では、時間は可逆であろうか。摂動によって一時的に曲線から外れても元に戻るのだから明らかに不可逆である。すなわち、系に非平衡を課すことによって、不可逆性が生れるのである。

非平衡の下で生じる複雑なものは、どのような性格の構造を持つのだろうか。上で述べた空間的な温度差による対流細胞や、平衡値からの濃度差による化学振動の構造は、非平衡が消失する過程で生じる構造である。外界によって系に課される非平衡によって生れる構造である。プリゴジンは、この構造を散逸構造と名づける。散逸構造は、物質の結晶構造、無機化合物の分子構造、地球上の陸や海の構造などとは、著しく異なる性格を持つ。後者は、平衡系で生じる構造であり、外界からの作用がない限り、永遠の相を持つ構造である。一方、散逸構造は、外界の課す非平衡がなくなると消失する構造、外界によって支えられる開放系としての構造である。構造がない系に非平衡が与えられると発生する構造、系を機能的に複雑なものにする構造である。この散逸構造の性格は、生物が持つ性格に似てはいな

いか。生物は、太陽からの高温度 (低エントロピー) エネルギーの流入と宇宙空間への低温度 (高エントロピー) エネルギーの放出という非平衡系で生じた散逸構造である。低エントロピーエネルギーの地球への照射という太陽が地球に与えた非平衡を利用して、個々の個体の構造を複雑にするとともに、個体の種類を増やしてきたのが、生物なのではなかったか。太陽光の低エントロピーを食物という形で自己の内に吸収して、自己の身体の崩壊という不断のエントロピー増大を防ぐとともに、卵子から乳幼児、乳幼児から子供、子供から大人という個体の成長を行ってきたのではなかったか。このように、プリゴジンにとって複雑なものは、成長・歴史・進化などの不可逆的な時間変化があるものなのである。

### 3 複雑なものの探究

成長・歴史・進化という時間変化を持つ複雑なものを、プリゴジンは、どのように捉えようとしたのか。化学生物系における自己組織現象の理解を目指す著書『散逸構造』を、プリゴジンは、化学反応の反応速度式に粒子の拡散方程式を加えたものを基礎方程式として著す [8]。反応速度式は、反応溶液中の反応物質の濃度を、系の状態を表現する変数として、系の時間変化を記述する方程式であり、拡散方程式も、粒子の空間的な濃度勾配から、粒子の移動速度を求め、粒子濃度の空間的・時間的変化を求める方程式である。すなわち、反応速度式と拡散方程式を用いる探究手法は、事象を微小な領域に分割し、微小な部分に運動方程式を適用し、これを加え合わせることによって、全体としての振舞を予測するという通常の物理学の探究手法と異なって、系を物質濃度という巨視的量で記述し、巨視的量の時間変化から事象の振舞を考察するという現象論である。この現象論的方程式から出発する複雑なものの記述は、プリゴジンの探究法の特色といえよう。この探究法の他分野への応用を、プリゴジンは提唱しているが、ここにおいても基礎方程式は現象論的方程式である。例えば、氷河期・間氷期などの地球の気候変動の記述には、太陽からの熱入射と宇宙空間への熱放射の熱釣合方程式を、白蟻などの昆虫の営巣の記述には、ロジスティッ



ク方程式で代表される生物の個体数の増減を表す方程式を、基礎方程式として用いている [9]。すなわち、プリゴジンは、事象の変動をできるだけ忠実に表現する一方、可能な限り少数の変数で表現する現象論的方程式で、複雑なものを記述しようとする。複雑系科学は、複雑なものの時間変動を記述する科学であるから、その基礎方程式は、系の状態変数の時間的変化率を表す式、すなわち力学の運動方程式に似た方程式となる。力学における軌道による物体の記述のように、事象の状態変数の時間変化で記述される系を力学系という。プリゴジンの複雑系科学は、力学系理論の上に成り立っているのである。それでは、プリゴジンの複雑系科学は、いかなる点で通常の力学と異なるのであろうか。それは、複雑系科学が、系を構成する要素間の相互作用、すなわち系を記述する変数間の相互作用を、可能な限り忠実に表現しようとするところにあるといえよう。変数間の相互作用は、変数の間の積として、微分方程式上で表現される。このような方程式は、非線形微分方程式と呼ばれる。複雑系科学は、非線形微分方程式の非線形項を、通常の力学のように無視しないで、そのまま解こうとするのである。すなわち、プリゴジンの複雑系科学は、非線形力学系の理論といえるのである。

ところで、プリゴジンの複雑なものは、成長・進化するものであった。非線形力学系理論は、事象の成長や進化を、どのように表現するのだろうか。事象の成長や進化は、時間の経過と共に、事象の構造が複雑になることである。現在の事象の構造が崩壊して、新しい機能的な構造が生れることである。この構造の変化は、力学系理論の中で、どのように表現されるのだろうか。いま、微分方程式  $dx/dt = -x^3 + \lambda x$  に従って時間変化する力学系を考える [10]。この力学系の例として、例えば、反応系 ( $A + X \rightarrow 2X$ ,  $3X \rightarrow$ ) がある。ここで、反応速度定数を、簡単のため、1としている。反応種 A、X の濃度を、それぞれ  $\lambda$ 、 $x$  とすれば、与式が得られることが理解できよう。この力学系の定常状態 ( $dx/dt = 0$  を満たす点) を考える。定常状態は、 $-x^3 + \lambda x = 0$  を満たす点であるから、 $\lambda \leq 0$  のとき  $x = 0$ 、 $\lambda > 0$  のとき  $x = 0$  と  $x = \pm(\lambda)^{1/2}$  である。微分方程式から判るように、定常点  $x = 0$  は、 $\lambda \leq 0$  では、 $x = 0$  の近傍で  $dx/dt < 0$  となって、外部摂動によって  $x$  が 0 からずれても元に戻るから安定であり、 $\lambda > 0$  で

は、 $dx/dt > 0$  となるから不安定である。一方、 $\lambda > 0$  の  $x = \pm(\lambda)^{1/2}$  の解は安定である。定常点は、系が永続的に留まる点であるから、系の状態すなわち構造を表している。すなわち、系のパラメータ  $\lambda$  が、 $\lambda \leq 0$  から  $\lambda > 0$  に変わると、系の構造が、 $x = 0$  から  $x = \pm(\lambda)^{1/2}$  に変わることを示している。 $\lambda$  のような、構造変動を引き起こす系のパラメータを、制御パラメータという。力学系の制御パラメータが大きくなると、現在の構造が不安定になって、新しい構造が生れるのである。制御パラメータの数は一つとは限らず、系の構成が複雑になると、多数の制御パラメータを持つことになる。この多数の制御パラメータが値を変えていくと、次々と新しい構造が生れるのである。制御パラメータは、多くの場合、温度差や基質濃度など、外界から強制される非平衡の大きさである。すなわち、非平衡の大きさが増大していくと、構造が新しい非平衡に適さなくなり、非平衡が要求する新しい構造に変わるのである。それでは、制御パラメータすなわち非平衡の大きさを変えるメカニズムは何だろうか。これを、生物の発生・進化という構造変化に見てみよう [11]。原始地球においては、酸、塩基、糖といった低分子の合成量は、かなりの量に成っていたが、生物の構成要素となる高分子の量は少なかったという。高分子の合成は、通常の場合の重合の過程では生成速度が遅く、自己触媒による急速な生成を考えねばならないとプリゴジンは主張する。こうして、さまざまな高分子が合成されて、それらの濃度が増していくと、これらの濃度が制御パラメータとなって、新しい構造すなわち新しい高分子が生まれる。すると、これらの高分子の濃度が新しい制御パラメータになって、さらに新しい構造が生れると考えられる。これは、太陽の低エントロピーエネルギー照射という非平衡過程がある限り、非可逆過程であり、生物の発生・進化を説明すると、プリゴジンは主張するのである。

外的状況が系に課す制御パラメータが大きくなると、系の時間的振舞を表現する微分方程式の解が変化し、この新しい解が系の新しい構造を与える。これが、プリゴジンの主張である。この構造変化を、もう少し仔細に考察する。制御パラメータの変化によって構造が変わることを分岐と呼び、分岐が生じる制御パラメータの値を分岐点と呼んでいる。分岐点での構造変化は、いかなるメカニズムによって生じるのだろうか。分岐点を  $\lambda_c$  と

すると  $\lambda < \lambda_c$  での構造は、 $\lambda$  が  $\lambda < \lambda_c$  の値を持つ系の方程式が、その解として決める。一方、 $\lambda > \lambda_c$  での構造は、 $\lambda > \lambda_c$  の値を持つ系の方程式が決める。それでは、 $\lambda$  が  $\lambda_c$  を越えて変わるときの構造変化は、いかなるメカニズムによって生じるのか。分岐点を境とする二つの構造は、いかなる関連を持つのか。プリゴジンは、状態変数のゆらぎによって、構造変化が生じるという [12]。系が一つの構造を持つとき、変数のゆらぎは小さく、系の巨視的振舞に何の影響も及ぼさない。だが、系が分岐点に近づくと、現在の構造が不安定となって、変数に対する拘束が弱くなり、ゆらぎが大きくなるのである。温度差を大きくしたとき発生する対流細胞のように、構造が空間的に均一なものから空間変化を持つ複雑なものに変わるとき、空間的にコヒーレントなゆらぎが発生して、新しい構造に変わっていくのである。これから判るように、分岐点の近傍は、ゆらぎが支配する世界である。分岐点前後の系が決まった構造を持つときには、系を記述する微分方程式に従って系は時間変化するが、分岐点近傍では、ゆらぎを記述する確率過程の微分方程式に従って、系は変動するのである。したがって、系が到達する新しい構造は、確率的なゆらぎを出発点として形成されることになる。系が分岐する構造に様々なものが可能なとき、その時点のゆらぎが分岐する構造を決めることになる。すなわち、分岐点前後の構造は、決定論的方程式で結ばれていないことになる。プリゴジンは、ここにも不可逆性、すなわち時間の矢を世界にもたらす契機があるとする。系が一つの構造を持つとき、系は微分方程式に従って変化するから、記述される世界は可逆性を持つ明快な世界である。一方、分岐点近傍は、確率過程の方程式に従う乱雑な不可逆の世界である。すなわち、制御パラメータが大きくなって、系の構造が変わるとき、可逆な世界から、不可逆な世界を経て、可逆な世界に変わることになる。このような系の変化に、進化・成長・形態形成などの不可逆な生物的時間が発生する原因があると、プリゴジンは主張するのである。

最後に、構造について考える。プリゴジンの複雑系科学は、力学系理論に基づいていた。すなわち、物体の位置や化学種濃度の時間変化を表す微分方程式(空間変化があるときは偏微分方程式)が、系を記述する方程式となっている。系の構造は、この方程式の解として与えられる。構造には、

時間的構造と空間的構造がある。時間的構造は、系が持つ時間的秩序を意味しており、リミットサイクル (非線形振動) がその例である。一方、空間的構造は、流体の回転、化学種の濃度分布などの空間的秩序のことである。これらの構造は、系の方程式の解として求まる。すなわち、時間的構造は、常微分方程式の解として求まり、空間的構造は、偏微分方程式の解として求まる。系の方程式には、系の非平衡の大きさを表す制御パラメータが含まれており、制御パラメータが分岐点を越えて変わると、解の構造が変わることは前に述べたことである。すなわち、これらの構造は、系の非平衡によって生じることが判る。系の非平衡が動力源となって、微分方程式に従う時間変化が生じ、系の構造が生れるのである。系が上述の時間的・空間的構造を持っているとき、外界が課す非平衡による非平衡の散逸が不断に起こっているのである。非平衡も一つの構造であるから、非平衡という全体的な構造の散逸の上に、系は時間的・空間的構造を保持するのである。非平衡がなくなれば、これらの構造は消失してしまうのである。これから、発生する構造を散逸構造 (dissipative structure) とプリゴジンが呼んだことは、前に述べたことである。この構造は、自己組織系 (self-organizing system) という性格を持つことに注意しよう。系の構造は、非平衡を制御パラメータとして含む微分方程式の解として与えられる。すなわち、非平衡によって系自身が生む構造として与えられることに注意しよう。通常の構造物のように、系外の事物によって形成されるのではなく、系自身が自らの構造を生むのである。構造がまったくない系においても、外的に系を非平衡にすると、複雑な構造が生まれるのである。すなわち、無構造・無秩序から、構造・秩序が生れるのである。制御パラメータを大きくしていくと、構造がない系に、複雑な空間構造・時間構造が現れるのである。この自己組織系としての散逸構造は、生物の発生・進化を説明するとプリゴジンは主張する。生物は、簡単な構造の卵子から、複雑な構造の胚へと、あるいは、無機物・有機物の一様なものから、単細胞生物という複雑なものに、自己組織的に発生・進化するのである。「自己組織系としての散逸構造」は、生物の誕生・再生を適切に表現するキーワードなのである。

## 4 複雑なものの性格

ここでは、プリゴジンが複雑系を考えるとき、いかなる観点から複雑性を見ていたか、を考えることにしよう。このプリゴジンの複雑なものの性格を、①非線形性、②構造変動、③カオスの振舞、④非可逆性の四つの点から考察することにしよう。

非線形性は、系を記述する方程式の性質である。微分方程式には、線形性と非線形性の区別がある。系の状態を表す変数 (例えば、 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ ) の二次以上の項 (例えば、 $XY$ 、 $Y^2$ 、 $X^3Y$ ) を含む微分方程式 (例えば、 $dX/dt = aX^3 + bX$ ) を、非線形微分方程式といい、含まない微分方程式 (例えば、 $dX/dt = aX$ ) を線形微分方程式という。線形微分方程式と非線形微分方程式は、性格を著しく異にする。線形微分方程式は、数学的に比較的簡単に解が求まるのに対し、非線形微分方程式は、一部を除いて数学的解を求めることができない。従って非線形微分方程式は、計算機による数値解析が解析の中心となる。また、その解が表す系の振舞も、両者で著しく異なる [13]。線形微分方程式が、単振動・減衰振動などの線形微分方程式の解から判るように、単調な変化をする解を持つのに対して、非線形微分方程式は、「結果が初期値に依らない」、「微小な初期値の違いが大きな結果の違いとなる」、「摂動を加えても元に戻る運動をする」、「パラメータの変化により解の振舞が大きく変わる」、「カオスを持つ」などの奇妙な (weird) 振舞をする解を持つ。先に述べた制御パラメータ変化による構造の変化、すなわち生物における発生・成長・進化などの事象は、非線形微分方程式によって初めて記述可能となるのである。この複雑なものの一般的性質である非線形性に、プリゴジンは、次の独自性を与える。化学に科学的基盤を置くプリゴジンは、自己触媒反応という非線形性を強調する。自己触媒反応とは、反応生成物が、反応自身を触媒する化学反応である。これは、分子  $X$  を合成する酵素を分子  $X$  が活性化することなどにより生じるとされる。化学反応  $A+2X \rightarrow 3X$  は、自己触媒反応の例である。この反応の反応速度式は、 $dX/dt = kAX^2$  ( $k$ : 反応速度定数) となって、 $X^2$  の項があることから、非線形であることが判る。生物に生起する特異な事象は、自己触媒反応が基盤になっている、とプリゴジンは主張する。自己

触媒反応は、系に生じた微小な化学種を増幅する機能を持ち、生物の発生に先立つ有機物の増大に、重大な役割を果たしたというのである [14]。また、生物の最も特異な事象である自己複製も、自己触媒反応が基になって生じるとする [15]。何故なら、遺伝物質によって合成された蛋白質の仲介により遺伝物質自体が合成されるからである。このように、自己触媒反応による非線形性が、プリゴジンの複雑なものの特徴と言えよう。

複雑系科学が対象とする複雑なものの特徴の一つに構造がある。プリゴジンの構造は、どのような特徴を持つのだろうか。前節において、複雑なもの探究過程から、複雑系の構造について考察した。そこでの考察結果を整理すると、次のようになろう。プリゴジンの複雑系の構造は、系に非平衡が加わると発生する。非平衡の緩和が大きくなるように、系の構造が発生するのである。系の構造には、時間的構造と空間的構造があるが、非平衡の散逸過程で生れるのである。これから、複雑系の構造は、散逸構造と呼ばれることになる。また、先に述べたように、複雑系は、非平衡の緩和を大きくするように、構造が発生させる。すなわち、複雑系は、緩和が最大となるように、自己の構造を組織する。これから、複雑系は、プリゴジンにおいては、自己組織系と呼ばれることになる。これらの他に、プリゴジンの複雑系は、どのような特徴を持つのだろうか。非平衡系で生じる構造変化を、簡単なものから複雑なものへの構造変化、系が成長・進化する過程として捉える。これが、プリゴジン複雑系が持つ構造の特徴といえよう。一様な時空の系に非平衡が加わると、空間的・時間的秩序を持った構造が生まれる。これがプリゴジンの構造である。プリゴジンは、系の構造が複雑化するメカニズムを執拗に求めようとする。複雑系という力学系を表現する微分方程式は、一つの構造の下での空間的・時間的秩序を明らかにするが、構造変化のメカニズムについては記述内容としない。このメカニズムを明らかにするため、プリゴジンは、確率過程論に基づき、系の状態変数のゆらぎを調べる。考察結果は、構造変化が発生するときには、空間的・時間的相関を持ったゆらぎが著しく増大し、新しい構造を準備することが示す。このように、プリゴジンは、構造変化の詳細な過程、とりわけ単純な構造から複雑な構造への構造変化のメカニズムを、執拗に探究するのである。プリゴジンにおける最後の構造の特徴は、過程としての構造にあ

るといえよう。通常概念としての構造は、物体の存在と密接に絡んだものである。橋の存在は橋という構造を持った物体の存在であり、私の存在は私という物質的・精神的構造を持った物体の存在である。構造は、絶対的で固定的な物体の存在形態であった。だが、プリゴジンの構造は、物質から離れて変わり得るものとしての構造である。物質は、永遠に存在するかも知れないが、それが見せる外見としての構造は、置かれた状況に依存して変貌していくのである。我々のまわりにある様々な物体は、永遠普遍的物質の上に乗って、状況に応じた顔を見せる構造なのである。物体の本質は、永遠普遍的物質にあるのではなく、生成・変化する構造にあるのである。私という物体は、触れると手応えがする物質ではなく、外界の状況に応じて形態を変える構造なのである。このように、プリゴジンの構造は、事象の現われ、すなわち現象なのである。

複雑系のカオス的振舞を強調するのも、プリゴジン複雑系科学の特色といえよう。カオス的系とは、方程式に従って決定論的時間変化をしながらも、ランダムな確率論的時間変化をする系のことである [16]。カオスは、非線形微分方程式が解として示す、系の奇妙な (weird) 振舞のことであり、俗に非線形現象と呼ばれるものの一つである [17]。非線形微分方程式は、制御パラメータを変えていくと、次々と新しい構造が現れる。この構造の一つに、カオス的振舞をするものがある。カオスは、初期条件に対する鋭敏な依存性という性質を持っている。初期条件の僅かな違いが、時間の経過と共に、指数関数的に増大していくのである。従って、カオスが生じている系では、事象の予測ができないことになる。事象の予測は、初期条件が近接している系は、同じような時間的経過をたどる、との仮定の下に行われるからである。このカオスの鋭敏な初期条件依存性に、プリゴジンは事象の非可逆性を見る。大きな隔たりを持つ二つの解が、微分方程式の時間反転によって、近接する初期値に近づくことは、解が測定値を反映していて、誤差を持つことを考えると、有り得ないからである。また、プリゴジンは、カオスの次の性質からも、非可逆性が事象に与えられるとする。微分方程式には、解が求まらない、すなわち積分できない非可積分系という種類がある。非可積分系の微分方程式は、微分方程式の一部を無視して近似解を求め、無視した項を摂動項として微分方程式を解き、これを近似

解に補正として加えるという摂動論で解く。だが、太陽のまわりを回る惑星の運動を、惑星間の相互作用を摂動項として摂動論で解こうとすると、補正項は収束せずランダムに振動する場合がある。すなわち、補正項がカオス状態になるのである。太陽のまわりの惑星の運動と惑星間の相互作用が共鳴し、正確な解が求まらなくなるのである。運動方程式が、たとえ時間反転に対して対称性を持っていても、正確な解すなわち軌道が求まらなければ、時間の対称性を主張できなくなる、とプリゴジンは主張するのである。それでは、カオス状態にある系は、いかなる手法で把握可能となるのか。それは、物体の確率分布関数を導入することによって可能になると、プリゴジンはいう。事象の変化を物体の軌道の変化で追求した結果、カオスによって軌道の同定ができなくなり、事象の変化が把握できなくなってしまった。物体の軌道を追求するのを止めて、物体が、位置・運動量を座標とする位相空間に、どのような確率で存在するのかを示す確率分布関数で、事象の変化を追求しようというのである。カオスは物体間の相互作用の共鳴現象であるから、物体の持つ位置や運動量に緩和が生じ、この確率分布関数の導入は、世界の事象の非可逆性を説明することになるとプリゴジンは主張する。

上のカオスを原因とする非可逆性の他にも、プリゴジンは、様々な個所で非可逆性について触れていた。この非可逆性の強調が、プリゴジン複雑系科学の特色の最後のものである。この非可逆性へのこだわりは、プリゴジンの時間への著しい関心に源を持つことは確かであろう。発生・進化・歴史として現れる時間を事象の非可逆性で基礎づける著作 *The End of Certainty - Time, Chaos, and the New Laws of Nature* - (邦訳『確実性の終焉』) からプリゴジンの非可逆性を整理すると共にその性格を見てみよう。まず、プリゴジンは、散逸構造の構造変化の中に自然の非可逆性を見る。太陽の存在や気候の変動等によって、系が非平衡状態になると、一つの散逸構造が生れる。散逸構造の発生は、構造の生成物として、新しい物質を生み出す。この新しい物質の蓄積は、新しい非平衡をもたらし、新規の散逸構造を発生させる。このようにして、非平衡状態は、次々と新しい構造を生み出し、系全体の構造を複雑にする。単純な構造が複雑な構造を生み出すことは、生物の進化、社会の発展、思想の発現に相当する。これは、人間に



身近な非可逆現象であり、このような非可逆現象の認識モデルを散逸構造は与えるのである。また、プリゴジンは、散逸構造が持つアトラクター構造にも、事象の非可逆性の源を見る。アトラクター構造は、散逸構造が示す時間変化の一つで、系の状態変数を座標軸として、状態変化を表すとき、閉じた曲線になるものをいう。アトラクター構造は、次の性質を持っている。系の状態に摂動を加えて閉曲線が示す状態変化から変化させても、必ず元の閉曲線が示す状態変化に戻るのである。心臓の脈拍運動肺の呼吸運動などに見られる、運動などによって脈拍運動や呼吸運動が激しくなっても、必ず正常のものに戻る現象は、アトラクター構造の例である。一時的に閉曲線からずれても必ず元に戻るということは、時間の対称性がないということ、すなわち非可逆であるということである。最後に、プリゴジンは、散逸構造と散逸構造を結ぶ分岐点に、非可逆性の起源を見る。系が一つの散逸構造を取るとき、系は構造を規定する方程式に従って時間変化する。だが、構造と構造の裂け目である分岐点においては、系の時間変化を規定する方程式はない。そこでは、現在の構造が不安定化することから、ゆらぎが増大し、系は確率過程論的に振る舞う。すなわち、新しい構造に多数の可能性がある場合、新しい構造は確率論的に決まることになる。したがって、現在の構造から新しい構造への時間変化は、非可逆的に行われることになるのである。このようにプリゴジンは複雑系の様々な部分に非可逆性を探すのである。これは、プリゴジンが発生・進化・進歩等の人間に身近な時間の起因を、懸命に求めていたからだと考えられる。

## 5 プリゴジンの複雑性

複雑系の振舞を記述しようとする科学は、プリゴジンの科学だけではない。このような傾向を持つ科学に、①システム科学、②計算機科学、③シナジェティックス、④現象学等があると思われる。ここでは、これらの科学の複雑系に対する探求方法と、プリゴジンのそれとを比較することにより、プリゴジンの方法の可能性について考察することにする。

システム科学は、高射砲の照準制御装置、航空機・船舶の自動操縦等の

制御装置を製作する過程から派生した考え方で、人工物の科学の別称を持つ科学方法論である [18]。人工物すなわち機械は、多数の部品がそれぞれの機能を果たすことによって、一つの全体としての機能を果たしている。すなわち、多数の部品が複雑に絡まる複雑な系なのである。物理学が、太陽と地球の系、バネに繋がれた物体の系等の、単純な系を扱うのに対して、システム科学は、航空機の自動制御を考えれば判るように、エンジン・主翼・尾翼等、無数の部品からなる系を扱うのである。システム科学は、このような複雑な系を、どのように表現するのか。行動理論・システム科学・計算機科学の科学者 H.A. サイモンは、複雑な系は階層理論によって記述されると主張する [19]。階層理論とは、事象が上位システム・下位システムという階層構造を持つとする考えである。例えば、自動車を見てみよう。自動車は、車体・エンジン・タイヤ等から成り立っているが、これらの部分は、更に、車体については鉄板・ボルト・ガラス等、エンジンについてはシリンダー・ピストン・クランク棒等から成っている。この全体が部分に、部分が更に小さな部分に、分解できる構造を階層構造という。上位システムの機能と構造は下位システムが表現するから、全体システムの機能と構造は、理解したい領域の下位システムまで降りることによって理解できる。この人工物の階層構造は、階層構造を持たせることによって製作が容易になるという人工物の製作過程の反映と言って良いだろう。システム科学は、下位システムの構成要素をブロック (矩形) で、その繋がりを線で表し、これから得られるブロック線図で、全体の構造を表現する。全体としての系の振舞は、構成要素が持つ機能を数式で表現し、ブロック線図が表す構造に従って、それを結び付けることによって得られる。H.A. サイモンは、このような人工物に対する記述法を、生物・社会・経済等の複雑系にも適用しようとする。適用が可能となるためには、系の上位システムが下位システムの諸要素に分解できねばならない。このとき、下位システムの諸要素は、相互に独立を保ちながら、一定の結び付きを持ち、上位システムの機能を果たしている。この下位システムの諸要素が、独立を保ちながら、弱い結合を持つことを、H.A. サイモンは準分解可能性と呼んでいる。システム科学の複雑系の記述には、この系の準分解可能性を仮定せねばならないが、自然系・社会系の多くの系は、この仮定が可能であると、H.A.

サイモンは考えている。

計算機科学による複雑なものへのアプローチとは、正確には、人工現実(バーチャルリアリティー)等を利用して、計算機の中に複雑なものを構成し、計算機が示す仮想的な振舞から、複雑なものを理解しようとする試みである。この試みを、金子・津田・池上等の主張の中に見てみよう [20]。前にも述べたように、カオスは鋭敏な初期値依存性を持っていて、系を記述する方程式がカオスを持つと、初期値が僅かに異なる二つの解の相違が、時間の経過と共に指数関数的に増大する。このことは、複雑系を記述する方程式が実験的に決められること、実験値は系の状態量の正確な値ではなく近似値であること、通常方程式はカオスを持つことを考えると、複雑系を記述する方程式を正確に決めることが不可能であることを意味する。このことを、金子・津田・池上等は、記述不安定性と呼んでいる。記述不安定性が成り立つならば、系を力学・電磁気学等の基礎方程式が成り立つ要素に分解し、これらの連立方程式群を系の記述の完全な方程式とし、これの近似解を求めることによって、系の振舞を説明しようとする物理学は致命的な打撃を受けることになる。なぜなら、連立方程式群が記述不安定性を持つことから、系の正確な表現であることが保証されないからだ。複雑系に対する物理学的手法に替わり得るものとして、金子・津田・池上等は、人工(仮想)世界の構成による手法を挙げる。物理学的手法の方程式を用いる定量的把握を放棄し、計算機の中に人工(仮想)的に複雑系を構成し、計算機上に現れる定性的現象で複雑系を定性的に理解しようというのである。この手法は、複雑系の事象が展開する時空を計算機上の人工(仮想)的な格子点で表し、事象展開の動因になると思われる要素を、格子点上の状態変数間の差分式として表現し、計算結果が示す時間発展から、複雑系の振舞を定性的に理解しようとするものである。計算機上に作られた人工(仮想)世界が示す振舞から、複雑系はいかなる振舞を持つか、その振舞はいかなる性質を持つか、を定性的に理解しようとするのである。この手法は、基礎方程式から出発していないから定量的な議論はできないが、事象展開の動因となっている要素を、構成的に計算機に取り込むことにより、複雑系が示す振舞の原因となる要素が特定できるという。また、この手法の定量的把握が困難という欠点も、複雑系では、カオスによる鋭敏な

初期値依存性より、事象の定量的把握が本質的に困難であり、定性的議論のみが可能となることから、本質的な欠点にならないと主張する。

シナジェティックスは、H. ハーケンによって提唱された複雑系の記述法で、複雑系を構成する要素間の相互作用の結果、複雑系全体としての巨視的振舞が、自己組織的に協同 (synergetic) 現象として発現する、とする考えである [21]。シナジェティックスは、具体的に、どのように複雑系を捉えるのか。H. ハーケンは、まず、複雑系の巨視的スケールにおける定性的変化に着目すべきことを主張する [22]。定性的変化とは、温度を下げていったときの液体から固体への水の変化、平板上の液体を下から加熱したときの熱伝導から対流への熱移動の変化、化学振動系で化学種の濃度を変えていったときの定常状態から振動状態への変化、等である。定性的変化が起こる点は、系の現在の構造が不安定になって、新しい構造が生まれる点である。そこでは、現在の構造が不安定になっているが、まだ新しい構造も生まれていないから、新しい構造の萌芽となるゆらぎが発生して、成長と減衰を繰り返しているという。これらのゆらぎの中から、新しい状況に合った一つの構造が優勢になり、それが系全体を支配するようになるという。この構造は、複雑系そのものを記述する変数の数に比較して極めて少数の変数 (パラメータ) で記述される、と H. ハーケンは考える。そして、この複雑系の構造を規定する少数の変数を秩序パラメータと呼んでいる。一つの構造が生まれて系が秩序パラメータで記述されるということは、系を構成する要素のすべてが秩序パラメータに従うことだと考え、複雑系の構造が少数の秩序パラメータで記述されることを隷属原理 (slaving principle) と呼んでいる。複雑系の各部分が協同的に相互作用した結果、系の構造が少数の秩序パラメータで表現できることを主張する隷属原理は、シナジェティックスの最も中心に位置する仮定と言えよう。それでは、シナジェティックスは、不安定点で生じる構造変化を、どのように捉えるのだろうか。系の構造を表す秩序パラメータは、系の構造によって規定される運動方程式に従って時間変化すると、シナジェティックスは考える。秩序パラメータが外的摂動によって値を変えたとき、その後の値の変化は、この運動方程式が決めるのである。ところで、運動方程式には制御パラメータという変数が含まれていて、制御パラメータが変わると秩序パラメータの変化が変わ

る。秩序パラメータの変化の仕方が変わることは、系の構造の変化を意味する。すなわち、シナジェティックスは、秩序パラメータの運動方程式に含まれる制御パラメータを変えることによって、複雑系の構造変化を表すのである。制御パラメータとしては、温度の絶対値、二点間の温度差、化学種の物質濃度等が用いられる。温度が下がると液体から固体への水の構造変化が、化学種の物質濃度が増大すると定常状態から振動状態への構造変化が生じるのである。

最後に、現象学による複雑性の探究を見てみよう。現象学は、不可避免的に人間に纏わり付く自然的・科学的・世俗的先入見から離れて、人間にとって存在する事象の在り方そのものを探究する手法である [23]。人間のまわりで生起する事象は、まわりの物体と、認知する主体と、閱してきた過去と、主体の願望と、不可分な関係を持っている。すなわち、人間のまわりで生起する事象は、時空の中に位置する世界のすべての要素と不可分な関係を持つ複雑系である。この複雑系を、現象学は、複雑性を壊すことなく、複雑性そのものの中から、把握しようとするのである。それでは、現象学は、どのような手法で複雑なものを把握しようとするのか。人間は様々な先入見の下で物体を認識する、と現象学は考える。認識主体から離れた客体として物体は存在する、空間に併存する他の物体と独立に物体は存在する、時間の流れの中で不変なものとして物体は存在する、社会的拘束を離れて客体として人間は物体を認識する、と人間は考える。だが、これは自然的・科学的・世俗的先入見に過ぎぬ、と現象学は考える。人間と物体、物体と物体、時間と物体、社会と物体の関連を切って、単純なものとした物体の認識に過ぎぬ、と現象学は考えるのである。そうであるならば、世界の諸事象と深い関連を持つ物体は、どのように認識されるのか。現象学は、これらの先入見を括弧に入れて、すなわち認識に先立つ判断のすべてを停止して、事象に向かうことを主張する。それでは、この判断停止の後で、いかなる姿を事象は見せるのか。それは、認識主体によって色濃く色付けされた物体の姿である。認識主体が放つ光の中でのみ姿を見せる物体の姿である。一方、認識主体は、まわりの物体の存在を意識することによってのみ、自己が存在することを確認する。このような認識主体と客体が一体となった現象野の中に物体は存在するのである。そして、このよう

な現象野から出発することによってのみ、本当の物体の姿を知ることができると、現象学は主張するのである。この現象学的アプローチから、物体が次の性格を持つことが判かるという。一つは時間性であり、物体は、認識主体の記憶(すなわち過去)と願望(すなわち未来)の下で眺められ、過去と未来を含んだ現在における物体という時間性を帯びたものになるという。更に一つは空間性であり、物体は、空間に散在する他の物体と共に眺められ、他の物体が形成する場の下における物体という空間性を帯びたものになるという。最後の一つは身体性であり、物体は身体を持つ主体に眺められるものとして存在するから、主体の身体によって持ち上げられるもの・移動させられるもの・食べられるものとして存在することになる。これが物体の身体性である。これらの性格を帯びたものとして物体は存在する、と現象学は主張する。

プリゴジンの複雑系の探究法は、これらの科学の探究法といかに異なるのか。これらの科学の探究法を整理すると次のようになろう。システム科学は複雑系を部分の集まりと考えることによって複雑系を定量的に理解しようとする、計算機科学は複雑系を構成的に計算機上に表現することによって定性的に理解しようとする、シナジェティックスは複雑系の構造変化を動力学的な数式で表現することによって定性的に理解しようとする、現象学は主体と客体の切断し得ぬ関連の中から関連を壊すことなく物体の存在論的性格を示そうとする。これらとの比較の観点からプリゴジンの探究法を整理すると、複雑系の構造と構造変化を反応速度式・運動方程式等の基礎方程式から出発して説明しようとするとなろう。

これらの諸学説の複雑系探究における関連を、いかに複雑系は認識されるか、の観点から考察することにする。基礎方程式が成り立つ部分に事象を分割し、この部分の基礎方程式を加えて全体系の方程式を導出し、その解から複雑系の振舞を説明する、という物理学的手法によって複雑系は解明できるのだろうか。プリゴジンの努力は、この立場からのものである。プリゴジンの得たものは、これを肯定するものだろうか。著書「Self-Organization in Nonequilibrium Systems (邦訳『散逸構造』)」の中で、プリゴジンは、反応速度式から出発して複雑系の構造と構造変化を解析する。この解析から看取されることは、複雑系の振舞の完全な記述ではなくして、複雑系に

特有な現象の簡単なモデルによる説明と言えるものである。すなわち、プリゴジンの手法は、複雑系そのものの記述ではなく、複雑系の定性的説明の一つなのである。プリゴジンは、生物系が時間の経過と共に複雑さを増大させる原因、このとき対称性を持つ空間に非対称が生まれる原因を、物理化学的に理解したかったのである。このようなことが非平衡系において生じることを、プリゴジンは簡単なモデルで示したのである。それは、決して複雑系の完全な説明ではなく、複雑系に特有な現象の定性的説明なのである。それでは、このプリゴジンの複雑系の定性的説明は、他の複雑系解析の手法に対して、どのような位置を占めるのか。複雑系を部分に分けて、部分の振舞を数式で表現し、これらを繋ぎ合わせることによって、全体の振舞を説明するシステム科学の手法も、全体が複雑であれば、得られた方程式が非線形の複雑なものとなり、計算機の数値計算によっても解くことができず、そのままでは複雑系解析の手法とはなり得ないであろう。結局、システム科学は、部品が線形方程式で記述される人工物(機械)の複雑系の解析手法となるだけで、自然系・人間系・社会系等の非線形複雑系の解析手段には成り得ないのではないか。次に、計算機科学の手法についてはどうか。計算機科学の手法は、複雑系を構成する主要な部分の振舞を、計算機上で構成的に表現し、複雑系の振舞を定性的に理解しようとするものだった。この計算機科学の手法は、プリゴジンの手法と、どのように異なるのか。それは、計算機科学の手法が、空間的にも時間的にも事象を離散的に表現し、離散系として複雑系を記述するのに対し、プリゴジンの手法は、基礎方程式に微分方程式を用いる連続系として複雑系を記述する点にある。複雑系は、離散系と連続系のどちらで、正確に記述されるのだろうか。人間・社会・経済等の複雑系は、本来離散系ではないだろうか。これらの構成要素は、個人・集団・会社等の空間的に孤立したものである。また、これらの要素は、一連の外的刺激を受けた後、内的検討の時間を経て、行動として外界に振る舞う。すなわち、時間的にも離散系である。これらのことを考えると、複雑系の記述には、プリゴジンの手法よりも計算機科学の手法が有効であると考えられる。それでは、シナジェティックスの手法についてはどうか。シナジェティックスは、事象を少数の巨視的な秩序パラメータの運動方程式で表現し、事象をいつも不安定点にあるものと

して捉え、事象の変化を不安定点のまわりの構造変動で表現するものだった。すなわち、プリゴジンの手法が物理学・化学の法則から出発する定性論であるのに対し、シナジェティックスは物理学・化学の法則から遠く離れた現象論的定性論なのである。我々の日常生活における人間認識・社会認識は、一種の複雑系認識である。このとき我々は、人間・社会の物質的基礎科学である物理学や化学を意識の外に置いている。すなわち、現象論的認識をしている。この日常的な複雑系認識から出発して、日常的認識を厳密で法則的なものにしようとするのが、シナジェティックスなのである。複雑系科学は、我々のまわりで頻出する生物・心理・経済等の現象の殆どは、物理学の分析的手法で分析し得ぬ非線形現象である、とする科学である。このような複雑系科学の方法論として、シナジェティックスの手法は、プリゴジンの手法より優れていると思われる。最後の現象学についてはどうか。現象学は、物体が世界に置かれている状況、換言すれば主体・他の物体・過去の物体・未来の物体等との関連を、根底的に明らかにする方法論であった。この関連は、複雑系を構成する要素間の相互作用を明らかにする。すなわち、現象学は、複雑系としての事象が、いかなる要素から構成されているか、いかなる相互作用を要素間に持つかを、明らかにする方法なのである。現象学は、実証科学が成り立つ基盤を明確にする方法論だと主張しているが、これは複雑系科学にも成り立つと思われる。すなわち、現象学と複雑系科学は補完関係にあると思われる。

## 6 結論

プリゴジンの複雑性は、時間にあったと結論できるのではないか。簡単な生物種から複雑な生物種に進化する生物的時間、新しい事象が生起し同じ事象が繰り返さない歴史的時間、前の時間を取り込み豊かな意味となって展開する音楽的時間等、プリゴジンにとって、時間は最も身近なものであると同時に最も不思議なものであった。このような理性を超えた複雑なものとしての時間を、プリゴジンは理解しなかったのである。だが、物理化学者であったプリゴジンは、物理化学の基礎過程から時間を理解しよう



とする。探求の結果は、時間の非可逆性の契機が、物理化学の基礎過程の中に、数多く存在することを示す。プリゴジンは、物理化学の基礎過程の中から、時間の非可逆性の契機を可能な限り抽出する。これはどうしてであろうか。フランスの詩人ヴァレリーと現代科学の関連を論じる論文の中で、プリゴジンは「ヴァレリーの時間は構築された時間あるいは構築すべき時間である。」と述べる [24]。すなわち、ヴァレリーにとって時間は芸術作品のような創造物である、とプリゴジンは主張する。これは、プリゴジンの時間観でもあるのではないか。プリゴジンは、時間には様々な形態があると考えるのである。この様々な時間の形態の原因を、プリゴジンは、物理化学の様々な基礎過程の中に探そうとしたのである。

複雑系の探求方法におけるプリゴジンの手法の位置付けについては、次の結論を得た。プリゴジンの手法は、基礎過程から出発して複雑系を解析する物理化学の伝統的手法に基づくものであった。複雑系の現象が基礎過程から遠く離れた上位レベルの現象であると考えられることから、プリゴジンの手法は、複雑系解析の手段としての有効性に制限があると思われる。すなわち、細胞における物質濃度の振動、細胞分裂による生物の増殖等、基礎過程が直接関係する複雑系の現象の解析に、応用が制限されると思われる。基礎過程から遠く離れた複雑系の現象の解析には、複雑系の主要な部分の振舞を計算機上で構成的に表現し複雑系の振舞を定性的に理解しよう計算機科学、および事象を少数の巨視的な秩序パラメータの運動方程式で表現し事象の変化を不安定点のまわりの構造変動で表現するシナジェティックスの手法が有効であると考えられる。現象学は、物体が世界に置かれている状況を明らかにする手法で、基礎過程から遠く離れた複雑系の現象的振舞の構成要素を明らかにするのに役立つと思われる。

## 参考文献

- [1] 複雑系については、次の文献に詳しい。吉永良正『複雑系とは何か』講談社（1996）。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）。

- [2] I・プリゴジーン「私自身によるプリゴジーン」(『現代思想』1986年12月号、青土社)。
- [3] 時間の可逆性について、プリゴジンは、次の文献で論じている。I・プリゴジーン『存在から発展へ』(小出、安孫子訳) みすず書房 (1984)。I・プリゴジーン『確実性の終焉』(安孫子、谷口訳) みすず書房 (1997)。
- [4] ニコリス、プリゴジーン『複雑性の探究』(安孫子、北原訳) みすず書房 (1993)、53頁。
- [5] I・プリゴジーン『確実性の終焉』(安孫子、谷口訳) みすず書房 (1997)、第VI章。
- [6] 文献 [4]、9頁。
- [7] ニコリス、プリゴジーン『散逸構造』(小島、相沢訳) 岩波書店 (1980)、319頁。
- [8] 文献 [7]、63頁。
- [9] 文献 [4]、第6章。
- [10] 文献 [4]、107頁。
- [11] 文献 [7]、第17章。
- [12] ゆらぎについては、次の文献を参考にした。プリゴジーン、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6章。I・プリゴジーン『存在から発展へ』(小出、安孫子訳) みすず書房 (1984)、第6章。文献 [4]、第4章。
- [13] 非線形微分方程式が示す現象、すなわち非線形現象は、次の文献に詳しい。吉川研一『非線形科学』学会出版センター (1992)、25頁。坂恒夫「複雑系思考」岐阜薬科大学基礎教育系紀要 (1999)、第11号、7頁。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)。

- [14] 文献 [7]、第 17 章。
- [15] 文献 [4]、19 頁。
- [16] カオスについては、次の文献を参考にした。山口昌哉『カオスとフラクタル』講談社（1986）。森田善久『生物モデルのカオス』朝倉書店（1996）。
- [17] 坂恒夫「複雑系思考」岐阜薬科大学基礎教育系紀要（1999）、第 11 号、7 頁。
- [18] Herbert A. Simon "The sciences of the artificial", The MIT Press (1969)。
- [19] 文献 [18]、chapter 7。
- [20] 金子、津田『複雑系のカオス的シナリオ』朝倉書店（1996）。金子、池上『複雑系の進化的シナリオ』朝倉書店（1998）。
- [21] シナジェティックスの原理のハーケンによる解説は、次の文献にある。H. Haken "Synergetics-an Introduction-", Springer-Verlag (1977)。シナジェティックスの応用については、次の文献が分かり易い。H. Haken "Principles of Brain Functioning", Springer-Verlag (1996)。
- [22] H. Haken "Principles of Brain Functioning", Springer-Verlag (1996)、chapter 4。
- [23] 現象学については、次の文献を参考にした。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）。
- [24] イリヤ・プリゴジン「ヴァレリーの時間概念の今日性」（J. ロビンソン＝ヴァレリー編『科学者たちのポール・ヴァレリー』（菅野等訳）紀伊国屋書店（1996）に収録）。