

— 総説 —

物質科学、生物科学、社会科学における不確実性

坂 恒夫

要約：物質科学、生物科学、社会科学に潜む不確実性が議論されている。物質科学においては、物質を構成する電子・陽子・中性子等の運動の中に不確実性が存在するだけでなく、環境の変化による構造変化においても不確実性が存在する。生物科学においては、認知システムの確実性を強化することが不確実性を生み出すこと、生物種の存続のためには遺伝システムに確実性と不確実性が必要であることが明らかになっている。社会科学においては、投資家心理に基づく資産市場価格の変動という不確実性が存在して、この不確実性の大きさを見積もる研究が行われている。不確実性は、物質事象・生物事象・社会事象の中に存在するだけでなく、事象を記述する方程式の中にもカオス解として存在する。科学は事象の不確実性の中で確実性を探る試みであるが、確実性は特別の条件の下においてのみ得られるだけである。

索引用語：不確実性、非線形系、カオス、散逸構造、シナジェティックス、認知、リスク、不確実性の評価

Uncertainty in the Material Sciences, the Biological Sciences, and the Social Sciences

Tsuneo BAN

Abstract: The uncertainty, which lurks in the material sciences, the biological sciences, and the social sciences, is discussed. In the material sciences, the uncertainty exists not only in the movements of electrons, protons, and neutrons, which compose the material, but also in the structural change of the material by the change of the environment. In the biological sciences, it is clarified that reinforcing the certainty of cognitive systems invents the uncertainty, and the certainty and the uncertainty are both necessary for inheritance systems to preserve the species. In the social sciences, the uncertainty in the change of the asset market price caused by the investor's psychology exists, and research by which the size of the uncertainty is estimated is performed. The uncertainty not only exists in material phenomena, biological phenomena, and social phenomena, but also exists as a chaos solution in the equation where the phenomena are described. The science is an attempt at searching for the certainty in the uncertainty of the phenomena, but the certainty can be gained only under special conditions.

Keyphrases: uncertainty, nonlinear system, chaos, dissipative structures, synergetics, cognition, risk, evaluation of uncertainty

1. はじめに

さまざまな科学の領野で事象の不確実性、すなわち事象の予測不可能性が主張されている。科学によって事象の変化を確実に把握し、事象の展開を予測しようとしても、失敗に終

わる可能性が大きいと言うのである。科学の確実性や予測可能性は、科学の代名詞と言えるもので、事象を科学的に捉えれば、必ず確実な知識が得られ、事象の予測ができると信じられてきた。事象の予測に失敗するときには、これは科学の事象探究の方法が間違っているからで、正しい方法を採用す

岐阜薬科大学基礎教育大講座物理学 (〒502-8585 岐阜市三田洞東 5-6-1)

Laboratory of Physics, Gifu Pharmaceutical University

(5-6-1, Mitahora-higashi, Gifu, 502-8585, JAPAN)

れば必ず確実な知識が得られる、と考えられてきたのである。だが、現代科学においては、正しい科学的方法を用いても、確実な知識を得ることや、正確な予測を行うことが、不可能であると考えられているのである。不確実性が現代科学において占める位置を、世界事象を複雑系に生起する事象として捉え、不確実性を複雑系における不可欠な要素とする、社会学者エドガール・モランの主張に見てみよう。

エドガール・モラン(Edgar Morin)は、1921年生まれのユダヤ系フランス人である。事象が生成と消滅を不断に繰り返す複雑系として世界を捉えるモランは、素粒子の微視的世界と宇宙の巨視的世界に注意を払うことを要求する。素粒子の微視的世界では、電子・陽子・中性子・光子・中間子・ニュートリノなどの素粒子が生成と消滅を繰り返している。陽子と中性子は衝突して中間子になり、中間子は再び陽子と中性子に崩壊する。光子は、電子と反電子を生成する。中性子は、陽子と電子と反ニュートリノに崩壊する。このように微視的世界は、構成要素が生々流転を繰り返して、定まった構造を持たぬ無秩序な世界なのである。ニュートン物理学における事象の確実性は、惑星を含む太陽系が一つの構造を持って、定まった運動をすることに起因しているが、微視的世界は、流体の乱流のような構造を持たぬ動きをしており、変化に確実性のない無秩序な世界だと言うのである。それでは、宇宙の巨視的世界についてはどうか。現代における宇宙科学の最も衝撃的な研究成果は、宇宙が膨張している、すなわち宇宙に起源があるとするハッブルの発見であるとモランは言う。遠方の銀河の発する光は、近くの銀河の光に較べて赤色を帯びている。これは、光のドップラー効果によるもので、遠方の銀河が近くの銀河に較べて速い速度で遠ざかっていることを示している。すなわち、宇宙が膨張していることを示している。宇宙が膨張しているということは、宇宙に起源があるということである。宇宙の全体が点状に集まって、そこから膨張を始めたということである。この点状の宇宙がビッグバンを始めたときの宇宙の状態は、想像ができるだけで、科学的には、まったく分かっていない。同様に、膨張する宇宙が拡大して最終的にどのような形になるかも、まったく分かっていない。我々が住む宇宙が「何処から来て何処へ行くか」を、我々は知らないのである。すなわち、我々は、不確実な世界に住んでいることになる。この様に、我々は、微視的世界においても巨視的世界においても、不確実性に取り囲まれているのである。我々を構成する物質にも我々が生きる空間にも不確実性が支配する我々の認識が不確実なものになることは必然であるとモランは主張する。

不確実性が支配する世界は、どのような世界であろうか。モランは、不確実性の支配する事象は、特異性・生成性・現象性を帯びると主張する²⁾。特異性は同じ事象が再び現われないということであり、生成性は新しい事象が生まれるということであり、現象性とは事象に構造がないということであ

る。この辺りの事情を、少しく詳細に調べることにしよう。非可逆的に膨張する宇宙で生じる事象は、一回限りの事象という歴史性を帯びることになる。この事象の特徴を表すため、モランは、歴史性を持つ事象を事件と呼ぶことを主張する。我々のまわりで展開する事象は、一回限りの事件の連続であると主張する。そこでは、事象のすべてが新しく生起して、展開の法則は存在しないと主張する。ここで、新しい事象の生起とは、これまでとは質的に異なる事象の生起であることに注意しよう。例えば、生物という事象(系)が生起したとすると、これは、物質の集まりに過ぎぬ系の生起なのではなくして、物質とは質的に異なる、新しい系の生起なのである。さらにモランは、不確実性が存在するところに、新しい系の生成があると主張する。新しい系が生成されるころは、古い系が崩壊するころであり、新しい系と古い系が揺らぎとなって生成消滅している。すなわち、このような系では、不確実性が著しく増大しており、この不確実性の下で新しい系が生成されるのである。

モランの科学論においてだけではなく、現実の科学研究においても、諸事象における不確実の存在と、事象に展開における不確実性の重要な役割が指摘されている。物質科学においては、強磁性体などの相転移において、揺らぎの増大、すなわち不確実の増大が観測されると共に、相転移における揺らぎの重要な役割が指摘されている。また、物質科学においては、系を記述する運動方程式に、カオスという不規則な振舞をする解があることが分かり、数学的解析に不確実性が存在することが明らかにされている。生物科学においては、DNAにおける遺伝情報の伝達や生物進化において、不確実性が本質的な役割を果たしていること、知覚システムや免疫システムにおける生物の認知活動に、不確実性が存在することが議論されている。社会科学においても、解析手段として数学を使用する経済動学・経済物理学・金融工学を中心にして、経済事象の予測が本質的に不可能であること、すなわち経済事象に不確実性が含まれることが議論されている。

本稿の目的は、前述のモランによる不確実性と科学の関連付けを導きの糸として、物質科学・生物科学・社会科学における不確実性を考察し、「いかなる不確実性が存在するか」、「不確実性はいかなる役割を果たしているか」、「不確実性はいかなる科学観の変更を迫るか」を問うことである。

2. 物質科学における不確実性

物質科学における不確実性を、物質科学の典型である物理学を中心にして考察することにする。物理学者には、ニュートン、カルノー、マクスウェル、ギブス、ハイゼンベルク、アインシュタイン等、さまざまな領域の物理学を確立した人々がいる。これらの人々の中で、物理学精神を最も体現している物理学者は誰であろうか。それは、アインシュタイン

ではないであろうか。このことは、アインシュタインが特殊相対性理論や光子量子説を提唱した 1905 年から 100 年後の 2005 年を、国連が世界物理年(the World Year of Physics)と定め、ドイツなどでアインシュタイン展が開催されたことから判ることである³⁾。

(1) アインシュタインにおける不確実性

アインシュタインは、いかなる物理学精神を持っていたのか。これを、アインシュタインの最大の研究成果とされる相対性理論に見てみよう⁴⁾。相対性理論は、特殊相対性理論と一般相対性理論から成る。特殊相対性理論は、電磁気学とニュートン力学の間の矛盾を解消する理論である。ニュートン力学において、物体の運動を決定する方程式は、慣性系において成り立つ。慣性系とは、ニュートン力学の慣性の法則が成り立つ系で、他の物体から力の作用を受けない物体が、現在の運動状態を、すなわち現在の状態が静止状態なら静止状態を、運動状態なら同じ速度の運動を保持し続ける系である。この慣性系において、物体に作用する力は、物体が得る加速度と物体の質量の積に等しい、という運動法則が成り立ち、加速度が物体の位置座標の 2 階微分で与えられることから、運動法則は微分方程式となって、微分方程式を解くことによって、物体の運動が一義的に決定されるのだった。一つの系が慣性系だとすると、この系に対して等速度で動く系も慣性系となるから、これらの慣性系の間には優劣がなく、これらは同等のものであることが判る。一方、電磁気学のマクスウェル方程式から導かれる光の波動方程式には、定数として光速が含まれている。換言すれば、マクスウェル方程式が成り立つ座標系では、どのような光も、定まった光速で伝播することを示している。だが、ニュートン力学に基づく波動理論は、媒質の動く速度が異なると伝播速度も異なることを示す。すなわち光のように、どのような系でも、同じ速度で伝わることはないのである。このニュートン力学と電磁気学の矛盾を、アインシュタインは、空間の 3 次元に時間の 1 次元を加えた 4 次元の時空を考えることにより解消する。すなわち、異なる速度で動く系は空間の長さや時間の進み方において異なることによって、ニュートン力学と電磁気学を統合したのである。

それでは、一般相対性理論は、どのような理論なのだろうか。ニュートン力学において、物体の質量 m は、物体に作用する力 F 、物体に生じる加速度 a 、および質量 m の間には、比例関係式 $F=ma$ が成り立つから、 F と a を測定することにより、正確に計算することができる。一方、万有引力による重力は物体の質量に比例するから、種々の重力場の重力を測定することによっても、計算することができる。計算結果は、二つの計算方法による質量が正確に一致することを示す。このことは、加速度を持つ系と、重力場を持つ系が、まったく等しいことを示す。これは、どうしてであろうか。これを、アインシュタインは、重力場を持つ時空の性質の現われと捉

え、重力場を、加速度を持つ座標系として表そうとする。すなわち、加速度を持たない座標系からの時空のゆがみとして、重力場を表そうとするのである。この様にして成立したのが一般相対性理論である。これから、一般相対性理論は、ニュートン力学と重力理論の統合であることが判るのである。

これらのことから、アインシュタインが抱く物理学精神は、「外部世界で生起する事象を、物理量の間に成り立つ関係の現われとして捉え、この関係を、可能な限り少数の物理量を用いて数式で表現し、普遍的な適用が可能な法則として定立する」、「法則の間に矛盾がある場合には、使用する物理量の概念を抽象化し、物理量に新しい意味を持たせ、両者を統合する新しい論理構造を持った法則を提示する」と整理できるであろう。また、これらのことは、アインシュタイン自身も述べていることでもある⁵⁾。このアインシュタインの物理学精神からは、数学を用いる定量的で確実な事象把握に対する信頼が窺われる。すなわち、アインシュタインにとって物理事象は、人間により確実に把握できるものなのだ。たとえ、系を記述する微分方程式による計算結果が、事象の測定結果と合致しないとしても、これは事象の不確実性によるのではなく、人間が持つ科学理論の未熟さによるのであり、科学が発展した暁には確実に合致するものなのである。

(2) プリゴジンにおける不確実性

次に、ノーベル化学賞を受賞した物理化学者プリゴジンの不確実性観を見てみよう。プリゴジンは、散逸構造という概念を提唱した物理化学者として知られている⁶⁾。散逸構造は、非平衡系において、非平衡が失われる過程、すなわち散逸する過程において、発生する構造である。例えば、シャーレに水を入れて、下から熱したとする。この系は、下部が高温で上部が低温であるから、非平衡系である。上部と下部の温度差が小さいとき、この温度の非平衡は、熱伝導という熱の移動で散逸する。温度差が、ある値より大きくなると、突然に対流が始まり、上と下に交互に動く水で、シャーレの水は、蜂の巣のような構造を持つのである。この上下に動く水によって発生する、蜂の巣状の構造が、散逸構造である。温度差という非平衡が散逸する過程で、シャーレに入った水に発生する散逸構造である。

プリゴジンは、非平衡系を多数の粒子から成る系と考え、粒子の位置と速度を変数とする確率分布関数で、散逸構造が表現されるとする。確率分布関数の変化すなわち散逸構造の生成消滅を記述するものは、マルコフ確率過程に基づく確率分布関数の発展方程式である。発展方程式は、確率分布関数を変化させる項として、粒子の拡散や化学反応に関する項を持っている。散逸構造は、この発展方程式の解として求まる。発展方程式は、系の非平衡の大きさ、例えば上部と下部の温度差を、系の状態を表すパラメータとして、解析される。発展方程式の解は、パラメータの離散した値を閾値として、大きく振る舞いを変える。すなわち、パラメータの値を変え

ていくと、閾値を境として、解の空間変化や時間変化が、大きく変わるのである。例えば、閾値より小さいときには定常解であったものが、閾値を越えると振動解に変わるのである。パラメータの変化、すなわち系の非平衡性の変化は、系が置かれた環境の変化を意味している。上述の、パラメータが変化すると、閾値を不連続点として、発展方程式の解が不連続に変わるとは、環境が変化すると、系の構造(散逸構造)が不連続に変わるとを意味している。生物事象や社会事象における種々の構造は、このような散逸構造であると考えられる。すなわち、生物種、生態構造、社会体制、社会意識などは、不連続に変化すると考えられるのである。

次に、不連続点で構造が変わるときの変化の仕方を見てみよう。構造変化は、確実性をもつ変わり方をするのだろうか。プリゴジンは、パラメータが変化し閾値に近づくと、現在の系の構造が不安定になって、構造を決める変数に、大きな揺らぎが発生することを示す。この揺らぎは、パラメータが閾値を越えたときに可能な系の種々の構造を表していると考えられる。パラメータが閾値を越えると、揺らぎとして表れている多数の構造の中から、一つが偶然に選ばれて新しい系の構造になるとプリゴジンは主張する。すなわち、新しい構造と古い構造は、確実性によって結ばれているのではなく、偶然性によって結ばれているのである。生物種、社会体制、経済体制などは、一つの散逸構造であるから、これらの変化すなわち進化は、偶然的なものとなり、非可逆性・歴史性を持つとプリゴジンは主張するのである。

以上のことから、プリゴジンの不確実性が、系を構成要素に分解し、構成要素に運動方程式を適用し、構成要素の運動を加え合わせることによって、系全体の運動を解析するという、古典的な科学探究に生まれた不確実性であることが理解できよう。プリゴジンの指摘によって、複雑な系を要素に分解し、要素の簡単な系を調べることによって、系全体を知るといふ、科学の分析的手法が確実性を持たなくなったのである。この科学による新しい世界観の創出によって、科学法則によってすべてが決まる決定論的世界と、偶然性だけからなる恣意的世界の中間の世界に、人間は住むようになったと、プリゴジンは述べている。

(3) ハーケンにおける不確実性

ハーケンは、シナジェティクス(synergetics)と呼ばれる科学の創始者である。シナジェティクスは、自己組織化の科学であるとされる⁹⁾。自然には、銀河の渦巻、雪の結晶、植物の形態、動物の機能など、さまざまな構造がある。これらの構造は、どのようにしてできたのだろうか。他の構造を持つものに人工物がある。これらの構造は、人間が与えたものである。自然の構造は、自然が自ら形成したものだから、自己組織された構造となる。この自己組織化のメカニズムを探るのがシナジェティクスである。自己組織化は、どのように起こるのだろうか。自己組織系は、分子、細胞、個体な

どの部分系から成っている。自己組織系が構造を持つとは、系を構成する多数の部分系が、秩序を持つ動きをすることである。すなわち、自己組織系の構造は、多数の部分系の共同現象によって、形成されるのである。このことからシナジェティクスは、共同現象の科学とも言われている。それでは、構造の自己組織化において、部分系の共同現象は、どのように生じるのであろうか。シナジェティクスは、部分系の共同現象において、一つの部分系の動きに他の部分系が従うという、隷属原理が成立しているとする。他の部分系を従える一つの部分系とは、動きが時間と共に増大する不安定な系であり、一つの部分系に従う他の部分系とは、動きが一定な安定な系だとされる。不安定な系が多数ある場合、例えば外部摂動に共振する振動モードが多数ある場合、それらの一つが偶然により選ばれて、構造を決める振動モードになると言う。この隷属原理により、自己組織系は、秩序パラメータと呼ばれる数個の変数で、運動が記述される系になると、シナジェティクスは言う。多数の要素から成って多数の運動の自由度を持つ自己組織系が、自己組織系の従属原理により、数個の秩序パラメータで記述される系に変わると言うのである。構造変化という自己組織系の運動は、秩序パラメータの運動方程式で記述されることになる。秩序パラメータの運動方程式は、事象の構造変化を最も適切に表現するように構成される。構造変化を記述するから、運動方程式には、非線形方程式が使用される。これから、シナジェティクスの解析方法が、複雑な事象を要素に還元して解析する分析的科学の方法ではなく、事象の現われを可能な限り忠実に方程式で記述する現象論的科学のものであることが理解できよう。

それでは、シナジェティクスは、いかなる不確実性を含んでいるのだろうか。シナジェティクスは、秩序パラメータの非線形運動方程式の解の振る舞いの質的变化として、構造の変化を表そうとした。運動方程式には、系が置かれた環境の状態を表す制御パラメータが含まれている。制御パラメータが変化すると、運動方程式にさまざまな解が表れて、系の構造が変化することを表す。系の構造が変化する制御パラメータの値の近傍では、現在の構造が不安定となって、新しい構造を表す大きな揺らぎが、秩序パラメータに表れる。この秩序パラメータの揺らぎは、系に可能な多数の構造の揺らぎであり、この中の一つがランダムに選ばれて、新しい系の構造となる。すなわち、プリゴジンの場合と同じく、過去と未来が対称ではなく、不確実性が存在することが分かる。また、非線形方程式は、カオスという解を持つことが知られている。カオスという解は、方程式に従った変化をしながらも、規則性がない変化をする解である。系の初期状態の僅かな違いが、時間の経過と共に限りなく増大する解である。すなわち、系がカオス状態に陥ったとき、系の時間展開の予測が不可能となり、系は不確実性を持つことになる。上で述べたように、シナジェティクスは、現象論的科学であった。現象

論的科学的であることも、不確実性を生む契機となるのではないか。シナジェティックスにおいては、記述される対象と記述する非線形方程式の間に、大きな隔たりがあると思われるのである。ハーケンは、最もシナジェティックス的な事象は言語であるという⁹⁾。言語は、個々の人が従うことによって学ばれ、個々の人に使われることによって生きているからだ。言語が持つ不確実性と同一不確実性を、シナジェティックスは持つのではないか。

3. 生物科学における不確実性

ここでは、生物事象の中に存在する不確実性を、認知科学・複雑系科学の観点から考察することにする。

(1) 認知過程における不確実性

動物は、置かれた状況の中で、自身の生存を保持することを迫られている。まわりには、自分を餌とする動物がいるかも知れない。あるいは、自分の餌となる動物がいるかも知れない。動物は、自分の置かれた状況を、いかに認知同定しているのだろうか。それは、自分と関連を持つものは認知し、関連を持たぬものは無視するという戦略によってである。自分のまわりには、捕食者、被捕食者のほかに、自分の仲間や他の動物達があり、樹木、岩、水飲み場もあるだろう。これらのものの中から、自分と関連を持つもののみが、認知されるのである。おそらく、捕食者、被捕食者、仲間、水飲み場などは認知されるが、他の動物、樹木、岩などは無視されるだろう。これは、動物の認知システムの効率化である。だが、この効率化は、認知システムの歪化でもある。カエルの網膜には、動いている小さな黒い丸い形のものに反応する神経細胞、すなわち虫検出装置があるとされる¹⁰⁾。ハエがカエルの目の前に飛んでいくと、この神経細胞が反応して、カエルは、ハエを捕らえることができるのである。だが、この動いている虫に特化した虫検出装置は、動かない虫に対しては反応しないとされる。例え、ハエが目の前にいても、ハエが動いていないならば、カエルは、ハエを認知できないのである。これは、認知システムの歪化ではないか。認知システムの本来の姿は、事象の現状の正確な認知である。認知システムの特異な認知への特化は、事象の現状の正確な認知を妨げ、事象の不確実性を増大させるのである。

それでは、人間の認知についてはどうか。人間は、目が見る以上のものを見るとされる¹¹⁾。人間は、事象を客観的に見ようとするのではなくて、自分が見たいものを見ようとするのである。この人間の認知の自己中心化は、目における神経細胞によるものと、脳における形態的意味的分析によるものに分けることができる。目の視神経は、物の縁や輪郭が際立って見える構造を持っているという。すなわち、黒っぽい色のテーブルの上に、白い紙を置いたとすると、紙の縁を映す神経細胞は、白さが増大する方向に反応し、テーブルの縁を

映す神経細胞は、黒さが増大する方向に反応するというのだ。物と背景との明るさが接近していて、物の輪郭がはっきりしないとき、この輪郭を際立たせる構造により、物をはっきりと捉えることができるというのである。次に、脳による自己中心化とは、目から送られてきた情報に対して、脳に蓄積された情報に基づき、形態的分析を施し、人間個体としての一つの意味を付与するものである。例えば、セザンヌの静物画に描かれたリンゴが、リンゴとして認知されるのは、絵を見る人の意味付与作用によるのである。絵具の斑点に過ぎぬ絵画が、リンゴの静物画として見られるのは、鑑賞者の意味付与作用によって、リンゴとして見ているからである。このような人間における認知の自己中心化は、日常生活に便宜を提供する一方、事象の正確な姿を提示して理性的判断の材料を提供するという科学的認識の立場からは、事象の不確実性を増大させるのではないか。人間による認知の自己中心化が進むと、すべての事象は、自己の都合に合わせて、解釈されることになるのではないか。このような例の一つが、宗教であろう。宗教では、すべての事象が、経典に従って解釈されて、経典の真理を示すものになっている。

ところで、認知と行動は、どのように結び付くのであろうか。ここで、この結び付きに現れる不確実性について考察することにする。ミツバチの餌探しについて考える¹²⁾。ミツバチは、広い領域に咲く花から蜜を集めて自分の巣に運ぶ。このため、花の情報を相互に伝達する強力な能力を持っている。フォン・フリッシュは、ミツバチの餌情報の相互伝達を研究し、有名なミツバチの尻振りダンスを発見した。フリッシュは、新しくコロニーの一員になった新参蜂が、収穫蜂が探してきた餌場には行っても、それと同じ匂いを持つがまったく異なる方角の餌場には行かないことから、餌場を示す匂い以外の情報伝達があることを確信する。そして、情報伝達の手段として尻振りダンスがあることを見出す。餌場との距離は、尻振りダンスの尻振りのテンポで表し、餌場の方向は、餌場と太陽の角度を尻振りの方向と重力の方向の角度に等しくすることによって表すというのだ。だが、フリッシュの主張には反証が提出される。収穫蜂が探してきた餌場の匂いと視覚的手掛りを与えると、新参蜂は正確に餌場に行くというのだ。矛盾する二つの主張の成否を明らかにする研究が、ミツバチの実際に餌探しをする状況に即して調べるという生態学的アプローチによって始められる。結果は、二つの主張とも成り立ち得るといふものだった。すなわち、餌場の匂いが行き渡っていると新参蜂は匂いに導かれて餌場に行くが、餌場の匂いがないと収穫蜂の尻振りダンスに導かれて餌場に行くというものだった。換言すると、新参蜂は、種々の認知機構を持っていて、これらを状況に応じて使い分けているのである。この生態学的アプローチによって判ったことは、生物の認知行動が不確実性を持つことではないだろうか。生物個体が置かれる状況は、空間的にも時間的にも変化する複雑なものだ

から、種々の行動の可能性があるのである。ミツバチの振舞は、不確実性に富み、予測し得ぬものなのである。

最後に、免疫システムにおける分子認知機構の不確実性について考える¹³⁾。免疫システムは、T細胞、B細胞、抗原、抗体など、多数の要素からなる極めて複雑な系である。しかしながら、免疫機構のエッセンスは、次の様に表すことができる。生体内に侵入した細菌、ウィルス、毒素などの非自己物質を認識し、生体から排除する生体防衛機構である。生体に侵入した非自己物質は抗原と呼ばれ、抗原を排除するために生体内で生成する物質は抗体と呼ばれる。抗体は、抗原を攻撃する機能を持つが、抗原ごとに異なる構造を持つことが要求される。また、生体内では、生体を構成する種々の物質が存在する。すなわち、免疫システムは、生体内に存在する多数の物質の中から、非自己物質のみを認知同定し、これを攻撃し得る特異な抗体を生成せねばならない。この作業は、不確実性に富む困難な作業である。これを、免疫システムは、いかに実現しているのか。抗体は細胞で生成されるが、種々の抗体は、その抗体に特異な細胞で生成される。免疫システムは、抗体を生成する細胞を、可能な限りランダムに作り出すことによって実現している。すなわち、可能な限り多種類の細胞をランダムに作り出し、その中から、生成する抗体が自己物質を攻撃しない細胞をまず選択し、非自己物質が侵入したときには、非自己物質を最も効率的に攻撃する抗体を生成する細胞を選択増殖することによって実現しているのである。このように免疫システムは、著しく多種類の非自己物質を認知同定するという不確実な作業を、著しく多種類の細胞を作り出すという認知対象と同等の不確実性を作り出すことによって実現しているのである。

(2) 遺伝進化システムにおける不確実性

生物は、親から得た DNA 遺伝情報を、生存の間、保持し、複製によって子供に与えることにより、種を保存する。DNA の維持と複製は、正確であること、すなわち確実性が要求される。不正確であると遺伝子が変わってしまい、種の維持や種の維持が不可能となるからだ。このため、DNA は、遺伝情報の維持と複製の確実性を求め、二本の塩基鎖で情報を保持するという二重らせん構造を持っている。だが、まったく正確な遺伝情報の維持・複製は、やはり生物の種の維持を困難にする。生物が置かれる環境は、不断に変化している。遺伝情報がまったく変化しないと、環境の変化を種が追えなくなり、環境不適合で生存できなくなるからだ。すなわち、生物種が維持されるためには、遺伝情報が変化することが要求されるのである¹⁴⁾。DNA 遺伝情報の変化、すなわち突然変異には、DNA 塩基の塩基置換、塩基挿入、塩基欠損、二本の相補塩基鎖の逆位などがある。突然変異の発生率は、温度上昇、化学物質、紫外線などの影響を受ける。これらの突然変異が生じると、大部分の生物は、生存不能になるが、その一部は、新しい環境に適合した生物に変わり、種の維持を可能にする

のだ。突然変異により大部分の生物が死滅するとしても、生物種が存続するためには DNA を変えざるを得ないのである。生物種が存続するためには、遺伝情報を保持するという確実性と共に、突然変異という不確実性が要求されるのである。生物種の維持と進化は、同じコインの表と裏なのだ。遺伝進化システムには、確実性と不確実性が要求されるのだ。

理論生物学者カウフマンは、生物種の生成消滅や生物種数の増減、すなわち進化事象は、系の個々の構成要素の機能の現われではなく、構成要素のネットワーク構造の機能の現れであると考え¹⁵⁾。カウフマンは、ON(点灯)と OFF(消灯)の二つの状態を取れる電球を並べ、電球間にブール代数で定義される相互作用を仮定することによって、進化事象のシミュレーションを行う。シミュレーションの結果は、系の終状態が次の三つの状態のいずれかになることを示す；①有限個の電球が循環して点灯する、②不断に新しい順序で点灯する、③長い周期で循環的に点灯する。カウフマンは、これらの状態を、①は秩序ある状態、②は無秩序なカオス的な状態、③は①と②の中間状態であると解釈する。さらにカウフマンは、①の秩序ある状態を、新しい生物種が発生した状態、あるいは生物種間に新しい関連が生まれた状態と解釈する。①の秩序ある状態は、電球間に複雑な相互作用がないとき生じやすく、②の無秩序なカオス的な状態は、電球間に複雑な相互作用があるとき生じるという。カウフマンは、外部環境の変化に対する系の応答を調べるために、外部環境への系の適応の良否を表す評価関数と、電球間の繋がりを表すブール関数を突然に変えるという突然変異を取り入れ、突然変異が生じて系が新しい状態になったとき、新状態の評価関数値が前状態の値より大きい場合のみ新状態に移るというシミュレーションを実行した。評価関数を連続的に変えて、系の状態の変化を調べると、③の①と②の中間状態が、評価関数の変化に追従して、評価関数値が大きな状態に変わって行った。すなわち外部環境の変化に追従して状態を変えたのは、③の秩序とカオスの中間状態だったのである。カウフマンは、この状態を「カオスの縁」と名づけた。生物は、カオスの縁に居るとき、外部環境の変化に従って、自己を変えていくことができる、すなわち生存を維持することができるのである。①の秩序ある状態は確実な状態であり、②のカオス的な状態は不確実な状態である。すると、①と②の中間状態は、確実と不確実の中間状態となる。確実と不確実の中間状態でこそ、生物は生きていくことができる、とカウフマンは言うのである。

生物種が絶滅する原因の一つに、遺伝的浮動と呼ばれるものがある¹⁶⁾。生物集団の個体数は、敵対する生物種がいなくても、一定値を保つのではなく、確率過程として増減を繰り返す。すなわち、何らかの原因で、出生率や死亡率が変化して、個体数が増減するのである。確率過程で個体数が増減すると、有限の世代の後で個体数が零となる確率、言わば生物集団が絶滅する確率は、著しく小さいかも知れないが有限値

を持つ。各世代の絶滅する確率を加えていくと、生物集団が絶滅する確率は限りなく1に近づき、生物集団は、いつかは絶滅することになる。すなわち、生物種は、環境変化による自然選択がなくても、敵対する生物種がいなくても、個体数が増減を繰り返し、いつかは絶滅していくのである。生物種の絶滅は、ダーウィンの自然選択がなくても生じるのである。個体数の増減は、確率過程の増減であるから、事象の不確実性による増減である。すなわち、生物種は、事象の不確実性により、絶滅することがあるのである。

4. 社会科学における不確実性

本稿の試みは、数理学の立場から諸科学における不確実性を考察することである。数学を手段とする社会科学には、計量経済学、統計経済学、経済物理学、数理ファイナンス、金融工学などがあるが、物質科学、生物科学との比較が容易なことから、経済物理学、金融工学における不確実性を考察することにする。

(1) 経済物理学における不確実性

経済物理学(econophysics)は、経済事象を物理学の科学方法論に基づき解明しようとする科学で、1995年、統計物理学者スタンレーが創成した科学である¹⁷⁾。経済事象を解明する科学は、経済学である。なぜ、経済物理学が必要となったのだろうか。経済学は、理想的な状況を想定して、論理を展開する傾向を持つという。例えば、外国為替市場や株式市場では、貨幣や株式の市場価格が、絶えず上下に震動しているが、これは、経済システムが不完全であることから、取引者が、経済情報を瞬時かつ平等に獲得できず、合理的な行動をとることができぬことによるのであり、経済システムが完全になった暁には、変動は無くなるとされて、経済学では研究されなかったというのである。また、複数の市場があるとき、「商品Aを売ってBを買う、Bを売ってCを買う、Cを売ってAを買う」のような循環的な売買ができるが、この循環売買で利益が生まれるとき、この取引の機会は裁定機会と呼ばれる。裁定機会が存在すると、商品を回転させるだけで、利益が得られることから、誰でも参入することになり、結局、裁定機会は消失する、と経済学は考える。これから、経済学は、「裁定機会は存在せず」を前提として、論理を展開することになるという。これに対して、経済物理学は、現実のデータを詳細に分析し、実際に生じていることを明らかにする点に特色があるという。経済物理学にとって、市場の変動も、裁定機会も存在するのである。経済物理学は、通常の物理学と同じように、所与の経済事象を客観的な目で眺め、物理学的テクニックを用いてデータを解析し、事象を説明する数学モデルを作り、コンピュータによる数値計算によって、経済事象の詳細を明らかにする科学なのである。

経済事象で最も不確実性を持つ事象は、市場における外国

為替や株式の価格の変動である。これらの市場価格は、不規則に変動しているように見える。市場価格の変動は、いかなる性格を持つのだろうか。この不規則な変動は、市場の構造のカオス的性格によるとする説がある¹⁸⁾。カオスとは、本稿の「物質科学における不確実性」の項で述べたように、非線形の差分方程式や微分方程式の解として現れる予測できぬ不規則な変動のことである。カオスの不規則な変動は、方程式の中の非線形項によって、変量が、値の違いによって異なる倍率で、拡大されたり縮小されたりすることから発生する。従って、変量の僅かな違いは、方程式に従って変化すると、急速に大きくなる。これが、カオスの初期値鋭敏性である。小さな蝶のはばたきが激しい嵐の原因になることを示す「バタフライ効果」である。このカオスの初期値鋭敏性を引き起こすメカニズムが、外国為替や株式の市場にも存在するとされるのである。それでは、値の違いによって異なる倍率で変量を拡大したり縮小したりする、非線形方程式においてカオスを発生させるメカニズムは、市場では、いかなるメカニズムによって実現されるのだろうか。株式市場で投資家が株式を買うのは、株式の価格が上昇しているときで、さらに値上がり期待されるときである。一方、投資家が株式を売るのは、価格が下降しているときで、さらなる値下がり期待されるときである。これは、投資家の売買が価格の変動を加速する方向に作用する、すなわち変量を非線形的に拡大・縮小するから、市場にカオスをもたらすメカニズムになるのである。また、市場では、市場価格と投資家の期待価格の僅かな違いによって取引の成否が決まる。これも、変量の微小な違いを拡大することになるから、市場にカオスを発生させるメカニズムになると考えられる。さらに、カオスの振舞をする系では、巨視的変化と微視的変化が同じ変化の形をしている、すなわち変化の時系列がフラクタル構造を持つことが知られている。市場価格の変動は、1日の変化も1年の変化も、変化の形から区別がつかないから、フラクタル構造を持つと考えられる。このことも市場がカオス系であることの証しとされている。だが、市場の不規則な動きは、特異な確率過程によるものであり、非線形方程式の不規則解としてのカオスではないとの指摘もある¹⁹⁾。

それでは、市場価格の変動は、いかなる分布を持つのだろうか。市場価格の平均値からのずれの分布を、同じ標準偏差のガウス分布(正規分布)と比較すると、両者は明らかに異なる。市場価格変動の分布は、ガウス分布より、大きく変動する回数が多い、すなわち、変動の大きな部分で大きな値を示すのである。従って、市場価格の変動は、ガウス分布を持たないことになる²⁰⁾。それでは、市場の価格変動は、いかなる分布を持つのか。アメリカ・ドイツなどの株式市場の価格の変動から、変動Gがx以上である分布 $P\{G>x\}$ を求めると、どの市場も $P\{G>x\} \sim x^{-a}$ (a:定数)となる。すなわち、ベキ分布になる。それでは、価格変動は、どうしてベキ分布になるの

か。この説明の一つに、物質の相転移との類比によるものがある。氷と水の相転移で、ベキ分布を考える。系の温度が臨界点(氷点)以下のときには、分子間の相関が遠方まで及び、系は固体(氷)となる。一方、臨界点以上のときには、分子の熱運動により、分子間の相関が指数関数的に減少して、系は液体(水)となる。温度が臨界点に等しいときには、両者の中間状態として、分子間の相関がベキ分布になる。この相転移の臨界点にある状態が、市場の状態であり、これから価格変動がベキ分布を持つというのである。相転移の臨界点は、「物質科学における不確実性」の項で述べた散逸構造の構造変化における閾値に相当する。そこでは、構造が不安定になって、大きな揺らぎが発生する。この大きな揺らぎが、市場価格の大きな変動に相当するとされるのである。

(2) 金融工学における不確実性

金融工学(financial engineering)は、その名前から分かるように、金融に関する工学的研究を行う科学である。現在の金融ビジネスは、数理モデルを用いる市場予測、計算機を利用する具体的数値など、実際的な結果を要求しており、理論的考察を旨とする経済学では対応が不可能であったことから、数理的取り扱いを得意とする工学の参入が要求されて、金融工学が誕生したとされる²¹⁾。それでは、金融工学と不確実性は、いかなる関係を持つのか。金融工学は、外国為替や株式などの不確実に変動する市場で、いかに投資収益を大きくするか、いかに投資リスクを小さくするか、などを考察する科学である。すなわち、市場の不確実性を、技術的工夫によって確実性に変える科学である。市場という不確実性の海の中に、確実性の船を浮かべる科学である。それでは、金融工学は、いかに不確実性に対処してきたのか。投資の基本は、いかなる市場の資産に、どれだけを投資するかということである。マーコビッツの提唱した「平均・分散モデル」は、これを次のように定式化する。市場に n 個の資産があつて、これらの収益率は r_i である。投資家の各資産への投資比率を x_i とすると、この投資の収益率 r は $r=r_1x_1+\dots+r_nx_n$ となる。一方、投資のリスクは収益率 r の分散が与えるとして、この分散を、各資産の収益率 r_i の平均値と分散、および投資比率 x_i で表す。そうして、一定の収益率 ρ を確保するため、 $r=\rho$ として、リスクすなわち収益率の分散が最小となる解 x_i を求めるのである。このマーコビッツのモデルは、膨大な計算を必要とするが、現在の資産運用論の土台となっている。ところが、ウィリアム・シャープは、全投資家が平均・分散モデルに従って資産運用を行ったとすると、平均・分散モデルの解 x_i が、現市場での各資産の構成比率と、国債等の無危険資産とを、組み合わせたものになることを発見する。すなわち、最も効率的な投資の資産構成は、現市場の各資産の構成比率に国債を加えたものだというのである。さらにシャープは、現市場での各資産の構成比率と国債等の無危険資産を組み合わせたものが、平均・分散モデルの解であるならば、各資産

の収益率 r_i 、無危険資産の収益率 r_f 、市場の平均収益率 r_M の間に $r_i-r_f=\beta_i(r_M-r_f)$ の関係があることを発見する。ここで、 β_i は、各資産のベータ値と呼ばれる定数で、過去のデータから計算することができる。これが資本資産価格付けモデル(CAPM)で、このモデルでは、各資産のリスクすなわち不確実性は、各資産の収益率 r_i が、市場の平均収益率 r_M からどれだけ離れているか、を示すベータ値が表すことになる。

金融工学の名前に最もふさわしい証券が、派生証券(derivative security)である²²⁾。派生証券は、そのペイオフが他の金融証券の価格と関連する証券である。例えば、1年後にその時のSONY株100単位の価格に等しい金額と換金できる契約書があるとす。この契約書は、ペイオフが株式の価格と関連するから派生証券である。通常の派生証券は、リスク管理を目的として作成される。代表的な派生証券であるオプション(option)を考えよう。オプションとは、決められた条件の下で資産を買ったり売ったりする権利である。買う権利を与えるオプションをコール(call)、売る権利を与えるオプションをプット(put)と呼び、オプションの価格をプレミアム(premium)と呼ぶ。例えば「Fは6ヵ月後にT社株200株を1株当たり5000円で買う権利をJ銀行から購入し、その代金として1株当たり250円をJ銀行に支払う」の契約は、プレミアム5万円のコールオプションである。この契約により、Fは、6ヵ月後の株価が5000円より高い場合は、この契約により5000円で購入でき、5000円より低い場合は、この株価で市場で購入でき、いかなる場合でも5000円以下で購入することが保証されるのである。それでは、オプションの価格(プレミアム)は、どのように決まるのだろうか。上のオプションの例で、考えることにする。6ヵ月後に株価が5000円以上になると、安い価格でFに売ることになるから、J銀行は損失を被り、5000円以下になると、Fは価格が安い市場で買うことになるから、Fの支払った代金(プレミアム)を利益として得る。すなわち、6ヵ月後の株価の予測値が、オプションの価格を決めることになる。株価の予測は、どのように行われるのか。株価 $S(t)$ は、関係式 $dS(t)/S(t)=\mu dt+\sigma dz$ に従って変化するとされる。ここで、 μ は株式の収益率、 σ は株価のボラティリティ(変動率)、 t は時間、 z はランダムウォークの変数である。すなわち、株価は、ランダムウォークで増減しながら変化するのである。6ヵ月後の株価は、この関係式に基づく計算機シミュレーションによって、あるいは、この関係式から導かれる微分方程式の解から求められるのである。

市場の不確実性は、金融工学によって、克服されたのだろうか。不確実性によるリスクは、正しく見積もることができたのだろうか。これを金融工学者フィッシャー・ブラックに尋ねることにしよう²³⁾。ブラックは、上で議論した株価の変化式に基づき、ブラック=ショールズ方程式と呼ばれる、派生証券の価格が満たす偏微分方程式を導き出した学者であると同時に、実際に方程式を解いて派生証券の価格を計算し、効

それぞれの基準で行われることから、株価の変動は著しく不確実なものになる。自然事象の不確実な変動のモデルであるランダムウォークは、各々の変動が相互に影響を与えないのに対し、社会事象の不確実な変動である株価の変動は、前回の変動に依存して変動するから、自然事象とは異なる不確実性を持つ変動であることが判る。また、金融工学は、株価などの不確実性の大きさを見積もる科学であった。金融工学が扱う派生証券は、そのペイオフが、他の金融証券の価格に関連する証券である。すなわち、派生証券を売って確実に利益を得るには、派生証券に関連する金融証券の価格の変動を知る必要がある。この価格の変動を、金融工学は、見積もろうとするのだった。だが、この計算において、金融証券の収益率やボラティリティ(変動率)は、一定値をもつと仮定していた。この仮定は、現実には成り立つことはない。これらの値は、不断に変化するのみならず、変化の仕方も不断に新しい形態をとるのだった。これは、社会科学において、社会は、研究対象であると同時に活用領域である、という循環が成り立つことに起因すると思われる。

6. 不確実性を取り除く作業としての科学

事象の不確実性に対して、科学は、いかなる立場に立つのか。先に述べたように、アインシュタインにおいては、事象の確実な予測は、科学精神そのものだった。一方、物質・生物・社会の事象には、不確実性が溢れていた。すなわち、科学の社会的役割は、事象の不確実性を取り除いて、人間の行動の効率を図ることなのである。

物質・生物・社会の事象は、不確実性で溢れると同時に、原子の構造、生体の器官、思考の論理など、確実性に富む事象も数多く見られる。これらの確実性は、どのようにして成り立つのだろうか。不確実性は、どのように克服されているのだろうか。原子の構造を考える。原子核では、陽子・中性子・中間子などの核子が、衝突によって相互に転化し、混沌とした状態にあるが、このことによって、核子を結び付ける核力が生まれ、元素記号で規定される原子核を形成している。このとき、核子の集まりを、それぞれの元素の原子核にするものは、核子の集まりのエネルギーの低さである。例えば、酸素の原子核が、陽子 8 個と中性子 8 個から成って、陽子 8 個と中性子 4 個に成らないのは、前者のエネルギーが低いからである。このように、酸素・水素・炭素などの元素の確実性を保障するものは、核子の集まりのエネルギーの低さなのである。物質事象では、物質構造のもつエネルギーの低さが、確実性を生み出すと考えられるのである。

生物事象の確実性は、いかに生まれるのか。生体の機能の基本は細胞にあるとされる。筋肉・神経・血球など、生体構成物のほとんどは、細胞から成っている。細胞は、溶液(細胞液)を化学物質(細胞膜)で区切ることによって、生まれたとき

れる。細胞は、細胞膜を透る物質や、細胞の形を変えることにより、種々の特性を得て、種々の機能を持つことができる。細胞膜を透る金属イオンを選択することによって、細胞内部の電位を低くし、電位変化によって情報を伝達する神経細胞になることができるし、内部に、ヘモグロビンという色素たんぱく質を持つと、赤血球になることができる。これらは、神経細胞・赤血球として、生体機能を確実に果たす一方、細胞内は、流体という不確実な状態にある。生物は、細胞膜で空間を区切ることによって、確実性を得たのである。

それでは、社会の確実性は、いかに得られるのか。社会を構成する個人は、それぞれ異なった性格と、異なった考えを持って、不確実な状態にある。だが、社会には、人権についての共通意識、聖なるものに対する尊敬、定期的な選挙による政治参加などの確実な事象が存在する。これらの社会事象の確実性は、教育制度・司法制度による強制、暗黙裡における社会教育によって成り立っている。経済活動における確実性も、法律の保証の下に成り立っている。

事象の確実性・不確実性を考えるとき、確実性の裏には必ず不確実性があることに注意せねばならない。核力による原子核の構造の維持という元素の確実性の裏には、核子の不断の相互転化という不確実性があった。細胞膜により空間を区切って種々の生体機能を受け持つ細胞を形成するという確実性の裏には、ある溶質については自由に透過させるという不確実性があった。経済事象・社会事象における諸制度が確実に機能するためには、構成要素である個人の主体的参加という不確実性が必要であった。このように、事象の確実性の裏には、不確実性が必ず存在している。

不確実性を取り除く作業としての科学には、確実性と不確実性は、いかなる形態で存在しているのか。科学は、言葉や数式を用いて、事象の論理構造を明らかにする作業である。言葉や数式は、いかに確実性を得るのか。まず、言葉について考えることにする。「リンゴ」という言葉について考える。「リンゴ」が示すものは、リンゴの木になる赤い実であり、人間が食べる果物であって、明確で確実であるように思える。だが、「リンゴ」が具体的に示すものは、赤かったり青かったり、形がゆがんでいたりして、それぞれのリンゴで異なっている。すなわち、「リンゴは、白または淡紅色の五弁花を開き、のち球状の赤色などの実を結ぶ」の科学的記述があるとき、「リンゴ」が示すものは不確実なのである。だが、この記述は、科学的記述として、確実性を持っている。この確実性は、事象の抽象化から得られると考えられる。事象の抽象化とは、すべての事象に含まれる事柄のみを考察し、他の事柄を考察外に置くことである。すると、抽象化された事象は、すべての事象で成り立って、事象の確実性が得られることになる。だが、この確実性の裏には、抽象化によって捨てられた不確実性があることを、忘れてはならないのである。

次に、数式による事象の記述について、考えることにする。

数式による記述も、本質は同じである。科学は、事象の現われのすべてを記述しようとはしていない。研究者が関心を抱くもの、社会が解明を期待するもの、確実な結果が得られそうなものを、記述しようとしているのである。これらを数学モデルで表現し、モデル上の事象の展開で、事象変化を予測しようとしているのである。ここでも、科学研究で得られた事象の確実性の裏には、モデル作りで無視した事象の不確実性が存在するのである。科学の確実性の裏には、事象の不確実性が満ちているのである。それでは、物質科学が確実性の高い科学、社会科学は確実性の低い科学とされる理由は何だろうか。それは、物質の構造と社会の構造が、堅固さにおいて異なるからだと考えられる。科学は、事象の構造を調べ、それを科学法則として示す。この構造の堅固さが、諸科学で異なるのである。事象が堅固な構造を持つときには、確実なもの、不確実なものからの分離が容易になり、対象を前者に限ることによって、科学は確実な予測が可能となるが、堅固な構造を持たないときには、確実なもの、不確実なものとの境界が不分明となり、モデルの改良によって予測の確実性を大きくしようとしても、モデルに組み込まなかった部分の不確実性が増大し、結局、不確実性の大きさは変化しないと考えられる。現実の事象は、確実なもの、不確実なものから成っていて、科学によって確実なものを明らかにしても、人間に対峙する事象は、確実なもの、不確実なもの、複合体であることに注意する必要があるのである。

7. 結論

物質科学、生物科学、社会科学に潜む不確実性について、議論した。物質科学においては、物質の構成要素において、それらの運動において、また物質の構造変化において、不確実性が存在する。生物科学においては、認知の確実性の強化が不確実性を生み出すこと、行動の認知システムに不確実性があること、免疫システムは外界の不確実性に不確実性の生成で対応すること、遺伝システムに確実性と不確実性が必要であることが判った。社会科学においては、市場価格の変動という不確実性が存在するが、これは人間心理に基づき発生する。また、この不確実性の大きさを見積もる研究が行われている。不確実性は、事象の中に存在するだけでなく、事象を記述する方程式の中にカオス解として存在する。科学は事象の不確実性の中で確実性を探る試みであるが、確実性は特別の条件の下においてのみ得られるだけである。

8. 引用文献

- 1) エドガール・モラン『方法 1. 自然の自然』(大津真作訳), 法政大学出版局, 1984, 第I部第1章.
- 2) 文献1), 第III部結論.
- 3) Jürgen Renn (Ed.) "Albert Einstein -Chief Engineer of the Universe-", WILEY-VCH, 2005.
- 4) アインシュタイン『相対論の意味』(矢野健太郎訳), 岩波書店, 1958.
- 5) アインシュタイン『晩年に想う』(中村, 南部, 市井訳), 講談社, 1971, 第二部.
- 6) ニコリス, プリゴジヌ『散逸構造』(小島, 相沢訳), 岩波書店, 1980.
- 7) I・プリゴジン『確実性の終焉』(安孫子, 谷口訳), みすず書房, 1997, 第〇章.
- 8) Hermann Haken "Advanced Synergetics", Springer-Verlag, 1983.
- 9) Hermann Haken "Synergetics -an Introduction-", Springer-Verlag, 1977, chap.13.
- 10) M・A・フィッシャー, O・ファーシャイン『人と機械の知能』(玉井哲夫訳), トッパン, 1989, 第8章.
- 11) ロバート・L・ソルソ『脳は絵をどのように理解するかー絵画の認知科学ー』(鈴木, 小林訳), 新曜社, 1997.
- 12) 伊藤正男, 佐伯胖編『認識し行動する脳ー脳科学と認知科学ー』, 東京大学出版会, 1988, 12章.
- 13) 免疫システムについては、次の文献を参考にした。
大内, 山本, 川村, 柴, 高柳, 當間, 遠藤『生命複系からの計算パラダイム』, 森北出版, 2003, 3章.
Alan S. Perelson, Gérard Weibuch 「Immunology for physicists」, *Rev. Mod. Phys.*, 1997, 69.
- 14) ジョン・メイナード=スミス『進化遺伝学』(巖佐, 原田訳), 産業図書, 1995.
- 15) スチュアート・カウフマン『自己組織化と進化の論理』(米沢富美子訳), 日本経済新聞社, 1999.
- 16) 文献14), 第2章.
- 17) 高安秀樹『経済物理学の発見』, 光文社, 2004, 1章.
- 18) 文献17), 2章.
- 19) Mantegna R.N., Stanley, H.E. "An Introduction to Econophysics", Cambridge University Press, 2000.
- 20) Takayasu, H. (Ed.) "Empirical Science of Financial Fluctuations", Springer-Verlag, 2002, 1.
- 21) 今野浩『金融工学の挑戦』, 中央公論新社, 2000.
- 22) デービッド・G・ルーエンパーガー『金融工学入門』(今野, 鈴木, 批々木訳), 日本経済新聞社, 2002, 第III部.
- 23) ペリー・メーリング『金融工学者フィッシャー・ブラック』(今野, 村井訳), 日経BP社, 2006.
- 24) エマニュエル・ダーマン『物理学者、ウォール街を往く』(森谷, 船見, 長坂訳), 東洋経済新報社, 2005, 第16章.
- 25) 金子邦彦『生命とは何か』東京大学出版会, 2003.