2 ニュートンによる世界観の革新と科学的説明

2.1 古典力学

ニュートンの時代の自然の研究は自然哲学 (Natural Philosophy) と自然史 (Natural History) に分かれていた。自然哲学は現在の物理学、化学に、自然史は生物学、地学におよそ対応している。1686 年に出されたニュートンの『プリンキピア』 (*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*) はそれまでの伝統を打ち破り、自然学の内容だけでなく、方法さえも革新した画期的な著作だった。ニュートンの『プリンキピア』は、コペルニクスからニュートンに至る一連の物理学、天文学の研究成果をまとめ上げたものであり、それら新しい研究活動はニュートン革命 (Newtonian Revolution) と呼ばれ、科学史上の典型的なパラダイム転換の例として取り上げられてきた。

Box 7 科学理論についての典型的な二つの見方

パラダイム説はクーン（Thomas Kuhn, 1922-1996）やファイヤーラーベント（Paul Feyerabend, 1924-1994）の科学についての相対主義的見方を指すが、それは科学理論や科学者集団についての歴史的な考察から生まれた。彼らが批判の対象にしたポパーは科学について次のような主張をもっていた。

1 科学理論はテスト可能でなければならない。
2 理論の本当のテストはそれを反証するための真剣な試みである。
3 科学的であるためには、理論は危険な予測をしなければならない。そして、予測が外れれば、その理論は放棄されなければならない。

ポパーの科学に対するテスト可能性、反証可能性（Falsifiability） の主張に対し、クーンは通常の科学的な活動では使われている理論はテストなどされず、そのようなテストが可能なのは科学革命という通常でない状態においてだけであると批判した。そして、彼は科学を次のように特徴づけた。

1 科学と擬似科学の区別は革命時の科学ではなく、通常科学の特徴によってなされる。
2 通常科学の主要な活動はパズルを解くことである。このパズルは科学者が未知の現象に対して仮説をつくることによって生まれる。このパズルは受け入れられている理論の内側でつくられ、解答が探される。
3 通常科学は、重要な事実の決定、理論と事実の照合、理論の整備という形で受け入れられている理論を拡張する。
4 通常科学はパラダイムに基礎を置いている。科学者集団は理論や実験からなるパラダイムを共有する。通常、パラダイムは問題視されず、研究の指針となる。

クーンによれば、科学は連続的な知識の蓄積ではなく、パラダイムが不連続に変わる度に知識も変わる。つまり、科学は直線的に進歩するものではない。観察言語と理論言語の間には明確な区別はなく、観察報告はパラダイムやそこでの理論を不可避的に背負っている。異なるパラダイムは互いに通約不可能（incommensurable）である。異なるパラダイムを比較する中立的な基準がな

いからである。また、正当化と発見の文脈の間にも明確な区別はない。合理的な論証によってあるパラダイムを受け入れるかどうかを決め、パラダイムを正当化することはできない。

［プリンキピアの構成と内容］
ところで、ニュートンの『プリンキピア』は 4 部からなっている。

1 部：目的、定義と公理
2 部： (book 1) 力に従う物体の運動に関するさまざまな数学的形式の定理、それらの導出はユークリッドの『原論』と同じ形式
3 部：(book 2) 流体の中での物体の運動と波の運動
4 部：(book 3) 万有引力の法則と天体運動の観測結果の組み合わせ

この構成は数学的な公理の提示と、それを運動の説明に適用するという二段階からなっている。さて、私たちが観察するのは現象としての運動である。自然に見られる結果は幾つかの異なる原因や力の複合的な結果である。現象としての運動は見かけの運動に過ぎなく、その背後には絶対空間に関しての真の運動がある。ニュートンはこのように考え、見かけの運動や原因から出発して、真なる運動や原因をどのように推論できるかを『プリンキピア』で数学的に示そうとした。
　ユークリッド幾何学の公理に対応するのが、慣性の法則、運動量保存の法則、作用反作用の法則という運動の 3 法則である。ニュートンは天体の運動の秩序を観測し、その秩序と運動、そして運動の 3 法則の論理的な帰結から、天体間に働いている力がなければならないことを導き出す。これらの前提から、二つの物体 $M$、$M'$ が互いに引き合い、それが $F = GMM'/r^2$ という式によって与えられることを巧みに示した（$G$ は重力定数、$r$ は物体間の距離）。そして、宇宙に存在するどのような二つの物体の間にもそのような力 $F$ が働いていることを帰納的に推論した。このニュートンの新しい物理学は古典力学と呼ばれ、18, 19 世紀の物理学のパラダイムとなった。
　では、ニュートンに始まる古典物理学のパラダイムはどのような世界観を私たちに提示するのだろうか。運動の法則も重力の法則も普遍的に成立している。つまり、いつでもどこでも必ず成立している。すると、自然には始まりや終わりはないのだろうか。運動方程式による物理システムの記述や説明が数学的、演繹的になされることは何を含意するのだろうか。このような問題を力学のパラダイム内で解決するのが対称性の原理とラプラス（Pierre-Simon Laplace, 1749-1827）の普遍的な決定論である。以下にこれら二つの主張を見てみよう。

2.1.1 対称性
　昔から対称性は私たちが世界を理解しようとする場合に大きな役割を演じてきた。均整がとれ、秩序をもった対象や変化はアリストテレスやガリレオ（Galileo Galilei, 1564-1642）の審美眼を満足させただけでなく、真理の基準の一つと受け取られ、真と美の両方を担ってきた。しかし、世界のもつ性質としての対称性は物理学の展開とともに自然法則や物理理論のもつ基本的な性質として捉え直され、時代とともに物理学の中で益々重要な役割を果たすようになってきた。
［時間と時制］
　物理現象も私たちの経験も時間的に変化している。私たちは過去、現在、未来という時制をもとに時間を考えている。この時間は未来から現在を通過し、過去へと流れ去って行く、あるいは

過去から現在を通過し､未来に向かって流れて行くと考えられている｡このような時間に対して、方向のある直線には前と後しかないように、物理学が採用したのはこのような前後の方向しかない時間だった。この時間はガリレオが最初にパラメータとして導入し、ニュートン力学の基本的な構成要素となった。マクタガート（John McTaggart, 1866-1925）は私たちが経験する、時制をもつ時間を*A*系列、方向のある直線的な時間を*B*系列と名づけたが、物理学での時間は私たちの心理的な時間と違って、時空多様体の部分空間であり、比喩的な「時の流れ」といったものとは異なるものである。ほとんどすべての既知の物理法則は過去と未来に対して同じように適用できる。これを、物理法則は時間反転に関して不変である（invariant)、と言う。だが、私たちの経験は時間非対称的である。私たちは過去と未来を同じようには考えていない。経験は過去から未来に向かってなされ、その逆ではないと信じている。過去は記憶され、未来は予想される、とみなされているように、過去と未来は全く異なったものと思われている。物理法則の時間反転不変性の疑問は今でも完全に解かれているわけではない。そこで、ここでは古典力学の法則の不変性とはどのようなものか明らかにしてみよう。

（問）時間 (time) と時制 (tense) の違いが何かに注目して、物理学の時間と経験的な時間の違いを具体的に列挙してみなさい。
（問）アウグスティヌスの時間に関する考えを調べ、現在主義（presentism）と呼ばれる主張をまとめなさい。

［対称性、普遍性、不変性］

対称性（Symmetry）という言葉は線対称や点対称の一般的な表現である。それらが図形を移動あるいは回転しても同じ形が保存されることを意味していたように、変化や運動がいつ、どこで起ころうとそれに同じ法則が適用され、同じ結果が得られることを保証するのが対称性の原理である。いつ、どこで、何に対しても同じことが成り立つことは普遍命題の「すべて」が物理世界で成立することの別の表現になっている。自然の中で変化が生じ、その変化の中で不変に保たれるものが対称的なものである。

（問）「すべての*A*は*B*である」という自然法則の命題を帰納的に考える場合と対称性を使って考える場合の違いはどこにあるのだろうか。使われる論理や数学の違いをヒントにしてみよう。

［対称性の数学］

ところで、不変に保たれるものがもつ代数的な構造は群（group）をつくる。群は一種類の演算だけが定義された数学的構造であり、対称性の数学的表現として用いられる。群は次の合成法則をみたす集合である。

(1) 閉包性 (2) 結合性 (3) 単位元の存在 (4) 逆元の存在

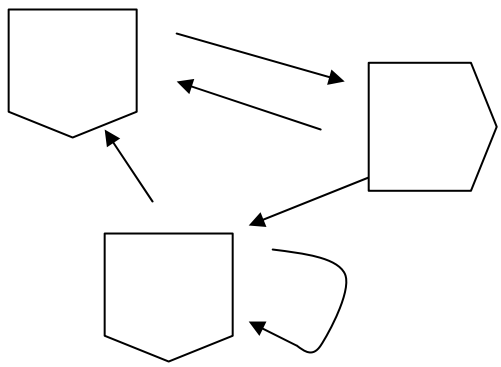
（整数の加法を考えて、この4つの法則の性質を理解しよう。二つの整数を加えても整数であり、何度加えても整数であるような整数の集合は加法に関して閉じている。これが（1）の閉包性という性質である。2＋(4＋3) ＝ (2＋4)＋3のように加える結びつき方を変えても同じ答えになる。これが（2）の結合性という性質である。加法は $x + 0 = 0 + x = x$ が成立し、0が単位元になっている。

また、どんな自然数 $x$ についても、$x + y = 0$となるような $y$ が存在する。実際、この $y$ は $-x$ である。したがって、整数の集合は（1）から（4）までの性質を満たし、加法に関して群をつくることになる。同じことを自然数、そして実数の集合について考えてみると、それぞれ群をつくるだろうか。）

運動や変化には様々あるが、図形の簡単な平行移動を考えてみよう。移動を$A$、$B$、$C$と表し、移動を続けて行うことを$AB$や$BA$で表し、そのような移動すべての集合を$F$としてみよう。ある移動$A$の逆の移動を$A^*$とし、何も移動しないことも移動の特殊なものとすると、集合$F$は群になる。というのも、$F$は移動に関して閉じており、

$A(BC) = (AB)C$, $\exists x\ (xA = Ax = 0)$, $\exists x\ (Ax = 0)$ (0は単位元)

が満たされるからである。



（問）上の等式が成立することを確かめてみよう。

［変換群］

物理的な変化の代表は運動であり、運動とは対象の移動である。ある位置の対象が別の位置に移動することは対象を置き換えることであるが、それらを対象の変換（transformation）と呼ぶことにすると、逆の変換が元の状態を復元する場合、すべてのそのような変換は群をつくる。そのような群は変換群と呼ばれる。物理的な運動変化は変換で表現されるから、変換群は物理的な運動変化の集まりを数学的に表現していることになる。以上が力学的な運動変化を群によって数学的に表現する概略である。

最も単純な力学システムは1個の粒子が1点として表されるものである。粒子は内部をもたないとすれば、空間内に延長をもたない質点（point particle、幾何学的な点）として表現される。粒子は空間内の位置、そして質量、電荷等の物理量の値が与えられれば、空間内で表現でき、それら物理量は一定である。また、私たちは観測者としてそのシステムを外から眺めるが、観測者から物理学的に不必要なものは一切取り除かれる。単純化された観測者の測定だけが座標系の形で残される。座標系はデカルト（René Descartes, 1596-1650）によって空間に導入されたが、観測者と観測結果がそこに集約されることになった。粒子と観測者の複雑な関係は点と座標系の関係に還元されて、単純化されて残っている。この座標系についても対称性の原理が成立する。古典力学の

場合、どのような座標系を選んでも運動は同じように表現されることが原理によって保証されている。

（問）古典力学の座標系がどのような役割を果たしているか要約しなさい。

［対称的な自然法則］
このような説明から自然法則の特徴をまとめると次のようになるだろう。

(1) 自然法則の普遍性は対称性概念によって物理化される。自然法則を述べた普遍命題を確証する必要があるとき、直接に確かめることはできない（なぜか)。しかし、対称性とその数学的表現である群を用いることによって、数学的な意味で確証を得ることができる。
(2) 物理システムの認識論的特徴づけは座標系と対称性概念によってなされる。これは観測者と物理システムの間にある認識論的関係の物理化である。

では、非対称的な法則はないのだろうか。その例は熱力学の第 2 法則、いわゆる、エントロピー増大の法則である。対称的でない法則が何を意味しているかは時間の向きなどと関連して、それほど明確ではない（後述参照)。
物理法則における対称性の再認識は 1905 年にアインシュタイン（Albert Einstein, 1879-1955）が相対性の原理（Principle of Relativity）を述べたことに始まる。互いに対して一定の速度で動いている二人の観測者にとって物理学の法則は正確に同じというのが相対性の原理である。異なる視点の同等性というアインシュタインの考えはすべての可能な観測者に対して物理法則が同一であるという考えをさらに追求させることになった。あらゆる運動への同等性を述べるという考えは、それを普遍法則に高め、等値性の原理（Principle of Equivalence）が得られた。この原理は、重力は見かけの力と区別できない、あるいは加速度の効果は重力の効果と全く区別できない、と言うものである。これら二つの原理は対称性原理の具体的な形である。
［ネーターの定理とその発展］
対称性原理の次の段階はネーター（Emmy Nöther, 1882-1935）の定理 (1918) である。この定理によると、物理法則の対称性にはそれに対応する保存則が存在する。この定理の逆も真である。つまり、どんな保存則にもそれに対応する対称性が存在する。対称性と保存則の関係は次のように分類できる。

1 空間的対称性は空間の均質性であり、線運動量の保存を含意する。
2 回転的対称性は空間の等方性であり、対称軸についての角運動量の保存を含意する。
3 時間的対称性は時間の均質性であり、エネルギーの保存を含意する。

対称性と保存性の同等性は、物理システムのある物理量が保存されて時間発展する場合は、それについての法則も普遍的であること、そしてその逆も成立することを意味している。

（問）エネルギーが保存されている対象について、過去から未来を予測することと、未来から過去を推測することはどのような関係になっているのだろうか。

（問）女性研究者としてのネーターの研究活動を調べ、現在の女性研究者の地位と比較してみなさい。

三番目の段階はこの 35 年間くらいの間の発見で、ゲージ場と呼ばれる特別の場ですべての物理法則は生まれ、その構造と振舞いは局所的対称性（local symmetry）によって完全に述べることができるというものである。時空のどのような点に視点を取っても等値性が主張できるというのが、法則が局所的に対称的ということである。

こうして、ニュートン以来の物理学は対称性概念によってその普遍的妥当性を拡大し、それが現在も維持されていることがわかる。少々込み入った話になったが、ニュートンに始まる力学は時間的変化を対称性の原理によって数学的に処理し、数学を使った推論によって自然現象を理解することに成果を上げたことが述べたかったことである。この数学的成果と並んで見過ごせないのが力学の生み出した自然観である。それを次に考えてみよう。

### 2.1.2 決定論

［力学的な決定論］

どんな出来事にも原因があるというのが因果的な決定論の主張である。この形而上学的な主張はニュートンの力学によって、物理世界の決定論として精巧に具体化された。ニュートンの決定論の洗練された表現はラプラスの魔物（物理学者ラプラスが思考実験で考えた架空の万能者）によって見事に与えられた。ラプラスの決定論は、すべての事象は原理上正確に予測できるという普遍的決定論（Universal Determinism）である。原理上予測できない事象はなく、例外は許されない。だから、予測できない事象があったとすれば、それは私たちの無知のためである。だが、これは私たち自身の予測、予言を含めた思考が決定論の範囲内にあれば成立しない（なぜか？私たちが自らの予言を破れることを考えてみよう）。それゆえ、「知る」ことは世界の中にはなく、世界は私たちが知る、知らないということとは独立している。確率は物理世界にはない私たちの無知のゆえに導入される。ある事象がどのくらいの確率で起きるかということは決定論的世界では何の意味ももっていない。決定論的世界ではどのような事象についてもそれが起きるか、起きないかのいずれか一方しか成立しておらず、起きるなら確率 1 で起き、起きないならその確率は 0 である。

私たちはコイン投げやサイコロ振りを確率的な出来事の典型例だと考えている。実際、公平なコインは表、裏の出る確率が 1/2 とみなされ、それをもとに確率モデルがつくられる。このような確率的な出来事は私たちの生活に馴染んでおり、公平な選択のためにコインやサイコロが使われ、時には賭けの道具にもなっている。しかし、ニュートン的な決定論が正しいとしたら、公平なコインを投げた場合の表か裏かの結果は決まっていないのだろうか。このような疑問に答えるためにラプラスの魔物に登場願おう。

［ラプラスの魔物］

ラプラスが生み出した魔物はコイン投げについての完璧な知識をもっており、投げられるコインの物理的な運命について完全に予測できる。魔物によれば、人間はコイン投げについて十分な物理的知識がなく、正確な予測ができないために、その過程が確率的に見えるに過ぎない。魔物はコイン投げで生じるバイアス（非対称性）は決して見逃さない。コインを投げるときの物理的

な状態のバイアスが何であるかを的確に知り、それが結果にどのようなバイアスを生むかを正確に予測できる。コインを投げて裏か表が出たということは、その結果にバイアスがあったということであり、それは原因であるコイン投げのどこかに最初からバイアスが潜んでいたためである。これは理屈の通った話に思える。というのも、この話は既に述べた対称性の原理の一例と考えることができるからである。対称性の原理を因果的決定論に適用すると、

結果に現れる非対称性は、原因がもつ非対称性によって引き起こされる、

と表現できる。この原理が成立している限り、魔物は原因のバイアスに注目することによって結果の裏、表というバイアスの予測を物理的な法則を使って行うことができる。

（問）バイアスのないコイン、バイアスのないコイン投げとはどのようなコイン、コイン投げでしょうか。

以上のことから、魔物は物理的な状況に関して予測ができ、確率などに頼らなくても、個々のコイン投げを一回毎に正確に予測でき、したがって、すべてのコイン投げの系列について正確な予測を行うことができる。つまり、魔物にはコイン投げの過程は全く決定論的なのである。それゆえ、自然の過程に確率的なものは何ら含まれていないことになり、確率の使用を主張・擁護するのは誤っていることになる。

この説明によれば、確率は私たち人間には不可避的に必要であるが、それは私たちが十分な知識をもつことができないために過ぎない。これが確率の古典的な解釈である。私たちが確率概念を使う理由は私たちの無知のためであり、十分な知識をもっていれば確率などに頼る必要はない。これがラプラスの魔物の主張である。

さらに現存する確率的な科学法則についても、それは現象的な法則であり、時間対称的な物理学の法則とは違って派生的なものに過ぎないと魔物は結論する。対象の変化を述べる現象的な法則は厳密な意味で法則ではない。そもそも確率が無知の反映であるから、それを使っての確率的な法則は法則と呼ぶに値しない。幽霊はどこにも存在しないが、考え出された多くの幽霊についての一般法則はつくろうとすればつくれる。統計法則はそのような類の法則であるというのが魔物の主張である。ちなみに、現象的と言われる法則にはエントロピー増大の法則やメンデルの遺伝法則がある。

（問）身長や体重の測定で生じる誤差と、コイン投げの確率を比べて、結果の系列や頻度に関して、二つの共通点を挙げてみよう。

［決定論と予測可能性］

ラプラスの魔物は、初期状態を正確に測ることができ、未来の予測のためには瞬時に完璧な計算ができなければならない。元来、決定論は実在の決定性を主張するものであり、私たちの認識とは何の関係もない。その決定論と予測可能性を同一視させる理由は古典力学の第 2 法則にある。第 2 法則と、微分方程式系の解が存在して、しかもその一意性を保証する定理とが結びつくことによって、系の初期条件が定まれば正確な予測が可能であることが数学的に証明できる。これに

よって現在の状態から演繹される未来や過去の状態が存在するということが保証される。さらに、この決定論は上の予測が実際に構成的に計算可能であるという定理によって強化される。ただ単に予測が可能というのではなく、実際に予測を計算できる。こうして古典的な決定論は予測可能性と同一視されることになる。そして、このような決定論＝予測可能性という認識的な決定論理解が、ラプラスが魔物に対して与えた役割である。

（問）「ラプラスの魔物は、決定論を認識論化して、予測可能性に置き換えた」という謂い回しが何を意味しているか、自分の言葉で説明しなさい。

［決定論と運命論］

このような魔物の主張は私たちの行為にも当てはまるのだろうか。人の行為の予測は大抵できないが、それは私たちの無知のためだけなのか。ここで、決定論と運命論（Fatalism）の区別が重要である。物理世界が存在し、ある時点の状態がわかっていれば、ラプラスの魔物にとって古典力学が主張する決定論は運命論である。（したがって、この節のタイトルは運命論でもよかったのかもしれない。）決定論は、過去が異なっていたとすれば、現在も異なっていただろうという考えを排除しない。決定論はまた、現在私がある仕方ではなく別の仕方を選ぶならば、私は未来に起こることに影響を与えることができるという考えも排除しない。しかし、運命論はこれを否定する。現在あなたが何をしようと過去と未来はそれとは無関係に決まっているというのが運命論の主張である。つまり、決定論と運命論はほとんど正反対のことを主張している。運命論は私たちの信念や欲求が無力なことを主張するが、決定論では信念や欲求は因果的に私たちの行動をコントロールできることが主張されている。

（問）あなたが「これから（問）を考え、答えを出す」には決定論がどうして必要なのだろうか。その際、運命論が成立していると「これから（問）を考え、答えを出す」必要はあるのだろうか。

ラプラスのような決定論的自然観を今の私たちはもっているだろうか。原理上その通りと答える人であっても、その原理は実現できないと考えていないだろうか。決定論的自然観は古典力学の一つの解釈であり、それが成立しないことはこの章の後半でじっくり考えてみよう。