

第1章 出来事の間と秩序

1.1 モノと時間空間

目覚めたあなたのまわりでモノがコトを起こす「出来事」が始まるとき、部屋の天井や壁が見えてその中にあなたがいることが分かる。部屋の片隅から壁に沿って x cm 歩み、その壁から垂直に y cm 進み、その床から z cm の高さにああなたの眼がある。住み慣れた部屋なら暗くても、実際に体を動かしてその位置までたどることができるだろう。あなたの身心は空間というものを知っているのだ。手を伸ばして時計を取るとき、腕

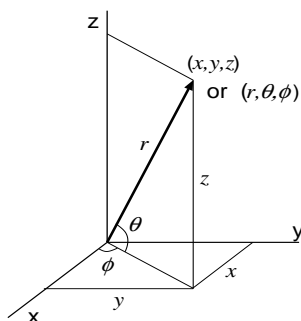


図 1.1: 3次元空間の座標 (x, y, z) 、または (r, θ, ϕ) .

をどのくらいどの方向へ伸ばすかを無意識に実行している。このやり方では、長さ r cm の棒を1つの壁から ϕ 度回して、さらに端を床から θ 度持ち上げて位置を特定するのだ。空間の位置は、デカルト座標 (x, y, z) や球座標 (r, θ, ϕ) の3つの数で指定することができる。これが、われわれがその中にいる3次元空間だ。

目覚めたあなたが飛んでいる蝶を見つけて眼で追えば、出来事を見ている。しかし、そこにあるすべてのものが決して動かず、あなたの記憶ということがなければ、出来事が起きたと断定することができないだろう。蝶が動くというときには、時間の前後があることを前提している。人間の認識作用さえも時間というものがあって起きると言うことが分かる。すべての出来事は時間

の流れとともに起きるのである。こうして、われわれもそこにいる世界での出来事は、空間と時間の中で生起する。今日では、時間と空間は4次元の時空として一体的にとらえられる。時間を t (time) と表わせば、モノやコトは4次元時空での座標 (t, x, y, z) を変数として在り、出来事は変数 t とともに物理的指標や位置座標が変化することによって立ち現われる。

われわれが時空間にいたとしたら、その広がりはどうなっているのだろうか。これは古くからの人間の問いである。日本人はこの問いをつきつめて考えてこなかったようだ。中国語には空間時間に相当する「宇宙」という言葉がある。中国では時間・空間は無始・無限と考えられたが、ヨーロッパでは世界の始まりが想定され空間は無限だと考えられてきた。しかし今日の宇宙論は、この宇宙が百数十億年前のビッグバンから展開してきたものとする。時間の始まりと空間の広がり有限性が考えられているのである。それは、空間をモノとは別の入れ物とする素朴な描像を否定する。実際、宇宙の膨張は銀河集団間の間隔の拡大として観測される。時空はモノと独立に存在するものではないし、モノは時空と切れて存在することができない。

古くから「存在論」は、人間の哲学的な思索の根本問題であった。R. デカルトは、精神現象と異なるモノの特徴として「延長」を考えた。後のI. カントは、『純粋理性批判』のはじめで空間と時間を論じ、空間と時間を、対象に付属するものではなく人間の認識にとって先験的な形式とした。そこでは、空間でのモノの長さや広がり考察され、モノが時空に存在するあり方が問われている。しかし、その意味や価値の形而上学的考察を控えれば、時空の問題は物理学のテーマであったのだ。カントの認識論は、ニュートン力学で確立した空間と時間の概念に基礎を置いてい

た。今日の物理学は、時空はモノの存在の仕方としてあり、時空と物質が一体となった出来事として世界を見る。その宇宙の歴史の中で、生物は時空の条件下で進化し、人間の認識能力は出来事の事項である時空を捉えることができるようになったのである。時空というモノの存在規定が人間の認識形式としての時間と空間につながっているのである。

このように、出来事を理解するのに時空は根本的なものである。第3章でニュートン力学の時間と空間のとらえ方を見た後、第8章で時空そのものを問題とする相対性理論が明らかにした時間と空間の一体性を見るだろう。めくるめく時空という概念に至るわけだが、ここまでモノと言ってきた対象も手に取ることのできる素朴な物とは限らないのである。第7章の電磁波に至れば、時空のある座標でのコトと言えるものがモノとして現象することを知らう。しかし、われわれは確かに観察できるモノを対象にしているのである。あなたは目覚めていて、意味のない思念をめぐらせているのではない。

1.2 出来事の秩序

抽象的な思索を終え、起き上がって行動を開始しよう。ヒトは、モノに働きかけてはじめて出来事を引き起こすことができるのだから。

数量を測る

人間の営みにおいて次の行動に踏み出すためには、あらゆる種類のモノを測り比較することが決定的に重要である。まず「延長」の長さを測って見よう。掌を広げて尺取虫のようにして机の端から端までの長さを測定する。しかし、あなたとわたしの掌の

大きさが違えば言い合いになる。そこで協定して手近かにある棒の何倍あるか測ろう。同じ棒で他の物の長さも測ればよからう。この協定に他の人も参加すれば万事がうまくいく。こうして、1尺という長さの単位が決定できる。ここにはモノの数量を測る原則がある。測定の道具と測定法を明示して単位を決めるのである。

しかし、時の経つのを1尺の棒の何倍かというようにしては測れない。時間を長さとは比べることはしない。これを、時間と長さは異なる次元を持つという。異なる次元の量には異なる単位を決めなければいけない。棒は陽の当たる場所に鉛直に立ててその影の方向を測ればよろしい。そうすれば、昼間を何等分かにして時間というものを言うことができる。黄金のように人が争って求めるものの量を測るには、また別の単位を決めるのがよろしい。やはり基準のモノを決めて、「てんびん」のようなもので比較して測るのである。ところが、はかりのような道具を発明したときには、第3章で出てくる力のモーメントのつりあいの理解が伴っていたのである。出来事の意味と技術の進歩がさまざまなモノに関する数量を測れるようにしたのであり、単位の決め方もその進展に応じて変化してきた。今日では、長さや時間の単位は高度に技術的な方法で決定され、その測定精度は $1/10^9$ にもなる。

人間は有史以来、長さや時間と質量(重さ)の単位を決めて生活を営んできた。王権は単位を決定し、租税を取り立てるのに用いた。有名な秦の始皇帝の度量衡の制定は、戦国の世を平定した統一国家による、征服した諸国への1つの単位系の強制である。今日われわれが使っている m, kg, s (秒) は、国際単位系という協定へ参加して、国内法令で定められたものだ。現代生活はこのほかに電流の A (アンペア) や温度 K (ケルビン) といった基

本単位を必要としており、物質の微視的分析までできるようになったので、分子量 mol (モル) というものまで基本単位としてゐる。単位は約束事だが、モノの数量を測って自然に対処しようとする人間の営みになくてはならないものである。

測定と誤差

単位は日々の生活と無縁ではない。江戸時代、一升は京都と江戸の枡座の焼印を押したものが公定単位であった。ところが、枡を木材で作るとき、どんなに熟練した職人でも完全に同一の枡を作ることはできない。実際に二三十年経過するうちに京都と江戸の1升の違いがはっきり分かるほどになった。そもそも枡の縦・横・高さの測定自体が誤差を含むのである。

目の前にある物の長さや重さはある数値をもっているはずである。それを真値と呼ぼう。しかし、誰もその真値がいくらであるかを言うことができない。測定して得られる値と真値の間にはくい違いがあると考えられる。この差を誤差という。どんなに精密な測定器具を製作してもそれには限度がある。実際に何度も測定を繰り返すと必ずちらばりを持った数値が得られる。個々の誤差の値がばらつくのである。誤差の原因はいろいろ考えられその検討を必要とするが、通常、多数回の測定でのばらつきぐあいを統計的に処理して誤差を推定し、真値が測定平均値を挟んでどのくらいの範囲におさまるかを推定して誤差を示す。

こうして、測定装置には精度というものがあり、測定値には誤差がつきものである。物理の教科書に光の真空中を進む速度が 2.99792458×10^8 m/s と書かれている。この9桁の数字は最高度の技術によって得られるのである。この数値の最後の桁の数は誤差を含み、それ以上精確には測定されていないのである。測定値の桁数を有効数字という。例えば、円の面積を精度よく求めよう

として半径を4桁以上測定したのであれば、 π の値を3.14としたのでは不十分で、測定精度に応じて3.1415...と桁数を上げて、有効数字を増やさなければならない。測定の精度を上げることは意味のないことではない。水星の近日点移動の微妙なずれは、一般相対性理論の実験的証拠となった。

数・量の秩序

ガリバーがリリパット人の国に漂着したとき、ガリバーとリリパット人はお互いの体を比較することになった。リリパット人はガリバーが自分たちの身長に12倍あることを知って、何人分の食事を提供しただろうか。その数は $12 \times 12 \times 12$ という大きなものである。体つきが相似であるから、体積(縦 \times 横 \times 高さ)は 12^3 倍であり、体重は体積に比例していると考えたのだ。ここでは、モノが3次元空間に立体的に存在するという基本的な規定性が働いている。解剖学的・生理学的な身体構造の比例関係も仮定されている。本当は、リリパット人がその国で適応的に生きていたのならガリバーの足の骨は体重を支えるのに苦労しなかったのか、象のように大きな耳を持たないで体温調節はうまくいったのだろうかという疑問が残る。骨や関節はある面積で体重を支える。生物が身長を x 倍にすると、体重が x^3 で大きくなるのに、支える面は x^2 でしか大きくならない。だから生物は、地球の重力や骨の強度に制約されて、大きくなるにも限界があるだろう。この話を持ち出したのは、体積が長さの3乗で面積が長さの2乗であることが、モノゴトの成り行きを律する法則の前提の規定性としてあることを強調するためであった。

モノの大きさや量が出来事の展開を規定していることをあらためて知らされる。大きさや量は数で表現される。ヒトはモノゴトを参照しながら、数学を発展させてきた。その数学によれば、

数には論理的な規則・秩序がある。だから、モノの大きさや量を数で表現すれば、数自身の秩序に従うことが必然となる。つまり、モノゴトを自然言語で語る範囲を超えて数によって語ろうとすれば、数学的論理に従う記述となる。こうして、自然の出来事は数理的に表現されることになる。G. ガリレイの言うように、「物理法則は数学の言葉で書かれている」。

自然が数の秩序に従って生起する印象深い事例を見よう。あなたが木の下に立っているとしよう。樹上を見上げるとどの葉も光を受けるように空間をまんべんなく埋めていることに気づく。実は一本の枝のまわりに出ている葉の並び方に規則があるのだ。ある種の草木は枝をらせん状にめぐるように葉を出し、別の植物はまた別の規則で…。あなたが花を愛でる人なら、花卉の枚数が3や5や13のものがあり、ひまわりの種の並び方が幾何学的で、らせん状に21個、34個、55個といった数になっていることを見出すだろう。13世紀の初めにフィボナッチという人が、1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55 ... という数列を紹介した。この数列は、 $a_1 = 1$, $a_2 = 1$ で始まり、第 n 項はその前の2つの項 a_{n-1} と a_{n-2} の和で次のように与えられている。 $a_n = a_{n-1} + a_{n-2}$ 。この単純な数列の秩序が生物の成長で出現するのである。生化学的なしくみがどんなものにせよ、細胞が分裂して数を増やすときフィボナッチ数列の規則に則っていることを明示している。

パターン・対称性

自然界にはさまざまなパターンがあふれていて、ヒトはそれに気づく能力をもっている。そもそも、モノとコトの出来事はパターンを成して出現するのである。ヒトにとってその出来事のパターンは情報である。あまりにのっぴらばーなものや乱雑なものを見ても、秩序あるものとの違いを知覚するだけで、それ以上

の情報を得ることができない。現代哲学の好みの言葉を使えば、ヒトはモノゴトにある差異を認めて、その差異のパターンやリズムなどから知識を組立ていく。先ほどの花卉の枚数やひまわりの種のらせんなどは、まず幾何学的な形として直観的に知覚する。数や量の規則・秩序はむしろ後から「計算」によってついてくるのだ。流体の現象では、実際に視覚的なパターンと数理的な記述が対応する。あるいは、電磁気学で計算して得た磁場を磁力線で図示するとパターンが現われる。視覚だけでなく、音のつくり出すパターンやリズムを聴き分けて感動することもできる。こちらはずっと計算から遠い。ヒトのもつ美の感覚は、こういう能力に根ざしているだろう。

こうして、物理的な出来事を数学の言葉で理解するとき、その理解にある種のパターンが伴うことになる。物理学に親しむと、このパターン認識は抽象的なものに進み、数理的な表現そのものをもパターンとして考えるようになる。異なる現象についての物理法則が、同じ形式の数学的な表現をもっていたり、同型な変換に対して共通な応じ方をするというのも、特徴あるパターンとして認識される。物理学者の注目するものに対称性ということがある。物理の対象には、鏡像対称や回転対称などさまざまな対称性をもつものがある。その見方を数学的に表現した物理法則に適用して、例えば物理法則がある変数について回転させても不変であるときその法則は回転対称性をもつと考えるのである。さらに、その対称性が破れて質的に異なる相が出現するということが起きる。人間が到達した普遍的な物理法則はたいてい数式が単純で、しばしばこの種の対称性をもっている。そういうとき、物理学者は美しいと表現する。あるいは、単純さや対称性に対する美の感覚は一つの発見法として機能する。

物理法則

われわれは、モノゴトがそのつどでたために起こるのではなく、同じ出来事は同じように生起することを経験上知っている。この経験を整理して、物理的なモノゴトは物理法則に則って生起する、と認識するのである。そして、その法則を数量的に把握しようとするれば、数理的に表現することになる。あなたが観念論的思考に親しむ人なら、「自然の特性というのは、人間と無関係に自然の中に存在するのではなく、人間の創造の産物である」という現代のソフィストの言葉にひかれるかもしれない。しかしあなたは、今科学が到達している物理法則に逆らって身の危険を冒す行為を決してしないだろう。「自然の特性は、...人間の創造の産物である」というような短絡的な物言いは正しくない。

物理量の間の関係が数学的に表現されることを、誰でもその名を知っているニュートンの運動方程式で見ておこう。子供の乗った三輪車を別の子供が押してもあまり加速できないが、大きな力を加えることのできる大人のあなたが押せば大きく加速できる。加速の度合、すなわち加速度は力の大きさに比例するだろう。しかし、三輪車を簡単に加速できるあなたも乗用車を押して加速することはむづかしい。それは三輪車よりも乗用車の質量が大きくて重いからだ。加速度はモノの質量に反比例するようだ。そこであなたは、その関係を

$$\text{加速度} = \text{力} / \text{質量}. \quad (1.1)$$

と表わしてみる。そして、さまざまな力学現象でこの関係を試験し、さらに未知の運動まで予言していつも成功するなら、あなたは(1.1)の関係が真理だと確信するだろう。そのようにして、真理と認められる物理量間の関係が、法則と呼ばれるようになる。

ところで、数学の大きな力は数量を記号で表現することにも負っている。そこで上の関係式を記号で表現しよう。このとき残念なことに漢字を記号とするのは不便なので、アルファベットを使うヨーロッパ流に従うと、加速度を acceleration の頭文字 a と、力と質量もそれぞれ force と mass の頭文字 F と m で表わすことになる。それで、運動方程式は物理の教科書で

$$a = F/m \quad (ma = F). \quad (1.2)$$

と書かれることになる。物理の本に出る記号は、出てくる物理量は何であるかを示そうとしているのだ。自然科学で法則が数式で書かれているとき、その式をいつも日本語の文章で説明できることは大事なことである。

この例のように、物理的な出来事では、一般にあるモノの量(時間なども含めて)と別のモノの量の間に一定の関係があって、数式に表現できる。物理現象の諸規則は物理量間の関係式として表現されるのである。物理的な規則の中でも普遍的な真理と認められるものを特に法則と呼び、抽象的な性格を持つものを原理と呼んだりする。自然科学で実験をするのは、2つもしくはそれ以上の物理量の間にどんな関係があるか見出そうとしているのだ。普遍的な物理法則はいつどこでも同じものであるはずだ。別の人が同じ条件で実験をすれば、測定誤差を除いて同じ結果にいたる。物理学はその法則を見出そうとする人間の営みである。

ここで注意が必要なことは、物理法則は経験則としての側面をもつということだ。進歩する実験がいつかある法則の不備を衝くかもしれない。かつてすべての運動について成り立つと考えられたニュートンの運動法則が、相対性理論と量子力学の発見によって、適用限界を持つことが今では明らかになっている。

1.3 物理学の方法

近代自然科学の先駆者であるガリレイは、少年のころ教会で、シャンデリアが一定の時間周期で往復するのを観察して振り子の等時性を発見した。このエピソードは、物理学が実験的な方法によって探究されるべきものだということをよく表わしている。現象が起きる条件の設定や測定器具と測定法の確定によって、再現性のあるやり方で現象を観察測定するのである。それは単位の決め方においてすでに前提されていたことだ。ガリレイは慣性の法則を発見するときに思考実験を行ない、傾斜面で速度を得た物体は床を磨けば磨くほど遠くまで達し、もし床が運動を妨げないなら速度を保ってどこまでもまっすぐに進むだろうという結論に到達した。そこでは数学的な考察も行なわれ、数理に見合った理論的な考察が進められた。実験条件もさまざまに変えて現象に現われる数量の変化が測定された。

ここには、それ以後近代科学が持つことになる方法の基本的特徴が見られる。近代科学がアジアではなくヨーロッパで興ったとき、経済的・社会的な要因だけではなく、実験と理論を組み合わせる普遍的な法則を探索して数理的に表現するというその方法にも負っていたのである。以来、科学の方法は意識的に自然現象に適用されてきた。現象の観察は、単に自然状態の観察にとどまらず、人間の自然への能動的な働きかけとしてさまざまに条件を変えるなどして行なわれる。そこでは、条件の単純化によって規則性を見出すことがまず行なわれ、その後には他の条件の加わった複雑な現象を次第に解明することが課題となる。科学の方法の論理的な特徴として、帰納的な方法と演繹的な方法が先になり後になり入れ替わりながら、物理学が発展した歴史を認めることができる。

物理学は自然を思弁的に知ろうとしたそれ以前の認識を超えて、もろもろのモノの間の関係の認識や、さらにモノゴトの多層的な認識によって、自然を具体的で構造的に把握してその知識を深めてきた。相対性理論に至ってカントによって認識の形式とされた時間空間が再び物理学の対象となり、量子力学に至って現象の観測が現象に影響を与えることまで明らかになり、認識論を修正するまでに発展した。続く章でこれらのことを見るだろう。具体的な対象を実践的に学習することによってだけ物理学の方法を身につけることができる。

人間の出来事を性急に变えたいと思う人は忘れがちであるけれども、現実の世界を思念だけで変えることはできない。ヒトはモノによってコトを起こすのである。そのモノゴトの基礎には物理法則がある。その世界はたいへん複雑で、一つや二つの割り切った文章で言い尽くすことはできない。われわれは、階層的で構造的な人間の科学的認識を手本として、息長くモノゴトに対処するよりほかに方法を持たない。