

科学と教科書

有安和人

序

本稿の目的は、科学を教科書から考察することにある。科学の教科書は、科学者を育てるために編成されている。したがって、教科書は科学の姿を如実に表しているといえる。

科学の教科書については、トマス・クーンの素晴らしい論考がある（『科学革命の構造』『本質的緊張』）。本稿は、クーンの論考を手掛かりに、教科書から科学を考察し、次のことを論ずる。(1)教科書は、法則・理論(法則を体系化したもの)の用い方を徹底的に教える。(2)科学という行為を支えているのは類比能力である¹。(3)学習者は、教科書によって類比能力を体得する²。(4)類比能力には初級(同質的類似性を対象にする類比)と上級(異質的類似性を対象にする類比)の二種類がある。科学者には両方の類比能力が必要である。(5)教科書が教えるのは初級の類比能力であり、上級の類比能力については教えない。(6)新しい理論形成には、「上級の類比能力」と「物語る能力」とが必要である。(7)これらの能力は文学に属し、科学者には文学能力が必要である。

なお、科学といっても多種多様であり、例えば物理学と生物学とではかなり異なる。本稿では物理学を主な考察対象とする。

1 教科書の考察

まず、教科書の考察から始めよう。科学の教科書は、他の学問から見ると、特異な性格を持っている。ここでは、①非歴史性、②内容の単一性、③演習問題の存在という三つの側面を考察する。

¹ 類比 (analogy) とは、二つの対象の要素間に類似性を見出す、或は両者に構造的同一性を見出すことに基づく推論を意味する。

² 実験の場合、教科書と実技とによって類比能力を体得することになる。本稿では、実験については扱わない。しかし、実験にも「類比能力」と「物語る能力」とは必要であり、本稿の論点は基本的に実験にも該当すると考えている。その具体例であり論拠は、思考実験である。現実実験の考案には思考実験が行われ、思考実験の考案には類比と物語が必要となる。

1.1 非歴史性

科学の教科書には歴史がない。例えば、力学の教科書はニュートン力学から出発する。ニュートン以前、即ち 16 世紀以前にも力学は存在していた。例えば、アリストテレスは、投射体の運動について論じていた。このアリストテレスの理論に対し、14 世紀にビュリダンを中心とするパリ学派の人々は、アリストテレスの理論的難点を指摘し、「インペトウス」理論を展開した (伊東, 270 頁)。このインペトウス理論は、ガリレオらの近代科学への途を準備するものであった。今日の力学の教科書において、ガリレオの名前が言及されることがあっても、アリストテレスや中世の学者が取り上げられることはまずない。

ではなぜ、科学の教科書には歴史がないのか。理由は二つである。(1)科学には正誤がある(あると考えられている)。(2)概念や法則の理解は、それらの用法を習得することとみなされる。順番に説明しよう。

まず(1)である。教科書は正しいとされる理論の集合体であって、それ以外の理論は排除される。例えば、現代の物理学教科書がニュートン力学から始めるのは、ニュートン力学が正しく、アリストテレスやビュリダンの運動論は誤りとみなすからである³。

³ 数学を除く科学は経験科学であるため、仮説は実験的に確証されても、真であると証明されるわけではない。反証されれば、偽となって消える。反証されていない複数の仮説が競合する場合も発生するが、おおむね一つの仮説に意見が収束してゆく。いわば競合する仮説が淘汰され、一つの仮説が生き残って定説となる。一つの仮説もしくは理論に収束する原因は、いくつか考えられるが、二つだけ挙げておく。第一に、科学者の個人差はおおむね正規分布に従い、大勢としては一つの意見にまとまるといえる (内井 (233-241, 252-266 頁) を参考)。第二に、理論は他の理論と結合し、理論のネット・ワークを構成する。ネット・ワークを構成できない理論は淘汰される。また、結合が増すことで、理論ネット・ワークのより内部へと移動し、定説となる。例えば、人工衛星を用いた位置測定システム GPS は、相対性理論なしでは作ることができない。或いは素粒子物理や宇宙物理は、相対性理論なしでは議論できない。こうして、相対性理論は理論ネット・ワークの内部に位置することになる。ところで、科学理論ネット・ワークは、柔らかいものである。相対性理論と量子論の間には矛盾が存在する。そこで、一部の物理学者は相対性理論に代わる新たな重力理論を検討している (佐藤, 96-102 頁)。また、量子論も、解釈問題など、不完全な部分が残っていると考えれば、この先書き換えられるかもしれない (佐藤, 103-105 頁)。科学理論ネット・ワークが柔らかいことと関連して、科学者自身も柔らかい。科学者には、実在論者も反実在論者もいる。実在論の立場の科学者は、科学の実践においては道具主義(理論を計算や予測のための道具と考える立場)を使い分ける (反実在論者は、一貫して反実在論者でいられる)。相対性理論と量子論の間には矛盾が存在するのであるから、少なくともどちらかの理論に欠陥

次に(2)である。科学においては、「概念や法則の理解とは、それらの用法を理解することである」とみなされる。例えば、ガリレオが発見した落体法則というものがある。自由落下する物体の移動距離は時間の 2 乗に比例するというものである。数式にすれば、

$$s = \frac{1}{2}gt^2 \quad (1.1)$$

となる。落体法則を理解するとは、式 (1.1) が使えるようになることを意味する。ガリレオが何を目的として探求し、どのように発見したかは、問題とならない。

また式 (1.1) において、「 g 」は「重力加速度」を表す。もし学習者が平面上での 2 物体の衝突現象の問題で「 g 」を使用したら、その学習者が「 g は重力加速度を表す」と答えることができたとしても、その学習者は「重力加速度」という概念を理解していないとみなされるだろう。つまり、「概念の理解とは、その用法の理解である」とみなされているのである。

科学の教科書では、諸々の概念や法則が列挙される。学習者にとっては、概念や法則の用法を習得することがすべてであり、必須である。そのため、教科書の各章には必ず演習問題が存在する。演習問題が解けることができれば、学習者は概念や法則を理解したとみなされる。つまり、用法の理解が概念や法則の理解なのである。

1.2 単一性

物理学の教科書は多数刊行されているが、その内容はほぼ同じである。例えば大学 1 年生の教科書の場合、速度と加速度の解説から始まり、運動の第 1~3 法則の説明、そして重力と摩擦力の説明へと続いてゆく。教科書の分厚さによって内容は当然異なる。分厚い教科書であれば、力学の説明の後に、電磁気学、相対性理論、量子力学へと続いてゆく。このような形式の教科書が一般的になったのは、クーンによれば 19 世紀以降であるという (1962, p.10 ; 邦訳 12 頁)。それまでは、権威とされる学者の著作が教科書であった。例えば 13~14 世紀の大学ならば、プトレマイオスの『アルマゲスト』、アリストテレスの『自然学』『天体論』『気象学』などが教科書として用いられた。18 世紀であれば、ニュートンの『プリンキピア』『光学』、ラヴワジエの『化学』などである。

がある。しかし、有用であるから科学者は両方使う。或いは、日常生活の現象を解析するにはニュートン力学などの非相対性理論で十分なので、有用な場合は非相対性理論を用いる (泉 (2017) を参考)。科学者が柔軟かいことも、一つの理論に収束する原因であるように思われる。

現代科学の教科書において内容がほぼ同じであるとは、唯一の正しい理論が存在するという事、そしてその理論を学習者が習得すべきであるということの意味する。例えば、哲学・経済学・心理学などの場合、いくつかの学説が解説されるのが一般的である。しかし科学の教科書で語られるのは、それぞれ一つの理論である。例えば、物体の運動について、諸学説など存在しない。運動の 3 法則（慣性の法則、力と加速度に関する基礎方程式、作用反作用の法則）による、一つの説明があるのみである（ただし 17 世紀までは、諸学説が常に存在し、それぞれの学者がそれぞれの自説を展開していた）。

1.3 演習問題の存在

科学の教科書には、各章ごとに必ず演習問題がある。演習問題を解くことは、講義の時間構成においてかなりの部分を占める。演習問題によって学習者は、概念や法則の使い方を体得する。このとき、学習者に要求されるのは「類比能力」である。

教科書における演習問題の重要性、さらには「類比能力」の重要性を明らかにしたのはクーンの功績である。

思うに、科学者集団によって公認された類似性を知覚する能力こそが、問題を解くことによって学生が習得する主要なことである。それは、紙と鉛筆で問題を解く場合も、うまく設計された実験室で問題を解く場合も同じである。(1977, p.308 ; 邦訳(2)398 頁)⁴

科学者になるために必要なのは、この「類比能力」なのである。即ち、既知の模範的問題（例題）と新しい問題との間に類似関係を知覚するという「類比能力」こそが、諸々の概念・法則の適用を可能にするのである。概念・法則を適用するためには、既知の問題と新しい問題との間に類似関係を知覚することが必要である。科学教育において演習問題にかなりの時間を割くのは、この「類比能力」を体得するためである⁵。

⁴ 訳は一部改変している。以下の引用も同様。

⁵ クーンの「パラダイム」という用語は悪名高いが、クーンは「パラダイム」に「模範的解法」という意味を込めていた。即ち、「パラダイム」には広義と狭義との二つの意味があり、広義では「科学者集団に共有されるすべてのもの」、狭義では「模範的解法」の意味であった (1977, pp.294,298 ; 邦訳(2)380, 385 頁)。学習者は、模範的問題において、概念・法則・理論を知得し、演習問題で類比能力を体得する。この類比能力とは、模範的解法という「視点」で世界を観ることであり、類比とは、模範的問題と新しい問

2 教科書が物語ること

以上の教科書考察から導かれる結論は、次の四点である。①科学は、習得すべき事柄が明確に決まっている。だから、教科書の内容は単一的になる。②習得すべき事柄とは、概念・法則・理論の用法である。③その習得を可能にするのは「類比能力」である。科学という行為を支えているのは「類比能力」である。④科学教育は「知得」というより、「体得」を基本とする。順番に説明しよう。

まず①②である。教科書が述べているのは、所定の概念・法則・理論であり、それらの概念・法則・理論を用いて問題を解くこと、或いは概念・法則・理論の用い方である。概念・法則・理論の理解とは、それらの用法を習得することである。

例えば、運動の第 2 法則は次のように定式化される (f は力、 m は質量を表す) ⁶。

$$f = m \frac{d^2s}{dt^2} \quad (2.1)$$

式 (2.1) は、自由落下運動の場合には式 (2.2) となり、バネに付けたおもりの運動 (単振動) の場合には式 (2.3) となる (k はバネ定数、 x はバネの長さの変化)。

$$mg = m \frac{d^2s}{dt^2} \quad (2.2)$$

題との類似性を見つけることである。だからクーンは、「異なるパラダイムでは、科学者は異なる世界で生きている」と述べたのである (1977, p.309n.18; 邦訳 (2) 400 頁; 1962, ch10)。この表現も評判が悪いが、次のように考えれば納得できるだろう。今あなたは図書館で司書の仕事をしているとする。これまで図書はすべて、著者別で分類していたとする。しかし、今日から、出版年度別に分類することになったとする。この時、あなたは同じ図書館で、同じ図書を相手にしているが、「異なる世界を見ている」と表現しても、「見える世界が全く異なる」と表現しても、違和感を覚えないのではないだろうか。ただ私自身は、クーンの「パラダイム思想」には部分的にしか賛成できない。その理由は次の二点である。第一に、16~19 世紀に起こった近代科学誕生以降、「パラダイム転換」と呼べるような、断絶的な転換は起こっていない。現代の教科書においては、確かにコペルニクス以前の科学は語られない。つまり、コペルニクスの頃に近代科学誕生という転換が始まったといえる。しかし、ニュートン力学・相対性理論・量子力学は一つの教科書において列挙される。したがって、19 世紀に近代科学は通常科学という安定期に入り、今もその通常科学は拡大しているといえる。以上が、教科書が物語るパラダイム転換である。第二に、数学に話を限定すると、数学ではパラダイム転換は起こっていない。数学の教科書では、今もユークリッド幾何学が教えられている。つまり、学問としての数学が紀元前 5 世紀頃に誕生し、それが拡大し続けているだけである。なお、クーンに関しては、Hoyningen-Huene (ch3,6) を参考にしている。

⁶ この例は、クーン (1977, p.299; 邦訳(2)388 頁) を参考にしている。

$$-kx = m \frac{d^2s}{dt^2} \quad (2.3)$$

式(2.3)は、天井からバネをつるし、バネの先端のおもりを上下振動させれば、式(2.4)になる。

$$mg - kx = m \frac{d^2s}{dt^2} \quad (2.4)$$

学習者は、各々の問題において、式 (2.1) を (2.2) ~ (2.4) のように適用できなければ、運動の第 2 法則を理解したとはみなされない。つまり、運動の第 2 法則を理解するとは、「それぞれの問題で、それぞれの用法ができること」を意味する。

法則・理論をゲーム規則と読み替えれば、教科書はゲーム規則とゲームの仕方(規則に従った行為の仕方)とを徹底的に教えるものといえる。習得すべき規則は決まっている。学習者は教科書に疑義をさしはさむことはない。そして、学習者は教科書を終えると、プレイヤーとして現場に登場する。

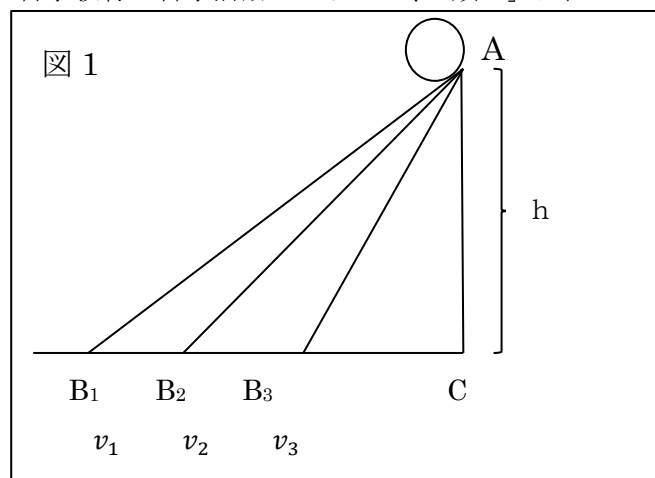
次に③である。科学は、スポーツや言語行為と同様、規則に従った行為である。これらの行為を支えているのは「類比能力」である。スポーツや言語行為は、場面ごとの行為を学習し、その学習した行為を新しい場面に類比で適用する。科学も、例題という「模範的問題」で法則・理論の使い方を学習し、それを新しい問題に類比で適用する。即ち、既知の場面(問題)と新しい場面との間に類似関係を知覚し、新しい場面に規則(法則・理論)を適用する。

最後に④である。「類比能力」は、知得されるものではなく、体得されるものである。そのため科学教育においては、演習問題にかなりの時間が費やされるのである。科学教育は「体得」を基本とする。

以上が、教科書考察から導かれることである。ところで、科学における「類比」の重要性を明らかにしたのはクーンの功績である(しかし、残念ながら、この功績はほとんど気づかれていない)。科学教育と科学活動とにおいて、「類比」は極めて重要な働きをしている。次に、「類比」について考えてみたい。

3 類比

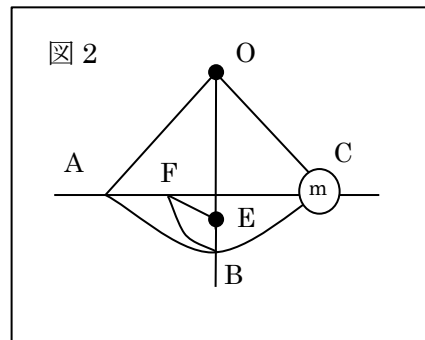
クーンは、新しい法則・理論形成においても、「類比」が大きな役割を果たしていると



主張する。科学の学習者が演習問題において既知問題と未知問題との間に類比を知覚する現象は、科学者が新しい法則・理論を形成する際にもよく観察されるという (1977, p.305; 邦訳(2)395 頁)。例えばガリレオは、斜面を転がり落ちる球の終速は、斜面の傾きに関係なく、その高さに依存することを発見した (『新科学対話』(下)30-31 頁)。

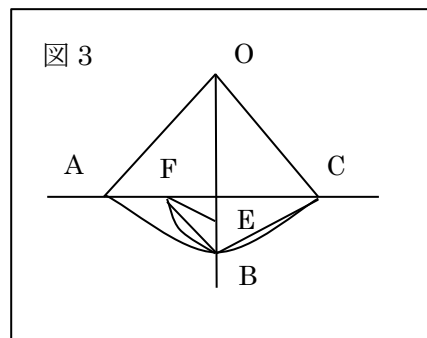
即ち、図 1 にあるように、三つの斜面 AB_1 、 AB_2 、 AB_3 を考え、各々の斜面上を A から球を転がすとする。このとき、球が転がり落ちた時の終速、即ち底面 B_1C 上での球の速度は、すべて同じとなる ($v_1 = v_2 = v_3$)。つまり、終速は斜面の高さ h だけに依存し、斜面の傾きには関係しない。

ガリレオは、この法則を類比によって発見した。即ち、斜面上の落下運動と振り子との類比で発見した。図 2 のように、一端 O を固定した糸の他端に球 m をつけた振り子を、点 C から落下させると、m は点 B を通って、点 A に到達する。次に点 E に釘を打って、m を点 C から落下させると、m は点 B を通過した後、m は弧 BF に沿って運動し、点 F に到達する。点 F の高さは、点 A、C と同じである。ということは、m を点 C から落下させても、点 F から落下させても、点 B での m の速度は同じであることになる。ここから、振り子の最下点での落下速度は、落下する高さのみ依存することが導かれる。



次に、図 3 のように、弧 CB と弧 FB に、弦 CB と弦 FB をそれぞれ引く。図 2 の現象との類比によって、斜面 CB (弦 CB) 上の落下運動でも、斜面 FB (弦 FB) 上の落下運動でも、点 B での速度は同じになる。以上が、ガリレオの類比である。

物体の落下も振り子も、人類は紀元前から見ていたはずである。しかし、これら二つの現象の間に、「類似性」を見て取ったのは、ガリレオが最初であった。そして、この「類比」が、「落体の落下距離は時間の 2 乗に比例する」という「落体法則」の発見につながった⁷。



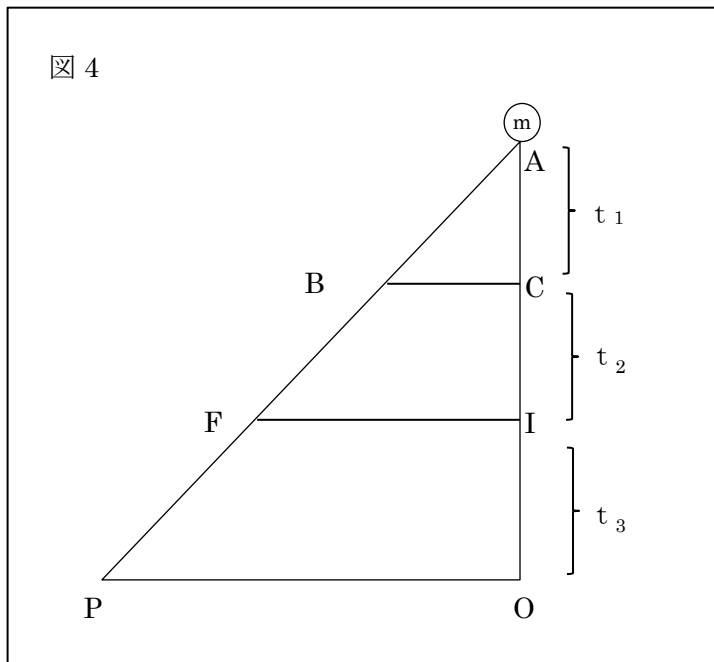
以上は、物理学内部での類比であった。もう一つ、違ったタイプの類比、しかも極めて重要

⁷ 落体法則の発見をめぐるのは、発見が帰納的だったのか演繹的だったのかをめぐる、論争が存在する (佐々木 (上), 244-286 頁)。私の論点は、実験の考案にも法則の導出にも、「類比」が大きな役割を果たしたということである。

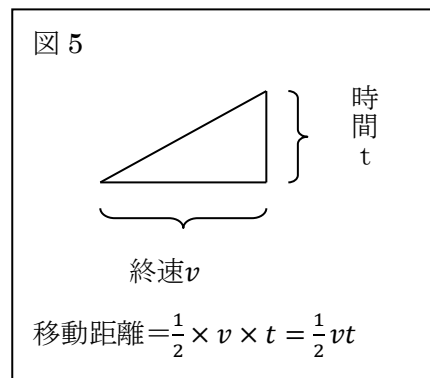
な類比がある。それは数学と物理学との類比である。この事例もガリレオから引き出すことができる（クーンは、このタイプの類比は論じていない）。

ガリレオは『新科学対話』（下）35-41 頁）の中で、数学の図形によって「落体法則」を証明している。この証明を支えているのが、「類比」である。等加速度運動は一様に速度が増加する。この現象と図形の相似との「類似性」にガリレオは気づいた。

図 4 のように、球 m が点 A から O へと自由落下するとする。AC、CI、IO は等しい時間間隔を表すとする ($t_1=t_2=t_3$)。 m が時間 AC 区間を落下するときの C 時点の速度を BC で表し、時間 AI 区間を落下するときの I 時点での速度を FI で表し、同様に O 時点での速度を PO で表すとする。等加速度運動の移動距離は、その終速の半分の速度で等速度運動した場合の移動距離に等しいから、ちょうど図 5 のように、三角形の面積が等加速度運動の移動距離を表すことになる。すると、図 4 の場合、時間 AC 区間の移動距離は三角形 ABC の面積となり、時間 AI 区間の移動距離は三角形 AFI の面積となる。面積比は、辺の 2 乗比になるから、「移動距離は時間の 2 乗に比例する」ことになる。即ち、落体法則が導かれる。



さて、図形の相似と等加速度運動との類比とはこうである。相似な三角形 ABC と三角形 AFI を、動力的に見てほしい。三角形 ABC が連続的に拡大して三角形 AFI になったとする。縦を時間、横を速度と見れば、時間が延びる（増加する）につれ、速度が一様に伸びる（増加する）。移動距離は「速度×時間」であるから、三角形の面積が移動距離を表すことになる。面積比は移動距離の比を表す。面積比は辺の 2 乗比であるから、



「落体の落下距離は時間の 2 乗に比例する」という「落体法則」は簡単に導かれる。

4 類比を支える文学能力

クーンが強調した類比能力とは、パターン認識のようなものである。教科書の演習問題とは、理論・法則の適用練習である。模範的問題（いわゆる例題）で或るパターンを認識することを学習し、演習問題にも同様のパターンを認識することによって、理論・法則を適用する。このようなパターン認識としての類比能力は、教科書で習得される。しかし、ガリレオの事例で考察されるような「新しい理論形成のための類比能力」は、教科書では学ぶことができない。なぜなら、教科書の演習問題は、模範的問題に類似するように人工的に作られたものだからである。そこにあるのは、同質的な類似性である。しかし、新しい理論形成においては、全く異質な類似性が問題となる。

ガリレオの類比は、異質な類似性の知覚を前提にする。もしくは「視点の転換」を前提にする。振り子と落下運動とは異質な現象である。ガリレオ以前の人類が見た振り子とは、「振動」「揺れ」、即ち横の運動である。ガリレオが見た振り子は「落下」である。振り子を「落下」と見ることによってはじめて、振り子と落下運動との類比が可能となる。そこには「視点の転換」がなくてはならない。

これに対し、教科書が教える類比能力とは、同質的な類似性を発見する能力である。いわば「初級の類比能力」である。ガリレオの類比は、「上級の類比」である。視点の転換によって異質な対象間に類似性を見る能力である⁸。

教科書が教えてくれないもの、しかも科学者になくなくてはならないもの、それは比喩のような、「視点の転換」を伴う上級の類比能力である。それは、いわば文学的な類比能力である。

⁸ 二つの対象に「構造の同型性」を洞察する能力ということができるかもしれない。ガリレオが追究したのは「構造」であって、「原因」ではなかった（『新科学対話（下）』24-25頁）。運動という問題に対し、ガリレオが追究したのは「速度と時間」「移動距離と時間」という「関係」「構造」であった。ところで、「構造の同型性」を把握するということ、最も洗練された形で結実させたのは、デデキント以降の現代代数学である。デデキントの目的は数学の基礎づけであった。即ち、数学全体が結局、「写像」という思考の法則に基づくことを明らかにすることであった（『数とは何かそして何であるべきか』45頁）。デデキントのしたことは、諸々の数学の根底にある「共通の構造」を取り出すこと、諸々の数学における類似性を見て取ることであり、類比の追究であったということができるかもしれない。この問題は、稿を改めたい。なお、デデキントについては、Sieg and Schlimm、類比と同型性との関係については、ホリオーク／サガードを参考にしている。

例えば、「時は金なり」という格言がある⁹。この格言はベンジャミン・フランクリンのものとされるが、この格言誕生の千年以上前から、時間も金銭も存在していた。しかし、誰もこの二つに類似性を見て取ることはなかった。フランクリン以前の人々にとって「時間」とは、「うつろうもの」「過ぎ去るもの」であった。フランクリンは「時間」を有効に「使うもの」、消費の対象と見た。「時間」も「お金」も「使うもの」。「使う」という点において、「時間」と「お金」は類似している。この類似性は、「時間」を「使うもの」と見ることによるのみ知覚可能となる。つまり、「時間」に対する「視点の転換」によって、「時間」と「お金」との類比が可能となる¹⁰。

このような「視点の転換」を伴う「類比能力」が、新しい理論形成に必要となる。もちろん、理論形成がすべて「類比」によって行われるわけではない。しかし、非常に多くの事例において、類比能力が大きな役割を果たしている。例えば、「原子核構造」と「惑星運動」との類比、「電気」と「水の流れ」との類比など（野内, 150-152 頁）、全く異質な類比が新しい理論形成を導いている。

以上から、科学者には文学的な類比能力、つまり文学能力が必要である、といえる。さらに、科学者には、もう一つの文学能力も必要である。それは「物語る能力」である。新しい理論形成には、「物語る能力」が必要となる。次に「物語る能力」について、数学の事例「虚数誕生物語」において説明しよう。

5 「虚数」の物語

⁹ この比喩については、野内（8-9 頁）を参照。

¹⁰ 白川静によると、「とき」とは、元々「この」「ここ」のように特定の時を指示する語であったという（『字訓』498 頁）。「とき」は時の流れの中でのふさわしい時期・季節・時代のように、かなり長い時間の意味であったという。つまり、「とき」と人間との関係とは、種まきのように、人間が時の流れに合わせるものであった。「とき」は、人間とは無関係に「うつろう」ものであった。「時は金なり」という場合、「お金」も「とき」も「無駄遣い」可能となる。「お金」も「とき」も「消費するもの」となる。即ち、人間の「こと（出来事）」に、「お金」も「とき」も組み込まれることになる。なお、「時は金なり」が格言となったのは、当時の人々の「時間」に対する「視点」が転換していたからである。或いは、生活そのものが、転換していたからである。産業革命によって、生活そのものが転換していたからである。つまり、産業革命以前と以後では、人々の類似性知覚が転換していたのである。「産業革命以前と以後とでは、人々の住む世界が変わった」というと、言い過ぎであろうか。おそらくクーンの批判者も、「産業革命以前と以後とでは、人々の住む世界が変わった」と表現することには、違和感を覚えないのではないだろうか。

まず、「物語」の定義について述べておきたい。野家は物語を、「時間的に離れた複数の出来事を指示し、それらを〈始め—中間—終わり〉という時間的秩序に沿って筋立てる言語行為」と定義している(野家 2005, 326 頁)。

白川静によると「もの」とは、対義語の「こと」が異にして特殊であるのに対し、特殊を分化する以前の一般であるという(『字訓』723 頁)。古代において「もの」とは、霊物であり、「ものしり」とは霊界の消息に通ずるもの、「ものふ(物部)」とはもと邪霊を払うことを司る職業の意であったという(724 頁)。さらに「かたる(語る)」は、形を与えて構成することだという。そして「かた」は、「形」「語る」「騙る」と同根で、無いことを有るように仮構して、こしらえ作ることをいう(191 頁)。

白川の「もの」「語る」「かた」の説明からすると、「物語」とは「不定のものに形を仮構する」ことになる。また、白川の語源説明からうかがえるのは、古代において、霊物のような理解不可能な「もの」の理解には「物語」が結合していたということである。

私は、野家の定義と白川の説明とを総合して、次のように「物語」を定義したい。「物語」とは、「不定もしくは理解不可能なものに形を与えて筋立てること」である。

では次に、虚数の誕生物語に話を進めよう。虚数概念は方程式の解法において生まれた(「虚数(imaginary number)」という用語はデカルトが導入する)。カルダーノ(1501-1576)は、3次方程式「 $x^3 + px + q = 0$ 」の解を、

$$x = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}}$$

と定式化した。これを「 $x^3 - 15x - 4 = 0$ 」に適用すると、「 $x = \sqrt[3]{2 + \sqrt{-121}} +$

$\sqrt[3]{2 - \sqrt{-121}}$ 」となり、虚数が現れる。しかし、カルダーノは虚数の問題を追求しなかった。

ところで、16世紀のヨーロッパにおいては、負数はまだ数として認められていなかった。ほとんどの数学者は、方程式の解に負数を認めていなかった(カツ：402 頁)。負数を認めなければ、「 $x^3 - 15x - 4 = 0$ 」の解は存在しない。

ここで「遊び」である。「 $x = \sqrt[3]{2 + \sqrt{-121}} + \sqrt[3]{2 - \sqrt{-121}}$ 」を解としたら、どうなるだろう。数として存在しない、不定の「もの」、理解不可能な「もの」に「 $\sqrt{-121}$ 」という形を与える。そして、そこから筋立てるのである。存在しないものを有るように虚構して、こしらえ作るのである。カルダーノにおいて未完成であった物語を

筋立てたのは、ボンベリ (1526-1573 頃) である。ボンベリは、虚数の問題を追求

し、「 $(2 \pm \sqrt{-1})^3 = 2 \pm \sqrt{-121}$ 」より、「 $\sqrt[3]{2 + \sqrt{-121}} + \sqrt[3]{2 - \sqrt{-121}} = 2 \pm \sqrt{-1}$ 」となること、即ち「 $x^3 - 15x - 4 = 0$ 」の解が、「 $2 \pm \sqrt{-1}$ 」となることを導き、二つの解の和が、「 $(2 + \sqrt{-1}) + (2 - \sqrt{-1}) = 4$ 」となり、「 $x^3 - 15x - 4 = 0$ 」の実数解「 $x=4$ 」となることを発見した¹¹。

虚数は、ガウスによって「複素数」として再定義される。即ち、「 $a+bi$ 」の形で表わされる数を、ガウスは「複素数」と定義した。複素数は、微積分と結合し、複素解析となる。そして複素解析は、微分方程式を解くための道具として、物理学にとって不可欠のものとなる (小野寺, 2-3 頁)。

以上の「虚数誕生物語」をまとめよう。16 世紀において、ほとんどの数学者は負数を数として認めていなかった。負数を認めなければ、「 $x^3 - 15x - 4 = 0$ 」という方程式に解は存在しない。カルダーノやボンベリは、「遊び」から、無い「もの」を有るように仮構して、その無い「もの」に「 $\sqrt{-121}$ 」という形 (記号) を与えた。そして数式を筋立て、様々な発見を導いた¹²。後世の数学者は、ボンベリの物語を語り継ぎ、さらに物語をつくった¹³。虚数の物語は、様々な理論と結合し、やがて複素数の理論となった。複素数の理論は微積分と結合し、複素解析という理論となった。また、複素数は物理学と結合し、間接的に実験・観察によって確証さ

¹¹ カルダーノとボンベリについては示野 (47-49 頁)、ボイヤー ((3), 28-29 頁) を参考にしている。虚数記号は最初、「 $\sqrt{-1}$ 」のように、負数と根号の合成によって表記された。しかし、この表記だと、 $i \times 2i = -2$ が、 $\sqrt{-1} \times \sqrt{-4} = \sqrt{(-1) \times (-4)} = \sqrt{4} = 2$ となってしまうため、「 i 」という記号が導入された。

¹² カルダーノは、無理数や負数を「つくりものの数 (numeri ficti)」と呼び、虚数を「詭弁的である」と称していた (ボイヤー(3), 28-29 頁)。ボンベリも虚数を「詭弁的」とみなしていた (28 頁)。したがって、カルダーノにとってもボンベリにとっても、虚数の探求は「物語」であったといえる。

¹³ 科学において物語が語り継がれる、或いは新しい理論候補が追求される原因は様々である。しかし、その中でも重要な原因は「多産性 (fruitfulness)」である (クーンも、この多産性を重視している (1977, p.322 ; 邦訳(2)417 頁))。次のライプニッツの言葉は、まさにこのことを物語っている。「無限大の直線や無限小の線分は、形而上学的観点から厳密に言って認められないし、実在するものと認められないと主張されるかもしれない。しかし、これらは、推論を短縮する理念的概念として確かに用いることができる。それは例えば、 $\sqrt{-1}$ や $\sqrt{-2}$ といった、通常代数学における想像上の根 (虚数) と同様である。」(「Varignon への手紙 (1702)」; (Leibniz, p.543)) ライプニッツはここで、微積分の正当化を、虚数と同様、「多産性」によって行っている。微積分は虚数と同様、誕生当時から理論的基礎を欠いた状態で発達した。それでも発達した理由は、「多産性」である。様々な問題が解けるといいう「多産性」に数学者は魅了され、微積分・虚数が探求され、物語が語り継がれたのである。

れた。複素数は、様々な数学理論と結合し、また物理学理論とも結合し、その過程で理論体系の内部に移行し、定説（理論）となった¹⁴。

以上の「虚数物語」から導かれる結論は次である。第一に、新しい理論は、時に「遊び」から生まれる。第二に、理論形成には、見知らぬ「もの」、不定の「もの」に形を与え、筋立てることが必要になる。つまり、「物語る能力」が必要である¹⁵。第三に、新しい物語は、語り継がれることで発達した（物語の垂直方向への発達）。第四に、新しい物語は既存の理論と結合し（物語の水平方向への発達）、間接的に確証されることで、理論体系内部へと移行し、やがて定説（理論）という身分を獲得した。

6 はじめに物語ありき

これまでの考察からわかったことは、「新しい理論をつくることにおいて、物語る能力は大きな役割を果たしている」ことだった。この結論から、さらに次の二点が導かれる。第一に、科学者教育に文学教育は必要である。即ち、新しい理論をつくるためには、物語る能力としての文学の能力が必要である。第二に、思考と物語とは緊密に関係している。ここでは、第二の点を考えてみたい。以下では、ノーベル経済学賞を受賞したカーネマン（Kahneman）の論考をもとに、「人間の思考には「物語思考」とも呼ぶべき思考様式がある」という主張を展開してみたい。

カーネマンは、思考には早い思考と遅い思考の二つの様式があるという

（Kahneman, pp.19-30）。前者はシステム 1、後者はシステム 2 と名づけられる¹⁶。システム 1 は、自動的に素早く作動し、ほとんど注意を伴わない。システム 2 は注意を伴い、複雑な計算を含み、意識的な推論に相当する。カーネマンの論点（最近

¹⁴ 虚数の物語は、クワインの全体論を支持している。即ち、(1)科学の主張は全体として確証・反証される。(2)数学は科学理論体系内部に位置し、自然科学に対する証拠は、数学の対象・原理の証拠となる。クワインの全体論に関しては、Resnik を参考にしている。

¹⁵ 理論形成に物語る能力が必要であるという主張に対する、もう一つの証言を引用しよう。「アインシュタインが自分の仕事を特徴づけるために、“発見”よりも“発明”という言葉を好んだのはそのためだ。彼はこう語った。「ここで起こっているのは、ものを作り上げる行為としての、発明なのです」」（アインシュタイン、60 頁）

¹⁶ 用語はスタノヴィッチ（K.E.Stanovich）によるもの。二つのシステムという考え（二重プロセス理論）は、最近の心理学者に広く支持されている。Evans and Frankish を参考。

の心理学の思潮でもある)は、システム 1 がしばしばシステム 2 の先導となること、システム 1 が出力した印象をシステム 2 の思考が出発点とすることにある¹⁷。

カーネマンとトヴァスキー (ほとんどの研究は両者の共同研究であった) は実験の名手であった。その中でも有名な実験に、「リンダ問題」がある。「リンダ問題」とは、次のような「リンダ」という架空の人物の記述を読み、八つの職業分類の中から、リンダがどの分類に最もよく当てはまるかを答えるものである。

リンダは 31 歳で独身。性格は明るく、思ったことをはっきり言う。大学で哲学を学んだ。学生時代は差別と社会正義の問題に深くかかわり、反核運動にも参加した。

(Kahneman, p.156)

リンダの職業の候補は、次の八つである。

- ① リンダは小学校の先生である。
- ② リンダは本屋で働き、ヨガ教室に通っている。
- ③ リンダはフェミニスト運動で活動している。
- ④ リンダは民生委員 (ソーシャル・ワーカー) である。
- ⑤ リンダは女性有権者連盟の一員である。
- ⑥ リンダは銀行窓口係である。
- ⑦ リンダは保険外交販売員である。
- ⑧ リンダは銀行窓口係であり、フェミニスト運動で活動している。

被験者 (大学生) は二つのグループに分けられ、第一グループはリンダが①~⑧に当てはまる順位づけを行い、第二グループはリンダが①~⑧である確率で順位づけを行う。実験結果は、第一グループと第二グループとの間に、ほとんど差がなかった。さらに、第一グループの 85%、第二グループの 89%において、「⑧「窓口係かつフェミニスト」の方が、⑥「窓口係」よりもリンダに適合する (リンダの可能性が高い)」と判断された (Kahneman, p.156)。「A かつ B」の確率は「A である」確率よりも低くなるから、この判断は論理的誤謬である ($P(A) \geq P(A \wedge B)$)。

カーネマンは、この論理的誤謬を「連言の誤謬」と名づけ、その思考過程を次のように説明する。リンダの人柄を説明した記述から被験者は、代表的・典型的な事例を想像し、もっともらしい物語をつくる。その物語に合致した選択肢がより確率が高いと判断する。

¹⁷ 私の以下の議論は、「リンダ問題」という実験結果にのみ依拠し、この「二重プロセス理論」そのものには依拠しない。

カーネマンは、タレブ (N.N.Taleb) の「物語の誤謬」という概念を引用して、次の内容を語っている (Kahneman, p.200)。我々は世界を理解するために物語をつくる。過去につくった物語は我々の世界観を形成し、そこから判断の誤謬が生じる。このような「物語の誤謬」は、我々が世界を理解する試みから不可避免的に生じる。

以上のリンダ問題から次の二点を結論することができる。第一に、人間の思考には、物語をつくって考えるという様式がある。第二に、このような思考様式は、論理的推論よりも、より根源的で原初的である。

世界の中で生きるためには、人間は世界を理解しなければならない。世界を理解する原初的な様式は、「物語」である。出来事と出来事を物語で結合し、理解する。多くの場合は、それらを因果関係で結合する。このような理解の仕方を、私は「物語思考」と呼びたい。即ち、「理解不可能な「もの」、見知らぬ「もの」に形を与えて筋立てること」を「物語思考」と呼ぶことにする。

物語思考は、思考様式として、根源的であり、原初的である。その理由は、野家の次の言葉が与えてくれる。

われわれはすでに物語りの外部について「直接経験 (生きられる経験)」「異他的なるもの」「偶然的なもの」「理解不可能なもの」など様々な言葉を弄して語ってきたからである。しかし、それらはいまだ「出来事」として分節化されておらず、…あくまで物語りの「外部」に属しているのである。(2005, 323 頁)

物語行為は世界制作の行為にほかならない。そしてわれわれは、物語行為による世界制作を通じて、ようやく物語りと世界の外部を「示す」ことができるのである。(324 頁)

物語行為によって世界が理解可能になるなら、物語思考が根源的かつ原初的であることは明らかである。物語思考が根源的かつ原初的であるから、リンダ問題では連言の誤謬という論理的誤謬を犯すのである。

かつてコーンフォードは、『宗教から哲学へ』において、哲学の起源が宗教にあることを明らかにした。コーンフォードは実に興味深いことを語っている。

じっさいそこには、「科学的」と「神秘的」と呼ばれてもよいと思われる二つの伝統がありました。そしてこれらの伝統は、正反対の結論に向かって、だんだん大きく分かれ開いていく線に沿った、二つのはっきり見分けのつく衝動によって引き起こされました。これらの衝動は、私たち自身の思索においてもいぜんとして力をもっている

すが、そのわけは、それらが人間の本性の二つの永遠な要求にぴったり対応し、人間の気質の二つの周知の型を特色づけているというごく単純な理由からにほかなりません。(2 頁)

コーンフォードの言葉は、「思考には「科学的思考」と「神秘的思考」がある」と読み替えることができる。そして、「神秘的思考」を「物語思考」と読み替え、神話から哲学や科学が生まれたとすれば、物語思考がより原初的であるということになる。

7 物語と思考

推論を構成するとは、文と文をつなげてゆくことである。物語も、文と文をつなげてゆくことである。物語の構成には、論理は必要である。物語が論理的構成物であるとは誰も思わないだろうが、部分的に演繹的推論や非演繹的推論が用いられることに誰も異論はないだろう。

物語における文と文との結合には、論理的に正しいものも論理的誤謬も含まれる。つまり、物語における文結合の外延(結合の種類)は、論理的推論における文結合の外延よりも広い。とすると、論理的推論をつくる場合、次のような順序はごく自然であるように思える。即ち、先に物語思考で文を筋立て、そこから非論理的な文結合を削除してゆくと、論理的推論になるという順序である。

もしこの仮説が正しければ、物語思考が先導して、論理的推論が導かれることになる。「考える力」の基礎には「物語る能力」が必要であるということになる。この仮説は、新しい理論の構成に「物語る能力」が大きな役割を果たしていたことと整合する。

8 結語

かつてクーンは、「通常科学はパズル解き (puzzle-solving) である」といった(1962, p.38 ; 邦訳 42 頁)。「通常科学」とは、革命 (理論転換) と革命との間の通常様態の科学の状態である。

通常科学とは、…、パラダイムによって特に重要とされる事実の知識を拡張し、それらの事実とパラダイムの予測との間の一致の度合いを増大させ、パラダイムそのものをより精確にする (articulation) ことである。(1962, p.24 ; 邦訳 27 頁)¹⁸

通常科学の目的には、新しい種類の現象を生じさせることは含まれない。実際、通常科学という枠組み (box) に合致しない現象は、科学者には全く見えない。科学者は通常、新しい理論を発明することを目的としない。(1962, p.24 ; 邦訳 28 頁)

教科書が教える科学とは、まさに「パズル解き」であるといえる。即ち、「重要とされる事実の測定、事実と理論の一致、理論の精確化という三つの部類の問題で、経験的・理論的通常科学の文献はすべて埋まる」(Kuhn,1962, p.34 ; 邦訳 38 頁) という印象を、教科書は与える¹⁹。教科書を学習しなければ、問題を解くことはできない。教科書は、研究対象 (問題) の規準と問題の解き方とを教える。したがって、教科書は必ず習得すべきもの、最初に習得すべきものである。

しかし、教科書だけでは、科学者としては未完成である。教科書は全く新しい問題 (教科書で与えられる問題とは全く異質の問題) との出会い方を教えてくれない。何かわからぬ「もの」を「問題」として捉える、即ち不定の「もの」を物語ることによって分節し、「問い」という「こと」(言) にまで仕立て上げる (形を与える) ことは教えてくれない。そして、新しい「問い」から「答え」を物語る、或いは新しい理論を形成する仕方は教えてくれない。わからぬ「もの」に出会い、「問い」にまで仕立て上げ、「答え」を物語るためには、「視点の転換」と「物語る能力」とが必要である。これらの能力は文学に属する。したがって、科学者には文学能力が必要である。さらに、わからぬ「もの」に出会い、或は困難や苦難に出会い、物語ることによって分節し、「すべきこと」や「答え」を物語ることは、生きる力である。したがって、文学能力は、すべての人間にとって必要である。

このような文学能力の訓練には教科書は存在しない。その訓練方法は、古典的名著とされる思想家の著作と格闘、もしくは対話することである。「読む」とは書き手の視点で世界を見る、考えることである。したがって、古典的名著を読むことで、

¹⁸ ここでの「パラダイム」とは (クーンは説明していないが)、現代物理学でいえば相対性理論や量子論といった、支配的な理論を指示している。

¹⁹ 教科書だけを見れば、科学は「パズル解き」、或は「残骸掃除 (mop-up work)」(Kuhn,1962, p.24 ; 邦訳 27 頁) と思えるかもしれない。しかし、次のハッキングの言葉のように、実際の科学は「パズル解き」ではなく、多様な営みである。「科学的方法とは何か。それは実験的方法なのか。この問いは立て方がまずい。なぜ科学の唯一の方法が存在しなければならないのか。家を建てるのに、またトマト栽培でさえ、たった一つの方法しかない訳ではない。」(ハッキング, 248 頁)

その著者となって世界を見て考え、そして自ら問いを仕立て上げ、自ら物語る。これが文学能力の訓練である。

教科書が存在しないとは、二つの意味でそうである。第一に、一人の著作、一冊を読めば終わりというものではない。何人もの思想家の著作を何冊も読まねばならない。第二に、唯一の考察対象、唯一の探求方法が存在するわけではない。もしそうなら、科学、さらにはすべての思想も、すべて人工知能に置換可能となるだろう。必要なことは、多くの視点移動の追体験と物語る行為の試行である。多くの著作を読み、それぞれの著者となって視点を移動し、世界を見、考え、そして自ら物語る必要がある。したがって、この種の学習には一冊の教科書というもの存在せず、学習は一生続くとはいわないまでも、長期間続くのである。

参考文献

- ポイヤール,C.B. (1983-4) 『数学の歴史 1-5』加賀美鐵雄・浦野由有訳、朝倉書店
- コーンフォード,F.M. (1987) 『宗教から哲学へ —ヨーロッパ的思惟の起源の研究—』
廣川洋一訳、東海大学出版会
- デデキント,R. (2013) 『数とは何かそして何であるべきか』 澁野昌訳、岩波文庫
- アインシュタイン,A. (2011) 『アインシュタイン論文選』(ジョン・スタチュエル編) 青木薫訳、ちくま学芸文庫
- Evans, J.St.B.T. and Frankish, K. ed. (2009) *In two minds : Dual processes and beyond*, Oxford and New York (Oxford U.P.) , 2009
- ガリレオ・ガリレイ (1937,1948) 『新科学対話 上・下』今野武雄・日田節次訳、岩波文庫
- ハッキング,I. (1986) 『表現と介入 —ボルヘスの幻想と新ベーコン主義—』 渡辺博訳、産業図書
- ホリオーク,K.J./サガード,P. (1998) 『アナロジーの力 認知科学の新しい探求』 鈴木宏昭・川原哲雄監訳、新曜社
- Hoyningen-Huene,P. (1993) . *Reconstructing Scientific Revolutions : Thomas S. Kuhn's Philosophy of Science*, tr. A.T.Levine, Chicago and London (University of Chicago Press)
- 伊東俊太郎 (1978) 『近代科学の源流』 中央公論社
- 泉圭介 (2017) 「相対論的力学」『数理科学』 650 号
- Kahneman,D. (2011) . *Thinking, Fast and Slow*. London (Penguin Books)
- カッツ,V.J (2005) 『数学の歴史』 上野建爾・三浦伸夫監訳、共立出版

- Kuhn, T.S. (1962) . *The Structure of Scientific Revolutions*. Chicago and London
(University of Chicago Press) (2012 4th edition) / クーン, T. 『科学革命の構造』
みすず書房(1971)
- Kuhn, T.S. (1977) . *The Essential Tension: Selected Studies in Scientific Tradition
and Change*, ed. L. Krüger, Chicago and London (University of Chicago Press) /
『本質的緊張 1・2』安孫子誠也・佐野正博訳、みすず書房 (1987, 1992)
- Leibniz, G.W.F. (1956) . *Philosophical Papers and Letters*, tr. L.E. Loemker, Dordrecht
and Boston (D. Reidel) (1969 2nd edition)
- 野家啓一 (2005) 『物語の哲学』岩波現代文庫
- 野家啓一 (2015) 『科学哲学への招待』ちくま学芸文庫
- 小野寺嘉孝 (2000) 『なっとくする複素関数』講談社
- Resnik, M.D. (2005) . *Quine and the Web of Belief* in ed. S. Shapiro *The Oxford
Handbook of Philosophy of Mathematics and Logic*. Oxford and New York (Oxford
University Press)
- 佐々木力 (1995) 『科学革命の歴史構造 上・下』講談社学術文庫
- 佐藤勝彦 (2010) 『相対性理論から 100 年でわかったこと』PHP サイエンス・ワールド
新書
- Sieg, W. and Schlimm, D. (2014) . “Dedekind’s abstract concepts: Models and
mappings.” *Philosophia Mathematica* 25, 292-317
- 示野信一 (2012) 『複素数とはなにか』ブルーバックス
- 内井惣七 (1995) 『科学哲学入門 ー科学の方法・科学の目的ー』世界思想社