HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	構成的理想化に基づく科学的理解の解明
Author(s)	高橋, 和孝
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(理学)
Dissertation Number	甲第16088号
Issue Date	2024-09-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k16088
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/93284
Type	doctoral thesis
File Information	Kazutaka_Takahashi.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

博士学位論文

構成的理想化に基づく科学的理解の解明

高橋 和孝

北海道大学大学院理学院
自然史科学専攻

2024 年 9 月

目次

序論.....3

第 1 章　科学的理解とモデリング.....5
1.1 現象を科学的に理解する
1.2 科学的説明から科学的理解への展開
1.3 モデルと理想化

第 2 章　科学的理解の因果理論.....17
2.1 ストレヴァンスの消極的因果理論
2.2 ポトチュニックの積極的因果理論
2.3 因果理論の諸問題

第 3 章　科学的理解の文脈主義.....25
3.1 科学理論のインテリジビリティ
3.2 カリファーの客観主義的理解
3.3 科学的理解に事実性は要求されるか
3.4 文脈主義の課題

第 4 章　モデルと構造主義.....34
4.1 科学理論の統語論的見解
4.2 科学理論の意味論的見解と経験的十全性
4.3 構造主義

第 5 章　解釈された具象化構造としてのモデル.....42
5.1 モデルの解釈と記述
5.2 人工物説
5.3 具象化された構造
5.4 モデルのインテリジビリティ

第 6 章　構成的理想化と科学的理解.....54
6.1 モデル-現象間関係
6.2 モデルによって現象を構成する
6.3 構成的理想化
6.4 科学的理解の相補性

第 7 章　物理学における理解.....63
7.1 物理学における時空描像の転換
7.2 時空論と科学的理解

結論.....69

謝辞.....71

参考文献.....72

序論

本論の目的は、科学における理想化されたモデルの有効性を「理解」や「表象」という概念の捉え直しを通じて明らかにすることである。

17 世紀のいわゆる「科学革命」以降、自然に対する人類の知識は大きく拡大してきた。これを可能にしたのは、コントロールされた環境の下で自然を定量的に評価する実験手法の確立にある。実験によって獲得された知識は、それを演繹的に導出できるような理論体系の下に包摂されることでより確固とした知識になっていく。科学は知識を体系化し、そこから未知の現象を予測し、さらにそのような予測に基づき自然に介入することで新技術の誕生を促してきた。

科学の最も重要な役割の一つは、それが現象に対する理解をもたらしてくれることにある。例えば、太陽の周りを公転する惑星の運動が楕円軌道になるという現象は太陽と惑星の間に働く万有引力によって理解することができる。異なる形質を持つ純系を交雑させたとき、その子世代には一方の形質しか現れないが、孫世代には 1/4 の割合で子世代には現れなかった形質が現れるという現象はメンデルの遺伝法則によって理解することができる。また、ある商品の価格や取引量は消費者の需要曲線と生産者の供給曲線の均衡によって理解することができる。

現象を理解しようとするとき、モデルは重要な役割を果たしている。我々は現実の対象を直接研究することなく、その対象のモデルを研究することによって、現象についての知識を得たり、それを理解したりすることができる。ここで注目すべきなのは、モデルは現象の正確な表象ではなく、意図的に誤らせた表象であるということだ。万有引力によって惑星の楕円軌道を理解する場合、我々は太陽と惑星が共に完全な球体で、質量が一様に分布していることを仮定する。メンデルの遺伝法則は、親から受け継がれる対立形質のうち、どちらか一方の形質だけが現れるということ、すなわち遺伝子の発現に完全な優劣があることを仮定する。商品の価格や取引量は、消費者と生産者が商品について同じ情報を持ち、外部の経済主体から影響を受けないことなどを仮定する。現実にはこのような仮定が成り立たないことは明白である。太陽や惑星の表面には複雑な凹凸があるし、質量も一様ではない。遺伝子に完全な優劣があるケースはむしろ稀である。現実の市場では、消費者と生産者の間に情報格差があることが一般的であるし、政府などの外部からの介入も存在する。このように現実に成り立つこととは異なる仮定を置くことによってモデルを構築するプロセスは理想化と呼ばれる。科学におけるモデルが本質的に偽なる仮定であり、誤った表象であるということは、多くの論者によって強調されている（cf. Potochnik 2017, Mäki 2020, Frigg & Nguyen 2020）。

科学の目的が単に知識の獲得に終始するなら、モデルに基づく現象の理解は説明できない。なぜなら、伝統的な定式化に従って、知識を「正当化された真なる信念」と見なすとすれば、モデルは明らかに真なる仮定ではなく、知識に求められる要件をまったく満たしていないからだ。このような観点から、近年、科学哲学において、科学的探求を世界の真なる知

識の獲得という観点ではなく、現象に対する良い理解の提供という観点から分析する試みが活発になっている。そこで争点の一つとなるのは、理想化が現象を意図的に誤らせた表象であり、偽なる仮定であるとするなら、理想化はいかにして現象の科学的な理解を提供できるのかという問題である。

この問題に答えるために、本論は「理解」と「表象」という 2 つの概念を分析していく。まず、第 1 章では、科学哲学において科学的理解をめぐる議論が現在どのように位置づけられているのかを確認しつつ、理想化が現象の理解にいかにして関連するのかを述べる。第 2 章では、理想化と理解の関係を説明する代表的な見解である「理解の因果理論」を取り上げる。理解の因果理論は理想化と理解を因果性の把握に求める立場であるが、このような見解は科学的理解の実践を適切に捉えることができていないことを指摘する。第 3 章では、科学的理解を科学理論のインテリジビリティという概念によって捉えるアプローチを導入する。この立場は、現象の理解を因果関係の把握に限定せず、理解する主体のスキルや文脈に応じた多様な仕方を許容する見解であり、科学的実践の多くの事例に適合する。しかし、このように多様な理解の仕方を許容することは科学的な理解とそうでない理解をいかにして区別すべきなのかという新たな問題を生じさせる。この問いに答えるためには、理論とモデルの関係、そしてモデルが現象を適切に表象するとは何を意味するのかを明らかにしなければならない。第 4 章では、科学哲学において、理論を言語的対象として捉える見解からモデルを中心に据える見解へと展開していく歴史的な流れを整理しつつ、モデルによる現象の表象を「構造」によって捉えようとする議論を取り上げる。しかし、表象を構造だけによって捉えることは同じ構造を持つモデルの個別化や構造への認識的アクセスがいかにして可能になるのかという問題があることを指摘する。このような問題を解消するために、第 5 章ではモデルを「解釈された構造」によって捉える見解と人工物として捉える見解を統合すべく、モデルを「解釈された具象化構造」として捉えるべきであることを論じる。第 6 章では、モデルによる現象の表象を指示関係の一種として捉える表象理論を棄却し、モデリングは現象を構成することであるという見解を提示する。ここでは、理想化は現象の構成を容易にするインテリジブルなモデルを作る役割を持つということが論じられる。最後に第 7 章では、こうして捉え直された理想化による科学的理解という観点から、相対性理論の登場に端を発する物理学における時空描像の転換の哲学的意味を分析する。

第 1 章　科学的理解とモデリング

科学の目的の一つは現象の理解を達成することである。この章では、科学的説明をめぐる議論を振り返りつつ、科学哲学において科学的理解という概念がどのように位置づけられてきたのかを論じる。そして、モデリング・プロセスの一つとしての理想化が科学的理解の問題といかにして関連するのかを示す。

1.1 現象を科学的に理解する

1992 年、ブラジルのリオデジャネイロで開催された地球サミット（環境と開発に関する国際連合会議）で、21 世紀に向けて持続可能な開発を実現するために各国や国際機関が実施すべき行動指針として「アジェンダ 21」（Agenda 21）が採択された。そこでは、産業革命以降の人類の開発が地球の生態系や気候、人間の福祉に不可逆的な影響を及ぼしていることに警鐘が鳴らされ、「森林破壊や砂漠化、有害物質の管理などのさまざまな問題に対して行動を起こし、持続可能な社会へと変化させていくこと」が目標として掲げられている。アジェンダ 21 はその後の持続可能な開発目標の規範となり、環境問題に対する国際社会の動向に大きな影響を与えている。

アジェンダ 21 は「持続可能な開発のための科学」に求められる要件として、「科学的な理解を強化すること」（Enhancing scientific understanding）という項目を掲げ、その主な目標を次のように説明している。

> 重要な目標の一つは、人間と自然環境システムのつながりについての基本的な理解を増強し、開発オプションが環境に与える影響をより良く理解するために要求される分析的で予測的なツールを改善することである。（United Nations 1992）

ここでは、持続可能な開発が実施可能であるために、我々は各々の開発オプションが地球環境にどのような影響を与えるのかを良く理解していなければならないということが明確に打ち出されている。そして、その「理解」は科学的知見に基づいた「科学的理解」でなければならないとされる。

では、「科学的理解」とは何を意味するのだろうか。この章では、科学哲学においてこれまで科学的理解がどのように論じられてきたのかを概観する。「理解」という語は非常に多様な意味で用いられるので、まずは、科学哲学で「理解」が論じられるときに、どのような対象が念頭に置かれているのかを明確にしておかなければならない。具体的に言えば、次のような種類の「理解」は本論にとって関心のある「理解」の用法ではない。例えば、我々は落ち込んでいる人物を見たときに「私は彼の気持ちが理解できる」と述べることがある。ここでは、「理解」は他者の気持ちに共感するという意味で用いられている。また、「自転車の

乗り方を理解する」のように、道具の使用法や運用の仕方を理解しているという意味でも用いられる。これらの「理解」の概念は心理学や教育学にとっては関心があるかもしれないが、科学哲学が対象にしているものではない。科学哲学の議論で関心が持たれるのは、客観的事象として成立している自然現象や社会現象を対象とするような「理解」である。

「現象」という言葉は、ここでは「第二次世界大戦の勃発」のような個別的事象ではなく、観察可能な個別的事象から一般化された命題を指すものとする。例えば、「水は熱すれば蒸発する」や「供給量が増大すれば物価は下落する」のようなものが理解の対象である。現象とそうでないものの境界はしばしば曖昧である。ケプラーの法則は惑星が太陽を一つの焦点とする楕円軌道を描くことを主張するが、慣習によって、それは経験則であると見なされている。しかし、我々は惑星が楕円軌道を描いている様子を直接見ることはできない。もし直接見られるのであれば、ケプラーの功績は何に帰すことができようか。何が経験的法則で、何が理論的法則であるのかを厳密に切り分けることは本論の課題ではない。我々はしばしこの問題に立ち入らず、慣習的に経験的一般化として見なされる現象を理解の対象だと捉えておきたい。

さて、理解の対象が現象であるとするなら、現象を理解していることと単にそれを知っていることとの間にはどのような違いがあるのだろうか。日本語で認識論を意味する**エピステモロジー**（epistemology）の語源である古代ギリシア語の**エピステーメー**（episteme）は、現代でいう**知識**（knowledge）よりも**理解**（understanding）という概念により近いものであったとされる（Grimm 2021）。プラトンは感覚から得られる知識（ドクサ）を真の知識（エピステーメー）から区別し、完全なエピステーメーを実在の基本要素である善のイデアの把握に求めた（Moss 2020）。また、アリストテレスにとって、エピステーメーを持つことは、単に事物を知っているだけではなく、その原因や説明を把握していることであった（Lear 1988）。古代ギリシアにおいて、エピステーメーを持つためには現象の表面的な知識に留まらない深い理解が求められていたのだ。

エピステーメーはその後ローマ世界に輸出され、ラテン語で**スキエンティア**（scientia）と呼ばれるようになる。この言葉が近代になり、英語の**サイエンス**（science）の語源となった。概念史的に言えば、科学とはその起源からして「知識」よりも「理解」を志向するものであったと言える。しかし、近代以降の自然科学は「理解」よりも「知識」、より具体的には命題的知識に重点が置かれてきた（Pasnau 2017）。科学哲学においても、論理実証主義が分析の対象としたのは、主に「知識」や「説明」であり、「理解」は主体の心理的体験と結び付けられ、哲学的に検討されるに値するものとは見なされなかった。

ところが近年、科学の目的は単に知識の集積にあるのではなく、自然現象の理解を促進することにあるという見解が再び強調されるようになってきている。例えば、現代の科学哲学界を牽引するキャサリン・エルギンは、「我々の偉大な知的業績、とりわけ科学や芸術に関連した業績は、それが知識に向けられてきたというよりもむしろ理解に向けられてきたことを評価することなしには筋が通らない」と主張している（Elgin 1991, 1996）。このような

転回の背景には、知識や理論を言語的対象と見なす論理実証主義的な見解が否定され、より多元的な世界の把握の仕方がありうるという見方が浸透してきたことが関係している。理論を言語的対象と見なす観点では、理論と世界（経験世界）の間に言語的対応関係が成り立たねばならないが、そこには真偽という厳しい対立関係が存在する。理論は真か偽かのどちらかであり、その中間は存在しえない。ここに理解という認識的価値が介入する余地はないであろう。しかし、真なる知識よりも良い理解を志向することが科学の目的であるならば、科学理論を真偽という真理値を持った言語的対象と見なす見解は修正されなければならない。こうした背景から、論理実証主義以降、科学哲学では言語的対象としての理論よりも言語から独立したモデルが科学において中心的な役割を果たしていることが次第に強調されるようになっていく。モデルが本来的に偽なる表象であるとすれば、このような流れは知識よりも理解と親和性を持つように見えるのである。

知識と理解は異なる概念であるとしても、その違いをはっきりと述べることは非常に困難であるように思われる。ヨハネス・ケプラーは彼の師であるティコ・ブラーエが遺した惑星運動の詳細な観測データに基づいて、惑星の軌道が楕円であることを正しく突き止めることができた。彼は惑星の軌道が楕円であるという現象を知ったのである。では、彼は惑星の軌道が楕円であるという現象を理解していたと言えるであろうか。アイザック・ニュートンが万有引力の法則に基づいて、惑星の運動が楕円軌道になることを導くことができたとき、明らかに彼らの認識的状況は異なっている。ニュートンはケプラーよりも惑星の軌道についてより深い理解を持っていたと考えられるだろう。時代が下って、アルバート・アインシュタインは惑星の運動をニュートンとは異なる描像で理解した。彼によると、惑星は太陽から受ける万有引力という遠隔力の作用によって楕円運動するのではなく、太陽が作る重力場によって時空が曲げられ、惑星は曲がった時空を直線運動しているのだという。この直線運動をある座標系から見ると、それは楕円運動しているように見えるのである。現在では、アインシュタインの理論に基づく予測がニュートンのものよりも正確であることが検証されており、一般にアインシュタインの理論が正しいと考えられている。では、このことによってニュートンは惑星の運動を理解していなかったことになるのだろうか。あるいは、もしいつかアインシュタインの理論が反駁されるときが来るとしたら、彼もまた惑星の運動を理解していなかったことになるのだろうか。この問いは、科学的理解を得るときに使用される理論／モデルが世界の正しい記述／表象であることが果たして要求されるのかという問題にかかわっている。本論では第 3 章で、この問題を詳細に論じることになるであろう。

さて、ニュートンとアインシュタインに共通するのは、彼らが共に惑星運動が楕円軌道になるという現象の説明を与えているということである。現象を理解するには単にそれを知っているだけではなく、それが他の現象とどのように関連するかについてのより広範な知識が必要であるというのは多くの論者が認めるところである。現象を科学的に理解するためには、科学的な知識に基づいてその現象を説明することができなければならない。実際、科学哲学では、科学的説明を適切に定式化しようとする試みにおいて、理解という概念がそ

れと密接に関連するものとして論じられてきた経緯がある。そこで次の節では、科学的説明をめぐる論争を振り返りながら、理解という概念がどのように扱われてきたのかを見ていきたい。

1.2 科学的説明から科学的理解への展開

カール・ヘンペルは、現象の科学的な説明は、数学における証明と同じように厳密に特徴づけることができると主張した（Hempel 1965）。科学的説明に対する彼の最初の定式化である**演繹的法則的モデル**（deductive-nomological model）（以下、DN モデル）によると、現象を科学的に説明するとは、普遍法則を含むいくつかの真なる言明からその現象が演繹的に帰結することを示すことである。例えば、惑星の運動が楕円軌道であるという現象は、万有引力の法則という普遍法則と太陽や惑星についての初期条件から演繹的に帰結することを示すことができる。のちにヘンペルは、DN モデルは決定論的な自然法則にしか適用できないという問題があることを認め、統計的法則にも適用可能な**帰納的統計的モデル**（inductive-statistical model）（以下、IS モデル）を提唱した。

彼は良い科学的説明はしばしば良い科学的理解を提供することを認めていた。ただし、科学的説明が厳密な基準を持つ客観的な概念であるのに対して、科学的理解はそれを把握する主体のスキルや文脈に依存するプラグマティックな概念であると考えた。数学の証明の妥当性がそれを把握する主体に理解の感覚を生じさせるかどうかには関係なく成立するのと同じように、科学的説明の良さはそれを把握する主体に現象の理解の感覚を生じさせるかどうかには関係しない。ヘンペルにとって、真正な科学的説明とはそれを把握する主体のスキルや文脈とは独立に成立するのである。

現代の科学哲学者であるカリーム・カリファやヘンク・デ・レクトらは、ヘンペルのこのような客観主義的見解が非常に影響力を持っていたことが、科学的理解に対する哲学的分析の発展を妨げてきたと主張している（Khalifa 2017, de Regt 2017）。ヘンペル以降、科学的説明を特徴づけようとする試みが活発に展開されてきた一方で、それと密接に関連すると見られる科学的理解については長い間ほとんど顧みられることがなかった。「理解」とは説明を把握する主体の心理的状態以外の何ものでもなく、心理学の研究対象としては興味深いかもしれないが、哲学的に分析すべき概念とは見なされなかったのだ。

このような事情で、科学的理解についての分析は長らく停滞してしまうのだが、ここでは、のちの議論にも関連するので、ヘンペル以降の科学的説明をめぐる議論がどのように展開していったのかをもう少し見ていこう。ヘンペルの DN モデルと IS モデルは、直観的には科学的説明とは見なせないような説明をも科学的説明として見なしてしまうという欠点があった。有名な例として、いわゆる旗竿問題を挙げることができる。地面に立てられた旗竿が作る影の長さを説明したいとする。我々は太陽の位置と旗竿の長さについての言明とユークリッド幾何学という普遍法則から、影の長さについての言明が演繹的に帰結すること

を示すことができる。ところが、これと同様にして、我々は影の長さについての言明から旗竿の長さについての言明が演繹的に帰結することを示すこともできる。直観的には、旗竿がある特定の長さを持つということは、それがそのように設計されたためなのであって、それが作る影の長さから当の旗竿の長さを説明するのは論理が倒錯していると考えるだろう。しかし、DN モデルに従うと、旗竿の長さからその影の長さを説明することも、影の長さから旗竿の長さを説明することも共に科学的な説明であると見なされてしまうのだ。別の例として、「避妊薬を服用すると妊娠しにくい」という統計的法則と「男性である太郎は避妊薬を飲んだ」という言明から「男性である太郎は妊娠しにくい」という言明が帰結する。しかし、このことによって太郎が妊娠しないことの科学的な説明が与えられたとは見なされないだろう。太郎が妊娠しないのは、彼が男性であるからなのであって、避妊薬の服用は彼が妊娠するかどうかには因果的なつながりを持たないからだ。

ヘンペルの説明モデルの欠点は、科学的な説明に要求されるように思われる「非対称性」と「関連性」を適切に捉えることができていない点にある。この欠点を克服するために、ウェスリー・サモンは科学的説明の**因果メカニズムモデル**（causal mechanism model）と呼ばれる見解を提唱した（Salmon 1984）。この見解によると、現象を科学的に説明するとはその現象の生起に関わる統計的関連性と因果関係を示すこととして捉えられる。旗竿の例では、旗竿はそれが作る影の長さに因果的に影響を及ぼすが、その逆の関係は成り立たない。また、避妊薬のケースでは、太郎が避妊薬を服用したことと彼が妊娠しなかったことの間には、統計的関連性も因果関係も見出されない。よって、因果メカニズムモデルはヘンペルの説明モデルの反例をクリアしているように見える。サモンによれば、現象を科学的に説明するためにはその現象の因果関係の把握が要求されるのである。

フィリップ・キッチャーは DN モデルの欠点を解消する別のアプローチである**統合モデル**（unification model）を提唱した。彼によると、科学的説明とはできるだけ少数の論証パターンを用いて、できるだけ多数の現象の説明を導き出すことに他ならない。彼は「科学は同じパターンの導出を何度も繰り返しながら、多くの現象の説明を導き出す方法を示すことで、自然に対する我々の理解を進める（Kitcher 1989）」と述べ、そのような統合的な説明が科学的な理解を提供することにも触れている。キッチャーはさらに、「原因」は「理由」から派生すると主張し、科学的説明における因果関係の把握は理由を把握することに由来する副産物に過ぎないとした。科学的説明の統合モデルによると、良い科学的説明とは多様な現象に対してより統合的な論証を与えることにある。統合モデルによれば、影の長さから旗竿の長さを説明するよりも、旗竿の長さから影の長さを説明する方がより統合的である。また、避妊薬の服用から太郎が妊娠しないことを説明するのは統合的ではない。キッチャーの説明モデルは説明の統合性という概念によって、ヘンペルのモデルの反例に対処している。

科学的説明に対する因果メカニズムモデルと統合モデルは互いに相補的な関係にあるのか、それともどちらか一方がもう一方に還元されうるのかという問題は現在でもまだ意見の一致を見ていないが、科学的説明に対してプラグマティックな態度を取ることによって

問題そのものを解消しようとする立場が存在する。バス・ファン・フラーセンは、これまで紹介したヘンペルやサモン、キッチャーらの説明モデルはどれも科学的説明を理論と事実との 2 項関係として捉えることを目指しており、そのような目標設定そのものが誤りなのだと指摘した（van Fraassen 1980）。彼によると、科学的説明とは常に「なぜ」という疑問に対する「答え」なのであり、それが問われる文脈を無視することはできない。すなわち、科学的説明は、理論と事実、そして文脈の 3 項関係として捉えるべきだという。ファン・フラーセンによると、さまざまな相容れない説明モデルが提案される理由は、科学的説明は本来、文脈を含めた 3 項関係として分析されるべき概念であるにも関わらず、理論と事実という 2 者だけに注目してしまうことに起因する。科学的説明を定式化しようとする試みは、さまざまな相容れないモデルが提案されるうちに、次第に文脈主義的な見解が登場するようになっていく。

こうした中で、「説明」そのものよりも、それを通じて主体が達成する「理解」とは何かをめぐる議論が注目されるようになってきた。ヘンペルによれば、科学的な理解とは主体が科学的な説明を把握したときに生じうる心理的状態以外の何ものでもなく、ある科学的説明が良いものであるかどうかは、それを把握する主体の理解の有無とは無関係に成立するものであった。しかし、科学的説明が文脈主義的に捉えられなければならないとするならば、科学的説明の良さは、それを把握する主体の理解とは切り離せない。だとすれば、科学的理解の方がむしろ科学的説明に先立つ概念なのではないだろうか。ポール・ハンフリーズは「理解」が「説明」に先行する概念であるという見解を明確に打ち出している。

> 科学的理解は、科学的説明よりもはるかに豊かな地平を提供するものであり、後者はそれ自体が目的なのではなく、理解のための手段として捉えるのが最善である。（Humphreys 2000）

ハンフリーズにとって、科学の目標は現象の説明を与えることではなく、現象に対する我々の理解を達成することにある。説明はそれが理解に寄与する限りにおいて妥当なものとされるのである。

しかし、説明と理解が密接な関係を持つことを認めつつ、やはり理解は説明に従属する概念であると主張する見解も存在する。例えば、マイケル・ストレヴァンスは科学的説明を因果的モデルによって特徴づける試みの中で、科学的理解とは科学的説明の把握以外の何ものでもないと述べている（Strevens 2008）。彼によると、科学的な理解は、現象の因果的な説明を与えることであり、説明を抜きにした理解はありえない。ストレヴァンスはヘンペルと同様に、理解とはあくまで説明に付随した主観的体験であると考えている。

理解を主体の感覚として捉える限り、それは常にプラグマティックで、単に心理的な問題に過ぎないことになってしまうであろう。デ・レクトは、このような状況を打開するために、科学の文脈に現れる理解の概念を次のように分類することを提案した。

> 科学的説明との関連で使用される「理解」という語には 3 つの異なる意味があり、それらは明確に区別されなければならない。
>
> PU：理解の現象論（phenomenology of understanding）＝ 説明に付随しうる理解の感情
> UT：理論の理解（understanding of a theory）＝ 理論を使用することができるということ
> UP：現象の理解（understanding of a phenomenon）＝ 現象の妥当な説明を持つということ
>
> UP は一般に科学の認識的目的と見なされている。それは伝統的なヘンペルの見解と対立するものではなく、彼が科学的理解と呼んでいるものに相当する。UP は PU を伴いうる。つまり、説明は理解の感覚を生じさせるかもしれないが、必ずしもそうとは限らない。・・・わたしは UP には UT、すなわち説明に使用される理論の（文脈主義的な）理解が必要であると主張する。（de Regt 2017, 23-24）

彼の分類の核心にあるのは、心理的体験としての理解（PU）と説明的な理解（UT に基づく UP）を区別すべきという見解である。理解の心理的体験の研究は、理解の現象論と呼ばれる。理解の現象論とは、どのような条件下で主体に理解の感覚が生じるか、いかにして主体に理解の感覚を生じさせることができるか、というような心理学的研究である。一方で、科学的な理解についての研究は、科学の事例を参照しつつ、科学者の間でどのような理解の基準が成立しているのかを探っていく研究である。

この区別は人間の「推論」についての研究としての論理学と心理学の区別になぞらえることができるであろう。心理学は、例えば、人間はある条件下でどのように推論する傾向があるのかについて研究する。このような心理学的研究は、認知バイアスなど、人間が陥りやすい推論のパターンを明らかにしてきた。論理学の研究は、同じく人間の推論を対象としていながら、これと異なるアプローチを取る。19 世紀後半から急速に発展した記号論理学の出発点は、数学における推論を人間の推論の規範とする考えにあった。数学で用いられる推論の仕方を形式化し、厳密な推論規則を備えた人工言語を研究の対象とするのだ。このような記号論理学の成果は、現代ではコンピュータ科学や通信技術にとって欠かせない存在となっているだけではなく、ゲーデルの不完全性定理をはじめとする多くの哲学的に興味深い発見へと導いた。

デ・レクトの分類でもう一つ重要な点は、理論の理解（UT）と現象の理解（UP）の区別である。デ・レクトは現象を科学的に理解するためには、現象の説明が必要であることを認める。この点で、説明抜きの理解はありえないというヘンペルやストレヴァンスらの見解を受け入れる。しかし、説明に使用される当の理論やモデルが理解不可能であるならば、現象に対する理解は得られない。デ・レクトは、理論の理解はそれを使用する主体のスキルや文

脈に依存するという点ではプラグマティックな見解を保持するのである。すなわち、デ・レクトは現象の科学的な理解は主体に理解の感覚が生じているかどうかには依存しないという点で客観主義的態度を取りつつ、理論の理解は主体のスキルに依存するという点で文脈主義的態度をも保持する。彼は客観主義と文脈主義の中庸的な見解を提示していると言えるだろう。

現在の科学的理解をめぐる議論は、理解の感覚とは明確に区別された**説明的理解**（explanatory understanding）をめぐるものとして捉えることができる。それはすなわち、科学者や科学者集団が科学的な理解を達成する仕方をさまざまな事例に基づいて分析し、その基準やあり方を探っていこうとする研究である。本論では、このような見解に基づき、現象の説明的理解がいかにして達成されるのかを検討していく。

1.3 モデルと理想化

現象の理解が説明を与えることにあるのだとすれば、説明を与える理論やモデルはどのような性質を持っていなければならないのだろうか。モデルはしばしば現象を意図的に誤った仕方で表象するが、それにもかかわらず現象の良い理解を提供している。モデルが現象の説明を与えるために重要な役割を果たしているとすれば、この事実はいかにして成り立つのであろうか。この節では、科学におけるさまざまなモデリング・プロセスのうち特に理想化に焦点を当てて、それが科学的理解の問題とどのように関連するのかを述べる。

科学はモデルを構築することによって多様な現象の理解を促してきた。モデルとはある現象ないしはターゲットを表象するような何らかのオブジェクトであり、現象を直接調べることなくその性質を明らかにしてくれるようなものである。例えば、我々は、東京とロンドンを最短で往復するためには北極圏を通らなければならないことを、そこを実際に飛行することなく、地球儀を調べることによって知ることができる。このとき、地球儀は現実の地球をターゲットとして表象するモデルである。モデルは地球儀のように直接手で触れることができるような具象的なオブジェクトだけからなるのではない。科学においてより重要なのは、数理モデルなど、直接手で触れることができない抽象的なオブジェクトである。ロトカ＝ヴォルテラの捕食者・被食者モデルは、捕食者と被食者の個体数を変数としてその時間発展を決める微分方程式として与えられるが、我々はこの方程式を紙面上で（コンピュータ上でもよいが）解くことによって、フィールドに出ることなく、ある環境における生物種の個体数の変化についての予測を立てることができる。人工衛星を目標の軌道に乗せることができるのも、翌日の天気をまずまずの精度で予測することができるのも、すべて、モデルの存在があってこそ可能となる。現代の文明社会において、モデルは必要不可欠な要素なのだ。

ここで注目すべきは、モデルは、それが具象的であるか、抽象的であるかにかかわらず、現実のターゲットを正確に表象しているわけではないということだ。地球儀と現実の地球

を比較すれば、このことは一目瞭然であろう。両者はまず、大きさにおいて異なるし、形状についても、現実の地球の地表が複雑な凹凸からなっているのに対して、地球儀はほぼ完全な球形であるという点で異なる。現実の地球が多様な物質から構成されているのに対して、地球儀は金属やプラスチックなどの単一の素材からできている。地球儀は現実の地球が持つほとんどの性質を誤って表象している。抽象的なオブジェクトに目を向ければ、このことはより明白である。ニュートンの太陽系モデルやロトカ＝ヴォルテラの捕食者・被食者モデルは、多くの点で現実の対象の性質を無視するか、歪めた形でそれを表象している。実際、科学の実践において、現実のターゲットを完全に正確に表象しているようなモデルは皆無だと言ってよい。現実のターゲットを完全に正確に表象するオブジェクトは、ターゲットそれ自身ということになるであろうが、そのようなものがモデルであると見なされることはないであろう。

モデルを構築するモデリング・プロセスには、**抽象化**（abstraction）、**理想化**（idealization）、**近似**（approximation）などの段階がある。ここでは、ローマン・フリッグが与えている例にならい、ブランコに乗っている子どもの運動をモデリングするケースを考えてみよう（Frigg 2023a）。我々はまず、ブランコの形状や色、素材などの性質を**無視**（omission）し、鎖の長さと子どもの質量、子どもにはたらく力などの力学的なパラメータのみに注目する。これは抽象化の段階である。そして、鎖の長さと子どもの質量は常に一定であり、子どもが受ける力は重力と鎖から受ける張力のみであり、子どもは大きさを持たない質点であると仮定する。この段階は、抽象化によって得られたさまざまなパラメータを具体的な値に固定する段階である。多くの場合、そのようなパラメータは 0 や無限大などの極端な値に固定される。この段階は、ターゲットの持つ性質を**歪曲**（distortion）する段階であり、この段階が理想化と呼ばれる。このような抽象化と理想化の段階を経ることではじめて、我々は運動方程式

$$m\frac{d^2\theta}{dt^2} = -\frac{mg}{l}\sin\theta \qquad \text{(式 1.1)}$$

を得ることができる。ここで、mは子どもの質量、θはブランコが振れる角度、lは鎖の長さ、gは重力加速度を表す。さらにここから、θが非常に小さい場合に、$\sin\theta \sim \theta$という関係が成り立つという近似を用いることによって、

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = -\frac{g}{l}\theta \qquad \text{(式 1.2)}$$

という式を導く。この式から、ブランコに乗る子どもは周期$2\pi\sqrt{l/g}$で単振動することがわかる。

近似が数学的な定理に基づくのに対して、抽象化と理想化は数学的な定理に関係なく行

われるターゲットの性質の変更であることに注目されたい。近似は抽象化や理想化とは明確に区別されるモデリング・プロセスであると考えられる。近似との違いに比べて、抽象化と理想化との違いはそれほど明確ではない。実際、理想化もある種の「無視」であるから、それは抽象化の一種に過ぎないと主張する立場が存在する（Ducheyne 2007）。これに対して、マーティン・ジョーンズは、抽象化はパラメータの存在そのものを無視するが、理想化が無視するのはパラメータの値であるとして、理想化と抽象化は互いに異なるモデリング・プロセスであると主張している（Jones 2005）。つまり、あるパラメータの値を 0 に固定すること（理想化）と、そのパラメータそのものを無視すること（抽象化）は異なる。前者はパラメータがモデルに組み込まれており、モデルの重要な要素をなしているが、後者はそうではない。ブランコに乗る子どもにはたらく力は力学的モデルの重要な要素をなしているため、空気抵抗や摩擦力などのいくつかの力を無視することは、ターゲットを誤って表象していることになる。しかし、ブランコの色や素材は力学モデルを構成するパラメータに含まれてはいない。別の例として、ミクロ経済学の市場モデルでは、消費者と生産者の選好を理想化し、需要／供給曲線を単調減少／増加関数として表象するが、彼らの性別や国籍などは抽象化されている。このような議論を踏まえ、フリッグは「抽象化はターゲットの（不完全ではあるが）真の表象をもたらし、理想化は虚偽を主張する」として両者を特徴づけている（Frigg 2023a）。

抽象化が不完全ではあるが現象を正確に表象するモデリング・プロセスであるとするなら、それが現象の理解を提供することを受け入れることは比較的容易い。なぜなら、正確に表象されたモデルは現象の持つ性質と正確に同じ性質を備えているので、モデルについて成立する事柄が現実の現象においても成立すると考えるのは極めて自然だからだ。一方で、理想化においては、ブランコに乗る子どもにはたらく力が彼の運動の仕方にとって重要な要素であると見なしておきながら、摩擦力や空気抵抗を無視するという明らかに誤った仮定を置いている。理想化の役割が、現実の現象とは異なる性質をモデルに付与することにあるのだとするならば、そのような理想化で得られたモデルによって、我々はいかにして現象を理解することができるのであろうか。

理想化を論じるときに重要になるのは、同じ現象に対してさまざまな相容れない理想化の仕方が可能であるという事実である。ブランコの現象を理想化するとき、我々はしばしば摩擦力や空気抵抗などが 0 であると見なすが、それらがある一定の値を取るものとして理想化することもできる。運動方程式に減衰項が加われば、ブランコの往復運動は減衰振動になるという別のモデルが作られるだろう。どちらの理想化によって得られるモデルも科学において重要な役割を果たしている。ある論者たちは同じ現象に対してさまざまな理想化がありうるという事実は、理想化を行う科学者の目的を参照することで説明されなければならないと主張している（cf. Cartwright 1983, Giere 1988, Weisberg 2013）。

ワイスバーグは科学の実践において重要な種類の理想化として、**ガリレイ的理想化**（Galilean idealization）、**ミニマリストの理想化**（minimalist idealization）、**多重モデルによる**

理想化（multiple-models idealization）を挙げている（cf. Weisberg 2007, 2013, Elliott-Graves & Weisberg 2014）[1]。ガリレイ的理想化とは、モデルを単純化し、計算を可能にするために実行される理想化である。ガリレイ的理想化は、計算を可能にするというプラグマティックな理由で実行されるため、新たな数値計算手法の開発によって将来的に**脱理想化**（de-idealization）されることを想定してなされる。ミニマリストの理想化とは、現象の生起に関わる主要な因果的要因だけを含んだモデルを構築することによって、現象の因果関係の把握を達成することを目的とする。多重モデルによる理想化は、同じ現象に対して互いに異なる複数のモデルを併用するような理想化である。例えば、気象予測では、さまざまな異なる種類の気象モデルを併用することで予測精度を高めている。ワイスバーグによれば、これらのさまざまな理想化は科学者の持つ異なる**表象的理想**（representational ideal）によって正当化される。

> モデルが対象と比べて意図的に歪められているとき、そのモデルは理想化されていると言う。私は理想化について、これを、私が表象的理想と呼んだ一組の基準に導かれる行為だと理解する。したがって異なる種類の理想化は、異なる基準によって導かれる。（Weisberg 2013, 274）[2]

ガリレイ的理想化は、それが数値計算手法の改善により将来的に脱理想化されるという意味で、科学者が現象の完全な表象を得ようという理想によって正当化される。ミニマリストの理想化は関心のある現象を生じさせる主要な因果的要因だけをモデルに含めるような理想によって正当化される。そして、多重モデルによる理想化は複数の表象的理想を実現するために異なるモデルが用いられるということによって正当化される。ワイスバーグによれば、理想化は科学者の目的に合致するように対象とする現象を歪めることとして把握されるのである。

科学の実践に目を向けるとき、目的の違いが理想化の違いを生むという側面は確かにあるであろう。しかし、目的の違いだけによって理想化の違いを説明することには限界がある。なぜなら、科学者はしばしば明確な目的を持たずに理想化を実行することがあるからだ。リーゼ・マイトナーとオットー・ロベルト・フリッシュは天然ウランの核分裂反応を説明するために液滴モデルと呼ばれる原子核モデルを用いた。このモデルの基礎となるアイディアは、原子核を構成する陽子や中性子は互いに強い相互作用という近距離力によって結び付けられているというものである。強い相互作用は近距離で顕著な影響を及ぼす力であるため、隣り合った核子同士はその作用を受けるが、隣り合わない核子同士はその作用をあまり受けない。強い相互作用による引力と電磁気力による斥力が均衡していれば原子核は安定

---

[1] ガリレイ的理想化を最初に明確に定式化したのはエルナン・マクマランである（McMallin 1985）。

[2] 邦訳では原著の representational ideal に対して「表現的理想」という語があてられているが、ここでは本論の用語に合わせての「表象的理想」という語に置き換えた。

して存在することができる。しかし、原子核が重くなればなるほど、長距離力であるクーロン斥力の寄与が大きくなり、原子核は安定して存在できずに分裂する。この状況は表面張力と分子の反発力の均衡としてその形状を維持する液滴になぞらえることができる。核分裂の様子は、ちょうど一粒の水滴が二つに分裂するようにして表象できるのである。液滴モデルは原子核の構造を理想化し、それをある種の液体と見なすことで、物理学者たちが核分裂反応を理解することを助ける。では、液滴モデルはどのような表現的理想によって導かれていると言えるであろうか。液滴モデルは現象の完全な表象を得ることも、因果的要因を捉えることも目的としていない。物理学者たちが液滴モデルを使用するとき、彼らは原子核が文字通りに液体であると考えているわけではない。彼らがこのモデルを使用する理由は、すでによく知られた現象の表象と結びつけることによって核分裂というあまりよく知られていない現象に対する理解を容易にさせるという点にある。このことから、理想化と理解は密接なつながりを持つことが示唆される。

そこで本論で検討したいのは、理想化を科学的理解に寄与するものとして捉える見解である。理想化と科学的理解というトピックは個別に見れば長い議論の歴史があるが、それらを結びつける試みは登場してまだ間もない（cf. Strevens 2017, Potochnik 2017）。ここで議論の焦点となるのは、理想化されたモデルは、それが現象を誤って表象しているにもかかわらず、なぜ現象の科学的な理解を提供することができるのかという問題である。この問題には、明確にすべき 2 つのことが含まれている。一つは科学的理解とは何かという問題であり、もう一つは理想化、もっと一般的に言えば、表象とは何かという問題である。次の章では、因果性の把握に基づいてこの問題に答えようとする代表的なアプローチを紹介し、その妥当性を検討する。

第 2 章　科学的理解の因果理論

現象の科学的な理解がそれに対して説明を与えることにあるのだとすれば、どのような説明の仕方が科学的に妥当なのかが改めて問題になる。科学的理解の文脈では、現象の理解をある種の因果性の把握に求める見解が根強い。例えば、ステファン・グリムは「現象を理解するとは、もしも他の性質が異なっていたら何が生じていたかに答えられることである（Grimm 2010）」と述べ、現象に対する反事実的判断の可否が科学的理解の有無を決定すると主張している。現象の理解にある種の反事実的判断が要求されるとすれば、理解する主体は現象の因果構造を正しく把握しなければならないことになるであろう。この章では、理想化による理解の成立をある種の因果性の把握に基づいて説明するマイケル・ストレヴァンスとアンジェラ・ポトチュニックの見解を取り上げ、彼らの見解を批判的に検討する。

2.1 ストレヴァンスの消極的因果理論

ストレヴァンスは「理想化の役割とはある要因が説明されるべき現象に対して違いをもたらさないことを示すことにある（Strevens 2017）」と主張し、理想化が因果性の把握に寄与する点を強調している。彼によると、理想化によってある要因を誤って表象しているモデルは、その要因が説明されるべき現象に対する**差異形成者**（difference-maker）ではないことを教えてくれる。例えば、容器に密閉された気体がボイルの法則に従うことを示すために、我々は気体分子と容器の壁面との衝突を考慮するだけでよく、分子の大きさや分子間力を考慮する必要がない。このことは、気体のボイル的な挙動に因果的に関係するのは気体分子と壁面の衝突だけであり、分子同士の衝突や分子間力は因果的に無関係であることを教えてくれる。ストレヴァンスによれば、理想化によって、現象の生起に関係する要因とそうでない要因を区別できるようになることで、我々は現象を科学的に理解できるのだという。

ストレヴァンスの見解によると、理想化の役割とは、それによって排除されなかった要因が現象に因果的に関連することを示すことにあるのではなく、むしろ排除された要因が因果的に関連しないことを示すことで現象の理解が促されるということになる。ポトチュニックの表現を借りれば、ストレヴァンスは理想化を消極的な表象的役割を持つものとして見なしていると言えるだろう（Potochnik 2017）。

しかし、理想化はこのような消極的役割しか持たないのであろうか。彼の議論の大きな問題の一つは、モデリングについて論じるとき、彼は理想化と抽象化のどちらを意味しているのかが曖昧であるという点にある。気体のボイル的な挙動は確かに分子の大きさや分子間力を無視することで導出できる。しかし、このとき彼が念頭に置いているのはそれらのパラメータの存在そのものを無視するということなのだろうか。それとも、パラメータの存在を仮定した上で、それを 0 にするということなのだろうか。前の章で確認したように、前者の場合であれば、それは理想化というよりもむしろ抽象化と呼ぶべきであろう。ストレヴァン

スの念頭にあるのが抽象化であるとすれば、それは消極的な表象的役割しか持たないことは自明だ。しかし、後者の意味での理想化を念頭に置いているのだとすれば、ストレヴァンスの見立てに反して、それは積極的な表象的役割を持つと言える。なぜなら、我々は分子の大きさや分子間力を 0 以外の値に設定することで、それが気体のボイル的な挙動にどのような影響を与えるのかを調べることができるからだ。つまり、理想化はそれによって排除されなかった要因が現象にどのような影響を与えるのかをも教えてくれる。彼が「理想化」という言葉によって、抽象化を意味しているのだとすれば、それは科学におけるモデリングを不当に狭く見積もっているし、前章で述べたような狭義の理想化を意味しているのだとすれば、それが積極的役割を持つことは明らかである。理想化はある要因を無視することではなく、むしろある要因を際立たせるためになされると見なす方が科学の実践により適合していると考えられる。

2.2 ポトチュニックの積極的因果理論

ストレヴァンスの消極的因果理論に対して、ポトチュニックは理想化の積極的な表象的役割を強調する。彼女は科学の実践において、理想化がほとんどすべての分野で中心的な役割を果たしていることを例証した上で、理想化を「それが真であるかどうかに関係なく、しばしばそれが偽であることを十分知った上でなされる仮定（Potochnik 2017）」として特徴づけている。モデルが科学において中心的な役割を果たしており、しかも理想化が偽なる仮定であるとするならば、科学は「正当化された真なる信念」として特徴づけられる知識の探求ではありえないことになる。ポトチュニックは、科学の目標を現象の理解に据えるなら、科学の実践において理想化が重要な役割を果たしていることをうまく説明できると主張している。

ポトチュニックによれば、理想化は現象によって**具現化**（embody）される**因果パターン**（causal pattern）の表象を促すために、現象の科学的理解に寄与する（Potochnik 2017, 2020）。ここで、因果パターンの表象とは、あるシステムの性質の変化が別の性質にどのような変化を与えるのかを表象するということである。例えば、一定の体積を持つ気体に対して、その温度を上昇させると圧力が減少するということを表象することは因果パターンの表象である。現象には多様な因果パターンが具現化されているが、我々は一定の認知的限界を持つため、そのすべてを表象することができない。そこで、理想化によって主体にとって関心のある因果パターンに注目することで、現実世界の因果関係を理解することができるのだという。

このようにポトチュニックは理想化における表象の積極的役割を強調した上で、それが偽なる仮定を生み出すプロセスであることを明確に主張している。

現時点の私の見解では、理想化は積極的な表象的内容を持つ。それは単に無関係な要因

を排除することによって表象に役立つのではなく、それが表象するもののおかげで役立つのである。・・・理想化はある要因について偽なることを述べることで、その要因の関連性を主張する。（Potochnik 2017, 52）

ポトチュニックによれば、現象に具現化される因果パターンの表象は正確な表象よりもむしろ誤った表象によって促される。そして、それは表象する主体の認識的限界を反映しているのだという。

理想化と理解をめぐる彼女の議論で中心的な役割を果たしているのは「現象に具現化される因果パターン」という概念である。現象に具現化されるパターンとは何を意味するのかを説明するために、ポトチュニックはダニエル・デネットの議論を援用している。図 2.1 に 90×10 の 6 つのマトリックスが描かれている[3]。これらはすべて、完全なバーコードをある一定のノイズを加えて出力したデータである。ノイズの比率は A が 25%、B が 10%、C が 25%、D が 1%、E が 33%、F が 50%である。我々がもしこのことを知っているとすれば、A～F のマトリックスはすべて同じパターンを持っていると見なすことができる。しかし、そうした情報がなければ F にパターンが存在することを認識することは非常に困難である。デネットはデータに**リアル・パターン**（real pattern）が存在するのは、そのデータを単純なビットマップよりも小さいデータ容量で伝送できるときであると規定した。ビットマップとは「ピクセル 1 は黒、ピクセル 2 は白、・・・」という仕方で、ピクセルの色を逐一指定することでマトリックスを伝える方法である。この方法に従えば、すべての可能なマトリックスを伝送することができる。しかし、D のマトリックスは「10 ピクセルごとに黒と白が並ぶ。ただし、ピクセル 57、88、・・・は例外である。」のようにして、ビットマップよりも小さい容量で情報を伝えることができる。A～E も同様のデータ圧縮が可能だが、F はそのような記述によって圧縮することができない。

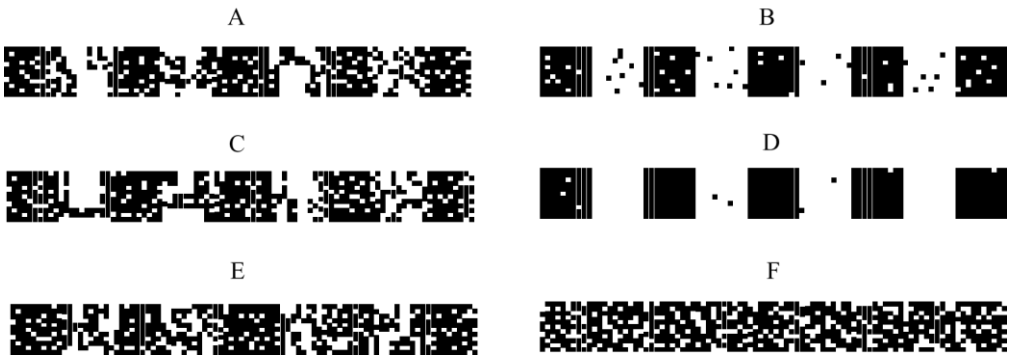

図 2.1 バーコードのリアル・パターン

[3] Dennett1991 の図をもとに作成した。

デネットの議論を引き継ぎつつ、ポトチュニックが強調するのは同じマトリックスが異なるパターンを持ちうるという事実である。A と C は 25%のノイズが加えられたバーコードというパターンを持っており、A〜F は任意のノイズが加えられたバーコードというパターンを持っている。ポトチュニックによれば、同じマトリックスが異なるパターンを持つように、同じ現象は異なる因果パターンを具現化することができる。どの因果パターンを表象するのかは、我々が現象のどのような側面に関心があるのかによって決まるのだ。

デネットのリアル・パターンに加えて、ポトチュニックの因果概念はジェームズ・ウッドワードが唱えた介入主義に基づいている。

> 私は［因果パターン］という考えを因果性に対するジェームズ・ウッドワードの操作主義的アプローチに訴えることで動機付けたい。・・・ウッドワードによれば、XがYの原因であるのは、Xに対する介入が、ある背景的状況において、Yの値を変化させるときに限る。（Potochnik 2017, 29-30）

現象に具現化される因果パターンとは、現象に介入を加えることによって得られる変数間の依存関係としてのパターンである。ある一つの現象にはさまざまな依存関係のパターンが具現化されうる。

現象に具現化される因果パターンの表象の例として、彼女は万有引力の法則を挙げている。万有引力の法則によれば、質量を持つ物体の間には次の式で与えられる力がはたらく。

$$F = G\frac{mM}{r^2} \qquad \text{(式 2.1)}$$

ここで、Fは力、Gは万有引力定数、mとMは質量、rは距離である。万有引力の法則によると、2 つの物体の間にはたらく力の大きさは、距離の 2 乗に反比例し、それらの質量に比例する。惑星の運動をこの法則に基づいて理解するとき、我々は理想化によって、惑星が完全な球体であり、その質量は一様に分布していると見なす。ポトチュニックは、万有引力の法則は例外なく成り立つ普遍的な法則なのではなく、例外のある規則性であることを指摘した上で、それは 2 つの物体にはたらく力がそれら物体の質量と距離にどのように依存しているかを示していると主張する。そして、その依存性のパターンこそが因果パターンなのであり、現象に具現化されているものであるという。

しかし、理想化という文脈において、デネットのリアル・パターンの議論とのアナロジーは成り立つのであろうか。まず指摘したいのは、デネットのバーコードは直接目で見ることができるパターンであるが、万有引力の法則は直接的に把握できるパターンではないということである。それどころか、ニュートンが万有引力の法則を発表した当時、接触していなくてもはたらく遠隔力の存在は徹底的な非難の的となった。力という概念が現象に具現化

しているように見えるのは、我々がすでに現象のニュートン的な見方に慣れてしまっているためである。「表象」を現象とは独立に主体の内部で生じていることであると見なすならば、それは因果パターンの表象ではあるかもしれない。しかし、因果性をウッドワード的な介入主義に基づいて理解するなら、力という概念を介入可能な変数として扱えるのかどうかを正当化する必要があるだろう。

ある物理変数に対して介入を加えると言うとき、多くの場合、我々はすでに何かしらの解釈に基づいてそれを行っている。図 2.2(a)のような簡単な装置を考えよう。気体が容器に封入されており、容器の蓋は自由に動ける状態になっている。はじめ、容器内の気体の圧力は大気圧と等しい。この状態から、図 2.2(b)のように、容器の蓋におもりを乗せると、蓋の位置が下がり容器内の気体の体積が減少する。蓋が静止しているとき、蓋にかかる力はつりあっているので、おもりが蓋を押している力の大きさに応じて容器内の気体の圧力は増大する。ポトチュニックはこのとき、圧力と体積の間には、一方を変化させると他方が変化するという因果パターンが具現化していると見なすだろう。しかし、この実験を通じて我々が介入したのは、蓋におもりをのせるという行為だけである。おもりをのせるという行為が、圧力を増大させる行為なのか、それとも体積を減少させる行為なのかは事実的な仕方では決定できない。それを決定する唯一の仕方は、そのように解釈するということだけだ。つまり、おもりをのせるという行為が力という力学変数に対する介入であるというのはすでに理想化の産物であると言える。力は現象に具現化しているのではなく、我々がそれを具現化させていると述べるほうがより適切である。この点に関連したより深い議論は第 6 章で現象とモデルの関係について論じるときに再び取り上げることになるであろう。

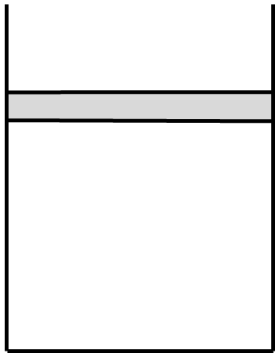

図 2.2(a) 気体が封入された容器

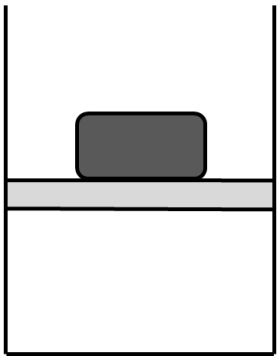

図 2.2(b) 気体が封入された容器

2.3 因果理論の諸問題

ストレヴァンスやポトチュニックの因果理論は理想化が科学的な理解へ寄与する理由を因果性の把握に結び付けることによって説明する見解である。しかし、仮に因果性という概

念がより明確に定式化され、前節で論じた問題が克服されたとしても、明らかに因果性の把握とは見なせない仕方での理解はありふれている。

空間中を移動する光がたどる経路はフェルマーの原理と呼ばれる物理原理によって理解できる。フェルマーの原理とは「光は光学距離を最小にするような経路をたどる」という原理であり、光学距離とは光が進む距離に屈折率をかけた値として定義される。より厳密に書き下すなら、屈折率をn、微小距離をdsとして、経路Cの光学距離Iは

$$I = \int_C nds \qquad \text{(式 2.2)}$$

によって与えられる。フェルマーの原理によれば、始点 A と終点 B を結ぶ可能な経路Cのうち、光が実際にたどるのは光学距離Iを最小にする経路である。例えば、図 2.3(a)のように光が地点 A から鏡を反射して地点 B へ移動するとき、光は入射角と反射角が等しくなるような経路をたどる。入射角と反射角が等しいような経路が光学距離を最小にするからである。これは光の反射の法則として知られている現象である。また、図 2.3(b)のように光が空気中の地点 A から水中の地点 B へ移動するとき、光は屈折率の小さい空気中の移動距離を大きくし、屈折率の大きい水中での移動距離を小さくすることで全体の光学距離を最小化する。光の屈折の法則はこのような仕方で説明できる。光の反射の法則や屈折の法則は、光が光学距離を最小にするような経路を移動する性質を持つということによって理解されるのである。

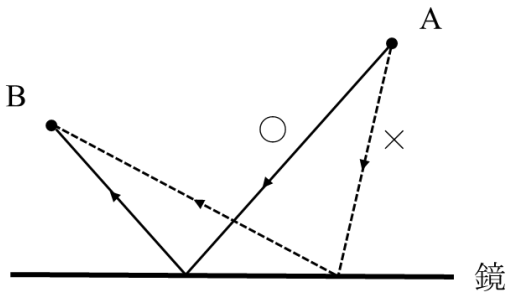

図 2.3(a) 反射の法則

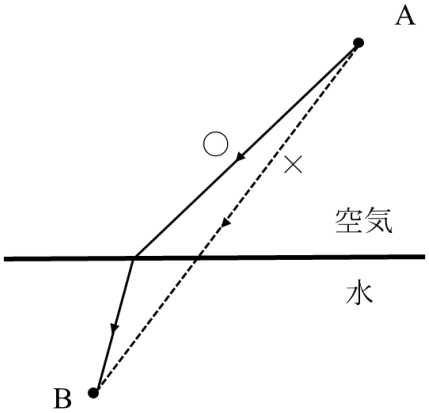

図 2.3(a) 屈折の法則

フェルマーの原理が光の反射の法則や屈折の法則を説明するからといって、光が光学距離を最小にする経路を移動することがそれらの現象の原因だと主張することはできないであろう。なぜなら、光が実際にたどる経路は始点と終点の位置によって特定されるが、終点の位置が経路に因果的な影響を与えるというのは明らかに日常的な直観に反するからであ

る。フェルマーの原理は因果性の把握とは異なる仕方で光学現象に対する科学的な理解を提供している。

フェルマーの原理のように、経路によって定まるある作用量があり、その作用量を最小にするような経路が実際に実現する経路であるという仕方で与えられる物理法則は最小作用の原理と呼ばれる[4]。最小作用の原理はそれ自体が物理法則であるというよりは、物理法則を記述する形式の一つだと言える。古典力学のラグランジュ形式や量子力学の経路積分はこの原理に基づいて定式化される。最小作用の原理によって物理現象を理解するとき、我々はある物理量の変化が別の物理量に変化を与えるという仕方でそれを理解しているわけではない。そうではなく、ある物理量の始状態と終状態からそれを結ぶ経路を特定することによって、その物理量が関連する現象を理解しているのだ。

別の身近な例として、図 2.4(a)のように高さhに置かれた小球が斜面を下って水平面に達したとき、その速度を求めるという状況を考えてみよう。小球には重力と垂直抗力のみがはたらき、摩擦力や空気抵抗は無視するものとする。斜面が一定の角度であれば、小球にはたらく斜面方向の重力を運動方程式に当てはめることによって、水平面での速度を計算できる。しかし、図 2.4(b)のように斜面が複雑な形状をしていれば、斜面方向の重力の大きさは小球の位置に応じて変化するため、それを逐一考慮することは膨大な計算量になる。通常、我々はこのような問題を解くとき、運動方程式ではなく、力学的エネルギー保存則を用いる。力学的エネルギー保存則とはある物理系の始状態の力学的エネルギーの総和と終状態での力学的エネルギーの総和が等しいという法則である。力学的エネルギー保存則は物体にはたらく力が保存力である場合に運動方程式から導出できる。力学的エネルギー保存則を用いれば、運動中に質点が受ける力の大きさを逐一考慮する必要がないので、質点の運動を引き起こす因果的作用を知らなくても、我々は終状態において質点がどれくらいの速度であるのかを知ることができる。

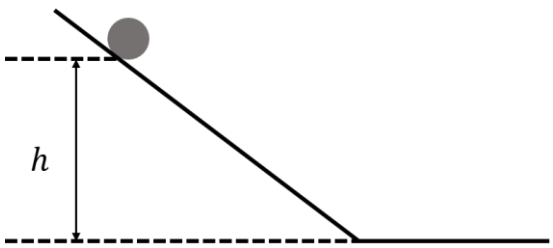

図 2.4(a) 斜面を下る小球

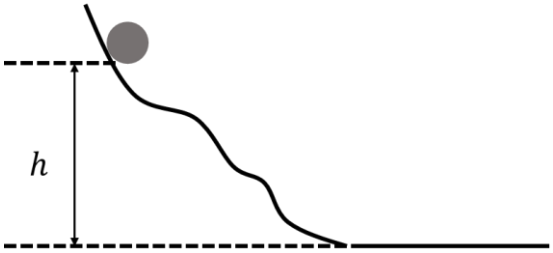

図 2.4(b) 斜面を下る小球

[4] ここで最小作用の原理と呼ばれているものは、厳密には、経路を仮想的に変化させたときに、作用量の 1 次の変分が 0 である（作用量が停留する）ような経路が実現するという原理であるため、変分原理とも呼ばれる。

力学的エネルギー保存則に基づく運動の理解は、ある解釈の下では因果性の把握として見なされるかもしれない。フィル・ダウは**因果プロセス理論**（causal process theory）と呼ばれる因果理論を提唱している（Dowe 2000）。この理論によれば、因果プロセスとは保存量を持つ物体の世界線であり、因果的相互作用は保存量の交換を伴う。力学的エネルギーを保存量と見なせば、斜面を下る小球は因果プロセスと見なしうる。しかし、力学的エネルギーを保存量と見なすことができるのは、小球に保存力しかはたらかないような場合だけである。実際の斜面では、小球には摩擦力などの非保存力がはたらくため、力学的エネルギーは保存しない。我々は摩擦力を考慮したモデルを組み立てて、小球の速さを計算しなおすことができるが、その場合、例えば、摩擦力が小球にする仕事が始状態と終状態の力学的エネルギーの差に等しいという関係を利用する。小球の運動のこのような理解には依存性という意味での因果性の把握も因果プロセスという意味での因果性の把握も要求されていない。また、斜面を下る小球の運動には、保存量が交換するという場面が存在しない。保存量は交換される対象ではなく、注目している物理系が時間を通じて持ち続けている対象として理解する方が自然であろう。

これまでの議論から明らかになったのは、因果性の概念をどのように解釈するとしても、現象の理解に因果性の把握を課すことは強すぎる要求であるということだ。現象を理解するために、その因果性の把握は必要条件でも十分条件でもない。物理現象の理解に因果性が伴うものとそうでないものがあるという違いはそれを説明する物理法則の形式に由来しているように思われる。運動方程式のように物理法則が微分形式によって与えられているとき、我々はそこに因果的な解釈を与えやすい。しかし、力学的エネルギー保存則のように物理法則が積分形式によって与えられている場合、そこに因果的な解釈を帰属させることは困難である。しかし数学的に言えば、微分形式と積分形式は互いに変換可能な形式であり、両者に内容的な違いはない。我々は文脈に応じて因果的な解釈が可能な微分形式と全体性を把握しやすい積分法則を使い分けているのである。

以上のように科学的な理解には、因果関係の把握に留まらない多様な仕方がありうるのだとすれば、我々は因果性という枠組みよりも多様なケースを包含できるような視点を持つ必要があるだろう。次の章では、理想化と理解の関係のより適切な説明を与えるために、現象を科学的に理解するとは何を意味するのかという問題をより深く掘り下げていく。

第 3 章　科学的理解の文脈主義

本章では、理想化と理解の問題を因果性という観点からだけでなく、もっと広い視点から考察するために、科学的理解の文脈主義と呼ばれるアプローチを導入する。文脈主義は科学的な理解の成立を客観的な真理の把握よりも、理解する主体のスキルや文脈に基づかせる見解である。文脈主義に対して、理解を主体の客観的真理へのコミットに結び付けて捉えようとする見解は科学的理解の客観主義と呼ばれる。本章では、科学的理解の文脈主義を擁護しつつ、それが内包する課題について議論する。

3.1 科学理論のインテリジビリティ

前の章では、科学的理解の仕方には因果性の把握に留まらない多様な仕方がありうることを確認した。物理法則は微分形式や積分形式、最小作用の原理に基づく形式など多様な展開の仕方がある。それらのどの形式による説明がより良い理解をもたらすのかは対象とする現象によって異なる。運動を引き起こす要因である力を逐一把握する必要がないという点で、エネルギー保存則は力学的現象の因果的説明を与えることはできないが、熱現象や電磁気現象などに対しても適用可能な枠組みを提供する。エネルギー保存則はより統合的な性質を有していると言えるであろう。

現象の理解がその説明を与えることにあるとするなら、説明に対する基準と同じくらい多くの候補が理解に対しても存在することになる。ファン・フラーセンに従えば、何が妥当な科学的説明であるのかはその文脈と切り離せないのであった。デ・レクトはファン・フラーセンの説明の文脈主義を、主体の理解へと遡及して解明することを試みている。彼は理論のどのような側面に対して主体が価値を見出すのかということの違いが、その理論に基づく説明にどのような基準が適用されるのかという違いを生むのだと主張する。

第 1 章で確認したように、デ・レクトは現象の理解（UP）と理論の理解（UT）を明確に区別し、科学的理解の成立を理解の感覚という心理的体験の成立から明確に切り離した。主体が現象を科学的に理解する（UP）とは、その現象の説明を与えることであるが、それと同時に、説明に使用される理論を主体が理解（UT）していなければならない。現象の理解と区別するために、デ・レクトは理論が主体にとって理解可能であることを**インテリジビリティ**（*intelligibility*）という言葉によって表現する。その上で、彼は主体が現象を科学的に理解しているために満たされるべき基準として、**現象の理解基準**（Criteria of Understanding Phenomena）（以下、CUP）と呼ばれるものを与えている。

> CUP：ある現象*P*が科学的に理解されるのは、インテリジブルな理論に基づき、経験的十全性や内部整合性などの基本的な認識的価値に合致するような*P*の説明が存在する場合であり、その場合に限る。（de Regt 2017, 92）

ここで、インテリジビリティとは「理論*T*の使用を促すような*T*の性質の集まりに科学者が帰属する価値（de Regt 2017）」とされる。デ・レクトは、インテリジビリティが帰属されうる理論*T*の性質の主な例として、可視性、単純性、因果性、統合性を挙げている。個々の科学者の持つスキルや文脈に応じて、異なる性質にインテリジビリティが帰属される。

彼は豊富な科学史上の事例を参照することによって、このことを正当化している。例えば、19 世紀までの物理学において、現象の科学的理解を達成するとは、現象を可視的な描像によって説明することができるということであった。ルートヴィッヒ・ボルツマンは 2 原子分子の比熱が単原子分子のそれと異なるという現象を、2 個の分子が剛体棒でつながれたダンベル・モデルを構成することによって説明した。このとき、彼の念頭にあったのは、可視的な力学的描像によって説明することが現象の理解を深めるという価値観である。時代が下り、20 世紀になってから、原子の放射・吸収スペクトルを説明する相異なる 2 つの理論が提案された。一つはエルヴィン・シュレーディンガーが唱えた波動力学であり、もう一つはヴェルナー・ハイゼンベルクやヴォルフガング・パウリらが唱えた行列力学である。波動力学は物理状態を波動関数によって記述する理論であり、ある種の波動的な描像を取り入れることで、原子に可視的なイメージを与えた。一方、行列力学は原子に具体的な視覚的イメージを与えることを避け、観察可能な物理変数だけを用いて原子スペクトル現象を説明することを試みた。シュレーディンガーは自身の波動力学が時空間的に可視化できるのに対して、行列力学が抽象的で具体的な可視化が不可能である点を指摘することで自説を擁護した。これに対してパウリは、理論が可視性を持つことが優位であるように見えるのは、単に我々が古典的な見方に慣れているからに過ぎず、古典的な「わかりやすさ」は新しい「わかりやすさ」に取って代わるべきであると主張した。デ・レクトによると、このような科学史上の事例が示しているのは、科学は真なる理論を追求しているというよりも、むしろ現象をよりわかりやすく理解するための理論を追求しているのであり、どのような理論がわかりやすいのかは科学者のスキルや文脈によって変化するということだ。ボルツマンやシュレーディンガーは理論の可視性という性質にインテリジビリティという価値を帰属したのに対して、ハイゼンベルクやパウリは可視性にあまり価値を置かなかった。彼らのうちどちらが世界に対する正しい描像を持っていたのかと問うのはナンセンスである。デ・レクトは、過去において正しいとされていたが、現在では否定されている理論、例えば、燃焼のフロギストン説などもある時代においては一定の理解を提供していたという点では評価に値するとしている。彼は科学的理解において、説明に使用される理論が真理を捉えていることは要求されないとして、真理へのコミットメントを避けるのである。

デ・レクトはさらに、科学的理解をこのように捉えることは、科学的説明に対してさまざまな相異なるモデルが提唱されてきた事実をうまく説明できると述べている。彼によると、例えば、科学的説明に因果性が要求されるのは、説明を構成する主体が理論が生み出す因果的説明にインテリジビリティという価値を帰属させるときであり、統合性が要求されるのは、理論が多様な現象を少数の論証パターンによって説明を与えるということにインテリ

ジビリティという価値を帰属させるときである。どのような科学的説明が妥当であるのかは、理論のどのような性質に主体がインテリジビリティという価値を帰属させるかに依存する。デ・レクトの見解は、ファン・フラーセンによって提唱された科学的説明の文脈主義を、理解という概念を用いて再定式化したものと見なすことができるであろう。

3.2 カリファーの客観主義的理解

主体のスキルや文脈を強調し、あまり真理にコミットしないデ・レクトの見解に対して、カリファーはより真理にコミットした理解観を提示している。カリファーによると、主体が現象を科学的に理解していると言えるためには、主体が持つ説明情報が科学的な知識に十分類似していなければならず、科学的な知識は科学的説明評価（scientific explanatory evaluation）（以下、SEE）の安全な結果として得られるものでなければならない（Khalifa 2017, Khalifa 2023）。SEE は、(1)ある現象に対する説明候補を検討する段階、(2)それらの説明候補を比較し、最善の説明を選ぶ段階、(3)最善の説明にコミットする段階の 3 つの段階からなる。カリファーによれば、説明を与える理論のインテリジビリティが要求されるのは説明候補を検討する(1)の段階であり、この段階ではまだ我々は現象の説明候補を見出したに過ぎない。説明候補が(2)と(3)の段階を通過したときにはじめて、当該現象の理解が達成されるのだという。カリファーは説明を与える理論が主体にとってインテリジブルでなければならないことを認めるが、それだけでは科学的理解の成立にとって十分ではないと主張する。

カリファーは素粒子物理学の事例を参照することによって、その正当化を試みている（Khalifa 2023）。1960 年代、素粒子物理学は亜原子粒子（原子よりも小さいスケールの粒子）の挙動を説明する様々なモデルが提案されていたが、実験的な証拠が不足していたため、どれも抽象的な数学理論の域を出ていなかった。このような状況のなか、スタンフォードと MIT の実験物理学者たちは、電子・陽子散乱実験で予想外の衝突断面積を発見した。理論物理学者のジェームズ・ビョルケンはすでにカレント代数モデルという非常に難解な代数的モデルに基づいて、このことを予測していた。彼が予測した曲線はビョルケン・スケーリング曲線と呼ばれる。しかし、ビョルケンのモデルは非常に難解であったので、これを理解できる実験家はほとんどいなかった。リチャード・ファインマンは、陽子や中性子などのハドロンはパートンと呼ばれる固い点粒子からなるというアイディアに基づき、ビョルケンのオリジナルな説明をより直観的に理解しやすいものにした。ファインマンのパートン・モデルとビョルケンのカレント代数モデルはどちらもビョルケン・スケーリング曲線を正確に予測する数学的に等価なモデルであった。しかし、実験家たちはより理解が容易なファインマンのモデルを用いて、それを検証するための実験をデザインした。カリファーによると、このような素粒子物理学の状況は、電子・陽子相互作用によるビョルケン・スケーリングという現象に対する説明となりうる候補を検討する段階に相当するという。ここでは、単に現象の予測が可能であるということは、その現象に対する説明候補としては十分でなく、その

手段としてのモデルがインテリジブルでなければならないという科学者の判断が働いていることが示されている。このことから、カリファーは、SEE における第一の段階である説明候補の検討では、デ・レクト的な理論のインテリジビリティが要求されると主張する。しかし、彼はデ・レクトの CUP が理解に対する基準としては不十分で、それは単に SEE における説明候補の基準であるに過ぎないとしている。彼によると、科学的理解が成立するためには、SEE の第二、第三の段階である説明の比較とそれへのコミットがなければならない。

カリファーは素粒子物理学の事例をさらに続ける。ファインマンのパートン・モデルはビョルケンのモデルよりも当時の科学者にとってインテリジブルな性質を持っていたため、ビョルケン・スケーリングの説明候補と見なされた。しかし、そのような説明候補はファインマンのモデルが唯一のものであったわけではない。ビョルケン・スケーリングを説明する別の候補として、桜井純によって提唱されたベクトル中間子支配モデル（VMD モデル）がある。VMD モデルは、陽子や電子などのハドロンの相互作用を、ファインマンのパートンではなく、ベクトル中間子と呼ばれる粒子によって媒介されると考える。桜井のモデルは、ファインマンのモデルと同様に定性的に理解しやすく、当時知られていた実験事実にもうまく当てはまっていた。しかし、パートン・モデルと VMD モデルは、光子の縦横吸収率に異なる予測をしていた。決定実験の結果、パートン・モデルのほうがより正確な予測であることがわかった。カリファーによると、VMD モデルはビョルケン・スケーリングに対する説明候補ではあるが、ビョルケン・スケーリングに対する理解を提供するものとは見なされない。

ここまでのデ・レクトとカリファーの議論をまとめるとすれば、科学的な理解が成立するためには、その手段となる理論やモデルがインテリジブルな性質を持たなければならないという点について、彼らの見解は一致しているが、カリファーは科学的理解に対してデ・レクトよりもより真理にコミットした厳しい基準を課しているということになるであろう。彼らの対立の争点は、科学的理解を提供する科学理論は**事実的**（factive）でなければならないのか、それとも**非事実的**（non-factive）なものなのかという点である。次の節では、科学的理解に**事実性**（factivity）が要求されるのかという問題を検討し、デ・レクトの文脈主義とカリファーの客観主義のどちらが理解の妥当な捉え方なのであるのかを考察する。

3.3 科学的理解に事実性は要求されるか

デ・レクトの CUP によると、現象を科学的に理解するためには、説明を与える理論が経験的に十全であることが要求される。ファン・フラーセンに従えば、理論が経験的に十全であるとは、実験報告、観察報告によって記述できるような構造としての**現れ**（*appearance*）に対して、その理論が提示するモデルの経験的部分構造が同型であるということである（Fraassen 1980）。すなわち、ある理論が経験的に十全であるかどうかの判断は、その理論が提示するモデルの非経験的構造がどのようなものであるかには依存しない。この意味で、

デ・レクトの見解では、同じ現象を構造が異なる多数のモデルによって理解することが許容されていることがわかる。

これに対して、カリファーが SEE の第二の段階である比較の段階で要求するのは、複数の理論の中から一つの「勝者」を選び出すというものだ。そこで、彼は経験的適合性（*empirical fitness*）と呼ばれる概念を導入する。

> 現象 P の説明 Q が文脈 C で経験的に適合するのは、C における P の説明として検討に値する他のすべての説明 Q*に対して、C で利用可能な最良の証拠と方法を与えたときに、なぜ P なのかを Q*は Q よりもよく説明するという判断が安全でない場合であり、その場合に限る（Khalifa 2023, 41）

カリファーによれば、文脈に応じて適切な科学的理解の仕方は一意に定まる。

科学的理解における文脈主義を部分的に認めることによって、カリファーはデ・レクトに歩み寄りを見せているとは言えるが、デ・レクトのように科学的理解が非事実的であるという点にまでは踏み込んでいない。しかしカリファーにおいても、科学的な理解は何か特定の真なる理論によって提供されるのではなく、文脈の違いに応じて複数の理解の仕方が許容されるという点は認められている。

デ・レクトとカリファーの議論の大きな争点になっているのは理解に事実性が要求されるのかどうかという問題である。理解に事実性が要求されるかどうかを検討するために、惑星運動の例を考えよう。惑星が楕円軌道を描くのは、ニュートンの重力理論によると、惑星が太陽から重力を受けて、その軌道が直線から曲げられることで生じるという仕方で理解できる。一方で、アインシュタインの重力理論（一般相対性理論）は、重力という力の存在そのものを否定する。その代わりに、太陽が周囲の時空をゆがめ、惑星は曲がった時空を直線的に運動する。ある座標系からそれを観測すると楕円軌道を描くように見える。このように両者は同じ現象をまったく異なる描像で理解するのである。ニュートンの理論とアインシュタインの理論は、論理的に両立不可能であり、互いに異なる数学的構造を持つモデルを提示している。それにもかかわらず、両者は共に惑星が楕円軌道であることの科学的な理解を提供していると言える。

カリファーの経験的適合性基準を用いて、同じ現象に対して異なる理論による理解が可能であるという事実を説明するのは難しい。なぜなら、現在使用可能な証拠と方法を総動員するなら、アインシュタインの理論が惑星の軌道を正確に予測していることは明白だからだ[5]。彼の基準では、ニュートンの理論が未だに惑星軌道の理解を提供する理論として科学者の間でその地位を保っていることは説明できない。また、カリファーは科学的理解の成立に真理へのコミットメントが必要であると主張しているが、物理学者たちはアインシュタ

[5] 一般相対性理論の実験的検証については Misner, Thorne & Wheeler 1973 の第 38 章から第 40 章を参照されたい。

インの重力理論に対して真理へコミットしていながらも、同時にニュートンの重力理論の描像で惑星軌道を理解することができる。生物学者たちは現実の生物種で遺伝子に完全な優劣が存在することはほとんどないことを知った上で、メンデルの遺伝法則に基づいて形質の違いを理解することができる。経済学者たちはミクロ経済学モデルを用いるとき、生産者や消費者がしばしば非合理的な意思決定をする主体であることを十分承知していながら、彼らを合理的意思決定者として取り扱う。ニュートンの理論やメンデルの法則、ミクロ経済学モデルはインテリジブルな性質を持っているがために、理解を提供することができるのであり、真理へのコミットメントという基準はそれほど重要なものではないのだ。もしも、真理や事実性が科学的な理解にとって必須の条件であるならば、同一の現象を相容れない異なる理論によって理解できるという事実は説明できない。なぜなら、真理という観点から見るならば、相容れない異なる 2 つの理論が共に真であることはありえないからだ。

ただし、ニュートンの理論ははじめからインテリジブルな理論だと見なされていたわけではない。万有引力という物体同士の接触を伴わずに生じる遠隔作用の概念は、その発表の当時、デカルト主義者たちからの猛烈な批判の対象となった。また、ニュートン自身の理論の展開の仕方は、幾何学的な作図を用いたものであり、その論証は非常に難解なものであった。ニュートンの力学を解析学の手法によって捉え直し、現在の我々が知るような形式にまとめ上げられたのは、レオンハルト・オイラーやジョゼフ・ルイ・ラグランジュなどの数学者の手によるところが大きい（cf. 山本 1997）。一般に、ある理論が科学者集団に広く受け入れられるようになるには、経験的な予測の成功から一世代以上の時間の経過が必要であると言われる。古い理論に慣れた科学者にとって、新しい理論の持つ性質がインテリジブルであると見なすことは容易ではない。時代の進行に伴って異なるスキルを持った科学者が登場し、それに加えて、理論がよりインテリジブルな形式に改良されていくことによって、次第に科学者集団に認められるものとなるのだ。

事実性という言葉によって「科学的理解を提供するのは唯一の真なる理論である」ということが含意されるとするならば、それは理解に対して過大な要求を課していることになるであろう。我々は同じ現象を相異なる複数の理論によって理解できるということを考慮するならば、虚偽が理解にとって有用なものとなりうることを認め、それがなぜ有用なのかを説明できなければならない。

インザ・ローラーは、虚偽がしばしば理解に対する認識的価値を持つことを認める一方で、それは理解の内容を構成する説明の要素にはならないと主張し、理解の事実性を擁護しようと試みている（Lawler 2021）。彼女によれば、我々は偽なる仮定を導入することによって、他から見分けることが困難な真なる情報への認識的アクセスを可能にする。虚偽から真の情報を抽出することによって現象の理解が達成されるが、虚偽自体は理解の内容に含まれない。頂上に登るためには梯子が必要だが、一度そこに到達すれば梯子は不要になるのと同様に、理解を達成するためには虚偽が必要だが、一度理解が達成されれば虚偽は不要である

という[6]。

ローラーの立場は前章で議論したストレヴァンスの理論に類似している。彼女によれば、理想気体が現象の理解に寄与するのは、分子の大きさや分子間力を無視することが、気体のボイル的挙動の理解の内容には含まれないためである。しかし、すでに論じたように理想化によって排除された要素が現象を構成する要素に含まれないという見方は、理想化の範囲を不当に狭く見積もっている。我々は分子の大きさをさまざまに変化させることが、気体のボイル的挙動にどのような変化を生じさせるのかを調べることができる。

また、虚偽の中から真の情報を抽出することがいかにして可能になるのかという点についてローラーは十分な説明を与えていない。ボイル的挙動を導出することを可能にするような分子の運動の仕方が真なる情報であるということはいかにして正当化されるのであろうか。ある現象を説明できることとそれが真であることがどのようにしてつながるのかはまったく明らかではない。

理解に事実性が要求されるかどうかという問題は事実性という言葉をどのように解釈するかに依存しているように見える。現象を理論と対置される対象として捉える限り、モデルによって導入される仮定は真偽という性質を持たざるをえない。しかし、このような 2 項対立図式が否定されるなら、真偽や事実性という言葉によってモデリングや理解という概念を定式化することは意味をなさなくなるであろう。もし事実性という概念が意味をなさないのであれば、理解に事実性が要求されるのかという問いはナンセンスなものとなる。本論では第 6 章で、モデルと現象は対置的な関係にあるのではなく、前者が後者を構成するという関係にあることを論じる。そこでは、理解に事実性が要求されるのかという問題は生じないのである。

3.4 文脈主義の課題

科学的理解の文脈主義は、科学的理解が因果性の把握に限定されないという事実にうまく適合する。前の章で論じた理解の因果理論によれば、理想化とは現象の因果関係を抽出することであり、理解とは現象の因果パターンを表象することであった。しかし、理想化の役割が因果関係の抽出に留まらないとするならば、理想化による科学的な理解の仕方も因果パターンの表象に留まらないことになるであろう。デ・レクトの文脈主義的な理解概念によると、理解を提供する理論は、科学者のスキルや文脈に応じて、因果的なものでもありうるし、統合的なものでもありうる。因果性は現象の理解にとって必要な要件ではない。

理解の仕方に多様な方法を認める立場において問題になるのは、科学的に妥当な理解の仕方と、それ以外の理解の仕方、すなわち**誤解**（misunderstanding）をいかにして区別することができるのかというものである。惑星が楕円軌道になるという現象を「ティタン神族のア

---

[6] ここでローラーはルートヴィッヒ・ウィトゲンシュタンの有名な梯子の比喩を用いている。

トラスが惑星を運動方向に押し続けているから」というふうに説明するとする。この説明をわかりやすいという理由で科学的な理解を提供するものとして受け入れることは到底できないであろう。デ・レクトは科学的理解において、理論やモデルのインテリジビリティは必要条件に過ぎず、それを達成するためには別の認識的価値が要求されることを認めている。

> CUP によると、インテリジブルな理論*T*を持つことは[現象]*P*を科学的に理解するための単なる必要条件である。明らかに、インテリジビリティだけでは現象の説明的理解の達成に成功するために十分ではない。・・・そのために、[CUP]は経験的十全性と内部整合性という 2 つの基本的な科学的価値に従っている。・・・経験的十全性と内部整合性は、科学的な理論と説明に対する基本的な要請として一般に受け入れられている。ただし、それらは理論化や説明のための厳格な制約としてではなく、価値として機能するということに留意すべきである。・・・それにもかかわらず、適当な度合いの経験的十全性は現象の理解を提供する説明にとって必要な条件であるように思われる（de Regt 2017, 93）

デ・レクトは科学的理解を提供する理論の性質に多くのものを認めていながらも、そこには少なくともある一定の経験的十全性が要求されると考えている。彼によれば、占星術師が個人の習性を説明するとき、それが天体の運行に基づくインテリジブルな理論体系に従っているのだとしても、個人の習性を理解しているとは言えない。彼らの理論は天体の運行と個人の習性の関係について経験的に十全ではないからだ。

デ・レクトは理論のインテリジビリティが科学的理解にとって重要な役割を果たすことを明らかにしたが、それは科学的理解の必要条件を与えているに過ぎない。科学的理解に要求される他の認識的価値については明言を避けている。科学的理解に要求される他の認識的価値についての判断を一旦保留するなら、デ・レクトの CUP は次のように論理的に弱めた形式で述べ直すことができる。

> 弱い CUP：ある現象*P*が科学的に理解されるのは、インテリジブルであり、*P*を適切に捉えている理論に基づいた*P*の説明が存在する場合であり、その場合に限る。

ここで、現象を適切に捉える理論を経験的に十全な理論と解釈すればデ・レクトの CUP が得られる。我々の次なる課題は理論が現象を適切に捉えるということの意味を解明することである。ニュートンの理論はインテリジブルであり、なおかつ、現象を適切に捉えているからこそ現象の理解を提供するのだ。このことは裏を返せば、「ティタン神族のアトラスが惑星を運動方向に押し続けている」のような直観的には科学的とは見なせないような説明であっても、もしそれが惑星運動の適切な表象の仕方であることが正当化されるなら、ニュートンの理論やアインシュタインの理論に基づく説明と同等の権利で科学的な理解を提供

していると主張することができるであろう。ここで注意しなければならないのは、「適切な表象」を真理や事実性に訴えることで特徴付けることは単に議論を後退させるだけであるということだ。本章で見てきたように、真理へのコミットメントは科学者が現象を理解する上でそれほど重要ではないのであった。科学者は同一の現象を相異なる理論やモデルによって理解することができる。ニュートンの理論とアインシュタインの理論は共に惑星の軌道を説明するが、両者が共に真なる表象であることはありえない。もし実在との一致としてモデルの適切な表象を特徴付けるなら、両立しない異なるモデルによって現象が理解できるという事実は説明できないであろう。

このことを念頭に置いた上で、以降の章では、理論をモデル群の提示とする見解を紹介し、モデルが現象を適切に表象するとは何を意味するのかについて考察していく。しかし、本章を締めくくる前に、ここでデ・レクトの理解概念におけるもう一つの問題を指摘しておかなければならない。それは彼の理解概念の分類に関するものだ。これまで述べてきたように、デ・レクトは科学的な理解をその心理的体験から切り離し、主体が現象を科学的に理解しているとはインテリジブルな理論に基づいてその現象の説明を与えることであると特徴づけた。理論がインテリジブルであるとは、主体がそれを使用できるということであり、その使用を促すような性質として因果性や統合性などが挙げられていた。しかし、デ・レクトは理論のどのような性質がその理解を生じさせうるかを明確にしているが、そもそも理論を理解するとは何を意味するのかはあまり明確にしていない。理論の理解の意味が明確にならなければ、それに基づく現象の理解の問題は単に問いの移し替えに過ぎなくなってしまう。もちろん、デ・レクトはその分析を完全に放棄しているわけではない。例えば、彼は理論を理解しているための基準として、具体的な計算を実行しなくても、その定性的帰結を知ることができるということなどを挙げている。しかし、彼はどの提案も暫定的なものに過ぎないことを認めている。この問題を解消するためには、理論やモデルと現象の関係を適切に捉える観点が要求されるが、ここではまだそれを論じることができる段階にはない。理論とモデルの関係、そしてモデルの適切な表象について議論したあと、第 6 章で再びこの問題が検討されるであろう。

第 4 章　モデルと構造主義

本章では、科学哲学において、科学理論に対する捉え方が言語中心的なアプローチからモデル中心的なアプローチへと転換していく流れを整理し、デ・レクトのインテリジビリティという概念が適切な解釈の下でモデルに対しても適用できることを示す。そして、デ・レクト自身が理解を提供する理論の認識的価値として取り上げている経験十全性の妥当性を検討する。

4.1 科学理論の統語論的見解

経験的十全性はいわゆる**受容された見解**（Received View）に対するアンチテーゼとして登場した。「受容された見解」とは、主に論理実証主義によって展開された、科学理論を一群の公理系と世界との指示関係として捉える見解である。このような立場は科学理論の**統語論的見解**（Syntactic View）と呼ばれる。これに対して、科学理論をある一群のモデルの提示と見なし、モデルを科学的探究に中心に据える立場が登場する。この立場は科学理論の**意味論的見解**（Semantic View）と呼ばれる[7]。この章では、理論を言語的対象と見なす統語論的見解からモデル中心的な科学観である意味論的見解が登場するまでの過程を整理し、科学モデルの位置づけがどのように転換してきたのかを確認する。そして、経験的十全性はモデルについての構造主義的な見解の一種であることを示し、それが抱える問題について論じる。

ルドルフ・カルナップは統語論的見解の最も影響力のある人物として知られている（Carnap 1952）。彼によると、科学理論を記述する言語は、まず、論理語と非論理語に分けることができる。論理語とは、¬（not）、&（and）、∨（or）、→（if … then）のような論理結合子や∀（all）、∃（exist）のような量化子などからなる。一方、非論理語とは論理語以外の語であり、それはさらに**観察語**（observational term）と**理論語**（theoretical term）というカテゴリーに分けることができる。観察語とは「赤色」や「熱い」や「固い」などの直接に観察できる性質を指示する語であり、理論語とは「電磁場」や「温度」などのように直接に観察できない性質を指示する語を意味する。これらの性質は、個体定項としての時空点に帰属される。理論語は**対応規則**（correspondence rule）と呼ばれるルールによって観察語と結びつけられる。カルナップによれば、科学における経験的に有意味な言明はすべてこれらの語の組み合わせによって表現できる。ある一つの理論を提示するとは、そのうちの最も基礎的な言明（公理）と対応規則を与えることに他ならない。統語論的見解によると、科学理論は言語的対象として見なされるのである。

論理実証主義にとって、現象を科学的に説明するとは、厳密な推論規則を適用することに

---

[7] フリッグは統語論的見解、意味論的見解という表現は誤解を招きうるとして、それぞれ言語論的見解（Linguistic View）、モデル論的見解（Model-Theoretic View）と表現することを提案している（Frigg 2023a）。

よって、理論からその現象が帰結することを示すことにある。理論を少数の基礎的な言明の集まりと見なす考えは、古代ギリシアの数学者ユークリッドがまとめた『原論』に遡ることができる。彼は当時知られていた平面幾何学の命題がたった 5 つの公理から論理的に演繹できることを示した。ユークリッドの理論体系はその後の自然哲学に決定的な影響を与えた。ニュートンの『プリンキピア』は、定義と公準、公理から始まって、次々と定理を証明していくというユークリッドのスタイルを模倣している。ブルバキは『数学原理』において、集合という原初的対象とそこで成立するいくつかの公理からさまざまな数学的定理が演繹できることを示した。現代数学において、ある命題の妥当性の根拠はそれが扱う事物にあるのではなく、それを導く厳密な論証にあるという見方は通説となっている。

統語論的見解によれば、モデルは理論の直観的理解を助けるために使用される身近なオブジェクトに過ぎない。例えば、通常のユークリッド空間における球面はユークリッド幾何学の平行線公準を異なる公準で置き換えることによって得られるリーマン幾何学の 2 次元的なモデルとして理解できる。この場合、リーマン幾何学は理論に対応し、地球儀などがそのモデルに対応する。我々はリーマン幾何学からどのような性質が帰結するのかを、地球儀において成り立つ性質を研究することで知ることができる。リーマン幾何学では、どのような三角形の内角の和も 180 度より大きいことが帰結するが、このことは地球儀に三角形を描いてみることで確認することができる（図 4.1）。統語論的見解にとって、モデルは理論の帰結を直観的に把握するという学習的な価値を持つ。ただし、そのような身近なオブジェクトの使用はしばしば理論の誤った解釈へと我々を導く。ユークリッドのオリジナルの証明は明示されていない多くの前提を暗黙に仮定しているということが 19 世紀までに多くの数学者によって指摘されてきた。例えば、『原論』の最初の定理である正三角形の作図では、2 つの円が交点を持つことを暗黙に仮定している。そのような暗黙の仮定が入り込む理由は、ユークリッドがその証明を実際の幾何学的図形のイメージに導かれて展開したことに起因

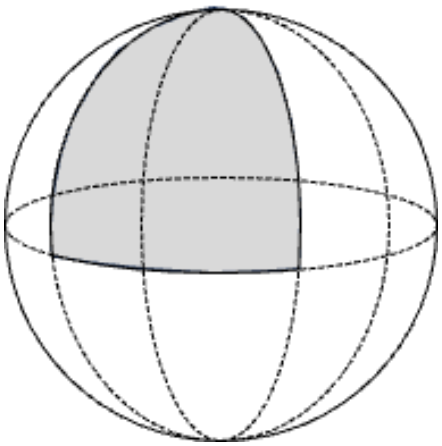

図 4.1 球面三角形

しているのであろう。モデルとなるオブジェクトは理論が言及していない多数の性質を持ち合わせているので、公理の集合としての理論からは帰結しない事実を理論の帰結として取り違えてしまうというリスクが存在する。このような不備を是正するべく、ダフィット・ヒルベルトは 20 あまりからなる新たな公理系によって幾何学を再構築することを試みた（Hilbert 1903）。ヒルベルトは数学においてユークリッドの統語論的アプローチを先鋭化させたが、論理実証主義の哲学はその試みをさらに科学理論一般にまで押し広げようとする試みであったと言えるだろう。

このような理由から、統語論的見解にとっては、モデルを使用することは理解に役立つ利益よりも誤解に導くリスクの方が大きいものと見なされることになる。彼らにとって、モデルは言語的対象としての科学理論をインテリジブルにするための道具的価値しか持たない。そこでは、科学モデルそれ自体が世界を表象したり、インテリジビリティを持ったりするという観点は存在しないのである。

統語論的見解は理論を言語的対象として捉える立場なので、同じ理論が異なる言語的表現によって記述できるという事実を説明しなければならない。例えば、古典力学はニュートン力学、ラグランジュ力学、ハミルトン力学という異なる形式で展開できる。これらの形式はそれぞれ異なる基本方程式を持つが、同一の理論であると考えられている。統語論的見解の支持者はこれまで、同一な理論の基準を与えるさまざまな試みを展開してきた[8]。しかし、どのような基準が理論の同一性を適切に特徴付けているのかをめぐる問題はまだ見解の一致を見ていない。この点が明らかにされない限り、言語による科学理論の把握は単にその一面を捉えているに過ぎないであろう。

科学理論の統語論的見解は、科学理論を言語的対象として捉える見方であり、そこでは科学モデルは論理モデルと同一視される。つまり、科学モデルは基礎的言明の集まりとしての

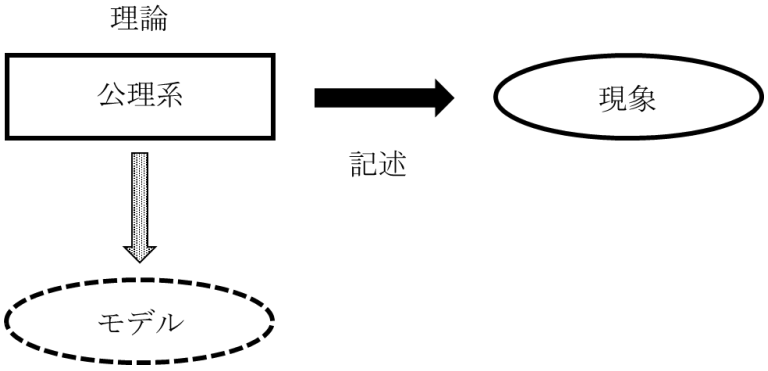

図 4.2 理論とモデルの統語論的図式

[8] 例えば近年では、クラーク・グリマーの定義可能同一性（definable equivalence）やハンス・ハルヴォーソンの圏論的同一性（category theoretic equivalence）などが提案されている（Glymour 2013, Halvorson 2016）。

科学理論から帰結する個々の言明や、無矛盾性などの内部整合性を評価するための道具に過ぎない。このような見方に対して、モデルをその言語的表現から独立した自律的オブジェクトとして捉えようとする見方が次の節で紹介する科学理論の意味論的見解である。

4.2 科学理論の意味論的見解と経験的十全性

パトリック・スッピスは、科学理論の公理は世界の観察可能な事物を記述しているのではなく、数学的構造を定義しているのだという見解を提示した（Suppes 1960）。この見解によると、公理系はある一群の数学的構造（モデル）を記述しているのであり、そのように記述された数学的構造（モデル）が世界を表象することになる。同一のモデルはさまざまな言語的表現によって特定することができるので、統語論的見解において生じた理論の同一性基準の問題は生じない。意味論的見解は、言語と世界を直接に「指示」という関係で結び付けるのではなく、中間にモデルを介在させることで統語論的見解の問題を克服する試みであると言える。

意味論的見解にとって、モデルはその言語的表現とは独立に世界を表象する自律的オブジェクトとして理解される。意味論的見解は言語と現象との結びつきをモデルと現象とのそれに置き替える見解であるとすれば、モデルが現象を表象するとは何を意味するのかを明確にしなければならない。意味論的見解の草分け的存在であるファン・フラーセンは経験的十全性という概念によってそれを説明しようと試みている（van Fraassen 1980）。

ファン・フラーセンの経験的十全性がどのような概念なのかを理解するために、ここでは、彼の議論に従って、次のような幾何学的公理を考えてみよう。

(A0) 少なくとも一本の直線がある。
(A1) いかなる二本の直線に対しても、その両方に乗っている点は高々一つである。
(A2) いかなる二つの点に対しても、その両方に乗っている直線はちょうど一本である。
(A3) いかなる直線にも、少なくとも二つの点が乗っている。
(A4) 点の数は有限である。
(A5) いかなる直線にも、無限に多くの点が乗っている。

(A1)〜(A3)を持つ理論をT_0、T_0に(A4)を加えた理論をT_1、T_0に(A5)を加えた理論をT_2とする。各々の理論は内部整合的であり、T_1とT_2は共にT_0を論理的に含意する。さらに、統語論的見解に従えば、T_1とT_2は互いに不整合であるということが帰結する。なぜなら、T_1とT_2を組み合わせれば、「点の数は有限であり、かつ、無限である」という矛盾した命題が導かれるからだ。すなわち、理論をその言語的側面から分析する統語論的見解ではT_1とT_2は互いに相容れない理論であるということになる。

ファン・フラーセンは、これを意味論的見解から眺めてみると、理論のまったく違った側

面が見えてくると述べている。意味論的見解によると、理論はある一群の構造を記述している。ある理論のすべての公理を満たす構造は、その理論のモデルと呼ばれる。T_1のモデルは、例えば、図 4.3(a)のような 7 つの点と 7 本の線からなる図形である。また、点と線の関係を保ちつつ若干の変形を施した図 4.3(b)のような図形もT_1のモデルとして考えられる。このように、ある理論を満たす構造には無数のものがありうる。一方で、T_2を満たす構造とは、ユークリッドの公理を満たすような通常のユークリッド平面である。

さて、理論の意味論的見解が統語論的見解よりも豊かな帰結をもたらすことを示すため、ファン・フラーセンは**埋め込み**（embedding）という概念を導入する。彼によると、「一つの構造が、もう一つの構造の一部（部分構造）と同型であるとき、第一の構造は第二の構造に埋め込むことができる（Fraassen 1980）」。図 4.3(a)や図 4.3(b)のような図形はT_1のモデルであるが、これらはユークリッド平面に描かれている。つまり、これらの図形はT_2のモデルであるユークリッド平面に埋め込まれている。このことから、ファン・フラーセンは「T_1のいかなるモデルも、T_2のあるモデルに埋め込まれる（T_2のあるモデルの部分構造と同一視できる）」と結論づける。T_1とT_2について統語論的見解からわかることは、せいぜい、互いに不整合であるという事実だけであったが、意味論的見解からは一方が他方に埋め込まれるというより実り豊かな帰結をもたらすのである。

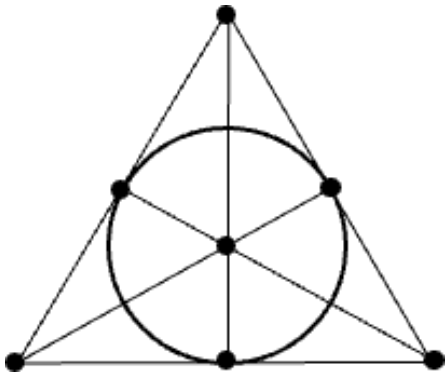

図 4.3(a) T_1のモデル

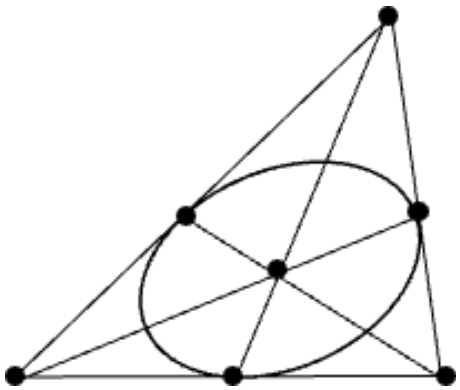

図 4.3(b) T_1のモデル

以上のような見解に基づいて、ファン・フラーセンは科学理論の経験的十全性を次のように定式化している。

> 理論を提示するとは、一群の構造、すなわちモデル群を特定し、それらのモデルのある一定の部分（経験的部分構造）を観察可能な現象の直接的な表象の候補として特定することである。実験報告や観察報告によって記述される構造は「現れ」と呼ばれる。理論

> が経験的に十全であるのは、あらゆる「現れ」がその経験的部分構造と同型であるようなモデルをその理論が持つ場合である。（Fraassen 1980, 64）

ファン・フラーセンによると、科学者がある理論を受け入れるのは、理論が提示するモデルのうちの一つが世界を正確に表象しているときであり、正確な表象とは経験的十全性に他ならない。そして、経験的十全性はモデルの経験的部分構造と現象から得られる「現れ」との間の同型性によって把握される。

ファン・フラーセンの見解は、モデルとターゲットの表象関係を同型性に基づいて捉える立場として一般化できる。このような立場は表象についての**構造主義**（*structuralism*）と呼ばれる。もし表象についての構造主義が棄却されるならば、経験的十全性が適切な表象の基準にはなりえないことになるであろう。次の節では、表象についての構造主義の見解を紹介し、その妥当性を検討していく。

図 4.4 理論とモデルの意味論的図式

4.3 構造主義

構造主義の基本的な戦略はモデルの本質をその構造に求める考え方である。彼らはモデルの物質的側面は表象にとって無関係であり、科学が目標にしているのは物理的事物に備わる抽象的構造であると主張している（cf. French & Ladyman 1999, da Costa & French 2003）。

ここで「構造」と呼んでいるものは、一般的には、集合論的構造として解釈される。集合論的構造Sは、ドメインと呼ばれる空でない集合UとU上の関係からなる添え字集合Rの対$\langle U, R\rangle$として定義される。例えば、$U = \{a, b, c\}$、$R_1 = \{\langle a, b\rangle, \langle b, c\rangle, \langle c, a\rangle\}$はじゃんけんのような 3 すくみ構造を定義する。演算はある特別な種類の関係として理解できる。例えば、たし算のような 2 項演算は、$\{\langle 1,1,2\rangle, \langle 1,2,3\rangle, \langle 1,3,4\rangle, \dots\}$のような 3 項関係として捉えることができる。ここで、ドメインや関係が具体的にどのような事物であるかは問題ではない。3 すくみ構造が（石、紙、はさみ）でも（ヘビ、ナメクジ、カエル）でも実現できるように、ある一つの構造はさまざまな具象的事物によって実現できる。

2 つの集合論的構造$S = \langle U, R\rangle$と$S' = \langle U', R'\rangle$が同型であるとは、それぞれのドメイン内の関係を保つような全単射$f: U \to U'$が存在する場合であり、かつ、その場合に限る。構造Sと

S'が同型であるということを、$S \cong S'$と表記する。構造主義によると、モデルと現象（データ・モデル）は共に数学的構造を備えており、前者が後者を表象するとは、両者の間に同型関係が成立する場合である。つまり、モデルMが現象Tを表象するとは、モデルMの構造S_Mと現象（データ・モデル）Tの構造S_Tの間に$S_M \cong S_T$という関係が成立することである。ニコラ・ブルバキはその一連の著書『数学原論』において、数学が研究するほとんどの対象は集合論的構造として記述できることを示した（cf. Bourbaki 1974）。彼らによると、数学が扱う構造は、順序構造、代数構造、位相構造の 3 つに大別されるが、これらの構造はすべて集合論的構造として記述することができる。例えば、実数は大小関係という順序構造と四則演算という代数構造を持った対象として記述される。数学の研究対象が集合論的構造であるとするなら、科学で重要なほとんどのモデルは集合論的構造を持ったオブジェクトとして理解できる。

表象の構造主義の利点は、モデルを研究することによって、なぜ現実の現象についての知識が得られるのかを非常にうまく説明しているように見えることにある。例えば、地球儀が現実の地球を表象しているなら、両者は同じ構造を持つので、地球儀において成立することが明らかになった構造は現実の地球においても成立すると考えるのは極めて自然だ。ニュートンの万有引力の法則やメンデルの遺伝法則、ミクロ経済学の市場モデルは、現実のターゲットがそれと同じ構造を持つため、我々の理解に役立つのだと考えられる。また同様に、表象の構造主義は「数学の不条理な有効性」に対して明快な答えを与える。

このような利点にもかかわらず、表象の構造主義は多くの問題を抱えているということを指摘しなければならない。その問題の一つは、構造の同型性は科学的表象の条件として強すぎるという点である。我々は前の章までに、科学モデルがいかに現実のターゲットの性質を歪めた仕方で表象しているかを見てきた。モデルは現象の構造全体を正確に表象しているわけではない。

いくつかの構造主義者たちはモデルとターゲットの同型性を部分的同型性に弱めることでこの問題に対処しようと試みる（cf. da Costa & French 2003）。2 つの構造$S = \langle U, R \rangle$と$S' = \langle U', R' \rangle$が部分的に同型であるとは、$S \cong S''$を満たすような$S'$の部分構造$S'' = \langle U'', R'' \rangle$が存在するということである。科学的表象の基準を部分的同型性に弱めれば、モデルは現象の持つ構造を完全に備えていなくてもよいことになる。ブランコに乗る子どもの力学モデルを構築するとき、我々はブランコの色や素材を無視して、子どもが受ける力や紐の長さに関連する構造を考慮するだけでよい。しかし、このような修正は抽象化されたモデルに対しては当てはまるが、理想化されたモデルに対しては当てはまらない。第 1 章で確認したように、理想化はモデルに含まれるパラメータ、例えば子どもにはたらく力を現実の値とは異なる値を持つものとして仮定する。このようにして組み立てられたモデルは、現実の現象とは異なる数学的構造を仮定することになる。したがって、理想化されたモデルを適切に扱うためには、部分的同型性は依然として強すぎる要求であると言えるだろう。

さらに、モデルを数学的構造として捉える立場では、同じ数学的構造を持った異なるモデ

ルが存在することをうまく説明できないという問題がある。これはワイスバーグによってモデルの個別化の問題と呼ばれているものである（Weisberg 2013）。例えば、ブランコの往復運動を記述する調和振動子モデルはバネの振動や化学結合のモデルとしても使用されるし、ロトカ＝ヴォルテラ方程式は生態学における捕食者-被食者関係だけでなく、経済における雇用率-労働分配率関係のモデルとしても使用される。構造主義的表象の観点からは、これらのものはすべて同じ一つのモデルであるということになる。しかし、通常の科学の用法に従えば、これらは互いに異なるモデルであると見なされるであろう。適切な表象理論は同じ数学的構造を持つモデルがいかにして個別化されるのかを説明しなければならない。

表象の構造主義のもう一つの問題は、数学的構造は抽象的な性質であるとすれば、我々はいかにしてそのような対象に認識的にアクセスすることができるのかという点である。モデルが現象を適切に表象しているのかどうかを知るためには、我々はモデルの持つ性質と現象の持つ性質とを互いに比較することができなければならない。構造主義に基づいてモデルの評価を行おうとすれば、必然的にモデルと現象の構造を比較することになる。しかし、現象に内在する数学的構造とは何を意味し、我々はいかにしてそれを知ることができるのかについて説得力のある説明はまだ提示されていない。科学の実践において、モデルの評価が実際に行われている事実を考慮すれば、我々は何らかの仕方でそれを可能にするようなモデルの持つ性質に認識的にアクセスすることができなければならないであろう。

以上の議論から、科学的な理解を提供するモデルの適切な表象の基準として、経験的十全性、あるいはより一般的に構造主義的な表象理論はそのままの形では受け入れられないことが示された。理想化によって異なる数学的構造を持つモデルが、現象の理解を提供すること、また、同じ構造を持つモデルであってもさまざまな現象を表象できることを考慮するなら、構造の（部分的）同型性は、適切な表象のための必要条件であるとも十分条件であるとも言えないだろう。さらに、モデルが現象の理解を提供するためには、我々はモデルの持つ性質に対して認識的にアクセスできなければならない。次の章では、こうした問題を解決するために「解釈」や「具象化」という概念を導入することで、適切な表象の在り方を探っていく。

第 5 章　解釈された具象化構造としてのモデル

前章で議論したように、科学モデルを数学的構造という側面だけから分析することは多くの困難に直面する。このような困難を克服する試みとして、この章では、モデルを「解釈された構造」として捉える見解と人工物として捉える見解を取り上げる。さらにそれらを統合すべく、モデルを「解釈された具象化構造」として捉える見解を提示して、モデルのより適切な捉え方を探っていく。

5.1 モデルの解釈と記述

ネルソン・グッドマンはあるオブジェクトがターゲットを表象するとき、そのオブジェクトは常にターゲットを何ものか**として**（*as*）表象しているということを強調した（Goodman 1976）。地球儀は地球を球として表象しており、ミクロ経済学モデルは経済主体を合理的な意思決定者として表象している。モデルは現象をそれが実際に持つのとはまったく異なる性質を持つものとして表象する。液滴モデルは原子核を液体として表象するが、物理学者たちは原子核が文字通りに液体としての性質を持つと考えているわけではない。

エルギンはグッドマンのアイディアを推し進めて、モデルXがターゲットTをZとして表象するのは、XがTをそのようなものとして指示する**Z表象**（Z-repreentation）であるときであると述べている（Goodman & Elgin 1988）。重要なのは、Z 表象は Z というオブジェクトが実在していなくても成立する表象概念であるということである。例えば、ユニコーンのイラストはそれが実在しなかったとしても「ユニコーン表象」である。エルギンによると、オブジェクトが何かを表象するとき、それが実在しているかどうかは問題ではない。モデルの条件はそれが何ものかとして表象されるという事実にあるのであって、それが実在するかどうかは必要ではないのだ。

フリッグとヌエンはグッドマンやエルギンの as 表象のアイディアを発展させ、DEKI 説と呼ばれる表象理論を展開した。DEKI 説という名前は、この理論の重要な要素である**指示**（denotation）、**例示**（exemplification）、**かぎ**（key）、**転嫁**（imputation）の頭文字に由来する。地球儀が地球を表象するとき、地球儀は地球を指示している。しかし、「地球」という単語もまた地球を指示していることを考えるならば、指示概念だけでは表象概念を捉えきれないことは明白であろう。モデルがターゲットを表象するとき、そこには単に言葉が対象を指示するということ以上の事態が成立していなければならない。そこで出てくるのが「例示」という概念だ。この概念はグッドマンやエルギンによってすでに唱えていた概念であり、DEKI 説においても取り入れられている。フリッグらの定式化によると、オブジェクトXが性質Pを例示するとは、XがPを例化しており、かつPが参照されているということである。地球儀は「球」や「青」や「プラスチック」などのさまざまな性質を例化しているが、そのすべてが参照されているわけではない。幾何学の講義の文脈では「球」という性質が参照さ

れるであろうし、地理学の講義では「青」を参照することで、海洋の大きさに言及するかもしれない。このとき、幾何学の講義では、地球儀は「球」を例示し、地理学の講義では、地球儀は「青」を例示している。すなわち、オブジェクトが例化する性質は文脈によらずオブジェクト自身に内在的な性質であるが、それが例示する性質は参照される文脈に応じて変化する。

ここで注目すべきは、我々はモデルが持つ性質そのものをターゲットに転嫁するわけではないということだ。我々は地球儀の青い部分を「海洋」として解釈し、これを現実の地球に転嫁する。このように、モデルとなるオブジェクトの持つ性質を別の性質として**解釈**（interpretation）し、この解釈された性質をモデルが例示することを、フリッグらは ***I* 例示**（*I*-exemplification）と名付けている。この *I* 例示はグッドマンやエルギンの *Z* 表象をより精緻化した概念であると言うことができるであろう。*I* 例示された性質は「かぎ」によって、表象されるターゲットに応じた適切なスケールに変換される。地球儀が *I* 例示する「海洋」は適切な縮尺を用いて拡大され、現実の地球へと転嫁されるのである。つまり、モデルはそれ自身が持たない性質を *I* 例示し、その性質は「かぎ」によって適切なスケールに変換されたのちに、ターゲットに転嫁される。

DEKI 説は多くの場合モデルは現象を誤って表象しているという事実をうまく取り込んでいる。モデルに要求されるのは、同型性や類似性などのターゲットとの対応関係ではなく、性質を持つオブジェクトとその解釈である。DEKI 説に従えば、モデルが現象を正確に表象しているとは、モデルが現象に転嫁する性質を実際に現象が持っているということになる。同様にして、DEKI 説はモデルがしばしば具体的なターゲットを持たないことに対しても明快な説明を与える。フリッグらによれば、ターゲットを持たないモデルは *Z* 表象の一種として捉えられる。ターゲットを持たないモデルの例として、物理学におけるエーテル・モデルがある。エーテル・モデルは光を伝える媒質としてエーテルという実体を想定するモデルであり、19 世紀までの物理学では一般的に用いられていたが、現在ではその存在は否定されている[9]。生物学では、ロナルド・フィッシャーは 2 つよりも多くの交配グループを持つ生物のモデルである多性モデルを考案した（Fisher 1930）。しかし、フィッシャー自身はそのような生物種は自然界には存在しないと考え、単に理論的な関心からその研究を進めた。ところが、現在では、多数の交配グループを持つと考えることでその振る舞いをうまく説明することができる生物種が複数発見されている（Weisberg 2013）。科学の実践では、ターゲットを表象していると考えられていたモデルが実はターゲットを持たないことが判明したり、反対に、ターゲットの表象が意図されていないモデルが実は具体的なターゲットを持つことが判明したりするケースはありふれている。このような**ターゲットレス・モデル**（targetless model）の存在は DEKI 説によれば、モデルが転嫁する性質をターゲットがまったく持たないということによって説明される。ただし、そのことはモデルがターゲットを表

[9] エーテル・モデルについては第 7 章でより詳しく論じる。

象していないということを含意しない。モデルはオブジェクトの *I* 例示（解釈）として得られるのであり、ターゲットがどのような性質を持つかに依存しないのである。しかし、モデルの正確性が問題になるときには、それとターゲットが持つ性質との何らかの比較が必要となる。

フリッグやヌエンと同様に、ワイスバーグはモデリングにおいて科学者の解釈が果たす役割を強調している（Weisberg 2013）。彼は表象の構造主義に従えば、数学的構造が等しい異なるモデルを個別化できないことや、純粋な数学的構造が因果性を表象できないという問題に触れ、モデルは「解釈された構造」であることを明確に打ち出している。

> 数理モデルはもっぱら数学的構造だというわけではない。むしろ、数理モデルは解釈された数学的構造である。したがって、同一の数学的構造が、振り子、バネ、回路に用いられる場合、これらのモデルで異なるのは構造の解釈であって、とりわけ、割り当ておよび理論家によって意図された範囲が異なるのである。・・・数学的な組み合わせは因果的ではないので、それらが因果的結合を表せるという事実は、単にそれらの数学的構造だけに関わることがらではない。微分方程式が因果的構造を表すという数学的な理由は一切ない。むしろ、方程式が因果的構造を表しているかどうかは、これらの方程式がどのように使われているかで決まるのだ。したがって、因果モデルを扱っているのかどうかを決める際には、解釈を考慮すること、特に割り当てを考慮することが必須となる。（Weisberg 2013, 109-110）

ワイスバーグによれば、同じ数学的構造を科学者が多様に解釈できることが多様なモデルを生み出している。調和振動子モデルはバネの振動を表象することもできるし、個体中の分子の振動を表象することもできる。モデルを解釈された構造として理解することで、科学者が異なるモデルとして扱うものを正しく個別化することができるのだ。

フリッグやヌエン、ワイスバーグなど現代の多くの科学哲学者はモデルの解釈を重視するが、構造の解釈がどのようにして成立するのかについて彼らは素朴な理解に留まっているように思われる。地球儀などの具象モデルであれば、青い部分を海洋として解釈することは容易だ。しかし、数理モデルなどの抽象的なモデルでこの解釈がいかに成立するのかを説明することは難しい。ワイスバーグは、我々が構造を解釈するとき、それを記述する方程式や図表を媒介すると主張する。ただし、彼はモデルそれ自体とモデルの記述を明確に区別すべきであると強調している。

> モデルについて論じたり、何かを書いたり、写真や図表を見せたりするときには、私たちはモデル記述を行っている。こうした記述は、モデルそのものから区別されなければならない。（Weisberg 2013, 47）

ワイスバーグがモデルとその記述を区別すべきだと主張する理由の一つは、ある一つのモデルを互いに異なる複数の仕方で記述できるという事実にある。地球儀のような具象モデルの場合、その写真や絵などがモデル記述となるが、これらの記述は複数の仕方で実現できる。また、バネの振動モデルなどの数理モデルは変数としてどのような記号を選んでも同一のモデルを記述しているものとして解釈される。例えば、次の 2 式はm、μを質量、x、θを変位、t、τを時間、k、κをバネ定数と解釈すれば、その記述は異なるにもかかわらず、同じモデルである。

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = -kx \qquad \text{(式 5.1)}$$

$$\mu\frac{d^2\theta}{d\tau^2} = -\kappa\theta \qquad \text{(式 5.2)}$$

このことは科学者が通常、両者を同じモデルとして扱うという事実に適合する。ワイスバーグは、モデル記述はモデルを特定し、モデルを解釈することを助けるが、それ自身はモデルの構成要素ではないという見解を提示している。

5.2 人工物説

ワイスバーグが認めているように、数学的構造に解釈を与える場合、我々は常にその記述である方程式に現れる変数に対してそれを行う。このことを考慮するならば、仮にモデル記述がモデルの構成要素ではないとしても、それがモデルにとって重要な役割を果たしていることは否定できない。我々は純粋な数学的構造に直接には認識的にアクセスすることはできないのだから、そのようなアクセスは常に記述を通じてなされる。

モデル記述をモデル本体と切り離す見解に対して、ターヤ・クヌッティラはモデルが持つ具象物としての側面を重視すべきであるという見解を提示している（Knuuttila 2021）。彼女によれば、モデルはターゲットを表象するだけでなく、それが**人工物**（artifacts）であるという側面を持ち合わせており、この両面から分析されない限り、我々はモデルを適切に捉えることができない。人工物とは抽象的対象を実現する物理システムや生物システムである。人工物説はモデルをすでに出来上がった完成品と見なすのではなく、科学者によって常に修正され、操作されるダイナミックなものとして捉える。クヌッティラにとって、モデル記述は抽象的な対象としての数理モデルを実現し、我々がそれを操作することを可能にする積極的意味を持つのである。

クヌッティラはモデルが現象に何らかのつながりを持つという意味での**外部的表象**（external representation）に加えて、モデル・システム内部で成立する**内部的表象**（internal representation）を導入する。例えば、急カーブを意味する道路標識は他の道路標識からなるシステムの関係性の中で内部的に理解することもできるし、もし適切な位置に置かれれば、

それは危険を知らせる機能を持つようになる。道路標識はこのように内部的な表象と外部的な表象を行っている。このことは科学モデルでも同様である。クヌッティラによれば、現象とは独立に成立する内部的表象の存在がモデルをそれ自体として研究することを可能にしている。

しかし、科学モデルが知識の拡大を可能にする認識的人工物であり、机や椅子などの通常の人工物からは区別されることを考慮するなら、通常の人工物にはない何らかの性質をモデルが備えていることが示されなければならない。人工物説はモデルのダイナミックな側面を捉えることに成功しているが、それがなぜ知識の拡大をもたらすのかについては十分に明らかにしていない。それを示すためには、人工物がどのような種類のオブジェクトなのか、とりわけ内部的表象を可能にする機構がいかなるものなのかという点をもっと掘り下げていく必要があるだろう。

5.3 具象化された構造

本節では、フリッグやワイスバーグらの「解釈された構造」とクヌッティラの「人工物」というアイディアを統合し、より洗練されたモデルの捉え方を目指す。

構造主義は科学において数学が非常に重要な役割を果たしているという事実を、モデルとターゲットが共に数学的構造を備えたオブジェクトであるというアイディアによって説明した。つまり、科学における数学の役割を考慮するなら、モデルが認識的価値を持ちうるには、それが数学的構造を持たなければならないことは否定できない。一方で、クヌッティラが主張するように、モデルは単に抽象的であるだけではなく、我々がそれを操作することを可能にするような具象的なオブジェクトでなければならない。

このような対立を乗り越えるために本論が提示するのは、モデルを**具象化された構造**（concretized structure）と見なす見解である。我々が認識的にアクセスできるのは常に「具象化された構造」であり、具象的事物を欠いた純粋な数学的構造のようなものは把握できない。方程式は構造を持つ自律的なオブジェクトの記述なのではなく、それ自体が具象化された構造なのである。ただし、方程式は単独でその構造を具象化しているわけではない。方程式などの数学的対象を操作するとき、我々は数学的に妥当な推論に従わなければならない。数理モデルの具象化は、方程式のような記号そのものだけでなく、その記号を組み合わせたり、変形したりする規則を含めて達成される。記号の形成や変形は我々が同じ規則に従うという事実によって具象化されるのである。つまり、同一の方程式であっても異なる変形規則に従えば、異なる数学的構造が具象化される。

具象モデルの場合、構造の具象化は直接的に理解できる。地球儀はそれ自体が具象化された構造である。具象モデルと数理モデルとの違いは、前者が具象的事物によって構成され、後者が抽象的事物によって構成されるという事実にあるのではない。両者の違いは、構造を具象化する仕方にある。具象モデルは通常の可視的な具象的事物によって具象化されるが、

数理モデルは記号とその形成／変形規則によって具象化される。ただし、ある種の数理モデルは図形的に可視化できることもある。その場合、図形とそれを扱う規則が構造を具象化する。

構造の具象化の仕方はその解釈に影響を与える。例えば、ニュートン力学とラグランジュ力学は同じ数学的構造を異なる仕方で記述していると見なすことができるが、前者が「力が加速度を生じさせる」という日常的な体験に引き付けやすい解釈を許す一方で、後者はそのような具体的な解釈ができない。また、波動力学と行列力学は数学的に等価な理論だが、物理状態の記述に波動関数を用いる前者と行列を用いる後者ではその可能な解釈の仕方に大きな違いがある。シュレーディンガーは後者の定式化が時空間的に可視化できないことを批判したことはすでに確認したとおりである。この観点からは、波動力学と行列力学は同じ数学的構造を持ちながら、互いに異なるモデルとして見なされることになる。このことは、同じ科学理論ないしは同じ科学モデルであることの基準を単に数学的な等価性に置くとすれば望ましくない結果であろう。しかし、科学的な理解を科学の主要な目的に定めるなら、理解の違いを生む理論やモデルの特性はそれらの本質的な構成要素として見なされるべきである。理解という観点では、数学的構造よりも具象化や解釈が重要な要素となるのだ。

具象化の仕方がモデルの構成要素に含まれるという見解に対して想定される批判は、ワイスバーグがモデル記述において指摘した点に関連するが、通常明らかに同じモデルと見なされるようなケースであっても、その具象化の仕方が多数あるのだとすれば、それだけ異なるモデルがあることになってしまうというものだ。この問題を解消するために、本論は具象化構造の**移行可能性**（transferability）という概念を導入する。2 つの具象化構造が互いに移行可能であるとは、それに対して同じ解釈が与えられる要素が一方から他方へと一対一に対応付けられるということである。例えば、式 5.1 と式 5.2 は、mをμへ、xをθへ、tをτへ、kをκへと対応付けることで互いに移行することができる。ここで、対応づけられる各々の要素（記号）に対しては同じ解釈が与えられている。さらに、移行可能性は同値関係なので、これによって具象化構造の集合を類別し、同値類を作ることができる。このようにして作られた同値類がある一つのモデルに対応する（図 5.1）。つまり、式 5.1 と式 5.2 はある適切な解釈の下で同じモデルであるということは類別された具象化構造という観点から説明できる。我々はこの種の類別を日常的にも無意識に行っている。例えば、同じ記号を使っていても、本論にプリントされた式 5.1 と別のテキストに掲載された式はその具象物としての側面においては何かしらの点で異なる。それらが同じ記号であると認識できるのは、両者を同値関係によって類別しているからに他ならない。具象化構造の類別は、具象モデルにおいても成り立つ。地球儀が地球のモデルであるというとき、我々はある特定の地球儀が地球のモデルであることを主張しているわけではなく、移行可能性によって類別されたある一群の地球儀が地球のモデルであると主張している。

移行可能性は具象物の間に定義される関係であって、その数学的構造については一切言及していない点に注目されたい。構造主義者にとって、ある一つのモデルは数学的構造が等

しい対象の集まりとして同定されていた。しかし、我々はそのような構造を直接に知ることができないとすれば、モデルの同定は具象物を通じてなされると考えるべきである。移行可能性は、具象物を構成する部分間の対応関係に基づいてモデルを同定するため、我々はあらかじめその数学的構造を知る必要はない。数学的構造の把握はモデルの同定に先立つのではなく、むしろ多数の具象物がある一つのモデルとして同定されることによって、我々はそれらがある共通の数学的構造を備えているということを把握するのである。

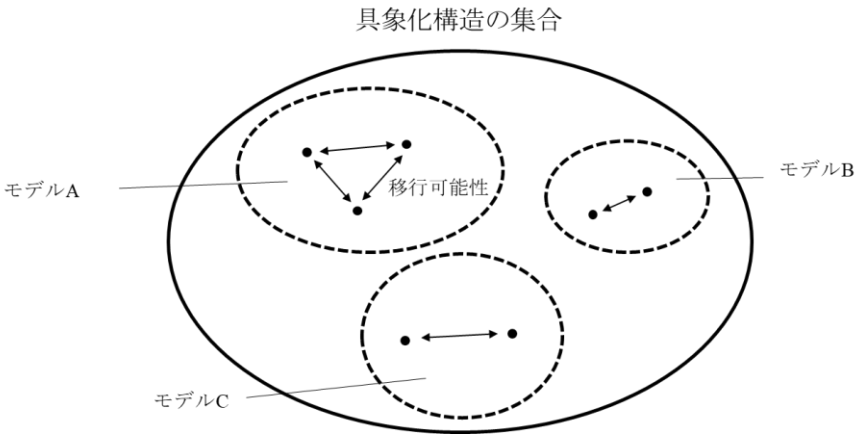

図 5.1 移行可能性による具象化構造の類別

具象化構造について理解するために、ファン・フラーセンの七点幾何学を思い起こそう。彼によると、図 5.2 は理論T_1の一つのモデルであった。そして、この図は理論T_2のモデルであるユークリッド平面に描かれている。よって、T_1の構造はT_2の部分構造と同型であるため、

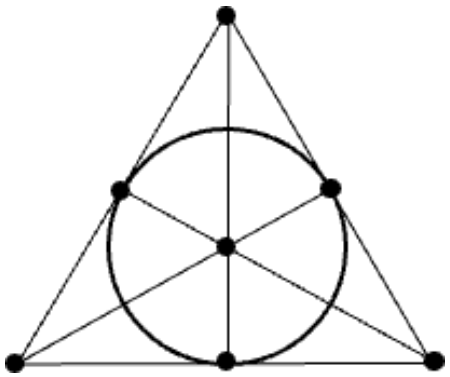

図 5.2 ファノ平面

T_1はT_2に埋め込まれるのであった。しかし、ピーター・ターニーは数学的構造という観点から言えば、T_1はT_2の部分同型とは見なせないことを指摘した（Turney 1990）。図 5.2 は有限射影幾何学のモデルの一つとして知られ、ファノ平面と呼ばれている。ユークリッド平面では交点を持たない 2 本の直線が存在するのに対して、射影平面では任意の 2 本の直線が交点を持つ。さらに、ユークリッド平面は、無限個の点と直線（曲線）から構成されるのに対して、有限射影平面は高々有限個の点と直線（曲線）から構成される。ターニーは、射影平面はユークリッド平面と矛盾するので、図 5.2 はユークリッド平面に埋め込むことができないと述べている。

ターニーが主張するように、純粋に数学的構造の観点から見るなら、図 5.2 はユークリッド平面と部分的にさえ同じ構造を持ちえない。しかし、同じ構造を持たないのだとすれば、なぜファノ平面はユークリッド的に描くことができるのだろうか。この問題を解消する方法は、図 5.2 がすでに具象化された構造であると見なすことだ。すなわち、図 5.2 は幾何学的図形によって具象化された構造なのである。ファノ平面をユークリッド的に描くことができる理由は、ファノ構造とユークリッド構造が部分的に同型であるという事実にあるのではなく（実際、両者は部分的にさえ同型ではない）、それらが共に同じ種類の幾何学的図形によって具象化できるという事実にある。ただし、その場合、我々は図形を構成する各要素に対して異なる解釈を適用する必要がある。有限射影幾何学の公理を満たすモデルをユークリッド的に具象化するためには、図 5.2 の「円」を直線として解釈し、「●」のみを点として解釈しなければならない。この意味で、両者はやはり異なるモデルであると理解されるのだ。

以上のように、モデルは数学的構造、具象化、解釈という 3 要素によって成り立つことが示されたが、これらの要素は相互に依存的な関係を持っている。例えば、明らかに具象化の仕方はその数学的構造に依存している。ユークリッド構造を図形的なオブジェクトによって具象化することは容易だが、算術の構造を記号以外の仕方で具象化することは難しい。しかし、それが不可能だということはない。算盤は算術構造を記号以外の仕方で具象化している例だと言えるであろう。また、具象化の仕方は解釈に決定的な影響を与える。ニュートンの運動方程式やロトカ＝ヴォルテラの被食者・捕食者モデルのように、モデルが微分方程式で具象化されている場合、それを因果的に解釈することは容易である。これに対して、エネルギー保存則のような積分形式で与えられている場合、通常それは因果モデルとは見なされない。エネルギー保存則によって現象を理解する場合、エネルギーという物理量が始状態と終状態で変わらないという性質が重要なのであって、始状態から終状態までどのような因果プロセスを経たのかという情報は一切必要ないからだ。また、シュレーディンガーの波動力学は物理状態を波動関数によって具象化しているため、時空間中を伝わる波という解釈が可能になる。その一方で、行列力学は同じ対象を行列によって具象化しているため、身近なオブジェクトとしてそれを解釈することは困難であった。

科学理論の統語論的見解と意味論的見解の対立は具象化構造という観点から説明するこ

とができる。統語論的見解は科学理論を言語という具象的オブジェクトによって把握するが、それが持つ構造を捨象する。理論と同じ構造を持つオブジェクトによって具象化されたモデルはその理論の論理モデルとして機能する。意味論的見解は具象化を捨象して構造を捉えようとする。この見解によれば、言語は構造を特定する役割を担うものの、現象を表象するための本質的な要素であるとは見なされない。どちらの見解も理論とモデルの関係の不十分な捉え方に基づいている。我々が認識的にアクセス可能なすべてのオブジェクトは常に具象化構造なのであって、具象物それ自体や構造それ自体というようなものは存在しない。理論とモデルはどちらも具象化構造に解釈を与えることで現象を表象しているという点で共通している。両者の違いはより広範に適用できる具象化構造であるか、特定のケースに特化した具象化構造であるかという違いでしかない。

具象化の多様性は数学の厳密性と衝突するように見えるかもしれない。ヘンペルは科学的説明が数学の証明と同じように厳密な基準を持たなければならないと主張した。しかし、数学の証明が厳密な基準を持つということ自体、それほど自明な事実ではない。数学において重要な証明法の一つに背理法がある。背理法はある命題を真であると仮定すると矛盾に導かれるということから、もとの命題の否定が真であることを証明する手法である。$\sqrt{2}$が無理数であることや素数が無限に存在することなどは背理法によって証明することができる。ここで重要なのは、背理法は任意の命題は真か偽かのどちらかであるという排中律と呼ばれる原理を仮定しているということだ。オランダの数学者ライツェン・ブラウワーは、数学の哲学における直観主義と呼ばれる立場から、排中律は知られていない真理の存在を仮定していると主張し、排中律に基づく推論を退けた（cf. Shapiro 2000）。あるいは、推論方法ではなく、仮定そのものの妥当性がしばしば議論されるものの一つに選択公理と呼ばれるものがある。選択公理とは「空集合を要素に持たない任意の集合族に対して、それぞれの集合から要素を選び出して新しい集合を作ることができる」というものであり、数学における多くの有用な定理が選択公理を仮定することによって証明できることがわかっている。しかし同時に、選択公理から「球を 3 次元空間内で有限個の部分に分割し、それらを回転・平行移動によってうまく組み替えることで、もとの球と同じ体積の球を 2 つ作ることができる」という明らかに直観に反する定理が導かれることもわかっている。こうした理由で、数学界では一時、選択公理の妥当性をめぐって大論争が巻き起こったのである。これらの事実が示しているのは、数学においてどのような仮定や推論が許されるのかは、数学者たち自身にとってもしばしば不一致があるということである。

数学はどのような仮定と推論の方法に依拠すべきなのかという問題は、一見すると数学はどのような対象を扱っているのかという存在論的な問題と関わるように見える。これに対して、カルナップは統語論的観点からこの問題を解明しようと試みた（Carnap 1950）。彼によれば、数学や科学で使用される我々の推論法則はすべて言語の変形規則から派生する。変形規則とはどのような形式の文からどのような形式の文へ変形することができるのかを規定する規則である。同じ記号を使う言語であっても、変形規則が異なれば異なる言語と見

なされる。現実の言語は明確な変形規則を持っているわけではないが、我々は規約と習慣によってそのような規則を緩やかに共有している。規約と習慣が使用される言語を決定し、そこから推論規則が派生するのだ。このような見解に従えば、数学や科学で使用される推論法則は絶対的な法則とは見なされない。どのような変形規則を備えた言語によって記述されるのかに応じて異なる推論の仕方が可能となる。カルナップによれば、どの言語を選択すべきかについての客観的な基準は存在せず、その選択はプラグマティックな基準によってなされるのだという。

本論はこのような見解を言語に限定せず、具象物一般に拡大すべきであると主張する。幾何学の構造は直線を生成する規則と円を生成する規則を備えた具象的オブジェクトの集まりによって可視的に具象化することができる。ユークリッドやヒルベルトはそれを言語的なオブジェクトによって具象化できることを示したが、言語による具象化の優位性はその厳密性にあるのではない。言語による具象化はより大きな統合性を持つということによって正当化されるのである。

5.4 モデルのインテリジビリティ

科学理論の統語論的見解と意味論的見解の対立を具象化構造という観点から見るならば、理論とモデルの違いはその提示の仕方にあるのであって、両者に実質的な違いはないことになる。前節で確認したように、ある種の推論の仕方でさえ、具象化構造に埋め込まれているのだとすれば、我々はモデルを用いて推論するのではなく、モデルを用いるという事実が既に何かの推論を内包しているのだと考えることができる。これまでの議論が示しているのは、理論が言語的に提示される包括的な体系であり、モデルは言語とは独立した自律的オブジェクトであるという区別はもはやそれほど明確ではないということである。このような理由から、以降の議論では、理論とモデルという言葉をあまり区別せずに用い、デ・レクトのインテリジビリティをモデルの特性を指すものとしても捉える[10]。デ・レクトの基準に従えば、現象を科学的に理解するとはインテリジブルなモデルに基づいてその説明を構成するということである。これまでの議論から、モデルのインテリジビリティは、数学的構造、その具象化の仕方、そして解釈という 3 つの要素によって決まるということが示唆される。以下では、科学者がインテリジビリティを帰属する主な性質としてデ・レクトが挙げている単純性、可視性、因果性、統合性がモデルのどのような側面に由来するのかを論じる。

まず、モデルの単純性は数学的構造の単純性に多くを負っている。直観的に言えば、より少数のドメインや関係によって構成される構造がより単純だと言える。ただし、何が単純だと見なされるかは文脈やそれを把握する主体の経験やスキルによって異なる。より多くの場面で使用される構造はあまり使用されない構造に比べてより単純であると見なされるだ

[10] デ・レクト自身は理論をさまざまな現象に適用される包括的枠組みとし、モデルをある特定の現象に応じて使用されるものとして区別している（de Regt 2017）。

ろう。すぐに見るように、このことは少数の論証パターンによる統合というキッチャーの見解にも関連する。

モデルの可視性は可視的なオブジェクトによって構造が具象化されるということに由来する。数学的構造には可視的なオブジェクトによって具象化されやすいものとそうでないものがある。ユークリッド幾何学が扱う構造はその可視化が容易であったために古くからの研究対象となってきた。これに対して、射影幾何学や非ユークリッド幾何学などのように具体的な可視化が難しい構造を扱う理論は数学的な対象としては興味深いものとされたが、その登場から長らく自然現象の説明とは結び付けられなかった。幾何学が空間についての理論であるというのは極めて自然な見方であるように見える。しかし、このような見解は、そこで扱われている構造が定規やコンパスのような測量器具によって生成されるオブジェクトによって具象化されるという事実を現実の対象に投影しているに過ぎない。実際、まったく図形を用いずに幾何学を展開することは可能であるし、むしろ現代幾何学のテキストには作図はほとんど登場しない。

現象をできる限り少数の論証によって説明するというキッチャー的な統合性を持つために、モデルは言語によって具象化されなければならない。言語は記号同士を組み合わせて文を作るための形成規則と文同士を組み合わせて論証を作るための推論規則からなる。モデルが言語によって記述されているとき、その構造は言語的に具象化されている。現象の表象に頻繁に用いられる構造であれば、その具象化の結果は同じ論証パターンとなって現れる。

モデルの因果性は、具象化構造を因果的に解釈することによって得られる。この点はワイスバーグも指摘していることだが、数学的構造それ自体はまったく因果性のようなものを持たない。ニュートンの運動方程式は物体の質量と加速度の積が物体にはたらく力の大きさに等しいことを主張するが、力が加速度を生じさせるという因果的性質は純粋な数学的構造としてはまったく含意されていない。純粋な数量的関係に因果的な関係を帰属させるのは解釈を通じてである。すでに述べたように、因果的な解釈は物理法則が微分形式によって具象化されている場合により容易なものとなる。因果性という観点で見れば、物理法則は微分形式が好まれることになるが、統合性などの他のインテリジブルな価値の観点では積分形式が好まれることもありうる。エネルギー保存則は、熱現象や電磁気現象など幅広い現象に適用可能であるという点でより大きな統合性を持つ。

インテリジビリティが帰属される性質としてデ・レクトが挙げているものはすべて、構造と解釈、具象化によって捉えることができる。そればかりか、デ・レクトが明示的に挙げていないようなものもインテリジビリティという価値が帰属される候補となりうる。例えば、アリストテレスが述べるように、我々人間は多数の感覚機能の中でもとりわけ「見る」ことに世界の把握の多くを負っているため、モデルが可視性を持つことに多くの価値を見出すが、もし我々が違う仕方で世界を捉えることに慣れていれば、それとはまったく異なる側面に価値を見出すかもしれない。つまり、我々はインテリジビリティに違いをもたらす性質に対して、「単純性」や「因果性」のような言葉を事後的に当てているのであって、それらの

性質が主体の存在とは独立にモデルそのものに備わっているわけではない。インテリジビリティとはモデルを使用する主体とそのモデルを構成する構造、解釈、具象化との関係性から生まれるのである。

第 6 章　構成的理想化と科学的理解

本章では、解釈された具象化構造が理解の対象としての現象とどのように関係するのかを議論する。まず、モデルと現象を指示関係の一種と見なす表象理論を棄却し、現象はモデルによって作り出されるという見解を提示する。そして、理想化を従来のような「偽なる仮定」や「誤った表象」という解釈から解放し、より構成的な理想化の捉え方を示しつつ、それが現象の科学的理解にいかにして寄与するのかを論じる。

6.1 モデル–現象間関係

本論ではこれまで現象を経験的一般則として扱ってきた。では、そのような現象は我々の現前に現れる純粋現象からどのようにして得られるのであろうか。多くの論者は、純粋現象は直接モデルと比較することができないことを認めている（van Fraassen 1980, Weisberg 2013, Frigg & Nguyen 2022）。構造主義者によれば、純粋現象は数学的構造を持たないのでモデルと直接比較することはできない。科学者は純粋現象からデータ・モデルを構築することでモデルとの比較を行うとされる（van Fraassen 1980）。しかし、モデルとデータ・モデルの構造を比較することが可能だとしても、データ・モデルがいかにして純粋現象を表象するのかが明らかにならなければ、モデルと現象の関係は不明なままである。

ワイスバーグによれば、モデルは純粋現象を表象するのではなく、純粋現象を抽象化することで得られたターゲット・システムを表象している（Weisberg 2013）。その上で、彼はモデルがターゲット・システムをどれほど忠実に表象しているのかを評価するための基準を与えた。最も一般的な形式で書き下せば、モデルMとターゲットTの忠実度$S(M,T)$は以下の式で与えられる。

$$S(M,T) = \theta f(\Delta_M \cap \Delta_T) - \alpha f(\Delta_M - \Delta_T) - \beta f(\Delta_T - \Delta_M) \qquad \text{(式 6.1)}$$

ここで、Δ_Mはモデルが例化する性質の集合、Δ_Tは現象が例化する性質の集合であり、fは性質の集合に実数を割り当てる関数、θ、α、βは重み付けパラメータである。重み付けパラメータはモデル製作者の目的の違いを反映して設定される。右辺第一項はモデルとターゲットが共有する性質の集合によって決まり、第二項と第三項はモデルとターゲットが共有しない性質の集合によって決まる。彼の基準は事物間の類似性に基づく見解であると言える。

しかし、共有する性質の数に基づいて類似性を評価する方法には一定の限界がある。イルカ・ニーニルオトは、類似性概念を**部分的同一性**（partial identity）と**相似性**（likeness）に分類している（Niiniluoto 1988）。Mが例化している互いに関連する性質$P_1, \dots, P_n$とTが例化している互いに関連する性質$Q_1, \dots, Q_n$があるとする。モデルMが現象Tに部分的に同一であるという意味で類似しているのは、任意の$i = 1, \dots, n$に対して、$P_i = Q_i$が成立するときである。

一方で、モデルMが現象Tに相似であるという意味で類似しているのは、任意の$i = 1, \ldots, n$に対して、P_iがQ_iに類似しているときである。ウェンディ・パーカーは、ワイスバーグの類似性基準は部分的同一性という意味での類似性には適合するが、相似性という意味での類似性には適合しないとして、彼の忠実性基準を批判している（Parker 2015）。

ワイスバーグの忠実性基準が相似性を取り込めないということを理解するために、地球儀によって地球を表象する場合について検討してみよう。地球は自転によって生じる遠心力によって、赤道が子午線よりも僅かに膨らんだ楕円体を形成している。議論を簡単にするために、現実の地球が完全な楕円体であると仮定するとしたら、球の形をした地球儀と立方体の形をした地球儀ではどちらが現実の地球に類似したモデルであると言えるであろうか。両者は形状を除く性質はすべて共有しているとする。ワイスバーグの忠実性基準に従うなら、どちらも現実の地球が例化する楕円体という性質を持たないので、どちらか一方がより地球に類似しているとは言えないことになる。しかし、直観的には、球は楕円体により類似していると考えられるだろう。このようにワイスバーグの類似性基準は、性質間に成り立つ類似性（相似性）が考慮されていないために、直観的により類似しているように見える対象を適切に評価することができない。

データ・モデルにせよ、ターゲット・システムにせよ、純粋現象から得られる何らかの対象とモデルが比較されることでそのモデルの評価が行われるとする見解の背景には、表象をモデルと現象との指示関係として捉えるという発想がある。すでに DEKI 説を紹介したときに触れたように、フリッグとヌエンは表象が指示を含意することをほとんど必然的に成り立つものとして仮定している（Frigg & Nguyen 2022）。このような観点をモデル-現象の 2 項対立図式と呼ぼう（図 6.1）。こうした観点からは、モデルとなるオブジェクトと現象は存在論的に独立した実体であり、そこに指示関係の一種としての表象関係が成り立つと考えられる。それはちょうど、本というオブジェクトが「本」という言葉とは独立に存在していることに対応するであろう。モデルの評価を現象との比較によって行おうとするときに生じる困難を克服するためには、我々は表象を指示関係の一種と見なす 2 項対立図式そのものを克服しなければならない。

図 6.1 モデル–現象の 2 項対立図式

6.2 モデルによって現象を構成する

モデル–現象の二項対立図式に対して、いくつかの論者はモデルを現象の表象という側面から見るのではなく、現象をより良く把握するための認識的ツール、あるいはベンチマークのようなものとして見なすべきであるとの見解を示している（cf. Knuuttila 2011, Mäki 2020）。またそれとは別の観点から、モデルと現象の 2 項対立を退け、モデルをそこから我々が現象についての推論を引き出すことを可能にするものとして捉える見解も存在する（cf. Suárez 2004）。しかし、彼らにとっても、現象はモデルとは独立に成り立つという見解は保持されている。このような見解に対して、本論はモデルは現象に先行する存在者であり、現象はモデルによって構成されるという見解を提示する。しかし、モデルが現象を構成するとしても、その素材としての**データ**（data）はモデルとは独立に存在していなければならない。そうでなければ、我々は純粋なフィクションとしての現象と現実の現象を区別することができないであろう。そこで、まずはデータと現象の関係を考察することから議論を始めなければならない。

純粋現象からデータを得るプロセスは**測定**（measurement）と呼ばれる。アメリカの実験物理学者パーシー・ブリッジマンは操作主義的観点から測定の意味を明らかにしようとした初期の人物として知られる（Bridgman 1927）。彼は、距離や時間などの物理学的概念はその測定方法によって同定されるという見解から、通常同一の概念と考えられているものであっても、異なる測定方法で測られる概念は異なる概念として取り扱うべきであると主張した。測定方法とは、測定器具とその使用方法を指定することによって与えられる。例えば、時間は水晶時計や原子時計など異なるメカニズムを持つ測定器具によって測ることができるが、操作主義的見解に従えば、これらは同一の時間という概念を測定しているのではなく、それぞれ異なる時間を測定している。それにもかかわらず、我々が通常それらは同一の時間を異なる仕方で測定していると見なすのは、それらの測定結果が常に相関しているためである。

実際、物理学では 2 つの測定方法を持つが同一であると考えられてきた概念を異なる概念として区別することによってブレイクスルーが生まれるということがある。その最も顕著な例が慣性質量と重力質量の区別であろう。慣性質量とはニュートンの運動の第二法則に基づいて定義される質量概念であり、重力質量とは万有引力の法則に基づいて定義される質量概念である。物体の落下速度はその質量に依存しないという落体の法則は両者が物体によらず常に一定の比率である場合に成り立つ。ところが、慣性質量と重力質量の比率が一定であるということは先験的に明らかなことではない。それは実験的に検証すべき事実なのである。アインシュタインは落体の法則という経験則は慣性質量と重力質量が一定の比率であることを高い精度で示しており、このことはより深い次元の物理法則からの帰結として説明すべきであると主張した。

操作主義的態度がブレイクスルーのきっかけを生み出しうる一方で、それを額面通りに

押し進めようとすればすぐに困難に直面するように見える。我々は地球から月までの距離のように直接測ることができない物理量を知りたいとき、幾何学の知識と計算によってそれを導き出すことができる。しかし、操作主義に従えば、物差しで測ることができる日常スケールの物体の大きさと宇宙のようなマクロ・スケールの物体の大きさは異なる概念であるということになってしまう。また、もっと極端に言えば、物差しで測ることができるものであっても、使用する物差しが異なれば異なる概念を測定していることになってしまう。

前者の問題を一旦脇に置けば、後者の問題は次のようにして解決できる。まず、測定方法の集合を測定結果が互いに相関するような測定方法によって類別する。類別によって得られた同値類にそれぞれ *A*、*B*、*C*、という仕方でラベルを付ける。それぞれの同値類の中から代表元を選び、代表元での測定値をそのラベルの測定値とする。ある事物を同値類 *A* の代表元によって測定したときの値が 3 であったとき、その事物の *A* という性質の値が 3 であると解釈される。同一の事物に対してさまざまな条件で異なる測定方法で得られた結果が互いに相関するという事実を見出すことによって、我々はその事物に何か特定の性質が備わっていると見なすようになるのである。つまり、我々は事物にあらかじめ備わっている性質を測定によって把握するのではなく、測定するという行為が事物に性質を付与するのだ。データとは純粋現象を操作主義的な意味で測定することによって得られた値の集まりであり、それらのデータは単にラベルが与えられているだけであってまだ解釈が与えられていない。

ラベルに意味を与えるのは理論やモデルである。それは、地球から月までの距離のように直接測定できないような事物を検討する場合により明らかである。科学の実践においては、測定器具によって直接その値を得ている概念はむしろまれで、ほとんどの概念は何らかの理論やモデルを仮定した上でその定量化を行っている。ピエール・デュエムは科学において純粋な観察事実と見なされる多くのものが、いかに物理学の理論に負荷的であるかを例証している（Duhem 1914）[11]。顕微鏡を用いて細胞を観察したり、望遠鏡を用いて惑星を観測したりするとき、我々は光学の理論に基づき倍率などを考慮した上で観察データを報告する。惑星の位置や距離を決定するためには、幾何学だけでなく、地球が自転や公転をしていることを考慮しなければならない。すなわち、我々はデータを得るとき、すでに何らかのモデルに依拠しており、それを何ものかとして解釈しているのである。

我々はこのようにして解釈されたデータから現象を構成している。つまり、現象はモデルの中にすでに埋め込まれている。モデルが現象の持つ性質を歪めたり、無視したりすることによって得られるのだとすれば、我々はあらかじめ現象を構成する要素のチェックリストのようなものを持っていて、あたかもそうしたリストにチェックを入れるかのようにしてそれを行っていることになるであろう。しかし、あらかじめそのようなリストを持っているのであれば、モデリングを実行することの意味はすでに失われている。モデリングによって

---

[11] このような見解はノーウッド・ハンソンによって観察の理論負荷性としてより明確に主張されている（Hanson 1958）。

我々が行っているのは、むしろデータに性質を帰属させるということである。すなわち、モデリングとは純粋現象に性質を帰属させることであり、それによって我々の理解の対象であるところの現象が構成される。現象を記述するとき、我々はすでにモデルを用いてそれを行っているのだ。

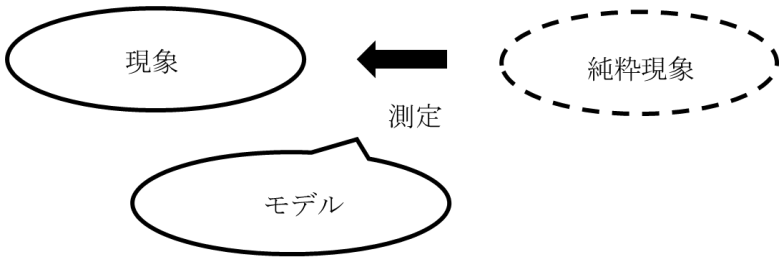

図 6.2 モデルによる現象の構成

モデルが現象に先行するのであれば、モデルにはそれが何らかの現象の構成に用いられているものといかなる現象の構成にも用いられていないものが存在することになる。19 世紀までの物理学者たちは光の伝播をエーテルという媒質を伝わる波として解釈することによって現象を構成していた。しかし、20 世紀になり、相対性理論によってエーテルの存在が否定されてから、物理学者たちはエーテル・モデルに基づいて現象を構成することをやめた。フィッシャーが多性モデルを導入したとき、彼はそのモデルをいかなる現象の構成にも用いなかった。しかし、現象を構成しないからといって、それが研究不可能だというわけではない。モデルは解釈と構造を持っているので、もしもそれによって現象を構成することができたなら、そこでどのような性質が成り立つのかを研究することができる。実際、多性モデルが現実の現象を構成するために用いられるようになったとき、フィッシャーの研究成果は重要な役割を担ったのである。現在のエーテル・モデルやかつての多性モデルのように、いかなる現象の構成にも用いられていないモデルを我々はターゲットレス・モデルと呼んでいるのだ。ターゲットレス・モデルをこのように捉えれば、エーテル・モデルや多性モデルなどのように、ある時代と文脈においてはターゲットを持つとされるが、別の時代と文脈においてはそのように見なされないようなモデルの事例を説明することができる。ターゲットレス・モデルとはそれが表象する現象が存在しないモデルなのではなく、我々がそれによって現象を構成しないようなモデルを指しているのである。

データは何らかの実在の姿の反映であるという見方は多くの科学者が素朴に感じているところであろう。推測統計学では通常、データは真の確率分布からランダムに生成されたものであると見なした上で、さまざまな統計手法の強みと弱みについて検討する。パラメータの点推定や区間推定、仮説検定の意味はこのような想定がなければまったく理解できない。

しかし、データを真の確率分布からのランダム・サンプリングであると想定すること自体がある一つのモデルを採用しているということを意味している。我々は真の分布からデータを得ているのではなく、真の分布から得られるということによってデータを解釈しているのである。データが何かしらの傾向性を持っていれば、その背景に真の構造があることが示唆されているように見えるかもしれない。しかし、解釈できないデータはそもそも意味のあるデータとは見なされない。例えば、ある測定手続きによってデータを得るということを想定されたい。同一であると考えられる対象に対してその測定を繰り返すとき、測定ごとに見かけ上まったく異なるランダムな数の並びが生成されるとしたら、その測定手続きの妥当性自体が疑われるであろう。ランダムに見えた数の並びをあるモデルによって解釈することで意味を与えることができたときにはじめて、単なる数の並びがデータと呼ばれるに値するものとなるのである。このようにして得られたさまざまなラベルのデータを有機的に結びつけることで現象が構成される。そして、この段階でもモデルは決定的に重要な役割を担うのである。

データや現象が我々の解釈の産物であるとしても、その解釈の仕方には一定の制約もある。第 2 章の気体が封入された容器の例を再び検討してみたい。容器の蓋におもりをのせるという行為が、気体の圧力を増大させる行為であるのか、気体の体積を減少させる行為であるのかを決めるためには、そのように解釈するしかないことを論じた。つまり、それはすでにモデリングの産物であるということだ。しかし、そのような解釈は完全に自由に行えるというわけではない。容器に目盛りを取り付け、おもりをのせたとき、その体積が減少したことを確認したとする。その場合、容器の蓋におもりをのせるという行為が気体の体積を増大させる行為であったと解釈することはできない。モデリングの仕方は純粋現象として得られたデータによって一定の制約を受ける。しかし、そのような制約が満たされてさえいれば、どのような仕方でモデリングをするかは自由である。ちょうど、与えられた 2 点を通るような曲線が複数引けるのと同じように、与えられたデータに適合し、現象を構成する複数のモデルを作ることができる。その中で最もインテリジブルなモデルが最も良い理解を提供するのである。

6.3 構成的理想化

モデルが現象に先立つのだとすれば、モデリング・プロセスである理想化もまた現象に先立つことになる。だとすれば、理想化は現象のある要素を歪めたり、無視したりすることではありえない。理想化の役割とは、インテリジブルなモデルを構築し、それに基づいて現象を作りだすということにある。このような理想化の捉え方を**構成的理想化**（constructive idealization）と呼ぼう。構成的理想化の観点からは、理想化された現象を脱理想化することで現実の完全な表象に近づけるというガリレイ的理想化の理念は棄却される。脱理想化とは現実の完全な表象に近づくことではなく、表象そのものをやめてしまうということであ

る。

しかし、理想化は現実の性質を歪めるわけではないにもかかわらず、なぜ我々は理想化を直観的にはそのようなものとして捉えるのであろうか。多様な現象をある一つのモデルによって構成するためには、多くのパラメータを導入する必要がある。ブランコの現象を構成するためには、子どもが受ける力や紐の長さなどの力学的なパラメータを含むモデルがなければならない。より多くのパラメータを持つモデルはより多くの現象を構成することができるが、パラメータがある一定の数に達したとき、それ以上パラメータの数を増やしても構成される現象の範囲に実質的な変化が生じないという段階が来る。このようにある範囲の現象を構成することを可能にする最大のパラメータ数を持ったモデルを**飽和したモデル**（saturated model）と呼ぶことにしよう。飽和したモデルは多くのパラメータ数を持つため、その数学的構造は複雑である。我々はモデルのインテリジビリティへの要求から、パラメータをある値（多くの場合は 0 か無限大）に固定することで、いくつかのパラメータを除こうとする。理想化とは飽和したモデルからよりインテリジブルなモデルを構築することとして理解される。つまり、我々は現実の対象を歪めるのではなく、飽和したモデルを歪めるのである。実際、理想化によってあるモデルを構築すると言うとき、それよりも高次のモデルの存在が念頭に置かれている。理想気体が理想化されたモデルであるのは、分子の大きさや相互作用などのパラメータを含んだモデル（ファン・デル・ワールス気体）の方がより多くの現象を構成することができるという了解がある。ファン・デル・ワールス気体もまたそれより高次のモデルからの理想化である。飽和したモデルの存在は科学の実践ではっきりと言及されることはないが、理想化について語るときにはその存在が暗に前提されているのである。

このように、理想化は現象の構成という観点から定式化されなければならない。理想化を偽なる仮定や誤った表象として捉える従来の見方は、現象がモデルによって構成されるという見解から見れば、その前提からすでに誤っている。表象をモデルと現象との指示関係の一種と見なせば、我々は必然的にモデルを真偽という様相で捉える見方に導かれるだろう。しかし、これまで論じてきたように、現象はモデルと比較される対象なのではなく、モデルによって作られる対象なのである。構成的理想化の観点からは、さまざまな理想化の違いを現象のどのような側面を知りたいかの違いによって説明することはできない。ガリレイ的理想化やミニマリストの理想化の違いは、何をインテリジブルな性質と見なすかの違いという観点から説明される。ガリレイ的理想化はより単純なモデルにインテリジビリティという価値を置くということによって説明され、ミニマリストの理想化は因果的に解釈できるモデルにインテリジビリティという価値を置くということによって説明されるのである。ワイスバーグはさまざまな理想化の違いを彼が表現的理想と呼ぶ科学者の目的の違いによって説明することを試みているが、本論が提示したのは科学者の理解における違いとしてそれを説明することである。

惑星の軌道が楕円軌道であるという現象はすでにモデリングの産物である。しかし、ケプ

ラーのモデルはそれを説明できる内容を持たなかった。これに対して、ニュートンやアインシュタインの理論は惑星の軌道が楕円軌道になるという現象を構成した上で、それに対する説明をも与えることができた。アインシュタインの理論がより正確であると言われる理由はそれが実在を捉えているからではなく、より広範な経験的データにわたって現象を構成することができるという点にある。しかし、このことはニュートンの理論が棄却されることを意味しない。ニュートンの理論は日常的なスケールの経験的データに対して現象を構成することができるインテリジブルなモデルとして今日でもその有効性を保っているのである。すなわち、どのモデルが現象を正確に表象しているかと問うのはナンセンスである。我々が現象について言及している時点で、すでに何らかのモデルが含意されている。モデルの評価は、それが構成する現象に対して説明を与えることができ、かつインテリジブルであるかという観点からなされるのである。

モデルにより構成された現象は、当該モデルが持つ構造を反映しており、そのような構造をよりインテリジブルな仕方で具象化、解釈することが現象の理解を促す。モデルは構造が付与された現象を作り出すとともに、そのような構造を我々が分析しやすくするという二重の役割を持っているのである。

6.4 科学的理解の相補性

第 3 章の最後に、理論の理解と現象の理解というデ・レクトの分類は問いの置き換えに過ぎないのではないかという懸念を提示した。現象を構成主義的に捉えることはそのような懸念を払拭できることを示してこの章を締めくくりたい。

すでに確認したように、デ・レクトは主体が理論やモデルを理解していると言えるための基準を完全には明確にしなかった。それを明確にするためには、モデルを使用するとは何を意味するのかを明らかにしなければならない。モデルを使用する方法には大きく分けて 2 通りのものがありうる。一つはモデルを現象の構成と切り離して使用する方法である。すでにいくつかの事例を見てきたように、科学は具体的なターゲットが存在しないような仮想的対象を扱ったモデルが多く存在する。物理学では、エーテル・モデルの他にも、外部からエネルギーの供給を受けずに永久に外部に仕事をする永久機関など多くのターゲットレス・モデルが考えられてきた。これらのモデルはいかなる現象の構成にも用いられていないが、もしそれが現象の構成に用いられればそこでどのような性質が成り立つのかを調べることができる。モデルが持つ構造はその具象化に応じてさまざまな仕方で取り扱うことができる。物理学の学習や研究が紙と鉛筆だけでも成立する理由は、モデルの性質はそれが表象する現象とは切り離して研究することができるという点にある。

モデルを使用するもう一つの方法は、それを現象の構成に用いるというものである。つまり、それは現実の対象をモデルによって記述することであり、現実の問題を物理学の問題として定式化するということである。例えば、鳥が飛行している様子は生物学的に捉えること

も可能であろうが、その運動に着目するとき、我々は空気という流体の中を動く一定の形状を持った物体としてそれをモデリングしている。このように、モデルから現象を構成し、対象をそのモデルを分析する問題に落とし込むということがモデルの第二の、そしてより重要な使用法なのである。

モデルを理解しているとは、以上述べた 2 通りの意味でのモデルの使用法を理解しているということになるであろう。とりわけ重要なのは後者の現象を構成するという使用法である。モデルによって現象を構成できるということが、そのモデルの理解につながるのである。すなわち、現象を構成することによってモデルが理解され、理解されたモデルに基づいてその現象の説明が与えられることによって現象が理解される。モデルの理解と現象の理解はこのような相補的な関係にある（図 6.3）。

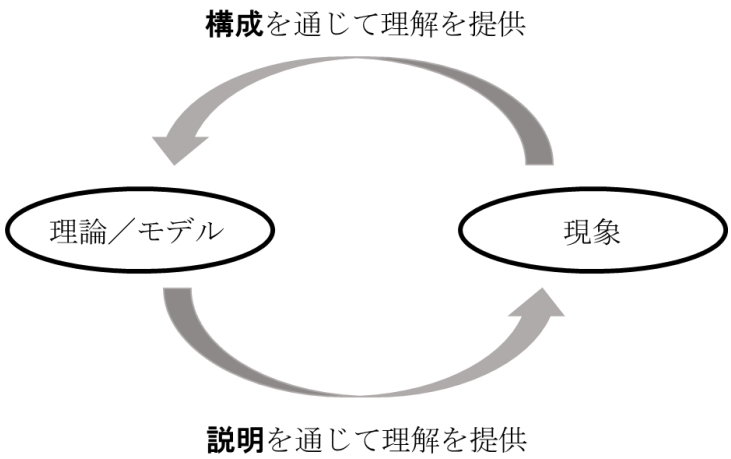

図 6.3 理論／モデルと現象の理解の相補的関係

これまでの議論から、理想化はそれが偽なる仮定であるにもかかわらず、いかにして現象の科学的理解を提供できるのかという最初の問いに答えることができる。まず、我々はある測定手続きによって生み出される数の並びをモデルによって解釈し、現象を構成する。現象を構成し、それに対する説明を与えるためには、モデルはインテリジブルな性質を持っていなければならない。理想化はモデルをインテリジブルにする役割を持つため、現象の科学的理解を提供する。科学的理解を構成主義的に捉えることで、理想化は偽なる仮定の導入という消極的役割を持つものから現象の構成という積極的役割を持つものとして評価されるのである。

第 7 章　物理学における理解

新たな測定方法の導入によって生み出される新たなデータに対して、もはや既存のモデルが現象を構成して、その説明を与えることができなくなったとき、新たなモデルの誕生が促される。しかし新たなモデルの誕生は、多くの場合、その解釈をめぐる論争を引き起こす。新たなモデルは新たな数学的構造を導入するため、それを古いモデルに基づいて解釈しようとすることはしばしば困難であるからだ。新たな構造を持つモデルは新たな解釈を導入することで、よりインテリジブルなモデルになりうる。この章では、相対性理論の登場による時空描像の転換を構成的理想化とそれにより実現される科学的理解という観点から分析することを試みたい。

7.1 物理学における時空描像の転換

20 世紀初頭に登場したアインシュタインの相対性理論によって、我々の時空描像は根本的に変更されたと言われる。古典的な描像によれば、少なくとも正統な解釈の下では、時間と空間は物質と相互作用しないそれぞれ独立した実体として扱われた。しかし、相対性理論によると、時間と空間は互いに不可分な時空連続体として扱われ、物質やエネルギーの存在によりその幾何学的性質はさまざまに変わりうる。科学的理解という観点から、このような時空描像の転換はどのように把握できるのだろうか。

相対性理論が生まれるきっかけとなったのは、よく知られるように、アルバート・マイケルソンとエドワード・モーリーによって光速に対する地球の速さの比を検出することを目的に行われた一連の実験である。当時、光は横波として空間を伝わることが知られていたが、波であるからにはその媒質となるものが存在しなければならないと考えられていた。この未知の媒質はアリストテレスの第 5 元素にちなんで、エーテルと名づけられた。我々は遠方の星から届く光を見ることができるのだから、エーテルは宇宙全体を満たしており、その抵抗を検出できないのだから、それは他の物質と力学的な相互作用をしない物質だということになる。一方、地球は太陽のまわりを公転しつつ、同時に自転していることを考慮すれば、地球は宇宙の中で何らかの速度を持って運動しているに違いない。光速と地球の速さの比を検出することができれば、エーテルに対する地球の速さ、ひいては宇宙の中での地球の速さを知ることができるのではないかということだ。

マイケルソンはそれを実行するために、マイケルソン干渉計と呼ばれる装置を考案した（図 7.1）。装置の概略は以下の通りである。まず、光源から出た光はハーフミラーによって、鏡 A に向かう光と鏡 B に向かう光に分けられる。ハーフミラーから鏡 A と鏡 B までの距離はそれぞれ等しい。鏡 A と鏡 B で反射された光は再びハーフミラーを通り、検出器に集められる。2 つの経路の光学距離の差は検出器での干渉縞を調べることで決定することができる。地球は自転や公転などによって、エーテルの中を時々刻々異なる速度で運動しているの

だから、その違いが干渉縞の移動として観測されるはずであった。しかし、実験の結果、地球の運動によって生じるそのような移動は確認されなかった。

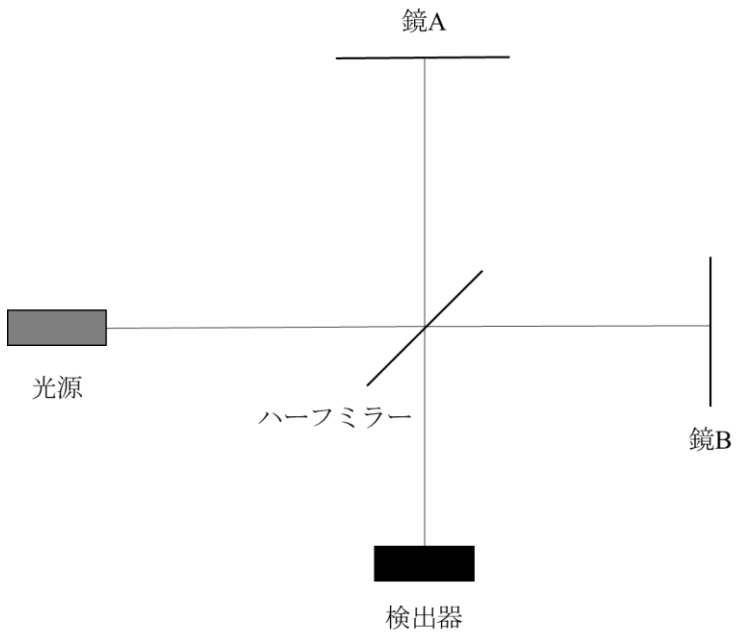

図 7.1 マイケルソン干渉計

この実験結果をエーテル仮説に基づいて額面通り理解するなら、地球とエーテルの相対速度は 0 であるということになり、地球は宇宙空間の中で静止しているということになる。しかし、広大な宇宙の中で地球だけが特別な位置を占めるという見方は 19 世紀末の物理学者たちにとって到底受け入れられることではなかった。ヘンドリック・ローレンツは、物体がエーテルの中を運動するとき、その物体の長さは運動の方向に対して縮むという仮説を立てた。彼によると、マイケルソン干渉計がエーテルに対する地球の相対速度を検出できなかったのは、エーテルに対して運動する装置の運動方向の長さが縮んだためである。ローレンツにとって、地球が速さを持たないのは、そのような収縮によって生じる見かけの効果なのだ。

しかし、どのようなメカニズムによってそのような収縮が生じるのかは依然として不明であった。エーテルは物体と力学的な相互作用をしないのだとすれば、どのような機序で物体を収縮させることができるのだろうか。ローレンツは運動する電子が作る電場が変形するという仮説などを導入してそれを説明しようと試みたが、その試みはいずれもアドホックな仮定に基づくものと見なされた。

当時の物理学者たちは光学実験の結果をエーテル・モデルによって解釈し、光学現象を構成していた。現象がエーテル・モデルによって構成されている以上、その説明の仕方は必然

的にエーテル・モデルに基づくことが要求される。

アインシュタインはマイケルソンとモーリーの実験結果を額面通りに受け入れ、「光速は光源の運動状態によらず一定である」という事実は、何か別の法則の帰結として説明されるべきことではなく、むしろその事実に基づいて物理学の理論を構築しなおすべきであることを主張した。彼は、「物理法則はいかなる慣性系でも同じである」という特殊相対性原理と「光速は光源の運動状態によらず一定である」という光速度不変の原理から、ローレンツによって提示されていた運動する物体の収縮が導かれることを示した。さらに彼は、同時性が慣性系によって異なることやある慣性系に対して相対的に運動している系の時計の進み方が遅くなることなどを導く。物体の長さや時計の進み方が、それを観測する座標系の取り方に依存するという帰結は、時間と空間の構造は物体（観測者）の存在とは無関係に存立するという古典的な描像からは理解が困難なものであった。

アインシュタインは電磁気現象が電荷同士の相対速度だけによって決まるという事実を強調した。もしそうであれば、電荷同士の相互作用を媒介する電磁波が何かその媒質となるものを伝わると考えることには意味がないであろう。観測者が媒質に対して静止しているか運動しているかの違いが物理現象に違いを生まないのだとすれば、そのような対象を導入する必要はない。こうして、エーテルの存在は否定されるに至るのである。

マイケルソンとモーリーの実験結果を解釈するために、通常の物体や波が空間中を移動するのと同じ仕方で光を解釈することはもはやモデルのインテリジビリティを大きく損ねることがわかったのである。実際、我々は通常の物体の速度と同じようにしては光速を測定していない[12]。光速を測定するいかなる種類の実験も、ある場所、ある時刻での光の送信と受信を記録しているに過ぎない。このことは、例えば、物理学者のマックス・ボルンやアルノルト・ゾンマーフェルトによって明確に主張されている。

> 光あるいは電磁気的力は、物質との関連でしか観測されない。物質の全然ない空間はけっして観測の対象になり得ない。作用は物体にはじまり、すこし遅れて他の物体に到達する。これが私たちの断定しうるすべてである。（Born 1972, 198-199）

> われわれの目は“光波をみる”と学校で教えられたが、それは迷信である。われわれの目が見るのは、入射光量子の大きさ$h\upsilon$に従ってわれわれの視覚的印象の多色の世界を生ずる網膜での光電過程である。（Sommerfeld 1969, 383-384）

19 世紀までの物理学者たちは、光の送信と受信の記録を、ユークリッド空間を移動する何らかの実体を想定することによって解釈し、光学現象を構成してきたが、それは唯一の構成の仕方なのではない。

---

[12] 光を何か速度を持つ実体として捉えるべきではないことは最近では特にティム・モードリンによって強調されている（Maudlin 2015）。

アインシュタインが特殊相対性理論を発表してから数年後、ヘルマン・ミンコフスキーは特殊相対性理論の持つさまざまな帰結がユークリッド空間とは異なる構造によって捉えることができることを示し、それが時空ダイアグラムという可視的オブジェクトによって具象化できることを示した。彼が考案した構造はミンコフスキー空間と呼ばれる。ミンコフスキー空間はユークリッド空間とは異なる数学的構造を持つが、適切な解釈の下で同じ種類の幾何学的オブジェクトによって具象化することができる。例えば、ユークリッド構造を具象化する場合、円という幾何学的オブジェクトがある点から等距離にある点の集まりとして解釈されるが、ミンコフスキー構造を具象化する場合、双曲線がそのように解釈されるオブジェクトとなる。

ミンコフスキーが特殊相対性理論の構造を幾何学的な図形という可視的オブジェクトによって具象化したことは、相対論的物理学のその後の展開に決定的な影響を与えた。一般相対性理論では、物質やエネルギーの分布が決める計量に基づいて物体の運動を記述する。そこでは、重力という遠隔力の存在は見かけ上のものでしかなく、物体の運動は時空の幾何学的構造によって決定される。一般相対性理論では、物体はユークリッド空間とは異なる計量を持つ空間を運動すると解釈することによって現象が構成されるが、そのような空間はリーマン空間と呼ばれ、すでに 19 世紀から数学者たちによって研究されていた。一般相対性理論の登場以降、リーマン空間は単に数学者たちの理論的関心の対象に留まるのではなく、現象の構成に用いられるようになった。つまり、それまでターゲットレス・モデルに過ぎなかったリーマン空間は時空というターゲットを表象するモデルとなったのである。

7.2 時空論と科学的理解

相対性理論がもたらした一連の時空描像の転換は時空の実体説と関係説の対立という伝統的な哲学的問題を新たな段階へと導いた（cf. Sklar 1977, 内井 2006）。時空の実体説とは、空間と時間は物体とは独立にそれ自身として存立する実体と見なす立場であり、時空の関係説とは、空間と時間は物体同士の関係性から派生する概念であり、物体の存在を欠いた時空は存在しないとする立場である。関係説によれば、ある物体の運動は常に他の物体に対して相対的に特定できるだけである。例えば、ある物体が静止しているのか、それとも運動しているのかといったことは絶対的な意味を持たず、他の物体を参照することで相対的に決められる。ニュートンは有名な「バケツ実験」によって実体説を擁護することを試みた。水の入ったバケツを回転させたとき、はじめバケツの中の水は静止しているが、バケツの回転が水に伝わるにつれ、徐々に水はバケツと一緒に回転をはじめ、バケツの側面付近の水が盛り上がる（図 7.2）。ニュートンによれば、水が盛り上げるのはそれが空間の中で回転運動することによって遠心力を受けるためであり、他の物体と比較しなくても遠心力の有無によって運動を特定することができる。彼によれば、関係説では遠心力がいかにして生じるのかを説明できない。これに対して、エルンスト・マッハは関係説の立場から、回転するバケツ

の中の水が盛り上がるのは、水が周囲の物体に対して回転しているからであり、このような相対的な回転運動が遠心力を生み出すのだと主張した。

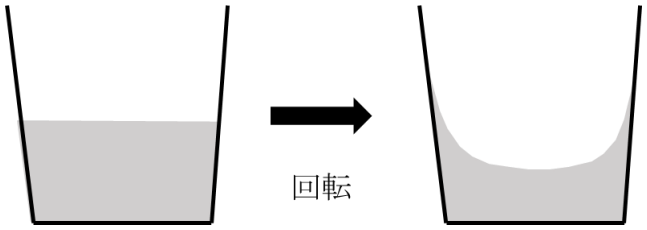

図 7.2 バケツ実験

一般相対性理論はその計量が物体とエネルギーの分布によって決まるリーマン空間によって時空を表象することを考慮すれば、一見すると実体説にとって有利に事が運んでいるように見えるかもしれない。実際、一般相対性理論によれば、物体やエネルギーが存在しない状況はミンコフスキー空間に相当することが帰結するが、このことは物体の存在を欠いたとしても宇宙には構造があることを示唆している。しかし、物体を取り除いたときに残るミンコフスキー空間こそが時空の実体であると考えることはできない。なぜなら、もし物体が存在したなら、それはもはやミンコフスキー時空ではなく、別の計量構造を備えたものとなるからだ。相対性理論が実体説的に解釈できるとしても、具体的にどのような対象を時空の実体と見なすのかは論者によって分かれる[13]。これに対して、相対性理論を関係説的に定式化しようとする試みもある。ジェレミー・バターフィールドは「物理理論は時空点に言及せず、可能的対象とその可能的配置に訴えることで書きなおすことができる（Butterfield 1984）」と主張している。この立場によれば、計量などの多様体に付随する概念は実体としての時空を表象していると考えるべきではなく、経験的な予測を引き出す道具的役割を持つものとして捉えるべきであるということになる。

時空の実体説と関係説の論争は時空という対象についての科学的実在論論争とみなすことができる。本論のこれまでの議論を踏まえるなら、時空が実体を持つものなのか、それとも物体間の関係に過ぎないのかという問いはナンセンスであるように思われる。時空は我々が現象を構成するために使用されるモデルなのであって、それがインテリジブルであるかどうかという観点から分析されるべきだ。相対性理論に関連する一連の物理学の発展が教えてくれるのは、ある種の測定手続きによって得られるデータについては、ユークリッド空間よりもミンコフスキー空間の方がそれを解釈し、そこから現象を構成し、それを理解

[13] カール・ホッファーによれば、現代の実体説は、多様体実体説、多様体＋計量実体説、計量実体説の 3 つの立場に分類することができる（Hoefer 1996）。

するために有用であるということである。しかし、このことから現実の時空はユークリッド空間ではないことが帰結するわけではない。ユークリッド空間は現代でも多くの現象の構成にとって有用であり、構造の単純性や具象化の容易性などから非常にインテリジブルなモデルなのである。

時空の関係説は形而上学的な対象を措定せず、観察可能な対象だけに基づいて物理理論を構築すべきとする立場の一種として理解することもできる。しかし、時空が形而上学的であって、物体がそうではないと考える根拠はそれほど強固なものではない。物体という持続し続ける実体を想定することが、時空という実体を想定することよりも経験主義的であると考える積極的根拠はないように思われる。どちらの想定も純粋現象に内在するものではなく、現象を構成するために措定されるモデルの要素であるということに変わりはない。

以上のように、物理学における相対性理論の登場が引き起こした時空描像の転換は、現象を構成するためのよりインテリジブルなモデルを構築するプロセスとして理解できる。マイケルソン・モーリーの実験結果をはじめとする新たな測定手法が生み出すデータから現象を構成するためには、それまでの古典力学に基づくモデルはもはやインテリジブルなものとは見なされなくなった。時空描像の転換はより広範なデータに対して、より良い科学的理解をもたらしてくれるようなモデルの探求として捉えることができるのである。

結論

本論は構成的理想化という概念を導入することによって、モデルによる現象の科学的理解がいかにして成立するのかを解明した。以下では、本論が特に強調した点をまとめる。

本論の前半部では主に「理解」という概念の分析を行った。科学的理解には因果性の把握に限定されない多様な仕方がある。物理学の実践では、エネルギー保存則や最小作用に原理に基づいて現象の説明や予測を行うことがあるが、このような場合、我々は始状態から終状態までの因果的過程を把握しているわけではなく、始状態と終状態で保存される量、あるいは最小化される量に基づいて現象を把握している。

科学的理解は現象の説明を与えることで達成されるが、このとき、説明に使用される理論／モデルはインテリジブルな性質を持たなければならない。インテリジブルな性質には、因果性、統合性、可視性、単純性などがあるが、理論／モデルのどのような性質にインテリジビリティという価値が帰属させられるのかは、それを使用する主体のスキルや文脈に依存する。また、科学的理解には現象を正確に把握すること、あるいは説明に使用される理論／モデルが真であることは要求されない。なぜなら、我々は同じ現象を異なる複数の理論／モデルによって理解できるからである。ニュートンとアインシュタインの重力理論は、惑星の運動を異なる描像で記述するが、共にその科学的理解を提供している。

しかし、理論／モデルが単にインテリジブルであるということだけでは、それに基づく説明によって科学的理解が達成されたとは見なせないであろう。こうしたことから、本論の後半部では、理論／モデルが現象を適切に表象するとは何を意味するのかを検討した。多くの論者によって、モデルは構造と解釈を持たなければならないことが指摘されているが、モデルをどのように記述するのかはモデルそのものとは無関係であるとされてきた。このような見解に対して、本論はモデルは「解釈された具象化構造」であるという見解を提示した。この見解に従えば、異なる仕方で具象化されたモデルは異なるモデルとして扱われる。

最後に、本論はモデルと現象を指示関係の一種と見なす見解を棄却し、現象はモデルとは独立に存在し、モデルと照合されるべきものなのではなく、モデルによって構成されるものであるという見解を提示した。現象を構成するためには、モデルはインテリジブルでなければならない。理想化はインテリジブルなモデルを作るためにあるパラメータを無視したり、歪めたりするが、このことは偽なる仮定を置いているわけでも、現象を誤って表象しているわけでもない。理想化は、現象を構成し、それに対する説明を与えることを容易する役割を持つため、現象の科学的理解を促すのである。

科学は観察に基づいて、観察できない世界の姿を明らかにする営みであると言われる。科学哲学では、観察できない世界についての記述は実在を捉えているのかどうかという議論が長年争われてきた。実在論者によれば、科学理論が措定する観察不可能な対象は少なくともある側面では実在している。これに対して、反実在論者はそのような対象は観察可能な対象に還元されるか、経験的な予測を導き出すための道具的価値しか持たない。反実在論者に

比べ、実在論者は観察不可能な対象の措定により積極的な認識的価値を見出す。

本論を通じて見出された見解によれば、観察不可能な実体の措定は、我々が現象を構成し、それを理解することを助けるという理由で正当化されることになる。観察不可能な対象の措定は、それが実在しているという意味ではなく、それによって現象の理解が可能になるという意味で積極的な認識的価値を持っているのである。

謝辞

本研究をまとめるにあたり、お世話になった方々に感謝の意を表したい。

まず、北海道大学大学院理学研究院教授 松王政浩先生には、科学哲学という学問の方法や研究の進め方について一からご指導を賜った。なかなか研究の方向が定まらず、停滞しているときにも常に励ましの言葉をかけていただき、また研究の進捗報告では議論の甘い点について数々の厳しく鋭いご指摘をいただいた。松王先生の温かいご指導がなければ、本論を書き上げることはできなかったであろう。感謝してもしきれない。

また、北海道大学情報基盤センター教授 重田勝介先生、北海道医療大学リハビリテーション科学部准教授 森元良太先生、北海道大学高等教育推進機構准教授 岩間徳兼先生におかれては、ご多忙のところ学位審査の労をお取りいただいた。先生方には、折に触れて、本研究の発展性を評価していただき、また、多くの貴重なご意見・ご助言をいただいた。特に、森元先生には、研究を進める上でさまざまな相談に乗っていただき、公私共に大変お世話になった。深く感謝申し上げたい。

そして、北海道大学科学基礎論研究室の院生及び OB・OG の皆様には、ゼミや勉強会での議論はもちろんのこと、普段の何気ない会話などからも非常に多くの刺激を受けた。哲学に限らずさまざまなテーマについて、皆様と徹底的に議論し、語り合った日々から多くのことを学び、本研究を遂行するために必要な見識を広げることができた。また、北海道大学オープンエデュケーションセンターの教員・スタッフの皆様には、業務を通じてさまざまな経験をさせていただいた。センターの業務で得た知識や経験は本論の随所で生かされている。ここに感謝申し上げる。

最後に、本論を書き上げるまでの非常に長い期間、辛抱強く見守り、支えてくれた家族に最大限の感謝の意を表し、謝辞といたしたい。

参考文献

Born, M., 1920, *Einstein's Theory of Relativity*, translated by Henry, L. and Brose, M. A., E. P. Dutton and Company Publisher [M・ボルン著、林一訳『アインシュタインの相対性理論』東京図書]

Bourbaki, N., 1974, *Éléments d'Histoire des Mathématiques*, Hermann [N・ブルバキ著、村田全、清水達雄、杉浦光夫訳（2006 年）『ブルバキ数学史 上・下』筑摩書房]

Bridgman, P. R., 1927, *The Logic of Modern Physics*, The Macmillan Company [P・R・ブリッジマン著、今田惠、石橋榮訳（1941 年）『現代物理学の論理』創元社]

Butterfield, J., 1984, Relationism and Possible Worlds, *British Journal for the Philosophy of Science* 35 (2): 101-113

Carnap, R., 1950, Empiricism, Semantics, and Ontology, *Revue Internationale de Philosophie* 4 (11): 20-40 [R・カルナップ著、永井成男他訳（1999 年）「経験主義、意味論、及び存在論」『意味と必然性：意味論と様相論理学の研究』紀伊國屋書店]

Carnap, R., 1956, The Methodological Character of Theoretical Concepts, in *The Foundations of Science and the Concepts of Psychology and Psychoanalysis* (Vol.I, Minnesota Studies in the Philosophy of Science), ed. by. Feigl, H. and Scriven, M., University of Minnesota Press, 38-76 [R・カルナップ著、竹尾治一郎訳（2003 年）「理論的概念の方法論的性格」、永井成男、内田種臣編『カルナップ哲学論集』紀伊國屋書店]

Cartwright, N., 1983, *How the Laws of Physics Lie*, Oxford University Press

da Costa, N. C. A. and French, S., 2003, *Science and Partial Truth: A Unitary Approach to Models and Scientific Reasoning*, Oxford University Press

de Regt, H. W., 2017, *Understanding Scientific Understanding*, Oxford University Press

de Regt, H. W., 2023, Can Scientific Understanding Be Reduced to Knowledge?, In *Scientific Understanding and Representation,* ed. by Khalifa, K., Lawler, I., and Shech, E., Routledge

de Regt, H.W. and Dieks, D., 2005, A Contextual Approach to Scientific Understanding, *Synthese* 144: 137-170, Springer

de Regt, H. W. and Baumberger, C., 2019, What Is Scientific Understanding and How Can It Be Achieved?, In *What Is Scientific Knowledge? An Introduction to Contemporary Epistemology of Science,* ed. by McKain, K. and Kampourakis, K., Routledge

Dennett, D. C., 1991, Real Patterns, *The Journal of Philosophy* 88 (1): 27-51

Dowe, P., 2000, *Physical Causation*, Cambridge University Press

Ducheyne 2007, Abstraction Vs. Idealization, *The Reasoner* 1: 9-10

Duhem, P., 1914, *La Théorie Physique: Son Objet et Sa Structure* (2nd ed.), [P・デュエム著、小林道夫、熊谷陽一、我孫子信訳（1991 年）『物理理論の目的と構造』勁草書房]

Einstein, A. 1905, Zur Elektrodynamik Bewegter Körper, *Annalen der Physik* 322 (10): 891-921

Einstein, A. 1917, *Über die Spezielle und die Allgemeine Relativitätstheorie*, Vieweg [A・アインシュタイン著、金子務訳（2004 年）『特殊および一般相対性理論について』白揚社]

Elgin, C. Z., 1991, Understanding Art and Science, *Midwest Studies in Philosophy* 16: 196-208

Elgin, C. Z., 1996, *Considered Judgment*, Princeton University Press

Elliott-Graves, A. and Weisberg, M., 2014, Idealization, *Philosophy Compass* 9 (3): 176-185

Fisher, R. A., 1930, *The Genetical Theory of Natural Selection*, The Clarendon Press

Fleisher, W., 2022, Understanding, Idealization, and Explainable AI, *Episteme* 19: 534-560

French, S. and Ladyman, J., 1999, Reinflating the Semantic Approach, *International Studies in the Philosophy of Science* 13 (2): 103-121

Frigg, R., 2023a, *Models and Theories,* Routledge

Frigg, R., 2023b, Understanding Scientific Representation, *Linkage: Studies in Applied Philosophy of Science* 3: 1-6

Frigg, R. and Nguyen, J., 2020, *Modelling Nature: An Opinionated Introduction to Scientific Representation*, Springer

Giere, R. N., 1988, *Explaining Science: A Cognitive Approach*, University of Chicago Press

Glymour, C., 2013, Theoretical Equivalence and the Semantic View of Theories, *Philosophy of Science* 80 (2): 286-297

Goodman, N., 1976, *Language of Art* (2nd ed.), Hackett Publishing [N・グッドマン著、戸澤義夫、松永伸司訳（2017 年）『芸術の言語』慶應義塾大学出版会]

Goodman, N. and Elgin, C. Z., 1988, *Reconceptions in Philosophy and Other Arts and Sciences*, Hackett Publishing [N・グッドマン、C・Z・エルギン著、菅野盾樹訳（2001 年）『記号主義：哲学の新たな構想』みすず書房]

Grimm, S. R., 2010, The Goal of Explanation, *Studies in History and Philosophy of Science* 41: 337-344

Grimm, S. R., 2021, Understanding, Stanford Encyclopedia of Philosophy

Halvorson, H., 2016, Scientific Theories, In *Oxford Handbook of the Philosophy of Science*, Oxford University Press

Hanson, N. R., 1958, *Patterns of Discovery; An inquiry into the Conceptual Foundations of Science*, Cambridge University Press

Hempel, C., 1965, *Aspects of Scientific Explanation and Other Essays in the Philosophy of Science*, Free Press

Hilbert, D., 1903, *Grundlagen der Geometrie*, B. G. Teubner [D・ヒルベルト著、寺阪英孝、大西正男訳（1970 年）「幾何学の基礎」、正田建次郎、吉田洋一監修『ヒルベルト 幾何学の基礎 クライン エルランゲン・プログラム』共立出版]

Hoefer, C., 1996, The Metaphysics of Space-Time Substantivalism, *The Journal of Philosophy* 93 (1): 5-27

Humphreys, P., 2000, Analytic Versus Synthetic Understanding, in *Science, Explanation, and Rationality: The Philosophy of Carl G. Hempel*, ed. by. Fetzer, J., Oxford University Press, 267-286

Jones, M., 2005, Idealization and Abstraction: A Framework, in *Idealization XII: Correcting the Model-Idealization and Abstraction in the Science*, ed. by. Jones, M. and Cartwright, N, 173-217

Khalifa, K., 2017, *Understanding, Explanation, and Scientific Knowledge,* Cambridge University Press

Khalifa, K., 2023, Should Friends and Frenemies of Understanding be Friends? Discussing de Regt, In *Scientific Understanding and Representation,* ed. by Khalifa, K., Lawler, I., and Shech, E., Routledge

Kitcher, P., 1976, Explanation, Conjunction, and Unification, *The Journal of Philosophy* 73 (8): 207-212

Kitcher, P., 1989, Explanatory Unification and the Causal Structure of the World, in *Scientific Explanation*, ed. by Kitcher, P. and Salmon, W. University of Minnesota Press

Knuuttila, T., 2005, Models, Representation, and Mediation, *Philosophy of Science* 72: 1260-1271

Knuuttila, T., 2011, Modelling and Representing: An Artefactual Approach to Model-Based Representation, *Studies in History and Philosophy of Science Part A* 42 (2): 262-271

Knuuttila, T., 2021, Epistemic Artifacts and the Modal Dimension of Modeling, *European Journal for Philosophy of Science* 11: 65

Lawler, I., 2021, Scientific Understanding and Felicitous Legitimate Falsehoods, *Synthese* 198 (7): 6859-6887

Lear, J., 1998, *Aristotle: The Desire to Understand*, Cambridge University Press

Lutz, S., 2017, What Was the Syntax-Semantics Debate in the Philosophy of Science about?, *Philosophy and Phenomenological Research* 95 (2): 319-352

Mäki, U., 2020, Puzzled by Idealizations and Understanding Their Functions, *Philosophy of the Social Science* 50 (3), 215-237

Maudlin, T., 2015, *Philosophy of Physics: Space and Time*, Princeton University Press

McMullin, E., 1985, Galilean Idealization, *Studies in History and Philosophy of Science Part A* 16 (3): 247-273

Misner, C. W., Thorne, K. S. and Wheeler, J. A.,1973, *Gravitation*, Princeton University Press [C・W・マイスナー、K・S・ソーン、J・A・ホイーラー著、若野省己訳（2011 年）『重力理論：Gravitation－古典力学から相対性理論まで、時空の幾何学から宇宙の構造へ』]

Morrison, M. and Morgan, M. S., 1999, Models as Mediating Instrument, In *Models as Mediators. Perspectives on Natural and Social Science*, ed. by. Morgan, M. S. and Morrison, M., 10-37, Cambridge University Press

Moss, J., 2020, Is Plato's Epistemology about Knowledge?, In *What the Ancients Offer to*

Contemporary Epistemology, ed. by. Hetherington, S. and Smith, N. D., Routledge

Niiniluoto, I., 1988, Analogy and Similarity in Scientific Reasoning, In *Analogical Reasoning: Perspectives of Artificial Intelligence, Cognitive Science, and Philosophy*, ed. by Helman, D. H., 271-298, Kluwer

Parker, W., 2015, Getting (Even More) Serious about Similarity, *Biology and Philosophy* 30 (2): 267-276

Pauli, W., 1958, *Theory of Relativity*, translated by Field, G., Pergamon Press [W・パウリ著、内山龍雄訳（1974 年）『相対性理論』講談社]

Pasnau, R., 2010, Medieval Social Epistemology: Scientia for Mere Mortals, *Episteme* 7 (1): 23-41

Peirce, C. S., 1974, *Collected Papers of C. S. Peirce I-VI*, ed. by. Hartshorne, C. and Weiss, P. Harvard University Press

Pincock, C., 2011, *Mathematics and Scientific Representation*, Oxford University Press

Potochnik, A., 2017, *Idealization and the Aims of science*, The University of Chicago Press

Potochnik, A., 2020, Idealization and Many Aims, *Philosophy of Science* 87: 933-943, Philosophy of Science, Association

Reichenbach, H., 1957, *The Philosophy of Space and Time*, Dover Publications

Salmon, W., 1984, *Scientific Explanation and the Causal Structure of the World*, Princeton University Press

Shapiro, S., 2000, *Thinking About Mathematics: The Philosophy of Mathematics*, Oxford University Press [S・シャピロ著、金子洋之訳（2012 年）『数学を哲学する』、筑摩書房]

Sklar, L., 1977, *Space, Time, and Spacetime*, University of California Press

Sommerfeld, A., 1964, *Optics. Lectures on Theoretical Physics. Vol. 4.*, translated by Laporte, O. and Moldauer, P. A., Academic Press [A・ゾンマーフェルト著、瀬谷正男、浪岡武訳（1969 年）『理論物理学講座 IV：光学』講談社]

Strevens, M., 2008, *Depth: An Account of Scientific Explanation*, Harvard University Press

Strevens, M., 2017, How Idealizations Provide Understanding, In *Explaining Understanding: New Perspectives from Epistemology and Philosophy of Science*, ed. By Grimm, S. R. *et. al*, Routledge

Suárez, M., 2004, An Inferential Conception of Scientific Representation, *Philosophy of Science* 71 (5): 767-779

Suppe, F., 1989, *The Semantic Conception of Theories and Scientific Realism*, University of Illinois Press

Suppes, P., 1967, What is a Scientific Theory, In *Philosophy of Science Today*, ed. by. Morgenbesser, S., Basic Books, 66-67

Suppes, P., 2002, *Representation and Invariance of Scientific Structures*, CSLI Publications

Turney, P., 1990, Embeddability, Syntax, and Semantics in Accounts of Scientific Theories, *Journal*

of Philosophical Logic 19 (4): 429-451
United Nations, 1992, *Adenda 21*, United Nations Conference on Environment and Development
van Fraassen, B. C., 1980, *The Scientific Image*, Oxford University Press [B・C・ファン・フラーセン著、丹治信春訳（1986 年）『科学的世界像』、紀伊國屋書店]
van Fraassen, B. C., 2008, *Scientific Representation: Paradoxes of Perspective*, Oxford University Press
Weisberg, M. 2007, Three Kinds of Idealization, *Journal of Philosophy* 104 (12): 639-659
Weisberg, M. 2013, *Simulation and Similarity: Using Models to Understand the World,* Oxford University Press [M・ワイスバーグ著、松王政浩訳（2017 年）『科学とモデル：シミュレーションの哲学入門』名古屋大学出版会]
Woodward, J., 2003, *Making Things Happen: A Theory of Causal Explanation*, Oxford University Press
内井惣七（2006 年）『空間の謎・時間の謎：宇宙の始まりに迫る物理学と哲学』中央公論新社
近藤洋逸（1966 年）『新幾何学思想史』三一書房
田中正（1995 年）『物理学と自然の哲学』新日本出版社
松王政浩（2023 年）「数理モデルをめぐる、最近の科学哲学論争から」『現代思想 2023 年 7 月号 特集 ＝〈計算〉の世界』青土社、119 頁～130 頁
山本義隆（1997 年）『古典力学の形成—ニュートンからラグランジュへ』日本評論社