

モデルとは何か？

三 浦 雅 弘

はじめに

「モデル」という語には多様な意味があるが、科学論の文脈において、例えばマックス・ブラックは、1.縮尺または拡大モデル、2.アナログ・モデル、3.理論的モデル、4.数学的モデル、等の表現を、彼のよく知られた論文の中で列挙している¹⁾。ブラックも指摘するとおり、これらのうちの「数学的モデル」という表現が今日最も多用されているのは、言うまでもなく社会科学の領域である。

一方、20世紀の数学の所産の中には、アルフレッド・タルスキによって創始された「モデル論」と呼ばれるものがある。この数学内部のモデル論と、自然科学ないし経験科学の内部で語られるモデルとの間には、ブラックも、また、ある有力な論理学者も述べるように、関連性はなく、相互に独立した概念だというのが言わば公式見解というものであろう²⁾。

その公式見解に対する異議申し立ては、近年では例えばファン・フラセソ³⁾に見られ、さらに遡ればパトリック・スップス⁴⁾は、1960年代に両者の連続性を力強く擁護していた。本稿では、「モデル」と呼ばれるものの諸相を概観した後に、この両者の関係の考察へと立ち戻り、数理論理的モデル概念と科学的モデル概念とは延長線上に位置づけられ、かつ、前者がより根源的であると見た、スップスの指摘の重要性を喚起したい。彼の問題提起の背後には、なぜ数学が経験世界へと適用可能なのか、より正確に言うならば、数学が経験世界に適用可能となる条件は何なのかとい

う、哲学古来の問題が潜んでいたように思われる。

タルスキのモデル論

創始者タルスキによれば、モデル論とは、形式化された理論を構成している文と、それらの文が適用される数学的構造との間の相互関係の探究にほかならない⁵⁾。したがってモデルとは、その理論に含まれるすべての文を真とするような構造である。このことからモデルが、文という言語的存在とは区別される非言語的存在とされていることは明らかであろう。言い換えれば、理論は言語的であるのに対して、モデルは非言語的なのである。しかもモデルは数学的構造である以上、抽象的な存在と見なされる。

われわれがモデル論に出会うことが多いのは、論理学においてであろう。論理的妥当性の定義に際してわれわれは、対象言語の外に立ち、その対象言語の文がどのような成り立ちを有するのかを、メタ言語において考察する。このような考察が「モデル論」と呼ばれ、「証明論」と呼ばれるものと並んで論理学の基礎的方法論と見なされている⁶⁾。

最も基礎的な古典命題論理に即して考えるならば、通常行われるモデル論的手続きの大筋は以下のようなものである⁷⁾。まず、論理結合子についての真理値表による解釈を前提としながら、与えられた文に含まれる原子文の各々につき、真および偽という2通りの可能性を考えて、いかなる場合にも

真となる文を妥当とする。次いで、モデルという概念を導入することにより、いま得られた妥当性という概念を再定義する。それによって、対象言語の文と、それを真あるいは偽とする非言語的事象との関係、ひいては言語と、それが表現するものとの関係において、妥当性という概念が捉え直されることになる。

具体的には、ある文の真偽は、その文の意味づけと、言語外対象（世界）という二つの要因によって決定される。ここで意味づけとは、その結果、ある与えられた文が、ある与えられた世界において1つの真理値をもつようになる操作である。したがってそれは、任意の文と任意の世界が与えられたときに、1つの真理値を選択する関数であると言ってよい。そして一般的には、この付値関数 V と世界 w との順序対 $\langle V, w \rangle$ が、古典命題論理の「モデル」であることになる。しかし、古典命題論理では、意味づけの結果は文の真理値の違いにのみ反映されるので、その文を真とするものと偽とするものとの二種の付値関数を考えればすべての可能性は尽くされ、世界 w を導入しなくとも付値関数は定義可能である。したがって、ある文がすべての付値関数によって真という値を与えられるのであれば、この文は妥当であり、いかなる世界においても真である。古典命題論理のモデルは w を省いた V のみによって定義されるのである。

さて、古典命題論理における意味づけの対象は、文と論理結合子の二種しかなく、文は真と偽という意味以上の内容を全くもたない。そして、論理結合子の意味はあらかじめ真理値表によって定められたとおりである。したがって、古典命題論理のモデルは、付値関数 V が、任意の文に対して真あるいは偽という値を与えることと、論理結合子の真理値表による解釈を充たすこと、という2つの条件のみで与えられることになる。かつてフレーゲは、「文の真理値をその文の意味として認めざるを得ない」と述べた⁸⁾。そう認めるならば、すべての真なる文は同一の意味をもち、すべ

ての偽なる文も同一の意味をもつことになるが、この事態は、古典命題論理においてはまさしく実態なのである。

3つの科学的モデル - 経験的モデル、理論的モデル、数学的モデル

(1) 経験的モデルとしてのアナログ・モデル

ブラックは、経済流通システムを考察するための流体モデルのように、媒体の変化を伴うモデルを、アナログ・モデルと呼んでいる⁹⁾。このようにアナログ・モデルとは、本来の考察の対象を、それとは別の経験可能な物質の対象（あるいはシステムないしプロセス）に変換したモデルであるが、そこにおいても本来の対象の構造や関係ネットワーク（web of relationships）は可能な限り忠実に再現されることが意図されている。その意図が成就されて初めて、構成されたアナログ・モデルのある適切な特性から、本来の対象に即した有効な予測が可能になるからである。

その場合、構成されたアナログ・モデルから、本来の対象において生起する事象を予測するためには、一連の解釈規則が必要である。それは理想的には、アナログ・モデルに具体化されている諸関係と、本来の対象において具体化されている諸関係との間に、1対1対応が成立していることだと言えるであろう。それによって初めて、アナログ・モデルに適用される語彙と、本来の対象に適用される語彙とを、相互に正確に翻訳しうる規則が手に入るからである。

上のことから二つのことを指摘できる。一つは、アナログ・モデルが本来の対象と共有しているのは、縮小あるいは拡大されたスケール・モデルの場合のごとき一連の物質的特性や大きさの比率ではなく、同一の関係パターンとしての抽象的構造だということである。もう一つは、言わば同じことの数学的表現であるのかもしれない。集合論においては、2つの集合の元の間に1対1対応が成り立つとき、それらの集合は互いに「同型

(isomorphic)」であると言われる。したがって、アナログ・モデルの支配的原理は、本来の対象との同型性 (isomorphism) にあると言ってよい。

(2) 理論的モデル、あるいは、理論のモデル

理論的モデルは「理論のモデル」と言うほうが、誤解のおそれが少ないかもしれない。ブラックがその例として挙げているのは、ボーアの原子モデルであるが¹⁰⁾、ほかに名高いものとしては、ワトソン・クリックのDNAモデルなどがある。これらはアナログ・モデルのように経験可能なモデルでもなければ、量子力学の理論そのものや分子生物学の理論そのもののように、文の集合からなる言語的な存在であるのでもない¹¹⁾。まさしくタルスキによるモデルの定義に一致して、理論を充足する非言語的な存在でありながら、経験的・具体的に構築される必要はないものなのである。

同じく物理的・物質的な現象ではあるが、貨幣や物資の流通が可視の対象であるのに対して、原子や遺伝子は微視的对象であり、それを可視化して構築することは、その理論的モデルの本質には無関係である。それらの理論的モデルは、たとえ想像的でしかなくとも、その可能な構造が記述されさえすれば、モデルの資格として必要十分である。したがって、理論的モデルとはある仕方で記述される構造である、と言うことができ、その構造と、本来の微視的・物質的对象との間にも、同型性が要請されるのは自明であるので、この点において、アナログ・モデルと理論的モデルとの間に、モデル概念の連続性を認めることができる¹²⁾。

理論的モデルが経験可能な具体性を全く必要としないことの例示的説明として、ブラックは、幾何学的主題を電流回路モデルによって解明する、という事例を挙げている¹³⁾。彼によれば、この例では、具体性も乏しく想像力も及びにくい電流というものの既知の性質を、本来の対象に適用することで解法が得られたという。したがって、例えば数学的演算体系のごとき抽象的な存在ですら、それよりも具体的な本来の対象の理論的モデルと

して活用可能であることをこの例は教えている、という。

(3) 数学的モデル

モデルという概念が多用される分野としては、数理社会学、行動科学、認知科学等の領域が思い浮かぶ。それらの専門家にとって、ことに数学的モデル化は不可欠の手法とされ、多くの場合、本来の対象のシステムは、数学的モデル上に写像されねばならない。本来の対象領域は、集合や関数等の抽象的な定義域の上に投射され、そうして得られる数学的对象の間に成り立つ諸関係によって、本来の対象がもつ諸要因の間の諸関係が「モデル化」される、と言われるわけであるが、その具体的手続きはブラックによれば以下のようなものである¹⁴⁾。

本来の領域における適切な変数が、常識なり理論的考察なりによって同定される。

諸変数の間に成り立つと推測される諸関係について、いくつかの経験的仮説が立てられる。

諸変数についての数学的定式化や操作が容易になるように、(時によっては大胆な)単純化が施される。

数学的定式化を施し、それによって得られる方程式の解法が探究され、それが容易に求められない場合には、築かれた数学的システムの大域的特性が探究される。

本来の対象領域では数値未知区域の数値を数学的に算出し(「外挿(extrapolation)」と呼ばれる手続き)それが本来の領域でテスト可能であれば、フィードバックして検証する。

線形化等の単純化が可能であれば、要素関数の初期条件を除去する。この操作によって、理論の一般性が増大することがある。

以上の「数学的モデル化」と呼ばれる手続きを用いることの利点は、ブラックによれば、あらゆる経験的探究領域に数学的解析を適用して得られるものと変わらない。すなわち、

イ. 本来の対象システムにおいて成立している諸

関係の厳密な定式化、
 口．数学的演算を介することによる推論の容易さ、
 八．「モデル化」によって示される構造の、直観的把握の容易さ、
 等々である。

「数学的モデル」への疑問とモデルの階層性

(1) ブラックの疑問

ところがブラックは、「数学的モデル化」と呼ばれる操作に伴う不利益も明らかだとする。その主張は以下のものである¹⁵⁾。

- a. 数学的解析のために要求される大胆な単純化は、数学の有する厳密さが、本来の対象領域における経験的検証可能性にとってかわりうるものであるかのような錯覚を招くことがある。
- b. 数学的操作そのものに説明力があるかのような幻想を呼び起こすことがある。すなわち、数学はどのような関数が既知データに近似的に適合するかを示すことで、説明の「形式(form)」は与えるが、「因果的(causal)」説明を与えるわけではないことが誤解されやすい。

ブラックは、「数学的モデル」と呼ばれるものが、宇宙に遍在し靈妙な天上の性格をもつものと古代から中世にかけて信じられていた第五元素、「エーテル」的性格を与えられることを危険視している。彼によれば、数学的方程式は決して、本来の対象システムの働きに対応する不可視のメカニズムの働きを指示するものではない。

一言にすれば、ブラックは、一般に「数学的モデル」と呼ばれるものが、「数学的理論」ないし「数学的取り扱い・手続き・操作」の別名に過ぎないと考えている。「数学的モデル」と呼ばれるものは、アナログ・モデル等の経験的モデルや、より抽象的な理論的モデルとは、その存在の性格上、一線が画されるべきだというのである。このブラックの意見に対して、私は次の二つの観点から反論が可能であると思う。一つは、経験的モデ

ルや理論的モデルに課せられた同型性の要請という観点からであり、もう一つは、モデルの階層性という観点からである。まず、後者の観点から考えて行きたい。

(2) モデルの階層性

社会科学全般や行動科学においては、「モデル」という語によって、(定量的)仮説の集合ないし複合体を意味することは広く行われているように思われる¹⁶⁾。そして、ある社会調査法の標準的な教科書によるならば、仮説は少なくとも以下の3つ以上の文を含むものとされる¹⁷⁾。

- () 独立変数と従属変数を明示する文
- () 独立変数と従属変数の関連の仕方を示す文
- () 独立変数と従属変数とが関連すると考えられる理由を述べる文

この定義は、モデルを言語的存在と見なす点で、モデルを、言語的存在としての理論を充足する非言語的存在とするタルスキの定義に抵触するとも思われるが、ここでは、()がブラックの言う「因果的説明」という要素に関係し、また、()はまさしく、モデルが関数表現を含まなければならないことを明言していることに注目したい。理論的モデルの多くにおいては、この関数表現の指し示すものが扇の要の位置にあると思われるが、すでに理論的モデルの段階において、数学的モデルの一部、それも最重要な一部が組み込まれていることが、ここに示されているのではないだろうか。

いわゆる「コネクショニスト・モデル」に力点を置いたある認知科学の教科書の中で、執筆者のひとり、**「モデルの階層性」**とでも呼ぶべき主張を展開している¹⁸⁾。以下でその議論を要約してみよう。

われわれの認知行動を脳神経系の作用によるものとして理解するためには、3つのモデルが必要とされる。第一は、生理学的実験における神経細胞の活動データに素子的説明を与えるための「生理モデル」、第二は、行動科学的実験データに機能的説明を与えるための「認知モデル」、そして

第三は、これら2つのモデルを抽象化して一般化しようとする「計算モデル」である。

脳神経系の機能を生理学的に理解するためには、神経細胞の活動データに密着した解釈概念が必要とされ、それを与えるのが生理モデルである。生理モデルは、脳神経系を、神経細胞という演算素子が多数接続されて、超並列的に機能しているシステムとして理解しようとするモデルであり、これによりわれわれは、システム全体の作動が、計測されるデータにどのように反映されるかを予測することができる。

人間や動物を対象とする非侵襲的な行動実験は、マクロの立場から、脳の機能ブロックの特性を解明して行く。認知モデルはその結果を受けて、機能ブロックもしくはその集団をモジュール化し、個々のモジュール機能や、モジュール間の相互作用を指定することで、システムとしての脳神経系の作用を説明しようとするモデルである。

すぐに気づかれることであるが、生理モデルの先に認知モデルの姿を見通すことは容易でない。そこで、その両者を繋ぐ役割を果たすことを期待されるのが計算モデルである。神経系を論理回路と見立てたり、統計学や解析学を援用することにより、学習や記憶を司る脳神経系の作用が解明されつつあるが、この計算モデルは、もとの脳神経系の現象からの抽象度が高く、したがって高い一般性を与えられていることにより、生理モデルと認知モデルの橋渡しを可能とするとよい。このことの現実的な意味は、生理実験より得られた生理モデルから、計算モデルを媒介して、認知モデルに繋げ、そこから行動実験が可能となること、そして同様にその逆のルートによる研究プロジェクトも可能となることである。

以上の、モデルの階層性というアイディアは、数学的モデルに対するブラックの疑念に十分対処できるのではないだろうか。上述の、認知科学における、生理モデルと認知モデルとを媒介するものとして構想される計算モデルは、そのような特定の役割を与えられている点において、単なる数

学的取り扱い・手続き・操作といった範疇に還元されるものではない。また、先に紹介した、数学的モデル化の具体的手続きの項目においてブラックが述べている、「変数の間に推測される諸関係について、いくつかの経験的仮説を立てる」という内容は、明らかに数学的モデルに先行すべき、理論的モデルの構築作業を意味している。その後引き続き構築される数学的モデルは、この理論的モデルと緊密な論理的関係を有するはずであり、それは決して、経験世界を超越したところに組み立てられる純粋数学の理論などではありえない。他の理論的モデルよりも抽象度が高いという必然的な属性のうちに、あらかじめ一定の役割が期待されている数学的モデルは、単なる数学的な操作でもなければ、それ自体が独自の領域を専有する純粋な理論でもないと言えるだろう。付言すればスピスは、「その理論の或る数学的モデル」という言い方で、ブラックが暗黙のうちに仮定しているモデル構築作業を表現している¹⁹⁾。

(3) 同型性の要請

ブラックによれば、経験的モデルとしてのアナログ・モデルが本来の対象と共有しているのは、関係パターンとしての抽象的構造であった。この条件はおそらく、両者の間の集合論的同型性と置換可能である。ブラックはこの同型性の要請が、少なくとも記述可能な構造をもたねばならない理論的モデルにも求められると見なしている²⁰⁾。彼によれば、モデルと本来の対象との間の同型性は、その度合いがモデルの信頼度の判定基準を与えることにより、そのモデルの使用に合理的な根拠を与えることができるという。

さらに、理論的モデルと数学的モデルとの連続性を主張し、したがって、ある意味でそれらの階層性を先駆的に述べていたとも考えられるスピスは、経験的モデルと数学的モデルとの同型性を指摘している。すなわち、アナログ・モデル等の経験的モデルは、もとの理論の少なくとも1つの数学的モデルとの同型性が示される。彼によれ

ば、この同型性が存在して初めて、「もの」に対する「数」の適用が正当化される、という²¹⁾。この主張が正しいならば、本来の対象、その経験的モデル、その理論的モデルの延長上に築かれる数学的モデルのあるもの、の間には、それらのモデルがそれぞれ適切なものであれば、一貫して集合論的同型性が求められることになる。

モデル論と科学的モデル

(1) 数学と経験科学の連続性

スッピスによれば、科学理論は、論理の語彙とその理論の基本的記号とを含む抽象的な論理計算体系と、その体系に経験的内容を与える一連の規則群とからなる²²⁾。批判も可能とはいえ、既成の科学理論を静的に眺めた場合、この科学理論観はいまなお一つの標準の位置を占めている。科学理論が数学的体系とは区別されねばならないという意味で重視されるべきは、後者の規則群であり、科学理論は意図された経験的解釈を、対応定義によって体系的に特定される必要がある。

さて、スッピスのいう意図された解釈を担う構造こそが、前述の理論的モデルと数学的モデルとが一体化された科学的モデルであることに疑問の余地はないであろう。そこにおける構造とは、すでに見たとおり非言語的な関係パターンとも呼ぶべきものであって、これがタルスキの数学理論としてのモデル論において定義された「モデル」と近接するものであることは明らかである。タルスキは「モデル」を、理論を充足する非言語的存在としていたからである。

事実スッピスは、モデル論と科学的モデルとの連続性を主張すると同時に、タルスキのモデル概念の根源性を強調してやまない²³⁾。モデルという概念の意味は、数学においても経験科学においても同一であるが、前者の数理論理的モデル概念こそ、全ての経験科学の多種多様な領域において、厳密な言明のために要求されるモデルの根本的な概念を提供している、というのである。

しかるに、一般的・公式的見解は、モデル論と科学的モデルとの無関係・相互独立の主張に傾いているように見える。おそらくこれは、社会科学、行動科学、認知科学等で、モデルを「定量的仮説の集合」とする教科書の記載が一般的慣例であることから来ている。「仮説の集合」とは、厳密に定式化された暁には、「公理と見なされるような文の集合」と言い換えられ、その言語的な把握が明瞭となる。しかし、この定義を採用するかがり、モデルと理論との区別がなくなることも明らかであろう。

(2) 「モデル」のその他の語用論

科学における「モデル」という語の使われ方はほかにもあるようだ。スッピスによれば、物理学の内部でも、相応の歴史を有して理論内容が截然と確定されているような領域では、「モデル」という語はあまり用いられない。それに対して、その領域に属する物理現象の細部に関して、いまなお十分な説明を与えていない部門では、その語が頻繁に用いられるという²⁴⁾。カール・ヘンペルにも類似の指摘がある²⁵⁾。そのような言わば発展途上の領域では、「モデル」の用語法に、物理的・非言語的な意味をもたせた使用と、理論的・言語的な意味をもたせた使用との、間断のない相互作用が観察される、とスッピスは述べている。

ファン・フラーセンも、スッピスと同様、メタ数学と諸科学における「モデル」という語の使用に、通常言われるほどの距離はない、と考える論者のひとりである。加えて彼は、科学者による理論的「モデル」の用語法に見受けられるある特性に注意を促している²⁶⁾。彼によれば、例えば「原子のボーア・モデル」は、単一の構造を指すのではなく、構造の一つのタイプ、換言すれば、ある一般的な特徴を共有する構造の集合を指している、という。その理由は、科学者の用法によると、ボーア・モデルは、水素原子にもヘリウム原子にもその他にもあてはまるものと考えられているからである。したがって、このような科学者の「モ

デル」の用法は、正確には「モデル・タイプ」と呼ばれるべきものだ、というのである。

おわりに

本稿においては、1)一般に科学的モデルと呼ばれるものの中に、「数学的モデル」と呼ばれるべきものが、その重要な一角を占めていること、2)数学的モデルを組み込んだ科学的モデルにおける「モデル」概念は、タルスキの首唱した数理論理学的モデル概念と極めて近い位置に立つこと、を明らかにしようとした。これら2つの論点を、1960年代から主張していたのはスッピスであり、彼によれば、科学理論の抽象的な集合論モデルは、その部分として、物理的モデルの構成要素となる基礎的集合を含んでいる。そして、この集合論的・数理論理学的モデル概念こそ、物理的モデル概念よりも根本的・基底的であるという²⁷⁾。

当時スッピスと相反する見解を表明していたのはブラックであったが、スッピスとブラックとの相違は、やや強引に対比するならば、プラトニズムと経験主義との相違であるようにも思われる。ブラックも、変数間の諸関係について経験的な仮説を構築する、という作業自体はモデルの構築にほかならないことを認める。しかし、通常その後続くべき一連の数学的操作は、あくまで「操作」にすぎず、「モデル化」と呼ばれるべき理由はない、とする。あまつさえ、「数学的モデル」なる幻想に、因果的説明力を求めようとするならば、それは砂上の楼閣を重ねようとする錯誤とすら見なされるのである。

科学の営みにおいて、経験的手法を重視するブラックに対し、スッピスは、コンピュータ科学におけるトップダウン・システムにも通ずる数学的手法を重視する。スッピスによれば、科学理論の要諦は、計算体系に与えられる意図された経験的解釈にある。そしてその解釈を担うのがモデルであり、それは言い換えれば、非言語的な関係パターンとしての数学的構造なのである。つまり、モデ

ルの構築作業に経験的要素は不可欠であるものの、科学理論の二つの焦点に位置している計算体系もそのモデルも、その実体は数学的構造という抽象的存在なのである。

コンピュータ科学において、ある計算手順がトップダウン・システムをもつとされるのは、その手順が、解決すべき問題に対する明快な解法を提供できるように十分定義され、明確に理解された固定的な計算手順(その中には、予め指定された知識の蓄えを含めてよい)に従って構成されている場合である。それに対して、ボトムアップ・システムとは、明確に定義された演算規則と知識の蓄えは予め指定されておらず、システムがシステム自身の「経験」に従って、そのやり方を「学習」し、改善して行くようなシステムである。このシステムでは、実行されるごとに(言い換えると、「経験」を重ねるごとに)システム自身によって評価がなされ、その評価に基づいて、出力の質が高められるように演算規則が修正されて行く²⁸⁾。

ペンローズによれば、数学的理解力をはじめとする人間の理解力一般を、人間が知ることのできる計算的メカニズムに還元することは不可能であるものの、数学内部に限ってさえ、コンピュータが効力をもつのはトップダウン・システムで用いられた場合に限られるという²⁹⁾。トップダウン・システム自体が、経験的要素の介入を限定している点でプラトン主義的であると言えるのみならず、上のように述べているペンローズも、物理的世界をプラトンのな数学的世界から「出現」と考える点でプラトン主義者と言えよう³⁰⁾。

スッピスとペンローズに共通する姿勢は、ともに数学と経験科学との関係に重大な関心を寄せながら、数学に重きを置いたプラトニズムに与する点である。それに対してブラックは、数学の研究から出発したキャリアと、『数学の本性』³¹⁾という処女作までもちながら、そこに占めるべき数学の役割を制限する方向で科学理論を捉えていると言えよう。ブラックは科学理論に対して、因果的説明力という条件を強く求め、数学的理論はその条

件を全く充たさないとするが、その意見はペンローズも共有しているものである。ペンローズによれば、「疑いの余地のない」主張を生み出すためにはトップダウン・システムが有効であるが、「説明」という目的にとっては、ボトムアップ・システムが有効かもしれないと認めるからである³²⁾。

本稿執筆時において、念頭にありながら論じられなかったのは、モデル概念と、『論理哲学論考』におけるウィトゲンシュタインの「論理形式(logische Form)」という概念との関連である。ウィトゲンシュタインは、像(Bild)を实在のモデルと見なす一方で、そもそも像が实在するものの像であるためには、像と实在との間に論理形式が共有されねばならない、とした。この論理形式なるものが、当時のウィトゲンシュタインにあっては、数学の命題や価値に関する命題と並んで、「語りえず、示されるほかないもの」とされたことはよく知られている。像や論理形式の議論は、やがてウィトゲンシュタイン自身によっては顧みられなくなるものの、いまなお興味深い哲学的考察を喚起する力を秘めているように思われる³³⁾。

註

1. Black, M. 'Models and Archetypes' in his *Models And Metaphors*. Ithaca: Cornell U.P., 1962. p.239.
2. Black, M. *op.cit.* p.226. Hodges, W. 'Model Theory' in Craig, E. (Ed.) *Routledge Encyclopedia of Philosophy*. London: Routledge, 1998.
3. Van Fraassen, B.C. *The Scientific Image*. New York: Oxrorrd U.P., 1980. p.44. ファン・フラースン(丹治信治訳)『科学的世界像』、東京：紀伊国屋書店、1986、93頁。
4. Suppes, P. 'A Comparison of the Meaning and Uses of Models in Mathematics and the Empirical Sciences', *Synthese*, 12 (1960)
5. Tarski, A. 'Contributions to the Theory of Models I', *Indagationes Mathematicae*, 16 (1954). p.572.
6. Kleene, S.C. *Mathematical Logic*. New York: John Wiley & Sons, 1967. p.33. クリーニ(小沢健一訳)『数学的論理学(上)』、東京：明治図書、1971、45頁。
7. 内井惣七ほか、『論理学 - モデル理論と歴史的背景』、京都：ミネルヴァ書房、1976、13頁以下。
8. Frege, G. 'Ueber Sinn und Bedeutung', in seine *Function, Begriff, Bedeutung*. Goettingen: Vandenhoeck & Ruprecht, 1962. S.48. フレーゲ(土屋俊訳)「意義と意味について」、フレーゲほか、『現代哲学基本論文集』、東京：勁草書房、1986、15頁以下。
9. Black, M. *op.cit.* pp.222f.
10. Black, M. *op.cit.* pp.228f.
11. Suppes, P. *op.cit.* p.290.
12. Black, M. *op.cit.* pp.229ff.
13. Black, M. *op.cit.* p.232.
14. Black, M. *op.cit.* pp.223ff.
15. Black, M. *op.cit.* p.225.
16. 高根正昭、『創造の方法学』、東京：講談社現代新書、1979、44頁。
17. 木下栄二、「社会調査の基本ルールと基本の道具」、大谷信介ほか、『社会調査へのアプローチ - 論理と方法』に所収、京都：ミネルヴァ書房、1999、62頁。
18. 大森隆司、「脳と認知」、都築誉史編、『認知科学パースペクティブ』に所収、東京：信山社、2002、197頁以下。
19. Suppes, P. 'What is a Scientific Theory?' in Morgenbesser, S. (Ed.) *Philosophy of Science Today*. New York: Basic Books, 1966. スッピス(大出晁訳)「科学理論とは何か」、ネイゲルほか、『現代の科学哲学』に所収、東京：誠信書房、1967、81頁。
20. Black, M. *op.cit.* p.239.
21. スッピス、「科学理論とは何か」、81頁。
22. スッピス、「科学理論とは何か」、78頁以下。
23. Suppes, P. 'A Comparison of the Meaning and Uses of Models in Mathematics and the Empirical Sciences',

- p.289 & p.294.
- 24 . Suppes, P. *ibid.* pp.292f.
 - 25 . Hempel, C.G. *Aspects of Scientific Explanation*. New York: The Free Press, 1965. pp.445f. ヘンペル (長坂源一郎訳) 『科学的説明の諸問題』、東京：岩波書店、1973、129 頁以下。
 - 26 . Van Fraassen, B.C. *op.cit.* p.44. ファン・フラーセン、前掲邦訳書、93 頁。
 - 27 . Suppes, P. 'A Comparison of the Meaning and Uses of Models in Mathematics and the Empirical Sciences', p.291.
 - 28 . Penrose, R. *Shadows of the Mind*. London: Vintage, 1995. p.18. ペンローズ (林一訳) 『心の影 1』、東京：みすず書房、2001、22 頁。
 - 29 . Penrose, R. *ibid.* pp.199f. ペンローズ、前掲邦訳書、235 頁以下。
 - 30 . Penrose, R. *ibid.* p.414. ペンローズ (林一訳)、『心の影 2』、東京：みすず書房、2002、228 頁。
 - 31 . Black, M. *The Nature of Mathematics*. London: Routledge and Kegan Paul, 1933.
 - 32 . Penrose, R. *op.cit.* pp.199f. ペンローズ、『心の影 1』、236 頁。
 - 33 . 本稿の作成に当たっては、立教大学大学院社会学研究科応用社会学専攻に在学中の、鶴見裕之・松井博史両氏より少なからぬ助力を得た。記して謝意を表したい。