

数学学習における思考実験の機能に関する研究

-実験に対する科学哲学からの考察-

数学科 倉井庸維

これまで数学の学習における思考実験の規定とその活用に関する研究や思考実験を含む数学する学習のモデルの設計がなされてきたが、ポパーとクーンの科学哲学の立場から科学の探究過程における実験や思考実験の機能は、本モデルと対応させることが可能であることが示された。

キーワード：実験、思考実験、自然科学、物理学

1. はじめに

1.1. これまでの研究

これまで、マッハ(1971)の思考実験をもとに、数学の学習における思考実験の規定とその活用に関する研究が(倉井, 2001b)が行なわれ、さらに、Polya(1954)のアイデアを加え思考実験を含む数学する学習のモデルの設計が以下のように示されてきた(倉井, 2001a)。

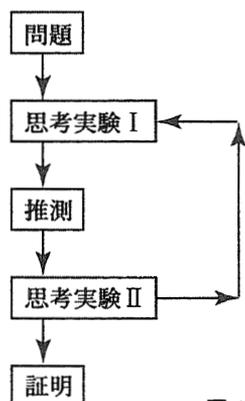


図1 数学する学習モデル

このモデルを具体的な数学の問題解決過程に適用し、十分適用可能であることを示してきた。しかし、このモデルに見られる思考実験が、科学の探究過程における実験や思考実験から導かれる妥当なモデルであることを示す必要がある。

1.2. 研究の目的と方法

そこで、本稿の目的は、自然科学における実験の機能、さらには、思考実験の機能について考察し、その結果思考実験を含む数学する学習のモデルの妥当性を示すことを目的とする。

そのための方法として、実験に対して、自然科学の辞書的定義から始めて、現代の物理学を中心に考察してい

る科学哲学者カール・ポパーとトーマス・クーンの著作から彼らの実験観を読みとることとする。

2. 現物実験の定義

実験について論議を進めるためには、まず、実験の定義を明確にしておく必要がある。そこで、いくつかの辞書で実験の定義を調べてみる。

2.1. 国語辞典における定義

まず、国語辞典*1によると、実験とは、

「理論や仮説が正しいかどうかを、人為的な操作により実地に確かめてみること。」

別の辞書では*2

「実際に試みること。実地の試験。人為的に一定の条件を設定して、自然現象を起こしてみること」

とあり、「仮説を確かめること」と、「条件を設定して、自然現象を起こしてみること」の2種類があることがわかる。

2.2. 自然科学の辞書における定義

では、自然科学の辞書ではどうなのであろうか。複数の辞書を調べてみると、

辞書1：「適当な装置を用いて人工的につくられた条件や状況の下で起こる現象を、観察、測定することをいう。

(略)自然科学における実験は、一般に、仮説や理論を検証するために行われるもので、そのために都合のよい諸条件を整えて、目的の現象を起こさせて、それを測定する。」*3

辞書2：「特定の現象や関係を研究する目的で、人為的にととのえられた条件のもとでおこる現象を、適当な装置を用いて観測、測定すること。」*4

辞書3：「適当な制限条件を人為的に与えて現象変化を起こさせ、そのなりゆき、結果を調べることをいう。」

*5

これら3つの辞書に共通してみられる実験についての定義は、それぞれ表現は異なるが、「適当な装置を用いて人工的につくられた条件や状況の下で起こる現象を、観察、測定すること。」であると考えられる。そして、辞書2では、実験の目的として、「仮説や理論の検証をするために行われる」が上げられているが、辞書1、3には、仮説の検証という表現は、記載されていない。ここでも、国語辞典に見られた2種類の定義に分けることができる。

実験をいわば道具として使用している自然科学よりは、むしろ、「実験とは何か」を問う哲学の方が、より実験について考察しており、また、定義を明確にしているかもしれない。そこで、つぎに、哲学の立場から、実験がどのように定義されているのかを調べる。

2.3. 哲学の辞書における定義

哲学の辞典において、実験は、

「広義の観察に属するが、通常は観察と区別される。実験は自然に働きかけ、人為的条件のもとでどんな現象が生ずるかを観察することで、自然に対して問いかけ、その答えを求めることを意味する。

(略) 実験には対象の諸因子の関係を明らかにするためのもの、対象の構造をさぐるためのもの、仮説の検証のためのものなどがあるが、最後のものが特に重要である。(略) *6

と記述されており、本研究との関連で考えると、「自然に働きかけ」、「自然に対する問いかけ、その答えを求めること」は重要な言葉であり、実験の機能としては、「対象の諸因子の関係を明らかにするためのもの、対象の構造をさぐるためのもの、仮説の検証のためのもの」が上げられている。

また、別の辞書*7では、

「人為的に組み上げられた条件、状態のもとで現象を観察することをいう。この方法の意識的、近代的な採用は、普通ガリレイに始まるといわれている。自然科学における実験は、一般に帰納、あるいはアブダクションによって得られた仮説もしくは仮説的法則、理論の検証のために行われるもので、仮説から個別的な観

察可能な被検証事象を演繹し、その事象を簡単に説明できるような形に、諸条件や機構、状態を組み上げ、そこで実際に当該事象が観察された場合に、その前提となった仮説が、確からしさを増した、とみなすのである。したがって、実験はつねに検証すべき理論的前提をもっており、それなしに実験を行うことは意味がない。」

と記述されており、ここでは、実験とは、「人為的に汲み上げられた条件、状態のもとでの現象を観察することであるが、自然科学に限定すると、「仮説的法則、理論の検証のために行われる」ことがわかる。ここでも、2種類の実験があることがわかる。

そこで、これらの辞書による定義から、実験の定義には、共通して「自然への働きかけ」や「自然への問いかけとその答えを求めるための営み」であるが、一つは、対象の構造や対象の諸因子の関係を求めるための実験と、仮説の検証としての実験の2つの意味があるといつてよさそうである。そこで、実験の定義を、次のように設定する。

定義1：未知の対象の構造を探ったり、対象の諸因子の関係を求めるためにデータを得るために、人為的な条件、状態の下で観察すること。

定義2：理論または仮説の検証のために、仮説から個別的な観察可能な被検証事象を演繹し、その事象を簡単に説明できる形に、諸条件や機構、状態を組み上げ、観察すること。

定義1と定義2との関係は、定義2は、検証すべき事柄(仮説)が実験者において明確になっている場合であり、仮説の検証が主要な目的であるが、定義1においては、実験者は全く推測をもってはいないものの、それほど明確ではなく、構造や因子の関係を探るためのデータを得ることが、主要な目的である。

では、次に現物実験の機能について考察していく。

3. 現物実験の機能

現物実験は、どのように機能しているのだろうか。これは、時代とともに、変化しているはずである。クーンの論文*8をもとに、実験の歴史的変遷を追う。

古代から中世にかけて誕生した科学は、天文学、和声学、数学、光学、静力学の5分野からなっていた。この

分野は、発達していくために、実験をほとんど必要としなかったのである。すなわち、17世紀の前の実験は、古代や中世の伝統にあって、実験の多くが「思考実験 (Thought Experiment)」であった。すなわち、心の中で可能な実験状況を描くが、その結果は日常の経験だけから十分に予言できるとし、ガリレオの実験も実際に実行されたかどうかあやしいとしている。17世紀を境にして、新しい型の実験が誕生したが、実際に実行された古い型に属する実験には、以下の2つの目的があった。

- (1) 他の手段で前もって分かっていた結論を立証すること
- (2) 当時の理論によって提起された疑問に対して具体的な答えを与えること

これに対して、新しい実験とは、ベーコンから始まり、ギルバート、ボイル、フックなど経験様式の実践者によってなされた。その実験は、以前には観測されずに、しばしば存在すらしなかった状況下で、自然がどのように振る舞うかを観察する目的からなされた。その実験の成果は、広範な自然誌的、実験的な記録として表され、その中には、科学的理論の構築の前提となると彼らの多くが考えたさまざまなデータが集積されていた。これらの実験は高く評価されたが、理論はしばしばおとしめられ、両者の間に実際に生じていた相互作用は、通常は意識されていなかった。また、人間の介入なしには成り立たない条件を設定し、そのもとで自然を提示すること、新しい実験装置の導入・開発もなされた。ここから、新しい科学も生まれた。

こうしたクーンの物理科学の発展の歴史に関する記述に対して、前節での2つの実験の定義に対応させると、定義1である「人為的条件のもとでの観察」は、ベーコンから始まる新しい実験であり、定義2である「仮説の検証」は、古い実験であるとみなすことができると思われる。その後、新しい実験は、再度実証性をもつように発展し、さらに高度に理論的な負荷性をもった間接的実証へとすすんだ (小森田⁹)。では、現代の自然科学において、実験はどのように捉えられており、その機能は、どのようなものであるのかが問題となる。

トラスティド¹⁰は、実験や観察を「仮説を試験する目的で、つまり、仮説が承認されるか否かを確かめるために」¹¹行い、「観察は外部的出来事に干渉しないという意味で受動的で」¹²あるとしている。逆に、実験は対象物に対して積極的に干渉することが必要であり、

そのためには、「巧妙な取り扱いが必要」¹³となっている。実験を、仮説—演繹法に位置付け、

「ある仮説が提案され、つづいて演繹あるいは計算がなされ、その仮説が正しいばあいに観察することが予想される結果が示される。観察結果が演繹あるいは計算されたものと一致することが予想される。もし、観察結果が演繹や計算の結果と一致すれば、その仮説は正しいことが確認されたとされる。もし、一致しない場合には、その仮説は反駁されることになり、科学者は考え直さなければならない。」¹⁴

と記述している。

この記述からわかることは、実験を、前節での実験の定義2と同様、「仮説の検証」として捉えていることがわかる。その実験においては、演繹あるいは計算が必要として、そこから導かれる事柄が、実際に行った実験の結果とが一致するかどうかによって、仮説の確証か反証されるかどうかの一種であるとしており、実験の機能は、仮説に対して、確証をもつか反証するかの2つの機能があることがわかる。

また、クーン¹⁵は、「一般に認められた科学的業績で、一時期の間、専門家に対して問い方や答え方のモデルを与える」パラダイムという概念から、科学の発展、科学の歴史を説明しようと試みている。彼によれば、科学的研究は、明確には分けられないが、3つの種類があり、それぞれのタイプの実験があるとしている。1つは、事実を求める実験観測である。物理学では、物体の比重や圧縮率、波長やスペクトル強度、電気電導度、接触電位差、化学では化学組成、化合量、溶液の沸点と酸度、構造式の光学活性などがある。既知の事実を測定し、より正確で信頼のおける、適用範囲の広い方法を発展させると功績とみなされる。2番目は、パラダイム理論から出る予測との一致を証明する試みとしての実験がある。理論と実験とをあわせようと工夫・修正を施す。アインシュタインの一般相対論を検証する測定分野は、まだ3つしかなく、コペルニクスの年周視差の予言を証明するための特別な望遠鏡、光速度が水中よりも空気中において大きいことを示すためのフーコーの装置などは、自然と理論を一致させるために必要になった装置である。3番目の実験は、パラダイム理論を整備するためにおこなわれる実験である。パラダイムにまつわる多少の不明確さを解決し、前には注意されるにとどまっていた問題にも解答を下すことができる。この実験には、3つの種類

の実験がある。1つは、物理常数の決定を目標とするものが含まれる。物理常数とは、万有引力常数、アヴォガドロ数、ジュール係数、電荷などが含まれ、測定値を改良していく努力は、問題を設定するための安定したパラダイム理論がなければならぬとクーンはいう。この実験に含まれる2つめは、定量的法則を目標とする実験であり、気体の圧力と体積に関するボイルの法則、電気引力に関するクーロンの法則が含まれる。これらの対して、クーンは、パラダイムなしには決しておこななかったという。3つめの実験は、一連の現象を扱うために展開されたパラダイムを近接領域に応用する場合に行われる実験で、その計画や解釈にパラダイムは影響する。

以上のことから、クーンの科学研究における実験の機能は、次の3つにまとめることができる。

- ①測定
- ②理論との一致を示す検証
- ③理論の拡大と整備

これから、現物実験の機能として、1つは、測定が上げられる。その次は、トラストファッドによれば、仮説の検証であり、クーンによれば、理論の検証にあたりと考えられる。すなわち、検証する機能があるといえる。これは、当然、仮説ないし理論を検証することができなければ、仮説は、反証されたことになり、仮説を修正するか、新たに構築することへと向かうのである。これは、前項の定義2にあたるものである。

一方、クーンは、実験の機能として、理論の拡大と整備を上げている。これにより、場合によっては、パラダイムを変更することも余儀なくされるが、新たな発見や発明は起こす可能性を秘めた実験として、前項の定義1を対応させることは可能であろうと思われる。そこで、現物実験の機能として、

- (1) 測定
- (2) 仮説の検証
- (3) 理論の拡大と整備

の3つを挙げ、前項の定義1は(3)に、定義2は(2)に対応させることにする。

4. 思考実験

4.1. マッハの思考実験

マッハは、思考実験という言葉が最初に用いたと言わ

れている。ここでは、マッハは、思考実験をどのようなものとしてとらえていたのかを明確にする。その前に、まず、マッハが現物実験に対してどのような考え方を持っていたのかを明らかにする。

マッハは、ガリレイが、落下距離が時間の二乗に比例して増加することを示そうとした過程を示した後で、「前もって何等かの見解をもっていなければ実験は決しに行くことはできない。というのは実験によってその見解に形が与えられるのだから。」*16としている。ここから、現物実験に対して、「仮説の検証である」という見解をもっており、現物実験によって、真偽が決定されると考えていたことがわかる。そして、「推測を1つももっていないならば、いったい何を研究し、いかにして研究しようというのであろうか。」と述べ、「実験は、その推測を確認するか、修正するか、否定する。」としている。ここから、マッハは、実験の機能として、推測の確認と修正と否定の3つがあると考えていたことがわかる。そして、マッハは、推測の具体的な例として、現代であれば、「速度 v は、何の関数だろうか?」、「速度 v は、時間 t の関数だろうか」と自問することであり、ガリレオの時代だとしたら、「 v は距離 s に比例するだろうか、 v は t に比例するだろうか」と自問することであるとしており、推測が自分自身への問いかけ、問題提起であることを示している。また、マッハは、物理学者であったことから、実験も物理学の実験を想定している。物理学は、精密科学であり、実験は、取り上げている要因間の関数関係を探し出し、それを方程式で表現するための決定をするものととらえていたことがわかる。

では、マッハは、思考実験はどのように捉えていたのであろうか。マッハは、思考実験を「より高度な知的段階でひろくおこなわれている別種の実験」*17として捉えている。実際に物を用いて行う実験は、現物実験 (*physischen Experimentes*) と呼び、思考実験と区別しており、現物実験と思考実験との関係は、思考実験は、「現物実験のまえに」*18 行われるとし、思考実験が行われる時期を明確に示している。

では、思考実験は、どのように行われるのであろうか。その方法は、「理想化 (*Idealisierung*) された状態」*19 あるいは「結果を得るために不必要な要因は消去された抽象化 (*Abstraktion*)」*20 状態において、「さまざまな要因 (*Umstände*) を連続的に変化させる」*21 (変化法 *die Methode der Variation*) ことによって、行われるのである。これによって、要因間の関係を求めること、すなわち、2つの量の間の関係式を求めることが、

可能になるのである。そして、「思考実験の結果として」*22推測 (*Vermutung*) が得られ、その推測の真偽は現物実験で決着が図られると考えていたのである。

ここから、思考実験から現物実験へと進む思考の過程として、次のような流れでまとめることができる。

①「理想化、抽象化された状態の設定」→②「要因の抽出」→③「要因の変化」→④「要因間の関係把握」→⑤「推測の成立」→⑥「現物実験」

もちろん、この流れは、大まかなものであり、常にこの順番に進むものではなく、行き戻りがあると考えられる。

では、マッハが思考実験を用いた例を取り上げ、上の思考過程をなぞってみる。

マッハは、

「或る結果に対して決定的な影響をもつ要因を思考のなかで変化させてみることも有益である。とりわけ連続的に変化させてみる場合には、可能なあらゆるケースを縦覧することができ、特に得るところが大きい。」*23

としながら、万有引力に関する思考実験として、次の例をあげている。

「石は地上に落ちる。石を次第に高くしていく。地上から石までの連続的な変化に対して<或る点に達すると落ちなくなるという>期待の不連続を持ち出すにはわが身を強いねばならない。月の高さに昇っても、石は落ちようとする傾向を突然に失うわけではあるまい。大きな石も小さな石もみな一様に落ちる。石が月の大きさになったとしよう。月も地上に落ちようとするはずだ。月が地球と同じ大きさになったとしよう。そうなると一方だけが他方に引き寄せられるという考えに固執して、逆を考えない限り、我々の表象はこんがらがってしまう。引力は相互的なはずだ。2つの物体が等しくない場合にも、引力はやはり相互的なはずだと見なされる。」*24

ここでは、地球、石、月が理想化された状態で置かれている。要因は、石の大きさと石と地球との距離である。ここで、石と地球との距離をどんどん大きくしていき、月の位置まで動かしたとする。このとき、さらに、石を月の大きさまで大きくすれば、月と変わらなくなる。月

も地上に落ちようとするはずであるが、落ちないことから、ここから、引力が、相互であることを導いている。この例は、変化法を中心に思考実験を説明しているが、一方、理想化も思考実験を行う上で重要な働きをする。

「ある結果に対して量的な影響をもつ要因が存在する場合には、その1つないしは幾つかを、思考の中で減量していき、ついには消去してみることに、そうして残りの要因だけが規定的な役割を演じていると考えてみることに、これは大切な操作である。」*25

とし、この操作を理想化あるいは抽象と呼んでいる。

「水平方向に投射された物体の蒙る運動抵抗や、緩い斜面を登る物体が蒙る減速を、頭の中で次第に小さくしていき、ついにはそれが零になった状態を考えることで、「無抵抗等速運動体」の表象がえられる。つまり、抵抗がなければ物体はいつまでも等速運動をつづけるという考えに至る」*26り、

理想化によって、「無抵抗等速運動体」という概念を産み出すに至っていることも説明している。ここでは、理想化においても、変化法が用いられており、理想化を作る過程においても思考実験が行われていると考えていたようである。

また、思考実験は、誤りであることを指摘するために行われることもある。その例として、ガリレイの例をあげている。

「もし<アリストテレス以来ひろく信じられてきたように>重い物体は軽い物体よりもはやい速度で落ちるという属性をもっているとすれば、重い物体に軽い物体を結び付けて落とせばどうなるか？軽い方にひきとめられるから、はじめよりもゆっくり落ちる筈だ。ところが全体としては初めより重くなったのだから一層は早い速度で落ちる筈だ。こういう矛盾に陥るから、先の<アリストテレス流の>考えは維持できない。」*27

さらに、思考実験によって確定的な結論が得られないが、これまでに行われきた経験やその範囲によって、現物実験が行えない場合に、思考実験は、確定的な結論をかなり近似的に推測し、さらには、それまでの実例とともに、説明したり、弁護したりすることができるという。

「思考実験の自然な継続である現物実験の方式をそういう推測によってしか決定できない場合もまれではない。ガリレイは落体の実験にとりかかる前に一観察と熟考の結果彼に判っていたのは速度が増大するということだけであったが、一速度の増加する様式について予め推測を下していた。彼の実験は、過程から導かれる帰結を実地に検証するという方式によってのみ、はじめて可能になったのである。それは、落下距離の法則からそれを規定する速度の法則を探る分析的推論の方が逆に辿る総合的推論よりも困難であったことによる」*28

としている。現物実験の代行として、思考実験を行なわれ、本来は現物実験によって導かれる結論を、後押しする機能をも示している。

ここからも、思考実験と現物実験を区別し、思考実験とは、現物実験に先立って行われ、推測を得ることを目的にしていることがわかるが、また、マッハが、現物実験によってのみ、確定されると考えていたことも示している。そして、思考実験といえるためには、①「理想化、抽象化された状態の設定」、②「要因の抽出」、③「要因の変化」の3つが、行われる必要があり、それに対して、現物実験は、推測を確認するか、修正するか、否定するために行われるとみなしているが、その現物実験に対して、思考実験は、単なる推測を得るのみではなく、推測の後押しともいえる説明的な機能や、原理を否定する機能があることも指摘している。

4.2. 思考実験の機能

マッハは、1897年に、『思考実験について』という論文を発表したが、それ以降思考実験について著名な哲学者が見解を述べている。

ポパー*29は、ベーコン流の帰納主義に対する批判として、新しい科学観を展開した。ここでいうベーコン流の帰納主義とは、白紙の状態から観察や実験によってデータを蓄積していき、そこから帰納的に法則が導かれるという科学観である。それに対して、ポパーは、観察や実験に先だつて必ず推測や仮説といわれるものがあり、それを反駁しようと実験を試み、そこから反駁されずに残ったものが真実として一時的に受け入れられるが、科学として認められるためには、常に反証される危険（反証可能性）を持っているという科学観を示した。彼は、仮説を真であると判定するような決定的実験を否定し、その仮説の確証が強まるかあるいは偽であることが示さ

れる実験しかありえないとしている。

さらに、こうした観点から、思考実験に対しても、通常の実験と同じであるとし、その用法*30として、批判的用法、発見的用法、弁護的用法の3つをあげている。そこで、これら3つの用法を見ていく。

ポパーは、科学を批判主義の立場からとらえているために、思考実験においても、批判的用法を最も評価している。思考実験の代表的な例で、かつ、その批判的用法の典型的な例として、より重い物体の自然（落下の）速度はより軽い物体のそれよりも大きいというアリストテレスの仮説をくつがえすために、ガリレオが行った思考実験をあげている。それは、要約すると以下のようである。

「自然落下速度の異なる2つの物体をとってより遅い物体とより速い物体とを結び合わせたならば、速い方の物体は遅い方の物体によってその速度は遅くなるが、遅い方の物体は、速い方の物体によって速くなる。したがって、その物体は、速い物体よりも少し遅い速度で落ちるはずである。ところが、2つの物体が結合されると、いままでより重い物体になるので、より速い速度で落下することになり、矛盾する。」*31

このガリレオの思考実験によって、アリストテレスの「重い物は、軽い物より速く落ちる。」という仮説が、否定されたのである。この例は、マッハにおいても扱われており、ガリレオの「新科学対話」にみられ*32、マッハの示した思考実験を批判という側面に着目して、より明確にしたといえる。

発見的用法の例としては、原始論の発見的基礎をなしたことや、金または他の物質の一片をとり、それを「もはやそれ以上分割できないほど小さな部分になるまで」小さく切り刻んでいったとき、これ以上「分割不能なアトム」という概念は、思考実験によるものである。また、熱力学や相対論や量子論において、重要な役割を果たしたとしている。

さらに、弁護的用法とは、すでに作られた仮説が真であることをより確かにする用法である。ポパーは、この用法についての例は、何も上げていないが、すでに前節で見たように、マッハがその例を示していると思われる。すなわち、現物の実験が、不可能ないし不十分である場合に予め予測される結論を、推測し、その推測に正当性を与える用法であろう。ポパーは、批判哲学の立場に立ち、絶対的な真実を否定している。科学において、絶対

的な真実が存在せず、常に批判に曝され、その批判に耐えたとき、暫定的に真実として認められると立場であるために、思考実験において批判的用法こそが、最も望ましい形であると考え、批判されるべき用法として弁護的用法を考えていたことは、当然のことであると思われる。

しかし、ポパーは、思考実験のこの3つの用法を、通常の現物実験と同様にみなし、それぞれ同列に扱っているようだが、マッハのいう、現物実験に先立ち推測をするという思考実験の本来の機能を考えると、発見的方法と、批判的用法と弁護的用法は、同列には扱うことができず、むしろ、現物実験に先立ち行われる思考実験にみられる発見的用法と、現物実験の代わりに行われる思考実験にみられる批判的用法と弁護的用法ととらえた方が自然に思われる。

マッハは、基本的な構図として、以下の図のように考えていたと思われる。しかし、現物実験が行えない場合、現物実験に代わって、思考実験が行われる。さらに、ポパーは、思考実験の用法を、発見的用法、批判的用法、弁護的用法として、明確にしているが、位置づけが不明確であったので、この点を明確にするために、推測の前の思考実験を発見的用法をもつ「思考実験Ⅰ」、推測ができた後の思考実験を「思考実験Ⅱ」とし、弁護的用法と批判的用法をもつものとして位置づけると、これまでに設計された思考実験を含む数学する学習モデル(図1)と対応できると考える。

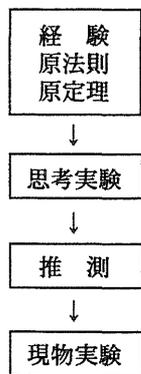


図2 マッハの思考実験のモデル

<引用文献>

- *1西尾実, 岩淵悦太郎, 水谷静夫編 (1986) 「岩波国語辞典: 第四版」岩波書店
- *2 「広辞苑 第2版」 (1969) 岩波書店
- *3 「改訂版 物理学辞典」 (1992) 培風館
- *4 「理化学辞典 第4版」 (1987) 岩波書店
- *5 「化学大辞典」 (1963) 共立出版
- *6栗田賢三, 古在由重編「哲学小辞典」 (1979) 岩波書店
- *7 「哲学事典」 (1971) 平凡社
- *8 T. クーン (安孫子誠也・佐々木正博訳) (1987) 「物理科学の発達における数学的伝統と実験的伝統」 (pp. 47-88) 「本質的緊張 1・2」みすず書房
- *9小森田精子 (1994) 「実験的方法と科学—錬金術, ベーコンの実験的科学」, 大林信治・森田敏照編『科学思想の系譜学』, ミネルヴァ書房
- *10ジェニファー・トラスティド (所澤保孝ほか訳) (1984) 「科学の方法と論理」昭和堂, pp. 22-60
- *11同, p. 22
- *12同
- *13同
- *14同, p. 23
- *15 T. クーン (中山茂訳) (1971) 「科学革命の構造」みすず書房, pp. 26-38
(Kuhn, T. S. (1962). *The structure of scientific revolutions*. Chicago: University of Chicago Press.)
- *16エルンスト・マッハ (伏見譲訳) (1973) 「マッハ力学—力学の批判的発展史」講談社, p. 120-121
- *17エルンスト・マッハ (廣松渉・加藤尚武編訳) (1971) 「思考実験について」, p. 105, 『認識の分析』法政大学出版局
- *18同, p. 106
- *19同, p. 113
- *20同, p. 113
- *21同, p. 111
- *22同, p. 108
- *23同, p. 109
- *24同, p. 111
- *25同, p. 113
- *26同, p. 113
- *27同, pp. 111-112
- *28同, p. 116
- *29 K. ポパー (1980) (藤本隆志ほか訳) 「推測と反駁」法政大学出版局

- *30K. ポパー (1971) (大内義一, 森博訳) 「科学的
発見の論理」 恒星社厚生閣, pp. 543-560
- *31原文は, ガリレオの「新科学対話」に見られるサル
ヴィヤチの弁明を引用しているが, ここでは, 要約した。
同, P. 543
- *32ガリレオ・ガリレイ (今野武雄, 日田節次訳)
(1995) 「新科学対話」岩波書店

<参考文献>

- 倉井庸維 (2001a). 思考実験を含む数学するモデルの設計
 , 筑波数学教育研究, 第20号, 49-56
- 倉井庸維. (2001b). 数学の学習における思考実験の規定
とその活用に関する研究, 日本数学教育学会誌, 第83
巻, 第9号, 2-9
- エルスト・マッハ (1971). 思考実験について, 認識の分析 (pp. 101-
124), (廣松渉・加藤尚武編訳), 法政大学出版局
(E.Mach(1926).Uber Gedanken Experimente,
Erkenntnis und Irrtum(pp.182-200),Leipzig
Verlag von Johann Ambrosius Barth.)
- Polya, G.(1973). Induction and Analogy in
Mathematics, Volume 1 of Mathematics
and Plausible Reasoning , Princeton
University Press