

〔大阪体育大学紀要
第24巻(1993) pp.89-104〕

応用という観点での「実験」の位置づけ

齊藤了文

Experiment from an Application Point of View

Norifumi SAITO

BULLETIN
OF
OSAKA COLLEGE OF PHYSICAL EDUCATION

〔大阪体育大学紀要
第24巻(1993) pp.89-104〕

応用という観点での「実験」の位置づけ

齊藤了文

1993年3月31日受付

Experiment from an Application Point of View

Norifumi SAITO

It is said that many philosophers of science seem to undervalue the role of experiment. This neglect of experiment is, I think, due to the tradition of justification (i.e. positivism or antipositivism). This paper aims to describe the experiment from the other perspective. That is application point of view. Bacon wants to dominate nature due to experiment. This role of experiment makes it possible to elucidate application or engineering. Now this type of experiment necessarily goes to the simplification or idealization. And the possibility of this experiment consists of the mechanical point of view or weakly-organized system's point of view. And the possibility presupposes the complexity of the world. Up to this I describe scientific experiments.

In relation to engineering I want to explore the points. Engineering deals with the idealization, but its fundamental concerns are the residue. This is the mother of errors. If the system we want to analyze is strongly-organized system, we cannot differentiate cause and effect. And so we must specify the effects. This is the factor of safety. Lastly I must indicate the engineering-specific experiment, i. e. simulation. Even if we know all natural laws, it cannot be said that we can control everything. The synthesis of many natural laws is needed. Design, this is the main theme of engineering. In engineering we must recover the residue and we must design. So if we call scientific experiment analytic, engineering experiment is synthetic.

I. 実験が無視されてきた

「科学哲学者は理論と実在の表現について絶えず議論しているが、実験、またはテクノロジー、あるいは世界を変えるための知識の使用についてはほとんど何も語らない。これは奇妙なことである。というのも、「実験的方法」はまさに科学的方法の別名であるのが普通だったからである。」¹⁾ハッキングは、『表現と介入』でこう述べている²⁾。更に彼は別の箇所でも次のようにも述べている。

「科学哲学のどんな分野でも、実験以上に体系的に無視されてきたものはない。小学校の先生は、科学的方法は実験的方法だと我々に語ったかもしれないが、科学の歴史は理論の歴史になっている。実験は、それが理論をテストする場合にのみ価値がある、と哲学者は言う。実験の仕事はそれ自身の生命をもっていない、と暗示する。だから実験の多くの異なった役割を記述する用語さえも我々には欠けている。この一面性は理論にとってもよくはない。」³⁾

このところ、科学哲学の中で主として問題になっていたのは、理論や仮説の選択において実験が果たす役割である。つまり、決定的実験が可能かどうかという問題である。

例えば、ポパーにとっては、反証可能性を主張するために、実験が理論に対して大きな寄与をなすことを認めようとする。

しかし例えばファイヤーアーベントは、実験よりもプロパガンダに理論選択の役割を認め、クーンも合理的議論と実験的証拠は、2つの競合するパラダイムの選択のための要因ではあっても、主要な要因とは認めていない。

また、デュエム、クワインは、どんな理論も仮説も、背景知識の調節や補助仮説を使うことによって、実験による反証を免れると論じている³⁾。

実験は理論に依存するのか、それとも独立の意義をもつのか。これをハッキングは問題にする。そして彼は、実験が理論に先立つということに関して「弱い解釈 weak version」と「強い解釈 strong version」を区別する。前者は、「全く精神を欠き、結果を解釈するための理解も能力も備えていない自然への干渉はほとんどなにも教えてくれない⁴⁾」というものである。この弱い解釈を否定する人はそうはいないであろう⁵⁾。しかし、「調べている現象に関する理論をテストしている場合に限って実験は意味をもつという⁶⁾」「強い解釈」は非常に問題を含む。例えば、ブラウン運動の観察や電波望遠鏡による宇宙の観察といった例を見ることによって、強い解釈の問題性は強く印象づけられる。

更に、熱力学は、蒸気機関の深遠な分析から生まれたと言われる。これは、発明ということに含まれている実験が理論を導いたものだと理解できる。このように、実験は理論に単に依存するものではないということを彼は論じる。

「新しい技術にたどり着く一つの道は理論と実

験とを精巧に仕上げた後にそれを実用上の問題に適用するというものである。しかし別の道も存在しており、そこでは発明がそれ自身の実用上のペースで進展していき、理論はその余剰力で別個に新設される。最も明白な実例は最良の実例——蒸気機関である。』⁷⁾

このようにハッキングは、実験が理論とは独立の意義をもつと論じる。

それでは、実験をあまり重視しないということは、どのような文脈において生じてきたのか。

実験はもともと実証主義と結びつく文脈をもっていた。つまり、頭の中でちりあげでないことを示すために、実験が行われていた。そして、求める理論が頭の中でちりあげでないという論点は、極端に走って、ベーコン、ミルなどによって述べられたように、帰納法に従う理論の形成という主張に結びついていった。つまり、伝統や習慣といった先入観に従うのではなく、自然の示す通りに物事を理解することによって、科学的な理解ができると見なされていった。しかし、理論や法則の形成に関しては、単純に帰納法によって正当化できないことは明らかであった。従って、法則の発見はともかくとして、その検証や反証のために実験が必要だとみなされてきた。このような実証主義的な論点を反駁しようとしたのが、「事実が理論を倒せない」というクーン等の主張である。

このように科学哲学の動きを纏めてしまうと、そこでは実験は、理論を検証できるか、理論を形成できるか、といった見方で理解されていたことになる。理論の正当化の枠組み、そこにおいて実証主義をとれるかどうかといった仕方で、「実験」が位置づけられていた。

しかし、このような「実証主義」をめぐる観点とは違った文脈で、「実験」を理解することも可能であろう。その文脈は「自然の支配」と結びつく文脈である。

この文脈において実験が行われる場合、実験家において、実際に何が注目され、何が前提されているのか。つまり、理論の検証という意味での「理論の錬磨」に向かうのではなく、理論を応用する場合の実験の位置づけが問題である。この小論はこれを解明しようとする。

ここで、この小論の限定を行う。まず、この小論は概観的である。つまり、実験についての解明にはその具体的詳細を示すことが実は重要になる。しかしここでは、ある程度の枠組みを示すことで満足したい。この小論は科学史の探究をしないというのが、第二の限定である。つまり、科学革命期に実験がどのような役割を果たしたかといった歴史的論点は扱わない⁸⁾。

II. 自然の支配

自然の支配と結びつく「実験」を、ベーコンは提起した。広い意味での工学的観点の実験である。

「無秩序で不安定な自然を機械的技術により拷問にかけて審問し、新科学の実験の下にコントロールすること——これがベーコンの行おうとしたことである。」⁹⁾

なぜ、自然を拷問にかける必要があったのか。このことは、自然をコントロールすることとどのような結びつきをもっているのか。このとき、実験はどう理解されるのか。これが問題である。

この最初の問いに、伊東俊太郎はベーコン以前の自然概念を対比することによって答えようとする。

「フランシス・ベーコンより一時代前のルネサンスにおける自然概念は、本質的に有機体的なものだった。このことは当時のヘルメス主義、グノーシス主義、新プラトン主義を通じて言える。ここでは、この宇宙（コスモス）の部分は相互に結び付けられており、生きた全体として関係し合っていた。大宇宙と小宇宙（人間）は感応し合ってお

り、自然は生命力に満ち、諸力の絶えざる闘争とその調和の中にあり、本質的に不安定なものである。ルネサンスの有機体思想は、ギリシアのコスモスの概念を受け継いでいるが、プラトンの『ティマイオス』におけるように、ギリシアのコスモスは「ヌース」による統制に対して、つねに「アナンケー」の反逆を伴っており、秩序にはむかう要因をもっていた。ルネサンスの自然も、調和をもたらそうとする力に対し、つねに反逆する無秩序の力があり、この微妙な平衡の上に成り立っている。従って当時の自然は、本質的に無秩序なもの、完全にはコントロールできない破壊性暴力性をもつものと観念されていた。・・・中略・・・ルネサンスからエリザベス朝にかけて、自然の秩序は壊れるかも知れないということは、常に人々の不安の種だったのである。この壊れ易い自然の無秩序を説得して、その力を利用しようとしたのが魔術師たちであった。

しかしベーコンは、ルネサンスの魔術師がいわば自然の有機的システムの中にわけ入り、これを人工的に拘束することなく、むしろ内在的に説得して、その力を用いようとする行き方に反対する。それではいまだ自然の助手であり召使であるにすぎない。今や人間は自然の主人とならなければならず、自然を我々の教師ではなく、むしろ奴隷としなくてはならない。このためには外からこれを解剖し、実験という人工的くびきをかけて、自然を裸にし、これを操作すべきである。そうでなければ、自然を完全に支配することはできないという。」¹⁰⁾

自然を内在的に説得する¹¹⁾のでは、自然の召使にすぎない。自然の主人となるためには、自然を外から解剖し実験する必要があると伊東は解説する。

もちろん自然の主人になろうとする意図は認められるかもしれない。しかし、実験をすることに

よってどうして自然をコントロールできるのか。この点を明確にするために、「自然を拷問にかけろ」ということは一体どういうことなのか、具体的に実験のどのような有り方がここで問題になっているのか、それを見ていくことにしよう。

例えば、動物が呼吸できるのは、大気のどのような成分であるかを確かめたいとする¹²⁾。このとき、動物を大気の成分のそれぞれ、つまり酸素や窒素や二酸化炭素といったものの中に入れてみる。すると、呼吸を可能にするのは酸素であって、窒素ではないという知識が得られる。このとき、もちろん自然のままでは、酸素と窒素が分離した状態で我々に与えられてはいない。このようにほっておいては生じない多くの変化を自然の中に作り出すこと、それが「自然を拷問にかけろ」とことだと考えられる。

つまり、実験するということは、原因と結果の関係を見つけるために、自然には生じない条件をつくって、どれが原因であるかを分離することである。このため、ある現象が生起している事例と、それと多くの点で類似しながらその現象の生じていない事例を比較しようとする。この方法をミルは、差異法 Method of Difference と呼んでいる¹³⁾。更にミルは、一致法 Method of Agreement と差異法を合わせて消去法 Methods of Elimination と名づけ、ペーコンの時代以後、これらは実験的研究の基礎とみなされている¹⁴⁾、と述べる。

同じことであるが、自然発生説にかんする非常に単純化した例を挙げてみる。肉を2つのフラスコに入れておく。その一方は、しっかりとふたをし、他方はふたをせず、ハエのたかるままにしておく。このとき、前者においてはウジがわくことはないが、後者においてはウジがわく。このように、問題となる事象が生起する場合と生起しない場合を作りだし、その相違には何の関係するかを見つけ出していこうとする。これは、「対照実験」

と呼ばれることもある¹⁵⁾。

このように、自然発生説の例や呼吸の例などをみていくと、実は何が原因かを決定するためには、どのような要因がそれに関係しているかを確定することが必要だということがわかってくる。このように、原因を分析することが、自然のコントロールに寄与する。だから呼吸においては、酸素と窒素を分離できるかどうか問題であり、自然発生説においては、例えば最初から肉にハエの卵がついているという可能性をなくせるかどうか関係する。

つまり、実験によって因果関係を確定するためには、純粋化した試料を使うことが必要とされる。つまり、原因となる可能性のある多くのものから、当該の原因を取り出し確定するために、試料の純化が必要とされるのである。(純化が不可能な場合には、相関関係を統計的に分析して、因果関係を推定することが行なわれることもある。しかし、純粋に原因を取り出せないために、それに基づくコントロールという面では、弱いものになっている。)

自然をありのまま使うのではなく、純粋化したものを使う。これが、物質の測定や定義においても必要となるのである。もちろんここで純粋化といっても、それは素材だけの問題ではなく、単純な幾何学的形状をもつとか、表面の物理的状态を一定のものにするということを含んでいる¹⁶⁾。

ガリレオが「実験に関連してしばしば語る完全に滑らかな平面や理想的な球、そして全く抵抗のない完全な真空などは、現実の経験においてはどこにも見出しえないものである。彼はこのような理念化された状態において実在の精確な数学的関係を把握し、これを逆に自然のなかに投げかけてゆくのである。このような理想化された数学的場面において、彼は自然の秩序の理念的設定を試みる。近代の慣性原理や自由落下の法則が精密に定

式化されるのは、このような精神的転向の上においてのみである。]¹⁷⁾

ガリレオの実験をこう理解すると、数学化と結びつく実験（ここでは、現実の実験は近似的なものしか教えないと言われる）においても、原因の探究というミルの意味での実験においても、「理想化」「純粋化」といったものが必要になるということがわかる。

ここから2つのことが見て取れる。第一に、数学化と結びつくにしろ結びつかないにしろ、科学的分析に関わる実験においては、理想化や純粋化が必要とされるということである。第二に、実験室で理想的状態を作ることが科学の実験にとっては大きな意味をもつことになる。他の影響をなくして、求める原因を探ろうとするために実験装置や純粋な試料が重要になるのである。（もちろん、ここに言う純粋化は、世界が多くの特徴的なものに分析されるという考えを含んでいる。しかし、世界が、結局は幾何学的、原子論的に分析され尽くすという論点を必ずしも含んでいないことに注意すべきである。）

さて、それでは実験をおこなってそこから結論を得るということは、どのような考えを基礎としているのだろうか。

近代的な実験家の「典型的な成果は、広範な自然誌的、実験的な記録であり、その中には彼らの多くが科学的理論の構築の前提になると考えたさまざまなデータが集積されていた。それらの記録をよく調べてみると、その著者たちが思っていたほど実験の選択や設定が偶発的でなかったことが分かる。おそくとも1650年頃からは、それらを生み出した人々は通常、ある種の原子論または粒子論哲学によって導かれていた。従ってかれらの好みの実験は、粒子の形、配置、運動を明らかにすると思われる実験であった。]¹⁸⁾

実は、原因を分析しそれを特定するというこ

は、「原子論」とうまくあっている。これなら、分析すべき究極のものが存在することになるからである。

この点はベイコン以前の自然概念においても見られたように、有機的自然観といったものは、実験にとって非常に具合の悪いものになっている。例えば、クロード・ベルナールは、『実験医学序説』第二編第一章で、生物学においても実験を行えるということ論じている。彼が反論しようとした説は、生命をもっている物質は自発性を発揮しており、そのため周囲の物理化学的影響を免れているというものであった。「ある人たちの間に今なおいわゆる生氣論的思想として残っているこの思想は、実験医学に対する真の障害を構成している」]¹⁹⁾

ここで彼は生物の有機的内界の特異性を認めはするが、それは結局は生命現象の複雑さに由来するものとする。「一切の生物現象を通じてただ一つのデテルミニズムがあるのみである。』²⁰⁾その点を詳しく述べれば次のようになる。「生命が健康状態として発現するのは、生活細胞の健全な活動によってであり、病気を特徴づけるものは生活細胞の異常な作用である。最後に治療作用が生活細胞の上に働くことができるのも、ある種の毒物や薬剤によって変化した有機的内界の媒介によってである。これら各種の問題を解決するためには、あたかも機械の構造を知るためにこれを分解する如く、生物をいわば順次に分解していかねばならない。その意味は、細胞に対して実験を施すに至るに先立って、まず消化器とか呼吸器とかいう系統器官に、次には胃とか肺とかいう単一器官に対して実験を行わなければならないということである。』²¹⁾

世界を有機的に理解しようとするのではなく、機械の如く理解して、分解できるものとする。これが実験にとっては必要なことなのである。例えば、有機体論に基づくと、部分の変化によ

て全体への影響がある。そのため、部分的実験によっては本質的なことがわからない、と主張されることになる。クロード・ベルナールはこのような状況に対抗して、実験医学序説を書いていたのである。

「ガリレオは病気の診断学に解剖学が果たす役割の大きさに非常な感銘を受けたようである。人体を機械におきかえてみると、機械の具合が悪くなったとき、いきなり勘や経験に頼るよりも、機械を分解し、各部分を精細に点検したほうが着実に修理につながる。いや機械だけでなく、自然そのものを研究するときも、複雑な自然現象をできるだけ細かな要素に分解し、それらの要素を取り出し、それを精密に調べるのが有効であろう。」²²⁾

ガリレオが、解剖学にどの程度共感していたかどうかはともかく、このようなエピソードが語られているということは、実は世界を有機体とみなすのではなく、機械とみなすことによって実験が可能になると彼が考えていたと考えてもいいであろう。ガリレオ自身の考えはともかくとして、世界についてのこのような見方の変更は、実験の位置づけにとって重要な意味をもっていたのは間違いないところであろう。

もう一つ、次のようなことも指摘しておきたい。それは古代や中世と比較して実験を理解することによって明らかになる。

「古代や中世の伝統にあっては、検討してみると、実は多くの実験が「思考実験」であったことが判明する。つまり、心の中で可能な実験的状况を描いてみるが、その結果は日常の経験だけから十分に予言できるのである。」²³⁾

日常経験から容易に分かることという意味での「古代や中世の思考実験」と対比した、近代の実験は、どのようなものであるのか。

「この経験的様式を、ベーコンがその最も影響

力ある提唱者であった様式に対比してみよう。ギルバート、ボイル、フックのようなその様式の実践者が実験するときには、すでに分かっていたことを立証したり、当時の理論の拡張に必要な細部の決定を目的としたりすることはほとんどなかった。その代わりに彼らは、それ以前には観測されず、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したいと考えた。彼らの典型的な成果は、広範な自然誌的、実験的な記録であり、その中には彼らの多くが科学的理論の構築の前提になると考えたさまざまなデータが集積されていた。」²⁴⁾

ここで少なくとも分かることは、「古代や中世の思考実験」と比べて「近代の実験」は、日常経験から容易に分かることを実験、観察しようとしているのではないということである。自然を目的論的に理解しようとするれば、それを強制して奇妙なふるまいをさせることは自然の理解に反することになる。だから、自然をそのままの姿にしておいて、それを観察することが必要とされたように思われる。この論点は、わざわざ自然を強制しなければ、自然は真実を語らないとする考えが、目的論よりも原子論と結びつきやすいことを示唆するであろう。しかし、その論点以上にここで注目したい論点は、近代の実験は「世界の複雑性」を扱おうとしたことである。世界の様子が日常経験を外挿して理解できるかどうかを試そうとしているのである。

人間は自然の支配に魔術を用いることはできない。「自然の託宣の解釈には限りない忍耐を要し、自然という偉大な書物のページは、謙虚さと尊敬の念をもって読まれるべきである。」²⁵⁾順序正しい分析によってしか世界は理解できないとする、この意味での「世界の複雑性」が実験を行う場合には前提として存在する。

III. 機械論について

まずここで、機械とみなすという論点をここでより詳細に考察したい。これは、科学の実験においても、工学の実験においても重要な意味をもつと考えられる。いわば、理論をもとにして考える人と実験をもとにして考える人の相違を提示したいと思う。

まず指摘したいことは、「応用の立場」での機械論ということは、例えば力学的世界観といった存在論や哲学を仕上げることではないということである。つまり、機械論がこの世界についての本当の姿を示していると論じることは重要ではない。

例えば、理論を仕上げて整合的な説を作ろうとする場合には、その説が「真理」であることを主張することと対応して、力学的世界観といった存在論が主張されることになるであろう。しかし、応用においては、ある程度の粗さはあっても、測定においてこの世界が部分的に分解可能であることを確認すればよい。そしてこのような確認が部分的であるために、全体の整合性は求められず、そのためそれに対応した存在論は（ある程度の指針として役立つことは認めるにしても）必要とはされないし、まともな仕方では主張もできない。

つまり「機械と見なす」ということは、原子論、粒子論とも結びつき、単純な力学ですべてが記述でき、世界が生命をもたない機械であるという存在論的な言明をしているように思えるかもしれない。しかし、実は存在論的な言明でなく、世界の「分解可能性」²⁶⁾といったものがより重要なのである。

（この論点は、前節で述べた純粋化とも関係するが、そこで言う純粋なもの、幾何学的に単純なもの、原子といったものである必要はないのである。）

世界はその部分部分が相互に完全に独立ではなく相互作用をしている。このような全体論的な見

方は一応は認められる。しかし、「各部分が主としてその部分の（時間的・空間的に）近くにある他の部分とだけ相互作用を持ち、遠方にある部分との相互作用は近似的に無視できる」「つまり相互作用が「局所化」して考えられる」²⁷⁾弱システムとして、世界を理解できることが重要である。そして、この弱システムと、相互作用を局所化できないものとみなす「強システム」²⁸⁾を（相対的な区別ではあっても）区別することが重要である。つまり、相互作用はどこにも存在しているから全体論をとるべきだと主張するのではなく、遠くの相互作用は無視できて、局所的な相互作用のみを考えればよいということが重要である。

つまり、実験が可能であるためには、部分の記述で全体が「完全に」記述されてしまうとする力学的な決定論をとる必要はなく、言わば弱システムの部分だけを取り出せるということが必要である。即ち、完全な決定論をとることは、実験にとっては（指導理念を示すことにはなっても）必要はなく、それと対極にある有機体論、全体論はそのままでは実験ができないことを主張するのに近い。だから、ある意味で全体論を受入れつつも、それを弱めた主張である「弱システム」として世界を理解することが、実験にとっては必要になる。そして、有機体論や力学的決定論は、理論としての整合性が要求され、世界について語る理論として存在論と言えるかもしれない。しかし、それに対して、弱システムという規定は、一応現実にあった規定ではあっても、相対的であるために特に一定の存在論的な言明とは結びつきにくい。

さて、ミルに関連しても述べたように、純粋化によって原因の特定が行われるということは、その原因が他の原因とは区別されて扱われるということである。これは、相互作用がその純粋化された原因の中だけに「局所化」されていることを基本的には意味すると考えてもいい。このように、

純粹化を進めることによって、初めのころは複雑な強システムと思われていた現象が、実験によって分析されることになるのである。

つまり、科学的な分析における「科学の進歩」ということは、いわば複雑に入り組んだ世界即ち「強システム」の世界を、原因を局所化することによって、探究の場面を限定することができたということである。つまりこの探究の場面の近傍に原因が見つかるという意味で、世界全体を弱システムにしている。こういうように科学の進歩を言い換えることができる。

ここで例をあげて弱システムの問題を更に考察したい。例えば温度とか、熱放射の分光分布とかに関して、熱平衡放射の状態の情報を得ようとする。その場合「平衡系の外からさぐり(プローブ)、たとえば温度計を挿入するか、さもなければ平衡系を包む壁のどこかを破って内部状態を「見る」(広義には「観察する」)か、どちらかが必要なのである。もちろん、そのような手立ては、多かれ少なかれ熱平衡状態を乱すから、その度が過ぎれば事は台なしになる。けれども、壁の外で「ふところ手の見物」をしていては話は進まない。」²⁹⁾

この探針(プローブ)が大きすぎれば、それによる影響によって、求める状態を乱すことになり、何を測定したか分からなくなってしまう。完全な状態で観察することはできない。そのため、何かもとのシステムを乱すものをそこに挿入する。ここで問題は、度が過ぎれば、全くそのシステムを計測したとは言えなくなるということである。しかし、全く介入を行わなければ、何が起きているかを知ることはできない。

このとき、測定器具、測定手段の進歩が重要な意味をもってくる。例えば非破壊検査や細胞の染色の方法といったものは、できるだけ求める状態を乱さないで、その様子を知ろうとする方法だと考えられる³⁰⁾。このような方法が発見、発明される

ことによって科学が進歩すると言われるのは、測定手段が観察したい内部を乱さないという弱システムの状態を維持するということが効いている。

だからこの場合、初期値に対する鋭敏な依存性を示すカオスが生じると問題になる。つまり、介入を行うことが、ひどい結果をもたらすことになるのである。強システムならば問題である。

試しにやることによって、世界が全く変化してしまえば、実験した甲斐がない。自然に比べて人間の及ぼす影響が大きいと、人間のコントロールによって強システムが存在してしまう。大気汚染や二酸化炭素による温室効果の影響が大きくなると問題は非常に複雑になる。人間は多くのことをシステム化や効率化などによって解決していたが、この方策の有効性は世界の大きさに依存する。強システムになると、問題が複雑になって解けなくなる。多体問題が解けないのと同じことである。この意味で手に負えなくなると、システムの崩壊が始まる。大規模なコンピュータ・プログラムでは時としてこのようなことが起こる。このあたりの問題は、原理的には有限の複雑さの問題ではあるが、實際上人間に取り扱えないほど複雑な有限の問題なのである。

試しにやってみる。これが可能であるためには、世界の他の部分との間に強いシステムのつながりがあるとはならない。ここでやったことの副作用が、他の部分に及んではいけない。逆に、システムのある程度の線型性が認められると、測定における多少の誤差は許されることになる。

もしプラトニズムをとればこの誤差は、現象の不完全性を示しているものと解釈され、また検証ということに注目すれば、この誤差は検証にとっての不完全性を示すものと解釈される。しかし、応用においては、測定における誤差は差し当たり仕方がない。問題は、この誤差がシステム全体にどう効いてくるかということである。その意味で

システムを差し当たり線型とみなせるかどうか、弱システムとみなせるかどうか、応用にとって重要になるのである。

IV. 作る時の実験の役割

以上においては、理論の検証という意味での実験ではなく、理論の応用を念頭に置いた「科学の」実験に含まれる理解を解明してきた。ここでは更に科学と対比された「工学」における実験の位置づけを概観してみたい。

自然を拷問にかけるという意味での科学の実験においては、1. 理想化、2. 機械論、3. 複雑性といったことが問題となっていた。つまり、科学の実験においては理想化、純粋化を必ず伴うことになり、それは分解可能性という意味での機械論的な考えを基礎としている。更に、世界が複雑であって、直観的に全体が理解されるのではなく、分析を必要とするということが前提されている。以下これらの論点を更に考察することによって、工学における実験の意義を見ることにしたい。

第1の論点に関しては、科学は法則を発見し、工学はそれを単純に適用しているというある程度一般的な考えと関係している³¹⁾。科学的な実験によって「理想」を示すということは、工学においてはそれをできるだけ実現することを目指せばいいのか。

工学においては理想化は、一つには求められる目的とも考えられるが、それと同時に、理想化によって排除された部分を見捨てるかどうかという問題の考察へも導いている。法則が理想的に実現されるのは、特殊な実験室の中にすぎない。そのためその時排除された要因がどう効いてくるかわからない。例えば、非常に奇妙な例をあげると、マイクロマシンにおいては、重力よりも表面張力の方が大きな影響を与える。そのため、非常に小さな機械の設計においては、表面張力を考慮した

機械が求められる³²⁾。通常の機械を設計する場合には、理想化をして無視した部分が、マイクロマシンにおいては関与してくる可能性がある。工学においては、具体的なものを作る場合にこの無視した部分がどのように関与するかを考えなければならない。通常の実験で無視した部分を回復することが、具体的なものを作る工学においては要求されるのである。

法則を現実の中で使うということは、分解可能性という仕方で差し当たり無視した部分を、この具体的状況の中でどの程度無視できるかを考え直すことを含んでいる。もし無視できないとすれば、機械のエラーという仕方で障害が生じることになる。

科学において原因を求め、数学的法則を求める場合には理想化は非常に役立った。実験室における実験が純粋な状態を作るのに貢献した。しかし、工学においては、実験室で得られた結果とか、それによって見つけられた法則を現実の中で使えるかどうかを見なければならない。

「科学理論は、(他の事情が同じならば) 複雑な理想化が少なければ少ないほど、より容易により良くテストされる。だから良い目標、古典的実験は、単純で直接的である傾向がある。工学者は、複雑な実際の要求を満たさなければならないので、単純なシステムの構成に自分の努力を集中するといった種類の自由を持ってはいない。吊り橋の設計は、風や雨の影響が巨大な保護防壁の建設によって除去されるならば、かなり単純化されるだろう。しかしそのような設計単純化のコストは、ひどく高い prohibitive ものにつくだろう。…中略…その状況は次の場合と類似している。非常に小さな摩擦や極端な剛性 rigidity ないし複雑さを増加させ科学的理論に容易に適用可能でなくするあらゆるパラメータに極端な値や0の値を与えることに対して、その望ましさ desirability 対そ

のコストを考える場合である。だから我々は、工学者が不可避的な複雑さをどのように扱うかを知る必要がある。」³³⁾

工学においては科学法則を用いている。しかしこの論点は、多くの無視してきた特徴をもう一度回復しなければならない³⁴⁾という論点を含んでいる。現実の世界の中で機械を動かしたり構造物を作ったりする場合に必要とされる実験は、様々な影響下にその機械がうまく動くかどうかを調べる実験なのである。つまり純粋化した試料がどのような「本質」を示すかということ調べる実験ではないのである。この意味で、科学の実験を分析的実験³⁵⁾と呼べば、工学の実験は、総合的実験と行うことができるであろう。

第2の論点「機械論」ということについては、予め少し論じておいたので、以下、弱システムである場合に、実験の再現可能性の問題を論じることとする。

実験をやるということは、学習して経験を積むことができるということである。このとき、この世界がある程度安定であることが必要である。つまり、いつでも危機的 critical な状況というわけではない。ためしにやる、だめなら何故だめかを理解して、今後はそのような間違いをしないようにする。このために特に自然環境の安定性が必要となる。(もちろん、機械を使う人間が非常に変わった使い方をしないということも重要である。これは、機械にとっては人間の環境が安定する必要性を述べていることになる。)

例えば、戦争のような場合には、このような条件が満たされないかもしれない。しかし、常にそのような状況であれば、本来学習もできない。すぐ死んでしまうだろう。

ハッキングは実験の反復は実際にはそれほどうまくいかないと言うように、実験の「反復可能性」をあまり重視しようとしな³⁶⁾。しかし、実は工学

においては、反復できること、安定していることは、それを用いた機械を作る場合には必要なことである。

ここで興味深いことには、工学における実験、例えばプロトタイプを作ることは、その実物を作ることと比べてみても、単純さの程度の違いといったことになってしまう。すると橋やビルのような構造物においても、他のものとよく似ていれば、それだけで具体的な検証をある程度うけたものとなる。以前の橋やビルが、そのままある程度の実験を行ってしかも成功したことを示している。すると、ポパーのように、反証可能性の高い独創的な理論がいいという評価は、機械や構造物の場合にはいえない。(もし、科学における理論に、工学における構造物を対応させると、どんな地震や火災にも耐えられる構造物は、反証可能性の高い理論に対応するかもしれない。しかし、このような構造物は非常に高価につくであろう。工学は、資源の制約の下で問題を解こうとしている。)

実験するということは、実は多くの安定した場合で確かめていることになる。つまり、複雑な具体的状況においてはたいていの場合、実験にはどんな条件が係わっているか詳細には判っていない。逆に考えると、工学においてはわりと日常的な状況で実験が行われていると考えられる。前例があるということは、日常的に安定している多くの場合で、うまくいくことが確かめられている。

つまり、例えば自然の中に架けられた橋による実験は個別的なことを確かめているとはいえない。自然の一定の安定なタイプの状況で、何が起るかを確かめている。

これを近似とってはおもしろくない。環境やコンテキストが、現実には起こりやすい場合を扱っている。これは、個別的例示という側面(実証主義の論点ではこれが強調されていた)ではなく、実は一定の範囲の普遍性を示している。いくつか

試してみて、工学的な利用はできると分かる場合もある。

工学の実験は、こうして見てくると、大きな枠組みにおいては、「模倣をすすめる」ような実験である。科学においては、検証のための実験という意味が大きいため「模倣が意味を持たなくなる」ような実験と位置づけられる。

また、これは純粋化によって独立変数を求めるという意味での科学の分析的実験とは違っている。もちろん工学においては、特殊な状況において何が起こるか（例えば、衝突において、どの程度の破壊が生じるか）を見ることも重要である。

このような文脈においては、工学は2種類の実験を行う。まず、工学においては、大抵の場合は、通常において何が起こるかを実験する。ただ、危険な場合に何が起こるかを見るために、例外的な状況をつくって実験する。そして、この例外的状況は、分析的実験における特殊な状況とは、個別的状况であることは共通している、その内容は異なる。

例外的状況を確定する実験は、限界を定めるという意味では特殊なものを求めようとしているともいえるが、もちろんこの実験は、普遍的な法則を検証するための一つの個別的事例を与えるものとみなすことはできない。例えば、フックの法則が成り立たないほどバネを引っ張ったり、振り子の等時性が成り立たないほど振幅を大きくしたりする。これがどのあたりで生じるかを確定することが重要になる。これは橋の安全性や時計などの測定装置の誤差を理解するためにも必要である。

実験をするということは、実験をすることによって知識が増えることを予想している。応用の立場ではこのとき増えた知識は、理論の検証というものというよりも、具体的状態を作った上で、そこにおけるエラーがどこで起こるかを確定するのに使われる。更に、コスト等の資源の制約も考

えなければならぬために、何が重要か、ということについてその順序も決定しなければならなくなる。

第3の論点である複雑性は、更に作るということに結び付けて考える必要がある。作ることができれば、それについてすべて知っているという論点は、少し保留しなければならない論点を含む。例えば化学反応に関しても、化学反応式によって求める物質が得られるであろうが、実はそこには触媒、圧力、温度などのさまざまな条件が関連する。これらの幾つかの条件を考慮して、しかもコストなども考慮してそれらの条件を調和させ、最適化しなければ、実際には作るということは成り立たない。100年かからないと反応が終わらなるとすれば、その方法はあまりいいものではない。

さて工学においては物理的模型の代わりに情報モデルが用いられることがある。だからここではコンピュータ・シミュレーションを、工学の設計において用いられる実験と理解して、以下その位置づけを行うことにしたい。

シミュレーションは、個別的な法則が分かっているとしても全体としてどのようなふるまいをするか分からないときに用いられる。個々の原因が分かっていたからといって、それが複合したときにどのような結果を生じるかということは、実際には全く分からないことがある。これが複雑な世界に対する問題である。世界を理解しようとする場合にも、複雑な場合には常識にたよって外挿することで満足することはできない。シミュレーションが一種の実験としての役割をもつのは、自明でない結論を提示するからである。

ここにおいても、最初に述べたのとは少し違う意味で工学の総合的実験という論点が見られる。特に作るということと結びついて、設計においては顕著である。「設計においては、互いに相反する条件下において重量、コストその他の目的関数の

最適化を計るシンセシスの世界であり、その世界においては解の唯一性は一般に成り立たないが、最適解を求めることが設計の目標であり、現象の本質を衝くモデルを用いた計算機シミュレーションを試行錯誤的に繰り返して最適解を決定するプロセスこそ設計業務の真髄であろう。]³⁷⁾

まず、設計のためのシミュレーションにおいては、個々の場合について具体的に実験し計算しなければならないことを指摘しなければならない。特定の入力や環境に対して、特定の出力を示している。だから対象のもつ傾向を知るためには、統計処理などの処理が必要となる。これは、具体的に翼の角度や大きさに関して個別的に試さなければならないということの意味している。

さて、対象が定まればその性質は一義的に定まるであろう。これが科学的分析である。しかし、工学の設計においては、まず要求する性質が先行する。しかし、性質が定まってもその性質をもつ対象の候補は多数あり一義的には定まらない。従って、設計においては「仮のモデルを作って評価し、評価された結果に基づいてモデルを修正し、再び評価を行うという試行錯誤のサイクルを繰り返すことによって、解を探索的に求める」]³⁸⁾ことになる。

ここに述べられている個別的な処理の必要性は、理論や法則という普遍的なものを理解するだけでは、設計が可能でないことを示している。つまり、多くの法則や条件を総合する場合に、特に実験が必要となるのである。工学の設計においては、予め理想化によって排除した部分を回復するだけでなく、そのうちそれらを組み合わせることによって生じる問題も解決しなければならない。

以上、理想化、機械論、複雑性ということについて、工学の実験を概観してきた。つまり、理想化において省かれた要因を再び回復し、大抵は安定な状況で動いている機械の限界を見極めるため

に安全性を保証する実験を行い、設計において多くの法則や条件を組み合わせその最適化をするための実験を工学は行っている。これらの実験は、少なくとも単に法則を理解していればすむというものでなく、具体的に多くの実験をしなければ動く機械が作れないということを示している。この意味で、工学の実験は、科学とは違った意味で必要なものである。

V. 工学の含む問題点

工学において実験は必要な手段である。しかし、その一番の問題は、強システムである。もし強システムになっていけば、基本的に実験は行えなくなる。少なくとも、実験は困難になる。そして、それが生じるのがシステムの大規模化と精度の向上である。

さて、非常に洗練されたモデルを作ろうとすると、多くの相互作用を回復する必要がある。ただ、細かい部分を省いて大きく影響する部分だけを取り出してモデル化すれば、ある程度の機械ができる。理想化に関しては、ある程度実現されていても機械はできる。「すべて」の相互作用を回復することは、実はもとの泥沼にもどることを意味する。ある程度の安定性が得られたら、後は無視しないと効率よく動くものは作れないことになる。

精度を高めるということは、強システムを作ろうとすることだ³⁹⁾。相互作用の緊密な結びつきを意味している。これが実現できるということは、工学の発展を示しているが、そのために要する実験や計算の量は非常に莫大なものとなる。例えば、飛行機を作るために風洞による試験（風試）を行い、模型に働く力や模型表面上の圧力などを計測する。そして、例えばボーイング B-767 の空力設計に要した風試時間は 2 万 6000 時間に達した⁴⁰⁾。

例えば、空力設計のためのシミュレーションを

考えてみる。「希薄気体を除けば、航空機などの回りの気体の流れは、NS 方程式により完全に記述される。しかしながら、差分法などを用いて NS 方程式をそのまま数値風試するためには、TFLOPS 以上の性能をもつスーパーコンピュータが必要となる。したがって当分は、流れに種々の仮定を行うことにより、NS 方程式の近似方程式を作り、この方程式を用いた数値風試を行うことが実際的である。」⁴¹⁾

つまり、航空機が低速で巡行状態にあるときは、NS (ナビエ・ストークス) 方程式に非粘性、非圧縮、渦なしの仮定を行うと、NS 方程式は最も単純化された方程式であるラプラス方程式になる。この程度の速度では、このような仮定をしてもよい近似を与える。そして速度が上がると圧縮性等を考慮した方程式を使わねばよい近似にはならないと言われている。

あまり高度でない機械を作る場合には、多くの近似化をした方程式を計算すればよい。しかし、高度の機械を作る場合には、複雑なシステムになるために、計算量も莫大なものになる。工学の進歩は一つには、強システムを扱うことができるかにかかっている。

これは具体的なものを作るということが含む問題点である。理論の正当化を観察や実験を通してどうして行うかという問題設定においては、理論が差し当たり固定して考えられた。しかし、具体的なものを作る場合には、差し当たり仮説として提案された形状がどの程度望ましいかを決定しようとする、多くの形状を具体的に比較するしかない。物理の教科書の練習問題のように、法則に単に具体的な数値を当てはめるということではすまないのである。方程式が与えられるだけで、すべてがわかったとは到底いえない状況が具体的なものを作るという状況である。

科学は純粋化によって原因の特定を行うことに

よって、弱システムを作ろうとしてきた。それによって、ある程度の積み上げができることになり、科学の進歩が可能になった。しかし、そこにおいても、工学はその成果を単純に引き受けることはできない。つまり、大規模化と精度の向上は、実は強システムを作り出している。これはシミュレーションにおける法則の組み合わせを考えると理解できる。設計ということが、この複雑さを招来している。もちろんある程度の安全性を考慮して設計が行われている。しかしそれも、環境の安定性に依存している。だから環境を変化させるような影響を与える産業が起こるとコントロールの面からいって非常に問題になる。

エラーが出たらそれをうまく処理するように、作らなければならない。これには幾つかの現実的な制約が関与する。だからもちろんアドホックになってしまい、論理的には非常に危ういことをしているように思われるかもしれない。しかし、これが現実に理論を応用する道なのである。

VI. ま と め

結局、応用という観点で実験を理解するということは、まず、実証主義を取るかどうかという枠組みでものを理解することをやめることが必要である。世界をコントロールしようという枠組みで実験を考える場合には、理論の検証という枠組みで実験を考えるのとは違う見方をする必要がある。つまり、有機体論、全体論を排し、機械論的なものを見方をすることが実験を行うためには必要になってくる。もちろん、機械論的な見方といっても、世界が真実には機械と理解できるといった存在論的な主張をしているわけではない。差し当たり分析と合成の可能なものとして世界を理解するということである。しかも、これが、「差し当たり」であるところが、工学的な見方の長所になっている。つまり、差し当たり理想化したものを実

際の機械を作る場合には回復しなければならない。さもなければ、そこにエラーが生じることになる。

結局、有機体論でもなく、力学的決定論でもないところに、応用のための実験が行える場所がある。これが弱システムの世界である。一言で言えば、これこそが（世界に関する）実験の可能性の制約である。

世界をコントロールしようとするために、科学においては純粋化といった方法によって、原因を局所化することが試みられてきた。この科学の方法は、コントロールするためには、つまり強システムの泥沼から這い出す手段としては有効である。ただ、工学も機械を作る場合には、この純粋化から無視された部分を再び取り入れざるをえない。そこがエラーやノイズの場所になっているからである。また、設計においては、多くの法則を組み合わせる必要がある。そしてこれらのことによって新たな複雑性、強システム化が生じることになる。工学の実験は、この複雑性を解明し、限定するために行われている。その意味で工学の実験は、総合的実験と呼んでもいいと思われる。

世界のコントロールということに着目すると、操作できる要素（原因）を取り出すことが、まず必要である。だから、そのためには、この要素の粗さや細かさは差し当たり関係しない。これが、純粋化を求める科学と、コントロールを求める工学との相違に結びついている。もちろん工学においても、精密機械のように強システム化を求めるようになると、純粋化は必要とされる。ただ工学は、純粋化では解決できない複雑性を扱おうとしているのである。

このように見てくると、世界のテクノロジー化によって、世界は機械化しすべてがロボット化するというイメージはあまり説得力をもたないことがわかる。科学による世界理解を数学化と結び付

け、それによって世界がすべて記述され支配されるという考えは、実は工学の現実を見ていない抽象論であることがわかる。工学においては、無視された部分があること、しかもそれが安定した部分であることが重要である。もし世界がすべてシステム化されるとすると、それは強システムになり、実は実験もできず、機械を作り出すこともほとんどできない世界になってしまう。理論的に解明されたことを単純に、直線的に外挿できないことが、「応用」の興味深い点である。

注

- 1) p. 243 イーアン・ハッキング『表現と介入』産業図書 p. 149 Ian Hacking, "Representing and Intervening" Cambridge University Press 尚、邦訳がある場合には、ほとんどの場合それに従っている。
- 2) 実験が無視されてきたという論点に関しては例えば、p. 3f. "The Neglect of Experiment" Allan Franklin Cambridge University Press また、p. ix "How Experiments End" Peter Galison The University of Chicago Press を参照
- 3) p. 247 "Experimentation and Scientific Realism" Ian Hacking in "The Philosophy of Science" ed. by R. Boyd, Ph. Gasper, and J. D. Trout MIT Press originally from "Philosophical Topics" 13 (1982)
- 4) p. 250『表現と介入』, p. 153 "Representing and Intervening"
- 5) 例えば、クロード・ベルナルも『実験医学序説』第1編第1章2などで、実験には単なる観察だけでなく、推理や判断を下すことも必要だと論じている。
- 6) p. 251『表現と介入』, p. 154 "Representing and Intervening"
- 7) p. 265『表現と介入』, p. 163 "Representing and Intervening"
- 8) この論点について、クーンは、科学革命期における変革を導いたものは、実験的諸発見ではないと述べている。The Essential Tension p. 46, 136f.などを参照。

- 9) p. 238 伊東俊太郎『科学の社会的次元』新・岩波講座哲学 8
- 10) p. 237f. 伊東俊太郎『科学の社会的次元』新・岩波講座哲学 8
- 11) これができないのは、原罪による。だから実験を通して外から知るしかない。こういう神学的な理由も伊東は提示している。p. 242 伊東俊太郎『科学の社会的次元』新・岩波講座哲学 8
- 12) この例は自明なものではあるが、ここでは J. S. ミルの『論理学体系』第 3 巻第 7 章 3 (J. S. Mill, A System of Logic Book 3 Ch. 7 § 3) からとったものである。
- 13) このあたりの論述は、J. S. ミル『論理学体系』第 3 巻第 8 章 (J. S. Mill, A System of Logic Book 3 Ch. 8) を参照
- 14) この点は、p. 48『科学思想の歴史』ギリスピーみすず書房 The Edge of Objectivity Charles Coulston Gillispie も参照
- 15) p. 94f.『実験科学の精神』高田誠二 培風館 参照
- 16) p. 209f.『実験科学の精神』高田誠二 培風館 参照
- 17) p. 162f.『人類の知的遺産 31 ガリレオ』伊東俊太郎 講談社
- 18) p. 60『本質的緊張 1』トーマス・クーン みすず書房 p. 43 “Mathematical versus Experimental Traditions in the Development of Physical Science” in “The Essential Tension” Thomas S. Kuhn
- 19) p. 104『実験医学序説』クロード・ベルナル 岩波文庫
- 20) p. 110『実験医学序説』クロード・ベルナル 岩波文庫
- 21) p. 111『実験医学序説』クロード・ベルナル 岩波文庫
- 22) p. 69『ガリレオの生涯と科学的業績』豊田利幸 in『世界の名著 ガリレオ』
- 23) p. 59『物理学の発達における数学的伝統と実験的伝統』in『本質的緊張 1』トーマス・クーン みすず書房 p. 42 “Mathematical versus Experimental Traditions in the Development of Physical Science” in “The Essential Tension” Thomas S. Kuhn
- 24) p. 60『本質的緊張 1』トーマス・クーン みすず書房 p. 43 “Mathematical versus Experimental Traditions in the Development of Physical Science” in “The Essential Tension” Thomas S. Kuhn
- 25) p. 254『ペイコン主義』パオロ・ロッシ in『西洋思想大辞典』第 4 巻 平凡社
- 26) この概念は、H. A. サイモンに由来する。第 7 章『新版システムの科学』パーソナルメディア, The Sciences of the Artificial 2nd. ed. Ch. 7 Harbert A. Simon MIT Press
- 27) p. 32『感情』戸田正直 東大出版会
- 28) p. 33『感情』戸田正直 東大出版会
- 29) p. 231『実験科学の精神』高田誠二 培風館
- 30) もちろん、乱し方を確定できれば、それを補正することによって測定は可能となる。医療におけるコンピュータを用いた断層法はこれにあたる。
- 31) 「工学についての最も単純な見方は、それが直接的演繹的活動に他ならないというものである。工学者は科学者によって与えられた多くの方程式から選択し、関心のあるパラメータの値を代入し、計算を行う（もしくはそれを機械にやらせる）そしてそれからその答えを手元にある特殊なプロジェクトに応用する。まずい教え方をされた工学講座は、この立場を助長している。しかし工学の実際の経験をしている人は誰も、そんなに単純で同情的でない見解を黙認するとは思えない。」p. 353 “Applying Idealized Scientific Theories to Engineering” Ronald Laymon in “Synthese 81” 1989
- 32) 『ゾウの時間ネズミの時間』本川達雄 中公新書 においても、大きさが生物の設計原理に非常に効いているということを述べている。
- 33) p. 355 “Applying Idealized Scientific Theories To Engineering” Ronald Laymon in “Synthese 81” 1989
- 34) 工学の方法論を具体的に説明している本においても、工学の問題解決において除外してきた因子が最終的に明白な影響を及ぼすかどうかをチェックしなければならないということを強調している。(p. 9『エンジニアリングアナルシス 工学問題の解き方』D. W. VER PLANK, B. R. TEARE, Jr 野村正二郎訳丸善株式会社)

- 35) 実験の力を借りて、複雑な現象をより簡単な条件や関係に導くことを、クロード・ベルナールは「実験的分析」と表現している。『実験医学序説』第一編第2章7 参照
- 36) p. 373ff.『表現と介入』, p. 229ff. “Representing and Intervening”
- 37) p. 111『最近のシミュレーション技術』川井忠彦 in 『日本機械学会誌』1993年2月
- 38) p. 102『知識処理による問題解決の高度化へ』大須賀節雄 in 『日本の科学と技術』1986 Vol. 27 No. 241
- 39) 例えば、航空機の例に関しては、「航空機は、軽量化、抵抗減少、安全性向上をギリギリまで追求するため、一部分の設計変更も周辺に影響を及ぼし重大なコスト増の主原因となっている。」p. 134『航空機のコンピュータモックアップ』杉本隆男 in 『日本機械学会誌』1993年2月
- 40) p. 92『革新技術への挑戦を支える』三浦 甫 in 『日本の科学と技術』1986 Vol. 27 No. 241
- 41) p. 96『革新技術への挑戦を支える』三浦 甫 in 『日本の科学と技術』1986 Vol. 27 No. 241