

# 科学理論の構造と科学的認識

——高等教育における理論教育のための基礎的研究——

岡 本 正 志

岩 田 年 浩

## 目 次

1. はじめに
2. 物理学史からみた物理理論と研究の特徴
3. 電磁気学理論の成立過程からみる科学理論と科学の場
4. 経済学におけるモデリングと物理法則
5. 経済学における数理化・物理法則化の問題点
6. おわりに



# 科学理論の構造と科学的認識

——高等教育における理論教育のための基礎的研究——

岡本正志\*, 岩田年浩\*\*

## 1. はじめに

環境問題や STS (科学—技術—社会) などが今日的テーマとなって、専門研究ばかりでなく異分野間を総合化する視点の必要性が語られている。しかしながら、個別専門分野間の壁は相変わらず高い。現実的課題からは総合的視点が要求されていながら、その解決の一翼を担うべき高等教育機関がもっとも閉鎖的状况であるという皮肉な現状では、将来への展望は開けそうもない。

そのような現状からの脱皮をめざして、我々は、文系理系という枠を乗り越えた新たな教育のあり方を検討することにした。そのために、専門分野の特徴がもっとも現れる理論科目を取りあげて、そこに文理間の壁をこえる一般的な構造を取り出すことができるのかを探ろうとしている。

本稿は、そのための基礎研究として、まずは物理学理論と経済学理論の特徴や共通性、問題点などを探り、科学理論の構造や科学的認識の本質について検討した。その際、岡本は科学史と科学教育を主たる研究分野としており、岩田は経済学の研究者であるから、それぞれのフィールドから科学理論についての知見を出し合って検討した。

## 2. 物理学史から見た物理理論と研究の特徴

物理学が、現在のような姿になったのは17世紀以降である。科学革命といわれるこの17世紀の変化は、主として天文学と運動論において生じたが、これが今日の科学理論の原型を作ったということができる。その基本的な姿をまず確認しておこう。

近代物理学の重要な特徴の一つは、現象の定量的把握にある。量を正確に測定することによって、これまで見逃されてきた諸性質が顕わになり法則的把握が可能になった。ガリレオが落下法則を解明できたのは、時間と落下距離とを定量的に測定したからである。近代科学を精密科学ともよぶのは、このような量の精密な測定が主要な特徴となっていることを示している。物理学が数学を利用した解析的手法を導入して成功したのは、現象の定量的把握が可能になったからである。

物理学の方法に定量的視点が導入されたのは、貨幣経済の発展や機械時計の出現という社会的背景の影響とともに、研究対象を、定量的扱いが可能な性質（第一性質）だけに限定したことによるものである。

物体の性質を第一性質と第二性質とに分類して論じたのは J. ロックであるが、彼は固さや延長、

\* 大阪女子短期大学教授

\*\* 広島大学大学教育研究センター客員研究員／関西大学総合情報学部教授

形、運動、数などのように、根元的で量的に記述できる性質を第一性質として、色や音、味などのような感覚に依存する性質を第二性質と呼んだ。このような図式はすでに古代ギリシャにおいて登場しており、たとえばデモクリトスの有名な断片「人の慣わしで甘さ、辛さ、温さ、冷さ、色。しかし、真実にはアトムとケノン」<sup>1)</sup>をあげれば十分であろう。

しかし、アリストテレスを代表とする近代以前の伝統的な自然哲学では、そもそも究極の要素たる元素そのものが火や土、空気、水などの質的性質を持っており、さらには温、冷、乾、湿などの感覚的性質を担っていたのであるから、質を排除することは不可能である。したがって、近代物理学が対象を第一性質に定めることができたのは、原子論的自然観がこの時期に復活したことが大きな原因であるといつて間違いないだろう。ガリレオやニュートンらが原子論者であったことは、それを物語っている。ロックはニュートンの友人であり、彼の哲学も、科学革命さなかの近代科学の影響を受けたもので、当時の原子論的自然観を反映したものである。

原子は重さと大きさという量的に規定された粒子であり、質的にはまったく無規定である。その離合集散と配列によって質を表現するので、量的世界観と合致する。自然現象を原子の運動によって説明することが質の量的把握を可能にしたわけである。

数学は、基本的に量の科学である。したがって数学的扱いが可能になるためには、現象が量化できる性質を持っていないとてはならない。物理学が数学を取り入れることに成功したのは、上述のように原子論的自然観に根ざし、対象を第一性質に限定したことが要因である。

なお、数学を利用することによって、法則がより一般化されて、それまで隠されていた新しい観点や可能性が見えてくることがある。たとえば、解析力学におけるラグランジュ形式を採用すると、力学系を幾何学的イメージに直結しないようなより抽象的な系として扱えることになる。そのような取り扱いができていたことが、量子力学への飛躍を可能にしたわけであるが<sup>2)</sup>、これは数学的抽象のもつ威力を示す良い例だといえるだろう。

近代物理学の今一つの重要な特徴として、実験的手法の意識的適用がある。実験的手法は、物理学の特徴をよく表すものであり、実験科学という言葉さえ産んだ。この意識的適用はガリレオに始まると言われるが、これは、真偽の判定を超越的な神やその他の信条などからではなく、自然そのものに求めるといふ考えが確立されたことになる。

たとえば天動説理論であるプトレマイオス体系は、宇宙は神の被造物であるので、その運動は円運動でなければならないというプラトンの信念に基づき、この信念と眼に見える現象とをいかに整合的に説明できるのかという観点から構築されたものである。そこでは、現象よりも先に完全なる運動(=円運動)が要請されており、それに沿うように理論を作りあげている。

神の問題は、とても一筋縄ではいかない。たとえば万有引力について、デカルトやライプニッツは遠隔作用的な力はオカルト的ではないかと批判したが、ニュートンは自然の背後の神の存在がそれを支えていると信じていた。彼は『プリンキピア』第二版に付けられた「一般的注解」において、「この太陽、惑星、彗星の壮麗きわまりない体系は、至知至能の存在の深慮と支配とによって生ぜられたのでなければほかにありようがありません。… この至高の存在はありとある事物を統治するのです」<sup>3)</sup>と述べた後、数ページにわたって神について語り、それに引き続いて万有引力の原因

について「私は仮説を捏造しない Hypotheses non fingo.」<sup>4)</sup> という例のことばを書き付けたのである。

しかし彼は、ここで次のように述べる。

この哲学（自然哲学のこと）では、命題が現象からひきだされ、後に帰納によって一般化されるのです。そのようにして… 運動の法則と重力の法則とが知られるにいたったのでした。そして重力が現実存在し、わたくしたちの前に開かれたその法則に従って作用し、天体とわたくしたちの海に起こるあらゆる運動を与えるならば、それで十分なのです<sup>5)</sup>

自然哲学の任務を現象の説明に限定して、いわば神とのかかわりを棚上げにしながら、自然哲学の研究方法を明確に述べたわけである。彼のこのような態度は『光学』「疑問31」の最後の部分においてさらにはっきりと語られているので、少し長い引用しておく。

自然哲学においても、難解な事柄の分析的方法による研究は合成的方法に常に先行すべきである。この分析とは、実験および観察を行ない、それらから帰納によって一般的な結論を引き出し、この結論に対する異議は実験または他の確かな真理から得られたもの以外には認めないことにある。なぜなら、実験哲学において仮説は考慮されるべきではないからである。実験および観測から帰納によって論証することは一般的結論の証明にはならないが、それは事柄の性質上許されるかぎりの最善の論証方法である。そして、それは帰納がより一般的であればあるほど確実であるとみなしてよい。そして、もし現象から何らの例外も生じなければ、結論は一般に成立すると宣言されうる。しかし、もしあとになって何らかの例外が実験から生じれば、そのとき初めてそのような例外が起こりうるものと宣言される。この分析過程によってわれわれは複合から要素へ、結果から原因へ、特殊な原因からより一般的な原因へと進み、最も一般的なものに達して論証を終るのである。これが分析の方法である<sup>6)</sup>

ここには、実験や観察に依拠して理論構築をする自然科学の基本的な態度が明確に語られており、しかも、そのようにして作られた法則の適用限界についてもきちんと意識されている。これが、自然科学の研究態度の基本路線を決定づけたと言ってよいだろう。

このように、実験的手法、定量的把握、数学の利用などが近代物理学の特徴となってきたが、これらに加えて、理論の体系化と知識の普遍的・一般的性格が強調される。次節にて、19世紀後半における電磁気学研究を例にして、物理学研究の中でどのように理論構築がなされるのかを具体的にみることにする。

### 3. 電磁気学理論の成立過程からみる科学理論と科学の場

電磁気現象は、今日ではマクスウェル方程式によって説明し尽くされている。電気や磁気に関す

る様々な現象が、わずか4つの基本方程式によって説明が可能であることは驚異的である。この電磁気学理論はいかにして形成されたのか。この分析を通して、物理理論の形成・確立過程を調べてみよう。

マクスウェル理論は、3つの論文によって徐々に完成していった<sup>7)</sup>。第一論文は「ファラデーの力線について On Faraday's Lines of Force (1855)」、第二論文は「物理的力線について On Physical Lines of Force (1861)」、第三論文は「電磁場の動力的理論 A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field (1864)」と名付けられている。これら三つの論文に基づき最終的には『電気磁気論 A Treatise on Electricity and Magnetism (1873)』という全2巻の大著として集大成した。第一論文では、題名通りファラデーの力線についてのマクスウェルの解釈と数学的表現が行われた。ここで彼は物理的アナロジーの重要性を指摘して、物理学の他の分野同士の部分的類似性が他方に光を当てると述べて<sup>8)</sup>、そのようなアナロジーとして非圧縮性流体を仮定し、これによって電磁氣的現象が説明できることを示している。

この論文の Part 2 では、ファラデーの電気緊張状態 (Electro-tonic State) について論じている。そこでは薄い球殻上での電磁気現象を扱っているが、アナロジーよりもむしろ数学的に展開して、電気緊張関数 (electro-tonic function 現在のベクトル・ポテンシャル) を導き出している。このようにして、マクスウェルはファラデーの得た概念を継承し、それをまず数学的に発展させたのである。

第二論文では、彼の有名な磁力線の渦モデルが提出される。これは物理的アナロジーの典型例ともいえるもので、彼はこれによってファラデーの力線モデルを凌駕し、そこから彼の独創である変位電流の概念を導き出すことができた。電流は、物質内部の渦間にある粒子の移動として捉えられているが、誘電体内では粒子は自由に動くことができない。しかし起電力によって力を受けた粒子は渦の周囲をいくらかは移動(変位)し、それによって渦を変形させ、渦の弾性による力とつりあったところで静止する。この粒子の変位分が電流的效果を生むと考え、変位電流と名付けたのである。この概念はエーテルにも援用されて、第三論文において光の電磁理論を導き出すことにつながり、きわめて重要な役割を果たした。

最後の第三論文は、それまでの分析を理論的に完成させたものである。マクスウェルは、それまでに創りあげてきたモデルを、ここではすっかり取り払って数理解析的手法のみによって電磁理論を完成したと評価されている<sup>9)</sup>。しかも、この第三論文において光の電磁波仮説が唱えられて、やがてそれは Hertz 実験によって検証されたために、一挙にマクスウェル理論の正しさを多くの科学者が承認することになったというわけである。

マクスウェル理論は、このようにして形成され確立されたといわれるが、そこでは、物理的アナロジーとともに、マクスウェルの数理解析的方法の持つ意義が強く主張されている。方程式から予言が生みだされ、やがてそれが実証されるという数理解析の素晴らしい成功例として語られているといってもよいだろう。

しかしながら、実際にマクスウェル理論が提起され確立されるまでを調べてみれば、そのように理想化して語れるほど、事態は単純ではなかった。たとえば、数学的手法が強く主張される第三論

文においてさえ、マクスウェルはそれまでの経験事実やアナロジーを十分に踏まえて議論しており、決してモデルをすっかり取り払ったわけではない。またマクスウェル理論を検証したといわれるヘルツの電磁波検証実験についても、評価されたのは当のドイツではなく、英国においてであった<sup>10)</sup>。そこには、理論の実験による検証といった単純な図式だけでは見えない科学の場というものが存在している。

したがって以下では、マクスウェル理論の成立過程と、それが科学者社会の中に確立される過程の二つに分けて調べてみることにする。前者については、マクスウェルの数学的手法が喧伝される第三論文の構造を詳しく見ることによって、後者については、ヘルツ前後の電磁波検証実験の様子とその科学者社会での反応を見ながら分析することにした。

### マクスウェル電磁理論の形成過程

先に述べたように、マクスウェルは第二論文までに創りあげてきた力学的モデルを、第三論文においてあっさり捨て去り、そこでは数学的演繹的な扱いによって理論構築が行われたと評価される。しかも、このような通説的評価は、数学的方法の生産的機能の典型として、たとえば次のように語られる。

「(マクスウェルが光の電磁波説を唱えたことについて) このマックスウェルの考えは経験の側から直接推察されたのではなく、電磁気理論の記号関係の独自の解釈によってもたらされたものである。これは記号体系の解釈が新しい物理的実在を予測させるという記号体系じたいの生産性を示している」<sup>11)</sup>

数学的方法が独自にもつ生産性は決して否定されるべきものではないが、しかし上の引用のように、はたしてマクスウェルは経験からではなく、記号体系の解釈から光の電磁波説を唱えたのであろうか。結論を先に述べれば、このような評価はまったく事実としても間違ったものである。マクスウェルは、光の電磁波説を数学から導き出したのではなく、むしろ現象こそが仮説提起の根拠となっていることが分かるのである。

マクスウェルの第三論文は、二つの部分からなっている。Part 1 はこの論文の基本的な考え方を丁寧に述べたものであり、Part 2 で数学的に検討してマクスウェル理論を定式化している。この Part 1 を読むと、上述の通説とは違ってイメージ豊かに基本構想を述べているのがわかる。その部分の叙述を整理してダイアグラム化したものが図—1である。ダイアグラムは、パラグラフの内容を簡略化してカード化し、論文の叙述の流れと内容に即して構造化してある。できあがった構造の特徴がわかるように、それぞれ適当にタイトルをつけておいた。このダイアグラムの矢印方向の流れは、第三論文 Part 1 の叙述の流れに即してつけているので、図の左下「現象と旧説」から右上の「検証」に至るまで、マクスウェル論文は矢印通りに展開されているわけである。また、論旨の展開が、現象から出発して仮説やモデルを作ったりするような場合は濃い灰色の矢印で示し、逆に理論展開を現象と比較したりしている場合には薄い灰色の矢印、仮説やモデルなど理論と理論とを比較したり発展させたりしているような場合には縦線を入れた矢印で表すようにした。ここで述べた「現象」とか「理論」は、それぞれ「観察事実や実験事実」、「仮説やモデルや理論的考察」





と見なせる場合のことを示している。なお、マクスウェルの原論文にはパラグラフ毎に番号がふられているので、それをこの中に入れることも可能であるが、煩雑であるので省略してある。

論旨の展開は左下「現象と旧説」から始まるが、そこでは電磁気のもっとも基本的な現象である「物体への相互作用」をとりあげ、遠隔作用説に基づく旧説を紹介している。しかしこの理論では、「電荷間に働く力は、お互いの相対距離に依存する」という実験事実と、理論の根拠である遠隔作用の概念とが矛盾する。そこで、途中の媒質が本質的な役割を果たすとみなす近接作用説の必要性を主張し（「矛盾（新説の必要性）」）、その際、物体に相互作用を及ぼすような力の源をどこに求めるのかを問いかける（「問題（力の源を問う）」）。次に、それを説明する媒質の弾性体モデルを提出して（「仮説とモデル」）、あとは、仮説に基づきモデルの特徴を整理し数式化して彼の理論を創りあげたわけである（「理論化」）。できあがった理論は、その理論の内容と実験や観察から得られる事実とを照合して検証されるが、そのために、マクスウェルはすでにファラデーも指摘していた電磁気現象と光との類似性を一歩進めて電磁波仮説を提案（「仮説から生まれた予言」）すると共に、この理論をいくつかの現象に適用して実験事実とよいオーダーで合致すると述べている（「検証」）。なお、図の中に注記してあるように、電磁波仮説はヘルツやロッジによって後に検証された。

さて以上からもわかるように、この論文は決してそれまでの力学的モデルを捨て去っているのではなく、明らかにそれらに基づいて議論されている。第二論文の渦モデルのような具体的な展開をしていないけれども、細胞状弾性体的なアナロジーで誘電体媒質を特徴づけながら理論化している。しかも、重要なことは、論理展開のあちこちで常に現象との比較照合がなされながら整合的な方向へと議論を進めていることである。たとえば、議論の出発はまず現象的事実からである。そしてそれを説明する旧説に対しても現象的事実から問題点をあげている（事実1，矛盾1）。仮説やモデルを作る際にも、たとえば電気吸収などの現象をあげ、それらを説明するモデルを提起している。最後の光の電磁波説を論じる際にも、ファラデー効果などの現象から電磁気現象と光の現象との類似性を指摘しており、しかも、ファラデーがすでにそのような指摘をしていることを引用しながら光の電磁波説を提出している。理論の数学的展開のみから光の電磁波仮説が導き出されたわけではないことは明白である。実際、マクスウェルは第三論文より以前に光の電磁波説を考えていた。1861年10月19日のファラデー宛書簡には次のように書かれている。

私の電気力の理論とは、絶縁体内では、わずかな電気的変位が起こることによって電気力が働くようになるというものです…球状のセルはそのような変位によってひずみます…球の弾性は、その周囲の電気的物質に作用し、それを下方に押すでしょう。コールラウシュとウェーバーによる、電気の静電的効果と磁氣的効果との間の数値的關係から、空気の媒質の弾性を決定し、それを光のエーテルと同じであると仮定して、横振動の伝搬速度を決していました。結果は毎秒193,088マイルです。フィゾーは直接実験から光速度 = 193,118マイルを決定しました。この事情は、単に数値的なものではありません。…今や光のエーテルと電磁氣的媒質とは同一であるという私の理論が事実であると信ずる十分な理由を得たと思います<sup>12)</sup>

マクスウェルが、光と電磁氣的現象との同一性を思いついたのは、決して数学的形式の中からでは

ない。ファラデー以来の実験的事実を照らし合わせればすでにその同一性が暗示されており、それを媒質の力学的理論において統一的に説明しうるのがどうか理論化の過程で課題となっていたのである。

通常、科学理論の形成過程を述べる際に、仮説→モデル→検証→理論の修正というフィードバックサイクルが述べられるが、しかし、その個々のステップの中にも同様な小さなステップが積み重ねられていて、自然科学では、経験と理論との関わりが常に意識されながら研究活動が行われていることを見失ってはならないだろう。

#### マクスウェル理論の確立過程における科学の場

マクスウェルの電磁場理論は、それが提案されたからといって、すぐに認められたわけではない。マクスウェルの理論そのものが十分に整理されておらず、数学的にも難解であったことに加えて、ポテンシャルなど遠隔作用説の残滓や、変位電流という信じがたい概念などが理論構成の主要な部分になっていたのであるから、たとえばケルヴィンのような当時の有力科学者でさえ、これに懐疑的であった。マクスウェル理論が承認されるまでには、この理論をより分かりやすく改良することと、この理論を決定的に証明する実験的検証が行われる必要があった。前者を数理的な面で主として推し進めたのはヘヴィサイドであり、後者の実験はヘルツによって成し遂げられた、というのが科学史上の常識である。念のために付け加えておけば、理論的な改良はヘルツによっても行われ、最終的にはローレンツによって完成したと考えられている。特に場を物質から独立した物理的実在と捉えたのはローレンツであり、彼以前には、ヘルツをも含めて、場は、たとえばエーテルのような弾性体的物質の属性として捉えられていた。したがって、今日の意味で、電磁場の理論が確立されたのはローレンツによるが、ここではそこまで踏み込む必要はないであろう。

さて、マクスウェル理論を証明する実験的検証として最も相応しいと考えられたのは電磁波の検出であった。前節で見たように、彼の理論的帰結として電磁波が予言されていたからである。電磁波の検証実験に関してはヘルツ以外にいくつかの事例があり、それほど単純ではない。以下のような事実がある。

(事実1) 1879年と80年にわたって、ヒューズ (D.E. Hughs, 1830–1900) もまた放電実験に成功していた。彼の場合、火花放電が500ヤード先で検出され、しかもそれは空気中の電気波によるものだと主張していた<sup>13)</sup>。

(事実2) ヘルツは、1887から88年にかけて電磁波検出実験を行い、1888年に論文として出版した。しかし、彼の実験が評判になったのは、論文の発表されたドイツよりもむしろイギリスであった。ドイツでは、このイギリスでの評判がフィードバックされて、彼の実験の本当の意義が理解された<sup>14)</sup>。

さて、(事実1) のように、ヒューズは、あきらかに電磁波実験に成功しており、しかも「空気中の電気波」が伝搬したと主張していた。しかもヘルツよりも7年も前にそれを確認している。に

もかわらず、なぜ彼の名がヘルツのようにもてはやされないのだろうか。じつは、彼はこの実験をスポティスウッドやストークス、プリースなどの前で実演したが、それをふつうの電磁誘導で説明できる現象だとされたために、論文印刷を躊躇してしまったのである。ヒューズ自身は元々この実験を公表する予定であった。しかしこの時、ストークスはすでに大科学者として高名であり、スポティスウッドはロイヤル・ソサエティの会長、プリースは避雷針技術の第一人者であった。当時の科学技術界のいわば第一人者というべき人物たちから認められなかったのであるから、ヒューズが躊躇したのも無理からぬことであった。

ヒューズと同様に、じつはヘルツもドイツではその実験の意義を十分には評価されなかった。しかし、ヘルツの場合、英国ですぐさま評価されたおかげで、一躍大物理学者としての名をあげるようになった。英国では、マクスウェルの電磁波理論を信じていたマクスウェリアンと呼ばれる科学者たちが存在し、彼らがヘルツの実験の意義をいち早く気づき、大きく取り上げたからである。

いくら画期的な理論や実験であろうとも、その意義を理解して多くの人々に伝える人や場が存在しなければ、そのまま埋もれてしまうことがいくらでもありうる。事実1と事実2は、それをもっとも端的に示す例である。

ここには、科学的発見の社会的性格が現れている。発見が公表され、様々な角度から検討されて、その上で科学者社会の中で正しいと認められたもののみが、科学的法則や知識として成立し、発見の荣誉に浴しうる。科学の法則というものは、個人の研究だけから生まれるのではなく、科学者社会の公認から生まれるという性格をもっている。この点は、科学的知識の性格を考える上で重要なポイントである。

#### 4. 経済学におけるモデリングと物理法則

科学の作業は一般に、複雑な諸現象の中からその本質を分析していくものである。第2節でニュートンの方法を引用したが、これはつまり、研究対象となる現象の中から本質的でないもの（部分的なもの、一面的なもの、一時的なもの、特殊的なもの）を捨象し、本質的要素を取り出し（又は本質的要素に分解していき）、それらの要素を再構成するというモデリングの手順である。その再構成されたものは、現象の縮図又は近似とすることができる。

どういう角度から分析するかという視角については、主観や価値判断が入るが、モデルを形成し、それがほとんど何人も否定しがたい理論となっていくには、理論的な客観性や、それと分かちがたい研究方法の客観性が要求されることになる。研究方法の客観性を言う場合、今日、科学一般で共通するものは数学的方法ということになる。かくして、科学の作業は、「前提→仮説→結論→数学的モデルの形成→その検証→再び前提の修正」というサイクルを描くことになる。こうした繰り返しから見れば理論研究そのものがフラクタル構造をもっていると言うことができよう。

経済分析の方法においても、こうした考え方は以前よりあり、例えば中山伊知郎は、(1)経験から出発した事実の確認、(2)普遍的な問題の設定、(3)これを解くための一定の条件の設定、(4)理論内容の獲得、という4段階を提起していた<sup>15)</sup>。

(1)は、研究の客観性を保障する要件であり、「理想」（つまり価値判断）の混入を避けなければならない。(2)の思考過程では、経済現象の「同形性」が確認され、かつこれに基づいて「同形の問題」が与えられる場合に初めて是認され、このための抽象化が必要とされる。(3)では、本質をとらえること、設定される条件は必要以上に仮説的でないこと、条件の一面性が固守されないことが必要とされる。(4)の段階では、普遍的分類つまり理論が帰結される。確かに、この考え方は極めて自然科学的であり、経済現象の歴史性について配慮はなされていない。しかし、こうした観点が経済理論（ここでは近代経済理論を指す）に引き継がれてきた一つの傾向となってきたのである。

経済学の数理化は、他の社会科学にはない様々な長所を示してきた。つまり、経済現象——例えば経済成長率や利潤率、物価など——の変動が何を基準に、どのような原理をもって変動するのかを明らかにしてきた。とりわけ「均衡」という経済学にとって重要な概念は体系の安定・不安定を論じる場合にも、分析上大きな役割を果たしてきた。この数理的モデルの形成においては、「均衡」概念と類似したものが多く取り入れられている。

1947年の著書でポール・サムエルソンはこの点について、極大化行動の定理の源泉の1つにふれて、「これが本質的に熱力学の方法であることを指摘しておいてもよいであろう。これは特定の仮定（とくに熱力学の第1および第2法則）にもとづいている純粹に演繹的科学であると考えることができる。このような抽象的推論がギブス Gibbs やその他の学者の手により有意義な定理にまで発展していくということが、もとの仮説の正当性を裏付けることになる」<sup>16)</sup>と述べ、同様に、変数に対するパラメーターが変化したときの一般的定理にふれて、「これは有名なル・シャトリエの原理という項目のもとに含まれるいくつかの現象に対応する。その定式がほとんど形而上学的な曖昧さをもつところから、その意味はしばしば曖昧であり、同時に異なった現象の説明に使用されている。上の定式化は容積の所与の圧力変化に関する変化が、エントロピーが一定に保たれ、温度が均衡条件と合致するように変化するときよりも、温度が一定のときの方が大きいという理由を説明している」<sup>17)</sup>と述べている。こういう傾向の画期をたどれば1933年創刊の *Econometrica* で「数量化・数理化を支えるのは自然科学の方法である」ことが明記されていることに行きつく。

さらに、こうした物理法則や概念を経済学に適用した場合の可能性についての研究もなされている。例えば、城島国弘（1988）は、空間と財の流通の場、質量と資本、光と資源、熱と権力の間での対応を丹念に示している<sup>18)</sup>。これは確かに一つの学際的成果である。

今日、数理的モデリングは一部のマルクス経済学者も含めて大きく広がり、いわば当然の傾向になっており、古典経済学の成立以後、限界革命・ケインズ革命・マネタリズムの登場という経済理論の展開の中で貫かれてきたと言える。事実、1995年の *Review of Economic Studies* では数式のあるページは全体の50.2%に上っている。

## 5. 経済学における数理化・物理法則化の問題点

しかし、こうした中で発生してくる問題もある。物理法則における質量という実体概念と重量という現実の形態に差異があるように、抽象化された思考によって形成されたモデルや理論が、特に

社会科学（経済学）においてはそのまま適用されがたい問題をもつ。

近代経済学の主たる流れがたどってきた足跡に対しては、近年いくつかの批判がなされている。それらを取り上げながら、近代経済理論のあり方について何が議論されているのかについて洗い出しておくことにする。

ハーバート・サイモンは、経済学と心理学や他の社会科学と対照させて以下のように述べる。

経済学者は人間は合理的であるという信念を持ちたがる。ところが、行動は環境の中で生まれるものであり、個人は目標の実現のためにそれをどのように実現するかを計測する手段をもっている。従って、ある行動が合理的かどうかの決定は、環境についての一定の前提や仮定の文脈の中で行動を研究するか、目標－手段の関係で研究する場合のみ可能である。…新古典派経済学は次の三点で他の社会科学と距離を置いている。まず、前提となっている目標や価値の内容については何も語っていない。次に、現在・未来にかかわりなく、異時点間を運動している時にも一律に整合的な行動を仮定している。最後に、行動は客観的に合理的であると仮定している<sup>19)</sup>。

他の社会科学者は実証的に研究しているにもかかわらず経済学者はそうしていないとするわけである。サイモンは、心理学者は合理的でない人間の感情がどのようにして形成されるのかまで説明するとする。彼は経済学が現実を説明できるように移行するには、その「実証的基盤を大幅に拡張する必要がある」<sup>20)</sup>としている。

同様の見解は、W・レオンチェフによっても、「自分にとっては初期の（古典派）経済学者によっていくつかの壮大なアイデアを得た。しかし、他の経済学者は彼らの考え方は継承しても、より多くの事実を収集するのではなく、理論構築を続けた。彼らの定式化が事実からはずれたときには、さまざまな仮定を置きはじめた、ここから、近代の理論経済学は悪化しはじめた。……今日の理論経済学者たちは、系統的に事実を観察するというきびしいしつけを受けていない」<sup>21)</sup>。1919年以来産業連関表を発明し、各国でその適用がなされている点からしても、彼の批判はより直載である。

同様にA・アイクナーは経済理論の内でも、効用関数・限界生産の理論・右上がりの供給曲線には実証研究の基礎が欠けていると考えている<sup>22)</sup>。

彼らが批判する新古典派経済学の人間のとらえ方においては、人間は世界のあらゆる情報を集めることができ、自らの行動の範囲と結果を予測し、効用を最大化しようとすることになる。こうした現実性に欠ける問題点の指摘に対応して、情報の不完全性を考慮し将来生ずるであろう事態の生起確率を考える等の試みもあるが、期待効用を最大化する点で本質は変わらないのである。

より根本的に言えば経済学（近代経済学）の内容と方法そのものの中に現実から離れるものが含まれていることによる<sup>23)</sup>。近代経済学は論理実証主義に基づくと一般的に言われてきたが、前提に基づいて得られた論理的結論の、この実証という手続きが、数理的モデルによる論証にとって代わることになっているのである。しかも、この数理的モデルの高度な活用によってこそ科学性の高さ

が承認されるのが経済学の常識である。ここには、数理的モデル展開をもって実証にかえることの無理と、科学を数学の利用に取ってかえられない根本的な問題が横たわっている。

このことから考えられることは、数理的分析を超越的に批判することではなく、コンプリートな経済モデルを形成し、そこから導かれる均衡経路の安定性・不安定性を解析していくような、より精緻な研究が意味をもとう。問題は数学を経済学研究の有用な分析の用具として位置づけるのか、目的化するのかにあると言えよう。その場合、経済学研究者のなすべきことは、どういう条件の下で何を分析するか（たとえば、企業や人間がどのような行動をとるかを現実的にモデルに取り入れることなど）という構想と、結果をどのように解釈するかということにあらう。数理的モデルそのものに内在した批判的研究に特有の意味があると言える。そして、数理的経済モデルの学習と実証（計量経済分析）と新たな傾向となっているカオスの経済分析のいずれもが経済学の教育には魅力をもっている。

教育的観点からも研究の見直しは求められているのである。

## 6. おわりに

科学史の視点から物理学理論の特徴とその形成・確立過程を、そして経済学研究の立場からは物理学的手法を取り入れようとする経済学の動向とその問題点をそれぞれ述べてきた。

物理学では、数理化は当然のことであるが、そこには定量的扱いを可能にする条件が備わっていることが必要である。物理学は、自然を原子の振る舞いで捉えることによってそれを可能にした。このことは、社会科学にも重要なヒントを与えるであろう。質的变化を量の変化によって表現できるような条件設定が鍵である。もっとも、近年の数学の動向にはトポロジーの利用による質の表現やカオス理論などの新しい手法が登場しているので、伝統的な数理的手法を乗り越えるようになることも考えられるが、それは今後の研究の進展によって確かめなければならない。

物理学の場合、たとえ数理化が行われるとしても、その際、常に現実の現象との比較吟味が行われている。ファラデーはまったく数学ができなかったが、彼の研究はきわめて独創的で大きな成果を生み出すことができた。そのファラデーの研究を一層押し進めたマクスウェルは、ファラデーとは対照的にきわめて数学的能力に優れていた。この2人が、ともに電磁気学分野のもっとも優れた研究を成し遂げたことは、物理研究の本質を考える上で重要なヒントを示すものである。

一方、経済学では、数理化はずいぶん行われているが、しかしそれが果たした長所は認めながら、数理化が自己目的化されている現状があることを指摘した。もっと実証的でなければならないのに、そうではない理論的現状は、物理学から見れば学術的に映る。もっとも物理学にもそのような状況が見られないことはないが、そうした理論は早晚信用を失うことは明らかである。理論は実証に支えられてこそ意味をもち、そのことによってすべての構成員を納得させることができる。客観性という条件は、現象そのものからの条件であるとともに、科学者集団内での社会的条件であるということが、科学的認識の基礎に横たわっていることを再確認すべきであろう。

我々の目的は、自然科学や社会科学を含めた、科学理論の教育はいかにあるべきかを検討するこ

とである。その困難性はいうまでもないが、文系理系両者をも統一的に把握しうる理論教育の一般原則を見いだすことができるのか、われわれにとって今後のもっとも重要な課題である。

### 【註】

- (1) 山本光雄訳編『初期ギリシャ哲学者断片集』岩波書店, 1958, p. 77. なお, 山本の訳は多少煩雑であるので, ここでは, M.R. Cohen and I.E. Drabkin, *A Source Book in Greek Science*, Harvard U.P., 1975, p. 548n1 にしたがって訳しておいた。
- (2) 湯川秀樹編『古典物理学』岩波講座現代物理学の基礎 1, 岩波書店, 1975, p. 89
- (3) ニュートン『プリンキピア』(河辺六男訳) 世界の名著26, 中央公論社, 1971, p. 561
- (4) 上記『プリンキピア』の河辺六男訳では, 仮説を「立てません」とされているが, ラテン語 *tingo* には「偽造する」という意味があるので, 「捏造する」と訳すのが正しいと言われる。cf. 渡辺正雄編『ニュートンの光と影』共立出版, 1982, pp. 120–123
- (5) ニュートン *op. cit.*, p. 565
- (6) ニュートン『光学』(田中一郎訳) 科学の名著6, 朝日出版社, 1981, p. 250
- (7) これらの論文は, 後に纏められた下記の論文集に収録されている。なお, 本稿でもマクスウェルの引用はすべてこの論文集からのものである。  
W. D. Niven ed., *The Scientific Papers of J. Clerk Maxwell*, 2 vols., Cambridge, 1890
- (8) J.C. Maxwell, *On Faraday's Lines of Force*, in *Scientific Papers*, Vol. I, p. 156
- (9) 広重徹『物理学史Ⅱ』培風館, 1968, p. 30
- (10) 岡本正志『19世紀後半における Maxwell 電磁理論の確立過程に関する研究』文部省科研費報告書, 1998
- (11) 小林道夫『科学哲学』産業図書, 1996, p. 37
- (12) Maxwell to Faraday, 1861.10.19. この邦訳は後藤憲一『ファラデーとマクスウェル』清水書院, 1993に収録されている。
- (13) Edmund T. Whittaker, *A History of the Theory of Aether and Electricity*, Thomas Nelson and Sons, 1951. 霜田光一他訳『エーテルと電気の歴史』下, 講談社, 1976, p. 366
- (14) Bruce J. Hunt, *The Maxwellians*, Cornell University Press, 1991, p. 158 なお, マクスウェリアンの活動を詳しく論じた日本語文献は岡本のものしかない。cf. 岡本正志(10)
- (15) 中山伊知郎『経済学一般理論』, 日本評論社, 1948
- (16) P.A. Samuelson, *Foundations of Economic Analysis*, 1947. 佐藤隆三訳『経済分析の基礎』勁草書房, 1967, p. 22
- (17) P.A. Samuelson, *ibid.*, p. 40
- (18) 城島国弘『経済学と物理学』多賀出版, 1988
- (19) H.A. Simon, "The Failure of Armchair Economics", *Challenge*, Nov./Dec. 1986, pp. 19–21
- (20) H.A. Simon, *ibid.*, p. 25

- (21) W.Leontief, "Why Economics Needs Input-Output Analysis", *Challenge*, Mar./Apr. 1985, p. 29
- (22) A. Eichner, *Why Economics is not yet a Science*, 1983. 百々和監訳『なぜ経済学は科学ではないのか』日本経済評論社, 1986
- (23) 経済学の隣接科学である経営学では, 例外的現象を含む現実そのものを類型化することが盛んである。



# The Structure of Scientific Theory and Scientific Recognition:

A Study on the Theoretical Subjects in Higher Education

Masashi OKAMOTO\* Toshihiro IWATA\*\*

It has been pointed out that we need the synthesis of natural sciences and social sciences, as C.P. Snow said in *The Two Cultures* in 1959. Although this point of view has recently been regarded as important in relation to environmental and STS (Science-Technology-Society) issues, theoretical subjects in higher education have been isolated from one another in Japan.

The authors started a project to develop the synthesis of theoretical subjects by extracting the common structure from natural sciences and social sciences. In the present paper, the structure of theory and the process of inquiry in physics, particularly J.C. Maxwell's ideas on electromagnetism, were discussed from a historical point of view, and critical analysis was made of research trends in economics, which tends to borrow mathematical methods from physics.

J.C. Maxwell's third paper on electromagnetism is usually regarded as full of mathematical analysis, after abandoning the dynamical model of electromagnetic fields. However, this is incorrect. His ideas are stated quite clearly in Part I of this paper. He used the models like cellular elastic body to set up equations. After his ideas were examined closely and compared with experimental proofs in Part I, they were analyzed mathematically in Part II.

A mathematical method is useful in economics as well as in physics, however research trends of economics lack actual proofs, while theories of physics are based on actual proofs to assure objectivity. Objectivity is an important condition in the respect that scientific recognition should be regarded as a collective recognition by scientists, because whenever the hypothesis is turned into theory, all of the members of the society of scientist have to be convinced of the truth of the theory.

---

\* Professor, Osaka Women's Junior College

\*\* Professor, Kansai University

