

# 物理学を事例的素材とした科学論の授業展開の可能性

佐野正博

## 1. はじめに

科学論は、物理学と異なり、社会的にいまだ十分に確立された学問分野とはなっていないし、標準的なカリキュラム内容があるわけでもない。科学論とはどのようなものであるべきなのかは、論者によって様々である。

そもそも自然科学に限ってもその中には物理学、化学、生物学、地学などといったように対象も内容も異なる様々な分野があるし、物理学、化学、生物学、地学それ自体もさらに細かな諸分野に分かれているので、「科学とは何であるのか？」という問題に答えることは極めて大変な作業である。

こうした問題は 20 世紀前半までは主として哲学者たちによって哲学的視点から抽象的に取り扱われてきた。そうした傾向が変化し始めたのは、1970～80 年代におけるクーン、ファイヤアーベント、ラカトシュらの科学論的研究によってである。そうした研究により、「科学史学や科学社会学によって明らかにされた経験的事実を基礎とした、科学についての理論的研究」という新しいスタイルの科学論が社会的認知を受けることとなった。

しかしながら、そうした意味での科学論は、学問分野として一定の制度的位置を占めるようになってはいるわけではいまだない。科学に関して哲学的立場から論じる科学哲学や、科学的な自然認識や自然像を概括的に論じる自然科学概論といった授業と比べて、科学に関する経験的事実を基礎とした理論的研究としての科学論の授業はあまり多くはない。

そこで本稿では、物理学を事例的素材として用いながらこうした意味での科学論の授業を展開する試みを紹介することで、筆者が期待する現代的科学論の授業のあり方を示すことにしたい。

## 2. 科学的測定における理論依存性の問題

現代的科学論の授業で最初に取り上げるべき問題は、科学における測定・実験・観察の理論依存性である。

一般的には、「自然に対する先入観抜きのあるままの観察」が科学理論の基礎を構成する、と考えられている。確かに先入観を持って自然を観察すると、先入観によって認識結果がゆがむ可能性がある。したがって「一切の先入観を排除してありのままに観察することが科学において極めて重要である」という主張には根拠がないわけではない。

しかし物理学における科学的な測定が、文字通りの意味で「一切の先入観を排除した何らの前提も持たない」行為であるとは単純には言えない。

ここではそのことを、可動コイル型電流計という電流の測定装置を例にとって説明しよう。可動コイル型電流計は、図 1 のような内部構造を持ち、回転コイルを流れる電流に対して永久磁石の磁界が及ぼす力のモーメントと回転バネの釣り合いを利用して電流の大きさを測定する装置である。

永久磁石がつくる磁場の大きさを  $B$ 、可動コイルの高さを  $h$ 、巻数を  $n$  とすると、可動

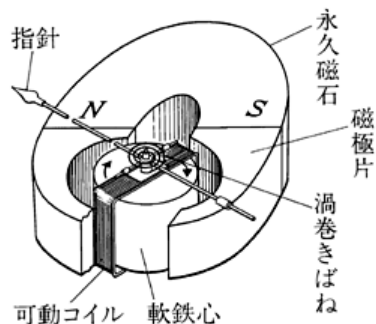


図1 可動コイル型電流計の内部構造

(『理化学辞典』第三版, 岩波書店, 1977年, p. 252)

コイルを流れる電流全体に磁場が及ぼす力の大きさは、フレミングの左手の法則  $F=BIL$  より、 $F=nBIh$  となる。可動コイルの直径を  $a$  とすると、渦巻きばねに働く力のモーメント  $N$  は、 $N=F \cdot a=nBIha$  となる。ここで渦巻きばねの弾性定数を  $k$  とすると、電流計の針の振れの角度が  $\theta$  の時に渦巻きばねがおよぼす力のモーメント  $N$  は  $k\theta$  になる。磁場がコイルの電流に及ぼす力による力のモーメントと、渦巻きばねの弾性力による力のモーメントがつりあったところで、電流計の針は静止する。したがって  $nBIha=k\theta$  となり、電流の大きさは  $I = \frac{k}{nBha} \theta$  となるので、針の振れの角度  $\theta$  を測定することで電流の大きさ  $I$  を測定することができる。

こうした意味で、可動コイル型電流計はフレミングの左手の法則  $F=BIL$  という理論に基づいて測定装置である。

物理学の分野で利用される様々な測定装置は、可動コイル型電流計に限らず、何らかの理論を前提として設計されたものである。

例えば、「セシウム133原子の基底状態の二つの超微細準位間の遷移に対応する放射の91億9263万1770周期の継続時間を1秒間とする原子時計という測定装置は、量子力学的理論に依存している。また電圧をジョセフソン効果によって、抵抗を量子ホール効果によって規定するという国際度量衡委員会の1988年勧告は、科学論的には電圧や抵抗の測定に際して量子力学的理論に依

存した測定装置を採用することを勧告したものと位置づけることができる。

測定装置や測定単位がこのように科学理論に依存して設計・規定されているという意味において、科学的な測定・実験・観察は科学理論に依存して遂行されている、ということになる。

### 3. 理論依存性に関するパラダイム論的理解

理論依存性という事実をどのようなものとして理解するのが、現代的科学論の授業で取り上げるべき基本的問題の一つである。

理論依存性に関する有力な見解の一つは、クーンのパラダイム論などのように、理論依存性(theory-dependence) という事実を理論負荷性(theory-ladenness)として解釈する考え方である。

この立場からは、理論依存性という事実を根拠として「理論が異なれば得られるデータも異なることになるので、ニュートン力学と相対性理論、ニュートン力学と量子力学などといった異なる理論間の優劣を、データを基礎として議論することは無意味だ」というような主張が展開されている。

科学論の授業において、こうした理論負荷性論を哲学的にではなく科学論的に議論し批判的検討を加えるためには、「理論が異なれば得られるデータも異なる」という主張や、理論の循環的自己正当化などの問題を物理学的事例を基に具体的に論じることが有用である。

本稿では、電流  $I$  に対して磁場  $B$  が及ぼす力を測定する図2のような構成の実験装置を例に取り、電流  $I$  に対して磁場  $B$  が及ぼす力の大きさに関する理論として  $F=BIL$  と  $F=BI^2L$  のどちらが正しいのかを検証する空想的実験という物理学的事例をもとに理論負荷性論の科学論的検討を行うことにしよう。

この場合のポイントは、 $F=BI^2L$  という空想的法則の実験的検証の際には電流計の目盛をその理論にしたがって書き直す必要がある、ということである。

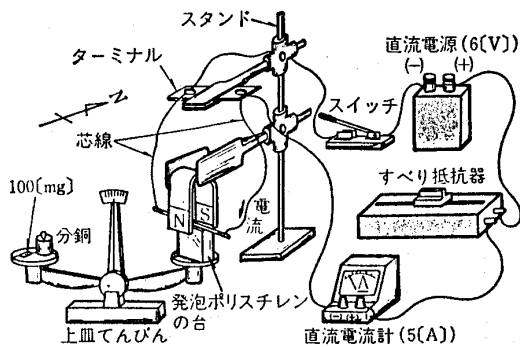


図2 磁界が電流に及ぼす力を測定する実験装置の例 (『高等学校 物理』三訂版, 清水書院, 1989年, p. 294)

$F=BIL$  に基づいて可動コイル型電流計を設計する場合には、 $F=BIL$  を前提とした通常の電流計に関する前述の議論から分かるように、電流の大きさ  $I$  と針の振れの角度  $\theta$  に関

$$\text{する新しい関係 } I = \sqrt{\frac{k\theta}{nBha}}$$

で電流計の目盛をつけ直す必要がある。

このように前提理論に対応して目盛をつけ直した電流計による測定値は、通常の電流計による測定値とは異なるものとなる。その結果として、図2のような構成の実験において  $\theta$  が  $I^2$  に比例することになり、 $F$  が  $I^2$  に比例することが「実験」的に示されることになる。

こうした空想的実験では、前提理論の異なりに応じて異なる測定データが得られることで、同一の実験行為が  $F=BIL$  と  $F=BI^2L$  のどちらの理論も正当化することになる。

#### 4. 理論の循環的正当化に関する批判的検討

理論負荷性論に関するさらなる科学論的検討において重要なのは、図2の実験装置に関して示した前述の循環的正当化がなぜ成立しているのかということの分析である。

図2の事例において循環的正当化が成立したのは、検証すべきフレミングの左手の法則それ自体が可動コイル型電流計の理論的設計に際して利用されているためである。

図2のような実験的構成においても、直流電流の大きさを測定する装置として、可動コイル型電流計のようにフレミングの左手の法則を利用した直流電流計ではなく、電流の理

論的定義  $I = \frac{dq}{dt}$  を利用した測定装置や、フレ

ミングの左手の法則とは関連のない理論的法則を利用した測定装置を用いれば循環的正当化は生じない。

科学的測定の理論依存性にも関わらず、フレミングの左手の法則の実験的検証に関しては、図2のような実験的構成においても循環的正当化を避けることが実際には可能である。

理論の実験的検証の際に、検証対象となっている理論それ自体を利用して設計された測定装置を用いなければ循環的正当化が生じることはない。

理論負荷性論者はこのことを認めた上で「フレミングの左手の法則のような派生的理論と、量子力学のようにすべての物体に関して普遍的に成立することが主張されているような普遍的な基本理論とでは事情が異なる。普遍的理論の場合にはそれをまったく利用しないような科学的測定装置は存在しない」ので第3節のような循環的正当化の構造が普遍的理論の場合には成立すると反論しているが、その主張に対する再反論には次節の議論や理論の重層的ネットワーク構造の議論などを物理学的事例を基に論じることが必要になる。

このように物理学的な事例分析を用いることで、理論負荷性論者の主張の主観的意図および基本的骨格を学生に対して興味深い形で科学論的に理解させることができるとともに、理論負荷性論に関する科学論的視点からの批判的検討が可能となるのである。

#### 5. 経験的なものとしての理論

##### ---- 先行理論を素材とした新理論の形成

理論依存性は「データに内在する理論的要素」という問題であった。これと対をなす「理論に内在する経験的要素」という問題が、理論とデータとの関係で現代的科学論において取り上げるべきもう一つの基本的問題である。

科学史学によって明らかにされた経験的事

実によれば、特殊相対性理論や量子力学の確立期に物理学者は数多くのデータの積み重ねから理論を形成するだけでなく、先行理論を一つの素材として新しい理論を形成している。特殊相対性理論や量子力学は、先行の科学理論を一つの基礎として形成されたのである。

特殊相対性理論は、真空中の光速が一定値になるというマクスウェル電磁気学の理論的帰結を利用して導き出されている。その当時はまだマクスウェル電磁気学の理論的内容が広く知られていたわけでもないこともあり、1905年の特殊相対性理論の第二論文の2番目の脚注でアインシュタインがわざわざ指摘しているように、第一論文で仮定した二つの要請のうちの一つ「光は真空中ではつねに一定の速さで伝播する」という要請は、電磁場に関するマクスウェル方程式から導出される波動方程式より光速  $c$  が真空の誘電率  $\epsilon_0$

と透磁率  $\mu_0$  という定数を用いて  $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$  になるというマクスウェル電磁気学の理論的帰結そのものに他ならない。(真空の誘電率  $\epsilon_0$  と透磁率  $\mu_0$  がどの座標系においても同一の値であるならば、どの座標系においても光速は一定であることになる。)

またシュレディンガーは、波動力学という形式での量子力学理論を提唱した1926年の固有値問題シリーズの4部作の中の2番目の論文において、アインシュタイン＝ド・ブロイの関係式  $E = h\nu$ ,  $p = hk$  を利用することで古典力学的波動方程式  $\nabla^2 \psi = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2}$  から出発して量子力学的波動方程式を理論的に導き出している。

このように新しい科学理論の形成プロセスにおいて、実験データとともに先行理論が一つの素材として利用されるということは、理論が経験的データを一般化したものとして経験的なものでもあることに由来するのである。

## 6. おわりに

科学の知的な意味におけるおもしろさは、実験・観察などを通して経験的レベルで感じることができるだけでなく、様々な現象に関する体系的で統一的な説明や様々な理論間の思いがけない結びつきなどを通して理論的レベルで理解することもできる。

例えば、気体分子の衝突による力積によって気体の圧力を説明する気体分子運動論は、ミクロのレベルにおける衝突とマクロのレベルにおける圧力とを理論的に結びつけるものとして興味深い。またそのことを光量子論と関連させて光圧を光子気体の衝突として説明する議論は、ハレー彗星などの尾が太陽から放射される光の圧力によって太陽の反対側に伸びるという現象の理論的説明としてさらに知的好奇心をくすぐることになる。

科学が経験的レベルだけでなく、このように理論的レベルにおいても知的におもしろいということは、科学という営みが、実験・観察・観測・測定といった「経験」的活動と、新しい理論の形成や経験的現象の理論的説明・解析などといった「理論」的活動との複合的活動であることを端的に示すものである。

もちろん経験的活動と理論的活動の複合という科学の特徴は、物理学分野における「実験屋」と「理論屋」という社会的分業にも示されているように一般にもよく知れている。

しかしながら、経験的活動が純粋に経験的なわけではなく、理論的活動が純粋に理論的なわけではないこと、そして、科学においてはデータと理論のそれぞれが経験的要素と理論的要素の両方を含み持った重層的なネットワーク構造を成していることには一般に注意があまり払われてはいない。

「科学とは何なのか？」を科学的に論じる科学論の授業においてこうした問題を具体的かつ批判的に検討することを通じて、科学の理論的要素と関連した知的おもしろさを論じるとともに、科学的なものを見方考え方を深めることができる、と筆者は考えている。