

## 新しい科学としての量子情報について

2001 年 1 月 18 日

名古屋大学名誉教授 豊田利幸

1999 年 2 月に開かれた当研究会で、私は「マクスウェルの歩んだ道」と題する講演を行い、その記録は数理解析研究所講究録 1142 に Notes on the life of Maxwell: Beyond the Classification of Physical Sciences の題で要約しておいた。今回は Maxwell 晩年の講演 Essay for the Eranus Club on Science and Free Will を紹介しつつ、私見を述べることにしたい。これは 1873 年 2 月 11 日に行われたもので、彼自身による正式の題名は

DOES THE PROGRESS OF PHYSICAL SCIENCE TEND TO GIVE ANY  
ADVANTAGE TO THE OPINION OF NECESSITY (OR DETERMINISM)  
OVER THAT OF CONTIGENCY OF EVENTS AND FREEDOM OF THE  
WILL?

というかなり長いものである。その講演の概要とエラヌス・クラブの性格については拙著『物理学とは何か』（岩波書店 2000 年）を参照されたい。念のために手許の Webster's Ninth New Collegiate Dictionary で contingency を引いてみると

1. likely but not certain to happen
2. not logically necessary
3. happening by chance or unforeseen causes
4. subject to chance or unseen effects determined by free choice

となっている。エディンバラ大学の学生時代にケトリーの『社会物理学』を読み、クラウジウスの論文の英訳（1859）を目にして直ちに書いた気体分子運動

論の論文から分かるように、彼は気体の分子運動がニュートンの運動理論とは全く異質で非決定論あるいは偶然性の本質にもとづくことを知悉していた。

私は上の3及び4で使われている“happening by chance”, “subject to chance determined by free choice” というコトバに大きな親近感を抱いてきた。実は Maxwell のその講演から丁度 100 年後の 1973 年 3 月 19 日に「古典力学の確率論的取り扱い」と題する小論が収録されている『古典力学Ⅱ』の第 1 版が「岩波講座現代物理学の基礎」の一巻として刊行された。さらに 1979 年 11 月には当時名古屋大学で同じ研究室にいた柏村昌平氏と共著で *An approach to Dynamical Description of Dissipative Systems* と題する論文を *Annals of Physics* に発表した[1]。その頃の私の研究状況については 1981 年 7 月に当研究所で開かれた「力学系の理論とその応用」を主題とする研究集会で報告し、同年 12 月発行の『数理解析研究所講究録 443』に収録されている。その小論の原題は「古典力学における数学的諸問題——物理学者の視点——」であったが発表の段階で「古典力学における解の一意性と安定性」に改めた。よく、Newton の運動方程式は因果律や決定論に強い指示を与えてきたが、1920 年代に建設された量子力学によって物理学の理論構成の大きな変革が行われ決定論に代わって確率論が脚光を浴びるようになった、といわれている。私自身もそう思い込んでいた。ところが上記研究会が開かれる少し前になって、量子力学の建設者の一人 Max Born (1882 – 1970) の晩年の著書の一冊 *Physics in my generation*, Pergamon, 1956 を偶然目にし、少なからぬ衝撃を受けた。今さらいいうまでもないことであるが、物理学では観測によって自然界から多くの情報を獲得し、できるだけ広い論理の枠組を用いて理論的に把握することが基本的である。この著書の中でボルンは直線状の有限の距離はなれた二点間で自由に運動している物体が両端で完全反射している場合をとりあげて次のように論じている。物体の運動を観測する

場合、初めの位置と速さの量的な測定が問題になるが、それらは当然誤差幅を持っている。時刻  $t=0$  のそれらの値を  $\Delta x_0$ ,  $\Delta v_0$  とすると、 $t$  秒後の位置は

$$\Delta x_0 + (v_0 + \Delta v_0)t = \Delta x_0 + v_0 t + \Delta v_0 t$$

であるから誤差幅  $\Delta v_0 t$  は時間と共に増大する。それが区間  $L$  の長さを越えれば、物体の位置は一意性を完全に失う。ボルンはこの簡単な例によって、観測ということを考えれば古典力学においてすら因果律は近似的にある範囲内ではか成立し得ないことを説得的に示した。

微視的世界と呼ばれている分子運動の振る舞いに初めて物理学の光をあてた Maxwell は決定論的な因果関係の代わりに確率論的多体問題の重要性を身をもって示した。それはやがて量子力学の誕生とともに微視的世界の論理として量子論理の世界へと繋がってゆく。すなわち、微視的世界から観測という手段によって巨視的世界で認識された情報相互の間に存在する新しい論理構造として、Boole 束とよばれる古典論理に代わって、より広く自由な直相補モジュラー束に我々の思考を拓げることを意味した。無限次元の場合は、さらに制限をゆるめた弱直相補モジュラー束となる。1973 年、私は、これらのモジュラー束の表現空間として複素ヒルベルト空間がなぜ必要になるかを *Necessity of Complex Hilbert Space for Quantum Mechanics* と題する論文で *Progress of Theoretical Physics* に発表した[2]。この事に関する詳細な議論は岩波講座現代物理学の基礎（第 2 版）『量子力学Ⅱ』の第 19 章にも書いておいたので参照されたい。これから察せられるように、私はかなり前から、Newton 力学は実際の世界の巨視的な近似を扱っているだけであること、しかも微分方程式も三体問題は厳密に解くことができず、非線形となると数値解法も困難を極めること、等から、Newton 力学よりもむしろ確率論的なアプローチに強い関心を持っていた。それは Newton 力学に代表される古典論理の枠組に入りきらない論理構造として量子論理に結

びついていったのである。

さて Maxwell はこのエラヌス講演の主目的を当時の哲学者あるいは形而上学者の啓蒙におき、まず彼らに最近の物理的科学的進歩を具体的に限られた時間ながら懇切に説明し、従来の哲学者の方法とアイディアが物理的なアイディアによってどう修正されるべきか、かれらに理解できるように真剣に努力した。前掲の拙著『物理学とは何か』の p.156-157 にその部分の拙訳を載せてあるのでそれらを参照して頂ければ幸いである。ここでは Maxwell が一人でも多くの人に知ってもらいたいと思っていたことに論点を絞って話しを進めることにしよう。

まず最初に掲げた講演の題目に使われている THE CONTIGENCY OF EVENTS AND FREEDOM OF THE WILL についてであるが、前出の拙著では「事象の偶然性と意思の自由」と訳している。これと対照的なのは「必然性あるいは決定論」で、Newton 力学の金科玉条とされていたものである。そして人々はこれを動力的 (Dynamical) と呼び、前者を統計的 (Statistical) と呼んで新しい物理的科学的性格づけている。これはそれから半世紀後に誕生する量子情報の時代を予見していたというより、ガリレオによって切り開かれた新しい科学の出発点を再確認したものというべきかもしれない。ここで念のため注意しておくならば、Maxwell は動力的物理を統計的物理と並列して扱っているのではなく、前者は古い現象論に過ぎず、新しい科学は統計的物理であると明言している。

この講演で Maxwell がわかりやすく、そしてあくまでも自然の真実に即して説明しようとしたのは、「分子科学」 (Molecular Science) こそが新しい科学であり、「決定論」 (Determinism) である Newton 力学と、「統計力学」である「分子科学」の間には決定的相違があるということであった。そのさい彼は

多くの個々の人間による観察の決定的な重要性を強調するとともに、形而上学的推理を厳しく拒否した。こうして彼は、われわれの生活における偶然性が大きな役割を果たす自由意志の重大な意義を明らかにしたのである。

今日われわれは主として教育上の便宜から、物理的世界を巨視的世界と微視的世界に分類して扱っている。しかし、自然を観察しその性質について考える一人の人間をきれぎれに分割することはできない。同様に科学は部分部分に分離して扱われるべきではない。いいかえれば科学は一つなのである (Science is one)。

[1] T. Toyoda and S. Kashiwamura, *Annals of Physics*, Vol. 123, No. 1, 1979.

[2] T. Toyoda, *Progress of Theoretical Physics*, Vol. 49, No. 3, 707-713, 1973.