

# 電子の描像

## ——化学指導法の改善（Ⅱ）——

柏原 林造

化学反応で中心的な役目を果たす電子の挙動は複雑である。電子は1897年のJ.J.Thomsonの発見以来、多くのことが解明された。また、逆に電子の研究から新しい理論が生まれ、その結果から電子の新しい様相が生じた。電子が化学反応で扱われる時は、様々な状態におかれる。このような様々な状態の電子ではなく、電子1つ1つの実体について、歴史的経過を踏まえながら、振り返った。電子の実体は量子力学的な存在で、粒子性と波動性を兼ねそなえているという表現は比喩的に考えなければ理解しにくい。一方、チャッターベバークングという複雑な動きをしていることが知られており、イメージとしては理解しやすい。

### 1. はじめに

化学反応や物質の性質を支配するものは電子である。しかし、電子の実体は大変複雑である。電子は、負の単位電荷を帯びた、質量の非常に小さい粒子であると、単純には理解できる。しかし、電子は種々の様相を示す。その電子の実体は、歴史とともに変っている。また、電子は種々の状態で異なる働きを示す。自由電子、価電子、 $\pi$ 電子、フロンティア電子……等々、いろいろな形容詞を冠して呼ばれる電子は、同じ電子でありながら役割や状態が異なる。本稿ではこのような役割・状態には触れず、電子1つ1つの実体について、歴史的な経緯を振り返ってみた。

### 2. 電子の発見

電子は1897年イギリスの科学者J.J.Thomsonによって発見された。<sup>1)</sup>これは比電荷の測定から、質量が水素の1000分の1で、負の電荷をもつ微粒子が、陰極線の正体であると決定したということである。

これを報じる論文はJ.J.Thomsonによって“Cathode Rays”と題してPhilosophical Magazine誌に発表された。(5), 44, 293~316 (1897)。この論文は邦訳されていて物理学古典論文叢書<sup>2)</sup>に収められている。電子の発見に該当するところを遠藤真治氏の訳文により引用する。

「 $m/e$ の値は気体の性質には無関係であること、およびその値 $10^{-7}$ は今まで知られていたこの値の最小値で電解の際の水素イオンの値である $10^{-4}$ とくらべて極めて小さいことがわかる。」p.20

「もし、陰極付近の極めて強い電場の中で気体分子が分解されて、ふつうの化学的原子にではなく、この原初的原子（簡単のためにこれを微粒子 corpuscle と呼ぶことにしよう）に分かれるならば、そしてもし、これらの微粒子が荷電されていて電場によって陰極から投げ出されるならば、それらは正しく陰極線と同様の振舞いをするだろう。（中略）この見地によれば、陰極線中にはある新しい状態の物質が存在することになる。普通の気体状態におけるよりもずっと物質の細分割の進んだ状態であり、すべての物質、つまり水素とか酸素とかの互いに異なった材料から得られる物質がすべて同一種類のものになってしまう状態である。この新しい状態における物質はすべての化

学元素を形成するための材料である。」 p.22

このように、電子が発見されたといっても、いかにもその実体は漠然としたものであった。電子の電荷が、水素原子の電荷と同じ大きさのものであると報告されるのは、それから2年後のことである。

J.J.Thomson は、同じ Philosophical Magazine 誌に、“On the Masses of the Ions in Gases at Low Pressures” と題する論文を報告した。(5), 48, 547~567 (1899) .

「実験は、低圧気体中における負の電荷は、きわめて種々の異なった方法によって生じるかもしれないが、一定の大きさを持っている個々の単位から成っているということを示している；この負の電荷の大きさは約  $6 \times 10^{-10}$  静電単位であり、溶液の電解の際の水素原子によって運ばれる正の電荷に等しい。低圧気体では、負電荷のこれらの1個1個は一定質量の担体といつも結びついている。この質量は非常に小さくて、これまでに単独に存在できるものとして、見いだされた最小の質量であり、水素イオンの質量の約  $1.4 \times 10^{-3}$  にしかならない。このような負の帯電が生ずることは、質量が1個の原子の質量よりも小さい何かあるものがそのさい原子の集まりから分離されるので、原子の分裂を意味している。」 (同古典叢書 p.119より。齊藤幸江氏訳)

このような事情を広重徹氏は「“電子の発見” は、したがって、1897年における瞬間的なできごとではなく、1899~1900年にいたって完成する1つの歴史だったのである。」と記している。(同古典叢書 p.131の解説)

これが、現在のわれわれがもっている最も素朴な電子のイメージを与える端緒となった業績の一端である。もちろん、ここに至るまでには、非常に長い科学者たちの努力があったのであるが、結論的には、上記のような経緯で、電子というものの実体が明らかになった。すなわち、負の単位電荷をもった微小な粒子である、という解釈である。

その後の、R.A.Millikan の電荷の精密測定 (1909~1913) などを経て、現在では、電子は静止質量  $m_e = 9.1093897 \times 10^{-31}$  kg、電気素量  $e = 1.60217733 \times 10^{-19}$  Cということが知られている。

### 3. 量子論まで

電子が発見されたからといって、すぐに原子の構造があきらかになったのではなかった。電子が原子の中でどのように存在するかということは、電子の発見者 J.J.Thomson ですら、原子の内部に負の電荷を帯びた電子が分布すると考えており、現在のような原子核の周囲に電子が存在するという原子構造論が確立されるには、E.Rutherford (1911) の出現を待つ必要があった。長岡半太郎が提案した土星型原子模型 (1903) は、直接 E.Rutherford に影響は与えていないといふものの、E.Rutherford に先立つものであった。その後の原子構造論は中性子の発見 (1932)、中間子論 (1935) などを経て、現在の素粒子物理学へとつながる。その間、電子そのものの実体が変わらなかったかということ、そうではなく、大きな変革をせまらるのであった。それはまた、20世紀の科学革命の中心であった量子論の原因でもあり、結果でもあった。

N.Bohr の提唱した原子構造論 (1931) は、その後の物理学の流れを変えた画期的のものであった。電子のとり得る状態についての大変革であり、原子構造についての考え方の根底を変えたものであ

った。しかし、この理論は電子の状態についての理論であり、本稿ではこれ以上 Bohr 理論に深入りしない。

しかし、電子の実体に根底的変革をせまった L.De Broglie の電子の波動説 (1924) が、前期量子論時代の最盛期に出現したことを忘れてはならない。現在のわれわれが、いつも電子の実体として悩む、「粒子か波動か?」という問題も、すべてがこの L.De Broglie の波動説に起因する。その波動説の由来を L.De Broglie は次のように述べている。

「光に対して波動説及び粒子説という二つの相矛盾する理論を認容しなければならない必要、電子が古典思想に従って原子の内部で取ることの出来る無限に多くの運動のうちでなぜある運動だけが可能であるかを理解することの不可能性、これが丁度私が理論物理学の研究を再び始めた頃物理学者に提出されていた謎である。

私がこれらの困難について考え始めた時に、主として二つのことが私の注意を惹いた。一つは光量子説であって、これは光の粒子のエネルギーを  $W = h\nu$  (但し  $\nu$  は振動数) という式をもって定義しているから、満足な説とは見なすことが出来ない。ところで純粋な粒子説は振動数を定義する要素を一つも含んでいない。この理由だけから考えても、光の場合には粒子の観念と周期性の観念とを同時に導入しなければならない。

もう一つは、原子内部における電子の安定な運動を決定するために整数を入れなければならないということである。今までのところ物理学において整数が入って来る現象は干渉及び固有振動の現象であった。それが私に、電子もやはり単なる粒子として思い浮かべることが出来ないもので、これにも同様に周期性を認めなければならないということを思い付かせた。

そこで私は自分の研究を指導するものとして次のような一般的思想に到達した。物質に対しても輻射線、特に光に対しても粒子の概念と波の概念とを同時に導入する必要がある。他の言葉で言うと両方の場合において波を伴う粒子の存在を認めなければならない。しかし粒子と波とは互いに独立であるわけにはゆかず、ボーアの言葉を使うと実在の補足的な二つの面を構成するものであるから、粒子の運動とそれに結びついた波の伝播との間にある平行関係を設けることが出来なければならない。そこでまず到達すべき目的はこの対応関係を打ち立てることであった。

それには私は最も単純な場合、言い換えると孤立した粒子すなわちあらゆる外界の作用を免れている粒子の場合を考えることにした。その粒子に一つの波を結びつけようというのである。」<sup>31</sup>  
L.De Broglie によって提唱された電子の波動説は、ただちに実験的に証明される (1927) とともに、E.Schrödinger によって波動方程式という形で定式化された (1926)。

#### 4. 粒子性と波動性

かくして、点電荷として電子は粒子と考えられていたものが、粒子であると同時に波動性すらも付加された。これはかつて光が17世紀以来、粒子説と波動説とで対立していたことと、様子はいささか異なる。光についてはどちらか一方に決着をつけようという対立であった。結果としては A.Einstein の光電効果の理論 (1905) により、両方の性質を兼ね備えていることが定着した。このような経緯もあって、電子の場合には、粒子説と波動説が対立するというのではなく、両義性を

どう解釈するかということが、はじめから問題となっていたのである。

粒子であり、波のようなものという、我々は砂丘や海岸で波状に分布した砂粒を見ることができから、このようなものかと思いがちである。しかし、ここでいう波動性というのは、電子の集団のことではないということに留意したい。「電子波は1個1個の電子に伴うものであって、電子ひとつだけについても波の干渉ということを書いてよいのである。」<sup>4)</sup>

それは、電子のもつ本来の特性として備わっているものであるから、もはや回避できないものである。しかし、そうだからといって、粒子性と波動性の両義性が簡単に受け入れられるものではないことは、次のような表現に出会えば、いっそう明らかになる。

「光量子の位置を正確に測定しようとする」と波動性が現われ、「運動量を正確に測定しよう」と粒子性が現われる。」<sup>5)</sup>

これは不確定性原理を説明する文章の一部であり、光量子を電子と置き換えても同じことである。

N.Bohr は不確定性原理から帰結される2種の観測のこのような関係を「相補性」と呼んだ。先に引用したL.De Broglieの「ボーアの言葉を使うと実在の補足的な二つの面」というのはこういうことである。

しからば、我々は、電子というものは微小な粒子であるが、同時に波動としての性質をもったものだ、と表現することができるとともに、電子はあるときは波動でありあるときは粒子であると表現してもいいことになる。「同時に」ということと、「あるときは」というのは、まったくあい異なることである。しかし、電子については、このような両方の表現がなされている。

この両義性の困難については、次のような説明がわかりやすい。

「実際質点と呼ばれる体系が目に見えないほど小さいか、または古典的な記述を許すほど定常的でないならば、粒子の普通の性質を決して示さないであろう。本質的な観測可能性に限界があるため粒子の概念は物理的意味を失うにいたる。この事情を誤解することによって、2元論、すなわち電子のような物理の究極の本体は粒子であるとともに波であるというような奇怪な概念が量子力学からみちびかれるという主張がおこったりする。この本体は粒子でもなければ波でもなくもっと抽象的なものであって、その記述には量子力学がもっとも簡単ですぐれた規則を与えるというのが正しい主張である。(中略)

このような基本的な事情にもかかわらず以後粒子とか波とかいう言葉を用いることを少しも禁じない。それどころか電子を素粒子の1つだとよぶような一般的な使用を守るであろう。しかしもちろんこれはただ習慣として用いるだけのことである。したがって何か矛盾がおこったときには、「古典的な言葉」を原子的本体に用いるのはただ比喩として用いるのであるということをおこして解決するように努力されたい。」<sup>6)</sup>

すなわち「粒子」とか「波動」というのが古典物理学的用語であり、電子そのものが量子力学的存在であるということである。

## 5. チッターベベーグング

電子の本体は粒子性と波動性に終わらずさらに複雑な動きがあることが明らかになった。1928年、

P.A.M.Dirac は相対論を満足する電子の波動方程式を作った。(Dirac 方程式とか、相対論的量子力学とか呼ばれるものである)。それから得られる電子の速度を表す演算子が  $c \alpha$  となる。 $\alpha = \pm 1$  で、結局電子の速度が光速度  $c$  として得られた。

「電子は瞬間的に光速度で運動していることになる。この運動を “Zitterbewegung” という」<sup>7)</sup>

「Dirac 電子がこの種の複雑な軌道運動をもつことは1930年に E.Schrödinger によってはじめて指摘され、今日それはチッターベベグング (Zitterbewegung あるいは dancing motion) と呼ばれている。」<sup>8)</sup>

このような瞬間的には光速度で、向きがふらふら変るような運動をチッターベベグングという。

この運動は、測定されたものや仮定されたものではなく、相対論的量子力学の結果である。この Dirac 方程式から陽電子が予言され、後に観測された (1932) ように、その正当性は一応立証されている。したがって、この運動もその方程式から帰結されたものであり、受け入れられる。

複雑な運動であり、結局は数式の解釈ということになるのであるが、言葉の使用法からみてもはるかに理解しやすい概念である。「電子とはどんなものか?」という説明を中学生や高校生に求められたとき、粒子性や波動性を言うよりも、光速度で向きを変えながら動いているということを行ったほうが理解しやすいと考えられる。

かくして、粒子である電子に波動性を付加することによって波動方程式が得られ、さらに相対論を適用することによって Dirac 方程式が導かれた。その結果の1つがチッターベベグングである。すなわち、電子の実体は量子力学を生み、それからまた電子の実体が新しい様相で生じたのである。

## 6. おわりに

「電子の発見」の歴史でもなく、「原子の構造」の歴史でもなく、ただ、電子の実体をどのように思い描いたらいいのか、という視点で、歴史的な面にも配慮しつつ述べた。

化学で重要な役割を果たす電子について抽象的なイメージしか抱けないとしたら、化学はますます抽象的なものになってしまう。電子の実体をイメージするとき、粒子性と波動性には深入りせず、チッターベベグングのほうを考えたほうがわかりやすい。

それでは、電子のことはこれですべてよくわかるのかというと、そうではない。電子には様々な状態があり、種々の働きをする。自由電子、価電子、 $\pi$  電子、フロンティア電子などいろいろな状態の電子が存在する。同じ電子でありながら、働きが異なるのである。しかし、本稿ではただ電子の実体ということのみを考え、これらについては触れなかった。N.Bohr の原子構造論についても同様である。

## 7. 参考文献

- 1) J.P.トムソン著、伏見康治訳、“J.J.トムソン”，河出書房新社(1969)
- 2) 物理学史研究刊行会編，“物理学古典論文叢書 8”，東海大学出版会(1969)
- 3) ルイ・ド・ブロイ著、河野与一訳，“物質と光 (岩波文庫)”，岩波書店(1972)，p.173
- 4) 湯川秀樹，井上健“量子力学”，岩波書店(1955)，p.4

- 5) 原田義也, “量子化学”, 裳華房(1978), p.77
- 6) マジナウ, マーフィー著, 佐藤, 国宗訳, “物理と化学のための数学Ⅱ”, 共立出版(1961), p.365
- 7) 朝永振一郎他, “場の量子論”, 岩波書店(1955), p.43
- 8) 湯川秀樹他, “量子力学Ⅱ”, 岩波書店(1972), p.161