

ファラデー及びマクスウェルに依る物理学の変革

——昭和十六年九月十九日ファラデー・マックスウェル記念会に於ける講演——

桑木彥雄

Faraday の Experimental Researches in Electricity と題する二冊の書は、彼が一八三一年から一八五二年までロンドン Royal Society の Philosophical Transactions に此書と同じ表題の下に唯だそれに発表順に First Series, Second Series 等の番号を附して掲載した論文三十篇と、其他、以上に先だつ一八一二年以来 Annals of Philosophy, Philosophical Magazine, Proceedings of the Royal Institution 等の雑誌に掲載した電気学上の論文とを集めたものである。此書第三冊の出版が一八五五年で、彼は一八六七年に七十七歳で歿したのであるから、此書の出版以後に Phil. Mag. 等に掲載したものもあり、又晩年の講演や書簡並に談話等の重要視せられるものもあるが、一八三一年の電磁感応を初めとする彼れの著名なる電気学上の発見は凡て上記の書中 Transactions より転載のものの中に見出される。既記のように是等の論文の各篇が番号を追うているが、又各篇中の各パラグラフにも第一篇以下凡てに通じた番号があり、最終三三六二に及んでいる。一パラグラフの長さは二三行のもあり、一頁位のもあるが、W. Ostwald 等の著 Grosse Männer (5. Aufl., 1919) の中に、ファラデーが一八三一年から一八五〇年頃、即ちその四十歳から六十歳頃までに年々幾何パラグラフを書いたかを計算し、初めの十年間には毎年平均二三百パラグラフを書いていたが、五十代の初めに数年の休養期があり、其後一八

五五年五十五歳で所謂第二の研究大時期に入り、磁気と光との相関の発見等があるが、其後は発表の分量漸次減少し質的にも空想的部分多きこと等を述べている。誰も知るように、ファラデーの論文は、Royal Institutionの実験室に於ける彼れの研究実験の有^{あり}の儘^{まま}の記録と云われ、実験結果の有無を問わず発表せられてある。後には無結果の報告は「Transactions」に掲載を止めたと云われるが、一八五〇年「Transactions」に出でた、第二十四篇「重力と電気との可能の關係に就て」と題せる論文など、先ず実験の準備、装置、精密度等を詳細に記述し、初めに実験を良導体に試み、次に不良導体に、更に絶縁体に試みて、結局斯^か様の方法では何等^{なんら}問題の關係を見出し得なかつたと記載して一篇を成している如きものもある。是等に依つて或はファラデーの論文は単に日記体に雑然と書下されたものである如き感も与えられるが、Maxwellの評に、ファラデーは電磁感応の発見の場合にも、磁気と光との關係の発見のときにも、最初の発見から発表されるまでに夫々^{それぞれ}三箇月を費し、その発表の結果は全く後人の補正の餘地なきまでに完成されていると云つてある。ファラデーの細心の用意を見るべく、又無結果の実験の記載の場合、例えば上記の電気と重力との關係を求むる実験に於ても、結論に於て、実験は不成功であつたが、上記の關係の實在については疑わなことを記してあるように、凡^{すべ}ての論文に於て研究の意図、過程が詳記してあるから、彼が発見に導かれた経路が明らかであり、従来多くの実験的発見の中には偶然の発見と称せられるものも少くないが、ファラデーの場合には前述の理由により然^{しか}か称することが常に殆ど不可能で、凡^{すべ}てが或る理想から必然的に導出されたと思られる。例えば、彼れの電磁感応の発見は一八二〇年の Oersted の発見（偶然的と称せられる）に次いで其逆に、「磁気より電気を造る」ということ、又静電感応に類推した電流感応の有無を試みたことによりて自ら導かれた如き其一証である。

然^{しか}しながらファラデーには常に意識せられつつあつた尚^{なほ}一層抽象的な理想があつて、それを実証しようと

して次々に試みた結果に或は成功したものもあり又不成功に終わったものもあつたが、彼れの実験記録の全部はこれらの理想実現のための所謂「悪戦苦闘」のドキュメントであつたと見られないでもないようである。

Bence Jones の *Life and Letters of M. Faraday* にファラデーが二十代の時分に物質並に力に関し或る空想を述べていることが記されてあるが、其後の *Exp. Res.* 三冊、又晩年の *Juvenile Lectures* の *Sir W. Crookes* が編纂したものなどを通じて、ファラデーが物質や力に関する根本的の考に終始一貫したものがあつたことが容易に知られ、その考が彼れの一生の研究を支配したと見られるのである。即ち夫等は第一に自然界の凡ての力は皆一元的であるということ、即ち電気力、磁力、重力、分子力、その他、熱、光に関する物理的な力は皆相互に關係があり、甲の力より乙の力へ轉換も出来、互に *identical* であり *common origin* であるということ、第二にはこれらの力が一物体から他物体へ伝達するのは中間物を媒介とし、直接作用でないということであり、以上の二つが自ら *conviction* となり、彼に避け得られない考となつたといふこと、*Exp. Res.* の随所に見出されるのである。

又以上と關聯した彼れの物質觀があつた。物質と力との概念は二元的であるか、又は一元的ならば物質が主か力が主かという稍形而上学的な問題に、ファラデーは力一元説をとり、物質原子についても之を一の球状体と考ふる如き当時普通の説に賛同せず、*Boscovich* と同様に、原子を力の中心と見、然かも夫等の力は中間作用に依る、所謂力線に依るものとするのであるから、ボスコヴィッチが直接作用の中心とする説に於て、広がりなき中心点の惰性（質量）を如何にするか等の問題を生ずることを避け得、二つの原子が重なり合ひ、又は隣り合うことを、二つの波の重なり合うことに比喩した場所さえある。

十八世紀時代には物質を *substance* とする外に熱に *caloric*、光に *corpuscle*、電気磁気にも夫々 *substance* た

る流動体を考えていたが、十九世紀に入り、波動説エネルギー論が corpuscle 及び caloric の説に代わり、電磁気流動説に代わってファラデーの力線説出でたが、一八八一年今より恰も五十年前に Helmholtz がロンドンでファラデー記念演説をなした中に、ファラデーの電気分解の法則は、物質原子の荷う電氣量に陰陽二種の最小量があることを示すから寧ろ電氣を二元的な substance と考え陰陽二種の電氣原子から成ると考えた方が適切であると述べた。この考は二十世紀初頭に於ける電子論の根本概念と一致するから、ヘルムホルツは電子論の魁をなしたと云われる。併しここに電氣を實質的に見た考方は、中間作用説を徹底せしむれば不用となるが、ヘルムホルツは極微距離に於ける直接作用を肯定していたのである。現在の理論で、電子等は場の特異位置となり又は波動となるのであるから、ファラデーのもとの考が今に生きていと云えるであろう。

ファラデーが力に関する根本的な考方の二つの中第一の、自然界の種々の力は結局同一源であるという考に就ては一八四五年の有名な「光線のマグネつけと磁力線の輝き」の論文の初頭にも記してあるが、一八三一年の電磁感応の発見が電氣力と磁氣力との同一源であることの豫想より出発し、又之に続いて静電氣、ヴォルタ電氣、動物電氣の同一なることを示す実験、磁性の普遍なることの実験、又既記重力と電氣と相関の実験、又一八六二年彼れの最後の研究と云われるスペクトルと磁氣の相関の実験等皆同様の conviction より出たことを待たない。又自然界の力は結局一元的で相互に転換も出来るが、其場合に力の創造も消滅もあり得ないと云つてある。ファラデーは force or power と称する。当時 Volta 電池の起電力に就て単なる接触作用とする説と化学作用に依るとする説と二説が並び主張されたが、ファラデーは化学作用説を賛し、若し単なる接触によるもので化学作用の如き何等かの消耗によつて電氣を生ずるのでないならば、それによつて不斷運動を生ずるから其説は不合理であると論じた。それが一八四〇年であるから Joule, Mayer 及びヘルムホル

ツに数年を先んじてエネルギー不滅則の考に到達したと云われている。周知のように此原則は初め「力の不滅則」と称せられファラデーも後に屢々之しばしばに就て述べたが、Exp. Res. 第三卷の On some points of magnetic philosophy の中に、並に Phil. Mag. 1857 に載せた彼れの On the conservation of force と題した論文の中に、重力が距離の自乗に逆比例して増減するならば、力が不生不滅であるとする此原則に背くと述べてある。ファラデーの此説には誰も諒解に苦しむべく、Phil. Mag. 1858 にウィーンの Prof. Brücke の駁論があるが、ファラデーが之に對するマクスウェルの注意に答えて自分のいう力とは the source or sources of all possible actions of the particles or materials of the universe である、用語の相違を辯じしめぬ。

自然界の力が凡て同一根元に基くということには、実験的証拠もあり、又之により演繹した「力の不生不滅」の概念は物質不滅の概念と共に当時の学者に自ら共通の考とも解され、ファラデーの如上の考は容易に学界に受入れられたが、他の、力の伝達は中間作用に依るといふ考方は當時に於て全くファラデーにのみ独自であつた考方であり、マクスウェルが一八五五年に On Faraday's lines of force の論文を書いたまではファラデーの此説の積極的支持者は学界に一人もなかつた。或は電磁感應其他のファラデーの発見は偶然的にても他の人によりて発見せられることもあり得たであろうが、中間作用の説はファラデーに依らなければ起り得なかつたであろうとも云い得べきことは当時の学界の趨勢が之を示すのである。

ギリシャの分子論者が真空と分子とを考えたのに対し、アリストテレスは真空を否定し、物質の連続説を主張し、近世デカルトも真空の否定に於てはアリストテレスと同じく、空間に充滿する稀薄物質の仮定によりて天体運動を説明し、同様一の間物は Huygens に依りて光の説明に用いられたが、ニュートンの万有引力論が当時デカルト派より機械論から中世スコラ派の性質論に逆転するものとして非難されたに拘らず、や

がて引力論を基とする数学の応用の発達と共に引力という真空空間を透す直接作用説が真なるものと認められ、少くもそれ以上の仮説が不用とせられた。琥珀が塵を吸い、磁石が鉄を吸う現象は夙く観察せられ、中世時代の記述には之等を混同するものもあつたが、Gilbert 以後之等を *electrocity*、*magnetism* として別種の現象とし、デカルト時代此の如き作用を夫等の物体の特殊の雰囲氣に依るものとも見たが、やがて十八世紀後半に、電気磁氣に夫々二種又は一種の流動体を仮想する説あり、クーロンの法則見出されるに至つて万有引力論に應用された数学の結果は殆ど其儘電気にも引用された。一八二〇年のエールステッドの発見した現象は従来の引斥の作用以外の廻転作用であつたために、却て前述の「雰囲氣」説の復活を思ふものもあつたが、一八三一年のアンペヤの研究により、微小電流の直接作用によりて凡てが説明され、之に基いた Weber, Gauss, Riemann, Clausius, Neumann 等の研究は一八五〇年代まで続いていた。一八三五年の Hamilton の有名な力学論文の初めには凡ての自然力は結局ニュートン流義の中心力に帰すべきことを述べてある。

かよのうの学界の趨勢の中に在つてファラデーは一八三一年の電磁感応発見の論文に於て既に *magnetic lines of force* の概念を導き、続つて *electric lines of force* を導入し、力の伝達はこれらの曲線に沿うとし、質的にも量的にも空間に描かれた力線に依つて電磁の諸現象を説明し、その力線の振動が光の輻射に相当することを述ぶるに至つた。今日は等の論文を読むことは必しも至難でなく、ファラデーの種々の洞察に愉快を感じるが、一八五〇年代には Sir G. B. Airy の如き卓れた学者がファラデーの実験の天才に敬意を表しつつも、ファラデーの力線論が如何に迂遠で且つ誤謬に富み、之に反して直接作用論が如何に簡單であり明瞭であるかを云い、又ヘルムホルツは、前記のファラデー講演に於て、往時屢々力線説の理解につとめて然かも遂に絶望したと述べてあり、一般に学界の所謂正統派では、ファラデーが当時の通説に反し晦澁なる理論を編んだの

は、ファラデー自身が正当なる教育を受けなかったのに原因すると解釈せられ、其説は顧みられなかった。かような時代に突如一八五五年に当時ケンブリッジを出たばかりの二十五歳の青年学者 J. Clark Maxwell が Exp. Res. の諸論文を耽読し、又 Tait の注意で一八四二年の W. Thomson (Lord Kelvin) の熱の流動と引力論との公式間の類推に関する論文にヒントを得て、On Faraday's lines of force なる論文を草し、初めてファラデーの力線を数学的力学的に表出した。ファラデーは自己の考が数学化されたことを意外の喜としたと云うが、続いてマクスウェルは一八六一年に On physical lines of force を発表し、其中に初めて所謂電磁場のマクスウェル方程式を導出し、一八六四年に A dynamical theory of electromagnetic field の論文に於て光の電磁論を唱え、この論文に依つて初めて英のみならず、独仏の学者の注意を引き、一八七四年マクスウェルは有名な Treatise を書き、一八七九年四十九歳で死んだが、一八八八年 Hertz の実験により、これらの理論が一般に認められるに至った。上記のマクスウェルの三論文の初めの二つは Ostwald's Klassiker の中に Boltzmann の訳並に註がある。其中にマクスウェルが既に一八五五年に、一八七〇年以後 Mach 及び Kirchhoff によつて物理学界に導入された認識論的見解を明らかに叙述してあると強調した一節もある。其他マクスウェルの三論文及び Treatise に関する Kommentar の文献の数は極めて多い。今夫等それらに就て詳述し得ないが、ファラデーの磁気並に電気の力線の考、マクスウェルの導いた種々の力学的説明等は後に或は変更され又は抛棄されたが、ファラデーとマクスウェルとの自らなる協力によつて此の如き理論の創成が物理学史に一大時期を劃し、物理学理論の構成に一大変革を与えた諸般の意義の根本的なものとしては、既述のように、凡てすべての自然力は一元的であるということ、並に力の伝達は中間作用に依るといふことがかなり広汎の程度に於て実証せられたというに在ると云い得べく、就中理論の特異性は後者、中間作用説に在り、ファラデー、マクスウェルが与

えた是等の根本的な考方の転向に依つて初めて物理学の其後の発達、電子論、相對論、統一的場の理論を導き得たことは多言を要しないのである。マクスウェルには又物理学に確率論の応用を導入したという大きな仕事があるが茲にはその詳説を省略する。Einsteinのベルリン市内の佳居はアパートの五階に在り、その書齋は所謂 Dachstube 屋根裏で、何等の裝飾なく書棚もなく、傍らに助手の机があるばかり位であるが、壁間に三個の額があり、ファラデーとマクスウェルと Schopenhauer との肖像であるという。物理学者としてファラデーとマクスウェルとを選んであることは恐らく二人の特に獨創的であつたことに依つたのであらうと思われる。

(日本数学物理学会誌第五卷第三号)

- 桑木或雄著『科学史考』（河出書房、昭和一九年）所収。
- 読みやすさのために、旧漢字は新漢字に、旧かなは新かなに変更し、適宜振り仮名をつけた。ただし、「堯」、「儘」などの一部の漢字は旧漢字のままにした。
- PDF化にはL^AT_EX 2_εでタイプセッティングを行い、dvipdfmxを使用した。

科学の古典文献の電子図書館「科学図書館」

<http://www.cam.hi-ho.ne.jp/munehiro/sciencelib.html>

「科学図書館」に新しく収録した文献の案内、その他「科学図書館」に関する意見などは、
「科学図書館掲示板」

<http://6325.teacup.com/munehiroumeda/bbs>

を御覧いただくか、書き込みください。