

マクスウェルからアインシュタインへ

酒井邦嘉

今年、『高校数学でわかるアインシュタイン——科学という考え方』（東京大学出版会）と『科学という考え方——アインシュタインの宇宙』（中公新書）を同時に出版した（以下ではそれぞれ、『UP版』と『新書版』と略す）。新書版にも書いたが、ガリレオ（一五六四—一六四二）の没年にニュートン（一六四二—一七二六）が生まれたことは広く知られているのに、マクスウェル（一八三二—一八七九）の没年にアインシュタイン（一八七九—一九五五）が生まれたという符合は、あまり知られていない。ここでは、マクスウェルが確立した電磁気学からアインシュタインの相対性理論（相対論）への展開を紹介しながら、『UP版』の第9講と第10講の内容を補いたい。

電気と磁気は別物？

歴史的には電気と磁気は別々に発見された。そのことを踏まえて、高校や大学初年級の電磁気学は、点状の電荷（電磁気の

現象を引き起こす電気の実体）の周りに放射状に生じる「電場」と、その電場を規定する「クーロンの法則」（ガウスの法則）から始まるのが慣例である。また、電荷の流れである電流は、その周りに電場だけでなく環状の「磁場」を作る。実際、電流の周りに方位磁針（磁気コンパス）を置けば、N極が磁場の方向を指し示す。この現象はエルステッドが一八二〇年に発見したのだが、アンペールが法則として確立させたので、「アンペールの法則」と呼ばれる。

ここで、次のような相対論的效果が予想できる。ある慣性系 K （加速度を持たずに等速で直線運動をする座標系）に対して静止する電荷が一行に分布しているとしよう。この電荷が静止している慣性系では、クーロンの法則により電場が生じるが、磁場は存在しない。一方、慣性系 K' に対して、電荷の列の方向に運動する慣性系 K' では、アンペールの法則によって、その運動に垂直な環状の磁場が生じることになる。電荷に対して相對運

動するだけで磁場が生じるのだから、不思議だ。電場と磁場がそれぞれ別の法則に支配されていると考える限り、この不思議は解決しない【『UP版』一四八頁】。

さらに突き詰めて考えれば、電場と磁場は互いに相関関係にあるものの、因果関係ではない。電場に対する相対運動が原因となつて、結果として磁場が生じるのではなく、慣性系 V では電場と磁場が「同時に」生じている。こうした電場と磁場の時間変化が波として伝わる現象が「電磁波」なのであり、光の実体でもある。電気と磁気を別々に扱うことの限界は明らかである。また、電磁波それ自体は電荷を持たないことに注意したい【『UP版』一四七頁】。

マクスウェル方程式から相対論へ

一八六四年に発表された「マクスウェル方程式」は、電場と磁場に関する四つの式から成る。そのうち二つは、電荷と磁極（磁石のN極とS極）に対するガウスの法則である。三つ目は「ファラデーの法則」であり、電線を巻いたコイルの中に磁石を入れると電線に電流が流れるというのを、ファラデーが一八三一年に発見した。逆に磁石を固定しておいて、電線の方を動かしても同様だが、両者が互いに静止しているときには電流が流れない。つまり、磁場に対して電荷や導体（電気を伝える物体）の相対運動があれば、磁場の時間変化に比例した電場が生じている。

ここでマクスウェルは、逆に電場の時間変化に伴つて、磁場が生じているはずだと考えた。これは電場と磁場を対称的に扱うと同時に、電流に関するアンペールの法則の拡張になっている。以上のように、マクスウェル方程式は当時知られていた電気と磁気に関する法則をすべて統合した上で、さらに欠けていた最後のピースを嵌め込んだのだった。

一六歳にして既に電磁気学を独学で習得していたアインシュタイン少年は、光が止まって見えるという力学の予想が電磁気学と矛盾するというパラドックスに、既に気づいていた。ニュートン力学によれば、光速の値は、観測者と光源の相対速度によつて変わるはずである。ところが電磁気学では、光速という物理定数（物理的な性質として決まった数値）が、真空や物質の電磁氣的性質を表す別の物理定数から導かれ、光速は相対速度といった光源の運動状態には全く関係しない。これは明らかな矛盾だ。つまり、物理学の根幹を成す力学と電磁気学が、互いに相容れない関係に陥ってしまったのである【『新書版』一六九頁】。

奇しくもマクスウェルの没年に生まれたアインシュタインは、迷うことなく電磁気学の方が正しいと直感したに違いない。光速は相対速度に関係しないのだから、たとえ光線のピームを光速に近い速度で追いかける観測者であろうとも、地上で観測した（つまり地球に相対的に静止している観測者が測った）のと同じ結果が得られなくてはならない。

言い換えれば、マクスウェル方程式と、それが導く光速は、慣性系間の変換に対して不変でなくてはならない。これが「光速不変の原理」である。また、光速以外にも電荷や質量は不変な量だ【『UP版』一五三頁】。ある物体上の一点に固定した時間である「固有時」も慣性系によらずに一定であり【『UP版』八一―八二頁】、時間の基準となる。例えばセシウム原子時計による「一秒」の定義は、慣性系によらずに定められる。ところが、運動を観察する慣性系で固有時を表すという逆の説明が主要な教科書でなされているため【例えばL・D・ランダウ、E・M・リフシッツ『ランダウ・リフシッツ物理学小教程 力学・場の理論』一九〇―一九一頁、ちくま学芸文庫（二〇〇八）】、時間という概念について初学者が誤解しやすい一因にもなっている。

電磁気学はわかりにくい？

高校や大学で物理学を習ったことがある人で、「力学はイメージが湧きやすいが、電磁気学はわかりにくく苦手だった」という感想を持つ割合は高いようだ。確かに、例えば「電流」を一つ取ってみても、物体の移動と比べればはるかに抽象的だ【『UP版』一四三頁】。力学と電磁気学を別物のように教える時、そうした意識の違いが助長されるのかもしれないが、あくまで物理は一つである。電磁気学がわかりにくいと感じられる要因として、電気と磁気に関する各論から始まるため相互の関連がつかみにくいこともある。高校の物理でも、コンデンサーやコイルを含む複雑な回路や、起源のよくわからないローレンツ力（後述）といった各論が現れるし、さらなる数学の準備が必要なマクスウェル方程式は「範囲外」である。

力学はニュートンの『プリンキピア』を踏まえて、三つの基本法則と、その第二法則を定式化した「運動方程式」から始まるのが慣例で【『新書版』一三三―一三八頁】、高校物理でも基本は同じである。これは数学と同様の公理主義を貫いているため、論理的にわかりやすい。それならば、電磁気学もマクスウェル方程式を公理として始めるのがよいのではないだろうか。ところが、そのような立場から書かれた教科書はほとんど無かった。

最近になって、私の先輩の小宮山進氏が、教え子の竹川敦氏と共同で、『マクスウェル方程式から始める電磁気学』（裳華房、二〇一五）という教科書を著した（以下では『マクスウェル電磁気学』と略す）。この本はマクスウェル方程式から始められ、「最も重要なことは、そうすることではじめて、個々の現象を、電磁気学の全体像の中に位置づけて理解できる（つまり、全体像を把握できる）」ということと記されている【『マクスウェル電磁気学』iv頁】。必要となる数学（特に関門となるベクトル場の微積分）も初歩から丁寧に解説されていて安心だ。マクスウェル方程式の説明の後は、時間変化がない静電気・誘電体や静磁気・磁性体の解説が続ぎ、最後に電磁波が明らかにされる。この一冊をマスターすれば、もはや「電磁気学はわからない」というコンプレックスから解放されることだろう。

『マクスウェル電磁気学』のまえがきには、「それによって電

磁気学をより効率的に学ぶことができる」とある。これは昨今の効率重視の風潮から歓迎されるだろうが、マクスウェル方程式から始めることの利点はむしろ、科学における「法則」という考え方がしつかり学べるということだと私は考える。そして、相対論が電磁気学を基礎として生まれたことは事実だが、そこには「非合理的な背景」があったということも正しく伝えたい【『新書版』四頁】。

また『マクスウェル電磁気学』では、ローレンツ力（電荷を持つ粒子が磁場中を運動するときに受ける力）がマクスウェル方程式とは独立の関係式であると説明されているが【『マクスウェル電磁気学』八頁】、ローレンツ力は相対論の基礎であるローレンツ変換から自然に導くことができる【『UP版』一六二―一六四頁】。この自然な導出は、「4次元時空の慣性系はすべて同等であり、あらゆる物理法則は慣性系間のローレンツ変換に対して不変である」という特殊相対性原理【同五九頁】にマクスウェル方程式が従うことが起源となっている。つまり、ローレンツ力は電磁波に対する基本的な物理的要請によるものなのである。

電磁波に対する基本的な物理的要請として、他には空間の同一性・等方性・対称性がある【『マクスウェル電磁気学』二九頁】。空間のどの場所も同等の性質を持つことが「一様性」で、どの方向も同等であることが「等方性」だ。この要請は、「宇宙は一様で等方的である」という宇宙原理と同様である【『新

書版「二五一頁」。もし電荷や電流があると、その周りで一様性または等方性に制限が現れる。しかし同時に生じる、点電荷の周りの球対称性や、直線状の電流の周りの軸対称性といった「対称性」には、空間の一様性と等方性が確かに反映されているのだ【豪華房のウェブ・ページにある『補足事項』A.2とA.3を参照のこと】。

相対論の学び方・教え方

相対論から百年が経ち、高校や大学で相対論をどのように学ぶかを見直すべき時期にきている。相対論の基礎となる数学については、テンソルの演算を除けば高校数学で十分にカバーできることが実証済みである【『UP版』第5〜9講】。問題はむしろ、物理のどの項目と連動させて相対論を扱うかである。

「相対性理論」といった別物の講義では、また「相対論はわか

りにくい」という感想を助長することになりかねない。私の経験では、理系大学の最初の学期に必修の講義である「力学」に相対論を組み込み、ニュートン力学の修正という形で展開することが有効である。これによって、例えば運動量とエネルギーを統一的に理解したり、重力と慣性力の関係について深く考えることができる【『UP版』第6〜7講】。「力学」に相対論を組み込むことのもう一つのメリットは、学生が特に高い関心を持つ相対論を、大学に入ってモチベーションが一番高い時期に教えられるということである。

一方、相対論を必修や専門講義である「電磁気学」の最後のほうに組み込むこともある。初年級用の主要な教科書を見ればわかるように、既に盛り沢山の内容である電磁気学に相対論を加えた例はほとんどないが、電磁気学の発展の延長線上に相対論を位置づけたいという要望は強いだろう。電磁気学の直接的

な発展に重きをおけば、相対論が「マイケルソン・モーリーの
実験」の話から始まることになるが、既にアインシュタイン自
身が明らかにしているように、電磁波を伝える媒質の議論に対
して、光速不変の原理に基礎をおく相対論は明確に切り離す必
要がある【酒井邦嘉『相対論をめぐる誤解』六一―三頁、『UP』
八月号、東京大学出版会（二〇一六）】。

時間と空間という物理の根幹に関わる相対論は、電磁気学に
固有の問題ではない。相対論が相対論的量子力学はもちろん、
素粒子論や宇宙論にまで広がっていくことを踏まえて、物理学
全体の基礎として相対論を教えたいと私は考える。さらに願わ
くば、文系の大多数にも相対論を「常識」の一部として共有さ
れる日が来て欲しいものだ。

小宮山進氏は、マクスウェル方程式から始まる講義を初めて
行つて最後の講義を終えたとき、学生たちから大きな拍手が湧
き起こつたという。思い起こせば私が助教として赴任して初めて
「認知神経科学」の講義を行つたときも、講義後に学生たちか
ら自然と拍手が起こつた。これは新しい講義に対する教員と学
生双方の、瑞々しい情熱と知的興奮が為せるわざであろう。マ
クスウェルからアインシュタインへと受け継がれた「科学とい
う考え方」の素晴らしさを、多くの人に情熱を持って伝えたい
ものである。

（さかい・くによし 言語脳科学）

酒井邦嘉
高校数学でわかるアインシュタイン 科学という考え方
四六判・二二四頁・二四〇〇円

酒井邦嘉編
芸術を創る脳 美・言語・人間性をめぐる対話
四六判・二七八頁・二五〇〇円

東大EMP・横山禎徳編
東大エグゼクティブ・マネジメント
課題設定の思考力
四六判・二五六頁・一八〇〇円

東大EMP・横山禎徳編
東大エグゼクティブ・マネジメント
デザインする思考力
四六判・二七二頁・二〇〇〇円

太田浩一・松井哲男・米谷民明編
アインシュタイン レクチャーズ@駒場
東京大学教養学部特別講義
四六判・二九六頁・二六〇〇円

東京大学出版会（表示は本体価格）