相対論をめぐる誤解

酒井邦嘉

先日、『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)。タイトルから想像されるように、どちらもアインシュタインの相対性理論(相対論)を中心に扱っている。元々は一つの講義録を二冊に分けたもので、両者を並行して読み進めれば、理解が深まるだろう。

相対論をめぐっては、最初の発表から百年以上経った今なお誤解が流布している。ここでは、特殊相対性理論に関する典型的な誤解を四つ取り上げる。最初の二つは相対論の基礎についてのもので、続く二つは相対論の効果に関するものである。相対論の持つ理論的な整合性や、数学的な美の一端に触れていただきたい。

①アインシュタインは「エーテル」の存在を否定した?

音を伝える媒質は空気であり、空気がないと音は伝わらない。光を伝える媒質として想定されたのが「エーテル」である。「アインシュタインが初めてエーテルの存在を否定した」と言われることがあるが、ある物事の存在を否定することは「悪魔の証明(probatio diabolica)」と同じで、科学的な議論にはならない【酒井邦嘉『科学者という仕事』二二一—二四頁、中公新書(二〇〇六)】。例えば「お化けが存在しない」ということは科学的に証明できないのだ。正しく言えば、「アインシュタインの相対論により、エーテルが不要であることが証明された」ということである。

アインシュタインは、一九〇五年に発表した論文(以下では「第一論文」と呼ぶ)の初めに、「〝光を伝える媒質〟に対する地球の相対的な速度を確かめようとして、結局は失敗に終ったいくつかの実験をあわせ考えるとき、力学ばかりでなく電気力学においても、絶対静止という概念に対応するような現象はまっ

たく存在しないという推論に到達する。〔中略〕〝光エーテル〟という概念を物理学にもちこむ必要のないことが理解されよう【アインシュタイン（内山龍雄訳）『相対性理論』一四―一五、岩波文庫（一九八八）】」とだけ記している。

後にアインシュタインは、「特殊相対性理論がすべての慣性系の物理的同等性を明示したことから、静止しているエーテルという仮説は支持しえないことが証明された。それゆえ、電磁場が物質的な担い手の状態として把握されるべきだ、という考えは放棄されねばならなかった【アインシュタイン（金子務訳）『特殊および一般相対性理論について』白揚社、一九二頁（二〇〇四）】」と述べた。「慣性系」とは、加速度を持たずに等速で直線運動をする座標系である。エーテルの存在を検証しようとした「マイケルソン-モーリーの実験」は、特殊相対性原理（後述）に基づくアインシュタインの思考に何ら影響を与えることがなかったのである【『新書版』一六九―一七〇頁】。ただし、エーテルの効果を観測しようとして開発された「二光束干渉計」という装置のアイディアは重力波の検出器に踏襲されたので、実験自体には意味があった。

相対論の多くの解説書では、判で押したように「エーテル」と「マイケルソン-モーリーの実験」の話から始まる。それは、電磁気学の直接的な発展に重きを置いたためであろう。「光の媒質となりうる『真空』とは何か」という電磁気学の問題は未解決だが、そのことと相対論は明確に切り離す必要がある。そこで今度の本ではエーテルの説明を一切省くことにした。相対論は「エーテル」の議論と独立して構築されたのであり、ニュートンの唱えた「絶対的な不動の空間」という概念【『新書版』一一六頁】の放棄こそが最大の前進だった。それはいかに革命的だったことか。今度の本は、読者が想像力で補う

余地を残しつつ、相対論の確かな道筋を示すことに専心した。

②物体が光速を超えられないのは相対論の前提である？

相対論と言うと、「物体は光速を超えられない」ということが前提になっていると誤解されがちだ。物体が光速を超えられないこと自体は正しいが、これは相対論の帰結であって前提ではない【『UP版』六四頁】。相対論の前提とは、「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変換に対して不変である」という特殊相対性原理だけである。「4次元時空」とは、3次元空間（x, y, z）と時間 t（あるいは光速 c を掛けた ct）を合わせたものを言う。また、光の実体は電磁波であり、光速は電磁気学の法則によって導かれる定数である【『新書版』一六七－一六八頁】。「光の伝播速度は、光源や観測者の運動速度によらず常に一定である」という光速不変の原理は、特殊相対性原理の一部であり、相対論の前提だった。光速不変の原理と、物体が光速を超えられないという法則は、レベルの違うものとして区別する必要がある。

③物体が光速に近づくと重くなる？

相対論の専門書でも、「物体の質量は光速に近づくと増大する（重くなる）」と書かれている本が多数ある。例えばアインシュタインの論文に対する解説では、「運動質量［運動する物体の質量］は静止質量［静止時の質量］に比べて大きくなる【アインシュタイン（井上健他訳編）『アインシュタイン選集1』一五頁、共立出版（一九七一）】」と書かれている。その一方で、相対速度によらない「固有質量」も導入されている【同、一二頁】。

相対論では長らくこの三種類の質量（運動質量、静止質量、固有質量）が想定されてきたのだが、よく整理して考えれば、運動量とエネルギーの定義には元から質量が含まれていて【『UP版』八三－八五頁】、その質量自体が慣性系によらない不変量なのである【同、一五三－一五四頁】。質量は常に不変であるー方で、「物体の運動量は光速に近づくと大きくなる」と言うのが正しい。また、「光速を超える物体は『虚数の質量』を持つ」と新聞で報道されたことがあったが【酒井邦嘉「いかに分かりやすく正確に伝えるか」, *Journalism* No. 291, pp. 70-77 (2014)】、たとえ計算上であっても質量が虚数に変化することはない。

④光速に近づくと時間が縮む（遅くなる）？

「第一論文」には、「静止系で考えると、走っている時計は遅れることになる」と書かれていた【『相対性理論』三五頁】。その三年後にミンコフスキーは、ある物体上の一点に固定した時間である「固有時」という考え方を導入した。基準となる固有時と同じ時間間隔を、その物体に対して相対運動する慣性系 K の時計で計ると、固有時より必ず長くなる【『UP版』八〇－

八二頁】。これが「時間の伸び」という相対論的効果である。

前述のように、相対論では「絶対静止」や「絶対運動」という概念がないから、ある慣性系を便宜上「静止系」と見なし、相対的に運動する慣性系(便宜上の「運動系」)の時間を「静止系」から観測したとしよう。すると、確かに時間が伸びるのだ。例えば、光速に近い速さで運動しているミューオン(素粒子の一つ)を地上で観測すると、ミューオンの崩壊までの寿命(半減期という時間)は実際に長く変化する【『新書版』一七九—一八〇頁】。

二つの慣性系それぞれに時計があり、「相対的(relative)」に(両者の関係・比較の上で)違いがあるなら、一方の時計が進んで他方の時計が遅れるのが「常識」だろう。しかし「相対論に従う」という意味での「相対論的(relativistic)」には、「時間の伸び」という法則自体が二つの慣性系間で互いに同等だから、時間は慣性系同士で「互いに」伸びることになる【『新書版』一七八頁】。たとえて言えば、二人の顔の間に大きな凸レンズを置いて、互いの顔を見るようなものだ。

「第一論文」以来、「運動系では、光速に近づくと静止系よりも時間が縮む」という解釈(いわゆる「時計の遅れ」)が大勢だった。一方、固有時は物体上で定まる不変量であるから、例えばミューオンの寿命の計測のように、「相対運動する系では時間が伸びる(時計が進む)」とするのが適切である。また、以下のような議論を踏まえれば、これは単に「相対的な」規準のとり方の違いだけが原因ではない。

時間の比較に必要な手続きは単純だ。まず相対運動する二つの慣性系それぞれで、時空の原点を予め決めておく。どの時点、どの場所を選んでも構わないが、二つの慣性系間で原点が一致するように基準点を定める。原点より一定の時間が経って

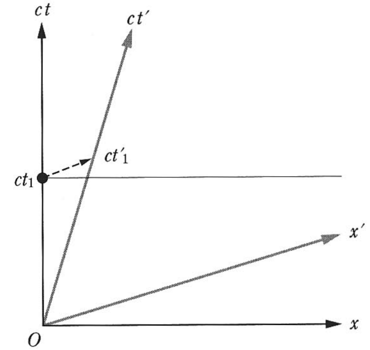

図1　時間の伸び

から、二つの慣性系に置かれた時計を見せ合ったとしよう。二つの時計が指し示す時間が異なるなら、一方からは自分の時計が相手より進んでおり、他方からは自分の時計が相手より遅れていて、それぞれの観測結果が食い違うことになる。この問題を解決するには、相対論的に正しい「時間の計り方」を理解する必要がある。

4次元時空の座標系として、空間を1次元として横軸（x軸）方向にとり、時間を縦軸（ct軸）にとって、2次元に単純化して考えよう。慣性系Kから見たとき、もう一つの慣性系K'の相対速度をvとする。慣性系$K(x, ct)$と慣性系$K'(x', ct')$それぞれに、同じ性能で同期させた時計を複数配置する。また、$x=0$と$x'=0$に置いた時計を使って、$t=0$と$t'=0$で同期させておく。以下の図では便宜上、慣性系Kを直交座標系、慣性系K'を斜交座標系として、両者で一致する原点をOとした【『新書版』一六〇―一七九頁】。

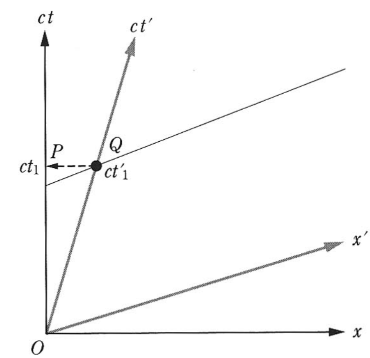

図2　逆に見た「時間の伸び」

慣性系Kで$x=0$に置かれた時計について時間t_1（固有時）が経つとき、慣性系K'の時計で経過する時間t'_1を求めてみよう。図1でct軸上の点（$0, ct_1$）からx'軸と平行な線を引くと、ct'軸と交わる点がある。この交点が求めたいt'_1を与える。交点（$0, ct'_1$）は、慣性系Kで（$0, ct_1$）を通るx軸に平行な線より必ず（斜交座標系の傾きに関係なく）上にあるから、$ct'_1>ct_1$となって、慣性系K'で計った時間は伸びていることになる。また、時間t'_1とt_1の関係は次式のようになる【『UP版』六八―六九頁】。

$$t'_1 = \frac{t_1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} > t_1 \quad \text{—} \quad ①$$

前述のように物体の速度vは光速cに達しえないので、必ず$v<c$である。すると、$0<\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)<1$だから$\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}<1$となり、①式の分母は1より小さいため、$t'_1>t_1$が成り立つ。つまり、時間は伸びている。

次に、時間の伸びが「相対論的」であることを確かめるため、二つの慣性系を入れ替えて考えてみよう。すなわち、慣性系K'で$x'=0$に置かれた時計について時間t'_1（固有時）が経つとき、慣性系Kの時計ではどのくらいの時間t_1が経過するだろうか。

図2でct'軸上の点（$0, ct'_1$）からx軸と平行な線を引くと、ct軸と交わる交点がt_1を与える。交点P（$0, ct_1$）は、慣性系K'で点Q（$0, ct'_1$）を通るx'軸に平行な線より必ず（斜交座標系の傾きに関係なく）上にあるから、$ct_1>ct'_1$となって、慣性系Kで計った時間は伸びていることになる。なお図1と図2では、ct'_1がグラフ上で同じ長さとなるように表示しており、ct_1の方は一致しない。

ここで、次のような疑問が生じる。図1で慣性系K'の時計を基準にすれば、慣性系Kの時計は遅れているのではないか。①式を次のように変形してみよう。

$$t_1 = t'_1\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} < t'_1 \quad \text{—} \quad ②$$

①式と同様に$\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}<1$だから、②式の$t_1<t'_1$が成り立つ。特殊相対性原理によればすべての慣性系は同等であり、ど

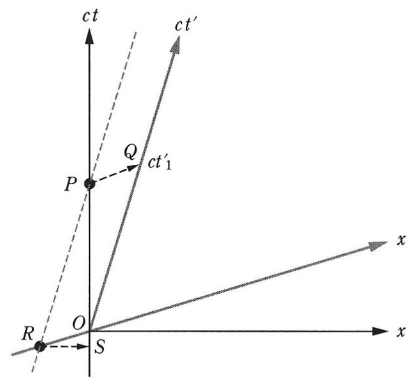

図３「時間の伸び」の相対性

の慣性系を基準にしても結果は変わらないはずなのに、この場合は時間が縮むように思える。しかし、この推論は以下に説明するように検討の余地がある。

図3は図1に基づいている。ct軸上の点P $(0, ct_1)$ からx'軸と平行な線を引くと、点Q $(0, ct'_1)$ でct'軸（慣性系K'の時間軸）と交わる。また、この点Pを慣性系K'で見ると、ct'軸と平行な線を引いてx'軸と交わる点Rの位置、すなわち $(x', ct') = (-vt'_1, 0)$ にある。慣性系K'で見ると慣性系Kは速度$-v$で運動するから、$x=0$に対応する点Rの位置は、時間t'_1が経ったときにx'軸上で$-vt'_1$となる。つまり、点Rの位置にある$x'=0$とは別の時計と、慣性系Kの$x=0$に置かれた時計を見せ合うこと

になる。時間を計るために、一方の慣性系では一つの時計だけを使い、他方の慣性系では複数の時計を使うという非対称性が、「相対的」に異なる効果が生じる原因となっている。

また、グラフ上の距離$\overline{RP}$は$\overline{OQ}$と等しいから、慣性系K'で時間ct'_1が経過するとき、点Rの位置では点Pまで時間が変化する。単に時計の読みだけで「相対的」に比較すると、慣性系K'の$x'=-vt'_1$に置かれた時計の読みは慣性系Kの$x=0$に置かれた時計より進んでおり（①式）、慣性系Kの同じ時計の読み（点Oから点Pまで）は慣性系K'の同じ時計より遅れている（②式）。

さて、点Rからx軸と平行な水平線を引いて、ct軸（慣性系Kの時間軸）と交わる点をSとしよう。点Rでは$t'=0$だが、点Sでは$t<0$であり、点Sは予め決めた基準点ではないことに注意したい。つまり、時間t'_1に対応する時間を慣性系Kで計るためには、点Rに対応した点Sからの経過時間を計る必要がある。言い換えると、慣性系K'で点Rから点Pまでの時間を計るなら、慣性系Kでも原点Oの$t=0$からではなく、点Sから点Pまでの時間を計らなくてはならない。この「開始点のず

れ」を考慮せずに、単に二つの時計を見比べるだけでは、正しい比較にならないのである。つまり時計が遅れて見えるときは、時間を計るための基準を見直す必要があったのだ。

慣性系Kでの経過時間は、次のように幾何学的に求められる。図3のΔPSRは図2のΔOPQと合同だから、求めたい図3の距離$\overline{SP}$は、図2の距離$\overline{OP}$すなわちct_1と等しくなる。したがって、次式が成り立つ【『UP版』六九―七〇頁】。

$$t_1 = \frac{t'_1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} > t'_1 \quad ―\quad ③$$

つまり$t_1>t'_1$、となって、「相対論的」に時間が伸びることになる。また、慣性系Kの$x=0$に置かれた時計の読み（$\overline{OP}=ct'_1\sqrt{1-v^2/c^2}$）と、「開始点のずれ」（$\overline{SO}$）を足し合わせることでも、③式が得られる（☆読者への宿題）。結論として、相対論では「時間が伸びる」と考えるのが適切なのである。

相対論に限った話ではないが、原論文に様々な試行錯誤の過程が記されていることがある。研究には常に発展の余地が残されているものだから、それは当然のことだ。解説書もまた、その筆者の見識に左右される。詰まるところ、納得するまで自分で考え抜くしかないのだ。この姿勢こそが「科学という考え方」であり、相対論は自分の科学的思考に対する最良の試金石だと言えよう。とにかく「理解したい」という好奇心さえあれば、相対論は必ず理解できる。そのことを学生に保証するだけでも、十分に教育的であろう。

ここに扱った問題に対し、金子務氏の貴重な提案に助けられたことを、ここに記して感謝したい。

（さかい・くによし　言語脳科学）