

國學院大學學術情報リポジトリ

時間はいつでもどこでも同じように進むのか：
相対性理論における同時刻の相対性

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2023-02-06 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 近藤, 良彦, 西川, 哲夫 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.57529/00001316

〔研究ノート〕

時間はいつでもどこでも同じように進むのか

—相対性理論における同時刻の相対性—

近藤 良彦 西川 哲夫

【要旨】

特殊相対性理論における同時刻の相対性について初心者にもその本質がわかるように解説する。図と数式を程よく織り交ぜて、高等教育で物理学を学んだことのない人にも理解できるような解説を試みる。最初に、空間を表す座標系である物差しと時間を表す時計を用いて、物の長さは同時刻で計られるべきことを示す。それを用いて相対性理論が登場する以前の理論の前提となっているガリレイの相対性原理と絶対時間について紹介する。それらが、相対性原理と光速不変の原理によってどのように修正されるかをわかりやすく説明する。ここで、電車とホテルが登場させて思考実験することにより、同時刻の相対性の意味を明らかにする。相対性理論の理解を妨げているものに「常識」があること、特に絶対時間に関する「常識」があることも指摘する。さらに、教育の観点からも常識について考察する。

【キーワード】

特殊相対性理論 光速不変の原理 同時刻の相対性 アインシュタイン 常識

1. はじめに

最初に、アルベルト・アインシュタインの言葉を引用しよう。

常識とは18歳までに身に付けた偏見のコレクションのことを言う^[1]

相対性理論を理解しようとしても理解できない理由の一つに、この「常識」がある。「当たり前」と考えていることが、理解の妨げになっているのである。「当たり前」のことには理由があるはずである。理由もわからないまま当たり前だと判断してはならない。その理由を掘り下げていくことが、本当の理解につながる。

ある公立小学校教師の実践記における次のくだりは示唆に富んでいる。

相対性理論などは、自分もわかっていない理論なのに、教えてみると、「これはいったい何なんだろう」というほど、どんどん子供たちが吸収していってしまうのです。なかには、私の教えていることの矛盾点まで指摘する子もいました。^[2]

大人がわからない理論を子どもたちがどんどん吸収するのは、決して驚くに当たらないとも言える。常識にとらわれない子どもの方が、大人よりも相対性理論を理解できても不思議ではないからである。それほど「常識」とは相対性理論を理解する上で弊害となる場合がある。常識とは人間が勝手に作り上げたものである。自然の法則が人間の「常識」に影響されることはない。我々を変えなければならないのは、法則ではなく「常識」の方である。

相対性理論が言わんとしていることは何であろうか。一言でいえば、「自然の法則は見方を変えても変わらない」ということになるだろう。もちろん、自然現象は見方を変えれば変わって見えることがある。しかし、その現象の根本にある法則それ自体は見方を変えても変わらないと、相対性理論は主張しているのである。

相対性理論に興味を持ったことのある人であれば、光の速度は変わらないという話を聞いたことがあるだろう。しかし、光を追いかけるように走りながら見れば、光の速度は遅くなるのではないだろうか。逆に、光とすれ違うように走りながら見れば、速くなるのではないだろうか。前を走っている自動車を後ろから別な自動車で追いかけて見れば速度は遅くなり、自動車が互いにすれ違う場合は一方の自動車からもう一方を見れば速度は速くなる。この常識からすれば、そのような疑問は当然のように思える。ところで、光の速度はどのようにして測るのだろうか。具体的な方法は別として、速度は道のりを時間で割ればよい。道のりは進んだ長さであり、それを進むのかかった時間で割れば速度が計算できる。追いかけてもすれ違って光の速度が変わらないとはどういうことなのか。アインシュタインは、長さや時間のほうが変化するのではないかと考えたのである。

相対性理論が誕生した20世紀の初頭では、光の速度が変わらないことが実験でも確かめられていた。一方、時間がどこでも一定のテンポで進むことは、誰もが疑わない当たり前の常識であった。別な言い方をすれば、時間は一つで宇宙全体を同じく等しく流れているような感覚、これは絶対時間と呼ばれている。その常識に疑問を投げかけた一人が、まさにアインシュタインその人である。

本稿では、この相対性理論を初心者でもわかるように解き明かすことを試みる。特に、特殊相対性理論^③における同時刻の相対性の概念を解き明かすことが目的である。次節では走っている電車の長さを測る方法を考えることを通して座標系について考える。3節と4節ではアインシュタインの相対性理論の前の話として、ガリレイの相対性原理とガリレイ変換の話をする。5節から9節で相対性理論に進み、同時刻の相対性について説明しよう。10節ではまとめとして、本論で取り上げた思考実験について考察する。さらに、「常識」についても一度考えてみよう。最後には、アインシュタインの教育観についても触れてみる。

2. 走っている電車の長さを測る

初めに止まっている電車の長さを測る場合を考える。長さを測る道具は物差しだ。この場合は

巻尺と言ったほうがよいだろう。物体の長さを測る場合、普通は物差しを物体の端に合わせて、引き算ができればその必要はない。次の図 2.1 のように電車と平行に物差しを置いて、右端と左端の目盛りの値を読めばよい。

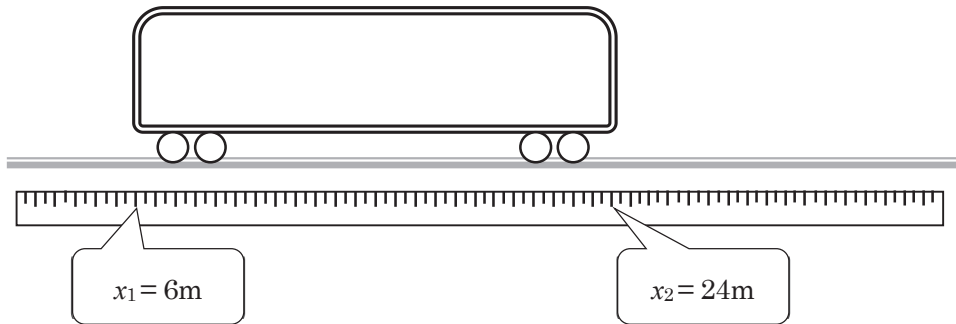


図2.1

この図のように、電車の左端と右端を指す目盛りを、それぞれ x_1 と x_2 と表すことにする。図2.1では、 x_1 が6mで x_2 が24mであるから、電車の長さは

$$x_2 - x_1 = 24\text{m} - 6\text{m} = 18\text{m}$$

となる。このように、物体の長さは物差しを置いて両端の位置の目盛りを読み取ればわかる。この物差しを置くことを、より専門的に言えば、座標系を置くと言う。

次に、走っている電車の長さを測る場合を考える。長さは物差しで両端の位置がわかればよいことを利用する。図2.2で電車は矢印の方向へ速度 v で走っている。この電車の長さを測るために、人が電車の右端の位置を読み取ってから左端に行って位置を読み取っている様子を表している。

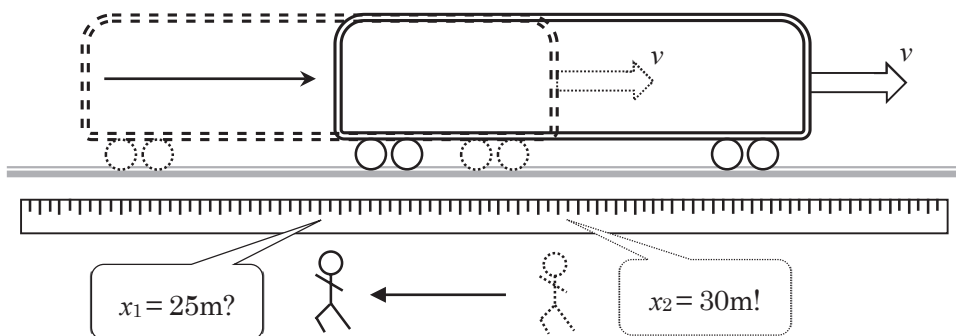


図2.2

図2.2のように右端の位置の目盛りが30mで左端が25mだとすると、 $30\text{m} - 25\text{m} = 5\text{m}$ が電車の長さとなる。これは正しいであろうか。もちろん正しくはない。なぜなら、人が右端から左端に移動する間に電車の左端の位置が動いてしまうからだ。

走っている電車の長さを測る方法を考える。長さを測るためには物差しと言う物体の位置を明示する座標系が必要であった。言い換えると空間の位置を示す座標系である。走っている電車の長さを測るためには、この座標系とは別の座標系も必要となる。それは日常よく使われているものである。お分かりであろうか。時間を測る時計である。図2.3のように、時計を並べて人が電車の位置と時刻を記録していくとする。ここで、 (t_1, x_1) は電車の左端が時刻 t_1 に x_1 の位置を通過したという意味で、 (t_2, x_2) は電車の右端が時刻 t_2 に x_2 の位置を通過したという意味である。

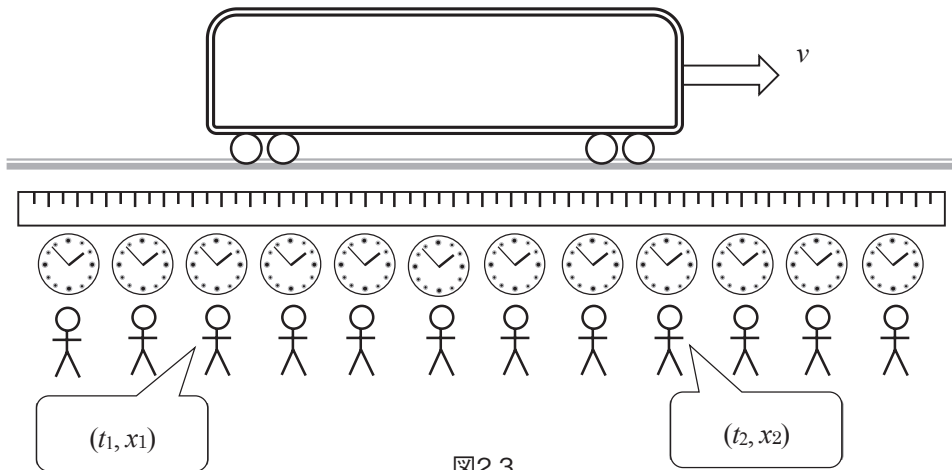


図2.3

電車が通り過ぎた後に、記録した人たちが集まって、結果を次の表1と表2にまとめた。

表1 電車の左端の位置と時刻

t_1 (s)	3	4	5	6	7
x_1 (m)	9	17	25	33	41

表2 電車の右端の位置と時刻

t_2 (s)	3	4	5	6	7
x_2 (m)	27	35	43	51	59

2つの表の値をどのように利用すればよいだろうか。その答えは、 t_1 と t_2 が同じ時刻の x_1 と x_2 の値を利用するである。すなわち、走っている物体の長さは同時刻に両端がどの位置にあるかで決められる。例えば、 $t_1 = t_2 = 5\text{s}$ のとき、

$$x_2 - x_1 = 43\text{m} - 25\text{m} = 18\text{m}$$

となり、これが走っているときの電車の長さである。

3. ガリレイの相対性原理

自然界の法則について考えてみよう。図3.1のように、地面の上に置いた箱に力を加えなければ止まったままである。この事情は一定の速度で走る電車の床の上でも成り立つ。そこで、「置いた箱に力を加えなければ止まったままである」を法則1としよう。

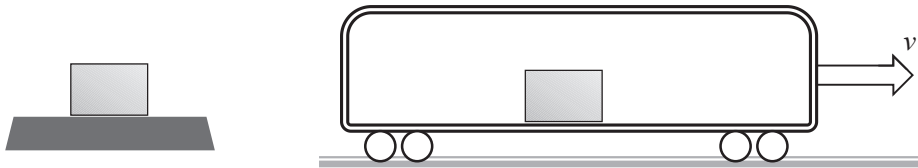


図3.1

法則1はどんな場合でも成り立つわけではない。例えば、電車が急停車するときは、置いた箱がひとりでに動くことがある。法則1が成り立たない場合を非慣性系と呼ぶ。一方、成り立つ場合を慣性系と呼ぶ。すなわち、慣性系とは止まっている座標系または一定の速度でまっすぐ進む座標系のことである⁽¹⁾。

慣性系で成り立つ法則をもう一つ考えよう。図3.2のように、地面に立ち、手にボールを持って高く上げ、離すとどうなるだろうか。真下に落ちる。さらに、一定の速度で走る電車の中でも同様に真下に落ちる。この「手にボールを持って高く上げ、離すと真下に落ちる」を法則2としよう。

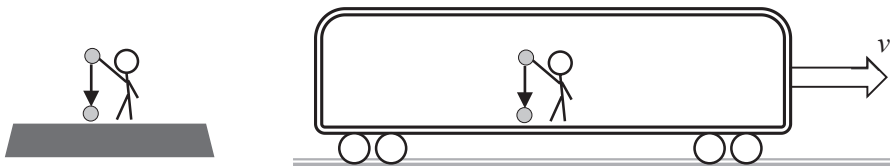


図3.2

法則2も、非慣性系、例えば電車が発進して速度を上げるときや停止のために速度を落とすときには成り立たない。

法則1や法則2のような物体に関する法則は、より基本的な「力学の法則」から導き出すことができる。力学の法則は慣性系で成り立つ法則である。図3.2のような地面の上や電車の中だけでなく、例えば、一定の速度でまっすぐ進む船や飛行機の中でも、慣性系であれば成立する。この事実を最初に発見したのが、ガリレオ・ガリレイであり、

「どの慣性系を基準にしても力学の法則は全く同じである」

を、ガリレイの相対性原理と呼ぶ。

ここで、ガリレイの相対性原理を基にして、頭の中で行う実験、思考実験をしてみよう。「ど

の慣性系を基準にしても」であるから、ある慣性系から見た力学現象を別の慣性系で見ても「（根本となる）力学の法則は全く同じ」でなければならない。そこで、地面の慣性系から電車の慣性系を見る場合を考えよう。法則 1 は箱を置いた人にとっての法則であるから、電車に置かれた箱は電車では止まったままでも、地面から見れば一定の速度 v で直進するよう見える。このように、法則 1 の「置いた箱に力を加えなければ止まったままである」はガリレイの相対性原理で言うところの（根本となる）法則とは言えない。

しかし、この法則 1 を拡張して「箱に力を加えなければ止まっているか一定の速度で直進する」とすれば、どの慣性系を基準にしても成り立つ（根本となる）力学の法則となる。これを「慣性の法則」と呼ぶ。次に、法則 2 について見てみる。電車でボールを離れた人には、ボールは真下、すなわち足元に落ちる。当然、地面から見ても電車の人の足元に落ちて見える。電車は一定の速度で走っているのだから、そう見えるためには、図3.3のようにボールの軌跡は曲線的になる。これは、地面では垂直に降る雨が電車から見ると斜めに降っているように見える⁽²⁾のと同じことである。

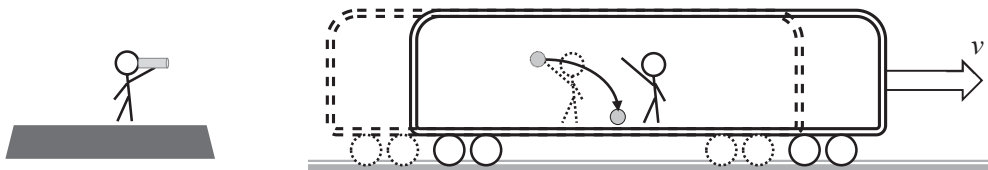


図3.3

ガリレイの相対性原理では「法則は全く同じ」となっているから、ボールの落ち方も同じでなければならない。すなわち、落ちていく速さが同じと言うことになる。そのためには、地面で過ぎていく時間と電車で過ぎていく時間が同じである必要がある。これは絶対時間と呼ばれていて、具体的に定義すると

「2つのできごとの時間間隔は運動状態と無関係に一定である⁽³⁾」

となる。しばらくの間、これを絶対時間の原理として採用しよう。

4. ガリレイ変換

力学の法則とは物体に働く力と運動との関係を表す規則である。ガリレイの相対性原理によれば、慣性系を変えても力学の法則は全く同じなのだから、物体の状態は慣性系である地面から見ても電車から見ても変わらない。図4.1で、地面に立っている電柱は電車から見ても地面に立っている電柱である。この電柱の位置を明示するために、図のように地面と電車に物差しを置くことにする。そして、地面の物差しと電車の物差しの左端どうしが一致したところで、地面と電車の時計の時刻を 0 にセットする。ここで、 x と x' はそれぞれ地面の物差しと電車の物差しが指

す電柱の位置である。

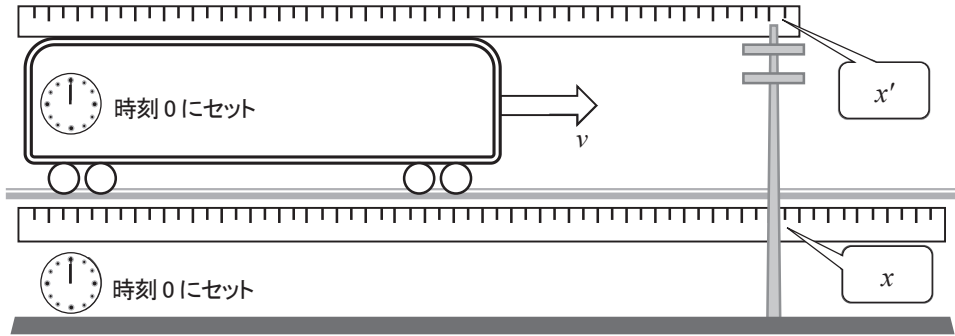


図4.1

図4.1のように、時刻0では $x = x'$ であるとしよう。

図4.2は、地面と電車でそれぞれ t と t' の時間が経過した様子である。電車は速度 v で走っているから、その間に進んだ距離は地面と電車ではそれぞれ vt と vt' となる。絶対時間の原理から $t = t'$ であるから、 $vt = vt'$ であることがわかる。

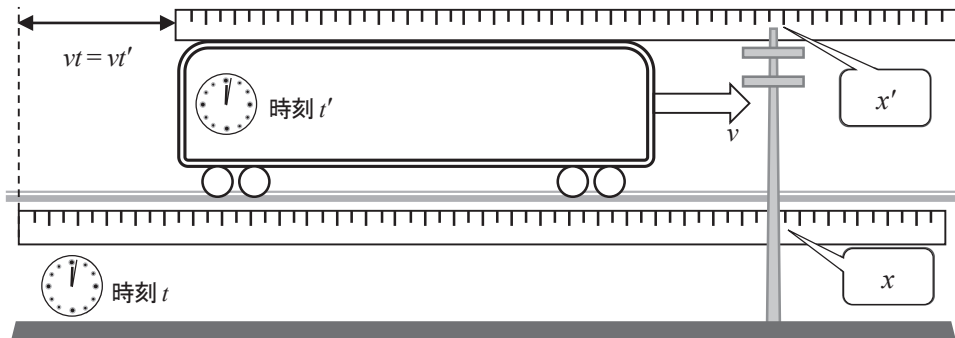


図4.2

ゆえに、 x と x' の関係は $x - vt = x'$ となる。以上をまとめると、地面の座標系 (t, x) と電車の座標系 (t', x') の間に、

$$\begin{aligned} t' &= t \\ x' &= x - vt \end{aligned}$$

の関係があることがわかる。これは、地面で測定した時間と位置を電車に変換した場合にどうなるかがわかる式で、ガリレイ変換と呼ばれている。

これから、ガリレイ変換を用いて、止まっている電車と走っている電車の長さの関係を求めてみよう。図4.3のように速度 v で走っている電車の長さを、地面と電車に置かれた物差しそれぞれ

で測る。電車の中では電車は止まっている。走って見えるのは周りの景色である。ゆえに、電車に置かれた物差しで測った長さは、止まっているときの電車の長さである。この長さを l_0 とする。一方、地面から見た電車は走っているので、長さは同時刻に左端と右端の位置を測って得られる。この長さを l とする。

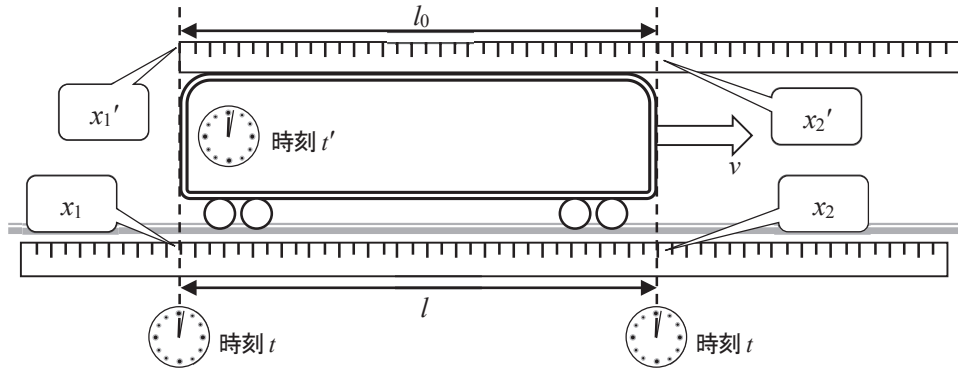


図4.3

図4.3のように、地面の物差しで同時刻 t に測った電車の左端と右端の位置をそれぞれ x_1 と x_2 とする。他方、電車の物差しで測った左端と右端の位置をそれぞれ x'_1 と x'_2 とする。ガリレイ変換からこれらの位置の間には次の関係があることがわかる。

$$x'_1 = x_1 - vt$$

$$x'_2 = x_2 - vt$$

止まっているときの長さ

$$l_0 = x'_2 - x'_1$$

に、これらの関係を代入すると

$$l_0 = (x_2 - vt) - (x_1 - vt)$$

$$l_0 = x_2 - x_1$$

となる。速度 v で走っているときの長さは $l = x_2 - x_1$ であるから、

$$l_0 = l$$

が導かれる。このように、止まっている電車と走っている電車の長さは同じであることがわかる。

このことから、電車は止まっても走っても長さが変わらない理由は、この世界ではガリレイ変換が成り立つからであることがわかる。ガリレイ変換が成り立つ理由は、この宇宙がガリレイの相対性原理と絶対時間の原理を採用しているからと言えるだろう。もし、ガリレイの相

対性原理と絶対時間の原理が成り立たないとすれば、止まっている電車と走っている電車の長さが同じになる必然性はなくなる。

5. 光の性質

我々にとって、光はとても身近なものである。アインシュタインは光に対して特別な関心を持っていた。光の性質は、力学の法則ではなく、電磁気の法則から導かれる。その一つが「光は電磁波の一種で真空中を伝播速度 c で直進する」という重要な性質である。伝播速度 c とは光速のことであるが、この光の速度は見方によって変わるのだろうか。止まっている車と時速100kmで走っている車のヘッドライトの光の速さは違うのだろうか。もしそうだとすると、光の速さが違う分だけ、止まっている場合と走っている場合の電磁気の法則を変えなくてはならない。しかし、電気や磁気に関する基本的な法則が、止まったり走ったりする、すなわち慣性系によって変わってよいものだろうか。アインシュタインは変わらないと考えた。そして、ガリレイの相対性原理を拡張して

「いかなる慣性系を基準にとろうとも、すべての物理法則は全く同じである。」

と主張した。これは、相対性原理と呼ばれる。

電磁気の法則が相対性原理を満たすためには、慣性系によって光速が変化してはいけない。そこで、アインシュタインは

「真空中の光の速さは、光源の運動状態に無関係である。」

と考えた。これは、光速不変の原理と呼ばれる。この原理は一見とても奇妙に感じる。例えば、図5.1のように、日の光の速さを地面の人と電車の人が測ったとしよう。

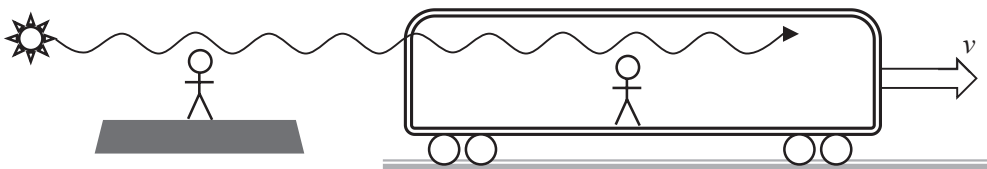


図5.1

地面で測ると光速は $c = 30$ 万 km/s であったとすると、速度 v で走っている電車で測っても $c = 30$ 万 km/s になるのである。速度 v で遠ざかる方向に走っているのだから、電車で測ると $c - v$ と思えるが、 c となるのである。実際、現在まで何度も光速は測定されているが、再現性のあるきちんとした実験で、真空中の光速が $c = 30$ 万 km/s から変化したという結果は報告されていない。

6. 同時刻の相対性

ここで思考実験を試みよう。図6.1のように一定の速度 v で走る電車の中心でホタルが光ったとする。ホタルの光は広がって行き、やがて電車の左端と右端に到達する。この様子を、地面で観測した場合と電車で観測した場合でどうなるか、頭の中で実験する。

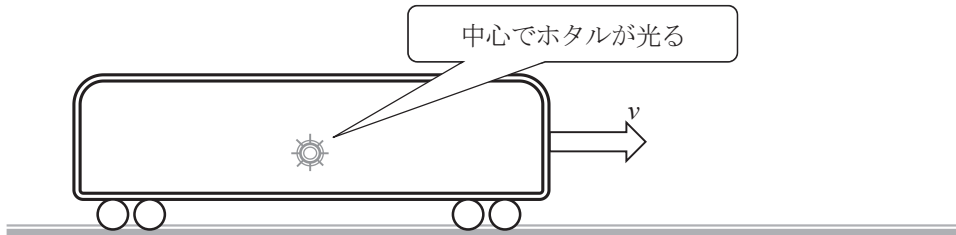


図6.1

最初に、地面から観測してみよう。光速不変の原理により地面で観測される光の速さは全方向で $c = 30$ 万km/sである。光が電車の端に伝わる間に、電車はわずかでも右に動くから、図6.2のように光は左端に最初に到達することになる。このできごとに、出来事Aと名前を付ける。出来事Aは時刻 t_A に起こったとする。このとき、電車の右側に進んでいる光は、左側に進む光と同じ距離を進んでおり、右端にはまだ到達していない。

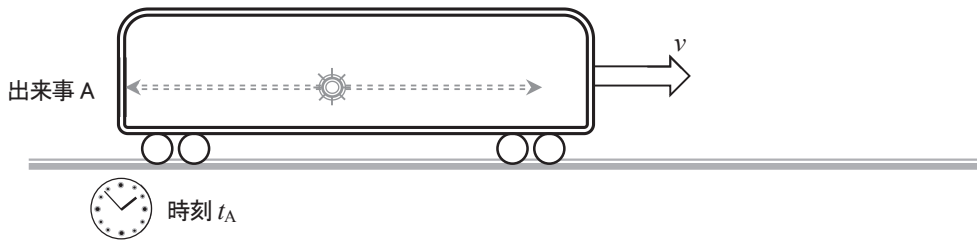


図6.2

それから時間が経過して、電車の右側に進んでいた光が右端に到達したときを図6.3は表している。このできごとに、出来事Bと名前を付ける。出来事Bは時刻 t_B に起こったとする。

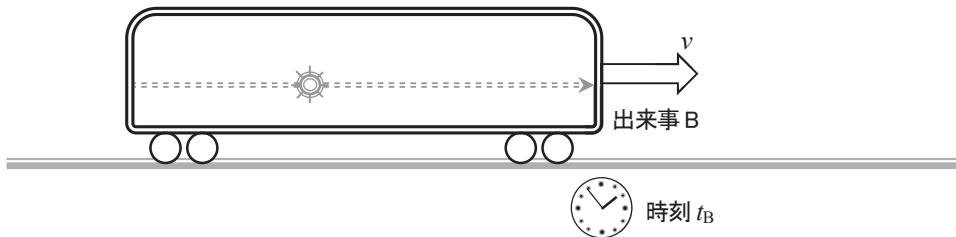


図6.3

この思考実験からわかるように、出来事Aと出来事Bは同時には起こっていない。すなわち、光が電車の左端に到達した時刻 t_A と右端に到達した時刻 t_B には、 $t_A \neq t_B$ の関係がある。

次に、電車の中で観測してみよう。電車を基準にすれば、電車は止まっている。走っているのは外の景色である。図6.4のように、電車の中心から広がる光は左方向にも右方向にも同じ距離を進んでそれぞれ左端と右端に到達する。このとき、左端と右端に光が到達したというできごとは、それぞれ上述の出来事Aと出来事Bと同じである。電車では出来事Aと出来事Bは、それぞれ時刻 t'_A と時刻 t'_B に起こったとする。

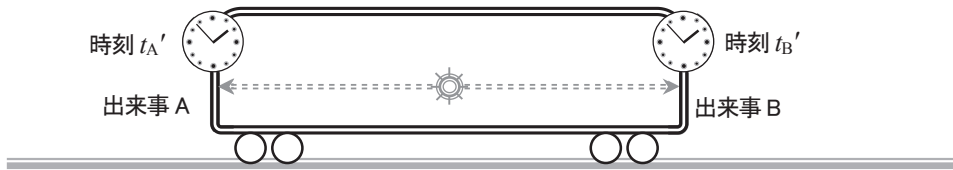


図6.4

光速不変の原理が成り立つから、中心で光った光は左端と右端に同じ距離を同じ速度 $c = 30$ 万 km/s で伝わり、同時刻に到達する。ゆえに、出来事Aと出来事Bは同時刻に起こる。すなわち、光が左端に到達した時刻 t'_A と右端に到達した時刻 t'_B には、 $t'_A = t'_B$ の関係がある。

光が電車の左端に到達した出来事Aと右端に到達した出来事Bは、地面で観測しようが電車でも観測しようが同じできごとである。しかし、電車では同時刻 $t'_A = t'_B$ に起こり、地面では $t_A \neq t_B$ と同時刻に起こっていない。相対性原理から慣性系によらずすべての物理法則は全く同じであるから、地面でも電車でも出来事Aと出来事Bは全く同じ現象である。そして、光速不変の原理に従えば、ここで行った思考実験のとおり、慣性系によって出来事Aと出来事Bは同時刻に起こったり起こらなかったりすることは明らかである。すなわち、同時刻は絶対的でなく、相対的なものである。これを同時刻の相対性と呼ぶ。

このことは、慣性系が変われば時間も必然的に変わることを意味している。すなわち、絶対時間の原理は成り立たず、これを放棄しなければならない。

7. 同時刻の定義

前節の思考実験でわかったように、同時刻は絶対的でない。そうなると同時刻とは何なのか考え直さなければならない。同時刻はどのように定義されるのか。すなわち、離れている時計を同時刻に合わせるにはどうすればよいか考えよう。

アインシュタインは速度が不変である光を利用することを思いついた。実際、相対性理論の第1論文もこの同時刻の定義から始まっている。その定義の仕方は次のようである。

A地点とB地点に時計があり、これら2つの時計が同時刻に合わせられているとする。図7.1

のようにA地点からB地点に向けて光を放ったとしよう。A地点から光が放たれた時刻が t_1 で、その光がB地点に届いた時刻が t_2 であったとする。

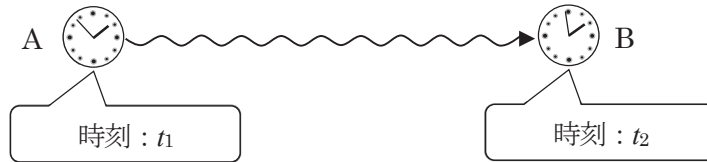


図7.1

そして、B地点に届いた光は同時に反射してA地点に向かったとする。ここで、B地点に届いた時刻と反射した時刻は同一地点のできごとだから、いかなる立場から見ても同時刻に起こった出来事である。図7.2のように、反射した時刻が t_2 であり、A地点に戻った時刻が t_3 であったとする。

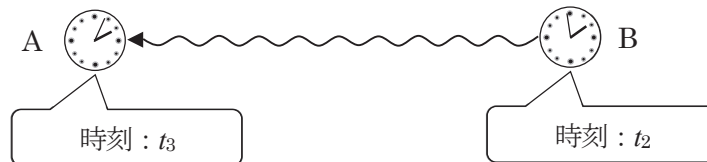


図7.2

光の速さは不変だから、光がA地点からB地点に行くのにかった時間 $t_2 - t_1$ とB地点からA地点に戻るのにかった時間 $t_3 - t_2$ は同じになる。すなわち、

$$t_2 - t_1 = t_3 - t_2$$

が、同時刻の定義である。

A地点とB地点の時計が同時刻に合わせられていない場合はどうすればよいだろうか。例として、A地点から光が放たれた時刻が1時丁度（ $t_1 = 1:00:00$ ）で、B地点に届いて反射した時刻が1時0分5秒（ $t_2 = 1:00:05$ ）で、A地点に戻ってきた時刻が1時0分4秒（ $t_3 = 1:00:04$ ）であるとする。A地点に戻ってきた時刻の方がB地点で反射した時刻よりも早いことから、計算するまでもなく同時刻に合わせられていないのは明らかである。これを同時刻にあわせるためにはどうすればよいであろうか。

同時刻の定義より、光が行くのにかかる時間と戻るのにかかる時間は同じなのだから、それぞれの時間は行って戻るのにかった時間を2で割ったものに等しい。すなわち、

$$t_2 - t_1 = t_3 - t_2 = \frac{t_3 - t_1}{2}$$

である。A地点の同一の時計で測った、行って戻るのにかった時間は $t_3 - t_1 = 4$ 秒であるから、 $t_2 - t_1 = t_3 - t_2 = 2$ 秒となる。一方、例では、 $t_2 - t_1 = 5$ 秒と $t_3 - t_2 = -1$ 秒であるから、A地点の

時計は3秒遅れている（あるいは、B地点の時計は3秒進んでいる）ことになる。ゆえに、B地点の時計と同時刻に合わせるには、A地点の時計を3秒進ませればよい。

8. 同時刻の差

同時刻の定義を用いて、地面に置かれている時計と電車の中の時計をそれぞれ図8.1のように同時刻に合わせたでしょう。そして、電車の中心でホタルが光ったとする。

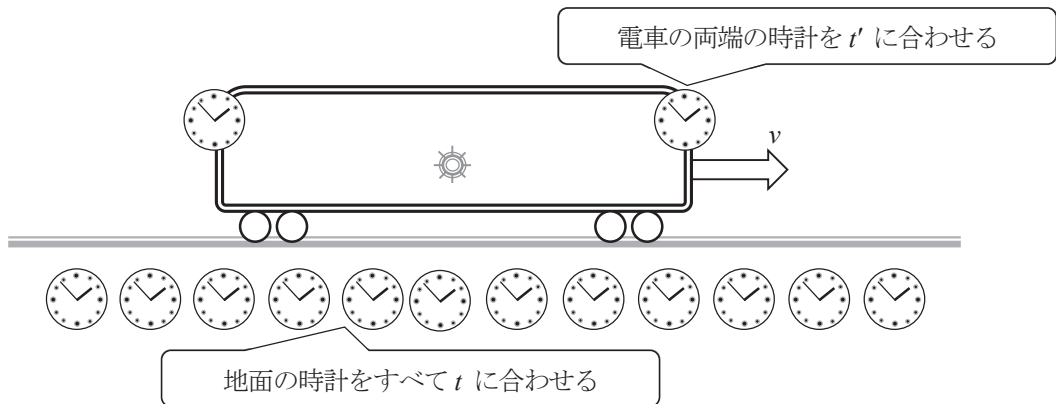


図8.1

電車の中の人にとっては、周りの景色が動いて電車は止まっている。その中心で放たれた光は全方向に同じ光速 c で伝わるのだから、図8.2のように左端 A' と右端 B' には同時刻 t_A' に光が届く。

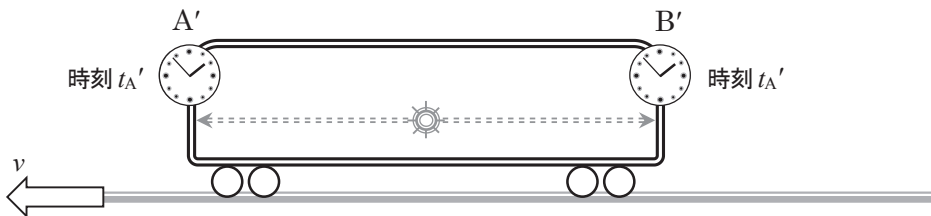


図8.2

同じ現象を地面にいる人の立場で見てみよう。電車の中心で放たれた光が伝わる間に電車はわずかに動くから、図8.3のように電車の左端 A' に光が届いたとき、右端 B' には光は届いていない。

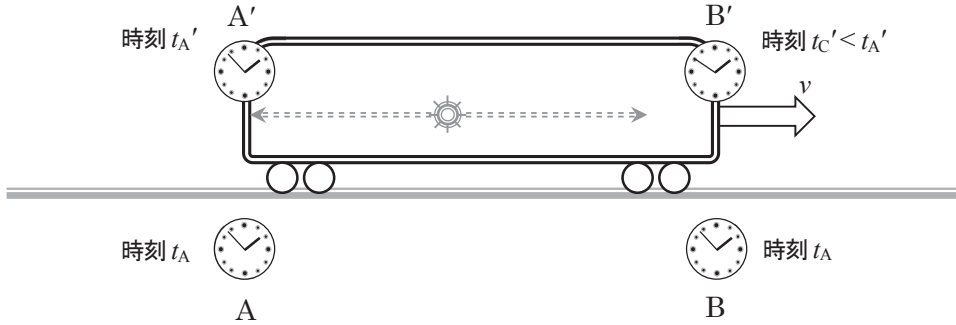


図8.3

電車の中の時計では両端に光が届いた時刻が t_A' であるから、地面Aにいる人が時刻 t_A で見た左端 A' の時計の時刻は t_A' である。一方、地面Bにいる人が同じ時刻 t_A に見た右端 B' には、まだ光が届いていない。ゆえに、地面Bにいる人が見た右端 B' の時計の時刻を t_C' とすると、その時刻は光が届く前の時間を指しているから、 t_C' は t_A' より過去の時間となっている。

この思考実験から、地面の別々の時計は互いに同時刻に合わせられ、電車の中の別々の時計も互いに同時刻に合わせられるが、地面と電車の時計を互いに同時刻に合わせることはできないことがわかる。すなわち、地面の時間と電車の時間は異なっている。このことは、絶対時間が成立しないことを物語っている。

9. 時間差を求める

電車の中心で放たれた光は、電車の中で観測すると両端に同時刻に到達する。一方、地面で観測すると左端に到達してから右端に到達する。この時間差はどのくらいであろうか。最後にこれを見積もってみよう。

電車が速度 v で走っていて、その長さは地面で測ると l であるとする。図9.1のように、地面の時計が時刻0のとき、電車の中心でホタルが光ったとする。

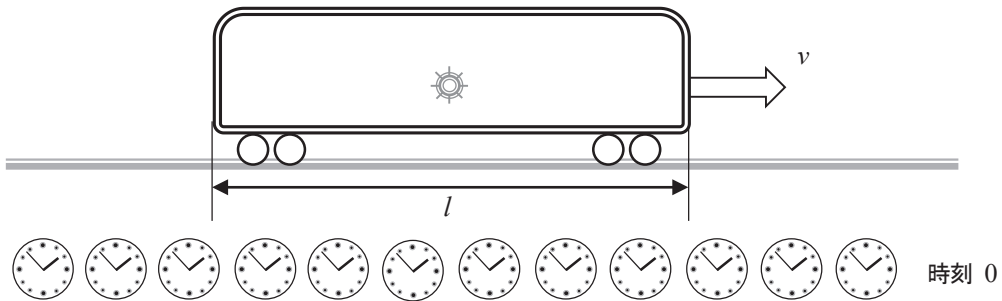


図9.1

時間が過ぎて時計が時刻 t のときに、ホタルの光は電車の左端に届いたとする。このとき電車は速度 v で走っているので、図9.2のように vt だけ右に移動している。同時に、左に向かったホタルの光は ct だけ進んで電車の左端に届いている。

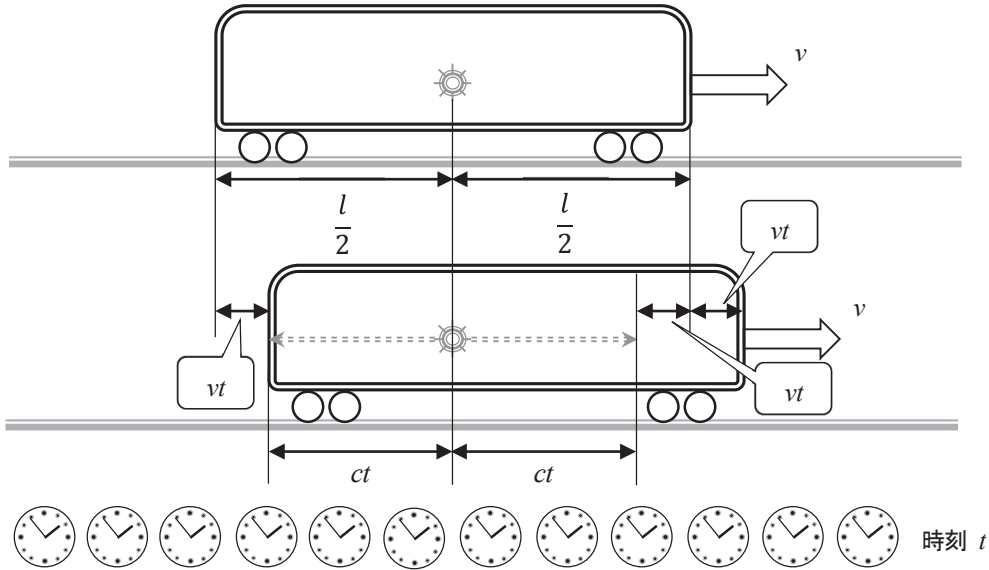


図9.2

図9.2からわかるように、光の進んだ距離 ct と電車の移動距離 vt の和は電車の長さ l の半分となる。これを用いると時間 t を

$$ct + vt = \frac{l}{2}$$

$$(c + v)t = \frac{l}{2}$$

$$t = \frac{l}{2(c + v)} \quad \dots\dots ①$$

と表せる。

さらに、 Δt だけ時間が過ぎて、光が電車の右端に届いたとする。この Δt が見積もるべき、電車の左端に光が届いてから右端に届くまでの時間差である。図9.3のように、電車はさらに $v\Delta t$ 移動している。同時に、右に向かっている光はさらに $c\Delta t$ 進んで電車の右端に届いている。

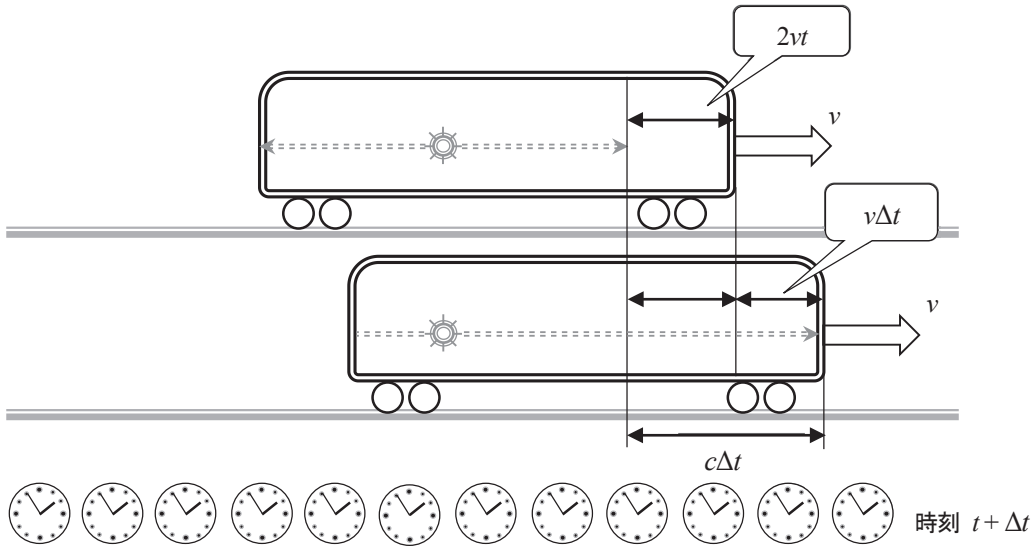


図9.3

図9.3からわかるように、光がさらに進んだ距離 $c\Delta t$ は $2vt$ と電車がさらに進んだ距離 $v\Delta t$ の和であることがわかる。すなわち、

$$\begin{aligned} c\Delta t &= 2vt + v\Delta t \\ c\Delta t - v\Delta t &= 2vt \\ (c - v)\Delta t &= 2vt \end{aligned}$$

となり、よって時間 Δt を

$$\Delta t = \frac{2vt}{c - v}$$

と表せる。この式に①式を代入すると

$$\begin{aligned} \Delta t &= \frac{2v}{c - v} \times \frac{l}{2(c + v)} \\ \Delta t &= \frac{vl}{(c^2 - v^2)} \\ \Delta t &= \frac{vl}{c^2(1 - v^2/c^2)} \quad \dots\dots(\text{公式1}) \end{aligned}$$

となる。この式を公式1と呼ぶことにしよう。

公式1から何がわかるだろうか。まず、 $v = 0$ にすると、 $\Delta t = 0$ となる。これは電車が止まっていれば、地面の同時刻と電車の同時刻は同じになることを意味している。次に、 $l = 0$ にする

と、 $\Delta t = 0$ となる。 l は電車の長さとしたが、同時刻を問題としている場合は、むしろ、電車の両端に置かれた2つの時計の間の距離と考えた方がよい。このように、 $l = 0$ とは2つの時計が同じ場所にあることを意味しており、同じ位置にある2つの時計の時間差はゼロとなる。すなわち、同一点で同時刻に起こった2つの事象は、別な慣性系で観測しても同時刻の事象となる。

公式1は l に比例している。ゆえに電車の長さが大きくなれば、あるいは2つの時計の間の距離が大きくなれば、時間差はそれに比例して大きくなる。また、速度が大きくなると、分子の v は大きくなる。さらに、分母の $(1 - v^2/c^2)$ は速度 v が光速 c に近づくほど小さくなる。ゆえに、速度が大きくなれば時間差はより大きくなる。ただし、一つ気を付けなければならないことがある。距離 l は走っている電車の長さであり、止まっているときの電車の長さ l_0 とは異なるということである。

3節で、ガリレイ変換では電車の長さが変わらないことを示した。ガリレイ変換は絶対時間の原理が基となっている。しかし、光速が不変であるという事実に基づくと、絶対時間の原理は成り立たないことが明らかとなった。ゆえに、速度によって電車の長さが変わらない保証はどこにもない。むしろ、変わると考えるのが自然である。実際、速度が大きくなると長さは縮むのであるが、その証明はまたの機会に譲ることにしよう。

10. おわりに

同時刻の相対性は、特殊相対性理論の帰結の中でも特に重要である。アインシュタインは特殊相対性理論を説明するために、同時刻の相対性の思考実験を好んで用いている。この思考実験から絶対時間が成立しないことは明らかである。絶対時間、すなわち、時はどこでも同じテンポで進んでいくことは「常識」であった。しかし、それは単に「常識」に過ぎなかったわけで、当たり前のことではなかったのである。当たり前のことには理由がある。理由がわからないで「当たり前」と考えてはいけないのである。むしろ、理由がわからない「当たり前」を見つけ出し、それを疑ってみることが科学の進歩につながると言える。

本論では、2節で電車の長さを測ることを考えた。改めてその意味を考えてみよう。物の長さとは同時刻に右端と左端がどの位置にあるかで測られる。一方で、我々は物差しで物の長さを測るとき、両端を同時に見たりはしない。では、なぜ物の長さを測ったと言えるのだろうか。それは、時間が経過しても物差しと物の相対的な位置が変わらないように固定しているからである。もし固定していなければ、同時刻に両端の位置を測らない限り、正確な長さを知ることはできない。逆に、走っている電車の長さであっても、同時刻に両端の位置を測れば、正確な長さを知ることができる。

ゆえに、同時刻が変わることがあれば、長さが変わることになる。ある立場では同時刻に起こったことが、別な立場では異なった時刻に起こる。こんなことが起こりうるのであろうか。5節で紹介した光速不変の原理を認めれば、それは起こりうることであることがわかる。これは時

を刻むテンポが立場によって違うことを意味する。一方で、我々は、時がどこでも同じテンポで刻まれるという常識に慣れきってしまっている。その常識が相対性理論の理解を妨げている。常識を取り払えば相対性理論はもっと理解しやすくなるだろう。光速不変の原理は実験的に正しいことが確かめられている。一方、時がどこでも同じテンポで刻まれることを確かめた人は誰もいないのである。

常識がいつも正しいとは限らない。これは、言われるまでもなく、多くの人が知っているであろう。しかし、我々は知らないうちに常識に慣らされてしまう。それはある程度仕方のないことなのかもしれない。常識に染まりきってしまわないためにはどうすればよいであろうか。その一つの方策は、疑問を持ち続けることである。アインシュタインはまさにそうであった。彼は、疑問を持ち続けて考え抜くことによって真実を見出すことに成功したのである。

ここで、教育について考えてみたい。教育によって、常識が身に付けさせられることもあれば、疑問を持つ心が育てられることもある。今までの議論から、それは一見相反するようにも思える。しかし、常識を身に付けることと疑問を持つ心は対立するものではない。それはバランスの問題のようにも見える。それでも、常識について常に考える必要はあるのではなからうか。特に、「常識」と言う言葉だけで片付けられている事柄については、疑問を持って考えてみるべきなのかもしれない。

アインシュタインその人には教育者としても見るべきものが多くある。最後に彼の教育に関する言葉を一つ紹介しよう。

「わたしの考えでは、何が悪いといって、学校が主として恐怖、権力、作りだされた権威によって運営されるほど悪いことはない。そのようなやり方は、生徒の健康な感情、誠実さ、自信をこわしてしまう。そのようにして卑屈な臣民が作りだされる」^{[4][5]}

教育者としては何とも耳の痛い言葉であるが、それ以上に深い意味があるように見える。主格と所有格を変えてみよう。例えば、子どもを持つ親として、「学校」と「生徒」をそれぞれ……。これ以上は、自分で自分の首を絞めそうな気分になるので、今回はここで筆をおくことにする。

〔補注〕

- (1) 本当の意味での慣性系は地球上にはない。それは重力が働いているからである。慣性系と言えるものを想像するとすれば、宇宙にぽつんと浮かんだ宇宙船を思い浮かべるとよい。一方で、地球の重力はかなり弱いので、地球上の止まった座標系や一定の速度でまっすぐ進む座標系は近似的な慣性系と言える。
- (2) 電車から見て、雨粒が曲線的にならないで直線的な斜めに見えるのは、雨粒が一定の速さで落ちているからである。それに対してボールが曲線的に見えるのは、加速、すなわち速度を上げながら落ちているからである。
- (3) 2つのできごととは、例えば3節の図3.2や図3.3では、ボールを離れたできごととボールが落ちたできごとで

ある。絶対時間とは、ボールを離して落ちるまでの時間間隔がある人から見て1秒であったとすると、それを他の人がどのような状態で見ても同じ1秒となることである。

〔参考文献〕

- [1] 「アインシュタイン150の言葉」、ジェリー・メイヤー&ジョン・P・ホームズ(編)、ディスカバー21、2003年11月15日 第32刷発行
- [2] 陰山英男、「子供は無限に伸びる」、PHP研究所、2002年2月6日
- [3] 「アインシュタイン相対性理論」、内山龍雄(訳・解説)、岩波文庫、1995年5月8日 第18刷発行
- [4] C. ゼーリッヒ、「アインシュタインの生涯」、広重徹(訳)、東京図書、1968年1月20日 第12刷発行
- [5] 福島肇、「新装版相対論のABC たった二つの原理ですべてがわかる」、講談社、2007年7月20日

相対性理論の入門書は枚挙に暇がないが、解説をわかりやすくするために参考にした初心者にも読みやすいと思われる文献には下記がある。

- 内山龍雄、「相対性理論入門」、岩波新書、1979年2月20日 第3刷発行
- ハラルド・フリッチ、「世界を変えた式——アインシュタインVSニュートン」、青木薫(訳)、丸善、1996年9月20日
- 松田卓也・二間瀬敏史、「なっとくする相対性理論」、講談社、1996年10月20日
- 松田卓也・木下篤哉、「相対論の正しい間違え方」、丸善、2002年10月15日 第3刷発行

(こんどうよしひこ 國學院大學人間開発学部初等教育学科教授)

(にしかわてつお 了徳寺大学教養部准教授)