

Title	長さと時間の相対論
Author(s)	仲座, 栄三
Citation	沖縄科学防災環境学会論文集(Physics), 1(1): 1-8
Issue Date	2017-02-17
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12001/20786
Rights	

長さ と 時間 の 相 対 論

仲 座 栄 三¹

¹正会員 琉球大学工学部環境建設工学科 (〒903-0213 沖縄県西原町字千原 1 番地)

E-mail: enakaza@tec.u-ryukyu.ac.jp

宇宙線ミューオンの寿命の観測, Hafele & Keating の実験に始まる航空機やGPS衛星搭載の原子時計の時間の遅れの観測, 重力場における原子時計の時間の遅れの観測, LIGOによる重力波観測など, これまでに物理学界が実施してきた相対性理論に関する観測結果の解釈が正されている. アインシュタインは, 特殊相対性理論の中で, ローレンツ変換後の時空を運動系の時空と見なした. その結果, 一定速度で運動している物体の運動方向の長さそして時間は短縮して観測されるとした. また, エネルギー・運動量の存在する場の時空は実際に歪んでいると考えた. 本論は, こうして観測される観測値は見かけ上のものであって, 「相対論的座標系を導入し, それらを数学的に定義される1つの慣性系上で, 互いに静止した関係となって測定するプロセスを経ると, 歪みのない時空, そして常に一定のテンポで時を刻む時計が観測される」ことなどを明らかにしている.

Key Words : *relativity, new theory of relativity, twin paradox, length contraction, time dilation*

1. はじめに

アインシュタインによって提示された相対性理論に対するこれまでの我々の理解は, 『静止している原子時計に対して, 一定速度で運動している原子時計の時間は遅れる』あるいは『一定速度で動いている棒の長さは短縮している』というものであった^{1,2}. そのことから, 時間や長さに関する各種のパラドックスが派生してきた.

『アインシュタインの相対性理論からはパラドックスが派生する』という指摘に対して, 現代物理学界の大方の認識は, 『派生されない』というものであった. すなわち, 相対性理論からパラドックス等が派生するという主張は, 『相対性理論に対する誤解』から生じるものとして指摘されてきた.

現代の物理学界が正しいと認める物理的解釈を, 著者自身も長年正しいものとして認めてきた. しかしながら, 『一定速度で運動している原子時計が, 静止している原子時計に対して遅れているのであれば, 地上の原子時計はどこのかような原子時計に対して遅れるものか?』この間に答えることは, 次つぎと静止した時計を追い求めることになり, これはまさに『絶対性理論の探求』を意味する.

こうした中で著者は, 『これまでの相対性理論は, 実は, 光の速度不変の原理に拠る絶対性理論である』とする結論に陥った. 調べてみると, アインシュタインも, 晩年, 「相対性理論」を「普遍性理論」と呼び名を変えたかったようである.

しかし著者は, 遂に, アインシュタインの相対性理論が誤りであったことの証拠をつかむことになる³. その内容が新・相対性理論としてまとめられている⁴. 以下では, その内容から, 特に, 「長さ」と「時間」について

説明を行い, 著者の提示する新相対性理論の正しさを具体的に示すことにする.

2. アインシュタインによる長さ と 時間 の 相 対 論

アインシュタイン自身が, 特殊および一般相対性理論について解説している². それによると, 長さ と 時間 に対する相対性は, おおよそ以下のとおりである (著者による補足が若干施してある).

距離を測るには1つの基準体が必要であることはすでに知られている. いちばん簡単なのは, 列車自体を基準体(座標系)として用いる方法である. 列車に乗っている観測者は, 列車に沿って印を付けた1点からもう一つの点に達するまで測量棒を繰り返し動かしていけば, それら2点間の距離を測量できる. しかし, レールの側(軌道堤)から列車上のその2点間の距離を割り出す段になると, 事情はまったく別である. そこでは次のような方法が示されよう.

距離を測ろうとする車内の2点を A'B' とする. この2点は, 軌道堤に沿って速度 v で動いている. さて, われわれが第一に問題にするのは, 列車上の2つの点 A'B' が一定時刻 t に, ちょうど通り過ぎて行くときの軌道堤上の A および B の点である. 軌道堤上のこれら2点間の距離は, メートル尺を軌道堤に沿って繰り返し動かしていくことによって得られる.

この第二の測定が, 第一の測定と同じ結果を与えるにちがいない, とまったくア・プリオリに決めつけてしまうことはできない. 軌道堤から測ることのできる列車の長さは, 列車そのものから測定したものと違っていることがありうるのである. このような事情から, 次の異議が生じてくる. すなわち, ある単位時間内に(列車から測って)

車中の距離が $w(m)$ を行くとするなら、(軌道堤から測って)同じ $w(m)$ である必要はない. …

座標系 K' の x' に沿って、メートル棒を始点が点 $x' = 0$ に、終点が点 $x' = 1$ に重なるように置く。では、座標系(静止系) K に対して相対的なメートル棒の長さはどれほどになるか? これを知るには、座標系 K に対して相対的な測量棒の始点と終点が、ある一定の時間 t に座標系 K のどこにあるか、を問いさえすればよい。ローレンツ変換の式からこれら2点を求めることができる。

$$x(\text{測量棒の始点}) = 0.0 \times 1/\gamma,$$

$$x(\text{測量棒の終点}) = 1.0 \times 1/\gamma$$

この2点間の距離は、 $1/\gamma$ である(γ はローレンツ係数)。

静止系 K に関して棒は速度 v で動かされる。したがって、速度 v で長さ方向に動く剛体のメートル棒の長さは $1/\gamma(m)$ となることがわかる。それゆえ、運動する剛体棒は同じ静止状態にあるときの棒よりも短くなり、その運動状態が速くなればなるほど、それだけ短くなるのである。

速度 $v = c$ となると $1/\gamma = 0$ となり、さらに速度が大きくなると平方根は虚数になる。そのことから、相対性理論では、速度 c は現実の物体にとって、到達できずまた越えられない一つの限界速度の役をつとめている、と結論される. …

もしもガリレイ変換にもとづいたならば、運動にもなって測量棒が短縮するとはいえなかったであろう. …

さて、 K' の原点($x' = 0$)に持続的に静止している秒時計が1つあると考えよう。この時計がつづけて刻む2つのカチカチを、 $t' = 0$ と $t' = 1$ とせよ。この2つのカチカチに対し、ローレンツ変換の式によって、 $t = 0$ および $t = \gamma$ 。 K から判断して、時計は速度 v で動かされている。すなわち、この基準系から判断すると、その時計の2つのカチカチの間に1秒が通過するのではなく γ 秒であり、したがっていくらか長い時間になる。時計の進みは、静止状態よりも運動中のほうがゆるやかになるのである。ここでまた、光速 c が到達不能な限界速度の役を演じている。

3. 新・相対性理論による長さや時間の相対論

長さや時間に関するアインシュタインの説明を、著者は長年正しいものとして認めてきた。現代物理学界は、いまなお、そのことを正しいものとして認めている。しかし、そのことはまったくの誤りであった。

上に述べたアインシュタインの方法にしたがって、軌道堤から測定した列車の長さは、アインシュタインの説明に反し、列車内の観測者の測る長さと同じであった。この結論は、従来の解釈を信じる者からは驚きであろうが、実際にやってみるとあまりにも明々白々である。

相対性理論は、そのようなことではなかった。アインシュタインが述べた軌道堤からの測定とは、光測量や写真測量による(電磁波を用いての)測定として説明されるべきであった。しかし、そうであってもアインシュタインの説明は正しくない。このことは、次のように容易に説明できる。

- 1) 軌道堤に列車が静止しているとき、列車内の観測者の測る列車長も、軌道堤上の観測者の測る列車長も、共に、 l_0 とする。
- 2) 列車内の観測者及び軌道堤上の観測者の持つ時計が共に0時を指す瞬間に、列車は、軌道堤上の観測者に対して一定の速度で運動を始め、その運動状態が継続している。
- 3) 相対性原理によれば、軌道堤から一定速度で運動しているものと観測されている列車内の観測者は、自分が軌道堤に対して一定速度で移動していることを知る余地はない。したがって、列車内の観測者は、常に、自分と列車とは静止しているものとの意識の上に、列車内の長さを互いに静止した関係となって測定し、それが常に、長さ l_0 となっていることを確認できる。
- 4) 一方、軌道堤上に静止している観測者は、一定速度で遠ざかる列車の長さを光測量によって計測できる。光測量によれば、動いている列車の長さは(アインシュタインの説明とは逆に)、それが静止時の長さ l_0 よりも伸びて観測される。このとき計測される長さを l とする(実際の計算は後に示される)。
- 5) したがって、静止系(軌道堤上の観測者)の観測する時間は、列車と互いに静止した関係となって計測した際の測量時間 (t_0) よりも長い時間 (t) となる。その要因は、観測者に対して動いている物の運動方向の長さの測量に関しては、計測する2点間で時間の同時条件が満たされていないというところにある。
- 6) このような軌道堤上の観測者の測定に対して、相対性原理によれば、列車内の観測者もまた同時に、自分を静止系の観測者と見なした上で、一定速度で遠ざかる軌道堤上の2点間の距離(軌道堤上の観測者が長さ l_0 と観測している軌道堤上に固定された2点間の距離)を、長さ l と計測し、それに要した測量時間を t と計測することになる。
- 7) したがって、軌道堤上の観測者の持つ時計の経過時間も、列車内の観測者の持つ時計の経過時間も、まったく同じとなる。
- 8) 軌道堤上の観測者も、列車内の観測者も、自分に対して一定速度で運動している物の運動方向の長さを正しく計測していない。すなわち、計測値 l_0 と l とは一般に等しくない。それらは観測者と被測定物とが互いに静止した関係にあるときにのみ等しい。
- 9) 以上の試行実験によって、観測者は、彼に対して一定速度で運動する物の運動方向の長さを正しく計測できていないことが明らかにされる。
- 10) 一方、(アインシュタインが説明する方法)軌道堤上に配置した無数の正確な時計の助けを借りて計測される列車の長さ(一定速度で運動している物の運動方向の長さ)は、それが軌道堤に静止している時に計測された時の長さと同じに等しい。アインシュタインの主張は、こうして論駁される。

ここに取り上げた列車の計測と同様な問題として、松田・木下(2001)⁵⁾、松田(2005)⁶⁾は、一定速度で飛行する2台のロケット間の距離を測る問題を取り上げている。その議論の中で、地上から観測される一定速度で飛行する2台のロケット間の距離は、それが地上で静止して計測されるとき長さとなり終始同じ長さとなることを図式解法で示している。しかしながら、彼らは、そのことがアインシュタインの主張を論駁していることに気づいていない。逆に、アインシュタインの説明を裏付けるために、2台のロケット内の飛行士の測るロケット間の距離は、それが地上に静止して、観測者がそれと互いに静止した関係となって観測する時の長さよりも実際に伸びていると説明している。このとき、ロケットには実際に引張力が作用しているとも述べている。結果として、アインシュタインの「静止系から観測される運動物体の長さは、それが運動系で互いに静止した関係となって計測される長さよりも短縮している」とする説明を正しいものと結論づけている。

実は、この種の問題は、インターネット上や相対性理論の解説書などで、ベルの宇宙船パラドックス (Bell's spaceship paradox) として紹介されている⁷⁾⁸⁾。それらの結論は、いずれも、松田らと同様に、アインシュタインの相対性理論の正しさを主張する内容となっている。

しかしながら、そのような説明を受け入れると、先に時間に関して述べたように、「それでは、運動速度に関係しない、すなわち絶対的に静止している場はどこに存在するのか？」という問いを投げられ、その追究は絶対性理論の探求へと通じてしまうことになる。

アインシュタイン、松田やBellの説明は、これまで正しい解釈として現代物理学界に受け入れられてきている。しかし、このような解釈は、アインシュタイン自身が導入した相対性原理に背く。

先に行った1)～10)の議論で示されるように、観測者に対して一定速度で運動する物の、運動方向の長さは正しく計測されていない。このことを解決するために導入されるのが相対性理論である。

しかしながら、アインシュタインの導入した相対性理論は正しくなかった。その誤りの要員は、その相対性理論の前身であるガリレイの相対性理論にまでもさかのぼる。ガリレイは、「ガリレイ変換を経て、静止系の観測者の視点は運動系の時空による視点へと移る」と考えた。その考えは、アインシュタインによってそのまま彼の相対性理論に引き継がれた。この誤った設定による歪みは、相対性理論にパラドックスという形でその片鱗を今日まで現しつづけてきた³⁾。

Hafele & Keating (1972)⁹⁾による原子時計を用いた観測結果をはじめとして、これまでに行われた様々な物理学実験は、アインシュタインの主張が正しいことを実証するものと考えられている。さらに、ごく最近では、LIGOの観測結果が時空の歪みを重力波として捉えたと報じている(2011, 2/11)¹⁰⁾。しかし、こうした現代物理学界による実験のすべては、絶対的な時間及び長さ、絶対的に平らな空間の追究を許し、それそのものが絶対性理論の探求となる。

仲座(2015)は、こうした現代物理学界による相対性

理論の解釈を正し、新しい相対性理論を提示している³⁾⁴⁾。もちろん、その理論からは一切のパラドックスも派生されることはない。その核心は、ガリレイ変換やローレンツ変換の後の時空を、運動系の観測者の時空と置くのではなく、静止系の観測者が運動系と並走して運動系内の時空や力学を観測するために、数学的に設定される移動座標系の時空と置くところにある。

ここに、静止系及び運動系の2つの座標系に加えて第3の座標系が設定される。しかしながら、前2者が物理的に設定される物理的座標系であるのに対し、後者は相対性理論によって数学的に設定される移動座標系であり、数学的移動座標系 (mathematical moving coordinate system) あるいは相対論的移動座標系 (relativistic moving coordinate system) と呼ぶことができる。この座標系は、常にそれを構築する側の物理的座標系と結び付けられており、その意味においても、相対論的移動座標系もしくは相対論的座標系と呼ぶことができよう。

さて、先の議論1)～10)で説明されたように、観測者は彼に対して一定速度で運動している物の長さをその運動方向に正しく計測していない。すなわち、静止系の観測者は、運動系の時空や力学を正しく計測していない。

正しい時空の計測や力学の観測を行うためには、静止系の観測者は、数学的手法を用いて、運動系と並走する座標系を新たに設定し、その座標系から運動系の力学を静止力学として観測する必要がある。そのために必要な数学的変換則がガリレイ変換であり、かつローレンツ変換である。それらの変換則にもとづいた力学を相対論的力学 (relativistic dynamics) と呼ぶことができる。

いま、軌道堤上の観測者の測る時空を時間 t 及び空間座標 (x, y, z) で表し、運動系のそれらを T 及び (X, Y, Z) で表すことにすると、相対性原理にもとづいて、いかような時点においても時間単位や長さの単位に関して、次なる関係式が満たされていなければならない。

$$|t| = |T| \quad (1)$$

$$|x| = |X|, \quad |y| = |Y|, \quad |z| = |Z| \quad (2)$$

これらの関係式は、いかような慣性運動においても、時間や長さの単位が運動状態によって変化することはないことを表している。

以上の条件設定に対し、静止系の観測者が彼に対して一定速度で運動している運動系の時空や力学を観測するために数学的に導入する相対論的移動座標系の時空は、次のように設定される³⁾⁴⁾。

$$t' = \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \left(t - \frac{vx}{c^2} \right) \quad (3)$$

$$x' = \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} (x - vt) \quad (4)$$

$$y' = y, \quad z' = z \quad (5)$$

ここに、時間 t' 及び空間座標 (x', y', z') は、静止系の観測

者が数学的に設定する相対論的移動座標系の時空を表す。また、 c は光の速さ、 v は静止系に対する運動系の相対速度を表す。運動方向は x 軸方向にある。

アインシュタインの相対性理論に基づく従来の解釈は、式 (3) ~ (5) の左辺に示す時空を、運動系の時空として位置付けている。ここに、ガリレイ変換から今日に至るまで連続として引き継がれてきた誤りを見ることが出来る。

ガリレイ変換に対する我々の従来の解釈は、式 (3) ~ (5) において、 $v^2/c^2 \ll 1$ と設定することで、見かけ上与えることができる。しかしながら、そのような設定で数値的に従来の考え方と同じ値を得たとしても、その背景にある物理的思想には雲泥の違いがある。

4. 時間及び長さの観測値の正しい相対論的解釈

以上の議論によって、観測値を正しく解釈する準備はすでに整った。以下においては、軌道堤上から観測される列車の長さの正しい解釈について説明する。

アインシュタインが主張した軌道堤上の観測者の測定法に基づく列車の長さの測定値は、彼の予想に反し、終始、一定値を示すことはすでに説明したとおりである。

アインシュタインの相対性理論によれば、観測される長さについて、次なる関係式が与えられる。

$$l = \sqrt{1 - v^2/c^2} l_0 \quad (6)$$

ここに、 l は静止系から観測される運動物体の運動方向の長さであり、 l_0 はその長さを運動系の観測者がその物体と互いに静止した関係となって測定する長さを表す。

式 (6) に対する物理学界の認識は分れている。その1つは、長さ l_0 を静止系の観測者がその系内で互いに静止した関係となって測定するときの長さと考えている。このとき、その長さは、運動系の観測者がその物体と互いに静止した関係となって測定する長さと同じとなり、長さの定義が静止系と運動系とで対称となる。このような解釈の上で、静止系の観測者に観測される運動物体の長さを l と定義しているため、運動物体の長さは、静止系から眺めると式 (6) に則り短縮していると定義される。

他の1つは、松田らの主張に見る長さの定義であり、静止系から計測される長さが l であり、その長さは、その物体が静止系の観測者と互いに静止した関係となって測定された時の長さであると定義される。このとき、運動系の観測者がその運動物体と互いに静止した関係となって測る長さ l_0 は、静止系の測定した長さ l よりも伸びていて、それらの関係が式 (6) で表されると定義される。

前者の定義の場合、軌道堤上から測定される列車の長さが、それが軌道堤上で静止して観測されるときに長さと同じであるとする前章における議論の結論に反する。また、後者の定義の場合、運動状態に依存しない物の長さを定義する必要が生じるため、絶対的静止状態の物体の存在、すなわち絶対性理論の探求を許すことになる。

以上の議論から、現代物理学界による相対性理論の解釈は誤りであると結論される。この結論は、式 (3) ~ (5) を相対性理論の基礎理論として位置付ける新相対性理論の立場からは、当然の帰結と言える。

以下においては、著者の提示する新相対性理論に拠って、正しい相対論的時間及び長さの定義が説明される。

相対性理論における長さの測定は、光を用いたものである。そのため、相対性理論の基礎式においては、光の速さが導入されている。

さて、軌道堤上の観測者が光測量によって、彼に対して一定速度で運動する列車の長さを測量すると、その長さは、光が列車を追いかけて測量する場合と、逆に、光が列車の運動方向に向かって測量する場合とで異なる。したがって、それらに要した測量時間もそれぞれ異なる。それらの平均測量時間 t は、次のように与えられる。

$$t = \frac{1}{2} \left(\frac{l_0}{c-v} + \frac{l_0}{c+v} \right) = \frac{1}{1-v^2/c^2} \cdot \frac{l_0}{c} \quad (7)$$

ここに、 l_0 は列車が軌道堤上で静止している際に、互いに静止した関係となって測定される長さを表す。したがって、その計測に要した時間 t_0 と長さ l_0 との関係は、次のように与えられる。

$$l_0 = ct_0 \quad (8)$$

また、式 (7) より、軌道堤上の観測者が光測量によって計測した列車の長さは、次のように与えられる。

$$l = \frac{1}{1-v^2/c^2} l_0 \quad (9)$$

したがって、軌道堤上の観測者に対して一定速度で移動する列車の長さは、従来の「短縮」して観測されるとする解釈とは逆に、「伸びて」観測される。このように長さが伸びて観測される理由は、静止系の観測者は運動系内の2点を同時に計測していないということにある。

静止系の観測者が、運動系内の2点に対して同時の条件を満たすためには、運動系と並走して、その2点と互いに静止した関係となって観測するための移動座標系の設定が必要となる。そのために導入されるのが、式 (3) ~ (5) に示す新・相対性理論の変換則である。

式 (3) によれば、数学的に設定される相対論的移動座標系の時間 t' と軌道堤上の (あるいは、列車内の) 観測者の時間 t (あるいは、 T) との関係が、次のように与えられる。

$$t' = \sqrt{1 - v^2/c^2} t \quad (10)$$

あるいは、

$$t' = \sqrt{1 - v^2/c^2} T \quad (11)$$

式 (10) 及び (11) は、静止系の時間と運動系の時間とが、常に、同じ値を取ることを示し、かつそれらが、相対論的移動座標系に対して短縮して受け渡されること

を表している。

式 (10) や式 (11) の物理的解釈は、次のように与えられる。

軌道堤上の観測者が一定速度で運動している列車に向けて光測量を実施すると、その光が列車内の観測者に伝える時間は短縮して観測される。そのことは、これまですでに行われている物理学実験によっても示すことができる。

例えば、観測者（静止系）に対して一定速度で遠ざかる星（運動系）の放つ光の振動数は、それを観測する静止系の観測者には、赤方偏移（redshift）して観測される。すなわち、星の放つ振動数 f_0 と、それが静止系で観測される振動数 f'_0 との間に、次の関係式が成立する。

$$f'_0 = \frac{\sqrt{1-v^2/c^2}}{1+v/c} f_0 \quad (12)$$

この関係式には、古典的ドップラー効果（1次の振動数シフト量）が含まれているため、相対論的振動数の変化量（2次の振動数シフト量、 f'_{0r} ）のみに着目すると、次の関係式を得る。

$$f'_{0r} = \sqrt{1-v^2/c^2} f_0 \quad (13)$$

すなわち、静止系や運動系の時計が示す時間 t_0 と、周波数の赤方偏移をもとに運動系の観測者に観測される静止系の時間 t'_0 との関係は、次のように与えられる。

$$t'_0 = \sqrt{1-v^2/c^2} t_0 \quad (14)$$

この関係式は、式 (10) に示す静止系の時間と相対論的移動座標系の時間との関係と一致する。

ここに示す実験とは逆に、星に座す観測者に対しては、地球から発せられる光の振動数 f_0 が、式 (12) の関係式で表される redshift を生じて (f'_0 となって) 観測される。この思考実験結果は、静止系と運動系とでまったく同じ時間が流れていることを示すものである。

L. Essen (1971)¹⁰⁾ は、アインシュタインの相対性理論を批判し、ローレンツ変換後の時間は、アインシュタインの言う「運動系の時間」に対応するのではなく、「運動系で観測される静止系の時間」を表すと主張した。式 (14) は、L. Essen の主張が正しいことを示している。

L. Essen の主張は正しかったこととなったが、彼は、当時、説明の修正に留っており、アインシュタインの相対性理論を書き換えるまでには至っていない。

さて、式 (10) 及び式 (14) が示すように、軌道堤上の観測者が光測量すると、その様子は、相対論的移動座標系に時間短縮して受け渡される。

したがって、列車と並走する相対論的移動座標系に受け渡される軌道堤上の光測量結果は、次のようになる。

$$t' = \sqrt{1-v^2/c^2} t = \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} t_0 \quad (15)$$

$$l' = \sqrt{1-v^2/c^2} l = \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} l_0 \quad (16)$$

ここに、 t' 及び l' は、静止系の観測者が運動系の長さとその運動方向に計測した際の観測時間 t と長さ l を、それぞれ相対論的移動座標系に変換した時の時間及び長さを表す。

いま、静止系として設定している軌道堤上では、光の速さが c として計測されている。相対性原理によれば、逆に運動系を静止系と見なすこともできるため、運動系に計測される光の速さも c でなければならない。すなわち、光の速さの不変性は、相対性原理が保証することとなる。

静止系の観測者は、構築した相対論的移動座標系に拠って運動系内の時空及び力学を互いに静止した関係となつて観測することができる。相対論的移動座標系の時間は、静止系や運動系の時計の示す時間に対して、式 (10) に示すように時間短縮して設定されている。したがって、運動系の観測者が彼に対して静止している列車の長さを測定するのに、 T 秒間の計測時間を要したとしても、相対論的移動座標系においては、それが短縮して、 $\sqrt{1-v^2/c^2} T$ 秒間であつたと設定される。そのため、相対論的移動座標系の観測者は、運動系内の距離を短縮して計測することになる。

したがって、相対論的移動座標系の時間にもとづいて、運動系内の静止した2点間の距離（列車の長さ） l_0 の測量に要する計測時間と計測長さは、それぞれ次のように与えられる。

$$t' = \sqrt{1-v^2/c^2} \frac{l_0}{c} \quad (17)$$

$$l' = \sqrt{1-v^2/c^2} l_0 \quad (18)$$

この相対論的移動座標系による計測は、運動系と互いに静止した関係となつての観測になるため、正しい計測となる。運動系の観測者が、自身の持つ時計の示す時間でなく、静止系から届く光の振動数シフトにもとづいて計測する静止系の時間〔式 (14) に示す時間関係〕に拠つて測定する場合も式 (17) 及び (18) と同じ結果を得る。したがって、 t' 及び l' に対して、ローレンツ変換の逆変換を施すことで、運動系の観測者は、静止系の観測者が運動系内の時空及び力学をいかに計測しているものかを知ることができる。

運動系と並走する相対論的移動座標系に届く時間と長さの情報を、さらに光通信にて静止系に送り返すと、静止系の受け取る時空の情報（時間 t'' 、長さ l'' ）は、式 (15) 及び (16) にもとづいて、次のように与えられる。

$$t'' = \sqrt{1-v^2/c^2} t' = t_0 \quad (19)$$

$$l'' = \sqrt{1-v^2/c^2} l' = l_0 \quad (20)$$

式 (19) 及び (20) に示されるように、静止系の観測

者が相対論的移動座標系を経て最終的に得る運動系の時空の情報は正しく、それが静止系で互いに静止した関係となって測定されるときの時空と一致する。

このことに関して、従来、相対性理論の解説書は、次のような関係式を与えてきた。

$$t = t_0 / \sqrt{1 - v^2 / c^2} \quad (21)$$

$$l = \sqrt{1 - v^2 / c^2} l_0 \quad (22)$$

これらの関係式は、式 (17) 及び式 (20) に対応すると想定されるが、その解釈は、新相対性理論にもとづく説明とまったく異なるものとなっている。

5. 加速度や重力が存在する場における相対論的座標系の設定

これまでの議論において、ガリレイ変換、ローレンツ変換は、静止系の時空を、運動系と並走する相対論的移動座標系へと変換することにあり、運動系の時空への変換ではないことを明らかにした。静止系の観測者は、相対論的移動座標系を構築することで、運動系と互いに静止した関係となって、運動系の時空及び力学が観測可能となることが示された。

このことと同様に、一般相対性理論で議論されている一般座標系を用いた時空の設定は、加速度や重力の存在を数学的にそして局所的に消し去り、数学的に設置される慣性系座標から時空や力学現象を観測するための数学的手法と言える。したがって、「重力によって時空が歪む」という表現は正しくない。時空が歪んでいるのは、加速度や重力の存在を消し去るために数学的に設定される一般座標系（以降、これを相対論的一般座標系と呼ぶ）の時空であり、そのことは実際に我々が見上げる空の空間が重力などで歪んでいるとする根拠にはならない。

式 (23) に示すアインシュタインが与えた重力場の方程式は、実際の空間の曲率を支配する方程式ではなく、エネルギー運動量テンソルの影響を、数学的に、運動方程式から消し去るために必要となる相対論的一般座標系の計量テンソルを得るための支配方程式と言える。

$$R_{ij} - \frac{1}{2} g_{ij} R + A g_{ij} = -\kappa T_{ij} \quad (23)$$

ここに、 R_{ij} はリッチテンソル、 R はスカラー曲率、 g_{ij} は一般座標系の計量テンソル、 A は定数、 T_{ij} はエネルギー運動量テンソル、 κ は重力と関連づけられる係数である。

先に式 (7) 及び (9) で示したように、我々は、観測者に対して相対速度を有する系の時空や力学を正しく観測し得ていない。正しい計測のためには、相対論的移動座標系を数学的に設定する必要があった。

これと同様に、観測者に対してエネルギー運動量テンソルがゼロでない場における時空及び力学の計測は一般に正しくない。エネルギー運動量テンソルが有意な大きさを持って存在する時空における運動は、そのテンソル

量に応じた時空の曲率を有する相対論的一般座標系の測地線上の運動と見なすことができる。その結果、そのような運動を加速度や重力の働かない慣性運動（慣性系）に結びつけることができる。このように数学的に構築される慣性系から眺めると、我々が加速度や重力の存在する場で、時間や距離をいかように測定しているのかが明らかとなる。

以上の議論により、我々は、数学的に相対論的一般座標系を導入することで、加速度や重力の効果を消し去り、1つの数学的慣性系上で時空や力学の観測が可能となる。逆に言えば、加速度や重力の存在する場における我々の時空の観測結果には常にそれらの影響が含まれているということになる。

これは、加速度や重力の強さを相対速度に置き換え、前章の式 (7) 及び (9) を用いれば、観測者は常に相対速度の大きさに依存した時空の観測結果を得るということと同じである。このようなとき、観測者は正しい観測結果を得ていない。

したがって、2011年、LIGO チームによって観測されたと報じられた時空の波の観測は、重力の影響を表す一種の波動現象の観測であったとしても、実際に存在する時空の歪みの伝播を表すものとの根拠にはならない。すなわち、我々の時空の観測値には、常に重力の影響が不可避免的に現れる。相対論的一般座標系を導入し、それらの影響を消し去った数学的慣性座標系上で、観測者は観測対象系と互いに静止した関係となれる。観測者は、そこで重力の影響を受けない観測が可能となる。

相対論的一般座標系の導入を経て得られる数学的慣性系から、逆に、我々の観測している時空を観測すると、そこには先と符号の逆転した加速度や重力の場が観測される。そこから、さらに相対論的一般座標系を導入することで、再び数学的慣性系上の測定結果を得る。このプロセスは、前章で式 (7) から式 (20) に至る過程に相当する。こうして最終的に得られる測定結果が、加速度や重力の影響を受けていない時空や力学を表すことになる。

アインシュタインの論じた一般相対性理論に関しては、例えば、地上から出発したロケットがUターンを経て地球に戻るとき、そのUターンの存在（すなわち、加速度の存在）が系間に非対称性を与えるものとされてきた。しかしながら、ここに議論される相対性理論によれば、Uターンしたのは、地球側であると説明することも可能になり、加速度や重力が作用する場であっても、相対性理論に対称性が保証される。

さて、アインシュタインの重力場の方程式の解としてシュヴァルツシルトの時空がある。これによれば、我々の測定する微小時間経過 Δt と、相対論的一般座標系を導入し、重力の影響を取り除いた数学的慣性系で観測される微小時間経過 $\Delta t'$ とに、次のような関係が与えられる。

$$\Delta t = \Delta t' / \sqrt{1 - a/r} \quad (24)$$

ここに、 a はシュヴァルツシルト半径であり、 r は動径方向の座標値を表す。

式 (24) は、我々の観測値が相対論的一般座標系を導入して得られる慣性座標系上にかような時間となって受け渡されるかを表している。この結果は、式 (15) に対応する。

従来の一般相対性理論においては、式 (24) の右辺に示す時間 $\Delta t'$ が、重力の作用しない慣性系で実際に観測される時間と見なされてきた。しかしながら、それはそうではなく数学的に設定される架空の慣性系の時間を表すことに注意を要する。

式 (24) を用いれば、地球上の地表近くの標高差 h を有する2地点における重力ポテンシャルの強さの違いがかような観測時間の違いを派生させるかが分かる。すなわち、次式が得られる。

$$\Delta t_1 = \Delta t_2 \sqrt{1 - gh/c^2} \quad (25)$$

ここに、 g は地表近くの重力加速度を表し、 Δt_1 は低地点1における時間経過、 Δt_2 は高地点2における微小時間経過、 h は地点1と地点2との標高差を表す。

この結果から、我々が加速度や重力の存在する場で計測する時間や空間は、それらの影響を受けて、無加速度や無重力の空間で測定される時間及び長さよりも歪んで計測されており、例えば、時間及び r 方向の長さについて、次の関係式で与えられる。

$$\Delta t = \Delta t_0 / (1 - a/r) \quad (26)$$

$$\Delta r = \Delta r_0 / (1 - a/r) \quad (27)$$

ここに、 Δt_0 及び Δr_0 は加速度や重力の存在しない場において実際に計測される微小時間及び微小長さを表す。

以上をまとめると、観測者に対して一定速度で運動している運動系の時空や力学の計測には、ローレンツ変換を適用し、運動系と互いに静止した関係となってその系内の時空や力学が計測できる。これと同様に、加速度や重力の存在する系においては、それらの強さに依存した計量テンソルを有する4次元の相対論的一般座標系を適用することで、それらの影響を消し去った数学的慣性系において時空及び力学を計測できる。

すなわち、ある観測者に対して一定速度で運動している系であっても、また加速度や重力が存在する系であっても、相対論的座標変換によって、数学的にそれらの系を静止系あるいは無加速度・無重力系と見なすことができる。その結果、異なる2系間で互いにかような力学現象を観測したとしても、それらの系の中で何れが絶対的に静止していて、いずれが絶対的に運動している系（あるいは、いずれの系が加速度や重力の存在する系）であるかどうかを決定付けることはできない、という結論に至る。このことが、相対性原理の本意となる。

運動状態の慣性系、そして加速度や重力の存在する系であっても、数学的にはそれらのすべてを1つの静止した系、あるいは無加速度及び無重力の系と見なすことができるので、力学現象を規定する物理法則は、そのような系に対してただ1つ存在すればよい。相対速度、加速度や重力の存在する場の力学に対する物理法則は、その

唯一の物理法則に相対論の逆変換則を適用することで得られる。そうして得られる法則に、我々が観測する物理現象は支配されることになる。これが、「すべての系で力学法則は同じ方程式で表される」とされるゆえんである。ここに導入される時空の変換則が相対論の基礎理論を成す。

これまでの議論に見るように、アインシュタインの相対性理論の構築において、その前提として導入されてきた光速不変の原理、等価原理などの類は、相対性理論構築に全く不必要となる。したがって、相対性理論構築の前提となる原理は、相対性原理のただ1つと結論される。

以上によって、これまで特殊相対性理論及び一般相対性理論としてそれぞれ分けて議論されてきた相対性理論が、相対性原理の下で、ここに統一されたと言える。

6. 物理学実験による検証

これまで議論してきた内容に関して、物理学界が実施してきた実験結果との乖離は存在しないと判断される。ただし、Hafele & Keating (1972) が行った実験結果などに見る相対速度の存在による時間の遅れの要因が未だ説明されていない。彼らの実験からは、観測者に対して一定速度で運動する時計の時刻は観測者の時計の時刻に対して遅れることを示しており、本論におけるこれまでの議論内容に背く。これまでの議論で明確なように、慣性系間で時間の相違があってはならず、そのことは相対性原理が保証することとなっている。

飛行機やGPS衛星を用いた実験においては、それらが一定の高度を一定速度で飛行したことになる。このことは、すなわち、飛行機が地上に対して慣性運動していたのではなく、地球中心から離れた半径をもって円周運動を行っていたことになる。よって、飛行機やGPS衛星は、常に動径方向に落ち続けていたことになる。その加速度の効果は、特殊相対性理論的に予測される時間の遅れの効果と一致する。

したがって、これまで慣性運動の効果による時間の遅れとして計測されてきた原子時計の遅れは、そうでなく、円周運動に伴う加速度（向心力）の存在による効果として説明される。すなわち、慣性飛行による時間の遅れとされて来たことは、そうでなく、加速度や重力の存在する場で力学現象を計測したためによる遅れであったと結論される。したがって、相対論的一般座標系を導入して得られる慣性系上でそれらを比較すると、原子時計には何らの遅れも生じていないことが確かめられる。正しい観測値は、この慣性系から再度の変換を経て与えられる。

その結果、最終的に、与えられる加速度や重力の影響を受けない時間 t'' 及び長さ l'' が、式 (26) 及び (27) に2度の変換を適用し、次のように与えられる。

$$t'' = t_0 \quad (28)$$

$$l'' = l_0 \quad (29)$$

ここに、 t_0 及び l_0 は加速度や重力の存在しない場において観測者と互いに静止した関係にある物の長さを

測定する際の観測時間及び測定長を表す.

式 (26) から式 (29) に至る過程は, 式 (7) から (20) に至る過程に対応させられる. 運動方向に直行する方向の長さの測定に関する従来の解釈も誤りであることが容易に示されるが, これについては, 別の機会に触れたい.

Rossiiが観測した宇宙線ミューオンの寿命の延びの観測結果¹²⁾に対する考察はすでに, 文献3)及び4)にて議論されているのでそれを参考にして頂きたい.

最後に, LIGOによる重力波の検出¹¹⁾は, 重力の強さの影響による時空の歪みでなく, 例えば式 (26) 及び (27) において, 右辺の分母のかっこ内で与えられる重力の影響の変動量が, 左辺に示す我々の計測値 Δt 及び Δl に影響を与えたのであって, 見上げる空の時空は, 右辺に示す Δt_0 及び Δl_0 を普遍的微小要素として持つ時間と3次元直交座標系で常に表示されたままにある. それがゆえに, 逆に重力波の検出が可能となったのである.

7. おわりに

アインシュタインが相対性理論構築の最初に述べた, 一定速度で運動する物体の運動方向の長さの測定に関する定義は, 誤りであったことが示された. さらに, アインシュタインが導入したローレンツ変換後の時空は, 実際の運動系の時空を表すものではなかった. この誤りは, ガリレイ変換に対する我々の解釈の誤りが, 彼の理論に持ち込まれたものである. ローレンツ変換後の時空が, 相対論的移動座標系の時空として定義された. 相対論的移動座標系の導入によって, 運動系の時空やそこに繰り広げられる力学が, 互いに静止した関係となって観測可能となった. それを通じての観測結果は, 運動系の正しい時空及び力学を与えた. 加速度や重力の存在する場においては, 観測者にはその加速度や重力の影響で正しく時空が計測されていない. 数学的に, 4次元の相対論的一般座標系を導入することで, それらの影響を消し去ることが可能となった. その結果, 加速度や重力が存在する場においても, 数学的慣性系上の計測を経て正しい計測が可能となった.

飛行機やGPS衛星を用いた物理実験による原子時計の時間遅れに関する結果などは, 慣性飛行による遅れを表

すものではなく, それらの運動に伴う加速度及び重力が存在する場での観測であったがゆえの遅れであったことが示された.

以上に拠って, 相対性理論に対するこれまでの我々の解釈の誤りが正され, ここに特殊相対性理論と一般相対性理論が統一されると結論されよう. 統一場の時空は, 観測者によって, 任意に選ばれる時計の刻む時間単位 μ と, 任意に選ぶことのできる物指しが示す長さ l_0 の単位で測られる3次元直交座標で表される.

参考文献

- 1) 内山龍雄訳・解説 (1988) : アインシュタイン相対性理論, 岩波文庫, 187p.
- 2) 金子務訳 (2004) : アインシュタイン著・特殊および一般相対性理論について, 白揚社, 216p.
- 3) 仲座栄三 (2015) : 新・相対性理論, ボーダーインク, 180p.
- 4) Eizo NAKAZA (2015): Resolving our erroneous interpretation of the Galilean Transformation, accepted in Physics Essays, Vol. 28, N. 4, pp. 503-506.
- 5) 松田卓也・木下篤哉 (2001) : 相対論の正しい間違え方, 丸善, 229p.
- 6) 松田卓也 (2005) : 特殊相対性理論のパラドックス, 2台のロケットのパラドックスを巡って, 別冊・数理科学「相対論の歩み」, pp.45-52.
- 7) WIKIPEDIA(2016): Bell's spaceship paradox, https://en.wikipedia.org/wiki/Bell%27s_spaceship_paradox
- 8) J.S. Bell (1987): Speakable and unspeakable in quantum mechanics, Cambridge University Press, ISBN 0-521-52338-9.
- 9) J.C. Hafele and R.E. Keating (1972): Around-the-world atomic clocks, Science, Vol. 177, Issue 4044, pp. 168-170.
- 10) L. Eessen (1971): The special theory of relativity, oxford Science Research Paper 5, pp.1-27.
- 11) B.P. Abbott et al.(2016): Observation of gravitational waves from a binary black hole Merger, Physical Review Letters, 116, 061102, pp.1-16.
- 12) B. Rossi and D.B. Hall (1941): Variation of the rate of decay of mesotrons with momentum, Phys. Rev., 59, 3, 2223-228.

(2016.10.10 受付, 2017.2.17 公開)