

琉球大学学術リポジトリ

ローレンツ変換の正しい物理的解釈： 補遺バージョン

メタデータ	言語: 出版者: 沖縄科学防災環境学会 公開日: 2022-07-25 キーワード (Ja): キーワード (En): relativity, Lorentz transformation, length contraction, time dilation, redshift 作成者: 仲座, 栄三 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24564/0002019408

ローレンツ変換の正しい物理的解釈 補遺バージョン

仲座 栄三¹

¹正会員 琉球大学工学部社会基盤デザインコース (〒903-0213 沖縄県西原町字千原 1 番地)
E-mail: enakaza@tec.u-ryukyu.ac.jp

本論は、先に投稿された「仲座栄三 (2017) : ローレンツ変換の正しい物理的解釈, 沖縄科学防災環境学会論文集, Vol.2, No.1, Physics, pp.15-19.」の再整理と、それに対する補遺を含めてまとめられている。ローレンツ変換に対する従来の解釈の問題点, アインシュタインの相対性理論の問題点が議論され、仲座の提案する新相対性理論の妥当性が説明されている。

Key Words : *relativity, Lorentz transformation, length contraction, time dilation, redshift*

1. 光測量による棒の長さの測定時間

いま、観測者に対して静止している棒の長さが l_0 と測定されている。そのような状況下、棒が、時刻 $t=0$ に運動し出し、瞬時に一定速度 v に達して、その運動状態を保っている場合を想定する。棒の運動方向は棒軸方向 (x 軸方向) と仮定する。

静止系の観測者が光測量を用いて、一定速度で運動しているその棒の長さを測定すると、光伝播の往復において次のように測定時間が異なる。

$$t_1 = \frac{l_0}{c-v} \quad (1)$$

$$t_2 = \frac{l_0}{c+v} \quad (2)$$

これらの測定時間の平均値をもって、静止系の観測者の観測する運動中の棒の長さ及び測定時間が、次のように与えられる。

$$\bar{t} = \frac{c}{2} \left(\frac{l_0}{c-v} + \frac{l_0}{c+v} \right) = \gamma^2 l_0 \quad (3)$$

$$\bar{l} = \frac{1}{2} \left(\frac{l_0}{c-v} + \frac{l_0}{c+v} \right) = \gamma^2 \frac{l_0}{c} \quad (4)$$

ここに、 c は光の速さを表す。 \bar{t} は、静止系の観測者が運動中の棒の長さをその運動方向に光測量する際の平均値を表す。また、 \bar{l} は平均長さ \bar{l} の測定に要した平均測定時間を表す。 γ はローレンツ係数を表し、次のように与えられる。

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \quad (5)$$

一方、運動系の運動方向に直交する方向 (y 軸及び z 軸方向) の長さの光測量については、次のように与えられる。

$$\bar{l}_y = \bar{l}_z = \bar{l} \cdot \frac{1}{\gamma} = \gamma l_0 \quad (6)$$

ここに、 \bar{l}_y 及び \bar{l}_z は、それぞれ静止系の観測者が光測量を用いて計測時間 \bar{t} 内に測る y 軸及び z 軸と平行な方向の運動系の長さを表す。

式 (3) 及び (4)、式 (6) が示すように、運動している棒の長さ、そしてその計測に要した時間は、運動方向の測量のみでなく、運動方向と直方向の測量においても、伸びて計測されている。

なお、棒が静止系の観測者と互いに静止した関係にある時に見せる長さ l_0 と測定時間 t_0 との関係は、次のように与えられる。

$$t_0 = \frac{l_0}{c} \quad (7)$$

2. 従来の考え方にもとづくローレンツ変換式が与える運動している棒の長さの測定時間

ローレンツ変換に対する従来の解釈によれば、静止系の空間及び時間を (x, y, z, t) で表し、運動系の空間及び時間を (x', y', z', t') で表すとき、ローレンツ変換は、一般に、次のように表される¹⁾。

$$x' = \gamma(x - vt) \quad (8)$$

$$y' = y \quad (9)$$

$$z' = z \quad (10)$$

$$t' = \gamma\left(t - \frac{vx}{c^2}\right) \quad (11)$$

この場合、 x 軸及び x' 軸は、棒の運動方向に取られており、静止系に対して棒が一定速度で遠ざかる場合が想定されている。 v は静止系に対する棒（運動系）の速度を表す。

ローレンツ変換を適用するに当たり、静止している棒が瞬時に一定速度で運動し出したとする先の問題を考える。すなわち、静止系の観測者に対して、棒の両端が同時に発射し、それぞれ瞬時に一定速度 v に達したとすると、棒の後端の出発に対して、 $(x=0, t=0)$ を与え、棒の先端に対して $(x=l_0, t=0)$ を与えることができる。このとき、ローレンツ変換は次なる関係を与える。

$$(x=0, t=0) \text{ に対して } (x'=0, t'=0) \quad (12)$$

$$(x=l_0, t=0) \text{ に対して } \left(x'=\gamma l_0, t'=-\gamma \frac{vl_0}{c^2}\right) \quad (13)$$

これらの結果より、出発直前まで長さ l_0 と測量されていた棒の長さは、棒が出発した直後には、実際に伸びて $x'=\gamma l_0$ の長さになっていると判断される。

また、棒の先端に固定された時計は、静止系の観測者の測る時間 $t=0$ に対して、時間 $t'=-\gamma \frac{vl_0}{c^2}$ を指しているため、運動している棒に座す観測者によれば、棒の先端は、静止系の観測者が測る $t=0$ 時よりも先に出発したものと判断される。

「棒の両端は同時に出発した」とする静止系の観測者の主張に対して、棒に座す観測者は、「棒の先端と後端との出発時間は異なっていた」と主張する。このように、観測者の立場による相違が実際に起こり得るのかどうかは大いに疑問とするところとなろう。

Dewan and Beran²⁾, Bell³⁾は、上述の内容と同様な説明を与えている。松田・木下⁴⁾, 松田⁵⁾は、図式解法を用いて、一定速度で運動している棒の長さは、それが観測者に対して静止している際に見せる長さ l_0 よりも実際に伸びて、 γl_0 となっていると説明している。（運動している棒の長さはそれが静止時の長さよりも実際に伸びているとする説明を、以下においては、説明者の名前のイニシャルを並べてDBBMKらの説明と呼ぶ。）

このことに関し、竹内⁶⁾は「二つのロケットは一緒に飛べない」「予期せぬフライング」(pp.129-136) と説明している。その中で、「出発前に(縦列の)2台のロケットを固く結んでいた紐は、ロケットの出発後には、

先頭のロケットのフライングによって切れていた」とする説明を与えている。

棒の両端の同時発射を観測することと、2台のロケットの同時発射を観測することとは本質的に同じことであるので、DBBMKらの解説及び竹内の解説によれば、伸びることの許されない剛体棒は「一定速度で飛行できない」あるいは「出発直後に破壊している」とする判断が与えられよう。

3. アインシュタインの説明

ここで、式 (8) に対して、静止系の観測者の測る棒の長さ l を、次なる関係で与える¹⁾。

$$l = x - vt \quad (14)$$

式 (14) を式 (8) に代入し、次なる関係を得る。

$$x' = \gamma l \quad (15)$$

アインシュタインは、相対性原理にもとづいて、運動系の長さ、すなわち運動している棒に座す観測者の測る棒の長さは、それ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るとき長さ l_0 と同じであるとしている。すなわち、次なる関係を与えている。

$$x' = l_0 \quad (16)$$

このとき、式 (15) より、次なる関係が与えられる。

$$l = l_0 / \gamma = \sqrt{1 - v^2/c^2} l_0 \quad (17)$$

この結果をもって、アインシュタインは、「運動している棒の長さは短縮している」と判断した。

また、アインシュタインは、運動している棒に固定された基準時計の指す時間 t' と静止系の基準時計の指す時間 t との関係にも短縮効果が現れ、次なる関係が与えられることを示している。

$$t' = \sqrt{1 - v^2/c^2} t \quad (18)$$

ここで、次のような疑問が生じる。

「一定速度で運動している棒の長さや時間は、実際に短縮しているのか？」それとも、「ただ短縮して観測されているだけなのか？」という疑問である。このことに関して、L. Essen⁷⁾は、「両者共に同じであるが、短縮して観測されている」とする見解を与えている。

運動している棒の長さや時間が実際に短縮するとなると、例えば「一定速度で運動している人は、それに対して静止している人よりも歳を取らない」とする解釈をもたらす。

アインシュタイン⁸⁾は、「軌道堤上に静止している観測者によれば、同時刻に占める列車の後端と先端の位置

間の距離は、列車が線路上に静止している際に見せる長さ l_0 よりも実際に短くなっている」と説明している。また、時間についても、「地球の極に置いた時計の示すテンポと赤道上に置かれた同じ時計の示すテンポとは異なる」⁹⁾ (pp.36-37) とする説明を与えており、アインシュタインの相対性理論によれば、運動系の長さや時間は、それが静止系と共に静止している際に見せるそれらよりも、実際に短縮していることになる。

いま車長よりもわずかに短いガレージの存在を仮定しよう。アインシュタインの説明によれば、高速で移動してきた車は地上に静止しているそのガレージに一瞬納まるとする判断を与える。このことに関して、和田⁹⁾及び杉山¹⁰⁾は、「高速で移動して来た車は、実際にガレージに納まる」と説明している。

このようなアインシュタインの説明によれば、縮むことを許されない剛体棒は、出発できない。あるいは、出発した瞬間に短縮破壊を起こしてしまうことになる。

これまでに物理学界が実施してきた実験結果、例えば、原子時計を飛行機搭載させた実験結果¹¹⁾や、GPS衛星搭載の原子時計の周波数の補正事実¹²⁾などによれば、「一定速度で運動している時計の示す時間は、静止系の時計が示す時間よりも実際に短縮している」ことを示している。

4. DBBMKらの主張とアインシュタインの主張との相違

第2章で述べた結論と第3章で述べた結論とは、内容が互いに異なる。第2章で述べたDBBMKらの結論は、静止時の棒の長さを l_0 とした上で、それが一定速度で運動するとその長さが伸びて γl_0 になり、静止系からはそれが短縮して観測されるので、静止系の観測者に観測される運動している棒の長さは、 $(\gamma l_0)/\gamma$ 、すなわち l_0 となると述べている。

したがって、アインシュタインとDBBMKらによる解釈は、ローレンツ変換に対して同じとなっているものの、運動系の長さの設定は式 (17) と式 (13) に見るように、互いに異なる。

DBBMKらの説明によれば、先に説明したガレージの長さは、車の長さ l_0 よりも短いので、「高速で移動して伸びている車は、なおさらガレージに納まらない」とする判断を与える。

これに対して、アインシュタインの説明によれば、第3章で述べたように、「高速で移動してきた車は実際に短縮していて、一瞬ガレージに納まる」とする判断になる。

竹内の「2台のロケットを結ぶ紐は、先頭のロケットのフライングによって切れていた」とする説明（あるいは、DBBMKらによる運動系は実際に伸びているとする説明）は、系間の対称性を破り、相対性原理に反する。

また、アインシュタインの説明も、運動系の長さや時間は実際に短縮するとしており、静止系と運動系との間に成立していなければならない時間及び長さの対称性が保持されていない。すなわち、アインシュタインは自ら打ち立てた相対性原理に自ら背いていることになる。

相対性理論に関して、「長さや時間に関するパラドックスは存在しない」と説明される場合がある。しかしながら、上述のように、相対性理論に対する現代物理学界の解釈の内容は、少なくとも2分され、そしてそれらは互いに相反している。また、いずれも相対性原理に背いている。パラドックスの存在を主張する立場からは、このような現代物理学界の実情の解決と、パラドックス解決への取り組みは、軌を一にするものと主張されよう。

5. 仲座の主張

「ローレンツ変換後の空間や時間 (x', y', z', t') は、運動系の空間や時間を表す」このドグマから現代物理学界は、これまで抜け出すことができなかった。

上述した相対性理論に係わる混乱のすべては、ローレンツ変換式より与えられる次なる関係式の解釈から派生されるものとなっている。

$$x' = \gamma l, \quad t' = t/\gamma \quad (19)$$

ガリレイ変換に対して、式 (19) は、 $\gamma=1$ をもって与えられる。

「ローレンツ変換後の空間や時間 (x', y', z', t') は、運動系の空間や時間を表す」この誤った定義を正さなければ、これまで説明してきた2つの互いに相反する議論は、永遠に繰り返されることになる。

ローレンツ変換はそのようなことにはなっていない。仲座は、ローレンツ変換を以下のように定義している^{13), 14)}。

ローレンツ変換の導入による相対論的慣性系の構築

ローレンツ変換後の時間 t' 及び空間 (x', y', z') は、静止系の観測者が運動系の観測者と互いに静止した関係となって（相対速度の存在を消し去って）、運動系内の力学を観測するために構築する新たな慣性系の時間及び空間を表す^{13), 14)}。

先に設定された静止系及び運動系に加えて、ここに新たに導入される慣性系は、相対論的慣性系（あるいは、相対論的移動座標系）と呼ばれる^{15), 16), 17)}。

相対論的慣性系の具体的な構築については、第6章にて説明される。

一定速度で運動する棒の測定法

我々が先に行った光測定の測定値 \bar{l} [すなわち、式 (3) に示す結果] と、第2章～4章に述べた現代物理学界の見解とは、大いに異なる。我々の観測値は、アインシュタインの説明やDBBMKらの説明とはまったく逆に、

「運動している棒は、伸びて計測される」ことを示している。

式 (3) 及び (4), 式 (6) が示すように、静止系の我々は、運動している棒の長さや時間を正しく計測していない。このことは、運動系で繰り広げられる力学を正しく計測し得ないことをも意味する。

静止系の観測者が運動系の力学を正しく計測するためには、運動系と互いに静止した関係となる必要がある。そのために静止系の観測者が講ずる策が、新たな移動座標系の構築である。

例えば、目前を通り過ぎる水の波の変形を観察する場合、波の伝播速度が速すぎて、観察が困難という場合が生じる。このような時、観測者が取る策は、移動座標系の構築である。波速と同じ速度で移動する新たな座標系を構築し、その座標系から現象を観察すると、静止した波のおだやかな変形が観測可能となる。

これと同様に、相対論的慣性系の構築は、静止系に対して運動している運動系を互いに静止した関係となって観測するための一つの策である。

ガリレイ変換の場合、式 (19), あるいは式 (8) ~ (11) によれば、運動系とまったく同じ座標系が相対論的慣性系として設定されることになる。結果としては、運動系で観測する力学と同じこととなるが、相対論としては、新たに構築した相対論的慣性系から運動系内に繰り広げられる力学を観測することが、相対論的力学を成す。

しかしながら、従来のガリレイ変換に対する我々のこれまでの解釈は、相対論的慣性系の構築という段階を経ないものとなっている。こうした問題点が、アインシュタインによって彼の相対性理論へ持ち込まれることとなった。その結果が、現代まで連綿と繰り返されて議論されている相対性にまつわるパラドックを派生してきたと結論される^{13,14,15,16,17}。

観測値の相対論的慣性系への変換、そして運動系への変換

相対性原理によれば、運動系の観測者の測る棒の長さ L (以降、相対論的慣性系における観測及び運動系における観測結果には、適宜、大文字記号を与える) は、それが静止系で静止時に見せた長さ l_0 でなければならない。したがって、静止系の観測者が測ろうとする長さ l は、式 (14) において、 l_0 である。

よって、次なる関係が設定される。

$$L = l = l_0 \quad (20)$$

ここで、式 (16) との違い、すなわち式 (20) に示す諸量がローレンツ変換後の長さ x' と等値されていない点に注意を要する。

長さに関し、 $l = l_0$ でなければならないことについては、松田⁹も図式解法を用いて示している。但し、松田は運

動系における長さ L については、 $L = \gamma l_0$ として与えている。文献^{15,16} にそのことが詳しく説明されている。

式 (20) をもって式 (14) に立ち戻ると、 x 軸上に無数に並べた時計の助けを借りて (アインシュタインの方法⁹によって) 計測される運動系の長さ l は、アインシュタインの予想に反し、まったく短縮していないことになる。すなわち、アインシュタインが説明した運動物体の長さの計測法は、相対性理論とは無関係となっていることが示される^{15,16}。

式 (20) を式 (8) に代入し、次式を得る。

$$x' = \gamma l_0 \quad (21)$$

また、式 (11) に、 $x = vt$ を代入し、次なる関係を得る。

$$t' = t / \gamma \quad (22)$$

式 (21) にもとづき、相対論的慣性系の x' 軸の長さが静止系や運動系の軸の長さよりも伸びて設定されていることが分かる。また、式 (22) によって、相対論的慣性系の時間が静止系の時間よりも短縮して設定されることが分かる。

一方、運動系の観測者の時計が示す時間 T は、相対性原理によって、静止系の観測者の時計が示す時間と同じであり、いかなる時点においても、

$$T = t \quad (23)$$

で与えられる。

式 (20) と (23) は、相対性理論において、相対性原理を成立させるために暗黙裡に成立してなければならない。

式 (21) 及び (22) で得られる長さ x' や時間 t' をそのまま運動系の長さや時間と見なしてはならない。運動系の観測者は、構築される相対論的慣性系と互いに静止した関係にあるため、相対論的慣性系 (ローレンツ変換) を経て静止系の長さや時間の情報を正しく得ることができる。逆に、静止系の観測者は運動系内に繰り広げられる力学を、相対論的慣性系 (ローレンツ逆変換) を経て正しく理解することができる。

こうして、静止系の観測者は、運動系内の観測者が観測する力学法則に、ローレンツ逆変換を施すことで、運動系に対する相対論的力学法則を正しく知ることができる。このとき、相対性原理にもとづいて、運動系の力学法則は静止系の力学法則とまったく同じものとなっていないなければならない。

以上により、静止系の観測者が運動系の長さや時間を正しく理解するためには、ローレンツ変換に則り、静止系から相対論的慣性系へ、そして相対論的慣性系から運動系へと、変換を2度経験する必要がある。2度の変換とは、次のように説明される。

式 (3) 及び (4) に示す観測値に対して、時間短縮変換 [式 (11) の適用]

$$t' = \frac{1}{\gamma} \bar{t} = \gamma t_0 \quad \left(l' = \frac{1}{\gamma} \bar{l} = \gamma l_0 \right) \quad (24)$$

座標軸の短縮変換 [式 (8) あるいは式 (21) の適用]

$$l'' = \frac{1}{\gamma} l' = l_0 \quad (25)$$

式 (24) に示す時間短縮変換は、長さを等方的に短縮する。したがって、相対論的慣性系 (x', y', z', t') において、静止系で観測した運動系の長さほどの方向に対しても同じ短縮効果を受ける。例えば運動方向の長さについては、式 (24) のカッコ内の式に示すように、長さ \bar{l} から l' へと短縮変換される。

運動方向に対する相対論的慣性系の座標軸は、式 (21) に示すように、静止系や運動系の軸の長さに比較して伸びて設定されている。したがって、運動系からその軸方向の長さを読み取る際にはその点の注意が必要である。このことへの対処が式 (25) に示す変換である。

運動方向の軸の短縮変換 [式 (25)] は、その軸方向のみの長さの短縮をもたらす。運動方向の軸方向のみに行われる長さの短縮によって、最終的に運動方向の長さの観測値は l_0 へと戻る。その結果、式 (4) で伸びて計測されていた計測時間も、2度目の短縮を受け、最終的に t_0 へと変換される。

式 (6) に示す運動方向と直交する方向の長さについては、1度目の変換で (時間の短縮によって) $(\gamma l_0)/\gamma$ が与えられ、長さはすでに l_0 に戻っている。その時点で、時間も t_0 へと変換されている。これはローレンツ変換式 (9) 及び (10) が意味するところとなる。

したがって、運動系の観測者が相対論的慣性系 (x', y', z', t') から読み取る時間 t'' は、最終的に、次のように与えられる。

$$t'' = \frac{l''}{c} = t_0 \quad (26)$$

式 (24) は、DBBMK らが主張した $x' = \gamma l_0$ [式 (13)] の関係を内包している。さらに、2度目の変換を経た後の長さを表す式 (25) は、 $l'' = l_0$ すなわち $L = l_0$ を与えており、アインシュタインの相対性原理の成立 [式 (20)] に帰結している。

ローレンツ変換に対する従来の解釈は、変換後の時間及び空間を、運動系の時間及び空間と見なしているため、式 (24) あるいは式 (21) の結果をそのまま運動系の長

さと判断している。いかなる軸方向についても正しい長さ l_0 を得るには、運動方向については、式 (21) で得た結果を、ローレンツ係数で除すことが求められる [式 (25)]。

以上の議論で明らかであるように、相対速度の存在する場に対する我々の観測値は、式 (3) 及び (4)、そして式 (6) が示すように、正しい値を示すものとなっていない。正しい値を得るためには、ローレンツ変換の導入、すなわち相対速度を消し去って観測するための新たな慣性系の導入を経ての観測が必要となる。

重力場で我々が測定する時間や空間についても同様なことが言える。重力場における力学の観測に対しては、一般座標系が導入され、重力を消し去った慣性系を通じた観測 (新たな慣性系の導入) が必要となる¹⁵⁾。

新たな慣性系の導入という点に、特殊相対性理論と一般相対性理論の本質的な調和性を見い出せる。こうして相対性理論の本質は、相対論的慣性系の構築にあることが示される^{15), 16)}。

6. 静止系から運動系に届く光が伝える時間及び長さの情報を用いた検証

第5章で議論した仲座の主張の正しさを、観測値をもとに、以下に検証する。

運動系内の観測者は、光測量によって、測定距離と測定時間との間に常に式 (7) が成立していることを確認できる。これは、相対性原理が保証することとなる。

つぎに、運動系内の観測者は、光測量に静止系から届く光を用いたとしても、測定距離と測定時間とに式 (7) が成立していることを確認できる。

これら2つの光測量では、いずれにおいても時間測定に運動系内の観測者の時計の示す [式 (23) の条件を満たす] 時間を用いている。それゆえ、上に述べる2つの光測量結果は、静止系の光源から運動系に届く光を用いた場合と、運動系の光源が発する光を用いた場合とに区別を与えることはできない。

この結果、運動系内に座す我々は、静止系から届く光を眺めていたとしても、静止系の観測者が運動系内の距離測定で、式 (3) 及び式 (4) を得ていることを通常気にすることはない。

式 (23) に示すように、静止系と運動系との間に時間差は存在しない。しかしながら、静止系から運動系に届く (その逆も同じ) 光が伝える振動数は、次のように redshiftを生じて観測される。

$$f' = \sqrt{1 - v^2/c^2} \frac{1}{1 \pm v/c} f \quad (27)$$

ここに、 f は光源の振動数、 f' は観測される振動数を表す。符号 \pm については、観測者に対して光源が遠ざかる場合にプラスの符号を取る。

式 (27) は、運動方向に伝播する光が示す振動数を与

えており、運動方向と直交する方向に伝播する光については、次のように2次の振動数シフトのみとなる。

$$f' = \sqrt{1 - v^2/c^2} f \quad (28)$$

振動数シフトが、式 (27) や式 (28) の関係を満たして観測されることは、周知の事実である。このことは、式 (23) が成立している証でもある。すなわち、式 (23) の関係が成立していなければ、式 (27) や式 (28) に示すような周波数シフトの観測は不可能となる。

観測事実、すなわち、静止系から運動系に届く光の示す振動数を手掛かりに、運動系の観測者が静止系の時間を計測すると、例えば、式 (1) に示す静止系の計測時間は、次のように時間短縮して計測される。

$$t' = \left(\sqrt{1 - v^2/c^2} \frac{1}{1 + v/c} \right) \cdot \left(\frac{1}{1 - v/c} \frac{l_0}{c} \right) = \gamma t_0 \quad (29)$$

この計測時間内に光が運動系内を伝播する距離 l' は、次のように計測される。

$$l' = c \gamma t_0 = \gamma l_0 \quad (30)$$

第2章で紹介した相対性理論に対する従来の解釈は、式 (30) で与えられる長さをもって運動系の長さとして判断したことになる。しかしながら、ローレンツ変換は、運動方向の長さについて、式 (8) あるいは式 (21) に示すように、もう一段の変換を求めている。

静止系の観測者が、ローレンツ変換をもって構築する相対論的慣性系は、運動系と互いに静止した関係を保ち、原点に置かれる基準時計の時間が式 (22) に示すように静止系や運動系の基準時よりも短縮して設定されものであった。さらに、運動方向の x' 軸は、式 (21) に示すように、静止系や運動系の同方向の軸よりも伸びて設定される。このことから判断して、式 (29) 及び式 (30) で与える時間や長さは、静止系による観測時間や長さを相対論的慣性系の時間及び長さへと変換したものと判断される。

第5章において、相対論的慣性系の構築法については本章にて説明する旨を述べた。以上の議論から、相対論的慣性系は、静止系から放たれた光が運動系に伝える時間情報を基準時間として用い、到達光がその時間に応じて運動系に設定する軸をもって構築される¹³⁾。ただし、式 (21) あるいは式 (30) が示すように、運動方向の軸設定には注意が必要である。

さらに、相対論的慣性系の時間は、基準時を設定する位置から運動方向に測る長さに応じた時間修正 [式 (11) の考慮] が必要となることについても注意しなければならない。文献¹³⁾では、このことの補足説明が必要であろう。

運動系の観測者の測る長さ (相対論的慣性系から運動系の観測者が読み取る長さ) l'' については、式 (30) に

示す長さが式 (25) の変換を受ける必要があるため、最終的に次なる長さを得る。

$$l'' = l' / \gamma = c t_0 = l_0 \quad (31)$$

また、その長さの測定に要する時間 t'' については、次のように与えられる。

$$t'' = l'' / c = t_0 \quad (32)$$

式 (31) 及び式 (32) に示すように、最終的に得られる長さ及び時間は、静止系の観測者が観測対象とした運動系内の長さ及び時間を正しく示している。

静止系の観測者は、一定速度で運動している棒の長さを式 (3) に示すように計測している。この長さは静止系から眺めた運動している棒の長さである。この静止系による計測長さが、運動系でいかような長さに対応するものかを運動系の観測者に聞いてみると、式 (31) に示すように、長さ l_0 に対応していることを知らされることになる。

運動系の運動方向と直交する方向の長さについては、式 (6) に示す縦と横の長さの関係を考慮した上で、式 (28) に示す振動数シフトを適用して、次のように与えられる。

$$l'_y = l'_z = c \frac{1}{\gamma} (t_0 \gamma) = l_0 \quad (33)$$

ここに、 l'_y 及び l'_z は静止系から運動系に届く光が伝える時間を用いて、運動系の観測者が測る運動方向に直交する方向の長さを表す。この場合、式 (9) 及び式 (10) が示すように、相対論的慣性系における長さがそのまま運動系の観測者に観測される長さとなる。これは、式 (9) 及び式 (10) の意味するところとなる。

式 (33) は、計測時間について、次なる関係を与える。

$$t'' = l'_y / c = l'_z / c = t_0 \quad (34)$$

式 (27) ~ (34) に示す結果は、先に議論した式 (20) ~ (26) で得たと同じ結論を与えている。すなわち、観測事実をもとに、前章で述べた仲座の主張の正しさが示さたと言えよう。

以上の議論の内容は、次のようにまとめられる。

静止系の観測者は、ローレンツ変換、すなわち相対論的慣性系の構築を経て、運動系の正しい長さや時間、そして力学の理解が可能となる。

運動系の観測者は、静止系から運動系に届く光が伝える時間情報 (redshift) を観測することで、相対論的慣性系の時間及び空間軸を設定することができ、その新たに構築される慣性系を通じて静止系の観測者が運動系のいかような長さ及び時間を計測しているかを知ることができる。その結果は、長さについて l_0 を、時間については

t_0 を示す。これがローレンツ変換の意味を成す。

逆に、運動系と互いに静止した関係にある相対論的慣性系から眺めた運動系の長さ、時間、そして力学に対して、ローレンツ逆変換を適用して、静止系の観測者が運動系のそれらをいかように観測することになるのかを知ることができる。すなわち、相対論的慣性系を経ての力学が相対論的力学を成す。

7. 双子のパラドックスの解決¹⁴⁾

式 (3) が示すように、静止系の観測者が運動系の長さを光測量するとき、その長さや計測時間は、それが互いに静止して計測される際の長さや計測時間よりも伸びて計測される。静止系の観測者が運動系の長さの計測に要した時間〔式 (4)〕は、運動系に対しても全く同じ時の流れとなって経過する。このことは、相対性原理が保証することとなる。したがって、静止系及び運動系共に、未来永劫に歳月の経過は等しい〔式 (23)〕。しかし、式 (1) に示す計測時間に亘って静止系から放たれた光は、その光が伝える振動数 (redshift) にもとづけば、運動系の観測者には式 (29) が示すように時間が短縮して計測される。

相対性理論に関する物理学界のこれまでの解釈は、式 (15) あるいは式 (18) などをもとに、運動系の時間は静止系の時間よりも遅れており、長さは短縮して観測されるというものであった。本論におけるこれまでの議論において明らかとなっているように、ローレンツ変換は新たに構築される相対論的慣性系の時間及び空間と静止系 (あるいは運動系) のそれらとの対応を示すものであった。

例えば、式 (7) で示す計測時間に対して、静止系の観測者が式 (1) に示す計測時間の経過を必要としたとしても、それは、放たれた光に対して測定対象物が逃げていることによるものであって、運動系と静止系の観測者との間で時間経過が異なることを表すものではない。すなわち、ローレンツ変換は、運動系の観測者が経験する歳月と静止系の観測者が経験する歳月との比較を与えるものではない。

以上をまとめると、静止系と運動系とに分かれて暮らす双子が重ねる歳月は、それぞれまったく同じとなる。すなわち、式 (23) が成立している。しかし、相手の系から届く光が伝える相手の時間情報は、互いに短縮 (あるいは振動数がredshift) して観測される。すなわち、式 (27) と式 (28) の関係が成立する。

したがって、双子の時間経過に関してパラドックスは存在しない。これまで、双子のパラドックスや長さのパラドックスが派生してきたゆえんは、ローレンツ変換に対するアインシュタインの (そして、物理学界の) 誤った解釈にあったと結論される^{13), 14)}。

以上の議論に従えば、ローレンツ変換式 (8) ~ (11) の左辺 (すなわち、相対論的慣性系の時間及び空

間) を運動系の時間及び空間と見なすミンコフスキーの時空の概念も、再検討を要することが理解されよう。また、Rossi とHall (1941) が与えた宇宙線ミューオンの観測結果¹³⁾に対して、物理学界は、「高速で飛行する宇宙線ミューオンの方が若さを保持し、地上の観測者はそれよりも多く齢を重ねる」とする解釈を与えてきた。しかしながら、そうした解釈も誤っていたことになる。そのことの正しい解釈は、相対論的質量及び相対論的エネルギーを持って与えることができる¹⁴⁾。

原子時計の観測結果に関する説明を含め、詳しい説明は、文献^{13)~17)}を参考にして頂きたい。

8. 相対論的長さ及び時間のまとめ

これまで議論してきた相対論的長さ及び時間について、以下にまとめる。

アインシュタインによる説明

静止系の観測者に、互いに静止した関係となって計測される棒の長さ

$$l_0$$

運動系の観測者が互いに静止した関係となって測る棒の長さ

$$l_0$$

多数の時計の助けを借りて静止系から観測される運動している棒の長さ

$$l_0/\gamma$$

静止系の時間 t と運動系の時間 t' との関係

$$t' = t/\gamma$$

DBBMKらの説明

静止系の観測者に、互いに静止した関係となって計測される棒の長さ

$$l_0$$

運動系の観測者が互いに静止した関係となって測る棒の長さ

$$\gamma l_0$$

静止系から観測される運動している棒の長さ

$$l_0$$

静止系の時間 t と運動系の時間 t' との関係

$$t' = t/\gamma$$

仲座の説明

アインシュタインが述べた「運動している棒の長さの計測方法」は、相対性理論とは無関係である。

静止系の観測者に、互いに静止した関係となって計測される棒の長さ

$$l_0$$

運動系の観測者が互いに静止した関係となって測る棒の長さ

$$l_0$$

光測量によって、静止系から観測される運動している棒の運動方向の長さ

$$\gamma^2 l_0$$

光測量によって、静止系から観測される運動している棒の運動方向と直交する方向の長さ

$$\gamma l_0$$

静止系の時間 t と運動系の時間 T との関係

$$T = t$$

静止系の観測者がローレンツ変換を経て知る棒の運動方向の長さ

$$l_0$$

静止系の観測者がローレンツ変換を経て知る棒の運動方向と直交する方向の長さ

$$l_0$$

相対速度を有する系から届く光が伝える時間情報 T'

$$T' = t/\gamma$$

9. おわりに

アインシュタイン及び物理学界のローレンツ変換に対するこれまでの解釈は誤っていた。アインシュタインが述べた静止系による運動系の長さの計測方法は、相対性理論とは無関係であった。光（すなわち、電磁波）を用いての計測が、相対性理論に関係する。

仲座が提案する新相対性理論に基づいて、ローレンツ変換の正しい物理的解釈が議論された。これまで、特殊相対性理論を取り扱った解説書などでは、「静止系の時間に対して、運動系の時間は遅れる」「運動している棒の長さは短縮して観測される」などと説明されてきた。また、数多くの観測結果は「そのことを肯定している」などと説明されてきた。しかし、こうした従来の説明が誤りであったことが明らかとなった。

アインシュタインが特殊相対性理論を発表して来、数多くの疑義がアインシュタインの相対性理論に投げられてきた。ここに、それらの問題が解決されたと言える。その解決の糸口は、ローレンツ変換の物理的解釈を正すことにあった。

以上により、ローレンツ変換は、相対性原理を理論的に成立させる変換則となっていることが示された。ただし、そのためには静止系から相対論的慣性系へ、そして相対論的慣性系から運動系へと、変換を2度に亘って施す必要がある。

謝辞

本研究を実施するに当たり、「尾崎次郎基金」の支援を受けている。ここに記し、心からの感謝の念を捧げるとともに、感謝の意を表します。

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) WIKIPEDIA (2017): Bell's spaceship paradox, https://en.wikipedia.org/wiki/Bell%27s_spaceship_paradox
- 3) J.S. Bell (1987): *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*, Cambridge University Press, ISBN 0-521-52338-9.
- 4) 松田卓也・木下篤哉（2001）：*相対論の正しい間違え方*，丸善，229p.
- 5) 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・数理解科学「相対論の歩み」，pp.45-52.
- 6) 竹内薫（2001）：*ゼロから学ぶ相対性理論*，講談社，211p.
- 7) L. Essen (1971): *The special theory of relativity*, oxford Science Research Paper 5, pp.1-27.
- 8) 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.
- 9) 和田純夫（1996）：*相対論的物理学のきまどころ*，岩波書店，p.173.
- 10) 杉山直（2001）：*相対性理論*，講談社，205p.
- 11) J.C. Hafele and R.E. Keating (1972): *Around-the-world atomic clocks*, Science, Vol. 177, Issue 4044, pp. 168-170.
- 12) Neil Ashby (2002): *Relativity and the Global Positioning System*, Physics Today, pp.41-47.
- 13) 仲座栄三（2015）：*新・相対性理論*，ボーダーインク，180p.
- 14) Eizo NAKAZA (2015): *Resolving our erroneous interpretation of the Galilean Transformation*, Physics Essays, Vol. 28, N. 4, pp. 503-506.
- 15) 仲座栄三（2017）：*長さと時間の相対論*，沖縄科学防災環境学会，Vol.1, No.1, Physics, pp.1-8.
- 16) 仲座栄三（2017）：*あなたはアインシュタインの相対性理論を論駁しえるか？*，沖縄科学防災環境学会，Vol.2, No.1, Physics, pp.1-7.
- 17) 仲座栄三（2017）：*ローレンツ変換の正しい物理的解釈*，沖縄科学防災環境学会，Vol.2, No.1, Physics, pp.15-19.
- 18) B. Rossi and D.B. Hall (1941): *Variation of the rate of decay of mesotrons with momentum*, Phys. Rev., 59, 3, pp.2223-228.

(2017.7.7 受付)