

琉球大学学術リポジトリ

相対論的時間と光の速さについて

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, light speed, Lorentz transformation, time dilation, redshift, relativistic time 作成者: 仲座, 栄三 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24564/0002019410

相対論的時間と光の速さについて

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

2つの慣性系の存在を仮定し、呼び名の上でそれらに違いを与えるために、その一方を静止系と呼び、他方を運動系と呼ぶ。このようなとき、古典的物理学によれば、静止系に対して一定速度 v で遠ざかる運動系に向けて、静止系から一定速度 u で投げられた石の速度は、運動系から眺めれば、速度 $u - v$ となって観測される。これと同様に、静止系に対して一定速度 v で遠ざかる運動系に向けて、静止系から放たれた光 (伝播速度 c) を運動系から眺めれば、その伝播速度は $c - v$ となって観測されるはずである。しかし、実際には、静止系と同様に、運動系でもその光の伝播速度は c となって観測される。このことに関し、アインシュタインは「光速不変の原理」を導入し、相対性理論を導いている。本論は、「光の速度不変の原理」を導入することなく、光の速度がそのように観測される事実の物理学を説明している。

Key Words : *relativity, light speed, Lorentz transformation, time dilation, redshift, relativistic time*

1. はじめに

アインシュタイン^{1,2)}は、彼の相対性理論を構築するに当たって、「相対性原理」と「光速不変の原理」を導入している。したがって、アインシュタインの相対性理論によれば、光の速さは、それを物理的に説明することはできないものの、いかなる慣性系の観測者に対してもアприオリに等方的で一定となることが求められる。

一方、仲座^{3,4,5,6,7,8)}は、アインシュタインが導入した「光速不変の原理」を相対性理論構築に不必要なものとし、「相対性原理」のみの導入によって、新たな相対性理論を構築している。その結果、ローレンツ変換に対するアインシュタインの解釈と仲座の解釈とは決定的な違いが現れる。

仲座の新相対性理論においては、光速不変の原理が導入されていないので、光の速さがいかなる慣性系においても等方的で一定値となって観測されることは、物理的に説明されなければならない。

本論は、「いかなる慣性系から眺めても光の速度が等方的で一定となって観測される」ことを、物理的に説明することを目的としている。

2. 相対性原理の下で行われる光測量

いま、ある観測者に対して一定速度 v で運動している一つの剛体棒を考える。運動は棒軸方向にある。このとき、呼び名の上でそれらに違いを与えるために、その観測者の系を静止系と呼び、運動している棒に座す観測者の系を運動系と呼ぶことにする。静止系の空間座標を (x, y, z) とし、時間を t で表す。運動系の運動方向は、 x

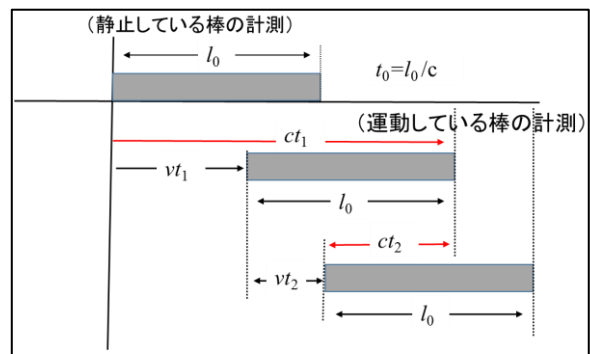


図-1 一定速度で運動している剛体棒の光測量

軸の正方向に取る。

議論を進めるに当たって、静止系と運動系とが互いに静止した関係にあり、両系の観測者の目前に静止している同じ長さ l_0 の棒の存在を確認しているものとする。

次いで、運動系が一定速度 v で静止系から遠ざかる場合を想定する。このようなとき、相対性原理によれば、静止系の観測者の目前に静止している棒の長さも、運動系の観測者の目前に静止している棒の長さも、終止一定の長さを保ち、両系が互いに静止した関係にある際に確認し合った際の長さをそれぞれ保持していなければならない。

このようなとき、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棒の長さ l_0 を、静止系からリモート計測する状況を考える。

このとき、光伝播の往復において、次のように測定時間が異なる^{7,8)} (図-1参照)。

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

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

ここに、 c は静止系の観測者が放つ光の速さを表す。

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。

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

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

ここに、 \bar{l} 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{t} は平均長さ \bar{l} の測量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（すなわち、 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。この式の詳しい誘導は、後に、式(8)の誘導の際に行う。ここでは結果のみを示す。

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

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 軸方向の運動系の長さを表す。

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、いかなる座標軸方向に静置された棒に対しても、次のように与えられる。

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

したがって、光測量によれば、静止系から観測される運動系の長さは、何れの座標軸方向に対しても伸びて計測され、運動方向とそれに直方向の伸びの比は、ローレンツ係数で与えられる。

ここまでの議論において、相対性原理の導入を行っているものの、相対性理論の助けを必要としていない。すなわち、式(1)～(7)の成立は、相対性理論と無関係に成立し、古典的物理をもって説明される。

3. 運動系の観測者に観測される静止系の光

前章の議論は、静止系の観測者が、彼に対して一定速度で運動している棒の長さ l_0 を光測量した際に、それはどのような長さとなって観測されるものであるか？また、その測量に要した時間は、いかほどのものとなって現れる

ものか？などについてであった。

ここでは、静止系の観測者の実施する光測量の様子を運動系から眺めるとき、いかような測量となって運動系に現れるものか？について議論を行う。

以降の議論においては、運動系の空間座標を (X, Y, Z) とし、時間を T で表す。静止系と運動系が互いに静止した関係にあるとき、それらの座標系は互いに同じ向きにある。また、時間も両系共に同じテンポで進んでいることが確かめられているものとする。運動系の運動方向は、 x 軸の正方向にあり、一定速度 v とする。

静止系の観測者が、運動系の Y 軸や Z 軸に沿う方向の距離を測定する際には、少し工夫を必要とする。図-2に示すように、静止系の観測者が OP 方向に光を放つと、運動系は静止系から OB 方向に離れるため、運動系の Z 軸に沿う方向の測量は、 BP 方向に伝播する光で行われる。その結果、次なる関係が成立する³⁾。

$$(ct)^2 = (vt)^2 + Z^2 \quad (8)$$

ここに、 Z は距離 BP を表す。同様な関係が Y 軸方向にも成立する。

式(8)の関係より、次なる関係式を得る。

$$Z = \sqrt{1-v^2/c^2} ct \quad (9)$$

したがって、静止系から放たれた光の内、 OP 方向に伝播する光が、運動系では BP 方向すなわち、運動系の Y 軸や Z 軸方向に伝播する光として観測される。この光の伝播は、 Y 軸や Z 軸方向の距離を式(9)に基づいて測量することになるため、静止系から運動系に届く光の速度が $\sqrt{1-v^2/c^2} c$ となって観測されるか、もしくは時間が $\sqrt{1-v^2/c^2} t$ となって届いているかのいずれかになる。

観測事実として、一定速度で移動する光源から届く光は、周波数の赤方偏移 (redshift) を生じて観測されることが分かっている。したがって、この場合、光の速度が変化しているのではなく、「時間が短縮して届いている」ことを選択しなければならない。よって、静止系から運

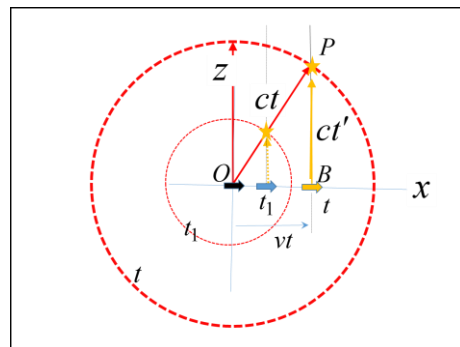


図-2 静止系から発せられた光の伝播とそれが運動系で観測される際の伝播形態

動系に届く光が伝える時間情報 t' は、次のように与えられる。

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

この結果は、静止系から運動系に届く光は、 Y 軸や Z 軸方向に速さ c で伝播するとする結論をもたらす。

運動系の観測者が、静止系から届く光の伝える時間を式 (10) に基づいて観測できるのは、相対性原理によって、運動系の時間 T が静止系の時間 t と等しいとする次の関係式を満たしていることによるものである³⁾。

$$T = t \quad (11)$$

観測者に対して、一定速度で移動する光源から届く光が周波数のredshiftを生じて観測されることについては、実験的にも確かめられる。すなわち、ここまでの議論は、相対性理論に立ち入ることなく成立する。したがって、光の伝播速度がいかなる慣性系においても一定の速さとなって観測されることは、光速不変の原理や相対性理論が示すことではなく、以上に示すように物理学的事実として説明される。

アインシュタインは、光速不変の原理を成立させる変換式としてローレンツ変換式を導き、運動系の時間の短縮を見出したが、それは相対性理論によって与えられるものとなっている。また、運動系の時間が遅れるとする解釈は、まるで時間という概念が通常の物理的解釈を超えた特別な存在であるかに語られた。

しかし、ここまでの議論で分かるように、議論の内容はなんら特別な物理でもなく、古典的物理学の基礎のみで説明されるものとなっている。

式 (1) に対して、式 (10) を適用すると、静止系から届く光が運動系の X 軸方向に伝播する場合の時間情報が、次のように与えられる。

$$t'_1 = \frac{l_0}{c-v} \sqrt{1-v^2/c^2} \quad (12)$$

また、式 (2) に対しては、次式を得る。

$$t'_2 = \frac{l_0}{c+v} \sqrt{1-v^2/c^2} \quad (13)$$

これらの結果によれば、静止系から運動系に届く光の中で、運動系の運動方向に伝播する光は、その伝播方向によって伝播時間が異なって観測されることになる。

しかしながら、式 (12) 及び (13) には、古典的物理が教えるドップラー効果が考慮されていない。それらの効果を考慮すると、式 (12) 及び (13) は、正しくは次のように与えられる。

$$t'_1 = \frac{l_0}{c-v} \sqrt{1-v^2/c^2} \frac{1}{c+v} = \frac{l_0/c}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \quad (14)$$

$$t'_2 = \frac{l_0}{c+v} \sqrt{1-v^2/c^2} \frac{1}{c-v} = \frac{l_0/c}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \quad (15)$$

すなわち、静止系から運動系に届く光が伝える時間情報

は、伝播方向に依存しない。

以上の議論から、静止系から運動系に届く光は、運動系内において、等方的に一定の速さ c をもって伝播し、その光が伝える時間情報は、静止系の時間や運動系の時間に比較して短縮していることが示される。これまでの議論で分かるように、これらの結論は、相対性理論に一切立ち入ることなく得られている。すべて古典的物理学による考察によって示される。

以上により静止系の発する光が運動系の観測者にいかように観測されるものであるかが明らかとなった。以下においては、式 (1) ~ (6) で与えられる静止系の光測量が、運動系でいかなるような測量結果となって現れるかについて議論する。

式 (10) の議論において、静止系から発せられた光が運動系の観測者に伝える時間情報とその光の伝播速度が与えられた。したがって、それらの情報により、静止系から届く光を用いて、運動系の観測者が運動系内に測る距離 l' が次のように与えられる。

運動方向について、

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

運動方向と直方向について、

$$l' = l_0 \quad (17)$$

式 (16) 及び式 (17) は、静止系の観測者が運動系を光測量する様子を、運動系の観測者はいかように観測するものとなるかを表す。両式が成立することが、静止系から運動系に到達する光が、運動系で等方的に一定の速さ c で伝播することを表す。

4. 新相対性理論を成すローレンツ変換式が与える長さや時間

仲座の与える新相対性理論^{3,7,8)}において、ローレンツ変換後の時間及び座標は、運動系と並走する慣性系、すなわち相対論的移動座標系の時間及び座標を与える。相対論的移動座標系は、静止系の観測者が運動系と互いに静止した関係となって(相対速度を消し去って)運動系の力学を観測するために数学的に構築する移動慣性座標系である。ローレンツ変換が与える相対論的移動座標系の時間及び空間の値は、静止系から発せられた光が運動系の観測者に届ける時間及び空間情報と読み替えることもできる。

静止系の空間及び時間を (x, y, z, t) で表し、相対論的移動座標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、次のように表される^{3,7,8)}。

$$x' = \gamma(x - vt) \quad (18)$$

$$y' = y \quad (19)$$

$$z' = z \quad (20)$$

$$t' = \gamma \left(t - \frac{vx}{c^2} \right) \quad (21)$$

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 は静止系に対する運動系 (棒) の速度を表す。

式 (18) に

$$l_0 = x - vt \quad (22)$$

を代入し、次なる関係を得る。

$$x' = \frac{l_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (23)$$

また、式 (21) に

$$x = vt \quad (24)$$

の関係式を代入し、相対論的移動座標系の原点位置の時間と静止系の時間との関係を次のように得る。

$$t' = \sqrt{1 - v^2/c^2} t \quad (25)$$

以上より、仲座の新相対性理論を成すローレンツ変換が与える長さや時間の情報 [式 (23), 式 (25)] は、第3章で与えた、物理学的考察に基づく光測量結果 [式 (16), 式 (10)] と一致する。

5. アインシュタインの相対性理論の誤り

アインシュタイン^{1,2)}は、式 (18) ~ (21) に示すローレンツ変換式のダッシュの付く物理量を運動系の時間や座標とみなした。この問題は、実は、ガリレイ変換に対する我々の誤った解釈が、アインシュタインによって彼の相対性理論に持ち込まれた形になっている^{3,4)}。

その結果、アインシュタインの相対性理論からは、運動している棒の長さは、運動方向に短縮して観測され、運動している時計は静止系に静置されている時計に対して時間短縮しているとする判断が下された。こうした誤った解釈が、アインシュタインの相対性理論にまつわる数々のパラドックスを派生させてきた。

L. Essen⁹⁾は、アインシュタインの相対性理論の問題点を指摘し、ローレンツ変換後の時間について、運動系の時間に対応するのではなく、運動系の観測者に観測される静止系の時間 (静止系から運動系に届く光が伝える時間情報) とすべきであったとする旨の批判を与えている。前章までの議論は、Essenの主張の正しさを示す内容となっている。

アインシュタインは、光速度不変の原理を導入し、光を特別な存在と化した。こうして光を特別な存在に位置付けたことは、相対性理論構築の喜びにもまして、アインシュタインにとって最も誉であったことは、当時の世

界観や宗教観を鑑みれば想像に難くない。

6. おわりに

いかなる慣性系に対しても光の伝播速度が一定となって観測されることの事実は、これまで相対性理論によって説明されるとされてきた。すなわち、「光速度不変の原理」に基づいて、光の伝播速度はいかなる慣性系でも一定となって観測されなければならないとされ、その物理的メカニズムは原理の下に不問に付されてきた。

しかしながら、本論では、一般に行われている光測量を例示し、静止系で発せられた光が運動系にいかように届き、その光が運動系に伝える時間情報がいかように遅れるものとなるかを、古典的物理学によって明らかにした。

本論で議論されるように、アインシュタインが相対性理論構築の前提として導入した「光速度不変の原理」は、相対性理論構築に不必要であり、相対性理論は、相対性原理の下で構築される。しかしながら、このとき、相対性原理は、運動系における長さや時間が静止系の長さや時間と等しいとする両系間の対称性を規定しているのに過ぎず、なにか特別な物理現象を規定している訳ではない。

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) 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, Physics Essays, Vol. 28, N. 4, pp. 503-506.
- 5) 仲座栄三 (2017) : 長さや時間の相対論, 沖縄科学防災環境学会, Vol.1, No.1, Physics, pp.1-8.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 仲座, 栄三 (2017) : ローレンツ変換の正しい物理的解釈: 補遺バージョン, 沖縄科学防災環境学会, Vol.2, No.1, Physics, p.22-29.
- 9) L. Essen (1971): The special theory of relativity, oxford Science Research Paper 5, pp.1-27.

(2017.10.12 受付)