

琉球大学学術リポジトリ

ローレンツ変換はガリレイ変換を与えない

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): Galilei transformation, relativity, Lorentz transformation, Nakaza's new relativity 作成者: 仲座, 栄三 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24564/0002019416

ローレンツ変換はガリレイ変換を与えない

仲座栄三¹

¹ 正会員 琉球大学工学部工学科 (〒903-0123 沖縄県西原町千原1番地)

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

アインシュタインの特殊相対性理論の基礎を成すローレンツ変換は、マクスウェルの電磁場理論や波動方程式を同じ形に変換し、相対性原理を満たす。そのローレンツ変換に対して相対速度が光速に比較して十分に小さいという条件を課すとき、それはガリレイ変換に帰結すると解釈されてきている。しかしながら、ガリレイ変換は、マクスウェルの電磁場理論や波動方程式を同じ形に変換しない。すなわち、ガリレイ変換は光に対して相対性原理を満たしていない。相対性原理を満たすローレンツ変換から導かれるガリレイ変換が、その根幹となる相対性原理を満たしていないということは、重大な矛盾といえる。本論は、従来のガリレイ変換に対する矛盾を明らかにし、相対性原理を満たす変換則を提示している。また、ローレンツ変換がニュートンの運動法則に対して相対性原理を満たすことを明らかにしている。それらの結果は、アインシュタインの相対性理論の誤りについても言及している。

Key Words: Galilei transformation, relativity, Lorentz transformation, Nakaza's new relativity

1. はじめに

ガリレイ変換は、ニュートンの運動方程式を同じ形に変換するものの、マクスウェルの電磁場の方程式を同じ形に変換しないことで知られる。相対速度が光速に比較して十分に小さいとの仮定のもとに、ローレンツ変換はガリレイ変換と同じ式形を与える¹⁾。このことから、ガリレイ変換は、相対速度が光速に比較して十分に小さいときの変換則を成すものと見なされてきている。

ローレンツ変換は、マクスウェルの電磁場の方程式を同じ形に変換することから、アインシュタインの相対性原理を満たす²⁾。しかしながら、それに対して相対速度が光速に比較して十分に小さいとする条件を与えて得られるとされるガリレイ変換が、その根幹となる相対性原理を満たしていないことは重大な問題といえる。このことに関して、これまでに十分な議論は行われてきていない。

ここに、ガリレイ変換に対する我々の解釈の矛盾点が明らかにされ、相対性原理を満たす正しい変換則が与えられる。また、その変換則は、従来のガリレイ変換とはまったく異なる性質の変換則となっていることが明らかにされる。これによって、ガリレイ変換に対するこれまでの我々の解釈は正される。従来、ローレンツ変換は、ニュートンの運動方程式を同じ形に変換せず、ニュートンの運動方程式に対して相対性原理を満たしていないと

されてきた。しかしながら、このことに関しても従来の説明は誤りであり、ローレンツ変換はニュートンの運動方程式に対して正しく相対性原理を満たすことが明らかにされる。

2. ニュートンの運動方程式のガリレイ変換

よく知られるように、ガリレイ変換は、一般に次のように表される。

$$x' = x - vt \quad (1)$$

$$y' = y \quad (2)$$

$$z' = z \quad (3)$$

$$t' = t \quad (4)$$

ここに、 v は相対速度を表し、 x 軸の正の方向にある。

上に示すガリレイ変換をニュートンの運動方程式に適用すると、次の関係が与えられる。

$$m \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = f \quad (5)$$

$$m' \frac{\partial^2 x'}{\partial t'^2} = f' \quad (6)$$

ここに、 m は慣性質量、 f は作用力を表す。また、 $m' = m$ 、 $f' = f$ である。

従来からいわれるように、ガリレイ変換は、ニュート

ンの運動方程式を同じ形に変換している。すなわち、ガリレイ変換は、ニュートンの運動方程式に対して相対性原理を満たすと結論される。

3. 波動方程式のガリレイ変換

音波など、波の伝播を表す関数を η で与えるとき、その伝播を支配する波動方程式は、一般に次のように表される。

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \tag{7}$$

ここに、 c は波の伝播速度を表す。

式 (7) に示す波動方程式を満たす波の一般解は、次のように与えられる。

$$\eta = \eta(x - ct) \tag{8}$$

もしくは、

$$\eta = \eta(x + ct) \tag{9}$$

式 (7) ~ (9) に対してガリレイ変換を適用すると、それぞれ次なる関係式が得られる。

$$\left(\frac{\partial}{\partial t'} + (c + v) \frac{\partial}{\partial x'}\right) \left(\frac{\partial}{\partial t'} - (c - v) \frac{\partial}{\partial x'}\right) \eta' = 0 \tag{10}$$

$$\eta' = \eta'\{x' - (c - v)t'\} \tag{11}$$

$$\eta' = \eta'\{x' + (c + v)t'\} \tag{12}$$

ここに、 η' は変換後の波の伝播を表す。

従来からいわれるように、ガリレイ変換は波動方程式及びその一般解を同じ形に変換していない。ここまでの議論は、ガリレイ変換に対する我々の従来の解釈と符号する。

一方、ニュートンの運動方程式に対しては、ガリレイ変換は相対性原理を満たすということが、第2章の結論であった。水波や音波などの波動現象はニュートンの運動法則に支配されるものであることを考えると、波動方程式の一切に対してガリレイ変換は相対性原理を満たしていないとする結論には矛盾があるように思える。

このことに関する詳しい議論は、後に行うことにして、ここでは、ガリレイ変換後の波動方程式の一般解である波の伝播方程式 [式 (11) 及び (12)] に見るように、ガリレイ変換後の波の伝播速度が相対速度に依存して現れている点に着目しておく程度にとどめる。

4. 波動方程式のローレンツ変換

ローレンツ変換は、一般に次のように与えられる ^{1,2)}。

$$x' = \gamma(x - vt) \tag{13}$$

$$y' = y \tag{14}$$

$$z' = z \tag{15}$$

$$t' = \gamma(t - vx/c^2) \tag{16}$$

ここに、 γ は $\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ と与えられ、ローレンツ係数と呼ばれる。

ここに示すローレンツ変換を波動方程式 (7) , その一般解である式 (8) 及び (9) に適用すると、それぞれ次なる関係を得る。

$$\frac{\partial^2 \eta'}{\partial t'^2} = c^2 \frac{\partial^2 \eta'}{\partial x'^2} \tag{17}$$

$$\eta' = \eta'\{1/\sqrt{1 - v^2/c^2} (1 - v/c)(x' - ct')\} \tag{18}$$

$$\eta' = \eta'\{1/\sqrt{1 - v^2/c^2} (1 + v/c)(x' + ct')\} \tag{19}$$

ここに、式 (18) 及び式 (19) では、 $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ や $(1 - v/c)$ あるいは $(1 + v/c)$ などが明示されているが、 $\eta' = \eta'(x' - ct')$ や $\eta' = \eta'(x' + ct')$ の形に表すこともできるので、ローレンツ変換が波動方程式及びその一般解を同じ形に変換しているのを確認できる。また、注目すべきは、変換後の波の伝播速度が相対速度に依存せず、変換前と同じ速度 c となっている点にある。

ローレンツ変換は、波動方程式を同じ形に変換しているため、それが光など電磁波の伝播現象に対して相対性原理を確かに満たしていることを確認できる。

さて、式 (18) 及び式 (19) に対して、相対速度 v が波の伝播速度 c に比較して十分に小さいとする条件 ($v^2/c^2 \ll 1$) を与えると、近似的に次なる関係を得る。

$$\eta' = \eta'\{(1 - v/c)(x' - ct')\} \tag{20}$$

$$\eta' = \eta'\{(1 + v/c)(x' + ct')\} \tag{21}$$

これらの結果には、古典的ドップラー効果が明示されているものの、変換先でも波の伝播速度が変化せず c となることについては、物理学における光の伝播に関する実験事実と符合する

アインシュタインによれば、ローレンツ変換式に現れる座標及び時間 (x, y, z, t) は静止系の座標及び時間を表し、 (x', y', z', t') は運動系における実際の座標及び時間を表すと定義される ^{1,2,3)}。従来の我々の定義によれば、このような定義は、ガリレイ変換式に対しても同じである。

アインシュタインや従来の我々の定義に対して、著者は、「ローレンツ変換が与える空間及び時間 (x', y', z', t') は、静止系の観測者が運動系の力学を計測する際、相対速度の存在を消し去るために (運動系と並走して運動系の力学を観測するために) 数学的に導入される相対論的移動座標系の空間及び時間を与える」ことを主張してい

る^{6,7,8)}.

5. ローレンツ変換が与える近似式とガリレイ変換との物理的相違

ローレンツ変換が近似として与える波の伝播式 (20) や式 (21) は、正しく相対性原理を満たしている。それに対して、ガリレイ変換が与える結果 [式 (11) 及び式 (12)] は、相対性原理を満たしていない (ただし、ガリレイ変換は、ニュートンの運動方程式に対しては相対性原理を成立させていることに、再び注意しておく必要がある)。

また、式 (20) 及び式 (21) が波長と振動数との両方にドップラーシフトを受けているのに対して、式 (11) 及び式 (12) は、振動数のみにシフトを受けている点も異なる点として挙げられる。

したがって、相対速度が波の伝播速度に比較して十分に小さいとする条件をローレンツ変換に付与して近似的に得られる結果とガリレイ変換から得られる結果とは物理的にまったく異なるものと結論される。

そもそもアインシュタインの相対性理論にローレンツ変換が必要とされたのは、従来のガリレイ変換が光など電磁波の伝播に対して相対性原理を満たしていないことにあった。したがって、ローレンツ変換が近似的に与える結果とガリレイ変換が与える結果との物理的意味の相違が現れるのは当然といえよう。

しかるに、我々の従来の解釈は、「ガリレイ変換は、ローレンツ変換に対して、相対速度が波の伝播速度に比較して十分に小さいとする条件を付与して近似的に得られる」とするものであったことは、誤りであったと結論されなければならない。

アインシュタインは、相対性原理を導入し、「絶対静止空間に対する速度ベクトルがどのようなものかを考えることは無意味なことである」と述べている²⁾。さらに、「光エーテル(光を伝える媒質の役割をになうエーテル)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」とも述べている²⁾。

ここで改めてガリレイ変換の結果、式(11)及び式(12)を眺めてみると、相対速度は明らかに波を伝える媒質に対するものとなっている。すなわち、ガリレイ変換は、波を伝える媒質に対して固定された座標系から、それに対して一定速度で移動している移動座標系への変換となっている。その結果、振動数にシフトを受けている。

こうして、ガリレイ変換は、波に対して明らかに媒質の存在を認めている。これは、アインシュタインが「光

エーテル、すなわち光を伝える媒質の存在を物理学にもちこむ必要はない²⁾とした相対性原理の精神に反する。すなわち、アインシュタインの相対性原理を満たす満たさないという意味において (波を伝える媒質の存在を求める求めないという意味において)、両変換式は互いに相反する意味を与える変換式となっていることをここに確認できる。

従来のガリレイ変換は (その式形だけからの判断としては)、 $v/c \ll 1$ なる条件下でローレンツ変換の近似として与えられるようにも見える。しかし、 $v/c \ll 1$ なる条件を課してしまうと、古典的ドップラーシフトが現れないので、 $v \approx 0$ を意味し、波に対しては移動座標系への変換を与えない。

以上に議論されるように、ガリレイ変換は、波に対して相対性原理を満たさないため、それを以て構築される理論は、波に対しては相対性理論と呼ぶことはできない。いやむしろ、ガリレイ変換は、波を伝播させる媒質が占める空間を一種の絶対静止空間として、それに対する相対速度ベクトル考える理論と言える。

6. ローレンツ変換が近似として与える変換則

前章までの議論から、我々は、相対速度 v が光速 c よりも十分に小さい ($v^2/c^2 \ll 1$) としたときの近似式として、次なる関係を得なければならない。

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

$$y' = y \quad (23)$$

$$z' = z \quad (24)$$

$$t' = t - (v/c)(x/c) \quad (25)$$

これらの関係式は、時間に対する補正項 [式 (25) の右辺第二項] の存在の有無において従来のガリレイ変換式と異なる。また、これらの関係式は、ローレンツ変換式において、二次のオーダーの振動数シフト (redshift) を落とした結果となっている。

式 (25) の右辺第二項に見る時間補正項は、変換先において時間の同時条件を満たすためのものであり、理論的には $[x]$ 及び $[x']$ の値が十分に大きい場合も含む。したがって、 $v^2/c^2 \ll 1$ という条件を課したとしてもその項を無視することは出来ず、また波に対する相対性原理を成立させるためには必須の項となっていることに注意が必要である。

これらの関係式を波動方程式 (7)、その一般解である波の伝播式 (8) 及び式 (9) に適用すると、それぞれ式 (17)、式 (20) 及び式 (21) を得る。すなわち、変換後に得られる関係式は、その変換前の式形とまったく同

じであり、相対性原理が満たされていることを、ここに確認できる。

以上の議論から、相対速度 v が光速 c よりも十分に小さい ($v^2/c^2 \ll 1$) としたとき、ローレンツ変換が近似的に与える変換則は、従来のガリレイ変換ではなく、式 (22) ~ (25) と結論される。

ところで、式 (22) において、 $x = vt$ 及び $x = vt + l$ を代入すると、それぞれ $x' = 0$ 及び $x' = l$ が与えられる。これらの関係を式 (25) に与えると、次なる関係を得る。

$$\Delta t' = -vl/c^2 \quad (26)$$

ここに、 $\Delta t'$ は移動座標系において、原点及び $x' = l$ における 2 点間の時間差を表す。

逆に、相対性原理に則り、運動系から静止系を観測するとき、静止系における時間差 (より正確には、静止系と並走する移動座標系における時間差) Δt が、 x 軸上に距離 l だけ離れた 2 点間で、次のように与えられる。

$$\Delta t = vl/c^2 \quad (27)$$

アインシュタインが述べるように、「運動している時計は、それに対して静止している時計に比較して実際に遅れる」^{1),2)} というのであれば、光の速さに比較して十分に遅い同じ速度で運動する 2 台の宇宙探査機搭載の原子時計や GPS 衛星の原子時計の時間^{4),5)} に対しても、式 (26) に示す時間差は当然ながら有意な値となって現れていなければならない。しかるに、それらの原子時計に対してそのような事実はこれまでに一切報告されていない。

このような事実は、「式 (22) ~ (25)、あるいは式 (13) ~ (16) に見る左辺の物理量は、運動系の実際の空間や時間を表す訳ではない」^{6),7),8)} とする著者の定義を支持するものと言える。

アインシュタインの相対性理論の誤りが指摘され、新しい相対性理論がすでに提案されている^{6),7),8),9),10)}。その中では、ローレンツ変換式の左辺に見る空間座標や時間を運動系の実際の空間座標や時間と設定したアインシュタインの誤りが指摘されている。

相対性原理が静止系及び運動系の両者に対して等しく成立するためには、両系で全く同じ空間や時間の単位が共有されている必要があり、その上で、静止系が発する光を運動系で観測すると、式 (18) 及び式 (19) に示す光の伝播が観測される。すなわち、静止系から発せられる光は、運動系で、古典的ドップラーシフトのみでなく、二次の振動数シフトを伴って観測される。このことは、静止系と運動系との立場を入れ替えてもまったく同じである。

これに対して、アインシュタインは、ローレンツ変換後の空間座標や時間を運動系の実際の空間座標や時間とみなしている。その結果は、相対性原理を成さず、静止系に束縛された空間や時間を与えている。そのため、アインシュタインの相対性理論は、空間や時間に関する数々のパラドックスを派生させている。

7. 運動方程式に対する相対性原理の成立と波動方程式に対する相対性原理の成立の違い

第 2 章及び 3 章の結論は、ガリレイ変換がニュートンの運動方程式に対して相対性原理を満たすものの、波動方程式に対しては相対性原理を満たさないということであった。ここで、波として水波や音波などを想定すると、それらはニュートンの運動方程式に支配されるものであるから、運動方程式と同様に波動方程式もガリレイ変換に対して相対性原理を満たさなければならず、矛盾に感じられる。

それらの理由を数学的に見ると、質点に対するニュートンの運動方程式には、時間のみの関数として定義される質点位置の時間微分の項が含まれるものの、空間変数による微分が含まれていないということに尽きる。式 (5) に示すニュートンの運動方程式が、ガリレイ変換によって相対性原理を満たす形に変換されたことは、質点が位置する空間中の任意点という「ただの一点」に対しては同時の条件が問われないということの説明されよう。

一方、ローレンツ変換は、運動系の力学計測に光など電磁波を用いる観測に対する変換則となっている。光はその振動数のみでなく、波長に対してもドップラー効果が現れることと、二次の振動数シフトを起こすことが、力学計測に対して相対性原理を成立させる仕組みとなっている。

観測者に対して相対速度を有するような運動系から届く光は、観測者にドップラー効果と二次の振動数シフトを生じて観測される。そのことは両系で空間と時間に対して互いにまったく同じ単位を共有することによって実現される。したがって、両系で空間と時間に対して互いにまったく同じ単位を共有することは相対性原理を成立させるための与条件となる。

相対性理論に関する教科書等を読んでみると、大抵において、「ローレンツ変換はマクスウェル方程式を同じ形に変換するが、ニュートンの運動方程式を同じ形に変換しない」と説明されている。この説明も誤りである。

式 (28) に示すニュートンの運動方程式にローレンツ変換を施すと、式 (29) あるいは式 (30) を得る¹⁰⁾。

$$m' \frac{\partial^2 x'}{\partial t'^2} = f' \tag{28}$$

$$\frac{m}{\sqrt{1-v^2/c^2}^3} \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = f \tag{29}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{mv}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \right) = f \tag{30}$$

従来の説明では、式 (28) と式 (29) [あるいは、式 (30)] との比較から、ローレンツ変換は、ニュートンの運動方程式を同じ形に変換しないと判断されている。

しかしながら、式 (29) は次のように書ける。

$$\frac{m}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}^2} \frac{\partial v}{\partial t} = f \tag{31}$$

すなわち、

$$\partial V = \frac{\partial v}{\sqrt{1-v^2/c^2}^2} \tag{32}$$

$$M = \frac{m}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \tag{33}$$

とおくことで¹⁰⁾、次式を得る。

$$M \frac{\partial V}{\partial t} = f \tag{34}$$

すなわち、ローレンツ変換はニュートンの運動方程式を同じ形の方程式に変換しており、ニュートンの運動方程式に対して相対性原理を満たす。式 (32) や式 (33) に示すように、変数を適宜置き換えることができるのは、マクスウェルの電磁場理論のローレンツ変換の場合と同じである。ただし、これらの結果を得るには、アインシュタインの特殊相対性理論に現れる相対論的速度合成則を式 (32) に示すように修正する必要がある¹⁰⁾。

ところで、ローレンツ変換を施すことは、例えば、静止系で式 (8) の形に伝播される波動が運動系でいかように観測されるものとなるかを知るための変換といえる。ローレンツ変換から得られる結果は、観測される波はドップラー効果や二次の振動数シフトを生じて観測されるというものであった。

8. おわりに

以上の議論から明らかとなったことは、ガリレイ変換とローレンツ変換とは、まったく異なる物理的背景を持つ変換則となっていることである。

ローレンツ変換は、光など電磁波（その伝播に媒質の存在を求めない波）を運動系の力学計測に用いる際の変換則となっている。数学的には、これによって静止系の観測者は相対速度の存在を消し去り、運動系と互いに静止した関係となれる。その結果、静止系の観測者は運動系の力学計測を正しく行うことが可能となる。

相対速度 v が光速 c よりも十分に小さい ($v^2/c^2 \ll 1$) とするとき、ローレンツ変換式は、ガリレイ変換式とは異なる変換式を与える。こうして得られる変換式は波動方程式に対して相対性原理を満たす。

一方、ガリレイ変換は、音波など、その伝播に媒質が必要となる波に対する変換則となっている。したがって、ガリレイ変換と、ローレンツ変換からその近似として与えられる変換則とは、（相対性原理を満たす満たさないという意味において）それらの物理的背景に根本的な違いが存在する。したがって、ガリレイ変換は、条件 $v/c \ll 1$ あるいは $v^2/c^2 \ll 1$ とは無関係に設定された変換則と言える。

アインシュタインの相対性理論の誕生以来、「ガリレイ変換は、相対速度が光速に比較して十分に小さいという条件をローレンツ変換に課すことで近似的に得られる」としてきた我々のガリレイ変換に対する認識は、正しくなかった。ここに、その誤りが正された。

従来、ローレンツ変換は、マクスウェルの電磁場の理論を同じ形に変換するもののニュートンの運動方程式を同じ形に変換しないとするものであった。しかしながら、ローレンツ変換は、ニュートンの運動方程式に対しても同じ形に変換し、相対性原理を成立させることが明らかとなった。ただし、そのためには、アインシュタインの特殊相対性理論に現れる相対論的速度合成則の修正が必要であった。

本論の結論は、ガリレイ変換に対する我々の認識の誤りを正すことにとどまらない。「ローレンツ変換後の空間及び時間は運動系の空間及び時間を表す」とするアインシュタインの相対性理論は修正されなければならないことをも要求している。そのことによって、アインシュタインの相対性理論に付随してきた一切のパラドックスも解消される。

L. Essen¹¹⁾ や H. Dingle^{12,13)} は、当時、広く知られる物理学者であった。彼らは、研究者としての晩年をアイン

シュタインの相対性理論に誤りがあることの指摘に費やした。彼らに加えて数多くの研究者が同様な指摘を行っているが、それらの主張はこれまで現代物理学界に受け入れられてきていない。

アインシュタインの相対性理論の誤りを主張する者は、物理学界をあげて実施されてきた実験結果、例えば飛行機搭載の原子時計の実験⁴⁾、GPS衛星搭載の原子時計の実験⁵⁾などによって否定されてきている。しかし、それらの実験結果のすべては特殊相対論の効果をなんら証明するものではなかった。単に、観測者に対して動いているものや重力下(加速度の存在下)における力学計測に対して光や電磁波を用いることによる問題点の発現を示すに過ぎなかったと判断される^{8),9),10)}。

アインシュタインの相対性理論の誤りはすでに指摘され著者による新相対性理論が提示されている。詳しくは、それらを参照して頂きたい。

謝辞: 本研究の一部は、尾崎次郎基金の援助を受けて実施された。ここに記し、感謝の念を捧げる。

参考文献

- 1) アルバート・アインシュタイン著・金子務訳: 特殊及び一般相対性理論について, 白揚社, 216p., 2004.
- 2) 内山龍雄訳・解説: アインシュタイン相対性理論, 岩波文庫, 187p., 1988.
- 3) 戸田盛和: 相対性理論 30 講, 朝倉書店, 231p., 1997.
- 4) J.C. Hafele and R.E. Keating: Around the world atomic clocks, Science, Vol.177, Issue 4044, pp.168-170, 1972.
- 5) B.P. Abbott et al.: Observation of gravitational waves from a binary black hole Merger, Physical Review Letters, 116, 061102, pp.1-16., 2016.
- 6) 仲座栄三: 新・相対性理論, ボーダーインク, 180p., 2015.
- 7) Eizo NAKAZA: Resolving our erroneous interpretation of the Galilean Transformation, Physics Essays, Vol. 28, N. 4, pp. 503-506, 2015.
- 8) 仲座栄三: 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論文集(Physics), Vol.2, No.1, p.22-29, 2017.
- 9) 仲座栄三: 相対論的時間と光の速さについて, 沖縄科学防災環境学会論文集 (Physics), Vol.2, No.1, pp.77-80, 2017.
- 10) 仲座栄三: 相対性理論による速度及び運動方程式, 沖縄科学防災環境学会論文集 (Physics), Vol.3, No.1, pp.1-11, 2018.
- 11) L. Essen: The special theory of relativity, oxford Science Research Paper 5, pp.1-27, 1971.
- 12) H. Dingle: The 'Clock Paradox' of Relativity, Nature, April 27, pp.865-866, 1957.
- 13) H. Dingle: Clock paradox of relativity, Science, Vol.127, pp.158-160.

(2018 7.16 受付)