沖縄科学防災環境学会論文集 (Physics), Vol.4, No.1, 15-23, 2019

アインシュタインの相対性理論に関する時間及び長さのパラドックスを解く

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相対性理論からは時間及び長さに関するパラドックスが派生される．これまでに，それらについて様々な解釈が投じられてきている．本論は，仲座の新相対性理論によって，それらの解釈の誤りを正すものである．これにより，双子のパラドックス，浦島効果，ガレージのパラドックス，2 台のロケットの同時発射の問題，原子時計の時間の遅れ，一般相対性理論における時空の歪（曲がり）など，これまでパラドックスとされてきた問題が解決される．

Key Words: *Nakaza's relativity, Lorentz transformation, twin pradox, time delay, length contraction*

1.　はじめに

仲座によって新しい相対性理論が提案されている [1),2)]．その後，その新相対性理論によって解決される物理学的諸問題などが説明されている [3),4),5),6),7),8),9),10)]．しかし，新しい相対性理論が提示されたとは言え，これまで 100 年間にもまたがって我々の思考を束縛してきたアインシュタインの相対性理論のドグマから抜け出すのは容易なことではない．

例えば，これまで著者が投稿した論文，あるいは著書などの説明においても，誤解を受けるような説明であったり，説明に誤りがあったりしている．特に，原子時計の計測時間についての説明では，一般相対性理論における重力の効果による遅れ，あるいは地球上の周回軌道上を一定速度で飛行する人工衛星や航空機搭載の場合の遅れについての説明 [1),2)]には補足を要する．

新相対性理論によれば，時間や長さの単位は物理学上絶対的に定義されるものであり，それらが重力や加速度の存在，あるいは相対速度の存在で相対論的に歪むことはあり得ないとする説明にある．その下で，原子時計による時間の計測値や，光測量などでによる距離の計測値には，それらの影響が現れていなければならない．すなわち，物理学的に定義される時間及び空間とそれらの単位を用いて「計測される時間と空間」とが混同されている場合がある．計測される時間や長さは，絶対的に定義される時間や長さの単位を不変的なものとして用いて計測されるものであり，それら計測される時間や空間と物理学上絶対的に定義される時間及び空間の単位との違いを明確にしなければならない．

著者は，アインシュタインの相対論的時間や長さの概念を相対性理論から一掃し，新相対性理論を構築しながらも，2 台のロケットの同時発射問題（すなわち，Bell の宇宙船パラドックスの問題）においては，やはり従来の考え方を抜け出せていない [1)]．

本論は，これらの説明を修正することを目的としている．また，そのことを通じて，アインシュタインの相対性理論から派生されてきた数々のパラドックスの解決を図るものである．

2.　座標系及び時間の定義

アインシュタインによるローレンツ変換の空間座標や時間の定義と仲座の新相対性理論によるそれらの定義との違いはすでに，文献1)–10)に詳しく説明されている．ここでは，それらの概要のみを述べる．座標軸の定義の詳細等についてもここでは割愛する．

2.1　アインシュタインによる説明

アインシュタインの相対性理論の本質を成す基礎理論は，以下に示すローレンツ変換をもって説明される [11)]．

$$t' = \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}(t - vx/c^2) \tag{1}$$

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

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

$$z' = z \quad (4)$$

ここに，（x，y，z）及びtはそれぞれ静止系の空間座標及び時間，（x'，y'，z'）及びt'はそれぞれ運動系の空間座標及び時間，vは運動系の静止系に対する移動速度，cは光の速さを表す．いま運動系は，x軸の正の方向に，一定速度で運動する場合が仮定されている．

式（1）から式（4）に示されるように，アインシュタインの相対性理論では，ローレンツ変換した先の時間及び空間座標がアプリオリに運動系の時間及び空間を表すものと定義されている．

式（1）及び式（2）に示す関係に，

$$x = vt \quad (5)$$

及び

$$x = vt + l \quad (6)$$

なる関係をそれぞれ代入し，次なる関係式を得る．

$$t' = \sqrt{1 - v^2/c^2}t \quad (7)$$

$$x' = \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}l \quad (8)$$

ここに，lは運動物体の運動方向の長さが静止系で計測される際の長さを表す．

アインシュタインは，相対性原理によって，式（8）から次の関係を与えている．

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

ここに，l_0は運動物体が観測者の目前で静止して計測される際の長さを表す．

アインシュタインは，式（7）及び式（9）に基づいて，「運動系の時間t'は静止系の時間tよりも短縮しており，静止系で観測される運動系の運動方向の長さlはそれが静止して観測される際の長さl_0よりも短縮している」とする説明を与えている．その結果，時間及び長さは絶対的なものではなく，相対的なものであるとする概念が生まれ，ニュートン力学で定義される不変的な時間や長さの定義は物理学の世界から葬りさられることとなった．

2.2 E. Dewan & M. Beran，J. S. Bell，松田による 2 台のロケットの同時発射の問題の説明 [12),13)]

静止系で鉛直方向に間隔を空けて縦列をなして静止している同型の 2 台のロケットの同時発射の問題を考える（話を簡単にするために，この問題ではx軸を鉛直上向きに取る）．この 2 台のロケットは，静止系の観測者から見て，同時に発射し，互いにまったく同じ一定の速度vで移動するものと設定される．

この事に関して，著者は，文献 1)において「赤い糸（ひも）の問題」として紹介している．その問題とは，「静止系で，2 台のロケットが発射を待っている．このとき，これら 2 台のロケットは緩みのない赤い糸でしっかりと結ばれている．静止系でこれら 2 台のロケットが同時に，そして互いにまった同じ速度で，飛び立つ様子が観測されるとき，2 台のロケットを結んでいた赤い糸は，そのまま両者を結んだままか？それともそれは発射とともに切れているか？」を問うものとなっている．この問題の本質は，発射前の 2 台のロケットの間の距離と発射後におけるロケット間の距離とに相違はあるか？ということを問うている．

静止系の観測者に対しては，問題の設定条件から，2 台のロケットの間隔は，それらが発射前もまた発射後も終始一定となって観測されている．ここで，発射前のロケット間の距離をl_0と置く．

アインシュタインの相対性理論である式（1）及び（2）に，2 台のロケットの位置と発射時刻，$t = 0$，$x = 0$及び$t = 0$，$x = l_0$をそれぞれ代入し，それらに対応して，$t' = 0$，$x' = 0$及び$t' = (-vl_0/c^2)/\sqrt{1 - v^2/c^2}$，$x' = l_0/\sqrt{1 - v^2/c^2}$なる関係を得る．

すなわち，運動系の観測者（ロケットのパイロット）の測る 2 点は運動系の座標において，$x' = 0$と$x' = l_0/\sqrt{1 - v^2/c^2}$に位置するため，それら 2 点間の距離$l'$は，次のように与えられる．

$$l' = l_0/\sqrt{1 - v^2/c^2} \quad (10)$$

よって，静止系で静止していた 2 台のロケット間の距離は，それらが一定速度で運動し出した後にはそれらが静止時の 2 点間長l_0よりも伸びてl'となる（この長さl'は，運動系の観測者，すなわちロケットのパイロットが 2 台のロケットと静止した関係となって測る長さを表す）．

ここで，静止系では 2 台のロケットの発射時刻が共に$t = 0$を示し「同時発射」と観測されることが，運動系では（パイロットの観測によれば）対応する 2 点において「同時発射ではない」とする説明が与えられる．この場合，先頭にあるロケットが後方のロケットの発射時よりも，$(vl_0/c^2)/\sqrt{1 - v^2/c^2}$だけ早めに発射したことになる．その結果，「発射後の 2 台のロケット間の距離は，発射前の長さよりも伸びている」と説明される．したがって，「2 台のロケットを結んでいた赤い糸は，先頭のロケットの発射と同時に切れている」と説明される．

E. Dewan & M. Beran，J. S. Bell，松田が与えた説明は，さらに込み入っている．詳しくは，文献 12), 13) を参照して頂きたい．

上術のような説明に対しては，例えば次のような反論が投じられている．

上の説明では，2 台のロケットの同時発射問題であったが，それは 1 台のロケットの発射問題，すなわち，2 台のロケットを 1 台のロケットの先端と後端の 2 点の同時発射の問題に読み替えることができる．このとき，静止系の観測者はロケットの先端部と後端部の 2 点の同時始動及びまったく同じ速度での移動を観察するこになる．そのような場合に，運動系の観測者からは，この 2 点間の長さが伸びて計測され，しかもそれらが非同時の始動として計測されるとなる．このとき，この 1 台のロケットはその作用で破壊していることになるのではないか？すなわち，運動系の観測者となるパイロットの観測によれば，ロケットの後端よりも先に先端部が始動し出すことになり，後端部エンジンからの噴射で始動するロケットの発射と矛盾することになる．

このような疑義に対して，E. Dewan & M. Beran，J. S. Bell，松田は反論を与えているが，後に明らかにされるように，それらの詳細をここで議論してもそれは無意味なこととなるため，それらの詳細もここでは割愛し，文献 12)及び 13)に譲る．

2.3　相対論的長さのパラドックス

式（9）に示されるように，アインシュタインの相対性理論によれば，運動している物体の長さは運動方向に短縮して観測される（静止系の観測による）．アインシュタインの説明によれば，運動している物体の静止系で計測される長さは，物体の両端が静止系で「同時」に占める空間の長さとして定義される [11]．したがって，従来の解釈によれば，「長さが短縮して観測される」という意味は，実際に長さが短縮していることを意味する [14, 15, 16]．

式（9）より，静止系で観測される運動物体の長さlととそれが静止して観測される際の長さl_0との関係として，

$$l = \sqrt{1 - v^2/c^2}\, l_0 \tag{11}$$

を得る．

仮に，目前に 1 台の車とそのガレージとがあり，それらが観測者と互いに静止して測定されるとき，車の長さl_0はガレージの長さよりも長いものとする．したがって，この時点ではその車はガレージに収まらない．しかし，車がある一定の速度で移動して来るときには，「ガレージから見る運動している車の長さlは短縮しているので，その車はガレージに収まる」とする判断が与えられる（ガレージから見て，車の先端と後端とが同時に占める長さは，l_0よりも短縮している）．

このような判断は，ガレージ側から見た説明であるが，相対性原理によって，この説明を今度は，逆に車の側から観測すると，「運動して見えるガレージの長さは元の長さよりも短縮して観測されるので，車はなおさらそのガレージに収まらない」とする判断が与えられる．この判断は，先の「車はガレージに収まる」とする説明に矛盾する．相対性原理によれば，いずれの観測者側から眺めても，観測される物理現象に相違があってはならないので [11]，これらの結果は相対性原理に背く．

こうしてアインシュタインの相対性理論は，長さのパラドックス（ガレージのパラドックス）を派生させる．

3.　仲座の新相対性理論による説明 [1)-10)]

仲座によって提案されている新相対性理論が，アインシュタインの相対性理論と根本的に異なる点は，ローレンツ変換した先の時間及び空間座標が，運動系と並走する移動座標系（すなわち，数学的に設定される移動座標系）の時間及び空間を表すとする点にある．静止系及び運動系に加えて，この第 3 の座標系を相対論的座標系と定義する．

一方，光（電磁波）の伝播の観測という観点に立てば，ローレンツ変換後の時間及び座標値は，相対速度を有する系から発せられる光の伝播，その光が伝える時間情報（あるいは振動数）及び，その光の伝播が描く距離の観測値を表すと説明される．

すなわち，従来の相対性理論で運動系の時間や長さの短縮として説明されてきた事は，運動系から静止系に届く光が伝える時間情報及びその光が示す伝播距離に関することであり，実際に運動系の時間や長さが短縮することではない．

3.1　新相対性理論における変換式の定義

静止系の空間座標及び時間を（x，y，z）及びtで表し，運動系の空間座標及び時間を（X，Y，Z）及びTで表すことにする．相対性原理による系間の対称性によって，両系の空間座標の目盛間隔は互いに等しく，経過時間は未来永劫に互いに等しくなければならない．

したがって，両系の時間に関し，以下の関係が与えられる．

$$t = T \tag{12}$$

式（12）の存在は，アインシュタインの相対性理論による相対論的時間の定義と根本的に異なる．また，アインシュタインが運動物体の相対論的長さを定義づけたことに関しても，相対性原理に則りそれは不変でなければ

ならない．このように物理学的に定義される時間と空間の単位は，いかなる力学計測においても不変となっていなければならない．ここに展開される相対性理論が，新相対性理論と呼ばれる所以の第一義がここにある．

静止系を基準とする新たなローレンツ変換は，次のように与えられる．

$$t' = \gamma\left(t - \frac{vx}{c^2}\right) \tag{13}$$

$$x' = \gamma(x - vt) \tag{14}$$

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

$$z' = z \tag{16}$$

ここに，γ は$\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ を表す．運動系の運動はx軸方向にある．

式（13）から式（16）の関係式は，「静止系から発せられる光など電磁波を用いて運動系に静止している長さl_0の剛体棒の長さがいかように観測されるものとなるか」という観点から導かれている[1),10)]．

したがって，

$$x = vt + l_0 \tag{17}$$

という関係が成立し，運動によって運動物体の長さは不変であるという，相対性原理が働いている．

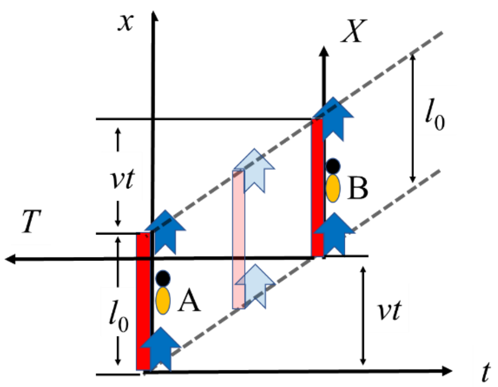
これらの変換式の式形は，アインシュタインの定義によるローレンツ変換の式（1）から（4）及び式（6）に示す式形と同じである．しかしながら，それらの意味する物理は，互いにまったく異なる．したがって，式（13）から（16）を新たなローレンツ変換と呼ぶことができる．

アインシュタインのローレンツ変換との根本的な相違は，先ずもって，新たな変換式に対して式（12）及び式（17）の存在に見られる．すなわち，一定速度の運動に対して時間と長さが不変に保たれるというところにある．

図–1 は，２台のロケットが，ロケット間をl_0だけ空けて互いに静止している状態から，同時に発射し共に一定の速さで飛び立っていく場合の，2 台のロケットの位置関係を表す．このとき，式（12）及び式（17）を満たす静止系（観測者Ａの系）と運動系（観測者Ｂの系）との関係は，**図–1** に示す通りである．

静止系の観測によれば，この２台のロケットはゼロ時に同時に発射した．しかも移動速度vは 2 台共にまったく同じである．また，ロケットが静止時に見せたロケット間長l_0は，ロケットが静止時もまた発射後もそのまま変わらずにある．

相対性原理によれば，静止系から運動系と観測されている観測者Ｂの系を逆に静止系と見なすことができる．このとき，観測者Ｂの傍らにある２台のロケットは，終始静止したままにある．したがって，それらの間の長さは，終始，l_0のままにある．この関係を表すのが式（17）である．



図–1　相対性原理を満たす２台のロケットの同時発射とその後の位置と時間の関係

これと同様に，時間についても，静止系で時間がt_0だけ経過したと観測されるのであれば，運動系でも時間はt_0だけ経過していなければならない．このことは，式（12）で表される．

こうして，新相対性理論においてはアインシュタインによって葬り去られた時間及び長さの不変性が再定義され，逆にアインシュタインが導入した光速度不変の原理，そして相対論的時間及び長さの定義が相対性理論構築の過程から一掃される[1)-10)]．

ところで，**図–1** に示す静止系から見る運動系の位置の時間変化（あるいは逆に，運動系から見る静止系の位置の時間変化）はどのような観測によって得られたものか？が問われよう．

実は，この観測には，アインシュタインの方法[11)]が用いられている．すなわち，「空間に配置された正確な多数の時計の助けを借りて，それらの時計の示すある瞬間に，2 台のロケットがそれぞれ通過する２点（ロケット位置）を順次プロットした」図となっている．したがって，**図–1** から分かるように，アインシュタインが述べた「静止系で運動系の長さは短縮して観測される」は，誤った判断であったと結論される[3)]．

図–1 は，アインシュタインの計測方法とは別に，光など電磁波を用いた計測によっても得られる．但し，その際，2 つの独立した光源からそれぞれ光を放ち，観静止系の時間を用いて，それぞれの光がそれぞれのロケット位置を追跡し，互いに独立して観測される２台のロケット位置を順次プロットしたのが**図–1** と見なすこともできる．

式（13）から（16）に示すローレンツ変換式は，**図–1**

に示す観測結果に直接的には関係していない．すなわち，運動物体の位置観測に，光など電磁波を用いたとしても，運動している物体のただの１点を追跡するここことに関しては，ローレンツ変換を必要としない．ローレンツ変換は，運動している２点間の距離を光を用いて同時測量する際に，あるいは相対速度を有する他の系から発せらた光がどのように計測されるものとなるかを表す際に必要となる．以下にその議論が行われる．

3.2　時間及び長さに関するパラドックスの解決

仲座の新相対性理論によれば，いかような力学計測においても時間及び長さの単位は不変に保たれ，そのことは相対性原理によって保証される．これらのことは，新たな特殊相対性理論においては，式（12）及び式（17）に示すとおりである．したがって，時間に関する双子のパラドックスや相対論的浦島効果という解釈が，新相対性理論から派生されることはない．また，長さに関するガレージのパラドックスなど，長さのパラドックスなども派生されることはない．

２台のロケットの同時発射の問題に対しては，**図−1** に示すように，いずれの系から眺めても同時発射であり，ロケット間の距離は，相対性原理に照らして，未来永劫に発射前と同じ長さのままにある．両系の時間経過も互いに全く同じとなる．したがって，「ロケット間をつなぐ赤い糸は，未来永劫に切れることなく結ばれたままにある」と結論される．

アインシュタインの相対性理論からは時間及び長さのパラドックスが派生されることが，H. Dingle[17, 18]及び L. Essen[19]によって厳しく指摘されている．彼らの主張は，「アインシュタインの相対性理論は，相対性原理を満たしていない」とする指摘であった．彼らの主張が正しかったことが，半世紀を経て，新相対性理論により明らかにされたといえる．

3.3 E. Dewan＆M. Beran，J. S. Bell，松田が提起する問題の解決

前章第２節にて２台のロケットの同時発射問題が議論された．アインシュタインのローレンツ変換は，静止系の座標及び時間を運動系の座標及び時間と結び付けているため，静止系と運動系の時間や座標の対応関係が議論されるなど，誤った解釈に基づく議論がこれまで連綿と行われてきた．また，そのことが，各種のパラドックスを派生させる要因ともなっている．

新しく定義されたローレンツ変換は，式（12）および式（17）で表される時間及び長さの不変性を堅持した上で，静止系から（あるいは，逆に運動系から）放たれた光など電磁波が，運動系（あるいは，逆に静止系）で観測されるとき，それがいかようなものとなって現れるかを与える．

したがって，E. Dewan＆M. Beran，J. S. Bell，松田が２台のロケットの同時発射の問題に適用したローレンツ変に基づく時間や長さに関する静止系と運動系との間の対応関係の説明[12, 13]は，正しくは，以下のようにまったく異なる説明をもって置き換えられなければならない．

以下においては，静止系の観測者が彼に対して一定速度で運動している物体の長さ（あるいは，運動系内に静止している２点間の距離）をその運動方向に光測量する場合を想定する．このような静止系の光測量の様子が，運動系から眺めて，どのようなものとなっているのかを考える．このような対応関係を明らかにすることが，新ローレンツ変換の物理的意味を与える．

ここで，静止系の観測者が観測対象としている運動系内の２点間の長さをl_0（これは，運動系の観測者が計測する運動方向の長さである）とする．このとき，静止系の観測者がこの長さを光測量する際の測定時間は，光の伝播方向と運動系の運動方向とによって異なり，

$$t_1 = \frac{l_0}{(c-v)} \tag{18}$$

あるいは

$$t_2 = \frac{l_0}{(c+v)} \tag{19}$$

と与えられる．また，これらの時間の平均値は，次のように与えられる．

$$\bar{t} = \frac{t_1+t_2}{2} = \frac{1}{1-v^2/c^2}\, l_0/c \tag{20}$$

静止系の観測者によるこのような観測結果が，運動系の観測者には，運動系内に静止している２点間を往復する光（電磁波）となって観測される．ただし，その光が運動系内において伝播した実際の距離は，先に静止系の観測者が観測対象とした長さl_0とは異なり，次のようになっている．

$$l' = \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}\, l_0 \tag{21}$$

すなわち，静止系の観測者は運動系内の長さl_0を測定しているはずなのに，運動系内の観測者がその状況を運動系で確認すると，そのようにはなっていない．式（21）に示す長さl'の伝播距離となっている．また，この２点間の距離を測定するのに要した伝播時間は，光の往路と復路において共に等しく，

$$t' = \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} l_0/c \qquad (22)$$

となっている．

静止系の観測者は，式（18）あるいは式（19）で示される時間の間，光を放ったのだが，運動系にはそのようには届いていない．しかも，静止系からは式（18）及び式（19）が示すように，それぞれ異なる伝播時間として観測されているものが，運動系の観測者によれば，式（22）に示すように，それらはまったく同じ伝播時間となっている．

式（20）と式（22）を比較してみると，静止系の観測時間は，式（18）や式（19）で表される個々の観測時間ではなく，それらの平均時間が$\sqrt{1-v^2/c^2}$だけ短縮した形となって運動系の観測者に観測されている．このように，静止系から届く光が示す時間情報が運動系で短縮して観測される要因は，光の振動数の redshift にある．

ここで改めて式（13）から式（16）までに示される新ローレンツ変換式を見ると，式（13）は，元はといえば，次のように表され，

$$t' = \sqrt{1-v^2/c^2}\left(\frac{1}{1-v^2/c^2} l_0/c\right) \qquad (23)$$

また，式（14）は，次のように表される．

$$x' = \sqrt{1-v^2/c^2}\left(\frac{1}{1-v^2/c^2} l_0\right) \qquad (24)$$

すなわち，式（13）及び式（14）の右辺に示す量は，静止系の観測者が運動系内の２点間の長さl_0を測定した際に要した平均観測時間及びその時間内に光が測量した距離が，それぞれ短縮する形を表している．これに対して，式（13）及び式（14）の左辺は，運動系から眺めて，静止系から届く光が運動系内でいかほどの計測時間となって現れ，またその間にその光が伝播した距離はいかほどの長さとなって計測されるのかを表す．したがって，静止系の観測値は，時間にしても伝播距離にしても共に短縮した形で運動系の観測者に観測される．

以上の考察からは，次のようなことがいえる．

静止系の観測者が，彼に対して運動している物体の長さを光など電磁波を用いてその運動方向に測定するとき，その長さが正しく測定されているものかどうかは，その物体と互いに静止した関係にある運動系の観測者に訊いてみる必要がある．

その運動系の観測者によれば，「静止系から届いた光は，その系内に静止した２点間を正しく測量するものであったが（光の伝播の往路と復路に要した時間はまったく同じであったが），その光が運動系内で測量している実際の距離は，運動物体の長さl_0よりも長く，式（21）で与えられる長さl'となっている．また，その計測時間は式（22）のt'で与えられる時間となっている」さらに，「静止系から届く光の振動数は，運動系内で発せられる同じ光と比較すると，その振動数に古典的ドップラー効果と redshift を生じている」と説明される．

アインシュタインの相対性理論を信じ，そのローレンツ変換を用いて議論された E. Dewan & M. Beran，J. S. Bell，松田による２台のロケットの同時発射の問題の説明と類似した議論，すなわち静止系の時間及び長さと運動系の時間及び長さとの対応関係の議論は，数多くの教科書などでも取り上げられている．

上の議論において，「ローレンツ変換を，静止系の時間及び空間（長さ）と運動系の時間及び空間（長さ）との対応関係に用いてはならない」ということが明らかとなった．正しくは，ローレンツ変換は「光など電磁波を用いた計測において，静止系の観測者に観測される運動系の長さ及びその計測に要した時間と，その光が運動系内の観測者に観測される際の，伝播距離及びその伝播に要した時間との対応関係を表す」と説明される（但し，運動系の立場からは，この説明の逆の説明が与えられる）．

この問題に対しては，著者も，文献 1）において新相対性理論を掲げつつも，従来の考え方に沿う説明を与えてしまっている．こうして，そのドグマから抜け出すのは容易ではない．以下に，E. Dewan & M. Beran，J. S. Bell，松田による説明と対比させならが，正しい説明を与える．

まず，２ 台のロケットが静止状態から発射した瞬間は，静止系の観測者及び運動系の観測者（ここでは，パイロットに当たる）には，それぞれ$t=0$及び$T=0$として，静止系の観測者にもパイロットにも「2 台とも同時発射」として観測される．

同時発射した２台のロケットは静止系から見ると共に一定速度vで移動して観測される．逆に，これをロケットのパイロットから見ると，２ 台のロケットは終始静止したままにあるが，静止系が一定速度$-v$で遠のいていくのが観測される．このような状況下で，仮に，静止系の観測者の時計が時間経過 $t=(l_0/c)/(1-v^2/c^2)$ を指しているとすると，パイロットの時計も時間経過 $T=(l_0/c)/(1-v^2/c^2)$ を指している．いま，ロケットは２台であり，パイロットはそれぞれのロケットに１人を想定している．彼らは運動系で互いに離れた位置にいるが，それぞれのパイロットの時計の指す時間は，共にまったく同じである．彼らの時間は共に時間Tをもって表される．

E. Dewan & M. Beran，J. S. Bell，松田は，アインシュタ

インのローレンツ変換を持ち出し，それに静止系の時間及び空間座標値を代入し，パイロットの測る時間や空間座標値との対応を議論した．しかしながら，この議論は誤りである．これは，アインシュタインのローレンツ変換の定義の誤りに基づいている．

仲座の新ローレンツ変換の定義によれば，変換式は「静止系の（あるいは運動系の）観測者の放つ光など電磁波が，運動系で（あるいは静止系で）いかように観測されるものとなるかを表す」ものであった．したがって，ローレンツ変換を用いた議論は，以下のように正されなければならない．

以下においては，静止系の観測者が２台のロケットの同時発射と共に，先頭ロケットから後方ロケットへ向けて，後方ロケットから先頭ロケットへ向けて，それぞれ互いに逆向きの２方向に光を発射する場合を想定する．

このとき，静止系の観測者によれば，それぞれの光が先頭及び後方のロケットに到達するのに要する時間は，それぞれ式（18）及び式（19）に示すように，光の伝播方向とロケットの移動方向とによって（異なるものとして計測される．

それぞれのパイロットは，運動系でその光を受け取るが，受け取ったそれらの光は共に，その振動数に古典的ドップラーシフト及びredshiftを生じて計測される．静止系の観測者には，光はそれぞれのロケットに非同時に届いたと観測されるが，ロケットのパイロットには，静止系からの光は共に同時に届く．その光が示す振動数に基づいてこれらの様子を計測すると，発射から光を受け取るまでの時間経過は共に式（23）として測られる．このとき，パイロットが受け取った静止系からの光の伝播速度は，その伝播方向に係わらず，速さcを示している．また，それらの光が伝播した距離は，式（24）に示す長さとなって測られる．

新ローレンツ変換は，静止系の観測者の測る平均計測時間とそれが運動系で計測される時の時間との間に式（23）に示す関係が成立することを示している．すなわち，E. Dewan & M. Beran，J. S. Bell，松田がパイロットの測る発射時間のずれとして計算した時間差は，2 台のロケットの発射時間の差を表すのではない．静止系で計測される光の伝播方向と運動系の運動方向との違いに応じて，静止系の観測者にそれぞれ計測される計測時間の平均値（平均時間）との差が短縮した値を表す．

2 台のロケットは，静止系の観測者からも，また運動系の観測者からも「同時発射，そして２点間の距離は不変」となって計測される．その結果，両観測者の計測値は互いに対称的となり，相対性原理は満たされる（**図–1** を参照）．

3.4　原子時計の示す時間の遅れ，計測される時空の歪

著者は文献 1）や 2）において，原子時計の遅れに関する Hafele＆Keatingによる実験 [20]及びGPS衛星搭載の原子時計 [21]に時間の遅れが計測された要因について，「静止系から放たれた基準時を示す光は，運動系でredshiftを起こして観測されるため，それを元に運動系の原子時計の時間を計測すると，その時計の時間は遅れて計測される」とする旨の説明を与えている．

しかしながら，Hafele & Keating による実験の場合の原子時計の遅れは，そのように基準時との差を随時取ることで求められたものではない．Hafele & Keating による原子時計の飛行実験の場合，４台の原子時計を飛行機に搭載し，一定高度，一定速度でそれらを一定時間飛行させた後に地上に戻り，地上に固定してあった原子時計の示す基準時との差が直接比較されている．

さらに著者は，文献 1）及び 2）において，「重力による原子時計の遅れは存在しない」とし，これに対しても基準局から届く光の振動数と，比較すべき原子時計の振動数との差として説明している．このような説明は誤りである．これらの説明を修正しなければならない．

新相対性理論において，一貫して説明している本質的なことは，「相対速度，あるいは重力や加速度の存在で，物理学的に定義される時間及び長さ（空間）が歪むことはない」ということにある．これに対して，アインシュタインは，時間及び空間は，相対的なものであり，相対速度，あるいは重力や加速度の存在によってそれらは歪むととされ，４次元の時空が定義されている．

Hafele & Keating による飛行機搭載の原子時計の遅れ，あるいは人工衛星搭載の原子時計の遅れや進みは，正しくは重力の変化と遠心力の変化で説明される [6),7),9),10)]．すなわち，これまで特殊相対性理論による効果とされてきたことは，遠心力の変化による効果として説明されなければならない．

アインシュタインの相対性理論に基づく従来の説明では，重力の変化や加速度の存在によって，時間及び空間が歪むとされてきた．しかしながら，仲座の新相対性理論では，物理学的に定義される時間及び空間は不変的なものであり，またそれらは互いに独立していると定義されている．

例えば，重力の存在下で，離れた２点間の距離を光など電磁波を用いて測定することはすなわち，地上の離れた２点間の距離を測定するのに，投じた質点の奇跡及び所要時間を測定することと同様となる．投じられた質点

の奇跡が重力の影響を受けて曲率をもった軌跡を示すこと及び（redshift が存在するのなら）所要時間が短縮して観測されることは当然であり，それらは無重力下の２点間の距離を質点が移動する際に示す正しい直線距離及び所要時間と異なることは当然である．

したがって，例えば，重力の存在下で光の伝播が直線的でなく，曲率をもって曲線状に現れる理由は，光など電磁波と重力の干渉が光の伝播形態に及ぼす効果のためであって，重力でその周りの空間や時間が歪んでいる訳ではない．正しくは，「重力の影響下で光など電磁波を計測すると，時間及び距離にそれらの影響が現れて計測される」と説明しなければならない．すなわち，時間及び空間の「計測値」は，重力の強さに依存する．ただし，その変化を計測している時間及び長さの単位は不変的であり，互いに独立している．したがって，正しい時間や空間，そして力学の把握は，一般座標系を導入して，重力や加速度の影響を消し去った上で行う必要がある．このことは，特殊相対性理論におけるローレンツ変換の必要性に置き代える事ができる．

すなわち，特殊相対性理論において，ローレンツ変換の導入は，静止系の観測者が相対速度の影響を消し去って運動系の電磁場の観測を行うための座標変換であったように，一般相対性理論における一般座標系の導入は，重力や加速度の影響を消し去って電磁場の観測を行うための座標及び時間の数学的変換といえる．

重力や加速度場で光など電磁波を観測すると，それには必ず重力及び加速度の影響が現れる．例えば，地表で光など電磁波の観測を行うと，それには重力の影響が現れる．そのため，電磁波を用いた距離及び時間の計測値にもそれらの影響が現れる．したがって，それらの影響を受けない距離及び時間の計測には，一般座標系を導入し，それらの影響を消し去って観測を行う必要がある．

アインシュタインの一般相対性理論において，４次元の時空として説明されたきたことは，電磁波によって「計測される時間と空間とは密接に関係している」ということであって，それらを計測する時間及び空間の単位は不変であり，それらは互いに独立している．

アインシュタインは，星の周りはその重力によって空間や時間が歪み，その結果，その星の背後から現れる光はその効果（重力レンズの効果）によって輝きを増して観測されると説明した．しかしながら，その説明は誤りであり，星の周りの空間や時間といえども，そこは三次元直交座標をもって，そしてそれに独立した時間単位をもって測られる不変的な空間と時間が定義される．

例えば，重力の存在下で光など電磁波の計測を行うと，それはあたかも空間が曲率を持って存在するかのように観測され，時間は遅れて計測される．このとき，アインシュタインの一般相対性理論は，それらの観測値を説明するものとなっている．しかし，それらの観測値をそのまま鵜呑みにして重力によって時間や空間が歪んでいると判断してはならない．ここにアインシュタインの誤りがある．星の周りの正しい空間や時間は，数学的４次元の一般座標系上で計測される歪んだ空間及び時間の逆変換によって（すなわち，電磁場に及ぼす重力の効果を消し去って）与えられる．それらは，直交三次元座標系とそれに独立した時間をもって理解されなければならない．

一方，光速度不変の原理の導入，時空の歪の定義は，電磁場と重力場の物理的メカニズム解明の思考停止をもたらす．

4. おわりに

アインシュタインの相対性理論では，ローレンツ変換後の空間及び時間，あるいは一般座標系導入後の空間及び時間を実際の空間及び時間として設定しているため，「空間及び時間が相対速度あるいは重力や加速度の影響で歪む」と定義されている．しかし，その定義は誤りである．正しくは，「相対速度が存在する環境下や，重力場あるいは加速度場で電磁波の観測を行うと，計測される時間及び長さには不可避的にそれらの影響が現れて観測される．正しい計測値を得るには，それらの影響を取り除くための理論，すなわち相対性理論が必要である」と設定しなければならない．

新相対性理論によれば，時間や長さ（空間）の不変的な単位が物理的に定義される．そのように定義される時間及び長さの単位を用いて，原子時計の振動数の計測など，電磁波を用いて局所的な時間や長さ（空間）を計測すると，それら計測値には重力や加速度の影響が現れる．したがって，物理学的に定義される不変的な時間及び長さと，電磁波を用いて計測される局所的時間及び長さとが存在することに注意を要する．

これまで時間や長さのパラドックスとされてきたことは，元はといえば，アインシュタインのローレンツ変換の定義の誤りに基づいていることが明らかにされた．古典的ドップラー効果の物理的メカニズムが明らかのように，新相対性理論によれば，相対速度の存在下における電磁波の振動数のredshiftの物理的メカニズムは明らかである（光の波動性にある）．一方，重力や加速度の存在による電磁波の振動数の redshift のメカニズムは，その「粒子性」にあると想定される．それが重力と電磁場の

干渉の際に現れていると言える．それらの物理的メカニズムを明らかにすることが，質量と重力の根源的解明や，素粒子の質量発現の解明につながる可能性が推測される．このようなことこそが，LIGO など重力波観測 [22]の本質といえよう（ただし，時空の波ではなく，重力変動波として捉える必要がある）．

謝辞

本研究を実施するに当たり，「尾崎次郎基金」の支援を受けたことに対し，心からの感謝の念を捧げる．また，稲垣賢人博士，琉球大学大学院理工学研究科博士後期課程の田中聡氏，琉球大学工学部宮里信寿氏，琉球大学大学院理工学研究科博士前期課程本屋敷凉氏には，本論を通読頂き貴重な提言等を頂いた．ここに記し，感謝の意を表します．

参考文献

1) 仲座栄三：*新・相対性理論*，ボーダーインク，180p.，2015.
2) Eizo NAKAZA: Resolving our erroneous interpretation of the Galilean Transformation, Physics Essays, Vol. 28, N. 4, pp. 503-506, 2015.
3) 仲座栄三: あなたはアインシュタインの相対性理論を論駁し得るか？，沖縄科学防災環境学会論文集(Physics)，Vol.2，No.1，pp.1-7，2017.
4) 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.
5) 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，p.77 -80，2017.
6) 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.1-11，2017.
7) 仲座栄三: 物理学 70 の不思議「なぜ時空は 4 次元か？」に答え，沖縄科学防災環境学会論文集 (Physics)，Vol.3，No.1，pp.12-16，2018.
8) 仲座栄三：物理学 70 の不思議「なぜ時空は 4 次元か？」に答える，沖縄科学防災環境学会論文集 (Physics)，Vol.3，No.1，pp.12-16，2018.
9) 仲座栄三：ローレンツ変換はガリレイ変換を与えない，沖縄科学防災環境学会論文集 (Physics)，Vol.3，No.1，pp.17-22，2018.
10) 仲座栄三：アインシュタインの相対性理論の矛盾点の分析と仲座の新相対性理論の導出，沖縄科学防災環境学会論文集(Physics)，Vol.4，No.1，pp.1-14，2019.
11) 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.
12) WIKIPEDIA: Bell’s spaceship paradox, https://enwikipedia/org/wiki/bell%27s_spaceship_paradox, 2019.
13) 松田卓也：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，サイエンス社，pp.45-52，2005.
14) W. リンドラー著，小沢清・熊野洋訳：*特殊相対性理論*，地人書館，243p.，1989.
15) 和田純夫：*相対論的物理のききどころ*，岩波書店，173p.，1996.
16) 杉山直：*相対性理論*，基礎物理学シリーズ，講談社，205p.，2010.
17) H. Dingle: The ‘Clock Paradox’ of Relativity, Nature, April 27, pp.865-866, 1957.
18) H. Dingle: Clock paradox of relativity, Science, Vol.127, pp.158-160.
19) L. Essen: The special theory of relativity, oxford Science Research Paper 5, pp.1-27, 1971.
20) J.C. Hafele and R.E. Keating: Around the world atomic clocks, Science, Vol.177, Issue 4044, pp.168-170, 1972.
21) N. Ashby: Relativity and the Global Positioning System, Physics Today, PP.41-47, 2002.
22) B.P. Abbott et al.: Observation of gravitational waves from a binary black hole Merger, Physical Review Letters, 116, 061102, pp.1-16, 2016.

(2019 8. 26 受付)