時計の時刻合わせから立証する特殊相対論の破れ VIII

(2010 年 6 月 21 日に投稿した修正英論文 VIII の原稿)

須 藤 晃 俊

本論の思考実験では先ず始めに，ある静止系に置いてあった長さLの棒の両端に設置された時計Aと時計Bの時刻を光の信号を用いるアインシュタインの方法によって合わせた.

次にその棒が運動を始めて，棒が最初に静止していた座標系に対して等速度$\boldsymbol{v}$に到達した時点で，棒上の観測者が2度目の時計の時刻合わせを行なった. これは等速度運動する棒の座標系で，2個の時計が同時刻となるように行なった操作である.

このとき棒上の観測者が調整する時計の時間はLv/c^2秒になる場合もあるし，ならない場合もある.

特殊相対論によれば，すべての慣性系で同一の物理法則が成立しなければならない. しかし本論の思考実験では，等速度運動する棒の両端の時計の2度目の調整時間は，棒の速度が分かっていても，棒及び静止系の観測者はその調整時間を予測できない. 速度が確定していても調整時間は確定しない. この結果は相対性原理と完全に矛盾する.

本論は相対性原理の破たんの原因は，棒が最初に置いてあった座標系に関与している未知の速度ベクトルの存在を無視したことにあると結論する.

また本論は，この速度ベクトルの始点としての未知の静止系の存在も同時に予測する.

特殊相対論は完全に修正を迫られている.

I. 序 論

19世紀末，当時の物理学者の多くは光を伝える媒質の役目をになうエーテルの存在を確信し，エーテルは“絶対静止”の状態にあると考えた.

マイケルソンとモーリーはエーテルに対する地球の運動，すなわち絶対速度を検出しようと試みた. しかし彼らの実験からは期待する結果が得られなかった[1].

マイケルソンはエーテルは運動する地球の表面に対して静止している(地球に随伴している)と結論し，期待された効果が検出できなかった理由を説明した.

一方ローレンツは“絶対静止系”に対する地球の運動を確信していたので，エーテルに対して速度$\boldsymbol{v}$で運動する物体は，進行方向の長さが $\sqrt{1-(v/c)^2}$ 倍に収縮するという仮説を提案してその場を凌いだ[2].

マイケルソンの考えでは地球の実験室から放出された光は等方的に伝播するが，ローレンツの解釈では光は非等方的に伝播する.

ところがアインシュタインは1905年に発表した特殊相対論の論文の中で，特別な性質を与えられた“絶対静止空間”は物理学には不要であり，エーテルの概念の導入を許すような特別な座標系は存在しないと主張した[3].

当時のアインシュタインの目的は，ローレンツやポアンカレのようにマイケルソン−モーリーの実験で期待された効果が生じなかった理由を説明することではなく，電磁気学に現れる非対称を解消するための座標系間の変換式を求めることであった.

そしてアインシュタインは特殊相対論構築の際に，光が同じ長さの光路をもつ 2 つの反射鏡に同時刻に到着すると定義によって決めた[4].

したがってアインシュタインは光が 2 つの反射鏡に到着した時間が，絶対的同時か否かの問題には答えていない. 本論はこの問題に決着を付ける思考実験を提示する.

II. 運動している座標系での時計の時刻合わせ

マイケルソン−モーリーの実験から期待された効果が検出できなかった理由を説明するために，マイケルソンとローレンツはそれぞれ独自の解釈を提案した.

これらの解釈を光の伝播の観点からみると，マイケルソンが考えた地球の座標系では光は光源に対して等方的に伝播する. このような座標系を“マイケルソンの座標系”と定義する.

一方ローレンツの場合には，エーテルに対して運動している地球上の実験室では光は非等方的に伝播する. このような座標系を“ローレンツの座標系”と定義する.

ところがアインシュタインは“マイケルソンの座標系”と“ローレンツの座標系”の相違を実験によって識別することは不可能であると考えた(アインシュタインはこのような識別自体もしていない).

そして光の信号が等速度運動する列車の前後に到着した時刻を列車の座標系における同時刻と定めた.

したがってアインシュタインは光が列車の前後の時計に到着する時刻が，絶対的同時刻であるか否かについての議論はしていない.

アインシュタインの提案に従って時計の時刻を合わせれば，“ローレンツの座標系”でも光は実験室の前後の壁に同時刻に到着することになる.

その結果“マイケルソンの座標系”と“ローレンツの座標系”内の観測者は共に，自らの座

標系で光は等方的に伝播すると判断することになる．アインシュタインは自らが提案した時計の時刻合わせを行なうことによって，この2種類の座標系を区別することを物理的に無意味なことにした．しかし本論ではこの2種類の座標系の識別が可能な思考実験を提示する．

アインシュタインはお互いに相対運動している慣性系はすべて同等だから，あらゆる慣性系の観測者は自らの座標系を静止系と見なして良いと考えた．

しかし自分のいる座標系が静止系であると主張するためには，その座標系の観測者はアインシュタインが提案した時計の時刻合わせを行なうことが前提となる．

アインシュタインは新しい物理学を構築する際に，絶対静止空間のような特別な座標系は必要ないと考えた．またアインシュタインは絶対座標が存在するとしても，それに対する速度を確かめる方法がないから，このような仮想的な座標系を想定して物理学を構築すべきでないと主張した．

そしてアインシュタインはこのような座標系に対する絶対速度には触れずに，慣性系間の相対速度をたよりにして特殊相対論を導いたが，その際アインシュタインは，ある慣性系にある 2 個の時計の同時刻を光の信号を用いて決めることを提案した．

アインシュタインは特殊相対論を構築する際に，次の“光速不変の原理”を提案した．

“Any ray of light moves in the “stationary” system of co-ordinates with the determined velocity c, whether the ray be emitted by a stationary or by a moving body.”[4]

“Let a ray of light start at the “A time” t_{A} from A towards B, let it at the “B time” t_{B} be reflected at B in the direction of A, and arrive again at A at the “A time” t'_{A}.

In agreement with experience we further assume the quantity

$$\frac{2\mathrm{AB}}{t'_{\mathrm{A}}-t_{\mathrm{A}}}=c\ ,$$

to be a universal constant — the velocity of light in empty space.”[5]

本章では先ず，アインシュタインが特殊相対論を構築するときに重要な役割を果たした“同時刻の相対性”について確認する．

いま空間内の A 点と B 点に正確に同じテンポで時を刻む時計 A と時計 B がある場合を考える．アインシュタインは光が A 点から B 点に到着するのに要する時間は，光が B 点から A

点に到着するのに要する時間に等しいと定義によって決めれば，2 個の時計の時刻を比べることが可能であると主張した(同時刻の操作的定義)[4].

つまり時計 A の時刻が t'_{A} のときに光が A 点から B 点に向かって出発し，時計 B の時刻が t'_{B} のときに B 点に到着して反射され，時計 A の時刻が $t'_{\mathrm{A'}}$ のときに A 点に戻ってくれば，これらの時刻の間には次の関係が成立する.

$$t'_{\mathrm{B}} - t'_{\mathrm{A}} = t'_{\mathrm{A'}} - t'_{\mathrm{B}}. \tag{1}$$

$$\frac{1}{2}(t'_{\mathrm{A}} + t'_{\mathrm{A'}}) = t'_{\mathrm{B}}. \tag{2}$$

アインシュタインはこれらの関係が成立するとき，その座標系における 2 個の時計の時刻は一致していると定義によって決めた.

さてここで静止系に一本の棒が置いてあるとしよう. そしてその棒の両端にある時計 A と時計 B は，静止しているときにアインシュタインの方法によって時刻を合わせておくものとする.

その後この棒が静止系に対して等速度運動を始めるとしよう(Appendix A 参照).

このとき棒の座標系の観測者は，棒の両端の時計の時刻が運動系の同時刻となるように，改めて時計の時刻を調整する必要が生じる.

いま静止している物指しで測って長さ L の剛体の棒 1 の軸が，静止系の x 軸の＋方向に沿って等速度 $\boldsymbol{v}$ で運動している場合を考える(図 1 参照).

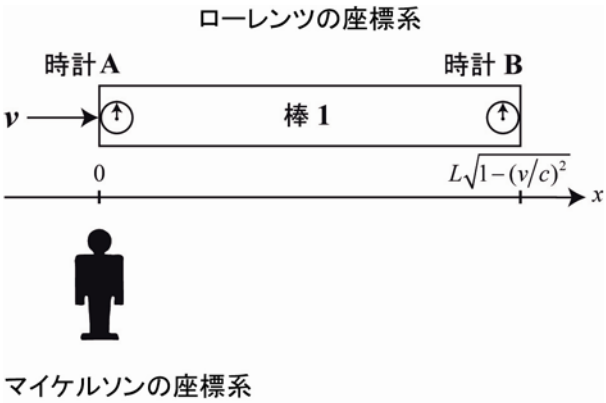

図 1. 棒 1 が"マイケルソンの座標系"に対して等速度 $\boldsymbol{v}$ で運動している. この棒の両端の A 点と B 点には時計 A と時計 B が設置されていて，これらの時計の時刻は時計が静止していたときに一致させておく.

ただし本論で考察する棒の速度は，特殊相対論の適用が必要となるような高速であるとする．

この棒 1 の左右の両端 A 点と B 点には同種の時計 A と時計 B が置いてあるが，それらの時計は静止していた時に時刻を合わせておくものとする．

本論ではこれらの時計の時刻が，運動系における同時刻となるように時計の時間調整を試みる．

いま棒1の座標系の時計Aの時刻が t'_{A} のときに，光が棒の後端のA点から前方のB点に向かって出発し，時計Bの時刻が t'_{B} のときにB点に到着し，時計Aの時刻が $t'_{\mathrm{A'}}$ のときにA点に戻ってくるとする．この運動系の時刻 $t'_{\mathrm{A}}, t'_{\mathrm{B}}, t'_{\mathrm{A'}}$ には静止系の時刻 $t_{\mathrm{A}}, t_{\mathrm{B}}, t_{\mathrm{A'}}$ が対応するものとする．

ここで本論で思考実験を行なう際に指針とするために，アインシュタインの論文を以下で引用しておく．

“We imagine further that at the two ends A and B of the rod, clocks are placed which synchronize with the clocks of the stationary system, that is to say that their indications correspond at any instant to the “time of the stationary system” at the places where they happen to be. These clocks are therefore “synchronous in the stationary system.”

We imagine further that with each clock there is a moving observer, and that these observers apply to both clocks the criterion established in § 1 for the synchronization of two clocks. Let a ray of light depart from A at the time t_{A}, let it be reflected at B at the time t_{B}, and reach A again at the time t'_{A}. Taking into consideration the principle of the constancy of velocity of light we find that

$$t_{\mathrm{B}} - t_{\mathrm{A}} = \frac{r_{\mathrm{AB}}}{c - v} \quad \text{and} \quad t'_{\mathrm{A}} - t_{\mathrm{B}} = \frac{r_{\mathrm{AB}}}{c + v}$$

where r_{AB} denotes the length of the moving rod—measured in the stationary system.”

* “Time” here denotes “time of the stationary system” and also “position of hands of the moving clock situated at the place under discussion.” [6]

この部分の表現は曖昧であるが，ここでこの時間間隔の計測を行なうのは運動系の観測

者ではなく，静止系の観測者であることを確認しておく．またこの時間 $t_{\mathrm{A}}, t_{\mathrm{B}}, t'_{\mathrm{A}}$ は運動系の時計の時間ではなく，静止系の時計で計測した時間であることも併せて確認しておく．それは $(t_{\mathrm{B}} - t_{\mathrm{A}})$ と $(t'_{\mathrm{A}} - t_{\mathrm{B}})$ には，運動系における時計の時間の遅れが考慮されていないことから明らかである．またこの論文は次のように続く．

"Observers moving with the moving rod would thus find that the two clocks were not synchronous, while observers in the stationary system would declare the clocks to be synchronous."

結局棒が静止してしたときに時刻を合わせた棒の両端の時計が運動を始めたときには，2 個の時計が運動系における同時刻となるように，再度時間調整を行なう必要が生じる．本論では実際に調整すべき時間の予測を以上で引用したアインシュタインの論文に基づいて行なうこととする．

ところで特殊相対論によれば運動する棒は進行方向に $\sqrt{1-(v/c)^2}$ 倍に収縮するから，光が A 点から B 点に到着するのに要する時間を静止系の時計で $(t_{\mathrm{B}} - t_{\mathrm{A}})$ 秒とすると，

$$t_{\mathrm{B}} - t_{\mathrm{A}} = \frac{L\sqrt{1-(v/c)^2}}{c-v} \quad (秒). \tag{3}$$

式(3)の右辺の分子，すなわち $L\sqrt{1-(v/c)^2}/c$ はすでに引用したアインシュタインの公式中の r_{AB} に対応している．

この光の伝播を静止系の観測者が見た場合，光が棒の後端から棒の前端の B 点に到着するまでの間に，B 点は静止系の光源から遠ざかってしまう(図 2 参照)．

したがって光が長さ $L\sqrt{1-(v/c)^2}$ の棒の両端を通過するのに要する時間を静止系の観測者の時計で計測した場合には，単純に $L\sqrt{1-(v/c)^2}/c$ 秒とはならない．

結局静止系の観測者の計測では，光が A 点から B 点に到着するのに要する時間 $(t_{\mathrm{B}} - t_{\mathrm{A}})$ は，光が B 点から A 点に戻ってくるのに要する時間 $(t_{\mathrm{A'}} - t_{\mathrm{B}})$ よりも長くなる．

式(3)の c-v は光速が光源の速度に依存することを意味しているものではない．光速は常に一定で c であるから，式(3)の c- v は光速の変化を記述したものではない．

式(3)はアインシュタインの論文中の式を引用したものだから，本来は何の問題もない式である．しかし本論では念のため式(3)の正当性を再確認する作業を行なった．

ところでローレンツの変換式の中で時間の変換式は次の式である．

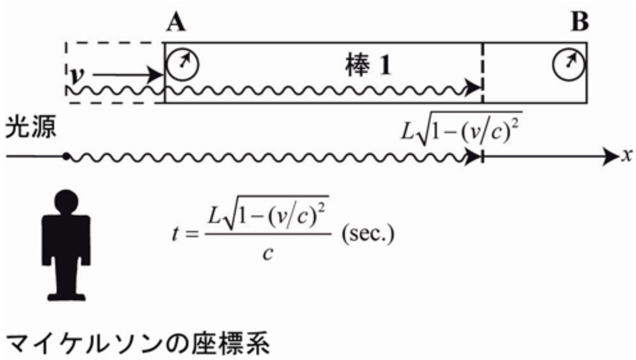

図 2. いま静止している観測者の前の光源と等速度運動している棒の後端 A から同時に光が放出されると，光速は光を放出する光源の速度には依存しないから，それぞれの光は一定の速さ c で伝播する．その光が静止している観測者の時計で $L\sqrt{1-(v/c)^2}/c$ 秒後に $x=L\sqrt{1-(v/c)^2}$ の地点まで到達したときには，棒の前端 B はすでにその地点にはなくさらに前方に進んでいる．

$$t'=\gamma\left(t-\frac{vx}{c^2}\right),\quad \text{ただし，}\gamma=\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}}. \tag{4}$$

また式(4)の逆変換式は次の式である．

$$t=\gamma\left(t'+\frac{vx'}{c^2}\right). \tag{5}$$

ところでフレンチの教科書では次の関係式を導いた[7].

$$t'_2-t'_1=\gamma(t_2-t_1). \tag{6}$$

式(6)を導く際に用いた変換式は式(4)であるが，本論では逆の立場を扱っている．つまり式(6)を導いたのはS'系の観測者であったが，本論の式(10)を導くのはS系の観測者である．したがって本論で用いる変換式は(5)でなければならない．

このことを念頭に置いて，本論ではフレンチの教科書の論法をそのまま借用して以下の議論を進める．

1個の時計がS'系の点$x'= x'_0$に静止しているとする．ここで時刻が異なる2つの事象を考えてみる．

事象 1: $(x'_0\,, t'_A)$,　　事象 2: $(x'_0\,, t'_{A'})$

S'系に対して速度$\boldsymbol{v}$で運動するS系で測定されるこの2つの事象の時間座標を計算してみる．

ローレンツ変換を用いると次の式が得られる.

$$t_{\mathrm{A}} = \gamma\left(t'_{\mathrm{A}} + \frac{vx'_0}{c^2}\right),\qquad \text{ただし,}\ \gamma = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}}. \tag{7}$$

$$t_{\mathrm{A'}} = \gamma\left(t'_{\mathrm{A'}} + \frac{vx'_0}{c^2}\right). \tag{8}$$

これから,

$$t_{\mathrm{A'}} - t_{\mathrm{A}} = \gamma(t'_{\mathrm{A'}} - t'_{\mathrm{A}}). \tag{9}$$

この式を書きなおすと次の式が得られる.

$$t'_{\mathrm{A'}} - t'_{\mathrm{A}} = (t_{\mathrm{A'}} - t_{\mathrm{A}})\sqrt{1-(v/c)^2}. \tag{10}$$

ここで式(10)の左辺は次のように表現できる.

$$t'_{\mathrm{A'}} - t'_{\mathrm{A}} = (t'_{\mathrm{B}} - t'_{\mathrm{A}}) + \left(t'_{\mathrm{A'}} - t'_{\mathrm{B}}\right). \tag{11}$$

一方式(10)の右辺は次のように表現できる.

$$(t_{\mathrm{A'}} - t_{\mathrm{A}})\sqrt{1-(v/c)^2} = \left\{(t_{\mathrm{B}} - t_{\mathrm{A}}) + \left(t_{\mathrm{A'}} - t_{\mathrm{B}}\right)\right\}\sqrt{1-(v/c)^2}. \tag{12}$$

式(11)と式(12)の右辺を等号で結ぶと次の関係が導ける.

$$(t'_{\mathrm{B}} - t'_{\mathrm{A}}) + \left(t'_{\mathrm{A'}} - t'_{\mathrm{B}}\right) = \left\{(t_{\mathrm{B}} - t_{\mathrm{A}}) + \left(t_{\mathrm{A'}} - t_{\mathrm{B}}\right)\right\}\sqrt{1-(v/c)^2}. \tag{13}$$

ところで運動系の一点$x' = x'_0$で経過する時間t'_{A}, t'_{B}, $t'_{\mathrm{A'}}$には,静止系の時間t_{A}, t_{B}, $t_{\mathrm{A'}}$が対応している.

したがって式(13)は次の2式に分離できる.

$$t'_{\mathrm{B}} - t'_{\mathrm{A}} = (t_{\mathrm{B}} - t_{\mathrm{A}})\sqrt{1-(v/c)^2}. \tag{14a}$$

$$t'_{\mathrm{A'}} - t'_{\mathrm{B}} = \left(t_{\mathrm{A'}} - t_{\mathrm{B}}\right)\sqrt{1-(v/c)^2}. \tag{14b}$$

議論を正確にするために,時計Aの時刻がt'_{A}, $t'_{\mathrm{A'}}$のときを$t'_{\mathrm{A}}\left(\text{clock A}\right)$, $t'_{\mathrm{A'}}\left(\text{clock A}\right)$と表現し,時計Bの時刻が$t'_{\mathrm{B}}$のときを$t'_{\mathrm{B}}\left(\text{clock B}\right)$と表現する.また$t'_{\mathrm{B}}\left(\text{clock A}\right)$は,A点(時計A)から放出された光がB点(時計B)に到達したときの時計Aの時刻を意味するものとする.以上のことを踏まえると,式(14a)は次のように表現できる.

$$t'_{\mathrm{B}}\left(\text{clock A}\right) - t'_{\mathrm{A}}\left(\text{clock A}\right) = (t_{\mathrm{B}} - t_{\mathrm{A}})\sqrt{1-(v/c)^2}. \tag{15}$$

ところで本論は等速度運動する棒の両端の時計の時刻をアインシュタインの方法を用いて単に合わせるだけでなく,実際に調整する時間も問題にしている.

そのために本論では当初S系に静止していた時に時刻を合わせた棒の両端の時計の時刻が,静止系の観測者から見て完全に一致している必要があった.

この棒が等速度運動を始めると棒の両端の時計の時間の経過は遅れるが,この2個の時

計が時を刻むテンポは同じである．したがってこの状況ではS系の時刻がt_{A}の時には，S'系の時計AとBの時刻は共にt'_{A}となる．またS系の時刻がt_{B}の時には，S'系の時計AとBの時刻は共にt'_{B}となる．

いま時刻t'_{A}にA点を出発した光が時計Bに到達する時刻をt'_{B}とすれば，その時間差は$(t'_{\mathrm{B}}-t'_{\mathrm{A}})$となる．この時間差は，光がA点からB点まで伝播する間に時計Aで経過する時間と一致する．

いま最初に棒の両端の時計の時刻を合わせた座標系が“マイケルソンの座標系”の場合を考える．等速度運動を始めた棒の両端の時計AとBの時刻は，絶対的に一致している．したがって“マイケルソンの座標系”に対して等速度運動を始めた段階で，まだ時計Aと時計Bの時刻が運動系で同時刻となるように再調整していない段階では，“マイケルソンの座標系”の観測者は次の関係が成立していると考える．

$$t'_{\mathrm{B}}\left(\text{clock A}\right)-t'_{\mathrm{A}}\left(\text{clock A}\right)=t'_{\mathrm{B}}\left(\text{clock B}\right)-t'_{\mathrm{A}}\left(\text{clock A}\right). \tag{16}$$

一方最初の時刻合わせを“ローレンツの座標系”上で行なった場合には，時計Aと時計Bの時刻は絶対的な意味で一致しているとはいえない．したがって，

$$t'_{\mathrm{B}}\left(\text{clock A}\right)-t'_{\mathrm{A}}\left(\text{clock A}\right)\neq t'_{\mathrm{B}}\left(\text{clock B}\right)-t'_{\mathrm{A}}\left(\text{clock A}\right). \tag{17}$$

ところでマイケルソンは“マイケルソンの座標系”のx軸の原点にあった光源から放出された光は，$x=\pm L$の地点に“絶対的同時刻”に到達していると予測した．本論がマイケルソンの見解をそのまま引用すると，読者に著者がエーテル静止系の存在を認めているような印象を与えるかもしれない．また本論が特殊相対論を完全に無視していると指摘されるかも知れない．しかし著者は“絶対的同時刻”を使用した説明はここでは行なわず，IV章の結論に至って著者が読者に説得する準備ができた時点で行なうことにする．

さて式(15) と式(16)を考慮すると、次の関係が成立する。

$$t'_{\mathrm{B}}\left(\text{clock B}\right)-t'_{\mathrm{A}}\left(\text{clock A}\right)=(t_{\mathrm{B}}-t_{\mathrm{A}})\sqrt{1-(v/c)^2}. \tag{18}$$

以上のように棒の両端の時計の時刻を最初に合わせた座標系が“マイケルソンの座標系”であった場合には，式(15)と式(18)が共に成立すると結論できる．

一方棒の両端の時計の時刻を最初に合わせた座標系が“ローレンツの座標系”であった場合には，式(15)が成立しても式(18)は成立しない．

つまり，

$$t'_{\mathrm{B}}\left(\text{clock B}\right)-t'_{\mathrm{A}}\left(\text{clock A}\right)\neq(t_{\mathrm{B}}-t_{\mathrm{A}})\sqrt{1-(v/c)^2}. \tag{19}$$

ところで“マイケルソンの座標系”では式(3)と式(18)から次の式が導ける．

$$t'_{\mathrm{B}} - t'_{\mathrm{A}} = \frac{L\left(\sqrt{1-(v/c)^2}\right)^2}{c^2} \tag{20a}$$

$$= \frac{L(c+v)}{c^2}\ \ (秒) \tag{20b}$$

同様に光がB点からA点に戻るまでに運動系の時計で経過する時間$(t'_{\mathrm{A'}} - t'_{\mathrm{B}})$を“マイケルソンの座標系”の観測者が観測すると，次のようになる．

$$t'_{\mathrm{A'}} - t'_{\mathrm{B}} = \frac{L(c-v)}{c^2}\ \ (秒) \tag{21}$$

今後簡単のためt'_{A}をゼロとすると，式(20b)と式(21)から次の式が導ける．

$$\frac{1}{2}t'_{\mathrm{A'}} = \frac{1}{2}\left[\left(t'_{\mathrm{B}} - t'_{\mathrm{A}}\right) + \left(t'_{\mathrm{A'}} - t'_{\mathrm{B}}\right)\right] \tag{22a}$$

$$= \frac{1}{2}\left[\frac{L(c+v)}{c^2} + \frac{L(c-v)}{c^2}\right] \tag{22b}$$

$$= \frac{L}{c}\ \ (秒) \tag{22c}$$

“マイケルソンの座標系”の観測者は，光がA点からB点に到着するのに要する時間は$L(c+v)/c^2$秒と判断するが，その光がB点に到着したときには，時計Bの時刻t_{B}は定義によってL/c秒でなければならない．しかし$L(c+v)/c^2 > L/c$であるから，この矛盾を解消するには時計Bの時刻が時計Aの時刻よりも遅れていなければならない．そこで実際に時計Bの時刻を遅らせるために調整する時間をΔt_1とすれば，その時間は両者の差を取れば良い．

すなわち，

$$\Delta t = \left(t'_{\mathrm{B}} - t'_{\mathrm{A}}\right) - \frac{1}{2}t'_{\mathrm{A'}} \tag{23a}$$

$$= \frac{L(c+v)}{c^2} - \frac{L}{c} \tag{23b}$$

$$= \frac{Lv}{c^2}\ \ (秒) \tag{23c}$$

この時間調整を行なうと2個の時計は運動系における同時刻となるが，ここまでの思考実験は既存の理論を適用した単なる練習問題であることを確認しておく．

したがってこの場合の時刻調整では，時計Aの時刻をΔtだけ進めるか時計Bの時刻をΔt

だけ遅らせる必要がある.

アインシュタインによって提案された通常の時間調整の方法では，2個の時計の間に式(1)と式(2)の関係が成立していれば，実際に時計をどれだけ調整するかは問題にならない．この時間調整を行なうことによって，この運動系でも式(1)と式(2)の関係が成立することになる.

III. ディスカッション

前章では等速度運動している時計の調整時間から“マイケルソンの座標系”と“ローレンツの座標系”の識別が可能であることを立証したが，“ローレンツの座標系”に対して等速度運動する棒の時計の調整時間は，なぜLv/c^2 秒と異なる値を取るのであろうか?

ここでII章で扱った棒1と同種の棒2が等速度$\boldsymbol{w}$ (ただし$\boldsymbol{w} \gg \boldsymbol{v}$)で運動する場合を考える(棒2の両端の時計AとBも棒1の両端の時計と同様に，静止していた時に時刻を合わせておくものとする).

そしてII章で棒1に対して行なった思考実験を棒2についても同様に繰り返すことにする. このとき棒2の前方の時計Bが調整することになる時間をΔt_2とすると,

$$\Delta t_2 = \frac{Lw}{c^2} \quad (秒) \tag{24}$$

次は棒2が初めから等速度$\boldsymbol{w}$で運動するのではなく，先ず等速度$\boldsymbol{v}$で運動しているときに最初の実験を行なう. つまり初めの段階では棒2は等速度$\boldsymbol{v}$で棒1と並進運動するが，この時点で棒2の前方の時計Bは棒1の時計Bと同様に最初の時間調整Δt_1を行なう(図3参照).

その後棒2は等速度$\boldsymbol{w}$になるまで加速するが，この速度$\boldsymbol{w}$は棒1と棒2の座標系の相対速度が$\boldsymbol{v}'$となる速度であるとする.

したがってこれらの速度$\boldsymbol{w}, \boldsymbol{v}, \boldsymbol{v}'$の関係は特殊相対論の速度の加算則によれば，次のようになる.

$$w = \frac{v + v'}{1 + \frac{vv'}{c^2}} \ . \tag{25}$$

ここで等速度$\boldsymbol{w}$に達した棒2の時計Bが2度目に調整する時間をΔt_3とすると，“マイケルソンの座標系”の観測者は$\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3$の間には次の関係が成立すると考える.

$$\Delta t_2 = \Delta t_1 + \Delta t_3 . \tag{26}$$

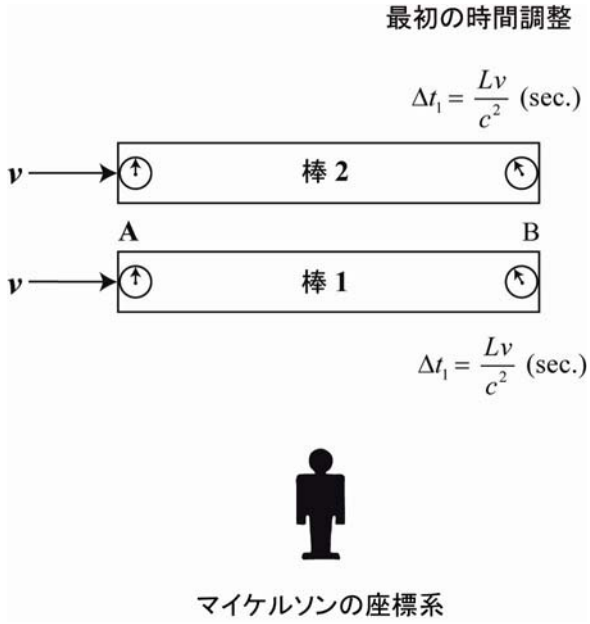

図 3. “マイケルソンの座標系”上の観測者によって予測される棒 1 の時計 B が調整する時間 Δt_1 と棒 2 の時計 B が最初に調整する時間 Δt_1 .

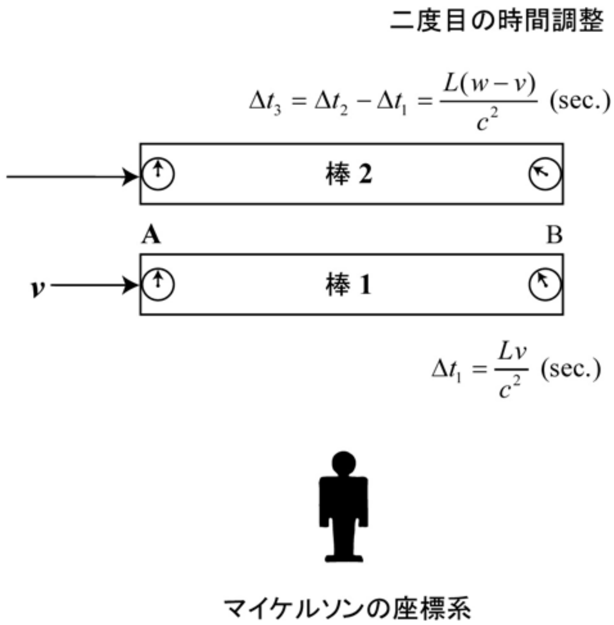

図 4. “マイケルソンの座標系”上の観測者によって予測される棒 2 の時計 B が 2 度目に調整する時間 Δt_3 .

これより“マイケルソンの座標系”の観測者は Δt_3 を次のように予測する(図 4 参照).

$$\Delta t_3 = \Delta t_2 - \Delta t_1 \tag{27a}$$

$$= \frac{L(w-v)}{c^2} \quad (秒) \tag{27b}$$

ところが特殊相対論によれば，お互いに相対運動する慣性系がある場合，唯一重要な速度は座標系間の相対速度である．したがって棒 1 の座標系の観測者は，自らの座標系が静止していて，棒 2 の座標系が等速度 $\boldsymbol{v}'$ で運動していると考える．そして棒 1 の観測者は，棒 2 の時計 B が行なう時間調整 Δt_4 として次の時間を予測する(図 5 参照).

$$\Delta t_4 = \frac{Lv'}{c^2} \quad (秒) \tag{28}$$

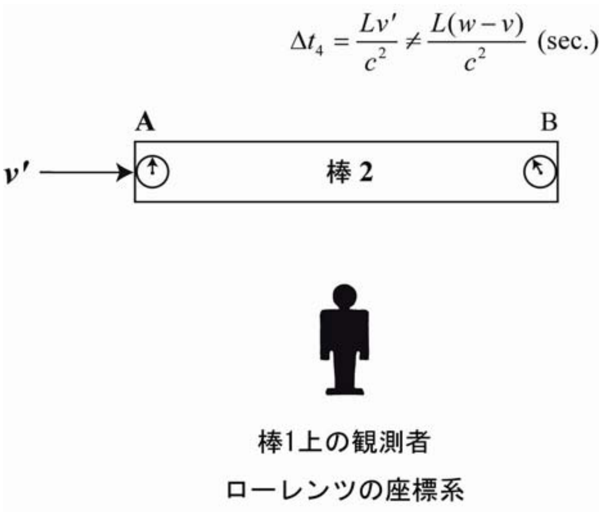

図 5. 自分の座標系が静止系であると信じている棒 1 の座標系の観測者によって予測される棒 2 の時計 B で調整する時間 Δt_4 .

結局“マイケルソンの座標系”の観測者が予測する時間 Δt_3 と“ローレンツの座標系”である棒 1 の観測者が予測する時間 Δt_4 は，異なることになる(Appendix B 参照).

運動する時計の“2度目の時刻合わせ”で調整する時間から，当初時計が静止していたときに時刻を合わせた座標系が，“マイケルソンの座標系”であったかそれとも“ローレンツの座標系”であったかの識別は可能である.

この場合これらの棒の両端の時計を合わせるために調整する時間は，その静止系に関与

している未知の速度 ***v*** に依存する. したがって ***v*** の大きさ次第では, たとえすべての棒の速度が同じであっても, 棒の座標系の観測者が調整する時間に差異が生じてしまう.

IV. 結 論

本論で行なった思考実験の過程を整理しよう. 先ず始めに, ある静止系に置いてあった長さLの棒の両端に設置された時計Aと時計Bの時刻を光の信号を用いて合わせた. この時刻合わせでは, アインシュタインが提案した方法を採用した.

次に静止していた棒が運動を始め, 棒が最初に静止していた座標系に対して等速度***v***に到達した時点で, 棒上の観測者が2度目の時刻合わせを行なった. これは棒の座標系で, 2つの時計が同時刻となるように行なった操作である.

このとき棒上の観測者が調整した時計の時間から, 本論では以下のような結論を導いた (表 I 参照).

最初に棒の時計の時刻を合わせた静止系	“マイケルソンの座標系”	“ローレンツの座標系”
式 (16) の関係	成立する.	成立しない.
等速度運動を始めた棒の時計で調整する時間 Δt	$\Delta t = Lv/c^2$.	$\Delta t \neq Lv/c^2$, 予測できない.

表 I. 2種類の静止系で成立する物理法則と観測される実験結果

しかしここで問題なのは, “マイケルソンの座標系”での光の伝播で, 本論が“絶対的同時刻”という表現を用いたことである. このような表現の使用は特殊相対論によって禁止されている. 特殊相対論を論破することなしに“絶対的同時刻”という表現を安易に用いることは, 物理的には容認できないことは, 著者も承知している.

そこで一応の結論が得られた現在, それまでの思考過程を放棄する. そして今度は逆の論理を用いて, 2度目の時計の調整時間から棒が最初に置いてあった座標系を定義しよう.

本論の思考実験の結果, 等速度運動する棒の両端の時計Aと時計Bの時刻の間に式(16)の関係が成立する場合は, 調整時間が(23c)であった.

しかし本論ではここで論理を逆転させて, 2度目の時計の調整時間が(23c)となる場合は, 時計Aと時計Bの時刻の間に式(16)の関係が成立すると結論する. この関係が成立するとき

最初に棒の両端の時計の時刻を合わせた座標系を“マイケルソンの座標系”と定義する. この座標系では光は等方的に伝播すると結論できる.

一方2度目の時計の調整時間が(23c)とならない場合はどうか? この場合には最初に棒の両端の時計の時刻を合わせた座標系を“ローレンツの座標系”と定義する. この座標系では光は非等方的に伝播すると結論できる. 以上のことをまとめると次の表のようになる(表II参照).

等速度運動を始めた棒の時計で調整する時間 Δt	$\Delta t = Lv/c^2$.	$\Delta t \neq Lv/c^2$.
式 (16) の関係	成立する.	成立しない.
最初に棒の時計の時刻を合わせた静止系	“マイケルソンの座標系”	“ローレンツの座標系”
静止系に関与している未知の物理量	なし.	未知の速度ベクトルの関与あり.
“相対性原理”	成立する.	成立しない. ただし未知の速度ベクトルの存在を考慮すると成立する.

表 II. 2度目の時計の調整時間から棒が最初に静止していた座標系を定義する

本来静止系と考えられていた“ローレンツの座標系”で光が等方的に伝播しないために, 等速度運動を始めた棒の座標系の2つの時計の時刻の間に, 式(16)の関係が成立しない(Appendix C参照).

このような実験結果が生じる原因として, 本論は“ローレンツの座標系”に関与している未知の速度ベクトルの存在を予測する.

さらに本論は速度ベクトルの存在だけでなく, この速度ベクトルの始点としての未知の静止系の存在も同時に予測する.

本論では等速度運動を始めた棒の両端の時計の時刻が, 棒の座標系で同時刻といえるように 2 度目の時刻合わせを行なった. そのとき時計の調整時間がLv/c^2秒の場合には, 棒が最初に静止していた座標系を“マイケルソンの座標系”と定義した.

著者はマイケルソン−モーリーの実験以降に行なわれた様々な実験結果を分析して, 現在では地球の座標系は“マイケルソンの座標系”であると考えている[8,9,10,11].

しかしマイケルソンが考えていた地球に付随するエーテルについては，20 世紀初頭の物理学者が信じていた仮想物質を支持している訳ではない．現代的には真空を構成する仮想粒子を波としての光が伝播するための媒質と考えるのが自然と考える.

いま地球の座標系が光が等方的に伝播する“マイケルソンの座標系”であったとしよう．その場合にも，宇宙空間の座標系の中には“マイケルソンの座標系”であっても，地球との間に相対速度を有する座標系も存在するであろう．少なくともそのような座標系の存在を禁止する物理法則は存在しない.

以上のことから，本論は“ローレンツの座標系”に関与している速度ベクトルの起点としての静止系は，その座標系から空間的に遠く離れた座標系にその候補を求めるべきではないと考える.

そこで本論は，新たにその存在を予測した未知の速度ベクトルを次のように定義する.

量子電磁力学によれば，電気力を伝える真空は粒子と反粒子の対で構成される仮想粒子が密に詰まった状態である.

また不確定性原理によれば，これらの仮想粒子は最低のエネルギー状態にあっても，静止することなく常にゆらいでいる.

このことから，物理空間内の点の座標系とその点と同一座標を占める真空内の仮想粒子の座標系の間には，無数の相対速度が存在することになる.

未知の速度ベクトルは，物理空間内の点の座標系とその点と同一座標を占める真空内の仮想粒子の無数の座標系との間の相対速度の平均値として定義できる.

ところでアインシュタインは特殊相対論を構築する際に，次の“相対性原理”を公理として採用した[4].

“The laws by which the states of physical systems undergo change are not affected, whether these changes of state be referred to the one or the other of two systems of coordinates in uniform translatory motion”

しかし本論はアインシュタインによってすべて同等と考えられていた慣性系が 2 種類に分類

できることを立証した.

それ故に本論は, アインシュタインが特殊相対論を構築する際に, すべての慣性系は同等であるとみなしたことは間違いであると結論する.

[1] A.A.Michelson and E.W.Morley, Am.J.Sci.**34**, 333 (1887).

[2] H.A.Lorentz, Kon.Neder.Akad.Wet.Amsterdam.Versl.Gewone.Vergad.Wisen Natuurkd.Afd. **6**, 809 (1904).

[3] A.Einstein, *The Principle of Relativity* (Dover Publication,Inc.New York,1923), p.38.

[4] A.Einstein, *The Principle of Relativity* (Dover Publication,Inc.New York,1923), p.41.

[5] A.Einstein, *The Principle of Relativity* (Dover Publication,Inc.New York,1923), p.40.

[6] A.Einstein, *The Principle of Relativity* (Dover Publication,Inc.New York,1923), p.42.

[7] A.P.フレンチ,平松惇監訳「MIT 物理　特殊相対性理論」(培風館), p.95.

[8] R.J.Kennedy and E.M.Thorndike, Phys.Rev.**42**, 400 (1932).

[9] H.Müller *et al.*, APPLIED PHYSICS.B-LASERS AND OPTICS,**77**, 719 (2003).

[10] H. Müller, S.Herrmann, C.Braxmaier, S.Schiller, A.Peters, Phys.Rev.Lett.**91**, 020401 (2003).

[11] C.Braxmaiere, H. Müller, O.Pradl, J.Mlynek, A.Peters, S.Schiller, Phys.Rev.Lett.**88**, 010401 (2002).

Appendix A

当初静止していた棒が運動を始めてある一定の速さに到達するには, 棒を加速させる必要がある. しかし特殊相対論では加速状態にある座標系は扱わない. したがって本論の思考実験は特殊相対論が適用できない実験を扱っているとの反論も出るかもしれない.

当初棒が静止していた座標系の観測者から見ると, 加速を始めた棒の両端の時計で経過する時間は, この観測者の座標系の時計で経過する時間に比べて遅れる.

しかし本論の思考実験では, 棒が加速している間に棒の両端の時計の時刻がどれだけ遅れるかは問題にならない. 静止系の観測者から見ると棒の両端の時計が時を刻むテンポは2個の時計で共通だから, 2個の時計の時刻は常に一致している. それ故に棒の加速中に2個の時計の時刻がどれだけ遅れようとも, 本論の思考実験の結果には何の影響も与えない.

また棒が運動を始める場合，静止していた棒がいきなりx軸の＋方向に向かって加速を始めると考えるべきではない．

実際には，静止していた棒をあらかじめx軸の−方向へ移動させておく必要がある．そしてその地点から棒をx軸の＋方向に向かって加速させ，棒が当初静止していた位置を通過するときには，等速度で運動している状況を想像すれば良い．この状況を図示したのが図1である．

Appendix B

最初に棒が静止していたときに，棒の両端の時計の時刻を合わせておいたにも係らず，等速度運動を始めた棒の時計の 2 度目の時刻合わせで，時計の調整時間が確定せずに様々な値を取るのは，明らかに“相対性原理”と矛盾する．

時計の調整時間は等速度運動する棒の速度が分かっていても予測できない．最初に棒が静止していた座標系が“マイケルソンの座標系”であった場合には，2 度目の時刻合わせで調整される時間はLv/c^2秒となる．

一方最初に棒が静止していた座標系が“ローレンツの座標系”であった場合には，2 度目の時刻合わせで調整される時間はLv/c^2秒とはならず，その値は予測できない．この実験結果は“相対性原理”と矛盾する．しかし本論の目的は“相対性原理”を原理から引きずり降ろすことではない．本論の目的は“ローレンツの座標系”に本来的に関与している未知の速度ベクトルを理論の中に取り込むことによって，“相対性原理”を原理として存続させることである．

Appendix C

表 I と表 II は“ローレンツの座標系”だけでみられる逆説を示したものであり，“マイケルソンの座標系”のものではない．したがって相対論を擁護する側からみれば，著者の解析は“ローレンツの座標系”(光の速度が等方的ではない) の無効性を示すものではあっても，その解析は特殊相対論に影響を及ぼすものではないとの反論が出るかも知れない．そこで著者はこの問題について解説しておく．

アインシュタインが特殊相対論を構築する際に要請した“相対性原理”によれば，すべての慣性系で同じ物理法則が成立する．またそれ故にすべての慣性系は同等である．したがって特殊相対論では静止系を分類することはない．

エーテルに対する地球の運度を検出しようと試みたマイケルソン−モーリーの実験で，期待された効果が検出できなかったことも考慮して，アインシュタインは“ローレンツの座標系”と

“マイケルソンの座標系”を区別することは，物理的に無意味なこととみなした(勿論アインシュタインはこのような分類自体を行なっていない).

それではマイケルソンやローレンツたちにとって，当然存在すると考えられたこれらの座標系の区別が，特殊相対論の登場と相前後して次第に論じられなくなってしまったのはなぜか?

アインシュタインは特殊相対論を構築する際に，それぞれの慣性系の時計の時刻は，その座標系で式(1)と式(2)の関係を成立するように合わせるべきだと主張した.

アインシュタインが提案した方法は，あらゆる慣性系で光が等方的に伝播すると主張できるように，その座標系の時計の時刻を調整することを要求している.

この時刻合わせを行なうと，本来ならば光が非等方的に伝播しているはずの“ローレンツの座標系”でも，光が等方的に伝播することになり，2 種類の座標系を識別することが困難になった.

“ローレンツの座標系”は“マイケルソンの座標系”と共に，アインシュタインの意味での静止系に組み込まれ，この静止系をそれ以上分類することはなくなった.

以上のような事情を考慮すると，アインシュタインがすべて同等と見なした慣性系の中には，“マイケルソンの座標系”と“ローレンツの座標系”が依然として混在していると考えられる.

アインシュタインはこの 2 種類の座標系が存在しないことを証明した訳ではない．アインシュタインは彼が提案した巧妙な時計の時刻合わせの方法を用いて，“マイケルソンの座標系”と“ローレンツの座標系”の識別を物理的に無意味なこととしたのである.

結局特殊相対論の慣性系の中には“ローレンツの座標系”も含まれているから，“ローレンツの座標系”の無効性を示せれば，“相対性原理”と矛盾する実験が提示できたことになる.
その場合には“相対性原理”を理論の根幹に据えている特殊相対論も無傷ではいられず，理論の修正が必要になる.