時計の時刻合わせから立証する特殊相対論の破れ I

(2009 年 6 月 24 日に投稿した英論文 I の原稿)

須 藤 晃 俊

本論では仮想的な絶対座標∑を想定し，∑に対して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が用いた方法によって合わせる思考実験を行なった.

等速度$\boldsymbol{v}$で運動する棒1の座標系に対して，等速度$\boldsymbol{v}'$で運動する棒2の座標系の時計が調整する時間を∑の観測者と棒1の観測者が予測すると，∑と棒2の相対速度と棒1と棒2の相対速度が異なるために，2人の観測者が予測する時間に相違が生じてしまう.

しかしこの場合実際に時計の調整を行なうのは棒2の観測者であるから，∑の観測者と棒1の観測者の両方の予測が正しいということはあり得ない.

本論はここまで思考実験を進めた時点で，実際にはその存在が立証できていない∑を地球の座標系に置き換える. 光の伝播の等方性の観点からは，2つの座標系の相違を現在まで識別できていないから，本論の思考実験の範囲内では∑と地球の座標系の置き換えが可能と考えた.

我々がこの置き換えさえ許容できれば，特殊相対論の予測と実際の実験結果に不一致が生じる慣性系の存在を立証できる.

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.

ところで 20 世紀中にもたらされた実験の新しいテクニックによって，ブリエとホールはマイケルソン−モーリー型の実験を 4000 倍の精度で改良した[5,6].

またケネディ−ソーンダイク実験では，干渉計の 2 つの光路を違った長さにつくり，実験室の速度によって光速度が変わるかどうかが調べられた[7].

マイケルソン−モーリーの実験の現代版は，光速度の非等方性にもっと厳しい制限を与える. 現在最も精密な制限はドイツベルリンのフンボルト大学のグループによるものと考えられる.

ミュラーらは現代版のマイケルソン−モーリーの実験を一年以上にわたって実施し，地球が自転しているという前提で，直交する 2 つの可視光空洞共振器の共鳴周波数を比較した[8].

そこで得られた Robertson- Mansouri- Sexl の実験の枠内における等方性の破れのパラメータの範囲は，ブリエとホールの実験で得られたものの約 3 分の 1 である[5].

さらに同著者らは精度を以前の唯一の結果より約 2 桁低い 10^{-15}まで落とした標準模型拡張のフォトニック領域から，パラメータ 7 項目の範囲を得ている[9,10]. 約 1 年にわたってデータを収集した結果，光速度の変化に対して $\Delta c/c \leq (2.6 \pm 1.7)\times 10^{-15}$ という制限がつけられた[8,11]. これは実験精度の範囲のゼロとも矛盾がない[12].

仮説として選択した絶対座標$\sum$に対する実験速度$\boldsymbol{v}(t)$は，等速v_s=369km/sで$\sum$を通る太陽の運動[13]，地球が太陽の周りを公転する軌道運動（軌道速度v_e=30km/s）および地球の 1 日の自転（コンスタンツがある緯度での速度$v_d \approx 330$m/s）の影響を受けている[12].

特別な根拠はないが，光の伝播の等方性の破れに上記の速度で一番小さい地球の自転速度だけが関与すると仮定しても$v_d/c \approx 10^{-6}$である.

したがって地球の運動が光速の変化を引き起こしているなら，現代の技術でそのような変化を容易に検出することが可能だが，そのような変化は実際には観測されていない．

本論はミュラーらの実験でなぜ光の伝播の非等方性を検出できないのか説明できない．地球は運動しているにも係らず，光は地球に固定された実験室に対して等方的に伝播している．

そこで本論は静止系に対して等速度運動する座標系を新たに導入して，その座標系で思考実験を行なうことにする．しかしその座標系で地球上で行なった実験と同様な実験を繰り返しても，光の伝播の非等方性が検証できる確証はない．

そこで我々はその運動系の充分な高速を利用して別の実験を考案し，確実な方法で特殊相対論の破れを立証することにする．

ところで Robertson[14] ならびに Mansouri と Sexl [15] の運動学的解析によれば，特殊相対論は紛れもなく，空間の等方性を確立する実験 (マイケルソン−モーリーの実験[1])，∑に対する実験室の速度 ***v*** からの光速の非依存性 (ケネディ−ソーンダイクの実験[7])，および特殊相対論の時計の遅れ (アイヴェス-スティルウェルの実験[16]) とのつじつまが合う[12].

本論はこのアイヴェス-スティルウェルの実験とアインシュタインが要請した“光速不変の原理”に基づいて思考実験を行ない，最終的にマイケルソン−モーリーの実験とケネディ−ソーンダイクの実験を考慮して∑と地球の座標系を置き換え，特殊相対論の破れを立証する．

II. なぜ新たな思考実験が必要なのか？

特殊相対論は一世紀の間，その理論に挑戦するあらゆる反論や批判を退けてきた．また現代においても，特殊相対論の破れを検証しようとする様々な実験が行なわれているにも係わらず，特殊相対論の破れは検証されていない．

このような状況下で本論が思考実験だけで決着を付けようとするならば，本論は現代の精密な実験で立証できない効果をなぜ思考実験だけで立証できるのか明確な論理で物理学者を説得する必要があろう．

序論では非等方的な光の伝播の検出に挑戦する実験について考察したが，この他にも現代では原子物理学から宇宙論に至る様々な分野で高感度の実験が行なわれている．

ところでエンリコ･フェルミ以来，“有効場の理論”は素粒子物理学で広く使われてきた．この理論の手法ではローレンツ不変性の破れは背景場によって起こされる．

ローレンツ不変性の破れへの有効場の理論的なアプローチは，インディアナ大学のコステ

レツキーたちによって提案された[17].

マクシム・ポスペロフとマイケル・ローマリスの論文[6]の図 1 にも現れる一様な背景ベクトル **b** がもし存在すれば，本論でその存在を指摘された速度 $\boldsymbol{v}$ もそのベクトルの影響を受け，その大きさが時々刻々変化するであろう.

有効場の理論は光速度の変化の他にもスピン歳差周波数の変化や天体物理学的な観測などからローレンツ不変性の破れを観測できると予測している.

1960 年，ヒューズらとそれとは独立にドリヴァーは，ローレンツ不変性の違う種類の検証を行なった[18]. 実験室の磁場は地球の回転とともに銀河の慣性系に対して変化するが，この実験では磁場の変化がリチウム 7 の核スピン歳差周波数に及ぼす影響が測定された.

ヒューズ–ドリヴァーの実験の現代版では，ローレンツ不変性を破るようなパラメータの多くにきわめて厳しい制限がつけられている.

これらの実験ではローレンツの破れは核スピン歳差周波数の変化に現れるが，この変化はベクトル **b** によって決まる特別な方向に対して磁場が回転することによって起きると考えられている.

また宇宙論では近年発見されたダークエネルギーの候補として，宇宙全体を満たす新たな場クインテッセンスが有力視されている. クインテッセンス場 φ は時間的空間的に変化し続けているから，この場と物質が相互作用すれば，ローレンツ不変性の見かけの破れとして現れるかも知れないと期待されている.

マクシム・ポスペロフとマイケル・ローマリスが[6]の中で紹介しているこれらの実験では，宇宙背景放射によって定義される慣性系$\sum$や背景ベクトル **b** あるいはクインテッセンス場 φ などが想定されている.

ローレンツの破れの本当の理由が何であろうと，これまでの実験によっても期待される効果は観測されていない. もしこれらの実験で期待される効果が観測されれば，それはその実験で想定した$\sum$や **b** や φ のどれかを発見したことになる.

一般に相対論の破れを発見することは，静止系に関する証拠を発見するのと同じであるとの認識が定着している. しかし本論は$\sum$や **b** の存在は相対論の破れから発見されるが，相対論の破れ自体は$\sum$や **b** の発見を伴わない状況でも発見できると考える. 本論がこの立場を表明する理由は，V 章のディスカッションで説明する.

結局本論の目的はこれら静止系の候補を発見することではないので，相対論に挑む現代の高精度の実験とはその目的を異にしている (理由 1).

したがって本論で相対論の破れを立証しても，それは$\sum$や $\mathbf{b}$ の証拠を発見したことにはならない．

本論の思考実験では当初は$\sum$を想定して思考実験を進めるが，実験の最終段階では$\sum$の存在とは無関係に特殊相対論の矛盾を指摘する．本論の思考実験の予測値は最終的には$\sum$の影響を受けないから，本論では$\sum$が発見されていない状況でも相対論の破れを立証できる．

本論の思考実験では特殊相対論の立場では静止系と見なせる 2 つの座標系の観測者が，別の座標系で行なう実験に特殊相対論を適用して結果を予測する．このとき 2 人の観測者は異なった値を予測することになるが，本論の思考実験の場合には，2 人の観測者の予測が共に正しいことはあり得ない．したがってどちらかの慣性系で相対論は確実に破れていることになる．

現在$\sum$や $\mathbf{b}$ や φ の存在の証拠は発見されていないが，それらの発見は他の物理学者に任せ，本論では相対論の破れの発見だけに目的を限定する．その場合には相対論の破れは思考実験だけで確実に立証できる (理由 2).

現在相対論に挑んでいる実験は$\sum$や $\mathbf{b}$ や φ の存在を想定し，もしそれらが存在すれば相対論の破れが発見できるかも知れないと予測している．しかし本論では静止系と見なせる 2 つの座標系の観測者のそれぞれが，特殊相対論を適用して予測する実験結果が異なってしまう状況を提示できるので，相対論が確実に破れている慣性系の存在を立証できる．

本論は現在相対論に挑んでいる数多くの実験が追及している未解決の問題をすべて解決できる訳ではない．しかし以上のような理由によって，次章以下の思考実験も正当性を主張できると考えた．

III. 運動する座標系の時計の時間調整

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際に重要な役割を演じた“同時刻の操作的定義”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るならば，2 個の時計の時刻を比べることが可能であるとした (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 個の時計の時刻は合っていると定義によって決めた．以上のことを確認した後，実際にアインシュタインの指示にしたがって時計の時刻合わせを行なう.

本章では自由空間の中を光が一定の速さ c で直線的かつ，等方的に伝播する仮想的な絶対座標∑を仮定する[14]．∑のもっともらしい候補は宇宙マイクロ波背景放射である.

アインシュタインの光速不変の原理によれば，光速は光源の速度に依存せず常に一定であるから，この静止系に対して等速度運動する座標系では，光は非等方的に伝播する.

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 軸のプラス方向に沿って等速度 v で運動している場合を考える.

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 (図 1 参照).

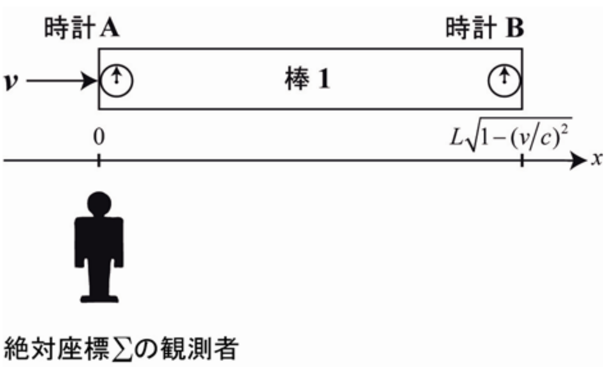

図 1. 棒 1 が仮想的絶対座標∑に対して等速度 $\boldsymbol{v}$ で運動している．この棒の両端の A 点と B 点には時計 A と時計 B が設置されていて，これらの時計の時刻は，時計が静止していたときに一致させておく.

本論では先ず，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'_{A} , t'_{B} , $t'_{\mathrm{A'}}$ には，静止系の時刻 t_{A} , t_{B} , $t_{\mathrm{A'}}$ が対応するものとする.

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，

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

また運動する座標系で経過する時間は遅れるから，静止系の時計で $(t_{\mathrm{B}}-t_{\mathrm{A}})$ 秒が経過する間に運動系の時計で経過する時間 $(t'_{\mathrm{B}}-t'_{\mathrm{A}})$ を静止系∑の観測者が観測すると，次のようになる (Appendix A 参照).

$$t'_{\mathrm{B}}-t'_{\mathrm{A}}=(t_{\mathrm{B}}-t_{\mathrm{A}})\sqrt{1-(v/c)^2} \quad (\text{秒}) \tag{4}$$

この 2 式から次の関係が導ける.

$$t'_{\mathrm{B}}-t'_{\mathrm{A}}=\frac{L(c+v)}{c^2} \quad (\text{秒}) \tag{5}$$

同様に光が B から A に戻るまでに運動系の時計で経過する時間 $(t'_{\mathrm{A'}}-t'_{\mathrm{B}})$ を静止系∑の観測者が観測すると次のようになる.

$$t'_{\mathrm{A'}}-t'_{\mathrm{B}}=\frac{L(c-v)}{c^2} \quad (\text{秒}) \tag{6}$$

簡単にするため t'_{A} をゼロとすると式(5)と式(6)から次の式が導ける.

$$\frac{1}{2}t'_{\mathrm{A'}}=\frac{1}{2}\left[\left(t'_{\mathrm{B}}-t'_{\mathrm{A}}\right)+\left(t'_{\mathrm{A'}}-t'_{\mathrm{B}}\right)\right] \tag{7a}$$

$$=\frac{1}{2}\left[\frac{L(c+v)}{c^2}+\frac{L(c-v)}{c^2}\right] \tag{7b}$$

$$=\frac{L}{c} \quad (\text{秒}) \tag{7c}$$

静止系の観測者は光がAからBに到着するまでに棒の両端の時計で経過する時間は $L(c+v)/c^2$ 秒であると判断するが，その光がBに到着したとき，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，

$$\Delta t_1 = \frac{L(c+v)}{c^2} - \frac{L}{c} \tag{8a}$$

$$= \frac{Lv}{c^2} \quad (\text{秒}) \tag{8b}$$

この操作を行なうと 2 つ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．

IV. 時計の時間調整から導く特殊相対論の破れ

本章では III 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 の両端の時計も棒 1 の時計 A，B 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 III 章で棒 1 につい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，

$$\Delta t_2 = \frac{Lw}{c^2} \quad (\text{秒}) \tag{9}$$

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 2 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．

$$w = \frac{v + v'}{1 + \frac{vv'}{c^2}} \tag{10}$$

．

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，静止系Σ

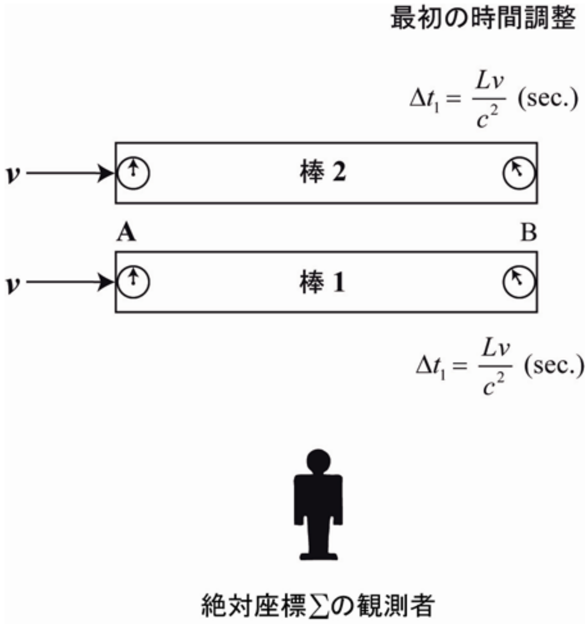

図 2. ∑上の観測者によって予測される棒 1 の時計 B が調整する時間 Δt_1 と棒 2 の時計 B が最初に調整する時間 Δt_1 .

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.

$$\Delta t_2 = \Delta t_1 + \Delta t_3. \tag{11}$$

これより静止系∑の観測者は Δt_3 を次のように予測する (図 3 参照).

$$\Delta t_3 = \Delta t_2 - \Delta t_1 \tag{12a}$$

$$= \frac{L(w-v)}{c^2} \quad (\text{秒}) \tag{12b}$$

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 4 参照).

$$\Delta t_4 = \frac{Lv'}{c^2} \quad (\text{秒}) \tag{13}$$

結局静止系∑の観測者が予測する時間 Δt_3 と棒 1 の観測者が予測する時間 Δt_4 は，異なることになる.

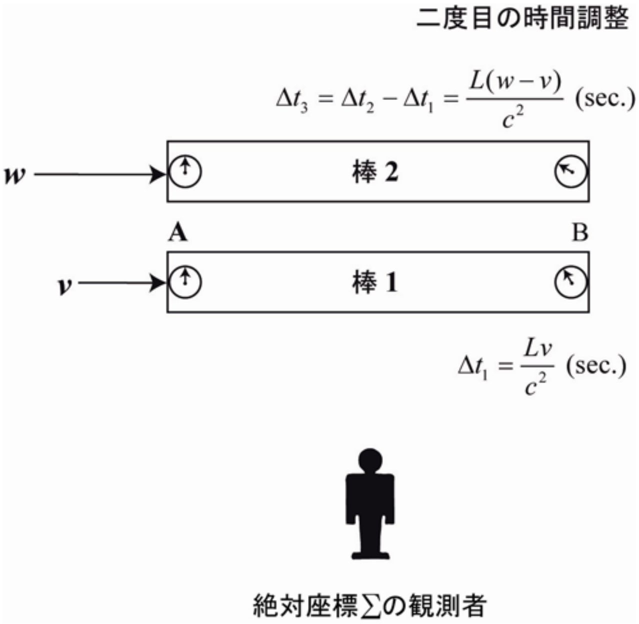

図 3. ∑の観測者によって予測される棒 2 の時計 B が 2 度目に調整する時間 Δt_3 .

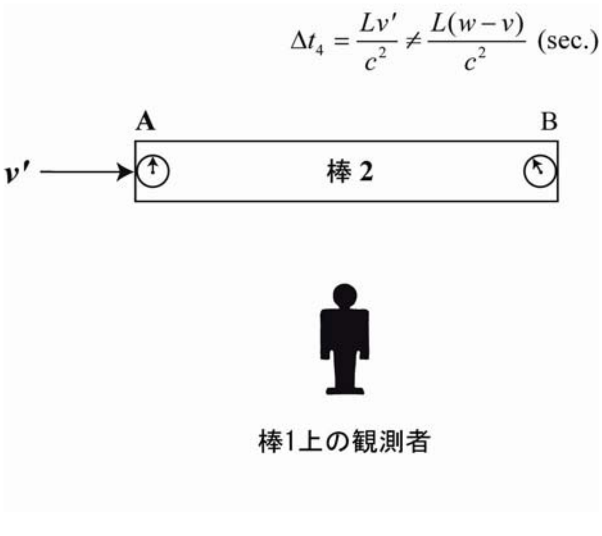

図 4. 自分の座標系が静止系であると信じている棒 1 の座標系の観測者によって予測される棒 2 の時計 B で調整する時間 Δt_4 .

V. ディスカッション

等速度運動する棒の長さを測定する場合，ものの長さは相対的な物理量だから，観測者と棒の座標系の相対速度によって棒の長さに相違が生じた. しかしこの場合には実際に時間調整を行なうのは棒 2 の観測者であるから，その調整時間は絶対的である. Δt_3 と Δt_4 の両方

が正しいということはあり得ない．したがってこの場合はどちらの観測者の予測が正しいか，必ず決着が付くのである．

ところで前章の思考実験では仮想的な絶対座標∑を想定したが，現代の最高水準の技術をもってしても∑と地球の間の相対速度は観測されていない．つまり地球における光の伝播の非等方性は検出されていないし，∑の存在も立証されていない．

したがって観測できない∑を想定して相対論の破れを指摘しても何の意味もないとの批判が出るかも知れない．∑を想定して相対論の破れを指摘したところで，本来∑の存在を認めない相対論は，何の打撃も受けないであろう．また∑が存在すること自体が相対論の破れの証明になるので，改めて思考実験によって相対論の破れを立証する必要もないかも知れない．

それらの批判に答えるために，本論はマイケルソン−モーリーの実験とケネディ−ソーンダイクの実験の結果をその根拠として，本論の思考実験の静止系を∑から地球の座標系に置き換えることを提案する．この置換は本論の核心部分であるが，この置換さえ承服できれば，相対論の破れは等速度運動する棒 1 と棒 2 を使った実験で立証できる．しかし本論は地球が∑そのものであるとか，地球と∑の間の相対速度は存在しないと主張している訳ではない．

地球は運動しているが，光の伝播の等方性の観点に限定すれば，現在地球と∑は識別できていない．したがって本論の“棒 2 の時計の時刻合わせ”を行なう場合には，静止系を∑から地球に置き換えても実験結果は変わらない．つまり地球上の実験でも Δt_3 と Δt_4 の相違は検出できるはずである．

VI. 結 論

本論は等速度運動する棒 2 の座標系の時計 B が調整する時間を 2 つの座標系の観測者に予測させた．その結果∑と同様に静止系と見なせる地球の観測者は，その調整時間を $L(w-v)/c^2$ 秒と予測し，運動している棒 1 上の観測者は，Lv'/c^2 秒と予測した．それぞれの観測者と棒 2 の相対速度が異なるために 2 人の観測者の予測に相違が生じたが，本論は後者が予測する時間 Δt_4 が誤りであると結論する．

その理由は棒 1 の観測者が本来の静止系に対する自らの座標系の運動を考慮していないからである．

特殊相対論では棒 1 と棒 2 の座標系はともに静止系とみなせるが，本論は光が非等方的に伝播する慣性系は静止系とは言えないことを示した．

棒 1 や棒 2 の座標系は等速度運動に到達する前に加速段階があったために，地球とこれ

らの座標系の間には非対称が存在するのである.

これは有名な"双子のパラドックス"において, 宇宙旅行をしてきた双子の兄の宇宙飛行士の年齢が, 地球上に残っていた弟よりも若い理由を説明するときの論理と同様である[20].

技術的には困難であるが, 理論的には地球に対して等速度運動する 2 つの慣性系を導入して行なう実験で, 特殊相対論の破れは立証できるのである.

[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. 40.

[5] A.Brillet and J.L.Hall, Phys. Rev. Lett.**42**, 549 (1979).

[6] M.ポスペロフ, M.ローマリス, 「ローレンツ不変性はどこまで正しいか」パリティ, 2005年4月号(丸善).

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

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

[9] V.A.Kostelecky and M.Mewes, Phys.Rev.D. **66**, 056005 (2002).

[10] J.A.Lipa, J.A.Nissen, S.Wang, D.A.Stricker, D.Avaloff, Phys.Rev.Lett.**90**, 060403 (2003).

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

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

[13] C.H.Lineweaver, L.Tenorio, G.F.Smoot, P.Keegstra, Astrophys.J.**470**, 38 (1996).

[14] H.P.Robertson, Rev.Mod.Phys.**21**, 378 (1949).

[15] R.M.Mansouri and R.U.Sexl, Gen.Relativ.Gravit.**8**, 497 (1977); **8**, 515 (1977); **8**, 809 (1977).

[16] H.E.Ives and G.R.Stilwell,J.Opt.Soc.Am.**28**, 215 (1938); **31**, 369 (1941).

[17] D.Colladay and V.A.Kostelecky, Phys.Rev.D.**55**, 6760 (1997); Phys.Rev.D.**58**, 116002 (1998); V.A.Kostelecky and C.D.Lane, Phys.Rev.D.**60**, 116010 (1999).

[18] V.W.Hughes, H.G.Robinson, V.Beltran-Lopez, Phys.Rev.Lett.**4**, 342 (1960);
R.W.P.Drever, Phil.Mag. **5**, 409 (1960).
[19] D.Hils and J.L.Hall,Phys.Rev.Lett.**64**, 1697 (1990).
[20] 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.148.

Appendix A

特殊相対論を構築する際，アインシュタインは以下の“光速不変の原理”を導入した[3].

“光は常に真空中を一定の速さ c で伝播し，この速さは光源の運動状態には無関係である．”

したがって式(3)のc-vは，光速の変化を示す式ではない．静止系の観測者から見ると棒が移動しているために，光と棒の速度差がc-vと観測されるのである.