空間の等方性を検証する思考実験

須藤晃俊

Abstract

1887年のマイケルソン−モーリー実験からは期待された結果が検出できなかったが，それ以来地球上の空間の方向依存性を検証する実験は，有意な結果をもたらしていない．

しかし，本論の思考実験では，特殊相対論構築の際に重要な役割を果たした“同時刻の操作的定義”を等速度運動する座標系に適用して，実際に時計の時間調整を試みた．

その一連の論究から，特殊相対論が予測する値と異なる値を予測する座標系が存在することが分かった．

本論の思考実験によって，空間の等方性を検証することが可能になり，相対性原理が破れている慣性系の存在も明らかになった．

１．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．

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[1]．

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”というようなもの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．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解答を与えていない．

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[4]．

また，ケネディ−ソーンダイク(Kennedy−Thorndike)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[5]．

マイケルソン−モーリー実験の現代版は，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が，彼らの実験では，光速度の変化に対して，$\Delta c/c \le 2\times10^{-15}$ という制限がつけられた[6]．

ところが，1980 年代にアメリカが打ち上げた COBE 人工衛星による観測から得られた結果は，太陽系が平均的に 350km/s程度の速度でコップ座の方向に運動していることを意味していた．

光速度は約 30 万km/sであるから，その速度比は 10^{-3}程度である．したがって，地球が運動することによって光速に変化が生じているとすれば，現在の技術水準で充分検出が可能であるが，実際にそのような変化は観測されていない．

本論はこのような状況を打開するために，既存の実験とは異なる思考実験によって，ひとまず決着を付けておこうと考えた．

2．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果たした“同時刻の操作的定義”について確認する[7]．

いま空間内の2点 A，B に正確に同じテンポで時を刻む時計 A，B がある場合を考える．アインシュタインは，光が A から B に到着するのに要する時間は，光が B から A 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つ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”)

つまり，時計Aの時刻がt_{A}のときに光がAからBに向かって出発し，時計Bの時刻がt_{B}のときにBに到着して反射され，時計Aの時刻が $t_{\mathrm{A'}}$ のときにAに戻ってくれば，これらの時刻の関係は次の２式で記述できる．

$$t_{\mathrm{B}} - t_{\mathrm{A}} = t_{\mathrm{A'}} - t_{\mathrm{B}} \qquad (1)$$

$$\frac{1}{2}(t_{\mathrm{A}} + t_{\mathrm{A'}}) = t_{\mathrm{B}} \qquad (2)$$

アインシュタインはこれらの式が成立するとき，その座標系における2つ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う．

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_0で運動している場合を考える．この棒１の左右の両端A，Bには同種の時計A，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から前方のBに向かって出発し，時計Bの時刻がt_{B}のときにBに到着し，時計Aの時刻が $t_{\mathrm{A'}}$ のときにA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１は進行方向に $\sqrt{1-(v_0/c)^2}$ 倍に収縮するから，光が A から B 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，

$$t_{\mathrm{B}}' - t_{\mathrm{A}}' = \frac{L\sqrt{1-(v_0/c)^2}}{c - v_0} \quad (\text{sec.}) \qquad (3)$$

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

$$t_{\mathrm{B}}-t_{\mathrm{A}}=(t'_{\mathrm{B}}-t'_{\mathrm{A}})\sqrt{1-(v_0/c)^2}\quad \text{(sec.)} \tag{4}$$

この２式から次の関係が導ける.

$$t_{\mathrm{B}}-t_{\mathrm{A}}=\frac{L(c+v_0)}{c^2}\quad \text{(sec.)} \tag{5}$$

同様に，光が B から A に戻るまでに運動系で経過する時間$(t_{\mathrm{A'}}-t_{\mathrm{B}})$を静止系の観測者が観測すると次のようになる.

$$t_{\mathrm{A'}}-t_{\mathrm{B}}=\frac{L(c-v_0)}{c^2}\quad \text{(sec.)} \tag{6}$$

今後簡単のためt_{A}をゼロとすると式(5)と式(6)から次の式が導ける.

$$\frac{1}{2}t_{\mathrm{A'}}=t_{\mathrm{B}}=\frac{1}{2}\left[\frac{L(c+v_0)}{c^2}+\frac{L(c-v_0)}{c^2}\right]$$

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

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$L(c+v_0)/c^2$ 秒であると静止系の観測者は判断するが，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、$L(c+v_0)/c^2 > L/c$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とれば良い．すなわち，

$$\Delta t_1=\frac{L(c+v_0)}{c^2}-\frac{L}{c}$$

$$=\frac{Lv_0}{c^2}\quad \text{(sec.)} \tag{8}$$

この操作を行うと，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.

３．本論と特殊相対論の予測に相違が生じる思考実験

本章では2章で扱った棒１と同種の棒 2 が等速度w (ただし，$w \gg v_0$)で運動する場合を考える.（棒２の時計も棒１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2章で棒１について行った思考実験を棒２についても同様に繰り返すとしよう．このとき棒２の時計Bが行うことになる時間調整をΔt_2とすると,

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

次は，棒2が初めから等速度wで運動するのではなく，先ず等速度v_0で運動しているときに1回目の実験を行う．つまり，初めの段階では棒2は等速度v_0で棒１と並進運動するが，この時点で棒2の時計Bは棒１の時計Bと同様に1回目の時間調整Δt_1を行う.

その後，棒2は等速度 w になるまで加速するが，この速度 w は棒1と棒2の相対速度が v となる速度であるとする.

したがって，これらの速度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.

$$w = \frac{v_0 + v}{1 + \frac{v_0 v}{c^2}} \tag{10}$$

ここで，等速度 w に達した棒2の時計 B が2回目に調整する時間を Δt_3 とすると，静止系の観測者はこれら3回の時間調整の間には，次の関係があると判断する.

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

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 1 参照）

$$\Delta t_3 = \Delta t_2 - \Delta t_1$$

$$= \frac{L(w - v_0)}{c^2} \quad \text{(sec.)} \tag{12}$$

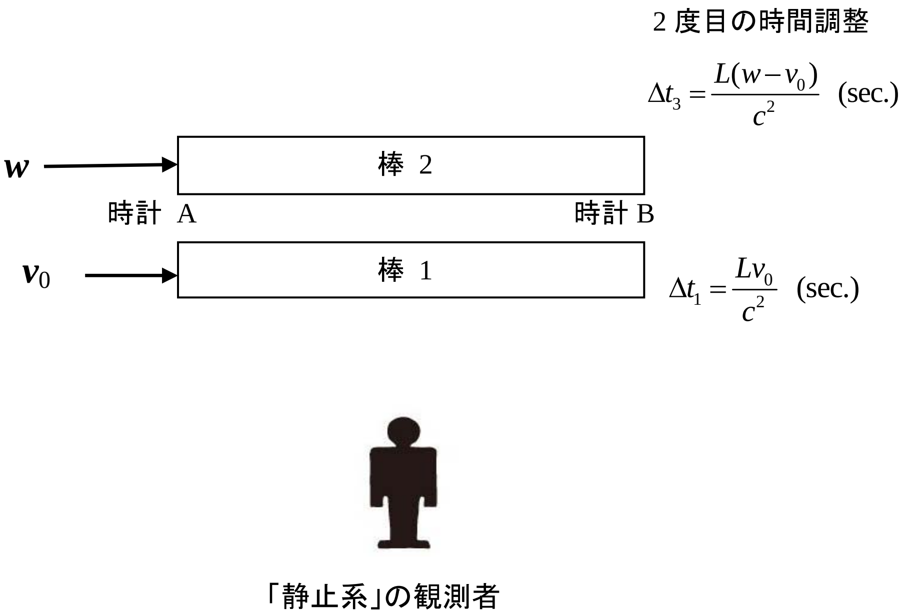

Fig. 1　静止系の観測者が予測する棒1の時計 B の時間調整 Δt_1 と
棒 2 の時計 B の 2 度目の時間調整 Δt_3

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 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 が行う時間調整として次の Δt_4 を主張することになる.（図 2 参照）

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

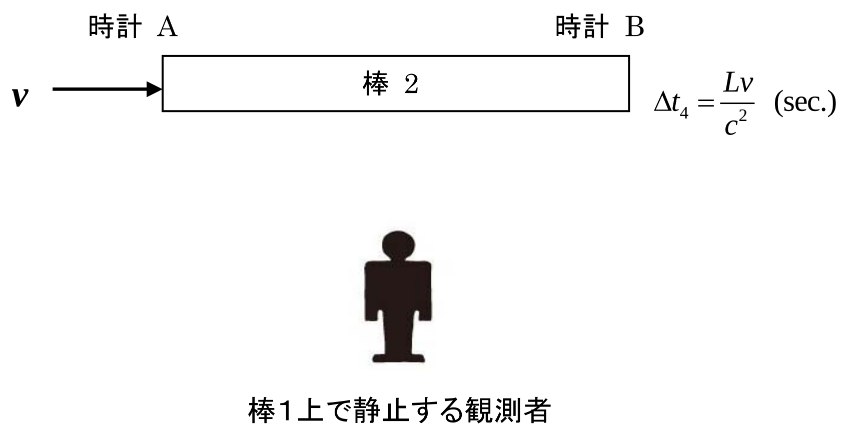

Fig. 2 棒 1 の観測者が予測する棒 2 の時計 B の時間調整 Δt_4

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．

ところで，運動する棒の長さを測定するときには，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，この場合実際に時間調整を行うのは棒2の観測者であるから，その調整時間は絶対的であり，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，この問題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．

4．結　論

棒1の座標系を地球と見立てて，その空間を等速度 v で運動する棒2の時計Bが行う時間調整 Δt から，次の結論が導ける．すなわち，$\Delta t = Lv/c^2\,(\mathrm{sec.})$ の場合には，実験室で放出される光は等方的に伝播する．

しかし，この場合には実験室の空間を等速度運動する棒 2 の座標系では，光は非等方的に伝播し，相対性原理は成立しない．

一方，$\Delta t \neq Lv/c^2\,(\mathrm{sec.})$ の場合には，光は非等方的に伝播する．この場合，地球の座標系は未知の静止系との間に相対速度v_0を有することになる．以上をまとめると次の表のようになる．

	$\Delta t = \dfrac{Lv}{c^2}$ (sec.) の場合	$\Delta t \neq \dfrac{Lv}{c^2}$ (sec.) の場合
地球の実験室の光の伝播	等方的伝播	非等方的伝播
この場合の静止系	地球(棒 1 の座標系)	未知の静止系
実験室と未知の静止系との相対速度	な　し	あ　る
地球上での相対性原理	成立する	成立しない

表1．等速度運動する棒 2 の時計 B の時間調整で，相違が生じる座標系の比較

本論の思考実験は，地球上の空間の方向依存性を検証しようとして目的を達成できなかったマイケルソ

ン−モーリー実験に回答を与えるものである．本論の考察によって，特殊相対論の立場では静止系と考えられる座標系であっても，その座標系と未知の静止系との間に相対速度があるために，相対性原理が成立しない慣性系が存在することを指摘しておく.

（注）

アインシュタインは特殊相対論構築の際，次の光速不変の原理を要請した.

“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[8]．”

したがって，式(3)の c-v_0 は，光速が変化することを示す式ではない．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_0 と観測されるのである.

参考文献

[1] A.A.Michelson and E.W.Morley, Am.J.Sci.**34** 333-45 (1887).

[2] H.A.Lorentz, Kon.Neder.Akad.Wet.Amsterdam.Versl.Gewone.Vergad.Wisen Natuurkd.Afd. **6** 809-31(1904).

[3] 湯川秀樹監修『アインシュタイン選集１』(共立出版), p19.

[4] マクシム・ポスペロフ,マイケル・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』(丸善) 2005 年 4 月号, p7.

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

[6] H.Müller *et all*,Phys.Rev.Lett.**91**,020401(2003).

[7] 湯川秀樹監修『アインシュタイン選集１』(共立出版), p22.

[8] 湯川秀樹監修『アインシュタイン選集１』(共立出版), p20.