

# マイケルソン-モーリーの実験に最終的な回答を与える思考実験

須藤晃俊

## Abstract

特殊相対論を構築する際、アインシュタインはエーテル問題を本来それが存在するか否かの議論から、エーテルの概念や仮説の導入が、物理学にとって必要であるか否かの議論に問題をすり替えてしまった。

確かに真空自体に光を伝播する媒質の役割を与えると、仮想物質としてのエーテルを探求する必要はなくなる。

しかし、それでも我々は光源から放出された光が、光源に対して等方的に伝播するのか否かを決定できる実験を探求しなければならない。

そのような実験は従来存在しないと考えられてきたが、本論ではそのような実験が存在することを示す。

本論の思考実験では実験結果を特殊相対論に基づいて予測するが、それにも係わらず、我々は最終的に特殊相対論の予測と矛盾する結果に到達してしまう。

特殊相対論の予測との不一致が生じる原因として、本論はアインシュタインがその存在を否定した未知の速度ベクトルの存在を予測する。

## 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。

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 $(1 - \beta^2)^{1/2}$ 倍(ただし、 $\beta = v/c$ )に収縮するという仮説を提案してその場を凌いだ。

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次のように述べている。

『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、また電磁現象が起きている真空の空間のなかの各点について、それらの点の“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も無意味なことになる。このような理由から、“光エーテル”[光を伝える媒質の役目をになうエーテル]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』<sup>1</sup>

また、後年、アインシュタインは次のようにも述べている。

『相対性理論に従えば、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のであり、さらにエーテルの風とかそのようなものを立証する実験とかも存在しないのである。…その時々選ばれた基準体に対する運動がものをいう』<sup>2</sup>

アインシュタインは、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。

ここで、マイケルソン-モーリーの実験に関する当時の代表的な2つの解釈を確認しておく。

**エーテル擁護説**：「絶対静止エーテル」が存在しているにもかかわらず検出できないとすると、地球はローレンツの収縮仮説に基づき、進行方向の長さが $(1 - \beta^2)^{1/2}$ 倍に収縮していると考えられる。地球上の観測者も含めたすべての物体が一様に収縮しているとすれば、観測者は静止と運動を区別する何の手段も持たない。（光の伝播の状況を確認する実験は、現時点では存在しないと考えられているが、もしそのような実験が存在すれば、この場合の光の伝播は光源に対して異方的である）

**エーテル否定説**：真空に光を伝える媒質としての性格を付与すると「絶対静止エーテル」なる概念は不必要となり、エーテルは単なる思考の産物に過ぎなくなる。もしエーテルが存在しないならば、光源から放出された光は光源に対して等方的に伝播するはずであるから、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くても何の不思議もない。

特殊相対論では、運動する列車内の前後の壁に設置された時計の時刻合わせは、列車内の観測者によって、光の信号を用いて操作的に行われる<sup>3</sup>。（同時刻の相対性）

そのためアインシュタインは、光が列車の前後の壁に設置された時計に到達したときをその座標系における同時刻と定めただけで、光の伝播が光源に対して等方的か否かという問題、つまりある座標系における同時刻は絶対的な意味で同時なのか否かについて、回答を与える実験には言及していない。

アインシュタインはエーテル問題を本来それが存在するか否かの議論から、エーテルの概念や仮説の導入が、物理学にとって必要であるか否かの議論に問題をすり替えてしまった。

それでは、エーテルに対する地球の運動を検出する実験は存在しないのであろうか？

ここでエーテルの風の存在を立証する実験は、光源から放出された光の伝播が、光源に対して等方的か否かを決定する実験と同じであることを確認しておく。

本論では以下の思考実験において、ある座標系における光の伝播が、等方的か否かを決定する方法が存在することを示す。

しかしそれに先立ち、我々は次の二つの意味を包含している「光速不変の原理」を仮定する。

**光速不変の原理1**：真空中の光速は、光源の速度に依存せず、常に一定の速  $c$  で伝播する。

**光速不変の原理2**：光源から放出された光は、光源から等距離  $L$  に設置されたあらゆる方向の反射鏡に到達し、そこで反射され、同時刻に戻ってくる。もし光が往復するのに要する時間を  $t$  とすれば、光速は  $2L/t$  となるが、この速さは自然界における普遍定数の一つである。

我々は以上の原理をたよりにして、以下の思考実験の考察を進める。

## 2. 特殊相対論に基づいて結果を予測する思考実験

思考実験に先立ち、実験装置等の状況を説明しよう。

(1) 地球上の駅のプラットフォームと平行に伸びた 2 本の線路上に同種の列車 A と B が停車している。

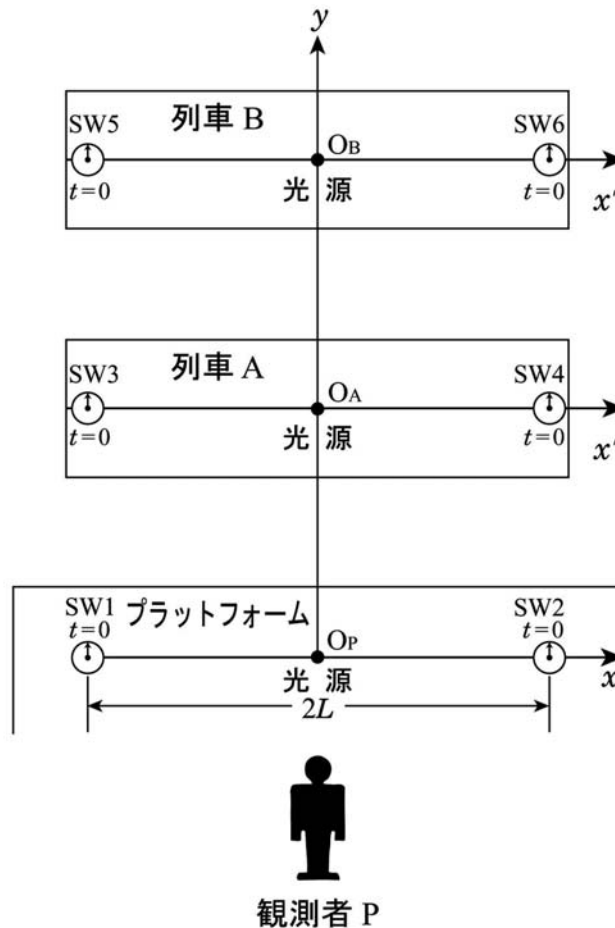


図1. プラットホームと列車A, Bの座標系に設置された光源と2つのストップ・ウォッチ。

(2) プラットホーム上には $x$ 軸が線路と平行に伸び、 $x$ 軸の原点から垂直に $y$ 軸が伸び、 $x$ 軸の原点には光源 $O_p$ が設置されていて、観測者Pが立っている。また $x = \pm L$ の地点には 2 個のストップ・ウォッチが設置されている。いまマイナス方向のストップ・ウォッチをストップ・ウォッチ 1、プラス方向のストップ・ウォッチをストップ・ウォッチ 2 と名づける。

(3) 列車Aの床には $x$ 軸と平行に $x'$ 軸が伸び、床の中心にある $x'$ 軸の原点には光源 $O_A$ が設置されている。また $x' = \pm L$ の地点には 2 個のストップ・ウォッチが設置されている。いまマイナス方向のストップ・ウォッチをストップ・ウォッチ 3、プラス方向のストップ・ウォッチをストップ・ウォッチ 4 と名づける。

(4) 列車Bの床には $x$ 軸、 $x'$ 軸と平行に $x''$ 軸が伸び、床の中心にある $x''$ 軸の原点には光源 $O_B$ が設置されている。また $x'' = \pm L$ の地点には 2 個のストップ・ウォッチが設置されている。いまマイナス方向のストップ・ウォッチをストップ・ウォッチ 5、プラス方向のストップ・ウォッチをストップ・ウ

ウォッチ 6 と名づける.

(5) 本論の思考実験に使用するすべてのストップ・ウォッチは同種のもので, それらは静止状態で同じテンポで時を刻むものとする.

以上のことを踏まえて思考実験を開始する. なお思考実験の観測値の予測は, 特殊相対論に基づいて行うものとする.

いまプラットフォームの原点に静止している観測者 P の前を当初静止していた列車 A が速度  $v$  で, また列車 B が速度  $v$  で通過する状況を考える.

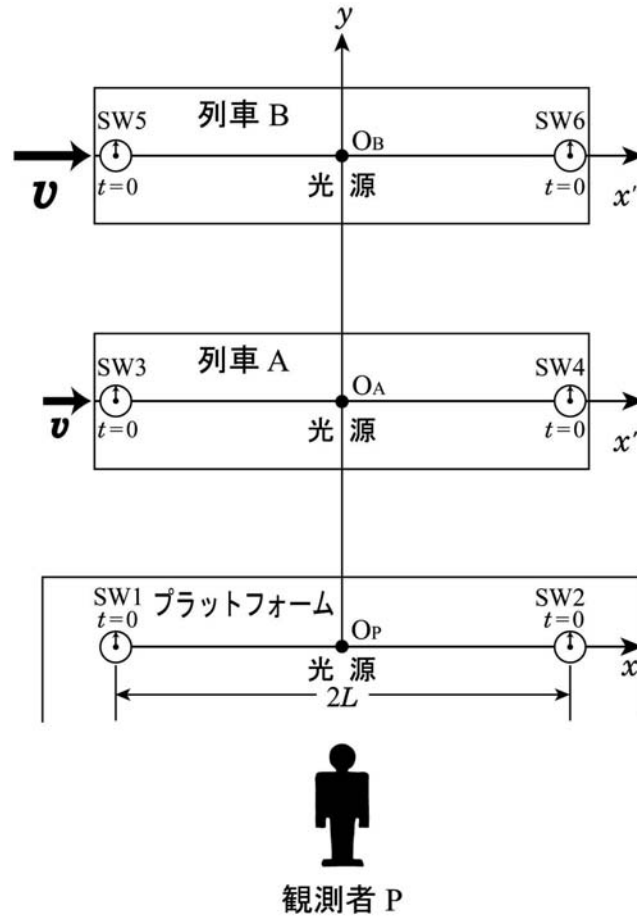


図2. 光源  $O_A$  と  $O_B$  が  $y$  軸に到達したとき, 3つの光源  $O_P$ ,  $O_A$  そして  $O_B$  から同時に光を放出する. この図では列車 A と B の進行方向の収縮は描かれていない.

ここで列車 B の速度  $v$  とは, 列車 A からの観測で列車 B の速度が  $w$  と観測される速度である.

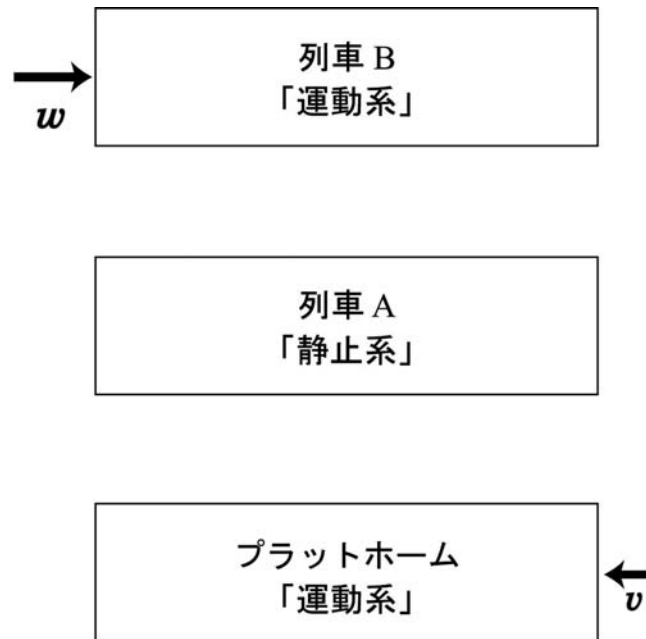


図3. プラットホームと列車Bの座標系の速度の関係. 速度 $v$ と $w$ は列車A内の観測者が観測するそれぞれの座標系の速度である.

またこれらの速度は日常の列車の速度ではなく, 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.

ところで特殊相対論の速度の加算則によれば,

$$v = \frac{v+w}{1+\frac{vw}{c^2}} \quad (1)$$

いま光源 $O_p$ から放出された光は光源 $O_p$ に対して等方的に伝播して、光源から等距離にある2個のストップ・ウォッチ 1 と 2 に絶対的の同時刻に到達すると仮定しよう。(この場合の光の伝播は“エーテル否定説”を仮定した場合の伝播である)

光がストップ・ウォッチ 1 と 2 に到着した時, それぞれのストップ・ウォッチは作動を始める.

次は光源 $O_A$ から放出された光について考察する.

光源 $O_p$ ,  $O_A$ そして $O_B$ が観測者Pの前のy軸上で一致したとき, この3個の光源から同時に光を放出する. それらの光は観測者Pに対して等方的に伝播する.

さらに「光速不変の原理1」によれば, 真空中の光は光源の速度とは無関係に, 常に一定の速さ $c$ で伝播する.

もし2個の列車がプラット・ホーム上で静止していれば, 光は観測者Pから見て, 列車の前方と後方の壁に同時に到達する. しかしながら, 本論の思考実験では列車は運動している.

光源 $O_A$ の場合には, 光は原点 $A_0$ から放出される. この原点 $A_0$ は $x'$ 軸と $y$ 軸が交わった交点である. 光は原点 $A_0$ に対して等方的に伝播するが, 列車の後方は原点 $A_0$ に近づいてくる.

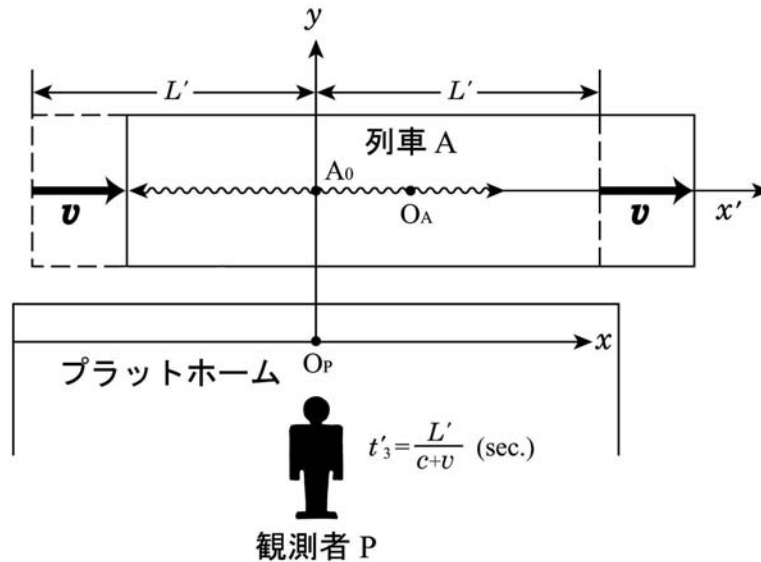


図4. 列車Aの座標系の原点yにあった光源OA<sub>0</sub>から放出された光は、観測者Pのストップ・ウォッチによる計測で、 $t'_3$ 秒で列車の後壁のストップ・ウォッチ3に到達する。[式(3)参照]  
この時点では光はまだ列車の前壁のストップ・ウォッチ4には到達していない。

一方、列車の前方は原点A<sub>0</sub>から遠ざかる。観測者Pによる観測では、光が列車の前方よりも後方に先に到達する。光がストップ・ウォッチ3と4に到達した瞬間、それぞれのストップ・ウォッチは作動を始めるが、観測者Pから見ると光が先に到達するストップ・ウォッチ3は、光が遅れて到達するストップ・ウォッチ4よりも先にスタートする。

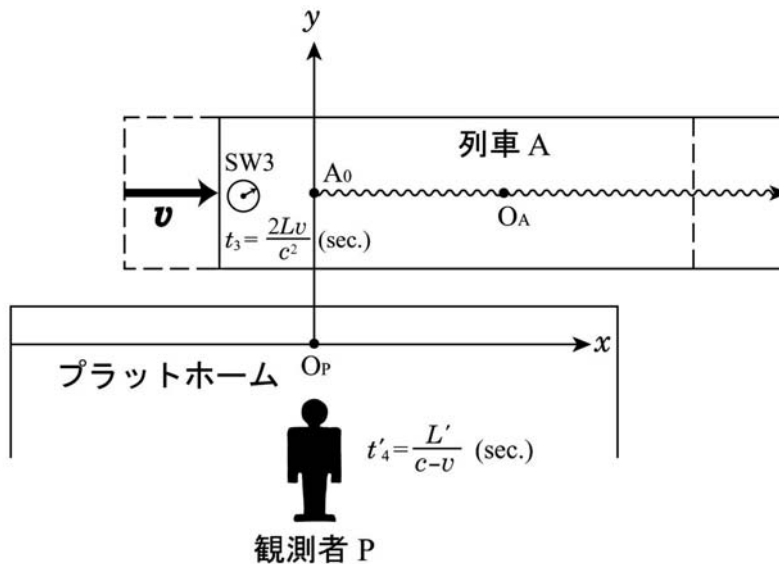


図5. 原点yにあった光源OA<sub>0</sub>から放出された光は、観測者Pのストップ・ウォッチによる計測で、 $t'_4$ 秒で列車の前壁のストップ・ウォッチ4に到達する。[式(4)参照]  
光がストップ・ウォッチ3とストップ・ウォッチ4に到達するのに要する時間の差 $t_{3\cdot4}$ は、観測者Pのストップ・ウォッチによる計測では、 $(t'_4 - t'_3)$ 秒である。  
しかし、ストップ・ウォッチ3とストップ・ウォッチ4の時間差を観測者Pが観測した場合、列車内のストップ・ウォッチで経過する時間は、観測者Pのストップ・ウォッチで経過する時間よりも遅れる。  
したがって、観測者Pが観測するストップ・ウォッチ3とストップ・ウォッチ4の時間差 $t_{3\cdot4}$ は、 $2Lv/c^2$ 秒となる。[式(5)参照]

ところで特殊相対論によれば、観測者Pから見た列車Aの長さは進行方向に $(1 - \beta^2)^{1/2}$ 倍に収縮する。

観測者Pからの測定で $O_A$ から列車後端までの距離を $L'$  とすると、

$$L' = L(1 - \beta^2)^{1/2} \quad (\text{ここで, } \beta = v/c) \quad (2)$$

光源 $O_A$ から放出された光がストップウォッチ 3 に到達するのに要する時間をプラットフォームの観測者Pのストップウォッチで $t'_3$ とすると、

$$\begin{aligned} t'_3 &= \frac{L'}{c+v} \\ &= \frac{L(1-\beta^2)^{1/2}}{c+v} \quad (\text{sec.}) \end{aligned} \quad (3)$$

同様に光がストップ・ウォッチ 4 に到達するのに要する時間を $t'_4$ とすると、

$$\begin{aligned} t'_4 &= \frac{L'}{c-v} \\ &= \frac{L(1-\beta^2)^{1/2}}{c-v} \quad (\text{sec.}) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで式(3)の $(c+v)$ と式(4)の $(c-v)$ の項は、光速が光源の速度に依存することを示しているのではないことに留意したい。運動する列車から放出される光速も常に一定で $c$ のままである。

光がストップ・ウォッチ 3 とストップ・ウォッチ 4 に到達するのに要する時間の差を $t_{3,4}$ とすると、 $t_{3,4}$ は観測者Pからの観測で $(t'_4 - t'_3)$ 秒である。

ところで、列車内の時計はプラットフォームの観測者の時計から見るとゆっくり進む。(しかしながら、同一列車内の2個の時計が時を刻むテンポは同じである)

プラットフォームの観測者Pのストップ・ウォッチで1秒が経過する間に列車A内のストップ・ウォッチで経過する時間は $(1 - \beta^2)^{1/2}$ 秒、同じく列車B内のストップ・ウォッチで経過する時間は、 $(1 - \beta'^2)^{1/2}$ 秒である。(ただし、 $\beta' = v/c$ )

したがって観測者Pが観測するストップ・ウォッチ 3 と 4 の時間差 $t_{3,4}$ は、

$$\begin{aligned} t_{3,4} &= (1 - \beta^2)^{1/2} (t'_4 - t'_3) \\ &= \frac{2Lv}{c^2} \quad (\text{sec.}) \end{aligned} \quad (5)$$

しかし、運動している列車AとB内の観測者の場合、自らの座標系で「光速不変の原理2」を適用するから、列車A内の観測者は光がストップ・ウォッチ3と4に同時に到達すると判断する。

何故なら、2個のストップ・ウォッチは、アインシュタインによって導入された操作的方法によ

って、光が到達したときをその座標系における同時刻と定めるからである。

さて、次は列車 B の座標系について考察しよう。

光源  $O_B$  から放出された光がストップ・ウォッチ 5 と 6 に到達した時、それぞれのストップ・ウォッチは作動を始める。

光源  $O_B$  から放出された光がストップ・ウォッチ 5 に到着するのに要する時間をプラットフォームの観測者のストップ・ウォッチで  $t_5'$ 、ストップ・ウォッチ 6 に到着するのに要する時間を  $t_6'$  とする。

プラットフォームからの観測では、ストップ・ウォッチ 5 はストップ・ウォッチ 6 より早く動き始める。

ここで、先に動き出したストップ・ウォッチ 5 と後から動き出したストップ・ウォッチ 6 の時間差をプラットフォームの観測者の観測で  $t_{5,6}$  とすると、

$$\begin{aligned}
 t_{5,6} &= (1 - \beta^2)^{1/2} (t_6' - t_5') \\
 &= \frac{2LU}{c^2} \quad (\text{sec.})
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

その後列車 A と B は一旦停止し、最終的にはプラットフォームの最初の停車位置まで戻ってきて停止する。

列車の減速や加速の間、ストップ・ウォッチが時を刻むテンポは、プラットフォームの観測者から見て変化する。

しかし、テンポの変化は、1 台の列車内の 2 個のストップ・ウォッチで共通だから、列車が減速したり加速したりする間も、時間差  $t_{3,4}$  と  $t_{5,6}$  は変化しない。

さて、次に  $y$  軸と平行な直線上に静止した 3 個のストップ・ウォッチ 2, 4, 6 の時間を一致させる。

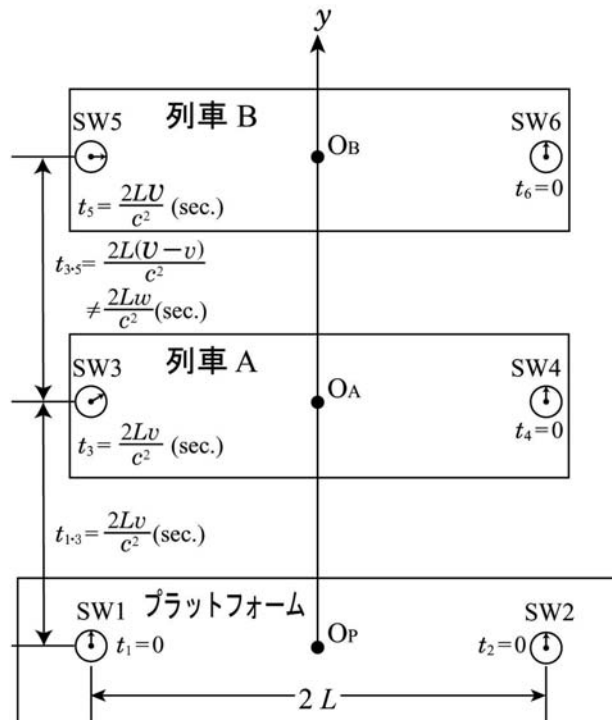


図6. 3つの座標系の6個のストップ・ウォッチの時間差. 一般的にストップ・ウォッチ1,2,4,6の時間は本来ゼロではないが、本論の議論で重要なのは6個のストップ・ウォッチの時間差だけである. それ故適当な時間調整によって、これら4個のストップ・ウォッチの時間をゼロに合わせた。



ストップ・ウォッチ 4 と 6 の時間をストップ・ウォッチ 2 の時間に一致させるために行う時間調整をそれぞれ  $t_4$ ,  $t_6$  とする。(ただし、この時間調整は実際に行う必要はなく、計算上の調整でかまわない)

次にストップ・ウォッチ 3 に対してストップ・ウォッチ 4 と同様の時間調整  $t_4$ 、ストップ・ウォッチ 5 に対してはストップ・ウォッチ 6 と同様の時間調整  $t_6$  を行う。

その後プラットホームの観測者 P は、プラットホームのストップ・ウォッチ 1 と列車 A 内のストップ・ウォッチ 3 の時間差  $t_{1,3}$  及び、ストップ・ウォッチ 1 と列車 B 内のストップ・ウォッチ 5 の時間差  $t_{1,5}$  を計測する。

ストップ・ウォッチ 1 とストップ・ウォッチ 2, 4, 6 の時間は、これまでの時間調整により、絶対的な意味で一致している。

したがって  $t_{1,3}$  は  $t_{3,4}$  [式(5)] と一致し、 $t_{1,5}$  は  $t_{5,6}$  [式(6)] と一致する。

すなわち、

$$t_{1,3} = t_{3,4} = \frac{2Lv}{c^2} \quad (\text{sec.}) \quad (7)$$

$$t_{1,5} = t_{5,6} = \frac{2LU}{c^2} \quad (\text{sec.}) \quad (8)$$

これより列車 A 内のストップ・ウォッチ 3 と列車 B 内のストップ・ウォッチ 5 の時間差  $t_{3,5}$  は、以下のようになる。

$$\begin{aligned} t_{3,5} &= t_{1,5} - t_{1,3} \\ &= \frac{2L(U-v)}{c^2} \quad (\text{sec.}) \end{aligned} \quad (9)$$

特殊相対論によれば、お互いに相対運動する複数の座標系がある場合、唯一重要な速度は相対速度である。また列車 A 内の観測者は自らの座標系を「静止系」とみなす。

列車 A と B の相対速度は  $w$  だから、列車 A 内の観測者が特殊相対論を適用すると時間差  $t_{3,5}$  は式(7)から次のように予測する。

$$t_{3,5} = \frac{2Lw}{c^2} \quad (\text{sec.}) \quad (10)$$

以上の結果をまとめると、次の表のようになる。

運動系	プラットホーム	列車 A	列車 B
静止系			
プラットホーム		相対速度: $v$ 時間差: $t_{1,3} = 2Lv/c^2$ (sec.)	相対速度: $v$ 時間差: $t_{1,5} = 2LU/c^2$ (sec.)
列車 A	相対速度: $v$ 時間差: $t_{1,3} = 2Lv/c^2$ (sec.)		相対速度: $w$ 時間差: $t_{3,5} = 2L(U-v)/c^2$ $2Lw/c^2$ (sec.)

表 1. 2つの座標系間の相対速度とその座標系間の時間差  $t_{1,3}$ ,  $t_{1,5}$ ,  $t_{3,5}$

### 3. ディスカッション

本論思考実験で得られた結果[式(9)]は、列車 A 内の観測者による予測[式(10)]とは一致しない。

それではこの不一致の原因は何であろうか？ 本論の考察で光が等方的に伝播することを仮定したからであろうか？ 否そうではない。

ここで“エーテル否定説”と“エーテル肯定説”の座標系間の対応を表にまとめる。

座標系 \ エーテルの有無	存在しない	存在する
	静止系	プラットフォーム
運動系	列車 A	プラットフォーム
運動系	列車 B	列車(速度 $w$ )

表 2. エーテルが存在する場合としない場合の「静止系」と「運動系」の関係

“エーテル否定説”の列車 A の座標系には“エーテル肯定説”の地球、すなわちプラットフォームの座標系が対応している。

またプラットフォームの座標系には、エーテルの座標系が対応している。

さらに列車 B の座標系には速度  $w$  で走向する列車の座標系が対応している。

地球周辺の空間における光の伝播が光源  $O_p$  に対して等方的であるときは、時間差  $t_{3.5}$  [式(9)]は特殊相対論の予測と一致しない。

一方、光の伝播が光源  $O_p$  に対して異方的であるときは、時間差  $t_{3.5}$  と  $t_{1.3}$  が特殊相対論の予測と一致しない。

### 4. 結論

光源に対する光の伝播が等方的(“エーテル否定説”の立場)か異方的(“エーテル擁護説”の立場)かで、特殊相対論の予測と本論思考実験の予測との不一致が生じる状況が異なることが分かる。

すなわち、もし時間差  $t_{1.3}$  が式(7)に一致すれば、光の伝播は光源  $O_p$  に対して等方的である。

一方、時間差  $t_{1.3}$  が式(7)に一致しなければ、光の伝播は光源  $O_p$  に対して異方的である。

時間差 $t_{1.3}$	光源 $O_p$ に対する光の伝播	エーテルの風
$t_{1.3} = 2Lv/c^2$ (sec.)	等方的伝播	存在しない
$t_{1.3} \neq 2Lv/c^2$ (sec.)	異方的伝播	存在する

表 3. 2つの座標系間の時間差  $t_{1.3}$  と光源  $O_p$  からの光の伝播、及びエーテルの風の有無

我々は時間差 $t_{1.3}$ が式(7)に一致しないときには、その原因としてアインシュタインがその存在を否定した未知の速度ベクトルの存在を想定せざるを得ない。

本論の思考実験は、マイケルソン-モーリーの実験に最終的な回答を与えるものである。

(参考文献)

1. 「アインシュタイン 相対性理論」内山龍雄訳・解説(岩波文庫)p15

他の参考文献として、以下の2つがある。

「相対論」物理学古典論文叢書 4・物理学史研究刊行会編(東海大学出版会)

「運動物体の電気力学について」p3

「アインシュタイン選集 I」湯川秀樹監修(共立出版)

「運動している物体の電気力学について」p20

2. 「わが相対性理論」A. アインシュタイン著／金子務訳(白揚社)p68

3. 「アインシュタイン 相対性理論」内山龍雄訳・解説(岩波文庫)p16