

# 特殊相対論の予測との不一致が生じる思考実験

## 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ていた。

そして、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（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」<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」が存在しているのに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るれば、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と考えられる）

**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。

さて、ここで“エーテル擁護説”の中に出てくるエーテルを現代物理学に従い、仮想物質から真空自体に置き換えてみると、もはやエーテルの有無について議論する必要はなくなる。

また、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ここで確認しておく。

特殊相対論では、運動する列車内の前後に置か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)

アインシュタインは光の信号が、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が、光の伝播が光源に対してア・プリアリな意味において等方的か否かという問題に回答を与える実験には言及していない。

エーテル問題はアインシュタインによって、有無の議論から、概念あるいは仮説としてのエーテルの要・不要の議論に、問題を摩り替えられてしまったようだ。

しかし、本論ではある座標系における光の伝播が、真の意味で等方的か否かを確かめる方法が存在することを以下の思考実験で示す。

## II. 特殊相対論の予測との不一致が生じる思考実験

思考実験に先立ち、実験装置等の状況を説明しておく。

1. 地球上の駅のプラットフォームと平行に伸びた線路に2台の列車AとBが停車している。列車AとBは同種のものであるが、仮に列車A、Bと名付ける。
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 $y$ 軸が伸びている。また、 $x$ 軸の原点には光源 $p$ が設置されていて、同地点には観測者が立っている。
3.  $x = \pm L$ の地点にはストップウォッチが設置されている。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と名付ける。
4. 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Aが設置されている。
- また、 $x' = \pm L$ の地点には、ストップウォッチが設置されている。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と名付ける。
5. 列車B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 $b$ が設置されている。
- また、 $x'' = \pm L$ の地点には、ストップウォッチが設置されている。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ォッチ6と名付ける。
6. 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、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 $u$ で通過する状況を考える。(図1)

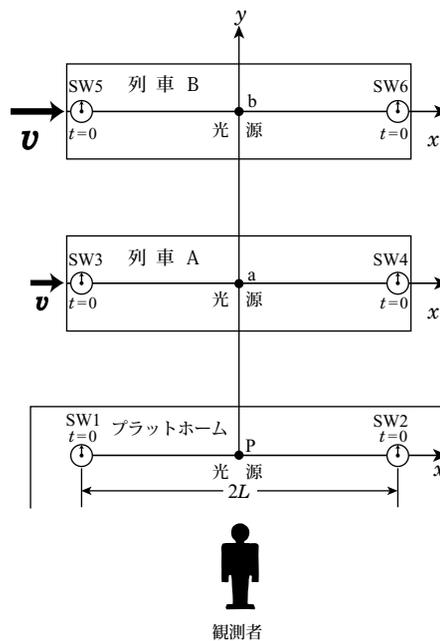


図1. プラットホーム上の観測者に対して、速度 $v$ で走行する列車Aと速度 $u$ で走行する列車Bの光源 $a$ と $b$ が、プラットフォームの光源 $p$ と $y$ 軸上で一致したとき、3つの光源から光が放出される。

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  $U$  とは、列車Aからの観測で、列車Bの速度が  $w$  となる速度であるとする。(図2)

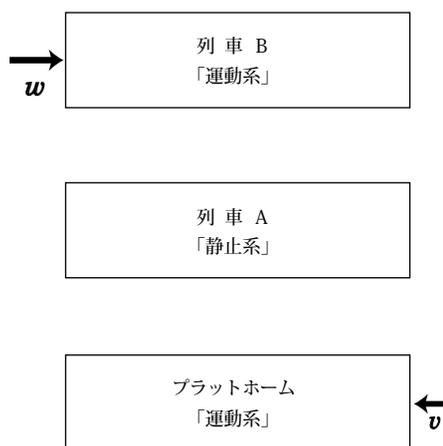


図2. 列車Aから見たプラットホームと列車Bの座標系の速度の関係

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。

特殊相対論の速度の加算則によれば、

$$U = (v + w) (1 + vw/c^2)^{-1} \quad (\text{II } 1)$$

本論の思考実験では、光は光源 p に対して等方的に伝播すると仮定すると、光源 p から放出された光は、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着する。(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に到着したとき、それぞれのストップウォッチは作動を始める。次は光源 a から放出された光について考察する。

光速不変の原理によれば、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。

また、特殊相対論によれば、プラットホームの観測者から見た列車Aの長さは、進行方向に、 $(1 - \beta^2)^{1/2}$  倍に収縮する。

いま、光源 a とストップウォッチ3の間の距離をプラットホームの観測者の測定で  $L'$  とすると、

$$L' = L(1 - \beta^2)^{1/2} \quad (\text{II } 2)$$

光源 a から放出された光が、ストップウォッチ3に到着するのに要する時間をプラットホームの観測者のストップウォッチで  $t_3'$  とすると、

$$\begin{aligned} t_3' &= L' / (c + v) \\ &= L(1 - \beta^2)^{1/2} / (c + v) \quad (\text{秒}) \end{aligned} \quad (\text{II } 3)$$

また、光がストップウォッチ 4 に到着するのに要する時間を同様に  $t'_4$  とすると、

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

光が 2 個のストップウォッチ 3 と 4 に到着したとき、それぞれのストップウォッチは作動を始める。

ところで、列車内の時計はプラットフォームの観測者から見るとゆっくり進む。

プラットフォームの観測者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、先に動き出したストップウォッチ 3 と後から動き出したストップウォッチ 4 の時間差をプラットフォームの観測者の予測で  $t_{3.4}$  とすると、

$$\begin{aligned} t_{3.4} &= (1 - \beta^2)^{1/2} (t'_4 - t'_3) \\ &= 2Lv/c^2 \quad (\text{秒}) \end{aligned} \quad (\text{II 5})$$

しかし、列車 A 内の観測では、ストップウォッチ 3 と 4 の時間差は認識できない。なぜなら、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な方法によって、時刻を合わせてあるからである。

さて、次は列車 B の座標系について考察する。

光源 b から放出された光がストップウォッチ 5 と 6 に到着したとき、それぞれのストップウォッチは作動を始める。

光源 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同様に  $t'_6$  とする。

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予測で  $t_{5.6}$  とすると、

$$\begin{aligned} t_{5.6} &= (1 - \beta'^2)^{1/2} (t'_6 - t'_5) \\ &= 2LU/c^2 \quad (\text{秒}) \end{aligned} \quad (\text{II 6})$$

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ると変化する。

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 3)

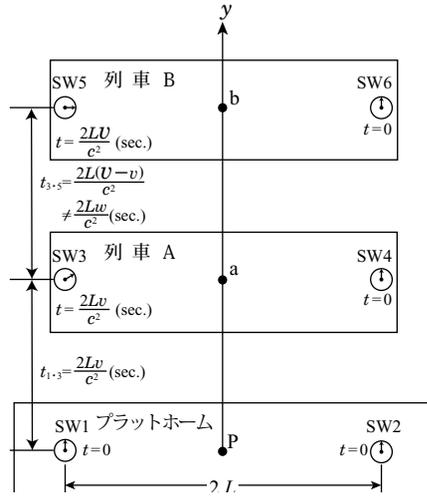


図3. 6個のストップウォッチの時間差の関係  
ストップウォッチ1, 2, 4, 6の時刻は本来ゼロではないが, 本論の思考実験では6個のストップウォッチの時間差のみが重要なので, 簡単のために, 4個のストップウォッチの時刻が $t=0$ となるよう調節した. 6個のストップウォッチはすべて動いている. また, ストップウォッチ3と5の針の位置には特に意味はない.

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 $\Delta t, \Delta t'$ とする。(ただし, この時間調整は実際に行う必要はなく, 計算上の調整で良い)  
次にストップウォッチ3に対して $\Delta t$ , ストップウォッチ5に対しては $\Delta t'$ の時間調整を行う.

これらの時間調整の後, プラットホームの観測者は, プラットホームのストップウォッチ1と列車A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のストップウォッチ5の時間差 $t_{1,5}$ を確認する.

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(II 5)] と一致し,  $t_{1,5}$ は $t_{5,6}$  [式(II 6)] と一致する.  
すなわち,

$$t_{1,3} = t_{3,4} = 2Lv/c^2 \quad (\text{秒}) \quad (\text{II } 7)$$

$$t_{1,5} = t_{5,6} = 2LU/c^2 \quad (\text{秒}) \quad (\text{II } 8)$$

これより, 列車Aのストップウォッチ3と列車Bのストップウォッチ5の時間差 $t_{3,5}$ は, 以下のようなになる.

$$\begin{aligned} t_{3,5} &= t_{1,5} - t_{1,3} \\ &= 2L(U - v)/c^2 \\ &= 2Lw(c^2 - v^2)/c^2 (c^2 + vw) \\ &= 2\alpha Lw/c^2 \quad (\text{秒}) \end{aligned} \quad (\text{II } 9)$$

[ただし,  $\alpha = (c^2 - v^2)/(c^2 + vw)$ ,  $\alpha$ はスカラー]

ところで、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ことから、列車A内の観測者は自らの座標系を「静止系」とみなすことができる。

列車AとBの相対速度は  $w$  だから、列車Aの観測者が特殊相対論を適用すると、時間差  $t_{3.5}$  は式 (II 7) から次のように予測される。

$$t_{3.5} = 2Lw/c^2 \text{ (秒)} \tag{II 10}$$

本論思考実験の結果 [式 (II 9)] は、列車Aの観測者の予測 [式 (II 10)] と一致しない。

この不一致の原因は、光の伝播の等方性（エーテル否定説）を仮定して議論を進めたからであろうか。答えは否である。

“エーテル否定説”を仮定した本論思考実験の列車Aの座標系は、“エーテル擁護説”を仮定した場合の地球（プラットフォーム）の座標系に対応する。（表1参照）

	エーテル否定説の座標系	エーテル擁護説の座標系
静止系	プラットフォーム	エーテル
運動系	列車A	プラットフォーム
運動系	列車B	列車A

表1. “エーテル否定説”と“エーテル擁護説”の座標系において、対応する座標系

また、“エーテル否定説”を仮定した本論思考実験のプラットフォームの座標系は、“エーテル擁護説”を仮定した場合のエーテルの座標系に対応し、列車Bの座標系は列車Aの座標系に対応する。

地球周辺の空間における光の伝播が、プラットフォームの光源に対して等方的に伝播している場合には、時間差  $t_{3.5}$  [式 (II 9)] から、特殊相対論との不一致が検出される。

一方、光が光源に対して異方的に伝播している場合には、時間差  $t_{3.5}$  と  $t_{1.3}$  から、不一致が検出される。

結局、本論の思考実験では、光の伝播が等方的（“エーテル否定説”の立場）でも、異方的（“エーテル擁護説”の立場）でも、どちらの場合にも特殊相対論との不一致が検出される。

すなわち、時間差  $t_{1.3}$  が式 (II 7) と一致する場合には、光は光源 p に対して等方的に伝播しているし、一致しない場合には、異方的に伝播していると結論できる。（表2参照）

時間差 $t_{1.3}$	光源 p に対する光の伝播
$t_{1.3} = 2Lv/c^2$ (秒) の場合	等方的伝播
$t_{1.3} \neq 2Lv/c^2$ (秒) の場合	異方的伝播

表2. 時間差  $t_{1.3}$  と光源 p に対する光の伝播の関係

また、以上の考察から、実際に実験を行う場合には、プラットフォームの2個のストップウォッチと1台の列車内の2個のストップウォッチ、計4個があれば良いことが解る。

本論の思考実験は、現代版マイケルソン - モーリーの実験といえる。

ところで、特殊相対論との不一致が生ずることは、特殊相対論が間違っていることを意味するのであろうか。本論は、特殊相対論を否定するのではなく、特殊相対論を不完全な理論とみなす。

我々は、アインシュタインがその存在を否定した未知の速度  $v$  が座標系に關与する可能性があることを認めなければならない。

その速度の物理的意味は後に検討するとして、その値は簡単に求めることができる。

先ず式 (II 9) より、

$$\alpha = (c^2 - v^2)/(c^2 + vw) \quad (\text{II } 11)$$

これより、

$$v^2 + \alpha wv - (1 - \alpha)c^2 = 0 \quad (\text{II } 12)$$

ここで問題にしているのは、 $v > 0$  の場合であるから、マイナスの解を削除すると、

$$v = [-\alpha w + \{\alpha^2 w^2 + 4(1 - \alpha)c^2\}^{1/2}] / 2 \quad (\text{II } 13)$$

この値は、未知の速度の  $x$  軸方向の成分である。

### III. 結論

本論の思考実験の目的は、エーテルの有無を確かめることではなく、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か否かを確かめる実験が存在することを立証することであった。

そして、その思考実験から、特殊相対論の予測と異なる結果が得られることも示した。

本論は、お互いに相対運動する2つの座標系で、重要な速度は相対速度だけでなく、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関与も考慮しなければならないと結論する。

いま、相対運動している複数の座標系があるとしよう。これらの中には未知の速度ベクトルが関与する座標系もあるし、関与しない座標系もある。

また、一般に速度ベクトルが存在する場合でも、その大きさや向きは、それぞれの座標系で異なる。

したがって、この速度ベクトルの存在を考慮せずに、「お互いに相対運動するすべての座標系は同等である」とするアインシュタインの「相対性原理」は、視覚的には成立するが、物理的には成立しない。

ところで、この速度ベクトルの正体は何であろうか。本論はこの速度ベクトルに次の定義を与える。

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。(ただし、この速度ベクトルは、空間内の座標系から見た速度とは逆向きのベクトルとして定義する)

つまり、この速度ベクトルは、物理空間内の点と同一座標を占める真空内の仮想的な点(座標系)を起点(「静止系」とし、物理空間内の点を終点とするベクトルとして定義できる。

したがって、この場合の「静止系」は、現実の物理空間には存在しない。(ただし、速度ベクトルが存在しない空間内の点の座標系では、空間内の点を「静止系」とみなすことができる)

そして、この定義から、この速度ベクトルは空間内の点の座標系の真の速度とみなすことができる。

本論では、現実には観測できない仮想粒子が詰まった真空中の仮想的な点にローレンツの意味における「エーテル静止系」の地位を与える。

そして、本論は速度ベクトルの起点となるこれらの仮想的な点を「**深層静止系**」と命名する。(「深層」というのは、この速度ベクトルの起点と終点が物理空間内の同一座標を占めることから命名した。「深層静止系」は仮想的な概念であって、実在ではない)

また、この速度ベクトルを現実の物理空間の速度ベクトルと区別するため、「**深層速度ベクトル**」と命名する。

ここで、本論思考実験の各座標系と「深層速度ベクトル」の関係は以下の様になる。(表3参照)

	エーテル否定説の座標系	エーテル擁護説の座標系	深層速度ベクトル
静止系	プラットホーム	エーテル	存在しない
運動系	列車A (速度 $v$ )	プラットホーム (みかけ上の静止系)	存在する 深層速度ベクトル $v$
運動系	列車B (速度 $u$ )	列車(ただし、プラットホームに対する速度は $w$ )	存在する 深層速度ベクトル $u$

表3. “エーテル否定説”と“エーテル擁護説”の座標系と深層速度ベクトルの関係

また、「深層速度ベクトル」の大きさは、“質量による空間の引き摺り効果”の程度をベクトル表示した場合の大きさと一致する。ただし、この2つのベクトルの向きは逆になる。

次に、深層速度ベクトルが存在しない2つの座標系について考える。

1つの座標系には光源Aが、また、別の遠方の座標系には光源Bが設置されているとしよう。光源AとBの距離は天文学的スケールであり、それぞれの座標系はお互いに高速で遠ざかっているものとする。

この状況は、巨大な質量を持つ天体等の座標系が、その質量に見合った仮想粒子群を引き摺っていると考えれば良い。

光源Bの座標系から放出された光は、この座標系に随伴するエーテル(仮想粒子群)の領域内では、光源Bに対して等方的に伝播する。

したがって、光源Aの観測者が光源B近傍の光速を遠隔測定することができれば、物理定数としての光速とは異なる値を観測することになる。(光源Bの座標系に仮想粒子群が付随することなく、空間内の各点の「深層静止系」同士の相対速度が近似的にゼロとみなせる状況で光速を測定した場合には、物理定数としての光速を観測することになる)

すなわち、光源Aから遠ざかる方向に放出された光の速さは、超光速になるし、観測者に向かって伝播してくる光は、物理定数としての光速より遅い値で観測される\*<sup>1</sup>。

しかし、このことは光速が光源(座標系)の速度に依存することを意味するものではないし、光を追い越す物体が存在することを意味するものでもない。(この場合でも、物体近傍の「ローレンツ静止系」に対する物体の速度は、光速  $c$  未満である)

光速を遠隔測定して、物理定数としての光速とは異なる値を観測したとしても、光が光源Bの座標系に随伴している現代のエーテルの領域を抜け出すと、光は空間内の各点の「ローレンツ静止系」(「深層静止系」)に対して速さ  $c$  で伝播することになる。

したがって、光が光源Aの地点まで伝播してきた時には、光源Aの観測者は、物理定数としての光速を測定することになり、「光速不変の原理」に矛盾する状況が生じる訳ではない。

ところで、現時点では天文学的に遠距離を隔てて存在する2つの「ローレンツ静止系」の間の相対速度に、上限値を与える理論は存在しない。(つまり、真空を構成する仮想粒子が遠距離を隔てて存在する場合、これらの仮想粒子間の相対速度の限界値にまで、言及した理論は存在しない)

特殊相対論の要請として存在するのは、運動する物体とその近傍のローレンツ「静止系」との間の速度の上限値としての光速である。

以上の考察より、ある距離を隔てて存在する無数の「深層静止系」は、お互いにある相対速度を持つことが可能なことから、ニュートンがその存在を確信していた「絶対静止系」とは言えないことが解る。

しかし、「深層静止系」はローレンツの意味における現代の「エーテル静止系」と考えることができるので、一見矛盾する表現ではあるが、「**相対的絶対基準系**」と呼ぶのが適切であろう。

### 補注

\*1. この予測は、特殊相対論の速度の加算則を否定するものではない。この場合は、その加算則の適用外の問題について論じているのである。特殊相対論の速度の加算則が成立するのは、列車AとBの座標系の質量がプラットフォーム（地球）の座標系の質量に比べて小さく、列車AとBの座標系が引き摺る仮想粒子群を無視できる場合である。

すなわち、真空中のあらゆる点の「深層静止系」同士がプラットフォームの座標系に対して静止しているとみなして良い場合に、この速度の加算則は成立する。

一方、光源Bの座標系の質量が大きく、この座標系に付随する仮想粒子群の領域を無視できない場合は、光源Aの観測者は光源Bの座標系から放出された光や物体の速度に対して、特殊相対論の速度の加算則を適用することはできない。

### 参考文献

- 1) 内山龍雄訳・解説「アインシュタイン 相対性理論」p15, (岩波文庫)  
他の参考文献として、以下の2つがある。  
物理学史研究刊行会編「相対論」物理学古典論文叢書4 (東海大学出版会)  
「運動物体の電気力学について」p3  
湯川秀樹監修「アインシュタイン選集 I」(共立出版)  
「運動している物体の電気力学について」p20
- 2) A. アインシュタイン「わが相対性理論」p68, (白揚社)
- 3) 内山龍雄訳・解説「アインシュタイン 相対性理論」p16, (岩波文庫)