よく見る相対論の誤解

遠藤龍介　山形大学理学部

相対論の内容は，日常生活から得た直感や常識に反するものが多いため，それにともなった誤解を生じさせやすい．トンデモ系の確信犯的な誤解はともかく，一般の人がよく陥りやすい間違いのうちでもあまり説明が見当たらないものに対して解説を試みる．

1.　相対論における誤解

相対論では，日常的な生活で培われた私たちの直感や常識が働かない場合が多く出てくる．日常的な速さでは，ジェット機でさえ光速に比べればはるかに遅いからである．また，重力場の中での物体の位置エネルギーは，その物体の静止エネルギーと比べると普通ははるかに小さいからである（同じくらいの大きさになると一般相対論の効果が大きくなる）．

相対論の初心者にとって，常識が正しい理解の邪魔をすることがよくある．常識に反することを事実として認めていたとしても，何かを議論しているうちにいつのまにか常識が割り込んできてしまうのだ．例えば，特殊相対論で見かける多くのパラドックスは，「同時刻が観測者によって異なる」という常識に反する事実を忘れてしまうことによって生まれる．あるいは，より初歩的なものであるが，無意識のうちに絶対静止系のようなものを思い描いてしまったために生じる誤解もよく見かける．日常生活における「地面は絶対静止」という常識が割り込むのであろう．

誤解を防ぐ方法は，ありきたりだが慣れることしかないだろう．一般向けの解説書などでは典型的なパラドックスとその解消が丁寧に書かれている物が多いので，それらを何度も読み返すことである．一回読んで納得しただけでは不十分である．頑固な常識の割り込みを防ぐには反復練習が必要である．

本解説では，一般向けの解説書等ではあまり見かけないような相対論に関する誤解をとりあげる．初心者に相対論の話をするときには，このような誤解を起こさないよう注意すべきだと思う．また，一般相対論が絡んでくると，解説書ですら誤解してしまっているものもあるので，それもとりあげて説明しよう．

本解説でとりあげる「誤解」は以下のものである：

- 特殊相対論は一般相対論より難しい．
- 重力による時間の遅れの導出は特殊相対論のそれより難しい．
- 重力による時間の遅れは，重力の強さに比例する．
- 双子のパラドックスは一般相対論でないと解決できない．
- 特殊相対論では「光」がとても重要である．

2.　特殊相対論は一般相対論より難しい？

物理や数学を本格的に勉強したことのない人がよく勘違いすることに，「特殊相対論の方が一般相対論より難しい」というのがある．これは，

「一般」＝「一般向け」＝「やさしい」

「特殊」＝「特殊な人向け」＝「難しい」

と考えるからである．「特殊は簡単，一般は難しい」という数理系の常識とはまったく逆なのが面白い．このことは私自身も最近になって気がついたことである．３，４年前から講義[1)]で学生達にきいてみると，確かに上の様な誤解をする人がいた．昔はこの事実を認識せずに講義をしていたので，学生達も戸惑っていたのかもしれない．（私もこれで異文化共生の第一歩が踏み出せた？）

3.　重力による時間の遅れの導出は難しい？

一般相対論の方が特殊相対論よりも易しいといっているわけではない．実際，一般相対論の方が概念的にも数学的にも難しい面が多い．しかし，重力による時間の遅れに関しては別である．等価原理さえ認めてしまえば，重力場中で時間がゆっ

くり流れることはとても簡単に説明できる．特殊相対論における時間の遅れよりも簡単なくらいである．以下では，等価原理からいかにして時間の遅れが出るか解説しよう．

3.1 等価原理

ガリレオのピサの斜塔の実験としてよく知られているように，重力のもと，物体は質量や組成によらず全く同じように自由落下する(図 1)．真空中では鉄も鳥の羽も同じように落下する．[2] アインシュタインはこのことを積極的にとりあげ，この性質こそ重力の本質と考えて一般相対論構築における重要な指導原理の一つとした．

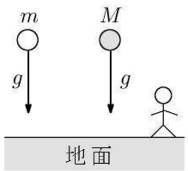

図 1. ガリレオの落下実験

アインシュタインが「人生最良のアイデア」といったエレベーターの思考実験を用いてこの等価原理を説明しよう．

地球上で（ケーブルが切れて）自由落下しているエレベーターの中の観測者を考える．エレベーター内の物体も同じように自由落下するので，観測者に対して最初静止していたものはずっと宙に浮かんでいるように見える．これは無重力の空間に浮かんでいるのと区別が付かない(図 2)．つまり，自由落下している観測者は，無重力の慣性系にいる観測者と等価である．そこでは特殊相対論が成り立つ．

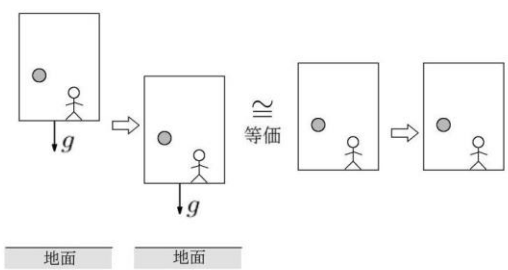

図 2. 等価原理 1

逆に，無重力の空間に「上向き」に加速度gで加速上昇するエレベーターを考えてみよう．エレベーターの中の人は，重力と同じような「下向き」の見かけの力（慣性力）を感じる．その中で，同じ高さから二つの物体を同時に静かに離すと，二物体は同時に床に着く．（外からみれば床の方が近づいて行くのだから同時なのは当たり前．）これは，重力加速度gの地上にいるのと物理的に全く同じであり，区別が付かない(図 3)．

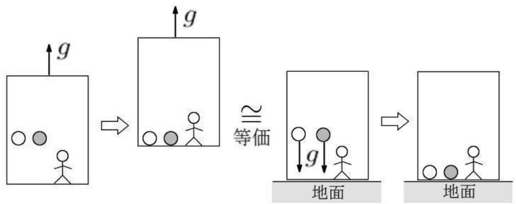

図 3. 等価原理 2

上の等価原理を積極的に使うと，次のことが言える．すなわち，重力場中の物理を知りたいときには，それと等価な加速度系を考えればよい．特殊相対論の成り立つ無重力空間で，加速度運動する観測者を考えるのである．そうすれば特殊相対論で扱うことのできる物理に置き換えられる．

3.2 重力による時間の遅れ

一般相対論によると，重力場中では場所によって時間の進み方が異なる．地上では標高が高いところよりも低い方が時間の進み方が遅い．10cm 低ければ 1 秒間に10^{-17}秒ほど時間がゆっくりと流れる．これを利用することで，現在では 5cm の精度の標高差測定が可能となっている．[3]

簡単なので，等価原理を使ってこの時間の遅れを導出してみよう．エレベーターの床と天井の時間の流れ方を比較することで行う．

地上で静止しているエレベーターの床と天井の時間の流れ方が異なるかどうかは，次のような実験で確かめられる．床の時計で周期Tの光パルスを床から天井に向けて発射する．天井で受け取った光パルスの周期が天井の時計でT'としよう(図 4)．時間の流れ方が同じであれば，$T = T'$ が観測される．そうではなく，$T' > T$ が観測されたとしたらそれは床の時間の方がゆっくり流れていることを示す．なぜなら，もし時間の流れが同じであるのに，床から 1 秒間に 10 個のパルスを送ったはずが天井には 1 秒間に 5 個しか来ない

とすれば，半数のパルスがどこかで消滅したか，あるいは大量のパルスが途中で滞っていることになっておかしいからである．

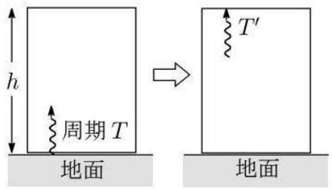

図 4. 時間の進み方の比較実験

重力場中の物理法則を知らなければ，上の実験での T' を理論的に求めることはできない．そこで，等価原理を使って，無重力空間中を一定の加速度gで上昇するエレベーターの問題に置き換える(図 5)．エレベーターの外にいる慣性系の観測者の立場で考える．パルスが発射された時のエレベーターの速度が $v=0$ であったとしよう．天井の高さhが日常的な距離とすれば，パルス発射後もエレベーターの速度は光速cに比べてとても小さく，特殊相対論を使うまでもなくニュートン力学が適用できる．$t=0$ で床から発射されたパルスは，$t=h/c$ に天井に届く．（厳密にいえば，この間に天井が移動した距離 $gt^2/2$ も考慮すべきだが，t が小さいので無視できる．）エレベーターは天井にパルスが届いた時には $v=gt=gh/c$ の速さで動いている．このため，天井で受け取るパルスの周期 T' は，ドップラー効果によって，$T'=T(1+v/c)=T(1+gh/c^2)$ となる．すなわち，

$$\frac{T'}{T}=1+\frac{gh}{c^2} \qquad (1)$$

が成り立つ．[4)]

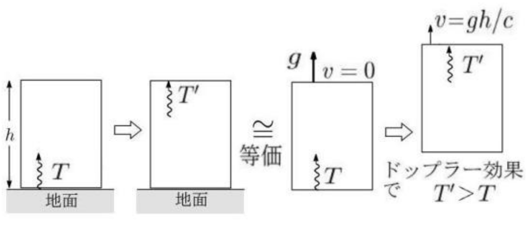

図 5. 等価原理 3

上の計算で$T'>T$となったが何も不思議なことはない．よく知られたドップラー効果に過ぎない．しかし，等価原理によってこれを地上に静止しているエレベーターの中の話に戻すと，その帰結は常識に反した驚くべきものとなる：天井から見ると床の時間はゆっくり流れる．$\Delta T=T'-T$ と置くと，時間の遅れの式は(1)より $\Delta T/T=gh/c^2$ と表される．エレベーターの天井と床との間の重力ポテンシャルの差（単位質量あたりの位置エネルギーの差）が，$\Delta U=gh$ であることを思い出すと，この時間の遅れの式は，

$$\frac{\Delta T}{T}=\frac{\Delta U}{c^2} \qquad (2)$$

と表される．分母の c^2 は単位質量あたりの物質の静止エネルギーと考えることもできる．

どうだろう，重力による時間の遅れの導出は簡単だというのがわかってもらえただろうか．一番難しいところでもドップラー効果くらいである．（それも音のドップラー効果の式を準用するのでいいし，それが $(c+v)/c$ なのか $c/(c-v)$ なのかは近似的にどちらでもよい：$1/(1-v/c)\approx 1+v/c$.）逆に言えば，こんなに簡単なことで驚くべき結果が導かれるのだから，積極的に用いたときの等価原理の凄さがわかるだろう．

4. 時間の遅れは重力の強さに比例するか？

時間の遅れる割合が重力の強さに比例するものと誤解する人がいる．一般向け解説書に「強い重力場中では時間がゆっくり進む」などという記述があるためかもしれない．「強い」を「強さ」だと思い，重力加速度が大きいほど時間がゆっくり進むと解釈してしまうのだろう．さらには，正の相関関係があると，（日常的な常識が入り込んで）比例関係だと思いがちなこともあるかもしれない．

前節で見たように，時間の遅れの式に現れるのは重力の強さというより，重力ポテンシャルである．つまり，「力」ではなく「エネルギー」が時間の進み方を支配しているのである．

力ではなくエネルギーが重要ということは，量子力学の知識を使えばより簡単に理解できる．時間の遅れを表す(2)式は重力場による赤方偏移を

表す式でもある．赤方偏移であれば，光子のエネルギーの視点から理解できる：床から $h\nu$ のエネルギーを持って放出された光子が天井に届いたときのエネルギーは位置エネルギーとして消費した分だけ減って$h\nu'$（$\nu' < \nu$)となる．これが赤方偏移である．この説明なら，赤方偏移（＝時間の遅れ）を支配するのは重力の強さではなくポテンシャルエネルギーであることが一目瞭然であろう．

物理教育関係で活躍している先生でさえ，時間の遅れが重力の強さによるものだと勘違いしている場合がある．遠心分離器で太陽表面と同じ28G の遠心力を与えれば，遠心分離器内の時計は，太陽表面と同じ割合でゆっくり進むだろうと予測して実験（実際は換気扇を使った）を行っている．[5),6)] さらには，これを読んだ学生がそれを信じて，私の講義 [1)] のレポートに書いてきた．そればかりか，有名なサイエンスライターもその著書 [7)] で，換気扇で一般相対論の検証ができるとして紹介している．誤解はこのように再生産されていくのであろう．

一様でない重力の場合

ところで，(2)式を$\Delta T/T = gh/c^2$ と表せば，g は重力の強さなので，ΔT が重力の強さに比例するといってもいいのではないかと言われそうである．確かに一様重力場ではその通りかも知れない．しかし，実際の重力は地球から離れるにしたがって弱くなっていく.（30km 上空の重力加速度は，地上にくらべて 1% 程小さい.）このような場合はやはりポテンシャルで考えるのが正しいのである．

上空に行くほど重力が弱くなる場合で考えて見よう．例えば，N階建ての超高層ビルを考えて，上の階に行くほど重力加速度の大きさが小さくなるものとする(図 6).

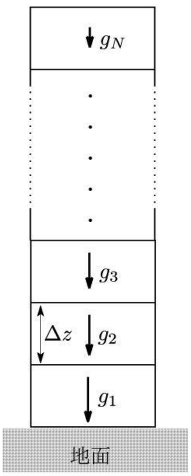

図 6. 超高層ビル

各階の高さをΔz とし，その階での重力加速度はほぼ一定と考えg_nとする（nは階数)．(1)式より，1 階の床にいる人にとって 2 階の床の時計は $1 + g_1\Delta z/c^2$ の割合で速く進む．2 階から 3 階を見れば $1 + g_2\,\Delta z/c^2$ の割合で速く進む．合わせると，1 階から見た 3 階の時計は

$$\left(1+\frac{g_1\Delta z}{c^2}\right)\left(1+\frac{g_2\Delta z}{c^2}\right) \approx 1+\frac{1}{c^2}(g_1\Delta z + g_2\Delta z)$$

の割合で速く進む（Δz^2の項は無視した)． 同じように続ければ，1 階から見ると屋上の時計は

$$1+\frac{1}{c^2}\sum_{n=1}^{N} g_n\Delta z = 1+\frac{\Delta U}{c^2}$$

の割合で速く進むことがわかる．ここで，$\Delta U = \sum g_n\Delta z$ は屋上と 1 階との重力ポテンシャルの差に他ならない．つまり，一様重力場でなくとも，ΔUを重力ポテンシャルの差とすれば(2)式は常に正しい．

時間の遅れの式(2)が一般の重力場でも成り立つことがわかったので，星の表面での時間の遅れを求めることができる．質量 M，半径Rの星の表面における重力ポテンシャルは，無限遠方を基準にとれば，$U = -GM/R$ である（Gは重力定数)．したがって，(2)式より，十分遠方の人から見ると星の表面の時間は，

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{GM}{c^2R}$$

の割合だけ遅れる．太陽表面で考えて見よう．$M = 2\times10^{30}$kg，$R = 7\times10^{8}$m であるので，上の値は，$G = 6.7\times10^{-11}$m^{3}kg^{-1}s^{-2}，$c = 3\times10^{8}$m/s より，2×10^{-6} 程度になる．地球で百万秒（12 日弱）経つと，太陽表面の時計は 2 秒遅れる．

重力の強さの方はどうなるだろうか．もう一つ星を考え，その質量と半径をそれぞれm, r とする．この星の表面の時間の進み方が質量Mの星の表面と全く同じだったとしよう．このとき，$GM/c^2R = Gm/c^2r$ であることから，$r/R = m/M$ が成り立つ．二つの星の表面における重力加速度の大きさの比は，万有引力の逆二乗則より，

$$\frac{Gm/r^2}{GM/R^2} = \frac{R}{r} = \frac{M}{m}$$

で与えられる．すなわち，質量mの星の表面の重力の強さは，質量Mの星の表面の M/m 倍になる．

Mを太陽質量，mを地球質量とすれば$M/m \approx 3 \times 10^5$．仮に地球の全質量が中心に凝縮していたとすると，太陽表面と同じ時間の進み方をする場所が地球の中心から約 2km（＝太陽半径の 30 万分の１）のところにあり，そこでの重力の強さは 1 千万 G 近く（太陽表面の 30 万倍）である．この例からもわかるように，重力の強さで時間の遅れが決まるとするととんでもない結論を出しかねない．

補足：円運動の場合

遠心分離器で時計を回す話が出てきたので，遠心力を重力と考えたときの時間の遅れを見ておこう．3 節でやったときのように，無重力の空間で加速度運動する時計の進みを求め，それを等価原理で重力の問題として見直すことにする．ただし，今回はエレベーターのときほど簡単ではなく，特殊相対論における時間の遅れの知識が必要となる．

回転するリング型の宇宙ステーションを考えよう(図 7)．遠心力による重力によって，滞在者は快適に暮らせる．この宇宙ステーションの住人にとっては，回転中心への向きが上方である．

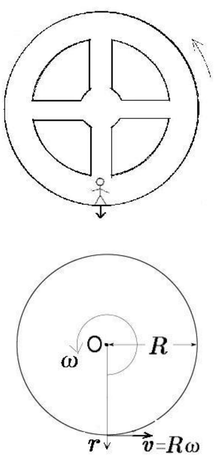

図 7. リング型宇宙ステーション

宇宙ステーションの半径をR，回転の角速度を ω とすると，床に立っている人は，中心 O で静止している人から見ると $v = R\omega$ の速さで運動をしている．したがって，O から見ると床にいる人の時計は，特殊相対論の効果で，$\sqrt{1 - v^2/c^2}$ の割合でゆっくり進む． $v \ll c$ とすれば，$\sqrt{1 - v^2/c^2} \approx 1 - v^2/2c^2$ の近似式が使えるので，時間が遅れる割合$\Delta T/T$ は，

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{v^2}{2c^2} = \frac{R^2\omega^2}{2c^2} \qquad (3)$$

と求められる．

さて，等価原理を使ってこれを重力の問題として考えよう．中心 O からの距離rの位置での質量あたりの遠心力の大きさは，$g(r) = r\omega^2$ である．等価原理を使えば，これが位置rにおける重力加速度と解釈できる．今回は一様ではなく，位置に依存する重力場の例である．重力の大きさはrに比例している．フックの法則の成り立つバネの力と同じなので，位置エネルギーはrの二乗に比例する．バネ定数が $k = -\omega^2$ とみなせるので，位置 r における重力ポテンシャルは， $U(r) = kr^2/2 = -r^2\omega^2/2$ で与えられる．これより，回転中心 O と床 $r = R$ における重力ポテンシャルの差は，

$$\Delta U = \frac{1}{2}R^2\omega^2$$

となる．この ΔU を使って(3)式を表すと，

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta U}{c^2}$$

となり，再び(2)式が導かれた．

このように円運動の場合も，等価原理で遠心力を重力とみなし，重力場中の時間の遅れの式(2)を使うことができる．ただしΔU を求める際には，重力の強さが r に比例する重力場だということを考慮しなければいけない．

とはいっても上の導出を見ればわかるように，この場合の時間の遅れは，結局は特殊相対論の式，

$$\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

を使っただけである．わざわざrに依存する重力の問題にしなくとも，最初から特殊相対論の式(3)を使う方がすっと簡単である．

太陽表面と同じ時間の遅れの効果 $\Delta T/T \approx 2 \times 10^{-6}$ を出そうと思ったら，どの程度の速さが必要だろうか． $v^2/2c^2 \approx 2 \times 10^{-6}$ より，$v/c \approx 2 \times 10^{-3}$となる．これは，$v \approx 6 \times 10^5$m/s というとんでもない高速を意味する．高性能の遠心分離器でも10^2m/s のオーダーであることと比較しても，いかに実現が困難であるかがわかるだろう．

5. 双子のパラドックス

双子の兄が弟を地球に残して高速ロケットで遠くの星まで宇宙旅行をして帰ってくる．弟の立場で考えると，兄は往路も復路も高速で移動しているので，特殊相対論の効果で兄の時間はゆっくりと流れる．地球に戻って再会した時には，弟の

方が兄よりも歳をとっているだろう．一方，兄の立場で考えると，高速で移動しているのは弟の方である．再会したときに歳をとっているのは弟の方ではないか？いったいどっちが正しいのか？

皆さんご存じの双子のパラドックスである．

正解は「兄の方が若く弟の方が歳をとっている」である．もちろん，特殊相対論の範囲でこの結論を得ることができる．時空図を紹介しているものであれば，一般向けの解説書[8] でも大抵は説明があるのでここでの解説は省略する．しかし，解説書によっては，次の様な誤解や混乱が含まれるのを見かける．

5.1 一般相対論でないと解決できない？

双子のパラドックスは一般相対論を使わないと解決できないという誤解をよく見る．一般向け解説書にこう書いてある本も多い．解説本の著者自身がよく理解せずに書いているので，この誤解が再生産されていくのであろう．[9]

誤解を含む解説には次の様な記述がある．

- 兄は星に近づくと方向転換をするために，減速・静止・加速を行う．すなわち兄だけが加速度運動をする．
- 特殊相対論では慣性系しか扱えないので，加速度運動を扱うことはできない．
- 加速度運動を取り扱える一般相対論を使わないとこの問題は解けない．

この２番目と３番目が間違いである．いうまでもないことだが，特殊相対論は加速度運動を扱うことができる．そうでないと運動方程式も書けないではないか！慣性系しか扱えないのではなく，慣性座標系で物理法則を記述するのが便利だといっているのだ．すべての慣性系で同じ物理法則が成り立つからである．加速度系に移ったとしたら，ニュートン力学でもそうであったように，それに応じて式がややこしくなるだけである．一般相対論に頼る必要はない．

5.2 一般相対論なら説明できる？

では一般相対論では説明できないのだろうか．もちろん説明できる．一般相対論は特殊ケースとして特殊相対論を含むのだから当たり前だとも言える．しかし，一般向け解説書で見られる一般相対論を使った説明には少し異論がある．

一般相対論を使った説明は次のようになる．

- 兄は方向転換の際に加速度運動をする．
- 等価原理により，この加速度運動による見かけの力は重力と見なせる．
- この重力場のもと，遙か「上方」にある地球と，兄との重力ポテンシャルの差は大きな「高度差」によって莫大なものとなる．
- 方向転換中は，一般相対論の効果により，兄から見て重力ポテンシャルの高いところにある地球の時間は劇的に進む．
- 加速度運動の際に地球の時間が急激に進んだことが効いて，再会したときには兄より弟の方が歳をとっている．

要するに，加速度運動による見かけの力を等価原理で重力とみなし，重力による時間の遅れの効果で再会時に兄の方が若いことを説明している．

この説明で私が異論を差し挟みたいのは次の点である．加速度運動の際の地球時間の急激な進みを，等価原理を使って重力による時間の遅れの効果で説明していることである．間違いではないものの，何かがずれている．第３節を思い出して欲しい．そもそも，重力による時間の遅れは，等価原理を使って加速度運動の問題に帰着したのではなかったか．その加速度運動における時間の遅れは特殊相対論から導かれる．それを，加速度運動における時間の遅れを重力の問題に置き換えて説明しようとするのはロジックが逆である．回り道をしなくとも，最初から特殊相対論で説明すればいいのである．

6. 光速度不変性の意味

特殊相対論はその理論構成がとてもシンプルにできている．出発点に二つの原理がある：

- **相対性原理**：すべての慣性系で同じ物理法則が成り立つ．
- **光速度不変性**：真空中の光速は，光源の運動によらず，すべての慣性系で同じ値をとる．

このたった二つだけから，特殊相対論の様々な結論が導かれる．本節では光速度不変性について考えて見たい．

多くの解説等では（私の講義も含めてだが）光速度測定の歴史などからこのテーマを始める．マクスウェルの電磁気学や，光は波か粒子かなどといった話題にも触れたりする．これらは，物理的・歴史的には重要なことではあるが，特殊相対論の論理構造の上ではほとんどが必要ないことである．重要なのは「光」ではなく「速さ」である．

6.1 光速度は「限界の速さ」

光速度不変性から光速が限界の速さであることが導かれる．

物体に力を加えて加速すればその物体の速度は増していく．力を加え続ければいずれ光速を越え，光を追い越せるだろうか？ そうはいかない．なぜなら，光を追いかけている物体にとっては，光速度不変性により，いつまでたっても光は光速度で逃げていくからである．したがって，どんな物体も，光速度を越えるまでは加速できない．これが限界の速さである．

限界の速さであれば，実験で測定可能である．加速器で電子などを加速していけば，やがてこれ以上速度が増えない状況に至るだろう．そこが限界の速さである．この実験では「光速」を測定しているわけではないことに注意して欲しい．測定しているのは電子の速さであって光の速さではない．あくまでも「限界の速さ」の測定である．

6.2 「限界の速さ」の普遍性

特殊相対論の二つの基本原理のうち，光速度不変性の方は，次の限界の速さの存在に置き換えることができる：

- **限界の速さの存在**：有限の大きさの限界の速さが存在する．

置き換えが可能であることを以下で説明する．置き換えられると言うことは，光速度不変性のことは一旦忘れて，限界の速さがあるとしか仮定しないのである．

相対性原理から，この限界の速さの値は，すべての慣性系で同じ値になることが言える．なぜなら，電子の加速実験による限界の速さの測定を考えると，もし慣性系ごとにその測定値が違ったとしたら，それは慣性系ごとに物理法則が違うことを意味するからである．相対性原理に矛盾しないためには，限界の速さはすべての慣性系で同じ値でなければならない．

限界の速さの値がすべての慣性系で共通であることがわかったところで次のことを考える．

ある慣性系で限界の速さで運動しているもの（X とする）があったとしよう．別の慣性系から見ても X は限界の速さで運動しているといえるだろうか？

答えは Yes である．以下がその証明である．

別の慣性系から見たら限界の速さでなかったと仮定して矛盾を導こう．限界の速さより速いということはあり得ないから，この慣性系では X は限界の速さより遅いことになる．だとすると，この慣性系では X を追い越す物体 Y を考えることができる．これをもとの慣性系で見ると，Y が X を追い越していることになり，X が限界の速さであることに矛盾する．

以上より，「限界の速さ」が光速度不変の原理における「光速度」と同じ役割を果たすことがわかったであろう．特殊相対論は，

- **相対性原理**
- **限界の速さの存在**

の二つの原理から出発してもよかったのである．必ずしも光は必要ではない．[10)]

とはいっても，光速度測定の歴史を否定しているわけではもちろんない．これらは，限界の速さの発見の歴史として依然として重要な実験である．光は限界の速さで伝わる貴重な実例でもあるのだから．上で言いたかったのは，特殊相対論を考える上では，光が波か粒子かとか，エーテルは本当に存在しないのか，といったことにこだわる必要はないのだということである．

参考

1) 「相対論で学ぶ多角的な視点（共生を考える）」という一年生向け一般教育（山形大学では基盤教育という）の講義．この講義では，物理に限らずに「相対論的な発想」の紹介もしている．受講生からの発想も募集しており，その一部を次の web ページに載せている．

興味があればご笑覧を.
http://sci.kj.yamagata-u.ac.jp/~endo/kougi/relativity/relativity.html
2) 空気抵抗の無い月面での実験も有名．アポロ 15 号の乗員がハンマーと鳥の羽根を同時に落とす様子の動画が youtube などで見られる．apollo 15, feather, hammer, drop で検索．NASA のページであれば,
https://www.hq.nasa.gov/alsj/a15/a15.clsout3.html#1672052
3) 東京大学の香取グループによる実験.
T. Takano et al., Nature Photonics, Vol. **10**, (2016) 662.
4) 正しくは $T'/T = \sqrt{c+v}/\sqrt{c-v}$ であるが, $v \ll c$ なので, 特殊相対論を知らずに音のドップラー効果の式を使ったとしてもよい近似で正しい.
5) 塚平恒雄「水虫先生のナニワ教育道」
実業之日本社, 1998 年.
6) 塚平恒雄, 宝田卓男, 大山光晴「たのしく遊べる科学実験」永岡書店, 1999 年.
7) 竹内薫「ゼロから学ぶ 相対性理論」
講談社, 2001 年.
8) 例えば,
和田純夫「図解雑学 時空図で理解する 相対性理論」ナツメ社, 1998 年.
9) 少し古いけれども, 一般相対論からの結論までをも取り違えて, 兄は若くないと言い出す本もある.
J. A. Coleman, “Relativity for the Layman: A simplified account of the history, theory, and proofs of relativity”, Penguin Books, 1959.
ブルーバックスから日本語訳が出ている.
ジェームズ A. コールマン「相対性理論の世界 はじめて学ぶ人のために」講談社, 1966 年.
10) 「光」より「速さ」が重要であることを主張する論文としては次のものが有名である.
N. D. Mermin, “Relativity without light”, Am. J. Phys. , Vol. **52**, (1984) 119.