

相対性理論の意味するもの

田中 裕

科学哲学的考察 -古きパラダイムの揚棄と crucial experiment について-

相対性の原理と理論

アインシュタインの特殊相対性理論の誕生を告げる1905年の論文の前半部分は「相対性の原理」と「光速度不変の原理」から、ローレンツ変換を導出するという構成になっている。この二つの原理の関係を考えてみよう。ここで相対性の「原理」と相対性の「理論」を区別しておくことが必要である。

相対性の「原理」とは、一般相対論にまで普遍化された形において述べるならば、「最も普遍的で包括的な物理法則は基準座標系の選択に依存しない形で表現されるべきである」という理念の表明であって、それ自身は実験的な検証の対象になるような命題ではない。¹それは、特殊な基準系でのみ成り立つ「法則」をもって満足しないように、たえずその制約を越えるように物理法則を書き換えるべきことを我々に要請する形式的原理であって、この「原理」に経験的に検証可能な実質的内容が与えられることによって、初めて相対性の「理論」となる。

特殊相対性理論の場合は「光速度不変の原理」が、一般相対性理論の場合は「等価原理」が、この相対性の原理に実質的な経験内容を盛り込んでいる。真空中の光速度が互いに等速直線運動するあらゆる慣性基準系で常に同一であるということは、光速度 c が普遍的な物理法則の表現にとって本質的な意味をもつということであるが、この事実は実験観察によって検証すべきことであって、ア・プリアリな論拠から導出すべきことではない。

1905年の時点でのアインシュタインの論文では言及されはしなかったが、マイケルソンとモレーの実験結果がもし肯定的なものであれば、光速度不変の原理は支持できなかったであろう。しかしながら、この実験は、地球上での光の速度の測定値は、地球の運動の影響を受けず、あらゆる方向で常に同一であるという事実を確認することによって、後に特殊相対性理論の実験的検証という意味をもつようになったことは、科学史のうえで周知の事柄である。²またニュートン物理学では、重力は「真の」力であり、物質に起因する遠隔的な相互作用であった。これに対して、

¹ 「相対性の原理」という用語そのものは既にポアンカレによって1895年に使用されたが、「原理」とはいても、彼の意味するところは、「おそらく光学現象はそこに存在する物体の相対運動にしか依存しない」という経験的な仮説であって、「よくできた理論は、この原理を一挙に全く厳密に証明することをゆるすものでなければならない」ものであった。(広重徹、「エ・テル問題・力学的世界観・相対性理論の起源」、『アインシュタイン研究』(中央公論社所収、昭和52年)211頁参照)。アインシュタインの1905年の論文 Zur Elektrodynamik bewegter Körper ではじめて「相対性の原理」は、理論構成の形式的原理という性格を与えられた。しかし、のちにアインシュタインが「特殊相対性理論が古典力学とは違ったものになっているのは、この相対性の要請によるものではなく、むしろ真空中の光速度が一定であるという要請がその原因である」と述べたように、相対性理論に「実質的な内容」を与えているのは「光速度不変の原理」である。「(一般)相対性の原理」が、慣性系でしか成立しない「光速度不変の原理」とは異なるレベルの普遍的要請であるという認識は、一般相対性理論において生まれ、次のように定式化された。「すべての自然法則はあらゆる座標系に対して成り立つような等式によって表現されるべきである。すなわち、任意の座標変換に対して共変(これを一般共変性とよぶことにする)な等式によって書きあらわされるべきである。」(Einstein, Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie, *Ann. der Phys.* Ser.4, 49 (1916), pp.769-822)

² アインシュタイン自身は、1921年のプリンストン大学講義で、「相対性理論は、光の伝播法則の上に時間の概念を樹立し、なんらの根拠なしに光の伝播に中心的理論的役割を与えるといつてしばしば非難される」と述べた後で、マイケルソン・モレーの実験結果に言及して、それが特殊相対性理論に於ける「光速度不変の原理」を支持すると述べている。Einstein, *The meaning of Relativity*, Princeton U.P. p.27

遠心力のような慣性力は、絶対空間以外の基準系でのみ現われ、重力のような「作用・反作用の法則」には従わない「見かけ」の力であった。アインシュタインの一般相対性理論では、重力と慣性力とはともに「時空の歪み」として本性上同一であるという「等価原理」が採用されたが、この原理もまた重力赤方変移(重力場に逆らって電波する光のスペクトルが赤の方向にずれる)の観測によって実験的に検証されるべき事柄なのである。

カール・ポパーは、「重力赤方変移が実測されなければ、一般相対性理論は支持できないであろう」と述べたアインシュタインの発言に、「マルクス、フロイト、アードラーの独断的態度とは全く異なった、そして彼らの追従者の独断的態度とはさらに一層異なった」批判的な理性の典型を見いだしたが、³彼の言う如く、実質的な内容をもつ「反証可能」な実験的帰結を明示することによって、アインシュタインは彼の相対性の理論に科学にとって必要不可欠な具体性を与えたと言ってよからう。

基準系の選択に依存しない普遍的な真理を目指す「相対性の原理」は、同時に科学理論を積極的に経験的反証の場に曝すことを要求する立場でもある。無限に開かれた地平をもつ科学的探求にとって、反証可能な原理をもつことは、理論が空虚な説明図式に退行しないために必要不可欠である。

アインシュタインの相対性理論は、ニュートン物理学の信奉者に対して、たんにそれに代わるべき新しいパラダイムを提示することによって自足するような理論ではなかった。それは古典物理学を特殊な事例としてそのなかに含む包括的な理論であることを志向すると共に、ある決定実験を提示し、その実験の試練に耐えることによって、ニュートン物理学を破棄すると同時に形を変えて保存するより高次の理論であることを経験的に証明したのである。

非ユークリッド的世界の実在性

一般相対性理論は、「太陽の周辺では空間が湾曲すること」、すなわち強い重力場のある空間は非ユークリッド的であることを理論的に主張している。この理論とニュートン物理学との間の決定実験の一つが、有名な皆既日食の時の恒星の視位置のずれを測定する天体観測であった。ニュートン物理学ではユークリッド空間がア・プリオリに前提されており、直線や平面のなんたるかは物理学に先立って固有の意味をもっており、空間的な距離は「絶対」空間に固有の計量によって物質とは独立に定められていた。それゆえにニュートン物理学においては、光の経路や運動物体の軌跡が「湾曲」することは意味をなすが、「空間が湾曲する」ということは無意味であったというべきであろう。時間と空間を事象や物体の相互関係の表現として捉える相対性理論においては、ユークリッド空間はそれらの相互関係の可能な表現の一つという以上の意味はもちえない。我々の世界がユークリッド的であるかそうでないかは、経験によって決定されるべきア・ポステリオリな事柄となる。言い換えれば、相対性理論では、従来ア・プリオリな必然性をもつと仮定されて来た幾何学の命題を実験観察によって反証可能な命題として捉え直すのである。

一般相対性理論とニュートン物理学のように、異なるパラダイムをもつ二つの理論の間で「決定実験」が遂行される可能性を否定する議論は古くからある。例えば、ポアンカレは、1902年に次のように書いている。

「天文学で直線とよぶものは単に光線の通る道をさすに違いない。だから万が一にも負の視差を発見でもしょうものなら、あるいは視差はすべてある一定の限界以上であると証明でもしょうものなら、それは次の二つの結論、すなわち我々はユークリッド幾何学を放棄し得るか、あるいは光学の法則を変更して光は厳密に言えば直線的に伝播しないと認め得るかというこの二つから選択したことになる。全ての人々がこの後の回答のほうを有利と

³ K. Popper, *Conjectures and Refutations*, Harper Torchbooks, 1963, p.36

見なすことは付け加えて言うまでもない。だからユークリッド幾何学は新しい実験を氣遣うことは少しもない。」(ポアンカレ、『科学と仮説』)⁴

ポアンカレは「幾何学の原理は経験命題でも先天的総合判断でもない」とする徹底した規約主義の立場に基づいて「非ユークリッド幾何学の可能性」を擁護したが、上に引用した文章は、相対性理論以前の物理学者の偏見を共有している点で、むしろ彼の「規約主義」の限界を示すものと解釈できるだろう。それは非ユークリッド幾何学の可能性は擁護できたが、その現実性は予測できなかったからである。物理学者が、ポアンカレの予想とは異なり新しい実験事実に基づいてユークリッド幾何学を変更することを選択したこと、さらには、ある意味でユークリッド幾何学を優先的に保持しつづけることは不可能であると結論するに至った事情を次に検討してみよう。

我々は此处で、一般相対性理論の検証実験の「観測の問題」とでも言うべきものに遭遇する。古典物理学の用語で記述できる実験状況のただ中において、古典物理学の理論枠組のなかでは説明困難な観測結果を予言する点ことこそ、古典物理学を揚棄する現代物理学の二本の柱である相対性理論と量子論の「観測の問題」の根本的特徴である。もちろん、一般相対性理論は決定論的な理論であり、波束の収縮にかかわる量子論に固有の問題は存在しない。しかし、ボーアが「量子現象という新しい経験分野において観測の問題の示す特異な側面」を明らかにするために述べた次の言葉は、量子力学のみならず一般相対性理論の実験的検証においても成立するであろう。

「現象が古典物理学による説明の可能な範囲をいかにはるかに越えたものであっても、およそ確かめられた事実と言われるものの説明というものは古典的な言葉で表現されるものでなければならない。...-私の言わんとすることは要するに、我々が『実験』という語で考えている状況とは、そこで我々が何を行い、何を学ぶことになったかを他の人達に語り得るような一つの状況を指すのであって、その意味では実験上の道具立ての説明や観測結果の説明は古典物理学の用語法の適切な適用を含む意味のはっきりした言語で表現されねばならないということである。」⁵

恒星の視位置の変化から太陽光線の屈折角を計算する時に、実験家は光の経路がそこからずれる「直線」の概念を前提して、太陽の裏側からくる恒星の視位置の変動から、屈折角を計算した。このとき実験物理学者が前提した幾何学は如何なるものであったろうか。

実験物理学者が、「太陽の周辺で光が彎曲する」ということを確認する場合、彼が依拠する幾何学は、依然としてニュートン物理学で彼が親しんできたユークリッド幾何学であったといわなければならない。なぜならば、一般相対性理論のなかでは、光は測地線に沿って運動するのであり、局所的にはいたるところで「直進」するからである。したがって、太陽光線の彎曲を確認したという説明は、相対論の内部に属する言明ではなく、「古典的な言葉」すなわちユークリッド空間に於ける光の彎曲ということによって説明が為されているのである。

ポイントは、非ユークリッド幾何学を現実の空間の表現として採用する一般相対性理論が、ユークリッド幾何学と古典物理学の用語でも記述できる実験状況において観測されたという事実、しかも、古典物理学の中では予想もされなかった観測事実を予言したという事実である。

この辺の事情を解明するために、必要最小限の数式を交えてさらに詳しくこの決定実験の内容を検討してみよう。我々は、非ユークリッド的な世界として、アインシュタインの一般相対性理論の基礎方程式の解の一つであるシュバルツシルド解によって記述される時空を例として採り上げる。これは静的かつ等方的な非ユークリッド的な時空であり、一般相対性理論の古典的な

⁴ Poincaré, *Science and Hypothesis*, Dover, p.73

⁵ ニールス・ボーア(井上健訳) 『原子理論と自然記述』、みすず書房、199頁

検証はすべてこの解の応用と考えることができる。

いま中心の質量を M 、万有引力定数を G 、慣性系における真空中の光速度を c とするとき、 $a=2GM/c^2$ を重力半径とよぶ。この名称の由来は、もしも $c=1$ $2G=1$ となる単位系を選ぶならば、 $a=M$ となり、天体の質量を長さの数値で表現できるからである。太陽の場合、 a はほぼ 3 km 程度である。極座標表示で中心からの距離を r で表わし、 $\beta = a/r$ とおく。太陽の場合は $r > 7 \times 10^5 \text{ km}$ であるから、 β は極めて小さい。

シュバルツシルド時空は、半径方向に時空が収縮する非ユークリッド的時空である。基準系のとりかたに依存しない不変の時空計量 ds は、空間部分を極座標で表示して、

$$ds^2 = (1-\beta)dt^2 - (1-\beta)^{-1}dr^2 - r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2) \quad \text{となる。} \quad \beta=0 \text{ と見なしうる領域では、ミンコフスキー時空(ユークリッド的時空) } ds^2 = dt^2 - dr^2 - r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2)$$

と一致する。観測者がユークリッド空間を前提して測定を行なう状況は、一般相対性理論の立場では、等方座標系を設定することによってシュバルツシルド解を変換することによって記述できる。すなわち、 β と r はそのままにして、 r を、 $r=r''(1+a/4r'')^2$ で置き換える。 a/r'' を改めて β'' とすると、

$$ds^2 = (1-\beta/4)^2(1+\beta/4)^{-2}dt^2 - (1+\beta/4)^4(dr''^2 + r''^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2))$$

この座標系での光の速さは、 r'' の関数となり、それは $ds=0$ より

$$v = dr''/dt = (1-\beta/4)(1+\beta/4)^{-3}$$

(中心に近づけば近づくほど慣性系における $c=1$ より小さくなることに注意)

$$\text{光の屈折率 } n \text{ は } n=1/v = (1-\beta/4)^{-1}(1+\beta/4)^3 = 1 + \beta'' \quad (\beta'' = 1 + 2GM/c^2 r'')$$

によって決まる。

従って、非ユークリッド空間を直進する光は、観測者がユークリッド空間を前提して測定する場合には、屈折率 n が r'' によって異なる媒質に満たされたユークリッド空間を進む場合と同じだけ屈折する。 r'' に太陽の半径 r_0 を代入したときの n の値を n_0 として、屈折光学の古典的な理論によって、太陽の周辺を通る光の屈折角 θ_0 を求めると、 $\theta_0^2 = 4GM/c^2 r_0 = 8.48 \times 10^{-6} = 1.75''$ を得る。⁶

四次元の湾曲する時空で直進する(ゼロ測地線を通る)光を、平坦なユークリッド空間に射影するとき、その軌跡が湾曲することは、ちょうど、二次元の湾曲した空間である球面をメルカトル法の地図のやり方で平面に射影すると、最短の経路(大円)が湾曲した線として表示されることになぞらえることができよう。問題はニュートン物理学とユークリッド幾何学を前提してこの光線の湾曲という現象を説明できるかということである。我々が問題とする可能性は、空虚な論理的可能性ではなく、歴史的な状況に即した現実的な可能性である。

ニュートンの『光学』では万有引力の光の経路に及ぼす影響は未解決問題のうちに数えられていた。そしてニュートンの後継者たちもこの問題をニュートン物理学の枠組の中で解決することはできなかった。実際、光が重さのある微粒子であるとする粒子説で光の屈折を粒子に働く引力で説明する場合、屈折率が1より大きい媒質中の光速度は真空中よりも大きくなり、波動説による場合と逆の事実を予言してしまう。フーコーによる実験が、この点に関しては波動説を支持したことが、光量子仮説が受け入れられるまで、物理学者が粒子説を斥けた理由の一つであった。従って、万有引力と光の相互作用に関する首尾一貫した理論はニュートン物理学の中では存在していなかったと言うのが正しい歴史的認識であろう。また、光速度で太陽周辺を通過する重さのある物体が描く双曲線軌道を計算して、屈折の角度(漸近線の交角)をニュートン物理学で計算す

⁶ 一般相対性理論の古典的な検証実験にかかわる理論的予測は、すべて、シュバルツシルド解をつかって導き出すことができる。(Robert M. Wald, *General Relativity*, The University of Chicago Press, 1984, pp.136-148 参照)それは「湾曲した時空」というものをみとめないニュートン物理学とのあいだの決定実験という性格を持つのである。

ることは可能であるが、その値は $2GM/c^2 r_0 = 0.875''$ (一般相対性理論の予言の半分) になり、実験と合わない。それゆえに、ニュートン力学とユークリッド幾何学から実測された光の湾曲を説明することは事実上できなかつたと言ってよからう。

一般相対性理論とニュートン物理学との間の決定実験のひとつである重力場での光の湾曲についての結論は、次のように要約できよう。

- (1) 一般相対性理論はニュートン物理学では考えられなかつた現象の生起を予言する決定実験を提案し、その結果を説明する。
- (2) その決定実験は、ニュートン物理学の枠組の中で定式化され、実験家はニュートン物理学を使ってその状況を記述してよい。
- (3) その決定実験の結果は、ad hoc な救済策を構じない限り、ニュートン物理学の枠組のなかでは説明できない。

なぜ物理学者が「ユークリッド空間のなかで光線が湾曲する」というニュートン物理学の立場ではなくて相対性理論の立場を選択したか、その理由は、ニュートン物理学の立場は、自己自身の内部では説明困難な逆説的事実を含んでいたからである。この事実は古典物理学の内部にいるものによっては気づかれず、一般相対性理論という、古典物理学でア・プリオリに前提されていた原理を否定する立場から提起された決定実験によってはじめて、顕在化されたというべきであろう。

相対性理論は、物体の相対速度が光速よりもはるかに小さく、重力場の時空計量に及ぼす影響を無視しうる特殊なケースとして古典物理学の実験的予測を包含しているという意味では、ニュートン物理学を「揚棄」するより普遍的な理論であった。それは、ニュートン物理学の内部で記述可能な実験的状況において古典的時空概念の限界を示す決定実験を提起することによってであることが示された。「四次元時空の曲率」や、その帰結である「時間の肥大」⁷や「三次元空間の湾曲」という一般相対性理論に固有の非古典的な概念が実験的に検証される場面は、ニュートン物理学でも記述しうる状況のただ中に生じる逆説的な特異性にほかならないからである。

相対性理論の含意する世界観

四次元世界の遠近法

相対性理論が自然に適用される世界は極大宇宙である。ここで極大という意味は、天文学的な意味での大宇宙をあつかうということだけではなく、非常に高いエネルギーや極端に大きな重力場が存在するような場合をも含んでいる。古典物理学の実験観察が基礎としていた人間的尺度で考えるならば、この理論には、我々の常識を逆なでする所が多々あることはよく知られている。例えば、相対性理論の基本原則である一慣性系における一光の相対速度の不変性という原理は、我々が、たとえ光速の 99.9% の速度で光を追いかけたとしても、もとの光を依然として前と同じ速さで見いだすであろうという逆説的事態を主張している。実際、絶対基準系（絶対静止のエーテル）に対する地球の運動の影響を測定しようとしたマイケルソン・モレーの実験が否定的な

⁷ 重力赤方偏移の現象は、今日ではメスバウエル効果を使うガンマ線の実験によって実験室で検証されたが、この現象を光の波動説によって説明するときは、振動数の減少に伴う「時間の肥大 (time dilatation)」という言葉が使われる。要するに、重力のある静止系で、ポテンシャルの高いところでは、低いところと比べて時計が遅れるという現象である。

結果を与えるまでは、アインシュタインを除く殆どの古典物理学者は、このような逆説を物理学の基本原則として受け入れることを拒否していたといつてよい。例えば、ローレンツは、光速度の不変性という事実を、エーテルが運動物体に与える収縮効果と、エーテルが運動する時計に与える遅延効果が、互いに相殺した結果生じた「見かけ上の現象」であると考えていた。彼は、「エーテル」という隠れた実在が及ぼす未知の因果的效果によって、絶対的な意味で運動物体が収縮し、運動する時計が遅れる、と考えたのである。絶対静止系を前提したローレンツにとって、光速度の不変性は、説明されるべき変則的事実であって、決して物理学の普遍的な原理などではなかったのである。「運動物体の収縮」および「運動する時計の遅れ」という二つのアイデアは、ローレンツ変換とともに、アインシュタインの特殊相対性理論にも登場するが、その物理的解釈は本質的に変化したといつてよい。相対性理論では、この二つの効果は、どの慣性系を基準にしても平等に現れるから、絶対静止のエーテルに起因するものと考えることができないからである。それは、時空の計量の定義にかかわる本質的問題となり、複数の原理的に対等な時間系列の存在と、絶対的同時性の否定という相対性理論の核心ともいふべき基本思想から説明されるのである。そして、この相対性理論の核心部分は、絶対時間と絶対空間という概念に基づいて構成されたニュートン物理学の根幹を否定するものなのである。

我々は、相対性理論がニュートン物理学の連続線上に構想されたものではないことを明瞭に理解しなければならない。ニュートン物理学との不連続性を見失わないことは、相対性理論を理解するうえで必要不可欠であるにもかかわらず、しばしば見落とされる。その理由は、相対性理論の立場からニュートン物理学を光速度を無限大とする極限操作によって数学的に導くことができるために、数学的な一般化という事実が、意味論的な本質的相違点を覆い隠しているからである。ニュートン物理学は、厳密には真ではないが、物体の速度が光速度に比べて小さいときは、近似的に真となるという意味で、相対性理論のなかに包摂されているということは確かに誤りではない。ひとたび、相対性理論のパラダイムを受け入れるならば、その立場にたつてニュートン物理学を受容することは可能である。しかしながら、相対性理論というひろい枠組みのなかに包摂されたニュートン物理学は、元来のニュートン物理学がそれ自身のパラダイムの枠組みのなかでもっていた意味を失っていることに注意しなければならない。

そのことは、次のような考察によって明らかとなる。相対性理論では四次元の時空は、過去と未来を向いた二つの光円錐によって、三つの領域、すなわち絶対未来、絶対過去、共時的（空間的）領域の三つに別れる。基準事象 O （今此処）から見て、絶対未来とは、如何なる慣性基準系においても未来となる領域であり、絶対過去とは、如何なる慣性基準系においても過去となる領域である。相対性理論に固有の時空的領域は共時的（空間的）領域であり、そこにある事象は、基準系の取り方によって O の未来にも過去にも現在にもなりうるという意味で、生起の時間的順序が完全に相対化されている。我々は、このような共時的領域はニュートン物理学では存在しえない領域であることに注意しなければならない。

さて、相対論で光円錐を図解するときには、時間軸と空間軸を二等分するかたちで光円錐を表示するのが慣例であるが、これは光速度 $c = 1$ という尺度を採用したことを意味している。人間の日常的な尺度では、光速度 c は極端に大きな値であるから、実際の光円錐は空間軸に限りなく接近するために、相対論に固有の領域である共時的領域も限りなくニュートン物理学の絶対的に同時的な領域に縮退していくように見える。しかしながら、このような数学的極限操作によって相対性理論の時空概念がニュートン物理学の時空概念に移行するという考え方は、厳密にいつて誤りなのである。 $1/c$ がゼロでなくて有限の値であることは、両者の概念の間の連続的移行を不可能にするということを以下に示そう。

共時的領域とは何であるかということを確認するために、「基準系 f では出来事 x が出来事 y よりも前に起きた」という関係を $A(x, y, f)$ で、「基準系 f では、出来事 x が出来事 y と同時に起きた」という関係を $S(x, y, f)$ で表記しよう。

出来事 x に関して、 x の絶対的未来領域、 x の絶対的過去領域、 x の絶対的な同時的領域、および共時的領域という三つの概念を次のように、時空の計量に言及しない形で区別することができる。今、出来事 x の絶対的未来領域に属する出来事を、

$$F(x) = \{y | (\exists f)A(x, y, f)\}$$

出来事 x の絶対的過去領域に属する出来事を、

$$P(x) = \{y | (\exists f)A(y, x, f)\}$$

出来事 x と絶対的な同時的領域に属する出来事を

$$S(x) = \{y | (\exists f)S(x, y, f)\}$$

出来事 x と共時的な領域に属する出来事を

$$C(x) = \{y | (\exists f)S(x, y, f)\}$$
 と書けば、

相対性理論とニュートン物理学との本質的な相違点は次のように表現できよう。

ニュートン物理学では、 x と共時的な領域 $C(x)$ はそもそも存在せず、

任意の x, y に対して $y \in P(x)$ または $y \in S(x)$ または $y \in F(x)$

のどれかが、そしてどれか一つのみが、かならず成り立つのに対して、

相対性理論では、 x と絶対的に同時的な領域 $S(x)$ はそもそも存在せず、

任意の x, y に対して $y \in P(x)$ または $y \in C(x)$ または $y \in F(x)$ のどれかが、そしてどれか一つのみが、かならず成り立つ。

そして、共時的領域にとって本質的なことは、「……と共時的である」という関係が推移律を満たすとは限らないということにある。即ち、事象 a と b が共時的であり、事象 b と事象 c が共時的であっても、事象 a と事象 c とは共時的とは限らないのである。それは、 a と b とを同時的とするような基準系と、 b と c とを同時的とする基準系がそれぞれに存在したとしても、この二つの基準系が一致するとはかぎらないということに由来するのである。

空間的に隔てられた二つの事象が、あらゆる基準系で同時的となることは、相対性理論においては起こりえないことに注意したい。したがって、「共時性」とは、弱められた意味での「同時性」なのではない。その理由は、上で示されたように、共時的な領域に属する出来事については、絶対的な同時性の概念が否定されることによって、時間的な継起の概念もまた相対化されるからである。互いに共時的な二つの事象は、基準系の取り方によって、どちらが先に起きたかが変わりうるからである。すなわち

$$C(x) = \{y | (\exists f)S(x, y, f)\} = \{y | (\exists g)A(x, y, g) \& (\exists h)A(y, x, h)\} \text{ が成り立つ。}$$

相対性理論は、光速度を無限大とする極限においては（正確には、物体の速度 v と光速度の比がゼロとなる極限においては）ニュートン物理学と一致するということがよくいわれる。しかし、その意味は、光速度が物体の運動速度に比べて非常に大きい場合には、相対性理論はニュートン物理学と同じ観測結果を予言するということであって、相対性理論の時空概念とニュートン物理学の時空概念の区別がなくなるという意味ではない。

なるほど、 $1/c$ がきわめて小さい場合には、共時的領域 $C(x)$ は、（光円錐が無限に空間軸に接近するために）ニュートン物理学でいう絶対的同時領域に限りなく接近するであろう。しかしながら、両者の意味するものは上で示した通り全く異なっており、決して同一視できないことに注意しなければならない。 $1/c$ がゼロではなくて有限の値をとるということ、しかもそれがあらゆる慣性系でつねに同一の値をとるということが、ニュートン物理学と相対性理論との間の不連続性を形成するのである。

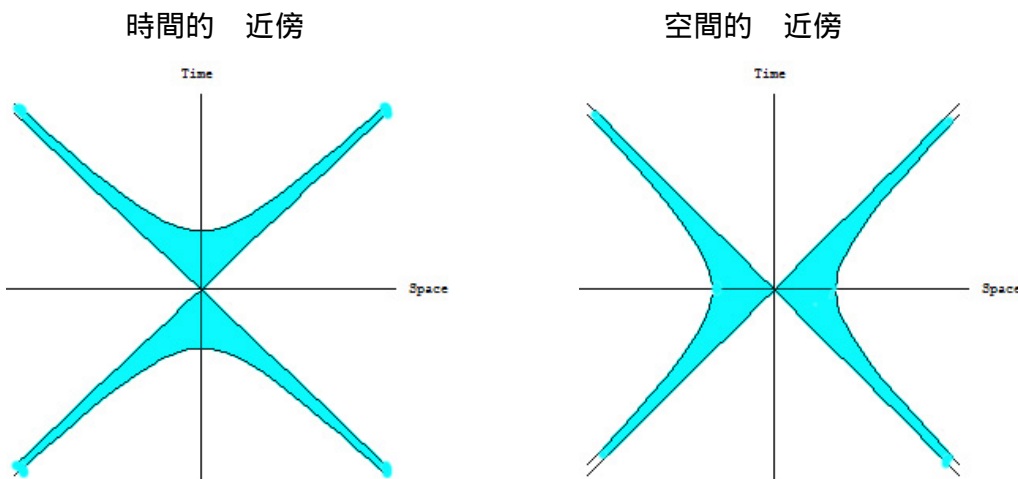
相対性理論では絶対的基準系の存在を否定したのではなく、観測できない実体を切り捨てる「オッカムの剃刀」の原理にもとづいて、単にその存在を前提しないですませたという主張が為される場合がある。しかし、もし絶対的同時性という概念を、「あらゆる基準系で同時的」という意味にとるならば、このような解釈はミスリーディングであることが分かるだろう。「絶対時

間はありません」という主張は相対性理論のメッセージの核心にある。

我々は、計量抜きで四次元の時空の構造を根拠に語ったが、計量を入れた場合には、さらにニュートン物理学と相対性理論の時空の遠近法はさらに明瞭になることを次に示そう。ニュートン物理学では、時間的な近さと空間的な近さは、それぞれ独立であって、ある出来事の時間的かつ空間的な近傍は、時間を dt 、空間距離を dl として $|dt| < \epsilon$ かつ $|dl| < \epsilon$ によって表示される。

要するに、ニュートン物理学の遠近法は、近傍が有界な閉じた領域を形成するという意味で、基本的には常識と一致するといっておかろう。

これに対して、相対性理論の遠近法は、時間と空間とが不可分離的であるために、 dt も dl もそれぞれ単独では不変の意味を持ち得ない。そこで、基準座標系の変換にたいして不変であるのは、 $|ds| < \epsilon$ であり、それは時間的にも空間的にも無限に延長する、開かれた領域であるという特徴を持っている。それは四次元ミンコフスキー時空における近傍が、時間的にも、空間的にも双曲的な構造を持つことによって表されている。ミンコフスキー時空では、(光速 $c = 1$ とし) 座標時間の経過を dt で、空間座標で表示された距離を dl ($dl = (dx^2 + dy^2 + dz^2)^{1/2}$) として、時間的な四次元距離は $ds^2 = dt^2 - dl^2$ によって、空間的な四次元距離は $ds^2 = dl^2 - dt^2$ で表示されるから、四次元時空の近傍は、ニュートン物理学のように、 $|dt| < \epsilon$ かつ $|dl| < \epsilon$ のような閉じた領域によって与えられるのではなく、 $|ds| < \epsilon$ によって与えられる双曲的な超曲面で囲まれた領域で表示される。それゆえに、この時空における「今此処」の近傍は光円錐に沿って過去と未来へ向かって限りなく延長しているのである。



相対性理論における近傍が時間軸と空間軸に沿って無限のなかに伸びているということは、あまりよく認識されていないのではないだろうか。それは、ニュートン物理学のなかで、あるいはニュートン物理学がその洗練にすぎない我々の日常言語の「近傍」概念とはあまりにもかけて離れているように見えるからである。ここでも、我々は c の極限操作によって、事態を単純化しようとするかもしれない。つまり、 c を限りなく大きくすれば、時間的な近傍は限りなく絶対現在の領域に近づき、共時間近傍領域にあらわれる空間的な近傍は無視しうるのではないかと考えるのである。しかしながら、相対論という時空の計量にとって、基準系の変換に対して不変であるのは、四次元距離 ds であって、そのなかに現れる dt や dl ではないということが、ここで重要な意味を持つてくる。それは、言い換えるならば、空間を捨象した「今」や、時間を捨象した「此処」という概念に、不変の意味がないということの意味している。

ニュートン物理学では、時間的な近傍と空間的な近傍とは独立の概念であって、二つの出来事が時間的に接近しており、なおかつ空間的にも接近していると述べることに何の矛盾もないが、相対性理論では、二つの出来事が接近しているという場合、それは「空間的に接近しているか (space-like な四次元距離の意味で) それとも「時間的に接近しているか (time-like な四次元

距離の意味で)」どちらか一つだけを意味するのであって、「時間的な四次元距離の意味で近傍にあり、かつ空間的な四次元距離の意味でも近傍にある」ということはできないのである。

我々が日常的な地上の出来事について語る場合、ニュートン物理学で事が足りるから、一々相対性理論を持ち出す必要がないというのは、もしそれが、相対論的宇宙論は我々の日常生活とは無関係であるという意味でならば、正しくない。有名なオルバースのパラドックスは、夜空が暗いのはなぜであるかという日常的には自明の理にすぎぬことを問題にしたものであるが、現代の物理学者は、これをビッグバン宇宙論と関連させて説明しているからである。また、このような例を持ち出すまでもなくとも、我々は、一度、天空を見上げ、人間的尺度をはるかに越える宇宙について観想するならば、むしろ相対性理論の方が極大宇宙の理解に自然な尺度と遠近法を与えているということを次に示そう。

まず、天文学的距離は、光速度を媒介として時間で表示されていることは周知の事柄である。そこでは、文字どおり $c = 1$ とする尺度が自然なのである。さらに、我々は、相対性理論でいう過去の光円錐上の領域 ($t < 0, ds = 0$) に直観的な意味を与えることができる。すなわち、過去の光円錐とは、我々が夜空を見上げたときに我々の周囲に広がっている「時間の奥行きをもった」三次元空間として解釈できる。天文学者が観測している天体は、我々の地球時間を基準にしたその都度の現在 ($dt = 0$) の宇宙の姿なのではない。例えば、冥王星は5時間前の、ケンタウロス座のは4年前の、アンドロメダ星雲は150万年前のというように、過去に向かう時間的な奥行きをもった対象の姿を、今此処で見ているのである。このことは、古典物理学の時空概念に従うならば、「遠方の天体になればなるほど、それだけ遠い過去の宇宙の姿を我々に見せている」ということになる。しかし、「遠い」とか「近い」という語を、空間と時間の計量を切り離して考えているならば、それは、我々の基準系でのみ通用する考え方であることに注意しなければならない。基準系の選択に依存しない四次元距離で測るならば、宇宙のどれほど遠方の、どれほど過去におきた出来事であっても、時間的または空間的な四次元距離の尺度において、我々のごく近傍にあるといわねばならない場合があるからである。我々が、例えば今日観測した超新星の爆発が、10万年前に10万光年はなれた遙か遠方で生じた出来事であったという場合、ニュートン物理学のパラダイムに従うならば、それは時間的にも空間的にも極度に遠く隔てられた事柄であるが、相対論的宇宙論の遠近法によれば、その出来事は、今此処と四次元的な距離において近接しており、ある不変なる意味において、昨日地上で我々の周辺で起きた出来事よりも我々に近いということができる。

過去の光円錐とは時間の奥行きを持った三次元の空間である。それは、現在の直接性 (presentational immediacy) をもって知覚されるのであり、ここで示されたような相対論的宇宙論の遠近法によれば、我々が見上げる夜空の星は、そのまま、ビッグバン以後の悠久の宇宙の歴史的過去を、今此処で直接に開示していることになる。

相対性理論とプロセス・コスモロジー⁸

相対性理論と量子論は単に物理学の新理論であるばかりではなく、さらに宇宙論へと一般化されるべき重要な原理を孕む点に於てホワイトヘッドの形而上学の成立過程に大きな影響を与えた。ホワイトヘッドのコスモロジーは「宇宙の創造的進化 (the creative advance of the universe)」という用語に示唆されるように、宇宙の歴史性を強調する自然観のうえに成り立っている。彼の所謂「プロセス・コスモロジー」は、アインシュタインによって体系化された時間の相対論的把握とどのような関係にあるのか、プロセス・コスモ

⁸ Alfred North Whitehead, *Process and Reality*, Corrected Edition, The Free Press (以下 PR と略記する) 本文で言うプロセス・コスモロジーとは *Process and Reality* の宇宙論をさす。

ジーを現代物理学との関連性においてとりあげ、時空(世界)がそこにおいて生成する場所 = 延長連続体(the extensive continuum)というアイデアの意味するものを再考したい。

問題1 同時性は光信号によって定義出来るか。

(提題) 同時性は光信号によって定義できるように思われる。アインシュタインの特殊相対性理論によれば、異なる空間的場所における同時性は「光速度不変の原理」に基づいて操作的に定義される。一般に物理学の用語の意味は、その用語を含む命題の真偽を検証する実験的手続きを指定することによって確定する。我々は何らかの物理的信号によらなければ異なる空間的場所に設置された二つの時計を合わせることが出来ない。光信号の伝播速度が観測者や光源の運動状態に依存せず一定であることには実験的な支持があるから、時計を同期化するには光信号を使うのが最も適当である。よって、同時性を光速度不変の原理に立脚して光信号によって定義することは、客観的な実験操作の現場から遊離した抽象概念を排除し、物理理論の数学的定式に経験的意味を与えている点で全く正当なものである。

(反対提題) 同時性は光信号による時計の同期化によっては定義できない。ホワイトヘッドは、光の信号理論によって同時性を定義するアインシュタインの手続きをいわゆる科学哲学三部作の中で批判した。彼は、同期化された時計によって計測される物理学的時間からではなくて、我々にその都度知覚される同時的世界の無限の広がり(持続)から出発する。時間は「自然の成層化」である。この同時的世界は、関係性による認知に於ては全体性として開示され、任意の個的経験にとっての形容態による認知においては部分的に開示される。このような、自然の成層化の系列が時間秩序の起源である。自然の成層化としての複数の時間系列を認める立場から、ホワイトヘッドは、アインシュタインのいう同時性は「直接知覚された同時性」を説明しないと、光速度の不変性に基づく同時性の定義に反対している。

この問題に対して次のように答えよう。一般に「同時性」は様々な意味に於て語られるから、その全てに共通する定義を求めることは出来ない。しかし、その様々な意味は何の脈絡もなく単に併存しているのではなく、そこには焦点的な意味と周辺的な意味の区別と関係とがある。従って、同時性の定義とはその焦点の意味を解明すると同時に様々な派生的な周辺の意味との関係を秩序だてることにほかならない。焦点の意味を与える候補者として、次の二つを考えよう。

(1) 時計で計測された時間(物理的な周期運動の数の測定)の秩序を与える同時性。この同時性の測定は、異なる場所に設置された時計を同期化することによって可能となる。

(2) 知覚の二つの異なる様式のうちの一つ(現在の直接性の様式)に由来する同時性。これは、他の様式(因果的有効性の様式)に由来する時間の方向性と共に、我々の時間経験を構成する。

このうち(2)の方が(1)よりも根源的である。なぜならば、相対性理論においても近接した場所での時計の同期化は現在の直接性の様式での知覚によって為されるほかに、ただ遠隔の場所の時計の同期化に光信号が使われている。一般に、あらゆる物理的測定は、(2)のレベルでの同時性を前提せざるを得ない。従って、(1)を客観的な物理学的時間、(2)を主観的な心理学的時間と呼び、(1)を(2)よりも根源的なものと見なすのは本末転倒である。我々は物理的対象の時空的配置を感覚的对象の時空的配置の観察によって初めてさだめることができるのであって、その逆は成立しない。従って、(1)のレベルで登場する時計の同期化によって(2)のレベルでの同時性を定義する事はできない。さらに、(1)のレベルの同時性ですら、厳密に言えば光の信号によって定義されたわけではない。その理由は、ホワイトヘッドが「自然認識の原理」で示したように、光の信号とはまったく独立に、物理的な測定を可能ならしめるア・プリオリな諸条件(時空の一様性、等方性、変換の対称性、推移性など)からローレンツ変換を導出する事は可能である。⁹

⁹ Whitehead, *An Enquiry concerning the Principles of Natural Knowledge*, pp.147-164

ローレンツ変換を光速度普遍の原理を前提せずに、一様性や対称性などの弱い過程から導く他の試みは、テルレツキ - 「相対性理論のパラドックス」(中村誠太郎監修、林昌樹訳、東京図書、1968) および、Mermin, N.D., *Relativity without light*, *Am. J. Phys.* Vol.18, No.1, 1987, pp.29-55 参照。

この場合、時間測定と空間測定とを媒介する定数 C (臨界速度)があるべき事は必然的要請となるが、現実には測定される光速度がそれに等しいということはア・ポステリオリな事実となる。即ち、光速度の不変性はいかなる物理的観測によっても反証不可能な原理なのではなく、場合によっては成り立たないことも可能な経験的な事実の一つであるにすぎない。しかし、もし同時性が「光速度の不変性」によって定義されてしまうと、「光速度」が変わり得るという事態を最初から排除してしまうことになる。一般に、時空の座標的秩序は物理的な観察と測定を可能ならしめるア・プリオリな諸条件に由来し、特定の種類の物理的現象の持つ偶然的性格に依存しない。速度の概念がすでに異なる空間座標に一つの時間座標を割り当てることを前提しく光速度も例外ではない。時計の同期化という物理的操作がすでに同時性の概念を前提している以上、同時性は「光速度の不変性」と「時計の同期化」によっては定義されない。

問題2 プロセス・コスモロジーの「宇宙の創造的進化」という考え方は時間秩序の相対論的把握と両立するか。

(提題) 「宇宙の創造的進化」という考えは時間秩序の相対論的把握とは両立しない様に思われる。

(1) まず相対性理論に於ける四次元宇宙では、全ての事象が「永遠の相のもとに」記述されており、未来の不確定性と過去の確定性との対比が失われている。そこにはプロセス・コスモロジーで強調される時間的生成の入る余地はない。そこでの時間は完全に空間化されている。

(2) 時間を自然の成層化から導くホワイトヘッドの相対性理論では、宇宙全体の時間的切断は客観的意味を持たなければならない。しかしながら、一般相対性理論においては時空の座標的秩序が物質(重力場)によって決定されるから、全体としての宇宙に一つの時間座標を割り当てる事ができるかどうかは、物理的偶然性(物質の分布状況)に支配される。ある種の宇宙モデルに於ては、大域的な宇宙時間が存在し、宇宙が時間的に定常的であるかあるいは非定常的であるかを論ずることが可能である。

しかし、全体としての宇宙に一つの時間座標を割り当てることの不可能な宇宙モデル(アインシュタイン方程式のゲーデル解)もある。このような宇宙に於ては、全体としての宇宙の時間的切断には、いかなる客観的意味もない。そこでは、過去と未来の区別が局所的な意味しか持たないから、全体としての宇宙の歴史という概念は空虚なものとなる。

(反対提題) ホワイトヘッドは、一方に於てアインシュタインの一般相対性理論とその標準的解釈に反対し、それに代わる時空と重力の理論を提示したが、他方に於てアインシュタイン理論の数学的定式を自分の自然哲学的範疇のなかで再解釈することは可能だと言っている。

この問題に対して、次のように答えよう。我々はプロセス・コスモロジーの時間論を考える場合、ホワイトヘッドの科学哲学三部作と「過程と実在」とを区別しなければならない。前者と違って後者では、自然の基礎的構成要素に客観性(objectivity)とともに主観性(subjectivity)を認め、「世界に於ていかに主観性が成立するか」を主題としている。従って、時計によって計測される「客観的」時間だけでなく我々によって主体的に生きられた時間も同時に問題とされている。そこでは、現実の諸契機は「時空の座標」において生起するのではない。

時空は現実の諸生起の関係から抽象されたものである。それゆえにプロセス・コスモロジーでいう「プロセス」とは、第一義的には座標時間で計測され得る時間的過程ではない。現実態に於ける時空の素領域と、その素領域そのものの生成(=現実的生起)とは区別されねばならない。宇宙の「創造的進化」とは、第一義的には一つの現実的生起が、そこにおいて生成する現実的世界(絶対過去の領域にある事象の総体)を超越して新しいものを付加する事を意味するのであって、時空そのものの生成を論じる。可能態としての延長連続体(時空の生起する場所)と現実態としての時空(そこに安定した物質は存在しなくとも良い)とを区別しなければならない。

我々は現実的生起(actual occasion)と現実的世界(actual world)との関係を次のように図式化できよう。 a, b, c, \dots によって個々の現実的生起を表示する。 $W(x)$ によって現実的生起 x の現実的世界を表示する。

プロセス・コスモロジーはライプニツのモナド論とおなじように、個々の現実的生起はそれぞれの観点から宇宙を抱握(prehend)している。

いま、式 $x \in W(a)$ によって、現実的生起 x は現実的生起 a の現実的世界の成員であることを表す事にする。「個々の現実的生起はそれが抱握する現実的世界にふくまれるどの成員とも異なる新しいものである(PR21)」から、それは自己自身の現実的世界の成員になる事はできない。即ち、

$$(a) (\sim a \in W(a))$$

が成り立つ。さらに、「どの現実的生起にもそれに固有の意味での現実的が対応し」(PR28)「同一の現実的から二つの異なる現実的生起が生起することはありえない。二つの現実的の相違は、一方に含まれ他方に含まれない現実的生起の存在と、それぞれの現実的生起に付随して登場する諸存在によるものである。(PR23)から、

$$(a, b) (W(a) = W(b) \rightarrow a = b)$$

プロセス・コスモロジーで言う過去と未来との非対称性は「ある現実的生起が他の現実的生起の現実的の成員であるという関係」の非対称性によって表現される。即ち、

$$(a, b) (a \in W(b) \rightarrow \sim b \in W(a))$$

宇宙の創造的進化とは、ある現実的生起の現実的世界は、その現実的世界の全ての成員のすべての現実的世界を含むことを意味する。即ち

$$(a, b, c) (a \in W(b) \& b \in W(c) \rightarrow a \in W(c))$$

それぞれの現実的生起が現実的世界に新しいものをもたらす、現実的世界を創造的に進化させるというプロセス・コスモロジーでいう「世界の創造的進化」を上のように図式化することができるならば、それは複数の現実的契機とそのそれぞれに対応する複数の現実的世界の創造的前進を語るものであって、ただ一つの現実的世界の創造的進化を語るものではないから、あらゆる事象を直線的な時間秩序のもとにおくことができなくとも、我々は現実的世界の創造的進化について有意味に語る事ができる。

ゲーデルが嘗て述べたように、リーマン時空に共通の時間座標が設置できなければ、世界の歴史性について語る事ができないというのは速断にすぎると言わなければならない。宇宙の歴史性とは、どの現実的生起の現実的世界も創造的に進化するという事であって、その現実的生起と共時的なすべての現実的生起の現実的が「同時に進化する」と言う事ではない。

ミンコフスキー時空やリーマン時空において宇宙論のモデルを構成するものが共通して陥りやすい落とし穴は「たんなる可能態を現実態」と混同することである。連続体は可能態にかかわり、現実的世界は量子的(非連続)である。延長連続体(the extensive continuum)は進化する現実的世界がそこに於いてある場所であり、世界の可能なあり方にかかわりを持つ。宇宙モデルが決定論的な構造をもっている事から、現実の世界が決定論的であるという結論をだすことは本末転倒であって、抽象的なものと具体的なものとの位置を置き違えたものである。またある宇宙モデルに世界時間がない事を理由に「時間の非実在性」を結論するのも同様の誤りである。我々は、世界時間の非存在を理由に、そのモデルを退けるという選択肢を少なくとも同等の権利をもって選ぶことができるからである。¹⁰

¹⁰ ゲーデルは一般相対性理論を宇宙論の問題に適用した場合、世界時間の存在しない特殊解を発見したが、その宇宙モデルの存在を根拠として、時空が実在の根本形式ではないという観念論哲学の立場を支持した。しかし、時間はそれぞれの認識主観の成立と一体不可分であり、そのような主観は、そこにおいて自己が成立する世界を前提する。現実的生起に主観性を認めるプロセス・コスモロジーの立場からすれば、個々の主観が自己自身の絶対過去を二回経験することは論理的に不可能である。したがって、閉じた時間的測地線の存在を許容するモデルに現実的な意味はないと言うべきであろう。Gödel, K., "An Example of a New Type of Cosmological Solutions of Einstein's Field Equations of Gravitation", *Reviews of Modern Physics*, 21, 1949. "A Remark about the Relationship between Relativity Theory and Idealistic philosophy", in *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, pp. 555-562, 1950.