

相対論における同時性と現在

理学研究科 教授 中尾 憲一

概要 一般相対論は特殊相対論と無矛盾な重力の理論であり、数々の実験や観測によって検証されてきた。この理論は宇宙の様々な物理現象を説明するだけでなく、Global Positioning System (GPS) の位置決定精度を実用的なレベルまで高めることに役立っている。相対論では時間と空間をまとめて時空と捉える。そして一般相対論では時空それ自身が変化しうるものと考え、重力を時空の曲がり引き起こす見かけの力として説明する。この理論における同時性と現在について考察する。

キーワード 相対論、同時性、過去・現在・未来



会場の様子

1. 時刻と場所、時間と位置

社会生活を営む上で、時刻と場所という概念はとても大切です。時間割表とキャンパスマップ、教室配置図を持っている学生は、望みの授業を受けることができます。日常生活だけでなく、遠い宇宙で起きる出来事を理解する上でも、時間と空間という概念は極めて重要な役割を担います。

ガリレイやニュートンの世界観では、時間は一様に流れており、各時刻に3次元空間が付随しているイメージです。

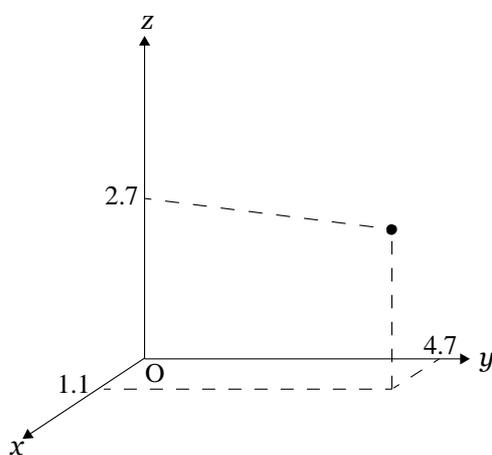


図1 3次元空間と座標系

3次元空間における位置は、そこに張られた座標系 (x, y, z) で指定することができます。例えば「 $x=1.1, y=4.7, z=2.7$ の点」という具合に3次元空間の位置を指定することができます(図1参照)。より即物的に言うと、自分のいる位置を原点 O 、自分の向いている向きを x 軸方向として、そこから前方に1.1、左に4.7、上方に2.7移動して辿り着くことのできる場所ということです。ちなみに3次元の「3」は位置を指定するのに x 座標、 y 座標、 z 座標という3つの座標が必要だということです。この世界観では各時刻に付随する3次元空間の全ての点を、それぞれ同時刻と見做すことができます。

座標系の選び方は無数にあります。中学の理科で「力の働いていない物体は、同じ方向に同じ運動をする(=等速直線運動をする)」と学んだことを覚えているでしょうか。これは慣性の法則と呼ばれています。この法則はどんな座標系でも成り立つわけではなく、慣性系と呼ばれる特別な種類の座標系でのみ成り立ちます。慣性系に対して一定の速度で移動する座標系でも慣性の法則が成り立つので、その座標系もやはり慣性系です。この一定の速度の選び方は、1m/s, 12m/s, 83m/s,...と

無数にあるので、慣性系も無数に存在します。どの慣性系でも、慣性の法則だけでなく、すべての物理法則が同様に成り立ちます。これは相対性原理と呼ばれます。

アインシュタイン以降の世界観では、時間と空間をまとめて時空と捉えます。アインシュタインは先に述べた相対性原理に加えて、**光の速さ（光速）はどんな慣性系でも等しい**という原理を導入しました。これが特殊相対論です。光速不変の原理は一見すると「えっ？」となる主張です。私たちの経験では、地上に静止している電柱を走行中の電車から見ると、電柱は運動しています。そして、電車の速さが変われば電車の中から見た電柱の速さも異なって見えます。物体の速さは慣性系によって異なるのです。しかし、電気と磁気を統一的に説明するマクスウェル理論は光速だけは慣性系に依らないことを予言します。マクスウェル理論において光速 c は真空の誘電率 ϵ_0 と真空の透磁率 μ_0 という 2 つの物理定数を用いて $c = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0} = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ と表されます。光速は物理定数なのです。相対性原理により物理定数はどんな慣性系でも等しいので、光速は不変という結論が得られます。さらに、これまで行われた全ての実験結果は、光速不変の原理と無矛盾です。光速で運動するモノはどんな慣性系で観測しても光速で運動します。そして、この光速不変の原理から、**異なる慣性系では同時刻の 3 次元空間が異なるという結果が導かれます**[1, 2]。こうなると、時間と空間をまとめて、時空と考えることが必要になります。4次元時空です。

特殊相対論によれば、ある慣性系で一瞬でも静止して見える物体は、どのような慣性系で見てもその速さは光速を超えません。それゆえ、**物理的な影響の伝播する速さは光速以下**と仮定します。ちなみに、もし光速より速く伝播するモノ（タキオン粒子と呼ばれることがあります）が存在するならば、それを用いて現在から過去に情報を送ることができます。この仮定は、それはできないという要請です。この仮定も私たちの経験と無矛盾です。

特殊相対論はマクスウェル理論を正しく理解するために導入された理論です。一方、重力の理論であるニュートンの万有引力の法則は、特殊相対論と相性が悪く、特殊相対論が提案されてから、多くの研究者が特殊相対論と無矛盾な重力理論を

模索しました。アインシュタインは特殊相対論を発表してから 10 年後の 1915 年に、特殊相対論と無矛盾な重力理論を発表しました。その理論は一般相対論と名付けられ、今日まで数多くの実験的検証に耐えてきました。特に 2015 年にアメリカの研究グループが成し遂げた史上初の重力波直接検出と 2019 年の巨大ブラックホール極近傍の撮像は、強い重力における一般相対論の予言を、今までに無いレベルで確認した画期的な出来事です。この一般相対論は重力を、**時空が曲がっていることによって生じる見かけの力**として説明します。

特殊相対論では座標系と言え、特別な理由がない限り慣性系を採用します。しかし、重力が存在する状況、すなわち曲がった時空には慣性系は存在しません。それゆえ一般相対論では座標系の選び方はもっと自由で、特殊相対論より一層強い意味で**普遍的な同時性という概念は存在しません**。目的に応じて同時性を決めて良いのです。

ちなみに、時空が曲がっていても、その曲率半径よりもずっと小さな領域に注目すると、そこでは時空の曲がりは無視できて[3]、近似的な慣性系を設定できます。この座標を局所慣性系と呼んでいます。曲がった時空でも局所的には特殊相対論が成り立っているのです。ちなみに一般相対論によれば、我々の生活している地球とその近傍では、時空の曲率半径は 2~3 億 km です。地球の半径は 6.4 千 km くらいで、時空の曲率半径はその 3 万倍程度の長さなので、地球と同じくらいのサイズの領域内では、時空をほぼ平坦と見做すことができます。わずかに曲がっている効果が万有引力として観測されるのですが、万有引力は時間の曲がりだけが見えている現象です。しかし一般相対論は 3 次元空間も曲がっていることを予言します。私たちが日頃お世話になっている **Global Positioning System (GPS)** の精度を実用に足るレベルまで上げるために、この空間の曲がりやが考慮されています。空間の曲がりやを考慮せずに設計された GPS は精度が悪くて、私たちは目的地にたどり着くことができません。一般相対論も我々の生活で重要な役割を担っています。

2. 過去・現在・未来

特殊相対論と一般相対論をまとめて相対論と呼ぶことにします。相対論では時空図と呼ばれる絵を描いて議論を行うことがしばしばあります。図2は縦軸が時間 t に光速 c をかけた ct 、そして水

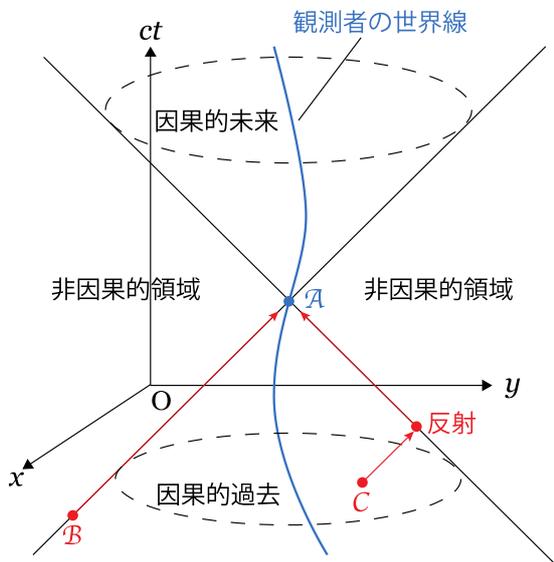


図2 時空図

平方方向に x 軸と y 軸を描いたものです（これら3本の軸に直交する z 軸は、この図には描けないので省略しました）。この図では、光は時間軸から 45° 傾いた直線に沿って移動します[4]。光は過去から未来（この図では下方から上方）に伝播します。光が伝播する向きが時間の進む向きを決めています。まだ説明していませんでしたが、質量が正の物体は光速未満の速さで移動します。光速で移動できるのは質量がゼロの場合だけです。それゆえ、質量が正の物体は、図2中の t 軸となす角度が 45° より小さい曲線に沿って時空の中を移動します。時空中の物体の軌跡を**世界線**と呼んでいます。図2に描かれている青い曲線は、ある一人の観測者の世界線です。

相対論における独特な言葉使いですが、時空の点を**事象**と呼びます。別に何か出来事が起こってなくてもそう呼ぶのです。ここで、観測者の世界線上の事象Aに注目しましょう。既に述べたとおり、物理的な影響が伝播する速さは光速を超えないので、事象Aから影響が及ぶ領域は、図2中の事象Aを頂点とする上に開いた円錐の中だけです。この円錐は事象Aから放射される光の世界線からなるので、**光円錐**と呼ばれます。特に上に開いたものを**未来の光円錐**と呼び、それとその内部

を**事象Aの因果的未来**と呼んでいます。一方、事象Aに対して物理的な影響を与えうる領域は下に開いた円錐（事象Aに到達する光の世界線からなり、過去の光円錐と呼ばれる）上とその内部だけです。この領域を**事象Aの因果的過去**と呼んでいます。それ以外の領域は事象Aにとっての**非因果的領域**と呼びます。

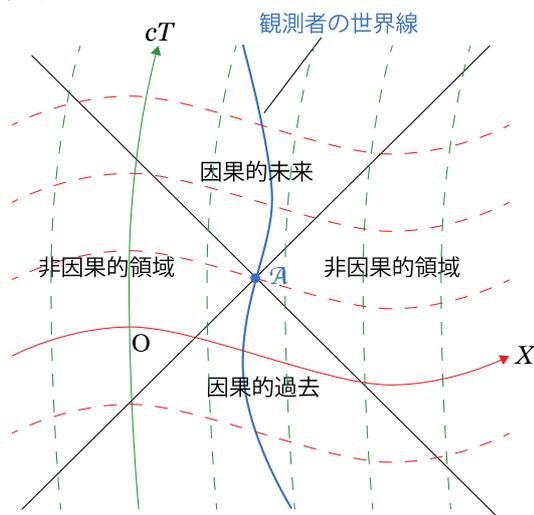


図3 他の座標の例

時間座標という観点からは、事象Aの非因果的領域内のどの事象も、事象Aと同時刻の関係にあると見做すことができます。図3は図2とは異なる時間座標 T と空間座標 X の例です（見やすいように、他の2つの空間座標は省略しました）。 T 軸と X 軸が曲線ということに驚かれるかもしれませんが、一般相対論の研究では普通のことです。赤の曲線が同一時刻（ T が一定）の空間を表し、緑の曲線では X が一定の値をとります。他にも無数に時間座標の選び方（同一時刻の空間の選び方）があります。これが先ほど述べた、一般相対論には普遍的な同時性が存在しないという意味です。しかしながら、これは座標の選び方の問題です。

日常生活で私たちが、2つの出来事が同時刻に起きたと見做すのはどんなときかというと、それらの出来事が同時に観測されたときではないでしょうか。ここでは光で観測することにしましょう。この観点から「同時刻」を定義すると、図2中の観測者が事象Aと同時刻に起きたと見做すのは、事象Aを頂点とする過去の光円錐上で起きた出来事です。例えば、図2では過去の光円錐上の事象Bから放射された光（矢印付きの赤い直線）は事象Aで観測者に届きますから、事象Bは事象Aと同時刻と見做されます。また、ある事象から放射

された光が反射されて事象 A に届いたときも、その出来事はやはり事象 A と同時刻と見做されるでしょう（図 2 の事象 C）。そうすると過去の光円錐とその内部、すなわち事象 A の因果的過去で起きた出来事は事象 A と同時刻ということになります。しかし、この主張に納得できる人は、どれだけいるのでしょうか。

3. 共通の「現在」という感覚

アカデミックカフェではお話しなかった内容を少し付け加えさせていただきます。

私たちの日常感覚では、「現在」という同時刻の瞬間があって、その「現在」を境にして過去と未来があります。一方、これまで説明してきたように、相対論では同時刻には任意性があるので、日常感覚の現在・過去・未来は、普遍的な意味を持ちません。相対論に基づいて考えると、現在・過去・未来という捉え方がなぜ生まれるのかが、むしろ非自明です。アメリカの物理学者 Hartle がこの問題について論じています[5]。前節では、一人の観測者にとって同時刻と見做すことのできる領域について述べましたが、ここでは「現在」という感覚を共有するための必要条件について考えてみましょう。

遠い未来には人類が太陽系の外の進出し、銀河系全体に人類社会が広がっていると想像してみましょう。その頃には、銀河系の中心近くに地球と似たような環境の惑星 A が見つかると、そこに入植した人類が社会生活を営んでいるかもしれません。地球と惑星 A の距離はほぼ 3 万光年（光が到達するのに 3 万年かかる距離）です。惑星 A でもしばしば地震が起きます。それゆえ、ある場所で地震が発生したことを惑星 A 全体に光速で連絡するシステムが構築されています。その連絡を受けた人々すべてが、地震が起きたことをほぼリアルタイムで知ることができ、震源からある程度の距離にいる場合は、地震波が到来する前に何らかの対処ができます。また、連絡を受けた人々は惑星 A 上の他の人々に地震が起きたことを、やはりほぼ一瞬にして伝えることができます。このように、惑星 A では地震が起きた「現在」という感覚を共有できます。一方、惑星 A で起きた地震の情報を受け取った地球人たちは心配して、惑星 A の住人に被害状況を尋ねるでしょう。しかし、その安否確認の連絡を惑星 A の住人が受け取るのは、地震

発生から約 6 万年後です。銀河系全体で「現在」という感覚を共有するのは絶望的です。

この思考実験は、「現在」という感覚を共有できる領域のサイズには上限があることを示唆しています。厳密に言うところのサイズは、連絡を取り合う人々の運動状態や時空の曲率にも依存するのですが、問題の本質を理解しやすいように、ここではそれらの効果を見捨てた大雑把な話をします。ある領域のサイズを L と記しましょう。その領域内のもっとも遠い 2 点間では、最速の光速で連絡を取り合うのに $2L/c$ 程度の時間がかかります。そうすると、共有される“現在”という感覚には $2L/c$ 程度の時間幅が存在すると言って良いでしょう。人々が感じとることのできる最小の時間間隔に比べてこの時間幅 $2L/c$ が大きい場合は、共有される現在が“瞬間”とは見做せなくなります。例えば、地球は半周の長さが 2 万 km ですから、それを L とすると、 $2L/c$ は 0.13 秒です。地球上で共有される現在は、私たちの日常感覚では瞬間と言って良いでしょう。月は地球から 38 万キロ離れており、 $2L/c$ は 2.5 秒なので、この場合の共有される現在を瞬間と言えるのかどうかは微妙です。火星に至っては地球から 7.5 千万 km 以上離れていますから、 $2L/c$ は 500 秒（6 分 20 秒）を超えます。この共有される現在を私たちは瞬間と見做すことができるのでしょうか。地球と火星を含む領域において「現在」という感覚を共有することは、難しいと思います。

上述の議論は Hartle の論文に書かれている内容の一部を参考にしたのですが、Hartle はこのような議論だけでなく、様々な観点から「現在」を論じていますから、興味のある方は参考文献[5]をご覧ください。

4. 最後に

現在主義[1]において「存在とは現在である」と定義される「現在」は、ここで紹介した物理学に基づいた「現在」とは異なると思います。しかし、現在主義の「現在」に対応する概念が、物理学の枠組みにおいて何を意味するのかは、興味深い問題だと思います。

このアカデミック・カフェでは、日頃接する機会のない哲学者の佐金先生と議論する機会を得て、改めて「時間」と「現在」について考えることができたことはとても有意義でした。このような機

会を与えてくださった木下勇先生（URA センター特任教授）と鳥生先生（大学教育研究センターおよびURA センター特任教授）に感謝します。また、当日の司会をご担当くださった橋本文彦副学長の明快な導入とまとめは、このアカデミックカフェを学術的により意義あるものにしていただきました。澤田弥生氏と武藤多美子氏のサポートには心から感謝します。そして、Hartle の論文を通して、このテーマをより深く考える手助けをくださった佐藤文隆先生（京都大学名誉教授）に感謝します。

参考文献

- [1] 佐金武(2020) “形而上学における同時性と現在”, アカデミックカフェ抄録.
- [2] Schutz, B.F. 著, 江里口良治・二間瀬敏治 共訳(2010)『相対論入門』, 丸善株式会社.
- [3] R=300 とか R=500 と書かれている道路標識があります。この数値は道路の曲率半径を表しています。曲率半径は道路の曲がり具合を表す幾何学量で、例えば、R=500 の道路からはみ出さずに走るためには、半径 500m の円の上を走るときと同じだけハンドルを切る必要があるという意味です。この道路をハンドルを全く切らずに進むと、そのうち道路から飛び出てしまいますが、10m 進んだときに道路の中心からどれだけずれるかを計算してみると、10cm 程度だということがわかります。10m 以下の区間を運転するだけなら道路はほぼ真っ直ぐとみなしても大して問題になりません。それと同じ考え方です。
- [4] 時空が曲がっている場合、この座標系は慣性系ではありません。このように光が伝播するように見える座標を選んだと考えてください。注目している領域が大き過ぎなければ、このような座標は存在します。
- [5] Hartle, J.B. (2005) “Physics of now”, *American Journal of Physics* 73, 101-109.

発表者紹介

大阪市立大学大学院理学研究科教授。広島大学大学院理学研究科博士課程後期修了。理学博士。専門は理論物理学、特に強い重力場における物理現象（宇宙論、ブラックホール、時空特異点など）の研究を行っている。