

## 「特殊相対性理論の歴史 (前半, ウィキペディアより)」の日本語訳

黒月樹人 (KINOHITO KULOTSUKI), treeman9621.com

### 特殊相対性理論の歴史 01 ニュートン

アイザック・ニュートンは絶対空間に関する彼の理論を基礎づけたが、彼はまた、ガリレオ・ガリレイの相対性原理も付け加えた。このことは、互いに対して相対的に一様な動きをする、すべての観測者が同等であるということと、任意の観測者に対して、動きの絶対的な状態のせいにはすることができないということを主張していた。19世紀の間中、エーテル理論は、特に、ジェームズ・クラーク・マクスウェルによって、その形式の中に与えられたものとして、広範に受け入れられた。マクスウェルによれば、すべての光学現象と電気現象は、媒体の中で伝播する。かくして、エーテルに相対する、絶対的な動きを決める可能性があるように思えるが、ガリレオの原理に反することにもなる。これらの実験とそれらの失敗により、ヘンドリック・ローレンツによって、マクスウェルとローレンツの電気力学の発展が導かれた。ヘンリ・ポアンカレは、自然の一般法則が電気力学と重力を含むものとして、相対性原理を主張することにより、このことを、形式的に完全なものにした。アルバート・アインシュタインは、ローレンツ電気力学を完全に再解釈し、時空の概念を変換することにより、結局は、特殊相対性理論 (SR) を考案して、そして、エーテルを無視した。このことは、一般相対性理論に対する道筋を明らかにする。後続するヘルマン・ミンコフスキーの研究が相対論的な場理論の基礎を生み出す。

#### ◇エーテルから相対性原理へ

1816年、オーガスチン・ジーン・フレネルは、光が横波として伝播し、物質がエーテルの中を通過するとき、ある係数で、部分的にエーテルを引きずるという、静止エーテル理論を発展させた。この仮定に基づいて、フレネルは、光行差や、多くの光学現象を説明することができた。1845年、ジョージ・ガブリエル・ストークスは、フレネルとは違って、物質がエーテルを完全に引きずるような抵抗があると主張した。彼のモデルでは、エーテルは、超高周波数で振動し、低速度の状態で流体であるような、松脂 (pine pitch) のように硬いものであるようだ。そうして、地球はそれの中をかなり自由に動くことができるが、そのエーテルは、光の進行を助けるためには、じゅうぶんな硬さをもつものであるという。1851年に、双方の理論が考慮され、フレネルの理論が望まれたが、その理由は、アルマンド・ヒッポライト・ルイス・フィゾーが、動く流体の中で光速度を測定するという実験を行って、フレネルの引きずり係数 (随伴係数) を確定したからである。1861年から1864年にかけて、ジェームズ・クラーク・マクスウェルは、マクスウェルの方程式と名づけられた、電気と磁気とインダクタンスの状況における、一組の方程式群を発展させた。マクス

ウェルは、光は実際、同じエーテル媒体の中での、電磁気放射という波動であり、それが電磁現象の原因であることを、最初に提案したのである。

## 特殊相対性理論の歴史 02 マイケルソン

1881年、アルバート・エイブラハム・マイケルソンは、干渉計を使用して、フレネルの理論において期待されるように、地球とエーテル（エーテル風）の相対的な動きについての測定を試みた。しかしながら、マイケルソンは、相対的な動きを決定することができなかったため、その結果を、ストークスの論文の立証として解釈した。1881年、J.J.トンプソンは、マクスウェルの理論を彼なりに発展させて、電荷された物体は、電荷されていない物体に比べて、動きの中で集まりにくいことを認めた。静電気場は、物体に対して、力学的な質量のほかに、「電磁気的な質量」を加えるようなものとして振舞う。すなわち、トンプソンによれば、電磁気エネルギーは、ある確かな質量に対応するのである。1886年にヘンドリック・ローレンツは、マイケルソンの1881年の実験の計算が間違っていて、その実験が決定的なものではないことを、示した。マイケルソン自身は、このことを認めた。ローレンツはまた、ストークスの理論にあるような、エーテルの完全な抵抗には、自己矛盾があることも示した。1886年にマイケルソンとエドワード・モーリーは、流動する液体の中での、フレネルの引きずり係数を測定したという、フィゾーの実験を調べるために、ある実験を行った。その状況において、フレネルの理論が非常に正確に確認された。マイケルソンの目下のところの意見としては、エーテルがほとんど静止していると確認されたということである。1887年にマイケルソンとモーリーは、再試行したマイケルソンの1881年の実験の結果を出版した。現在有名なマイケルソンとモーリーの実験は、期待された肯定的な結果を生み出してはなくて、フレネルの静止エーテルについて語った、1886年のマイケルソンとモーリーの実験と比べ、はっきりとしたものであった。しかしながら、完全引きずりエーテルというストークスの代案は、エーテルが正当なもの認められにくいものであるが、これはローレンツの1886年の論文に由来することである。1887年ウォルデマール・ボイトは、非圧縮弾性媒体の中で伝播する波に対してのドップラー効果を調べ、ローレンツ変換に良く似た、相対論的な変換関係を、最初に導いた。ボイトは対応する偏微分方程式から始めた。ボイトは、その解を波動の表現と仮定して、座標の回転と時間の推移に対して説明する、ガリレオ変換の最も一般的な形式の議論へと組み込んだ。相対論的な変換は、ある特別な場合として関係し、ボイトは偏微分波動方程式に対する、ガリレオ変換された波動表現を対象として、それらを導いた。ボイトは、(電磁波としての)縦波に対して有効となる変換関係と、横波に対して有効となる変換関係を、厳密に区別した。ボイトの変換は、引き続くマイケルソンとモーリーの実験の否定的な結果を予測したが、その方程式は、対称的ではなかった。しかしながら、ボイトの研究は、彼の同時代の人々からは完全に無視された。1889年オリバー・ヘビサイドは、トンプソンの1881年の研究を続け、物体の質量が増加することを認め、それが電荷によって増加されるときだけな

く、より大きな速度になったための、電磁気質量の増加ということもあると考えた。さらに加えてヘビサイドは、静電気の場合、光の速度で、状態を物理的に決めるのではないということを通じて、(ヘビサイド楕円体の) 動きの方向において収縮することを決定づけた。1889年に、ヘビサイドに続いて、ジョージ・フィッツジェラルドは、物質的な物体もまた、マイケルソンとモーリーの実験の否定的な結果を説明することのできる、動きの方向において収縮すること(長さの短縮)を示した。1890年のこと、ハインリッヒ・ヘルツが、1887年に電磁波の存在を証明したことがあるが、その後1890年に、ヘルツは(そして、ヘルツと同じようにヘビサイドも)マクスウェルの理論をさらに発展させた。その「マクスウェル-ヘルツ」方程式は、電気力学のさらなる発展に対して、重要な基礎を、引き続いて形成した。ヘルツは、ストークスのように、実験とは相容れないことではあるが、物体がエーテルを、まったくいっしょに運ぶということを仮定した。20世紀の初頭、ヘルツの理論もまた、実験によって直接的に証明され、ローレンツ変換によって置き換えられた。ヘルツは、力学的な衝撃と接触作用に対して、すべての電磁気過程が導かれるべきであるということに由来する、「力学的な世界観」の、最後の支持者の一人であった。

### 特殊相対性理論の歴史 03 ローレンツ

1892年、ローレンツは、電磁波の源として電子の存在を仮定し、マクスウェル-ローレンツ方程式によって、マクスウェル-ヘルツ方程式を置き換えることにより、ローレンツ-エーテル/電子理論の基礎を設けた。ローレンツのモデルにおいては、エーテルは完全に動かないが、フレネルの理論と比較して、エーテルは物質によって部分的に引きずられることもない。ローレンツは、エーテルの力学的な性質と電磁過程については、何も言明していないが、逆もまた真実で、ローレンツは、電磁気の過程によって、力学的な過程を説明しようと試み、そのようなわけで、抽象的な電磁エーテルを創造した。ローレンツの理論の骨子において、ローレンツは、ヘビサイドのように、静電磁場の収縮を計算した。同じ年に、ローレンツは、フィッツジェラルドからはまったく独自に、マイケルソン-モーリーの実験を説明するために、長さの収縮を提案した。ありそうなことだということ的印象づけるため、静電磁場収縮のたとえを、ローレンツは述べている。しかしながら、ローレンツでさえ、それが必要な理由であるわけではなく、純粋な、この目的のためだけの仮説として、長さの収縮が、依然として残っているということを確認した。1895年にローレンツは、 $v/c$ のオーダーの項のために、「対応する状態の理論」を導入した。この理論は、(エーテルに対して相対的に)運動している観測者が、観測者の「仮想の」場において、同じ観測者が、その観測者の「現実の」場で静止している観測者となるように、しているということを述べている。その理論の重要な部分は、ローレンツ変換への道を整え、ポイトとは独立に導入した、局所時間  $t' = t - vx/c^2$  にある。この概念のおかげで、ローレンツは、光行差やドップラー効果や、ヒッポライト・フィゾーによる、運動する液体と静止している液体のいずれの中でも成立するという、フレネルの引きずり係数(随伴係数)の測定を、説

明することができた。しかしながら、ローレンツの局所時間は、時計によって測定される時間ではなく、補助的な数学の道具のみによって決められる時間であった。しかしながら、ローレンツは、彼の理論が作用反作用の原理に反するという事実を認めており、なぜかという、エーテルが物質に作用するものの、物質は動かないエーテルに作用することができないからです。1895年、ヘンリ・ポアンカレは、反作用原理の破綻を除き、ローレンツの理論が、電気力学のすべての理論の中で、欠陥が最も少ないものであると判断した。なぜならば、他の理論に比べ、ローレンツの理論は、フィゾーの実験や電気や磁気の保存を説明することができるからである。ローレンツが、 $v/c$  に対する最初のオーダーの実験へと、否定的な（光学の）エーテルが流れてゆくのを説明しようと望んだだけなのに対して、（マイケルソンモーリーの実験に基づいた）ポアンカレは、物質の相対的な動きを観察することが可能なだけであり、物質の絶対的な動きや、エーテルに対する相対的な動きは観察できないという意見を持っていた。1897年、ヨセフ・レーマーは、ローレンツのモデルと非常に良く似た、あるモデルを生み出した。しかしながら、レーマーは、さらなる段階へと進み、二次のオーダーの項のための、ローレンツ変換へと拡張した。そのようなわけで、レーマーは、ローレンツ変換を、今日用いられている、代数的な等価形式の中へと押し込んだ最初の人であった。レーマーは、そのことから長さの短縮が導かれうるだけでなく、電子軌道に対しての、ある種の時間の遅れも、レーマーが計算したことの根拠であることに気づいた。レーマーは、1900年に、彼の考察を特殊化した。1899年に、ローレンツは、二次オーダーの項に対して、彼の変換を拡張し、(数学的な) 時間遅延効果もまた、記した。トンプソンによって認識された、質量の速度依存性の統合は、ローレンツの理論にとって、特別に重要なことである。ローレンツは、質量が速度によって変わるだけではなく、方向に関しても依存していることに気づき、エイブラハムが後に「縦の」質量や「横の」質量と呼んだものを、ローレンツは導入した。(横の質量は、後に相対論的質量と呼ばれるものに対応している。) 1898年、19世紀の後半、電気信号によって同調された、世界規模の時計のネットワークを発展させため、多くの試みがあった。その場合、光の有限な伝播速度ということもまた、考慮されなければならないことであった。それで、ヘンリ・ポアンカレは、この過程の、ある重要な結果を描き、天文学者たちが、光の速度を決めるときに、光は一定の速度をもち、かつ、その速度があらゆる方向において同じであると、単純に仮定していることを説明した。この仮説を除いてしまったら、オーレ・ルーマー (Ole Rømer) が木星の衛星の観測に基づいて行ったような、天文学の観察から、光の速度について言及するという事は、不可能になってしまうだろう。ポアンカレはまた、空間的に離れた事象の間の同時性を決めるときに、光の伝播速度を、習慣的に（そして、実際に、たびたび）用いることができることも、記した。ポアンカレは、次のように言うことによって結論づけた。「二つの事象の同時性、もしくは、それらの継続順、あるいは、二つの継続時間の同等性などは、自然法則が、可能な限り単純なものであるかもしれないということを表

明するため、そのように定義されたものである。すなわち、これらの規則のすべて、これらの定義のすべては、無意識の便宜主義の成果に過ぎないのである。」

## 特殊相対性理論の歴史 04 ポアンカレ

1900年、1895年と同じように、ポアンカレは、マイケルソン-モーリーのものと似た実験において、エーテルに対する関係における、物質の絶対的な動き、あるいは、物質の相対的な動きを調べることは不可能であると論じた。ポアンカレは、このことを「相対運動の原理」と呼んだ。同じ年に、ポアンカレは、ローレンツの局所時間を、光の信号に基づく、同期化の手続きの結果として、解釈した。ポアンカレは、エーテルの中で運動している、二人の観測者 A と B が、光学的な信号で、彼らの時計を同期させると、仮定した。なぜなら、観測者たちは、観測者自身が静止していると信じており、観測者たちは、観測者たちの時計が同期しているかどうかを調べるため、信号の伝達時間と、そのときの、観察者の観察の、相互関係のみを考えなければならないからである。しかしながら、エーテルの中で静止している観測者の観点から見ると、それらの時計は同期しておらず、そして、それらの時計は局所時間  $t' = t - vx/c^2$  を示している。しかし、なぜなら、運動している観測者たちは、観測者たちの運動について何も知らず、観測者たちは、このことを認識していないからである。そのようなわけで、ローレンツとは違って、ポアンカレが定義した局所時間は測定可能であり、時計によって示されるものである。同じ研究においてポアンカレは、電磁気エネルギーが、 $m = E/c^2$  (or  $E = mc^2$ ) の質量の、質量密度をもつ、架空の流体のように振る舞うということ認め、架空の電磁気運動量をも、ポアンカレは定義した。しかしながら、ポアンカレは放射のパラドックスに迷い込んだが、これについては、1905年にアインシュタインが完全に説明した。1900年、ウィルヘルム・ウィーン (Wilhelm Wien) は、(トンプソンとジョージ・フレデリック・チャールズ・シーレ (George Frederick Charles Searle) の各研究に引き続いて) 完全な質量は電磁気に由来するもので、質量とエネルギーの関係についての式は  $m = (4/3)E/c^2$  であると仮定した。このことは、自然界のすべての力が電磁気力 (電磁気界の視点) であるという背景状況において、式へとまとめられた。ウィーンは、重力も電磁効果であると仮定したとき、電磁エネルギーや慣性質量と、重力質量とが、比例関係にあらねばならないと、主張した。1900年、エミール・コーン (Emil Chon) は、代りの電気力学を生み出し、その中でコーンは、(少なくとも、以前の形式においての) エーテルの存在を放棄した、最初の一人として、エルンスト・マッハ (Ernst Mach) のように、代りの参照系として、固定された複数の星を用いようとした。(異なる方向における、異なる光速度のように) 内的な欠陥を理由として、コーンの理論は、ローレンツの理論やアインシュタインの理論によって、その座を奪われた。メニヘルツ・パラギイ (Menyhért Palágyi) は、哲学的なモデルを提示し、それによれば、空間と時間は、ある種の「時空」の、二つの側面のみをもつものである。パラギイは、時間を架空の四番目の次元として用い、それについて、パラギイは、それに、その形式 (そこでは、 $i = \sqrt{-1}$ ) を、

すでに与えていた。しかしながら、パラギイの哲学とローレンツの電気力学との間に、関連は何も存在しない。なぜかという、ローレンツの局所時間とは違って、パラギイの時間座標は、光速度と関係していないからである。パラギイは、すでに存在している  $n$  次元空間の構成物や非ユークリッド幾何とは、何の関係もないとして、これらも拒絶した。(特徴的なことに、パラギイは、非ユークリッド幾何の精神の中で発達した、ミンコフスキーやアインシュタインの時空構造も、後に拒否していた。) 1901年～1903年のことであるが、ウォルター・カウフマン (Walter Kaufmann) は、質量が速度に依存することを、最初に確信した。1902年、マックス・エイブラハム (Max Abraham) は、カウフマンの実験に対する説明を提出し、ローレンツに引き続いて、エイブラハムは、縦の質量と横の質量という名称を生み出した。ローレンツと比較して、エイブラハムは収縮仮説を信じていず、それゆえ、エイブラハムの質量用語は、ローレンツの用語と違っている。カウフマンの実験は、しかしながら、ローレンツ理論とエイブラハムのものとを十分に区別する価値があるものではない。ポアンカレに引き続いて、エイブラハムは、「電磁気運動量」の概念を導入したが、そこでは、ポアンカレとは対照的に、エイブラハムは、 $E/c^2$  と比例した、物理学的に独立した、現実の存在として、考慮している。1902年、ポアンカレは、哲学的かつ大衆的な科学本である「科学と仮説」を出版したが、そこには、次のようなことが含まれていた。空間と時間と同時性の相対性に関する、哲学的な評価。相対性原理の破棄は、決して探求されることができないという、意見。エーテルが存在しないことがありうること。非ユークリッド幾何に関する、多くの注意点。1904年5月、ローレンツは、電気力学のローレンツ共変形式を生み出すのに、あと一歩のところに来ていた。ウィーンやエイブラハムのように、ローレンツは、力学的な質量ではなく、電磁気質量のみが存在すると論じた。他の重要な一歩は、ローレンツ変換が非電気力に対しても変わるべきであるという仮説である。1904年、コーンは、ローレンツの研究に続いて、(ポアンカレのように) 局所時間が、数学的な構築物であるだけでなく、光の信号によって、動く時計を同期させることの結果であることに気づいた。コーンは、このことが光学現象に対して有効なだけでなく、機械的な時計は現実の時間を示すだろうと信じた。エイブラハムも、収縮された電子を論じたローレンツ理論と、世界の電磁気概念とが、折り合うことはないと批判したが、その理由は、物質の安定性を保証するために、非電気力が必要とされるからである。かくして、(エイブラハムの理論と互換である) 世界の電磁気概念と、(ローレンツ変換と互換である) 相対性原理の、どちらが正しいのかという、問題が生じた。1904年、セントルイスにおける9月の講義の中で、ポアンカレは、(ガリレオの相対性原理の修正と、ローレンツの対応状態の理論において) 次の原理を定義した。すなわち、相対性原理のことであるが、それによれば、物理現象の法則群は、一様な移動速度のもとで、その動きに沿って運ばれている観測者に対するように、静止している観測者に対しても、同じでなければならないので、そのような動きの中で、それに沿って私たちが運ばれているかどうかを決めるということについて、何も持つことができず、私たちは何も手段を持たない。ポアンカレはまた、彼の、

時計を同期させる方法も特殊化し、すべての観測者に対して、光速度を超える速度が生じないという状況で、「新しい方法」もしくは「新しい力学」の可能性を説明した。しかしながら、ポアンカレは、相対性原理、ニュートンの作用反作用、質量保存、エネルギーの保存、これらを完全に成り立たせることはなく、ある実験によって脅かされさえすると、批判的に書き留めている。1904年、フリードリヒ・ハッセノール (Friedrich Hasenöhr) は、(ハッセノールが明白な質量と呼ぶ) 物体の質量部分が、空洞の周りで弾んでいる放射として、考えうることを示唆した。放射の明白な質量は温度に依存しているが、(あらゆる熱せられた物体は放射を出すから) そのエネルギーに比例しており、ハッセノールは、 $m = (8/3)E/c^2$  であると最初に結論づけた。しかしながら、エイブラハムとハッセノール自身は、1905年に、その結果を  $m = (4/3)E/c^2$  へと変更したが、それは静止状態にある物体に対する電磁気質量と同じ値である。しかしながら、ハッセノールは、このエネルギーと明白な質量の関係は、物体が放射している限り、すなわち、物体の温度が絶対0度以上であれば、保たれると述べた。1905年6月5日、ヘンリ・ポアンカレは、ローレンツの研究に存在するギャップを打ち切る、研究の概要を提出した。(この短い論文は、1906年1月に出版された、より完全な研究の結果を含んでいた。) ポアンカレは、電磁気学のローレンツ変換が、完全なローレンツ共変ではないことを示した。それゆえ、ポアンカレは、変換群の特徴を指摘し、電荷密度と電流密度の変換に対する、(その変換においては、相対論的な速度加算式が暗に含まれ、ポアンカレは、ローレンツ宛の手紙の中で、5月に、さらに詳しく述べた) ローレンツの複数の式を正した。ポアンカレは、「ローレンツ変換」という用語を最初に使用し、今日用いられている対称形式に、ポアンカレはその用語を当てはめた。ポアンカレは、電子の安定性を確かにするためと、長さの収縮を説明するために、非電氣的な結合力を導入した。ポアンカレはまた、非電氣力に対する、ローレンツ不変性の有効性を拡張することによって、重力のローレンツ不変モデルの概要も構成した。(2008.08.04)