量子論・古典論の統一はできるか
第I部　光行差とノード流れの場の理論　[序章]

松原邦彦

2020年1月6日

目 次

第 1 章　序章 **2**
1.1　古典力学と量子力学の存在論の衝突 2
1.2　量子論と古典論の統一はなぜ必要か 4
1.3　アインシュタインの時空間のとらえ方 5
1.4　存在確定の考え方による時空間の理論 5

第1章　序章

1.1　古典力学と量子力学の存在論の衝突

物質の究極の源とその入れ物である時間と空間の性質について見きわめようとする物理学は古代ギリシャの自然哲学の時代より始まった。天体運動の観測から天動説、コペルニクスの地動説とたどり、ガリレイおよびニュートンを経て時空の一つの性質が解明されるごとにその世界観を一変させてきた。またファラデー、マックスウエルなどにより電磁気現象が解明され、光の正体が明らかになった。２０世紀初頭のアインシュタインの相対性理論は時空間の概念に大きな変革をもたらした。その後、量子論の展開と素粒子論の発達を経て、現在は宇宙物理学が展開されている。

このような理論物理学の分野では、一般的な公理を設定し、それらに基づき具体的事象ついて予測計算し、実験や観測を行って、公理から導かれる理論の構築を行うことで自然界の奥底を見きわめようとする努力が続けられている。この分野では大きく分けて２つの自然観がその理論構築の根底をなしている。一つはアインシュタインの時空間のとらえ方であり、もう一つは量子論的な自然界のとらえ方である。物理の世界を理解するには、連続性と因果律ををもとに組み立てられている古典力学と、非連続的構造をもつ量子力学とを取り込まなければならない。

ところがこの２つの自然界の記述の仕方とその世界観は相容れない基本的な理論構造をもっている。一般相対性理論を含む古典的理論が時空はなめらかに湾曲する幾何学的構造を有するのに対して、量子力学を主体とする量子理論ではなめらかな幾何学的構造はなくなり、量子的揺らぎ構造を有する。前者では因果律は厳密に保たれるのに対して後者では因果律は曖昧である。そして両者の時空構造をつなぐ架け橋となる理論を持たない所から理論構造の上で衝突が存在する。

古典的理論は人類が原始時代から培ってきた自然感と体験を通して蓄積してきた知識をもとに、いくつかのパラダイムの変革を経て形づくられてきたものである。我々が生まれたときから備える自然の認識方法、つまり日常生活の中で道具を使ったり、汽車や自動車を作ったり、山や川の産物や、そこで起こる事象などを見聞きして培った認識方法で理解できるように組み立てられている。そこでは常に事物は因果関係、つまりある事象の発生には必ず原因となる事象があることを前提にして、その過程を明らかにすることが物理の探求であった。天動説から地動説へ移っても、またニュートン力学が現れても、さらに相対性理論が現れても、それは変わらなかった。相対性理論ではそれまでの直感的な時間空間の認識では理解が難しいものではあったが、ひとたび時空間の構造を理解すれば、人間が本来持っている自然界の認識のしかたと矛盾することはなく、自然界のより深い認識へと進むことができるものであった。

しかし、量子力学においては日常生活の中で培った事物の認識方法では把握できない概念がいくつか現れる。その代表的な例が波動と粒子の相補性であり、不確定性である。エネルギー保存をはじめ、いくつかの保存則などは大局的には両立しているものの、極微の世界に入ると存在の確定すらままならず、従来の存在論と論理的衝突が起こるのである。ところがそこで組み立てられた数学的構造から予測される事象は実験の

結果とよく一致する。そこで我々は思考のいくつかの段階でこれらの論理を本心から理解することなしに考え方を切り替えて使用しなければならないのである。

これは２０世紀初頭に始まった量子論の展開と共に深刻化してきた。量子理論の基礎となる理論の提起をした物理学者たちはそれらを平然と提示したわけではない。彼らは例外なく古典力学との整合性を求めて悪戦苦闘している。プランクは黒体輻射を古典論によって説明しようとした。このとき光の放出や吸収に際して現れる不連続性を完全に認めるのをひどくためらい、自分の発見を認めたがらなかった。1905 年にアインシュタインが提示した光量子の考えは、波動という連続性をもつ事象を不連続性をもつ粒子という古典的な像に還元しようとする、一連の筋書きの追求から生まれたものであった。

ハイゼンベルクは 1925 年、直接観測される物理量のみが実在するという概念によって、特殊相対性理論と同じようなブレークスルーを狙ってマトリクス力学を考え出した。しかしそれは結果的にいくつかの古典的存在論、基本的な要素はすべて特定の時間と場所に存在する、という概念を犠牲にせざるを得なかった。彼は自らが発見した運動量と位置の交換関係の意味を、古典力学で訓練を受けた科学者たちに説明するため、古典論の言葉を使って視覚化するにはどうすればよいかを考えていた。そうするうちに、かの不確定性関係の式に到達した。シュレーディンガーは 1926 年、粒子という不連続体の持つ運動量とエネルギーを量子化という手続きを逆に使って、古典的な連続関数の操作で置き換えることを狙った。そしてかの有名な波動方程式に到達した。ところがその波動関数の物理的解釈をめぐって様々な議論を呼ぶことになった。シュレーディンガーは「波束」が古典力学系の 1 個の点と同じ法則に従うことを示せると考え、様々な試みをしたがうまく行かなかった。ボルンは波動関数を確率の波と解釈したが、シュレーディンガーはこの解釈を受け入れることはなかった。ド・ブロイは、粒子にはこれを先導する波動が付属しており、それに導かれて粒子が運動するという「パイロット波理論」を主張したが、ほとんどの科学者はこれを受け入れなかった。

アインシュタインは量子力学が完成していくにつれて、古典的力学の実在論との乖離に批判的となっていった。1935 年、いわゆる EPR 問題を提起して量子力学の論理的不完全性を指摘し、完全な記述が可能であるような理論があり得るとした。量子力学の波動関数による記述が不完全である、との指摘にはボーアが反論したが、この問題はその後「量子もつれ」として局所的な隠れた変数理論の可否の問題に発展した。1952 年、量子力学における実在論を回復しようとする試みがボームによって提起された。彼は「パイロット波理論」に基づいて測定理論も含むように拡張し、確定論的な量子論を構成した。しかしそこで導入されている量子ポテンシャルなる量は非局所的な変数で、一般的に物理学者の受け入れるところとはならなかった。ベルは 1964 年、何らかの隠れた変数によって決定的な理論に支配されているならアインシュタインが指摘する、もつれた量子の状態を現実の実験によって検証することができることを示した。1982 年、アスペは光子を使ってベルの提唱する検証実験を行い、隠れた変数によって決定論的な量子力学を作っても事実に合わないことを検証した。

1 世紀を超える時代にわたって多くの科学者がその理論的衝突の問題に関わってきたが、両者の論理の溝は深まることはあっても埋め合わされることはなかった。現在の科学者は時空の大きさが極微の世界を量子の世界とし、巨視的な世界を通常の古典的世界として原理を使い分けている。しかしその境界は実に曖昧で、巨視的世界で量子の性格を持った粒子の振る舞いが消えるわけではない。時空の大きさが巨視の世界に移行するにしたがって、どこかで適用されなくなるはずであるが、その境界を明確に定めることはできない。

1.2　量子論と古典論の統一はなぜ必要か

量子論と古典論はなぜ統一できないまま進行してきたのであろうか。ここで数学的な表現形式のことを言っているのではなく、また万物を一つの方程式で表すことを主張しているのでもない。力学の表現形式はそれぞれの適用範囲内で独自の形式をとって構わないし、それが自然の姿である。問題はそれらの基本となる原理についてであり、その根拠とする論理構造について言及しているのである。この宇宙ははたして相反する法則を原理として包含するであろうか。多くの科学者は量子力学の公理を「それがまさに自然界の本質である」と捉えることで自然を理解するというが、ではそのような相異なる法則をこの世界が備えるという一般的公理はいかなるものであろうか。ある人はいわゆるボーアの相補性原理がそれであるというかもしれない。物には表と裏があるように 2 面性を備えるのが常だと。しかし表と裏、あるいは＋極と－極の 2 極は、面かあるいは棒によって接続していなければ相補的関係になりえない。そうでなければ 2 極は互いに無限に離れてゆくか、あるいは無限に近接して一体化してしまうかのどちらかである。相補関係は 2 つの間に連携する媒体がなければ成り立たないであろう。現在の量子力学における波と粒子の相補関係には、それに相当する物理的実体がなく、両者を連携させるのは心の中、心の持ち方、概念だけなのである。

量子論と古典論は論理的に衝突する一方で部分的に依存しあっている。量子的現象が観測されるのは位置、速度、電圧、電流、濃度、温度その他古典的原理に基づいて設計された計測装置である。また量子論の理論的展開に用いられる数学的手法の多くが古典論で発達してきた連続系の微分であり、幾何学解析学の概念である。一方、一般相対性理論で時空構造を決めているのは物質の持つ質量やエネルギーであり、それらは量子論的粒子やエネルギーの塊からなる。また惑星や宇宙構造を観測する手段としての光線や宇宙線は量子力学的な構造をしており、その性質を使って様々な測定が行われたり、天体構造の推定が行われたりしている。

筆者には、物理的実体である宇宙が相反する法則を同時に共存して持つ、という考えは納得できない。そもそも量子の世界だけにあてはまり、巨視的世界を除外する原理なるものがあることが不自然である。極微の世界で当てはまる公理は巨視的な世界の公理の源泉であり、その公理を基に巨視的な世界の公理が成立しているはずである。もし相いれない公理があれば、それは異なる宇宙を作り、分裂しているはずである。そしてそれぞれの宇宙は ” 決して相互に干渉しないもの ” になっているはずである。だが現実の宇宙は微視的世界と巨視的世界が厳然としてここに調和を保って存在し続けている。公理はこの世に存在するすべての事象に共通でなければならず、原理は統一したものであるはずである。

時空間は未だ解明されない謎がいっぱい詰まっており、我々はまだその一端を覗いているにすぎないのであろう。人類はまだ時空間のとらえ方に力が不足しており、その性質あるいは成り立ちについて、何か肝心な知識が欠けているのではないだろうか。このいまだ欠けている時空の性質についての知識はなんであろうか、ということになる。現在の物理学が抱えている 2 つの理論的構造の衝突も時空間の新たな性質の発見によって、いつか解決に向かうと考えられる。いくつかの究極理論が提起されているが、早急に究極を求めるのでなく、小さな改良を多く積み重ねることによって問題の解決に徐々に迫ることができると考えられる。

私は第 I 部、第 II 部を通じてこの挑戦を行っている。第 I 部では時空間の解釈を拡張して電磁場を再定義する。ここで取り扱う事がらには上記にいう衝突の解決に直接触れるものではない。しかしそれらは第 II 部で述べる理論の前提をなすものであるからスキップすることはできない。ここでは新たに考察の対象となる時空の性質を明確にするためにいくつかの背景について記述しておこう。

1.3　アインシュタインの時空間のとらえ方

アインシュタインは相対性理論で時空に対する次のような考え方を述べている [2]。まず時間に関しては、「主観的な時間が存在する」と主張する。各個人にとって自分の時間という系列があると同じように広く一般に物理事象にも固有の時間が存在する、と考えるわけである。次に空間に関しては、「ある物体 (Object) Aに属する空間の存在」を主張する。これは次の言葉で述べられている。「ある物体Aを、他の任意の物体Xと接するまで延ばしていくことができる。物体Aのあらゆる延長の集合を〔物体Aの空間〕と言うことが出来る。この意味で我々は抽象的な空間について語ることが出来ず、ただ〔物体Aに属する空間〕について語ることが出来るのみである」と。絶対的な共通時空間上での物理事象（絶対座標上での物理事象のふるまい）は現実には存在し得ないと考えるわけである。アインシュタイン以後の時空間のとらえ方では、物理的存在を決定すべき信号が距離 r に光速で、時間をかけて伝わり、空間を埋め尽くすという、いわゆる光円錐を形成する。

特殊相対性理論以来、電磁波の媒質は真空そのものであり、真空なる空間そのものが場をもつと考えられてきた。空間上の一点における物理事象が他点において確定するには、光速による場の伝播が必要であることは良く理解されている。このことは、空間上の一点 O における力場の源から発せられた場が周辺の空間に光速 c でしか伝わらない、すなわち、

$$r = ct \tag{1.1}$$

で各空間点に時間をかけて確定していくと考えられている。この式は本来、互いに離れた２空間点における同時性を定義するのに用いられたものであるが、近接作用論の確立により、これは空間上の２点間の相互作用の伝達を表す式として使用される。この式で注目すべきは距離 r は源から観測点までの任意の距離を意味していることである。したがって、あらゆる方向の r に同時に確定していくという構造を採っている。これは特定の方向だけをとる理由がない限り当然のこととされるのであるが、自然界は本当にそのようにできているのであろうか。アインシュタインはそのことについてなにも触れていないし、以後の物理学者もそれには何の疑念も持たないでいる。

また時空連続体について一般相対性論の中で次のように述べている。「時空連続体そのものは作用を与えるが、作用を受けることの無い時空を考えるのは科学における物の考え方に反する」。この物理学の巨匠は時空連続体の性質を作用の原因であるばかりでなく、それ自身も他から作用を受ける「場」としての性質をもつとみなした。一般相対性理論ではこの考えの上に、慣性質量と重力質量の等価原理を用いて展開される。かくして「時空連続体は他の物理的存在によって作用を受ける」という彼の最初の考えが貫かれる。このようにして時空の客観性を奪いさり、物理法則の時空表現における一般共変性の要求を用いてきた。ここに見られる特徴は、物理的存在によって時空間は決定され、それは必ずエネルギーを通して決まる。つまりエネルギーだけが時空連続体の性質を決定している。エネルギーがあれば質量が存在し、重力場が常に質量の存在に関係するようになっている。なぜエネルギーだけが時空の性質を決定することになるのかについては言及していない。

1.4　存在確定の考え方による時空間の理論

あらゆる物質が「無」であるとき、はたして空間というものがあるであろうか。この時空間と物と質との性質を極限的にとらえていくと、全ての物質が「無」ならば全ての相互作用はなく、もはや空間も時間も全く必要でない。仮に在ったとしても何の役割も果たさないのではないだろうか。そのとき時空間は無いと考

えて差し支えない。つまり物質があるから時空間が在るのではないか。これが筆者の思索の出発点であった。我々がある物体の存在を意識するとき、必ず時空上の点あるいは範囲を指定することを要求してくる。それらの指定なくしては存在そのものの概念が成り立たない。そもそもある物体が時空のある点に存在するとはどういう状態で決まるのであろうか。観測者が時空の異なる点にいて、何らかの相互作用を持ったとき、その存在が意味を持つ。１つの物体が存在すれば、必ず相互作用が存在する。もし相互作用のない物体を考えたとすれば、その物体の存在はもはや同一宇宙の中で意味をなさない。

ではもし、現時点ではその物体が他点にいる観測者に何の相互作用ももたらさないが、将来、その物体から発した場が観測者に到達してある相互作用を引き起こすとしたら、観測の時点ではその物体は存在しないと言えばよいのであろうか。答えはイエスでもありノーでもある。何の作用もしていない現時点では観測者にとってその物体は存在しない。しかし将来のことを考えると、その物体は現時点でも存在していて、相互作用を行う信号が伝播の途中にある、としなければ将来を予測することができない。それにもかかわらず観測者がその信号を検知できなければ、物体の存在については決定のしようがない。つまり状態はその時点で不確定なのである。

いずれにしても、相互作用が発現してみなければ、ある物質の存在は確定しない。物質は素粒子の形で存在すると考えるのが現代の物理学の基本となっており、素粒子の相互作用は何らかの力場を通して決まるとする。そこで力場の伝播はそのまま相互作用すべき対象の存在を確定する信号の伝播を意味する。ここでは存在の確定という用語を次のように定義して使用する。

定義 I 存在の確定　空間の１点における物理的な事象が或時点において存在するとは、周辺の空間に対する力場の伝達によって確定することを言う。力場の伝達を確定信号の伝播と呼ぶ。

物質の源である素粒子がどれほどのエネルギーを伴うかには関係なく、その粒子固有の時空間を自らの入れ物として創生すると考える。素粒子１つ１つがそれ自身運動しているいないに関わらず、あたかもいつも宇宙空間の中心であるかのように現象している。つまり自分自身を常に時空間の中心に据えて、自らの存在を確定すべき入れ物として主観的に、そして自己中心的に時空連続体を創生しているとみなす。客観的にとらえられる宇宙空間はそのような時空間の集合で成り立っていると考える。この考え方が従来の場の考え方と違う点は、空間が先に存在していてそこに場があるのでなく、場が広がることそれ自体が空間の創生をなす、とすることである。上記の定義によれば存在の確定とは力場の到達とほとんど同義である。それにもかかわらずこの言葉を使うのは、従来の力線による場の表現における直達のイメージや、予め与えられた「場」のイメージを払拭するためである。中性の粒子のようにプラスマイナス同量の対になった場は電荷に対して力を及ぼさないから力場として作用しないが、存在確定の信号は常に発信されており、相互作用を及ぼす電気的な場が打ち消されているだけである。全ての物理事象が固有の時空間を創生する「源」となり得ると考えることは出来ない。いわゆる「場」の源となり得る特定の存在物があり、それは電荷および質量を持った素粒子の集合、つまり物質である。

この考え方を素粒子に当てはめて考えるならば、我々の頭の中にできあがっている従来の時空の概念とは、それぞれの素粒子が時々刻々創生する独自の時空の共用部分をもって形成されている、との見方ができる。これとほとんど同じ考え方はペンローズのスピンネットワークの理論に見られる [3]。そこでは、電子は一般的な背景としての空間内に存在するのでなく、自分自身の入れ物である空間を創造しているとする。そして多数の電子が集まると共有的な空間が構成されるというものである。ペンローズがこの考えを発表していたのを筆者は全く知らなかったが、その考えは極めて良く似ている。彼の理論はスピノールを基本的な要素であるとしているが、筆者の着想は第 I 部に述べる存在の確定の方法にあり、量子論的な概念から出発せず、因

果関係が常に成立する古典論的な概念から出発している。そのため、その後の理論の展開はペンローズの理論とは全く異なる。

この理論によれば、光速度一定の原理は至極当然のことになる。なぜならば、素粒子は自らの入れ物としての時空間を光速で作り続けるのであるから、それが関与する時空間の中ではそれ以上の速度を持つ事象を確定できない。速度は時空間の中で決定されるものであるから、創成されていない時空に関する事象は存在が許されない。無限大という値は許されないとすればどこかで限界値を持つであろう。したがって光速度は速度の限界値、いわば超速度なのである。運動する素粒子は、運動しながらその素粒子自身を中心として独自の時空間を常に創成している。そのため、やはり超速度、つまり光速でその時空は確定している。いかなる立場であってもその時空創成の速度はその位置関係を決めるために一定であって不思議ではないのである。

これから展開する理論は上記の時空概念に従って次の２つの「仮定」を設定することから始まる。

仮定 I：磁場は電場の信号の光行差から発生する。

理論展開の指導原理的な役割をはたす一つの観点を導入する。それは「力とは時空上の何らかのギャップ（矛盾）から生じ、そのギャップを解消するために発生するのではないだろうか」という問いから出発する。「力」という語はおそらく人間が石や木を腕を使って動かすとき、気をこめて体の筋肉を使ってエネルギーを出す状態を「力を出す」と表現した所から発していると考えられる。物が動く原因として力という概念が生まれたのであるが、物が位置を変えようとするのであるから、そのギャップとは存在確定の信号上でのギャップであろうと解するのである。そう考えると、光行差は存在確定の信号伝達プロセス上のギャップの一種と考えられ、これが誘導場を発生するとの見方がでてくる。この見方で電磁場を眺めると、磁場は存在確定信号としての電場の光行差から誘導発生するものとの捉え方が成立する。

第 I 部ではこの考え方を用いて電磁場の光行差理論を展開する。ここでは時空間が主観的な存在物であって、物質あるいはエネルギーの存在によって時空が存在すると考える点で完全にアインシュタインの考え方に沿っている。その故に、この考え方によって特殊相対性理論で取り扱われる形式を変更すべきものはなにもない。しかしこの「存在の確定」のプロセスにしたがって従来の「場」について再解釈が行われ、場の構成要素の再構築に導く。古典的な電磁場理論では、磁場の発生はアンペールの法則またはビオ・サバールの法則にしたがうとされるが、上の考え方に基づいて磁場は光行差によって発生すると解釈しなおすのである。また荷電粒子の流れの変化から発生する誘導電場も同じく光行差を原因として発生するとの捉え方が可能になる。

これらの結果を整理すると、従来の電磁場の表現形式よりもっと基本的な形をとる表現方法が存在することが示唆される。これが第 4 章に述べるノード流れの場であり、4 元テンソルの形式を持つダイアディックプロダクトの表現をとる電磁場の方程式が得られる。さらに角運動量さえも存在確定信号の光行差で説明できることが明らかになる。まだ多くの問題点があるが、将来の理論において一つの指導原理になる資格はあるであろう。

仮定 II：素粒子の存在の確定は 1 時点に 1 方向にしか行われない。

アインシュタイン以前の時空間のとらえ方は、ある物理的な存在が距離 r の空間点に確定すると、瞬時に全ての空間にその存在が確定するという時空間のとらえ方をしていた。従ってある時点で事象が存在確定すればその瞬間に一斉に距離 r が無限に大きい３次元球体全体に確定するという概念になっていた。筆者はこれを「1 時点全空間存在確定」のパラダイムと呼ぶ。アインシュタイン以後の捉え方はいわば距離 r だけ離れた場所への確定が時間をかけて行われるとしている。この結果、同時刻における確定信号（光円錐）の伝播の前線は３次元空間の中で球面で時空を覆い尽くすとみなす。そこでは座標の原点を固定したとき、任意

の座標方向に対して対称性を保証している。存在確定信号はいわゆる光円錐を構成し、特定の方向のみを選ぶということがない。これを「1 時点全方向存在確定」のパラダイムと呼ぼう。

筆者はこれらに対して 1 時点に 1 方向にしか確定しないとする理論的枠組みを考える。そして確定信号の源は回転放射によって周囲の空間に存在確定を行なっているとする。この発想がなぜ出て来たかについては第 II 部で詳しく述べる。この仮定のもとでは第 I 部で取り扱った存在確定の信号が非連続的なノードの流れの場に変身する。そして量子力学的な諸性質が現れてくる。ノード流れのドップラー効果によってド・ブロイーアインシュタインの関係式と同等な関係式、スピンの存在などである。特に注目すべきは、シュレーディンガー方程式に現れる波動関数に独特の解釈を与えることである。これらは古典力学的な表現式である電磁場方程式、質量と力、運動方程式、重力の等価原理などと連続的に繋がり、概念の飛躍がないのである。この仮定の根拠や理論を第 II 部で展開する。

関連図書

[1] 湯川秀樹, 物理講義, 原　治　編, 講談社 (1975).

[2] アインシュタイン, ”相対論の意味”, 矢野健太郎　訳　p.83-p.89 岩波書店 (1961) Original: Albert Einstein, “ The Meaning of Relativity ”, Fifth Edition, Princeton University Press, 1955(Princeton)

[3] F. D. ピート　著, 久志本克己　訳, 宮崎　忠　監修, ”超ひも理論入門”,　(上）, (下）ブルーバックス, 講談社 (1990). 原著： F. David Peat, ”Superstring and the Search for the Theory of Everything”, Contemporary Books, New York(1988).