

量子場は概念としてどのような到達点なのか？

岡村 和弥 (ドレスト光子研究起点)

E-mail: k.okamura.renormalizable@gmail.com

量子場理論は物理理論として大いに成功しており、数学的定式化においても近年発展目覚ましい。数学的にはまだまだ解決していない難題に溢れているが、概念的にその有用性は疑う余地はない。「場」の概念が誕生して以来、古典物理学は一般相対性理論の成立までその適用範囲を様々なに広げ、「場」はガリレイ・ニュートンらの時代からの（とはいってもガリレイからニュートンまで短くない時を要したが）物理学的世界観・自然観を継承しつつ変革する中心的存在であった。古典物理学での「場」は今では古典場とも呼ばれ、時空の各点に物理的自由度が与えられるものであり、数学的には関数として定義される（確率的な系では超関数として定義される場合もある）。そして、量子物理学での「場」が量子場であり、時空の各点に物理的自由度が与えられるものであり（これについては古典場と同様である）、作用素値超関数もしくは有界時空領域ごとに $*$ -代数を考えることで記述される。ワイトマン流に古典場とフォン・ノイマンの量子力学の定式化を統合するものが前者であり、後者は荒木・ハーク・カストラー流の代数的な定式化である [1]。

では、量子場はいかなる概念として捉えられるべきであり、どこまでの射程をもつ概念なのか？このことについて議論を行いたい。量子力学系（有限自由度量子系）においてさえ、実体を想定した捉え方は正しくない。例えば、「電子は粒子でも波でもない」の表現はちょうどその事実に対応している。粒子も波も物理現象を生じさせる（或いは現象そのものの）実体として通常扱われている（ここでの名付ける行為が実体論的であるということ）。電子は状態に応じて粒子的応答も波のような干渉も引き起こすが、電子をどちらかの実体、或いはその両方を統合した実体として考えるのは妥当ではないのである。量子場とは、量子力学系と同じく実体的に通常扱われる現象とは決して無縁でないものの、時空のいたる所で生じる事象の間を動力学的につなぎ統計的に記述する（無限自由度）量子系のことである。先述のように、量子場は概念装置として有効に機能してきた実績がある。電子の（量子）場とは、電子と呼ぶ（名付けられた）対象を（量子）場として扱うという試みであり宣言である。電子以外の物質や電磁場などのゲージ場においても同様である。量子場理論においては、（準）粒子に対して粒子数の増減に応じて「生成・消滅」という言葉を用いられている。「生成・消滅」は、（準）粒子という（通常実体的に扱われる）現れ方に対してのみ適用可能であって、有限自由度系と無限自由度系を隔てる大きな違いであるが、量子場の「本質」というわけではない（相互作用により量子場が別の量子場へと変わる過程とも関係しているので、量子場に不可欠な一側面であることは間違いない）。ひとつの量子場は、時空のいたる所で生じる事象が「同一の物理的由来」を持つことの想定から定まる（始まる）。何をどこまで同一とするのか、というところに物理としての問題意識がある（数式で表すときにはすでに前提となっている（背後に隠れた）意識である）。そのうえで、量子場の動力学、なかでも異なる量子場の間相互作用が現代物理学における本質的な主題となる。慣性系・基準系が本質的な役割をすることは古典場であったり量子力学系の場合と何ら変わらない。非相対論的量子場の動力学は、数学的には量子力学系の延長上であり、ハミルトニアンで記述できる状況（より一般には物理量代数の1パラメータ自己同型群）が存在する（有限自由度量子系の「極限」としての無限自由度量子系という扱いも含まれる）。しかし、数学的な形式では同じであっても物理は大きく異なっており、無限自由度量子系である（相対論的・非相対論的を問わず）量子場では粒子描像では捉えきれない現象が数多くあり「相転移」が生じる。一方で、相対論的量子場は相互作用とオフシェル

は切っても切れない関係があり、相互作用する場はオフシェル運動量を必ず伴うが、対照的に自由場はオンシェル運動量のみをもつ。また、ハークの定理の帰結も無視できないため、相対論的量子場の動力学は量子力学系のものとは根本的に異なると考えられる。

「場」の概念の有用性は決して物理学に限られるものではない。多様な現象に満ちた世界の、動的で生き生きとした非自明な様相を「場」というチャンネルを駆使して理解する可能性が開かれる。しかし、単に旧態依然とした「場」を考えるわけではなく、量子場に触発された実体から離れた「場」の扱いが肝心なのである。ここでは「物」を例にとろう。フッサールが始めた現象学において、その実践として「物」のあり方が解析されている [2]。人間（我々）が身体を動かし様々な角度から見て（可能ならば触れたりして）生じる見え方（および感触）の変化の規則性の構造を通じて、「物」が確かにそこにあると考える。本来はもう少し丁寧な説明を要するものではあるが、この「規則性の構造」をフッサールは「現われの構造」と呼んでいる。「物」が「物」たりうるのは、現われの構造を通じた確証がなされているからである。確証が得られないときは、すぐに構造をとりかえて認識を更新していく（そのような無意識の働きかけが絶えず行われている）。このように考えると、「物」は実体であるという捉え方は芳しくないとわかるだろう。そのように捉える行為には決して必然性はなく、人間の身体の動きと結びついた「物」の理解を「本当にある」・「そこにある」と主張するだけの空虚なものへと変貌させてしまう。「物の場」を考えるというのは、「物」の配置関係などを通してより多彩かつ複雑で動的な「物」の「本質」に触れていこうとする試みである。ある「物」（物 A とする）が別の「物」（物 B とする）の陰に隠れて見えない状況などが「物の場」を考えたときに典型的な体験である。基準となる場所からは物 A しか見えないが別の場所・角度からは物 B が見える、更には物 A と物 B が両方見える角度があるということがそのような状況の特徴づけているのである。しかし、「物の場」を考えるというのはこのような状況に限らず、無数の「物」を一度（あるいは一斉）に扱う状況をも想定している。その際、ある時点ではそこにあった「物」が別の時点では別の場所に移されている状況なり、酷似した別の「物」とすり替えられているような事態も含まれる。もしくは、ある時点でなかった「物」（「なかった」に多義性がある）が別の時点では目の前にある状況は「物の場」にとって「当然」であり、この状況は量子場の（準）粒子モードにおける「生成・消滅」とのアナロジーが成り立つ。また、「物」をいくつか集め加工し組み上げると「道具」になることもある。これはいくつかの「物」の間で複雑に作用しあう変化・動きが機能になるということに他ならない。「道具の発明」が、「物の場」をはじめとした様々な「場」の概念を通じて理解される場面があるのである（そして「道具の場」へと至る）。「物の場」だけでは少々不足な感があるが、「場」の概念は、量子場と同じ地平から見直すことにより、物理の文脈を超えて更なる活躍する概念となることが期待される（[3]での場の概念に関する議論が参考になる）。同時に、量子場とはなにかを語る術が増えていく進展が望まれる。電磁場のように観測者の扱いおよび異なる観測者の間の変換性により深い理解を要する系も存在すること、「場」自体は「物」ではないことの2点注意しておく [4]。

さて、量子場に限らず「場」の概念自体に不満はないものの、「○○の場」を定義・適用する過程で自明化してしまっている時空の意義や意味を問い直す試みは決して不自然な行為ではない。物理学として時空の起源を追究していくのは至極当然でその方向での研究はその問いに対する1つの解答となる。しかし、考察している文脈・領域においては、時空の意義や意味に対しその起源は必ずしも解答を与えるとは限らない。例えば、生物や知的生命体、特に人間が時空をどのように把握するように至ったかについての問いが考えられる。本稿はまだまだ構想中の段階の話をも

く含むものであり, [4] の内容との関係に踏み込んでいるわけでもない。そして, 創発を通じて時空 (および「場」) の起源を考える小嶋泉氏の構想 [3, 5] にどのように圏代数 [6] が絡むか、という問題も興味深い。タイトルの問いには答えられてはいないが, 量子場概念は多くの分野を巻き込むに足る深みを持ち, 更なる自然理解の一助になると考える。

参考文献

- [1] 大津 元一, 小嶋 泉 編著, 『ここからはじまる量子場 —ドレスト光子が開くオフシエル科学—』, (朝倉書店, 2020).
- [2] 田口 茂, 『現象学という思考 —〈自明なもの〉の知へ』, (筑摩書房, 2014) .
- [3] 小嶋 泉, 『量子場とマイクロ・マクロ双対性』, (丸善出版, 2013) .
- [4] 西郷 甲矢人, 田口 茂, 『〈現実〉とは何か —数学・哲学から始まる世界像の転換』, (筑摩書房, 2019) .
- [5] 小嶋 泉, 岡村 和弥, 『無限量子系の物理と数理』, (サイエンス社, 2013) .
- [6] H. Saigo, Category Algebras and States on Categories, *Symmetry* **13** (2021), 1172.