



| | |
|------------------|---|
| Title | 量子現象によって開示される存在論的構造 |
| Author(s) | 新井, 朝雄; Arai, Asao |
| Citation | シェリング年報, 14, 95-103 |
| Issue Date | 2006 |
| Doc URL | https://hdl.handle.net/2115/27964 |
| Type | journal article |
| File Information | s14.pdf |



量子現象によって開示される存在論的構造

新井朝雄

1 序—自然哲学のための存在論的視座

この論文の目的は、自然哲学的な観点から、量子現象およびそれを解明する理論体系である量子力学の認識論的・存在論的含意を論じることである。無論、ひとくちに自然哲学といってもさまざまな立場がありうる。本稿の立場は、それを西欧哲学のコンテクストにおくとすれば、基本的に、ゲーテとシェリングの自然哲学のそれに近い「理念と呼ばれるものは、つねに現象として現われるものであり、だからあらゆる現象の法則としてわれわれの前に登場するものである」というゲーテの言葉⁽¹⁾は、筆者の構想する自然哲学にとって基本的な直観のひとつを表明する。他方、本論文の基調とシェリングの自然哲学との連関については、次に引用するシェリングの言葉によって示唆したい⁽²⁾—(i)「数学が示現するのは理念、事物そのものの真の根本本質並びに根本形式である。」(ii)「哲学と数学とは、両者が普遍と特殊の絶対的同一に基づいて成立するということが、したがってまた両者は、こういう種類の統一がいずれも直観である限り、一般に直観のうちにあるということにおいて、相等しい。」(iii)「自然を理念の普遍的所産としてとらえるためには、われわれは理念そのものの始源と意味とに帰って行かなくてはならぬ。」(iv)「自然学は、それ自体個々の現象や所産を超えて、それらを一に帰せしめ、また、それらの共通の源泉としてそれらを生ずるところの理念に達することである。」(v)「一切の物が神或いは絶対者から生まれ出ることを理解するのは、哲学の根本にして必然的な意図であり、自然が主観・客観化の永遠なる作用の實在的な面の全体である限り、自然哲学は哲学一般の根本的にして必然的な面である。」

理念ないし理念界には種々の“型”と“位階”がある。本稿が主に対象とするのは、理念界の中でも、数学的概念や数学的理念が存在する領界である。筆者は、これを数学的理念

界と呼ぶ。とはいえ、この領界は、他の諸理念と孤立してあるものではなく、華嚴哲学的に言えば、まさに重重無尽に関連しあっているし、領界“内部”においてもそうである⁽³⁾。自然現象のうち、無機的自然現象—基本的に物理学が対象とする現象—は、この理念界に属する理念が中心的な役割を演じることにより現出させられる。別の言い方をすれば、ここに物理現象の理念的原像があるということである⁽⁴⁾。だが、この場合、次の点に注意する必要がある。すなわち、ゲーテの言うように、理念は現象として現われるとはいえ、理念と現象との照応は必ずしも1対1というわけではない、という事実である。また、ひとつの現象に関わる理念もひとつとは限らない。実は—詳しく説明する余裕はないが—、どの現象も、理念界全体をあげての働きの結果なのである、というのが真相である。

ゲーテ的な観点から言えば、自然哲学者がやるべきことは、自然現象の源泉たる理念界それ自体の探索—単に諸理念を個別的に見出すというだけでなく、それらの相互関係を認識すること—と同時に諸々の理念がどういう構造を経由して現象へと“下降する”か、その構造を厳密かつ明晰にとらえることである。また、既存の理念的枠組みで解明できない新しい現象に出会ったときに、その現象をあらしめている理念をその究極まで探究することである。そうして得られる認識は、存在の形而上的次元から形而下的次元およびその逆のプロセスすべてにわたる全一的・有機的な存在論を形成するはずのものである。本論文の構想する存在論は、この意味での存在論である。それは、シェリングの言う「自然と精神の絶対的同一」のより具体的な内実を明らかにすることにもなるであろう。

2 数学的理念界の構造

この節では、序で言及した数学的理念界の構造について簡単にふれておく。数学は、20世紀になってから、集合論的な考え方と公理論的方法の展開によって、ある種の革命的転換を遂げた⁽⁵⁾。それは、本稿の自然哲学的観点から言えば、数学的理念界における位階的構造と多層的構造の発見として捉えることができる。これがいかに画期的なものであったかは、20世紀の数学の偉大な展開が示す通りである。実際、ここでは、詳細は割愛せざるをえないが、20世紀を通して、19世紀以前の人々が夢想だにしなかったであろう、数学のさまざまな領域が開拓され、しかも、それぞれ、非常に深く展開され、たいへんな高みに達したのである⁽⁶⁾。そして、数学は、現在も生き生きと発展し続けている。

上述の発展によって明らかにされた知見をもとに、数学的理念界の構造を考察すると次

のことがわかる。(1) 数学的理念界は、いわば“立体的”・“多層的”に構成され、位階的構造をもつ。(2) ひとつの理論体系(たとえば、ベクトル空間論)としてまとめられる領域は、あるひとつの公理系によって原理的な仕方で統制されている。筆者は、そのような、ひとつの理論体系の根源としての公理系を元型的理念と呼ぶ⁽⁷⁾。この命名の意は、それが、存在の根源(シェリング風に言うならば絶対者)に向かって、もうこれ以上“逆行”できない、いわばぎりぎりの始源的理念を表すということである。かくして、数学的理念界は、存在の根源(絶対者)から、諸元型的理念が分節し、それぞれの分節から、無限分節的に—しかし、互いに調和的・有機的に関連ないし浸透しあいながら—諸理念、諸概念が生成されていくという構造をもつ⁽⁸⁾。まさに理理無礙の風光である⁽⁹⁾。

3 量子現象の存在論的構造

以上を準備として、いよいよ本論の主題に入る。

3.1 量子現象の特質とその哲学的含意

周知のように、私たちが日常的次元で知覚する物質は、その物質に固有の、原子と呼ばれる微視的構成要素からできている[その大きさの程度は 10^{-8} cm(一億分の1cm)]。原子は、ある種の構造をもち、電子と呼ばれる微視的对象と原子核と呼ばれる微視的对象からなる[原子核の大きさは、 $10^{-13} \sim 10^{-12}$ cm(原子の大きさの程度の十万分の一から一万分の一)程度]。電子は“外的”には構造をもたないが、原子核は、そうではなく、核子(陽子、中性子)と呼ばれる微視的对象をその構成要素とする。だが、原子、電子、核子は、古典力学的な意味での粒子ではない。というのは、それらは、ある条件のもとでは、古典力学的な意味での粒子と同様な振る舞いをするが、別の環境のもとでは波動的に現象するからである。微視的对象が有する、この特性は波動-粒子の双対性(二重性)と呼ばれる⁽¹⁰⁾。これが、日常的次元において知覚される物体の特性とは、根本的に異なる特性のひとつであることは明らかであろう。

通常物質と並んで、現象界全体を貫いて流れる光についても同様のことが成り立つ。すなわち、光は、古典物理学の範疇では電磁波(電磁場の波動)として記述されるが、光電効果—短波長の光をある種の金属に当てると電子が飛び出してくる現象—という量子現象に端的に表されているように、粒子的にも現象する。この意味での光(電磁波)は光量子と

呼ばれる。波動的には、古典的な電磁波として、粒子的には光量子として現象する存在を光子と呼ぶ。

このように、微視的な領域、すなわち、物質界の深層へと入っていくと、まったく新しい、存在の相が立ち現われてくる。原子、電子、核子あるいは光子のように、物質界の微視的階層に関わり、古典物理学では記述できない微視的对象を総称的に量子的粒子と呼ぶ。ただし、上述のことから明らかなように、量子的粒子は、古典物理学的な意味での「粒子」ではない。この名称は、古典物理学的言語を超えた意味で理解されねばならない⁽¹¹⁾。

量子的粒子によって現出させられる現象を量子現象と呼ぶ。この範疇の現象の基本的特徴のいくつか—いずれも古典物理学の常識に反するもの—を列挙しよう。(QP.1) 物質の安定性. 古典物理学にしたがえば、物質は単時間のうちに“つぶれて”しまうことが示されるが⁽¹²⁾、これは、通常のほとんどの物質が安定的に存在することと矛盾する。物質の安定性は、古典物理学の限界を示す好例のひとつである。(QP.2) 現象的多重性. すでに述べたように、量子的粒子は、波動的にも粒子的にも現象しうる。しかし、もし、人が、これらの現象を観測する装置とは異なる観測装置を用いて量子的粒子を観測するならば、別の性格をもつ現象が現れることが予想される。20世紀の偉大な物理学者のひとりであるニールス・ボーアが見事に指摘したごとく、現象と観測装置は不可分ものであり、むしろ「実験全体の説明を含む、特定された状況のもとで得られる観測」が厳密な意味での現象と呼ばれるものなのである⁽¹³⁾。現象的多重性の概念は、ボーアが提唱した相補性—量子的粒子からなる系、すなわち、量子系にあっては、波動と粒子のように、互いに排他的である現象、あるいは、位置と運動量のように、その測定が互いに排他的であるような物理量の組が系全体の性質を特徴づけるという性質—の概念をより一般化したものである。(QP.3) 古典力学的な意味での因果的追跡の不可能性. 古典力学では、ある時刻での、粒子の位置と運動量の測定に基づいて、ニュートンの運動方程式の解の一意性が成立する時間内の任意の時刻において、その粒子の位置と運動量を一意的に予言できる。だが、量子的粒子に関しては、古典力学的粒子のように運動量と位置を同時に決定できないので(すでに述べたように、位置を測る操作と運動量を測る操作は互いに排他的であり、位置と運動量という物理量の組は相補的)、そのような因果的追跡はできない。この事態の数学的表現のひとつが、ハイゼンベルクの不確定性関係である。(QP.4) 物理量の測定値のランダム性. 量子的粒子に関しては、同一の状態において、同一の物理量を測定する場合、その測定値は、一般には、確率的に分布する。(QP.5) 量子的粒子(複数)の分離不可能性(量子現象の非局

所性)。これは、粒子的描像から見て、二つ以上の量子的粒子がひとつの量子系を形成する場合、それぞれがいかに物理空間的に離れていると想定される場合でも、それらの間に必ず相関がある事態をさす。

量子現象が有するこれらの特徴すべてを、いくつかの基本原理に基づいて、統一的に説明し、さらには、非常に広範囲にわたる量子現象を予言し、解明する理論が量子力学である。だが、この理論の骨格を述べる前に、上述の経験的事実だけから導かれる、ある重要な哲学的含意を手短に指摘しておきたい。まず、現象的多重性は、各量子的粒子を現象的形式でもって一意的に特徴づけることができないことを意味する。これは、量子的粒子の本性が理念的・形而上的なものであることを示す。シェリングは、観念的なものの実在的なものへの転化として物体性をとらえる⁽¹⁴⁾。ここでの考察は、この転化が、まさにいま問題としている存在のレベル—量子レベルと呼ぶ—で起こることを示唆する。これは、(QP.5)の事実と深く関連している。結論から言ってしまえば、(QP.5)は、量子系の状態の非物理的空間性、形而上性を指し示す、ということである。そして、これは次の項で述べる量子力学の理念によって根拠づけられるのである。

3.2 量子現象を現出する普遍的理念

一般に、量子系に限らず、物理系を記述するには、状態の概念、物理量の概念が必要である。これらの概念は、古典物理学と量子力学とは根本的に異なる。それは、本論文の自然哲学的観点から言えば、当然であると言わねばならない。量子現象を現出する基本的理念は次に述べる公理系によって特徴づけられる。

量子力学の公理系⁽¹⁵⁾

(QM.1) (状態) 各量子系 S に複素ヒルベルト空間 \mathcal{H}_S が同伴し、系の状態は \mathcal{H}_S の零でないベクトルによって表される。ただし、ベクトル Ψ によって表される状態とその任意の零でない複素数倍 $\alpha\Psi$ (α は零でない複素数) によって表される状態は同一である (状態の相等原理)。(QM.2) (物理量) 量子系 S の物理量は \mathcal{H}_S 上の自己共役作用素によって表される。特に、系の全エネルギーを表す自己共役作用素はハミルトニアンと呼ばれる。(QM.3) (測定) 物理量 A を状態 Ψ で測定したときにその値が実数の部分集合 J (ボレル集合) に落ちる確率は $\|E_A(J)\Psi\|^2/\|\Psi\|^2$ で与えられる。ただし、 $\|\cdot\|$ は \mathcal{H}_S のノルム、 E_A は A のスペクトル測度を表す。(QM.4) (時間発展) 時刻 t_0 での状態が Ψ_0 であるとき、時刻 t での状態は、その間に系を測定しない限り、ハミルトニアン H を用いて、 $\Psi(t) = e^{-i(t-t_0)H/\hbar}\Psi_0$ で与

えられる．ただし， i は虚数単位であり， $\hbar = h/(2\pi)$ (h はプランクの定数)．

考察する系の外的自由度が有限で n であるとき，次の公理が追加される．(QM.5) (正準交換関係) \mathcal{H}_S は自由度 n の正準交換関係 (canonical commutation relations; CCR)

$$Q_j P_k - P_k Q_j = i\hbar \delta_{jk}, \quad (\text{CCR1})$$

$$Q_j Q_k - Q_k Q_j = 0, \quad P_j P_k - P_k P_j = 0 \quad (j, k = 1, \dots, n) \quad (\text{CCR2})$$

の自己共役表現の表現空間である ($\delta_{jj} = 1$; $j \neq k$ のとき, $\delta_{jk} = 0$)．すなわち，状態のヒルベルト空間 \mathcal{H}_S は，(CCR1)，(CCR2) を満たす自己共役作用素の組 $\{Q_j, P_j | j = 1, \dots, n\}$ が作用するヒルベルト空間である．

これらの公理系は，本稿の哲学的観点からは，前項で略述した事柄の根底にある数学的理念を見事にとらえたものだと言える．紙幅の都合上，残念ながら，上のすべての公理系について詳しい解説を行うことはできない．ここでは，(QM.1)，(QM.4)，(QM.5) についてのみふれる．まず，量子力学的状態の概念 (QM.1) であるが，これは，量子力学的状態が形而上的なものであることを語る．特に，通常見過ごされがちなのであるが，状態の相等原理は決定的である．これは数学の専門用語を使えば，量子力学的状態の空間は，複素ヒルベルト空間の射影空間であるということである．この空間は極度に抽象的な空間であって，物質的・感覚的な対応物をもたない．したがって，量子力学的状態に対しては，通常の意味での物理的解釈はできないのである⁽¹⁶⁾．

公理 (QM.4) は状態の時間発展と呼ばれるが，これは通常の意味での時間発展，すなわち，物質的・感覚的現実における時間発展を意味するものではない．状態が形而上的なものであるから，それは当然である（形而上的次元は，物理的空間性および物理的時間性のうちでないことに注意）．ここでいう「時間発展」は，実は，象徴以上の意味をもたない⁽¹⁷⁾．したがって，状態の物理的運動という描像には意味がない．量子系を観測するとき，一般には，系の状態が別の状態に変化することを称して“状態が収縮する”という言い方がなされる場合があるが，これは，ここで提示した観点からは，適切な言い方とは言えない．なぜなら，量子力学的状態は，形而上的なものであるから，現象界におけるのと同様の意味では，変化することはありえないからである（そもそも通常の意味での変化という概念は適用できない）⁽¹⁸⁾．では，そうした表現によって指示されている真の事態は何か，ということになるが，本稿の思想を首尾一貫させようとするれば，次のようになる．すなわち，公理 (QM.4) は，量子系の形而上的次元の在り方—それは超時間的，超物理空間的—が，現

象的次元の系の時間の推移に関わる観測・測定をどのように規定するかをとらえたものなのである。より具体的に述べるならば、まず、時刻 t_0 における系の測定は、初期状態 Ψ_0 を定める。するとこれに応じて形而上的次元（状態のヒルベルト空間 \mathcal{H}_S 内）にひとつの曲線 $\Psi(t) = e^{-i(t-t_0)H/\hbar}\Psi_0$ —状態曲線と呼ぶ—が一意的に指定される（ t は実数）。そして、この曲線は、以後の測定の参照曲線となる。すなわち、時刻 $t > t_0$ で系を測定したとき、状態 Φ が指定される（選択される）確率が $\frac{|\langle \Phi, \Psi(t) \rangle|^2}{\|\Phi\|^2 \|\Psi_0\|^2}$ となるような曲線が定められたということなのである（ $\langle \cdot, \cdot \rangle$ は \mathcal{H}_S の内積を表す）。状態は変化せず、測定する時刻が変わるだけであり、その時刻に応じて、指定される参照曲線が一般には確率的に選択されるということなのである。この説明から明らかなように、現象的時間を表すパラメーター t は、形而上的次元では、状態曲線を表すパラメーターにすぎない。拙著『量子現象の数理』（朝倉書店、2006）の4章で証明したように、状態のヒルベルト空間は、互いに交わらない状態曲線で埋め尽くされる。これは、ハミルトニアンを任意にひとつ指定するとき、形而上的次元において、当該の系のすべての状態が、観測との関連において、ある秩序にしたがって存在することを意味する。言い換えれば、ハミルトニアンは、状態の空間にある秩序を生み出すのである。そうした秩序構造をもつ状態空間から、どの状態を取り出すか（どの現象が現れるか）は、観測装置の設定による。そして、そのような量子レベルに関わる観測（測定）を通して、理念的なものである量子的粒子が実在的・物質的なものへと転化するのである。こうして、量子現象現出に関わる真の存在論的構造が明らかになる⁽¹⁹⁾。以上に提示した、新しい解釈によれば、量子現象の非局所性が当然の帰結として出てくることは明らかであろう。

最後に公理 (QM.5) について簡単に注釈しておく。これは、一言で語るならば、現象的多重性の数学的表現である。純代数的構造としてのCCRは、さまざまなヒルベルト空間に線形作用素の組を用いて実現されうる。このような組をCCRの表現と呼ぶ。CCRの表現は無数に存在し、これらのうちには、互いに同値なものとそうでないものがある。同値なものどうしは、物理的に同等である。CCRの表現ごとに量子系に対する物理的描像のひとつの枠組みが定まる。現象的多重性とは、まさに、この物理的描像の枠組みの多様性に対応するものなのである。こうして、理論的には、無限に多様で相補的な現象が可能であることが示される。このような意味において、CCRは、量子力学の根源的理念のひとつなのである。

謝辞

建設的な論評と有用な示唆を寄せられた審査員の方々に感謝いたします。

注

- (1) ゲーテ『自然と象徴—自然科学論集—』(高橋義人 編訳, 前田富士男 訳, 富山房百科文庫 33, 富山房, 1982), p.114.
- (2) シェリング『学問論』(勝田守一 訳, 岩波文庫, 岩波書店, 1957). 引用ページは順に, p.64, p.65, p.144, p.152, p.153.
- (3) 理念界あるいは形而上的次元の事柄を通常の言語で語るのは極度に困難である. というのも, 通常の言語は, 第一義的には, 形而下の次元, すなわち, 物質的・感覚知覚的次元に対して有効に使用されるようにできているからである. だが, それでも, 通常の言語を詩的, 比喩的あるいは象徴的に使うことにより, より高次のリアリティの事情を示唆することは, ある程度は, 可能である. 以下, 本稿で理念界ないし形而上的次元について言及する場合, その言語的表現はすべて比喩的ないし象徴的なものであることを了解されたい.
- (4) 物理現象の現出と関わる数学的理念界の存在風景の一部を拙著『現代物理数学ハンドブック』(朝倉書店, 2005)—以下, A05として引用—toに叙述し, 最終章(20章)に華厳哲学的観点から, ここで述べたことをより具体的に示唆しておいた. なお, 拙著『物理現象の数学的諸原理』(共立出版, 2003)—以下, A03として引用—toも参照. 自然界の大きな相のひとつをなす植物界に関わる現象には, 無機的自然現象の理念に加えて, 別の理念が関与していると考えねばならない. ゲーテのいう原植物の理念はそのひとつである. 動物界についても同様.
- (5) ここでは歴史的な事柄の詳細にふれる余裕がない. たとえば, A03の序章やブルバキ『数学史』(村田 全・清水達雄 訳), 東京図書, 1970, を参照.
- (6) 具体的にあげるならば, たとえば, 測度論, バナッハ空間論, ヒルベルト空間論, 距離空間論, 位相空間論, 超関数論, 群論, リー代数の理論, 多様体の理論, 作用素環の理論, リーマン幾何学, 確率論, 無限次元積分論(汎関数積分論)等々. A05を参照.
- (7) A03の序章, A05の第1章, 1.1節を参照.
- (8) ここで述べたことは, シェリングが『学問論』のp.63で提出した課題, すなわち「それをなすにはそういう数学そのものは, 先ずその根源に立ち還り自己のうちに表現されている理性の範型をいっそう普遍的に理解しなくてはならぬであろう」に現代的な観点から答えるものである, と筆者は考えている.
- (9) 「理理無礙」という術語は, 井筒俊彦博士が『コスモスとアンチコスモス—東洋哲学のために—』(岩波書店, 1989)の第I章において, イスラームの大哲学者イブヌ・ル・アラビーの存在論を華厳哲学的に読み解く際に用いられたものである.
- (10) これは, 通俗的に, しばしば誤解されているように, “粒子であると同時に波である”という意味ではない. むしろ, 微視的对象の本性は, 粒子的でも波動的でもない何かであって, それがある環境のもとでは, 粒子的に現象し, 別の環境では波動的に現象するというのが, 事

態を正確にとらえた言い方である。私たちは、ここにおいて、まったく新しい存在の相に面しているのであるという認識が重要である。

- (11) 上に言及した量子的粒子のほかに、数多くの量子的粒子の存在が知られている。その中でも、電子、核子、光子のように、より基本的とみなされる量子的粒子は、総称的に、素粒子と呼ばれる。
- (12) たとえば、朝永振一郎『量子力学 I [第 2 版]』(みすず書房, 1969) の §16 を参照。
- (13) 引用は、ニールス・ボーア論文集 1『因果性と相補性』(山本義隆 編訳), 岩波文庫, 岩波書店, 1999, p.203 による。これは、ゲーテの鋭い洞察「現象というものは、観察者と別箇に存在しているのではない。むしろそれは観察者の個性と絡み合い、纏れあっている」(『箴言と省察』1224) と通じ合う。
- (14) シェリング『学問論』, p.146。
- (15) 数学の術語については、拙著『ヒルベルト空間と量子力学』(共立出版, 1997), 新井朝雄・江沢 洋『量子力学の数学的構造 I, II』(朝倉書店, 1999), A03 を参照。なお、数学で「空間」というときは、特に断らない限り、いわゆる物理的空間のことではなく、何らかの構造をもつ集合のことを指す。それは純粋に理念的なものである。
- (16) 状態のヒルベルト空間が、たとえば、ある種の関数を要素とする集合によってあたえられる場合があるが、この場合でも、関数は、何らかの感覚的・物理的な解釈をもつものではない。物理の教科書の多くにあっては、この点の認識は曖昧であり、誤解も多い。
- (17) ほとんどの物理の教科書では、状態を何か物理的なものとしてイメージし、その時間発展を通常的时间発展のように考えている。しかし、これは、より深く考察するならば、論理的に首尾一貫しない考え方であることがわかる。もちろん、そうだからといって、多くの物理学者がそうであるように、量子力学の理論を使う立場にとっては何ら問題は生じない。
- (18) この論述から明らかなように、本稿の観点から言えば、“状態(波束)の収縮”を問題とする、いわゆる観測理論はまったく無用のものである。そうした理論は、そもそも問いの立て方が間違っているのである。
- (19) この構造自体は、ハミルトニアン H が自由ハミルトニアンであるか否か、また、系の自由度が有限であるか否かには依らない(したがって、量子場の理論にも適用される)。なお、量子現象も、巨視的な装置を使って観測されるという意味では、巨視的なものであって、そこで使用される時間概念は、古典物理学で使用される時間概念と異なるところはない、ということに注意しておく。ただ、量子現象の観測が、古典物理学的現象の観測と決定的に違うところは、それが、時間的には、離散的な間隔においてしかなされ得ない、という点である(多くの場合、二つの時刻に対応する状態、すなわち、始状態と終状態だけの観測)。これは、すでに述べた、量子的粒子の因果的追跡の不可能性と関連している。この意味では、量子力学にあっては、通常的时间は、観測の時刻を指定するためのパラメーターにすぎないことが結論される。ところで、通常的时间に実体性がないことは、古典物理学の枠内でも(特に相対性理論において)容易に洞察されるが、量子力学にあっては、それは、いま述べた意味で、さらに徹底化される。

(あらい あさお・北海道大学)