

量子力学における解釈問題と科学的事実主義

北島雄一郎

一 はじめに

我々が直接観測できないものが、我々とは独立に存在していて、かつ、それを科学理論は記述しているという立場を科学的事実主義という。科学的事実主義に関する問題の一つとして、科学的事実主義のもとで科学理論が記述する実在とはどのようなものであるかという問題がある。もちろん、科学的事実主義が妥当な立場でないとしたら、科学理論が記述する実在がどのようなものであるかという問題は意味がなくなる。しかし、科学的事実主義の主張、特に科学理論はどのような実在を記述しているのかについての主張を明確にしなければ、科学的事実主義が妥当な主張であるかどうかを検討できない。したがって、科学的事実主義が妥当な立場であるかどうかを検討するためにも、科学理論が記述する実在とは何かを考察することは必要であろう。本稿では、そのような考察を行いたい。

ここでは、科学的事実主義を次の三つの主張からなる立場と考える。

- ・我々が直接観測できないものが、我々の観測とは独立に存在する。
- ・そのような実在を、科学理論を通して、我々は認識できる。
- ・科学の目的は、科学理論を通して認識できる実在をより正確に認識することである。⁽¹⁾

科学理論としては、量子力学をとりあげる。そして、科学的实在主義が妥当であるという前提のもとで、量子力学が記述する实在には、以下の三つの要素のうち少なくとも一つを含むと考える。

- ・ 物理的実体
- ・ 物理的実体の性質
- ・ 物理的実体間の関係からなる構造

例えば、科学的实在主義の立場によれば、現代物理学は陽子や中性子といった物理的実体を扱い、陽子や中性子のスピンなどの性質を述べ、そして陽子や中性子がどのような構造によって原子核を構成しているかを記述している。このように、通常の科学的实在主義は、科学理論が記述する实在の要素には、実体、実体の性質、実体間の関係からなる構造すべてが含まれていると考えているといえるだろう。

本稿では、实在の要素として、すべての要素が考えられるのか、すべての要素を实在の要素として考えられないならば、どの要素が实在の要素として考えられるのかという問題を、量子力学の解釈問題を通して、検討する。量子力学が記述する实在を考えるので、物理的実体の性質とは量子力学における観測可能量(2)に関わる性質を指すことにし、例えば位置や運動量も含めることにする。

量子力学の解釈問題とは、量子力学が記述する实在とはどのようなものであるかという問題である。この問題を考えてるとき、特に量子力学が記述している物理的実体の性質はどのようなものであるかということが検討されてきた。つまり、量子力学が記述する实在に、物理的実体の性質が含まれていることを前提にして、問題が立てられていた。本稿では量子力学の解釈問題を検討することによって、量子力学は物理的実体の性質を記述していると考える考え方はさまざまな問題をはらんでいるということを指摘する。そして、物理的実体の性質を实在の要素として考えることは妥当でない」と結論する。

本稿の構成を述べる。二節では非相対論的量子力学における解釈問題、三節では特殊相対論と量子力学を統合しようとする試みである代数的場の量子論における解釈問題をとりあげ、検討する。そして、物理的実体の性質を量子力学が記述する実在の要素であると考えerことは妥当でないと結論する。このことをふまえて、四節では、量子力学が記述する実在の要素に、物理的実体のみが含まれる場合、物理的実体間の関係からなる構造のみが含まれる場合、物理的実体と物理的実体間の関係からなる構造が共に含まれる場合に分類して、それぞれの場合を検討する。そして、実在の要素に、物理的実体と物理的実体間の関係からなる構造が共に含まれる場合が妥当であると結論する。

二 非相対論的量子力学における解釈問題

二・一 非相対論的量子力学

量子力学は、状態と、「物理量 A を観測したら、物理量 A の値は a である」という形の観測命題から構成され、ある状態のもとで観測を行ったとき物理量 A の値が a である確率が計算される。物理量とは、運動量や位置のことであり、運動量に関する観測命題とは「運動量を観測したら、運動量の値は a である」という形の観測命題、位置に関する観測命題とは「位置を観測したら、 a という位置で観測される」という形の観測命題である。状態は、ヒルベルト空間上の密度作用素であらわされ、「物理量 A を観測したら、物理量 A の値は a である」という形の観測命題は、物理量 A をあらわす自己共役作用素の、ボレル集合 a に対応したスペクトル射影作用素によってあらわされる。

観測命題という呼び方からも分かるように、通常の量子力学の定式化においては、観測者の存在が仮定されている。科学的事実主義の立場から量子力学を解釈するならば、量子力学における観測命題は、観測者の存在とは独立な命題、つまり「物理量 A の値は、観測とは独立に、 a である」という命題に解釈される必要がある。例えば、「運動量を観測したら、運動量の値は a である」という観測命題は「運動量の値は、観測とは独立に、 a である」と解釈され、「位置

を観測したら、 a という位置で観測される」という観測命題は、「位置は、観測とは独立に、 a である」と解釈される必要がある。そのためには、観測とは独立に、観測命題の真偽が決まっているとみなすことができないからならぬ。例えば、「机の上を見ると、鉛筆が見える」という観測命題の真偽が定まらないならば、「机の上に、観測とは独立に、鉛筆が存在する」ということはできないだろう。「物理量 A を観測したら、物理量 A の値は a である」という観測命題が真であれば「物理量 A の値は、観測とは独立に、 a である」と解釈でき、「物理量 A を観測したら、物理量 A の値は a である」という観測命題が偽であれば「物理量 A の値は、観測とは独立に、 a ではない」と解釈できる。

次に「物理量 A を観測したら、物理量 A の値は a である」という観測命題と「物理量 A を観測したら、物理量 A の値は b である」という観測命題を考える。ただし、 a と b は互いに排反とする。このとき、「物理量 A の値は a である」という観測命題が真であれば、「物理量 A の値は b である」という観測命題は偽でなければならない。また、「物理量 A の値は a である」という観測命題または「物理量 A の値は b である」という観測命題のいずれかが真であれば「物理量 A の値は a または b である」という観測命題は真であり、「物理量 A の値は a である」という観測命題と「物理量 A の値は b である」という観測命題の両方が偽であれば「物理量 A の値は a または b である」という観測命題も偽でなければならないだろう。しかし、これらの条件を満たすように量子力学における観測命題すべてに真偽を割り振ることはできないという定理が存在する(例えば、Bell (1966)を参照)。つまり、量子力学における観測命題すべてを、「物理量 A の値は、観測とは独立に、 a である」という命題、もしくは「物理量 A の値は、観測とは独立に、 a でない」という命題と解釈することはできない。

しかし、観測命題すべてに真偽を割り当てることができなくても、観測命題すべての集合の部分集合には、真偽を割り当てることのできる。科学的実在主義の立場から量子力学を解釈するならば、どの観測命題に真偽を割り当てることのできるか、つまり、どの観測命題が観測とは独立な命題と解釈できるかが問題となる。このような問題は量子力学に

おける解釈問題とよばれる。

二・二 非相対論的量子力学におけるバップ様相解釈とコッヘン・ディークス様相解釈

どの観測命題を観測とは独立な命題と解釈するかについては、いくつかの立場がある。ここでは、コッヘン・ディークス様相解釈とバップ様相解釈をとりあげる。コッヘン・ディークス様相解釈は、状態のみから真偽の確定した観測命題の集合が決まると考える。一方、バップ様相解釈は、ある一つの物理量を固定し、その物理量を指定物理量とよぶ。そして、指定物理量に関する観測命題は真偽が確定していると考ええる。指定物理量は数学的にはどの物理量をとることもできるが、本稿では位置を指定物理量とするバップ様相解釈をとりあげる。このとき、「位置を観測したら、 a という位置で観測される」という位置に関する観測命題が常に確定していると考えるので、常に物理的実体の位置は確定していることになる。指定物理量として位置以外の他の物理量をとることもできるが、ここで位置を指定物理量とする理由は次の通りである。

量子力学が記述する実在が古典力学が記述する実在と全く違うならば、量子力学が誕生したことによって古典力学が記述していた実在が捨て去られたのだから、量子力学に代わる新理論が誕生したとき量子力学が記述する実在も捨て去られる可能性を否定できない⁽⁴⁾。そのため、量子力学が記述する実在は古典力学が記述する実在と整合的でなければならぬ。古典力学は、物理的実体は常に位置と運動量は確定している実在像を与えていた。そこで、古典力学となるべく整合的な実在像を得ようという目的から、本稿では位置を指定物理量とする⁽⁵⁾。しかし、この説明では、なぜ運動量ではなく位置を指定物理量としたのかという疑問が残る。運動量を指定物理量としたときは、物理的実体の位置は確定していないものの、運動量は確定しているので、この場合も運動量に関しては古典力学と整合的になるからである。この疑問に答えるために、量子力学において観測がどのように行われているのかを考えよう。例えば、 z 方向のスピンが上向

きであるような電子を検出するためには、 z 方向の磁場をかけスピンの電子と下向きの電子を空間的に分離することによって、検出を行う（シュテルン・ゲルラッハの実験）。このように、スピンという、位置とは関係がない性質も、最終的には位置の測定を通して、測定することになる。この例から分かるように、物理的実体の位置は常に確定していると考える方が、このような測定を説明する際に説得力があるだろう。物理的実体の位置が確定していなくて運動量が確定しているならば、物理的実体を検出器で検出したとき、検出器がある位置に、位置の確定していない物理的実体が現れる理由を説明しなければならない。物理的実体の位置が確定しているならば、そのような理由はいらない。従って、位置を指定物理量とするのが最も自然な解釈だといえる。

二・三 バップ様相解釈とコッヘン・ディークス様相解釈における過小決定の問題

コッヘン・ディークス様相解釈とバップ様相解釈は共に、量子力学が予測する結果とは整合的になるように定式化されている。つまり、実験や観測に基づいて、どの解釈が正しいかを決定することはできない。このとき、以下に述べる二つの過小決定の問題が生じる。第一の問題は、バップ様相解釈において、どの物理量を指定物理量として考えるかという問題である。指定物理量が違うのならば、その解釈が与える实在像も全く異なるものになるからである。例えば、位置を指定物理量とすると、物理的実体は常に確定した位置に存在することになるが運動量は常に確定しているとは限らない。一方、運動量を指定物理量とすると、物理的実体は常に確定した運動量をもつことになるが位置は常に確定しているとは限らない。この問題に関して、二・二節で位置を指定物理量としてとる理由を述べた。そこで、ここではこの理由が妥当なものであるとして話を進める。

第一の問題が解決したと仮定しても、コッヘン・ディークス様相解釈と位置を指定物理量とするバップ様相解釈の間で過小決定の問題が生じる⁽⁶⁾。それは、この二つの解釈が、全く異なる实在像を提出しているからである。コッヘン・デ

イークス様相解釈は、時間と共に確定した命題が変化する。例えば、物理的実体がある位置で観測されるという観測命題の真偽は常に確定しているわけではないので、ある時刻において物理的実体がどこかの位置に存在していると考えることができるとしても、別の時刻では物理的実体はどこかの位置に存在していると考えることができるとはかぎらない。一方、位置を指定物理量とするバップ様相解釈によれば、位置に関する観測命題は常に確定しているので、物理的実体は常にどこかの位置に存在していると解釈することができるとはかぎらない。つまり、コッヘン・ディークス様相解釈による量子力学が記述する実在と、バップ様相解釈による量子力学が記述する実在は、全く異なる。

反实在主義者が科学的实在主義に反対する論拠の一つとして、この過小決定の問題がある。科学的实在主義者のこの批判への応答の一つは、どちらの解釈を選択するかについての基準として、経験的な要素だけではなく、経験を超えた要素もあるというものである(例えば、Ladyman (2002) の pp. 181-183を参照)。科学的实在主義者によるこのような応答に対して、経験を越えた要素は、より実用的な理論を選択する基準となるだけであって、实在を記述している理論を選択する基準とはならないという反实在主義者からの再批判もある。しかし、本稿ではこの問題には立ち入らず、経験を越えた要素が实在を記述している解釈を選択する基準になりうるとしても、コッヘン・ディークス様相解釈とバップ様相解釈のどちらが妥当な解釈であるかを決定することは難しいということを指摘したい。

経験を越えた要素として考えられるのは、単純性、古典力学が提示する实在像との整合性、現代物理学における他の理論との整合性などであろう。古典力学が提示する实在像との整合性を考える理由は、二・二節でも述べたように、量子力学が記述する实在が古典力学が記述する实在と全く違うならば、量子力学が誕生したことによって古典力学が記述していた实在が捨て去られたのだから、量子力学に代わる新理論が誕生したとき量子力学が記述する实在も捨て去られるかもしれないからである。この節では、単純性と古典力学が提示する实在像との整合性を考える。現代物理学における他の理論との整合性については、三節において、特殊相対性理論も考慮に入れた代数的場の量子論のもとでコッヘ

ン・ディークス様相解釈やバップ様相解釈が可能であるかどうかを考えることによって考察する。

まず、単純性という基準を考えよう。位置を指定物理量としたバップ様相解釈の場合、その解釈を定式化したとき、密度作用素によって表すことができないような通常の量子力学では用いられない状態があらわれ (Kitajima, 2005, Proposition 4.1)。⁷ この状態に基づいて解釈をすることになる。コッヘン・ディークス様相解釈の場合は、通常の量子力学では用いられないような状態は存在するもの (Kitajima, 2005, Proposition 3.1)。⁸ 通常の量子力学で用いられる密度作用素によって表すことができる状態のみに基づいて解釈することができる (Kitajima, 2005, Theorem 3.1)。通常の量子力学で用いられない状態を用いる解釈を単純でないと考えれば、位置を指定物理量とするバップ様相解釈の方が単純でないことになる。しかし、実在の要素がより少ない方が単純な解釈であると考えると、位置を指定物理量とするバップ様相解釈の方が単純な解釈であることになる。なぜなら、位置を指定物理量とするバップ様相解釈では物理的実体の位置のみが実在の要素であると解釈するのに対して、コッヘン・ディークス様相解釈ではある時刻では物理的実体の位置が確定しているけれども違う時刻では物理的実体の位置は確定しておらず他の物理量に関する観測命題の真偽が確定していることになり、非可算無限個の性質が実在の要素であると解釈することになるからである。結局、単純性をどのようなものと考えるかによって、バップ様相解釈の方が単純であるということになったり、コッヘン・ディークス様相解釈の方が単純であるということになったりする。したがって、単純性という観点から、バップ様相解釈とコッヘン・ディークス様相解釈のどちらが妥当な解釈であるかを判定するのは難しい。

次に、古典力学が提示する実在像との整合性について考える。古典力学が提示する実在像は、常に物理的実体はある一点に存在し、かつある確定した運動量の値をもっているというものであった。古典力学では常に物理的実体はある一点に存在しているということとの整合性を考慮に入れれば、指定物理量を位置としたバップ様相解釈の方が古典力学が提示する実在像と整合的であることになる。なぜならば、コッヘン・ディークス様相解釈では、物理的実体がある位置

で観測されるという観測命題の真偽は常に確定しているわけではないので、ある時刻において物理的実体がどこかの位置に存在していたとしても、別の時刻では物理的実体はどこかの位置に存在していると解釈できるとは限らないのに対して、指定物理量を位置としたバップ様相解釈のもとでは、Kitajima (2005) の Theorem 4.1 とその後の部分で述べたように、常に物理的実体はある一点に存在していると解釈することができるからである。一方、古典力学では物理的実体の位置と運動量のどちらか一方のみを特権的に扱っていないということとの整合性を考慮に入れば、コッヘン・ディークス様相解釈の方が古典力学が提示する实在像と整合的であることになる。なぜならば、バップ様相解釈では位置のみを特権的に扱っていて運動量は無視しているが、コッヘン・ディークス様相解釈では位置と運動量のどちらか一方を特権的に扱っておらず、観測とは独立な性質は状態のみから決まると考えているからである。このように、古典力学が提示する实在像との整合性という観点からも、バップ様相解釈とコッヘン・ディークス様相解釈のどちらが妥当な解釈であるかを判定するのは難しい。

以上のことから、単純性や古典力学が提示する实在像との整合性という経験を越えた要素によって、コッヘン・ディークス様相解釈とバップ様相解釈のどちらが妥当であるかを決するのは難しい。そこで、三節では、現代物理学における他の理論との整合性について考える。本稿では特に、現代物理学における他の理論として特殊相対論を考え、特殊相対論と量子力学を数学的に厳密に統合しようとする試みである代数的場の量子論において、コッヘン・ディークス様相解釈とバップ様相解釈が定式化できるかどうかを検討する。

三 代数的場の量子論における解釈問題

三・一 代数的場の量子論

この節では、代数的場の量子論について簡単に述べる。代数的場の量子論は、特殊相対論と量子力学を数学的に厳密

に統合するという目的のもと、一九六〇年頃から R. Haag や荒木不二洋らによって始められた。この理論は、ミンコフスキー空間上の有界な開集合にフォンノイマン代数とよばれるヒルベルト空間上の有界作用素の集合を対応させる。このようなフォンノイマン代数は、局所代数とよばれる。非相対論的量子力学と同様に、「物理量 A を観測したら、物理量 A の値は a である」という観測命題は、局所代数に含まれる物理量 A をあらわす自己共役作用素の、ボレル集合 a に対応するスペクトル射影作用素によってあらわされる。非相対論的量子力学と違うのは、この観測命題がミンコフスキー空間の有界な開集合に対応していることである。つまり、局所代数に含まれる物理量 A をあらわす自己共役作用素の、ボレル集合 a に対応するスペクトル射影作用素は、「ある有限の広さを持つ場所、ある有限の時間幅をもった時間において、物理量 A を観測したら、物理量 A の値は a である」という観測命題と解釈される。代数的場の量子論は、このような局所代数全体の集合に、相対論的な条件も含む物理的に妥当な条件を課する（例えば、Haag (1966) を参照）。

代数的場の量子論を科学的実在主義の立場から解釈しようとするとき、非相対論的量子力学と同様に、「ある有限の広さを持つ場所で、ある有限の時間幅をもった時間において、物理量 A を観測したら、物理量 A の値は a である」という観測命題が、「ある有限の広さを持つ場所で、ある有限の時間幅をもった時間において、物理量 A の値は、観測とは独立に、 a である」というように解釈できるかどうかということが問題になる。二・一節で述べたように、観測命題が観測とは独立な命題と解釈されるためには、観測命題の真偽が確定していなければならない。しかし、非相対論的量子力学の場合と同様に、局所代数に含まれる観測命題すべての真偽が確定しているとは考えることはできない（例えば、Kitajima (2006) の Theorem 5.2 を参照）。科学的実在主義の立場にたつならば、非相対論的量子力学の場合と同様に、局所代数のどの観測命題の真偽が確定しているかを調べる必要がある。そこで、コッペン・ディークス様相解釈と、バップ様相解釈のアイデアに従って、局所代数のどの観測命題の真偽が確定しているかを考えてみる。

三・二 代数的場の量子論におけるコッヘン・ディークス様相解釈とバップ様相解釈

状態のみから真偽の確定した観測命題は定まるという考え方であるコッヘン・ディークス様相解釈を代数的場の量子論に拡張する試みは、Dieks (2000) によって始められた (Dieks, 2000, Section 5)。「ある有限の広さを持つ場所で、ある有限の時間幅をもった時間において、物理量 A の値は、観測とは独立に、 a である」という形の命題の集合は、ミンコフスキー空間の有界な開集合に対して、一意に定まらなければならない。しかし、Clifton (2000) は、Dieks (2000) の定式化では、局所代数において真偽が確定した観測命題の集合に任意性があるという事実を指摘し (Clifton, 2000, Section 3) ʼ Dieks (2000) の定式化を批判した。

Clifton (2000) は、Dieks (2000) とは別のアイデアでコッヘン・ディークス様相解釈を代数的場の量子論において定式化しようとして、ある特別な状態において、その状態のみから決まる真偽の確定した観測命題の集合を定式化した (Clifton, 2000, Proposition 1)。⁽⁷⁾ Clifton (2000) の定式化を、任意の状態に拡張したものが、Kitajima (2004) の Theorem 11 である。この定式化のもとで、「ある有限の広さを持つ場所で、ある有限の時間幅をもった時間において、物理量 A の値は、観測とは独立に、 a である」というように解釈できる命題の集合は、Dieks (2000) の場合と違って、任意のミンコフスキー空間の有界な開集合に対して一意に定まる。Kitajima (2000) の Corollary 12 とその後の記述より、この定式化がコッヘン・ディークス様相解釈を代数的場の量子論に拡張したものであるということが分かる。しかし、この定式化は、大きな問題を抱えている。それは、多くの状態において、その状態のみから決まる真偽の確定した観測命題が存在しない⁽⁷⁾ということである (Clifton, 2000, Proposition 3)。つまり、コッヘン・ディークス様相解釈は、代数的場の量子論においてはうまくいかない。

代数的場の量子論において、バップ様相解釈はうまく定式化できるのだろうか？ バップ様相解釈は、ある一つの物

物理量を指定物理量として固定し、真偽の確定した観測命題は指定物理量と状態のみから決まると考えていた。ある物理量を指定物理量として選ぶときは、なんらかの理由付けが必要であった。非相対論的量子力学の場合は、二・二節で述べた理由のもとで、位置作用素を指定物理量とした。しかし、代数的場の量子論では、非相対論的量子力学より抽象度が高く、局所代数のなかの自己共役作用素は、位置や運動量のように具体的な物理量として解釈できない。局所代数に含まれる自己共役作用素は、その局所代数が対応している時空領域における観測可能量としか解釈できないのだ。つまり、局所代数の中の一つの物理量を選ぶ理由付けができないのである (cf. Earman & Ruetsche, 2005, p. 575)。従って、バップ様相解釈を代数的場の量子論において定式化することは難しい。

以上のことから、代数的場の量子論において、コッヘン・ディークス様相解釈もバップ様相解釈も定式化するのは難しい。非相対論的量子力学においては、コッヘン・ディークス様相解釈、バップ様相解釈が共に定式化でき、その結果、過小決定の問題が生じた。しかし、代数的場の量子論においては、二つの解釈が定式化できないので、過小決定の問題すら生じない。このように、量子力学が記述している物理的実体の性質は何かという問題である量子力学の解釈問題は、満足な解決が得られず、むしろ否定的な結果が得られている。これは、量子力学は物理的実体の性質を記述しているという立場のもとで、量子力学が記述している物理的実体の性質は何かという問題を考えていたことに起因する。つまり、量子力学が記述している実在の要素として、物理的実体の性質を含めて考えることは妥当でなく、物理的実体の性質は実在の要素ではないと考える方が妥当であるということになる。

四 量子力学が記述する実在の要素

一節で述べたように、量子力学が記述する実在の要素として、物理的実体、物理的実体の性質、物理的実体間の関係がある。この節では、これらの実在の要素について考察する。三節と四節の議論より、量子力学が記述している実在の

要素に、物理的実体の性質は含まれないと考えることが妥当であると結論した。一節で述べたように、本稿では科学的実在主義の立場にたつて、量子力学が記述している実在の要素に、何が含まれているかを検討している。今、三つの可能性が考えられる。

I型…量子力学が記述している実在の要素には、物理的対象間の関係からなる構造のみが含まれる。

II型…量子力学が記述している実在の要素には、物理的対象のみが含まれる。

III型…量子力学が記述している実在の要素には、物理的対象と物理的対象間の関係からなる構造が含まれる。

この節では、I型、II型、III型の中で、どの立場が妥当かを考える。

四・一 I型

まず、I型の科学的実在主義から考える。I型の科学的実在主義は、可能でないと私は考える。その理由を以下に述べる。

Ladyman (1998) は、量子力学において物理的実体は存在しないと主張した。Ladyman (1998) の主張の根拠は、次のようなものである。French (1989) が示したように、量子力学的粒子は個性をもつと解釈することもできるし個性をもたないとも解釈できるから、量子力学的粒子には過小決定の問題がある。しかし、そもそも物理的実体がないとしたら、過小決定の問題は避けられる。したがって、量子力学が記述している実在の要素は、物理的実体間の関係からなる構造のみであり、物理的実体は存在しない (Ladyman, 1998, pp. 419-420)。このように、Ladyman (1998) は主張する (French & Ladyman (2003) の pp. 36-37 も参照)。

私は、量子力学的粒子の個性性に関する過小決定の議論は特殊相対論も考慮に入れた場合、成立しないと考えている。理由は、以下の通りである。量子力学的粒子が個性性をもつならば、粒子にラベルをつけることによって、粒子の個数

を数えることができるであろう。しかし、相対論的場の量子論において個数を数えられるような粒子は存在しないという定理 (Halvorson & Clifton, 2002, Theorem 3) が存在する。この定理によれば相対論的場の量子論において粒子の個数を数えることはできないのだから、粒子は個性性をもたないことになる。つまり、量子力学的粒子の個性性に関する過小決定の問題は、非相対論的量子力学においては成立していたが、特殊相対論も考慮に入れた枠組みにおいては成立せず、量子力学的粒子は個性性をもたない。このように、Ladyman (1998) が物理的実体が存在しないと主張する根拠となっていた過小決定の問題は、相対論的場の量子論において成立しないから、この立場は説得力のある理由を持たない。従って、Ladyman (1998) の主張は妥当でないということになる。

物理的対象が存在しないならば、物理的対象間の関係からなる構造が存在するということはできないという考え方が通常の考え方である。この考え方を否定するためには、何らかの根拠が必要である。しかし、今述べたように Ladyman (1998) が提示した根拠は適切でなかったので、この考え方は否定されていない。したがって、物理的実体間の関係からなる構造が存在するならば物理的実体が存在するということになる。つまり、物理的実体間の関係からなる構造が量子力学が記述する実在の要素であるならば、物理的実体も量子力学が記述する実在の要素であるということになるので、物理的実体間の関係からなる構造のみが実在の要素であることはできない。

四・二 II型

次にII型の科学的実在主義を考える。私は、II型の科学的実在主義も可能でないと考える。理由は次の通りである。

光に関する科学理論を考えよう。この科学理論が扱う物理的実体は、エーテルとよばれる物理的実体から、電磁場とよばれる物理的実体になり、現在はボソンとよばれる物理的実体になっている。一節で述べたように、科学的実在主義の立場にたつたとき、科学の目的とは我々が直接観測できない実在を、より正確に記述することである。つまり、エー

テルという物理的実体からボソンとよばれる物理的実体へ移行したことによって、より正確な実在の記述を与えているはずである。

しかし、二つの実体に違いがあるならば、その性質もしくは他の実体との関係において違いが存在しなければならぬということ的前提すると、II型の科学的实在主義のもとでは、エーテルとよばれる物理的実体、電磁場とよばれる物理的実体、ボソンとよばれる物理的実体に違いは存在しない。なぜなら、II型の科学的实在主義は、物理的実体の性質も物理的実体間の関係も実在の要素ではないと考えるからである。したがって、II型の科学的实在主義のもとでは、エーテルという物理的実体からボソンとよばれる物理的実体へ移行したことによって、より正確な実在の記述を与えるようになったとはいえない。これは、II型の科学的实在主義が妥当でないということの意味する。

四・三 III型

I型とII型は妥当でないと結論したので、III型が残った。III型の科学的实在主義に対しては、Psillos (2001) による、次のような批判がある (Psillos, 2001, Section 3)。それは、科学理論を通して我々が認識しうる実在の要素として、物理的実体間の関係からなる構造は含まれるが、物理的実体の性質は含まれないという主張は、不可能であるというものである。なぜなら、対象間の関係に関する記述から対象の性質がある程度分かるからである。Psillos (2001) が挙げている例は、「三十郎は振一郎の父である」という例である (Psillos, 2001, p. S20)。この三十郎と振一郎の関係に関する言明から、「三十郎は男である」という三十郎の性質が分かる。確かに、この例であれば、対象間の関係から対象の性質が分かる。しかし、対象間の関係に関する記述から対象の性質が分からない例もある。例えば、次のような例である。無限の長さを持つ数直線と、その数直線上の二つの物体を考える。「ある物体の二メートル右側に別の物体が存在する」という二つの物体の関係に関する言明から、二つの物体の位置を含めた性質は分からない。つまり、物理的実

体間の関係に関する言明から、物理的実体の性質が分からない場合もある。任意の物理的実体間の関係に関する言明から、物理的実体の性質が分かるのなら、Psillos (2001) の主張は妥当だが、今挙げた例から分かるように、そうではない。したがって、Psillos (2001) の主張は妥当でないので、III型の科学的实在主義は可能である。

四・一節と四・二節で、I型とII型の科学的实在主義は妥当でないと結論した。以上の議論から、III型の科学的实在主義が最も妥当な立場であるということになる。

五 ま と め

本稿では、科学的实在主義の立場に立って、量子力学が記述する实在の要素には、物理的実体、物理的実体の性質、物理的実体間の関係からなる構造という三つの要素のうちどれが含まれるのかを、量子力学の解釈問題を軸に、検討してきた。

二節では、非相対論的量子力学におけるコッヘン・ディークス様相解釈とバップ様相解釈という二つの解釈を述べ、これらの解釈のどちらが妥当であるかは経験的な要素のみからでは決定できないという過小決定の問題があることを指摘した。そして、単純性と古典力学が提示する实在像との整合性という経験を越えた要素の観点から、二つの解釈のうちどちらが妥当であるかを決定できるか検討したが、いずれかの解釈に決定できる積極的な理由付けはないという結論に達した。

三節では、コッヘン・ディークス様相解釈とバップ様相解釈のどちらが妥当であるかという問題を、現代物理学における他の理論との整合性の観点から考えようとした。現代物理学における他の理論として、特殊相対性理論を考え、特殊相対性理論と量子力学を数学的に厳密に統合しようとする代数的場の量子論において、これらの解釈を検討した。その結果、代数的場の量子論においては、これらの解釈を定式化するのは難しいということが分かった。つまり、非相対

論的量子力学においては、二つの解釈が定式化できたために過小決定の問題が生じたわけだが、代数的場の量子論においては、いずれの解釈も定式化できないため過小決定の問題すらおこらない。もし非相対論的量子力学の枠組みで、過小決定の問題が解決したとしても、代数的場の量子論において解釈を定式化できないという問題に出会うことになる。

量子力学の解釈を行う上で、前提にしていた条件は、量子力学が記述する実在の要素には、物理的対象の性質が含まれるという条件であった。このような非相対論的量子力学における過小決定の問題や代数的場の量子論において解釈を定式化できないという問題が生じる理由は、この前提の条件が誤っているためだと思われる。したがって、量子力学が記述する実在の要素に、物理的実体の性質は含まれない。

四節においては、実在の要素に、物理的実体のみが含まれる場合、物理的実体間に関する構造のみが含まれる場合、物理的実体と物理的実体間の関係からなる構造が含まれる場合に分類して、それぞれの場合を検討した。こうした検討の結果、現時点で私は、量子力学が記述する実在の要素は、物理的実体と物理的実体間に関する構造であり、物理的実体の性質は実在の要素ではないと考えている。

参考文献

- Bell, J. S. (1966). 'On the Problem of Hidden Variables in Quantum Mechanics', *Reviews of Modern Physics*, 38, 447-452.
- Bub, J. & Clifton, R. (1996). 'A Uniqueness Theorem for No-collapse Interpretations of Quantum Mechanics', *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 27, 181-219.
- Bub, J., Clifton, R. & Goldstein, S. (2000). 'Revised Proof of the Uniqueness Theorem for "No Collapse" Interpretations of Quantum Mechanics', *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 31, 95-98.
- Clifton, R. (1995). 'Independently Motivating the Kochen-Dieks Modal Interpretation of Quantum Mechanics', *British Journal for the Philosophy of Science*, 46, 33-57.

- (2000). 'The Modal Interpretation of Algebraic Quantum Field Theory', *Physics Letters A*, 271, 167-177.
- Dieks, D. (2000). 'Consistent Histories and Relativistic Invariance in the Modal Interpretation of Quantum Mechanics', *Physics Letters A*, 265, 317-325.
- Earman, J. & Ruetsche, L. (2005) 'Relativistic Invariance and Modal Interpretations', *Philosophy of Science*, 72, 557-583.
- French, S. (1989). 'Identity and Individuality in Classical and Quantum Physics', *Australasian Journal of Philosophy*, 67, 432-446.
- & Ladyman, J. (2003). 'Remodelling Structural Realism: Quantum Physics and the Metaphysics of Structure', *Synthese*, 136, 31-56.
- Haag, R. (1996). *Local Quantum Physics (Second Edition)*, Springer.
- Halvorson, H. & Clifton, R. (1999). 'Maximal Beables Subalgebras of Quantum Mechanical Observables', *International Journal of Theoretical Physics*, 38, 2441-2484.
- (2002). 'No Place for Particles in Relativistic Quantum Theories?', *Philosophy of Science*, 69, 1-28.
- Halvorson, H. (2006). 'Algebraic Quantum Field Theory', in Butterfield, J. and Earman, J. (eds.), *Handbook of the Philosophy of Science Volume 2: Philosophy of Physics*, Elsevier.
- Kitajima, Y. (2004). 'A Remark on the Modal Interpretation of Algebraic Quantum Field Theory', *Physics Letters A*, 331, 181-186.
- (2005). 'Interpretations of Quantum Mechanics in terms of Beable Algebras', *International Journal of Theoretical Physics*, 44, 1141-1156.
- (2006). 'On the Problem of Hidden Variables in Algebraic Quantum Field Theory', *Annals of the Japan Association for the Philosophy of Science*, 15-1, 25-38.
- Ladyman, J. (1998). 'What is Structural Realism?', *Studies in History and Philosophy of Science*, 29, 409-424.
- (2002). *Understanding Philosophy of Science*, Routledge.
- Laudan, L. (1981). 'A Confutation of Convergent Realism', *Philosophy of Science*, 48, 19-48.

Okasha, S. (2002). *Philosophy of Science: A Very Short Introduction*, Oxford University Press.

Psillos, S. (2001). 'Is Structural Realism Possible?', *Philosophy of Science*, 68 (Proceedings), S13-S24.

—— (1999). *Scientific Realism: How Science Tracks Truth*, Routledge.

佐藤俊治 (二〇〇二) 「様相解釈への導入」 科学哲学 三五一—二二二—二二二。

Worall, J. (1989). 'Structural Realism: The Best of Both Worlds?', *Dialectica*, 43, 99-124.

注

(1) 我々が直接観測できないものが我々とは独立に存在していて、かつ、それを科学理論は記述していると考えるけれども、科学の目的は実在をより正確に認識するというのではなく、観察や予測をより正確に行うことであるという立場を取ることとも可能かもしれない。しかし、科学の目的は実在をより正確に認識することではなく、観測や予測をより正確に行うことであるとしたら、それは反実在主義に極めて近い立場であり、科学的事実主義とは呼べないだろう。したがって、科学的事実主義の定義として、この条件を入れない場合もある(例えば、Psillos (2001) の p. S18 における定義)けれども、この条件も科学的事実主義の定義とすることは妥当であろう。

(2) 科学的事実主義に関わる論争の一つとして、観察可能なものと観察不可能なものを区別することができるかどうかという問題がある。この問題において観察可能であるということは、検出器などの助けを借りずに人間の目だけで観察できるということである(例えば、Okasha (2002) の pp. 66-70 を参照)。しかし、量子力学において観測可能量とよばれるものは、人間の目で見ることができないのではなく、検出器を用いて観測できる量のことである。例えば、位置、運動量、エネルギー、スピンなどが含まれる。(3) ロッパン・ギョークス様相解釈については Clifton (1995) を、バブ様相解釈については Bub & Clifton (1996) を、Bub, Clifton & Goldstein (2000) を参照。これらの研究では、有限次元のヒルベルト空間のもとで考察していたので、位置や運動量を数学的に厳密に扱うことができなかった。Halvorson & Clifton (1999) は無限次元のヒルベルト空間のもとでこれらの解釈を考察し、位置や運動量も数学的に厳密に扱えるような枠組みを与えた。

(4) この議論は、Laudan (1981) によって論じられた悲観的な帰納法とよばれる議論を念頭に置いている。悲観的な帰納法とは、次のような議論である。現在までのほぼ正しい経験的予測をしていた科学理論において実在していると考えられていた対象、

例えば熱素やエーテルなどは現在の科学理論においては実在しないと考えられている。このことから帰納的に現在受け入れられている科学理論が扱う対象、例えば電子なども将来の科学理論においては実在しないと考えられるだろう。このようにして悲観的な帰納法は科学的実在主義に反対する。このような科学的実在主義に対する批判を考慮に入れると、量子力学が記述する実在は、古典力学が記述する実在と、整合的でなければならぬ。

(5) 量子力学のバップ様相解釈では、位置と運動量の両方を指定物理量とすることはできない。

(6) 佐藤(二〇〇二)は、コッヘン・ディークス様相解釈(佐藤(二〇〇二)は、ファーマス・ディークス様相解釈とよんでいる)とバップ様相解釈のもとで、過小決定の問題が生じることを指摘した後、両者の優劣を決定する基準がないと述べ、「量子力学の哲学における実在主義の復権を唱えることはできない」と結論している(佐藤、二〇〇二、二二一―二二三頁)。

(7) Halvorson (2006) は、Clifton (2000) が「確定した命題は状態のみから決まる」ということをあらわすために課した条件が適切ではない可能性があるとして、この条件より弱い条件を提案している(Halvorson, 2006, Section 5.2)。しかし、この条件の下で、多くの状態のもとで、その状態のみから決まる真偽の確定した観測命題が存在しないという問題が解決できるかどうかは明らかではない。

(8) 実在の要素に、物理的対象、物理的対象の性質、物理的対象間の関係からなる構造のいずれも含まれないと考えるならば、それは科学的実在主義とはいえず、反実在主義の立場であろう。本稿では、科学的実在主義は妥当であるという前提のもとで議論をしているので、この可能性は考えない。

(9) 注4で述べた悲観的な帰納法に対して、Worall (1989) は、古い理論から新しい理論に移行しても、科学理論が記述する実在として物理的対象間の関係からなる構造は保存されると主張して、科学的実在主義の立場を擁護した。Ladyman (1998) は、Worall (1989) の立場をふまえた上で、さらに量子力学的粒子における過小決定の問題を考慮に入れて、物理的実体は存在しないが物理的対象間の関係からなる構造は存在すると主張した。

(筆者 きたじま・ゆういちろう 四天王寺国際仏教大学非常勤講師/科学哲学)

qualities are concerned. Unfortunately, this interpretation begs the question because it presupposes the very point that an idea can have size, shape or motion as physical objects do. The latter interpretation is an attempt to dismiss the metaphysical problem by assimilating Lockean ideas with intentional objects, that is, the objects which appear to us. However, since Locke denies that ideas can be characterized as such objects, this interpretation must be rejected.

Furthermore, Locke can avoid the metaphysical problem, while maintaining that the naive interpretation is plausible. Judging from the textual evidence, Lockean ideas should be understood as *mental* images. Now, the question is how these mental images can have properties such as size, shape or motion. We can find the answer to this question in Locke's epistemological method. In the metaphysical problem it is assumed that no mental entities, including ideas, can be extended, unlike physical properties. This idea can be dismissed in Locke's epistemology. His main epistemological device is a "historical, plain method," a scientific method entirely based on our observations. This method implies that we must take an agnostic attitude towards the nature of mind because any inquiries into it go beyond our observations. This means that, in this method, the idea that no mental entities can be extended must be rejected as a dogmatic opinion. Thus, since Locke does not have to take the metaphysical problem seriously, there is no problem for him to maintain the resemblance between ideas and qualities in the naive way.

The Interpretation Problem of Quantum Mechanics and Scientific Realism

by

Yuichiro KITAJIMA

Part-time lecturer

International Buddhist University

Scientific realism holds that the physical world exists independently of human perception, and that the aim of science is to provide a true description of the world. Entities, properties of entities and structures consisting of relations between entities could be regarded as the elements of reality from a realistic point of view. The interpretation problem of quantum mechanics is an attempt to answer the question; which properties of physical entities are real in quantum mechanics? That is, this problem presupposes that properties of physical entities can be

regarded as the elements of reality. In the present paper I discuss the interpretation problem of quantum mechanics in order to examine which elements are real. I conclude that the properties of physical entities cannot be regarded as the elements of reality, and that the elements of reality are entities and structures consisting of relations between entities.