

## 遅延選択と確率的遡及因果

### — 確率はどの段階で崩壊するのか —

Delayed Choice and Probabilistic Backward Causation  
— At Which Stage Does the Collapse of Probability Occur? —

榛葉 豊\*

Yutaka SHINBA

Abstract : When we use Bayes - Laplace theorem for the retrospective situation, by its nature, determining the probability of hypothesis by the observed data, with the propensity interpretation of probability, we encounter some difficulty called Humphreys' Paradox that shows the incommensurateness between collapsed value 1 for the past event and Bayesian value of probability. There is another Paradox called Newcomb's problem, which concerns backward causation and enigma for probability 1. We discuss retrospective causality and usage of the subjunctive mood with the past perfect tense of propensity considering these problems. Wheeler's delayed choice experiment by gravitation lens in the universe will show us some suggestion. We must self-examine the tense of subjective probability, and the meaning of causality. Then we could progress into the hard problem of integration between objective and subjective nature of probability as well as into another hard problem of relation between classical and quantum probability.

#### 1. 確率の収縮と遡及因果

初期 Keynes の論理解釈や de Finetti と Ramsey の主観解釈などの、確率を信念の度合いとする確率の主観的解釈では、確率の値 1 と 0 は特別な意味を持っている。論理解釈では通常の論理での命題間の関係を表す。それ以外の値の場合がまさに不確実な状況での、信念の度合いあるいは確証度を表すということになる。主観解釈でもこのことについては同様である。値 1 と 0 は、一般に不確定という世界観の下でも、当然含まれなければならないであろう、世界記述の特殊な場合であると、単純には取れよう。しかし、決定論の世界と非決定論の世界が、そこで峻別されているとも思える。この別の世界観間のトポロジーを考察したい。

もうひとつ、確率がいつ、何によって 1 に変化するのかと言う問題を、主観説、客観説（これらの全く違った 2 つの概念は、ヤヌスの双面であるからなどと言って逃げてはならず、これらは将来的には統合されるべきものであると筆者は考える）の両方にわたって考察してみたい。

これらの問題を考察するには、因果の問題が係わってくる。因果と相関について、この世にあるのは相関だけであり、因果

とは錯覚か、それとも人間の脳の癖が習慣に過ぎないという、Hume 以来の注意が立ち現れる。この根本的な問題には、今回は触れないことにする。しかし、確率を収縮させる（崩壊させる）もの（こと）は何かと言うことについては避けると言うわけにはいかないであろう。

Popper の傾向性解釈<sup>15)</sup> は、量子力学を扱うためという目的が大きな動機となって提出された客観解釈である。量子力学の確率は、普通の物理学者にとっては、von Mises の頻度解釈を素朴にしたような客観解釈（物理的解釈）である。傾向性解釈は、客観解釈でありながら、たとえば今年中に極東で限定核戦争が起こる確率というような単一事象の確率を論ずることが出来るというのが特徴である。従って、なかば、主観解釈であるとも言える。そこにいう傾向性（Propensity）とは、関係する世界の配置であるとか状況であるとか、量子力学に引きつけて言えば、測定対象系と実験装置と（さらには観測者の）もつ、ある場所で電子が観測されるというような特定の結果を生じる「傾向」を数値で表したものである。従って、状態ベクトル（対象だけでなく観測装置も含んだ）のようなものであると言える。

この傾向性概念に対する難点として、良く取り上げられるの

2007 年 3 月 2 日受理

\* 理工学部 情報システム学科

が、Humphreys<sup>13,14)</sup>のパラドックスとNewcomb<sup>15-17)</sup>問題である。傾向性は確率とは言えないのではないかと露わにする問題で、多くの分析がある。

前者は明示的に時間の経過を含んだ問題で、遡及確率をBayes-Laplaceの定理により、まさに確率の逆算法として「原因」の確率を認識するときに、傾向性概念は意味を失うのではないかと「パラドックス」である。この問題には、いつ確率が観測結果を表す事象である事を表す値 $\mathbf{1}$ に確定するかということを含んでいる。確率の崩壊（収縮）である。これは端的に言って、観測問題の波束（確率振幅）の収縮に当たる。ここでこれまでの論者に筆者もひとまず合意することは、量子力学が特別なのではなく、普通の確率でも、「同じ」、「崩壊」というよく分からない事が起こっているということである。

Popperは「砂漠でルーレットの出目で行軍する兵士」という例え<sup>4)</sup>を出して、量子力学の観測理論での議論の持つ、古典的確率に対する特権性を否定した。ルーレットの針の向く方向に一定時間ずつ行軍する兵士のアンサンブルを重ね焼きしたものは、もやとした雲が拡がっていく（正規分布の点の集まりをあらわす確率密度分布関数の）ようなものである。ある時間が経ったあとで、当の兵士が次のどちらに行こうかとしている瞬間にその兵士を「観察したら、古い雲は消え去り、私たちがその兵士を観察したその地点から新しい雲がはじまってしまう。・・・これは「波束の収縮」と同じである・・・」。情報が得られたことにより確率は $\mathbf{1}$ に変化する。という例え話である。

しかしやはり観測理論と兵士では、厳然とした違いはあるのである。どうして卿の生前に、このことについて物理学者との議論がもつとなされなかったのかと惜しまれてならない。筆者の感ずる限りでは、Popperの憎んだ唯物論者の、そもそも問題が存在しないというお決まりの態度と結果的には同じ事になってしまうのではないか。

違いは、古典確率には存在しない干渉についてと、まさにそれに対する非干渉化（デコヘア）がどうして起こり、観測者は非干渉化をどう認識するのかである。非干渉化は量子的実在である潜在性から古典的実在性への変容である。現象や実体が観測により生成されるという言い回しも使われている。潜在から存在への変容は確率で言えば、確率 $\mathbf{1}$ で無かったものが確率 $\mathbf{1}$ になると言うことである。

Everettの多世界解釈に関連した考察も必要になってこよう。

一方、後者、Newcomb問題の方は、筆者には確率のトポロジー、決定論と非決定論の距離感を考えさせてくれるように思われる。このパラドックスでは、「 $\mathbf{1}$ に非常に近い確率で」という条件が含まれ、そしてそれがパラドックスたるために本質的である。この問題は、確率 $\mathbf{1}$ だとパラドックスにならないのである。この大違いの原因をこの問題は考えやすく提示してくれる。

またこの問題は、因果と相関、原因と責任と言った問題に近づく分かりやすい一つの捌め手であると思う。

量子力学の観測理論、特に物理的観測理論という、観測装置の巨視性を理論の数学モデルに本質的に取り入れて、「波束の収縮」を導出する（なかには量子力学の改変も含む理論もある）

理論達が沢山これまでに提出されてきた。種々の観点からいろいろの工夫を凝らしているのであるが、数学的に自明な波束の収縮の不可能性を避けるために執った手段として、これらに共通するのは、根拠が明らかでない観測量代数の制限と言う手法でなければ、(多くの場合)時間  $\rightarrow \infty$  や粒子数  $\rightarrow \infty$  の極限をとると言うことである。これは物理学というものの本性であり責められるべきではないかも知れない。だが、極限をとる理論での現実には実現されない極限を、マイクロマクロ変換という大義明分の下で飛び越え、説明とすることには反省があつて当然である。これが確率空間（可換、非可換の両方共）でのトポロジーをどう考えるかということである。

この極限移行概念の最近の観測理論の手柄は、「波束の収縮」、「非干渉化過程」を時間の関数として連続に記述するという、「瞬間の間の変化」を描き出すことが出来るようになってきたことである。

さて、両問題に共通する遡及という事態に対しては、「Wheelerの遅延選択実験」の思考実験が、別の視点からの靈感を与えてくれるのではないかと思う（哲学者の議論では遅延選択実験についての議論を見たことがない。またSchrödingerの猫に関しても「Wignerの友人」のパラドックスが観測理論ではさんざん考え尽くされていると思うが、これに触れたのを見たことがない。しかしこちらについては似た議論がされている）。この思考実験を古典確率との統合という文脈からなぞってみたい。

## 2. 確率の動力学に関する要請

さて、上記の問題を分析するために、2つのパラドックスを述べなければならないが、この議論でよく使われる概念を先に述べておかななくてはならない。確率の動力学については、次のような原理が要請されることが多い。ここで言う確率は、主観解釈で扱われるのがわかりやすいような問題を、我々は考察するのであるから、信念の度合いが先ず候補になるが、傾向性を扱う文脈では、その意味こそ追求されるべきである「傾向性」と言うことになる。

たとえばノ瀬は次のような要請<sup>12)</sup>を示している。

### ・過去確率原理

「ある出来事が特定の仕方であつた今生じてしまったものとして確認されるやいなや、少なくとも単独の出来事の確率に関する限り、その出来事の生起確率は $\mathbf{1}$ でなければならない」

過去と未来は非対称であり、起きてしまったことの確率は $\mathbf{1}$ であつて、変更できず固定されている。知った以上、過去についての確率的議論は出来ない。すなわち現在から見て確率 $\mathbf{1}$ であるという立場であり、逆に時間の流れに乗ってみれば起こる以前は、一般には確率が幾ら近くても $\mathbf{1}$ ではないのだが、起こった「瞬間」に $\mathbf{1}$ になる事を含意している。

この原理は観測問題での一切の議論・考察を飛び越して、導き出すべき結論を公理にしている様なものである。強いて言うなら、今日の観測問題では真つ先に否定される、観測者の無

限退行の後の abstract Ich が「認識」した「とき」に波束の収縮（固有状態への射影）が起こるという Wigner - von Neumann 理論と同じである。

そして、当然のことではあるが、頻度解釈では単一事象は扱えないのであるから、この原理は確率的な認識や考察を行う人間に伴われている信念の度合いか、傾向性についての言明である。傾向性の場合、認識者が確認や意識をしないでも事実があれば収縮すると言うことである。

ここで大切な注意しておきたい。ほとんどの論者は、哲学者も物理学者も経済学者、認知心理学者もではあるが、量子論においてもあっても次のことが成り立っているように見えると言うことを主張する。すなわち、論者間の細かい異同については論じないことにして、「観測以前は確率的分布で表され、測定すると突然の不連続な変化で固有状態になる」ということである。

これは大きな間違いである。波束の収縮を、状態ベクトルあるいは波動関数で表現するために誤解が生じるのである。波動関数は複素数で表される潜在であって、確率の雲のようなものとは本質的な差がある等と彼らも言ってみたりはするものの、やはり確率分布関数との見かけの類似性に引っ張られるのである。「波束の収縮」のとき量子力学で起こっていることは、分離することは出来なくて絡み合っているのはあるが、実は概念的には別の次の2つのことなのである。

それは、デコヘア（非干渉化）と「確率の崩壊」の2つである。確率振幅の分布関数（すなわち波動関数）が何らかの出来事によって確率分布関数（で表される対象）になる、ということと、その確率分布関数が、ある1つの可能な固有値に対応する状態に崩壊するということである。この2つは、時間的に引き続いて起こるのではなく一般には分離できずに同時進行するように見える。

この後者の方が、ここでいう過去確率原理に対応するものである。筆者はこちらの方が真に理解困難な過程であると思う。デコヘアの方がまだしも理解しやすいのではないだろうか。

ところで状態を状態ベクトルではなく、密度行列で記述すればこの様な誤解や混乱は生じない。密度行列は確率振幅とその確率的混合を1つの概念で表せる数学的道具である。よく、本質的還元不能な確率と無知による確率の両方を同時に表すなどと言われる。状態ベクトルが根元的なものと考えると、密度行列は2次的なものであるのではないのかと疑問になるかも知れない。だが、量子力学をごく基本的な自然の観察から再構成してみると、むしろ密度行列が状態を表す根元的で自然な概念であることが分かる<sup>30,31)</sup>。世界に関する命題が作る束を考察するとそれは直相補モデューラ束という Boole 束から分配律を外したものであることが分かる。この命題束の表現を Hilbert 空間の線形部分空間の包含関係で作る束で作ることが出来ることが Gleason の定理で示せる。そして世界の状態が、すべての観測量に対し確定的な値を与える事は出来ないと考えると、それを記述するのはその Hilbert 空間の自己共役作用素であり、また同時に観測量の方も自己共役作用素で表現されることが分かるのである。逆に、密度行列において、対角線上のある一カ所だけが

1である時、対応する基底ベクトルが波動関数であるような「特殊な」状態であるベクトル状態なのである。

勿論物理に数学を合わせるならば、世界は Hilbert 空間では記述できず超関数の空間が必要になるのではあるが、ここではそのことは関係しないであろう。

最終的には分けて考えてはいけないのだが、2段階で表現してみよう。先ず密度行列が対角行列にデコヘアされる。これは量子力学的干渉性が無くなるということ、頻度解釈での客観確率の崩壊と言えよう。さて密度行列が対角化されたとき、その対角線上の数値の分布が古典的確率分布である。これがどれか一つに崩壊すると行列はある行列要素のみ1となって測定は完了する。この最後の選出の過程こそが、ここで言う過去確率原理で崩壊する、主観確率または傾向性確率である。

しかし密度行列の上記の変化は、それぞれが分離して継続して起こるのではなく同時進行するのである。であるから、量子力学が古典論とは全く概念的に違うのではなく、古典的収縮を含むのである。そして多分その古典的崩壊とデコヘアは絡み合っているであろう。

（上で注意した2つの概念を併せたもの他にもう一つの概念が観測理論では登場する。それは von Neumann のいう観測の第1段階と第2段階である。第1段階は今日ではスペクトル分解過程と呼ばれる。対象の取り得る測定される量の固有値と観測装置上で読み取る量に対応させる過程で、von Neumann はその様な相互作用を起こす自己共役作用素の存在を証明した。つまり対象系と観測装置をエンタングルするのである。しかしそれは確率とは関係のない概念である。我々が議論している2つの概念は第2段階に相当する。）

一ノ瀬は補助仮説として

・単調性

「ひとたび一つの命題が証拠的確率1を持ったなら、それは以後それを保持する」

も採用する。それ以後の時間発展を正確に計算できないであるとか、記憶が薄れていくなどの理由をつければ、時間の経過と共に確率はだんだん1から減じていく。しかし少なくとも発覚直後から「少し」の間は確率1に非常に近いと想定できる。これは観測理論では第1種の観測と呼ばれてきた。（第2種は、固有値は得られるが、まさにその観測過程に依って、状態は分からなくなってしまうと言う例外的なタイプである）

さて一ノ瀬は過去確率仮説を次のように言い換えて議論を行っている。

・確率崩壊仮説

「私たちがいる出来事が過去へと過ぎ去って行くのを観察するやいなや、そうした私たちの観察こそが、その出来事確率が値1へと崩壊することの原因となる」

しかしこの言い方は、確率を統合しようという筆者にすれば、

物理学者が精力的に検討して葬り去った量子力学の「Wignerの友人」のパラドックスをも特別規せず、確率一般に成り立つ議論をしようと一ノ瀬も将来的にはするはずなのに、再燃と言うより論点先取に近いものであって、驚愕の感がある。この仮説の文面は、半分明示的に主観確率しか扱わないと宣言していると取れる。まさにHumphreysのパラドックスが問題にしている筈の傾向性確率を除外すると言っているようなものである(過去確率原理で、頻度解釈の方は除外して議論することにはなっていた)。

「Wignerの友人」とは次のようなものであった。それは「Schrödingerの猫」に付随して語られるようになったパラドックスであった。部屋の中に友人を閉じこめ、「猫はいつ死んだか」と部屋を開けてから質問するのである。猫の問題は、マクロな猫の状態が(メソスコピックな状態の重ね合わせは、20世紀末より既に観測されつつある事を注意しておく)生と死の重ね合わせであるという容認できない状況を問題にしたのであった。少し言い換えると、どの時点あるいは段階で猫は死ぬのかと言う問題でもある。友人は認識力と記憶と内省能力を持っていて、私に報告が出来る。私にとっては質問をするまで友人の状態は重ね合わせであり、従って彼が観察している猫も重ね合わせである。質問の答えを聞いた時点で私にとって波束は収縮する。しかしマクロ物体であり、生命体であり、意識を持ち、abstract Ichである友人にとっては、彼が、猫が死ぬのを観察した時点において、猫は重ね合わせではなくなり、波束は収縮するのである。これは、Wigner-von Neumannの理論の奇妙さでもある。この奇妙さゆえ、解釈から意識や認識というものを排除しようと言うことになり、いわゆる物理的観測理論や多世界解釈が生まれたのである。そして客観解釈しか言っていないかのような風潮になったのである。これは一ノ瀬の書く「ビデオを箱の中に設置しておいて、ずっと廻していつ猫が死ぬかを記録しておくとうなるだろう」と似ているようであるが本質は全く違っている。ビデオは単なるマクロ物体で、デコヘアの議論の対象にはなりうるが、意識やAbstract Ich等は持っていない。そして意識や認識と言うことがまさに主観確率の担い手なのであるからである。しかし、主観的存在の認識を意識のない過去のマクロ物体に仮託するという観点を提起しているとも考えられる。Wignerはもしかすると最初から確率の謎の深さに気付いていたのかも知れない。

この確率崩壊仮説を吟味することによって、観測理論での確率はどの確率であるのかということが、我々にとって浮き彫りになって来るのであろう。

### 3. Humphreysのパラドックス

Salmonは、Humphreysが考案したパラドックスだとして、次のような問題を1979年に示した<sup>14)</sup>。遡及因果に関する命題では、Bayesの定理を用いた遡及因果的確率計算が奇妙な事態を招く。逆確率が意味を持たないように見える傾向性確率は、確率と言えないのではないかという例である。その問題にHumphreysという名前がエポニムされたのはFetzerによつての

ことで1981年のことであった。Humphreys自身の議論はそれより後年の著作<sup>15)</sup>に見いだされる。次の表現はEarsan and Salon(1992)<sup>39)</sup>によるものである。

「フリスビーを生産する機械AとBがある。機械Aは1日あたり1%の不良品を出し生産量は800個である。一方機械Bは古くて、1日あたり2%の不良品を出し、200個しか生産できない。1日の終わりに2つの機械で作られたフリスビーは1000個である。これらは検査されて不良品はある箱に入れられているとする。1日の終わりにその中からフリスビーをランダムに1つ取り出す。このときそれが機械Aで作られた「確率」はどれだけだろうか」

設定は観測理論での2重スリット実験から非干渉化の論点を除いたものと同じである。

さて、不良品であるという事象をDとする。またAでそれが機械Aで生産されたものである事を表し、Bで機械Bによって生産されたものである事を表す事にする。すなわち、それぞれの機械の不良品率は $p(D|A)=0.01$ 、 $p(D|B)=0.02$ である。またそれぞれの機械による生産量の割合から事前確率は、 $p(A)=0.8$ 、 $p(B)=0.2$ である。これらの尤度と事前確率を用いると、Bayesの定理により仮説の事後確率は、

$$\begin{aligned} p(A|D) &= \frac{p(D|A)p(A)}{p(D|A)p(A) + p(D|B)p(B)} \\ &= \frac{0.01 \times 0.8}{0.01 \times 0.8 + 0.02 \times 0.2} \\ &= \frac{2}{3} \end{aligned}$$

と計算される。左辺の条件付き確率の意味は、観察された証拠Dと言う条件の下で、その証拠を招来するような仮説(理論)の確率、いわゆる逆確率、である。

これを何日にもわたる平均であるとか、フリスビーを取り出すという行為を何回もやると言ったときの統計をとるといった状況に当てはめて頻度解釈的にとれば、全く問題は発生しないと思われる。しかし単一事象についての議論であるとするとうなるであろうか。ある特定の日に、夕方、不良品箱から1個のフリスビーを取り出すと言った状況である。その時の信念の度合いかあるいは傾向性はちゃんと意味を持ちうるのかという心配が発生するのである。

条件付き確率 $p(A|D)$ は、単純に読めば「不良品箱の中からランダムにフリスビーをとりだしたとき、それがその日(その時点以前に既に)機械Aで生産されていた「確率」である。このBayesの定理で計算された逆確率が傾向性だとすると、「今手に握っているフリスビーが、機械Aで生産された傾向は2/3である」と言わねばならない。機械Aが不良品を出す傾向性なら有意だが、「機械Aが今手に持っているフリスビーを

事前に生産したように「する」、夕方の世界のもつ傾向性」は意味不明であろうと言うのである。この文は遡及因果を語っているのである。

Bayes の定理は、確率算としては常に成り立つ。主観確率という扱いでは、理論の検証過程のモデルとしてずっと使われてきたし、実用問題としても Bayes 統計学や Bayes 推論として使われている。現実の統計的状況での実用上の解釈には困難を来さない。例えそれがリスク解析、エキスパートシステム、ベイジアンネットワーク、ベイジアンフィルターなどでの、時間的にみれば遡及推論になる場合であってもである。

ただ、3 囚人問題の解釈<sup>22, 32)</sup>のように、繰り返しやアンサンブルをどうやっても想定できないであろう本質的に単一事象である場合には、その時の自然な解釈である主観解釈を、どう頻度解釈に対応させてよいのか分からないと言った状況が出現する。

さて、この問題でどこが受容しにくいのかを浮き彫りにするため Gillies は<sup>10)</sup> 次のような問題の修正を試みた。すなわち

「機械 A はオレンジ色のフリスビーを生産し、機械 B はブルーのフリスビーを生産する」

を追加してみた。現に手に持っているフリスビーは既に機械 A か B によって既に生産されたものであり、そのフリスビーの色は生産されたとき以来、夕方までずっと決定（固定）していた、すなわち確率 1 であった。生産されたとき色は決定していてこれは過去確率原理で言う「確認されるやいなや」に該当すると思われる。勿論なにが確認か、意識の関与はなくて良いのか、等の観測理論でおなじみの疑問は当然だが、ここでは私に知らせないようにしつつ、第 3 者が確認してもしなくても色は変わらないと言うことで了解することにしよう。(但しここが量子力学との本質的な違いで、量子力学では第 3 者が途中で確認すると「色」が変わるのである事には注意しなければならない。非干渉化がいかに重大かの証左である。)

箱に手を突っ込んで 1 つのフリスビーを抜き取り、その結果もし手に持ったフリスビーの色がオレンジであった場合、それがオレンジ色であった確率はずっと 1 であったはずなのに、手に持ったオレンジ色のフリスビーが機械 A で生産された傾向性は 1 以下である 2/3 としなければならないというのである。傾向性と言うときの言葉の使い方からして、それは「今手に持っているオレンジ色のフリスビーという証拠とそれも含めた夕方の世界の状況が、時間的に遡って、事前に機械 A で生産されて色がオレンジであったように「する」傾向性」という奇妙な文になり、partial backward causation があるとしなければ理解不能であると議論した。

しかしそうであろうか。目をつぶって 1 つのフリスビーをとったとして、見る前の時点ではどうであろうか。私にとってフリスビーは A で作られたものかも知れず、B で作られたものであるかも知れず確率 1 ではない。夕方現在どちらの色かと問えば、数値的計算は Bayes の定理によって今の色の確率を言うの

は妥当である。色は昼間からずっと変化しないのであるから、そのままの確率の値を昼の生産時の色の確率として良く、さらに 1 対 1 対応で機械 A か B かの別の確率として良いと考える。従って色を確認するという行為が、遡及して過去の事象の確率を収縮させているとして問題ないのではないだろうか。すなわち一ノ瀬の言う遡行確率仮説

「私たちが過去の出来事を虚構的に現前化させることが、確率が過去へと遡行して 1 へと崩壊することの原因なのでありそこから過去についての決定論が現れる」

は、もし私たちの認識の上での遡及因果を認めるとすれば妥当のように見える。

そしてこのことは、傾向性確率でなく、ここの確率が信念の度合いだとしたら、なおさら問題はないと思われる。しかし、確率が abstract Ich によって崩壊するというはなしは、観測理論で真っ先に否定されたものである。精神世界の物質世界への介入のようなことはタブーだった。だが、ここで言う確率は、頻度解釈の確率ではなく、信念の度合い、そうでなければ傾向性である。信念が認識結果で突然変化するのとは当然である。問題はそのことをどう頻度解釈の確率と折り合いをつけるかである。

この問題に対する哲学者の反応は、このパラドックス故に傾向性解釈はうまくいかないものであることが分かったとするもの、さらに Gillies のように傾向性解釈を考察分類<sup>10)</sup>して、長期傾向説を採用するというものがある。この長期傾向説とは、単一事象の確率を扱うのをあきらめたものである。極大決定された世界の状況下で、繰り返し試行を行って、長期的に見てその確率値が得られるという頻度解釈に近いものである。量子力学の確率はこれに近いのかも知れない。だが長期傾向説はすでに頻度解釈(加うるに波動関数のように世界とか装置の状況に確率の責任を帰するという解釈)に戻ってしまったようなものである。

また、Bayes の定理の方を問題にして、適用範囲を定めるべき(数学的にではなく解釈の上で)だとするものもある。たとえば朝作業開始以前に  $p(A|D)$  を評価するのは有意味である。

日中の A で表されるオレンジ色のフリスビーが生産されるという事象も、D という、夕方不良品をとりだしているという事象も、確率評価時点より以後で未だどうなるか分からない事である。しかし同じ条件付き確率を、夕方評価した場合には意味がない。なぜなら条件 D が実現したときには、フリスビーの色も判明し、そして A か B かも既に決定されていてしかも判明しているからである、と言う主張である。

こうして分かってくるのは、信念の度合いや傾向性に遡及因果を許さなければならないように見えたり、確率を評価する時点と、条件となる事象、問題にする事象の時間的前後関係が問題になってくる可能性があると言うことである。このことは原初的には我々の意識の内の出来事である。

生理学的な議論であるが Goodman は仮現運動<sup>20)</sup>という現象

について議論している。それは暗闇で光点が継続して接近した場所で光ると、その方向に光点が移動したように見えるという現象である。移動方向が決定する第2の発光以前に相当する中間の点にも遡って光点は連続して見える。Penroseも<sup>33,34)</sup>意識の離散性の可能性を論じている。遡及因果はそれ自体が我々の世界の分節化の在り方に関係している。その整理は大きな仕事であろう。しかし我々は、過去の事象について、つまり歴史について条件付き確率的な表現を用いる。更には架空の物語についても可能性の議論などをする。これらの表現の仕方が上記の実際に起こる出来事の遡及確率についての整理と同様なのであるかも知れなければならぬ。

#### 4. Newcomb 問題

Nozick は、物理学者 Newcomb が考案した問題であるとして次のような問題を論じた<sup>15)</sup>。この問題は Humphreys のパラドックスとも似た、遡及因果にからんだ意志決定の問題である。前者よりもっと困難な、確率のトポロジーと心理の問題を内包していると言えるだろう。いろいろなバージョンが知られているが、少し分かりにくい確率のトポロジーの問題に気付かせてくれる Nozick の 1993 年版<sup>16)</sup>から見ていこう。

「ここに箱 1 と箱 2 がある。箱 1 には必ず 10 万円入っている。箱 2 には 1 億万円入っているか何も入っていないかのどちらかである。あなたの取れる戦略は (1) 両方の箱の中のものを受け取る、(2) 箱 2 に入っているものだけを受け取る、のどちらかである。しかしこの問題がある。箱 2 に 1 億円入れるか入れないかはある超越者が決める。彼はあなたの戦略決定を、事前に非常に正確に予言できる。またあなたも彼の予言能力を信じている。彼はあなたの選択を予言し、その予言に依存して以下のことを行う。もし彼が、あなたは両方の箱をとると予言した場合箱 2 には 1 億円は入れない。あなたが箱 1 の 10 万円は放棄して箱 2 の中に入っているものだけを受け取ると予言した場合には、1 億円を箱 2 に入れる。このことをあなたは良く理解しているし、またあなたが理解していることを超越者は知っている。さてあなたの最適戦略はどちらであろう」

超越者とか神が出てきて、哲学的分析は出来ない様にも見えるが、「非常に正確に」などとなっていて、確率は 1 ではなくていくら 1 に近くても  $p < 1$  が想定されているのである。もし 1 なら決定論となるがそうではないのである。従って技術の進歩や未知の作用によって、将来その様な予知に近いことが可能になる事も有り得る、と想定して分析することは不合理ではない。

仮に確率 1 で予知できると言うことにすると、パラドックスではなくなり最適戦略は容易に決定できるかに見える。箱 2 だけを受け取るとすると、それは予知されていて、その結果として超越者は箱 2 に 1 億円を入れている。もし両方の箱をとるならそれを予知していた超越者は箱 2 に何も入れず、箱 1 の 10 万円しか受け取れない。従って箱 2 のみを受け取るというのが最

善のように見える。

Newcomb 問題において、予知が当たる確率  $p$  を、Humphreys のパラドックスに現れている、Bayes の定理で算出された機械 A で生産された確率、であるとし、過去に遡って箱 2 に超越者が 1 億円を入れることと、やはり遡って機械 A で生産されるということに対応させてやれば、両者はほぼ同型問題である。

違いは一つには、Newcomb 問題には、意志決定論の文脈として、過去の出来事が確率 1 に固定されると、効用の値が決まるという追加された部分がある。だがそれは本質的ではなく、本質的なのは、 $p$  が 1 に非常に近いとされ、またその値自身も解答者に委ねられていると言うことである。超自然的な話しに見えるのも本質ではない。 $p$  が 1 に近いため現実の話ではない様に感じられるだけである。ということは、観測理論の「2 重スリット実験」(あるいは「Stem-Gerlach 型実験」)も含めて 3 者は観測理論の非干渉化の問題派別にすれば、ほぼ同型問題であることが分かる。

所で、確率 1 という決定論にはさらなる困難が待ち受けているかもしれない。私の選択は予知の時点で決められており、そもそも選択の自由はないのではないのか。それとも、選択の時点では自由意志があり、それを予知時点という過去から再び未来である現在をみて、私が自由に決めている結果を過去からのぞき見しているだけで、私の選択が遡及因果で超越者を動かし、超越者は受動的役割しか持たないのだろうか。この因果の輪のパラドックスは良く問題にされることではあろう。だがここでは論じないことにしよう。

さて、問題文通り  $p < 1$  であることにする。それでも箱 2 のみを受け取るという選択は、直前の議論により最善である。予言が外れる場合もあるわけだが、 $p$  を必要なだけ 1 に近くとってみれば期待金額について同じ結論になる。この場合確率的遡及因果が働いていると言える。

両方の箱を受け取るのが最善であるという考えもあり得る。これは、確率的遡及因果はあり得ないとする立場である。遡及因果がないとすると、超越者が予知をして箱 2 に 1 億円を入れるか入れないかした時点で箱の中は決定され、それ以後ずっと確率 1 でそのままの状態である。観測理論なら予知した時点で波束は収縮している。だから、いま私が 1 つの箱だけとろうと両方ともとろうと、箱の中の金額は変わらない。それなら両方取った方が得である、と言う論法である。

予知の確率は 1 ではないから外れることもあるわけである。したがって超越者が、私は箱 2 だけとると予知して箱 2 に 1 億円入れたのに、それが外れて私が両方の箱をとっても論理的矛盾にはならないのである。もし確率 1 であったら、論理的に成立しない循環因果になってしまったところであった。

このように、Newcomb 問題は、確率のトポロジーとして  $p = 1$  と  $p < 1$  が質的に全く異なる(それは決定論かそうでないかであるから当然と言えるが)ことを、改めて浮き彫りにしてくれるのである。

以下に示す版も Newcomb 問題と呼ばれる。確率のトポロジ

一の困難が表立ってはいないが、隠れているだけである。

・Ayerによる「Calvinistの勤行」<sup>18)</sup>

「カルヴァン派は運命予定説を信仰している。それによると、彼らの神は彼らの誕生以前に既に彼らを救済または断罪してしまっている。しかし自分が救済されるかは死後になって分かるのである。にもかかわらず彼らは勤勉を心がける。彼らは今勤勉であることが、もうすでに彼らの将来に影響しないことをわかまえている。しかし一方彼らは、神の選んだ人だけが誕生後勤勉になりうると信じている。すると彼らの信念に依れば選民の一人である事が現在勤勉であることの必要条件である。ということは勤勉であることが選民であることの十分条件である。彼らは過去のために勤勉であろうとする。自分は生まれる前に神に救済されていた、とするために現在勤勉であろうとする。」

・Dummettの「酋長の踊り」<sup>19)</sup>

「ある部族では成人の条件としてライオン狩りに行って勇敢に振る舞わねばならない。若者は2日旅し、2日間ライオン狩りをし、2日間かけて帰ってくる。見届け人が若者に同行し、帰ると酋長に若者が勇敢だったかどうかを報告する。その部族では、酋長の行う儀式はいろいろなことに影響しうると信じられている。酋長は若者が勇敢にライオン狩りをするように、と念じて6日間踊りを踊る。と言うことは、若者が勇敢であったかどうかが決まってしまった後の2日間も、酋長は若者のために踊り続けるのである。これは過去の事件に影響しようとしていると考えられる。」

・三浦の表現<sup>28)</sup>

「ゲジゲジが大好きな人は癌になると言うことが判明した。これはゲジゲジに発癌物質があるのではなく、ゲジゲジが大好きになる遺伝子を持つ人は、その遺伝子がまさに発癌遺伝子であると言うことであった。だからゲジゲジを沢山食べたからと言って、その遺伝子がなければ癌にはならない。逆にその遺伝子を持つ人に、ゲジゲジを食べないように監視していても癌になる。さて、あなたはゲジゲジを目の前にしている。統計に依ればこの状況でゲジゲジを食べた人は非常に高い確率で癌になっている。食べなかった人が癌になったという例はほとんど無い。発癌遺伝子がないのにゲジゲジを自発的に食べる人はほとんど0である。あなたは今日の前のゲジゲジが食べたい。しかし食べればほぼ確実に発癌遺伝子の持ち主だった、ことになってしまっただろう。どうしたらよいだろうか」

これらはすべて確率的遡及因果である。ただ、Nozick版のように、各戦略の結果の効用を示して意志決定論の問という形にしていなくてもよい。

もう既に事態が決定してしまった後でも、未だ自分はその決定された内容を知らない場合には自分にとって確率は1ではない。従って、何かその決定に影響すると信じていることを行いたくなるのである。文面を見ると、因果関係ではなく相関関係

であると直ちに読める事例達である。それを、遡及因果という手を使って、因果関係に持ち込もうとするあがきである。

Calvinistの勤行ではどうだろうか。神が選民を最初に決定する。選民⇒死後救済される。また非常に高い確率で選民以外⇒勤勉でない、と言うことから、現在の時点からみると「勤勉」と「救済」は因果関係ではなく相関である。それを勤勉⇒選民だった、といったん過去へ遡及因果をおこし(backward causation)、そこから現在を通り越して死後という未来の救済に順方向の因果(forward causation)を果たすという仕組みである。この話も確率1では成り立たない。今から勤勉にしても、過去の神の決定は覆らないのに、と言う筋だが、もし確率1だとしたら、救済されない人はそもそもなりたくても勤勉にはなれないからである。

三浦の例でも構造は全く同じである。発癌遺伝子⇒癌。一方、発癌遺伝子⇒ゲジゲジ好き。「ゲジゲジ好き」と「将来発癌」には因果関係はない。今、目の前の「ゲジゲジ食べたい」、なのだが、それを否定することにより、遡及因果で発癌遺伝子がないと言うことであつたと言うことにして、そこから順方向因果で「将来癌にならない」にしたいのである。(食べたいのが饅頭ではなくゲジゲジにしてあるのは、饅頭だと発癌遺伝子がない人でもある程度は食べたいと思われるからである。ゲジゲジなら、普通の人が食べたいとはほとんど絶対思わないであろうからである)

酋長の踊りでは少々違って次のようになる。ここで主人公である酋長が現在とる行為は、もうすでに無駄な踊りである。今までの例とは違って、この行為は若者の過去の勇敢な狩りの結果では無い。だからそれを遡及してと言うことにはならない。そうではなくて、同時的でないと効力のない踊りを、過去に向かって発しているのである。しかし共通するのは、確率1で既に決定されてしまった、若者の勇敢さが、見届け人の明日の報告までは、酋長にとって $p < 1$ であると言うことである。不確定であるからこそ、また踊りの効力があると思えるのであって、酋長は2日間踊り踊り続けるのである。

この例は、最も単純な例で遡及因果はしないが、むしろ、それぞれの人にとって、いつ確率が崩壊するのかわきという問題に特化している例と言える。観測問題で言う「観測者」あるいは「巨視的観測装置」は、この場合言うまでもなく見届け人である。そして見届け人は「Wignerの友人」でもある。見届け人が若者の振る舞いを観察した時点で若者の勇敢さが確率1に崩壊するのか、それとも狩りの旅から帰ってきて、酋長に報告して酋長が若者の振る舞いを知った時点なのか、である。確率を信念の度合いとするなら、問題はほとんど無いであろう。酋長の信念の度合いなら明日の報告の時に、見届け人の信念の度合いなら、既に若者が狩りをしているときに崩壊している。

この問題では他の表現と違って、若者の勇敢さから酋長の踊りへの順方向の因果というものがみられない。他の例では順方向に確率的因果があつて、その逆が真であるように感じられる心理により遡及因果をしている。しかしこの例では、酋長は確率崩壊以前なら直接に過去向き因果が出来ると感じている。

曾長の行為は、我々も良くやることである。検査の結果を聞く前は、癌の確率は私にとって崩壊していない。そこで、わざと検査結果を聞くのを延ばして、その間に癌になりにくいと言われることをしたり（曾長の例と同じ）、もし癌だったらそういう振る舞いをしないでだろうと言うことをやってみたり（Calvinistは勤行をし、三浦はグジグジを食べたいのを我慢する）のである。

このように我々はいったん過去に自分の身を置き、その過去の視座から確率的順方向因果で、現在を改善しようとするのである。小島が<sup>29)</sup>「仮定法過去完了」と呼んでいるのはこのことであろう。Bayesの定理に現れる条件付き確率を考えると、我々はついVenn図の上に平面的に並んでいる点集合で「空間的に」併置されていると感じて、時制を忘れがちなのである。であるからHumphreysのパラドックスがなぜ困難なのか説明されないと理解できない人も多いであろう。

われわれが条件付き確率について時制を忘れて話を進めがちなのは、西洋の命題論理学自身が、時制を頭には組み込んではいない<sup>35)</sup>からなのであるか。

## 5. Wheelerの遅延選択実験

Bohrは<sup>36)</sup>、非可換な量のどちらを測定するか自由があるような状況で、そのどちらを測定するかを最後の瞬間まで遅らせるという思考実験を論じている。「遅延選択実験」である。

たとえば、光源から出た光子を2つのスリットに通す。集光レンズでフィルムに像を造るようにする。そうするとフィルムには沢山の光子の集積として干渉パターンが記録される。これは光子が2つのスリットを通ったとすることで光子の波動性が見えている。しかしフィルムを取り除くと、2つのスリットから光子が来る交叉する2つの方向の延長上に光電管を置けば、光子は2つのスリットに対応するどちらかの光電管で記録される。これは光子がどちらか1つのスリットだけを通ったとすることで、光子の粒子性をみている。いわゆる相補性である。

フィルムを置くか取り除いて光電管で観測するかを、光子がスリットを通りすぎた後と後に決めると言うのが遅延選択実験である。光子がスリットを通るときには未だ粒子性を測られるのか波動性を測られるのか決まっていない。それなのに未来の実験が何なのかを知っていて1つか、そうではなくて2つのスリットを同時に通るかを決めているように見えるということになる。逆に言うと、最後の測定が、時間的に遡及因果して、過去の光子の振る舞いを決定しているように見えるのではないかとすることである。ただそんな高速に実験装置を切り替えることはできないと思われていた。

量子力学者、重力理論家、宇宙論者のJ. Wheelerはこの思考実験が別のやり方で可能であると考え、1979年、Einstein百年祭のプリンストンのシンポジウムで、実験を提案した。また、1980年6月、フィラデルフィアでのアメリカ哲学会にて講演をして、哲学者に量子力学の深刻さを印象づけた。

1982年には、Bellの不等式<sup>37)</sup>を用いた、量子力学と局所実在

論にもとづく確率力学理論との決定実験を目論んだAspectの実験が行われたが、このとき、実験装置の各部分が「共謀」といけない(どんな機構でか分からないが念のため)と言って、遅延選択も実験に組み込まれた<sup>38)</sup>。その結果、局所実在論は維持できないことが分かったことはよく知られている。1986年にはWheelerの提案の実験が成功し、量子力学の予言通りになることが分かった。

しかしもっと印象深いのは、重力レンズを使った遅延選択実験であろう。

銀河はその全質量による重力場で光を曲げレンズの働きをすることがある。クェーサーという天体があるが、それが非常に接近して見える2重クェーサーという現象がある。これは銀河による重力レンズによって1つのクェーサーが2つに見えていたのである。この状況は上記の遅延選択実験をものすごく拡大したものである。2つの経路の間隔は5万光年であった。また、クェーサーから地球までの距離は数十億光年と見積もられた。2つの経路の光行差を埋めるため(そうしないと干渉しない)のテクニックなども伴えば、次の実験が地球上で出来る。つまり両方の経路からの光を交叉させるようにして、そこにスクリーンを置くか、その位置からずれた位置にスクリーンを置くかの選択である。ずれた位置のスクリーンは、前出の実験での2つの光電管に相当する。

この実験では、重力レンズの左右を通ったときから、地球での観測(どちらの実験をするかという選択)まで十億年オーダーの遅延があるわけである。

Wheelerは、頭と尻尾は姿が実体として見えているが洞体は煙であるGreat Smoky Dragonというドラゴンの絵(観測と観測の間は、あるいは「記録」された事象と「記録」された事象の間は「現象」ではないと言う寓意)とか、尻尾のある眼球(眼球は現在の私たちの世界、尻尾は我々の宇宙の過去)が自分の尻尾を見ている絵などを示して、現在の我々の観測が過去を決定し、ひいては現在の我々を生成しているという事を述べる。これは前節で述べたいったん過去の視座に遡及因果して身を置きそこから順方向因果すると言う図式と同じである。だが、多分大きな違いは、前節の例は信念の度合いととるべきなのに、ここでは本来の意味での傾向性にとらねばならないという事である。

遅延選択は確かに遡及因果を起こしているように見える。しかもそれは信念の度合いという主観確率の世界ではなく客観的な傾向性についてである、しかし筆者には、量子不可分性は空間だけでなく時間についても不可分、因果と言うより、実験全部、開始から終了までが部分に分解できない1つの現象なのであると思える。

## 6. パラドックス間の関係と共通する問題。仮定法過去完了的視座

前節までで見てきたように、

i) 傾向性解釈を過去に遡った事象を変数とする条件付き確率に適用したときの困難を表すHumphreysのパラドックス。

ii) 意志決定論の文脈で提出された、そして確率1の謎のすぐ脇にあり、いったん過去に遡及しその視座から起こらなかった未来に順方向に因果する、仮定法過去完了の構造の Newcomb 問題。

iii) 量子力学基礎論、宇宙論の文脈で提出された、どの時点で波束の収縮が起こるのかを直接遡及因果の形で提出し、更に宇宙は循環因果で生成されているのかその謎を問い、宇宙全体の量子不可分性 (Quantum Non-separability) を時間方向にも適用すべきであると主張しているかのような Wheeler の遅延選択実験。

これら3つの問題は、構造の上ではほとんど同型問題に近い。他のいろいろな難問をそれぞれに抱えつつ、共通しているのは遡及因果と仮定法過去完了で語られるべき過去に視座を置いた順方向因果の組み合わせになっているということである。これを、一ノ瀬はブーメラン因果<sup>12)</sup>と呼んでいるが、これは何も珍しい事ではない。初等統計学で戒められる、因果と相関を間違えてはいけないと言う注意で、過去の事象を通しての因果という事例である。だから難しいのはやはり遡及因果するところである。ただし、われわれが、ああたったかも知れない世界についての悔悟をするときの事を意志決定論の文脈で分析するとき<sup>29)</sup>、このブーメランという言い方は簡潔で良く感じを表していると思う。

そしてもう一つ共通しているのは、確率のトポロジー、すなわち  $p=1$  と、1に幾らでも近いが  $p \neq 1$  という場合の間の違いが問題の様相を変えてしまう言うことである。このことは、i), ii) のどちらにおいても、本来パラドックスが成立するかどうかの違いとなっている。根本的な相違であるが単純にパラドックスが成立しないとされる方の  $p=1$  の場合は、都合が悪いからと言って捨てて良いようなものではない。この両者の間の接続性こそ探求されるべき事柄である。

iii) は確率1と言う事柄が頭には現れない。遡及因果が表に出ている。しかし確率が数十億年も遡及して1になると言うことを述べている。それが提出されて実験が遂行されたのが、デコヘアの議論や実験が行われるようになる以前であるから無理もないが、最終段階の地球上での測定による崩壊は瞬間に(と言うより無時間的に起きると言う扱いである。しかし、20世紀末あたりからの物理学の状況は  $p=1$  という状態への確率の崩壊(波束の収縮)を時間につて連続的に扱うことが出来るようになってきている。現実にはその中間状態も観察されている。我々はむしろこの点に注目すべきであろう。

われわれがなすべきは、観測問題のような客観確率だけでなく主観確率に対しても確率1の世界と崩壊する前の世界を連続的につなぐ考察であり、さらには主観解釈と客観解釈の統合である。

さて一方でパラドックスの間に重大な相違はある。第1には、取り扱われる確率が i) と ii) は主観確率 ( i) の傾向性確率は客観確率であると言われるが主観確率の面も持っている ) であるのに対し、iii) は客観確率をアつかっている。Popper は、物理学者が自分では認識せずに、あるいは多少は気付いていて

も主張がぶれてしまっていて同じ頁の中で主観解釈になったり客観解釈になったりする、と揶揄しているが、物理学が信念の度合いを扱っているとは、現在ほとんどの人は思わないであろう。

従って主観確率の面を考察したいという欲望には物理学は対外的には禁欲的である。初期の観測理論では主観確率と客観確率の概念の違いがあまり認識されていなかった。「Wignerの友人」のパラドックスは直ちに唯我論に行き着いてしまう。その様な事柄を恐れ、それ以後は返って主観確率や認識、意識と言う概念を持ち込むことは厳しく戒められてきたのである。

第2に当然のことではあるが、iii)は確率振幅で記述される非可換確率である。後の相違はいろいろあるが、付随的にしか過ぎないであろう。「非可換確率の崩壊は古典確率の崩壊と同じ事である」という Popper や一ノ瀬の主張で満足するのではなく、「非可換確率と古典確率は、前者が後者を含み、崩壊のメカニズムも同じものである。それがどうして違うように見える場合があるのかということこそが、探求されなければならない。デコヘア(非干渉化)での極限移行、すなわち客観確率の崩壊と確率1の謎で象徴される主観確率の崩壊の関係も統合整理されなければならない」としたい。

もし仮に一ノ瀬の主張のように逆行確率仮説が証明されたとすると、意識が確率を崩壊させるのであるが、これは確率を信念の度合いととれば、知った瞬間に変化するのとは当然である。傾向性にとると多少問題を発生するかも知れないが、とにかく観測理論で何十年前から忌避されている様な現象とは対象が違う。観測理論では、状態ベクトルを確率振幅 ( Popper が批判するように、物理学者達は確率振幅に対して、主観解釈と客観解釈の間でぶれている様に見えるという難点はあるが、しかし Popper は密度行列を知らなかったようで、彼の物理学者に対する批判のうち何割かは密度行列が同時に持つ確率の2つの側面のあらわれを物理学者は述べていたと言うように説明できると思う ) であると言いつつ、深層心理では何か実体的なイメージを持っているからである。

しかし、確率の非干渉化、すなわちデコヘアの途中の解析や実証も物理学ではされている現在、それが信念の度合いではないことは承知で言うが、瞬間ではなく有限の時間をかけて量子力学なら波束の収縮、信念の度合いなら確率の崩壊が起こると言う統一した理解が望まれる。急いで付け加えるが、当然このことは、確率の異なる側面である客観解釈と主観解釈の統合という難問も抱き合わせになっている。事は一気に臨まねばならないのではないだろうか。

Newcomb 問題に現れる「予知」などからんだ尤度を厳密に1であるとすると、もとのパラドックスに、循環因果というさらなるパラドックスが付け加えられることになる。すると自由意志が否定されるという問題もからんできて、全く違った様相になってしまう。循環因果は、電気回路の自励発振と良く似ている。循環因果の種(原因)は何かという疑問も生じてくる。この様にいろいろな疑問が出てくると言うことは、確率のトポロジーの重大性を認識させてくれる。

遡及因果についての議論は何となくやりにくい印象を受ける。

我々には未だ原因と言うことの意味がはっきり了解されていないという困難のためであるのは勿論だが、さらには、対偶や逆などという論理を用いるときには、意識的に時制の問題を外から付け加えなければならぬ為であると思われる。時制を内蔵し、かつ非可換確率論を基本とした確率論の構築をしなければならぬのであろう。

最後に、非常に古くからの問題ではあるが、因果という基本問題は、遡及因果だから特に奇妙と言うだけのことではない。因果と相関との違いは自明ではない。原因や責任とは何を意味するのかと言った問題は、われわれの倫理の基本問題でもあり、今年論じられなかったが、これから精力的に研究を遂行知る所存である。

謝辞：筑波大学図書館情報学群の緑川信之教授にはいつもながら議論をしていただきまして感謝いたします。私も言語分析の方をちゃんとやらなければと感じる今日この頃です。

#### 参考文献

- 1) K. Popper, 『科学的発見の論理』上・下 大内他訳 恒星社厚生閣 (1971年) .
- 2) K. Popper, 『实在論と科学の目的 - ポストスクリプト I』, 上・下, 小河原他訳 岩波書店 (2002年)
- 3) K. Popper, 『開かれた宇宙 - ポストスクリプト II』, 小河原他訳 岩波書店 (1999年)
- 4) K. Popper, 『量子論と物理学の分裂 - ポストスクリプト III』, 小河原他訳 岩波書店 (2003年)
- 5) K. Popper, *A World of Propensities*, Thomas Press, (1995)
- 6) ポパー哲学研究会編, 『批判的合理主義 第2巻 応用的諸問題』, 未来社 (2002年)
- 7) 小河原誠編, 『批判と挑戦』, 未来社 (2000年)
- 8) 蔭山泰之, 『批判的合理主義の思想』, 未来社 (2000年)
- 9) P. S. Laplace, 『確率の哲学的試論』, 岩波書店 (1997年, 原著は1814年)
- 10) D. Gillice, 『確率の哲学理論』, 日本経済評論社 (2004年) 原書 *Philosophical Theories of Probability* は2000年
- 11) 一ノ瀬正樹, 『原因と結果の迷宮』, 勁草書房 (2001年)
- 12) 一ノ瀬正樹, 『原因と理由の迷宮』, 勁草書房 (2006年)
- 13) P. Humphreys, "Why Propensities Cannot Be Probabilities", *The Philosophical Review* **94**, (1985)557-570
- 14) W.C. Salmon, "Propensities: a Discussion Review of D.H. Mellor *The Matter of Chance*", *Erkenntnis* **14** (1979)183-216
- 15) R. Nozick, "Newcomb's Problem and Two Principles of Choices", *Paradoxes of Rationality and Cooperation*, University of British Columbia Press.(1985)107-133
- 16) R. Nozick, *The Nature of Rationality*, Princeton University Press(1993)
- 17) D. Lewis, "Prisoner's Dilemma is a Newcomb Problem", *Philosophical papers I*, Oxford(1983)
- 18) A.J. Ayer, 『知識の哲学』, みすず書房 (1981年), 原著 *The Problem of Knowledge* は (1956)
- 19) M. Dummett, 「結果は原因より先行できるか」, 『真理という謎』, 勁草書房(1986年)原書 *Truth and Other Enigmas* は1978年
- 20) N. Goodman, 『世界制作の方法』, みすず書房 (1987年) 原書 *Way of World Making* も1987年
- 21) 榛葉豊, 「人間中心原理と確率の本性 - 確率過程量子化の解釈のために -」, 静岡理工科大学紀要 12 巻 (2004年) 177
- 22) 榛葉豊, 「信念の度合いと不充足理由律 - 3 囚人問題の Bayes 解をめぐる -」, 静岡理工科大学紀要 13 巻 (2005年) 53
- 23) 榛葉豊, 「統計的確率に対する信念の度合い - 確率的言明の反証可能性 -」, 静岡理工科大学紀要 14 巻 (2006年) 73
- 24) 伊藤邦武, 『ケインズの哲学』, 岩波書店 (1999年)
- 25) 伊藤邦武, 『人間的な合理性の哲学』, 勁草書房 (1997年)
- 26) 三浦俊彦, 『可能世界の哲学』, 日本放送協会出版局 (1997年)
- 27) 三浦俊彦, 『論理学入門』, 日本放送協会出版 (2000年)
- 28) 三浦俊彦, 『論理パラドクス』, 二見書房 (2002年)
- 29) 小島寛之, 『確率的発想法』, 日本放送協会出版 (2004年)
- 30) J. M. Jauch, *Foundation of Quantum mechanics*, Addison-Wesley(1972)
- 31) 渡辺慧, 『知識と推測 - 科学的認識論』, 東京図書 (1975年) 原書 *Knowing and Guessing* は1969年
- 32) 市川伸一, 『確率の理解を探る』, 共立出版 (1998年)
- 33) R. Penrose, 『心は量子で語れるか』, 講談社 (1998年) 原書 *The large, the Small and the Human Mind* は1997
- 34) R. Penrose, 『皇帝の新しい心』みすず書房 (1994年) 原書 *The Emperor's New Mind* は1989
- 35) 石飛道子, 『ブッダ論理学 - 五つの難問』, 講談社 (2005年)
- 36) N. Bohr, 「原子物理学における認識上の諸問題をめぐる Einstein との討論」『ニールスボーア論文集 I, 因果性と相補性』岩波書店 (1998年) 原論文は "Discussion with Einstein on Epistemological Problem in Atomic Physics", *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, Ed. Schipp, Evancton Illinois(1949)
- 37) J.S. Bell, *Physics* **1**(1965)195
- 38) A. Aspect and G Roger, in *Proc. Int'l Symp. on Foundations of Quantum Mechanics, Tokyo 1983*, Phys. Soc. Japan(1984)
- 39) J. Earman and W.C. Salmon, "The Confirmation of Scientific Hypothesis", *Introduction to Philosophy of Science*, Princeton Hall(1992)
- 40) R.M. Sainsbury, 『パラドクスの哲学』 勁草書房 (1993年) 原書 *Paradoxes*, Cambridge U.P.(1988)