因果の非対称性と逆向き因果の可能性について

森 田 邦 久*

Asymmetry of Causation and Possibility of Backward Causation

Kunihisa MORITA*

Abstract

The asymmetry of causation and backward causation are discussed. The problems are whether asymmetry of causation is objective or subjective, and what backward causation is. First, I survey and criticize three theories about causation: Dowe's fork theory, Menzies and Price's agency theory and Woodward's manipulability theory. Next, I insist that we should distinguish between causal process and causal direction, and that the former objectively exists but the latter does not. Third, I clarify what backward causation is if the causal direction does not objectively exist. I focus on the relative direction of temporal axis in causal process. Forth and finally, I would like to apply my theory to the problem of non-locality in quantum mechanics.

1. 序論

いまビリヤード台の上にビリヤード玉 A が運動量 p_1 をもって転がっている。そして、太郎がキューで別のビリヤード玉 B をつき p_2 の運動量を与えて、O 点で A にぶつけた。これによって A の運動量は p_3 に変化した (図 1)。このとき、「O 点以降の A の運動量が p_3 であることの原因は、O 点で B が A に運動量 p_2 で衝突したこと (とそれ以前に A が運動量 p_1 をもっていたこと) である」とわれわれは言う。しかし一方で、「O 点以前の A の運動量が p_1 であったことの原因は、O 点で B が A に運動量 p_2 で衝突したこと (とそれ以降の A の運動量が p_3 であること) である」とは言わないだろう。

このように、原因と結果にはあきらかな非対称性があり、われわれの経験上、ほとんどすべての場合において原因は結果に時間的に先行する。しかし、マクロな世界を記述する基本的な力学方程式である Newton 方程式は時間に関して対称的である。同様に、ミクロな世界を記述する量子力学の場合も、Schrödinger 方程式は時間に関して 1 階の微分方程式であるが、相対

論的效果も考慮に入れた Klein-Gordon 方程式は時間の 2 階微分方程式であるから、Newton 方程式と同様、時間に関して対称的である。

それでは、このような原因と結果の非対称性の起源はどこにあるのだろうか。Hume (1748/2004, sec VII) のように、定義によって原因が結果に先行するということもできない。なぜなら、Dummett (1964/1978) が指摘したように、われわれは逆向き因果の可能性を合理的に思考することができるからだ。

本論文では、まず、非対称性の起源を世界の側に見る Dowe の立場 (フォーク理論 fork theory) とわれわれの主観の側に見る Price の立場 (行為者理論 agent theory) を批判検討する。次に、Woodward の因果理論 (操作可能性理論 manipulability theory) も概観する。

その後、因果過程、因果的相互作用、因果の向きという 3 つの要素を区別し、Dowe が CQ 理論を用いて主張するように、因果過程と因果的相互作用は実在性をもつことを認める。そして、因果の絶対的な向きは客観的ではないが、相対的な向きはあることを議論し、その議論から逆向き因果だと認められるような現象には、物理的にどのような特徴があるのかを論じる。

ところで、Price、Dowe、Cramer らは量子力学に見られる非局所相関が逆向き因果として解釈できると

* 早稲田大学高等研究所
E-mail: k-morita@aoni.waseda.jp

図1 2つのビリヤードボールの衝突

主張するが、本論の最後の節では、それまでの議論をこの問題にどのように応用できるのかを示す。

2. Dowe のフォーク理論

Dowe は、自身が提唱した「因果の保存量理論 conserved quantity theory of causation (以下、CQ 理論)」を用いて、因果の向きは、因果過程が形成するフォークの向きによって決定されるとするフォーク理論を提唱した。

CQ 理論とは、運動量や角運動量、エネルギー、電荷といった保存量によって因果過程および因果的相互作用を特徴づける理論である。Dowe (2000, p.90)。によると、CQ 理論は、

CQ1: 因果的相互作用は、保存量の交換を含む世界線の交差である。

CQ2: 因果過程は保存量をもつ対象の世界線である。

という2つの主張からなる。たとえば、冒頭でも挙げた2つのビリヤード玉の衝突という現象を考えてみよう(図1)。このとき、保存量として運動量を考える(運動エネルギーなどでもよい)。すると、衝突までは、どちらの運動量にも変化はない。それゆえ2つのビリヤード玉の描く世界線は因果過程である。そして、ビリヤード玉の衝突はこれらの世界線の交差であらわれ、このときそれぞれの運動量は交換するので、これは因果的相互作用である。ここで「交換する」とは、一方の減少分が他方の増加分と等しいことを指す($p_4 = p_2 + (p_1 - p_3)$)。

この CQ 理論は因果過程や因果的相互作用について

図2 2つのビリヤードボールの衝突

の分析であるが、因果の向きについてはなにも言わない(図に描かれた矢印はボールの運動方向を示しているに過ぎない)。そこで因果の向きを論じるためには別の理論が必要となる。それがフォーク理論である。その中心的な主張は

因果過程の方向は、その過程によって一部が構成されている開いた結合フォークの向きによって決まるか、そのような結合フォークがないならばその過程がある因果の網のなかで多数を占める開いた結合フォークの向きによって決定される (Dowe 1996, p.243; 2000, pp.204-5)。

というものである。ビリヤード玉の衝突のようなものは、これをビデオにとって逆回しをしても不自然ではないが、これは「フォーク」がないからである(図1参照)。

一方で、たとえば、「ガラスのコップが割れる」という事象の場合、一本であらわされるコップの世界線が、因果的相互作用の後、いくつものガラスの破片の世界線へと分岐する(図2)。これはビデオの逆回しをすると不自然な映像となるだろう。言い方を変えれば、多数の世界線が集まって一本の線になるような現象は自然界にはほとんどない。つまり、この世界は「なぜか」結合フォークの向きが未来へと開いたものが多数を占めている。この事実から、Dowe は「フォークの開いている向きが因果の向きである」と主張するのである。

これに対してはいくつかの異論がある。ここではそれらについて詳論はしないが¹、それらの異論をおいても、Dowe の議論には以下のような重大な難点がある。

Dowe の議論ではたしかに逆向き因果は不可能ではない。なぜなら、フォークの向きが因果の向きを決め

¹ たとえば、Dowe (2000), ch.8 などを参照。

るわけであるが、それが時間の向きと一致しなければならぬ理由がないからだ。つまり、フォークの向きと時間の向きが逆になる可能性は残っているのである。そして、じっさい彼自身が、たとえば EPR 相関において逆向き因果が成立していると主張する。

しかし、彼が EPR 相関において逆向き因果が成立していると主張する根拠は、そうすると非局所的相関を避けることができるからというだけにすぎない。つまり、じっさいに EPR 相関において時間と逆向きのフォークが存在するというを示したわけではない。

Dowe は、われわれが現在知らないだけでそのようなもの（ERP 相関における逆向きに開いたフォーク）があるはずであり、それが見つかれば自分の理論が正しいとわかる、と述べる。しかし、現時点で「時間と逆向きに開いているフォークがあり、そのとき因果も逆向きになっている」という現象が見つかっていない限り、フォークの向きと因果の向きが一致しているのは偶然である可能性があるわけだから、彼の理論は説得力をもたない。

ここで、本論で言う EPR 相関とは、たとえばスピンの 0 の粒子が 2 つの粒子にわかれたとき、一方の粒子のスピンを観測することによってもう一方の粒子のスピンの角運動量保存則より、瞬間的にわかるような現象のことである。量子力学によると、それぞれのスピンは観測されるまで確定されていないのだから、一方の粒子スピンの観測が原因でもう一方の粒子のスピンの瞬間的に決定されることになる。これは非局所的な相関といわれ、光速度以上の因果的相互作用を認めない相対論的な要求を満たさない²。そこで、Dowe は（そして Price も）ここに逆向き因果を想定することによって非局所相関を避けようとするのである。つまり、一方の粒子のスピンの観測されたことが原因で、時間をさかのぼり、分裂直後のもう一方のスピンの粒子が決定されるのである。

3. Price の行為者理論

Menzies と Price (Price 1992; Menzies & Price 1993) によると「因果的非対称性は〔中略〕われわれ自身の世界に対する非対称的な見方の産物である」という (Price 1992, p.512)。つまり、われわれは過去を

知っているが未来を知らないために、過去は固定されていて未来は開いているように感じる。それゆえ、現在の行為によって、未来に意図的にある結果を生じさせることができる（とわれわれは信じている）が、現在の行為によってすでに決定されている過去を作り出すことはできない（とわれわれは信じている）。

それが、結果に時間的に先行している事象を原因として考える理由であるというのだ。もし、ある行為より時間的に先に生じるその行為による結果が、その行為が完了するまでわからないならば、われわれは逆向き因果を想定することに違和感をもたないという。なぜなら、「結果」が過去の事象であっても、それを知らないのだから、それを引き起こすことを信じることができるからだ。

たとえば、Dummett (1964/1978) の有名な「酋長の踊り」において、なぜ酋長の踊りが原因で若者が勇敢に狩りをする（酋長の踊りはすでに若者が狩りを終えているはずの時刻を過ぎても行われる）という結果が生まれると信じることができるのかということ、「若者による勇敢な狩り」という結果が、「酋長の踊り」という原因となる行為が完了するまでわからないからなのである。EPR 相関もまさしくこのような例に当たる。すなわち、どちらかの粒子のスピンを測定（原因）するまで粒子のスピン（結果）はわからないのである。

だが、Price が想定するような状況、つまり「ある行為より時間的に先に生じるその行為による結果が、その行為が完了するまでわからないような状況」は、Dowe (1996; 2000) も指摘するように、「ある現象を逆向き因果として解釈することが可能になるような状況」であるにすぎない。普通の向きの因果現象の場合と異なり、逆向き因果として解釈しなければならない必然性が何もないのである。

4. 因果の操作可能性理論

Woodward (2003; 2007) は、「操作可能性理論 manipulability theory」もしくは「介入理論 intervention theory」と呼ばれる理論を提唱した（以下、「操作可能性理論」で統一）。操作可能性理論とは、

2 つの変数 X と Y があるとき、ある特定の状況下で、ある介入 I によって X を変化させたとき、つねに Y がなんらかの変化をこうむるならば、 X は Y の原因だとする。

² この場合でも満たすという議論もある。たとえば (Sakurai 1994, pp.231-2) や (レッドヘッド 1987/1997, 127-29 頁) を参照。

という理論である。介入とはなにかという条件も Woodward は詳細に議論しているがここでは紹介しない (Woodward 2003, p.98; 2007, p.75)。

本論文冒頭の例を再び考えてみよう。「O 点で運動量 p_2 をもって B が A に衝突したこと」を X とおき、「O 点以降で A が運動量 p_3 をもつこと」を Y、「O 点以前で A が運動量 p_1 をもつこと」を Y' としよう。X を介入 I (これは「太郎がキューで B をつくこと」に相当する) によって変化させると、Y は変化するが Y' は変化しない。操作可能性理論によると、それゆえ、X は Y の原因であるが、 Y' の原因ではないことになる。

さて、操作可能性理論は、言い換えれば、「X を変化させることによって Y を操作することができるが、X が Y の原因であるための条件である」と主張する理論なのだから、Price の行為者理論も広い意味で操作可能性理論である³。

では行為者理論と Woodward の操作可能性理論との違いはなにか。Woodward によると、(彼の) 操作可能性理論は「行為者 agent」という概念に依拠していない点が、Price の理論と異なる点だという。「因果の非対称性の起源はあることを成し遂げるためには別のことをやらなければならないというわれわれの経験にある」(Price 1992, p.515) という Price らの議論が正しいならば、人間が引き起こすことのできないような事象へどうやって因果概念を拡張するのかという問題が生じるのである (Woodward 2000, pp.123f)。

5. 因果の向きはなにによって決定されるのか

5.1 因果過程の実在性と因果の向きの相対性

では、因果概念とわれわれの主観はまったく関係ないのだろうか。もう一度、本論文冒頭の例を考えてみよう。

介入 I による X の変化は Y を変化させるが Y' は変化させないので、操作可能性理論によると、X は Y の原因となるが、 Y' の原因とはならないのであった (もちろん、じっさいに過去が変化したかどうかは直接的には観察不可能であるが、運動量保存則を信じると、変化していないはずである)。しかし、X を変化させることによって、O 点以前で A がもつ運動量が変化して、O 点以降の A がもつ運動量が不変であっても、運動量保存則も Newton の運動方程式も破りはしないのだから、このような非対称性は Newton 力学からは説明できないので「不思議」なのである。

だが一方で、ある意味では、X の変化によって Y' が変化しないことはあたりまえのようにも思える。なぜなら、X を変化させた 2 つのビリヤード玉を使った実験を用意したとき、その実験の設定において Y' を固定しているからだ。

Woodward は、行為者理論の「因果は主観的である」という主張にたいして、「スピードを出しているバスの前へ飛び出したとき私が怪我をするかどうかは、因果的にであれそのほかの仕方によってであれ、私の信念や願望に依存しない」と指摘した (Woodward 2000, pp.118-9)。この例はたしかに客観的な因果関係が実在することを示唆するが、注意したいことは、この例は因果の向きについてはなにも示していないことである。

このことについてより明確に見るために、Dowe の CQ 理論をこの例に適用してみよう。すると、バスが人間に衝突した際に保存量の交換があるはずだから、ここで因果的相互作用があったと言うことはできるはずである。しかし、すでに指摘したように、CQ 理論は因果の方向についてはなにも言わない。ビリヤードの例で言うと、A の運動量が B との衝突で変化したことが因果的相互作用であるということは CQ 理論では言えるが、なぜ A と B の衝突が O 点以前の A の運動量を変えずに O 点以降の A の運動量を変えたのかを説明することはできない。

つまり、CQ 理論の主張する因果過程や因果的相互作用の実在性を認めつつ (スピードを出したバスの前に飛び出したら怪我をすることがわれわれの信念にはよらないことを認めつつ)、因果の非対称性の客観性を疑うことはできる。じっさい、Price の論文では、すでに引用したように、因果そのものではなく、因果の非対称性の起源をわれわれ自身の非対称に帰しているのである。それゆえ、行為者という概念を持ち込んでも、スピードを出したバスの前に飛び出したときに怪我をするか否かがわれわれの信念に依存することを認めることにはならない。

ここで、主観が問題になるのは、「介入による X の変化が Y' を変化させずに Y のみを変化させる」という因果の非対称性 (向き) の問題なのである。先に述べたように、じっさいに操作可能性を調べるには、介入によって変えた複数の X の値に応じていくつかの実験を用意すればよいわけだが、この時点ですでにわれわれは Y' を固定したものをを用意するであろう。する

³ じっさい Price 自身も自身の理論を操作可能性理論と称することがある (Price 1992, p.514) し、Woodward も行為者理論は操作可能性理論の一種だとする。

と、 X と Y 、 Y' は因果的につながっている（それは CQ 理論により客観的にわかる）のだから、 X を変化させると Y が変化するのは（物理的には）何も不思議はないし、 Y' ははじめから固定されているのだから変化しようがない。言い方を変え、問題はわれわれが Y を固定した実験を準備できないことである。もちろん、運動量保存則から予測して X を変化させても Y が一定になるように、 Y' をあらかじめ調整することはできるが、これはあきらかにいま問題にしているような変化ではない。

しかし、このことは、じっさいに未来が開いている open ということの意味するわけではないし、未来が操作可能であることを意味するわけでもない。ただ、われわれの認識論上の制限から操作可能であるように思えるということだ（このようなわれわれの認識論上の制限もまた物理的に説明できるのかもしれないがここではその問題はおいておく）。

ここまでの議論を整理しよう。概念的な分析としては、行為者理論をも含んだ意味での操作可能性理論は正しいであろう。だが、ここで重要なのは、因果過程や因果的相互作用と原因・結果を区別しなければならない、ということである。これらを明確に区別せずにすべてをひっくるめて「われわれの信念や態度によって『構成された constituted』」(Woodward 2000, p.118) と考えると、走っているバスの前に飛び出したときにわれわれが怪我をするかどうかがわれわれの信念や態度に依存するというおかしい主張になってしまう。

もちろん、歴史的にわれわれが因果という概念を形成していく過程では、因果過程や因果的相互作用と原因・結果を区別していなかったであろうが、物理的に分析していくと、これらは区別すべきである。CQ 理論が言うように、因果過程や因果的相互作用は保存量概念から客観的に存在すると言ってよい。だが、因果過程におけるどの時空点が原因で結果か、因果過程（保存量をもった対象の世界線）上のどの向きが原因 → 結果の向きかは、世界のあり方に絶対的には依存しない。因果の非対称性は部分的にはわれわれの非対称性を反映している。

ここで「絶対的には」という句に傍点を打ち、「部分的には」という句を挿入したのにはわけがある。それが本論の主要な論点となる。以下で論じよう。

5.2 なにが因果の向きを決定するのか

このように因果の非対称性の起源がわれわれの側に

あるとすると、逆向き因果の問題をどのように考えればよいのか。因果の非対称性がわれわれの認識論上の制限にその起源があるのだとすると、逆向き因果は存在しないか、もしくはあったとしても、Price が言うような認識における特殊な状況でしかあり得ないのだろうか。

ここで、タキオンを用いた過去への情報伝達や過去へのタイムトラベルといった事例を考えてみよう。もしこのようなことが可能であるならば（そして相対性理論によると現実性はともかく原理的には可能である）、われわれの直観からしても、Woodward の主張からしても（それが可能だとして）、これは逆向き因果なのではないだろうか（そして、この例は、Price の想定するような認識論的状况に依存しないものである）。

相対性理論によると、もし光速を超える粒子タキオンが存在したとして、それを自由に操れるならば、過去へ情報を伝達することも可能になる (Davies 1995/2005, ch.3; ch.11)。このとき、現在において、どのような情報 (X) を過去に送るかを選択する (I) ことにより、過去 (Y) を変えることが可能となるだろう⁴。つまり、現在の事象に介入することによって過去の事象に変化を起こすことができるのだから、操作可能性理論によると、これは逆向き因果であり、そしてこれを逆向き因果だとすることはわれわれの直観にも合う。ここでは、過去へのタイムトラベルや情報伝達が引き起こす種々のタイムパラドックスについては目を瞑ることにしよう。

さて、そうすると、このような「逆向き因果」は物理理論によって保証されているものであり、われわれの認識論的な制限とは関係なさそうである。これはどういうことだろうか。まず、もう一度ビリヤードの例を考えよう。いま因果過程を構成する、保存量をもつ

⁴ (原因と結果が必然的に結びついているとして) 原因は結果を「引き起こす」ものだろうか。それとも「変化させる」ものだろうか。操作可能性理論は後者であると主張しているように思える。しかし、操作可能性理論は、介入によってある事象の変数 X の値を a_1 にしたときの結果の変数 Y の値が b_1 であり、 a_2 にしたときは b_2 である場合に、 X が Y の原因であるということなのであり、これはすでに存在する事象を「変化させる」ものではない。たとえば、「酋長の踊り」でも、変数 X の値が「踊る」なら変数 Y の値が「勇敢に狩りをする」で、変数 X の値が「踊らない」なら変数 Y の値が「勇敢に狩りをしない」となるならば、 X が Y の原因である。しかし、これは「踊ることによって過去の若者の行為を変化させた」のではない。なお、この論点は、匿名の査読者により指摘していただいた。

対象（ビリヤード玉 A や B）の系を考えたとき、この系の時間軸は因果の向きを判断する観測者の系の時間軸の向きと一致し、いま考えている範囲ではこれらの向きが変化することはない。ところが、たとえば、タキオンによる情報伝達の例においては、因果過程とは、たとえば、光速以下の粒子から成り立っている送り手や発信装置、受け手や受信装置などと、情報を運ぶタキオンの世界線である。そして、タキオンの時間軸は、件の因果過程を構成しているほかの対象の時間軸とは逆を向いている。

これらの因果過程のなかで、操作可能性理論における「介入」は、たとえば発信装置などによってなされるだろう。その介入が行われた時点をも O とすると、O 点「以前」は、ここまでで議論したように、われわれの認識論上の制限から固定される。それゆえ、介入によって X（どのような情報を送るかなど）の変化が影響するのは、O 点「以降」ということになるが、この「以前」「以降」とは正確にはどういう意味か。それは観測者の系の時間軸において O 点以前・以降という意味である。そうすると、じっさいに情報を運ぶタキオンの系の時間軸は観測者の系の時間軸とは逆を向いているから、「過去」へ影響を及ぼすことができるわけである。

つまり、ひと続きの因果過程において観測者の系の時間軸と逆向きの時間軸をもった系があれば、その因果の向きは逆向きである。それゆえ、たとえば Dummett の酋長の踊りが本当に（物理的に）逆向き因果かどうかはこの因果のメカニズムがあきらかにされ、なんらかの保存量をもつ対象（祈りのパワーを伝達する物質？）の系の時間軸が観測者の系の時間軸と逆向きであるかどうかで決まるのである。

6. ここまでのまとめ

ここで本論の議論をまとめておこう。原因と結果は時間的に非対称である。すなわち、一般に、原因は結果に先行する。しかし、客観的に世界を記述していると思われる物理法則は時間的に対称的である。それではこの因果関係における非対称性はなにに起源をもつのだろうか。それは、主観に起源をもつのだろうか、それとも、客観的に世界の側に起源をもつのだろうか。これが問いであった。

この問いについて、本論では以下のように議論した。すなわち、因果過程は客観的に存在する。しかし、そ

の因果関係における方向は絶対的には決まっていない。それゆえ、因果の非対称性は主観に起源をもつ。より具体的には、Price の言うように、「現在の行為によって、未来に意図的にある結果を生じさせることができる」とわれわれは信じているが、現在の行為によってすでに決定されている過去を作り出すことはできないとわれわれは信じている」ことに起源がある。

では、時間を逆行する因果は存在し得ないのだろうか。

また、存在するとしても Price が言うように、認識論的に特殊な状況下においてのみなのだろうか。これにたいして、本論では否定的に答える。すなわち、相対的な因果の方向性は客観的に決定されているのである。その根拠は次のような点にある。

物理法則上にあらわれる時間のパラメータ t は絶対的な方向について何も教えてくれないが、ある系 S の時間パラメータ t が別の系 S' の時間パラメータ t' と、たとえば $t' = -t$ のような関係にあれば、 S における時間方向と S' における時間方向は逆向きになっているはずであるから、 S と S' がなんらかの共通した因果過程をもつなら、そこで逆向き因果が成り立つ。

たとえば、タキオンによる情報伝達などがそれにあたる。タキオンを送受信する系を S 、タキオンを系 S' とすると、 S における未来からタキオンを介して S における過去へ情報を伝達することが可能になるのである。これは Price の言うような、われわれの認識に特殊な制限があるような場合でなくとも、生じうる現象である。

7. 量子力学と逆向き因果

さて、それでは、EPR 相関において逆向き因果が生じているという Price や Dowe の主張は、以上の議論によって根拠づけることができるだろうか。ここで Cramer (1980; 1986) による交流解釈 transactional interpretation をみてみよう。

Schrödinger 方程式は $\partial\psi/\partial t = C\psi$ (C は適当な定数) という形の偏微分方程式になっているので解はひとつであるが、相対論的な効果を考慮した量子力学の方程式である Klein-Gordon 方程式は $\partial^2\psi/\partial t^2 = -D^2\psi$ (D は適当な定数) という形の偏微分方程式なので、解は $\psi = \exp[-iDt]$ と $\psi^* = \exp[+iDt]$ の 2 つがあり得る。このとき、 ψ^* の時間パラメータを t' とおき、 ψ の時間パラメータを t とおくと、 $t' = -t$ の関係になる。つまり、 ψ を未来へ向かう波動関数としたならば

(これを遅延波と言う)、 ψ^* は過去へ向かう波動関数 (これを先行波と言う) ということになる。

いま、時刻 T_0 において電子が放出されたとしよう。この電子が吸収体によって吸収される時刻を T_1 としたとき、 $T_0 < T_1$ である (われわれの通常の過去から未来への方向を正の方向としている)。以下で Cramer の言う「交流 transaction」がいかにして生じるかを 3 つのステップで述べるが、その記述は、じっさいの時間の流れに沿ったものではなく、理解を助けるための擬似時間 pseudo-time におけるものであることに注意しよう。

(1) 電子が T_0 で放出された際に、 $t > T_0$ の時間方向と $t < T_0$ の時間方向の双方へ波動関数 ψ_0 と ψ_0^* がそれぞれ伝達される。そして、 $t = T_1$ で電子が吸収されると、(2) 今度は $t > T_1$ と $t < T_1$ の双方へ系を記述する先の波動関数とは位相が $\pi/2$ だけずれた波動関数 ψ_1 と ψ_1^* が再び伝達される。すると、 $T_0 < t < T_1$ において、(3) ψ_0 と ψ_1^* が出会い干渉して、振幅が $\psi\psi^*$ の合成波が生じる (こうして Born の確率則が「導出」される)。これにより、電子は実体化する (「交流が完成した」と言う)。一方、 $t < T_0$ においては、2 つの先行波が干渉して打ち消しあい、 $t > T_1$ においても、やはり 2 つの遅延波が干渉して打ち消しあう。このとき、波動関数は (Copenhagen 解釈と違い) 実体的に存在するものと解釈する。

さて、以上が交流解釈の概要であるが、どのような場合に逆向き因果が存在するのか (もしくは逆向き因果など存在しないのか) について議論されないままこの解釈は提唱されていた。いまやわれわれは逆向き因果が存在する条件を手に入れた。それに基づいてこの Cramer の議論を振り返ってみる。

先行波 ψ^* の時間 t' は、観測者たちの時間 t と $t' = -t$ の関係があり、さらにエネルギーという保存量をもつ。それゆえ、本論での議論によると、先行波の世界線は因果過程であり、さらに、観測者系とは逆向きの時間をもっている。それゆえ、(観測者系から見て) 因果の方向が逆向きになっているのである。

また、 ψ^* は吸収体がなければ存在しないものであるから、吸収体への介入によって (吸収体を置いたり置かなかったりすることによって) より過去の時刻における電子を実体化させたりさせなかったりという選択ができる。つまり、操作可能性理論によっても、これは逆向き因果であると言える。

量子力学に見られる非局所相関が逆向き因果として

解釈できるという主張について、Price や Dowe の議論はその「可能性」を示唆するだけであり、たとえば Schrödinger 方程式にまで踏み込んだ議論ではなかった。Cramer の議論は、物理的にはより精巧な議論であるが、因果に関する哲学的議論により根拠づけられたものではなかった。しかし、以上の議論により、EPR 的状况において逆向き因果が生じることが、哲学的にも物理的にも根拠づけることができたであろう。ただし、Price や Dowe の議論は、明確には主張されていないが、時間に逆行する隠れた変数的なものを想定しているように思えるので、そこには注意が必要である。

謝辞

匿名の査読者によるコメントは本稿の改訂に有益であったことをここに記して謝意を表したい。

文献

- Cramer, J. G. (1980) Generalized Absorber Theory and the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox, *Physical Review D* 22-2, pp.362-76.
- Cramer, J. G. (1986) The Transactional Interpretation of Quantum Mechanics, *The Review of Modern Physics* 58-3, 647-87.
- Davies, P. (1995/2005) *About Time: Einstein's Unfinished Revolution*, New York: Simon & Schuster Paperbacks: originally published in 1995 from Orion Productions.
- Dummett, M. (1964/1978) Bringing about the Past, in: *Truth and Other Enigmas*, Cambridge: Harvard UP.
- Dowe, P. (1992) Wesley Salmon's Process Theory of Causality and the Conserved Quantity Theory, *Philosophy of Science* 59, pp.195-216.
- (1996) Causality and Conserved Quantities: A Reply to Salmon, *Philosophy of Science* 62, pp.321-33.
- (2000) *Physical Causation*, Cambridge: Cambridge UP
- Hume, D. (1748/2004) *An Enquiry Concerning Human Understanding*, New York: Dover; originally published in 1748.
- Price, H. (1996) *Time's Arrow and Archimedes' Point*, Oxford: Oxford UP.
- Menzies, P. & Price, H. (1993) Causation as a Sec-

- ondary Quality, *British Journal for the Philosophy of Science* 44, pp.187–204.
- Price, H. (1992) Agency and Causal Asymmetry, *Mind* 101, pp.501–20.
- (1994) A Neglected Route to Realism about Quantum Mechanics, *Mind* 103, pp.303–36.
- (1996a) Backwards Causation and the Direction of Causal Process: Reply to Dowe, *Mind* 105, pp.467–74.
- レッドヘッド, M. (1987/1997) 『不完全性・非局所性・実在主義』, 石垣壽朗訳, 東京: みすず書房; Michael Readhead, *Incompleteness, Nonlocality, and Realism*, Oxford: Oxford UP, 1987.
- Sakurai, J. J. (1994) *Modern Quantum Mechanics: Revised Edition*, Reading: Addison-Wesley Publishing Company.
- Woodward, J. (2003) *Making Things Happen*, Oxford: Oxford UP.
- (2007) Causation with A Human Face, in: *Causation, Physics, and the Constitution of Reality*, Oxford: Oxford UP., pp.66–105.
- (2009 年 1 月 5 日投稿、2009 年 7 月 30 日再投稿、2009 年 12 月 24 日掲載決定)