

『ミクロとマクロをつなげる』の補足解説

フィジクスとメタフィジクスの双対性

谷村 省吾

このノートは数理科学 2022 年 1 月号 pp.52–57 掲載記事『ミクロとマクロをつなげる—概念体系の網はいかにして世界を捉えるか』についての補足解説 (supplementary commentary) である。誌面では挙げられなかった参考文献を紹介しながら解説する。

1. 原子の実在性

本誌記事では原子や電子などのミクロ世界に関する概念体系と人間スケールのマクロ世界の概念体系とをいかにしてつなげるかという話をした。この話は、視覚や触覚などの感覚で捉えられないが、あるはずのように思えるものごとを我々はいかに理解すべきか、どういうふうになったら理解したと言ってよいのか、それは存在していると言ってよいのかなどといった哲学的問いと背中合わせである。この種の哲学的議論の一つの頂点である科学的実在論論争に触れないわけにはいかないと思うので、少し触れておく。

本誌記事を書くにあたって、マッハやボルツマンの時代の話については戸田山和久氏の本『科学的実在論を擁護する』¹⁾を参考にした。とくに、《マッハは原子論者に会おうと、相手の話を遮って「あなたはそれを見たのか」と詰問し、立ち往生させるのが常だったという》エピソードは『科学的実在論を擁護する』¹⁾の p.16 にある。論理実証主義運動の時代背景や、「ドイツ物理学」・「ユダヤ物理学」という区別があったことも戸田山氏の本¹⁾に書かれている。アダム・ベッカーの本『実在とは何か』²⁾は、主としてベルの不等式の破れに至る量子力学における論争の歴史を扱っているが、論理実証主義を含む科学哲学界の動きについても詳述している。ハイゼンベルクやボルンが活躍していた時代のエピソードについては、佐々木隆氏の記事³⁾を参考にした。

ペランが原子の数(アボガドロ数)を手を替え品を替えて測った話はペラン自身が書いた本『原子』⁴⁾に詳しく書かれている。江沢洋氏の『だれが原子をみたか』⁵⁾は高校生でも読める本だが、大学生なら江沢氏の『だれが原子をみたか』を読んでからペランの『原子』を読むとよいと思う。

ポアンカレの「数えられるということは（原子は）あるのでしょうか」というセリフは、ポアンカレの本“Mathematics and Science: Last Essays”⁶⁾ p.89に現れている文の意識である。元はフランス語だが英訳文は次のとおり：

The atoms are no longer a convenient fiction; it seems, so to speak, that we can see them since we know how to count them.

戸田山和久氏が「数えられるということは、あるのでしょうか」と言ってポアンカレの話を紹介したのを私は聞いて、その表現の方がしっくり来ると思った。ポアンカレの本のこの章は、1912年にポアンカレがフランス物理学会で行った講演録である。ポアンカレはこの講演を依頼されたとき、いまさらこの話題について自分が新しく付け加えられることなどないので依頼を断ろうと思った、と書いている。この講演の中でペランの実験についても言及している。

イワノフという科学哲学・科学史の研究者は、ポアンカレの論説を分析して、ポアンカレがこう言ったからといって科学的实在論に転向したわけではなく、反基礎付け主義的な構造主義にとどまっていると結論している⁷⁾。

2. 科学的实在論論争

哲学者の言うところの「实在論」はなかなかわかりにくい。科学哲学では、対象实在論・介入实在論・構造实在論・認識的構造实在論・存在的構造实在論・半实在論・構成的实在論など多様な实在論が唱えられており、反实在論サイドからも還元的経験主義・消去的道具主義・悲観的帰納法・構成的経験主義・決定不全性など实在論に対するさまざまな反論が唱えられている（すべて戸田山氏の本¹⁾で整理されている）。反实在論的主張と言っても、その中には实在論の腰を折るような痛烈な批判もあるし、实在論派に理解を示すような妥協的な提案もある。实在論 vs. 反实在論論争の初期はシャープな対立だったのかもしれないが、双方の意見を交わしているうちにだんだん議論は妥協点を探るものになってきて、实在概念を擁護する側の積極的な考えと、实在なんか考えない方がよいという消極的な考えとがグラデーションを帯びて分布しており、部外者には論争の焦点がわかりにくくなっている。また、基礎付け主義（知識の体系にはこれ以上遡及できない基礎があると考え）・反基礎付け主義（基礎などないと考え）といった、個別の科学分野を超えたメタな態度のバリエーションがあり、ますます論点が複雑になっている。さらに科学哲学の外に、形而上学的实在論（普遍者の实在性を主張する）・唯名論（普遍实在などない、名前・言葉があるだけだと主張する）など、物理学者の手に負えそうにない伝統的哲学論争が背後に控えている。哲学に疎い物理学者は自分の態度がナニ实在論・ナニ主義に該当するのかわからないし、そのような分化・分類があることすら知らないで、哲学者の問題の立て方についていくのは難しい。

「实在」という言葉の意味からして、物理学者が思う「实在」と哲学者が思っている「实在」は違っているし、さらに哲学の専門分野ごとに違っていると思っただ方がよい。このことはとくに物理学者は心した方がよい。例えば、光子は実

在するか、とか、波動関数は実在するか、時間は実在するか、自由意志は実在するか、といった問いを哲学者と議論するときは「実在」という言葉でどうい
うことがらを意味するつもりなのか、どういうことがらなら認めるのか、物理
的世界があることは認めるのか、自分が物理的世界の一部分にすぎないことは
認めるのか、物理法則は正しいと認めるのか、物理法則に従わない何ごとかが
あると信ずるのか、この世界以外の世界の話もするつもりなのか、など念入り
に解きほぐしながら議論した方がよい。

私は上に挙げたような実在論・反実在論の分類整理が徒労だとは思わない。
素人が不用心に「ある」とか「ない」とか言っていることを丁寧に腑分けして、
「ヒッグス粒子がある」とか「ニュートリノ振動を見つけた」とか「量子もつれ
状態を作る」とかいう言葉の内容を慎重に考えることは意義があると思う。た
だ、その程度の意味内容なら各物理学者も心得ているし、実在の分類・線引き
を哲学者がシャープにしようとする科学者の実感・実態から乖離していくし、
妥協的な実在の定義に落ち着くなら物理学者にとっては「初めからそんなも
んだと思っていたよ」というところに落ち着きがちなので、こちらとしては、よ
く言えば、もどかしい、悪く言えば、科学者がやっていること・考えているこ
とをそっちのけにして科学についてあさっての方向から議論してやがる、とい
うことになる。

ファインマンは彼の講義の中で「躍るアトム (Atoms in Motion)」と題する
回を設けて、こう述べている⁸⁾：

《もしもいま何か大異変が起こって、科学的知識が全部なくなってしまい、
たった一つの文章だけしか次の時代の生物に伝えられないということになった
としたら、最小の語数で最大の情報を与えるのはどんなことだろうか。私の考
えでは、それは原子仮説（原子事実、その他、好きな名前でもよんでよい）だろ
うと思う。すなわち、すべてのものはアトム—永久に動き回っている小さな粒で、
近い距離では互いに引きあうが、あまり近づくと互いに反発する—からできて
いる、というのである。これに少しの洞察と思考を加えるならば、この文の中
に、我々の自然界に関して実に膨大な情報量が含まれていることがわかる。》

原子仮説と呼ぼうが原子事実と呼ぼうが何でもよいという態度も含めて、私
はファインマンの主張が適切だと思う。それがどの程度の仮説でどの程度の事
実なのかは、使う人がわかっていればよいし、それはやっているうちにわかる
ことなのである。

『ご冗談でしょうファインマンさん』⁹⁾に、物理学の学生だったファインマン
が、電子は本質的対象 (essential object, 実在概念の一種らしい) か? と教授
に問いかけられて哲学学生たちと議論し、大変な混乱に遭ったというエピソード
が書かれていたことも思い出した。ある意味、想像どおりの、ステロタイプ
どおりの、やはりと思うような混乱であった。ぜひこのエピソードを読んでほ
しい。

本記事で私は科学的実在論論争に冷淡だと書いたが、そうやって闘わされて
きた「科学についてのつっこみと反省」から新しい科学の思考方法が生まれるな

ら大歓迎である。とくに AI (artificial intelligence, 人工知能) を用いた新しい科学のヒントが科学哲学や現代存在論にあるかもしれないと私は考えている。

3. メタフィジカルなコミットメント

哲学の部外者にとってわかりにくいことだが、反実在論者も「原子や電子は存在しない」とか「原子や電子に依拠した科学は間違っている」とか言うつもりではないのである。反実在論者も、原子や電子という概念を使うといろいろな物理現象を首尾よく説明できることは認めるし、その説明原理を使っているな機器をデザインして狙い通りの機能を実現できていることも認めるのである。ただ、見て来たかのように、文字通り「つぶつぶの原子や、動き回っている電子がある、そういう赤裸々なありようをした原子や電子があるんだ」という信じ方をしない、この世界の本当の姿はこうなっているという断言はしたくない、そのような責任を自分は負いたくないし、物理学にはそこまでの証明能力・責任能力はないはずだ、なぜなら物理学は実験・観察によって実証できることを真と判定する学問であって、見ることも触ることもできないマイクロ世界の「真の姿」について物理理論が語れるはずがない、「真の姿」については態度を保留すべきだ、というのが反実在論の骨子なのである。

そうであれば、「反実在論 (anti-realism)」という強気の否定語ではなく、「回避実在論 (evasive realism, non-committal realism)」くらいにしておけばよかったのと思うが、歴史的には、反実在論というのは、原子なんて本当にあると君は信じるのか？見たのか？と問い詰めるマッハのようなかなり強気のネガティブな態度を汲んでいるし、経験的方法によって実証不可能な形而上学的用語を物理理論から駆逐しようという論理実証主義運動¹⁰⁾を経て形成されたので、「反実在」という名を与えられたのであろう。

雑にはあるが、視覚や触覚などの感覚を超えて世界の真のありようを思考する学問が(伝統的、従来の)形而上学、メタフィジクス (metaphysics) である、と定義しておこう (これは旧式の形而上学の特徴付けであり、最近の形而上学はそこまでストレートにメタフィジクスではないらしいが、それについては次の節で述べる)。経験や観察による直接確認が不可能なものごとに関して何らかの信念を請け合うことを「メタフィジカルなコミットメント」という¹¹⁾。「原子や電子は本当にあるんだよ、電子の正体はこういうものだよ」などと他人に言う人はメタフィジカルなコミットメントを負うことになる。

反実在論を知る哲学者に言わせれば、メタフィジカルなコミットメントは非常に重いもので、そうやすやすと物理学者が負うことはできないはずのものらしい (伊勢田哲治氏の言¹¹⁾を読むと、メタフィジカルなコミットメントに非常な重きを置いているように感じられる)。メタフィジクスは、語義からして物理学の範疇ではないはずだからである。反実在論的立場をとってれば、安易に信じたことが後で間違いだと判明する失敗を避けられる。これを「認識論的リスクの軽減」という。

極端に言えば、「實在論的立場をとるということは、見てもいないことについて世界の真のありようはこうだと本気で信じることであり、後で大間違いが判明するかもしれないリスクを負うことなんですよ、實在論というのはそういう重いコミットメントとリスクを伴うのですよ、それでもあなたは實在論者でいられますか？ それはもう物理学者の責任の範疇を超えているでしょう」というのが反實在論者が言えることである。

自らの責任を回避し、こういう脅し文句を言うだけのために反實在論という立場があるように私には思える。そういう立場が可能だということは私も理解しているつもりだが、全然面白くないし、役立たずな立場である。

例えば蛍光灯のしくみの實在論的な説明はこんなふうである（あと10年もしないうちに蛍光灯は見られなくなるかもしれないが）。希薄なガスに高電圧をかけて電流を流すと電子がガス中を高速で飛ぶ。電子がガスの原子にぶつかって原子にエネルギーを渡すことによって、飛び飛びのエネルギー準位を持つ原子がエネルギーの高い準位に移る。このことを原子の励起という。この原子が光子を放射してエネルギーを捨てることによって低エネルギー準位に戻る。このとき出た光子は紫外線と呼ばれる電磁波でもあり、蛍光管のガラスに塗ってある蛍光物質の原子に当たって、蛍光物質原子を高エネルギー準位に移す。この原子が別の光子を放射して低エネルギー準位に戻る。このとき出る光子が蛍光灯が出す光である。

光子や電子や電流や電圧の實在性や原子の不連続エネルギー準位構造の實在性にコミットせずに、上に述べた説明を「もっともらしい話だが本当にそうなのかどうかはわからない」と判ずる立場も可能である。ただ、原子・電子のありようについてのメタフィジカルな言説を信じないことによって得るものが認識論的リスクの軽減だけだったら寂しいし、つまらない。コミットメントを忌避してマイクロ世界のありようについて想像したり語ったりするのを控えるよりは、マイクロ世界の真相に肉薄するイメージ・理解を獲得したいと私は思う。第一、そのようなイメージを欠いた状態では、次のステップに進むための想像力が働かないと私は思う。リスクを負って、電子のありようを信じて、イメージを描いて、こうすればこうなるはずだと考えた人が真空管もブラウン管も電子顕微鏡もダイオードもトランジスタもLSIも発明したと思う。

さすがに反實在論者も、リスク軽減だけをメリットとして謳^{うた}っても普通の人は喜ばないことはわかっているようだし、自分だけがリスク軽減したところで實在論者よりもできることが増えるわけでもなく、ただ、あれこれの反實在論的論説をひねり出して實在論擁護者を悩ませることだけはできた。これが科学的實在論論争のなりゆきだったと思う。

論理実証主義者たちが科学理論的な概念・言説をいかにして経験・感覚と結びつけるかという問題提起をした点はよかったと私は思う。それなら物理学者たちも気にしていることだからだ。ところが、論理実証主義運動が形而上学を敵に回すところからスタートしてしまったために、形而上学的理論語らしく見える實在概念が槍玉に上げられ、その後は、科学理論で述べられていることを

どこまで真に受けてよいのかという議論の形が整ってしまったと思う。つまり、**実在概念を畏れ多い形而上学的概念として祀り上げて**、科学の領分・責任範囲について科学の外で議論するという形に移行したのである。私がこういふことを言うと「我々は形而上学的概念を祀り上げてなんかいない」という応答が哲学者側から返って来そうなので、このノートの5節でこの点に触れる。

4. 疎まれる形而上学，生き延びる形而上学

歴史上、形而上学は何度も批判に晒^{さら}されているらしい。カルナップらの論理実証主義運動も、理論物理と経験主義の融和よりは、自然科学からの形而上学概念の排斥を主たるターゲットとしていたらしい。つまり、経験・感覚に還元できない形而上学的語彙は科学理論から姿を消すべきだというのが論理実証主義者たちの狙いだったのである^{2, 10)}。

近年では分析形而上学や現代形而上学という分科名が掲げられている^{12, 13)}。旧来の形而上学が、物理的・感覚的方法では捉えられない世界の奥底の真の姿について思索するという大上段の構えであったのに対して、現代の形而上学は、「世界の基礎的なありかた」を探究するという、やや穏やかな姿勢になっている。現代形而上学は、存在者をどんな種類に分けるべきか、共通の性質があるとはどういうことか、個物が同じであるとはどういうことか、何を関係と呼ぶか、因果関係とは何かなどの問題をなるべく一般的・論理的・分析的に整理することを目指しているようである。「世界の真の姿」ではおおげさすぎるので、「基礎的なありかた」にトーンを下げたという感じである。

それはそれでよいのだが、事物の基礎的なありかたを論ずるなら、物理学、とくに素粒子論や量子論や相対論や物性物理学を尊重しないわけにはいかないだろうと思う。どうも現代形而上学や現代存在論は、古典物理学的な、素朴見たまま的な、卑近な事物の存在・分類を丁寧な自然言語で論じているだけのように見える。

例えば、「個物・性質・状態を区別しよう、個物は一定・固有の性質を備えているものであり、同一の個物であっても状態・容態は変わることがある」と言ったときに、水と氷は別物と定めるのだろうか？ 氷と雲と雪は別物と考えるのだろうか？（地球の雲は水滴や氷のつぶが大気中に漂っているものである。）原子論的には、水素ガスと酸素ガスの混合物と、液体の水と、固体の氷とでは、水素原子と酸素原子の位置関係・運動状態の違いしかないので、哲学的存在論的には、これらは同一物の異なる状態だとみなすのか？ 鉄は金属としての普遍的な性質（電流をよく通す、光沢がある、変形しても元の形に戻ろうとする、大きな力をかけると破断せずに変形するなど）を持ち、一方で水素は金属ではないように見えるが、木星の中心付近のような超高圧力下では水素は固体になり金属になっていると考えられている。そうすると「金属である」か「金属でない」といふのは、個物の性質というよりは、一時的な状態だと言った方がよい。「月と地球は個物であり、重力は個物間の関係だ」と定めるのか？ 重力場

や電磁場は「関係」なのか「個物」なのか？ K メソンという粒子と反 K メソンという粒子（K メソンの反粒子）があり，K メソンと反 K メソンは別種の粒子として同定されるが，K メソンを生成すると短時間のうちに反 K メソンになっている確率が大きくなり，さらに時間が経過すると K メソンである確率が大きくなる．これを「K メソン-反 K メソンの振動」という^{14~16)}．そうこうしているうちに最初の 1 個の K メソンは「K メソンと反 K メソンの重ね合わせ状態」になってしまう．さて，K メソンと反 K メソンは区別されるべき個物なのか？それとも同一物の異なる状態なのか？「K メソン状態」と「反 K メソン状態」と「K メソンと反 K メソンの重ね合わせ状態」は別々の状態とみなすべきなのか？「K メソン性」・「反 K メソン性」という別々の性質があると言ってよいのか？素粒子の標準模型においては，電子ニュートリノとミューニュートリノは性質の異なる粒子として定義され，互いに移り合うことはないと考えられていたが，ニュートリノ振動によって確率的に互いに移り合うことが実験で観測されている．電子ニュートリノとミューニュートリノは異なる個物なのか？異なる状態なのか？ニュートリノ振動は異なる個物間の関係だと言うべきなのか？現代の素粒子論では，電子も光子も K メソンもニュートリノも量子場の励起状態にすぎないと考えられているが，そうすると量子場こそ基礎的な存在者であり，モノらしきものはすべて量子場の状態にすぎないと考えるべきではないのか．

古代ギリシャのデモクリトスは，すべての物質はアトム (atom) の集合体であり，アトム自体の性質は乏しく，アトムの配列や運動状態の違いが物の色や硬さや臭いなどの性質を形作っていると考えたらしいが，場の量子論を含む現代物理学の知見にもとづけば，少なくとも物理的世界の基礎的な存在様式に関しては，個物ごとに性質や関係があると考えるアリストテレスよりも，「基礎的な統一的存在者の多様な顕在化状態がある」とするデモクリトスの考えのほうが真実に近かったと言えるのではないか．

存在論と実在論は別ものかもしれないが，量子力学におけるベルの不等式の破れは，物理量の値の客観的実在性（粒子の位置やエネルギーや運動量やスピンなどの物理量は，人がそれを測っていないときも，その値が実在しているとする考え）を否定していると解釈されるが^{2, 17~21)}，これについて存在論を扱う哲学者はどう考えているのか．

現代形而上学者は，こういった現代物理学の知見あるいは世界観にもとづいて物理的存在者の基礎的な存在様式を考えるつもりはあるのだろうか？それとも日常的スケールで見られるもの・語りやすいもののみ存在様式を論ずるつもりなのだろうか？もしも「典型的な思考の枠組みを整備しているのであって，具体的な個物や関係を何をあてはめるかは臨機応変に変えてもらってかまわない」というのであれば私が批評することもないし，そういう取り組みであったとしても自明な内容ではないと思う．ただ，言うほどには「世界の基礎的なありかた」ではないと思うし，そういうことをやっているなら，世界の基礎的な存在者・存在様式を分析しているというよりは，人間による日常的認識様式・

日常的記述分類概念を整理していると言った方がよいのではないかと思う。あくまでこれは私の感想である。

5. 形而上学というパワーワード

以上、哲学的反实在論・形而上学・存在論などを論評してきたが、私は、これらの哲学分野をただただ批判したいのではない。哲学者界の内側では現代形而上学は世界の基礎的なありかたを吟味する穏当な学問だという了解をしておりながら、哲学界の外にいる人間に向かって哲学者が「形而上学」・「メタフィジックス」を、物理学者が扱える枠を超えた、問答無用のパワーワードとして使用するシーンがしばしば観察されるのがよくないと私は思うのである。

『科学を語るとはどういうことか』¹¹⁾において科学的实在論について議論する場面で、哲学者である伊勢田氏が《これは理系の人に話してまず共感が得られることが無い話》(初版¹¹⁾ p.180)と前置きしている点は、好感が持てる。それでも、

《法則の背後にあるメタフィジックス》(同¹¹⁾ p.192), 《反实在論はメタフィジカルなレベルの話》(同¹¹⁾ p.200), 《理論が含意するメタフィジックスは、どこまで受け入れるべきだろうか、と考えると、そこはもう科学の範囲外ではないか、と考えるのが反实在論です》(同¹¹⁾ p.215), 《「電子や光子があるとするとメタフィジックスを含意する理論がうまくいっている」ことは受け入れなくてはならないが、「電子や光子もある」まで受け入れる義理はない。これは理解しにくいところだと思います》(同¹¹⁾ p.215), 《我々にわかるかどうかに関係なく、誤ったことを信じてしまうということ自体をひとつの望ましくない出来事と考え、それをリスクと呼ぶものです》(同¹¹⁾ p.221), 《理論から電子を抜いたりしないんですよ。それに対するメタフィジカルなコミットメントだけを抜くんですよ》(同¹¹⁾ p.227)

などの説明を読んでいると、少なくとも反实在論者にとっては、メタフィジックスというのは直接の観察では捉えられない世界のありようのことを指していると思われる。つまり、現代形而上学者や現代存在論者があまり拘泥していない「世界の深層の真のありよう」に反实在論者はこだわっている。そして、伊勢田氏の見解を読んでいると、メタフィジカルな間違いは取り返しのつかないことであって、物理学者が気やすくメタフィジックスに言及してはいけなような気がしてくる。

他方で、別の哲学者が時間の形而上学と称して《存在論的な同時性の概念》という、経験的・物理的方法によって検出不可能な、物理学的に完全に無意味な概念を物理学者相手に披露して、相対性理論と矛盾しないと言っておられるのは痛かった(『〈現在〉という謎』²²⁾ p.33)。

また別の哲学者とのやりとりであるが、

《ダウは「私は時間の『A理論』を、過去・現在・未来のあいだになんらかの形而上学的に深い重要な差異があるとするとする立場とみなす」と述べる。ここで「A

理論」とは「時間が経過する」と考える立場の形而上学的理論である》(同²²) p.171).《この「世界の状態に影響を与える」とは経験的にわかるような影響ではなくあくまで形而上学的なものである》(同²²) p.172).《さて、以上のようにして、〈現在〉が存在しているということはどういうことか、過去・現在・未来のあいだに形而上学的に重要な差異があるとはどういうことかが明らかになった》(同²²) p.174)

など、前後を含めて何度読み直しても意味がわからない文章を私は頑張って読み、「形而上学的な差異とはどういう差異なのですか」、「経験的にはわからない形而上学的な影響とはどういう影響なのですか」と何度質問しても「形而上学的と書いてあります」という以上の答えが返って来ないのには絶望的な徒労を感じた。そんなふうに形而上学という言葉を使ってよいのなら、いくらでも使って何でも説明した気になれるだろうと思った。そんな推論のしかたで間違いを犯すリスクはないのか、どうしてそんなに自信を持てるのか、不思議であった。

別の問題について《経験不可能な前提から経験不可能な結論を取り出す、悪しき意味での形而上学性を帯びている》(同²²) p.133)と述べる哲学者もいるので、この文脈では形而上学は経験不可能なことがらを論ずる学問として捉えられていることがわかる。また、形而上学で閉じた言説を言うのはよくない(説得力がない)と考える哲学者もいることはわかる。こうした観察を踏まえて、形而上学の濫用を批判する文章を私は書いた²³⁾。

こうして見ると、「形而上学」・「メタフィジクス」に対する哲学者たちの態度の粗さ・細かさの粒度がばらばらである。科学的実在を論ずるときの「メタフィジクス」は経験・感覚を超えた世界の正体について思惟する学問として慎重に扱われるのに対して、哲学的時間論になると急に都合のよいように「存在論的」・「形而上学的」が物理学を超越した説明不要の言葉として使われる。一方で、現代形而上学や現代存在論は、そのような大胆な態度はなく、むしろ人々が当たり前に使っていた語彙・概念を丁寧に解きほぐしている。一人の哲学者がこれら全部をやっているわけではないので、哲学界もまとまっていないのだなという感想を抱くしかないが、それにしても物理学者である私たちにはメタフィジクスへのコミットメントが高いハードルに見えるのに対して、そちらさんの方はずいぶん甘いのだと思う。

哲学者の側で、形而上学の位置づけと使い方と使用禁止事項を整理してから哲学の素人と話をしてもらいたいと思う。何なら、「いまは従来型の世界の奥底真相型の形而上学の話をしています」とか「いまは現代流の世界のありかた型の形而上学の話をしています」とか、断りをつけてほしいくらいである。

6. 物理の中のメタフィジクス

まず、ある学問分野が他の分野の研究者の役に立たなければならないという考え方を私はしない。各学問分野はそれぞれ固有の存立価値があることを私は認めている。また、哲学は、新しい学問分野を生む母体になっていると私は思

う。哲学は、いわば「プロト学問」を育む役割を果たしており、それゆえに方法論が未整備で制度化されていない問題を扱うことが多いと思う。ただ、「共通の現実世界」について何らか正しいことを言うつもりなら、分野が異なる相手にも通じることを言うべきだと思う。

わかっていたきたいのは、物理学者も経験・観察できないことを想像したり言及したり推論の道具として使ったりするのは当然のこととしているということである。どこで読んだか忘れてしまったが、ファインマンも「物理学をやる上では観測不可能な理論的概念がどうしても必要だ」ということを述べていた。佐藤文隆氏は「私は大学で解析力学を教えるときに、解析力学はものごとをありのままに見ない修行である、と言っている」と、どこかに書いていた。古典力学であってもラグランジアンや作用積分やハミルトニアンやポアソン括弧など、直接観測と結びつかない概念装置を使うのは普通のことである。重力場も電磁場も電子も光子も波動関数も直接に見えるものではないが、しばらく物理学を修行すれば、それらに関する直観が養えるし、その直観を使って推論も説明も、さらには発見や発明もできるようになる。

また、メタフィジカルな描像というのは古典論理的な意味で一意的である必要はない。量子力学では光を粒子とすることも波動とすることもできるというのはよく知られている。「思いかた」だけの問題ではなく、実験のやりかたによって光は粒子のように見えたり、波動のように見えたりもする。このことをどう説明するかという問題が量子論の発端であった。

しかも一つの現象の説明のしかたも一通りしかないわけではない。例えば、光電効果（光子が原子に当たって電子が飛び出すと解釈される現象）は、光は粒子だと考えないと説明できないとよく言われるが、光は波動だと考えても説明できることが指摘されている²⁴⁻³⁰。光の粒子モデルを使って説明されていたことを波動モデルでも説明できることを示す試みは Neo-Classical Theory (NCT) と呼ばれ、いつか流行ったらしい。

余談だが、とくにラム^{24, 27}は Neo-Classical Theory の急先鋒で、“Anti-photon”（「反光子」と訳すしかないと思うが、陽子には反陽子、中性子には反中性子という相方粒子が存在するが、反光子という素粒子はない、というか、反光子と光子は区別がつかない）と題する論文²⁸で「光子など実在しない」と言っているのに近いことを主張している。ラムと言えば、水素原子のエネルギー準位のずれ、いわゆるラムシフトを実測して 1955 年にノーベル物理学賞を受賞した人である。ラムシフトは量子電磁力学のくりこみ理論で説明されたのだから、ラムはまさに電磁場の量子論の正しさを実証した人と言えるのだが、そのラムが電磁波を量子化した光子の概念に対してこれほど否定的であったことは驚きである。アインシュタインともちょっと路線は違うが、近代においては珍しくラムはメタフィジクスにこだわった物理学者だと言えるかもしれない。

ただ、光子モデルで説明できていたことを波動モデルで再説明するデモンストレーションを二つ三つやってみせても、結果がわかっている少数の現象に限定したアドホックな（その場しのぎの）説明しかできないので、Neo-Classical

Theory が量子論に取って代わるようなことはなかった。これをメタフィジクスの改変と呼ぶのは大げさで、モデルの良し悪しの問題と言った方がよいかもしれないが、個別事象の説明能力だけでは光の真の姿を決めることはできないという教訓だと思えばよいだろう。

光の真のありようは粒子か波動かのどちらかに決める必要はなく、光子は実在しているかという問いも「どういう意味において実在しているか？」という設定にしないと意味をなさない。世界の存在様式は古典論理の言葉で語られる以上に豊かであり、それを描述するのに量子論が適するなら量子論も動員して、なるべく「ありのままのありかた」を理解しイメージできるようになった方がよい。

7. メタフィジクスの妥当な位置づけ

直視的な方法で確認できない直観的イメージを抱くことがメタフィジクスであっても、そのイメージが理論と実験に矛盾しないようにできていて、それがどの程度の近似的描像なのか使う人がわかっているれば問題はないし、有意な生産的道具になる。何しろ物理学的に正しいメタフィジカルな描像は、世界の真の姿ではないかもしれないが近似的描像にはなっているのだ。科学は合理主義と経験主義のいいとこどりなので、合理的かつ経験・観察事象の理解を助けるメタフィジクスであれば、神経質に排除する必要はないのである。

科学的実在論論争は、戸田山氏の本¹⁾で扱っている範囲では、チャクラヴァティ(Chakravartty)の半実在論とギャリー(Giere)の構成的実在論を合わせたものでよいのではないかと、いうところに落ち着いたようである。半実在論は、雑に言えば、外から見られる法則性のような抽象的構造だけの実在性を認めるとは言わずに、個物的対象の法則的性質や内的構造も実在することを認めましょうというような立場である。構成的実在論は、私の言葉で言えば、科学理論の中に現れる実在ふうの概念は特定の観点から見た現象に対して類似のモデルを与えるものであればよい、というような主張である。近似とか類似とか理想化の程度があることを認め、観点ごとに異なるモデルが作れることも認めて、それらの観点とモデルが実在を多角的に捉えていると思えるならいいじゃないか、くらいの、おおらかで安値の実在概念である。

デネット³¹⁾は、自由意志と決定論が両立しようと論証する上で、「人間の自由意志は物理法則に反するようなどてつもない自由なんかじゃない、もっとつつましいものだ」と説得するという「自由意志のデフレ戦略」を採った。構成的実在論も、デネットの論法に似ていて、「科学的実在概念は、人間の知覚の及ばない世界の奥底の本当の姿だなんてそんな大それたものじゃなく、この世界の実相に近いイメージであり、かつ、数学的定式化におとしこめるものだ」とするくらいの「実在概念のデフレ戦略」だと言えるかもしれない。

私も構成実在論でよいと思っている。私はもっとおおらかに文脈・分解能依存実在論と言ってもよいとさえ思っている。ギャリーは自分の立場を観点主義

的实在論と呼ぶことにしたいが、私の見解も似たようなものである。世の中にはクォークが实在すると思わないと説明がつかないレベルの現象もあるし、そこまで立ち入らなくても原子の配置換えの化学反応として理解できる現象もある。星の内部構造など忘れて各天体を質点として扱ってよいレベルの運動もある。ある素粒子に付けた「電子ニュートリノ」という名前が、他の粒子に転換するまでの一時的な状態に付けたラベルにすぎなかったことが判明することもある。光子のスピン値は、測定されていないときも測定されたときと同様にあると思って計算してはいけないという文脈依存性を有している。そんなニュートリノや光子を実在的にイメージすることは難しいが、量子力学とはそういうものだと思うしかないなら、そう思うべきであり、哲学者が思う实在イメージあるいは实在基準を自然界や科学の側に押し付けようとするのは筋違いである。物理学者が必要としている（しかもすでに修得している）实在像は、数学的な完成度の高い物理理論および精度の高い多面的な物理実験と矛盾しないような表象である。そういう目でメタフィジクスを論ずるべきだと私は思う。

科学理論が实在概念に言及する際にメタフィジクスに遠慮する必要などない。主従反転して言えば、メタフィジクスの側が科学理論と科学実験・観察を真にするような实在モデルの基盤を提供すべきなのである。言うなれば、フィジクスはメタフィジクスに明晰な骨肉・構造・意味内容を与え、メタフィジクスはフィジクスに世界の指示語・代用品としての实在表象を与えるのである。そして両方がそろって、世界を理解・把握するための手段を構成するのである。これをフィジクスとメタフィジクスの双対性 (duality of physics and metaphysics) と呼びたいくらいである。この見方で形而上学のすべてを包括できるとは思わないが、少なくとも物理学に関わるメタフィジクスはこのように位置づけてよいのではないか。

現代形而上学や現代存在論が扱っている「世界の基礎的なありかた」というのは、素粒子論が扱うような「物理的世界の基本的存在者」ではないらしいことはわかった。現代存在論は、人が身の回りの事物を把握し他人と通じる話をするための基礎概念と語彙の整理だと思ってよさそうである。

私は AI ロボットの数理的基礎を研究しているが、「身の回りの存在論」は AI ロボットを考える上で大いに参考になりそうだと思う。どうすれば AI が個物・性質・関係といった概念を獲得できるかというのは大問題だからだ。成人となった人間にとっては、少なくとも身の回りのことに関しては、何が個物で、何ごとは個物の関係かという判断に迷うことはほとんどないが、個物の不変な性質や可変な状態や個物間の関係を AI ロボットすなわち機械に認識させることは、具体的に何が達成できればよいのかすらわからない難しい課題である。「AI の認識論」や「AI の存在論」ができてよいかもかもしれない。

AI が判断したことに関して「なぜそのように判断したのか」という理由を AI から人に説明させることも難問である。逆に、人から AI に説明するというのも難題である。人と AI とが共存して人の知的能力を増強するためにはどのような基盤があればよいかというのは、技術的にも哲学的にも面白い課題だと

思う。さらには、人と AI ロボットとの協力を通して科学を発展させることができるようになれば、科学そのものが新しいフェイズに突入することになるだろう。

8. アインシュタインとハイゼンベルク

『部分と全体—私の生涯の偉大な出会いと対話』³²⁾ はハイゼンベルクの自伝である。とくに第 5 章「量子力学およびアインシュタインとの対話」に、物理学における観察と理論の役割についてのアインシュタインとハイゼンベルクのそれぞれの考えが顕れていて、興味深い。少し長くなるが、『部分と全体』の p.103 以降の記述を引用する。以下は、1926 年春、ハイゼンベルクがベルリン大学を訪ねて、自らが創始した行列力学（量子力学）について講演した後、アインシュタインと交わした対話の一部。

ハイゼンベルクの言葉として、「原子の中の電子の軌道は観測できません。」「しかし一つの原子から放電現象の際に放射される輻射から、振動数と原子内の電子のそれに属する振幅とを直ちに結論することができます。振動数と振幅の全体についての知識は今までの物理学においても、電子軌道の知識の代用品のようなものです。観測され得る量だけを、理論の中にとりあげることがやはり理にかなっているのです、この全体だけを、いわば電子軌道の代表として導入することが自然であると私には思えます。」

アインシュタインは反論した。「しかしあなたは、物理学の理論では観測可能な量だけしかとりあげ得ないということを、本気で信じてはいけません。」

ハイゼンベルクは驚いて聞き返した。「まさにあなたこそ、この考えをあなたの相対性理論の基礎にされたのではなかったでしょうか？ この絶対時間というもの観測されないのですから、絶対時間について人は議論してはならないのだということをあなたはたしかに強調されました。規準系が運動してようと静止してようと、ただ時計の示す所だけが、時間の決定に関係するのであるということ。」

アインシュタイン：「おそらく私はその種の哲学を使ったでしょう。しかし、それでも、やはりそれは無意味です。あるいは、もう少し控え目な意味で、われわれが実際に観測するものを思い出すことは発見の手順としては価値のあることと言えるかもしれません。しかし原理的な観点からは、観測可能な量だけをもとにしてある理論を作ろうとするのは、完全に間違っています。なぜなら実際は正にその逆だからです。理論があってはじめて、何を人が観測できるかということが決まります。」「われわれが何かを観測したということを中心としたなら、自然法則を、少なくとも実際の面で知っていなければなりません。ですから理論だけが、すなわち自然法則の知識だけが、感覚的な印象からその基礎にある現象について結論することをわれわれに許すのです。」「言いかえれば、世界が実在すること、われわれの感覚的印象がいくらか客観的なものに基礎を

置いているという事実が、マッハでは少し軽視され過ぎているのです。」

雑にまとめるなら、ハイゼンベルクは、量子力学は観測可能なことのみを記述・計算するものであって、観測不可能な電子の軌道は記述できなくてよいとしており、実在に関するメタフィジカルなコミットメントをとらない態度でいる。ハイゼンベルクは、アインシュタインも経験主義的・反実在論的な態度を支持するだろうと思っていたら、アインシュタインが意外に実在論寄りであることを知って驚いた、というなりゆきである。

アインシュタインはさらに多くの興味深いことを語っているが、引用はここまでにしておく。『部分と全体』³²⁾ p.126 以降には、ハイゼンベルクがアインシュタインの言葉を噛みしめながら思索をめぐらし、1927年には不確定性関係のアイデアに行きついた様子が書かれている。

9. EPR とボーア

アインシュタイン、ローゼン、ポドルスキーは1935年に、量子力学は物理理論として不完全だ、と主張する論文を発表した³³⁾。EPR論文に対してボーアが同年に同題の反論論文を書いた³⁴⁾。

アインシュタインたちは、「ある物理理論が完全ならば、その理論は、すべての実在の要素 (element of physical reality) に対してそれぞれ理論的な対応物 (語・概念) を持つべきだ」という形で「完全な物理理論」の必要条件を定式化した。対偶は、「実在の要素に対応する概念が欠けている理論は不完全だ」ということになる。一方で、「系を乱さずに確率1の確かきで、ある物理量の値を予測できるならば、その物理量に対応する実在の要素があると言ってよい」という形で「実在の要素」に対する十分条件を定式化した。EPR論文にはこう書いてある：

Whatever the meaning assigned to the term *complete*, the following requirement for a complete theory seems to be a necessary one: *every element of the physical reality must have a counterpart in the physical theory.* (中略) We shall be satisfied with the following criterion, which we regard as reasonable. *If without in any way disturbing a system, we can predict with certainty (i.e., with probability equal to unity) the value of a physical quantity, then there exists an element of physical reality corresponding to this physical quantity.*

彼らは完全性と実在をそのように規定した上で、エンタングルした粒子対についての思考実験を提示した。量子力学によれば、こういう状況設定が可能である：粒子A、Bが離れ離れにあるのだが、粒子Aの位置を測ればその測定値からBの位置を正確に推測できるし、粒子Aの運動量を測ればBの運動量を正確に推測できる、という状況を作り出せる。そうすると、粒子Bに触れることなく粒子Aだけを観測してBの位置と運動量を正確に知ることができるの

だから、B の位置と運動量は実在の要素だ。一方で、量子力学は一つの粒子の位置と運動量の両方を同時に記述できない。よって量子力学は不完全だ。というのが EPR の論法である。

これに対するボーアの反論は、なかなか理解するのが難しいのだが、「離れ離れにある粒子 A, B の対のうち粒子 A の位置を正確に測って B の位置を推測しようとする実験設定の選択そのものが、粒子 B の運動量を予測することをできなくしている、という意味で、直接には粒子 B に触れていなくても系の状態を乱している」というのがボーアの反論の内容である。さらに付け加えて、「粒子の位置を測る方法と運動量を測る方法は古典物理の範囲で明確に区別されており、両方を同時に行う方法はないので、量子力学は位置と運動量の値をいちどきに述べる必要はないようにできている」という意味のことを言っている。位置と運動量は独立な実在と呼べるものではなく、一方を観測し顕在化させるとき他方は不可視となり潜在化する、という意味で相補的なのだ、という考え方をボーアは提示している。

EPR 論文は、ボーアによってすぐつぶされた、と見られたせいか、発表直後は他の物理学者からあまり注目されなかったようである。私の感想としては、EPR 論文は論旨が明快でわかりやすいが、ボーアの論文は言葉が多くて論旨を読み取りにくい、しかし、じっくり読むと、よく考え抜かれて書かれていることがわかる論文である。

10. ボーア語録

ミクロ量子物理とマクロ古典物理の関係をボーアほど深く考えた人はいないのではないかと思える。ニールス・ボーア論文集『因果性と相補性』³⁵⁾ は、いま読んでも新鮮な洞察に触れることのできる論文集である。いくつかのキーワードをピックアップする形で紹介しよう。以下の括弧内の数は『因果性と相補性』³⁵⁾ の掲載ページである。

1. 単一不可分性 (Individuarität) : 量子仮説は、原子的現象のすべての観測には、観測装置との無視することのできない相互作用が伴うということの意味している。それがために、現象に対しても、観測装置に対しても、従来の物理学の意味における独立した実在性なるものを付与することはできなくなる。(p.20)

2. 相補性 (Komplementarität) : 考察している対象の振る舞いに関して、異なる設定の実験によって私たちが手に入れる、見かけ上は互いに相容れない情報は、明らかに従来のやり方では相互に関係付けることはできないけれども、(経験全体の包括的な説明にとっては同様に欠かすことのできないものであって、) それらは互いに相補的であると見なし得るのです。(p.124)

3. 現象 (phenomenon) : 私は、現象という言葉をもっぱら、実験設定全体の記述を含む、特定された状況の下で得られる観測を指すことのみ用いられるべきであると提唱した。このような用語法では、観測問題は何ら難解なものではなくなる。(p.266) [前述の意味で「現象」という言葉を用いれば、] 記号

的な量子力学の形式の適切な物理学的解釈は、古典物理学の諸概念で定義される条件の下に生じる単一不可分な現象に関する、確定的ないし統計的な性格の予測に尽きている。(p.267)

4. 古典物理学と実験：現象が古典物理学で説明のつく範囲からどれほど外れていても、すべての証拠の説明は古典論の用語で表されなければならない…要するに、「実験」という言葉で私たちが指しているものは、私たちが何を行い何を学んだのかを他人に語る事が可能な状況であり、それゆえ、実験設定や観測結果の説明は、古典物理学の用語を用いることで曖昧さなく表現されなければならない。(p.223)

5. 単一不可分性：[前述の「実験」の定義は、] 原子的対象の振る舞いと、その現象が発生する条件を定めるのに用いられる測定装置との相互作用の明確な分離が不可能なことを意味している。(p.223)

6. 相補性：異なる実験条件の下で得られた証拠は、単一の描像で理解することはできず、諸現象の全体のみが対象に関する可能な情報を尽くすことができる、という意味で相補的と考えられなければならない。(p.224)

7. 非可換性と相補性：記号的な作用素が非可換であるということは、そのそれぞれに対応する物理量の正確な定義を可能とするような実験設定が相互に背反的であるということを通じて反映しているのである。(p.308)

8. 両立不可能と相補性：一見したところその共存が科学の基本原則とは相容れないように見える新しい諸法則に対して、物理学の法則としての地位を与えているのは、もっぱら相補的な物理量の曖昧さのない定義を可能とする二つの実験手続きが互いに排他的であることのみによる。(p.114)

11. ミクロ側から見たマクロ

フィリップ・アンダーソンは主に物性物理を研究した理論物理学者であり、ノーベル物理学賞を受賞した人でもあるが、次のようなことを述べている³⁷⁾：

《私のもう1つの考えは、量子観測理論の明らかな困難や矛盾は、ある尺度の体系に、これと全く異なる尺度に適した概念や性質（因果律や剛性、その他の性質）を適用しようと試みた為に生じた結果であるという点です。私が他の論文に書いたように、一つ一つの電子にとって、実験装置—シュテルン・ゲルラッハの磁石やスリットなど—というものは、我々が電子の性質を見る場合に比べて、遙かに不可思議に見えるはずで、これらの物体は電子に対して単に境界条件としてしか作用せず、自分自身の量子状態が変化することがない、という不思議な性質を備えているのです。》(p.6)

つまりアンダーソンは、マクロ系から見るとミクロ系は奇妙だとよく言われるけれど、ミクロ系の身になってみればマクロ系の方が奇妙に思えるだろう、ミクロの電子の側から見れば、マクロな装置の方こそ決定論的因果性や剛性（固い・観測されても変化しない・量子系に影響を与えるが量子系から影響を受けない）など不可思議な性質を備えたしろものに見えるだろう、という意味のこ

とを言っている。

別のところでもアンダーソンは、対称性の自発的破れ (spontaneous symmetry breaking) に伴って「一般化された剛性 (generalized rigidity)」と「新しい力学 (new dynamics)」が創発されることを指摘している³⁹⁾。マイクロ系からマクロ系が創発する道筋はこの線にあると思われる。

小嶋泉氏が提唱したマイクロ・マクロ双対性 (Micro-Macro duality)^{40, 41)} は、ボーア流の相補性・単一不可分性とアンダーソン流のマクロ系創発のコンセプトに数学的定式化を与えているように私には思える。

12. 非ユークリッド幾何学とガウスの三角測量

本誌記事中で「現実の空間でユークリッド幾何学が成り立つかどうかは実験してみないとわからない」と述べたが、しばしば引き合いに出されるガウスの測量について説明を補っておく。

平面上の一直線 L とその直線上にない一点 P が与えられたとき点 P を通って直線 L と交わらない直線 L' がただ一本だけ存在するのがユークリッド幾何学である。ただし、この言い方はユークリッドのオリジナルの表現ではない。ヒルベルトの『幾何学の基礎』⁴²⁾ ではこれに近い表現を採用している。 L' は P を通る L の平行線と呼ばれ、上に与えた条件は平行線公理と呼ばれる (ユークリッド原論⁴³⁾ では第 5 公準)。

平行線公理を否定して、点 P を通って直線 L と交わらない直線 L' が無数に存在すると仮定しても、矛盾のない数学理論が成立し、そのような理論は非ユークリッド幾何学と呼ばれる。ユークリッド幾何学では三角形の内角の和はつねに 180° に等しいことが証明できるが、非ユークリッド幾何学では三角形の内角の和は 180° とは限らない⁴⁴⁾。

ガウスはドイツの 3 つの山頂がなす三角形を実測して内角和が 180° になるかチェックしたそうである^{45, 46)}。なお、光線は直線に沿って進むと仮定していた。ガウスの目的は、実空間でユークリッド幾何学の正否をテストすることではなく、測量方法の精度をチェックすることだったようである。地球周辺の 3 次元空間でユークリッド幾何学が成立していても、地球表面に沿った測地線で囲まれた三角形 (平面三角形ではない) の内角の和は 180° 以上になるので、多数の地点で小刻みに三角測量を行って接続していくと長距離で「ずれ」が蓄積する。その「ずれ」をチェックするためにガウスは大きな三角形の測量を行ったようである。

一般相対性理論の成立以前に、実空間でユークリッド幾何学が成り立つかどうか疑って試した人がいたら面白いので、ガウスがユークリッド幾何学を試す実測を行っていたかのように語られることがあるが (私もそう思い込んでいたが)、ガウス自身はそういうつもりではなかったようである。

13. 光子の局在化問題と二つの局所性

光子に対しては量子力学的正準交換関係を満たす「位置演算子」や局所保存量としての「光子数密度」が数学的に存在しないことは、パウリの時代から繰り返し証明されている^{47~51}。また、3次元空間中の光子の存在確率がデルタ関数的に集中した状態（局在状態）は数学的に存在しないことも証明されている^{49, 50}。また、光子の検出確率分布は光子の検出方法に依存して変わることも理論的に指摘されている⁵²。

2009年8月1日に名城大学で大貫義郎おおぬきよしお氏が「量子化とは何だろうか？」と題して行ったセミナー講演から私は、相対論的な massive particle の局在状態は数学的に存在するが、スピンの1以上の massless particle の局在状態は存在しないというニュートン-ウィグナーの定理を知った。光子は massless かつスピン1なので光子の局在状態はないことになる。大貫氏の講演に対する応答として2009年9月5日には私は「光子の位置とは何だろうか？」と題して講演していた。9月19日には「光子の位置とは何だろうか？その2」、10月17日に「同 その3」、10月24日に「同 その4」という題で講演していた。

2009年10月31日に名城大学で行われたセミナーで、大貫氏は「二つの局在性」と題して講演した。大貫氏は、量子力学の位置演算子で定められるところの「粒子がここにある」という意味での位置概念と、相対論的場の量子論の保存則や相互作用の「物理量の移動やものごとの影響は遠い場所に瞬時に伝達することはなく近い場所を介して伝わっていく」という意味での局所性概念は、数式的に異なっているし物理的解釈も異なっているということを描した。これは非相対論的量子力学と相対論的場の量子論との「ずれ」として興味深い。この点に関してはさらに研究が必要だと私は考えている。記録に残す意義のあることだと思い、ここに書き留めておく。

14. 群表現の縮約

本誌記事中で言及したイノニュウ-ウィグナーの縮約⁵³は、あるリー群の表現から、適切な極限をとって別の群の表現を構成する方法である。例えば、相対論的対称性であるポアンカレ群のユニタリ表現から非相対論的対称性であるガリレイ群の射影ユニタリ表現が縮約によって構成できる。ポアンカレ群そのものには光速 c というパラメータは存在しないので、群に対しては光速無限大 ($c \rightarrow \infty$) という極限操作はできないのだが、群と表現をセットにして連動させることによって $mc/p \rightarrow \infty$ という極限が数学的に定められる。

15. 流体力学は固体の力学か？

本誌記事中に私は《古典力学というのは、質量分布が理想的に局在化した質点と、ユークリッド幾何的な剛体とをモデルとしており、基本的に「固形物」の

力学である》と書いた。これに対して、古典力学には流体力学もあるではないか、というコメントを受けたので応じておく。

もちろん日常的にも物理学的にも気体や液体などは固形物ではなく流体と見なされている。古典力学の一部門として流体力学が成立していて、有用であることも疑いない。

私は、剛体（変形不可能な固体物）が質点間の相対距離が不変な質点系でモデル化されるように、流体というのは質点間の相対距離が可変な質点系でモデル化されると考えた。「流体粒子」という概念があるが、あれは仮想的な粒^{つぶ}の集合体として流体をモデル化している。もちろん原子・分子の存在が確認されている現代にあっては、気体も液体も分子という「ほぼ質点」たちの高密度集合体だと言ってよい。分子論が成立する以前でも質点の力学があったおかげで質量密度や運動量密度という力学量を流体に対して適用するという発想ができたと思える。

しかも流体の運動状態はデカルト直交座標を参照して記述されるのが普通である。直交座標というのは、固体・剛体であるところのものさしを参照して空間中の位置や変位を記述する方法である。海はあるが陸も石もないような、周囲に固体のない天体上で知的生命体が発生したとしたら、その生物は直交座標を思いつくことができるか？と考えると、流体のみの環境内での直交座標の発明は、私にはけっこう難しいことのように思える。流体の運動の記述には、少なくともユークリッド幾何学的な（すなわち剛体的な）背景空間概念が必要であるように思われる。もしもユークリッド幾何学に頼らないとすれば、多様体論とリーマン幾何学くらいが必要になる。

人間にとっては、空中に投げられた石や、空中を揺れる振り子や、惑星の運動など、希薄な空間中を動く物体の動きが規則的な運動として目につくことは自然であり、それらを数学的に記述することから古典力学が始まったと想像するのは、そんなに的外れではないと思われる。我々の力学では、質点の位置や速度を記述するにも、剛体的な枠としてのユークリッド空間を参照している。自然界は、真空中に非一様な物質分布が点在していて、あちこちに変形しにくい固形物塊があるような舞台を提供したが、そこでは固体を基本的な対象または視座とする質点系の古典力学の方が基本的だと言えるのではないだろうか。

そういったことを考えて私は本誌記事において、物質塊が現れるという並進対称性の破れに伴って固形物をモデルとする古典力学系が創発する舞台が準備されたという意味のことを書いた。こういう言い方では認識論と存在論とを混同していると取られるかもしれないが、宇宙の歴史的には存在論的な創発が先であり、存在様式の変化が新たな認識様式を可能にしたという考え方を私はしている。アンダーソンが述べていた（本ノート 11 節）、対称性の自発的破れに伴って一般化された剛性と新しい力学が創発されるというストーリーを私も汲んでいる。

一様な物質分布が優勢であるような自然界であったとしたら、物体の運動も、その世界に住む生物による力学の立て方も、我々にとってなじみ深い運動や我々

の知る力学とはだいぶ異質なものになっていた可能性はあると思う。

16. 重力は量子化されなければならないか？

素粒子は、互いに相互作用していない状態、すなわち自由粒子と呼ばれる状態において同定・分類・命名される。自由粒子は一定の運動量やエネルギーや電荷などを持つ。素粒子間の相互作用とは、素粒子が持っている運動量の一部を他の素粒子に受け渡したり、素粒子が持っている電荷を他の素粒子に受け渡したりすることである。古典力学では運動量を変化させるものを「力」と呼んだので、その名残で、運動量変化をもたらす相互作用のことをいまでも力と呼んでいる。

素粒子間の相互作用には、電磁気力、弱い力、強い力、重力という4種類の様式があることが知られている。そして電磁気力、弱い力、強い力の3種類の相互作用を記述する場の量子論はすでに定式化されており、実験によって検証もされている。が、重力に関しては、量子論的モデルがいくつか提案はされているものの、数学的に満足できる形には完成しておらず、実験による検証もされていない。

私だけでなく、何人かの物理学者は、非公式にはあるが、重力に対する量子論はないかもしれない、なくてもよいかもしれないと言っている。

量子論の最大の特徴は、物理量を非可換演算子として扱うことである。素粒子に地球の重力が作用することは実験でも確かめられているし、その作用のしかたは量子力学で記述されるが、量子力学扱いされるのはあくまで素粒子の運動であり、そのような場面でも重力場（重力ポテンシャルまたは計量場）そのものは *c*-number と呼ばれる実数値関数で表される。つまり、重力場そのものを非可換演算子だと考えないと説明がつかないような現象は今のところ見つかっていない。

一方で、熱統計力学という物理理論に目を移すと、適用する対象が古典系であろうと量子系であろうと、熱力学の特徴的な数量である温度やエントロピーは非可換演算子ではなく、普通の古典物理量と同様の実数もしくは実数値関数である。位置と運動量の演算子の交換関係に類するようなエントロピーの交換関係はない。

ミクロな構造を持つマクロ系を対象としても熱力学の諸概念が徹底的に古典物理的概念であるように、重力・時空概念も、あくまでマクロスケールでのみ顕在化する古典物理的概念であって、量子化（非可換演算子化）される必要はないかもしれない。

重力の非量子論説を表立って表明している文献はなかなか目にしないが、だからこそ、ミクロは量子力学、マクロは古典力学という話をしたついでに、重力はどっちなんだということをここに書き留めておくのは一興かもしれないと思い、書くことにした。まとめると、重力はあくまで古典物理に属し、物理理論としては量子化される必要はないかもしれない。

参考文献

- 1) 戸田山和久『科学的事実論を擁護する』, 名古屋大学出版会 (2015). マッハ, ボルツマン, ベラン, ポアンカレ, カルナップ, シュリックなどが考えたこと・したことについてはこの本に書かれている. 現代に至る科学的事実論論争の流れについて詳しく書かれている.
- 2) アダム・ベッカー (吉田三知世 訳)『実在とは何か—量子力学に残された究極の問い』, 筑摩書房 (2021).
- 3) 佐々木隆「ハイゼンベルグ方程式—ハイゼンベルグ演算子の重要な役割」, 数理科学 2009年6月号 pp.24-29.
- 4) ジャン・ペラン (玉蟲文一 訳)『原子』, 岩波書店 (1978). 原著初版は1913年. p.335に13通りの実験によるアボガドロ数の測定結果が表として掲げられている. ただしすべての実験をペランが行ったのではない. この本は一般読者向けの書物ということになっているが, 注意深く正確に書かれている. 訳者による序言も感動的.
- 5) 江沢洋『だれが原子をみたか』, 岩波書店 (1976).
- 6) H. Poincaré (translated by J. W. Bolduc), "Mathematics and Science: Last Essays", Dover (1963). Chapter VII, p.89.
- 7) M. Ivanova, "Did Perrin's experiments convert Poincaré to scientific realism?", HOPOS: The Journal of the International Society for the History of Philosophy of Science, **3**, 1-19 (2013). <http://philsci-archive.pitt.edu/9510/>
- 8) ファインマン, レイトン, サンズ (坪井忠二 訳)『ファインマン物理学 I: 力学』, 岩波書店 (1967). 第1章, p.4. 英語版の "The Feynman Lectures on Physics" の全文がカリフォルニア工科大学のウェブサイトで公開されている: <https://www.feynmanlectures.caltech.edu/>
- 9) R. P. Feynman, "Surely You're Joking, Mr. Feynman!", Bantam Books (1985). A Map of the Cat?, p.57. R. P. ファインマン (大貫昌子 訳)『ご冗談でしょう, ファインマンさん (上)』, 岩波書店 (岩波現代文庫) (2000). 「ネコの地図?」, p.105.
- 10) ルドルフ・カルナップ (内井惣七, 内田種臣, 竹尾治一郎, 永井成男 訳)『カルナップ哲学論集』, 紀伊國屋書店 (1977).
- 11) 須藤靖, 伊勢田哲治『科学を語るとはどういうことか—科学者, 哲学者にモノ申す』, 河出書房新社 (初版 2013), (増補版 2021). とくに第5章「科学者の理解しにくい科学哲学的テーマ 2—実在論と反実在論をめぐる応酬」に注目してほしい. この本の増補版が用意されるときに『松王政浩/谷村省吾からの提題』が提出された: <https://web.kawade.co.jp/bungei/16310/>
また, 増補版出版後に谷村省吾の論説『なぜすれ違うのか, すれ違ってのになぜほうっておけないのか』が公開された: <https://web.kawade.co.jp/bungei/16034/>.
- 12) 鈴木生郎, 秋葉剛史, 谷川 卓, 倉田 剛『現代形而上学—分析哲学が問う, 人・因果・存在の謎』, 新曜社 (2014).
- 13) 倉田 剛『現代存在論 I, II』, 新曜社 (2017).
- 14) ファインマン, レイトン, サンズ『ファインマン物理学 V: 量子力学』, 岩波書店 (1979). p.217, 11-5 節に K メソン-反 K メソンの振動についての解説がある. これは CP 対称性の破れが発見される以前の説明のしかたになっている. また, クォークモデルにも依拠しない説明になっている. ファインマンレクチャーが行われたのが1961年から1963年で, クローニンとフィッチが CP 対称性の破れを発見したのが1964年.
- 15) 谷村省吾, 三田一郎「宇宙の起源を探る CP の破れ」, パリティ (丸善), 1994年9月号, pp.10-23.
- 16) 長島順清『素粒子物理学の基礎 II』, 朝倉書店 (1998). p.391, 11 章が K メソンと CP 対称性の破れについて解説. このノート本文で私は「K メソン-反 K メソンの振動」と書いたが, neutral kaon mixing (中性 K 中間子の混合) とか K^0 - \bar{K}^0 mixing と呼ばれることもある. 長島氏は「ストレンジネス振動」と書いている.
- 17) 谷村省吾「揺らぐ境界—非実在が動かす実在」, 日経サイエンス 2013年7月号 pp.36-45. (別冊日経サイエンス No.199 「量子の逆説」 pp.66-75 (2014年6月) に再録).
- 18) 谷村省吾「「揺らぐ境界—非実在が動かす実在」を読んでいる疑問が湧いた人のための補足」, 日経サイエンス, ウェブ公開 2013年6月8日, 増補版 2013年7月6日. <http://www.nikkei-science.com/?p=37107>
- 19) 谷村省吾「アインシュタインの夢 といえる—測っていない値は実在しない」, 日経サイエンス 2019年2月号 pp.64-71.
- 20) 谷村省吾「『アインシュタインの夢 といえる: 測っていない値は実在しない』を読んで, もっ

- と理解したいと思った人のための補足解説”, 日経サイエンス, ウェブ公開 2018 年 12 月 26 日, 第 2 版 2019 年 2 月 15 日. http://www.nikkei-science.com/201902_064.html
- 21) 谷村省吾「量子論と代数—思考と表現の進化論」, 数理科学 (サイエンス社) 2018 年 3 月号 pp. 42–48. 補足解説記事付きで公開: <http://hdl.handle.net/2237/00030854>
 - 22) 森田邦久 (編著), 谷村省吾ら『〈現在〉という謎—時間の空間化批判』, 勁草書房 (2019).
 - 23) 谷村省吾『一物理学者が観た哲学』, 名古屋大学学術機関リポジトリ 2019 年 11 月 6 日公開. <http://hdl.handle.net/2237/00030853>
 - 24) W. E. Lamb, Jr. and M. O. Scully, “The photoelectric effect without photons”, in *Polarization, Matter and Radiation. Jubilee volume in honor of Alfred Kastler* (1969), pp.363-369. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19680009569>
 - 25) P. W. Milonni, “Semiclassical and quantum-electrodynamical approaches in non-relativistic radiation theory”, *Physics Reports* 25, pp.1–81 (1976).
 - 26) 日本物理学会編『量子力学と新技術』, 培風館 (1987). 第 9 章 (著者 矢島達夫氏) pp. 184–185. 《…これらについても, 光の古典論を用いて現象の出現のみならず, 量的な性質についても驚くべき程度にまで説明できることを指摘する理論がいろいろ現れてきた. これらの理論は Neo-Classical Theory (NCT) と呼ばれ, 1965~1978 年頃の時期にこれを主張する研究者と批判する研究者との間に活発な論争が繰り広げられてひところの話題となった.》
 - 27) 霜田光一「光の粒子性の証拠」, パリティ (丸善), 1993 年 8 月号, pp.75–77. 冒頭にこう書かれている: 《内外のたいていの物理の教科書には, 光の干渉・回折・偏光などは光が波動性を示す現象であり, 光電効果・コンプトン効果などは光が粒子性を表す現象である, と書かれている. そして, 大部分の物理学者も量子力学を学ぶ学生も, 光電効果とコンプトン効果を説明するためには, 電磁場を量子化して光量子すなわち光子を考えなければならないと信じている. 光電効果もコンプトン効果も光を波と考えたのでは理解できないので, これらの効果は光が粒子性を持つことの証拠とされている. しかし, これは物理教育における“迷信”のようなものである. 光電効果やコンプトン効果は, 光が古典的な電磁波であると考えたのでは説明できないと思ひ込むのは正しくない. 自然科学においては 99 パーセントの人々に信じられているからといって, それが真理とは言えない.》
 - 28) W. E. Lamb, Jr., “Anti-photon”, *Applied Physics B* 60, pp. 77–84 (1995). 論文末尾の Summary にこう書かれている: 《It is high time to give up the use of the word “photon”, and of a bad concept which will shortly be a century old. … For a friend of Charlie Brown, it might serve as a kind of security blanket.》《“光子”というのは光の本質を知らない人が使う隠れ蓑のようなものだ.》(霜田光一²⁹⁾による訳)
 - 29) 霜田光一「光の粒子性と波動性 III: 光電効果とコンプトン効果の波動論」, レーザー研究, 1997 年 25 巻 6 号 pp.442–446. https://www.jstage.jst.go.jp/browse/ljsj/25/6/_contents/-char/ja/
 - 30) 「谷村省吾氏からの提題 3. 科学的実在論 vs 反実在論論争は, なぜ科学者に不評か」の中でも, 光の量子効果と思われる現象を光子の概念を使わずにどこまで説明できるかという試みとして Neo-classical theory を紹介している. <https://web.kawade.co.jp/bungei/16310/>
 - 31) ダニエル・C・デネット (戸田山和久 訳)『自由の余地』, 名古屋大学出版会 (2020).
 - 32) W. ハイゼンベルク (山崎和夫 訳)『部分と全体—私の生涯の偉大な出会いと対話』, みずす書房 (1974).
 - 33) A. Einstein, B. Podolsky and N. Rosen, “Can quantum mechanical description of physical reality be considered complete?”, *Physical Review* 47, pp.777–780 (1935).
 - 34) N Bohr, “Can quantum mechanical description of physical reality be considered complete?”, *Physical Review* 48, pp.696–702 (1935).
 - 35) ニールス・ボーア論文集 1 (山本義隆 編訳)『因果性と相補性』, 岩波書店 (1999).
 - 36) A. アインシュタイン (井上健 訳)『科学者と世界平和』, 講談社 (2018). 付章『物理学と実在』(筒井泉 訳)にアインシュタインの実在観がよく表れている. 筒井泉氏による解説も含めて興味深い.
 - 37) P. W. アンダーソン (瀧川 仁, 小形正男 訳)「多は異なり—再考」, 東京大学学内広報 (フィリップ=ウォレン=アンダーソン博士に東京大学名誉博士称号授与) No. 1254 (2003). 講演のタイトルは有名な論文³⁸⁾から来ている.
 - 38) P. W. Anderson, “More is different: Broken symmetry and the nature of the hierarchical structure of science”, *Science* 177, pp.393–396 (1972).

- 39) P. W. Anderson, “Basic Notions of Condensed Matter Physics”, Addison Wesley (1984), p.264.
- 40) I. Ojima, “Micro-Macro duality in quantum physics”, Proceedings of International Conference on Stochastic Analysis, Classical and Quantum, arXiv:math-ph/050238.
- 41) 小嶋泉『量子場とマイクロ・マクロ双対性』, 丸善出版 (2013).
- 42) ヒルベルト『幾何学の基礎』, 共立出版 (1970).
- 43) 中村幸四郎ら訳・解説『ユークリッド原論』, 共立出版 (1971).
- 44) 小林昭七『ユークリッド幾何から現代幾何へ』, 日本評論社 (1990).
- 45) S. Weinberg, “Gravitation and Cosmology”, John Wiley & Sons (1972), p.5, p.23. ガウスが3山頂のなす三角形の測量をしてユークリッド幾何学のテストをしたという話はたぶん myth (作り話) だと書いてある (測量自体は本当にしたが, 実空間がユークリッド幾何学に従うことを疑うつもりはなかったらしい).
- 46) ThatsMaths (Irish Times のブログ), “Gauss’s great triangle and the shape of space”,
<https://thatsmaths.com/2014/07/10/gauss-s-great-triangle-and-the-shape-of-space/>
 (2021年9月閲覧)
- 47) W. パウリ『量子力学の一般原理』, 講談社 (1975). 原著は1933年版. p.294に, 光子数密度を表す相対論的な物理量は存在しないことと, 光子の位置を表す演算子は存在しないことが書かれている.
- 48) M. H. L. Pryce, “The mass-centre in the restricted theory of relativity and its connexion with the quantum theory of elementary particles”, Proceedings of the Royal Society of London. Series A 195, pp.62–81 (1948).
- 49) T. D. Newton and E. P. Wigner, “Localized states for elementary systems”, Review of Modern Physics 21, pp.400–406 (1949).
- 50) A. S. Wightman, “On the localizability of quantum mechanical systems”, Review of Modern Physics 34, pp.845–872 (1962).
- 51) 亀淵 迪, 表 實『量子力学特論』, 朝倉書店 (2003).
- 52) S. Tanimura, “The photon detection operator and complementarity between an electric detector and a magnetic detector”, Physica Scripta T160, 014039 (4pp) (2014). <https://arxiv.org/abs/1309.0620>
- 53) E. Inonu and E. P. Wigner, “On the contraction of groups and their representations”, Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA, Mathematics 39, pp.510–524 (1953). Inonu はトルコ出身の物理学者で, 後にトルコの副首相や外務大臣になっている. その名前はトルコ流には Erdal İnönü と綴られる.

(たにむら・しょうご, 名古屋大学大学院情報学研究科)