

物理学の 常識に挑む 数学者

ハイゼンベルクの不確定性原理は打ち破れる
そんな衝撃的な主張で物理学者の度肝を抜いた
数学者の小澤正直は数学理論という武器を使って
物理学の常識を問い続ける



日本経済新聞社

小澤正直 (おざわ・まさなお)
東北大学大学院情報科学研究科教授

- 現代物理学の常識とされるハイゼンベルクの不確定性原理を書き直し、新たな定式化を提唱した。
- 仕事時間の大半は紙と鉛筆で計算している。「数学は、見えなところにあるはずのものを探る可能性の科学。探していた式が見つかった時は嬉しいですね。」
- バッハの音楽が好き。複数の旋律が重なり合いながら展開していく構造的な面白さに惹かれるという。

いつもネクタイにジャケットのきちんとした姿、穏やかな口ぶり。今年54歳になった数学者の小澤正直には、破天荒なところは微塵もない。だが言っている内容はけた外れだ。「ハイゼンベルクの不確定性原理は、打ち破ることができます」。80年間にわたって信じられてきた現代物理学の基本中の基本を静かに、だがきっぱりと否定する。

1927年にウェルナー・ハイゼンベルクが提唱した「不確定性原理」は、新たな世界観を打ち立てた。私たちが物体を見る「観測」という行為は、見られる側の状態を決定的に変えてしまう。だから物体の状態を完全に知るのは不可能で、見る前の状態は本質的に不確定だ——そんな見方である。物体は常にある決まった状態でそこにあり、観測によって知ることができるという、それまでの物理学の前提を突き崩した。

ハイゼンベルクはこの新たな世界観を、美しく単純な式で表した。「物体の位置の測定誤差と、測定で生じる運動量の乱れの積が、常に一定の値以上になる」という不確定性原理の式は、物理の教科書の最初に載っている。その意味は「位置の測定誤差をゼロにしようとする、運動量の乱れが無限大となる。だから誤差ゼロの測定はできない」ということだと、学生たちは教わる。

しかし小澤は「それは間違い。誤差ゼロの測定は原理的に可能です」と言い切る。「ハイゼンベルクの式は、あらゆる観測について成立するわけではありません」。

ハイゼンベルクが見落としたもの

小澤によれば、ハイゼンベルクをはじめ、従来の観測理論の研究者は、2つの異なる不確定性をごた混ぜにしているところに問題がある。1つは観測される側の物体が元々備えている量子ゆらぎ。もう1つは観測によって物体の状態に生じる乱れだ。

量子力学によれば、物体の位置や運動量などの性質は唯一の値には決まらず、常にある幅を持っている。この物体の位置を観測すると、そこには誤差が生じ、運動量に乱れが生じる。小澤はこれら由来の異なる不確定性を厳密に区別した上で、観測を精緻に定式化した。いわば観測という物理学的な過程を、数学の言葉で書き表したのだ。

すると、ハイゼンベルクの重大な見落としが浮かび上がってきた。彼の式は、「測定対象の状態と、測定による誤差や乱れとの間に相関がない場合」という暗黙の前提が入っている。これらが相関しているような特殊な測定を実行すれば、ハイゼンベルクの不確定性原理を打ち破る、誤差ゼロの観測が可能になる。そんな特殊な観測は容易ではなく、日常的に行うのは不可能だが、究極の微小測定が必要

になる局面では、決定的な意味を持つ。

1980年代前半、米国で重力波検出の限界に関する論争が持ち上がった。重力波は超弦理論など最新の物理学理論を検証する手がかりとされ、米国や日本で観測が進んでいる。観測では重力波の振動が

光の干渉計の光路長に及ばず極めて微細なずれを検出する必要があり、その限界はハイゼンベルクの不確定性原理がもたらす「標準量子限界」で決まると長年信じられてきた。しかしノースウエスタン大学のユーエン（Horace P. Yuen）がこれを破る観測は可能だとの新説を打ち出し、反対するカリフォルニア工科大学のケープス（Carlton Caves）との間で議論になっていた。

1986年に東京で開かれた国際シンポジウムで、たまたまユーエンの講演を聞いてこの議論を知った小澤は、自分が考えていた誤差ゼロの測定がちょうど当てはまる例だと気づいた。ただちにどのような測定をすればいいのかを計算して発表。明確に標準量子限界を超える具体例が出たことで論争は決着し、軍配はユーエンに上がった。

英科学誌*Nature*の編集者マドックス（John Maddox）はこの時、コラムにこう書いている。「どんな装置ならこの観測を実現できるのかは、まだまったくわからない。（中略）だがそのことが、測定装置の設計において絶対的だと考えられてきた制限を打ち破ろうという意欲に水を差すことはないだろう」。

論争の後で、ケープスは小澤にこう言った。「ハイゼンベルクではないかもしれない。しかし観測に何らかの制約はあるはずだ」。小澤はその通りだと思った。「観測における本当の制約を記述する式が必ずあるはずだ。それを明らかにしたい」。小澤はハイゼンベルクの式に代わる、不確定性原理の一般式を探す仕事に乗り出した。

しかし93年に初期の成果を上げて論文を投稿したところ、掲載を断られてしまう。理由に納得できなかった小澤は嫌気がさし、しばらくこの仕事から遠ざかった。しかし90年代の末に、小澤は再挑戦を決意する。イタリアの大学で観測理論について講義し、学生たちと議論する中で、ハイゼンベルクの不確定性原理を破る誤差ゼロ測定を光の実験で検証できる見通しが立ってきたためだ。そのころ長年付き合っていた女性と結婚し「少しちゃんと仕事をしようという気になったので……」という事情もあったようだ。

ただ、その後も事が順調に進んだわけではない。物理学

$$\Delta q \Delta p + \sigma_q \Delta p + \sigma_p \Delta q \geq \hbar/2$$

小澤による不確定性原理の一般式

Δq は位置の測定誤差、 Δp は測定による運動量の乱れ、 σ_q 、 σ_p は位置と運動量の量子ゆらぎ。ハイゼンベルクの式は最初の項しかないの、位置の測定誤差 Δq をゼロにすると運動量の乱れ Δp が無限大になる。そのような測定は不可能だ。小澤の式では、 $\Delta q \Delta p$ がゼロでもあとの2項で不等式を満たすことができるので、測定誤差 Δq がゼロでも Δp が有限の値に抑えられる。よって誤差ゼロの位置測定が可能になる。

の権威ある学術誌は、一面、極めて保守的だ。見慣れぬ数学手法を駆使して物理学の常識を転覆しようとする小澤の論文を、容易に掲載しようとしなかった。論文の査読者とひっきりなしにやりとりし、「おかげで英語は上達しました」と小澤は笑う。

しかし一方で、小澤の仕事に関心を持つ人も徐々に増えてきた。光の実験で理論を検証したいという実験家が連絡してくるようになり、日本の物理学界の雰囲気も、「うさん臭い」から「興味深い」に変わってきた。招待講演の依頼も舞い込み始めた。

そんな中で昨年、小澤はついに自ら構築した新しい不確定性原理の式を正式に論文発表する機会を得た。ハイゼンベルクの元の式に、測定する側とされる側との関係を表す2つの項を付け加えたものだ。位置の測定誤差がゼロでも、ほかの2項の値をうまく選べば不等式を満たすことができ、これに対応した観測が実現できる。通常の測定では新たな2項はゼロになり、ハイゼンベルクの式に帰着する。

手法は数学、結論は物理

「小澤の式は、どのような観測をしても必ず成立する。物理学を考える上で、その意義は非常に大きい」と、早くから小澤の理論に注目していた理論物理学者、東京工業大学教授の細谷暁夫は瞠目する。「我々は今まで、不確定性原理を本当の意味で理解していなかったようだ」。

物理学の常識を、数学の論理を武器に問い直す。これが小澤のスタイルだ。俎上に上げる「常識」は物理学の根幹をなす根本問題で、ほとんど哲学との境界にある。研究領域の枠を超えて発想を広げ、基本的な問題に真正面から取り組むのは、専門分野の細分化が進んだ最近では珍しい。

こうした小澤の流儀には、彼の一風変わった経歴が投影している。学園紛争直後の1970年、小澤は東京工業大学に入学した。高校生のころから物理学が大好きで成績も良かったが、東工大では悩んだ末、設立されたばかりの情報科学科に進学した。当時、情報という切り口から物理学に新たな進展をもたらしたノイマン（John von Neumann）やブリルアン（Leon Brillouin）らの本を夢中になって読み、情報こそ次代の科学を開くカギになると感じていたからだという。

だが進学してみると、基礎数学以外はコンピューター技術やオペレーションズ・リサーチなど実務面を重視した内



容。「がっかりして授業から足が遠のいてしまった」。代わりに夢中になったのが哲学だ。東工大でセミナーを開いていた哲学者、吉田夏彦の門を叩き、1年がかりでカントの『純粹理性批判』を読み上げた。

そして大学院に進むと、かねて興味があった量子力学の観測理論に本腰を入れて取り組み始めた。もちろん授業で聞いたことはなく、すべて独学だ。東工大の助手をしていた80年に哲学方面の友人たちに誘われ、軽井沢の別荘でノイマンの本を片手に思索のひと夏を過ごした。観測を定式化する方法を思いついたのはこの時だ。これがその後の小澤の仕事の原点となった。

意外なことかもしれないが、観測にかかわる基本問題は、物理学者にはむしろ敬遠される傾向がある。量子力学は、観測の前と後がどうなっているかは語るが、その間は空白のまま。式では書けない飛躍とされる。その本質が何なのかは、むしろ「物理学というより哲学の問題」とみなされ、堅気の学者は手を出さない。実は関心を抱いている物理学者は少なくないが、その1人は「うっかり手を出すと『あいつはもう終わった』と思われかねない。おおっぴらにはできません」と明かす。

小澤がこの分野に踏み込むことを躊躇しなかったのは、彼が物理学業界のそうした微妙な雰囲気の外にいたというせいもあるだろう。観測に対する小澤の関心は、哲学への関心と軌を一にする。「私にとって一番興味があるのは、自分の認識とは何かという問題です。それは観測の理論をきちんと組み立てないとわかりません」と言う。

小澤の観測理論にも、依然として空白は残っている。だが「観測」と一口に言っても、それは測定される物体と測定する機械、その数字を見る人間の3者が相互作用する、複雑な過程の組み合わせだ。小澤によって、そのどの部分が物理学で解明され、どの部分が空白なのかが明確になった。そんなことすら、これまで曖昧だったのだ。

直感が論理で裏切られるのが科学の醍醐味

物理の常識を粗上に上げる小澤の仕事は、常に数学者ではなく物理学者に向けて発信される。そしてその結論は、しばしば物理学者を不安にさせる。彼らの典型的なコメントは「間違いは見つからないが、物理的な直感に合わない」

というものだ。

それも無理はないかもしれない。小澤の議論では、常に論理が先に来る。論理を発展させ、どんな観測がありえるのかを数学的に証明する。まず現象が先にあり、それを説明できる論理を探すことに慣れた物理の人間には極めて馴染み難く、判断を下すのも及び腰になる。

この違いについて、小澤はこう語る。「物理の人は、世界は見えていると思っています。見えるものの背後にある秩序を探すのが物理学なのです。しかし数学の人間は秩序から出発します。それを論理的に発展させ、見えていない世界に何があるのかを探そうとするのです。学問としては、理論を頼りに未知の物を構築していく工学に似ています」。そしてこう付け加える。「個人的には、直感が論理で裏切られていくのが、科学の醍醐味だと思っています」。

しかし物理学と数学の間にあるこうしたギャップは、今後、次第に狭まっていくだろう。物理学の伝統的な手法からは外れた、新たな学問領域が誕生しているからだ。

その代表例が、量子情報科学だ。量子コンピューターや量子暗号通信は、先に現象が見つかったわけではない。まず量子力学の基本原則から理論が構築され、それを実現する実験的な研究へと発展してきた。量子力学の不確定性を活用するこれらの技術では、観測によって素子やデータの状態が変わることが、目的の計算や通信を行う上で極めて重要な意味を持つ。小澤の観測理論は今、実はこの分野において最も注目されている。

小澤は先ごろ、自らが提唱した新しい不確定性原理を量子コンピューターの論理回路における誤り確率の推定に応用。これまで見逃されていた誤差が存在し、従来の設計では計算に重大な支障が起きることを示した。またこの問題を回避する方法も提案。「今後は観測の理論を使って量子情報科学を発展させる仕事を進めたい」と意欲を燃やす。

小澤が投げた石の波紋に気づいた人は、まだ多くない。しかし具体的な応用技術が生まれると、その原理に興味を持つ人が増えてくる。量子情報科学の進展は必然的に、観測について根本的に理解したいという欲求を生むだろう。すでにその傾向は出始めており、これまで哲学として棚上げにされていた量子力学の基本問題が、物理学の表舞台でも議論されるようになりつつある。

量子情報科学は情報通信を高度化するだけでなく、物理学理論に本質的な進展をもたらすのではないかと、研究者の多くが感じている。将来、量子情報科学がどんな物理学教科書にも載る日が来るかもしれない。その時、最初のページにはハイゼンベルクではなく、小澤の不確定性原理の一般式が記されているに違いない。(編集部 古田彩)