

1 不確実性の六つの世代

不確実 よくわかっていない、あるいは完全には明らかでない状態。疑わしさ、曖昧さ。

オックスフォード英語辞典

不確実性はいつも悪いものとは限らない。予測できない意外なことであっても、喜ばしいものであれば歓迎される。馬に乗って予測不能な揺れを楽しむ人は多いし、誰が勝つのか最初からわかっているスポーツには面白みがない。生まれてくる子供の性別を知らされたくない親もいる。私たちのほとんどは、自分の死ぬ日を事前に知りたいとは思わないだろうし、自分の死に方を知らされるなど、もつてのほかだ。しかしこれらは例外的な事例だ。人生は宝くじのようなものと言われる。不確実性はしばしば疑いを生み、疑いは私たちを不安にする。だから私たちは、不確実性を消し去るか、少なくとも減らしたいと思う。これから何が起ころのか心配なのだ。天気の前測が難しいのはよく知られているし、天気予報が外れることも多いが、それでも私たちはついつい天気予報に見入ってしまう。

テレビでニュースを見たり、新聞を読んだり、ネットサーフィンをすると、これから何が起ころのか、

わからないことだらけだ。航空機事故はランダムに起こる。地震や火山の噴火が起こると共同体が破壊され、都市の大部分が壊滅することさえある。景気には波があり、良くなったり悪くなったりする。不況のあとに好況が続き、その後また不況になるが、景気と不況がいつ入れ替わるのかはほとんどわからない。乾季と雨季の繰り返しや、天気予報についても同じだ。選挙が近づくと私たちは世論調査に注目し、誰が勝つかを予想しようとする。近年、世論調査の信頼性は下がっているようだが、それでも私たちが一喜一憂させる力がある。

単にわからないだけではない場合もある。何がわからないのかすら、はっきりしない場合だ。たとえば、私たちのほとんどは気候変動について心配しているが、声高な少数派はすべてデマだと主張している。でっち上げたのは、エセ科学者か、中国人、火星人と主張するのかもしれない（お好きな陰謀論をどうぞ）。とはいえ、気候変動を予測する気象学者ですら、その正確な実態には確信が持てないでいる。彼らは気候変動の一般的な性質をきちんと把握していて、現実に対して警鐘を鳴らすには十分な確信を持っている。そんな学者にも、正確な予測はできないのだ。

母なる自然が私たちに何をもたらすのかははっきりわからないだけでなく、私たちが自分自身に何をもたらすのかもはっきりしない。世界経済はいまだに2008年の金融危機の影響でぐらついているのに、それを引き起こした張本人たちは以前と同様の事業を行い、そのせいで前よりも大きな金融危機がもたらされようとしている。それにもかかわらず、国際金融をどのように予測すればよいのか、私たちはほとんどわかっていない。

（歴史的にも珍しい）比較的安定した期間が過ぎたあと、世界政治は急速に分断が進み、かつては信じられたことにも揺らぎが生じている。フェイクニュースで連発される偽情報のなかに、真実は覆い隠されてしまう。そして案の定、声高に文句をいう人が、デマを拡散した張本人であることが多い。インターネットが民主化したのは、知識ではなく、無知と偏見だった。インターネットによって、ゲートキーパー〔新聞・放送・インターネットなどで、ニュースや記事の取捨選択をする人や組織〕は取り払われ、情報を管理するゲートは開けっ放しになっている。

人間の問題には混乱がつきまとうのが常だが、科学においてさえ、自然が法則に厳密に従うという古い考え方は、もっと柔軟な考えに取って代わられた。私たちは、近似的に正しい規則やモデルを見つけることができるが（分野によって「近似」とは「小数点第10位まで」を意味することもあれば、「10分の1の小ささから10倍の大きさの間」を意味することもある）、それらはすべて暫定的なものであり、新しい証拠が現れたときには新しい規則に取って代わる。カオス理論によると、たとえシステムが厳密な規則に従っていても、その動きを予測することは不可能だ。量子論によると、物質の大きさが最小となるレベルの世界では、宇宙は本質的に予測不可能である。不確実性は、単に人間が無知であることを表わしているのではない。不確実性は、世界の構成要素なのだ。

不確実性の第一世代

多くの人がそうであるように、未来に起こることはすべて運命だと考えることもできる。しかし、ほとんどの人は、そうした生き方に抵抗を感じている。いずれ大惨事が起こるだろうと危惧していても、ちょっとした先見の明があれば、それを回避できるかもしれないと密かに考えている。嫌なことに直面したときに人類がとる共通の戦略は、そうならないように用心するか、状況を変えようとするかだ。だが、何が起こるかかわからないときには、どのような予防措置をとればよいのだろうか？ タイ

タニック号の事故のあと、船舶には余分の救命ボートを積み込むことが義務づけられた。すると、その重さが原因でイーストランド号「シカゴを母港としていた遊覧客船」はミシガン湖で転覆し、848人が死亡した。「意図せざる結果の法則」「何事も思い通りにはいかないという格言」のせいで、善意が裏目に出た事例である。

私たちが未来について懸念するのは、私たちが時間に縛られた生き物だからだ。私たちは、時間の流れの中で自分がどこにいるかを強く意識し、将来起こる出来事を予想し、その予想に基づいて行動する。タイムマシンは持っていないが、あたかも持っているかのように振る舞うことで、将来の出来事が起こる前に行動を起こす。もちろん、私たちの現在の行動を真に引き起こしているのは、結婚や雷雨、家賃の支払いといった明日起こる予定の出来事ではない。それらが起こると考えている、私たちの現在の信念だ。進化と個々の学習によって形作られた脳は、明日の生活が楽になるように、私たちに今日の行動を取捨選択させている。脳は、意思決定を行う機械として、未来を推量する。

脳は、ほんの一瞬先んじた決断を下す。クリケットや野球の選手がボールをキャッチする際、ボールを検知する視覚系とボールの位置を算定する脳の間には、わずかだが明らかな時間の遅れが存在する。彼らがボールをキャッチできるのは、脳がボールの軌道を予測するのに優れているからだ。簡単なボールを取り損ねたときは、脳の予測が外れたか、予測結果に反応するのに失敗したかのどちらかである。キャッチボールのすべてのプロセスは無意識のうちに行われ、途切れることがないため、脳よりも一瞬先んじて動いている世界で生きていることに私たちは気づかない。

数日、数週間、数カ月、数年、あるいは数十年も先駆けて下される決断もある。私たちは、出勤のバスや電車に間に合うように、目覚ましをかけて起きる。明日や来週の食事に、食べ物を買う。今

度の休みに家族で出かける計画を立て、そのときのために今準備をする。英国の裕福な親は、子供が生まれる前に、上流階級の人が行く学校に入学申し込みをすませる。もつと裕福な人々は、立派に成長するまでに数百年はかかる樹木を植え、5世代先の末裔が見事な眺めを楽しめるようにする。

脳はどのようにして未来を予測するのだろうか？ 脳は、世界の仕組み（あるいは、世界の仕組みと推測できるもの）を簡略化した内部モデルを構築する。そして、自分の知っていることをモデルに入力し、その結果を観察する。たとえば、絨毯がめくれているのを見つけると、これらのモデルの一つが、誰かがつまづいて階段から落ちるかもしれないから、このままでは危険だと伝える。そこで私たちは予防措置を講じ、正しい位置に絨毯を固定する。この予測が本当に正しいかどうかは問題ではない。実際、絨毯を固定してしまつたら、この予測は正しくなくなってしまう。このモデルに与えた条件はもう適用できないからだ。しかし、進化あるいは個人的な経験に基づいて、同様のケースで予防措置が講じられなかったときに何が起こるかを予想することによって、モデルを検証し、改善することができるとができる。

この類のモデルでは、世界の仕組みを正確に記述する必要はない。このモデルが示しているのは、世界の仕組みに関する信念なのだ。ヒトの脳は数万年をかけて、このような信念に基づいて決定を下す機械に進化した。だから驚くことでもないが、不確実性に対処するために私たちが最初に学んだのは、超自然的な存在が世界を支配していると考え、その存在について体系的な信念を作り上げることだった。人間は、自然を支配しているのが自分ではないことを知っていた。自然は常に私たちが驚かせ、不愉快なこともしばしば起こった。したがって、人間以外の存在（魂、精霊、神、女神など）が自然を支配していると仮定するのが至極当然であるように思われた。するとほどなく特殊な階級の

人々が出てきて、自分たちは人類が目的を達成できるように、神との間を取り持つことができる主張した。未来を予言できると主張した預言者や占い師は、共同体の中で特に信望を集める存在となった。

これが不確実性の第一世代だ。人間は信念の体系を発明した。すべての世代の人々がより強力な信念を欲したため、その体系はさらに精緻なものになっていった。私たちは、自然の不確実性を神の御旨として説明づけたのだ。

不確実性の第二世代

人間が不確実性を意識し始めた第一世代は数千年続いた。そこには証拠の裏付けもあった。何が起こったとしても、それは神の御旨と信じられたからだ。もしも神々がお喜びになれば良いことが起こり、お怒りになれば悪いことが起こるといわけだ。したがって、もしもあなたに良いことが起こったならば、それはきつとあなたが神を喜ばせたからだし、悪いことが起こったならば、それは神を怒らせたあなた自身のせいなのだ。このようにして、神々に対する信念は道徳規範と深く結びつくようになった。

そうこうするうちに、これほど融通の利く信念体系は、実は何の説明もしていないということに多くの人が気づき始めた。空が青いのは、神がそのように創造したからだというのなら、ピンクでも紫でもよかったかもしれない。人々はこれまでとは異なる方法を模索するようになり、観測に基づく証拠に裏付けられた(あるいは否定された)論理的推論に基づいて世界を考え始めた。

これが科学だった。空が青いのは、上層大気の詳細によって光が散乱するからだ、と科学は説明す

る。ただし、なぜ青が青に見えるのかについてはまだ説明できておらず、神経科学者がこの問題に取り組んでいる。このように、科学はすべてを理解したと主張したことはない。科学は進展するにつれて数多くの成功をおさめ、それとともに恐ろしい失敗も犯しながら、次第に自然のある側面をコントロールする能力を私たちに与え始めた。電気と磁気の関係に関する19世紀の発見は、科学における最初の革新的な事例の一つであり、すべての人々の生活に影響を及ぼす技術につながった。

科学によって、私たちが考えていたほど自然は不確実ではないことがわかってきた。惑星が空をさまようのは、神の気まぐれによるものではない。互いにわずかの外乱を与え合うことを除けば、惑星は楕円の周期軌道に従う。どのような楕円が適切かを定め、こうしたわずかな外乱の効果を理解すれば、数世紀後の惑星の位置を予測できる。とはいえ、実際にはカオスによる限界があるので、予測が可能なのは数百万年先までだ。自然には法則が存在し、私たちはそれを発見し利用することで、何が起こるかを予測できる。基礎となる法則を見つけ出せば、ほとんどの物事は説明できるといふ信念が、先行きが不透明であるという不快感に取って代わった。宇宙のすべては、果てしなく長い時間にわたってこれらの法則が作動しているだけなのではないかと、哲学者たちは思い始めた。自由意志は幻想で、すべては巨大な時計仕掛けの機械なのかもしれない。

おそらく、先行きがわからず不確実なのは、無知による一時的なものにすぎない。十分な努力と思考によって、すべては明らかにできる。これが不確実性の第二世代だった。

不確実性の第三世代

科学によって、私たちはある事象がどのくらい確かなのか、あるいは不確かなのかを定量化する方

法を見出した。それが確率である。不確実性に関するこの研究は、新しい数学分野になった。本書では、世界をより確かなものにするために編み出された数々の数学的方法を検証していく。政治、倫理、芸術など、数学以外の多くの分野も貢献したが、私は数学の果たした役割に焦点をあてる。

確率論が発展したのは、二つの異質なグループに属する人々がそれを必要とし、経験を積み上げたおかげだ。その人々とは賭博師と天文学者である。賭博師が勝ち目（オッズ）を上げたかっただけにして、天文学者は、不完全な望遠鏡から正確な観測結果を得ようとした。確率論の概念に関する理解が深まるにつれて、それが扱うテーマはサイコロや小惑星の軌道といった元々の興味の範囲を越え、物理の基本原理にも影響を及ぼすようになった。たとえば私たちは、数秒ごとに酸素やその他の気体を吸い込む。空気を構成する莫大な量の分子は、小さなビリヤード玉のように飛び回る。もしもすべての分子が部屋の一隅に集まってしまい、自分がその反対側にいたなら、（空気がなくて）大変なことになる。原理上は起こりうるのだが、確率の法則によると非常に稀なことなので、実際には起こらない。熱力学第二法則により、空気は一樣に混ぜ合わさった状態に留まる。ちなみに熱力学第二法則は「宇宙は常に無秩序へと向かっている」と解釈されることが多い。この法則は、時間の進む方向に関するパラドックスとも関係しており、深い問題をはらんでいる。

熱力学は、科学では比較的新参者であった。熱力学が登場するまでに、確率論は生死、離婚、自殺、犯罪、身長、体重、政治など、人間に関わる事柄を扱うようになっていた。そして、確率論の応用として、統計学が生まれた。統計学は麻疹の流行から、次の選挙での投票の動向に至るまで、あらゆる物事を解析する強力な道具になった。先の見えない金融の世界に対しても、満足するまでには至らないにせよ、ある程度の光明を投じた。統計学により、私たちは確率の海を漂う生き物であることが明らかになった。

確率論とその応用である統計学が、不確実性の第三世代を支配した。

不確実性の第四世代

20世紀の初めになると、不確実性の第四世代が華々しく登場した。それまでに私たちの直面してきたさまざまな形の不確実性はすべて、人間の無知を反映したものと考えられていた。私たちが何かについて確信が持てないのは、それを予測するのに必要な情報を持ち合わせていないからだ。たとえば、コイン投げについて考えよう。コイン投げは昔から「ランダムネス（偶然性）」の象徴だが、その力学的なメカニズムは非常に単純で、決定論に基づいている（決定論とは、背後に存在する法則に確率的な要素が含まれず、すべてが確定的に表されることをいう）。そして原理的には、決定論的なプロセスはいかなるものであれ、すべて予測可能である。コインに作用するすべての力を理解し、投げる際の初速度や方向、回転の速さと回転軸などがわかれば、私たちは力学の法則を用いて、どちらの面が上になった状態に着地するかを計算できるはずだ。

しかし、基礎物理学における新発見により、このような物の見方には修正が必要になった。コインについてはこのやり方で問題ないかもしれないが、必要とする情報が入手できない場合がある。なぜなら、自然ですらそれを知らないからだ。1900年頃、物理学者たちは、極小スケールの物質の構造について理解し始めていた。原子だけでなく、原子を構成する素粒子についても知るようになったのだ。アイザック・ニュートンの発見した運動および重力の法則というブレイクスルーは古典物理学を生み出し、これによって物質の世界について幅広く理解できるようになった。一方で、ますます高

精度化する計測技術を用いて、古典的な物理現象は検証された。そうすると、理論や実験から、世界について二つの異なる見方ができることがわかってきた。それが粒子と波（波動）である。

粒子は物質の微小な塊で、局在化（限られた一部の空間に存在すること）しており、正確に定義できる。波は、移動する擾乱〔時間的に変わらない定常な状態からの乱れ〕であり、水面に生じる波紋のようなものだ。粒子よりも刹那的で、広い空間に広がっていく。たとえば、惑星の軌道を計算するときには、惑星を粒子と捉える。これは、惑星や恒星の間の距離は膨大なので、人間のサイズで考えると惑星は粒子になるからだ。一方で、音は空中を伝搬する擾乱であり（すべての空気はほぼ同じ場所に留まるが）、したがって波である。粒子と波は古典物理学の象徴的存在だが、まったく異なった概念である。1678年、光の性質について大きな論争が起こった。クリステイアン・ホイヘンスは、光は波であるとする理論をフランス科学アカデミーで発表した。ニュートンは光は粒子の流れと確信しており、彼の見方が優勢だった。見当違いの議論で100年が浪費されたあと、新しい実験によりこの問題は解決した。ニュートンの考えは間違いで、光は波だった。

もう一方で1900年頃、物理学者は光電効果を発見した。光がある種の金属に衝突すると、微小電流が流れる。光は微小な粒子、すなわち光子の流れであるとアルベルト・アインシュタインは推論した。ニュートンはやはり正しかったのだ。しかし、ニュートンの理論は正当な理由があつて破棄されてきたのであり、多くの実験が光は波であることを明確に示していた。また論争を一からやり直さなければならなくなった。光は波なのか、あるいは粒子なのか？ 最終的な答えは、「両方」だった。光はときには粒子のように振る舞い、ときには波のように振る舞う。どちらなのかは実験に依存する。これはまったくもって不可解だった。

数人の先駆者たちがすぐさま、このパズルを解き明かす方法を考え始め、量子力学が生まれた。そして、粒子の位置やその速さといった、古典物理学では確実とされてきたものがすべて、原子よりも小さなスケールの物質には当てはまらないことが判明した。量子の世界は、不確実性で満たされている。粒子の位置をより正確に測定しようとすると、それだけ粒子の速さがはつきりしなくなる。いっそう悪いことに、「どこに存在するか？」といった問いに対してさえ、きちんとした答えがない。与えられた場所に粒子が局在している確率を示すのが関の山だ。量子的な世界に属する粒子は、古典的な世界の粒子とは程遠い存在で、ぼんやりと広がる確率の雲のようなものでしかない。

物理学者が量子の世界をより深く調べようとするほど、すべてがさらにぼやけていった。数学的な記述はできたが、奇妙な数学だった。数十年の間に、彼らは量子現象が規則で表せないほどランダムであることを確信するようになった。量子の世界は真に不確実性からできており、欠けている情報もなければ、それ以上深いレベルで記述することもできない。「黙って計算せよ」が標語となった。「それがいったい何を意味するのか」といった面倒な質問はするな、ということだ。

不確実性の第五世代

物理学が量子論の問題で足踏みしている間に、数学が新しい道を切り開いた。それまでは、ランダムなプロセスの反対は、決定論的なプロセスだと考えられていた。決定論では、現在の状態が与えられれば、可能な未来はただ一つしか存在しない。不確実性の第五世代が現れたのは、決定論的なシステムであつても予測困難な問題が生じることに、数学者と少数の科学者が気づいたときだった。これが非線形動力学、すなわちカオス理論だった。数学者たちがもっと早い時期にこの重要な発見をして

いたら、量子論の発展の仕方は異なっていただろう。実は、量子論が登場する以前にカオスの事例が一つ発見されていたのだが、珍しい現象として放置されていたのだ。カオスについて整然とした理論が現れたのは、1960年代と70年代になってからだった。とはいえ本書では、説明のしやすさを重視して、量子論よりも先にカオスの問題に取り組むことにする。

「予測は、特に未来を予測するのは、とても困難だ」と物理学者のニールス・ボーアは言った（あるいはヨギ・ベラだったかもしれない。ほら、この程度のことでも私たちが不確かということがわかる^①）。冗談みたいに聞こえるかもしれないが、実はそれほど単純な問題ではない。科学における予測のほとんどは、一定の条件下で、ある事象が起こることを予測するものであり、いつかを予測するものではない。たとえば、私は地震が起こることを予測できるが、それは岩石にストレスが蓄積されていくからだ。そして、ストレスを計測することによってこの予測を検証できる。でもそれは本当の意味で地震を予測する方法ではない。地震を予測するには、それがいつ起こるかを対象に先んじて決めなければならぬのだ。また、ある事象が過去に起こったことを「予測」することも可能である。これは昔の記録を遡って調べることを意味し、その事象が起こっていたことに誰も気づいていなかった場合には、理論の正しさを検証する正当な手段となる。このような検証はしばしば「後付け（ポストディクシオン）」と呼ばれるが、科学仮説の検証という意味では、通常の予測（プレディクシオン）と変わらない。1980年にルイス・アルヴァレズとウォルター・アルヴァレズ（息子）は、6500万年前に隕石が地球に衝突し、恐竜が絶滅したと予測した。これは真正銘の予測であった。その後、仮説を支持あるいは否定する証拠を求めて、地質記録や化石記録を調査することができたからだ。数十年にわたる観察によって、ガラパゴス諸島に生息するダーウィンフィンチ類のくちばしの大き

さは、完全に予測可能であることがわかった。ただし、年平均降水量が予測できればという条件がつく。その年に雨が多かったか（あるいは少なかったか）に忠実に従って、くちばしの大きさは変動する。降雨量の少ない年には餌の種子が硬くなるため、大きなくちばしが必要となる。その一方で、雨量の多い年には、小さなくちばしの方が便利だ。このように、くちばしの大きさは条件付きで予測が可能と言える。信頼できる賢者が来年の降雨量を教えてくれれば、私たちは確信を持ってくちばしの大きさを予測できるだろう。これは、くちばしの大きさが明らかにランダムではないことを意味する。もしもランダムだったならば、降雨量には従わないはずだ。

システムの一部の特徴が予測可能で、残りは予測不可能ということは珍しくない。私の好きな天文学の例を紹介しよう。2004年に天文学者たちは、アポフィスと呼ばれるあまり知られていない小惑星が2029年4月13日に地球に衝突する恐れがあると発表した。彼らによると、2029年にうまい具合に逸れたとしても、2036年4月13日に2度目の危機が訪れるという。すると、あるジャーナリストが次のような質問をした（公正を期すと、ユーモアたっぷりのコラムでの話だ）。「衝突の起こる年がわからないのに、どうしてそれほどはっきり日付がわかるのか？」

読むのを中断して考えてほしい。「1年は何か？」がヒントだ。

とても簡単だ。衝突の可能性があるのは、小惑星の軌道が地球の軌道と交わるか、あるいはほぼ交わる時だ。その軌道は時間の経過とともに少しずつ変化し、二つの天体がどれだけ接近するかに影響を及ぼす。十分な精度で小惑星の軌道を決定できるだけの観測技術がなければ、小惑星がどれだけ地球に近づくのかを確実に知ることはできない。天文学者は十分な精度の軌道データを持ち合わせていたので、今後数十年について、ほとんどの年は衝突の危険はないと除外することができたが、20

29年と2036年は除外できなかったのだ。これとは対照的に、衝突の起こる日付は別の特徴で決まる。1年経つと、地球はその軌道の（ほぼ）同じ位置に戻る。これが「年」の定義だ。具体的に言うと、小惑星の軌道との交点に、地球は1年間隔で近づく。つまり、毎年の同じ日に接近するのだ（交わるタイミングが真夜中近くであれば、1日のずれはあるかもしれない）。アポフィスと接近するのはたまたま4月13日だったわけだ。

したがって、ボア（あるいはベラ）はまったく正しかった。彼の言葉はまさに核心を突くもの。物事の仕組みが詳細にわかっているときでさえ、翌週、翌年、あるいは次の世紀に何が起こるか、まったくわからないかもしれないのだ。

そして、不確実性の第六世代へ

私たちは今や不確実性の第六世代に突入した。さまざまな形の不確実性があり、それぞれはある程度まで理解可能だ、ということに私たちは気づいた。これが第六世代の特徴である。私たちは広範な数学的手法を駆使して、依然として恐ろしく不確実な世界で賢明な選択をすることができる。高速で強力なコンピュータは、莫大な量のデータを速やかに正確に解析してくれる。大流行している「ビッグデータ」については、今のところ私たちはそれで何か有益なことをするよりも、データを集める方が得意だ。私たちの地力はコンピュータによって増強され、歴代の数学者がこれまで紙と鉛筆で計算してきたよりも多くの演算を、今ではわずか1秒で実行することができる。さまざまな形の不確実性に関する数学的理解と、パターンや構造を解析したり、不確実性を定量化する複雑なアルゴリズムとを組み合わせたことによって、私たちはある程度、この不確実な世界を飼いならすことができ

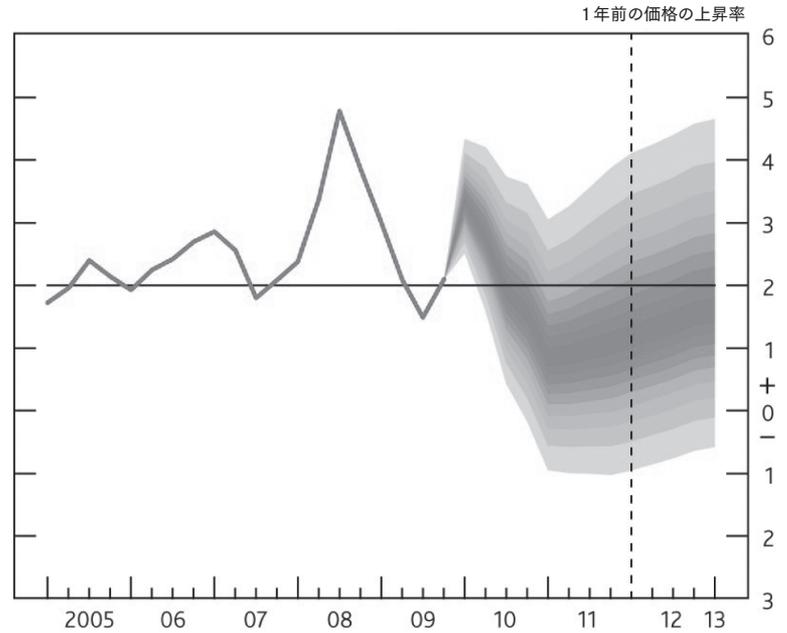
るようになった。

私たちは以前よりもはるかに正確に未来を予測することができるようになった。天気予報が外れるのは困りものだが、1922年にルイス・フライ・リチャードソンという先見の明のある科学者が『数値処理による天気予報』を著して以来、天気予報の精度は目覚ましく改善している。予報の精度が上がっただけでなく、その予報が当たる確率も査定してくれる。たとえば天気予報のサイトが「25%の確率で雨」と言うとき、こうした予報が出た場合の4回に1回はちゃんと雨が降ることを意味する。「80%の確率で雨」と言った場合、5回に4回は予報が当たる可能性が高い。

イングランド銀行がインフレ率の変動予想を公表する際には、その予想の信頼性に対する評価も同様に付け加えられる。この評価を一般に公開する効果的な方法として、「ファンチャート」というものがある。このグラフは、予測されたインフレ率の時間発展を示すが、1本の線ではなく、濃淡のある帯で描かれている。時間が経過するにつれて、帯の幅は広くなり、正確性が失われていくことを示している。色の濃さが確率の高さを示し、暗い領域は明るい領域よりも確率が高いことを表す。濃淡のある帯には、予想の90%が含まれている。

ここでのメッセージは二つある。第一は、進歩した技術を活用すれば、より正確な予測が可能になるということ。第二に、予測の信頼性を考慮することによって、不確実性に対処できるということ。

第三のメッセージは、不確実性が役立つ場合もあるということだ。この点についても理解が進み始めている。多くの技術分野では、機器や作業の効率が上がるように、制御可能な程度の不確実性が故意に付加されている。工業での問題に対する最適解を見つげるための数学的手法では、ランダムな擾乱が用いられる。これによって、局所解（近傍の解と比べるとよいが、大域的に見るとそれほどよく



2010年2月の消費者物価指数に基づく、イングランド銀行のインフレ予想を示すファンチャート

ない戦略)にはまるのを防ぐことができる。天気予報でも、記録されているデータにランダムな変動を加えることによって精度が改善できる。衛星測位システムでは、電波干渉の問題を防ぐために擬似乱数の系列が用いられる。高価な燃料を節約するために、宇宙飛行ではカオスが活用されている。

不確実性はどこまで解明できるのか？

とはいうものの、ニュートンの言葉を借りると、私たちは依然として「海岸で遊んでいる子供のようなもの」だ。「なめらかな小石を見つかったり、きれいな貝殻を見つかったりして、はしゃいでいるだけだ。目の前には真理の大海原が誰にも知られないまま広がっているというのに」。いまだに答えられていない難解な問いはたくさんある。たとえば、地球上のすべてが依存しているにもかかわらず、世界金融の仕組みを私たちはよくわかっていない。医学の専門知識によって、ほとんどの伝染病の流行に早い段階で気づき、その病状を和らげることが可能になったが、その広まり方は必ずしも予測できない。ときおり新しい病気が発生するが、いつどこでその姿を現すのか、私たちには見当もつかない。地震や火山活動についても非常に正確な計測ができるようになったが、予測した実績は私たちの足下の地面がぐらぐら揺れるのと同じくらい心許ない。

量子の世界に関する理解が深まると、より深遠な理論への足掛かりが得られ、量子論に内包されているパラドックスが解けるようになるかもしれない。量子論の不確実性の問題は、現実にはより深い層があると考えても解決できないことを物理学者は数学的に証明している。しかし、この証明には、反論の余地のある仮定が含まれており、抜け穴が見つかっている。古典物理系で発見された新しい現象は量子の奇妙な振る舞いに酷似しており、その仕組みは既約な「単純化できない」ランダムネスとは

まったく関係ないことがわかってきた。量子の奇異な性質を発見する前に、私たちがこのような現象、すなわちカオスについて知っていたら、今日の量子論はまったく異なるものになっていただろう。あるいは、ありもしない決定論を探し求めて、数十年を無駄にしていたかもしれない。

私はこれらすべてのことを、6世代の不確実性としてきれいにまとめたが、現実はそのほど整然としたものではない。それぞれの原理は、最終的には非常に単純であることが判明したが、それがわかるまでの道のりは複雑で混乱に満ちていた。予期せぬ紆余曲折、大きな躍進、そして行き詰まりがあった。さまざまな数学的進展のなかには、人騒がせな間違いだと判明したものもあった。その意義が認識されるまで、数年放置されていたものもあった。数学者たちの間ですら、イデオロギーの分裂があった。政治、医学、金融、法律がすべて関わったこともあった。

このような物語を個別の章に分けて語るとしても、年代順に話すのは賢明ではない。時間の流れよりも、アイデアがどう展開されるかの方が重要だ。そのため、不確実性の第四世代（量子）の前に、第五世代（カオス）を扱うことにする。また、基礎物理学の古い発見に遭遇する前に、統計学の近代的応用について考察することにする。ときには横道に逸れて、好奇心をそそるクイズや、簡単な計算、驚きの事実についても紹介する。このような次第ではあるが、本書の物語にはすべて理由があり、それぞれがきちんと組み合わさっている。

不確実性の六つの世代へようこそ。