

博士論文

平成 24 (2012) 年度

情報理論的観点からみた進化論  
——進化論における確率概念の哲学的意義——

慶應義塾大学大学院文学研究科

哲学・倫理学専攻 哲学分野

森元 良太

## はじめに

---

現代の進化論では、「適応度 (fitness)」という概念が生物進化を表すのに重要な役割を担う。適応度とは、生物がどれだけ長く生存し、どれだけ多くの子孫を産むかを定量的に表したものであり、確率的に定義される。生物進化を数学的に表すには確率概念が欠かせない。では、この確率概念は進化現象を正しく表しているのだろうか。もしそうであれば、現実の世界に不確定的な要素があることを意味しているようにみえる。つまり、進化は非決定論的な現象かもしれないということになる。あるいはそうではなく、世界はほんとうのところ決定論的であるかもしれない。そうであれば、確率概念は現象をありのままに表現していないことになる。本稿では、進化論における確率概念と進化現象との関係について検討する。

世界が決定論的であるかどうかは古代ギリシアの時代から議論されてきた。近代以降、ニュートン力学の成功により、決定論的世界観はより具体的に表現されるようになる。ニュートン力学は、あらゆる物体が確定的に運動することを示している。手に持っているボールをはなすとしよう。そのボールは手からはなれた後、空中に静止するかもしれないし、真上に飛んでいくかもしれない。手からはなれた後のボールの軌道は、論理的には無限の可能性がある。だが、実際には真下に落ちるというただ一つの軌道しか描かない。そして、ニュートン力学を用いると、手からはなれた瞬間のボールの状態がわかれば、落下するただ一つの軌道を正確に計算することができる。天文学者で数学者のピエール・ラプラスは、あらゆる物体の運動がニュートン力学によって確定的に記述できることから、世界は決定論的であると主張した。その後、彼のつくった決定論的世界観は広まることになる。

ラプラスによると、世界には不確定的な要素は一切なく、すべての物体は決定論的に運動している。したがって、もし完全な知識を持つ全知全能者がいるとすると、その存在者は世界を記述するのに確率といった不確定的な概念を必要としない。それに対し、私たち人間は完全な知識を持っていない。それゆえ、確率概念が必要になるのである。ラプラスはこのように、決定論的な世界観にもとづき、確率を私たち人間の無知の表明として解釈した。この全知全能者は「ラプラスの魔物」として知られている。

しかしながら、決定論的世界観は量子力学の誕生により、大きく揺らぐことになった。量子力学では、肉眼で直接みることのできない小さな対象が扱われる。たとえば、一個の電子を壁に向けて発射し、その電子が壁のどの位置にあたるのかを予測するとしよう。量子力学では、電子のあたる位置を確定的に知ることができない。できるのは、確率的な予測だけである。このことは、発射される電子やその周囲の環境の状態についての完全な知識があるとしても変わらない。量子力学の誕生以降、量子力学における確率概念の解釈を

めぐり多くの議論が繰り広げられてきた。量子力学の標準的な解釈によると、この確率概念は実在の世界についての性質を表しており、微視的な世界は非決定論的であるとされる。それに対し、世界はほんとうのところ決定論的であり、量子力学における確率概念は世界の実在を表してないと主張する者もいる。アインシュタインはその一人である。このように、確率をどう解釈するかによって、世界に対する理解は大きく変わる。したがって、世界を正確に理解したいのであれば、確率概念の正しい解釈が必要なのである。本稿では量子力学の解釈問題には立ち入らないが、確率解釈が世界観の形成に大きくかかわることに注意しておきたい。

生物学に目を向けると、進化の数理モデルには確率概念が用いられている。それでは、進化論における確率概念は何を表しているのだろうか。これが本稿で解き明かしたい問題である。現代進化論の祖チャールズ・ダーウィンは、確率概念そのものについてではないが、チャンスという不確定な要素について次のように述べている。「ある一頭のオオカミの習性や構造に生得的変化がわずかに生じることによって、オオカミ自体が利益を得るとしたら、そのオオカミには生存して子孫を残す最善のチャンスがあるだろう」(Darwin 1964, p.91)。ダーウィンによる「生存して子孫を残す最善のチャンス」という表現は、現代の進化論では適応度を使って表される。適応度は、上述したように、生存と繁殖の能力を確率的に表したものである。ここに確率概念がかかわってくる。では、確率概念は何を表しているのだろうか。それは、世界の非決定性であろうか。それとも、私たちの知識の不十分さであろうか。あるいは、別のことを表しているのだろうか。本稿では、進化論における確率概念が何を表しているのかという問いに一つの解答を与える。

# 目次

---

はじめに .....	i
第1章 なぜ確率概念が哲学の問題となるのか .....	1
1.1 進化論と確率概念 .....	1
1.1.1 進化とは何か .....	2
1.1.2 進化の諸要因 .....	6
1.1.3 進化論の数学化と確率概念の導入 .....	11
1.2 確率概念と世界観 .....	15
1.2.1 確率概念の解釈 .....	16
1.2.2 確率概念と物理世界 .....	20
1.3 本稿の概要 .....	24
第2章 ニュートン力学的観点からみた進化論 .....	26
2.1 ニュートン力学的観点から .....	26
2.1.1 生物個体 .....	27
2.1.2 ニュートン力学的観点到に依拠する理由 .....	29
2.2 決定論的な進化現象 .....	31
2.2.1 遺传的浮動 .....	32
2.2.2 自然選択 .....	35
2.3 無知解釈 .....	36
2.4 道具主義 .....	38
2.5 まとめ .....	40
第3章 量子力学的観点からみた進化論 .....	42
3.1 量子力学的観点から .....	43
3.1.1 量子力学的観点到に依拠する理由 .....	43
3.1.2 しみ出し論証 .....	45
3.2 非決定論的な進化現象 .....	48
3.2.1 遺传的浮動 .....	48
3.2.2 自然選択 .....	49
3.3 傾向性解釈 .....	52

3. 4	非局所的な实在論 .....	54
3. 5	まとめ.....	56
第4章	進化論の自律性.....	58
4. 1	集団的思考 .....	58
4. 1. 1	集団レベルの進化現象.....	59
4. 1. 2	マイアによる集団的思考 .....	61
4. 1. 3	ソーバーによる集団的思考 .....	64
4. 1. 4	ブランドンたちのしみ出し論証の難点 .....	68
4. 1. 5	ブランドンたちの自律性論証の難点.....	69
4. 2	遺伝的浮動はフィクションではない .....	71
4. 2. 1	集団遺伝学は単純化しすぎなのか.....	71
4. 2. 2	ミルスタインの批判 .....	73
4. 2. 3	物理学的情報 .....	75
4. 2. 4	生物学的情報 .....	77
4. 2. 5	遺伝的浮動はフィクションではない.....	80
第5章	進化論的な説明.....	82
5. 1	物理学だけでは生命現象は説明できない.....	82
5. 1. 1	科学的説明の実用論 .....	83
5. 1. 2	説明戦略の間のトレード・オフ .....	87
5. 1. 3	多角的な観点による説明の補完.....	91
5. 1. 4	多様で複雑な生命現象.....	92
5. 2	粗視化.....	94
5. 2. 1	還元不可能性 .....	94
5. 2. 2	粗視化 .....	96
5. 2. 3	包括的な説明 .....	98
第6章	情報理論的観点からみた進化論 .....	100
6. 1	情報理論.....	100
6. 1. 1	最大エントロピー原理.....	100

6. 1. 2	ジェインズの統計力学.....	103
6. 2	情報理論と進化論.....	106
6. 2. 1	自然選択モデル.....	107
6. 2. 2	遺伝的浮動モデル.....	109
6. 2. 3	情報理論的観点からみた進化論の目的.....	111
6. 2. 4	ベイズ主義的解釈.....	113
6. 2. 5	合理性.....	117
第7章	結論.....	120
	参考文献.....	124
	謝辞.....	135
Appendixes	.....	136
A1	情報理論の最大エントロピー原理.....	136
A2	統計力学モデルの導出.....	138
A3	自然選択の最大原理.....	141
A4	等確率の導出.....	144
A5	遺伝的浮動モデルの導出.....	146
A6	ベイズの定理の導出.....	150

# 第 1 章

## なぜ確率概念が哲学の問題となるのか

---

### 1. 1 進化論と確率概念

「生物学では進化の観点がなければ何も理解できない (Nothing in biology makes sense except in the light of evolution)」。これは、進化論の発展に大きく貢献した遺伝学者テオドシウス・ドブジャンスキーの有名な論文 (Dobzhansky 1973) のタイトルである。この論文のなかでドブジャンスキーは、生命現象を理解する上で進化の観点が欠かせないことを強調している。

現代の進化論は、1859 年にチャールズ・ダーウィンが『種の起源』を出版したことに端を発する。ダーウィンは生物が長い時間をかけて変化し、多様になっていったと主張した。ダーウィンの進化論は、紆余曲折があったものの 20 世紀半ばには広く受け入れられるようになり、進化研究は飛躍的に発展する。20 世紀初頭には進化の数理モデルが考案され、理論的な基盤が与えられた。また、20 世紀半ばにはさまざまな実験的成果が進化の数理モデルに適用され、それと合わせて遺伝学、古生物学、分類学といった生物学の多くの領域が進化の名のもとに統合されることになる。いわゆる「進化的総合 (evolutionary synthesis)」の成立である (Huxley 1942)。冒頭で引き合いに出したドブジャンスキーは、ショウジョウバエの実験的成果に進化の数理モデルを適用するなど、進化的総合に深くかかわった人物である。

最近では、発生学や形態学に進化の観点を導入する試みがなされており、進化論は適用範囲を拡張し続けている。分子レベルの研究も進展し、1953 年に DNA (デオキシリボ核酸) の二重らせん構造のモデルが提唱され、2003 年にはヒトの全ゲノムを解読するヒトゲノム計画の完了が宣言された。それと並行して、ゲノミクスやプロテオミクスという新たな分野が登場する。19 世紀以降、進化に関する研究は飛躍的な進歩を遂げ、それとともに人々の生命に対する理解は大きく変わってきた。生物が共通の祖先に由来し、自然選択によって進化してきたことなどは、進化論がもたらした生命への新たな視座であり、進化論は、生命現象の解明に重要な役割を担ってきた。

ところで、進化論の描く世界とはどのようなものだろうか。進化論では、「適応度」という概念を用いて生物進化が表現される。適応度とは、生物がどれだけ長く生存し、どれだけ多くの子孫を産むかを定量的に表したものである。この適応度という概念は「確率」を使って表現され、それゆえ生物進化を数学的に表すには確率概念が用いられる。この確率という概念が厄介なのである。たとえば、「私の適応度 (あるいは生存確率) が 0.5 であ

る」という文の意味を考えてみよう。現実の世界では、私は生きているか、あるいは生きていないかのいずれかの状態に決定しており、その中間の確率的な状態といったものはありえない。では、上の文をどう理解すればよいのだろうか。私が平均寿命の半分の約 40 歳で死ぬということを意味しているのだろうか。あるいは、私が生きているのか死んでいるのかわからない状態にあるということだろうか。確率概念の意味を明確にしなければ、上の文を正確に理解することは難しい。本稿では、確率概念の哲学的分析を通して、進化論における確率概念が何を表しているのかを明らかにする。

### 1. 1. 1 進化とは何か

1859 年に生命観を一変させる著作が出版された。チャールズ・ダーウィンによる『種の起源』である。ダーウィンはこの著作のなかで、生物が変化することを唱えた。この学説は「進化論 (evolutionary theory)」と呼ばれ、人々に多大な影響を与えた。その影響は生物学内部にとどまらず、物理学、心理学、さらには宗教、社会学、哲学などさまざまな領域に及び、いまでもその波及効果は続いている。

進化とは何だろうか。まずは、「進化 (evolution)」という言葉の意味の変遷についてみてみよう。ダーウィンが『種の起源』で提示した考えは「進化論」と呼ばれるが、実のところ彼自身は「進化」という言葉をほとんど用いていない。「エヴォリューション」という言葉はラテン語の「*evolutio*」を語源とし、もとは巻物を開くようにすでにできあがった物語を展開することを意味していた。この言葉には、運命論的な意味合いが含まれていたのである。「エヴォリューション」という言葉が生物学に最初に登場したのは、1670 年に無名の評論家が博物学者ヤン・スワンメルダムの前成説を紹介したときである。前成説とは、生物の完成されるべき形態や構造が卵や精子のなかにあらかじめ入っており、それが個体発生の過程で展開していくという考えである。スワンメルダムが昆虫の発生過程の「変化」を前成説で説明したものを、無名の評論家が「エヴォリューション」という言葉を用いて解説した。その解説のなかで、「エヴォリューション」という言葉は、すでに完成しているものを展開していくという原義どおりの意味で用いられていた。つまり、発生の結果はすでに運命によって定められているということである (Richards 1992)。

ダーウィン自身は『種の起源』のなかで、「進化」という言葉を一度しか使っていない。その言葉は『種の起源』の最後に登場する。

このような生命の見方は壮大である。すなわち、生命はさまざまな力とともに、最初わずかな形態、もしくは一つの形態のなかに吹き込まれた。そして、この惑星が確固たる重力の法則にしたがって回転する一方で、非常に単純なはじまりから、最も美し

く、かつ最も素晴らしい無数の形態がこれまで進化<sup>1</sup>してきて、いまでも進化<sup>2</sup>しているの  
である (Darwin 1964, p.490, 強調は筆者)。

ここでの「進化」という言葉は、前成説における「エヴォリューション」を意味していな  
いことに注意しよう。ダーウィンは、物理法則の不変性と生物の発展の可変性を対比させ  
るために「進化」という言葉を用いた。彼はこの言葉を運命論的な意味ではなく、当時の  
日常的な意味で使用した。1670年に最初に登場してから200年近く経過し、この言葉の持  
つ運命論的な意味合いは薄れていた。ダーウィンの時代、「進化」という言葉は主に、一  
連の長い出来事が順序正しく現れ、萌芽的な状態から完成した状態に発展することを意味  
していた。ダーウィンは、最初の単純な生命が素晴らしいものへと発展していくさまを表  
すのに、「進化」という言葉を用いた。そして彼は、この進化という観点が新しい「生命  
の見方」だと主張したのである。

しかしながら、ダーウィン自身は前述したように「進化」という言葉をほとんど用いて  
おらず、上の引用部は非常にまれな例である<sup>1</sup>。彼がこの言葉を避けたのは、その言葉には  
当時、前成説の主張に含まれる運命論的な意味がまだ少し残っており、その語法はダーウ  
ィンの考えとは相容れないものだったからである。また、日常的な用法では、「進化」と  
いう言葉は「進歩 (progress)」の概念と強く結びついており、ダーウィンは自らの考えを  
そのような言葉で表したくなかったということもある。そのため、ダーウィンは「進化」  
という言葉ではなく、「変更を伴う由来 (descent with modification)」という言葉を使用し  
た (Gould 1977; Browne 2002)。

それでは、なぜダーウィンの考えが「進化論」と表現されるようになったのだろうか。  
それはハーバード・スペンサーによる (ボウラー 1987)。スペンサーはダーウィンの考え  
を一般化し、生命や社会をも含む宇宙の変化を単一の枠組みで説明するために「進化」と  
いう言葉を用いた。ダーウィンが生命の進化理論を考案したのに対し、スペンサーは万物  
の進化を支配する原理を提唱した。スペンサーは、「進化とはその最も単純で最も一般的  
な側面からすると物質の統合である」 (Spencer 1862, p.285) と述べる。また、スペンサー  
はその後『生物学原理』を出版し、その第3部の「生命の進化 (The Evolution of Life)」で  
生物の進化を扱っている。そこでは、生物の時間的変化を表すのに「進化」という言葉が  
用いられている (Spencer 1864-67)。スペンサーのこうした考えが広まったことにより、「エ  
ヴォリューション」という言葉に含まれる運命論的な意味合いは薄れていった。「ダーウ  
ィンもスペンサーも、ともに発生学上の概念を越えた重要なステップを生み出した。彼ら  
はその過程が人間のような一つのゴール<sup>3</sup>へ向かうものではなく、端が開かれていると信じ

<sup>1</sup> ダーウィンは『人間の由来』の序文でも「進化」という言葉を用いている。彼は『種の起源』に対す  
る評価の一部を説明するときに、「残念なことに、自然科学界の元老たちの多くは、いまだにどのよう  
な形の進化にも反対している」 (Darwin 1981, p.2) と述べている。

たからである」(ボウラー 1987, p.24)。スペンサーによって、「エヴォリューション」という言葉は運命論から解き放たれたのである。

残念ながら、スペンサーの貢献はよい結果ばかりをもたらしたわけではない。彼の語法は、進化と進歩を同一視するという誤解を生み出すことになる。スペンサーは「進化」を物質自体の能力とは考えずに、物質の性質と外部の環境との相互作用の結果とみなしていた。これが、生物に関する当時の考え方にうまく合っていたのである。当時のイギリスはヴィクトリア朝時代で、産業革命によって政治や文化などが進歩している最中であった。そのため、当時の人々は、生物進化を単純なものから複雑なものへと向かう過程とみなすことが多かった。しかも、当時の進化論者たちはダーウィンの「変更を伴う由来」という表現よりも簡潔なものを求めていたので、「進化」という表現は使い勝手がよかった。スペンサーの普及活動により、ダーウィン自身の意図とは別に、彼の考えは「進化論」と呼ばれるようになったのである (Browne 2002, p.59)。

しかし、進化という言葉は進歩を意味してはいない。ダーウィンはそのことに注意を払っていた。ダーウィンの1838年の『N ノート』には次のように記されている。「人間の知性は、暗黒時代を考慮してもギリシアの時代から向上していない（このことは進歩や発展に反対しているみたいだ）。現在のスペインをみても。人間の知性はかなり衰えているのかもしれない（外部環境の効果による）。（私の理論には、進歩するような絶対的な傾向は一切ない）」(Barrett 1974, p.339, 強調は原著者)。このように、ダーウィンは進化と進歩をはっきり区別している。

ダーウィン自身が「進化」ではなく「変更を伴う由来」という表現を用いたことはすでに述べた。ダーウィンはこの言葉で二つの事柄を意味している。一つは同種内で生じる特徴の変化、もう一つは新種を生成する大規模な変化である。現代の進化論では、これらはそれぞれ「小進化 (microevolution)」と「大進化 (macroevolution)」と呼ばれる。ダーウィンは、小進化について次のように述べる。「人間は、表に現れていて目にみえる形質 (character) にしか働きかけることができない。(・・・) 一方自然は、あらゆる内部器官、あらゆる体質のわずかな違い、そして生命機構全体に対して作用することができる。(・・・) 自然のもとでは、構造や体質のごくわずかな違いが生存闘争においてうまく均衡している形成を変え、その形成を保存することがある」(Darwin 1964, pp.83-84)。形質とは、足の速さや眼の色、翅の形状といった生物の特徴のことであり、英語の「character」もしくは「trait」にあたる。ダーウィンはこの箇所、小進化によって形質が変化すると述べている。一方、大進化についてはウマの飼育を例に次のように述べる。「ここで、大昔にある人が足の速いウマを、別の人は強くて大きいウマを欲していたとしよう。ウマの形質の最初の違いはごくわずかであっただろう。ある飼育家たちは足の速いウマを、別の飼育家たちは強いウマを選択し続けると、やがてその違いは大きくなり、二つの亜品種の形成が認められるようになる。最終的に、何百年も経過すれば、それらの亜品種は二つのしっかりした別の品種へと変わるようになる」(ibid, p.112)。ダーウィンの考えによると、進化というのは、

まず個体間<sup>2</sup>に作用する小進化が基礎にあり、そしてその小進化による変異が長い時間をかけて蓄積し、やがて種分化という大進化へ至る。

20世紀に入ると、進化は「遺伝子 (gene)」をもとに考えられるようになる。そのきっかけとなったのは、グレゴール・メンデルの『雑種植物の研究』である (Mendel 1866)。メンデルは、エンドウの実験をもとに遺伝の仕組みを解明した。その仕組みは、いまでは分離の法則、独立の法則、優性の法則というメンデルの三法則として知られている。メンデルの論文は1865年に「ブルノ自然科学会例会」で口頭発表され、翌年出版されたが、当時ほとんど注目を集めることはなかった。その後1900年に、ド・フリース、カール・コレンス、エリッヒ・チエルマクによってほぼ同時に独立に発見され、世に広まることとなった<sup>3</sup>。メンデルの法則はエンドウだけでなく、植物一般、さらには動物にも適用されることがわかり、1906年のウィリアム・ベートソンによる遺伝学の誕生へとつながった。遺伝学とは、親の形質が子孫に伝わる仕組み、および個体間の変異が生じる機構を研究する分野である。1909年には遺伝学者ウィルヘルム・ヨハンセンが、メンデルの法則にしたがう因子を「遺伝子」と名づけた (Johannsen 1909)。ヨハンセンは形質とその形質をつくり出す因子とを区別するため、「表現型 (genotype)」と「遺伝子型 (phenotype)」という用語を導入する。遺伝子という用語は、メンデルの法則にしたがって分離する遺伝子型の一部にあてられた。ヨハンセンの意図は、遺伝と発生の研究を分離させて、前者を「遺伝学」という独立した研究分野として確立させることにあった (Churchill 1974)。

当時、メンデルによる遺伝の研究はダーウィンの進化論と齟齬をきたすと考えられており、いまからみると不毛な論争がしばらく続いた。進化論は連続的な変化を主張しているのに対し、メンデルの遺伝法則は離散的な変化を表しており、両者は相容れないものとみなされた。しかし1930年代には、ロナルド・フィッシャー、セウォール・ライト、ジョン・バードン・サンダーソン・ホールデンが離散的な遺伝子を仮定した進化の数理モデルを提案することで、論争は収束をむかえる。その後、進化は「集団における遺伝子の頻度変化」として定義されるようになる。この定義はいまでも一般的なものとされている。遺伝子の頻度変化による進化の定義は、先の小進化に対応している。つまり、種内の生物の変化を表す。一方、大進化にもこの定義はあてはめることができる。新種とその親種が遺伝的に異なれば、定義上、大進化も進化とみなすことができる。いずれにしても、現代進化論において、「進化」という言葉は運命論的な語源の意味ではなく、頻度変化という数学的な表現で理解されているのである。本稿では断りのない限り、現代の進化生物学の用法にしたがい、進化を集団内の遺伝子の頻度変化という意味で用いることとする。

<sup>2</sup> ダーウィンは、個体間だけでなく、群 (group) 間にも生存競争が生じることがあると考えている。彼は『人間の由来』のなかで道徳の進化を論じるとき、個体にとって不利な形質でも、群にとって有利であればその形質は進化するとしている (Darwin 1981)。

<sup>3</sup> エリッヒ・チエルマクをメンデル論文の同時発見者とみなすかどうかについては意見がわかれている (Simunek *et al.* 2011)。

## 1. 1. 2 進化の諸要因

進化は何によって生じるのだろうか。ダーウィンはその答えを『種の起源』の正式なタイトルに記している。『種の起源』は1859年に初版が出版され、1872年の第六版まで改訂が重ねられた。初版の正式なタイトルは、『自然選択、すなわち生存闘争において有利な品種の保存、による種の起源』 (*On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life*) である。つまり、ダーウィンは自然選択によって進化が生じると考えたのである<sup>4</sup>。版を重ねるうちにタイトルは若干修正されたが、「自然選択による」という部分は第六版までそのまま残された。自然選択とは何だろうか。ダーウィンは『種の起源』のIV章で次のようにまとめている。

有機体にとって有益な変異 (variation) が生じるとするならば、そのような形質を持った個体は間違いなく、生存闘争において保存される最大のチャンスを持つだろう。そして、遺伝の強力な原理にもとづき、それらの個体は類似の形質を持つ子孫を生む傾向 (tend) にあるだろう。この保存の原理を、私は略して「自然選択」と呼んでいる (Darwin 1964, p.127)。

このようにダーウィンは、自然選択には少なくとも三つの条件が必要であると考えた。すなわち、「変異」、「生存闘争において保存されるチャンス」、「遺伝の原理」である。それぞれを具体的にみてみよう。

いま、ある山中にシカの集団が生息しているとしよう。通常、集団内のシカの個体は足の速さなどの形質に違いがある。「変異」とは、このような形質の違いのことである。ダーウィンは、自然選択が生じるためには生物の間に変異が必要であると考えた。ダーウィンは、自然選択が生じるためには生物の間に変異が必要であると考えた。ダーウィンが想定した変異には二つのタイプがある (Provine 2001)。一つは、集団内の個体間にある小さな違いである。たとえば、ヒトはそれぞれ身長や視力などの形質にわずかながら違いがあり、どの二人もまったく同じということはない。こうした個体差はヒトに限らず、生物集団内のあらゆる個体の間にみられる。ダーウィンは、こうした集団内の個体差を変異と考えた。もう一つは、個体間の大きな違いである。ある個体が形質を突然大きく変え (sport)、集団内の他の大半の個体とは顕著に異なるようになることがある。こうした変化によって生じる顕著な違いが、第二のタイプの変異である<sup>5</sup>。どちらのタイプの変異も世代を通して伝わるという点で共通している。だが、二つのタイプの変異には大きな違いがある。前者の変異はわずかな違いであり、集団内ではその違いが連続的であるのに対し、後者の変異は大きく、不連続的である。ダーウィンは、大きな変異はまれにしか生じず、

<sup>4</sup> ダーウィンは同書のなかで、生命の樹 (tree of life) という考えも提示している。この考えによると、現存の生物種は共通の祖先に由来する。その由来のパターンが樹の形状に似ていることから、生物の進化パターンは生命の樹と呼ばれている。さらに、ダーウィンは生命の樹が一本、ないし数本しかないことも主張している (Darwin 1964)。

<sup>5</sup> ボウラーは、ダーウィンが第三のタイプの変異も考えていたと主張している (Bowler 1974)。

また仮にそうした変異が生じたとしても集団のなかで薄まっていくと考えた。一方、小さな変異はどんな生物種にも豊富にみられる。自然選択が働くには多くの変異が必要であり、自然選択は小さな連続的な変異に対して働いていると考えられる。それゆえ、ダーウィンは自然選択をゆっくりと連続的に働くものとみなすようになった。ダーウィンは『種の起源』の最終章で次のようにまとめている。「私は種がこれまで継起する軽微で有利な変異の保存と集積によってゆっくりと変化してきたし、いまも変化していることを確信した」(Darwin 1964, p.480)。この変異という概念は生物学に新しい観点を導入することにつながるようになるが、それについては4. 1節で詳しくみることにする。

では次に、「生存闘争において保存されるチャンス」について説明しよう。あるシカが速い足という形質を持っていれば、そのシカは捕食者のオオカミから逃れるチャンスが大きく、成体まで生き残って子を産むチャンスも大きくなる。一方、足の遅いシカは捕食者に食べられやすく、子を産む年齢まで生存できないかもしれない。それゆえ、速い足という形質を持つシカは、生存闘争において生き残って子孫を残すチャンスが大きくなる。ダーウィンのいう「生存闘争において保存されるチャンス」は、生存闘争で生き残って子孫を残すことのできるチャンスのことである。現代の進化論では、交配可能な時期まで生存し、子孫を残すことのできるチャンスの大きさを「適応度」という概念を使って表す。つまりこの場合、速い足という形質は遅い足に比べて適応度が高いのである。

ここで一つ注意が必要である。上の引用文にある「生存闘争において保存されるチャンス」や「類似の形質を持つ子孫を生む傾向」とは何だろうか。あるいは、「適応度」を生存と繁殖のチャンスの大きさとしているが、チャンスとは何だろうか。さらには、チャンスといった不確定な要素が実在の世界に存在するのだろうか。これは、本稿の中心的な問題である。

話を戻して、三つ目の要素である「遺伝の原理」を説明しよう。遺伝とは、親の形質が子やそれ以後の世代に現れる現象のことである。速い足という形質は子に遺伝する。つまり、足の速い親は自分と似たような足の速さの子を生むのである。そして、オオカミとシカが同じ環境に生息するとしたら、数世代後のシカの集団では、足の速いシカの頻度が増加し、足の遅いシカの頻度が減少することになる。このように、ダーウィンは自然選択が働くには、「変異」、「生存闘争において保存されるチャンス」、「遺伝」という三つの条件が必要であると考えたのである。

現在では、進化生物学者のリチャード・ルウイントンによる自然選択の定式化が一般的である。

進化の原動力としての自然選択の原理は、ダーウィンによって、資源に限りがあり、生命の危険が伴う環境に生息する有機体の間での「生存闘争」として考案された。ダーウィンの論証のこの中核部分は、生物のあらゆるレベルにおける変化についての強

力な予測システムとなった。今日の進化生物学者からみると、ダーウィンの枠組みは次の三つの原理から成り立っている。

1. ある集団におけるそれぞれの個体は、形態、生理、行動が異なる（表現型の変異）。
2. 種々の環境において表現型が異なれば、生存と繁殖の割合も異なる（異なる適応度）。
3. 後の世代への寄与について、親と子に相関がある（適応度は遺伝可能）。

自然選択による進化の原理には、これら三つの原理が含まれる。これらの原理を満たすとき、集団は進化的な変化をするだろう（Lewontin 1970, p.1）。

つまり、自然選択が作用するには、集団内の個体間に変異があり、そうした変異が適応度の違いにつながり、変異は遺伝する必要がある。自然選択によって生物集団の遺伝子頻度は変化するので、自然選択は進化の要因とされている。

ところで、進化の要因は自然選択以外にもある。ヒューゴ・ド・フリースは、オオマツヨイグサの栽培実験で、多くの新しい変異を生じさせることができた。彼はこのように新しい変異が突然生じる現象に「突然変異（mutation）」という名前をつけた。ド・フリースは『突然変異説』の冒頭で次のように説明している。

ダーウィンは自らの自然選択説において、種の起源に関連する二つの原理を組み合わせている。（・・・）一つは、ダーウィン以前の時代の種の起源をめぐる論争でやり玉にあげられた原理である。それは、新しい形態がもとの形態から突然生じることにより、自然が次第に進歩するという仮定である。そうした現象は「突然変異」と呼ばれる。（・・・）ダーウィンの理論における二つ目の原理とは、個体の変異が連続的な自然選択によって新種の起源へとつながることができるという考えである（De Vries 1909, p.11）。

ド・フリースは、新種を生じさせる現象を突然変異と考えていた。だが現代では、新種を生じさせるというよりも、一つの種内の個体に変異を生じさせる現象を突然変異と呼んでいる。個体に生じる変異には、目にみえる形質だけでなく、内部器官やDNAの塩基配列なども含まれる。

ド・フリースは上の引用で、ダーウィンは突然変異と連続的な自然選択の二つの要因を組み合わせると新種の起源を説明すると述べている。一方、ド・フリースは後者の考えに懐疑的であった。彼は、「自然選択の理論は決して証明されたとみなされるべきではない。というのも、通常の（個体の）変異が累積することによる進化の説明を受け入れるには、幾多の困難があるからである」（*ibid*, p.70）と述べている。その重大な困難の一つは、「種

の起源における自然選択の役割は建設的なものではなく、破壊的なものだ」 (*ibid*, p.212) ということである。ド・フリース自身は、ダーウィンの理論を全面的に批判するつもりはなかったが、ド・フリースの考えは「突然変異説」と呼ばれ、ダーウィンの理論の対抗理論とみなされるようになる。そしてその考えは一時、自然選択説よりも支持されるほどであった。だがその後、進化の総合説が確立し、またオオマツヨイグサは染色体異常を頻繁に引き起こす特殊な植物であることがわかり、突然変異によって新種が生じるという考えは急速に支持を失うことになった (ポウラー 1987)。現代では、突然変異は進化の要因の一つとされているが、それだけで新種が誕生するとは考えられていない。

進化の要因は自然選択と突然変異以外にもある。進化生物学の教科書では、「遺伝的浮動 (genetic drift)」も進化の要因として挙げられる。遺伝的浮動とは、生物集団が有限の個体数から構成されるために、世代間で集団における遺伝子頻度が変化する現象のことである。生物は一生の間に多くの配偶子をつくるが、そのすべてが次世代の生物集団を形成するわけではない。実際に次世代に寄与できるのは、そのなかのごく一部の配偶子だけである。このとき、配偶子はそれ自身に含まれる遺伝子の生存上の有利さとは関係なく選ばれることがある。そのため、世代間で集団内の遺伝子頻度が変化する。遺伝的浮動は、集団の遺伝子頻度を変化させるので、通常は進化の要因とみなされる。わかりやすく説明するために、赤と白の玉が同じ割合で 100 個入っている壺から 10 個の玉を取り出す場合を考えてみよう。玉を 10 個取り出したら玉の色の割合を記録し、再び玉を壺に戻すという作業を何度か繰り返す、いわゆる復元抽出をおこなう。そうすると、玉を 10 個取り出す度に色の割合が異なることが観察されるだろう。赤が 7 個で白が 3 個のときもあれば、赤と白が 5 個ずつのときもあり、それ以外の割合もありうる。抽出される玉の色の割合はランダムに変動するのである。このような現象が遺伝子レベルでも生じているのであり、それが遺伝的浮動である。

ダーウィンは、現在では遺伝的浮動と呼ばれる現象が進化を引き起こすことに気づいていた。彼は『種の起源』で自然選択を説明した直後に次のように述べている。「有利な変異が保存され、有害な変異が捨てられることを、私は自然選択と呼ぶ。有益でも有害でもない変異は自然選択の影響を受けないので、おそらく多型と呼ばれる種にみられるように、変動する要素 (fluctuating element) に委ねられるだろう」 (Darwin 1964, p.81)。このように、ダーウィンは自然選択の影響を受けない変異が存在し、そのような変異は変動することを認めている。しかしながら、ダーウィン自身はその変異が変動する仕組みについては何も述べていない。

遺伝的浮動のモデル化をおこない、変異の変動の仕組みを明らかにしたのは、フィッシャーとライトである。フィッシャーは、遺伝的浮動がダーウィンの自然選択説に脅威を与えると考えていた。フィッシャーは、自然選択や突然変異が働かなければ、生物集団の構成は遺伝的浮動によって変化すると述べている。しかしフィッシャーは、実際には遺伝的浮動の効果は大きくないと論じている。「任意交配する種の変異が自然選択や突然変異な

しで減少することは、ほとんどないといってよいくらいに遅い」 (Fisher 1922, p.323)。フィッシャーは遺伝的浮動によって集団の変異が変動することはほとんどないと主張しており、その考えを生涯変えることはなかった。

一方ライトは、遺伝的浮動が生物進化において重要であることを最初に主張した人物である。ライトは1929年に「優性の進化—フィッシャー博士の返答への論評—」という論文で、遺伝的浮動の重要性を強調する (Wright 1929)。ライトは、集団のサイズが遺伝的浮動に重要な役割を担うことを示し、集団のサイズが小さければ遺伝的浮動の効果は大きくなると論じた。自然界における生物集団のサイズは十分小さいので、遺伝的浮動は進化に重要な役割を担うとする。そして、「適度な強さの自然選択には左右されない遺伝子は通常ランダムに浮動するだろう」 (*ibid.*, p.561) と結論づける。生物進化における遺伝的浮動の重要性をめぐる、フィッシャーとライトは激しい論争を繰り広げ、その対立はフィッシャーが亡くなるまで続いた (Provine 2001)。

その後1960年代になると、遺伝的浮動の重要性についてDNA分子のレベルで議論されるようになる。DNA分子の変化が主に自然選択によるのか、それとも遺伝的浮動によるかが争点となった。集団遺伝学者の木村資生は、分子レベルの進化では自然選択に中立、もしくはほぼ中立な遺伝子が支配的であると主張し、分子進化の「中立説 (neutral theory)」を唱えた (Kimura 1968; Ohta and Kimura 1971; Kimura 1983)。中立説とは、「タンパク質やDNAの塩基配列の比較研究によって明らかになった、分子レベルの進化的変化の大部分がダーウィンの自然選択ではなく、自然選択に中立あるいはほぼ中立な突然変異遺伝子の遺伝的浮動によって生じる」 (Kimura 1983, p.xi) という説である。木村によると、分子レベルの変異のほとんどは形質に影響を及ぼすことはなく、それゆえ自然選択は働かない。実際、DNAの塩基が変わっても、コードするアミノ酸に変化をもたらさないことがあり、このようなDNAの塩基の変化を「同義置換 (synonymous substitution)」と呼ぶ。アミノ酸が変化しなければ形質も変化しないので、このような遺伝子は自然選択に対して中立である。その他にも中立説を支持する証拠が次々みつき、1980年代には木村の中立説は受け入れられ、分子レベルにおける遺伝的浮動の効果が認められるようになった。

このように、生物進化はダーウィンが提唱した自然選択だけではなく、突然変異や遺伝的浮動によっても生じることがわかっている。さらに、ある集団に別の集団から個体が入ってくることや、ある集団の個体が別の集団に移ることによっても集団構成が変化する。動物は餌や配偶子を求めて場所を移動し、植物の花粉や種子は風に飛ばされたり動物に付着して運ばれたりする。このように、集団に外部から生物が入ることによって新たな遺伝子がもたらされることを「遺伝子流動 (gene flow)」と呼び、進化要因の一つとされている。ただし本稿では、進化の主要因である自然選択と遺伝的浮動に議論の焦点を絞ることとし、他の進化要因については扱わない。

### 1. 1. 3 進化論の数学化と確率概念の導入

ダーウィン以来、進化のさまざまな要因が明らかになる一方で、進化論を数学的に表現する研究が進められた。その研究分野は「集団遺伝学」と呼ばれ、進化論の数学的な土台を築くことになる。ダーウィン自身は進化論を数学的に表現することはなく、それは後の人たちの課題となった。

進化論の数学化は、ダーウィンの従弟フランシス・ゴールトンにはじまる。ゴールトンはダーウィンの『種の起源』とアドルフ・ケトラーの『社会物理学の試論』に感銘を受けた。ゴールトンは学生時代、優等生は親も優等生であることが多いことに興味を持ち、遺伝法則の解明に努める。1869年刊行の『遺傳的天才』のなかで、誤差論を遺傳現象の説明に導入した (Galton 1869)。誤差論は、天文学における観測値の誤差を処理するために開発された理論である。同じ対象を何回か測定してみると、その結果はいつも同じ値になるわけではなく、ばらつきが生じる。測定の際や条件の違い、実験器具や実験者の影響などによって誤差が生じてしまう。誤差論では、測定の際に生じる誤差を考慮して、測定値のばらつきから真の値を推測しようとする。ゴールトンの偉業は、誤差論を測定誤差の処理ではなく、集団の特性自体を扱うために援用した点にある。このことは変異の分析法の開発、さらには集団遺伝学の土台作りに繋がった。ゴールトンの偉業については、4. 1節で取り上げる。

集団遺伝学を確立させ、進化論の理論的基盤を築いたのは、上述のフィッシャー、ライト、ホールデンである。フィッシャーは、統計学でおなじみの「分散 (variance)」という概念や「分散分析 (analysis of variance)」という統計的手法を考案し、進化論の数学化に大きく寄与する。分散とは、集団のばらつき度合いを定量的に表す概念であり、分散分析は、そのばらつきの諸要因を分解してそれらの効果を調べる手法である。フィッシャーは、表現型の分散の要因を遺伝子、遺伝子間の相互作用、環境の三つに分解し、それら諸要因の効果の関係を数学的に表現した。遺伝子の効果は、遺伝子がそれに対応する表現型に与えるものである。遺伝子間の相互作用には、優性の効果、エピスタシス、多面発現がある。

これらの効果を説明するために、ここで遺伝学の基本事項を解説しておこう。遺伝子は細胞内の染色体上の特定の場所に存在し、その場所のことを遺伝子座 (locus) という。たとえば、ヒトは細胞核のなかに染色体を46本持つが、これを大きさ順に並べると2本ずつ対をなしていることがわかる。ヒトのように染色体を一對ずつ持つ細胞や個体のことを二倍体 (diploid) と呼ぶ。また、アリやハチのような膜翅目の昆虫には、染色体を一組しか持たない個体が存在し、そうした個体を一倍体 (haploid) と呼ぶ。さらに、植物には三組ないし四組ずつ染色体を持つものもある。ヒトのような二倍体の生物では遺伝子座に遺伝子が対として存在するが、その対となる遺伝子が対立遺伝子 (allele) である。そして、対立遺伝子のどちらか一方の遺伝子に含まれる情報だけが形質に現れ、その現れた形質もしくはその遺伝子を優性 (dominant)、現れなかった形質もしくはその遺伝子を劣性 (recessive) と呼ぶ。

ここで話を戻して、遺伝子間の相互作用について説明しよう。優性の効果とは、同じ遺伝子座における対立遺伝子間の相互作用による効果である。どの遺伝子が表現型として現れるのかは、同じ遺伝子座における対立遺伝子との関係によって決まる。一方、エピスタシスは、ある遺伝子が別の遺伝子座に存在する遺伝子の発現に影響を与えることである。優性の効果が同じ遺伝子座における遺伝子間の相互作用であるのに対し、エピスタシスは異なる遺伝子座における遺伝子間の相互作用である。また、多面発現は一つの遺伝子が二つ以上の形質の発現に関与することである。フィッシャーは、上述したように、表現型の分散の要因を遺伝子、遺伝子間の相互作用、環境の三つに分解した。そして、遺伝子間の相互作用と環境の効果は、どちらも集団のサイズが大きければいつも同じ分布となるため、表現型の分散にはほとんど影響を及ぼさないと考え、どちらの効果も無視できると論じた。そのことから、表現型のばらつきの変化、すなわち自然選択による効果が、遺伝子の分散を使って表されることを数学的に示したのである。この成果をフィッシャーは「自然選択の基本定理 (fundamental theorem of natural selection)」と呼び、1930年出版の『自然選択の遺伝的理論』でその導出を示した (Fisher 1930)。自然選択の基本定理については後で説明する。

ライトは少し遅れて進化の数理的研究を発展させた。ライトが博士号を取得した研究は、テンジクネズミの毛色に関する近親交配 (inbreeding) の実験に関するものであった。近親者の間で何世代も交配を続けると集団内の遺伝子は均質になるので、遺伝子が表現型のばらつきを生じさせる効果が弱まり、遺伝子間の相互作用の効果が現れてくる。その効果を分析することで、ライトは遺伝子よりも遺伝子間の相互作用が表現型に影響を及ぼすことを確信した。さらに、ライトは家畜の近親交配の研究もおこなった。その結果、小さな群れのなかでの交配ははじめに近親者間でおこなわれ、それによって生じる変異は大集団において任意交配で生じるものより大きくなることを発見した。また、小さな群れのなかで交配を繰り返した後に群れ同士を比べると、異なる群れの間では遺伝的に非常に異なることもわかった。ライトはこのことから、自然界において自然選択は小さな集団に最も効果的に作用すると固く信じるようになる。こうした成果と確信をもとに、ライトは「平衡遷移説 (shifting balance theory)」を提案する (Wright 1931)。平衡遷移説によると、進化は三つの段階を経ていく。第一段階では、大きな集団がいくつかの小集団にわかれ、それぞれの小集団は遺伝的浮動によって適応度が減少する。第二段階では、各小集団において自然選択が働き、有利な遺伝子の相互作用システムが増える。第三段階では、複数の小集団の間で自然選択が働き、適応度の高い小集団は個体数を増やしていく。しかも、適応度の高い集団内の個体が近接する集団に移住し、その集団内の個体と交配することで、大集団は全体として適応度を上げるのである (Crow 2007; Provine 1986)。

ホールデンは、フィッシャーやライトよりも関心が広く、主著『進化の諸原因』のなかでは集団遺伝学を発展させるだけでなく、細胞学などの他の生物学の分野を集団遺伝学と総合させるよう努めた (Haldane 1932)。また、自然選択の数理モデルを最初に考案したのは

ホールデンであり、これは集団遺伝学に関する彼の大きな業績である (Haldane 1924-32)。彼はすべての遺伝子が優性であり、遺伝子の対は完全に分離するという単純なメンデル集団を仮定し、漸化式を用いてある世代の遺伝子頻度を前の世代の遺伝子頻度から導出した。そして、理論的成果をオオシモフリエダシヤクという工業暗化で有名なガに関する実験結果に適用し、自然選択が進化に重要であることを確信した。ホールデンはフィッシャーよりも、単一の遺伝子が自然選択において重要であることを強調する。さらに、ホールデンはフィッシャーと同じく、自然界における現実の生物集団は大集団であると考えた。『進化の諸原因』には自身の成果と合わせてフィッシャーやライトの集団遺伝学の大半のモデルが掲載されており、当時の生物学者の間で教科書として広く使用された。この著作により集団遺伝学が確立することになる (Sarkar 2004; Sarkar 2007)。

ゴルトンにはじまる進化の数学的研究は、フィッシャー、ライト、ホールデンによって集団遺伝学として結実した。そのとき、二つのアプローチが同時に展開されることになる (Svirezhev and Passekov 1990)。一つは「決定論的アプローチ (deterministic approach)」と呼ばれるもので、主にホールデンとフィッシャーによって展開された。このアプローチは集団内の個体数が非常に多いことが仮定されている。ある集団における遺伝子頻度が世代間で一意的に変化するという意味で、このアプローチは決定論的と呼ばれている。この決定論は、次節で述べる哲学や物理学で取り上げられる決定論とは関係ないことに注意が必要である。後述するが、物理学では物体の運動を確率といった不確定的な要素を一切用いずに表現できれば、その運動は決定論的であるとされる。たとえば、ニュートン力学で表されるある系の状態が決定論的であるというのは、ある時刻における物体の状態が、別の時刻の状態とニュートンの諸法則から確率を用いずに一意的に計算できることを意味する。それに対し、集団遺伝学の決定論的モデルと呼ばれるものは、以下で説明するように確率概念が用いられている。

二つ目は、ライトとフィッシャーによって考案された「確率過程アプローチ (stochastic approach)」である。このアプローチでは集団のサイズが小さいことが仮定されており、マルコフ過程と呼ばれる確率過程を使って集団の変化が表現される。マルコフ過程とは、ある時刻の出来事が過去のある一時刻の状態にのみ依存し、それより前の時刻の状態には影響されないような場合の過程である。遺伝子頻度の世代間での変化が、決定論的アプローチでは一意的であったのに対し、確率過程アプローチは確率的に表現される。

決定論的アプローチの基本的なモデルは、自然選択についてのものである。上述したフィッシャーの自然選択の基本定理は、進化の主要なモデルである。自然選択の基本定理によると、生物集団に自然選択が働いたときの集団の平均適応度 $\bar{w}$ の時間的变化は、

$$\frac{d\bar{w}}{dt} = \sum_k p_k (w_k - \bar{w})^2 \quad (1.1)$$

という方程式で表される。ただし、集団における遺伝子  $k$  の頻度を  $p_k$ 、適応度を  $w_k$  とする。この式は、平均適応度の変化が遺伝子頻度  $p_k$  の分散と等しいことを示している。つまり、生物集団が多様なほど、その集団の平均適応度は増加するのである。式 1.1 の右辺をみると、自然選択モデルには確率  $p_k$  が用いられており、適応度の変化が確率を使って表現されている。決定論的アプローチでは、突然変異や移住、さらには任意交配でない場合などにもモデルを拡張することができる。ただし、集団内の個体数が非常に多いことを仮定しているので、遺伝的浮動による遺伝子の頻度変化を表すことはできない。

そこで、ライトとフィッシャーは遺伝的浮動による遺伝子頻度の変化を表すため、確率過程にもとづく別のアプローチを考案する。確率過程アプローチでは、集団内の個体数が有限であることが仮定されている。ここでは、二倍体の生物について考えることにしよう。ライトとフィッシャーの遺伝的浮動モデルでは説明を簡単にするため、世代間で集団の大きさが  $N$  で一定であることが仮定されている。集団内の各個体は二倍体なので、各世代の集団は  $2N$  個の配偶子から構成される。一世代の間に非常に多くの配偶子がつくられるが、そのなかで次世代に寄与するのは  $2N$  個だけであり、繁殖時に  $2N$  個の配偶子が抽出されることになる。また、ある特定の遺伝子座に注目し、そこには遺伝子  $A$  か  $a$  のいずれかがあるとする。さらに、遺伝子  $A$  と  $a$  の適応度に差がないことも仮定されている。これらの仮定を満たすと、ある世代  $t$  に遺伝子  $A$  が  $i$  個で、その頻度が  $p$  であるならば、次世代  $t+1$  に遺伝子  $A$  が  $j$  個存在する確率  $p(i, j)$  は、

$$p(i, j) = \binom{2N}{j} p^j (1-p)^{2N-j} \quad (1.2)$$

という方程式で表すことができる。これは遺伝的浮動の基本的なモデルであり、「ライト-フィッシャーの遺伝的浮動モデル」と呼ばれる。

ライト-フィッシャーの遺伝的浮動モデルでは、式 1.2 の左辺に確率  $p(i, j)$  が用いられている。これは確率論では推移確率 (transition probability) と呼ばれるものであり、先の決定論的アプローチには登場しない。決定論的アプローチと確率過程アプローチはこの点が異なる。決定論的アプローチでは上述したように、次世代の遺伝子頻度が一意に決まる。それに対し、確率過程アプローチでは次世代の遺伝子頻度は確率的に求められる。

ある世代  $t$  のとき、 $2N$  個の配偶子のうち特定の遺伝子座に遺伝子  $A$  があるのは  $i$  個だとすると、世代  $t+1$  のときに集団内に遺伝子  $A$  は  $0$  個から  $2N$  個存在する可能性があり、この  $2N+1$  通りの各可能性を推移確率として表現する。また、確率過程アプローチでは世代  $t$  における遺伝子  $A$  の個数の可能性も  $0$  個から  $2N$  個までの  $2N+1$  通りあるので、集団サイズが  $N$  の場合、推移確率は全部で  $(2N+1)^2$  個必要となる。そのゆえ、集団サイズが大きくなると計算量は指数関数的に増加し、実際には確率過程アプローチは採用されない。このアプローチの適用は集団のサイズが小さい場合に限られるのである。

自然選択と遺伝的浮動の数理モデルを紹介したが、どちらにも確率概念が用いられている。ここでは説明していないが、他の進化要因を数学的に表現するときにも、突然変異率や移住率というように確率概念が用いられる。確率概念は進化論の数学化には不可欠である。では、進化論における確率概念は何を表しているのだろうか。この問題を考える前に、次節では、確率概念がなぜ哲学で問題とされるのかについて説明する。

## 1. 2 確率概念と世界観

確率は進化論に限らず、物理学や心理学、社会科学の諸分野など、さまざまな分野で利用されている。確率を使って研究することはいまや一般的である。また、確率を使用するのは専門家だけではない。確率の簡単な計算方法であれば小学生の頃から教えられるので、だれしも確率を足したり掛けたりした経験があるはずである。「コインを二回投げて、二回とも同じ面が出る確率はいくつですか」、「サイコロを振って、1か6の目が出る確率はいくつですか」といった類の問題を解いたことがあるだろう。このような確率計算が可能であるのは、確率論の数学的な基礎がしっかりと打ち立てられているからである。

一方、確率概念は何を表しているのかということを探ると、どのように答えるだろうか。たとえば、気象予報士が「東京の明日の降水確率は 20%です」といったとき、この言明に登場する「確率」は何を意味するのだろうか。明日は一日の 20%にあたる 4.8 時間、雨が降ることだろうか。東京の 20%の地域に雨が降ることだろうか。それとも、気象予報士の勘を数値で表したものだろうか。あるいは、別の事柄を意味しているのかもしれない。ここで問題にしているのは、気象予報士が実際にどのような計算をおこなったかではなく、確率概念の意味についてである。気象予報士は現在の気圧配置や過去の記録などを考慮して確率を計算しているわけだが、そのことと「降水確率 20%」の意味とは別の問題である。確率の計算ができたとしても、確率概念の意味について尋ねられると、答えに困ってしまう。日常でよく利用している天気予報でさえ、確率概念の意味を正確に理解するのは難しいのである。そこで、1. 2. 1 項では確率概念の代表的な解釈を紹介する。確率概念には複数の解釈の仕方があることがわかるだろう。

1. 2. 2 項では、物理学の理論と確率概念の関係について手短かに解説する。近代以降、人々は物理理論を通じてこの世界がどうなっているのかを理解しようとしてきた。ニュートン力学には確率概念が用いられず、世界が決定論的であることを表していると解釈される。その一方で、サイコロ振りや賭け事など、確率はさまざまな場面で用いられている。哲学者や物理学者の間では、決定論的な世界観のもとで確率概念をどう解釈すればよいのかについて多くの議論が交わされてきた。また、20 世紀になると、原子やそれよりも小さな物体の運動が確率概念を用いて表されるようになる。量子力学の誕生である。量子力学

を用いれば、確率的ではあるが未来についての予測ができる。だが、量子力学における確率が何を意味しているのかという問いに対しては、確率の計算をいくら正確におこなったとしても答えが得られるわけではない。この問いを解決するには哲学的な議論が必要となる。この節では、確率概念の解釈の問題が世界観の形成や科学理論の理解に関係することを示す。

## 1. 2. 1 確率概念の解釈

確率の研究は1654年のブлез・パスカルとピエール・ド・フェルマーの往復書簡によって始まったとされる。この往復書簡では、パスカルが友人のシュヴァリエ・ド・メレから受けた賭博に関する問題について議論されている。メレの質問は、賭けを中断したときの賞金の配当に関するものであった。パスカルの解法では、賭けをするときの勝ち負けの「運」が確率によって表されている。また、パスカルは1670年に死後出版された『パンセ』のなかで、神の存在を信じることを擁護するために意思決定理論的な論証をおこなっている。そのときパスカルは、人々が神の存在を「信じる度合い」を確率で表した。

実は、確率の基礎となる考えを思いついたのはパスカルだけではない。1657年にはオランダの物理学者のクリスチャン・ホイヘンスが確率論の最初の教科書を執筆した。1662年にはフランスでポール・ロワイヤル『論理学』が出版され、その末尾に神の存在を信じることを擁護するパスカルの論証が掲載されている。ちなみに、「プロバビリティー (probability)」という言葉が数として表現されたのはこの著作が最初である。同じ時期には、ドイツの哲学者ゴットフリート・ライプニッツが法律の問題に確率を適用しようとしていた。1660年代後半になると、オランダでジョン・ヒュッデとヤン・デ・ウィットが生命保険の計算に確率を利用した。また、1662年にはイギリスの商人ジョン・グラントが死亡者の記録から死亡率についての統計表を作成している。確率の基礎となる考えは、1660年前後にヨーロッパ各地の多くの人たちによって独立に考案されたのである (Hacking 2006)。

確率論の研究は1650年代から1700年代にかけて飛躍的に進展した。初期の確率論研究で決定的な革新をもたらした人物はジャック・ベルヌーイである。ベルヌーイは確率の極限定理を最初に証明した。その成果は、死後の1713年に出版された『推測法』のなかで示されている。ベルヌーイが証明したのは、現在では「大数の法則」と呼ばれている<sup>6</sup>。コイン投げを例に大数の法則を説明しよう。コインを投げる回数を $n$ 、表の出る回数を $r$ とする。大数の法則によると、コインを投げて表の出る確率は、任意の正数 $\varepsilon$ について、

---

<sup>6</sup> 正確にいうと、大数の弱法則である。大数の法則には、大数の強法則もある。大数の強法則は大数の弱法則よりも条件が強い。

$$\lim_{n \rightarrow \infty} p\left(\left|p - \frac{r}{n}\right| > \varepsilon\right) = 0 \quad (1.3)$$

と表される。簡潔に述べると、コインを数限りなく投げたときに表の出る頻度はある値に収束し、その値が確率である。実際に普通のコインを投げてみると、10回投げた程度では表の出る頻度は0.5にならない場合もあるが、コインを投げる回数を100回、1000回と増やしていくと、0.5に近づいていくことが確かめられる。この大数の法則は極限定理の一つである。

確率論には「中心極限定理」というもう一つ重要な極限定理がある。中心極限定理によると、試行回数が多くなれば、二項分布が有名な釣鐘状の正規分布に近づいていく。このことを最初に示したのはアブラーム・ド・モアヴルである。ド・モアヴルは、ベルヌーイの大数の弱法則の証明を洗練させることで、中心極限定理の特殊な場合を証明した。ド・モアヴルはその成果を1733年に知人や学生に配布し、1738年に自著の『偶然論』第二版に掲載した (Fischer 2010)。

その後しばらくして、別の重要な確率論の定理が証明される。「ベイズの定理」である。ベイズの定理はトーマス・ベイズが証明したものであり、ベイズの死後1763年に友人のリチャード・プライスによって公表された (Bayes 1763)。仮説の集合  $H_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) とデータ  $D$  があるとき、ベイズの定理は、

$$p(H_i | D) = \frac{p(D | H_i)p(H_i)}{\sum_i p(D | H_i)p(H_i)} \quad (1.4)$$

で表される。 $p(H_i)$ は事前確率、 $p(H_i | D)$ は事後確率と呼ばれる。また、 $p(D | H_i)$ は条件つき確率であり、 $D$ が与えられたという条件のもとでの $H_i$ の確率を表す。ちなみに、プライスによると、ベイズの目的は哲学者のデイヴィッド・ヒュームの提起した帰納の問題を解決することであった。未来の出来事を予測する際に過去の観察結果にもとづいて帰納的な推論をすることがあるが、ヒュームはこうした帰納的な推論の正当性に疑問を投げかけた (Hume 1739)。それに対し、ベイズの定理は、過去の出来事にもとづいて未来の出来事を帰納的に推論できることを数学的に示すものである。たとえば、「明日太陽が昇る」という未来に関する仮説の確からしさは、それ以前の観察データをベイズの定理に代入すれば求めることができる。

ベルヌーイやド・モアヴル、ベイズたちの成果は、ピエール・ラプラスによって一般化された。ラプラスは1812年に『確率論』を出版し、古典的な確率論が集大成を迎える。ラプラスの著作は当時の確率論の教科書として広まった。

20 世紀に入ると、確率論の数学的基礎づけがおこなわれる。1933 年にアンドレ・コルモゴロフが測度論にもとづいて確率論の公理化をおこなった (Kolmogorov 1933)。測度論とは、面積や体積などの大きさに関する概念の数学的な性質や法則を究明する数学の一分野である。コルモゴロフは測度論が確率論の基礎づけに使えることを見抜き、確率の測度、すなわち「ものさし」を次のように定義した。確率測度  $P(\cdot)$  とは、任意の命題  $A$  と  $B$  に対し、

$$0 \leq P(A) \leq 1$$

$A$  が必然的に真であるなら、 $P(A) = 1$

$A$  と  $B$  が両立不可能 (排反的) であるなら、 $P(A \text{ または } B) = P(A) + P(B)$

を満たすものである。ここでは命題を使って定義したが、出来事についても同様に定義できる。この三つの条件は確率であれば必ず満たさなければならないもので、「確率論の公理」とされている。サイコロ振りを例に考えてみると、「1 の目が出る」、「2 の目が出る」、 $\dots$ 、「6 の目が出る」という各命題に対して  $1/6$  の確率測度が与えられる。また、サイコロを投げると必ず 1 から 6 までのいずれかの目が出るので、 $P(1 \text{ の目が出るか、または } 2 \text{ の目が出るか、}\dots\text{、または } 6 \text{ の目が出る}) = 1$  である。さらに、同時に 1 の目と 3 の目が出ることはないので、 $P(1 \text{ の目が出るか、または } 3 \text{ の目が出る}) = P(1 \text{ の目が出る}) + P(3 \text{ の目が出る})$  となる。サイコロの出る目に関するこれらの命題はコルモゴロフの公理を満たしている。確率論はコルモゴロフが公理化したことで数学的に基礎づけられ、またその適用範囲も広がった。いまや確率は非常に多くの場面で使用されている。賭け事や降水確率、物理学など枚挙にいとまがない。確率概念は現代の知識を特徴づける上で欠かすことができない。確率的な知識の科学への積極的な活用は、「確率革命 (probabilistic revolution)」として科学革命の一つとされるほどである (Krüger *et al.* 1987)。

その一方で、哲学的な観点からすると、確率という概念は厄介な代物である。というのも、確率という言葉は多義的であり、確率が何を意味するかは文脈ごとに検討しなければならないからである。喫煙者が肺ガンになる確率と、競馬である特定の馬が一着になる確率は、同じことを意味するのだろうか。「明日の降水確率は 20% である」と「ある位置に電子が存在する確率が 20% である」という言明に登場する確率はどうか。これらの言明で使われる確率はどれも確率論の公理を満たしている。だが、そのことによってこの確率の意味が明らかになるわけではない。確率論の公理は確率の意味には言及せずに、確率が満たすべき数学的な条件を示している。それに対し、確率概念はさまざまな解釈が可能であり、文脈ごとに意味を特定する必要がある。そこで以下では、確率概念の主要な解釈のいくつかを紹介することにしよう (ソーバー 2009)。

一つ目の解釈は、確率を「実際の頻度」として解釈するものである。あるコインを 100 回投げるとしよう。各コイン投げでは、コインは表か裏のどちらかが出る。コインの表が

出るといふ命題を  $H$  とすると、確率  $P(H)$  は 100 回投げたうちで実際に表が出る頻度として解釈することができる。この解釈は、コルモゴロフの確率論の公理を満たしている。つまり、 $P(H)$  は 0 から 1 までの間の実数であり、 $P(H \text{ または } H \text{ でない}) = P(H) + P(H \text{ でない}) = 1$  である。実際の頻度による確率解釈は客観的な解釈である。すなわち、この解釈では諸事象の集まりのなかである事象が実際に何回生じるかによって確率を解釈するのである。

また、主観的解釈という別の確率解釈が存在する。競馬で一着になる馬を予想するとき、「次のレースである特定の馬が一着になる」といふ命題に対し、私たちはどれだけの確信や信頼を持つのかについて語るることができる。主観的な解釈では、確率概念を私たちの「信念の度合い (degree of belief)」として解釈する。コイン投げについてもこの解釈をあてはめることができる。「コインを投げて表が出る」といふ命題を  $H$  とする。この命題に対して私たちが持つべき信念の度合いは、0 から 1 までの間の実数でなければならない。私たちは、コインを投げると表が出るかあるいは出ないかのどちらかであるということを確認している。つまり、 $P(H \text{ または } H \text{ でない}) = P(H) + P(H \text{ でない}) = 1$  である。また、1 回のコイン投げで表と裏の両方が同時に出ることに付与する信念の度合いは 0 にするのが当然である。このように、信念の度合いは確率論の公理を満たすように解釈することができる。

多くの哲学者は、自然科学では、実際の頻度による解釈と信念の度合いによる主観的解釈のどちらによっても捉えられない確率概念が用いられると考えている。公平なコインが奇数回投げられたときや一回も投げられていないときでさえ、「コインの表の出る確率は 0.5 である」と語ることがある。それゆえ、実際の頻度としてこの確率を解釈することはできない。もしこの言明がコイン投げのシステムの客観的な性質を表しているのであれば、そこで語られているのは信念の度合いについてではない。それでは、こうした確率言明は何を意味しているのだろうか。

その候補の一つは、「仮説的な相対頻度解釈 (hypothetical relative frequency interpretation)」と呼ばれるものである。この解釈によると、ある事象の確率とは仮説的な相対頻度のことである。公平なコインが有限回数投げられるとしても、表と裏が正確に同じ回数ずつ出るとは限らない。ところが、そのコインを何度も繰り返し投げ続けて、投げる回数を限りなく増やしていくとどうだろうか。上述の大数の法則を思い出すと、この場合、表の出る頻度は 0.5 に収束するだろう。この確率は実際の頻度と同じである必要はないが、それでも、もし仮に試行回数を限りなく増やしていくなら、頻度が確率 0.5 に収束するということがいえるのである。

また、その他の確率解釈の候補として人気の高いのが、「傾向性解釈 (propensity interpretation)」である。傾向性とは確率的な性向 (disposition) のことである。たとえば、水溶性は性向である。水溶性は次のように定義できる。ある物質  $X$  に水溶性があるのは、 $X$  が通常の条件のもとで水に浸されるならば、その  $X$  は水に溶ける場合であり、その場合に限られる。この定義によると、ある特定の「～ならば、…」という言明が物質  $X$  にあてはまればよく、水溶性の物質が実際に一度も水に浸されない場合でも成り立つ。スーパーに

陳列されている砂糖は実際に水に浸さないかもしれないが、水溶性という性質を持っている。また、この定義の「通常の場合」というのは、砂糖がロウで覆われていることや水温が低いといった可能性を排除している。さらに、この定義は決定論的な表現になっている。この定義は単に、水溶性の物質は正しい仕方で水に浸されるとおそらく溶解するだろうと知っているのではなく、それは浸すと必ず溶けると知っているのである。確率の傾向性解釈は、確率的な「～ならば、…」という言明を性向の場合と同じように説明する。「コインを投げるならば、表の出る確率は 0.5 である」という言明が真であるなら、その理由は何だろうか。思いつくのは、確率的な「～ならば、…」という言明が真であるのは、対象が傾向性と呼ばれる特殊な性向的性質を持つからという理由である。砂糖が水に浸されたときに溶けるのなら、砂糖には水溶性という性向的性質がある。同様に、コインを投げたときに表が確率 0.5 で出るなら、コインには、投げられるときに表が出るような特定の傾向性がある。このように、傾向性解釈では確率を対象の持つ客観的な性質とみなすのである。

ここで紹介した解釈は確率解釈のごく一部であるが、確率概念には複数の解釈が存在することがわかるだろう。確率は数学的には公理化され、さまざまな分野で利用されている。だが、確率概念が何を表しているのか、どういう意味なのかという解釈の問題になると、数学のように計算をして答えが出るような問題ではなくなる。確率概念の意味を理解し、より明晰な別の概念に置換えるためには、哲学的な議論が必要となる。進化論における確率概念も同様であり、進化論の描く世界観を理解するためには、確率概念が何を表しているのかを明らかにする必要があるのである。

## 1. 2. 2 確率概念と物理世界

進化論の描く世界をみるまえに、私たちの日常的な世界がどのようなものかについて確認しておこう。リンゴは熟すと木から落ちる。そのときリンゴはどのような軌道を描くのだろうか。横方向に回転しながら動いたり、空高く飛んで行ったりするかもしれない。また、右方向に 0.7、左方向に 0.3 の確率で動くということも考えられる。もちろん他の軌道を描くことも考えられ、論理的には無限の可能性がある。ところが実際には、その無限の可能性のなかのただ一つの軌道しか描かない。しかも、物理学のある法則を用いれば、その唯一の軌道を記述することができる。その法則がニュートンの法則である。

ニュートンの法則とは、物体の運動についての三つの法則のことである。これは、アイザック・ニュートンが 1687 年に『自然哲学の数学的的原理』のなかで提示したものである (Newton 1687)。地上のみならず天体をも含むあらゆる物体がこの法則にしたがっている。とりわけ、第二法則は実際の計算によく用いられるもので、次のように表される。

物体に力が作用すると、その力の方向に加速度が生じ、その加速度の大きさは力の大きさに比例して対象の質量に反比例する。

これは「運動の法則」とも呼ばれる。この法則を用いれば、力を受けたどんな物体の運動も記述することができる。ちなみに、第一法則は、物体は外部から力が働かない限り、静止したままか等速度運動を続けるというもので、「慣性の法則」と呼ばれる。第三法則は、二つの物体が互いに及ぼし合う力は、大きさが同じで向きが反対であるというもので、「作用・反作用の法則」とも呼ばれる。ニュートン力学はこれらの法則から成り立っている。

ニュートン力学は、地上のみならず天体をも含むすべての物体の運動を表すだけでなく、当時よくわかっていなかった現象を解明した。地球や他の惑星が自転するために自転軸方向が赤道方向よりも少しつぶれていることを示し、月と太陽の引力によって潮の干満が生じることを説明した。さらに、エドモンド・ハレーはニュートンの運動法則を用いて未来の彗星の軌道を計算し、わずかな誤差の範囲内で予測に成功した。こうしたことにより、ニュートン力学は自然科学において不動の地位を占めるようになる。

ニュートン力学は科学だけでなく哲学にも大きな影響を与えた。ニュートン力学の哲学への影響は多岐にわたるが、ここではニュートン力学の描く世界観に注目したい。ニュートン力学はどのような世界観を表すのだろうか。それには、上の第二法則が関係している。この法則は次の微分方程式で表される。

$$F = m \frac{d^2x}{dt^2} \tag{1.3}$$

ここで、 $F$  は力、 $m$  は質量、 $t$  は時間、 $x$  は位置ベクトルを表す。また、右辺の  $d^2x/dt^2$  は位置  $x$  を時間  $t$  について二階微分したもので、加速度を表す。この方程式を解くには式 1.3 の両辺を二回積分し、未知の積分定数を求める必要がある。積分定数は、ある任意の時刻における位置と速度がわかれば求めることができる。このように、どんな物体の運動でも計算によって、任意の時刻における状態を導出することができる。この微分方程式の答えは、パソコンを使ってシミュレーションをしたり近似を使ったりしなくても、手順を踏んで計算すれば得ることができる。すなわち、解析的に答えが求められる。しかも、その解は一つだけ存在するのである。

天文学者で数学者のピエール・ラプラスは、こうした特徴をもとにニュートン力学の描く世界観を明示した。彼は 1814 年に『確率の哲学的試論』を出版し、そのなかで次のように述べている<sup>7</sup>。

<sup>7</sup> ラプラスは 1812 年に『確率論』(Laplace 1812) を出版したが、この著作は数学的に難解であった。『確率の哲学的試論』は、その内容を一般向けにかみ砕いて書いたものである。『確率論』は二篇にわかかれていて、第二編の冒頭にニュートン力学的な世界が描かれている。

われわれは、宇宙の現在の状態はそれに先立つ状態の結果であり、それ以後の状態の原因であると考えなければならない。ある知性が、与えられた時点において、自然を動かしているすべての力と自然を構成しているすべての存在物の各々の状況を知っていると、さらにこれらの与えられた情報を分析する能力を持っているとしたならば、この知性は、同一の方程式のもとに宇宙のなかの最も大きな物体の運動も、また最も軽い原子の運動をも包摂せしめるであろう。この知性にとって不確かなものは何一つないであろうし、その目には未来も過去と同様に現存することであろう（ラプラス 1997, p.10）。

この引用文にある「同一の方程式」とはニュートンの法則のことである。また、「知性」とは、ラプラスが想定した架空の存在者であり、いまではラプラスの名をとって「ラプラスの魔物」と呼ばれている。ラプラスはこの魔物に二つの人間離れした能力を与えた。一つは、ある時刻における物体の状態を正確に知ることができるという能力で、もう一つは、瞬時に完ぺきな計算ができる能力である。つまり、魔物は「全知」であり「全能」でもある。ラプラスはこの二つの能力とニュートンの法則の特徴を合わせることで、決定論的な世界観を巧みに表現した。ラプラスの魔物は全知ゆえに、任意の時刻における物体の状態を正確に知ることができる。また、魔物は全能ゆえに、完全な情報にもとづき、物体のあらゆる時刻における状態を瞬時に計算することができる。したがって、「この知性にとって不確かなものは何一つない」のである。すなわち、過去も未来もただ一つの状態に決まっているのである。ラプラスの述べた決定論は次のように定式化することができる。

ある時刻における状態についてのすべての情報が与えられると、ニュートンの法則によってあらゆる時刻における状態を一意的に計算できる。

これはニュートン力学的な世界観を表している。

ところで、世界が決定論的だとすると、「確率」といった偶然的な要素はどのように理解すればよいのだろうか。確率は私たちの日常的な生活に溢れている。サイコロを投げて1の目が出る確率、降水確率、宝くじの当選確率など、枚挙にいとまがない。もしラプラスのいうように世界が決定論的だとすると、こうした確率は何を表していることになるのだろうか。

ラプラスは確率概念を私たちの無知として解釈する。ラプラスによると、完全な知識を備えた知性にとって「不確かなものは何一つない」のに対し、「確率は一部はこの無知に相対的であり、一部は我々の知識に相対的である」（*ibid.*, pp.12-13）。つまり、確率概念は私たち人間の無知の表明として解釈される。これは、確率の「無知解釈（ignorance interpretation）」と呼ばれる主観的解釈の一つである。この解釈によると、確率というのは実際の現象ではなく、人間の知識の不十分さを表す概念とされる。偶然的な要素は現象の

側にはなく、私たちの認識の側にある。決定論的な世界観のもとでは、説明や予測に確率概念を用いることは無知の表明を意味しているのである。

このように、ニュートン力学の描く世界観というのは決定論であり、その世界観のもとでは確率概念は私たちの知識の不十分さを表しているものとして解釈される。この世界観は21世紀の現代においても、私たちの日常だけではなく、科学にも大きな影響を及ぼし続けている。

実のところ、この決定論という言葉は古くからあったわけではない。『西洋思想大事典』によると、「**determinism** (決定論) という英語は、これに相当するフランスやドイツ、イタリアの言葉と同様に、17世紀および18世紀につくられたものである」(ウィーナー編1973, p.733)。決定論という言葉は近代になってからつくられた。また、ラプラス自身は決定論という言葉を使っておらず、自然法則にもとづく決定論という考えが広まったのはラプラスの著作が出版された1810年代ではない。それは、ラプラスの死後しばらく経った1860年代になってからである(Hacking 1990, p.691)。そしていまでは、常識的な世界観とみなされるようにまでなった。

こうした決定論的世界観は、量子力学の誕生により大きく揺らぐことになる。量子力学は、原子やそれよりも小さなスケールにおける現象を記述するものである。量子力学の標準的な解釈である「コペンハーゲン解釈 (Copenhagen interpretation)」によると、量子力学は現象が非決定論的であることを表している。コペンハーゲン解釈は、物理学界の重鎮ニールス・ボーアを筆頭に多くの人々が採用した解釈である。ボーアの研究所がデンマークの首都コペンハーゲンにあり、その研究所で教え子のヴェルナー・ハイゼンベルクやボーアの仲間たちが集まってこの解釈を展開させたことから、コペンハーゲンの名前がつけられている。この解釈によると、たとえば1個の電子を壁に向けて発射させ、その電子が壁のどの位置にあたるのかを予測するとしよう。量子力学では、電子が壁のどの位置にあたるのかを一意的に計算することができない。できるのは確率的な予測だけである。どんなに知識があっても、発射される電子やその周囲の環境について確率的に表現することは変わらない。コペンハーゲン解釈では、量子力学の確率概念を私たち人間の無知ではなく、世界のありのままの姿として解釈し、原子やそれよりも小さなスケールの微視的な世界は非決定論的であるとするのである。

コペンハーゲン解釈はだれもが受け入れているかというと、そうではない。量子力学における確率概念の解釈をめぐる論争は現在も続いており、決着はついていない。たとえば、あの有名なアルベルト・アインシュタインは、コペンハーゲン解釈とは異なる解釈を提唱した。アインシュタインは現象が決定論的であるという強い信念を抱いており、確率的な量子力学の理論は不完全であると主張した。また、測定をおこなうたびに世界が分岐する

という多世界解釈や心理状態を持ち出す多精神解釈など、確率的な量子力学を解釈するのにさまざまな案が打ち出されている<sup>8</sup>。

いずれにしても、確率や偶然といった概念の解釈が、自然の理解や世界観の形成においていかに重要であるかがわかるだろう。またそのとき、科学理論、とりわけ物理学の理論が大きくかかわっている。ニュートン力学や量子力学における確率解釈の問題からわかることは、確率概念は世界の本質的な部分を表す可能性があるという点である。世界がどのようなものであるかについて知りたいのであれば、確率が何を表すのかを明確にする必要がある。確率概念の解釈は、世界を理解する上で非常に重要な問題なのである。

進化論に立ち戻ろう。1. 1. 3項で、進化の数理モデルには確率概念が用いられていることを示した。それでは、進化論における確率概念は何を表しているのだろうか。これが本稿で解決を試みる問題である。ダーウィンは、確率概念についてではないが、「生存して子孫を残す最善のチャンス」(Darwin 1964, p.91)という表現を用いている。このチャンスはいまでは適応度を使って表現される。ここに確率概念がかかわってくる。では、確率概念は何を表しているのだろうか。それは、世界の非決定性であろうか。あるいは、私たちの知識の不十分さだろうか。ダーウィンはチャンスについて別の箇所で次のように述べている。「私はこれまで、変異がチャンスによるものであるかのように述べることがあった。(・・・)これはもちろん、まったく不正確な表現であるが、個々の変異の原因について私たちが無知であることを率直に認めるには役立つだろう」(ibid. p.131)。ここで、ダーウィンはチャンスを私たちの無知の表明として理解しているようである。この言い回しは、ラプラスが明示した決定論的世界観にもとづく確率解釈とほぼ同じである。ダーウィンは、チャンスを世界に内在する客観的な要素としてではなく、人間の無知を反映した主観的なものとして解釈している。はたして、この解釈は正しいのだろうか。

### 1. 3 本稿の概要

進化論における確率概念が何を表しているのかという問題に対し、これまで大きく二分する解答が提案されてきた。一つは、ニュートン力学に依拠した論証である。それによると、進化現象は決定論的であり、進化論における確率概念は私たち人間の無知を表している。これは先のラプラス的な世界観に類似している。もう一つは、量子力学に依拠した論証である。この陣営は、微視的な量子現象が進化という巨視的な現象にまで影響を及ぼすと考える。そして、量子現象が非決定論的であれば、その影響を受ける進化現象も非決定論的であり、進化論における確率概念はそうした非決定論的な現象をありのまま表してい

---

<sup>8</sup> 量子力学の解釈については、レッドヘッド (1997) やアルバート (1997)、西脇 (2004) を参照のこと。

ると主張する。2章では、ニュートン力学的観点を採用する陣営の議論を紹介し、3章では、量子力学的観点に依拠した議論を紹介する。

4章では、両陣営の論証を批判的に検討する。進化論は集団の変化を表す理論であり、ニュートン力学や量子力学のような基礎的な物理理論とは異なる種類の現象を表すことを論じる。また、進化論に必要な情報を明らかにするため、物理学に関する情報と生物学に関する情報にわけ、それぞれについて考察する。

5章では、科学的説明の本性をめぐる科学哲学の議論を参照しながら、進化論の説明の特徴を明らかにする。ここでは、一つの現象に対して複数の説明が可能であること、また複数の説明の間にトレード・オフがあることを示す。そして、生命現象は多様であるがゆえに、多角的な観点から複数の説明で補完し合うことが必要であることを論じる。物理学の説明は生命の一側面を捉えているが、それだけでは生命の謎は明らかにできないことを示す。また、そこで議論したことを踏まえ、進化論が基礎的な物理理論に還元できないことを論じる。進化論は物理的に詳細な情報があるとしても、すべての情報を用いるのではない。さまざまな情報が入手できたとしても、進化論では敢えて情報を減らすことで説明をおこなっている。進化論の説明には、生物についての完全な情報は必要なく、部分情報で十分であることを示す。

6章では、ニュートン力学や量子力学の観点に依拠した解決策とは異なる、新しい観点からの議論を提示する。それは、情報理論的な観点から進化論をみることである。情報理論は、手持ちの情報を合理的に処理する手法を与えてくれる。進化論による説明が部分情報だけで十分であるならば、情報理論は進化論に有益な道具を提供してくれるはずである。実際、情報理論の手法を用いると、進化論の代表的な数理モデルが導出できる。こうした成果にもとづき、進化論が合理的なモデルであることを示す。

最後に、7章では、本稿でおこなった議論を簡潔にまとめる。進化論では、生物学者の目的や関心に応じて異なる確率モデルが構築される。そのとき、生物学者の手持ちの情報が最大限に活用され、また情報に合わせて合理的に信念更新がおこなわれる。進化論における確率概念は、手持ちの部分情報を最適に処理した結果を反映しており、ベイズ主義的に解釈されることを結論づける。情報理論的な観点は、従来議論で捉えることのできなかつた進化論の重要な特徴を明らかにしてくれるのである。

## 第2章

### ニュートン力学的観点からみた進化論

---

ラプラスによると、世界は決定論的であり、偶然的な要素は世界のなかには存在しない。それゆえ、確率という偶然的な要素は私たちの無知に起因することになる。決定論的世界観は進化論の理解にも影響を及ぼしている。ダーウィンは19世紀の人物で、決定論的世界観を抱いていた (Sober 1984)。ダーウィンは確率概念そのものについて言及してはいないが、1. 2. 2項で述べたように、偶然に訴えて説明することを「私たちの無知」の表明としている。ダーウィンはラプラスと同様のことを述べている。というのもダーウィンは、私たちが無知ではなく完全な知識を備えているならば、偶然に訴える説明などしないと述べているからである。これはまさに、ラプラスが定式化した決定論的世界観である。

ダーウィン以来、進化の数理モデルはいくつも提示され、1930年代には集団遺伝学が確立した。進化を数学的に表現するには確率概念が不可欠であり、それは現在も変わらない。進化論における確率概念は何を表しているのだろうか。ここでも、決定論的な世界観がかかわってくる。決定論というのは捨て難い世界観のようである。生物学の哲学者のアレックス・ローゼンバーグをはじめとする何人かの哲学者は、進化論に確率概念が使用されているにもかかわらず、進化現象は決定論的であると主張する。本章では、ローゼンバーグたちの論証を細かくみることにしよう<sup>9</sup>。

#### 2. 1 ニュートン力学的観点から

ニュートン力学が成功を収め、ラプラスがニュートン力学の表す世界観を明示したことにより、決定論的な世界観は広く浸透していった。いまでも、多くの人たちは決定論的世界観になじんでいる。哲学者のなかにも決定論的な世界観を抱いている人たちがいる。そのような哲学者は、進化論の持つ世界観はニュートン力学の決定論的世界観のなかに含まれているとする。ここでは、彼らがニュートン力学的観点を採用する理由について詳しくみることにする。

---

<sup>9</sup> 本章で紹介する議論は主に、Rosenberg (1994)、Horan (1994)、Graves, Horan, and Rosenberg (1999)に依拠している。この論争は現在も継続中であり、ローゼンバーグを代表とするこの陣営の人たちは当初の考えを多少修正しながら論を戦わせている。上の文献でローゼンバーグたちは、進化論における確率概念の問題についてだけでなく、科学哲学一般の問題も扱っているため、本稿ではそこでの議論を中心に取り上げることとする。

## 2. 1. 1 生物個体

ローゼンバーグは、進化論的な世界観を究明するために、進化論を統計力学と比較する。そしてそのことから、進化論は生物個体を扱う理論であると主張する (Rosenberg 1994)。統計力学は、温度や圧力などに関する巨視的な熱現象を分子や原子に関する微視的な現象と結びつけるための理論である。ローゼンバーグは二つの理論を比較するとき、科学哲学者のキム・ステレルニーとフィリップ・キッチャー (Sterelney and Kitcher 1988) による進化観を批判的に検討する。

ステレルニーとキッチャーも進化論と統計力学の比較をおこない、自らの進化観を提示する。ステレルニーたちは次のように述べる<sup>10</sup>。「人は原理的に集団内の個々の有機体の来歴を物語ることができるだろう。それは、抽出した個々の気体分子の運動を追跡できるのとまさに同じように、それぞれの有機体の発生、繁殖、生殖の仕方を十分詳細に説明することによってである。ところが、進化論は統計力学と同じく、そのように精微な (fine grain) 記述をする必要はない。進化論の目的は、進化する諸集団の歴史における中心的傾向 (central tendencies) を明らかにすることであり、その目的のために、(・・・) 平均をとるという戦略はまったく適切なのである」 (ibid., p.345)。ここでいう「中心的傾向」とは、集団の平均が変化していく傾向のことである。統計力学の場合、気体集団の平均運動エネルギーの変化、生物集団の場合、フィンチ集団の嘴の平均の長さの世代を通じての変化などが中心的傾向にあたる。ステレルニーたちは、進化論と統計力学では説明の目的が同じであると考えている。彼らによると、統計力学では個々の気体粒子の位置やエネルギーについての詳細な情報を捨象することによって温度やエントロピーが説明できるのであり、統計力学の目的は気体粒子の集団の平均的な傾向を解明することである。進化論も同様に、個々の生物個体の性質に関する詳細な情報を捨象することによって生物集団の世代間の変化が説明できるのであり、その目的は生物集団の平均的な傾向を説明することである。それゆえ、統計力学と進化論は集団の変化を扱うという点で共通しており、同様の目的を持った理論であるとする。個々の有機体の変化を精微に記述することは原理的にはできるかもしれないが、進化論ではそのような詳細な記述は求められていないのである。

それに対しローゼンバーグは、ステレルニーたちによる進化論と統計力学の比較はうまくいかないと批判する。ローゼンバーグは統計力学を次のような理論と考えている。「ステレルニーとキッチャーは、熱力学は一個の分子の運動を追跡するのに関連するような精微な記述は不要であると正しく述べている。しかし、〔進化論と統計力学の〕この類比はうまくいかない。それは単に、個々の分子には熱力学的性質が一切ないので熱力学者は個々の分子に関心を寄せることができないのに対し、進化生物学者は認知能力に限りがあると、個々の有機体の運命に関心を抱くはずだからである」 (Rosenberg 1994, p.64)。ロ

<sup>10</sup> ステレルニーとキッチャーの論文の目的は、『利己的な遺伝子』で有名なりチャード・ドーキンスの遺伝子選択主義を再評価することであり、進化論を統計力学と対比することではない。

ローゼンバーグは、統計力学が個々の粒子を扱う理論ではないと考える点ではステレルニーたちに同意している<sup>11</sup>。

だが、進化論が何を扱う理論であるかに関して、ローゼンバーグはステレルニーたちと意見を異にしている。ステレルニーたちは、進化論が統計力学と同じく集団を扱う理論だと考えているのに対し、ローゼンバーグは上の引用文にもあるように、進化論は生物個体に関する理論だと主張する。ローゼンバーグによると、「自然選択は個々の対象一つずつに対して作用する。したがって、自然選択の生み出す効果は足し合わせることができ、そこから集団全体の平均や分散などの統計的性質が構成できる」(ibid., p.64, 強調は原著者)。また、進化論と統計力学を対比させて次のように続ける。「すべての有機体は、適応度という進化論に登場する性質を持っている。(・・・)説明に使う性質——適応度と適応度の違い——は個々の対象(item)に備わる性質であり、それらを集めた集団全体の算術平均の値自体は、説明上個々の値を足し合わせること以上の役割は一切ない。それに対し、エントロピーという熱力学の概念は、ボルツマンの時代から現代まで、構成分子とその集合の力学的性質にそのまま還元されることを拒んできた概念である」(ibid., pp.64-65)。つまり、ローゼンバーグによると、適応度は生物個体の性質であり、進化論でよく用いられる集団の適応度や形質の適応度といった表現は、単に個体の適応度を計算した結果にすぎない。ローゼンバーグにとって、自然選択が作用するのはあくまで生物個体に対してなのである。

ローゼンバーグはその後、議論をさらに展開させる(Bouchard and Rosenberg 2004; Rosenberg and Bouchard 2005; Rosenberg 2006)。ローゼンバーグや彼と同様の考えを持つ人たちは、進化はあくまで個体についての現象であることをくり返し強調する。そこでは再び進化論と統計力学の比較がおこなわれ、両者の相違点が指摘されている。ローゼンバーグたちは統計力学について、「[熱力学]第二法則の創発的な(emergent)特性は、エントロピーがアンサンブル(ensemble)の個々の構成要素の性質ではなく、アンサンブル全体の性質だという事実によって説明される」(Bouchard and Rosenberg 2004, p.702)と述べる。アンサンブルとは、ある範囲内にパラメータの値を含む同種の微視的状态の集合という意味の統計力学の専門用語であるが、ローゼンバーグたちは集団という程度の意味で使っている。アンサンブルについては、5.2.2項で詳しく説明する。また、創発的な性質とは、それよりも基本的な性質から生じるが、その基本的な性質には還元できないような性質のことである。たとえば、意識は脳の創発的な性質であるといわれることがある。意識は脳の物理的な性質から生じるとされるが、そのような物理的性質には還元できないものである。ローゼンバーグたちは、エントロピーもこのような創発的な性質であるとする。彼らは、物理学の哲学者のデイヴィッド・アルバート(Albert 2000)の考えに依拠して、エントロピーが創発的な性質であることを説明する。ある容器のなかに多数の粒子が入っているとすると、ここで、それらの粒子の配置(arrangement)と分布(distribution)は異なるこ

<sup>11</sup> 統計力学が何を扱う理論であるかについて議論の余地はあるが(Guttman 1999)、ローゼンバーグとステレルニーたちの考えに相違がないため、ここでは統計力学は粒子集団を扱う理論と考えることとする。

とに注意しよう。配置とは、各粒子がその容器のなかのどの位置にどの物理量で存在するかを特定したもので、分布とは、容器の空間的な各領域や運動量領域にどの割合で粒子が存在しているかを表したものである。つまり、一つの分布は一つ以上の配置に対応することになる。アルバートによると、系のエントロピーは粒子の分布に依存する。エントロピーは粒子の配置や分布によって説明されるが、これらは位置や運動量という個々の粒子の性質に還元できない。そのことから、ローゼンバーグたちはエントロピーを集団レベルの創発的な性質とするのである。

他方、適応度についてローゼンバーグたちは、「ひとたびエントロピーと適応度の違いを理解すると、自然選択の理論をアンサンブルに関してだけの主張とみなしたいという衝動は消え失せる」(Bouchard and Rosenberg 2004, p.702)と述べる。彼らによると、適応度は単に個体の性質を足し合わせただけであり、個体の性質から生じる創発的な性質ではない。集団の適応度は、その集団を構成する個体の適応度の平均にすぎない。したがって、適応度は個体に還元できる性質であり、エントロピーのような集団レベルの創発的な性質とは異なる。「アンサンブルの適応度は、アンサンブルのエントロピーと少しも似ていない。それは単に、適応度はエントロピーと異なり、アンサンブルの構成要素の性質を計算した値だからである」(ibid., p.704, 強調は原著者)。

このように、ローゼンバーグたちは適応度を個体の性質に還元できるものと考え、進化は個々の生物個体に作用する現象であると主張するのである。

## 2. 1. 2 ニュートン力学的観点に依拠する理由

ローゼンバーグたちは、進化を生物個体についての現象とみなしている。生物個体は直接目でみることのできる巨視的な物体である。巨視的な物体がニュートン力学にしたがうことは、ローゼンバーグたちがニュートン力学的観点を採用する大きな理由となっている。それについてもう少し詳しくみてみよう。

1. 2. 2項で述べたように、17世紀以降、ニュートン力学は自然科学において不動の地位を占め、確固たる物理学の基礎理論とみなされるようになった。ところが、20世紀に量子力学が登場したことにより、その状況は大きく変わる。量子力学は肉眼で直接みることのできない小さな対象を扱う理論である。微視的な対象を扱う量子力学は、ニュートン力学とは異なる世界観を表すとされている。その理由は、量子力学に確率概念が用いられていることにある。量子力学の伝統的な解釈にしたがうと、微視的な世界は非決定論的である。微視的な量子現象は進化現象に影響を及ぼさないのだろうか。

ローゼンバーグは、進化現象が決定論的かどうかを論じるとき、非決定論的な量子現象が進化現象に影響を及ぼすことがあると述べる(Rosenberg 1988)。「世界は確かに、その基本法則によると非決定論的である。そして、微視的物理学の基礎的過程は、その微視的

な非決定性が巨視的世界に伝わる仕方（たとえば、ガイガー・カウンター）で巨視的過程にまでつながっている（hook up）。よって、組織化して一つにまとまったどんなレベルの現象も量子力学的な非決定性の『影響を受ける』。量子力学の非決定性が意味をなすと思われる唯一の確率〔解釈〕によると、確率とはある出来事が別の出来事を生じさせる傾向性もしくは性向のことであり、その傾向性はそれ以上細かく分析できない性質である。したがって、いくつかの進化的出来事には、進化的に重要な帰結をもたらすような確率的な傾向性が含まれるはずである。その理由は、そうした進化的出来事が量子的な出来事から作り出されているか、あるいは量子的出来事とつながっているからというだけである」（*ibid.*, p.189-190）。

ローゼンバーグはその後、進化現象に影響を及ぼしうる微視的現象として点突然変異（point mutation）の事例を挙げている（Rosenberg 1994）。点突然変異とは、DNA の一塩基が変化する現象である。DNA 塩基の化学変化は量子力学によって記述することができ、量子力学の伝統的な解釈にしたがうと、そのような現象は非決定論的である。ローゼンバーグは次のように述べる。「遺伝物質の点突然変異はよく知られているように、確率的な量子相関の結果である。したがって、突然変異によって生じる少なくともいくつかの進化現象は、物理学と同じ理由で確率的であるだろう」（*ibid.*, p.60）。また、科学哲学者のバーバラ・ホーランも同じようなことを述べている。「突然変異はおそらく、進化的な力が完全に決定論的であるという主張の例外になるだろう。いくつかの突然変異は真正な非決定論的過程であることは知られている」（Horan 1994, p.83, n.1）。このように、ニュートン力学的観点を採用する陣営は、微視的な量子現象が進化現象に影響を与えることを認めている。

しかしながら、彼らは微視的な量子現象が進化現象にまで及ぼす効果は非常に小さいと主張する。ローゼンバーグはその理由を次のように述べている。量子力学の非決定性の効果を「認めても、進化生物学者が興味を引く問題は何も解決しない。というのも、その効果が及ぼす確率は非常に小さく、化学結合のレベルよりも上のどんな現象も決定論的に限りなく近づくので、進化現象や進化論に確率的特性があったとしても、量子力学の確率ではそれを決して説明できないからである」（Rosenberg 1988, p.190）。

また、グレイブス、ホーラン、ローゼンバーグは、量子現象の及ぼす効果が小さいことを示すために、四つの理由を挙げている（Graves, Horan, and Rosenberg 1999）。一つは、点突然変異が突然変異のなかで最小の単位だという理由である。点突然変異とは DNA の一塩基が変化する現象であるが、突然変異にはそのほかに、逆位や挿入と呼ばれるものなどいくつか種類がある。逆位とは、ある長さの DNA 断片が 180 度回転することで、別の塩基配列に変化する現象である。挿入とは、DNA の塩基配列の途中で別の DNA 断片が付加し、塩基配列が変わる現象である。点突然変異はこのような突然変異のなかで最小の単位であり、ほかの突然変異に比べると生物集団に与える効果は小さいのである。二つ目は、遺伝暗号が冗長だという理由である。遺伝暗号とは、塩基配列とアミノ酸との対応関係を示す

暗号である。この暗号では、コドンと呼ばれる三塩基の配列によって一つのアミノ酸が指定される。コドンを構成する塩基は4種類なので、コドンの組合せは64通りとなる。それに対し、アミノ酸は20種類しかない。そのため、コドンの塩基配列が異なるにもかかわらず、同じアミノ酸を指定する場合があります、遺伝暗号は冗長なのである（これを遺伝暗号の縮重という）。たとえば、アデニン・シトシン・ウラシル（ACU<sup>12</sup>）、アデニン・シトシン・シトシン（ACC）、アデニン・シトシン・アデニン（ACA）、アデニン・シトシン・グアニン（ACG）という塩基配列はすべてレオトニンという同じアミノ酸を指定する。そのため、一つの塩基を変化させる点突然変異が生じたとしても、生成されるアミノ酸は変わらないことがある。ゆえに、ローゼンバーグたちは点突然変異がアミノ酸の置換に与える効果は小さいと考える。三つ目の理由は、アミノ酸置換が生じたとしても、タンパク質に与える効果は小さいというものである。タンパク質は多くのアミノ酸から構成される。タンパク質のなかには、共通祖先から由来するために種間で類似したものがあり、それは相同タンパク質と呼ばれる。このようなタンパク質では、点突然変異によって塩基配列が変化しても、タンパク質の機能はほとんど変わらない。このことから、ローゼンバーグたちは点突然変異の効果は小さいとする。四つ目の理由は、復帰突然変異によって点突然変異の効果が相殺されうるというものである。復帰突然変異とは、突然変異したDNA塩基が再び突然変異を起こし、もとの塩基に戻る現象である。これが生じると、点突然変異の効果は打ち消される。以上の理由から、ローゼンバーグたちは、非決定論的な量子現象の効果が生物進化のレベルに影響を及ぼすことはほとんどないと主張する。したがって、彼らはニュートン力学的観点から進化論を考察するのである。

このように、ローゼンバーグたちは進化現象が巨視的な生物個体の現象であるがゆえに、ニュートン力学的観点を採用した。彼らは微視的現象の非決定性が巨視的な進化現象に影響を及ぼすことを認めているが、その影響は非常に小さいとする。そのため、巨視的な進化現象は決定論的とみなしてもよいと主張する。また、ローゼンバーグたちは生物学の理論的発展という意味でも、進化現象が決定論的であるという想定は重要であると考えている。これについては、2.4節で解説する。

## 2.2 決定論的な進化現象

前節では、ローゼンバーグたちがニュートン力学的観点に依拠する理由を説明した。彼らは、進化論の理論的特徴に依拠して、進化現象は決定論的であるはずだと論じた。そこでの議論は、進化現象一般についてのものであった。ローゼンバーグたちは個別の進化現

---

<sup>12</sup> Aはアデニン（Adenine）、Cはシトシン（Cytosine）、Gはグアニン（Guanine）、Uはウラシル（Uracil）というアミノ酸の英語名の頭文字をとった略語である。

象をどのように理解しているのだろうか。本節では、遺伝的浮動と自然選択に関するローゼンバーグたちの論証を紹介する。

## 2. 2. 1 遺伝的浮動

まずは、遺伝的浮動についてのローゼンバーグたちの考えをみてみよう。ホーランは、自然火災の例を用いて遺伝的浮動を説明する (Horan 1994, pp.83-85)。ある場所にある動物の集団が生息しているとする。その場所で自然火災が発生し、その集団の 90%が焼死してしまったとしよう。このような自然災害では、生物個体の生存や繁殖の有利さとは関係なく生死が決まる。それゆえ、この自然災害は遺伝的浮動の事例となる。ホーランによると、もし仮にその地域に同じ条件で火災が生じるとするならば、まったく同じ過程を経て同じ個体が焼死する。火元に近い場所にいる個体は必ず死亡し、火元から離れたところにいる個体は必ず逃げることができる。そういう意味で、この過程は決定論的である。ある過程が決定論的であるのなら、それを正確に表現するのに確率概念は必要ない。では、なぜ遺伝的浮動モデルには確率概念が用いられているのだろうか。ホーランによると、それは「変動しやすい環境について私たちが知りうることには限界がある」 (ibid., p.85) からである。自然災害がいつどこで生じるのかは私たちにはわからない。それゆえ、私たちには遺伝的浮動が非決定論的にみえる。だが、遺伝的浮動はほんとうのところ決定論的な過程なのである。ホーランによると、遺伝的浮動モデルに確率概念が用いられるのは、私たち人間が環境について無知だからである。

ローゼンバーグはさらに議論を進め、遺伝的浮動にみえる現象はフィクシオンにすぎず、全知全能者の立場からすると遺伝的浮動という概念は進化論から消去可能であると主張する (Rosenberg 1994, Ch.4)。ローゼンバーグによると、遺伝的浮動が説明上必要であるのは、私たち人間が完全な情報を持っていないからである。これは上のホーランの主張と同じである。ローゼンバーグは遺伝的浮動として説明される現象を二つ挙げる。一つは、密猟者による捕獲の例である。いま、生物学者がある草原に生息するキリンの集団を調査しているとしよう。この地域には高木が多いとすると、首の長いキリンは首の短いキリンに比べて餌を採りやすいので、この環境では首の長いキリンが適している。つまり、首の長いキリンの適応度が高いことになる。生物学者はこのとき、自然選択は首の長いキリンに働き、それゆえ、その集団において首の長いキリンの頻度が増加するということを予測するだろう。ところが、そこに密猟者が生物学者に気づかれずにやって来て、首の長いキリンだけを捕獲し、動物園に密輸したとする。そうすると、このキリン集団では首の長いキリンの数が減少し、首の短いキリンの頻度は増加することになる。このとき、生物学者は密猟者による捕獲の事実を知らない。つまりこの例では、生物学者は完全な情報を持っていないことが想定されているのである。

ローゼンバーグによると、このような状況において生物学者に可能な説明は三つある。最初の選択肢は、自然選択による説明である。だが、この選択肢を取ることはできない。生物学者は首の長いキリンの数が減少した理由を知らないので、彼らは首の長いキリンが生存に不利であることを正当化できない。したがって、生物学者はこの現象を自然選択によって説明することはできない。次の選択肢は、この調査結果が自然選択説の反証事例になるという説明である。首の長いキリンは生存に有利であるため、自然選択説によると、そのような形質を持つキリンの頻度は増加することが予測される。一方、生物学者の調査結果はその予測に反している。それゆえ、自然選択説は反証されたことになる。しかし、だれもこの調査結果が自然選択説の反例になるとは考えないだろう。最後に残った選択肢が、遺伝的浮動による説明である。ローゼンバーグによると、生物学者が遺伝的浮動を説明に用いるのはこのような状況においてである。すなわち、生物学者は完全な情報を持っていないために遺伝的浮動を説明に用いるのである。

では、遺伝的浮動の二つ目の事例をみてみよう。ここでも、ある草原にキリンの集団が生息しているとしよう。そこに、二度と起こらないような珍しい風が吹き、キリンの餌である二本の高木が絡まったとする。そして、首の長いキリンの多くはこの木に首を引っ掛け、死んでしまったとする。この場合も、キリンの集団では首の長いキリンの頻度が減少することになる。このような想定のもとで、ローゼンバーグは次のように述べる。生物学者が「珍しい木と、その曲がった枝に引っ掛かった間抜けなキリンの頭骨とを一度もみていないのであれば、彼らが遺伝子頻度の変化を遺伝的浮動によって説明する理由はまたもや認識的なものとなる」 (*ibid.*, p.73)。ここでもローゼンバーグは、生物学者には情報が不足しているとき、遺伝的浮動が説明に用いられると主張する。

ローゼンバーグはこれら二つの例から次のように主張する。「このような架空の事例から一般化ができるのであれば、結論は、全知全能者の立場からすると遺伝的浮動という概念は一切必要ないということになるだろう」 (*ibid.*, p.73)。全知全能者は、密猟者が首の長いキリンを捕獲したことや、首の長いキリンが枝に引っ掛かったことを知っている。ローゼンバーグによると、どちらも長い首という形質が生存に不利に働いた自然選択の事例である。密猟者の例では、長い首のキリンは動物園で人気があるために、密猟者の標的になってしまった。高木の例では、キリンの首が長いために枝に引っかかってしまったのである。したがって、全知全能者にとっては、遺伝的浮動はフィクションであり、遺伝的浮動の概念は消去可能である。それに対し、生物学者は完全な情報を持っていない。ローゼンバーグはこのことについて、「認知能力に限りのある私たち人間は、(・・・)理論を適用する際に確率を必要とし、そして遺伝的浮動の概念を必要とする」 (*ibid.*, p.73) と述べている。つまり、私たちには知りうる情報とそれを処理する能力に限界があるため、遺伝的浮動の概念が必要となるのである。これが、遺伝的浮動の概念が説明上必要であることのローゼンバーグによる理由である。

このように、遺伝的浮動に確率概念を用いるのは、私たちが環境について無知だからである。もし仮に環境について十分な知識があるならば、遺伝的浮動を使った説明は消失し、自然選択による説明に取って代わられることになる。ローゼンバーグによると、遺伝的浮動にみえる現象は実のところ自然選択である。それゆえ、遺伝的浮動はフィクションなのである<sup>13</sup>。

ここで紹介したローゼンバーグの考え方は現実離れしていると思うかもしれない。しかし、少なくとも 1950 年代の進化生物学では、自然選択でなんでも説明しようとする「適応主義 (adaptationism)」が主流であった。当時、生物学者のアーサー・カインは、生物学者が自然選択の証拠をみつけられないときに遺伝的浮動に訴えると述べている (Cain 1951a; Cain 1951b; Beatty 1992b)。

セウォール・ライトは、ある特定の生態学的な条件が与えられると遺伝的浮動が生じ、遺伝的浮動によって明らかにランダムな変異のパターンが生み出されることを示してきた。するとすぐに、どんな変異の事例についても、かつて適応的な中立性を使って説明したのと同じように、遺伝的浮動を使ってランダムなものとして説明する生物学者が出てきた。だが、その説明の手続きは間違っている。そのような生物学者は、遺伝的浮動が作用していることを証明しているのではなく、自然選択が作用していることを証明できていないのである。それゆえ、遺伝的浮動に訴えることで、誤りを隠してしまっている。(・・・)カーターが指摘するように、生物学者にはより深い洞察が求められる。だが、自然界のどんな変異についても、まず自然選択の効果が検討され、それでは説明のつかない変異は遺伝的浮動に起因すると自信を持って判断できるほど、完璧な分析がおこなわれているのかは疑わしい。自然選択の効果の分析は完璧でなかったという可能性が常にあり、実のところそういう可能性は高いのである (Cain 1951b, p.1049)。

カインは典型的な適応主義者であり、ほとんどの変異は自然選択によって説明できると考えている。それゆえ、遺伝的浮動を使った説明は、生物学者による変異の分析が不十分だからであり、もし仮に変異について完璧な分析がおこなわれるのなら、自然選択によって説明される可能性が高いと主張する。これは、ローゼンバーグが主張していることとほとんど同じである。適応主義者はローゼンバーグのように遺伝的浮動を捉えていたようである。

1950 年代の進化生物学の状況を、著名な古生物学者のスティーブン・ジェイ・グールドは「総合説の硬化 (hardening of modern synthesis)」と揶揄し、過度な適応主義の風潮に警告を鳴らしている (Gould 1983)。適応主義がまともな研究プログラムかどうかはいまも論

<sup>13</sup> ローゼンバーグの議論を素直に受け取ると、遺伝的浮動による説明が消失するのであれば、自然選択による説明もなくなり、物理学的な説明に取って代わられるように思われるだろう。実際、ローゼンバーグの議論に対してそのような批判が加えられている。それについては 4. 2. 2 項で検討する。

争が続いている (ソーバー 2009)。本稿で適応主義の是非について論じるつもりはないが、ローゼンバーグの議論が生物学者にとって必ずしも突飛なものではないことがわかるだろう。

## 2. 2. 2 自然選択

ローゼンバーグたちは、遺伝的浮動にみえる現象はほんとうは自然選択であると主張する。そこで次に、彼らが自然選択をどのように考えているのかをみることにしよう。ローゼンバーグたちは2. 1節で解説したように、進化というのは生物個体についての現象だと考えている。生物個体は巨視的対象であり、ニュートン力学にしたがって決定論的に変化する。また、突然変異による微視的な非決定論的現象の効果を一部認めてはいるものの、その効果は巨視的な現象にほとんど影響を与えないと論じていた。それゆえ、進化現象というのは本来決定論的であり、自然選択も決定論的な現象ということになる。

ホーランは、次の意味で自然選択は決定論的であると述べる。「体の大きさ〔を発現する遺伝子〕が同じ複数の有機体が同一の環境に生息するなら、それらの有機体は正確に同じ繁殖力を持つ」(Horan 1994, p.86)。つまり、遺伝子と環境が同じならば、個体の繁殖力は同じである。これは、遺伝子と環境によって個体の繁殖力、すなわち適応度が一意に決まるということを表している。自然選択が決定論的な現象であるのは、このような意味においてである。

ローゼンバーグは、理論の目的と私たちの目的を区別し、本来なら自然選択の理論は決定論的な現象を描くと主張する (Rosenberg 1994, pp.63-66)。ローゼンバーグによると、科学理論の目的は真理の解明や経験的に正当化されることである。「これらの目的は、精微な記述の内容を無視したり中心的傾向だけに焦点をあてたりするのでは果たされない」(ibid., p.63)。この「中心的傾向」とは、2. 1. 1項で述べたステレルニーとキッチャーによる表現であり、体長や嘴の長さといった形質の集団平均の変化のことを指している。たとえば、フィンチの嘴の長さについて集団の平均を取ると、個々のフィンチ個体の詳細な情報は考慮されない。また、集団内の遺伝子頻度の変化も中心的傾向であるが、遺伝子頻度を求めるときも生物個体についての微細な記述は必要ではない。それゆえ、生物集団の中心的傾向だけに焦点をあてる説明戦略は真理の解明にはつながらない。ローゼンバーグによると、「中心的傾向を説明することは、自然選択の理論の目的ではなく、理論を使用する私たちの目的である。もし仮に私たちの目的が変わり、また目的を達成する私たちのやり方が変わるとするなら、私たちの使用する理論は統計的ではないかもしれない」(ibid., p.63, 強調は原著者)。

「私たちの目的」とは何だろうか。ローゼンバーグはライトの言葉を引いてくる。ライトは進化論で用いられる遺伝子頻度について次のように述べる。

自然選択は極めて複雑な出来事である。(・・・) そうした複雑な状況において、口頭での議論は「進化の」諸要因のどれかを擁護する方向に向かっている。私たちにはすべての要因を一度に定量的に考慮する手法が必要である。それゆえ、私たちには突然変異、異種交配、自然選択、隔離といった多様な要因に関する一つの共通したものさしが必要である。一見すると、これらの要因は「互いに」通約不可能であるように思われる。だが、もしそれらの要因自体の本性ではなく、それらの要因が集団に及ぼす影響に焦点をあてると、状況は単純になる。そのようなものさしは、遺伝子頻度への効果に見出すことができるのである (Wright 1942, p.225, 強調は原著者)。

ここでライトは、進化論ではさまざまな進化要因を遺伝子頻度という共通のものさしで表すのは、私たちの関心によるものであるとしている。そしてそのために、進化要因自体の本性を解き明かすことは放棄されることになる。この進化要因の本性の解明がローゼンバーグのいうところの理論の目的である。つまり、私たちの目的というのは遺伝子頻度という中心的傾向を表すことであり、それに対し、理論の目的とは進化要因の本性を解明することである。

ローゼンバーグによると、自然選択の理論の目的は本来、真なる進化現象を説明することであり、それには精微な記述が必要となる。ここで再び全知全能者が登場するが、「無限の能力を持つ認知的存在者、すなわちラプラスの魔物は、(・・・) 自然選択によって進化過程を説明するのに統計的な情報を一切必要としない」 (*ibid.*, p.64)。全知全能者は完全な知識を持っているので精微な記述ができる。ローゼンバーグたちによると、個体の生存と繁殖はほんとうのところ一意的に決まっているので、全知全能者は自然選択の理論の目的である決定論的な進化現象という真理を明らかにできるのである。

このように、ローゼンバーグたちによると、自然選択の現象は決定論的であり、それを表す理論は本来ならば決定論的である。それゆえ、進化論に確率概念は必要ないことになる。それでは、進化論における確率概念は何を表しているのだろうか。これについては次節で説明することにしよう。

### 2. 3 無知解釈

ローゼンバーグたちによると、遺传的浮動にみえる現象はほんとうのところ自然選択である。前節のカインの引用にもあったように、遺传的浮動の概念が説明上必要とされるのは、生物学者に十分な情報がない場合である。もし生物学者が完璧に生物や環境を調査すれば、遺传的浮動にみえる現象は、最終的には自然選択によって説明されることになる。

そして、その自然選択は決定論的な現象である。これが上でみたローゼンバーグたちの見解である。では、決定論的であるはずの進化現象を表す理論になぜ確率概念が用いられているのだろうか。

ローゼンバーグは前項で述べたように、理論の目的と私たちの目的を対比させる。理論の目的は、精微な記述をおこない、真理を明らかにすることであった。全知全能者は生物個体や環境についてのすべての情報を持っているので、真なる決定論的な進化現象を描くことができ、確率概念を必要としない。それに対し、いまある進化論が確率的であるのは、「説明の対象となっている現象を記述するのに平均が用いられているからである」(ibid., p.64)。そして、このように平均を使って進化現象を表すことが私たちの目的であった。ローゼンバーグは自然選択モデルに確率概念が用いられるのは、理論自体が本質的に確率的であるからではなく、私たち人間の目的に依拠しているからだと主張する。

なぜ私たちの目的に依拠すると、自然選択モデルに確率概念が用いられることになるのだろうか。ホーランは、環境について私たちが十分な知識を持っていないからだと主張する(Horan 1994, pp.85-87)。ホーランは前節でみたように、遺伝子と環境によって個体の生存力や繁殖力が一意に決まるという意味で、自然選択は決定論的な現象であるとする。このような意味で自然選択が決定論的な過程であるなら、自然選択の理論には本来確率概念など不要なはずである。だが、私たち人間は環境についてすべてのことを知っているわけではない。ホーランは、体の大きさを発現する遺伝子がすべて同じである複数の個体を例に説明を続ける。これらの個体が同一の環境に生息するなら、同じ繁殖力を持つはずである。また、各個体の栄養の摂取量や運動量などが異なれば、遺伝子が同じであっても、体の大きさに違いが出てくるだろう。もし私たちが栄養の摂取量や運動量などの環境条件に関してすべての情報を得ることができたら、自然選択の理論には確率概念は必要ない。だが、実際に私たちはそのような完全な情報を手にしていない。それゆえ、「苦肉の策として、私たちは集団遺伝学の理論に訴えて、『集団の平均適応度』で埋め合わせをしているのだろう」(ibid., p.87)。ホーランによると、自然選択モデルに確率概念が用いられるのは、私たちが環境について十分な知識を持っていないからである。そのために、やむを得ず私たちは平均という確率的な概念に頼らざるを得ないのである。

このようにローゼンバーグたちは、進化現象は決定論的であり、進化論における確率概念は私たち人間の無知によるものであると主張する。全知全能者であれば生物がどのように進化するかを一意的に計算することができる。だが、私たち人間は生物や環境の詳細について完全に知っているわけではない。それゆえ、生物がどのように進化するかを一意的に記述することができず、確率を使ってその中心的傾向を説明するしかない。全知全能者は生物進化を記述するのに確率概念を一切必要としないが、私たちは生物や環境についての十分な知識がないため確率概念に頼らざるを得ない。したがって、進化論における確率概念は、私たち人間の知識の不十分さを表しているのである。これはまさに、ラプラス的

な確率概念の「無知解釈」である。以上が、ローゼンバーグたちによる決定論的な進化像である。

ローゼンバーグたちが支持する無知解釈は、確率概念を主観的に解釈する。主観的解釈には、無知解釈の他に「ベイズ主義」というものがある。ベイズ主義は、確率をある仮説について人が正しいと信じる度合いとして解釈する。ベイズ主義はさらに、観察データが得られたときに、仮説に対する信念の度合いをどのように変更するかについても言及する。

1. 2. 1項でベイズの定理を紹介したが、ベイズ主義ではこの定理にしたがい信念を更新することが要請される。無知解釈では知っているか知らないかが問題となっていたが、ベイズ主義では知と無知の間の信念の度合いも取り扱うことができる。ベイズ主義については、6章で説明することにする。

## 2. 4 道具主義

ローゼンバーグたちは、物理学は実在論的であるが、進化論は道具主義的な理論であると主張する。科学理論のなかで進化論については道具主義を採り、それ以外の科学の理論については別の立場を採用するという意味で、「局所的道具主義 (local instrumentalism)」と呼んでいる。なぜ彼らは科学に対して一貫しない立場をとるのであろうか。

ローゼンバーグたちが進化現象を決定論的とみなす理由についてはすでに述べた。それは、進化現象は巨視的な生物個体の現象であり、巨視的な対象はニュートン力学にしたがい決定論的に振舞うというものであった。彼らは微視的現象の非決定性が巨視的な進化現象に影響を及ぼすこと認めているが、その影響は非常に小さいものとする。そのため、巨視的な進化現象はほぼ決定論的であると主張する。ローゼンバーグたちはこれとは別の理由で、進化現象が決定論的であると考えている。その理由が局所的道具主義を採用することに深くかかわっている。

ローゼンバーグたちが点突然変異という微視的な現象が非決定論的であるとするのは、量子力学の標準的な解釈に依拠していた。すなわち、コペンハーゲン解釈によると、微視的現象は非決定論的である。しかし、それはあくまで標準的な解釈によるものであり、量子力学の解釈についてはその他にいくつもの案が提出されている。量子力学における確率解釈の問題は解決しているわけではなく、微視的な世界が非決定論的であることは確定事項というわけではない。たとえば、世界が決定論的だと主張する考え方もある。そうした解釈の一つに、「隠れた変数理論 (hidden variable theory)」による解釈がある。これはアインシュタインが主張したものである。アインシュタインは、世界は決定論的であるという強い信念を抱いていた。彼は「神はサイコロを振らない」という名言を残しているが、この言葉でアインシュタインは、神が偶然に任せて世界をつくらないといいたいのである。

アインシュタインはこのように、世界は決定論的であると考えた。それゆえ、確率概念を用いる量子力学は不完全な理論であり、量子力学にはまだ発見されてない隠れた変数があるはずだと主張したのである。

しかし、ローゼンバークたちは量子力学において決定論的な隠れた変数理論を擁護するわけではない。彼らは「たとえ量子力学の非決定性がときに生物学的過程にしみ出すとしても、そのことが進化論における確率の根源ではない」(Graves, Horan, and Rosenberg 1999, p.144)と述べている。このことから明らかなように、彼らは量子現象を非決定論的としている。彼らの主張したいことは、量子力学と進化論における確率概念の根源は別であるということである。彼らは、微視的レベルでは非決定論的な量子力学が、巨視的レベルでは決定論的な古典力学がそれぞれ成立しているとする。そして、物理学においても量子現象の非決定性は巨視的な現象にはほとんど影響せず、「巨視的レベルと微視的レベルの間でどんな量子的なしみ出しの出来事が生じようとも、巨視的な物理的過程と対象は限りなく決定論的なものに近づいていく」(ibid., p.145)。物理学と同様に、進化論においても量子現象の非決定性の効果は非常に少ないとする。

また、ローゼンバークは「物理学と化学が実在論的に解釈されるのに対し、生物学は道具主義的な科学である」(Rosenberg 1994, p.7)と述べている。これは局所的道具主義の立場を採用していることを表している。ローゼンバークが進化論を道具主義的だとする理由は、「自然が非常に複雑であるため、私たちには生物学のレベルで作用している規則性を発見することは望めない[からである]。それゆえ、生物学では(・・・)有益な道具を発見することで満足しなければならない」(ibid., p.7)。ローゼンバークによると、私たち人間には十分な知識がないため、複雑な実在の進化現象を表す理論を手に入れることができず、有益な道具として確率的な進化論を使用せざるを得ない。それゆえ、現在の進化論は道具主義的な理論なのである。

ローゼンバークたちは科学の理論的發展においても、局所的な道具主義は重要であると主張する。微視的な現象が非決定論的であっても、巨視的な現象は決定論的であり、決定論的な隠れた変数を想定することは理論發展につながると述べている(Graves, Horan, and Rosenberg 1999, p.145)。彼らはクローン植物の実験を例に挙げる。クローンは遺伝的に同一な細胞や個体のことである。クローン植物の間の変異に関して生物学者は最初に決定論的な仮定をおく。つまり、遺伝的に同一の植物であれば、同じ環境のもとで同じ進化を遂げることを仮定する。この決定論的な仮定にもとづくと、予測結果と実際の観察結果がずれていれば、生物学者はそのずれの原因を探求することになる。ローゼンバークたちによると、このような決定論的仮定をおくことは理論の發展につながる。生物学者には非決定論者はいないのであり、生物学者は実験を工夫することによって決定論的な仮定からのずれの原因を探求している。それゆえ、ローゼンバークたちは理論の發展のために最初に決定論的な隠れた変数理論のような仮定をおくべきであると主張する。

これらの理由により、ローゼンバーグたちは量子力学と古典力学の理論については実在論的、進化論については道具主義を採用し、局所的な道具主義の立場をとる。そして、進化現象に関しては決定論的であるという仮定から出発すべきであり、その仮定は理論的発展につながるという意味でも穏当であることを論じる。

## 2. 5 まとめ

ローゼンバーグたちの論証をまとめよう。彼らによると、進化論は道具主義的な理論であり、そこで使われる確率概念は知識の欠如を表している。このことを示すために、ローゼンバーグたちは以下の論証をおこなった。

- (1) 進化現象は生物個体の振舞いである。
- (2) 生物個体の振舞いは巨視的対象の変化である。
- (3) 巨視的対象の変化はニュートン力学で記述される。
- (4) ゆえに、進化現象はニュートン力学で記述される。
- (5) ところで、ニュートン力学によると、巨視的現象は決定論的である。
- (6) それゆえ、進化現象は決定論的である。
- (7) もし私たちに完全な情報があれば、進化論は決定論的な理論となる<sup>14</sup>。
- (8) だが、現在の進化論には確率概念が用いられている。
- (9) したがって、進化論における確率概念は知識の不十分さを表している。
- (10) 私たちに十分な知識がないため、実在の進化現象を表す理論を手に入れられない。
- (11) よって、進化論は道具主義的な理論である。

(1)、(2)、(3)の命題は一般的に受け入れられており、ローゼンバーグたちを批判する人たちもこのことを認めるだろう。ローゼンバーグたちはこれらの命題から(4)を主張する。このことを主張するには、進化論がニュートン力学の用語に置換えられることが必要である。つまり、(4)には進化論がニュートン力学に還元されることが仮定されている。(5)はニュートン力学の標準的な解釈である。ローゼンバーグたちは(4)と(5)から(6)を導き出す。ここで、ローゼンバーグたちはラプラスと同じく全知全能者を想定する。全知全能者のように完全な情報があるなら、現象をありのまま表す理論を手にすることができるので、(7)がいえる。ところが実際の進化論はそうではない。

---

<sup>14</sup> 進化論が決定論的な理論だとすると、進化要因の一つである自然選択も決定論的に表されることになる。生物個体が決定論的に選択されるというのは、わかりにくい考えである。ローゼンバーグたちは杓子定規に議論をして、進化論は道具主義的な議論であると主張している。ローゼンバーグたちの論証への批判は4章以降で展開することにする。

つまり、現状は（８）である。そして、ローゼンバーグたちによると、現在の進化論には確率概念が用いられているが、今後さらに進化論研究が発展すると私たちの知識が増えるので、将来の進化論は確率を用いない理論へと変化する。それゆえ、（７）と（８）から（９）が導き出される。また、自然の複雑さと私たち人間の無知さゆえに、（１０）となる。さらに、私たちの知識の量が変わると、確率的な進化論から確率を用いない進化論へと変化するので、ローゼンバーグたちは（１１）を結論づける。以上がローゼンバーグたちの論証である。

## 第3章

### 量子力学的観点からみた進化論

---

1930年代に多くの知識人がヨーロッパからアメリカやイギリスに流出した。そのとき何人かの物理学者が生物学に流れてきた。量子物理学者のマックス・デルブリュックはその一人であり、彼は分子生物学という現在の生物学の主要な分野を開拓した（ジャドソン 1982; フィッシャー・リプソン 1993）。量子物理学の世界ですでに名の知れたデルブリュックを生物学に向かわせたのは、1. 2. 2項で紹介したボーアである。ボーアの1932年の「光と生命」という講演がデルブリュックの生涯の方向を変えた。ボーアはそこで、生物を原子のレベルで記述しようとしても「生物の究極的な秘密」（Bohr 1933, p.458）は明らかにならないという考えを発表した。ボーアは量子力学における「相補性（complementarity）」という自ら考案した性質が生物と物体の間にみられることを示唆した。相補性というのは、微視的な対象が古典物理学的には互いに排他的な関係にある性質を持ち、実験の仕方に一方だけが現れることをいう。光の波としての性質を調べるには干渉実験をおこない、粒子としての性質を知りたいければ散乱の実験をおこなうとそれぞれの性質が現れる。ボーアは相補性の考えが量子力学の完全な記述にとって必要であると主張し、さらには生命と物体の間にも類似の性質がみられると考えた。デルブリュックは「生物学における相補性概念がすぐそこに、目の前までやってきていることを期待しつつ、それからの人生のすべてをこの問題と格闘することに費やした」（フィッシャー・リプソン 1993, p.101）。また、デルブリュックは「遺伝子の安定性と遺伝学の持つ代数的な特徴が量子力学に親近性を持つように思われた」とも述べている（Delbrück 1976, p.300）。このように量子力学は分子生物学の誕生に深く関係した。

エルヴィン・シュレディンガーも生物学に関心を持った物理学者の一人である。シュレディンガーは『生命とは何か』のなかで、「遺伝の仕組みは、量子論という基盤そのものと密接に関連するだけでなく、それに基礎づけられる」（Schrödinger 1944, p.47）と述べている。彼はこの本のなかで、遺伝子の化学的な安定性や突然変異といった生物学的現象が量子力学での量子飛躍（quantum jump）によって説明できることを示唆した。量子飛躍とは、電子がある軌道から別の軌道に飛び移ることであり、遷移（transition）とも呼ばれる。原子の内部では原子核のまわりをいくつかの電子が回っているが、その電子の軌道半径はとびとびの値しかとらない。原子より大きな物体であれば、回転するときの軌道の半径はどんな値でもとりうるが、原子より小さな物体だと回転軌道の半径は離散的な値しかとらない。これはニュートン力学で扱える巨視的な対象と量子力学で扱う微視的な対象の振舞いの大きな違いである。

シュレディンガーは、自身の名のついた量子力学の基本方程式を導き出すなど多くの功績を物理学に残し、ノーベル物理学賞にも輝いている。『生命とは何か』は、ノーベル賞受賞後に量子物理学から生命科学に関心に移したシュレディンガーが、1943年にトリニティー・カレッジでおこなった講演をまとめ、翌年に出版されたものである。当時は分子生物学が急速に発展している最中で、多くの量子物理学者が生命科学に携わっていた。そうした背景もあり、シュレディンガーの本は生物学者に大きな刺激を与えた。シュレディンガーは遺伝や突然変異が量子力学によって記述できることを示そうとしたのである。

1953年にはDNAの二重らせんモデルが提唱された。その後、生物学では分子レベルの研究が急加速する。はたして、こうした試みは生物学が量子力学によって説明されることを意味するのだろうか。生物学は最終的には物理学に還元されてしまうのだろうか。

生物学の哲学者のなかにはこうした問いに肯定的に答える人たちがいる。ロバート・ブランドンとスコット・カーソンは、「DNA分子の構造が複雑なので、現時点で量子力学の方程式がDNAに適用できないとしても、少なくともいくつかの突然変異はほんとうに量子現象であることは疑いようがない」(Brandon and Carson 1996, p.320)と述べている。ブランドンたちは量子力学が科学や哲学に多大な影響を与えてきたことを踏まえ、量子力学の観点から進化論における確率概念を分析する。それでは、ブランドンたちの論証をみてみよう<sup>15</sup>。

### 3. 1 量子力学的観点から

ブランドンとカーソンは、量子力学的観点から進化論の特徴を明らかにしようとする。本章では、まず彼らが量子力学的観点に依拠する理由を紹介し、次に微視的な量子現象が進化現象とどのように関係するのかについてみることにしよう。

#### 3. 1. 1 量子力学的観点に依拠する理由

ブランドンとカーソンは量子力学を科学の模範とみなし、量子力学の持つ特徴から科学についてのいくつかの考え方を引き出す。そして進化論についても量子力学の観点から分析をおこなう。

量子力学は科学だけでなく哲学にも大きな衝撃を与えた。20世紀に登場した量子力学は、ニュートン力学に取って代わり物理学の基礎理論となった。ノーベル賞を受賞した物理学

---

<sup>15</sup> 本章で紹介する議論は主に、Brandon and Carson (1996)に依拠している。ブランドンたちもローゼンバークたちと同じく、論争の展開とともに考えを微修正している。そのため、当初示していた科学像と整合的でない部分がか見受けられる。ここでは、科学哲学一般の問題も扱いたいので、基本的には上の文献での議論を取り上げることにする。

者スティーブン・ワインバーグは、物理理論が将来最終的に到達するであろう究極理論 (final theory) について次のように述べている。「究極理論は何世紀も先のことであって、私たちがいま想像できるものとはまったく異なるものになるのかもしれない。だがしばらくの間、究極理論はすぐ近くまで来ているものと想像してみよう。私たちがすでに知っていることを基礎にすると、この理論についてどのような推測ができるだろうか。今日の物理学のなかで、そのままの形で究極理論にも生き残りそうだと私が思う部分は、量子力学である」(ワインバーグ 1994, p.237)。ブランドンたちはワインバーグのこの言葉をそのまま受け入れており、量子力学が未来においても物理学の基礎理論であり続けると考える (Brandon and Carson 1996, p.316)。ブランドンたちが量子力学を進化論の考察の基盤に据える一つの理由はここにある。

また、量子力学は哲学にも大きな影響を与えた。量子力学は新しい世界観を生み出した。ブランドンたちは量子力学についてコペンハーゲン解釈を採用している。これは 1. 2. 1 項で説明したように、量子力学の標準的な解釈である。コペンハーゲン解釈によると、原子より小さな微視的レベルでは、世界は非決定論的である。たとえ私たちがラプラスの魔物のように完全な情報を持っていたとしても、未来について一意的な予測はできず、できるとしても確率的な予測である。量子力学における確率概念は実在の現象をそのまま描いており、それゆえ微視的な量子現象は非決定論的であると解釈される。この非決定論的な世界観は哲学に大きな影響を与えた。本章ではブランドンたちの論証を紹介するが、量子力学に依拠した彼らの論証は新たな進化像を提示してくれている。

ブランドンたちはなぜコペンハーゲン解釈を採用するのだろうか。その理由の一つに、「ベルの定理」という量子力学の重要な定理についての理解がある。ベルの定理は、量子物理学者のジョン・スチュワート・ベルが証明したものである (Bell 1964)。ベルは、隠れた変数が局所的なものであるならば必ず満たさなければならない不等式を導き出した。隠れた変数理論は 2. 4 節で述べたように、確率的な量子力学は不完全であり、量子力学にはまだ発見されていない隠れた変数があるはずだと主張する。局所的であるとは、ある地点でおこなうことが空間的に十分離れた別の地点の対象に影響を与えないということである。ベルの示した不等式は、量子力学から導かれる粒子の相関の式に関しては成り立たず、量子力学の予測がこの不等式を破る場合があることが理論的にわかった。これを利用すれば、量子力学が正しいか正しくないかが検証できる。つまり、粒子の相関の測定値がこの不等式を破るのなら、局所的な隠れた変数理論は否定されるのである。これがベルの定理である。その後 1982 年には、物理学者のアラン・アスペたちがその実験に成功した。実験結果はベルの不等式を破っていることを示し、量子力学の予測と一致した。このことは、ベルの定理によって隠れた変数理論が否定されたことを意味する (レッドヘッド 1997; 西脇 2004)。

ブランドンたちによると、「ベルはすべての隠れた変数による説明が量子力学の予測と矛盾することを示した」(Brandon and Carson 1996, p.318) と述べ、量子力学において決定

論的な隠れた変数を仮定する局所的な決定論は論理的に一貫しないとする<sup>16</sup>。ブランドンたちは、ベルの定理によって、量子力学にける確率概念は主観的ではなく、客観的なものであることが示されたと考えている。このことから、彼らは微視的な量子現象は非決定論的であると考え、コペンハーゲン解釈を採用する。

### 3. 1. 2 しみ出し論証

ブランドンとカーソンは、遺伝的浮動が非決定論的な現象であると主張する。一般的に、非決定論的な現象とされているのは微視的なレベルの量子現象であり、彼らは量子現象に依拠した論証をおこなう。ブランドンたちの論証の骨子は、微視的なレベルの非決定性が巨視的な進化現象にまでしみ出すというものである。本項では、この「しみ出し論証 (percolation argument)」と呼ばれる論証を紹介する。

微視的な量子現象の効果が巨視的な進化現象に影響を及ぼすという考えは、生物学の哲学者のエリオット・ソーバーの論証 (Sober 1984) に遡ることができる。ソーバーによると、「哲学者や科学者は非決定論が微視的なレベルに限られると考えていることがある。というのも、有機体や生物集団はあまりに多くの素粒子から構成されているため、微視的なレベルでのチャンスが進化生物学で表される巨視的なレベルに『しみ出す』ことはできないからである」 (*ibid.*, p.121)。しかし、ソーバーは続けて、この理由に説得力があるわけではないと述べる。

偶然というものが微視的なレベルにおける還元できない要素であるなら、大数の法則 (やその他の法則) によって巨視的な世界が決定論にうまく合うようになっているということを私は理解できない。おそらく、もし仮に多くの素粒子が実際とは異なる振舞いをするのであれば、そうした素粒子から構成される巨視的な対象 (有機体や集団) の振舞いも異なるものとなるだろう。そして、粒子の集団が実際にそうであった仕方で振舞わなければならないという決定論的な保証は一切なのである。有機体と呼ばれる粒子の集団のほとんどの振舞いは、かなり高い精度で予測できる。だが、還元できない偶然的な要素を持つ粒子から有機体が構成されている限り、有機体も非決定論的な系でなければならない。偶然が微視的なレベルで実在するのなら、巨視的なレベルにおいても同じように偶然は実在するのである (*ibid.*, p.121, 強調は原著者)。

---

<sup>16</sup> ブランドンたちはベルの定理がすべての隠れた変数の理論を排除したと述べているが、これは誤りである。ベルの定理が排除したのは局所的な隠れた変数の理論であり、非局所的な隠れた変数の理論の可能性は否定していない。非局所的な隠れた変数の理論の例として、デヴィッド・ボームの理論がある。この点については、ローゼンバークたちも指摘している (Graves, Horan and Rosenberg 1999, pp.143-144, n.5)。

ソーバーは、素粒子の集団は量子効果を増幅させ、微視的な非決定論は巨視的な生物の振舞いにまでしみ出すはずだと述べている。

ブランドンとカーソンは微視的な現象の非決定性が巨視的現象にまでしみ出すことに関してソーバーに同意し、その上で、ソーバーの論証を補強する。ブランドンたちによるしみ出し論証では次のことが前提とされていた。まず、進化は DNA の一塩基が突然変異することによって生じる。いわゆる、「点突然変異 (point mutation)」と呼ばれる現象である。次に、DNA は化学物質なので、DNA の塩基配列の変化は化学変化である。さらに、化学変化は量子力学によって量子飛躍として記述されることができる。これらがしみ出し論証の前提である。ブランドンたちはこのことから、DNA 塩基の変化が化学変化であることと、化学変化が最終的には量子力学によって量子飛躍として記述されることから、DNA 塩基の突然変異は量子力学によって記述できるという主張を導き出す。

ところで、量子力学の標準的な解釈によると、量子現象は非決定論的である。ブランドンたちは、量子力学の標準的な解釈であるコペンハーゲン解釈を採用することを明言している。コペンハーゲン解釈によると、量子現象は非決定論的である。ブランドンたちは、上述したように DNA 塩基の突然変異が量子力学によって記述できると主張するので、DNA 塩基の突然変異は非決定論的な現象であるということが導かれる。さらに、最初の前提にあるように、ブランドンたちは進化が DNA 塩基の突然変異によって生じるとしている。それゆえ、進化は非決定論的な現象であるという結論が導き出される<sup>17</sup>。

ブランドンたちは、量子現象の非決定性が生物進化のレベルにまでしみ出すことを正当化するため、次の思考実験を提示する。ここで、一倍体の個体だけから構成される集団を考え、その集団内の各個体はある特定の遺伝子座に対立遺伝子  $A$  か  $a$  のいずれかを持つとしよう。また、この集団に対し、集団内で頻度の高い遺伝子に有利な自然選択が働いているとする<sup>18</sup>。いま、この集団において遺伝子  $A$  と遺伝子  $a$  の頻度が同じであると仮定する。つまりこの集団は、図 3. 1 において矢印で示した均衡状態にある。

<sup>17</sup> ブランドンは 2007 年の論文においてもこの考えを変えていない (Brandon & Ramsey 2007)。ブランドンはその論文のなかでカーソンとの 1996 年の共著論文を参照し、「個々の有機体の生死、そして最終的には繁殖の成功は根本的には非決定論的である」 (*ibid.*, p.68) と述べている。

<sup>18</sup> これは頻度依存の自然選択と呼ばれるものである。この種の自然選択はチョウのベーツ擬態などにみられる (Ridley 2003)。チョウの擬態については 4. 1. 1 項で解説する。

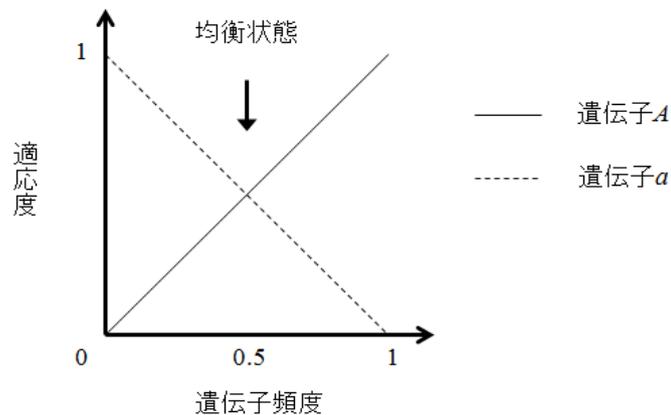


図3. 1 遺伝子頻度と適応度の関係 (Brandon and Carson (1996), p.319 の図を一部改変)

この状況で、集団内のある個体に突然変異が生じ、遺伝子  $a$  が遺伝子  $A$  に変化したとする。そうすると、この集団では遺伝子  $A$  の頻度が増加し、遺伝子  $a$  の頻度が減少することになる。この集団には頻度の高い遺伝子に有利な自然選択が働いているので、頻度の高い遺伝子  $A$  を持つ個体は自然選択によってさらに頻度を増していく。そして最終的に、この集団では遺伝子  $A$  を持つ個体だけが生き残ることになる。逆の場合も同様である。このような状況では、点突然変異が生じるだけで、集団内の遺伝子頻度は変化ようになる。ブランドンたちはこの思考実験を、DNA の一塩基の突然変異が生物進化に影響を与えることの論拠とする。この思考実験の興味深い点は、微視的な点突然変異が巨視的な生物集団のレベルに影響を及ぼすことにある。また、この思考実験では、一個の DNA 塩基の突然変異、すなわち点突然変異をもとに進化現象が考えられていることにも注意すべきである。

デイヴィッド・ステイモスは、これが単なる思考実験ではないことを示すため、量子力学によって記述できる点突然変異の実例を挙げる (Stamos 2000)。量子力学にはトンネル効果と呼ばれる現象がある。トンネル効果とは、粒子がその粒子の持つエネルギーよりも高いポテンシャルの壁を通り抜ける現象のことであり、量子効果の一つと考えられている。ちなみに、古典力学にしたがう巨視的な物体であれば、そのようなことは起こらない。ステイモスは、点突然変異がトンネル効果という量子現象を通じて起こることを示すのである。たとえば、アデニンという DNA 塩基は通常チミンという別の塩基と二つの水素結合を形成し、三つの水素結合を形成するシトシンという塩基とは結びつかない。ところが、アデニンは互変変換することによってシトシンと結合することができる。互変変換とは、主に水素原子の結合位置が変化することで、二種類以上の構造異性体が互いに容易に変換する現象である。この互変変換は上述のトンネル効果によって生じる。すなわち、DNA の塩基配列の変化は原理的に量子力学によって記述できるのである。さらにステイモスは、互変変換による点突然変異が生物個体のレベルまで影響を与える事例を示す。ヒトの P450c17 遺伝子の 440 番目のコドンにシトシン・グアニン・シトシン (CGC) という塩基配列で並

んでいる。この配列の二番目の塩基グアニンがアデニンに突然変異し、シトシン・アデニン・シトシン (CAC) という配列に互変変換すると、その塩基配列によって指定されるアミノ酸はヒスチジンからアルギニンに変わる。この変化が生じると、水酸化酵素が不足するようになり、高血圧などの症状を引き起こす。これは点突然変異によって表現型が変化することを示す事例となっており、しみ出し論証の一例である。

ステイモスは微視的な点突然変異が巨視的な生物個体のレベルまで影響を及ぼす事例を提示し、ブランドンたちを擁護する。ブランドンたちはこのように、進化現象は非決定論的だと主張するのである。

### 3. 2 非決定論的な進化現象

前節では、量子力学にもとづいて、進化現象が非決定論的であることを示す論証を紹介した。ブランドンたちは進化現象が非決定論的であることを示すために、しみ出し論証とは別の論証も提示している。前節のしみ出し論証では進化現象一般について論じられたが、以下で扱う論証は遺伝的浮動と自然選択を個別に検討する。

#### 3. 2. 1 遺伝的浮動

上述のしみ出し論証では、量子現象の非決定性が生物個体のレベルまで影響を与えることが主張されたが、ブランドンたちはそれとは別の論証も提示している。ブランドンたちは、遺伝的浮動の現象は、量子現象の効果とは関係なく非決定論的であることを論じている。

ブランドンたちは遺伝的浮動を説明するのに、壺から玉を抽出するという単純な現象と類比させる。そこでは、繁殖時における配偶子の抽出が、玉の抽出と類似した現象であるという想定がなされている。この類比は遺伝的浮動の説明によく用いられるものである。ここで、壺のなかに赤と白の玉が同じ割合で合計 1000 個入っているとす。それぞれの玉は色だけが異なり、大きさや重さ、手触りなどは同じであるとする。また、壺の中身は外からみえないとする。いま、この壺のなかから玉を 10 個取り出すとしよう。このとき、最も起こりやすい結果は、赤と白が 5 個ずつ抽出されることである。しかし、赤が 3 個で白が 7 個、または赤が 8 個で白が 2 個抽出されるなど、他の結果になる可能性もある。このように、起こりうる結果は複数あり、実際にそのなかのどの結果になるかは確定的に予測できないのである。遺伝的浮動の場合も同様で、多くの配偶子のなかからどの配偶子が次世代に遺伝するのかが一意的に決めることができない。ゆえに、ブランドンたちは遺伝的浮動が非決定論的な現象だと主張する。

ブランドンたちはさらに議論を進め、「量子力学が予測科学として大成功を収めているのとまったく同じように、遺伝的浮動の理論も大成功を収めている。どちらの理論の成功も集団——量子力学の場合は粒子集団、浮動の場合は生物集団——のレベルにおいてである。あるレベル（個々の粒子、個々の有機体、さらには有機体からなる個々の集団）において予測できないように思えるものも、適切なレベルに焦点を合わせると、非常にうまく予測できることがわかる」（Brandon and Carson 1996, p.323）。そしてそのことから、「遺伝的浮動は明らかに統計的、確率的、非決定論的な現象である」（*ibid.*, p.324）と主張する。

ブランドンたちは上述したように、量子力学についてコペンハーゲン解釈を採用している。つまり、量子力学における確率概念を实在論的に解釈し、量子現象は非決定論的であるとする。ブランドンたちは、量子力学と遺伝的浮動モデルには集団レベルの現象を予測できるという共通点があることに注目し、遺伝的浮動モデルにおける確率概念も实在論的に解釈できると主張する。そしてこのことから、遺伝的浮動は非決定論的な現象であると結論づけるのである<sup>19</sup>。

この論証は3. 1. 2項のしみ出し論証と同じく、量子力学が非決定論的であることに依拠している。しかし、本項で紹介した論証は量子のレベルから累積的に進化現象を記述するしみ出し論証とは異なり、遺伝的浮動モデルが集団レベルの変化を「自律的（autonomous）」に説明できるということが主張されている。ここでの自律性とは、集団の変化を集団よりも下位レベルで還元的に説明するのではなく、集団レベルで説明することである。この論証は、進化論の説明の自律性に訴えていることから「自律性論証」と呼ばれている。自律性については4章で検討することにする。ブランドンたちはこれらこのことを踏まえた上で、「たとえ個々の個体の生死が完全に決定されているとしても、それでもなお、集団レベルにおける進化は重要な点で非決定論的だと考える理由が存在する」（*ibid.*, p.334）と主張する。

### 3. 2. 2 自然選択

ブランドンとカーソンは、自然選択も非決定論的な現象であるとする。自然選択についての彼らの議論は単純である。ブランドンたちによると、自然界の生物集団は大きさが有限である。有限集団において自然選択は遺伝的浮動と分離することができない。ブランドンたちは上述したように遺伝的浮動を非決定論的な現象とするので、遺伝的浮動とは切り離せない自然選択も非決定論的な現象となる。

ブランドンたちは自然選択が遺伝的浮動から切り離せないことを示すため、玉の抽出の例を用いる。つるつるした玉とざらざらした玉が3000個入った壺のなかから10個玉を取

---

<sup>19</sup> ブランドンたちのこの議論は非常に弱いように思われる。この議論については、4. 1. 5節で批判的に検討する。

り出すとしよう。壺のなかにつるつるした玉とざらざらした玉が 1 対 2 の割合で入っているとすると、予測される抽出結果はそれぞれ  $3\frac{1}{3}$  個と  $6\frac{2}{3}$  個となる。しかし、実際に抽出した結果がこのような分数になることはなく、たとえば 4 個と 6 個のように非負の整数の値になる。それゆえ、実際の抽出結果と予測値の間に偏り (bias) が生じる。一方、もし抽出する玉の数が 100 個、1000 個と増えていけば、抽出結果はもとの壺のなかの玉の割合に近づいていく。統計学の言葉を使えば、標本は母集団に近づいていく。極端な話、壺のなかの 3000 個の玉をすべて取り出せば、偏りは一切なくなる。だが、抽出する玉の数が少なければ、たとえ玉の性質につるつるとざらざらのように違いがあっても、偏りは不可避免的に生じる。この偏りは「サンプリング・エラー」とも呼ばれる。統計学では、抽出する数が少なれば偏りが大きく、抽出する数が多くなれば偏りが小さくなるのがわかっている。また、玉を 10 個取り出したときにつるつるした玉が 4 個抽出されたとして、どの玉が予想通りで、どの玉が偏りなのかは識別できない。有限個の玉抽出では、予想通りに抽出された玉と予想とは違う玉を分離することはできないのである。

ブランドンたちは進化現象をこの玉抽出の事例に対応させる。生物個体もしくは遺伝子を玉と考え、世代交代をするときに個体や遺伝子が抽出されると考えれば、進化現象は玉の抽出に対応する。そして、性質に差のある玉抽出が自然選択に、偏りが遺伝的浮動にあたる。有限の個体数からなる生物集団では、玉抽出の場合と同じく偏りが不可避免的に生じる。すなわち、実際の生物集団では遺伝的浮動が必ず生じるのである。ブランドンたちは次のように述べる。「遺伝的浮動だけが作用する場合に引き出される結論は、自然選択と合わせたときにもあてはまる。とくに、他の条件が同じならば、標本空間が小さくなれば、遺伝的浮動は起こりやすくなる。そして、玉抽出で数値として示した事例は、遺伝的浮動がどうしても生じるような状況があることを示している」 (*ibid.*, p.325, 強調は原著者)。しかも、次世代の生物集団のなかのどの個体が自然選択による結果で、どの個体が遺伝的浮動によるものかは、玉抽出の場合と同じく識別できない。したがって、有限集団では自然選択は遺伝的浮動と分離することができないのである。

ブランドンはその後、自然選択と遺伝的浮動の関係をさらに明瞭にしている (Brandon 2005)。ブランドンは再び玉抽出の例を用い、抽出確率の違いが大きくなれば起こりうる結果の確率分布が広がることを示す。壺のなかに玉が 100 個入っており、そこから 4 個の玉を取り出すとする。ここで、壺のなかの玉について、三つの異なる場合を考えてみよう。赤と白が 50 個ずつ、赤が 55 個で白が 45 個、つるつるした赤玉とざらざらした白玉が 50 個ずつという場合である。一つ目の場合は、等確率の分布のもとで玉を無作為に抽出するということになる。これは、生物集団内の個体もしくは遺伝子の適応度がすべて同じという状況に対応し、そのもとでは遺伝的浮動のみが生じ、自然選択が生じることはない。他の二つの場合は、この状況から移行することになる。そして、すべての玉の抽出確率が 1 か 0 のどちらかであるような方向に移行すると、最も確率値の異なる分布となる。これは、集団内の遺伝子の適応度が 1 か 0 のどちらかであり、そうした状況では浮動は生じること

はなく、自然選択のみが働くことになる。自然選択と遺伝的浮動についての関係をまとめると、図3. 2のようになる。

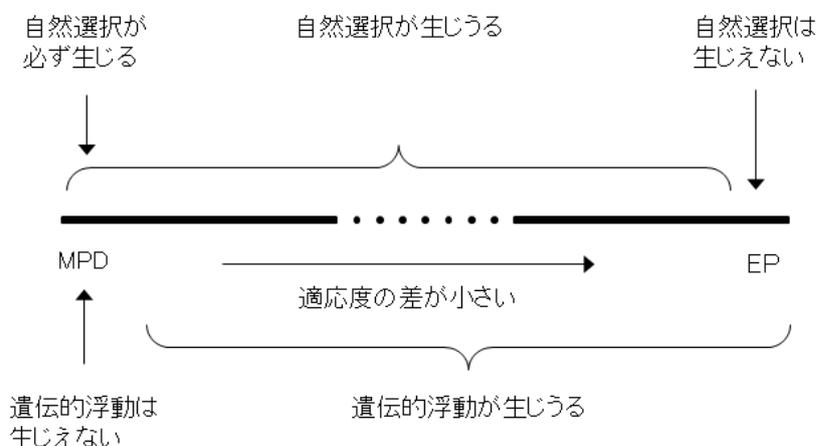


図3. 2 自然選択と遺伝的浮動の関係 (Brandon 2005, p.162 を一部改変)

中心が破線になっている太い線は、適応度の分布の可能性を表す。左端のMPDは適応度が1か0のどちらかであるときの分布であり、確率の差が最大(Maximal Probability Difference)の場合を表す。右端のEPは、すべての適応度が同じ確率(Equal Probability)である場合を表す。

ブランドンは、実際の生物集団が図3.1の両端の状況になることはないことを促す。つまり、生物集団内のすべての遺伝子の適応度が1か0のどちらかしかない場合と、すべての適応度が同じである場合は実際にはない。したがって、実際の生物集団は有限であり、自然選択が働くときは必ず遺伝的浮動も生じるのである。

3. 2. 1項でみたように、ブランドンとカーソンは遺伝的浮動が非決定論的な現象であると主張する。そして、本項でみたように、有限集団において自然選択と遺伝的浮動は分離できない仕方に関連し合っている。したがって、ブランドンたちは、「有限集団では自然選択はサンプリング・エラーという遺伝的浮動の効果を消去できないので、集団のレベルにおいて自然選択は非決定論的である」(Brandon and Carson 1996, p.325)と結論づける。実際の生物集団の大きさは有限であるので、自然選択は非決定論的な現象である。この論証は、遺伝的浮動が非決定論的であることにもとづいており、ブランドンたちはそのことを量子現象の非決定性と結びつけて論じた。それゆえ、ここでの自然選択に関する論証も量子力学に関連している。

### 3. 3 傾向性解釈

科学哲学者のカール・ポパーは確率概念の傾向性解釈を考案した (Popper 1957)。傾向性は 1. 2. 1 項で述べたように、確率的な性向のことである。また、性向とは水溶性や可燃性のように「～ならば、・・・」という形で表現される性質であり、たとえば水溶性は水に浸すならば溶けるという性質であった。傾向性も「～ならば、・・・」といった形で表現される性質であり、傾向性は性向と同じく物質に備わる性質である。両者の違いは、性向が決定論的であるのに対し、傾向性は確率的な性質という点にある。傾向性解釈によると、コインには表が確率的に出るといった傾向性が備わっており、ウランは確率的に崩壊する傾向性がある。傾向性解釈は確率概念についての客観的な解釈の一つである。

ポパーはかつて量子力学における確率概念に対して頻度解釈を採用していた。しかし、量子力学では一回限りの確率的な出来事が重要な問題になるので、彼は自らの考えを変える。量子力学では、「ある特定のラジウム原子が 1600 年の間に崩壊する確率が 0.5 である」という命題のように、一回限りの出来事を表すのに確率概念が用いられる。それに対し、頻度解釈では何度も試行を繰り返すことが前提とされているので、一回限りの出来事にあてはめることができない。そこでポパーは傾向性解釈を提案するのである。ポパーは当初、傾向性は量子力学における確率解釈だけに適用されるとしていたが、その後、量子力学だけでなく、何らかの傾向を持つようなどんな出来事にも適用できると考えるようになった (Glavotti 2005)。ポパーは頻度解釈から傾向性解釈に考えを変えた理由について、次のように述べている。「私が頻度解釈を捨てたのには二つの理由がある。一つは、量子力学の解釈に関係している。もう一つは、(出来事の系列とは異なり) 単一の出来事、すなわち『一回限りの出来事』の確率について私自身の考え方に欠点があったことである」 (Popper 1959, p.27, 強調は原著者)。ブランドンとカーソンは、この傾向性解釈を進化論における確率概念の文脈に持ち込んだ。3. 1. 2 項のしみ出し論証を思い出すと、彼らは量子現象の非決定性が進化現象にまでしみ出すと論じていた。したがって、量子力学における確率概念について傾向性解釈を採用するのであれば、進化論における確率概念も同様に傾向性として解釈される。

実のところ、ブランドンはしみ出し論証を提示する以前から進化論の文脈において傾向性解釈を支持していた (Brandon 1978)。自然選択説はかつてトートロジーだという批判を浴びせられたことがあるのだが、ブランドンはその解決に傾向性解釈を提案したのである。この批判の要因の一つに、ハーバード・スペンサーがダーウィンの自然選択説を「最適者生存 (survival of the fittest)」という短い言葉で表したことがある。スペンサーは、1. 1. 1 項で述べたように、ダーウィンの考えを進化という言葉を用いて表現した人物である。自然選択説がトートロジーだという批判は、この「最適者生存」という表現に向けられてきた。自然界においてだれが生存するのか。それは最適者である。では、だれが最適者なのか。それは生存したものである。このように、「最適者生存」という表現は循環しており、経験的内容とは独立にいつでも正しい空虚な主張になってしまう。それゆえ、自然選

択説はトートロジーだと批判された（たとえば、Manser 1965; Smart 1963; Popper 1974）。自然選択説がトートロジーもしくは循環的だと批判する人たちは、適応度が実際の生物の生存と繁殖の成功の度合いによって定義されると考えている。「だれが最適者なのか」という上の問いをみても、その答えは「生存したものである」となっている。これは適応度が実際に生存した個体によって定義されていることを意味しており、そのために自然選択説が循環に陥るのである。

ブランドンや哲学者のスーザン・マイルズとジョン・ベイティーは、この問題を解決するために適応度を生物個体の傾向性として定義することを提案した（Brandon 1978; Mills and Beatty 1979）。ブランドンは、傾向性解釈にもとづく「繁殖の成功の確率（もしくは未来の世代へ遺伝的に貢献する期待値）は、（コインの表の出る確率がコインとコイン投げの設定の持つ物理的性質であるのと同じように）有機体と環境の持つ何らかの生物学的な性質ということになる」（Brandon 1978, p.202）と述べる。また、マイルズとベイティーは、「適応度が有機体の複雑な性的性質であるとみなすことを提案する。大まかにいうと、ある有機体の適応度とは、ある特定の環境と集団においてその有機体が生存し繁殖する傾向性のことである」（Mills and Beatty 1979, p.270, 強調は原著者）。ブランドンたちは、適応度を生物個体の生存と繁殖の能力という傾向性として定義すれば、自然選択説が循環だという批判が回避できると考える。傾向性解釈にもとづく、だれが生存するのかという問いに対して、適応度の高い有機体と答える。そして、適応度が高いのはだれなのかという問いに対しては、実際に生存した有機体ではなく、生存と繁殖の能力という傾向性の高い有機体と答えることで、循環を回避できる。ブランドンやマイルズとベイティーによると、適応度を個体の持つ傾向性として解釈すれば、循環の問題が解消される。そして、ブランドンはその後もこの考えを変えておらず、進化論における確率概念を傾向性として解釈する（Brandon and Carson 1996）。ブランドンたちは進化現象を非決定論的だと考えているので、進化論における確率概念を客観的に解釈しようとするのである。

ブランドンとカーソンが傾向性解釈を支持する理由は他にもある。ブランドンたちは、「個々の有機体の進化的な運命がほんとうに確率的な傾向性に支配されていると仮定することは、20世紀の集団遺伝学の理論のめざましい発展にとって不可欠であった。また、(…)すべての経験的な証拠はその考えを支持しているのである」（*ibid.*, p.331）と述べる。遺伝的に同一ある複数のクローンを同じ環境で育てたとしても、いつも同じ数の子孫を残して同じタイミングで死ぬとは限らない。通常は、寿命も子孫の数も異なる。上の引用部の「個々の有機体の運命が確率的な傾向性に支配されている」という表現は、このような意味である。これは、2.4節で述べたローゼンバーグたちの考えと反対のことを主張している。ローゼンバーグたちは決定論な仮定をおくことが生物学の理論の発展につながると述べているが、ブランドンたちはそうではない。

ブランドンたちは、生態学者のジェイムス・ビーバー（Bever 1994）による植物の実験を例に確率的な傾向性の仮定をおくことの正当性を説明する。ビーバーはいくつかの異なる

種の植物のクローンをそれぞれ複数用意し、均一になるように制御した土壌で同じ時間それらを栽培し、植物と土壌中の微生物群集の間の関係を調べた。また、均一になるように制御した別の土壌でも同様の実験をおこなった。その結果、遺伝的に同一の植物が同じ土壌で育ったとしても、花房の数や発芽率など異なることが実証された。ビーバーの実験における傾向性の仮定とは、クローン植物が同じ環境に生息してもどれだけ長く生存し、何個体の子孫を繁殖するのかが一意に決まらないというものである。

ブランドンたちによると、ビーバーの実験結果を説明するために、もし決定論的な仮定をおいたとすると、実験結果にみられるクローン間の違いは測定誤差によるものとされる。というのも、それぞれのクローンが決定論的な性質を持つならば、同一環境で育てられたクローンは同じように成長するため、クローン間に違いは生じないことになるからである。それゆえ、測定誤差による説明では、結果の違いが実験者による花房の数え間違いや測定器具の不備に帰せられる。一方、傾向性の仮定をおけば、実験結果の違いは測定誤差によるのではなく、個々の植物に備わる傾向性という確率的な性質によるものとみなすことができる。ブランドンたちによると、「進化生物学の実験における統計的な特徴を説明するのに、測定誤差は何の役割も担っていないことは間違いない」(Brandon and Carson 1996, p.331)。

ブランドンたちが述べるに、ビーバーの実験では「同じ条件で栽培された同一の遺伝子型を持つそれぞれのクローンは異なる成長を遂げることが仮定されている。そうでなければ、その実験は各条件についてそれぞれの遺伝子型に一つのクローンを栽培するだけのほかに小さな規模にすることができる。このような実験に精通した人は皆、データをみなくてもその仮定が満たされることを知っているだろう」(ibid., p.330)。

また、ブランドンたちは、実際に生物学は生物個体に確率的な傾向性があると仮定することで発展してきたと考えている。もし生物個体の生存力や繁殖力が決定論的な性質であるとするなら、生物学の実験は一つの生物個体だけを扱えばよく、何個も種を播いたり複数の生物で実験をしたりする必要はなくなる。だが、実際の生物学の実験はそうではない。

以上が、ブランドンたちが傾向性の仮定は理論の発展につながり、しかも実験的な証拠に支えられていると主張する理由である。このように、ブランドンたちは進化論における確率概念を傾向性として解釈するのである。

### 3. 4 非局所的な実在論

ブランドンたちにとって、進化論とはどのような理論なのだろうか。ブランドンとカーソンのしみ出し論証を思い出すと、DNA 塩基の化学変化が非決定論的であり、その非決定

論的な効果が生物個体のレベルまでしみ出してくるというものであった。それゆえブランドンたちは、進化現象は非決定論的だと主張した。進化現象が非決定論的であるのは、ある遺伝子を持つ個体が特定の環境に生息したとしても、どれだけ長く生存し、どれだけ子孫を残すのかは確率的にしか定まらないということである。これはまさに、傾向性解釈の主張と同じである。ブランドンたちは、進化論における確率概念が非決定論的な実在の進化現象をありのまま捉えていると考えている。彼らは、「個々の有機体の生死のレベルではほんとうに非決定論的であるという事例と、さまざまな進化的な運命について確率的な傾向性を仮定するという事例は、〔確率という〕理論的存在についての実在性を支持する標準的な論拠となる」(ibid., p.333)と述べている。このように、ブランドンたちは確率的な進化論が実在論的な理論であると主張する。

また、ブランドンたちの科学観も進化論を実在論的に捉えることにつながっている。彼らは、「非局所実在論(global realism)」と自ら呼ぶ立場をとる。非局所実在論とは、科学全体を実在論的に解釈すべきだという考えである。これは、2.4節で紹介した「局所的道具主義」と対峙する考えである。局所的道具主義はローゼンバーグたちが採用した考えであり、彼らは量子力学における確率概念を実在論的に解釈するが、確率的な進化論は道具主義的であるとした。科学全体を眺めたときに、進化論という局所的な理論に関しては道具主義を採用するという意味で、局所的道具主義であった。それに対し、非局所実在論は、科学全体は実在論的であるべきだという一貫した考え方である。

ブランドンたちが非局所実在論を採用する理由には、ベルの定理による成果が関連している。3.1.1項で述べたように、ベルの定理やアスペの実験により決定論的な隠れた変数の理論は否定された。ブランドンたちの表現によると、「ベルの成果は、量子力学についてのある特定の解釈が論理的に矛盾することを示した。それは、世界が決定論的でなければならないという強い信念に動機づけられ、それゆえ量子力学を微視的な世界の現象を予測するための単なる便利な道具にすぎないとする解釈である」(ibid., p.318)。ブランドンたちは、少なくとも量子力学における確率概念を実在論的に解釈することは認められているとする。その上で、ブランドンたちは物理学や進化生物学を含む科学全体についてどういう立場をとるべきかを議論する。ブランドンたちは、ローゼンバーグたちのような局所的道具主義の立場は代償が大きすぎるという。というのも、物理学が実在論的で、それ以外の科学が道具主義的であるならば、「科学の統一」が難しくなるからである。ブランドンたちは、一貫した立場こそが科学の発展につながると考えるのである。

ブランドンたちが示そうとしてきたことは次のことである。「もし科学に対して実在論者の立場を採るなら—すなわち、もし科学的活動をおこなうことの最も重要な目的が現象を生み出すメカニズムを真に記述する理論を発展させ、しかも理論的な成果と実験的確認を理論的存在の実在性を支持する証拠とみなすのなら—、進化論は根本的に非決定論的であると結論づけるべきである。だが、もし進化論に関して形而上学的に決定論的な立場を採るなら—すなわち、進化過程が決定論的だということを科学以外の理由で判断するなら

—、ローゼンバーグやホーランと一緒に進化論は道具主義的な科学であると結論づけるべきである」 (*ibid.*, p.336, 強調は原著者)。この条件付きの選択肢のなかで、ブランドンは前者の非局所的実在論を支持する。なぜなら、後者のような考えは、ベルの定理などの科学の成果や統一科学という目的に照らしてみると、代償があまりにも大きいのである。また、前節で述べたビーバーによるクローン植物の実験結果のような生物学の実例を考慮しても、後者の考えに否定的な結論となる。

以上より、ブランドンたちは進化論が実在論的な理論であると結論づける。進化論における確率概念は、非決定論的な実在の進化現象を表している。また、量子力学の成果や生物学の現状を踏まえると、進化論における確率概念を客観的な傾向性として解釈すべきである。さらに、統一科学という重要な目標のためにも、非局所的実在論を採用すべきなのである。

### 3. 5 まとめ

それでは、ブランドンたちの論証をまとめることにしよう。ブランドンたちは次の論証をおこなった。

- (1) 進化は DNA の一塩基の突然変異によって生じる。
- (2) DNA の突然変異は微視的な化学変化である。
- (3) 化学変化は量子力学によって記述される。
- (4) それゆえ、DNA の突然変異は量子力学によって記述される。
- (5) ところで、微視的な現象は非決定論的である。
- (6) よって、DNA の突然変異は非決定論的な現象である。
- (7) 微視的な DNA の突然変異は巨視的な進化現象に影響を与える。
- (8) したがって、巨視的な進化現象も非決定論的である。
- (9) また、遺伝的浮動は集団レベルでは非決定論的である。
- (10) 自然界の生物集団は大きさが有限である。
- (11) 有限集団において、自然選択は遺伝的浮動と分離することはできない。
- (12) それゆえ、自然選択も非決定論的な現象である。
- (13) 現象が非決定論的であれば、それを表す理論は確率が用いられる。
- (14) したがって、進化論における確率概念は客観的に解釈される。
- (15) また、確率的な進化論は実在論的な理論と解釈される。

(1)、(2)、(3)は経験的に正当化されており、ブランドンたちはこれらのことから(4)を導く。進化現象は進化論で表されるので、(4)を主張するには、進化論の用語が量子力学から導出される必要がある。つまり、(4)には進化論が量子力学に還元されるという仮定が含まれている。ブランドンたちは(5)で、コペンハーゲン解釈に言及している。そして、(4)と(5)から(6)が引き出される。ここでブランドンたちは、遺伝子の適応度が集団の頻度に依存する自然選択を例に挙げ、(7)を主張する。そして、(6)と(7)から(8)を導き出す。これがしみ出し論証である。また、ブランドンたちはしみ出し論証の他に、自律性論証もおこなっている。ブランドンたちはそこで(9)を主張する。また、自然界において無限の大きさの生物集団はないので、(10)がいえる。そして、(9)と(10)と(11)より(12)が引き出される。さらに、(13)の考えを踏まえて、進化論の確率概念は現象の非決定性をありのまま表しているので、(14)と(15)が結論づけられる。以上がブランドンたちの論証である。

## 第4章

### 進化論の自律性

---

進化論における確率概念は何を表しているのだろうか。進化論の説明の対象について、ローゼンバーグたちとブランドンたちの陣営は意見を異にしていた。ローゼンバーグたちは進化論が生物個体の変化を説明する理論であると考え、それに対し、ブランドンたちは進化論が最終的にはDNA分子の変化をもとに記述できると考える。どちらの陣営もまったく異なる観点から進化論について考察していた。

しかしその一方で、両陣営には少なくとも二つの共通点がある。一つは、進化論が一つひとつの対象の変化を基礎として現象を表現する理論だという想定である。ローゼンバーグたちは個々の生物個体、ブランドンたちはDNA塩基の電子の変化にもとづく説明を想定していた。どちらの陣営も進化論が一つの対象の変化を扱う理論だと考えている。二つ目の共通点は、進化現象は突き詰めると物理学の基礎的な理論で説明できると想定していることである。ローゼンバーグたちはニュートン力学、ブランドンたちは量子力学を想定しており、どちらも物理学の基礎的な理論とされている。4.1節では一つ目の共通点について、4.2節では二つ目の点についてそれぞれ検討してみよう。

#### 4.1 集団的思考

本節では、進化論が一つひとつの対象の変化を基礎とした理論であるという、ローゼンバーグたちとブランドンたちの考えについて批判的に検討する。ローゼンバーグたちは進化論が生物個体の変化を説明する理論であるとし、ブランドンたちは進化論が最終的にはDNA塩基の電子の変化にもとづいていると考えていた。どちらの陣営も、進化論が一つの対象の変化を基礎として表す理論であるとみなしている。

両陣営に対し、進化論は一つひとつの対象の変化を表す理論ではないという批判が寄せられている。本節では、まず両陣営に対する主要な批判を紹介し、次に、「集団的思考 (population thinking)」と呼ばれる進化論の特徴について明らかにし、進化論が一つひとつの対象ではなく、生物集団を説明の基礎的な対象にしていることを論じる。さらに、これらのことを踏まえて、ブランドンたちのしみ出し論証と自律性論証を批判的に検討する。

#### 4. 1. 1 集団レベルの進化現象

ここでは、進化が集団レベルの現象であることの事例をみることにする。遺伝的浮動、頻度依存選択、ワーランド効果の三つを取り上げ、いずれも一つひとつの対象の変化をもとにするだけでは説明できないことを示す。自然選択と遺伝的浮動という進化の主要な現象が集団レベルで生じることを示せば、ブランドンたちとローゼンバーグたちのどちらの陣営の論証の前提も土台から掘り崩すことになるだろう。

まずは、遺伝的浮動について考えてみよう。科学哲学者のデニス・ウォルシュ、ティム・レウエンス、アンドレ・アリューは、遺伝的浮動とコイン投げとの類比を用いて、一つひとつの対象の変化にもとづく説明だけではどちらの現象も説明できないことを主張する (Walsh, Lewens and Ariew 2002)。コイン投げについて、たとえばコインを 10 回投げたとき、なぜ表が 9 回出るより、表が 6 回出る方が起こりやすいのだろうか。また、なぜコインを 100 回投げて表が 99 回出るより、10 回投げて表が 9 回出る方が起こりやすいのだろうか。ウォルシュたちによると、これらの問いは個々の対象の力学的変化にもとづく説明では答えられない。つまり、ニュートン力学や量子力学ではこうした現象を説明できない。だがウォルシュたちは、統計的な説明を用いればその問いに答えられるという。実際、これらの問いは統計学の知見によって答えることができる。ウォルシュたちは一つひとつの対象の変化にもとづく説明が有益であることを認めるが、そのことから統計的説明が不要であるとはいえないとする。同様に、遺伝的浮動も個々の対象の変化に基づいて説明することはできない。

ウォルシュたちはライト効果やハーゲドールン効果などの遺伝的浮動の具体例を挙げている。ライト効果とは、生物集団がそれより小さな集団に分離することによって遺伝子頻度が増える現象である。生物集団は小集団に分離することがある。小集団では大集団よりも個体数が少なくなるので、遺伝的浮動の効果が大きくなる。そのため、集団全体で見ると、小集団に分離する集団と分離しない集団では遺伝子頻度の変化の仕方が異なる。ちなみに、ライト効果という名称は、フィッシャーがライトの考えを批判するときにつけたものである。ライトはこの名称を好んでいなかったが、彼の意味に反し、その名称は広まってしまった。ハーゲドールン効果は、繁殖時に膨大な数の配偶子からわずかな数しか抽出されないため、世代間で遺伝子頻度が大きく変化する現象である。ウォルシュたちは、これらの現象を一つひとつの対象の変化にもとづいて説明することはできないが、生物集団の変化として説明することならできると主張する。このように、遺伝的浮動による遺伝子頻度の変化を説明するには、生物個体の変化をどんなに詳細に記したとしてもそれだけでは不十分であり、集団の概念に頼らざるを得ないのである。

さらに、ウォルシュたちはこのことからローゼンバーグによる無知解釈も批判する。「統計誤差というのは、個々のコイン投げの原因にではなく、コイン投げの系列にみられる。類比的に、個々の生物の生死や繁殖の出来事を眺めることでは遺伝的浮動の事例がみえな

いとしても、そのことから、遺伝的浮動が進化的変化の原因に関する私たちの無知の反映にすぎないということは導出されないのである」 (*ibid.*, p.458)。

次に、自然選択の一例である頻度依存選択をみてみよう。生物学の哲学者のロベルタ・ミルスタインもウォルシュたちと同じく、進化は集団レベルの現象であると主張する<sup>20</sup> (Millstein 2006)。彼女は頻度依存選択を事例として取り上げる。頻度依存選択とは、形質もしくは遺伝子型の適応度が、集団内におけるその形質もしくは遺伝子型の頻度に依存する現象である。ミルスタインはチョウの擬態を例に挙げている。無毒のチョウは他の有毒種に擬態することがある。ある集団において擬態のチョウの頻度が低ければ、そのチョウは捕食者のトリをだましやすいため適応度が高くなる。逆に、その集団において擬態のチョウの頻度が増えると、捕食者をだましにくくなり、適応度は低くなる。このように、頻度依存選択では適応度が頻度という集団の特性に依存して決まるのである。この現象は個体の性質をいくら細かく観察しても、それだけでは説明することができない。ミルスタインによると、「頻度依存選択は集団レベルの選択の明確な事例である。というのも、選択の結果（ある世代から次の世代への遺伝子あるいは遺伝子型の頻度変化）は、集団内の遺伝子型の頻度という集団レベルのパラメータによって決まるからである」 (*ibid.*, p.630)。ちなみに、ミルスタインは生物集団の性質として集団の大きさや集団の成長率も挙げている。

最後に、自然選択の事例をもう一つ挙げておこう。いわゆる「群選択 (group selection)」と呼ばれる現象である。群とは、生物の群れの単位である。生物学の哲学の代表的な問題に、「選択の単位 (unit of selection)」問題というものがあり、そこでは、自然選択が何に対して働くのかが問われている。群はその解答の一つとして考えられている。群選択支持者のソーバーは次のように群選択を解説する (ソーバー 2009)。説明を簡単にするため、生物個体は利己的か利他的のどちらかであると仮定する。ここで、利己的とは自分の生存と繁殖上の利益のために他の生物を犠牲にすること、利他的とは他の生物の利益のために自分を犠牲にすることを意味する。素直に考えれば、利他的な個体は利己的な個体よりも生存と繁殖において不利なので、時間が経てば利己的な個体に駆逐されてしまう。だがソーバーは、部分と全体の違いに注目すれば、利他的個体の生存が説明できると主張する。

いま二つの集団があり、集団1には利己的な生物が5個体と利他的な生物が90個体いて、その適応度がそれぞれ0.5と0.4であるとする。また、集団2には利己的な生物が15個体と利他的な生物が10個体おり、それぞれの適応度0.2と0.1であるとする。表4.1に集団内の個体数と適応度を示した。注意すべきは、どちらの集団においても利己的な個体は利他的な個体よりも適応度が高くなっていることである。しかし、集団1と集団2を合わせた全体の集団を考えると、その事態は逆転する。表4.1をみると、集団全体では、利己的な個体の適応度が0.275であるのに対して利他的な個体の適応度は0.36となり、利他的な個体

<sup>20</sup> ミルスタインとウォルシュたちは進化が集団レベルの現象であることには同意するが、それが因果的かどうかについて意見を異にする。ミルスタインは因果的と考え、ウォルシュたちは因果的でないとする。

の適応度の方が高くなっている。つまり、利他的個体は部分集団の内部では頻度が減少するが、集団全体では頻度が増加するのである。

表 4.1 利他性の進化

	集団 1	集団 2	集団全体
利己的な個体	5 個体、適応度 0.5	15 個体、適応度 0.2	20 個体、適応度 0.275
利他的な個体	90 個体、適応度 0.4	10 個体、適応度 0.1	100 個体、適応度 0.36

これは「ワーランド効果 (Wahlund effect)」と呼ばれるもので、統計学では「シンプソンのパラドックス (Simpson's paradox)」として知られている (Wahlund 1928; Simpson 1951)。ワーランド効果が示しているのは、部分を足し合わせたものと全体が必ずしも同じではないことである。

2. 1. 1 項で紹介したローゼンバーグの次の主張を思い出そう。「自然選択は個々の対象一つずつに対して作用する。したがって、自然選択の生み出す効果は足し合わせることができ、そこから集団全体の平均や分散などの統計的性質が構成できる」(Rosenberg 1994, p.64, 強調は原著者)。ローゼンバーグは、集団全体の性質は個々の生物個体の性質を足し合わせることで求められると考えている。だが、群選択の事例が示しているのは、集団全体の性質は必ずしも部分を足し合わせたものと同じでないということである。はたして、ローゼンバーグはこの事例に対して説得的に反論できるのだろうか。かなり難しいだろう。しかも、上の群選択の事例は、何か情報を欠いたために部分と全体が異なっているわけではない。このことは、ローゼンバーグのような還元主義の立場が人間の無知を理由に集団レベルの現象の説明を放棄してしまうのを防ぐためにも重要である。

以上、集団レベルの現象である自然選択と遺伝的浮動の事例を紹介した。これらの事例をみると、ウォルシュたちやミルスタインの主張に分があるように思われる。すなわち、個体の変化だけでは説明できない集団レベルの進化現象が存在するのである。集団が小集団に分離することによって遺伝子頻度に変化したり、集団の大きさや集団内の頻度などが生物の生死に影響を及ぼしたりすることは、個体レベルの性質だけでは説明できない。ウォルシュたちの批判が正しければ、進化論の被説明項が生物個体であるという主張は否定されることになる。次節では、進化論の採用する説明の枠組み自体が集団を基礎にしていることをみることにする。

#### 4. 1. 2 マイアによる集団的思考

「ダーウィンが生物学へ果たした偉大な貢献を簡潔に述べるとき、どの分野の批評家たちもきまって、ダーウィンの革新を『集団的思考』というひと言でまとめる」(Ariew 2008,

p.64)。これは、アリューが『オックスフォード版・生物学の哲学の教科書』の「集団的思考」の項目のなかで述べた文である。「集団的思考」という表現は生物学者エルンスト・マイアが命名したもので、マイアはダーウィンの貢献を「科学の文献に『集団的思考』という新しい考え方を導入したことにある」と評している (Mayr 1959b, p.410)。マイアがこの表現を用いて以来、アリューのいうとおり、生物学、哲学、歴史などの分野で集団的思考はダーウィンの最大の貢献として紹介されている。集団的思考はマイアが最初に言い出した進化論の特徴ではあるが、実のところ、マイア自身の理解は進化論の革新的な思考法を十分に捉えているとはいえない。集団的思考のより適した理解については次項で解説することにして、ここではまず、マイア自身の考えをみてみよう。

マイアによると、集団的思考という考え方は生物学以外の分野にはあまり浸透していない。マイアは著名な物理学者のウォルフガング・パウリと意見を交わしたとき、「集団的思考は、物理主義的思考に慣れた人々には理解に苦しむようである」 (Mayr 1997, p.xvi) と感想を漏らしている。マイアが物理主義的思考と呼ぶのは、一つの対象の変化を基本として還元的に現象を捉える考え方のことである。正確には、物理主義というよりも、還元主義もしくは物質一元論といった方がよいだろう。いずれにしても、還元主義者には理解しがたい集団的思考について、マイアは次のように説明することで、この著名な物理学者を納得させている。「私がそれぞれ互いに異なる向きと速さで運動するわずか 100 個の分子からなる気体を想像するように提案すると、パウリはようやくその考え方をほぼ理解できた」 (ibid, pp.xvi-xvii)。

マイアは、古代から受け入れられてきた「本質主義 (essentialism)」という考えと対比させて集団的思考を説明する。マイアによれば、本質主義は生物種にはその種固有の性質があるとするとする。それは、三角形には三つの辺を持つという固有の性質があるのと同じである。本質主義者の考えでは、生物学の目標は種の本質を特定することである。類型学 (typology) と呼ばれる分野が本質を探究する典型であり、この分野では生物の間の類似性から生物種の本質に迫ろうとする。本質主義的な類型学に対して、マイアは次のように述べる。「集団的思考を採る人と類型学者の最終的な結論は正反対である。類型学者にとって、タイプ (エイドス) は実在するが、変異は幻想である。それに対し集団的思考を採用する人にとって、タイプ (平均) は抽象的なものであり、変異のみが実在する。この二種類の自然の見方ほど異なっているものはないだろう」 (Mayr 1959b, p.2)。つまり、マイアによると、類型学的思考を採る人は三角形や平均といったものを実在とみなし、個々の違いは実在しないと考える。一方、集団的思考を採用する人は、平均といった抽象的对象は実在せず、さまざまな点で異なる個体が実在すると考えるのである。このようにマイアは、集団的思考の革新的な点は生物間の共通性ではなく違いを実在とみなしたところにあると主張する。

マイアはまた、集団遺伝学を批判する道具として集団的思考を用いている (Mayr 1982)。彼によると、物理の世界は定量的であるのに対し、生物の世界は定性的である。生物の定性的な側面は定量的に表すことはできるが、それにより個々の生物の実在性は失われてし

まう。数学的な集団遺伝学は生命現象を定量化するとき過度に単純化するあまり、生物集団を純血なもののみなし、類型学的に捉えることにつながっている。それゆえ、集団遺伝学は集団内の個体間の違いを反映できず、非現実的な結論へと不可避免的に陥ってしまう。しかも、このような類型学的思考はダーウィンの導入した集団的思考ではないので、自然選択をうまく解釈できない。マイアは、「個体の唯一性を理解しない人は自然選択の働きを理解することができない」(Mayr 1982, p.47)と述べ、集団遺伝学者を批判する。ちなみに、上の引用文の「個体の唯一性を理解しない人」とは、集団遺伝学者のフィッシャーを指している。

この批判は、マイアが集団遺伝学を「豆袋遺伝学 (beanbag genetics)」と揶揄したことに関連している。マイアはかつて、1950年代半ばまでに形成された集団遺伝学を豆袋遺伝学と批判した(Mayr 1959a; Mayr 1976)。彼は当時の集団遺伝学に対して次のように注意を促した。「この時代は過度の単純化がなされていた。進化的変化は、豆袋から豆を出し入れするのと同じように、本質的に遺伝子のおし入れとして表現されていた」(Mayr 1976, p. 309)。マイアによると、当時の集団遺伝学では遺伝子間の相互作用が考慮されていないため、一つの遺伝子に対して一つの絶対適応度が想定されていた。このことが実際に想定されていたかはさておき<sup>21</sup>、集団遺伝学モデルの前提が単純化されていることは確かであろう。ただしマイアは、当時の研究状況を否定しているわけではなく、研究分野の発展に必要な段階であると述べている。

話を戻そう。集団的思考による進化論の特徴づけは、生物学の哲学者や歴史家の間で広まった。しかし、マイアによる集団的思考の解釈と集団遺伝学への批判はどちらも難点がある。ここでは、集団遺伝学批判についての問題点を指摘し、マイアによる集団的思考の解釈の問題点は次項でみることにしよう。集団遺伝学はダーウィンの自然選択説の受容に大きく貢献し、総合説の基礎を築くことにも成功した。ところが、マイアは集団遺伝学の数理モデルでは自然選択を理解できないと述べており、この主張は集団遺伝学の成果と齟齬をきたしているように見える。マイアが集団遺伝学を本質主義的とする理由は、集団遺伝学では生命現象を数学化するとき過度な単純化がなされ、生物の個体間に実在する性質の違いを捨象してしまうからである。たとえば、フィッシャーの想定した大集団や、その帰結として遺伝子間の相互作用を軽視することがそれにあたる。

確かに、生命現象を数学的に表現するとき単純化は欠かせない。だがそうした単純化は、メンデル遺伝学と生物測定学派を調停し、集団遺伝学を確立するために重要な役割を担った。生物測定学派では大集団を想定することが方法論の核であった。それゆえ、非常に多くのメンデル的な遺伝物質が形質発現にかかわるといえるのは数学的処理があまりに面倒で、実験によってテストすることも難しいので、生物測定学者にはメンデル的な遺伝物質は受け入れられなかった。それに対しフィッシャーは、生物測定学派と同じく大集団を

<sup>21</sup> ウィンターは、当時の集団遺伝学者であるフィッシャーやライトのモデルの前提を分析し、それらの前提にマイアの指摘する想定はなされていないことを示した。そして、「マイアの主張は(…)当時の理論の仮定に関する誤解に基づいている」(Winter 1997, p. 161)と結論づけている。

想定していたにもかかわらず、進化の一般的な規則性に注目することで、生物測定学派の敬遠した遺伝物質の詳細な処理という難点を回避することができた (Morrison 2004)。フィッシャーが調停に成功したのはマイアの批判とは裏腹に、「大集団」を想定したからであり、それによって遺伝物質の詳細を扱わずに生物集団についての一般的な特徴を浮き彫りにできたのである。しかも、単に変異を遺伝による変異と環境による変異に区別しただけでなく、遺伝による変異をいくつかの成分に分解することも可能にした。個体間に実在する性質の細かな違いは捨象することになるかもしれないが、集団遺伝学は生物集団の重要な特徴を捉えることができる。

#### 4. 1. 3 ソーバーによる集団的思考

ところで、そもそもマイアによる集団的思考の解釈は正しいのだろうか。集団的思考はマイアが提唱した考え方であるが、上でみたように進化論の特徴をうまく捉えているとはいえない。ソーバーは、マイアによる集団的思考の捉え方を批判し、集団的思考のより適した理解を提示した (Sober 1980)。ここでは、ソーバーによる集団的思考について解説する。また、それと合わせて、進化論ではなぜ集団的思考が採用されているのかについて掘り下げて分析する。

マイアによると、集団的思考は平均といった抽象的対象が実在することを認めず、生物の個体間の違いを実在とする考え方である。そしてマイアは、フィッシャーをはじめとする集団遺伝学者に対し、個々の生物の違いを実在とはみなさない本質主義者だと批判した。しかし、集団遺伝学者を含め、個々の生物の違いが実在しないと考える人などいるのだろうか。ソーバーは、変異の存在は本質主義と集団的思考との相違点ではないとする。ソーバーによると、本質主義と集団的思考のどちらの考え方を採用しても、変異の存在は認めることができる。両者の違いはそのことではなく、変異を説明するときの戦略にある。集団的思考は、単に本質主義的思考を拒否しただけでなく、後述するアリストテレスの「正常モデル (normal model)」という伝統的な考え方を排除したのである。それでは、ソーバーによる集団的思考の解釈を詳しくみてみよう。

ソーバーによると、本質主義は変異を構成している基礎的な秩序の解明を目的とし、アリストテレスの正常モデルという説明方式を採用する。正常モデルでは、どのようなものにもそれ本来の存在の仕方と場所があり、その本来的な姿を正しく把握することが本質の理解につながるとされる。そして、本来的な姿を正常あるいは自然な状態とし、何らかの力が干渉して本来的な姿からの偏りを異常あるいは不自然な状態とする。物理現象を例に考えてみよう。岩のような重い物体はほとんど動かないが、埃のような軽い物体はよく動く。重い物体と軽い物体という違いの背後にあって、それぞれをまとめあげている秩序とは何だろうか。アリストテレスの正常モデルによると、地上において重い物体はいままでい

う地球の中心に位置することが自然な状態である。だが、ほとんどの重い物体はそこにはない。なぜなら、物体に何らかの干渉力が働いて、地球の中心に位置するのを妨げているからである。このように、物体の状態のさまざまな違いは自然な状態からのずれとして説明される。つまり、干渉力がなければ、すべての重い物体は同じ場所に位置することになる (Lloyd 1968)。

近代科学以降、物理学には自然や不自然といった言葉は登場しなくなるが、アリストテレスの正常モデルを対応させることはできる。たとえばニュートンの第一法則によると、物体に力が働かなければ、その物体は静止するか等速運動をする。いわゆる慣性の法則である。力が働くか働かないかで自然な状態と不自然な状態を区別できるという点でアリストテレスの考えとは両立するが、何を自然状態とするかについてはアリストテレスの考えと異なっている。アリストテレスの考えでは、物体が地球の中心に止まっているのが自然な状態である。一方、ニュートン力学では、静止だけでなく等速運動も自然な状態にあたる。もちろん、自然と不自然という用語はニュートン力学には用いられていないが、区別自体はつけられるのである。

では、生命現象に正常モデルを適用するとどうなるのだろうか。アリストテレスは生命現象に自らの正常モデルをあてはめた。たとえば遺伝について考えると、一切干渉力を受けなければ、子は親に正確に似る。つまり、親子の違いは干渉力によって説明されることになる。干渉力が強すぎると奇形が生まれ、奇形は正常な遺伝パターンからの偏りとされる。本質主義的な正常モデルでは、干渉力が作用せずに、親子で一致している性質を本質とし、そのような性質を備えていることを自然あるいは正常な状態とみなすのである。正常モデルは物理学では採用こそされないが、対応づけることは可能であった。ところがダーウィン以降、進化論に関しては自然や不自然という区別をあてはめることはできなくなった。

ここまでくると、マイアの類型学的思考の解釈が誤っているのは明らかである。マイアによると、類型学者の本質主義的思考は平均のようなタイプを实在すなわち本質とみなすが、個々の生物の違いは幻想にすぎないとする。しかし、上で述べたように、本質主義者は個々の違いが实在しないと考えていない。むしろ、本質主義の正常モデルは変異を説明する強力な道具となっている。本質主義は、タイプだけでなく個々の違いが实在することも認める。本質のみが实在し、それ以外の性質は幻想だとは考えていない。本質以外の性質もきちんと实在し、そうした性質は本質からのずれとして理解しているのである。

さて、ダーウィン以降、本質主義的な正常モデルの考えはどうなったのだろうか。ここで対抗馬として「集団的思考」が登場する。ソーバーによると、集団的思考は誤差論を進化現象に適用するときに導入された。誤差論というのは、測定時に生じる誤差を数学的に処理するための理論である。誤差論を発展させたラプラスやカール・ガウスは、観察においてほんとうは唯一の真の値が存在するにもかかわらず、観測者が観察ごとに結果を読み間違えてしまい誤差が生じ、観察結果がばらつくと考えた。また、観察結果は真の値と誤

差の二つの成分からなり、観察回数が多ければ観察結果の平均値は真の値を表すとした。誤差論を使った変異の説明では、変異は自然界に関するものではなく、観察に関するものとされる。マイアの類型学的思考というのはこの誤差論の考え方に近い。すなわち、平均が真の値であり、変異や誤差は幻想である。

その後、社会学者のアドルフ・ケトレーは誤差論を自ら「社会物理学 (Social Physics)」と呼ぶ分野へ適用した (Quetelet 1835)。ケトレーは「平均的人間 (average man)」という概念を考案し、これにより多様な性質や特異的な性質を除外し、中心となる性質に注目した。彼は社会現象の理解を容易にするため、虚構として平均的人間を導入する。その一方で、社会における平均的人間と物理学における重心とが似ており、重心が因果的役割を担うことから、平均的人間も同様の役割を担うと考えた。このことにより、ケトレーは平均的人間を単なる抽象物ではなく実在的なものとみなすようになる。ケトレーにとって、誤差論は誤差についての法則であったが、誤差は観察ではなく自然界の出来事に関するものであった。ただし、ケトレーは個体間の違いを重要とは考えておらず、あくまで平均に注目した。

「変異」の捉え方を大きく変えたのは、1. 1. 3項で紹介したゴールトンである。ゴールトンは、平均ではなく、分布に注目した。彼は、ある世代の変異は前の世代の変異、およびその変異の遺伝により説明されるとする。彼は誤差分布を遺伝によって生じる個体差と関連させる。誤差法則を単に誤差についてではなく、分布についての法則とみなしたのである。ゴールトンは遺伝に関心があり、さまざまな人種や階級の人体測定をおこなった。その結果、たとえば人の身長や胸囲はどんな種類の集団で測定しても、似たような釣鐘型の確率分布となることを示した。この確率分布は「正規分布 (normal distribution)」、あるいは「ガウス分布 (Gaussian distribution)」と呼ばれている。身体的特徴などの変異はもはや測定誤差によるものとはみなされなくなった。

ゴールトンは、生物集団にみられる形質の確率分布を遺伝による要因と環境による要因に分離させた。ゴールトンは遺伝要因として「祖先遺伝の法則 (law of ancestral heredity)」を考案した。この法則によれば、形質の半分はそれぞれの親から、1/4 はそれぞれの祖父母たちから、1/8 は曾祖父母から、・・・という仕方で受け継がれる。そのため、変異は遺伝要因によって減少することになる。ところが、実際の観察結果は、変異の量が世代を通じて一定であることを示している。そこでゴールトンは、環境要因が変異を増加させるように作用すると考えた。遺伝要因による変異と環境要因による変異を足し合わせると、世代を通じて変異は一定になると説明する。このように、実際に観察される形質の変異は遺伝要因と環境要因の二つの分布を足し合わせたものとして表される。ゴールトンにとって、変異は単なる測定誤差ではなく、それ自体に法則的な効果を担う集団の性質なのである。変異は個体の性質ではなくなり、集団の性質となった (Sober 1980)。科学哲学者のイアン・ハッキングは、ゴールトンを集団レベルの現象を自律的に説明し、偶然という厄介な概念を手なずけるのに成功した偉大な人物として讃えている (Hacking 1990)。自律的な説明と

は、変異を説明するのに、個体の性質を積み重ねるのではなく、集団自体のしたがう法則を使うことである。そのとき、確率分布を用いて集団の変化が表現される。ゴールトンの説明はまさにそのようになっている。

マイアによると、集団的思考は平均などの抽象物は実在せず、個体の唯一性や違いのみが実在するという考え方であった。だが、この解釈も間違っている。ソーバーによると、集団的思考とは変異を集団の性質とみなす考え方であり、生物個体の諸性質は無視される。ダーウィン以降、集団の概念は進化の理論化において重要な役割を担ってきた。生物測定学派もメンデル学派も集団の性質を特定し、集団間の変化の定式化に努めてきた。ゴールトンはダーウィンの自然選択説を支持していなかったが、変異を集団の性質とする考え方は生物測定学派、さらにはフィッシャーなどの集団遺伝学者に受け継がれることになる。マイアはフィッシャーを代表とする集団遺伝学者を本質主義者として批判したが、実際はその逆である。フィッシャーが生物測定学派とメンデル学派を調停したときに「分散」の概念を導入しており、これはまさに集団的思考を採用していたことを表している。

フィッシャーは『自然選択の遺伝的原理』のなかで自然選択モデルを導出した後に、次のように述べている。

自然選択の基本定理は熱力学の第二法則と非常によく似ていることに気づくだろう。どちらの理論も集団もしくは集合体の性質を扱うが、実のところ集団を構成する個々の対象とは関係がない。また、どちらも統計的な法則である。さらに、どちらの理論も測定可能な量の一定の増加が要請されている。一方は物理系のエントロピーの増加、他方は〔集団の増加率を表すマルサスパラメータ〕 $m$ によって測定可能な生物集団の適応度の増加である（1930, p.39）。

フィッシャーは進化論が集団を扱う理論であることを正しく理解したうえで、数学化をおこなったのである。

ここで、集団的思考についてももう少し掘り下げてみよう。ゴールトンにとって、集団に作用する法則は祖先遺伝の法則であった。この法則は残念ながら誤りであることがわかったが、遺伝の仕組みはその後、メンデル遺伝学、そして分子遺伝学が解き明かしていった。ここで重要なのは、生物の形質は遺伝するということである。生物は次の世代に形質を遺伝させ、世代交代を繰り返すことで変化していく。このことは、石や机のような無生物にはない特徴である。また、世代交代をするときに、前の世代の遺伝子がすべて次世代に受け継がれるわけではない。適応度の違いによって遺伝子や個体が取捨選択される。生存や繁殖に有利な遺伝子や個体は不利なものより多く選ばれて、次世代の集団を形成する。これが自然選択である。また、集団の大きさも遺伝子や個体の抽出に影響を与える。集団サイズが小さければ、適応度の違いをあまり反映しない遺伝子抽出がおこなわれる。すなわち、遺伝的浮動である。世代交代をするときの遺伝子抽出は進化現象の典型例である。抽

出 (sampling) というのは、基礎的な物理理論が描く現象ではない。力学が物体の「運動 (motion)」を描くのに対し、進化論は生物の「抽出」を表現する。そして、抽出がおこなわれるには、一つの対象だけではなく、集団が存在しなければならない。進化論が集団的思考という枠組みを採用しているのは、進化というのが集団のなかからその一部を抽出する現象だからである。それゆえ、進化論は集団を基礎とした理論なのである。

#### 4. 1. 4 ブランドンたちのしみ出し論証の難点

ここで、ブランドンたちの論証を思い出そう。ブランドンたちは、しみ出し論証と自律性論証によって、進化論の特徴を明らかにしようとした。本項ではしみ出し論証について、次項では自律性論証について批判的に検討する。

3. 1節で紹介したしみ出し論証は、DNA 塩基の点突然変異という微視的な現象の影響が巨視的な進化現象にまでしみ出してくるというものであった。この論証では、次のことが前提とされていた。

微視的な DNA の突然変異が巨視的な進化現象に影響を与える。

ここでは、この前提について検討する。

しみ出し論証に対し、ローゼンバーグたちは、非決定論的な量子現象が進化現象に影響を及ぼす可能性は圧倒的に小さいと反論する (Graves, Horan, and Rosenberg 1999)。つまり、ローゼンバーグたちは、ブランドンたちの上の前提に批判を加えるのである。ブランドンたちの論証はこの前提にもとづいているため、この前提が誤りであれば、論証自体も誤っていることになる。ローゼンバーグたちは、微視的な現象の効果がしみ出すには、次の条件が満たされなければならないとする。それは、非決定論的な量子現象が点突然変異を引き起こすこと、点突然変異が頻度依存の自然選択の働いている集団に生じること、点突然変異によって有利な遺伝子が不利に変化するかまたはその逆が生じること、対立遺伝子の一方が集団内で固定することである。ローゼンバーグたちは、これらすべての条件を満たす可能性は極めて小さいので、微視的な現象が巨視的な進化現象に影響することはほとんどないと批判する。

一方、ステイモスはブランドンたちを擁護するため、量子力学によって記述できる点突然変異の経験的証拠を挙げた (Stamos 2000)。ステイモスは量子現象の非決定性が互変変換、トンネル効果、熱運動を通じて点突然変異につながることを示し、点突然変異は量子力学によって記述できると主張する。それに対し、ミルスタインは、点突然変異が進化現象の一部にすぎないことを示し、ローゼンバーグたちを擁護する (Millstein 2003)。ここで注意すべきは、突然変異によって進化が生じることはだれも否定していない点である。上

の前提の是非をめぐる争点はむしろ、ミルスタインも指摘するように、点突然変異が進化現象に及ぼす実際の頻度についてである。確かに、ステイモスが示すように、点突然変異は量子力学によって記述できるだろう。だがその一方で、ミルスタインが主張するように、点突然変異は進化現象の一部にすぎないことも正しい。つまり、点突然変異が量子力学によって記述できることと、点突然変異が進化現象の一部であることは両立するのである。

では、問題点はどこにあるのだろうか。ブランドンたちの論証では、点突然変異が非決定論的な現象であるがゆえに、進化現象全体が非決定論的であるという結論が引き出されている。この論証が成り立つには、ブランドンたちの上の前提が全称命題でなければならない。というのも、結論はすべての進化現象について述べており、この結論を引き出すためには上の前提ですべての進化現象の要因について言及しなければならないからである。ところが前述の対立をみる限り、ブランドンたちの前提は全称命題ではなく、特称命題として理解すべきである。すなわち、その前提はすべての進化現象が DNA 塩基の突然変異によって生じるのではなく、いくつかの進化現象は DNA 塩基の突然変異によって生じるということ述べているのである。ゆえに、ブランドンたちの論証では、上の前提から進化現象全体についての結論は導き出せない<sup>22</sup>。また、しみ出し論証では、集団的思考という進化論の重要な特徴を説明できない。したがって、ブランドンたちのしみ出し論証はうまくいかない。ただし、ブランドンたちは、進化論が集団現象を説明する理論であることを理解していた。これについては、次項でみることにしよう。

#### 4. 1. 5 ブランドンたちの自律性論証の難点

3. 2 節では、ブランドンたちの「自律性論証」を紹介した。自律性論証とは、次のような論証であった。ブランドンとカーソンによると、量子力学が予測に成功するのは、粒子の集団レベルにおいてであり、このことは遺伝的浮動も同様である。遺伝的浮動モデルは、個々の遺伝子についての一意的な予測はできないが、集団という適切なレベルでは確率的に予測ができる。そして、ブランドンたちによると、遺伝的浮動モデルは量子力学と同様、集団レベルにおいて成功した理論なのである。それゆえ、遺伝的浮動は非決定論的な現象である。

自律性論証では、ブランドンたちも進化論が集団レベルの自律的な説明であることを認めている。ブランドンたちが進化論を自律的な説明と述べる時、4. 1. 3 項で解説したハッキングの言葉を引いている。ところが、法則が自律的であることと現象が非決定論

---

<sup>22</sup> 現象が非決定論的であるというためには、すべての現象が非決定論的である必要があるのだろうか。量子現象の場合、コペンハーゲン解釈によると、光子や電子は測定しないときは決定論的に運動しており、測定したときだけ非決定論的に振舞う。つまり、すべての現象が非決定論的だというわけではない。一つでも非決定論的な現象があれば、現象の非決定論性を認めることになるのだとすると、ミルスタインの批判はうまくいかないだろう。

的であることは異なる。これはハッキングも注意を促していることである。ハッキングは、統計法則が自律的であることを論拠に、その法則が非決定論的であると述べていない。つまり、ブランドンたちのように、量子力学と遺伝的浮動モデルはどちらも集団の振舞いの確率的な予測に成功しているから類似しているということから、そこで用いられる確率概念を同じように実在論的に解釈できるとは限らない。それゆえ、遺伝的浮動が非決定論的な現象であることも結論づけられない。したがって、確率的な浮動モデルが自律的であることから、現象が非決定論的であることは導き出せないのである。自律的というのは、集団のしたがう法則にもとづいて集団現象を説明することであり、そのことは現象が非決定論的かどうかは関係がない。

ここで、仮にブランドンたちの議論に合わせて、非決定論の主張を緩めてみるとどうなるだろうか。すなわち、確率や統計を用いて集団レベルの変化を自律的に説明すれば、現象が非決定論的であることが示されると仮定するならば、遺伝的浮動が非決定論的な現象であると主張できるのだろうか。非決定論の主張をこのように緩めて適用範囲を広げると、その主張は内容の乏しいものになってしまうだろう。たとえば、コイン投げのモデルでは、コインの表と裏の確率分布という集団レベルの特性として結果が説明される。また、コイン投げのモデルは確率過程として表すことができる。それゆえ、緩めた非決定論の基準にしたがうと、コイン投げは非決定論的な現象ということになる。だが、コインを投げるたびに非決定論的な現象が生じると主張する人はいないだろう。非決定論の基準を緩めることで、コイン投げが非決定論的な現象であると述べたとしても、その主張には有意義な内容が含まれていない。したがって、ある法則やモデルが集団レベルの変化を自律的に説明できるとしても、そのことだけから現象が非決定論的であると主張できないのである。

ブランドンたちの論証には他にも欠点がある。確かに、量子力学と遺伝的浮動モデルは集団の変化をうまく予測している。この点で両理論は類似している。ところが、量子力学と遺伝的浮動モデルは重要な点で異なっている。それは、量子力学が一個の対象の変化を基礎とするのに対し、遺伝的浮動モデルは集団の変化を基礎として現象を表現する理論だという点である。これは4. 2. 2項で解説した集団的思考とも関連している。量子力学は一個の量子の状態について確率的な予測しかできないが、ブランドンたちが言及するコペンハーゲン解釈では、量子力学における確率概念を実在論的に解釈する。つまり、コペンハーゲン解釈が量子現象を非決定論的とするのは、集団レベルではなく一個の量子の状態に関する主張である。ブランドンたちが集団レベルの自律性という量子力学と遺伝的浮動モデルの類似点を主張するのであれば、量子力学を一個の量子ではなく、量子の集団の記述として解釈する必要がある。これは、コペンハーゲン解釈ではなく、アインシュタインの統計的解釈に近いものである。統計的解釈では、波動関数の状態ベクトルを一つの系の記述ではなく、系の集団の記述として解釈する。この解釈はすでに否定されてはいるが、コペンハーゲン解釈と対立する解釈として提唱されたものである。統計的解釈では、現象

を決定論的と考え、量子力学における確率概念を反実在論的に解釈する。つまり、量子力学と遺伝的浮動が集団現象を自律的に説明しているという類似点を主張したいのであれば、ブランドンたちは量子力学に対して統計的解釈を採用する必要がある。だが、もし統計的解釈を採用するのであれば、量子現象が非決定論的であるという前提を放棄しなければならない。量子力学に依拠して議論をするには、量子力学に対して一貫した解釈をおこなわなければならない。ブランドンたちが非局所実在論を採用する理由の一つは、科学理論への一貫性した態度を支持していたからであった。そのことを踏まえると、なおのことブランドンたちは一貫した解釈をしなければならない。しかし、ブランドンたちの自律性論証は一貫した解釈にもとづいていないのである。以上みてきたように、ブランドンたちの自律性論証もうまくいかない。

本章では、進化論の扱う対象について論じた。進化論は一つひとつの対象の変化ではなく、生物集団の変化を表す理論である。それは、ニュートン力学や量子力学の説明とは異なるものである。

## 4. 2 遺伝的浮動はフィクションではない

本節では、ローゼンバークたちとブランドンたちのもう一つの共通点について検討する。それは、進化現象は突き詰めると物理学の基礎的な理論で説明できるという想定である。ここでは、遺伝的浮動はフィクションだというローゼンバークの論証を足がかりに、二つ目の想定の問題点を指摘する。また、そのことを通じて、進化論の特徴を明らかにする。

### 4. 2. 1 集団遺伝学は単純化しすぎなのか

4. 1. 2項で述べたように、マイアはかつて、集団遺伝学を「豆袋遺伝学」と揶揄した(Mayr 1959a; Mayr 1976)。マイアは当時の集団遺伝学が過度に単純化されたものであり、集団遺伝学のモデルは豆袋から豆を出し入れすることを表すのと変わらないと批判した。マイアがこのような批判をおこなった 1950 年代は、分子生物学が飛躍的発展を遂げた時代であった。そのことから、遺伝学の成果は生物学の各分野において無視できないという当時の風潮が予想される。その後、分子レベルの生物学研究は急速に発展することになる。マイアが集団遺伝学を揶揄してから 50 年近く経つが、現在の集団遺伝学は「豆袋遺伝学」ではなくなったのだろうか。遺伝学者のジェームス・クローはこれまでの集団遺伝学の動向について、豆袋遺伝学は「有益な近似と新しい洞察を加えるために細部への注意を回避することによって、いまでも存続している」(Crow 2001, p. 771)とまとめている。現在でも、集団遺伝学モデルの前提は単純化されているようである。

ところで、モデルを単純化することにはどのような問題があるのだろうか。マイアは、単純化したモデルでは「完全な理解 (complete understanding)」 (Mayr 1976, p.326) にほど遠いと批判する。こうした考えは、ローゼンバーグたちの論証の根幹にあるものと同じである。ローゼンバーグたちはこのことを、当時の集団遺伝学を批判する文脈ではなく、現在の集団遺伝学モデルにおける確率概念の哲学的意義を問う文脈で論じた。確率概念が問題になるのは、私たちが決定論的な世界観を常識としているからである。決定論的な世界では、どのような出来事についてもそれが起きるか起きないかのいずれかであり、出来事が確率的に起きることなどありえない。そして、出来事の変化はニュートン力学によって正確に記述することができる。1. 2. 2項で述べたように、ラプラスは初期状態に関する完全な情報を持つ存在者を想定し、ニュートン力学の表現する世界観を明示した。ラプラスの魔物は確率概念を一切用いることなく、ニュートン力学によって個々の物体の運動を一意的に記述する。その意味で、ニュートン力学の描く世界は決定論的である。ローゼンバーグは、決定論的世界観にもとづき確率的な進化モデルについて次のように主張する。「進化論に現れる確率の類いは進化過程に登場しない。このことにより、生物学者の用いる理論は、人間の認知と計算処理上の制約を受けた(…) 道具となっている」 (Rosenberg 1994, p.57)。ローゼンバーグによると、人間の持つ不完全な知識によって単純化された理論は、実在の現象を表していない。単純化の問題点というのは、生命現象に対して不完全な説明を与えることである。

ローゼンバーグはさらに、遺伝的浮動はフィクションであると主張した。ローゼンバーグによると、遺伝的浮動が説明上必要であるのは、私たち人間が完全な情報を持っていないからである。2. 2. 1項で述べたように、ローゼンバーグは遺伝的浮動として説明される現象を二つ挙げている。一つは、密猟者による捕獲の例であり、もう一つは、珍しい突風により変形した木にキリンの首が引っかかる例であった。ローゼンバーグによると、どちらの例も、生物学者は情報が不足しているときに遺伝的浮動を説明に用いるということを示していた。

ローゼンバーグはこれら二つの事例から、「全知全能者の立場からすると、遺伝的浮動という概念は一切必要ない」 (ibid., p. 73) と結論づけた。全知全能者は、密猟者が首の長いキリンを捕獲したことや、首の長いキリンが枝に引っ掛かったことを知っている。これに対し、生物学者にはそのような情報が欠けている。それゆえ、「私たち限りのある人間は(…) 理論を適用する際に確率を必要とし、そして浮動の概念を必要とする」 (ibid., p. 73)。つまり、私たちには知りうる情報とそれを処理する能力に限界があるため、確率や遺伝的浮動の概念に頼らざるを得ないのである。これが、遺伝的浮動が説明上必要であることの、ローゼンバーグによる理由であった。

#### 4. 2. 2 ミルスタインの批判

ローゼンバーグの論証に対し、ミルスタインはいくつかの批判をおこなっている (Millstein 1996)。ここでは、そのなかから二つの批判を紹介し、ローゼンバーグの提示した問題を再考する。

まずは、ローゼンバーグの挙げた事例に対する批判を検討してみよう。ミルスタインによると、ローゼンバーグの事例はいずれも遺伝的浮動に関するものではない。一つ目の例では、首の長いキリンは動物園で人気があるため、密猟者に捕獲された。二つ目の例では、首の長いキリンはその長さゆえに枝に引っ掛かった。いずれの例も、長い首が自然選択に不利に働いているので、遺伝的浮動ではない。ローゼンバーグ自身も二つ目の例が自然選択の現象であることを認めており、次のように述べている。すべての事実を知る人は、「短期間で環境が変化したことにより、長い首は適応的でなくなり、したがって自然選択によって遺伝子頻度が増加したと述べるだろう」 (Rosenberg 1994, p.73)。ミルスタインはこのことを踏まえて批判を続ける。「浮動以外の事例から議論をはじめ、すべての事実を知っているなら浮動の概念は必要ないだろうと結論づけたとしても、多くを証明していない。(・・・) ローゼンバーグは自然選択の明瞭な例ではなく、遺伝的浮動の明瞭な例を考察する必要がある。そうしない限り、全知全能者の観点から浮動の必要性に関する結論は引き出せない」 (Millstein 1996, p.S12)。ミルスタインの批判は、遺伝的浮動がフィクションであると論じるためには、ローゼンバーグは実際に浮動とされている事例を用いなければならないというものである。

ミルスタインが正しく指摘しているように、ローゼンバーグの挙げた事例は自然選択である。しかし、ローゼンバーグに遺伝的浮動の事例を挙げる必要があるというミルスタインの批判については同意しかねる。なぜなら、ローゼンバーグは自身も認めるように、説明上遺伝的浮動とされる現象が実際には自然選択であると考えているからであり、そのために彼は自然選択の事例を持ち出した。ローゼンバーグにとって、遺伝的浮動の現象など存在しないのである。ローゼンバーグは遺伝的浮動とされるどんな現象についても自身の論証が成り立つと主張しているので、以下では、通常遺伝的浮動の典型例として挙げられる配偶子間の無作為抽出を扱うことにする<sup>23</sup>。ここで注意すべきは、ローゼンバーグが遺伝的浮動を自然選択に消去できると述べていることである。

それでは、ミルスタインの次の批判に移ろう。彼女は、ローゼンバーグの議論を進めると、遺伝的浮動だけでなく自然選択も消去されてしまうと批判する。これは、上でみたローゼンバーグの主張とは異なる。ミルスタインは、自らの批判に対するローゼンバーグの反論を見越して次のように述べる。「ローゼンバーグであれば、全知全能者は配偶子抽出の出来事の詳細をすべて知っている」と論じるだろう。したがって、全知全能者が自然選択

<sup>23</sup> ミルスタインは実際に遺伝的浮動とされる事例として、配偶子間の無作為抽出や創始者効果 (founder effect) などを挙げている。創始者効果とはマイア (Mayr 1963) により提唱された概念で、もとの集団から隔離された少数の個体によって「新しい個体群が確立されるときに、もとの集団における遺伝的変異からごく一部だけが引き継がれる効果」 (ibid., p. 211) のことである。

によってその特定の現象を説明できないとしても、無作為抽出を構成する過程を詳しく述べることによってその現象を説明するだろう。このことは、全知全能者の立場からすると遺伝的浮動が消去できることを示唆している」(ibid., p.S17)。ミルスタインはローゼンバーグのこのような反論を見越して批判を加える。ミルスタインによると、全知全能者は自然選択の過程を構成する一つひとつの個体の振舞いを述べることができるが、遺伝的浮動や自然選択の概念によって説明される集団レベルの現象を見落としてしまう。ところが、進化は個体ではなく集団レベルの現象である。したがって、「浮動が消去可能であるなら、自然選択も同様に消去可能である」(ibid., p. S17)。ミルスタインはこのように、ローゼンバーグの議論を進めると、遺伝的浮動は自然選択に消去されるどころか、その自然選択自体も消去されることになるかと批判する。

全知全能者が何を知りうるかは私にはわからない。だが、ミルスタインが批判するように、ローゼンバーグの議論を進めると、遺伝的浮動だけでなく自然選択の概念も消去できるように思われる。なぜなら、ローゼンバーグは自然選択を一つひとつの個体の振舞いによる現象と考えているからである。その上でローゼンバーグは、「自然選択の現象と理論は突き詰めると決定論的である」(Rosenberg 1994, p. 73)と主張する。一つひとつの個体の振舞いと決定論の主張を結びつけるのは「ラプラスの魔物」である。ラプラスの魔物が世界を記述する道具はニュートン力学であり、ニュートン力学は一つひとつの物体の運動の軌跡を決定論的に表現する理論である。したがって、ローゼンバーグの想定する全知全能者がラプラスの魔物であるなら、ミルスタインが批判するように、その魔物は自然選択を含むあらゆる現象を一つひとつの物体の決定論的な物理過程として記述するだろう。ゆえに、ローゼンバーグの議論を進めると、遺伝的浮動と思われていた現象は自然選択ではなく、ニュートン力学によって記述される個々の物体の物理過程に消去されることになる。

本項では、ミルスタインの批判を参考にしながら、ローゼンバーグの論証を検討した。ローゼンバーグは、完全な知識や情報があれば遺伝的浮動の概念は消去できると主張する。ところが、何に消去されるのかについて二つの可能性が考えられた。一つは自然選択であり、もう一つはニュートン力学で表現される個々の対象の物理過程である。ミルスタインはここで批判を止めているが、本稿では議論を引き戻して以下の問題を検討する。完全な知識や情報を持つ存在者にとって遺伝的浮動とされる現象は消去できるのだろうか。できるとしたら、どのような現象に消去できるのだろうか。この問題に対して、ローゼンバーグの意図を汲み、全知全能者が持ちうる情報を二種類に区別して考察する。一つは、ラプラスの魔物のようにニュートン力学に関する完全な情報がある場合で、もう一つは、それに加えて生物学に関する完全な情報がある場合である。4. 2. 3項と4. 2. 4項で、それぞれについて考察する。

### 4. 2. 3 物理学的情報

まずは、物理学に関する完全な情報を持つラプラスの魔物のような存在者を仮定し、遺伝的浮動による説明が消去できるかについて考察しよう。ここでも、遺伝的浮動の典型例として配偶子間の無作為抽出を取り上げることとする。一世代の間に非常に多くの配偶子がつくられるが、次世代の集団を形成するのはそのなかのごく一部だけである。繁殖時に配偶子の無作為抽出がおこなわれるため、世代間で遺伝子頻度は変化する。遺伝的浮動は次世代の遺伝子頻度をどのように変えるのだろうか。1. 1. 3項で紹介した遺伝的浮動モデルを思い出そう。ある集団に有性生殖をする個体が  $N$  個存在し、各個体は遺伝子  $A$  か遺伝子  $a$  のいずれかを持つと仮定する。説明を簡単にするため、次世代の個体数は現世代と同じになると仮定すると、繁殖時に配偶子のなかから  $2N$  個の配偶子が抽出されることになる。ただし、各配偶子は無作為に抽出されるとする。いま、現世代に遺伝子  $A$  を持つ個体が  $i$  個存在し、その頻度を  $p_i$  とする。このとき、次世代に遺伝子  $A$  を持つ個体が  $j$  個存在する確率  $p(i, j)$  は、

$$p(i, j) = \binom{2N}{j} p_i^j (1 - p_i)^{2N-j} \quad (4.1)$$

と表される。これは、ライト-フィッシャーモデルと呼ばれる遺伝的浮動の基本的なモデルであった。

式 4.1 は、次世代の状態が現世代の状態のみに依存して決まることを示している。「マルコフ性 (Markov property)」を持つ。すなわち、遺伝子  $A$  を持つ個体の数は式 4.1 の推移確率にしたがうマルコフ連鎖になっている。また、この式は繰り返し掛け合わせることが可能であり、数世代後の遺伝子  $A$  の存在確率を求めることができる。さらに、ある特定の世代の後に集団内のすべての個体が遺伝子  $A$  だけになる確率なども求めることができる。この式は数学では「二項分布 (binomial distribution)」と呼ばれ、遺伝的浮動以外の現象にも適用することができる。たとえば、この式を用いるとガラポンをまわして出てくる玉の結果が予測できる。ガラポンのなかには赤玉が 10 個と白豆が 9990 個入っていると、ガラポンを 5 回まわすとする。このとき、赤豆が 1 個出る確率は式 4.1 で表すことができる。すなわち、浮動モデルとガラポンの抽出モデルは数学的に同じなのである。ガラポンから玉を抽出することは豆袋から豆を取り出すのと同程度に単純化されており、ライト-フィッシャーの遺伝的浮動モデルは、マイアの指摘する意味で豆袋遺伝学である。マイアによる集団遺伝学批判については次項で扱うことにし、以下では、遺伝的浮動と玉抽出の比較を通してローゼンバーグの論証を批判的に検討する。

ローゼンバーグは、完全な情報を持つ全知全能者の立場からすると、遺伝的浮動はフィクションであると主張する。いま、全知全能者を物理学に関する完全な情報を持つラプラスの魔物と仮定している。ラプラスの魔物は遺伝的浮動や玉の抽出過程をどのように表現

するのだろうか。式 4.1 の遺伝的浮動モデルは、集団内の遺伝子や玉の変化を確率過程で表現する。これに対し、ラプラスの魔物はニュートン力学によって世界を記述する。ニュートン力学は集団ではなく、個々の対象の変化を表す理論である。ゆえに、魔物は集団に関する概念に一切頼ることなく、個々の配偶子や玉の変化を完璧に記述するだろう。ミルスタインも指摘するように、ラプラスの魔物の立場からすると、遺伝的浮動モデルはおろか玉抽出モデルも必要ない。ラプラスの魔物は遺伝的浮動と玉抽出の過程を個々の対象の物理的な軌跡として記述するはずである。そして、ラプラスの魔物にとって、それらの過程の違いは配偶子や玉の運動量などの物理的性質にあるだけで、それ以外にはないのである。

それではなぜ、私たちには遺伝的浮動と玉の抽出が異なるように思えるのだろうか。ローゼンバークであれば、私たち人間の知識が欠如しているためと答えるだろう。というのも、物理学に関して完全な知識を備えたラプラスの魔物には、あらゆる現象が個々の対象の物理過程にしかみえないからである。そのため、魔物が遺伝的浮動や玉の抽出過程と呼ばれる現象を描くとするなら、各々の配偶子や玉の軌道を個別に記述する。そのとき、配偶子と玉は物理的対象として同等に扱われ、それらの物理的性質だけが注目される。このような記述の仕方は、ラプラスの魔物に限ったことではない。私たち人間もニュートン力学によって世界を記述するときには、配偶子と玉を同じ物理的対象として扱い、その物理的性質に注目するのである。

しかし、配偶子と玉では決定的な違いがある。それは、4. 1. 3 項で述べたように、配偶子は次世代に遺伝するのに対し、玉は遺伝しないということである。フィンチや大腸菌の配偶子が遺伝することは事実であり、ガラポンの玉が自ら複製しないことも客観的事実である。また、フィンチの親子を考えた場合、父と子の配偶子は、たとえそれを構成するすべての塩基配列が同じであるとしても、物理的には異なる対象である。繁殖時に父親と母親の配偶子が接合することによって子の細胞が形成されるが、子が成体になるまでに細胞は何度も分裂を繰り返し、その間に親の配偶子は物理的には消滅する。その代わり、物理的には異なるが、同じ塩基配列を持つ新たな配偶子が複製される。こうしたことはニュートン力学に関する知識だけで表すことができない。というのも、ニュートン力学は物体の生成と消滅を記述しないからである。そのため、ニュートン力学では、配偶子が物理的に消滅することや、新しい配偶子が生成されること、さらには配偶子に含まれる遺伝情報が世代を越えて伝達されることも表現できないのである。このことは、配偶子が物理法則に反することを意味してはいない。そうではなく、4. 1. 3 項で述べたように、進化論が物理学の基礎理論で描こうとする現象とは異なるものを表現しているからである。物理学の基礎理論が物体の「運動」を描くのに対し、進化論は「抽出」を表現する。物理学では運動が最も基本的な (primitive) 現象と認められているように、進化論では抽出こそが最も基本的な現象とされている。生物は生存し、死亡する。世代交代のときに、現世代の形質の一部が次世代に遺伝する。これらの出来事は現に生じており、説明を必要とする現

象である。そのため、進化論では物理学の基礎理論とは異なる説明の枠組みが採用されているのである。

もちろん、配偶子と玉が異なる性質を持つのは私たちの知識の欠如に起因するものではない。むしろ、私たちは物理学以外の知識を手に入れることができるので、配偶子が遺伝するのに対し、玉は遺伝しないことを知っている。私たちはこの違いをもとに、遺伝的浮動と玉の抽出が異なる過程であることを理解することができる。それに対してラプラスの魔物は物理学に関する完全な知識を持っているにもかかわらず、この違いを説明できないため、遺伝現象を表すことができないのである。

本項では、物理学に関して完全な知識を持つラプラスの魔物を想定し、遺伝的浮動の概念の消去可能性について検討してきた。ラプラスの魔物は玉抽出とされている現象を一つひとつの玉の物理的軌跡として記述するので、玉抽出の説明は消去される。ラプラスの魔物にとって、抽出という概念は必要ない。そうすると、遺伝的浮動は配偶子の抽出過程であるから、玉抽出と同じように消去されてしまうように思われる。ところが、物理学に関する知識だけでは、たとえそれが完全であるとしても、配偶子が世代を越えて遺伝するという客観的事実を説明することはできない。世代を通しての生物の変化は、生物個体の物理的軌跡を記述するだけでは表すことができない。ラプラスの魔物は完全な知識を持っているので、遺伝に関する知識も持つことができると反論したくなるかもしれない。また、世代ごとに個体数を数えればよいという反論も考えられるだろう。だがこうした反論は、物理学とは別の種類の知識が存在することを暗に認めてしまっている。その時点で、遺伝的浮動はフィクションではなくなる。遺伝現象や世代を越えての生物の変化は現に生じており、説明すべき現象なのである。したがって、ローゼンバーグの主張とは異なり、遺伝的浮動は個々の対象の物理過程だけから説明できない。

#### 4. 2. 4 生物学的情報

それでは、魔物にさらなる能力を与え、生物学に関しても完全な情報も持っていると仮定してみよう。つまり、生物の生存や繁殖の能力、遺伝などについてあらゆることを知っているとしよう。そのような魔物は遺伝的浮動を消去できるのだろうか。本項では、生物学の知見を用いて、遺伝的浮動が消去できないことを論じる。

近年の生物学の発展には目を見張るものがある。特に分子レベルでは多くの知見が得られてきた。マイアはおそらくこのような状況を見越して、当時の集団遺伝学の前提が単純化されすぎていると注意を促したのだろう。20世紀半ば以降、分子生物学は大きな進展を遂げ、私たちは新しい知識を得ることができた。なかでも、遺伝物質がDNAであると同定されたことは最大の成果である。また、DNAからRNA、アミノ酸、そしてタンパク質へと至る過程が解明されたことも、その後の生物学の発展に大きな影響を与えた。二本鎖DNA

の一本が鋳型となり、遺伝情報が RNA に転写される。三つの RNA、すなわちコドンがひとまとまりとなり、アミノ酸を翻訳する。2. 1. 2 項で、遺伝暗号が冗長であることを説明した。コドンは 64 種類あるのに対し、アミノ酸は 20 種類しかない。そのため、異なるコドンが同じアミノ酸を指定することがある。UCU、UCC、UCA、UCG というコドンはすべてセリンという同じアミノ酸に対応するが、このように同じアミノ酸を指定する二つ以上の異なるコドンを互いに「同義的 (synonymous)」と呼ぶ。また、アミノ酸への翻訳に関しては、すべての DNA がアミノ酸に翻訳されるわけではないこともわかっている。ヒトの場合であれば、大部分の DNA はアミノ酸に翻訳されない。このような塩基配列は「がらくた DNA (junk DNA)」と呼ばれている<sup>24</sup>。同義的なコドンやがらくた DNA の存在が確認されたことも、分子生物学の大きな成果である。

ここでは、全知全能者が生物学に関する知識も持っている想定している。すなわち、同義的なコドンやがらくた DNA の存在を知っている。そのような存在者に遺伝的浮動の概念は必要ないのだろうか。同義的なコドン UCU と UCC は物理的に異なる対象である。しかし、それらはいずれも同じアミノ酸を指定する。そのため、同義的なコドンは同じタンパク質、さらには同じ形質をつくり出す。形質が同じであれば生存と繁殖の能力に違いをもたらさないで、同義的なコドンは同じ適応度を持つことになる。つまり、物理的に異なるが、適応度に関しては同じ対象が存在するのである。がらくた DNA も同様である。がらくた DNA はさまざまな塩基配列をしているため、物理的に異なる仕方で存在している。ところが、それらはいずれもアミノ酸に翻訳されない。したがって、がらくた DNA も物理的には異なるが、適応度に関して同じ対象である。ニュートン力学では、すべての対象に関して位置や運動量などの物理的性質に必ず違いが存在し、ラプラスの魔物のように完全な知識があれば、その違いを知ることができた。ところが、生物学の場合は、適応度という生物学的性質に違いのない対象が存在する。この事実は、生物学に関する知識が増えたとしても変わらないだろう。むしろ、知識が増えたことにより、そのような対象の存在が明らかになったのである。このような対象の存在は、物理学の知識だけでは説明することができない。これは、ラプラスの魔物がいくら物理学に関する情報を持っていようとも、同義的なコドンやがらくた DNA の存在を説明することはできないことを示している。それに対し、生物学の知識も備えた全知全能者は、適応度に違いのない対象の存在を知っている。そのような対象には進化的な違いがないので、抽出は無作為におこなわれる。この過程を説明するには、遺伝的浮動の概念に頼らざるを得ない。全知全能者は生物学に関する知識があるために、遺伝的浮動を消去できない。したがって、全知全能者に遺伝的浮動の概念は不要だというローゼンバークの主張は間違っているのである。

生物学の新たな知見によって遺伝的浮動が実際に生じることが確認できたので、それらの知見によってライト-フィッシャーの遺伝的浮動モデルがどのように正当化されるの

<sup>24</sup> 「がらくた DNA」は日本人の大野乾により命名された (Ohno 1972)。がらくた DNA には、偽遺伝子や繰り返し配列などがある。偽遺伝子とは、かつて機能を持っていたが、今では機能を失った遺伝子である。繰り返し配列とは、同じ塩基配列が繰り返されている配列である。

かをみることにしよう。ちなみに、フィッシャーとライトが遺伝的浮動モデルを提示したのは1930年代であり、分子生物学の知見が急増して得られるようになったのはそれより後の1950年代以降である。ライト-フィッシャーモデルは同義的なコドンやがらくたDNAが発見される前に考案されたものである。それにもかかわらず、これらの存在は遺伝的浮動モデルの正しさを示している。塩基配列が同じコドンや配偶子は一つの同値類に属し、同じ適応度の値を持つ。それら同値類を  $A$  や  $a$  と名づけると、遺伝的浮動モデルの遺伝子  $A$  や遺伝子  $a$  に対応することになる。そして、この二種類の遺伝子が同じアミノ酸や同じ形質をつくり出すなら、つまり、二つの同値類が同義的であるなら、二つの同値類に属するすべてのコドンや配偶子は同じ適応度を持つことになる。この場合、配偶子や遺伝子は物理的に違いがあっても、適応度には違いがないので、抽出は無作為におこなわれることになる。この抽出はまさに遺伝的浮動である。したがって、ライト-フィッシャーの遺伝的浮動モデルは同義的なコドンやがらくたDNAの存在によって正当化することができるのである。

ライト-フィッシャーの遺伝的浮動モデルは、その他の知見とも整合的である。メンデルの分離の法則は遺伝の仕組みを表す重要な法則である。DNAは染色体上に対をなして存在する。分離の法則によると、配偶子を形成するとき、対をなす染色体が一組ずつに分離する。繁殖時には異なる二つの配偶子が混じり合うのではなく、そのまま受け継がれる。そのため、世代を越えて同じDNA塩基配列が存続できる。つまり、DNAは次世代に遺伝可能である。前述したように、遺伝可能性はガラポンの玉にはないDNA特有の性質である。この遺伝可能性は式4.1を「繰り返し」使用できることを正当化する。ゆえに、数世代後の遺伝子頻度を予測することができるのである。また、メンデルの分離の法則によると、次世代の遺伝子頻度は現世代の遺伝子頻度のみに依存して決まる。メンデルの法則によって次の世代の遺伝子や形質の割合が計算できることを考えると、このことは明らかである。そして、これは遺伝的浮動が「マルコフ過程」になっていることを示している。このように、遺伝的浮動モデルは生物学の知見とも両立するのである。

ところで、集団遺伝学モデルは豆袋遺伝学であるというマイアの主張はどのように理解すればよいのだろうか。マイアは集団遺伝学モデルの単純化に注意を促した。彼の指摘するように、確かにライト-フィッシャーの遺伝的浮動モデルでは遺伝子間の相互作用があまり考慮されていない。その意味で、ライト-フィッシャーモデルは単純化されている。その一方で、このモデルはマイアの指摘の後に明らかになった分子レベルの生物学的知見と整合的である。そして、生物学的知見は遺伝的浮動が単なるガラポンの過程とは異なることを示している。同義的なコドンやがらくたDNAの存在は、配偶子間に無作為抽出が生じることの証拠になっている。また、配偶子が遺伝可能であることは、式4.1を繰り返し掛け合わせる理由になっている。さらに、遺伝の法則は式4.1がマルコフ性を持つことを示している。これらは、ガラポンの玉にはない、生物学特有の性質である。ゆえに、遺

伝的浮動モデルと玉抽出モデルは同じ単純な数理モデルであるが、その論拠はまったく異なる。したがって、遺伝的浮動モデルは生物学特有の現象を表しているのである。

マイアの指摘の問題点は、知識の増加が理論やモデルの複雑化につながるという想定にあると考えられる。知識の増加は必ずしも理論やモデルの複雑化につながるわけではない。ニュートン力学に限定すると、ラプラスの魔物は完全な知識を持つにもかかわらず、理論やモデルを複雑化するどころか、ニュートンの三法則と万有引力の法則という単純な法則だけを必要とする。また、ラプラスの魔物は豊富な知識を持っているとしても、遺伝的浮動のモデルを複雑にすることはもとより、遺伝的浮動モデル自体を構築することもできない。同義的なコドンやがらくた DNA の存在は、ラプラスの魔物でさえも知りえない、物理的性質とは異なる性質が存在することを意味するのである。さらに、そのような知識が増えたとしても、必ずしも理論やモデルが複雑になるわけではない。ラプラスの魔物は知識を取捨選択することなく、すべての知識を現象の記述に用いることができた。ところが、その魔物が物理学に加えて、生物学についての知識を持つとすると、現象を説明する際に選択肢が生まれることになる。したがって、現象を説明する際に一方の情報を選択すると、他方の情報を捨てることになる。情報を取捨選択するには何らかの基準が必要であり、その基準の一つが単純化である。ライト-フィッシャーの遺伝的浮動モデルの前提は単純化されているが、それはマイアのいう意味での単純化ではない。マイアは集団遺伝学のモデルが遺伝の仕組みを無視した単純な豆抽出モデルにすぎないと揶揄したのが、そうではない。むしろ、集団遺伝学のモデルの前提の正当性は、遺伝学を含む生物学的な知見によって支えられているのである。

#### 4. 2. 5 遺伝的浮動はフィクションではない

生物学の発展により、私たちは多くの知識を獲得した。同義的なコドンやがらくた DNA の発見はその一つであり、物理的には異なるが生物学的には同じ対象が存在することを示した。DNA の複製メカニズムも明らかになり、DNA の複製によって塩基配列は同じであっても、物理的には異なる DNA 分子が新たに生成されることがわかった。このような対象の存在は、物理学だけでは説明できない現象が存在することを表している。遺伝的浮動はその一例である。ゆえに、完全な知識があるなら遺伝的浮動の概念は消去可能である、というローゼンバーグの主張は間違っている。遺伝的浮動はフィクションではなく、説明すべき実在する現象である。本節では、ローゼンバーグの論証について検討してきたが、ここでの批判はブランドンたちの論証にもあてはまる。ブランドンたちのしみ出し論証では、量子力学が物理学の基礎理論とされていた。量子力学に関する完全な知識があるとしても、上の現象を説明するには量子力学とは別の種類の知見が必要となるのである。

遺伝的浮動や自然選択の現象は科学的な知識や情報にもとづいてモデル化される。そのとき、情報は取捨選択されることになる。遺伝的浮動をモデル化するときに物理学の情報はほとんど役に立たないので、そのような情報は捨てられる。なぜなら、物理学の情報だけでは、DNA が遺伝することや同じ適応度を持つ遺伝子が存在することを説明できないからである。つまり、多くの情報が得られたとしても、それらすべての情報を使用するわけではないのである。すべての情報を考慮しないことや未知の情報があることは、考慮する情報が少ないという意味でモデルの単純化と考えることができる。しかしそのことは、進化モデルがフィクションだということを意味するわけではない。重要なことは、モデルの前提のなかに実在を表す情報が含まれているかどうかということである。遺伝的浮動のモデル化に必要な情報は、同義的なコドンの存在や遺伝の法則などであり、その他の情報はほとんど考慮されない。私たち人間の誕生するはるか昔から、遺伝の法則は成り立っており、同義的なコドンは存在していた。こうした情報は実在の一側面を表している。その意味で、遺伝的浮動モデルは実在の現象を表しているのである。

進化論では、生物集団の変化が確率分布を使って自律的に説明される。この生物集団というのは生物個体を無作為に寄せ集めたものではない。集団内の各個体は同じ形質や遺伝子を共有する必要がある。集団内の個体間にそうした共通性があることは、祖先から脈々と受け継がれてきたという進化論的な根拠がある。つまり、遺伝である。遺伝は、世代交代のたびに遺伝子の抽出が繰り返しおこなわれることを保証してくれる。

## 第5章

### 進化論的な説明

---

本章では、ローゼンバークたちとブランドンたちの両陣営に対して別の角度から批判を加える。まず5. 1節では、科学的説明の特徴に注目することにより、進化現象は物理学だけでは説明できないことを示す。次に5. 2節では、進化論の説明の特徴から、進化論が物理学の基礎理論に還元できないことを示す。ここでは、進化生物学以外の生物学の分野の説明も視野に入れ、進化を含む生命現象について取り扱うことにする。これらの分析を通じて、進化論には個々の生物の詳細な情報を必要とせず、そのなかの一部の情報で十分であることを示す。

#### 5. 1 物理学だけでは生命現象は説明できない

物理学は進化を含む生命現象の謎を解き明かしてきた。ワトソンとクリックはDNAの立体構造を明らかにすれば「生命の秘密 (secret of life)」を垣間見ることができると考えた (Watson and Berry 2003)。DNAの二重らせん構造の解明には、X線回折法という物理学的手法、およびアデニン、チミン、シトシン、グアニンの化学構造の知見が鍵となった。その後、DNAの複製や転写・翻訳の過程が物理的に説明され、さらにはヒトの全DNA塩基配列が特定された。こうした成果は生き物についての理解を深めてくれる。物理学は今後も生命現象の謎を解き明かしていくだろう。進化論をニュートン力学や量子力学といった物理学の基礎理論にもとづいて議論する人たちの背後にはおそらくこうした考え方がある。はたして、進化を含む生命現象は最終的には物理学の基礎理論で説明できるのだろうか。本章では、科学的説明の特徴に注目することで、この問題に否定的な答えを与える。

まずは、科学的説明の特徴を明らかにしておく必要がある。そこで次の5. 1. 1項では、科学的説明の諸条件を挙げる。説明の条件のなかでも、説明が問いの文脈に依存することに焦点をあてる。問いの文脈は質問者の意図や背景知識を反映したものである。このようなアプローチを科学的説明の「実用論 (pragmatism)」という。5. 1. 2項では、複数ある意図や目的の間のトレード・オフについて論じる。質問者の意図や目的は多様であり、説明がいつも一つの文脈のもとでなされるわけではない。説明をするときに、質問者は意図や目的に合わせて、現実性を重視したり包括的に眺めたりするなど説明の戦略を変えている。説明をする際に、現実性や包括性などの説明戦略の間でトレード・オフが存在する。5. 1. 3項では、発生学の説明と進化生物学の説明を比較することで、問いの文脈が同じであっても異なる種類の説明が可能であることを論じる。どちらも生命現象を説

明する上で重要であり、時間スケールを変えることで異なる観点から説明を与えている。私たちは複数の説明を同時に受け入れることができ、それらが補完的に生命現象を説明するのである。5. 1. 4項では、生命現象が多様であり複雑であるため、その謎を解き明かすには多角的な観点から複数の説明で補完する必要があることを示す。生物学は生命の謎を解き明かすとともに、多くの謎をみつけ出してきた。生命現象は多様かつ複雑であるため、生命現象を物理学だけで一元的に説明することなどできない。たとえある文脈や説明戦略のもとでは物理学によって生命現象の一側面が説明されたとしても、生命現象のあらゆる側面が説明されることにはならない。別の文脈や説明戦略のもとでは、生物学による説明が求められるのである。生命の謎を解き明かすには多角的な観点から複数の説明で補い合うことが必要である。

### 5. 1. 1 科学的説明の実用論

現象を説明することは科学の大きな課題である。科学で説明を与えるとはどういうことだろうか。どのような条件が満たされると、科学的に説明したことになるのだろうか。哲学では、科学的説明の特徴を明らかにするために多くの議論が交わされてきた。そこでは、物理学が科学の典型例とみなされ、物理学での説明に主眼がおかれてきた。リンゴが木から落ちるとい物理現象の説明を例に考えてみよう。リンゴが着地するまでの時間や着地直前の速度はどのように説明されるだろうか。まず、落下直前のリンゴの位置や速度、リンゴの質量などを知る必要がある。そして、リンゴに関するそれらの情報をニュートン力学の第二法則に代入する。そうすると、着地時間や速度が説明できる。これは科学的説明の典型例である。

この説明では、リンゴの初期状態と第二法則から着地までの時間や着地直前の速度が演繹されている。また、ニュートン力学の第二法則という一般法則が説明に用いられている。さらに、リンゴの初期状態や第二法則は経験的にテストすることができ、しかも初期状態や第二法則は正しくなければならない。科学哲学者のカール・ヘンペルとポール・オッペンハイムはこのような説明を科学的説明の典型例と考え、それが満たすべき条件を以下のようにまとめている (Hempel and Oppenheim1948)。

- (1) 説明は演繹的に妥当な推論でなければならない。
- (2) 説明を与える文には、演繹するとき必要とされる一般法則が少なくとも一つ含まれていなければならない。
- (3) 説明を与える文は経験的にテスト可能でなければならない。
- (4) 説明を与える文に含まれる言明は真でなければならない。

ヘンペルとオープンハイムの議論は科学的説明の本性の解明への糸口を切った。彼らは科学的説明の必要条件として上の四つを挙げ、それらすべてを満たすと十分条件になると考えた。

条件（１）は、説明したい事柄と説明を与える文との関係を表している。説明は推論によってなされるので、この関係は論理的関係である。ヘンペルたちは、前提が正しければ必ず結論も正しくなる演繹という推論形式を条件に挙げた。これは真理保存性という演繹の特徴であり、この条件は科学的説明の客観性を保証するという意味で重要である。また、演繹は人間でなくてもコンピュータなどによって機械的に遂行でき、科学的説明の客観性を保証してくれる。それゆえ、ヘンペルたちは条件（１）を科学的説明の条件と考えた。

条件（２）は、科学的説明に科学法則が用いられることだけでなく、その法則が推論を演繹的に妥当にするために用いられなければならないことを述べている。これは、説明の前提に科学法則が含まれており、しかも説明が演繹的になっているというだけでは、科学的説明とは呼べないことを表している。演繹には、ある文からその文自体を導き出す推論も含まれる。たとえば、成体のヤツメウナギはガラス眼を持つという前提から、成体のヤツメウナギはガラス眼を持つという結論が自明の形で引き出せる。また、この前提にそれとは矛盾しないどんな文をつけ加えても、成体のヤツメウナギはガラス眼を持つという結論を論理的に妥当な形で引き出すことができる。それゆえ、成体のヤツメウナギはガラス眼を持つという観察結果とニュートンの第二法則という科学法則から、成体のヤツメウナギはガラス眼を持つという結論が演繹的に導出できる。ところが、この推論では結論を引き出すときにニュートンの第二法則は使用されておらず、だれもこれを科学的説明とは認めないだろう。条件（２）は、このような事例を科学的説明とみなさないために課せられたものである。

条件（３）は、実験や観察では真偽を確かめられない非科学的な要素を科学的説明から排除するため、すなわちホメオパシーなどによる説明と科学的説明を区別するためのものである。これは説明に関する条件というより、科学と非科学の線引きをおこなうための基準となっている。また、条件（４）は、誤った前提を用いても正しい説明にはならないということをいっている。これは、一見すると科学的説明の条件としては自明と思うかもしれないが、厄介な問題を引き起こす。それについては後述する。ヘンペルたちによると、これら四つの条件が科学的説明の必要条件であり、しかもそれらすべてを満たすと十分条件になる。

ヘンペルとオープンハイムの分析は科学的説明の代表的な特徴づけとして広まった。しかし、この特徴づけには問題がある。上の四つの条件をすべて満たしても、科学的説明の十分条件にはならない事例が挙げられる（Bromberger 1966）。たとえば、なぜ東京スカイツリーの高さは634mであるのかを尋ねられたとしよう。この問いに対して次のように答えることができる。まず、2012年9月20日13時40分の太陽高度は45度で、東京スカイツリーは地面に垂直にたっており、そのときの東京スカイツリーの影の長さが634mであった。

さらに、光は直進し、二つの角が等しい三角形は二等辺三角形であることもわかっている。これらの前提から、東京スカイツリーの高さは 634m であることが演繹される。この説明では、光の直進性という物理法則が演繹に使われている。また、光の直進性、太陽高度、影の長さなどは経験的にテストすることができる。しかも、すべての前提は真である。すなわち、この説明はヘンペルたちの挙げた四つの条件をすべて満たしている。だが、質問者はこれを「なぜ東京スカイツリーの高さが 634m であるのか」という問いに対する説明だとは考えないだろう。なぜなら、この問いを投げかけた時点で、質問者は東京スカイツリーの高さが 634m であることを知っているからである。そうでなければ、質問者はそもそもこの問いを発することができない。そうすると、質問者の意図は別にあると考えるのが自然である。質問者が求めている説明はおそらく、東京スカイツリーが 634m であるのは覚えやすい数字にするために武蔵（ムサシ）という旧国名と語呂を合わせたから（平塚 2011）というものだろう。こうした事例は、ヘンペルたちによる四つの条件をすべて満たしたとしても、必ずしも説明とみなされるわけではないことを示している。

東京スカイツリーの事例では、求められている説明が科学的なものではないので、科学の事例を使ってヘンペルたちの欠点を浮き彫りにしてみよう。なぜ月は地球の周りをまわっているのだろうか。この問いに対して次のような答えが考えられる。万有引力の法則によると、地球と月の間に引力が働いている。月が地球の周りをまわっているのは、この引力と月が地球から離れようとする力との合力によるのである。この説明は東京スカイツリーの高さの説明と同じく、ヘンペルとオッペンハイムによる科学的説明の条件をすべて満たしている。だが、この問いを発した人が別の意図で質問しているかもしれない。質問者が万有引力の法則によって月が公転していることをすでに知っていれば、「なぜ月は地球の周りをまわっているのか」という同じ問いに対して、別の答えを求めている可能性がある。その場合、原始地球に天体が衝突し、地球と天体の破片が集まって月ができたから、月は地球の周りをまわっている、と答えることができる。これは巨大衝突説と呼ばれるもので、月の形成の有力な仮説とされている（Hartmann and Davis 1975）。以上のことから、ヘンペルたちの四つの条件をすべて満たしても科学的説明の十分条件にはならないことがわかる。

こうした反例は、科学的説明にはさらなる条件が必要であることを示している。それは、質問者の意図、目的、背景知識といった「問いの文脈」を特定するということである。科学哲学者のバス・ファン・フラッセンは、説明が問いの文脈に依存することを明らかにした（van Fraassen 1977）。「なぜ月は地球の周りをまわるのか」という問いでは、どこを強調するかによって質問の意図が変わってくる。たとえば、「まわる」のところに強調点をおくと、月が静止したままや等速直線運動を続けるなどの他の運動ではなく、なぜ回転運動をするのかという問いになる。この問いには、万有引力の法則を使って答えることで、他の運動ではなく回転運動であることが説明できる。一方、「月」という言葉に強調点をおくと、地球の周りをまわっているのが土星の衛星タイタンや火星などの他の物体でなく、

なぜ月なのかを問題にしていることになる。この場合、巨大衝突説が説明の有力候補の一つとなる。ファン・フラーセンは、こうした実用論的側面が科学的説明の条件に含まれていると主張する。「『なぜ命題 P であるのか』という疑問文によって正確に何が求められているかは、文脈ごとに違ってくる。さらに、その疑問が生ずるか否かは背景理論とデータに相対的に決まり、その背景理論とデータも文脈に依存する。そしてまた、その答えがこの疑問に対する答えとしてどれだけよいものかを評価するのに、背景情報のどの部分が使われるべきなのかということまでも、文脈によって決まるのである」(van Fraassen 1980, p.156)。

このことは、ヘンペルとオッペンハイムの説明へのアプローチには欠けていた、科学的説明の重要な特徴を明示している。すなわち、科学的説明は、考えられる現象が複数ある中で一つだけが正しく、それ以外が誤りであることを示さなければならないのである。上の問いで「月」に強調点がおかれている場合、「月が地球の周りをまわる」、「タイタンが地球の周りをまわる」、「火星が地球の周りをまわる」など、いろいろな可能性が考えられる。そして説明を与える巨大衝突説は、その可能性のなかで「月が地球の周りをまわる」という文だけが正しく、他の文が偽であることを示してくれる。ヘンペルたちの分析法やそれに影響を受けたアプローチがうまくいかない理由について、ファン・フラーセンは次のように述べる。「科学的説明をめぐる議論は〔ヘンペルたちによる〕最初の分析の時点で間違っていた。〔ヘンペルたちは〕説明を理論と事実の関係と捉えていたが、実際はそうではなく、理論と事実と文脈の間の三項関係である。(・・・)説明というのは本質的に〔文脈に依存して〕相対的なのである」(ibid., p.156)、と。ファン・フラーセンの分析を踏まえると、科学的説明の条件として以下のものをつけ加える必要がある。

#### (5) 説明は問いの文脈に依存する。

ファン・フラーセンによる説明の実用論的アプローチは、科学的説明の特徴をうまく捉えているように思われるが、問題がないわけではない。というのも、実用論的アプローチだと、ある説明を「科学的な」説明にする条件が何であるかを明らかにしてくれないからである(ローゼンバーグ 2011)。説明に問いの文脈が必要であることは、科学的説明だけでなく、非科学的な説明にもあてはまる。「なぜパスカルは確率概念を出現させたのか」という問いは、「なぜ(ライプニッツや他のだれでもなく)パスカルが確率概念を出現させたのか」という文脈で尋ねられることもあれば、「なぜパスカルは(微積分や他の概念でなく)確率概念を出現させたのか」という文脈で問われている場合もある。どちらの文脈であれ、その説明は科学的ではない。そして、こうした非科学的な説明にも実用論的な要素が含まれている。問いの文脈という実用論的条件は、科学的説明の十分条件ではないのである。

しかしこの問題点は、科学的説明の特徴づけに実用論的アプローチが役に立たないということの意味してはいない。ファン・フラーセンは、ヘンペルたちの分析に不足している点を明らかにしたのであり、条件（5）は科学的説明の必要条件になっている。実際、月が地球の周りをまわるといふ現象に対する説明は科学的であり、その説明は問いの文脈に依存して変わる。もしある説明を科学的にするための、科学と非科学の線引きの基準を求めているのであれば、条件（5）とは別に基準を設ければよいだろう。テスト可能性というヘンペルたちの条件（3）はその基準の一部をなすと考えられる。科学と非科学の線引きの正確な基準を特定することは本稿の目的ではないが、以下ではこの条件（3）を科学的説明の必要条件として受け入れることとする。

実用論的アプローチには、ヘンペルとオッペンハイムによる科学的説明の特徴づけの反例に対処することとは別に、正しい説明とよい説明を区別したいという意図がある。正しい説明にはよい説明でないものがあり、またその逆もある。前者の例として哲学でよく引き合いに出されるのは、直径 5cm の丸い穴の開いた板に一辺 5cm の正方形の断面の杭が通らないことの説明である（Putnam 1975）。この場合、穴と杭の大きさや形を使えば容易に説明ができる。また、これとは別の説明として、量子力学に訴えて板と杭を構成する各原子から説明するというやり方も考えられる。量子力学に訴える説明は正しい説明ではあるが、よい説明とはいえない。個々の原子とその性質についての膨大な情報は、杭が穴を通り抜けられないことについての不必要に冗長な説明になってしまうのである。一方、正しくはないがよい説明の例としてニュートン力学の諸法則を使った説明が挙げられる。物理学者はニュートン力学に問題があることを知っているが、それにもかかわらずニュートン力学はいまでもよい説明を与えてくれる（ローゼンバーグ 2011）。

ヘンペルたちの分析法ではこのような正しい説明とよい説明の区別は見落とされてしまう。彼らの提示した条件（4）には、説明を与える文に含まれる言明は真でなければならないとある。つまり、説明に使用される法則は真であるものに限られる。これは非常に厳しい条件である。それに対し、ファン・フラーセンの実用論的アプローチではこうした問題にうまく対処できる。本稿では、科学的説明としてファン・フラーセンによる実用論的アプローチを採用する。つまり、科学的説明の必要条件として条件（3）と（5）を認めることとする。

## 5. 1. 2 説明戦略の間のトレード・オフ

科学的説明が問いの文脈に依存しているということは、同じ一つの現象に対して複数の説明が可能であることを意味している。次に論じたいのは、説明の間の関係である。一つの現象に対して複数の説明が可能であるなら、説明の間の関係はどうなっているのだろうか。ここでは、複数の可能な説明の間の関係を考慮して、生命現象を説明するのに物理学

以外の説明が必要であることを示す。ただし、生命現象を説明するのに物理学以外の説明が可能であるからといって、物理学の説明が間違っているといいたいわけではないことに注意しよう。

前項では、実用論的アプローチは正しい説明とよい説明を区別していると述べた。では、どういった説明がよい説明なのだろうか。ファン・フラッセンは説明の「よさ」の基準をいくつか挙げており、そのなかの一つに、答えが冗長でないというものがある<sup>25</sup>。ファン・フラッセンは、ある答えに何らかの文を加えても、その文を加えないときと比べて疑問に対する答えとして変わらないのであれば、何も加えない答えの方がよい説明だとしている (van Fraassen 1980, p.147)。穴と杭の例を思い出すと、穴や杭を構成する原子を使った微視的な説明は正しいけれども、冗長で不要な情報が多い。それに対し、穴と杭の大きさや形を使った巨視的な説明をすれば、それに不要な情報をいくら加えても、なぜ杭は穴を通らないのかという疑問に対する答えとしては変わらない。それゆえ、この場合、説明としては巨視的な説明がよいことになる。もちろん、このことは微視的な説明が説明であることを否定しているわけではない。

説明の冗長性について、もう一つ例を挙げておこう。品川駅から慶應義塾大学三田キャンパスまでの行き方を知りたい人がいるとする。このとき、解像度の高い航空写真のような詳細な画像を使うと正確な説明はできるかもしれないが、不要な情報が多すぎて説明としてはわかりにくくなってしまふ。慶應義塾大学界隈に不案内な人だと道に迷ってしまうかもしれない。一方、いくつかの対象のみが描かれ、それ以外の対象は省略されているような地図を使うと、正確ではないがわかりやすい説明ができる。どの対象をその地図に描くかは現実とは関係なく、人の関心によって決まる。文脈や背景知識に応じて使用する情報を取捨選択しているのである。説明では、現に存在している事物を捨象し、正確さが欠けているとしても構わない。むしろ説明ではそのことが求められることが少なくない。実際、地図を使うとよい説明ができるということにはだれも異議をさしはさまないだろう。説明はときに、現実から遠ざかる方がよい場合もあるのである。

数理生態学者のリチャード・レヴィンズは、生物学のモデルと地図の類似点を強調する。細部まで正確に描かれた地図がよいとは限らないのと同じように、生物に関するすべての特徴を詳細に描く説明が必ずしもよいわけではないという (Levins 1966)。生物学ではさまざまな生物に共通する特徴の一般的なパターンを取り出すために細部の特徴を捨象することがある。このことについて自然選択説の説明を例に考えてみよう。

ダーウィンの訪れたガラパゴス諸島は、多様な生物が生息していることで有名である。たとえば、ダーウィンフィンチの種数は、分類法に依存するが 14 か 15 あるとされている (Grant and Grant 2008)。ガラパゴス諸島にあるダフネ島には、ガラパゴスフィンチとサボ

---

<sup>25</sup> ファン・フラッセンは冗長という表現を用いてはいない。彼の表現によると、「ある答えが他の答えによって全体的もしくは部分的に関連性を失わないこと」 (van Fraassen 1980, p.146) とある。だが、この表現はわかりにくい。そのため、内容を理解しやすくするために、筆者が表現を変えた。

テンフィンチが生息している。ガラパゴスフィンチの嘴は太く、サボテンフィンチの嘴は細い。なぜダフネ島のサボテンフィンチの嘴は細いのだろうか。

夫婦で活躍する進化生物学者のピーター・グラントとローズマリー・グラントは、1973年からガラパゴス諸島の生物や生態などを継続的に調査し、進化が数十年という短い期間で生じることを示した (*ibid.*)。1982年から83年にかけてガラパゴス諸島はエルニーニョの影響で観測史上最大の大雨を記録した。大きな堅い実のなる大木は倒れ、その代わりに小さな柔らかい種子を持つ草木が急増した。生態系が短期間で劇的に変化したのである。それより少し前は干ばつが続いて砂漠に近い環境だったので、大きな堅い実が多く、太い嘴を持つサボテンフィンチの数が多かった。だが、エルニーニョの後では、太い嘴のサボテンフィンチの数は減り、その代わりに嘴の細いサボテンフィンチは数を増やした。つまり、細い嘴に有利な自然選択が働き、その形質を持つフィンチの頻度が世代を重ねて増えていったのである。

自然選択説を使った進化論的説明はファン・フラーセンによる条件(5)を満たしている。この問いでは「細い」というところに強調点があり、サボテンフィンチの嘴が太いなどの他の形状ではなく、細いことの理由が問われている。それゆえ説明では、「ダフネ島のサボテンフィンチの嘴は細い」、「ダフネ島のサボテンフィンチの嘴は太い」等々の可能性のなかで、「ダフネ島のサボテンフィンチの嘴は細い」という文だけを真とし、残りの文を偽とする理由を示す必要がある。グラント夫妻の説明は、ダフネ島の環境では細い嘴が有利で、それ以外の嘴が不利であるという証拠から、「ダフネ島のサボテンフィンチの嘴は細い」という文だけが真であることが示されている。また、この説明は科学的説明の条件(3)も満たしている。グラント夫妻はエルニーニョ以前の砂漠に近い環境では太い嘴のフィンチが多いという証拠を挙げており、自然選択説は観察結果を通じてテスト可能である。したがって、グラント夫妻の説明は科学的説明の必要条件を満たしている。

一方で、サボテンフィンチの嘴が細いことを物理法則を使って説明することは原理的には可能だろう。物理学的な説明では、フィンチを構成する膨大な数の物体の位置や運動量などの物理的性質の変化を詳細に描くことになる。物理学的な説明は間違いではないが、ファン・フラーセンのよさの基準からすると、よい説明とはいえないのである。

ところで、ある現象に対して複数の説明が存在するとき、それらの説明の間の関係はどうなっているのだろうか。レヴィンズはそれについても分析している。彼は、説明の戦略に一般性、現実性、予測精度の三つがあることを示し、説明の際にはそれらの間で「トレード・オフ」があると主張する。ここでは、一般性と現実性の関係性を取りあげてみよう。一般性とは説明がより多くの系に適用できることであり、現実性は説明に多くの独立変数が含まれていることである<sup>26</sup>。レヴィンズは、集団遺伝学と群集生態学の説明を比較し、集団遺伝学や群集生態学は一般性や現実性を同時に高めることはできないと主張する。古典

<sup>26</sup> レヴィンズは一般性や現実性について明確に定義していない。だが、生物学者のステイヴン・オーザックとソーバー (Orzack and Sober 1993) はレヴィンズの意図を汲んでそれらを定義しているので、ここではその定義を採用した。

的な集団遺伝学のモデルでは、環境が一定であるという仮定をおいているが、現実の環境はほとんどの場合一定ではない。一方、群集生態学のモデルでは、環境の変化に焦点をあてる。また、集団遺伝学のモデルは種内の遺伝子頻度の変化を説明するが、群集生態学のモデルでは基本的に種内の生物の遺伝子を同質とし、進化を無視することがある。「もちろん、自然を理解し、予測し、変更するという同一ではないが重複する目標に向けて、一般性、現実性、予測精度を最大限にする扱いやすいモデルが利用できることが望ましい。しかしそれはありえない。それゆえ、いくつかの代替戦略が発展してきたのである」(Levins 1966, p.422)。

上の自然選択説による説明と物理法則を使った説明の関係はどうなっているのだろうか。自然選択説による進化論の説明では、同種のサボテンフィンチ個体を調べ、それらに共通する情報を抽出している。そのため、同種内の複数の個体をまとめて説明することができる。一方、物理学的説明では、サボテンフィンチの各個体は位置や運動量などの物理的性質が異なるので、それぞれのフィンチ個体に対して異なる説明を与えることになる。それゆえ、進化論の説明は複数の生物をまとめて説明できるという意味で、物理学的説明よりも「包括的 (inclusive)」である。ここでいう包括性とは、説明がより多くの事例をまとめて扱えるということである。レヴィンズは説明戦略として包括性を挙げていないが、説明戦略が一般性、現実性、予測精度の三つで尽きるということはないだろう。

また、現実性についても進化論の説明と物理学的説明は異なる。自然選択説による説明では、同種内の複数の異なるフィンチに共通する情報を取り出す一方で、個々のフィンチの詳細な違いの多くを捨象する。それに対し、物理学的説明はフィンチを構成する原子やそれより下のレベルまで詳細に描き、説明に使う独立変数の数も膨大になる。それゆえ、物理学的説明は進化論の説明よりも現実性が高い。

ここで注意しなければならないのは、トレード・オフと二者択一は異なるということである。説明戦略の間にトレード・オフがあるというのは、ある目的に合わせて包括性を重視した説明が与えられる場合もあれば、別の目的に合わせて現実性を重視する場合もあるということである。だが、このことはどちらか一方のみを取捨選択して受け入れるように迫っているのではない。私たちは両方の説明を同時に受け入れることができるのである。

説明というのは質問者の意図や目的を反映した文脈に依存するため、唯一の文脈があるわけではない。物理学による説明が求められることもあれば、集団遺伝学や生態学を使った説明が質問者の意図に適っていることもある。サボテンフィンチの嘴の細さを説明する場合、物理学による説明は現実的ではあるが、包括的ではない。一方、自然選択説による説明は、現実性は低いかもしれないが、複数の生物を包括的に扱うことができる。問いの文脈や説明戦略は一つだけではなく複数存在するので、物理学を使った説明だけが説明というわけではないのである。多様な生命現象をまとめて理解したい場合は包括的な説明を求め、個別の生命現象をより正確に知りたい場合は独立変数の数を増やして現実性を重視

する。説明では、質問者の背景知識や目的に合わせて包括性や現実性などの説明戦略を変えるのであり、複数の説明戦略の間には常にトレード・オフが存在するのである。

### 5. 1. 3 多角的な観点による説明の補完

生物学にはさまざまな下位領域があり、それぞれの分野では生命現象に対して異なる説明を与える。ここでは、進化生物学と発生学の説明を取りあげ、生命現象を説明する上でどのような分業がなされているのかをみることにする。

ここで再び、「なぜダフネ島のサボテンフィンチは嘴が細いのか」という問いを例に考えてみよう。自然選択説による進化的説明は、嘴の形状や環境の変化にもとづいて説明がなされている。この場合、問いの文脈としては「細い」というところに強調点があり、なぜサボテンフィンチの嘴は太いなどの他の形状ではなく細いのかということが問われている。つまり、起こりうる現象として「ダフネ島のサボテンフィンチの嘴は細い」、「ダフネ島のサボテンフィンチの嘴は太い」などがある。そして、自然選択説による説明では、さまざまな可能性のなかで「ダフネ島のサボテンフィンチの嘴は細い」という文が真であり、他の文が偽であることが示されている。

ところで、「なぜダフネ島のサボテンフィンチは嘴が細いのか」という同じ問いに対し、生物学では別のタイプの説明が与えられている。それは発生学による説明である。進化生物学者のアルハト・アブザノフたちは、骨形成タンパク質 BMP4 を発現する遺伝子が嘴の形状形成に関与していることを突き止めた (Abzhanov *et al.* 2004)。*Bmp4* 遺伝子が発生の早い段階で発現すると嘴は太くなり、逆に遅い段階で発現すると嘴は細くなる。サボテンフィンチの場合、この *Bmp4* 遺伝子が発生の遅い段階で発現するため、嘴は細くなるという。

アブザノフたちの説明もファン・フラーセンによる説明の条件 (5) を満たしている。この発生学による説明は進化論的説明と同じく、問いのなかで「細い」というところに強調点がおかれていて、サボテンフィンチの嘴が太いなど他の形状ではなく、細いことの原因が問われている。それゆえ、説明では「ダフネ島のサボテンフィンチの嘴は細い」、「ダフネ島のサボテンフィンチの嘴は太い」等々の可能性のなかで、「ダフネ島のサボテンフィンチの嘴は細い」という文だけを真とし、残りの文を偽とする理由を示す必要がある。アブザノフたちの説明は、*Bmp4* 遺伝子が発生の早い段階で発現すると嘴は太くなるが、サボテンフィンチの場合は発生のタイミングが異なるので細くなるというもので、「ダフネ島のサボテンフィンチの嘴は細い」という文のみが真であることを示している。よって、この発生学的説明はファン・フラーセンの条件 (5) を満たしている。また、*Bmp4* 遺伝子発現のタイミングと嘴の形状の関係は経験的にテストすることができる。それゆえ、科学的説明の条件 (3) も満たしており、発生学を使ったアブザノフたちの説明は科学的説明の二つの必要条件を満たしている。

発生学的説明と進化論的説明は、科学的説明の興味深い特徴を浮き上がらせてくれる。科学的説明が問いの文脈に依存するというのは、同一の現象に対して複数の説明が可能であることを許容する。では、文脈を一つに固定すると、その文脈に適した説明が一つに決まるのだろうか。発生学と進化論による二種類の説明から、そうでないことがわかる。上の二つの説明の文脈はいずれも「細い」というところに強調点をおいており、どちらの説明も嘴が他の形状ではなく細いことが真であることを示している。それに対し、発生学的説明と進化論的説明では、「ダフネ島のサボテンフィンチの嘴は細い」という文を真とする理由が異なる。発生学を使った説明の特徴は、一世代内での形質の変化を表すことである。一方、進化論を使った説明は、数世代にわたる変化にもとづいて問いに答える。両者の違いは時間スケールにある。時間スケールを変えることで、生命現象の異なる特徴を明らかにできる。時間スケールを変えるという方略は、ファン・フラーセンやレヴィンズの分析では明示されていないが、科学的説明の重要な特徴と考えることができる。

進化論と発生学を使った二種類の説明は互いに異なる観点から生命現象を眺めている。進化論的説明では、より長い時間スケールで大域的に生命現象を眺めることで、種やそれより上の分類群の変化を説明することができる。一方、発生学的説明では、それより短い時間スケールで局所的な観点から生命現象を捉える。進化論的説明と発生学的説明はどちらも生命現象を説明する上で重要であり、どちらか一方のみが正しいというわけではない。私たちは両方の説明を受け入れることで、生命現象の異なる側面が捉えられるのである。多角的な観点は生命現象を理解するのに不可欠である。

#### 5. 1. 4 多様で複雑な生命現象

アリストテレスはかつて「哲学は驚きからはじまる」と語った。科学という言葉がまだない当時、知的営みを総称して哲学と呼んでいた。生命現象は謎に満ちており、私たちが絶えず驚かしてくれる。物理学による説明はそうした驚きの一部を解消してきた。だが、生命というのは絶えず変化し、また新たな生命が生まれ続けている。それゆえ、生命は極めて多様でとてつもなく複雑であり、私たちの驚きはやむことがない。

生物学は生命の謎を解き明かす一方で、新たな謎を発見し続けており、こうした発見は生命の本性の理解をより難解にしている。20世紀半ばに遺伝物質の正体を暴こうと多くの研究者が先取権争いをし、1944年にオズワルド・エイブリーたちがその正体を突き止め、1953年にワトソンとクリックがその構造のモデルを提示した。それは、わずかに四種類の塩基からなるDNAが絡まり合ったものである。しかしその後、DNAの塩基以外の物質も遺伝することがわかり、いまやエピジェネティクスが生命の新たな謎を解き明かし、それ同時に新たな謎をみつけ出している。21世紀を迎えるころにはヒトの全ゲノムの解読に世界中の生物学者が邁進し、2003年にそのプロジェクトはひとまず完了した。だがそれは、生

命の謎を解き明かすよりも多くの謎を生み出した。ゲノミクス、プロテオミクスと次から次に新たな分野が出現し、いままも生物学者は新しい謎を解き、それとともに次々謎がみつかる。生命現象は解明されるどころか、謎が増す一方である。生命現象についての新発見は生命の厳密な定義をさらに困難にしている。非常に多様で極めて複雑な生命現象を一元的に説明しようというのは土台無理なのかもしれない。

しかし、生命を厳密に定義するのが困難であるからといって、生命現象が説明できないことにはならない。実際、生物学は生命現象の多くの謎を解き明かし、説明を与えてきた。生物学は生命が厳密に定義できないほど多様であることを明らかにし、その多様性に説明を与えようとしている。重要なのは、多様で複雑な生物が現に存在していることである。生物学者はそのことに驚きを覚え、その驚きを解消するために説明を与えるよう努めてきた。ダーウィンがビーグル号の航海で世界中の生物を目のあたりにしたとき、その多様さと複雑さに驚嘆して、種の起源を「神秘中の神秘 (mystery of mysteries)」(Darwin 1964, p.1)と記している。そして、その驚きを鎮めるために自然選択説を思いついた。さらに、自然選択では説明しきれない生命現象に驚きを感じた (*ibid.*, p.46)。その驚きは遺伝的浮動として、ライトやフィッシャーによって解消される試みがなされることになる (Plutynski 2007)。生物学者は新たにみつかる生命の謎に説明を与え続け、それに成功してきたのである。

科学的説明は問いの文脈に依存する。その文脈は私たちがどこに驚きを覚えるかで変わってくる。進化論を認める人とそうでない人では、同じ生命現象をみたとしても驚きが違うはずである。ダーウィンが生物の多様性を感じた驚きは、当時進化論を受け入れない人には十分理解できなかったであろう。また、進化生物学者と発生学者の間でも驚き方は異なっている。長期的に生命現象を眺めたときの生物の類似や相違の発見は驚きに値する。短期的に眺めたときは別の驚きがある。生命現象に対する唯一の驚き、そしてそれを説明する唯一の文脈といったものなどないのである。

進化現象は物理学によって説明できるかもしれない。だからといって、進化論的説明や発生学による説明が不要であるというわけではない。4. 1. 3項でも述べたように、進化生物学と物理学では基本的だとする現象が異なる。それゆえ、進化論は物理学の理論とは異なる観点で生命現象に説明を与えるのである。複雑かつ多様な生命現象に対して抱く驚きを解消するため、生物学者はさまざまな説明の術を考案してきた。世代を通じての生物進化を知りたいときは、包括的な説明戦略を採用し、生物個体の微細な物理的变化を明らかにしたいときは、現実性の高い説明戦略を採用する。このように、異なる説明戦略の間にはトレード・オフがあり、目的や意図に合わせて説明を使い分けている。ときには、時間スケールを変えることもある。そうすることで、生物学では生命現象に多元的な説明を与えている。しかも、私たちはそうした複数の説明を同時に受け入れることができ、多角的観点から生命現象を説明することができる。一つの文脈や説明戦略で生命現象のある

側面が説明されても、そのことで生命現象がすべて説明されるわけではない。生命現象が多様であり複雑であるため、その謎を解き明かすには多角的な観点が必要なのである。

## 5. 2 粗視化

ローゼンバーグたちとブランドンたちはどちらも、基礎的な物理理論に依拠して進化論の特徴を明らかにしようとした。どちらの陣営も、進化論が基礎的な物理理論に還元されるということを想定している。もしこの想定がないのであれば、ニュートン力学の描く決定論的な世界観は進化論に適用できることの根拠を失うことになる。また、進化論における確率概念を量子力学と同じように解釈する理由が不明瞭になる。

本節では、こうした還元主義の議論に対してさらに批判を加える。ニュートン力学や量子力学の表す世界観について議論するとき、何でも知っている存在者が想定されていた。進化論の表す世界観を明らかにする上で、同じような想定が必要なのだろうか。ここでは、進化論に必要な情報とは何かについても検討する。

### 5. 2. 1 還元不可能性

ローゼンバーグたちとブランドンたちは、進化論が基礎的な物理理論に還元できることを想定している点で共通しており、いずれも還元主義の立場である。一方、進化論は、4. 1. 3項で述べたように生物集団の変化を表す理論であり、一つの対象ではなく集団を基本的対象とする理論である。進化論が説明するのは変異の変化である。変異は集団内の個体間の違いであり、単一の対象の特徴ではなく集団の特徴である。実際にダーウィンは『種の起源』のなかで、生物の集団内に変異が存在する事例をたくさん挙げている。進化論の説明の対象は集団内の変異であり、進化論は単一の対象の変化を表すのではなく、集団を基本的対象とする理論である。

進化論の持つこの特徴は確率概念をめぐる議論にも適用することができる。というのも、ニュートン力学や量子力学では一つの対象自体に位置や運動量などの物理量があるのに対し、進化論では一つの対象のみに注目してもそれ自体に量はなく、複数の対象を比較することにより適応度などの量が相対的に与えられるからである。つまり、進化論は複数の対象の存在を前提としているのである。このように、進化論は集団的思考にもとづいており、ニュートン力学や量子力学のような一つの対象を基本的対象とする理論とは異なる。

また、ニュートン力学では対象が三つ以上になると解析的な計算が正確にできない。これは「多体問題 (*n*-body problem)」と呼ばれる問題で、数理物理学者のアンリ・ポアンカレによって解析的な計算ができないことが証明された。物体の間には相互作用が働いてお

り、物体が三つ以上になるとその相互作用が複雑になり、それらの物体の軌道を解析的に計算することはできないのである。1. 2. 1項で解説したラプラスによる決定論の定式化を思い出そう。そこでは、ニュートンの第二法則の特徴として解析的に解が求められるということを指摘した。しかも、この特徴は決定論の定式化には欠かせないものであった。それゆえ、ニュートン力学で解析的に計算ができなくなると、現象が決定論的であるかどうか疑わしくなってくる。ましてや、進化論で扱う生物集団はほとんどの場合、三个体以上である。ニュートン力学が三つ以上の対象を解析的に扱えないことを考えると、進化論と基礎的な物理理論では、扱う対象が異なるのである。このことは進化論の重要な特徴である。

進化論を基礎的な物理理論へ還元できないことを示す別の理由もある。進化論では、生物集団の変化を説明するために、適応度という概念が用いられる。適応度は、生存と繁殖の有利さの度合いを定量的に表したものであり、生物に備わる性質である。適応度というのは複数の物理的性質により実現可能な性質である。たとえば、フィンチの硬い嘴とチーターが走り出すときの大きな加速度は、同じ 0.75 という適応度を持つことができる。このとき、適応度が 0.75 であることは、嘴の硬さによってもチーターの大きな加速度によっても実現されるので、適応度から嘴の硬さやチーターの加速度は一意に決まらない。このように適応度と物理的性質の関係は対照的ではない。すなわち、物理的性質から適応度は決まるが、ある適応度を実現する物理的性質が複数あるので、適応度から物理的性質は一意に決まらない。このような性質を「複数実現可能 (multiple realizable)」な性質という。フィンチの嘴とチーターの加速度は物理的に異なるので、それらの振舞いを基礎的な物理理論で説明すると、非常に異なるものとなる。また、複数のフィンチ集団が同じ硬さの嘴を持っていても、各集団を構成する個体は物理的に異なっているので、この場合も基礎的な物理理論では異なる説明となる。したがって、進化論は適応度という複数実現可能な性質を扱うので、ニュートン力学や量子力学に還元することはできない。進化論と基礎的な物理理論では、理論が扱う性質も異なるのである。進化論は、生物に備わる形質が物理的に異なっても、複数の物理的性質に実現可能な適応度を用いることにより、共通部分を一つの枠組みで説明することができる。これは基礎的な物理理論とは異なる、進化論の特徴の一つである。

まとめると、進化論は、適応度という複数実現可能な性質を用いて、生物集団を基本的対象としてその集団の変化を表す理論である。このことを図示すると以下となる。

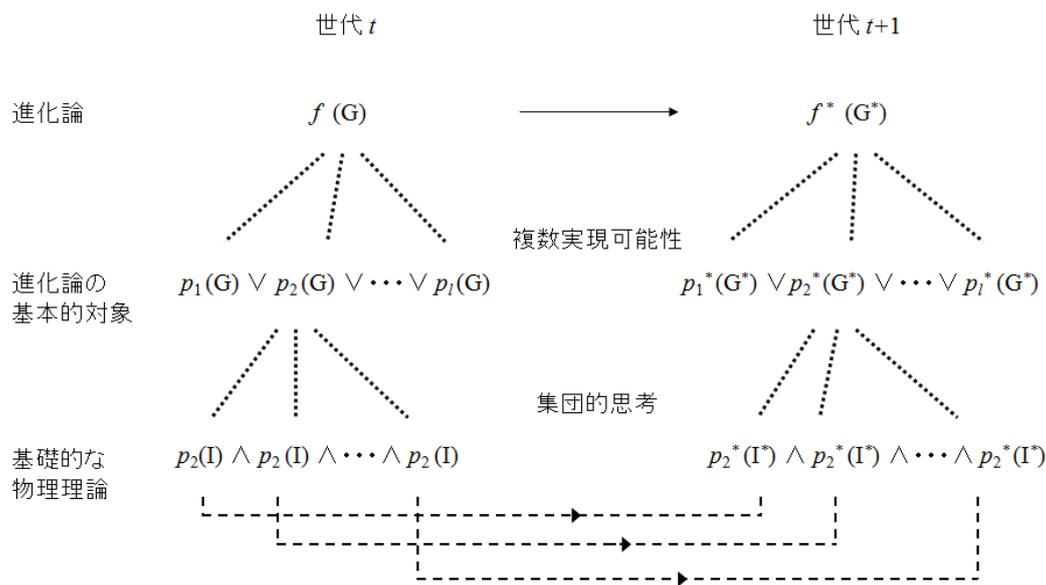


図 5.1 基礎的な物理理論と進化論の関係

進化論とその基本的対象、および基礎的な物理理論の関係を表した図である。進化論の基本的対象となる集団  $G$  は個体  $I$  の集まりで構成され、その集団における各個体は同じ性質  $p_l$  を持つ。また、適応度  $f$  は複数の物理的性質  $p_l$  によって実現可能である。進化論での矢印は、適応度  $f$  の集団  $G$  が適応度  $f^*$  の集団  $G^*$  に進化することを表す。基礎的な物理理論での矢印は、個体  $I$  やその子孫の個体  $I^*$  の変化、および性質  $p_l$  や性質  $p_l^*$  の変化を表す。

図 5.1 をみると、進化論と基礎的な物理理論では対象も性質も異なることが明らかである。よって、進化論はニュートン力学や量子力学に還元することはできない。ここでの議論がうまくいっているのなら、ローゼンバーグたちとブランドンたちの還元主義的な論証はどちらも受け入れられない。

## 5. 2. 2 粗視化

進化論と基礎的な物理理論はどのような関係にあるのだろうか。以下では、この関係を明らかにするため、進化論を統計力学と比較する。というのも、統計力学で扱う対象は粒子集団であり、またその粒子集団の性質は複数実現可能だからである。これは、前項で示した進化論の重要な特徴である。統計力学は、温度やエントロピーなどの巨視的な性質の変化を表し、粒子数  $10^{23}$  乗のオーダーの系を扱う理論である。統計力学では、このような膨大な数の粒子を一つの集団として扱う。温度は粒子集団内の各粒子が持つエネルギーの平均によって決まり、エントロピーは各粒子の空間配置によって決まる。すなわち、

温度やエントロピーは、粒子集団の性質であり、単一の粒子に備わる性質ではない。そして、温度から粒子集団のエネルギー分布を一意的に決めることも、エントロピーから集団における各粒子の空間配置を一意的に決めることもできない。このことは、温度やエントロピーが複数の異なる粒子集団により実現可能であることを表している。つまり、統計力学は進化論と同様に、集団レベルの複数実現可能な性質を扱う理論である。このように、統計力学には進化論の重要な諸特徴が備わっているのである。

統計力学では、膨大な数の粒子からなる系を扱うので、系の初期状態を正確に測定することができない。また、すべての粒子の状態を解析的に計算することもできない。物理学者のウィラード・ギブスによると、統計力学をそのような「不確かな基礎の上に構築しようとする人は、物体の構成要素に関する仮説にもとづいて研究を進めている」（Gibbs 1902, p. viii）。そこでギブスは、個々の粒子の存在を仮定する代わりに、「アンサンブル」という概念を導入する。アンサンブルとは、ある範囲内にパラメータの値を含む同種の微視的状态を持つ系の集合である。たとえば、カノニカルアンサンブル (canonical ensemble) とは、系のエネルギーが  $E$  と  $E+\delta E$  の間にある微視的状态の集合であり、その範囲内のエネルギーを持つ粒子はすべて「同値類 (equivalence class)」とみなされる。すなわち、それらすべての粒子はエネルギーに関して同じとされる。このアンサンブル概念の導入によって、統計力学に個々の粒子の詳細は不要であることの根拠が与えられた (Guttmann 1999)。つまり、統計力学では個々の粒子についてのすべての性質が必要なわけではないのである。このように、粒子数やエネルギーといったパラメータを平均化し、考慮する情報量を減らす操作を「粗視化 (coarse graining)」と呼ぶ。この操作で得られた情報は、対象についての全情報ではなく、そのうちの一部の情報である。統計力学では、粗視化によって非常に多くの粒子を同値類とみなし、同値類でひとまとめにされた粒子の集まりを一つの集団として扱う。そして、粗視化を通じて考慮する情報を減らすことにより、温度やエントロピーという集団の性質を扱うことができるのである。

進化の理論を構築するときにも粗視化と同様の操作が必要とされる。ヒトの染色体を例に考えると、そこには DNA の塩基が約  $3 \times 10^9$  個含まれている。これは非常に多いので、実際に進化現象を説明するとき、それらすべての DNA を一度に取り扱うことはできない。また、DNA 間の働きは複雑に絡みあっているので、すべての DNA を一度に扱うことはさらに難しい。そこで、進化論では形質などの観察可能な情報から遺伝子を特定し、各遺伝子に対し一つの適応度を付与する。そのためには、ある特定の形質を共通に持つ個体を集めた生物集団と、その形質を所有しない個体を集めた生物集団とを比較し、各集団の子孫数を求める必要がある。

ここで、似たような形質を共通に持つ複数の個体を同値類とみなしている。それぞれの個体では、共通した形質以外が異なっているとしてもそれらの違いは区別されない。つまり、たとえ特定の情報以外のものが得られたとしても考慮しないのである。そのことは、今後生物学が進展して、形質を発現する DNA 断片を特定できたとしても変わらない。進化

論の理論構築では、適応度に値を付与するために敢えて考慮する情報を減らしている。これは、統計力学の「粗視化」と同じ操作がおこなわれていると考えることができる。進化論では、対象を粗視化することにより、共通の形質を持つ個体の集まりを一つの生物集団として扱うことができる。これに対し、一つの対象についての詳細な情報が得られた場合、粗視化せずにすべての情報を考慮してしまうと、集団を特定することはできない。進化論では、敢えて対象を粗くみることにより、集団レベルの現象を一般化するのである。

進化論には、生物集団内の個体を同値類とみなすことの生物学的な根拠がきちんとある。進化論で説明される生物集団は、4. 2節で述べたように、生物個体を無作為に寄せ集めたものではない。そうではなく、集団内の生物個体は似たような形質や遺伝子を共通に持っている必要がある。そうした類似性を保証してくれるのが「遺伝」という生物学的なメカニズムである。石や机といった物体が自発的に遺伝をして増殖することなどないのに対し、生物は遺伝をして増殖していく。祖先から遺伝子を受け継ぎ、由来が同じ生物個体をひとまとめにしたものが生物集団なのである。

ここで進化論と基礎的な物理理論との関係をまとめておこう。嘴の硬いフィンチ集団の進化を例に考えてみる。そのフィンチ集団における各個体は、嘴が硬いという性質を共有している。ところが、各個体では、爪の長さや羽の大きさなど、嘴の硬さ以外の性質が異なっている。集団内の個体間の違いを無視するのが「粗視化」という操作である。この粗視化により、硬い嘴というフィンチ集団に共通する性質だけを取り出せる。しかも、粗視化によって集団内の個体を同値類とみなすことができる。進化論では、このような同値類の集まりを一つの集団とし、その集団を基礎として進化現象を説明するのである。これは、4. 1節でみたように、進化論が集団的思考を採用していることと整合的である。そして、粗視化によって嘴の硬いフィンチ個体の集まりは一つの生物集団とみなされ適応度はその集団内の各個体の生存力と繁殖力から相対的に決まる<sup>27</sup>。つまり、粗視化を通じて適応度が決まる。統計力学でも同様に、粗視化によって温度やエントロピーなどの巨視的性質が決まる。このように、物理的性質から適応度や温度への実現関係は、粗視化という観点を通じて理解することができる。すなわち、物理的性質の一部だけが統計力学や進化論で扱う性質へ実現されるが、すべての物理的性質が実現されるわけではないのである。

### 5. 2. 3 包括的な説明

ここまでで、進化論はニュートン力学や量子力学に還元することはできないことがわかった。というのも、進化論と基礎的な物理理論は対象も性質も異なるからである。対象が異なるのは、進化論が集団的思考という枠組みを採用しているからであり、性質が異なるのは、適応度が複数の物理的性質によって実現可能な性質だからである。これらは、基礎

<sup>27</sup> 嘴の硬さという性質、あるいは形質の適応度は集団に備わる性質であり、個体の適応度とは異なる。

的な物理理論とは異なる、進化論の重要な特徴である。そして、これらの特徴は粗視化という操作とも整合的である。進化論では生物集団の諸性質を粗視化することにより、同じ形質を持つ個体を一つの集団とみなすことができ、集団レベルの現象を包括的に説明することができる。また、考慮する情報を減らすことにより、形質の適応度を決めることができる。したがって進化論は、基礎的な物理理論には還元できない自律的な科学理論なのである。

科学では、一つの対象の変化を表すだけではなく、集団の変化を包括的に表現することも重要である。5. 1. 2項で述べたように、包括的説明とは、より多くの事例をまとめて扱う説明のことである。もちろん、自然現象の基本構造を解明するために、還元の試みは重要である。そのためには、対象を詳細にみる必要がある。ブランドンたちやローゼンバーグたちの論証の背景にはこのような考えがあるのだろう。また、次章で詳しくみるが、かつて物理学者のルートヴィヒ・ボルツマンが統計力学を個々の粒子にもとづいて還元的に説明しようとしたことは、このような試みの一事例である。他方で、個々の対象を粗くみると、個々の対象の詳細な記述だけではみえないものが、集団レベルで見えてくることがある。その具体例が、ウィラード・ギブスによる統計力学であり、進化論である。統計力学や進化論は実用的な理論である。統計力学で還元可能性を巡る議論が過去にあったが、これと同じことが進化論で近年議論されている。統計力学では、ボルツマンの還元主義的アプローチとギブスの実用論的アプローチに分かれた。進化論でも同様に、還元主義に向かうだけではなく、実用論的側面も重視すべきである。つまり、科学は深さ（還元）だけではなく、広さ（包括）も目標としているのである。

## 第6章

# 情報理論的観点からみた進化論

---

ここまでで、進化論は生物集団の変化を基礎とする理論だということがわかった。生物集団は、生物個体を無作為に寄せ集めたものではない。そうではなく、似たような遺伝子や形質を共有している必要がある。そうした類似性を保証してくれるのが遺伝という生物学的なメカニズムである。石や机といった物体が自発的に遺伝をして増殖することはないのに対し、生物は遺伝をして増殖していく。増殖することは生命の必要条件の一つでもあり、生物の重要な特徴である。

また、進化論は生物集団をそれより下のレベルに還元する形で説明するのではない。そうではなく、集団の特徴を使って説明する。そのため、個々の個体の細かい特徴には目を向けないことになる。それは、生物学者に情報が欠けているからではない。進化現象を説明するとき、意図的にさまざまな情報を捨象するのである。これは、ローゼンバーグたちがいうところの無知とは異なる。生物個体についての全情報ではなく部分情報を扱うという点も、進化論の重要な特徴である。

情報を扱う理論に「情報理論」があり、情報理論は部分情報を合理的に利用する手法を提供してくれる。ここでは、情報理論という新たな観点から進化論における確率概念について考察する。とくに、集団遺伝学の基本的なモデルであるフィッシャーの自然選択モデルとライト-フィッシャーの遺伝的浮動モデルを具体例として検討する。

### 6. 1 情報理論

情報理論は汎用性の高い理論であり、統計力学に適用することができる。本節ではまず、情報理論の「最大エントロピー原理 (maximum entropy principle)」と呼ばれる手法を解説する。次に、最大エントロピー原理を用いると、従来の統計力学のモデルが導出できることを示す。

#### 6. 1. 1 最大エントロピー原理

情報理論は、1948年にクロード・シャノンが発表した論文「通信の数学的理論」により誕生した (Shannon 1948)。この論文は翌年、ワレン・ウィーバーの解説を添えて本として出版される。シャノンによると、「通信の基本的な問題は、ある地点において選ばれたメ

ッセージを別の地点で正確に、あるいは近似的に復元することである」 (*ibid.*, p.379)。電話やメールで人と情報のやり取りをするとき、こちらの情報を伝えるために電波や電気の信号を相手に送る。そのとき、情報をなるべく正確に、できるだけ圧縮して効率よく伝送することや、相手にはやく届くように送ることが望ましい。情報理論では、情報をむだなく効率的に送り、誤った情報を極力減らして確実に情報を送ることが課題とされる (Cover and Thomas 2006; 藤田 1969)。

シャノンはこうした課題を解決するため、情報エントロピーや通信速度、通信路容量などの概念を導入した。情報エントロピーは情報を定量的に表したもので、通信速度は通信路で単位時間に伝送される情報量、通信路容量は単位時間あたりに伝達できる情報量の上限のことである。情報エントロピー $H$ は、

$$H = -\sum_i p_i \log p_i \quad (6.1)$$

と表すことができる。ただし、 $p_i$ は出来事 $i$ の起こる確率である。たとえば、サイコロを1回振る場合、起こりうる出来事は1から6のそれぞれの目が出ることであり、1の目の出る出来事確率は $p_1$ 、2の目の出る出来事確率は $p_2$ 、・・・と表される。

式6.1の情報エントロピーはシャノンが数学的に導き出したものである。シャノンは、情報エントロピーは次の条件を満たすべきだと考える。

[情報の定量的な] 測度 $H(p_1, p_2, \dots, p_n)$  というものが存在するならば、それは次の性質を持つ必要があると考えるのは理にかなっている。

1.  $H$ は $p_i$ について連続的であるはずである。
2. すべての $p_i$ が等しく、 $p_i = 1/n$ であるならば、 $H$ は $n$ に関する単調増加関数である。  
等しく起こりうる出来事について、起こりうる出来事が多くなると、選択肢の数や不確かさが増加する。
3. 選択肢が二つの連続した選択肢にわけられるならば、もとの $H$ は分離したそれぞれの $H$ の値の加重和になるはずである (Shannon 1948, pp.392-393)。

シャノンはこれら三つの条件を満たす関数を求め、その結果として式6.1を導き出した。

情報が最も正確に相手に伝わる場合や最も効率的に届く場合、情報エントロピーや通信路容量などの定義された関数が極値となる。このときの極値は「最大エントロピー原理」という手法によって求めることができる。この原理を提唱したのは、統計物理学者のエドワード・ジェインズ (Jaynes 1957a; Jaynes 1957b) である。

最大エントロピー原理について具体例を使って紹介しよう。いま、サイコロを 1 回投げた出目の数  $i$  に 10000 を掛けた金額  $f_i$  円が貰えたとし、サイコロの目  $i$  が出る確率を  $p_i$  とする。このとき、サイコロのどの目が出るのかわからない。だが、最大エントロピー原理を用いれば、手持ちの情報を最大限に活用することにより確率  $p_i$  を導出することができる。 $p_i$  は確率なので、1. 2. 1 項で述べたコルモゴロフの確率論の公理を満たす必要がある。すなわち、

$$\sum_i p_i = 1 \quad (6.2)$$

を満たさなければならない。これは、情報理論では「規格化条件 (normalization)」とも呼ばれる。また、得られる金額の期待値  $\bar{f}$  を

$$\bar{f} = \sum_i p_i f_i \quad (6.3)$$

と定義できる。つまり、ここでは (1) 規格化条件と、(2) 得られる金額の期待値が情報として与えられている。

この二つの制約条件のもとで式 6.1 の情報エントロピーが最大となる場合の確率  $p_i$  は、ラグランジュ未定乗数法と呼ばれる手法を用いて求めることができる。ここで、次の関数  $L$  を定義する。

$$L = H + \alpha \left( \sum_i p_i f_i - \bar{f} \right) + \beta \left( \sum_i p_i - 1 \right) \quad (6.4)$$

ただし、 $\alpha$  と  $\beta$  はラグランジュ未定乗数と呼ばれる定数である。式 6.4 の右辺の第 1 項は情報エントロピー  $H$  である。最大化 (もしくは最小化) したい関数を目的関数と呼び、ここでは情報エントロピーがそれにあたる。右辺の第 2 項と第 3 項は、式 6.2 と式 6.3 の制約条件を表す。これらの条件のもとで情報エントロピーが最大となるのは、関数  $L$  が極値をとる場合である。したがって、関数  $L$  の極値を求めると、導出結果として情報エントロピーが最大の場合における確率  $p_i$

$$p_i = \frac{\exp(\alpha f_i)}{\sum_i \exp(\alpha f_i)} \quad (6.5)$$

が得られる<sup>28</sup>。ただし、ラグランジュ未定乗数  $\alpha$  は、式 6.3 の制約条件に代入すると求められる。最大エントロピー原理は最適化法の一つであり、数学ではラグランジュ未定乗数法と呼ばれる。

情報理論では、与えられた情報を最大限に活用することにより、最適解が確率値として求められる。上の例は情報エントロピーを最大化にする場合であったが、目的や状況に応じて通信路容量などの別の関数を最大化することもある。たとえば、情報をはやく伝達したい場合は通信速度の関数を最大にすればよく、誤った情報を減らしたい場合は汎化誤差関数 (generalization error function) という関数を最大にすればよい (西森 1999)。情報理論の手法を用いると、部分情報を最大限に活用することができるのである。6.2 節で示すが、これと同じ手法を用いると、フィッシャーの自然選択モデルやライト-フィッシャーの遺伝的浮動モデルといった進化論の基本的なモデルを導出することができる。

## 6.1.2 ジェインズの統計力学

前項で述べたように、最大エントロピー原理はジェインズが考案した手法である。ジェインズは、統計力学を情報理論の枠組みで理解するためにこの手法を用いた。統計力学とは巨視的な熱現象を原子や分子の微視的な現象と結びつけるための理論である。

熱現象を利用した乗り物に蒸気機関車がある。蒸気機関車が走る原理は、石炭を燃やして水を沸騰させ、その蒸気をシリンダーに送り、その圧力で車輪が回転するというものである。蒸気機関車は、温度が上昇すれば蒸気圧が増大するという熱現象を利用している。温度や圧力は測定することができ、熱現象は観察可能な物理量によって説明ができる。

こうした熱現象の研究は 18 世紀後半にはじまり、19 世紀の半ばに熱力学という科学の一分野として結実する。熱力学は、 $10^{23}$  乗というモル・オーダーの個数の対象からなる巨視的な系の現象を巨視的に取り扱う分野である。一方、巨視的な現象を微視的な現象と結びつける分野が 20 世紀半ばに登場する。それは統計力学と呼ばれる分野であり、巨視的な熱現象を原子や分子の微視的な現象と結びつけることを目的とする。統計力学は主にジェームス・マクスウェル、ボルツマン、ギブスによって体系化される。ボルツマンはマクスウェルの手法を踏襲したが、ギブスはそれとは異なるアプローチを考案した。ボルツマン流のアプローチとギブス流のアプローチはいまでも統計力学の二分したアプローチとされている (Frigg 2007)。

ボルツマン流のアプローチでは、非常に多くの分子から構成される単一の系の振舞いを表すことが目的とされる。それぞれの分子は力学の法則にしたがって運動する。量子力学がまだ登場していない当時、力学の法則はニュートン力学の法則を指していた。ボルツマンが力学の法則にしたがう莫大な数の粒子の運動からはじめるのは、たとえアド・ホック

<sup>28</sup> 導出の詳細は Appendixes 1 を参照のこと。

な仮定を立てたととしても、詳細で正確な物理学の知識を得ることができるという信念があったからである (Guttmann 1999)。

ある密閉した容器のなかに気体分子が入っており、その容器内の温度や圧力といった巨視的な性質が一定であるとする。容器の体積が変わらず、この容器に外部から熱や力が加えられない限り、容器内の巨視的状态は変わらない。それに対し、容器内の各分子は絶えず運動しているので、微視的状态は変化し続けている。ここでボルツマンは、全体のエネルギーが一定のとき、特別な理由がなければすべての微視的状态は等しい確率で実現する、という重要な仮定をおく。これはのちにリチャード・トールマンによって「ア・プリオリ等確率の原理 (principle of equal a priori probability)<sup>29</sup>」として定式化される (Tolman 1979)。

ボルツマンはさらに「エルゴード仮説 (ergodic hypothesis)」と呼ばれる仮定をおく。エルゴード仮説とは、十分長い時間にわたる時間平均が位相空間の平均と等しいというものである。位相空間とは、系のすべての粒子の状态 (この場合、位置と運動量) を集めたものである。簡単に述べると、一つの粒子の状态を長時間測定して平均した値は、ある一時刻に多粒子を測定して平均した値と等しいとするという仮定である。統計力学では、密閉された容器のなかの気体の集団は一つの系として表される。その容器内の分子数は莫大なので、すべての分子の位置と運動量といった物理量を同時に測定することはできない。また、実際の測定には時間間隔があり、人にとっては短くても微視的なレベルからすると極めて長く、分子間の衝突などで状态が変化してしまう。私たち人間に記録できるのは、十分長い時間にわたって測定した物理量を時間平均したものである。また、位相平均も容易に計算ができる。ボルツマンはこれらの仮定から、平衡状態における気体分子の速度分布を導出した。これはマクスウェル - ボルツマン分布と呼ばれており、統計力学の重要な成果の一つとされている<sup>30</sup>。

一方ギブスは、1902年に『統計力学の基本原理解』を出版し、マクスウェルやボルツマンのアプローチとは異なる統計力学を展開する (Gibbs 1902)。ギブスは、5. 2. 2項で解説した「粗視化」や「アンサンブル」の概念を考案した人物である。粗視化とは、系のエネルギーや粒子数といったパラメータを平均化して考慮する情報量を減らす操作のことであり、アンサンブルは、ある範囲内にパラメータの値を含む同種の微視的状态を持つ系の集合であった。ジェインズは、粒子数が多いことの「難点は自然の神秘を説明しようとする試みを妨げることであり、それゆえ、いくつかの自明な命題を演繹するという穏当な目的で満足せざるを得ない」 (ibid., p.vii) と述べている。こうした考えは、ギブスが粗視化やアンサンブルの概念を統計力学に導入することにつながった。ギブスは熱力学が分子構造の詳細によらず成り立っていることから、統計力学も分子構造についての仮説は必要ないと考えた。統計力学のモデルの精度は粒子の運動の詳細には依存せず、粗視的なモデルを使用することで正確な結果が得られる。統計力学にはすべての粒子の運動に関する詳細

<sup>29</sup> 「等重率の原理」とも呼ばれる。

<sup>30</sup> ただし、ここでは気体分子が古典力学にしたがって運動することを仮定している。量子力学が誕生すると微視的粒子の数が変わると、粒子の種類によって平衡状態の分布が異なることがわかっている。

な知識は不要であり、そうした不要な知識は結果を明らかにするよりもむしろ覆い隠してしまう。このことは、ギブスが統計力学を実在論的ではなく実用論的に理解する要因ともなった (Guttmann 1999, p.23)。

ジェインズはギブス流のアプローチを推し進める (Jaynes 1957a; 1957b)。ジェインズは、必要最低限の情報からマクスウェル - ボルツマンによる従来の統計力学モデルを導出し、統計力学には系の内部のあらゆる粒子に関する詳細な情報は必要ないと主張する。そして、このとき導出に用いた手法が「最大エントロピー原理」である。

では、ジェインズによる導出をみてみよう<sup>31</sup>。N個の同等な粒子からなる系があるとする。個々の粒子について、粒子がエネルギー $E_i$ の状態にある確率を $p_i$ とする。 $E_i$ はそれと精度上見分けのつかない状態のいくつかを代表しているとする。そうすると、系の平均エネルギー $\bar{E}$ は

$$\bar{E} = \sum_i p_i E_i \quad (6.6)$$

と表せる。また、確率 $p_i$ はコルモゴロフの確率論の公理を満たすので、

$$\sum_i p_i = 1 \quad (6.7)$$

となる。この式は、系の粒子数が一定であることにも対応している。というのも、エネルギー $E_i$ の状態にある粒子数を $n_i$ とすると確率 $p_i$ は $n_i/N$ で表され、式 6.7 に代入すれば、

$$N = \sum_i n_i \quad (6.8)$$

となるからである。

系の平均エネルギー $\bar{E}$ と粒子数 $N$ は実際に測定することができ、私たちは知ることができる。だが、その微視的な状態 $E_i$ と $p_i$  (もしくは $n_i$ ) はわからない。このとき、平衡状態におけるエネルギー分布は最大エントロピー原理を用いると、式 6.6 と式 6.7 を制約条件としてエントロピーを最大にした場合の粒子のエネルギーとして求めることができる。しかも、その導出結果はマクスウェル - ボルツマン分布と同じものになる。ジェインズは、最大エントロピー原理を用いて従来の統計力学の結果の導出に成功したのである。ここで紹介した導出では、系の平均エネルギーと粒子数が一定であることが条件になっていたが、ジェインズはエネルギーが変化する場合や、エネルギーと粒子数が変化する場合の平衡状態に

<sup>31</sup> 詳細な導出は Appendix 2 を参照のこと。

における気体粒子分布も求めている。それぞれの気体粒子集団は、ミクロカノニカルアンサンブル、カノニカルアンサンブル、グランドカノニカルアンサンブルに対応する。

ジェインズの導出をまとめよう。まず、系に関して私たちが持っている情報を明確にし、次にそれを制約条件として最大エントロピー原理を用いる。この導出では、従来の統計力学で仮定されているエルゴード仮説や等重率の原理といったものは必要ない。これらの仮定はそれ自体の根拠が不明瞭だと指摘されている。ジェインズのアプローチではそうした難点を回避できる。また、統計力学にエルゴード性などの物理的仮定や個々の粒子の状態に関する詳細<sup>32</sup>が不要である。そのことからジェインズは、確率概念を用いる統計力学は決定論の問題とは関係がないと主張する。それに加えて、ジェインズはこのことから統計力学を実在論的に捉えなくてもよいと考えている。これはギブスの実用論の哲学をより具体化したものである。ジェインズも統計力学を実用論的、もしくは道具主義的に捉える。道具主義とする理由は、私たちの手持ちの情報に応じて導出される結果が変わるからである。ジェインズは、従来の統計力学と同じ結果を導出するのにエルゴード性などの物理的仮定や個々の粒子の力学的状態の詳細が不要であったことから、因果的な仮定を記述することだけでなく、物理学者のおこなう推論も物理学に含まれると考える。ジェインズは、統計力学を物理学者のおこなう推論の一種とみなしたのである。ジェインズは情報理論が統計力学を包摂するより広い枠組みだと捉えている。実は、最大エントロピー原理を用いると、統計力学だけでなく、進化論のモデルも導き出すことができる。次節ではその導出をみることにしよう。

## 6. 2 情報理論と進化論

進化論が生物集団を基礎とする理論であることは4章で論じた。フィッシャーの自然選択モデルは、自然選択が生物集団へ及ぼす効果を表したものである。フィッシャーのモデルでは、生物集団内の個体数が非常に多いことが明示的に仮定されている。また、5章で明らかにしたように、進化論には集団を構成する個体についてのすべての情報は必要ない。もし仮に個体についてあらゆることがわかっているとすると、進化論によって生物集団の変化を説明するときには、その情報のなかの一部だけしか使用されない。生物学者は進化現象を説明する際に敢えて情報を捨象するのである。

情報理論は部分情報にもとづいて推論をするための合理的な道具を提供してくれる。最大エントロピー原理はその代表例である。そこで以下では、情報理論の観点から進化モデ

---

<sup>32</sup> ただし、主観的な統計的推論に唯一要請される客観的な物理的仮定として、粒子の枚挙の仕方があるとする。

ルを考察してみる。本節では、進化論の基本モデルであるフィッシャーの自然選択モデルとライト-フィッシャーの遺伝的浮動モデルを取り上げることにする。

## 6. 2. 1 自然選択モデル

フィッシャーの自然選択モデルは、集団の特性の時間的変化を表すものである。1章で紹介したように、フィッシャーの自然選択モデルは、

$$\frac{d\bar{w}}{dt} = \sum_k p_k (w_k - \bar{w})^2 \quad (6.9)$$

という方程式で表される。ただし、 $\bar{w}$ は集団の平均適応度、 $p_k$ は集団内での遺伝子  $k$  の頻度、 $w_k$ は遺伝子  $k$  の適応度である。この式は、集団の平均適応度の変化が遺伝子頻度  $p_k$  の分散と等しいことを示している。だが、この式は遺伝子頻度の変化を表していない。そこで、木村資生はフィッシャーのモデルと同じ条件のもとで、遺伝子頻度の変化  $dp_k/dt$  を表す式を導出した (Kimura 1958; Crow and Kimura 1970)。

木村の導出方法をみてみよう。遺伝子頻度の変化を示す式を導出するには、二つの情報が入手できればよい。すなわち、遺伝子頻度  $p_k$  がコルモゴロフの確率論の公理を満たすことと、平均適応度  $\bar{w}$  の定義である。それぞれ、次のように表すことができる。

$$\sum_k p_k = 1 \quad (6.10)$$

$$\bar{w} = \sum_k p_k w_k \quad (6.11)$$

これら二つの事柄がわかっているという条件のもとで、ラグランジュ未定乗数法によって遺伝子の頻度変化を求める。そのため、次の関数  $L'$  を定義する。

$$L' = \frac{d\bar{w}}{dt} + \alpha' \left( \sum_k p_k w_k - \bar{w} \right) + \beta' \left( \sum_k p_k - 1 \right) \quad (6.12)$$

ただし、 $\alpha'$  と  $\beta'$  はラグランジュ未定乗数である。式 6.12 の右辺の第 1 項は目的関数であり、第 2 項と第 3 項は制約条件である。これらの制約条件のもとで平均適応度の変化が最大と

なるのは、関数  $L$  が極値をとる場合である。したがって、関数  $L$  の極値を求めると、導出結果として遺伝子の頻度変化を表す式が得られる<sup>33</sup>。

$$\frac{dp_k}{dt} = p_k(w_k - \bar{w}) \quad (6.13)$$

この導出は木村によるものであり、彼はこの導出法を「自然選択の最大原理 (maximal principle of natural selection)」と名づけた (Kimura 1958)。木村がこの導出をおこなったのは、フィッシャーの自然選択モデルでは遺伝子の頻度変化が表せなかったためである。木村は言及していないが、以下では、情報理論と自然選択モデルの類似性について検討する。

まず、情報理論と自然選択モデルの共通点として二つの制約条件が挙げられる。情報理論では式 6.2 と式 6.3 を制約条件としているが、これらは自然選択モデルの制約条件の式 6.10 と式 6.11 と同じである。式 6.2 および式 6.10 は規格化条件であり、確率が満たさなければならない条件である。この条件は出来事の起こりやすさを定量的に測定するために必要である。また、式 6.3 と式 6.11 はある量の平均値を定義したものであり、数学的には同値である。情報理論では、誤情報の伝達される割合の平均値や得られる金額の期待値などを定義し、関数として表すことができる。そうした関数は、同じ数式で表されているとしても、私たちの目的や関心に依じて解釈が異なることがある。たとえば、シャノンのように伝達効率のよい通信路を構築するという目的のもとでは、式 6.2 は誤情報の伝達される割合の平均値として定義される。また、サイコロ投げで得られる金額を予測することに関心がある場合、得られる金額の期待値が同じ式で定義される。自然選択モデルでは、自然選択による生物集団の変化を予測することが目的である。このように、情報理論と自然選択モデルの条件は同じ数式で表され、その数式は私たちの目的や関心に合わせて解釈されるのである。

さらに、情報理論と自然選択モデルでは導出法も共通している。情報理論では、エントロピーを最大にするため、最大エントロピー原理と呼ばれる手法が用いられた。一方、自然選択モデルでは、生物集団の遺伝子の頻度変化を求めため、自然選択の最大原理と呼ばれる手法を使用する。最大エントロピー原理と自然選択の最大原理はどちらも、「ラグランジュ未定乗数法」と呼ばれる同じ数学的手法である。

このように、情報理論と自然選択モデルは制約条件だけでなく、導出法も数学的に同じである。ラグランジュ未定乗数法とは、部分的な情報から最適解を求めるときに使う手法であった。したがって、生物集団が特定の形質を共通に持つという観察結果を情報として捉えると、自然選択モデルと情報理論はどちらも手持ちの情報を最大限に活用する理論として理解することができる。つまり、自然選択モデルは部分情報を扱うモデルであり、情報理論の一部とみなすことができるのである。

<sup>33</sup> 導出の詳細は Appendixes 3 を参照のこと。

## 6. 2. 2 遺伝的浮動モデル

では次に、遺伝的浮動モデルの導出をみてみよう。ここでも、前項の自然選択モデルの導出のときと同じく、最大エントロピー原理を利用することができる。自然選択モデルの導出の場合、式 6.9 のフィッシャーのモデルから議論をはじめたが、ここではその式を用いる必要はない。

まずは、次世代の集団を形成する配偶子に 1 から  $2N$  までの番号をつけることにしよう。配偶子のある特定の遺伝子座には遺伝子  $A$  か  $a$  のいずれかがあるとする。また、 $k$  番目の配偶子に遺伝子  $A$  が含まれる確率を  $p_k$  とする。現世代の時点で次世代のどの配偶子に遺伝子  $A$  が含まれているのかはわからないので、 $p_k$  は未知である。そこで、最大エントロピー原理を用いて確率  $p_k$  を導き出してみる<sup>34</sup>。この確率  $p_k$  は確率論の公理を満たさなければならない。つまり、

$$\sum_{k=1}^{2N} p_k = 1 \quad (6.14)$$

が成り立つ。これは自然選択モデルを導出する場合と同じ制約条件である。ただし、ここでは平均適応度についての情報が与えられていないとする。つまり、自然選択モデルの導出のときの式 6.11 の条件は与えられていない。

次に、確率変数  $x_k$  を以下のように定義する。 $k$  番目の配偶子の特定の遺伝子座に遺伝子  $A$  が含まれているなら  $x_k$  に 1、遺伝子  $a$  が含まれているなら  $x_k$  に 0 の値を与える。そうすると、はじめの条件では、次世代に遺伝子  $A$  を持つ生物が  $j$  個体存在するとしているので、

$$j = \sum_{k=1}^{2N} x_k \quad (6.15)$$

となり、その期待値  $\bar{j}$  は、

$$\bar{j} = \sum_{k=1}^{2N} p_k x_k = 2Np \quad (6.16)$$

となる。ここまでで与えられている情報は、式 6.14 と式 6.15 である。式 6.16 は期待値の定義であるので、式 6.15 をもとに表すことができる。つまり、式 6.14 と式 6.16 が与えられていると考えることもできる。最大エントロピー原理を用いると、この二つの情報のもとでエントロピーを最大にしたときの、すなわち情報を最も効率よく利用したときの確率  $p_k$  を求めることができる。ここで、エントロピーは

<sup>34</sup> 詳細な導出は Appendix 5 を参照のこと。

$$H = -\sum_{k=1}^{2N} p_k \log p_k \quad (6.17)$$

で表される。情報理論では、式 6.14 と式 6.16 を制約条件、式 6.17 を目的関数としてその関数の極値を求めることにより、確率  $p_k$  を導き出すことができる。計算結果は以下となる。

$$p_k = p^j (1-p)^{2N-j} \quad (6.18)$$

式 6.18 では、 $2N$  個から  $j$  個を抽出する組合せが考慮されていないので、その組合せを掛け合わせることで以下の式がえられる。

$$p(i, j) = \binom{2N}{j} p^j (1-p)^{2N-j} \quad (6.19)$$

これは、1. 1. 3 項の式 1. 2 で示したライト - フィッシャーの遺伝的浮動モデルとまったく同じ式である。このように、最大エントロピー原理を用いると、遺伝的浮動モデルが導出できるのである。

この情報理論の手法をもとに、遺伝的浮動が非決定論的な現象であるか否かを考察してみよう。ここで必要な情報は、集団の大きさ  $N$ 、現世代に遺伝子  $A$  を持つ個体数  $i$ 、次世代で存在すると仮定する遺伝子  $A$  を持つ個体の数  $j$ 、および確率論の公理である。確率論の公理以外は、生物集団に関する情報である。このことは、遺伝的浮動モデルが物体に関する情報の積み重ねから構成されていないことを示している。また、この導出には集団に関する情報だけが用いられていることから、遺伝的浮動モデルは集団レベルの変化を自律的に説明していることもわかる。ただし、自律的な説明が可能であるということから、現象の非決定性が示せるわけではない。ブランドンたちは、集団レベルの自律的説明に訴えることで、遺伝的浮動が非決定論的な現象であると主張した。しかし、4. 1. 5 項で述べたように、彼らの論証からは遺伝的浮動が非決定論的な現象であることは引き出せない。

では、遺伝的浮動モデルは現象の非決定性を表しているのだろうか。答えは、否である。遺伝的浮動モデルは、現象が非決定論的であるかどうかについて何も述べていない。情報理論的手法の導出をみると、遺伝的浮動モデルで考慮されているのは、生物集団に関する情報の一部だけである。いま注目した特定の遺伝子座以外に存在する遺伝子、交配相手、外敵、気候などの進化に関連する多くの情報は考慮されていない。先述の非決定論の定式化によると、初期状態についての完全な情報が非決定論の問題に答えるための条件となっている。だが、遺伝的浮動モデルはこの条件を満たしていないのである。では、もし仮に

生物集団に関するすべての情報を考慮すると、どうなるのだろうか。ここでは、個体間の違いとして、生物個体が特定の遺伝子を持つかどうかだけにのみ注目し、その他の性質は考慮していない。だが、実際の生物は多様であり、それぞれの個体は多くの点で異なっている。もしすべての情報を考慮するなら、個体間に生存や繁殖上のさまざまな違いを無視できなくなる。そうすると、複数の生物個体の共通点を一般化することが困難となり、遺伝的浮動モデル自体がつかれなくなってしまう。遺伝的浮動モデルを構築するには、敢えて一部の情報しか考慮しない、すなわちすべての情報を考慮しないことが必要である。このことは、自然選択モデルにもあてはまる。現象が非決定論的かどうかについて、遺伝的浮動モデルと自然選択モデルは何も述べていないとすると、進化論における確率概念は何を表しているのだろうか。これについては、次項で検討することにする。

### 6. 2. 3 情報理論的観点からみた進化論の目的

では、進化モデルにおける確率概念は何を表しているのだろうか。情報理論は、部分的な情報が得られている場合に、それらの情報を最大限に活用する手法を提供してくれる。その一例が最大エントロピー原理であった。情報理論の目的は、ラプラスの魔物のようにあらゆる情報が与えられたという想定のもとで、伝達される情報を時系列的に追跡することや、サイコロの軌道を完全に記述することではない。情報理論はむしろ、手持ちの情報を最大限に活用することにより、効率よく伝達される符号の配列やサイコロを投げて出る目の数など、未来の出来事を予測することを目的の一つとしている。すなわち、情報理論の目的は未来の出来事の予測であり、実在の現象の完全な記述ではない。

このことは、進化論にもあてはまる。5. 2節で述べたが、適応度に値を付与するのに生物集団内の個体についての詳細な情報は不要である。進化論は実在の進化現象を完全に記述することを目的としているわけではない。そうではなく、進化論では、部分情報から生物集団に関する未来や過去の出来事を予測することが目的の一つとされているのである。

また、予測の精度は情報の量と関係しているといえる。たとえば、サイコロには6つの面があるという情報に加え、4の目がいままでの試行回数のちょうど半分出たという情報が得られるとする。最大エントロピー原理を用いると、手に入れた情報に応じて確率的な予測値が導出できる。また、情報が増えるにしたがい予測の精度は高くなる。フィッシャーの自然選択モデルは単純なモデルであるが、自然選択の最大原理を用いると、突然変異やエピスタシスといった遺伝的要因や環境要因なども情報として加えることができる。これらの情報を加えると、進化モデルにおける確率値は変化し、生物集団が受ける進化の結果をより正確に予測することができる。実際、木村はフィッシャーの自然選択モデルを拡張し、自然選択だけでなく、遺伝的要因や環境要因も考慮した以下の式を導出している (Kimura 1958 ; Crow and Kimura 1970)。

$$\frac{d\bar{w}}{dt} = \sum_k p_k (w_k - \bar{w})^2 + \sum_k \log Z_k + \sum_k \frac{dw_k}{dt} p_k \quad (6.20)$$

この式の右辺第一項は、フィッシャーの自然選択モデルである。右辺第二項の  $Z_k$  は連鎖<sup>35</sup>や組換え<sup>36</sup>といった遺伝要因による偏りの度合いを表すパラメータで、最後の項は環境による世代間の適応度の変化を表す。

情報理論的観点から進化論をみると、予測の精度が上がることを情報量の増加として理解することができる。そして、進化論における確率は考慮する情報に応じて変わる。そうした意味で、進化論における確率概念には主観的要素が含まれている。一方、考慮する情報が少なくなると予測の精度は下がる。だが、生物集団の変化を説明することはできる。たとえば、遺伝要因などを考慮せず、自然選択に関連する情報のみを考慮する場合は、自然選択による生物集団への効果を説明することができる。これに対し、遺伝要因などを考慮に入れると、生物集団が受ける進化の全体的な効果を説明することはできる一方で、自然選択のみによる効果を説明することはできない。つまり進化論では、私たちの目的や関心に応じて考慮する情報を変えることができるのである。

ただし、考慮する情報が変わったとしても、客観性が失われるわけではない。たとえば、地球の公転運動を説明する場合、私の体重は考慮されない。これらの情報を考慮することは予測の精度を上げることにつながるにもかかわらず、地球の公転運動の説明にはほとんど役に立たない。他方、こうした情報を考慮しないとしても、地球がほぼ楕円体であることや太陽の質量が約  $1.99 \times 10^{30} \text{kg}$  であることは客観的な事実である。同様に、遺伝要因や環境要因に関する情報を考慮しないとしても、フィンチの嘴の大きさがその生物集団に影響を及ぼすことは観察可能な客観的出来事であり、進化論はそうした出来事を説明する。これは、適応度に値を付与する際に、生物集団における各個体が特定の形質あるいは遺伝子を共通に持っているという客観的な観察結果を前提としているからである。このように、進化論では、考慮する情報が減少しても客観性は保持される。

このことは、4. 1節で解説した「集団的思考」とも関連する。自然選択モデルでは、大きな嘴と小さな嘴という複数の個体に共通する情報のみを抜き出し、羽の数や眼の大きさなどの情報を無視する。これにより、大きな嘴を持つ個体からなる集団と小さな嘴を持つ個体からなる集団とを適応度によって比較することができる。それに対し、一個体のさまざまな形質をいくら詳細に表し、個体の運動をどんなに正確に記述したとしても、集団の変化を説明するのはそれとは別のことである。単一の対象を扱う方法論をマイアは物理主義的思考法と呼んだが、これでは木をみているが森をみていないようなものである。自然選択モデルは木の一部をみて、森全体を概観することにより、生物集団の進化現象を説明する。森をみるとき木の一部しかみてないことから、森が実際に存在することは否定で

<sup>35</sup> 連鎖とは、同一染色体上の二つ以上の遺伝子がいっしょに次世代に遺伝する現象のこと。

<sup>36</sup> 組換えとは、染色体の一部が切れて別の染色体の一部と入れ替わる現象のこと。

きない。また、物理学では物体の「運動」を最も基本的な現象とし、その一方で、進化論では「抽出」を最も基本的な現象としていた。物体の運動が最も基本的な現象であるからといって、抽出が最も基本的な現象ではないことにはならない。遺伝子や個体が抽出されることも客観的な現象なのである。進化論は複数の個体に共通する情報を最大限に活用することにより、生物集団の変化を確率的に説明することができる。そしてこのことは、進化論における確率概念に客観的要素が含まれることを表している。

情報理論的観点から進化論をみると、進化論における確率概念には主観と客観の両方の要素が含まれていることが明らかになった。進化論における確率概念をめぐる従来の議論では、私たちの知識やその変化に依存することで確率概念を主観と客観に区別している。この基準にしたがうと、進化論における確率概念は手持ちの情報に依存するので、主観的に解釈される。だがそれは、私たちの知識の不十分さを表すという消極的な意味で主観的に解釈しているわけではない。進化論における確率概念には、進化現象の客観的な側面が反映されている。確率解釈としては主観的に解釈されるが、進化論における確率概念には主観と客観の両方の要素が反映されているのである。このことは、進化論における確率概念の重要な特徴であり、従来の二極化した議論では十分に捉えることができていない点である。

#### 6. 2. 4 ベイズ主義的解釈

それでは、進化論における確率概念はどのように解釈できるのだろうか。本項では、進化論における確率概念がベイズ主義的に解釈できることを示す。先のジェインズは統計力学における確率概念をベイズ主義的に解釈している (Jaynes 1986)。本節での私の論証は彼のこうした考えが下地にある。ベイズ主義は確率の主観的解釈ではあるが、確率を単なる無知として解釈するわけではない。むしろ私は、進化論では手持ちの情報が合理的に活用されているという積極的な点を強調したい。これはローゼンバークの主張と異なる点である。また、確率をベイズ主義的に解釈したとしても、確率概念が現象の客観的な特性を捉えてないと主張するつもりもない。ここでの目的は、客観的解釈を否定することではなく、ベイズ主義的解釈の可能性を示すことである。ここでも、ライト-フィッシャーの遺伝的浮動モデルを具体例として検討することにしよう。

ライト-フィッシャーの遺伝的浮動モデルをみる前に、それよりも単純なモデルについて考えてみよう。ある生物集団に有性生殖する生物が  $N$  個体存在し、それぞれの個体はある特定の遺伝子座に対立遺伝子  $A$  か  $a$  のいずれかを持つとする。ここでは説明を簡単にするため、世代を通じて集団内の個体数は変わらないものとする、繁殖時にはその集団における  $2N$  個の配偶子が抽出されることになる。

6. 2. 2 項で遺伝的浮動モデルを導出したときと同じく、ここでも次世代の集団を形成する配偶子に 1 から  $N$  までの番号をつけることにしよう。そして、次世代の集団を形成

する  $k$  番目の配偶子の特定の遺伝子座に遺伝子  $A$  が含まれる確率を  $p_k$  とする。 $p_k$  は未知であるとして、最大エントロピー原理を用いてこの確率を導き出してみよう。

確率  $p_k$  は確率論の公理を満たす必要があるので、

$$\sum_{k=1}^{2N} p_k = 1 \quad (6.21)$$

となる。この情報を  $D_1$  としよう。他にわかっていることがないとすると、この条件のもと、エントロピーが最大となるときの確率  $p_k$  を求めると、

$$p_k = \frac{1}{2N} \quad (6.22)$$

が得られる<sup>37</sup>。したがって、情報  $D_1$  が与えられたとき、次世代に遺伝子  $A$  を持つ生物が  $j$  個体存在する確率  $p(j|D_1)$  は、

$$p(j|D_1) = \frac{j}{2N} \quad (6.23)$$

となる。この導出法も最大エントロピー原理である。ちなみに式 6.22 は、どの配偶子も抽出される確率が等しいことを表している。

次に、従来のライト-フィッシャーモデルの設定と同様、現世代において遺伝子  $A$  の頻度が  $p$  であることも知っているとする。つまり、先の情報  $D_1$  に加え、もう一つ情報が増えたのである。この情報を  $D_2$  としよう。6. 2. 2 項では、最大エントロピー原理を用いて、 $D_1$  と  $D_2$  の情報が与えられたときの、次世代に遺伝子  $A$  を持つ生物が  $j$  個体存在する確率  $p(j|D_1 \& D_2)$  を導出した。ここで、最も単純な上のモデルと比べると、式 6.16 の期待値  $j$  が情報として増えていることに注意しよう。この状況では、式 6.21 と式 6.16 が情報として与えられている。この二つの情報のもと、エントロピーを最大にしたときの確率  $p(j|D_1 \& D_2)$  は、6. 2. 2 項で示したように、

$$p(j|D_1 \& D_2) = \binom{2N}{j} p^j (1-p)^{2N-j} \quad (6.24)$$

<sup>37</sup> 導出の詳細は Appendix 4 を参照のこと。

となる。このように、情報理論の手法を用いると、現世代の遺伝子頻度  $p$  から次世代の確率  $p(j|D_1 \& D_2)$  が求められるのである。ここで再び、式 6.24 がライト - フィッシャーの遺伝的浮動モデルと同じであることを確認しておこう。

ところで、遺伝的浮動モデルが情報理論の手法から導出できることは何を意味しているのだろうか。経済学者で統計学者のアーノルド・ゼルナーは、「最適な情報処理規則 (optimal information processing rule)」からベイズの定理が導出できることを示した (Zellner 1988)。情報処理規則とは、入力情報を加工し、情報を入力するときの規則である。情報処理規則には、入力情報よりも出力情報を減らすものや、関係のない情報を加えるものがあり、それらはいずれも効率の悪い規則である。それに対し、効率のよい規則とは、出力情報を入力情報に限りなく近づけ、理想的には等しくする規則である。ゼルナーはこれを最適な情報処理規則と呼んだ。彼は、最適な情報処理規則にしたがえば、ベイズの定理が導出できることを示す。彼はそのために、入出力情報の定量的な測度を導入する。いま、パラメータ  $\theta_i$  とデータ  $D$  が与えられたとすると、入力情報は、

$$I(\theta_i) = \sum_i p(\theta_i | D) \log p(\theta_i) \quad (6.25)$$

$$I(D) = \sum_i p(\theta_i | D) \log p(D) = \log p(D) \sum_i p(\theta_i | D) = \log p(D) \quad (6.26)$$

$$I(D | \theta_i) = \sum_i p(\theta_i | D) \log p(D | \theta_i) \quad (6.27)$$

となり、出力情報は、

$$I(\theta_i | D) = \sum_i p(\theta_i | D) \log p(\theta_i | D) \quad (6.28)$$

となる<sup>38</sup>。ただし、それぞれ  $p(\theta_i | D)$  を重みづけている。このとき、入出力の情報量の差、すなわちエントロピー  $H$  は、

$$\begin{aligned} H = & -\sum_i p(\theta_i | D) \log p(D | \theta_i) - \sum_i p(\theta_i | D) \log p(H_i) - \log p(D) \\ & + \sum_i p(\theta_i | D) \log p(\theta_i | D) \end{aligned} \quad (6.29)$$

<sup>38</sup> ゼルナーは情報量を連続量として定義しているが、本稿では上述の遺伝的浮動モデルの導出に合わせるため、離散量で定義しなおしている。

となる。いま、確率  $p(\theta_i|D)$  の出力情報を求めており、この確率は以下のコルモゴロフの確率論の公理を満たす。

$$\sum_i p(\theta_i|D) = 1 \quad (6.30)$$

式 6.30 の条件もと、式 6.29 のエントロピーを最大化すると、

$$p(\theta_i|D) = \frac{p(D|\theta_i)p(\theta_i)}{\sum_i p(D|\theta_i)p(\theta_i)} \quad (6.31)$$

が導出される<sup>39</sup>。これはまさに、1. 2. 1 項で紹介したベイズの定理である<sup>40</sup>。このように、最適な情報処理規則からベイズの定理が導出されるのである。ここでも、「最大エントロピー原理」が用いられていることに注意しよう。

上述したように、遺伝的浮動モデルも最大エントロピー原理から導出することができる。最大エントロピー原理は、入出力情報の差を最小限にする最適な情報処理規則である。つまり、遺伝的浮動モデルは、入出力情報の差を最小化することで導出できるのである。言い換えると、入出力情報の差を最小化せず、出力情報が入力情報よりも少なくなったり関係のない情報が加えられたりすると、遺伝的浮動モデルは導出できない。遺伝的浮動モデルでは、与えられた情報に応じて合理的に信念更新することで、次世代の遺伝子頻度が予測できるのである。たとえば、規格化条件の情報  $D_1$ 、および現世代における集団内の遺伝子  $A$  の頻度の情報  $D_2$  が与えられたとき、それらの情報を合理的に信念更新することによって、式 6.24 の事後確率  $p(j|D_1 \& D_2)$  が求められる。これは、遺伝的浮動モデルにおける確率概念がベイズ主義的に解釈できることを示している。

ここでは、進化モデルの一例として遺伝的浮動モデルを考察し、その確率概念がベイズ主義的に解釈できることを示した。遺伝的浮動モデルでは、与えられた情報に応じて確率が変化する。その意味で、遺伝的浮動モデルにおける確率概念は主観的に解釈される。また、6. 2. 3 項でみたように、自然選択モデルについても遺伝要因や環境要因を考慮すれば、それに従ってモデルを導出することができ、そういう意味で自然選択モデルにおける確率概念も主観的に解釈できる。だがそれは、ローゼンバーグによる無知解釈とは異なる。ローゼンバーグは全知全能者と人間を対照させ、人間の不十分な知識という消極的な点を強調した。しかし、科学哲学者のマルセル・ウェーバーが指摘するように、理論が複雑な現象を完全に説明できないとしても、その理論が実在のある側面を正確に表現するこ

<sup>39</sup> 導出の詳細は Appendix 6 を参照のこと。

<sup>40</sup> 式 1.4 ではパラメータ  $\theta_i$  のところが仮説  $H$  で表記されているが、本質的には同じである。

とは可能である (Weber 2001)。ウェーバーは、ローゼンバーグたちやブランドンたちに対して確率解釈についての選択肢が少なすぎると批判する。どちらの陣営も二つの選択肢しか想定していない。一つは、現象が決定論であれば、その理論における確率概念は主観的に解釈されるというものであり、もう一つは、現象が非決定論であれば、その理論における確率概念は客観的に解釈されるというものである。それに対し、ウェーバーは他の選択肢も可能であると批判する。たとえば、現象が決定論的であっても、確率概念は客観的に解釈される余地はある。ウェーバーは、ある理論が複雑な現象を完全には説明できないとしても、その理論が何も表現しないというわけではなく、「実在のある側面を正確に表現することは可能である」 (*ibid.*, p.S217) と主張する。ウェーバーのいうとおり、決定論的世界観のもとで許容される確率解釈が主観的無知しかないというのは、あまりに選択肢が少なすぎる。

ウォルシュたちやミルスタインは、進化論が生物集団の変化を表す理論であると主張した。彼らは遺伝的浮動や頻度依存選択では集団の大きさや集団内の頻度が進化に影響することを指摘し、それらが個体の性質だけでは説明できないことを示した。また、6. 2. 2項でみたように、進化論のモデルは集団の個体数や集団内の頻度という、集団レベルの情報にもとづいている。つまり、進化は集団レベルの現象である。また、個体数や集団内の遺伝子頻度は、私たちとは独立したものである。したがって、進化論における確率概念は単なる無知によるものではなく、実在のある側面を捉えている。

進化論では、個体の変化が詳細に説明されるわけではない。ソーバーによると、進化論は集団レベルの現象を一般化したものである (Sober 1984)。この一般化は、ある集団における複数の個体を記述したり、複数の異なる集団の共通点を説明したりできるので有益である。これは、進化論が個体の詳細な情報を考慮しないことによって可能となる。進化論では、個々の個体の詳細な情報を取捨選択することで、生物集団の変化が説明できる。また、進化論では取捨選択した情報は効率的に処理され、合理的に信念更新がおこなわれることによって確率が変わる。この点においても、ローゼンバーグの無知解釈とは異なる。ベイズ主義的解釈は、進化論の合理的な側面も表すことができるのである。最後に、合理性についてさらに考察することにしてしよう。

### 6. 2. 5 合理性

ローゼンバーグたちとブランドンたちの論争を思い出すと、進化現象が決定論的か非決定論的か、そして進化論は実在論的か否かということが争点となっていた。フィッシャーの自然選択モデルやライト - フィッシャーの遺伝的浮動モデルは実在論的なモデルなのだろうか、それとも反実在論的なモデルなのだろうか。また、進化現象は決定論的なのだろうか、非決定論的なのだろうか。

本章では、進化論の代表的モデルを具体的に検討し、それらが実際にどのように導出されるのかをみてきた。それによりわかったことは、進化論で生物集団の変化を捉えるには全情報は必要なく、部分情報があれば十分だということである。このことを悲観的に捉える必要はない。というのも、進化論ではさまざまな情報を敢えて無視することで、集団レベルの変化が自律的に説明できるからである。もし仮に生物学者が生物個体についてのあらゆる情報を入手したとしても、進化現象を説明するときには生物学者の目的や関心に合わせて情報の一部を捨象するのである。そういう意味で、進化論には認識論的な側面が含まれている。

だがその一方で、進化論のモデルを導出するときに使用される情報は実在の進化現象のある側面をきちんと捉えている。生物集団内の個体がある特定の形質を持っていて、かつそうした形質が遺伝することは、生物についての実在の一側面である。また、集団の大きさや、集団内で特定の遺伝子を持つ個体数、さらには確率論の公理などもそうした情報に含まれる。したがって、進化論には実在論的な要素と認識論的な要素が混在している。このことは進化論の確率概念の解釈にも関連している。つまり、進化論における確率概念が主観的に解釈されるとしても、その確率概念には客観的な要素が反映されているのである。

これらのことは、進化論が実在論的か反実在論的かという従来の視点では、十分に捉えることができない。従来の議論は、シマウマが白か黒のいずれであるかを議論するようなものである。そのような問いを立てても、シマウマの特徴をうまく捉えることはできない。進化論の重要な特徴は、生物個体に関するすべての情報を考慮するのではなく、複数の個体に共通する客観的な部分情報を考慮すれば十分だということである。すべての情報を考慮すると情報過多となり、進化現象を効率的に説明することができない。そうではなく、進化モデルでは部分情報を最大限に活用することで、生物集団の変化の説明が可能となる。最大エントロピー原理を用いた導出はそのことを保証してくれる。進化論は、その導出に手持ちの情報が最大限に活用されているという意味で「合理的 (rational)」なモデルなのである。もし手持ちの情報を最大限に活用しなければ、遺伝的浮動モデルも自然選択モデルも導出されない。進化論のこうした特徴は情報理論の観点から理解することができる。したがって、進化論が実在論的か反実在論的かと問うのではなく、合理的か否かと問うべきである。そしてこの問に対して、進化論は合理的な理論であり、集団レベルの変化という実在の一部を表していると答えられるのである。

また、情報理論的観点からみると、進化論の目的が実在の完全な記述ではなく、説明や予測であることが理解でき、さらには、進化論が集団的思考を採用することも理解できる。適応度を定めるには部分情報で十分であり、諸個体の持つ性質の一部に関する情報がそれにあたる。進化論では複数の個体の一部をみて、集団全体を概観することにより、生物集団の変化について説明や予測をおこなうことが可能となる。このことは、進化論が集団的思考を採用していることと整合的である。さらに、ニュートン力学的世界観に立脚するローゼンバークのような立場が主張するのは異なり、進化論が部分情報にもとづいている

からといって不完全な理論というわけではない。むしろ、進化論では敢えて詳細な情報を無視することにより、生物集団の変化についての予測や説明が可能となる。進化論の目的は、実在を完全に記述することではなく、部分情報から集団レベルの現象を説明したり予測したりすることなのである。

## 第7章

### 結論

---

進化論における確率概念は何を表しているのだろうか。本稿では、ローゼンバーグたちとブランドンたちの二つの陣営による論証を足がかりに、この問題について検討した。ローゼンバーグたちは、進化論に確率概念が用いられるのは、私たちが進化現象について十分な知識を持っていないからだとして主張する。一方、ブランドンたちによると、非決定論的な進化現象をありのまま表しているから進化論に確率概念が用いられる。このように、二つの陣営は相反する解答を提示した。だがその一方で、両陣営の論証には共通点がある。どちらの陣営も、進化論が一つひとつの対象を基礎とした理論であり、進化現象は突き詰めると物理学の基礎理論で説明できることを想定している。両陣営の論証はどちらもこの二つの想定に依拠したものであった。

私はこの二つの想定を批判することで、両陣営の論証の土台を掘り崩すことを試みた。まず、進化論が「集団的思考」を採用していることから、進化論が一つひとつの対象を基礎とした理論ではないことを示した。集団的思考は、ゴルトンが誤差論を生物集団の変異の説明に援用することで、進化論の説明の枠組みとして採用されたものである。誤差論は、測定誤差による観察結果のばらつきを数学的に処理するための理論である。誤差論では観察結果のばらつきは真の値からの誤差とみなされるのだが、ゴルトンは誤差論の考え方をひっくり返し、集団自体の特徴を表す理論として捉える。生物の特徴を測定したときの結果のばらつきは、測定誤差によるものではなく、遺伝要因による変異と環境要因による変異を足し合わせたものとして解釈しなおしたのである。この説明では、集団の変化を自律的に説明するために確率分布が用いられる。

ところで、進化論が集団的思考を採用する理由は何だろうか。それは、基礎的な物理理論と異なる種類の現象を表すためである。ニュートン力学や量子力学という基礎的な物理理論は、物体の「運動」を描くための理論である。このような理論では、物体の運動が最も基本的な変化であるとされている。だが、生物は無生物とは異なる特徴を備えている。たとえば、生物の形質は次の世代に遺伝するのに対し、石や机のような物体は遺伝しない。生物は世代交代を繰り返しながら変化していくが、そのとき、遺伝子や個体が取捨選択される。この取捨選択、すなわち「抽出」を表す理論が進化論である。進化というのは、集団のなかから遺伝子や個体が抽出される現象である。抽出がおこなわれるには、一つの対象ではなく、集団が存在しなければならない。よって、このような進化現象は物理学の基礎理論だけでは表せないのである。

では、ローゼンバーグたちやブランドンたちのもう一つの想定は受け入れられるのだろうか。もう一つの想定とは、進化現象は突き詰めると物理学の基礎理論で説明できるとい

うものである。ラプラスの魔物のように物理学に関して完全な知識を持つ存在者は、配偶子や個体の運動を完璧に記述することができるので、遺伝的浮動の概念は不要であるかのように思われた。だが、物理学だけの知識では、配偶子が次世代に受け継がれ、形質が遺伝することを説明できない。こうした現象を説明するには、物理学とは異なる種類の知識が必要となる。同義コドンやがらくた DNA の存在が確認されたことはその一例であり、これらは、物理学的には異なるが生物学的には同じ対象が存在すること示している。遺伝的浮動はそうした対象に作用する。このように、進化論はニュートン力学や量子力学といった物理学の基礎理論とは異なる種類の現象を表すのである。

また、科学的説明の本性を究明する科学哲学の伝統的な議論を踏まえると、説明というのは問いの文脈に依存し、問いの文脈は質問者の意図や目的に応じて変わる。進化現象のある側面を物理学的に説明することはできるだろう。しかし、進化現象のすべてを物理学で説明することはできない。同じ現象を説明するのに複数の説明戦略が存在するからである。何世代にもわたる生物進化を知りたいときは、より多くの事例をまとめて扱う包括的な説明戦略を採用し、特定の生物個体の微細な物理的変化を明らかにしたいときは、現実性の高い説明戦略を採用する。異なる説明戦略の間にはトレード・オフがあり、目的や意図に合わせて説明を使い分けることになる。生命現象が多様であり複雑であるため、生命の謎を解き明かすには多角的な観点が必要なのである。

では、進化論はどのように現象を説明しているのだろうか。進化論の説明では、統計力学で用いられる「粗視化」と同じ操作が関与している。粗視化とは、考慮する情報を減らす操作で、多くの対象をまとめて取り扱うには有効な手法である。もし仮に生物についての完全な情報があったとしても、進化論の説明ではその一部しか使用されず、ほとんどの情報は捨象される。進化論では多様な個体のさまざまな性質を粗視化することによって、似たような形質を持つ個体の集まりを一つの生物集団として扱うことができる。それにより、集団レベルの現象が包括的に説明される。物理学の理論を使って還元的に現象を説明することも重要ではあるが、進化論では複数の対象を包括的に説明することも目標とされているのである。

さて、情報を扱う理論に情報理論があるが、情報理論は部分情報を合理的に活用する方法を提供してくれる。その一つが「最大エントロピー原理」であり、この手法を用いると手持ちの情報を最大限に利用して確率分布を推論することができる。最大エントロピー原理は統計物理学者のジェインズが考案したものであり、彼はこの手法を用いて従来の統計力学モデルを導出することに成功した。ジェインズは物理学者のおこなう推論も物理学の一部だと考えていた。実のところ、最大エントロピー原理は進化論のモデルを導出するのにも用いることができる。このとき、多様な生物についての莫大な情報のなかの一部だけあれば十分であった。それは、集団の大きさや、集団内で特定の遺伝子を持つ個体数など、生物集団に関する情報である。これらは、実在の生物のある側面に関する情報である。また、その一方で、生物学者の意図や目的に合わせて考慮する情報が変わり、それに依

導出される進化モデルも変わるという意味で、進化論は認識論的な側面も含んでいる。進化論のモデルには実在論的な要素と認識論的な要素の両方が入り混じっている。

そして、進化論のモデルが最大エントロピー原理から導出できるというのは、進化論のモデルが手持ちの部分情報を最大限に活用した結果として導き出されるものであることを示している。進化論はこの意味で合理的な理論とすることができる。情報理論的観点からみると、進化論の目的が実在の完全な記述ではなく、説明や予測であることが理解できる。だからといって、進化論が不完全な理論というわけではない。むしろ、進化論では、敢えて詳細な情報を無視することで、生物集団の変化の説明や予測が可能となるのである。進化論の目的は、実在を完全に記述することではなく、手持ちの部分情報にもとづいて集団レベルの現象を予測したり説明したりすることである。

また、遺伝的浮動モデルが最適な情報処理規則にしたがうと導き出せることも明らかになった。最適な情報処理規則とは、入力情報と出力情報の差を極力減らすという情報処理規則であり、この規則を用いると「ベイズの定理」も導き出せる。一方、出力情報が入力情報よりも少なくなったり関係のない情報が加えられたりすると、遺伝的浮動モデルは導出できない。遺伝的浮動モデルでは、与えられた情報に応じて合理的に信念更新することで、次世代の遺伝子頻度が予測できる。このことは自然選択モデルも同様である。すなわち、進化論における確率概念はベイズ主義的に解釈できるのである。ベイズ主義的解釈は、与えられた情報に応じて確率が変化するという意味で主観的な確率解釈である。だがそれは、ローゼンバーグたちのような無知解釈とは異なる。ローゼンバーグたちは全知全能者と人間を対照させ、人間の不十分な知識という消極的な面を強調した。それに対し、私の提案する解釈では、ローゼンバーグたちと同じ主観的解釈ではあるが、手持ちの情報を最大限に利用しているという進化論の合理的な側面を示すことができる。以上が、情報理論的観点から明らかになった進化論の特徴である。

私たちは確率論や情報理論という有益な推論装置を手にしており、部分情報を合理的に処理することができる。ジェインズは、情報理論の最大エントロピー原理を統計力学に適用した。私が最大エントロピー原理を用いて進化論のモデルを導出できたことは、ジェインズの成果に負うところが大きい。ジェインズは、「統計力学はもはや物理的仮定に依拠しているのではなく、単なる統計的な推論の一事例になったのかもしれない」(Jaynes 1957a, p.621) と述べている。統計的な推論ということで、ジェインズは情報理論の最大エントロピー原理を指している。ジェインズにとって、統計力学は情報理論の一部なのである。

さらに近年、量子情報理論の分野が劇的に発展している。そうした状況のなか、量子力学を情報理論的観点から再検討しようと試みがなされている。たとえば、物理学の哲学者のロブ・クリフトン、ジェフリー・バブ、ハンス・ハルヴォーソンは次のように述べている。「私たちは量子力学について、概念的に問題を含む力学的観点を情報理論の観点に置換えることを提案する。すなわち、量子力学はなにより波動と粒子についての力学的理論ではなく(・・・)、情報伝達が可能かどうかについての理論とみなすことを提案してい

るのである」(Clifton, Bub, and Halvorson 2003, p.1563)。統計力学や量子力学が情報理論の一部となるのかどうかはさておき、情報理論的観点が現代科学において重要視されていることは確かである。もしかしたら将来、「科学では情報の観点がなければ何も理解できない」といわれるようになるかもしれない。

## 参考文献

---

- Abzhanov, A., Protas, M., Grant, B. R., Grant, P. R. and C. J. Tabin (2004) “Bmp4 and Morphological Variation of Beaks in Darwin’s Finches”, *Science* 305, 1462-65.
- Albert, D. (1992) *Quantum Mechanics and Experience*, Harvard University Press. (高橋真理子訳『量子力学の基本原理解——なぜ常識と相容れないのか——』, 日本評論社, 1997)
- Albert, D. (2000) *Time and Chance*. Harvard University Press.
- Ariew, A. (2008) “Population Thinking”, in M. Ruse (ed.), *Oxford Handbook of Philosophy of Biology*. Oxford University Press, 64-86.
- Arnauld, A. and Nicole, P. (1662) *La logique, ou L’art de penser*.
- Barrett, P.H. (1974) *Darwin’s Early and Unpublished Notebooks*. In H. E. Gruber, *Darwin on Man*. Dutton, 259-426.
- Bayes, T. P. (1763) “An Essay Towards Solving a Problem in the Doctrine of Chances”, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 53, 370-418.
- Beatty, J. (1984) “Chance and Natural Selection”, *Philosophy of Science* 51, 183-211.
- Beatty, J. (1992a) “Fitness: Theoretical Contexts”, in F. Keller and E. Lloyd (ed.), *Keywords in Evolutionary Biology*, Harvard University Press, 115-19.
- Beatty, J. (1992b) “Random Drift”, in F. Keller and E. Lloyd (eds.) *Keywords in Evolutionary Biology*, 273-81.
- Bell, J.S. (1964) “On the Einstein-Podolsky-Rosen paradox”, *Physics* 1, 195–200.
- Bernoulli, J. (1713) *Ars Conjectandi*. Thurnisius.
- Bever, J. D. (1994) “Feedback between Plants and Their Soil Communities in an Old Field Community”, *Ecology* 75, 1965-77.
- Bohr, N. (1933) “Light and Life”, *Nature* 133, 421-23 and 457-59.
- Boucharad, F. and Rosenberg, A. (2003) “Drift, Fitness and the Foundations of Probability”, in A. Hüttemann, (ed.), *Determinism in Physics and Biology*, Mentis, 108-35.
- Boucharad, F. and Rosenberg, A. (2004) “Fitness, Probability and the Principles of Natural Selection”, *British Journal for the Philosophy of Science* 55, 693-712.
- Bowler, P. J. (1974) “Darwin’s Concepts of Variation”, *Journal of the History of Medicine* 29, 196-212.
- Bowler, P. J. (1984) *Evolution: The History of an Idea*. University of California Press. (鈴木善次ほか訳『進化思想の歴史』(上・下巻), 朝日選書, 1987)
- Bowler, P. J. (1988) *The Non-Darwinian Revolution: Reinterpreting a Historical Myth*. Johns Hopkins University Press.

- Bowler, P. J. (1990) *Charles Darwin: The Man and His Influence*. Cambridge University Press. (横山輝雄訳『チャールズ・ダーウィン——生涯・学説・その影響——』, 朝日選書, 1997)
- Brandon, R. (1978) “Adaptation and Evolutionary Theory”, *Studies in the History and Philosophy of Science* 9, 181-206.
- Brandon, R. (2005) “The Difference between Selection and Drift: A Reply to Millstein”, *Biology and Philosophy* 20, 153–70.
- Brandon, R. and Beatty J. (1984) “Discussion: The Propensity Interpretation of ‘Fitness’ — No Interpretation Is No Substitute”, *Philosophy of Science* 51, 342-47.
- Brandon, R. and Carson, S. (1996) “The Indeterministic Character of Evolutionary Theory: No ‘No Hidden Variable Proof’ but No Room for Determinism Either”, *Philosophy of Science* 63, 315-37.
- Brandon, R. and Ramsey, G. (2007) “What’s Wrong with the Emergenist Statistical Interpretation of Natural Selection and Random Drift? ”, in D. Hull and M. Ruse (eds.), *The Cambridge Companion to the Philosophy of Biology*. Cambridge University Press, 66-84.
- Bromberger, S. (1966) “Why Questions”, in R. Colodny (ed.), *Mind and Cosmos*. University of Pittsburgh Press, 86-111.
- Brosius, J. and Gould, S. J. (1992) “On Genomenclature: A Comprehensive (and Respectful) Taxonomy for Pseudogenes and Other ‘Junk DNA’”, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 89, 10706–10.
- Browne, J. (1995) *Charles Darwin: Voyaging. Volume I of a Biography*. Princeton University Press.
- Browne, J. (2002) *Charles Darwin: the Power of Place. Volume II of a Biography*. Knopf.
- Cain, A. (1951a) “So-called Non-adaptive or Neutral Characters in Evolution”, *Nature* 168, 424.
- Cain, A. (1951b) “Non-adaptive or Neutral Characters in Evolution”, *Nature* 168, 1049.
- Churchill, F. (1974) “Willaim Johannsen and the Genotype Concept”, *Journal of the History of Biology* 7, 5-30.
- Clifton, R., J. Bub, and H. Halvorson (2003) “Characterizing Quantum Theory in Terms of Information-Theoretic Constraints”, *Foundations of Physics* 33, 1561-91.
- Cover, T. and Thomas, J. (2006) *Elements of Information Theory*. 2nd edition. Wiley.
- Crow, F. (2001) “The Beanbag Lives on”, *Nature* 409, 771.
- Crow, F. (2007) “Sewall Wright”, in M. Matthen and C. Stephens (eds.), *Handbook of Philosophy of Biology*. Elsevier, 87-100.
- Crow, J. and Kimura, M. (1970) *An Introduction to Population Genetics Theory*, Harper and Row.
- Dawkins, R. (1976) *The Selfish Gene*. Oxford University Press. (日高敏隆他訳『利己的遺伝子』, 紀伊国屋書店, 1991)
- Darwin, C. (1964) *The Origin of Species*, Harvard University Press. (八杉龍一訳『種の起源』(上・下巻), 岩波書店, 1990)

- Darwin, C. (1981) *The Descent of Man and Selection in Relation to Sex*. John Murray. (長谷川眞理子訳『人間の進化と性淘汰』(I・II巻), 文一総合出版, 1999-2000)
- Delbrück, M. (1976) "Light and Life III", *Carlsberg Research Communications* 41, 299–309.
- de Moivre, A. (1773) *Apprximatio ad summan terminorum binomii (a+b)<sup>n</sup> in seriem expansi.* offprint.
- de Moivre, A. (1718) *The Doctrine of Chance, or a Method of Calculating the Probability of Events in Play*. (2nd edition, 1738)
- de Vries, H. (1901-03) *Die Mutationstheorie; Versuche und Beobachtungen über die Entstehung der Arten im Pflanzenreich*. 2 vols, Veit. English translation: *The Mutation Theory: Experiments and Observations on the Origin of Species in the Vegetable Kingdom*. (translated by J. B. Farmer and A. D. Darbyshire), Open Court, 1909-10.
- Dobzhansky, T (1973) "Nothing in Biology Makes Sense Except in the Light of Evolution", *The American Biology Teacher* 35, 125-29.
- Ehrenfest, P. and Ehrenfest, T. (1959) *The Conceptual Foundations of the Statistical Approach in Mechanics*. Cornell University Press.
- Ewens, W. (2000) *Mathematical Population Genetics: I. Theoretical Introduction*. 2nd edition. Springer.
- Fischer, H. (2010) *A History of the Central Limit Theorem: From Classical to Modern Probability Theory*. Springer.
- Fischer, E. P. and Lipson, C. (1988) *Thinking about Science: Max Delbrück and the Origins of Molecular Biology*. W. W. Norton and Company. (石館三枝子・石館康平訳『分子生物学の誕生—マックス・デルブリュックの生涯—』, 朝日新聞社, 1993)
- Fisher, R. (1922) "On the Dominance Ratio" *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh* 42, 321-341.
- Fisher, R. (1930) *The Genetical Theory of Natural Selection*. Oxford University Press.
- Fodor, J. (1978) "Special Sciences", *Synthese* 28, 97-115.
- Frigg, R. (2007) "A Field Guide to Recent Work on the Foundations of Thermodynamics and Statistical Mechanics", in D. Rickles (ed.), *The Ashgate Companion to the New Philosophy of Physics*. Ashgate, 99-196.
- 藤田広一 (1969) 『基礎情報理論』, 昭晃堂.
- Galton, F. (1869) *Hereditary Genius: An Inquiry into its Laws and Consequences*. Macmillan.
- Galton, F. (1908) *Memories of my life*. Methuen.
- Gayon, J. (1998) *Darwinism's Struggle for Survival*. Cambridge University Press.
- Gibbs, J. W. (1902) *Elementary Principles in Statistical Mechanics*. Ox Bow Press.
- Gigerenzer, G., Swijtink, Z., Porter, T., Daston, L., Beatty, J., and Krüger, L. (1989) *The Empire of Chance: How Probability Changed Science and Everyday Life*. Cambridge University Press.

- Gillespie, J. (2004) *Population Genetics: A Concise Guide*. Johns Hopkins University Press.
- Gillies, D. (2000) *Philosophical Theories of Probability*. Routledge. (中山智香子訳『確率の哲学理論』, 日本経済評論社, 2004)
- Glavotti, M. C. (2005) *Philosophical Introduction to Probability*. CSLI Publications.
- Glymour, B. (2001) “Selection, Indeterminism, and Evolutionary Theory”, *Philosophy of Science* 68, 518-35.
- Gould, S. J. (1977) *Ever since Darwin*. W. W. Norton. (浦本昌紀・寺田鴻訳『ダーウィン以来』, 早川書房, 1984)
- Gould, S. J. (1983) “The Hardening of the Modern Synthesis”, in G. Marjorie (ed.), *Dimensions of Darwinism*. Cambridge University Press, 71-93.
- Grant, P. and Grant, R. (2008) *How and Why Species Multiply*. Princeton University Press.
- Graves, L., B. Horan, and A. Rosenberg (1999) “Is Indeterminism the Source of the Statistical Character of Evolutionary Theory”, *Philosophy of Science* 66, 140-57.
- Griffiths, P. and Stotz, L. (2007) “Gene”, in M. Ruse and D. Hull (eds.), *Cambridge Companion to Philosophy of Biology*. Cambridge University Press, 85-102.
- Guttman, Y. M. (1999) *The Concept of Probability in Statistical Physics*. Cambridge University Press.
- Hacking, I. (1990) *The Taming of Chance*. Cambridge University Press. (石原英樹・重田園江訳『偶然を飼いなす』, 木鐸社, 1999)
- Hacking, I. (2006) *The Emergence of Probability: A Philosophical Study of Early Ideas about Probability, Induction and Statistical Inference*. 2nd edition. Cambridge University Press.
- Haldane, J. B. S. (1924-32) “A Mathematical Theory of Natural and Artificial Selection”, 9 parts. *Transactions and Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*.
- Haldane, J. B. S. (1932) *The Causes of Evolution*. Harper and Brothers.
- Hartl, D. and Clark, A. (2007) *Principles of Population Genetics*. 4th edition. Sinauer.
- Hartmann, W. and Davis, D. (1975) “Satellite-sized Planetesimals and Lunar Origin”, *Icarus* 24, 504-15.
- Hempel, G. and Oppenheim, P. (1948) “Studies in the Logic of Explanation”, *Philosophy of Science* 15, 135-75.
- Hilts, V. (1973) “Statistics and Social Science”, in R. Giere and R. Westfall (eds.), *Foundations of Scientific method: The Nineteenth Century*. Indiana University Press, 206-33.
- 平塚桂 (2011) 『東京スカイツリー』, ソフトバンククリエイティブ.
- Horan, B. (1994) “The Statistical Character of Evolutionary Theory”, *Philosophy of Science* 61, 76-95.
- Hume, D. (1739) *A Treatise of Human Nature: Being an Attempt to Introduce the Experimental Method of Reasoning into Moral Subjects*.

- Huxley, J. (1942) *Evolution: the Modern Synthesis*. Allen and Unwin.
- Jaynes, E. (1957a) “Information Theory and Statistical Mechanics”, *Physical Review* 106, 620-30.
- Jaynes, E. (1957b) “Information Theory and Statistical Mechanics II”, *Physical Review* 108, 171-90.
- Jaynes, E. (1963) “Information Theory and Statistical Mechanics”, in K. Ford (ed.), *Statistical Physics*. W. A. Benjamin, Inc., 181-218.
- Jaynes, E. (1968) “Prior Probabilities”, *IEEE Trans. on Systems Science and Cybernetics*, SSC4, 227-41.
- Jaynes, E. (1986) “Predictive Statistical Mechanics”, in G. T. Moore and M. O. Scully (eds.), *Frontiers of Nonequilibrium Statistical Physics*. Plenum Press, 33-55.
- Jaynes, E. (2003) *Probability Theory*. Cambridge University Press.
- Jenkin, F. (1867) “The Origin of Species”, *North British Review* 46, 277-318.
- Johannsen, W. (1909). *Elemente der exakten erblichkeitslehre*. Gustav Fischer.
- Judson, H. F. (1979) *The Eighth Day of Creation; The Makers of the Revolution in Biology*. Simon and Schuster. (野田春彦訳『分子生物学の夜明け——生命の秘密に挑んだ人たち——』(上・下巻), 東京化学同人, 1982)
- Keller, E. F. and Lloyd, E. (eds.) (1992) *Keywords in Evolutionary Biology*. Harvard University Press.
- Kimura, M. (1958) “On the Change of Population Fitness by Natural Selection”, *Heredity* 12, 145-167.
- Kimura M. (1968) “Evolutionary Rate at the Molecular Level”, *Nature* 217, 624-26.
- Kimura, M. (1983) *The Neutral Theory of Molecular Evolution*. Cambridge University Press. (向井輝美・真壁真一訳『分子進化の中立説』, 紀伊國屋書店, 1988)
- Kolmogorov, A. N. (1956) *Foundations of the Theory of Probability*. 2nd English edition, Chelsea. (坂本實訳『確率論の基礎概念』, 筑摩書房, 2010)
- Krüger, L., Daston, L. J. and Heidelberger, M. (eds.) (1987) *The Probabilistic Revolution*. 2 vols. MIT Press. (近昭夫ら訳『確率革命』, 梓出版社, 1991)
- Laplace, P. (1812) *Théorie Analytique des Probabilités*. Courcier. (伊藤清・樋口順四郎訳『確率論』, 共立出版, 1986)
- Laplace, P. (1814) *Essai Philosophique sur les Probabilités*. (内井惣七訳『確率の哲学的試論』, 岩波書店, 1997)
- Levins, R. (1966) “The Strategy of Model Building in Population Biology”, *American Scientist* 54, 421-431.
- Lewontin, R. (1970) “The Units of Selection”, *Annual Review of Ecology and Systematics* 1, 1-18.
- Lloyd, G. (1968) *Aristotle: The Growth and Structure of His Thought*. Cambridge University Press. (川田殖訳『アリストテレス——その思想の成長と構造——』, みすず書房, 1973)
- Manser, A. R. (1965) “The Concept of Evolution”, *Philosophy* XL, 18-34.

- 町田茂 (1994) 『量子力学の反乱——自然は実在するか?——』, 学習研究社.
- Matthen, M., and Ariew, A. (2002) “Two Ways of Thinking about Fitness and Natural Selection”, *Journal of Philosophy* 119, 55–83.
- Matthen, M., and Ariew, A. (2009) “How to Understand Casual Relations in Natural Selection: Reply to Rosenberg and Bouchard”, *Biology and Philosophy* 20, 355-64.
- Matthen, M. and Stephens, C. (eds.) (2007) *Handbook of Philosophy of Biology*. Elsevier.
- Mayr, E. (1959a) “Where Are we? ”, Cold Spring Harbor Symposium on Quantitative Biology 24, 409-40. Reprinted in E. Mayr (1976) *Evolution and the Diversity Of Life*. Harvard University Press, 309- 10.
- Mayr, E. (1959b) “Typological versus Population Thinking”, in B. J. Meggar (ed.) *Evolution and Anthropology: A Centennial Appraisal*. The Anthropological Society of Washington, 409-412. Reprinted in E. Mayr (1976) *Evolution and the Diversity of Life*. Harvard University Press, 26-29.
- Mayr, E. (1963) *Animal Species and Evolution* , Harvard University Press.
- Mayr, E. (1972) “The Nature of the Darwinian Revolution”, *Science* 176, 981-89.
- Mayr, E. (1976) *Evolution and the Diversity of Life*. Harvard University Press.
- Mayr, E. (1982) *The Growth of Biological Thought: Diversity, Evolution, and Inheritance*, Belknap Harvard.
- Mayr, E. (1997) *This is Biology: The Science of the Living World*, Harvard University Press.
- Mendel, G. (1866) *Versuche Über Pflanzen-Hybriden. Verhandlungen des naturforschenden Vereines in Brünn* 4: 3-47. (岩槻邦男・須原準平訳『雑種植物の研究』, 岩波文庫, 1999)
- Mills, S. and Beatty, J. (1979) “The Propensity Interpretation of Fitness”, *Philosophy of Science* 46, 263-86.
- Millstein, R. (1996) “Random Drift and the Omniscient Viewpoint”, *Philosophy of Science* 63 (Proceedings), S10-S18.
- Millstein, R. (2000) “Is the Evolutionary Process Deterministic or Indeterministic? An Argument for Agnosticism”, Presented at the Biennial Meeting of Philosophy of Science Association.
- Millstein, R. (2002) “Are Random Drift and Natural Selection Conceptually Distinct? ”, *Biology and Philosophy* 17, 33–53.
- Millstein, R. (2003) “How Not to Argue for the Indeterminism of Evolution: A Look at Two Recent Attempts to Settle the Issue” in A. Hüttemann, (ed.), *Determinism in Physics and Biology*, Mentis, 91-107.
- Millstein, R. (2005) “Selection vs. Drift: A Response to Brandon’s Reply”, *Biology and Philosophy* 20, 171-75.
- Millstein, R. (2006) “Natural Selection as a Population-Level Causal Process”, *The British Journal for the Philosophy of Science* 57, 627-53.

- 森元良太 (2007a) 「決定論と確率概念——進化論的世界観とは——」, 『生物の科学・遺伝』, 別冊 20 号, 146-50.
- 森元良太 (2007b) 「進化論の還元不可能性」, 『科学哲学』 40, 15-27.
- Morimoto, R. (2008a) “Information Theory and Natural Selection”, *Annals of the Japan Association for Philosophy of Science* 16, 57-73.
- 森元良太 (2008b) 「遺伝的浮動はフィクションか」, *Nagoya Journal of Philosophy* 7, 17-33.
- 森元良太 (2009a) 「遺伝的浮動と情報理論」, 『生物科学』 60, 197-204.
- 森元良太 (2009b) 「進化論における確率概念の解釈——ベイズ主義的解釈の可能性——」, 『科学哲学』 42, 83-96.
- 森元良太 (2009c) 「進化と偶然—日本人生物学者がもたらした新しい知見」, 日本哲学会国際交流 WG 編, 『哲学の現在』, 斯文堂, 85-89.
- 森元良太 (2010) 「進化論における確率概念」, 松本俊吉編, 『進化論はなぜ哲学の問題になるのか』, 勁草書房, 75-94.
- 森元良太 (2012) 「進化論と還元不可能性」, 横山輝雄編, 『ダーウィンと進化論の哲学』, 勁草書房, 175-189.
- Morimoto, R. (2013a) “Genetic Drift Model as Rational Inference”, in H. Nakao (ed.), *Proceedings of the CAPE International Workshops, 2012*. CAPE Publications, 11-25.
- 森元良太 (2013b 予定) 「生命現象は物理学や化学では説明し尽くせない」, 『生物科学』.
- Morimoto, R. and Nishiwaki, Y. (2006) “Probabilistic Reasoning in Evolutionary Theory”, *Reasoning and Cognition Interdisciplinary Conference Series on Reasoning Studies* 2, 181-85.
- Morrison, M (2000) *Unifying Scientific Theories: Physical Concepts and Mathematical Structures*. Cambridge University Press.
- Morrison, M (2002) “Modelling Populations: Pearson and Fisher on Mendelism and Biometry”, *British Journal for the Philosophy of Science* 53, 39-68.
- Morrison, M (2004) “Population Genetics and Population Thinking: Mathematics and the Role of the Individual”, *Philosophy of Science* 71, 1189-1200.
- Nagel, E. (1961) *The Structure of Science*, Harcourt Brace.
- Newton, I. (1687) *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. English translation: *Sir Issac Newton's Mathematical Principles of Natural Philosophy and His System of the World*. (translated by A. Motte and F. Cajori), University of California Press, 1934.
- 西森秀稔 (1999) 『スピングラス理論と情報統計力学』, 岩波書店.
- 西脇与作 (1995) 「進化生物学と決定論の自然化」, 『科学基礎論研究』 23, 7-13.
- 西脇与作 (1998) 「遺伝モデルは古典的無知の結果か?」, 『科学哲学』 31, 1-16.
- 西脇与作 (2002) 「生命を自然的に捉える」, 『哲学』 108, 1-44.
- 西脇与作 (2004) 『科学の哲学』, 慶應義塾大学出版会.

- Ohno, S. (1972) “So Much ‘junk DNA’ in Our Genome”, *Brookhaven Symposium in Biology* 23, 366-70.
- Ohta, T. and Kimura, M. (1971) “On the Constancy of the Evolutionary Rate of Cistrons”, *Journal of Molecular Evolution* 1, 18–25.
- Orzack, S. and Sober, E. (1993) “A Critical Assessment of Richard Levins’ ‘The Strategy of Model Building in Population Biology’”, *Quarterly Review of Biology* 68, 533-46.
- Pascal, B. (1963) *Euvres complètes*. L. Lafuma (ed.) Intégrale. (田辺保訳『パスカル著作集』(全7巻), 教文館, 1980-1984)
- Plutynski, A. (2007) “Drift: A Historical and Conceptual Overview”, *Biological Theory* 2, 156-67.
- Price, G. R. (1970) “Selection and Covariance”, *Nature* 227, 520-21.
- Popper, K. (1957) “The Propensity Interpretation of the Calculus of Probability, and the Quantum Theory”, in S. Körner (ed.), *Observation and Interpretation*, Butterworth Scientific Publications, 65-70 and 88-89.
- Popper, K. (1959) “The Propensity Interpretation of Probability”, *British Journal for the Philosophy of Science* 10, 25-42.
- Popper, K. (1974) “Intellectual Autobiography”, in P. A. Shilpp (ed.), *The Philosophy of Karl Popper*. La Salle: Open Court Press.
- Price, G. R. (1970) “Selection and Covariance”, *Nature* 227, 520-21.
- Provine, W. B. (1986) *Sewall Wright and Evolutionary Biology*. University of Chicago Press.
- Provine, W. B. (2001) *The Origins of Theoretical Population Genetics*. 2nd edition. University of Chicago Press.
- Putnam, H. (1967) “Psychological Predicates”, in W.H. Capitan and D.D. Merrill (eds.), *Art, Mind, and Religion*. University of Pittsburgh Press, 37–48.
- Putnam, H. (1975) *Mind, Language, and Reality*. Cambridge University Press.
- Quetelet, A. (1835) *Sur l’Homme et le Développement de ses Facultés, ou Essai de Physique Sociale*. Bachelier.
- Readhead, M. (1987) *Incompleteness, Nonlocality, and Realism: A Prolegomenon to the Philosophy of Quantum Mechanics*. Oxford University Press. (石垣壽郎訳『不完全性・非局所性・実在主義——量子力学の哲学序説——』, みすず書房, 1997)
- Rice, S. (2004) *Evolutionary Theory: Mathematical and Conceptual Foundations*. Sinauer.
- Richards, R. (1992) “Evolution”, in E. Keller and E. Lloyd (eds.), *Keywords in Evolutionary Biology*. Harvard University Press, 95-105.
- Ridley, M. (2003) *Evolution*. 3rd edition. Blackwell Science.
- Rosenberg, A. (1978) “The Supervenience of Biological Concepts”, *Philosophy of Science* 45, 368-86.

- Rosenberg, A. (1988) "Is the Theory of Natural Selection a Statistical Theory", *Canadian Journal of Philosophy (suppl.)* 14, 187-207.
- Rosenberg, A. (1994) *Instrumental Biology, or the Disunity of Science*. University of Chicago Press.
- Rosenberg, A. (2001) "Discussion Note: Indeterminism, Probability, and Randomness in Evolutionary Theory", *Philosophy of Science* 68, 536-44.
- Rosenberg, A. (2005) *Philosophy of Science*. Routledge. (東克明・森元良太・渡部鉄兵訳『科学哲学』, 春秋社, 2011)
- Rosenberg, A. and Bouchard, F. (2005) "Matthen and Ariew's Obituary for Fitness: Reports of Its Death Have Been Greatly Exaggerated", *Biology and Philosophy* 20, 343-53.
- Rosenberg, A. (2006) *Darwinian Reductionism: Or How to Stop Worrying and Love Molecular Biology*. University of Chicago Press.
- Roughgarden, J. (1979) *Theory of Population Genetics and Evolutionary Ecology*. Prentice-Hall.
- Sarkar, S. (2004) "Evolutionary Theory in the 1920s: The Nature of the Synthesis", *Philosophy of Science* 71, 1215-26.
- Sarkar, S. (2007) "Haldane and the Emergence of Modern Evolutionary Theory", in M. Matthen and C. Stephens (eds.), *Handbook of Philosophy of Biology*. Elsevier, 49-86.
- Schrödinger, E. (1944) *What is Life?: The Physical Aspect of the Living Cell*. Cambridge University Press. (岡小天・鎮目恭夫訳『生命とは何か—物理的にみた生細胞—』, 岩波書店, 1951)
- Shannon, C. (1948) "A Mathematical Theory of Communication", *Bell System Technical Journal*: 27, 379-423.
- Simpson, E. H. (1951) "The Interpretation of Interaction in Contingency Tables", *Journal of the Royal Statistical Society, Ser. B* 13, 238-41.
- Simunek, M., Hoßfeld, U., and Wissemann, V. (2011) "'Rediscovery' Revised -the Cooperation of Erich and Armin von Tschermak-Seysenegg in the Context of the 'Rediscovery' of Mendel's Laws in 1899-1901", *Plant Biology* 13, 835-41.
- Sklar, L. (1993) *Physics and Chance: Philosophical Issues in the Foundations of Statistical Mechanics*. Cambridge University Press.
- Smart, J. J. C. (1963) *Philosophy and Scientific Realism*. Routledge and Kegan Paul.
- Smocovitis, V. (1996) *Unifying Biology: The Evolutionary Synthesis and Evolutionary Biology*. Princeton University Press.
- Sober, E. (1980) "Evolution, Population Thinking, and Essentialism", *Philosophy of Science* 47, 350-83.
- Sober, E. (1984) *The Nature of Selection*, The MIT Press.
- Sober, E. (2000) *Philosophy of biology*. 2nd edition. Oxford University Press. (松本俊吉・網谷祐一・森元良太訳『進化論の射程—生物学の哲学入門』, 春秋社, 2009)

- Sober, E. and Shapiro, L. (2007) “Epiphenomenalism: The Do’s and the Don’ts”, in P. Machamer and G. Wolters (eds.), *Thinking about Causes: from Greek philosophy to modern physics*. University of Pittsburgh Press, 235–64.
- Spencer, H. (1862) *The First Principles*. Williams and Norgate.
- Spencer, H. (1864-67) *The Principles of Biology*. 2 vols. Williams and Norgate.
- Stamos, D. (2000) “Quantum Indeterminism and Evolutionary Biology”, *Philosophy of Science* 68, 164-84.
- Stephens, C. (2004) “Selection, Drift, and the ‘Forces’ of Evolution”, *Philosophy of Science* 71, 550-70.
- Strelny, K. and Kitcher, P. (1988) “The Return of the Gene”, *Journal of Philosophy* 85, 339-61.
- Stigler, S. M. (1986) *The History of Statistics: The Measurement of Uncertainty before 1900*. Harvard University Press.
- Svirezhev, Y. and Passekov, V. (1990) *Fundamentals of Mathematical Evolutionary Genetics*. Kluwer.
- Tolman, R. (1979) *The Principles of Statistical Mechanics*. Dover.
- Uffink, J. (2007) “Compendium of the Foundations of Classical Statistical Physics”, in J. Butterfield and J. Earman (eds.), *Handbook for Philosophy of Physics*. Elsevier, 924-1074.
- van Fraassen, B. (1977) “The Pragmatics of Explanation”, *American Philosophical Quarterly* 14, 143-50.
- van Fraassen, B. (1980) *The Scientific Image*. Oxford University Press, New York. (丹治信春訳『科学の世界像』, 紀伊国屋書店, 1986)
- Wahlund, S. (1928) “Zusammensetzung von Population und Korrelationserscheinung vom Standpunkt der Vererbungslehre aus betrachtet”, *Hereditas* 11, 65–106.
- Walsh, D. (2000) “Chasing Shadow: Natural Selection and Adaptation”, *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences* 31, 135-53.
- Walsh, D., Lewens, T. and Ariew, A. (2002) “The Trials of Life: Natural Selection and Random Drift”, *Philosophy of Science* 69, 452-73.
- Watson, J. and Berry, A. (2003) *DNA: The Secret of Life*. Knopf. (青木薫訳『DNA——すべてはここから始まった——』, 講談社, 2003)
- Watson, J. and Crick, F. (1953) “A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid”, *Nature* 171: 737-38.
- Weber, M. (2001) “Determinism, realism, and probability in evolutionary theory”, *Philosophy of Science* 68 (Proceedings), S213-S224.
- Wiener, P. (ed.) (1973-4) *Dictionary of the History of Ideas*. 5 vols. (荒川幾男ら編『西洋思想大辞典』 (全5巻), 平凡社, 1990)
- Weinberg, S. (1992) *Dreams of a Final Theory*. Pantheon Books. (小尾信彌・加藤正昭訳『究極理論への夢』, ダイヤモンド社, 1994)

- Winter, W. (1997) "The Beanbag Genetics Controversy: Towards a synthesis of opposing views of natural selection", *Biology and Philosophy* 12, 149-84.
- Wright, S. (1929) "The Evolution of Dominance: Comment on Dr. Risher's Reply", *The American Naturalist* 63, 556-61.
- Wright, S. (1931) "Evolution in Mendelian Populations", *Genetics* 16, 97-159.
- Wright, S. (1942) "Statistical Genetics and Evolution", *Bulletin of the American Mathematical Society* 48, 223-46. Reprinted in W. Provine (ed.), *Evolution*. University of Chicago Press, 466-89.
- Zellner, A. (1988) "Optimal information processing and Bayes' theorem", *American Statistician* 42, 278-84.

## 謝辞

---

本研究を遂行するにあたり、長きに渡ってご指導とご助言を賜りました、慶應義塾大学 西脇与作教授に心から感謝いたします。

学位論文審査の労をお執り頂きました、慶應義塾大学 岡田光弘教授、南山大学 横山輝雄教授、愛媛大学 中島敏幸准教授に厚く御礼を申し上げます。

生物学の御指導と温かいご支援を賜りました、慶應義塾大学 池田満里子名誉教授に深く感謝いたします。農業環境技術研究所上級研究員・東京大学大学院 三中信宏教授には、日本進化学会等で哲学の発表をおこなう機会を度々与えて頂き、深く感謝いたします。東京大学 古田幹雄教授には、数学や物理学について貴重なご助言を賜りました。ここに深く感謝いたします。

日々の研究だけでなく多岐にわたり御指導を賜りました、日本大学 飯田隆教授、慶應義塾大学 坂上貴之教授、東京都市大学 広田すみれ教授、東海大学 松本俊吉教授には深く感謝しております。

また、石田洋一氏、鈴木生郎氏、田中泉吏氏、中尾央氏、ピエール・アラン・ブライヤール博士、横尾剛氏、および西脇与作研究室の皆さまには、多くの貴重なご意見をいただきました。心から感謝いたします。

最後に、辛抱強く支援してくれた、妻、両親、そして子供たちに感謝の意を表して謝辞といたします。

# Appendixes

---

## A1 情報理論の最大エントロピー原理

いま、 $N$ 個の出来事  $E_i$  ( $i=1, 2, \dots, N$ ) があり、それぞれの出来事にある値  $x_i$  が対応しているとする。たとえば、コインを投げて表が出たら 100 円貰え、裏が出ると何も貰えないというゲームをしているとすると、出来事は「コインの表が出る」と「コインの裏が出る」の二種類であり、それぞれの出来事に 100 と 0 という値が対応する。いま、それぞれ出来事  $E_i$  の生じる確率  $p_i$  は与えられていないが、 $x_i$  の期待値  $\bar{x}$  はわかっているとする。そうすると、期待値  $\bar{x}$  は、

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^N x_i p_i \quad (\text{A 1.1})$$

で表される。また、確率  $p_i$  は確率論の公理を満たすので、

$$\sum_{i=1}^N p_i = 1 \quad (\text{A 1.2})$$

となる。これは規格化条件とも呼ばれる。情報理論の最大エントロピー原理を用いると、これら二つの式より未知の確率  $p_i$  を求めることができる。シャノンによって導出された情報エントロピー  $H$  は、

$$H = -\sum_{i=1}^N p_i \log p_i \quad (\text{A 1.3})$$

の式で表される。エントロピー  $H$  を最大にするためには、 $H$  が極値でなければならないので、

$$dH = 0 \quad (\text{A 1.4})$$

となる。また、式 A 1.2 を微分すると、

$$\sum_{i=1}^N dp_i = 0 \quad (\text{A1.5})$$

となる。さらに、 $x_i$ の期待値 $\bar{x}$ は定数なので、式 A1.1 を微分すると、

$$\sum_{i=1}^N x_i dp_i = 0 \quad (\text{A1.6})$$

となる。ここで、制約条件つきで極値（この場合は最大値）を求める方法にラグランジュ未定乗数法がある。ラグランジュ未定乗数法を用いると、式 A1.1 と式 A1.2 の制約条件のもとでエントロピー $-H$ が最大となるのは、

$$dH - \alpha \sum_{i=1}^N dp_i - \beta \sum_{i=1}^N x_i dp_i = 0 \quad (\text{A 1.7})$$

と表すことができる。ただし、 $\alpha$  と  $\beta$  はラグランジュ未定乗数である。ここで、式 A1.3 を  $p_i$  について微分すると、

$$\frac{dH}{dp_i} = -\sum_{i=1}^N \frac{dp_i \log p_i}{dp_i} = -\sum_{i=1}^N (1 + \log p_i) \quad (\text{A 1.8})$$

となり、これを式 A 1.7 に代入すると、

$$-\sum_{i=1}^N \{(1 + \log p_i) + \alpha + \beta x_i\} dp_i = 0 \quad (\text{A 1.9})$$

となる。 $dp_i$  は 0 以外の値を取りうるので、この恒等式が成立するには  $dp_i$  の各係数がすべて 0 でなければならない。ゆえに、

$$(1 + \log p_i) + \alpha + \beta x_i = 0 \quad (\text{A 1.10})$$

が得られる。この式を変形すると、

$$p_i = \exp(-\alpha' - \beta x_i) \quad (\text{A 1.11})$$

となる。ただし、 $\alpha' = \alpha + 1$  とする。

次に、 $\alpha'$  を求めるため、式 A 1.11 を式 A 1.2 に代入すると、

$$\begin{aligned}
1 &= \sum_{i=1}^N p_i = \sum_{i=1}^N \exp(-\alpha' - \beta x_i) = \exp(-\alpha') \sum_{i=1}^N \exp(-\beta x_i) \\
\therefore \exp(\alpha') &= \sum_{i=1}^N \exp(-\beta x_i)
\end{aligned}
\tag{A 1.12}$$

が得られる。式 A 1.12 を式 A 1.11 に代入すると、

$$p_i = \frac{\exp(-\beta x_i)}{\sum_i \exp(-\beta x_i)}
\tag{A 1.13}$$

が導出される。 $\beta$  はこの式を式 1.1 に代入すれば得られる。

## A2 統計力学モデルの導出

ある閉じた容器のなかに  $N$  個の同等な粒子が入っている。それぞれの粒子について、粒子がエネルギー  $E_i$  ( $i=1, 2, \dots, N$ ) の状態にある確率を  $p_i$  とする。このとき、 $E_i$  はそれと精度上見分けのつかない状態のいくつかを代表しているとする。そうすると、この系の平均エネルギー  $\bar{E}$  は

$$\bar{E} = \sum_i p_i E_i
\tag{A2.1}$$

と表すことができる。また、 $p_i$  は確率論の公理を満たすので、

$$\sum_i p_i = 1
\tag{A2.2}$$

となる。この式は、系の粒子数が一定であることにも対応している。というのも、エネルギー  $E_i$  の状態にある粒子数を  $n_i$  とすると確率  $p_i$  は  $n_i/N$  で表され、式 A2.2 に代入すれば、

$$N = \sum_i n_i
\tag{A2.3}$$

となるからである。

系の平均エネルギー $\bar{E}$ と粒子数 $N$ は実際に測定することができ、私たちは知ることができる。一方、その微視的な状態 $E_i$ と $p_i$ （もしくは $n_i$ ）は粒子数が多いのでわからない。このとき、最大エントロピー原理を用いると、平衡状態における気体分子のエネルギー分布を求めることができる。最大エントロピー原理にしたがうと、式 A2.1 と式 2.2 を制約条件としてエントロピーを最大にすれば、気体分子のエネルギー分布が求められる。

統計力学では、系のエントロピー $S$ は、系の粒子数 $N$ 、体積 $V$ 、エネルギー $E$ といった巨視的な条件のもとで、微視的な粒子の取りうる状態の場合の数 $W$ のみによって定まる。これは、

$$S(N, V, E) = k_B \log W(N, V, E) = -k_B \sum_i p_i \log p_i \quad (\text{A2.4})$$

と表すことができる。ただし、 $k_B$  はボルツマン定数である。平衡状態ではエントロピーが最大になるので、

$$dS = k_B \left( \sum_i \log p_i \right) dp_i = 0 \quad (\text{A2.5})$$

となる。式 A2.1 と式 A2.2 をそれぞれ微分すると、

$$\sum_i dp_i = 0 \quad (\text{A2.6})$$

$$\sum_i E_i dp_i = 0 \quad (\text{A2.7})$$

が得られる。ここで、ラグランジュ未定定数法を用いると、

$$\sum_i (\log p_i + \alpha + \beta E_i) dp_i = 0 \quad (\text{A2.8})$$

となる。ただし、 $\alpha$  と  $\beta$  はラグランジュ未定乗数である。 $dp_i$  は 0 以外の値を取りうるので、式 A2.8 が常に成立するには、 $dp_i$  の係数が 0 でなければならない。ゆえに、

$$\log p_i + \alpha + \beta E_i = 0 \quad (\text{A2.9})$$

となり、これを変形すると  $p_i$  が求められる。

$$p_i = \exp(-\alpha - \beta E_i) \quad (\text{A2.10})$$

$\alpha$  を求めるために式 A2.2 に代入すると、

$$\exp(-\alpha) = \frac{1}{\sum_i \exp(-\beta E_i)} \quad (\text{A2.11})$$

が得られる。

次に  $\beta$  を求めてみよう。熱力学では、平衡状態における系の温度を  $T$  とすれば、

$$\left( \frac{dS}{dE} \right)_V = \frac{1}{T} \quad (\text{A2.12})$$

となることがわかっている。式 A2.4 より、

$$\begin{aligned} \left( \frac{dS}{dE} \right)_V &= k_B \left( \frac{d \log W}{dE} \right) = k_B \left\{ \frac{d}{dE} \left( - \sum_i p_i \log p_i \right) \right\} \\ &= k_B \left[ \frac{d}{dE} \left\{ \sum_i p_i (\alpha + \beta E_i) \right\} \right] = k_B \left\{ \frac{d}{dE} \{ \alpha N + \beta E \} \right\} = k_B \beta \end{aligned} \quad (\text{A2.13})$$

となる。式 A2.12 と式 A2.13 より、 $\beta$  が得られる。

$$\beta = \frac{1}{k_B T} \quad (\text{A2.14})$$

この式を式 A2.10 に代入すると、平衡状態における気体粒子のエネルギー分布  $p_i$  が得られる。

$$p_i = \frac{\exp(-E_i/k_B T)}{\sum_i \exp(-E_i/k_B T)} \quad (\text{A2.15})$$

### A3 自然選択の最大原理

フィッシャーはダーウィンの自然選択説を数学的に表現した (Fisher 1930)。フィッシャーの導出した式は自然選択による集団の平均適応度の時間的変化を表したものである。これは「フィッシャーの自然選択の基本的定理」と呼ばれるものであり、次式で表される。

$$\frac{d\bar{w}}{dt} = \sum_k p_k (w_k - \bar{w})^2 \quad (\text{A3.1})$$

ただし、 $\bar{w}$ は集団の平均適応度、 $t$ は時間、 $p_k$ は集団内での遺伝子  $k$  の頻度、 $w_k$ は遺伝子  $k$  の適応度である。

フィッシャーの自然選択の定理は、集団の平均適応度の変化が遺伝子頻度分散と等しいことを示している。この式は自然選択による平均適応度の変化を表しているが、自然選択がどのように遺伝子頻度を変化させるかについては何も述べていない。そこで、木村 (1958) は「自然選択の最大原理」と自ら呼ぶ手法によって、平均適応度の変化  $d\bar{w}/dt$  が最大のときの遺伝子の頻度変化を表す式を導出した。以下ではその導出法を紹介する。

まず、集団の平均適応度は次のように定義される。

$$\bar{w} = \sum_k p_k w_k \quad (\text{A3.2})$$

任意の小さな頻度変化  $dp_k$  について、平均適応度の変化量は式 A3.2 より、

$$d\bar{w} = \sum_k w_k dp_k \quad (\text{A3.3})$$

となる。遺伝子頻度  $p_k$  の総和は以下の確率論の公理

$$\sum_k p_k = 1 \quad (\text{A3.4})$$

を満たすので、これを微分すると、

$$\sum_k dp_k = 0 \quad (\text{A3.5})$$

となる。ここで、フィッシャーの基本定理は式 A3.1 で与えられており、これを変形すると、

$$\frac{d\bar{w}}{dt} = \sum_k p_k (w_k - \bar{w})^2 = \sum_k \frac{1}{p_k} \left( \frac{dp_k}{dt} \right)^2 \quad (\text{A3.6})$$

となる<sup>41</sup>。いま、平均適応度の変化  $d\bar{w}/dt$  が最大時を求めているので、式 A3.6 を定数とすると、

$$\sum_k \frac{1}{p_k} \left( \frac{dp_k}{dt} \right)^2 = c \quad (\text{A3.7})$$

と表される。ただし、 $c$  は定数である。

ここで、ラグランジュ未定乗数法を用いるために、以下の関数  $L$  を

$$L = d\bar{w} + \lambda \left( \sum_k \frac{(dp_k)^2}{dp_k} - c(dt)^2 \right) + \mu \left( \sum_k dp_k \right) \quad (\text{A3.8})$$

と定義する。平均適応度の変化  $d\bar{w}$  を最大にする遺伝子の頻度変化  $dp_k$  を求めるには、関数  $L$  が最大でなければならず、式 A3.8 を  $p_k$  について微分すると、

$$\frac{dL}{dp_k} = \frac{d\bar{w}}{dp_k} + \lambda \frac{d}{d(dp_k)} \left( \sum_k \frac{(dp_k)^2}{dp_k} - c \right) + \mu \frac{d}{d(dp_k)} \left( \sum_k dp_k \right) = 0 \quad (\text{A3.9})$$

となる。この式を展開すると次の式が得られる。

$$w_k + \alpha \frac{dp_k}{p_k} + \beta = 0 \quad (\text{A3.10})$$

この式の両辺に  $p_k$  を掛け、 $k$  について総和をとると、

$$\sum_k w_k p_k + \alpha \sum_k dp_k + \beta \sum_k p_k = \bar{w} + \beta = 0 \quad (\text{A3.11})$$

<sup>41</sup> この変形は適応度の定義による。詳しくは、Fisher (1930)、Kimura (1958)、Crow and Kimura (1970) を参照のこと。

となり、 $\beta$  が得られる。

$$\beta = -\bar{w} \quad (\text{A3.12})$$

これを式 A3.10 に代入すると、

$$w_k p_k + \alpha dp_k - \bar{w} p_k = 0 \quad (\text{A3.13})$$

となり、これを变形すると、

$$dp_k = -\frac{(w_k - \bar{w})p_k}{\alpha} \quad (\text{A3.14})$$

が得られる。さらに、これを式 A3.6 に代入すると、

$$\sum_k \frac{(dp_k)^2}{p_k} = \sum_k \frac{\left(\frac{w_k - \bar{w}}{\alpha \lambda} p_k\right)^2}{p_k} = \sum_k \frac{(w_k - \bar{w})^2 p_k}{\alpha^2} = c(dt)^2 \quad (\text{A3.15})$$

となる。ここで、式 A3.6 と式 3.7 より、

$$c = \sum_k p_k (w_k - \bar{w})^2 \quad (\text{A3.16})$$

であり、遺伝子頻度の減少でなく増加について求めていることに注意すると、

$$\frac{1}{\alpha} = -dt \quad (\text{A3.17})$$

となる。よって、遺伝子の頻度変化の式が次式として得られる。

$$\frac{dp_k}{dt} = p_k (w_k - \bar{w}) \quad (\text{A3.18})$$

このように、自然選択の最大原理を用いると、自然選択による遺伝子の頻度変化を表す式が導出できるのである。

## A4 等確率の導出

ライトとフィッシャーは遺传的浮動の数理モデルを導出した。ライト-フィッシャーの遺传的浮動モデルは、集団遺伝学の教科書で必ず紹介される代表的な進化のモデルである。標準的な導出方法では、繁殖時に配偶子が無作為に抽出されることが仮定されている。つまり、どの配偶子も抽出される確率は等しいとされている。だがここでは、等確率を仮定するのではなく、等確率が推論の結果として導き出せることを示す。

ライト-フィッシャーの遺传的浮動モデルの導出は A5 でおこなうが、その前に最も単純なモデルを導出してみよう。ある生物集団に有性生殖する生物が  $N$  個体存在し、それぞれの個体はある特定の遺伝子座に対立遺伝子  $A$  か  $a$  のいずれかを持つとする。ここでは説明を簡単にするため、世代を通じて集団内の個体数は変わらないものとする。繁殖時にはその集団における  $2N$  個の配偶子が抽出されることになる。次世代の集団を形成する配偶子に 1 から  $2N$  までの番号をつけることにする。そして、次世代の集団を形成する  $k$  番目の配偶子に遺伝子  $A$  が含まれる確率を  $p_k$  とする。ただし、確率  $p_k$  の値はわからないとする。通常の教科書であれば等確率が暗に仮定されており、この確率は  $1/2N$  とされる。だがここでは、確率  $p_k$  は未知であるとして、最大エントロピー原理を用いて導き出してみる。

確率  $p_k$  は確率論の公理を満たす必要があるので、

$$\sum_{k=1}^{2N} p_k = 1 \quad (\text{A4.1})$$

となる。最も単純な設定では、わかっていることは以上である。エントロピー関数  $H$  は

$$H = -\sum_{k=1}^{2N} p_k \log p_k \quad (\text{A4.2})$$

で表される。この場合、確率  $p_i$  を求めるには、式 A4.1 を条件として式 A4.2 のエントロピーを最大にすればよい。エントロピー  $H$  を最大にするので、

$$dH = 0 \quad (\text{A4.3})$$

となる。また、式 A4.1 を微分すると、

$$\sum_{k=1}^{2N} dp_k = 0 \quad (\text{A4.4})$$

となる。最大エントロピー原理を用いて、 $H$  を最大にすると、

$$dH - \alpha \sum_{k=1}^{2N} dp_k = 0 \quad (\text{A4.5})$$

となる。ただし、 $\alpha$  はラグランジュ未定乗数である。ここで、式 A4.2 を  $p_k$  について微分すると、

$$\frac{dH}{dp_k} = -\sum_{k=1}^{2N} (1 + \log p_k) \quad (\text{A4.6})$$

となる。これを式 A4.5 に代入すると、

$$-\sum_{k=1}^{2N} \{(1 + \log p_k) + \alpha\} dp_k = 0 \quad (\text{A4.7})$$

が得られる。この恒等式を満たすには、 $dp_k$  の係数が 0 でなければならないので、

$$(1 + \log p_k) + \alpha = 0 \quad (\text{A4.8})$$

となる。この式を整理すると、

$$p_k = \exp(-\alpha - 1) \quad (\text{A4.9})$$

となり、これを式 A4.1 に代入すると、

$$\sum_{k=1}^{2N} p_i = \sum_{k=1}^{2N} \exp(-\alpha - 1) = \exp(-\alpha - 1) \sum_{k=1}^{2N} 1 = 2N \exp(-\alpha - 1) = 1 \quad (\text{A4.10})$$

となる。ゆえに、

$$\exp(-\alpha - 1) = \frac{1}{2N} \quad (\text{A4.11})$$

となり、これを式 A4.9 に代入すると、

$$p_k = \frac{1}{2N} \tag{A4.12}$$

が得られる。このように、最大エントロピー原理を用いると、次世代の集団を形成する  $k$  番目の配偶子に遺伝子  $A$  が含まれる確率  $p_k$  を求めることができる。つまり、等確率は仮定する必要はなく、導き出すことができるのである。さらに、次世代を形成する配偶子に遺伝子  $A$  が  $j$  個体存在する確率  $p_j$  は、

$$p_j = \frac{j}{2N} \tag{A4.13}$$

となる。

## A5 遺伝的浮動モデルの導出

それでは、最大エントロピー原理を用いて、ライト-フィッシャーの遺伝的浮動モデルを導出してみよう。この導出はジェインズ (Jaynes 1968) を参考にした。ここでも A4 の設定と同じように、ある生物集団に有性生殖する生物が  $N$  個体存在し、それぞれの個体はある特定の遺伝子座に対立遺伝子  $A$  か  $a$  のいずれかと持つとする。また、世代を通じて集団内の個体数は変わらないものとする。さらに、次世代の集団を形成する配偶子に 1 から  $2N$  までの番号をつけて、 $k$  番目の配偶子に遺伝子  $A$  が含まれる確率を  $p_k$  とする。ライト-フィッシャーの遺伝的浮動モデルの標準的な導出では、繁殖時に配偶子がランダムに抽出される、すなわち等確率で抽出されることが仮定されているが、ここでも A4 の設定と同じく、等確率は仮定しない。

まず、確率  $p_k$  は確率論の公理を満たさなければならないので、

$$\sum_k^{2N} p_k = 1 \tag{A5.1}$$

が成り立つ。ここで、確率変数  $x_k$  を次のように定義する。すなわち、 $k$  番目の配偶子に遺伝子  $A$  が含まれているなら  $x_k$  に 1 を、遺伝子  $a$  が含まれているなら  $x_k$  に 0 の値を与えることとする。また、A4 のときと同じように、次世代を形成する配偶子に遺伝子  $A$  が  $j$  個体存在する。そうすると、遺伝子  $A$  の個数  $j$  は、

$$j = \sum_{k=1}^{2N} x_k \quad (\text{A5.2})$$

と表される。いま、現世代の集団に遺伝子  $A$  が  $i$  個存在し、集団内における遺伝子  $A$  の頻度を  $p$  とする。このとき次世代の配偶子に存在する遺伝子  $A$  の個数の期待値  $\bar{j}$  は、

$$\bar{j} = \sum_{k=1}^{2N} p_k x_k = 2Np \quad (\text{A5.3})$$

と表される。式 A5.1 を微分すると、

$$\sum_{k=1}^{2N} dp_k = 0 \quad (\text{A5.4})$$

となり、式 A5.3 を  $p_k$  について微分すると、

$$\sum_{k=1}^{2N} x_k dp_k = 0 \quad (\text{A5.5})$$

となる。エントロピー関数  $H$  は

$$H = -\sum_{k=1}^{2N} p_k \log p_k \quad (\text{A5.6})$$

で表され、これを  $p_k$  について微分すると、

$$\frac{dH}{dp_k} = -\sum_{k=1}^{2N} (1 + \log p_k) \quad (\text{A5.7})$$

となる。式 A5.2 と式 A5.3 の条件のもとでエントロピー  $H$  を最大にすると、

$$dH - \alpha \sum_{k=1}^{2N} dp_k - \beta \sum_{k=1}^{2N} x_k dp_k = 0 \quad (\text{A5.8})$$

が得られる。ただし、 $\alpha$  と  $\beta$  はラグランジュ未定乗数である。式 5.7 を式 A5.8 に代入すると、

$$-\sum_{k=1}^{2N} \{(1 + \log p_k) + \alpha + \beta x_k\} dp_k = 0 \quad (\text{A5.9})$$

となり、この恒等式が成り立つには、 $dp_k$ の係数が0でなければならないので、

$$1 + \log p_k + \alpha + \beta x_k = 0 \quad (\text{A5.10})$$

が得られる。これを変形すると、

$$p_k = \exp(-\alpha - \beta x_k - 1) \quad (\text{A5.11})$$

となる。この式を式 A5.1 に代入すると、

$$\sum_{k=1}^{2N} p_k = \sum_{k=1}^{2N} \exp(-\alpha - \beta x_k - 1) = \exp(-\alpha - 1) \sum_{k=1}^{2N} \exp(-\beta x_k) = 1 \quad (\text{A5.12})$$

となる。よって、 $\alpha$  は

$$\exp(-\alpha - 1) = \frac{1}{\sum_{k=1}^{2N} \exp(-\beta x_k)} \quad (\text{A5.13})$$

で表される。この式を式 A5.11 に代入すると、

$$p_k = \frac{\exp(-\beta x_k)}{\sum_{k=1}^{2N} \exp(-\beta x_k)} = \frac{\exp(-\beta x_k)}{\{\exp(-\beta) + 1\}^{2N}} \quad (\text{A5.14})$$

となる。 $\beta$  を消去するために、式 A5.3 にこの式を代入すると、

$$\frac{\sum_{k=1}^{2N} x_k \exp(-\beta x_k)}{\sum_{k=1}^{2N} \exp(-\beta x_k)} = 2Np \quad (\text{A5.15})$$

となる。この式の左辺を変形すると、

$$\begin{aligned} \frac{\sum_{k=1}^{2N} x_k \exp(-\beta x_k)}{\sum_{k=1}^{2N} \exp(-\beta x_k)} &= \frac{d}{d\beta} \log \left\{ \sum_{k=1}^{2N} \exp(-\beta x_k) \right\} = \frac{d}{d\beta} \log \{ \exp(-\beta) + 1 \}^{2N} \\ &= \frac{2N}{\exp(\beta) + 1} \end{aligned} \quad (\text{A5.16})$$

となる。したがって、

$$\beta = \log \frac{1-p}{p} \quad (\text{A5.17})$$

が求められる。これを式 A5.14 に代入すると、

$$p_k = \left( \frac{p}{1-p} \right)^{x_k} \left/ \left( \frac{p}{1-p} + 1 \right)^{2N} \right. \quad (\text{A5.18})$$

が得られる。これは  $k$  番目の配偶子に遺伝子  $A$  が含まれる確率である。そうすると、次世代に遺伝子  $A$  が  $j$  個抽出される確率  $p_j$  は、式 A5.2 を用いると、

$$p_j = \sum_{k=1}^{2n} p_k = \left( \frac{p}{1-p} \right)^{\sum_{k=1}^{2N} x_k} \left/ \left( \frac{p}{1-p} + 1 \right)^{2N} \right. = p^j (1-p)^{2N-j} \quad (\text{A5.19})$$

となる。ただし、この確率は順列を考慮していない。そこで順列を考慮して、二項係数を掛けると、

$$p(i, j) = \binom{2N}{j} p^j (1-p)^{2N-j} \quad (\text{A5.20})$$

が得られる。これは、ライト-フィッシャーの遺伝的浮動モデルと同じである。このように、最大エントロピー原理を用いて遺伝的浮動モデルが導き出せるのである。

## A6 ベイズの定理の導出

ゼルナーは、最適な情報処理規則という規則からベイズの定理が導出できることを示した (Zellner 1988)。情報処理規則とは、入力情報を処理し、情報を出力するときの規則である。情報処理規則には、入力情報よりも出力情報を減らすものや、関係のない情報を加えるものがあり、それらはいずれも効率の悪い規則である。それに対して効率のよい規則とは、出力情報を入力情報に限りなく近づけ、理想的には等しくする規則である。ゼルナーはこれを最適な情報処理規則と呼んだ。彼は、最適な情報処理規則にしたがうとベイズの定理が導出できることを示した。この導出にも最大エントロピー原理が用いられる。

まず、入出力情報の定量的な測度を導入しよう。いま、仮説  $H_i$  ( $i=1, 2, \dots, N$ ) とデータ  $D$  が与えられたとすると、 $H_i$  の情報  $I(H_i)$ 、 $D$  の情報  $I(D)$ 、 $H_i$  の条件のもとでの  $D$  の情報  $I(D|H_i)$ 、 $D$  の条件のもとでの  $H_i$  の情報  $I(H_i|D)$  はそれぞれ、

$$I(H_i) = -\sum_i p(H_i|D) \log p(H_i) \quad (\text{A6.1})$$

$$I(D) = -\sum_i p(H_i|D) \log p(D) = -\log p(D) \quad (\text{A6.2})$$

$$I(D|H_i) = -\sum_i p(H_i|D) \log p(D|H_i) \quad (\text{A6.3})$$

$$I(H_i|D) = -\sum_i p(H_i|D) \log p(H_i|D) \quad (\text{A6.4})$$

と表すことができる。ただし、それぞれの情報は  $p(H_i|D)$  で重みづけをしている。また、入出力の情報量の差を関数  $L$

$$L = \sum_i p(H_i|D) \log p(D|H_i) + \log p(D) - \sum_i p(H_i|D) \log p(H_i) - \sum_i p(H_i|D) \log p(H_i|D) \quad (\text{A6.5})$$

で表すことにする。最適な情報処理規則にしたがうと、出力情報は入力情報に限りなく近づき、理想的には等しくなる。この規則を用いて情報の損失を最小限にするには、A6.5 の関数  $L$  を最小にする必要がある。ここで、 $p(H_i|D)$  は確率なので、以下の公理を満たす。

$$\sum_i p(H_i|D) = 1 \quad (\text{A6.6})$$

式 A6.6 の条件もと、最大エントロピー原理を用いて式 A6.5 の極値を求めると、

$$\frac{d \left[ L + \alpha \left\{ \sum_i dp(H_i | D) - 1 \right\} \right]}{dH_i} = 0 \quad (\text{A6.7})$$

が得られる。ただし、 $\alpha$  はラグランジュ未定乗数である。この式の左辺を変形すると、

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dH_i} \left[ \sum_i p(H_i | D) \log p(H_i | D) + \log p(D) - \sum_i p(H_i | D) \log p(D | H_i) \right. \\ & \quad \left. - \sum_i p(H_i | D) \log p(H_i) + \alpha \left\{ \sum_i dp(H_i | D) - 1 \right\} \right] \\ &= \sum_i [\log p(H_k | D) - \log p(D | H_k) - \log p(H_k) + \alpha] + 1 - 1 \\ &= \sum_i [\log p(H_k | D) - \log p(D | H_k) - \log p(H_k) + \alpha] \end{aligned} \quad (\text{A6.8})$$

となり、

$$\log p(H_i | D) = \log p(D | H_i) + \log p(H_i) - \alpha \quad (\text{A6.9})$$

が得られる。この式を式 A6.6 に代入し、 $H_i$  について微分すると、

$$\sum_i \log p(H_i | D) = \sum_i \log p(D | H_i) + \sum_i \log p(H_i) - \alpha = 0 \quad (\text{A6.10})$$

となる。よって、

$$\alpha = \sum_i \log p(D | H_i) \log p(H_i) \quad (\text{A6.11})$$

が得られる。この式を式 A6.9 に代入すると、

$$p(H_i | D) = \frac{p(D | H_i)p(H_i)}{\sum_i p(D | H_i)p(H_i)} \quad (\text{A6.12})$$

が求められる。これはベイズの定理である。すなわち、最適な情報処理規則にしたがうと、最大エントロピー原理を用いてベイズの定理が導出されるのである。