

報告番号 甲 乙 第 号

森元 良太君 博士学位請求論文 審査報告

論文題目：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－

論文審査担当者

主査 慶應義塾大学文学部教授 文学研究科委員	岡田光弘
副査 慶應義塾大学名誉教授	西脇与作
副査 南山大学人文学部教授	横山輝雄
副査 愛媛大学大学院理工学研究科准教授	中島敏幸

学識確認 慶應義塾大学文学部教授	岡田光弘
------------------	------

論文の概要

進化現象の表現にとって核心的となる確率概念を哲学的見地から検討し、進化現象理解のために確率概念の情報理論的解釈を採ることの重要性を提案する。20世紀前半から議論されてきた集団遺伝学の数理モデルを情報理論的に再構成し、進化論のベイズ主義的確率概念を導出する。これらを通じて情報理論的立場から自然選択モデルと遺伝的浮動モデルの有効性を示す。

目次

はじめに

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
- 1.2 確率概念と世界観
- 1.3 本稿の概要

第2章 ニュートン力学的観点からみた進化論

- 2.1 ニュートン力学的観点から
- 2.2 決定論的な進化現象
- 2.3 無知解釈
- 2.4 道具主義
- 2.5 まとめ

第3章 量子力学的観点からみた進化論

- 3.1 量子力学的観点から
- 3.2 非決定論的な進化現象
- 3.3 傾向性解釈
- 3.4 非局所的な实在論
- 3.5 まとめ

第4章 進化論の自律性

4.1 集団的思考

4.2 遺伝的浮動はフィクションではない

第5章 進化論的な説明

5.1 物理学だけでは生命現象は説明できない

5.2 粗視化

第6章 情報理論的観点からみた進化論

6.1 情報理論

6.2 情報理論と進化論

第7章 結論

Appendixes

A1 情報理論の最大エントロピー原理

A2 統計力学モデルの導出

A3 自然選択の最大原理

A4 等確率の導出

A5 遺伝的浮動モデルの導出

A6 ベイズの定理の導出

各章の概要

進化論では「適応度 (fitness)」という概念が自然選択による進化を表すのに使われる。生物個体がどれだけ長く生存し、どれだけ多くの子孫を残すかを定量的に表したのが適応度で、確率を使って定義される。では、この確率概念は何を意味しているのか。本論文はこの問いを正面から取り上げる。

第1章では本論文の背景となる確率解釈が説明される。確率は測度として数学的に公理化されているが、「何の」確率かは解釈によって補完されなければならないこと、それには確率概念を明確な別の概念で置き換える必要があること、ここに哲学的な考察が必要となること、が指摘される。

物理学の哲学における確率概念の2つの代表的解釈が対置される。あらゆる物体の運動がニュートン力学によって確定的、一意的に記述できるという意味で、世界は決定論的であるが、私たち人間は完全な知識をもてないゆえ、確率概念を必要とする、というのがラプラスの確率の「無知解釈」である。だが、量子力学の標準的な解釈によると、ミクロな物理世界は非決定論的で、それを表す確率は客観的に解釈される。このように、確率の解釈次第で世界に対する理解は大きく変わる。これらの検討を通じて森元君は、世界を正確に理解するためには確率概念の正しい解釈が不可欠となることを確認する。

進化論の創始者チャールズ・ダーウィンは、確率概念そのものについては言及していないが、適応度を「生存して子孫を残すチャンス」と表現している。このチャンスを確率的に表したものが現在の進化論における適応度であり、確率の使用は世界が非決定論的であるからか、それとも、我々に十分な知識がないからか、あるいは、別の理由によるものかが問題となる。森元君は、上記の物理学上の確率概念解釈の伝統的問題が進化論の確率概念解釈の問題にも現れることを指摘し、そこに本論文の研究課題の意義を見出す。

第2章と第3章はこの進化論的確率概念の解釈問題に対する代表的な二つの解決策の紹介にあてられる。一つは、ニュートン力学に依拠した策で、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と考える。もう一つは、量子力学に依拠した策で、ミクロな量子現象が進化というマクロな現象にまで影響を

及ぼす事例をもとに、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のような非決定論的現象を表すのに使われると主張する。ニュートン力学的観点を採用する陣営の議論は第2章で、量子力学的観点に依拠した議論は第3章で述べられる。

第4章は両陣営の主張の批判的検討である。二つの陣営の相反する解答は共通の前提をもっていると指摘される。いずれの陣営も進化論が一つひとつの対象、つまり生物個体に基づく理論であること、また進化現象は最終的には基礎的な物理理論によって説明できると想定していることが確認される。両陣営の議論が共通して依拠するこれら二つの想定を再考し、批判することによって両陣営の主張の根拠を切り崩す。

まず、進化論は個別の対象を扱うのではなく、「集団的思考」を採用する統計的理論であることが主張される。フランシス・ゴールトンが誤差論を生物集団の変異の説明に応用し、進化論の説明の枠組みとして採用したことに注目する。誤差論では観察結果のばらつきは真の値からの誤差だが、ゴールトンはその誤差論の考え方を逆転させ、誤差が集団自体の特徴を積極的に表していると捉え直したとして、その意義を評価する。これはマックスウェルの気体分子運動論と同じで、ゴールトンは測定結果のばらつきを測定誤差によるものではなく、遺伝要因による変異に、環境要因による変異を加えた結果だと考えたことを指摘する。このような考察から、進化論が集団的思考を採用するのは、基礎的な物理理論が取り扱う現象とは異なる種類の現象を扱うためであることが論じられる。ニュートン力学や量子力学は、個別的な物体の「運動」を記述する理論であり、そこでは物体の運動が最も基本的な変化である。石のような物体の性質は遺伝しないが、生物の形質は次の世代に遺伝する。生物集団は世代交代を繰り返しながら変化していき、その際の選択的、浮動的な変化を描くのが進化論である。進化は集団から遺伝子や個体が何世代にもわたって抽出された結果であり、集団がなければ存在しない。このように議論して、進化論における「集団的思考」の不可欠性を結論する。

次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 of 批判的検討である。彼らは進化現象が最終的に基礎的な物理理論で説明できると言う。ラプラスの魔物は配偶子や個体の運動を完璧に記述できるので、遺伝的浮動の概念は魔物には不要である。だが、物理学の知識では、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ず、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になる。同義コドンやがらくたDNAは物理学的には異なるが、生物学的には同じ対象である。遺伝的浮動はそうした対象に作用する。進化論は基礎的な物理理論とは異なる種類の現象を異なる仕方であらう。それらを使って両陣営の論証が批判される。

第5章は科学的説明の哲学的議論を踏まえ、進化論の説明の特徴が明らかにされる。科学的説明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ができても、進化現象のすべてを物理学によって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。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。多様で複雑な生命現象を解き明かすためには多角的な観点からの説明が必要であることが指摘される。次に、進化論の説明には統計力学での「粗視化」と同じ操作が使われていることが指摘される。粗視化とは情報削減操作であり、多くの対象を一括して取り扱うために使われる。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、集団レベルの現象を包括的に説明できることが示される。

第6章では情報理論を使って進化論の確率概念がもつ哲学的意義が考察される。情報理論は部分情報を合理的に活用する方法を提供し、その一つが「最大エントロピー原理 (maximum entropy principle)」である。手許の情報を最大限に利用して確率分布を推論する最大エントロピー原理は統計物理学のエドワード・ジェインズによるもので、彼はこの原理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。本章ではこれらを概観した上で、最大エントロピー原理を使って進化論の典型的集団遺伝学モデルが導出される。また、多様な生物についての莫大な情報のすべてではなく、生物学者の意図や目的に合わせて取り上げる情報を変え、それに応じてつくられる進化モ

デルも変わるという意味で、進化論が認識論的な側面を含んでいることが示される。進化論のモデルをジェインズと同じように分析することによって、進化論のモデルは実在論的な要素と認識論的な要素の両方を含むことが明らかになる。さらに、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ことから、進化論のモデルが部分情報を最大限に活用した結果であり、その目的が実在の完全な記述ではなく、文脈に応じた説明や予測であることが説明される。進化論の目的は実在の完全記述ではなく、部分情報に基づく集団レベルの現象の予測、説明であるという視点を森元君は提出する。

さらに、最適な情報処理規則に従うと遺伝的浮動のモデルが導き出せることが示される。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、この規則からベイズの定理も導出できる。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ことが指摘される。遺伝的浮動のモデルでは、与えられた情報に応じて合理的に信念更新することによって、次世代の遺伝子頻度が予測できる。これは自然選択モデルも同様であり、進化論における確率概念はベイズ主義的に解釈できることを示している。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解釈であるが、無知解釈ではない。無知解釈をとるローゼンバーク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マイナス面を強調するのに対し、提案される解釈は同じ主観的解釈であっても、それが手許の情報を最大限に利用しているという合理的側面をもつことがわかる。

第7章では、本論文の議論と成果が簡潔にまとめられる。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、生物学者の手許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、手許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。情報理論的観点から進化論を考察することにより、従来の議論では捉えることのできなかつた特徴が明らかにされる。

審査要旨

本論文は進化論で用いられる確率概念についての科学哲学的な考察からなっている。それは、20世紀後半から議論されている進化論の代表的な論争に対して情報理論的観点から批判し、自ら解答を求める野心的な試みである。進化論における確率概念について情報理論を使って考察し、科学理論と情報の哲学的意義を検討したものは他に類がなく、科学哲学の新しい切り口と展開を提供するものとなっている。

最初に指摘すべきは、本論文のスタイルについてである。20世紀後半からの科学哲学の手法は、研究対象としての科学理論を一つ定めた上で、その理論が課題とする事柄や現象がどのようなものかを存在論的、認識論的、そして意味論的に探求する、あるいはその理論がもつ未決の問題を具体的に解明することが主流となっている。本論文もそれに従い、生物学理論としての進化論を対象に定め、そこで用いられる確率概念が何かを進化論の現状に合わせて解明しようとしている。この点で科学哲学の近年の手法に従った典型的な研究となっている。

では、本論文が対象とする進化論とはどのような理論なのか。ダーウィンの自然選択説とメンデルの遺伝学が総合され、進化論が「総合説」として登場するのは1930年頃である。この総合説の核心にある理論が集団遺伝学であり、フィッシャー、ライト、ホールデンらによってつくられた。集団遺伝学は数学的なモデルを中心にした理論で、確率・統計的モデルを使って生物集団の進化を説明する。では、何がどのように説明されるのか。ここでの基本概念が生物の「集団(群)」である。メンデル集団あるいは個体群が世代交代を繰り返し、長い期間に渡って集団が変化していく過程を、自然選択、突然変異、遺伝的浮動等の進化要因を使って確率・統計的に説明するモデルをつくり、実証的なデータを使ってモデルの確証をするのが集団遺伝学の研究となる。では、このモデルで必ず使われる確率概念は一体どのようなものか、それが本論文の課題となっている。

さて、本論文が取り上げた論争は、「集団遺伝学が描く世界は決定論的なのか、それとも非決定論的なのか」という問題を巡ってのものである。ニュートン力学を下敷きに決定論的な変化を前提にして進化論の確率概念を捉えるのがかつてのローゼンバークらで、古典的世界観を前提にした結果、確率解釈はラプラスの無知解釈とほぼ同じものとなる。一方、量子力学的な非決定論を前提にして進化現象を考えると、確率は客観的に解釈されることになる。確率概念がどのようなものかを議論する際の、上述の二つの陣営の違いはこの問いに対しての答えの違いからきている。二つの陣営の論争は専門誌 (*Philosophy of Science, British Journal for the Philosophy of Science* 等) を飾ったが、その論争に対する批判が本論文のターゲットとなっている。二つの陣営が共に認める二つの前提についての批判から始め、集団遺伝学の情報理論的な解釈を前提にして確率概念を考えようとするのが本論文の意図である。論争への批判は、両陣営が「集団的思考」と物理学とは異なる「情報概念」を無視、あるいは軽視していることとに向けられる。そして、確率解釈は文脈依存的であり、集団遺伝学という文脈でどのように確率概念を理解すべきかについての解答が本論文の結論となっている。さらに、その結論を補強するのが統計力学の認識論的側面と集団遺伝学のそれがほぼ同じである点であり、最大エントロピー原理を適用した技術的な結果が付録として加えられている。論争に対する的確な要点整理と鋭い批判がなされ、その後森元君自身の明確な主張が平易に展開され、付録ではそれを裏打ちする数学的な証明が与えられ、十分な説得力をもつ、迫力ある議論となっている。審査員一同はこれらを高く評価する。

ただし、次の点を指摘しておきたい。力 (force、その具体例が重力や電磁気力) による進化論の解釈はアナロジーとしては巧妙で効果的だが、古典力学の力と同じように自然選択や遺伝的浮動の進化の要因を考えることには無理がある。「自然選択が外から働き、その結果進化が起こる」ことは「力が物理的な対象に働き、それによって運動が生じる」ことに確かに似ている。だが、古典力学の力が解析力学で数学的に展開できたのに対して、自然選択の解析的な展開など誰もしない。さらに、集団遺伝学を統計力学と類比的に扱うことにも慎重な態度が必要である。熱力学が統計力学に書き換えられたのは力学還元主義の一端であり、集団遺伝学での確率・統計の使用と同じように考えるのは危険である。力は確率的ではなく、力による変化が確率的であるのが力学である。だが、集団遺伝学では変化は確定的で、力が確率的なのである。この辺の議論は未だ十分とは言えず、それは本論文だけの責任とは言えない。この考察は今後の研究に期待したい。

また、対象となる集団 (例えば、気体分子集団とメンデル集団) のサイズ、つまり生物集団の個体数と気体の粒子数は大きく異なる。微生物の生物集団のサイズがどのように大きくても、1モルの粒子数 (アヴォガドロ数と呼ばれ、水なら18グラムが1モル。 6.02×10^{23} 個で、これは水分子を横に並べると 1.8×10^{11} km となり、光が1週間かけて進む距離。) とは大きく異なる。二つの集団のサイズの違いから、遺伝的浮動は気体集団では無視できてもメンデル集団では無視できず、大数の法則は気体集団ではほぼ成り立つが、メンデル集団では成り立たないと考えるべきだろう。これにはより細やかな議論と実証的な考察が求められる。

本論文で取り上げられた論争は20世紀末から現在に至るもので、二つの陣営を古典派、統計派と呼ぶことができる論争である。情報派と呼べる本論文は丁寧に文献を精査し、両陣営共通の前提を見出し、そこから捉え直そうという点で極めて哲学的である。その哲学的な意図は情報理論的な統計力学解釈を使うことによって具体化され、論争をいずれか一方に加担するという仕方を取らずに解決する途を選ぶことに成功しているように見える。この解決の仕方が真に最終的な解答かどうか早計に結論は出せないが、本論文によって一定の成果と見通しが得られたことは確かである。

生物学のデータや知見をあくまで尊重して哲学の議論を進める点、決定論、非決定論の論争の文脈で進化論の確率に関する議論を展開する点、さらにこれらの議論のためには情報概念を明確に捉える必要があることを明確に指摘した点などに高いオリジナリティが認められる。確率概念が進化論をどこまで広げるかというこのテーマの将来

の進展も期待できる。

以上の理由から、審査員一同は森元良太君の本論文が博士（哲学）の学位授与にふさわしいものであると判断する。