

## 審査の結果の要旨

氏 名 中島 蒼

生物が未知で多様な環境に適応する過程には大きく分けて2つのメカニズムが存在する。一つは個体が自身やその祖先の経験情報をもとに、未来の形質や振る舞いを変化させる学習による個としての適応である。もう一つは集団内に多様な形質や振る舞いを持つ個体を作り出し、その中でより環境に適したものが多くの子孫を残すことで集団として適応する進化的適応である。この2つは背反・排他するものではなく自然界において共存する。しかし、学習による個としての適応と進化による集団としての適応がどのように関係し生体の適応を形作っているか、その原理は未だ解明されていない。また同様の構造は、工学における最適化問題において学習器がもつ解の候補を逐次的に更新する最適化法と、解の集団を作成しその変異と自然選択によって最適解を探索する進化アルゴリズムのような集団的最適化法との間にも見出すことができる。

本論文では、個の学習と集団の進化とが協調して機能する背後に潜在する数理構造の解明を試み、その数理構造を生物そして工学の問題に応用する研究を行っている。

本論文は「Mathematical Structure of Coordination between Individual Learning and Populational Evolution and its Applications」（個の学習と集団の進化が協調する数理構造とその応用）と題し、6章からなる。

第1章「Introduction」（序論）では、個の学習と集団の進化との関連性について、本論文で扱う問題と設定、そして引き続く章の内容を概説している。

第2章「Background」（背景）では、個の学習と集団の進化、それぞれに関して問題設定を数理的に定式化し、生物学および工学においてこれまでに行われてきた先行研究の内容をまとめている。

第3章「Preliminary」（準備）では、第4, 5章で用いられる数理的な手法や記法の導入が行われている。本論文で主要な役割を果たす対数分散・共分散に引き続き、個体群動態理論の手法である適応度の経路積分表現と変分原理、遡及過程とその拡張を詳説し、フィッシャーの自然選択の基本定理を解説している。合わせて、数理最適化における凸解析、最急降下法やその変種の性能に関する一連の数理的な結果を概説している。

第4章「Acceleration of Evolutionary Processes by Learning and Extended Fisher's Fundamental Theorem」（学習による進化過程の加速と拡張されたフィッシャーの基本定理）では、祖先の経験情報がエピジェネティクスなどにより子孫に引き継がれる生物

的状況を想定し、祖先情報を用いた学習による進化の加速を解析している。祖先の振る舞いを真似る祖先学習を導入し、祖先学習が進化を加速しうることを数値計算で確認すると同時に、祖先情報の活用が集団適応度の勾配に対する最急降下ダイナミクスと等価であることを証明し、適応度勾配を用いないランダム変異と比較して、学習が進化を本質的に加速すること示した。そしてフィッシャーの基本定理を学習を含む状況に拡張して進化の加速を定量的に解析する方法論を構築した上で、記憶の有限性により祖先情報の継承が不完全な状況においても進化の加速が成立しうることを証明した。

第5章「Theoretical Analysis of Evolutionary Algorithms via Techniques from Population Dynamics」（個体群動態の手法に基づく進化アルゴリズムの理論的解析）では、個体群動態理論の手法を拡張・応用して逐次最適化と進化アルゴリズムを組合せた数理最適化手法を解析する方法を構築している。フィッシャーの基本定理を進化計算に拡張して、逐次最適化アルゴリズムを並列実行した場合と自然選択を取り入れた進化計算とを比較し、自然選択の導入が常に並列最適化を加速することを示している。また遡及過程を進化計算に拡張し単ステップ近似という計算法を与えている。その応用として確率勾配法と進化アルゴリズムを組み合わせた手法を扱い、勾配推定のノイズが自然選択の導入により事後的に勾配方向にバイアスされることを導いている。

最後に第6章「Conclusion」（結論）では、本論文の成果を簡潔に纏めると共に、今後の研究課題を提示している。

以上を要するに、本論文は個の学習と集団の進化という適応・最適化における2つのメカニズムの協調を理解・解析するための数理的基盤を構築し、生物学および数理最適化の両面に応用した。本内容は理論進化学と数理最適化の境界領域を開拓し、数理情報学分野の研究に大きく寄与した。よって本論文は博士（情報理工学）の学位請求論文として合格と認められる。