

生物進化システムのロバスト性

RA 大竹洋平

情報理工学系研究科数理情報学専攻

1 目的

本研究の目的は、生物が用いている計算原理を追求することにある。

計算手法として人間が人工的に設計してきたものは数多く、その合理性と汎用性が追及されてきた。しかし、人工的な手法だけではなく、生物が自然に選択してきた計算手法が注目を集めている。なぜなら、それは数十億年にもわたる進化の過程を経て自然の中で改良されてきたものであり、長年にわたり機能してきているからである。そういった生物システムから発想を得て考案された計算手法については多くの研究がなされてきた。Genetic algorithm や evolutionary computation などまさに進化的な方法論を取り入れた計算手法や、neural network や immune system など生体内の機能をモデル化したものなどである。

よって、生物から動機付けられる計算手法を考案・開発していくことは非常に有用であると考えられる。そこで本研究では、生物系からの計算原理を考究するために不可欠な生物学における数理的手法の整備を進める。

2 具体的課題

研究テーマは「生物計算を目指した生物数学の整備」であり、具体的な設定課題は、進化ダイナミクスの統一的理解（変異ダイナミクス）と、個体の行動規則とその集団としての振る舞いである。

生物の進化システムは、ロバストな計算が行われてきた一つの極例と考えられる。進化ダイナミクスの振る舞いを理解することは、生物計算にとって最も重要である。頻度依存選択・遺伝・変異という進化の要素が全て入った方程式を解析し、その振る舞いについて議論してきた[1]。さらに適応の変異や、遺伝する変異と継承されない変異などを比較する研究を進めることで、進化的計算において重要な要素である変異について広く調べ

てきた[2]。

そもそも生物数学・数理生物学は、マクロな生物学、特に生態学で確立されてきた。例えば、進化ゲーム理論は、主に社会科学における意思決定システムの解析に用いられていたゲーム理論に対し、その合理性の仮定をはずすことで生物間の関係をモデル化することに成功した。それにより、局所的な相互作用しか判断できないはずの生物個体の意思決定によって、集団全体としてどのような振る舞いを示すかを理論的に研究できるようになった。しかしこれは生物集団に限らず、個々の構成要素が複雑に相互作用するシステムに広く応用可能である。構成要素と全体の振る舞いが直感的には理解できないような一般の系（生物学以外の工学・社会科学における様々な問題）への適用可能性も探る。

3 本年度の成果

生物進化システムのロバスト性を探るためには、まずその第一段階として進化の論理を理解することが重要となる。論理を理解する最初の過程では、現象の中から法則性を抽出することが必要である。そこで、RA 一年目としての本年度は具体的対象として、生物社会・人間行動など様々なシステムに広くみられる「協力」という現象を取り上げ、その進化ダイナミクスについて議論してきた。それは、個人レベルでの利得と、社会全体としての利得が相反するような場合であり、合理性を追求する最適化の観点から言えば、要素に着目した場合の最適化と全体に着目した場合の最適化の方向が逆であるような場合である。

まず、進化とは何かということの共通の理解が必要になるが、ここでは集団内におけるある行動の頻度が変化することと考える。つまり、集団内の構成比率が個体間相互作用によって変化している様子が観測されることになる。

進化とは時間とともに何らかのものが変化す

ることであるのだが、最初に調べなければならないのは、進化が起こらない条件である。進化を記述する方程式としては、集団遺伝学にもとづくレプリケーター方程式¹を用いた。それによって相互作用が線形の場合（もちろん、それでも方程式は非線形であり、複雑な現象が起こりうる）についての進化が起こらない条件を割り出すことができた。それらについては、超ロバスト計算原理考究の講義を挟んだ議論からうまれてきたものである。

その上で、実際の人間行動・社会現象についてどのような進化ダイナミクスが起こりうるかを議論した。協力行動が存続することが難しい場合（期間が決まっているような場合）にも、進化の要素を考慮に入れると、その存続可能性が違ったものとなる。特に、これまで協力行動が存続する説明として信じられてきたものについても、進化ダイナミクスをきちんと解析すると、協力行動の存続がなりたたなくなり、別の説明が必要となってくる。そのことについては[3]の会議に RA として出張・発表をした。その議論からも、協力の存続条件の不十分性は確固たるものであることがわかった。

4 今後の課題

具体的な社会現象・生物現象をモデル化して解析してきた。これは具体的な問題解決であるので、プロジェクトの目的からすると副産物とも言える。しかし、生物システムの原理を他の様々なシステムへと適用することも考えれば、ロバスト計算の広い意味での目標を達成するものであると考えられる。

まず、進化が起こらない条件については割り出すことができたが、しかしその場合にも、実際には集団内で個体数変動は起こっている可能性もある。それは、化学平衡の状態に例えられるのだが、実際には反応が起こっているにもかかわらずそれらの反応が双方向で釣り合っているのを見かけ上は反応が起こっていないように思われるだけであると同様の解釈である。化学反応と同様の効果はもちろんあるのだが、それ以外に進化特有の現象として考えられるのは、個体数が絶えず変化し続けているのに、構成比率が変わっていないような場合である。それらについては、進化

ダイナミクスの解釈としても明確に区別しておく必要があり、それらによって実際の現象としてどのような差異が生じてくるかといった議論が重要になるだろう。今後議論を進めていきたい。

さらに、具体的な現象がわかってきたら、次に進化ダイナミクスの統一的理解が求められる。進化と自己組織化の論理を考究することであり、それを使った問題解決方法を設計することになる。進化原理に基づく最適化問題の解法や伝染病伝播のモデル化・解析などの具体的な問題に応用していくことも考えられる。

Reference

[1] Yo-Hey OTAKE & Kazuyuki AIHARA: Bifurcation and stability analyses of the replicator-mutator equation on the iterated prisoner's dilemma. *International Symposium on Dynamical Systems Theory and Its Application to Biology and Environmental Sciences*. Shizuoka University, Hamamatsu, JAPAN. March 14–17, 2004. (poster)

[2] Yo-Hey OTAKE & Kazuyuki AIHARA: Analysis of bifurcation and optimal response on the evolution of cooperation. *International Symposium on Artificial Life and Robotics*. B-Con Plaza, Beppu, Oita, JAPAN. February 4–6, 2005. (oral)

[3] Yo-Hey OTAKE & Kazuyuki AIHARA: Effects of variation in the finitely iterated prisoner's dilemma game. *The European Conference on Mathematical and Theoretical Biology (ECMTB05)*. Dresden University of Technology, Germany. July 18–22, 2005. (oral, Evolution and Ecology に採択)

http://www.ecmtb05.org/php/schedule.php?c_speakerid=767&name=Evo.Phenotyp%203

¹ Taylor, P. D. & Jonker, L. B. Evolutionary stable strategies and game dynamics. *Math. Biosci.*, **40** pp.145–156. (1978)