

文化進化の数理モデル：

その狙いと今後の展望

若野友一郎

明治大学先端数理科学研究科

概要

これまでに多くの数理モデル解析やシミュレーションが、文化進化のダイナミクスを研究するために用いられてきた。その結果、さまざまな進展がみられたが、学術論文で発表される重要な成果のいくつかは、数学を用いて表現されていることも多く、実証研究者と理論研究者との溝となりうる。本稿では、一切数式を用いずに、多くの文化進化のモデルの基礎となった単純モデルの枠組みと結果を解説し、特にそこから、これまでに理論研究者が、どのような動機でどのような目的をもって、数理モデルを研究してきたかを概説する。

1. はじめに

数理モデルを用いた文化進化の研究は、1980年代のいくつかの論文（Feldman & Cavalli-Sforza 1984; Boyd & Richerson 1985; Rogers 1988）を出発点として、近年ますます盛んになりつつある。同時に、考古学、人類学、心理学の分野における実証研究者の間においても、文化進化への関心は高まりつつある。しかしながら、いくつかの重要な理論的成果は、専門知識を必要とする数学的な用語で記述されることも多く、実証研究者と理論研究者との円滑な共同研究を阻害する要因となっている可能性がある。特に重要なのは、理論研究者がどのような動機で、どのような目的をもって数理モデルを研究してきたかを、分野全体で共有することで、今後の理論研究と実証研究との共同作業のあり方を探ることである。そのため本稿では、多くの数理モデルの基礎となっている「単純モデル」を、数式を用いずに解説する。単純化は、数学的な取り扱いのためにもなされるが、それ以上に、研究者が何を明らかにしたいのか、に大きく限定される。人間の文化的学習行動は当然に複雑であって、単純な数式で記述できるものではないのは明らかである。「単純モデル」が、どのような目的でどのように学習行動を単純化したのかを知れば、これまでの理論研究がどのような方向性で行われてきたのかの概要を知ることができる。本稿は、関連諸分野の

実証研究者にこれまでの理論研究の方向性を理解して頂き、同時に従来理論研究にはなかった方向性を提示して頂くことで、今後の円滑な共同研究を推進するために著した。

2. 単純モデル：個体学習戦略と社会学習戦略

ここでは、主に Feldman et al. (1996) によって提示された数理モデルを解説する。近年の多くの数理モデル研究は、程度の差こそあれ、このモデルの拡張と考えることができる。

人間の学習行動は明らかに極めて複雑であり、それをどのように単純化して切り分けるかは、様々な方法がありうる。理論研究の多くでは、学習過程を個体学習 (individual learning; IL) と社会学習 (social learning; SL) の2つに分けて考える。ここで個体学習とは、社会的な相互作用が一切ない学習過程であり、個人による試行錯誤などがその例である。社会学習とは、社会的な相互作用を含む学習過程であり、模倣や教示などがその例である。

単純モデルでは、個体は上の2種類の学習のうち、いずれかを選択すると仮定する。個体学習戦略を選んだ場合、その個体は個体学習しか行わない。社会学習戦略を選んだ場合、その個体は社会学習しか行わない。また単純モデルでは、世界には正しい行動 (Correct; C) と間違った行動 (Wrong; W) の2種類の行動しか存在しないと仮定する。個体学習者はある一定の確率で正しい行動を獲得し、社会学習者は周囲の個体の行動を模倣しその結果として C か W のどちらかの行動を獲得する。個体学習戦略を選ぶにせよ、社会学習戦略を選ぶにせよ、その目的は、正しい行動を学習する機会を最大化することである。

上のような、ある意味で極端に思える単純化を行ってもなお、いくつかの興味深い問題を考えることができる。そのひとつは、ただ単に他者を模倣するだけの社会学習が、個体学習よりも有利になりえるか、である。もし社会学習者が、ランダムに選んだ誰かの行動を模倣するだけであれば、そのような無反省な学習は、正しい行動を獲得することの助けにならないように一見思える。しかし、もし正しい行動をしている個体の生存率が、そうでない個体の生存率よりも高いならば、結果として集団中の正しい行動をしている個体の割合は、高くなる。だから、ランダムに誰かを選んで模倣することは、ランダムに C と W のどちらかを選択することと同じではない。ランダムに誰かを選んで模倣することは、生き残った個体の中から誰かを選ぶ、という選択をすることになり、結果として正しい行動を獲得する可能性が増えるのである。個体学習と社会学習のどちらか有利かは、集団中においてどの程度の割合が、正しい行動をしているかに依存する。

上のような問題に対し、数理モデルは言葉を用いた論理でなく、数式で答えを与える。ただしそのためには、個体の学習、出生、死亡について、さらに次のような仮定をおく。

1. 子供は親の学習戦略(IL/SL)を模倣するが、行動そのものは親からは遺伝しない
2. 子供は人生において一度だけ、ILかSLを実行する。その結果、CかWのいずれかの行

動を獲得する。SL を実行する場合には、親世代の個体からランダムに1個体を選んで、その行動を模倣する。IL を実行する場合には、ある一定の確率（たとえば60%）でCを獲得する。

3. 学習戦略と、その結果獲得した行動に応じて、子供の生存率が決定する。生存率に応じて、一部の子供だけが成人となる。

ここまで仮定することにより、集団中のCの割合のダイナミクスを数式で記述することができるようになり、その結果、ILとSLのどちらが有利かについて、答えを出すことができる。

ある同じ行動が、常に正しい行動である場合、その行動の頻度は増加しつづける。これは一見自明なことに思えるが、その理由を理解するのは重要である。上のモデルでは、行動自体は遺伝しない。正しい行動Cを持った親が生んだ子供が、行動Cを獲得するかどうかは、親との行動とは無関係である。だから、Cが増える理由は、Cがたくさん子供を生むからではない。Cが増える理由は、間違った行動Wを持った子供が死ぬからである（上の3.の部分）。Cの頻度が親世代において70%であったならば、SL戦略を持つ子供はCを確率70%で学習する。しかし、Cを学習した子供のほうが、生き残りやすい。その結果、彼らが大人になったとき、Cの頻度は70%より増加している。行動Cの頻度を増加させるのは、ILではなくSLである。行動Cの頻度が増加する結果、SLがILより有利となり、最終的にはSL-Cの組み合わせだけが生き残っていくことになる。

ある行動が、親世代においてはその時代の環境に適合した正しい行動であったものの、次世代においては環境に適合しない間違った行動である、ということが起こりえる。これを環境変動と呼ぶことにしよう。ILにとっては、環境変動は何の影響もない。なぜなら、試行錯誤は新しい環境で行われるからである。しかしSLにとって、環境変動は重大である。

「時代を生き抜いた親世代の個体を選ぶ」ことは、必ずしも自分にとって正しい行動を選ぶことの指標とはならないからである。よって環境変動がたまに起きるような状況では、ILとSLのどちらが有利かという問題は、さらに興味深い問題となる。この問題に答えを与えることが、単純モデルが作られた主たる目的であった。

数理解析の結果として、まず環境変動が存在する場合には、ILとSLが共存する状態が永遠に続くことが知られている。すなわち、集団中の一部の個体がIL、残りの個体がSLを行っている状態である。環境変動が毎世代起きるのでない限り、親世代の個体から学ぶことは、ランダムに行動を選ぶよりは有利である。親世代から学ぶことの有利さと、ある一定の確率で正しい行動を学べる有利さとが、ちょうどバランスする状態が存在し、その状態が最終的な平衡状態となる。

数理解析が導いた別の興味深い結果は、上のようなILとSLの共存状態が実現したとき、集団全体としてのパフォーマンス（正しい行動をしている個体の割合）は、すべての個体が個体学習しているときのパフォーマンスと等しい、というものである。すなわち、

各個体に個体学習という学習手段に加えて、社会学習という新しい選択肢が与えられたにもかかわらず、そのことは集団全体としてのパフォーマンスになんら寄与しないということの意味する。この結果は **Rogers' paradox** と呼ばれている。パラドックスとは呼ばれるものの、このことは数学を用いなくても、直感的に理解できる。もし親世代から学ぶこと（すなわち **SL** の）有利さが、**IL** の有利さを上回るならば、結果として **SL** 戦略は増加し、**IL** 戦略は減少する。これは集団において、今正しい行動は何かという、他者からの情報に依存しない一次情報を与えてくれる者（すなわち **IL**）が減るということである。その結果、人々の行動はランダムに **C** か **W** を選ぶ行動により近くなる。すると、親世代から学ぶことの有利さが減少し、その結果 **IL** 戦略が有利となる。このように考えると、親世代から学ぶことの有利さと、**IL** の有利さが一致する状態は、安定的であって、必ず最後はそこに行き着くことが理解できる。

3. 単純モデルからの発展

単純モデルは興味深い問題とその答えを提示するが、一方で人間の学習行動のモデルとして極端な単純化を行っていることも事実である。これまでに、非常に多くの理論研究によって、さまざまな発展がなされてきた。

人間は単なる無反省な模倣以上の社会学習を行っている。我々は誰から学ぶべきかを考えて学ぶ。我々はより成功している者から学び(**payoff-biased transmission**)、より社会的影響力の強い者から学び(**prestige-biased transmission**)、多数派の意見をより積極的に取り入れたりする(**conformism**)。これらの、様々な種類の社会学習は、多くの理論研究によって取り扱われている(e.g., **Henrich & Boyd 1998; Wakano & Aoki 2007; Nakahashi et al. in press**)。また、空間構造や社会構造が学習や文化に与える影響についても、数理モデルによって研究されている(e.g., **Lehmann et al. 2010; Rendell 2010; Wakano et al. 2011; Kobayashi & Wakano 2012**)。

他にも単純モデルからの発展研究は無数に存在し、すべてをここで網羅することは到底不可能であるが、特に近年において盛んに研究されているのは、蓄積的な文化進化である。人間社会における文化伝達では、まず社会学習によって行動や知識を獲得し、それに試行錯誤を加えてより優れたもの（あるいは新しい環境に適合したもの）へと改良し、その改良が次世代へと伝えられていく。これにより、一世代では到底なしえないような技術の発展などが可能になったと考えられる。単純モデルでは、「社会学習したものを個体学習で改良する」といったプロセスが不可能であるため、蓄積的な文化進化を表現できない。この蓄積的な文化進化の有無、あるいはその効率の大きな違いが、ネアンデルタール（あるいはその時代のヒト属）の遅々とした石器文化の進化と、サピエンス（あるいはより新しい時代のヒト属）の急速な石器文化の進化の違いの原因である可能性がある。蓄積的な文化進化をモデルで表現するためには、学習戦略の生活史 (**life history strategy**) を研究する必要がある。このような理論研究としては、**Enquist et al. (2007), Borenstein et al.**

(2008), Aoki (2010), Aoki et al. (2012) などがある。

4. おわりに

本稿では、単純モデルにおける環境変動下における個体学習と社会学習の共存、それにとともなう Rogers' Paradox について解説した。これらは、ほとんどの文化進化の理論研究者が共通に関心を持つ、いわばこの業界の標準的研究テーマとなっている。今後の理論研究の方向性を考えるとき、上で述べたような単純モデルの発展を続けることも重要であるが、一方で新学術領域研究「ネアンデルタールとサピエンス交替劇の真相: 学習能力の進化に基づく実証的研究」のような学際的研究プロジェクトでは、最新の实証研究から得られる知見を、理論研究にフィードバックし、また最新の理論研究の成果を実証研究にフィードバックすることが求められている。しかし異分野間の研究交流、とくに理系一文系間の研究交流は現実問題として極めて困難である。そのために、ここでは努めて数式を排除し、なおかつメカニズムが理解できる概説を著した。本稿が、文化進化の理論研究者の世界を紹介し、同時に実証研究者が理論研究に対して、このような視点が抜けている、という指摘を頂き、そこから共同研究が生まれる契機となれば幸いである。

5. 参考文献

Feldman, M.W., Cavalli-Sforza, L.L., (1984) Cultural and biological evolutionary processes: gene-culture disequilibrium. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 81, 604-607.

Feldman, M.W., Aoki, K. & Kumm, J. (1996) Individual versus social learning: evolutionary analysis in a fluctuating environment. *Anthropol. Sci.* 104, 209-232.

Boyd, R. & Richerson, P.J. (1985) *Culture and the Evolutionary Process*. Univ. of Chicago Press.

Rogers, A.R. (1988) Does biology constrain culture? *Am. Anthropol.* 90, 819-831.

Henrich, J., (2004) Demography and cultural evolution: how adaptive cultural processes can produce maladaptive losses--the Tasmanian case. *Am. Antiquity* 69, 197-214.

Kobayashi & Aoki (2012) Innovativeness, population size, and cumulative cultural evolution. *Theoretical Population Biology* 82, 38-47.

Henrich, J., Boyd, R., (1998). The evolution of conformist transmission and the emergence of between-group differences. *Evol. Hum. Behav.* 19, 215-241.

Nakahashi W, Wakano JY, Henrich J (in press). Adaptive social learning strategies in temporally and spatially varying environments. *Human Nature* DOI: 10.1007/s12110-012-9151-y

Wakano JY & Aoki K (2007) Do Social Learning and Conformist Bias Coevolve? Henrich and Boyd Revisited. *Theoretical Population Biology* 72:504-512.

Lehmann, L., M. W. Feldman, and R. Kaeuffer. (2010) Cumulative cultural dynamics and the coevolution of cultural innovation and transmission: an ESS model for panmictic and structured populations. *J. Evol. Biol.* 23:2356–2369.

Rendell, L., L. Fogarty, and K. N. Laland. (2010) Rogers' paradox recast and resolved: population structure and the evolution of social learning strategies. *Evolution* 64:534–548.

Kobayashi Y & Wakano JY (2012) Evolution of social versus individual learning in an infinite island model. *Evolution* 66:1624-1635

Wakano JY & Aoki K (2006) A mixed strategy model for the emergence and intensification of social learning in a periodically changing natural environment. *Theoretical Population Biology* 70:486-497

Borenstein, E., Feldman, M.W. & Aoki, K. (2008) Evolution of learning in fluctuating environments: when selection favors both social and exploratory individual learning. *Evolution* 62, 586-602.

Enquist, M., Eriksson, K. & Ghirlanda, S. (2007) Critical social learning: a solution to Roger's paradox of nonadaptive culture. *Am. Anthropol.* 109, 727-734.

Aoki, K. (2010) Evolution of the social-learner-explorer strategy in an environmentally heterogeneous two-island model. *Evolution* 64, 2575-2586.

Aoki K, Wakano JY, Lehmann L (2012) Evolutionarily stable learning schedules and cumulative culture in discrete generation models. *Theoretical Population Biology* 81:300-30

Aoki, K., Nakahashi, N., (2008) Evolution of learning in subdivided populations that occupy environmentally heterogeneous sites. *Theor. Popul. Biol.* 74:356-368.

Wakano JY, Kawasaki K, Shigesada N & Aoki K (2011) Coexistence of individual and social learners during range-expansion. *Theoretical Population Biology* 80:132-140.

Lehmann L, Wakano JY (in press) The handaxe and the microscope: individual and social learning in a multidimensional model of adaptation. *Evolution and Human Behavior.* to appear.

A perspective on models of cultural evolution

Joe Yuichiro Wakano
Meiji University

ABSTRACT

Many theoretical works using mathematical models or computer simulations have been performed. Although these studies have revealed some important achievements in theoretical aspects of cultural evolution, they are described in mathematics and are not necessarily easily accessible to all empirical researchers. To facilitate more collaboration, here we verbally, without equations, review the simplest type of models of cultural evolution to introduce the common motivations and questions among theoretical researchers in this field. Then we review the assumptions of the simplest type of models in detail. This reviewing process might serve to clarify motivations or interests which have been considered as important by empirical researchers but never modeled by theoretical researchers.