

進化研究の情報通信分野への応用の可能性



研究ノート

黒川 瞬*

The Potential for Applying Evolutionary Research
to the Field of Information and Communication

Key Words : Information Science, Network Structure, Evolutionary Biology,
Evolutionary Game Theory, Spite

はじめに

私は、2024年9月にJAIST（北陸先端科学技術大学院大学）を退職し、2024年10月1日付で大阪大学大学院情報科学研究科に着任した。これまで所属してきた部門は、理学系研究科、農学研究科、動物研究所、経済・マネジメント学群、総合文化研究科、知識科学系、と多岐にわたるが、所属部門によらず、生物の行動の進化を中心に研究を進めてきた。これまでどのような研究を行ってきたか、そして、これから初めて所属することになる情報科学研究科でどういった研究を進めていきたいかについての展望を述べる。

これまで著者が行ってきた研究分野の背景

ニコ・ティンバーゲンによると、生き物の行動は四つの問いかけ方がある¹⁾。まずは、二つに分けられる。一つは究極要因で、もう一つは至近要因である。究極要因というのは、そもそもどうしてその行動がどういう利点があったかに迫る要因である。一方、至近要因は、その行動を具体的にどのようにして実現されるかである。フェロモンの働きや、遺伝子の発現などがこれに該当する。そして、究極要因は機能（適応）と系統発生の二つに、そして、至近要因は機構と発達（個体発生）の二つにそれぞれ分割され、全部で四つの問い方があるとされている。

私はこの四つのうち、これまで、機能（適応）を調べる研究を進めてきた。進化生物学の研究である。三つがあるとき、進化が起こる。このメカニズムの結果、相対的に適応的な性質が集団内に広がる（＝進化する）、と考えられる。しかし、身の回りを見渡してみると、一見非適応的な生物の行動は散見される。例としては、自己犠牲的に振舞い相手に利する行動である、利他行動があげられる。「種全体にとってみれば利他行動は益があるから行動だから進化しても自然」と考える人がいるかもしれないが、これは、進化の分野では適切な説明とはされていない。進化は、あくまで個体の遺伝子が次世代に受け継がれることを通じて起こり、複製の単位はあくまで個体だからである。種全体にとって益がある行動であっても、個体自身にとって損な行動であれば、複製に失敗し、その性質は集団内に広がっていかない。「一見自分にとって損な行動にもその個体にとっての何らかの適応的利益があるはずであり、その背後にある適応的意義を見つける」というのが、私が取り組んでいる研究の端的な説明になる。

進化生物学分野における著者のこれまでの研究

これまで、一見非適応的な行動として、大きいグループにおける利他行動、ならびに、嫌がらせ行動に着目し、それらがいかに進化しえたのかについて研究をしてきたので、それらについて、以下ではそれぞれ概説する。まずは、大きいグループにおける利他行動である。ヒトは村や国といった大きいグループにおいて利他行動を行う²⁾。こうした大きいグループにおける利他行動はいかに進化しえたのか？こうした問題に取り組むには、二者間での相互作用に限らないn者間での相互作用を取り扱う必要がある。しかし、私がこの問題に取り組んだ時点では、遺伝的浮動を考慮した進化ゲーム理論的解析を行う



* Shun KUROKAWA

1984年4月生まれ
東京大学大学院 理学系研究科 生物科学専攻博士課程修了（2013年）
現在、大阪大学大学院 情報科学研究科
バイオ情報工学専攻 バイオインスパイアードネットワーク講座 准教授
理学博士
専門／進化生物学
E-mail : kurokawa.shun.ist@osaka-u.ac.jp

理論的な整備は二者間での相互作用に限定されており³⁾、 n 者間での相互作用の解析は行えない状況だった。そこで、私は、 n 者間での相互作用の解析を行えるようにまずは拡張をし、大きいグループにおける利他行動の進化について研究できるようにした。そして、その上で大きいグループにおける利他行動が、周りが利他的に振舞っていたら利他的に振舞い、周りが利他的に振舞っていなかったら利他的に振舞わない性質である互恵性を介して進化しうることを数理的に示した⁴⁾。つづいて、嫌がらせ行動の進化である。嫌がらせ行動は、自らの適応度を下げて、相手の適応度を下げる行動であると定義される。嫌がらせ行動には、毒物を放出するといった行動が該当するが、嫌がらせは自分にとって損な行動なので、何も特別なメカニズムがなければ集団内に広がらない(=進化しない)はずであり、その存在は説明を要する⁵⁾。私は、同一個体が繰り返し相互作用し、嫌がらせ個体が条件次第で嫌がらせを行ったり行わなかったりする場合は、嫌がらせ行動を行う個体が集団内に広がりうることを明らかにした⁶⁾。

情報科学研究科に着任して

これまで私は、進化ゲーム理論を用いて生物の行動の進化について研究をしてきたが、2024年10月から大阪大学大学院情報科学研究科バイオ情報工学専攻バイオインスパイアードネットワークング講座に所属している。この講座でやるべきことは、生物は長い進化の歴史の中で効率的な仕組みを確立してきたわけであるが、その工夫を拝借することで、情報通信分野における改良を行うことであると理解している。例えば、アリは、すべての個体が働く必要はないし、逆に、すべての個体が働いてはいけない。しかるべき時に備えて、休んでいる必要がある。どのようにして必要な個体数が働いている状況を実現するのがよいだろうか？反応閾値モデルというモデルが提出されている⁷⁾。このモデルに従えば、休む時間を確保しながら、それでいて、必要な個体数が働いている状況を実現することができる。これはよくできた工夫と言えると考える。これを応用することで特定の Aerial base station、Reconfigurable Intelligent surface といった通信機器だけを働かせることなく、それでいながら作動している Aerial base station、Reconfigurable Intelligent surface と

いった通信機器の数を確保することが可能である。バイオインスパイアードされた研究で成果を出すためには、まず、このようにうまくいっている仕組みを見つけることから始まるだろう。

これまでの進化に関する研究の経験を生かして、この分野で活躍するためにはどうすればいいか、着任してからの三か月近く考えてきたが、難しさを感じている。どうして難しさを感じるのか、その理由を考えてみたが、以下の二点があげられると思う。一つ目は、進化を考える際に目をつける生物現象は、「うまく成功を収めている！」と膝をうつような現象ではなく、一見非適応的な行動だからである。バイオインスパイアードな研究をするためには、うまくいっている現象を生物模倣する必要があるが、進化研究で目をつける現象はそうではない。また、二つ目は、進化研究は究極要因を探るものであったからである。至近要因であれば、具体的なメカニズムであるため、応用することも容易かもしれないが、究極要因はそうではないため、少し難しいかもしれない。

しかし、その一方で、私には情報通信分野でもいさせる経験があると考えられる。以下で三つ述べる。一つ目の経験は、進化ゲーム理論を用いて研究してきた経験である。これまで私が研究で用いてきた進化ゲーム理論は相互作用を考えるツールであり、情報通信分野も相互作用がある。例えば、あるユーザが使用するデータ量が多いと、別のユーザが使用できるデータ量は少なくなる。ユーザ間はもちろん直接やり取りしているわけではないが、システムを介して相互作用をしている、という見方ができる。二つ目の経験は、どういう状況下で、個体最適と全体最適が一致するかについては、これまでの研究でよく調べてきた経験である。これまで私がテーマとしてきた利他行動は、しばしば、個体最適ではないが、全体最適な行動である。私はこれまで利他行動の進化について精力的に研究を進めてきたが、個体最適と全体最適が一致する状況を調べてきた、と言い換えることができる。全体最適と個体最適が一致しない、という状況は、情報通信分野でも見受けられる。ユーザが使うデータ量は、全体最適を考えれば控え目であった方がいいが、個体最適を考えれば控え目でない方がいい。もちろん、全体最適と個体最適を一致させないまま、ユーザが使えるデータ量を規制

することは可能である。しかし、使うデータ量が同じであったとしても、規制されたデータ量を使うのではなく、自分自らの意思で控えめにデータ量を使った方が、ユーザの気分がいいと考えられる。このように、全体最適と個体最適を一致させるご利益はある。三つ目の経験は、嫌がらせ行動の進化の研究を行ってきた経験である。個体と個体の相互作用に偏りがある状況を考える際、ネットワーク科学が有用であることは既に指摘されており、情報科学の研究であると考えられることができるだろう。実はネットワーク科学を用いた研究は進化生物学分野でも行われている。例えば、先行研究は、どのようなネットワークの際に、利他行動の進化が促進され、どのようなネットワークの際に、利他行動の進化が阻害されるのかを数理研究により明らかにした⁸⁾。利他行動が進化しやすいネットワークについて特定されてきたのである。嫌がらせもまた自分にとって損な行動なので、特別なメカニズムなしには進化しないと予期されるが、利他行動の進化がネットワーク構造次第では促進されたように、嫌がらせ行動の進化もまたネットワーク構造次第では促進されるかもしれない。これを調べることは進化生物学の前進につながる。また、嫌がらせ行動の進化を促進するネットワーク構造を特定することは単に進化生物学の前進のみならず、情報科学分野においても役立てられる可能性があると考えられる。その根拠はこうである。先行研究で利他行動の進化を促進するようなネットワーク構造が特定されているが、そのネットワーク構造が嫌がらせ行動の進化を阻害することが本研究で分かれば、そのようなネットワーク構造は、いいことづくめであり、この世の中に是非取り込むべき、ということになるだろう。他方、利他行動の進化を促進するようなネットワーク構造が嫌がらせ行動の進化もまた促進することが本研究で分かれば、そのようなネットワーク構造をいい点ばかりでなく、悪い点もある、ということになり、そのようなネットワーク構造設計に対しては慎重にならないといけな

いだろう。以上で三つの経験を述べた。今後、これまでの研究を通じて培った知見を活かしながら、そして、たまには、これまでの研究を通じて培った知見に縛られることなく、情報通信分野で活躍していきたい。

参考文献

- 1) Tinbergen, N., 1963. On aims and methods in ethology, *Zeitschrift für Tierpsychologie*, 20: 410-433.
- 2) Boyd, R., Richerson, P. J., 1988. The evolution of reciprocity in sizable groups. *Journal of Theoretical Biology*, 132, 337-356.
- 3) Nowak, M. A., Sasaki, A., Taylor, C., Fudenberg, D., 2004. Emergence of cooperation and evolutionary stability in finite populations. *Nature*, 428, 646-650.
- 4) Kurokawa, S., Ihara, Y., 2009. Emergence of cooperation in public goods games. *Proceedings of the Royal Society B*, 276, 1379-1384.
- 5) Hamilton, W. D., 1970. Selfish and spiteful behaviour in an evolutionary model. *Nature*, 228, 1218-1220.
- 6) Kurokawa, S., 2024. Successful conditional altruistic strategies and successful conditional spiteful strategies are different. *Animal Behaviour*. 209, 143-153.
- 7) Bonabeau, E., Theraulaz, G., Deneubourg, J. L., 1996. Quantitative study of the fixed threshold model for the regulation of division of labour in insect societies, *Proceedings of the Royal Society B*, 263, 1376, 1565-1569.
- 8) Ohtsuki, H., Hauert, C., Lieberman, E., Nowak, M. A., 2006. A simple rule for evolution of cooperation on graphs and social networks, *Nature*, 441, 502-505.