

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：12702

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2013～2017

課題番号：25118006

研究課題名(和文)共感性の適応理論

研究課題名(英文)Adaptation Theory of Empathy

研究代表者

大槻 久(Ohtsuki, Hisashi)

総合研究大学院大学・先導科学研究科・講師

研究者番号：50517802

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 49,340,000円

研究成果の概要(和文)：個体から個体へと恐怖や痛み等の負の情動が伝わる「情動伝染」が進化する条件は、当該個体間が似通った環境を共有する場合であり、個体間の血縁の大小とは関係が薄いことを見出した。また情動伝染の進化はグループサイズの増大に先んじて起きたという理論的予測を得た。「他者に協力されたから自分も第三者に協力する」という正の共感性に基づく協力は、そのような情動状態が長続きしないいわば「冷めやすい共感性」である時に限って適応進化可能であることが分かった。またヒトの持つ同調性は、時として集合知の劣化をもたらすが、向社会性を促進し得ることを見出した。

研究成果の概要(英文)：Negative emotional contagion, which means the contagion of negative emotions such as fear or pain between individuals, can evolve by natural selection if those individuals share similar environments. In contrast, the effect of their genetic similarity on its evolution is marginal. I have also obtained a theoretical prediction that the evolution of emotional contagion should have occurred before the expansion of group size in group-living animals. Reciprocal cooperation based on positive empathy, such as "I will cooperate with a third party because I received help from someone", can evolve only if such a positive emotional state lasts for a limited period of time. Human conformity sometimes undermines the quality of collective intelligence of a group, but it can promote cooperation.

研究分野：数理生物学

キーワード：共感性 進化 数理生物学 進化ゲーム 間接互惠性

1. 研究開始当初の背景

(1) 他個体の情動反応を自らも引き受ける「情動伝染」(emotional contagion)、自他の情動状態が区別可能で、それに応じて情動や行動の変化を起こす「共感」(empathy)、他者の情動状態を認知的に理解する「同情」(sympathy)など、生物の持つ共感性には複数のレベルが存在すると考えられる。これらの共感性機能はヒトを含む複数の生物種でその存在が報告されている。

(2) 一方で、共感性を持つことが生物の適応度にどのような影響を与え適応進化可能であるかについては、これまで verbal な議論に留まり、漠然とした「~であろう」という予測がなされて来たに過ぎなかった。特に共感性がもたらす負の側面、例えば共感性機能を維持するために必要な一連の発生・生理的コストや、他者の情動を不必要に引き受けることに伴う進化的な機会損失コスト等、はこれらの議論の中で主だって考慮されて来なかった。したがって、理論モデルによる formal な予測が必要と考えられる。

(3) 理論的予測は何も現実を追認するために行われるのではない。共感性が進化するために必要な種々の生態学的条件や、進化の道筋(複数形質間の進化の順序)を明らかにすることで、どの分類群、どの系統で共感性が進化しやすいかを明らかに出来、系統学的観点から共感性の進化的起源に迫ることができると考えられる。

(4) ヒトはしばしば他種との比較において、その高い向社会性で特徴づけられる。他者への同調、他者の視点取得、心の理論といった心的機能は共感性に関連が深く、同時にヒトの向社会性を支える基盤となっている可能性が高い。したがって共感性がヒトの社会性の進化にどのように影響したかを理論的に明らかにすることで、ヒトの社会性の本質的理解に貢献できると考えられる。

2. 研究の目的

そこで共感性の適応進化の道筋と、共感性がヒトの向社会性の進化に及ぼす影響を多角的に理解するため、以下の4つの目標を設定した。

(1) 情動伝染が適応的となる生態学的条件の解明：情動伝染がどのような条件下で進化するかを明らかにする。具体的な生態学的条件としては、情動伝染機能を備えるための発生・進化的コストの大小、環境から得られる情報のノイズの大小、環境(例えば捕食者の接近)に適切に対応することで得られる利益の大小、群れサイズ、群れ内の血縁度、集団構造、などの影響を調べる。

(2) ヒトの共感性の適応的基盤の解明：負の

情動伝染にとどまらないヒトの共感性についてその適応的基盤の理論的検討を行う。具体的には、正の情動伝染(他者の正の情動から正の情動を得る)の進化条件を検討する。また同調性をヒトの持つ共感性の一種と捉え、同調伝達の諸性質、同調伝達の進化条件、同調による集合知の劣化等について理論的に検討する。

(3) 同調性が向社会性を進化させるメカニズムの解明：ヒトの同調性がどのように向社会性の進化に影響を与えるかを、社会的ジレンマを例に取り理論的に検討する。

(4) 他者の意図推論による社会的ジレンマ解決の可能性の探求：囚人のジレンマに代表される社会的ジレンマでは、他者の協力・非協力の意図を正確に理解しそれに対して最適に振る舞うことで、高い協調性と効率的な裏切り者排除の両者を同時に実現できると考えられる。そこで他者の意図推論の能力がどのように社会的ジレンマの解決に貢献するかを理論的に探る。

3. 研究の方法

(1) 情動伝染の能力を持つ個体と持たない個体を想定した集団遺伝学モデルを構築し、情動伝染をもたらす遺伝子が集団中に広まる条件を、各種生態学的条件をパラメータとして解析する。

(2) 正の共感性の進化に関し、間接互惠性の進化モデルを構築し、他者から受けた協力を第三者に互恵的に返す upstream reciprocity の進化を進化的安定性解析によって調べる。また同調伝達に関しては、集団の空間構造が同調伝達に与える影響を調べると共に、他者の意思決定を参照しそれに同調して意思決定する個体からなる集団から生み出される集合知の振る舞いを理論的に調べる。さらに協力行動と罰行動の分業の進化条件について調べる。

(3) 他者に同調するエージェントを想定し、社会的ジレンマの意思決定において同調行動が協力と非協力の進化動学にどのような影響を与えるかを進化ゲーム理論の手法を用いて調べる。

(4) まず様々な二者間の様々な社会的ジレンマについてその基礎的性質を調べる。その後、他者の意思決定がマルコフ決定過程に従っていると推定する学習エージェント同士が、社会的ジレンマにおいて協力を達成できるか否かを、学習モデル、最適意思決定モデルを組み合わせて数理的に調べる。

4. 研究成果

(1) 情動伝染が適応的となる生態学的条件の解明

二個体間の情動伝染の進化について調べた（発表論文）。具体的には他者がもたらす情報を全く参照しない「独立反応戦略」、他者の行動をそのままコピーする「行動模倣戦略」、他者の情動をコピーしその情動に基づいて行動する「情動伝染戦略」の三戦略を想定し、どのような条件下でどの戦略が最適となるかを調べた。

その結果、情動伝染戦略の進化条件は、(i) 他者と自分の環境類似度が中～高程度であること（例：自分と他者が同一の危険を共有している）、(ii) 他者の行動に関する環境ノイズが大きいこと（例：他者の取った行動を正確に認知はできない）、(iii) 他者が極端な行動を取った時のみ情動伝染が働くこと（例：他者の平常時の行動にはいちいち反応しない）であることが分かった。

特に結果(i)は、一緒に育てられた仲間の情動は伝染するが、見知らぬ他者の情動は伝染しないというマウスの実証研究の知見とも合致する。本研究の成果から、情動伝染は個体間の環境類似性が鍵となるという「環境類似仮説」を提唱するに至った。

n 個体からなるグループにおける情動伝染戦略の優位性について理論モデルを構築し検討した（発表論文）。具体的には集団は n 個体からなる複数のグループに分かれていると仮定し、前項目で述べた「独立反応戦略」と「情動伝染戦略」の優位性について、進化的安定性解析を用いて調べた。

その結果、(i) 「情動伝染戦略」が固定した集団には、 n の値に関わらず「独立反応戦略」個体は進化的に侵入できないこと、(ii) 「独立反応戦略」が固定した集団には、 n の値が小さい時に限って「情動伝染戦略」が進化的に侵入できること、(iii) これらの条件にグループ内血縁度 R の大小はあまり影響を与えないこと、の三点を見出した。

結果(i)、(ii)は、情動伝染の進化がグループサイズの増大に先んじて起きたことを強く示唆するものである。また、家禽の集団飼育において情動伝染を介したパニックによる圧死がしばしば報告されているが、これは野生下と飼育下の集団サイズが余りに異なるために生じる副作用（つまり、飼育下でも野生下で得た適応が発揮されるために情動伝染が必要以上に起きてしまう）であると、モデルの結果から解釈できる。また、結果(iii)は、遺伝的類似性ではなく、先に述べた環境類似性こそが情動伝染の進化に重要であることを再度示したものである。

(2) ヒトの共感性の適応的基盤の解明

間接互惠性には「他者に協力した人が第三者から協力を得る」という downstream reciprocity(DR)と、「他者に協力された人が第三者に協力をする」という upstream reciprocity(UR)の二つのモードがあるが、前者は認知的共感に、後者は情動的共感に関

わっているという報告がある。先行研究ではUR 単独の進化条件が極めて限定的であることが分かっている。そこでDRとURを組み合わせる戦略の進化条件を進化ゲームモデルを構築して調べた（論文準備中）。

その結果、社会規範を適切に選べばURをその一部として含む間接互惠戦略が進化可能であることが分かった。その条件は、(i) $b/c > 2$ が成り立つこと（ただし b, c はそれぞれ協力の利益およびコスト）、および(ii) URが発動するのは、他者に協力された直後に限ること（つまり正の共感性は「冷めやすい」共感性でなくてはならない）、の二つであることを見出した。

複数の個体が独立に意思決定を行うと、その集約結果は優れたパフォーマンスを持つことは「集合知」として知られている。しかし他者の意思決定を参照することにより、自分ではコストを払わずに情報を得ることができるので、これは一種の社会ジレンマを生み出し、他者に同調した意思決定は集合知の劣化をもたらす。

そこで同調的意思決定が集合知をどの程度劣化させるかを定量的に見積もり、その近似式を得た（発表論文）。

従来モデルは社会的ジレンマにおいて協力しなかった者が罰を受けると仮定していたが、この仮定の下では「協力はするが罰を行使しない」二次のフリーライダーが出現するという問題点を持つ。しかし「協力者」かつ「罰行使者」となる為には二重のコストを払わねばならず、しかもその行為の異なる特性から心理的コストも存在するのではないかと考えた。

そこで「協力者」と「罰行使者」の分業によって協力と罰が集団中に維持される可能性を進化ゲーム理論モデルを通じて探った（発表論文）。

その結果、(i) 罰行使コストは協力コストよりも大きい、(ii) 集団に空間構造が存在する、(iii) 戦略に突然変異が小さな確率で起きる、の三条件が揃った時に、協力と罰が集団に分業の形で安定的に維持されることを発見した。

(3) 同調性が向社会性を進化させるメカニズムの解明

繰り返し囚人のジレンマゲームのように、他者の前回の行動を自分の現在の行動に反映させる戦略は互惠性の成立の鍵となる。繰り返しが存在しない場合でも、事前の意思決定において他者への同調性があれば協力が進化するのではないか。この点を調べるために二者および三者の公共財ゲームを例に取り、無限集団におけるレプリケーター動学、および有限集団における確率進化動学を調べた（発表論文）。

その結果、同調性を持つ戦略が存在しない

場合には、無条件非協力が唯一の安定戦略になるのとは対照的に、同調性を持つ戦略の存在下では、無条件協力、条件付き協力、無条件非協力の三者が広いパラメータ条件下で安定共存することが分かった。すなわち同調性は協力を促進する。

(4) 他者の意図推論による社会的ジレンマ解決の可能性の探求

他者の内的状態の推移モデルとして入出力マルコフモデルを想定する。そしてこのマルコフモデルのパラメータを推定することで、他者の意図推論を行うと考える。そこで最も理想的な条件、つまりこのパラメータが正しく推定できている条件を想定し、この条件下で Bellman 方程式に従って動的最適化を行うエージェントの行動様式を調べた(発表論文)。

その結果、相手の事を TFT (しっぺ返し戦略)に従っている個体であると認識している場合、広いパラメータ範囲で学習エージェントの最適行動は TFT とは異なる行動ルールになることが分かった。この事実は、行動と信念が consistent にならないこと、つまり学習エージェント同士の協力は TFT では達成できないことを示している。

他方、相手の事を WSLs (Win-stay Lose-shift 戦略)に従っている個体であると認識している場合、学習エージェントの最適行動もまた WSLs になることが分かった。すなわち WSLs は学習による均衡を構成できることが分かった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 23 件)

Ohtsuki H. Evolutionary dynamics of coordinated cooperation. (査読有) *Front Ecol Evol.* (2018) 6:62, DOI:10.3389/fevo.2018.00062.

Nakahashi W, Ohtsuki H. Evolution of emotional contagion in group-living animals. (査読有) *J Theor Biol.* (2018) 440:12-20, DOI:10.1016/j.jtbi.2017.12.015.

Oya G, Ohtsuki H. Stable polymorphism of cooperators and punishers in a public goods game. (査読有) *J Theor Biol.* (2017) 419:243-253, DOI:10.1016/j.jtbi.2016.11.012.

Nakamura M, Ohtsuki H. Optimal decision rules in repeated games where players infer an opponent's mind via simplified belief calculation. (査読有) *Games.* (2016) 7(3):19, DOI:10.3390/g7030019.

Sekiguchi T, Ohtsuki H. Effective group size of majority vote accuracy in sequential decision-making. (査読有) *Jpn J Ind Appl Math.* (2015) 32(3):595-614, DOI:10.1007/s13160-015-0192-6.

Nakahashi W, Ohtsuki H. When is emotional contagion adaptive? (査読有) *J Theor Biol.* (2015) 380:480-488, DOI:10.1016/j.jtbi.2015.06.014.

[学会発表](計 18 件)

Ohtsuki H., Reeves T, Fukui S. Public goods cooperation by asymmetric players. The international society for ecological modelling global conference (ISEM) 2017, 2017 年

Ohtsuki H. Reputation effects in Public and Private interactions. 10th European Conference on Mathematical & Theoretical Biology and SMB Annual Meeting (ECMTB 2016), 2016 年

Ohtsuki H. Evolution of Coordinated Cooperation. 2015 Joint Meeting of The 5th China-Japan-Korea Colloquium on Mathematical Biology and The Japanese Society for Mathematical Biology, 2015 年

Oya G, Ohtsuki H. Stable polymorphism of cooperators and punishers in a public goods game. 2015 Joint Meeting of The 5th China-Japan-Korea Colloquium on Mathematical Biology and The Japanese Society for Mathematical Biology, 2015 年

大槻 久、中橋 涉 情動伝染の進化条件、第 7 回日本人間行動進化学会、2014 年

[その他]

日本人間行動進化学会第 7 回大会 (2014.11.29~30)において、口頭セッション 4・5 を共感性領域の企画セッションとして開催した。

6. 研究組織

(1)研究代表者

大槻 久 (OHTSUKI, Hisashi)
総合研究大学院大学・先端科学研究科・講師
研究者番号: 5 0 5 1 7 8 0 2

(3)連携研究者

中丸 麻由子 (NAKAMARU, Mayuko)
東京工業大学・環境・社会理工学院・准教授
研究者番号: 7 0 3 2 4 3 3 2