

原著論文

地域コミュニティ保守行動に関する進化論的検討：階層淘汰論に基づく利他的行動の創発に関する理論的分析

An evolutionary study of pro-social behavior in a local community: A theoretical analysis of emergence of altruistic behavior based upon multilevel selection

羽鳥剛史（東京工業大学大学院理工学研究科）

藤井聡（東京工業大学大学院理工学研究科）

Tsuyoshi HATORI (Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology)

Satoshi FUJII (Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology)

The regional subsistence can be improved if and only if at least one local resident exhibits altruistic and cooperative behavior. This is known as the volunteer's dilemma. This study aimed to examine social conditions that encourage such pro-social behavior in a local community. For this purpose, a mechanism creating altruistic behavior is modeled which is based upon the idea of multilevel selection in the evolutionary theory. We present a dynamic model including both group selection and individual selection. We derive the analytical solutions from the model in order to investigate the conditions under which altruistic behavior can emerge. The model indicates that group selection could be an important force to encourage altruistic behavior. Finally, based on the analysis, measures which promote voluntary pro-social behavior are discussed.

キーワード

ボランティア・ジレンマ、利他的動機、進化心理学、階層淘汰、社会的行動

volunteer's dilemma, altruism, evolutionary psychology, multilevel selection, pro-social behavior

問 題

まちづくりや地域づくり等、地域の固有性が重要となる公共事業においては、地域コミュニティ（あるいは、地域共同体）が重要な役割を担う。しかしながら、まちづくりや地域づくりへの参画の程度には、個人差が存在しているのが実情であり、“地域の問題に熱意をもって取り組む人”と“地域の問題に無関心な人”が混在していることが常態であろう。事実、地域における公共事業の成否は、ごく一部、あるいは場合によっては一名の“地域の問題に熱意をもって取り組む人”の存在にかかっていることが経験的に知られている。例えば、国土交通省は、様々な地域の観光振興に尽力した人々を選定する“‘地域カリスマ百選’選定委員会”を平成14年～16年度に設定し、その中で“100人のカリスマ”を選定している（国土交通省，2005）。この様に、国土交通省にて上記の委員会が開設されたという事実は、地域づくり、まちづくり等において地域の問題に積極的に貢献する“カリスマ”の存在が成功の鍵となっていることを経験的に示唆していると言えよう。

以上の経験的な知見が示唆するように、一名ないしは少人数による地域コミュニティに対する献身的な振る舞いは、当該地域の存続を支える重要な要件であり、この意味において、“地域コミュニティ保守行動”と呼ぶに相応しいものと考えられる。それでは、こうした“地域コミュニティ保守行動”はどのような状況において現れるのだろうか。地域の公共事業の成否がこうした数名及び一名による地域コミュニティに対する献身的な振る舞いにかかっているとするとするならば、そうした人々が出現する“社会的条件”を明らかにすることは、地域計画を立案する上で重要な基礎的知見となるものと考えられる。

このように、一人、ないしは一部の人々が協力的に振る舞うことで、社会全体（この場合には地域全体）の利益が増進する一方で、そうした協力的な人々が一人もいなければ、結局は公共利益の増進が見込めない、というような状況は、数理的なゲーム理論の枠組みの中では一般に“ボランティア・ジレンマ”と呼ばれている（Diekmann, 1985; 藤井, 2003）¹。このようなボランティア・ジレンマを解消する上では、個人の利他的動機が重要な役割を果たすものと考えられる（藤井, 2003）。すなわち、多大な利己的損失を被ることを一人でも引き受け、社会に献身的に振舞おうとする利他的な動機を有する人々の存在が、ボランティア・ジレンマ状況において社会全体（地域全体）の厚生水準を高める上で、極めて重要であると考えられる。

無論、現実の地域コミュニティ保守行動は、個々人の多様な心的動機に起因し得るもの

であり、利他的動機もそうした多様な動機の一つと言えよう²。ただし、地域社会において、少数もしくは一名の個人による地域コミュニティ保守行動がより根強く定着する上では、そうした様々な心的動機の中でも、特に、“仮に、地域コミュニティ保守行動によって、大幅な利己的損失を被らざるを得ないとしても、そうした利己的損失を厭わず地域コミュニティの存続のために尽力しよう”とする利他的動機が醸成されることが本質的に重要な課題の一つであることは論をまたない。このような問題意識に基づき、本研究では、以上に述べた、地域コミュニティ保守行動の社会的条件について理論的に検討するにあたり、ボランティア・ジレンマにおける個人の“利他的動機”に着目することとした。

以上の問題意識の下、藤井・松山（2004, 2005）は、進化心理学的アプローチに基づいて、このような地域コミュニティ保守行動を駆動する利他的動機が醸成されるための社会的条件について理論的な検討を加えている。その一連の研究では、ボランティア・ジレンマ状況において、どのような社会的環境の中で“利他的行動者”が進化論的に創発するかどうかについて、近年の進化生物学の中で注目されている階層淘汰理論（Sober & Wilson, 1998）を考慮したモデル分析によって検討している。ただし、そこで援用されているモデルは数値シミュレーションに留まるものであり、それ故、そのモデルの分析結果も数値実験上の一つのサンプルにしか過ぎない。このような数値実験は、利他的行動が創発するための社会的条件を同定する上で一定の有効性を有しているものの、数値実験という方法論の性質上、モデルのパラメータ設定の妥当性及びそこで得られた数値解の一般性を十分に検証することが難しいという問題を内在している（廣瀬・小木・田村, 2002）。そのため、こうした分析を通じて得られた知見の理論的妥当性を完全に保証することもまた困難であると言わざるを得ない。この問題を解消し、利他的行動の起源・条件に関して、より厳密な理論的検討を行う上では、利他的行動が創発する基本的なメカニズムを理論的に明らかにすることが不可欠であると考えられる。については本研究では、上記のモデル分析と同様の理論的な考え方に基づいて構築した数理モデルを、“解析的”に解くこととした。この様に解析的な分析手法を用いることにより、利他的行動の創発条件について論理的に検討することができ、ひいては、パラメータの設定や解の導出に付随する恣意性の問題を排除できるという意味において、“より一般的な”知見を得ることが可能となるものと期待される。

進化心理学的アプローチ

20世紀後半から、生物学や人類学だけでなく、心理学や経済学等の社会科学の中で進化論的な視点に基づく研究が盛んに進められ（Cosmides & Tooby, 1994; Maynard Smith,

1982; Nelson & Winter, 1982; Tooby & Cosmides, 1989)、その中で、個人の負担を犠牲にした利他的行動がいかんして醸成されるかについて検討した研究が数多く蓄積されてきている。ここで、利他的行動とは、“自分の利益を犠牲にしてでも集団内の他者の利益の増進を図る行動”と定義される（長谷川・長谷川，2000）。このような利他的行動に対して、その発生起源を説明する進化メカニズムがいくつか提案されている。第1に、血縁淘汰(kin selection)が挙げられる(Hamilton, 1964a, 1964b)。すなわち、血縁関係にある個体においては、たとえ自分の利益を犠牲にしたとしても、相手の利益を高めることによって、お互いに共通の遺伝子が増える可能性は高くなる。そのため、血縁関係にある個体間では利他的行動が進化し得ることが指摘されている。第2に、互惠的利他行動(reciprocal altruism)が提案されている(Trivers, 1971)。これは、繰り返し付き合いのある個体間においては、自分が利他的に振る舞うことによって相手から返報を享受することが期待でき、その結果、両個体とも利他的行動を採用することによって、長期的には高い適応度を維持することが可能となる、という原理に基づくものである。

これら血縁淘汰や互惠的利他行動に関する研究の意義は、自己の利益を犠牲にするような利他的行動が、共通の血縁関係、あるいは長期的な相互依存関係においては、その個体にとって適応上有利な行動になり得ることを理論的に明らかにした点にある。地域コミュニティにおいても、特定の血縁関係や互惠的な関係の中で、このような利他的行動に基づく協力関係が形成される場合も少なくない。しかし、そうした協力関係に基づいて、全員が公平に労力を負担することによって地域づくりを成功に導くことは現実的に難しく、前述の経験的知見が示唆するように、一人あるいは少数の個人が地域のために熱心に取り組むことが、地域コミュニティ保守の現実的形態であるものと考えられる。この点で、本研究が想定する地域コミュニティ保守行動は、一人あるいは少数の個人のみならず多大な犠牲を強いるものであり、仮に長期的な観点から見ても、個人的損失の負担についての非対称性(あるいは、不公平性)が極めて高いものと言えよう。地域の問題に熱心に取り組む“カリスマ”は、そうした負担を一人で引き受け、地域に対して献身的に振る舞っていると考えられる。一方、上記の進化メカニズムは、比較的対称的な(公平な)個人的負担に基づく協力関係を基盤としており、それ故、そうした進化メカニズムだけでは、なぜ少数ないしは一名の個人が、大幅な利己的損失とその不公平な負担を厭わず、利他的に振舞うのかを説明することは難しいものと考えられる。このような利他的行動の発生起源を説明する上では、個人の損得だけに還元しない進化メカニズムを検討することの意義は決して皆無で

はないと推察される次第である。

階層淘汰論

以上の問題意識に基づいて、本研究では、進化理論の先端領域である進化生物学において近年特に注目されている“階層淘汰論 (multilevel selection)”に着目する。ここで、階層淘汰論とは、一個の遺伝子の生存確率はその遺伝子が含まれている個体の生存率とその個体が属する集団の生存率に依存すると考える進化論である。すなわち、階層淘汰論によれば、遺伝子には様々な階層で淘汰圧が作用する。その階層としては、大きく集団内の個人淘汰 (individual selection) と集団間の集団淘汰 (group selection) という2つの階層に分けられる。ここで、個人淘汰論とは、進化プロセスにおいて環境に適応できずに淘汰されるか、あるいは生き残るかという“単位”が“個体”であるのに対して、集団淘汰論とは、淘汰の単位が“集団”であると考えられる進化論である。

ただし、従来の進化生物学においては、“個人淘汰論は是だが、集団淘汰論は避けなければならない”という風潮（あるいは、ドグマ）が支配的であったという事が Sober & Wilson (1998) によって指摘されている。この風潮は、ダーウィンの進化論の基本的な考え方が十分に社会的に理解されていなかった 19 世紀後半や 20 世紀初頭に、社会問題を安易に集団淘汰論で説明しようとした際に生じた種々の誤謬に対する反省によって生じたものであり、ドーキンスの“利己的遺伝子” (Dawkins, 1976) の発刊以来、より強固なものとなったことも、同じく Sober & Wilson によって指摘されている。ところが、20 世紀の後半から進化生物学において上述の風潮は変わりつつあり、“階層淘汰論”が大きな注目を集めるに至っている。Sober & Wilson (1998) はこの階層淘汰論に基づいて、利他的行動の起源の少なくとも一つは階層淘汰に含まれる“集団淘汰”であると指摘している。すなわち、集団淘汰が存在するからこそ、“自分の利益（すなわち、生き残る確率）を犠牲にしても集団内の他者の利益の増進を図る”という自己犠牲的な利他的行動が、進化プロセスの中で“創発”する可能性が存在するのである。ここで、“創発”とは“ある階層における要素どうしの相互作用が、他の階層における異なるタイプの要素を生じさせる”現象と定義される (Gilbert & Troitzsch, 1999)。上述の利他的行動の創発は、集団レベルの集団間の淘汰によって、集団内部の利他的行動が生じることを意味している。Sober & Wilson は、こうした利他的行動を特に“進化論的利他的行動”と呼称し、こうした進化論的利他的行動は個人淘汰論では説明できず、かつ、少なくとも部分的にでも集団淘汰論を許容する階層淘汰論でなければ説明することが著しく困難である、という点を指摘している。

ここでもしも Sober & Wilson の指摘に一定の妥当性があるとするのなら、集団淘汰のメカニズムを一切考慮しないような進化論的検討では社会科学における重大な関心事の一つである“利他的行動”の起源・条件について十分に論理的な理解を深めることができない、という危険性が考えられることとなろう。本稿は、この問題意識の下、進化論的な立場から、利他的行動の創発条件に検討を加えようとするものである。

なお、藤井・松山（2004, 2005）もこうした問題意識に基づいた分析を行っているが、そこで用いられている手法は、乱数を用いた数値シミュレーションアプローチであり、それ故、モデルの解が数値的に求められているにしか過ぎない。それ故、本研究では、解析的なアプローチに基づいて、利他的行動の創発における集団淘汰の役割について、より数理的に厳密な検討を加えることとした。

集団淘汰メカニズム

階層淘汰論に基づく進化モデルを構築する前に、本稿において想定される集団淘汰過程について説明する。Henrich（2004）は、集団淘汰はその対象とする問題に応じてさまざまな形態をとり得るものの、大きく 1）人口増加（demographic swamping）、2）集団間の競争（intergroup competition）、3）功績の伝播（原文では、prestige-biased selection）の 3 つの形態に分かれることを指摘している。第 1 の人口増加に基づく集団淘汰は、高い適応価を有している集団において、その人口が増大する現象を表している。すなわち、集団内の人口の増減に応じて、その集団の規模が変化する状況を“淘汰”と捉えている。第 2 の集団間の競争に基づく集団淘汰は、適応価の低い集団が他の集団から搾取された結果、集団内の個人が分散し、その集団が消滅する状況を表している。第 3 の功績の伝播に基づく集団淘汰は、より適応価の高い集団の諸特性（集団内の規範や文化等）が集団間で伝播する状況を表している。このような功績の伝播に基づく集団淘汰は、Dawkins（1989）によって提唱された“ミーム”の概念と整合的であると考えられる。すなわち、進化過程における複製・淘汰の単位を“遺伝子”に限定せず、“文化”、“考え”、“知識”等、個人及び集団の中で蓄積されている多様な情報を表す“ミーム”もまた複製・淘汰を通じて、個人間、集団間に伝播するという考え方である。そして、このようなミームの概念を導入することによって、多様な社会現象を説明することが試みられているのである。本稿では、個々の地域内の地域コミュニティ保守行動に依存して、異なる地域間で集団淘汰が作用することを仮定するが、必ずしも第 1、第 2 の解釈のように、地域コミュニティの人口増加や消滅として集団淘汰を捉える必要はない。もちろん、これらの解釈のように、地域コミュニ

ティ保守行動がなされないような地域が人口の減少や拡散を通じて消滅する可能性も存在するが、このような淘汰過程は通常100年から1000年のスケールで生じる現象であることが報告されている (Soltis, Boyd, & Richerson, 1995)。本稿ではより短い時間スケールを想定しており、第3の功績の伝播として集団淘汰を想定することとした。

方 法

以下では、本研究で提案する理論モデルを定式化する。なお、ここで提示する数理モデルは現象の抽象表現であり、したがって、必ずしも“地域コミュニティ保守行動”にしか妥当しないものとは言い難い。ただし、以下の定式化は、“地域コミュニティ保守行動”を想定しつつ、その背後の因果プロセスを論理的に検討し、それを抽象的な数理モデルの形として定式化したものである。なお、本モデルと地域コミュニティ保守行動との関連については、“考察”にてさらに論ずることとしたい。

モデル化の前提条件

“ボランティア・ジレンマ問題” N 人の個人から構成される集団が複数存在する状況を想定しよう。集団の集合を G 、ある集団 $g \in G$ に属する個人の集合を $N_g = \{1, \dots, l_g, \dots, N\}$ で表す。ここで、各集団は1つの地域コミュニティを表すものと解釈できる。各個人の寿命は全員共通であり、それを“1世代”と呼ぶことにしよう。ただし、個人の寿命はその個人の“生物学的な寿命”とは異なり、本人が自分の行動規範を変更しないで保持し続ける期間と解釈できる。また、集団を構成する各個人は、生涯の行動を規定する“遺伝子”を有すると仮定する。ここで、個人の遺伝子は、“利他遺伝子”と“庶民遺伝子”の2つのいずれかに分類されると考える。利他遺伝子を有する個人（以下、利他的個人、あるいは利他的行動者と呼ぶ）は、自分の個人的な利得を犠牲にしつつも、集団の利得の増進に寄与するように“プログラム”されていると考える。そこで、利他的個人は、一生涯で c の費用 ($c > 0$) を拠出するが、集団内の全員に a の利益 ($a > 0$) をもたらすと仮定する。本稿では、利他的個人によってもたらされる集団の利益の具体的な内容を特定化しないが、例えば、地域の経済的発展、文化的豊かさ、及び地域における平均的な生活水準等が該当しよう。集団の利益はこのような“地域の活力”を総称したものと考えられる。そして、利他的個人が負担する費用は、その個人の生活水準の低下等、利他的行動による機会費用を表している。このような利他的行動は、本稿が対象とする自己犠牲的な地域コミュニティ保守行動を表していると考えられる。また、利他遺伝子は、このような利他的行動を促

進めるような当該個人の行動規範や心理的動機を表現しているものと解釈できる。一方、庶民遺伝子を有する個人（以下、庶民と呼ぶ）は、自分で利他的な行動を行うようには“プログラム”されていないが、利他的行動者の恩恵を被ることが出来る。庶民遺伝子は、このような庶民としての行動を規定するような行動規範や心理的動機を表している。

以上のことより、利他的個人が i 人存在する集団 $g \in G$ において ($0 \leq i \leq N$)、利他的個人及び庶民 $l, m \in N_g$ が一生涯で得られる利得はそれぞれ

$$u_l^A = -c + ia \quad (1)$$

$$u_m^D = ia \quad (2)$$

で表現される。これより、庶民の方が利他的個人よりも高い利得を得ることが出来る。また、集団の利得は、個人の利得の総和で表現され、

$$U_g = \sum_{l \in N_g} u_l^s \quad (3)$$

と表される。ただし、上式 s は各個人の遺伝子を表しており、利他的個人の場合、 $s=A$ 、庶民の場合、 $s=D$ となる。今、集団内の利他的個人が i 人であるので、上式(3)は

$$U_g = i(Na - c) \quad (4)$$

に帰着する。ここで、 $Na > c > a$ が成立すると仮定する。この仮定は、その人数に関わらず利他的個人が存在する方が集団の利得が高くなるものの、当該個人にとっては利他的行動を採ることによって不利益を被ることを保証する条件を表している。

このように、本稿の分析枠組みにおいて、利他的個人は自分の所属する集団に対して多大な利益をもたらすが、その一方で、当該個人にとって多大な犠牲を強いる結果となる。すなわち、上記の利得構造は、冒頭で述べたボランティア・ジレンマ問題を表している。なお、本研究で提案する動学的モデルにおいては、以上の利得構造は明示的には定式化しない。ただし、以下に述べる階層淘汰メカニズムを記述する動学的モデルは、以上に述べた個人及び集団の利得構造の存在を前提として、定式化するものである。

階層淘汰と突然変異 このような社会における利他的行動者数の推移、すなわち、集団内の遺伝子頻度の時間変化は、個人淘汰と集団淘汰の2つの淘汰メカニズム、さらに突然変異によって規定されると想定する。第1に、各集団内において、個体レベルの淘汰が作用する。すなわち、個人が生涯をかけて取得した利得、つまり“適応価”に応じて、各個人の有する遺伝子が次世代に継承されるかどうか決定される。ここで、式(1)-(2)より、利他遺伝子を有する個人は、庶民遺伝子を有する個人に比べて、その適応価は低くなる。この結果、個人淘汰によって利他遺伝子は駆逐される傾向にある。

第2に、集団間において、集団レベルの淘汰が作用する。すなわち、各集団がその世代に取得した利得、つまり集団の“適応価”に応じて、集団が次世代において存続するか否かが決定される。ここで、式(4)より、集団の適応価は、その集団内に存在する利他的行動者数に依存する。したがって、利他的行動者が多数存在する集団は、強固な地域コミュニティ保守行動を通じて、将来にわたって存続する傾向が高くなる。その結果、適合度の高い集団は社会の中で高い割合を占めるようになるものと考えられる。

最後に、各個人は自分の生涯をはじめる段階において、突然変異によって、先代とは異なる遺伝子を継承する場合が小さな確率で生起すると仮定する。このような突然変異として、利他遺伝子が生起する場合と庶民遺伝子が生起する場合の2つが考えられる。ただし、突然変異によって、庶民遺伝子が発生するという仮定を置かなくとも、もともと集団内においては庶民遺伝子を持った個体が常に増加する傾向にあり、そうした仮定を設定したとしても、分析結果に本質的な影響を及ぼさない。そのため、以下では突然変異によって、利他遺伝子のみが発生すると仮定する。このような突然変異はそれ自体“偶発的”な現象であるが、このようにして出現した利他的個人が集団内に定着するか否かは、個人淘汰や集団淘汰の強度に依存して“必然的”に決まるものと考えられる。

なお、前述したように、以上の淘汰現象は、必ずしも個々の個体及び集団が“死滅”することを意味する必要はない。むしろ、本研究では、このような淘汰現象を、個人及び集団の特性(“ミーム”)が、学習及び模倣を通じて、個人間、集団間で伝播する状況を表しているものと解釈する(Brodie, 1996; Dawkins, 1976)。すなわち、個人淘汰は、地域において各個人がより生活水準の高い他者の行動特性を学習する現象を、一方、集団淘汰は、集団間の社会的学習を通じて、集団の特質が集団間で伝播する状況を表していると考えられる。

進化心理シミュレーションによる分析 藤井・松山(2004, 2005)は、上記の前提条件に基づいて、進化心理シミュレーション分析を実施し、ボランティア・ジレンマ状況において集団淘汰が存在する場合に利他的行動が生起するか否かを数値実験的に分析している。これらのシミュレーション分析の詳細については、藤井・松山(2004, 2005)の出版に譲るものとし、ここでは、藤井・松山(2005)のシミュレーション分析の結果の概略を紹介することにしよう。Figure 1は、本シミュレーションにおける集団内の平均的な利他的行動者数の推移を表したものである。ここで、縦軸は各集団内の平均利他的行動者数を表し、横軸は集団淘汰の強度(集団淘汰圧)を0から1で指標化したものである。図から観察されるように、集団淘汰圧が強くなるに伴って、利他的行動者数が増大しているこ

Figure 1

とが分かる。これは、集団淘汰圧と利他的行動者の出現との間に因果関係が存在することを暗示する計算結果であると考えられる。

このように、藤井・松山（2004, 2005）の進化心理シミュレーション分析を通じて、利他的行動の発生起源を集団淘汰によって説明できることを示唆する知見が得られている。しかしながら、既に述べたように、上記のシミュレーション分析は、数値実験的に特定の解を導出したものにすぎず、利他的行動の創発を集団淘汰によって完全に説明できることを理論的に検証したものではない。そこで、以下では、本シミュレーションの前提条件に基づいて、個人淘汰と集団淘汰を考慮した動学的モデルを構築し、そのモデルの解析解を導出することを通じて、集団淘汰と利他的行動の創発との間の因果関係について数理的により厳密な理論的検証を行うこととする。

動学的モデルの定式化

本研究では、社会における利他的行動者数の時間変化は、“集団間での集団淘汰”、“集団内での個人淘汰”、ならびに“突然変異”によって引き起こされる、という形の淘汰メカニズムを想定する。以下、この基本的な想定に基づいた淘汰メカニズムを、連続時間を仮定した動学的モデルとして定式化することとしよう。前述したように、集団の適合度は集団内の利他的行動者数に依存すると考える。したがって、集団の状態もまた集団内の利他的行動者数によって完全に記述されると仮定する。ここで、このような集団の状態を“状態 i ”と呼称する ($0 \leq i \leq N$)。また、状態 i の集団数を n_i で表す。これより、当該社会全体の状態は、各状態の集団数 n_i から構成される状態変数ベクトル $\mathbf{n} = (n_0, n_1, \dots, n_i, \dots, n_N)$ を用いて表現される。ただし本モデルでは、集団の数ではなく社会における各集団の割合に着目する。そこで、社会における集団 i の割合を x_i で表そう ($0 \leq i \leq N$)。すなわち、 x_i は

$$x_i = n_i / \sum_{k=0}^N n_k \quad (5)$$

で表現される。上記と同様にして、社会の状態は各集団の割合 x_i から構成される状態変数ベクトル $\mathbf{x} = (x_0, x_1, \dots, x_i, \dots, x_N)$ で表される。なお、式 (5) より、社会状態 \mathbf{x} に対して、

$$\sum_{i=0}^N x_i = 1, \quad 0 \leq x_i \leq 1 \quad (6)$$

が成立する。また、集団内の利他的行動者数の平均 r は、

$$r = \sum_{i=0}^N i \cdot x_i \quad (7)$$

で表される。以下、 r を特に“平均的な利他的行動者数”と呼称する。

個人淘汰 集団内で個人淘汰が生起する場合、その集団内の利他遺伝子を備えた個体が

一人減少すると仮定する。また、個人淘汰は集団内部の現象であり、その生起確率は、式(1)と(2)に示したように利他的行動者と庶民との間の利得の差が一定値であることを踏まえ、集団の状態に依存せず一定であると仮定する。したがって、ある1つの集団において単位時間当たり個人淘汰が生起する確率は一定値 μ を用いて表現される ($0 \leq \mu \leq 1$)。確率 μ は個人淘汰の強度を表すパラメータであり、以下では“個人淘汰圧”と呼称する。

突然変異 集団内で突然変異が生起すると、利他遺伝子を備えた個体が一人増加すると仮定する。ある1つの集団において単位時間当たり突然変異が生起する確率を微小確率 ε で表現する ($\varepsilon \ll 1$)。

集団淘汰 集団レベルにおいては、利他的行動者が多数存在する集団の割合は増加し、そうでない集団の割合は減少すると仮定する。ここでは、状態 i にある集団の割合の集団淘汰による単位時間当たりの変化の期待値を、状態ベクトル \mathbf{x} の関数として $v_i(\mathbf{x})$ を用いて表現する。ただし、関数 $v_i(\mathbf{x})$ に関して、任意の2つの状態 j, k ($j > k$) に対して、

$$v_j(\mathbf{x}) > v_k(\mathbf{x}) \quad (8)$$

が成立すると仮定する。上式は、利他的行動者がより多く存在する集団の方が、その割合が増加する傾向が高いことを保証する条件である。

このような階層的な淘汰メカニズムの下での集団割合の推移は確率的な過程であるが、本研究では大数の法則が成立すると仮定し、集計化された集団割合の推移を決定論的なフローとしてモデル化しよう。すなわち、集団割合の期待値に着目する。上記で定義した個人淘汰と突然変異の生起確率 μ, ε 、集団淘汰による集団割合の時間変化 $v_i(\mathbf{x})$ を用いて、各集団の割合の時間変化の期待値は以下のように表現される。

$$\frac{dx_0}{dt} = v_0(\mathbf{x})x_0 + x_1\mu - x_0\varepsilon \quad (9)$$

$$\frac{dx_i}{dt} = v_i(\mathbf{x})x_i + x_{i+1}\mu - x_i\mu + x_{i-1}\varepsilon - x_i\varepsilon \quad (i = 1, 2, \dots, N-1) \quad (10)$$

$$\frac{dx_N}{dt} = v_N(\mathbf{x})x_N - x_N\mu + x_{N-1}\varepsilon \quad (11)$$

ここで、上式(10)の第1項は集団淘汰効果を表している。第2項、第3項は個人淘汰効果を表しており、第2項は状態 $i+1$ にある集団の状態 i への遷移、第3項は状態 i にある集団の状態 $i-1$ への遷移を表している。第4項、第5項は突然変異効果であり、第4項は状態 $i-1$ にある集団の状態 i への遷移、第5項は状態 i の集団の状態 $i+1$ への遷移を表現している。ただし、集団0では利他的個人がそれ以上減少しないため、上式(9)において、式(10)の第3項、第4項は存在しない。また、集団 N では、利他的個人はそれ以上増加しないた

め、上式(11)において、式(10)の第2項、第5項は存在しない。上式(9)-(11)は、それぞれの第1項のみを考慮した場合には、集団を淘汰単位として集団間の進化的選択の動学的過程を記述したレプリケータダイナミクスを表している(Weibull, 1995)。ただし、本モデルにおいては、集団内の個人淘汰及び突然変異の項が付加されている点に留意する。

最後に、集団淘汰を表す関数 $v_i(\mathbf{x})$ について検討しよう。いま、上式(9)-(11)を満足する期待値パスにおいても条件式(6)が成立すると仮定する。このとき、以下の条件式

$$\frac{dx_0}{dt} + \frac{dx_1}{dt} + \dots + \frac{dx_N}{dt} = 0 \quad (12)$$

が成立しなければならない。上式に式(9)-(11)を代入すれば、以下の条件式が成立する。

$$v_0(\mathbf{x})x_0 + v_1(\mathbf{x})x_1 + \dots + v_N(\mathbf{x})x_N = 0 \quad (13)$$

以下では、上式と条件(8)を満足する関数の中から、簡単のため、状態 i に関する一次関数

$$v_i(\mathbf{x}) = \rho \left(i - \sum_{k=1}^N kx_k \right) \quad (i = 0, 1, \dots, N) \quad (14)$$

を仮定する。ここで、 ρ は集団淘汰の強度を表すパラメータであり、 $\rho \geq 0$ を仮定する。以下では、 ρ を“集団淘汰圧”と呼称する。

以上の定式化より、方程式(9)-(11)を満足する期待値パスにおいて、すべての集団割合の合計は必ず1であり、かつ、個々の集団割合は負にならないことが保証される。前者は、式(9)-(11)に式(14)を代入すると、 $\sum \dot{x}_i = 0$ が成立することにより明らかである。また、後者は、任意の i に対して ($0 \leq i \leq N$)、 x_i が0のとき、 $\dot{x}_i \geq 0$ が成り立つことより確かめられる。従って、方程式(9)-(11)を満足する解軌道は、集団割合の条件(6)を必ず満足している。

なお、以上の問題設定は、“ボランティア・ジレンマ”という理論的構成概念を基本として論理的に定義したものであり、現実の個人間、及び、集団間の複雑な相互作用のすべてを網羅的に記述したモデルではない点には留意が必要である³。冒頭で述べたように、本研究は、地域コミュニティを支える利他的動機が発生する社会的構造の本質を理論的に明らかにすることを目的としており、以上の数理モデルもそうした研究の主眼に合うように、現実社会に存在する様々な要素をあえて捨象し、簡略化して表現したものと言える。従って、本研究の理論モデルは一つのメタファー（隠喩）として解釈すべきであり、本研究は、そうした理論モデルの分析結果から暗示される理論的含意を通じて、地域コミュニティ保守行動の発生起源についての理論的な知見を得ようとするものである。

結 果

以下では第1に、上式(9)-(11)より平均的な利他的行動者数 r の推移を導出する。その上

で、第2に、上記モデルの特別なケースとして、各集団における利他的行動者数に上限を設けた場合を想定し、定常状態における集団内の利他的行動者数を解析的に導出する。以下、前者を“一般モデル”、後者を“簡易モデル”と呼称する。

一般モデルにおける利他的行動者数の挙動

各集団の占める割合の推移を方程式(9)-(11)から一意的に求められる解軌道として数値的に解き、式(7)に基づいて“平均的な利他的行動者数” r の挙動とその期待値を導出した結果を Figure 2、Figure 3 に示す。なお、この数値的手法は、個々のエージェントの挙動とその相互関連の全てを逐一再現した上で解を求めるような完全なシミュレーション手法 (c.f. Axelrod, 1997) とは本質的に異なり、解析的に誘導した方程式(9)-(11)の解を求める際に援用するというものには過ぎない。その両者の相違は、解の唯一性である。その意味において、この数値計算は、解析的手法を基本とした数値的計算であると言える。

本計算では、集団内の個人の人数を $N=100$ 人に、突然変異の生起確率を $\varepsilon=10 \times 10^{-8}$ に設定している。また、式(9)-(11)の連立微分方程式は、4次の Runge-Kutta 法を用いて計算した。なお、以下の数値計算では、異なるパラメータ間でその値のオーダーが異なっているが、分析結果を考察するにあたり、各パラメータの値そのものは実質的な意味を有していない点に留意する。各パラメータの値を変化させた時、分析結果にどのような影響を及ぼすかが分析の焦点である。

さて、Figure 2 では、集団淘汰圧を $\rho=7.0 \times 10^{-3}$ 、 7.3×10^{-3} に設定した場合のそれぞれのケースの平均的な利他的行動者数の推移を表している。ここで、個人淘汰の生起確率を $\mu=0.7$ に固定している。また、横軸の“時間”は、Runge-Kutta 法に基づく微分方程式の計算ステップ数を表している。これより、平均的な利他的行動者数は淘汰圧を受けて常に揺れ動いているものの、集団淘汰圧が大きい方が集団内に利他的個人が定着する様子が確認できる。また、Figure 3 は、集団淘汰圧について7パターン、個人淘汰の生起確率について2パターンを設定した上で、平均的利他的行動者数の“期待値”を計算した結果を示している。ここで、平均的利他的行動者数の期待値は、設定時間内の平均的利他的行動者数の挙動の期待値を表している。すなわち、平均的利他的行動者数の期待値 E_r は、計算ステップ数 N_s 、各ステップ k ($1 \leq k \leq N_s$) における平均的利他的行動者数 r_k を用いて、

$$E_r = \sum_{k=1}^{N_s} r_k / N_s \quad (15)$$

で表現される。Figure 3 から、集団淘汰圧が大きくなるにつれて、利他的行動者数が増

Figure 2

Figure 3

加すること、個人淘汰圧が高い方が、利他的行動者数は減少することが確認される。

簡易モデルの解析結果

集団割合の時間変化（式(9)-(11)）の定常状態は、以下の式

$$\frac{dx_i^*}{dt} = 0 \quad (i=0, \dots, N) \quad (16)$$

を満足する状態ベクトル \mathbf{x}^* で表される。しかし、 N 個の連立方程式をすべて満足する状態ベクトル \mathbf{x} を解析的に導出することは実質的に困難である。そういった事情から、上記の様に一般モデルの場合には数値的な解法を用いたのだが、集団内の利他的個人数の上限が 1 人の場合を想定したモデルを想定すると（以下、これを簡易モデルと呼称する）、その定常解を解析的に誘導することが可能となる。この様に定常解を解析的に誘導することで、一般モデルを数値的に解く際に設定せざるを得なかった各種パラメータの水準の影響を除去した上で、解の挙動についての“より一般的な知見”を得ることが可能となると期待される。ただし、当然のことながら、実際には集団内に複数の利他的個人が存在する場合が考えられる。事実、上記の一般モデルの数値計算においても、複数の利他的個人の出現が観察されている。それ故、利他的行動者の創発に関して一般的な知見を得る上では、モデルの一般性を確保することが重要となるが、本簡易モデルにおいても、集団淘汰と個人淘汰が利他的行動者の創発に及ぼす影響の本質的なメカニズムについては、先に述べた一般モデルのものが内蔵されたものであり、その意味において、その解の挙動を探る事を通じて、利他的行動の創発について同様の理論的考察が可能であると考えられる。

さて、簡易モデルにおいては、集団の状態は状態 0 か状態 1 で表されるため、当該社会の状態はベクトル $\mathbf{x} = (x_0, x_1)$ で表現される。各集団割合の変化の期待値は、一般モデルと同様にして、個人淘汰と突然変異の生起確率、及び集団淘汰による時間変化を用いて

$$\frac{dx_0}{dt} = v_0(x)x_0 + x_1\mu - x_0\varepsilon \quad (17)$$

$$\frac{dx_1}{dt} = v_1(x)x_1 - x_1\mu + x_0\varepsilon \quad (18)$$

で表される。ここで、 $x_0 + x_1 = 1$ が成立するため、 $v_0 = -v_1$ が成り立つことが分かる。したがって、式(17)と(18)は同一の内容を表している。そこで、以下では式(18)に着目する。一般モデルと同様に、集団淘汰による集団の割合の変化を以下のように表現する。

$$v_1(x) = \rho(1 - x_1) \quad (19)$$

以上の問題設定の下で、本簡易モデルの定常解 $\mathbf{x}^* = (x_0^*, x_1^*)$ を検討する。ここで、定常状態において、以下の条件式が満足されなければならない。

$$\frac{dx_1^*}{dt} = 0 \quad (20)$$

上記の条件を満足する定常解 x^* に関して、次の解析的命題が成立する(証明は**付録**に記載)。

解析的命題

定常状態において、集団淘汰圧 ρ が大きいほど、利他的行動者の存在する集団の割合 x_1^* は増加する。さらに、個人淘汰の生起確率 μ が小さいほど、 x_1^* は大きくなる。

なお、ここでは、本モデルにおいて解析的に証明された上記の命題を、特に“解析的命題”と呼称している。後述するように、この解析結果の理論的解釈を通じて導かれる命題を“理論的命題”と呼称しており、本研究ではこれら2つを区別して用いることとした。

以上の分析結果は、既往研究(藤井・松山, 2004, 2005)で行われた進化シミュレーションから得られた知見と一致する結果を表している。さらに、本結果は一般モデルの数値計算結果とも整合している。すなわち、個人淘汰圧が大きいほど人々は利己的に振る舞い、集団淘汰圧が大きいほど人々は利他的に振る舞う結果となる。本理論モデルを用いて、このような集団淘汰と利他的行動の創発との因果関係が解析的に示されたものと考えられる。

考 察

本研究では、地域コミュニティにおける利他的行動者の存在が、当該地域の公共事業の成否に本質的な影響を及ぼすという問題意識の下、進化心理学における階層淘汰論に基づき、社会集団の中で利他的行動者が創発するメカニズムを、進化モデルを用いて記述し、利他的行動者が生ずる社会環境を理論的に検討した。その結果、集団淘汰が存在することによって利他的行動が創発する可能性が存在することが理論的に明らかにされた。同様の知見は、すでに藤井・松山(2004, 2005)、あるいは神(2006)によっても示されているが、本研究の重要な特徴は、数理的検討において、恣意的なパラメータ設定から自由となり得る解析的手法を可能な限り援用した上で、検討した点に求められる。また、理論的には、Sober & Wilsonによっても階層淘汰論によって進化論的利他主義者の創発が説明できることが論じられているところではあるが、少なくとも筆者の知る限り、その主張の解析的妥当性については、必ずしも十分に検討されているとは言い難いものと考えられることから、その意味においても、本研究の特徴を指摘することができよう。

無論、以上に述べた理論的検討は、あくまでも理論的なものにしか過ぎず、その理論的検討がどのような現実的意味を持つのかについての検討については、慎重を要するであろう。ただし、Henrich(2004)あるいはDawkins(1989)の主張に一定の妥当性があるとする

のなら、集団淘汰とは、集団内の個人が他の集団における先進的な取り組みを学習することによって集団の特質が伝播するような状況を表すものと解釈することができることとなる。この点を踏まえれば、次のような理論的命題が成立する。

理論的命題

外部の集団における先進的な取り組みを学習しようとする一定の動機が存在する集団では、集団内に利他的行動者が創発する可能性が高まる。

ただし、この命題は、集団淘汰が存在するとき、集団内部に利他的個人が常に定着し続けることを必ずしも意味しない。むしろ、集団内部では、自己犠牲的な利他的個人は常に駆逐される傾向にあることに留意しなければならない。そして、このような状況においても、集団淘汰が存在することによってのみ、集団内に利他的な動機が常に再生産され得ることが示されたのである。言い換えれば、外部の集団における先進的な取り組みを取り入れようとする一定の動機が原動力となって、集団内で利他的行動が再生産され得るのである。

地域計画への示唆 本研究で得られた重要な理論的含意は、個人による自己犠牲的な地域コミュニティ保守行動が個人の学習意欲や地域愛着と密接に関わっており、利他的個人の出現が一定の因果関係に基づいて生起し得る現象であるという可能性を理論的に明らかにした点である。従来、都市計画や地域計画等の実務的な現場（国土交通省、2005）においては、このような利他的動機は個人に“偶発的”に備わっているものと見なされており、その重要性が認識されてはきたものの、地域計画論を展開する上で、計画要素から排除される傾向にあった。しかし、本研究の理論的検証を通じて、このような利他的個人の出現が特定の進化メカニズムの下で生起し得る“必然的”な現象である可能性が理論的に示された。この点を踏まえれば、このような因果関係に基づいて、利他的行動者の自発的出現を促進することも、地域計画の新しい展開になり得ることが示唆される。

さて、ここでは、本研究の知見が地域計画に示唆する点を考えてみることにしよう。

第1に、“集団”意識の適切な保持の重要性を、本研究が暗示しているものと考えられる。例えば近年では、市町村合併の進展や道州制の導入、ひいてはグローバル化の進展が著しいが、このような動向に伴う、地域、国家という“集団”の溶解が、利他的動機の減退を導き、利己的動機の氾濫を誘発することが、本研究の分析より示唆されている。このような状況において、過剰な個人主義を是正し、地域の“集団”としてのアイデンティティを保持することにより、利他的行動が出現する傾向が高まる可能性が考えられる。

第2に、“地域間の社会的学習”を高めることが、地域に資する利他的行動の出現を促す

効果があるものと考えられる。前述したように、集団淘汰は集団内の規範や精神的風土が集団間で伝播する状況を表しているが、そのためには、個々人が地域に対する愛着を有するとともに、外部地域の動向を常に意識し、より良いものを取り入れようとする積極的な態度が必要であると考えられる。このことから、そうした態度が欠如するといった場合には、地域間の社会的学習が低下することによって、地域における自発的な利他的行動の発生が抑制され得るという可能性が考えられる。

さて、以上2点を踏まえれば、“地域コミュニティ保守行動の自発的な発生”を促進するためには、地域において“集団”としての凝集性を高めるとともに、その一方で外部に対して“開かれた”精神的風土を保持することが重要であるという、半ば相矛盾する2つの傾向性の重要性が示唆されたものと考えられる。このことは畢竟、地域の“ウチ”と“ソト”との間で適切な平衡状態を保つことが地域計画に課された本質的な課題であることを暗示しているといえるかもしれない。無論、以上の考察は、あくまでも本研究の分析結果から示唆される理論的可能性に過ぎないものの、本研究の数理的検討を通じて、そうした主張を厳密な理論的検討を踏まえた上で提示し得たものと考えられる。今後は、実際の社会を対象にして、上記の理論仮説を実証的に検証することが必要である。

引用文献

- Axelrod, R. (1997). The complexity of cooperation, Princeton, N.J., Princeton University Press. (寺野隆雄 監訳 (2003). 対立と協調の科学：エージェント・ベース・モデルによる複雑系の解明 ダイアモンド社)
- Brodie, R. (1996). Virus of the mind: The new science of the meme, Seattle, WA, Integral Press. (森弘之 (訳) (1998). ミーム：心を操るウィルス 講談社)
- Cosmides, L. & Tooby, J. (1994). Better than rational: Evolutionary psychology and the invisible hand, American Economic Review, 84(2), 377-382.
- Clary, E. G., Snyder, M., Ridge, R. D., Copeland, J., Stukas, A. A., Haugen, J., & Miene, P. (1998). Understanding and assessing the motivations of volunteers: A functional approach, Journal of Personality and Psychology, 74(6), 1516-1530.
- Dawkins, R. (1976). The selfish gene, New York, Oxford University Press.
- Diekmann, A. (1985). Volunteer's dilemma, Journal of Conflict Resolution, 29, 605-610.
- 藤井 聡 (2003). 社会的ジレンマの処方箋：都市・交通・環境問題の心理学 ナカニシヤ

出版

- 藤井 聡・松山公紀 (2004). 「まちづくり問題」に関する進化論的検討—利他的行動の創発に関する進化シミュレーション分析 土木計画学研究・講演集 (秋大会), CD-ROM, 30
- 藤井 聡・松山公紀 (2005). 「まちづくり問題」に関する進化論的検討 (2) —利他的行動と感謝の創発に関する進化シミュレーション分析と実証分析 土木計画学研究・講演集 (秋大会), CD-ROM, 32
- Gilbert, N. & Troitzsch, K. G. (1999). Simulation for the social scientist, United Kingdom, Open University Press.
- Hamilton, W. D. (1964a). The genetical evolution of social behavior I, Journal of Theoretical Biology, 7, 1-16.
- Hamilton, W. D. (1964b). The genetical evolution of social behavior II, Journal of Theoretical Biology, 7, 17-52.
- Henrich, J. (2004). Cultural group selection, coevolutionary processes and large-scale cooperation, Journal of Economic Behavior & Organization, 53, 3-35.
- 長谷川寿一・長谷川真理子 (2000). 進化と人間行動 東京大学出版会
- 廣瀬通孝・小木哲朗・田村善昭 (2002). シミュレーションの思想 東京大学出版会
- 神信人 (2006). 連結型リーダーの出現による二次的ジレンマ問題の解決: リーダー特性とメンバー特性の共進化のシミュレーション 日本社会心理学会第47回大会発表論文集 68-69.
- 国土交通省 (2005). 『観光カリスマ百選』
<http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha05/01/010318_4_.html> (2008年2月26日)
- Maynard Smith, J. (1982). Evolution and the theory of games, Cambridge, Cambridge University Press. (寺本英・梯正之 (訳)(1985). 進化とゲーム理論 産業図書)
- Nelson, R. R. & Winter, S. G. (1982). An evolutionary theory of economic change, Cambridge, Mass, The Belknap Press of Harvard University Press.
- Sober, E. & Wilson, D. S. (1998). Unto others: The evolution and psychology of unselfish behavior, Cambridge, Harvard University Press.
- Soltis, J., Boyd, R., & Richerson, P. J. (1995). Can group-functional behaviors evolve by cultural group selection?: An empirical test, Current Anthropology, 36, 3, 473-483.

Tooby, J. & Cosmides, L. (1989). Evolutionary psychology and the generation of culture, Part I. Theoretical considerations, Ethology and Sociobiology, 10, 29-49.

Trivers, R. (1971). The evolution of reciprocal altruism, Quarterly Review of Biology, 46, 35-57.

Weibull, J. W. (1995). Evolutionary game theory, Cambridge, MIT Press.

付 録

前述した**解析的命題**を証明する。式(20)に式(18)を代入して、

$$v_1(x)x_1 - x_1\mu + (1-x_1)\varepsilon = 0 \quad (21)$$

が成立する。ここで、微小な確率 $\varepsilon \ll 1$ は無視し得る程小さな値であるため、上式第3項を消去する。その結果、定常状態における集団の割合は、

$$\begin{cases} x_1^* = 0 & (\rho < \mu \text{ のとき}) \\ x_1^* = \frac{\rho - \mu}{\rho} & (\rho \geq \mu \text{ のとき}) \end{cases} \quad (22)$$

で表される。ここで、 μ を固定したとき、 $\rho \geq \mu$ を満足する ρ に対して

$$\frac{\partial x_1^*}{\partial \rho} = \frac{\mu}{\rho^2} > 0 \quad (23)$$

が成立する。また、 ρ を固定した場合も同様に、 $\rho \geq \mu$ を満足する μ に対して

$$\frac{\partial x_1^*}{\partial \mu} = -\frac{1}{\rho} < 0 \quad (24)$$

が成立する。以上のことより、集団淘汰圧 ρ が大きくなるほど、あるいは、個人淘汰の生起確率 μ が小さくなるほど、 x_1^* は増大する。したがって、**解析的命題**の成立が示された。

脚 注

- 1 ここで、“ボランティア・ジレンマ”は、社会的ジレンマ研究の中で、理論的に定義され発展してきた理論的構成概念であり、現実のボランティア問題、あるいは既往のボランティア論における想定状況と必ずしも合致するものではないことに留意されたい。
- 2 近年のボランティア論においては、地域の問題に積極的に取り組むことを通じて、自己実現や自己充足を得ようとする自己志向的な動機の重要性が指摘されている (c.f. Clary, Snyder, Ridge, Copeland, Stukas, Haugen & Miene, 1998)。
- 3 例えば、地域コミュニティにおいては、個人間の感謝行動 (藤井・松山、2004) あるいは集団内の偏見や抑圧等、様々な相互作用の形態が考えられる。さらに、利他的行動者の“能力”の問題も存在し、本研究のモデルにおいて想定されているように、個人の利他的

行動がその集団の適合度を必ずしも高めるとは限らない可能性も考えられる。

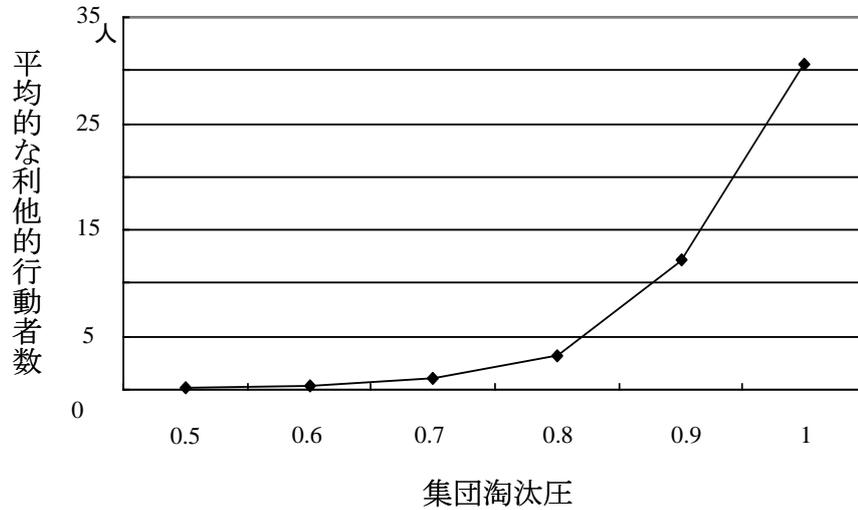


Figure 1 集団淘汰圧と利他的行動者数の収束値

(藤井・松山 (2004, 2005) のシミュレーション結果)

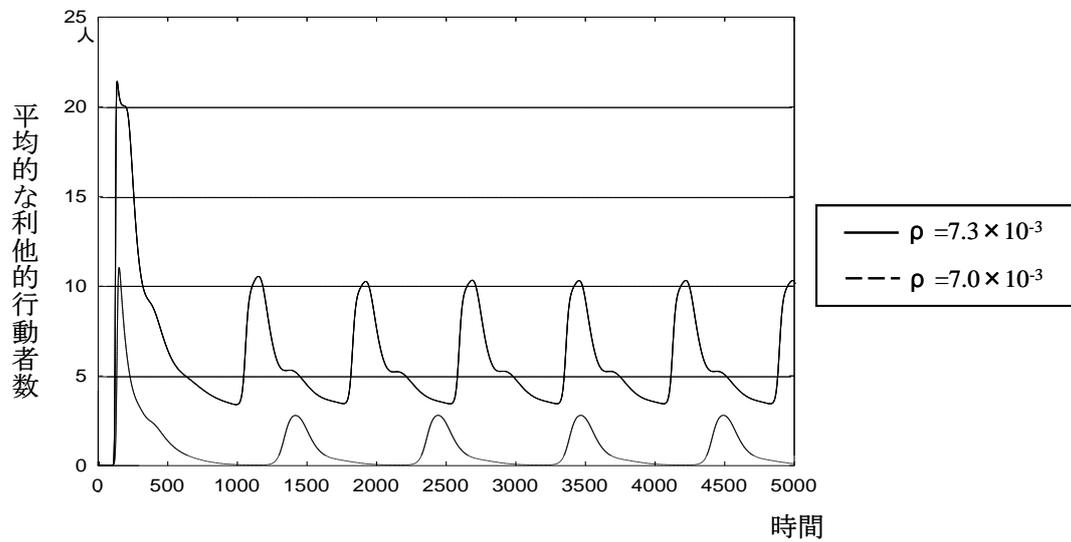


Figure 2 集団内の平均的な利他的行動者数の推移

($\mu = 0.7$, $\varepsilon = 1.0 \times 10^{-8}$)

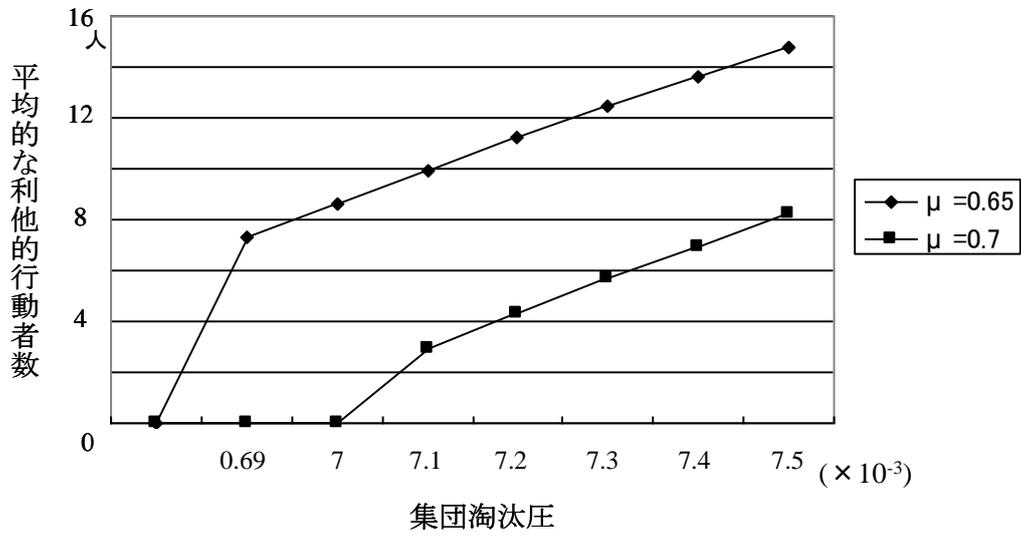


Figure 3 個人淘汰圧・集団淘汰圧と利他的行動者数の収束値
($\varepsilon = 1.0 \times 10^{-8}$)