

進化的数理モデルによる社会経済現象の記述

小松秀徳¹, 杉山大志²

1: (財) 電力中央研究所 システム技術研究所

2: (財) 電力中央研究所 社会経済研究所

要約:

人間の意思決定のメカニズムはどのようにして形成されたのだろうか。また、各人の意思決定の相互作用を積み上げていった結果としての社会経済的な現象は、どのように形成されたのだろうか。人間は生物であり、生物の唯一の指導原理は進化である。したがって、人間の様々な社会経済現象は、進化の観点から統一的に説明できる可能性がある。本稿では、このような進化に注目した数理モデルを構築することによって、社会経済現象を扱ってきた既存の諸分野における定性的な説明を体系化し、科学技術政策における合理的・安定的な意思決定を行う道具として役立てることができるかを予備的に考察する。また、社会経済現象の一例としてリスク認知バイアスを取り上げ、その発生起源を進化心理学的な観点から説明する数理モデルの簡単な例についても検討する。

免責事項

本ディスカッションペーパー中、意見にかかる部分は筆者のものであり、
(財) 電力中央研究所又はその他機関の見解を示すものではない。

Disclaimer

The views expressed in this paper are solely those of the author(s), and do not necessarily reflect the views of CRIEPI or other organizations.

目次

1.	はじめに-----	1
2.	進化的数理モデルを介したリスク認知バイアスの説明-----	2
2.1.	リスク認知バイアスとは-----	2
2.2.	簡易的な進化的数理モデルによる予備的検討-----	3
2.3.	包括適応度によるリスク認知バイアスの解釈-----	7
2.4.	リスク認知バイアスのその他の説明要因について-----	10
3.	より複雑な社会経済現象を説明するモデルの可能性について----	10
3.1.	経済の発生-----	10
3.2.	技術進歩-----	12
4.	まとめ-----	13
	参考文献-----	14
	補遺-----	16

1. はじめに

人間の意思決定のメカニズムはどのようにして形成されたのだろうか。また、各人の意思決定の相互作用を積み上げていった結果としての社会経済的な現象は、どのように形成されたのだろうか。進化は生物の最も根本的な指導原理であるが、人間もまた生物であり、進化という指導原理の上に成り立っている。したがって、人間の社会経済現象は、進化のメカニズムに基づいて統一的に説明できる可能性がある。本稿では、様々な社会経済現象に対して、進化論の解釈に基づいて統一的な説明を与える数理モデルを構築することを最終目標とし、その第一歩として、モデル化の可能性を予備的に考察する。

人間は、新古典派経済学が仮定するような、完全に合理的な判断を行ってはいない。逆に、人間の判断が限られた情報に基づいて成されると考える「限定合理性」や、概ね正しい判断を素早く下すことができるが、常に正しい判断を下すとは限らない判断プロセスである「ヒューリスティクス」の存在等が知られている（ギアリー 2007）。進化心理学では、人類が持つこういった一般的な心理特性や、それに起因する不合理性の起源について、説明を与えてきた(Hampton 2009)。例えば、我々の祖先はサバンナ時代を生き延びる中で、危険な動物を見極めなければいけない状況に日常的に直面していた。このような状況下では、猛獣かどうかを特定するのに、正確だが時間がかかるようなプロセスでは、判断が終わる前に捕食されてしまうかもしれない。そのため、正確さよりも素早さが求められる判断プロセスが生存上有利であり、そのような判断プロセスが進化した(エヴァンス 2003)。こういったヒューリスティクスに基づく判断プロセスによって、時として実際には危険でないものについても危険であると判断してしまうような状況が発生する。人間にとって様々な局面で合理的な判断が難しい理由の一つとして、このヒューリスティクスの生物学的な進化が考えられる。

一方で人間の意思決定は、生物学的な進化のみによって生得的に規定されるのではなく、環境（生物を取り巻く外的な要因）にも同時に影響されることが知られており、これを考慮した新たなアプローチとして進化発達生物学（ビョークランド 2008）も現れ始めている。では、生物学的な進化によって得られた心理的特性と環境的な要因は、どのように作用して最終的な人間の意思決定を成しているのだろうか。この問いに対して示唆を与える枠組みの一つとして、Slovic らの論じた「二つの思考モード」が挙げられる。すなわち、人間は解析的な判断（熟考）と感情的な判断の二つを併用している（「腹で感じ、頭で考える」）と指摘している(Slovic 2004)。また、もう一つはソマティックマーカー仮説（ダマシオ 2010）である。こちらは、人間はまず直観的な判断によって選択肢を絞り込み、絞り込まれた選択肢について熟考することで最終的な判断を行っている、と提唱している。これら二つの枠組みは、「直感的な判断」と「腹」、「熟考」と「頭」が対応すると捉えることで統一的に理解できるだろう。もしそうであるならば、たとえ我々人間に、生物学的な進化によって得られたバイアスのかかった判断や意思決定を行う強い傾向があるとしても、

環境的な要因に影響を受け得る熟考（その結果自体も環境になり得る）等によって修正される可能性は残されているだろう。

ここで環境的な要因とは主に文化である。ここでいう文化とは、遺伝子型レベルでの生物学的な進化を介さずに、表現型レベルで適応的な形質を伝達する手段であり、交叉（アイディア同士の組み合わせ）、突然変異（アイディアの改変）、選択（アイディアの生存・死滅）といった特徴を持つという点で、それ自体が生物学的な進化と似た性質を持つ。そして、人間が情報を収集して熟考したり、他人の行動を模倣したりすることで判断を下しているように、文化は人間の意思決定に影響を与えている。

このように、直感が生物学的な進化に影響を受けてきたこと、熟考が文化的な進化に影響を受けること、直感が熟考によって補正されること、またそれらの結果が生物学的にも文化的にも適応度としてフィードバックされ得ること、等の要素を考慮することで、様々な社会経済的現象を説明できる可能性がある。このような統一的な説明を行う上で、数理モデルは強力な手段となりえるが、その取り組みは少ない。数理モデルの構築を通じて、我々がどのような存在であるか、人間が本質的に持つ不合理性は何故存在するのか、それがどのようにして我々の生活に対して影響を与えうるか、といったことをより深く理解することは、我々がどのように行動す「べきか」、あるいはどのように合理的な判断を下す「べきか」を議論する際の助けとなるだろう。そして最終的には、例えば環境リスク規制・市場規制のあり方や、技術進歩を促進するための法の在り方など、様々な科学技術政策について、合理性・安定性の高い意思決定を行うための道具として活用できる可能性がある。

本稿の構成を以下に述べる。まず2章では、社会経済現象の一例として、リスク認知バイアスを取り上げる。ここでは、人間に対して包括適応度(本人だけでなく血縁者までも含めた適応度)を最大化する進化が働いてきたと仮定すれば、人間はリスクを過大評価する傾向を持ち得る、ということを示す数理モデルの例を示す。3章では、経済や技術進歩等、その他の社会経済現象の進化的な数理モデルの枠組みについて、既存文献のレビューを通して予備的に考察し、4章ではまとめを述べる。また、補遺では2章で示した数理モデルの詳細を検討する。

2. 進化的数理モデルを介したリスク認知バイアスの説明

本章では、社会経済現象の一例としてリスク認知バイアスを取り上げ、その発生源を進化心理学的な観点から説明する数理モデルの例を示す。

2.1 リスク認知バイアスとは

リスク認知バイアスの厳密な定義は見当たらないが、一般的には客観リスクと主観リスクの乖離であると言われている(日本リスク学会 2006)。客観リスクと呼ばれているもの自

体、専門家集団の中で共有されている価値に基づいたものに過ぎず、客観リスクは存在しないという指摘が存在するが、ここではとりあえず客観リスクを統計的に評価されるリスク（望ましくない事象が発生する確率）とし、主観リスクを特にヒューリスティクスによって判断されるリスクとする立場で議論を進める。例えば、損失余命（あるリスクにさらされた人の余命が、そのリスクにさらされなかった人の余命と比較して、平均的にどれだけ短くなるか）等の、一般的に用いられているリスク評価基準は客観リスクである。またヒューリスティクスとは、思考のコストを節約しつつ、大体的場合は良い判断を導き出すが、必ず正しい判断を導き出すとは限らないような人間の意思決定プロセスのことである。

リスク認知バイアスとして知られている現象には、カタストロフィバイアス（極めて生起確率が低くても、一回の事象で大きな被害をもたらす可能性があるリスクを過大視する傾向）のようにリスクを過大評価するものがある一方で、正常性バイアス（異常性が一定範囲内に収まっていると感じれば、その異常性を無視してしまう傾向）のように、過小評価するものもあるが、本章では特に過大評価する傾向を持つものについて注目する。

表1は、スロヴィックが主観リスクを調査する際に用いたリスクの諸特性を、ガートナーがまとめなおしたものである(ガートナー 2009)。これはあくまで Slovic らがアンケート調査するため仮説的な候補であり、最終的にはこれらを構成尺度とした「恐ろしさ」と「未知性」の二次元に落としこまれているが、本章ではこれら各特性に対して、簡単な進化的数理モデルの例を示した上で、進化心理学的な解釈からどのように説明し、分類できるかを考える。

2.2 簡易的な進化的数理モデルによる予備的検討

2.2.1 方針

本節では、文化的な進化を考慮せず、包括適応度の概念を取り入れた簡易な数理モデルのみにより、表1に示した特性がどこまで説明できるかを検討する。包括適応度を簡潔に表現すると、個人の適応度だけでなく、その血縁者の適応度も含めた適応度である。次項では、まずこの包括適応度の概念について説明する。

2.2.2 包括適応度とは

かつて進化論にとって、自分を犠牲にしてまで利他的な行動を取る生物の存在は、ダーウィンの適者生存の理論だけでは説明できない謎であった。なぜなら、万が一その利他行動によって自分が繁殖する機会を逸してしまうようなら、その個体の適応度を下げることになり、そのような行動が適応的であるとは考えられなかったからである。このような行動の例として、例えばアラームコール（天敵がやってきたことを、警戒音を発生することで群れの他個体に知らせること。他の個体を被食のリスクから遠ざける一方で、警戒音を発する個体自身は捕食される可能性が高まる、という利他的な行動である）が挙げられる。

この謎に答えを与えたのが包括適応度の概念である(Hamilton, 1964)。包括適応度は

表1 Slovic らがアンケート調査に用いた、リスク評価に影響を与える諸特性（太字については後段で特に考察する）

特性	概要
大惨事の可能性	一回の事件で多数の使用者が出る場合、リスクを大きく評価する。
復元性	リスクの結果を元に戻せないものについて、リスクを大きく評価する。
子供	子供が関係する場合、リスクを大きく評価する。
未来の世代	リスクが未来の世代に影響する場合、リスクを大きく評価する。
タイミング	差し迫ったリスクほど大きく評価し、遠い将来のリスクは割り引かれる。
犠牲者の身元	犠牲者の身元が分かっている場合、リスクを大きく評価する。
個人的なリスク	自分を危うくするリスクを大きく評価する。
極度の恐怖	恐怖を感じる対象のリスクを大きく評価する。
自発性	自発的に近づくことができるリスクよりも、降りかかってくるリスクを大きく評価する。
個人による制御	自分が制御できるものよりも、自分が制御できないもののリスクを大きく評価する。
馴染み	よく知らないものに関するリスクを大きく評価する。
理解	技術の仕組みが良く理解できないとリスクを大きく評価する。
利益	対象がもたらす利益が明確でないと、明確である場合よりもリスクを大きく評価する。
公平さ	一方に利益がもたらされ、他方にリスクがもたらされる場合、リスクを大きく評価する。
信用	関係している機関が信用できないとリスクを大きく評価する。
メディアの注目	メディアでとりあげられるほどリスクを大きく評価する。
事故の歴史	過去に事故があるとリスクを大きく評価する。
出所	自然起源のリスクよりヒト起源のリスクを大きく評価する。

（ある個体が得た報酬） + Σ （血縁度） × （その血縁個体が得た報酬） - （利他行動にかかるコスト）

で与える、としている。この式が意味することは、次のようなことである。生物は、勿論自らの報酬を大きくし、自身が繁殖することによっても自分の遺伝子を残せるが、自分と遺伝子を共有する血縁個体が生き延びて繁殖に成功できるように手助けをすることによっても、間接的に遺伝子を残すことができる。血縁個体は上式内「血縁度」の部分で与えられる割合（例：息子なら0.5、孫なら0.25等）だけ、確率的に自分と同じ遺伝子を共有し

ている。これら血縁個体が子孫を残す見込みが、自分がその血縁個体を助けて子孫を残せるように手助けする（すなわち利他行動を取る）ためにかかるコストよりも大きければ、その利他行動は進化する。このとき、自分が得る報酬だけでなく、その血縁個体が得る報酬に自分と同じ遺伝子を共有する確率をかけ、そこからその血縁個体に対して行う利他行動に必要なコストを引いたものを、自分が確認できる範囲内の全血縁個体について足し合わせたものが包括適応度である。すなわち、自身のコピーを多く残そうとする駆動力が遺伝子にあるとすれば、個人の報酬のみを最大化するよりも、自分の持つ遺伝子のうち多くの部分を共有する血縁者の繁殖成功も助けた方が、より多く報酬を獲得することができ、より多く自分のコピーを残すことができるということである。これが人間についても当てはまることを支持するデータもあり、例えばデイリーらは、血縁者以外の養子に対する虐待が圧倒的に多いこと等を論じている（デイリー 1999）。

勿論、リスク認知バイアスは包括適応度のような生物学的な要因だけでなく、文化的な要因にも強く影響を受けているはずであり、統一的な数理モデルを構築するのであれば、本来は生物学的進化と文化的進化の両面を考慮したモデルが必要であろう。しかし、本章では研究初期のアイデアを議論するために、生物学的な要因のみに注目し、人間に包括適応度を高める選択圧が働いてきたという前提に立った場合、主観リスクが客観リスクよりも大きくなり得る、ということのみに着目することにする。

2.2.3 モデル分析

進化心理学では、我々の心理的特性のほとんどが、人類の祖先が生き延びてきたサバンナ時代に形成されたと考えられている。サバンナ時代には、リスク源に近づけば近づくほど死亡リスクが高まるが、そのリスクを生き延びた場合にはより多くの遺伝子を残す機会が得られるという、リスクと利益のトレードオフ構造が至る所に存在していた。例えば、我々の祖先の住んでいたアフリカのサバンナでは糖分と脂肪が慢性的に不足していた。これらは栄養価が高く、人類生存の上で重要な役割を担っていた。しかし、糖分を手に入れるには果物を採集し、脂肪を手に入れるには動物を殺すか死肉をあさるかしかなく、こういった仕事はしばしば命に関する危険な仕事であった（ハート 2007）。

このような環境において、個人の報酬ではなく、その血縁者が得る分も含めた報酬を大きくするように進化が進むことが、リスク認知バイアスの発生源となった可能性がある。このことを議論するために、以下に簡単な数理モデルを与える。

リスクに近づけば近づくほど生存確率が低下するが、リスクを生き延びた際に得られる報酬が大きくなる（同様に、リスクから離れば離れるほど生存確率が上昇するが、リスクを生き延びた際に得られる報酬は低下する）構造をモデル化すると次のようになる(図1)。

R : 報酬 $R=P/P_{max}$

A : リスクに対する生存確率 $A=-(P/P_{max})+1$

P : 位置($P_{max}-P$ = リスクからの距離, $0 \leq P \leq P_{max}$)

P_{max} : リスク源の位置

P を変数とする一次元の空間において、 $P=P_{max}$ の位置にリスクが存在する。また、各個体がリスクに対してどれだけの距離を取るかを P の値によって表現する。各人の P の値が大きくなる（すなわち P_{max} に近づく）につれ、得られる報酬 R が増え、それと同時にリスクを生き延びる確率 A が小さくなる、というトレードオフ構造になっている。各個体はこのようなゲームに一度だけ参加し、リスクを生き延びた（その確率は A ）個体は、位置 P に応じた報酬 R を得ることができ（ゆえに個人の報酬の期待値は RA である）、繁殖を行うことができるものとする。もしリスクを生き延びることができなかった（その確率は $1-A$ ）場合は、報酬を得ることも繁殖を行うこともできない。

このモデル上で、まず個人が得られる報酬を最大化する位置は $P=P_{max}/2$ となる。ここでは、この個人の報酬の期待値を最大化するという考え方が、前節で述べた客観リスクに対応するものと捉える。例えば、損失余命等のリスク評価基準は、血縁者の余命に与える影響まで考慮された基準ではなく、専ら個人単位でのリスクの大きさを扱ったものである。

続いて、ヒューリスティクスが包括適応度を高めるような進化の産物であり、ヒューリスティクスによる判断の結果（ここでは P の値）が主観リスクに対応するという前提に立って、個人の報酬の代わりに、包括適応度の期待値を最大化するようなリスクとの距離を求める手順を考える。ここでは簡単のため、利他行動にかかるコストを0とし、子孫個体を取る位置は親個体と常に同じであるとする。また、子孫については、繁殖時に必ず親個体から子孫が1個体生成される場合を考え、1世代後の1子孫が得る報酬についてのみ考えることにする（勿論、得られた報酬に繁殖率が比例する場合や、複数の子孫や2世代、3世代後の子孫についても考えた、より一般的な包括適応度等を計算することもできるが、詳細は補遺を参照されたい）。また、子孫は自分よりも後の世代を生きるということを考慮して、親個体は自分が一度だけゲームに参加した後、次のゲームには参加せず、代わりに次のゲームに子孫個体に参加することとする。このとき、親個体がゲームに参加する直前時点では、子孫の報酬の期待値は RA^2 である。 RA ではなく、 RA^2 というように A を余分にかけて2乗としなければいけないのは、子孫が報酬を得るには、親個体がリスクを生き延びて繁殖をすることが必要だからである。同様に、1個体が1子孫を繁殖する前提で孫の代を考えるのであれば、孫の報酬の期待値は RA^2 となるし、ひ孫の報酬の期待値は RA^3 となる。このように、子孫が繁殖に成功するためには、子孫が生き残るだけでなく、その親個体が生き残ることも同時に必要であり、世代を超えて連続して血縁個体が生き残らなければいけない。

ここでは親個体の数を1、その子孫個体の数を1とした最も単純な場合を考えているので、親個体から見た直接の子孫の血縁度が0.5であることを考慮して、包括適応度は $RA + 0.5 \cdot RA^2$ となる。 $A = -(P/P_{max}) + 1$ が線形であったのに対して、 $A^2 = \{-(P/P_{max}) + 1\}^2$ は下に凸の曲線であるので、 $0.5 \cdot RA^2$ を最大化する位置は $P = P_{max}/2$ よりも原点に近づく。このことから、包括適応度を最大化する位置も、 $P = P_{max}/2$ から原点に近づくことがわかる。つまり、包括

適応度を最大化するリスクからの距離は、個体毎の報酬を最大化する距離よりも大きくなることわることが、数理モデルによって示される。このように、子孫個体が報酬を得るためには、生存確率を世代差数だけ余分にべき乗する必要がある、これが原因となって、包括適応度を最大化する位置はリスクからより遠ざかる。

以上の定式化をさらに拡張することで、複数世代の子孫を考慮した場合、得られた報酬に繁殖率が比例する場合等、その他の様々な拡張を施した場合についても解析解を得ることができるが、これらの拡張の詳細については補遺を参照されたい。

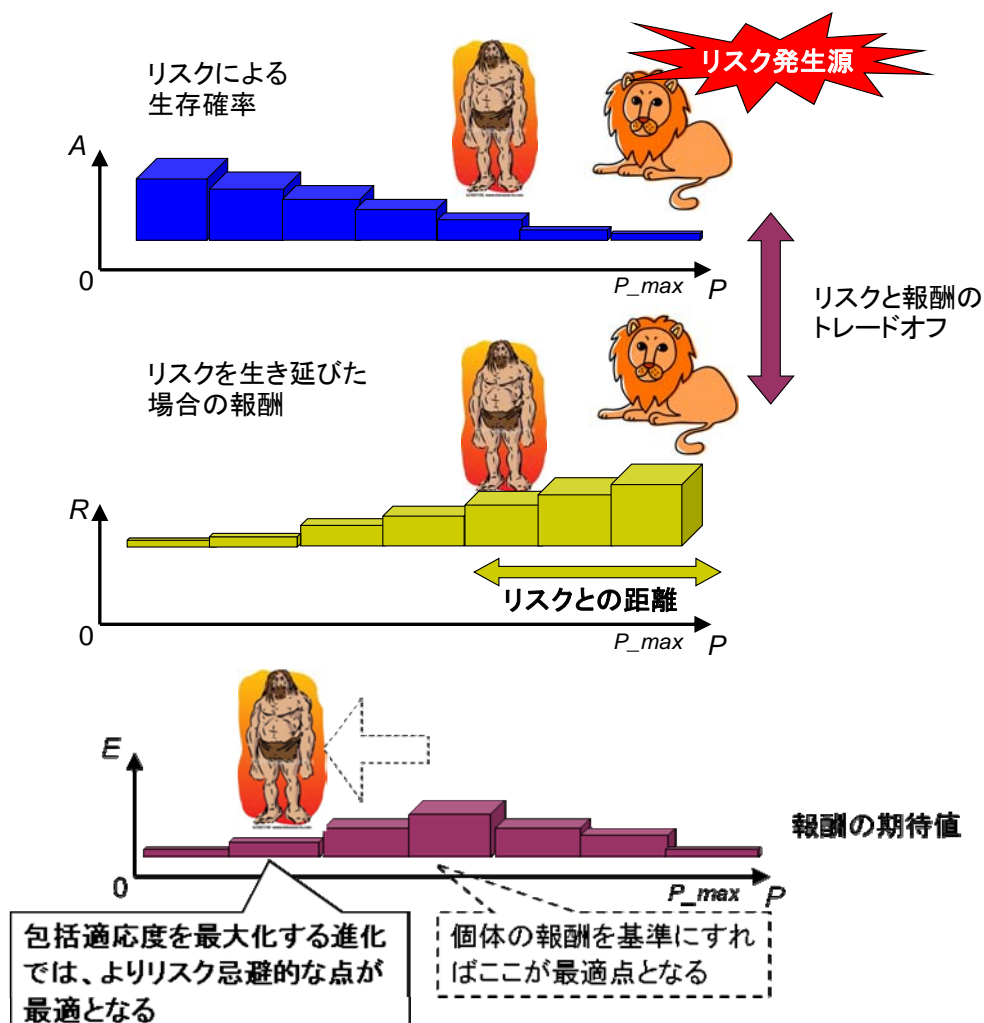


図1 リスク認知バイアスの進化を説明するモデルの例

2.3 包括適応度によるリスク認知バイアスの解釈

ここまで考えてきた数理モデルに基づいて、表1に示したもののうち、多くの項目を説明できると考えられる。そこで以下では、表1のうち太字で書かれたリスク評価に影響を与える諸特性について、包括適応度の観点からどのように説明できるかを考える。

- 1 **大惨事の可能性（一回の事件で多数の使者が出る場合、リスクを大きく評価する）、復元性（リスクの結果を元に戻せないものについて、リスクを大きく評価する）**：遺伝子プールの消滅は、一度起こってしまうとその後の包括適応度上昇の可能性が完全になくなってしまふものであり、最も避けるべき事態である。この考え方に基つくと、「大惨事の可能性」と「復元性」は同様のものとしてひとまとまりにすることができる。
- 2 **子供（子供が関係する場合、リスクを大きく評価する）、未来の世代（リスクが未来の世代に影響する場合、リスクを大きく評価する）**：包括適応度は、自身の報酬だけでなく、子孫等の血縁者の報酬も足しこんだものである。したがって、子孫の報酬も低下させてはならない。一世代後の子孫が「子供」であり、さらに後の世代の子孫が「未来の世代」であると考えれば、これらは同様のものとして捉えることができる。また、ある個体から見た親個体の数は常に2であり、おそらく自分よりも今後繁殖に成功する確率は低く、さらに親となる個体の数は常に4であり、その繁殖成功率はますます低くなる。一方、直接の子孫は繁殖回数次第で2以上に、孫の世代では4以上に増やすことができる。このように、包括適応度を増加させる要因について考えると、世代方向が過去であるか未来であるかによって非対称性があり、包括適応度の増加に貢献する可能性が高いのは、過去の世代より未来の世代であることがわかる。このことから、子供や未来の世代を重視する特性が、進化的に獲得され得ることが説明できそうである。
- 3 **タイミング（差し迫ったリスクほど大きく評価し、遠い将来のリスクは割り引かれる）**：各個体の子孫の生存と繁殖を確認し、包括適応度の上昇が確認できるのはせいぜい数世代先までであり、また遠い世代よりも近い世代の血縁者の血縁度が高いことから、まずは近い世代の血縁者が子孫を確実に残すことができることを優先する必要がある。
- 4 **犠牲者の身元（犠牲者の身元が分かっている場合、リスクを大きく評価する）**：犠牲者が血縁者であった場合は、包括適応度の低下につながるため、犠牲者が血縁者であるかどうかについて敏感になる、という理由が考えられる。人間は大規模の集団に対して共感を覚えることが苦手なようである。例として、募金を行う際、「〇〇人が苦しんでいます」とメッセージを書くよりも、「〇〇ちゃんが苦しんでいます」と特定の人物名を書いて、その子の写真を掲載する方が、募金が集まりやすい、という現象 (Identifiable Victim Effect) が知られている (Slovic 2007)。犠牲者の身元が明らかにされることでリスクを大きく感じる傾向があるという現象は、この Identifiable Victim Effect の裏返しとも解釈できそうである。すなわち、人類は長い間小規模の民族集団で暮らしてきており、そのほとんどが血縁者であったため、集団サイズが一定以上になると、

包括適応度がカバーする範囲を超えており、共感を覚えることが難しいのかもしれない。これに対して、身元を明らかにすることには、想起させる集団サイズを仮想的に血縁者として認識させる、すなわち包括適応度のカバーする範囲に近づかせる効果があり、その結果リスク認知バイアスが発生する、という仮説も立つ。犠牲者が本当に血縁者かどうかについて識別するという点については、一部の社会性昆虫で、ホルモンによって相手が血縁者であるかどうかを識別する能力が備わっているものが確認されている一方で、人間にはこのような経路は確認されていないようだ。人間は長い間、民族集団と血縁者関係がほぼ一致していたため、そのような能力が特に必要ではなかったのかもしれない。では、犠牲者が血縁者でなくても共感を覚えるという我々の感覚や、実際に募金が増えるということはどのように説明がつかだろうか。例えば、人間は他人の痛みを観察したり、痛みを経験したというストーリーを聞かされたりするだけでも、痛覚系回路が活性化することが知られている。これは進化的に有利であった痛覚系（実際、痛覚系が何らかの理由で形成されなかった場合、短命になりやすいことが知られている）の使いまわしであると考えられる（池谷 2009）。すなわち、考えるよりも前に、生物学的な要因により進化した痛覚系というモジュールが、使いまわしによって素早く活性化するため共感が生まれる、と解釈できるかもしれない。

- 5 **個人的なリスク（自分を危うくするリスクを大きく評価する）、極度の恐怖（恐怖を感じる対象のリスクを大きく評価する）**：包括適応度には個人の報酬も考慮されており、あるリスクによって命を奪われることは包括適応度の低下を意味するので、そのような事態は避けなければならない。この点では、これら二項目は同様だとみなすことができる。

- 6 **自発性（自発的に近づくことができるリスクよりも、降りかかってくるリスクを大きく評価する）、個人による制御（自分が制御できるものよりも、自分が制御できないもののリスクを大きく評価する）**：血縁者内で各個体が取れるリスクからの距離が多様であるとすれば、安全な位置にいる他の多くの個体よりも、リスクを取って報酬を得に行く個体が、血縁個体にとっての主要な報酬源となる。つまり、大半のリスク忌避的な個体が血縁個体を絶やさぬように維持する主要な駆動力となり、冒険好きで相対的にリスクテイクを行う個体が包括適応度を高める駆動力となるだろう。

上記項目の6番について補足すると、本章で試算した簡易モデルにおいて採用した、個体群内の全個体が同じ位置にいるという仮定は、親のリスクに対する態度が子孫へ完全に遺伝することを想定しており、極端に単純化した状況である。実際には、血縁者間でもリスクに対する態度には多様性があるだろうし、このような前提で包括適応度を最大化するような、各個体のリスクからの距離は、ある分布を成すことになるだろう。これは、子孫が親と異なる配置を取り得るという条件を置くことによって扱えると考えられる。

2.4 リスク認知バイアスのその他の説明要因について

本章の議論では、統一的な数理モデルを構築するための一歩として、包括適応度を考慮した生物学的な進化のみによって、リスク認知バイアスがどのように生じうるかを考えてきた。しかし、既に述べたとおり、リスク認知バイアスは生物学的な要因だけでなく、文化的な要因にも強く影響を受けているはずであり、統一的な数理モデルを構築するのであれば、さらに文化的な進化の影響も考慮する必要があるだろう。以下では、さらに文化的な進化をも考慮したモデルを構築するには、どのような要素を付加すればよいかを考える。

人間の判断は、生物学的な要因のみならず、個人的に情報を収集する、周囲の人間と情報交換を行う、熟考する等の文化的な要因も影響している。原始的な例を考えると、自分以外の誰かが見知らぬものを食べたことで命を落としたと知れば、自分は「その食べ物は危険である」と認識して食べないようにするだろう。また、人間には想起しやすい事象に基づいて判断を行う傾向があることが知られている。これは利用可能性バイアスと呼ばれ、人間の利用可能な情報の量が限られていることに原因があると考えると、このような文化的な進化を、このモデル上において考慮することも可能だろう。例えば生物学的な要因によって決まる位置をリスク認知の初期値として捉え、集団内の個体同士がお互いの位置に関して情報交換を行うことで自分の位置を補正して、最終的なリスク認知とするようなモデル化も考えられる。

3. より複雑な社会経済現象を説明するモデルの可能性について

前章まで、人間の社会経済現象の一例としてリスク認知バイアスを取り上げ、これが生物学的な進化によって発生する可能性があることを、数理モデルを用いて示した。本章では、リスク認知バイアス以外の社会経済現象について、進化論的解釈を与える数理モデルがどのように構築できるかを模索する。そこで、生物学的な進化と文化的な進化が、経済活動や技術進歩等の人間の社会経済現象にどのように影響を与えているか、また今後特に文化的な進化をモデル化する際はどのような点に注目すべきかを、既存の文献をレビューしながら予備的に考察する。

3.1 経済の発生

ダンバーらは、様々な動物で見られる大脳皮質の大きさと群れの大きさの相関関係から、人間が相互に顔と身元を認識できる集団のサイズは高々150から230人程度である、と予測した (Dunbar 1993)。この集団サイズはダンバー数とも呼ばれるようになった。我々の祖先はサバンナ時代、恐らく当初はダンバー数程度の少数集団で暮らしていたと考えられる。この段階では、集団内のほとんどが互いに血縁者であったため、個体同士の協力関係を維持する主な駆動力は、前節で見た包括適応度を最大化するような進化にあった。しかし、文化的な進化によって獲得した技術の助け (例えば武器) を借りながら、猛獣等の自然界の脅威をしりぞけ、集団サイズを増大させていった後は、ある人間集団の脅威は別の人間集団となり、人間集団同士の争いが起こるようになった。これらのどの局面でも、各人に

とって相手が信用できるかどうかを見極めることは重要であった。何故なら自分が相手に有益なことをしたからといって、相手がそれに見合ったお返しをしてくれるとは限らず、いわゆるフリーライドが起こる可能性が否定できないからである。これは集団内の個体同士の関係にも当てはまるし、集団同士の場合にも当てはまる。それでは、血縁者以外の相手との協力関係が如何にして発生し得たか。これは、進化ゲームの研究によって、Tit-for-tat（やられたらやり返す）という一見野蛮な行動規則が、協力関係を維持するための安定解であることが見出されたことによって説明がつく(Axelrod 1981)。実際、このような血讐の文化はごく最近まで見られた(塩田 2006)。

このような流れの中で、経済はどのようにして発生したのだろうか。このことを考えるために、経済活動に必要な、数という概念の発明にまでさかのぼる。数を正確に数えるという文化的な活動が芽生えたのは、集団同士が血讐に明け暮れていた頃であると考えられる。敵地に送った兵士が帰ってこなかった場合に、部族によってはその補償を求めるといったことが必要となったからだ。このような公平な取引を行うためには、数を正確に数える技術が必要であった。当初は、人やものの数を数える時に、一つの特別な石と対応させて数えていたが、やがて石では数え切れなくなるほどに数の規模が膨れ上がってきた。そこで、数をまとめて数える方法、すなわち5進法や10進法が発明された(ベントレー 2009)。このような数を扱う技術の文化的な進化によって、人類は自分が良く知った人間として把握しきれぬ人数、つまりダンバー数以上の人間についても扱えるようになったと考えられる。これは今から4000年前頃のことであり、人類史上から見ればごく最近のことである。

この等価交換を可能にする石と、数を数える技術の確立が、経済活動の原点となった。ここで重要になるのは、貨幣(交換の単位となる石)への信用である。貨幣への信用とは、それを使う自分以外の人間全てへの信用である。なぜなら、同じ貨幣が同じ価値を持つことは、貨幣を使う人間同士で、互いが貨幣価値への約束を覆さないだろうと信用することによって成り立つからである。これは、血縁関係にある他人や近隣部族等、直接的に利害を与える関係にある他人以上に遠い関係にある、顔も見知らぬ人間との相互的な信用が必要であることを意味する。経済とは、人類がより遠い人間との信用関係を互いに確立した上で成り立っているという点で、人間の高い徳性に基づくものである。また、交換という行動は、人間のみが学習できる高度な特性であり、チンパンジーには交換を学習させることができないことが指摘されている(リドレー 2010)。

人間はヒューリスティクス、限定合理性(Rubinstein 2008)などに基づく様々な不合理性を抱えている。新古典派経済学では、経済主体は完全に経済合理的な振る舞いをする、即ち個人は利潤を最大化する振る舞いをする、という前提の基に理論が構築されたが、この考え方には既に限界が来ている。例えば、本質的に同一の内容の質問であっても、問い方を変化させることで選択が変化し、利益よりも損失を忌避する傾向が現れる「フレーミング効果」が知られており(Tversky 1981)、人間の選択に関して完全合理性が成立しないことがわかっている。このような人間の意思決定における不合理性は、前章で見たよう

な包括適応度の考え方に基づく、生物学的な進化によって得られたリスク忌避的な行動に根差していて、前章と同様の枠組みによって説明できるかも知れない。また、交換経済においては、自分がアクセスできないものを交換して双方が得をするという構造が成り立っていれば、利益について公平性は必要なかったかもしれない（リドレー 2010）が、最後通牒ゲームに見られるように、不公平感を感じた時には自分が損をしてでも相手に一矢報いようと行動するなど、人間の公平性への欲求は様々に変化すると考えられる。数理モデルを考える上でも、財に対するアクセスの容易さが、公平性の感じ方に寄与するという観点が必要かもしれない。

3.2 技術進歩

人類は火を使えるようになったことで体毛を失い、記憶力を犠牲にする代わりに推論力を高め、文字を記録するという技術を獲得したと考えられている（ハンフリー 2004）。また、料理文化の獲得によって栄養摂取の効率化が成され、消化器官に割くエネルギーを脳の発達に回せるようになったとも考えられている（ランガム 2010）。これらは、技術の文化的な進化によって、たとえ生物学的な長所を犠牲にしても、正味の利益を増やすことができた例である。このような段階では、生物学的な選択圧を弱めることに文化的な進化が大きく貢献していただろう。そして文化的な進化が進むことによって、生物学的な選択圧を低下させることに成功し、また進化ゲーム的な協力関係によってより大きな集団サイズを維持できるようになった。集団サイズがあるサイズを超えると、より多くの文化を保持できるだけの集団的知能が確保された。文化はますます発展し、以前よりもさらに大きな集団サイズを維持することができるようになると、文化的な進化の速度は生物学的な進化の速度に比して圧倒的に速くなった。このような集団サイズの相転移点がダンバー数に相当すると考える。ダンバー数に達しない集団は、文化を維持できるだけの集団的知能を持つことができず、衰退していく。実際、タスマニア島民等で、小規模の民族の中で技術が衰退していった例が知られている。このような考え方は、リドレーが主張するカタラクシー（リドレー 2010）や、カウフマンが主張する文化の自己組織化（カウフマン 1999）、さらには外適応に基づくポジティブフィードバック（Lane 2009）にも対応すると考えられる。

技術進歩の原動力は、模倣を介した人間同士のアイデアの交換と、模倣の失敗である（リドレー 2010）。この構造は、遺伝子が交叉によって混合され、突然変異によってコピーに乱れが生じるという、生物学的な進化におけるダイナミクスと非常に似ている。他人の模倣を行うという機能は、他人が自分とは違うことを認識するメタ認識の能力に立脚した、人間の持つ高度な機能の一つである。模倣は、文化的な進化の駆動力であると同時に、共感を生む原動力の一つになっており、協力関係を支える基盤になっているとも考えられる。なぜなら、他人の模倣をすることによって、他人が起こした行動の過程、結果、そして最終的にどのような感情を持つか、までを追体験することができるからである（松沢 2011）。

人間同士の交流が密であるほど、文化的な効率性が高いと主張する、ソーシャルキャピ

タル（社会関係資本などと邦訳される）と呼ばれる概念がある（パットナム 2006）が、技術進歩はこのソーシャルキャピタルの概念とも関連がある。社会的な結びつきはネットワークの密度の高さ・ネットワーク自体の大きさと捉える事が出来、文化的な進化の速度は、このネットワーク上でアイディアの交叉や突然変異が起こる頻度の高さと考えられる。技術進歩促進を目的として資金を投入しても思ったような効果が得られないのは、このようなネットワーク構造に影響を与えるものではないからではないか。ネットワークが大きく密度が高いものであれば、アイディアの交叉も突然変異が起こる頻度は大きくなる。人間をノード、アイディア交換の経路をエッジとした複雑ネットワークとして考えた場合、この複雑ネットワークの成長と、このネットワーク上での情報の交叉・突然変異としてモデル化できそうである。意図的に技術進歩を促進するには、如何にネットワークの構造を密で大きいものにするか、というネットワーク構造の設計問題として記述できるかもしれない。

前節で見た交換経済も技術進歩と関係がある。交換経済は、分業化を推し進めた。互いがアクセスできないものを交換し合えば、両者が得をし、その結果分業化が進むためである（リドレー 2010）。これによって社会的な効率性はさらに上がり、交換経済も分業もますます進んだ。この分業は専門家に伴う技術の進歩によって可能となり、その技術の維持には集団サイズが十分大きい必要がある。この繰り返しで、集団サイズの巨大化と分業による多様化がさらに進み、技術もますます進歩した。このような分業と社会の成長を、生物的なアナロジーで考える。生物では、胚という単一の細胞が分裂し、これらの細胞が分裂を繰り返しながら、分化することで多様な臓器を形成し、これらの異なる臓器同士が協調することによって生物として機能している。つまり、発生の概念がある。この発生の概念は、人間社会についても同様に当てはまるのではないだろうか。すなわち、人間という単一の主体が相互作用することで形成されるコロニーが組織であり、これら組織はそれぞれ分業を行っており、その役割は多様である。このように分業する多様な組織が、相互作用して成り立っているのが社会である。多様なサブシステムが相互作用しており、その階層構造が幾重にも重なることで、全体として機能しているという点で、生物も社会も同様の構造を持つとみなせる。このような観点に立ち、複雑ネットワーク上での各人の役割の分業を細胞分化と捉えれば、細胞分化を考慮した進化モデル(Stanley 2003)の発想に基づいたモデル化が有効かもしれない。

4. まとめ

本稿内のリスク認知バイアスに関する数理モデルは、現在よりも選択圧が高かったサバンナ時代を想定したが、生存確率・豊かさに関して、現在はサバンナ時代と比べて遥かに恵まれた時代である。それに関らず、我々の社会経済活動においては、リスク認知バイアスの例で見たように、様々な局面で合理的とは言い難い意思決定がなされることがある。

このようなことが何故起こり得るのかを理解するために、進化的な解釈に基づいて議論をできるような数理モデルが必要である。

また、本稿で検討を試みたようなモデルにおいては、モデル自体の精緻さや予測への利用可能性よりも、むしろモデルに基づいて現象のメカニズムを様々に議論し、理解を深めることが重要である。このようなモデルを、人間の様々な社会経済現象を対象として構築し、進化のメカニズムに基づいて統一的に理解し、環境リスク規制・市場規制のあり方や、技術進歩を促進するための法の在り方などについて、より合理的で安定性の高い意思決定を行うための道具とすることが目標である。

参考文献

- 池谷裕二, 2009: 単純な脳、複雑な「私」, 朝日出版社
- 塩田光喜, 2006: 石斧と十字架 —パプアニューギニア・インボング年代記—, 彩流社
- アントニオ R. ダマシオ, 2010; デカルトの誤り 情動、理性、人間の脳, 筑摩書房
- スチュアート・カウフマン, 1999: 自己組織化と進化の論理 —宇宙を貫く複雑系の法則—, ちくま学芸文庫
- ダン・ガードナー, 2009; リスクにあなたは騙される—「恐怖」を操る論理, 早川書房
- ディラン・エヴァンス, 2003; 超図説 目からウロコの進化心理学入門—人間の心は10万年前に完成していた, 講談社
- デビッド C. ギアリー, 2007; 心の起源 —脳・認知・一般知能の進化—, 培風館
- デビッド F. ビョークランド, 2008; 進化発達心理学 —ヒトの本性の起源—, 新曜社
- ドナ・ハート, 2007: ヒトは食べられて進化した, 化学同人
- 日本リスク研究学会, 2006: リスク学事典, 阪急コミュニケーションズ
- ピーター J. ベントレー, 2009; 数の宇宙, 悠書館
- マーティン・デイリー, 1999; 人が人を殺すとき—進化でその謎をとく—, 新思索社
- マット・リドレー, 2010: 繁栄—明日を切り拓くための人類10万年史—, 早川書房
- リチャード・ランガム, 2010; 火の賜物 —ヒトは料理で進化した—, エヌティティ出版
- ロバート D. パットナム, 2006; 孤独なボウリング —米国コミュニティの崩壊と再生—, 柏書房
- Amos Tversky and Daniel Kahneman, 1974; Judgment under Uncertainty: Heuristics and Biases, Science, 185 (4157), pp. 1124-1131
- Amos Tversky and Daniel Kahneman, 1981; The Framing of decisions and the psychology of choice, Science, 211 (4481), pp. 453-458
- Ariel Rubinstein, 2008; 限定合理性のモデリング, 共立出版
- David Lane, Sander van der Leeuw, Denise Pumain, and Geoffrey West, 2009; Complexity Perspectives in Innovation and Social Change, Springer-Verlag
- Kenneth O. Stanley and Risto Miikkulainen, 2003: A Taxonomy for Artificial Embryogeny, Artificial

- Life, 9(2), pp. 93-130
- Louise Barrett, Robin Dunbar, and John Lycett, 2002; Human Evolutionary Psychology, Princeton University Press
- Paul Slovic, 2007; "If I look at the mass I will never act": Psychic numbing and genocide, Judgment and Decision Making, 2(2), pp. 79-95
- Paul Slovic, Melissa Finucane, Ellen Peters, and Donald G. MacGregor, 2004; Risk as analysis and risk as feelings: Some thoughts about affect, reason, risk, and rationality, Risk Analysis, 24(2), pp. 311-322
- Robert Axelrod and William D. Hamilton, 1981; The Evolution of Cooperation, Science New Series, 211(4489), pp. 1390-1396
- Robin. I. M. Dunbar, 1993: Coevolution of neocortical size, group size and language in humans, Behavioral and Brain Sciences, 16(4), pp. 681-735
- Simon Hampton, 2009; Essential Evolutionary Psychology, Sage Publications Ltd
- William D. Hamilton, 1964; The genetical evolution of social behaviour. I. J Theoretical Biology 7 (1), pp. 1-16
- W. Troy Tucker, Scott Ferson, Adam M. Finkel, and David Slavin, 2008; Strategies for Risk Communication -Evolution, Evidence, Experience-, New York Academy of Sciences

補遺

本補遺では、本文内 2.2 節で取り上げた、リスク認知バイアスの発生起源を説明する簡易的な数理モデルについて、解析解の導出過程の例を示す。複数世代にわたって子孫を考慮する場合や、繁殖率が報酬に比例する場合など、定式化のさらなる拡張についても併せて議論する。

(1) 単純なケースについての解析解の導出

親個体 1 体と、その子孫個体 1 体について、包括適応度を最大化するリスクからの距離の解析解を導出する方法を提示する。また、包括適応度を最大化するリスクからの距離が、個人の報酬の期待値を最大化するようなリスクからの距離よりも常に大きくなることを示す。

R : 1回のゲームで得られる報酬

A : 1回のリスクを生き延びる生存確率

P : 個体の位置($P_{max}-P$ = リスクからの距離)

P_{max} : リスクが存在する位置

j : 各個体がゲームに参加する回数 (1以上の整数)

i : 子孫のインデックス

a_i : 子孫個体との世代ギャップ

n : 血縁個体が認識できる子孫個体の数

r_i : 血縁度

c : 利他行動にかかるコスト

E : j 回のゲームで得られる報酬の期待値

報酬 R と生存確率 A を P の関数として

$$R = \frac{P}{P_{max}}, \quad A = \left(1 - \frac{P}{P_{max}}\right) \quad (1)$$

とし、 E を以下の通りとする。

$$E = jR \cdot A^j = j \frac{P}{P_{max}} \cdot \left(1 - \frac{P}{P_{max}}\right)^j \quad (2)$$

生物学的な進化によって得られた一般的な心理的傾向に注目することを目的とし、各個体を取る P の値は、例えば他者との情報交換などによって変化することはないものとする。また、本文2章内では、各個体が複数回ゲームに参加する場合を考慮していなかったが、ここではより一般的な場合として、各個体が j 回ゲームに参加する場合を考える。上式は $j=1$ を代入すると、ちょうど本文内2章内の簡易モデルに一致する。

各個体を得る報酬を最大化する場合は以下の問題を解けばよい。

$$\max(E) \quad (3)$$

E を最大化する P を $P_{opt_noninclusive}$ とする。 P について微分すると、

$$\begin{aligned} & \frac{\partial E}{\partial P} \\ &= j \frac{1}{P_{max}} \cdot \left(1 - \frac{P}{P_{max}}\right)^j + j^2 \frac{P}{P_{max}} \cdot \left(-\frac{1}{P_{max}}\right) \cdot \left(1 - \frac{P}{P_{max}}\right)^{j-1} \\ &= j \frac{1}{P_{max}} \cdot \left(1 - \frac{P}{P_{max}}\right)^{j-1} \cdot \left\{ \left(1 - \frac{P}{P_{max}}\right) - j \frac{P}{P_{max}} \right\} \\ &= j \frac{1}{P_{max}} \cdot \left(1 - \frac{P}{P_{max}}\right)^{j-1} \cdot \left(1 - \frac{P}{P_{max}}(1+j)\right) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

以上より、 $P_{opt_noninclusive}$ は

$$P_{opt_noninclusive} = \frac{P_{max}}{1+j} (j \geq 1) \quad (5)$$

このことから、ゲームへの参加回数が多いほど、リスクからの距離が遠い位置が最適であることがわかる。

次に、ハミルトン則が成立しており、子孫は先祖個体が参加した次のゲームに参加するとし、さらに子孫が取るリスクからの距離が、祖先と一致すると仮定すれば、包括適応度を最大化する問題は以下のようなになる。

$$\max \left(E + \sum_{i=1}^n (r_i A^{a_i} E - c) \right) \quad (6)$$

簡単のため、 $c=0$ 、子孫数が1の場合について考えると、以下のようなになる。

$$\max \left(E + \frac{1}{2} AE \right) \quad (7)$$

上式を満たす P を $P_{opt_inclusive}$ とし、 $E_{inclusive} = E + \frac{1}{2} AE$ とする。 P について微分すると、

$$\begin{aligned} & \frac{\partial E_{inclusive}}{\partial P} \\ &= E' + \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{P}{P_{max}}\right) \cdot E' + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{-1}{P_{max}}\right) \cdot E \end{aligned} \quad (8)$$

ここで

$$E' = j \frac{1}{P_{max}} \cdot \left(1 - \frac{P}{P_{max}}\right)^{j-1} \cdot \left(1 - \frac{P}{P_{max}}(1+j)\right) \quad (9)$$

であることに注意して展開すると

$$\begin{aligned} & \frac{\partial E_{inclusive}}{\partial P} \\ &= \frac{1}{2} \cdot \left\{ j \frac{1}{P_{max}} \cdot \left(1 - \frac{P}{P_{max}}\right)^{j-1} \cdot \left(1 - \frac{P}{P_{max}}(1+j)\right) \cdot \left(3 - \frac{P}{P_{max}}\right) + \left(\frac{-1}{P_{max}}\right) \right. \\ & \quad \left. \cdot j \frac{P}{P_{max}} \cdot \left(1 - \frac{P}{P_{max}}\right)^j \right\} \\ &= \frac{1}{2} \cdot j \frac{1}{P_{max}} \cdot \left(1 - \frac{P}{P_{max}}\right)^{j-1} \\ & \quad \cdot \left\{ \left(1 - \frac{P}{P_{max}}(1+j)\right) \cdot \left(3 - \frac{P}{P_{max}}\right) + \left(\frac{-1}{P_{max}}\right) \cdot P \right. \\ & \quad \left. \cdot \left(1 - \frac{P}{P_{max}}\right) \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

ここで

$$F = \left(1 - \frac{P}{P_{max}}(1+j)\right) \cdot \left(3 - \frac{P}{P_{max}}\right) + \left(\frac{-1}{P_{max}}\right) \cdot P \cdot \left(1 - \frac{P}{P_{max}}\right) = 0 \quad (11)$$

とすると、

$$\begin{aligned} F &= \left(\frac{(1+j)P^2}{P_{max}^2}\right) + \left(\frac{-3(1+j)P}{P_{max}}\right) + \left(\frac{-1}{P_{max}}\right) \cdot P + 3 + \left(\frac{P^2}{P_{max}^2}\right) - \frac{P}{P_{max}} \\ &= \left(\frac{(2+j)P^2}{P_{max}^2}\right) - \left(\frac{(5+3j)P}{P_{max}}\right) + 3 = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

⇔

$$P^2 - \left(\frac{(5+3j)P_{max}}{2+j}\right)P + \frac{3P_{max}^2}{2+j} = 0 \quad (13)$$

よって

$$P = \frac{1}{2} \cdot \left\{ \left(\frac{(5+3j)P_{max}}{2+j}\right) \pm \sqrt{\left(\frac{(5+3j)P_{max}}{2+j}\right)^2 - 4 \cdot \frac{3P_{max}^2}{2+j}} \right\} \quad (14)$$

$P \leq P_{max}$ なので

$$P_{opt_inclusive} = \frac{1}{2} \cdot \left\{ \left(\frac{(5+3j)P_{max}}{2+j}\right) - \sqrt{\left(\frac{(5+3j)P_{max}}{2+j}\right)^2 - 4 \cdot \frac{3P_{max}^2}{2+j}} \right\} \quad (15)$$

ここで $P_{opt_inclusive} - P_{opt_noninclusive}$ をリスク認知バイアスであると定義すると、 $P_{opt_inclusive} - P_{opt_noninclusive} < 0$ が常に成り立つことを示せばよい。左辺は

$$\begin{aligned} &P_{opt_inclusive} - P_{opt_noninclusive} \\ &= \frac{1}{2} \cdot \left\{ \left(\frac{(5+3j)}{2+j} - \frac{2}{1+j}\right)P_{max} - \sqrt{\left(\frac{(5+3j)P_{max}}{2+j}\right)^2 - 4 \cdot \frac{3P_{max}^2}{2+j}} \right\} \\ &= \frac{P_{max}}{2} \cdot \left\{ \left(\frac{(5+3j)}{2+j} - \frac{2}{1+j}\right) - \sqrt{\left(\frac{5+3j}{2+j}\right)^2 - \frac{12}{2+j}} \right\} \end{aligned} \quad (16)$$

となる。 j は1以上の整数で、

$$\left(\frac{(5+3j)}{2+j} - \frac{2}{1+j}\right) > 0, \quad \left(\frac{5+3j}{2+j}\right)^2 - \frac{12}{2+j} > 0 \quad (17)$$

なので、

$$\left(\frac{(5+3j)}{2+j} - \frac{2}{1+j}\right)^2 < \left(\frac{5+3j}{2+j}\right)^2 - \frac{12}{2+j} \quad (18)$$

が示されればよく、実際

$$\begin{aligned} &\left(\frac{(5+3j)}{2+j} - \frac{2}{1+j}\right)^2 - \left(\frac{5+3j}{2+j}\right)^2 + \frac{12}{2+j} \\ &= \frac{-4j}{(1+j)^2(2+j)} < 0 \quad (j \text{ は1以上の整数なので}) \end{aligned} \quad (19)$$

となり、 $P_{opt_inclusive} - P_{opt_noninclusive} < 0$ は常に成り立つ。

(2) より多くの子孫を包括適応度に考慮する場合

より多くの子孫を包括適応度に考慮して一般化する場合を考えるため、新たに以下を導

入する。

g : 何世代後の子孫までを考慮するか($1 \leq g \leq g_{max}$)

h : 繁殖率(1個体あたりどれだけ子孫を残すか)

すると、包括適応度の最大化は以下の問題として記述しなおせる。

$$\max \left(E + \sum_{g=1}^{g_{max}} h^g \left(\frac{1}{2} \right)^g (A^g E - c) \right) \quad (20)$$

h が定数だとした場合、 P の関数の形状には影響を与えないので、これを最大化する P はやはり $P_{opt_noninclusive}$ よりも原点に近くなる。

また、繁殖率は祖先個体を得る報酬の期待値に比例すると仮定し、 $h=dE$ (d は定数)と置き換えたとしても、

$$\max \left(E + \sum_{g=1}^{g_{max}} (dE)^g \left(\frac{1}{2} \right)^g (A^g E - c) \right) \quad (21)$$

となり、(1)と同様の議論から、これを最大化する P はさらに原点近くになる、即ちさらにリスク忌避的になると予想される。

包括適応度はあくまで利他行動の効果を説明するものであり、繁殖率が包括適応度に依存するというわけではない。上記のような定式化には、個体毎の繁殖率と包括適応度を明確に切り分けて記述することができるという利点があるため、このような混同を避けることができる。また、親個体と子孫個体でリスクに対する距離が同じであると仮定すれば、繁殖率が報酬と比例するか否かに関らず、常にリスク認知バイアスが発生することが予想される点も特徴である。