

進化シミュレーションによるリスク下の人間行動の創発 変動環境の下での行動進化について

Evolving Human Behavior under Risky Situations by Evolutionary Simulation:
On Evolution of Behavior in Unstable Environment

鶴島 彰

Akira Tsurushima

*1セコム株式会社 IS 研究所

SECOM CO., LTD. Intelligent Systems Laboratory

By simulating the human evolutionary process, Tsurushima and Komatsuzaki analyzed human risk behaviors and concluded that the evolved behavior is risk accepting. In their simulations, however, the environmental conditions were stable within the simulation period, yet the Pleistocene, the background of human evolution, was an unstable and harsh period. In this study, we extend the Tsurushima and Komatsuzaki simulation model so as to change the environmental conditions within the simulation period and analyzed the influence of the environmental variation on the evolved human risk behavior. The influence of environmental change has appeared as a distribution of simulation results; the evolved behavior itself has been independent of environmental variations.

1. はじめに

リスクや危険な状況下での人間行動には非合理性があり予測が難しいことが知られている。近年の研究によるとこの様な人間行動は、後天的な学習だけでなく、生得的・器質的な要因があり [Ishii 12]、種によっても異なる [Real 91] ため、生物の進化過程で獲得されたと考えられるようになってきた。

[鶴島 16] は、マルチエージェントシミュレーションでエージェントを進化させることにより、リスク状況下での人間行動のモデルを獲得しようとした。彼らは、エージェントに、生物学でいうライフヒストリ (Life History) を組み込むことにより、人間や他の生物における行動の進化を創発させ、その結果を比較することにより人間を含む様々な生物のリスク行動と進化要因の関係を分析した。ここでライフヒストリとは、r-K 戦略、育児コスト、性比などをはじめとする、種に特有の形質や行動様式のことである。様々な環境条件に基づいたシミュレーションにおいて、進化過程でエージェントの人口が安定する全てのケースにおいて、リスク受容的な行動が進化した。これらのケースには、多様な環境条件のものが含まれるが、リスク受容の強さを示す値は環境条件によらずほぼ一定であった。さらに、エージェントのライフヒストリを変更した他の生物との比較において、リスク受容的な行動の進化は他の生物でも同様で、ライフヒストリの単純な生物ほどこの傾向が強い事が分かった。結果の妥当性は未検証だが、心理実験などを通じた妥当性の評価が期待される。

[鶴島 16] は、シミュレーションパラメータを変えて多様な環境条件における進化結果の分析を行ったが、一方で、シミュレーション期間中の環境条件は常に一定で、進化中に環境が変動する影響は検討していなかった。しかし彼らがモデル化した、人間進化の背景となる更新世の世界は、氷期と間氷期を繰り返す、環境変化の激しい時代だった。このことを考えると、単に多様な環境条件でシミュレーションを行うだけでは十分でなく、進化期間中に起きる環境条件の変動が進化結果に与える影響を調べる必要があると考えられる。

本稿ではこの問題に取り組むために、[鶴島 16] のシミュレーションモデルを拡張する。そして彼らが選んだ環境のパラメータセットの範囲内（人口が安定して進化する環境もあれば、絶滅する環境もある）で、進化中に環境をランダムに変動させ、その影響が進化結果に与える効果を分析する。

2. シミュレーション

まず本節において、[鶴島 16] のシミュレーションモデルとその結果について説明する。

モデルは環境とエージェントから構成され、進化の背景を表現した環境の下で複数のエージェントが活動し、子供が生まれたり死んだりする。エージェントは遺伝子と呼ばれる 0 と 1 から構成される固定長のコードをもち、一定の規則に従ってそれが子孫に受け継がれる。遺伝子はリスク状況下での行動を表現したもので、エージェントは遺伝子にコード化されたルールに基づいて日々意思決定を行い、その結果により寿命や再生産のパートナーとして異性から選ばれる確率が変化する。ランダムに生成した遺伝子を初期値として、一定の期間シミュレーションを実行した結果、生存しているエージェントのすべての遺伝子を合わせた遺伝子プールが、リスク状況下でのエージェントの行動を表したものである。エージェントのライフヒストリを人間に特有のものとする事で、進化した行動が人間のリスク行動を表していると考えられる。

環境は、進化の背景となった更新世の世界を抽象的に表現したもので、400 個のフィールドから構成されている。各フィールドは、便益 (B)、コスト (C)、安全 (S) の三つの値を持ち、それぞれ特定の範囲の一律分布からランダムに値が選ばれる。

エージェントには男女の性別があり、性決定遺伝子とフィールドを選択するルール遺伝子、誕生日、そしてエネルギー (E) と呼ばれる値を持っている。エージェントの基礎代謝量は、男が 10、女が 8 と定められている。全てのエージェントは、誕生時に基礎代謝量の 20 倍のエネルギーが与えられる。シミュレーション時間の一日ごとに、エネルギーから基礎代謝量が引かれ、0 になるとエージェントは死亡し環境から取り除かれる。これを避けるために、エージェントはフィールドをひとつ選ぶことで、環境からエネルギーを獲得しなければならない。

フィールドを選択すると、まず安全 (S) の値で示された確率

連絡先: 鶴島 彰

セコム株式会社 IS 研究所

サービスエンジニアリングディビジョン

a-tsurushima@secom.co.jp

01011110 11011101 00111111 01101110 00011001 01111111 01111111 01111111 01111101

制御 (無効) 0.25 (無効) 0.1 0.5 0.5 0.5 (無効)
 $C \geq 10$ $E \geq 50$ $S < 15$ $C < 20$ $B < 100$

図 1: $B \in [50, 150], C \in [0, 40], S \in [1, 30]$ で E の最大値を 500 とした場合の、エネルギーが 50 以上のとき、便益が 100 未満、コストが 10 以上 20 未満、安全が 15 未満のフィールドを選ぶルール遺伝子の例

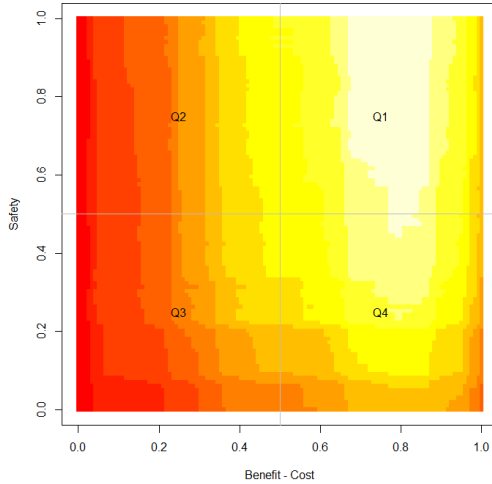


図 2: シミュレーション結果の例

でエージェントは死亡する。エージェントが生き残った場合、便益とコストの差分 $P = B - C$ (利益) がエネルギーに加算される。ここでエネルギーが正の値であればエージェントは一日生き延びることができる。フィールドをひとつ選ぶごとに、エージェントが安全 (S) と利益 (P) の間で意思決定を行ったとみなすことができる。エージェントに選ばれたフィールドは便益の値が一度 0 にもどる。そして選択された日から 10 日後に新しいフィールド値が再び振りなおされる。フィールドの便益 (B) の値は、期待値 100 の一様分布から選ばれるので、コストと安全を考えなければ、ひとつのフィールドはちょうど一人の男のエージェントを養うことができる (便益一日あたりの期待値は 10 で、この値は男の基礎代謝量とちょうど釣り合っている)。環境には 400 のフィールドがあるので、環境収容力は、理論的には男なら 400 人で女なら 500 人である*1。エージェントは 1 から 6 個のルール遺伝子を持ち、ルール遺伝子にはそれまでに獲得したエネルギーの総和であるルールスコアという値が付いている。エージェントは遺伝子にコード化されたルールに従ってフィールドの選択を行う。ルール遺伝子の例を図 1 に示す。

エージェントに組み込んだライフヒストリを以下にまとめる。

- エージェントの寿命は 30 歳で、10 歳から 30 歳まで毎日消費行動 (フィールドの選択) を行う。ただし女性は男性の 0.8 倍の頻度でのみ消費行動を行う。
- 基礎代謝量の 50 倍以上のエージェントは再生産を行う。再生産が可能なのは、男性は 10 歳から 30 歳まで、女性は 10 歳から 20 歳までとする。ただし女性エージェントは前回の再生産から 730 日間は、再生産禁止期間とする。特定の発情期はなく、可能な場合は常に再生産が行われ

*1 実際にはコストと安全があるので、環境収容力はずっと低くなる。

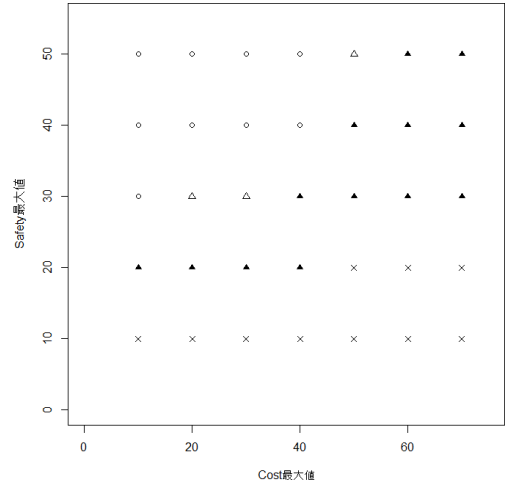


図 3: ○は全ての結果で人口が安定、△は半数以上の結果で安定、▲は半数以上の結果で不安定、×は半数以上の結果で絶滅

る。再生産のペアは、エージェントのルールスコアによるルーレット選択によりランダムに決められる。再生産の 365 日後に子供のエージェントが誕生する。子供の性別は両親から受け継いだ性決定遺伝子により確率的に決まる。誕生以前に母親が死亡した場合、子供の誕生は行われない。

- 基礎代謝量の 50 倍以上のエネルギーをもつエージェントは、50 倍未満のエージェントに余剰分を譲渡する利他行動を行う。直系の子への利他行動と、第三者への利他行動があり、直系の子への利他行動を行うのは女性のみとする。

子供の遺伝子は、両親から受け取った遺伝子の交叉と突然変異により作られる。交叉は多点交叉で行われ、0.02 の確率で突然変異が起きる。

3. シミュレーション結果

図 2 に、 $B \in [50, 150], C \in [20, 0], S \in [1, 40]$ のときのシミュレーション結果の例を示す。この図は、シミュレーション終了時に生存していたエージェントのルール遺伝子を集めた遺伝子プールを表現したもので、それぞれのルールが選択する便益、コスト、安全の値の範囲を合成したものである。図の縦軸は安全 (S) を、横軸は利益 (便益とコストの差、P) を表し、明るいほどそのフィールドを選択する行動が多く、暗いほどそれが少ない事を意味する。この例では Q1 が最も明るく、この部分は安全も利益も高く、エージェントにとって最も有利な部分なので、この進化は合理的といえる。Q2 と Q4 は、一方が安全は高いが利益が低く、他方はその反対というトレードオフの関係にある。Q2 に比べて Q4 が明るいことから、進化したエージェントは安全よりも利益を優先すると結論付ける事がで

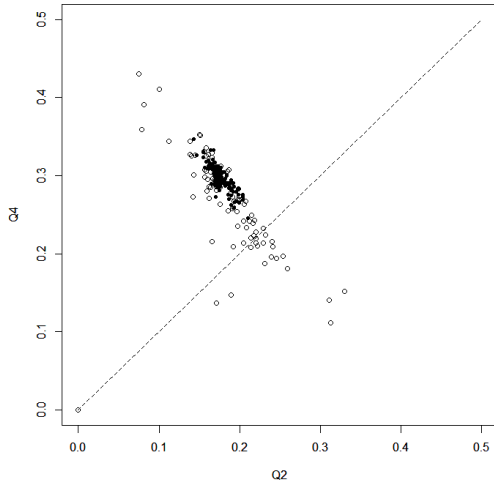


図 4: q_2 と q_4 の散布図。○は環境変動がある場合（本稿の結果）。●は環境が安定な場合

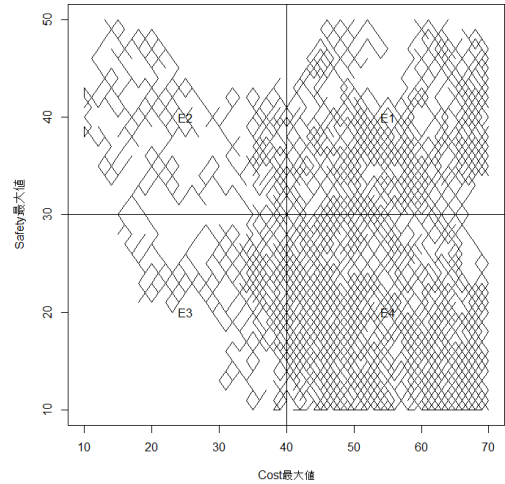


図 5: 環境変動の一例。この例では環境条件が、 S^{max} が小さく C^{max} が大きい、生存に不利な領域 (E4) に偏っている

きる。

シミュレーション結果は、1. 人口が安定する場合、2. 人口が不安定な場合、3. 絶滅が発生する場合の三通りに分類することができる。図 2 のような結果は 1 のケースで典型的に見られるものである。コストの最大値を 10 から 70、安全の最大値を 10 から 50 まで様々に変化させシードを変えた、合計 350 通りのシミュレーション結果 (図 3) のうち、130 ケースが 1 の「人口が安定する場合」であった。さらに、その全ての場合において Q_4 が Q_2 よりも明るく、 Q_4 を選ぶ行動の頻度が高かった。人口が安定する事が、ある形質の進化が種に定着する必要条件と考え、[鶴島 16] は進化した人間行動はリスク受容的であると結論付けた。

4. 変動環境

人類進化の背景となった更新世の世界は、その大部分が氷河時代であり、ビーバー、ドナウ、ギユンツ、ミンデル、リス、ヴェルムの六回の氷期と間氷期を繰り返す、不安定で厳しい環境であった。この様な大きな環境変動は、生物進化にも少なからぬ影響を与えたと思われる。しかし、[鶴島 16] のシミュレーションでは、コストと安全の最大値を変えることにより多様な環境を表現しているが、シミュレーション期間内では環境変化は発生せず、常に一定の環境条件の下で進化が行われている。そのため環境変化が進化に及ぼす影響がモデルに組みこまれておらず、このことが分析におけるひとつの限界となっている。本稿ではこの問題に取り組むために、モデルを拡張し環境変化が行動の進化に及ぼす影響を分析する。

[鶴島 16] と同様、環境を表すパラメータとして安全の最大値 (S^{max}) とコストの最大値 (C^{max}) をとり、シミュレーション期間中、10 日に一度の割合で、ある規則に従ってこの二つを変化させることにより環境変動をモデルに組み込む。二つのパラメータの変動の範囲は、[鶴島 16] と同様 $S^{max} \in [10, 50]$ 、 $C^{max} \in [10, 70]$ とした。環境変動は、開始から $10n$ 日後のパラメータが、以下で与えられる確率過程 (ランダムウォーク) として与えられるように実現した。

$$S_n^{max} = S_0^{max} + \zeta_1 + \zeta_2 + \dots + \zeta_n \quad (1)$$

$$C_n^{max} = C_0^{max} + \nu_1 + \nu_2 + \dots + \nu_n \quad (2)$$

ただし、 ζ_1, ζ_2, \dots と ν_1, ν_2, \dots は、いずれも -1 または 1 をとる期待値 0 の確率変数である。各パラメータが変動の範囲を超えた場合の処理として、以下の二通りを試した。

- **A** : S_n^{max}, C_n^{max} の値が想定した範囲を超える場合は、 ζ, ν を 0 に置き換え、値が範囲内に留まるようにする。
- **B** : S_n^{max}, C_n^{max} の値が想定した範囲を超えた場合は、シミュレーションで使うパラメータを想定した範囲の最大値と最小値で代用する。

A はパラメータが頻繁に範囲内を行き来するのに対し、B は範囲内の最大値や最小値に張り付くため、範囲内での行き来は少なくなる。

5. 変動環境シミュレーション

環境変動を組み込んだモデルで、シードを変えて 100 回のシミュレーションを行った。その結果、A では 12 ケース、B では 43 ケースで絶滅が発生した。絶滅しなかったケースのうち、リスク受容的な行動 ($Q_4 \succ Q_2$) が進化したのが A では 70/88 ケース、B では 48/56^{*2} ケースだった。ここで q_1, q_2, q_3, q_4 を、遺伝子プールの各領域 Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 に対する評価値 [鶴島 16] で、値が大きいほどその領域を選択する頻度が高いとする。 q_4/q_2 をリスク受容的態度の強さを表す指標 (1 より大きいほどリスク受容的で小さいほどリスク回避的) と考えると、今回のシミュレーション結果では q_4/q_2 の平均が A は 1.606、B は 1.721。標準偏差はそれぞれ 0.873 と 0.897 であった。[鶴島 16] の人口が安定した場合のシミュレーション結果においては、 q_4/q_2 の平均が 1.715 で標準偏差が 0.201 であった。この二つを比較すると、平均値はほぼ変わらないのに対して、標準偏差の値が約 4 倍に増えている。このことから、環境変動の影響がシミュレーション結果の分散として表れている事がわかる。

図 4 は横軸に q_2 、縦軸に q_4 をとったシミュレーション結果の散布図である。環境変動を組み込んだシミュレーション結果を○で、[鶴島 16] の結果 (環境変動がない場合) を●でプロッ

*2 B で絶滅と生存のケースを足しても 100 にならないのは、 q_4/q_2 が無限大となったケースを分析から除外したため。

	最小値	平均	最大値
全シミュレーション (A)	-0.614	-0.005	0.597
絶滅のケース (A)	-0.614	-0.238	0.155
全シミュレーション (B)	-0.927	-0.010	0.994
絶滅のケース (B)	-0.927	-0.376	0.825

表 1: 絶滅したケースの $e_2 - e_4$ の比較

トした。図の破線は $q_4 = q_2$ の位置を表す。この図からも、多数回シミュレーションを繰り返したときの期待値は環境変動がない場合とほぼ変わらないものの、個々のシミュレーション結果は大きく分散し、時には絶滅することもあることがわかる。

式 1、式 2 で与えられる環境は期待値=初期値のランダムウォークなので、範囲内で定期的に移動するが、範囲全体を一律に動き回るとは限らず、偏りが生じるのが普通である。図 5 は、あるシミュレーション期間中の S^{max} と C^{max} の変化を表したものである。この例では生存に不利な E4 に偏った環境でシミュレーションが行われていることが示されている。このような S^{max} が小さく C^{max} が大きい生存に不利な領域で頻繁に推移したケースでは、絶滅の確率が高くなると考えるのが自然である。いま、 S^{max} と C^{max} が移動する範囲を、それぞれ 30 と 40 を境界として図 5 のように四分割 (E1,E2,E3,E4) する。E2 は安全が高くコストが小さい生存に最も有利な領域で、反対に E4 は最も不利な領域である。シミュレーション期間中に S^{max} , C^{max} が E1,E2,E3,E4 それぞれの領域に留まった時間の割合を e_1, e_2, e_3, e_4 ($\sum_{i=1}^4 e_i = 1$) とすると、 $e_2 - e_4$ の値が大きいほど生存に有利、小さいほど生存に不利な環境でシミュレーションが行われたことになる。表 1 に、全シミュレーションと絶滅したケースの、 $e_2 - e_4$ の値の最大値、平均、最小値を示す。これを見れば環境条件が、E4 の様な生存に不利な条件に留まる割合が大きいほど、絶滅の可能性が高い事が分かる。

では $e_2 - e_4$ の値、つまり環境条件における生存に対する有利不利の違いは、進化結果であるリスク回避性の強さ (q_4/q_2) にどんな影響を与えるだろうか。たとえば不利な環境で進化したエージェントほどリスク回避性が強く、有利な環境で進化したエージェントほどリスク回避性が弱く表れるといった事が起きるだろうか。これを確かめるために、絶滅したケースを除いたシミュレーション結果について、生存の有利不利を表す $e_2 - e_4$ と進化結果のリスク回避性の強さを表す q_4/q_2 について相関係数を調べた。その結果、A と B の相関係数はそれぞれ 0.059, 0.163 であり、生存に関する有利不利とリスク回避性の間に相関は見つからなかった。

6. 考察

5. 節の結果から、シミュレーション期間中の環境変動の影響は主に結果の分散となって表れ、結果の期待値そのものには影響しない事が分かった。また、環境変動における生存に有利不利の差も、人口や絶滅の確率には影響を与えるものの、進化結果である行動 (q_4/q_2) そのものには影響しないことが分かった。つまりシミュレーションモデルに環境変動の影響を組み込んだとしても、結果のバラツキは大きくなるものの、結果そのものには影響は与えず、結論として [鶴島 16] の結論を直ちに修正する必要はないと言える。また [鶴島 16] は、環境条件を有利なグループと不利なグループに分けてシミュレーション結果を比較した分析において、 q_4/q_2 値の平均に大きな差が見ら

れなかったことを報告している。これらを併せて考えると、リスク行動の進化に環境条件が与える影響は大きくなく、生物としてのライフヒストリーの違いに、進化結果はより強く影響されるという推論が成り立つ。

とはいえ、環境変動が個体の生存や種の定着、さらにその帰結としての進化に依然大きな影響を与える要素であることは疑いえない。事実多くの生物には環境変動の影響から個体を守る機能である学習が備わっている。

進化と学習は生物が環境に適応するための二大戦略であり、進化のみでは対応することができないような、個体の生存期間中に起きる細かい環境変動に対して個体学習は有効に働く。当然、学習は人間にとっても基本的な能力であり、進化過程においてもこの学習能力が環境変動による影響の抑制に効果を発揮し、進化そのものにも大きな影響を与えてきた [Baldwin 96]。本来人間のリスク行動は、進化などの生得的要素だけで決まるのではなく、後天的な経験による学習も大きな影響を与えている。そのため、リスク行動を問題にするとき、進化だけではなく、学習の影響も併せて分析することが必要と思われる。たとえば [Suzuki 16] は、他者の行動観察に基づく学習が人間のリスク選好態度を変化させ、さらにこの変化は尾状核における脳内の神経表現を変える事を報告している。一方、[Hinton 87] は、学習機能が進化結果に大きな影響を及ぼす事をエージェントシミュレーションにより示している。これらの事実を考えると、本稿の結論のように環境変動が進化結果に直接的には影響しなかったとしても、進化と学習を同時に考慮した場合、それらの相互作用によって進化結果であるリスク行動が間接的な影響を受ける可能性は排除できない。少なくとも人間のリスク行動に学習が影響することは事実なので、今後は、学習と進化と環境変動の三者を同時に考慮できるようにシミュレーションモデルを拡張していく必要があるだろう。

参考文献

- [Baldwin 96] Baldwin, J. M.: A new factor in evolution, *American Naturalist*, Vol. 30, pp. 441–451 (1896)
- [Hinton 87] Hinton, G. E. and Nowlan, S. J.: How learning can guide evolution, in *Complex Systems 1*, pp. 495–502, Complex Systems publications, Inc. (1987)
- [Ishii 12] Ishii, H., Ohara, S., Tobler, P. N., Tsutsui, K., and Iijima, T.: Inactivating Anterior Insular Cortex Reduces Risk Taking, *The Journal of Neuroscience*, Vol. 32, No. 45, pp. 16031–16039 (2012)
- [Real 91] Real, L. A.: Animal Choice Behavior and the Evolution of Cognitive Architecture, *Science*, Vol. 253, pp. 980–986 (1991)
- [Suzuki 16] Suzuki, S., Jensen, E. L. S., Bossaerts, P., and O’Doherty, J. P.: Behavioral contagion during learning about another agent’s risk-preferences acts on the neural representation of decision-risk, *PNAS (Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America)*, Vol. 113, No. 14, pp. 3755–3760 (2016)
- [鶴島 16] 鶴島 彰, 小松崎 常夫: リスク状況下での行動の進化とライフヒストリー, *認知科学*, Vol. 23, No. 4, pp. 377–394 (2016)