

意思決定の適応モデル： 進化的計算による視点

高木 英 至*

ミクロ経済学ないしミクロ経済学に基礎を置く合理的選択論は、行為主体が一定の固定的な評価関数（効用関数など）を持って状況の中で一意な選択をなすと仮定する。プロスペクト理論／行動経済学はその評価関数を実際の人間行動により適合したものに修正している。本稿ではさらに、プロスペクト理論の評価関数（効用関数、確率重みづけ関数）が「進化」ないし「適応」の観点から生成されるというアイデアを述べる。単純な計算機実験の結果を示すことにより、適応の視点から多様な効用関数が出現できること、確率評定の仕方が変異し得ることをデモンストレーションする。

キーワード：効用関数，プロスペクト理論，進化的計算

1 はじめに

1.1 合理的選択論

人間行動に基礎を置きながら社会現象を説明するモデルを構築しようとするとき、選択肢として最も有力なのは合理的選択論（Rational Choice Theory）である（Abell, 1991; Elster, 1989）。合理的選択論の要件を何と定めるかは理論家によって変異があり得る。が、基本的にはミクロ経済学と同様に、行為主体が状況を一定の評価関数（効用関数など）によって評価し、その評価結果によって行為の選択肢を一意に選ぶ、と考えることになる。人間の行為のメカニズムの関する社会科学上の主張はいろいろあるにせよ、社会現象を説明する演繹体系の中で用いることができる理論装置は、合理的選択論において他にない。合理的選択論の隆盛は、20世紀後半以降ゲーム理論が進展し、普及したことを背景とするといえるだろう。

むしろ合理的選択論の評価は、社会科学の

中でさまざまである（e. g., 盛山, 1997）。一方では合理的選択論の機械的な人間観に対する文学的な嫌悪の表明もあれば、効用を公理体系と見たときの不備の指摘もある。実際、効用系に対する反例、逆理の存在の指摘の歴史は古い（酒井, 1982）。

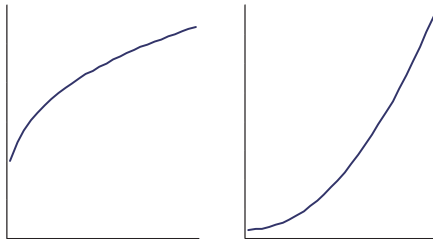
こうした負の評価の存在にもかかわらず合理的選択論の魅力が持続するのは、合理的選択論が位置する社会科学の課題特性に故があると見るべきだろう。社会科学の課題は社会現象を説明することであり、行為の選択そのものはそのための前提に過ぎない。その前提の妥当性は、合理的選択を前提としたときの社会レベルの帰結（予測）に対する評価に基づくのが原則である。すなわち、前提自体の良し悪しや好み、現実性を議論するのは本筋ではない、という事情である。社会科学の演繹体系に組み込める、合理的選択論に代わる選択肢は見当たらない。

しかし、人間行動そのものの説明に関心を向けたとき、合理的選択論、ないしその背後の効用系に対する不満は正当性を帯びて来る。

* たかぎ・えいじ

埼玉大学教養学部教授、社会心理学

その不満への対処として次に述べるプロスペクト理論ないし行動経済学が出現する余地があったと見るべきだろう。



(a)危険回避 (b)危険選好

図1:典型的な効用関数の形状

1.2 プロスペクト理論

不確実性下の意思決定事態を考えたとき、効用系による合理的選択の処理は、単純化すれば次のようになる。行為主体は結果に対する基数的（数量的）効用関数を持つと考え、その効用の値と（その値の結果が生じる）主観確率の積和（期待効用）を最大化する選択肢を行為主体は選ぶ、と考える（期待効用仮説）。効用関数の典型的な形状は図1のごとくである。上側に凸な効用関数(a)は危険回避的であり（限界代替率ないし限界効用の逓減）、下側に凸な関数(b)は危険選好的である。

Kahneman と Tversky らによるプロスペクト理論（ないし行動経済学）は、上記のような古典的な経済学ないし合理的選択論の定式化に対して重要な挑戦を提起している（Kahneman & Tversky, 1979; Maital, 2007）。古典的な経済学では、行為者は自己の効用関数から総資産の評価を行い、その総資産の評価から選択が生じると仮定する。その評価は行為者に固有の効用関数に基づき、効用関数はしばしば図1(a)のような上方に凸の（危険回避的な）形態であることが仮定される。対してプロスペクト理論は、大まかにいえば、次の前提によって古典的経済学理論に対峙している。①

選択の評価（効用関数）は総資産額によってではなく参照点（e.g., 現状）を基準にした変化への評価によってなされる。②参照点から見た gain であるか loss であるかによって効用関数の反応が異なる。概して人はlossに対してより敏感である。③不確実性が導入される選択事態では、確率も重み付け評価の関数によって評価される。

効用関数として次のような関数が例示されることもある。

$$u(x) = \begin{cases} x^\alpha, & \text{if } x \geq 0 \\ -\lambda (-x)^\beta, & \text{if } x < 0 \end{cases}$$

上記の関数は図2のような形状となる。図2(a)は極端に描いた場合であり、しばしば例示されるパラメータの値（ $\alpha = \beta = 0.88$, $\lambda = 2.25$ ）を使うと図2(b)のようになる。

1.3 意思決定の適応理論

上記のようなプロスペクト理論は、人間による選択の説明の観点からは大きな進歩といえる。プロスペクト理論ないし行動経済学の名によって進められた多くの経験的知見は、古典的な定式化による以上に、プロスペクト理論の定式化が説明力を持つことを示してきた（多田, 2003；友野, 2006）。

本研究の目的は、そのプロスペクト理論に対し、さらに適応モデル、つまり進化的な適応の観点を導入することにある。この適応モデルは次のアイディアから出発する。すなわち、これまで提起されてきた評価関数、例え

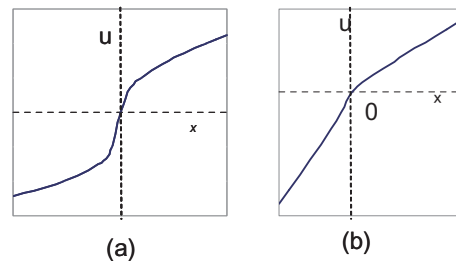


図2:プロスペクト理論が想定する効用関数

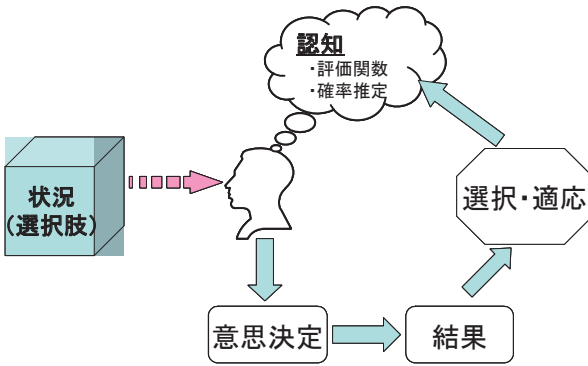


図3:意思決定の適応モデルの概念図

ば効用関数は、進化的な、ないし適応上の根拠によって生成されるのではないか、という点である。判断事態が量的（金額や確率など）に表現されるなら、人はプロスペクト理論が仮定するように、結果の価値の評価（効用関数）や可能性の評価（確率の重みづけ関数）を用いて判断するだろう。しかしそれらの関数は行為者に固有に備わっているというより、行為者が適応反応として獲得し（あるいは進化の過程で遺伝的に獲得し）、状況に応じて使い分けていると見るべきものだろう。例えばプロスペクト理論では、効用関数の仮定によって、ある額の獲得より同じ額の喪失の回避の方が行為者にとって重要となる。が、こうした損失回避反応は、損失によって行為者の生存が危うくなる事情に基づく適応的な戦略と見ることができるだろう。

適応モデルの概念図を描けば図3のようになる。行為主体が状況（選択肢群を含む）に対して適用する認知の中に、選択肢がもたらす結果を評価する関数、確率推定機能が含まれているだろう。従来の理論では、プロスペクト理論を含め、この認知の機能が固定的な与件として存在すると考えていた。しかしこの認知は、実は条件依存的と考えることができる。この認知に基づいて行為主体が意思決定し、その結果が生じる。その結果に応じ

た適応が生じ、認知自体が、少なくとも長い目で見れば適応的に選択されるであろう、と考える。

言い換えれば、この適用モデルは、合理的な意思決定そのものが、適応／進化というメタ原理の下で生成されると考えるのである。

こうした適応モデルの考えを概念上テストする単純な方法は、仮想の意思決定事態を計算上で生成し、進化計算によってどのような認知様式が形成されるかを確認することである。ここでは特に、プロスペクト理論の効用関数の形状などが進化的に生成されるか否かを、計算機実験によって評価しようとする。

2. シミュレーション1：生き残り基準の作動

2.1 生き残り基準

適応の考え方からすれば、危険回避的な効用関数が生じる場合を考えることは容易だろう。人は日々利得を得て生きてゆくでしょう。このとき、利得自体の期待値は同じであっても、利得のバラツキがあるとき、不運にして利得があまり得られない期間ができる可能性は高まる。この不運な期間があれば、全期間で得られる利得の総量ないし期待値が同じでも、生き残る可能性は減るだろう。つまり、危険回避的な効用関数とは、こうした不運な期間が生じることを回避する機能を果たすと見ることができる。人がこの状況に適応するとすれば、危険回避的な評価関数（効用関数）を持った方が適応的であることになる。

このアイディアが働く状況を次のように計算モデルとして操作化する。

2.2 判断事態

以下の計算機実験では計算上のエージェントに次のような選択肢を複数提示する。

[a, p; -b, 1-p]

すなわち、この選択肢を選べば利得 a の結果と利得 $-b$ の結果が生じ得る ($a, b \geq 0$)。それぞれが生じる確率は p と $1-p$ である。利得の a と $-b$ はエージェントの効用関数によって評価される ($u(a), u(-b)$)。また、 p と $1-p$ もエージェントの重みづけ関数 w によって評価されると考える ($w(p), w(1-p)$)。ただしプロスペクト理論に従い、 $w(p) + w(1-p) = 1$ という制約はない。

エージェントには1回のラウンドで10個の選択肢が提示され、自己の判断基準 (u と w) に従って1つを選ぶ。選んだ選択肢の p の値をそのまま用いて結果が a か $-b$ かが決まる。出た結果の値がエージェントの、そのラウンドでの利得となる。

p は $[0, 15/15]$ を一様乱数に従って選ぶ (可能な値は16個)。 a は $[0, 12.0]$, b は $[0, 10.0]$ の一様乱数で決める。なお、10個の選択肢のうち1つは $[3, 14/15; -3, 1/15]$ である。従ってどのような選択肢が並ぼうと、判断基準が適切であれば、1ラウンド当たり期待値 2.6 の利得は確保することができる。

2.3 戦略

エージェントの戦略は88の2進数の次元から成り立つ。効用関数には上式をそのまま用い、 α, β, λ のためにそれぞれ8次元を使う。確率は $[0.0, 1.0]$ で1/15刻みで生じ、その間の16の値に対する w の値も4次元の2進数で決まる。

2.4 計算手順

100のエージェントを仮定する。1つのラウンドで各エージェントは1回の選択を行い、1世代で500ラウンドを繰り返す。500ラウンドの利得の合計がエージェントのその世代での利得である。「生き残り基準」がある条件では (後述)、生き残り基準を充たせなかったエージェントは「死ぬ」。

世代の終わりで生き残ったエージェントの中から利得比例確率で「両親」を選び、交差を施して次の世代のエージェントを生成する。交差後、新エージェントの戦略の各次元に突然変異を施す。

2.5 実験計画

先の適応性のアイデアを検証するため、「生き残り基準」のある条件とない条件を導入した。生き残り基準を充たせぬ場合とは、過去10ラウンドの利得合計が基準 (合計10) に達さないことである。生き残り基準のある条件では、生き残り基準を充たせなければ次世代の「親」にはならない。各条件につき、1000世代までの試行を20回繰り返した。

2.6 結果

この計算では課題自体が確率的であるため、1000世代を経てもエージェント間でパラメータの値にある程度の変異がある。エージェントの最終のパラメータ値の平均をとり、その平均値が条件ごとにどの範囲にあるかを計算した。結果を表1に示す。計算された値はプロスペクト理論の想定に近いが、生き残り基準あり条件で β の値が、生き残りなし条件で α の値が、それぞれ 1.0 を超えている点が想

表1:パラメータの平均値

	α		β		λ	
	平均	信頼区間	平均	信頼区間	平均	信頼区間
生き残り基準あり	0.73	[0.69,0.77]	1.35	[1.22,1.48]	3.21	[2.90,3.52]
生き残り基準なし	1.37	[1.26,1.48]	1.00	[0.83,1.16]	2.98	[2.68,3.26]

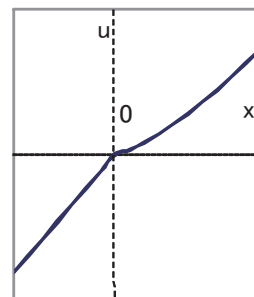


図4:計算上の効用関数 (生き残り基準なし)

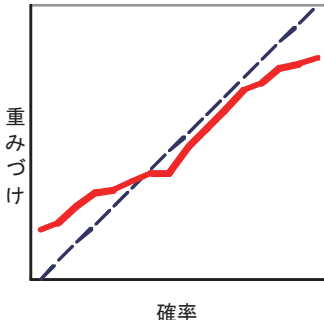


図5: 確率重みづけ(生き残り基準なし)

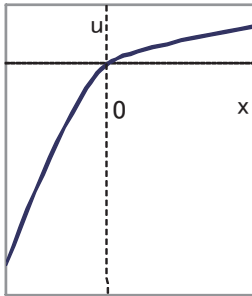


図6: 計算上の効用関数(生き残り基準あり)

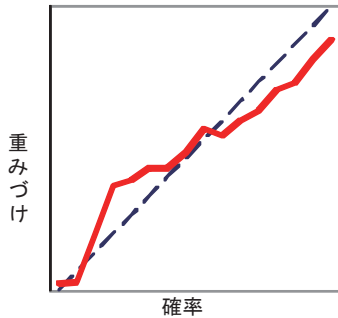


図7: 確率重みづけ(生存基準あり)

定とは異なる。

まず生き残り基準がなく単純に進化計算させた場合の平均的な効用関数と確率重みづけの結果を、それぞれ、図4と図5に示す。効用関数は直線に近く、あえていえば正の結果の範囲では危険選好の傾向がある。確率評価については、低い確率値の範囲で重みづけが確率値より高く、高い確率値では重みづけが低くなっている点で、プロスペクト理論の想定を再現している。

生き残り基準を導入した条件での結果は図

6と図7である。一見して分かるように、生き残り基準の導入は効用関数を危険回避的に行っている。図6の関数形状は古典的理論における危険回避的な(上方に凸な)効用関数に近い。また、確率重みづけ関数をより鋭敏に(傾きを高く)する効果を持った。低い(高い)確率値の範囲で重みづけが確率値より高い(低い)点ではプロスペクト理論の想定通りである。

2.7 考察

このシミュレーション1は既述の適応理論のアイデアの想定範囲内の結果になったといえる。まず、単純に進化計算させた場合は危険中立的か危険選好的な効用関数となるのに、生き残り要因が作用する条件では危険回避的な効用関数が生成されている。図6の結果を眺めるなら、プロスペクト理論の主張(図2)にもかかわらず、行為者には古典的な危険回避型の効用関数を仮定してもよさそうに思えるほどである。

計算上生まれた確率重みづけ関数の形状は、大まかにはプロスペクト理論の議論を再現しているように見える。しかし、プロスペクト理論の想定も図5、図7の結果も、客観的な生起確率の変動に対する主観的な確率の感度が鈍いことの結果に過ぎないかも知れない。

3. シミュレーション2: 確率評価の分離

3.1 確率評価の変異可能性

プロスペクト理論では判断に確率を利用すると仮定する。その確率の重みづけ関数は、生起する事象にかかわらず同一と考えている。しかしここで、事象によって確率の評価が異なる、例えば、正の結果が生じる確率と負の結果が生じる確率が別様に重みづけられるとしたらどうであろうか? 通常、行為者の危険への態度は効用関数によって決まると考え

表2：パラメータの平均値（シミュレーション2）

	α		β		λ	
	平均	信頼区間	平均	信頼区間	平均	信頼区間
生き残り基準あり	0.61	[0.52,0.70]	1.04	[0.87,1.21]	3.04	[2.60,3.48]
生き残り基準なし	1.24	[1.11,1.38]	0.73	[0.59,0.86]	2.11	[1.66,2.56]

るが、負の結果は正の結果より生じやすいと推定することによって、危険回避性が作用する可能性もあるだろう。

認知的な社会心理学では、人間には基本的にoptimismが備わっていて、物事はうまく行く、という方向にバイアスがかかるという議論がある(e.g., Baron, Byrne & Branscombe, 2006). Planning fallacy などである。他方で、別の側面では人には一種のpessimismが備わっている可能性もある。こうした傾向がこの文脈で計算上再現されるか否かは1つの興味とってよい。

3.2 戦略の定義と実験計画

以上の考えのもとに、シミュレーション2では、確率重みづけ関数wに対応する戦略次元を64（4次元×16個）増やし、152次元で計算することにした。確率重みづけ関数は、正の結果用と負の結果用の2種類ある、と考える。シミュレーション1と同様に、生き残り基準あり／なしの1要因（2水準）を導入し、各条件で20試行を繰り返す。他のシミュレーションの設定はシミュレーション1と同じである。

3.3 結果

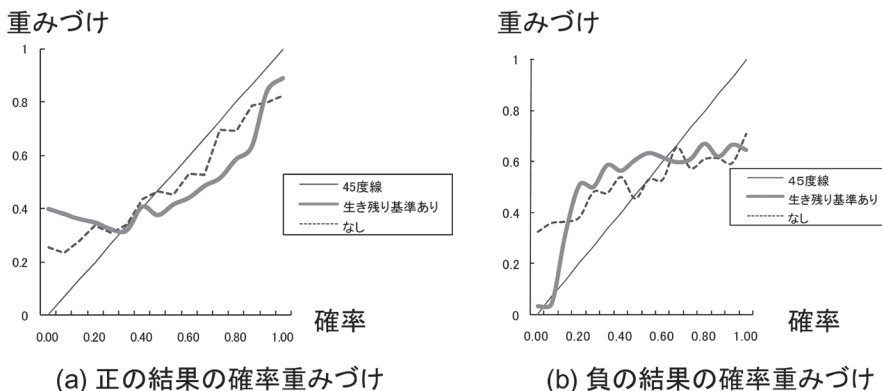


図8：確率重みづけ関数（シミュレーション2）

2.6と同様に、試行ごとにエージェントの最終のパラメータ α 、 β 、 λ の値の平均をとり、その平均値が条件ごとにどの範囲にあるかを計算した。結果を表2に示す。パラメータの値はシミュレーション1とは異なるが、効用関数の大まかなパターンはシミュレーション1と同じであると見てよい。ただし生き残り基準なし条件で、負の領域における効用関数が下側に凸に傾いている。

シミュレーション2での確率重みづけ関数を図示したのが図8(a)、(b)である。一見して分かるのは、図に示す値が平均値であるにもかかわらず曲線が平滑的でない（安定しない）ことである。この点は、重みづけ関数を2つにすることによって関数を形成するために入力数が半減し、十分な計測ができなかった結果であるかも知れない。

しかし図8でも一定の傾向を見てとることができる。

第1に、正の結果に対する重みづけのパターンは単一の重みづけ関数を仮定したシミュレーション1（図5、図7）の場合に似ている。傾きが45度線より緩くなっているのは反応感

度の鈍さを表しているかも知れない。

第2に、しかし負の結果に対する重みづけはいくぶんパターンが異なっている。小さな確率のときに生き残り基準あり条件で重みづけが低くなる点を除けば、多くの確率の値の範囲で、負の結果の生起確率はほぼ等しいと評価される点である。つまり負の結果が生じる確率に関しては、その確率が特に低いと分からない限りは、ほぼ等しく「起きるかもしれない」と判断する傾向があるということになる。

第3に、多くの確率の範囲で、生き残り基準が存在して生き残りへの考慮が働く条件では、正の結果が生じる可能性をより低く、負の結果が生じる確率をより高く評価する傾向があるように見える。つまり生き残り基準のもとでは、行為者はよりpessimisticに判断する、という結果になっている。

3.4 考察

正と負の結果に対する確率重みづけ関数を分けてシミュレーションを実施してみた。効用関数についてはシミュレーション1の結果とはさほど変わらないが、確率重みづけについては、正の結果に比べて負の結果を起きやすいと推定する傾向が見られる。生き残り基準が働く条件ではその傾向がより明確になる傾向がある。

危険回避の傾向は、通常は効用関数の形状によって説明される。しかしこのシミュレーションのように、結果に応じて推定される確率が異なることが許された場合、確率推定によって危険回避傾向を発達させることも、行為者の側にとっては可能である。現実の人間の危険回避傾向が結果の評価（効用関数）に基づくのか、確率推定に基づくのかは、興味ある経験的課題になるかも知れない。

このシミュレーション2では、確率重みづけが結果の正負だけで異なるというモデルを

採用した。しかし正負で区分するなら、より一般的には、重みづけが予想する結果の効用値の関数と見るべきかも知れない。

4 シミュレーション3：競争志向の導入

4.1 競争志向

ここまでのシミュレーションで出現した効用関数の形状は、基本的には図4と図6のパターンである。図6は明確に危険回避的であり、図4は危険中立的、ないしいくぶん危険選好的ともいえる。ただ、ここまではまだ、明確に危険選好的な効用関数、つまり図1(b)のような形状の効用関数は現れていない。本稿が提起している適応理論の観点からは、危険選好的な効用関数を含めて、いろんなタイプの効用関数が条件に応じて生成されると都合がよい。

では明確に危険選好的な効用関数はどのような場合に出現するであろうか？

思いついた1つのアイデアは次の点である。普通に進化的計算をするだけでは、効用関数は直線に近くなるだけのはずである。生き残り基準がある場合は危険回避的になる。危険選好的な効用関数が進化する場合とは、普通に生き残ることに意味がない、よほど高利得を獲得しない限り、途中で消えるのと同じ、という場合ではないか？つまり行為者間で強い競争関係があり、その競争に偶々勝ち残れるほどの高得点をあげたときにだけ生き残るような場合ではないか？この強い競争関係の中で危険選好的である行為者は、多くの場合、失敗して消え去るだろう。しかし一部の者だけが残って子孫を作るとすれば、多くは消え去っても、一部が残ればよい。とすれば、強い競争関係があるときに危険選好的な効用関数を持つ戦略（遺伝子）は生き残って繁殖するかも知れない。

4.2 条件設定

以上のアイデアを試す方法として考えたのが、エージェントの中のトップ10だけが子孫を作れる、という条件で、シミュレーション1と同じ計算機実験をすることである。この条件で同じく20試行を繰り返した。

4.3 結果

シミュレーション3で生じた平均的な確率重みづけ関数を図9に示す。形状は図5に似ているが、より45度線に沿っている。

効用関数を決める α 、 β 、 λ の値の試行ごとの平均値は試行によって大きな変異があり、全体が1つのクラスタをなすとは見えにくい。子孫の親となれるエージェントを上位の10に限ったことから、試行によって偏った「進化」が生じやすかったためかも知れない。3つのパラメータの平均値を標準化して試行間の距離をとり、階層的クラスタ分析を適用すると大まかに2つのクラスタに分かれた。第1

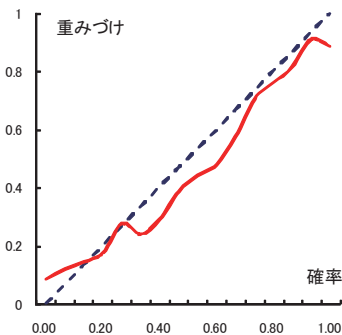


図9: 確率重みづけ関数 (シミュレーション3)

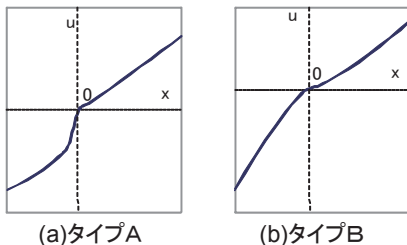


図10: 効用関数(シミュレーション3)

のクラスタ(N=14, タイプA)では平均値で $\alpha=1.04$ 、 $\beta=0.42$ 、 $\lambda=3.46$ である(図10(a)). この効用関数は、0点の付近で効用の値が跳躍的に変化することで負の利得を忌避する格好になっている。第2のクラスタ(N=6, タイプB)ではパラメータの平均値は $\alpha=1.32$ 、 $\beta=1.22$ 、 $\lambda=2.66$ となる(図10(b)). 図10(b)の形状は正の利得の領域で危険選好的である点で図4(シミュレーション1, 生き残り基準なし)に近い。

4.4 考察

シミュレーション3ではシミュレーション1とはいくぶん異なった計算結果を示したものの、シミュレーション1とは明確に異なる効用関数、確率重みづけを見出すことはできなかった。親となるエージェントを上位に限定したために、試行ごとの結果の一貫性も低かった。もともとシミュレーション1の場合でも相対的に利得が高いほど親に選ばれやすいので、シミュレーション3がシミュレーション1と明確に異なる結果を生み出すことはなかったかも知れない。

5 まとめ

本稿では、意思決定の判断基準が適応的に生成されるという視点から、仮想の意思決定事態を用いた3つの探索的な計算機実験(シミュレーション)の結果を報告した。これらのシミュレーション結果は全体として次の点を例示できたと思う。第1は、適応のアイデアに基づき、多様な形態の効用関数を生成できることが示せたことである。第2は、事象の確率評定の仕方が適応の考慮から変異し得ることを例示することができたことである。

ここまでの分析には限界もある。第1に、計算結果は意思決定課題の構成によって変わることは容易に想像できる。本稿で用いた課題

は特殊であるため、結果の一般性を主張することに限界があるだろう。第2に、ここまでの計算試行では、どのような形態の効用関数でも出現させることができた訳ではない。例えば単純な危険選好的な効用関数はここまでの試行では出現していない。出現し得る効用関数の形状については多くの検討の余地がある。¹

参考文献

- Abell, P. (Ed.) 1991 *Rational Choice Theory*. Edward Elgar.
- Baron, R.A., Byrne, D., & Branscombe, N.R. 2006 *Social Psychology* (11th edition). Boston: Allyn & Bacon.
- Elster, J. 1989 *The Nuts and Bolts for the Social Sciences*. London :Cambridge Univ. Press, エエルスター 1997 『社会科学の道具箱—合理的選択理論入門—』, 海野道郎(訳), ハーベスト社.
- Kahneman, D. & Tversky, A. 1979 Prospect theory: An analysis of decision under risk. *Econometrica*, 47, 263–291.
- Maital, S. (Ed.) 2007 *Recent Developments in Behavioral Economics*. Cheltenham: Edward Elgar.
- 酒井泰弘 1982『不確実性の経済学』, 有斐閣.
- 盛山和夫 1997 合理的選択理論, 井上俊他(編)『現代社会学 別巻 現代社会学の理論と方法』, 岩波書店, 137-156.
- 高木英至 2007 効用関数の進化的基盤：進化的計算による分析, 『日本シミュレーション&ゲーミング学会全国大会論文報告集 2007年秋号』, 13-14.
- 多田洋介 2003『行動経済学入門』, 日本経済新聞社.
- 友野典男 2006『行動経済学』, 光文社 (新書).

1 シミュレーション1の結果は最初に高木(2007)で報告された。本稿は高木(2007)の結果にシミュレーション2,3の結果を含めて報告するものである。