

進化シミュレーションで獲得した効用関数 検証のための分析と実験について

Analysis and Experiments for Validation of The Utility Function Acquired by Evolutionary Simulation

鶴島 彰

Akira Tsurushima

セコム株式会社 IS 研究所

SECOM CO., LTD. Intelligent Systems Laboratory

a-tsurushima@secom.co.jp

Abstract

Using evolutionary simulation, Tsurushima and Komatsuzaki generated a human behavior model under dangerous situations, and provided a hypothesis that humans act risk acceptingly between risk and profit. The aim of this paper is to verify the validity of their human behavior model. Since their model is abstract, it is difficult to directly verify it. Therefore, we took two-step procedure. First, applying multi-attribute utility theory to this model, we elicited several properties from it, and then verify those properties by psychological experiments. In this paper, we report the results of multi-attribute utility analysis and the results of preliminary experiments conducted for psychological experiment design.

Keywords — Evolution, Human Behavior, Multi-attribute Utility Theory, Contingent Valuation Method

1. はじめに

鶴島・小松崎 [1] は、生物のライフヒストリに注目した進化シミュレーションにより、進化の過程で人類が獲得したと思われる危険な状況下での行動モデルを生成し、このモデルの分析により人間は危険と利益のトレードオフ状況で危険選好的な行動を取り、この傾向はライフヒストリの単純な生物ほど強くなるとの仮説を提唱した。彼らの想定では、シミュレーションモデルに組み込むエージェントのライフヒストリを、人間のそれと近いものにするによって、人間が獲得したと想定される行動を進化させることができる。しかし彼らが進化させたとする行動モデルは、いわゆる構成論的ロジックにより生成されたものにすぎず、仮に生物のライフヒストリが特定の行動の進化に強く影響を与えるという理論を受け入れたとし

ても、生成された結果（行動モデル）が人間のなんらかの行動を反映していることは自明ではない。行動モデルが、なんらかの人間行動を表現していると主張するためには、少なくとも実際の人間行動との比較検討を通した妥当性の評価は必須であると思われる。

しかし彼らの行動モデルは、抽象的な数値をベースにした進化計算の結果であり、それらの数値を生物の特定の形質や行動と結び付けるのはきわめて困難である。そのため、行動モデルと具体的な人間の行動を直接比較することは難しい。

我々は、二段階に分けたアプローチを採ることにより、間接的にこの行動モデルの妥当性評価を試みる。まず第一段階として、この行動モデルを危険と利益を属性とした効用関数と見立て、多属性効用理論 [2] を適用して、効用関数の意思決定理論的な性質について分析する。そして第二段階として、これらの性質が人間の被験者でも成り立つかを実験により確認することを試みる。本稿では、この実験に向けての予備実験とその結果について報告する。

2. 遺伝子プール

鶴島・小松崎 [1] は、危険な状況での行動を、便益 (b)、コスト (c)、安全 (s) の三つ組み（フィールドとよぶ）の数値で表した選択の問題として抽象化した。 $(b, c, s) \in \mathbb{R}^3$ は、シミュレーションパラメータ (s と c の最大値をパラメータとして様々な環境を設定する) で与えられた一様分布からランダムに選ばれ、エージェントは日々、自身のエネルギーから引かれていく基礎代謝量を補うために、400 個のフィールドの中からひとつを選ばなければならない ($b-c$ がエネルギーに加算される)。エネルギー (e) が 0 になるとエージェントは死亡するし、選んだフィールドの s の逆数で表される死亡確率の実現によって死亡することもある。つまり、フィールドの選び方の巧緻によりエージェン

ト生存期間は左右され、子孫を残す確率も変化する。

エージェントは遺伝子セット $GS \triangleq (\sigma, \Pi, \Omega)$ を持ち、 σ は性決定遺伝子、 $\pi \in \Pi$ はルール遺伝子、 $\omega \in \Omega$ はルールスコアである。この中で、フィールド選択をコントロールするのがルール遺伝子 (π) で、エージェントがフィールドを選択する際、選ぶべきフィールドの範囲を限定している。たとえば、以下のルール遺伝子

$$(e \geq 50) \wedge (c \geq 10) \wedge (s < 15) \wedge \\ (c < 20) \wedge (b < 100)$$

は、エネルギーが 50 以上の時、コストが 10 以上かつ安全が 15 未満、コストが 20 未満、便益が 100 未満の範囲から任意のフィールドを選ぶことを意味する。ルールスコア (ω) は、各ルールの優秀さを表す値であり、ルール毎に一つずつ付いており、それまでにそのルールが環境から獲得したエネルギー ($b - c$) を加算した値である。 $1 \leq |\Pi| \leq 6$ かつ $|\Pi| = |\Omega|$ であり、サイズはエージェントによって異なる。フィールドの選択は、まず ω によるルール選択で Π の中（一つ以上のフィールドを満たす π のみ）からひとつの π が選ばれ、次に π が満たすフィールドの中からひとつのフィールドがランダムに選ばれる。

σ, π は、一定長の二進数でコード化されており、交叉、突然変異などのオペレーションを経て、子孫に遺伝する (Ω は内部変数なので遺伝しない)。

シミュレーション終了時刻 T に生存しているエージェントの集合を A_T とし、すべての $a \in A_T$ の有する Π_a の要素の和集合 $\mathfrak{R} = \bigcup_{a \in A_T} \Pi_a$ を遺伝子プールとよぶ。遺伝子プールは集団 A_T が、フィールドを選択する際の行動の傾向を表しているとみなせる。

図 1 に遺伝子プールの例を示す。横軸は便益とコストの差 (利益: $b - c$)、縦軸は安全 s をそれぞれ規格化したもので、この空間に全ての $\pi \in \mathfrak{R}_T$ を重ね合わせて作図したものである。図の明るい部分ほど多数のルールに共通に含まれる領域であり、エージェントに選択される傾向が高い事を表している。図は Q1, Q2, Q3, Q4 の領域に分かれているが、Q1 は利益も大きく安全性も高い、エージェントにとって有利な領域で、Q3 はその反対である。図 1 では、Q1 がもっとも明るく、Q3 がもっとも暗いことから、この進化は合理的であると考えられる。一方、Q2 と Q4 はトレードオフの関係にあり、安全性が低く利益が大きい Q4 が、その反対の Q2 よりも明るいことから、鶴島・小松崎 [1] は人間は進化の結果、危険選好的な行動を獲得したと考えた。

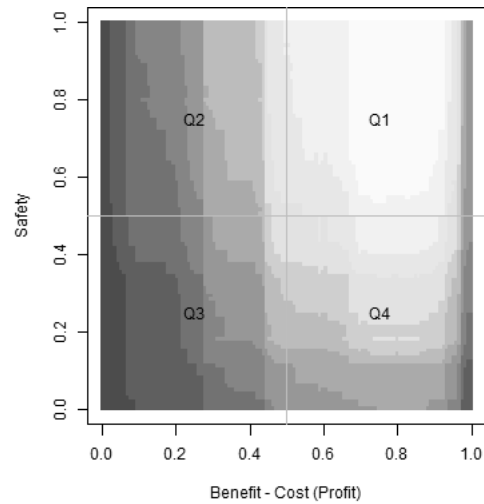


図 1 遺伝子プールの例

3. 頻度関数

\mathfrak{R} は、エージェントの集団が、安全と利益で特徴づけられたフィールドを選ぶ際の行動のモデルと考えることができる。エージェントがあるフィールドを選ぶという事は、そのエージェントがそのフィールドが有する安全と利益を選好する遺伝子を持つ事を意味する。複数の遺伝子の条件を満たすフィールドは、そうでないフィールドよりも選ばれやすく、高いルールスコアを持つ遺伝子の条件を満たすフィールドは、そうでないフィールドよりも選ばれやすい。これらを利用して、我々は行動の頻度を表す基数的関数を組み立てることができる。

便益 B 、コスト C 、安全 S の変数を持つ次のような関数を考えよう。

$$F(B, C, S) = \sum_{i \in A_T} \sum_{j \in \Pi_i} \omega_j^i g_j^i(B, C, S) \quad (1)$$

ただし

$$g_j^i(B, C, S) = \begin{cases} 1 & \text{エージェント } a_i \text{ のルール遺伝子} \\ & \pi_j \text{ が } B, C, S \text{ を満たす} \\ 0 & \text{上記以外} \end{cases} \quad (2)$$

さらに

$$\omega_j^i = \frac{\omega_j^i}{\sum_{k \in \Pi_i} \omega_k^i} \quad (3)$$

とする。この関数は、 B, C, S で表されるフィールドが A_T により選択される頻度を表す。

ここで新しい変数 $P = B - C$ を導入し、二変数 P, S からなる次の関数を定義しよう。

$$\tilde{F}(P, S) = \sum_{i \in A_T} \sum_{j \in \Pi_i} \tilde{\omega}_j^i \tilde{g}_j^i(P, S) \quad (4)$$

ただし

$$\tilde{g}_j^i(P, S) = \begin{cases} 1 & \exists b \exists c (P = b - c \wedge g_j^i(b, c, S) = 1) \\ 0 & \text{上記以外} \end{cases} \quad (5)$$

P と S を 0 から 1 で規格化すれば、これは図 1 を表したことになる。

図 1 のそれぞれの領域 Q_l に含まれる P と S の範囲を、 P_{Q_l}, S_{Q_l} のように表すとすると、各領域 l が選ばれる相対的な頻度 \tilde{q}_l を下記のように数値化することができる。

$$q_l = \int_{y \in S_{Q_l}} \int_{x \in P_{Q_l}} \tilde{F}(x, y) dx dy \quad (6)$$

$$\tilde{q}_l = \frac{q_l}{\sum_{m=1}^4 q_m} \quad (7)$$

図 1 の各領域は式 7 により、 $\tilde{q}_1 > \tilde{q}_4 > \tilde{q}_2 > \tilde{q}_3$ と評価される。 x が y よりも選好される事を $x \succ y$ で示すとすると、エージェントのフィールド選択行動は $Q1 \succ Q4 \succ Q2 \succ Q3$ と表すことができる。 $Q4 \succ Q2$ から、危険選好的な行動が進化したことがわかる。さらに $\tilde{q}_4/\tilde{q}_2 = 1.65$ より、危険選好の度合いは 1.65 倍であるといえる。我々は、 $\tilde{F}(\cdot)$ を安全と利益の間の行動頻度を表した関数と考え、これに基づいて \mathcal{R} を表す効用関数を推定していく。

4. 人口が安定する場合

効用関数の推定に入る前に、鶴島・小松崎 [1] のシミュレーション結果のうち人口の安定したケースについて考えよう。

定義 1 (人口の安定) 次の条件を満たしたとき人口が安定するという。

$$|A_T| > 0 \wedge CV(|A_t|_{0.2T < t \leq T}) \leq 0.2$$

ただし $CV(\cdot)$ は変動係数、 A_t は時刻 t のエージェントの集合である。

鶴島・小松崎 [1] は、様々なシミュレーションパラメータの組み合わせを試す事により、人口が安定するパラメータの範囲を絞り込み、人類が進化した環境は、このパラメータの範囲のどこかにあると考えた。彼ら行った 350 ケースのシミュレーションのうち人口の安定したケースは 130 ケースあったが、その全てにおいて $Q4 \succ Q2$ であり、 \tilde{q}_4/\tilde{q}_2 は平均が 1.715 で標準偏差が 0.201 と小さかった。このことから、人口が安定するシミュレーションパラメータであれば、結

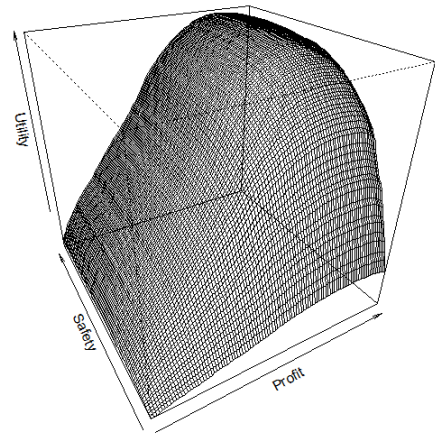


図 2 人口が安定した 130 ケースから得られた頻度関数 $\hat{U}(\hat{P}, \hat{S})$

果として得られる遺伝子プールに大きな差はないと考え、環境のパラメータを特定をすることなく、人類が獲得した行動がリスク受容的であると結論付けた。

この考えに基づき、我々も人類が獲得した遺伝子プールとして、人口が安定した 130 ケースの平均を選ぶ。このときこの 130 ケースには、幾つかのシミュレーションパラメータの違うケースが含まれている。そのため、図 2 の両軸の範囲をどう揃えるべきかという問題が生じる。

例えば、安全の最大値が 40 と 20 の二つのケースで得られた遺伝子プールにおいて、前者では図 1 の縦軸のトップが 40 であり、後者のそれは 20 である。この二つの遺伝子プールを合成する際、後者の縦軸を半分に縮小してから前者と重ね合わせるべきか否か。

この問題に対する我々の考えは、シミュレーションパラメータとして設定した値による調整は行わず、それぞれのシミュレーションにおける最大値同志、最小値同志を直接併せ(すなわち全てのシミュレーション結果を規格化した状態で併せ)て合成するというものである。

理由として以下を上げる。

1. リスク行動はそもそも相対的なものである。それは外界の何か特定の量を基準に決まるものではなく、進化したそれぞれの環境全体に対して相対的にしか定義できないだろう。何かの基準があるとすれば、それは環境における期待値であろう。
2. シミュレーションで環境を表現するのに使った便

益、コスト、安全は、抽象的な概念であって、それぞれに対応する物理量が現実世界に存在するというものではない。抽象的な量であれば、その絶対値にあまり意味はなく、最大値と最小値という範囲で捉えるのが妥当であろう。

だから、図1のように、遺伝子プールの両軸は絶対的な値ではなく、0から1の間の相対的な量によって定義される。人口の安定したシミュレーションで得られた130ケースの遺伝子プールを、この様にして合成した頻度関数を図2に示す。

二つの変数 P, S を0から1の間で正規化したものを \hat{P}, \hat{S} とし、 \hat{P} と \hat{S} を使って式4を変形したものを $\hat{F}(\hat{P}, \hat{S})$ とすると、図2を表す頻度関数は

$$\hat{U}(\hat{P}, \hat{S}) = \sum_{e \in E} \hat{F}_e(\hat{P}, \hat{S}) \quad (8)$$

となる。ただし E は人口が安定したシミュレーション結果の集合、さらに \hat{F}_e は個々のシミュレーション結果 e に関する \hat{F} とする。以後、表記の煩雑さを避けるために、式8の $\hat{U}(\hat{P}, \hat{S})$ をドットなしで $\hat{U}(P, S)$ のように記述する。さらに、最大値を1、最小値が0で正規化した $\hat{U}(P, S)$ を用いる。

5. 多属性効用分析

MCDMやMAUTなど、複数の属性間のトレードオフを分析する多様な研究 [3, 4] が行われてきた。本稿では Keeney and Raiffa の多属性効用理論 (MAUT) [2] に基づいて、構造のわからない頻度関数 \hat{U} を分析する。

MAUT は、von Neumann と Morgenstern の期待効用理論 [5] を、対象を特徴づける属性が複数の場合へと拡張したものである。この理論は、人間の中に効用関数の存在を仮定し、それを数学的な関数の形式で取り出すことを目的とする一連の理論体系である。

MAUT では、通常、人間の意思決定者にいくつかの質問をし、その答えを手掛かりに数学的な制約条件を構成し、数値関数の形に構成していく [6]。しかし本稿では、人間の意思決定者の代わりに進化シミュレーションで得た $\hat{U}(P, S)$ (式8) を使い、その分析結果に基づいて真の効用関数 $U(P, S)$ を推定していく。

5.1 分解表現

複数の変数をもつ効用関数を直接同定する事は非常に困難である。そのため MAUT では、目指す多属性効用関数が、それぞれの単一変数からなる関数の合成である分解表現が可能かどうかについて調べる。

ここで、本稿で扱う効用関数は安全と利益を二つの変数にもつので、まずそれぞれを変数とする効用関数について考える。安全も利益も人間にとっては値が大きいほど有用であるので、これらの効用関数はどちらも単調増加型であると考えるのが自然である。ところがシミュレーションで求めた $\hat{U}(\cdot)$ は、厳密には単調増加にはなっていない。鶴島・小松崎 [1] では、環境から得るエネルギー (利益) を表すのに、便益とコストの二つの確率変数の差をとっている。ところが、どちらの確率変数も一様分布に従うため、その差である利益は厳密な一様分布ではなく、両端の頻度が小さい台形型をしている。そのため、利益の最大値と最小値の付近は頻度が低くなってしまい、この部分を選択するルールの進化が抑制される。その結果、進化した $\hat{U}(\cdot)$ は、利益の両端が少し下がってしまい、厳密には単調増加にはならない。しかしこのことは、シミュレーションモデルの構造に起因する制約なので、以下の分析で使う $\hat{U}(\cdot)$ には、変数が大きくなる方向では値が最大値よりも下がらないような修正を加えた。

多属性効用関数の分解表現を考えると、鍵となる概念が効用独立性 [7] である。我々の例を使うと、 S が P と効用独立とは、 $P = p$ を固定した時、 S の条件付き選好が p の値によらず変わらない性質をいう。

効用独立性は確実同値を調べることにより確認することができる。確率 p_1, p_2, \dots, p_n でそれぞれの結果 x_1, x_2, \dots, x_n を生ずるくじの不確実な結果を \tilde{x} 、結果の期待値 \bar{x} とすると、 \bar{x} と無差別であるような確実な結果 \hat{x} を確実同値とよぶ。本稿では、 $\hat{U}(\cdot)$ を使って確実同値を次のように定義しよう。

定義 2 (確実同値) F を S と P からなるベクトルとした時、 \tilde{F} の確実同値 \hat{F} とは

$$\hat{U}(\hat{F}) = E[\hat{U}(\tilde{F})], \quad \text{or} \quad \hat{F} = \hat{U}^{-1} E \hat{U}(\tilde{F}). \quad (9)$$

多属性効用関数の効用独立性は、一方の変数を固定したとき、他方の変数上で定義されるくじ (lottery) の確実同値が、固定した変数の値を変えても変化しないことで確かめることができる。

図3は、一方の変数を0.1, 0.2, ..., 1.0に固定したとき、他方の変数上で0.2と0.7が等確率で生じるくじの確実同値 (×) を表したものである。この例において、 \tilde{S} の平均は0.3063 標準偏差は0.0025、 \tilde{P} の平均は0.4234、標準偏差は0.0025だった。くじの値を変えていくつかの実験を繰り返したところ、標準偏差の最大値は0.0084で、ほとんどの場合はより小さな値だった。以上の結果から、どちらの変数においても、確実同値は他方の変数の値によらず変わらない事が確

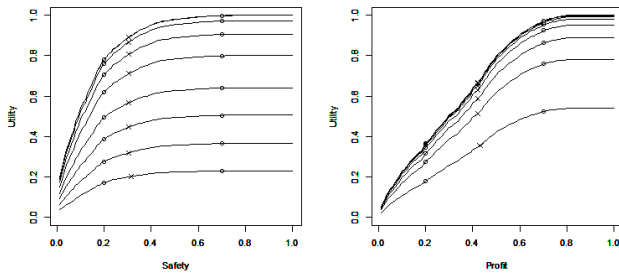


図3 $\hat{U}(\cdot)$ 上の确实同値 (x) は他方の変数の変化に対して独立である。

認され、 $U(\cdot)$ は相互効用独立であると考えられる。

仮説 1 $U(\cdot)$ は、 S と P に対して相互効用独立である。

すなわち、 $U(\cdot)$ は S と P のそれぞれを変数とする二つの関数 $u(S)$ と $u(P)$ の合成関数として構成することができる。

条件付き効用関数の形状から、それぞれの変数に対する意思決定者のリスクに対する態度を分析することができる。

さらに幾つかの言葉を定義しよう。

定義 3 (リスク回避) 下記の条件のとき、意思決定者はリスク回避的であるという。

$$\hat{U}[E(\tilde{F})] > E[\hat{U}(\tilde{F})] \quad (10)$$

リスク回避的な意思決定者は、くじの期待値を不確実なくじそのものよりも好む。意思決定者がリスク回避的であるなら、彼の効用関数は凹関数である。 $\hat{U}[E(\tilde{F})]$ と $E[\hat{U}(\tilde{F})]$ を比較することにより、さらに図3の観察により、 $\hat{U}(\cdot)$ は両方の変数に対してリスク回避的であるといえる。

仮説 2 $U(\cdot)$ を構成する $u_s(S)$ と $u_p(P)$ は、どちらもリスク回避的である。

定義 4 (リスクプレミアム) くじ \tilde{x} のリスクプレミアム RP とは、くじの期待値と确实同値との差である。

$$RP(\tilde{x}) = \bar{x} - \hat{x} = E(\tilde{x}) - \hat{U}^{-1}E\hat{U}(\tilde{x}). \quad (11)$$

リスクプレミアムとは、リスク回避的な意思決定者が不確実性を避けるために進んで支払う量のことである。表1はそれぞれの変数を0.3, 0.4, ..., 0.7としたとき、その値に±0.2を加算した値が等確率で生じるくじの平均と确实同値とリスクプレミアムを示したものである。ここから、 S の値が変わってもそのリスクプレミアムは変化しない(不変型リスク回避的)が、 P の値が大きくなるにつれそのリスクプレミアムは大きくなる(増加型リスク回避的)ことが観察される。

表1 $RP(\tilde{S})$ は不変だが、 $RP(\tilde{P})$ は P の増加に伴って大きくなる

\tilde{S}	\hat{S}	$RP(\tilde{S})$	\tilde{P}	\hat{P}	$RP(\tilde{P})$
0.3	0.184	0.116	0.3	0.309	-0.010
0.4	0.297	0.103	0.4	0.397	0.003
0.5	0.384	0.116	0.5	0.466	0.034
0.6	0.472	0.128	0.6	0.522	0.078
0.7	0.572	0.128	0.7	0.591	0.109

これらは $\hat{U}(\cdot)$ を構成する二つの関数 $U(S)$ と $U(P)$ の形状の制約条件となる。

仮説 3 $u_s(\cdot)$ は不変型リスク回避関数、 $u_p(\cdot)$ は増加型リスク回避関数である。

5.2 多属性効用関数

仮説 1 から、この関数は以下のような多重線形表現で表すことが可能である。

$$U(S, P) = k_s u_s(S) + k_p u_p(P) + k_{sp} u_s(S) u_p(P) \quad (12)$$

もしも k_{sp} が0ならば、この関数は加法的表現を持ち、そうでないなら乗法的表現を持つ。 k_s, k_p, k_{sp} を推定するために、 $\hat{U}(\cdot)$ と $u(\cdot)$ を0から1の間でスケールする。最も好ましい結果を $F^* = (S^*, P^*)$ 、最も好ましくない結果を $F^0 = (S^0, P^0)$ とすると、 $\hat{U}(F^*) = 1, \hat{U}(F^0) = 0, u(S^*) = 1, u(S^0) = 0, u(P^*) = 1, u(P^0) = 0$ となる。

確率 p で F^* 、確率 $(1-p)$ で F^0 が生じるくじと無差別な (S^*, P^0) を考えよう。

$$p_s U(F^*) + (1-p_s) U(F^0) = U(S^*, P^0) \quad (13)$$

$U(F^*) = 1$ と $U(F^0) = 0$ と式13より左辺は p 、 $u(S^*) = 1$ と $u(P^0) = 0$ と式12より右辺は k_s 。ゆえに、

$$p_s = k_s = U(S^*, P^0). \quad (14)$$

同様にして

$$p_p = k_p = U(S^0, P^*). \quad (15)$$

シミュレーション結果 $\hat{U}(S^*, P^0) = 0.0496$ と $\hat{U}(S^0, P^*) = 0.1956$ から、 $k_s \approx 0.0496$ 、 $k_p \approx 0.1956$ である。さらに $k_s + k_p \neq 1.0$ から、 $\hat{U}(S, P)$ は乗法形となる。

仮説 4 $U(\cdot)$ は乗法型表現を持つ(加法型表現は持たない)。

表 2 推定した $u_s(\cdot)$ と $u_p(\cdot)$ のパラメータ

	a_s	b_s	c_s
$u_s(\cdot)$	0.9081	6.5316	1.0080
	a_p	b_p	c_p
$u_p(\cdot)$	1.0370	2.0770	-0.0118

乗法形をもつ効用関数は、次のように因数分解することができる。

$$kU(S, P) + 1 = (kk_s u_s(S) + 1)(kk_p u_p(P) + 1) \quad (16)$$

$U(S, P)$ と式 16 の左辺は戦略上同等であることに注意しよう。ここで、この式に S^* と P^* を代入すると、

$$k + 1 = (kk_s + 1)(kk_p + 1). \quad (17)$$

ゆえに

$$kk_s k_p = 1 - k_s - k_p. \quad (18)$$

式 12 の $k_{sp} = kk_s k_p$ と置き換えると、 $k_{sp} = 0.7548$ 。

さらに $k_{sp} > 0$ から、 S と P は相互に補完的であると言える。

仮説 5 $U(\cdot)$ の変数 S と P は相互に補完的である。

これは (S^*, P^*) と (S^0, P^0) が等確率で発生するくじ L_1 と (S^*, P^0) と (S^0, P^*) が等確率で発生するくじ L_2 があつたとき、常に L_1 が選好されることを意味する。言い換えれば、一方の変数のみ最大化したときの効用の増加分は小さくなく、両方の変数を同時に増加させなければ効用の増加につながらない。図 2 の形状からも、このことは明らかだろう。

式 12 の推定を完了するため、最後に、二つの単属性効用関数 $u_s(\cdot)$ 、 $u_p(\cdot)$ を推定しよう。仮説 3 から関数の形状として、不変型危険回避関数である前者には指数関数を、増加型危険回避関数である後者には二次関数を選んだ。

$$u_s(S) = -a_s e^{-b_s S} + c_s \quad (19)$$

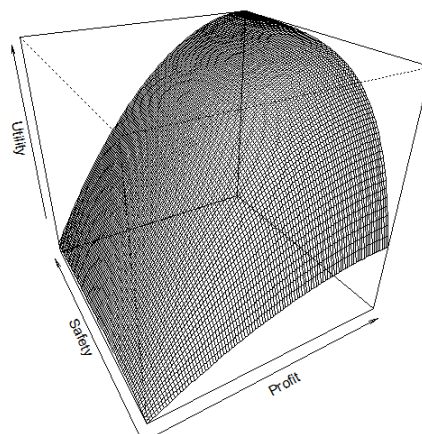
$$u_p(P) = -a_p P^2 + b_p P + c_p \quad (20)$$

推定した式 19 と式 20 のパラメータを表 2 に与える。さらに図 4 に式 12 の形状を示す。

6. 検証

多属性効用関数 $U(\cdot)$ の推定過程で得られた仮説 1~5 が、人間の被験者においても成り立つかどうかを確認することで、鶴島・小松崎 [1] の結果の妥当性について検討する。

危険と利益の多属性効用関数を人間の被験者を使って評価するためには、何らかの形で生命の損失を伴う

図 4 推定した効用関数 $U(S, P)$

ような危険を数値評価したり、生命と利益（具体的な金額）とのトレードオフを評価することが避けられない。しかし、人間の被験者からこのような評価を引き出すことは簡単ではない。

政策分析や政策科学などの分野において、生命の損失と利益のトレードオフに関する研究が積み上げられている [8, 9]。これらの分野では、ヘドニック賃金法 (Hednic Wedge Method) や仮想市場評価法 (Contingent Valuation Method) を使って、市場データや人間の被験者から支払意思額 (Willingness To Pay) を引き出して効用関数を推定し、確率的生命価値 (Value of Statistical Life) を評価している。

これらの研究を参考に、本研究では、仮想市場評価法をベースとした質問紙を開発することにより、上記の仮説の評価を試みる。本稿では、人間の被験者を使ったこのような評価を目的とした予備実験の内容と結果について報告する。

7. 予備実験

仮想市場評価法とは仮想的な財の取引を想定し、アンケート調査などによって被験者の支払意思額を引き出すことにより、財の効用を計測する手段である。市場の存在しない財を含め、あらゆる財の評価に適用できるという利点がある半面、信頼性や正確性を確保するのが難しく、様々なバイアスを取り除く工夫が必要となる [10]。今回の予備実験は、仮想市場評価法の適用、および作成した質問内容の有効性や適切さを評価する目的で行われた。

7.1 手法

仮想市場評価法による質問紙は、通常、被験者の支払意思額をいかに正確に引き出すかに注目して設計される。しかし今回の予備実験の目的は、支払意思額の評価ではなく、仮説1~5の妥当性の評価である。そのため、質問紙における問題の設定や表現は、仮想市場評価法の実例 [11] を参考にしたが、具体的な質問内容や想定は、通常、仮想市場評価法で行われているものとは大きく異なるものとなった。以下、予備実験で使用した質問紙の内容について説明する。質問紙は、死亡確率を低減できるセキュリティ商品を想定した後、様々な条件を変化させた新しい想定を示し、質問を繰り返すという方法で作成されている。

想定 0 身に着けているだけで交通事故で死亡する確率を 6/100,000 から 5/100,000(-17%) に低減させる架空のセキュリティ商品を想定させ、支払意思額（月額）を尋ねる。

想定 1 無料ボランティアとして、被験者がセキュリティ商品のフィールドテストに参加したと想定し、死亡確率を 6/100,000 から 5/100,000(-17%) に低減させる商品（タイプ1）と 4/100,000(-33%) に低減させる商品（タイプ2）のどちらかを選ばせる。

想定 2 被験者がタイプ2を選び、さらに100個の商品の中から任意の一つを選び装着したと想定する。しかし後になって、タイプ2は100個中50個が本物で50個がダミーだった事、さらにタイプ1は100個すべてが本物だったことが明らかになる。この情報が提示された段階で、1. タイプ1を選んでいれば良かったと思うか、2. タイプ2を選んでいて良かったと思うか、3. どちらでも同じと思うかを質問する。

想定 3 現在装着しているタイプ2（本物かダミーか分からない）を、死亡確率を $x\%$ 低減させる事のできる別の商品（本物）と交換するかどうかを質問する。 x に入る数値を 2% から 32% まで 3% 刻みで変え、回答は 1. 交換したくない、2. どちらかというかと交換したくない、3. どちらともいえない、4. どちらかというかと交換したい、5. 交換したい、の五段階から選ばれる。

想定 2a・想定 3a 想定1の無料ボランティアという想定を変更し、被験者が支払意思額の12倍の金額を受け取ってフィールドテストに参加していると想定しなおしたうえで、想定2と想定3の質問を繰り返す（それぞれ想定2a、想定3aとする）

想定 4 被験者の一般的なリスク態度に関する質問をする。4-1. 確率 0.5 で 10,000 円が当たる宝くじと、無条件で 5,000 が貰えるオプションのどちらを選ぶかを訊く。4-2. 4-1 の宝くじの確実同値を訊く。4-3. 確率 0.5 で 60,000 円が当たり外れると 50,000 円が貰える宝くじと、無条件で 55,000 円が貰えるオプションのどちらを選ぶかを訊く。4-4. 4-3 の宝くじの確実同値を訊く。

想定 4a 想定1のタイプ2のセキュリティ商品を装着しているという想定（死亡確率が 33% 低減している想定）の下で想定4と同じ質問をする。回答をそれぞれ 4a-1、4a-2、4a-3、4a-4 とする。

想定 5 これまでベースになってきた交通事故死亡率が 6/100,000 から 3/100,000 に低減された状況を想定し、その状況の下で想定3と同じ質問（交通事故死亡率を 3/100,000 から 2/100,000(-33%) 低減させるセキュリティ商品の効果が確率 0.5 で実現する状況）をする。

想定 6 これまで出た想定（死亡確率については 0% 削減と 33% 削減、利益については報酬なしと報酬あり）の組み合わせに関する質問。A. 0% 削減と報酬なし、B. 0% 削減と報酬あり、C. 33% 削減と報酬なし、D. 33% 削減と報酬ありの四通りを考え、1. 0.5 ずつの確率で A と D が現れるくじと、2. 0.5 ずつの確率で B と C が表れるくじのどちらを選ぶかを訊く。

想定0と想定1は抵抗回答を排除する目的で導入した。想定0で極端な支払意思額（0円など）を答えた回答、想定1でタイプ1を選んだ回答は抵抗回答とした。

想定3と想定3aは、 P で条件付けされた S に対する確実同値を尋ねる質問である。同様に、想定4と想定4aは、 S で条件付けされた P に対する確実同値を尋ねる質問である。

想定2と想定2aは S に対するリスク回避性を、異なる P 水準に対して尋ねている。同様に想定4-1と想定4-2は、 P に対するリスク回避性を異なる S 水準に対して尋ねている。

想定3と想定5は、 S の水準が変化したときの S に対する確実同値の変化を尋ねている。同様に、想定4-2と想定4-4は、 P の水準が変化したときの P に対する確実同値の変化を尋ねている。両方とも確実同値を測定することにより、リスクプレミアムの変化を評価することを意図している。

予備実験では、フィールドテストで選んだタイプ2の商品100個のうち、50個が本物で50個がダミーであるというやや特殊な状況設定を行った。これは安全性に対するリスク回避性を計測するために導入した工夫で、安全性の水準が確率的に変化するという想像が難しい状況を、なるべく被験者がイメージしやすいような具体的な状況設定に置き換えたものである。なお安全性そのものも確率的な概念であるため、確率的概念である安全性がさらに確率的に変化する、という状況は自明なものとは言えないが、本稿においてはこれ以上踏み込んだ議論は行わず、利益（金額）に対するリスク回避性と同様に扱う。

さらに、想定3、想定3a、想定5においては、被験者の確実同値を引き出すために、2%から32%まで3%刻みの数値に対して、5段階で交換したいか否かを尋ねた。これは確率的に変化する安全性というものに対する確実同値という、理解の難しい概念に対する反応を引き出すための工夫である。回答を、「交換したくない(1)」から「交換したい(5)」のように5段階の数値に置き換え、ロジスティック曲線で回帰させ、その中央値である3(どちらともいえない)をとる値を求め、被験者の確実同値であるとした(図5)。また、ロジスティック曲線の回帰に失敗するような回答(全て同じ値など)は、異常回答であるとした。

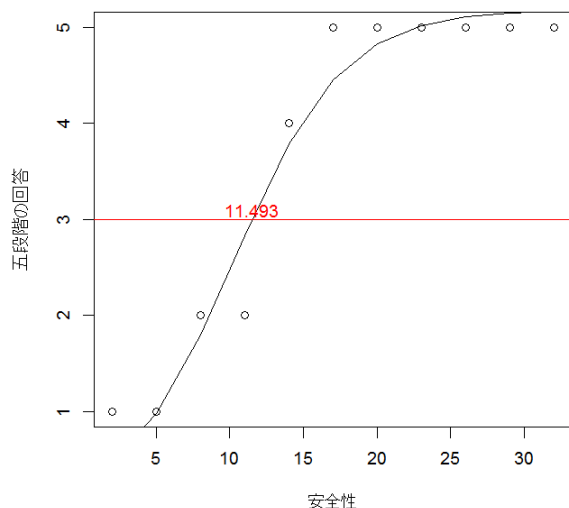


図5 (回答の例) 五段階の回答をロジスティック曲線で回帰させ、3をとる値を確実同値(11.493)とする

8. 結果

20代から50代までの成人男女(筆者の同僚の会社員)25人にアンケート質問紙を送り21人から回答を得た。このうち、想定0と想定1により抵抗回答、異常回答を除いた有効回答数は8人(38%)であった。

仮説1

仮説1に関連する想定は、想定3、想定3a、想定4-2、想定4a-2がある。前者二つはPで条件付けされたSの確実同値を、後者二つはその反対を評価している。

表3 仮説1に関する回答

被験者	想定3	想定3a	想定4-2	想定4a-2
1	18.273	18.273	3000	3000
2	14.966	14.966	5000	5000
3	18.011	18.011	5000	5000
4	17.248	17.248	1000	1000
5	17.972	7.143	5000	5000
6	17.306	17.306	4500	4500
7	14.913	14.913	5000	5000
8	11.493	10.811	2000	2000

想定3と想定3aの結果を見ると、ほとんどの被験者が二つの質問にほぼ同じ値を回答しているが、被験者5のみ7.143と大きく異なる値を回答している。想定4-2と想定4a-2については全員が二つの想定で同じ答えをしている。被験者5を異常値と考えれば、条件変化によっても確実同値はほぼ変わらないので実験の結果は仮説1の内容と整合的と考えることができる。

結果2

想定2はSに対するリスク回避性を、想定4-1はPに対するリスク回避性を調べる質問である。一方、リスク回避的であれば確実同値は平均値よりも小さくなり、リスク受容的であれば確実同値は平均値よりも大きくなる事から、想定3と想定4-2も形を変えたリスク回避性に関する質問ととることができる。

想定2の結果は、8人中2人がリスク回避、1人がリスク受容、そして5人がリスク中立であった。確実同値については、リスク受容の2人は確実同値が平均値よりも小さく、リスク受容の1人は僅かに大きかった。リスク中立と回答した5人については、確実同値が14.91から18.27という、くじの平均である17.0からやや広い範囲に分散した。

想定4-1については、リスク中立を表す選択肢を用意しなかったため、回答がバラついたが、想定4-2に対して5,000円と回答したものをリスク中立であると解釈すると、8人中4人がリスク回避であり、4人がリスク中立であった。

仮説2ではSもPも両者ともリスク回避的となっていたが、予備実験の結果を見ると、どちらについても必ずしもリスク回避的であるとはいえず、むしろリスク中立的である可能性を示唆する回答だった。

仮説3

想定3と想定5により、安全水準の変化に対するリスクプレミアムの変化を測定する。8人のうち確実同値が増加したものの3人、減少したものの3人、変わらないものの2人であった。なお本件に関しては考察に譲り、ここではこれ以上の結果は記さない。

想定4-2と想定4-4により、利益の水準の変化に対するリスクプレミアムの変化を測定する。8人のうち利益の水準の増加に伴いリスクプレミアムが減少したものの4人、不変だったものの4人で、増加したものは0人だった。全員が不変もしくは減少だったものの、両者を対応のあるt検定で分析した結果P値は0.118であり、この結果のみからリスクプレミアムは減少する(両者に差がある)とするのは不十分であろう。なお仮説3においては、 $u_p(\cdot)$ は増加型リスク回避とされており、予備実験の結果は整合的ではなかった。

仮説4・仮説5

仮説1の結果から効用関数 $U(\cdot)$ が乗法型表現を持つことは明らかである。一方、加法型表現を持つかは、式12の k_{sp} の値を調べることになるが、これを直接評価するのは難しいので、代わりに想定6として (S^*, P^*) と (S^0, P^0) が等確率で発生するくじと、 (S^*, P^0) と (S^0, P^*) が等確率で発生するくじのどちらを選好するかという質問で置き換えた。さらにこの質問の答えは結果5の代替的か、補完的かの回答とも繋がるものである。

予備実験の結果は、8人全員が選択肢2を選び、仮説4については「加法型表現を持たない」となり整合的だったが、仮説5については補完的ではなく「代替的」という結果が得られ整合的ではなかった。

9. 考察

予備実験の経験は、仮想市場評価法の難しさを印象付けるものだった。まず有向回答率が38%と低く、想像以上に抵抗回答、異常回答が多かったことから、仮想市場評価法に伴うバイアスを取り除くことが困

難であると感じた。今回の設定で扱っている安全性が6/100,000と非常に小さな値のため、その変化率を想像することが困難であるとの意見があった。

仮説1については、予備実験の結果は相互効用独立という仮説を支持するものであった。安全と利益において、一方の水準の変化が他方に影響するとは考えづらいので、これは予想通りの結果であった。回答者の中には、想定3と想定3aの欄を結んで「変わらない」と書いたものもあったので、あえて二回にわたり確実同値を訊かないで、変わるか変わらないかを答えさせるだけでも良かったかもしれない。

仮説2については、安全も利益もリスク中立的という結果となり、両者ともリスク回避的であるとの仮説と反するものとなった。特に想定4-1については、期待効用理論などで出てくる意思決定者のリスク態度を評価する質問と同じものなので、明確なリスク回避性が表れると期待していたにもかかわらず、そうでなかったのは意外だった。予備実験の参加者が少数だったこと、被験者が理系の研究者という特殊な集団だったことなど、検討すべき問題は残されている。特に、確率的概念である安全性が確率的に変動するという、イメージしにくい概念の取り扱いについては、より深い考察が必要だと考える。

仮説3については、シミュレーションで得られた、「 $u_p(\cdot)$ は増加型リスク回避関数」という仮説そのものに疑問があった。想定4-1と想定4-3の質問は、いわゆる共通結果効果(common consequence effect)の一種で、選好関係が変化する現象のひとつである。そのため選好結果が変化することは不思議ではないが、通常ならば利益水準が大きくなるにつれリスクプレミアムが小さくなる(リスク回避性が弱くなる)のが自然と思われるが、シミュレーション結果はその反対であった。予備実験の結果は仮説3を支持せず、リスクプレミアムが不変もしくは減少するというものだった。しかしt検定の結果から、減少型リスク回避とまでは言いきれない状況であった。そもそも仮説2において、利益についてのリスク回避性そのものが肯定されていない状況で、減少型か増加型かを議論する意味は大きくないといえる。

シミュレーション結果で「 $u_p(\cdot)$ は増加型リスク回避関数」となったことは、鶴島・小松崎[1]のシミュレーションモデル上の限界である可能性がある。5.1節において、便益とコストの差である利益(P)が両端が下がった台形型の分布であることを指摘した。多属性効用分析を行うにあたっては、 $\hat{U}(\cdot)$ を単調増加になるよう修正して扱ったが、そもそもこれらの要因が最終的

に得られた $u_s(\cdot)$ や $u_p(\cdot)$ の形状に影響を与えている可能性は否めない。

想定3および想定5は、安全水準の変化に対するリスクプレミアム変化を測定する目的の質問である。ベース水準が想定3では6/100,000、想定5では3/100,000と異なるが、どちらも-33%の変化が等確率で発生する状況を提示している。本予備実験では、微小な確率の変化を表現するために、質問において割合（パーセント）表現を使っているが、リスクプレミアムの変化を正しく計測するには、ベース水準の対して、等しい変化幅（割合ではなく）をもった状況を設定する必要がある。そのため想定5では、-33%ではなく-66%（どちらも変化幅が2/100,000となる）の変化を提示すべきであった。予備実験の結果では確実同値の増加が3人、減少が3人、不変が2人であったが、リスクプレミアムの測定方法に問題があるのでこの結果そのものにあまり意味はない。むしろ、本来の半分の幅の変化で顕著な差が見られなかったことから、-66%の変化を使って測定した場合に、リスクプレミアムが増加するという結果が出ることも想像される。しかし、この場合においても、-66%というパーセント表現が、本来よりも変化を拡大させるバイアスになる可能性も考えられる。

仮説5は8人全員が選択肢2を選んでいるが、これは最も予想外の回答だった。シミュレーション結果では、安全と利益は補完的なもので、どちらか一方のみを上げて効用は高まらず、両者を同時に増加させる必要があるというものだった。ところが予備実験の結果はこれに反し、両者を同時に上げるよりも、どちらか一方のみを集中して上げる方が効用の増加が大きいという代替的なものだった。しかし本来、安全と利益は互いに代替の効かないもので、どちらか一方だけあれば満足できるというものではない。そのためこの結果は不自然で、今回設計した質問紙の想定が、本来意図したものを計測していない可能性が考えられる。被験者への実験後のインタビューで、商品のフィールドテストに参加するという設定自体に、既に参加するというコストを支払っているという感覚があり、そのためなんらかの便益を受け取ることによってコストが補償されるべきだという感覚を持ってしまい、安全も利益もその補償のための「何か」にすぎないという思いがあったという意見が得られた。この感覚が正しければ、安全を受け取るべき利益の一種と考えてしまい、その結果、代替的な反応を返してしまった事が考えられる。また、シミュレーションモデルで想定していた安全は、非常に危険な状況から非常に安全な状況まで

広い範囲をカバーする概念であったが、本予備実験で想定した状況は極めて微小な範囲での安全性の変化であった。この両者の違いが、結果の差になって表れた可能性も考えられる。

10. おわりに

今回の予備実験により、仮想市場評価法適用の難しさと問題点が明らかとなった。今回得られた問題点を精査し、よりバイアスを配した質問紙の設計に繋げていくとともに、それらをシミュレーションモデル自体の弱点への指摘としても受け止め、構成論的手法と経験的手法の両方の視点から、危険の下での人間行動の解明へと結びつけていきたい。

参考文献

- [1] 鶴島彰 and 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,” 認知科学, vol. 23, no. 4, pp. 377–394, 2016.
- [2] R. L. Keeney and H. Raiffa, *Decision with multiple objectives: preferences and value tradeoffs*. John Wiley and Sons Inc., 1976.
- [3] V. Chankong and Y. Y. Haims, *Multiobjective Decision Making: Theory and Methodology*. North-Holland, 1983.
- [4] J. Wallenius, J. S. Dyer, P. C. Fishburn, R. E. Stuer, S. Zionts, and K. Deb, “Multiple criteria decision making, multiattribute utility theory: recent accomplishments and what lies ahead,” *Management Science*, vol. 54, no. 7, pp. 1336–1349, 2008.
- [5] J. von Neumann and O. Morgenstern, *Theory of Games and Economic Behavior*. Princeton University Press, 1944.
- [6] R. L. Keeney, “A decision analysis with multiple objectives: the mexico city airport,” *Bell Journal of Economics and Management Science*, vol. 4, pp. 101–117, 1973.
- [7] —, “Utility independence and preferences for multiattributed consequences,” *Operations Research*, vol. 19, pp. 875–893, 1971.
- [8] W. K. Viscusi, *Fatal Tradeoff*. Oxford University Press, 1992.
- [9] —, “The value of risks to life and health,” *Journal of economic literature*, vol. 31, no. 4, pp. 1912–1946, 1993.
- [10] L. Venkatachalam, “The contingent valuation method: a review,” *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 24, pp. 89–124, 2004.
- [11] 交通事故の被害・損失の経済的分析に関する調査研究報告書, “内閣府政策統括官（共生社会政策担当）,” 2007, <http://www8.cao.go.jp/koutu/chouken/h19/houkoku.pdf>.