

# 科学的不確実性下のリスク費用便益分析

藤見 俊夫<sup>1</sup>

<sup>1</sup>正会員 熊本大学大学院准教授 自然科学研究科 (〒860-8555 熊本市中央区黒髪2-39-1)

E-mail: fujimi@kumamoto-u.ac.jp

巨大災害、温暖化、伝染病などカストロフィックな被害をもたらすリスクについては、科学的に確実な予測ができないことが多い。しかし、科学的不確実性のあるリスクに関しても、それを回避・軽減する政策について費用便益分析の実施が求められている。科学的不確実性下では、科学的に客観的なリスク定量化を行うことができないため、実証主義に立つ通常のリスク費用便益分析は適用できない。しかし、事実判断と価値判断の区別を認めるポスト実証主義に立てば、科学的不確実性下においてもリスク費用便益分析の正当性を確保できる。本研究では、そうしたポスト実証主義のリスク費用便益分析を行うため、Ahnによって開発された客観的曖昧性下の期待効用モデルに基づくリスク費用便益手法を提案した。

**Key Words :** risk cost benefit analysis, scientific uncertainty, post-positivism

## 1. はじめに

地球温暖化による極端気象災害、東南海・南海地震や富士山噴火、新型悪性ウイルス等の世界規模の伝染病、遺伝子工学やナノテクノロジー等の最先端技術の暴走など、非常に稀ではあるが甚大な被害をもたらすカストロフィック・リスクについて、その被害を回避・軽減するための政策が社会から強く求められている。ただし、そうした政策には莫大な費用が発生するため、どの程度までの効果が見込める政策を、どれほどの費用をかけて実施すべきかについて、適切に判断する必要がある。例えば、東日本大震災レベルの巨大津波に対する防潮堤の建設や、福島原発事故の放射性物質漏れに対する除染などは、費用と便益を比較したうえでの社会的判断が強く求められている。

標準的なリスク費用便益分析はそうした社会的判断を科学的に行うための手法として知られている。しかし、カストロフィック・リスクは、発現頻度が非常に小さくそのメカニズムも複雑であるため、十分に信頼性の高い科学的予測が不可能であるという「科学的不確実性」をともなう。こうした科学的不確実性のあるリスクに対しては、客観的なリスク定量化は不可能であり、標準的なリスク費用便益分析の正当性は失われてしまう。そのため、科学哲学の分野では、科学的不確実性下においてリスク費用便益分析を実施するには、リスク定量化に価値判断の余地を認めるポスト実証主義に立つ必要があると主張されている<sup>1,3)</sup>。しかし、この点について理念的

に議論されることはあっても、具体的な手法まで提案した研究は見当たらない。そこで、本研究ではポスト実証主義に立ち、科学的不確実性下のリスク費用便益分析手法について提案することを目的とする。

本研究の構成は以下のとおりである。2.では、科学的不確実性下においては、リスク定量化を客観的かつ価値中立的に行えると想定する実証主義ではなく、リスク定量化においても価値判断が含まれることを認めるポスト実証主義に立ったリスク費用便益分析手法を構築する必要があることを説明する。3.では、ポスト実証主義のリスク費用便益分析を実施するための基礎となる期待効用モデルについて検討する。4.では、科学的不確実性下におけるリスク費用便益分析の適用プロセスについて検討する。その具体的なイメージを素描するために、仮想的な適用例を示す。5.はまとめである。

## 2. 科学的不確実性とポスト実証主義

### (1) リスク定量化と実証主義

リスク費用便益分析は、リスクのもたらす損害とその発生確率を明らかにするリスク定量化と、その明らかにされたリスクに対する価値判断を行うリスク評価の二つのプロセスに分けられる<sup>2)</sup>。リスク定量化はリスク評価の前提となるので、リスク費用便益分析の正当性において特に重要である。標準的なリスク費用便益分析では、リスク定量化が客観的かつ価値中立的に実施されること

を要求する。こうした立場は（素朴）実証主義と呼ばれており、伊勢田<sup>1)</sup>は下記の二つのテーゼを認める立場として定義している。

科学的客観性テーゼ：リスク定量化は科学的に客観的なものである。

分離可能性テーゼ：リスク定量化とリスク評価における事実判断と価値判断は明確に分離できる。

科学哲学の分野においては、科学的客観性テーゼも分離可能性テーゼも厳密には成立しないことが広く受け入れられている。科学が完全に客観的であり主観的要素を全く含まないと断言できないことは、Kuhn<sup>4)</sup>によるパラダイム論以降なかば常識になっている。事実判断と価値判断の厳密な区分の可能性についても、観察の理論負荷性<sup>5)</sup>や、モデルやデータ選択における実践上の限界<sup>6)</sup>などより否定されている。しかし、厳密には成立しないことは近似的にも成立しないことを意味しない。現実問題を対象としたとき、これら二つのテーゼが近似的に成立すると見なせるなら、実証主義に立つ標準的なリスク費用便益分析を行うことは有益である。例えば、交通事故や病気のような日常的なリスクについては、標準的なリスク費用便益分析を行うことに大きな問題はないであろう。

しかし、カタストロフィック・リスクのような科学的不確実性をともなうリスクを対象とする場合、科学的客観性テーゼは近似的にも成立するとはいえない。なぜなら、科学的不確実性とは、データの希少性や低信頼性、因果構造の複雑性などの理由により、科学的手法のみではリスクのもたらす損害とその発生確率を明らかにすることはできない状況だからである。つまり、科学的不確実性の定義自体がリスク定量化を科学的に客観的に行えない状況を指している。科学的不確実性下でリスク定量化を行おうとすれば、科学的手法で明らかにできない部分は分析者の主観的判断で補完する必要がでてくる。

科学的客観性テーゼが成立しなければ、リスク定量化に分析者の価値判断が紛れこむことは避けられない。科学的な実験や調査によってではなく専門家の主観的判断のもとで得られた知見であるなら、たとえ分析者が優れた専門家であったとしても、その知見を一般住民の判断より優先させるべきとは必ずしも断言できない。なぜなら、科学者の判断が一般住民の判断から優先される唯一の根拠は、それが科学的方法論から得られた知見であることだからである。事実、主観的判断においては、専門家といえども意思決定のバイアスからは逃れられないことが知られている<sup>7)9)</sup>。また、対象リスクに関する知識量の観点からも、専門家の専門知識に対して、住民はローカルナレッジ<sup>10)</sup>を有している。

標準的なリスク費用便益分析は、実証主義の立場をとるがゆえに、専門家の主観的判断を科学的実験や調査から得られた知識と同一視して扱っしかない。そのため、科学的に十分な裏付けのある知見と専門家の主観的判断にすぎない知見とを混合してしまい、専門家の主観的判断を特権的に扱ってしまうという問題が生じる。

## (2) リスク費用便益分析の必要性

科学的不確実性下ではリスク定量化の科学的な客観性が失われる。このとき、リスク費用便益分析は放棄して、他の代替的なアプローチを採用すべきであろうか。例えば、市民や企業、NPO、行政などの多様な関係者が参加する開かれた熟議によりリスクに関する政策判断を行う方法が挙げられる<sup>11)13)</sup>。しかし、こうした民主的アプローチにも深刻な欠点がある。まず、熟議の参加者の大多数がリスク評価にバイアスをもつ傾向があれば、そこでの議論に基づくリスク評価にも歪みが生ずる可能性が高くなる。実際、イメージのしやすいリスクを重視する想起容易性バイアス<sup>14)</sup>の影響を受けたり、リスクの深刻さや発生確率の見積もりが感情によって大きく左右されたりすることが知られている<sup>15)16)</sup>。その結果、多くの人々はリスクに対して過剰反応と完全な無視の両極端の傾向に陥りやすい<sup>17)</sup>。さらに、集団での議論においては、自分の評判や自己像を守りたいという願望や、議論の蓄積の有限性により、議論を通じて集団意見が極端な方向に向かっていくという集団極化<sup>18)</sup> (group polarization) の生じる場合があることが知られている。科学的不確実性のあるリスクのような低頻度で複雑な事象に対しては特に適切な評価が苦手であるので、科学的不確実性下ではこれらの問題が悪化すると考えられる。例えば、人々の注目を集めている派手なイメージのリスクに対して過剰に反応し、地味ではあるが本当に深刻なリスクについては無視されてしまう危険がある。

もしリスク費用便益分析が適用可能であれば、これらの問題は大きく軽減される。まず、Sunstein<sup>17)</sup>やPosner<sup>19)</sup>が主張するように、リスク費用便益分析により系統立てて金銭価値化された費用と便益は、合理的で民主的な議論に少なくとも有益な情報として役立つ。つぎに、Shrader-Frechette<sup>2)</sup>が指摘するように、より質の高い討論的議論を行うための基盤となる。リスク費用便益分析は評価の前提や手続きが定式化され客観的に明示されているため、独断的な意見の押しつけ合いや議論対象の誤解によるすれ違いの生ずる可能性を減らすことができる。

リスクに関する政策判断において、様々な認知バイアスや社会心理効果、独断や偏見の悪影響を軽減するには、評価の前提や手続きを客観的に明示し、体系的かつ整合的な評価結果を提供するリスク費用便益分析は非常に有効である。そのため、科学的不確実性においても正当に

適用できるようなリスク費用便益分析が求められる。

### (3) ポスト実証主義

科学的な不確実性下において実証主義のリスク費用便益分析の正当性が失われたのは、リスク定量化で科学的客観性テーゼが成立しないためであった。そこで本研究では、科学的客観性テーゼは放棄して、分離可能性テーゼのみを要求する立場をとる。伊勢田の分類によれば、こうした立場はポスト実証主義に位置づけられる。

ポスト実証主義では、リスク定量化の科学的な客観性を否定するが、それを事実判断の領域と価値判断の領域に分離可能であることは認める。そのため、事実判断の領域では科学的に明らかになる知識のみを扱い、価値判断の領域では不足した情報を主観的判断により補完してリスク定量化を行うことが可能になる。例えば、科学的な不確実性によりパラメータの値は分析者が主観的に定めるしかないが、パラメータの取りうる範囲は科学理論から明らかになる場合を想定しよう。このとき、パラメータの取りうる範囲を定めることは事実判断であり、その範囲でパラメータ値を定めることは価値判断であると分離できる。

リスク定量化における事実判断と価値判断では、その正当性を確保するための条件がそれぞれ異なる。まず、事実判断は現時点で入手しうる最良の科学的知見に基づくべきである。科学的な不確実性のもとでも、科学的な実験や調査による知見が全く得られないという状況は稀である。現実世界を認識するための完全ではないにしても最良のアプローチは「科学」であることを認めるなら、完全に科学的なリスク定量化を行えないからといって全てを放棄するのではなく、可能なかぎり科学方法論に基づく事実判断を行うべきである。つぎに、価値判断においては、専門家の評価を特権的に扱うのではなく、多様な人々の意見を反映させた社会的な評価でなければならない。つまり、科学的な不確実性におけるリスク定量化を正当なものとするには、科学的合理性に従った事実判断と社会的合理性に従った価値判断に基づいて実施する必要がある。

科学的な不確実性下においてにリスク費用便益分析を実施するには、ポスト実証主義の立場をとり、最良の科学的知見に基づく事実判断と多様な人々の評価を反映した価値判断によりリスク定量化を行う必要がある。この点については科学哲学の分野で既に指摘されているものの、それらは理念的に語られることが多く、具体的にどのような意思決定モデルに基づいてリスク費用便益分析を実施すべきかについての研究は見当たらない。以下では、この点について検討する。

## 3. ポスト実証主義の期待効用モデル

### (1) リスク費用便益分析と期待効用モデル

標準的なリスク費用便益分析においては、適用する分野によって様々な数理構造をとるが、それらを包括した形としてVon Neumann-Morgenstern<sup>20)</sup>の期待効用モデル(以下vNMEU)に基づくとみなすことができる。発生確率と被害の大きさの積で定義されるリスクや、エンドポイントの発生確率を用いた費用便益分析も、vNMEUにおける効用関数の特定化の一つとして位置づけることができる。

リスク費用便益分析を期待効用モデルで基礎づける利点は二つある。まず、選好が満たすべき条件を公理として明示できる点がある。それにより、評価順序が循環しないなど最低限の合理性が保証されているか、また、暗黙のうちに不合理な選好条件が課されていないかを確認することができる。また、様々な評価のあり方を評価関数の特定化として表すことで、それらがどのような条件を暗黙のうちに仮定しているのかを明らかにできる。例えば、発生確率と被害の大きさの積で定義されるリスク評価はリスク中立的であることを暗黙に仮定しているし、エンドポイントの発生確率をリスク評価とすることは結果の効用が一定であることを含意している。つまり、様々な評価のあり方を期待効用モデルの観点から体系化することができる。

科学的な不確実性下においては、リスク定量化にも価値判断が混入するため、客観的なリスク定量化を前提とするvNMEUは適用できない。ポスト実証主義のリスク費用便益分析においては、期待効用モデルに下記の条件が要求される。

- ①リスク定量化に含まれる事実判断と価値判断を区分して扱える。
- ②多様な価値判断を柔軟に反映させることができる。

不確実性下の期待効用モデルとして一般的に用いられるSavage型の期待効用モデル<sup>21)</sup>(以下SEU)では条件①を満たすことができない。SEUは、科学的にリスクが唯一に特定されない状況でも主観確率を構成することができるが、その主観確率は科学的事実と主観的判断の両方が不可分に混合されるためである。

### (2) 科学的な不確実性の定式化

条件①を満たすには、リスク定量化において事実判断として扱われる範囲を示す必要がある。それにはまず、科学的な不確実性と「無知(ignorance)」が区別されなければならない。無知は候補となる科学モデルすら存在しない状況であるため本研究の対象外である。問題となる

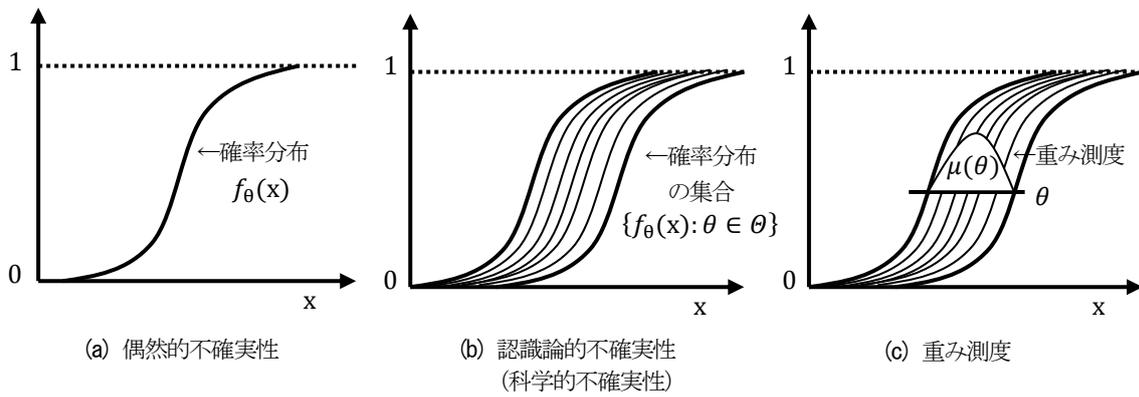


図-1 偶然的な不確実性と認識論的不確実性

のは、リスクを説明・予測しうる複数の科学モデルが並存し、そのどれを採用すべきかが情報不足により科学的に判断できない状況である。候補となる科学モデルは、因果構造や関数形、パラメータ値など様々なレベルで異なりうる。

リスク解析や安全・信頼性工学などの分野では、不確実性は偶然的な不確実性 (aleatory uncertainty) と認識論的不確実性 (epistemic uncertainty) に分類される。前者は現象のランダム性により生ずる不確実性であり、信頼できる単一の科学モデルから導かれた一本の確率分布として表現される (図-1a)。後者は分析者の知識不足により生ずる不確実性であり、科学モデルの因果構造や関数形、パラメータ値などを科学的な客観性をもって定められない状況である。Apostolakis<sup>22)</sup>や Paté-Cornell<sup>23)</sup> は候補となりうる全ての科学モデルからそれぞれ導出された確率分布の集合として認識論的不確実性を表示することを提案している (図-1b)。その研究例として、地球温暖化リスク<sup>25)</sup>、水害リスク<sup>26)</sup>、地震リスク<sup>27)</sup>について認識論的不確実性を確率分布の集合として表示したものがある。

本研究で扱う科学的な不確実性は認識論的不確実性に対応する。そのため、リスクを説明・予測しうる全ての候補となる科学モデルから導出された確率分布の集合を事実判断とする。ここで、候補となる科学モデルの範囲は論理や実験的事実に基づいて客観的かつ価値中立的に定められなければならない。科学的な不確実性のあるリスクとして確率分布の集合を所与としたとき、どのようにそれをリスク評価に反映させるかは価値判断の領域になる。

### (3) 客観的曖昧性下の期待効用モデル

近年、曖昧な客観リスクを確率分布の集合として定式化し、それらを評価する期待効用モデルが開発されつつある。これは客観的曖昧性 (objective ambiguity) 下の期待効用モデルと呼ばれている。vNMEUでは客観的な唯一の確率分布が所与とされるのに対して、客観的曖昧性

下の期待効用モデルでは確率分布の集合が所与とされる。このモデルでは、与えられた確率分布の集合のなかで真の確率分布がどれであるかは不明であり、その集合に含まれる個々の確率分布に主観的重みづけをして意思決定される。

この客観的曖昧性下の期待効用モデルは科学的な不確実性のあるリスクにそのまま適用できる。あるリスクの科学的な不確実性を確率分布の集合として与えて事実判断とし、そこでの主観的重みづけを価値判断とすることで、条件①を満たすことができる。

客観的曖昧性下の期待効用モデルには、Jaffray<sup>28)</sup>の先駆的な研究をはじめ、Olszewski<sup>29)</sup>やAhn<sup>30)</sup>、Gajdos et al.<sup>31)</sup>、Gravel et al.<sup>32)</sup>により開発されたモデルがある。これらのうち、本研究では、Ahnの期待効用モデル (以下AEU) をポスト実証主義のリスク費用便益分析に採用する。AEUを選択した理由は、Gravel et al.のモデルは連続的な幅を扱えないため評価対象がかなり限定されてしまう欠点があり、他の全てのモデルの評価関数が $\alpha$ -Maximinまたはその特殊形をとるため条件②を満たすことができないからである<sup>32)</sup>。 $\alpha$ -Maximinは最悪の確率分布と最善の確率分布における評価がパラメータ $\alpha \in [0,1]$ で線形結合されている形をとる。そのため、最悪または最善以外の確率分布についての情報が無視され、直観的に不適切な判断が導かれることがある<sup>33)</sup>。また、科学的な不確実性の範囲をどのように設定するかは実践上の最も困難な課題の一つである。その境界に位置することが多いであろう最悪の確率分布と最善の確率分布に、 $\alpha$ -Maximinの判断は決定的に依存してしまう。AEUは次節で述べるように、多様な価値判断を柔軟に反映させられるモデル構造を有している。また、AEUを導出する一連の公理も規範性の条件として自然に受け入れられるものであり、その評価関数も常識的な判断と整合的である。そのため、条件②の観点から、本研究ではAEUを科学的な不確実性下のリスク費用便益分析に用いる。

#### (4) AEU

AEU の評価対象は確率分布の集合である<sup>注4</sup>。個々の確率分布をパラメータベクトルによって一対一で規定されるものとして定式化することで、評価対象を確率分布の集合からパラメータベクトルの集合に置き換えることができる<sup>注5</sup>。パラメータベクトル $\theta \in \Theta$ によって一対一に規定される確率分布 $f_\theta(x)$ を考える。ここで、 $x \in X$  は結果ベクトルである。確率分布の集合 $A \subseteq \Theta$ を集合 $B \subseteq \Theta$ と同等以上に選好するとき、 $A \succeq B$ と表記する。

意思決定者の選好がある一連の合理性の条件を満たすと仮定すると、その選好は下式の期待効用関数 $V$ で表現できる<sup>注6</sup>。

$$A \succeq B \Leftrightarrow V(A) \geq V(B)$$

$$V(A) = \begin{cases} \frac{\int_A \phi \{ \int u(x) df_\theta(x) \} d\mu(\theta)}{\mu(A)} & \text{if } A \text{ is a set} \\ \phi \left( \int u(x) df_\theta(x) \right) & \text{if } A = \{\theta\} \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 $u$ と $\phi$ は単調増加関数、 $\mu$ はパラメータ集合上の確率測度である。

AEUを科学的不確実性の文脈に適用すると以下のようなになる。まず、AEUの評価対象である確率分布の集合は科学的不確実性のあるリスクとして解釈される。それは①効用関数 $u$ 、②不確実性態度関数 $\phi$ 、③重み測度 $\mu$ の3つから構成されているAEU評価関数によって評価される。効用関数 $u$ は結果 $x$ で得られる効用を定める関数である。不確実性態度関数 $\phi$ は科学的不確実性の大きさに対する態度を表している。 $\phi$ が凹関数であれば、科学的不確実性として定式された確率分布の集合のなかで個々の分布のばらつきが大きいほど、そのリスクに直面したときの効用は小さくなる。重み測度 $\mu$ は、意思決定者が個々の確率分布にどれほどの注意を払うかについての主観的な重みとして解釈できる(図-1c)。一方で、科学的知見ではないにしても経験に裏打ちされた直観としてどの確率分布が尤もらしいかという専門家の判断がある。他方で、どの確率分布が前提とするのが公平性や人権の観点から望ましいかという倫理的な判断や、どの確率分布が自分達の生活に甚大な影響をもたらすので注意を払いたいという住民の判断がある。これら倫理的価値、予防的態度、専門家の経験的直観などによって重み測度は構成される。

#### 4. AEUに基づくリスク費用便益分析

##### (1) AEUによるリスク費用便益分析の手順

科学的不確実性下において AEU によるリスク費用便益分析を実施する手順は以下ようになる。まず分析対象とする科学的不確実性のあるリスクを確率分布の集合として定式化する。これは事実判断に関係するところであり、科学的かつ価値中立的に行われなければならない。つぎに、AEU の評価関数を構成する①効用関数 $u$ 、②不確実性態度関数 $\phi$ 、③重み測度 $\mu$ を特定する。これは価値判断に関係するところであり、誰の価値判断を反映するかによって異なって特定される。例えば、客観性を重視する専門家は効用関数 $u$ 、不確実性態度関数 $\phi$ は実際に観測された行動データから関数形を推計し、重み測度 $\mu$ は正しい可能性が高いと考える確率分布に大きな重みを与えるように設定するであろう。他方、自分達の生活への影響を重視する一般住民は、効用関数 $u$ と不確実性態度関数 $\phi$ を自分達の評価が反映できるように設定し、重み測度 $\mu$ もどれが起こりやすそうかではなく、どれが起こってほしくないかを反映させて設定するであろう。

ポスト実証主義の立場におけるAEUを用いたリスク費用便益分析では、住民、企業、NPOなどの価値判断の異なる主体ごとに異なる分析結果となることを認める。それらの分析結果を集約して政策判断につなげる役割は、リスク費用便益分析の実施者ではなく、民主主義的手続きに委ねられる。その手続きは、社会的判断について合意が得られるまで熟議を繰り返すという直接民主主義的な形態から、各利害関係者が各自の分析結果を公開し、民主的代表者に最終的な判断を委ねる間接民主主義的な形態まで取りうる。いずれにしても、ポスト実証主義のリスク費用便益分析は、科学的な政策判断のため手法ではなく、民主的手続きによる政策判断の質を高めるための情報提供・整理ツールとして利用されることになる。

##### (2) 仮想的な適用例

###### a) 放射性物質の除染問題

AEU に基づくリスク費用便益分析を行う具体的なイメージを得るため、福島県における放射性物質の除染問題に適用する。ただし、ここでは手法の説明を目的としているので、かなり単純化した問題設定を行う。除染の目標水準は、原発事故による追加的な被ばく量をどの程度に抑えるかを定めるものであり、1mSv/年から100mSv/年まで意見が分かれている。日本では普段でも平均 1.48mSv/年の放射線を浴びており、1mSv/年程度は自然に変動するため、1mSv/年まで除染すれば安全である。一方、1mSvから 100mSv までの範囲では被ばく量と発がん率の関係に科学的不確実性がある。原爆被ばく者約 12 万人のデータより 100mSv 以下の 1 回の被ばくでは

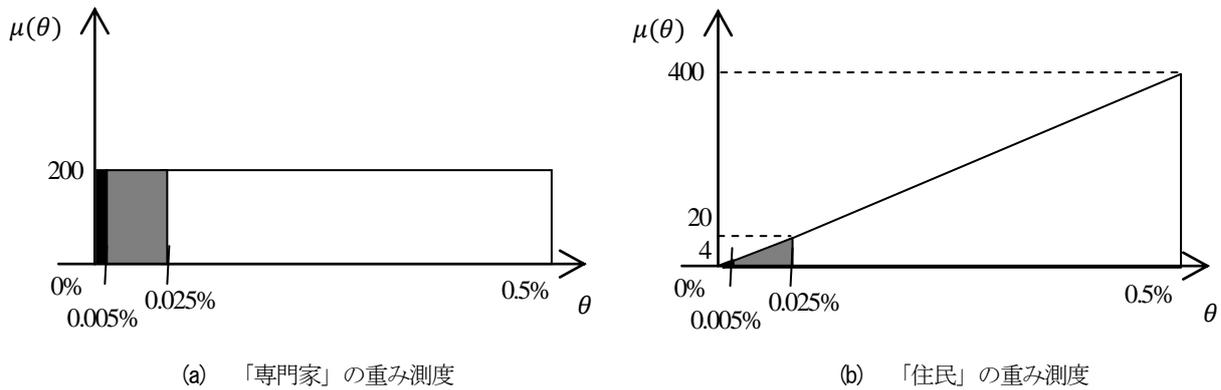


図-2 発がん確率の科学的不確実性に与えられる重み測定

人に対する放射線影響は統計的に有意に認められていない。しかし、それは 100mSv 以下では発がんリスクは増加しないという「しきい値あり仮説」が正しいことを必ずしも意味しない。発がん率は増加するが他の要因に紛れて統計的に判別できないだけであるという「しきい値なし仮説」も成立しうる。ICRP<sup>33)</sup>は「直線しきい値なし仮説 (LNT)」に基づき、100mSv の被ばくにより発がんリスクが 0.5%の増加と予測している。原爆は瞬間的に被ばくしており、年間を通じた合計として同じ放射線量を被ばくするときは発がん確率は小さくすると予想されるが、ここでは同じ確率を用いる。このとき、1mSv/年、5mSv/年、100mSv/年では、それぞれ[0, 0.005%], [0, 0.025%], [0, 0.5%]だけ発がん確率が増加すると科学的不確実性の幅をもって予測される。

上記の前提をもとに、「専門家」と「住民」という二つの仮想的な立場から AEU によるリスク費用便益分析を行う。発がんリスクの科学的不確実性は、しきい値なし仮説の予測と LNT の予測の間に真の発がん確率は存在するとして定式化する。政策の代替案は「1mSv/年」、「5mSv/年」、「100mSv/年」とする。政策費用は産業技術総合研究所<sup>34)</sup>の試算を用いて、それぞれ2480万円/人、815万円/人、0円/人とする<sup>37)</sup>。これらは下記の表-1として整理できる。

### b) AEUに基づくリスク費用便益分析

まず、「専門家」の立場から AEU に基づくリスク費用便益分析を行う。対象リスクは「発がん」であり、結果  $x$  は、 $x = 1$  のとき「発がんする」、 $x = 0$  のとき「発がんしない」とする。予測分布  $f_{\theta}(x)$  はベルヌーイ分布であり、この予測分布を 1 対 1 で定めるパラメータは発がん確率  $\theta$  である。AEU の評価対象となる代替案は  $\theta$  の集合と費用  $c$  の組である。例えば、代替案「1mSv/年」は発がん確率  $\theta$  の集合  $\theta_1 = [0, 0.005\%]$  と代替案の費用  $c_1 = 2230$  万円/人の組合せとして表現できる。AEU 評

価関数は以下のように特定化する。まず、発がんしたときに統計的生命価値である 226 億円<sup>35)</sup>の価値を失うと考え、効用関数は  $u(x) = -22600x - c$  とする。つぎに、不確実性態度は中立であると考えて線形  $\phi(u) = u$  とする。重み測定  $\mu$  は、科学的不確実性の範囲で特定の発がん率を重視する理由がないとして一様測定を用いる (図-2a)。この特定化のもと、代替案「1mSv/年」で得られる AEU 評価値は下式で算出される。

$$\begin{aligned}
 V(1\text{mSv}) &= \frac{\int_{\theta_1} \phi\{\int u(x) df_{\theta}(x) - c_1\} d\mu(\theta)}{\mu(\theta_1)} \\
 &= \frac{\int_{[0, 0.005\%]} \{-22600\theta - 2480\} d\mu(\theta)}{\mu([0, 0.005\%])} \\
 &= -0.565 - 2480
 \end{aligned}$$

ここで、右辺の第 1 項は発がんリスクによる効用、第 2 項は除染費用負担による効用である。同様に、代替案「5mSv/年」、「100mSv/年」を評価した結果を表-2に示す。

つづいて、「住民」の立場から AEU に基づくリスク費用便益分析を行う。ここでは、効用関数と不確実性態度は「専門家」のものと同一とする。重み測定  $\mu$  は、発がん率が高い予測ほど重視するという点を反映させるため、 $\theta$  の最大値 (0.5%) を最頻値とする三角測定を想定する (図-2b)。このときの三つの代替案の AEU 評価値を表-2に示す。

### (3) 適用例の考察

上記の分析結果は、非常に単純化された問題に対する仮想的なものなので評価自体には意味がないが、AEU に

表-1 仮想的な除染の代替案

| 代替案       | 発がん確率  |        | 費用/人    |
|-----------|--------|--------|---------|
|           | しきい値あり | LNT    |         |
| 1 mSv/年   | 0%     | 0.005% | 2480 万円 |
| 5 mSv/年   | 0%     | 0.025% | 815 万円  |
| 100 mSv/年 | 0%     | 0.5%   | 0 円     |

基づくリスク費用便益分析を実施することのメリットを示すには役立つ。まず、科学的な不確実性を定式化することで客観的に明示し、それを系統立てて評価することができる。除染問題の例では、科学的な不確実性として「しきい値あり仮説」と「LNT 仮説」の二つの科学モデルが並存し、前者は 1 mSv/年から 100 mSv/年まで発がんリスクが 0%で一定であり、後者は 0%~0.5%まで直線的に増加すると事実判断されている。この事実判断のもとでは、発がんによる損失を統計的生命価値で評価する限り、最悪のシナリオを重視する重み測度をとっても、発がんリスクの費用より除染費用の方が圧倒的に大きくなるが示された。

科学的な不確実性下においては、科学的合理性と社会的合理性がそれぞれの領域を越権するかたちで極端なリスク評価が行われがちである。一方で、科学的に不確実なのだから住民が望んでいる 1 mSv/年まで除染を行うべきとの主張は、利用可能な科学的知見まで放棄している。他方で、100 mSv/年以下は発がんリスクに影響がないため除染は無駄だとの主張は、科学的な不確実性の存在を無視している。AEU に基づくリスク費用便益分析は、科学的合理性に従って科学的な不確実性を特定し、そのもとで社会的合理性に従ってリスクを評価することで、科学的にも社会的にも妥当な評価を行うことができる。

また、AEU に基づくリスク費用便益分析は、より質の高い議論を行うための情報提供・整理ツールとして役立つ。この適用例の分析結果について様々な批判があるであろう。例えば、科学的な不確実性の定式化が正しいのか、発がんの損失を統計的生命価値で評価してよいのか、漠然とした不安や資産価値の下落など他の重要な要因が考慮されていないのではないのか、などの批判である。これらの批判に対して反論・修正、またその結果を批判するというプロセスを繰り返すことで、より妥当性の高い分析結果が得られることが期待できる。このとき、評価関数が明示されていることが議論の基盤になる。例えば、発がんによる損失を統計的生命価値で評価するのは過小評価につながるのと批判については、「住民」の AEU 評価関数に基づいて、最適な代替案が「100 mSv/年」から「5 mSv/年」に変わるのは発がんの損失が 26 億円/人より大きいときであるとの試算結果を提供できる。こうした情報は合意形成に役立つと期待できる。

表-2 仮想的な除染代替案の AEU 評価値

| 代替案       | 発がんリスクの効用 |        | 除染費用負担の効用 |
|-----------|-----------|--------|-----------|
|           | 専門家       | 住民     |           |
| 1 mSv/年   | -0.57     | -0.75  | -2480     |
| 5 mSv/年   | -2.83     | -3.77  | -815      |
| 100 mSv/年 | -56.50    | -75.33 | 0         |

## 5. まとめ

本研究では、科学的な不確実性下のリスク費用便益分析手法をポスト実証主義の立場から提案した。科学的な不確実性のあるリスクに関する論争の多くは、リスク定量化において事実判断と価値判断の領域が区別されていないため、議論が錯綜しているように思われる。科学的知見ではない専門家の主観的判断に基づいてリスク定量化を行うのは社会的合理性に反するが、科学的に明らかになっていることを完全に無視して人々の価値判断に基づくことは科学的合理性に反する。本研究で提案した AEU に基づくリスク費用便益分析は、それらの領域を区分して扱えるため、そうした無用な混乱を避けることができる。

本研究は、科学的な不確実性の費用便益分析手法のアイデアを示したに留まっており、現実問題に適用するには様々な課題が残されている。例えば、どこまでを科学的知見として扱うか、異なる価値判断の人々や集団をどのようにグループ分けするか、それらの価値判断を表す評価関数をどのように特定化するかなどの課題が考えられる。それらは今後の課題である。

## 文末脚注

注1 リスク費用便益分析の多くの文献では、本研究でのリスク定量化 (risk quantification) とリスク評価 (risk valuation) をそれぞれリスク分析 (risk analysis) , リスク管理 (risk management) と呼ぶことが多い。ただし、リスク分析はリスク費用便益分析と紛らわしい点、後半で期待効用理論と関係してくるためリスク管理よりリスク評価のほうが理解しやすいとの点から、本研究ではリスク定量化、リスク評価という用語を採用した。

注2 Gajdos et al<sup>30</sup>のモデルでは最悪分布の期待効用と Steiner point 分布の期待効用の凸結合で表されるので、厳密には  $\alpha$ -Maximin の特殊例ではない。しかし、同様の問題が生ずる。また、Gajdos et al のモデルでは、不確実性回避を公理として採用しているため、不確実性愛好的な判断は非合理的と見なされる。しかし、不確実性への態度は住民の好みに属するものであるため、ある特定の好みを非合理であると判断する公理には問題がある。

注 3 例として、環境汚染を防ぐために政策 A と政策 B のどちらかを選択する場合を考える。政策 A に効果がある確率は 0-50%または 90%~100%と予測され、政策 B に効果がある確率は 0-10%または 50%~100%と予測されたとする。この場合、直観的には明らかに政策 B のほうが望ましいと判断されるのに、 $\alpha$ -Maximin では二つの政策が無差別であると判定される。

注 4 厳密に言えば、AEU の評価対象は確率分布の正則集合 (regular set) か単集合 (singleton) である。しかし、この数学の技術的な制約は現実への応用において問題とならないと考えられる。

注 5 評価対象をパラメータベクトルの集合に置き換え可能であることは、Ahn が論文中で言及している。

注 6 AEU は、パラメータ集合 (つまり確率分布の集合) 上に定義された選好に下記の 6 つの公理を課す。以下で、 $\lambda$  は  $\Theta$  上の Lebesgue 測度、 $A \Delta B = (A \cup B) \setminus (A \cap B)$  である。

#### 公理 1 : 弱順序

$\succeq$  は弱順序である (完備性と推移性を満たす)

#### 公理 2 : Lebesgue 連続性

$\lambda(A) > 0$  かつ  $\lambda(A_n \Delta A) \rightarrow 0$  の場合、すべて  $n$  について  $A_n \succeq B$  なら  $A \succeq B$  であり、 $B \succeq A_n$  なら  $B \succeq A$  である。

#### 公理 3 : 下方 Hausdorff 連続性

$A_n$  が Hausdorff 距離で  $\{a\}$  に収束する場合、すべて  $n$  について  $A_n \succeq B$  なら  $\{a\} \succeq B$  であり、 $B \succeq A_n$  なら  $B \succeq \{a\}$  である。

#### 公理 4 : 互いに素な集合の中間性 (betweenness)

A と B が互いに素の場合、 $A \succeq B$  なら  $A \succeq A \cup B \succeq B$  であり、 $A > B$  なら  $A > A \cup B > B$  である。

#### 公理 5 : 均衡性 (balancedness)

正規集合 A, B, C, D について、 $[A \cup B] \cap [C \cup D] = \emptyset$  であり、 $A \sim B > C, D$  または  $A \sim B < C, D$  が成立している場合、 $A \cup C \succeq B \cup C$  なら  $A \cup D \succeq B \cup D$  である。

#### 公理 6 : 単一確率分布における独立性

任意の  $a, b, c \in \Theta$  と任意の  $\alpha \in (0, 1)$  について、 $\{a\} \succeq \{b\}$  なら  $\alpha\{a\} + (1 - \alpha)\{c\} \succeq \alpha\{b\} + (1 - \alpha)\{c\}$  が成立する。

注 7 産業総合研究所<sup>30)</sup>の報告書にある表 5 のシナリオ 1 とシナリオ 2 のデータを用いた。これらは 1mSv 以上、5mSv 以上の地域を面的除染した費用であるが、ここでは完全な効果があることを前提としている。

## 参考文献

- 1) 伊勢田哲治 : 応用科学哲学の問題としてのリスク, 科学哲学, 38(2), pp.27-44, 2005.
- 2) Shrader-Frechette, K.S.: Risk and Rationality: Philosophical Foundations for Populist Reforms, University of California Press, 1997. (松田毅訳 : 環境リスクと合理的意思決定—市民参加の哲学, 昭和堂, 2007) .

- 3) Mayo, D. G.: Sociological versus metascientific views on risk assessment, in Mayo, D. G. and Hollander R. D. (eds.) Acceptable Evidence: Scientific and Values in Risk Management, New York, NY: Oxford University Press, pp.249-279, 1991.
- 4) Kuhn, T. S.: The Structure of Scientific Revolutions, University of Chicago Press, 1962. (中山茂訳 : 科学革命の構造, みすず書房, 1971) .
- 5) Hanson, N.R.: Patterns of Discovery, Cambridge University Press, 1958.
- 6) Whittemore, A.S.: Facts and values in risk analysis for environmental toxicants, Risk Analysis, Vol.3, pp.23-33, 1983.
- 7) Morgan, G. Morris, S.C., Henrion, M. Amaral, D. A. L., and Rish, W. R.: Technical uncertainty in policy analysis: a sulfur air pollution example, Risk Analysis Vol. 4, No. 3, 201-216, 1984
- 8) Cooke, R.: Subjective Probability and Expert Opinion, Oxford University Press, 1991.
- 9) Wilson, R., Crouch, E. A. C. :Risk-Benefit Analysis, Harvard University Press, 95-97, 2001.
- 10) Greetz, C.: Local knowledge, further essays in interpretive anthropology, New York, Basic Books, 1983. (梶原景昭訳 : ローカル・ナレッジ, 解釈人類学論集, 岩波書店, 1991) .
- 11) Edwards, A.: Scientific expertise and policy-making: the intermediary role of the public sphere, Science and Public Policy, Vol.26, No.3, 163-170.
- 12) Johnson, G. F: Deliberative Democracy for the Future: The Case of Nuclear Waste Management in Canada, University Toronto Press, 2008. (船橋晴俊, 西谷内博美監訳 : 核廃棄物と熟議民主主義—倫理的的政策分析の可能性, 新泉社, 2011.)
- 13) 藤垣裕子 : 専門知と公共性—科学技術社会論の構築へむけて, 東京大学出版, 2003.
- 14) Tversky A and Kahneman D. Judgment under uncertainty: heuristics and biases. Science 1974; 185:1124-1131.
- 15) Loewenstein G, Weber EU, Hsee CK, Welch N. Risk as feelings. Psychological Bulletin, 2001; 127:267-286.
- 16) Slovic P., Finucane M. L., Peters E, and MacGregor D. M. : Risk as analysis and risk as feelings: Some thoughts about affect, reason, risk and rationality. Risk Analysis, 2004; 24:311-322.
- 17) Sustain, C. R.: Deliberative trouble? Why groups go to extremes, Yale Law Journal, Vol.110, pp.71-119.
- 18) Sustain, C. R.: Worst-Case Scenarios, Harvard University Press, 2007.
- 19) Posner, R.: Catastrophe: Risk and Response, Oxford University Press, 2005.
- 20) Von Neumann, J, Morgenstem, O.: Theory of games and economic behavior, Princeton university press, 1953. (銀林浩, 橋本和美, 宮本俊雄監訳, 阿部修一, 橋本和美訳 : ゲームの理論と経済行動, ちくま学芸文庫, 2009) .
- 21) Savage, L.J.: The foundation of statistics, second revised edition, Dover Publication, 1972.
- 22) Apostolakis, G.; The concept of probability in safety assessments of technological systems, Science, Vol.250, pp.1359-1364, 1990.
- 23) Paté-Comell, E.: Uncertainties in risk analysis: six levels of treatment, Reliability Engineering and System Safety, Vol.54, pp.95-111, 1996.
- 24) Paté-Comell, E.: Risk and uncertainty analysis in government safety decisions, Risk Analysis, Vol.22, pp.633-646, 2002.
- 25) Meinshausen, M., Meinshausen, N., Hare, W. Raper, S.C.B., Frieler, K., Knutti, R., Frame, D.J. and Allen, M.R.: Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2°C, Nature, Vol.458, pp.1158-1162, 2008
- 26) Merz, B and Thieken, A.H.: Flood risk curves and uncertainty bounds, Natural Hazards, Vol.51, pp.437-458, 2009.
- 27) Senior Seismic Hazard Analysis Committee (SSHAC): Recommendations for probabilistic seismic hazard analysis: guidance on uncertainty and use of experts, NUREG/CR-6372, 1997.

- 28) Jaffray, J. Y.: Linear utility theory for belief functions, *Operations Research Letters*, Vol.8, pp.107–112, 1989.
- 29) Olszewski, W. B.: Preferences over Sets of Lotteries, *Review of Economic Studies*, Vol.74, pp.567-595, 2007.
- 30) Ahn, D.: Ambiguity without a state space, *Review of Economic Studies*, Vol.75, pp.3-28, 2008.
- 31) Gajdos, T., Hayashi, T., Tallon, J.M. and Vergnaud, J.C.: Attitude toward imprecise information, *Journal of Economic Theory*, Vol.140, pp.27-65, 2008.
- 32) Gravel, N., Marchand, T., and Sen A.: Uniform expected utility criteria for decision making under ignorance or objective ambiguity, *Journal of Mathematical Psychology*, Vol.56, pp.297-315, 2012.
- 33) ICRP: Low-dose Extrapolation of Radiation-related Cancer Risk, *ICRP Publication 99. Annals of ICRP Vol.35, No.4, 2005.*
- 34) 産業技術総合研究所：福島県内の除染実施区域における除染の費用に関する解析, 2013.
- 35) 内閣府：交通事故の被害・損失の経済的分析に関する調査研究, 2007.

(2011. 7. ? 受付)

## RISK COST BENEFIT ANALYSIS UNDER SCIENTIFIC UNCERTAINTY

Toshio FUJIMI

Standard risk cost benefit analysis (RCBA) cannot be implemented under scientific uncertainty where science cannot produce reliable results by itself due to lack of knowledge and data. The main purpose of this paper is to develop RCBA method under scientific uncertainty. We argued that RCBA should be based on post-positivism where risk quantification must give up scientific objectivity but requires separation between fact and value judgments. The former and latter should follow scientific and social rationalities, respectively. This paper proposed a RCBA methods under scientific uncertainty based on post-positivism by applying Ahn's expected utility model.