多様なステークホルダーが存在する社会のリスクに基づく意思決定

椿 広 計*, 堀 芳 樹**

Risk-based Social Decision under Different Stakeholders

Hiroe TSUBAKI* and Houju HORI JR.**

The authors suggest three problems for social decision by minimum risk principle, those are how to distribute risk to different stakeholders, how to transform objective probabilities of risk events into the subjective probabilities and how to ignore rare risk events purposively for our daily life. In order to solve the problems the authors suppose cooperative researches among welfare economics, statistical decision theory and fuzzy mathematics etc.

Key words: Multi Stakeholders, Statistical Decision Theory, Quasi Prior Distribution
キーワード: 多様な利害関係者, 統計的決定理論, 擬似事前分布

1. はじめに: 期待損失最適化行動へのいくつかの疑問

椿は, Taylor (2009) に基づき, 筑波大学大学院ビジネス科学研究科 (社会人を対象とした大学院) で Operations Management の講義の一部を担当した. シナリオプランニングとも呼ばれる期待利得最適化決定の講義である. 属人的意思決定ではなく, 科学的意思決定の必要性, 数理科学・統計科学の社会全般での重要性を印象付けることが講義目的となる. その内容自体は, 石黒他 (2014) にも紹介した. 決定空間 (選択可能性のある行動の集合) を決定木上に配置すると共に, 利得に影響を与える不確実な将来事象の分岐もその確率と共に決定木上に配置した. 勿論, 利得表 (損失関数), すなわち, ある決定の下で, ある現象が実現した際の利得も提示する.

このビジネスシナリオ記述は, 決定者と不確実な現象の生成者としての Nature とのゲームの木を用いて,

一連の経営シナリオを表現するものであり, 国内外のビジネススクールで教育されている.

筆者は, 経営系大学院でデータ解析の講義は多く担当した. 特に, 企業のクレジットリスク評価 (倒産確率評価) を統計的確率予測手法に基づき講義することが多かった. しかし, 統計的決定理論は, 「統計的管理」という講義の中で理論と例題を一通り教えるだけであった. 期待利得最適化原理に基づく, 現実ビジネスに適用可能な意思決定技法の講義は, 専門職大学院を設置した 2005 年以降である. 社会人学生へのインパクトの源泉が, 実務的決定に直結しているからだということも認識した.

一方, 2005 年以降, 統計数理研究所リスク解析戦略研究センターが設立したリスク研究 NOE (Network of Excellence) で医薬品・食品・環境・金融・品質・防災など様々な分野の専門家と議論した. 当初は, 数理科学におけるリスク科学とは期待損失関数 (リスク関数) の最適化であり, まさに同時期から講義を始めていた単純な統計的決定理論が基本原理であると信じていた. しかし, 議論を重ねる中で, その種の原理に, 漠然とした疑問を感じ始めていた. 椿 (2007) で, 既にリスク評価の主観性をなどを指摘はした.

特に, 東日本大震災以降, 予防対応が難しい希少確率現象への事後的社会対応の設計が, 「クライシス対応」

*独立行政法人統計センター 理事長
(National Statistics Center)
連絡先: 〒162-8668 東京都新宿区若松町 19-1 総務省第 2 庁舎
Tel: 03-5273-1201
E-mail: tsubaki@nstac.go.jp
**元 三重大学教育学部
(Faculty of Education, Mie University)

というテーマとしてリスク研究 NOE で議論された。そこで、期待損失最適化行動に対する自身の疑問点を幾つか整理することができた。日本行動計量学会第 100 回シンポジウムでは、それらの素朴な疑問を論点とし提示した。それが本稿である。ベイズ統計学、統計的決定理論 (Wald, 1949), ゲーム論的確率論 (Shafer and Vovk, 2001), 厚生経済学, 行動経済学, 特に Prospect 理論 (Kahneman and Tversky, 1979), ファジィ数学 (Uemura and Sakawa, 1993) 等の研究者にとっては、素人のあまりにも自明な、あるいは的外れの議論が多々あるのではないかと危惧する。むしろ、ここで挙げた問いかけに対して、必要なソリューションを専門家から教示頂ければ幸いである。

2. 社会のリスク許容性とリスク分配

既に述べたように、統計数理研究所リスク解析戦略研究センターで、多様な社会リスク専門家と対峙した。2005 年以前に応用統計家として筆者の扱ってきた社会リスク問題は、医薬品リスク、クレジットリスク、品質管理、地球環境であった。リスクセンター設立後、食品安全、化学物質、防災、自殺対策などの専門家と対峙して、改めて確認できたのは、リスクを回避すべきものとしたり、許容したりする、受け止め方の多様性である。また、数理科学方法論としての人工知能、ファジィ数学分野、システム科学分野の専門家と交流して理解できたのは、リスクを発見すべき対象とする分野や、検証・評価すべき対象とする分野や、対応を設計しようとする分野の多様性であった。

医薬品開発・品質管理分野で既に、消費者危険、生産者危険といった用語で議論してきたことではあった (椿, 藤田, 佐藤, 1999) が、社会にはリスクについて多様な利害関係者がいることも再確認できた。そして、社会的意思決定と利得との関係は、利害関係者の立場やリスク許容性に強く依存することに改めて気づいた。椿 (2007) でも触れたが、医薬品、食品、環境化学物質の 3 分野の安全性について考えてみよう。

医薬品随伴作用の一定以下の危険性は、投与される本人に対して、自身が医薬品主作用による自身の疾病からの回復のためにある水準までは甘受可能なことが前提になっている。佐久間昭氏が「薬はリスク」と呼んだように、リスクをとることで利得を得ることが、当然視されている分野である (津谷, 2010)。

食品については、それを食することに起因する利得

はあることを意識している。一方、それによって食中毒が起きるといった随伴の危険性は、個人ないしは社会全般で、通常許容されていない。古来、「河豚は食した命は惜しし」といった故事が、現実には日本で悩まれたのかは、興味深い問題である。これは、探検やベストを目指す行為も、prospect 理論が例示する負債からの脱却のように、日常的効用関数を歪める現象たり得るとしなければ、説明がつかない。

さて、医薬品でも生命に危険のない疾患の治療薬に対して生命に影響を与える副作用が生じることは社会的に許容されない。これは、ソリブジン事件が良い例題となる。1993 年に上市された抗ヘルペスウイルス剤ソリブジンは、帯状疱疹などの有効性が期待されていた。ところが、抗がん剤との併用により、上市後ただちに死亡を含む重篤な副作用が発生した。上市 1 月後には緊急安全性情報が配布されるに至り、その後自主回収も行われたのである。患者が抗がん剤を投与されていることを告知されていない、患者が異なる病院に通院し薬歴管理が不十分という問題があったことは確かに問題である。

しかし、ここで敢えて注目したいのは、この薬害は、抗がん剤とソリブジンの併用で生じたことである。それに関わらず、社会的には抗がん剤ではなく、ソリブジンが制裁を受けたということである。社会は、抗がん剤には一定以下のリスクを許容するが、抗ウイルス剤にはそれほどのリスクは許容しないのである。

このように、ある決定に対する社会ないしは個人のリスク許容性は、その決定の結果で社会ないしは個人が得られると予想する便益の質ないし価値に強く依存するということである。

一方、環境化学物質の場合にはより本質的な問題が生じ得る。すなわち、物質の主機能によって便益を得る者と、当該物質によって損失を被る者が分離する場合がある。そのような他責の要因でリスクが生じた者は、そのリスクが小さくても許容することは困難である。

しかし、受益者側と被害者側の社会における構成比、力関係、被害の非可逆性などで社会的意思決定は変動する。公害問題、受動喫煙などに対する社会的意思決定が時代の趨勢に依存することを観れば、その種の社会的リスク選択が行われてきたことが読み取れる。

初等的意思決定では、何らかの集団を想定し、その集団全体での期待利得を最適化するという方法論が用いられる。しかし、竹内 (2010) が指摘したように現実には社会的意思決定を通じて、利得や損失は個々人に

分配ないしは再分配されるという厚生経済学的視点を忘れてはならない。

3. 社会を構成するメリットと利得の配分

社会的意思決定はなぜ必要なのかと言えば、社会を構成し、個々人が社会に投資を行い、効用や損失を分配してもらった方が、個々の効用が増えると期待されるからである。これには、社会的意思決定の結果は、社会構成員に共有の価値を産みだすからとも言える。

利得関数の評価に際しては、結果を生じせしめたコストを減殺する必要がある。コストに見合った価値・効用を生成する行動は、最低限の合理性を担保される。

今、単純な書籍の購入という状況を考えよう。この場合、売り手側は本を製造したコストを評価し、その最低価格を設定できなければならない。購買価格は、この最低価格以上に設定される。これは、社会的知識を動員したうえでの、経済的価値の客観的評価行為となる。

一方、買い手側は、一定の予算制約の中で、どの本を買うかということを考える。この際には、夏目(1906)が示したように、2つの主観的価値基準が強く作用する。とにかくこの本が欲しいという「非論理的期待価値」、この本がどの程度、どういう意味で現在あるいは将来に役に立つのかといった「論理的期待価値」である。これだけが、主観的期待価値の要素ではないかもしれないが、この主観的期待価値の総和が、個人のある本に対する主観的期待価値となる。それを価格に変換したものが主観的期待価格と呼ぶべきものである。従って、行動の期待価値は

$$\text{行動の期待価値} = \text{主観的期待価格} - \text{購買価格}$$

となる。従って、主観的期待価格が購買価格を上回る場合に購入という行動が、合理的と許容される。この種の価格決定の数理はゲーム論的確率論 (Shafer and Vovk, 2001) では本質的である。

今、統計と漫画好きのA君の前に1冊500円のシリーズ漫画5巻(5巻完結)と1冊千円の統計と英語の参考書が有ったとしよう。残念ながらA君に許された予算は2000円である。仮にA君にとっての主観的期待価値は次のようなものとしよう。

統計の参考書：1冊目 2000円, 2冊目以降 0円

英語の参考書：1冊目 1000円, 2冊目以降 0円

漫画 1巻目：1000円, 2巻目 900円,
3巻目 800円, 4巻目 700円, 5巻目 600円

当然だが、漫画でも同じ巻を2冊買う場合については、2冊以降の期待価値は0である。本論で触れることはできないが、人間行動の不完全性はしばしば、この種の不合理な行動を生成し、個々人に後悔を与える。

A君の期待価値を最大化するためには、統計の教科書1冊と漫画を2巻まで買えば、期待価格は3900円、価値との価格との差、行動の期待価値は1900円となる。

さて、ここにBさんという別人格を仮想する。Bさんは、同様の予算制約を有しているものとする。しかし、主観的期待価値は異なり、次のようなものとする。

統計の参考書：1冊目 1500円, 2冊目以降 0円

英語の参考書：1冊目 2000円, 2冊目以降 0円

漫画 1巻目：800円, 2巻目 600円, 3巻目 400円,
4巻目 400円, 5巻目 400円

このとき、Bさんにとっての期待価値最適化行動は、統計と英語の参考書を購入することで、行動の期待価値は1500円となる。

さて、ここでA君とBさんが社会を形成し、予算を共有し、予算制約を4000円とすることの検討を開始した。このとき、A君が支配者となれば、統計と漫画5冊を3500円で購入することがA君にとっての期待価値最大行動であり、A君の期待価値は2500円と増大する。しかし、Bさんの期待価値は、600円と社会形成前より減少する。従って、Bさんは社会を形成しないのが合理的である。

一方Bさんが支配者になった場合、統計・英語と漫画2冊を4000円で購入するのが最適行動である。このとき、Bさんの期待価値は1900円と上昇する。しかし、A君の期待価値が1900円と社会形成前と同一水準に留まることとなる。A君としては、社会を形成するメリットはないと考えるであろう。

2人の言い分を通すには、参考書2冊と漫画5巻全て買うことが必要だが、これは予算制約を500円オーバーする。そこで、A君とBさんは合理的議論を行うこととなる。そこで、A君は漫画を1冊諦めて、A君にとってはあまり効用のない、英語の参考書を買う妥協を行うこととする。

これにより、A君の期待価値は2400円、Bさんは、自身では絶対買わない漫画2冊を共有のすることには

なるが、期待価値 1700 円となり、双方にとって、社会を形成することが合理的となる。社会全体のこの行動による総期待価値 4100 円は、社会を形成する前の個別最適期待価値の総和 3400 円を上回る。こうして、社会形成が合意されると共に、社会的意思決定が成立する。

この素朴な例は、単純な交渉により、期待価値の一意分配が成立する場合である。社会にこのようにステークホルダーが複数存在する場合の多目的最適化問題、厚生経済学におけるパレート最適化については一意解が存在しないし、誰かにとって都合の良いパレート最適解が別の人に痛みを与えることを覚悟しなければならない。多目的最適化問題の許容される解の集合の中で、どの解を選ぶのかについては、政治的に力のある集団がその解を選ぶというのが現実である。しかし、社会全体の期待価値を最大にする基準と同様に、社会構成員の中で期待価値最小の者の期待価値を最大化する基準などが権力者によって、配慮されている必要がある。

4. 確率的倫理制約条件

社会的には最大期待総利得の最適化が得られ、個々の社会構成員の期待損失がそれほど小さくなっていない行動にも、問題が生じることがあり得る。すなわち、一定の確率で社会の部分集団に非可逆的損失を与える場合である。可逆的損失ならば、社会は利得の再分配によって、当事者の損失を補填する行動が可能である。しかし、人命や文化的な生活などへの非可逆的変化を与えてしまった場合には、少なくともその直接の被害者への補てんは不可能である。できることは、せいぜい、被害者の権利を相続できる者への分配に過ぎない。

このようなことを避けるために、社会は、期待総利得最適化行動をある程度合理的な行動と認めた上で、社会を構成する個人が不可逆的損失を被ることを制度的に禁止することとなる。あるいはその種の事象が生じる確率を一定値以下にするといった確率不等式制約条件を課し、条件付最適化行動を社会に課すことが通例となっているはずであると推量する。本稿では、この制約を倫理的制約条件と呼ぶことにする。このように社会的意思決定には、個人の致命的リスクを回避する何らかの方法論が必要と考えられる。

これを倫理制約と呼んだのは、環境基準の設定に関する科学技術者の努力目標が如何にばらついているか

を科学技術倫理の教科書で学んだことに起因している。Harris et al.(2013)によれば、環境基準の設定には、次の 5 つが存在した：

比較基準：通常受け入れられているリスクより大きくないこと

正常性基準：自然状態と同じ程度であること

最適汚染基準：効用関数が最適となること

最大保護基準：人体影響の可能性があるリスクが全て排除されること

証明可能危害基準：人体影響が立証されているリスクが全て排除されること

これに対して、Harris et al. (2013) は、次の 2 つの倫理の妥協点を時代に応じて探るという接近を提唱した：

社会の倫理：個人の行為はその影響を受けるものに最大の効用を与えるのが正しい

個人の倫理：自由に意思決定ができる各個人を平等に尊重できる行為が正しい

前者は、Virtue ないしは Aspiration Ethics と呼ばれており、プロフェッショナルの目指すべき道のようなものである。日本人が考える倫理は後者、すなわちエチケットの類であるが、これが語源通りの (Inhibition) Ethics である。

後者の倫理を時代時代に応じて発動する必要がある。冷媒としてのフロンガスを炭化水素系冷媒に置換する際、その代替物質が可燃性を持つことから、年間 1 台あたりエアコンで何件の着火確率があるかリスク評価がされている（例えば、日本冷凍空調学会,2014）。

一定の不可逆的損失を確率的に制御するということは、残存リスクを許容することである。実際、欧州はその残存リスクは保険によって補填することを決断した。この種の倫理的確率制約をどの水準にするかは、実は社会的最適化をどの水準で何時実行すべきかに強く依存している。北欧におけるオゾン層破壊に起因する皮膚がん増加の抑制という当時のシナリオの中で、どのようなリスク評価が行われたのかは、今後十分研究される必要があろう。

5. 統計的決定理論とリスク選好

統計的決定理論は Wald (1949) の創設以来、多くの

研究がある。そもそも、決定理論の枠組みでは、リスク関数とは期待損失関数に過ぎない。少し、通常の記法とは異なるが、それを次のように定式化してみよう。

まず、意思決定 d は決定集合 D の要素とする。

将来状態 s は、不確かであり集合 S の要素とする。

将来状態 s の従う「真の確率分布」を $p(s)$ とする。

将来状態 s についての「意思決定者の事前分布」を $q(s) = w(s) p(s)$ とする。

意思決定 d を行い、将来状態 s が実現した時に発生する損失は、関数 $L(d, s)$ で表されるものとする。ここで、真の事前分布という用語を使ったがこれは Wald (1949) に既にあった意識と考える。一方、ここでは通常の事前分布を取って「擬似事前分布」と呼ぶことにする。

もし、標本情報の観察がない、Fuzzy 理論というノーデータ問題を考えれば、

$$\begin{aligned} B(d) &= E_{q(s)}[L(d, s)] = \int_S L(d, s) dQ(s) \\ &= \int_S L(d, s) w(s) dP(s) \end{aligned}$$

を最小にする決定 d が、事前分布 Q に対する擬似 Bayes Risk 最小化決定となる。この状況は、 s 所与の条件付分布 $f(Y|s)$ が既知の追加情報 Y が観測され、将来状態 s の真の条件付確率分布

$$p(s|Y) = p(s) f(Y|s) / \int_S f(Y|s) dP(s)$$

と共に、将来状態 s についての意思決定者の事後分布

$$\begin{aligned} q(s|Y) &= q(s) f(Y|s) / \int_S f(Y|s) dQ(s) \\ &= w(s) p(s) f(Y|s) / \int_S w(s) f(Y|s) dP(s) \end{aligned}$$

がベイズの定理で導かれた場合にも拡張される。従って、擬似ベイズリスク最適化決定 d^* は次のように表される。

$$\begin{aligned} d^* &= \operatorname{argmin}_d E_{q(s|Y)}[L(d, s)] \\ &= \int_S L(d, s) dQ(s|Y) \\ &= \int_S L(d, s) w(s) f(Y|s) dP(s) / \int_S w(s) f(Y|s) dP(s) \end{aligned}$$

勿論、Wald (1949) の統計的決定理論の教えるところは、真の事前分布を使わなくても擬似ベイズリスク最

適化決定は許容的である。また、許容的である決定のクラスは、やはり Wald の完全類定理の示すところ、擬似ベイズリスク決定のクラスと殆ど同じである。

つまり統計的決定理論の枠組みの中では、観測データに基づく統計的客観推論とは全く無関係に、将来状態を全く主観的に修飾するウェイト関数 $w(s)$ を導入されていることが、合理的な範囲で許容されていると考えられる。つまり、prospect 理論 (Kahneman & Tversky, 1979) で用いられているような確率加重関数のようなツールは、Wald の統計的決定関数論には織り込み済みとも考えられるのである。また、堀、椿 (2014) は、自然の状態確率（可能性分布）を決定者の態度に従い、ファジイ事象の確率に積分変換するといったメンバーシップ関数の役割も、殆ど擬似事前分布の導出ないしは確率加重関数と同様な役割を果たしていると考えた。

そのような修飾として実際にどのようなものが利用可能であろうか。一つはリスク回避の修飾である。ある状態 s が実現したとき、その最小損失を与える行動をとったときの損失を $m(s)$ とする。すなわち、

$$m(s) = \operatorname{Min}_d L(d, s)$$

である。 $m(s)$ の値がより大きい状態にウェイトを大きくするような事前確率の修飾を行えば、最大損失を最小化する保守的決定が最適行動として選ばれやすくなる。もちろん、 $m(s)$ の値がより低い状態にウェイトを大きくするような事前確率の修飾を行えば、最小損失を最小化しようとするリスク選好行動が最適行動として選ばれやすくなる。

実際、Wald の決定関数論において、最適行動が Max-Min 解となる分布は「最も不利な分布 (Least favorable distribution)」と呼ばれているが、この種の事前分布の想定は、真の事前状態を想定したり推定したりすることとは、独立な操作である。

例 1 リスク回避の確率の修飾

表 1 に示すような損失表と状態確率を想定する。

表 1. 損失表

状態	行動		状態確率
	d_1	d_2	$P(s)$
s_1	8	12	0.5
s_2	14	12	0.5

図 1. 2つの決定の期待損失の主観依存性

ここで、期待損失最適化行動は行動 d_1 で、期待損失は 11 となる。一方、Max-Min 行動は d_2 である。このとき、 $m(s_1) = 8$, $m(s_2) = 12$ となるので、prospect 理論に類似させて、 $w(s_i) \propto m(s_i)^\delta$ といった修飾を考えると、 $q(s_1) = 8^\delta / (8^\delta + 12^\delta)$, $q(s_2) = 12^\delta / (8^\delta + 12^\delta)$ となり、リスク回避の主観修飾された期待リスクを δ を横軸にしてプロットすると、図 1 のようになる。Max Min 決定 d_2 の期待損失は 12 と定数であるのに対し、 d_1 の期待損失は δ の単調増加関数であり、 $\delta > 4.17$ とリスク回避的に修飾すると単純な期待利得最適化決定より Max-Min 決定の方が選択されることになる。

さて、ここでの議論は prospect 理論のように個々人の意思決定の性質の分析でもない。むしろ、このような損失関数に基づく、リスク回避の擬似確率をこれまで述べた社会的意思決定の設計に利用しようというのである。すなわち、社会的損失関数 $L(d, s)$ をその構成要素 $i = 1, \dots, n$ に分解し、

$$L(d, s) = \sum_{i=1, \dots, n} L_i(d, s) \quad (1)$$

と考えたとき、ある状態 s が実現したとき、社会的最小損失を与える行動ではなく、特定の個人に最小損失を与える行動を探索し、それを $m(s)$ と考えることができる。

$$m(s) = \text{Min}_{d,i} L_i(d, s) \quad (2)$$

この値が大きな状態の確率が強調されるようなウェイトで修飾することにより、特定個人の最小損失が最大

化するが状態の事前確率が強調されることになり、社会構成員である個人に対する大きなリスクが回避され、個の倫理を配慮した決定に近づくものと考えられる。

6. 小さな確率の現象の無視

もう一つの状態の確率の事前修飾は、統計的仮説検定などで見られる、「小さい確率の現象は起きない」という想定に基づく行動を導くための修飾である。Vovk and Dempster (2001) は、希少確率の現象は 1 回観察では生起しないという行動原理が統計を支えているとしていて、これはコルモゴロフの基本的考え方であるとしている。実際に、新医薬品の許認可において、両側 5% の仮説検定が行われているが、新薬とプラセボの有効性が全く同じときでも、2.5% の確率で新薬が承認される残存リスクを意図的に認めた上で日常的行動を決定していることとなる。金融リスク管理分野でも、VaR (Value at Risk) による管理、すなわち予想収益 s の信頼率 99.5% の片側 (下側) 統計的信頼限界 s_{low} を求め、最悪でも収益は s_{low} であると主張することが、ある程度制度化されている。

これは意図した確率的想定外を設けて、日常的行動は決定し、不幸にも小さな確率現象が現実化した場合の対策については、非常時の対策の行動として別途計画しておこうという考え方である。実際、VaR においては、CVaR (Conditional Value at Risk) と称して、非常時が現実化したときの収益の期待値 $E[s | s < s_{\text{low}}]$ が算出されることがある。統計数理研究所リスク研究 NOE では、暫定的にクライシスとは次の 3 つの特性を有する事象とした：

制御性の小さい事象

無視されるほど小さな確率で生じる事象

起きた場合の損失が重篤と予期される事象

第一の性質から、未然防止や流失防止などのリスク事前対応では、対処しにくいというのがリスク研究の根幹ではある。一方第 2 の性質を有する事象については、リスクを如何にとるかの数理、つまり意図的無視の数理が、敢えて必要と考えていた。もちろん、意図的に無視され、保有されたリスク、意図的想定外リスクに関わるコストは日常行動に加算する必要がある。

この種の意図的想定外かつ重篤な現象の現実化に対する対策的行動、事前設計された非日常的対策行動を

通常のリスク対応と区別して「クライシス対応」と呼んだ。

以下では、敢えて小さな確率を無視して日常行動を決定するという考え方を紹介する。これは5章で述べた状態確率の修飾の立場では、状態 s の想定外領域 R , $P(s \in R) = \varepsilon$ を意図的に設定し, $s \in R$ ならば $w(s) = 0$ といった修飾を行い, 補領域 R^C については $p(s|Y)$ が確率測度となるように, $w(s) = 1/\{1 - P(s \in R)\}$ とするといったことに過ぎない。

VaR の例で, s の利得分布が, 位置母数 μ , 尺度母数 σ の位置・尺度分布族 $1/\sigma f((s - \mu)/\sigma)$ に従うとする。100 p % 点以下が生じないという条件付分布の期待値 $M(\mu, \sigma, p)$ は,

$$\begin{aligned} M(\mu, \sigma, p) &= \mu + \sigma k(p) \\ k(p) &= E[s|F^{-1}(s|\mu = 0, \sigma = 1) \\ &> p, \mu = 0, \sigma = 1] \end{aligned}$$

となる。 $M(\mu, \sigma, p)$ は, CVaR と異なり, 日常時の利得の条件付期待値を評価したもので, 日常的意思決定は無条件の期待値 μ の大小ではなく, $M(\mu, \sigma, p)$ の大小で決めることが考えられる。仮に, $\mu_1 > \mu_2$ であっても, 尺度母数が $\sigma_1 < \sigma_2$ を満たし,

$$0 < (\mu_1 - \mu_2)(\sigma_2 - \sigma_1) < k(p)$$

を満たせば, 無条件の期待利得と条件付期待利得は逆転する。すなわち, 確率の意図的修飾は行動に変容をもたらす。

例えば, 確実な利得の想定として, $\mu_1 = 0, \sigma_1 = 0$ の場合を考える。 $\mu_2 < 0, \sigma_2 > 0$ として, 期待利得が負の決定が, 小確率 p を無視した条件付期待利得最適化行動では選ばれる変動係数 $|\sigma_2/\mu_2|$ の閾値を利得分布として正規分布を仮定した場合に, p の関数として示したのが図2である。ただし, 確率 (横軸), 閾値 (縦軸) とともに対数軸で表示している。

p の値が, 片側仮説検定でよく用いられる水準 0.05, 0.01, 0.001 のとき, 閾値となる変動係数は, それぞれ, 9.2, 37, 297 となる。

5章におけるリスク回避的修飾に比すると, ここで考察した修飾は, むしろある標本空間を無視し, 条件付標本空間を日常とすることで, リスクを取るという戦略の一つである。現実には, 5章と6章の修飾は相反する行動決定の方法というよりは, 適宜調合して利用する方法と考えられる。

図2. 確率 p と決定逆転の変動係数の関係

7. 社会的意思決定プロセスの可視化

4章で述べたように, 社会的決定を社会の倫理の立場, 効用主義で考えれば, リスクとハザードや対策行動との関係を近似する統計モデルの開発活動を前提として, そのモデルに基づき, 社会の総期待損失関数最小化問題を定式化し, それを解いて行動を設計するということになる。しかし, これも4章で述べたようにこの数理最適化問題には, 社会の構成員としての各組織, 各個人に対して, 一定以上の非可逆的損失を与えることが, 抑止されるような制約条件を課す必要が, 個の倫理の立場から要求される。

この制約的枠組みを投入するには, ある水準の非可逆損失が生じる客観確率を一定水準以下に制約する条件を付加した上で, 社会の総期待損失の上昇が無条件の場合に比して許容できる範囲であることを示さなければならない。これが許容できなければ, 確率制約を緩和することを考えることになるが, それを認めるか否かは, 当該社会における倫理規範の現状, 並びに, 社会のリスク選好性に依存する。

確率的倫理制約に代わる枠組みとして, 5章で導入した客観確率の個人リスク回避的修飾も考えられる。

そもそも社会的意思決定は, 多重ステークホルダーの存在下では, 2, 3章で述べたように多目的最適化問題であり, 一意な解は存在しない。個人の損失関数の平均ないしは重み付き平均を最適化したパレート最適

解を結果として選択するだけである。しかし、多くの市民にとって、選択された意思決定がどのような意味を持つかは明確ではない。行動決定が結果として、社会の構成要員にどのようなリスクを分配したことになるかを可視化することが重要である。パレート最適な決定に基づく行動の下で、リスクの影響で損失を受ける、地点、産業、世代などがより明示される情報システムの開発が、社会的意思決定に関する事前の議論を高度化するために必要である。

特に、各構成員に対するウェイトやリスク回避をどの程度にしたとき、パレート最適行動の変容が生じるといったことが意識可能となることが有用である。行政は、社会的意思決定がどのような配慮によって、どこで変わり得るのかをパレート最適な決定曲面可能な限り提示して、政治、すなわち市民に選択を委ねることができれば、本来は好ましいと考える。

もちろん、社会がこのような数理的意思決定の可視化を好ましいと思うかは問題である。受け止める市民の数理的意思決定に関する力量については、初中等教育における数理的意思決定能力例えば西村他 (2011) の Bowland Maths の普及などの実社会での意思決定を意識した数理科学教育方法開発活動にも期待したい。

8. おわりに

筆者らが、統計数理研究所リスク解析戦略研究センターを事務局としてリスク研究 NOE 活動を立ち上げた 2005 年、既にリスク問題は多くの分野の関心事であった。それぞれの分野が独自の専門的リスク科学を進展させている現状に、理解を示した上で、統合的リスク科学の可能性を NOE のメンバーと議論してきた。当初の潜在リスク発見、リスク評価・リスク予測といった統計科学的方法論への関心は、徐々に、リスク事前対応、事後対応など社会システム工学的社会実装に移行していった。本稿はその種の議論の中で生成されたこと、特に、宮本定明、津本周作、鈴木和幸、大澤幸生、山下智志、津田博史ら NOE の中核メンバーとの 10 年に及ぶ議論は、大きな刺激となった。一方、この 3 年間、ファジイ理論の専門家である片桐英樹、蓮池隆との議論 (蓮池他, 2013) も頻度論的統計、ベイズ統計、ファジイ理論などをリスク科学の中で融合しなければならぬというアイデアを強く刺激するものであった。今回のシンポジウムを企画された木下富雄先

生と共に、これらの方々に深甚の謝意をささげたい。

参考文献

- Harris, C. E., Pritchard, M. S., Rabins, M. J. and Englehardt E. (2013). *Engineering Ethics: Concepts and Cases*, 5th ed., Wadsworth. 第 3 版には、「日本技術士会訳編 (2008) 科学技術者の倫理—その考え方と事例, 丸善。」がある。
- Kahneman, K. and Tversky, A. (1979). Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk, *Econometrica*, 47(2), 263–292.
- Shafer, G. and Vovk, V. (2001) *Probability and Finance: It's Only a Game!*, Wiley.
- Taylor, B. W. (2009). *Introduction to Management Science*, 10th ed., Global edition, Pearson Education.
- Uemura, Y. and Sakawa, M. (1993). A decision rule on possibility distributions of fuzzy events, *Cybernetics and Systems*, 24(2), 1993.
- Wald, A. (1949). Statistical Decision Functions, *the Annals of Mathematical Statistics*, 20(2), 165–205.
- 石黒真木夫, 岡本基, 椿広計, 宮本道子, 弥永真生, 柳本武美 (2014). 法廷のための統計リテラシー—合理的討論の基盤として—, ISM シリーズ: 進化する統計数理 3, 近代科学社.
- 竹内啓 (2010). 偶然とは何か—その積極的意味, 岩波書店.
- 津谷喜一郎 (2010). くすりはリスク: 漢方薬から西洋薬をみる, *薬剤疫学*, 15(1), 31–43.
- 椿広計, 藤田利治, 佐藤俊哉編著 (1999). これからの臨床試験 医薬品の科学的評価—原理と方法, 朝倉書店.
- 椿広計 (2007). 第 4 章リスク解析とは何か, 橋本俊詔, 長谷部恭男, 今田高俊, 益永茂編, リスク学とは何か, リスク学入門第 1 巻, 岩波書店.
- 夏目漱石 (1906). 文学論, 岩波文庫, 岩波書店夏目漱石全集などに所収.
- 西村圭一, 山口高志, 清水宏幸, 本田千春 (2011). 数学教育におけるプロセス能力育成のための教材と評価に関する研究—イギリス「ボーランド数学 (Bowland Maths)」の考察—, *数学教育*, 93(9), 2–12.
- 蓮池隆, 片桐英樹, 椿広計 (2012). 不確定性の基盤としてのファジイ理論, 未来への眼を向けるソフトコンピューティング, オペレーションズリサーチ, 57(10), 551–556.
- 堀 (植村) 芳樹, 椿広計 (2014). ファジイ理論による主観可能性分布変換公式, 2014 年度統計関連学会連合大会.
- 日本冷凍空調学会微燃性冷媒リスク研究会 (2014) 安全性評価について, http://www.meti.go.jp/committee/sankoushin/seizou/kagaku/freon_wg2/pdf/002.04.00.pdf

(2015 年 11 月 8 日受付, 2015 年 11 月 24 日最終修正)