技術解説

公共リスク評価のシステム方法論

田　村　坦　之*

Systems Methodology for Public Risk Assessment

Key Words：Risk Assessment, Risk Management, Public Risk, Decision Analysis, Systems Engineering

1．ま　え　が　き

科学技術の発展は，人類に多大の福祉をもたらしたが，その反面，科学技術の発展に伴って「公共リスク」すなわち不特定多数の人間または環境に対して，確率は小さいが極めて大きな有害な影響を及ぼす危険性も増大していることは，日航ジャンボ機の墜落（1985），チェルノブイリ原子力発電所の炉心溶融事故（1986），新しい化学物質や農薬の発がん性，温室効果ガス（CO_2，CH_4，N_2O，フロンなど）による地球温暖化などを思い起こせば明らかである．その結果，適切なリスク評価のシステム方法論を確立することが重要な課題となっている．

本稿では，「原子力発電プラントの建設」，「新薬や農薬の認可」といった公共的に重大な影響を及ぼす行動を「公共的行動」と呼び，公共的行動に伴うリスク評価のためのシステム方法論を解説することを試みる．

2．期待効用理論によるリスク評価の例

リスク評価問題の一例として，消費者が農薬を使用して栽培したレモンを買うか，低農薬で栽培したレモンを買うかを考えてみる．その際，消費者は発がん性と価格を考慮して，どちらのレモンを買うかを意思決定するものとする．

［問題設定］[1]：

農薬使用の輸入レモンは安価（1個60円）であるが，発がんリスク（今後1年間に発がんする確率p）は高くて$p=3\times10^{-6}$とする．一方，国産の低農薬レモンは高価（1個120円）であるが発がんリスクはバックグラウンドの発がん率$p=1\times10^{-8}$であるとする．これらの値は，あくまでも架空のものであるが，設定に当たってはAndersonらのレポート[2]を参考にしている．さて，読者諸氏はどちらのレモンを買いたいと思われるであろうか？

今ここでは消費者の立場に立って問題設定を行ったが，この他にも，新薬や農薬使用に関する規制者の立場，野菜や果物を栽培して生計を立てる農家の立場などの意思決定問題を設定することができる．原子力発電所の建設，新しい化学物質の開発などについても同じような問題設定を考えることができる．

レモンを評価する属性として，x_1は発がん性，x_2は価格を表すものとする．ここでは簡単のため，これら二つの属性は加法独立性[3)4)]を満たし，2属性効用関数$u(x_1,x_2)$は

$$u(x_1,\ x_2)=k_1u_1(x_1)+k_2u_2(x_2) \qquad (1)$$

と表せるものとする．ここで，x_1は1または0の値しかとらず，発がん性に関する効用関数$u_1(x_1)$は

$$u_1(x_1)=\begin{cases}\ \ 0,\ x_1=0\ (\text{発がんしないとき})\\ -1,\ x_1=1\ (\text{発がんするとき})\end{cases} \qquad (2)$$

を満たすものとする．また，価格に関する効用

*Hiroyuki TAMURA
1940年3月9日生
昭和39年大阪大学大学院修士課程修了
現在，大阪大学基礎工学部システム工学科（工学部精密工学科併任），教授，工学博士，統合システム解析
TEL 06－844－1151

関数$u_2(x_2)$は，$60 \leqq x_2 \leqq 120$の範囲で意思決定者とのくじに関する対話[4]によって求めることは困難ではない．ただし，

$$u_2(60)=0, \quad u_2(120)=-1 \tag{3}$$

に正規化されているものとする．

k_1とk_2は発がん性と価格に関する尺度係数を表し，原理的には，これも意思決定者とのくじに関する対話によって求まるはずのものであるが[4]，この例に関しては，実際問題として次に述べる理由により困難である．

いま，二つの代替案

- 代替案a_1：農薬使用のレモンを買う．
- 代替案a_2：低農薬のレモンを買う．

を評価するものとすると，代替案a_1，a_2に対する期待効用（効用の期待値）$U(a_1)$，$U(a_2)$は，各々

$$\begin{aligned} U(a_1) &= pu(x_{11}, x_{12})+(1-p)u(x_{21}, x_{22}) \\ &= 3\times 10^{-6}[k_1u_1(1)+k_2u_2(60)] \\ &\quad +(1-3\times 10^{-6})[k_1u_1(0)+k_2u_2(60)] \\ &= -3\times 10^{-6}k_1 \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} U(a_2) &= 1\times 10^{-8}[k_1u_1(1)+k_2u_2(120)] \\ &\quad +(1-1\times 10^{-8})[k_1u_1(0)+k_2u_2(120)] \\ &= -1\times 10^{-8}k_1-k_2 \end{aligned} \tag{5}$$

のように表せる．ここで，x_{11}，x_{12}は，各々属性x_1，x_2に関して確率pで生起する結果を表し，x_{21}，x_{22}は確率$(1-p)$で生起する結果を表す．$k_1+k_2=1$とすると，$k_1 \fallingdotseq 1$に対して，k_2の値は10^{-6}のオーダーであり，このように大きな比の尺度係数の値を精度よく求めることは不可能である．

また，農薬の使用による発がん確率が，技術進歩によって10^{-6}のオーダーから10^{-7}のオーダーに改善できたとする．このとき，期待効用理論に従うと発がん性に関する不効用は1/10に減少し，上の例の評価における発がん性の寄与が価格の寄与に比べて1/10になる．しかし，発がん確率が1桁小さくなったからといって，農薬の好ましくなさが1/10に減少するとは考えられない．

このように，期待効用理論によって説明しようとすると矛盾が生じるような現象は，これまでにもいくつも報告されている[5]．この例でも明らかなように，極めて小さい確率で生起する大きな損失を期待効用理論で説明することは不適切である．さらに，期待効用理論の反例に対処する代表的な理論としてKahneman-Tversky[6]のプロスペクト理論があり，そこでは確率に重みを考慮することが提案されているが，極めて小さい確率に対する重みについては懸案事項として残されている．

そこで，本稿ではこのような小さい確率で重大な有害事象が生起するリスク評価問題に対して，期待効用理論やプロスペクト理論に代わる数理モデルを紹介する．

3．公共リスク評価問題の定式化[1]

本稿では公共リスクの評価問題を一般化して不確実状況下の意思決定問題として次のように定式化する．まず，行動の決定はいくつかの代替案の中から1つを選択することによって行うものとし，それぞれの代替案は，A，C，X_jをそれぞれ代替案，結果，属性jの属性レベルの集合を表すと定義すると，$a \in A$，$c_i \in C$，$x_{ij} \in X_j$，$i=1, \ldots, m$，$j=1, \ldots, n$を用いて(6)式を及び図1に示すくじによって表現される．

$$a=(c_1, \ldots, c_m; p_1, \ldots, p_m) \tag{6A}$$

$$c_i=(x_{i1}, \ldots, x_{in}), \ i=1,2, \ldots, m \tag{6B}$$

これは次のように解釈される．代替案aを選択するとその結果として確率p_iで結果c_iが生起する．それぞれの結果はn個の属性X_jによって特徴付けられる．

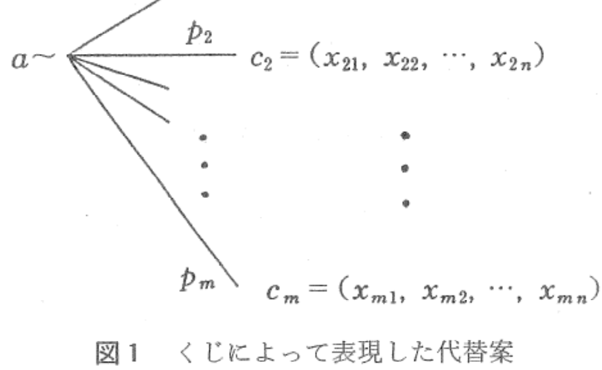

図1　くじによって表現した代替案

公共リスクの評価問題において，「代替案」は公共的行動の候補であり，「結果」は公共的行動がとられた結果，ある確率で生起する事象を表している．例として，原子力発電所の立地を考えると，代替案はいくつかの候補地となり，１つの候補地 a を選択するとそれに伴って確率 p_i で事故 c_i を発生する危険性が生じる．さらに事故が発生するとその結果として様々な種類の有害な影響 x_{ij}，$j=1,\ldots,n$ が生じることになる．ここでは簡単のために，立地特性以外の条件，例えば発電プラントや人間一機械系などについては，代替案の間で差異のないものとしている．

4．不確実下の価値関数[7)]

公共リスクの評価では，有害な影響を与える事故などの事象あるいは有害な影響そのものが発生する確率が非常に小さくても，有害な影響が生じたとき，そのインパクトが非常に大きいため，そのリスクの評価は重要となる．また，いくつかの属性のインパクトレベルが大きく異なるとき，それぞれの事象の発生頻度も大きく異なるために，トレードオフが成立することがある．従来から不確実状況下のトレード・オフ分析に用いられてきた多属性期待効用理論では，２．に示したように，このような選好構造を表現することは難しい．このような状況は，リスクのインパクトがその生起確率によっても変わると考えることにより比較的容易に扱うことができる．

そこで本稿では，不確実状況下のトレードオフ分析の手法として事象のインパクトがその生起確率によっても変化する状況をモデル化した「不確実性を考慮した価値関数」[7) 8)]を用いる．

ここではまず不確実性を考慮した単属性価値関数について述べ，次に不確実性を考慮した多属性価値関数について述べる．

4.1　不確実下の単属性価値関数

不確実下の価値関数[7)]はDyer-Sarin[9)]によって議論された確実状況下の価値関数を基礎とし，事象の生起確率 p を評価属性の中に加えることにより，不確実状況下の選好構造を表現できるように拡張されたモデルである．このモデルは後に示すように，価値関数が確率のレベルに依存する形式，あるいは確率の重み関数が結果のレベルに依存する形式をとり，Kahneman-Tversky[6)]のプロスペクト理論に代表される加重モデルをさらに拡張したモデルになっている．

単属性の場合には (6A) 式で与えられる代替案においてそれぞれの結果 c_i は１つの属性値 x_i によって表現される．すなわち，代替案 a は (7) 式のように書ける．

$$a=(x_1,\ \ldots,\ x_m\ ;\ p_1,\ \ldots,\ p_m) \tag{7}$$

不確実性を考慮した価値関数では，(7) 式で表される代替案の評価値が

$$F(a)=\sum_{i=1}^{m} f(x_i,\ p_i) \tag{8}$$

のように結果と確率の２変数関数 f の加法形で表されると仮定する．この f は確率 p_i で生起する結果 x_i の価値を与えると解釈でき，これを「不確実性を考慮した価値関数」と呼び，$f(x, p)$ と書く．

$f(x, p)$ は次のような性質を満たす．一般に意思決定者は代替案を選択したときに生じる結果が，ある中立レベルから増加するか減少するかに注目して評価を行うと言われている[9)]．この中立レベルをReference Point (RP) と呼ぶ．また，RPよりも増加側をGain Domain (GD)，減少側をLoss Domain (LD) と呼ぶ．いま X 上のRPを $x^R \in X$ とすると，f は (9) 式の条件を満たす．

$$f(x,\ p)\geqq 0 \quad \text{on} \quad GD \tag{9A}$$

$$f(x,\ p)<0 \quad \text{on} \quad LD \tag{9B}$$

さらに $f(x, p)$ は次の条件を満たすものとする．

$$f(x^R,\ p)=0,\ \ \forall p\in[0,\ 1] \tag{10A}$$

$$f(x\ ,0)=0,\ \ \forall x\in X \tag{10B}$$

$$f(x^*,1)=1 \tag{10C}$$

$$f(x^0,1)=-k \tag{10D}$$

ただし，X^* は最良レベル，X^0 は最悪レベルを表し，k は $f(X^*, 1)$ に対する $f(x^0, 1)$ の不満度の絶対値を表す．(10) 式は次のように解釈

できる．RPレベルの結果に対して意思決定者は価値のレベルを0と感じ，どの様な結果に対しても，起こり得ないときには価値のレベルを0と感じる．

次に正規関数を定義する．

［定義］

任意の確率pが与えられたときのX上の正規関数$v(x|p)$と，任意の$x \in X$が与えられたときのp上の正規関数$w(p|x)$を次のように定義する．

$$v(x|p)=f(x, p)/f(x^*, p) \quad (11A)$$

$$w(p|x)=f(x, p)/f(x, 1) \quad (11B)$$

これを用いて$f(x,p)$は，

$$f(x, p)=w(p|x^*)v(x|p) \quad (12)$$

$$=v(x|1)w(p|x) \quad (13)$$

の様に表現することができる．

4.2 不確実下の多属性価値関数

不確実下の多属性価値関数の構成を容易にするための分解表現を得るためには危険選好差独立性および弱危険選好差独立性に関する概念が必要である．これはDyer-Sarin[9]による確実状況下の多属性価値関数の分解表現を与える選好差独立性および弱選好差独立性の条件を不確実状況下に拡張する事によって得られるものである．詳細は文献[8]を参照されたい．

5．農薬の発がんリスク評価

いま，ここでは2つの属性，発がん性x_1と価格x_2は相互弱危険選好差独立であると仮定する．このとき，不確実下の価値関数$f(x_1, x_2, p)$は(14)式のように分解できる

$$f(x_1, x_2, p)=f(x_1, x_2^R, p)+f(x_1^R, x_2, p) + K(p)f(x_1, x_2^R, p)f(x_1^R, x_2, p) \quad (14)$$

この例では属性1に関しては発がんするかしないかの2つの状態しか存在しないから，x_1は1あるいは0のどちらかの値しか取らない．リスク(x_1, p)は，$x_1=1$のとき$p \leqq 3\times10^{-6}$のときに限り評価の対象とし，$x_1=0$のとき$f(x_1, x_2^R, p)=0.0$であるとする．また，属性1，属性2のRPをそれぞれ$x_1^R=0$，$x_2^R=60$とする．

このとき，$f(x_1, x_2^R, p)$は

$$f(x_1, x_2^R, p)=k_1v_1(x_1|x_2^R, 3\times10^{-6})w(p|1, x_2^R) \quad (15A)$$

$$k_1=f(1, x_2^R, 3\times10^{-6}) \quad (15B)$$

$$v_1(x_1|x_2^R, 3\times10^{-6})=\begin{cases}-1.0, & x_1=1\\ 0.0, & x_1=0\end{cases} \quad (15C)$$

$$w(p|1, x_2^R)=f(1, x_2^R, p)/f(1, x_2^R, 3\times10^{-6}) \quad (15D)$$

で表される．k_1は$f(x_1, x_2^R, p)$の最大インパクトレベルすなわち3×10^{-6}の確率で発がんすることに対する価値（不効用）を表す．ここでは$w(p|1, x_2^R)=w_1(p)$と書くことにする．このとき，$w_1(p)$は「価格に対するインパクトが0のとき，確率pで発がんする状況に対する正規化された価値（不効用）」を与える．すなわち，$w_1(p)$は$w_1(3\times10^{-6})=-1$，$w_1(1\times10^{-8})=0$に正規化された連続関数で，$10^{-8}\leqq p\leqq 3\times10^{-6}$の範囲で求める必要がある．具体的には意思決定者（ここではレモンの消費者）との対話によって求めるもので，例えば，農薬使用時の発がん確率が，技術進歩によって3×10^{-6}から3×10^{-7}に改善されたときに感じる価値（不効用）の値を$w_1(3\times10^{-7})$の値として設定する．

また，$f(x_1^R, x_2, p)$は$60\leqq x_2\leqq 120$，$0.0\leqq p\leqq 1.0$の領域において決定しなければならない．ここでは，

$$f(x_1^R, x_2, p)=k_2w(p)v_2(x_2|p) \quad (16A)$$

$$k_2=f(x_1^R, x_2^*, 1.0) \quad (16B)$$

$$w(p)=f(x_1^R, x_2^*, p)/f(x_1^R, x_2^*, 1.0) \quad (16C)$$

$$v_2(x_2|p)=f(x_1^R, x_2, p)/f(x_1^R, x_2^*, p) \quad (16D)$$

において，pは発がんしない確率を表すので$w(p)=p$とし，レモンの価格に対する価値$v_2(x_2|p)$はpの値のいかんにかかわらず一定であるとし，以後これを$v_2(x_2)$と書く．$v_2(x_2)$は，$v_2(120)=-1$，$v_2(60)=0$に正規化された連続関数で，$60\leqq x_2\leqq 120$の領域で意思決定者との対話によって求めるものである．k_2は$f(x_1^R, x_2, p)$の最大インパクトレベル，すなわち，発が

んしないとき，価格120円に対する価値（不効用）を表す．またこのとき，

$$f(x_1^R, x_2, p) = p k_2 v_2(x_2) \tag{17}$$

と表すことができ，これは期待効用関数と同様の形をしている．

これらを用いて(14)式を書き直すと，

$$f(x_1, x_2, p) = k_1 w_1(p) + p k_2 v_2(x_2) + K(p) k_1 k_2 p w_1(p) v_2(x_2) = k_1 w_1(p),\ x_1 = 1,\ p \fallingdotseq 0.0 \tag{18}$$

$$f(x_1, x_2, p) = k_1 w(p|x_1) + p k_2 v_2(x_2) + K k_1 k_2 p w(p|x_1) v_2(x_2) = p k_2 v_2(x_2),\ x_1 = 0 \tag{19}$$

のようになる．したがって，代替案の評価は，

$$F(a) = k_1 w_1(p) + p k_2 v_2(x_2) \tag{20}$$

によって行われることになるが，$x_1=0$である確率はほとんど1.0であることから

$$F(a) = k_1 w_1(p) + k_2 v_2(x_2) \tag{21}$$

によって評価できることになる．

(21)式からk_1，k_2を解釈しなおすと

k_1：発がん確率の中立レベルを1×10^{-8}，レモンの価格の中立レベルを60円と考えたとき，発がん確率が3×10^{-6}であることに対する価値（不効用）

k_2：同じ中立レベルに対して，レモンの価格が120円であることに対する価値（不効用）

となり，これらは各々発がん確率に対する不効用と，レモンの価格に対する不効用にかかる尺度係数（$k_1+k_2=1$）と解釈することができる．従って，$k_1>k_2$のとき，レモンの価格120円を高いと感じるよりも，発がん確率が3×10^{-6}であることに関するリスクの方をより大きく感じることを意味し，$k_1<k_2$のときはその逆であることを意味する．このことは，代替案a_1，a_2に関する評価

$$F(a_1) = k_1 w_1(3\times10^{-6}) + k_2 v_2(60) = k_1\times(-1) + k_2\times 0 = -k_1 \tag{22A}$$

$$F(a_2) = k_1 w_1(1\times10^{-8}) + k_2 v_2(120) = k_1\times 0 + k_2\times(-1) = -k_2 \tag{22B}$$

とも整合し，$k_1>k_2$のときには低農薬レモンを買って発がん確率を下げることを好み，$k_1<k_2$のときには農薬栽培のレモンを買って価格をおさえることを好むことになる．

つぎに，$1\times10^{-8}\leqq p\leqq3\times10^{-6}$の範囲で$w_1(p)$を評価した結果，$w_1(3\times10^{-7})=-0.5$であったとする．これは農薬製造の技術進歩の結果，農薬栽培のレモンの発がん確率が一桁改善されたときに，発がん確率に関する不効用が半減することを意味し，「不確実性を考慮した価値関数のモデル」は「期待効用理論に従うと不効用が1/10に減少する」という不合理を解消していることがわかる．

6．むすび

本稿では，期待効用理論との比較のもとに，「不確実下の価値関数による公共リスク評価のシステム方法論」を紹介した．これにより，期待効用理論では困難であった低確率高損失の公共リスクの評価が合理的に行えることを示した．このモデルが，現実の公共リスク評価に少しでもお役に立つならば，筆者の望外の幸せである．

参考文献

1) 田村，松井，鳩野：不確実下の価値関数による公共的リスク評価の方法論，日本リスク研究学会誌，2巻，1号，pp.89-96(1990)

2) E. L. Anderson and the Carcinogen Assessment Group of the U. S. Environmental Protection Agency: Quantitative Approaches in Use to Assess Cancer Risk, *Risk Analysis*, Vol.3, No.4, pp.277-295 (1983)

3) R. L. Keeney and H. Raiffa : *Decision with Multiple Objectives ; Preference and Value Tradeoffs*, Wiley, New York (1976)

4) 田村編著：大規模システムーモデリング・制御・意思決定ー，昭晃堂(1986)

5) P. J. H. Schoemaker : *Experiments on*

Decision under Risk, Kluwer-Nijhoff, Boston (1980)

6) D. Kahneman and A. Tversky : Prospect Theory ; An Analysis of Decision under Risk, *Econometrica*, Vol.47, No.3, pp.263−291 (1979)

7) 田村，森，中村：不確実性を考慮した価値関数による選好のモデル化，計測自動制御学会論文集，23巻，1号，pp.54-59 (1987)

8) 森：不確実性を考慮した価値関数とその分解表現，修士論文，大阪大学工学部 (1985)

9) J. S. Dyer and R. K. Sarin : Measurable Multiattribute Value Functions, *Opns. Res.*, Vol.27, No.4, pp.810-822 (1979)