

都市環境におけるリスク評価に関する一考察—水道水の場合—

Evaluating Environmental Risk in Drinking Water

朝日 ちさと* 萩原 清子**

ChisatoASAHI*, KiyokoHAGIHARA**

ABSTRACT: In urban area, people face various kinds of environmental risk as a result of such activity as consumption, production, and their interaction. The characteristics of environmental risk are uncertainty about the environmental damage, the probability it occurs, its severity, and non-reversal effect it causes. To deal with environmental risk properly, especially in efficient public investment, it is necessary to know the economic value of the risk. In this paper, we propose a model for evaluating environmental changes in risk and apply it to the risk of health in the case of drinking water. The model based on the revealed preference theory shows that individual make choices in which an environmental risk is one argument in their preference function and derives measures of willingness to pay for change in risk through the choice data. First, we conducted a questionnaire to get preliminary knowledge about the attitude toward risk people take when they drink water or substitutions. Next, the data of private expenditure and public investment to prevent the additional risk of health was put into the model; we can get a sum of the marginal willingness to pay for reducing the health risk of drinking water.

KEYWORDS: environmental risk, value of the risk, drinking water, revealed preference theory

1. はじめに.

都市が未曾有の成長を遂げてきた中で、生態系の破壊および都市内の生活や生産活動が相互に複雑に作用しあって都市の環境問題は深刻化している。都市の環境問題は次の諸点が特徴的である。

- ① 被害が拡散的であり、顕在化しにくい。
- ② 悪影響の有無や程度が不確実で、リスクとしての切迫感を持ちにくい。
- ③ 閾値が無いタイプの被害が増加している。(発ガン性物質など)
- ④ 不可逆的な被害となる。
- ⑤ 加害者・被害者の区分が曖昧である。(立証しにくい)

つまり、被害の有無・程度、被害を受ける確率についての不確実性が大きいため、対策を講じるのが困難または遅れがちであるが、起こり得る被害の質は恒久的で危険度の高いものになってきていると言える。よって、都市環境問題に対処するには不確実性を何らかの方法で把握し顕在化させ、諸都市活動に反映させなければならない。特に、環境に多大な影響をもたらすケースの多い公共投資の社会的な効率性を鑑みたとき、拡散的・不可逆的な環境被害の社会的費用は甚大なものとなる。このような環境リスクを、意思決定の基準となる費用便益分析の枠組みで他の投資決定基準と統一的に扱うためには、リスクの経済的評価を把握する

*東京都立大学大学院都市科学研究科都市科学専攻

**東京都立大学大学院都市科学研究科

必要がある。

以上の問題意識を踏まえ、本研究では、(1)環境リスクも含めた社会基盤設備投資のより適切な配分を達成するために、環境リスクを費用便益分析に明示的に反映させること、および(2)環境リスクを計量的に認識しヘッジ行動を採りやすくすることを目指して、都市環境におけるリスクの経済的価値を測る一方策を示すことを目的とする。

以下の構成は次の通りである。第2節にてリスクの経済的評価の理論的基礎およびその問題点を概観し、具体的なモデルとして選択と価値の代替モデル¹⁾を示す。第3節では、環境リスクの一例として水道水の水質リスクを採り上げ、選択と価値の代替モデルを用いて実際に評価を導出し、第4節にてモデルの制約および今後の課題について考察することとしたい。

2. 環境リスクと経済的評価

2. 1 リスクの経済的評価

不確実性下の効用は一般に期待効用関数で表される。リスクのある状態 A からリスクが減少した状態 B となることによって期待が変化し、実現する効用が U^A から U^B となったときに、その変化分を代替財 (EV・CV) で表したものがリスク減少分の価値となる。

2. 2 価値と選択の代替モデル¹⁾

顕示選好理論に基づき、観察された選択からリスク変化の価値を測る個人選択モデルである。リスク減少のための限界的な私的負担(消費)と公的負担(公共投資)のトレード・オフが、リスク減少のための公的負担が限界的に増加することに対する個人の支払容認額、つまりリスクの評価となる。期待効用最大化の仮定に基づいて定式化されるが、包絡面定理により観察不可能な効用関数がキャンセル・アウトされるため、期待効用関数の公理系を必ずしも満たさない任意の選好指標にも適用可能な拡張的モデルとなっている。

まず、基本モデルにて、リスクを要素として含む期待効用最大化がリスク変化の貨幣測度として表されることを示し、次に、リスクを観察された選択(私的負担・公的負担)の関数として表した価値と選択の代替モデルを説明する。最後に、期待効用を一般的な選好指標に拡張した場合を示す。

(1) 基本モデル

一般にリスクとは、危険事象の生起確率と危険事象の発生による被害の積(リスク=危険事象の生起確率×被害)で定義される²⁾。ここでは簡単化のため、被害程度を一定とし、危険事象については起こるか起こらないかの2状態しかないものとする。

モデルの基本的な仮定は次の通りである。個人の効用は、集合財 X および被害 A から成る効用関数: $U=U(X,A)$ にて表される。個人は集合財 X について well-behaved な選好をもっており、被害 A は確率 π で A^* 、確率 $(1-\pi)$ で 0 となるとする。この選好関係は間接効用関数:

$$U=V(M,P,A,)$$

で表され、

$$V(M,P,0)>V(M,P,A^*)$$

を満たす。但し、 M は所得、 P は価格(いずれも一定と仮定する。)を表す。間接効用関数 V は所得と被害に対して、

$$V_M>0, \quad V_{MM}<0, \quad V_A<0, \quad V_{AA}<0$$

を満たす。添字は偏微分を表す。個人は被害程度 A^* と生起確率 π を知っているものとする。

一方、政府はリスクの被害やその確率を減らすためになんらかの公共政策を実施するものとし、被害程度を低下させる政策を「リスク低減政策」、被害の生起確率を小さくする政策を「リスク回避政策」と呼ぶ。対リスク対策は多くの場合、非競合性と非排除性を特徴とする公共財的性格を持ち、市場では効率的な量まで供給されないことがある。その場合、資源配分の効率性を改善するために政府による施策が必要となるが、

そのリスク低減または回避政策が実際に個人の厚生を改善するかどうかを調べるためには、リスクが変化したことによる便益と費用を測らなければならない。

ここでは、被害の生起確率を減少させた場合のリスク変化の価値を測るモデルを示す。個人は期待効用を最大化するものとする。 A^* は固定されており M と π が変数となり、また、簡単化のため以後価格 P は省略する。

$$\max E(U) = \pi V(M, A^*) + (1 - \pi)V(M, 0)$$

全微分すると、

$$dE(U) = \{V(M, A^*) - V(M, 0)\}d\pi + \{(1 - \pi)V_{M^0} + \pi V_{M^*}\}dM = 0$$

よって、生起確率が変化したことによる事前の限界価値は、

$$\frac{dM}{d\pi} = \frac{V(M, 0) - V(M, A^*)}{\pi V_{M^*} + (1 - \pi)V_{M^0}}$$

となる。つまり、 π の変化に対する限界的な WTP (左辺) は、所得の限界効用の期待価値で貨幣換算された π の限界期待 (負) 効用に等しい。

(2) 選択と価値の代替モデル

観察された選択による価値導出の手順および条件は次の通りである。

- ① WTP を間接効用関数または支出関数によるリスクの関数として表す。
- ② 個人の選択か観察された行動を価格や制約に関係づけた効用関数を導出する。
- ③ 効用最大化の一階の条件を求める。
- ④ 一階の条件に、求めたい限界価値と観察可能な変数との関係が含まれているか否かを調べ、含まれているならば観察可能な変数が効用変化の測度となる。

被害の生起確率は、被害対策の私的負担 R と公的負担 G によって決まるとする。

$$\pi = \pi(R, G)$$

但し、
$$\pi(0, 0) = \pi^* \quad \pi_R < 0 \quad \pi_G < 0$$

が成り立つとする。個人は、所与の G のもとで期待効用を最大化する R を選択する。

$$\max E(U) = \pi(R, G)V[M - R, A(R, G)] + [1 - \pi(R, G)]V(M - R, 0)$$

一階の条件より

$$\frac{1}{A_R^*} = \frac{\pi V_A}{\pi(R, G)V_{M^*} + \{1 - \pi(R, G)\}V_{M^0}}$$

左辺は確率低下に対する私的負担の限界生産性の逆数、つまり π 減少に対する私的限界費用を表し、右辺は π 減少に対する限界価値を表す。リスク回避のための公的負担の限界的増加に対する価値は、期待効用関数を全微分し一階の条件を代入したものとなる。

$$\frac{dM}{dG} = - \frac{\pi_G}{\pi_R} = \frac{\partial R}{\partial G}$$

公的負担の限界的増加に対する個人の WTP は、 π 減少に対する私的負担と公的負担の限界生産性の比、ま

たは R と G の限界代替率に等しい。よって、観察可能である $\pi(R, G)$ が分かれば WTP を求めることができる。

2. 3 一般選好指標モデル

次に期待効用関数を任意の選好指標に拡張する場合を考える。

個人が期待効用関数を持ちそれを最大化するとき、個人の完全合理性が仮定されている。つまり、個人は、利用可能な情報をすべて用いて、すべての可能性を計算し、効用の最大化を唯一の規範として意思決定するとされている。また、期待効用理論における VNM 型効用関数は、完全合理性を定義する公理体系（完全順序・連続性・独立性）によってその形を規定されている。

しかし、実際の人間の選択においては、実験経済学や認知心理学上の知見から、リスク下の選択や確率判断において完全合理性の仮定に反するシステマティックなバイアスが存在することが知られている。この知見に基づき、選択主体およびモデル設計者の能力や合理性には限界があるとする限定合理性の立場で選択行動のモデル化が試みられている。合理性の限界は、視野や計算など「認知能力の限界」、効用最大化を唯一の規範とすることに対する「動機の限界」、モデル設計者の「観察能力の限界」など、様々な側面から考えられる。これらを定式化するために、消費者行動理論やゲームの理論などにおいて、従来の期待効用最大化問題の仮定を緩める、確率項を導入する、情報集合を明示する、などの手法が試みられている。

価値と選択の代替モデルの場合、リスク変化の限界的価値を表す最終式において一階の条件により間接効用関数がキャンセル・アウトされるため、VNM 型期待効用関数ではなく任意の選好関数を仮定してよいことになる。

任意の選好関数を、凸関数で二階微分可能であると仮定する。

$$I = f(M, A, \pi)$$

$$\pi^* = \pi(R, G)$$

G が一定であるとき R 最適化のための一階の条件は

$$\frac{\partial I}{\partial R} = -f_M \cdot + f_\pi \cdot \pi_R^* = 0$$

R が最適であるとき、 π^* を減少させる政策の限界的な厚生測度は、

$$dI = f_M \cdot dM + (f_\pi \cdot \pi_R^* - f_M \cdot) dR + f_\pi \cdot \pi_G^* dG = 0$$

$$\frac{dM}{dG} = -\frac{f_\pi \cdot \pi_G^*}{f_M \cdot} = -\frac{\pi_G^*}{\pi_R^*}$$

つまり、リスクを減少させる公的負担への限界的 WTP は、私的負担によるリスク減少と公的負担によるリスク減少の限界代替率に等しい。

3. 水道水の水質リスク評価

ここでは、都市環境リスクの一例として水道水の水質悪化によるリスクを取り上げ、上述のモデルに従い経済的評価の導出を試みる。

3. 1 水質リスクと管理の現状²⁾

(1) 水質リスク

水質リスクとは、水道水質の悪化という危険事象およびそれによって利用者が受ける被害の生起確率と被害程度の積と定義される。リスク発生のメカニズムは、①危険事象（リスク源）の発生②水道への影響③被害発生というフローで表され、最終的な被害の生起確率・程度はそれぞれの段階における事象の種類・

発生確率・因果関係によって規定される。

3. 2水質リスク管理

(1) 水質基準

健康や快適さを阻害する水質リスクは、水道法に定められた厚生省の水質基準を基本として管理されている。水質基準は、水質に影響を与える事象が危険事象であるか否かを判断するための指標であり、健康項目・水道水が有すべき性状に関連する項目・快適水質項目・監視項目が定められている。中心となる健康項目は健康影響（慢性毒性、発ガン性）を持つ物質について、WHOの水質基準設定に準じ、発ガン性のリスクレベルが 10^{-5} 程度になるような濃度に設定されている。これは、1日2リットルの飲料水を70年間にわたって飲用し続けると、10万人に1人の割合で発ガンするリスクレベルである。

(2) 高度浄水処理³⁾

近年では、環境悪化による水質リスク意識の高まりを受けて、より安全な基準の達成や基準外のリスクへの対応を視野に入れた高度浄水処理施設の導入が始まっている。東京都金町浄水場では、水源である江戸川の水質悪化に伴うかび臭等の除去を直接的な目的として、平成4年6月から日量26万 m^3 の第一期高度浄水施設を稼動しており、平成8年4月の第二期施設完成後は日量計52万 m^3 を処理している。

処理フローは、次の通りである。まず、取水した原水を既設の施設にて凝集沈殿処理し、オゾン処理と生物活性炭吸着処理からなる高度浄水施設に導く。オゾンによる酸化分解、生物活性炭による吸着・分解処理を行うことによって臭気の原因となる2-メチルイソボルネオール(2-MIB)やアンモニア性窒素($\text{NH}_3\text{-N}$)を完全に除去するとともに、陰イオン界面活性剤(MBAS)、トリハロメタン生成能(THMFP)を処理することができる。その後、中間塩素処理、pH調整の後砂ろ過、残留塩素の調整を行い浄水として供給している。

3. 3ケース・スタディ

一般選好指標モデルを用いて水質リスクの経済的評価を導出する。ここでは、水質リスクを発ガン率とし、公的負担として発ガン率に直接寄与する総トリハロメタンを処理する高度浄水処理投資を、私的負担として個人が水道水の代替とする市場財の購入額を想定した。初めに、リスクに関する水道水の代替財を把握するために、水道水と代替市場財の選択行動に関する予備的なアンケート調査を行い、次にモデルを設定し評価を試算した。

(1) 飲料水選択行動と水質リスクに関する意識調査

1) 調査目的

水道水に対する水質リスク認識、および私的負担を算出するために利用可能な指標（代替財）を把握することを目的とする。

2) 調査方法

複数選択式アンケートとし、1999年1月に東京都立大学の学生201名を対象に行った。質問項目は、①代替市場財も含む飲料水を選択行動、②①の選択行動における安全性（リスク）意識とした。有効回答数195、回収率100%であり、欠票6はいずれも拒否である。

3) 調査結果

①飲料水を選択行動

飲料水選択行動を、水道水をそのまま飲む・一度沸騰させて飲む・市場財を購入する、に分類して選択肢を設定したところ、結果は表1のようになった。一人あたり約2.3種類の行動を採っている。水道水をそのまま飲む人が約半数(48.7%)いる一方で、少なくとも1種類以上の市場財行動を採る人は82.1%に達している。市場財行動の中では、「清涼飲料水・お茶」(63.1%)が「ミネラルウォーター」(31.3%)・「浄水器」(29.2%)の約2倍となっており、飲料水選択の際には味などの嗜好要素も関与することが推測される。

②安全性（リスク）意識

①の選択における安全性意識の有無を聞いたところ、安全性を意識してそれぞれの選択を行った人の割

合は表2第1列の通りである。全体の95.4%が安全性を意識した上で選択をしていることがわかる。安全性を意識した場合、少なくとも1種類以上の市場財行動を採る人が59.0%にのぼるのに対し、水道水をそのまま飲む人は5.6%にとどまる。

また、安全性を意識した選択がそれぞれの選択に占める割合を表2第2列に示す。市場財行動は水道水に比べ、安全性に対する強いインセンティブを反映しているといえる。市場財行動の中では「清涼飲料水・お茶」の割合(31.7%)が他の2肢の約2分の1となっており、ここでも相対的な嗜好要素の強さが推測される。

表1 飲料水の選択行動

選択行動	件数	割合
非市場財 水道水をそのまま飲む	95	48.7%
一度沸騰させて飲む	115	59.0%
市場財 ミネラルウォーターを購入	61	31.3%
清涼飲料水・お茶を購入	123	63.1%
浄水器を通して飲む	57	29.2%
その他	3	1.5%
計	454	

表2 安全性(リスク)意識

選択行動	安全意識率	選択肢別意識率
非市場財 水道水をそのまま飲む	5.6%	11.6%
一度沸騰させて飲む	29.7%	50.4%
市場財 ミネラルウォーターを購入	20.5%	65.6%
清涼飲料水・お茶を購入	20.0%	31.7%
浄水器を通して飲む	18.5%	63.2%
その他	1.0%	66.7%
計	95.4%	

以上の予備的調査の結果から、安全性(リスク)が飲料水の選択にあたって1規定要因として存在すること、水道水に対するリスク認識は他の選択肢に対するリスク認識よりも高いこと、ミネラルウォーター・清涼飲料水類・浄水器が水道水の代替財と考え得ることが示された。

(2) 評価

1) モデル

水質リスクについて一般選好指標を定義する。

$$I(M,A,\pi)=\pi(R,G)I'(M-R,A^*)+\{1-\pi(R,G)\}I'(M-R,0)$$

A*は発ガン事象(一定)、 π は発ガン率、Rは水道水の代替財の購入費用、Gは高度浄水処理投資額とする。一階の条件と全微分より、高度浄水処理投資に対する個人の限界的WTPが、代替財購入による発ガン率減少分と高度浄水処理投資による発ガン率減少分の限界代替率として表される。

$$\frac{1}{\pi_R}=\frac{I'(M-R,0)-I'(M-R,A^*)}{\pi(R,G)I'_{M^*}+\{1-\pi(R,G)\}I'_{M^0}}$$

$$\frac{dM}{dG}=-\frac{\pi_G}{\pi_R}=\frac{\partial R}{\partial G}$$

2) 評価の算出

① π : 水質基準が、1日2リットルの飲料水を70年間にわたって飲用し続けたとき10万人に1人の割合で発ガンするリスクレベルに設定されているとすると、N歳の人が1年間の間に発病する確率は、 $\pi(0,0)=N/70\times10^{-5}$ となる。

② G: 1日2リットルの水道水を高度浄水処理するための年間投資額を算出する。金町高度浄水処理施設の総事業費272億円を、耐用年数30年、割引率を2%(長期市場利子率)として年間平均投資額を計算する。なお、運転費については高度処理分のみデータを得ることができなかったため省略した。

$$G=\{272\text{億円}/(1+0.02)^{30}/30\}\times(730/520,000,000\times365)$$

③ R: 個人は1日の摂取量2リットルのうち、安全性を意識してxリットルを市場財(ミネラルウォーター・清涼飲料水類・浄水器)にて代替する。簡単化のため、代替財は同量ずつ消費するとする。市場財の価格を順に、 $P_m=200$ 円/リットル、 $P_s=300$ 円/リットル、 $P_j=2$ 円/リットルとすると、年間の私的負担額は $R=(P_m+P_s+P_j)/3\times x\times365$ 日となる。

①②より、 $\pi(0,G)=N/70 \times 10^{-5} \times (1-\beta)$ となる。但し、 β は高度処理によるトリハロメタン生成能の除去能(約60%)³⁾とし、投資額に対して線形であると仮定する($\beta = \alpha G$)。

$$\pi_G = -N/70 \times 10^{-5} \times \alpha$$

①③より、 $\pi(R,0)=N/70 \times 10^{-5} \times (1-m/2)$ となる。 $m=3R/(P_m+P_s+P_j)/365$ より、

$$\pi_R = -N/70 \times 10^{-5} \times 3/730(P_m+P_s+P_j)$$

$$-\pi_G/\pi_R = \alpha / \{3/730(P_m+P_s+P_j)\}$$

各数値を代入すると、発ガンリスクを減少させる高度浄水処理投資に対する個人の限界的 WTP は年間約235,166円となる。

4. おわりに.

都市環境におけるリスク変化による厚生の変化を測る一手法として、リスク削減または回避のための私的・公的な市場行動のトレード・オフを用いて経済的評価を導出する価値と選択の代替モデルを示した。効用関数のキャンセル・アウトにより従来のように関数型に強い制約を受けず、リスクに対する個人の自己防衛消費および政府の公共投資が観察できさえすればよいことから、様々な都市環境におけるリスクの評価に適用可能であると思われる。例えば、渇水地域における各戸の貯水槽とダム投資、地震に対する防災商品の購入と社会基盤の耐震設備投資などのトレード・オフを利用することが考えられる。

モデルが適用可能であるためには、次の条件が挙げられる。

①専らそのリスクに対応する私的負担・公的負担が存在すること。私的負担・公的負担の目的が対リスクのみではなく他の目的も満たしている場合、算出された WTP はリスクの価値のみを表さない。水質リスクの場合、高度処理・市場財行動はおいしさや臭気除去をも目的とすることから、総合的な水質改善に対する WTP ともみなされ得る。

②私的負担・公的負担が顕示選好や市場行動として把握可能であること。リスク対策は、直接市場行動に表れる投資(ハード)ではなく規制や節制(ソフト)によってなされることも多い。その場合、規制や節制の効果を経済的価値に換算する必要性が生じ、バイアスが増すと考えられる。

③個人と政府の間に情報の非対称性が存在しないこと。モデルでは個人と政府がリスクについて同じ情報を持っていると仮定されている。しかしながら、実際には、政府が専門家によるリスク調査を踏まえて投資決定するのに対し、個人は主観的なリスク認知によって消費選択を決定することが多いと思われる。さらに心理学的な知見から、リスク認知は物理的・確率論的な「実際的特性」ではなく、未知性・恐ろしさといった「内なるイメージ」で規定されていることや、情報接触やカタストロフィック・イメージによって確率認知にバイアスがかかることが明らかになっている。^{4),5)}

このようなモデルとリスク認知特性による制約条件を満たすためには、リスク認知から消費選択に至るまでの選択プロセスを明示的にモデルに組み込む必要があり、今後の課題として残されている。

参考文献

- 1) Freeman III, A.M. *Evaluating Changes in Risk Perceptions by Revealed Preference*, The Handbook of Environmental Economics, 27, 1995.
- 2) 日本水道協会 『水道維持管理指針』1998.
- 3) 東京都水道局 『I 金町浄水場高度浄水処理施設の検証』1996.
- 4) Kahneman, D. and Tversky, A. *Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk*, Econometrica, Vol.47, 1979.
- 5) 岡本浩一 『リスク心理学入門ーヒューマン・エラーとリスクイメージ』1992.