

特集論文(社会基盤整備のためのリスク分析) 渇水リスクの経済的評価法に関する研究 —渇水対策プロジェクトに着目して—

多々納裕一*

渇水対策プロジェクトの実施は、流況の安定化を通じて渇水のリスク(渇水被害の確率分布)を変化させる。本研究では、渇水リスクの変化に対する経済的評価指標として等価的 option price を用いることを提案し、渇水対策プロジェクトの設計・評価を行う際の渇水リスク評価の手法を提示する。さらに、この際、「符号保存性」、「順序保存性」という観点から本評価指標の有効性を理論的に考察する。

Key Words : risk analysis, drought, option price, reservoir operation

1. はじめに

ライフスタイルの変化や水使用機器の普及に伴って、我々の日常生活は安定的かつ豊富な水量を確保できることを前提に営まれるようになってきた。このような状況を背景として、より信頼性の高い水利用システムへの要請が高まってきており、渇水に対する信頼性の向上を目的とした水利用システムの整備(渇水対策プロジェクト)が求められてきている。

渇水対策として種々のプロジェクトが計画・実行される。以下では、利水用貯留施設の整備プロジェクトを取り上げよう。この種の渇水対策プロジェクトの整備は、流況の安定化を通じて渇水被害の確率分布(渇水リスク)を安全側にシフトさせる。このような観点から捉えれば、渇水対策プロジェクトは渇水のリスクを制御・管理するための行為(リスクマネジメント)であると考えることができよう。従って、渇水対策プロジェクトの評価を行う際には、渇水対策プロジェクトの整備代替案に対応する渇水リスクの変化を評価することが重要である。

ここで、地域住民の視点から渇水被害を捉えれば、渇水被害は渇水によって生じた厚生水準の低下として認識できる。このような認識に立つと渇水被害の確率分布(渇水リスク)は地域住民の厚生水準の確率分布を規定していることになる。このことから渇水リスクは地域住民の生活の質を規定する要因となっているということが出来る。

本研究では、このような観点から渇水対策プロジェクトの整備問題を渇水リスクの制御問題として捉え、地域住民の立場に立ってプロジェクトの整備効果を評価することが重要であるとの認識に立つ。その上で、地域住民の立場から渇水対策プロジェクトの評価を行うための渇

水リスクの経済的評価方法に関して考察する。この際、渇水リスクの経済的評価指標は渇水対策プロジェクトによってもたらされる渇水リスクの変化に対する地域住民の選好と整合的な評価を与える指標であること(評価の整合性)が必要である。本研究では、評価の整合性という観点から渇水リスクの経済的評価指標について理論的考察を加え、具体的に渇水対策プロジェクトの整備計画問題を取り上げ、渇水対策プロジェクトの整備代替案の経済的評価・設計方法を提示することを目的とする。

2. 分析の基礎的枠組み

(1) リスク分析の基礎的な枠組み

岡田¹⁾は、伝統的な保険管理論におけるリスクマネジメントの概念をシステム論的に整理している。リスクに関わる「主体」は「行動主体」と「被害客体」とに区別され、「被害客体」の被る「損害」の生起確率が「リスク」と定義されている。「被害客体」が被る「損害」は「行動主体」の「行動(action)」と行動主体の行動の対象となる「危険事象(peril)」によって規定される。「危険事象」の生起確率は「危険事象」の発生環境である「危険状態(hazard)」によって規定される。このため、「損害」は「危険状態(hazard)」のもとで生起する「危険事象」とそれに対して行動主体の取る「行動」の結果として生じる。ここで、上述の「リスク」を規定する要素のうち、操作可能な要素は「危険状態」である。危険事象の発生環境である「危険状態」の制御は「危険事象」の生起確率分布に影響を及ぼし「行動主体」の「行動」を誘導するという役割を果たす。従って、リスクマネジメントを行う際には、リスクの発生構造を明確化し、「危険事象」の発生環境である「危険状態」を制御することでリスクを規定する損害の程度とその発生確率を望ましい方向へ誘導することが必要となる。

* 正員 工博 鳥取大学助教授 工学部社会開発システム工学科 (〒680 鳥取市湖山町南 4-101)

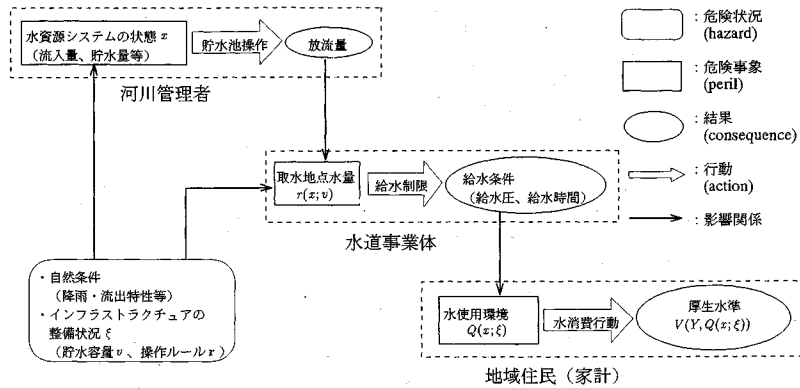


図-1 渇水リスクの発生構造

(2) 渇水リスクの発生構造

以上のような枠組みをもとに、渇水リスクの発生構造を整理しよう。水利用システムは貯水池を含む水資源システムと水道システムさらに水の需要主体である地域住民(家計)から構成されているとする。河川システムは河川管理者(行政)によって計画・管理され、水道システムは水道事業者によって管理されているものとする。

「渇水」は、河川流況の低下に伴って、平常時には充足されている水需要が満たされなくなる現象であり、「渇水リスク」はこのような現象の発生によって生じる被害の確率分布である。この場合、「被害客体」は地域住民であり、「行動主体」は、河川管理者、及び、水道事業者である。

渇水リスクの発生構造の第1の特色は、複数の行動主体の行動が最終的に被害客体である地域住民の厚生水準に影響を及ぼすことである。すなわち、これら各々の主体は「危険事象」を認知し、これに対応するため「行動」を起こす。その行動の結果が次なる主体に「危険事象」として影響を及ぼすという重層的な影響関係にある。図-1にこのような主体間の影響関係を図示する。

第1の行動主体である河川管理者にとっての「危険事象」は、下流取水地点において必要な河川流量を維持できるだけの放流が困難となるような「水資源システムの状態」 x の生起であり、これに対応するために貯水池からの放流量を削減するという「行動」をとる。ここで、水資源システムの状態 x は貯水池への流入量や貯水量等、貯水池からの放流量を決定する際に参照される状態変数(ベクトル)である。河川管理者の「行動」の結果として生じる取水地点の河川流量 $r(x; v)$ の減少は、第2の行動主体である水道事業者にとっての「危険事象」となる。ここで、 v は貯水容量である。水道事業者は種水地点の河川流量 $r(x; v)$ の減少に対応するため、減圧給水や時間給水といった給水制限を実施し、水需要の抑制を図る。これが水道事業者の対応「行動」である。こ

のような水道事業者の行動の結果、地域住民である家計は、水の利用可能な時間帯が拘束されたり、単位時間に獲得可能な水量が減少するなど、家計は水使用環境 Q の変化にさらされる。従って、被害客体である地域住民(家計)にとっての「危険事象」は水道事業者の行動の結果定まる水使用環境 Q である。この結果、家計の厚生水準 $V(Y, Q)$ は平常時の水準に比べて低下し、被害が発生するという構造を有する。なお、 Y はfull-incomeであり、家計が最大限労働を提供した場合の所得である。これは、固定所得を y 、賃金率を w 、利用可能時間を T として $Y=y+wT$ で与えられる。

渇水リスクの発生構造の第2の特色は、「危険事象」の発生環境である「危険状態」が、降雨や流出の特性等の自然的な条件と貯水池等のインフラストラクチャの整備状況といった河川管理者(行政)の政策変数によって構成されていることである。これらのインフラストラクチャの整備状況を ξ として定義しよう。ここで、インフラストラクチャの整備状況 ξ は貯水容量 v 等によって表現される物的な整備状況と操作ルール r 等の非物的な整備状況の両者によって規定されると考えられる。

貯水池の操作ルール r は、水資源システムの状態 x に対応して放流量を決定するルールであり、水資源システムの状態 x と取水地点での流量 $r(x; v)$ との対応関係を規定し、同時に河川管理者の行動(「貯水池操作」)を規定している。

さらに、これらのインフラストラクチャの整備状況は第1の行動主体である河川管理者の「危険事象」である水資源システムの状態 x の発生確率を規定し、河川管理者の行動や水道事業者の行動を介して家計が直面する水使用環境 $Q(x; \xi)$ をも規定する。

以上を要するに、「渇水リスク」の発生構造は以下のような構造を有する。i) 水資源システムの状態 x が渇水状態 F に陥ったことに伴って行われる河川管理者や水道自給体の行動を介して地域住民の厚生水準 $V(Y,$

$Q(x; \xi)$ が低下し、被害が発生するという構造となっている。ii) 水資源システムの状態 x が渇水状態に陥った場合に生じる被害の程度は、水資源システムの状態 x と貯水池等のインフラストラクチャの整備状況 ξ によって定まる水使用環境 $Q(x; \xi)$ に依存する。iii) さらに、水資源システムの状態の生起は、インフラストラクチャの整備状況 ξ に依存し、水資源システムの状態の確率分布は $\pi(x|\xi)$ で与えられる。iv) 従って、渇水による被害の確率分布である「渇水リスク」は、水資源システムの状態の確率分布 $\pi(x|\xi)$ と地域住民の厚生水準 $V(Y, Q(x; \xi))$ に規定される。このため、渇水リスクの評価を行う際には、水資源システムの状態の確率分布 $\pi(x|\xi)$ と地域住民の厚生水準 $V(Y, Q(x; \xi))$ の組 $(\pi(x|\xi), V(Y, Q(x; \xi)))$ を評価することが必要である。

(3) 渇水対策プロジェクトの整備計画問題

渇水対策プロジェクトは、渇水に対する信頼性の向上を目的として行われる貯水池等のインフラストラクチャの整備を指す。いま、現況におけるインフラストラクチャの整備状況を ξ_0 、渇水対策プロジェクト実施後の整備状況を ξ_1 とおこう。このとき、渇水対策プロジェクトの整備は渇水リスクを $(\pi(x|\xi_0), V(Y, Q(x; \xi_0)))$ から $(\pi(x|\xi_1), V(Y, Q(x; \xi_1)))$ へと変化させる。従って、地域住民の立場から渇水対策プロジェクトの整備効果を評価するためには、計画主体は渇水対策プロジェクトの整備によってもたらされる渇水リスクの変化を地域住民の視点で評価することが必要となる。

ここで、不確実性下の家計の厚生水準は期待効用によって定義することができる。期待効用は不確実性下における利得とその確率分布に対する選好を保存する。従って、貯水池等のインフラストラクチャの整備状況 ξ に対応した渇水リスクに対する代表的家計の選好は次式のように期待効用 $EU(\xi)$ の値によって表現される。従って、貯水池等のインフラストラクチャの整備状況 ξ は期待効用 $EU(\xi)$ の値によって順序づけることができる。

$$EU(\xi) = E[V(Y, Q(x; \xi)) | \xi] \\ = \sum_x V(Y, Q(x; \xi)) \pi(x|\xi) \dots \dots \dots (1)$$

計画主体が地域住民の視点に立って渇水対策プロジェクトを評価する際には、計画主体は渇水対策プロジェクトによってもたらされる渇水リスクの変化に対する地域住民の選好に対して整合的な評価を行う必要がある。いま、 m 個の渇水対策プロジェクトが構想されているとしよう。現況の整備状況を ξ_0 、渇水対策プロジェクト i ($i=1, \dots, m$) を実施した後の整備状況を ξ_i とおくと、渇水対策プロジェクト i に伴う代表的家計の不確実性下の厚生水準の変化は次式の $\Delta_{0i}EU$ で与えられる。

$$\Delta_{0i}EU = EU(\xi_i) - EU(\xi_0) \dots \dots \dots (2)$$

- a) システムの状態の違いに対する支払意志額の期待値の差を用いる方法
 - ・ 期待被害軽減額(期待利得増加額)
 - …等価変分、補償変分の期待値の差
- b) 整備状況の違いに対する支払意志額を用いる方法
 - ・ システムの状態に依存しない支払意志額
 - …等価的 option price、補償的 option price
 - ・ システムの状態に依存しない支払意志額
 - …certainty point、fair bet point

図-2 不確実性下の家計の享受便益評価手法の分類

これは、渇水対策プロジェクトの整備によってもたらされた渇水リスクの変化に対応している。 $\Delta_{0i}EU$ は渇水対策プロジェクトによってもたらされる整備状況の変化が望ましい場合には正、そうでない場合には非正となる。さらに、その値は渇水対策プロジェクトに対する選好順位を保存する。しかしながら、不確実性下の厚生水準の変化 $\Delta_{0i}EU$ は金銭タームの指標ではない。このため、渇水対策プロジェクトの整備効果を評価する際には、 $\Delta_{0i}EU$ を金銭タームの評価指標(渇水リスクの経済的評価指標)に変換することが必要となる。

3. 渇水リスクの経済的評価指標

(1) 不確実性下の家計の享受便益評価手法

厚生経済学分野では、不確実性下の家計の享受便益を評価するために多くの手法が提案されてきた²⁾。これらの手法は、プロジェクトの実施に伴うシステムの状態の確率分布の変化に対する家計の享受便益を評価することを意図している。これらを分類すれば図-2のようである。すなわち、これらの手法は「a) システムの状態の違いに対する支払意志額の期待値の差を用いる方法」と「b) プロジェクトの実施に対する支払意志額を計量化する方法」とに大別される。

a)の手法では、まず、プロジェクトの実施前及び実施後のそれぞれの整備状況において、基準となるシステムの状態と他の状態間での家計の厚生水準の差を等価変分 EV 、補償変分 CV 等の支払意志額によって金銭指標化し、それぞれの整備状況毎にその期待値を求め、その差をとって家計の享受便益の評価を行うという方法である。渇水リスクの文脈では期待被害軽減額がこれに相当する。従来、慣用的には渇水対策プロジェクトの整備効果の評価に際しては、直接被害額(家事労働時間の増加量×賃金率+臨時出費額)や渇水回避に対する支払意志額を直接アンケートする等の方法で渇水による被害額を算定し、その期待値の軽減額によって渇水対策プロジェクトの整備効果の評価が行われてきた^{3),4)}。被害額として支払意志額を用いず直接被害額を用いている点に相違はあるが、このような慣用的な渇水対策プロジェクトの経済的評価方法はこの方法に分類できる。

b) の手法は、プロジェクト実施前と実施後の期待効用の差を支払意志額によって金銭換算する方法あり、さらに「システムの状態とは独立な確定的支払意志額を求める方法」と「システムの状態に依存した支払意志額を求める方法」とに細分される。

支払意志額がシステムの状態に依存することを許さない場合には、プロジェクト実施前の期待効用を実施後の期待効用の水準に等しくするような支払意志額は、ただ1つに定まり等価的 option price と呼ばれる⁵⁾。また、同様な制約下ではプロジェクト実施前の期待効用を実施後の期待効用の水準に等しくするような支払意志額もただ1つであり、補償的 option price と呼ばれる⁵⁾。従って、これらの option price はプロジェクトによって家計が享受する便益の一元的な評価指標となっている。

一方、支払意志額がシステムの状態に依存することを許せば、プロジェクト実施前と実施後の期待効用の水準を等しくするような支払意志額の組み合わせは無数に存在する⁶⁾。このうち、すべてのシステムの状態における家計の効用が等しい水準であるという条件を満たす支払意志額の組み合わせが certainty point^{6),7)} であり、期待支払意志額を最小とする支払意志額の組み合わせが fair point^{6),7)} となる。これらはやはりプロジェクトによって家計が享受する便益の評価指標である。しかし、これらはシステムの状態によって異なる支払意志額の組(ベクトル)として与えられるために、プロジェクト代替案の評価は多面的になされる。このことは、これらの指標は一般のプロジェクト代替案の集合上で半順序を形成することを意味している。従って、代替案の集合に含まれるすべてのプロジェクトをこれらの指標の値(ベクトル)によって順位付けることはできない。そこで、これらの指標は渇水対策プロジェクトの評価・設計問題を分析する際の評価指標としては適当でない判断し、以下では、渇水リスクの評価指標として期待被害軽減額、及び option price を取り上げ、考察することとする。

(2) 期待被害軽減額

水使用環境が平常時の水準 $Q=q_0$ から渇水時の水準 $Q=q$ に変化した場合の等価変分 $EV(q; q_0, Y)$ 及び補償変分 $CV(q; q_0, Y)$ は、以下のように与えられる。

$$V(Y+EV(q; q_0, Y), q_0) = V(Y, q) \dots\dots\dots (3)$$

$$V(Y-CV(q; q_0, Y), q) = V(Y, q_0) \dots\dots\dots (4)$$

これらは、平常時から渇水時への水使用環境の推移に伴う厚生の変化を支払意志額として金銭タームに変換したものであり、渇水による被害の金銭評価額(渇水による被害額)を表わす。

不確実性下の期待支払意志額指標として期待等価変分 $E[EV(\xi)|\xi]$ 及び期待補償変分 $E[CV(\xi)|\xi]$ を定式化しよう。期待等価変分 $E[EV(\xi)|\xi]$ 及び期待補償変分 $E[CV(\xi)|\xi]$ は $EV(q; q_0, Y)$ 及び $CV(q; q_0, Y)$ の期待

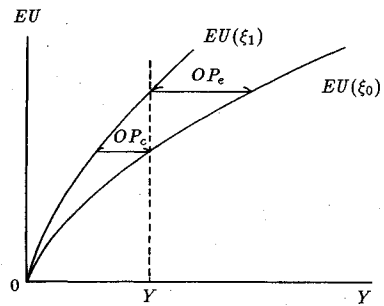


図-3 等価的 option price, 補償的 option price

値として以下のように与えられる。

$$E[EV(\xi)|\xi] = \sum_x EV(Q(x; \xi); q_0, Y) \pi(x|\xi) \dots (5)$$

$$E[CV(\xi)|\xi] = \sum_x CV(Q(x; \xi); q_0, Y) \pi(x|\xi) \dots (6)$$

現況の整備状況を ξ_0 、プロジェクト実施後の整備状況を ξ_1 とすれば、プロジェクト実施の効果は期待等価変分及び期待補償変分の変化分 ($\Delta E[EV]$ 及び $\Delta E[CV]$) として評価される。ここで、 q_0 は水使用環境の平常時の水準を表すから、これらの指標は渇水による被害額の期待軽減額であると解釈できる。

$$\begin{aligned} \Delta E[EV] &= E[EV(\xi_1)|\xi_1] - E[EV(\xi_0)|\xi_0] \\ &= \sum_x EV(Q(x; \xi_1); q_0, Y) \pi(x|\xi_1) \\ &\quad - \sum_x EV(Q(x; \xi_0); q_0, Y) \pi(x|\xi_0) \dots (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta E[CV] &= E[CV(\xi_1)|\xi_1] - E[CV(\xi_0)|\xi_0] \\ &= \sum_x CV(Q(x; \xi_1); q_0, Y) \pi(x|\xi_1) \\ &\quad - \sum_x CV(Q(x; \xi_0); q_0, Y) \pi(x|\xi_0) \dots (8) \end{aligned}$$

(3) Option price

Weisbrod⁸⁾ の問題提起を契機に、厚生経済学の方野では不確実性下の経済的評価指標に関して多くの研究が進んだ^{2),6),9)-12)}。Option price は option value の研究過程で提案されてきた^{9),12)}。Cicchetti and Freeman⁹⁾ は option value を option price と期待支払意志額の差として定義した。通常、事後的な支払意志額は実現するシステムの状態に依存する。option value は不確実性を有する財に対しての事前の支払意志額(option price)から、事後的な支払意志額の期待値を差し引いた金額となる。Bishop¹²⁾ は、不確実性の発生する原因が需要者側にあるのか供給者側にあるのかによって demand side option price と supply side option price を区別し、supply side option price の定式化を行っている。ここで、供給者側に起因する不確実性要因としては財の価格や公共財等の環境条件が挙げられる。また、需要者側の不確実性要因としては所得や状況依存的な選好等がある。Bishop の研究は、その後 Freeman¹³⁾ や Plummer¹⁴⁾ 等によって一般化された。さらに、Graham-T and Myers⁵⁾

は supply side option price を Hicks-Kaldor の等価変分、補償変分に倣って等価的 option price と補償的 option price を定式化した。

渇水対策プロジェクトによって生じる不確実性の変化は、家計にとっては水使用環境 Q の不確実性の変化として認識される。従って、渇水対策プロジェクトに対する option price は supply side option price に分類される。ただし、渇水対策プロジェクトの整備は、水資源システムの状態の確率分布 $\pi(\xi)$ に影響を及ぼすと同時に、水資源システムの状態と水使用環境との対応関係 $Q(x; \xi)$ にも影響を及ぼす。上述した supply side option price に関する研究ではプロジェクトはこれらのうちいずれかのみに影響を及ぼすと仮定されていた。従って、渇水リスクの経済的評価指標として option price を定式化する際にはこの点を明示的に考慮する必要がある。

渇水リスクの経済的評価指標として option price を定式化しよう。option price は実現する水資源システムの状態 x とは独立な渇水対策プロジェクトの整備に対する確定的支払意志額であり以下のように定義される。

$$E[V(Y+OP_e, Q(x; \xi_0))|\xi_0] = EU(\xi_0) \dots\dots\dots (9)$$

$$E[V(Y-OP_c, Q(x; \xi_1))|\xi_1] = EU(\xi_1) \dots\dots\dots (10)$$

ここで、図-3 に示すように等価的 option price OP_e 及び補償的 option price OP_c はいずれも施設整備に対する確定的な支払意志額を表すが、 OP_e が整備前を基準とするのに対して、 OP_c は整備後を基準とする点に違いがある。すなわち、 OP_e は整備前 ($\xi = \xi_0$) に渇水対策プロジェクト整備後の期待効用水準を達成するために与えるべき最小金額であるのに対して、 OP_c は整備後 ($\xi = \xi_1$) に渇水対策プロジェクトに対して支払得る最大金額である。

4. 渇水リスクの経済的評価指標の評価の整合性

(1) 符号保存性、順序保存性

2. でも述べたように、渇水リスクの経済的評価指標は渇水対策プロジェクトの整備に伴う渇水リスクの変化に対する地域住民の選好に対して、整合的な評価を与える指標である必要がある。このような評価の整合性を判定するための基準として「符号保存性」及び「順序保存性」がある。「符号保存性」とは「プロジェクトの実施に伴って生じる期待効用の変化の符号と当該評価指標の符号が一致する性質」である。また、「順序保存性」とは「複数のプロジェクトに対する期待効用による序列と当該評価指標による序列が一致するという性質」である。

Johansson¹⁵⁾ は、supply side option value の有効性を示すためには、supply side option value の符号のみでなく、期待効用の変化の符号と option price の符号及

び期待支払意志額の変化の符号が一致すること（「符号保存性」）が必要であると指摘している。環境が2状態のみをとるケースを想定する限りにおいては、期待支払意志額は期待効用によるプロジェクトの序列と一致した序列を与える（「順序保存性」）^{2), 16)}。従って、この場合、符号保存性が成り立つ。しかしながら、Helms¹⁷⁾ は環境が3状態以上の状態をとる場合には期待支払意志額指標は符号保存性、順序保存性を有さないことを示した。

一方、Graham-T and Myers⁵⁾ は、Johansson の問題提起に応じて彼らの提案した等価的 option price が有効であることを示唆している。また、森杉ら¹⁸⁾ も独自に同様の指摘を行っている。しかしながら、これらの研究ではプロジェクトの実施は環境とシステムの状態の関係を記述する関数に影響を及ぼすか、システムの状態の確率分布に影響を及ぼすかのいずれかが仮定されている。渇水対策プロジェクトは水資源システムの状態の確率分布 $\pi(\xi)$ 並びに水使用環境と水資源システムの状態の関係を記述する関数 $Q(x; \xi)$ の双方に影響を及ぼす。従って、渇水リスクの経済的評価指標として、option price 指標が評価の整合性を有するか否かに関しては改めて考察する必要がある。

(2) 期待被害軽減額指標の符号保存性と順序保存性

ここでは、期待被害軽減額指標 $\Delta E[EV]$ 及び $\Delta E[CV]$ の評価の整合性について考察する。先述したように、Helms¹⁷⁾ は、期待支払意志額指標は一般には符号保存性・順序保存性を有さないことを示している。可測効用関数は正の線形変換を除いて一意である。従って、期待被害軽減額指標 $\Delta E[EV]$ 及び $\Delta E[CV]$ が、渇水対策プロジェクトによってもたらされる期待効用の変化と整合性を持つためには、等価変分 EV 及び補償変分 CV は間接効用関数の正の1次変換であることが必要である。しかしながら、等価変分 EV 及び補償変分 CV は間接効用関数の単調変換であるが、一般には線形変換ではない。例えば、間接効用関数が所得に関して1次同次関数であるとき、等価変分 EV は間接効用関数の正の線形変換となる。このような1次同次性の仮定は、水及び合成財の需要が相似拡大的であることを仮定することと等しく、各財の需要の所得弾力性は1になる。このことは、水需要が所得に比例して増加することを意味しており、一般には、現実的に妥当な仮定とは言えない。従って、期待支払意志額指標を渇水リスクの経済的評価指標として用いるためには、個別の計画問題において評価の整合性に関する妥当性を吟味する必要がある。

(3) Option price の符号保存性と順序保存性

期待効用の変化 $\Delta_0 EU$ 及び option price (OP_e, OP_c) の間には以下の関係がある。

$$\Delta_0 EU = E[V(Y+OP_e, Q(x; \xi_0)) - V(Y, Q(x; \xi_0))|\xi_0]$$

$$=E[V(Y, Q(x; \xi_1)) - V(Y - OP_c, Q(x; \xi_1)) | \xi_1] \dots \dots \dots (11)$$

間接効用関数 $V(Y, Q(x; \xi))$ は所得 Y に関して単調非減少関数であるから、期待効用変化の符号と option price (OP_c, OP_e) の符号が一致することがわかる。従って、option price は一般的に符号保存性を有する。

次に順序保存性について考察しよう。まず、等価的 option price OP_e に関して議論しよう。渇水対策プロジェクトの代替案 ξ_1 及び代替案 ξ_2 の整備効果を比較する場合を想定する。整備代替案に対応する等価的 option price をそれぞれ OP_e^{01}, OP_e^{02} と表現しよう。このとき、式(11)と同様にして、整備状況 ξ_2 と整備状況 ξ_1 とに対する期待効用の差 $\Delta_{21}EU$ は次式のように表される。

$$\Delta_{21}EU = E[V(Y + OP_e^{01}, Q(x; \xi_0)) - V(Y + OP_e^{02}, Q(x; \xi_0)) | \xi_0] \dots \dots \dots (12)$$

間接効用関数は所得 Y に関して非減少関数であるから、 $\Delta_{21}EU$ と $OP_e^{01} - OP_e^{02}$ は同符号である。従って、 OP_e は順序保存性を有する。

次に、補償的 option price OP_c について考察しよう。

$$\begin{aligned} \Delta_{21}EU &= E[V(Y, Q(x; \xi_1)) - V(Y - OP_c^{01}, Q(x; \xi_1)) | \xi_1] \\ &\quad - E[V(Y, Q(x; \xi_2)) - V(Y - OP_c^{02}, Q(x; \xi_2)) | \xi_2] \dots \dots \dots (13) \end{aligned}$$

ここで、 OP_e^{01} 及び OP_e^{02} はそれぞれ期待効用の変化 $\Delta_{01}EU$ 及び $\Delta_{02}EU$ に対応した補償的 option price である。 $\Delta_{21}EU = 0$ すなわち整備状況 ξ_1 及び ξ_2 が無差別であるとしよう。このとき、 OP_c が期待効用による順序を正しく反映していれば $OP_c^{01} = OP_c^{02}$ でなければならない。ところが、式(13)において $OP_c^{01} = OP_c^{02}$ のとき、 $\Delta_{21}EU = 0$ となる保証はない。このように、補償的 option price OP_c は一般には順序保存性を有さない。

以上の考察から、3. で渇水リスクの経済的評価指標として定式化した指標のうち、符号保存性・順序保存性の双方の性質を有する指標は等価的 option price のみであることがわかった。等価的 option price 指標は渇水リスクの変化に対する代表的家計の選好順序を常に保存し、渇水対策プロジェクトの経済的評価指標として適切であるということが出来る。

5. 渇水プロジェクトの経済的評価問題への適用

(1) 渇水対策プロジェクトの経済的評価問題

ここでは、渇水対策プロジェクト整備計画問題として単一の貯水池の規模拡張問題を取り上げ、等価的 option price を用いて整備代替案を評価するための方法を

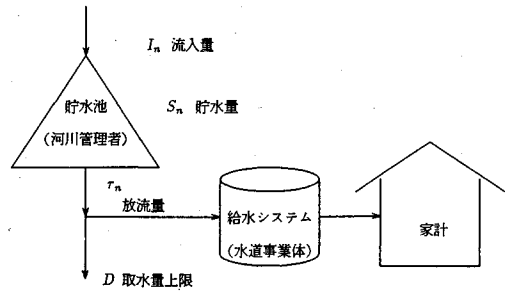


図-4 分析対象とする水利用システム

具体的に提示する。すなわち、図-4に示すように、現在、既設の貯水池があり、一定の水需要 D をまかっているものとする。この貯水池は、利水のみを目的としており、その容量は v_0 で、操作ルール r_0 に従って操作されているものとする。いま、貯水池のかさ上げを行って、貯水容量を v に拡大し、等価的 option price を最大化するような操作ルール r を用いることにより家計が享受する便益の計量化の問題を考察することとする。

このためには、まず、貯水容量の拡大や操作ルールの改善といった方策とその家計の厚生との関係を具体的に記述することが必要である。以下では、まず、流入量の確率分布が時間的に独立かつ同一の分布に従うという想定の下で、これらの方策と水資源システムの状態の確率分布との関係を記述する。次いで、流域内には家計のみが存在し、水需給の均衡によって家計の水使用環境が決定されるという想定の下で、貯水容量の拡大とそれに伴う操作ルールの改善が家計が直面する水使用環境に与える影響を記述する。さらに、等価的 option price を用いた渇水対策プロジェクト整備代替案の経済的評価・設計方法を具体的に示すこととする。

(2) 渇水対策プロジェクトと水資源システムの状態の確率分布¹⁹⁾

図-4において、 I_n 及び r_n は第 n 期の流入量及び放流量を、 S_n は第 n 期期首の貯水量を表している。従って、貯水池における連続式は次式のように与えられる。

$$S_{n+1} = I_n + S_n - r_n \dots \dots \dots (14)$$

ここで、放流可能量 X_n を次式のように流入量 I_n と貯水量 S_n の和 X_n として定義しよう。

$$X_n = I_n + S_n \dots \dots \dots (15)$$

放流可能量 X_n は第 n 期に貯水池から放流することのできる最大の水量である。いま、放流可能量を水資源システムの状態として定義しよう。このとき、操作ルール r に従う貯水池操作は次式のように放流可能量 X_n の実現値 x を放流量 r_n に対応づける関数 $r(x; v)$ となる。

$$r_n = r(x; v) \dots \dots \dots (16)$$

ただし、貯水容量は有限値 v をとるから、 $r(x; v) \in$

$\Omega(x; v)$ なる関係が成り立つ。ここで、 $\Omega(x; v)$ は、放流可能量 X_n の実現値が x である場合に、実現可能な放流量の存在領域である。

$$\Omega(x; v) = \{r | \max(0, x-v) \leq r \leq x\} \dots\dots\dots(17)$$

貯水池操作ルール r を所与とすると、放流可能量 X_n は既約な1次のマルコフ連鎖をなす。放流可能量の1ステップ推移確率 $P_{xk}^{(x;v)}$ を次式のように定義しよう。

$$P_{xk}^{(x;v)} = \Pr \{X_{n+1} = k | X_n = x\} \dots\dots\dots(18)$$

ここで、貯水池への流入量 I_n が独立かつ同一の確率分布 θ に従うと仮定しよう。

$$\theta(i) = \Pr \{I_n = i\} \dots\dots\dots(19)$$

このとき、式(14)から放流可能量 X_n の推移確率 $P_{xk}^{(x;v)}$ は θ を用いて次のように表わせる¹⁹⁾。

$$P_{xk}^{(x;v)} = \theta(k-x+r(x;v)) \dots\dots\dots(20)$$

放流可能量の(定常)確率分布 $\pi(x|r, v)$ を次式のように定義する。

$$\pi(x|r, v) = \lim_{n \rightarrow \infty} \Pr \{X_n = x\} \dots\dots\dots(21)$$

このとき、 $\pi(x|r, v)$ は以下の連立方程式の解となる。

$$\pi(x|r, v) = \sum_k P_{xk}^{(x;v)} \pi(k|r, v) \dots\dots\dots(22)$$

$$\sum_k \pi(x|r, v) = 1 \dots\dots\dots(23)$$

放流可能量は既約なマルコフ連鎖をなす。従って、上式の解である確率分布 $\pi(x|r, v)$ が一意に存在する。

以上明らかなように放流可能量の確率分布 $\pi(x|r, v)$ は貯水容量 v 及び操作ルール r に依存する。従って、貯水池の規模拡張に伴う貯水容量 v の拡大や操作ルール r の改善は放流可能量の確率分布 $\pi(x|r, v)$ を変化させることがわかる。

(3) 渇水対策プロジェクトと渇水時の家計の厚生

ここでは、貯水容量 v や操作ルール r と家計の直面する水使用環境 Q との関連関係を具体的に記述する。著者らは、渇水時の家計の水消費行動モデルに関して研究を行ってきた^{20), 21)}が、ここでは既存の研究成果を簡略化して示すにとどめ、水消費行動のモデル化とこのモデルを用いた分析の詳細に関しては別の機会に報告することとする。

流域内には等質な N 戸の家計が存在しており、水道事業体から給水を受けている。今、家計は同一の水使用環境 Q の下で、水消費行動を行っている。家計は、水、時間及び市場財を用いて洗濯、風呂、掃除等の家庭内サービスを生産し、生産された家庭内サービスと余暇時間及び水とニューメレールである合成財を消費しているとす^{20), 21)}。渇水時には減圧給水が行われるものとし、水使用環境 Q を具体的に単位水量当たりの獲得所要時間として定義しよう。渇水が生じると単位時間当たりの獲得所要時間 Q は増加する。獲得所要時間の増加は、水1単位当たりの取引費用 wQ の増加をもたらし、家庭内

サービス1単位当たりの生産コスト $\phi(p+wQ, w, g)$ を増大させる。ここで、 p は水1単位当たりの価格、 g は市場財の価格、 w は賃金率を表し、 $p+wQ$ は、水1単位当たりの一般化価格を表す。このとき、full-income を Y とすれば家計の間接効用関数は $V(Y, p, w, g, Q)$ のように表現できる。ここで、平常時、渇水時を通じて Y, p, w, g は一定であると考えられるから、簡単化のために以下 $V(Y, Q)$ のように表記する。

さらに、家計の水需要を $d(Y, Q)$ と定義しよう。このとき、ロウの定理により $d(Y, Q)$ は次のように求まる。

$$d(Y, Q) = \frac{\partial V(Y, Q)}{\partial p + wQ} / \frac{\partial V(Y, Q)}{\partial Y} \dots\dots\dots(24)$$

本研究では、水道事業体は河川から取水し各家計に給水していると仮定する。河川は上流のダムによって流況調節されており、ダムからの放流量 $r(x; v)$ によって河川の水量が決定されるものとする。ここで水道事業体は河川管理者との契約によって最大 D の水量を取水できるとし、平常時には、水量 D の給水を行っているものとする。渇水時にはダムからの放流量の減少に伴い、減圧給水により家計の水使用環境 Q : 単位時間当りの獲得所要時間)を変化させ、給水量を $r(x; v)$ に減少させるものとする。

流域内の家計は等質であるから、この流域内の集計的水需要量は $Nd(Y, Q)$ で与えられる。平常時、渇水時を通じて以下のように水の需給が均衡していると考える。

$$Nd(Y, Q) = r(x; v) \quad (r(x; v) < D \text{ のとき; 渇水時}) \dots\dots\dots(25)$$

$$Nd(Y, Q) = D \quad (r(x; v) \geq D \text{ のとき; 平常時}) \dots\dots\dots(26)$$

式(25)及び式(26)の解をそれぞれ $Q = q(r(x; v))$, $Q = q_0$ とおこう。このとき、渇水時の水需給均衡条件式(25)によって定まる水使用環境 $q(r(x; v))$ は操作ルール r 及び貯水容量 v に依存する。一方、平常時の水需給均衡条件式(26)によって定まる水使用環境 q_0 は定数であり、その値は操作ルール r 及び貯水容量 v に依存しない。いま、貯水容量及び操作ルールの組 (r, v) を所与とし、当該期の放流可能量が x である場合の水使用環境を $Q(x; r, v)$ とおこう。このとき、 $Q(x; r, v)$ は渇水時の水使用環境 $q(r(x; v))$, 及び、平常時の水使用環境 q_0 を用いて次式のように与えられる。

$$Q(x; r, v) = \begin{cases} q(r(x; v)) & (r(x; v) < D \text{ のとき; 渇水時}) \\ q_0 & (r(x; v) \geq D \text{ のとき; 平常時}) \end{cases} \dots\dots\dots(27)$$

(4) 渇水対策プロジェクト整備代替案の経済的評価方法

整備後の貯水容量 v を所与とすると、最適操作ルールの設計問題は代表的家計の享受便益(等価的 option price)最大化問題として以下のように定式化できる。

$$\begin{aligned} & \max_r OP_e \\ \text{subject to } & \sum_x V(Y+OP_e, Q(x; r_0, v_0))\pi(x|r_0, v_0) \\ & = \sum_x V(Y, Q(x; r, v))\pi(x|r, v) \end{aligned} \quad (28)$$

従って、最適操作ルール r^* は問題(28) の解として定義される。しかしながら、問題(28) を直接解くためには操作ルール毎に対応する OP_e の値を求め、すべての操作ルールについてこれを比較することが必要である。従って、問題(28) を直接解くことは現実的には難しい。

ここで、等価的 option price は期待効用に関して「順序保存性」を有するから、最適操作ルール r^* は次の期待効用最大化問題の解である。

$$\max_r E[V(Y, Q(x; r, v))|r, v] \quad (29)$$

先述したように放流可能量はマルコフ連鎖をなすから、問題(29) はマルコフ決定過程として次式のように変形できる。このため、最適操作ルール r^* は次式の解として求めることができる。

$$u(x) + l = \max_{r \in \Omega(x, v)} V(Y, q^*(r)) + \sum_y P_{xy}^r u(y) \quad (30)$$

ここで、 l は次式のように期待効用の最大値を与える。

$$l = \max E[V(Y, Q(x; r, v))|r, v] \quad (31)$$

また、 $u(x)$ は政策の相対値と呼ばれ、 $u(x) - u(y)$ は初期状態において放流可能量が y である場合と x である場合との定常状態における累積期待効用の最大値の差^{*1} を表している。式(30) から最適操作ルール r^* を求める際には政策改良法や逐次近似法等の効率的な解法を用いることができる。従って、問題(28) を直接解く場合に生じたような求解の効率性に関する問題は生じない。

6. 数値計算事例

本章では、以下のような分析ケースを想定し、本研究で提案した等価的 option price を用いた渇水リスクの経済的評価法の有効性を数値計算を通じて検証する。すなわち、渇水対策プロジェクトに伴う家計の享受便益の評価問題を取り上げ、5. で提案した等価的 option price を用いた渇水対策プロジェクトの評価方法と、従来用いら

^{*1} 計画期末 \bar{n} までの期間数を m とする。このとき、現在 $n = \bar{n} - m$ から計画期末 \bar{n} までの各期待効用の和(累積期待効用)を $u_m(x)$ とおく。累積期待効用 $u_m(x)$ は $u_m(x) = E[\sum_{i=0}^{m-1} V(Y, Q(X_{n-i}; r, v))|r, v, X_n = x]$ で定義される。いま、累積期待効用 $u_m(x)$ の最大値を $\hat{u}_m(x)$ とおく。このとき、 $\hat{u}_m(x)$ は以下の漸化式の解として求まる。

$$\hat{u}_m(x) = \max_r V(Y, q(r)) + \sum_y P_{xy}^r \hat{u}_{m-1}(y)$$

$$\hat{u}_0 = 0$$

ここで、政策の相対値 $u(x)$ は $u(x) = \lim_{m \rightarrow \infty} \hat{u}_m(x) - ml$ で定義され、 $u(x) - u(y) = \lim_{m \rightarrow \infty} \hat{u}_m(x) - \hat{u}_m(y)$ である。

れてきた期待被害軽減額 $(\Delta E[EV(\xi)|\xi], \Delta E[CV(\xi)|\xi])$ に基づく評価方法とを比較し、これらの評価方法の特質を数値計算により明らかにする。この際、操作ルールのみ改善を想定し、貯水容量は現況値に保たれる場合を取り上げる。

ここで、現況の貯水容量を $v_0 = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ 、操作ルールを以下に示す線形操作ルール r_0 と想定した^{*2}。

$$r_0(x; v) = \begin{cases} x & (x < D \text{ のとき}) \\ D & (D \leq x < v + D \text{ のとき}) \dots \dots (32) \\ x - v & (v + D \leq x \text{ のとき}) \end{cases}$$

線形操作ルール r_0 は、現行の制度下で計画上想定されている操作ルールである。

さらに、平常時の水需要量 D を $6 \text{ m}^3/\text{s}$ 、整備後の貯水容量 v を現況値 $10 \text{ m}^3/\text{s}$ に設定した。貯水池への流入量は平均 $6.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 、分散 $23.0 \text{ m}^3/\text{s}^2$ の独立かつ同一な対数正規分布に従うと仮定した。流域内の家計の数 $N = 80,000$ 戸、水の価格 $p = 110$ 円、貸金率 $w = 2,000$ 円/hr、市場財の価格 $q = 600$ 円、full-income $Y = 38,000$ 円/日に設定した。

(1) モデルの特定化

数値実験に際し、代表的家計の間接効用関数を次式のトランスログ型に特定化した。

$$\begin{aligned} V(Y, Q(\xi)) = & \exp \left\{ -\sum_{i=1}^3 \alpha_i \ln \frac{\phi_i(\xi)}{Y} \right. \\ & \left. - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \beta_{ij} \ln \frac{\phi_i(\xi)}{Y} \ln \frac{\phi_j(\xi)}{Y} \right\} \end{aligned} \quad (33)$$

ただし、 $(\phi_1(\xi), \phi_2(\xi), \phi_3(\xi)) = (\phi(p + wQ(x; \xi), w, g), w, 1)$ であり、 $\phi(p + wQ(x; \xi), w, g)$ は家庭内サービス1単位当たりの生産コストである。ここでは、CES型費用関数を用いて次式のような特定化を行った。

$$\begin{aligned} & \phi(p + wQ(x; \xi), w, g) \\ & = (0.1(p + wQ(x; \xi))^{0.5} + 0.25w^{0.5} + 0.25g^{0.5})^2 \end{aligned}$$

この際、パラメータ α_i, β_{ij} を次のように設定した。

$$(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) = (0.2 \quad 0.2 \quad 0.2)$$

$$\begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} & \beta_{13} \\ \beta_{21} & \beta_{22} & \beta_{23} \\ \beta_{31} & \beta_{32} & \beta_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.002 & -0.001 & -0.001 \\ -0.001 & 0.002 & -0.001 \\ -0.001 & -0.001 & 0.002 \end{bmatrix}$$

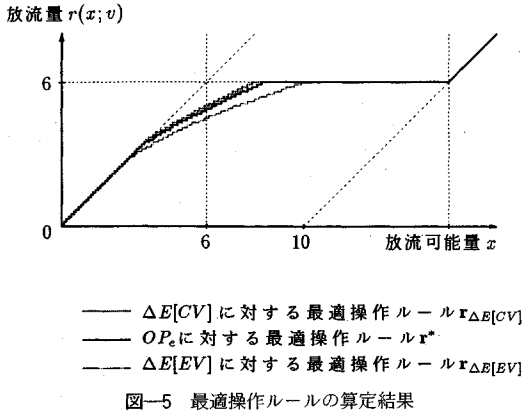
このとき、等価変分 $EV(q; q_0, Y)$ 補償変分 $CV(q; q_0, Y)$ は以下のように算定される。

$$EV(q; q_0, Y) = \exp \left(\frac{a(q_0, q)}{b(q_0)} \right) Y^{c(q, q_0)} - Y \dots \dots (34)$$

$$CV(q; q_0, Y) = Y - Y^{c(q_0, q)} \exp \left(\frac{a(q, q_0)}{b(q)} \right) \dots \dots (35)$$

ただし、 $a(q_0, q), b(q), c(q, q_0)$ は以下のように与え

^{*2} 単位計算期間を5日として、貯水容量を流量タームに変換している。 $v_0 = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ は $4,320,000 \text{ m}^3$ に相当する。



られる。

$$a(q_0, q) = \ln \frac{\hat{\phi}(q_0)}{\hat{\phi}(q)}$$

$$\left\{ \alpha_1 + \frac{1}{2} \beta_{11} \ln(\hat{\phi}(q_0) \hat{\phi}(q)) + \beta_{12} \ln w \right\} \quad (36)$$

$$b(q) = \sum_{i=1}^3 \alpha_i + \sum_{i=1}^3 \beta_{11} \ln \hat{\phi}(q) + \sum_{i=1}^3 \beta_{12} \ln w \dots \dots \dots (37)$$

$$c(q_0, q) = b(q_0)/b(q) \dots \dots \dots (38)$$

ここで、 $\hat{\phi}(q) = \phi(p+wq, w, g)$ である。

(2) 分析の結果

図—5に等価的 option price OP_e 及び期待被害軽減額 ($\Delta E[EV]$, $\Delta E[CV]$) をそれぞれ最大化する操作ルール r^* 及び $r_{\Delta E[EV]}$, $r_{\Delta E[CV]}$ の算定結果を示す。この図から、明らかに最適操作ルールはそれぞれの指標毎に異なっている。いずれも放流量の増大に伴って放流量を増加させる「単調」な操作ルールとなっており、線形操作ルール r_0 に比べて放流量を削減し貯水量を温存するような節水型の操作ルールとなっている。また、任意の x 及び v に関して $r_{\Delta E[EV]}(x; v) \geq r^*(x; v) \geq r_{\Delta E[CV]}(x; v)$ が成り立っており、 $r_{\Delta E[EV]}$, r^* , $r_{\Delta E[CV]}$ の順に節水の度合いが高い操作ルールとなっていることがわかる。

整備に伴う期待効用の改善量 ΔEU 、期待被害軽減額 ($\Delta E[EV]$, $\Delta E[CV]$)、及び、等価的 option price OP_e を求め、表—1に整理した。当然のことではあるが、それぞれの最適操作ルールに対応する指標の値が最も大きい。ここで、等価的 option price OP_e による評価は、期待効用の改善量 ΔEU による評価と一致しており、等価的 option price 指標 OP_e による評価の整合性(符号保存性・順位保存性)をこの例からも確認することができる。一方、期待効用の改善量 ΔEU による評価と、期待被害軽減額指標 ($\Delta E[EV]$, $\Delta E[CV]$) による評価は一致していない。このことは、これらの期待被害軽減額指標が順序保存性を有さないことを意味している。さらに、表—1から、期待被害軽減額指標は符号保存性を有さないことが読み取れる。操作ルール $r_{\Delta E[CV]}$ に対す

表—1 各操作ルールに対する評価指標値

	OP_e に対する 最適操作ルール r^*	$\Delta E[EV]$ に対する 最適操作ルール $r_{\Delta E[EV]}$	$\Delta E[CV]$ に対する 最適操作ルール $r_{\Delta E[CV]}$
ΔEU	0.02042	0.01971	0.01176
$\Delta E[EV]$	31.45	33.32	-2.43
$\Delta E[CV]$	204.67	180.13	240.26
OP_e	81.45	78.65	46.89

単位: 円/(戸・日)

る ΔEU の符号は正であるから、代表的家計は現況の操作ルール r_0 よりも操作ルール $r_{\Delta E[CV]}$ を選好するはずである。しかしながら、操作ルール $r_{\Delta E[CV]}$ に対する $\Delta E[EV]$ の符号は負となっており、 $\Delta E[EV]$ を評価指標として採用すると現況の操作ルールの方が望ましいという誤った評価を下す恐れがあることを示している。このように操作ルールの改善を含む渇水対策プロジェクトの設計・評価問題に関しては、期待被害軽減額指標は符号保存性・順序保存性を有さない。このため、経済的評価指標として用いることは適当ではないと考えられる。以上の結果から、渇水対策プロジェクトの設計・評価問題における経済的評価指標としては等価的 option price OP_e を用いることが望ましいと結論することができよう。

7. おわりに

本研究では渇水リスクの経済的評価問題に着目し、渇水対策プロジェクトによる家計の享受受益の評価方法に関して考察した。この際、渇水対策プロジェクトの整備が渇水の生起確率分布を制御し渇水に対して信頼性の高い水使用環境を提供することで地域住民の生活の質の確保・向上に貢献することに着目し、生活の質の向上に対する家計の支払意思額を用いて渇水対策の効果を計量化することが重要であること指摘した。さらに、渇水リスクの変化に対する家計の享受受益の金銭評価指標に関して理論的に考察し、結論を得た。(i) 渇水リスクの経済的問題においては、代表的家計の期待効用関数を構成する間接効用関数及び水資源システムの状態の確率分布のいずれにも貯水池等のインフラストラクチャーの整備状況が影響及ぼすことを考慮することが必要である。(ii) このような渇水リスクの経済的評価問題においても、等価的 option price は符号保存性・順序保存性を有する。一方、補償的 option price は符号保存性を有するが、一般には順序保存性を有さない。(iii) 期待被害軽減額(等価変分の期待値の差、補償変分の期待値の差)は一般には符号保存性・順序保存性を有さず、渇水リスクの評価問題においても同様に符号保存性・順序保存性のいずれの性質も満足しない。以上の考察結果を総合し、渇水対策プロジェクトの経済的評価を行う際には、等価的 option price を用いて家計の享受受益を計量化することが望ましいという結論を得た。さらに、渇水対策プロジェクトに操作ルールの改善を含む場合の家計の享受便

益の計量化法として以下のような方法を提案した。すなわち、期待効用を最大化するような操作ルールを求め、整備の効果を等価的 option price を用いて評価するという方法である。期待効用と等価的 option price の評価は整合的であるから、本方法によって評価の整合性を保ちつつ家計の享受便益の計量化を行うことができる。

最後に、本研究をまとめるにあたって、鳥取大学工学部、小林潔司教授、京都大学防災研究所、岡田憲夫教授、鳥取大学工学部、河合 一教授、金沢大学工学部、木俣昇教授、岐阜大学 森杉壽芳教授との議論から多くの知見を得た。さらに、本論文の査読委員の先生方にも多くのご示唆をいただいた。ここに、付記し感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 岡田憲夫：災害のリスク分析的見方，土木学会土木構造物委員会，「土と防災」講習会テキスト，pp. 61～78，1985.
- 2) Johansson, P.-O. : The Economic Theory and Measurement of Environmental Benefits, Cambridge University Press, 1987.
- 3) 建設省土木研究所：渇水時の水管理に関する計画学的研究，土木研究所資料，No. 1509，1979.
- 4) 建設省土木研究所：渇水被害の計測について，土木研究所資料，No. 1502，1979.
- 5) Graham-T. and Myers, R.J. : Supply-side option value : Further discussion, Land Economics, 66, pp.425～429, 1990.
- 6) Graham, D.A. : Cost-benefit analysis under uncertainty, American Economic Review, 71, pp.715～725, 1981.
- 7) Morisugi, H. and Iwase H. : Measurement of household damage costs from ground subsidence, Papers of the Regional Science Association, Vol.63, pp.13～29, 1987.
- 8) Weisbrod, B.A. : Collective consumption services of individual consumption goods, Quarterly Journal of Economics, 81, pp.351～352, 1967.
- 9) Cicchetti, C.J. and Freeman, A.M. III. : Option demand and consumer surplus : Further comment, Quaterly Journal of Economics, 85, pp.528～539.
- 10) Schmanlensee, R. : Option demand and consumer's surplus : Valuing price changes under uncertainty, American Economic Review, 62, pp.813～824, 1972.
- 11) Bohm, P. : Option demand and consumer's surplus : Comment, American Economic Review, 65, pp.733～736, 1975.
- 12) Bishop, R.C. : Option value : An exposition and extension, Land Economics, 58, pp.1～15, 1982.
- 13) Freeman, A.M. III. : Supply uncertainty, option price and option value, Land Economics, 61, pp.176～181, 1985.
- 14) Plummer, M. : Supply uncertainty, option price and option value : An extension, Land Economics, 62, pp.313～318, 1986.
- 15) Johansson, P.-O. : Option value : Comment, Land Economics, 64, pp.86～87, 1988.
- 16) 多々納裕一：利水用貯留施設整備の便益評価法に関する研究，鳥取大学工学部研究報告，Vol. 22, No.1, pp. 349～356，1991.
- 17) Helms, J.L. : Expected consumer surplus and the welfare effects of price stabilization, International Economic Review, 26, pp.603～617, 1985.
- 18) 森杉壽芳・大島伸弘：渇水頻度低下による世帯享受便益の評価法の提案，土木学会論文集，Vol. 359/IV-3, pp.91～98，1979.
- 19) 多々納裕一・岡田憲夫・河合 一：渇水の継続期間を明示的に組み込んだ貯水池運用計画モデル，土木計画学研究論文集，Vol. 9, pp.173～180，1991.
- 20) 多々納裕一・岡田憲夫・小林潔司：給水制限が水消費行動に与える影響に関する研究，京都大学防災研究所水資源研究センター報告，Vol. 10, pp.43～59，1990.
- 21) 岡田憲夫・多々納裕一・小林潔司・並河光夫：渇水時の水消費行動のモデル分析，京都大学防災研究所年報，第34号，B-2, pp.127～144，1991.

(1992. 5. 15 受付)

ECONOMIC EVALUATION OF DROUGHT RISK REDUCTION WITH ANTI DROUGHT MEASURES

Hirokazu TATANO

This paper discusses an evaluation problem of the benefit of reservoir under uncertainty. A reservoir has a function of flow stabilization. Since natural stream flow is uncertain, the available water in stream sometimes becomes shorter than water demands and then a drought happens. Constructing a reservoir makes the stream flow stabilized and probability of drought is reduced. We should consider how to evaluate the benefit of stream flow stabilization or reduction of drought probability. In the field of welfare economics, option price and expected consumer surplus are proposed for estimation of benefit of a project in a risky world. These measures are formulated and examined. The focus of this paper is to find the appropriate way to measuring the benefit of a reservoir through examination of these measures.