

不確実性下のプロジェクト評価：課題と展望*

Project Evaluation under Uncertainty: Issues and Perspective*

多々納裕一**

by Hirokazu TATANO**

1. はじめに

著者が学部生であったころの講義¹⁾で、「計画は未来の事柄に対する現在の意思決定である。」というドラッカーの定義を教えていただいた。この定義に集約されるように、計画は現在利用可能な知識と情報を用いて将来を見据え、現時点の行動を定めるものである。しかしながら、将来が完全に既知でない現時点において計画が定められる以上、計画の策定時には「予期できない事柄」を抱えたまま意思決定を下することになる。したがって、「計画」という行為は、本質的に「不確実性」を抱えた行為であるといえることができる。

社会基盤整備計画の実務においては、不確実性に対処するため、5ヶ年、10ヶ年という時限をきった計画が策定され、定期的な見直しが行われてきた。しかしながら、個別のプロジェクトに対しては一度計画決定がなされると若干の修正は行われるにせよプロジェクトは実施される傾向にあった。しかしながら、最近になって多くのプロジェクトが「時のアセスメント」によって中止もしくは延期になるということが少なくなってきた。

「未来のことがら」を確実に知ることができない以上、一般には、現時点で「望ましい」と判断されてなされた意思決定が未来の時点においても「望ましかったであろう」と判断されるという保証はない。しかしながら、できるだけ未来の時点においても望ましいプロジェクトを選択していくための計画のプロセスを設計することが重要であることは論を待たないであろう。我々は、将来時点においてはその時点の状況を現在において推測するよりもより確実に

知ることができる。すなわち、我々は現時点から将来時点の間に追加的な情報を獲得することができるのである。さらに、我々はその間に学習をし、知識の拡充を果たすであろう。したがって、現時点と将来時点における情報や知識の違いを考慮して、将来時点における情報や知識を活用できるように計画プロセスを設計することが必要であろう。

以下、まず、2では社会基盤整備に関わる不確実性とプロジェクトを評価する上での主要な課題を整理する。次いで、3では、不確実性下におけるプロジェクトの実施に伴う便益を評価するための指標について議論する。さらに、4では、不可逆なプロジェクトの評価問題を取り上げる。具体的には、単一のプロジェクトを現時点において実施するかどうかという一見全く単純な問題が、不可逆・不確実性下では不可逆性とあいまって複雑な問題として定式化されることを示す。そしてこの問題に関する計画論的な課題を考察する。最後に、5.では本研究の成果を取りまとめる。

2. 社会基盤施設整備を取り巻く不確実性とプロジェクト評価問題

(1) 不確実性の分類

不確実性下のプロジェクト評価の問題を議論するに際して、まず、本研究で議論の対象とする不確実性の概念を明確にしておくことには意味があるであろう。まず、F. Knightの分類²⁾について触れよう。経済学においては、不確実性に関してF. Knightの定義が広く受け入れられている。Knightによれば、不確実性には2種類あり、その一つは結果(consequences)に関する確率分布関数が既知の場合であり、他の一つはそのような確率分布に関する知識が全くない場合である。Knightは前者を「リスク」(

*キーマーズ：計画理論、便益評価、不可逆性、不確実性

**正員、工博、京都大学防災研究所総合防災研究部門
(宇治市五ヶ庄、TEL 0774-38-4308,
FAX 0774-38-4044)

risk)、後者を「不確実性」(uncertainty)と呼んだ。ここで、主観的な意味あいにおいて各状態または各事象の生起確率を理解しようという立場に立てば、このような区別にはあまり意味はない³⁾。現実の世界においては、上述のような完全無知の仮定はほとんど妥当ではない。むしろ、主体は生起しうる各状態の確からしさについて、あいまいなものであれ、部分的な知識を有している方が普通であろう。サベッジ⁴⁾は人々がこのような部分的な知識を持つ場合に、その人の行動が合理的で首尾一貫しているとみなせる場合には、そこから各状態の生起確率が導出できることを示した。したがって、サベッジのような主観確率論者の立場に立つ限り、不確実性下の意思決定の問題は、結局のところ、リスクが存在する場合の意思決定に帰着することになる。本稿では基本的にこのような立場に立ち、期待効用理論⁵⁾を用いた議論を進める。また、発生する事象がもたらす結果(consequences)の集合さえ特定できない場合は「無知」(ignorance)と呼ぶことも定着しつつあるようである⁶⁾が、本稿ではこの領域に関わる研究が重要であることは十分認識した上で「無知」の領域にはほとんど踏み込まない。「無知」の領域では、期待効用理論のような操作性の高い理論を見出すことが困難であるからである。

ここで、Bishopによって導入された「供給側の不確実性」の概念について触れよう。Bishop⁷⁾は不確実性の発生する原因がプロジェクトによって提供される(公共)財・サービスの水準が不確実性をもつ場合とそうでない場合を区別した。家計が直面する不確実性がこのような(公共)財・サービスの提供水準の確率的な変動に起因する場合を「供給側の不確実性」と呼び、それ以外の要因による場合を「需要側の不確実性」と呼んだのである。ここで、需要側の不確実性としては市場財の価格、所得の不確実性、さらには状況依存的選好などが挙げられる。需要側の不確実性のみが存在する場合には、プロジェクトが実施されているかそうでないかによって、家計に提供される(公共)財やサービスの水準が確定的に定まる。しかしながら、土木計画で想定する社会基盤整備の多くが必ずしもこの場合に該当しない。たとえば、河川にダムを建設する目的はそれによって流況を安定化し、渇水や洪水の発生する確率を減少

させようということにある。この場合、家計が享受する(公共的)サービスは平常時や災害時のアメニティであり、ダムの整備は渇水時や洪水時のアメニティの水準の実現の確率を変化させるのである。この場合、アメニティは確定的には定まらず、確率的にのみ定まることとなる。この他にも、交通情報システムの整備はもとより、道路・公園など多くの社会基盤整備は「供給側の不確実性」をもたらす。本稿では、3.において両者の不確実性が存在する場合の便益の評価指標に関して考察する。

(2) 不可逆性と情報

不確実性と並んで、プロジェクト評価の際に考慮しなければならない性質として、不可逆性、情報の利用可能性の概念を紹介しよう。

潜在的に可能な行為の選択肢集合を A 、その要素(行為)を $a \in A$ と表記しよう。ある行為を選択することによって将来の選択肢の集合がただ一つの要素からなる集合に限定されてしまう場合、その行為は「(完全)不可逆な行為」と呼ばれる。これに対し、行為の選択が将来の選択肢集合を不変に保つ(潜在的に可能な選択肢集合と一致させる)場合、その行為は「(完全)可逆な行為」とであるという⁸⁾。社会基盤施設整備をプロジェクトのうち、環境に不可逆な影響を与えるものは少なくない。プロジェクトの実施はその後に従前と同じ自然環境を享受する機会を失わせる行為であることが少なくないからである。数式によってこれを示せば、 $\Omega(a)$ を今期に行為 a が選択されたとしたときの次期における選択肢の集合とし、 a^0 を可逆な行為、 a^1 を不可逆な行為として、以下のように与えられる。

$$\Omega(a^0) = A, \quad \Omega(a^1) = \{a\} \quad (1)$$

ここで、 $a \in A$ である。

重要なことは、不可逆な行為の選択は将来時点における選択の多様性を失わせてしまうことである。極端な場合、不可逆な行為を選択してしまうと将来時点における選択肢はただ一つだけであり、それがたとえ好ましくない状況を生んだとしても我々はそれを甘受せざるを得なくなるということである。これに対し、完全可逆な行為の選択は将来時点における選択の多様性を現在の状態にとどめる。このことは、将来時点における「選択の多様性」が留保され

ていることを意味する。さらに、このことは将来時点における「情報の利用可能性」を保証するものでもある。

一般に不確実性の程度は現在から将来へ向けて増大することが予想される。言い換えれば、将来時点において意思決定を行うことができれば、その時点においては現時点でその時点の経済状況を予測するのに比べて不確実性の程度が減少しているものと期待される。すなわち、将来時点における選択の可能性が留保されていれば、より確実な状況の下で決定を下すことが可能となる。

いま、情報構造を $\mathcal{I} = [Y, \lambda]$ のように表現しよう。ここで、 Y はメッセージの集合（有限）であり、 $\lambda(y|s)$ は状態が s であるときにメッセージ y が得られる確率である。情報構造 $\mathcal{I}$ を有する主体は、第 n 期首までに得られたメッセージ $y_n \in Y$ をもとに、ベイズ学習を通じて事前分布から事後分布へと主観確率の更新を行うことができる。いま、第 $n-1$ 期における状態の事前確率分布を $\tilde{\pi}_n = [\pi_n(s)]_{s \in S}$ とすれば、第 n 期期首にメッセージ y_n が得られた場合にベイズ学習によって得られる事後確率分布 $\pi_n = [\pi_n(s)]_{s \in S}$ は、 $\pi_n = \Pi(y_n, \tilde{\pi}_n)$ によって与えられる。ここで、 $\Pi(y_n, \tilde{\pi}_n) = [\Pi(s|y_n, \tilde{\pi}_n)]_{s \in S}$ は次式で定義される。

$$\Pi(s|y_n, \tilde{\pi}_n) = \frac{\lambda(y_n|s)\tilde{\pi}_n(s)}{\sum_{s \in S} \lambda(y_n|s)\tilde{\pi}_n(s)} \quad (2)$$

ここで、メッセージ y の生起確率 $q(y|\tilde{\pi}_n)$ は $q(y|\tilde{\pi}_n) = \sum_{s \in S} \lambda(y|s)\tilde{\pi}_n(s)$ で与えられる。

特に、 $\tilde{\pi}_n(s) = \pi_{n-1}(s)$ とおくと、

$$\pi_n(s) = \sum_{y \in Y} \Pi(y, \pi_{n-1})q(y|\pi_{n-1}) = \pi_{n-1} = \dots = \pi_0$$

となり、後述する「静的不確実性」の場合となる。また、 $\{\tilde{\pi}_n(s)\}$ について確率的なダイナミクスを想定すれば動的な不確実性を表現できる。

(3) プロジェクト評価問題

社会基盤整備プロジェクトはその整備によって公共的な財やサービスを提供することで最終的に家計の厚生水準の向上を図ろうとするものであるということができよう。本来、プロジェクトは家計や関連する産業部門にさまざまな効果をもたらすと考えられる。しかしながら、産業を構成している企業は株主たる家計によって所有されているとするならば、これらの産業部門にもたらされた変化は、結局、所得の変化として家計に帰着することになる。そこで、本

稿では、議論をできるだけ明快なものとするために、計画主体と家計という2種類の主体のみを明示的に想定する。ここで、計画主体はプロジェクトが効率的であるか否かを判断し、その実施に関する決定を下すという役割を担う計画主体として想定する。

当然のことながら、プロジェクトの実施には費用がかかる。従って、プロジェクトが効率的であるためには、少なくとも潜在的にはその費用を配分してもなお個々の家計の厚生をパレート改善しうのような費用配分の可能性が保証されなければならない。このためには、プロジェクトに対する家計の支払意思額の合計が費用の合計を上回ることが必要である。したがって、プロジェクトの実施に関する評価に際しては家計の支払意思額の合計で与えられる便益から費用を差し引いた純便益の現在価値によって判断が加えられてきた。

しかしながら、これだけでは十分でない。不可逆性が存在したり、将来における情報の利用可能性が保証される（ほとんどの場合がそうであろうが）場合には、今期においてプロジェクトの実施を決定するという行為は、次年度において発生する便益の大きさが明らかとなった時点で決定を下すことの可能性を排除してしまっている。このようにして排除された代替案によってもたらされる便益は、今期におけるプロジェクト実施の機会費用として考慮されなければならないからである。ここで留意すべきことは、選択肢の多様性が確保されていれば選択を行うことが可能であること、将来時点においては追加的な情報ももたらされそれをもとに意思決定を下すことが可能であることの2点である。さらに、これらが今期の意思決定を留保すること（何も行わないこと）を積極的に評価することによって可能となったことに留意すべきであろう。不可逆なプロジェクトの評価を行う際には、そのプロジェクトの実施によって排除される「意思決定の留保」という選択肢に対する評価を忘れてはならない。

(4) プロジェクト評価における時間的要素

a) 静的なプロジェクト評価

土木計画の分野においても不確実性下のプロジェクト評価の問題は活発に議論されてきた。これらの研究で取り上げられた問題の多くは、不確実性下の

便益評価の問題である。不確実性下では便益の定義自体の自由度が大きい。たとえば、家計の支払意思額に基づいて家計が享受する便益を算定しようとする場合、この支払意思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思額の組み合わせは無数に存在する⁹⁾ことになる。このために、社会基盤施設整備プロジェクトを評価するという目的に促していかなる指標が望ましいのかを議論することはまずもってなされねばならなかった。初期の研究は他の状況を一定とした部分均衡的なアプローチが取られていた¹⁰⁾が、近年一般均衡的なアプローチとの融合が模索されている¹¹⁾。

計画主体が直面する不確実性が「静的」である場合（時間に依存しないという意味で「定常的」な場合）には、プロジェクトの実施によって生じる変化はやはり静的な不確実性の変化として生じる。プロジェクトによってもたらされる結果の確率分布が（過渡的には時間とともに変動したとしても少なくとも長い時間の経過後には）定常な分布へと収束する場合には、プロジェクト実施以前に生じていた結果の定常な確率分布とプロジェクト実施後のそれとを比較することで便益を評価することができる。過渡的な変化が十分に早いスピードで生じると仮定できる場合には近似的に定常性を想定でき、各期の便益は同一でとなる。ただし、この場合においても将来時点において追加的な情報が利用可能で不可逆性が存在する場合には、やはり動的な検討が必要になる。

従って、この場合には、上述のような条件付きではあるが、社会的割引率によって現在価値に割り引いた純便益の現在価値を用いてプロジェクトの評価を行えばよい。現時点においてプロジェクトの開始が選択されるような環境の下では、任意の将来時点においてプロジェクトを開始した場合の純便益のその時点における現在価値は、現時点でプロジェクトを実施した場合の現在価値に一致する。従って、前者の現時点における現在価値は後者のそれより必ず小さくなる。このため、現時点での開始が妥当とされるプロジェクトを延期することは合理的でない。従って、計画主体が静的な不確実性に直面する場合には、便益の評価に関する課題が中心的な課題となる。

b) 通時的なプロジェクト評価

次には、プロジェクトの規模を時間軸に沿って割り当てるという通時的な決定問題を取り上げよう。いま、通時的な決定問題を時間軸に沿ってすべての行為を割り当てるというオープンエンドな計画を作成する問題であると定義する。評価に際しては、互いに独立な行為の経路に対してそれぞれ純便益の現在価値を算定し、これを比較すればよい。この問題は不確実性下でよりも、確実性下で本質的な意味を持つ問題である。すなわち、プロジェクトを取り巻く経済環境がプロジェクトの便益を時間軸に沿って増大させていくような局面では、大規模なプロジェクトを実施しても遊休が生じ、そのための損失が生じてしまう。一方、プロジェクトが規模の経済性を有するときには、規模の拡大とともに限界費用が減少するためにより大規模なプロジェクトが費用面からは有利となる。従って、このような状況下では段階的なプロジェクトの実施が合理的となる。土木計画の分野でも、道路整備や河川整備の段階的整備論として研究が展開されてきた。もちろん、不確実性が動的であり、情報が利用可能でない（状態が観測できない）という特殊な状況下では重要である。

ここでは、通時的な決定問題はオープンエンドな計画を作成する問題であるため、経済状態等のシステムの状態に応じて対応を定めるといった柔軟な計画は求め得ない。そのためには、以下のような動的な問題としてプロジェクトの整備問題を捕らえる必要がある。

c) 動的なプロジェクト評価

本稿では、動的なプロジェクト評価問題を観測可能な情報に基づいて状態量の分布に対して各期の行為を対応づけるルールを決定する問題として定義する。不可逆性・不確実性下のプロジェクトでは、一般にこの問題が重要となる。それは、今期においてプロジェクトの実施を決定するという行為は、将来において発生する便益の大きさが明らかとなった時点で決定を下すことの可能性を排除しないことを保証するためである。このためには、「意思決定の留保」は独立した選択肢として代替案集合に含まれなければならない。本稿では4.においてその方法を具体的に示す。また、5.で述べるようにこのような計画を作成することで、構造的な変動にも対応する可能性が生じる。

3. 不確実性下の便益評価指標

(1) 家計の消費行動

不確実性下におけるプロジェクトの便益を評価する際には、多くの場合以下のような仮定が採用されている。¹⁾(1) 家計は市場財の消費行動を行う際には彼の意思決定環境を確定的に知っている。(2) 市場財の消費に際して、家計は近視眼的に効用を最大化する。この仮定に従って家計の厚生水準を記述しよう。

いま、プロジェクトによって供給される(公共)財・サービスの水準を q とし、他の市場財の量および価格(ベクトル)を x , p , 状況依存的選好を ε , 所得を y とすると、家計の消費行動モデルは以下のように定式化できる。

$$\begin{aligned} v(p, q, Y) &= \max_x u(x, q, \varepsilon) \\ \text{subject to} \quad & p \cdot x = y \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、 $u(\cdot)$ は効用関数、 $v(\cdot)$ は家計の間接効用関数である。したがって、家計の厚生水準 $v(p, q, \varepsilon, Y)$ は、家計が消費行動に際して直面する意思決定環境 (p, q, ε, Y) に依存することとなる。

(2) 需要側の不確実性と供給側の不確実性

ここで、これらの意思決定環境のうち、プロジェクトによって供給される(公共)財・サービスの水準 q 以外の意思決定環境 p, ε, Y の一部または全部が確率的に変動する場合を想定しよう。ただし、家計が消費行動を決定する時点においてはこれらの変数は確定しておりその値を家計が確実に知っているが、プロジェクトを実施するか否かを判断する時点においてはこれらの変数の値は家計にとって既知でなくその確率分布のみがわかっているものとする。このような場合がBishopのいう需要側の不確実性である。

プロジェクトによる公共財の供給水準が q として与えられる場合の家計の厚生水準を期待効用理論に基づいて定式化しよう。この場合、「結果」は多次元の変数として与えられるが、Krepsによれば期待効用理論をほぼそのまま適用できる¹⁴⁾。すなわち、期待効用を導出する際に必要となる選好に関する公理系が満たされるなら、間接効用関数 $v(p, q, \varepsilon, Y)$ は、フォン・ノイマン＝モルゲンシュテルン効用関数と

みなしうるのである。従って、このプロジェクトの実施によって生じる家計の厚生水準 $EU(q)$ は

$$EU(q) = E_{p, \varepsilon, Y}[v(p, q, \varepsilon, Y)] \quad (4)$$

ただし、 $E_{p, \varepsilon, Y}[\cdot]$ は期待値を表す。

社会基盤整備プロジェクトの場合、プロジェクトの実施が必ずしもそれによって提供される(公共)財やサービスの水準が確定的に定まらない場合も少なくない。たとえば、防災施設整備の場合には、自然災害を引き起こす洪水や地震といった外力自体の発生を制御することは困難であり、むしろ同一規模の外力が生じた場合に発生する被害の程度を軽減するにすぎないのである。この場合には、防災プロジェクトの整備は災害時に家計が直面するアメニティの水準を変化させると解することができよう。従って、家計は供給側の不確実性にも直面することになる。いま、外力の規模を z 、防災施設の整備水準を ξ とし、その際に消費者が直面するアメニティの水準を $Q(z; \xi)$ で表そう。さらに、外力の生起確率を $\pi(z)$ とすれば、家計の厚生水準 $EU(\xi)$ は

$$EU(\xi) = \sum_z E_{p, \varepsilon, Y}[v(p, Q(z; \xi), \varepsilon, Y)]\pi(z) \quad (5)$$

のように与えられる。ただし、この場合もう一つの異なった定式化も可能である。すなわち、アメニティ水準の生起確率を導入するのである。いま、アメニティ水準 q が生起する確率を $\pi(q|\xi)$ で与えよう。ただし、 $\pi(Q(z; \xi)) = \pi(z|\xi)$ である。このとき家計の厚生水準 $EU(\xi)$ は次式で与えられる。

$$EU(\xi) = \sum_z E_{p, \varepsilon, Y}[v(p, q, \varepsilon, Y)]\pi(q|\xi) \quad (6)$$

(3) 便益評価指標の分類

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¹⁵⁾。これらの手法は、いづれも何らかの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-1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用いる方法」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

¹⁾ もちろん例外はある。特に(1)に関しては家計が長期・短期の行動をとる場合には、長期の問題において彼の意思決定環境は不確実である¹²⁾¹³⁾。

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。

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¹⁶⁾。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¹⁶⁾。したがって、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⁹⁾。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^{9),17)}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^{9),17)}となる。これらはやはりプロジェクトによる家計の厚生水準の変化を金銭尺度で表現したものである。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、このままでは一元的指標であるプロジェクトの便益の評価指標とはならない。後述するように、この場合には、これらの支払意志額を期待値を用いて便益を構成する必要がある。

(4) 不確実性下の便益評価指標の定式化

a) 期待被害軽減額

システムの状態が平常時の状態 $Q = q_0$ から他の状態 $Q = q$ に変化した場合の等価変分 $EV(q; q_0, y)$ は次式で与えられる。ただし、表記の便宜のために間接効用関数を所得およびシステムの状態のみの関

- a) システムの状態の違いに対する支払意志額を用いる方法
 - ・ 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

図一1 不確実性下の家計の享受便益評価手法の分類

数とし、所得は確定的に与えられるものとする。

$$V(y + EV(q; q_0, y), q_0) = V(y, q) \quad (7)$$

これは、環境が平常時の状態から他の状態へと推移すること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る。渇水を例にとると、平常時 q_0 から渇水時 q に移行したことに伴う厚生水準の低下の金銭評価額(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 $E[EV(\xi)|\xi]$ を定式化しよう。期待等価変分 $E[EV(\xi)|\xi]$ は $EV(q; q_0, y)$ の期待値として以下のように入れられる。

$$E[EV(\xi)|\xi] = \sum_x EV(Q(x; \xi); q_0, y) \pi(x|\xi) \quad (8)$$

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の変化分 $(\Delta E[EV])$ として評価される。ここで、 q_0 は環境の平常時の水準を表すから、これらの指標はプロジェクトの実施に伴う被害の期待軽減額(利得の期待増加額)であると解釈できる。

$$\begin{aligned} \Delta E[EV] &= E[EV(\xi_1)|\xi_1] - E[EV(\xi_0)|\xi_0] \\ &= \sum_x EV(Q(x; \xi_1); q_0, y) \pi(x|\xi_1) \\ &\quad - \sum_x EV(Q(x; \xi_0); q_0, y) \pi(x|\xi_0) \quad (9) \end{aligned}$$

b) 等価的 option price

システムの状態が実現値 x をとる場合の支払意志額を $s(x; \xi)$ とおこう。このとき、式(7)と同様に次の関係が成り立つ。

$$E[V(y + s(x), Q(x; \xi_0))|\xi_0] = EU(\xi_1) \quad (10)$$

したがって、整備後の厚生水準と整備前の厚生水準を同じ水準にするような支払意志額の組 $s = \{s(x)\}$ は無数に存在する。なお、 $E[\cdot|\xi]$ は、プロジェクトの整備水準が ξ であるという条件の下での状態変数 x に関する期待値を表す。

ここで、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思額である。このことは、任意の相異なる x_0, x_1 に対して $s(x_0) = s(x_1) = \text{const.}$ となることを意味している。そこで、上式において $s(x) = OP_e$ とおけば、次式が成り立つ。

$$E[V(y + OP_e, Q(x; \xi_0)) | \xi_0] = EU(\xi_1) \quad (11)$$

この支払意思額 OP_e が EV 系の option price (等価的 option price) である。

c) Ceratinty point

無数に存在する支払意思額の組み合わせのうち、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思額の組み合わせが certainty point $c = \{c(x)\}$ である。したがって、certainty point $c = \{c(x|EU_1)\}$ は次式の解として定義される。

$$E[V(y + c(x), Q(x; \xi_0)) | \xi_0] = E[V(y, Q(x; \xi_1)) | \xi_1]$$

$$V(y + c(x), Q(x; \xi_0)) = u_0 (= \text{const.})$$

d) Fair bet point

システムの状態に依存した支払意思額のうち、期待支払意思額を最小とする支払意思額の組み合わせが fair point $f = \{f(x)\}$ である。fair bet point $f = \{f(x|EU_1)\}$ は次の問題の解として定義される。

$$m(EU_1; \xi_0) = \min E[f(x) | \xi_0]$$

$$\text{s.t. } E[V(y + f(x), Q(x; \xi_0)) | \xi_0] = EU\{12\}$$

次式のように certainty point c 及び、fair bet point f の期待値 EC 及び EF を定義し、期待被害軽減額 $\Delta E[EV]$ 、等価的 option price とともに、以下で考察を加えることとする。

$$EC = E[c(x|EU_1) | \xi_0] \quad (13)$$

$$EF = E[f(x|EU_1) | \xi_0] \quad (14)$$

(5) 符号保存性、順序保存性

不確実性下の便益評価指標は、プロジェクトの整備に対する地域住民の選好と整合的な評価を与えることがある必要がある。このためにはこれらの指標が「符号保存性」及び「順序保存性」を有する必要がある。ここで、「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。

表－1: 符号保存性、順序保存性

指標	符号保存性	順序保存性
$\Delta E[EV]$	×	×
OP_e	○	○
EC, EF	×	○
EC', EF'	○	○

Johansson¹⁸⁾ は供給側オプションバリューの有効性を示すためには、その符号のみでなく、少なくとも期待効用の変化の符号と option price の符号及び期待支払意思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、期待支払意思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」）^{15) 19)}。しかしながら、Helms²⁰⁾ は環境が3状態以上の状態をとる場合には期待支払意思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 Myers¹⁶⁾ は、Johanssonの問題提起に応じて等価的 option price が有効であることを示唆している。また、森杉ら^{??)} も独自に同様の指摘を行っている。さらにこの結果はより一般的な設定の下で確かめられている²²⁾。

また、certainty point 及び fair bet point に関しては、森杉^{??)} がその研究の中で符号保存性及び順序保存性を有するという言及を行っているが、これは厳密に確かめられたものではない。多々納はこれについても独自に考察を加え、certainty point 及び fair bet point の期待値は順序保存性を満たすが符号保存性を満たさないことを示している。同時に、以下のような補整を施せばこれらが符号保存性をも満たすことを示している²¹⁾。

$$EC' = E[c(x|EU_1) | \xi_0] - E[c(x|EU_0) | \xi_0] \quad (15)$$

$$EF' = E[f(x|EU_1) | \xi_0] - E[f(x|EU_0) | \xi_0] \quad (16)$$

表－1 に以上の結果をとりまとめておく。

4. 不可逆性下のプロジェクトの評価

(1) 意思決定環境の設定

いま、あるプロジェクトの構想を有している危険中立的な単一の主体（政府）が、現時点においてそのプロジェクトを実施するかどうかを評価しようとしている状況を想定しよう。そのプロジェクトのプロ

プロジェクトライフは有限(N)であり、現在期を第0期として、各期はパラメータ n によってあらわされるものとする。1期の長さはプロジェクトの整備に要する期間を包含するほど十分に長く設定するものとする。

この意思決定主体にとって利用可能な選択肢は、「プロジェクトを実施する(with)」($a = 1$)、「意思決定を留保する(without)」($a = 0$)であり、次期の選択肢集合はそれぞれ $\Omega(1) = \{1\}$, $\Omega(0) = \{0, 1\}$ であると仮定する。

プロジェクトを実施する場合、建設費用として c が必要であるが、その他の費用は簡単のために0と仮定する。プロジェクトが実施された場合、第 n 期の便益 b_n は、各期の経済状態 s_n に依存し、 $b_n = b(s_n)$ によって与えられるものとする。各期の経済状態は、プロジェクトの有無とは独立に離散的な状態空間 S 上で確率分布するものとする。第0期において意思決定主体は、経済状態の生起に関する主観的確率分布(確率関数 $\pi(s_0)$)を有しているものとする。

いま、第 n 期における純便益は $nb(a_n, a_{n-1}, s_n)$ として次式で与えられる。

$$nb(a_n, a_{n-1}, s_n) = \begin{cases} 0 & (a_n = 0, a_{n-1} = 0) \\ b(s_n) - c & (a_n = 1, a_{n-1} = 0) \\ b(s_n) & (a_n = 1, a_{n-1} = 1) \end{cases}$$

すなわち、第 n 期においてプロジェクトが実施されないなら(この場合、当然第期においてもプロジェクトは実施されていないことが前提となる。)、当該期において得られる純便益は0である。一方、第 n 期においてプロジェクトが実施されないなら(この場合も、当然第期においてプロジェクトは実施されていないことが前提となる。)、当該期において得られる純便益は便益 $b(s_n)$ から建設費用 c を差し引いた額となる。さらに、第 $n-1$ 期以前にすでにプロジェクトが実施されていれば、当該期において得られる純便益は便益 $b(s_n)$ そのものとなる。ここで、上式右辺の条件において $a_n = 0, a_{n-1} = 1$ の場合が記述されていないのは、 $0 \notin \Omega(1)$ であるためである。

さらに、計画主体は情報構造 $\mathcal{I} = [Y, \lambda]$ を有しており、第 $n-1$ 中に得られたメッセージ $y_n \in Y$ をもとに、ベイズ学習を通じて主観確率の更新を行う。ここで、 Y はメッセージの集合(有限)であり、 $\lambda(y|s)$ は状態が s であるときにメッセージ y が得られる確率である。第 $n-1$ 期期首において形成された状態の主観

確率分布を $\pi_{n-1} = [\pi_{n-1}(s)]_{s \in S}$ とし、第 n 期期首にメッセージ y_n が得られた場合にベイズ学習によって得られる主観的確率分布 $\pi_n = [\pi_n(s)]_{s \in S}$ は、次式で定義される。

$$\pi_n(s) = \Pi(s|y_n, \pi_{n-1}) = \frac{\lambda(y_n|s)\pi_{n-1}(s)}{\sum_{s \in S} \lambda(y_n|s)\pi_{n-1}(s)} \quad (17)$$

すなわち、静的不確実性を想定する。

(2) 合理的な意思決定のモデル化

以上の設定のもとで、この意思決定主体の行動をモデルで定式化しよう。いま、この主体が合理的であれば、1) 選択肢の多様性が確保される限り、将来時点においても選択が可能であること、2) 将来時点までに得られた情報を用いてより確実な環境のもとで決定を行うことが可能であること、を考慮するであろう。この場合には、今期の決定を行うために、将来の各期における決定方法をもあわせて決定する必要が生じる。

いま、第 $n-1$ における行為として a_{n-1} が選択され、経済状況に関する確率分布が学習の結果 π_{n-1} に定まっているという状況の下で、第 n 期以降の決定を最適に行った場合に達成される純便益の第 n 期期首における現在価値を $V_n(a_{n-1}, \pi_{n-1})$ と定義する。この時、社会的割引率を $1 - \beta$ とおけば、第1期以降の最適な決定の系列は以下の最適性方程式の解として与えられる。

$$\begin{aligned} V_n(a_{n-1}, \pi_{n-1}) &= \max_{a_n \in \Omega(a_{n-1})} \left\{ \sum_{s \in S} nb(a_n, a_{n-1}, s) \pi_n(s) \right. \\ &\quad \left. + \sum_{y \in Y} q_n(y|\pi_{n-1}) V_{n+1}(a_n, \Pi(y, \pi_{n-1})) \right\} \quad (18) \\ &\quad (n = 1, 2, \dots, N) \end{aligned}$$

$$V_{N+1}(a_N, \pi_N) = 0 \quad (19)$$

ここで、この決定問題における第 n 期の状態は経済状態の確率分布 π_n で与えられるから、 $n = 1, 2, \dots, N$ の各期における最適な決定 a_n^* は、当該期 n における経済状態の確率分布 $\pi_n = \Pi(y, \pi_{n-1})$ の関数 $a_n^*(\pi_n)$ として与えられる。

現在期(第0期)において、プロジェクト実施の決定をした場合($a_0 = 1$)には、以降の各期における選択肢集合が $\{1\}$ となることをに注意すると、

$$V_1(1, \pi_0) = \beta \gamma \sum_{s \in S} b(s) \pi_0(s) \quad (20)$$

を得る。ただし、 $\gamma = (1 - \beta^N)/(1 - \beta)$ である。したがって、現在期(第0期)において、プロジェク

ト実施の決定をした場合の純便益の現在価値の最大値 $W_0(1, \pi_0)$ およびプロジェクト実施に関する決定を留保した場合の純便益の現在価値の最大値 $W_0(0, \pi_0)$ は次式で与えられる。

$$W_0(1, \pi_0) = \gamma \sum_{s \in S} b(s) \pi_0(s) - c \quad (21)$$

$$W_0(0, \pi_0) = \beta V_1(0, \pi_0) \quad (22)$$

したがって、 $W_0(1, \pi_0)$ と $W_0(0, \pi_0)$ との値の大小を比較することによって、現在期においてプロジェクトを実施すべきか否かの判断を下すことが可能となる。

(3) 伝統的な費用便益分析の枠組みとの関係

ここでは、上述したようなプロジェクトの経済的妥当性の評価法と with and without 原則にしたがった伝統的な純便益の現在価値を用いる評価法との関連に関して考察しよう。

まず、伝統的な with and without 原則に従って、現在期にプロジェクトを実施した場合の純便益の現在価値 NPV を導出しよう。with and without 原則に従えば、まず、プロジェクトを実施して対象とする社会基盤が整備された場合と整備されなかった場合を比較して、各期で生じる便益を算定することが必要となる。設定により、各期の便益はこの前提にしたがって算定されたものであるから、便益の現在価値 B は $B = \gamma \sum_{s \in S} b(s) \pi_0(s)$ で与えられる。一方、費用の現在価値 C は各期の管理費用が 0 であり、現在期の建設費用が c であるから、機会費用が 0 であれば、 $C = c$ となる。このとき、現在期にプロジェクトを実施することによって生じる純便益の現在価値 NPV は

$$NPV = \sum_{s \in S} \gamma \sum_{s \in S} b(s) \pi_0(s) - c \quad (23)$$

となる。しかしながら、既に指摘したように、この方法では現時点において決定を留保するという選択肢を積極的に評価しておらず、決定の留保によって保たれる将来時点の「選択の多様性」や「情報の利用可能性」によってもたらされる便益の発生を考慮していない。決定を留保することによって生じる便益は、プロジェクトを実施するという決定を下すことによって生じた機会費用に他ならない。したがって、純便益の現在価値を用いてプロジェクトの経済的な妥当性を評価するためには、プロジェクトの実施によって得られる純便益の現在価値 NPV からプロジェクトを実施することによって排除された代替案であ

る意思決定の留保によってもたらされはずの純便益の現在価値 $W_0(0, \pi_0)$ を減ずるという操作を施さねばならない。このようにして修正された現在価値 $NPV'' = NPV - W_0(0, \pi_0)$ の符号による評価は、上述の方法による評価と完全に一致する。

ある代替案を選択したことの機会費用は、もしその代替案が選択されなければ選択されたに違いない排他的な他の代替案によってもたらされる純便益をいう。したがって、ある代替案の機会費用を算定するためには、他の排他的な代替案によってもたらされるすべての純便益を算定しておくことが必要である。しかしながら、現実にはより簡便に機会費用を考慮した場合と整合的な評価を下しうる。すなわち、機会費用を考慮せずに、排他的なすべての代替案に関して純便益の現在価値を算定し、それを相互に比較してもっともその値の大きなものを選択すればよいという訳である。なぜなら、このようにして採択される代替案は純便益の現在価値がもっとも大きく、その機会費用は第 2 位の代替案の純便益の現在価値であるから、明らかに機会費用を考慮した純便益の現在価値は非負となるからである。

ここで、注意すべきことは「代替案」と呼んでいる言葉の意味するところである。通時的 (intertemporal) な問題の場合、排他的代替案とは、時間軸に沿った互いに異なる決定の経路を意味する。整備の経路に関する制約が設けられ比較的少数の経路しか存在しない場合ならばともかく、実際にはこれらをいちいち数え上げて比較することは不可能である。本稿で取り上げたプロジェクト評価の問題は通常であればもっとも単純な問題に属するであろう。今期プロジェクトを実施するかしないかを議論しているに過ぎないのだから。しかしながら、このように最も簡単なケースでも、プロジェクトが不可逆性を有することや不確実性の存在を明示的に考慮すれば、整備の経路を列挙するのが現実的には不可能となるほど問題は複雑となる。

図-2 にプロジェクトライフを $N=2$ として、このプロジェクトの整備問題に対応した決定樹木 (decision tree) を示す。前節の意思決定問題の定式化でも議論したように、第 1 期における決定は、第 1 期までに得られたメッセージ y の内容に応じて定まる経済状態の主観的確率分布 $\pi_2 = \Pi(y, \pi_1)$ の関数 $a_2(\pi_2)$

として与えられる。したがって、一つの決定の経路は $(a_1, a_2(\pi_2))$ として与えられる。 $a_1 = 1$ のとき $a_2 = 1$ であること、メッセージ集合 Y に含まれるメッセージの種類を m とすれば互いに異なる m 種の経済状態の主観的確率分布に対して行為が対応づけられなければならないことに注意すれば、独立な決定の経路の数 $2^m + 1$ を求めることができる。独立な経路の数は N の増加とともに指数関数的に増大するから、単純に互いに排反な代替案を比較することが困難となることは容易に推察できる。

本研究では、ダイナミックプログラミングの考え方を適用し、経路そのものを比較することなしに最適な決定の系列（最適政策）を求める方法を示している。この方法を用いることによって計算の労量が大きく削減される。それにも増して重要なことは、現在期（第0期）において意思決定を留保するという行為の便益を与えることである。第0期における選択肢がプロジェクトの実施と意思決定の留保以外になく、その便益が第0期において意思決定を留保するという決定を含む決定の経路の中で最大の便益を与えることから、この便益は必ず第0期にプロジェクトを実施するという決定の機会費用を与えることになる。

さらに、意思決定を留保することの便益は、1) 選択の多様性を留保することの便益と、2) 情報の利用可能性を留保することの便益という互いに排反な便益によって構成されていることを示すことができる。このことは、不可逆なプロジェクトの実施によって失われる機会の性質を示すものであり、不可逆性の意味のより深い理解を助けてくれる。

(4) 情報構造の不確実性と決定ルール

a) 意思決定と情報構造

ベイズ意思決定モデルでは、現在期の決定を行うに際して、前もって将来における任意の状態に最も望ましい行為を対応づける方法（決定ルール）が設計される。したがって、意思決定環境が安定しており、時間とともに変化しないのであれば、意思決定者は一度決定を行えば、将来においては単に過去に設計した決定ルールに従って行為を選択すればよく、いかなる行為を選択すべきか悩む必要はない。すなわち、いかに不確実性や不可逆性が存在していたとしても将来時点において生じるすべての状況はすで

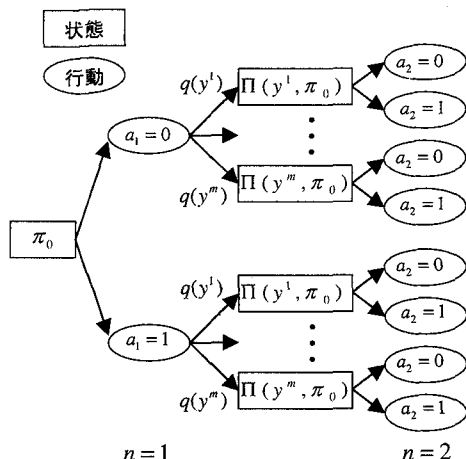


図1: $N=2$ の場合のプロジェクト整備問題

に現時点の意思決定の中に織り込まれていることになる。したがって、計画が失敗する可能性はない。

しかしながら、恐らく意思決定環境は長期にわたって安定的ではなく、長期的には変化しうるものとみなすことが自然であろう。少なくとも、時間の経過とともに我々の社会に蓄積される知識の量は増大していく。将来時点で初めて獲得される知識を予測することができたとすると、その知識は現時点においてすでに獲得されていることになる。この意味で将来時点においていかなる知識が獲得されているかを予測することは本質的に不可能である。

ある経済状態と特定のメッセージを関連付ける情報構造は将来にある種の知識を抽象的に表現したものと解釈できる。このため、将来に向かって知識が拡大していくという認識の下では、現時点における情報構造が将来時点においてもそのままの構造を維持していると考えerことは適当ではなからう。

この場合には、いかにベイズ意思決定モデルを用いようとも、計画は失敗しうる。現時点で想定した最適な決定ルールが将来時点において新たに獲得された情報構造を前提として求められた決定ルールと整合的である保証はないからである。本章では、将来時点における情報構造を現時点において確実に知ることができないという前提に立った場合に、将来時点において新たに得られる情報構造にもとづいて設計される決定ルールと整合的な決定を与える意思

決定の可能性に関して考察する。

(5) 情報構造の変化と意思決定

いま、Blackwell⁽²³⁾に従い、情報構造の詳細さの違いを以下のように定義しよう。

定義 Blackwell

2つの情報構造 $\mathcal{I} = [Y, \Lambda]$ および $\mathcal{I}' = [Y', \Lambda']$ が、 $Y = \{1, \dots, m\}$, $Y' = \{1, \dots, m'\}$ に対して

$$\Lambda' = B\Lambda$$

を満足するマルコフ行列 B が存在するとき、情報構造 $\mathcal{I} = [Y, \Lambda]$ は情報構造 $\mathcal{I}' = [Y', \Lambda']$ よりも詳細な構造を有するといひ、 $\mathcal{I}' \preceq_B \mathcal{I}$ と書く。

いま、2つの情報構造 $\mathcal{I}$ および $\mathcal{I}'$ が与えられ、状態の初期確率分布が π_0 である場合の現在期における最適な意思決定をそれぞれ $a_0^{\mathcal{I}}(\pi_0)$, $a_0^{\mathcal{I}'}(\pi_0)$ と表記する。この時、詳細な証明は省略するが、最適値関数 $V_n(a_{n-1}, \pi_n)$ の凸性より、以下の命題が導かれる^{(24), (25)}。

命題 1

$\mathcal{I}' \preceq_B \mathcal{I} \Rightarrow$ 任意の π_0 について

$$\Omega(a_0^{\mathcal{I}'}(\pi_0)) \subseteq \Omega(a_0^{\mathcal{I}}(\pi_0))$$

すなわち、情報構造がより詳細になれば（完全情報に近づけば）、第0期に選択される行為はより選択の多様性に富む行為となる。この結果は、情報構造がより詳細となれば情報の価値が高まり、意思決定を留保することの価値が高まることに対応している。

(6) 整合的な決定の可能性

最も情報構造が詳細な情報構造は完全情報であるという事実と任意の情報構造がその情報構造よりも詳細な情報構造となるような情報構造は null(情報)であるという事実に着目しよう。定義より、完全情報は他のすべての情報構造よりも詳細であるから、将来の情報構造として完全情報を想定した上でプロジェクトの実施が決定されても、将来時点においていくら情報構造が詳細になろうともその決定は確実に正しい。したがって、逐次的にベイズ意思決定モデルを適用している時点で、プロジェクトの実施がこのモデルにより支持された場合には、その時点で完全情報を想定したベイズ意思決定モデルを用いてもやはりプロジェクトの実施が支持されるかどうかを確か

めることには価値があるだろう。完全情報を想定した場合にもプロジェクトの実施が支持されれば、プロジェクトを実施することで将来時点で不整合が生じることはないからである。

これに対し、通常のベイズ意思決定モデルの結果と完全情報を想定したベイズ意思決定モデルの結果が異なる場合には、望ましい決定を特定できない。プロジェクトを実施した場合には将来的に決定の不整合を招く恐れがあるし、意思決定を留保した場合にはプロジェクトを実施していれば得られたはずの便益をみすみす逃してしまうことになりかねないからである。もちろん、両者のリスクの程度が明らかであれば、これらの決定によって生じる機会費用を比較して決定を下すことができる。しかしながら、情報構造の変化に関するリスクを計量化することは極めて困難な課題である。情報構造がある種の知識であるとするならば、知識の変化に関して確率分布を想定することは容易な作業ではない。むしろ、リスクとしての計量化を図らないで意思決定を行う可能性を見出す努力が必要なのかもしれない。

5. おわりに

本稿では、計画プロセスにも管理が必要であるという問題意識から、不可逆・不確実性下のプロジェクト評価の問題を中心として考察を行ってきた。本稿では行為の不可逆性を、その行為が選択された結果として将来時点の選択肢の多様性が損なわれるような性質として次期における選択肢集合を用いた定式化を示した。今期において完全に不可逆な選択肢を選択したことによって次期の選択肢がただ一つに限定されてしまうのは、不可逆な選択肢を選択しているという条件の下でそれ以外の選択肢を選択することの費用、すなわち、切り替え費用、が禁止的に高いと解釈することもできる。したがって、より広義には、将来決定を変更するのに正の切り替え費用が必要であるような行為は不可逆な行為であると定義される。社会基盤の整備には、多額の建設費用が必要なもの少なくなく、プロジェクトライフ終了後に売却して投下した費用のすべてを回収することはほとんど不可能であり、通常、整備後の状態から整備前の状態に復元するための費用は極めて大きい。この意味で社会基盤施設の整備問題のほとんどは不可

逆性プロジェクトに関わる問題である。さらに、多くの社会基盤が長期のプロジェクトライフを有することから、不確実性も無視できない。したがって、本研究で考察してきた状況は決して特殊な状況ではなく、ごく一般に見られる状況である。本稿で提案した不確実性化における不可逆なプロジェクト実施の経済的妥当性の評価法は、極めて単純化した事例を対象として定式化しているが、より複雑な事例を想定しても主要な結論に変化はない。その主要な結論とは、「プロジェクトの実施」に対する排他的代替案として「意思決定の留保」を取り上げ、「意思決定の留保」によって得られる便益を「プロジェクト実施」の機会費用として考慮すべきであるという結論である。便益の評価指標の問題や整合的計画の問題等残された問題も多いが、今後取り組んでいきたい。

謝辞

まず、最初に土木計画学研究発表会で講演の機会を与えていただいた土木計画学研究委員会に心より感謝したい。また、今回の講演の直接の理由となった土木学会論文奨励賞受賞論文「危険回避選好を考慮した2段階離散選択モデルに関する研究」は筆者が鳥取大学で共著者である小林潔司教授（京都大学）と喜多秀行教授（鳥取大学）行なった共同研究であり、お二人との議論なくしてはその論文は生まれなかったに違いない。特に小林潔司先生には常に卓抜なアイデアとしっかりとした学問的裏付けを持って私が鳥取大学で研究を開始した当初から積極的にご指導・ご助言を賜った。また、著者が不確実性を研究のテーマとさせていただいたのは、岡田憲夫教授（京都大学）の影響によるところが大きい。また、本論文の作成に際しても同教授との議論から多くを学ばせていただいた。最後に、常に暖かく見守ってくださっている吉川和広先生（京都大学名誉教授）並びに同門の関係諸子に心から感謝いたします。

参考文献

- 1) 吉川和広：土木計画のシステム分析，新体系土木工学 52，技報堂出版，1980。
- 2) Knight, F.: Risk, Uncertainty and Profit, Houghton, Mifflin & Co., 1959.
- 3) 酒井泰弘：不確実性の経済学、有斐閣、1982。
- 4) Savage, L.: The Foundations of Statistics, John Wiley, 1954.
- 5) von-Neumann, J. and O. Morgenstern: Theory of Games and Economic Behavior, Princeton University Press, 1971 [鈴林浩・橋本和美・宮本敏夫訳：ゲームの理論と経済行動、東京図書、1972-73]。
- 6) Faber, M. and Proof J.: Evolution, Time, Produc-

- tion and the Environment, 2nd edition, Springer-Verlag, Berlin, 1993.
- 7) Bishop, R.C.: Option value: An exposition and extension, Land Economics, 58, pp.1-15, 1982.
- 8) Schmutzler, A.: Flexibility and Adjustment to Information in Sequential Decision Problems: A Systematic Approach, Springer-Verlag, 1991.
- 9) Graham, D. A.: Cost-benefit Analysis under Uncertainty, American Economics Review 71, pp. 715-725, 1981.
- 10) Morisugi, H and E. Ohno: Proposal of a benefit incidence matrix for urban development project, regional Science and urban Economics, No.25, pp.461-481, 1995.
- 11) 上田孝行:防災投資の便益評価—不確実性と不均衡の概念を念頭において、土木計画学研究講演集 19(2), 17-34, 1996.
- 12) 多々納裕一・小林潔司・喜多秀行:危険回避度選好を考慮した2段階離散選択モデルに関する研究、土木計画学研究論文集, No.13, pp. 553-562, 1996.
- 13) 小林潔司・文世一・多々納裕一:交通情報による経路誘導システムの経済的便益評価に関する研究、土木学会論文集, No. 506/IV-26, pp.72-86, 1995.
- 14) Kreps, D.M.: A Course in microeconomic Theory, Harvester Wheatsheaf, pp.71-131, 1990.
- 15) Johansson, P. O.: Cost-Benefit Analysis of Environmental Change, Cambridge University Press, 1993.
- 16) Graham-T., T. and Myers, R.J.: Supply-side option value: Further discussion, Land Economics, 66, pp.425-429, 1990.
- 17) 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.
- 18) Johansson, P-O: Option value: Comment, Land Economics, 64, pp.86-87, 1988.
- 19) 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.
- 20) Helms, J.L.: Expected consumer surplus and the welfare effects of price stabilization, International Economic Review, 26, pp.603-617, 1985. bibitemmorisugi3 森杉寿芳・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.
- 21) 多々納裕一:不確実性下の便益評価指標の符号保存性・順序保存性, mimeo, 1992.
- 22) 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、土木学会論文集, No.464/IV-19, pp.73-82, 1993.
- 23) Blackwell, D.: Comparison of experiments in J. Neymann(ed.) "Proceedings of the second Berkeley symposium on mathematical Statistics and probability", University of California Press, 1951.
- 24) 多々納裕一・丸橋秀朗・小林潔司:情報構造が不確実性下の開発戦略に及ぼす影響に関する研究、土木学会第50回年次学術講演会概要集, 第4部, pp.382-383, 1995.
- 25) 高尾秀樹:不可逆性、不確実性下の開発戦略決定問題に関する理論的研究、鳥取大学大学院修士論文, 1995.