

土木計画におけるリスク研究

Risk Researches in Infrastructure Planning

黒田 勝彦*

By Katsuhiko KURODA

In planning of infrastructure systems uncertainties are unavoidable. Therefore, some risks are inherently involved in any planning and design of infrastructure systems. The present paper reviews the risk management methods in infrastructure planning from the viewpoint of mathematical decision analysis. The methods can be divided into two categories: the first one is to treat risks and/or uncertainties explicitly, second is to treat risks implicitly. A typical mathematical method treating risks and/or uncertainties explicitly is the statistical decision theory while the example of the latter method is an application of various kinds of decision criteria in decision phase taking into account of the uncertainties.

1. はじめに

筆者は1990年のスペシャルセッションにおいて、「土木工学におけるリスク対応策の分類」¹⁾と題して、①土木工学が対象とするリスクの内容と分類、②回避型、除去型、軽減型の3種類のリスク対応策があること、③一般的なリスク分析と評価のシステム論的方法、について述べた。そこでは、土木計画に係わるリスクとして「決定系リスク」と名付けた。しかし、「決定系リスク」の具体的な取扱法については詳細は述べていなかった。今回はこの点に絞って内容を纏めた。

2. プラニング・プロセスからみたリスク

2・1 誰にとってのリスクか

先の文献¹⁾では、リスクを定義する際に重要な
正会員 工博 熊本大学教授
工学部土木環境工学科

こととして”誰にとってのどのようなリスクか”の考察がリスク・マネジメントにとって不可欠であることを指摘した。土木計画に関連するリスクも例外ではなく、この点を考えておく必要がある。

考えられるリスクの受け手(Risk recipients)としては、①計画主体(多くは政府、公共団体)、②決定主体(公共計画では国会または地方政府議会)、③事業実施主体(多くは政府または公共団体または第三セクター)、④事業請負主体(ゼネコン等)、⑤施設利用者、⑥利用者以外の不特定市民、に分類出来よう。しかしながら以下の節で考えているリスクでは、個々の具体的計画によってリスクの受け手が異なるので、特に、リスクの受け手を特定しない一般的な議論を行う。

2・2 計画問題としての同定過程とリスク

計画過程では、先ず、動機の分析からニーズが把握され計画目的が同定される必要がある。この段階

で真のニーズが把握出来なければ、図-1に示すように、誤った目的が設定され、以後にいくら精・な過程を経たとしても、出来上がった計画は受容されない危険をはらむ結果となろう。

2・3 計画フレームの設定過程とリスク

計画目的が明確に設定されると、これを達成するための手段（代替案A）の作成が行われるが、その際に必要なのは、未来における状況（環境） Θ の予測と代替案の実施による結Uの予測である。この場合図-2に示したように、 $\{A, \Theta, U\}$ にそれぞれ不可避免的に不確実性が混入する。その結果、選択された決定は最適（決定基準の合意の下で）でなくなる危険をはらむ。

3. 計画段階での事前リスク対応の数学的フレーム

3・1 決定問題のフレーム

あらゆる決定問題は、先に述べた $\{A, \Theta, U\}$ なる3要素で表現出来る。このフレームを基に、リスクが決定問題にどのように取り入れられるかが明らかに出来る。図-3はこの決定問題を決定樹木の形で表現したものである。□は決定手番（Decision Fork）と呼ばれ、任意の案 a_j が選択されることを意味する。○は偶然手番（Chance Fork）と呼ばれ、決定者（計画の分析者）にとっては θ_i が真であるか解らない状況を示している。もちろん、どれか一つが真であることが解っている場合もこれに含めて表現出来ている。経済学では、 θ_i の確率 $P(\theta_i)$ が何等かの方法で既知または統計的に推定可能な場合、この確率 P をリスクと呼び、確率が全く解らない場合「不確実性」と呼んでいる。しかし、筆者は混乱を避ける為に、確率測度で θ_i の確からしさを表現する場合を「明示的取扱」、そうでない場合を「暗示的取扱」と呼ぶことにする。この構造を図-4に示す。上の図は不確実性の明示的取扱いの場合を意味し、下の図は暗示的取扱いの場合を示している。

3・2 明示的にリスクを取り扱う場合

この場合は、通常 θ_i の確率 $P(\theta_i)$ を導入して期待効用

$$E[a_j] = \sum P(\theta_i) U(a_j, \theta_i)$$

を最大にする代替案が選定される。結果Uが貨幣チームの損失や時間ロスなどの不効用で表される場合は特に期待効用最小化基準を用い、リスク最小化基

準とも呼ばれている。便益が代替案に依存せず一定と見なせる場合は、この方法でリスク処理が行われ

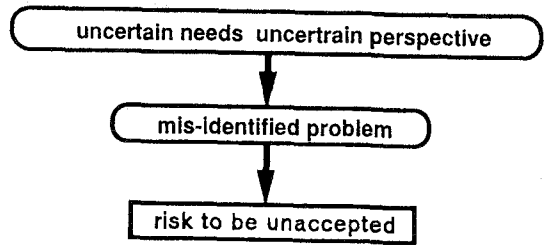


図-1 問題同定過程でのリスク

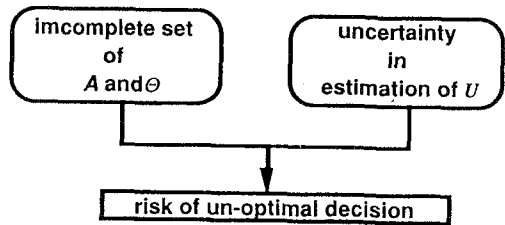


図-2 Aや Θ が不完備な場合のリスク

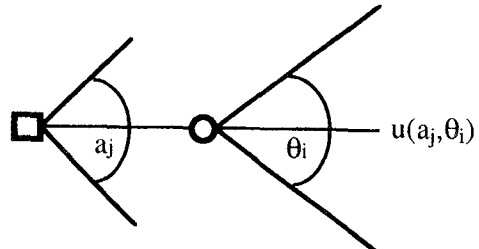


図-3 決定問題の樹木表現

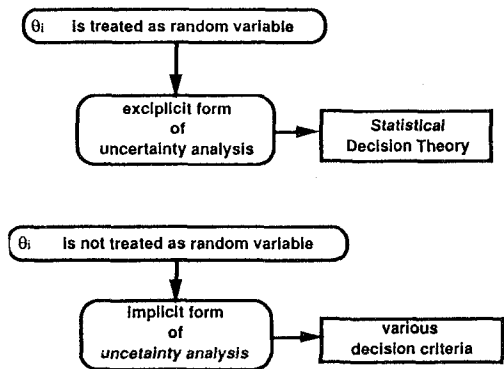


図-4 決定問題における不確実性の2種類の取扱

る場合が多い。多くの構造信頼性設計や交通信頼性設計などはこの考え方を導入している。この場合、結果Uの推定にモデル誤差などを導入して、モデル誤差の確率を用いても考え方は基本的に同じであることに注意されたい。このようなリスク処理問題の概念を図で示したのが図-5である。図において、 λ は、 $\{P(\theta_i) \mid i=1,2,\dots,m\}$ のベクトルを意味する。選択される案は●で示した案である。

筆者が先に発表したリスク処理のシステムでは、このようなリスクの定量化が前提となったフレームである。

3・3 暗示的リスクを取り扱う場合

決定問題 $\{A, \Theta, U\}$ として A, U が完備であるが、 Θ が完備ではない場合とか、例えば完備であっても Θ の不確実性が確率測定として表現出来ない場合がむしろ多い。そのような場合には如何なる取扱いが可能であろうか？ 土木計画が直面する不確実性はこのような場合の方が多く、むしろ定量的リスク問題として定式化できる場合は少ない。この場合、

(1) Θ が完備である場合

この場合はやはり図-3で決定問題が表現出来るので、誰にどの様な(種類の)リスクが及ぶかは予め解る。しかし、その量は解らない。このような場合は、どの代替案を決定するかは、決定基準の選択で合意を得る方法しかない。決定基準は各案に選択の基準量となる数値を設定することによって種々の考え方を反映させることが出来る。これには、周知のように歴史的に4種類の考え方²⁾が提案されている。

(a) Wald基準

$$v(a_j) = \min_{\Theta} \{U(a_j, \theta_i)\} \quad (1)$$

$$\text{選択案} = \max_A v(a_j)$$

(b) Laplace基準

$$v(a_j) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m U(a_j, \theta_i) \quad (2)$$

$$\text{選択案} = \max_A v(a_j)$$

(c) Hurwicz基準

$$v(a_j) = \alpha \max_{\Theta} \{U(a_j, \theta_i)\} + (1-\alpha) \min_{\Theta} \{U(a_j, \theta_i)\}$$

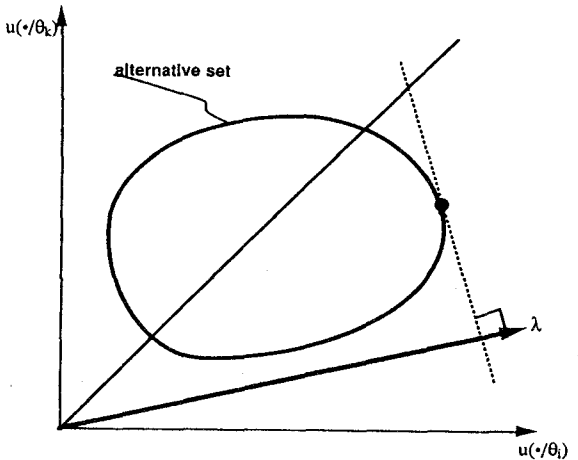


図-5 θ_i の確率が与えられる場合

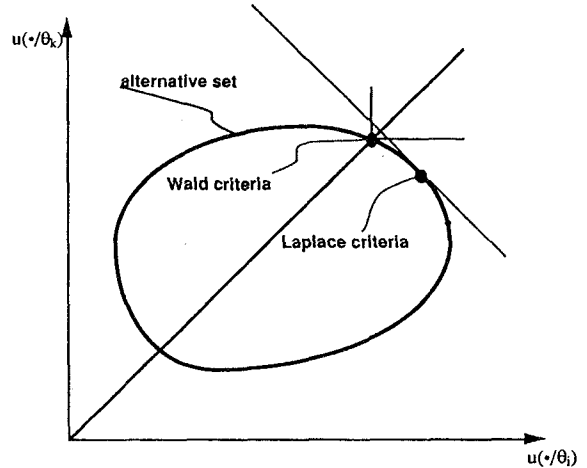


図-6 各種の選択基準

$$\text{但し, } 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (3)$$

$$\text{選択案} = \max_A v(a_j)$$

(d) Savage基準

$$v(a_j) = \max_{\Theta} [U(a_j, \theta_i) - \min_{\Theta} U(a_j, \theta_i)] \quad (4)$$

$$\text{選択案} = \min_A v(a_j)$$

これらの基準はいずれもリスクに対応した選択基準としては不充分であることが指摘されており²⁾、リスクを明示的に取り扱う方向 (Bayes基準) に向かったことは周知の通りである。この場合、 λ として LFP (Least Favourable Probability)³⁾を採用

する基準等がある。これは、図-6に示したWald基準に対応する確率を想定することに等しい。

(2) Θ が完備でない場合

この場合は、図-7に示したように、未来の環境 Θ の設定が不確かで、完全には同定出来ず、一部分のみしか想定出来ない場合に相当する。多くの計画は、このように、未来（不確実であっても）の状態の範囲が全く予想の範囲を超える場合を潜在的に抱え込んでいる場合が多い。このような場合にはこれから発生するリスクに対しては事前に計画問題の中で対応するには、 θ_i の分布として散漫な事前分布を適用し動的な代替案の系列（政策）を選択する方法がある。即ち、「歩きながら対応しよう」という考え方である。この場合、 Θ の完備性の如何に依らず、「事後リスク対応」となるので章を改めて解説する。

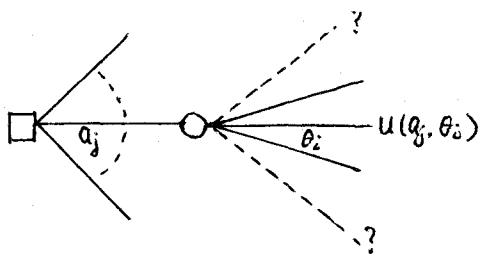


図-7 Θ が完備でない場合

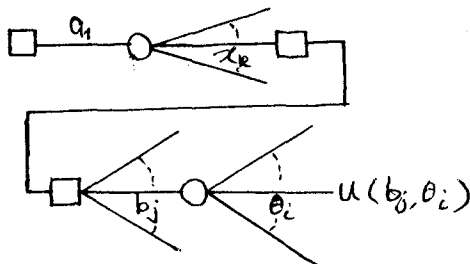


図-8 事後リスクの対応フレーム

4. 事後リスク対応の数学的フレーム

3. で述べたリスク対応は不確実性に直面している、いわば、計画段階の事前の対応に関する数学的フレームであった。しかし、3・3(2)で述べた場合を含めて、実際に計画が実行された事後では、事前に不確実であった要素のある部分が現実姿を現してきたわけであるから、これに、対応することも計画の中で考えられる。この考え方は図-8で示される。図は計画案 a^1 が実行された後、 Θ に関する情報 x_k が得られ、この情報に従って当初の計画 a^1 をリスクが小さくなるように変更しようとする過程を示している。この場合、 θ_i の事前の確率 $p_a(\theta_i)$ を情報 x_k で修正することが出来る。すなわち、 θ_i の下での x_k の条件確率 $f(x_k | \theta_i)$ が既知ならば

$$p(\theta_i | x_k) = \frac{f(x_k | \theta_i) p_a(\theta_i)}{\sum_i f(x_k | \theta_i) p_a(\theta_i)} \quad (5)$$

で先に述べたのと同様のベイズタイプの決定問題に持ち込める。特に $f(x_k | \theta_i)$ が予め解っている場合は、事前・事後分析 (Pre-posterior Analysis) の適用によってダイナミックなリスク対応政策を事前に求めておくことが出来る。これは、信頼性設計施工において観測的施工法 (Observational Proce-

dure) と呼ばれ多くの成果を挙げている⁴⁾。

$f(x_k | \theta_i)$ が既知でない場合も、多くの観測値が得られれば $f(x_k | \theta_i)$ を推定して再びベイズタイプのリスク問題に持ち込むことが可能である。

5. おわりに

紙数の都合で、リスクを暗示的に取り扱う方法の中で、複数のリスクの受け手がある場合のゲーム理論的フレームは解説することが出来なかった。次回の機会にこれも併せて纏めてみたい。

参考文献

- 1) 黒田勝彦；工学におけるリスク対応策の分類，土木計画学研究 No.13, pp.895-902.
- 2) 宮川光一；情報決定理論序説，岩波書店，pp.1-20.
- 3) T.S.Ferguson; Mathematical Statistics - A Decision Theoretic Approach, Academic Press
- 4) 例えば，
K. Kuroda and Y. Kato; Value of Field Measurement in Observational Procedure, Proc. of 6th ICASP, pp.224-231.1991, Mexico.