

規範的な意思決定モデルによる建設のリスクアナリシス

東海大学 正員 湊 隆幸*

By Takayuki Minato

建設におけるリスクアナリシスの主な目的は、リスクと「情報の価値」(value of information) または「管理の価値」(value of control) のトレードオフを定量化することにある。規範的な意思決定モデルは、論理的な意思決定(選択)の手段となるだけでなく、技術者がリスクとこれらの価値のトレードオフによる、「最適な」意思決定を行なうようなインセンティブを分析するのに適用できる。本文は、規範的なモデルによる意思決定の基本的な概念と仮説、および手法についての説明を行ない、この方法が建設におけるリスクアナリシスにおいて持つ有用性を論ずるものである。

【キーワード】 建設, マネジメント, リスクアナリシス, 情報の価値, 管理の価値

1. はじめに

リスク(risk)や意思決定(decision-making)という用語は、最近、新聞などでも最も頻繁に用いられる言葉の一つとなってきた。建設においても、近年の大型化、高度技術化、複雑化、または国際化により、リスクの問題に対する関心が高まっている。建設は、社会の重要な経済活動の一つであるが、その企画・立案から供用に至る建設段階(phased construction)の中で、不確実性を考慮し、限られた資源を効率よく使うための意思決定問題は重要であり、建設マネジメントにおいても重要な研究分野となっている。

意思決定(decision-making)とは、一般的に「個人(または企業)が、自分がとりうる行動の中から最も“好ましい”ものを選択(choice)すること」であると考えることができる。もしも、

問題を取り巻く環境に関する「十分な」情報があれば、意思決定は比較的容易であろう。しかしながら、建設計画のように、結果が得られる前に、しかも問題に関する情報が不確定であるような条件の下での意思決定においては、リスクの相互依存関連(relevance)が結果に及ぼす影響を考慮した上で、「最適な」決定を評価分析する必要がある。

意思決定の手法は、大別して、規範的(normative)、記述的(descriptive)および規定的(prescriptive)な方法に分類できる¹⁾。規範的な方法は、確率と効用の概念を基にしたモデル化(modeling)によって行われ、「理論的にはどのように意思決定すべきか」という理念を取り扱う。つまり、規範的なアプローチは、論理性に基づき、意思決定者の効用を最大にするような選択に対する判断を行なう方法である。一方、

*東海大学海洋学部海洋土木工学科 講師
電話: 0543-34-0411, ファクス: 0543-34-9768
Email: minato@scc.u-tokai.ac.jp

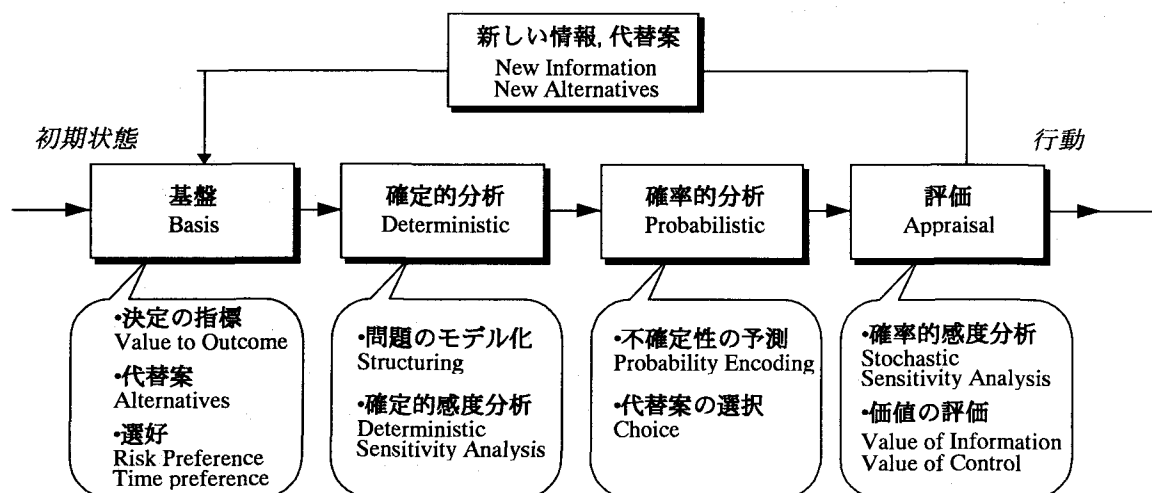


図-1 意思決定のサイクル

記述的な方法は、意思決定における人々の実際の行動に着目し、“通常”人々が「**実際に**どのように意思決定をするか」つまり、現実がどのように機能しているかという事実に基づき決定を行なう方法である。最後に、規定的方法とは、「人々の**意図**や**動機**などを考慮し」実際の意思決定の実用的価値を向上させようとするアプローチである。

リスクアナリシスは、規範的な手法による意思決定の中で、不確実性を評価するための道具である。その目的は、決定における「情報の価値」や「管理の価値」を計算することにより、人々が最も好ましい意思の決定を行えるよう、リスクと情報や管理のコストとのトレードオフに関する定量的な分析を行うことにある。

現在、建設におけるリスクアナリシスの研究は欧米を中心に発達してきている。しかしながら、その中には、実用性や機能のみを強調するあまり、リスクアナリシスで最も重要な概念である、情報の価値や管理の価値の議論や洞察が欠けるものも少なくない。本文を書くにあたって、筆者らは、未踏の分野のリスクアナリシスの手法について論ずる訳ではない。しかしなが

ら、規範的モデルの仮説や原理を明確にし、価値の評価に対する規範的手法の洞察と有用性を論ずることにより、リスクアナリシスの本来の目的を少しでも明確にできればと考える。

以上を念頭に、本文では、企業が利益を最大にするというような、経済性を指標とする意思決定の問題を例にとり、規範的なモデル化によるリスクアナリシスの手法について解説する。以下には、まず、規範的アプローチによる意思決定の手順を簡単に述べる。そして、本文の主題である規範的意思決定モデルの基本的な仮設と「価値」について、理論の概念と視点および計算方法を説明する。

2. 意思決定の流れ

図-1 に示されるように、意思決定の流れは、初期値の整理、確定的分析、確率的分析、および価値の評価の4段階に機能的に分類できる。

初期値の整理では、解決すべき問題の的確な設定を行うとともに、決定の指標、代替案、および意思決定者のリスクや時間に対する選好(preference)を明確にする(選好については、詳しく後述する)。

確定的段階は、全ての潜在的なリスクとその依存関係を構造化することにより始まる。図-2に示されるようなインフレンスダイアグラム(influence diagram)はこのための道具であり、決定変数(意思または代替案)を四角形で、状態変数(リスク、乱数)を円または楕円で、既知の値(公称値)を半四角形で、求める計算値をひし形で表現し、矢印により変数間の依存関係を示すものである。実際の意思決定の問題では、多数の変数がお互いに複雑に関連するが、インフレンスダイアグラムは、変数間の依存関係を機能的に定式化できるだけでなく、グラフィックス的な表現による、コミュニケーションの道具としても非常に有効である。確定的段階では、また、複数のリスクの中から、結果に及ぼす影響が「潜勢的な」ものを選び出し、モデルを簡素化するための、リスクの感度分析(sensitivity analysis)を行う(図-3)。本文は、ツールの議論が主な目的ではないので、インフレンスダイアグラムや感度分析の手法については、例えば、参考文献の2)から6)を参照するとよい。

確率的段階では、意思を決定(選択)するための分析を行なう。規範モデルでは、不確実性を確率の概念を用いて表現し、リスクの発生確率を、専門家の意見や過去の経験などから得られる値により予測する。これをもとに、意思決定は、決定者が持つリスクと時間に対する選好を考慮に入れ、各々の代替案についての期待効用(expected utility)を計算し、その値が最大となるような代替案を選択する。基本的に、意思決定の分析はこの段階が中心となるが、リスクアナリシスの目的からは、さらに情報の価値と管理の価値についての検討が必要となる。

評価段階では、不確定なリスクに関する新しい情報や代替案の評価を行なうために、リスクと情報や管理の価値のトレードオフの評価分析を行なう。もしも、新しい情報や別の代替案が、現在の決定の価値を高めるような場合、意思決定は、そのコストなどを考慮に入れた上で、再評価されることになる。

上記のように、意思決定は4つの段階から構成され、最終的に最も好ましい決定が得られるまで、繰り返し分析が行われる。次の章では、

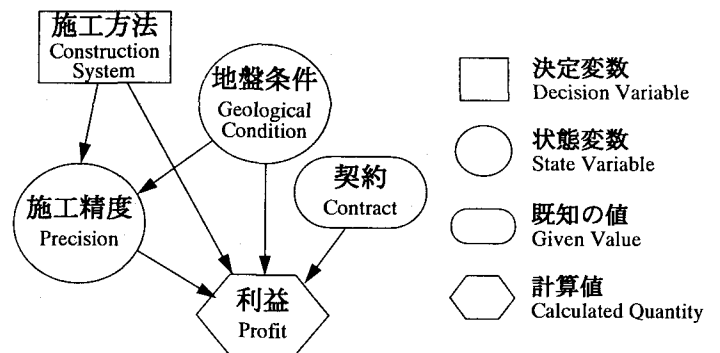


図-2 インフレンスダイアグラムの例

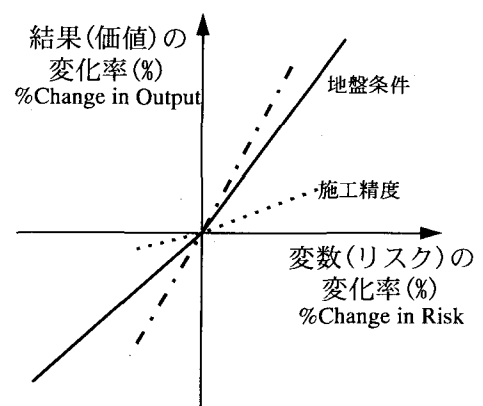


図-3 感度分析

この意思決定サイクルの分析における論理について説明する。

3. 規範的な意思決定モデルの仮説

規範的な意思決定モデルでは、人々の選択の問題を科学的視点から判断する。科学的視点とは、理論の定式化、つまりモデル化とデータの検討の両方を考慮した論理的な考察のことである。ここで、理論は幾つかの仮説からなり、したがって、結論はそれらの仮説から導かれたものであるということを認識しておく必要がある。規範的モデルによる意思決定の基本的な仮説は、「人々は、選択の機会において選好をもとにした価値つまり効用を合理的に比較検討し、意思の選択を行なう」という点である。

合理性に関する最も重要な条件は、不確実性の考慮である。この問題を考えるために、図-4

で示される決定樹(decision tree)を見てみる(図中の丸上に示された数字は、状態変数すなわちリスクによる不確定性を考慮した価値の期待値を、四角の点は決定変数すなわちお互いに排他的な選択肢(意思)の価値のうち最大値のものを表わす)。建設マネジメントというような行動の中で、明示的な価値の一つは金銭(money)である。例えば、ある工事を建設するのに二つの工法AとBがあるとしよう。この例題での意思決定は工法を選択することであり、工法Aを採用した場合、利益の期待額(expected monetary value)は、地盤条件により、その予測される状態(この時点では、この情報は確実ではない)の発生確率とそれぞれの場合の利益の期待値とを用いて、 $\text{¥}120(=80 \times 0.3 + 120 \times 0.3 + 150 \times 0.4)$ 、単位：百万円とする)と計算できる。一方、工法Bを用いた場合、地盤条件には関係なく $\text{¥}110$ の利益が期待できると考えられている。これらの計算の結果、単純に利益の期待値のみを比べた場合、一般には、工法Aが好まれることが考えられる。

しかしながら、ここで気付くことは、工法Bを用いた場合の利益は確実であるのに対し、工法Aの利益は不確実であるという点である。このことにより、一般的には、不確実性を全く好まない技術者は工法Bを採用するであろうし、逆に、不確実性を「気にしない」技術者は、工法Aを採用するであろうということが仮定できる。つまり、意思決定の問題が期待値だけでは満足に説明できないことから、リスクに対する選好(risk preference)を選択の指標に加味することが必要となると考えられるのである。このことより、合理的な意思決定を行なうためには、意思決定者がリスク回避的(risk averse)なのか、リスク中立的(risk neutral)なのか、それともリスク愛好的(risk preferring)なのかを考慮し、効用の計算にその度合いを数量的に反映させることが必要となる。

リスク選好の問題は、確実同値額(certainty monetary equivalent)と呼ばれる概念を用いるとうまく説明できる。いま、図-4の例題で、工法Aを選択する場合、それは一種の賭け

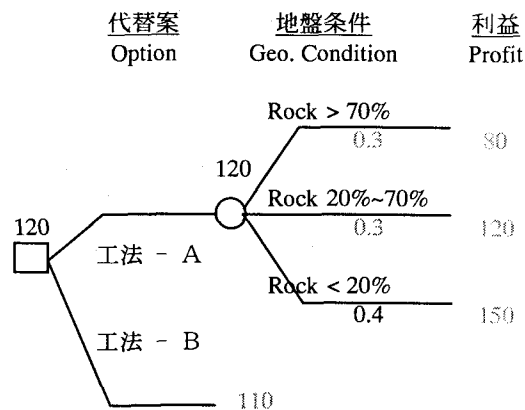


図-4 決定樹による意思決定

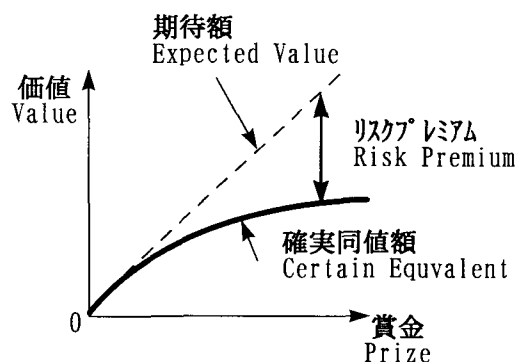


図-5 リスク・プレミアムの概念

(lottery)であると考えられる。例えば、この賭けを誰かが $\text{¥}100$ で買うと申し出たとしよう。もしも、この工事の持主が $\text{¥}100$ でこの工事を他人に売り渡すことと、自分でこの賭けすなわち工事を行なうことが「同値」であると考える場合、 $\text{¥}100$ はこの賭けに対する確実同値額であるという。つまり、確実同値額とは、不確実な結果をリスクのない場合に換算したときの価値であると定義できる。一般には、確実同値額を個別に矛盾なく求めることは困難であるため、実用的には、各人の効用を、図-5に示すような人のリスク回避特性に基づく、一次元の実数に変換した効用関数(utility function)により定義しておくとする。 (リスク回避の特性を考慮した効用関数の形状に関する議論は、例えば、文献8)を参照。)

いま、工法Aを採用する場合の利益の期待額

¥120 と確率同値額¥100 の差を計算すると、それは、技術者が考える工法Aに対するリスクのプレミアム、すなわち、彼がリスクを避けるために「あきらめる」金額のことである。したがって、リスクプレミアムが正であれば、その人はリスク回避的であり、逆に、負であればリスク愛好的であると言える。

$$\text{リスクプレミアム} = \text{期待値} - \text{確実同値額} \quad (2-1)$$

以上のことから、不確実な下での意思決定は、各々の選択肢の確実同値額(効用)を求め、式(2-2)と(2-3)による方法で、確実同値額の期待値が最大となるような選択を行なうことになる。

$$\text{モデル: } \max_i \bar{u}(d_i) \quad (2-2)$$

$$\bar{u}(d_i) = \sum_{j=1}^n u(d_i, \theta_j) p(\theta_j) \quad (2-3)$$

ここに、 $\bar{u}(d_i)$ は選択肢を d_i に対する期待効用、 θ_j は意思 d_i の結果の「場合分け」である。上式による定式化は、フォンノイマン-モルゲンシュテルン(von Neumann-Morgenstern)による期待効用仮説と呼ばれ、本章の最初に述べたように、規範的モデルによる意思決定の最も基本となる仮定である。

効用の大小により選択を行なう場合、AかBを選択するためには、 $A > B$ (ここで、記号“ $>$ ”は、「好ましい」という意味を表わす) というような順序づけができることが必要となる。さらに重要なのは、その順序付けに関して、合理性が保たれている必要があるという点である。例えば、 $A > B$, $B > C$ ならば $A > C$ であるということが必要である。このような効用の選好順序に関する公理は、期待効用仮説に基づく場合の重要な条件であるが、その議論は、他の文献⁶⁾⁷⁾にも詳しく説明されているのでここでは省略する。

合理的な意思決定を行なうためには、リスクへの選好に加えて、時間への選好(time preference)を考慮する必要がある。金銭は時間によって価値が変化するが、時間を考慮に入れた意思決定では、各々の選択肢が持つ正味現在価値(net present value, NPV)を式(2-4)によって計算し、それを確実同値額(効用)に換算し、

式(2-2)と(2-3)で示された期待効用の原理によって選択を行なうことになる。

$$NPV = I_0 + \sum_{t=1}^T \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (2-4)$$

ここに、 I_0 は初期投資額、 C_t は時間 t におけるキャッシュフロー、 r は割引率(discounted rate)である。

本章におけるこれまでの議論は、理論的なものであり、しかも期待効用の原理は、あくまでも意思決定に関する一つの仮説的な手法でしかない。したがって、筆者は、規範的な意思決定モデルを用いた場合、全ての行動がこの原理に基づいて行われるべきであるというような主張を行うつもりはない。しかしながら、ここに述べた規範的な手法およびその仮説は、少なからず弱点があるにもかかわらず、実際の現象に対する体系的な考察を行なうための優れた道具であることは間違いない。更に、最も重要なことは、この理論的なモデル化が、単に不確実性の下での選択の論理の問題に止まらず、人々のリスク回避的な行動についての洞察を基に、次章に示すような「情報の価値」や「管理の価値」というようなリスクアナリシスの問題へ適用されている点にある⁹⁾。

更に考慮すべきことは、意思決定における人々の「錯誤」(biases)の問題である。現実には、人々の意思は過去の経験やデータから得られる知識により、問題に対する「...であろう」というような「信じ込み」(belief)を基に決定されることが少なくない。しかしながら、Kahneman や Tversky らによる心理学からの研究¹⁰⁾にも指摘されているように、人々は、不確実性の問題を取り扱うのに、様々な錯誤を起こしがちである。例えば、人々の予測は、「過去のデータや経験の利用の容易さ」(availability)に依存しがちである。建設においては、新しい工事が計画される場合、最近行われた類似の工事が特に参考にされ、過去の貴重な経験が見落とされがちになるような場合などがこの例である。また、人々は決定を行うのに、「ある結果にたどり着くように分析の初期条件を調整してしまう

傾向がある」(adjustment and anchoring). さらに、「自分の経験や知識に関する自信過剰」(overconfidence)や「過去の事実に対する認識錯誤」(hindsight)の問題など、一般の人々が持つこれらの認知(cognition)の問題は、意思決定において、特に配慮すべきことのようにある。

確かに、建設技術者の中には、その優れた知見により、優れた意思決定を行うことのできる人々が多数いるのは事実であろう。しかしながら、そのような場合でも、系統的な手法を用いて問題を定式化することは、意思決定プロセスの透明性を高め、決定に関与する人々の意思の疎通(communication)を高める上でも、大いに考慮すべきことである。したがって、本文で論ずるような規範モデルによる、系統的、論理的な手法は、建設における意思決定にも有効であると考えられる。

4. 情報の価値と管理の価値

リスクに対する選好は、不確実性の下での意思決定においては、考慮すべき最も重要な問題である。期待効用仮説では、「一般に、人々はリスクに対して回避的である」という仮定に基づく論理的な選択を明らかにしている。さらに重要なことは、リスク回避の仮定より、「したがって、人々はリスクを小さくするような行動をとるであろう」という別の仮説が立てられることである。

リスクを低減するための一つの方法は、意思決定に潜在的な影響を及ぼすリスクに関する情報を得ることである。例えば、図-2 で示した例のように、地盤条件が建設工法の選択にとって重要な要因であれば、技術者には地盤調査を行なうというインセンティブが生じる。しかしながら、情報は「ただ」ではなく、それを得るためには時間と費用が必要である。それでは、地盤調査をするために、その技術者はどれくらい支払う「べき」ということが、疑問として生じる。このような、意思決定者が情報を得るために払う最大の金額つまり情報の価格は、「情報の価値」とよばれる。情報の価値は、経済学な

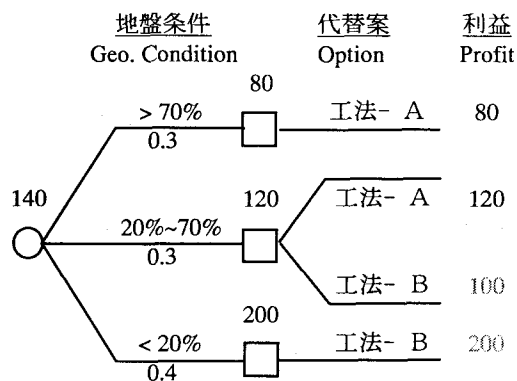


図-6 情報の価値

どの分野でも、「情報の経済学」として過去 20 年位の間盛んに研究されてきた分野であり、フォン・ノイマン-モルゲンシュテルンのモデルは、そこでも重要な働きをしている。

情報の価値の計算を行なうのに、図-2 の例を使う。ここで、同図に示された利益は、确实同値額(効用)を表わすものとする。図-2 では、工法Aを選んだ場合、地盤条件の不確実性とその発生確率を予測し、意思決定の判断が行われている。ここで、例えば地盤調査などにより、岩の含有率に関する情報が得られたと考えてみる。すると、意思決定の構造は、図-6 に示されるように、地盤条件が判った条件の下で工法を選択する、すなわち、「情報が最初に与えられ、その条件の下で意思を決定する」という論法になる。

例えば、図-6 に示されるように考えてみると、その効用の価値は¥140 となる。この計算を、図-2 の結果と比較してみると、地盤情報が得られた条件の下での利益の期待額の方が、¥20(=140-120)だけ大きいので、担当の技術者には、「もしも地盤調査の費用が¥20 以下であれば、調査を行ってみよう」というインセンティブが働くと考えられる。すなわち、図-6 に示されるような地盤の岩の含有率に関する情報が「確かに」得られた場合、¥20 は地盤に関する「完全情報の価値」(expected value of perfect information, EVPI)ということになる。

一般的に、情報により得られる結果が向上で

きると考える場合、人々は情報に価値を見出す時に、「今からは情報の時代である」などとも言われるが、期待効用仮説による規範的な意思決定モデルは、情報の価値に対する論理的な解を与えることにより、我々が「なぜ情報は価値があるのか」という問いに対する理解を深めるのに役立っている。

リスクを低減するための別の方法として、意思決定に潜在的な影響を及ぼすリスクを、「管理してしまう」方法が考えられる。つまり、情報の価値がリスクの不確実性を「知る」ことによる便益であるのに対し、管理の価値は、リスクの不確実性を「変える」ことにより得られる便益と考えることができる。例えば、工法Aに対して、地盤条件に左右されないようなある技術が利用できるでしょう。ここで、その技術を使えば利益の価値は¥145 になると計算できるとすると、「もしもその技術のコストが¥25 以下で利用できれば、技術者にはその技術を採用しよう」とするインセンティブが働くことは容易に想像できる。このような、リスクを管理する場合と管理しない場合の効用の差は「完全管理の価値」(expected value of perfect control, EVPC)と呼ばれる。

建設における管理方法は多種多様であるが、技術力(ソフトとハードの両方)の開発保持はその最も良い例であると考えられる。例えば、ロボット化というような非常に高価なハード技術から、施工中に行なうような V E (Value Engineering) というようなソフト技術にいたるまで、ここに示した意思決定モデルによる管理の価値の概念は、「なぜ、この技術は価値があるのか」という問いに定量的に答えることができる。管理の価値の概念は新しく、その研究は十分ではないが、建設のように、管理技術がリスクマネジメントの要素となるような分野においては、特に重要な概念である。

5. おわりに

人々が何かについて意思決定を行なう時は、必ずインセンティブの問題が関わる。インセン

ティブは、個人から企業のような組織にいたるまで、経済活動の場のあらゆる場面に考慮すべき問題である。これは、ある行動をとった時に、かならずその便益と費用についてのトレードオフが興味となるからである。例えば、不確実な状況の下での意思決定は、人々が意識していようといまいと、リスクと価値のトレードオフについてのインセンティブの問題を扱っているものであり、意思決定におけるリスクアナリシスは、「インセンティブを定量化すること、すなわち情報の価値や管理の価値を求めることである」ということに他ならない。

本文は、建設のリスクアナリシスについて、主に経済的な側面からの手法として、規範的な意思決定モデルを論じた。本文での主題は、リスクアナリシスの本来の目的が、人々が行動を選択するためのリスクと価値のトレードオフに関する定量化にあることを述べ、期待効用理論＝規範的モデルが、そのための重要な理論的な基礎となっていることを論じた。

この方法は、もちろん、建設におけるリスクアナリシスの唯一のアプローチ方法ではないことは明らかである。例えば、安全管理のように、ヒューマンファクターが要因となるような問題に対しては、認知科学(cognitive science)のような記述的なアプローチも必要であろうし、マーケティングのような「対人的な戦略的問題」に対しては、ゲーム理論のような規定的な手法も有効であろう。

しかし、いずれにしても、仮説とモデル化によるアプローチは、現実の問題に対する理解と洞察を得、論理性と透明性に基づいた議論を行なう上で有効な方法である。さらに、公共建設事業の透明性や国際化への対応などの社会ニーズを考えた場合、意思決定についての論理的な「説明を行う責任」(Accountability)のための技術や分析力は、国内だけでなく文化や考え方の違う外国の人々との議論においても、これからの土木技術者にとって有用であると考えられる。我が国の建設におけるリスクアナリシスの研究は非常に初期の段階にあり、日本の建設業を取り巻く環境を考えた場合、その積極的開発

が待たれるところであるが、本文が、リスクアナリシスに興味を持つ技術者や学生諸氏に少しでも役立つことを願うところである。

参考文献

- 1) Bell, E., Raiffa, H., and Tversky, A., eds. : *Decision Making: Descriptive, Normative, and Prescriptive Interactions*, Cambridge University Press, New York, 1988.
- 2) McNamee, P. and Celona, J. : *Decision Analysis with Supertree*, The Scientific Press, South San Francisco, U. S. A. , 1990.
- 3) Ashley, D. B. and Avot, I. : Influence Diagramming for Analysis of Project Risks, *Project Management Journal*, pp. 56-62, March, 1984.
- 4) Shachter, R. D. : Probabilistic Inference and Influence Diagram, *Operations Research*, Vol. 36, pp. 589-604, 1988.
- 5) Olmsted, S.M. : On representing and Solving Decision Problems, *Ph. D. Dissertation*, Department of Engineering-Economics Systems, Stanford University, 1984.
- 6) Howard, R. A. , eds. : *Readings on The Principles and Applications of Decision Analysis*, vol. I & II, Strategic Decision Group, Menlo Park, U. S. A. , 1983.
- 7) 松原 望 : 意思決定の基礎, 朝倉書店, pp. 77-81, 1985.
- 8) Arrow, K. L. : *Aspect of The Theory of Risk-Bearing*, The Academic Book Store, Helsinki, Finland, 1965.
- 9) Matheson, J. E. : Using Influence Diagrams to Value Information and Control, *Influence Diagrams, Belief Nets and Decision Analysis*, R.M. Oliver and J. Q. Smith, eds., John Wiley & Sons Ltd., New York, 1990.
- 10) Kahneman, D., Slovic, P., and Tversky, eds. : *Judgment under Uncertainty: Heuristics and Biases*, Cambridge University Press, New York, 1982.

A Tutorial in Project Risk Analysis by Normative Decision-Modeling

Takayuki MINATO

The major objective of project risk analysis is the evaluation of the *value of information* and *value of control*, which may give engineers incentives for seeking "best" decision under uncertainty. Normative theory of decision-making provides not only a rational framework for choosing among alternatives, but insights in evaluating the trade-off between risks and values. This paper serves as a tutorial introduction to the important concepts, fundamental assumptions, and modeling methodologies of normative decision theory. The objective of this paper is to discuss the potential and usefulness of normative decision-modeling approach for construction.