土木学会論文報告集
第313号・1981年9月
【論　文】

評価項目の重みの未知の場合の代替案総合評価法

A METHOD OF SYNTHETIC EVALUATION FOR ALTERNATIVES WITH UNKNOWN WEIGHT IN EVALUATION ITEMS

長尾義三*・浅岡顕**・若井郁次郎***
By Yoshimi NAGAO, Akira ASAOKA and Ikujiro WAKAI

1. はじめに

純便益最大，環境制約を考慮に入れた費用最小化問題というような単一目的評価問題としてでなく，港湾・道路等の土木施設計画を総合評価問題として認識することが要請されている．実際，土木施設計画は，自然・社会・経済および環境への影響が大きく，また相互に関連し合っている．一般には，影響範囲を限定して，評価要因を探索列挙し，さらに，属性，すなわち評価項目，評価指標を選択する．そして，計測された指標の値，すなわち指標値と，外生的に与えられた基準値と対照させたり，あるいは，評点，貨幣値もしくは効用値等評価値に変換して，さらに計画を総合的に評価する．この作業過程では，項目の列挙もれ，指標値の計測誤差，評価基準の個人差等の要因に基づく不確実性が混入する．この不確実性の処理としては，評価指標値の計測精度を高め，また総合評価への影響の多い評価項目の列挙もれがないこと，評価項目間の独立性が保持される等を確かめ，信頼性を高める一方，不確実性に対する感度分析を行ったり，弾力性をもった計画代替案を作る等の方法がとられている．

本研究では，計画主体によって実行可能な有限個の代替案が用意され，これが有限個の評価項目によって複数の評価者によって総合評価されるとした場合の問題を扱う．評価項目の列挙，各評価項目の評価値が，各代替案に対して与件として与えられていても，この評価値を元にして得られた各代替案の総合評価値が，評価者によって異なることがある．これは，各評価者が提示された代替案について，評価項目の重みをそれぞれの立場から異なって付与するためと考える．このとき，計画主体は総合評価値の大きい代替案を提案したく思うが，評価者のいずれかは自分にとって好ましくない代替案を否定しようとして総合評価値を小さくしようと行動する．

本研究では，この点に着目して，評価者を全体（これを評価主体という）として考えたとき，代替案の出され方で評価項目の重みが評価主体の内部でゆれ動くものと仮定し，これを計画主体と評価主体との間の零和2人ゲーム問題と認識した．なお，効用値等の評価値の求め方については，今後の課題とすべき点もあるが，**2**. で述べるように効用理論等により評価指標値からこの評価値を求めることが開発されている[10]．したがって，本研究では深く入らない．

この場合，評価値は評価者によって変わらないとしている．これは，ある評価項目に関心をもつ，あるいは専門的知識を有する評価者によって評価値が付与されたとき，これが評価主体のつけた値であり，これを計画主体の評価値とする暗黙の仮定をおいていることになる．これは，学校教育の場において各教官が行う科目の評価が当該校の評価になることと同じ考え方である．

2. 土木施設計画の問題点の認識

1. で述べたような研究の始められた動機は，著者らがわが国での土木施設計画が，基本計画段階で次のような状態におかれていることが多いと認識したことから生じた．これは本研究で提案する方法論の前提条件の根拠ともなる．

1）費用最小というような単一目的指向型の計画法では，一般の人々には受け入れられがたい．

2）いくつかの連続的な計画変数を操作して，多目的問題を最適化しようとするモデル同定は，現実的でない仮定を導入しない限り困難である．したがって，実行可能ないくつかの代替案を用意して，その中で，よりよい

* 正会員　工博　京都大学教授　工学部交通土木工学科
** 正会員　工博　名古屋大学助教授　工学部土木・地盤工学科
*** 正会員　工修　京都大学助手　工学部交通土木工学科

ものを選択する問題として取り扱うことが実際的であることが多い．

3) 計画主体は，複数の評価者の存在を意識して，複数の目的によって構成される公共の福祉の増大を意図する．しかし，一般に，普遍的な公共福祉関数を明示することは困難である[5),6)]．目的はそれぞれ評価する項目をもっている．これを列挙し，この項目をもつことについて各評価者間，少なくとも専門家の間で合意を得ることは可能な場合が多い．異なった評価者の関心の深い項目の指標について各代替案間の優劣を評価するため，指標値を求めることも可能である．これは，比例尺度，間隔尺度のほか，序数尺度で与えられる．若干の不確実性は混入する．

4) 3) の指標値に対して，なんらかの基準で共通に評価するため，貨幣尺度のほか効用値，評点などの無次元評価値をもとめることができる[10)]．一般に各評価者間ではこの評価値は異なる．しかし，同一評価者グループではその評価値の変動はかなり小さいという仮定は許される．

5) 各代替案は，各評価者によって選好される．しかし，どの評価項目にどのような重み付けがなされて，どのような選好がなされたかは計画主体には事前にわからない．よしんば，別の事例または意識調査などによって推測し得たとしても，代替案の提示の仕方によって，考えられないような重みづけがなされていると考えられることがある．

6) 重み付けは，固定したものでなく，その代替案のもつ，評価値の大きさ，不確実性によっても変動する．

7) すべての代替案を提示し，各評価者ごとに選好順序を聞くことも実際にはできないことが多い．これは，すべての代替案を示すことによって地価の高騰，生活不安などが予想されるからと思われる．また過去の類似の経験も，現在および当該計画の選好順序を決めるのにどれだけ役立つかはわからないことが多い．

3. 従来の研究

土木計画における総合評価に関する研究は，最近各方面で行われるようになっている[1)]．その結果，有用な多くの計画情報を提供している．しかし，**2.** で述べた著者らの問題点の認識 1)～7) までを含む計画についてみるならば，問題がないとはいえない．

従来から広く行われている費用便益分析法[2)]は，評価を貨幣尺度で行うということで，本研究で問題にした重み付けを潜在せしめている点で優れている．しかし，精確な Shadow Price の計測は容易でなく，また公共土木施設では市場価値は存在しない．貨幣尺度で計測できない景観のような評価項目の取り扱いが困難である．貨幣尺度を唯一の評価基準としているため，評価者ごとの無差別評価曲線の最も大きいものと，結論が一致するものではない．とはいえ，もっとも，理論背景をもつもので，計画主体の1つの情報としては，価値あるものであるが，評価者がこの方法ですべての場合合意をするとは考えられない．

Maass, Marglin らによって開発された多目的計画法[3,4)]は，専門家・意識調査等から評価者ごとの無差別評価曲線が得られるとして，これを外生的に与えているが，これに対しては，Arrow はこのような評価曲線を客観的に存在するものと前提しない方がよいと述べている[5)]．

貨幣尺度でなく，効用概念を導入した von Neumann や Morgenstern に始まる効用理論の実用化が Schlaifer, Fishburn, Keeney[7)~10)]らによって進められた．本研究でも，指標値を無次元の共通の評価値に転換する手法としてこの方法を用いることを肯定している．しかし，総合評価値を得るために用いられている重みづけを外生的に挿入することは客観性を欠く．Keeney[10)]，また Pearman[11)]の場合，評価項目の重要さの順序だけを与件としているが，元来この順序も，指標値の大きさ，すなわち，代替案の提示の仕方でも変わってしまうという著者らの認識 **2.** 5)～7) の条件を満たしていない．

しかし，一般に行われている重み法，すなわち，意識調査[12)]，評価者の代表，あるいは専門家によって重みの大きさまで外生的に与えようとする試みよりはより進歩しているといえる．この重み法は著者らの認識 **2.** 5)～7) を満たさない．

また，**2.** 6) の著者らの認識に応じてくれたものはいわゆる重み関数法[13),14)]であるが，関数形自体外生的に与えねばならない．恣意的になる恐れがある．

2. 1)，2) の著者らの認識から，従来多くの数理計画法，あるいは，Belenson と Kapur らの提唱する多目的線形計画法[15)]は，たとえ非線形のものが開発されて，有用な情報を与えても，適用する場合，その仮定について慎重に吟味を要することが多い．また，あらかじめ目標水準を設定する伏見・山口らの目標計画法[16)]や Goal Achievement Matrix 法[17)]とも問題認識が違ったものになる．目標水準設定自体かなり困難なことである．

貨幣尺度，効用値に変換せず，指標値そのまま，または正規化のような方法で統一尺度に直して，評価しようとする方法に，Factor Profile 法[18)]，Concordance Analysis 法[19)]がある．これは評価値の不確実性を取り除くことには，優れた方法であるが，重みはいずれも先見的に定めておかねばならない．Permutation 法[20)]も重みの順序があらかじめ既知ということが前提となっている．

以上述べたように，この種の問題に関する研究の大部分は，評価項目の重みが客観的に先決されるという前提に立っていることであって，実際には，2. 5)～7) で述べた著者らの認識に立って考える必要もある．重みの予知が可能なのは固定した重みが存在し，計画主体が論理的に証明できるか，数多くの客観的なデータが集積されており，多変量解析等[21),22)]によってある信頼限界のもとで推定，もしくは予測し得る場合に限られると考える．したがって，重みは先決できるという前提をおく前に，この重みがわからない場合についての研究を行って従来の研究を発展させることが当面必要となってくる．

4. LFW 法の考え方と手順

(1) 基本的な考え方

本方法論の前提を 2. の問題意識から明示すれば，次のとおりである．

1) 計画主体によって実施可能な離散型の代替案が有限個列挙されている (2. 1)，2))．この中から計画主体は代替案を選択する[11)~20)]．

2) 計画主体は，この計画を評価する異なった価値観をもつ複数の評価者の存在を意識する (2. 3))．

3) 個々の評価者は，代替案を評価するため評価項目をもち，代替案の提示によって評価値を行列表示で与えることができる．これは，評価項目のもつ評価指標ならびにこれを数量的に表わした評価指標値から求めた効用値・評点のように無次元値であるとする[7)~10)] (2. 3))．

4) この評価値の同一の数値は，同一の価値をもち，計画主体の効用値，評点とする[7)~10)]．

5) 3) で求めた評価値は，評価者全体すなわち評価主体の評価値とする (2. 4))．

6) 1) と 3) からゲーム理論でいう計画主体の効用表「ペイオフ・マトリックス」を構成することができる．

7) 評価値の加法は許される[7)~10)]．各代替案は，各評価項目に付与された重みづき評価値の総和，すなわち総合評価値で評価されるものとする．

8) 計画主体はその存在を意識した評価主体がどのように評価項目の重みづけをするか，また評価主体も計画主体がどのような代替案を出すかわからない (2. 7))．

9) 1つの代替案が出されると，これを否定しようとする評価者がいる．評価者は，この否定の行動を評価項目の重みづけで示す．重みは，総和 1 の確率値である (2. 6))．

10) 計画主体は，総合評価値の大きい代替案を提出しようとする．評価主体の中に，この代替案を否定してしまうとする評価者がいるので，総合評価値を小さくするよう重みづけをする (2. 5))．

11) 各代替案を示さなくとも，ある評価項目とある評価項目の評価値を示せば，評価値についての順序関係については合意が得られることがある．たとえば，大気汚染の NO_x の効用値 0.2 と建設費という評価項目の効用値 0.8 と比較したとき，どちらが問題かという選好順序は，誰もが前者を選好することが多いと考える．

4) の前提は，計画主体が評価者の立場を容認したとき認められる．実際には，その評価者の代表とみられる人，評価者の関心の深い評価項目についての専門家によってつけられた評価値を計画主体の評価値とする方法がとられるとする[7),10),31)]．また同じ評価値ということは，環境項目の効用値 0.8 と経済項目の効用値 0.8 とは重みが同じならば，同価値であるという前提である．

7) の前提は，一般の代替案総合評価法によくみられる方法であるが[7),10),31)]，評価項目の独立性と 4) の前提とが成立していなければならない．

以上の前提は，2. の認識が容認される場合，成立し得ると考える．

ここで計画主体は，前提 10) の行動原理に基づいて代替案を提案しようとする．しかし，どのような案に対しても前提 9) から，これを好ましくないという評価者がいることを想定する．評価者の行動は前提 10) に基づいてその代替案のもつ最も悪い評価値に着目して，その評価項目に大きな重みづけをするであろうと考える．この重みづけは，計画主体からみれば「予想もしない最悪の重みづけ (Least Favourable Weight Criterion——以下 LFW という) のもとで，総合評価がなされた」と観ずることになる．これを LFW 基準でなされたと定義する．また，これは最悪重みベクトルが付与されたことを意味する．したがって，計画主体としては評価者によって LFW 基準で行われても，総合評価値を最大にするような代替案を選ぼうとする．これは計画主体が評価主体とゲームを行ったとき，マキシミン基準に沿ったことになる．

一方，計画主体は，評価主体が付与する評価項目の重みがわかっていれば，総合評価値の最も大きくなるような代替案を示せばよいことになる．このとき，評価主体は，この案が好ましくない評価者の存在を意識して，これを否定するためにその代替案の最も低い評価値をもつ評価項目に関心を払い，前提の 9) に基づいてその評価項目に重みを配分するのが合理的な行動といえる．すなわち評価主体はミニマックス基準によって重みづけようとする．

ところが，前提の 8) より両者とも事前に相手がどんな代替案を提示するか，どの評価項目に関心を払っているかはわからない．このため両者の行動は，計画の効用

行列（評価者にとっては非効用行列）を前提の 4）から計画主体のペイオフ・マトリックスとする零和２人ゲームに従うと考えることができる．

評価者は，計画主体に総合評価値を支払うのでなく，これ以上の値をもつ計画を計画主体に与えなかった．すなわち，反対の最善を尽した．計画主体は，これ以下の総合評価値をもつ代替案を選ばなくて済んだという意味に解することができる．

得られたゲームの値は，LFW 基準によって選択された代替案の集合の総合評価値と同じであるとした．

実際には，代替案のすべてがいつも以上のように評価者に LFW 基準が用いられることはないであろう．しかし，よい代替案のもつよい評価項目に重みがつけられるより，前提の 2）と 9）からこれは当然として無視され，悪い評価項目にのみ関心が払われることの方が多いと考えたのである．計画主体がゲーム理論を導入するのも以上の経緯からであって，また，ミニマックス決定原理を用いるのは，厳しい評価者の存在を意識して計画の実行性をむしろ高めようとしたもので，楽観的なマクシマクシ決定原理を用うべき根拠は何もないことによる．

評価者がどのような重みづけをするかまったくわからないということは，実際的でなく，心情的に経済性より安全性をより重視するとか，評価者のわかっている２項目間の重みの順序づけぐらいは，合意が得られる場合があるかもしれない．このようなことは，評価者に課せられた行動の制約という形式で，取り扱うことにする．

次に，複数の代替案が事前に与えられている前提は，どの代替案が選ばれようと，計画主体にとって実行可能であるということである．したがって，環境基準はもちろん，工費・工期的にも，技術的にもチェックされている．したがって，選択される代替案集合の総合評価値は，計画主体の計画技術レベルの評価値ともいえるかもしれない．著者らは，対象となるペイオフ・マトリックスのもつゲームの値にこのような解釈を与えている．一般にミニマックス決定法則は混合方略（確率化方略）になる．各評価項目に対する重みはこれであってもよいが，代替案の決定法則としては，いずれか１つを選ばねばならない計画主体としては都合が悪い．そのための手順もあわせて考察する．

（2） LFW 法の手順

1） 計画対象についてすべての代替案を用意する．

2） 代替案群に対して，評価を異にすると思われる評価者のグループ分けをする．

3） グループごとに意識している評価要因，評価項目を見出す．この手法にはブレーン・ストーミング[23]，デルファイ法[24]，KJ 法[25]，DEMATEL[26]，ISM[27] 等の手法がある．

4） 評価項目を大，中，小のレベルに区分する．

当該の土木施設計画に関係すると考えられる大評価項目（大レベル）を選び出し，これを出発点として大評価項目に関連する中，小評価項目（中，小レベル）へと階層的に分解して評価項目の関連樹木を作成する[28]．

このように評価項目の関連樹木をつくり，評価指標を選択する．次に，評価指標に適切な尺度を設定する．これは基数尺度でも序数尺度でもよい．これらの尺度を用いて各代替案がもつ評価項目の指標値を専門家が計測する．このとき，環境基準等所定の基準に達しない代替案は捨て去る．

5） 各代替案に関係なく，4）の指標値から，前提条件 4）によって同等の価値を有する評価値（たとえば効用値）を求める[7)~10)]．評価値の求め方については本論では特に言及しない．

6） 5）の作業の結果から，評価値マトリックスを得る．すべての代替案について同じ評価値をもつ評価項目は検討の上削除する．評価グループごとに，評価項目数を減少しておくと，計算がしやすくなるためである．

7） 代替案群の Factor Profile などの作業で劣解の代替案を捨て去る．

8） 評価値マトリックスをペイオフ・マトリックスとするゲームに対してミニマックス解を求める．評価項目にかけられる重みの大きさの順序関係がわかっているときには，このような制約を満足するミニマックス解を求める．

9） 8）で求めた解は，代替案選択についても一般に２つ以上の代替案の混合方略として求められる．LFW 法でゲームの解を求めるのは，評価主体が多くの評価者の存在を意識して多くの代替案群の中から最悪の状態を想定して，少数の代替案に絞って，その中から選択しようとするためである．その場合，以上のように LFW 法によって求められる確率化代替案は，その計画主体の心のゆらぎを反映したものと考えられる．しかし，１つの案に絞るとすれば，どうすればよいかが次の問題となる．そこで，以下に述べる ① から ③ の方法を提案する．

① 求められた混合方略通りのくじを作って代替案を決定する．

② ゲームの値を下げて次善解としての純粋方略を求めて，混合方略の解と比較検討して決める．

純粋方略によって求める ② の方法は，LFW 法によって求めた代替案群の解と一致しないこともある．また，総合評価値としては低いことになる．しかし，計画主体が１つの代替案を指定するという意味で新たな１つの情報を計画主体に与えたことになる．したがって，この次善解は，LFW 法によって求めた代替案と比較して

意思決定をするという意味で有用であると考えられる．

③ ① のくじを作ることは行わないで，前提条件の 11) に基づき混合方略として得られた代替案の比較を行う．すなわち，それぞれの評価項目の最も小さい評価値を選択して，その値をもつ評価項目間でどちらが問題であるかを選好する．選好された評価項目について評価値の大きい代替案を選ぶ．

多くの評価者の存在を意識したとき，最適唯一解を求めることはきわめて難しい問題であり，いろいろなことを考慮して，最終的には，計画主体の判断に委ねられる．その場合，LFW 法ならびに次善解は，その判断に際して有益な情報を与える．次善解のみ最初から求めては，よりよい代替案を見失うことになる．

10) 9) で得られた結果が計画主体によって満足できなければ，9) の結果を比較して調整を図る．この方法は例題の後の考察で述べる．

(3) LFW 法の定式化[7)]

最初に必要な記号を定義しておく．

θ_j：評価項目，$j=1, 2, \cdots, m$.

Θ：評価項目集合，$\Theta=\{\theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_m\}$.

a_i：代替案 i, $i=1, 2, \cdots, n$.

A：代替案集合，$A=\{a_1, a_2, \cdots, a_n\}$.

u_{ij}：代替案 i が評価項目 j に対してもつ評価値．ただし，

$$0 \leq u_{ij} \leq 1.$$

この論文では，効用値で表わされていると考える．すなわち，u_{ij} はゲームの理論でいうペイオフ・マトリックスの ij 要素を構成する．

また，代替案 i と i' とがあるとき，代替案 i の方が代替案 i' より選好されるとは，次の条件を満たすことである．

$$u_{ik}=u_{i'k}, \ {}^{\forall}k=1, 2, \cdots, m.$$

ただし $k \neq j$.

$$u_{ij} > u_{i'j}, \ {}^{\exists}j=1, 2, \cdots, m.$$

$\boldsymbol{\tau}$：評価項目の重みベクトル，

$$\boldsymbol{\tau}=(\tau_1, \tau_2, \cdots, \tau_m),$$

$$0 \leq \tau_j \leq 1, \ \sum_{j=1}^{m} \tau_j=1.$$

$\boldsymbol{\tau}$ のうち，実行可能なものの全体の集合を T とする．すなわち，評価主体側の重みづけに関して制約のない場合には，

$$T=\{\boldsymbol{\tau}=(\tau_1, \tau_2, \cdots, \tau_m) \mid \sum_{j=1}^{m} \tau_j=1, \ 0 \leq \tau_j \leq 1, \ {}^{\forall}j=1, 2, \cdots, m\}.$$

である．

一方，評価主体側の重みづけに関して，

$$\tau_j-\tau_{j+1} \geq 0, \ {}^{\forall}j=1, 2, \cdots, m-1,$$

なる制約がある場合には，

$$T=\{\boldsymbol{\tau}=(\tau_1, \tau_2, \cdots, \tau_m) \mid \sum_{j=1}^{m} \tau_j=1, \ 0 \leq \tau_j \leq 1, \ {}^{\forall}j=1, 2, \cdots, m, \ \tau_j-\tau_{j+1} \geq 0, \ {}^{\forall}j=1, 2, \cdots, m-1\},$$

である．

$\boldsymbol{\delta}$：代替案の決定法則，A 上での重みベクトル．

$$\boldsymbol{\delta}=(\delta_1, \delta_2, \cdots, \delta_n)$$

$$0 \leq \delta_i \leq 1, \ \sum_{i=1}^{n} \delta_i=1.$$

そして $\boldsymbol{\delta}$ 全体の集合を Δ とする．

$$EU(\boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\delta}) : EU(\boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\delta})=\sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n} u_{ij}\delta_i\tau_j.$$

以上の記号の定義のもとで，次のミニマックス定理でいう最悪重みベクトル $\underline{\boldsymbol{\tau}}$ と A 上での決定法則 $\bar{\boldsymbol{\delta}}$ とを求める．

［ミニマックス定理］[7)]

$$V=\min_{\boldsymbol{\tau}\in T}\max_{\boldsymbol{\delta}\in\Delta} EU(\boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\delta})=\max_{\boldsymbol{\delta}\in\Delta}\min_{\boldsymbol{\tau}\in T} EU(\boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\delta}) \quad \cdots\cdots(1)$$

が成立し，

$$V=EU(\underline{\boldsymbol{\tau}}, \bar{\boldsymbol{\delta}})=\min_{\boldsymbol{\tau}\in T} EU(\boldsymbol{\tau}, \bar{\boldsymbol{\delta}})=\max_{\boldsymbol{\delta}\in\Delta} EU(\underline{\boldsymbol{\tau}}, \boldsymbol{\delta}) \quad \cdots\cdots(2)$$

なる $(\underline{\boldsymbol{\tau}}, \bar{\boldsymbol{\delta}})$ が存在する．

このとき $\underline{\boldsymbol{\tau}}$ は計画主体が決定法則 $\bar{\boldsymbol{\delta}}$ を用いたときに，評価の期待値を最小にするという意味で計画主体にとって最悪な重みベクトル (Least Favourable Weight) であり，$\bar{\boldsymbol{\delta}}$ は評価主体が重みベクトル $\underline{\boldsymbol{\tau}}$ を用いたときに，評価の期待値を最大にするという意味で計画主体のマクシミン決定法則である．また，このとき V はゲームの値であり，計画主体にとっては，期待される総合評価の上界を与えている．

なお，$\underline{\boldsymbol{\tau}}$, $\bar{\boldsymbol{\delta}}$ の求め方は，ゲーム理論および線形計画法の教科書に詳しい[29),30)]．

評価主体側は，各評価項目の相対的重要度を判断して，重要度の高い評価項目から低い評価項目へと順次着目しながら，代替案の評価を行う場合がある．このときは，上記の線形計画問題に，さらに次のような制約条件式を追加すればよい．すなわち，

$$\left.\begin{array}{r}\tau_j-\tau_{j+1} \geq 0, \ {}^{\forall}j=1, 2, \cdots, m-1 \\ \tau_j \geq 0, \ {}^{\forall}j=1, 2, \cdots, m\end{array}\right\} \quad \cdots\cdots(3)$$

このときの $\underline{\boldsymbol{\tau}}, \bar{\boldsymbol{\delta}}$ の求め方は，たとえば参考文献 30) の **3**. の方法に従えばよい．なお，制約条件式 (3) は，前述の T の定義に含まれているが，代替案の総合評価が行われる状況が2通りあることを明確にするために再記する．

(4) 混合方略と次善解としての純粋方略

最後に，以上の計算で得られた代替案の決定法則 $\bar{\boldsymbol{\delta}}$

が純粋方略でない場合の取り扱いを述べる．① の方法は，$\bar{\boldsymbol{\delta}}$ に従って唯一の代替案を選択するには，$\bar{\boldsymbol{\delta}}$ が指定する各代替案の選択確率 $\bar{\delta}_1, \bar{\delta}_2, \cdots, \bar{\delta}_n$ に応じたくじを引くことになる．しかし，ミニマックス解 $\underline{\boldsymbol{\tau}}, \bar{\boldsymbol{\delta}}$ によるゲームの値は，このようなくじによって各代替案を決定する過程の評価値なのであって，たまたまくじによって選択された1個の代替案のミニマックスの意味での評価値ではない．したがって，このようなくじによって選ばれた1個の代替案は，必ずしも，計画主体の出す手を純粋方略に制限したときのミニマックス解ではない場合がある．計画主体の代替案決定法則を純粋方略に限定したときにはミニマックス決定法則が以下の手順で得られることは明白である．すなわち，② の方法としてこのようなミニマックス決定法則を選択される代替案 $a_{\bar{i}}$ で表わすと，

① 評価項目の重みづけに制約のないとき

$$u_{\bar{i}\underline{j}}=\max_i \min_j u_{ij},\ 1 \leq j \leq m,\ 1 \leq i \leq n \quad \cdots\cdots(4)$$

② 評価項目の重みづけに順序関係の制約があるとき

$$v_{\bar{i}\underline{l}}=\max_i \min_l v_{il},\ 1 \leq i,\ l \leq n \quad \cdots\cdots(5)$$

によって代替案 $\bar{i}$ が求められる．ここで，v_{il} は次式によって求められる評価値である．

$$v_{il}=\sum_{j=1}^{m} u_{ij}\tau_{lj}^{*} \quad (i, l=1, 2, \cdots, n)$$

ただし，τ_{lj}^{*} は代替案 a_l の評価項目 j に対する重みである．そして，この τ_{lj}^{*} は各代替案 a_l ごとに次の線形計画問題を解くことにより求められる．すなわち，

$$\text{minimize} \sum_{j=1}^{m} \tau_{lj}u_{lj}$$

subject to

$$\sum_{j=1}^{m} \tau_{lj}=1$$

$$\tau_{lj} \geq 0 \qquad (\forall j=1, 2, \cdots, m)$$

$$\tau_{lj}-\tau_{l,j+1} \geq 0 \quad (\forall j=1, 2, \cdots, m-1)$$

ところで，この問題の解 τ_{lj}^{*} は，各代替案 a_l ごとに求まる最悪の評価を与える重みである．そのために，v_{il} は評価主体が代替案 a_l の評価項目 j に対する事前確率 τ_{lj}^{*} だけに基づいて代替案 a_i につける最小の評価値を表わす．こうして，v_{il} の全体は評価値を表わす正方行列を作る．

以上の式 (4)，(5) は必ずしも解が1個であるとは限らない．複数個ある場合，それらは同等の解を表わしている．次章 **5**. で示される具体例の中で $a_{\bar{i}}$ は次善解とよばれている．次善解 $a_{\bar{i}}$ の評価値は，$u_{\bar{i}\underline{j}}$，もしくは $v_{\bar{i}\underline{l}}$ で与えられる．「次善」という用語がなされているのは，

$$V(\underline{\boldsymbol{\tau}}, \bar{\boldsymbol{\delta}}) \geq u_{\bar{i}\underline{j}} \quad (u_{\bar{i}\underline{j}}=\min_j u_{\bar{i}j}) \quad \cdots\cdots(6)$$

または，

$$V(\underline{\boldsymbol{\tau}}, \bar{\boldsymbol{\delta}}) \geq v_{\bar{i}\underline{l}} \quad (v_{\bar{i}\underline{l}}=\min_l v_{\bar{i}l}) \quad \cdots\cdots(7)$$

である u_{ij}，$v_{\bar{i}\underline{l}}$ の中で $a_{\bar{i}}$ が最大値を指定するからである．

以上の議論は，すべてミニマックス決定原理に即したものであるが，$\bar{\boldsymbol{\delta}}$ が指定する選択の確率がゼロでない代替案は，それが選択される確率の大きさに関係なく，すべてが最悪重みづけベクトル $\underline{\boldsymbol{\tau}}$ にとってのベイズであることに注意しておこう．すなわち，これらの代替案を仮に $a_{i_1}, a_{i_2}, \cdots, a_{i_p}$ の p 個とすると，$1 \leq q \leq p$ のすべての q について，

$$\sum \underline{\tau}_j u_{i_q j} \quad \cdots\cdots(8)$$

の値は同じになる．つまり，a_{i_1} から a_{i_p} まではベイズの意味では $\underline{\boldsymbol{\tau}}$ に関して優劣がない．すなわち，期待効用最大原理からいえば，最悪重みづけベクトル $\underline{\boldsymbol{\tau}}$ さえ与えられれば，$a_{i_1} \sim a_{i_p}$ の中で何を選択しようと $\underline{\boldsymbol{\tau}}$ に関する期待効用値，すなわち総合評価値は同じである．換言すれば，$\underline{\boldsymbol{\tau}}$ のもとでは期待効用最大原理から $a_{i_1} \sim a_{i_p}$ の1個の代替案の選択は計画主体の主観に任されているといってもよいのである．$\bar{\boldsymbol{\delta}}$ が指定する確率くじを作り，それを1回引いて代替案を選択するというのが混合方略の正当な実施の方法である．このほかに以上の決定法則を示して審議会等の第三者の意見を聞くのもよい．また，混合方略の解に基づいて行う手順 9)，③ で述べた方法もその1つである．

5. 適用例と考察

本章では，**4**. で定式化されたゲームの理論による総合評価手法を，水資源計画問題[31]とK港の湾岸道路計画問題に適用し，考察を行う．

(1) 水資源計画問題

この例題は，Keeney の方法と比較するため，文献 31) から引用している．

Danube 川の支川である Tisza 川は，約 130 000 km^2 の流域面積を有し，そのうちの約 30 000 km^2 は，ハンガリーに属する．この Tisza 川流域の水資源開発が計画され，その代替案は以下のように与えられた．

1) 多目的運河貯水池システム：この代替案により，Tisza と Danube 両河川の水資源が利用される．
2) 揚水貯水池システム：この代替案は，Tisza 川の水を利用して Sátros と Bükk 両山脈の丘陵部を開発する．
3) 平地貯水池システム：この代替案は，Tisza 川の水を利用してその流域の平地部を開発する．
4) 山地貯水池システム：この代替案は，ハンガリー

国外の Tisza 川上流域に貯水池建設を行う．

5) 地下水貯水池システム：この代替案は，Tisza 川の河川水と地下水を利用するシステムである．

上記の 1)～5) の代替案の基本的目的は，55 年の期間，空間および時間にわたって水資源の自然供給を行い，総合的流出調節により水量と水質を確保することである．そして，ハンガリーの計画者は，以下の目標を設定した．

1) 需要量に見合う水量・水質の確保：この目標は，空間・時間にわたる水の量的・質的要求を満足することを意味する．

2) 洪水防御：少なくとも 50 年洪水に対する安全性を保障する．

3) 下水と汚水処理：排水・下水設備の充実と水の効果的利用・再利用を図る．

4) 資源利用：代替案の実施と操作に必要な自然的・社会的資源の使用は最小にする．

5) 環境影響：これは，貯水池建設，運河網，そして地下水揚水が環境に及ぼす影響を最小にする．

6) 弾力性：種々の不確実性に対して弾力的であることが望まれる．

以上の計画目的から **Table 1** に示す 12 の属性と評価指標が選ばれ，さらに，各代替案に予測される評価指標値と効用が得られた[31]．ただし，計画主体は，最良の場合には 1，最悪の場合には 0 の値をとる効用関数を，くじの原理に従って事前評価した．

次に，**Table 1** の効用行列に基づいて著者らはミニマックス基準による代替案の総合評価を行った．その結果，重みに制約のない場合を **Table 2** に，重みに制約のある場合を **Table 3～7** にそれぞれ示す．これらについて以下考察を行う．

重みに制約のない場合，$\underline{\tau}$ は θ_4 と θ_7 とに約 0.5 ずつの値を与えている．**Table 1** の効用行列でみると，θ_4 は代替案 a_2～a_5 に最小の効用値を与える属性であり，θ_7 は代替案 a_1 に最小の，代替案 a_2 に 2 番目の最小の効用値を与える属性になっている．$\underline{\tau}$ が「最悪重みづけベクトル」とよばれるゆえんである．ここではミニマックス決定法則は，代替案 a_1 に確率 0.641，代替案 a_4 に確率 0.359 で選ぶ混合方略で与えられている．これを次善な解，すなわち純粋方略で与えられる解として求めると代替案 a_2 が選ばれる．そして，このときの効用値は 0.399 となり，混合方略時の値 0.415 と比較して減少している．前述した手順 9) の ③ の方法を用いると a_1 となる．これは以下の理由で選ばれる．**Table 2** より注目すべき評価項目はエネルギー (θ_4) と森林・土地利用 (θ_7) である．次に **Table 1** から代替案 a_1, a_4 の θ_4, θ_7 に対する評価値を取り出し整理する．この場合，代替案 a_1 では $(u_{14}, u_{17})=(0.610, 0.200)$，代替案 a_4 では $(u_{44}, u_{47})=(0.067, 0.800)$ である．そして，両代替案がもつ小さい評価値を探す．ここでは，0.200 と 0.067 である．続いて，小さい評価値を示している評価項目間の選好を問う．この値をみながら，もし θ_7 よりも θ_4 を選好するならば，前者に重み 0 を，後者に重み 1 を付与することになる．最後に，選好された評価項目の評価値を比較して，評価値の大きい値をもつ代替案を選ぶ．こうして代替案 a_1 が選ばれる．

次に，重みに制約がある場合をみる．**Table 3** では，$\tau(\theta_1) \geq \tau(\theta_2) \geq \cdots \geq \tau(\theta_{12})$ の順に重みの制約を与えている．この場合は，ミニマックス決定法則は純粋方略となり，代替案 a_2 が選ばれる．さらに，重みの順序関係は同一であ

Table 1 Payoff Matrix in Water Resources Planning.

Attribute		Measure	Alternative a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
costs	θ_1	10^9 forints*/year	99.6	85.7	101.1	95.1	101.8
			0.489	0.894	0.435	0.637	0.409
water shortage	θ_2	percent	4	19	50	50	50
			0.960	0.783	0.251	0.251	0.251
water quality	θ_3	subjective	80	60	20	80	40
			0.936	0.815	0.379	0.936	0.638
energy†	θ_4	energy produced / energy used	0.70	0.50	0.01	0.10	0.01
			0.610	0.399	0.006	0.067	0.006
recreation	θ_5	subjective	80	60	40	20	20
			0.672	0.445	0.263	0.117	0.117
flood protection	θ_6	recurrence interval	100	200	67	200	500
			0.307	0.638	0.150	0.638	0.998
land and forest use	θ_7	1 000 ha	90	80	80	60	70
			0.200	0.400	0.400	0.800	0.600
social impact	θ_8	subjective	80	80	60	40	40
			0.914	0.914	0.791	0.615	0.615
environment	θ_9	subjective	80	60	20	60	40
			0.860	0.695	0.270	0.695	0.500
international cooperation	θ_{10}	subjective	80	60	40	20	40
			0.914	0.791	0.615	0.362	0.615
development possibility	θ_{11}	subjective	80	60	40	20	40
			0.914	0.791	0.615	0.362	0.615
flexibility	θ_{12}	subjective	80	80	20	40	20
			0.800	0.800	0.200	0.400	0.200

* 20 forints = \$1　(The upper number is measure value.
† Reuse factor　The lower number is utility value.)

Table 2 Weight without Rank (Case 1). (V=0.415)

Attribute	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7	θ_8	θ_9	θ_{10}	θ_{11}	θ_{12}
τ	0.0	0.0	0.0	0.525	0.0	0.0	0.475	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Alternative	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
$\bar{\delta}$	0.641	0.0	0.0	0.359	0.0

(The second-best pure strategy is a_2. V_p=0.399)

Table 3 Weight with Rank (Case 2). (V=0.625)

Attribute	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7	θ_8	θ_9	θ_{10}	θ_{11}	θ_{12}
τ	$0.143 \geq 0.143 \geq 0.143 \geq 0.143 \geq 0.143 \geq 0.143 \geq 0.143 \geq 0.0 \geq 0.0 \geq 0.0 \geq 0.0 \geq 0.0$											

Alternative	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
$\bar{\delta}$	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0

Table 4 Weight with Rank (Case 3). (V=0.661)

Attribute	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7	θ_8	θ_9	θ_{10}	θ_{11}	θ_{12}
τ	$0.125 \geq 0.125 \geq 0.125 = 0.125 \geq 0.125 \geq 0.125 \geq 0.125 = 0.125 \geq 0.0 \geq 0.0 \geq 0.0 \geq 0.0$											

Alternative	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
$\bar{\delta}$	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0

Table 5 Weight with Rank (Case 4). (V=0.631)

Attribute	θ_6	θ_2	θ_3	θ_5	θ_9	θ_4	θ_1	θ_7	θ_8	θ_{10}	θ_{11}	θ_{12}
τ	$0.350 \geq 0.130 \geq 0.130 \geq 0.130 \geq 0.130 \geq 0.130 \geq 0.0 \geq 0.0 \geq 0.0 \geq 0.0 \geq 0.0 \geq 0.0$											

Alternative	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
$\bar{\delta}$	0.021	0.979	0.0	0.0	0.0

(The second-best pure strategy is a_2. V_p=0.629)

Table 6 Weight with Rank (Case 5). (V=0.634)

Attribute	θ_6	θ_2	θ_3	θ_5	θ_9	θ_4	θ_1	θ_7	θ_8	θ_{10}	θ_{11}	θ_{12}
τ	$0.125 = 0.125 \geq 0.125 \geq 0.125 \geq 0.125 \geq 0.125 = 0.125 \geq 0.125 \geq 0.0 \geq 0.0 \geq 0.0 \geq 0.0$											

Alternative	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
$\bar{\delta}$	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0

Table 7 Weight with Rank (Case 6). (V=0.681)

Attribute	θ_2	θ_6	θ_3	θ_{10}	θ_8	θ_1	θ_5	θ_9	θ_4	θ_7	θ_{11}	θ_{12}
τ	$0.140 \geq 0.140 \geq 0.09 \geq 0.09 \geq 0.09 \geq 0.09 \geq 0.09 \geq 0.09 \geq 0.09 \geq 0.09 \geq 0.0 \geq 0.0$											

Alternative	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
$\bar{\delta}$	0.386	0.614	0.0	0.0	0.0

(The second-best pure strategy is a_2. V_p=0.677)

るが，$\tau(\theta_3)=\tau(\theta_4)$，$\tau(\theta_7)=\tau(\theta_8)$ という等号制約が与えられた場合の結果を **Table 4** に示す．このとき，属性 θ_8 に対しても重みが付与される．そして，同様に代替案 a_2 が選ばれる．

また，属性の順序を入れ換えて，重みに制約がある場合の計算結果を **Table 5** に示す．特に，属性 $\theta_6, \theta_2, \theta_3, \theta_5, \theta_9, \theta_4$ を重要と考えて，これら 6 つの属性に大きい重みが与えられるように設定した．この場合のミニマックス決定法則は，代替案 a_1 を確率 0.021 で，代替案 a_2 を確率 0.979 で選ぶ混合方略を示している．これは，代替案 a_1 と a_2 との属性 θ_6 に対する効用値の差が反映しているものと考えられる．また，このときの次善解は，② の方法によって代替案 a_2 を選ぶようになっている．

さらに，$\tau(\theta_6)=\tau(\theta_2)$，$\tau(\theta_4)=\tau(\theta_1)$ という等号制約が与えられた場合の結果を **Table 6** に示す．このとき，属性 $\theta_8, \theta_{10}, \theta_{11}, \theta_{12}$ 以外の属性に対して，等しい重みが付与される．そして，このときのミニマックス決定法則は，代替案 a_2 を選ぶ純粋方略である．

以上より，重みに等号制約のある場合とない場合とを比較すると，総合評価値は前者が高くなっている．また，$\boldsymbol{\tau}$ に部分的に等号制約が含まれる場合，この例ではミニマックス決定法則は純粋方略になっている．

また，重みに制約のない場合とある場合とを比較すると，前者の総合評価値は小さい．これは，重みに制約のある場合は，その制約が施設提供者への情報となる一方，重みに制約のない場合は，まったくどのような重みづけがなされるかわからないという不確実な状態であることに原因していると考えられる．

ところで，Keeney は評価項目の選好順序を先決的に次のようにつけている．

$$\theta_2 \succ \theta_6 \succ \theta_3 \simeq \theta_{10} \succ \theta_8 \succ \theta_1 \succ \theta_5 \simeq \theta_9 \succ \theta_4 \simeq \theta_7 \succ \theta_{11} \simeq \theta_{12} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(9)$$

ただし，$\theta_i \succ \theta_j$ は，θ_j より θ_i を選好することを表わし，$\theta_i \simeq \theta_j$ は θ_i と θ_j とが無差別であることを表わす．

これは **Table 7** に相当する．その結果，代替案 a_i の総合評価値は次のような乗法型の多属性効用関数で計算された．

$$U(a_i)=\left\{\prod_{j=1}^{12}[1+k\tau_j u_{ij}]-1\right\}\Big/k \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(10)$$

また，重みは以下のように計算されている．ここで，k は定数である．

$$\tau(\theta_1)=0.150,\ \tau(\theta_2)=0.243,\ \tau(\theta_3)=0.189$$
$$\tau(\theta_4)=0.090,\ \tau(\theta_5)=0.132,\ \tau(\theta_6)=0.200$$

$$\left.\begin{array}{l}\tau(\theta_7)=0.090,\ \tau(\theta_8)=0.165,\ \tau(\theta_9)=0.132 \\ \tau(\theta_{10})=0.189,\ \tau(\theta_{11})=0.034 \\ \tau(\theta_{12})=0.034,\ k=-0.715\end{array}\right\} \cdots\cdots(11)$$

その結果，代替案の選好は a_1 であった．これによると $U(a_1)=0.832$, $U(a_2)=0.831$ で，それぞれ他の代替案の総合評価値に比べると抜きんでている．一方，著者らの提案する結果によれば，**Table 7** に示すように a_1, a_2 の混合方略が選ばれていて，この方略の総合評価値は 0.681 である．また，次善解は a_2 であり，その総合評価値は 0.677 である．③ の方法によるときも a_2 であった．すなわち，著者らの方法は，全然重みについての情報がないとき，a_1 と a_4 の混合方略，次善解は a_2，③ の方法のとき，a_1，また Keeney らがつけた重みの順序関係のあるとき，a_1 と a_2 の混合方略，次善解は a_2，③ の方法も a_2 となって Keeney らが a_1 を唯一選好した結果とは，若干異なっている．この事例をみても，なんらかの不確実性をもつものに，与件として，判断基準もしくは確定値を設定すれば唯一解は得られる．しかし，不確実性をもつものは，不確実なものとして解を求め，最終的に計画主体の問題とした方がより事実に基づく．この例でも，a_1 もしくは a_2 いずれかがよく，他の代替案が絶対に捨て去られるべきというのは不確実性を考慮したとき，むしろ誤った判断であると思う．

LFW 法は確率化代替案を示し，唯一解を与えていない．計画主体は a_1, a_2 の選択にあたって確率的に，弾力的に対処すべきことを教えている．

①，② および ③ の方法は，計画主体が実際に行動するときの1つの指針を与えたものであって，確率化代替

Table 8 Payoff Matrix in Bay Area Highway Planning.

Interest Group	Attribute		a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}
Managing Agency of Highway (Offerer of Highway Planning Alternative)	construction cost	θ_1	5	4	3	4	4	3	5	5	4	4	4	2
	uncertainty in design	θ_2	4	2	2	2	4	2	3	4	3	3	4	2
	uncertainty in execution	θ_3	5	2	2	2	4	2	3	4	3	3	5	2
	completion time	θ_4	5	3	2	3	4	4	5	4	5	4	3	2
	maintenance/management cost	θ_5	4	2	2	1	3	2	3	2	4	2	3	2
	geomorphology/geology	θ_6	4	3	4	3	4	4	4	4	4	3	4	3
	natural disaster relief	θ_7	3	2	2	1	2	1	2	2	3	2	2	1
Navigator	direct obstacle to navigation	θ_8	1	3	1	3	3	3	3	3	1	3	1	3
	indirect obstacle to navigation	θ_9	1	3	1	5	3	3	3	3	1	3	1	5
	obstacle to electricwave/marine signal	θ_{10}	1	1	3	5	1	4	3	4	2	3	3	5
	stress	θ_{11}	1	2	1	5	2	4	3	4	1	3	1	5
	visibility	θ_{12}	1	2	2	4	2	4	4	4	2	4	2	4
	sea phenomena	θ_{13}	3	3	2	2	3	2	4	4	4	4	4	4
Roadside Inhabitant	air pollution	θ_{14}	3	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2
User	fire/explosion	θ_{15}	3	2	2	2	2	2	3	2	3	2	2	2
	convinient crossing/ramp	θ_{16}	1	2	2	4	2	3	5	3	5	3	2	3
	radius of curve	θ_{17}	3	3	2	2	3	2	3	4	3	3	4	4
	truck carrying dangerous article	θ_{18}	3	2	2	2	2	2	3	2	3	2	2	2
	comfortable crossing/ramp	θ_{19}	2	2	2	3	2	3	3	3	2	3	2	3
	typhoon/high tide/wave	θ_{20}	4	3	2	2	3	2	3	2	4	3	2	2
	ship clash	θ_{21}	1	3	1	4	3	3	3	3	1	3	1	4
Managing Agency of Port and Harbor	direct alteration of course plan	θ_{22}	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3
	indirect alteration of course plan	θ_{23}	4	4	4	5	3	3	3	3	3	3	3	3
	indirect obstacle to function in port and harbor	θ_{24}	2	3	2	3	2	3	3	3	2	4	2	4
	land use	θ_{25}	2	2	1	1	4	1	4	4	2	3	2	3
	consistency with port and harbor planning	θ_{26}	1	5	1	5	3	3	3	3	1	5	1	3
Regional Inhabitant	impact to industrial zone	θ_{27}	3	3	1	1	3	1	4	2	4	4	2	2
	consistency with developing region	θ_{28}	1	2	2	3	2	3	4	4	2	4	2	4
	accessibility to city and town	θ_{29}	3	3	3	4	3	4	4	4	3	4	3	4

案 a_1, a_2 の解に基づいてなんらかの方法で a_1 もしくは a_2 が求められることは，純粋方略，もしくは他の方法で，それらの解が唯一に得られたのとは，本質的に異なるものである．

(2) K 港における湾岸道路計画問題

K 港の湾岸道路計画は，総延長約 10 km の区間を有するもので，その中間において 4 つの主要航路を横断する．そして，この横断形式は，橋梁と沈埋トンネルの両方が考えられている．この横断形式の組合せにより 12 の代替案が考えられるに至った．また，直接・波及の両効果を 6 種類の立場（事業主体［道路管理者］，運航者，沿道住民，自動車利用者，港湾管理者および地域住民）ごとに分類し，結局 29 の評価項目が選ばれた．さらに，効用値は，1～5 の整数（1＝最悪，5＝最良）値が評価者の代表および専門家によって与えられた．こうして作成された効用行列を **Table 8** に示す．

この **Table 8** の効用行列に基づいて，**5.(1)** と同様に，重みに制約のない場合と制約のある場合とについて計算を行ったところ **Table 9～11** に示す結果が得られた．

重みに制約のない場合，ミニマックス決定法則は，代替案 a_1 と a_8 との混合方略になっている．さらに，この次善解を求めたところ，代替案 a_7, a_8, または a_{10} を選ぶ純粋方略へと変化した．ここでは，**5.(1)** と違って次善解が複数個出現している．これは **Table 11** に示されるように，重みに制約のある場合にもみられる．このような原因としては，**5.(1)** で取り扱った効用行列に比較して，本節での効用値が 5 段階評価という粗い評価のために類似の効用値をもつ複数の代替案が存在したものと考えられる．また方法手順 9) ③ によると a_8 の 1 つが選好される．

Table 11 において，興味ある結果が得られている．すなわち，$\underline{\tau}$ は θ_8 に 1 を付与する重みづけになっているが，ミニマックス決定法則は，代替案 a_2 と a_8 との混合方略になっている．これは，均衡解が代替案 a_2 と a_8 について 2 個存在するためにみられる現象である．そして，このときの総合評価値は，次善解の総合評価値と一致している．

これによって評価主体は a_8 の代替案の選

Table 9 Weight without Rank (Case 7). (V=2.33)

Attribute	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7	θ_8	θ_9	θ_{10}	θ_{11}	θ_{12}	θ_{13}	θ_{14}	θ_{15}	θ_{16}	θ_{17}	θ_{18}	θ_{19}	θ_{20}	θ_{21}	θ_{22}	θ_{23}	θ_{24}	θ_{25}	θ_{26}	θ_{27}	θ_{28}	θ_{29}
$\underline{\tau}$	0	0	0	0	0	0	0.667	0	0.333	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Alternative	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}
$\bar{\delta}$	0.333	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.667	0.0	0.0	0.0	0.0

(The second-best pure strategy is a_7, a_8 or a_{10}. V_p=2.00)

Table 10 Weight with Rank (Case 8). (V=3.26)

Attribute	θ_1	θ_8	θ_2	θ_{14}	θ_9	θ_3	θ_{10}	θ_5	θ_{22}	θ_{16}	θ_{17}	θ_4	θ_{27}	θ_{11}	θ_{18}	θ_5	θ_{12}	θ_6	θ_{13}	θ_{23}	θ_{19}	θ_{20}	θ_{24}	θ_{28}	θ_{25}	θ_7	θ_{26}	θ_{29}	θ_{21}
$\underline{\tau}$	0.085≥0.085≥……						……≥0.085≥0.034≥0.034≥……								……≥0.034≥ 0 ≥ 0 ≥……														……≥ 0

Alternative	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}
$\bar{\delta}$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.341	0.659	0.0	0.0	0.0	0.0

(The second-best pure strategy is a_8. V_p=3.24)

Table 11 Weight with Rank (Case 9). (V=3.00)

Attribute	θ_8	θ_1	θ_{14}	θ_9	θ_2	θ_{10}	θ_3	θ_{15}	θ_{11}	θ_{16}	θ_{12}	θ_4	θ_5	θ_{13}	θ_{17}	θ_{22}	θ_6	θ_{23}	θ_{18}	θ_{24}	θ_{19}	θ_{25}	θ_{20}	θ_{27}	θ_{26}	θ_7	θ_{28}	θ_{29}	θ_{21}
$\underline{\tau}$	1.0 ≥ 0.0 ≥ 0.0 ≥……																												……≥ 0.0 ≥ 0.0

Alternative	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}
$\bar{\delta}$	0.0	0.373	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.627	0.0	0.0	0.0	0.0

(The second-best pure strategy is a_7 or a_8. V_p=3.00)

択に最も関心を払う情報を得るとともに，比較検討すべき代替案群の範囲を狭めることができる．比較すべき検討代替案は a_1, a_2, a_7, a_{10} であるが，これらの代替案がもつ a_8 より優れている評価項目について大きな関心を払うことが必要である．その評価項目については選ぼうとしている代替案よりも，よい評価値が存在するから，それらのもつ評価値水準と同等にまで達するような対策，実際には，補償，代替施設，説得等の措置を考える指針を得るものと思われる．計画主体は，混合方略の性格から a_8 でなく，手順 9) ①，③ により a_1 を選ぶことになっても，計画主体はいま述べたことを考える必要がある．本方法は，こうした情報をも提供する点で実用的であるといえる．

6. 結　論

計画主体の提示する代替案に対して好ましくないと評価する人たちがいる．この評価は，代替案提示に伴う評価者が関心を払う重みづき評価項目の評価値の総和で行われるとした．計画者はこの総合評価値の大きい代替案を，そして評価者はこれを小さくするために重みづけをするとした．以上のことを評価値との間のゲーム問題として定式化し，この解を計画情報に用いた．計画主体が自分とは異なる立場から評価する評価者の存在を意識して，その評価者のつける重みは代替案によって変化するであろうとして計画主体が代替案の選択を行っているのが現実であると著者らは認識している．

つまり，土木施設計画の基本計画段階で，計画主体は，ペイオフ行列が得られても，その利得の総和の極大値をもつ代替案を選ぶことに迷うことがある．すなわち，計画主体は多くの評価者がどのような方略により代替案を評価してくるかはわからない．このような状況において，計画主体はあらかじめ何の行動基準をもたないよりも，なんらかの合理的な行動基準によって，その場合，最悪の状態を想定して意思決定を行った方がよいと考えられる．この意味で，本研究で提案した LFW 法は，計画主体の意思決定のための 1 つの計画情報になる．

上述のゲーム問題のモデル解は，一般に混合方略である．これは唯一の代替案による最適解が常に存在するものでないことを示す．実際，代替案が計画主体にとって実施可能ならば，いろんな評価者のことを考えれば，このような解が出ることは計画者の選択のゆらぎを反映したともいえると思われる．

重みという最も不確実なものを与件値としてモデルに入れて，唯一最適解を求めるよりも一部分でも不確実なものは，不確実なものとしてモデルに反映させ，計画実施にあたって計画主体が何を行えばよいかの情報を多く得ることを見出すことが重要なことと思うのである．

このように，本方法は従来の研究とは違った視点から，代替案評価の手法を提案したが，今後の課題として，次のような諸点が列挙される．

(1) 解は，代替案と評価項目列挙に大きく依存する．したがって，代替案は，その計画を行わなかった場合を含めて，もれなく列挙しておく必要がある．そうでないと，このマトリックス空間のみでの解に終わる．

(2) (1) と同様，評価主体，評価要因，評価項目ならびに指標値，あるいは評価値は慎重に選択，推計されねばならない．本研究では，例示的な意味もあって，評価値マトリックスの作成については，若干のコメントにとどめている．また例題では，効用値と評点マトリックスを用いている．これに対して，効用値の想定し得る最高値からの差をとった非効用値を用いることも考えられる．いずれにしても，このマトリックス自体に含まれる不確実性の処理も今後の課題となる．いまの段階では，これを確率変数として扱うか，2，3 の評価値を上下に変動させた場合の感度分析を行うことを推奨する以外に案は見当らない．

(3) 結果からみて，重みは評価値の小さい評価項目に大きくなる．これは実情にあっている．しかし，不確実性の程度を必ずしも反映していない．また，重みの変動幅（ゆれ動き）が0か1のようにかなり大きい．評価を安全側に見積り過ぎる傾向がある．

(4) ここで選択された代替案は，他の評価基準の最適案と必ずしも一致するものではない．いくつかの方法と併用して，比較しながら意思決定の諸情報を得たり，新しい代替案の存在を探索する手法を開発することも今後の課題となる．

(5) LFW 法は，**2**．ならびに **4.(1)** の問題意識から生まれている．したがって，LFW 基準が適当かどうかは，計画のおかれている環境から個々に実際に則して模索されるべき課題であることを，特に強調しておきたい．

本研究に際して，資料を提供して下さった建設省近畿地方建設局の関係者，ならびに計算作業を行って下さった西田哲郎氏（日本国有鉄道勤務）に感謝する．

参 考 文 献

1) 建設省近畿地方建設局：総合評価手法に関する文献・資料，昭和 53 年 10 月．
2) 宮川公男編：PPBS の原理と分析，有斐閣，昭和 44 年 11 月．
3) Maass, A. et al. : Design of Water Resource Systems, New Techniques for Relating Economic Objectives, Engineering Analysis and Government Planning,

Harvard University Press, Cambridge, 1962.
4) Marglin, S.A. : Public Investment Criteria, M.I.T. Press, Cambridge, 1967.
5) Arrow, K. : Social Choice and Individual Values, Yale University Press, New Heaven, 1963.
6) 矢島 隆：マルティ・オブジェクティブの評価と意思決定（上），（下），地域開発，7～8，1972.
7) von Neumann, J. and O. Morgenstern : Theory of Games and Economic Behavior, Princeton University Press, 1947.
8) Schlaifer, R. : Analysis of Decisions and Uncertainty, McGraw-Hill, 1969.
9) Fishburn, P.C. : Utility Theory for Decision Making, ORSA, No. 18, John Wiley and Sons, 1976.
10) Keeney, R.L. and H. Raiffa : Decision with Multiple Objectives : Preference and Trade-offs, John Wiley and Sons, 1976.
11) Pearman, A.D. : Uncertainty and Transport Investment Decision, World Conference on Transport Research, Proceedings, Rotterdam, 1977.
12) 谷 明良・宮武信春：通勤経路選好特性の計量化手法，土木学会論文報告集，No. 267, pp. 83～87, 1978.
13) 西村 昴・日野泰雄：複数目標を考慮した場合の代替案の評価について，土木学会関西支部年次学術講演会 講演概要，昭和 53 年.
14) Zeleny, M. : The Attribute-Dynamic Attribute Model, Management Science, Vol. 23, No. 1, 1976.
15) Belenson, S.M. and K.C. Kapur : An Algorithm for Solving Multicriterion Linear Programming Problems with Examples, Operational Research Quarterly, Vol. 24, No. 1, 1973.
16) 伏見多美雄・山口俊和：複数の目標をバランスよく達成するための数理計画的方法，経営科学，第 19 巻，第 2 号，1975.
17) Hill, M. : A Goal-Achievement Matrix for Evaluating Alternative Plans, Journal of the American Institute of Planners, Vol. 34, No. 1, 1968.
18) Bishop, A.B. : An Approach to Evaluating Environmental, Social, and Economic Factors in Water Resources Planning, Water Resources Bulletin, Vol. 8, No. 4, 1972.
19) Nijkamp, P. : A Multi-Criteria Analysis for Project Evaluation : Economic-Ecological Evaluation of a Land Reclamation Project, Papers of the Regional Science Association, Vol. 35, 1975.
20) Paelinck, J.H.P. : Qualitative Multicriteria Analysis : An Application to Airport Location, Environment and Planning A, Vol. 9, 1977.
21) 奥野忠一そのほか：多変量解析法，続多変量解析法，日科技連，1971.
22) 安田三郎・海野道郎：改訂 2 版，社会統計学，丸善，1977.
23) Baldwin, M.M. (ed) : Portraits of Complexity, Applications of Systems Mothodologies to Societical Problems, Battelle Monograph 9, June, 1975.
24) Dalkey, N.C. : The Delphi Method : RM-5888-PR, The RAND Corporation, Santa Monica, Cal., 1969.
25) 川喜多二郎・牧島信一編：問題解決学，KJ 法ワークブック，講談社，昭和 51 年.
26) Fontela, E. : DEMATEL Report No. 2, Analytical Methods, Battelle, 1973.
27) 河村和彦：複雑な社会問題を取扱う一手法. Interpretive Structural Modeling，計測と制御，16-1, 1977.
28) 科学技術と経済の会，牧野 昇・白根禮吉編：ヤンツ技術の予測と計画，日刊工業新聞社，昭和 46 年.
29) Dantzig, G.B. : Linear Programming and Extensions, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1963.
30) Owen, G. : Game Theory, W.B. Saunders Co., 1968.
31) Keeney, R.L. and E.F. Wood : An Illustrative Example of the Use of Multiattribute Utility Theory for Water Resources Planning, Water Resources Research, Vol. 13, No. 4, 1977.
32) 長尾義三・浅岡 顕・若井郁次郎：総合評価の不確実性と代替案の決定，第 1 回土木計画学研究発表会講演集，1979 年 1 月.

(1979.7.28・受付)