MIN-MAX計画モデルによる2,3の地域計画問題の実証的分析

京都大学工学部 正員 春名 攻
京都大学工学部 正員 吉川 和広

1. はじめに

近年、オイルショックを契期に従来の高度成長から低成長の時代に入ったといわれているが、社会構造の高度化や複雑化の傾向の進展にはあまり変化がみられず、大規模な土木事業による社会経済基盤の整備への要請は相変らず強いものがある。一方、このような大規模な土木事業が地域社会システムに及ぼす影響は広範で多岐にわたっており、関係を持つ社会システムの構成員の各レベルから、土木事業に対して多種多様な要請が発せられるようになった。

このように、土木計画問題とくに本研究が対象としている地域計画問題は、現象面でも評価面でも複雑な構造を呈示するようになった。現在、実際の社会システムを対象とする土木計画は数多くの個別計画によって複合的に構成されているが、このような計画問題を合理的に解決していくためには現象に合理的でかつ目的に合理的な計画化のためのモデルの作成と、モデル分析を実施して問題の解決にとって必要な情報を求めていくことが必要であると考える。

我々は上述のような特徴をもった計画問題を「多重・多階層」という構造的特性に着目してシステム的に分析を加えて明確化し、計画モデルとして定式化するとともに、評価方法としては単一の評価基準や複数の評価基準の場合に対して、計画目標水準の上昇というMIN-MAX基準の考え方を導入した『MIN-MAX計画法によって、実証的分析を加えてきた。本稿においては、後述する地域の交通施設計画や水システム計画の問題を対象としたMIN-MAX計画モデルによる実証的分析の方法と結果をとりまとめて示すとともに、問題の解決のための計画情報を求める場合に本アプローチが効果的な方法であることを示したいと考えるものである。

2. 広域的な土木施設計画問題における評価方法とMIN-MAX計画法

(1) 広域的な土木施設計画の評価の問題点

公共施設としての土木施設の計画主体は、施設を利用したり恩恵をうける個々の単体(たとえば個人、企業や集団)の総体であり複合的な主体である。そして広域的な性格を持つ土木施設になると、このような複合計画主体が異なる地域に分布して存在することとなる。さらに、土木施設の建設や存在が計画にもたらす効果も施設をとおしての活動や機能の向上というプラスの効果とともに、自然・社会環境の悪化に代表されるようなマイナスの効果のように相反する場合が多い。地域計画の諸問題の本来的な特徴は、その影響が広範囲で多岐にわたることに起因する"評価要素の多様さ"と、複合する個々の計画主体間の立場の違いに起因する"評価における競合"というやっかいな点に代表されると考えられる。

従来、数理計画法を用いた計画モデルによるアプローチでは、複合的な計画主体を総体的集合として単一の計画主体を想定するとともに、この想定された計画主体にとって最も望ましいと考えられる評価要素を多様な要素の中から選択的に抽出して評価尺度と評価基準を求めてきたのである。このような計画モデルを用いて求めた計画案に対して個々の計画主体(単位)レベルでの検討を加えてみると、各評価要素間での取扱いの不公平さや計画主体間での充足度の不均衡さという問題が生じている場合が多い。以下において述べようとする実証的研究においては、前者の評価の多元性という問題に対しては計画問題を多目標計画問題として定式化するという方法と、そこにおける複数の計画目標の達成水準の全体的な向上をMIN-MAX計画法によって目指すという方法を導入することによって解決をはかろうとしている。さらに、後者の計画主体間の競合と不均衡という問題に対しては、計画主体間での計画目標の達成水準の差異・不均衡を可能な限り解消するためのMIN-MAX計画法を導入することによって解決をはかろうとしている。以下の(2),(3)においては、これらの方法の概要を簡単に示していくこととするが、ここではまず、MIN-MAX計画法のねらいと基本的な方法を例をあげつつ述べるとともに、ついで多目標計画法における複数目標の評価と計画法について述べる。

(2) MIN-MAX計画法のねらいとアプローチの概要
──単一の評価基準を用いる場合──

MIN-MAX計画法の主要なねらいとその方法を簡潔かつ明快に示すために、数理計画法の中から輸送問題の例をとりあげて述べていくこととする。

古典的な輸送問題(Transportation Problem)では、m か所の異なる物資供給地 i からの供給量 a_i ($i=1,2,\cdots,m$)を、n か所ある異なる需要地での需要量 b_j ($j=1,2,\cdots,n$)に対して、どのように配分して輸送すれば総輸送費用が最小となるかという問題を取扱っている。すなわち、x_{ij} ($i=1,2,\cdots,m$　$j=1,2,\cdots,n$)を供給地 i から需要地 j への物資輸送、C_{ij} をこの場合の物資1単位あたりの輸送費用とするとき、輸送問題は次のように定式化される。

「
$$\min z = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} C_{ij}x_{ij}$$
Subject to
① $\sum_{j=1}^{n} x_{ij} = a_i$ (for all i)
② $\sum_{i=1}^{m} x_{ij} = b_j$ (for all j)
③ $x_{ij} \geq 0$ (for all ij)
(ただし、$\sum_{i=1}^{m} a_i = \sum_{j=1}^{n} b_j$)
」

つぎに、MIN-MAX計画法のねらいをわかりやすくするための一般的な仮定として輸送における費用の負担は需要地の側で行なうものとして、各需要地における輸送単価に着目して検討を加えることとする。さて、需要地 j における輸送単価は $\sum_{i=1}^{m} C_{ij}x_{ij} / b_j$ として求められるが、総輸送費用 z が最小となるような最適解においてはこの輸送単価の分布状況はつぎのようになっている。つまり、総費用 z が最小であるということは、全体をとおしての平均的な輸送単価は最低値が得られているが、需要地ごとに検討するとそこには格差が生じてきている。言葉をかえれば、全体的な目的としての輸送の総費用(あるいは平均輸送単価)の最小化というねらいのもとで、一部の需要地では平均輸送単価より安い単価が得られるという恩恵をうけるかわりに、一部の需要地ではより高い輸送単価となってしまうという犠牲が生じるのである。

現実には、需要地と供給地の間の空間的位置関係や輸送システムの整備状況の違いがあり、遠隔地では高い輸送単価を負担しなければならないことは明白である。しかし、このような差異をうまく補正したとしてもこの地域間の格差の問題は同じような形で表われてくる。土木事業が公共的な立場から実施されることを考えれば、計画主体間のこのような格差は望ましいことではなく、公正の原理という観点から可能な限りの均等化がはかられるべきであると考える。つまり、当該の土木事業から計画主体 j が受ける効用を U_j とすれば、計画主体間での最低の水準 $\min_j U_j$ を可能な限り上昇させる手段を選択することも土木計画の目的として重要なことである。つまり

$$U_j \geq U = \min_j U_j \longrightarrow \text{maximize}$$

のように MIN-MAX基準 ($\max \min_j U_j$) を導入した MIN-MAX 計画法によるモデル分析から得られる計画情報を求めることは土木計画の策定にとって重要な意味をもってくる。

上述の輸送問題に対してこの考え方を導入して MIN-MAX計画モデルを定式化すると以下のようになる。いま、C^*_{ij} を需要地の特性を考慮した補正ずみの費用係数とすれば

「
$\min.\ y$ (最高の輸送単価)
Subject to
① $\sum_{j=1}^{n} x_{ij} = a_i$ (for all i)
② $\sum_{i=1}^{m} x_{ij} = b_j$ (for all j)
③ $\dfrac{\sum_{i=1}^{m} C^*_{ij}x_{ij}}{b_j} \leqq y$ (for all j)
④ $x_{ij} \geq 0$ (for all ij)
(ただし $\sum_{i=1}^{m} a_i = \sum_{j=1}^{n} b_j$)
」

のように表わされるが、この場合も総輸送費用の低減化は前記同様に目指されてはいるが第1目的とはなっておらずその程度も少なくなっている。

(3) 多目標計画問題とMIN-MAX計画法

広域的な土木施設の計画問題のように土木事業に対して多種多様な要請が存在する場合には、これらの要請を可能な限り反映させた計画モデルを構成して分析を加え、望ましい計画案を策定していくことが必要であろう。我々はこのような観点から、地域計画において取扱われるような複雑な構造をもつ土木計画問題を「多重多階層」という構造的特性をもつ計画問題として把握して計画モデルとして定式化するとともにモデル分析を行なってきた。そしてこの過程において評価の多元性という特性を考慮して計画問題を多目標計画問題としてモデル化してきたのである。つまり、従来は計画のプラスの効果あるいはマイナスの効果の中から、最も合理的であると考えられる効果をとりだし評価基準を設けて目的を選択的に決定したり、適当な変換系を仮定して一元的な目的(評価)関数を設定して目的の達成水準の向上をはかってきた。

これに対して、上述の選択行為や変換系の仮定という

一連の操作の合理性に関する妥当性についての議論の余地が多く存在し、モデル分析の大きな問題点となってきた。そして、これに対する一つの試みが多目標計画法によるアプローチであると位置づけられよう。

多目標の計画法では複数の評価要素を各個独立してとりあげて尺度化することによって、計画目標として計画問題の中で直接的に取扱おうとするものである。そこでは全ての目標の達成度を測る尺度のすべてによって構成される目標空間が設定され，その空間と許容水準と呼ばれる計画目標の許容しうる達成状態をあらわす点gと、満足水準と呼ばれる計画目標の満足しうる達成状態を表わすGという2点を外生的に与えるという手順がとられる。そして点gとGを利用して、計画目標の達成水準を総合的に上昇させる方向を表わす目標ベクトル(Goal Vector)を空間に規定するのである。

多目標の計画法の中でもよく知られている線形計画法を用いた目標計画法(Goal Programming，GP)では，目標ベクトルで規定された目標の達成水準のうちでも最低の達成水準のものに着目し、これを順次引きあげていくことにより、全ての目標の達成水準を目標ベクトルにそって総合的に引き上げていくという方法がとられ、ここでもMIN-MAX計画法の考え方が適用されている。すなわちZを複数目標中の最低の達成水準とすれば，

$$\begin{cases} Z \rightarrow max \\ (\text{現在の計画案による目標}i\text{の達成水準}) \geqq Z \\ (i=1,2,\cdots\cdots) \end{cases}$$

というMIN-MAX計画問題として定式化されている。

この考え方をさらに進めたL字型効用関数を用いた目標計画法では、一般の効用関数の概念を近似的に反映させて、MIN-MAX計画法だけで到達しうる解状態からさらに水準を上昇させうる目標だけをとりだして、それらの目標だけについても可能な限り水準を上昇させようという試みが盛込まれている。この方法は全体的な視点からのトレードオフの関係を考慮した効用関数の考え方とは決して整合していないのであるが，個別的で実際的な観点から(部分的であれ)より達成水準を引きあげていくという安全側の計画を求めていくことにあたっているので一概に否定はできないところである。

上のような問題点を解消しようというのが，より近似の精度を向上させようという開いたL字型の効用関数を用いる目標計画法であるが，効用関数そのものの同定に対応して開角度の設定の方法なども問題点と考えられており今後の研究に待つところが大きい。

以上のいずれの方法にしても、順次多元的に設定した複数の計画目標のうちの最低の水準を与える目標という評価側面に着目してこれを引き上げていこうというMIN-MAX計画法の考え方がとられている。この方法は複雑な評価構造を持つ土木計画問題を実際的に解決していくためには有効な手段であると考えるものである。

3. 地域計画問題へのMIN-MAX計画法の適用

(1) 公共トラックターミナルの規模と配置計画問題

近年、わが国では各地で新たな物流拠点の建設整備が進められつつある。この研究ではこれらの物流拠点のうち、路線貨物輸送の合理化に対して重要な役割をはたすと考えられる公共トラックターミナルの規模と配置の計画問題をとりあげ、計画目的の多元性や圏域内での輸送単価の格差是正などを考慮した計画情報の作成を試みたものである。

さて、モデル化のための主な前提条件はつぎのようである。

①公共トラックターミナルの配置の対象とする経済圏を$i=1,2,\cdots,m$というゾーンに分割するとともに，他の経済圏を$j=1,2,\cdots,n$とする。

②公共トラックターミナルの候補地を$k=1,2,\cdots,r$とし、各候補地での公共トラックターミナルの規模(取扱い量)には上限が定められているものとする。

③公共トラックターミナルでは路線貨物だけを取扱いの対象とするが、そのうちの中継貨物については考慮しない。また路線貨物はすべていずれかの公共トラックターミナルを利用するものとする。

以上のような前提条件のもとで、地域における公共トラックターミナルの規模と配置計画のための計画モデルをL字型効用関数を用いた目標計画法を用いてつぎのように定式化した。モデルの定式化に先立ってつぎのような定義を行なっておく。

x_{ikj}^{l}：iゾーンとj経済圏との間の方向lの路線貨物のうち，kターミナルを利用する貨物量を表わす変数($l=1$のとき発生，$l=2$のとき集中)

a_{ij}^{l}：iゾーンとj経済圏との間の方向lの路線貨物需要(トン/日)

Q_k：kターミナルの取扱い貨物量の上限(トン/日)

C_{ik}, D_{ik}, T_{ik}：iゾーンとkターミナルの間のトンあたりの

集配コスト，集配距離，集配時間

C_k, T_k：kターミナルを通過するのに要するコスト，時間（トン当り）

C_{kj}, D_{kj}, T_{kj}：kターミナルとj経済圏の間のトン当りの路線運行コスト，路線運行距離，路線運行時間

w_1^l, w_2^l：方向lの集配車および路線運行車の平均積載量（トン/台）

g, G：各目標に与えられた許容水準および満足水準

y, z：各目標の満足水準からのかい離の程度を示す補助変数

以上のような準備のもとで計画モデルは次のように定式化される。

(a) 物理的な制約条件

$$\sum_{k=1}^{r} x_{ikj}^{l} = a_{ij}^{l} \quad (l=1,2,\ i=1,2,\cdots,m;\ j=1,2,\cdots,n)$$

$$\sum_{l=1}^{2}\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} x_{ikj}^{l} \leqq Q_k \quad (k=1,2,\cdots,r)$$

$$x_{ikj}^{l} \geqq 0 \quad (\text{for all } l, i, k, j)$$

(b) 目標の制約化

①
$$\begin{cases} \sum_l\sum_i\sum_j\sum_k (C_{ik}+C_k+C_{kj})x_{ikj}^l - y_C + z_C = G_C \\ \sum_l\sum_i\sum_j\sum_k (C_{ik}+C_k+C_{kj})x_{ikj}^l \leqq g_C \end{cases}$$

------------総輸送コストに関する目標

②
$$\begin{cases} \sum_l\sum_i\sum_j\sum_k (T_{ik}+T_k+T_{kj})x_{ikj}^l - y_T + z_T = G_T \\ \sum_l\sum_i\sum_j\sum_k (T_{ik}+T_k+T_{kj})x_{ikj}^l \leqq g_T \end{cases}$$

------------総輸送時間に関する目標

③
$$\begin{cases} \sum_l\sum_i\sum_k D_{ik}\left(\sum_j x_{ikj}^l/w_1^l\right) + \sum_l\sum_k\sum_j D_{kj}\left(\sum_i x_{ikj}^l/w_2^l\right) - y_D + z_D = G_D \\ \sum_l\sum_i\sum_k D_{ik}\left(\sum_j x_{ikj}^l/w_1^l\right) + \sum_l\sum_k\sum_j D_{kj}\left(\sum_i x_{ikj}^l/w_2^l\right) \leqq g_D \end{cases}$$

------------延走行台キロに関する目標

④
$$\begin{cases} y_C/\lambda_C = y_T/\lambda_T = y_D/\lambda_D \\ \lambda = g - G \end{cases}$$

------各目標の達成度の均衡をはかるための条件式

(c) 目的関数

目的の不達成度をMIN－MAX計画法としてバランスよく小さくしていくためにはy_C，y_T，y_Dのいずれか一つを選んで最小化をはかればよい。つまり

$$y_C \longrightarrow \text{minimize}$$

である。

なお，本研究でとりあげた計画目標は対象経済圏の全体にとっての目標であるため，各ゾーン間には輸送単価などに格差が生じてくる。そこで次式を設定して以下に述べるようなパラメトリック分析を行なった。

$$\frac{\sum_l\sum_k (C_{ik}+C_k+C_{kj})x_{ikj}^l}{R_j \sum_l a_{ij}^l} \leqq u \quad (\text{for all } i, j)$$

すなわち，対象経済圏とj経済圏との間の輸送単価のゾーンによる格差の是正（$u \to \min$）をはかっていったときに，目標計画モデルの解（計画案）がどのように変化していくかを計画情報として求めたのである。ここで，R_jは対象経済圏の各ゾーンとj経済圏の間の平均輸送距離を考慮した一種の換算係数である。

以上に示した計画モデルを京阪神都市圏における公共トラックターミナルの規模と配置の計画の問題に適用して実証的な分析を行なった。また，許容水準や満足水準を変化させたときの解の変化状況をみたり，格差是正をはかったときの影響を調べたが，これらの分析結果については講演時に言及することとする。

(2) 道路計画情報のための交通量配分計画問題

——多目的システムとしてのバイパス道路計画問題に関するシステム分析——

道路建設が社会経済にもたらす効果としては総走行時間や総走行費用の減小のようなプラスの効果や，騒音の発生・増加のようなマイナスの効果が考えられる。道路計画の内容を望ましいものとするためには，可能な限りプラスの効果を大きくし，同時にマイナスの効果を小さくしていくことが大切である。一般にこれらを同時に充足することは困難であるが，両者の間のトレードオフの関係を十分に考慮しつつこれら2種の目標の達成が望ましい（高い）水準でバランスするようにはからなければならない。本研究では道路計画の支配的プロセスとしての交通量配分計画問題に対して前述の目標計画法を適用して計画モデルを作成してK市のバイパス計画問題を分析した。そして設計速度や防音壁の整備程度をパラメータとして分析して計画情報としてとりまとめたのである。

さて，計画モデルの定式化は次に示すようである。まず定式化における主要な前提条件を①から④に示しておくこととする。

①本研究はすでに市街地道路が飽和状態となっている場合の通過交通による状況の悪化を改善することが問題となっている場合をとりあげるものとする。したがって，配分対象としては計画道路に関係する通過交通のみをとりあげることとする。

②幹線道路のみによって道路ネットワークを構成する。

③既存リンクにおいて現在交通量から検討対象とする通過交通を除いた残りの交通量をここでは部分交通量と呼んで区別し配分計算においては与件とする。

④道路構造令にもとづき各リンクの設計交通容量と設計速度を設ける。ただし，設計速度は制限速度として取

扱い、これ以上の走行速度は許さないものとする。なお、部分交通量のみで設計交通容量を越えているリンクでは設計交通容量を可能交通容量まで増加させると同時に、それに対応する走行速度をリンクの設計速度とする。

以上のような前提条件のもとで計画モデルをつぎのように定式化した。

物理的な制約条件

$$\sum_{j=1}^{m} \beta_{kj}^{l} = 1 \qquad \text{(OD交通量保存式)}$$

$$\sum_{k=1} f_k^l \sum_{j=1}^{m} \delta(k_j, i)\beta_{kj}^l + t_i^l \leqq Q_i \qquad \text{(容量制限式)}$$

ここで，f_k^lはODパターンkの方向lの交通量，β_{kj}^lはODパターン経路jがリンクiを通過するとき1 そうでないときは0をとる変数、t_i^lはリンクi,方向lの部分交通量，Q_iはリンクiの交通量をあらわしている。

目標の制約化

L字形効用関数を用いた目標計画法に従って、前述と同様に目標を次式のように定式化する。

$$① \begin{cases} \sum_l \sum_k f_k^l \sum_j C_{kj}^l \beta_{kj}^l - y_C^o + z_C^o = G_C^o \\ \sum_l \sum_k f_k^l \sum_j C_{kj}^l \beta_{kj}^l \leqq g_C^o \end{cases}$$

------総走行費用に関する目標

$$② \begin{cases} \sum_l \sum_k f_k^l \sum_j T_{kj}^l \beta_{kj}^l - y_T^o + z_T^o = G_T^o \\ \sum_l \sum_k f_k^l \sum_j T_{kj}^l \beta_{kj}^l \leqq g_T^o \end{cases}$$

------総走行時間に関する目標

$$③ \begin{cases} \sum_l \sum_k f_k^l \sum_j \delta(k_j, i)\beta_{kj}^l - y_g^o + z_g^o = G_g^o \\ \sum_l \sum_k f_k^l \sum_j \delta(k_j, i)\beta_{kj}^l \leqq g_g^o \qquad (g = 1, 2, \cdots, S) \end{cases}$$

------チェックポイントgにおける騒音に関する目標

$$④ \left(y_C^o / \lambda_C\right) = \left(y_T^o / \lambda_T\right) = \left(y_g^o / \lambda_g\right) \qquad (g = 1, 2, \cdots, S)$$

------目標の均衡のとれた向上を満たすための条件

ここでC_{kj}^lはODペアk経路j,方向lの車台あたりの平均走行費用を表わし，T_{kj}^lは同じく平均走行時間を表わしている。また$g = 1, 2, \cdots, S$はネットワークの適当なリンク上に設定されている騒音のチェックポイントを表わしている。

目的関数

目標の達成をはかるためにはy_C^o，y_T^o，y_g^o $(g=1,2,\cdots,S)$の中いずれか一つを選んで最小化すれば良いことは前と同様でありここでは

$$y_C^o \rightarrow min$$

とする。

以上で非常に簡単に目標計画法による交通量の配分計画モデルについて述べてきたが，このモデルをK市のバイパス計画問題に適用し実証的分析を行なったが，講演時にこれらについて言及する。また，これらは多目標として表わした評価側面において目標とする達成水準をMIN-MAX計画法として総合的に向上させていくことを目指して分析を行なったものであるが、一方計画的な配分を行なわず自動車の走行にまかせた状態として等時間原則による配分結果ももとめて比較検討してみた。このために等時間原則にもとずく交通量配分モデルを作成したがこのモデルもMIN-MAX計画法による行動モデルとして定式化されることがわかったが，ここではその説明は省略する。

(3)2階層構造をもつ水利用計画問題

従来の水利用計画では流域内で増加する水需要は極力充足させるという方針がとられてきた。そして、水利用の増加に伴ない都市下水道の量も増加し，これに各都市での下水道の立ちおくれが加わり河川水質の汚濁が深刻化してきている。このような状況に対して、流域内の利水問題や河川水質の保善・改善の問題を考える場合には，都市固有の計画目標と水を媒介としての都市間の有機的な連関関係を考慮しつつ水利用計画を求めていく必要がある。つまり，水系内の各都市の利水施設や下水道施設の整備問題を同時にとらえて，広域的な立場からの計画目標の設定の方法と計画化の方法を確立していくことが必要であると考える。

さて，この種の問題では国レベルと都市レベルという2階層の行政体が関係するため，これら2つの行政体の意志決定機構を考慮した問題として捉えて数理計画モデルとして定式化するとともに淀川水系を対象に実証的分析を加えたのである。また，モデル策定における基本方針としてつぎのような考え方を採用した。

① 国レベル行政体の意志決定問題としては流域内の都市間の浄水施設の整備水準における「格差の是正」をはかる中で水需要の充足を図ろうとする。また，河川水質の保全改善の目的を達成するためにダム開発規模を決定するとともに各都市の浄水施設，下水道施設の建設・整備のための補助金の配分額を決定する。

② 都市レベルの意志決定問題としては国レベルとは少し異なって国から与えられた補助金と都市独自の財源(

自己負担金）をもとに，都市の施設整備を目的とした浄水施設ならびに下水道施設の建設を行なう。

③　これらのいくつかの目的の達成においては広域的な観点からあくまでも国レベルの目的が優先されるが，地点間での競合という問題を合理的に解決していかなければならない。

以上のような方針のもとで２階層モデルを以下のように定式化した。

I. 都市レベルの意志決定問題の定式化

すでに示したように都市iの目的としては浄水施設と下水道施設の整備率の向上である。この２目的の間にＬ字型の効用関数を設定して新たな評価関数を導入すると設定された都市の目標は以下のように定式化される。

$$\left.\begin{array}{ll} D_i+d_1^i-e_1^i=\overline{D}_i, & D_i \geqq \underline{D}_i \\ w_i+d_2^i-e_2^i=\overline{w}_i, & w_i \geqq \underline{w}_i \\ d_1^i/(\overline{D}_i-\underline{D}_i)=d_2^i/(\overline{w}_i-\underline{w}_i) & \\ \quad (i=1,2,\cdots,N) & \end{array}\right\}$$

の条件のもとで

$$d_1^i \rightarrow min.$$

ここで，N＝都市の数，D_i＝都市iの浄水施設規模（変数），w_i＝都市iの下水道施設規模（変数），$d_1^i, d_2^i, e_1^i, e_2^i$＝各目的と満足水準とのかい離をあらわす変数，$\overline{D}_i, \overline{w}_i$＝$D_i, w_i$の満足水準，$\underline{D}_i, \underline{w}_i$＝$D_i, w_i$の許容水準である。

つぎに都市レベルの意志決定問題の制約条件について示すとつぎのようである。いま，$C_D(w_i), C_O(D_i)$＝下水道施設，浄水施設の建設費用，C_{i1}, C_{i2}＝浄水施設，下水道施設の建設に対する都市の自己負担金，α_i, β_i＝都市iに国から交付される補助金（パラメータ）とするとき

$$\left.\begin{array}{l} C_D(D_i) \leqq C_{i1}+\alpha_i \\ C_w(w_i) \leqq C_{i2}+\beta_i \end{array}\right\}$$

と表わされるのが財源に関する制約である。一方，物理的な制約条件は，F_i＝下水流達率，x_i＝下水放流量（変数）とするとき流量の連続条件より次式のようになる。

$$F_i D_i = w_i + x_i$$

II. 国レベルの意志決定問題の定式化

国レベルの行政体はMIN-MAX計画法の考え方を導入して，都市間の浄水施設の整備率の格差の是正をはかる中で流域内の水需要の充足を目指す目的と，河川の水質の保全改善を達成する目的を持っている。さらに，パラメトリックアナリシスを前提としてこれらの両目的に重みω_1，ω_2を与えて合成された評価関数を求め，目的関数として以下のように定式化する。つまり，

$$\left.\begin{array}{ll} z_1 \leqq \dfrac{D_i-\underline{D}_i}{\overline{D}_i-\underline{D}_i} & (i=1,2,\cdots,N) \\ z_2 \leqq \dfrac{\underline{B}_i-B_i}{\underline{B}_i-\overline{B}_i} & (i=1,2,\cdots,N) \end{array}\right\}$$

のもとで

$$\omega_1 z_1 + \omega_2 z_2 \longrightarrow maximize$$

ここで，z_1＝流域内各都市の最低の水需要供給率（変数），z_2＝水系における最低の水質改善度（変数），B_i＝都市iの直下の下流域の水質（変数），$\overline{B}_i, \underline{B}_i$＝$B_i$の目標水質（外的に設定される。），許容水質（現在水質）である。

つぎに，国レベルの意志決定問題における制約条件を示すと以下のようになる。まず，水質条件は次式で示される。

$$B_i \leqq \underline{B}_i \quad (i=1,2,\cdots,N)$$

つぎに物理的な制約条件はつぎのようである。つまり河川流量，水質の連続条件は

$$\left.\begin{array}{l} Q_0=Q_{10}+q, \quad q \leqq q_0 \\ Q_i=Q_{i-1}-D_i+w_i+x_i \quad (i=1,2,\cdots,N) \\ B_i=\dfrac{1}{Q_i}\{B_{i-1}(Q_{i-1}-D_i)+b_{w_i}w_i+b_{x_i}x_i\} \\ \qquad (i=1,2,\cdots,N) \end{array}\right\}$$

のように表わされる。ここで，Q_{10}＝既存開発流量，q＝ダム建設規模（変数），Q_0＝最上流地点の河川流量（変数），Q_i, B_i＝都市iの下流域の河川流量と水質（変数），q_0＝ダム建設規模の上限とする。

また，財源の条件は次式のように表わされる。

$$\sum_i \alpha_i + \sum_i \beta_i + C_q(q) \leqq M$$

ここで，$C_q(q)$＝ダムの建設費用関数，M＝国の水系に投入する総財源とする。また，都市（群）は上流から下流にかけて都市1，都市2，……，都市Nのように番号が付されているとする。

以上のモデルを淀川水系において適用して，ダムの開発，浄水施設・下水道施設の整備計画に関する分析を行なったが，このような分析結果については講演当日に説明を加えることとする。

(4) 水系全体の安全性の向上を目指した治水施設計画問題

流域全体の安全性を向上させるという洪水防御計画を作成することを目的としたときに治水施設計画においてつぎのような問題点が考えられる。すなわち，

① 現在の洪水防御計画や治水施設計画は、各計画基準点という特定の個所から個別的に検討・計画されているため、流域全体からみて整合がとれているかどうかが検討されていない。

② 施設計画の評価は計画基準点ごとの計画降雨の規模を通してのみ行なわれていて、計画の効果が具体的に検討されていない。

③ 流域全体を通して整合のとれた形での安全性の向上がはかられていない。

その他

④ 1水系内における計画基準点を選定し、その重要度ならびに計画規模(降雨規模)の決定過程に対する配慮がなされていない。

⑤ いかなる降雨パターンを計画に対して想定すべきか。

等の問題点も考えられる。まだまだ多くの問題点も考えうるが、本研究では、現状の研究成果の状態を一般的なものと考えて、④,⑤でとりあげた計画降雨規模と降雨パターンを与件としてとりあつかうこととし、主として①,②,③の問題点に着目した。そして、このような観点にたった治水施設計画問題をMIN-MAX計画法による治水計画モデルを作成して実証的な考察を行なった。

本モデルではまず洪水はん乱を流域に生起させないように流域全体の安全性の向上をバランスよく達成させるという治水施設計画の目的を設定した。このために、各計画基準点における目標達成度が互いに異ならないような施設の整備を行なうための方法をMIN-MAX計画法を用いて検討したのである。

分析を進めるにあたっては計画手段を3つのレベルに分割した。レベル1としてはダム建設を，レベル2としてはダム建設と河川改修を，レベル3としてはレベル2の計画手段に加えてダムの再開発を考慮した。また、ダム操作については、一定の最善と考えられる放流ルールを設定することとした。また、現実のデータの分析を行ない、治水施設の規模と費用及びダムの放流量と計画基準点におけるピーク流量とには線形性のあるものと判断しモデルにおいては線形性を仮定した。

以上のような前提のもとで治水施設計画モデルを以下のように定式化した。

<u>計画基準点における制約条件</u>

本モデルでは2種類の評価尺度を各計画基準点ごとに設定した。第1のタイプは余裕流量 z_{1i} であり、第2のタイプは安全率 z_{2i} である。すなわち、$\overline{w_i}, w_i$ = 計画基準点 i における疏通能及びピーク流量(変数)，C_{it_i} = 計画基準点 i より上流にあるダムの治水容量，a_{it_i} = C_{it_i} と w_i との関連関係を表わす線形式の係数とするとき

$$\left.\begin{array}{l} z_{1i}=\overline{w_i}-w_i \ (\text{タイプ}1), \quad z_1 \leqq z_{1i} \\ \left(\text{あるいは } z_{2i}=(\overline{w_i}-w_i)/w_i \ (\text{タイプ}2), \ z_2 \leqq z_{2i}\right) \\ w_i \leqq \overline{w_i}, \quad w_i = a_{i1}C_{i1}+\cdots\cdots+a_{it_i}C_{it_i}+\cdots \end{array}\right\}$$

<u>施設規模に関する制約条件</u>

いま，$\overline{w_i'}$ = 河川改修前の疏通能，r_i = 河川改修による疏通能の向上分(変数)，r_i^0 = 疏通能向上の上限値，C_j = 建設予定ダムの治水容量(変数)，C_j^0 = ダムの治水容量の上限値，C_ℓ' = 既存ダムの治水容量，P_ℓ = 再開発されたダムの治水量，C_ℓ = 再開発後のダムの治水容量(変数)，P_ℓ^0 = 再開発の上限値，Δ_j = 建設予定ダムの利水容量(パラメータ)，Δ_j^0 = 利水容量の下限値　とするとき

$$\left.\begin{array}{l} \overline{w_i}=\overline{w_i'}+r_i, \quad r_i \leqq r_i^0, \quad C_j \leqq C_j^0 \\ C_\ell = C_\ell' + P_\ell, \quad P_\ell \leqq P_\ell, \quad \Delta_j \geqq \Delta_j^0 \\ (i=1,2,\ldots,N, \ j=1,2,\ldots,J, \ \ell=1,2,\ldots,L) \end{array}\right\}$$

<u>費用に関する制約条件</u>

いま，m_{Ri} = 河川改修費(変数)，α_{Ri}, β_{Ri} = 改修費と疏通能との関係を示す係数，m_{Dj} = ダムの建設費(変数)，α_{Dj}, β_{Dj} = ダムの建設費とダムの規模の関係を表わす係数，$m_{\Delta\ell}$ = ダムの再開発費用(変数)，$\alpha_{\Delta\ell}, \beta_{\Delta\ell}$ = ダム再開発費と規模の関係を表わす係数とすると

$$\left.\begin{array}{l} m_{Ri}=\alpha_{Ri}r_i+\beta_{Ri}, \quad m_{Dj}=\alpha_{Dj}(\Delta_j+C_j)+\beta_{Dj} \\ m_{\Delta\ell}=\alpha_{\Delta\ell}P_{\Delta\ell}+\beta_{\Delta\ell}, \quad \sum_{i,j,\ell} m_{Ri}+m_{Dj}+m_{\Delta\ell} \leqq M \end{array}\right\}$$

ここでMは治水施設に投入される総財源である。

<u>目的関数</u>

以上にあげた制約条件のもとで水系全体でバランスよく安全度を向上させるために上述の z_1 と z_2 という2つのタイプの水準を向上させることとした。つまり，

$$z_1 \rightarrow \max. \quad (\text{あるいは } z_2 \rightarrow \max)$$

のようなMIN-MAX計画法を適用した。

以上にのべた計画モデルを用いて淀川水系での実証的分析を行なった結果、いくつかの興味ある結果が求められ、現行の治水計画がどのような目的をもって行なわれているかも類推することができた。これらについてはとりまとめて講演時に示したいと考えている。

4. おわりに

以上においては、現象面でも評価面でも複雑な構造を有するようになった近年の土木計画の問題に対しての有効なシステム的アプローチの方法の1つとしての、MIN-MAX計画モデルによる方法について述べてきた。土木計画問題における評価の多元性や計画主体間での評価の競合性という計画本来の特性に起因する問題を解決していくためには、「多重多階層性」という構造特性を適確に把握するとともに、MIN-MAX計画モデルのように従来とは若干異なった視点からの分析を精力的に展開していくことが必要であると考えている。我々はパラメトリック分析のための数学モデルやシステム的手法についても、より精度の高い多様な計画情報を得る目的で研究に取組んでいるが、本稿はとくに、MIN-MAX計画法に焦点をあてて研究成果を整理したものである。

参考文献

1) 輸送施設計画問題へのMIN-MAX配分法によるアプローチ：春名攻，第32回年次学術講演会，昭和52年
2) 多重・多階層計画問題の分析のための計画モデルにおける評価関数について：春名攻，第34回年次学術講演会，昭和54年.
3) 数理計画モデルによる公共トラックターミナルの配置と規模計画に関するシステム分析：吉川和広，春名攻，松元利德，昭和54年度関西支部年次学術講演会，昭和54年.
4) 多目的性・多階層性を考慮した土木計画問題のシステム分析について：春名攻，小林潔司，吉川和広，衛生工学研究シンポジウム，昭和53年
5) 治水施設の建設・整備計画に関するモデル分析：吉川和広，春名攻，第34回年次学術講演会，昭和54年.

(年次学術講演会はすべて土木学会の講演会である。)