

多目的意思決定分析と数理計画法 ：地域計画への利用

瀬尾 美巳子

1. はじめに

意思決定過程は、一般に客観的・解析的局面と主観的・判断的局面とから成るといえる。従来のシステムズ・アプローチの諸手法は、主として前者の取扱いにかかわるものであり、システム構造の定量的モデリングとその最適化を行なう点で有効性を示してきた。これに対して近年急速な発展を遂げてきた意思決定分析 (decision analysis) の手法は、主として後者にかかわるものであり、非定量的な意思決定の判断的な局面をいかに合理的な手続きをもって取り扱うかを志向するものである。これらの両者のアプローチはさらに多目的システムの最適化とその評価のために有効に結合されることが可能である。多目的 (あるいは多基準) 意思決定問題を取り扱う手法の有効性は、この両者をいかにうまく結合し、処理することができるかにかかっているといても過言ではない。

ここでは多目的意思決定問題の主要な特徴を吟味し(2)、その取扱いのためにすでに確立されてきた多属性効用分析法 (multiattribute utility analysis) を数理計画法と結合して利用することの有用性を示す(3)。特にその利点は、双対解を基礎的評価因子として用いることによって、その「価格」としての意義に新たな視点を提供することにある(4)。最後にこの方法を地域計画に適用

した例を紹介し(5)、若干の展望を与える(6)。

2. 多目的意思決定問題の特徴

多目的意思決定問題とは、評価対象となるシステム S が、多数個の評価基準または、最適化されるべき目的をもっている場合の意思決定問題 (decision problem) である。一般的な多目的最適化問題は下記のように表現される。

$$\max_{x \in X} (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)) \quad (1)$$

ここで $x \in R^n$ は意思決定変数ベクトル、 $X \subset S$ は実行可能ベクトルの集合、 $f_i: R^n \rightarrow R^1$ は目的関数である。問題(1)において、 m 個の目的関数は通常互いに非通約性および非両立性を持ち、問題(1)の完全に順序づけられた最適解または優越解を直接求めることはできない。ここで次の性質をもった解 x^\dagger の集合をパレート解または非劣位解 (noninferior solution) と定義する。

$$x^\dagger = \{x^\dagger | x^\dagger \in X, \exists x \in X, \text{ s.t. } f_i(x) \geq f_i(x^\dagger) \text{ for } \forall i \in I = [1, 2, \dots, m], \\ f_k(x) > f_k(x^\dagger) \text{ for } k \in I, k \neq i\} \quad (2)$$

解 x^\dagger は少なくとも他の1つの目的 f_i を悪化させることなしには、いかなる目的 f_k も良化させえないような目的空間の点に対応する解であり、それらは互いに比較不可能である。すなわち解 x^\dagger は部分的にのみ順序づけられる (partially ordered)。

問題(1)を解く (最適化する) ということは、通常「パレートの意味で最適」な解、すなわち非

劣位解の集合 x^+ を見出すことである。非劣位解集合 $x^+ = \{x^+\}$ の中から最も望ましい解 x^* (これを選好解 preferred solution と呼ぶ) を選択するにはもはや解析的手法によることはできず、なんらかの手法による判断的過程にしたがわなければならない。

さて問題(1)を解くためには、ベクトル評価関数 $\{f_i(x)\}$ のスカラー化が行なわれる。すなわち問題(1)は、スカラー評価関数 V の最大化問題に変換される。

$$\max_{x \in X} V(f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)) \quad (3)$$

問題(3)は、多次元評価関数 $\{f_i(x)\}$ 上で定義された多目的意思決定問題であり、関数 $V: R^m \rightarrow R^1$ は全般的評価関数である。一般に関数 V の値は意思決定者によるパラメータ(重みづけ係数)の選択に依存する。「選択された」重みづけに対応して(3)の解である選好解が求められる。通常の重みづけ法[1][2][3]による多目的数理計画問題(3)の解法は、非劣位解を求めうるに止まり、選好解の導出に必要な重みづけの選択に関する判断過程を取り扱うための合理的な手順を有しなかった。

他方、最近開発された多属性効用関数 (multi-attribute utility function, MUF) 法は、問題(3)を次のような分割されたシステム $S = (s_1, s_2, \dots, s_m)$ に関する多属性効用関数の評価問題(4)に帰着させる。

$$\max_{x_i \in S_i \subseteq S} U(\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_m) \quad (4)$$

関数 $U: R^m \rightarrow R^1$ は多属性効用関数と呼ばれる。Raiffa, Keeney らによって開発された MUF 法は、heuristic な手続を用いて U のパラメータ(スケール定数)を同定し、効用関数の数値を基底的に測定することを可能にする[4][5][6]。ここで χ_i は、各目的関数 $f_i(x_i)$ をその同定ないし最適化過程にかかわることなしにその達成の有効性を測る尺度のタームでとらえたもので、システム i の属性と呼ばれる。見られるように多目的意思決定分析のオリジナルな形態である MUF 法は多目的意思決定問題(3)に含まれる解析的局面

と判断的局面のなかで、特に判断過程に焦点をそばって選好解を見出すための工夫であるといえることができる。

このように MUF 法は問題(3)が含む $f_i(x)$, $i = 1, \dots, m$ の最適化過程を飛び越えて、多属性効用関数 U の主観的な同定の問題のみにかかわるために、多目的評価に本質的に内在するシステム評価のあいまい性に全面的に依存することになる。MUF 法における対話型の逐次的なプロセスの存在はこのような判断的過程に含まれる意思決定のあいまいさを除去しうるものではない。そこで問題(3)と(4)との間に存在する phase gap をいかに埋めることができるか、これがわれわれの問題である。

3. 多目的意思決定と数理計画法

多目的意思決定問題(3)において、 $x_i \in S_i \subseteq S$ とするとき、分割されたサブシステム i の目的関数 $f_i(x_i)$ を最適化する問題は通常の数理計画問題である。

$$\begin{aligned} \max f_i(x_i) \\ \text{subject to } g_r(x_i) \leq b_r \quad r=1, \dots, l_i \end{aligned} \quad (5)$$

ただし $x_i \in R^n$, $f_i: R^n \rightarrow R^1$, $x_i \in X_i \subseteq X$. 問題(5)の f_i , b_r , x_i は、それ自身1つの階層的なシステムの目的構造を示すものとみなされる(Ijiri [7]). ベクトル評価問題(1)を解く1つの方法である制約法 [8][9][10] は、 f_i , g_r をそれぞれ目的関数のセットとみなしている。多目的意思決定問題の選好解を見出すために、問題(3)を2段階において解く方法の一例は、Haimes [11][12] らによる Surrogate Worth Trade-off (SWT)法である。SWT法においては、Step 1において、問題(5)の型のスカラー最適化問題を ϵ -制約法のアルゴリズムによって解き、そこから得られる双対解 λ_{ir}^* を目的関数 f_i と f_r (5)の g_r で表現)との間の trade-off rate 関数と定義したうえで(最適解において $\lambda_{ir}^* = \frac{\partial f_i}{\partial f_r}$ が成り立つから)、step 2においては、代用評価関数(surro-

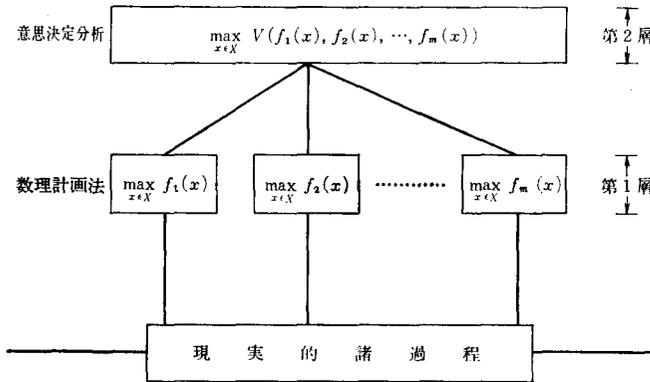


図1 システム分割と統合の2層モデル

gate worth function) $w_{ir}(\lambda_{ir}^*)$ を序数的に評価し、最も望ましい λ_{ir}^* の値 (すなわち意思決定者にとっての目的関数間の限界代替率と無差別な λ_{ir}^* の値) に対応する目的関数の値が求められる。こうして(5)の選好解 x_i^* が見出されるわけである。みられるようにSWT法では多目的意思決定問題(3)を解くための2つの局面 (解析的および判断的) をともに取り扱いうる工夫を有しているが、step 2における代用評価関数のアセスメントそのものは、step 1における解析的結果である λ_{ir}^* の値と無関係に付与され、この意味で両局面の phase gap が埋められているとはいいい難いものがある。ともあれ、SWT法は地域水資源計画などの具体的な問題に適用され([13][14])、またその対話型手法の開発も行なわれている([15])。

これに対して以下では、多目的意思決定問題(3)の選好解を見出すにあたっての phase gap を埋めるために、通常の数理計画問題(5)の最適双対解を、直接的に基礎的評価因子として利用する方法を述べる(Seo [16][17])。この方法の骨子は、システム構造の多層システムへの分割と統合にある。図1は、2層モデルにおける基本的なシステム構成と、それらに対応する主な分析手法を示している。

4. 多目的評価における Kuhn-Tucker ベクトルの利用: nested Lagrangian multiplier 法

まずシステム S を多数個の目的から成る構造とみなし、これらの目的をその性質に応じて階層化する。これらは大別して、定量的なモデリングと解析的な最適化に適した目的群(G1)と、より広汎であいまい、かつ複雑な内容をもち、意思決定者の判断と調整機能に委ねられるべきだとみなされる目的群(G2)とに分けられる。G1の目的群は、数個の数理計画問題(5)の中に構造化される。問題(5)を再定式化して($s=1, \dots, q$),

$$\begin{aligned} \max f_s(x_s) \\ \text{subject to } g_r(x_s) \leq d_r \quad r=1, \dots, p_s \quad (6) \\ h_k(x_s) \leq b_k \quad k=p_s+1, \dots, l_s \end{aligned}$$

ここで $g_r(x_s)$ は、サブシステム s の政策的制約条件、 $h_k(x_s)$ は技術的制約条件である。 (f_s, g_r, x_s) , $r=1, \dots, p_s$ はサブシステム s に含まれるG1の目的構造を示す。すなわち、 f_s (目的関数) は、システム S の下位目的、 d_r (政策制約定数) はシステム S の上位目的、 x_s (意思決定変数) は最下位の目的とみなされる。たとえば、図1を地域システムと考えると、第1層の各サブシステムで作成される数理計画問題(6)は、 f_s を各地方の目的関数(生産関数など)、 d_r は第2層の上位システムから送達された環境制約などの制約定数、 g_r は各地方の汚染排出関数、 x_s は資本形成などの各地方の意思決定変数であると考えられる。

さて問題(6)の局所最適解を x_s^* とすると、Kuhn-Tuckerの定理は、微分可能性と制約拘束条件が保持されるという条件のもとで、Kuhn-Tucker条件を満足するベクトル $\lambda_s^* \in R^{p_s}$, $\lambda_s^* = \{\lambda_{sr}^*\}$ の存在を保証する。したがって、 $\lambda_{sr}^* > 0$ のとき、 $\lambda_{sr}^* = \frac{\partial f_s}{\partial d_r}$ が成り立つ [1][18][19]。 λ_{sr}^* は Kuhn-Tucker 乗数であり下位目的 f_s の限界1単位の増加分によって評価された上位目的 d_r の機会費用を逆に表示するものと解釈できる。たとえば上述の地域計画問題を考える場合、 λ_{sr}^* は各地方 s の生産関数 f_s の値(産出量)の限界1単

位の増加に対してトレード・オフされるべき（すなわち代替的に放棄されるべき）、環境制約 b_r の値を逆に表示する。いまでもなくこのようなトレード・オフ値が低いほど、その地方にとっての環境制約 b_r の充足度がすでに高い（困難度が低い）ことを示す。一般に市場価格が、その商品の充足度に逆比例して変動すると類推的にこのようなトレード・オフ値 $1/\lambda_{sr}^*$ は、環境制約 b_r のある地方 s の生産目的に照らしての機会費用、ないし「価格」(Shadow Price)を示すものと解釈することができる。 λ_{sr}^* はその地方にとっての環境制約（上位目的）の満足度の指標である。

ここで Kuhn-Tucker の定理は、Kuhn-Tucker 条件を満たす乗数ベクトルの存在が、 x_s^* の問題(6)に対する局所最適性のための1次の必要条件であることを示し、そこでは関数の微分可能性が仮定されるだけで凸性は仮定されていないから、 x_s^* に対応する Kuhn-Tucker 乗数ベクトル λ_s^* の存在は、必要条件としては非凸問題においても保証されることに注意したい（制約拘束条件が満たされているという仮定のもとで）。

さてこのような解釈の下で λ_{sr}^* を問題(6)で表現されたシステムのための基礎的評価因子として利用することができる。そのために λ_{sr}^* に関する擬効用関数を次の形式で定義する（以下*は省略）。

$$u_s = u_s(\lambda_s(d_s)) \quad (7)$$

ただし $\lambda_s \in R^{p_s}$, $\lambda_s = \{\lambda_{sr} | \lambda_{sr} > 0\}$, $u_s \in R^{p_s}$, $u_s = \{u_{sr} | u_{sr} \geq 0\}$ 。

多目的意思決定問題(3)の選好解を見出すことは、こうして次の問題を解くことに帰着する。

$$\max U[u_1(\lambda_1(d_1)), \dots, u_q(\lambda_q(d_q))] \quad (8)$$

関数 $U: R^q \rightarrow R^1$ は多属性効用関数であり、その同定の方法は、オリジナルな MUF 法と同様に、lottery 法によって無差別実験を行なうことによ

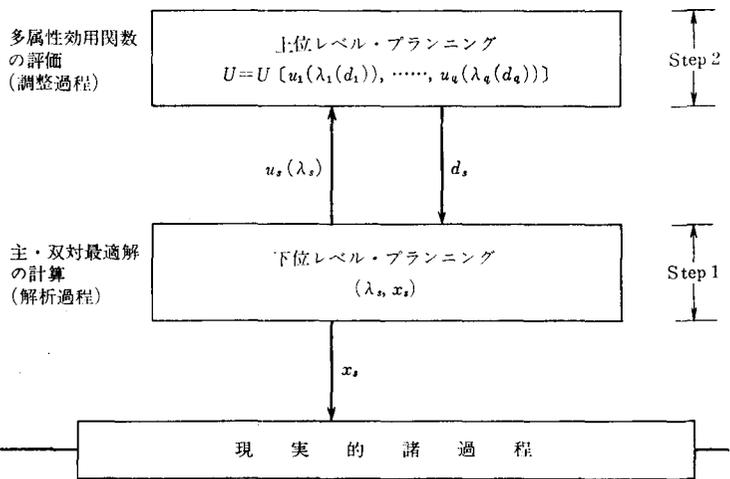


図2 多目的意思決定分析の2層モデル

って得られる。ただし無差別実験はすでに規準化された効用値のタームで行なわれるので、もとの属性値の次数からは自由であり、より合理的に行なうことができる。図1に示した意思決定の構造は、いまや図2の形態で機能することになる。

この方法では、まずstep1において、各サブシステム $s=1, \dots, q$ のもとで独立に作成された数理計画問題が解かれるが、そこには上位の意思決定者による政策制約（および政策パラメータ）が賦与されている。最適解 x_s^* は、現実の経済過程などに対して指標 (reference point) として表示され、双対解 λ_s^* は評価情報として上位に送達される。step2では上位の意思決定者が、基礎的評価因子としての $u_{sr}(\lambda_{sr}(d_s))$ を用いて、独自の政策的判断を下し、ここでstep1で得られた解析的な解がその調整的機能によって統合される。こうして意思決定過程のもつ解析的局面が、人間的・調整的機能にもとづいた判断的局面とシステム的に結合されることになる。最終的な評価値 U の値は、代替的な政策プランに対して測定され、最も望ましいプランの選択に利用することができる。関数 U はさらに複雑なネスティング構造をもった多属性効用関数として同定することができる。この方法は nested Lagrangian multiplier (NLM) 法と呼ばれる。

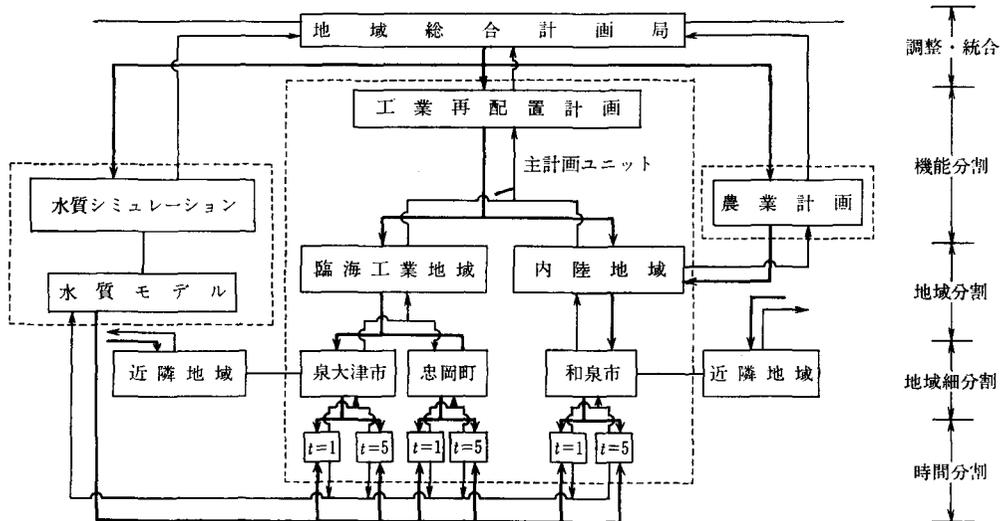


図 3 地域計画の階層的モデリング

5. 地域工業再配置計画への適用

以上の方法は、いくつかの形態での地域計画問題に適用されている [20] [21]. ここでは河川流域の水質管理と結合した工業再配置計画への応用例を紹介しておきたい [22]. 対象地域は、大阪泉北地方の一部であり、沿海部には堺泉北臨海コンビナートを擁し、内陸部にはなお農業・林業地帯を大きく残す問題複合体を形成している. これらの諸地域の急速な開発は河川水質の汚染制御と結合した工業再配置計画とその評価問題を提起せざるをえない. システム分割と問題の構造化は図 3 に図解されている. この構造の特質は、基本的な 2 層システムをとることに加えて、主計画ユニットが水質シミュレーションユニットに連結され、両者の間に入・出力関係を通じて反復的なループが形成されていることである.

主プログラミング・ユニットにおいては各地方(市・町)ごとに独立の数理計画問題が解かれる. 問題は、制限された土地と労働力供給のもとで、指示された一定の経済成長(総資本形成)と水質改善を達成するという条件にしたがって、地域的な工業生産高を最大にするような、産業別の資本、労働力および土地の量を見出すことである.

すなわち上位目的は成長政策と、土地および労働力の制約と、水質管理であり、下位目的は産出量の最大化である. 各計画期間ごとの市・町別の最大化された目的関数の値 H_{sj} は、プログラム・ユニットからの出力として、汚染負荷係数 ω_j を乗じた総和 $\sum_s \sum_j \omega_j H_{sj}(t)$ がシミュレーション・ユニットに入力される (j は産業を示す). 他方シミュレーション・ユニットからは汚染濃度 $Z(\tau)$ が出力され、流量 $Q(\tau)$ を乗じた総排出年間予想量 $\sum_{\tau=1}^{885} Z(\tau) Q(\tau)$ は、工業出荷額に比例して各市・町に配分され、主プログラミング・ユニットに汚染制約定数 $W_s(t)$ として入力される(図 4). この間にシミュレーション入力 $M(\tau)$ には、政策当局による干渉投入として調整パラメータによる削減 E が加えられている.

$$\frac{E \sum_s \sum_j \omega_j H_{sj}(t)}{365 Q(\tau)} = M(\tau) \quad (9)$$

ここで水質シミュレーションには、河川の自浄作用を考慮した Beck-Young model が若干の手直しをともなって利用された.

このようなシステムは、各産業ごとに異なる政策パラメータとしての土地係数 ϕ_j に関して 3 つの代替案について解かれた. それらの代替案は、I. 臨海地域と内陸地域との間の急進的な産業再

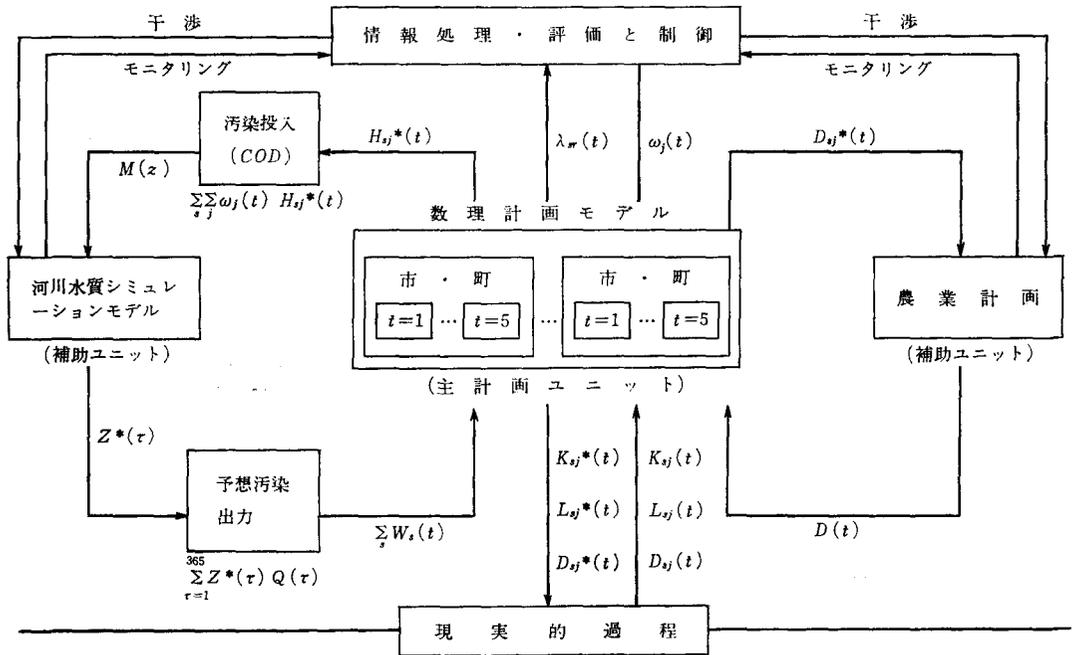


図4 主計画ユニットとシミュレーション・ユニットとの間の入・出力ループ (2層システム)

配置政策, II. 土地係数の大幅な削減による工業用地の減少政策, III. 水質管理と両立的な全般的な成長政策である. このような代替案の評価は, 問題(8)の形式で行なわれる. 関数 U は, 多属性効用関数の表現定理 [5][6] にしたがって表現されるが, 一般に乗法型をとる (すなわちスケ

ール係数の和が1ではない)ことが知られる. すなわち, MUFの乗法型表現は,

$$U = U(U_{IO}(u_K, u_W, u_L, u_D), U_{TA}(u_K, u_W, u_L, u_D), U_{IZ}(u_K, u_W, u_L, u_D)) \quad (10)$$

に関して, $U = \frac{1}{K} [\prod_s (1 + K k_s U_s(\lambda_s)) - 1]$

$$s = IO, TA, IZ \quad (11)$$

表1 Kuhn-Tucker 乗数と擬効用関数の値 (代替案III)

t : 計画期間

制約定数	$t=1$		$t=2$		$t=3$		$t=4$		$t=5$	
	λ	u	λ	u	λ	u	λ	u	λ	u
泉大津市										
$K(t)$	0.503	0.1033	0.4879	0.0003	0.337	0.0068	0.455	0.0089	0.288	0.0040
$W(t)$	3.837	0.9582	1461.44	0.9976	33.58	0.9592	37.90	0.9488	21.47	0.9763
$L(t)$	2.059	0.5023	2.065	0.0013	2.16	0.0590	2.65	0.0640	19.95	0.9065
$D(t)$	0.1915	0.0235	0.178	5.5×10^{-5}	0.8631	0.0219	0.1427	0.0011	2.511	0.1061
忠岡町										
$K(t)$	0.265	0.0016	0.291	0.0018	0.218	2.87×10^{-4}	0.1231	0.0003	0.04	0.0002
$W(t)$	37.80	0.9438	49.40	0.9889	61.27	0.9881	76.0	0.9715	93.30	0.9794
$L(t)$	2.33	0.0535	2.469	0.0456	3.0617	0.0463	3.83	0.0477	4.97	0.0520
$D(t)$	1.34	0.0286	1.343	0.0230	1.816	0.0261	2.40	0.0294	3.29	0.0343
和泉市										
$K(t)$	0.769	0.0385	0.944	0.0191	0.7569	0.0157	0.888	0.0259	1.30	0.0134
$W(t)$	14.584	0.9724	33.79	0.9947	40.94	0.9761	21.893	0.9522	58.14	0.9684
$L(t)$	1.7836	0.1071	1.55	0.0371	1.811	0.0409	1.56	0.0556	2.125	0.0273
$D(t)$	0.307	0.0072	0.4179	0.0035	0.118	0.0004	0.36	0.0027	0.796	0.0050

表 2 多属性効用関数の値

MUF	代替案 I			代替案 II			代替案 III		
	t=1	t=3	t=5	t=1	t=3	t=5	t=1	t=3	t=5
U_{IO}	0.786	0.830	0.867	0.828	0.850	0.882	0.833	0.839	0.902
U_{TA}	0.895	0.901	0.939	0.883	0.903	0.939	0.854	0.912	0.932
U_{IZ}	0.737	0.777	0.782	0.728	0.759	0.771	0.743	0.766	0.778
U_R	0.908	0.851	0.907	0.901	0.844	0.915	0.884	0.847	0.925

表 3 代替案のランキング

t	泉大津市			忠岡町			和泉市			地 域		
	AI	AII	AIII	AI	AII	AIII	AI	AII	AIII	AI	AII	AIII
1	3	2	1	1	2	3	2	3	1	1	2	3
3	3	1	2	3*	2*	1	1	3	2	1*	3	2*
5	3	2	1	1	1	2	1*	3	2*	3	2	1

(注) *は他の代替案とほとんど同じランクを示す

かつ、 $U_s = \frac{1}{K_s} [\prod_r (1 + K_s k_{sr} u_{sr} (\lambda_{sr}) - 1]$

$$r = K, W, L, D \quad (12)$$

ただし $1 \geq U \geq 0, 1 \geq U_s \geq 0, 1 \geq u_{sr} \geq 0, 1 > k_s > 0, 1 > k_{sr} > 0, \sum_s k_s \neq 1, \sum_r k_{sr} \neq 1, K > -1, K_s > -1$. K, W, L, D はそれぞれ資本、水質、労働力、土地に関する制約を表わす添字である。代替案 III に関する Kuhn-Tucker 乗数と擬効用関数の値は表 1 に示す。各代替案の MUF の値は表 2 に示す。表 3 は各代替案の各市・町にとっての選好度をランキングで示したものである。要約すれば代替案 III は、計画期間の中期以降において最も選好度が高いことが示されている。

6. 結びに代えて

以上において、多目的意思決定問題のもつ特質に照らして、多目的意思決定分析と結合された数理計画法の利用が、その双対性によって特に望ましいものであることをみてきた。すなわち数理計画法はその性質上、最適資源配分問題を解くと同時にそれと結合された評価問題を解くことができる。NLM 法はそうした評価問題の解を、直接に多目的評価関数の中に nesting する 1 つの途を提供し、そこに意思決定者の調整機能を導入しようとするものである。この方法にはなおいくつかの

問題が残されている。すなわち(1)システム評価の結果はシステム属性の測定単位の次元から自由ではなく、そこにはシステムの相対的なスケール特性が反映されていること、(2)MUFの導出は局所的な情報にもとづく仮説設定にほかならず、あり得べき偏りを是正するための検定手段を欠いていること、(3)評価の多様性を明示する配慮が存在しないこと、などである。これらに関しては、(1)は異なったスケールをもつシステムの比較考量を可能にする利点があるといえるし、(2)については現状値を基準とした感度分析による MUF の利用の途を推奨することができる。(3)に関しては評価のちらばりを考慮するためのエントロピーモデルとの結合の途を考えることができる。(2)(3)に関する応用については Seo and Sakawa [23] による試みがありそこでは計算機プログラム ICOPSS (Interactive Computer Program for Subjective Systems) の利用による MUF の評価と計算の例があげられている [24]。数理計画法との結合による多目的意思決定分析の新たな開発への途は、さらに興味ある多くの研究課題を含むものであるといえるであろう。

参 考 文 献

[1] Kuhn, H. W. and Tucker, A. W.: Nonli-

- near Programming, *Proceedings of Second Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability* (ed. J. Neyman), University of California Press, 1951
- [2] Zadeh, L. A. : Optimality and Non-Scalar-valued Performance Criteria, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. AC-8, (1963) pp.59-60
- [3] Geoffrion, A. M. : Proper Efficiency and Theory of Vector Maximization, *Journal of Mathematical Analysis and Applications* Vol. 22(1968), pp.618-630
- [4] Raiffa, H. : *Decision Analysis*, Addison-Wesley, 1968
- [5] Keeney, R. L. : Multiplicative Utility Functions, *Operations Research*, Vol.22(1974), pp.22-34
- [6] Keeney, R. L. and Raiffa, H. : *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs*, John Wiley and Sons, 1976
- [7] Ijiri, Y. : *Management Goal and Accounting for Control*, North-Holland, 1965
- [8] Marglin, S. A. : Objectives of Water-Resource Development : A General Statement, *Design of Water-Resource Systems*, (ed. A. Mass and others), Harvard Univ. Press, 1962
- [9] Cohon, J. L. and Marks, D. H. : Multiobjective Screening Models and Water Resource Investment, *Water Resources Research*, Vol.9, No.4(1973), pp.826-836
- [10] Haimes, Y.Y. and Wismer, D.A. : A Computational Approach to the Combined Problem of Optimization and Parameter Identification, *Automatica*, Vol.8, No.3 (1972), pp.337-347
- [11] Haimes, Y. Y. and Hall, W. A. : Multiobjectives in Water Resource Systems Analysis : The Surrogate Worth Trade-off Method, *Water Resources Research*, Vol.10(1974), pp.615-624
- [12] Haimes, Y.Y., Hall, W. A. and Freedman, H. T. : *Multiobjective Optimization in Water Resources Systems*, Elsevier, 1975
- [13] Sakawa, M. : Multiobjective Analysis in Water Supply and Management Problems for a Single River Basin, *Water Supply & Management*, Vol.3, No.1(1979), pp.55-64
- [14] Haimes, Y. Y. : *Hierarchical Analysis of Water Resources Systems* (chap.9), McGraw-Hill, 1977
- [15] Chankong, V. and Haimes, Y. Y. : The Interactive Surrogate Worth Trade-off (ISWT) method for multiobjective Decision making, *Multiple Criteria Problem Solving* (ed. S. Zionts), Springer-Verlag, 1978
- [16] Seo, F. : Evaluation and Control of Regional Environmental Systems in the Yodo River Basin : Socio-Economic Aspect, *Proceedings of IFAC Symposium on Environmental Systems Planning, Design and Control* (ed. A.Akashi and Y.Sawaragi), Pergamon, 1978
- [17] Seo, F. : An Integrated Approach for Improving Decision-Making Processes, *Behavioral Science*, Vol.25, No.5 (1980), pp.387-396
- [18] Luenber, D.G. : *Introduction to Linear and Nonlinear Programming*, Addison-Wesley, 1973
- [19] 福島雅夫, 非線形最適化の理論, 産業図書, 1980
- [20] Seo, F. and Sakawa, M. : An Evaluation Method for Environmental Systems Planning, *Environment and Planning A*, Vol. 11, No.2 (1979), pp.149-168
- [21] Seo, F. and Sakawa, M. : A Methodology for Environmental Systems Management : Dynamic Application of the Nested Lagrangian Multiplier Method, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. SMC-9, No.12(1979), pp.794-805
- [22] Seo, F. and Sakawa, M. : Multiobjective Decision Making for Industrial Land-use Program and Water Quality Control, Discussion Paper No.157, Kyoto Institute of Economic Research, Kyoto University, 1981
- [23] Seo, F. and Sakawa M. : Fuzzy Evaluation of Regional Planning with Conflicting Objectives, Discussion Paper No.161, Kyoto Institute of Economic Research, Kyoto University, 1981
- [24] Sakawa, M. and Seo, F. : An Interactive Computer Program for Subjective Systems and Its Application, WP-80-64, International Institute for Applied Systems Analysis, 1980