ダム建設計画に関する一考察

日本水道コンサルタント　正員　萩原良巳
同　上　正員　中川芳一
同　上　正員○渡辺晴彦

1. はじめに

現行の利水計画においては、新規水源をダム貯水池に依存した形をとることが多い。通常、ダム建設計画の策定に関しては、入力として、地質水文条件を考慮したうえで、ダムサイト候補地の設定と容量に対応した開発可能水量が与えられる。そして、利水目的に適合するだけの水量を確保することを前提として、経済的に有利なダム建設の規模配置工程計画案の抽出を行うわけである。

一般に、ダムサイト候補地がいくつか与えられた場合、基本的に次の2つの条件が課せられるため、これらを考慮した代替案の抽出が必要となる。

①ダムの開発水量が、当該ダムの貯水容量のみならず他のダム（とりわけ上流部）の貯水容量の大小に影響を受ける。

②ダム建設は大規模土木工事であり、規模の経済性が作用する。また、小規模ダムの建設は、技術的経済的に不利であり見送られるため、つくるとすれば最低の規模というものが与えられる。

以上の事項は、本質的には、ダムをつくる・つくらないというON－OFFの状態により、そのダムの建設に関する条件が大きく異るということを意味している。従って、このつくる・つくらないの決定は、ダム建設問題において重要な位置を占め、一種の組みあわせ問題を形成する。

本研究は、この組みあわせ問題としてのダム建設問題を対象とし、とくに利水目的が需要の充足にある場合について数理計画的アプローチを通して考察する。具体的には、2.において、最終目標年度の需要充足のための規模配置計画問題をとりあげ、3.では、途中年度の需要変化に対処するための建設工程計画問題の2つに分けてモデル分析を行う。ここで、規模配置計画問題については、これが、ダムをつくる・つくらないの0－1整数変数を含めた混合整数計画問題(MIP)として、また、後者の建設工程計画問題についてはMIPの結果を受け、動的計画法(DP)による定式化を経た分析を行うこととする。これらの分析を通して、ダムサイト候補地・開発可能水量が与えられた場合のダムの順序づけに対する情報作成のための方法論形成を行うことが、本研究の狙いである。

2. 利水施設規模配置計画に関するモデル分析

2－1 モデルの定式化

ここでは、目標最終年度における需要を充足し、経済的に有利な利水施設の組みあわせパターン選出のための数理モデルを定式化する。この際、対象とする利水施設はダムと取水施設であるものとし、図－1のようにM個のダムサイト、N個の取水施設を通し、L個の需要地への水供給を行う場合を想定する。1.において述べたように、この問題は、各施設をつくる・つくらないの判断を表わす0－1整数変数を含めてMIPとしてとりあげることができ、その具体的内容は次のとおりである。

①ダムiの開発水量q_iは、そのダムの容量v_iと、それに影響を及ぼすダム群（この集合をI_iとする）の容量により決定される。

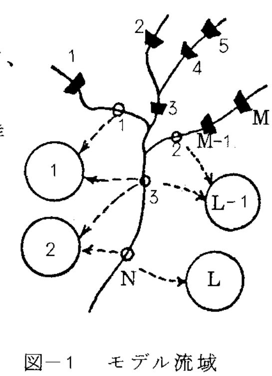
$$q_i=f_i(v_i, V_i),\quad V_i=\{v_j \mid j\in I_i\} \qquad (i=1\cdots\cdots M) \qquad (1)$$

②ダムiの容量に関しては、つくるとした場合に上下限が設定される。

$$v_i=0 \quad \text{or} \quad \bar{v}_i^{\min}\leq v_i\leq \bar{v}_i^{\max} \qquad (i=1\cdots\cdots M) \qquad (2)$$

③取水点jにおいては、維持流量r_jと取水量w_jを充足する流量Q_jがある。

$$Q_j=\sum_{k\in E_j} q_k-\sum_{k\in H_j} w_k\geq r_j+w_j \qquad (j=1\cdots\cdots N) \qquad (3)$$



図－1　モデル流域

但し、Q_jはそれより上流のダムの開発水量の総和から途中で取水される分を除いて定義される。

E_j：j地点より上流のダムの集合、H_j：j地点より上流の取水施設の集合

④取水施設についても、つくるとした場合には、その規模に上・下限が与えられる。

$$w_j=0 \quad \text{or} \quad \bar{w}_j^{\min} \leqq w_j \leqq \bar{w}_j^{\max} \qquad (j=1\cdots\cdots N) \qquad (4)$$

⑤取水施設から各需要地までは、あらかじめ設定された導水ネットワークを通して水供給がなされ、需要は必ず充足される。

$$w_j=\sum_{k\in G_j} x_{jk} \qquad (j=1\cdots\cdots N) \qquad (5)$$

$$d_k=\sum_{j\in F_k} x_{jk} \qquad (k=1\cdots\cdots L) \qquad (6)$$

但し、x_{jk}：j 取水点から k 需要地へ送水される水量

G_j：j 取水点からの送水先の集合

F_k：k 需要地への送水源の集合

⑥ダム・取水施設の建設コスト（それぞれ C_i^D, C_j^W とする）は、つくる場合とそうでない場合に分けて定義される。

$$C_i^D=\begin{cases} 0 & \cdots\cdots\text{つくらない} \\ g_i(v_i) & \cdots\cdots\text{つくる} \end{cases} \quad (i=1\cdots M) \qquad (7)$$

$$C_j^W=\begin{cases} 0 & \cdots\cdots\text{つくらない} \\ h_j(w_j) & \cdots\cdots\text{つくる} \end{cases} \quad (j=1\cdots\cdots N) \qquad (8)$$

さて、以上により与えられる施設規模配置計画問題は、ダム i、取水施設 j をつくる・つくらないを示す０－１変数を μ_i, ε_j で定義することにより、次のようにモデル化される。

$$\text{minimize} \ \sum_{i=1}^{M} C_i^D+\sum_{j=1}^{N} C_j^W \qquad (9)$$

$$\text{subject to} \quad q_i=f_i(v_i, V_i) \qquad (i=1\cdots\cdots N) \qquad (10)$$

$$\bar{v}_i^{\min}\mu_i \leqq v_i \leqq v_i^{\max}\mu_i \qquad (i=1\cdots\cdots M) \qquad (11)$$

$$Q_j=\sum_{k\in E_j} q_k-\sum_{k\in G_j} w_k \geqq r_j+w_j (j=1\cdots\cdots N) \qquad (12)$$

$$\bar{w}_j^{\min}\varepsilon_j \leqq w_j \leqq \bar{w}_j^{\max}\varepsilon_j \qquad (j=1\cdots\cdots N) \qquad (13)$$

$$w_j=\sum_{j\in F_k} x_{jk} \qquad (j=1\cdots\cdots N) \qquad (14)$$

$$d_k=\sum_{j\in F_k} x_{jk} \qquad (k=1\cdots\cdots L) \qquad (15)$$

$$\mu_i, \varepsilon_j \equiv 0 (\text{mod } 1) \qquad (i=1\cdots M, \ j=1\cdots N) \qquad (16)$$

ここで(9)式（具体的には(7)、(8)式）と(10)式に含まれる関数 g_i, h_j, f_i は、1.で述べた理由により、非線形形状を示す。このため、本研究では、以下の方法により、これらを線形関数の組におきかえる。

(i) ダム開発水量関数f_iについて

今、$I_i=\{j\}$, すなわち上流のダム１個にのみ影響されるものとすれば、(10)式は、$q_i=f_i(v_i, v_j)$ という２変数関数となる。ここで実際に v_i, v_j（i ダムと j ダム）について、いくつかの特定容量の組みあわせによる利水計算を通してq_iが得られているものとしよう。すなわち、 $v_i\to(\bar{v}_i^0, \bar{v}_i^1, \cdots, \bar{v}_i^{n_i})$, $v^j\to(\bar{v}_j^0, \bar{v}_j^1, \cdots, \bar{v}_j^{n})$ という系列に対し、対応する開発水量$\bar{q}_i$が表－１のように得られるのであれば、系列間を線形内挿することにより、

$$v_i=\sum_{k=0}^{n_i} \lambda_i^k \bar{v}_i^k \qquad (17)$$

$$\sum_{k=0}^{n_i} \lambda_i^k=1, \quad \lambda_i^k \geqq 0 \qquad (18)$$

$$\lambda_i^k \leqq \delta_i^{k-1}+\delta_i^k \qquad (k=0\cdots\cdots n_i) \qquad (19)$$

$$\sum_{k=0}^{n_i-1} \delta_i^k=1 \qquad (20)$$

$$\delta_i^k \equiv 0 (\text{mod } 1) \qquad (k=0\cdots\cdots n_i-1) \qquad (21)$$

表－１　開発水量とダム容量

	$\bar{v}_j^0$	$\bar{v}_j^1$	$\cdots\cdots$	$\bar{v}_j^{n_j}$
$\bar{v}_i^0$	$\bar{q}_i^{00}$	$\bar{q}_i^{01}$	$\cdots\cdots$	$\bar{q}_i^{0n_j}$
$\bar{v}_i^1$	$\bar{q}_i^{10}$	$\bar{q}_i^{11}$	$\cdots\cdots$	$\bar{q}_i^{1n_j}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$
$\bar{v}_i^{n_i}$	$\bar{q}_i^{n_i0}$	$\bar{q}_i^{n_i1}$	$\cdots\cdots$	$\bar{q}_i^{n_in_j}$

とする。また開発水量q_iは、

$$q_i=\sum_{k=0}^{n_i}\sum_{l=0}^{n_j}\lambda_i^k\bar{q}_i^{kl}\lambda_i^l=\boldsymbol{\lambda}_i\bar{q}_i\boldsymbol{\lambda}_j \tag{22}$$

という形でf_iを近似することができる。(22)式は、2次形式となっているが、一般的には$|I_i|+1$次形式となる。

(ii) ダム建設費用関数g_iについて

iダムの特定容量系列$(\bar{v}_i^0, \bar{v}_i^1, \cdots\cdots \bar{v}_i^{n_i})$に対する建設費用の系列を$(\bar{a}_i^0, \bar{a}_i^1, \cdots \bar{a}_i^{n_i})$とすれば、$g_i$は、

$$g_i(v_i)=g_i(\boldsymbol{\lambda}_i)=\sum_{k=0}^{n_i}\lambda_i^k\bar{a}_i^k \tag{23}$$

と定義することができる。ここで、特に、$\bar{v}_i^0=0$としておく。

(iii) 取水施設建設費用関数h_jについて

取水量w_jに対する特定値系列$(\bar{w}_j^0, \bar{w}_j^1, \cdots \bar{w}_j^{l_j})$を想定し、これに対する建設費用系列が$(\bar{b}_j, \bar{b}_j^1, \cdots \bar{b}_j^{l_j})$として得られるならば、$w_j$は次のようにおきかえられる。

$$w_j=\sum_{k=0}^{l_j}\xi_j^k\bar{w}_j^k \tag{24}$$

$$\sum_{k=0}^{l_j}\xi_j^k=1, \quad \xi_j^k\geqq 0 \tag{25}$$

$$\xi_j^k\leqq\zeta_j^{k-1}+\zeta_j^k \qquad (k=1\cdots\cdots l_j) \tag{26}$$

$$\sum_{k=0}^{l_j-1}\zeta_j^k=1 \tag{27}$$

$$\zeta_j^k\equiv 0\ (\mathrm{mod}\ 1) \qquad (k=1\cdots\cdots l_j-1) \tag{28}$$

また、h_jについては、

$$h_j(w_j)=h_j(\boldsymbol{\xi}_j)=\sum_{k=0}^{l_j}\xi_j^k\bar{b}_j^k \tag{29}$$

と近似することができる。このときも$\bar{w}_j^0=0$としておく。

さて、以上により、問題は、次のように定式化される。

$$\text{minimize}\ \sum_{i=1}^{M}\sum_{k=0}^{n_i}\lambda_i^k\bar{a}_i^k+\sum_{j=1}^{N}\sum_{k=0}^{l_j}\xi_i^k\bar{b}_j^k \tag{30}$$

subject to (11)〜(22)式、(24)〜(28)式

しかしながら、(22)式が2次形式となるため、これをさらに線形化するため次のような仮定を設ける。すなわち、対象とするダムiの上流にあるダムの建設水準は離散的に設定されるものとし、

$$v_j=\bar{v}_j^l\ \text{のとき}\qquad q_i=\sum_{k=0}^{n_i}\lambda_i^k\bar{q}_i^l \tag{31}$$

という形におきかえる。このときη_j^lという0－1変数の導入を行うことにより、(31)式は、

$$\sum_{k=0}^{n_i}\lambda_i^k\bar{q}_i^{kl}-(1-\eta_j^l)M\leqq q_i\leqq\sum_{k=0}^{n_i}\lambda_i^k\bar{q}^{kl}+(1-\eta_j^l)M \quad (l=1\cdots n_j) \tag{32}$$

$$\sum_{l=0}^{n_j}\eta_j^l=1 \tag{33}$$

$$\eta_j^l=\begin{cases}0: v_j\neq\bar{v}_j^l\\ 1: v_j=v_j^l\end{cases}$$

と書きかえることができる。（Mは十分大きな数とする）

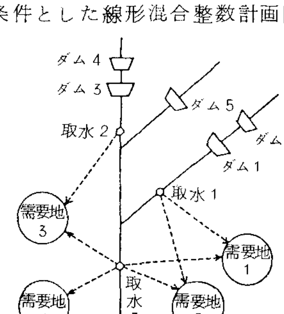
最終的には、(30)式を目的関数とし、(11)〜(21)式、(24)〜(28)式、(32)〜(33)式を制約条件とした線形混合整数計画問題として、利水施設規模配置計画問題を定式化できたことになる。

2－2　実流域におけるケーススタディ

対象とする流域には、図－2に示すように、5ケ所のダム、3ケ所の取水施設建設候補地が設定されており、4つの需要地が位置している。それぞれの状況については、以下に述べるように設定される。

(1) ダム

図－2からも明らかなように、ダム1とダム2、ダム3とダム4が直列に位置し、上流側の建設が下流側のダムの開発水量に影響を与えるとすれば、$I_1=\{2\}, I_3=\{4\}$である。一方、ダム2・4・5については他の影響を受けず、



図－2　ケーススタディ流域

$I_2=I_4=I_5=\phi$ であるとする。各ダムの容量と開発水量の関係を表２－(1)～(5)に示す。また、建設する場合の最低水準$\bar{v}_i^{\min}$は、同表に※で示した値である。ここで、各ダムの経済性をみるための１つの方法として、単位水量あたりの建設コストと開発水量の関係を図－３に示した。これによれば、ダム１・３・５の経済性に対し、ダム２・４は劣っていることがわかる。従って、ダム建設においては、前者３ダムを100％建設することによって得られる開発水量の範囲内（ここでは、10.56 ㎥/s)の需要であれば、後者２ダムの建設に関する検討は省略できることがわかる。

(2) 取水施設

図－４に施設規模（取水量）とコストの関係を示した。この図から取水施設３が他の２つに比べて経済的であることがわかる。従って、この段階で取水施設１・２は考察対象から除外することができる。

表２　$q_i=f_i(v_i, v_j)$ の関係

(1) $q_1 \sim v_1 \cdot v_2$

v_1 \ v_2	0	10.60	C_1^D
0	0	0	0
※20.00	1.29	1.29	424
40.00	2.42	2.42	507
59.00	3.44	3.41	570

(2) $q_2 \sim v_2$

v_2		C_2^D
0	0	0
※10.60	0.57	316

(3) $q_3 \sim v_3 \cdot v_4$

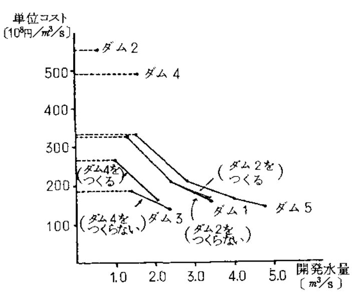
v_3 \ v_4	0	35.50	C_3^D
0	0	0	0
※20.00	1.40	0.99	263
36.05	2.38	2.08	334

(4) $q_4 \sim v_4$

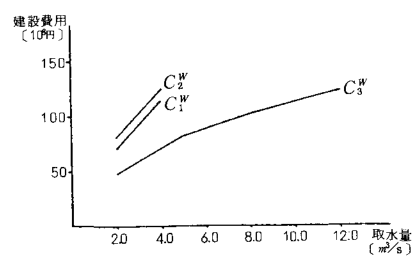
v_4		C_4^D
0	0	0
※35.50	1.59	778

(5) $q_5 \sim v_5$

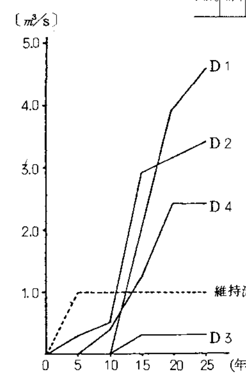
v_5		C_5^D
0	0	0
※20.00	1.54	512
40.00	2.82	591
60.00	3.98	657
74.15	4.74	704



図－３　ダムにおける単位開発コスト



図－４　施設施設建設費用



図－５　需要の変動

(3) 需　　要

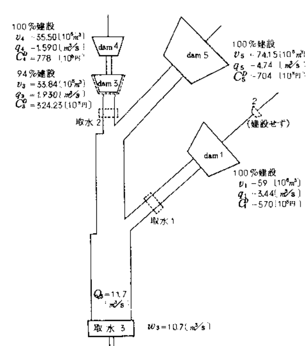
各需要地の需要水量は、目標最終年度である25年後に、それぞれ、4.6、3.4、0.3、2.4（㎥/s）であるとする。これは、図－５に示すような需要変化パターンをもとに設定される。また、取水点３においては、維持流量が 1.0 ㎥/s 必要とされているものとする。

さて、以上の問題設定に対し、２－１で定式化したMIPモデルの適用することにより、需要を充足し、建設費用最小となる施設建設パターンを求める。本研究では、小数法アルゴリズムにより計算を行った結果、図－６のようなパターンを得た。主な結果は次のとおりである。

①取水施設１、２が建設されない。

②ダム１、５が100％建設される。

③ダム２が建設されない。



図－６　最適解における施設建設パターン

ここで、①については、先に問題設定(2)で述べた理由によるものである。一方、②に関しては、次のような理由による。今、２変数x, yに対し、非減少な関数f, gがそれぞれ定義され、次の最適化問題を与えるものとする。

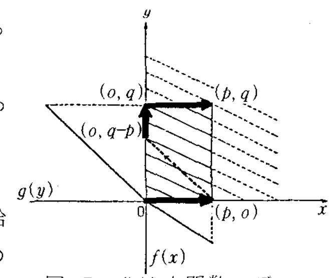
$$\text{minimize } f(x)+g(y), \text{ subject to } o \leqq x \leqq p \quad o \leqq y \leqq q \tag{34}$$

具体的に図－７に示すような関数形の場合、xとyの和（ダム建設では総開発水量）がパラメトリックに動くにつれて、最適解を形成する(x, y)の位置は$(o,o) \to (o,p) \to (o,q-p) \to (o,q) \to (p,q)$と変化する。このことは、ダム建設において、２つのダムを同時につくらねば需要がみたされない状況においては、片方を100％建設し、それでまかないきれない水量を残るダムが負担することを意味している。この理由により、ダム１、５は100％建設され、ダム３が残りを負担している。さらに、各ダムの図－３による位置からどのダムが

100 %建設されるかは、その単位水量あたりの開発コストの大きい方であることが判断できる。

また、③については、この状況での必要水量の開発においてダム2を含めた組みあわせ（このとき、5ダムすべてが建設される）よりも、ダム1・3・4・5のみの組みあわせの方が経済的であることを示している。

さて、ここで対象としている需要量は、すべて取水施設3を経由して供給されることから、本研究では、総需要量が変化した場合にどのようなダムの組みあわせが有効となるかを見るため、感度分析を行い、この結果、表－3を得た。これから、ケース3以降はダム1・3・5の組みあわせがとりあげられ、ダム2・4は、需要量の大きいケース1・2で建設対象となっていることがわかる。但し、ケース3以降でも、100 %建設されるダムは異っている。このことを総開発水量とダム建設費用についてパラメトリックに確めたのが図－8である。この図に示した区間Aでダム2・4を含んだ組みあわせをとることがそれまでのコスト増加傾向に対し、より傾きがきつくなることから、これらのダムの加入が大巾なコスト増加をもたらすのがわかる。これはまた、表－3における単位開発コストと、単位利水コストを示した図－9において、当該流域の需要は、3 m³/s から 9 m³/s の範囲に抑えた方が効率的であることの理由ともなっている。

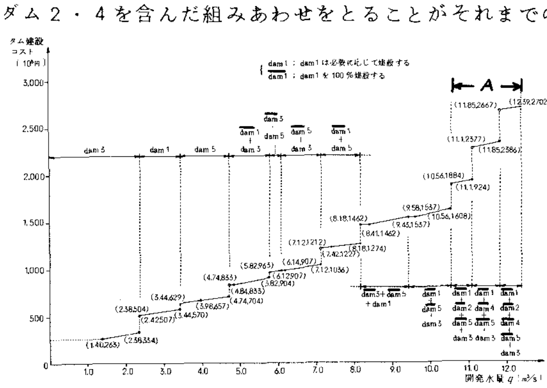


図—7　非減少関数モデル

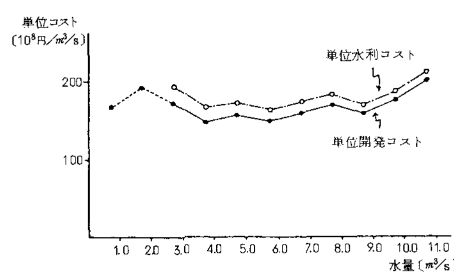
表－3　感　度　分　析　結　果

ケース№		1	2	3	4	5	6	7	8	9	(10)	(11)
需要水量		10.7	9.7	8.7	7.7	6.7	5.7	4.7	3.7	2.7	1.7	0.7
ダム容量 (10⁶ m³)	1	59.00	59.00	59.00	25.04	59.00	—	59.00	—	—	45.22	—
	2	—	10.60	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	3	33.84	29.50	21.96	36.05	—	29.16	34.09	—	—	—	24.91
	4	35.50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	5	74.15	74.15	74.15	74.15	65.21	74.15	—	73.41	55.18	—	—
開発水量 (m³/s)	1	3.44	3.41	3.44	1.58	3.44	—	3.44	—	—	2.70	—
	2	—	0.57	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	3	1.93	1.98	1.52	2.38	—	1.96	2.26	—	—	—	1.70
	4	1.59	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	5	4.74	4.74	4.74	4.74	4.26	4.74	—	4.70	3.70	—	—
	計	11.70	10.70	9.70	8.70	7.70	6.70	5.70	4.70	3.70	2.70	1.70
ダム建設コスト		2,376.20	1,895.03	1,545.66	1,483.33	1,244.30	1,007.54	895.34	701.56	642.54	504.32	284.73
取水施設コスト		117.15	113.58	109.63	104.50	96.17	87.83	78.50	66.83	55.17		
単位開発コスト		203.09	177.11	159.35	170.50	161.60	150.38	157.08	149.27	173.66	194.19	167.49
単位取水コスト		10.95	11.69	17.60	13.57	14.35	15.41	16.70	18.06	20.43		
単位利水コスト		214.04	188.80	171.95	184.07	175.95	165.79	173.78	167.35	194.09		

注）単位開発コスト＝ダム建設コスト／開発水量計、単位取水コスト＝取水施設コスト／需要水量
（10⁶円／m³／s）　　（10⁶円／m³／s）
単位利水コスト＝単位開発コスト＋単位取水コスト



図－8　開発水量に対するダムの組みあわせと建設費用



図－9　単位コストの変化

3. ダム建設工程計画に関するモデル分析

3－1　モデルの定式化

ここでは、2.の分析で得られた最終年度における利水施設建設パターンを受けて、それをどの順序で建設するかという工程計画のための情報作成を目的としたモデル分析を行う。この場合注意すべきことは、とくにダムの開発水量に関して、他のダムの建設順序が影響を及ぼすということである。

本研究では、この工程計画に対して、建設費用の最終年度価値の最小化を目的関数としたDPモデルを作成する。但し、ここでは、対象施設をダムに限定し、今、M個のダムをT期内に建設するものと考える。ダム i を t 期に建設するかを x_{it} で示し、

$$x_{it}=\begin{cases}1: i\text{ダムを }t\text{ 期に建設する}\\0:\text{そうでない場合}\end{cases}$$

とすると、当然次式が成立する。

$$\sum_{t=1}^{T} x_{it}=1 \qquad (i=1\cdots\cdots M) \tag{35}$$

t 期までのダム建設パターンは、これを $\hat{\boldsymbol{x}}^t$ で表現し、$\hat{\boldsymbol{x}}^t=\sum_{t=1}^{t}\boldsymbol{x}_t$ と定義する。また、$\hat{\boldsymbol{x}}^t$ に対する i ダムの開発水量を $h_i(\hat{\boldsymbol{x}}^t)$ で表わす。このとき、t 期に $\boldsymbol{x}_t$ のダム建設によるコストを $g(\boldsymbol{x}_t)$ とし、

$$g(\boldsymbol{x}_t)=(1+r)^{T-t}\boldsymbol{c}\boldsymbol{x}_t \tag{36}$$

と定義する。但し、γは利子率であり、$\boldsymbol{c}=(c_1, c_2 \cdots c_i, \cdots c_M)$は、各ダムの建設コストである。以上の準備により、$t$期までの建設費用$f_t(\hat{\boldsymbol{x}}^t)$は、DPにより、

$$f_t(\hat{\boldsymbol{x}}^t)=\min\left[g(\boldsymbol{x}_t)+f_{t-1}(\hat{\boldsymbol{x}}^t-\boldsymbol{x}_t)\right] \tag{37}$$

$$\sum_{i=1}^{M} h_i(\hat{\boldsymbol{x}}^t) \geqq q^t$$

$$f_T(\hat{\boldsymbol{x}}^T)=f_T(\boldsymbol{1}) \tag{38}$$

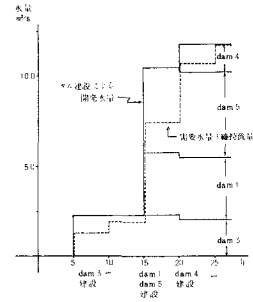
と定式化される。ここでq^tは、t期の需要水量と維持流量の総和である。

3－2　実流域におけるケーススタディ

対象流域の概要は、2－2で提示したものと同じである。とくに、需要は、各需要地で図－5のように変化し、2－2の結果から、ダム2を除く4つのダムの建設によりこれを満たす建設順序を考える。なお、計画期間は25年であるが、5年単位の5期に区切り、利子率は年7％とする。

図－10には、DPの計算結果を示したが、これから次のことがわかる。

建設順序はダム3→ダム1・5→ダム4となる。これは、図－3の単位開発コストの順とほぼ一致する。すなわち、需要にみあう分の水量開発ができるとすれば、単位開発コストの少い順に建設される。



図―10　時間的ダム建設パターン

4.　おわりに

本研究では、主にダム建設計画のための情報作成を意図した数理モデル分析を行った。まず、最終年度の需要を対象とした施設の規模配置パターンの抽出を、つくる・つくらないの0－1変数を含めたMIP問題としてとりあげ、次に、これを受けて、途中年度の需要供給のためのDPによる建設工程問題について分析した。この結果次のようなことがらを知ることができた。

①需要水量とダムの組みあわせをパラメトリックに分析することにより、ダムによっては、なるべく建設しない方が経済的に望ましい場合のあることを明らかにできた。

②また、単位水量あたりの開発コストを分析することにより、流域における需要の適正規模の範囲を示唆することができた。

③ダムの経済性からみた順序づけにおいては、そのための情報として、単位開発コストと開発可能水量のレンジが本質的であることがわかった。

以上の結果は、ダムサイトや開発可能水量・コスト関数といった入力に関する、データ構造を数理モデルを通して分析し、得られたものであり、その意味では、本研究の意図を反映することができたと考えられる。しかしながら、現実には、入力としてあげた上記の事項が多種多様であり、さらにProblem－Oriented な分析をすすめるためには、ケーススタディの積みかさねが不可欠であり、次のような分析方法の開発も課題として残されている。

①ダムの利水効果分析を意図した規模配置計画問題の双対問題の考察

②開発水量関数（22式）を直接考慮した非線形MIPアルゴリズムの開発

③取水点から需要地までの輸送問題を考慮したモデルへの拡張

参考文献

1)H. Greenberg："Integer Programming" Academic Press 1971.（邦訳"整数計画法"培風館）

2)森杉寿芳："公共投資の段階的地域配分モデルについて" 地域学研究第5巻 1974

3)茨木俊秀："整数計画法"(1)～(5)、オペレーションズ・リサーチ 1970. 9～1971. 1