土木学会論文報告集
第 211 号・1973 年 3 月

広域利水における水配分計画モデルに関する一考察

STUDY ON A MATHEMATICAL MODEL FOR WATER DISTRIBUTION PLANNING IN THE LARGESCALE WATER RESOURCE DEVELOPMENT

春名　攻*・岡田憲夫**
By Mamoru Haruna and Norio Okada

1. 緒　　言

近年，人口の増大とその都市への集中，経済の高度成長，生活水準の高度化と様式の多様化，その他諸々の経済的・社会的変化を反映して水需要が急激に増大し，将来における深刻な水不足が懸念されている。特にこの傾向の著しい首都圏・阪神都市圏などでは，従来の一水系開発主義による解決が不可能になりつつある。建設省の昭和 60 年における水需要の予測によれば，京浜・京葉地域では，年間 31 億トンという膨大な水不足が，また京阪神地域においては，年間 19 億トンの水不足が生ずるものと算定されている。これら両地域では，それぞれ利根川・淀川という大水系によって水が供給されているが，その水需要はきわめてひっ迫していることになる。このため，利根川には新規にダムなどの施設を 28 か所建設し，布川地点で利用率をほぼ限界の約 62% と設定している。また淀川でも 23 か所にダムなどの施設を建設して，枚方地点で利用率を開発限度の約 59% にまで高めることにしているが，これでもなお水需要を充足することはできない状況にある。このように水不足の予想される地方が存在するのに対して，一方では，なお大きな供給力が残されていると考えられる地域が 28 地域も存在している。

このように地域によって水需給のバランスの程度が異なっているので，水資源の有効利用という点からは，従来の常識的な需給圏を越えた水の融通方法を考えていくことが重要課題となってくる。このためには複数の水系を含む広域的な地域を対象としたダム群と他の利水施設の計画を水源開発の方式にとり入れていくことが最も有効な手段の一つになってくると思われる。この場合，各地域ごとに個別にダムを建設したり，導水路を建設したりしていると効率的な水源開発とその利用を促進することができない。したがって各行政体は従来のように単独で利水計画を策定するのではなくて，相互の間の調整をはかって総合的な計画を作り上げることが要請されてくる。さらに国の立場からみても，個々では不可能な計画の統一・調整の必要性がでてくる。このように利水計画が広域利水の方向に進む以上，計画間の総合的な調整方法と合理化の提案が必要になってくると考えてよかろう。もちろんこのような広域利水計画を実施するためには，行政的な問題や住民感情などの点でいろいろ困難な点が多く，今後このような観点からの分析や検討も必要であろう。

一方，水需給の問題の解決のための方法には，このような広域利水とは別の方向からのアプローチも考えられよう。すなわち節水や水利用体系の変換をも含めた水の効率的な使用の促進というアプローチである。この方法は広域利水が主として水の量に注目していたのに対して，その使用に際して不必要なロスをなくするとともに，全く別の角度から水を生み出すことにより実質的に供給可能水量を増加させようとするものである。その方法の主なものをあげれば次のようになる。

① 用途別給水システムと下水還元水の再利用
② 海水の淡水化
③ 農業用水等既得水利権の一部の都市用水への転換
④ 水使用における節水
⑤ 水道施設の漏水の防止

これらの方法は，技術的・経済的な問題に未解決な点が多く，一部の地域や特殊なケースを除いて実現性の乏しいのが実情である。またかりにこれらの方法が技術的・経済的に可能であっても，その実現には水使用形態の変更や，水利用における価値観の転換がかなりの程度必要であり，水使用に際しての協力態勢が要求される。

本研究においては，今後検討していかねばならない諸々の水需給問題の解決法のうちでも，最も実現性の高いと考えられる広域利水の問題をとりあげ，特にそのうち

* 正会員　工博　京都大学助教授　工学部土木工学科
** 正会員　工修　京都大学助手　工学部土木工学科

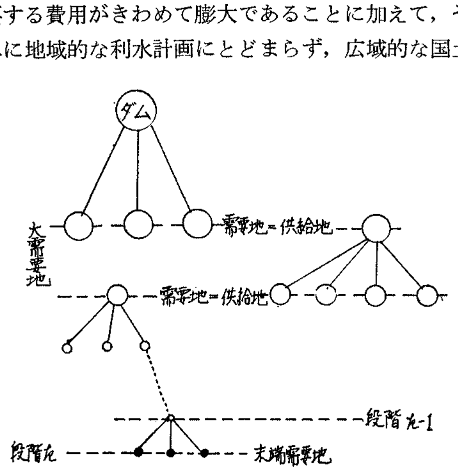
でも，ダムなどの水源開発と導水路・配水網の建設計画を対象とした合理的な水配分計画のモデル化を試みることにした。

2. 広域利水における水配分計画のモデル化

（1） モデル化における前提

広域利水計画の問題は，本研究でとりあげる施設建設計画の側面以外に，行政的・経済的な諸々の側面からの考察が必要である。また問題を単に利水の問題としてとらえるだけでは不十分で，人工導水路を建設し，ダムに大量の水を貯留することにより引き起こされる諸々の水理現象にいかに対処するかを考えることも重要である。しかし，ここでは考察の対象を広域利水計画のなかでもとくに重要と考えられる水配分問題に限定し，合理的な施設建設計画のための計画モデルを作成するとともに，適用例をとおしての実証的分析を行なうことにする。

さて，モデル化にあたっては，まず広域利水システムのもつ構造に注目する（図―1）。すなわち導水路，配水網の建設にも，大きな導水路を作り大需要地とを結ぶものから，浄水場と家庭とを結ぶ上水道の配水網といった種々の段階が存在している。さらに，各段階においてダムなどの水源施設を建設する側面と水源と需要地とを結ぶための導水路・配水網を建設するという側面がある。特に後者は地域的な利害に直接関係することが多いが，これは導水路・配水網の建設の多くが地方公共団体，各種水利組合などの直接・間接的な要請に対応して実施されるからである。これに対して，ダム建設計画は，建設省・農林省などの国レベルにおいて策定されるか，あるいは都道府県などのより上位の地方行政体が担当する場合が多い。これはダムなどの水源開発計画は，その建設に要する費用がきわめて膨大であることに加えて，それが単に地域的な利水計画にとどまらず，広域的な国土開発計画に強く関係する場合が多いことによる。



図―1 広域利水における各種のレベル

このように，両者の立場が異なっている点に注目すれば，広域利水を実現するためには，各種導・配水網を代表する種々の利害とダムなどの水源開発を代表する利害との間を総合的に調整するという機能が重要になってくる。したがって以下の議論では問題をダム群の建設と導水路網の建設に限定して，これを総合的にとりあつかっていくという計画問題を取扱かうこととする。

（2） モデルの構造

これまでに示した広域利水の目的にしたがって，以下に述べる広域利水計画のモデルにおいては，次のような機能を組み込むことにする。

① 建設するダムの位置選定と規模を計画する機能。

② 建設されるダムと需要地とを結ぶ導水路網の位置・規模を計画する機能。

③ ①，②の計画を合理的に調整する機能。

このうち，③の総合調整の機能を実現するにあたっては，なんらかの評価のための基準が必要であるが，ここでは，広域的な観点からの評価ということから，ダム群と導水路網の建設費の総和を最小にするという評価基準を採用することにした。したがって，以下においては，ダム群と導水路網で取扱われる水量の間の需給関係の制約を満たし，かつ最小の総費用を与えるような計画を選び出す過程を検討することによって，「総合調整のプロセス」に関する考察を行なうことにする。

（3） 定 式 化

モデルの定式化にあたって，まず以下のような記号を定義しておく。

D_j：需要地 $j(j=1, 2, \cdots, n)$ における需要量

D：対象地域における需要量の総和 $(=\sum_{j=1}^{n} D_j)$

A_i：建設するダムの候補地 $i(i=1, 2, \cdots, m)$ における建設可能規模の最大値

y_i：ダム i の建設規模を表わす指標 $(0 \leqq y_i \leqq 1)$。したがって建設されるダムの規模は $y_iA_i(0 \leqq y_iA_i \leqq A_i)$ によって表わされる。

x_{ij}：ダム建設の候補地 i から需要地 j への送水量。

モデルにおける変数としては，各ダム候補地から需要地へ送る水の量 x_{ij} と，各ダムをどの程度に建設するかを示す指標の値 y_i の2種の変数があげられるが，これらの変数が同時に満たすべき制約条件としては，供給サイド（ダム候補地）と需要サイド（水需要地）の間の水量のバランス関係がある。一般にダムから各需要地へ供給される供給量の総和は，各需要地の需要量以上でなければならない。すなわち，理論的には，供給量が需要量以上であれば実行可能な計画が求められる。しかし，実

際問題としては，予測された需要量に誤差が生じうることや，需要量の時期的変動，さらに送水時の漏水を始めとする無効水量などが存在しているので，これらの誤差を見込まないで供給量を定めると，実行不可能な計画を作成することになるが，一方では，ここでの目的が厳密な意味でのダムや導水路網の建設計画ではなくて，むしろ広域的な水配分問題を作成することにあるので，要求されるダムや導水路の建設位置や費用の算定は，水配分問題として要求される程度の大まかなものでよいと考えられる。このことは，あらかじめ需要量の算定にあたって，予測値の誤差，時期的変動，漏水を始めとする無効給水量などを見込んだ平均的な値を求めておくことにすれば問題はないであろう。また以下で示すように，計画モデルが線形計画として定式化される場合，不等号を等号とおいてしまっても，理論的には同一の最適解が得られるという保証があるので，以下のモデルにおいては需要量と供給量を等しいとおいて論を進めることにする。

以上に基づき，計画モデルにおける制約条件を以下のように設定する。

$$\left.\begin{array}{l}\sum_{i=1}^{m} x_{ij}=D_j \\ x_{ij} \geqq 0 \quad (i=1,2,\cdots,m\,;\,j=1,2,\cdots,n)\end{array}\right\} \cdots\cdots\cdots(1)$$

$$\left.\begin{array}{l}\sum_{i=1}^{m} A_i y_j=D \\ 0 \leqq y_i \leqq 1 \quad (i=1,2,\cdots,m)\end{array}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(2)$$

さて，式 (1) は導水路網施設の計画（需要地で必要とする水量を供給地からどのように導水すればよいかを決定する計画）が実行可能であるための条件を表わしたものであるが，供給地における供給可能条件を全く考慮していない。一方，式 (2) はダムの計画の代替案を選択する方式を定式化したものであるが，式 (1) を満たすような導水路施設の計画の斉合性を考えてはいない。しかも式 (1)，(2) を満たすようなダムと導水路網の計画が求められたとしても，全体として実行可能な計画が求められているかどうかわからないし，建設費の総和が最小という立場からみると，必ずしも最適な計画が求められているかどうかわからない。したがって全体で実行可能かつ最適な計画を求めるためには，式 (1)，(2) によって求められるダムと導水路網計画の代替案が次の要件を満たしていなければならない。

目的関数：

$$z=\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} c_{ij}x_{ij}+\sum_{i=1}^{m} R_i y_i \rightarrow \min. \cdots\cdots\cdots\cdots(3)$$

制約条件：

$$-\sum_{j=1}^{n} x_{ij}+A_i y_i \geqq 0 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(4)$$

$$(i=1,2,\cdots,m\,;\,j=1,2,\cdots,n)$$

ここに，

c_{ij}：ダムの建設候補地 i から需要地 j へ敷設する導水路網の建設単価

R_i：ダム建設候補地 i の建設可能規模の最大値に対応する建設費

以上の式 (1)，(2)，(3)，(4) からなるモデルが，広域利水の計画モデルを表わしているが，これは大型の線形計画（以下 LP と呼ぶ）の問題になっている。したがって，目的が単に最適解を得るだけであるならば，比較的容易に LP の一般の解法（シンプレックス法）を用いて最適解を得ることができる。しかし，式 (1)，(2) の制約条件の数が膨大になってくると，後に述べるようなディコンポジションによる簡便な解法によらないで一般の LP の解法を導入するのは，計算効率上得策でなくなる。さらに重要なことは，本研究で意図していることが，単にそのような計算技術上の問題だけではなく，広域利水システムの構造を解明しようとすることにある点である。すなわち，**2**．(**2**) でも述べたように，本研究ではダム群と導水路網で取扱われる水量の間に存在する全体的な需給関係を満たし，かつ最小の総費用を与えるような計画を選び出す過程を含んだモデルを作成し分析することを主眼としているが，このような計画化のプロセスが，以下に示すディコンポジションの原理ならびにそれに基づく解法のプロセスとよく対応していることを示そうとするものである。以下においては本計画モデルにおける LP のディコンポジションの原理と解法の内容ならびにその役割について述べていくことにする。

3．ディコンポジションモデルの数学的構造

（1） 数学的構造

ここではまず式 (1) のみを満たすような解を導水路網計画の代替案であるとし，また同様に式 (2) のみを満たすような解をダム群の計画代替案であると考えることにする。ここでは，式 (1)～(4) よりなる LP の問題に対する解を求めることだけを目的とはせず，式 (1) あるいは式 (2) より選び出された代替案をどのように用いて全体で実行可能な計画を作成していけばよいかということを検討することにするが，後述するように，最適な全体計画を作成していくプロセスにおいては，ダム群と導水路網の計画に対する代替案の組合わせを順次検討していくという方法がとられる。そこでは，実行可能な代替案が多数求めうるが，最適な計画を効率的に求めていくためには，それらを有効に利用していくことが必要である。このため以下においては，後の議論にとって必要な実行可能な代替案とモデル式との関係を明らかにしてい

くことにする。

式 (1), (2) を満たす実行可能解の集合は凸の有界集合を構成しているが，集合に含まれる実行可能解は，集合に含まれる任意のいくつかの点（実行可能解）$\{x_{ij}{}^{(k)}\}$, $\{y_i{}^{(l)}\}$ の1次凸結合で表わすことができる。

すなわち，任意の実行可能解における変数 x_{ij} および y_i は，次のように K 種の実行可能解の変数 $x_{ij}{}^{(k)}$ および L 種の実行可能解 $y_i{}^{(l)}$ を用いて次のように表わされる。

$$x_{ij}=\sum_{k=1}^{K}\lambda^{(k)}x_{ij}{}^{(k)}\cdots\cdots(5)$$

$$(i=1,2,\cdots,m;\ j=1,2,\cdots,n)$$

$$\sum_{k=1}^{K}\lambda^{(k)}=1\cdots\cdots(6)$$

$$y_i=\sum_{l=1}^{L}\mu^{(l)}y_i{}^{(l)}\quad(i=1,2,\cdots,m)\cdots\cdots(7)$$

$$\sum_{l=1}^{L}\mu^{(l)}=1\cdots\cdots(8)$$

さらに，式 (3), (4) は次のように表わされる。

$$z=\sum_{k=1}^{K}\Big(\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}c_{ij}x_{ij}{}^{(k)}\Big)\lambda^{(k)}+\sum_{l=1}^{L}\Big(\sum_{i=1}^{m}R_iy_i{}^{(l)}\Big)\mu^{(l)}\rightarrow\min.\cdots\cdots(9)$$

$$\sum_{k=1}^{K}\Big(\sum_{j=1}^{n}x_{ij}{}^{(k)}\Big)\lambda^{(k)}+\sum_{l=1}^{L}(-A_iy_i)\mu^{(l)}=0\cdots(10)$$

ここで，

$$z_1{}^{(k)}=\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}c_{ij}x_{ij}{}^{(k)}\cdots\cdots(11)$$

$$z_2{}^{(l)}=\sum_{i=1}^{m}R_iy_i{}^{(l)}\cdots\cdots(12)$$

$$\xi_i{}^{(k)}=\sum_{j=1}^{n}x_{ij}{}^{(k)}\quad(i=1,2,\cdots,m)\cdots\cdots(13)$$

$$\eta_i{}^{(l)}=-A_iy_i\quad(i=1,2,\cdots,m)\cdots\cdots(14)$$

とおくと，式 (9), (10) は次のようになる。

$$[\mathrm{I}]\left\{\begin{array}{l}
z=\sum_{k=1}^{K}z_1{}^{(k)}\lambda^{(k)}+\sum_{l=1}^{L}z_2{}^{(l)}\mu^{(l)}\rightarrow\min.\cdots\cdots(15)\\
\sum_{k=1}^{K}\xi_i{}^{(k)}\lambda^{(k)}+\sum_{l=1}^{L}\eta_i{}^{(l)}\mu^{(l)}=0\cdots\cdots(16)\\
\qquad(i=1,2,\cdots,m)\\
\sum_{k=1}^{K}\lambda^{(k)}=1\cdots\cdots(6)\\
\sum_{l=1}^{L}\mu^{(l)}=1\cdots\cdots(8)
\end{array}\right.$$

このように上式で表わされる関係は，式 (2) の実行可能な代替案の集合が満たすべき要件を表わしていることがわかる。

以上で，導水路網計画とダム群の計画の代替案がモデルにおいてどのような関係を有するかについて明らかにしてきた。次に，これらの代替案の組合せによって求められる全体計画が最適計画を構成するための条件について述べることにする。

さて，全体での最適解が満たすべき条件は，上記の主問題［I］が次の条件を満たすことと同値である。すなわち，問題［I］のように LP によって定式化された場合，基底行列が次の条件を満たせば，最適解が得られている。

$$\bar{z}_1{}^{(k)}=z_1{}^{(k)}-\boldsymbol{\Pi}\,\boldsymbol{v}_1{}^{(k)}\geqq0\ \text{ for all }k\cdots\cdots(17)$$

$$\bar{z}_2{}^{(l)}=z_2{}^{(l)}-\boldsymbol{\Pi}\,\boldsymbol{v}_2{}^{(l)}\geqq0\ \text{ for all }l\cdots\cdots(18)$$

ここで，$\boldsymbol{v}_1{}^{(k)}$, $\boldsymbol{v}_2{}^{(l)}$ は，

$$\boldsymbol{v}_1{}^{(k)}={}^t[\xi_1{}^{(k)}\xi_2{}^{(k)}\cdots\xi_m{}^{(k)}\ 1\ 0]$$

$$\boldsymbol{v}_2{}^{(l)}={}^t[\eta_1{}^{(l)}\eta_2{}^{(l)}\cdots\eta_m{}^{(l)}\ 0\ 1]$$

を，また $\boldsymbol{\Pi}$ は基底に対応する1組のシンプレックス剰数からなるベクトルを表わしている。すなわち，

$$\boldsymbol{\Pi}=[\Pi_1,\Pi_2,\cdots,\Pi_i,\cdots,\Pi_{m+2}]\cdots\cdots(19)$$

なお主問題においては，ダムのインデックス i に関する制約条件の数が m 個，λ, μ に関して各1個，計 $(m+2)$ 個の制約条件が存在するので，基底行列は $(m+2)\times(m+2)$ の大きさになる。しかし，式 (6), (8) および (16) における $(m+2)$ 個の制約条件は1次独立でないので，主問題を構成する制約条件のうちから λ, μ に対応する列以外の任意の1個を省くことが必要になる。すなわち主問題の基底解のランクは $(m+1)$ となるから，それに対応するシンプレックス剰数の数も $(m+1)$ となる。したがってインデックスを適当にならびかえて主問題の基底解と基底行列を行列表示すると次のように表わされる。

$$(m+1)\text{ 行}\left\{\underbrace{\begin{bmatrix}
\xi_1{}^{(1)} & \xi_1{}^{(2)}\cdots\xi_1{}^{(k_0)} & \eta_1{}^{(1)} & \eta_1{}^{(2)}\cdots\eta_1{}^{(l_0)}\\
\vdots & \vdots\qquad\vdots & \vdots & \vdots\qquad\vdots\\
\xi_i{}^{(1)} & \xi_i{}^{(2)}\cdots\xi_i{}^{(k_0)} & \eta_i{}^{(1)} & \eta_i{}^{(2)}\cdots\eta_i{}^{(l_0)}\\
\vdots & \vdots\qquad\vdots & \vdots & \vdots\qquad\vdots\\
\xi_m{}^{(1)} & \xi_m{}^{(2)}\cdots\xi_m{}^{(k_0)} & \eta_m{}^{(1)} & \eta_m{}^{(2)}\cdots\eta_m{}^{(l_0)}\\
1 & 1\cdots\cdots1 & 0 & 0\cdots\cdots0\\
0 & 0\cdots\cdots0 & 1 & 1\cdots\cdots1
\end{bmatrix}}_{(k_0+l_0=m+1)\text{ 列}}\right.$$

$$\cdot\begin{bmatrix}\lambda^{(1)}\\ \lambda^{(2)}\\ \vdots\\ \lambda^{(k_0)}\\ \mu^{(1)}\\ \mu^{(2)}\\ \vdots\\ \mu^{(l_0)}\end{bmatrix}=\left.\begin{bmatrix}0\\0\\ \vdots\\0\\1\\1\\ \vdots\\1\end{bmatrix}\right\}(m+1)\text{ 行}\cdots\cdots(20)$$

さて式 (17), (18) が満たされるかどうかを調べるためには，まず $\bar{z}_1$, $\bar{z}_2$ の最小値を求めるとともに，次にそのうちどちらか小さい方が非負であることを調べることが必要である。いま，最適解かどうかを調べるための条件を導くために，まず $\bar{z}_1{}^{(k)}$, $\bar{z}_2{}^{(l)}$ を次のように書き換える。すなわち，

$$\bar{z}_1{}^{(k)}=\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}f_{ij}x_{ij}{}^{(k)}-\Pi_{m+1}\cdots\cdots(21)$$

$$\bar{z}_2^{(l)}=\sum_{i=1}^{m} g_i y_i^{(l)}-\Pi_{m+2} \cdots\cdots(22)$$

ここで，

$$f_{ij}=c_{ij}-\Pi_i \cdots\cdots(23)$$

$$g_i=R_i+\Pi_i A_i \cdots\cdots(24)$$

いま，式 (21)，(22) より表わされる $\bar{z}_1^{(k)}$，$\bar{z}_2^{(l)}$ の最小値を計算するためには，この段階では定数項である Π_{m+1}，Π_{m+2} を省いて行なってもよいので，ここでは，この問題を次のような［Ⅱ］，［Ⅲ］の問題に書き表わすことにする。すなわち，

$$[\mathrm{II}]\begin{cases} F^{(k)}=\sum_{i=1}^{m} f_{ij} x_{ij}^{(k)} \to \min. \cdots\cdots(25) \\ \sum_{i=1}^{m} x_{ij}^{(k)}=D_j \cdots\cdots(26) \\ x_{ij}^{(k)} \geqq 0 \cdots\cdots(27) \end{cases}$$

$$[\mathrm{III}]\begin{cases} G^{(l)}=\sum_{i=1}^{m} g_i y_i^{(l)} \to \min. \cdots\cdots(28) \\ \sum_{i=1}^{m} A_i y_i^{(l)}=D \cdots\cdots(29) \\ 0 \leqq y_i^{(l)} \leqq 1 \cdots\cdots(30) \end{cases}$$

次に，上式で表わされる 2 つの LP の問題［Ⅱ］，［Ⅲ］の最適解 $F^{(k*)}$，$G^{(l*)}$ とそのときのシンプレックス剰数 Π_{m+1}，Π_{m+2} を用いて $\bar{z}_1^{(k)}$，$\bar{z}_2^{(l)}$ を計算することにより，次式で定義される H の値を求める。

$$H=\min(\bar{z}_1^{(k)},\ \bar{z}_2^{(l)}) \cdots\cdots(31)$$

このとき最適かどうかの判定条件は次式で表わされる。

$$H \geqq 0 \cdots\cdots(32)$$

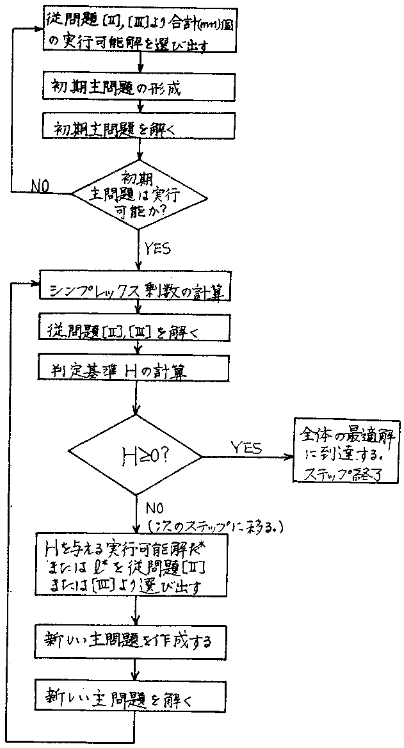
このように，問題［Ⅱ］，［Ⅲ］は主問題［Ⅰ］を新たに構成していくために用いられるため，ここでは問題［Ⅱ］，［Ⅲ］を主問題に対する「従問題」と呼ぶことにする。

（2）主問題の解の改善のプロセス

いま，上記のようにして求めた H は，最適解の場合以外には，一般には式 (32) を満たさない。すなわち，

$$H<0 \cdots\cdots(33)$$

であるときは，現在の H の値を与えている k^* または l^* で代表される実行可能解を新たに主問題に加えることにより，次の段階の主問題を構成して解いていくことになる。すなわち，そこで選ばれた実行可能解によって主問題の基底を構成するとともに，シンプレックス法によりピボットタームを見出して，基底から追い出される実行可能解を決めればよいことになる。このようにして新しい主問題における最適な基底行列が構成されたならば，これに対して新たなシンプレックス剰数ならびにそれを用いて $\bar{z}_1^{(k)}$，$\bar{z}_2^{(l)}$，H が計算できる。H が計算できたならば，この新しい H が式 (32) を満たすときに，全体における最適解が得られたことになるが，もし満たされなければ，上述と同様の手順を踏んで次のステップに進む。このようにしてディコンポジションの原理による解法のプロセスは，主問題 → 従問題 → 主問題というように条件式 (32) が満たされるまで継続する。これらのステップを実行するためにはまずステップ 1 において初期主問題を設定する必要がある。そのために従問題［Ⅱ］，［Ⅲ］より総計 $(m+1)$ 個の代替案を選び主問題の初期実行可能解を決定する。その方法はいろいろ考えられるが，実行可能な解を比較的容易に求めるためには，次の方法によることにする。すなわち，まず，全体における任意の 1 つの実行可能解を求める。この解を導水路に関する部分とダムに関する部分の 2 つに分割し，これを主問題を構成する代替案とする。またこの 2 つの代替案に付す重み（たとえば $\lambda^{(1)}$，$\mu^{(1)}$ と表わす。）の値を 1 とする。すなわち $\lambda^{(1)}=1$，$\mu^{(1)}=1$ とする。さらに残りの $(m-1)$ 個の代替案を従問題［Ⅱ］，［Ⅲ］より選ぶとともに，これらの代替案に付す重みの値を 0 ときめる。すなわち $\lambda^{(k)}=0$ $(k=2, 3, \cdots, k_0)$ かつ $\mu^{(l)}=0$ $(l=2, \cdots, l_0)$ とする。このようにすれば，初期主問題は機械的に実行可能になり，結局最初に選んだ全体における実行可能解が選ばれることになる。ここで，ディコンポジションによる解法のプロセスを示すと図—2 のフローチャートのようである。



図—2　ディコンポジションの原理による解法のプロセス

(3) ディコンポジションによる解法のプロセスと総合調整過程との関係

先に 2.(2) で詳述したように，本モデルには3つの機能が組み込まれている。すなわち，①ダムの建設位置の選定と規模を計画する機能，②建設されるダムと需要地とを結ぶ導水路網の位置・規模を計画する機能，③ ①,② の計画を合理的に調整する機能の3つである。そしてこれらの機能は上述したディコンポジションの原理とその解法により合理的に説明することができる。すなわち，式 (25), (26), (27) で表わされる従問題［Ⅱ］，ならびに式 (28), (29), (30) で表わされる従問題［Ⅲ］は，それぞれ上記の②，①の機能に対応していると考えられる。このようにして各個に独立に選び出された各代替案は，式 (15), (16), (6), (8) で表わされる主問題［Ⅰ］を解くことにより，全体において実行可能解でかつ建設費の総和が最小になるような計画へと調整されていくとともに，各計画の相対的な重み（構成度）を示す $\lambda^{(k)}$，$\mu^{(l)}$ なる値が求められる。もし最適解が得られていない場合には，新たに［Ⅱ］，［Ⅲ］の従問題から別の代替案を選び出して新しい主問題を作成し，再度 $\lambda^{(k)}$，$\mu^{(l)}$ を求める。したがってこの主問題は，①と②の機能を総合調整する計画機能すなわち③を代表しているものと考えてよい。そしてそこにおける $\lambda^{(k)}$，$\mu^{(l)}$ の値およびその変化の様子は，その調整過程を具体的に示す1つのファクターと考えることができる。このように，本モデルにディコンポジションの原理とその解法を適用すれば，モデルの作成上で意図する3つの機能の組み込みとその分析が可能になる。

4. 兵庫県の広域利水計画における実証的分析

(1) 兵庫県の利水問題の概要

兵庫県は，その県域内に大阪湾・瀬戸内沿岸と日本海岸とをもつ水利用の観点からは特色のある県である。しかも大阪湾・瀬戸内沿岸は，阪神工業地帯さらにはその延長として播磨工業地帯などの重工業地帯が広がっている。さらに神戸港という日本屈指の大港湾を抱え，工業・商業における物資の流通など経済活動がきわめて活発である。最近の企業の立地動向は，成熟期にある阪神工業地帯（工業整備特別地区）を中心に展開しており，特に東播地区には阪神都市圏からの機械工業をはじめとする都市型工業の分散立地が顕著である。また東播地区・阪神臨海地区の埋立地へは，流通加工型企業の進出がめざましい。さらに阪神地区や明石・加古川などの一部の東播地区のうちでは，阪神地域の諸都市との交通の便のよさ，時間距離の短縮，都市内地域・近郊住宅地の地価の高騰などの影響を受けて，宅地化が急激に進んでいる。このような背景のもとに年々急激な水需要の増大が発生し，将来，阪神・播磨地域の一部では深刻な水不足が発生するものと予測されている。特に神戸・西宮・尼崎などの阪神地域は，現在，武庫川・淀川水系の一環にあるが，昭和 60 年時点で，淀川の水供給能力が限界に達すると考えられるので，他の地域からの分水を考慮する必要がある。また日本海側の但馬地域は，将来予定されている地域開発・工業開発を含めても円山川水系の開発量にはかなりの余裕があると算定されている。さらには，1年間の降雨特性をみると，日本海側は冬期には降雪などの関係で比較的雨量に恵まれているのに対して，瀬戸内沿岸地帯は冬期は寡雨のため，日本海側と瀬戸内側では水の偏在が生じている。このように日本海側と瀬戸内側では，水が降雨の面でも，需要の面でも偏在している。したがって円山川水系の開発量の一部を阪神・播磨地域に分水する必要性が生じてくるわけである。

表―1 上水道用水・工業用水の需要水量および新規需要量

（単位：1 000 m³/年）

地域名		昭和40年 上水使用水量	昭和40年 工水使用水量	昭和40年 計	昭和50年 上水需要水量	昭和50年 工水需要水量	昭和50年 計	昭和50年 新規需要水量	昭和55年 上水需要水量	昭和55年 工水需要水量	昭和55年 計	昭和55年 新規需要水量	昭和60年 上水需要水量	昭和60年 工水需要水量	昭和60年 計	昭和60年 新規需要水量
阪神	阪神臨海	619	670	1 289	1 071	1 059	2 130	841	1 302	1 383	2 685	1 396	1 522	1 602	3 124	1 835
	〃 近郊	61	117	178	193	281	474	296	266	392	658	480	338	478	816	638
	計	680	787	1 467	1 264	1 340	2 604	1 137	1 568	1 775	3 343	1 876	1 861	2 080	3 940	2 473
播磨	東播（加古川水系）	99	338	437	243	1 040	1 283	846	311	1 499	1 810	1 373	374	1 717	2 091	1 654
	中播（市川，揖保川，夢前川水系）	120	591	711	218	899	1 117	406	287	1 141	1 428	717	359	1 196	1 555	844
	西播（千種川水系）	17	62	79	46	129	175	96	51	189	240	161	53	231	284	205
	計	236	991	1 227	507	2 068	2 575	1 348	649	2 829	3 478	2 251	786	3 144	3 930	2 703
丹波		8	16	24	23	47	70	46	28	67	95	71	31	84	115	91
円山川		30	9	39	60	56	116	77	60	82	142	103	60	128	188	149
淡路		14	19	33	43	46	83	55	358	62	120	87	76	119	195	162
県計		968	1 822	2 790	1 897	3 556	5 453	2 363	2 363	4 815	7 178	4 388	2 813	5 555	8 368	5 518

このような考え方に基づいて兵庫県は，各地域の地域開発の動向と将来の方向性とを関連づけることにより，今後の水資源開発の構想を打ち出している。

さて以下では，これらの事項を考慮に入れて，円山川水系と加古川水系，市川水系への分水路，さらには将来も比較的水源開発にゆとりのある播磨地域の千種川，揖保川などの諸河川の間の導水路などを含めた兵庫県広域利水施設のパターンを設定するとともに，広域利水計画をダム群と導水路網の建設計画としてとらえ考察をすすめることにする。

表—3　導水トンネル工事費

(m 当り)

諸元 ＼ 流量	$Q=10\ m^3/sec$	$Q=20\ m^3/sec$	$Q=30\ m^3/sec$	$Q=40\ m^3/sec$
断面積 (m^2)	5.0	10.0	15.0	20.0
径 (m)	2.50	3.60	4.40	5.10
巻厚 (m)	0.30	0.45	0.55	0.65
掘削量 (m^3)	7.83	16.00	23.97	32.32
コンクリート量 (m^3)	2.83	6.00	8.97	12.32
直接工事費 (円)	67 450	140 000	209 500	284 800
仮設費 (円)	6 745	14 000	20 955	28 480
その他 (円)	33 725	70 000	104 775	142 400
工事費計 (円)	107 920	224 000	335 280	455 680

表—4　水管橋工事費

(m 当り)

諸元 ＼ 流量	$Q=10\ m^3/s$	$Q=20\ m^3/s$	$Q=30\ m^3/s$	$Q=40\ m^3/s$
径 (mm)	2 500	3 600	4 400	5 100
t (mm)	12	17	20	23
W (kg/m)	743.4	1 516	2 180	2 906
工事費 (円)	594 400	1 212 800	1 744 000	2 324 800

(2)　各地区の需要量の算定

各地区の需要量は「兵庫県開発計画案概要（兵庫県昭和 45 年 7 月）」に基づき，県企画課水資源対策室が算定した結果を用いる。それを表—1 に示した。なお表—2 には表—1 で示された将来需要量を各水系ごとに割りふってある。その際，東播地区の新規需要量は，加古川に，西播地区は千種川に，但馬地区は円山川に依存させる。中播地区は現在の給水実績比（上水のみ）で，揖保川，夢前川，市川に割りふって計算した。これは各河川の下流に位置する各需要地は，末端においては従来どおりもよりの河川に依存すると考えたものである。したがって末端の配水管の建設は，この方針にのっとって行なわれる。

(3)　導水路網のルート選定と建設単価の算定

導水路は水道における配水管のような性格をもつものであり，道路に沿って配置することも考えられる。しかし供給量と需要量との関係から推定すると，その通水量は 10 m^3/sec 以上となる所もある。管内流速を 2.0 m^3/sec とすれば，その径は 2.5 m となり，このような大規模な管路を埋設することは，現在の市街地の状況から判断すると，かなり困難であると考えねばならない。また管路の破損などによる被害は，交通その他に大きな影響を与えると思われる。また導水路はある水系から他の水系に，さらに水系をこえて他の水系に水を導入する必要があり得る。このような条件を満足させるためには，トンネル配水池的な性格の設備が適当であると考えられる。このような観点から導水路は地山にトンネルとして設置することにした。なお，導水路の建設単価の

表—2　各水系新規依存量

(単位：m^3/sec)

水系	新規需要量	備考
加古川	19.2	
市川	6.3	
夢前川	1.1	31.4 (m^3/sec)（加古川～千種川）
揖保川	2.4	
千種川	2.4	
円山川	1.7	
	33.1	

表—5　円山川分水路事業費

$(6.0\ m^3/sec)$

費目	細目	工種	内訳	新規利水量 $6.0\ m^3/sec$ 数量	金額×10^6円
建設費					7 003
	工事費				5 675
		直接工事費			4 646
			ポンプ，モーター	4×5 800 kW	1 160
			取水口	7	1 400
			揚水ポンプ機場	350 m^2	52
			トンネル	0.95＝8 850m 42 300 1.10＝1 600m 51 200 1.18＝19 500m 57 500	1 578
			送水管	2×327m 966 t	386
			放水口		70
		管理設備費			100
		仮設工事費			697
		工事用動力費			232
	測量及試験費				186
	用地及補償費				1 000
		用地および補償費			
		補償工事費			
	船舶及機械器具費				50
	営繕費				46
	宿泊費				46
工事事務費					557
計					7 560

表—6 円山川分水路事業費

(8 m³/sec)

費目	細目	工種	内訳	新規利水量 8.0 m³/sec 数量	金額×10⁶円
建設費					8 390
	工事費				6 996
		直接工事費			5 747
			ポンプ，モーター	4×9 300 kW	1 860
			取水口	7	1 400
			揚水ポンプ機場	400 m³	60
			トンネル	0.95＝8 850 42 300 1.10＝1 600 51 200 1.32＝19 500 70 500	1 831
			送水管	2×395m 1 315 t	526
			放水口	7	70
		管理設備費			100
		仮設工事費			862
		工事用動力費			287
	測量及試験費				230
	用地及補償費				1 000
		用地および補償費			
		補償工事費			
	船舶及機械器具費				50
	営繕費				57
	宿泊費				57
工事事務費					670
計					9 060

算定にあたって用いた各種の概算単価の一部を表—3 から表—4 に掲げた。また，円山川分水路事業費ならびに建設単価のうち，いくつかを表—5 と表—6 に示した。

(4) ダムの建設費の算定

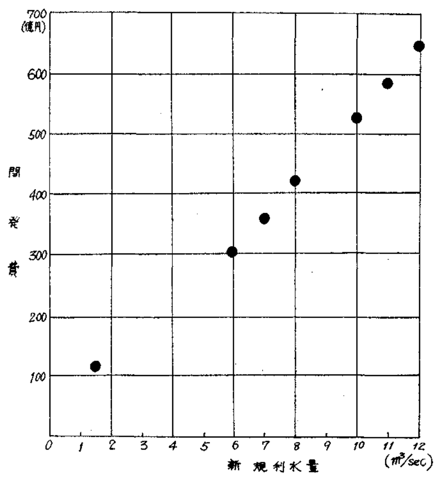
ダムの建設費の算定を，千種川水系，揖保川水系，市川水系，加古川水系ならびに円山川水系のそれぞれに対して行なった。その結果，新規開発量（ダムの規模すなわち容量に相当すると考えてよい）と開発費用との間には線形性がほぼ認められることがわかった。（ここでは，円山川水系開発費の算定結果を 図—3 に例示した。）したがって以下では，両者の関係を線形とみなして計算を進めることとし，これらを整理して表—7 に示した。

(5) モデルの修正

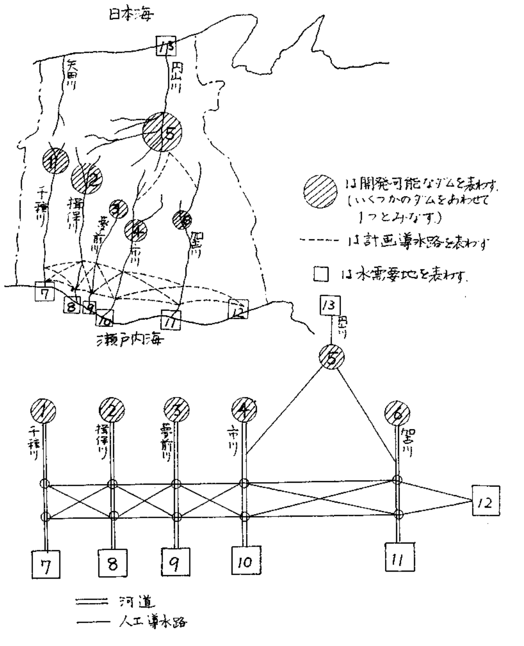
モデルの対象となる広域利水計画を模式化すれば，図—4 のようになる。さて河道をそのまま用いるルートは，建設費を 0 とみなすと，計算上冗長なルートが存在することになるので，これらの径路を省くと，模式図は図—5 のように簡単になる。なお円山川下流域の水需要地には，⑤ の供給可能量からあらかじめ ⑤ に依存する

表—7 各ダムの建設単価

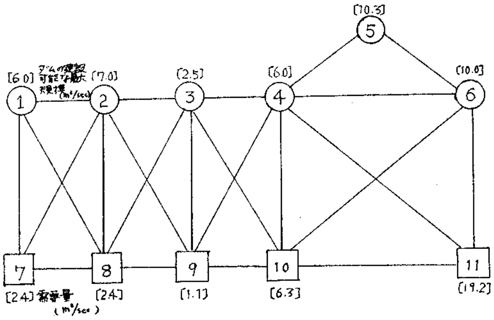
ダム	建設単価 (億円/m³/sec)	最大建設可能容量 (m³/sec)	最大規模の費用 (億円)
千種川関連ダム群	38	6.0	228
揖保川関連ダム群	37	7.0	259
夢前川関連ダム群	31	2.5	77.5
市川関連ダム群	65	6.0	390
加古川関連ダム群	65	10.0	650
円山川関連ダム群	54	10.3	556.2



図—3 円山川水系開発費と新規利水量との関係



図—4 兵庫県の広域利水計画の数学モデル化の模式図



図—5　モデルの模式図（修正したもの）

需要量分を差し引いておくことにより，この径路を省略することができる。またルート (6-12) とルート (11-12) とは建設単価が同一なので，このルート (6-12), (11-12) は最適計算上冗長になる。そこであらかじめ⑫の需要量を⑪に含めて計算することにすれば，需要地⑫およびルート (6-12), (11-12) は省略できる。以下の計算では，これらを省略して計算を進めることにした。

また，ここで用いる広域利水システムにおいては，導水路が中継地点を含むネットワーク構造になっているので，前述のモデルに対しては以下のような修正を必要とする。

いま，建設予定のダムの最大個数を m，中継地の数を p，需要地の数を n とするならば，モデルの定式化は以下のとおりになる。なおこの場合，需要地・供給地・中継地を問わず，すべての地点を供給地点として考えると同時に，需要地点であると考える。ただし実際のダムの場合には，その供給量を $A_i y_i$ とおき，需要地と中継地の供給量は0とする。また需要地の需要量は D_i，ダムと中継地の需要量は0とする。ここで，サフィックス i, j は以下において，

$$i, j=\begin{cases} 1, 2, \cdots, m: \text{ダ　ム} \\ m+1, \cdots, m+p: \text{中継地} \\ m+p+1, \cdots, m+p+n: \text{需要地} \end{cases}$$

とする。

このように考えるとモデルは次のように修正される。すなわち，

目的関数：

$$z=\sum_{i=1}^{m+n+p}\sum_{j=1}^{m+n+p} c_{ij}x_{ij}+\sum_{i=1}^{m} R_i y_i \rightarrow \min. \cdots(34)$$

制約条件：

$$\sum_{j=1}^{m+p+n} x_{ij}-A_i y_i=0 \quad (i=1,2, \cdots, m) \cdots\cdots\cdots(35)$$

$$\sum_{j=1}^{m+p+n} x_{ij}=0 \quad (i=m+1, \cdots, m+p+n) \cdots\cdots(36)$$

$$\sum_{i=1}^{m+p+n} x_{ij}=0 \quad (j=1, 2, \cdots, m, m+1, \cdots m+p) \cdots\cdots(37)$$

$$\sum_{i=1}^{m+p+n} x_{ij}=D_j \quad (j=m+p+1, \cdots, m+p+n) \cdots\cdots(38)$$

ここで任意の実行可能解はそれぞれの解集合 $\{x_{ij}^{(k)}\}$ および $\{y_i^{(l)}\}$ の端点の1次凸結合によって表わされることはすでに述べたとおりである。すなわち，

$$x_{ij}=\sum_{k=1}^{K}\lambda^{(k)}x_{ij}^{(k)} \cdots\cdots(39)$$

$$\sum_{k=1}^{K}\lambda^{(k)}=1 \cdots\cdots(40)$$

$$y_i=\sum_{l=1}^{L}\mu^{(l)}y_i^{(l)} \cdots\cdots(41)$$

$$\sum_{l=1}^{L}\mu^{(l)}=1 \cdots\cdots(42)$$

式 (39), (41) を式 (34) に代入すると，目的関数は

$$z=\sum_{k=1}^{K} z_1'^{(k)}\lambda^{(k)}+\sum_{l=1}^{L} z_2^{(l)}\mu^{(l)} \rightarrow \min. \cdots\cdots(43)$$

ここで，

$$z_1'^{(k)}=\sum_{i=1}^{m+n+p}\sum_{j=1}^{m+n+p} c_{ij}x_{ij}^{(k)} \cdots\cdots(44)$$

$$z_2^{(l)}=\sum_{i=1}^{m} R_i y_i^{(l)} \cdots\cdots(12)$$

のように表わされる。

また，式 (39), (41) を用いると式 (35) は次式のように表わされる。

$$\sum_{k=1}^{K}\xi_i'^{(k)}\lambda^{(k)}+\sum_{l=1}^{L}\eta_i^{(l)}\mu^{(l)}=0 \cdots\cdots(45)$$

$$(i=1, 2, \cdots, m)$$

ここに $\xi_i'^{(k)}$，はダム i から隣接する需要地または中継地間を結ぶ導水路に配分される水量の総和を表わし，式 (13) の $\xi_i^{(k)}$ に相等する。

（6） 結果の考察

ここでは，次の2つの場合に対して上述のモデルを適用し，分析を行なった。

ケースⅠ：神戸地域には，分水を行なわない場合。（したがって計算上は，加古川下流域の需要量を 19.2 m³/sec とし，神戸地域への分水はこれを含めない。）この場合は，地域全体の開発可能量 41.8 m³/sec に対し，総需要量は 31.4 m³/sec で，開発にはかなり余裕があることが特徴である。このケースで用いた各水系の下流域の

表—8（a） 神戸地域に導水しない場合（ケースⅠ）

記号	地域名	需要量 (m³/sec)
7	千種川下流域	2.4
8	揖保川下流域	2.4
9	夢前川下流域	1.1
10	市川下流域	6.3
11	加古川下流域	19.2
12	神戸地域	0.0

表—8（b） 神戸地域に導水する場合（ケースⅡ）

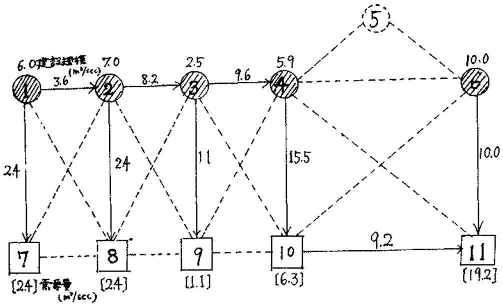
記号	地域名	需要量 (m³/sec)
7	千種川下流域	2.4
8	揖保川下流域	2.4
9	夢前川下流域	1.1
10	市川下流域	6.3
11	加古川下流域	19.2
12	神戸地域	5.0

需要量を表—8 (a) に示した。

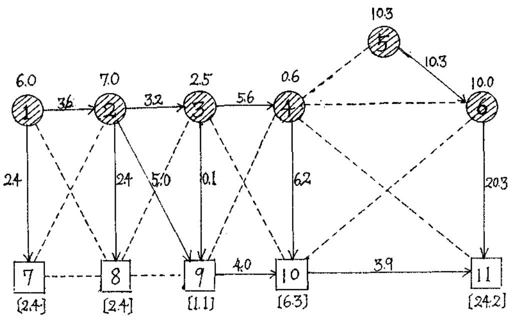
ケース II：神戸地域に 5 m³/sec の分水を行なう場合(したがって計算上は，加古川下流域の需要量 5 m³/sec を含めて，24.2 m³/sec とする。) この場合は，地域全体の開発可能量 41.8 m³/sec に対し，総需要量は 36.4 m³/sec で開発量がかなりひっ迫していることが特徴である。このケースで用いた各水系下流域の需要量を表—8 (b) に示した。

a) 計 算 結 果

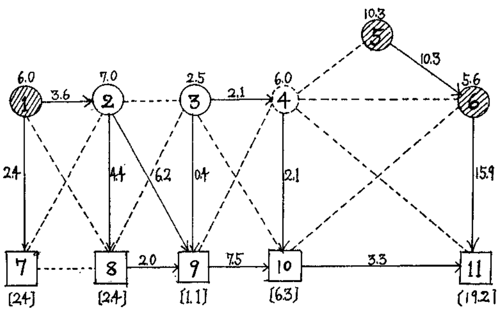
ケースIおよびケース II の主問題の初期実行可能解を図—6 (a) および図—7 (a) に示した。またこれらのケースの最適解を図—6 (b) および図—7 (b) に示した。これらの最適解は，最適解を構成する7つの解を表—9 および表—10 に示すような $\lambda^{(k)}$，$\mu^{(l)}$ の値を用いて重みづけして合成した結果求められたものである。また，



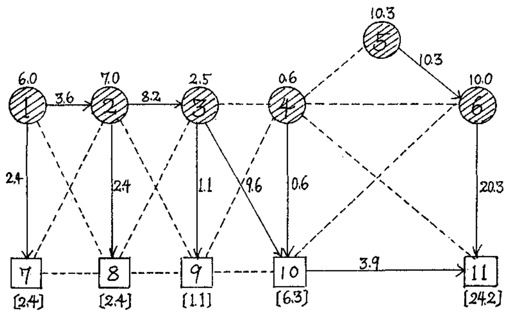
図—6 (a) 主問題の初期実行可能解 (ケース I)



図—7 (a) 主問題の初期実行可能解 (ケース II)



図—6 (b) 主問題の最適解 (ケース I)



図—7 (b) 主問題の最適解 (ケース II)

表—9 重み係数 $\lambda^{(k)}$, $\mu^{(l)}$ のステップ繰り返しによる変化 (ケース I)

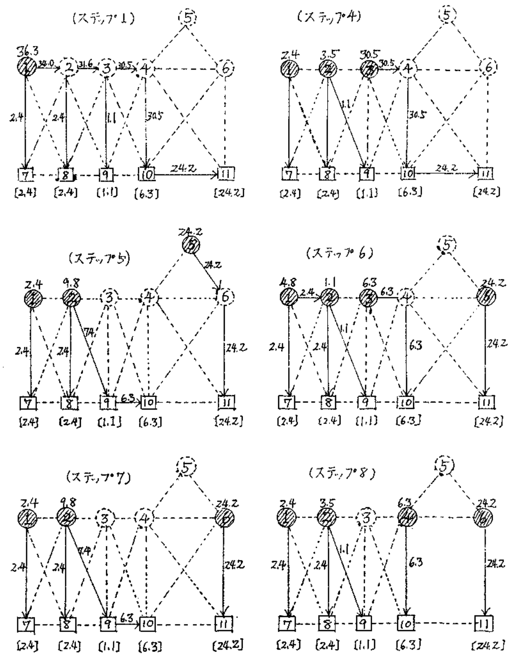
	k, l の値	重み係数	導入されるステップ	ステップ 1	ステップ 2	ステップ 3	ステップ 4	ステップ 5	ステップ 6	ステップ 7	ステップ 8	ステップ 9	ステップ 10	ステップ 11	ステップ 12	ステップ 13
l (ダム)	1	$\mu^{(1)}$	1	1.0	1.0	1.0	1.0	0.761	0.517	0.141	0.131	*	*	*	*	*
	2	$\mu^{(2)}$	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.239	0.483	0.859	0.869	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
k (導水路)	1	$\lambda^{(1)}$	1	1.0	1.0	1.0	1.0	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	2	$\lambda^{(2)}$	1	0.0	0.0	0.0	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	3	$\lambda^{(3)}$	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.743	0.508	0.012	*	*	*	*	*	*
	4	$\lambda^{(4)}$	1	0.0	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	5	$\lambda^{(5)}$	1	0.0	0.0	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	6	$\lambda^{(6)}$	2		0.0	0.0	0.0	0.104	0.142	0.212	0.213	0.202	0.172	0.172	0.172	0.172
	7	$\lambda^{(7)}$	3			0.0	0.0	0.076	0.145	0.318	0.320	0.199	0.140	0.075	0.075	*
	8	$\lambda^{(8)}$	4				0.0	0.042	0.032	*	*	*	*	*	*	*
	9	$\lambda^{(9)}$	5					0.030	*	*	*	*	*	*	*	*
	10	$\lambda^{(10)}$	6						0.171	0.337	0.341	0.367	0.338	0.274	0.274	0.274
	11	$\lambda^{(11)}$	7							0.121	0.124	0.0	0.0	0.0	*	*
	12	$\lambda^{(12)}$	8								0.0	0.092	*	*	*	*
	13	$\lambda^{(13)}$	9									0.138	0.193	*	*	*
	14	$\lambda^{(14)}$	10										0.152	0.217	0.217	0.217
	15	$\lambda^{(15)}$	11											0.263	0.263	0.263
	16	$\lambda^{(16)}$	12												0.0	0.0
	17	$\lambda^{(17)}$	13													0.075

* は基底から追い出されていることを示す。
ブランクは，まだ基底に導入されていないことを示す。

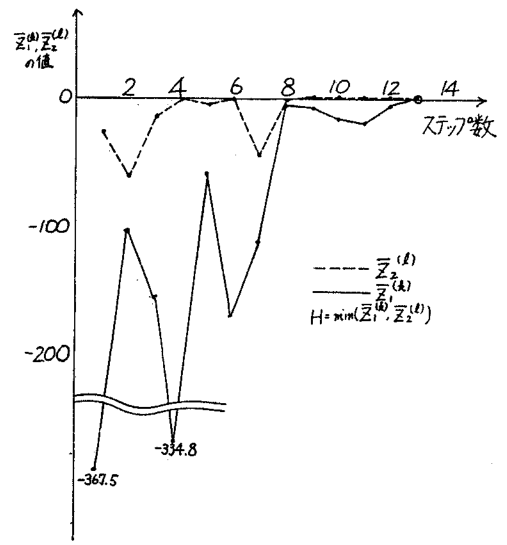
表—10 重み係数 $\lambda^{(k)}$, $\mu^{(l)}$ のステップ繰り返しによる変化（ケース II）

	k, l の値	重み係数	導入されるステップ	ステップ 1	ステップ 2	ステップ 3	ステップ 4	ステップ 5	ステップ 6	ステップ 7	ステップ 8	ステップ 9
l（ダム）	1	$\mu^{(1)}$	1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
k（導水路）	1	$\lambda^{(1)}$	1	0.0	*	*	*	*	*	*	*	*
	2	$\lambda^{(2)}$	1	1.0	1.0	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	*	*
	3	$\lambda^{(3)}$	1	0.0	0.0	0.065	0.071	0.091	*	*	*	*
	4	$\lambda^{(4)}$	1	0.0	0.0	0.0	*	*	*	*	*	*
	5	$\lambda^{(5)}$	1	0.0	0.0	*	*	*	*	*	*	*
	6	$\lambda^{(6)}$	1	0.0	0.0	0.383	0.383	0.359	0.048	*	*	*
	7	$\lambda^{(7)}$	2		0.0	0.057	0.056	0.058	0.089	0.090	0.090	0.101
	8	$\lambda^{(8)}$	3			0.421	0.394	0.394	0.346	0.328	0.328	*
	9	$\lambda^{(9)}$	4				0.0	*	*	*	*	*
	10	$\lambda^{(10)}$	5					0.0	0.058	0.056	0.056	0.062
	11	$\lambda^{(11)}$	6						0.340	0.359	0.359	0.426
	12	$\lambda^{(12)}$	7							0.066	0.066	0.097
	13	$\lambda^{(13)}$	8								0.100	0.221
	14	$\lambda^{(14)}$	9									0.095

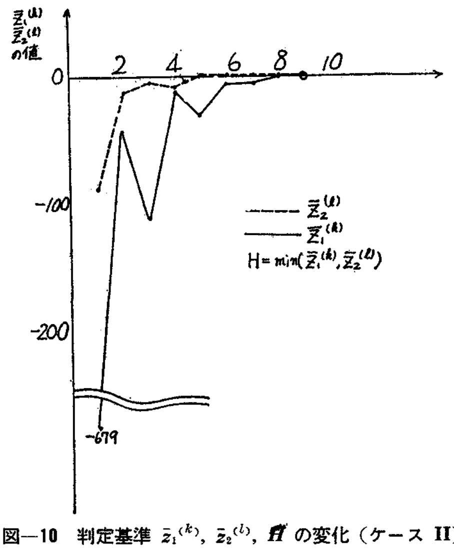
*は基底から追い出されていることを示す。
ブランクは，まだ基底に導入されていないことを示す。



図—8 最適解を構成する 6 つの代替案（導水路）（ケースII）
（ ）内はそれが最初に選ばれたステップを表わす

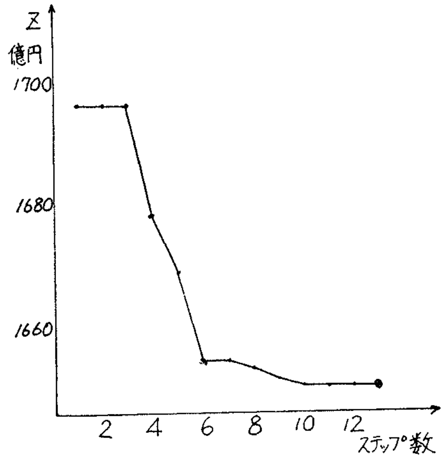


図—9 判定基準 $\bar{z}_1^{(k)}$, $\bar{z}_2^{(l)}$, H の変化（ケース I）

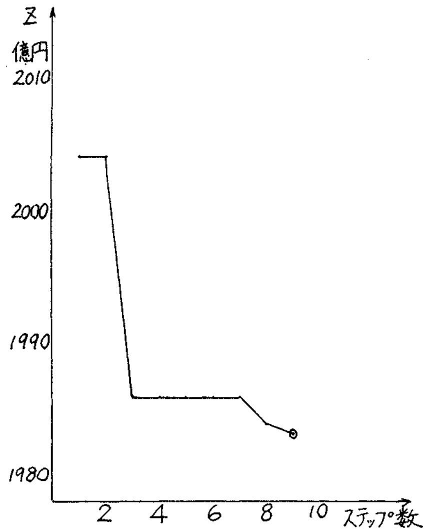


図—10 判定基準 $\bar{z}_1^{(k)}$, $\bar{z}_2^{(l)}$, H の変化（ケース II）

ケース II の最適解を構成する 7 つの実行可能解（代替案）のうち導水路の代替案 6 個を図—8 に示した。これらの解は，ディコンポジションの原理による解法のプロセスのいくつかのステップで選び出されたものであり，単独では全体における実行可能解にならない。しかし各ステップで選び出される解は，前述のように重みづけされることによって，全体における新しい 1 つの実行可能解を構成していくことになる。そして各ステップの主問題で得られる全体における実行可能解は，それまでに得られた従問題の解と新たに従問題より選び出される解を用いて，全体としてさらに改善された実行可能解へと置



図—11 目的関数 z の値の変化（ケース I）



図—12 目的関数 z の値の変化（ケース II）

き換えられていくことがわかる。その際に用いられる判定基準の変化を各ステップごとに**図—9**および**図—10**に示した。また $\lambda^{(k)}$, $\mu^{(l)}$ は各ステップにおける個々の実行可能解（代替案）に付すべき重みを表わしている。また，全体における実行可能解の改善の過程は，目的関数 z の変化をみればわかるが，これをそれぞれケースⅠ，Ⅱ の場合について図示すれば，**図—11**および**図—12**のようになる。この図より明らかなように，目的関数 z の変化が大きい段階は，ケースⅠの場合にはステップ6からステップ8あたりまで，ケース Ⅱ の場合にはステップ2から3までであり，以降はほとんど目的関数の値が変化していない。これはダム群と導水路網の調整では，あらかじめダム群の調整が行なわれてから後にはじめて導水路計画が策定されることが妥当であることを示している。これは，導水路の建設費がダム群の建設費に比して1桁分だけ小さいという事実に基づいている。この調整状況は，まずダム群の建設計画案が決定してから導水路網の計画案を策定するという従来の計画案策定過程とよく対応しており，このことは，ここでとりあげた計画モデルの妥当性を保証するものと考えてもよいであろう。

b）まとめ

以上2つの場合について項目別に結果を考察したが，以下ではこれらの結果から結論できることを要約することにする。

本研究で取扱った兵庫県の利水計画のように，近い将来において特定の地域に急激な水需要が集中する反面，他の地域においては水供給にゆとりがあると予測される場合には，これらの地域を越えた水供給すなわち広域利水計画が有効な手段となると考えられる。特に水配分と関連給水施設の建設計画に限定して考える場合，建設費用の観点からも合理的であることが示される。

次に，広域的なダム建設ならびに関連導水路網建設計画を策定する場合には，従来のようにダム建設計画が独自に先行し，これに従属するような形で導水路網建設計画が策定されることがよいかどうかを検討する必要がある。すなわち，これは，広域利水方式の場合には，地域を越えて導水するため，単にダムの建設のみならず，導水路の建設も同時に考慮することが必要であることや，導水路の建設費用が従来に比べて非常に高くなるため，建設費の総和を問題にする以上，導水路の費用を無視することができなくなるからである。

広域利水計画のモデル化にあたっては，このような点を考慮し，① ダム建設の位置選定と規模を計画する機能，② 建設されるダムと需要地とを結ぶ導水路網の位置・規模を計画する機能，③ ①，② の計画を合理的に調整する機能の3種類が組み込まれる必要がある。上述したように，①，② の機能をモデルにより表わすと，③ の調整機能は，このモデルにディコンポジションの原理を適用することにより表現することができるので，その調整過程に検討を加えることが可能となる。

ディコンポジションの原理を適用した兵庫県の広域利水計画を検討した結果についてのみいえば，従来のようにダム建設計画の策定を先行させても，決して不合理ではないことが示されている。すなわち，ダム群のダムサイトと規模を決定した上で，導水路網の計画案を練るという従来の方式が計算結果からほぼ妥当であることが示されている。しかしながら，現在に比して将来の導水路網の建設費や需要量が急増した場合，さらにはより広域的な利水計画を考えた場合には，この限りでないことも理論的に明らかである。試みに需要量を大きくさせて感度分析を実施してみると，ダム計画のみの最適解は全体

の最適解を構成しないことが明らかとなっている。

c) モデルに関する検討

① 費用算定に関する検討：上記の実証例で述べたように，現実のデータからは建設費用と規模の間にはほぼ線形性が仮定できるものと判断したが，実際にはダムの建設費用の算定はかなり複雑であるので，場合によってはこのような仮定が大きな誤差を生むことになる可能性がある。特に，昨今におけるダムの建設費の 50% 以上が土地収用費，補修費で占められていること，さらには，この費用が地域条件ならびにその時点の社会情勢によって極端に相違してくることなど，費用の算定にあたって対象ごとに具体的にほりさげたデータの収集が必要であると考えられる。

また，建設費用と規模との間の関係は，厳密には非線形で規模の経済性もみられるが，このモデルの対象としている計画のレベルとそこで必要とされる精度などを考慮すれば，この仮定でも十分妥当であると考えられた。さらに，評価の尺度として建設費用の総和をとったが，これも必ずしも適切であるとは断言できないということもある。したがって評価の尺度に関する研究を実施し，より適当な評価基準を導入していくことが今後に残されている。

② 需要量の算定に関する検討：本モデルの実証計算においては，各河川の下流に従来の方法によって需要地を設定した。すなわちこの需要量はあらかじめ各河川の下流域に位置する需要地の需要量を各水系に割りふって求めたものである。その際には，各河川の流域に位置する各需要地は，末端においてはもよりの河川に依存すると考えたものである。そのため末端の配水管の敷設はこの方針にのっとって行なわれるとした。しかしながら各需要地の需要量を各河川にどのように割りふるかによって，下流に設定する需要量の算定値が異なり，ひいては広域的な導水路の建設方法も変化するであろう。またこのことは末端の配水管の敷設が現在どのような状態であるのか，将来においてどのように拡充していくのか等々の問題と密接に関係している。したがって今後このモデルを用いて需要量を算定するためには，さらに検討を加える必要があると考えられる。

5. 結　　言

以上のように本研究は，広域利水に関する問題のうちから特に中心をなすと考えられる水配分問題をモデル化するとともに，手段としてのダム群と，それと一対をなす導水路網との両者の建設計画における調整過程の記述を試みたものである。すでに述べたように，本モデルはいくつかの前提条件の下に成り立っているが，ここにはモデル構成における問題点と，モデル運用における問題点が存在していると考える。以下では，本研究の今後の課題のとりまとめという観点から，これらの問題点を整理し，簡単に述べることにする。

(1) モデル構成における問題点

本モデルは，広域利水における水配分問題を対象としているのであるから，一般的な利水問題の中から広域利水計画に関連する部分のみを取扱ったものである。この場合，技術の点でモデルにおいて直接に取上げられなかった項目が存在する。これらの項目は，以下に述べるような各項目に整理されよう。

2.(1) でも述べたように，広域利水にも種々の段階の計画が存在する。本モデルで取り上げたのは，広域的な水配分問題を総合的な立場から検討するための計画情報を提示することを目的としたものである。この点でモデルの記述範囲はおのずと限定され，計画レベルと一致させるような形となっている。このため，末端の給配水計画をきめ細かく決定するための情報は，他の側面からの分析に委ねられる形となっている。

また，水理・水文学，河川工学上の技術的な側面からの考察は特に行なっていない。たとえば，

① ダム建設後の上流・下流部の河床の変動ならびにその対策

② 導水路の建設後の河川との分流点における河床の変動・河道の変化とその対策

③ ダムを河口堰として建設する場合の塩水の遡上と塩水対策

④ 流路の変更による地下水の変化や漁業などに与える影響

などが考えられる。

また，本広域利水計画を必要とする地域に関する種々の社会科学的分析あるいは生態学的な分析という検討方法についてはなんら言及していない。たとえば，地域における種々の活動の予測やその他の地域的要因を分析することにより，モデルのインプットデータと適用条件を決めなければならないが，モデル適用前にこの点に関しての十分な吟呼をしておくことが必要である。また，モデルを適用して実証計算を行なった場合，得られた結果を分析・検討するためには，地域における種々の活動に与える影響や自然の変化などの社会科学的・生態学的観点から考察を加えることが必要になってくると考えられるが，この点についても本研究では取上げていない。

また，実際問題としては，ダム群の計画の代替案ならびに導水路の計画の代替案は，上記の種々の側面から検討を加えることにより選び出されるべきものであり，単に式 (1)，式 (2) を満たす代替案を，それぞれダムなら

びに導水路の計画代替案とよぶのは必ずしも妥当ではない。ここでは総合化の評価基準として両者の建設費の総和に限定して分析を加えたものである。実際問題としては，上に述べたいくつかの観点から関連する要因を評価し，実行可能性と優劣を総合的に比較検討することが肝要であると考えられる。つまり，計画の総合化では，計画にかかわる種々の評価要因に関する同時的かつ総合的な検討が必要であるが，現在のところこれらに答えうるだけの計画技術が存在しておらず，これを補うためには計画者の高度な総合判断の能力が必要となってくる。

このモデルでいう総合化のプロセスの定式化とは，建設費用のみに注目した場合に限って，費用という側面からの各代替案の優劣の比較を行ない，効率のよい総合化（調整過程）の記述を目指したものであるので，これらの分析結果は計画の総合化のための判断資料としての取扱いが必要である。

（2） モデル運用上の問題点

これについては，先に **4**.（**6**）の **c**）で詳述したので，ここでは簡単に記しておくにとどめる。

まず，費用算定において施工条件を一定として考えたが，もしこの条件の検討も同時に行なえば，算定された費用も異なり，その結果計算結果も異なることがありうると考えられる。たとえば，兵庫県の実証例における導水路の建設に関しては，地質構造からみたとき，円山川・市川間の導水路の施工条件は異なるため，その算定値の大きさも逆転しうると考えられる。また実際の河川の河道を導水路として用いる場合には，建設費用は０として考えたが，築堤・護岸工事その他の必要から必ずしも０とみなせない場合も考えられる。

これらの問題点は，若干モデルの構成における除外項目として列挙したものと重複しているが，なんらかの形で費用に反映させることができるものもあり得ることを示している。要するに，これらの問題点はあくまでデータの精度に関するものであり，モデルの構造自体の問題ではない。したがって今後のモデルの適用に当たっては，その場合に応じて，要求される精度が満たされるようにデータの収集と検討をきめ細かく行なうことにより解決しうると考えられる。

以上に述べてきたように，このモデルを実際のダムの建設計画と導水路網の建設計画との総合化に用いる場合は，記述したさまざまな問題点について，今後引続いて検討していくことが必要であるが，得られた成果は，これらの分析結果が，水資源開発計画を策定していくうえでの有効な情報を提供しえた点にあると考えている。今後，モデルの検討で述べた点をふまえ，モデルの改善ならびに他の角度からの広域利水問題の分析とモデル化を行なっていきたいと考えている。

最後に，本研究を実施するにあたって有益なご助言をたまわった京都大学工学部土木工学教室吉川和広教授に深く感謝するとともに，資料の収集に協力いただいた建設省近畿地方建設局ならびに兵庫県の関係各位に謝意を表します。

参 考 文 献

1) 建設省：近畿圏の水資源実態調査，建設省近畿地方建設局，昭和 45 年.
2) 兵庫県：兵庫県水資源開発計画案概要，兵庫県企画部，昭和 45 年.
3) 建設省：広域利水調査，昭和 45 年.
4) 建設省：大阪湾紀伊水道地域大規模開発計画調査，建設省計画局，昭和 46 年 1 月.
5) 吉川和広・春名攻・岡田憲夫：ダム群と配水施設の配置計画に関する一考察，土木学会第 26 回年次学術講演会講演集，昭和 46 年.
6) 吉川和広・春名攻・岡田憲夫：都市における給配水施設の拡張計画モデルについて，土木学会第 27 回年次学術講演会講演集，昭和 47 年.
7) 春名攻・岡田憲夫：兵庫県の広域利水計画に関する一考察，近畿都市学会，昭和 47 年 6 月.
8) 石橋多聞：飲み水の危機，東京大学出版会，昭和 47 年.
9) 科学技術庁：将来の資源問題（上），科学技術庁，昭和46 年.
10) 佐藤武夫：水の経済学，岩波新書，昭和 40 年.
11) M. Hufschmidt et al. : Design of Water Resources, Harvard Univ. Press.
12) A.V. Kneese & S.C. Smith : Water Research, The Johnes Hopkins Press.
13) G.B. Dantzig : Linear Programming and Extensions, Princeton Univ. Press.
14) G. Hadley : Linear Programming, Addison-Wesley Publishing Company.
15) R.W. Llewellyn : Linear Programming, Holt, Rinehart and Winston.

（1972.7.18・受付）