

(1) 水道広域化の効果の評価に関する方法論的研究

A STUDY ON AREA-WIDE WATERWORKS SYSTEM EVALUATION

萩原良巳*・今田俊彦*
Yoshimi HAGIHARA, Toshihiko KONDA

Abstract: Area-wide waterworks are often planned to resolve water resources problem which cannot be solved by the single municipality. Improvement of water supply stability is one of the effects to be expected by area-wide waterworks. Areal definition as a combination of municipalities should be planned in order to get a most effective alternative from view point of the stability improvement. This paper deals with evaluation method of the effect.

Indices are extracted to evaluate water supply stability. Design of experiment method is adopted to make alternatives of area-wide waterworks based on these indices. Factor profile method selects the most effective alternative. Case study gives a practical usefulness of this approach.

Keyword: Area-wide waterworks, evaluation method, stability of water supply, design of experiment, factor profile.

1. はじめに

水道の広域化は、単独の水道事業者（または市町村）で解決できない問題点の解決を求めて、行政区域の枠組を超えて協同化することによってもたらされる。「広域化」という言葉に見られるように、これは単に領域が「広い」ということを示すのではなく、領域が「広がる」という行為に着目していると言える。従って水道広域化の計画論は、なぜ（広域化要因）、どこで（広域化対象事業者）、いつ（広域化の時期）「広域化」を行なうかを論ずる必要がある。広域化の実例を見て、計画論として特に望まれることは、広域化の時空間的範囲の設定と広域化による効果の評価に関する方法論の確立と考えられる。このことから筆者らは、広域化の実例をもとに現象分析を行ない¹⁾、広域化の範囲を設定する要因の抽出とその重要性の考察を行ってきた²⁾。一方、広域化の効果に関しては、定性的評価あるいは規模の経済性という一面的な効果の定量化が一般的であり、広域化の効果を定量化する試みとして、いくつかの研究があるのみである³⁾⁴⁾。3)は広域化によって集排水域が拡大し、取水可能量と汚濁負荷の稀釈可能割合によって効果を表わそうとし、4)は広域化が複数水系の水源から取水可能となる場合、水源変動の分散が小さくなることで効果を定量化している。これらの例は、その効果を用いて具体的にどの水道事業者の広域化がよいかを選択する計画プロセスへの導入が容易ではないように考えられる。具体的には、個々の水道事業者及び地域全体がどの程度の水量・水質の安定度に改善されるか、そして他の評価要因と考えられる建設維持管理費用に関わる経済性や水道事業者間の公平性をどう評価するかという問題点である。すなわち、広域化の効果を定量化し、それらを評価して広域化案を作成していく方法論を確立することが重要と考えられる。

以上のことから、本論では広域化の効果を分析し、広域化案を評価するための方法論について考察する。ここでは、広域化の効果として水需給バランスの改善を特に取りあげ、その定量化法を提示する。まず、水需給バランスは需要と供給（水源）という確率的に変動する確率変数で記述されるため、水需給バランスも確率変数と見なせる。また、個々の水道事業者が協同化した場合の全体の水需給バランスは、従来行なわれ

*株式会社日水コン・システム開発室 Department of Water Resources System Analysis and Planning, Nihon Suido Consultants, Co., Ltd.

ているような個々の水道事業体の一日最大不足水量の総和とはならない（最大不足量が生ずる時期が異なるため）。これらのことより、水需給バランスを地域全体の需給の関係として表わし、確率変数として評価する指標の提示を行なう。

次に、広域化案を評価し最適案を選定する方法として実験計画法を用いた手順を示す。これは、広域化案が多数考えられる場合に、上記の指標を算定していくことの煩雑さを避け、効率的に各案の比較を可能とするために用いられる。実験計画法によって、どの水道事業体を協同化するとその効果が大きいかを考察していくつかの代替案を抽出し、これを総合的に評価して最適案を選定していくのである。

そのため、本論の構成は以下となる。まず 2. で広域化の効果を表わす指標とその算定方法を示す。次に、3. で広域化の代替案を抽出する手順を示す。そして、4. で実際にある地域に適用した結果を示す。

2. 広域化の効果指標

広域化の効果は、参考文献 2) に示した広域化の目的に対応して①水量の安定化②水質・水圧等の給水サービスの向上、③財政問題の改善、④地域格差の是正といったものが考えられる。このうち、現実の広域化の 80% 程度が①の水量の安定化を目指した水需給バランスの改善を目的としている。このため、本論では特に供給水量の安定化を広域化の主要な効果と認識し、その効果指標の定量化方法を考察する。

2-1 供給安定度の定量化の問題点

従来の広域化計画においては、広域化される個々の水道事業が最大需要を満たすために新たに必要となる供給量の総和を、新規水源開発分として算定してきた。この時、水供給の安定度は一般的には 1/10（10 年に 1 度生ずると考えられる渇水に対応できるが、それ以上の規模の渇水には対応できない）の確率をもった安定度と考えられる（言葉上は、1/10 に対応して非安定度と言うべきであるが、ここでは安定度としておく）。しかし、このような計画論では必ずしも 1/10 の安定度とならないのが普通である。何故ならば、地域によって異なった時期に生ずる不足水量を、同一期に生ずると仮定して加算しているためであり、供給の安定度は上がるものの水源開発を過大に計画することになりかねない。また、個々の水道事業が算定する不足分についても、既存の水源の安定度が 1/10 である保証はないので、異なった確率を持つ不足分を単純に加算することによって、安定度の定量化は一層困難となる。さらに、水源の安定度が 1/10 や 1/5 等と表わせたとして、それ以下の確率で生ずる渇水に対する評価がなされていないことに問題が残る。水道事業は水行政の中で最も需要者に近い重要な事業であり、広域化された水道で一度渇水が生じると、その被害は広大な範囲に及ぶという性格から、広域化計画においては計画超過渇水への配慮も必要である。

以上示した 3 つの問題のうち、前 2 者は安定度の算定方法の問題を、後者は安定度の指標化に関する問題を示している。前 2 者からは、安定度の算定においては広域化される地域の水源、需要変動を一括して確率的にとらえていくことが必要であり、後者からは従来の安定度指標に対して新しい指標化が必要であることを示していると考えられる。

2-2 供給安定度指標と広域化の効果指標

供給安定度の指標として、取水可能量と需要水量の差で表わすと(1)式となる。すなわち、地域全体に n 個の広域化が行なわれた場合の不足水量の総和を示している。ここで、従来の不足水量の算定法と異なるのは、(2)式が $\sum_{j \in I} (D_{jt} - S_{jt})$ となっていない点である。

$$LC = \sum_{t=1}^n (\max_i LA_{it}) \quad (1)$$

$$LA_{it} = \sum_{j \in I} D_{jt} - \sum_{j \in I} S_{jt} \quad (i=1, \dots, n) \quad (2)$$

ただし、 LC : 地域全体の不足水量

LA_{it} : いくつかの市町村がまとめられたグループ i の不足水量系列（ t は旬、月等を表す）

S_{jt} : グループ i に含まれる j 市町村のある渇水生起確率（例えば 1/10）の取水可能量系列

(t は旬、日等)

D_{jt} : グループ i に含まれる j 市町村の水需要系列 (t は旬、月等)

I : グループ i の市町村の集合 (グループすなわち広域化は n 個)

なお、(2)式中の取水可能量は、一般的には渇水発生確率を $1/10$ とした場合の値であり、それ以上の大規模な渇水についての供給安定度を表わすことはできない。

このため、渇水発生確率 $1/10$ 以下の確率で生ずる渇水を考慮して、不足水量やそのときの渇水被害を指標化すれば以下となる。

$$L = \iint \{De_t - S_t(p)\} \cdot p \cdot dt \cdot dp = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{12} (De_t - S_{it}) \cdot p_i \cdot \Delta t \cdot \Delta p \quad (3)$$

$$D_M = \iint \{De_t - S_t(p)\} \cdot U_d(p) \cdot p \cdot dt \cdot dp = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{12} (De_t - S_{it}) \cdot U_d \cdot p_i \cdot \Delta t \cdot \Delta p \quad (4)$$

ここで、(3)、(4)の中央の式は水源水量の生起を連続型として、また右側の式は離散型として表わしたものである。ただし、それぞれの変数は以下の通りである。

L : 不足水量の期待値、

D_M : 渇水被害額の期待値

$S_t(p)$: 広域化地域全体の水源水量 ($= \sum_{j=1}^M S_{jt}$; S_{jt} は広域化対象市町村の月別水源水量)

トーマスプロット等で生起確率別に算定された水源水量系列 ($t = 1 \cdots 12$ で月を示す)

De_t : 広域化地域全体の需要水量 ($= \sum_{j=1}^M De_{jt}$; De_{jt} は広域化対象市町村の需要水量)

p : 水源水量の生起確率 (連続変数)

t : 時間、 i : 離散型で分割された添字

S_{it} : 離散型で表わした水源水量系列、 t は 12 ヶ月の月を示す。単位は m^3 /日であるため Δt は月間の日数を示す。

p_i : 離散単位 i の水源水量生起確率 ($1/5$ 、 $1/10$ 、 $1/20$ 等)

Δp : 離散単位 i と $i-1$ の生起確率の増分

$U_d(p)$: 生起確率 p の渇水の被害原単位 (不足水量 $1 m^3$ 当りの被害額)

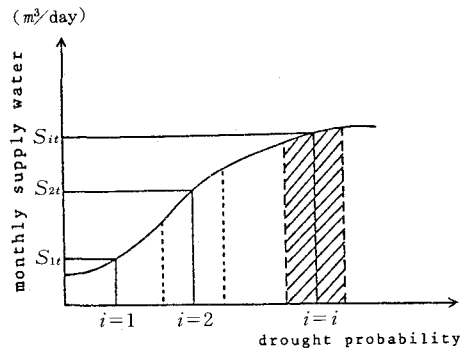


Fig.1 probability distribution of amount of water supply

式は、水源水量が確率変数であるとの認識より、図-1

の曲線を考え、年間不足水量の期待値を算定するものである。また、(4)式は(3)式と同様に水不足が生じた時の被害額の期待値を算定するものである。

ここでは広域化された各水道事業が水源の相互融通が可能であることを前提として、指標が作成されている (全水源水量と全需要水量の差を全不足水量としているため)。このような前提条件は、水源と需要の変動パターンが異なる水道事業が広域化を行なって、最もうまく広域化の効果を達成できる場合を想定してい

る。すなわち、季節的に水需給ギャップが異なる2水道が、互いの不足水量を補うように水の相互融通を行なう場合である。この例を図-2に示している。今2つの水道(A町、B市)が季節的な水不足を生じている。A町は地下水を水源としているため水源水量の季節変動は小さいが、需要の季節変動は大きくそのため夏期に水量不足を生じている。一方、B市は表流水を水源とし、冬期の降雨が少ないため冬期に水量不足を

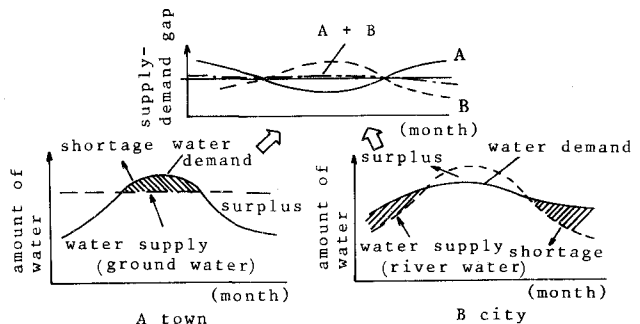


Fig.2 effect of water accommodation between municipalities

生じている。このような場合、A町、B市が水量不足時に相互に水融通を行なうことによって水不足の解消を行なうことができる。このような水源の相互融通は2-1で示した計画超過渇水時の有効な対応策の1つであり、広域化による重要な効果と言えるものであろう。本論では、その効果を広域化を行なう場合と行わない場合の安定度指標の相異として表わす。すなわち(5)式となる。

$$I = L_1 - L_2 \quad (5)$$

I : 水供給の安定度に基づく広域化の効果指標

L_1 : (3)~(4)式で算定される広域化後の不足水量、または被害額

L_2 : (3)~(4)式で算定される広域化しない場合の不足水量または被害額

2-3 広域化効果指標の算定手順

2-2で提示した広域化効果指標を算定するための手順を図-3に示している。

まず、不足水量の算定には再現年別(渇水生起確率別)の取水可能量系列が必要となるが、この算定プロセスを左側に示している。これは降雨実績よりトーマスプロットを用いて計画降雨系列を作成し、流出モデル等による計画流況を算定することによって得られる。一方、右側に渇水被害額を算定するプロセスを示している。ここでは不足水量別の渇水被害額を種々の渇水実績をもとに、世帯当り及び従業者当りの被害額原単位として算定した値を用いている。

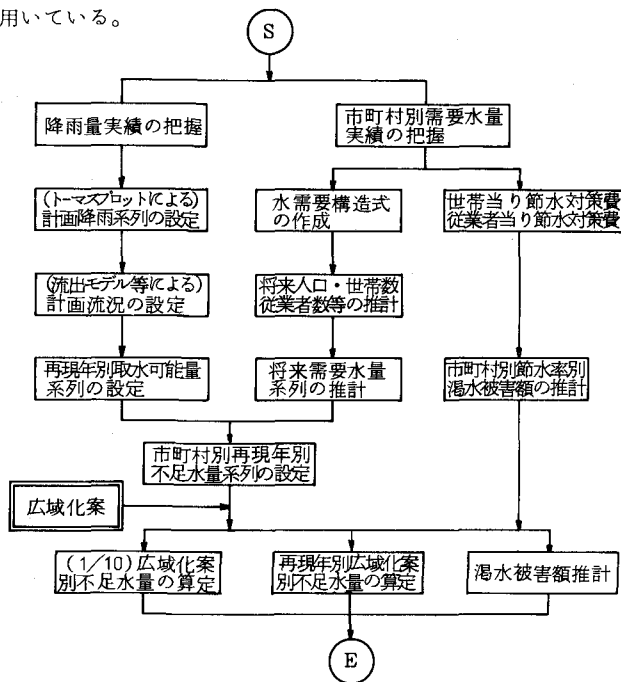


Fig. 3 measurement process of stability indices

3. 広域化案の抽出と評価

水道事業体の組合せとして広域化案を考える場合、広域化を望む水道の数が増えればその組合せは指数関数的に増加する。その組合せは地形条件を考慮することによって少なくなるものの、全ての代替案(組合せ)を2で示した方法によって効果指標を算定するのは効率的ではない。そのため、本論では実験計画法を用いて効率的に代替案を抽出していく方法を提案する。

広域化代替案の抽出と評価の過程を図に示せば図-4となる。まず、広域化代替案を抽出し(第1段階)、抽出された代替案について評価を加え、最適案を選定する(第2段階)。この時、それぞれについて広域化の効果を表わす要因の定量化を行なうが、その内容は第1段階は広域化の効果を直接的に表わし、第2段階

ではより幅の広い要因で間接的な要因をもとりあげることが必要であろう。このことから、第1段階においては、2.に示した水源の生起確率1/10における不足水量（通常の水量の安定度）を評価要因とし、第2段階では計画超過渇水をも考慮した渇水被害額、及びその経済性（費用便益）、広域化される水道事業間の公平性等を加えることを考える。

まず、第1段階の代替案の抽出は、不足水量を指標として実験計画法を用いて以下に行なう。広域化の効果は、水道事業（市町村に対応するので以下市町村と称す）間の相互連絡管と新規の水源開発によってもたらされると考え、相互連絡管並びに水源開発の有無による効果の差異を実験計画法によって考察する。実験計画法

とはその名の通り実験を計画的に構成するための方法論であり、実験条件の設定によって実験回数を減らし、有効な結果を得ようとするものである⁶⁾。この実験条件を因子（factor）、条件の具体的ケースすなわち因子の値を水準（level）という。本論の場合、相互連絡管の布設や水源開発が因子であり、その有無が水準（この場合、水準の数は常に2である）となる。このような2水準の実験には、直交表とよばれる表を使う方法が有用である。直交表は、表-1に示すように（1，2）の2水準を表わした行列であり、実験番号を行に、因子を列に対応させることができる。この場合、因子がA、B、C、Dと4つあるため、実験条件の考えられる組合せは $2^4=16$ 通りである。因子の効果

を見るため、1列にA、2列にB、順にA×B、C、A×C、B×C、Dと割りつける。どの任意の2列をとっても、同じ行の要素の積の和が0になる（ブル演算による2進法でのあまりが0＝直交性）ことがわかる。このため、Aのみの2水準間の効果（主効果）を見るためには、実験番号1、2、3、4と5、6、7、8のデータの比較をすればよい（1列目の1と2の実験の相違）。また、A×Bで表わされる第3列は、A、Bが互いに作用し合う効果（交互作用）を示すもので、

これは実験番号1、2、7、8と3、4、5、6のデータを比較すればよい（3列目の1と2の実測値の相違）。なぜならば、交互作用はBが1のもとでのAの効果（1，2列目に注目して実験番号1，2と5，6のデータの比較）とBが2のもとでのAの効果（同じように1，2列目に注目して実験番号3，4と7，8のデータの比較）の差異を比較すればよいためである。すなわち、 $\frac{1}{2}\{[\frac{1}{2}(x_7+x_8)-\frac{1}{2}(x_3+x_4)]-\frac{1}{2}(x_5+x_6)-\frac{1}{2}(x_1+x_2)\}=\frac{1}{4}\{(x_7+x_8+x_1+x_2)-(x_3+x_4+x_5+x_6)\}$ となり、3列目の1，2と一致していることがわかる。以上のように、4因子の主効果と2種類の交互作用を知るために8回の実験でよく（全組合せの半分）、因子数が増加するほどその効率性は上がる。このような直交表を用いて、相互連絡管と水源開発の主効果、交互作用を調べ、安定度の効果の大きいものを抽出し、これらの組合せより広域化代替案を抽出する。

代替案が抽出されると、他の評価要因を用いて最適案を選定する。この段階での評価は多面的な評価が要求されるため、総合的評価法の適用が考えられる。種々の評価法が考えられるが、本論においてはファクタープロファイル法が簡明でわかりやすいことから、これを用いることとする。また多面的な評価要因については、①計画超過渇水時の安定性、②経済性、③公平性を考えることができる。①については、2.で示している、ここでは②、③について示す。広域化の経済性の評価は、代替案の実行可能性の検討を行なう上で有効である。一般的には広域化によって規模の経済性（スケールメリット）が期待されるが、浄水場は別として管路については市町村を結ぶ距離によって経済性は著しく変化する。従って、これらの要因を考慮できる費用関数を作成し、費用便益比を算定する。これらを示せば以下となる。

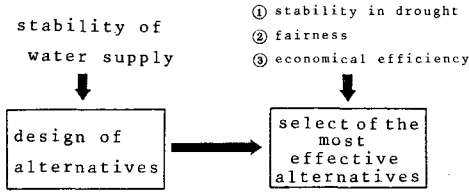


Fig.4 evaluation process of area-wide waterworks effect

Table 1 table of orthogonal arrays (L8)

factor	A	B	A×B	C	A×C	B×C	D	result experiment
number of experiment								
1	1	1	1	1	1	1	1	X ₁
2	1	1	1	2	2	2	2	X ₂
3	1	2	2	1	1	2	2	X ₃
4	1	2	2	2	2	1	1	X ₄
5	2	1	2	1	2	1	2	X ₅
6	2	1	2	2	1	2	1	X ₆
7	2	2	1	1	2	2	1	X ₇
8	2	2	1	2	1	1	2	X ₈

$$C = C_1 + C_2 \quad (6)$$

$$C_1 = a_1 + b_1 x_1$$

$$C_2 = (a_2 + b_2 x) \cdot l$$

$$E = I/C$$

$$(7) \quad E : \text{費用便益比}, \quad I : \text{便益} \quad (5) \text{式参照}$$

(7) 式の特長より、費用便益比 (E) が 1 より大なる時は、実行可能な代替案と言える。

一方、公平性の評価は広域化の効果の地域的バランスを示すものである。広域化される市町村の安定性の達成度の偏差の大きさが評価の対象となり、以下の式で表わすことが可能である。

$$T_1 = \max [e_{1j} - \bar{e}_1] \quad (j = 1 \cdots M) \quad (8)$$

または

$$T_2 = \max [e_{2j} - \bar{e}_2] \quad (j = 1 \cdots M) \quad (9)$$

T_1 : 融通する量の公平性指標 (各市町村の他市町への融通量とその平均との差の最大値)

T_2 : 融通される量の公平性指標 (各市町村の他市町からの融通量とその平均との差の最大値)

e_{1i} : 各市町村の融通量

e_{2i} : 他市町村からの融通される量 (被融通量と称する)

$\bar{e}_1$: 各市町村の融通量の平均

$\bar{e}_2$: 他市町村からの融通される量の平均

4. 事例分析

4-1 対象地域の水源・需要特性

ここで対象とした地域は 6 市町であり、その位置関係を図-5 に示す。各市町の水源地は、表-2 に示すよ

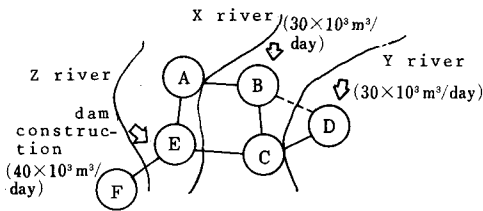


Fig. 5 location of municipalities

Table 2 water sources of municipalities

	kind of source	water source
A	river water	X river
B	ground water	30×10 ³ m ³ /day (dam construction)
C	river water	Y river
D	ground water	30×10 ³ m ³ /day (dam construction)
E	ground water	30×10 ³ m ³ /day (dam construction)
F	ground water	

うに、A、C 市は表流水、他は地下水である。図-3 の手順により、実績降雨量系列から再現年 (生起確率) 別取水可能量系列を算定した結果が表-3 である。

次に各市町村別の将来水需要系列を表-4 に示している。A、C 市は都市の規模が大きいため、年間の季節変動は小さいが、B、D、E、F 町は季節変動が大きい。水需給バランスを表-3、表-4 で見ると、A、C 市では冬期に B、E 市では夏期に、D、F 町では年間を通して水不足が生じている。これを C 市について例示したのが図-6 で

Table 3 monthly water supply according to probability of exceedance

city	probability	month											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	1/5	113	114	118	124	124	128	126	128	128	121	123	101
	1/10	100	80	108	121	112	126	114	122	121	100	90	78
	1/20	88	48	101	95	95	122	95	114	109	74	61	52
	1/30	76	40	80	75	70	118	70	101	92	46	54	39
B	1/5	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
	1/10	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
	1/20	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
	1/30	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
C	1/5	195	197	202	208	220	228	229	228	232	224	196	174
	1/10	183	179	187	192	208	221	216	213	218	211	174	161
	1/20	174	169	178	180	198	215	205	199	206	199	164	155
	1/30	167	161	170	171	187	209	195	187	193	187	157	150
D	1/5	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
	1/10	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
	1/20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
	1/30	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
E	1/5	119	119	120	120	120	120	120	120	120	119	119	119
	1/10	119	119	119	119	119	120	120	120	119	119	119	119
	1/20	119	119	119	119	119	119	119	119	119	119	119	119
	1/30	119	119	119	119	119	119	119	119	119	119	119	119
F	1/5	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
	1/10	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
	1/20	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
	1/30	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8

ある。

4-2 広域化代替案の抽出

代替案の抽出に当たり、まず実験計画法により市町間の相互連絡と水源開発の効果について分析する。因子数は相互連絡箇所6、水源開発箇所3の合計9であり、すべて2水準である。各要因の効果を検討するためには、2⁹(=512)通りのケースについて計算を行なう必要があるが、直交表の活用によって表-5の32ケースの水不足量を算定すればよい。表-5の行は計算されるケースを示し、また各列に因子の割付けを行なっている。表中の「1」は建設(連絡管の布設または水源開発施設の建設)を、「2」は建設しないことを表わしており、右欄には広域化後の全市町の不足水量・効果と水源開発量を示している。表-5の直交表と効果指標をもとに、各因子の主効果並びに交互作用を分散分析によって有意性の検定を行なった結果が表-6に示されている。また各水準別の効果(不足水量)の相違を市町の隣接図上に表わしたものを図-7に示す。以上の計算結果をまとめると以下となる。

① 相互連絡管の主効果は、(A~B)、(B~C)、(A~E)、(E~C)の市町を結ぶ連絡管が1%の危険率で有意である(表-6)。水準別の大きさでみると、(E~C)が約22(千m³/日)、(B~C)

Table 4 monthly water demand of municipalities

	month											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	98	92	97	92	99	100	107	104	98	99	93	97
B	37	35	41	39	45	46	54	52	45	41	35	37
C	184	178	191	185	196	195	213	210	193	192	181	188
D	30	29	31	29	31	32	34	33	31	31	29	30
E	91	88	102	97	113	114	133	130	112	102	88	92
F	10	9	10	9	10	10	11	11	10	10	9	10

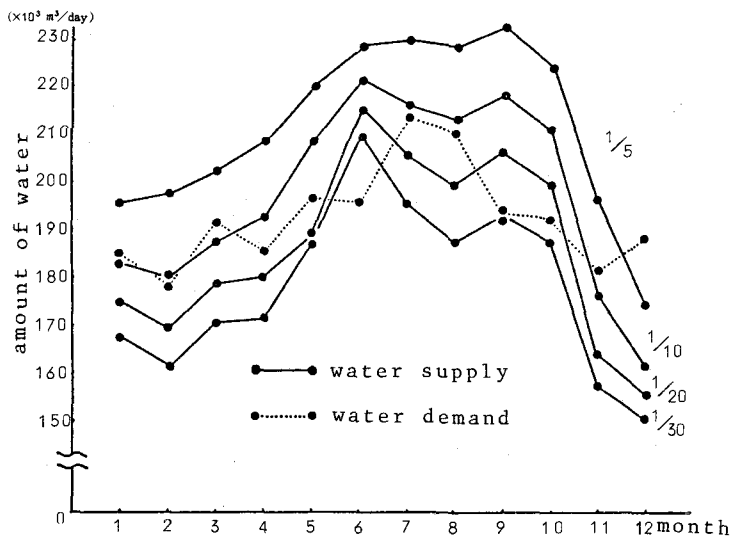


Fig. 6 monthly water demand and water supply according to probability of exceedance

Table 5 result of factorial design and experimental value

No.	factor												(x10 ³ m ³ /day)		
	① C D	② B A	③ A E	④ E C	⑤ E C	⑥ C D	⑦ D B	⑧ B A	⑨ A E	⑩ E C	⑪ E C	⑫ C D	shortage	water develop- ment cost	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	91	35
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-35	56	0
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-15	76	20
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-27	64	44
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-3	88	32
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-10	81	34
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-5	86	30
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-34	57	37
9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-35	56	0
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-20	71	41
11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	91	45
12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-51	40	20
13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-11	80	34
14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-51	40	10
15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-56	55	25
16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-73	18	14
17	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-17	74	18
18	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-5	88	32
19	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-14	77	21
20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-50	61	44
21	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-21	70	14
22	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-14	77	34
23	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-22	69	39
24	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-74	17	0
25	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	91	35
26	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-41	50	24
27	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-14	77	31
28	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-60	31	14
29	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-17	74	35
30	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-51	40	14
31	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-61	30	0
32	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-46	45	45

注) ①×②は連絡管C~D、B~Cの交互作用を示す。
eは割り付けていない列を示す。

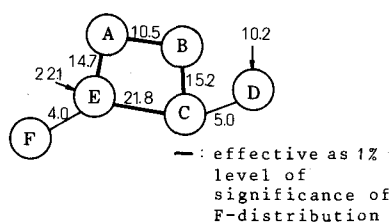


Fig. 7 effects of each factor

並びに (A~E) が約 1.5、(A~B) が約 1.1 という結果である (図-7)。

② 水源開発の主効果については、いずれも 1% の危険率で有意 (表-6)、その効果の大きさは 1.0~1.2 千 m^3 /日 の範囲に入っている。

③ 相互連絡管の交互作用については、(A~B) と (A~E) の連絡管の間で 5% の危険率で有意、さらに (A~E) と (E~C) の連絡管の間で 10% の危険率で有意である (表-6)。その内容は、表-5 の 1 と 2 の比較より、隣接する連絡管が無いほうがその効果の差異が著しい。これは、例えば水源開発が行なえない A 市より見ると、A~B の連絡管が無いほうが A~E の連絡管の効果が大きくなることから理解できる。

以上の分散分析結果を、より具体的に見るため、表-5 の各ケースから図-8 に示した 4 つのケースを抽出して、効果の比較を行なう。各ケースとも E と B で水源開発を行うが、連絡管の条件により 6.4~9.1 (千 m^3 /日) までの幅がある。これより、(A~B)、(E~C) の連絡管の組み合わせ、(A~E)、(B~C) の連絡管の組み合わせは良いが、(A~B)、(B~C) の組み合わせは相対的に劣る。すなわち、表流水と地下水の地域を相互に連絡した場合の効果が大きいことがわかる。

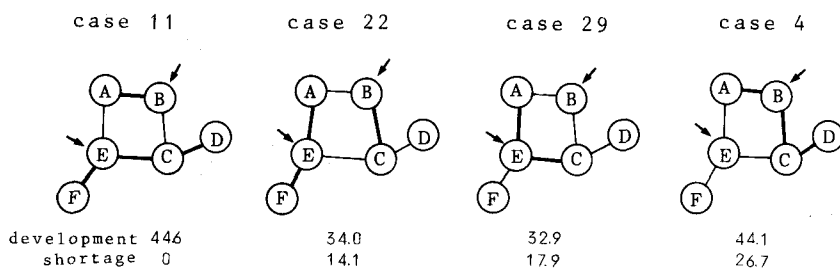


Fig. 8 illustration of effect for each type of pipe connections

4-3 広域化代替案の抽出

以上の結果より広域化の代替案を抽出するが、これは表-5 の各ケースのうち不足水量が少なく、開発水量も少ないものの中から選定する。この抽出した代替案を図-9 に示している。抽出された代替案は、基本的なケースとして、ケース 11、ケース 25 (いずれも不足水量 0) を修正させたものである。まず、ケース 6 はケース 11 を参考にして効果の大きい (A~E)、(B~C) の連絡管に変更したもの、ケース 27、ケース 6 はそれぞれケース 11、ケース 6 の (C~D) の連絡管を除いて (C~D) の効果が小さい)、D の水源開発としたもの等である。なお、F 村は水源開発不可能であるため、(E~F) の連絡管布設を前提とした。

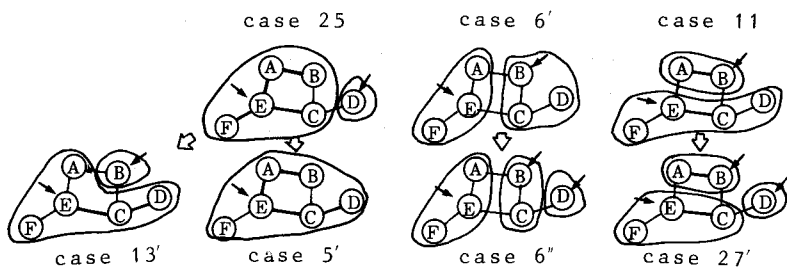


Fig. 9 alternatives of area-wide waterworks

4-4 広域化代替案の評価

ここでは、先に示した評価指標に基づいて、作成された代替案の評価を行なう。評価指標は、渇水時安定性、経済性、公平性である。渇水時の安定性は、その生起確率が1/20、1/30等についての渇水が生じた場合の不足水量及び被害額の期待値で表わす。一方、経済性は水源開発、連絡管に要する費用そのものと、渇水時の安定性を便益（渇水被害軽減額）とした費用便益比で表わす。さらに、公平性については、個々の市町の融通可能量の偏りを評価したもので、(8)、(9)式で表わされる。

Table 7 measurement result of evaluation indices

	alternatives No	drought damage ($\times 10^8$ yen)	economical efficiency		fairness	
			cost	cost benefit ratio	equation (8)	equation (9)
case 25	①	23.7	48.7	0.64	20.3	7.0
case 5'	②	51.2	6.3	0.60	19.0	7.8
case 13'	③	4.5	42.2	1.19	19.5	6.6
case 6'	④	4.6	40.2	1.24	20.3	7.9
case 6''	⑤	4.6	47.1	1.07	17.0	6.3
case 11	⑥	31.1	46.9	0.51	20.3	6.0
case 27'	⑦	6.2	50.8	0.96	19.0	8.9

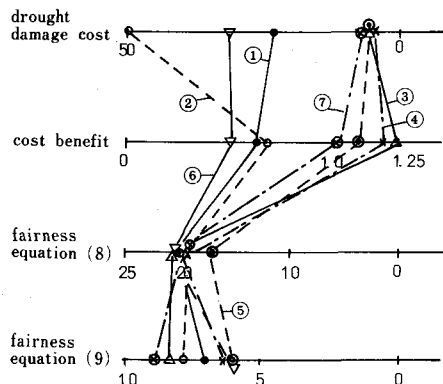


Fig. 10 factor profiles of alternatives

以上の各指標を代替案別にまとめたものが表-7であり、これらの指標値の差をファクタープロフィールとして表わしたものが図-10である（同図では、右側ほど望ましく目盛をとっている）。この結果より費用便益比が1.0以下のものは、代替案①、②、⑥、⑦となり、その実行可能性は低いと考えられる。残る③、④、⑤のうち渇水被害額はどちらも同じであるため公平性に着目すれば、⑤が③④よりも優れていると言える。以上より広域化の代替案のうちで最も望ましい案は⑤（ケース6の修正案）であると考えられる。

5. おわりに

本論では、水道広域化の効果のうち、水需給バランスの解消という点に着目し、その効果を評価することによって広域化の最適案を抽出する方法論を示した。水道の広域化の成立因子は、広域化によってそれぞれの水道事業が相互に利益を有することが基本である。その意味で共同に水源開発をすることによる規模の経済性と、水源間の相互融通の効果が共同化を行なうことの主要なメリットとなると考えられる。このため、このような広域化の効果を定量化し、広域化案を評価する方法論を提示し、事例分析を通してその有用性を示した。本論の今後の課題は、広域化の特性に応じた評価指標を整理することと、複数の評価指標を総合化して最適案を選択する評価方法について、種々の事例を通して整理することである。具体的には、水源の水質に著しく差異がある場合に、水の相互融通による水質の低下、また水処理プロセスの付加・運転による費

用増加といった評価指標を加える必要がある。本事例においては、表流水の水質が比較的良好であるため、このような評価指標をとりあげていないが、表流水の水質が今後悪化していくことを考えれば、この種の評価は重要となってくると考えられる。

本論の作成にあたり、東京都立大学助教授 小泉 明氏並びに厚生省の坂本弘道氏より有益な助言をいただいた。また、日水コン・システム開発室の蔵重俊夫氏から計算等に多くの協力を得た。改めて謝意を表す。

参考文献

- 1) 坂本弘道・今田俊彦；広域水道圏域の規模設定に関する一考察，衛生工学研究討論会論文集，Vol.19，pp35～42，1983.
- 2) 坂本弘道・今田俊彦；広域的水道の圏域設定の方法論に関する一考察，衛生工学研究討論会論文集，Vol.20，pp1～7，1984.
- 3) 丹保憲仁；都市・地域水代謝システムの構造と容量，水道協会雑誌，№497，pp16～34，1976.
- 4) 住友恒；安全性からみた広域水道の適正規模，水道協会雑誌，№565，pp2～7，1981.
- 5) 坂本弘道・山村尊房・今田俊彦；実態調査データによる広域水道計画要因の分析，水道協会雑誌，№590，pp2～17，1983.
- 6) 三上操；統計的推測，数学講座6，筑摩書房，1969.
- 7) 土木学会関西支部；都市施設計画の総合評価と住民参加，昭和54年度講習会テキスト