

下水道整備計画に関するシステム論的研究 II

—とくに線整備について—

(株) 日本水道コンサルタント 正員 堤 武

〃 平野栄一
〃 中村正久
〃 大門良巳

1. はじめに

下水道（特に流域下水道）計画における線（幹線）整備は独立したシステムとして存在するのではなく、時空間をまたぐトータルシステムの一部として扱われるべきである。¹⁾ 線整備計画は地域負荷配分サブシステムの各時間断面に対する負荷セクト量の空間的記述（面整備計画）に基き負荷収集ハロツク（処理場をもつ、処理区）ごとにその整備レベルと整備年次を与えることにより始まる。²⁾ 一方幹線の空間的配置とその建設費用は施設規模配置サブシステムより与えられるから、ある処理区に対しては時間断面ごとに整備空間、整備レベルおよび総投資額のいずれをも与件とすることに等しい。^{注1)} したがって線整備計画は地域負荷配分サブシステムで与えられる各時間断面の面整備レベルに対応するように投資パターンを定めることに相当する。これに対応する枝線整備と処理場整備が河海汚濁解析の基礎入力となり、与えられた水質基準が満足されるかどうか解析される。この基準が満足されない場合は負荷発生予測、施設規模配置、地域負荷配分のいずれかのサブシステムにフィードバックされることになる。

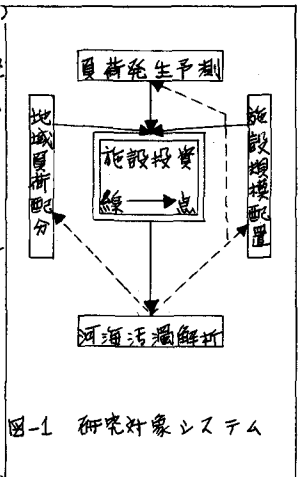


図-1 研究対象システム

2. 線整備の基本概念

汚濁負荷は対象とする空間の任意の点において時間の関数として発生し、所定の投資額によって整備する負荷の集収域も種々の条件下で同じく時間の関数として空間的に拡大される。ここに制約条件とは次のようなものである。すなわち、1) 投資は財政的見地から継年制的に行われ、2) 枝線整備は線整備に順いて行われる、3) 処理場整備は枝線整備に順いて行われる、等である。従って線整備はこれらの制約条件を満たす所定の面整備レベルに到達するように決定されなくてはならない。又上記の目的を達するため「与えられた投資額を現在および現在から計画最終年に到るまでの発生活汚濁負荷を最も合理的に集収しうような線整備を行う。」という原則に基いた投資をすることが適切である。このためには管渠は下流側から施工しなければ効果を発揮できない、い

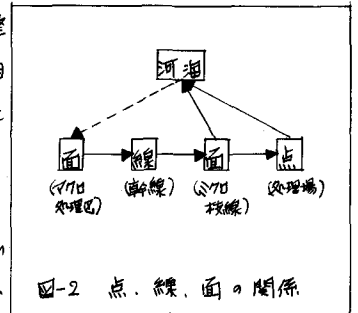


図-2 点、線、面の関係

注1) 実際には投資額は時間要素（利率化）を含むためその性格は施設規模配置計画における建設費用とは幾分異なる。

るという事情も含めて考慮することが必要である。このためには下流側より上流側への管渠建設の時間的、場所的おくれ、および計画負荷の経時的变化についてその評価に時間遅延割引きの概念を導入することが考えられる。⁴⁾

すなわち発生活汚濁負荷を例え処理人口に代表させ、その時間的経過を反映する投資配分のための指標を次のように定めることができる。

$$\Delta P_t = \Delta P_0 / (1+\alpha)^t \quad (2.1)$$

ここで ΔP_0 、 ΔP_t 、 α はそれぞれ、 t = 大年目に幹線にヒリ入れる人口数、 ΔP_0 を基準年次で考えるために $t=0$ 年目の値に換算した換算人口、時間的投資効果率とよばれる評価パラメーターである。 α は計画対象全域について一定と考えることができるが、その場合の α の意味は「この計画対象地域においても今日下水道がひくことの方が、同じ規模の下水道が同じ地域に明日ひくことより意義がある。」という望ましさを程度を表現するパラメーターであり、その値は下水道整備、水質汚濁防止による経済的、社会的さらに地域住民の心理的效果をも含めて時間的おくれに関連づけて定められるべきものである。概念的には α は経済学における利子率に、 $(1+\alpha)^{-t}$ は現価係数に通じる。この定義のもとでの α の定量化は困難であり、その性質も不明確に過ぎるということが考えられるため、河海を評価システムにもつ下水道計画においては α をより積極的に解釈し、地域負荷配分、施設規模配置および河海汚濁解析サハシステムと密接な関係を満たすことによりつみ総括的システムを構成する時間要素と定義することができよう。その場合 α は「ある地域において負荷発生が時間的変化の状況を投資計画に反映させる政策パラメーター」と解釈され、同じ計画対象地域内においても場所的、時間的に変化させることになる。

3. 投資効果指数⁴⁾

上述の時間的投資効果率、 α を導入して線整備のための投資配分の方策を検討する。ある処理対象地域の複数個の点に投資を行う場合、前述の如く投資配分の方法は次の二つの要素を含む必要がある。すなわち配分を行なおうとする投資可能地点からそれぞれ上流側の区域において下水管にヒリ入れようとする計画人口数も最終的に同じであり、かつそのための必要投資額その他の物理条件が同じであつても、1) 人口増加が早期において大きい方が投資効果が大きい、2) 上流側であつても考えている投資可能地点に近く早期に投資する地点で大きな処理人口の期待できる方ほど投資効果は大きい、とする。そこで α をとりあえず定数と考へ投資開始時期を $t=0$ 、 $t=t_0$ における i 処理点 X 地点での投資効果指数を $r(i, X)$ 、 j 処理点 Y の時間 t における人口密度を $\gamma(j, t)$ 、 j 分岐において $t=t_0, t_0+1, \dots, t_0+\eta, \dots$ での投資によって整備される幹線延長に対応する処理面積を $a_0(j), a_1(j), \dots, a_\eta(j), \dots$ 、線整備と面整備の時間的おくれを θ 年とすれば次のように表すことができる。

$$r(i, X) = \sum a_0(j) \cdot K(j, t_0+\theta) + \sum a_1(j) \cdot K(j, t_0+\theta+1) + \dots + \sum a_\eta(j) \cdot K(j, t_0+\theta+\eta) + \dots \quad (3.1)$$

ただし j 分岐は X 地点より上流部であるとし、

$$K(j, t) = \gamma(j, t) / (1+\alpha)^t + \sum_{\xi=t-1}^t \Delta \gamma(j, \xi) / (1+\alpha)^\xi, \quad \Delta \gamma(j, \xi) = \gamma(j, \xi) - \gamma(j, \xi-1) \quad (3.2)$$

である。

式(3.2)中オ1項は計画対象時間断面 $t=t_0$ における負荷の総電力量に対する時間選考割引き概念であり、オ2項は $t=t_0+1 \sim U$ の負荷の増加に関する部分である。注1) これを模式的に示せば図-2のようになる。 α は定数と考えているから $K(j, t)$ はあらかじめ各年ごとに計算しておくことができる分電固有の関数でありこれを投資効果係数と称する。地点 (i, X) より上流において、 $t=t_0$ 年以降計画最終年、 $t=U$ 年に到るまでの投資状況がわかれば $r(i, X)$ が定まることになる。すなわち(3.1), (3.2)式は投資配分(投資年次)を i 処理電全域について既知として定まる値であり、解を求めるためには逐次近次法を採用しておくはならない。

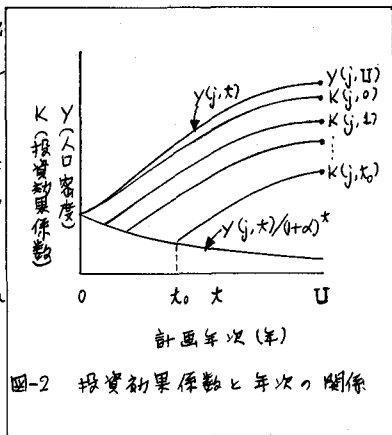


図-2 投資効果係数と年次の関係

ある処理電においてオ t_0 年次での投資総額、 $W(t_0)$ が与えられれば投資配分は例えば次 α ごとく定めることができる。

$$W(t_0, \rho) = (r_p / \sum_{j=1}^m r_p) \cdot W(t_0) \quad (3.3)$$

ここで $m, r_p, W(t_0, \rho)$ はそれぞれ $t=t_0$ における投資可能地点総数、 i 投資可能地点の投資効果指数、および $t=t_0$ における i 地点への投資額である。(3.3)式に従って投資配分を行うとすれば面整備状況は α によって変化する。 $K(j, t)$ の α に対する変化率は、

$$\frac{\partial K(j, t)}{\partial \alpha} = -\frac{t \cdot Y(j, t)}{(1+\alpha)^{t+1}} + \sum_{s=t+1}^U -\frac{s \cdot \Delta Y(j, s)}{(1+\alpha)^{s+1}} \quad (3.4)$$

で表すことができる。すなわち同じ t に対して K も K の α に対する変化率も α が増加すると単調減少する。更に(3.3)式によれば投資配分は原則的に投資効果指数の比によって定まることから例えば線形変化である二つの異なる Y の比(Y_r)および K の比(K_r)に対する性質を考えれば次 α とわかる。1) $\alpha=0$ のときは $K_r = K_1/K_2$ は $\bar{Y}_r = Y_1(U)/Y_2(U)$ に等しい、すなわち計画最終年次の人口密度比を考えていることになる。2) Y_r, K_r とも α の大小にかかわらず $t=U$ で $\bar{Y}_r$ に漸近する。

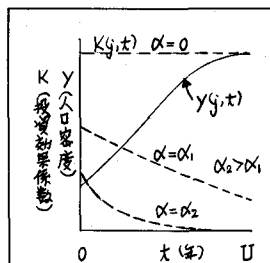


図-3 Kと α の関係

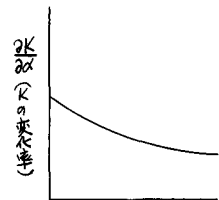


図-4 Kの変化率と α の関係

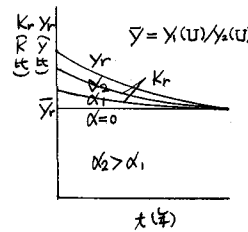


図-5(a) K_r と t の関係

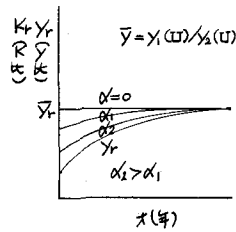


図-5(b) K_r と t の関係

注1) この式によれば基準年次は一樣にオ0年目(計画開始年)であるが汚濁負荷量の時間的割引きを夫々の計画時点から考えて $t=t_0$ を基準年とする方が $t=t_0$ 年以後の負荷量の時間的性格をより明確に表現することになる。しかしながら各計画時点ごとに $K(j, t-t_0)$ を求め、 $r(i, X)$ も定めることが複雑となり収束に到る反復計算回数も増えたため、本研究においては基準年次を $t=0$ として近似することにした。

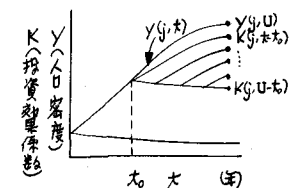


図-6 t_0 を基準年とする場合

3) Y_r が単調減少(増加)であれば K_r も単調減少(増加)し、 α が増加と K_r は Y_r に近づく(図-5(a), (b))。あるいは α が大きいほど K_r はまたの計画時点の人口密度比を代表する傾向を示す。従って投資効果指数、 r もこの傾向をもつと考えられるが、 r は愛荷の総流量に關与するものであり、しかも計画年次の異なる各分區ごとの投資効果指数、 r_j を累加したものであるからその特性は計画対象により複雑に変化するであろうと考えられる。

4. 投資配分アルゴリズム

前節の投資効果指数の定義に基き投資配分プロセスを次のように定める。いま $k, j, t, A(k, j)$, および $K(k, j, t)$ をそれぞれ、処理區番号、処理分區番号、投資年次、処理分區面積および投資効果指数とすれば、 (k, j) における投資効果係数、 $r_j(k, j)$ は、

$$r_j(k, j) = A_j(k, j) \cdot K(k, j, t_m(k, j)) \quad (4.1)$$

とあらわすことができる。ここで $t_m(k, j)$ は (k, j) における $\sigma-1$ 次近似平均投資年次である。各分區の上流側に連結する全 σ の分區の投資効果指数を累加したものを固有値でありこれを $r(k, j)$ とし (3.1) 式に代入するものとし、 $r_j(k, j) \cdot N(k, j)$ をそれぞれ (k, j) より上流の j_0 分區の投資効果係数、 (k, j) より上流の分區総数であるとするれば、

$$r(k, j) = \sum_{j_0=1}^{N(k, j)} r_{j_0}(k, j_0) \quad (4.2)$$

となる。また処理區における σ 年投資年に投資額、 $Z(n, k)$ が与えられたものとすれば、 (k, j) に投資されるべき投資額、 $Z_j(n, k, j)$ は

$$Z_j(n, k, j) = Z(n, k) \cdot \{r(k, j) / R(n, k)\} \quad (4.3)$$

ただし

$$R(n, k) = \sum_{j_0=1}^{M(n, k)} r(k, j_{j_0}) \quad (4.4)$$

ここで $r(k, j_{j_0})$, $M(n, k)$ はそれぞれ、 j_{j_0} 投資地点における投資効果指数、 σ 年投資年次における投資可能地点総数である。各分區 σ の幹線管渠建設費、 $C_j(k, j)$ および (k, j) を含むその上流側の分區の管渠建設費の総和、 $C(k, j)$ はあらかじめ施設規模配置サハシステムによって与えられているから、分區 (k, j) に投資される投資額と $C_j(k, j)$ との関係は、

$$S_n(n, k, j) = C_j(k, j) - C_s(n-1, k, j), \quad C_s(0, k, j) = 0 \quad (4.5)$$

とあらわすことができる。ここで $C_s(n-1, k, j)$, $S_n(n, k, j)$ はそれぞれ (k, j) における $\sigma-1$ 年目までの投資額、 σ 年目以降 (k, j) における必要投資額である。 $Z_j(n, k, j) \geq S(n, k, j)$ ならば (k, j) での投資は σ 年目に終る、 $Z_j(n, k, j) < S(n, k, j)$ ならば σ 年目以降にも投資が必要であることになる。前者の場合は $E(n, k, j) = Z_j(n, k, j) - S(n, k, j)$ が σ 年投資年次中に (k, j) 分區の直上流側の分區に配分される。後者の場合、 $A_s(n, k, j)$ を σ 年投資年次までに (k, j) で建設された管路延長、 $L_s(n, k, j)$ に対応する処理面積、 $\bar{r}(k, j)$, $\bar{r}_j(k, j) \in r(k, j)$, $r_j(k, j)$ の修正値とすればそれらは次のように表すことができる。

$$\bar{r}(k, j) = r(k, j) - r_j(k, j) \{A_s(n, k, j) / A_j(k, j)\} \quad (4.6)$$

$$\bar{r}_j(k, j) = r_j(k, j) \cdot \{1 - A_s(n, k, j) / A_j(k, j)\} \quad (4.7)$$

従つて (k, j) 分區において投資配分は以後、 $\bar{r}(k, j)$ 、 $\bar{r}_j(k, j)$ をそれぞれ $r(k, j)$ 、 $r_j(k, j)$ と同様
にみなして (4.3) 式以降の計算をくりかえすことになる。全々の投資配分が終了した後このプロ
セスで決まる次の近似平均投資年次、 $t_m^2(k, j)$ を用いて再び (4.1) 式に戻り近似計算が収束するまで
おちまち $t_m^2(k, j) = t_m^{n+1}(k, j)$ となるまで繰り返す。

5. 事例

実際の流域を事例の対象としてその投資効果率、 α の基本的性質を知つたため前述の投資配分法にの
つとり二、三の試算を行った。

5.1 概況

本流域に含まれるのは6市町があり、既に公共下水道が設置されている区域を除いて流域下水道
が設置されることになり、二つの施設配置案が与えられた。案1案2は処理場を最下流域に1ヶ所
設け、大幹線をもって全域をカバーするものがある。幹線が分岐するごとに処理分區に分け、その
総数は20である。案2案はT1(分區数, 17), T2(3), T3(7) およびT4(9)の処理場をもつ。両案につい
て各分區ごとの幹線管渠延長と対応する追加処理面積の関係、同じく管渠延長と追加費用の関係は既
に与えられているとした。

5.2 α を全域について一定とした場合の計算結果

両案に対する投資効果係数は(3.2)式をもとに計算した。ここでTは20年、 α は0, 0.1 および0.5
の3通りとした。案1次近似平均投資年次を全々の分區について10年、幹線、枝線建設時期のずれ
を0年、全投資終了に要する期間を10年、更に各年等額投資として(4.1)~(4.7)の計算を繰り返したか
いおれもその近似をもって収束した。案1案に対するその近似の $r(k, j)$ の値を表-5.1 に示した。
ここで明らかなのは $r_{\alpha=0.0}/r_{\alpha=0.1}$ は各分區についてほぼ一定の値(2.0~3.0)をとるのと対し、 $r_{\alpha=0.0}/r_{\alpha=0.5}$
はその値が大きく変化することである。案2案についても同様の傾向がみられた。おちまち $\alpha=$
0.0~0.1 の間では計画はほぼ類似の傾向を示すであろうと期待される。以上をもとに案1案の投資
配分を行った結果を概略的に面整備は幹線長に比例して行われるとして投資開始後2, 5 および8年
目に開いて平面的に示したのが図-6(a), (b) である。 $\alpha=0.0$ の場合は図-6(a)の $\alpha=0.1$ の場合とほぼ同
様の投資パターンをみせたので省略した。図-6(b)の $\alpha=0.5$ の場合は $\alpha=0.0 \sim 0.1$ の場合に比して多少
異なる様相を見せるものの本質的な差異は見出せない。又図示しなかったが、 $\alpha=0.5$ の場合と $\alpha=$
0.0 と $\alpha=0.1$ の場合には幹線整備期間は分區によって0~3年ほどいわれることがわかつている。更
に建設に要する年数は分區によって最少1年、最多27年程度であるが同一分區では同程度の年数を
費している。案2案に関してもその結果を図-7(a), (b) に案1案と同じく $\alpha=0.1, 0.5$ の両者につい
て示した。ここでも部分的に α の影響が見られるが全体としては大きく異なる点は見出せない。
この傾向は投資年数を5年とし、投資効果係数も基準年次に近く割り出した場合においても変わらな
い。おちまちこの段階では等額投資という年次ごとの制約条件が大きくきいていっていることになる。

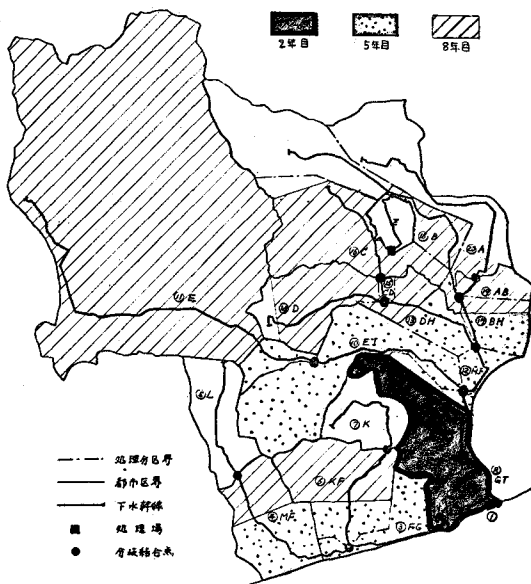


图-6(a) 处理场14所集 ($\alpha=0.1$)

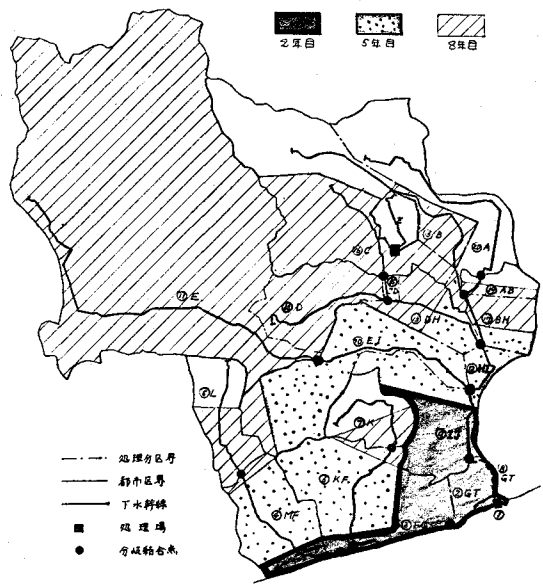


图-6(b) 处理场14所集 ($\alpha=0.5$)

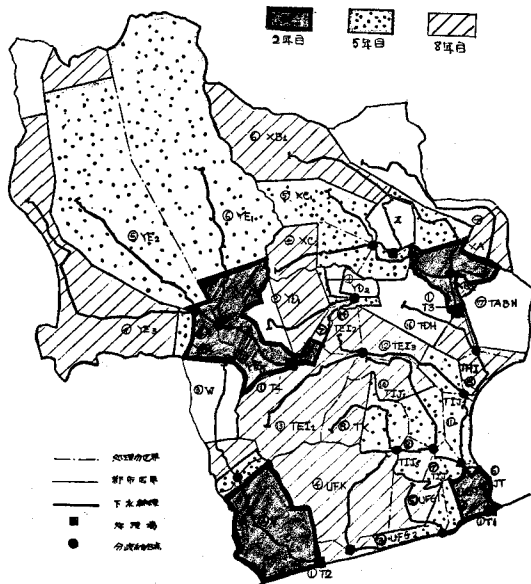


图-7(a) 处理场44所集 ($\alpha=0.1$)

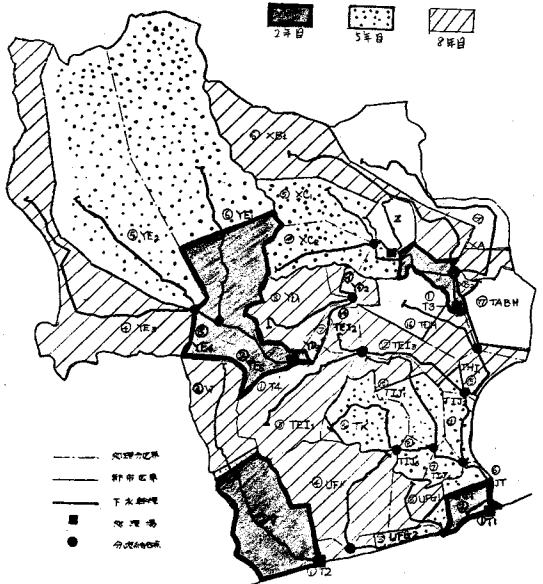


图-7(b) 处理场44所集 ($\alpha=0.5$)

表-5.1 投資效果指數(才1聖) 單位 $10^3 \text{ m}^3/\text{day}$

α	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0.0	478.4	100.6	89.8	42.1	4.6	38.3	18.6	377.8	377.8	222.9	184.7	122.7	73.0	29.0	40.8	40.4	45.2	31.1	11.6	10.1
0.1	205.8	47.4	40.0	18.1	1.5	16.5	6.0	158.4	158.4	92.5	75.1	48.2	30.2	11.1	17.6	17.4	15.9	10.9	3.9	3.3
0.5	33.5	13.5	9.0	4.0	0.1	2.6	0.2	20.0	20.0	8.0	5.4	2.8	2.6	0.7	1.7	1.7	0.8	0.5	0.2	0.1

5.3 α に地域特性をもたせた場合の計算

オ1節で述べたように K, α を他のサハシステムとの関連の上で政策パラメータとして扱うことはできないであろう。本事例においては地域受荷面分サハシステムによる解析を省略しているため、 α の地域特性を定めることができなかった。ここではオ1案についてある時点で幹線建設の進行している分岐の地域特性(単立幹線建設費、受荷密度など)をもつて投資効果指数を補正することにより α に地域特性をもたせることにせよ、その影響を調べた。

(a) 単立建設費当りの受荷収容量による補正

これは本来各計画時点における状況により補正すべきであるが簡単なため幹線収容受荷量を計画最終年次受荷量に代表させ次のごとく投資効果指数に置きかえを行う。 $J(k)$ を k 処理の分岐終数とすれば、

$$r_2(k, j) = r(k, j) \cdot e(k, j) = r(k, j) \cdot \left\{ (Y(k, j, U) / C(k, j)) / \left[(1/J(k)) \cdot \sum_{i=1}^{J(k)} (Y(k, i, U) / C(k, i)) \right] \right\} \quad (5.1)$$

ここで

$$Y(k, j, t) = Y(k, j, t) \cdot A_j(k, j)$$

$r_2(k, j)$ は (k, j) における補正投資効果指数であり、これは最終年次における管渠建設費用に対する受荷量の大きさによる補正を意味する。表-4.2に $e(k, j)$ の値を、図-8に $\alpha = 0.1$ の場合についてその結果を示した。

(b) 平均受荷密度による補正

同様にして平均受荷密度による補正を次のごとく行う。おなわち与時間断面において投資可能な地点における計画最終年に到る経歴を示す投資効果指数に対し、夫々の計画時点ごとその投資可能地点の属する分岐の特性を平均受荷密度に代表させて補正を行うものである。 $r_d(k, j)$ を (k, j) における最終年次平均受荷密度による補正投資効果指数とすれば、

$$r_d(k, j) = r(k, j) \cdot f(k, j) = r(k, j) \cdot \left\{ (y_j(U) / (1/J(k)) \cdot \sum_{i=1}^{J(k)} y_i(U)) \right\} \quad (5.2)$$

と表される。図-9に $\alpha = 0.1$ の場合について計算結果を示す。又表-5.2に同じく $f(k, j)$ の値を示した。夫々の計画の進行中に投資効果指数にその地域の特性を強く反映させるこれらの方法によればいずれの場合にもその補正の全体的効果は顕著であり、 α 自体の影響を打消すほどである。これらの補正係数の本質的意味は別として α に場所的、時間的特性を与えることも同様に計画全体に大きく影響を与えることが期待される。その場合、これらの例の様に地域特性を何れかの代表指標を数多くの指標の中より選んで用いる他、河海汚濁制御等、他の関連サハシステムとの相互関係により α が定まると考えるならば、我々は積極的にこの α を計画に導入しようである。

表-5.2 投資効果指数の補正係数

分岐 係数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
e	1.0	0.33	0.28	2.60	1.12	1.01	0.60	1.0	0.37	0.29	0.25	0.14	0.10	3.46	0.05	4.18	1.22	2.59	0.17	0.25
f	1.0	0.61	0.32	1.66	0.38	0.70	5.58	1.0	1.55	2.02	0.55	0.92	0.21	1.13	0.11	0.91	1.11	0.89	0.11	0.22

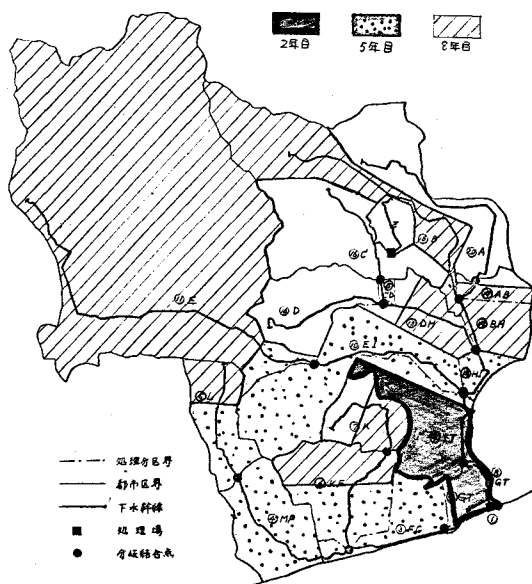


図-8 建設費による補正 ($\alpha=0.1$)

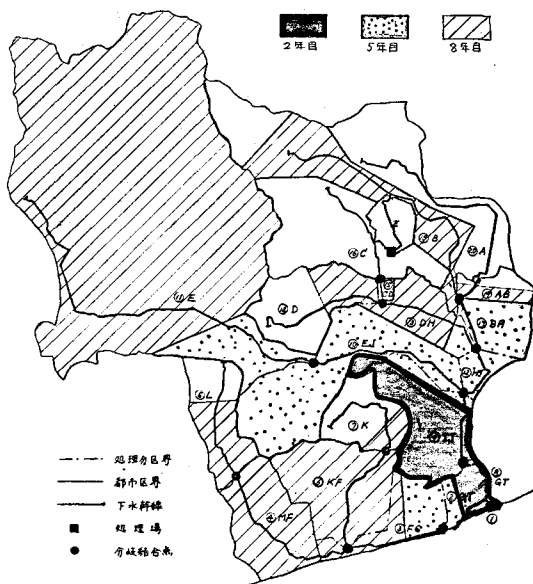


図-9 負荷密度による補正 ($\alpha=0.1$)

6. まとめ

幹線整備のための投資計画の決定はその空間的ひろがりをはかりに評価すべきかはいまだ明確にされてない。現在、一面的判断や直感的判断による不合理さに基いて行われてきた。既にこの問題を負荷の時間変化の評価に時間的投資効果率、 α の概念を導入することによって解決の糸口とすることと試みられた⁴⁾が本研究においては α をパラメトリックに扱いその面整備状況に対する影響を調べた。その結果以下のようなことがわかった。

- (1) 本事例のごときを幹線整備の典型とするならば、幹線整備のための投資パターンは定められた年次投資額による整備パターンは $\alpha=0.0\sim0.1$ のオーダーでは本質的差異を生じなかった。あるいはここでの α は経済学という利率のごとき敏感に評価パラメーターと認識するのは不適当である。
- (2) α が0.5程度で整備状況に部分的に多少の影響がみられるものの、 α が全域にわたって一定でありかつ各年投資額が制約条件である以上本質的差異は見出せない。

あるいは投資配分計画が地域の特性を増幅し、投資効果(例えば河海汚濁防止)の大小も顕著に示すためには投資配分モデルを下水道システム内の各サブシステムとの関連において考慮すること、例えば α を政策パラメーターとして河海汚濁制御との関連より定めること等が必要である。この意味で投資効果指数が地域特性をもつよう補正した場合については次のごときことがわかった。

- (3) 単位幹線建設費当りの負荷収容量による補正、平均負荷密度による補正のいおれの場合にも面整備状況は特性指標により大きく影響を受ける。

この研究の一部は建設省委託の「下水道整備計画のシステム分析的研究調査委員会」において行われた。

ブ. 参考文献

- 1) 堤、平野、中村、大隅「下水道整備計画の時間的サブシステムとその統合に関する基礎的研究」土木学会年次学術講演会 昭47.
- 2) 堤、大隅、中村「下水道整備計画に関するシステム論的研究」エーレック河川汚濁制御化面整備について」本会にて発表予定 昭47.
- 3) (株)日本水道コンサルタント「下水道設備計画の合理化に関する研究」建設省委託研究報告書 昭46.
- 4) (株)日本水道コンサルタント「分散式下水道の排水管および処理場に対する最大日流投資計画とそれに関する二、三の問題点の検討」昭42.