

(29) 下水道整備計画に関するシステム論的研究 VIII

—とくに水質環境を考慮した地域負荷配分について—

㈸日本水道コンサルタント 萩原良巳 上田育世
○中川芳一 辻本善博
上智大学 萩原清子

1. はじめに

従来の地域・都市計画においては、経済活動をはじめとする種々の社会活動の最適化を最大の目的とし、水質環境を意識するのは、経済活動等の最適化の結果として公共用水域に流出する負荷が、その水域の水質環境基準を満足するか否かの検討のみであった。そして、水質環境基準を満足しない場合は、下水道整備をはじめとする各種施策によって対応し、地域・都市計画の再検討までフィードバックされることは少なかった。すなわち、従来の地域・都市計画においては、公共用水域の水質環境は計画の要素として取り扱われず、単に、計画の結果をチェックするものにすぎなかった。

そこで、本稿では、公共用水域の水質環境を計画の要素として取り扱い、計画対象地域の公共用水域の容量を考慮した地域・都市計画作成プロセスの一環として、水質環境を考慮した地域負荷配分について述べる。すなわち、計画対象地域の公共用水域（海域、河川）内の複数個の水質環境基準点での水質環境基準等を制約とし、地域活動の最大化をはかるには、計画対象地域へ負荷を如何に配分するのが合目的かという地域負荷配分問題の定式化を2.で行ない、3.でその線型計画法（L.P.）による演算結果を示す。ついで、4.では、沿岸部における工業用水配分問題を、上述の負荷配分問題の一つの展開例として考察する。

2. 地域負荷配分モデル¹⁾

図. 1 に示すような、沿岸にいくつかの地区が存在しており、複数個の地区より負荷を取り入れている河川が数本流入している海域および河川の上流域を考察の対象とする。

2-1 システム方程式

ここでは、図. 1 に示したような流域システムにおける負荷移動の定式化を行なう。なお、記号の説明は表. 1 にまとめて示す。

(i) 流達負荷量関係式： i 河川 j 地区からの流達負荷量は、その地区の発生負荷量と流達率により次式で表わされるものとする。

$$y_{ij} = \sum_k s_{ijk} z_{ijk} \quad (1)$$

なお、ここで下水道整備による負荷の人為的カットを考えると、(1)式は、 β_{ijk} を i 河川 j 地区 k 種の人為的カット率として、

$$y_{ij} = \sum_k s_{ijk} (1 - \beta_{ijk}) z_{ijk} \quad (1')$$

と修正される。

(ii) 河川負荷移動式： i 河川流域の各地区からの流達負荷量の河川での移動および海域への流出を表わすモデル式は、流出率でもって河川の自浄作用等を代表させることにより、次式となる。（ここでのモデルは、平均的モデルであるため河川での散拡等は考えない。）

$$L_{i1} = y_{i1}, \quad L_{ij} = y_{ij} + b_{i,j-1} \cdot L_{i,j-1} \quad (2)$$

表. 1 記号の説明 (I)

z_{ijk}	i 投入点 (河川) j 地区 k 種発生負荷量
y_{ij}	i 投入点 (河川) j 地区流達負荷量
l_{ij}	i 投入点 (河川) j 地点流出負荷量
s_{ijk}	i 投入点 (河川) j 地区 k 種流達率
b_{ij}	i 投入点 (河川) の j 地点から $(j+1)$ 地点への流出率
z_i	i 投入点 (河川) 投入負荷量
γ	BOD-COD 変換係数
ω	単位変換係数
c_k	海域の k 環境基準点の水質
σ_{ik}	i 投入点の k 環境基準点への影響係数
c_k^0	k 水質環境基準点の基準値
L_{ij}^0	i 河川 j 地点での許容流出負荷量
Z_k^0	k 種の発生負荷量の上限
φ_k	k 種の (活動量に対する) クエイト
i	投入点 (または河川) ナンバー
j	地区 (または地点) ナンバー
k	海域の環境基準点ナンバー

(2)式で $j = J$ とすることにより、海域への流出負荷量は、

$$L_{iJ} = \sum_{j=1}^J \alpha_{ij} y_{ij}, \quad \alpha_{ij} = \prod_{\ell=1}^J b_{i\ell}, \quad (b_{iJ} = 1.0) \quad (3)$$

と表わされる。

(iii) 流出負荷—投入負荷関係式： 通常、河川、海域の汚濁指標としては、それぞれ BOD 、 COD が用いられる。本稿でもそれに従って、各地区の発生負荷量、流達負荷量および河川の流出負荷量は BOD で、海域への投入負荷量は COD とする。そのため、河川の流出負荷量と海域への投入負荷量との間に次式で表わされる変換を考える。

$$x_i = \omega \cdot r \cdot L_{iJ} \quad (4)$$

(iv) 投入負荷—水質関係式： 海域へ投入された負荷は、移流伝播、拡散混合等により海域全体に広がっていく。この過程は拡散方程式でもって表現できるが²⁾、ここでは、各投入点からの投入負荷量と各水質環境基準点での水質との間に、次式のような線型の関係式を仮定する。

$$c_k = \sum_i a_{ik} x_i \quad (5)$$

ここに、影響係数 a_{ik} は、流速、水深、拡散係数等の関数と考えられるが、その決定方法および(5)式の線型性の検証は3で行なう。

2-2. 制約条件式、目的関数

(i) 制約条件式： 本モデルの制約条件としては、種々の制約が考えられるが、以下の3式を本モデルの制約条件とする。

$$c_k \leq c_k^* \quad (6), \quad L_{iJ} \leq L_{iJ}^* \quad (7), \quad \sum_i \sum_j z_{ijk} \leq z_k^* \quad (8)$$

(6)、(7)式は、それぞれ海域、河川での水質環境基準を満足せねばならないという制約であり、(8)式は、対象地域での k 種の発生負荷量の総和の上限を抑える制約であり、その上限 z_k^* は地域の活動量の上限に対応し、土地、エネルギー、水資源の供給可能量等によって決定されよう。

(ii) 目的関数： 目的関数としては、地域の活動量を最大にするという考えのもとで、各地区の発生負荷量のウェイト付総和を最大にするという次式を採用することとする。

$$J = \sum_i \sum_j \sum_k \varphi_{ijk} z_{ijk} \quad (9)$$

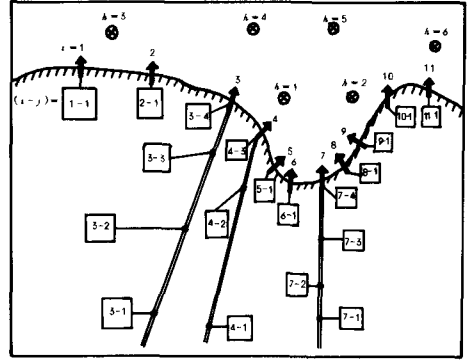
なお、ウェイト φ_{ijk} は、各地区の発生負荷量を人間の活動量、例えば、人口、工業出荷額等に変換する係数と考えることもできる。

3. 地域負荷配分モデルの適用例

ここでは、まず(5)式の影響係数の決定および線型性の検証について述べ、ついで、2で述べたモデルの適用例について記す。モデルの適用は、対象地域として A 湾を選び、まず、海域の水質環境を考慮した沿岸地域（負荷投入点）への負荷配分の演算を行ない、ついで、河川および海域の水質環境を考慮した全流域負荷配分を行なった。なお、演算対象地域（ A 湾）は、図・1にその流域システムを示したように、11個の負荷投入点（うち3個は河川）、6個の海域の水質環境基準点、19個の地区より成り立っている。

3-1. 影響マトリックスの作成¹⁾

まず、渦度、流れ関数、渦方程式、連続式より海域の潮流計算を、拡散方程式により汚濁計算を行ない、²⁾ その潮流、汚濁計算により(5)式の影響係数 a_{ik} を決定した。すなわち、 i 投入点より単位負荷量（ 1 Kg/sec ）を投入したときの k 水質環境基準点での水質として a_{ik} を決定した。ここで、影響係数 a_{ik} を行列で表わし



図・1 流域システム図

たものを影響マトリックスとよぶこととする。このようにして作成した影響マトリックスを表. 2 に示す。影響マトリックスの列は、投入点が海域の各水質環境基準点にどれだけの影響を与えているかを示し、行は、水質環境基準点への各投入点の影響の程度を示している。

表. 2 影響マトリックス

$$A = \begin{pmatrix} 0.1 & 4.0 & 1.1 & 2.0 & 0.5 & 0.5 & 1.5 & 0.5 & 0.2 & 0.8 \\ 0.0 & 0.2 & 0.0 & 0.0 & 0.2 & 0.5 & 1.6 & 2.1 & 5.4 & 5.0 & 1.2 \\ 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 \\ 0.4 & 0.1 & 0.4 & 0.1 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.2 & 0.4 & 0.5 & 0.5 & 0.1 & 0.0 & 0.0 & 0.5 & 0.0 & 0.1 & 0.0 \\ 0.1 & 0.1 & 0.2 & 0.2 & 0.0 & 0.1 & 0.1 & 0.2 & 0.1 & 0.1 & 0.1 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.5 & 1.0 & 1.0 & 0.5 & 0.1 \end{pmatrix}$$

また、(5)式の線型性の検証は、①1 投入点での単位負荷の2倍量の投入、②単位負荷量の2点投入による汚濁シミュレーションにより行ない、その結果、線型性の成り立つことを確認した。なお、潮流計算、汚濁計算の基礎式、アルゴリズム等については参考文献 2) に詳しいので、ここでは省略し、その結果の潮流図および11個の投入点よりそれぞれ単位負荷量(1 Kg/sec)を同時に投入した場合の汚濁分布図を図. 2、図. 3 に示すにとどめる。

3-2 沿岸地域負荷配分演算結果¹⁾

ここでは、2.で述べた地域負荷配分モデルの1サブシステムとして、海域での水質環境を考慮した沿岸地域への負荷配分の演算を行なう。すなわち、システム方程式としては(5)式の投入負荷-水質関係式のみを用い、(6)式のみを制約条件として、以下に記す目的関数を最大にする各投入点への配分負荷量 x_i を、 $L.P$ 計算により求めた。

$$J = \sum_{i=1}^{11} \varphi_i x_i \rightarrow \text{Max} \tag{10}$$

表. 3 に各水質環境基準点での基準値 c_h^* 、各投入点のウエイト φ_i および最適負荷配分量 $\hat{x}_i$ を示す。表. 3 より当然のことながら、表. 2 に示した影響マトリックスにおいて相対的に小さな値(影響係数)の並ぶ列に対応する投入点へ負荷が配分されていることがわかる。

3-3 全流域負荷配分演算結果

3-2.では海域の水質環境を考慮した沿岸地域(負荷投入点)への負荷配分問題を考察したが、ここでは、2.で述べたモデルに従い、海域および河川の水質環境を考慮した全流域の各地区への負荷配分の演算を行なう。2.で述べたモデルは、(1)~(5)式をシステム方程式、(6)~(8)式を制約条件式、(9)式を目的関数式とするモデルとして定式化され、制約式、目的関数式は、ともに各地区各種の発生負荷量 $z_{i,j,k}$ に関して線型である。そこで、各地区の発生負荷量として家庭分($k=1$)、工場分($k=2$)の2種を考え、各地区の各種(家庭および工場)への負荷配分の計算を $L.P$ により行なった。(通常、下水道計画においては、前記の家庭、工場の他に家畜等の発生負荷量も考えるが、家畜等の発生負荷量は、演算対象地域では前記2者に較べて小さいので、簡単化のため省略した。)

(1)演算ケースおよび入力データ： 制約条件式の変化により、各地区各種への最適配分負荷量 $\hat{z}_{i,j,k}$ がどのように変化するかを考察するため、海域の水質環境基準値 c_h^* ($h=1, \dots, 6$) として現行の基準値を用いた場合およびその半分の基準値を用い水質環境基準を厳しくした場合の2通りの場合を、また、対象全地区での k 種の発生負荷量の総和の上限 z_k^* ($k=1, 2$) を、現在の発生負荷量の総和の約100倍、約50倍とした2通りの場合を考えた。また、目的関数式(9)における各地区各種の発生負荷量にかかるウエイト $\varphi_{i,j,k}$ と

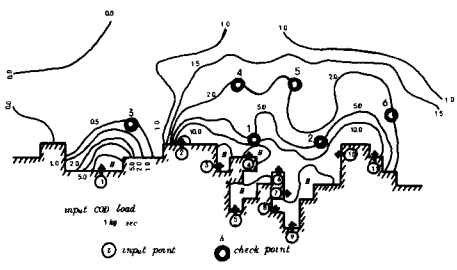
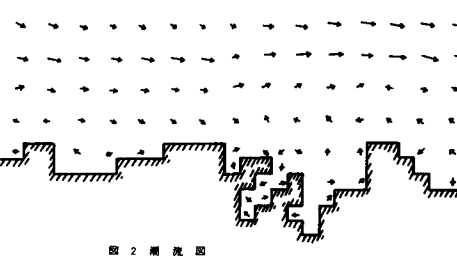


表. 3 演算結果

h	1	2	3	4	5	6					
$(\Lambda^*_{(ppm)})$	80	80	20	20	20	20					
i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
φ_i	1.0	3.0	2.0	2.0	1.0	1.0	2.0	3.0	3.0	1.0	1.0
$\hat{x}_i (\frac{\text{kg}}{\text{sec}})$	5.00	0.0	0.0	0.0	10.0	15.00	11.5	0.0	0.0	0.0	0.0
目的関数 $J = \sum \varphi_i \hat{x}_i$						投入負荷量総和 $\sum \hat{x}_i$					
51154						29425 (kg/sec)					

4. 沿岸地域工業用水配分モデルおよびその演算例⁵⁾

ここでは、3-2の沿岸地域負荷配分問題の1つの発展として、海域の水質環境を考慮した沿岸地域の工場立地と工業用水配分問題を考察する。すなわち、工業の業種として表. 8に示すような8種の業種を考え、この8種の業種を沿岸各地区にどのように立地させるのが合目的かを、海域の水質環境基準、各地区の工業用地、水およびエネルギーの供給可能量を制約として、地域全体の工業所得を最大にするには、どの地区のどの業種に工業用水配分するのが合目的かという工業用水配分問題を通して考察する。

4-1 沿岸地域工業用水配分モデル

まず、制約条件式としては、以下のものを考える。

(i) 土地、水、エネルギーの制約

$$\sum_{l=1}^8 Q_{il} \leq S_i \quad (i=1, \dots, 11) \quad (1)$$

$$\sum_{l=1}^8 u_{il} Q_{il} \leq W_i \quad (i=1, \dots, 11) \quad (2)$$

$$\sum_{l=1}^8 e_{il} Q_{il} \leq E_i \quad (i=1, \dots, 11) \quad (3)$$

(ii) 生産量の上限

$$\sum_{i=1}^{11} Q_{il} \leq Q_l^* \quad (l=1, \dots, 8) \quad (4)$$

(iii) 海域の水質環境基準

$$\sum_{i=1}^{11} \sum_{l=1}^8 a_{ih} \cdot u_{il} \cdot Q_{il} \leq c_h^* \quad (h=1, \dots, 6) \quad (5)$$

また、目的関数としては、対象地域の全工業所得の最大化をはかるといふ次式を採用する。

$$\sum_i \sum_l r_{il} \cdot Q_{il} \rightarrow \text{Max} \quad (6)$$

4-2 演算結果とその考察

4-1で述べたモデルに基づき、 L 、 P 計算を行ない、各地区各業種の最適生産量 $\hat{Q}_{il}$ を求めた。演算に用いた諸定数を表. 8～表. 11に示すが、演算ケースは表. 11に示すように水質環境基準値を変えた2ケースとした。また、演算結果を各地区各業種への工業用水供給量に変換して表. 12に示す。

表. 12より、両ケースとも単位発生負荷量の最も大きい化学肥料($l=7$)には水供給がないこと、ケース2では、紙・パルプ($l=3$)への水供給もなくなっていることがわかる。これは、ケース2では、ケース1より水質環境基準が厳しくなったためである。なお、食品($l=1$)と紙・パルプ($l=7$)との単位発生負荷量はほとんど同じで、化学肥料について大きい、それらの所得係数は食品のほうが大きいため、ケース2において紙・パルプへの水供給がなくなつたと考えられる。

また、ケース2においては、 $i=2, 8, 9$ 地区で水供給量に余裕が生じている。これは、3-3で述べたように、これらの地区の $h=1, 2$ の環境基準点への影響が大きいためである。さらに、機械($l=3$)、ゴム($l=5$)、非鉄金属($l=8$)の単位発生負荷量が小さいため、これらの業種の生産量は限度一杯の値になっている。

表. 7 記号の説明(Ⅱ)

Q_{il}	i 地区 l 業種の生産量
S_i	i 地域の単位用地必要量
u_{il}	i 地域の単位水使用量
e_{il}	i 地域の単位エネルギー使用量
u_{il}	i 地域の単位発生負荷量
r_{il}	i 地区 l 業種の所得係数
S_i	i 地区の工業用地供給可能量
W_i	i 地区の水供給可能量
E_i	i 地区のエネルギー供給可能量
Q_l^*	l 業種の生産量の上限

表. 8 入力データ (I)

l	業種	S_l (km ²)	W_l (km ³)	E_l (10 ⁶ kWh)	Q_l^* (10 ⁴ t/a)
1	食 品	258	675	0.27	0.2521
2	石 油	0.20	200	0.05	0.0249
3	機 械	11.20	4500	185	0.0027
4	紙・パルプ	675	29000	0.44	0.2205
5	ゴ ム	200	10000	0.56	0.0068
6	鐵 鋼	4800	240000	0.25	0.0562
7	化学肥料	110	4000	0.05	0.5867
8	非鉄金属	100	6500	0.05	0.0701

表. 9 入力データ (II)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1 食 品	6802	4810	6828	4820	4810	4810	4794	4807	4807	4810	4810
2 石 油	410	407	494	500	495	495	494	494	494	494	494
3 機 械	10976	10940	11011	11044	11044	11044	11044	11044	11044	11044	11044
4 紙・パルプ	19976	19871	19910	19910	19910	19910	19910	19910	19910	19910	19910
5 ゴ ム	48748	48678	48748	48748	48748	48748	48748	48748	48748	48748	48748
6 鐵 鋼	28841	28748	28748	28748	28748	28748	28748	28748	28748	28748	28748
7 化学肥料	748	748	748	748	748	748	748	748	748	748	748
8 非鉄金属	7410	7405	7405	7405	7405	7405	7405	7405	7405	7405	7405

表. 10 入力データ (III)

h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
c_h^* (ppm)	6133	1249	7299	8071	1940	7341	3747	3330	6171	5315	5238
Q_h (10 ³ km ³)	43809	47456	115000	25915	12804	1805	70805	78116	116720	16892	16360
c_h^* (10 ³ km ³)	28851	4571	17348	2881	4487	1561	926	797	3256	1601	1852

表. 11 入力データ (Ⅳ)

h	1	2	3	4	5	6
c_h^* (ppm)	80	80	20	20	20	20
Q_h (10 ³ km ³)	2	40	40	10	10	10
Q_h (10 ³ km ³)	548	4,506	4,015	514	41	20
Q_h (10 ³ km ³)	548	4,506	4,015	514	41	20

表. 12 演算結果

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1 食 品	125825			193376	30935						
2 石 油		4210		4586							
3 機 械	2168	96939	75826	1055	4625	4770	26410	21015			
4 紙・パルプ	90340			55780	1740	14216					36545
5 ゴ ム			4102								
6 鐵 鋼	45825							2400			
7 化学肥料											
8 非鉄金属											
工業用水供給量	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1 食 品	41175			51725	11475						
2 石 油		4558									
3 機 械	5175	87720	21825		4390	9315	35240	21015	28430		
4 紙・パルプ											
5 ゴ ム			4102								
6 鐵 鋼	24000							19200	4800		
7 化学肥料											
8 非鉄金属	45155		17940	25155	1490	15862		59995	15795		
工業用水供給量	0	42267	0	0	0	0	0	48777	11720	0	0

なお、ケース1、ケース2での地域全体の工業所得（目的関数の値）は、それぞれ $1.365,351 \times 10^7$ 円 $1,340,876 \times 10^7$ 円と大差がなかった。

5. おわりに

公共用水域の水質環境を地域・都市計画の要素として取り扱い、計画対象地域の公共用水域の容量を考慮した地域・都市計画作成プロセスの一環として、我々は、すでに河川の水質環境を考慮した地域（支流域）水配分問題を考察してきたが、³⁾⁴⁾本稿では、海域および河川の水質環境を考慮した地域負荷配分モデルの提示を行ない、そのモデルの具体的流域への適用例を示した。すなわち、まず海域の水質環境基準を制約とした沿岸地域負荷配分問題を線型計画法で解き、ついで、家庭ならびに工場の発生負荷量を決定変数とし、河川および海域の水質環境基準ならびに全流域での各々の発生負荷量の総和の上限を制約として、発生負荷量のウェイト付総和で表わした地域の活動量の最大化をはかる全流域負荷配分問題を線型計画法で解いた。

この結果、公共用水域の水質環境からみた各地区の許容発生負荷量が得られ、この許容発生負荷量を制約として地域の利水計画をはじめとする各種計画を策定するという、公共用水域の環境を考慮した地域・都市計画の一方法を示しえたと考える。

ついで、上述の公共用水域の水質環境を考慮した地域の利水計画の一例として、海域の水質環境および土地、水、エネルギーを制約とした沿岸地域工場立地および工業用水配分問題の定式化およびその線型計画法による演算結果を示した。

なお、本稿では、下水道の整備を考えなかったが、下水道整備計画のある場合には、システム方程式にその整備による負荷の人為的カットおよび処理場よりの放流負荷を、(1)式または参考文献3)に示したようなモデル式によって導入することにより、本稿のモデルおよび演算手法がそのまま適用可能であると考えられる。

また、3-3.の全流域負荷配分問題および4.の沿岸地域工業用水配分問題において、本稿では直接 L 、 P 、計算により各地区各種の許容発生負荷量および各地区各業種の工業生産量を求めた。しかし、これらの問題においては、問題を海域の環境基準点の水質と海域への投入（流出）負荷量の関係、河川の水質環境基準または土地、水、エネルギーの供給可能量等の制約を含んだ海域への投入（流出）負荷量と発生負荷量または生産量の関係という2つのブロックにわけ、分解原理を適用したほうが、海域の水質環境と沿岸部または河川流域部の（生産）活動との関係を考察する上で、その対応がより明確になると考えられる。そこで、この分解原理の上述の問題への適用は今後の課題とする。

最後に、本研究は、当社専務取締役・工博・海潟養之助先生の御理解のもとで、はじめて遂行できたことを明らかにして、謝意にかえます。

〔参考文献〕

- 1) 上田育世・萩原良巳・中川芳一・辻本善博：海域の水質保全のための沿岸地域負荷配分モデルに関する一考察，土木学会第31回年次学術講演会，1976
- 2) 萩原良巳・上田育世・中川芳一：下水道整備計画に関するシステム論的研究Ⅵーとくに海の扱いについてー，土木学会第12回衛生工学研究討論会講演論文集，1976
- 3) 萩原良巳・中川芳一：下水道整備計画に関するシステム論的研究Ⅵーとくに水環境からみた支流域水配分についてー，同上
- 4) 萩原良巳・中川芳一・辻本善博：下水道整備計画に関するシステム論的研究ーとくに下水道整備率をパラメータとしたときの支流域水配分についてー，本討論会発表予定
- 5) Hagihara, K. and Hagiwara, Y.: *Water Resource Allocation Considering With The Impact On The Coastal Sea*, Proc. 13th Conf. The Japan Section of the Regional Science Association, 1976