

ファジィDPモデルによる下水道面整備計画

小泉 明¹・稲員とよの²・佐藤則隆³

¹正会員 工博 東京都立大学教授 工学部土木工学科 (〒192-03 八王子市南大沢1-1)

²正会員 工博 東京都立大学助手 工学部土木工学科 (〒192-03 八王子市南大沢1-1)

³正会員 工修 東京都立大学工学部土木工科大学院修了 (現在 水資源開発公団)

本論文では、下水道の面整備計画を立案するためのファジィDPモデルを提案する。このモデルは、計画期間全体の削減汚濁量を最大にするために、どの地区をどの時点で面整備を行えばよいかを決定し、多大な時間を要する面整備を理論的に支え、不確実性を伴う将来の人口をファジィネスとして捉えることにより、将来の発生汚水量、面整備費用及び予算の不確実性を評価することができる段階的計画を立案するものである。そして、提案したモデルの比較分析並びにケーススタディを通して、モデルの特性を明らかにするとともにその有効性を示した。

Key Words : fuzzy dynamic programming, multi-stage optimization, uncertainty, robustness, sewerage system

1. はじめに

下水道の管きょ施設はマクロ的に見ればある広がりをもった面的施設とみなすことができ、その整備は対象地域に対して面的に行われる。本論文では、このような面整備を対象とするが、従来の面整備計画には二つの問題点がある。従来の下水道計画では、計画目標年度(例えば20年後)における将来像を計画¹⁾する。そして、その途中の期間は、対象とする各地区に対して公平に整備される場合、効率的に整備される場合、あるいは無秩序に整備される場合等様々な方法で行われる。このため、まず第一に、将来計画像に到達するまでの時間軸を考慮した科学的方法が確立されていないという問題がある。第二に、下水道の計画は将来人口に伴う発生汚水量の動向に大きく左右され、そのような外部条件は将来の不確実性を有する。しかしながら、従来の下水道計画においては、これを確定論的に取扱い、発生汚水量の推定に伴う将来の不確実性を十分に考慮していないことが多く見受けられる。

下水道面整備の大きな効果は各家庭や事業所で発生する汚水を処理し、汚濁物を削減することにある。もし目先の面整備だけを着目していたら、汚濁の削減量は面整備の順序に依存するから、計画期間全体から見て、全体最適は達成されず、単なる部分最適になってしまう。す

なわち、面整備に多大な時間を要することを考えると、第一の問題に対しては、時間のダイナミズムを考慮した面整備計画を支援するモデルが必要になる。第二の問題に対しては、将来の不確実性を考慮し、将来環境の変化に適応し得る計画²⁾の立案を望まなければならない。以上のことから、想定し得る様々な将来の状況に柔軟に対応する、時間のダイナミズムを考慮した下水道計画を立案することが、下水道の面整備に当たった重要な課題であると考えられる。

そこで、本論文では、まず、面整備計画を動的計画法(Dynamic Programming; 以下DPと略す)によってモデル化する。DPは部分最適を拡張し全体最適を行う理論^{3),4)}として広く知られており、これを本問題に適用することにより、時間軸を考慮した段階的な下水道計画が可能になる。次に、人口の推定に伴う不確実性をファジィ理論^{5),6),7)}を用いて考慮し、定性的な意志決定を行う。すなわち、意志決定を幅をもった形で考えることにより、将来環境に柔軟に対応できる計画案を立案できると考えた。

以上のように、本論文では、将来の不確実性を含む長期に及ぶ面整備計画にファジィDP(従来のDPモデルの評価関数にファジィ数が含まれる)モデル⁸⁾を適用し、時間のダイナミズムを考慮した将来環境に柔軟に対応することのできる計画モデルを提案する。

2. ファジィDPモデルの定式化

(1) モデルの基本的考え方

本論文では、下水道面整備計画を幹線管きょ配置計画の下位計画に位置付け、処理区割り、処理場の位置選定及び幹線管きょ施設の配置は決定済みであることを前提とする。

さて、下水道面整備は拠出できる予算に限界があるため、長期に渡り段階的に行われてきた。そこで、時間軸を一定間隔に区切り段階的に構成する。次に、対象地域を行政区分を基盤として処理区及び地域特性に配慮し、いくつかの地区に分割する。以上より、ある予算の範囲内で、どの地区をどの段階で面整備するかという簡単な意志決定問題に置き換えることができる。また、時間全体及び対象地域全体から見ると、下水道の効果を削減汚濁負荷量で評価し、これを最大にするのが望ましい。

したがって、時間軸の区分、対象地域の分割により、本モデルに対する問題構成は、「各段階の予算制約のもと、計画期間全体の累積削減BOD（Biochemical Oxygen Demand）汚濁負荷量を最大にするために、どの段階でどの地区を面整備するか」というものになる。なお、累積削減BOD汚濁負荷量は、下水処理場で除去される汚濁負荷の総量で計量化している。

ところで、モデルに必要な入力値は、各地区の発生汚水量の経年変化、各地区の面整備費用及び各段階の予算である。そこで、本来クリスプな数で表される、この3つの入力値をファジィ数とする。これらをファジィ数とすることにより、ファジィ環境下における適切な解を求め、柔軟な代替案を策定することが可能になる。

(2) ファジィ数の設定

ファジィ数とはだいたいどれぐらいという数字を意味しており、そのあいまいさがどこまで及ぶかという境界は、最小値・頂点値・最大値を結んだ三角形のメンバーシップ関数⁹⁾により表す(図-1)。以下に、各地区の発生汚水量の経年変化のファジィ数(ファジィ汚水量)、各段階の予算のファジィ数(ファジィ予算)、各地区の面整備費用のファジィ数(ファジィ面整備費用)の設定方法を説明する。

a) ファジィ汚水量

各地区の発生汚水量については、人口のみをファジィ数とし、このファジィ人口に発生汚水量原単位推定値を掛け、工場排水量を足して算出することにする。ファジィ人口は時間的に連続するファジィ数系列として表現される。ここで、発生汚水量原単位についてもファジィ数として取り扱うことも可能であるが、ファジィ数の積と

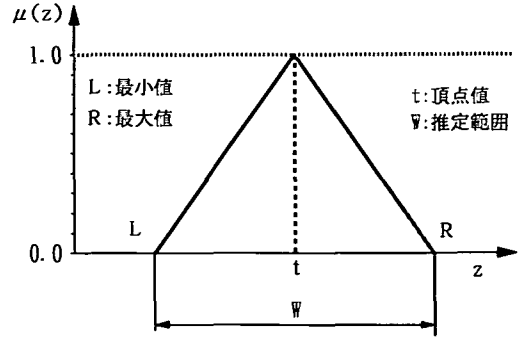


図-1 ファジィ数を表すメンバーシップ関数

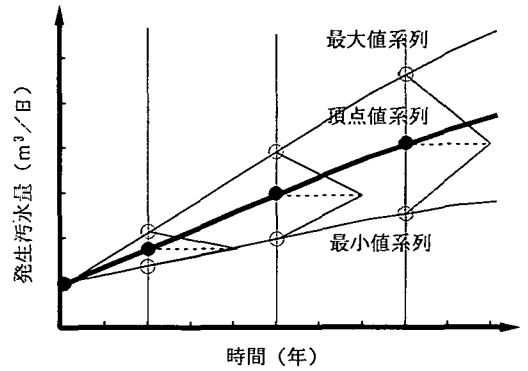


図-2 ファジィ汚水量

なるため人口のみをファジィ数としている。図-2において、頂点値系列は、例えば過去の実績値をもとにした統計的手法により推定される最も標準的な場合として設定する。これに対し、最大値系列は今後の長期的な開発等を考慮し、もっともその地区に人が貼り付いた場合を想定し、一方、最小値系列は経済環境の悪化により宅地開発等が全く行われず、人口の伸びが最低の場合を想定してその設定を行う。

b) ファジィ予算

各段階のファジィ予算は、種々の都市施設計画との兼ね合いも考慮し、予算をぎりぎりいっぱいつけた場合を最大値、緊縮財政を想定する場合を最小値、そして、頂点値は過去の予算実績等から決まる最も可能性の高い値として設定する。

c) ファジィ面整備費用

ここでは、面整備費用を過去の実績値をもとに作成した重回帰モデル式を用いて計算した。この費用関数は地区面積及び地区人口を説明変数として用いているため、面整備費用もファジィ数となる。

(3) モデルの定式化

段階 n の削減汚濁負荷量は、それ以前の整備状態を示すベクトル x_n と、新たな整備決定ベクトル d_n により式(2)のように表される。これに式(3)の予算制約を加えると、式(2)から式(6)のもと式(1)の評価関数を最大化する決定ベクトル群 (d_1, d_2, \dots, d_n) を見つけ出す問題に定式化される。さらに、式(1)は式(8)の関数方程式のもと式(7)のように分解でき、式(9)の初期条件より $k=N-1, N-2, \dots, 1$ と計算されファジィDPの適用が可能となる。

$$\text{Max}_{d_1, d_2, \dots, d_n} \sum_{n=1}^N \tilde{E}_n(x_n, d_n) \quad (1)$$

$$\tilde{E}_n(x_n, d_n) = \sum_{i=1}^m \{ (x_{ni} + d_{ni}) \cdot \gamma \cdot w \cdot \tilde{q}_{ni} \} \quad (2)$$

$(n = 1, 2, \dots, N)$

$$\sum_{i=1}^m \tilde{C}_i \cdot d_{ni} \leq \tilde{B}_n, \quad (n = 1, 2, \dots, N) \quad (3)$$

$$x_{n+1} = x_n + d_n, \quad d_{ni} + x_{ni} \leq 1 \quad (4)$$

$(n = 1, 2, \dots, N; i = 1, 2, \dots, m)$

$$x_n = (x_{n1}, x_{n2}, \dots, x_{nm})^t, \quad x_{ni} = \{0, 1\} \quad (5)$$

$$d_n = (d_{n1}, d_{n2}, \dots, d_{nm})^t, \quad d_{ni} = \{0, 1\} \quad (6)$$

$$\text{Max}_{d_1, d_2, \dots, d_k} \left\{ \sum_{n=1}^k \tilde{E}_n(x_n, d_n) + T\tilde{E}_{k+1}(x_{k+1}) \right\} \quad (7)$$

$$T\tilde{E}_k(x_k) = \text{Max}_{d_k} \left\{ \tilde{E}_k(x_k, d_k) + T\tilde{E}_{k+1}(x_{k+1}) \right\} \quad (8)$$

$$T\tilde{E}_N(x_N) = \text{Max}_{d_N} \tilde{E}_N(x_N, d_N) \quad (9)$$

ここに、

\tilde{E}_n : 段階 n における削減汚濁負荷量(トン)

x_n : 段階 n の状態ベクトル

d_n : 段階 n の決定ベクトル

x_{ni} : 段階 n における地区 i の整備状態

(0 : 未整備, 1 : 整備済み)

d_{ni} : 段階 n における地区 i の整備決定

(0 : 整備しない, 1 : 整備する)

N : 段階の数

m : 地区の数

γ : 換算係数($365 \cdot p \cdot 10^6$)

w : 削減BOD濃度(ppm)

p : 一段階当たりの年数(年)

\tilde{q}_{ni} : 地区 i からのファジィ汚水量(m^3 /日)

\tilde{C}_i : 地区 i のファジィ面整備費用(億円)

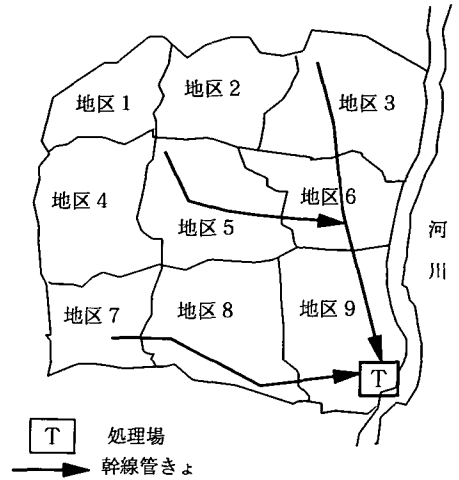


図-3 モデル地域

\tilde{B}_n : 段階 n におけるファジィ予算(億円)

$T\tilde{E}_n$: 段階 n 以降累積削減汚濁負荷量の最大値(トン)である。なお、 t は転置行列を表す。

これらの式中の \sim はファジィ数であることを示しており、前述のように発生汚水量、予算、面整備費用において将来の不確実性をファジィ数として考慮することにより、式(1)においてあいまいな評価を行い、ファジィ環境下で適切な解を求めることになる。

3. ファジィDPモデルの比較分析

ここでは、提案したファジィDPモデルを簡単なモデル地域に適用し、将来を確定論的に扱った場合のDPモデルによる結果との比較分析を行う。

(1) モデル地域

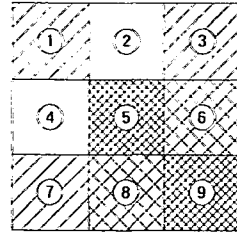
モデル地域は、近く宅地開発が行われる予定で、それに伴い下水道が整備されることになった。しかしながら、予算の関係上、モデル地域を早期にすべて面整備することはできず、計画目標年度まで段階的に行うことになった。そこで、ファジィDPを適用し、段階的な面整備計画を立案することにした。まず、計画目標年度を20年後に定め、目標年度における下水道の将来像を計画するとともに、モデル地域を9つの地区に分割した(図-3)。

モデル地域は現在地区9を中心に栄えており、今後、地区5を軸に大規模な開発がされる。これらを考慮し、各地区のファジィ人口を過去の実績値に基づく時系列曲線により推定し、それをもとにファジィ汚水量の設定を行った。設定されたファジィ面整備費用とファジィ汚水量を表-1に示す。

表-1 モデル地域の計画諸元

地区		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
整備面積 (km ²)		0.8	1.2	2.0	1.5	1.4	1.3	1.0	2.0	1.95	
汚水量原単位 (ℓ/人/日)		345	350	325	360	400	375	360	345	355	
計画人口 (人)	0年後頂点値	1010	3000	7520	3060	6090	8480	3920	8010	10830	
	5年後頂点値	1620	4800	7850	3510	10290	9690	4310	8720	11820	
	10年後頂点値	2350	5800	8260	5920	12740	10820	5280	10040	12250	
	15年後頂点値	3160	7300	8490	9530	14320	11760	5910	14090	12650	
面整備費用 (億円)	最小値	9.1	16.8	26.8	21.2	25.9	23.5	14.8	30.6	30.4	
	最大値	18.1	28.0	40.4	33.2	37.1	34.7	26.3	41.9	40.2	
発生汚水量 (m ³ /日)	0年後	最小値	350	1050	2520	1400	2800	3430	1960	2975	3850
		頂点値	350	1050	2520	1400	2800	3430	1960	2975	3850
		最大値	350	1050	2520	1400	2800	3430	1960	2975	3850
	5年後	最小値	490	1750	2520	1435	4235	3500	1960	3045	3990
		頂点値	560	2450	2625	1575	4480	3885	2100	3220	4375
		最大値	700	2625	2975	1715	5600	4060	2625	3500	4480
	10年後	最小値	910	1925	2520	1750	4970	4445	2275	3290	4025
		頂点値	980	2800	2765	2450	5460	5075	2450	3675	4410
		最大値	1120	3010	3430	2660	6300	5330	3395	3885	4585
	15年後	最小値	1260	2450	2520	2730	5250	4725	2555	4025	4095
		頂点値	1330	3325	2835	3850	6090	5425	2800	5075	4550
		最大値	1540	3605	4480	4130	6580	5950	4025	5355	4725
20年後	最小値	1330	2520	2520	2800	5285	4795	2695	4130	4305	
	頂点値	1400	3500	2870	4200	6300	5600	2975	5250	4900	
	最大値	1750	3850	4900	4480	6650	6160	4200	5530	5075	

ファジィDPの結果 (代替案1)



DPの結果 (代替案2)

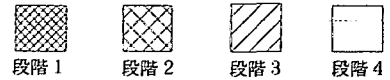
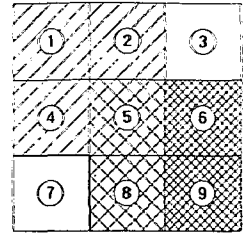


図-4 ファジィDPとDPの結果

表-2 削減汚濁負荷量の比較

各段階	ファジィDPモデル		DPモデル	
	整備地区	削減量(ト)	整備地区	削減量(ト)
段階1	5, 9	1273	6, 9	1276
段階2	6, 8	2840	5, 8	2840
段階3	1, 3, 7	4346	1, 2, 4	4475
段階4	2, 4	5936	3, 7	5936
合計		14395		14527

(2) 入力データ

面整備計画は5年ごとの4段階決定問題とする。予算については、ファジィ化せず、各段階一律70億円とする。ところで、ファジィDPモデルとDPモデルの相違点は、入力データ(発生汚水量及び面整備費用)が表-1に示すファジィ数であるか確定値(頂点値)であるかである。この比較はファジィ汚水量及びファジィ面整備費用の頂点値をDPモデルの入力データに使用することによって行うが、それ以外の条件はすべて一致させる。

(3) 結果

両モデルの計算結果を図-4に示す。両モデルの結果はともに、現在栄えてる地区9と今後大規模な開発が行われる地区5を軸にして面整備が展開し、時間のダイナミズムが考慮されていることがよくわかる。両モデルの結果を比較すると、地区1・地区8・地区9以外のすべての地区で面整備する時期が違うことがわかる。例えば、地区7では、ファジィDPの方が、DPよりも面整備の時期が一段階早い。これはあいまい性を考慮したか否かをよく表している。地区7は潜在的開発可能性が高く、これをメンバーシップ関数に反映させた結果、面整備の時期が早まった。地区3についても同様のことが言える。地区5については、ファジィ数の設定において、宅地開発により人口が予想以上に早く貼り付くことを考慮したため、面整備の時期が段階2から段階1に繰り上がっている。

表-2に各段階における削減汚濁負荷量を示す。表中

の値は、頂点値系列の汚水量が発生した場合について、両モデルの整備手順に対応する削減汚濁負荷量を求めたものである。表-2では、ごく僅かではあるもののDPモデルの方がファジィDPモデルより大きい削減量を示している。これは、確定的な未来(発生汚水量)に対してはDPの方が優れた最適性を有しているためと考えられる。現実的には、発生汚水量の予測値は不確定なものであり、時間の経過とともに実現する汚水量は必ずしも頂点値(予測値)とは一致しない。そこで次節では、様々な汚水量の仮想実現値系列をシナリオとして設定し、両モデルの整備手順に対応する削減汚濁負荷量を求め比較する。

(4) シナリオ分析

まず、2つの代替案を比較するため、ファジィDPモデルによる面整備パターンを代替案1、DPモデルによる面整備パターンを代替案2として固定する。そして、思考実験として現時点で考え得る発生汚水量の経年変化のシナリオ(仮想実現値系列)を16個作成した(表-3)。これは宅地開発・工場誘致などの開発計画の有無や経済成長の度合い、環境政策の有無を組み合わせで想定したシナリオである。各シナリオの実現時に、代替案1と代替案2をそれぞれ実施したと仮定して、両案について各面整備段階に従って総削減負荷量を計算し、どちらの代替案が優れているかを比較分析する。

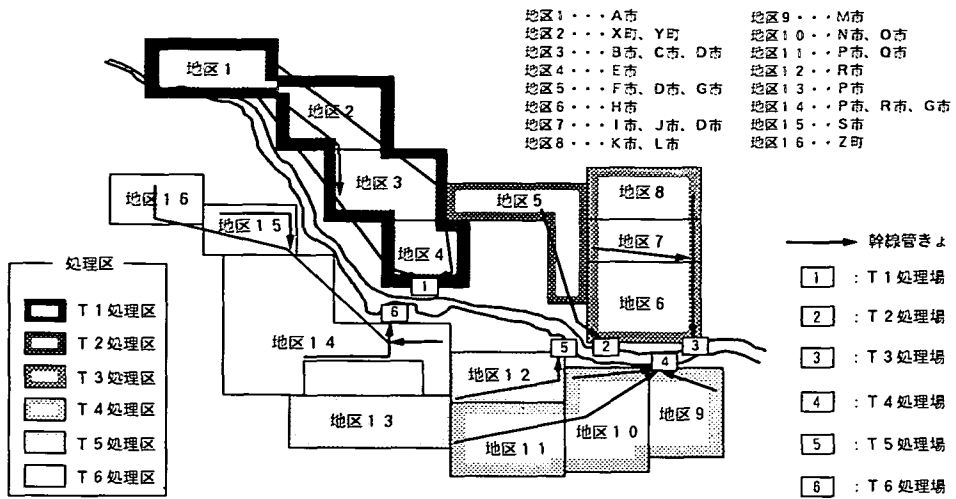


図-5 T川流域下水道と分割地区

表-5 各地区の人口増加率

地区名	1970年人口	過去の人口増加率(%/年)		累積人口増加率(/25年)	
		r_{max}	r_{min}	R_{max}	R_{min}
地区1	69,600	4.064	0.000	2.707	1.000
地区2	49,200	3.873	2.606	2.586	1.902
地区3	74,400	3.312	2.130	2.258	1.694
地区4	91,200	2.010	0.767	1.645	1.210
地区5	121,200	1.675	0.590	1.515	1.158
地区6	188,400	1.661	0.659	1.510	1.178
地区7	96,000	1.702	0.690	1.525	1.188
地区8	117,600	1.663	0.642	1.510	1.173
地区9	37,200	3.006	0.000	2.097	1.000
地区10	46,800	6.285	1.234	4.590	1.359
地区11	18,000	7.134	3.563	5.600	2.399
地区12	82,800	2.929	1.413	2.058	1.420
地区13	63,600	2.572	0.694	1.887	1.189
地区14	145,200	2.945	0.863	2.066	1.240
地区15	34,800	3.280	0.870	2.241	1.242
地区16	28,800	4.493	0.322	3.000	1.084

率 R_{max} および R_{min} を次式により求め、表-6 に示すファジィ人口を算定した。

$$R_{max} = (1 + r_{max} / 100)^N$$

$$R_{min} = (1 + r_{min} / 100)^N$$

ただし、 N は計画年数(ここでは25年)であり、人口増加率の最小値が負となる地区については $r_{min} = 0$ と置いている。

また、面整備費用についても過去における人口当り実績値をもとに算定した。これらの計画諸元を表-6 に示す。なお、予算については実績値を最小値とする5段階均等予算としている。

以上の入力データによる計算結果は、左岸流域の整備が比較的右岸流域よりも先行し、流域全体では、費用をかけて下水道ストックが増加していくにつれて、汚濁削減効果も増加していく(図-6)。また、各地区の整備段階は図-7となっている。

(2) モデルの適用結果

対象地域における下水道面整備計画をファジィDPで検討するため、地域を16の地区に分割した(図-5)。ただし、本計画は広域レベルで考え、流域下水道のみを対象とし、財政形態の異なる公共下水道は対象地域より外した。計画期間については1970年から25年間とし、5段階の面整備計画を考えることにした。

ここではファジィ人口の頂点値に過去の実績値を用い、最大値及び最小値については各地区の人口動態の傾向並びに地区特性をもとに設定した。すなわち、表-5に示すように、1970年以前の人口増加率の最大値 $r_{max}(\%)$ および最小値 $r_{min}(\%)$ を用いて、計画期間全体の累積人口増加

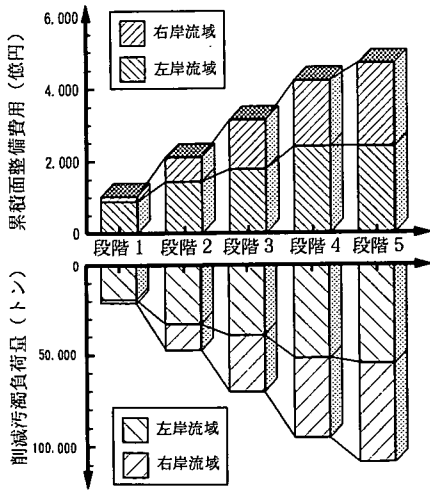
左岸流域については、既に高密度に市街化している左岸流域東部の整備が計画期間の前期に集中している。左岸流域北西部については、田畑等の市街化していない区域が多く含まれており、計画期間の中期から後期にかけて整備される。

一方、右岸流域については、その西部は開発されない丘陵及び台地が存在しており、大まかに、中期から後期にかけて整備される。右岸流域の南東部に位置する地区12は、計画立案時点において団地等の高密度な住宅地が広がっており、前期に整備される。地区9・地区10・地区11はニュータウン構想地域に含まれるが、地区9及び地区11は最後の段階で整備される結果となった。

表-6 T川流域の計画諸元

地区	面積 (ha)	人口(人)		発生汚水量(m ³ /日)		面整備費用 (億円)	
		1995年	1970年	1970年	1995年	1995年	(億円)
地区1	2.297	69,600	20,658	20,658	223.15	52,338	361.40
		151,200		42,418	331.11		
		188,400		52,338	361.40		
地区2	2.492	93,600	17,119	28,959	283.03	32,159	296.95
		105,600		32,159	296.95		
		127,200		37,919	319.78		
地区3	2.546	126,000	20,510	34,270	321.44	45,470	360.43
		140,400		38,110	335.58		
		168,000		45,470	360.43		
地区4	1.511	110,400	27,489	32,609	215.34	38,049	232.46
		130,800		43,169	247.17		
		150,000		40,150	276.56		
地区5	1.601	147,600	34,710	42,190	282.12	52,390	307.72
		183,600		63,350	401.52		
		222,000		70,075	419.06		
地区6	2.528	247,200	54,393	79,993	443.13	30,400	223.67
		284,400		33,920	233.64		
		114,000		39,040	247.08		
地区7	1.174	127,200	25,600	36,800	264.84	40,960	276.37
		146,400		47,360	292.81		
		138,000		13,893	167.22		
地区8	1.467	153,600	31,360	25,053	220.34	26,133	224.53
		177,600		26,133	224.53		
		37,200		14,460	187.85		
地区9	1.702	74,400	13,893	29,660	249.84	32,700	291.21
		78,000		41,241	258.40		
		63,600		47,721	276.33		
地区10	2.212	195,600	15,688	57,081	299.49	26,489	264.78
		214,800		36,789	302.44		
		43,200		41,733	318.23		
地区11	2.486	91,200	6,480	66,316	591.45	102,101	687.60
		100,800		108,416	702.25		
		117,600		13,032	159.02		
地区12	1.611	139,200	30,801	19,872	188.24	23,472	201.18
		170,400		9,545	127.93		
		75,600		13,145	145.62		
地区13	2.604	105,600	22,369	26,105	191.88	26,105	191.88
		120,000					
		180,000					
地区14	5.014	282,000	54,107				
		300,000					
		43,200					
地区15	1.308	66,000	10,512				
		78,000					
		31,200					
地区16	1.059	43,200	8,825				
		86,400					

注) 表中の3段に記載されている数字は、上段:最小値、中段:頂点値、下段:最大値を示している。



注) この結果は本来ファジィ数であるがここではその頂点値で代表させる。

図-6 費用と効果

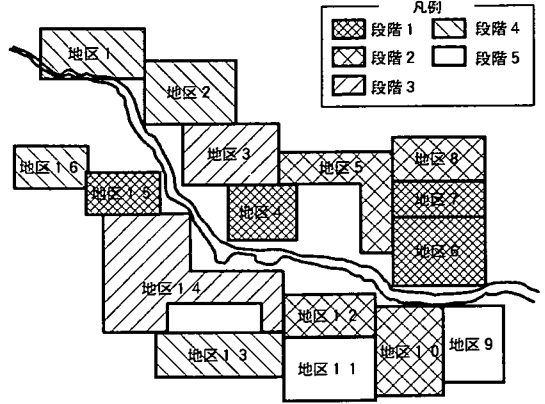


図-7 計算結果(モデル案)

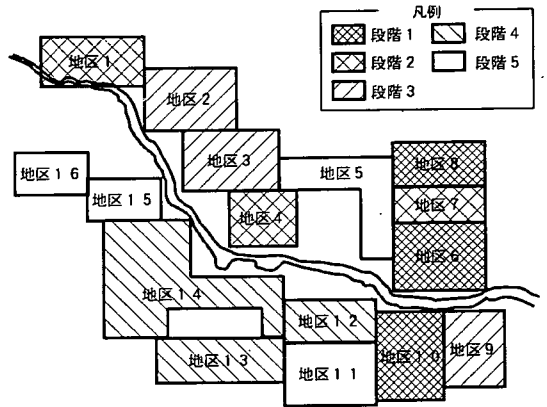


図-8 実際の面整備

(3) T川流域の実際の面整備との比較

つきに、ファジィDPモデルによる面整備案(以下モデル案と呼ぶ)からみて、過去における実際のT川流域の面整備がいかなる計画であったかを評価して見る。

そのため、実際の面整備順位をモデルの計算結果に合わせて分類し(図-8)、モデル案と比較する。

左岸流域東部に関する実際の面整備は、モデル案と類似性が見いだされる。したがって、対象地域全体、計画期間全体の河川水質からみて、適当な面整備だったと言える。ただし、地区5については住民の反対運動が起り、整備開始年度は早いかわ供用を開始したのは1988年からである。モデル案では、地区5は段階2に整備することになっていることから、この地区の整備の遅れは、この間の河川水質に対して悪影響を与えたと言える。

左岸流域北西部については、モデル案では中期から後期にかけて整備されるが、過去の面整備は左岸を優先して整備するという方針により、前期から中期にかけて整備された。対象地域を16の地区に分割したモデル案から

表-7 モデルによる結果と実際の結果の比較

項 目		段階 1 (S. 45-49)	段階 2 (S. 50-54)	段階 3 (S. 55-59)	段階 4 (S. 60-H. 1)	段階 5 (H. 2-6)
面 整 備 地 区	モデルによる結果	4, 6, 7, 15	5, 8, 10, 12	3, 14	1, 2, 13, 16	9, 11
	実際の結果	6, 8, 10	1, 4, 7	2, 3, 9	12, 13, 14	5, 11, 15, 16
累積削減汚濁負荷量 (トン)	モデルによる結果	20,622	67,232	136,498	230,777	338,579
	実際の結果	18,488	54,388	106,375	192,640	300,441
累積面整備費用 (億円)	モデルによる結果	1,073	2,169	3,193	4,269	4,739
	実際の結果	957	1,754	2,607	3,873	4,739
累積面整備費用当り 削減負荷量(トン/億円)	モデルによる結果	19	31	43	54	71
	実際の結果	19	31	41	50	63

見ると、左岸・右岸レベルで考えるのではなく、より細かい方針が必要であったように思われる。

一方、右岸流域南東部のニュータウン構想に含まれる地区 10 については、実際に段階 1、モデル案が段階 2 と、実際の方が整備順位が早い。地区 10 は現在に至るまでに著しく人口が流入し、結果的には実際の面整備順位は適当であったが、人口が流入しない場合の不確実性をも考慮したモデル案から見ると、余りにも開発がうまくいくことを前提とし過ぎた整備だったと言える。

左岸優先方針の弊害が出ていると考えられるのが、右岸流域の中で、特に地区 12 である。実際に段階 4、モデル案が段階 2 で面整備し、計画期間全体及び対象地域全体から考えると、この地区の面整備の立ち後れによる影響は大きい。

以上のようなファジィDPモデルと過去の実績における面整備順位の差異を、累積削減汚濁負荷量により評価すると表-7 となる。この表は、ファジィ汚水量の頂点値(過去の実績値)を用いて、ファジィDPモデルによる面整備手順と実際の手順に従って計算したものであり、各段階の削減汚濁負荷量及び面整備費用を順次累積した値と、それらの比率とを示している。この表を見ると、累積削減汚濁負荷量は、ファジィDPモデルによる面整備手順に従う方が実際の結果を上回っており、提案したモデルを用いることにより時間のダイナミズムを考慮した計画が策定されたと判断できる。なお、ここでは過去に対してファジィDPモデルを適用し、実際の面整備について評価したが、今後の下水道面整備計画にその適用が望まれる。

5. おわりに

本論文では、時間のダイナミズムを考慮した将来環境に柔軟に対応できる下水道面整備計画のためのファジィDPモデルを提案した。そして、ファジィDPモデルとDPモデルの比較検討を通して、DPが特定の状況に対

して有利な結果を与えるが、ファジィDPは様々な状況によく対応する柔軟な計画が立案できることが明らかになった。さらに、T川流域の過去にファジィDPモデルを適用し、その結果から評価して、実際の面整備がいかなるものであったかを指摘し、下水道面整備計画に対する科学的根拠の必要性について述べた。

なお、今後の課題としては、地区の数が増加することによる計算時間の増大に対処できる計算方法の改良、終末処理場や下水道幹線も組み込んだモデルへの拡張があげられる。

参考文献

- 1) 小泉明, 稲貝とよの, 足立晃一: 広域下水道計画に関する事例研究, 月刊下水道, Vol.16, No.6, 1993.
- 2) Shiv, K.G. and Jonathan, R.: Robustness in Sequential Investment Decision, *Management Science*, Vol.15, 1968.
- 3) Bellman, R.E. and Dreyfus, S.E.: *Applied Dynamic Programming*, Priceton University Press, 1962.
- 4) Bellman, R.E.: *Nonlinear Analysis* Volume I, Academic Press, 1970.
- 5) Bellman, R.E. and Zadeh, L.A.: Decision Making in a Fuzzy Environment, *Management Science*, Vol.17, 1970.
- 6) 小泉明, 戸塚昌久, 稲貝とよの, 川口士郎: 都市ごみ収集輸送計画のためのファジィ線形計画モデル, 土木学会論文集, No.443/II-18, 1992.
- 7) 小泉明, 稲貝とよの, 榊原康之, 川口士郎: ファジィ理論を用いた水運用計画モデルに関する研究, 水道協会雑誌, Vol.63, No.712, 1994.
- 8) Esogbue, A.O. and Bellman, R.E.: Contribution to Fuzzy Dynamic Programming, *2nd World Conf. "Mathematics at Service of Man"*, Las Palmas, 1982.

(1996.3.28 受付)

PLANNING OF SEWERAGE SYSTEMS BY FUZZY DYNAMIC PROGRAMMING MODEL

Akira KOIZUMI, Toyono INAKAZU and Noritaka SATO

In this paper, the fuzzy dynamic programming model is proposed for the planning of sewerage systems. This model decides both the district and the stage to construct the sewerage systems so as to maximize the total reduction of pollution load during planning period, and it supports the reasonable construction of branch sewers that need a long time. In addition, this model provides the planning scheme with robustness and also evaluates the uncertainty in the future considering the sanitary sewerage flow caused by future population as fuzziness. Furthermore, through the comparative analysis and the case study, the feature of this model is made clear and its availability is shown.