

## 都市域における雨水流出制御施設の流域配分計画

## ALLOCATION PLANNING OF RUNOFF CONTROL FACILITY IN URBAN WATERSHED

末石富太郎\*・城戸由能\*\*

By Tomitaro SUEISHI and Yoshinobu KIDO

Rapid urbanization brought changes to the social and hydrologic conditions of urban watersheds. Present urban drainage plan gives rise to a mismatch between design capacity and real discharge resulting frequent localized floods in the urban watershed. This paper proposes a practical scheme to allocate urban flood control facilities among sub-basins with different land use and runoff characteristics. First, capacity of each of alternative facilities is calculated by model simulation (Tank Model). Multi-Criteria Analysis (MCA) is applied to evaluate the order of priority of alternatives, quantifying their representative costs, risks and benefits for flood control. This enables to select the adaptable facilities for each drainage basin. Then, the combination of selected facilities are evaluated by MCA using criteria appropriate for a basinwide approach. Two steps achieve an effective scheme useful for preventing floods in urban watershed.

*Keywords* : urban watershed, flood control, tank model, multi-criteria analysis

## 1. 研究の背景

急激な都市化は都市地表面を不浸透化し雨水流出量を増大させ、下水道管渠や河道での雨水の流達時間を短縮する結果となった。このため都市河川流域の一部では排除能力が不足し、部分的な過負荷により局地的に発生する内水の排除不能による浸水を頻繁に起こしている。このような流域の状況を根本的に改善するには、大幅な河道河積の拡大や大型の貯留施設の設置が必要であるが、現実には用地不足により施策の実行はきわめて難しい。このため総合治水計画に基づく小流域単位での流域内貯留や雨水浸透型下水道など、各戸レベルに至る流出抑制対策が提案・実施されつつある。また、都市域内での開発行為による土地利用変更等に伴って増大した雨水流出量を調整する流出抑制施設の設置を指導する施策が積極的に実施されている。

このような制御施設の計画を流域全体に対して行ううえで、都市域全体を1つの大規模なシステムとみなし、排水区や制御施設をサブシステムとする多階層、多目的な計画問題としてとらえる必要がある。この場合、シス

テム全体の目的や手段を分解してサブシステムに与え、その部分目的に従って各サブシステムごとに施設計画を行うアプローチと、各サブシステムごとにある目的に従った施設計画を行い、都市域全体の目的を最適化するように各サブシステムごとの計画の調整をはかるアプローチが考えられる。各サブシステム間の調整をはかる場合には、雨水制御における役割分担を決定する必要があるが、その際には降雨量の時空間的な分布を無視することはできない。しかし、施設の設計計画段階で複雑な降雨量の時空間的な分布をすべて考慮に入れることは不可能に近く、各サブシステム間の詳細な調整は実時間制御を最適化するなどの制御の段階で基本的に取り扱うべきである<sup>1)</sup>。また、流域全体での制御を最適化するためとはいえ、各排水区に土地利用の制約を含む異なるレベルの治水目標を与える普遍的な基準を設定することは現段階では困難である。このため、全体システムで設定した目的はそのまま排水区に与えられ、各排水区の水理学的、社会的制約条件等に従って施設計画を進めることになる。しかし、下水道整備率に差がある支流域や財政事情の異なる市町間相互、あるいは官公庁・民間との間での関連施設の分担方法はまだ確立されていない。

本研究では、下水道排水区に代表される小流域単位で浸水防止を目的とした雨水制御施設を計画するため、

\* 正会員 工博 大阪大学教授 工学部環境工学科  
(〒565 吹田市山田丘2-1)

\*\* 学生会員 工修 大阪大学大学院(同上)

- ① 排水区の特徴を反映した施設を選択する
- ② 都市基盤施設としての多様な効用を評価する
- ③ 各排水区の水害防止目標を満たしつつ、流域全体の効用を高める代替案を選択する
- ④ 排水区内にさまざまな形態で存在する施設の最終効果のみを評価するのではなく、排水区のもつ特性そのものを評価する新しい評価手法の可能性を検討する

等の点に留意した。雨水流出モデルとして、SWMMのような分布定数系のモデルではなく、対象流域の特性を一括したパラメーターで表現する集中定数系のタンクモデルを採用した。このモデルを用いて設計した施設に対して多基準分析法(MCA)による代替案評価を行い、排水区単位と流域全体での雨水制御施設の計画法を実計算例を通じて提案する。

## 2. 対象流域概要とその問題点

対象とした寝屋川流域は、生駒山脈、淀川、大和川、上町台地に四方を囲まれた内陸の低平地と一部生駒山脈の西側斜面で構成され、流域面積約270 km<sup>2</sup>の典型的な都市型流域である。降雨は中小の諸河川により集められ旧淀川に流れ込み大阪市中心部を貫流するため、放流量に大きな制約をもつ。

元来、この流域は淀川、大和川の氾濫地域であり、河口から約20 km上流の生駒山麓まで感潮区域である。このような条件のもとで、昭和30年代以降大都市近郊地域として急速に市街化が進み、流域の保水・遊水機能は著しく減少し浸水被害を多発している。この対策として昭和40年来の流域下水道整備計画とともに、現在第3次全体計画(昭和50年)のもとで、河川改修や治水緑地の建設が行われている。また、急速な市街化に対し下水道整備が立ち遅れ、家庭下水、工場排水が直接河川に流入するため河川水の汚濁も進んでいる。Fig.1とTable 1に研究対象とした寝屋川北部流域下水道排水区の詳細を示す。

## 3. 計画手法の概要

### (1) 雨水排除計画の設定

対象流域の水害防止を主目的とした雨水流出抑制対策として次の制御施設計画を行う。

「現状の雨水制御施設が5年確率計画降雨に対し設計されているものとし、10年確率計画降雨に対応し得るシステムへの改善を目的として、各排水区に新たな雨水制御施設を建設する。」

さらに、この問題に今後進行する都市化に対応して排水区単位で流出抑制対策を実施しつつ、流域全体としての治水安全度を高める方向で計画進行を管理することを、その内容として含める。そのため、この原問題を次の2段階に分けて計画策定を行う。

- ① 各排水区内での雨水制御施設の種類問題
  - 1) 既存降雨資料から計画降雨を作成する。
  - 2) 各排水区の水害流出モデルを作成する。
  - 3) 代替施設の制御効果を雨水流出モデルで表現し、施設容量を算出する。
  - 4) 3)の結果をもとに複数の評価基準に対する評価値を算出し、多基準分析法(MCA)を用いて各排水区の水害流出抑制施設の優位度を決定する。
- ② 全流域からみた制御施設設置の評価問題
  - 1) ①で求めた代替施設の優位度から各排水区で上位の代替施設を抽出し、流域全体での施設および設置排水区に関する代替案を作成する。
  - 2) 流域全体に対する施設効果を表わす評価基準を加え、MCAを用いて代替案の優位度を決定する。

評価のフローは、Fig.2に示すようにMCAを中心とする評価システムと、雨水流出モデルを中心とするサブシステムからなる。評価手順の詳細を以下に述べる。

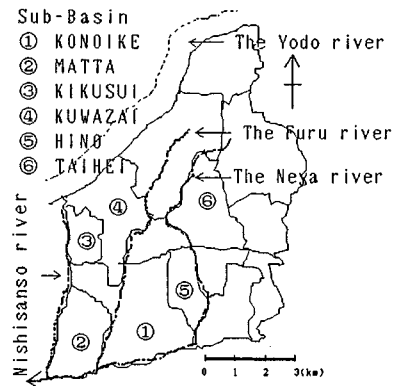


Fig.1 Study Area (North Neya River Basinwide Drainage System).

Table 1 Characteristic of Study Area (1987).

Name of Sub-Basin	KONOIKE	MATTA	KIKUSUI	KUWAZAI	HINO	TAIHEI
Area (ha)	1053.0	382.72	196.23	826.80	693.82	549.58
Main sewer Length(m)	3495.0	1704.0	2178.0	3817.0	3060.0	3330.0
slope (‰)	0.73	0.87	0.74	1.06	0.82	1.07
Impervious Area (%)	51.0	44.0	68.0	63.0	45.0	54.0
Runoff Coefficient	0.55	0.49	0.66	0.63	0.51	0.57
Population	92383	33577	17216	72537	60870	50848

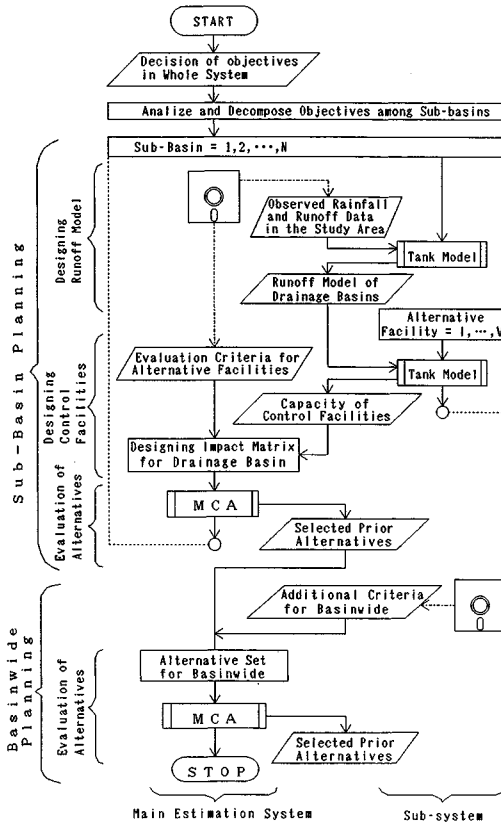


Fig. 2 Flowchart of the Proposed Scheme.

Table 2 Design Rainfall Intensity.

time (hr:min)	N = 5 Year		N = 10 Year	
	Intensity (mm/hr)	Cumulative rainfall (mm)	Intensity (mm/hr)	Cumulative rainfall (mm)
0:00	0.0	0.0	0.0	0.0
0:30	1.4	0.7	1.3	0.7
1:00	1.6	1.5	1.4	1.4
1:30	2.0	2.5	1.6	2.2
2:00	2.4	3.7	1.9	3.1
2:30	2.8	5.0	2.2	4.2
3:00	3.4	6.8	2.5	5.5
3:30	4.4	8.9	3.0	7.0
4:00	5.6	11.8	3.7	8.8
4:30	7.6	15.6	4.5	11.1
5:00	11.0	21.1	5.7	13.9
5:30	17.2	29.7	7.4	17.6
6:00	30.6	45.0	10.0	22.6
6:30	59.8	74.8	14.4	29.8
7:00	19.6	84.6	22.3	41.0
7:30	5.8	87.5	39.2	60.6
8:00	2.8	89.0	75.9	98.5
8:30	—	—	25.3	111.2
9:00	—	—	7.7	115.0
9:30	—	—	3.7	116.9
10:00	—	—	2.2	118.0

(2) 計画降雨の標準化

計画降雨は次の手順で作成した。

① 大阪管区気象台の昭和26~54年までの29年間に発生した年間最大の時間降雨量をもつ独立降雨の資料<sup>2)</sup>について統計確率的分析 (Hazen Plot<sup>3)</sup>) を行い、再現

確率5年および10年の時間最大降雨量、独立降雨量を求めた。

② 同じ資料を用いて時間最大降雨量、独立降雨量、降雨継続時間に対して行われた重回帰分析<sup>4)</sup>により得られた式(1)に①の結果を代入して再現確率5年および10年の降雨継続時間を求めた。

$$T_N = 4.208 + 0.149 \times R_N - 0.195 \times I_{\max N} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $T$ : 降雨継続時間 (時間)

$R$ : 独立降雨量 (mm)

$I_{\max}$ : 時間最大降雨量 (mm/h)

$N$ : 再現確率年数 (5, 10年)

③ タルボット型の降雨強度式を用いた特性係数法<sup>3)</sup>とハイエト・グラフ式から再現確率5年および10年の設計降雨の時間-降雨強度を算出した (Table 2).

(3) 雨水流出モデルの設計

対象流域の雨水流出現象を再現するとともに、貯留や浸透を主機能とする制御施設の効果を表現するため、タンク・モデル<sup>5)</sup>を使用した雨水流出のシミュレーションを行う。モデルの構造は Fig. 3 のように、流域を複数の流出孔をもついくつかのタンクとみなし、それぞれの流出孔からの流出量は貯留深に比例するとした。このモデルの特徴は、横から流出する孔は表面流出を、下方へ流出する孔は深層への浸透を表わすことにより現実の流出現象に対応させることができ、しかも流域の土地利用や制御施設の能力を表現することができる点にある。以下にモデルの基本式を示す。

$$q_{a_i} = \alpha_i (h - h_i) \cdot A \dots \dots \dots (2)$$

$$q_{b_j} = \beta_j \cdot h \cdot A \dots \dots \dots (3)$$

$$Q_a = \sum_i q_{a_i} \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 $q_{a_i}$ : タンク横孔からの流出量 ( $m^3/s$ )

$q_{b_j}$ : タンク下孔からの流出量 ( $m^3/s$ )

$A$ : 流域面積 ( $m^2$ )

$Q_a$ : 総表面流出量 ( $m^3/s$ )

$\alpha_i, \beta_j$ : 流出係数 ( $1/s$ )

$h$ : タンク内の水深 (m)

$h_i$ : タンク底から横孔までの高さ (m)

$i, j$ : 流出孔番号

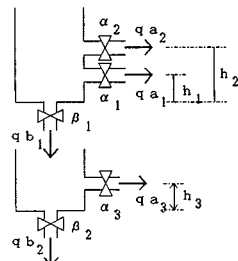


Fig. 3 Structure of Runoff Model.

各排水区にあるポンプ場の運転記録から降雨量と流入雨水量を求め、各排水区の流出モデルを作成した。排水区ごとに若干の差異はあるが対象流域の雨水流出は、①流出時間全体にわたる流出、②降雨のピークに対応して流出ピークを形成する流出、③降雨のピークに対して時間遅れをもち、降雨終了後の主要な流出からなると考えられる。そこで、それぞれの流出を表現する3つの横孔をもつ2段のタンク・モデル (Fig. 3) を採用した。モデルのパラメーターの決定は最大流出量の合致度と各計算時間ステップにおける計算値と観測値の誤差2乗平均を重視して行った。決定したパラメーターを Table 3、計算・検証結果の一例を Fig. 4 に示す。このモデルで計算される雨水流出量はポンプ場への流入量、つまり、各排水区での発生雨水量を表現している。

Table 3 のパラメーターの値は現状の排水区のもつ制御能力を表現していると考えられる。たとえば、鴻池排水区の  $h_1=1.0\text{ mm}$  という値は、ほぼ  $10\,000\text{ m}^3$  規模の貯留施設が存在する場合に相当し、後述する代替施設を設置した場合のモデル・パラメーターの変化幅ともオーダー的に一致している。この排水区は該当するような貯留施設を現実にもっているわけではなく、下水道の整備・未整備区域の混在やモザイク状の土地利用の影響を受けた複雑な水理学的性状に起因する流出抑制効果をもつと解釈できる。パラメーターのミクロな物理的意味を

十分説明することはできないが、モデルは現状の排水区全体の流出抑制機能を集約して表現していると考えられ、Table 3 の値をそのまま採用した。流出モデルについては評価システムとの関係を含めて最後にもう一度検討を加える。

(4) 制御施設代替案

雨水制御施設として次の5つをとりあげる。

- I. トンネル貯留施設、 II. 雨水滞水池
- III. 多目的貯留施設、 IV. 各戸貯留施設
- V. 浸透性舗装

これらの施設は、大規模な遊水池の設置や河道の大幅な拡幅が困難である都市域において、排水区域内で流出を抑制することを目的とした制御施設である。また、これらの施設は広範囲な土地利用変更をすることなく、既存のため池の有効利用や、公園・グラウンド等と併用したり、貯留水を雑排水として利用するといった多目的な側面をもつ。

タンク・モデルは流域の貯留・浸透効果をパラメーターで表現しているの、施設の制御効果をこのパラメーターと対応づけシミュレーションにより制御容量を求めた。施設的设计基準と対応するパラメーターを以下のように定める。

- I. トンネル貯留施設 (モデル・パラメーター： $\beta_1, h_3$ )

内径  $10\text{ m}$  の円筒管を排水区内の主要道路地下に埋設するものとして施設許容量を算出する。掘り込み式の敷設を仮定し土かぶりを  $20\text{ m}^6$  とする。トンネルへの雨水の流入・排水には既存のポンプ施設を利用し、新規のポンプ施設は建設しないものとする。

- II. 雨水滞水池 (モデル・パラメーター： $h_1, h_2$ )

寝屋川流域内で計画または設置されている47か所の貯留施設の資料<sup>7)</sup>および文献<sup>8)</sup>を参考にして、貯留容量  $10\,000\text{ m}^3$ 、表面積  $5\,000\text{ m}^2$ 、水深  $2\text{ m}$  の掘り込み式のコンクリート製の滞水池を標準とする。排水区内の公園・緑地部に設置するものとして、排水区内の施設可能容量を算出する。

- III. 多目的貯留施設 (モデル・パラメーター： $h_1, h_2$ )

雨水滞水池と同様に排水区内の学校、公園、緑地内に設置するものとして排水区内の施設可能容量を算出する。晴天時にはグラウンドなど貯留施設以外の利用ができ、雨天時には多段階の貯留深を設定した制御を行う。参考文献<sup>9)</sup>より貯留容量  $5\,000\text{ m}^3$ 、表面積  $10\,000\text{ m}^2$ 、水深  $0.5\text{ m}$  の施設を標準とする。

- IV. 各戸貯留施設 (モデル・パラメーター： $h_1, h_2$ )

一軒の独立住宅に  $1.5\text{ m}^3$  の貯留タンクを設置する。排水区内人口から排水区内独立戸数を算出し、これにより排水区内施設可能容量を算出する。立方体のコンク

Table 3 Parameters of Runoff Model.

Sub-Basin	Parameters of Tank Model								
	$h_1$ (m)	$\alpha_1$ (/sec)	$h_2$ (m)	$\alpha_2$ (/sec)	$\beta_1$ (/sec)	$h_3$ (m)	$\alpha_3$ (/sec)	$\beta_2$ (/sec)	
KONOHIE	0.0010	0.0300	0.0050	0.0100	0.0500	0.0015	0.0320	0.0220	
MATA	0.0003	0.0180	0.0040	0.0500	0.1200	0.0002	0.0130	0.0780	
KIKUSUI	0.0005	0.0500	0.0054	0.1500	0.0280	0.0002	0.0500	0.0600	
KIWAZAI	0.0001	0.0770	0.0046	0.0500	0.1800	0.0027	0.0650	0.0620	
HINO	0.0001	0.0100	0.0041	0.0052	0.0970	0.0045	0.0030	0.0200	
TAIHEI	0.0002	0.0220	0.0120	0.0450	0.0660	0.0011	0.0040	0.0320	

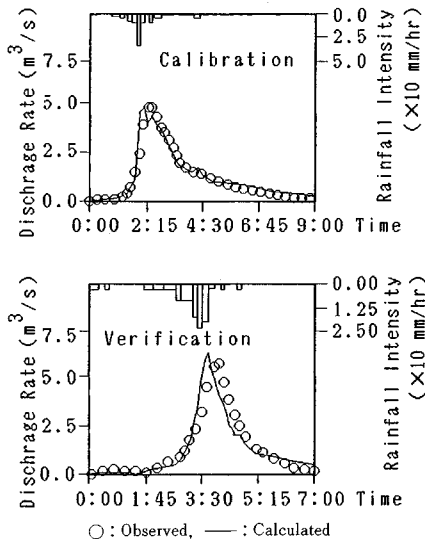


Fig. 4 Hydrograph of Model Simulation (Sub-Basin: KIKUSUI)

リート製タンクを設置する。

V. 浸透性舗装 (モデル・パラメーター:  $\beta_1, \beta_2$ )

歩道部のみの舗装を仮定し、道路率、歩道設置道路率をかけあわせた歩道面積率を1%<sup>8)</sup>として、排水区内浸透性舗装可能面積を算出し、これに、降雨流出時間、浸透速度  $1.4 \times 10^{-3}(\text{cm/s})$ <sup>8)</sup> をかけることにより各排水区の浸透可能量を求める。

制御容量は次の手順で決定した。

- 1) 5年および10年確率の計画降雨を入力として雨水流出シミュレーションを行い、発生する最大流出量(それぞれ、 $Q_p^{N=5}$ ,  $Q_p^{N=10}$ )を求める。 $Q_p^{N=5}$ は、現状の雨水排除システムで排除可能な最大雨水流出量を示し、10年確率の計画降雨による雨水流出量のうち  $Q_p^{N=5}$  を越える分は排水区内で内水浸水が発生させ、その総量が現状の雨水排除システムのもとの10年確率の湛水量となる。
- 2) 施設の制御効果を表現するパラメーターを等比率で変化させ、10年確率の計画降雨によって発生する最大流出量が5年確率計画降雨による最大流出量に等しくなるまで低減させる場合のハイドログラフを得る。このときのパラメーターの値は施設の貯留・浸透能力を排水区単位で合成したものに相当し、総流出量の減少分が制御容量に相当する。
- 3) 2) で求めた制御容量が各排水区の各施設ごとに設定した可能容量を越える場合は、総流出量が可能容量を越えない範囲で最大流出量を最も低減させるパラメーターの組合せを探索し、そのときのハイドログラフから施設の制御容量と制御効果を決定する。

Table 4 にシミュレーションによって求めた各排水区の最大流出量と各代替施設の制御容量とその諸元、施設設置時のモデル・パラメーターを、Fig. 5 に施設効果をモデル・シミュレーションによって表現した例を示す。

施設を設置した場合のモデル・パラメーターは、雨水滞水池等の貯留施設で数 mm、各戸貯留施設で1/10 mm、浸透施設では  $1 \times 10^{-3} \text{cm/s}$  のオーダーで変化する。これは、従来使われる流域の貯留深や浸透能とオーダー的に一致しており、この計算方法が妥当であると考えた。

また、従来、個別の施設で雨水制御を考える場合には、ハイドログラフのピーク部分のみのカットを想定した貯留容量の見積りを行うことが多い。しかし、排水区単位では施設の位置やその運転方法により、必ずしも排水区末端でのハイドログラフのピーク部分のみをカットするような制御効果をもたない。本研究ではモデルのパラメーターで排水区全体でもつべき貯留深や浸透能を表現することで、排水区単位の評価問題として取り扱う。

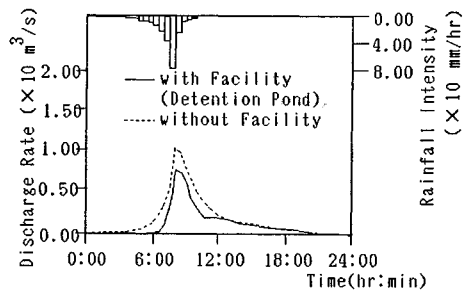


Fig. 5 Simulated Hydrograph with Regulation Facility (Sub-Basin: HINO).

Table 4 Capacity for Control Facility and Maximum Discharge with Its Implementation.

Sub-Basin		KONOIKE	MATTA	KIKUSUI	KUWAZAI	HINO	TAIHEI	
Peak Discharge (m <sup>3</sup> /sec)	N=5 year	39.05	16.80	20.74	57.11	8.06	22.87	
	N=10 year	50.56	21.66	26.48	73.51	10.45	29.77	
I Tunnel Reservoir	Control Volume (m <sup>3</sup> )		366,407	60,224	62,625	193,040	57,126	107,507
	Tunnel Length(m)		4,665	766	797	2,457	727	1,368
	Decided Parameter	$\beta_1$ (1/sec)	0.0972	0.2563	0.1881	0.5658	0.2095	0.1476
II Detention Pond	Control Volume (m <sup>3</sup> )		114,149	70,307	17,863	50,743	51,229	112,805
	Number of Ponds		12	8	2	6	6	12
	Decided Parameter	$h_1$ (m)	0.0162	0.0162	0.0050	0.0012	0.0156	0.0166
III Multi Objective Pond	Control Volume (m <sup>3</sup> )		114,149	70,307	17,863	50,743	51,229	112,805
	Number of Ponds		23	15	4	11	11	23
	Decided Parameter	$h_2$ (m)	0.0812	0.2002	0.0411	0.0556	0.0196	0.0305
IV Domestic Detention Tank	Control Volume (m <sup>3</sup> )		34,640	12,591	11,027	27,204	22,826	19,068
	Number of Tanks		23,094	8,395	7,352	18,137	15,218	12,713
	Decided Parameter	$h_1$ (m)	0.0036	0.0041	0.0010	0.0017	0.0047	0.0022
V Pervious Pavement	Control Volume (m <sup>3</sup> )		127,369	46,294	23,709	100,010	84,020	66,475
	Area of Pavement(m <sup>2</sup> )		105,298	38,272	19,600	82,680	69,382	54,956
	Decided Parameter	$\beta_1$ (1/sec)	0.0737	0.1756	0.0494	0.2543	0.2063	0.0962
	Parameter	$\beta_2$ (1/sec)	0.0324	0.1141	0.1140	0.0875	0.0425	0.0466

(5) 評価手法

雨水制御施設は都市基盤施設であり、多様な指標をもって評価すべきである。そこで本研究では多基準分析法 (MCA; Multi Criteria Analysis)<sup>10)</sup> を利用する。多基準分析法は Nijkamp によって開発された多目的計画の評価手法であり、その特徴は同一単位で見積ることができない競合する複数の評価基準をもって代替案の優劣を序列づけることにある。

本研究では、コンコダンス・ディスコダンス・マトリックス法を利用して代替案の優位度を求めた。この際重要な点は、この手法が最適解を求める手法ではなく優劣の序列づけを行うものであること、取り上げられる指標間に競合関係が成り立つものを選択すること、評価基準に与えるウェイトの設定による評価結果の変化に留意することである。MCA の手順を以下に示す<sup>10)</sup>。

① 代替案  $i$  ごとの各評価基準  $j$  に基づく評価値  $z_{ji}$  を算出し、インパクトマトリックス  $z$  を作成する。

$$z = \begin{bmatrix} z_{11} & \dots & z_{1i} \\ \vdots & & \vdots \\ z_{j1} & \dots & z_{ji} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (5)$$

② 各評価基準について、評価が高いほどその代替案が良好な場合 (式 (6)) と評価値が低いほど良好な場合 (式 (6)') について代替案の評価値が 1 (最良) から 0 (最悪) の範囲になるように標準化を行う。

$$r_{ji} = \frac{z_{ji}}{z_{j\max}} \dots \dots \dots (6)$$

$$\left(1 - \frac{z_{ji}}{z_{j\max}}\right) \dots \dots \dots (6)'$$

$$z_{j\max} = \max_i |z_{ji}| \dots \dots \dots (7)$$

③ 意思決定者による各評価基準  $j$  の重み  $w_j$  を設定する。

$$\sum_{j=1}^j w_j = 1 \dots \dots \dots (8)$$

④ 代替案  $i$  が  $i'$  より優れていると評価したすべての評価基準からコンコダンスセット  $C_{ii'}$  を構成する。

$$C_{ii'} = \{j | r_{ji} > r_{ji'}\} \dots \dots \dots (9)$$

これをもとに代替案  $i$  が  $i'$  より優れている度合を表わすインデックス  $c_{ii'}$  を計算する。

$$c_{ii'} = \sum_{j \in C_{ii'}} w_j \quad (i \neq i') \dots \dots \dots (10)$$

これに対し、代替案  $i$  が  $i'$  より劣っていると評価したすべての評価基準 (個数  $m_{ii'}$ ) からディスコダンスセット  $D_{ii'}$  を構成する。

$$D_{ii'} = \{j | r_{ji} < r_{ji'}\} \dots \dots \dots (11)$$

これをもとに代替案  $i$  が代替案  $i'$  より劣る度合を表わすインデックス  $d_{ii'}$  を計算する。

$$d_{ii'} = \frac{\sum_{j=1}^j |r_{ji} - r_{ji'}|}{\hat{d}_j^{\max}} / m \quad (i \neq i', j \in D_{ii'}) \dots \dots \dots (12)$$

$$m = \max_{(i, i')} m_{ii'} \dots \dots \dots (13)$$

$$\hat{d}_j^{\max} = \max_{(i, i')} |r_{ji} - r_{ji'}| \dots \dots \dots (14)$$

⑤ コンコダンスセットに基づいた代替案の絶対的な優位性を示すコンコダンスドミナント指標  $c_i$  と、ディスコダンスセットに基づいた代替案の絶対的な劣等性を示すディスコダンスドミナント指標  $d_i$  を作成する。

$$c_i = \sum_{i=1}^i c_{ii'} - \sum_{i'=1}^{i'} c_{i'i} \dots \dots \dots (15)$$

$$d_i = \sum_{i=1}^i d_{ii'} - \sum_{i'=1}^{i'} d_{i'i} \dots \dots \dots (16)$$

⑥ 式 (10)、式 (12) に示すように異なる定義に基づいて決定した優位性、劣等性を評価する両ドミナント指標による序列づけが一致したもものから順位を決定する。

⑦ 両ドミナントによる順位づけが一致していない場合には、両ドミナント指標の平均から優位度  $e$  を算出し、それによって代替案選択を行う。

$$e_i = (c_i - d_i) / 2 \dots \dots \dots (17)$$

(6) 評価指標

評価指標として次の 6 つの指標を取り上げ、代替施設の評価を行う。

① 施設建設費

施設建設費はモデル・シミュレーションで求めた施設制御容量をその施設的设计容量とみなし、3.(4) の設定のもとで次のような基本的な工法単価 (1986 年度建設物価) を用いて積算した。

- 1) 掘り込み費用：¥400/m<sup>3</sup>
- 2) 圧密工法費用：¥50/m<sup>2</sup>
- 3) 土砂処理費用：¥3 000/m<sup>3</sup>
- 4) コンクリート打ち費用：¥4 370/m<sup>3</sup>
- 5) 浸透性舗装費用：¥1 580/m<sup>2</sup>

② 施設維持費

貯留施設に関しては、単位容量当たりの維持費用として ¥200/m<sup>3</sup>・年<sup>9)</sup> を用い、浸透性舗装については、道路計画上の維持費<sup>11)</sup> をもとに単位面積当たりの維持費用を求めた。ただし、浸透能を維持するうえでは通常以上の管理が必要で、たとえば、ブラシ清掃の除去効率を 50% から 95% に高めるためには、清掃回数を 5 倍以上にしなければならない<sup>8)</sup>。このことを考慮して単位面積当たりの維持管理費を通常の 5 倍とした。

③ 治水レベル達成度

雨水制御効果を見積る評価基準として、10 年確率降雨を入力として施設設置時のシミュレーションを行う。現状の雨水排除システムで制御可能な  $Q_{N=5}$  になるまで最大流出量を低減させる効果を 100% とし、(4) で

設計した各施設の最大流出量低減効果を式(18)により表現した。

$$\text{治水レベル達成度} = \frac{Q_P^{N=10} - Q_{FP}^{N=10}}{Q_P^{N=10} - Q_P^{N=5}} \dots\dots\dots(18)$$

ここに、 $Q_P$ ：施設未設置時の最大流出量 (m<sup>3</sup>/s)

$Q_{FP}$ ：施設設置時の最大流出量 (m<sup>3</sup>/s)

④ 湛水危険度

現状の雨水排除システムの制御能力 ( $Q_P^{N=5}$ ) を上回る流出量は排水区内で浸水を引き起こす。この浸水量と浸水時間の積を湛水危険度とする。現状のシステムのもとで、10年確率の計画降雨によって発生する湛水危険度を100%として、施設設置時の湛水危険度を式(19)より求めた。

$$\text{湛水危険度} = \frac{\int_{t1'}^{t2'} \{Q_{FB}^{N=10} - Q_P^{N=5}\} dt}{\int_{t1}^{t2} \{Q_{FB}^{N=10} - Q_P^{N=5}\} dt} \dots\dots\dots(19)$$

ここに、 $Q(t)$ ：施設未設置時の雨水流出量 (m<sup>3</sup>/s)

$Q_P(t)$ ：施設設置時の雨水流出量 (m<sup>3</sup>/s)

$t1 \sim t2$ ：湛水継続時間 (s)

$t1' \sim t2'$ ：施設設置時の湛水継続時間 (s)

Fig. 6 に以上2つの制御効果を評価する指標の概念を模式的に示す。

⑤ 土地利用変更度

環境影響を評価する基準として土地利用変更度をとる。これは施設設置によって土地利用形態が変更された面積で表わす。トンネル貯留施設、浸透性舗装は土地利用変更なし、各戸貯留施設も住宅敷地内に小規模なタンクを設置するのでゼロとみなした。雨水滞水池、多目的貯留施設についてはその施設面積をもって表わす。

⑥ 多目的度

治水以外での利用可能性を評価する基準として多目的度を設定し、今回はカテゴリカルな値で与えた。多目的貯留施設に対して1.0、雨水滞水池、各戸貯留施設では貯留水の雑排水利用を考慮し0.5、トンネル貯留施設に

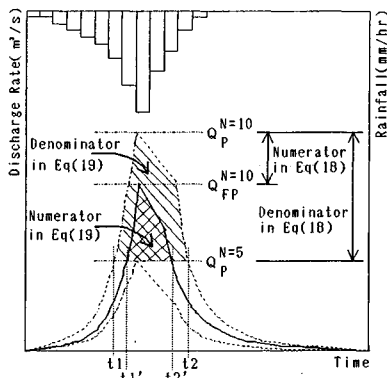


Fig. 6 The Criteria of Control Performance.

対しては貯留水の多目的利用は想定せず、浸透性舗装も浸透水の多目的な効用を考えず0.0を与えた。

4. 施設代替案の評価

(1) 各排水区における評価

Table 5 に各排水区で作成したインパクト・マトリクスを示す。各評価基準にかかる重みをすべて等しくした場合の6つの排水区での2つのドミナント指標と優位度の計算結果を Table 6 に示す。

各排水区での選択結果は、鴻池、菊水、桑才、氷野、太平が雨水滞水池、茨田がトンネル貯留施設となり、雨水滞水池が効用の高い施設であると評価されている。また優位度が2位となる施設は、鴻池、菊水、桑才が多目的貯留施設、茨田が雨水滞水池、氷野が浸透性舗装、太平がトンネル貯留施設である。氷野排水区での浸透性舗装の治水効果が高いのは、作成したモデルの流出成分構成が浸透性舗装でも十分期待した効果があげられる構造であったためである。このように全指標の重みが一定の場合には治水効果を見積る指標③、④の値の低い代替施設がまず排除され、他の指標で効用の高いものから順位づけが行われている。このことは指標③、④にかかる重みを2倍にしても、評価順位が変化しなかったことで確

Table 5 Impact Matrix of Alternative Facilities in Sub-Basins.

Criteria	Facility					
	I	II	III	IV	V	
KONOIKE	①	2195.71	617.29	1226.48	662.49	143.21
	②	742.58	231.34	231.34	38.77	350.80
	③	100.00	100.00	100.00	15.04	20.31
	④	0.00	0.00	0.00	77.63	69.00
	⑤	0.00	5.71	22.83	0.00	0.00
	⑥	0.00	0.50	1.00	0.50	0.00
MATTA	①	360.94	380.21	753.30	240.82	52.05
	②	122.06	142.49	142.49	25.52	127.50
	③	100.00	100.00	100.00	9.38	54.33
	④	0.00	0.00	0.00	82.01	18.50
	⑤	0.00	3.51	14.06	0.00	0.00
	⑥	0.00	0.50	1.00	0.50	0.00
KIKUSUI	①	375.31	96.73	192.06	210.90	26.66
	②	126.92	36.20	36.20	22.35	65.37
	③	100.00	100.00	100.00	3.70	23.01
	④	0.00	0.00	0.00	92.72	57.24
	⑤	0.00	0.87	3.50	0.00	0.00
	⑥	0.00	0.50	1.00	0.50	0.00
KUWAZAI	①	1156.81	244.60	545.36	520.29	112.45
	②	391.22	102.84	102.84	55.13	275.44
	③	100.00	100.00	100.00	5.53	36.42
	④	0.00	0.00	0.00	88.24	38.04
	⑤	0.00	2.54	10.15	0.00	0.00
	⑥	0.00	0.50	1.00	0.50	0.00
HINO	①	342.35	277.29	550.58	436.53	94.47
	②	115.77	103.82	103.82	46.26	234.14
	③	100.00	100.00	100.00	28.51	100.00
	④	0.00	0.00	0.00	58.21	0.00
	⑤	0.00	2.56	10.25	0.00	0.00
	⑥	0.00	0.50	1.00	0.50	0.00
TAIHEI	①	644.26	610.07	1212.11	364.69	74.74
	②	217.88	228.61	228.61	38.64	183.09
	③	100.00	100.00	100.00	7.97	44.58
	④	0.00	0.00	0.00	85.82	27.21
	⑤	0.00	5.64	22.56	0.00	0.00
	⑥	0.00	0.50	1.00	0.50	0.00

unit: ① ¥10<sup>6</sup>, ② ¥10<sup>6</sup>/Year, ③ %, ④ %, ⑤ ha, ⑥ non-dimension

Table 6 Concordance, Discordance, Composite Dominant of Alternative Facilities in Sub-Basins.

Sub-Basin Facility	KONOIKE					MATTA					KITUSUJ				
	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V
Concordance Dominant	-0.833	1.000	0.500	-0.167	-0.500	0.833	-0.333	-0.500	0.167	-0.167	-0.833	1.000	0.833	-0.500	-0.500
Discordance Dominant	0.730	-1.451	-0.768	0.421	1.068	-0.508	-0.589	0.715	0.331	0.051	0.863	-1.533	-0.878	0.899	0.649
Composite Dominant	-1.564	2.451	1.268	-0.588	-1.568	1.342	0.255	-1.215	-0.164	-0.218	-1.697	2.533	1.711	-1.399	-1.149

Sub-Basin Facility	KUWAZAI					HINO					TAIHEI				
	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V
Concordance Dominant	-0.833	1.000	0.500	-0.167	-0.500	-0.167	0.667	-0.167	-0.500	0.167	0.167	0.000	-0.500	0.167	0.167
Discordance Dominant	0.944	-1.533	-0.861	0.807	0.643	-0.449	-1.211	0.205	1.769	-0.314	-0.293	-0.665	0.634	0.225	0.100
Composite Dominant	-1.777	2.533	1.361	-0.974	-1.143	0.282	1.878	-0.371	-2.269	0.481	0.459	0.665	-1.134	-0.058	0.067

認できた。しかし、計画目標の確率年数を上げることで目標とする治水効果を達成できない代替案が多く現われた場合には、指標③、④にかかる重みづけにより各代替案の評価順位が変化することは容易に想像できる。計画目標の確率年数を変数として代替案を設計し、それぞれの排水区に適した確率年数を評価することも可能である。

施設設置条件から治水効果をそれほど高くできない各戸貯留施設の優位度は全排水区で低く評価された。一戸当たりの貯留容量を1.5 m<sup>3</sup>から3.0 m<sup>3</sup>とした場合の計算も行ったが、建設・維持費が高くなるのに対して治水効果は期待されるほど上ならず、どの排水区でも優位度は低いままであった。各戸貯留施設は今回取り上げた中では最後に選択すべき代替施設であるといえる。

ある1つの評価基準にかかる重みを他のすべての重みの2倍にした場合の計算を全排水区に対して行った。太平排水区での結果をTable 7に示す。ケース①~⑥がそれぞれ重みを2倍にした評価基準の番号と対応し、①はすべての重みを等しくした場合の結果である。維持費②、土地利用変更度⑤にかかる重みを2倍にした場合に優位度は大きく変化し、それぞれ各戸貯留施設、トンネル貯留施設が優位度最大となる。このような変化が全排水区で起きるわけではないが、重みを2倍にした指標について高い効用をもつ施設が逆転して優位度が上位になるように評価され、本システムが意思決定者の判断を反映した代替案評価を行える構造になっていることが確認できた。

(2) 流域全体における評価

(1)での評価をもとに、河道で結合され相互関連の深い鴻池、氷野、太平の3排水区を取り上げ、流域全体における代替施設設置計画の評価を行う。各排水区ごとの評価結果から優位度上位の2代替施設を取り上げ、計6つの代替案について多基準分析法を用いる。流域全体での治水効果を表現するものとして、各排水区での最大流出量減少量 (m<sup>3</sup>/s)、湛水量減少量 (m<sup>3</sup>) を評価指標として加えて評価を行った。本研究における制御・評価の対象は比較的平坦な都市域で発生する内水浸水であ

Table 7 MCA Evaluation due to Weights of Criteria (Sub-Basin : TAIHEI).

Weighted Case	Dominant of Facility	
	high←	→low
①	II, I, V, IV, III	
②	IV, I, V, II, III	
③	II, I, V, IV, III	
④	II, I, V, IV, III	
⑤	I, II, V, IV, III	
⑥	II, IV, I, V, III	

Table 8 Concordance, Discordance, Composite Dominant of Alternatives in Basinwide.

Sub-Basin Facility	KONOIKE		HINO		TAIHEI	
	II	III	II	V	II	I
Concordance Dominant	0.125	-0.125	0.250	-0.500	0.250	0.000
Discordance Dominant	-1.498	-0.316	-0.655	1.182	0.494	0.792
Composite Dominant	1.623	0.191	0.905	-1.682	-0.244	-0.792

り、ポンプ場で強制的に排除されない間は排水区内で滞留し続け、基本的には下流側へ流下する性質のものではない。また、現実の下水道等の排除システムにおいては、下水道幹線管渠や放流先の河道の流下能力に従って各排水区の排除能力は制約されており、下流側へ安全に流下できない量の雨水を排除することは不可能なように計画されている。このため、上流側の浸水が直接下流側での浸水危険度に寄与する構造になっているわけではない。しかし、下流側で余裕がある場合には、上流側での浸水危険度を減らすために制約値以上の雨水流送や放流が可能であるような状況を考慮し、一排水区で発生する最大流出量、湛水量を削減することは、他の排水区での浸水危険度を間接的に緩和する意味をもち得ると考えれば、流域全体の評価において各排水区での最大流出量・湛水量の削減量をもって流域全体の治水効果に寄与すると考えることにも妥当性がある。そのため、それぞれの排水区での最大流出量、湛水量の減少量が、流域全体あるいは下流端での浸水危険度の減少に貢献するものとして評価する。結果はTable 8に示すように、鴻池：雨水滞水池、氷野：雨水滞水池、鴻池：多目的貯留施設、太平：雨水滞水池、太平：トンネル貯留施設、氷野：浸透性舗装の



順になった。最大流出量、湛水量の減少量が最大の鴻池排水区の2代替案の優位度が高くなるが、これについて太平洋排水区よりも最大流出量、湛水量の減少量が低い水野排水区の雨水滞水池の優位度が高い。建設費、土地利用変更度の2指標による評価が他の代替案に比べ良好である氷野排水区の浸透性舗装の優位度が最低になり、流域全体に対する効用として新たに加えた2指標による序列づけが支配的な評価結果が得られた。

この評価結果から、流域全体の治水レベル目標を達成するために最も有効な排水区と代替施設を決定することができ、計画実行の優先順位や排水区相互間の役割分担を決定する一助となる。

## 5. まとめ

本研究では分散型の貯留施設を中心として、集中型の貯留施設であるトンネル貯留施設、制御形態の異なる浸透性舗装といった、今後都市域の雨水制御に広く利用されるであろう制御施設を対象に、各施設の優位度を流域ごとに多基準分析法を用いて評価し、その結果に基づいて全流域を対象とした施設代替案を設計し、その優位度を決定することにより、雨水制御施設の流域配分計画を行う手法について検討した。この手法により都市河川流域全体において、河川・下水道・雨水流出制御施設が浸水防止上果たすべき役割の分担が決定されれば、それに従って与えられた制御効果を達成するための制御施設の配分計画も実行できる。

多基準分析法を用いた評価手法により制御施設の多様な効用を見積ることが可能であるが、利用したモデル、指標の計算方法など、評価システムにおけるいくつかの課題が明らかになった。以下、それらをまとめることを通じて本研究の今後の発展性について論じる。

### (1) 評価指標に関する考察

まず、建設にかかわるコストとして用地費用を見積っていないことである。用地取得可能性については土地利用に基づいて施設設置の制約条件を設定し、土地利用変更度を評価基準として入れることで用地取得の困難さを見積っているともいえるが、より社会的な指標が望ましい。特に、雨水滞水池、多目的貯留施設の建設可能用地としてすべての学校、公園、緑地を対象としたので、全排水区で10年確率計画降雨に対する制御目標を達成している。このことが両代替施設の優位度を高くしている。しかし、実際に建設可能な用地は本文での仮定を下回り、また用地費用を見積っていないことで、道路地下に建設しほとんど施設用地を必要としないトンネル貯留施設と比較して建設費を低く見積っていることになる。

多様な効用を見積る目的で採用した多目的度という評価基準に関しても、十分な評価論理の構築ができず、カ

テゴリカルな数値を与えたことで優位度評価に影響を与えている。しかし、このような多目的な利用を考えることで現実の施設建設費の分担等、事業の推進が図られるのも事実である。施設用地費をいかに少なくするかによって大きな費用効果を生み出す代替施設となり得るのであり、その点では多目的な利用によって雨水制御目的の単独での事業費をいかに小さくするかが計画実施のポイントであることを示唆しているともいえる。今後より具体的な評価基準に発展させる必要がある。

流域全体での評価の際に、直接的には各排水区ごとの治水効果を示す最大流出量減少量と湛水量減少量を導入した。各排水区で地形的要因や人口・資産集中等の社会的要因により浸水被害の発生形態は多様であり、流域全体の視点で見れば同じ量の内水浸水がもつ浸水危険度に排水区ごとの強弱が存在する。これは評価するためには、湛水量から予測される浸水被害を各排水区ごとに求める一種の関数を設定する必要がある。全国規模のデータを用いて浸水深や浸水量から被害率を予測する関数型を求めることは可能である<sup>12)</sup>が、各排水区ごとにこれを求めるのに十分なデータは整備されていない。このため本研究では、流域全体での浸水危険度に対する各排水区ごとの強弱の設定は行わず、最も基本的な最大流出量および湛水量の減少量そのものを流域全体における各排水区の浸水危険度低減効果としての評価にとどめた。

### (2) 評価システムに関する考察

雨水流出モデルを利用した代替施設の治水効果・容量設計方法は排水区内で分散配置される施設については妥当であるといえる。集中型の制御施設については、従来、浸水防止の施設評価を行う場合はヒドログラフのピーク部分のみをカットする制御を想定して施設の最大効果を見積ることが多い。しかし、現実には全流出時間を見通したうえでのピーク部分のみを対象とした制御は困難であり、常に最大効果を期待するのは過大評価となる。そこで、本来集中型の制御施設であるトンネル貯留施設についても、3.(4)に述べた方法で制御効果を見積った。

本研究のねらいとして1.で述べた排水区のもつ特性そのものを評価する手法の可能性に大きく影響するのは、雨水流出を表現している物理モデルと評価システムとの論理的な因果関係である。本研究では、Fig.2に示したように排水区単位の施設の制御容量と制御効果という情報のみで両者は結びつけられている。この場合、評価結果に影響を与えるのは流出モデルで得られた施設容量と最大流出量削減の効果との関係である。施設設計の前段階で、各排水区で設置可能な最大容量までの数段階の施設容量を設定し、それに対する最大流出量削減効果を3.(4)で述べた方法で計算し、施設容量に対して最大流出量削減効果が単調に増加することを確認してい

る。無秩序にモデル・パラメーターを操作すれば、制御容量は小さくても制御効果の高い施設を設計する場合もあり得るが、特定のパラメーターを一定の割合で変更する今回の限定的なパラメーターの操作では、ハイドログラフ上の最大流出量の減衰と総流出量の減少は同時に進行し、評価を直接逆転させるような結果を導きにくい。むしろ、評価システム内での各評価基準値の算定方法や、MCAの重み係数の設定による影響の方が支配的である。

現段階では、流出モデルと評価システムとの論理的な因果関係が明確でないことは重大な問題とならないが、これを明らかにするには次の方法が挙げられる。

第1の方法は、流出モデルのパラメーターの変化に対するMCAの評価結果の感度を詳細に解析することである。この方法は、評価する施設と流出モデルとの関係を検討するうえで豊富な情報を提供するが、あくまで事例研究にとどまり発展性に乏しい。

第2の方法は、制御施設の代替案ごとに流出制御の効果を流出モデルで表現し、その最終効果のみを評価するのではなく、モデルのパラメーターそのものを評価対象とする中段階の評価システムを導入することである。本研究は後者の立場で行った。今後、さらに事例を積み上げることにより、このシステムを完成させれば、流出モデルと評価システムの論理的な因果関係を明確にすることができ、流域の特性に直接フィードバックをかけることのできる集中定数系のタンク・モデルの有用性が明らかになる。その時点では、流域内の土地利用計画そのものを雨水制御の視点で評価することも可能になる。

評価システム自身の問題点としては、MCAの評価基準にかかる重み係数の決定方法がある。今回の評価はすべての評価基準にかかる重みを均一にして行った結果であり、4.(1)で行ったような重み設定による優位度の変化を感度解析的に検討する必要がある。この評価方法が絶対的な評価ではなく、あくまで相対的な代替案の評価であるため、代替案の組合せで各基準の評価尺度に変

化が起こり評価結果が異なることが予想できる。評価システムの中にこのような感度解析的なステップを導入し、その結果を踏まえたうえで最終的な意思決定を行うことが重要である。たとえば、現実の意思決定過程をGaming Simulationなどの意思決定手法を用いてシミュレートし、評価基準の重みづけの論理を検証することのできるサブシステムを、Fig.2における評価システム部のMCAと結び付けることによって、より高度な意思決定システムへ発展させることが可能である。

なお、この研究は文部省科学研究費一般研究B(課題番号:60460167)の援助を受けて行った。

#### 参 考 文 献

- 1) Sueishi, T., Morioka, T. and Kido, Y. : Strategy of Real Time Control for Urban Storm Drainage System, 4th Intl. Conf. on Urban Storm Drainage, 1987.
- 2) 下水道技術改善対策研究会, 大阪府下水道研究会調査報告書, 昭和49~55年.
- 3) 岩井重久・石黒政儀:応用水文統計学, 森北出版, 1970.
- 4) 大阪府:寝屋川流域下水道計画調整調査, 昭和56年度調査報告書, 昭和57年.
- 5) 菅原正巳:水文学講座別巻, 続・流出解析法, 共立出版, 1979.
- 6) 大阪府土木部都市河川課:大阪の都市河川事業, 昭和59年版.
- 7) 大阪府:下水道技術改善対策研究会視察会配布資料, 昭和62年.
- 8) 社団法人日本下水道協会:合流式下水道越流水対策と暫定指針—1982年版—, 昭和57年.
- 9) 吉野文雄・本間久枝・吉川勝秀:総合治水対策としての雨水貯留施設の評価, 土木技術資料22-12, 1980.
- 10) Peter Nijkamp: Theory and Application of Environmental Economics, North-Holland Publishing Company, 1977.
- 11) 齊田 登・松浦義満:交通網計画案の評価方法に関する研究, 日本都市計画学会誌, 昭和50年.
- 12) 吉良竜夫編:水資源の保全—琵琶湖流域をめぐる諸問題一, 人文書院, 昭和65年.

(1989.1.27・受付)