

河川改修計画の策定手法に関する分析 An Evaluation Model for Stepwise River Improvement

(株)日水コン 正員 中 川 芳 一

(株)日水コン 正員 森 野 彰 夫

(株)日水コン 正員 徳 田 裕 平

1. はじめに

治水施設の規模決定に関する問題は つぎの2点に大きく分けてとらえることができる。

① 治水計画規模の決定とそれにとまなう施設規模の空間的配置問題

② 決定された計画規模に対する施設規模の段階的拡張問題

著者らは、このうち①の問題については、水文データの信頼度を不完全情報としたゲーム論的なアプローチにより、計画規模決定モデルの定式化を行ない、最適高水流量の評価を行なっている。本稿では、このように計画高水流量が定められたという条件の下で、②の問題すなわち施設の段階的整備方法について考察する。

具体的には、洪水防御の主要施設を上流域の洪水調節施設群と下流域の河道施設に分け、洪水調節施設の容量およびその建設年次が与えられた場合を対象に、複数の河川改修区間への投資配分方法を流域へのインパクトモデルを介したシミュレーション手法を通して分析することにした。これは、事業実施にとまなう治水安全度の向上といった観点に立ったとき、上流域の洪水調節施設の効果は下流域に対して全川一様に現われるのに比べ、下流域の河川改修の効果は改修区間毎にその効果が異なって現われると考えた。そして、この効果は上流域の河川改修にとまなうて生じる下流域への流量増といった流況の変化と同時に、流域内において発生する洪水被害に代表される一般資産、農作物資産等の社会経済指標の変化についても検討対象とした。特に後者については、計画を策定していく上では流域的資産の将来予測が必要であるという立場に立ったものであり、慣性力をもって変化する流域経済に対し、河川改修計画は流域内においてその調整効果を有するという観点から、各改修区間への投資配分方法を決定する際の評価要因とした。

2.では、まず、河川改修計画を段階的に実施していく上での評価の方法および考え方を提示する。そして、3.では、河川改修事業が流域環境に及ぼす種々の効果のうち、上流域の河川改修にとまなう河道内流下波形の変化ならびに河川改修地域の社会経済活動の変化を予測するためのモデル（以下、インパクトモデルと記す）について示す。ついで、4.では、このインパクトモデルを用い、将来20年間にわたるシミュレーションを行ない、3ヶ所の河川改修区間を対象とした最適投資配分結果を示す。

2. 段階的河川改修計画の評価方法

2-1 評価の考え方

河川改修を始めとする治水事業の実施により洪水氾濫が減少してくると流域における資産の蓄積と土地利用の高度化といった現象が現われる。このことは、治水事業が流域の経済を発展させ、その結果さらに治水安全度の向上を要求するという正のフィードバック関係にあると同時に、一旦洪水が発生したときの洪水被害の増加をもたらすため、相対的な安全度が低下するという負のフィードバック関係にあることをも示している。

また、上流域の河川改修は、従来遊水池等の機能を有していた区間に対しその調節効果を低減させるため洪水時における下流域の負担流量を増大させ、下流域の安全度を実質的に低下させる結果となる。この双方の結果が、資産密度の高い下流域における治水問題を顕在化させ、近年までの下流中心型の河川改修計画を推進してきた1つの理由といえる。

本稿では、以上の現状を踏まえ、つぎのような観点から段階的な河川改修計画のあり方を評価することとした。すなわち、河川改修事業は洪水氾濫を減少させるという保全効果を有するとともに、土地利用の高度化現象に代表される高度化効果を有していると考えられる。このため、河川改修事業を段階的に実施してい

く上では改修地域の特性に応じて、地域の社会経済活動に与える効果が異なって生ずると考えた。そして、この効果を把握するためのインパクトモデルを新たに、社会経済活動の変化予測モデルとして作成することとした。

河川改修計画の評価においては、事業投資による効果が図-1の形で現われると考えた。すなわち、各改修区間に対し投資の効果は、まず疎通能力の増加という形で現われ、その地域における洪水氾濫の実態を変化させる。具体的には、氾濫面積の減少、氾濫頻度の減少という形で現われることとした。そしてこの結果は対象地域における治水安全度の向上という形で土地利用の高度化現象を誘発する一方で、下流域に対しての洪水氾濫の実態を変化させることになる。

以上の観点から本稿では治水効果として、

- ① 氾濫面積 ② 氾濫頻度 ③ 氾濫被害

の3つの状態変化をとりあげ、公平性、効率性の2つの観点から段階的な河川改修計画案の評価を行なうこととした。

2-2 評価の方法

表-1に、公平性、効率性の2つの観点から分類・整理した評価基準の一覧を示す。評価基準の抽出に際しては、段階的な河川改修計画の評価の場面を図-2に示すように2つの側面から設定することとした。

- a. t期から(t+1)期に移行するときの状態の変化量(ΔD^t)
b. t期および(t+1)期における状態量(D^t, D^{t+1})

この状態量(D)については、上述の3つの状態量を対象として考える。

表-1 評価基準の一覧

評価の基準 指標	公平性	効率性
ΔD_i^t ($=D_i^t-D_i^{t+1}$) ~変化量	① 前期よりは状態が改善されること。 $D_i^t > D_i^{t+1}$ ①-1 任意の1つの区間 ①-2 前期最悪の区間 ①-3 全ての区間 ② 改善度合が各区間で等しいこと。 $\max(\frac{D_i^t-D_i^{t+1}}{D_i^t})-\min(\frac{D_j^t-D_j^{t+1}}{D_j^t}) \rightarrow \min$ ③ 投資効率が各区間で等しいこと。 $\max(\frac{D_i^t-D_i^{t+1}}{C_i^t})-\min(\frac{D_j^t-D_j^{t+1}}{C_j^t}) \rightarrow \min$	⑤ B/Cが1を超えること ($D_i^t-D_i^{t+1}$)/$C_i^t \geq 1$ ⑤-1 流域全体 ⑤-2 最悪の区間
D_i^{t+1} ($=D_i^t+\Delta D_i^t$) ~状態量	④ 地域間の較差が改善されること。 $\max_i D_i^t - \min_j D_j^t > \max_i D_i^{t+1} - \min_j D_j^{t+1}$	

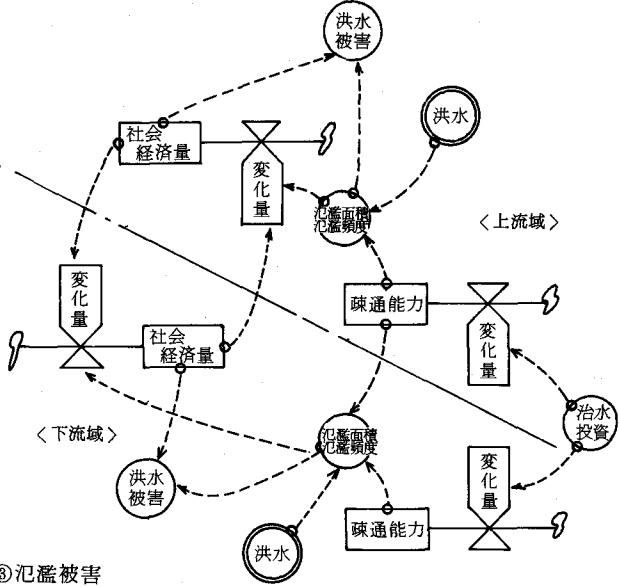


図-1 事業投資による効果

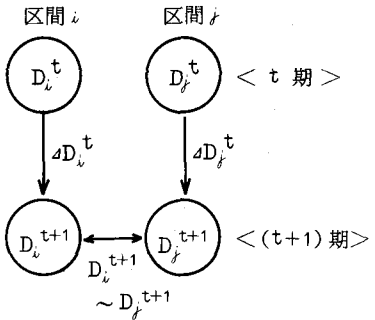


図-2 評価の側面

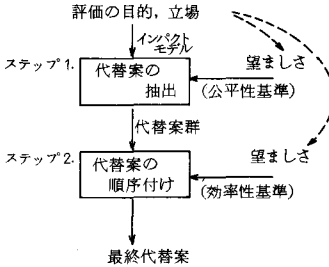


図-3 河川改修計画の評価手順

図-3に、本稿で設定した河川改修計画の評価手順を示す。この手順は、前掲表-1に示した各種評価基準のうち、まず公平性基準については、これを代替案抽出のための制約条件を考え、効率性基準により代替案の順序付けを行おうというものである。これは、室田らが指摘する、権利保全の原則（一時的にせよ洪水危険度が増大する区間があってはならない。表-1、①-3）、公平の原則（洪水生起頻度均一化の条件。表-1、④）を満足した上で、効率最大の原則を最終評価にもちこむという立場である。

段階的な河川改修計画の評価に際しては、この手順を2つのステップに分け、評価時点となる期毎について以下のように用いることとした。

Ⅰ) 各期においては、代替案の抽出を目的とする。(ステップ1)

このため、このとき用いる評価の基準は、公平性基準に着目し、権利保全の原則と公平の原則が満たされない代替案を棄却する。但し、全ての代替案が棄却される場合については、公平性基準のうち状態の変動量 (ΔD^t) にのみ着目した改善の傾向が認められる代替案もしくは既往最悪の状態よりは改善される代替案を残すこととする。

Ⅱ) 最終案の評価は、効率性基準にもとづいて行なう。(ステップ2)

そして、このときは、期毎について絞り込まれた代替案系列を対象に、計画完成に至るまでの累積投資効果を把握することにより、効率最大となる代替案系列を最終案として評価する。

3. 河川改修事業のインパクトモデル

本編では、河川改修事業の実施が流域に与えるインパクトをつぎの2つに分けて把握することとした。

(1) 河道内流況の変化予測モデル

(2) 流域内社会経済活動の変化予測モデル

(1)については、従来遊水池等の機能を有していた上流域の改修区間を整備することにより、洪水時における流量調節効果が低減し、下流域に対し洪水流量の増大を及ぼすという流量の連続条件に着目したインパクトモデルであり、(2)については河川改修事業の進捗にともなって土地利用が高度化していくという現象を把握するインパクトモデルである。以下、各モデルの内容について示す。

3-1. 河道内流況の変化予測モデル

河川改修事業は、上流域における改修が下流域の河道の洪水流量を増加させるという流量・被害等のトレード・オフの関係を生じせしめる。この関係をインパクトモデルとして作成するために、ここでは上林らが用いた流下率モデルの概念を用い、上流域における改修が下流域に与えるインパクトを氾濫面積、氾濫頻度の変化に着目して分析した。図-4に流下率モデルの概念図を示す。このモデルは、破堤点直上流の流量を Q_U 、破堤点直下流の流量を Q_L とすると実際の Q_L は図中の下側の実線となるが、これを破線で示すような流量に近似し、流下率 F_d を次のようにモデル化するものである。

$$F_d = \frac{Q_L - Q_D}{Q_U - Q_D} = \text{一定} \quad (1)$$

このモデルは代表的な洪水に対する氾濫解析の結果をもとに、この流下率を定め、他洪水についても適用するものであり、演算時間の短縮を目的とした近似法である。本稿でも、この方法を用い、上流域の改修規模 (Q_D^U) を種々設定したもとでの流下ハイドログラフの変化を推定し、図-5に示すように下流域の氾濫頻度の変化を下流域改修規模に応じて各々推定することとした。

また、氾濫面積の変化については、対象とする想定氾濫面積の上限値を、この改修計画が目標とする規模の下での値とし、計画完成時には0となるものとした。そして、この改修方式は計画高水位を一定とした掘削、拡張方式

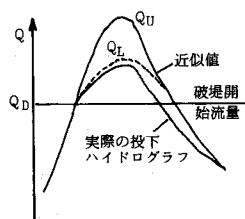


図-4 流下率モデル
注) 参考文献3)より転載

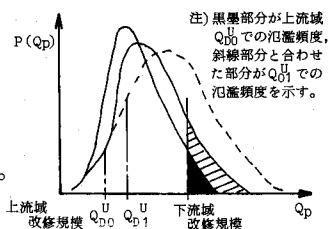


図-5 氾濫頻度の変化モデル

図-6 氾濫面積の変化モデル

—378—

4. 河川改修計画に関する段階的整備方法の分析

4-1 インパクトモデルの運用方法

本稿では、河川改修計画の段階的整備方針の設定に際し、改修事業の実施による流域内の自然的、社会経済的状態の変化を予測し、5ヶ年計画毎についてその評価を行ない、この結果をもとに次年度からの5ヶ年計画をさらに策定していくという立場をとった。このため、モデルの運用に際しては、まず評価の基本単位となる5ヶ年計画の代替案を複数案設定した。これは、流域全体での期間内改修投資額に対し、各改修区間への配分方法を複数案想定したものであり、各案に対しそのインパクトを把握した後、その期間内での望ましい計画案を抽出することとした。そしてこの後、この計画案下で出現する流域の状態を初期条件として、次期計画案評価のためのインパクトを把握するという手順を踏むこととした。

図-8にモデルの運用方法を示す。実流域への適用に際しては、対象とする改修区間を上・中・下流域の3区間に分け、評価対象とする期間を5ヶ年計画の4期分、20年間とした。そして、図中Tで示す各期(5ヶ年)を単位として、計画案(投資パターン)を評価することとし、改修実施にともなうインパクトは、1年を単位として5ヶ年($t=0\sim5$)

ずつにわたって把握した。

4-2 運用結果とその考察

表-2に分析に用いた、公平性、効率性を表わす4つの指標を示す。指標の選択に際しては、公平性、効率性の各観点から、自然的状態量、社会経済的状态量にかかわる指標を各々1指標用いることとした。

表-3に、昭和55年度の状態を初期状態とし、5ヶ年計画の1期分すなわち、昭和60年度における改修事業の効果の一覧を示す。この表は、左欄に示す21通りの設定した代替案(投資パターン)に対し、各案の効果を一覧表として示したものである。

河川改修計画案の評価は、5ヶ年計画内での投資順序は考慮せず、5ヶ年予算をどの改修区間に集中して投資するかについて検討することとした。このため設定した投資パターンの種類は、3区間への投資額配分比率の組合せ数となる。

(1) 代替案の抽出結果

表-3をもとに第1期での評価結果について、まず以下に示す。

期毎の評価においては、2-2で述べたように公平性基準にもとづいて代替案の絞り込みを行うこととし、前掲表-2に示した氾濫頻度と1人当りの被害額の推定結果をもとに、表-3○印で示す4つの代替案を抽出した。表中□印で示す指標が、下段の現況値(昭和55年度)と比較して改善されていることを示しており、全ての公平性指標について改善が認められる代替案を抽出した。但し、1人当りの被害額については、将来人口の増加を想定したため、改修区間毎の現況値との差異については評価対象から除いた。

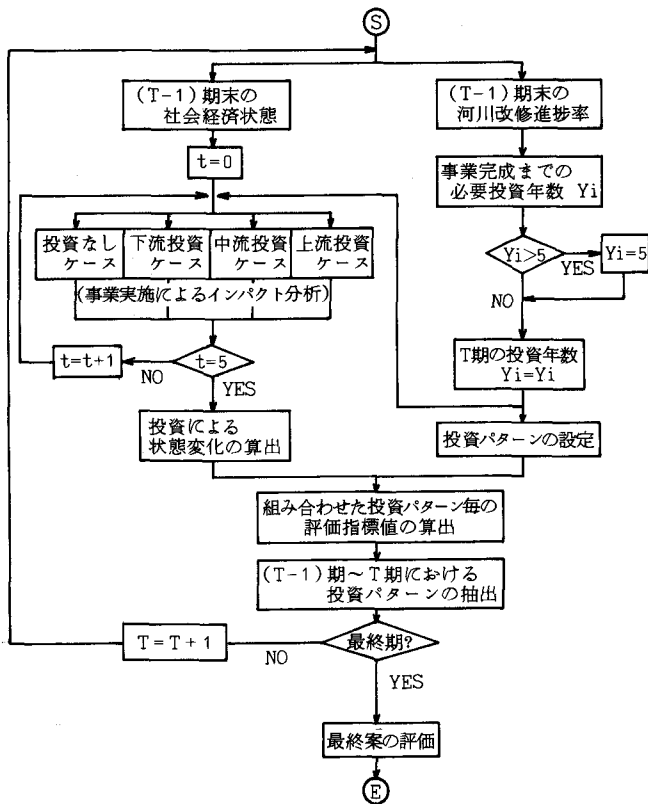


図-8 インパクトモデルの運用方法

表-2 評価指標の一覧

公平性指標		効率性指標	
a-1	氾濫頻度の較差 (KP)	b-1	氾濫面積の変化量 (ΔA)
	$KP = \max \int_{\hat{Q}_i^t}^{\infty} P_i(Q) dQ - \min \int_{\hat{Q}_j^t}^{\infty} P_j(Q) dQ$		$\Delta A_i = \int_{\hat{Q}_i^t}^{Q_i^*} A_i(Q) dQ - \int_{\hat{Q}_i^{t+1}}^{Q_i^*} A_i(Q) dQ$
a-2	1人当り被害額の較差 (DP)	b-2	被害額の変化量 (ΔD)
	$DP = \max \int_{\hat{Q}_i^t}^{Q_i^*} D_i(Q) F_i(Q) dQ / POP_i - \min \int_{\hat{Q}_j^t}^{Q_j^*} D_j(Q) F_j(Q) dQ / POP_j$		$\Delta D_i = \int_{\hat{Q}_i^t}^{Q_i^*} D_i(Q) dQ - \int_{\hat{Q}_i^{t+1}}^{Q_i^*} D_i(Q) dQ$
記号 $i(j)$: 改修地域, $P_i(Q)$: 地域 i の洪水生起確率分布, $\hat{Q}_i^t$: 地域 i における t 期の改修規模 $D_i(Q)$: 地域 i の流量規模別被害額, $A_i(Q)$: 地域 i の流量規模別氾濫面積 $F_i(Q)$: 地域 i の年最大流量生起確率分布, Q_i^* : 地域 i の計画高水流量, POP_i : 地域 i の人口			

表-3 投資効果の一覧 (第1期)

代 替 案	公平性指標値								効率性指標値							
	氾濫頻度 較差 (%)				1人当り被害額 較差				氾濫面積増加量				被害額減少量			
	上流域	中流域	下流域		上流域	中流域	下流域		上流域	中流域	下流域	合計	上流域	中流域	下流域	合計
①(0 0 5)	1.08	5.76	4.26	75.59	6.35	23.24	29.09	22.74	0.00	0.00	38.00	38.00	-1.18	-7.09	-4.54	-12.81
2(0 1 4)	1.08	6.24	4.13	76.91	6.35	22.54	29.42	23.07	0.00	8.20	29.50	37.70	-1.19	-6.14	-5.48	-12.82
3(0 2 3)	1.08	6.71	4.00	78.05	6.35	21.83	29.76	23.41	0.00	16.40	20.99	37.39	-1.20	-5.20	-6.42	-12.82
4(0 3 2)	1.08	7.19	3.88	79.03	6.35	21.13	30.09	23.74	0.00	24.60	12.49	37.09	-1.20	-4.25	-7.36	-12.81
5(0 4 1)	1.08	7.66	3.75	79.90	6.35	20.43	30.42	24.07	0.00	32.80	3.99	36.79	-1.21	-3.29	-8.29	-12.80
6(0 5 0)	1.08	8.14	3.62	80.66	6.35	19.72	30.76	24.41	0.00	41.00	-4.52	36.48	-1.22	-2.34	-9.22	-12.78
⑦(1 0 4)	1.11	5.76	4.22	73.01	5.73	23.24	29.39	23.66	15.80	0.00	30.40	46.20	-0.69	-7.10	-5.42	-13.20
⑧(1 1 3)	1.11	6.24	4.09	74.34	5.73	22.53	29.72	23.99	15.80	8.20	21.90	45.90	-0.69	-6.16	-6.35	-13.21
9(1 2 2)	1.11	6.71	3.96	75.48	5.73	21.83	30.06	24.32	15.80	16.40	13.39	45.59	-0.70	-5.21	-7.29	-13.20
10(1 3 0)	1.11	7.19	3.83	76.46	5.73	21.13	30.39	24.66	15.80	24.60	4.89	45.29	-0.71	-4.26	-8.22	-13.19
11(1 4 1)	1.11	7.66	3.71	77.33	5.73	20.43	30.72	24.99	15.80	32.80	-3.61	44.99	-0.71	-3.31	-9.16	-13.18
⑫(2 0 3)	1.14	5.76	4.18	70.58	5.11	23.24	29.69	24.58	31.60	0.00	22.80	54.40	-0.19	-7.12	-6.29	-13.59
13(2 1 2)	1.14	6.24	4.05	71.90	5.11	22.53	30.02	24.91	31.60	8.20	14.30	54.10	-0.19	-6.17	-7.22	-13.59
14(2 2 1)	1.14	6.71	3.92	73.04	5.11	21.83	30.35	25.24	31.60	16.40	5.79	53.79	-0.20	-5.23	-8.16	-13.58
15(2 3 0)	1.14	7.19	3.79	74.03	5.11	21.13	30.69	25.58	31.60	24.60	-2.71	53.49	-0.21	-4.28	-9.09	-13.57
16(3 0 2)	1.17	5.76	4.13	68.27	4.49	23.24	29.98	25.50	47.40	0.00	15.20	62.60	0.31	-7.13	-7.15	-13.98
17(3 1 1)	1.17	6.24	4.01	69.60	4.49	22.53	30.32	25.83	47.40	8.20	6.70	62.30	0.31	-6.19	-8.09	-13.97
18(3 2 0)	1.17	6.71	3.88	70.74	4.49	21.83	30.65	26.16	47.40	16.40	-1.81	61.99	0.30	-5.24	-9.02	-13.96
19(4 0 1)	1.20	5.76	4.09	66.09	3.87	23.24	30.28	26.42	63.20	0.00	7.60	70.80	0.81	-7.15	-8.02	-14.36
20(4 1 0)	1.20	6.24	3.96	67.41	3.87	22.53	30.62	26.75	63.20	8.20	-0.90	70.50	0.81	-6.20	-8.96	-14.35
21(5 0 0)	1.23	5.76	4.05	64.01	3.25	23.24	30.58	27.33	79.00	0.00	0.00	79.00	1.32	-7.16	-8.89	-14.74

〔現況〕 1.08 5.76 4.05 75.59 24.78

(1/1) F

(億円/年・人)

(億円/年)

注) 代替案(a,b,c)は、上流、中流、下流域への投資額配分比率を表わす。

以降、第2期についてはこの4案の下での流域状態を各々初期状態とし、 $21 \times 4 = 84$ 通りの投資効果がインパクトモデルを運用することにより得られる。そして、ここでの評価結果をもとに第3期以降の評価を同様な手順ですすめ、第4期(20年間)まで通して選択された代替案(投資系列)を表-4に示す。

表-4 代替案の抽出結果

期	1 期	2 期	3 期	4 期
投資系列	S.60	S.65	S.70	S.75
投資系列 I	(2,0,3)	(0,3,2)	(0,1,4)	(0,0,5)
投資系列 II	(2,0,3)	(0,3,2)	(0,0,5)	(0,0,5)
投資系列 III	(2,0,3)	(1,0,4)	(0,1,4)	(0,1,4)
投資系列 IV	(2,0,3)	(1,0,4)	(0,0,5)	(0,1,4)

(2) 代替案の順序付け結果

最終代替案の評価は、期毎に絞り込まれた代替案の系列、すなわち前掲表-4に示す4案を対象として、効率性基準の観点から行なうこととした。効率性を表す指標として抽出した氾濫面積の変化量、年平均想定被害額の変化量の2つの指標を用い、4つの代替案についてその累積投資効果を示したのが図-9(1)(2)である。各指標の望ましき(効率最大)については、図-9(1)に示す氾濫面積の減少量は大きい方が望ましく、一方、図-9(2)に示す年平均想定被害額の増加量は少ない方が望ましい。この両者の観点から最終案を順序付けるとⅢ案が最も望ましいことが

わかる。なお、同図に示す評価結果においては、Ⅲ案が氾濫面積、年平均想定被害額の両指標共優位な結果となったが、この両指標の結果がトレード・オフの関係を示すような場合については、氾濫の抑制といった河川改修事業の本来の目的を考え、氾濫面積の変化に着目して代替案を評価し、被害額については流域の被害耐性の強化等流域内の被害抑制施策の側面からの対策実施と合わせて評価することが望ましいと考える。

5. おわりに

河川改修を始めとした治水事業の

整備は、流域環境にさまざまな効果を及ぼす。本稿では、この効果について上流域における改修事業が下流域の河道の洪水流量を増加させるという流量・被害のトレード・オフ関係ならびに進捗率の向上による氾濫の減少が土地利用の高度化を出現させ、洪水被害を増大させるというフィードバック関係に着目した。そして、これらを改修実施にともなうインパクトとして評価した上での望ましい河川改修計画の策定方法について、その方法論を提示した。施設の段階的整備問題に関しては、数理計画手法を採用した最適化問題としてのアプローチが数多く行なわれている。しかしながら、河川改修計画の段階的整備方法を評価する際には、本稿でも取り扱ったように事業実施にともなう流域資産の蓄積状態の変化あるいは河川施設固有の現象である下流域への流況変化の伝播といった複雑な効果を考慮することが必要であり、数学モデルの適用に際しては、大胆なモデル化を行なわざるを得ない。本稿では、この点に関しては、インパクトモデルとしてシミュレーション手法により適宜、その効果を把握した。そして、計画案の評価においては、期毎に行なう評価と最終年度に一括して評価する2つのプロセスを用いるという、シミュレーションの結果を有効に利用した方法論の提示ができたと考える。

残された今後の課題を以下に示す。

- ① 氾濫面積、氾濫頻度の減少による地価上昇を通じた土地利用変化の分析。
- ② 土地利用の変化を考慮した上での将来被害率に対するシナリオ分析。
- ③ 洪水生起の実態をダイナミックに取らえ、時系列としての洪水生起状態を考慮した計画案の分析。

最後に、本稿の遂行にあたり、論文作成の機会を与えて頂いた、(株)日水コン 萩原良巳氏に深甚な謝意を表します。また、同 渡辺晴彦氏には研究の動機付けを受け、多大な協力を頂いた。ここに感謝します。

〔参考文献〕

- 1) 中川・飯塚・梅本; 治水計画規模の決定に関するゲーム論的研究, 第23回水理講演会論文集, pp.241~246, 1979.
- 2) 室田・江藤; 投資配分問題としての河川段階改修計画, 第27回水理講演会論文集, pp.487~484, 1983.
- 3) 上林・島田・涌井; 河川改修の段階的施工について, 河川, 426号, pp.51~60, 1982.

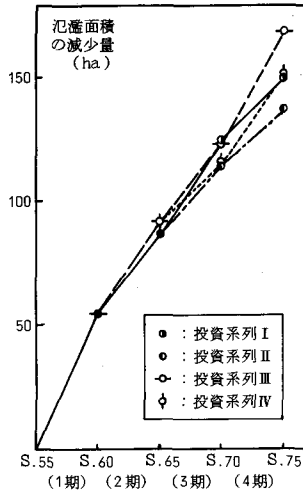


図-9(1) 代替案毎の累積投資効果 (氾濫面積)

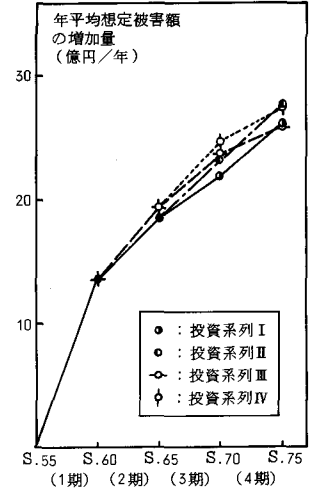


図-9(2) 代替案毎の累積投資効果 (年平均想定被害額)