

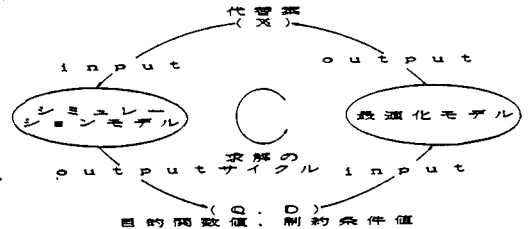
都市化流域をかかえる河川に対する治水施設整備計画に関するシステム論的研究

京都大学工学部 正 員 春 名 攻 京都大学工学部 学生員 ○野崎 一郎
 京都大学大学院 学生員 田井中 靖久

1. はじめに 都市化流域では、山林・水田の減少や市街地の増加等といった流域内における都市化が進行した結果、「降雨－流出－氾濫－被害」という一連の洪水被害現象の発生メカニズムがさまざまな悪影響を受けるという状況になっている。また、流域の都市化の進行に応じて進められるべき治水施設の整備が流域の都市化の進行に対応しきれず、都市化の進行による流域の変化に対して立ち遅れている現状である。一方、このような状況に対し、従来の治水施設整備計画では、1つの基本高水すなわち1つの計画降雨のみを用いて計画代替案を設計し、そのことが原因となって他の降雨に対して防災水準（治水安全度）を保つことができない状況に陥ることも多かった。このため、現在の都市化流域では、このような問題に起因して起る水害の多発化・深刻化が都市防災上大きな問題となっており、早急な防災水準（治水安全度）の向上の方策の確立が強く求められている。

そこで本研究では、従来継続的に行なってきた研究をさらに進展させて、都市化流域における流域全体及び氾濫域の都市化や、降雨の多様性に適切に対応した、有効な治水施設整備計画を策定する方法として計画検討と意志決定のプロセスを提案することにし、それらを猪名川流域の治水施設整備計画問題に適用し、その有効性を検証した。また、調整池の整備方法に関しても検討を行ない、それらに関しても猪名川流域を対象にして実証的検討を行なった。従って以下の2～4において降雨の多様性等を考慮した治水施設整備計画問題に関する検討内容に関して述べ、5において調整池に関する検討内容に関して述べることにする。

2. ハイブリッド型数理計画モデルの概要 治水施設整備計画問題を解く、すなわち計画代替案を合理的・効率的に設計していく中心的ツールとして、「降雨－流出－氾濫－被害」という一連の洪水被害現象を再現するシミュレーションモデルと、治水施設整備の計画目的を追求するための最適化モデルを混成したハイブリッド型数理計画モデルを開発し、そのモデル構成は、図-1に示すようになっている。



そして、本モデルで用いるシミュレーションモデル 図-1 ハイブリッド型数理計画モデルの概要は、従来の研究に基づいて洪水被害現象を適合した精度で表現できるように構成するとともに、本モデルの最適化モデルで用いる最適化手法は、従来の研究に基づいて探索型手法の中からコンプレックス法を用いることにした。また本モデルは、評価指標である目的関数値や制約条件値を、シミュレーションモデルの出力結果としてしか求めることができないため、関数形が明らかでなく非線形問題にも対応できる方法を取る必要があり、数理計画で数学モデルとして表わされる一般の非線形問題以上に困難な問題であると考えられる。従って、計画代替案の設計の際には、シミュレーションモデルの出力結果の動向を的確に把握し、最適解に出来るだけ効率的に接近していく方法を用いることが必要である。しかも、実証的検討で取上げるシミュレーションモデルは小規模なものではないので、シミュレーションモデルへのアクセス回数を減少することが、探索の効率化を図るためには重要であり、計画代替案の設計方法を工夫することが必要である。このため、本モデルの運用方法に関して検討を行なったが、紙面の関係上この内容に関しては発表時に述べる。

3. 治水施設整備計画策定で用いる検討プロセスの概要 都市化流域の社会・経済的な状況の把握や洪水被害現象の分析を多方面から検討を行なっていかなければ、その地域にとって真に望ましい計画代替案を設計していくことは困難であると考え、合理的・効率的に治水施設整備計画の策定していく方法として、図-2

Mamoru HARUNA, Yasuhisa TAINAKA, Ichirou NOZAKI

に示すような検討プロセスを提案することにする。

さてそのプロセスは、4つのステップより構成されているが、本稿ではその詳細に関しては参考文献に譲るとして、ステップ2、4の内容を簡単に述べる。まずステップ2では、ステップ1の結果から詳しい検討が必要と考えられる降雨の多様性に関して、検討を行なうことにした。すなわち対象流域の実績降雨の中から検討対象降雨群を抽出し、その降雨群に対してパターン分類を行ない、そのパターンの中から検討対象降雨を選定する。そして、その降雨群に対してシミュレーション実験を行なうことで計画対象降雨群を選定し、その降雨群に対してシミュレーション実験を行ない代表計画降雨を選定するとともに、多様性検討降雨を作成することにする。次にステップ4では、治水施設整備計画の計画代替案の設計方針を設定し、その方針にしたがって土地利用ケースごとの計画代替案を設計する。

さらに、その計画代替案に対する計画対象降雨群によるシミュレーション実験を行ない、その結果を用いて、降雨の多様性を考慮したことによる治水安全度の向上に関する検討を行なうことにする。さらに、土地利用状況の変化による計画代替案の変化を検討することにする。そして最後にそれらを計画情報として取りまとめることにする。

4. 実証的検討 本研究では、大阪府と兵庫県境を流れる淀川の一支出である猪名川流域を対象として先に述べたプロセスにしたがって実証的検討を行なった。まずステップ1では、既存の資料やデータ等を用いて現況分析的検討を行ない、分析で用いるシミュレーションモデルを検討対象流域である猪名川流域に合わせた形で構築することにし、治水施設整備計画を策定するに当たり検討が必要となる課題の抽出を行なった。さらに、その課題を踏まえた上で、治水施設整備計画を策定していく上での治水施設の想定を行ない、都市化や降雨の変化及び治水施設の規模などの要因が洪水被害現象に与える影響の把握を行なった。その結果、都市河川流域では流域全体の都市化が流域の流出機構を変化させ、氾濫域の都市化がダメージポテンシャルの増大をもたらしている一方、降雨の多様性により洪水被害現象が全般的な影響を受けることがわかった。

- STEP 1 分析方針決定のための検討
- 1-1 対象流域の地理的特性の理解
 - 1) 自然的条件
 - 2) 社会・経済的条件
 - 3) 物理的施設条件
 - 4) 既存の計画
 - 1-2 洪水被害現象を再現するシミュレーションモデルの構築
 - 1) シミュレーションモデルの定式化
 - 2) シミュレーションモデルのキャリブレーション
 - 1-3 治水施設整備計画策定上の検討課題の抽出
 - 1-4 検討対象とする治水施設の選定
 - 1) 治水施設の想定及び影響効果分析
 - 2) 検討対象とする治水施設の選定
 - 1-5 治水施設・降雨の多様性・流域全体及び氾濫域の都市化による影響効果分析
 - 1) 要因の割り付け及びシミュレーション実験
 - 2) 分散分析を用いた影響効果分析

- STEP 2 降雨の多様性に関する検討
- 2-1 検討対象降雨群に関する検討
 - 2-2 検討対象降雨群のパターン分類
 - 1) 検討対象降雨群の空間的・時間的分類方法に関する検討
 - 2) 検討対象降雨群のパターン分類
 - 3) 検討対象降雨群に関する検討
 - 2-3 検討対象とする代表降雨群に関する影響分析
 - 1) シミュレーション実験及び影響分析
 - 2) 計画代替案設計のための計画対象降雨群に関する検討
 - 2-4 分析降雨に関する検討
 - 1) 代表計画降雨に関する検討
 - 2) 多様性検討降雨に関する検討

- STEP 3 流域の都市化に関する検討
- 3-1 流域全体における都市化に関する検討
 - 1) 氾濫域に関する検討
 - 2) 氾濫域の都市化による影響分析
 - 3-2 流域全体の土地利用の設定に関する検討
 - 1) 流域全体の土地利用のシナリオの設定
 - 2) 流域全体の土地利用案の作成
 - 3-3 氾濫域における都市化に関する検討
 - 1) 対象地区の選定及び地区内の都市化特性の把握
 - 2) 対象地区内の土地利用に関する検討
 - 3-4 氾濫域の土地利用ケースの設定に関する検討
 - 1) 氾濫域の土地利用ケースのシナリオの設定
 - 2) 氾濫域の土地利用ケースの作成

- STEP 4 計画代替案の設計と計画情報の作成
- 4-1 治水施設整備計画代替案の設計方針の設定
 - 1) 計画代替案設計方針の設定
 - 2) 計画内容の評価に用いる評価項目・評価尺度に関する検討
 - 4-2 計画代替案の設計
 - 1) 計画モデルの定式化
 - 2) 計画代替案の設計
 - 4-3 計画対象降雨群による計画代替案に対する影響分析
 - 4-4 土地利用ケースの違いによる計画代替案の変化に関する検討
 - 4-5 計画情報の取りまとめ

治水施設整備計画策定に用いる検討プロセス

表-1 検討対象降雨の現況に対するシミュレーション実験結果

(単位: 百万円/年) (単位: m ³)									
降雨日時	多田地区の 降雨量	川口・淀川 間の降雨量	支川地区の降雨量の割合			分岐点の 降雨量	計画代替 案	計画代替 案	
			支川	淀川	淀川				
28年 9月24日	59.11	104.36	19	9	0	16.22	3-2	○	
32年 6月26日	31.99	78.76	16.95	4.94	90	21.47	2-2	○	
34年 8月12日	7.40	3.59	24	11	0	10.61	11-1	○	
34年 9月26日	76.01	199.45	31	15	0	17.19	3-1	○	
35年 8月29日	21.67	17.45	0	1	0	11.62	9-1	○	
40年 5月26日	5.95	10.58	73	50	0	14.52	10-3	○	
40年 9月16日	8.86	17.10	111.6	270	31	16.12	4-2	○	
40年 9月17日	48.97	93.16	147	100	1	16.97	1-1	△	
41年 9月17日	26.61	46.37	107	33	0	16.54	11-3	○	
42年 7月 8日	11.19	30.50	101.2	179	15	19.10	2-3	○	
43年 7月15日	17.56	31.47	114.3	177	36	19.51	4-3	×	
43年 8月28日	77.25	238.29	9	8	0	19.15	5-1	△	
46年 5月26日	1.01	4.2	4	32	0	10.31	8-1	×	
46年 9月 5日	20.95	28.60	39.5	127	5	17.54	7-2	○	
47年 7月11日	24.43	37.72	72	18	0	15.21	11-2	○	
47年 9月16日	51.88	134.58	152	96	1	19.03	9-2	○	
49年 4月 7日	7.54	7.88	13	7	0	12.82	10-2	△	
49年 8月25日	24.09	37.97	159	356	51	18.55	8-2	×	
50年 8月 6日	29.1	155.1	111.2	36.5	46	17.41	2-1	△	
50年 9月22日	13.44	20.03	44.56	236.4	88.8	23.13	6-1	×	
51年10月 8日	7.06	9.29	22.35	994	254	12.83	10-1	×	
53年 9月15日	42.24	154.18	136.9	582	65	27.03	7-1	×	
54年 9月30日	75.43	197.63	141.3	296	62	22.96	4-2	×	
58年 4月18日	7.24	11.48	50.5	142	6	11.99	4-1	×	
58年 9月14日	49.33	86.21	74	36	0	16.42	11-3	○	

(注: 支川・淀川・200年に引き伸ばした場合は引き伸ばし倍率について、CKは1.5倍以内、△は1.0倍以内、×は1.0倍以上である)

次に治水施設整備 表-2 氾濫域の土地利用ケースの作成

計画の策定の際には、流域全体及び氾濫域の都市化、降雨の多様性を十分考慮する必要があるため、ステップ2で降雨の多様性に関する検討を行ない、ステップ3で流域の都市化に関する検討を行なった。その結果、まず降雨の多様性に関しては、対象流域の実績降雨の中から総降雨雨量等を参考にして検討

ケース	氾濫域	都市化の進展状況
1	多田地区	メッシュ番号5・7・8・14・17・20においては現況のままであり、その他のメッシュにおいては年率5.0%で都市化が進展する
	川西・池田地区	年率5.0%で都市化が進展する
	支川地区	年率5.0%で都市化が進展する
2	多田地区	メッシュ番号5・7・8・14・17・20においては年率2.5%で都市化が進展し、その他のメッシュにおいては年率5%で都市化が進展する
	川西・池田地区	年率5.0%で都市化が進展する
	支川地区	年率5.0%で都市化が進展する
3	多田地区	年率5.0%で都市化が進展する
	川西・池田地区	年率5.0%で都市化が進展する
	支川地区	年率5.0%で都市化が進展する
4	多田地区	メッシュ番号5・7・8・14・17・20においては都市化が10.0%であり、その他のメッシュにおいては年率5%で都市化が進展する
	川西・池田地区	年率5.0%で都市化が進展する
	支川地区	年率5.0%で都市化が進展する

対象降雨を抽出し、その降雨を対象にして降雨のパターン分類を行ない、その降雨パターンごとにこの降雨パターンを代表しうる降雨を検討代表降雨として選定した。そしてその降雨群を用いてシミュレーション実験を行ない、その結果を表-1に示した。そして以降の検討においては、降雨の引き伸ばしを行なうために、引き伸ばし倍率が2.5倍以内の13降雨を以降の検討で用いる計画対象降雨とすることにした。そしてその降雨群を用いて、降雨の多様性に関して降雨の多様性を一つの降雨で代表させる代表計画降雨を選定するとともに、多様な降雨に対して同時に治水防災水準の向上が検討できるような合成・総合化した計画降雨として多様性検討降雨を作成した。次に流域全体および氾濫域の都市化に関しては、土地利用状況の推定方法に関する検討を行ない、その一部を表-2に示した。そして計画年次である昭和75年度の土地利用状況の予測を作成した。

最後にステップ4では、ハイブリッド型数値計画モデルを用いて、最も望ましいと考えられる治水施設整備計画の計画代替案を設計した。まず、計画代替案を設計していくための設計方針の設定を行なうとともに、計画内容の評価に用いる評価項目・評価尺度に関して検討を行なった。次に、治水施設整備計画の計画代替案を設計する計画モデルの定式化(図-3)を行なった後に、代表計画降雨及び多様性検討降雨を用いて各土地利用状況ごとの計画代替案を設計した。さらに、検討された計画代替案群を用いて、降雨の多様性が治水施設整備計画代替案に与える影響を明らかにするとともに、降雨の多様性と治水施設整備への投資額との関係に関しても検討を行なった(表-3)。またその計画代替案を用いて、都市化の進行為治水施設整備計画の計画代替案に与える影響を明らかにして、都市化の進行為治水施設整備への投資額との関係に関しての検討を行なった(表-4)。その結果、降雨・都市化の多様性を考慮して、最も望ましい治水施設整備計画の計画代替案を

目的関数	$\text{MAX} \{D(f_{i-1}(C))\} \longrightarrow \text{min}$ $I \subset \Omega \quad \Omega = (\text{地域 } I \text{ の集合})$
制約条件	- 治水安全確保のための制約 $D(f_{i-1}(C)) \leq D(f_{i-1}(C_0))$ - 下流の氾濫防止のための制約 $Q(f_{i-1}(C)) \leq W$ - 経費用制約 $\sum_{i=1}^n C_i = C$ - 治水施設規模の制約 $C_i \leq C_{i0} \leq C_{i1}$ D_i : 地域 i の被害額の期待値 Q, W : 分派地点ピーク流量及び疎通能 f_i : 治水施設設の規模による費用関数 C : 総費用 C_i, C_{i0}, C_{i1} : 治水施設 i の投資額及びその上下限 C : 治水施設への投資額の組合せ C_0 : 現況の治水施設への投資額の組合せ
注)	D, Q はシミュレーションモデルよりの出力値

図-3 計画モデルの定式化

表-3 各降雨に対するシミュレーション実験結果(300億円)

土地利用ケース3		(単位: 百万円/年) (単位: m ³)				
降雨日付	降雨の規模	多田地区の被害額の期待値	川西・池田地区の被害額の期待値	支川地区の被害額の期待値	分派地点の流量	分派地点の流量
28年 9月24日	ケース1	37	0	13	8	0 2108
	ケース2	126	0	1	2	0 2070
32年 6月26日	ケース1	140	284	1728	546	92 2871
	ケース2	380	680	1119	318	28 2785
34年 8月12日	ケース1	0	0	15	9	0 1211
	ケース2	0	0	1	2	0 1211
34年 9月26日	ケース1	361	35	21	11	0 2248
	ケース2	465	205	2	7	0 2110
35年 8月29日	ケース1	0	0	0	1	0 1475
	ケース2	0	0	0	1	0 1475
40年 5月26日	ケース1	0	0	68	42	0 1835
	ケース2	0	0	10	11	0 1835
40年 9月16日	ケース1	0	0	1147	325	34 2128
	ケース2	12	0	618	218	9 2080
41年 7月17日	ケース1	0	0	83	20	0 2260
	ケース2	11	0	12	10	0 2196
42年 7月8日	ケース1	0	0	863	190	11 2560
	ケース2	44	36	244	134	1 2436
46年 9月5日	ケース1	0	0	264	138	3 2275
	ケース2	7	0	108	93	0 2275
47年 7月11日	ケース1	5	0	61	19	0 2063
	ケース2	37	0	8	8	0 2012
47年 9月16日	ケース1	247	246	145	101	0 2588
	ケース2	429	612	67	49	0 2492
50年 7月14日	ケース1	7	0	60	24	0 2142
	ケース2	80	0	8	10	0 2078

(注: ケース1は代表計画降雨の場合、ケース2は多様性検討降雨の場合)

設計することができた。

5. 調整池に関する実証的検討 猪名川流域を対象として調整池の整備計画を策定するとともに、実証的検討を行なった。

最初に、現況分析的検討を行なったが、対象流域の大規模宅地開発状況に関する検討、流出現象を再現するシミュレーションモデルを用いた分析、等々のさまざまな分析を行なった結果、大規模宅地開発による流出時間の短縮化や、流出量の増大が生じたことが実証されたと考えた。

次に、計画化に関する検討を行なった。まず検討対象となる貯留施設として、大規模宅地開発地域において調整池を取り上げた。次に、貯留量規模の想定を行なう際に、大規模宅地開発地域においては、開発を行なう場合と行なわない場合の流出量を用いて、開発を行なう場合の流出量のピーク時間までの流出量を取り上げることとした。すなわち、ここでは、開発を行なう場合と行なわない場合との単位時間ごとの流出量の差の合計を、開発による大規模化を想定する上で基準となる貯留量として捉えた。そして、大規模化する場合の貯留量規模として、この基準となる貯留量を 120%と 150%増大させる場合の2パターンを想定した。

最後に、計画代替案の設計と計画情報の作成を行なった。まず、大規模宅地開発地域における調整池の整備計画を効果的・効率的に策定するための計画モデルの定式化を行なった。そこで、調整池の整備費用を評価尺度とする最小化計画法として本計画問題を規定した。次に、想定した貯留量規模に基づいて、定式化された計画モデルを用いて、各大規模宅地開発地域ごとに調整池の整備計画を策定した後に、調整池整備による流域全体の治水安全度への影響分析を行なった。そこで想定した貯留量規模の組合せに基づいて調整池を整備した場合と、大規模化による整備費用の増大分を、ダム・遊水池・河道改修等の治水施設に投資して整備した場合の両者の場合に関して、ハイブリッド型数理計画モデルを用いて流域全体の治水安全度の向上の程度に対する比較・検討を行なった。この結果を表一五、表一六に示す。これらの結果より、調整池を大規模化して整備した方が治水安全度の向上に効果があると判断した。

6. おわりに 猪名川流域に対して行なった実証分析を通して、都市化・降雨の多様性を考慮した、有効な治水施設整備案を設計することができることが明らかにされたので、本研究で提案した検討プロセスは、治水施設整備計画を策定していく上で有効な方法であると判断した。また、大規模宅地開発地域における調整池の整備計画も合理的・効率的に策定されたと判断した。

しかし、降雨の多様性を考慮した降雨を作成する際には、本研究で提案した方法以外にもさまざまな方法が考えられる。それらとの比較検討を行なうことによって、降雨の多様性を考慮した降雨を作成する方法をさらに進展させていくこと他、検討していくべき課題は多く残されていると考えられるので、今後も本研究の延長として分析的研究を継続していくことが必要であると考ええる。

参考文献 田井中靖久：都市化・降雨の多様性を考慮した治水施設整備計画方法に関するシステム論的研究、昭和63年 2月、京都大学修士論文

表一四 土地利用ケースによる最適化計画代替案（多様性検討降雨）

(単位: 100万円)										(単位: 100万円/年) (単位: m³/s)				
3000部門	部名	多田地区水	多田地区	川西・池田地区	支川地区	治水費用	各地区の治水費用期待値							
							多田地区	川西・池田地区	支川地区		流量			
土地利用ケース1	1754.74 (1048.26)	0.00 (0.00)	7706.00 (1175.31)	11775.00 (1775.89)	7744.35 (1.49)	30000.00	759.71	327.39	365.84	2558.95				
土地利用ケース2	1754.74 (1048.26)	0.00 (0.00)	7706.00 (1175.84)	11775.00 (1775.89)	7547.35 (1.46)	30000.00	383.79	305.89	381.67	2548.99				
土地利用ケース3	1754.74 (1048.26)	0.00 (0.00)	9992.00 (1235.64)	11211.00 (1242.95)	7425.25 (1.43)	30000.00	464.71	135.28	404.88	2572.28				
土地利用ケース4	1754.74 (1048.26)	0.00 (0.00)	9194.00 (1242.56)	11211.00 (1242.95)	7286.35 (1.20)	30000.00	451.22	135.57	451.87	2577.44				

(注: ()は治水費用削減率を示す。部名DAMは、支川地区のDAMを、多田地区水は、支川地区の水を、多田、川西・池田地区は上流域の水を、支川地区は、上流域の水を、支川地区の水を、

(注：()は調整費用であり、単位はDAMでは流出量 (m³/s) を、多田地区では貯留容量 (m³) を、多田・川西・池田地区では流出量 (m³/s) を、支川地区では流出量 (m³/s) を示している。)

表一五 流域の治水安全度（調整池、大規模宅地開発）

大規模宅地開発地域において想定された貯留量規模	各地区の被害額の期待値(100万円/年)			流量 (m³)
	多田地区	川西・池田地区	支川地区	
120%	429.50	315.08	283.65	2597.25
150%	422.28	307.65	283.65	2579.22

表一六 流域の治水安全度（治水施設、大規模宅地開発）

大規模宅地開発地域において想定された貯留量規模	治水施設への投資費用(億円)	各地区の被害額の期待値(100万円/年)			流量 (m³)
		多田地区	川西・池田地区	支川地区	
120%	300.37	432.14	321.29	283.65	2599.98
150%	300.76	430.58	320.77	283.65	2599.96