

ハイブリッド型治水計画モデルによる代替案の設計方法に関する検討

京都大学工学部 正 員 吉川 和広

京都大学工学部 正 員 春名 攻

京都大学大学院 学生員○多々納裕一

1. はじめに 近年の水理水文学や河川工学の発展と共にシステム・シミュレーション技法の進歩により洪水被害現象のメカニズムの再現性は高められてきている。しかし、治水計画問題の分析に持ちこむ際に、「いかにしてその情報の精度を落さずに合理的にかつ効率的に計画代替案を設計するか」という問題に関しては多くの検討課題が残されてきている。本研究は計画論的立場から、治水施設の配置・規模決定問題に対してシミュレーションモデルを組み込んだハイブリッド型の数理計画モデルの開発を試みたものである。すなわち、治水計画モデルをハイブリッド型計画モデルとして定式化し、これを用いた計画代替案の設計方法を提案し、実証的な検討を行ったものである。

2. ハイブリッド型治水計画モデルの概要

一般にモデルを用いて計画代替案を設計する際には、現象合理性、目的合理性および操作性という三つ要件が満足されている事が必要である。モデルを用いて計画代替案を設計する方法としては、従来は①シミュレーションモデルを活用する方法、②数理計画モデルによる方法、のいずれかがとられてきた。①の方法は、事前に想定した代替案に対してシミュレーション実験を行い、この結果に基づ

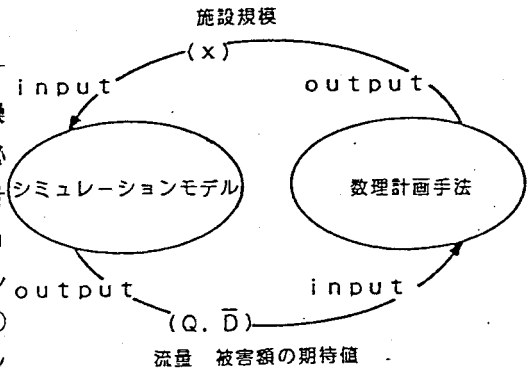


図-1 ハイブリッド型の治水計画モデルの構成

いて各代替案を比較・検討してその内で最も望ましい代替案を選択するという方法である。この方法は現象合理性には優れるが目的合理性を追及しにくい方法である。②の方法は現象を近似化・単純化して計画モデルに組込んで定式化し、数理計画モデルによって規範的に計画代替案を設計する方法であり、目的合理的で操作性は高いが現象合理性を保つことは難しい。そこでこれらの手法を混成（ハイブリッド化）し、両者の利点を同時に持つような計画モデルを作成することができれば上述の三つの要件は満たされる事となる。図-1にこのようなハイブリッド型計画モデルの基本的構成を示した。本研究では治水施設の配置・規模決定問題に対して検討を行ったが、この際のこのモデルの動作を示すと以下のようである。すなわち、各治水施設の規模をシミュレーションモデルに入力して、流量や被害額の期待値等を目的関数値・制約関数値として数理計画モデルに入力し、これに基づいて目的関数値を改善するような解（治水施設の規模）を探索解として求める。そしてこれを再びシミュレーションモデルに入力して実験を行う。このような過程を繰返すことに

Kazuhiro YOSHIKAWA, Mamoru HARUNA, Hirokazu TATANO

よって最適解を導出し、最も望ましい計画代替案を設計しようとするものである。

3. シミュレーションモデルの定式化

ハイブリッド型計画モデルに組込むシミュレーションモデルの満たすべき要件としては、①現象合理性という側面から計画目的に適合した精度で洪水被害現象を再現できること、②多数回の実験を行うことから比較的計算時間の短いモデルであること、の2点が要求される。そこで本研究では①の条件を満たすためにa)斜面上の流れの非線形性が表現できること、b)河道の洪水伝播機能が表現できること、c)土地利用形態の差異による流出

の違いを表現できること、d)氾濫現象が表現できること、e)発生する被害状況を捕らえること、f)種々の治水対策案がモデルに組込めること等を挙げて個別のサブモデルに関して検討を加えた。そして要件①②を総合的に勘案して図-2に示すようなシミュレーションモデルを構成した。このモデルの一連の動作を示すと以下のようなものである。まず、降雨確率・降雨波形を入力情報として確率降雨モデルによりハイトグラフを求める。次いで、有効降雨モデルではこれを入力情報として中安式損失雨量曲線を用いて損失雨量を求め、これを降雨量から差引いて有効降雨を求める。流出モデルではこれを入力情報としてKinematic Wave法によって各地点の流出ハイドログラフを求める。そして、氾濫モデルではこのハイドログラフをもとにして横越流公式によって氾濫流量を求め、2次元不定流計算で求められた結果より算出した氾濫流量と湛水深の関係に従って各メッシュ毎の湛水深を算出する。被害モデルでは、氾濫モデルで求められた湛水深と、都市化シナリオより与えられる土地利用データをもとにして得られたメッシュ内の資産額とを入力情報として、治水経済調査要綱による被害率を適用して被害額を求める。このようにして求めた被害額と降雨確率により被害額の期待値を算出するのである。ここで流域の都市化は有効降雨モデル・流出モデル・氾濫モデルに反映され、治水施設の規模の変化は流出モデル・氾濫モデルで取扱っている。このモデル

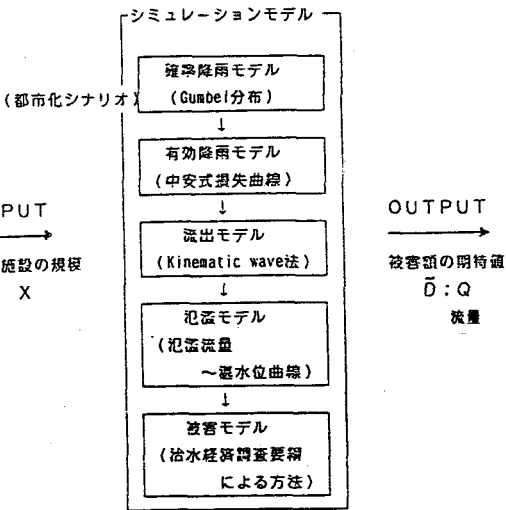


図-2 シミュレーションモデルの構成

表-1 ハイブリッド型計画モデルに用いた最適化手法

は全体として精度の高いモデルであるとは断言できないが、データの精度や数値計画手法の探索の精度を勘案すると十分適用可能であると判断された。

4. 数値計画手法に関する検討

ハイブリッド型計画モデルで

	手法1 (コンプレックス法)	手法2 (Box-Wilson法と許容方向法)
制約にかからない 場合の動作	鏡映・伸長・収縮・縮小	最急勾配探索
制約にかかった 場合の動作	陽的制約 制約の内側へリセット 陰的制約 許容域に入るまで 重心方向に収縮	線形制約 勾配射影探索 非線形制約 実行可能方向探索

最適解探索のために用いる手法に求められる要件を整理すると以下のようなものである。①シミュレーションモデルを組込むことから目的関数や制約関数の関数形の未知な問題に対応できること、②できるだけシミュレーションアクセス回数が少ないこと、③制約条件付きの問題に対応できること。本研究では以上の3条件を満たすモデルとして表-1に示す二つの手法を用いることとした。非線形最適化手法を大別すると直接探索法と傾斜探索法に分けられるが、条件①より導関数の導出を必要とする傾斜探索法は原則的に用いることができない。しかし、何らかの工夫を行うことによって勾配を求めることができれば適用可能となる。手法①は直接探索法であり制約条件付の問題に適用できるコンプレックス法を用いていることから条件①③を満たし、かつ新しい改善点を求めるのに1回～数回のシミュレーション実験を行うだけで良いことから、条件②をも満足し十分ハイブリッド型計画モデルに用い得るものと判断した。また手法②は基本的動作は傾斜探索法であるが、Box-Wilson法により実験計画法を用いて勾配を求めることができる。また、制約に対しては許容方向法によって対応している。ここで、一般に傾斜探索法は直接探索法に比べて探索は効率的であることから、手法②も1回当たりの計算量は多いものの全体的に見ると比較的効率の良い手法となっているものと考えられる。従って、手法②も条件①～③を満たしハイブリッド型計画モデルに適用可能であると判断した。

5. 実証的検討 本研究では大阪府と兵庫県境を流れる猪名川の流域を対象として治水施設の配置規模決定問題に対して実証的検討を行った。まず、計画モデルを表-2に示すように定式化した。すなわち、目的関数を流域全体の被害額の最小化とし、制約条件を流量・総費用・各治水施設の上下限の3種の制約条件とした。ここで、流量の制約とは、想定した河道改修地点が中・上流域に位置し、その規模の増大に伴って下流域の安全性が損われるおそれがあるため下流域の浸水防止という意図で設定した。このようにハイブリッド型計画モデルを定式化し、最適化手法を組込んで

表-2 計画モデルの定式化

目的関数	$\bar{D}(x) \rightarrow \min$
制約条件	$Q(x) \leq w$ $\sum_{i=1}^5 f_i(x) \leq c$ $x_i = \frac{x_i^*}{1000} (\bar{x}_i - x_i) + x_i$ $0.0 \leq x_i^* \leq 1000.0 \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5)$
$\bar{D}$: 流域全体の被害額の期待値	
f_i : 各施設の建設工事の費用関数	
c : 費用の上限値	
Q : 分派地点の流量	
w : 分派地点の流量上限	
x_1 : 猪名川ダムの上流水量	
x_2 : 多田治水地の治水容量	
x_3 : 多田地区の治水容量	
x_4 : 川西・池田地区の治水容量	
x_5 : 支川流域の治水容量の拡大率	
$\bar{x}_i, x_i$: 各治水施設の規模の上限値、下限値	
x_i^* : 各治水施設の規模の正規変量	
(数値計画モデル内部における変数変換)	
注) $\bar{D}, Q$ はシミュレーションモデルよりの出力	

解空間の概略的な認識
1. 実験計画法によるシミュレーション実験
2. 分散分析による効果の有無の判定
3. 解空間の概略の把握
① 二次元グラフ化
② 等高線プロット
↓
ハイブリッド型の治水計画モデルによる 計画代替案の設計
1. 初期点決定
2. モデルの運用
3. 代替案の妥当性の検討

図-3 計画代替案設計のプロセス

実際に計画代替案の設計を行った。

しかし、このモデルを問題の最初から直接適用して計画代替案を設計することは、求まった解の全域的最適性の保証がないことや解に精度上の問題が残ること、探索が非効率になりやすいこと等の問題を生じやすい。そこで本研究では図-3に示すようにハイブリッド型計画モデルを適用する前に「解空間の概略的な認識」という段階を設けてこれらの問題に対処しようとした。すなわち解空間や目的関数の概形を把握し、最適解のおおまかな位置を押えておくことでモデル運用のための初期点に関する情報や求まった解の信頼性の検討のための情報を得ようとするものである。以下、このプロセスに従って行った分析の結果の一部を示す。表-3は、 $H_{3,81}$ 直交配列表を用いてシミュレーション実験を行った後、分散分析を実施した結果である。これより、多田改修と川西・池田改修の効果が効果全体の大部分を占めていることがわかる。そこで追加実験を行って図-4に示すような等高線図等を得た。これらの結果より最適解の概略的位置を推測し探索の初期点の

表-3 治水施設の影響・効果（被害額の期待値）

施設全体	S	V	F	NS	ρ
A	4.303E 7	2.151E 7	2.461E 1	4.128E 7	0.41
B	2.851E 7	1.426E 7	1.631E 1	2.676E 7	0.27
C	1.043E 8	5.216E 7	5.968E 1	1.026E 8	1.03
D	8.916E 9	4.458E 9	5.100E 3	8.914E 9	89.52
E	2.035E 7	1.017E 7	1.164E 1	1.860E 7	0.18
A・B	1.555E 4	3.888E 3	4.448E-3	—	—
A・C	2.966E 5	7.415E 4	8.484E-2	—	—
B・C	1.710E 7	4.276E 6	4.892E 0	1.360E 7	0.14
A・D	1.241E 7	3.103E 6	3.550E 0	8.914E 6	0.09
B・D	5.149E 7	1.287E 7	1.473E 1	4.799E 7	0.48
C・D	7.239E 8	1.810E 8	2.070E 2	7.204E 8	7.23
誤差	4.021E 7	8.741E 5	1.000E 0	6.400E 7	0.64
$F^2(1.0)=3.20, F^2(0.5)=5.10, F^4(1.0)=2.57, F^4(0.5)=3.76$					
46 46 46 46					

A：猪名川ダム、B：多田治水地、C：多田改修、D：川西・池田改修、E：支川改修
S：変動 V：分散 $F=S/(V \cdot df)$ NS：純変動
 ρ ：寄与率

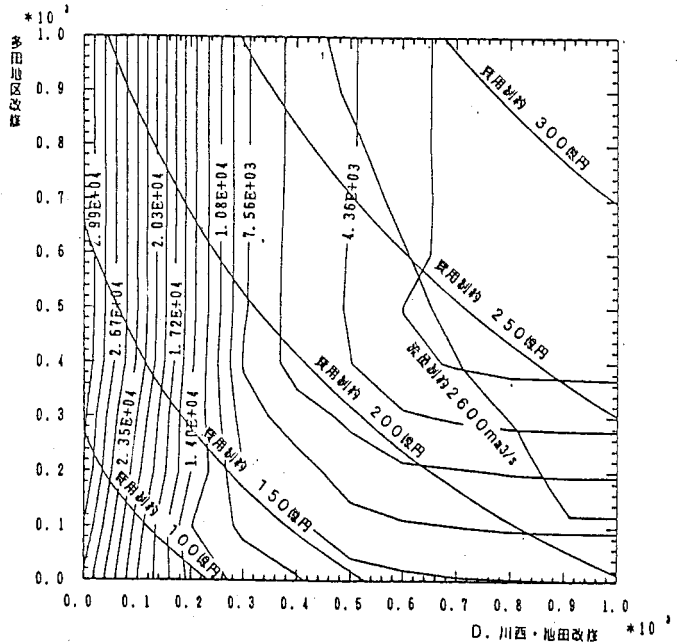


図-4 被害額の期待値と治水施設規模の関係

情報等を得た。そして、それらを有効に用いて計画代替案を設計したのである。検討の詳細に関しては講演時に述べることにするが、この検討によりモデルに用いる最適化手法やモデル運用のための手順について有効な情報を得ることができた。

6. おわりに 本研究ではハイブリッド型計画モデルを用いた計画代替案の設計方法を提案し実証的検討を加えた。この検討によって本方法による代替案設計の有効性を示すことができたと考える。今後はモデルの各部やモデル運用のための実用的な手順についてより詳細な検討を加え、計画問題の分析に用いる方法論と共に充実したものとしていきたい。