

シミュレーションモデルを組み込んだ最適化モデルによる 治水計画代替案設計に関する研究

京都大学工学部 正員 吉川和広 京都大学大学院 学生員 多々納裕一
京都大学工学部 正員 春名 攻 京都大学大学院 学生員 〇渡辺泰也

1. 概要

治水施設整備計画モデルを用いて計画代替案を設計する場合、一般のモデル分析の場合と同様に、洪水被害現象生起のメカニズムに対しての現象合理性や治水施設整備の評価をとおしての目的合理性、さらには多様な検討を行うための操作性等がモデル分析の満たすべき要件として強く求められる。従来の計画代替案の設計方法は、大別すると、①提案された代替案を多数回のシミュレーション実験を行うことにより比較・検討する方法と、②現象を近似的にモデル記述したのちに数理計画モデルにこの現象モデルを組み込んだ形で計画モデルを定式化したのちこれを用いて計画代替案を設計する方法 がとられてきた。しかし、前者は目的合理性や操作性に劣る場合が多く、後者は現象合理性に問題を含んでいる場合が多かった。本研究では上記の3条件を満足する設計方法の開発をめざして、シミュレーションモデルを数理計画モデルに組み込んだハイブリッド型の計画モデルを定式化し、これにより計画代替案を設計するという新しい方法の開発に関する研究を行ったものである。

2. モデルの概要

上述したような要件を満たすため、本研究では、図-1に示すシミュレーションモデルを組み込んだ数理計画モデルの開発を行った。以下モデルの具体的な内容について述べることにする。このモデルは、まずある治水施設整備の代替案を与え、これを洪水被害現象を再現するシミュレーションモデルに入力したのち、シミュレーション実験をとおしてその代替案を評価する情報を求め、ついでこの情報をもとにして数理計画手法によりさらに改善された代替案を設計するとともに、これを再びシミュレーションモデルに入力するものである。この計画モデルでは、このような過程を繰返すことにより、最適な計画代替案を設計しようとするものである。

3. モデルの構成

本モデルで用いるシミュレーションモデルでは、洪水被害現象を合理的に再現するだけでなく、治水施設整備案を入力すれば、被害の状況等を出力することができるようになっていなければならない。そこで、ここでは以下のような6つの条件に関して検討を行った。①斜面上の流れの非線形性が表現できること、②河道の洪水伝播機能が表現できること、③土地利用の形態の差異による流出の差異が表現できること、④氾濫現象が表現できるこ

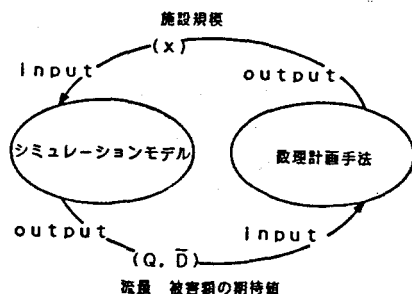


図-1 ハイブリッド型の治水計画モデルの構成

Kazuhiro YOSHIKAWA Mamoru HARUNA Hirokazu TATANO Yasunari WATANABE

と、⑤発生する被害状況をとらえることができること、⑥種々の治水対策案がモデルに組込めること以上6点である。また最適化の過程で多数回のシミュレーション実験を行うので検討が実行可能であるためには、計算時間がある程度以下に納められていなければならない。したがって、ここでは図-2に示すようなシミュレーションモデルを用いた。また、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エトグラフを求める。次に、有効降雨モデルではこれを入力情報として、中安式損失曲線を用いて損失雨量を算出し、これを降雨量より差引くことによ

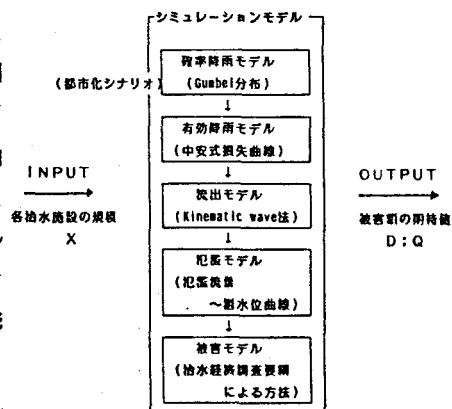


図-2 シミュレーションモデルの構成

って有効降雨を求める。続いて流出モデルでは、この有効降雨を入力情報として、Kinematic wave法を用いて斜面の流出流量および到達時間を求める。さらに斜面流出流量を入力情報として、同じモデルを用いて河道内流量および洪水到達時間を求める。そして氾濫モデルでは、この流量と別途求めた流量-水位の関係をもとにして、河道内の水位が一定の水位を越した時に破堤が起こると仮定して、横越流公式と連続式を用いて氾濫流量を求める。さらに、2次元不定流計算による氾濫解析結果をもとにした氾濫流量と湛水深の関係式により、各メッシュごとに湛水深を求める。被害モデルでは、得られた湛水深と都市化シナリオから別途推計された各メッシュごとの資産額をもとに、治水経済調査要綱による被害率を用いて被害額を算出するものである。そして、このようにして求められた被害額と降雨確率をもとに、被害額の期待値を算出する。ここで、流域の都市化は有効降雨を算出する際の土地利用地目別面積の変化、流出モデルにおける等価粗度の変化、被害額算定における資産額・被害率の変化等で取扱う。治水施設整備案は、流出モデル・氾濫モデルで取扱っている。このシミュレーションモデルは全体として精度の高いモデルであるとは言えないが、データの精度や数値計画手法の探索の精度や計算時間等を考慮すると十分適用可能であると考えられる。

また、ハイブリッド型の計画モデルで用いる数値計画手法は、目的関数・制約条件の値がシミュレーションモデルの出力値であることにより、関数形の明らかでない問題に対して逐次解の改善を行う探索型手法でかつ制約を考慮した手法でなければならない。さらに、探索の効率性を考えてシミュレーションモデルをアクセスする回数が少ないものでなければならない。一般に探索型手法は直接探索法と傾斜探索法に大別される。前者は収束は遅いが一回の探索における計算量が少なく、後者は収束は速いが一回の探索における計算量が多いという特徴がある。本モデルでは、数値シミュレーションを組込んでいるため、導関数を求めることは不可能であるので、そのままでは傾斜探索法を用いることができない。これに対しBox-Wilson法により近似的に傾斜を求めるという工夫を行えば適用可能となる。

したがって本研究では、表-1に示すように直接探索法としてはコンプレックス法、傾斜探索法としてはBox-Wilson法と許容方向法を複合した手法の2つの手法を適用可能であると判断した。そして、これらの2つの手法を探索に用いて、その結果を比較・検討し効率的で信頼性の高い解法を求めることとした。

4. 実証検討

実流域に本モデルを適用する前に、上述した2つの手法を比較・検討するため、図-3に示すような基礎的な検討を行った。ここでは、まず目的関数や制約条件式がともに明らかな関数問題に対して、2つの手法を組込んだモデルを運用して探索の効率性・信頼性等の比較を行った。また、本研究で対象とする計画問題がシミュレーションモデルを組込んでいるため目的関数その他の関数形が明らかでない問題である。このため関数問題における検討結果はそのまま実際問題に適用することができない。したがって、ここでは比較的小規模なシミュレーションモデルを組込んだ探索を行って比較・検討することとした。ここでの検討では図-4に示すような仮想的な流域を想定するとともに、図-5に示すようなシミュレーションモデルを用いた。また計画代替案設計のための計画モデルを表-2のように定式化した。(ここでの検討内容は、膨大なものとなるため、講演時に詳しく述べることとする。)

次に本研究では、図-6に示す大阪府と兵庫県境を流れる淀川の1支流である猪名川を対象として実証分析を行った。猪名川流域では、流域における都市化の進展により、治水安全度が低下している。これにもかかわらず、この都市化の進展が急で

表-1 ハイブリッド型計画モデルに用いた最適化手法

	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	映映・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 勾配制約探索 非線形制約 実行可能方向探索

1. 関数問題を対象とした運用実験
 - ① 制約条件のない問題
(内点に最適点がある場合)
 - ② 線形制約条件付きの問題
(線形制約上に最適点がある場合)
 - ③ 非線形制約条件付きの問題
(非線形制約上に最適点がある場合)

2. 仮想流域を対象とした運用実験
 - ① 線形の費用制約を設定した場合
 - ② 非線形の費用制約を設定した場合

図-3 モデルの解法に関する検討の手順

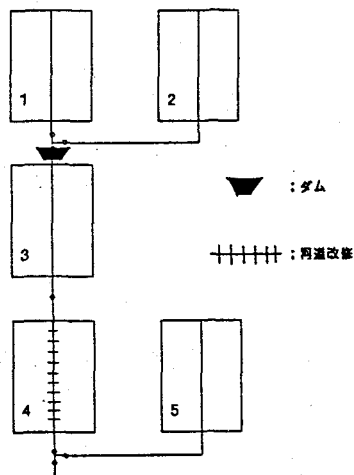


図-4 流域モデル図(仮想流域)

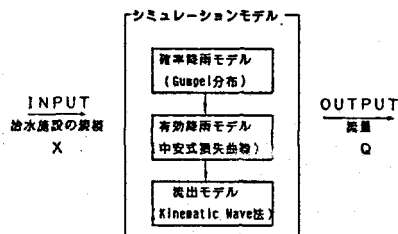


図-5 シミュレーションモデルの構成

表-2 仮想流域における運用実験の際の計画モデルの定式化

$$Q_y \rightarrow \min$$

$$f_x(x) + f_y(y) \leq c$$

$$Q \leq w$$

$$x \leq x \leq \bar{x}$$

$$y \leq y \leq \bar{y}$$

Q_y : 地区4の氾濫流量
 x : ダム放流量
 y : 地区4の放流量
 f_x, f_y : x, y の費用関数
 Q : 流域の下流端の流量
 w : 流域の下流端の放流量
 $\bar{x}, \bar{y}$: 施設 x, y の上限値
 $\underline{x}, \underline{y}$: 施設 x, y の下限値
 c : 総費用の上限値

あるため、治水施設の整備は遅れている流域である。そして、計画モデルの定式化の内容は表-3に示すようである。ここで、目的関数としては流域全体の被害額の期待値の最小化を用いている。また制約条件には、下流地点の流量制約、費用制約、各治水施設規模の上下限の制約を考えた。ここで、流量制約とは、今回想定した河道改修地区が中上流に位置しているため、この改修によって下流域における治水安全度が損われるおそれがあるので、下流域での浸水防止を意図し設定したものである。さらに、以上に述べた計画モデルで用いる $D(X)$ 、 $Q(X)$ を求めるためのシミュレーションモデルを組込んで、ハイブリット型の計画モデルを定式化した。ここでは、このようなハイブリット型の計画モデルを最初から直接適用して計画代替案を設計することは、全域的な最適解を得られる保証がないことや、解の信頼性や探索の効率性等々の問題があると判断し図-7に示すような工夫をした。すなわち、ハイブリット型の計画モデルを運用する前に「解空間の概略的な認識」という段階を設けたものである。すなわち、ここでは、目的関数や制約条件の概形を把握するとともに、最適解のおおまかな構成を推測することにより探索の初期点を求めておこうというものである。さらに、この情報によりハイブリット型の計画モデルにより求められた代替案の妥当性の検討も行うことができると考えたものである。本研究では、図-7に示すプロセスにそって計画代替案の設計を行ったものであるが、これらの詳しい検討内容は、講演時に述べることにする。

以上の検討結果からは、現象を表わすシミュレーションモデルを数理計画モデルに組込んだハイブリット型の計画モデルによる計画代替案の設計方法が、効率的で十分実用的な方法であることがわかった。

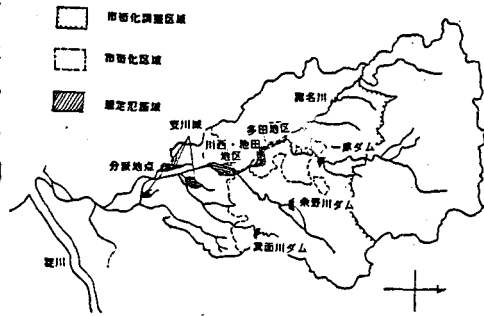


図-6 利根川流域の概要

表-3 計画モデルの定式化

目的関数	$\bar{D}(X) \rightarrow \min$
制約条件	$Q(X) \leq w$ $\sum_{i=1}^n \tau_i(X) \leq c$ $X_i = \frac{X_i^* (\bar{X}_i - X_i)}{1000} + \Delta_i$ $0.0 \leq X_i^* \leq 1000.0 \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5)$
$\bar{D}$: 流域全体の被害額の期待値	
τ_i : 各施設の建設工事の費用関数	
c : 費用の上限値	
Q : 分散地点の流量	
w : 分散地点の流量値	
X_i : 利根川ダムの治水率	
X_2 : 多田地区の治水率	
X_3 : 多田地区の治水率	
X_4 : 川西・池田地区の治水率	
X_5 : 利根川流域の治水率の最大値	
$\bar{X}_i, X_i^*$: 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副変数	
(数値計画モデル内部における操作変数)	
注) $\bar{D}$ 、 Q はシミュレーションモデルよりの出力	

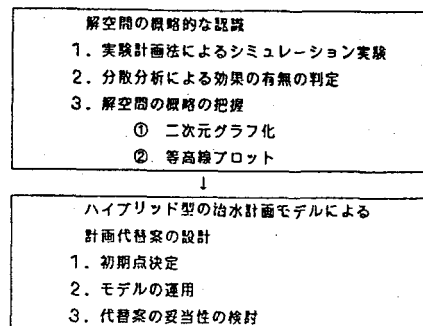


図-7 計画代替案設計のプロセス