

シミュレーションモデルを組み込んだハイブリッド型治水計画モデルの解法の効率化に関する実験的研究

京都大学工学部 正 員 古川 和広
京都大学工学部 正 員 春名 攻

島根県 正 員 多々納裕一
京都大学大学院 学生員 渡辺 泰也
京都大学大学院 学生員 〇田井中靖久

1. はじめに

近年、人々の価値観は多様化しており計画対象地域の人々の合意を得ることが困難になってきている。このため、合意を得やすい科学的で合理的な計画立案過程の方法論の構築の必要性が増してきており、合理的な分析や総合の技術の開発、とりわけ計画代替案の合理的な設計方法の開発が求められてきている。また、都市化流域における水害の発生危険度の増大に伴い、都市防災という観点からの治水計画問題は都市化流域計画の中で重要な課題となってきている。そこでわれわれ研究グループでは、ここ数年来猪名川流域の配置・規模決定問題を対象としてハイブリッド型治水計画モデルを用いた代替案の設計方法の開発を試みてきたが、本稿ではその中でも合理的な解法アルゴリズムの研究に焦点をあてて論じることとした。

2. ハイブリッド型治水計画モデルの概要

計画代替案の設計では、洪水被害現象に基づいたrealityを保証していること（現象合理性）、計画代替案が他の案に対して相対的に優位であることを保証していること（目的合理性）、およびモデル分析の多様性を保証し、ひいては分析の実行性に多大な影響を与える効率性（モデルの操作性）の3つの要件を満足しなければならない。そこで本研究では、ハイブリッド型治水計画モデルを『洪水被害現象を再現するシミュレーションモデルからの各種代替案に対する応答出力

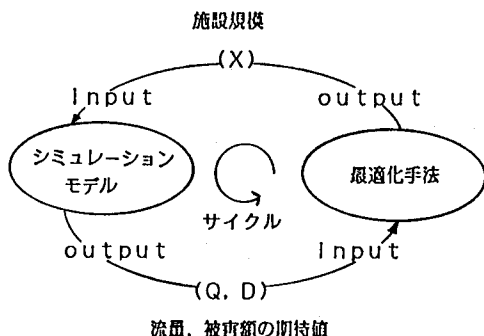


図-1 ハイブリッド型モデルの構成

を拘束条件とする数理計画モデル』と位置付けており、その構成は図-1に示すようである。すなわちこのモデルは、まず各施設の施設規模の代替案をシミュレーションモデルに入力し、それに対応する目的関数値や制約条件値を出力する。次にこの出力情報にもとずき目的合理性や現象合理性を満足させつつ、それを考慮して最適化手法によってこの段階でよりよい各施設の施設規模の代替案を設計する。そしてその代替案を再びシミュレーションモデルに入力するすなわち、ここで述べたような一連のサイクルを繰返すことによって、最適な施設規模の代替案を設計しようとするものである。

3. ハイブリッド型治水計画モデルの構成

本モデルで用いるシミュレーションモデルでは、①洪水被害現象を計画目的に適合した精度で合理的に再現すること、②入出力の関係が確定的でありかつ代替案が比較的簡単な数量として表現できること、③比較的計算時間の短いシミュレーションモデルであること、等々の要件を満足していなければならない。そこで、(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) 土地利用の形態の差異による流出が表現できること、(d) 氾濫現象が表現できること、(e) 発生する被害状況をとらえることができること、(f) 種々の治水対策がモデルに組み込めること、等々を挙げて個々のサブモデルについて検討を加えた。そして、要件①～③を総合的に勘案して図-2に示すシミュレーションモデルを構成した。このシミュレーションモデルは、個々には決して精度が高いとは言えないが、データや探索精度、計算時間を考慮すると、全体としては十分適用可能であると判断した。

またハイブリッド型治水計画モデルに用いる最適化手法は、目的関数値や制約条件値がシミュレーションモデルの出力値であること等々より、①関数形が明らかでない問題に対応できること、②制約条件を考慮できること、③アクセス回数が少ないこと、④微分不可能点が存在しても影響を受けないこと、等々を満足する手法でなければならないので、これらの事項を考慮して、本研究では最適化手法としてコンプレックス法を用いることにした。

4. ハイブリッド型治水計画モデルによる

モデル解法の効率化に関する検討

ハイブリッド型治水計画モデルは、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値として表現するため、関数形が明らかでないので最適化手法は、非線形の問題にも対処できる方法である必要があるが、一般の非線形問題は、局所解という問題があり、全域的な最適解を少数の探索によって得られる保証がない。従って、出力結果の動向を的確に把握してできるだけ効率的に最適解に接近していく方法をとる必要がある。

そこで、本研究では図-3に示す方法を用いることとした。すなわち、まず解空間の概略的に認識することし、目的関数式や制約条件式において効果の大きい要因についてグラフ化を行なった。そしてそれらのグラフを参考にしつつ解空間を近似的に表現し、ここで求めた近似曲面上で最適化手法を用いて最適解を求め、その近傍に初期解を設定して、その段階で始めてハイブリッド型治水計画モデルを運用し、最適な代替案を導出することで求解の効率化や解の信頼性を向上させるとともにモデル解法を効率化する方法である。

特にモデル解法を効率化するためには『初期解の設定』は、欠くことのできないものでありその詳しい手順を図-4に示した。つまりまず各要因の3水準の実験を行なう。ついで各要因の水準数を実験データの精度を等しくするように変更する。この際に要因の水準数を合理的な判断のもとで設定しうる方法として、曲面近似率（要因A_iに関するn_i水準実験がM水準実験（Mは十分大きな整数）の変動に占める割合）を指標とすることにした。

つぎに、解空間の概略的認識で作成したグラフを参考にしつつ、解空間を単純な形で表わすことができるなどの利点を持つ直交多項式を用いて近似曲面を作成することにし、

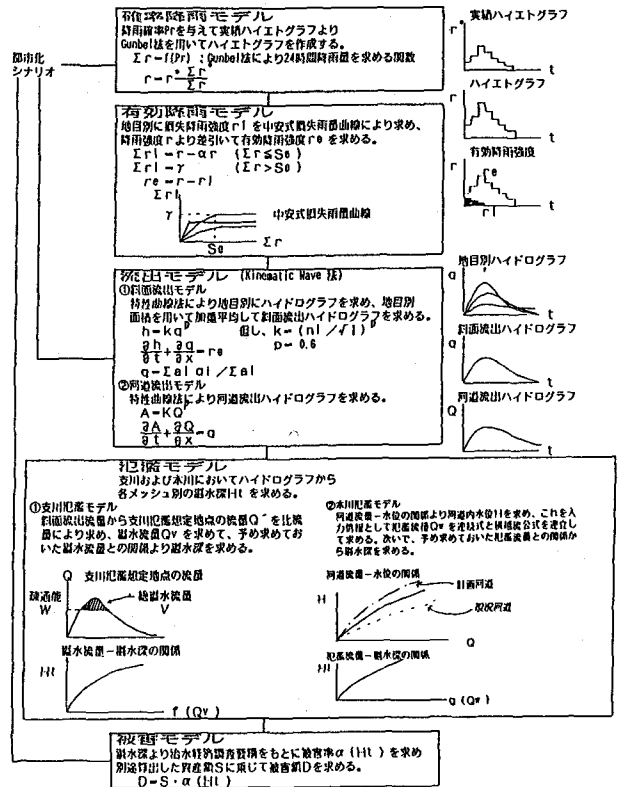


図-2 シミュレーションモデルの概観

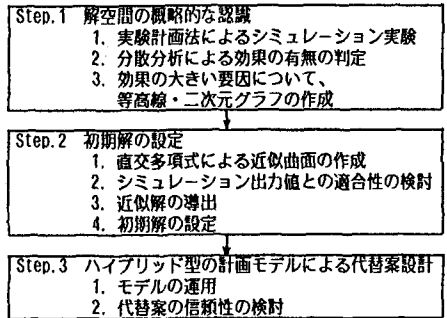


図-3 計画代替案設計のプロセス

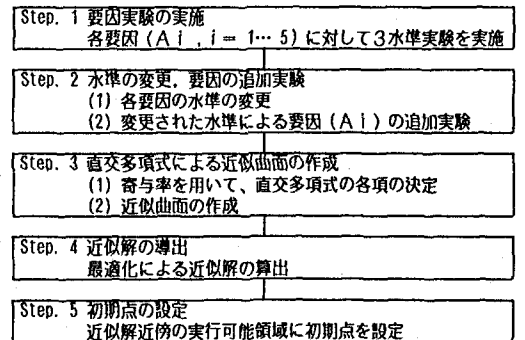


図-4 近似曲面を用いた初期点の設定プロセス

直交多項式の項を決定する指標としては、全体

与率を用いることとした。最後にこのようにして求められた近似曲面でSUMT(Sequential Unconstrained Minimization Technique)を用いて最適化計算を行なって近似解を導出し、求めた近似解の近傍の実行可能領域に初期解を設定するという方法である。

5. 実験的検討

本研究では、大阪府と兵庫県境を流れる淀川の一支流である猪名川流域(図-5)を対象として実験的検討を行った。猪名川流域は、都市化の進展によって治水安全度が低下しているにもかかわらず、都市化の進展に比して治水施設の整備が遅れている流域である。本研究では、当流域の治水施設の配置・規模決定問題を、被害額の期待値を評価尺度とする費用制約下の最大成分最小化問題として規定し、図-6のように定式化した。ここで、費用制約下の問題であるから費用と効果の關係に着目し、予め費用に対する効率を求めておくことが有効であると考えられるので、本研究では施設規模を各施設への投資額で表現することとした。また目的関数としては、①多田地区の被害額の期待値、②川西・池田地区の被害額の期待値、③支川流域の被害額の期待値の3種類を想定し、制約条件としては、a)治水安全度確保のための制約条件、b)下流の破堤防止のための制約条件、c)総費用の制約条件、d)治水規模の制約条件の4種類を想定し、また治水施設としてはA)猪名川ダム、B)多田遊水地、C)多田地区の河道改修、D)川西・池田地区の河道改修、E)支川流域の河道改修を想定している。

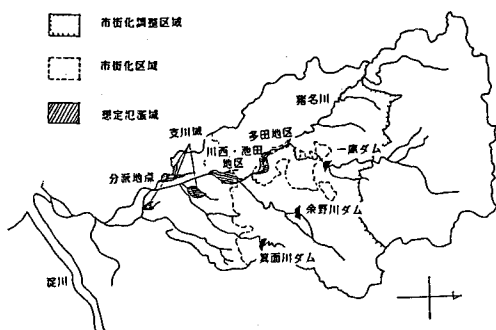


図-5 猪名川流域の概要

目的関数	$\text{MAX} (\bar{D}_i(f_j^*(a))) \longrightarrow \min$ $i \in \Omega \quad \Omega = (\text{地域 } i \text{ の集合})$
制約条件	- 治水安全度確保のための制約 $\bar{D}_i(f_j^*(a)) \leq \bar{D}_i(f_j^*(a_0))$ - 下流の破堤防止のための制約 $Q(f_j^*(a)) \leq W$ - 総費用の制約 $\sum_{j=1}^n c_j = C$ - 治水施設規模の制約 $c_{ji} \leq c_j \leq \bar{c}_j$
	$\bar{D}_i$: 地域 i の被害額の期待値 Q, W : 分派地点ピーク流量および疎通能 f_j^* : 治水施設 j の規模による費用関数 C : 総費用 $c_j, \bar{c}_j$: 治水施設 j の投資額及びその上下限 a : 治水施設整備の投資額の組合せ a_0 : 現況の治水施設整備の投資額の組合せ
注)	$\bar{D}, Q$ はシミュレーションモデルよりの出力値

図-6 計画モデルの定式化

以下に、図-3のプロセスに従って行なった分析の一部を示す。まず分散分析を用いて目的関数に関して、①では多田地区の河道改修、猪名川ダム、②では猪名川ダム、多田地区、川西・池田地区の河道改修、③では支川流域の河道改修、制約条件値である流量では猪名川ダム、多田地区、川西・池田地区の河道改修が、大きく寄与していることがわかった。そこで解空間の概略的な認識のために、目的関数および制約条件値である流量のシミュレーション実験の出力値のその要因に関するグラフを作成した。つぎに、初期解の設定における各要因の水準数の決定については、本研究においては水準の変更の指標である曲面近似率の変化率が0.5以下であれば、それ以上水準数の変更を行なわなくても良いと判断した。そして①～③の目的関数値と制約条件値である流量の解空間全体をひとつの近似曲面で表現し、シミュレーション実験の出力値と比較したところ、③と流量では近似曲面は初期解の設定に対しては満足できる精度であると判断したが、①と②では投資額が大きいく所近似曲面は初期解の設定に対しては満足できる精度であると判断できなかった。

そこで多田地区の河道改修の投資額と川西・池田地区の河道改修の投資額のレンジを2分割することにし、解空間を①では2つ、②では4つに分割した。そして解空間の概略的認識で作成したグラフを参考にしつつ、最適解の位置を考慮して①では1つ、②では2つの応答曲面を作成することにした。そしてそれぞれの応答曲面に対応するシミュレーション出力値の上述の要因に関するグラフを新たに作成した。①と②に関して新たに作成された近似曲面とそれに対応するシミュレーション出力値の上述の要因に関するグラフを比較して新たな近似曲面は、初期解の設定に対しては満足できる精度であると判断した。そしてシミュレーション出力値の上述の要因に関するグラフとそれに対応する近似曲面のグラフの一部を図-7に示した。そして初期

力値の上述の

表-1 計画代替案設計結果(総費用 250億円)

要因に関する
グラフとそれ
に対応する近
似曲面のグラ
フの一部を図
-7に示した。
そして初期解

250億	猪名川 DUM	多田 治水地	多田 改修	川西、池田 改修	支川 改修	地没 費額	目的 関数値	各地区の被害額期待値			分派地点 流量
								多田地区	川西、池田地区	支川地区	
近似曲面上の解	1857.09	464.16	7421.36	9256.55	5168.27	24167.43	—	—	—	—	—
近似曲面上の解のシミュレーション出力値	(1430.38)	()	(731.07)	(1377.91)	(1.05)	24167.43	2469.92	2469.92	2113.82	796.27	2385.58
ハイブリッド型計画モデルの初期点	(1440.15)	(0.00)	(8300.00)	(10000.00)	(5000.00)	24900.00	1588.60	1084.09	1588.60	833.02	2476.97
ハイブリッド型計画モデルによる解	(1446.52)	(4.14)	(926.28)	(1570.62)	(1.35)	24992.66	1042.97	1042.97	914.81	878.42	2505.51
解近傍の改善値	(1450.90)	(0.00)	(947.49)	(1563.38)	(1.35)	24994.56	1018.17	1018.17	945.32	878.42	2505.51

の設定に対しては満足できる精度であると判断した近似曲面を用いてSUMTにより近似解を導出し、その近傍に初期解を設定しハイブリッド型治水計画モデルを運用して最適解を求め、総費用をパラメータとするパラメトリック分析を行ない、代替案設計方法の適用性や有効性について考察を行なうこととした。代替案の設計結果として総費用 250億円とした場合を例にとって表-1に示した。まず、求められた解の信頼性を検証するために解の近傍でシミュレーション実験を行ない改善点を求めてみた(表最下段)。この結果、若干の解の改善を図ることが可能であったが、ハイブリッド型計画モデルによる解はほぼ最適解と一致していると判断できた。次に、近似解とハイブリッド型計画モデルによる解とを比較すると、各治水施設への投資額の差は最大8億円程度で近似解は最適解のおよその位置は示しているが、目的関数値が2倍と大きく違い、これを最適解とすることは精度上問題がある。これらの結果から各施設の投資額の傾向や目的関数値を考慮すると、本方法は最適解の探索を効率的に行なえる位置に初期解を設定しうるとともに、初期解の設定の後にハイブリッド型治水計画モデルを運用すると十分な精度で最適解に到達すると判断できた。従ってこの検討を通して本方法を用いた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が、治水における最大成分最小化問題に対して効率的な方法であることがわかった。

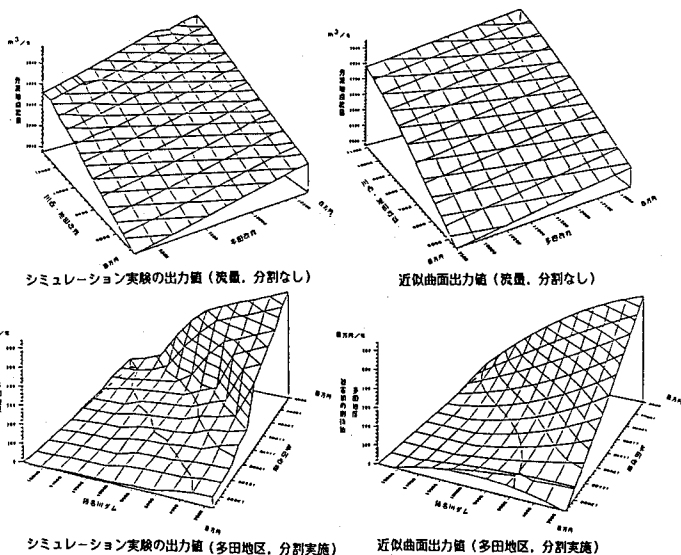


図-7 シミュレーション実験の出力値と近似曲面の出力値

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治水施設計画の代替案設計方法における効率的な解法のアルゴリズムに関して、猪名川流域の治水施設計画問題に適用してその有効性や信頼性について実証的な検討を行ない良好な結果を得た。今後に残された課題としては以下の事項が挙げられる。まずハイブリッド型計画モデルを用いた代替案設計方法に関しては、①ハイブリッド型計画モデルで用いた最適化手法について、可能ならばさらに効率的で信頼性の高い探索を行なう手法の開発を行なう必要があること、②初期解の設定における応答曲面の作成方法の確立すること、特に曲面近似率の取扱いに関する考察を行なうこと、③このモデルの他の流域の治水施設計画問題への適用性や、他の計画問題への適用可能性に関する検討を行なうこと、等々が考えられる。また都市化流域の治水施設計画問題としての課題は、④流域の都市化の進展、特に人口・資産の集積の合理的な予測方法や資産の把握方法の確立、等々が考えられ、今後それらについてより詳細な検討を加えて充実したものにしていきたいと考えている。