

ハイブリット型計画モデルの治水施設整備計画への適用に関する研究 —都市化流域を対象として—

Study on Development of Hybrid-type Planning Model for Flood Control

Facilities Planning in Urbanized Area

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

京都大学大学院 学生員 渡邊 泰也

1. はじめに

都市化流域の治水施設計画の問題は、社会システムや、洪水流出現象の生起メカニズムの複雑性に起因して、高度化・複雑化している。本研究ではこのような問題に対して、合理的な治水施設整備計画を立案していくためには、種々の社会・経済的な状況や物理的な現象の分析を、多側面から積み重ねて実施するとともに、計画化に関する多段階の検討・意思決定過程を経た上でなければ、真に合理的な治水施設整備案を求めてくることは困難であると考えた。この考えにもとずき、ここでは「現況分析」、「計画化のための検討」「計画情報の作成」という段階的な検討プロセスを提案し、理論的・実証的検討を加えることとした。

さて、近年水理水文学や河川工学等の学問分野の発展やシステム・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、これらの技法を治水施設整備計画問題の分析に持ちこむ際には、未だ『いかにしてその情報の精度を落さず、合理的にかつ効率的に計画代替案を設計するか。』という問題に多くの検討課題が残されてきている。これらに対し、本研究では計画論的な立場から、都市化流域における治水施設の配置・規模決定問題を研究対象として取上げ、この問題を総合的に検討する中核的なツールとして、降雨—流出—氾濫—被害の状況を再現するシミュレーションモデルを組込んだ、「ハイブリッド型計画モデル」の開発を試み、実際の河川流域における実証的考察を行なったものである。さらに、これまでの研究成果を取りまとめた形での実証的研究にもとずき、治水施設整備計画を、より实际的で合理的な問題へと近づけていくための研究を行った。すなわちモデルの入力情報となる計画降雨の取扱いと、それに対応する治水施設整備計画の方法について検討を行った。

2. 検討プロセスの概要

本研究では、高度化・複雑化した治水施設整備計画問題を検討するプロセスとして図-1に示すようなプロセスを提案することとした。まず第1ステップでは、対象地域の治水計画問題に関する検討対象課題を明らかにするために基礎的情報としての既存資料の収集や整理を行なうとともに、必要に応じてこれにもとずいた一次的分析を行なう。そしてこの分析を通して得られた認識を現況課題として抽出・整理し、現在対象流域が抱えている治水計画上の問題点の明確化を行なう。次に第2ステップでは、これらの問題を合理的に解決するような治水施設整備計画を策定するために、計画化のための検討を行う。ここでは、検討対象とする治水施設の選定を行うとともに、治水施設整備計画に影響を与える都市化・降雨の影響効果分析を通して分析シナリオの設定を行う。そして、治水施設整備計画の計画代替案の評価等の計画代替案の設計方針を取りまとめ、計画化のための前提条件の取りまとめを行なう。最後に第3ステップでは、これらの検討結果をもとに、計画モデルの定式化を行なうとともにハイブリット型計画モデルを用いて

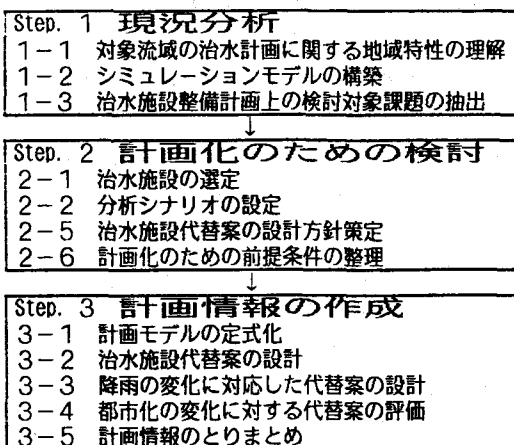


図-1 治水施設計画問題に対する検討プロセス

計画代替案の設計を行なう。そして、降雨・流域の都市化に対するパラメトリックなモデル分析を通して、治水施設の計画代替案に対して総合的な評価・検討を加えた後必要な計画情報を作成する。

3. ハイブリッド型計画モデルの概要とその解法

後に述べる現況分析の結果をもとに、ここでは治水施設整備の基本方針を『治水安全度の地域的な不均等を是正しつつ流域の治水安全度の確保・向上をめざした効率的な施設整備を流域の適切な都市化の想定のもとで行なうこと。』と設定した。そこで、当流域の治水施設計画問題を、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、降雨-流出-氾濫-被害という現象の再現にシミュレーションモデルを用いることを前提として、図-2のように定式化した。

さて、本研究で対象とするような治水施設整備計画問題における計画代替案の設計においては、「現象合理性」・「目的合理性」・「操作性」という3つの要件のバランスを保ちながら分析を進める必要があり、本研究においては、このような要請に応えるべく、洪水被害現象の再現を行なうシミュレーションモデル（現象合理性の確保）と、計画意図を反映して定式化する数理計画モデル（目的合理性の確保）とを混成して図-3のような構成の『ハイブリッド型計画モデル』を作成した。そして、これをモデルの特性を考慮しつつ効率的に運用することによって、上述の要件を満たす計画代替案の設計方法が構築できると考えた。

ここで本モデルの具体的動作は、「まず、シミュレーションモデルに治水施設系の規模（X）を入力し、評価要因（流量Q、被害D）を出力する。次に、最適化手法によって、評価要因（Q、D）の内容にもとづいて新たに改善された解（X）を求める。そして、この新しい解を再びシミュレーションモデルに入力する。」という一連の動作を繰返ししながら最適解に到達しようとするものである。しかしながら本モデルにおいては、上述のような要件があるためにシミュレーションモデルは、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、等々を満足する必要がある、図-4に示すように定式化した。一方、本モデルの解法として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という特徴があるので、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シミュレーションモデルのアクセス回数が少ないこと、等々の要件を満足する探索型の解法でなければならず、様々な実験的な検討の結果コンプレックス法を用いることとした。

次に、ハイブリッド型計画モデルを用いて実際の計画問題を分析する際に、効率的で信頼性の高い代替案設計方法の構築をめざした考察の結果を簡単に示しておくこととする。先述したことからも明らかのようにハイブリッド型計画モデルは、数学モデルとして表わされる一般形の非線形問題以上に困難な問題であると

目的関数	$\text{MAX } (\overline{D_i}(f_j^*(a))) \longrightarrow \text{min}$ $i \in \Omega \quad \Omega = (\text{地域 } i \text{ の集合})$
制約条件	- 治水安全度確保のための制約 $\overline{D_i}(f_j^*(a)) \leq \overline{D_i}(f_j^*(a_0))$ - 下流の破壊防止のための制約 $Q(f_j^*(a)) \leq W$ - 総費用の制約 $\sum_{j=1}^n c_j = C$ - 治水施設規模の制約 $\underline{c_j} \leq c_j \leq \overline{c_j}$

$\overline{D_i}$	: 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
$\underline{c_j}, c_j, \overline{c_j}$	: 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) $\overline{D_i}, Q$ はシミュレーションモデルよりの出力値

図-2 計画モデルの定式化
施設規模

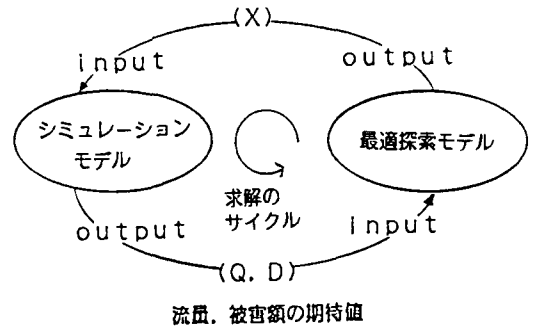


図-3 ハイブリッド型計画モデルの構成

最適化手法によって、評価要因（Q、D）の内容にもとづいて新たに改善された解（X）を求める。そして、この新しい解を再びシミュレーションモデルに入力する。」という一連の動作を繰返ししながら最適解に到達しようとするものである。しかしながら本モデルにおいては、上述のような要件があるためにシミュレーションモデルは、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、等々を満足する必要がある、図-4に示すように定式化した。一方、本モデルの解法として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という特徴があるので、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シミュレーションモデルのアクセス回数が少ないこと、等々の要件を満足する探索型の解法でなければならず、様々な実験的な検討の結果コンプレックス法を用いることとした。

次に、ハイブリッド型計画モデルを用いて実際の計画問題を分析する際に、効率的で信頼性の高い代替案設計方法の構築をめざした考察の結果を簡単に示しておくこととする。先述したことからも明らかのようにハイブリッド型計画モデルは、数学モデルとして表わされる一般形の非線形問題以上に困難な問題であると

考えられる。さらに、本モデルでは現象モデルとしてシミュレーションモデルを用いるので、探索の効率化をはかるためにはシミュレーションモデルのアクセス回数を減らすことが、求解のための計算の効率化にとって重要なことであるといえる。また、通常非線形問題とは異なっていて、求解の挙動を事前に検討することができないモデル構造となっているので、このままでは大域的な最適解を求めるためには、多大な計算を覚悟しなければならない。

以上のような問題を可能な限り解決したり、困難な問題を達成するために、本研究では図-5に示す検討プロセスを採用することとした。ここでは、まず解空間を概略的に認識することし、目的関数や制約条件において効果の大きい要因についてグラフ化を行なうこととした。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、まずその近似曲面上で最適化手法を用いて最適解を求めること

とした。そして、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計画モデルを運用し、最適な代替案を導出するという方法を採用した。これによって求解の効率化や解の信頼性を向上させるとともに、解法の効率化をはかることとした。

4. 実証検討

ここでは、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（図-6）を対象として、前述の治水施設計画問題の検討プロセスに従った事例検討について述べる。

(1) 現況分析

対象流域の地域特性の把握や過去の洪水実績に関する分析、シミュレーションモデルを用いた分析等々の様々な分析を行なった結果、以下のような検討課題の存在が明らかとなった。①洪水被害を増大させる流域の都市化の進展が今後も見込まれること、②用地確保

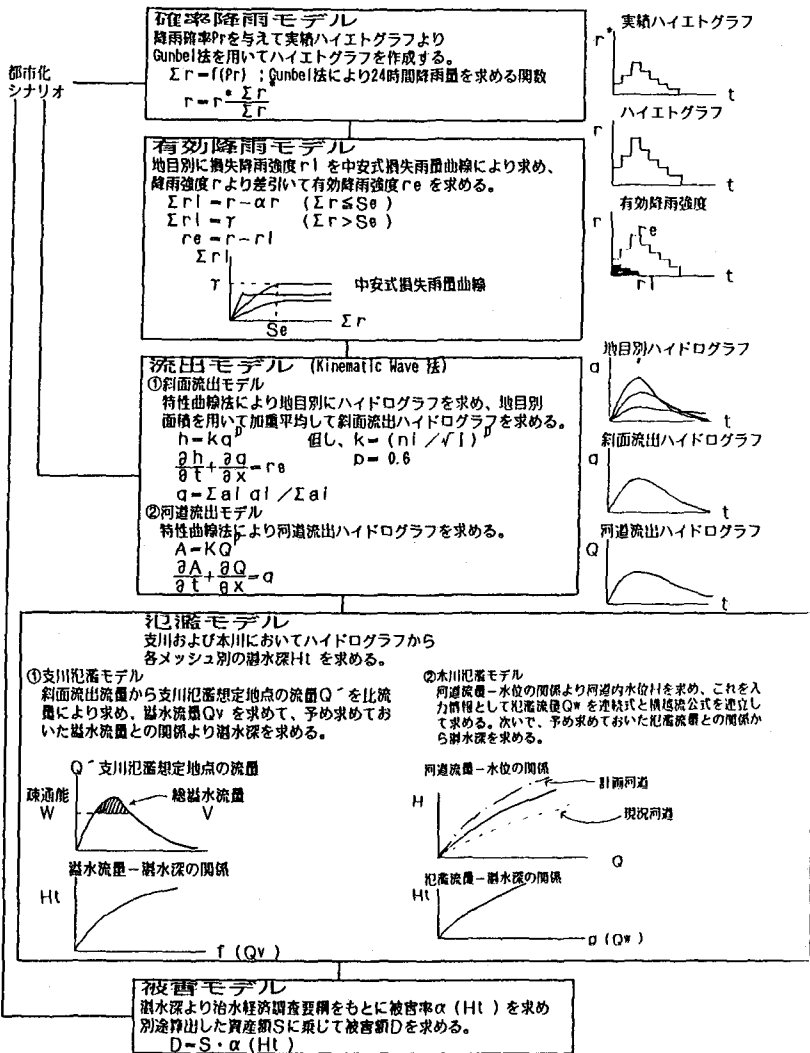


図-4 シミュレーションモデルの概要

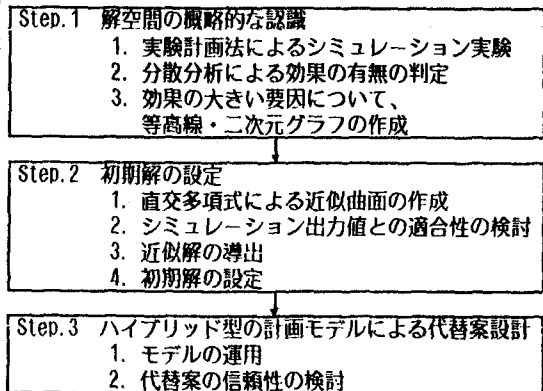


図-5 計画代替案設計のプロセス

等の問題により治水施設整備が困難で効率的な治水施設整備計画が必要であること、③治水安全度が極めて低く早急な改善が望まれる地区が存在すること、④上下流問題等の治水施設整備における競合が存在すること。

(2) 計画化のための検討

まず検討対象とする治水施設を、工事計画等をもとに実行可能性を考慮して、(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の5つとすることとした。

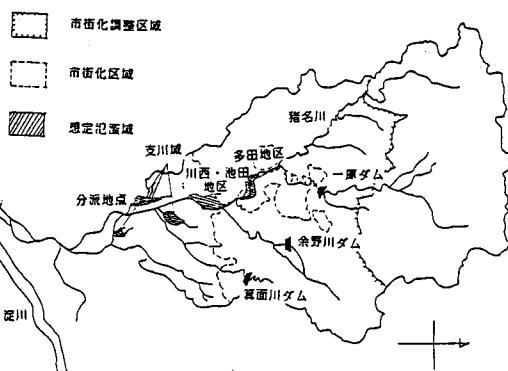


図-6 猪名川流域の概要

次に、分析シナリオとして与える都市化・降雨に関する分析を行なった。ここではまず、都市化・降雨の変化が洪水被害現象に与える影響を考慮するために、治水施設・降雨パターン・都市化パターンを要因とした直交配列表を用いたシミュレーション実験を行なった。この結果、降雨パターンすなわち降雨の時間的分布や空間的分布の差異により被害額の期待値や地点流量が大きく変化することが明らかとなった。また、都市化パターンの変化の影響は、治水施設の効果や降雨パターンの変化の影響に比べ小さいことも明らかとなった。そこで、分析シナリオとして与える都市化の進展予測は、トレンドによる簡単なモデルを作成し、計画目標年次末（昭和75年）時の流域の状況を予測することとした。続いて、降雨に関しては、実績降雨を降雨の時間的・空間的分布によりパターン分類して、その結果をもとに代表降雨パターンを決定することとした。ここでは流域を4つに分割したゾーンごとの平均総降雨量の比をもとにして降雨の空間的分布のパターン分類を行ない、これらの各パターンごとのシミュレーション実験を行なった。そして分析のシナリオとして与える降雨パターンとしては、昭和47年9月型降雨（後方集中型降雨）の流域一様型降雨を代表降雨パターンとして選択することとした。

最後にこれらの分析の結果をもとに、治水施設整備計画の計画代替案の設計方針を「治水安全度の地域的な不均衡を是正しつつ流域の治水安全度の確保・向上をめざした治水施設整備を行なうこと」とした。そこで評価の尺度として、現況分析における③④の課題を考慮して各氾濫想定地区ごとの被害額の期待値と、非氾濫想定域での地点流量を用いることとし、さらに②の課題も考慮して総費用も加えることとした。また評価方法としては、目的関数を各想定氾濫地区の被害額の期待値の最大値の最小化とし、制約条件として地点流量・総費用を設定するとともに、各地区の現況の治水安全度の確保の条件を制約条件に加えることとした。さらに分析シナリオの分析において、降雨パターンの変化が洪水被害現象に大きな影響を与えていることが明らかとなったため、先に選んだ代表降雨パターンにより求めた治水施設整備計画の代替案に対して、他の降雨パターンに対しても対応できる代替案の設計をめざした分析を行なうこととした。

(3) 計画情報の作成

ここでは以上のような検討・分析の結果をもとに、治水施設整備計画の計画代替案の設計を行なうとともに、それを総合的に評価し計画情報として取りまとめることとした。

まず治水施設整備計画の計画代替案の設計を行なうための計画モデルを図-2のように定式化した。すなわち目的関数として、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、(1) 治水安全度確保のための制約条件、(2) 下流の破壊防止のための制約条件、(3) 総費用の制約条件、(4) 治水規模の制約条件、の4種類を想定した。ここでは、前章で述べたように目的関数や制約条件である被害額の期待値や流量をシミュレーションモデルの出力値より求めるハイブリット型計画モデルとして定式化することとした。次に、図-5に示した解法のプロセ

スに従って、このハイブリット型計画モデルの最適解として治水施設整備計画の計画代替案を設計することとした。まず「解空間の概略的認識」において、実験計画法にもとずいてシミュレーション実験を行なった後、各治水施設の目的関数値および制約条件値に対する効果の有無や変動の大きさを求めるため分散分析を行なった。次に「初期解の設定」において、図-7に示すように解空間を直交多項式を用いた近似曲面で表現し、この近似曲面上でSUMTを用いた最適化計算を行ない近似解を導出して、その近似解の近傍の実行可能領域に初期解を設定した。最後に「ハイブリット型計画モデルによる代替案の設計」において、この初期解をもとにハイブリット型計画モデルを運用して計画代替案の設計を行なうとともに、その計画代替案の信頼性に関する検討を行なった。その結果の一部を、表-1に示すこととする。またここでは、総費用をパラメータとするパラメトリック分析を行なって投入費用に関する計画内容の変化状況として求めた(図-8、図-9)。この結果、総費用が小さいときは、川西・池田地区と多田地区といった治水安全度の低い地区へ重点的に投資すべきことが導かれた。そして、総費用が300億円以上では、三地区すべてに対して投資されるとともに、下流部の溢水防止のため貯留施設である猪名川ダムへの投資も必要であることが明らかとなった。このことから、流域の治水安全度の地区格差を是正しつつ、流域全体の治水安全度に関しては確保・向上しうような施設計画案を求めることができたと考える。

次に求められた総費用250億円の場合の計画代替案に対して、先の分析で影響が大きいことが明らかとなった降雨パターンの変化についての図-10に示すような分析を行なうこととした。ここではまず、先に求めたすべての降雨パターンについての求められた計画代替案の効果を確かめるためシミュレーション実験を行なった。この結果、2つのパターン、昭和28年9月型降雨(上流集中・後方集中型降雨)における多田地区と昭和32年6

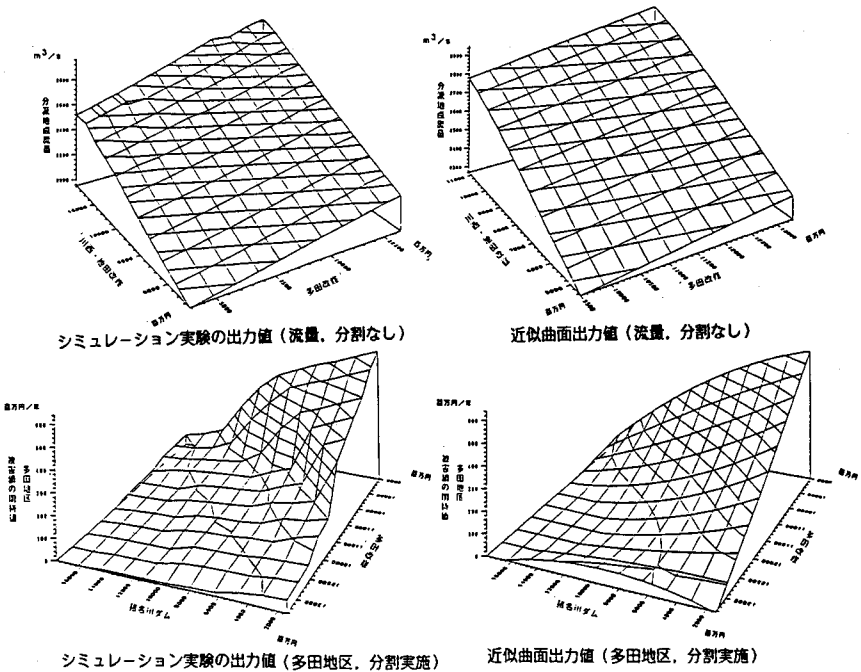


図-7 シミュレーション実験出力値と近似曲面出力値
表-1 計画代替案設計結果(総費用 250億円)

250億	猪名川 ダム	多田 治水地	多田 改修	川西、池田 改修	支川 改修	総投 資額	目的 関数値	各地区の被害額期待値		
								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	1857.09 (1430.38)	464.16 (19214.34)	7421.36 (731.07)	9256.55 (1377.91)	5168.27 (1.05)	24167.43	2469.92	2469.92	2113.82	796.27
ハイブリット型計画モデルの初期点	1600.00 (1440.15)	0.00 (0.00)	8300.00 (891.28)	10000.00 (1519.54)	5000.00 (1.02)	24900.00	1588.60	1084.09	1588.60	833.02
ハイブリット型計画モデルによる解	1449.00 (1446.52)	0.10 (4.14)	8484.42 (926.28)	10261.32 (1570.62)	4797.82 (1.00)	24992.66	1042.97	1042.97	914.81	878.42
解近傍の改善値	1374.74 (1450.00)	0.00 (0.00)	8595.00 (947.49)	10227.00 (1563.38)	4797.82 (1.00)	24994.56	1018.17	1018.17	945.32	878.42

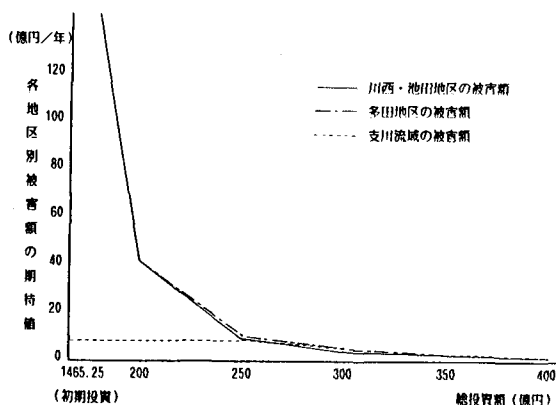
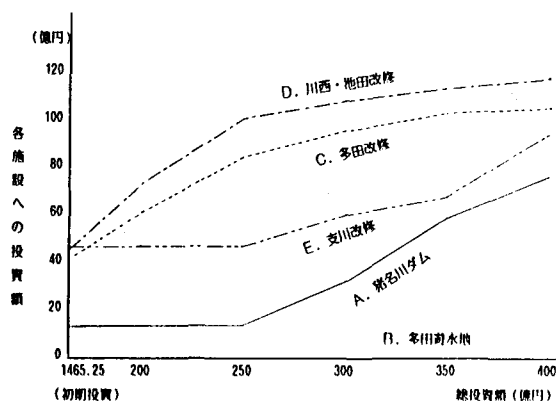


図-8 探索結果のパラメトリック分析（各施設への投資額）

図-9 探索結果のパラメトリック分析（地区別被害額の期待値）

中央型降雨）における支川域の被害額の期待値が代表降雨パターンの場合より大きいことが明らかとなった。そこで、2つの降雨パターンのそれぞれについて代表降雨パターンの場合と同様な治水安全度を得るためにどれほどの施設が必要であるかを求めることとした。ここでは、最も少ない投資で同様な治水安全度を得ることができる施設を求めることとした。すなわち増加費用の最小化を目的関数として各地区の被害額の期待値を制約条件とする計画問題として定式化し、代替案を求めた。その結果が表-2である。この分析を通してすべての降雨パターンに対応した治水施設整備計画の代替案を設計するためには、代表降雨パターンの代替案に対して多田地区・支川流域への追加的な投資が必要であることが明らかとなった。

Step.1 代表降雨パターンに対する代替案の設計

Step.2 設計された代替案の他の降雨パターンに対する分析
1)他の降雨パターンに対するシミュレーション実験
2)代表降雨パターンより治水安全度の低い他の降雨パターンの抽出

Step.3 降雨パターンの変化を考慮した代替案の設計

1)計画モデルによる代替案の設計
2)設計された代替案の評価

図-10 降雨パターンの変化を考慮した代替案の設計方法

表-2 降雨パターンを考慮した代替案

(単位 100万円)

施設	猪名川 ダム	多田 治水地	多田 改修	川西池田 改修	支川 改修
昭和28年9月型降雨	1374.7 (1450.0)	0.0 (0.0)	9746.2 (1178.8)	10224.4 (1563.4)	4797.8 (1.000)
昭和32年6月型降雨	1374.7 (1450.0)	0.0 (0.0)	8595.0 (947.4)	10224.4 (1563.4)	9164.4 (1.766)

5. おわりに

本研究においては、都市化流域の治水施設整備計画問題に対する段階的な検討プロセスを提案するとともに、合理的な計画代替案の設計のツールとしてハイブリット型計画モデルを開発し、猪名川流域を対象とした実証検討を通してそれらの有効性を明らかにすることができた。今後に残された課題としては、本方法論のレベルアップをめざして、①ハイブリッド型計画モデルで用いた最適化手法のより一層の効率化、②治水施設整備計画の計画代替案の設計における降雨の取扱いについての方法論の確立、③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、等々を行なっていくことが考えられる。

最後にこの研究を進めていくにあたり京都大学大学院で共同研究を行なった多々納裕一氏（島根県）、田井中靖久氏（京都大学大学院）、資料の提供や適切な助言を賜った建設省近畿地方建設局猪名川工事事務所調査第一課の町野健次課長、福地宜太郎氏、㈱建設技術研究所岡田耕部長、金光泰秀氏、西田良夫氏に感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 山口高志、古川勝秀、角田学：治水計画の策定および評価に関する研究、土木研究所報告書 156、1981.3
- (2) 池淵周一：計画降雨、土木学会関西支部昭和50年度講習会テキスト
- (3) 江藤剛治、空田明、米谷恒春、木下武雄：大雨の頻度、土木学会論文集 369、1986.5
- (4) 古川和広、春名攻、渡邊泰也：ハイブリット型治水計画モデルの解法に関する研究、土木計画学研究講演集、1986.10