都市化流域における治水計画問題のモデル分析*

Model Analysis on Planning Problem
of River Disaster Prevention in Urbanized Area

吉川和広** 春名攻*** 多々納裕一****

by kazuhiko YOSIKAWA mamoru HARUNA hirokazu TATANO

In this study a mathematical planning model is formulated as explorative optimization model, in which flood run-off simulation models is embedded to describe the disaster caused by flood, in order to analyse planning problem on river disaster prevention in urbanized area systematically.

Based on past studies a stage-wised planning process, comprised with "Stage of analysis" and "Stage of integration", is proposed and the mathematical planning model is used for designing alternatives of disaster prevention facilities at "Stage of integration" of planning process. Parametric analyses utilizing this model would produce effective information for disaster prevention planning in urbanized area.

The applicability of the mathematical planning model is evidenced through case study carried out in Ina River basin area.

1. はじめに

近年、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地域計画の中でも重要な課題となってきた。我々の研究グループではここ数年来このような治水計画問題に関してのシステム論的な検討を行って問題の解決を図ろうとしてきた。そして、その中でもとりわけ、治水計画情報の作成を行う際の合理的で効率のよい計画代替案の設計方法を一つの重要な課題として取上げてきた。現在、シミュレーショ

* キーワーズ：治水計画，システム分析，計画理論

** 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学科 (〒606 京都市左京区吉田本町)

*** 正会員 工博 京都大学助教授 工学部土木工学科 (同上)

**** 学生会員 京都大学大学院土木工学専攻 (同上)

ン技法の進歩によって水理水文現象に関する現象再現性は高められているが、計画問題の分析に持ち込む際に、その情報の精度を落さずに、操作的に計画代替案を設計するかという問題については、解決すべき課題が多く残されていた。

本研究では、我々の都市化流域における治水計画問題に対する視点を明確にするとともに、システム論的なアプローチを行って治水計画問題の検討プロセスを提案する¹⁾。そして、そのプロセスの中における治水計画モデルの位置付けを明らかにするとともに、シミュレーションモデルを組込んだ逐次探索型最適化手法による治水計画モデルを作成し、これを用いることによって計画代替案の設計を行い、さらに、実証レベルでの適用を通して各種の検討を行ったものである。

2. 本研究における治水計画問題分析の視点

急激な都市化を遂げた河川を中心に、近年新しい

型の水害が発生してきている。つまり、従来水害に対して比較的安全だと思われてきた地域までもが僅かな降雨で浸水する傾向や、一度の洪水で受ける被害の程度が以前に増して大きくなるという傾向が強くなってきている。都市化流域におけるこのような水害現象の変容は流出域の都市化と氾濫域の都市化という2つの側面からとらえることができる。

まず、流出域の都市化について見てみると、流域の保水・遊水機能が損われることにより、洪水や土砂の流出量が増大し、また、その流出時間も短縮されて河川の治水機能の劣化を招いている。一方、洪水の氾濫域での都市化が進行すると、被害対象そのものが増大したことになり、それ自体が洪水氾濫時における被害の増加につながる結果となっている。

このような流域の都市化（とりわけ、氾濫原の土地利用の高度化）に対応する防災上の観点から、河川氾濫原の洪水に対する安全度の確保という社会的要請が生まれ、治水技術も大いに発展してきたのである。それにもかかわらず、今日の都市化流域では都市化の進行状況が急激なのに対して治水施設の整備は遅れがちとなっている。これは人家が密集し、都市施設が集積している河川流域においては多大な工事費や工期が必要となり、防災上必要な治水施設の十分な整備を妨げているからである。

このように都市化流域、とりわけ今後も都市化が進行していくと思われる流域に対しては、流域を構成する都市社会の発展状況を的確に把握するとともに、治水計画と都市計画や地域計画の内容をあらかじめ十分に検討することによって、総合的な観点からの治水計画の計画化を図ることが必要である。

3. 治水計画問題の検討プロセスの概要

我々は、都市化流域における治水計画問題の分析や治水計画の策定を取扱った従来の研究を踏まえた上で、前述のような視点を盛り込んだ治水計画の策定方法の確立を目指して、システム論的なアプローチの方法を提案してきた。

本研究では、概ね10年程度先の地域の将来像に対応した治水対策を先行的に進めていくための計画化の方法と、計画化のための情報の作成方法を基本計画ないし整備計画のレベルでとりまとめるための方法の提案を行うこととする。従って、計画目標年次

ステップ1 治水計画問題検討のための分析のステップ

ステップ1 現況分析的検討 (対象地域における治水問題に関する検討対象課題の抽出)   1-1 対象地域の治水計画に関わる地域特性の把握   1. 自然的条件   2. 社会・経済的条件   3. 物的施設条件   4. 既存の諸計画   1-2 被害発生現象を記述する現象モデルに関する考察   1. 現象モデルの具備すべき条件   2. 水文・水理学、河川工学の分野における基礎研究のレビュー・考察   1-3 治水問題に関する検討対象課題の抽出

ステップ2 計画分析的検討 (対象地域の治水計画における前提条件の整理と計画化の方法の構成)   2-1 分析的検討の前提条件の整理   1. 水害発生シミュレーションモデルの定式化   2. 分析対象降雨（時間・空間分布、規模）   3. 流域の将来土地利用状況の想定   2-2 治水手段の構成   2-3 治水手段の影響・効果に関する分析   1. 着目すべき状態要因の列挙   2. 治水手段の影響・効果分析   2-3 治水対策代替案の作成（治水手段の組み合わせ）   2-4 評価の方法に関する検討   1. 評価項目、評価尺度の抽出   2. 評価方法に関する検討   2-5 治水計画の計画化の方法に関する情報の整理

ステップ2 治水計画問題検討のための総合のステップ

ステップ3 計画化のための検討 (治水計画の計画化のための必要情報の作成)   3-1 計画化の方法に関する前提条件の整理   1. 評価尺度および評価方法の整理   2. 計画モデルの具備すべき条件の整理   3. 治水対策代替案の整理   3-2 治水計画の計画化のための治水計画モデルの定式化   3-3 治水計画の計画化のための治水対策代替案の設計および評価   3-4 治水計画の計画化のための計画情報の作成   1. 流域の土地利用策に対する治水手段の構成に関する情報のとりまとめ

図-1 治水計画問題検討のためのプロセス

に流域の治水効果をあげるために有効な治水手段の種類や位置、規模等についての定量的な情報と、計画の持つ基本方向の明確化とを、ともに求めていくことが治水計画情報作成のねらいである。

ここでは、以上のような治水計画問題の検討プロセスを図-1に示すように分析と総合の2つのステージに分けている。まず、分析のステージの第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の基礎的情報としての既存資料の収集や整理を行うとともに、必要に応じてこれに基づいた一次的分析を行う。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・整理することとする。このステップで行う分析は、次に述べる計画化を直接に目指した分析と異なり、現在抱える治水計画問題に関する問題点の明確化や以後の計画的検討のフレームを設定する段階で、これを「現況分析的検討」と呼んでいる。

次の第2ステップでは、現況分析的検討の段階で

得られた計画的検討のフレームや計画における前提条件をベースとして、計画化を目指したシミュレーションモデルの定式化を行い、これを用いて治水手段の影響・効果分析を行うこととする。そして以後の検討過程で計画化を進めていくうえで必要な評価の方法や総合化の方法に関する情報をとりまとめるという、「計画分析的検討」の段階を設ける。

そして、最後の総合のステージでは、このような2つのステップを含む分析のステージで得られた情報に基づいて、治水対策案を想定するとともに、これらを治水計画モデルを用いて治水対策の組合せ内容を評価検討することとする。そして、これらの検討結果を用いて、具体的な計画代替案を設計するとともに、複数案想定した流域の将来の都市化の状況においてその効果の検討をさらに進めて、治水計画化のための情報としてとりまとめることとする。この総合のステージにおいては治水計画情報の作成にあたって計画代替案の合理的な作成や多様な情報を得ることが必要となる。そこで、治水計画モデルの合理性や操作性が重要となってくるのである。

4. 本研究で提案する治水計画モデル

ここでは、治水計画情報作成のためのツールとして治水計画モデルが充足すべき要件について述べるとともに、本研究で提案する治水計画モデルの作成に関する考え方を示しておくこととする。

一般的に治水計画モデルを用いて計画代替案を設計する場合、分析のためのモデルや設計に用いる計画モデルは以下のような要件を充足していることが必要である。

- ①現象合理性 計画レベルに対応した精度で流域における洪水被害現象を再現できること。
- ②目的合理性 適切な評価尺度で治水手段の効果を評価できること。
- ③操作性 各種の治水手段を計画化の検討に必要な範囲で比較的自由に組込むことができ、計画情報を多様に求めることが出来ること。

ところで、計画代替案を設計する方法は大別して次の2つの立場のいずれかをとっている。すなわち、一方は上記①の現象合理性を特に重視する立場であ

り、他方は②の目的合理性や③の操作性を重視する立場である。

前者は各種の治水手段群（治水施設の種類・位置・規模等の組合せ）を想定し、水理・水文現象を忠実に反映できるシミュレーションモデルを用いて、多数回の実験を行って各案の内容を比較検討し、治水の目的に照らし合せて評価することによって最も望ましい計画案を選択しようという方法である。後者では、まず、過去の実績データ・情報や現象合理的と考えられるシミュレーションモデルによる分析で求めた多様なデータの双方あるいはいずれか一方に基づいて、洪水現象と治水施設整備の関係等を開数近似化して求め、次いで、これらの関係式を用いて数理計画モデルを定式化した後に、規範的に計画代替案を設計して行こうとする方法である。

さて、前者の方法は、治水手段群の数次第で多数回の実験回数を必要とすることや、目的に対して直接的に最適な代替案を設計することができない等々の不利な点が存在する。しかし、ここではシミュレーションモデルのみを用いるために治水計画手段の多様な盛り込みが可能であり、現象合理性も直接的に保証されるという利点がある。一方、後者の方法は計画モデルで用いる制約条件や評価関数の同定の段階で関数近似を行うために、現象合理性には多少の犠牲が生じるという欠点を持つ。しかし、近似空間上ではあるが最適な代替案を自由度の大きい操作性の下で設計することができるという利点も持っている。

我々は、本研究でこの両者の長所を取入れた方法の開発を目指して次のような計画モデルの開発を行った。すなわち、現象メカニズムを反映したシミュレーションモデルを逐次探索型最適化モデルの中に組込むことによって現象合理的でかつ目的合理的と判断される計画モデルを作成することとしたのである。通常、逐次探索型最適化手法によって最適解を求める方法は、以前の探索によって求められた目的関数値や勾配などに基づいて、新しく目的関数値を逐次改善していき、最適性の基準を満すまでこのような解の改善を繰り返すという一連の動作よりなっている。ここで、これらの手法は目的関数値と制約関数値を求めることができれば解を改善することができる。シミュレーションモデルを入出力の関係か

図-2 シミュレーションモデルを組込んだ逐次探索モデル

図-3 最適解探索のための段階的アプローチの方法

らみると、あたかも関数のようにある施設規模 X に対して流量 Q や被害額の期待値 $\bar{D}$ などを出力するのであるから、 X を変数、 Q 、 $\bar{D}$ 等を制約値、目的関数値として用いることで、逐次探索型最適化手法への組み込みが可能となる。本研究で提案するモデルのフレーム的構成は図-2に示すようである。また、全体のモデルの構成は、5. 実証的検討のところでも示した治水計画モデルのようである。（後で詳述する。）

ここでは、まずシミュレーションモデルに治水施設の規模 X を入力して評価要因〔流量 Q 、被害 $\bar{D}$ 〕を出力する。次に、逐次探索型最適化手法によって評価要因 $(Q, \bar{D})$ に従って改善された解 X を求め、これ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り返しながら最適解に達しようとするものである。また、シミュレーションモデル構成は図-4に示したとおりであるが、計算時間の関係より氾濫モデルでは簡略化したモデルを用いている。この方法を用いることによって、計画モデルに求められる条件は満たされるばかりでなく現象メカニズムを反映したシミュレーションモデルを組込んでいることから、計画化の検討に必要

図-4 シミュレーションモデルの構成

な多様な計画情報を得ることも可能となる。

さらに、本研究では計算効率上の問題点を克服するために、モデル分析の際には次に述べるような工夫を施した。つまり、図-2のモデルだけを直接適用して治水計画の計画代替案を設計することはあまり適当ではないと考え、図-3に示すような段階的なアプローチをとることによって上述した欠点の克服を図ったのである。

①解空間の概形をシミュレーション実験を通して把握するとともに、シミュレーション実験の結果に基づいて解空間の関数近似を行う。

②近似空間における最適解を図-2のモデルと同じ定式化した数理計画モデルによって求める。

③近似解として求められた点の近傍において図-2のモデルによる最適解の探索を行い、目的合理的でかつ現象合理的な解を求める。

この方法を用いる事によって図-2の方法の利点を保ちつつ全域的な最適解に効率的に接近することが期待される。そこで、実流域を対象とした検討により、その有効性および適用性の検証を行った。

5. 実証的検討

ここでは、前述した治水計画問題検討のプロセスにしたがって、大阪府と兵庫県境を流れる淀川の支流である猪名川流域の総合的治水計画問題を対象に実施した事例レベルの検討について述べるとともに、その検討の過程で本研究で提案する図-2、図-3

図-5 流域の概要

の方法の有効性や適用性を実証レベルで検討することとする。

(1) 猪名川流域の治水上の問題点の抽出

猪名川は図-5に示すように淀川水系に属する支流で、今後予想される都市化の進行に伴い流出機構の変化やダメージポテンシャルの増大が想定される。

また、既往の出水記録や治水施設の整備状況から、特に猪名川流域で問題となるのは、多田地区や川西・池田地区の治水施設整備の遅れである。猪名川流域では工事实施基本計画により、超過確率1/200に対応できる治水施設計画が立てられ、これに基づいて河道やダム等の整備が行われつつある。下流部では1/200対応の堤防が完成し本川で破堤・溢水による水害の危険度は少なくなって来ているが、中流部に位置し鼓ヶ滝狭窄部を挟んで上下流の関係にある多田地区と川西・池田地区では、人口・資産の河川周辺への集積や狭窄部の開削問題等で治水施設の整備が進みにくい状況となっている。また、今後も人口・資産の集積が進むと見られ早急な治水施設の整備が必要となってきている。また、本川整備に伴って、支川域の内水問題も今後大きな課題となると考えられ、上下流・本支川といった治水施設の整備をめぐる競合関係が生じている。

(2) 代替案評価に関する検討

上述したように当猪名川流域においては、流域の都市化と治水施設の整備をめぐる競合関係が主要な治水計画課題となる。そこで、本研究では将来の流域の状況を想定したうえで地域的な治水安全度の不均衡を是正しつつ流域全体の治水安全度を確保・向上していくことを治水計画問題の検討における基本方向とした。ここで、このような基本方向を充足し

ているかどうかを検討し評価していくために、治水安全度をいかなる尺度で評価するかということが重要となる。本研究では、基本方向に照らして地域別の治水安全度の違いを評価するには、洪水頻度による水害の深刻さの違いや一回の水害による洪水被害の大きさによる深刻さの違い等々を表現できること、さらには、系統的に計画代替案の設計を行い評価していく上で、定量的で一元的な評価尺度となっていることが望ましい。そこで、本研究ではこれまでの専門分野での研究²⁾や我々の検討事例に基づいて被害額の年期期待値
$$Di = \int_0^{\infty} Di(X, T) Pr(T) dT$$

(T : Return period, X : 治水施設規模) を用いることとした。これは、この指標が被害額 $Di(X, T)$ のみならず洪水の発生頻度 $Pr(T)$ をも同時に表現しており、上述のような条件を比較的効果的に満たすものと考えたためである。また評価の手法としてはMIN-MAX計画法の考え方を適用した計画モデルを用いることとしたが、この具体的内容については後述することとする。

(3) 将来の土地利用状況の想定

本研究では、流域の開発計画や土地利用計画に基づいて概ね10年後を計画目標として複数の土地利用状況の想定を行った。すなわち、第1のケースとしては、「市街化区域に指定されている地域はすべて市街化し、市街化区域以外の農地は猪名川流域で採用されている0.5%/年の転換率によって市街化する。さらに流域の開発計画で概ね10年後に開発が完了が予定されている地区もすべて市街化する。」という案を用意した。また、第2のケースとしては、「市街化区域の市街化率は現況の市街化率と市街化率を100%とした時の中間の値をとり、市街化区域以外の農地は0.25%/年で市街化する。さらに流域の開発計画で概ね5年後に開発の完了が予定されている地区のみが市街化する。」という案を想定して検討を加えることとした。さらに都市化の影響の比較のために第3のケースとして「現況の土地利用状況がそのまま存続する。」という案も加えて準備することとした。

(4) 治水施設の影響・効果分析

ここではシミュレーションモデルを用いて、治水施設の整備の影響や流域の都市化や降雨波形の違い

表-1 降雨波形、土地利用、治水施設の影響

H 3.27

(要因の割付け)

要因	水準	内 容
A 降 雨	1	前方集中
	2	中央集中
	3	後方集中
B 市街化	1	ケース3
	2	ケース2
	3	ケース1
C 貯留施設		猪名川ダム 多田遊水池
	1	放流量1450 m ³ /s 治水容量 0.0 m ³
	2	放流量1300 m ³ /s 治水容量 3.6E5 m ³
	3	放流量1000 m ³ /s 治水容量 1.17E6 m ³
D 河道改修		多田地区 川西・池田地区
	1	疎通能 200 m ³ /s 600 m ³ /s
	2	疎通能1010 m ³ /s 1470 m ³ /s
	3	疎通能2020 m ³ /s 2300 m ³ /s
E 支川改修		内川 駄六川 空堀川
	1	疎通能倍率 1.0 1.0 1.0
	2	疎通能倍率 1.0 1.5 1.3
	3	疎通能倍率 1.0 2.0 1.5

表-2 降雨波形、土地利用、治水施設の影響

(分析結果)

被害額の期待値	多 田	川西・池田	支川域	全体
A	2.60	14.05	115.34	13.06
B	3.53	3.69	5.15	4.37
A・B	0.25	0.79	1.21	0.63
C	1.96	6.73	0.42	5.20
A・C	1.06	1.15	1.08	1.16
B・C	0.18	1.49	15.29	0.66
D	37.65	75.94	20.47	67.24
E	0.37	1.73	121.17	0.53

による影響を分析した。この分析では、有効な治水施設整備の組合せや交互作用の影響を求めて、解空間の概略的な認識を行うことと、今後の分析の対象とする流域の将来の土地利用状況や降雨波形を決定することを目的とする。ただこの際、すべての組合せ案を対象としてシミュレーション実験を行うと、その実験回数は膨大なものとなるため、直行配列表(H3.27, H3.81)を用いた実験計画法によってシミュレーション実験の回数を効率的に減らして分析を行った。表-1から表-4に要因の割付けとその分析結果の一部を示しておいた。そして、それらの結果から次のように考察を行った。

①降雨波形の影響が大きく、特に「中央集中型」の降雨が最も危険であり、その影響は降雨規模が大きいほど顕著となる。

②都市化の影響はさほど大きくないが、支川域に

表-3 治水施設の影響・効果

H 3.81

(要因の割付け)

要因	水準	内 容
A 猪名川ダム	1	放流量 1450 m ³ /s
	2	放流量 1230 m ³ /s
	3	放流量 1000 m ³ /s
B 多田改修	1	疎通能 200 m ³ /s
	2	疎通能 1010 m ³ /s
	3	疎通能 2020 m ³ /s
C 多田遊水池	1	治水容量 0.0 m ³
	2	治水容量 3.6E5 m ³
	3	治水容量 1.17E6 m ³
D 川西改修	1	疎通能 600 m ³ /s
	2	疎通能 1470 m ³ /s
	3	疎通能 2300 m ³ /s
E 支川域改修	1	疎通能倍率 1.0
	2	疎通能倍率 3.5
	3	疎通能倍率 5.5

表-4 治水施設の影響・効果

(分析結果)

被害額の期待値	多 田	川西・池田	支川域	全体
A	361.80	463.23	—	820.87
B	68.36	561.85	—	65.46
A・B	2.66	14.28	—	4.15
C	—	57.37	—	57.37
A・C	—	0.40	—	0.40
B・C	—	0.90	—	0.90
D	—	10332.0	—	10332.0
E	—	1.20	153.8	72.20
A・D	—	80.91	—	80.91
B・C	—	86.61	—	86.61
C・D	—	10.20	—	10.20

おいてはその影響は大きく、都市化の最も進行した「ケース1」が最も危険な状態である。

③多田地区と川西・池田地区については、本線の改修とダム貯水池の効果が大きく、支川域では支川の改修のみが効果があった。

④各施設の交互作用は主効果に比して約1/15～1/1000と小さく解空間(各地区の被害額と治水施設の規模との関係)は、概略的には各治水施設の規模の一次結合かあるいはそれに近い独立な結合で表わされると判断できる。

(5) 治水計画モデルの定形化・定式化

(2)で述べたように、治水安全度の地域的な不均衡を是正しつつ流域全体の治水安全度の確保・向上を目指して、MIN-MAX計画法(最大成分最小化手法³⁾)による定式化を以下に行なった。

目的関数 $\text{Max } \{D_i(X)\} \rightarrow \min$
 制約条件 $i=1, 2, \dots, n$

- ・治水安全度確保のための制約

$$D_i(X) \leq D_i(X_0)$$

- ・下流の破堤防止のための制約

$$Q_L(X) \leq W_L$$

- ・総費用の制約

$$\sum_{j=1}^m f_j(X_j) \leq C$$

- ・治水施設規模の制約

$$X_j \leq X_j \leq X_j$$

D_i : 地域 i の被害額の期待値を求める関数

Q_L, W_L : 地点 L の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

X_j, X_j, X_j : 治水施設 j の規模およびその上下限

X : 治水施設規模の組合せ

X_0 : 現況の治水施設規模の組合せ

ここで、 D_i, Q_L は図-2のモデルではシミュレーションモデルよりの出力として与えられる。

(6) モデル分析と計画情報のとりまとめ

上記のように定式化した計画モデルを用いて図-3のプロセスに従って治水施設整備の計画代替案の設計と計画内容の分析を行った。ここに、拘束条件である土地利用状況と降雨波形としては(4)の分析の結果よりそれぞれ「ケース1」の土地利用状況と「中央集中型」の降雨を用いることとした。

①関数形の概略認識とその近似

ここでは、まず(4)で示したように各治水施設の交互作用の影響が主効果に比べて小さいことから解空間は線形近似可能であると判断されるので、シミュレーション実験を行った結果に基づいて重回帰分析を実施し、目的関数式および制約条件式の線形近似を行った。

②近似空間における解の導出

次いで、これを用いてLP問題として(5)で示したような定式化を行った後、近似空間における最適解を求めた。その後、これに加えて総費用をパラメータとするパラメトリック分析も実施した。

③厳密解の導出

さらに、その解の近傍において図-2に示したモデルを用いてシミュレーションレベルでの現象合理

図-6 解の各地域の被害額の期待値に及ぼす影響

的な最適解を求めた。ここに、逐次探索型最適化手法としては直接探索法的一种であるコンプレックス法⁴⁾を用いた。

この結果の一部を図-6、表-5、表-6に示しておく。これを見ると、現況では最も被害額の期待値の大きい川西・池田地区が、総費用の増加に伴って急速にその被害を減少して行き、緩やかに減少していた多田地区と250億円付近でその評価値を同じくしている。その後、320億円付近まで両地区は同様にその評価値が向上しその付近で最もその評価値の良かった支川域と一致している。そして、その後各地域は同様にその評価値を改善していつている。

このことから、各地区の治水安全度を確保・向上しつつ不均衡を是正する方向で治水計画代替案が設計されたことがわかる。また、設計された計画代替案を他の土地利用ケースに適用してみたところ、他のケースに対しても有効であることがわかった。これらのことから、当流域の治水計画課題として取上げた流域の都市化と治水施設整備をめぐる競合関係に対して、一応の成果を得ることが出来たと考える。

(7) 本研究で提案した治水計画モデルの有効性

ここでは、上述したモデル分析の結果をもとに、図-2、図-3で示した治水計画モデルとその実際的な適用のための段階的なプロセスの有効性や適用性という視点から考察を加えることとする。

図-6を見れば、LPによる解とコンプレックス法(図-2のモデル)による解は被害額の低減度からは多少ずれがあるが、表-4、表-5を比較してみれば解となっている治水施設の構成状態はほとんど差異がない。このことからLPによって全域的な最適解の概略的位置が求められているという条件の下では、図-2のモデルの解はシミュレーションレベルでの現象合理的な最適解(厳密解)を求めることが出来たと言える。ここで、解の挙動がMIN-MAX計画法による定式化の目的に完全に一致していることを考慮すれば、ほぼこの事例においてはLPにより全域的な最適解の概略的位置が求められていたことを裏付けており、図-2のモデルによって厳密解に到達することが出来たと考えることが出来る。さらに、図-2のモデルのみを用いた場合に比べて、解の探索も効率よく行うことが出来るというモデル操作上の利点も明らかになった。

このような考察から、図-2のモデルは図-3の方法を用いることで実際の治水計画問題への適用性は十分にあると判断でき、治水計画の計画代替案を設計するのに有効な方法となっていると考えられる。

5. おわりに

本稿においては我々の所属する研究グループの都市化流域の治水問題に対する視点や、それを盛込んだアプローチの方法を示すとともに、本研究で提案するシミュレーションモデルを組み込んだ逐次探索型最適化手法による治水計画モデルをそのアプローチの中に位置付け猪名川流域を対象とした実証的な検討を行って、モデルの有効性について示した。

今後の課題としては以下の事柄が挙げられよう。

(1) 計画モデルについて

①本研究では逐次探索型最適化手法としてコンプレックス法を用いたが、今後他の手法の適用を検討しさらに効率の良いモデルを構築すること。

②シミュレーションモデルが大規模になり精度が向上するに従って計算時間が膨大となるため計算時間の短縮やあるいは他の面からの検討が必要なこと。

(2) 最適解探索のための段階的アプローチの

方法について

表-5 LPによる近似解の構成
(土地利用ケース1)

	猪名川ダム	多田遊水地	多田改修	川西改修	支川改修
総費用 (億円)	放流量 (m^3/s)	治水容量 (m^3)	減通能 (m^3/s)	減通能 (m^3/s)	減通能 倍率
0	1450	0.0	200	600	1.0
250	1350.5	0.0	918.6	1928.2	1.0
320	1235.1	0.0	1344.3	2043.5	1.0
453	11196.6	0.0	1770.8	2159.0	3.5347

表-6 コンプレックス法による厳密解の構成

(土地利用ケース1)

	猪名川ダム	多田遊水地	多田改修	川西改修	支川改修
総費用 (億円)	放流量 (m^3/s)	治水容量 (m^3)	減通能 (m^3/s)	減通能 (m^3/s)	減通能 倍率
0	1450	0.0	200	600	1.0
250	1334.6	281.8	957.7	1899.4	1.0
320	1224.5	2407.9	1370.3	2021.6	1.08

①解空間の概形を求めて関数近似する際には、実験計画法により交互作用が主効果に比べて小さいときは線形の関数で近似し交互作用が主効果に比べて無視出来なければ非線形の関数で近似することが必要である。そして、非線形近似した近似空間において解を求めるためにNLPによる解法が必要となる。そこで、今後の研究のためはこれらの手法の導入に関する検討を十分に行うことが必要である。

②LPやNLPで求めた解が真に全域的な最適解の概略的位置を与えているかどうかを調べるためにより詳細な方法(感度分析など)を用いた検討を行う必要がある。

最後に研究を進めるにあたり共同研究を共に行ってきた井山聡氏(建設省)、松原裕氏(運輸省)、堀倫裕氏(京都大学大学院)に対して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 吉川, 春名, 松原; 都市化流域における治水計画の方法論的研究, 昭和59年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要, 1984
- 2) 山口, 吉川, 角田; 治水計画の策定および評価に関する研究(I), 土木研究所報告, 1981
- 3) 清水; システム最適化理論, コロナ社, 1976
- 4) J. Kowalik, M.R. Osborne著, 山本, 小山訳; 非線形最適化問題, 培風館, 1970