

IV-3 洪水氾濫想定地域における土地利用管理問題に関する一考察

北海道大学院環境科学研究科 正員 加賀屋 誠 一

1. はじめに

最近、地域計画における基礎的構成要素としての水、あるいは、基本的圏域として水系に重点をおく考え方が非常に重要な視点として認識されつつある。例えば、第3次全国総合開発計画（三全総）の構想の1つである定住圏構想においても水系を基本とした地域総合環境システムの確立が重点的課題とされている。^{1) 2)} としてさらに、流域圏の位置づけでは、全国の河川流域ごとにクラスター作り、その中を閉じた地域として、³⁾ 地域計画を進めていく方向も提案されている。

水は、人間の居住条件として最も重要なものの1つである。そして水環境という側面から最適な地域設定および、計画を実施していくことは、従来からの計画に比べ多少の制約があっても、推進されて好ましいと考える。すなわち、人間の生活水準として、生命の基礎的必需性、安定性、快適性、精神的充実性の4つをあげると、水は、いずれにも重要な要素となっており、大きな役割を果たしてきている。例えば、上水道、産業用水等の利水的要素は、必需性、治山治水は、安定性、水質汚濁、臭気等の問題は、快適性、さらに景観、レクリエーション等は、精神的充実性をそれぞれ表わす。本研究は、この中で安定性に関する水準を取り上げ、河川流域の開発等による治水水準変化を評価し、その目標水準の達成状態について検討を行なったものである。ちなみに、総理府の行なった意識調査によると、暮らしの質に対する切実度と充足度の総合的評価によるニーズの高いものには、交通安全・老後・物価等の問題とともに災害問題が上位に連なっている。⁴⁾

2. 総合的治水対策と土地利用管理問題

水害軽減のため従来より行なわれてきた方法は、主に治山治水事業として技術的対策(Structural Measures)に力点が注がれてきた。しかしながら最近総合治水という概念が建設者によって提唱され、⁵⁾ 具体的な事業も徐々に着手されつつある。この考え方は、従来の治水事業に土地利用管理、耐久建築の推進、多目的遊水池、各戸貯留槽の設置等のソフトウェア的要素を取り込んで、被害の軽減効果を大きくし、かつ短時間に達成しようとするものである。水害は、もともと自然環境のインパクトの大きさにその規模を規定されるものであるが、それを完全にコントロールすることは難しい。これは、被害の構造での社会的要因に対する比重が大きくなってきているからである。したがって対策を考えると、治水事業に多様性を持たせることが必要となる。しかしながら、総合的治水対策を評価する方法に対する研究は、未だ確立しておらず、数も多くないようである。例えばL.D.Jamesは治水に対する技術的あるいは、社会的方法を分類し、特に社会的方法を分類し、特に社会的対策の効果が大きいことを示している。⁶⁾ またDay及びLeeは、洪水の予測可能時間の確保あるいは情報サービスの向上が、人命のみならず資産等の被害軽減のために大いに役立つことを示した。⁷⁾ さらに最近では、L.D.James等は、治水対策の地域生態系に与える影響等の調査研究を行なっている。⁸⁾ しかしながらこれらの考え方は、比較的土地条件の選好容易な地域では、適応しやすいが、条件が厳しいところでは、その制約を考慮せずに解決策を得ることができない。したがって技術的対策と社会的対策(Nonstructural Measures)を一体化し、同時に地域の均衡性を検討する手法が必要であり、それを用いることにより、いろいろな条件を考えながら地域の治水水準を評価していくことが可能となる。

表2-1は、治水対策の総合性からみた分類と各特性についての依存度を概念的に表わしたものである。水害から人口および資産等を守るためには、これらの項目の組合わせによる防災の多重性あるいは、補填性を増加する事業が必要となる。特に都市化の進んでいる地域では、大きな効果が期待でき、有効な概念となる。ただし、農業地域では、耐水性作物の育種、あるいは、遊水池の設定等の農業経営の変換という枠に限定されると考えられる。

3. 被害ポテンシャル軽減効果分析の方法

総合的治水対策の評価の方法として、前回、⁹⁾ 2つの概念を提案した。その1つは、地域の諸計画に見合った治水計画を考えること、他の1つは治水計画と他の計画を同時に評価する考え方である。前者を適応型(Adaptive type)、後者を最適型(Optimal type)と称した。いずれの場合にも、自然環境要因、社会環境要因、そして土地利用要因に代表される自然・社会環境接触要因によって構成されるシステムモデル

治水対策	効果	技術性	経済性	社会性
1. 技術的対策				
a, ダム b, 水路改良	◎	◎	△	○
c, 堤防, d, ポンプ場				
e, その他の構造物				
2. 社会的対策				
a, Flood Proofing ^{緊急建設的方法}	△	△	◎	○
b, 土地利用の調整	○	○	○	○
c, 住居の移動	◎	○	○	◎
d, 予報および予測	◎	△	△	◎
	○	◎	△	○

備考:◎はすぐれているもの ○はややすぐれているもの △は劣っているもの

表2-1 治水対策の総合的分類とその特性

である。適応型モデルについては主として妥当なシナリオに基づいたシステムダイナミックスモデル(SDモデル)によるシミュレーション分析、最適性モデルについては、最適制御理論による最適化モデル作成し、それぞれについて検討を行った。

図3-1は、本研究で考えたシステム領域の設定の概念である。図のように3つのサブシステムが互いに連関するシステムであり、相対的な関係より地域の被害ポテンシャルの変動をダイナミックに評価するシステムモデルである。ここでの被害ポテンシャルは、生起確率を用いた各年の想定被害額を期待値として表わしたものである。それを、ここでは、年期待被害額(Annual Expected flood damage)とする。これを用いると、被害ポテンシャルの軽減効果を地域の諸機能とのトレードオフ関係として分析可能となり、また、その動学的な変化を計測することができる。

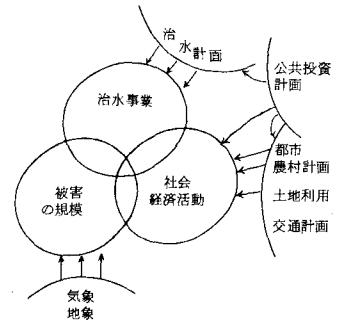


図3-1 システム領域の設定

4. モデルの適用事例

2種類のモデル適用例として石狩川中・下流域を10地域に分割し、適応型モデルによる被害ポテンシャルの地域特性を計測したものと、札幌市東北部地域への最適型モデルを適用し、土地利用管理方法の検討を試みた例を示す。

4-1. 適応型モデルの適用例

適応型モデル適用例として、分割された地域を下流よりA~Jゾーンとし、各々の地域の発展形態と被害ポテンシャルの変化、さらに治水水準達成状態について分析を行なった。¹⁰⁾ なお、

対象ゾーンの地域的指標のうち、人口密度、および、単位面積当たりの工業出荷額・商品販売額の昭和50年度の値を図4-1に示す。

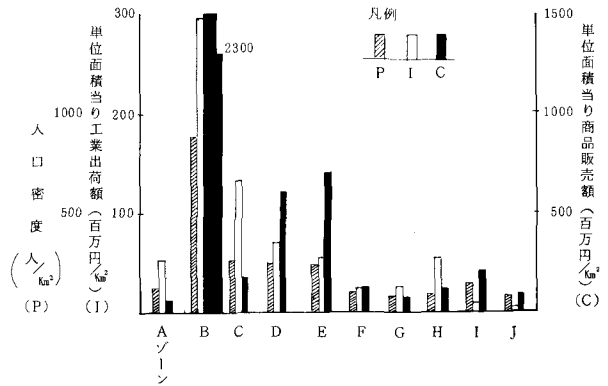


図4-1 各ゾーンにおける人口密度および経済度(昭和50年度)

1) 被害ポテンシャルの地域特性

各ゾーンの年期待被害額について投資一軽減被害額比(RI)が1の場合(すなわち、便益費用に均衡する状態)で投資を与えシミュレーションを行なった。なおRIを用いて決定される投資法は、土地利用の変化に追従した方法と考えられ、効率性の面から経済的な方法といえる。その結果のうち、各ゾーンごとの被害項目別の比率の変化を表わしたものが表4-2である。これによると、D、E、F、G各ゾーンは、水田被害額の占める割合が60%以上と大きく、将来もその比率に急激な変化が考えられない地域、またAおよびCゾーンは農業被害額の比率が急激に減少し、都市型水害地

域に変化する地域である。さらに、Bゾーンは都市化がますます進み、特に商業、業務の機能に及ぼす影響が大きくなる地域である。最後に、H、I、Jゾーンは、その核として中心都市が存在する地域であり、農業被害の占める比率が漸減傾向をとることが予想される。また、年総期待被害額の変化を図4-2に示す。これらにより、次の3つのパターンで表現できる地域特性が得られる。

a)人口・資産高集積型（都市化型）…構造物による治水対策の効果が非常に大きい、治水目標が達成された後も被害ポテンシャルの上昇がみられる。これは大都市周辺のような資産が急激に集積している地域である。この場合、目標水準をより高い状態に設定するか、社会的治水対策併用によって被害ポテンシャルを抑制していく必要がある。→Bゾーンに見られる。

b)人口、資産散在型（農村保持型）…治水投資によって被害ポテンシャルが減少していくことが予想される地域であり、最も治水投資の効果が安定している地域である。→D、E、F、G およびIゾーンに見られる。

c)中核都市周辺都市化型…a)およびb)で示された中間的地域性を有する地域であり、将来、軽減される被害ポテンシャルより被害ポテンシャルが上回る地域である。この場合、現在よりも治水安全度を増すためには、先行的投資を行なっていくか、土地利用計画面での配慮、および総合的な治水対策の方法を採り入れる必要がある → A、C、H、およびJゾーンに見られる。

ii)治水投資額の特性

費用-便益分析法による投資-軽減被害額比（R I）をいろいろ変化させながら必要投資額について検討を行なった。その1例としてR I = 1の時の各ゾーンの目標水準達成までの必要投資額を表わしたのが図4-2に示される。被害ポテンシャルの対応で考えると、aパターンでは、短期的に集約した投資が必要となる。またbパターンでは、比較的ゆるやかな伸びで、伸び率もほぼ一定でよい。さらにcパターンでは、治水投資の必要性が今後増加し、その伸び率も年々大きくしていく必要がある。

4-2、最適型モデルによる事例

4-1でみられるように人口および資産の高密度、高集積地域では、治水事業が被害ポテンシャルに与える影響が非常に大きいこと、しかしながら事業計画の実施方法によっては、被害ポテンシャルの軽減効果が充分表われないこと、また完全制御が難しいことなどが示された。このことは、技術的対策と社会的対策の結合による総合的な治水対策の必要性を示唆している。ここでは、都市部の2内水域について地域開発の治水面から最適過程を検討できるモデルを作成し、分析を行なった。今回は、その中で土地利用の許容

(単位%)

各被害 フラグ	各被害	各期待被害額比率				各被害 フラグ	各被害	各期待被害額比率			
		0年	10年	20年	30年			0年	10年	20年	30年
A	イ	70	36	19	16	B	イ	15	8	5	4
	ロ	17	13	8	7		ロ	17	24	14	9
	ハ	9	36	49	69		ハ	23	23	22	19
	ニ	2	10	15	5		ニ	38	36	49	53
	ホ	1	3	10	3		ホ	7	10	14	15
C	イ	38	25	16	5	D	イ	75	69	63	56
	ロ	34	20	13	6		ロ	16	14	12	11
	ハ	9	15	16	12		ハ	5	8	10	12
	ニ	9	21	29	37		ニ	3	7	11	16
	ホ	10	19	27	41		ホ	1	2	4	5
E	イ	75	65	59	53	F	イ	68	56	52	48
	ロ	6	5	5	4		ロ	15	11	13	14
	ハ	16	23	26	29		ハ	15	30	33	36
	ニ	2	5	7	10		ニ	1	2	1	1
	ホ	1	2	3	4		ホ	1	2	1	1
G	イ	64	50	43	35	H	イ	54	46	39	40
	ロ	15	8	5	5		ロ	16	12	9	7
	ハ	13	22	24	24		ハ	18	25	24	20
	ニ	4	9	12	16		ニ	6	10	14	16
	ホ	4	11	16	20		ホ	6	8	15	17
I	イ	32	28	20	14	J	イ	53	53	38	28
	ロ	8	6	5	5		ロ	9	7	5	3
	ハ	40	41	44	43		ハ	23	22	31	32
	ニ	14	18	21	27		ニ	9	11	17	24
	ホ	6	8	9	11		ホ	6	8	10	14

イ：水田

ロ：畑

ハ：住宅

ニ：卸小売業

ホ：製造業

表4-1 各被害項目別被害額の比率

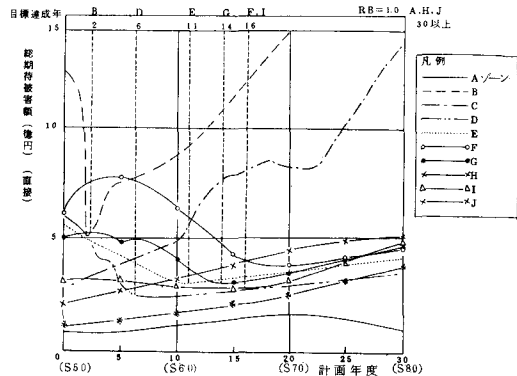


図4-2 各ゾーンにおける期待被害額予測

度,Flood-Proofing の方法による影響, さらに達成年度の設定が与える影響等の検討を行なった。

i) モデルの概要と最適過程

地域開発の状態を土地利用の高度化を考え, 洪水被害コストおよび, 治水対策コストによる最適制御問題を与える。すなわち土地利用の高度化(具体的には宅地化)の政策的制御と, 治水対策面からの制御の2変数制御による, 次の3評価関数を用いた最適経路探索モデルを考えることとする。3評価関数は, 技術的治水対策を行なう事業体(Public Agencies)の目的に適合するものを式(4-1), また地域開発主体(Private Party)の目的より作成されたものを(4-2)に示す。さらにそれらの総合的な目的関数を(4-3)に示す。これらの3評価関数を最小化することによる最適性を考えていく。

$$\left. \begin{aligned} J_1 &= \int_0^T \{Cf(t) + Cp(t)\} dt \cdots \cdots \cdots (4-1) \\ J_2 &= \int_0^T \{Cf(t) + Cfp(t) - U(t)\} dt \cdots \cdots \cdots (4-2) \\ J_3 &= \int_0^T \{Cf(t) + Cfp(t) + Cp(t) - U(t)\} dt \cdots \cdots \cdots (4-3) \end{aligned} \right\} \rightarrow \min$$

$$\text{ただし, } Cf(t) = \sum_j \sum_i \{Pi(t) \cdot Gij\{qj(t)\} \cdot Ri\{qj(t)\} \cdot Bij(t) \{1 - ej(t)\}\} \cdots \cdots (4-4)$$

$$Cp(t) = \sum_j Upj(t) \cdots \cdots (4-5)$$

$$Cfp(t) = \sum_j \sum_i Uij(t) \cdot hj \cdot ej(t) \cdot Ppi \cdots \cdots (4-6)$$

$$U(t) = \sum_j \sum_i Uij(t) \cdot Pi \cdots \cdots (4-7)$$

$$Bij(t) = lij(t)/Lj, qj(t) = \sum_i \{Rsi \cdot fi \cdot lij(t) - quj(t)\} \cdots (4-8)$$

またこれらを制御する状態変数は, (4-9)および(4-10)に示される。

$$\dot{lij}(t) = Uij(t) \cdots \cdots (4-9) \quad \dot{quj} = Upj(t) \cdot \alpha \cdots \cdots (4-10)$$

(4-9)は, 土地利用状態方程式, (4-10)は, 治水投資状態方程式である。また制約条件は(4-11)となる。

$$\sum_i (Uij - Uij') = 0, \sum_i lij = Lj, ej(t) = \text{const}, Uij, Uij', Upj > 0 \cdots \cdots (4-11)$$

これらの定式化された問題について最適制御問題としてポントリャーギンの最大原理を用いて解く。第1に(4-1)について考えると, 一般に $\partial J_1 / \partial Uij > 0, \partial J_1 / \partial Upj < 0$ である。また特に, J_1 は Upj に関して凸関数となり, またある Uij について J_1 を最小にする Upj が1点得られる。これを任意の Uij について考えると, J_1 を最小にする Uij が直線として得られ $Upj = \text{const} = Um (0 \leq t \leq T)$ となる。また $Uij(t)$ の動く範囲が小さいほど良い。つまり事業体の目的を達成するためには, 土地利用高度化とは独立に投資の規模が決定される解となる。これに対して, (4-2)および(4-3)については, ハミルトン関数が Uij と Upj に関して, 一次関数となる。

その最小値をとる条件を考えると Uij および Upj の組み合わせが最大値か最小値かをとり解が得られる。ここでは, (4-3)式を用いて検討を行なうが, 初期状態では, 被害ポテンシャルが大きいために, 治水事業をできるだけ最大とし, 土地利用の高度化はできるだけ制限しようとする制御が働き, ある t に達した時過渡状態になりその後治水事業最小, 土地利用高度化最大という解が得られる。そのアルゴリズムの概要は, 図4-4に示される。

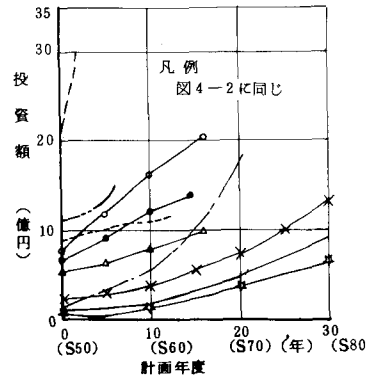


図4-3 各年度における投資額

$Cf(t)$; 年期待被害額 (mm)
$Cp(t)$; 年治水事業費 (mm)
$Cfp(t)$; Flood proofing 費用 (mm)
$U(t)$; 資産および生産額の増加量 (mm)
$Gj(t)$; 被害面積関数 (mm)
$Ri(t)$; 被害率関数
$Pi(t)$; 単位面積当り資産額 あるいは生産額 (mm/mm)
$ej(t)$; Flood proofing 率
$Rsi(t)$; 確率雨量 (mm/日)
$fi(t)$; 流出係数
$lij(t)$; 土地利用面積
$quj(t)$; ポンプ排水流量 (mm/日)
$Ppi(t)$; Flood proofing 単価 (mm/mm)
$Uij(t)$; 土地利用面積 (mm)
$Upj(t)$; ポンプ施設投資 (mm)
$qj(t)$; 氾濫流量 (mm/日)
hj ; Flood proofing 高 (mm)
Lj ; 全地域の土地利用面積 (mm)
i ; 土地利用の種類
j ; 地域の種類 (分水域)

ii) 対象地域

対象地域としては、札幌市にあるⅠ分水域と、Ⅱ分水域の内水氾濫想定区域とした。Ⅰ分水域は、居住人口、75千人、土地利用については、水田436ha、畑1192ha、宅地717haとなっており、一方Ⅱ分水域は、居住人口、105千人、水田190ha、畑1,915ha、宅地1,456ha（いずれも昭和50年度）であり現在平均1.0～1.5%程度の宅地化が進んでいる。またⅠ分水域よりⅡ分水域の方が想定氾濫が高く、したがって、Flood Proofing高をそれぞれ1.5m、3.2mとしている。

iii) 分析結果

図4-5および図4-6は、前述の解析結果による目標達成年度および、Flood Proofingを実施する面積の割合と、土地利用許容可能年度の関係を示したものである。目標達成年度は、治水の目標水準までのポンプ施設設備完了した年度であり、Flood Proofingは、盛土による冠水防止対策を行なうことである。換言すれば前者は、技術的対策、後者は、社会的対策の評価値を意味している。これによると、達成年度がゆるくすると土地利用の許容可能年度も遅れ、逆にFlood Proofingの実施される比率を大きくとるほど速まる。しかしながら比率が大きくなると、達成年度に対して、許容可能年度は、遅くなる。この場合2地域の許容可能年度を同時に評価しているので、条件の厳しいⅡ分水域では、それだけ到達する年度が遅れる。

図4-7は、空地の増加率を変化させた日までの総投資額を示したものである。これを現実の治水投資（実際に治水事業として行なわれる投資）規模と比較すると、斜線で示した領域で、共通範囲を作る。これは、Flood Proofingの割合が0.2、宅地増加率1%程度で得られた結果に一致する。すなわち治水事業費のみで、技術的、社会的対策の総合的な考え方を進めた場合の最適解である。したがって宅地増加率を、1%以上確保したい場合には、治水事業規模の拡大が必要となる。あるいは、土地利用に関しての開発主体の受益者負担的proofing費用を考える必要がある。

5. まとめ

以上の結果をまとめると次のようになる。

i)流域の多分割された各ゾーン被害ポテンシャルの特性を考えると、概ね3つのパターンに分類された。また、個人的厚生面から考えると、中流域ゾーンに高い値が得られた。これは、治水水準の設定が地域特性を考えて行なわれなければならない反面、全体としての重要度と、個人的厚生面での重要度のトレードオフ評価を考慮しつつ立案しなければならないことを表わしている。

ii)被害ポテンシャルは、特に都市化の進むゾーンでは、その増大が予想されるが、洪水に対する抵抗力を増す意味

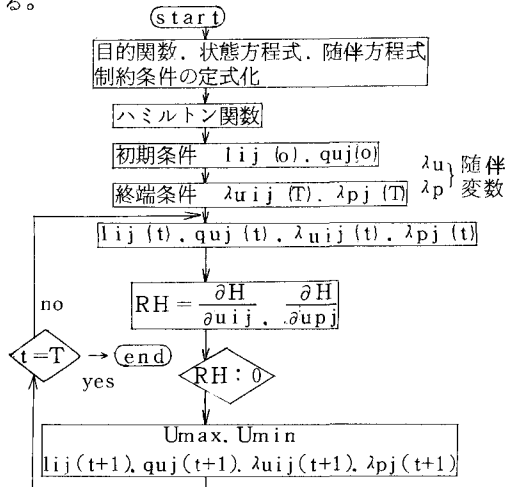


図4-4 解析のアルゴリズム

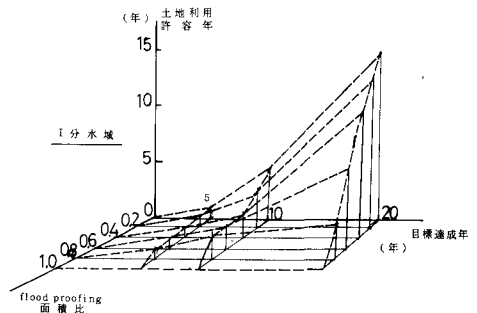


図4-5 シミュレーション結果による
土地利用許容年度（Ⅰ分水域）

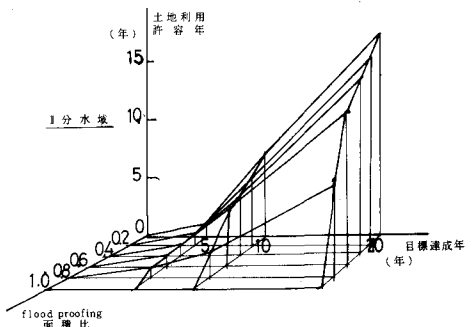


図4-6 シミュレーション結果による
土地利用許容年度（Ⅱ分水域）

でも、前述した農村部との投資の配分問題をなくする意味でも、多様性のある総合的治水対策の必要性が増すことが立証された。

iii)すなわち、都市化された地域での治水対策に占める社会的対策の重要性は大きい。つまり、土地利用の調整、あるいは、Flood Proofingを行なうことによる治水効果が、大きいことが確かめられた。

iv)農業および道路建設などの公共事業が、治水事業に与える影響は、あまり大きくないことも計測された。しかしながら農業開発による累積期待被害額については、かなりの規模になる。したがって今回は、特に分析できなかったが、上流地域の農業開発、あるいは、大型プロジェクトによる農地開発事業などの場合は、農業政策との競合性が問題となり、それらの間の均衡を考えていく必要がある。

v)交通への影響についても通過交通量の面から分析を行なったが、対象道路網1幹線のみであったせいか、被害は、ほとんど計測されなかった。これは、道路標高が氾濫高以上に設計されているためであると考えられる。しかしながら氾濫地域からの発生集中交通量に対する影響を考えると冠水時間の長期にわたる地域を中心に被害ポテンシャルの高い地域がみられた。

このように、被害ポテンシャルの時系列的変化に即応した治水計画のあり方は、地域の均衡ある発展を考える時、非常に重要で、また他の問題に対しても拡張できる。特に本手法は生活環境に影響を与える数多くの制約に対して、適正な対策を行ない、居住水準を高く上げながら、地域の発展性を考えていく有効な手段となり、有益な情報を提供できると考えられる。

今回で検討できなかった点は、

i)多地域に分割したモデルでそれぞれ独立した評価を行なっているため、相互的な影響、特に水文学的影響を考慮できなかったこと。

ii)このモデルについてそれぞれ分離した形でシミュレーションを行なったが、2つの考え方を1つのモデルで表現できなかったこと。

などである。

今後、地域、単年度あるいはある計画年度ごとの多目的評価情報を取り入れたシステムの構築を行ないたいと考えている。

6. 参考文献

- 1)国土庁；第3次全国総合開発計画，昭和52年11月
- 2)末石富太郎；水，エネルギーと生活圏構想，ジュリスト特集国土計画と生活圏構想No11 SUMMER 有斐閣
- 3)国土庁計画調整局編；メッシュデータの利用方法と事例研究
- 4)総理府，経済企画庁編；ライフサイクルと暮らしの質，昭和52年12月
- 5)総合治水政策はいかにあるべきか；河川，昭和52年1月
- 6)James, L. D.; Nonstructural Measures for Flood Control, Water Resources Research First Quater 1965
- 7)Day, H. J., Lee, K. K.; Flood Damage Reduction Potential of River Forecast, Proc. of ASCE, WR1 vol 102 April 1976
- 8)James, L. D. Benke, A. C., Ragsdale, H. L.; Integrating Ecological and Social Considerations into Urban Flood Control Programs, Water Resources Research April 1978
- 9)加賀屋誠一；地域システム分析に基づく治水水準決定過程に関する研究，昭和51年度 土木学会北海道支部論文報告集，第34号，昭和53年2月。
- 10)出口泰寛，加賀屋誠一；治水計画と土地利用計画との調整，建設業界 vol 127 No10 1978.10.

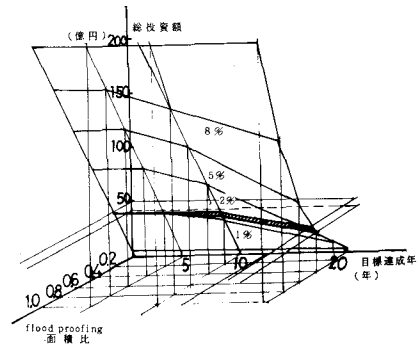


図4-7 宅地増加率による治水投資額