

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

北海道大学大学院環境科学研究科 正員 加賀屋 誠

1. はじめに

近年河川流域において人口及び資産の集積がめざましく治水計画上新たな問題を起こしている。特に都市周辺ではその傾向が顕著であり流域開発、市街地化が着々と進んでいる。例えばわが国の都市化を知る目安としてD I D地区人口は、昭和40年から昭和45年までに約18%伸び、その面積も同じ期間で約38%伸びている。これに対し昭和47年以降の洪水統計によると浸水家屋数が年平均40万戸、また時間雨量50mmの降雨で床上浸水する区域は、市街化区域の中で約11.5%、また居住人口で約670万人に影響があると考えられこの傾向は、ますます進行しつつある¹⁾。このような都市化による影響は、資産被害の増大、地域住民の災害への対応性の遅れなどの社会経済的な波及はもちろん、洪水到達時間の短縮、洪水流量の増大などの自然現象への影響となりフィードバックされている。建設省では、総合治水対策という新しい治水のあり方について検討を進めており、すでに土地利用管理の問題、地域の水害潜在性の情報の提供、さらに避難対策、水防体制の充実等一部で行なっている。この概念は現在、大河川および中小河川での整備率が、各々約52%、約13%であること、目標達成のためには、約27兆円もの投資が必要となり、昭和60年度達成目標年度とすると30%以上の伸び率で治水事業を行なわなければならないことなどを考えると、²⁾ 中間的措置として評価することができる。そして堤防、ダム等の直接防御方法のみならず防災調節池の確保、各戸貯溜槽の設置、水害危険区域の公示、低地域のピロティー建築の推進などの提案と共に速やかな実現が望まれる。

本研究は、以上のような多目的、多面的な概念を踏まえ、洪水に対する治水事業を地域計画の中に取り入れ、地域の発展度に応じた治水計画のあり方、また逆に治水計画に応じた地域の発展のあり方を探るための治水水準を設定し、その水準の地域における達成方法についての把握を行なうものである。ここで検討した点をまとめると以下ようになる。

- i) 地域の潜在的洪水被害強度を表わす期待被害ポテンシャルの位置づけ
- ii) 治水水準とその達成のための概念の構築と、多目的多段システム治水水準の位置づけ
- iii) 治水水準として考えられる諸指標の選択と、水準達成過程モデルの作成
- iv) システムモデルの分析結果とその考察

なおここでの治水水準とは、治水の効果として期待できる諸指標を、個別的あるいは、総合的に評価したものをいい、治水投資水準とは、投資規模、投資方法などを意味している。

2. 治水計画における水準の概念

治水水準を設定する場合、大別して2つの考え方があり、1つは、既往の最大外力、最大可能外力あるいは、モデル化された外力等の最大水害に対処できる方法を考える場合であり、他の1つは、経済性を追及していく場合である。

a) 絶対安全性を目標とする治水水準

治水水準としてどの程度人命被害を避けることができるか、あるいは、社会的パニックの予測、避難システムとしてどの程度確立する必要があるか等を考える場合、前者の考え方すなわち絶対安全性の概念を用いる必要がある。また他の災害でもより発生頻度の少ない、局所的な地震、火山噴火等に対する防災計画を考える場合この考え方が有効である。一般的に最大外力等の設定が難しいため、災害予知を重視し、それを計画に組み入れることが必要となる。

b) 経済性を目標とする治水水準³⁾

この概念は災害に対する完全防御が不可能であるという前提に基づき経済的な価値がどの程度確保

されたかという点を考えていく方法である。一般的に投資額を費用C, 被害軽減, 開発効果等を便益Bと考へ, それらを用いて投資効率 B/C , 超過便益 $B-C$ を評価し, それを治水水準と考へる。評価方法として, 次の4つの考へ方がある。

i) $B-C$ すなわち純便益を評価する。ii) B/C あるいは $(B-C)/C$, すなわち投資効率を評価する。iii) $B-C \geq 0$ が成立する限界, 投資効果のある範囲で最大, 最小規模を考へる。iv) C すなわち投資の最小となる点について考へる。以上に示す評価方法によりその最適条件を求めていく考へ方が経済性による治水投資水準決定方法であり一般的にはi)かii)を用い, 投資規模としてはi)で考へる方が大きくなる経済性を目標とする考へ方の最も大きな特徴は, 治水水準達成の割合を計測できる点である。したがってこの概念を利用し治水水準の動学的な達成度の変化を把握していくことが, 本研究における手法でもある。しかしながら従来の経済性を目標とする水準には次のような問題点がある。

イ) 比較する対象が主に技術的評価に限られる。

ロ) 投資効果として地域全体での評価を対象としているため, 地域を構成する要素, 例へば一人当りの被害はどうであるかなどの配慮が欠けている。

ハ) 実際には計画の中間的措置等動学的発展過程に追従できない。

以上の点を改良したのが, 新しい治水水準の概念である。

c) 多目的, 多段システムを考へた治水水準

a), およびb)について換言すればa)は工学的, 技術的な目標設定であり, b)の場合, 投資方法に対する価値基準の決定方法を設定することである。両者の特徴を加味してまとめたものが本研究の治水水準の概念である。その方法について考へると次のようになる。

- i) 計画外力を生起確率を用い表わし治水計画による目標達成度が動学的に把握できるようにする。
- ii) 治水事業評価の多目的性, 例へば地域全体の総費用, 総便益等の経済的指標, 目的達成年等の事業計画面での指標, さらに一人当り被害額に代表される個人的厚生等の水準について検討できるようにする。
- iii) 計画の多段システム, 例へば地域における他の計画, すなわち土地利用管理計画, 交通計画等が治水計画に及ぼす影響について評価できるようにする。

3. 期待被害ポテンシャル

従来より水害による被害評価の方法として用いられているダメージポテンシャルがある。これは一般に「河川に想定される最大氾濫区域内で現時点で生じるであろう被害額と定義される。つまり対象河川流域が一定規模の洪水を受けた場合に発生しうる最大限の被害を意味している。この考へ方は, 近年治水経済調査や水害想定区域の設定また治水工事の優先順位の検討, 河川相互間の重要度の判定等に利用されている⁴⁾。しかしながら計画高水を最大可能洪水として位置づけている点, 洪水氾濫という動的現象を静的, 一面的に把握する点にある。これらを改良して洪水規模別のダメージポテンシャルを評価すること, 時間的変化に追従できるようにすること等を考へたのが本研究で用いる期待被害ポテンシャルである。期待被害ポテンシャルの特徴をあげると以下のようになる。

- i) 地域の洪水発生確率を考へているので複数地域の相対的被害ポテンシャルを評価できる。
- ii) 治水の技術的進捗度に応じて被害軽減効果を計測できる。
- iii) 対象地域の経済または土地利用などの動学的変化に追従できる。
- iv) 水害調査が該当地域にあれば, 実測の被害額との比較ができ, 被害規模の検討ができる。
- v) 将来は, 被害対象地域より他地域へ波及する影響(例へば交通輸送被害)や, 貨幣価値表示不可能な被害等その規模の拡張ができる。

また問題点として, 確率雨量は年最大雨量の出現確率を用いているため年複数回の被害が発生する場合には, 精度が悪くなること, 氾濫区域, 湛水深等の決定が氾濫水理現象の解明と共に難しいことなどがあり, 今後の検討課題である。

今、 t 年度の期待被害ポテンシャルを表わすと(1)式ようになる。

$$\left. \begin{aligned} D(t) &= \sum_i di(t) + \sum_j dj(t) \quad (i \neq j) \\ di(t) &= A_E(t) \cdot Pi(t) \cdot Ri(t) \\ dj(t) &= F(Q(t)) \\ A_E(t) &= A(Q(t)) \\ Q(t) &= Q(f, \gamma, A\gamma, t) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(1)$$

f :流出係数, γ :確率雨量(mm/hr), t :計画年度, d_i :氾濫想定区域内期待被害ポテンシャル(万円)
 d_j :氾濫想定区域外波及期待ポテンシャル(万円) A_E :期待氾濫面積(m^2), P_i : i 種の資産額(万円),
 R_i :被害率, $Q(t)$:確率流量(m^3/sec)

4. 治水水準決定過程のモデル化と評価手順

これまでに、洪水被害の軽減効果を把握するための治水投資および社会経済システムの動的なシステムモデルをシステムダイナミクス手法を用い作成し、目標達成度、投資基準の設定、土地利用とのトレードオフ等について検討を行なった。ここでは、治水水準の設定方法に着目し、シミュレーション分析結果の検討、さらに最適制御理論による地域の発展状態と治水目標達成度とのバランスの問題について考察する。

a) 治水水準

治水水準は、治水の複数目標の組合わせとして考える。本論で考えた複数目標の各指標をあげると表-1に示すものとなる。

- 経済性 → { 期待被害ポテンシャル
治水投資額
総費用
- 技術的目標 → { 完成年度
氾濫想定流量
- 個人的厚生指標 → 1人当たり被害額

表-1 治水水準を表わす各指標

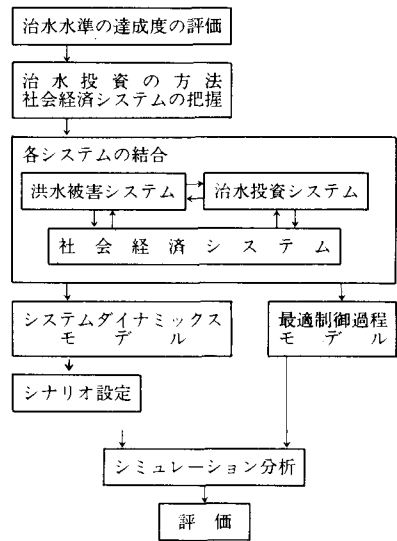


図-1 治水水準評価のためのフローチャート

b) 治水水準達成のためのシステムモデル

次に治水水準の動的変化計測のための具体的なシステムモデル作成について考える。

治水水準は、洪水被害、および社会経済システムの諸指標によって決定されるが、水準の決定方法に2つの概念を考える。1つは、地域における諸計画が進行中、あるいは治水投資の上位計画が与えられた場合、他の1つは、諸計画と治水計画が同時に行なわれた場合である。前者を、適応制御型治水水準決定過程、後者を最適制御治水水準決定過程と表現する。

i) 適応制御型治水水準決定過程

適応制御型治水投資を考えるとさらに2方法に分類される。1つは、上位計画に基づく投資方法であり、この場合一般的には、現状投資に増加率をパラメーターとして乗じたものと考え、外生的に与えるものとする。

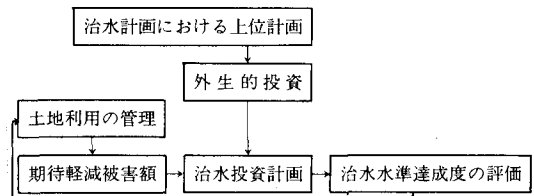


図2 適応制御型治水水準決定過程の概要

また、他の1つの方法は、軽減された被害額に一定の比率を乗じたものを次年度の治水投資とするものである。この場合には、地域の社会的、あるいは経済的な変化に追従する制御過程を構成する。

図-2に概念図を示す。以上の過程の検討には、システムダイナミクスモデルによる分析結果を用いる。

ii) 最適制御型治水投資決定過程

この方法は、地域における発展計画と治水計画を併立させ、最適発展性を検討していくものである。その概念図を図-3に示す。この場合、治水達成水準の指標を用いて評価関数を作成し、費用最小という条件のもとに動的制御システムを考える。簡単に最適制御過程を検討するモデルについて内水氾濫問題の定式化を例に考える。

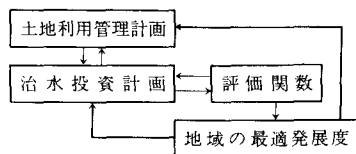


図-3 最適制御型決定過程の概要

イ) 状態方程式

状態方程式としては土地利用状態方程式と、治水事業状態方程式を考える。

$$\dot{l}_{ij}(t) = \begin{cases} +U_{ij}(t) & \left\{ \begin{array}{l} \text{対象土地利用を増加させたい} \\ \text{項目を } i, \text{ 減少する項目を } i' \text{ とする} \end{array} \right\} \dots\dots\dots(2)$$

$$\dot{Q}_{uj}(t) = U_{pj}(t) \cdot \alpha, \quad (j=1 \sim n) \dots\dots\dots(3)$$

\dot{l}_{ij} ; 土地利用の増分量,

U_{ij} ; 土地利用制御変数

\dot{Q}_{uj} ; 強制排除量増分量

U_{pj} ; ポンプ施設投資

α ; 1万円当り排除流量

i ; 土地利用分類(空地, 水田, 畑作地等)

j ; 対象地域

ロ) 評価関数

評価関数としては、ポンプ施設投資、期待被害ポテンシャルおよび宅地盛土費用の和と、土地利用の高度化による資産の増加量の差を最小にする最適制御問題を考える。

$$\left. \begin{aligned} J &= \sum_j \{ U_{pj}(t) + D_j(t) + E_j(t) - U_{ij} \cdot P_i \} \\ E_j(t) &= U_{ij}(t) \cdot h_j \cdot e_{ij}(t) P_{pi} \\ D_j(t) &= \sum_i P_i(t) L_{rij}(t) (1 - e_j(t)) \\ L_j^R(t) &= G_j(Q_{uj}) R_i(Q_j) \beta_{ij} \quad (\beta_{ij} = l_{ij} / L_j) \\ Q_j(t) &= R_{si} \cdot f_i \cdot l_{ij}(t) - Q_{uj}(t) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(4)$$

$D_i(t)$; 期待被害ポテンシャル

$E_j(t)$; 各土地利用別ウォータープルーフニング費用

h_j ; 盛土高

$e_{ij}(t)$; ウォータープルーフニング処理率

ハ) 制約式

$$\sum_j l_{ij} = L_j, \quad U_{ij} - U_{i'j} = 0, \quad e_j(t) = \text{const}, \quad U_{ij}, \quad U_{i'j}, \quad U_{pj} > 0$$

P_{pi} ; 単位面積当処理費用

$G_i(Q_{uj})$; 強制排除量に対する氾濫面積関数

$R_i(Q_j)$; 氾濫流量に対する被害率関数

Q_j ; 氾濫流量

R_{si} ; 確率降水量

f_i ; 流出係数

以上の式を用い、ポントリヤギンの最大原理を用い、評価関数を最小とする制御変数 $U_{ij}(t)$, $U_{pj}(t)$ を決定する。この解は、必要条件のみ与えるので、実際の導き出された解が最適解となるか確認する過程も考慮しシミュレーション分析を行なう。

5. シミュレーション結果

4で述べた手法により、実際の内水氾濫地域の諸指標を用いてシミュレーション分析を行なった。対象地域の人口、土地利用および産業諸指標（昭和50年度）を表わすと表-2のようになる。また昭和50年8月水害規模をモデルへ導入しモデルのチェックを行なったのが表-3である。また過去の水害統計（昭和37年～50年）による平均被害額と、昭和50年における想定被害額の比較を行なったのが表-4である。

これによるとシステムの各要素で多少改良の余地があるが、被害ポテンシャルの把握ができることが明らかになりまた過去の平均被害額に対応していることがわかる。

a) 適応制御型モデル分析結果

i) 表-5は、投資方法を外生的に与えていく方法（各評価値の上段は各年ごとに1割ずつ増加していく方法、中段は、各年ごとに2割ずつ増加させる方法）と前年の軽減被害額と等しい額を次年度の投資額とする方法（各評価値の下段）に分け、評価の条件を変えて、治水水準を表わしたものである。これを見ると軽減被害額による投資方法が、すぐれていることがわかり、特に累計被害額が、約50%以下となっている。

ii) また、評価条件で被害額最小、投資額最小、完成年度を均衡させるという条件の下で評価値を同時に満足させることが可能であるが、一人当たり被害額を地域的に均衡させる考え方は、他の条件とやや異なり、投資の偏り、完成年度の格差が大きくなっていく。

iii) 次に図-4のようにいろいろ土地利用政策を変化させ期待被害ポテンシャルの大きさの比較を行なった。その結果を現状維持の土地利用規則のP2を基準として各政策による相対的な大きさを表わしたのが表-6である。これによると土地利用の制限なしの場合、総累積被害額で10年後13%、20年後23%の増加、一人

当たり累積被害額で10年後35%、20年後41%と増加することがわかり、逆に土地利用の規制のみでその比率だけの被害の軽減効果が期待されることがわかる。

| 諸指標 | 地域 A | | | 地域 B | | |
|----------|------------|--------|--------|--------|--------|---------|
| 人口および世帯数 | 75千人 | 24千世帯 | | 105千人 | 34千世帯 | |
| 土地利用(ha) | 水田 436 | 畑 1192 | 宅地 717 | 水田 190 | 畑 1915 | 宅地 1456 |
| 就業者 | 農業 640人 | | 250世帯 | 900人 | | 370世帯 |
| および事業所数 | 製造業 4410人 | | 240カ所 | 6191人 | | 336カ所 |
| | 卸小売業 8162人 | | 1404カ所 | 11500人 | | 1970カ所 |

表-2 対象地域の人口、土地利用および産業諸指標

| 地域 | 地域 A | | | 地域 B | | |
|-------------------------|------|-----|------|------|-----|------|
| | 実測値 | 計算値 | 実/計 | 実測値 | 計算値 | 実/計 |
| 降雨量(24hr)mm | 133 | 180 | 0.73 | 120 | 100 | 1.20 |
| 溢水湛水量(万m ³) | 375 | 375 | 1.00 | 205 | 205 | 1.00 |
| 氾濫面積(ha) | 520 | 518 | 1.00 | 340 | 353 | 0.96 |
| 水田氾濫面積(ha) | 87 | 92 | 0.95 | 130 | 175 | 0.74 |
| 畑氾濫面積(ha) | 355 | 259 | 1.37 | 50 | 35 | 1.41 |
| 住宅数(戸) | 167 | 194 | 0.86 | 370 | 230 | 1.60 |
| 水田被害額(億円) | 0.15 | | | 0.28 | | 0.54 |
| 畑被害額(億円) | 3.87 | | | 3.21 | | 1.20 |
| 住宅被害額(億円) | 0.44 | | | 0.40 | | 1.10 |
| 総被害額(億円) | 4.46 | | | 4.30 | | 1.05 |

表-3 昭和50年8月水害規模における実測値と分析結果の比較

| 地域 | 評価値 | 年平均被害額(億円) | | 1人当たり平均被害額(円) | |
|---------|------|------------|----------------------|---------------|----------------------|
| | | 実測 | (分析初年度) | 実測 | (分析初年度) |
| 地域AおよびB | 4.50 | 4.30 | { 1.28(A) 3.40(B) | 2500 | { 1260(A) 3000(B) |

表-4 昭和37～50年平均被害額と想定被害額

| 評価値 | 投資構成比 | 完成年(年) | | 累積被害額(億円) | 累積投資額(億円) | 一人当たり被害額(万円) | |
|------------|-------|--------|-----|-----------|-----------|--------------|-------|
| | | 地域A | 地域B | | | 地域A | 地域B |
| 被害額最小 | 0.72 | 26 | 15 | 34.42 | 50.29 | 1.293 | 1.795 |
| | 0.72 | 17 | 12 | 29.73 | 57.49 | 1.040 | 1.738 |
| | 0.54 | 19 | 15 | 14.82 | 43.15 | 0.553 | 0.963 |
| 投資額最小 | 0.62 | 21 | 16 | 35.76 | 46.55 | 1.156 | 1.581 |
| | 0.54 | 14 | 13 | 33.43 | 53.41 | 0.971 | 1.440 |
| | 0.62 | 24 | 14 | 14.83 | 42.21 | 0.623 | 0.802 |
| 一人当たり被害額均衡 | 0.88 | 33 | 14 | 38.68 | 48.41 | 1.610 | 1.581 |
| | 0.94 | 25 | 10 | 33.36 | 53.02 | 1.471 | 1.440 |
| | 0.70 | 30 | 13 | 16.34 | 44.59 | 0.797 | 0.802 |
| 完成年度均衡 | 0.47 | 19 | 19 | 40.37 | 48.42 | 1.103 | 2.552 |
| | 0.48 | 14 | 14 | 35.39 | 59.19 | 0.962 | 2.290 |
| | 0.46 | 17 | 17 | 15.50 | 45.11 | 0.502 | 1.079 |

①上段、外生的投資、各年1割アップ、中段、同投資、各年2割アップ、段、軽減被害追従型投資

表-5 各評価基準による計画達成規模

b) 最適制御型モデル分析結果

本モデルでは、2地域において、強制排除施設規模と、土地利用管理面での宅地化を進めようとする場合の最適問題について検討を行なったわけであるが、表-7に示すように、治水水準の達成度が、土地利用の適正規模をコントロールすることがわかる。

6. 考察とまとめ

以上の結果についていくつかの点で考察とまとめを行なうと次のようなことがあげられる。

i) 適応制御型で考えた場合、軽減被害額による投資方法は、経済性、あるいは、個人的原生等の面で、すぐれた方法となることがわかった。これは、洪水発生頻度と地域の発展度を考慮しているからと考えられる。すべての地域でこの方法を適用することは難しいが、土地利用の高度化が進行しつつある所の投資規模の設定には、有効であると考えられる。

ii) 治水水準の達成の面では、一人当たり被害額を均衡させる場合、被害額最小、投資額最小にする場合、完成年度を均衡させる場合とその目標達成過程で相違が見られこれらの目標の間で、バランスをとりながら考えていく必要がある。

iii) 土地利用の変化、例えば宅地率が上昇させた場合、期待被害ポテンシャルは、増加するのが一般的である。逆に土地利用管理で宅地化を抑えていくと、期待被害ポテンシャルの上昇が抑えられる。このような考え方で対象地域の治水投資と土地利用の高度化の規模を同時に設定する問題について検討を行なったが、地域の適正規模を検討するための有効な手法であることがわかった。

7. おわりに

近年環境悪化を防止するための公共あるいは、民間ベースの投資が数多く行なわれているが、その規模決定に本論の考え方は有効となる。また、環境計画あるいは防災計画では、複数の目標が存在しそれぞれについて目的の同一性、かいら性、さらにトレードオフについて把握し、それらに基づいて多目的問題を解決することが重要となるわけである。今後は、個々の評価指標の総合評価を行なうための多目的評価の面で考えていきたい。

最後に本発表にあたり御指導、御助言いただいた北海道大学大学院環境科学研究科関清秀教授および、同研究科山村悦夫助教授に深く謝意を表す。さらに北海道大学工学部土木工学科五十嵐日出夫教授には数多くの点で御助言と御指導をいただいた。あわせて謝意を表す次第である。

参考文献

- 1) 総合治水井策はいかにあるべきか、河川、昭和52年1月
- 2) 建設省河川局、都市河川対策の展望、建設月報、1976年2月
- 3) 矢野勝正編、水災害の科学
- 4) 3)に同じ
- 5) 加賀屋誠一、山村悦夫；洪水被害事前評価に関する研究、日本地域学会第13回国内大会、昭和51年
- 6) 加賀屋誠一、山村悦夫、樺沢孝；内水氾濫被害の事前評価システムについて、第32回土木学会年次学術講演会講演概要集、昭和52年
- 7) 加賀屋誠一、山村悦夫、清治真人；治水連関モデルを用いた洪水想定被害の評価と予則手法について、第14回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集、昭和52年
- 8) 加賀屋誠一；治水連関モデルによる洪水想定被害評価の地域特性について、土木学会北海道支部論文報告集、昭和52年

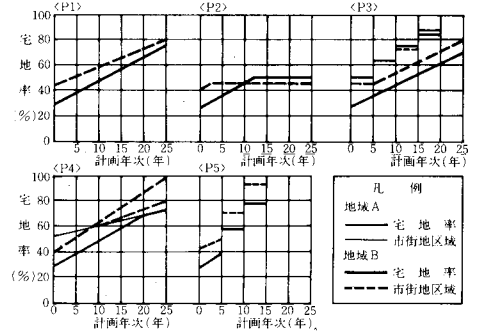


図-4 土地利用政策における宅地率

| | | P 1 | P 2 | P 3 | P 4 | P 5 |
|------|-------------------|------|------|------|------|------|
| 地域 A | 累積期待被害ポテンシャル | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.19 | 1.46 |
| | 1人当たり累積期待被害ポテンシャル | 1.23 | 1.00 | 1.00 | 1.25 | 1.37 |
| 地域 B | 累積期待被害ポテンシャル | 1.12 | 1.00 | 1.00 | 1.06 | 1.36 |
| | 1人当たり累積期待被害ポテンシャル | 1.41 | 1.00 | 1.32 | 1.25 | 1.91 |

(上段10年経過、下段20年経過の場合)

表-6 各土地利用政策における累積期待被害ポテンシャルの伸び

| 地域 | 達成年度 | T=2.5 | T=5.0 | T=10.0 | T=20.0 |
|------|------|-------|-----------------|-----------------|------------------|
| | 地域 A | | 4.32 (0.596) | 1.83 (0.619) | 0.981 (0.733) |
| 地域 B | | 3.18 | 3.30 | 3.91 | 4.55 |
| | | 4.17 | 1.79 | 0.983 | 0.310 |
| | | 0 | 0 | 0 | 0 |

[上段強制排除施設投資額(億円/年)下段宅地増加面積(ha/年)、また()はウォーターフロンディング費用]

表-7 最適制御型モデルによる適正規模