



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	都市化における地域環境評価に関する研究
Author(s)	山村, 悦夫; 加賀屋, 誠一; 太田, 充 他
Citation	北海道大学大学院環境科学研究科邦文紀要, 3, 1-18
Issue Date	1987-08-17
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/37078
Type	departmental bulletin paper
File Information	3_1-18.pdf



北海道大学大学院環境科学研究科邦文紀要	No. 3	1~18	1987・3月
---------------------	-------	------	---------

都市化における地域環境評価に関する研究*

山村悦夫 加賀屋誠一

太田 充 宮田 譲

地域計画学研究室

小 田 利 勝

徳 島 大 学

A Study on Regional Environmental Assessment in Urbanizing Areas

Etsuo Yamamura, Seiichi Kagaya, Mitsuru Ota
Yuzuru Miyata and Toshikatsu Oda

1. はじめに

わが国は、北海道から東北、北陸に至るまで、国土総面積の約 1/2 が、積雪寒冷地であるといわれ、国民の約 20% がその地域に居住している。このような地域に高度に集中集積がおこなわれている国は、あまり例がなく、特に、先進国の中でも最も多積雪地域を有する国であるといわれている。したがって、積雪寒冷地特有の居住環境を創造し、また文化や文明も生み出してきている。また一方、この地域に居住する人々の歴史は、寒さあるいは雪の克服の歴史、さらに、積雪寒冷条件が造り出す自然環境に適応する歴史であったといえる。

北海道は、そのような過酷な条件を最も多く持つ地域である。冬の寒さの厳しさ、大量の積雪もさることながら、そのような積雪寒冷条件が造り出した、人間の生活、生産にはなじまない特有の自然環境を有する。その典型的な例が、広く分布する泥炭地である。北海道には、約 20 万 ha の泥炭地が分布しており、これらの多くは低湿地を形成して、古くから開発、産業経済発展の阻害要因となってきた。泥炭は、石炭生成過程にある植物性の特殊土である。枯死した植物が、分解を妨げる水分過剰、低温、乾燥などの環境条件で分解不十分のまま堆積したものである。低温は、必ずしも必要条件ではないが、世界的には、大規模な泥炭地は、主として北方圏の国々に分布している。

北海道では、石狩川流域 5.5 万 ha、釧路川流域が、2.3 万 ha、さらにサロベツ川流域 1.5 万 ha の泥炭地が分布している。

泥炭地は、有機質が豊富に含有されており、農業生産には、適している場合が多い。しかしながら、それらの地域に人口、資産が集中集積すると、多くの問題が生ずる。その最も大きな問題は、水害による被害の発生である。北海道における都市水害のパターンをみると、改修末整備な中小河川の上流の急傾斜地と、河川下流の泥炭性低平地に発生するケースが多く、いわば危険区域の 2 つの大きな決め手となっている。

ここでは、主として、低平地における地域の安定性問題に着目し、①都市化の長期的過程を再現して、都

* 積雪寒冷地域の都市化に伴う環境変動の動態的研究 (代表 伊藤浩司) (I)

市化と、それに寄与する要因の関連性を導びき出すシミュレーションモデルの構築方法と、適用例、② 将来の都市化の可能性を見つけるための土地開発可能量算定モデル構築方法と適用例の紹介する。そして積雪寒冷地域の軟弱地盤地域で最も大きな問題である、洪水氾濫に対する安定条件改善方法（技術的治水対策および社会的治水対策による）と、都市化（土地利用高度化）の均衡ある発展の考え方について論議するものとする。

2. 河川流域における都市化長期的過程分析

(1) 氾濫原における土地利用高度化の問題

いくつかの都市では、近年土地利用の高度化が進み、今まで軟弱地盤・湿地帯等の地質条件、あるいは、地形条件が悪く、また開発が敬遠されていた地域にもそれが及ぶようになった¹⁾。そのような地域では、土地利用の高度化、生活空間の拡大と、治水対策などの安全性を高めるための目的を同時に達成することができるような地域計画が行なわれている。

しかしながら、互いの目的が影響しあい、また、他の直接的、間接的な居住空間の安定性に寄与する要因一例えば交通網整備、産業立地などが影響を与えるため、同一ステージで、それらを評価することが難しい。

他の問題点も含めて、治水計画等の防災対策が、地域の居住空間の安定性に寄与する度合の評価は、次のような理由で困難がある。

① 居住空間の決定要因として、安全性だけでなく、利便性、快適性等他の生活環境要素が影響し、それらの相互関連性を表わす、構造把握が、定性的にも定量的にも難しい。

② 地域安定性—ここでは、居住のために必要な自然条件等基礎的条件を満たすこと—を高める要因の中で安全性のみ考えても、直接的な防災対策だけでなく、地盤の強化、地下水処理、公園整備等間接的要因も影響し明確な要因抽出が難しい。

③ 治水効果を計測するための基準あるいは指標の設定が難しい。

④ 効果そのものが動的であり、それに適応した分析方法の確立が難しい。
などがあげられる。

ここでは、これらの点を踏まえ、治水事業と、土地利用の高度化に寄与する要因を抽出し、それらの相互関連性を把握するための動的シミュレーションモデルを構築し、比較的長期的な地域の発展段階を再現できる方法を検討するものである²⁾。

分析方法としては、システムダイナミクス（以下SDと表現する）を用い、いくつかの補助的、補完的方法を組み合わせ、また特に、史的事実検証のための方法としてSDの後方積分展開法（Backward SD）の適用を試みる。

なお分析にあたって次のような条件を考慮しながらモデル構築を行なうものとする。

① 居住空間は、地域安定性、ここでは居住性・雇用機会、安全性を表わす要素で構成されるものと考え、これらの要素の水準が高まれば拡大するものとする。

② 地域の発展に影響を与える要因と、その結合—システムの構造—は、基本的には時間によって変化しないものとし、それらの量的変化によってのみ影響するものとする。

③ 取り上げた要因以外の考えられる要因については、他の地域との相対的な関係が崩れることなく、それらのポテンシャルが変化しないか、他の要因が強くなっても対象とする要因の変化によって表わされるものとする。

④ 比較的定期的な再現性が可能であって、しかも分析に必要な少なくとも最小限のデータあるいは情報が得られるものとする。

(2) 方法と手順

i) 分析の手順

本章の分析手順は、図-2.1に示される。前述した問題解決のために、地域モデル構築による分析を試みる。地域モデルは、都市化に伴う土地利用形態の変化と、地域内での洪水、治水対策の関連性を把握するため、土地利用セクター、水害・治水セクターおよび人口セクターから構成されるものとする³⁾。基本地域モデルは、SD手法を用い、統計データの豊富な期間を再現するモデルとする^{4),5)}。また基本地域モデルの連関構造をもとにして、逆方向に積分を行なう後方積分型地域モデルシミュレーションを行なう。後方積分型 (Backward Type) の場合、SDの状態変数 (レベル変数) がフィードバックを含むため、誤差のチェックの問題があり、それらについての検討も行なわれなければならない^{7),8)}。最後に、SDシミュレーションによって補間的に得られたデータによって重回帰分析を用いた影響を計測し、またいくつかのシナリオによる治水事業ストック効果について検討する^{9),10)}。

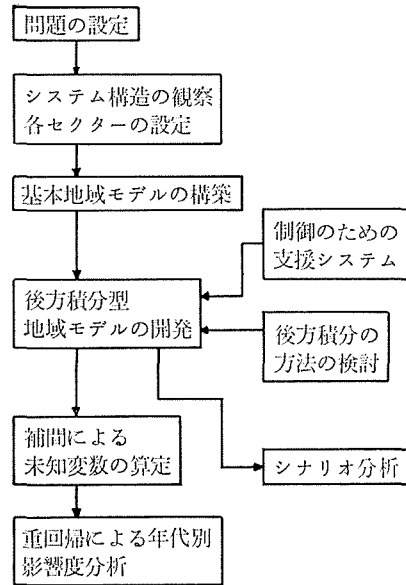


図1.2 分析の手順

ii) 問題の設定

都市化を人口の集中、生活・産業基盤施設の集積からみると、発展形態、あるいは、その期間の経済状態などと密接な関連性がある。すなわち、都市の発展は、様々な活動が、それぞれの時代を反映しながら現れるものであり、生活基盤が整備されると時間的遅れはあるものの地域の人口増加に繋がるのが一般的である。そのような都市における機能的構造を整理し、システムとして把えながら時間的変動を明らかにすることは、生活基盤整備事業の長期的効果計測にとって重要なことといえる。

ここでの目的は、短期的環境に対するインパクトよりむしろ長期的な変化の追跡に重点をおいた動学的モデルの開発である。そして都市化を説明する都市の構造は、基本的な要素とその結合関係には大きな相違はなく、その要素の定量的大きさと結合の強さに依存すると考えて地域モデル構築を行なうものとする。

汎濫想定地域での治水事業効果を評価する場合も、前述した考え方を導入することができる。そのような場合の分析の必要性をあげると以下になる。

① 従来、防災事業の地域居住環境の安定性に対する貢献度は、他の多くの要因の中で潜在的に存在し、それらを独立的に評価することが難しい。

② 今後予測される都市内での市街化対象地域は地理的、地質的条件で良好な場合が少なく、何らかの形でそれらの条件を克服していく必要があり、既存の土地について史的考察の必要性が高い。

③ 土地利用の高度化が比較的近年に現われ、時間的変化に追従できる情報、データが収集しやすい。

iii) 基本地域モデルの構築

ここでの地域モデルとしては、土地利用形態の変化と水害による影響に限定し、次の3つのサブセクターによって構成されるモデルを考える。

a) 人口セクター……地域の状態を表わす指標として、人口とそれに伴う人口動態、世帯数および宅地需要などの要因を与える。

b) 土地利用セクター……農地、住宅地、商業地、工業地に分割し、その相互関連性、転用性を考える。

また、それらの基盤整備のために必要な土地開発投資、治水投資等も要因として導入する。

c) 水害・治水セクター……洪水による被害を面積に着目し、氾濫想定面積を導入し、治水投資による整備済みの土地を治水整備地域面積として計測する。

モデルのシステム構造をその因果関係ループによって表わすと図-2.2 のようになる。

iv) 後方積分型モデルへの転換

SD 手法は、システムの構成要素の因果関係の着目したモデル構築の方法である。したがって人間の主観によるシステム観察能力にモデルの信頼性が依存し、特に事象が多い場合、深い洞察力を要求される。

この信頼性を確認するための方法としては、システム挙動について、リアルシステムに照合して妥当性を確かめることである。特に、モデル構築の際得られる情報やデータの中で因果関係の決定に役立つ情報が、パラメータを決定する情報よりも優先するといった構造依存型の場合、本質的にデータの欠けているシステムが多く、それらの検証のためには、システムの状態に関する変数（レベル変数）の過去におけるシステム挙動を検証する必要がある。

ここでは、初めに既存データで検証できる時間をシミュレーション期間とし、前方展開（前方積分）型モデルの有効性を検討するものとする。このモデルが前述の基本地域モデルである。

さらに、この構築された基本地域モデルを逆向きに変換して過去に遡る後方展開（後方積分）型地域モデルを得る。この新しいモデルは、先に構築した基本地域モデルの構造を変化させないで、時間を逆向きに積分する方法である。そして史的データと比較あるいは、史的データを補間するための役割を待つ。

本手法は、近年 SD モデルの検証方法として用いられているが、史的事実再現にも広範な利用可能性があるといえる。

後方積分を行なうにあたってそれらの意味を考察すると次のようになる。

一般的に動学的モデルは、1 次の微分方程式の集合として計算される。

$$dx_i(t)/dt = f(x_i(t) + u_i(t))$$

$$x_i(t) = x_{i0}$$

(2.1)

x_i はシステム状態変数、 u_i は外生要因、または x_{i0} 初期値を表わす。

このシステムは、ある初期条件を与えると解を持つことが知られている。またもし動学的システムが可観測であれば、出発点に到達できる。可観測性があれば、一般的に後方積分が可能である。しかしながら、社会システムの動学的モデルは、一般的に複雑で閉じた形での分析解がないか、あってもみつけれない。この場

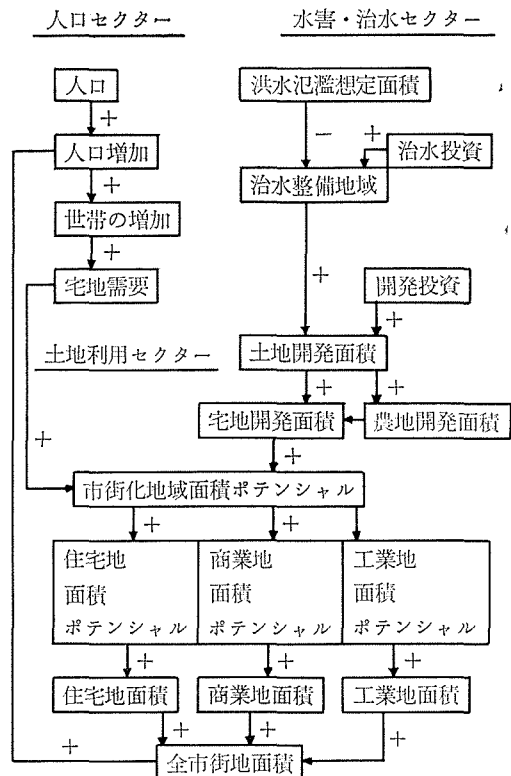


図-2.2 基本地域モデルの因果関係ループ

合、数値積分は近似的システム軌道を辿ることになる。

数値積分では丸めの誤差や、積分方法による近似誤差などが考えられるが、これらはいずれもモデルの安定性に影響する。動学的モデルの安定性は、前方、後方の積分方法で異なってくる。これは、これらのモデルの多くは、フィードバックを含む微分方程式であり、そのために前方、後方積分の安定性に非対称性があり、計算技術的に困難性がある。

例えば、今、図-2.3のようなループを考えた場合、そのループを表現する方程式は以下ようになる。

$$\begin{aligned} dL_d(t)/dt &= L_g(t) - L_r(t) + \xi(t) \\ \left. \begin{aligned} L_d(0) &= L_0 + \eta \\ L_g(t) &= \alpha \exp(\beta t) \\ L_r(t) &= L_d(t)/\gamma \end{aligned} \right\} \end{aligned} \quad (2.2)$$

ここで $\xi(t)$ は、フィードバックループの中で数値積分での不完全性によって発生する誤差であり、 η は、状態変数にもともと存在する誤差である。 α, β, γ は定数である。

(2)式は、次のような解をもつ。

$$L_d(t) = \exp(-t/\gamma) [L_d(0) + \eta] + \exp(-t/\gamma) \int_0^t \exp(s/\gamma) [L_g(s) + \xi(s)] ds \quad (2.3)$$

誤差項 $\xi(t)$ および η にはいずれも $\exp(-t/\gamma)$ が乗じられており、 t が大きくなるにつれて誤差項は急速に小さくなる。一方逆に後方へ積分を行なう場合、次式のように符号が逆になる。

$$dL_d(t)/dt \text{ Backwards} = -L_g(t) + L_r(t) + \xi(t) \quad (2.4)$$

このシステムに対する解は、

$$L_d(t) = \exp(t/\gamma) [L_d(0) + \eta] + \exp(t/\gamma) \int_0^t \exp(-s/\gamma) [L_g(s) + \xi(s)] ds \quad (2.5)$$

となり、明らかに時間とともに誤差項が増加することが考えられる。

したがって負のフィードバックループを持つ状態方程式では、この時間経過による誤差の累積をいかに小さくすることができるか検討する必要がある。

以上のことから後方積分型モデルの検証には、システムの構造安定性と、積分安定性の双方を考えながら、シミュレーションを行なう必要がある。

例として、先に構築した基本モデルと、後方積分型地域モデルでの人口レベル方程式を示すと以下ようになる。

基本地域モデル

$$PO. K = PO. J + (DT)(IPN. JK - DPN. JK + SMP. JK) \quad (2.6)$$

後方積分型地域モデル

$$PO. K = PO. J + (DT) \left\{ - (IPN. JK - DPN. JK + SMP. JK) \right\} \quad (2.7)$$

ここで、POは、地域人口、IPNは、出生数

DPNは、死亡数、SMPは、社会移動数である。また、それぞれ

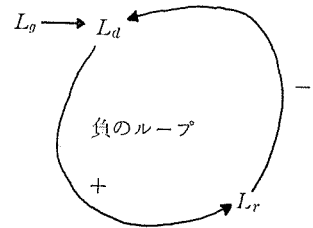


図-2.3 フィードバックシステムを含む後方積分

$$\left. \begin{array}{l} \text{IPN. } JK = \text{PO. } J/\tau 1 \\ \text{DPN. } JK = \text{PO. } J/\tau 2 \end{array} \right\} \quad (2.8)$$

$$\text{SMP. } JK = \text{PO. } J/\tau 3 \quad (2.9)$$

と考えると, (2.6), (2.7) は,

$$\text{PO. } K = \text{PO. } J + DT \left\{ \pm \text{PO. } J(1/\tau 1 - 1/\tau 2 + 1/\tau 3) \right\} \quad (2.10)$$

となる。ただし, K, J, JK は時間を表わす添字で, K は現在, J は, 1 単位前の時間単位, JK は, J から K までの時間を表わす。

$(1/\tau 1 - 1/\tau 2 + 1/\tau 3) = 1/\tau$ とすると (10) 式は

$$\text{PO. } K = \text{PO. } J + (DT)(\pm \text{PO. } J/\tau) \quad (2.11)$$

と変換できる。

この方程式は, 次のような連続システムでもまた表わすことができる。

$$d\text{PO}(t)/dt = \pm \text{PO}(t)/\tau; \text{PO}(0) = \text{PO}_0 \quad (2.12)$$

符号が正の場合, 正のフィードバックをまた, 負の場合, 負のフィードバックを示し, 解は (14) 式で得られる。

$$\text{PO}(t) = \text{PO}_0 \exp(\pm t/\tau) \quad (2.13)$$

もし, 時間 t が時間間隔 DT で n 分割したものと考えるならば (2.13) 式は, $n(DT)$ 時間段階で (2.14) 式のように表わすことができる。

$$\text{PO}_n = \text{PO}_0 \exp(\pm n(DT)/\tau) \quad (2.14)$$

一方矩形型積分法で得られた解が双方のシステムに対して過少値を与えることがわかる。結果として, 数値解は, 正のフィードバックシステムにとっては時間定数を大きくするようになり, また負のフィードバックシステムの場合, 逆になる。

これらの関係を量的に把握するため, $\text{PO}_n = \text{PO}_0 \exp(\pm 1)$ の値に到達する時間における時間定数 τ' を定義するならば, (2.14) 式を用いて実際の時間定数との関係が (2.15) 式で示される。

$$\tau'/\tau = \pm (DT/\tau) \ln(1 \pm DT/\tau) \quad (2.15)$$

例えば, この式よりシミュレーションシステムの時間定数変動がもし $DT/\tau < 1/10$ ならば 5% 以下に保持できることになる。すなわち, DT との比を適当に与えることによって後方積分による誤差を小さくすることができる。

v) 重回帰分析による影響度の評価

構造型予測もデルである SD モデルで得られた過去の補間史的データを用いて, 重回帰分析による影響度の評価を行なう。ここではデータのある時間間隔で任意に分割して, それぞれの時代区分における人口と他の説明変数との関係を確める。

vi) シナリオ分析

後方積分型地域モデルによって治水投資が様々な形に変化した場合の対象地域の地域安定性の変容の様子を再現する。

(3) シミュレーション結果

シミュレーションは, 先に示した手順によって行なうが, 対象地域は札幌市白石区とした。基本地域モデ

ルは1960年から1980年データにより構造同定が行なわれた。次に後方積分型地域モデルに変換し時間を遡り1874年までシミュレーションを行なった。なお、この長期後方積分についての検証に用いられた資料は、対象地域人口、土地利用等限られたものであり、かつ数年間隔のデータである。2つのモデルの関係は、図-2.4に示される。

モデルシミュレーションの結果得られた予測値と実際値の比較を人口および各土地利用面積で行なったのが表-2.1である。

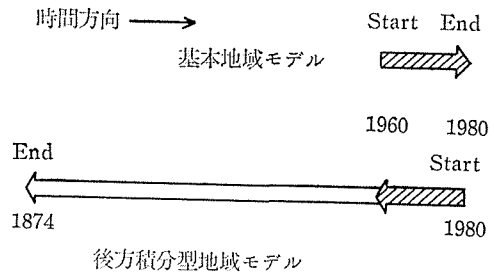


図-2.4 2つのモデルのシミュレーション

表-2.1 後方積分型モデルのシミュレーション

年	人 口 (百 人)		農 地 面 積 (ha)		宅 地 面 積 (ha)	
	実 際 値	予 測 値	実 際 値	予 測 値	実 際 値	予 測 値
1980	2280	2280	913	913	1477	1477
1970	1575	1612	1845	2080	723	715
1960	730	753	2549	2742	286	290
1950	197	200	2340	2531	91	61
1940	102	117	3362	3239	59	52
1930	84	83	3097	3016	34	29
1920	55	57	2997	2917	22	17
1910	45	44	2897	2818	10	7
1900	34	41	2606	2534	3	3
1890	13	13	1430	1394	2	2
1880	5	4	190	272	1	1
1874	4	3	84	78	1	1

また表-2.2は現在の氾濫想定面積から過去のとデータを予測したものであり、治水効果を表わす指標と考えられる。

これらのシミュレーション結果をまとめると以下のようなことがいえる。

① 後方積分型モデルでのレベル変数を決定する要因は、いずれも時間定数変動が1/10で誤差5%以下に保持でき、急激な積分誤差の増加現象は公われなかった。

② 人口、土地利用面積等で、実際値と計測値との比較をみると、適合性が高いといえる。しかしながら、地域の急激な成長期では、やや適合性が悪くなる。

表-2.2 シミュレーションで得られた予測値
(水害・治水セクター)

(単位 ha)

年	洪水被害 想定面積	治水整備 面積フロー	治水整備面積 ストック
1980	270	54	1425
1970	914	55	780
1960	1310	20	384
1950	1519	0	175
1940	1539	10	156
1930	1629	5	66
1920	1654	5	41
1910	1679	5	16
1900	1694	1	1

③ 洪水氾濫想定面積の計測値から明治期の水害潜在性が推定され地域総面積の28%にのぼっていることがわかった。

④ 人口増加数の計測では、過去の災害による影響を反映した結果も相互関連性のもとで明らかになった。

(4) 治水事業の影響評価とシナリオ分析

シミュレーション分析の結果から治水事業の地域安定性に与える影響を把握することができるが、より明確に表わすため、シミュレーション年を分割して、それぞれの時代を反映した影響要素を捉えてみる。方法としては、重回帰分析による標準化回帰係数を指標とする。データはシミュレーション分析によって補間されたものを用いた。得られた結果について人口を目的関数として他のデータによって説明するモデルを考えた。人口は、地域の定住条件を最も良く反映する指標の1つである。表-2.3は時代区分ごとに指標を表わしたものである。

さらに、いくつかのシナリオを作成し、治水事業の果たす役割について検討する。

シナリオは、数多く作成されるが、ここでは、次の3通りのものを設定する。

- (シナリオ-1)……治水事業が全くなかった場合
- (シナリオ-2)……大正初期に始まった治水事業を明治期について早めた場合
- (シナリオ-3)……既存の治水事業を2倍の水準に上げた場合

シミュレーション分析の結果は、表-2.4のように示される。なお、数値は現実の分析を100として指数で与えている。

以上の結果をまとめると次のようなことがいえる。

① 第1期において人口は農地面積の影響を最も強く受け、第2期および第3期においては、治水整備面積、さらに第4期は住宅地面積の影響を受ける。このように都市化は急速な伸びを示すが長期的には、それぞれの時代背景によって安定性に寄与する要因が異なることが明らかになった。特に、対象地域においては治水事業の寄与する期間が長期にわたっていることがわかった。

② シナリオ分析によって長期的にみると、治水事業による整備ストックの効果が大きく、事業の規模および速度が強く影響することがわかった。

表-2.3 人口に対する他の変数の影響

	標準化係数			
	第1期	第2期	第3期	第4期
治水整備面積				
ストック	—	1.452	0.972	0.827
農地面積	1.695	-0.143	-0.165	0.380
住宅地面積	0.498	-0.892	0.252	1.492
商業地面積	-0.724	0.475	-0.042	-0.980
工業地面積	-0.472	0.045	—	—
				重回帰係数
第1期 (1974~1912)				0.965
第2期 (1913~1945)				0.998
第3期 (1946~1959)				0.998
第4期 (1960~1980)				0.999

表-2.4 シナリオによるシミュレーション結果 (1980年の値)

シナリオ 変数	1	2	3
人口	95.3	102.7	113.0
治水整備面積	0.0	118.9	207.6
農地面積	91.7	107.7	108.3
住宅地面積	70.0	108.9	140.2
商業地面積	71.4	107.1	142.9
工業地面積	66.4	110.7	147.5
利用可能面積	71.6	105.2	130.2

3. 泥炭性軟弱地盤地域の宅地開発可能量算定法

(1) 軟弱地域への宅地開発拡大に伴う諸問題

前章で示したように、土地利用高度化に対して、地域安定性に関わる諸条件克服が極めて重要な役割を演じてきていることが、積雪寒冷地域に存在する都市発展の特徴であるといえる。とりわけ、多くの泥炭性軟弱地盤は、より低平な地域に分布するため、洪水氾濫、地盤沈下に対する安全性と、住宅開発規模の均衡を図ることが、今後の都市計画に重要な課題と言わなければならない^{(11),(12)}。

ここでは、特に、水害危険性を考慮した宅地開発可能量算定に対しての方法について論議するものとする。

一般的に、積雪寒冷地域における水害のタイプをみると、大きく2つに類型化することができる。1つは、豪雨や台風時期での大河川決壊による氾濫であり、他の1つは、都市内の排水路が排水しきれないで発生する内水氾濫である。北海道においては、内水氾濫として春の融雪時における出水も考えなければならない。総じて、最近では内水氾濫による都市水害は、増加している。このように、都市水害が多発するようになった理由として、以下の点が指摘される。

1) 都市河川流域の急激な都市化により、都市の保水力が低下したこと。

2) かつての氾濫原であった水田地帯や低湿地帯が宅地化されて家屋が建ち、浸水被害を受けやすくする市街地が形成されたこと。

3) 地下水の使用によって地下水位が減少し、特に泥炭性軟弱地盤地域を中心に地盤沈下が進んでいること。

換言すれば、水害が頻発している地域は、潜在的に被害ポテンシャルが高い地域であったが、資産、人口の集中につれて、その被害ポテンシャルも顕在化し、顕著に現われるようになったのが最近の特徴である⁽¹³⁾。したがって、水害を防御する対策として、河川改修等技術的対策の推進と共に、被害を最小限に食い止める社会的対策も重要であり、いわば有力な即効薬として位置づける必要がある。ここでは、技術的対策と社会的対策の均衡を考慮した、宅地開発可能量算定モデルを構築し、地域安定性に基づいた開発のあり方を考えるものとする⁽¹⁴⁾。

本方法の特徴をまとめると、以下のようになる。

① 従来より都市計画に関する意思決定にあまり評価されることのなかった水害危険度をモデルに取りこむこと。

② したがって目的関数を、得られる宅地開発量を最大にする（これは、宅地サービス量の最大化を意味すること）、それに伴う公共的負担をできるだけ少なくする（これは、治水投資の最小化）の2つに設定すること。

このような基本的概念に基づいた多目的問題は、札幌市北部地区で適用され検討された。

(2) 研究の方法

本章では、多目的試思決定問題を解くために、SWT法 (Surrogate-Worth Trade off Method) を適用した^{(15),(16),(17)}。

i) モデルの定式化

今、水害危険地域の開発状況を模式的に表わすと、図-3.1のような概念図が考えられる。

また地域での宅地開発可能量算定のための定式化について得られた結果は(3.1)～(3.3)となる。

$$f_1 = \sum_j \sum_t (A_{jt} - B_{jt} - C_{jt}) x_{jt} \longrightarrow M_a \quad (3.1)$$

$$f_2 = \sum_j \sum_t (-D_{jt} - E_{jt}) x_{jt} \longrightarrow M_{ax} \quad (3.2)$$

$$K_{j0} \leq x_{jt} \leq K_{jt} \tag{3.3}$$

ただし、 A_{jt} ；その時点での公示価格、 B_{jt} ；被害の現在価値、 C_{jt} ；耐水化の費用（この場合は、くい基礎、盛土などによる床高対策に関する費用を考える）、 D_{jt} ；ある公共投資レベルでの被害額、 E_{jt} ；ある公共投資レベルでの耐水化費用、 x_{jt} ；宅地開発可能量、 j ；地域、 t ；目標到達期間とする。

ここで目的規数 f_1 は、宅地開発量を最大化するもので、目的関数 f_2 は、治水投資を最小化するものである。制約条件には、地域の宅地開発可能な範囲を考える。

ここでは、水害危険地域における耐水化費用として、個人の受益負担と、公共負担を考えるものとしている。個人の受益負担として、基礎のカサ上げ、くい、盛土などの住宅施工が考えられる。また公共負担としては、排水施設があげられ、ポンプ施設、下水道、河川の改修などがある。

ii) 対象地域の設定

分析対象地域としては、北区篠路、屯田、茨戸地区を取りあげる。この地区は、茨戸川発寒川、伏籠川、創成川に挟まれた地域であり、札幌市で策定している統計区番号43～52に該当するものである。

これらの地域を500 m メッシュ 175 に分割し、統計区2～3 個を1つの単位として、全体を4つの地区に分割し、図-3.2のように表わす。

これによると、対象地域の総面積は、39.7 km² であり、北海道開発局が事業実施している伏籠川総合治水対策事業の流域面積の24.7%に相当している。4地域の土地利用状況を示すと、表-3.1のようになる。

対象地域の面積と統計区の面積は、ほぼ同じであり、その昭和55年(1980)時点での人口、人口密度、市街化区

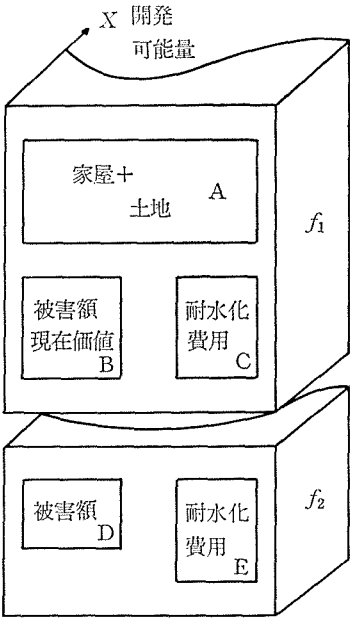


図-3.1 宅地開発可能量算定モデルの概念図

地域番号	統計区番号
J = 1	43, 44, 48
J = 2	47, 49
J = 3	45, 46
J = 4	50, 51, 52

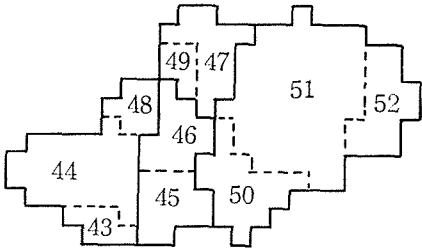


図-3.2 対象地域

表-3.1 対象地域の土地利用状況 (単位 ; ha)

J	市街地	農耕地	その他	合計
1	414.6	349.6	139.5	903.7
2	133.0	176.2	79.5	388.7
3	447.2	131.0	35.4	613.6
4	487.6	1005.9	570.3	2063.8
合計	1482.4	1662.7	824.7	3969.8

表-3.2 対象地域の人口および市街化面積

J	人口 (人)	人口密度 (人/ha)	総面積① (ha)	市街化面積② (ha)	②/①
1	15610	17.0	917.7	477.4	0.52
2	1317	2.1	384.0	23.5	0.06
3	26113	68.0	613.5	537.4	0.88
4	8669	4.2	2077.8	533.3	0.26
合計	51709	12.9	3993.0	1571.6	0.39

域面積などを表-3.2に示す。

次に、宅地は市街地の中に含まれるが、以下の
ような式で推定される。

$$\text{開発面積} = \text{宅地面積} + \text{道路面積} \\ + \text{公園面積}$$

そこで宅地面積の占める比率は、昭和46年から昭和55年までのこの地区の開発許可状況(89サンプルによって算出すると、開発面積の60%となり、その比率を用い開発可能量から宅地面積を算定することとする。

iii) 被害額の算定

被害額は、水害統計(建設省)と、その原票である一般資産調査票により算定した。これによると一般資産被害は、以下のように分類できる。

- イ. 家屋の被害(被災家屋の延床面積)
- ロ. 家財の被害(被災世帯数)
- ハ. 事業所資産の被害(事業所従業員数)
- ニ. 農漁家資産(農漁家棟数)
- ホ. 事業所営業停止損失額 $\{(イ + ロ + ハ + ニ) \times \text{営業停止損失率}\}$
- ヘ. 農作物

これらは、各資産別にそれぞれ算定される。例えば、家屋の被害額は、次のように算定することができる。

家屋被害額 = (浸水深別、勾配別被災家屋延床面積) $\times$ (都道府県別家屋1m²当たり評価額) $\times$ (浸水深別被害率)

これらの算定結果を示すと表-3.3のようになる。ここでは、実際の災害規模は、昭和56年8月の2回のケースを考え、それら前期・後期の浸水規模による被害の推定を行ない、それらの総計と、実際の被害額との比較によって検証を行なった。

この被害算定結果をみると、浸水規模がほとんど同じであったにもかかわらず、後期の被害額が、前期の被害額に比してかなり小さい。これは、前期の場合、資産集中地域に比較的大きな浸水が発生したためで、浸水地域の違いによって被害ポテンシャルがかなり異なってくることがわかる。ここでは、前期の例に基づいて、一般資産被害額の想定値を用いて、パラメータを考えるものとした。

表-3.4は、算定された一般資産被害の状況を示したものである。

iv) 計算の手順

SWT法は、Haimesらが開発したもので非劣解集合の中で選好解を探索する方法を ϵ -制約法からトレードオフ比 λ_{ij} を求め、それらの値の代理価値 W_{ij} として意思決定者に評価させる方法を導入して最適解を得るものである。

したがって、仮定された制約値 ϵ をパラメトリックに変化させ、その時のトレードオフ比 λ_{ij} を求めるためには、ラグランジェの未定数法を用いて、次式を解く。

$$Max f_1, \text{ subject to } f_2 \leq \epsilon \quad (3.4)$$

表-3.3 対象地域の水害被害額

J	前 期	後 期	合 計
1	429485 710326	64003 131852	493488 842178
2	225962 246658	20953 67923	246915 314581
3	7367 0	11280 0	18647 0
4	6083 321018	5575 47006	11685 368024
計	1946889	348592	2295491

ラグランジュ関数

$$L = f_1(x_{jt}) + \lambda_{12}[f_2(x_{jt}) - \varepsilon] \quad (3.5)$$

$$= \sum_j \sum_t (A_{jt} - B_{jt} - C_{jt}) x_{jt} + \lambda_{12} [\sum_j \sum_t (-D_{jt} - E_{jt}) x_{jt} - \varepsilon] \quad (3.6)$$

$\partial L / \partial x_{jt} = 0$ より

$$(A_{jt} - B_{jt} - C_{jt}) + \lambda_{12}(-D_{jt} - E_{jt}) = 0 \quad (3.7)$$

$$\therefore \lambda_{12} = (A_{jt} - B_{jt} - C_{jt}) / (D_{jt} + E_{jt}) \quad (3.8)$$

$$\partial L / \partial \lambda_{12} = 0 \text{ より } \sum_j \sum_t (-D_{jt} - E_{jt}) x_{jt} - \varepsilon = 0$$

$$\therefore \varepsilon = \sum_j \sum_t (-D_{jt} - E_{jt}) x_{jt} \quad (3.9)$$

(3.8), (3.9)式を用いて, ε をパラメトリックに変化させた場合の λ_{12} を算出することができ, その時の解がパレート最適解となる。

次に, 得られた λ_{12} を評価することによって, パレート最適解の選好解を見つけることにする。

今, 得られたパレート最適解(非劣解)の集合を点 f^* とすると, その時の傾きが λ_{12} となる。それを $\lambda_{12}(f^*)$ で表す。また, この点を通る意思決定者の無差別曲線の傾きを限界代替比と呼び, $m_{12}(f^*)$ で表す。 λ_{12} と m_{12} の差を代理価値(surrogate Worth)と呼び, 次式で定義する。

$$W_{12}(f^*) = \lambda_{12}(f^*) - m_{12}(f^*) \quad (3.10)$$

(3.10)の意味は, 次のように考えることができる。

① $W_{jt}(f^*) > 0$ は, $f_j(x)$ を一単位増加させることによって $f_i(x)$ を $\lambda_{ij}(x)$ 単位減少することを受け入れることができる。

② $W_{ji}(f^*) = 0$ は, 無差別であり, どちらともいいがたい。

③ $W_{ij}(f^*) < 0$ は, このような変化を受け入れることができない。

したがって $m_{ji}(f^*)$ の値を意思決定者から直接聞く代りに, $W_{ij}(f^*)$ の値をスコアとして引き出し, $W_{ij}(f^*) = 0$ となる点を求めることを行なえばよい。実際には, 都市計画担当者および河川計画担当者に $W_{ij}(f^*)$ の選好を行なってもらい, その情報によって判定する方法を採用した。

(3) 解析結果

i) パレート最適解の算定のためのシミュレーション

ε 制約法は, ε を変化させることにより, パレート最適解を求める方法であるが, 具体的な方法として, 次の LP 問題を解くことに帰着する。

目的関数

$$f_1 = a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_4 \rightarrow \max \quad (3.11)$$

制約条件式

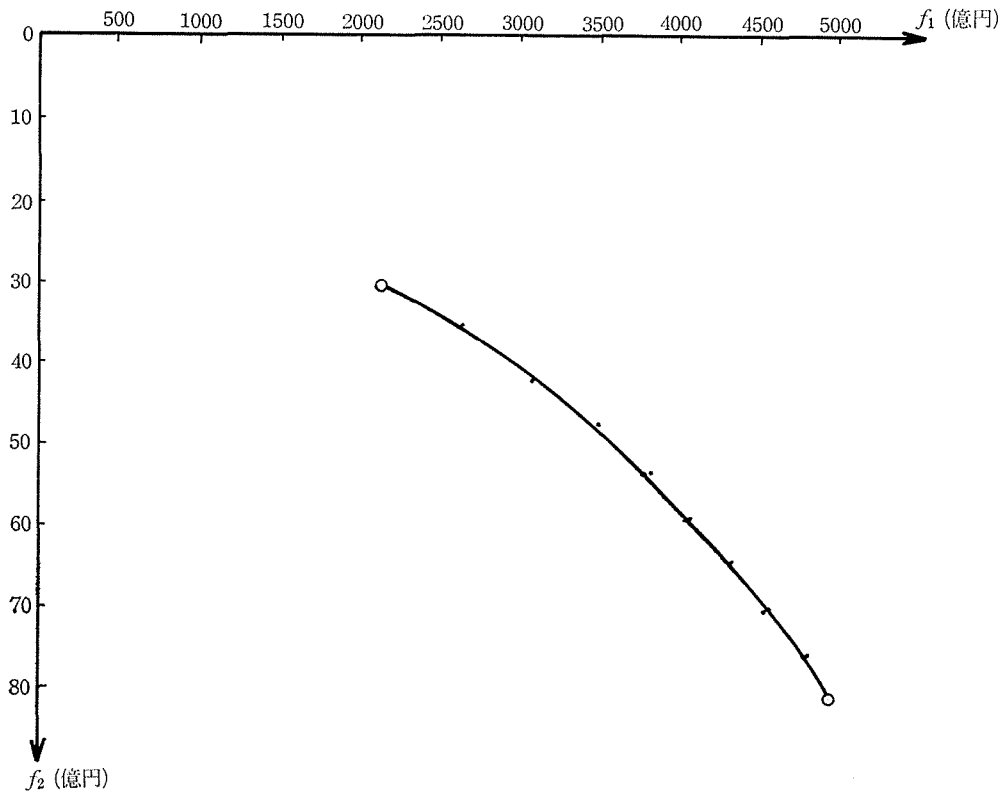
$$\left. \begin{array}{l} c_l \leq x_1 \leq c_u, \quad d_l \leq x_2 \leq d_u \\ e_l \leq x_3 \leq e_u, \quad f_l \leq x_4 \leq f_u \end{array} \right\} \quad (3.12)$$

$$f_2 = \varepsilon = -(b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4) \quad (3.13)$$

(3.11)は, 4地域の宅地開発, 可能量を最大にする目的を表わすもので, それぞれの地域の宅地開発可能量を $\{x_i | x=1, \dots, 4\}$ と表わしている。また, その規模の地域別制約が(3.12)で表わされる。さらに, (3.13)

表—3.4 得られたパレート最適解 (非劣解)

	k	f_2	x_1	x_2	x_3	x_4	f_1	λ_{12}
ε_1	30.8	30.8	248.8	79.8	268.3	292.6	2125.6	69.0
ε_2	36.4	36.4	312.9	79.8	368.2	292.6	2635.7	72.4
ε_3	42.1	42.1	443.1	79.8	368.2	292.6	3079.8	73.2
ε_4	47.7	47.7	542.2	79.8	368.2	337.5	3482.8	73.0
ε_5	53.4	53.4	542.2	79.8	368.2	523.6	3752.7	70.3
ε_6	59.0	59.0	542.2	79.8	368.2	710.1	4023.1	68.2
ε_7	64.7	64.7	542.2	79.8	368.2	896.2	4293.0	66.4
ε_8	70.3	70.3	542.2	79.8	368.2	1082.7	4563.4	64.9
ε_9	76.0	76.0	542.2	101.4	368.2	1238.2	4807.7	63.3
ε_{10}	81.6	81.6	542.2	233.1	368.2	1238.2	4922.3	60.3



図—3.2 得られた無差別曲線 (パレート最適解)

は、 ε 制約式で、治水投資に関わる制約を考えている。

ここでの前提条件は、次のように設定されている。

1) 昭和56年を $t=0$ として開発をスタートさせ、宅地開発量が飽和するまでの期間を考える。

3) $x_1 \sim x_4$ の制約条件の下限値は、(市街地面積 $\times 0.6$)、上限値は、(総面積 $\times 0.6$) と設定している。

以上のアルゴリズムによって得られた結果を表わすと表-3.4 のようになり、また図に表わすと、図-3.2 が得られる。

ii) 意思決定者による評価

意思決定者に対する質問調査によって各 λ_{12} に対する W_{12} のスコアをまとめると表、5 のようになる。この場合被験者は A から F までの6名であり、そのうち、都市計画担当者は4名 (A~D)、また河川計画担当者2名 (E, F) であった。表-3.5 で得られた回答に基づき、選好解を求めると、図-3.3 のようになり、選好領域は、2つの領域得られた。また、6名の平均として考えられた選好領域を、図-3.4 に示す。

表—3.5 各意思決定者の代理価値評価

	都 市				河 川		平 均	都 市	河 川
	A	B	C	D	E	F			
ε_1	+2	-3	+1	+1	0	0	0	0	0
ε_2	+3	0	+4	+2	+2	+2	+2	+2	+2
ε_3	+5	+5	+5	+3	+5	+3	+4	+4	+4
ε_4	+4	+3	+3	+2	+4	+2	+3	+3	+3
ε_5	+2	-5	+2	+1	0	0	0	0	0
ε_6	+1	-5	0	0	-2	-3	-0	-1	-2
ε_7	0	-5	-1	-1	-3	-5	-2	-1	-4
ε_8	-2	-5	-2	-2	-4	-7	-3	-2	-5
ε_9	-3	-5	-3	-3	-5	-8	-4	-3	-6
ε_{10}	-5	-5	-5	-4	-6	-10	-5	-4	-8

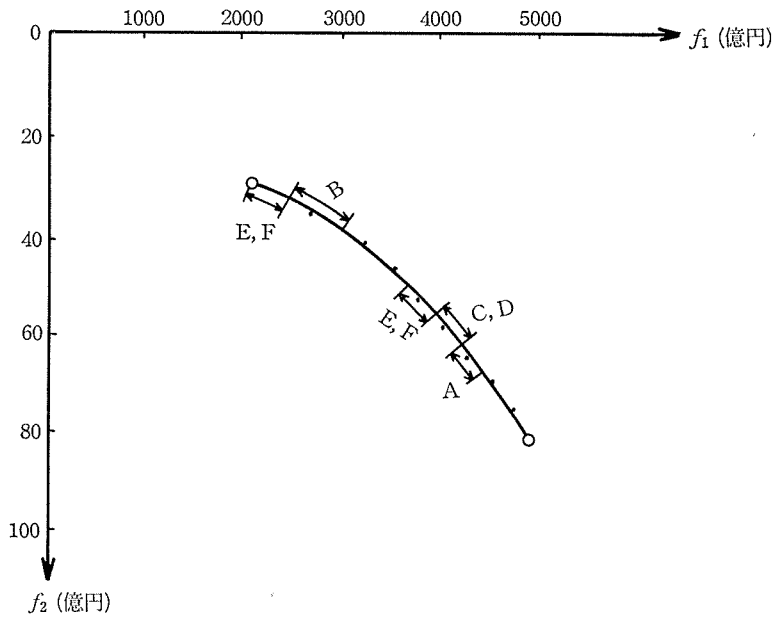
注) 都市は都市計画担当の平均、河川は、河川計画担当の平均を表わす。

これによると、都市計画および河川計画担当者の選好解は、 $\lambda_{12}=66 \sim 70$ の範囲に現われ、解の選好領域は、 $R_1 \{f_1=2100 \text{ 億円} \sim 2600 \text{ 億円}, f_2=30 \text{ 億円} \sim 38 \text{ 億円}\}$ および $R_2 \{f_1=3700 \text{ 億円} \sim 4000 \text{ 億円}, f_2=53 \text{ 億円} \sim 59 \text{ 億円}\}$ の範囲をとることが分った。

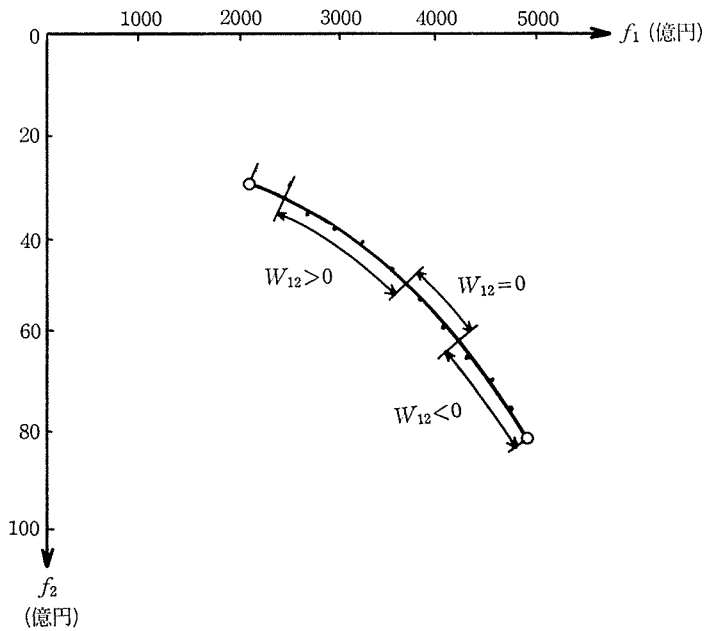
この解釈として、次のようなことがいえる。

① 意思決定者の選好は、宅地開発サービス量と、治水投資のトレードオフ比のある範囲に収束する。このことは、それぞれの量の絶対量による判断ではなく、宅地開発サービス量に応じて、一定の割合で地域安定性を保持すべく治水投資の量を決定しようという考え方に基づいている。

② 選好されたトレードオフ比を持たず範囲は、本対象地域では、2つあることがわかった。第1の選好領域 R_1 は、宅地開発サービスをできるだけ抑制して、治水投資の支出も抑制しようとする領域で、土地利



図—3.3 各意思決定者の選好領域



図—3.4 意思決定者平均値による選好領域

用規制の考え方を表わしている。第2の選好領域は、宅地開発サービスを高めながら、治水投資の投資効率を確保しようとする領域で、開発促進の場合の適応点と考えることができる。このどちらかについては、トレードオフ比による判断に意思決定が依存する場合には無差別となる。

③ このように、一般に、宅地開発と、災害に対する地域安定性の相異なる2つの目的を持つ多目的計画問題は、その無差別平面が複雑になり、凸性についても厳密な意味で保証されず、今後解決されなければならない問題といえる。

(4) ま と め

以上の結果を簡略にまとめると、次のような点があげられる。

① 水害危険地域での宅地開発可能量算定に、治水（耐水化）による負担の考え方を導入しその均衡を考えるモデルが提案され、実証的分析の結果、ほぼ納得できる解が得られた。

② すなわち、具体的な例をみると、無差別な解は、宅地開発サービス量のポテンシャルが高い地域1では、治水投資規模も大きくなり、宅地開発サービス量のポテンシャルが低い地域3の方が、治水投資規模も小さく、それらのバランスを考えると、地域3が優先順位として高い評価を与えている。これは、水害危険性を考慮した場合、ゾーニングや開発許可等で、地区の優先順位が変わることを示唆しているといえる。

③ 意思決定者の考え方による開発適正規模を求める選好解は、選好領域として意見の収束が可能であるが、無差別曲線が厳密に凸曲面を形成していないので、選好領域が複数あらわれ、解釈を要する結果となった。これは、地域単位に開発地域が異なり、被害ポテンシャル算定の際、曲面が複雑になるためである。したがって、今後は、このような問題についての検討が必要となることがわかった。

4. お わ り に

以上昭和59年、60年、61年度、3カ年にわたる研究の最終的なとりまとめを行なった。

ここでは、積雪寒冷地域特有の地盤である泥炭性軟弱地盤に立地する宅地開発の問題について、主として、水害に対する危険性と、その克服による土地利用高度化の過程を通して論じた。その結果、次のような点が明らかとなった。

① 居住環境を決定する要因が、その開発過程の自然的条件、社会、経済的条件と極めて密接な相互関連性をもつこと。

② 特に、積雪寒冷地の地域安定性に対する条件、例えば、水害危険性の軽減のための事業などは、直接的には現われないが、潜在的に土地利用高度化に大きな影響を与えていることが見い出されたこと。

③ 今後、札幌市などの積雪寒冷地域の都市化は、益々脆弱、劣悪な地域に拡大が予想され、地域安定性を高めるための相応の負担と、宅地開発規模との均衡のある政策選択が必要になったこと。

④ そのために、より総合的な視座をもとに、都市の土地利用管理が必要になってきており、多少の問題点を残しているが、宅地開発と、治水計画を同一ステージで評価できる今回のモデル開発の有効性が明らかになったこと。

今後の課題としては、積雪寒冷地の居住環境レベルを高めるための条件整理を行なって、物理的条件克服のみではなく、アメニティ創造という面から、より広汎で、多様なモデルの開発を行ないたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 加賀屋誠一, 山村悦夫: 都市水害の構造と住民の防災意識—札幌市東区, 西区の事例—都市と災害, 日本都市学会年報, Vol. 17 (1984), pp. 66-83.
- 2) 加賀屋誠一, 山村悦夫, 竹村 勉: 都市化過程における治水事業評価のためのシミュレーション分析, 土木計画学研究, 講演集 No. 7 (1985), pp. 189-196.
- 3) 加賀屋誠一, 山村悦夫: 小規模民間宅地開発への防災負担設定に関する実証的分析—札幌市南区を例として—土木計画学研究, 講演集 6 (1984), pp. 319-326.
- 4) 加賀屋誠一, 山村悦夫: 洪水被害事前評価に関する研究, 地域学研究 7 巻, 日本地域学会 (1977), pp. 77-94.
- 5) 加賀屋誠一: 地域水資源開発計画におけるコンフリクト調整への多基準分析の適用, 土木学会北海道支部論文報告集第 40 号 (1984), pp. 482-487.
- 6) Stover, J. C.: Including Future Events in System Dynamics Models, System Dynamics, North-Holland (1980), pp. 189-208.
- 7) Write, R. D.: Backward Integration Tests of Dynamic Models, World Modeling, North-Holland (1976), pp. 129-140.
- 8) Britting, K. R.: Backward Integration of System Dynamics Models —A Useful Validation Test, World Modeling, North-Holland (1976), pp. 141-149.
- 9) Burns, J. R. and Malone, P. W.: Optimization Techniques Applied to the Forrester Model of the World, IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics SMC-4, No. 2 (1974).
- 10) Hamilton, H. R. et al.: System Simulation for Regional Analysis; An Application to River Basin Plannin, MIT Press (1969).
- 11) 板倉忠興, 加賀屋誠一, 山本 博, 他: 都市災害の実態と対策の研究, 昭和 56 年北海道豪雨災害に関する研究, 昭和 56 年度科学研究研究費補助金 (自然災害特別研究 (1)) 研究成果報告書 (1982), pp. 133-173.
- 12) 加賀屋誠一: 水害危険地域における土地利用高度化の適正規模算定のための一考察, 土木学会北海道支部論文報告集第 41 号 (1985), pp. 470-475.
- 13) 建設省河川局編: 昭和 56 年水害統計 (1983).
- 14) 高野公男: 日常性の中での水防まちづくりの可能性と限界, 日本都市計画学会誌, No. 135 (1985), pp. 47-56.
- 15) Haims, Y. Y., Hall, W. A. and Freedom, H. T.: Multiobjective Optimization in Water Resources System, Elsevier, Amsterdam (1975).
- 16) Haims, Y. Y.: Hierarchical Analyses of Water Resources System (1977).
- 17) 竹田英二: 最近の多目的決定理論の動向, オペレーション・リサーチ, 1980. 10, pp. 658-666.

(1987 年 3 月 3 日受理)

Abstract

Recently in some cities of cold-region land use has been advanced in the areas which have the worse physical conditions, for instance, low lying area, weak and soft-conditional land and peaty foundation land. In such cities the efforts to increase the stability of land use against flood hazards are vital, then in the respect two modeling methods were proposed: one is the simulation model using the backward integration technique of System Dynamics in order to represent historical regional activities between land enhancement and flood control measures. The other is the multiobjective optimization model in order to estimate the future potential of housing development area in consideration of regional flood condition. The result of two modeling methods shows that both methods were available to identify the complicated relationship between the land use activities and flood control measures. Especi-

ally, the adequacy of backward integration technique of System Dynamics was confirmed in order to reproduce the long-term historical facts using cause-effect relationship. The optimization in terms of the Surrogate Worth Trade-off method gives the scale of land enhancement by means of evaluating two objectives, the maximization of regional service from land use and the minimization of the public flood control cost.

Key Words land enhancement, flood control, backward integration technique of System Dynamics, multiobjective optimization.