

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*

Simulation Analysis for Evaluation of Flood Control
Equipments on Urbanization Process

加賀屋 誠 **・山村 悦夫 ***・竹村 勉 ****

By Seiichi KAGAYA, Etsuo YAMAHURA and Tsutomu TAKEMURA

In general, the enhancement of land use is promoted by the equipments for infrastructure in order to increase the regional stability. Flood control is one of the historical and large-scaled measures. But it is difficult to indicate the degree of its contribution to the stabilization of the regional environment. In this study, the Backward Iteration Technique of System Dynamics Modeling is proposed in order to evaluate the effect of the flood control to the land enhancement. The empirical results show that regional population depends on the flood control by application of the long-term simulations.

1. はじめに

いくつかの都市では、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、あるいは氾濫原等地形条件が悪く、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。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、治水対策をはじめとする安全性の確保が相互関連性を持ちながら地域計画が行なわれている。

しかしながら、治水計画等の防災対策が、地域の居住空間の安定性の寄与する度合の評価は、次のような理由で困難がある。

* キーワーズ：後方積分型SD、治水効果

** 正会員 学博 北海道大学助教授 大学院環境科学研究科 *** 正会員 工博 北海道大学教授 大学院環境科学研究科 (〒060 北区北10条西5丁目) **** 正会員 学修 秋田県庁

(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近年、それらの相互関連性が考えられ、それらの構造把握、が難しい。

(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) 効果そのものが動学的であり、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学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。

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おこなうものとする。

- (1) 居住空間は、地域安定性、ここでは、居住性・雇用機会・安全性で捉えるが、それらが高まれば拡大するものとする。
- (2) 地域の発展の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うる要因については、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要因の変化によって表わされるものとする。
- (4) 比較的長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

(1) 分析の手順

分析の手順は図1で示される。

前述した問題解決のために、地域モデル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、1960年から1980年のデータをもとにシミュレーションを行うものとする。また、シミュレーションの際の制御のための支援システム^{4),5)}。ここでは、外生的に与える乗数の相互関連性を考えた政策シミュレーションの方法KSIMを導入する⁶⁾。さらに、基本的な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。後方積分型の場合、SDの状態変数がフィードバックを含むため^{7),8)}、誤差の問題があり、

それらについての検討も行なう^{9),10)}。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によるストックの効果を検討する。

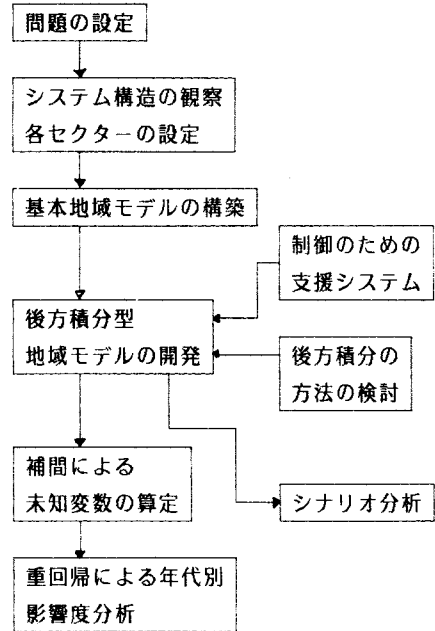


図1 分析の手順

(2) 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等からみると、対象都市の発展形態、その期間の経済状態等と極めて密接な関連性がある。すなわち、都市の発展は、その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、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、システムとして捉えながらその時間的変動を明らかにすることは、生活基盤整備の代表的なものの一つである治水事業の長期的効果計測に重要なことと考える。

ここでの目的は、短期的な環境に対するインパクトよりむしろ長期的な変化を追跡できる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には大きな相違はなく、その要素の規模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。

氾濫想定地域でのこれらの分析の必要性は以下の点にまとめられる。

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、時間的な変化に追従できる情報、データが収集しやすい。

(3) 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等の要因を与える。

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のようになる。

(4) 制御のための支援システム

ここで作成した地域モデルでは、住宅地乗数、商業地乗数、工業地乗数、農地転用率等検証のために外生的に与えるパラメータ（実際はテーブル関数として与えるので時間に依存する変数となる。）が必要であるが、ここでは政策シミュレーション手法の一つであるK S I Mを用いて一括して取扱うこととする。

今、それらのパラメータの状態を m_i とすると

$$m_i(t + \Delta t) = m_i(t) + \Delta t \cdot P_i(t) \quad i=1,2,\dots,n \quad (1)$$

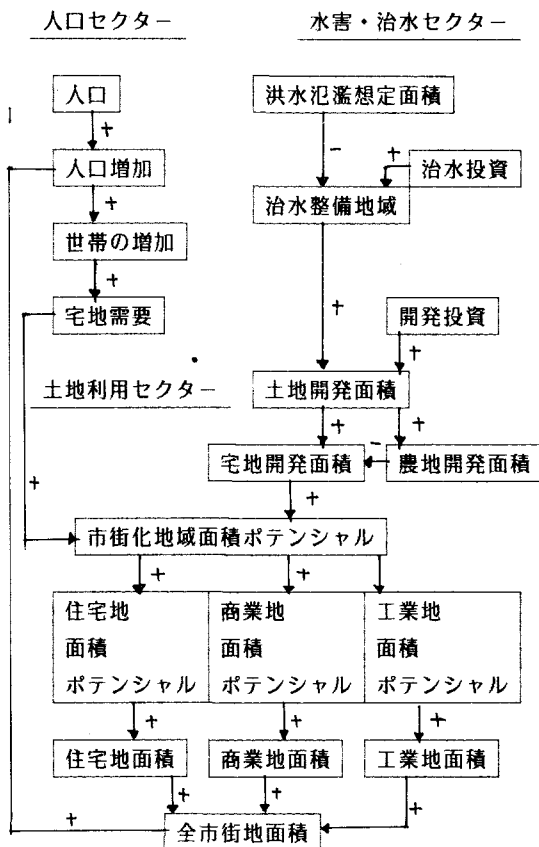


図2 基本地域モデルの因果関係ループ

$$P_i(t) = \frac{1 + \Delta t \mid m_i \text{ の負のインパクトの合計}}{1 + \Delta t \mid m_i \text{ の正のインパクトの合計}} \quad (2)$$

P_i は m_i 相互のインパクト関係を作ることによって得られる相互関係マトリクスによって算出される。

(5) 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であり、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持つ。

本手法は、近年SDモデルの検証方法として、またSDモデリングの正当性を議論する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考える。

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。

$$\begin{aligned} dx_i(t)/dt &= f(x_i(t) + u_i(t)) \\ x_i(t) &= x_{i0} \end{aligned} \quad (3)$$

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

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。可観測性があるためにシステム状態が得やすく、またこれらのモデルは一般的に後方積分可能である。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、あっても見つけることができない。この場合、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を与える。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になる。

$$dL_d(t)/dt = L_g(t) - L_r(t) + \xi(t)$$

$$L_d(0) = L_0 + \eta$$

$$L_g(t) = \alpha \exp(\beta t) \quad (4)$$

$$L_r(t) = L_d(t)/\gamma$$

ここで $\xi(t)$ と η は、数値積分での不完全性によって導入された誤差を表わし、 α 、 β 、 γ は定数である。(4) 式は、次のような解をもつ。

$$\begin{aligned} L_d(t) &= \exp(-t/\gamma) [L_d(0) + \eta] \\ &+ \exp(-t/\gamma) \int_0^t \exp(s/\gamma) [L_g(s) + \xi(s)] ds \end{aligned} \quad (5)$$

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 が大きくなると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。

$$\begin{aligned} dL_d(t)/dt & \text{ Backwards} \\ &= -L_g(t) + L_r(t) + \xi(t) \end{aligned} \quad (6)$$

このシステムに対する解は、

$$\begin{aligned} L_d(t) &= \exp(t/\gamma) [L_d(0) + \eta] \\ &+ \exp(t/\gamma) \int_0^t \exp(-s/\gamma) [L_g(s) + \xi(s)] ds \end{aligned} \quad (7)$$

となり、明らかに時間と共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の注意は、この時間経過にかかわる誤差をいかに小さくすることができるかである。

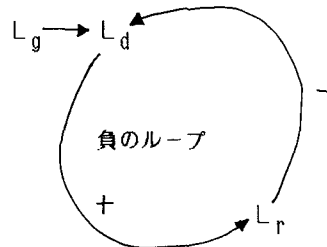


図3 フィードバックシステムを含む
後方積分

以上のことから後方展開型モデルの場合、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ことがわかる。構造安定性は、前方展開型モデルの検証に依存するが、一方積分安定性は、次の方法で精度を上げる努力を考える必要がある。

例えば、今、後方積分の方法として、図4のような3つの場合を考えることができる。

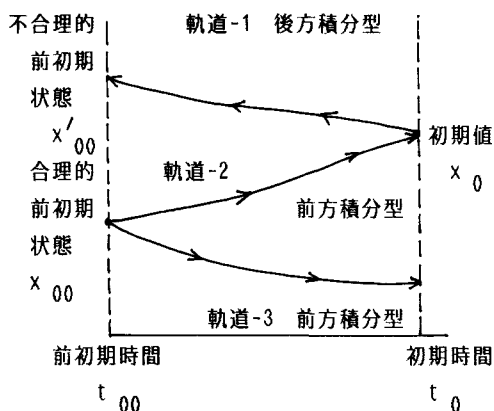


図4 後方積分型の主な軌道

a) 後方積分型……初期値 x_0 から後方に積分した場合の考え方であり軌道-1で示される。この場合はその前の状態(前初期状態 x_{00} と表わす)を合理的状態に導くかどうかは不明である。

b) 前方積分型……軌道-2および軌道-3で示されるように前初期状態 x_{00} から前方へ積分したものである。前方積分は安定性が高い軌道-2と3の結果は、理にかなった方法といえる。特に軌道-2は後方展開の方法としては望ましいといえるが、ここでは一般的なケースとして前初期状態が未知の場合の軌道-1の場合について考えるものとする。

軌道-1についてのシミュレーションを行なう場合の問題点としては前述したような不安定性が考えられる。それらの不安定性の解消方法としては絶対的な方法はないが、シミュレーション時間間隔と状態変化量との関係によって誤差の範囲を明示することができる。

例として、先に構築した基本地域モデルと、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

のようになる。

基本地域モデル

$$P0.K = P0.J + (DT) \{ (IPN.JK - DPN.JK + SMP.JK) \} \quad (7)$$

後方積分型地域モデル

$$P0.K = P0.J + (DT) \{ - (IPN.JK - DPN.JK + SMP.JK) \} \quad (8)$$

また $\left. \begin{array}{l} IPN.JK = P0.J / \tau 1 \\ DPN.JK = P0.J / \tau 2 \end{array} \right\} \quad (9) \text{ であり、}$

$SMP.JK = P0.J / \tau 3 \quad (10)$ と考えると(7)(8)は

$$P0.K = P0.J + (DT) \{ \pm P0.J (1/\tau 1 - 1/\tau 2 + 1/\tau 3) \} \quad (11)$$

$(1/\tau 1 - 1/\tau 2 + 1/\tau 3) = 1/\tau$ とすると(11)式は $P0.K = P0.J + (DT) \{ \pm P0.J / \tau \} \quad (12)$ 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。

$$\dot{P0}(t) = \pm P0(t) / \tau ; P0(t) = P0_0 \quad (13)$$

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。

$$P0(t) = P0_0 \exp(\pm t / \tau) \quad (14)$$

もし時間 t が時間間隔 DT を n 分割したものと考えれば、(14)式は n 時間段階で(15)式のように表わすことができる。

$$P0_n = P0_0 \exp(\pm n(DT) / \tau) \quad (15)$$

一方矩形型積分法を用いて(13)式は(16)式のように再構築される。

$$P0'_{n+1} = (1 \pm DT / \tau) P0'_n \quad (16)$$

もしシステムが、 $P0_0$ で初期化されるなら、 n 段階の値は(17)式のように表わせる。

$$P0'_n = (1 \pm DT / \tau)^n P0_0 \quad (17)$$

(15)式と(17)式とを比較すると $DT / \tau < 1$ の時、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小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、

$P0_n = P0_0 \exp(\pm 1)$ の値に到達する時間においての時間定数 τ' を定義するならば、(17)式を用いて実際の時間定数との関係が(18)式で示される。

$$\sigma/\tau = \pm(DT/\tau)/\ln(1 \pm DT/\tau) \quad (18)$$

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がわかる。すなわち、 DT と τ 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。

(6) 重回帰分析による影響度の評価

構造型予測モデルである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。

(7) 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、かつ数年ごとのデータである。2つのモデルの関係は、図4に示される。

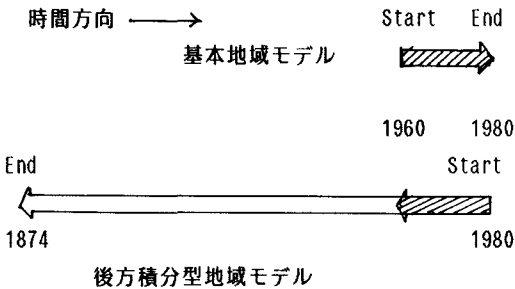


図4 2つのモデルのシミュレーション

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1である。

また表2は現在の氾濫想定面積から過去の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

表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

表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

られる。

これらのシミュレーション結果をまとめると次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減少は現われなかった。

②人口、土地利用面積等、実際値と計測値との比較では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。

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それぞれの時代を反映した影響要素を把えてみる。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変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一つである。表3は、時代区分ごとに指標を表わしたものである。

表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		

最後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さらに検討する。

シナリオは様々なものが考えられたが、ここでは次の3通りのものを設定する。

(シナリオー1) …治水事業が全くなかった場合

(シナリオー2) …大正初期に始まった治水事業を明治期に早めた場合

(シナリオー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。

表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

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は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。

5. まとめ

ここでは比較的長期の史的事実を再現するための方法についてその導入法、問題点を踏まえてその妥当性について検討した。その方法として後方積分型SDモデルの有用性が指摘された。特に治水事業のようなその効果が長期にわたって計測する必要がある場合において有効である。今回はモデルが比較的簡易であったが、今後さらに精緻にしていきたいと考えている。

なお、モデルシミュレーション等の計算には北海道大学大型計算機センターのアプリケーションプログラム「SDS」、および「KHSPSS」を用い

た。

6. 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；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、土木学会、(1984)pp.319-326.
- 3)加賀屋誠一、山村悦夫；洪水被害事前評価に関する研究、地域学研究第7巻、日本地域学会(1977)pp.77-94.
- 4)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.
- 5)Stover, J.C; Including Future Events in System Dynamics Models, System Dynamics, North-Holland (1980)pp.189-208.
- 6)Kane, J., et al.; KSIM: A Methodology for Interactive Resource Policy Simulation, Water Resources Research, vol.9 No.1(1973)pp.65-79.
- 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 Planning, MIT Press(1969).