

## 都市のSDモデル構築支援システム

A Development of System Dynamics Model  
Building Support System

福島 徹\*\*, 枝村 俊郎\*\*\*, 伊藤 裕文\*\*\*\*

By Tohru Fukusima, Toshiro Edamura, Hirofumu Ito

It is necessary to plan scientifically and efficiently by using computer. But, it is not easy to use computers such that, because of poor knowledge for them, or insufficient data, etc. Therefore, to bring a solution, we developed the city planning support system. Up to date, SD model takes long time and prodigious labor. Our system dynamic model building support system can produce effectual and various information to build SD models. In this paper, we introduce the outline of this system. This system consists of three parts, there are Data base systems for city planning, SD model base and SD model management system. From the Data base systems, we set data to analyse for model building. SD model base system, we use for initial condition model of this system. The model management system compiles the SD model, interface to planners, etc.

### 1. はじめに

都市計画の立案, 策定にあたっては, 計画の科学化, 業務の効率化, 迅速化をめざしてコンピュータの積極的利用が不可欠となってきた。しかしながら現実には, データの未整備や計画者の情報処理知識の不足等により, 計画者が活発にまた手軽にコンピュータを利用しているとは言い難く, 依然として, 従来通りの経験と勘をたよりの作業が進められるケースも多い。このような状況を解決するためには計画者がコンピュータを簡単に操作して必要な情

報を得ることのできる計画支援システムが必要である。そこで我々の研究室では計画情報を体系的に整備し, データベース化を行うとともに, 計画立案に有用な情報を会話型で提供する都市計画支援システム(KUCPAS)の設計とその開発を行ってきた。本論文ではこのKUCPASのサブシステムとして開発した都市のSDモデルの構築を支援するシステムについて紹介する。

SDモデルは都市構造や, 政策効果の分析, マクロ予測等計画策定過程において, しばしば用いられる有用な手法の1つとされている。ところが, モデルの開発にはデータの収集からシミュレーションに至るまでに多大の時間と労力が必要であり, また, モデル記述はDYNAMOとかCSPLと呼ばれるシミュレーション言語により行われるが, そのための知識も不可欠である。一方, SDモデルの特徴である非線形性や遅れの表現は逆にモデル挙動の把握を困難にし, 不透明なものとしているとの指摘もある。そこでS

\*キーワード: 支援システム, SDモデル, データベース

\*\* 正会員 工修 神戸大学総合情報処理センター講師  
(〒657 神戸市六甲台町1-1)

\*\*\* 正会員 工博 神戸大学工学部土木工学科教授

\*\*\*\* 工修 日本通運

Dモデル構築支援システムは、データベースを利用することにより、モデルとそれに必要なデータとの結合を自動的に行うと共に、モデル構築に必要な因果関係分析や挙動の解析を会話的に進めモデルの容易な作成を支援するものである。具体的には、本来バッチ型の連続型シミュレーション言語CSPLによるモデル作成を、モデル構築に必要な情報を提供しながら、端末との会話を通じて構造の決定、編集、実行を行う設計となっている。

## 2. SDモデル構築支援システムの特徴

SDモデル構築支援システムは、情報処理の専門的知識を持たない計画担当者が、端末を直接操作して目的とするモデルの構築を会話的に容易に進めていくことができることを目的としており、このために次のような特徴を備えている。

- ①計画者が簡単に操作することができる会話型システムである。
- ②都市情報をデータベースより直接利用している。
- ③モデル構築に必要な因果関係等分析をグラフィック機能を用いながら利用できる。
- ④モデルの挙動に関する情報を提供している。
- ⑤モデル構造の定義、修正が容易に行える。
- ⑥モデル構造の情報を蓄積、再利用できる。このことを利用してSDモデルを構築するときの出発点となるモデル（SD基礎モデル）を作成しており、このモデルをベースにしてモデル構築ができる。また、以前にモデル構築を行った時の、モデル構造を格納したファイル（SDモデル知識ベース）により、これを出発点として構築していくこともできる。
- ⑦時の経過にも柔軟なシステムで、最新の情報から都市のモデル化ができる。
- ⑧全国のどの都市においても適用できる。

## 3. SDモデル構築支援システムの構成

支援システムの構成は、モデル情報を格納しているSDモデルベースと都市の因果関係分析、モデルのパラメータ推定に必要となる都市情報とその維持管理をするデータベースシステム、そしてこれらの情報を操作しモデル構築、実行を行うSDモデルマネジメントシステムから構成されている（図-1）。

SDモデルベースは、SD基礎モデルとSDモデル知識ベースから構成されている。SD基礎モデルはSDモデルの骨格をなすモデルで、人口を中心に表現した標準モデル、SDモデル知識ベースは、これまでに作成したSDモデルのデータベースである。モデルの構築は、このモデルベースの構造に追加、修正する形ですすめられる。すなわち、SDモデルベースのモデル構造を出発点として、マネジメントシステムの都市構造の分析、モデル挙動解析等をもとに追加、修正をおこない最終的に目的とするSDモデルを構築していくわけである。また、最終的に得られたSDモデル構造は、必要に応じてSDモデル知識ベースに追加、保存できる。モデル構造情報は、因果関係情報、遅れ時間情報、指数情報、非線形関数情報、レイト情報、使用変数名情報、魅力度を構成する要因情報、魅力度の認識遅れ時間情報な

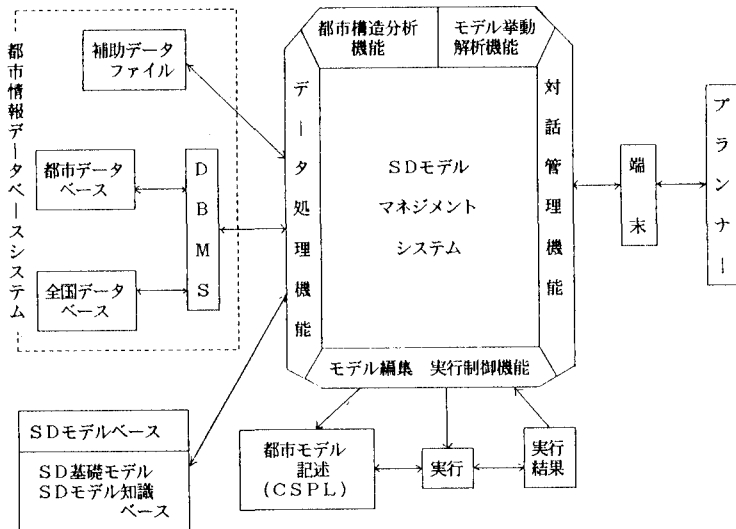


図-1 SDモデル構築支援システムの全体構成

どで構成されている。

都市計画情報データベースシステムは、KUCPASのデータベースシステムを利用することによって、モデルに必要となるデータを時系列で簡単に利用することができる。KUCPASでは現在全国180都市のデータが蓄積されており、これらのうちのいずれの都市でもシステムの利用が可能である。これらのデータの管理、検索のために、時系列データを効率的に扱えるデータベース管理システムを開発した。また、データベースにないデータをモデルが必要とする場合には、一時的に記憶するための補助データファイルを利用することができる。

SDモデルマネジメントシステムは、SDモデルベースと、都市計画情報データベースシステムからデータを受け、プランナーの目的にあったモデル構築を進めるためのシステムで、データの入出力を行うためのデータ処理機能、モデル構築のために必要な都市分析を行う都市構造分析機能、定義したモデル構造に従ってCSPLプログラムの編集を行い実行する編集・実行制御機能、テストランにおけるモデルの挙動を明確にしモデルの精度を検証するモデル挙動解析機能、プランナーにもわかりやすい会話でシステムの利用を進める対話管理機能を有している。

#### 4. SDモデルベース

##### (1) SD基礎モデル

SD基礎モデルは、支援システムによりモデル構築を進めて行く上でベースとするもので、人口セクターとそれととりまく都市環境セクターにより構成する。そして、この都市環境の構成因子が都市の魅力形成し、それにより人口セクターにおける転出入が変化、一方でこの人口増減が都市環境に影響を及ぼすというフィードバックループを形成している。

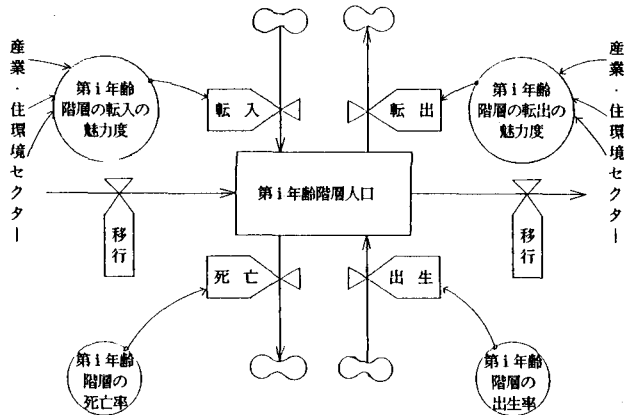


図-2 人口セクターの構成

##### 因果関係情報

| 式番号 | 式区分コード | 被説明変数名 | 説明変数1 | 説明変数2 | 説明変数3 | 説明変数4 |
|-----|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
|     |        |        |       |       |       |       |

##### 遅れ時間情報

| 式番号 | 説明変数1 | 説明変数2 | 説明変数3 | 説明変数4 |
|-----|-------|-------|-------|-------|
|     |       |       |       |       |

##### 指数情報

| 式番号 | 指数曲線の次数 |
|-----|---------|
|     |         |

##### レート情報

| 式番号 | 式記述 |
|-----|-----|
|     |     |

##### 点列で示す非線形情報

| 式番号 | 与えられた点の数(n) | $(x_1, y_1)$ | $(x_2, y_2)$ | ..... | $(x_n, y_n)$ |
|-----|-------------|--------------|--------------|-------|--------------|
|     |             |              |              |       |              |

##### 使用変数名情報

| 変数番号 | 変数名 | 四則演算式(合成変数の場合) |
|------|-----|----------------|
|      |     |                |

##### 魅力度を構成する要因情報

| 式番号 | 魅力度の要因を表現する式に使用した変数の数 | 移動タイプ<br>1:就業・就学型<br>2:居住型 | 魅力度の要因を表現する式 |
|-----|-----------------------|----------------------------|--------------|
|     |                       |                            |              |

##### 魅力度のテーブル関数情報

| 式番号 | 転出入区分 | $(x_1, y_1)$ | $(x_2, y_2)$ | ..... | $(x_7, y_7)$ |
|-----|-------|--------------|--------------|-------|--------------|
|     |       |              |              |       |              |

##### 魅力度の認識遅れ時間情報

| 転入の魅力度の認識遅れ時間 | 転出の魅力度の認識遅れ時間 |
|---------------|---------------|
|               |               |

図-3 モデル構造情報の表現

SD基礎モデルはモデル構築の基礎構造であるから、都市環境セクターは必要最小限の産業と住環境を考慮したモデルとなっている。ところで、モデルにおける可変部分はこの人口をとりまく都市環境セクターで、人口セクター自身はSDモデルの核部分として、会話による変更は考慮していない。支援システムでは、この都市環境セクターを修正、追加を加えながら目的とするモデルを構築しようとするものである。人口セクターは、年齢階層の違いによって出生率や死亡率および移動状態が異なることを考慮し、年齢階層別に出生、死亡、転入、転出を求めるコーホートモデルとなっている。この構造の概略は図-2に示すように、年齢階層別人口をレベルとして、出生、死亡、転入、転出、移行の各レイトより計算する。また年齢階層は9階層に区分している。人口セクターの転入、転出の魅力度の算出に、都市環境セクターの諸指標を用いているが、この両セクターは転入率、転出率に影響を及ぼす魅力度を介して連結する。転入、転出へ影響を及ぼす要因は、就業・就学型及び居住型の2つに分けて考、魅力度をを計算する。基礎モデルでは、居住型として人口密度、1人当たり住宅床面積、持家率等、就業・就学型として従業人口や大学生数等がある。

## (2) SDモデル構造情報の表現

SDモデルをプログラムにより修正、編集し、またモデルベースとして蓄積、再利用するためにはモデル構造をどのように整理し、情報化するかが問題となる。ここでは、本システムで用いたモデル構造情報の表現方法について述べる。モデル情報は図-3に示すようにいずれも表形式で扱っている。なお、モデルベースはディレクトリファイルを持ち、各々のモデルに関する情報として適用都市名、モデル構造の格納場所情報、作成年度、テストラン初年度、テストラン最終年、モデルに関する注記が記述されている。

①因果関係情報：SDモデルにおける変数間の因果関係を記述し、モデルを構成する骨格となる情報である。以下に述べるその他の情報の多くは、この情報に関する付加的情報である。なお表中の式区分コードとは次のようなものである。

【式区分コード】

-4~-1：説明変数の中に遅れを考慮した変

数のある重回帰式。数字は、説明変数の数を示す。

- 0：指数関数（但し説明変数は1つまで）
- 1～4：重回帰式、数字は説明変数の数を示す。
- 7：合成変数（被説明変数のみ入っている）
- 8：回帰により内挿、外挿する外生変数（被説明変数のみ入っている）
- 9：点列で定義する外生変数（被説明変数のみ入っている）
- 10：点列で定義する非線形関数（ただし被説明変数は1つまで）
- 11：レベル変数（被説明変数のみ入っている）

②遅れ時間情報：因果関係情報の中で遅れを考慮している重回帰分析に対し、遅れ年数データが入っている。

③指数関数情報：因果関係情報の中で指数関数を使用する場合の次数データが入っている。

④点列非線形関数情報：因果関係情報の中で、点列で定義する非線形関数を使用する因果関係に対して、非線形関数の点列データが入っている。

⑤レイト情報：因果関係情報の中でレベルを使用する変数に対して、レイトの式が入っている。

⑥使用変数名情報：都市データ、全国データ別に、使用している変数名が入っている。なお変数を四則演算によって合成する変数に対しては、四則演算の式が付与されている。

⑦内挿変数名リスト：使用変数の中でデータ不足のため、内挿する必要があると考えた変数名が入っている。

⑧魅力度を構成する要因情報：転入、転出への魅力度を算出するための要因を表現する情報。

⑨魅力度のテーブル関数情報：魅力度の要因のそれぞれに対し、転入、転出別に点列でテーブル関数の値が入っている。

⑩魅力度の認識遅れ時間情報：魅力度の認識遅れ時間が、転入、転出別に入っている。

⑪出力要求変数名リスト：モデル内での挙動を見るために出力を要求したい変数名が入っている。

## 5. 都市計画情報データベースシステム

支援システムの利用が時間の経過の影響を受けず、常に最新のデータを使用できるためには、追加・更新される都市計画情報データから独立で、かつ効率よく検索できるデータベース管理システム（DBMS）が必要である。都市計画情報データの利用特性を考えると、時系列データ処理のための次のような機能が有用である。

- ①任意の変数に対して利用できるデータの年度及びデータ数を知る。
- ②任意の変数に対して利用できるデータを年度と共にすべて読み込む。
- ③変数間の演算をデータの揃っているすべての年度に対して行う。
- ④欠落年度データの内挿、外挿を行う。

我々はこのような機能を有するデータベース操作言語を開発しサブルーチンコールの形で支援システムで利用している。また、モデル構築に必要なデータがすべてデータベースにあるとは限らない。そこでデータベースにないデータも繰り返し利用できるよう、補助データファイルに蓄積することができる。

## 6. SDモデルマネジメントシステム

## (1) 都市構造分析機能

都市構造分析機能は、都市を構成する変数間の正しい因果関係を見つけ出すためのもので、つぎのような機能が必要である。

## ① 2変数間の相関係数の出力

2変数間の相関係数を見ることによって、変数間の結びつきの強さを、また正負どちらの相関を持っているかを見る。

②重回帰分析による重回帰式と重相関係数の出力 重回帰分析を行い、その回帰パラメータと重相関係数を

出力し（図-4）、パラメータの正負は論理的に正しいか、また重相関係数も含めて重回帰式が妥当かどうかを検討する。

## ③遅れを考慮した相関係数の出力

2変数間の一方向のデータに遅れを考慮して、相関係数を求め、変数間の因果関係の向き、言い換えればどちらが原因で、どちらが結果かの判断の材料とする。図-5は転入者数と工場出荷額の間の遅れを考慮した相関係数のグラフ表示の例であるが、転入

```

22 EHN=1.00710*RTN-1106.31454
   R= 0.983 THE NUMBER OF DATA = 8
23 RTS=4.95326*POPU-494228.14844
   R= 0.852 THE NUMBER OF DATA = 8
24 OH GAISEI HENSU
25 TOP=0.08173*SS3+0.07806*FAS+43724.55908
   R= 0.953 THE NUMBER OF DATA = 5
26 EHS=0.42300*DPOPU-46730.79834
   R= 0.938 THE NUMBER OF DATA = 6
27 EMP=1.05661*DPOPU-85797.03125
   R= 0.969 THE NUMBER OF DATA = 7

```

図-4 重回帰分析結果の出力

```

HENSU NUMBER O INPUT SHITEKUDASAI
*2 17
2, -5 -0.72409 10 2, -4 -0.70913 11
2, -3 -0.53280 12 2, -2 -0.13845 12
2, -1 -0.01392 13 2, 0 0.22165 14
2, 1 0.67336 14 2, 2 0.76437 14
2, 3 0.76475 14 2, 4 0.49804 13
2, 5 0.17916 13
*****
* GRAPH OUTPUT
* YES-->0; NO-->RETURN *
*****

```

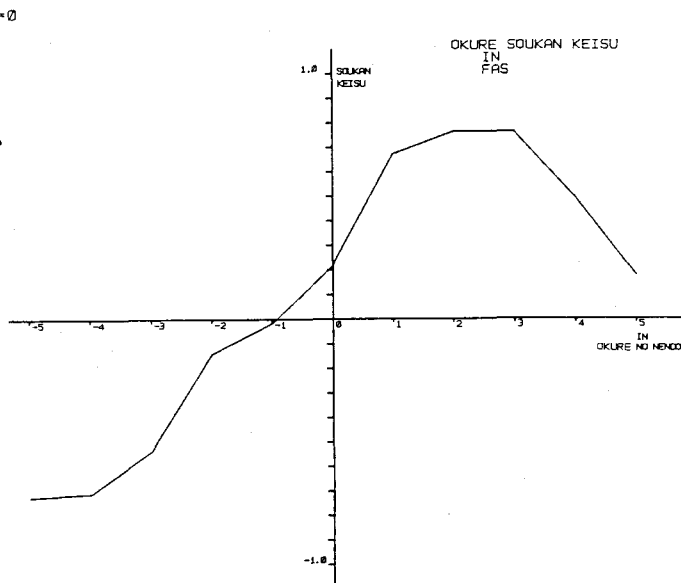


図-5 転入者数と工業出荷額との間の遅れを考慮した相関

者数は工場出荷額の3年遅れで正の相関が、工場出荷額は転入者数のほぼ5年遅れで負の相関が高くなっており、例えば前者を工場出荷額の増加に対して3年遅れで転入者数が追隨していると読むことができる。

#### ④ 2変数間の相関グラフのプロット

2変数間の相関をグラフで見ることによって2変数間には、どのような関係があるのかを認識することができる。これにより直線による回帰、非線形関数のあてはめなど判断の材料とする。

#### ⑤ 指数曲線への適合度の判定

グラフから2変数間に指数曲線が当てはまると考えられる場合、 $y=ax^c+b$ の $c$ を入力することによってこの場合の $y$ と $x$ の相関係数および回帰式を出力する。

#### ⑥ 変数の時系列変化のグラフ表示

変数の時系列変化をグラフで見ることによって、変数の変化の特徴をつかむ一助とする。そして、変数を外生変数として扱うのがよいのか、また外生変数と考えた場合、内挿、外挿による補完がよいのか、回帰で延長するのがよいのかを判断する資料とする。

#### ⑦ 因果関係連結検証機能

因果関係を2本以上連結した時の検証を行う。変数A、B、Cの間に、直列的な因果関係がある場合を想定する。変数A→変数Bと変数B→変数Cの因果関係に対して、他のいかなる変数からも影響されない独立の関係があるならば、 $r_{AB} \cdot r_{BC} = r_{AC}$ （ $r$ ：それぞれの間の相関係数）が成立する。しかし、現実には変数A→変数Bと変数B→変数C間に他の変数の影響を否定できないことの方が多く、そのような場合には成立しないので、因果関係を再考の資料とする。

#### (2) モデル挙動解析機能

##### ① テストラン結果の任意の変数の挙動をグラフ化する(図-6)。

テストラン期間内の挙動を調べたい変数を入力して、その変数のSDモデル内における挙動をグラフで出力することができる。また、それを過去のデータと比較したい

ときは、過去のデータも同時に出力し、過去のデータとモデル内の挙動を比較することによって、設定したモデル構造の良否を判定する資料とする。

#### ② モデル乖離度の計算

テストラン期間内の各変数の挙動を全て過去のデータと照合することは、實際上難しい。そこで、主要変数の過去のデータとの乖離の度合いを算出し、モデルの全体的整合性をみる目安とする。そして、またモデルの乖離度の計算法は次式により行った。

$$RRk = \sum (|REALik - TESTik| / REALik) / Nk$$

$RRk$  : 変数kの乖離度

$Nk$  : 変数kのテストラン期間内のデータ数

$REALik$  : 変数kのi番目の過去のデータ

$TESTik$  : 変数kのi番目のテストランデータ

$$RV = \sum RRk / m$$

$RV$  : モデル乖離度(主要変数の乖離度の平均値)

$m$  : 主要変数の数

#### ③ 感度分析機能

着目するパラメータをその値の近傍で動かすことによって、モデルに与える影響の強さを見る。この機能は、パラメータ以外の変数などにも使用でき、変数、パラメータ、テーブル関数、レベルなどを同様変化させることによって、全体のモデル挙動がど

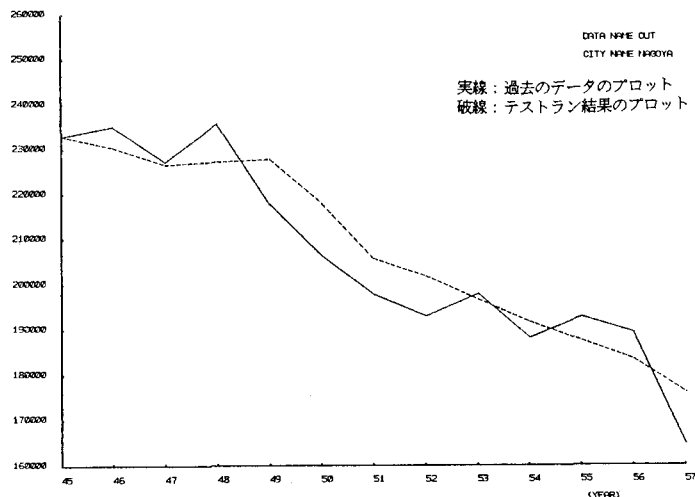


図-6 挙動分析の出力例

の程度変化するかを分析して、SDモデルの構造面での特徴を把握する資料とする。この資料は、構造依存型であるSDモデルでは、非常に重要である。

#### ④ テーブル関数構築支援機能

個々の魅力度はテーブル関数により統合化され転出入を決定する。モデルの説明力を高めるためにはテーブル関数形を修正する必要がある。本機能は、

どの魅力の要因をどのように動かせば操作が可能かを示す。具体的には、各要因の値の基準年に対する増減をテストラン期間に渡って表示することにより、どの要因のテーブル関数の修正が一番効果的かを知らる材料とする（図-7）。

#### ⑤ 魅力度構成要因の検証機能

SD基礎モデルでは、10個の要因で転出入の魅力度を決定している。しかし、これらの要因が論

理的に正しくモデルに影響しているかは、疑問である。そこで、着目した魅力度の要因をモデルからはずすことによって、モデルの挙動がどのように変化するかをみて、その要因のモデル内での影響力を検証することができる。

これらの機能を用いて、モデル構造を決定していく手順を図-8に示す。

\*\*\*\*\*  
\* TABLE FUNCTION SYUSEI SHIEN DATA \*  
\*\*\*\*\*

|    | NENDO | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 | 57 |
|----|-------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1  |       | -  | +  | +  | -  | -  | -  | -  | -  | -  | -  | -  | -  | -  |
| 2  |       | +  | +  | +  | +  | -  | -  | -  | -  | -  | -  | -  | -  | -  |
| 3  |       | +  | -  | -  | +  | +  | +  | +  | -  | -  | -  | -  | -  | -  |
| 4  |       | +  | +  | -  | -  | -  | -  | -  | -  | -  | -  | -  | -  | -  |
| 5  |       | -  | -  | -  | -  | -  | -  | -  | -  | -  | -  | -  | -  | -  |
| 6  |       | +  | +  | +  | +  | +  | +  | +  | +  | +  | +  | +  | +  | +  |
| 7  |       | +  | +  | +  | -  | -  | +  | +  | +  | +  | +  | +  | +  | +  |
| 8  |       | +  | +  | +  | +  | -  | -  | -  | -  | -  | -  | -  | -  | -  |
| 9  |       | -  | -  | -  | +  | +  | +  | -  | -  | -  | +  | +  | +  | +  |
| 10 |       | +  | +  | +  | -  | +  | +  | +  | +  | +  | +  | +  | +  | +  |

INPUT 1 , THEN CONTINUED !

図-7 魅力度決定支援情報

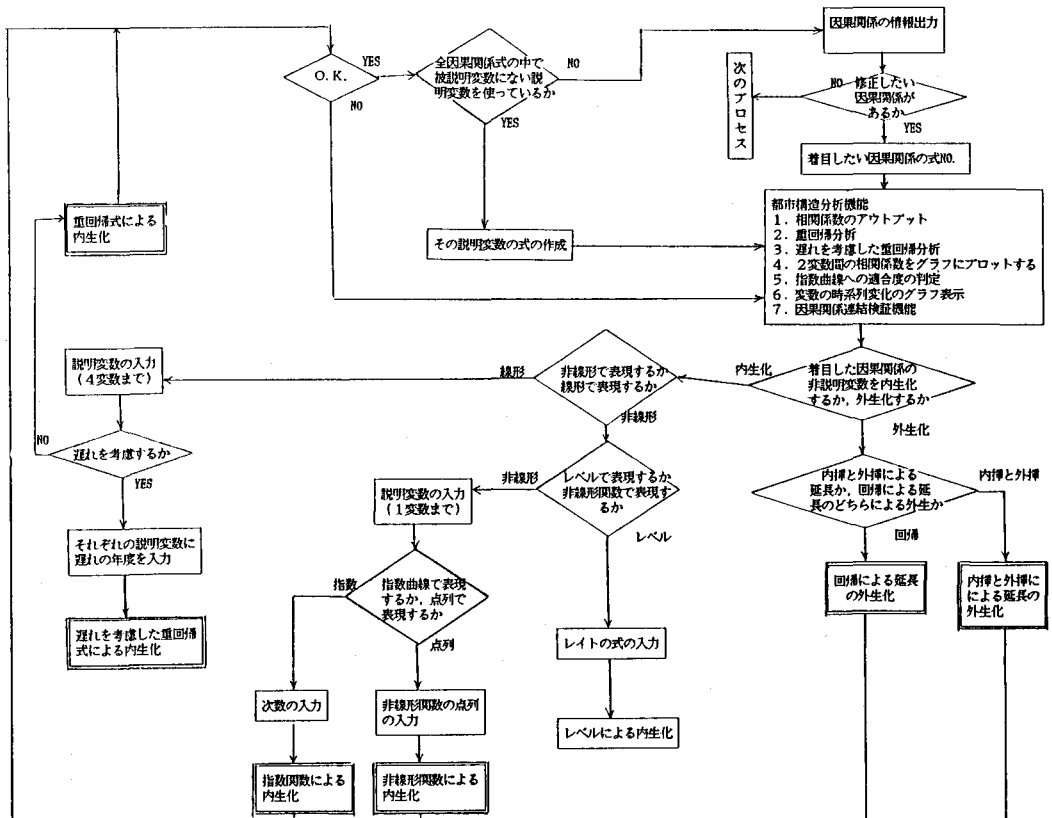


図-8 都市構造分析とモデル構築プロセス

### (3) データ処理機能

データ処理機能は、SDモデル構築のための情報を受け渡しする機能である。まず、SDモデルベースからモデル構造の情報を読み込む。そして、必要な社会経済指標のデータを、都市データベース、補助データファイルと全国データベースから読み込む。また、因果関係情報ファイルに新たに変数を加えたい場合は、端末からデータを打ち込み、補助データファイルに加えることができる。

また、金額に関する変数については、物価上昇を考慮しなければならないので、全国の物価指数を用いて補正を行っている。工場出荷額については、技術革新による補正も必要だと考え、GNPの実質成長率の伸び率をもとに補正を行うこともできる。

### (4) モデル編集・実行制御機能

モデル編集は、モデル構造の決定後、その構造をCSPLによって記述する部分であり、実行制御機能によって実行し結果を得る。

### (5) 対話管理機能

対話管理機能は、SDモデルマネジメントシステムの機能を電子計算機に熟達していないプランナーでも円滑に利用できるように、都市分析の結果、モデルの構造や挙動をわかりやすく表示し、モデル構築を進めて行くために、システムとプランナーの仲立ちをする役割をもっている。

## 7. SDモデル構築支援プロセス

SDモデル構築の支援プロセスを図-9に示す。システムはまず基礎となるデータ、モデル情報を読み込む。この際新たに分析を加えたい変数名及びデータベース中に無いデータの入力を行う。次に因果関係の分析に入り、モデルの構造を決めて行く。構造が決まると、人口セクターと都市環境セクターの連結部にあたる魅力度及びそのテーブル関数の設定を行う。次いで挙動分析に入り、テストランを行いモデルの挙動のチェックを行う。このあと、必要に応じて感度分析等を行いモデルを確定する。

## 8. おわりに

SDモデル構築という従来多大な時間と労力を要

していた作業を、データベースを活用して、多種多様な情報を簡単な会話を通じて提供し、モデル構築を進めるための支援システムの概要を提示した。モデルのフロー図作成等さらに有効なシステムとするための機能追加が残されているが、KUCPASの全国180都市のデータベースを用いて数都市に適用した結果十分短時間に目的とする、モデルの構築が出来ることが確認された。

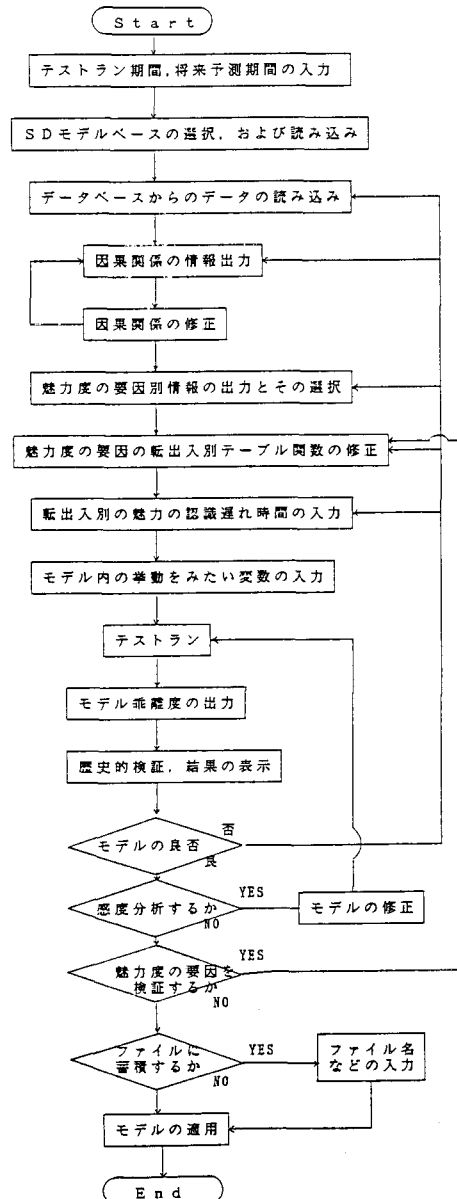


図-9 支援システムの利用手順