

# 都市群システムにおける 構造の安定性と変化に関するモデル分析

上田孝行<sup>1</sup>・松葉保孝<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 岐阜大学助教授 工学部土木工学科 (〒501-111 岐阜市柳戸1-1)

<sup>2</sup>学生員 東京大学大学院 工学系研究科 (〒113 東京都文京区本郷7-3-1)

本研究は、一極集中や多極分散など様々な構造の人口分布を出現させ得る都市群システムをモデル化し、その構造を規定する諸要因、とりわけ交通ネットワークとの関係を分析する。モデルは集積の経済(不経済)を反映した非線形システムであるため、解析的な手法と数値実験の両方により各種パラメータと実現する構造の関係を把握していく。その際には、システムの均衡状態として実現する人口分布パターンが安定であるかどうかの検討が不可欠であるため、その判定条件を提示した上で判定をおこなっている。

以上の分析を通じて、交通条件を規定するパラメータの変化に伴って集中と分散のパターンが出現することを示し、また、パラメータの組み合わせによっては不安定な構造が出現することを明らかにしている。

**Key Words :** a system of cities, interregional transport, spatial equilibrium, structural change, stability

## 1. はじめに

### (1) 問題意識

国土あるいは大都市圏といった広域な空間において実現する人口・経済活動の分布構造は、様々な諸要因に依存している。そのような要因の中で、生活や生産を支える多くの社会基盤施設がきわめて重要であることは言うまでもなく、また、それゆえに、社会基盤施設の整備プロジェクトの計画に当たっては、それが分布構造にどのような変化をもたらすのかについて十分な認識が必要となる。

このような問題意識に基づいて、土木計画学の分野においても、社会基盤整備に伴って生じる人口・経済活動の分布変化について、これまで定量的にもまた定性的にも多くの分析が試みられてきた。それにも増して、今日の経済社会状況は、分布構造の変化に関する科学的な知見を蓄積することの必要性を一層増大させてきていると思われる。国内的には、いわゆる東京一極集中と表現される国土構造の改変が依然として大きな政策的課題とされている。国際的には、経済のブロック化が進行しつつあり、各ブロック内での資源移動が完全に自由化されていきつつある。そのため、ブロック内では比較優位ではなく、絶対優位の原理に従って特定の都市域へ人口・経済活動が集中化する可能性(例えば、竹森(1995)<sup>1)</sup>)

があり、域内の各都市はこれまで以上に厳しい都市間競争へと直面していきつつある。

### (2) 本研究の目的と構成

以上のような問題意識のもとに、既に筆者らは、交通ネットワークにより連結された複数の都市から構成される空間経済システム、すなわち、都市群システムをA system of cities という名称のもとにモデル化し、その構造変化についての分析(上田・松葉(1994)<sup>2)</sup>, Ueda(1994)<sup>3)</sup>)を行ってきた。本稿は、それらの一連の研究で用いたモデルの特性について、近年発達の著しい非線形動学の観点から考察を行うとともに、その政策的な含意について検討することを意図している。

本稿の構成は以下のようになっている。2. では、定式化されたモデルについて解説する。3. では、2都市モデルに単純化した上で、均衡解としての立地分布構造の安定性を検討し、また、比較静学分析によるシステムの特性の考察を行う。4. では、一般的なケースにおける解の安定性条件と比較静学の手法について解析的なアプローチにより説明する。5. では、4.での解析的なアプローチを補足する目的で、数値実験を行う。6. では、その結果の政策的含意を考察する。7. では本稿での議論をまとめ、残された課題を整理する。

## 2. モデル

### (1) モデルの概要

本稿のモデルは、上田・松葉(1994)およびUeda(1994)と同じである。従って、本モデルの基礎となる立地論や既往の都市モデル等(例えば、Fujita(1993)<sup>4)</sup>、Krugman(1993)<sup>5)</sup>、Ueda and Morisugi(1994)<sup>6)</sup>)との関係については、それらの文献にゆずる。ここでは、本モデルの基本的前提と定式化について示す。なお、本稿では立地者を個人とし、また、立地分布を人口分布とする。ただし、企業を立地者として経済機能の分布を分析する際にも基本的には本稿での議論をそのまま適用することが可能であり、また、経済機能と人口の両者の空間分布を同時に扱うモデルも効用関数や利潤関数を一般均衡モデルと整合的に定義すれば本稿と同様の枠組みで分析することが可能である。

- i) 本モデルの対象とする空間経済システムは、1個の都市からなり、それらは単一のモードで代表される交通ネットワークにより連結されている。
- ii) このシステムには、総数一定の同質の選好を有する個人が存在している。
- iii) 各個人はそれぞれの都市の効用水準(立地魅力度)に応じて、立地する都市を選択している。効用水準の高い都市にはより多くの個人が立地しようとする。
- iv) 各都市の効用水準は、システム全体における人口分布に依存している。そのため、どの個人ももはや立地を変更してもより高い効用水準を達成することができなくなった状態でシステムが均衡する。

### (2) モデルの定式化

#### a) 都市の立地魅力(効用水準)

都市の特性を表す諸要因は、最終的には人口の立地魅力を介して都市の人口規模へ影響する。モデルの定式化の第一は、各要因と立地魅力、すなわち、効用水準の関係を表すことであるが、全ての要因を明示的に定式化するとは困難であるため、本研究では、内生的にきまるべき人口分布と、外生的に与えるべき交通ネットワーク(交通費用)、空間キャパシティ、都市固有属性によって各都市において実現できる効用水準が表される(Ueda(1994))と考える。そして、具体的には以下のように定式化する。

$$V_i = \left\{ \sum_{j=1}^I N_j \exp(-\gamma \tau_{ij}) \right\}^{\alpha_i} - \left( \frac{1}{L_i} \right) N_i^{\beta_i} + A_i \quad (1)$$

ここで、

$V_i$ : 都市  $i$  の効用水準

$N_j$ : 都市  $j$  の人口規模

$\tau_{ij}$ : 都市  $i$  から都市  $j$  への物理的距離

$\gamma$ : 物理的距離一単位に要する一般化交通費用  
(単位交通費用)

$L_i$ : 都市  $i$  の空間キャパシティ

$A_i$ : 都市  $i$  の外生的固有属性

$\alpha_i$ : 都市  $i$  におけるアクセシビリティの

魅力度・集積の経済を規定するパラメータ

ただし、都市において蓄積された技術や知識のストックに依存して決まるパラメータであると解釈される

$\beta_i$ : 都市  $i$  における集積の不経済を規定する  
パラメータ

第1項は対象とする都市群システムの中の各都市へのアクセシビリティを表しており、これが自都市の人口規模に関しては増加関数( $j=i$ の場合を含んでいる)であるため、これによって集積の経済が表されているものと仮定する。第2項は、自都市の人口規模に関して減少関数であり、集積の不経済を表していると考ええる。ただし、この項は空間キャパシティに関しては増加関数であるため、空間キャパシティの大きいほど集積の不経済は緩和されると考える。第1項と第2項の大きさは、本来は、各都市において都市全体の立地者数を固定して、都市内の土地市場や労働市場の一般均衡状態を求めて決定されるものである。第3項は各都市毎に定数として与えられ、都市固有の属性に依存した効用はこれに代表されるものとする。

関数に含まれる各パラメータの意味解釈については、まず、第1項のべき乗パラメータは、アクセシビリティが効用の中でどの程度卓越するかを規定している。アクセシビリティが旅客交通を介した対面型の情報交流の利便性を表していると考えられる場合には、それが都市内の企業の利潤を介してそこに立地する各個人の所得を引き上げる度合いを表していると見ることができよう。第2項のべき乗パラメータは、自都市の人口規模に対する集積の不経済の弾力性を表しており、言うまでもなく、同じ人口規模であっても、このパラメータが大きい方が不経済は大きい。

以上に加えて、ここで、第1項の解釈に関連して、集積の経済と交通によるアクセシビリティの両者に対する本稿での立場について補足しておく。集積の経済は、立地している自都市の人口規模が増大する

につれて、その都市での効用が上昇することを意味する。そのような関係が成り立つ理由の一つは、同一都市内で立地者同士がアクセスしあう場合の交通費用が他都市の立地者との場合のそれと比較して小さいため、同じ都市の中に立地すればお互いに交通費用を節約できること(例えば、金本(1989)<sup>7)</sup>による。いま一つの理由としては、地方公共財的にサービスが立地している都市の地方政府によって供給されている場合、それに規模の経済性が働き、財政システムを通じての各立地者の費用負担が人口が増大するにつれて減少するといった関係を挙げられる。その場合にも、人口の増大に伴って効用水準が上昇し、都市集積のメリットが発揮される。前者の考え方で捉えた集積の経済は、自都市へのトリップ需要と他都市へのその競合関係を明示的に考慮して定義すべきである。そのため、第1項は、ロジットタイプのトリップ需要関数と整合する消費者余剰に基づいて定義したものである。後者の考え方からは、本来は地方公共財的なサービスの供給技術や財政システムを明示的に定式化する必要があるが、最も単純には、それに依存した効用項を自都市の人口規模の増加関数とすること(金本(1992)<sup>8)</sup>で定式化できる。従って、本稿のモデルでは、そのような効用項が自都市の人口規模の関数として表される限りは、同様に自都市の人口規模の関数として表される第1項以外の集積の経済や不経済を表す項とともに合成されて第2項に反映されているとみなすことにする。

#### b) 立地選択

各都市の立地魅力が与えられると、それに基づいて、それぞれの個人は最も高い魅力度を享受できる都市へ立地しようとする。しかし、立地魅力度が通常のランダム効用理論におけるのと同様な加法的ランダム項によって表される不確実性を含んでいるものと考え、そのため、立地選択行動も確率的に捉えられるものとし、以下のようなロジットモデルに従って立地選択が行われると考える。

$$P_i = \frac{\exp(\theta V_i)}{\sum_{j=1}^I \exp(\theta V_j)} \quad (2)$$

ここで、

$P_i$ : 都市  $i$  への立地選択比率

$\theta$ : ロジットモデルにおけるランダム性の大きさを規定するパラメータ

#### c) 立地均衡状態

立地が均衡した状態においては、ロジットモデル

により表される各都市の人口は立地候補先となる都市の中で最も大きな効用水準を達せられる都市を選択している。その意味において、均衡状態では、どの個人ももはや他の都市へ立地を変更しようとする誘因を持たず、その時の各都市の効用水準は式(1)によって、そして、人口規模は式(2)に人口総数を乗じた次式によって決まっている。

$$N_i = N_T \cdot P_i = \frac{N_T \exp(\theta V_i)}{\sum_{j=1}^I \exp(\theta V_j)} \quad (3)$$

ここで、

$N_T$ : 総人口

均衡状態における人口分布と効用水準は、式(1)と(3)を連立方程式と見なして解くことによって得られる。しかし、これらは非線形方程式であるため、解析的な解を得ることはできない。そこで、本研究では、まず、2都市のケースに限定して、上記のモデルの基本的な性質を解析的に描写した上で、一般的な複数都市のケースについて検討する。さらにそれ以上の解析的に困難な段階については、数値シミュレーションによって、設定されたパラメータの各組のもとで均衡条件式を数値的に解き、人口分布パターンを考察する。

### 3. 2都市に特定したシステムの考察

#### (1) モデルの特定化

上記のモデルの定式化において、以下のような添字等の必要な書き換えを行ってモデルを特定化する。

$$\begin{aligned} I &= 2 \\ \tau_1 &= [\tau_{11}, \tau_{12}] \\ \tau_2 &= [\tau_{21}, \tau_{22}] \\ \tau_{12} &= \tau_{21} \\ N_2 &= N_T - N_1 \end{aligned}$$

均衡を定義する式(1)と(3)は、次のように書き改められる。

$$\begin{aligned} V_1 &= V_1(N_1; \alpha_1, \beta, \gamma, \tau_{11}, \tau_{12}, L_1, A_1, N_T) \\ &= \{N_1 \exp(-\gamma \tau_{11}) + (N_T - N_1) \exp(-\gamma \tau_{12})\}^{\alpha_1} \quad (1'.1) \\ &\quad - \left(\frac{1}{L_1}\right) N_1^\beta + A_1 \end{aligned}$$

$$V_2 = V_2(N_1; \alpha_2, \beta, \gamma, \tau_{22}, \tau_{21}, L_2, A_2, N_T)$$

$$= \{N_1 \exp(-\gamma \tau_{21}) + (N_T - N_1) \exp(-\gamma \tau_{22})\}^{\alpha_2} \quad (1'.2)$$

$$- \left(\frac{1}{L_2}\right) (N_T - N_1)^\beta + A_2$$

$$N_1 = N_T \cdot P_1 = \frac{N_T \exp(\theta V_1)}{\exp(\theta V_1) + \exp(\theta V_2)} \quad (3'.1)$$

$$N_2 = N_T - N_1 \quad (3'.2)$$

以上のように特定化した2都市モデルの均衡を定める方程式体系は、最終的には式(1'.1)と(1'.2)を式(3'.1)に代入することで都市1の人口 $N_1$ のみを内生変数とする一つの方程式に還元される。なお、上田(1991)<sup>9)</sup>や上田(1992)<sup>10)</sup>において、このような2都市ケースでのロジットタイプの立地均衡モデルの比較静学分析と均衡の安定性の判定に関する手法は既に示されており、ここでは、それに基づいて2都市モデルの枠組みでシステムの特性を考察する。

## (2) 分布構造の比較静学分析

特定化したモデルに含まれる各外生変数の変化によるシステムにおける人口分布( $N_1$ )の変化は、比較静学により次のように表される。

$$dN_1 = \frac{\theta N_T P_1 P_2 \left( \frac{\partial V_1}{\partial s} - \frac{\partial V_2}{\partial s} \right)}{1 - \theta N_T P_1 P_2 \left( \frac{\partial V_1}{\partial V_1} - \frac{\partial V_2}{\partial V_1} \right)} \cdot ds \quad (4)$$

ただし、ここで $s$ は、式(1'.1)および(1'.2)に含まれる外生変数を代表したものである。均衡解の安定性について後述する判定条件が満たされる場合には、分母は正となるため、いわゆるSamuelsonの対応原理(例えば、Takayama(1985)<sup>11)</sup>)により、安定な均衡解の変化の方向は分子の符号により判定されることになる。これに基づいて、各外生変数の変化による分布構造の変化は、表-1のようになる。

## (3) 分布構造の安定性

均衡に至るまでの立地変更の動学プロセスを次のように定式化する。まず、ある時点において実現している都市1の人口 $N_1$ が与えられたとき、式(3'.1)においてそれを与えるような都市1と都市2の効用水準の差を次のように定義する。ただし、これは式(3'.1)のようなバイナリ-ロジットモデルがロジスティック曲線に変換できることを利用している。

表-1 2都市システムでの比較静学

	$da_1$	$da_2$	$dL_1$	$dL_2$	$dA_1$	$dA_2$
$dN_1$	+	-	+	-	+	-
	$dt_{11}$	$dt_{22}$	$dt_{12}$	$d\beta$	$d\gamma$	$dN_T$
$dN_1$	-	+	?	?	?	?

$$N_1(t) = \frac{N_T}{1 + \exp\{-\theta(V_B(t))\}} \quad (5.a)$$

$$V_B(t) = F(N_1(t)) \quad (5.b)$$

一方、その際にこの2都市からなる空間経済システムの中で営まれている様々な活動を介して都市1と都市2のそれぞれで達成される効用水準の差を、式(1'.1)と(1'.2)から次のように定義する。

$$V_A(t) = G(N_1(t)) = V_1(N_1(t)) - V_2(N_1(t)) \quad (6)$$

均衡においては、言うまでもなく、式(5.b)と(6)の左辺同士は一致する。しかし、均衡に至るまでの動的プロセスにおいては、式(6)の左辺が式(5.b)のそれよりも高い限り、その時点において都市1で本来は達成できる効用水準に見合っただけの人口が存在しないことになる。その時点での都市1の時間当たり人口変化は正であり、しかも、それは式(6)と(5.b)の差が大きいかほど大きいと想定できる。これを次のような微分方程式で表す。

$$\frac{dN_1(t)}{dt} = K_1 \{G(N_1(t)) - F(N_1(t))\} \quad (7)$$

ここで、

$$K_1: \text{調整速度を規定するパラメータ} (>0)$$

この微分方程式であらわされる動的経路にあり、かつ、均衡解の周辺にある人口分布から出発したとき、時間の経過とともにそれが均衡点に収束していくと、その均衡解はSamuelsonの意味で安定あるいは漸近安定(Takayama(1985))である。式(7)の微分方程式を均衡解周辺に関して線型近似して微分方程式を解くと以下の式が得られる。

$$\frac{d(N_1(t) - N_1^*)}{dt} = K_1 \left\{ \frac{dG(N_1^*)}{dN_1} - \frac{dF(N_1^*)}{dN_1} \right\} d(N_1(t) - N_1^*) \quad (8)$$

$$N_1(t) = (N_1(0) - N_1^*) \exp \left[ K_1 \left\{ \frac{dG(N_1^*)}{dN_1} - \frac{dF(N_1^*)}{dN_1} \right\} t \right] + N_1^* \quad (9)$$

ここで、

\*: 均衡解であることを示す添字

微分方程式の解である式(9)から、時間が十分に経過した時に解が均衡解へ収束する、すなわち、安定であるための必要十分条件は、次式が成立することである。

$$\frac{dG(N_1^*)}{dN_1} - \frac{dF(N_1^*)}{dN_1} < 0 \quad (10)$$

この条件は、式(5.b)および(6)の定義に立ち戻って次のように書き改められる。

$$\frac{\partial V_1(N_1^*)}{\partial N_1} - \frac{\partial V_2(N_1^*)}{\partial N_1} - \frac{1}{\partial N_T P_1 P_2} < 0 \quad (11)$$

これと比較静学に用いた式(4)の分母が正であるという条件が等価であることは自明である。

#### (4) 代表的な分布構造の図解

2都市のケースに特定化した場合には、上記のように解析的な取り扱いが容易になるだけでなく、均衡解の性質を図解によって検討することができる。そこで、本モデルで定式化した都市群システム特性により生じる代表的な人口分布構造を図示してその意味について解釈する。

ここで示す2つのケースは、いずれも式(1'.1)と(1'.2)に含まれる外生変数を都市1と都市2で同一とした場合である。すなわち、モデルの構成要素に関しては2都市は対称である。このような場合、両都市がそれぞれ総量の半分ずつの立地量を持った分布が自明の均衡解となる。しかし、それが常にどのような場合にも実現する解、すなわち、式(11)で示した安定性の条件を満たす解であるとは限らない。パラメータの組み合わせによっては、複数均衡のケースがあり、他の安定な均衡解が実現解となることもあり得る。

図-1と図-2は、パラメータを次のように設定した場合である。

図-1のケース:

$\alpha$  小 and ( $\beta$  大 or  $L$  大)

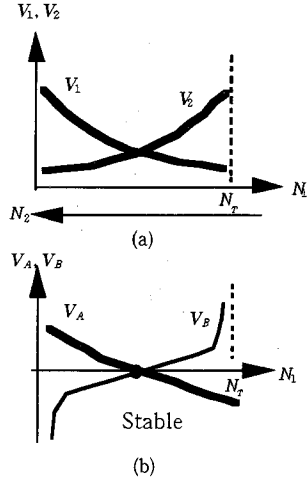


図-1 2都市システムの人口分布(1)

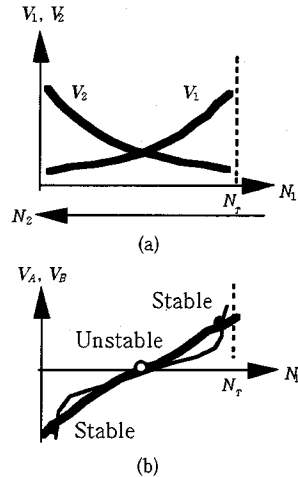


図-2 2都市システムの人口分布(2)

$$\frac{\partial V_1}{\partial N_1} < 0, \quad \frac{\partial V_2}{\partial N_1} > 0 \quad \text{for } N_1^* \in [0, N_T] \quad (12)$$

図-2のケース:

$\alpha$  大 and ( $\beta$  小 or  $L$  小)

$$\frac{\partial V_1}{\partial N_1} > 0, \quad \frac{\partial V_2}{\partial N_1} < 0 \quad \text{for } N_1^* \in [0, N_T] \quad (13)$$

図-1は、いずれの都市でもアクセシビリティよりも集積の不経済の方が効用水準に対して支配的になる場合であり、図-2はその逆の場合である。各図の内、パネル(a)は式(1'.1)および(1'.2)を描いたもの

であり、パネル(b)は式(5.b)と(6)で表される効用水準の差を描いたものである。パネル(b)の交点が均衡解である。図-1では解は唯一で、かつ、それが安定な均衡解である。一方、図-2では3つの解が存在し、中央の自明な解は不安定であり、左右の解が安定となる。中央の自明な解においてわずかな攪乱によりわずかに一方の都市の人口規模が大きくなったとする。すると、その都市の集積の経済が発揮されて他方の都市よりも効用が増大する。そのため、さらに人口を吸引して行き、その都市が大都市となる。このように、式(11)で示した安定性の条件はきわめて重要である。ここで示した2つのケースでは、両都市に外生的に与えられたモデルの構成要素は全て同じ、すなわち、対称でありながら、式(13)で示したように、アクセシビリティの形式で表現された集積の経済が効用水準を支配する場合には、どちらかの都市の人口が他の都市のそれよりも大きい非対称な分布が安定解となる。すなわち、対称性が破れ、2都市の内のいずれかへの人口の集中が実現する。そして、どちらの都市が大都市となるかは、上記のようにモデルに外生的に与えた構成要素からは決定できない。大域的に見て、どの均衡点に収束するかは、式(7)の微分方程式に与えられる初期値に依存している。本モデルで表される都市群システムにおいて実現する人口分布構造は、このシステムの初期状態に強く依存しており、歴史的な偶発的現象によって初期の分布にわずかな偏りがあれば、それが最終的にどの大都市になるかどうかを決めることになる。

#### 4. 一般的ケースでのシステムの考察

##### (1) 一般的ケースでの均衡問題の特性

一般的なケースでも、均衡を定義する条件式について、式(1)を(3)に代入することで以下のように条件式を集約できる。

$$N_i = \frac{N_T \exp(\theta V_i(N))}{\sum_{j=1}^I \exp(\theta V_j(N))} \quad (14)$$

ただし、

$$N = [N_1, \dots, N_I]$$

上式は本モデルの均衡問題が不動点問題に還元されることを表している。従って、通常の一般均衡問題と同様に不動点定理を用いた均衡解の存在に関する証明(上田(1993)<sup>12)</sup>が可能であり、また、均衡解の計算に際して各種の不動点アルゴリズムを活用する

ことが可能である。

##### (2) 分布構造の比較静学分析

上に示した式(14)を用いて、モデルの外生変数の変化による人口分布の変化は次のように表される。

$$dN = [I - (D_N V)]^{-1} (D_s V) ds \quad (15)$$

ただし、ここで

$$V = [V_1, \dots, V_I]$$

$I$ :  $I \times I$ の単位行列

$(D_X Y)$ : ベクトル  $Y$  がベクトル  $X$  の関数で

ある場合の  $Y$  の  $X$  に関するJacobi行列

$s$ : モデルの外生変数を代表するベクトル

ある均衡解において、式(15)に含まれるJacobi行列を計算すれば、式(15)に従って外生変数の変化に対応した各都市の人口の変化を知ることができる。しかし、2都市に特定化したケースとは異なって、各外生変数毎・各都市毎に人口変化の方向を一般的に確定することはほとんど不可能である。従って、後ほど示すような数値実験によって外生変数であるパラメータと均衡解の関係を調べていくというアプローチに頼らざるを得ない。しかし、パラメータの組み合わせによっては効用関数を単純な構造に変形できるため、その場合には、式(15)に従って比較静学の結果を解析的に得られる可能性がある。

##### (3) 分布構造の安定性

一般的なケースでの均衡解の安定性を判定するに当たっては、次のような微分方程式を考える。

$$\frac{dN(t)}{dt} = KE(N(t)) \quad (16.a)$$

ただし、

$$E \in R^I$$

$$E_i = \frac{dN_i(t)}{dt} = KE_i(N(t)) \quad (16.b)$$

ここで導入した立地分布  $N$  の関数であるベクトル  $E$  は、価格調整プロセスにおける超過需要ベクトルと同じ役割を果たすものである。その意味するところは、既に2都市のケースにおいて述べたのと同じであるが、これを陽表的に定式化することは容易ではない。また、安定性を判定する際には、微分方程式を均衡解周辺に関して線形近似するため、式(16)に

おける左辺を最初から適切な線形構造で定式化しておく。そのために、以下のベクトル関数を導入する。

$$V_i = V_i(N) \quad (17)$$

$$N(V) = H(V) \quad (18.a)$$

$$N_i(V) = \frac{N_T \exp(\theta V_i(N))}{\sum_{j=1}^I \exp(\theta V_j(N))} \quad (18.b)$$

これらを用いて、式(16)の右辺を、線形化されたものとして、次のように定式化する。

$$\frac{d(N(t) - N^*)}{dt} = \left\{ (\mathbf{D}_N V(N^*)) - (\mathbf{D}_V H(V^*))^{-1} \right\} (N(t) - N^*) \quad (19)$$

ただし、ここでも式(15)と同じ表記法によってJacobi行列を用いている。このような線形化された微分方程式は、ダランベール型と呼ばれ、その解が均衡解周辺で局所的に漸近安定性の性質を有することは、右辺の係数行列の固有値の実部が全て負であることと等価である。

ある行列の固有値が全て負の実部を持つことと数学的に同値である条件としては、Routh-Hurwitz条件があるが、式(19)では調整速度を規定する係数行列  $K$  を単位行列で置き換えているため、その場合には、以下のようなHicksの安定条件によって判定することができる。

$$\mathbf{R} = \left\{ (\mathbf{D}_N V(N^*)) - (\mathbf{D}_V H(V^*))^{-1} \right\} \quad (20.a)$$

$$R_{11} < 0, \begin{vmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{vmatrix} > 0, \dots, (-1)^I |\mathbf{R}| > 0 \quad (20.b)$$

ただし、

$|\mathbf{R}|$ : 主座行列式

以上の条件を用いて、着目している均衡解としての立地分布が安定であるかどうかを判定することができる。

## 5. 数値シミュレーションに基づく分析

### (1) 数値シミュレーションの目的

本研究での数値シミュレーションは、4. で示した一般的ケースでの比較静学分析や安定性の判定条

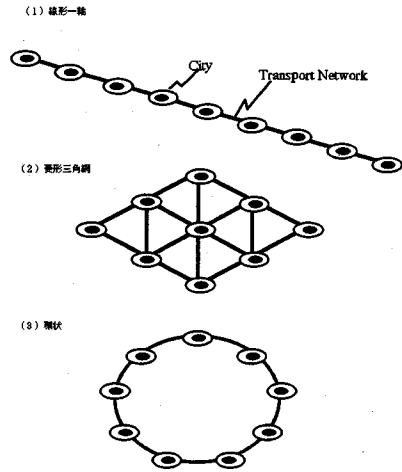


図-3 数値シミュレーションに用いた交通ネットワーク

件についての解析な取り扱いに限界があるため、システムの挙動をより詳細に知るために行うことを目的としている。

### (2) 数値シミュレーションの設定条件

#### a) 数値の設定

本研究では次のように外生変数とパラメータを設定して行った。なお、交通改善は、 $\gamma$  単位交通費用を低下させることで表される。

$$\begin{aligned} I (\text{都市数}) &= 9 & N_T &= 1.0 \times 10^7 \\ \gamma &= 1.0 \times 10^{-4} \rightarrow 1.0 & \alpha_i &= \alpha = 0.1 \rightarrow 1.2 \\ \beta_i &= \beta = 0.1 \rightarrow 1.0 & A_i &= A = 0.0 \\ L_i &= L = 1.0 & \theta &= 0.0001 \\ \tau_{ij} &= \text{number of links in minimum path} \\ & & & \times 10 + 10 \end{aligned}$$

また、初期値として以下の人口分布を与える。

$$\begin{aligned} N_i &= 1.16 \times 10^6 \quad (i=1, \dots, 5) \\ N_i &= 1.05 \times 10^6 \quad (i=6, \dots, 9) \end{aligned}$$

#### b) 交通ネットワークの構造

また、交通ネットワークの構造は、線形一軸、菱形三角網、環状の3つの構造(図-3)の場合を想定した。

### (3) シミュレーション結果

以上のような外生変数とパラメータの数値設定のもとで行ったシミュレーションは、きわめて多数の

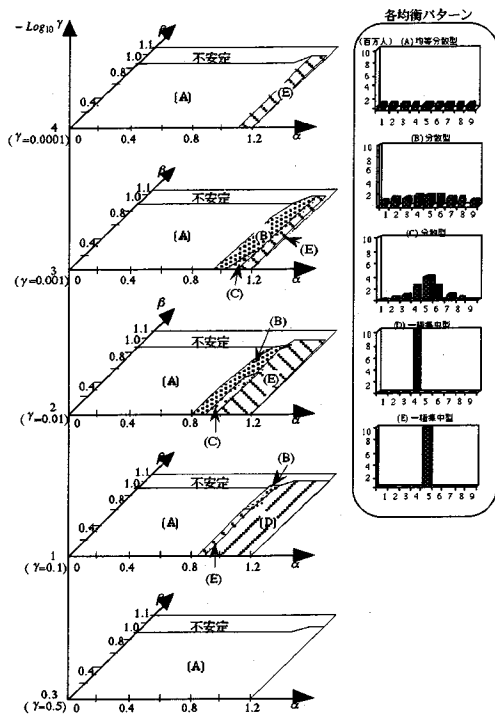


図-4 パラメータと人口分布(線形一軸)

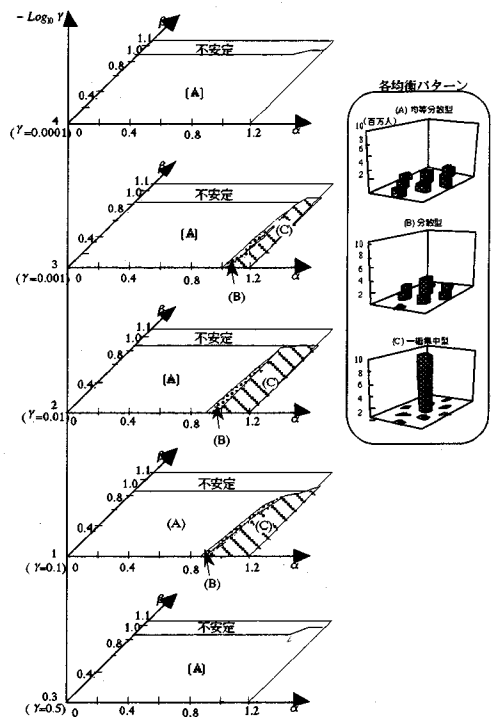


図-5 パラメータと人口分布(菱形三角網)

ケースにわたり、各形状のネットワークについて、それぞれ1000通りのパラメータの組み合わせを設定して均衡計算を行い、人口分布構造を求めた。無論、それらの全てをここで紹介することはできないが、本稿では、まず、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ の3つのパラメータの組み合わせをに従って人口分布構造がどのように変化するかを図-4～図-6に示す。これらの図は、パラメータの張る空間を均衡解の安定性と実現する立地分布パターンに応じて分割したものである。得られた結果から読みとれるシステムの特性的については図-4～図-6で基本的には共通しているため、主に図-4に着目して説明する。

まず、第一に、集積の不経済の度合いを規定するパラメータである $\beta$ が1前後の領域では安定な均衡解は得られない。収束計算により得られた解であっても、その解について安定性の条件を用いて判定すると不安定な解である場合、あるいは収束せずに振動を繰り返す場合がこの領域に含まれる。

第二に、それ以外の安定な解の得られる領域ではパラメータの組み合わせに応じて複数の代表的な均衡パターンが出現する。これらを図-4の線形一軸型の交通ネットワークのケースでは5個の代表的分布構造に分類して領域を分割した。アクセシビリティ

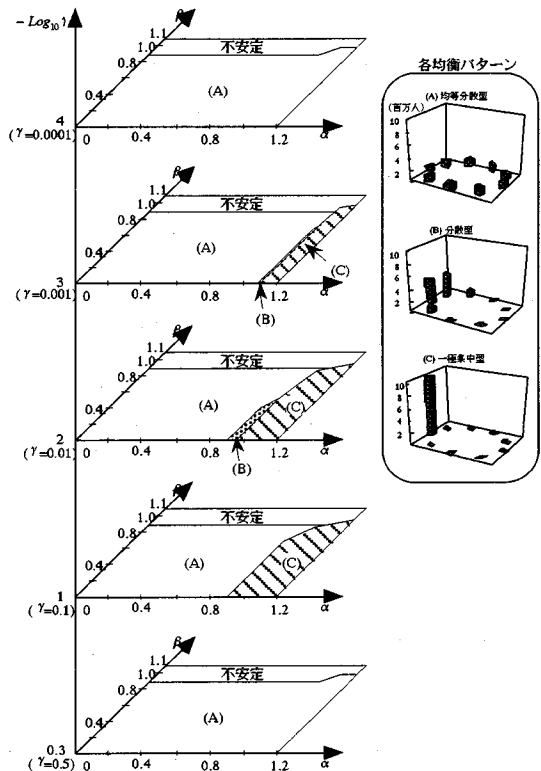


図-6 パラメータと人口分布(環状)



による集積の経済の度合いを規定するパラメータ  $\alpha$  が大きくなるにつれて、(C), (D), (E) のような一極集中型の人口分布構造が実現する領域が存在している。これは次のような意味を持っていると言える。効用水準を規定する要因の中で、集積の経済が一層重要になるにつれて、少しでも多くの他の都市よりも人口が多くなった都市はその限界的な効用の増大が他の都市も大きく、さらに多くの立地を集めることになる。(D)と(E)の相違は、ともに一極構造であるが、極となる都市の位置が異なる。一軸状に並んだ都市群の中で中央以外の都市が極と成り得るのは、最初に初期の立地分布として不均等な分布を与えたことによる。

第三に、単位交通費用を表すパラメータである  $\gamma$  に着目すると、交通改善はその低下を意味する。

図-4において、 $(\alpha, \beta) = (1.1, 0.85)$  のときに、 $\gamma$  の値に応じて実現する立地分布構造を取り出して整理したものが図-7である。なお、これ以外のパラメータの組み合わせの場合については、 $\gamma$  が大きいほど不安定解の出現する領域が大きくなる傾向が見られるが、交通費用低下に伴う構造変化のパターンは以下に紹介するのと基本的に同じ傾向が見られる。

図より、単位交通費用が低下するにつれて、分散→集中→分散といった変化が生じることが分かり、これは以下のように説明される。交通費用が極端に高い場合には、どの都市においても交通に関して不便であるため、集積のメリットがなく、デメリットを避けるために人口は分散される。交通費用が中位の場合には、交通便利性が都市によって大きく異なり、特に中心の都市が便利になる傾向があるため中心の都市に人口が集中する。交通費用が極端に低い場合には、どの都市においても同じように便利になり、都市間格差がなくなるため、再び人口はデメリットを避けて分散する。このような人口分布の変化は、交通未発達の社会から、超高速交通が実現したハイモビリティ社会、あるいは交通が完全に電気通信手段に代替されたテレコミュニケーション社会など、時間と料金の抵抗がきわめて低減された社会への移行に伴う空間経済の構造変化の歴史的な流れを示しているものと思われる。

## 5. 政策的含意について

本稿で示したモデルは、都市群システムを非常に単純な形式に抽象化したものであり、そこから得られる政策的含意の一般性に限界があることは言うまでもない。しかし、単純化された構造の範囲内でも

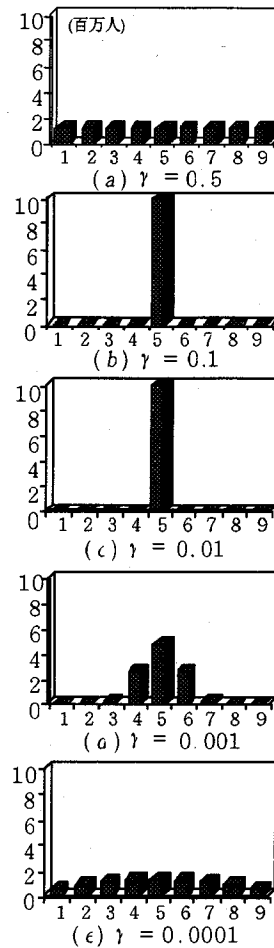


図-7 単位交通費用の低下に伴う人口分布変化

いくつかの興味深い示唆が得られる。

国土計画のレベルにおいては、周知のように一極集中構造から分散型の構造へと国土構造を変革させることが最重要課題とされている。一方、経済社会システムの中で情報の重要性はますます強調されており、情報の獲得と交換を目的とした交流活動は一層増大するとの見解が一般的である。このような状況の中で、本稿で示した分析の結果の含意について考えてみる。

第四次全国総合開発計画をはじめとして、国土政策においては高速交通ネットワークの整備は分散型国土構造の実現に寄与する最重要施策の一つとして位置づけられている。4.において示した数値シミュレーションの結果からは、交通改善はある水準までは一極集中化を助長しており、それ以上に交通費用を小さくさせないと分散構造は実現していない。従って、分散型構造を実現させること自体が目的となる

場合には、交通費用が大きく低下して、どの都市の間でもアクセシビリティにさほど大きな差がなくなる水準になればそれは可能である。一方では、アクセシビリティの効用水準に対する支配力を規定するパラメータ $\alpha$ が大きくなるにつれて、集中型の分布構造が出現してくるという結果も得られている。そのため、経済社会活動において情報交流の重要性がさらに高くなるにつれて集中型の構造が潜在的には実現しやすくなっている。このことに留意が必要である。

実際の国土政策においては、分散型の構造を実現することが自明の正当性をもっているのかのごとく論じられることが多い。しかし、分散型の構造が集中型の構造よりも社会的に望ましいとするのは、社会的な価値判断の基準を明確にすることなしには不可能であり、無条件に分散型を望ましいとすることはできない。そこで、本稿で示したモデルの範囲内で計量することのできる社会的厚生をの尺度を設定して、そのもとで交通改善によって分散型の構造を実現することが常に望ましいものであるかどうかを検討してみる。

社会的厚生をの尺度としては、本モデルでは立地者の均衡効用水準を定義しているの、ロジットタイプの確率的選択行動と整合する尺度として、各都市の均衡効用水準の期待最大値であるログサム関数を用いる。

$$W = \left( \frac{1}{\theta} \right) \ln \left\{ \sum_{j=1}^I \exp(\theta V_j(N^*)) \right\} \quad (21)$$

しかし、これはシステムの中の立地者が認知している、内部化された効用であり、このシステムの中で営まれる経済社会活動は立地者によって認知されない負の外部性を生じさせているという側面がある。その代表的なものの一つとして、トリップに伴って発生する環境排出を想定する。それは総トリップ長を尺度として計測できるものとする。(1)の第一項の $\{ \}$ 内は、立地者一人当たりのトリップ発生量を一定とした上でロジットタイプの目的地選択モデルにより定義される一般化消費者余剰と整合的であるため、そのトリップ需要関数を用いて総トリップ長は以下のように表される。

$$T = \sum_i N_i \left\{ \frac{\sum_j \tau_{ij} N_j \exp(-\gamma \tau_{ij})}{\sum_{j=1}^I N_j \exp(-\gamma \tau_{ij})} \right\} \quad (22)$$

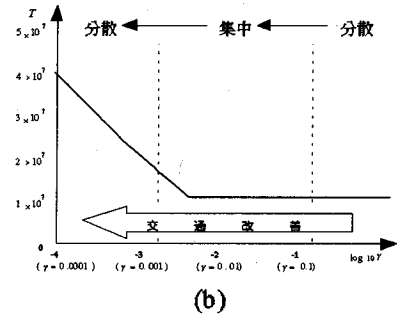
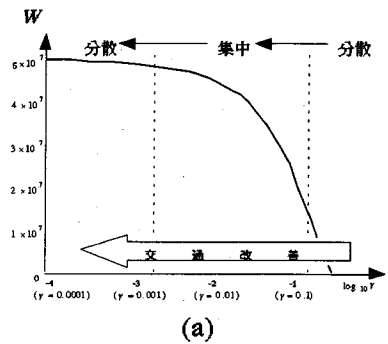


図-8 単位交通費用の低下に伴う厚生変化

図-7に示した交通改善による立地分布構造の変化に応じて、式(21)および(22)に示した社会的厚生をの尺度がどのように変化するかを示したのが、図-8である。式(21)の尺度で見た社会的厚生、すなわち、立地者に認知されている効用から見た社会的望ましさは単位交通費用の低下に伴って増大している。しかも、それは分散構造から集中構造を経て再び分散構造になるまで一貫して増大している。従って、この尺度で見ると、交通改善に伴う集中から分散への構造変化は望ましいと言える。しかし、もう一方の尺度である式(22)の総トリップ長で見ると、それも交通費用の低下に伴って、特に、集中構造から分散構造に立地分布が変化するにつれて急激に増大している。これが環境排出の増大を意味し、また、それが現在は立地者によって認知されていなくとも地球環境問題のように長期的に極めて重大な問題となり得る場合には、集中から分散への構造変化は望ましいものではない。従って、ここで示した2つの尺度を総合した価値尺度に基づいて集中から分散への構造変化を評価した場合には、そのような変化が常に無条件に望ましいとは言えない。交通改善の影響は、このような性質を有しているため、高速化によって時間短縮を図ると同時に新技術によって交通から発生する環境負荷の削減も実現しなければならない。この点に留意が必要である。

## 6. おわりに

本稿では、交通ネットワークに連結された複数の都市からなる空間経済システムをモデル化し、そこでの立地分布構造の安定性と政策実施に伴う変化を分析した。得られた知見の内、再度、ここで強調しておくべきであると思われるのは、第一に、交通改善に伴い立地分布構造は、分散型から集中型へ、そして再び分散型という変化を示すという点である。第二には、それを立地者の認知している効用と交通に伴う環境排出の2つの尺度で見た場合、交通改善により実現する集中型から分散型への変化は無条件に常に望ましいものであると言えないという点である。

無論、以上の知見は本稿で示した理論的な枠組みに強く依存しており、さらに一般性をもった分析へと発展させることが必要である。特に、効用関数の設定やネットワークの構成パターンについては、他のケースでの分析結果を多数蓄積していくことが不可欠であると考えている。

**謝辞:** 本研究を核として筆者らが行っているA system of cities に関する一連の研究は、筆者の内、上田が1994年度の前半にCSIRO(オーストラリア連邦科学産業研究機構)に滞在中に始めたものであり、同機関のBrothie, J. 博士とRoy, J. 博士との議論に多くを負っている。また、本研究の初期段階の成果を平成6年度応用地域科学会全国大会において報告した際に、佐々木公明教授(東北大学)、金本良嗣教授(東京大学)から有益な示唆を頂いた。本稿における政策的含意についての考察は両教授からの示唆を動機として行ったものである。また、本稿の匿名の査読者からもそれぞれ貴重な意見を頂いた。これらの方々に感謝の意を表す次第である。ただし、本稿に関する一切の責は筆者のみが負うことは言うまでもない。なお、本研究の一部は、文部省による奨励研究(A)06750560による助成を受けている。

## 参考文献

1) 竹森俊平: 国際経済学, pp.71-110, 東洋経済新報社, 1995.

- 2) 上田孝行, 松葉保孝: A system of cities model を用いた交通改善の影響分析, 平成6年度応用地域科学会全国大会報告資料, 1994.
- 3) Ueda, T.: A system of cities with interregional transport network, presented at the international workshop on "Transport Policy in the context of network and price equilibrium", DBCE, CSIRO, Melbourne, 1994.
- 4) Fujita, M.: Monopolistic competition and urban systems, *European Economic Review* 37, pp.308-315, 1993.
- 5) Krugman, P.: On the number and location of cities, *European Economic Review* 37, pp.293-298, 1993.
- 6) Ueda, T. and Morisugi, H.: On the derivation of realized level of utility as a function of population, 土木学会第49回年次学術講演会概要集第4部, pp.914-915, 1993.
- 7) 金本良嗣: 都市問題: 都市規模の経済学, 応用ミクロ経済学(伊藤元重・西村和雄編), pp.145-172, 東京大学出版会, 1989.
- 8) 金本良嗣: 東京一極集中の経済学, 最適都市を考える(宇沢弘文・堀内行蔵編), pp.95-106, 東京大学出版会, 1992.
- 9) 上田孝行: 交通改善による生活機会の増大が人口移動に及ぼす影響のモデル分析, 土木計画学論文集No.9, pp.237-244, 1991.
- 10) 上田孝行: 拡張された立地余剰を用いた一般均衡モデル, 土木計画学論文集No.10, pp.183-190, 1992.
- 11) Takayama, A.: *Mathematical Economics*, Cambridge University Press, 1985.
- 12) 上田孝行: 立地余剰概念を用いた交通改善の影響分析, 東京大学学位論文(博士), 1993.

(1995. 6.5 受付)

# A MODEL ANALYSIS OF STRUCTURAL CHANGE AND STABILITY IN A SYSTEM OF CITIES

Takayuki UEDA and Yasutaka MATSUBA

This paper models a system of cities which generates various spatial structures. The factors determinant to the structures, in particular, the transport network is to be examined. Since the model includes agglomeration economy and diseconomy, the system of equations is non-linear and therefore has to be solved in a not only analytical but also numerical way. The stability of spatial structure must be examined through the analysis.

As major findings in the analysis, it was verified that reduction of transport cost caused the structural change as dispersed -> concentrated -> dispersed again, and that there emerged an unstable structure under some combinations of parameter values.