

旅客トリップを明示した SCGE モデルの試み
SCGE model for passenger transport improvement

小池淳司*¹⁾・上田孝行*²⁾・宮下光宏*³⁾

Atsushi KOIKE, Takayuki UEDA and Mitsuhiro MIYASHITA

1. はじめに

近年、応用一般均衡分析 (CGE あるいは AGE) の土木計画学への応用は著しい¹⁾。それは、交通整備評価においても例外ではなく、空間的応用一般均衡 (SCGE) のフレームにより、都市間物流を表現するモデルが研究・開発されてきている²⁾。しかし、これらのモデルでは新幹線整備計画のような業務トリップ、自由トリップなどの都市間人流を表現することが出来ない。そこで、本研究ではこれら旅客トリップを明示した空間的応用一般均衡モデルの構築を試み、新幹線整備などの旅客トリップにおける交通整備評価を行うことを目的としている。

従来から、企業の業務トリップを、生産関数 (あるいは、付加価値関数) に取り込む手法として、業務トリップにより獲得可能な人的資本水準を生産投入要素とする考え方がある³⁾。本研究では、このモデル化と同様の考え方で、業務トリップを投入要素の1つとして捉えることでモデル化している。さらに、世帯の自由トリップにおいては家計生産関数⁴⁾として表現することを試みている。以上のモデル化は旅客純流動デー

タなどの交通データと整合することに加えて、応用一般均衡のフレームでモデル化しているため、容易に従来の都市間物流モデルを統合できる特徴を有している。なお、本研究の対象としているトリップは表-1 に示す通りである。

2. モデルの前提条件

まず、以下のように変数を設定する。
 $s \in S = \{1, \dots, s, \dots, S\}$: 地域を表すラベル
 $i \in I = \{1, \dots, i, \dots, I\}$: 財の種類を表すラベル
 $k \in K = \{1, \dots, k, \dots, K\}$: 投入要素の種類を表すラベル
また、モデル構築に際して以下のような仮定をおく。

- 1) S 個に分割された国土空間を考える。
- 2) 経済主体は各地域毎に企業、世帯、交通企業の3主体より構成されている。各地域の各産業 (アクティビティベース) 毎に企業が1つ存在する。また、世帯・交通企業は各地域毎に1つ存在する。
- 3) 企業は、中間投入財と土地、資本、労働および業務トリップを生産要素として生産を行う。また、その行動は利潤最大化行動に従う。
- 4) 世帯は企業に生産要素を提供し、対価を受け取る。そして、これらの所得から自地域で生産された財サービスに加えて、他地域で生産する財サービス、レクリエーション時間、交通サービスを同時に消費する (なお、この消費行動をトリップ投入型消費と呼ぶ)。また、その行動は効用最大化行動に従う。
- 5) 交通企業は、土地、資本、労働を生産要素として、交通サービスを生産する。また、その行動は利潤最大化行動に従う。
- 6) 市場は各地域毎に閉じているものとする。また、社会は長期的均衡状態にある。

表-1 本研究の位置付け

トリップの種類	土地利用交通モデル	SCGE モデル (既存) ²⁾	本研究
出勤・登校トリップ	○ (地域内)		
帰宅トリップ	○ (地域内)		
通社トリップ			
業務トリップ A (物の運搬を伴わない)			○ (地域間)
業務トリップ B (物の運搬を伴う)		○ (地域間)	
自由トリップ (家事・買物 A: 日常的)	○ (地域内)		
自由トリップ (家事・買物 B: 非日常的)			○ (地域間)
自由トリップ (社交・娯楽)			○ (地域間)
自由トリップ (観光・レクリエーション)			○ (地域間)

Key Words : 旅客トリップ、空間的応用一般均衡モデル

*¹⁾正会員 工博 長岡技術科学大学 環境・建設系
*²⁾正会員 工博 東京工業大学 開発システム工学専攻
*³⁾学生員 長岡技術科学大学 環境システム専攻
(〒940-2199 長岡市上富岡町 1603-1 e-mail: ak@vos.nagaokaut.ac.jp)

3. 企業の行動モデル

地域 s に立地し財 i を生産する企業は、自地域で生産された中間投入財 X_{si}^s と労働力、資本、土地、業務トリップにより構成される生産要素 f_{ki}^s を用い、図-1 に示す

ようなネステッド CES 型の生産構造の生産技術を用いて商品 Q_i^s を生産するとする。

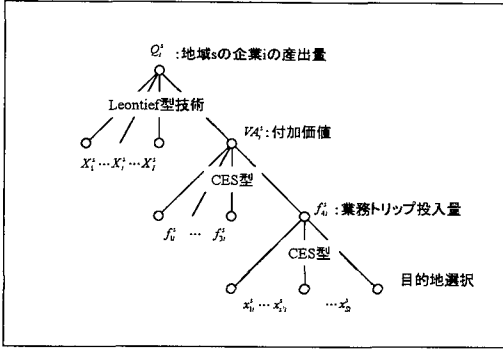


図-1 企業の生産関数構造

したがって、企業の生産関数は以下のように定式化できる。

$$Q_i^s = \min \left[\frac{VA_i^s}{a_n^s}, \frac{X_n^s}{a_n^s}, \dots, \frac{X_1^s}{a_1^s}, \dots, \frac{X_n^s}{a_n^s} \right] \quad (1)$$

$$VA_i^s = \phi_{li} \left[\sum_{k \in K} \delta_{ki} f_k^s \right]^{\frac{\sigma_{li}-1}{\sigma_{li}}} \quad (2)$$

ただし、 VA_i^s ：付加価値関数、 a_{li}^s ：投入係数、 a_n^s ：付加価値係数、 ϕ_{li} ：効率パラメータ、 δ_{ki} ：分配パラメータ ($0 < \delta_{ki} < 1$)、 σ_{li} ：代替パラメータ

上式より、付加価値1単位あたりの生産要素需要 cf_k^s が以下のように求まる。

$$cf_k^s = \frac{f_k^s}{VA_i^s} = \phi_{li}^{-1} \delta_{ki} \sigma_{li} w_k^s \left[\sum_{k \in K} \delta_{ki} \sigma_{li} w_k^{1-\sigma_{li}} \right]^{\frac{\sigma_{li}}{1-\sigma_{li}}} \quad (3)$$

ただし、 w_k^s ：生産要素価格

ここで、生産要素を $k=1$ ：労働力、 $k=2$ ：資本、 $k=3$ ：土地、 $k=4$ ：業務交通とする。

次に、業務交通による生産投入要素は各地域への業務交通量の関数として表現され、その選択行動は以下の最小化問題として定式化できる。

$$\min_{x_{s'i}^s} \sum_{s' \in S} (p_{s'}^s + t_{s'}^s w_1^s) x_{s'i}^s \quad (4)$$

$$\text{s.t. } f_{4i}^s = \phi_{4i} \left(\sum_{s' \in S} A_{s'i}^s x_{s'i}^s \right)^{\frac{\sigma_{4i}-1}{\sigma_{4i}}}$$

ただし、 $p_{s'}^s$ ： $s'(\in S)$ までの交通費用、 $t_{s'}^s$ ： s' までの交通所要時間、 $x_{s'i}^s$ ： s' までの業務交通量（トリップ）、 $A_{s'i}^s$ ：アクセシビリティ、 ϕ_{4i} ：効率パラメータ、 σ_{4i} ：代替パラメータ

上式より、業務交通1単位あたりの各地域への業務交通需要 $cx_{s'i}^s$ が以下のように求まる。

$$cx_{s'i}^s = \frac{x_{s'i}^s}{f_{4i}^s} = \phi_{4i}^{-1} A_{s'i}^s \sigma_{4i} (p_{s'}^s + t_{s'}^s w_1^s)^{-\sigma_{4i}} \left[\sum_{s' \in S} A_{s'i}^s \sigma_{4i} (p_{s'}^s + t_{s'}^s w_1^s)^{-\sigma_{4i}} \right]^{\frac{\sigma_{4i}}{1-\sigma_{4i}}} \quad (5)$$

さらに、その時の業務交通1単位あたりの費用は業務交通の生産要素価格 w_4^s と等しくなり、以下のように求まる。

$$w_4^s = (p_{s'}^s + t_{s'}^s w_1^s) cx_{s'i}^s \quad (6)$$

なお、ここで得られる交通需要関数には、CES型生産関数の特徴として、総交通費用に占める各地域への交通費用の割合が以下になるという特徴がある。

$$\frac{(p_{s'}^s + t_{s'}^s w_1^s) cx_{s'i}^s}{\sum_{s' \in S} (p_{s'}^s + t_{s'}^s w_1^s) cx_{s'i}^s} = \frac{A_{s'i}^s \sigma_{4i} (p_{s'}^s + t_{s'}^s w_1^s)^{-\sigma_{4i}}}{\sum_{s' \in S} A_{s'i}^s \sigma_{4i} (p_{s'}^s + t_{s'}^s w_1^s)^{-\sigma_{4i}}} \quad (7)$$

すなわち、上式の両辺を交通費用で割ることで、従来の交通需要予測モデルで用いられている重力モデルと同様の形であることが確認できる。また、企業の生産構造をより階層的にモデル化することにより、交通機関選択、経路選択も同様にモデル化が可能である。

ここで、企業の技術は規模に関して収穫一定であるため、企業の提供する生産財の価格は単位生産量あたりの生産費用に等しい水準となる。すなわち、以下の式が成立する。

$$P_i^s = a_n^s \left[\sum_{k=1,2,3} w_k^s cf_k^s + \sum_{s' \in S} (p_{s'}^s + t_{s'}^s w_1^s) cx_{s'i}^s \right] + \sum_{i \in I} P_i^s a_i^s \quad (8)$$

さらに、上式を全ての財に対して行列表現すると以下になる。

$$\begin{bmatrix} P_1^s \\ \vdots \\ P_i^s \\ \vdots \\ P_n^s \end{bmatrix}^t = \begin{bmatrix} a_n^s \left\{ \sum_{k=1,2,3} w_k^s cf_k^s + \sum_{s' \in S} (p_{s'}^s + t_{s'}^s w_1^s) cx_{s'i}^s \right\} \\ \vdots \\ a_n^s \left\{ \sum_{k=1,2,3} w_k^s cf_k^s + \sum_{s' \in S} (p_{s'}^s + t_{s'}^s w_1^s) cx_{s'i}^s \right\} \\ \vdots \\ a_n^s \left\{ \sum_{k=1,2,3} w_k^s cf_k^s + \sum_{s' \in S} (p_{s'}^s + t_{s'}^s w_1^s) cx_{s'i}^s \right\} \end{bmatrix}^t [-A]^{-1} \quad (9)$$

ただし、 $\mathbf{I}$ ：単位行列、 $\mathbf{A}$ ：投入係数行列

すなわち、生産財価格が上式を満たしている場合、全ての企業において超過利潤が発生しない。

4. 世帯の行動モデル

地域 s に立地する世帯は、自地域に立地する企業に生産要素（労働力、資本、土地）を提供して、自地域の企業が生産した財 q_i^s およびトリップ投入型消費の合成財 Z^s （旅行先への交通需要 $x_{s'R}^s$ 、旅行先でのレクリエーション時間 $t_{s'R}^s$ 、旅行先での財消費 $d_{s'R}^s$ の関数）、土地サービス I^s を消費し、図-2 に示すようなネステッド CES 型の効用関数を持つとする。

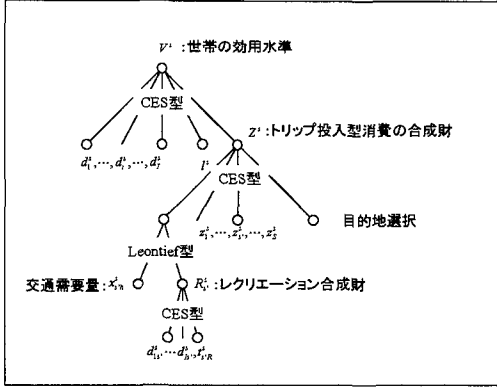


図-2 世帯の効用関数構造

したがって、世帯の効用最大化行動は以下のように定式化できる。

$$\begin{aligned}
 V^s = & \max \left[\sum_{i \in I} \left\{ \left(\gamma_{1i}^s \right)^{\frac{1}{\rho_1}} \left(d_i^s \right)^{\frac{\rho_1-1}{\rho_1}} \right\} + \left(\gamma_{12}^s \right)^{\frac{1}{\rho_1}} \left(Z^s \right)^{\frac{\rho_1-1}{\rho_1}} + \left(\gamma_{13}^s \right)^{\frac{1}{\rho_1}} \left(I^s \right)^{\frac{\rho_1-1}{\rho_1}} \right] \\
 \text{s.t. } & \sum_{i \in I} P_i^s d_i^s + \sum_{j \in S} P_j^s d_{ij}^s + \sum_{k \in S} p_k^s x_{jk}^s + w_3^s I^s = \sum_{k=1,2,3} w_k^s F_k^s \\
 & T^s = F_1^s + \sum_{j \in S} t_{ij}^s x_{jk}^s + \sum_{j \in S} t_{ij}^s I^s
 \end{aligned} \quad (10)$$

ただし、 V^s : 間接効用関数、 γ_{1i}^s : 最終需要に関するシェアパラメータ、 ρ_1 : 消費財の代替弾力性、 F_k^s : 世帯が所有する資本 $k=1,2,3$ 、 T^s : 世帯の総利用可能時間

なお、制約条件の第一式は所得制約、第二式は時間制約を表している。これらは一般化価格での制約条件として以下のようにまとめることができる。

$$\begin{aligned}
 & \sum_{i \in I} P_i^s d_i^s + \sum_{j \in S} P_j^s d_{ij}^s + \sum_{k \in S} (p_k^s + w_1^s (t_{ij}^s + t_{jk}^s)) x_{jk}^s + w_3^s I^s \\
 & = w_1^s T^s + w_2^s F_2^s + w_3^s F_3^s
 \end{aligned} \quad (11)$$

上式より、各財の需要関数が以下のように求まる。

$$d_i^s = \frac{\gamma_{1i}^s (w_1^s T^s + w_2^s F_2^s + w_3^s F_3^s)}{P_i^s \rho_1 \left[\sum_{i \in I} \gamma_{1i}^s P_i^{s(1-\rho_1)} + \gamma_{12}^s Z^{s(1-\rho_1)} + \gamma_{13}^s I^{s(1-\rho_1)} \right]} \quad (12)$$

$$Z^s = \frac{\gamma_{12}^s (w_1^s T^s + w_2^s F_2^s + w_3^s F_3^s)}{P_z^s \rho_1 \left[\sum_{i \in I} \gamma_{1i}^s P_i^{s(1-\rho_1)} + \gamma_{12}^s Z^{s(1-\rho_1)} + \gamma_{13}^s I^{s(1-\rho_1)} \right]} \quad (13)$$

$$I^s = \frac{\gamma_{13}^s (w_1^s T^s + w_2^s F_2^s + w_3^s F_3^s)}{w_3^s \rho_1 \left[\sum_{i \in I} \gamma_{1i}^s P_i^{s(1-\rho_1)} + \gamma_{12}^s Z^{s(1-\rho_1)} + \gamma_{13}^s I^{s(1-\rho_1)} \right]} \quad (14)$$

ただし、 P_z^s : トリップ投入型消費の合成財価格

次に、世帯はトリップ投入型消費の合成財消費 Z^s (各地域毎のトリップ投入型消費の合成財 z_{ij}^s の関数) をどの地域で消費するかを選択する。その選択行動は以下の最大化問題として定式化できる。

$$Z^s = \max_{z_{ij}^s} \sum_{j \in S} \left\{ \left(\gamma_{2j}^s \right)^{\frac{1}{\rho_2}} \left(z_{ij}^s \right)^{\frac{\rho_2-1}{\rho_2}} \right\} \quad (15)$$

$$\text{s.t. } P_z^s Z^s = \sum_{j \in S} P_{jz}^s z_{ij}^s$$

ただし、 γ_{2j}^s : 地域選択に関するシェアパラメータ、

P_{jz}^s : 地域毎のトリップ投入型消費の合成財価格

上式より、各地域毎のトリップ投入型消費の合成財の需要量が以下のように求まる。

$$z_{ij}^s = \frac{\gamma_{2j}^s (P_z^s Z^s)^{\frac{\rho_2-1}{\rho_2}}}{P_{jz}^s \rho_2 \sum_{j \in S} \gamma_{2j}^s P_{jz}^{s(1-\rho_2)}} \quad (16)$$

さらに、この最適化条件に付随するラグランジュ乗数より、トリップ投入型消費の合成財の価格 P_z^s が以下のように求まる。

$$P_z^s = \left[\sum_{j \in S} \gamma_{2j}^s P_{jz}^{s(1-\rho_2)} \right]^{\frac{1}{1-\rho_2}} \quad (17)$$

次に、世帯は各地域毎のトリップ投入型消費 z_{ij}^s (各地域への交通需要 x_{jk}^s とレクリエーション合成財 R_{ij}^s の関数) の交通費用とそれ以外の費用にどれくらい割り振るかを選択する。その選択行動は以下のトリップ投入型消費に必要な費用 C_j^s の最小化行動として定式化できる。なお、ここでの選択に際してはレオンチェフ型を採用する。

$$\begin{aligned}
 C_j^s = \min & \left[(P_{jz}^s + w_1^s t_{ij}^s) x_{jk}^s + P_{jR}^s R_{ij}^s \right] \\
 \text{s.t. } z_{ij}^s = \min & \left\{ \frac{x_{jk}^s}{b_1}, \frac{R_{ij}^s}{b_2} \right\}
 \end{aligned} \quad (18)$$

ただし、 b_1, b_2 : 消費割合を表すパラメータ、 P_{jR}^s : レクリエーション合成財の価格

上式より、交通需要量と各消費地でのレクリエーション合成財の需要量が以下のように求まる。

$$x_{jk}^s = \frac{z_{ij}^s}{b_1}, R_{ij}^s = \frac{z_{ij}^s}{b_2} \quad (19), (20)$$

さらに、各地域毎のトリップ投入型消費の合成財 z_{ij}^s の価格 P_{jz}^s は1単位あたりの費用として以下のように求まる。

$$P_{jz}^s = \frac{P_z^s}{b_1} + \frac{P_{jR}^s}{b_2} \quad (21)$$

最後に、世帯はレクリエーション合成財 R_{ij}^s (旅行先で消費する財消費 d_{ij}^s と旅行先で費やす余暇時間 t_{ijR}^s の関数) における各財と余暇時間の消費水準を決定する。この段階での世帯の旅客行動は、そこへ出かけた際に、世帯が自ら消費財を生産し消費していると解釈する、家計生産関数 (household production function) ⁴⁾ の概念を用いるとする。この場合、世帯行動は以下の費用最小化行動として定式化できる。

$$\min_{d_{1R}^s, d_{2R}^s} \left(\sum_{i \in I} P_i^s d_{iR}^s + w_1^s t_{sR}^s \right) \quad (22)$$

$$\text{s.t. } R_s^s = \phi_h \left[\sum_{i \in I} \delta_{ih} d_{iR}^s \frac{\sigma_h - 1}{\sigma_h} + \delta_{0h} t_{sR}^s \frac{\sigma_h - 1}{\sigma_h} \right] \frac{\sigma_h}{\sigma_h - 1}$$

ただし、 δ_{ih}, δ_{0h} ：家計生産関数における分配パラメータ、 σ_h ：家計生産関数におけるシェアパラメータ

上式より、レクリエーション合成財 1 単位あたりの当該地域での財消費量および余暇時間消費量が以下のように求まる。

$$d_{1R}^s = \phi_h^{-1} \delta_{ih} \sigma_h P_i^s P_i^{s-1-\sigma_h} \left[\sum_{i \in I} \delta_{ih} \sigma_h P_i^s P_i^{s-1-\sigma_h} + \delta_{0h} \sigma_h w_1^s P_i^{s-1-\sigma_h} \right] \frac{\sigma_h}{1-\sigma_h} \quad (23)$$

$$t_{sR}^s = \phi_h^{-1} \delta_{0h} \sigma_h w_1^s P_i^{s-1-\sigma_h} \left[\sum_{i \in I} \delta_{ih} \sigma_h P_i^s P_i^{s-1-\sigma_h} + \delta_{0h} \sigma_h w_1^s P_i^{s-1-\sigma_h} \right] \frac{\sigma_h}{1-\sigma_h} \quad (24)$$

さらに、レクリエーション合成財の価格 P_{sR}^s はレクリエーション合成財 1 単位あたりの生産費用と等しくなり、以下のように求まる。

$$P_{sR}^s = P_i^s \frac{d_{1R}^s}{R_s^s} + w_1^s \frac{t_{sR}^s}{R_s^s} \quad (25)$$

5. 交通企業の行動モデル

地域 s に立地する交通企業は、自地域の世帯からの労働力 f_{10}^s 、資本 f_{20}^s 、土地 f_{30}^s を生産要素として、交通サービス Q_0^s を生産するものとする。また、その生産関数を以下のように定式化する。

$$Q_0^s = \min \left[\frac{f_{10}^s}{c_1^s}, \frac{f_{20}^s}{c_2^s}, \frac{f_{30}^s}{c_3^s} \right] \quad (26)$$

ただし、 c_1^s, c_2^s, c_3^s ：交通企業の投入係数

上式より、交通企業における生産要素需要関数および交通サービス 1 単位あたりの生産要素需要 cf_{k0}^s は以下のように求まる。

$$f_{k0}^s = c_k^s Q_0^s, \quad cf_{k0}^s = c_k^s \quad \text{ただし、} k=1,2,3 \quad (27), (28)$$

また、交通企業は規模に関して収穫一定の技術を仮定しているため、常に、以下の条件を満たし、超過需要・超過利潤が発生しない。

$$\sum_{s \in S} P_s^s \left(\sum_{i \in I} x_{is}^s + x_{sR}^s \right) = \sum_{k \in \{1,2,3\}} w_k^s f_{k0}^s \quad (28)$$

6. 経済均衡の表現

本モデルは、企業の生産に対して、規模に関して収穫一定の技術を仮定しているため、企業は常に需要に見合うだけの生産を行う。すなわち、本モデルの均衡条件としては生産要素市場に関する均衡条件が満たされればよい。また、全ての市場は地域内で閉じているため、地域 s での生産要素市場に関する均衡条件は以

下ようになる。

$$\sum_{i \in I} w_1^s (\alpha_i^s Q_i^s (\mathbf{D}^s) f_{1i}^s) + w_2^s (c_2^s Q_0^s (\mathbf{D}^s) f_{2i}^s) = w_1^s \left[T^s - \sum_{s \in S} t_{sR}^s P_{sR}^s (\mathbf{P}^s) - \sum_{s \in S} t_{sR}^s (\mathbf{P}^s) \right] \quad (29), (30)$$

$$\sum_{i \in I} w_2^s (\alpha_i^s Q_i^s (\mathbf{D}^s) f_{2i}^s) + w_3^s (c_3^s Q_0^s (\mathbf{D}^s) f_{3i}^s) = w_2^s F_2^s \quad (31)$$

$$\sum_{i \in I} w_3^s (\alpha_i^s Q_i^s (\mathbf{D}^s) f_{3i}^s) + w_3^s (c_3^s Q_0^s (\mathbf{D}^s) f_{3i}^s) = w_3^s [F_3^s - I^s]$$

ただし、 $\mathbf{D}^s$ ：地域 s の消費ベクトル、 $\mathbf{P}^s$ ：地域 s の生産財価格ベクトル

また、業務交通に関する生産要素需要は式(28)から、常に満たされる。さらに、企業の生産量は地域内最終需要と地域外からトリップを伴う消費の関数として以下のように表現できる。

$$\begin{bmatrix} Q_1^s \\ Q_2^s \\ Q_3^s \end{bmatrix} = [\mathbf{I} - \mathbf{A}]^{-1} \begin{bmatrix} d_1^s + \sum_{s \in S} d_{1s}^s \\ d_2^s + \sum_{s \in S} d_{2s}^s \\ d_3^s + \sum_{s \in S} d_{3s}^s \end{bmatrix} \quad (32)$$

7. おわりに

本研究では、旅客トリップを明示した空間的一般均衡モデルのフレームを構築した。このフレームにおいて交通整備事業などを評価する場合には、整備前後の所要費用および所要時間を外生的に与え、均衡計算の結果から効用水準の変化を計測することで旅客トリップにおける交通整備を評価することが可能である。

また、既存の SCGE フレームに立脚しているため、都市間物流を対象とした交通整備評価モデルと容易に統合することが可能である。なお、本モデルの数値計算結果を講演時に発表する予定である。

【参考文献】

- 1)土木学会：応用一般均衡モデルの公共投資評価への適用，土木計画学ワンデーセミナーシリーズ 15，1998.
- 2)例えば、宮城俊彦・本部賢一：応用一般均衡分析を基礎にした地域間交易モデルに関する研究，土木学会論文集，No.530/IV-30，31-40，1996.
- 3)例えば、小林潔司・奥村誠：高速交通体系が都市システムの発展に及ぼす影響に関する研究，土木計画学研究・講演集，No.18，221-224，1995.
- 4)Gary S. Becker：The Economic Approach to Human Behavior，The University of Chicago Press，1978.