

都市環境政策評価のための交通・立地統合均衡モデルの開発*

Constructing of Combined Transportation and Location Equilibrium Model to Evaluate of Urban Environmental Policies*

武藤慎一**, 上田孝行***, 金沢敏徳****

By Shinichi MUTO**, Takayuki UEDA***, Toshinori KANAZAWA****

1. 背景・目的

現在, 都市交通に起因する問題, 例えば大気汚染や騒音などの環境問題, また, 交通事故や道路混雑の問題など外部不経済による問題が深刻化してきている. このような問題に対し, 交通施設改善を含めたいくつかの政策が検討されているが, そのような政策の有効性を評価するには, 交通と立地との間の強い相互関係を考慮して, 交通体系に及ぼす影響のみならず立地変化も考慮して分析を行うことが必要とされている.

そのため, 従来より土地利用-交通モデルと称するモデル開発が進められてきたが, 近年になって上田(1995)¹⁾は, 上記モデルをミクロ経済学的行動理論に基づく理論フレームに再構築し, モデルの理論的根拠を明確化したモデルを開発している. そこでは, 特に立地に関わる行動モデルが数理最適化問題として定式化されている. 一方, 宮城(1995)²⁾は土地利用-交通モデルでも, 交通に関わる部分を交通均衡モデルをもって詳細に定式化した土地利用-交通統合モデルを開発している. そして, 小池(1997)³⁾は, これら立地均衡モデルと交通均衡モデルを, 古典的消費者行動理論の枠組みで総合的に定式化したモデルを開発している.

本研究も, モデルの本質的な部分は小池らのモデルに近い形であるが, 特に実際の政策評価への適用を目的とした Nested Logit タイプのモデル開発を行う.

2. 基本モデルの定式化

2.1 モデルの仮定

本モデルは, 以下の仮定に基づく.

- 1) 社会は, 都市環境政策が重点的に行われる都市圏(a)とそれ以外の都市圏(b)からなり, さらに都市圏(a)は $I \{I_1, \dots, i, \dots, I\}$ 個の地域からなるとする.
- 2) 地域 i には, 世帯, 就業者一人あたりで捉えた企業, 土地開発者, 不在地主が存在する(図 1).

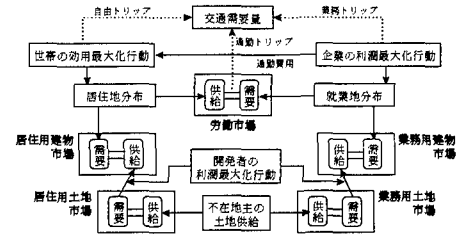


図1 都市圏(a)の地域 i における経済主体の相互関係

- 3) 土地と建物は別個に取り引きされているとする. また, それぞれ居住用と業務用とを区別する.
- 4) 市場は, 居住・業務用の建物市場および土地市場が存在する.

2.2 各経済主体の行動

2.2.1 立地者の行動モデル

ここでは, 立地者(世帯・就業者一人あたりで捉えた企業)の行動モデルを定式化する. なお, 交通均衡モデルについては世帯・企業とも同様に定式化できるが, 立地均衡モデルについては細部で差異があるため, 立地均衡モデルに限り世帯と企業と分けて説明を行う.

(1) 立地均衡モデル

a) 世帯の立地行動

世帯は, まず都市圏(a)か(b)かを選択し(都市圏選択), その後都市圏内の地域を選択する(地域選択). この行動モデルは, 以下のような数理最適化問題として表現できる^{1), 4)}.

$$\max_{\Phi_{a,i}^Z, P_i^A} \left[ZH^Z(\Phi_{a,i}^Z, P_i^A) + P_b^A \cdot S_b^A - \frac{1}{\theta^A} \sum_i [P_i^A \cdot \ln P_i^A] \right] \quad (1.a)$$

$$\text{s.t. } \sum_i P_i^A = 1, \quad \sum_i \Phi_{a,i}^Z = P_a^A \quad (1.b)$$

$$\text{ここで, } ZH^Z = \sum_i \Phi_{a,i}^Z \cdot V_{a,i}^Z - \frac{1}{\theta^Z} \sum_i \left[\Phi_{a,i}^Z \cdot \ln \frac{\Phi_{a,i}^Z}{P_i^A} \right] \quad (2)$$

ただし, P_i^A : 都市圏 i ($=a$ or b) の立地選択確率, $S_b^A(V_b^Z)$: 都市圏 b における世帯の効用(定数), 添え字 i : 地域を表す, $\Phi_{a,i}^Z = P_a^A \cdot P_{a,i}^Z$, $P_{a,i}^Z$: 都市圏 a かつ地域 i の立地選択確率, $V_{a,i}^Z$: 都市圏 a かつ地域 i を選択した世帯の効用, θ^A, θ^Z : ロジットパラメータ.

式(1)の目的関数は, 都市圏選択に関する選択の基本

*キーワード: 人口分布, 都市計画, 環境計画

**学生員 工修 岐阜大学大学院 博士後期課程

(岐阜市柳戸 1-1, TE: 058-293-2465, FAX: 058-230-1248,

E-Mail: shinichi@cc.gifu-u.ac.jp)

***正会員 工博 岐阜大学助教授 工学部 土木工学科

****正会員 パシフィックコンサルタンツ

公式⁴⁾、またその中に組み込まれている ZH^Z は地域選択に関する選択式を表している。

式(1)を解くと、各立地選択確率が求められる。

【都市圏 a の立地選択確率 P_i^A 】

$$P_a^A = \frac{1}{1 + \exp \left[\theta^A S^A (V_b^A) - \theta^A \frac{1}{\theta^Z} \ln \sum_i \exp \theta^Z V_{a,i}^Z \right]} \quad (3)$$

【都市圏 a かつ地域 i に対する居住地選択確率 $P_{a,i}^Z$ 】

$$P_{a,i}^Z = \frac{\exp \theta^Z V_{a,i}^Z}{\sum_i \exp \theta^Z V_{a,i}^Z} \quad (4)$$

このうち、 $V_{a,i}^Z$ は次の世帯の財消費行動より導かれる。すなわち、世帯は所得制約の下で効用を最大化するよう行動するものとする、その財消費行動は以下のように定式化できる。

$$V_{a,i}^Z = \max_{z_i, a_i, X_i} U_{a,i}^Z(z_i, a_i, X_i) \quad (5.a)$$

$$\text{s.t. } z_i + r_i a_i + q_i X_i = W + Y_i - \mu \frac{\sum_{ij} n_{ij} t_{ij}}{N_i} \omega (= I_i) \quad (5.b)$$

ただし、 $U_{a,i}^Z$ ：都市圏 a かつ地域 i を選択した世帯の直接効用関数、 z_i ：合成財消費、 a_i ：建物消費、 X_i ：自由目的トリップ消費、 r_i ：地域 i の居住用建物地代、 q_i ：自由目的トリップに関する一般化価格、 W ：就業者一人あたりの賃金(外生変数)、 Y_i ： i 地域に居住する世帯の資産所得、 n_{ij} ：地域 i に居住し地域 j で就業する世帯数、 t_{ij} ： ij 間の交通所要時間、 μ ：時間価値、 ω ：年間の通勤日数を表すパラメータ。

ここでは、地域 i に居住する世帯の所得は、平均賃金、資産所得および平均的通勤時間による時間価値の合計値で表されると考えている。

式(5)を解くと、以下のように各需要関数が得られる。

$$\text{合成財消費： } Z_i = Z_i(r_i, q_i, I_i) \quad (6.a)$$

$$\text{居住用建物消費： } a_i = a_i(r_i, q_i, I_i) \quad (6.b)$$

$$\text{自由目的トリップ消費： } X_i = X_i(r_i, q_i, I_i) \quad (6.c)$$

また、間接効用関数 $V_{a,i}^Z$ も、

$$\text{間接効用関数： } V_{a,i}^Z = V_{a,i}^Z(r_i, q_i, I_i) \quad (7)$$

のように求められ、これを式(4)に代入することにより、世帯の居住地選択確率が決定する。

なお、これらのうち総交通消費の一般化価格 q_i については、次項にて定式化される交通均衡モデルより求められる。

b) 企業の立地行動

企業の立地行動も基本的には世帯のそれと同様に定式化できる。ただし、世帯では効用最大化行動として定式化した部分を、企業では利潤最大化行動として

定式化する。よって、企業の各立地選択確率は、式(3),(4)における $V_{a,i}^Z$ を企業利潤 $\Pi_{a,i}^Z$ に置き換えた形となる。なお、この企業利潤 $\Pi_{a,i}^Z$ は、以下の企業の生産行動より導かれる。すなわち、企業は生産技術制約の下で利潤を最大化するよう行動するものとする、その生産行動は以下のように定式化できる。

$$\pi_{a,i}^Z = \max_{A_i, B_i} \left[Z_i - R_i A_i - Q_i B_i - W - \frac{\sum_{ij} n_{ij} P_{ij}}{E_i} \omega - \frac{\sum_{ij} n_{ij} t_{ij}}{E_i} \chi \right] \quad (8.a)$$

$$\text{s.t. } Z_i = Z_i(A_i, B_i) \quad (8.b)$$

ただし、 Z_i ：合成財供給量、 A_i ：生産のための建物投入、 B_i ：業務トリップ投入、 R_i ：地域 i の業務用建物地代、 Q_i ：業務トリップに関する一般化価格、 χ ：パラメータ。

式(8)を解くと、以下のように各投入量・供給量が得られる。

$$\text{業務用建物投入： } A_i = A_i(R_i, Q_i) \quad (9.a)$$

$$\text{業務トリップ投入： } B_i = B_i(R_i, Q_i) \quad (9.b)$$

$$\text{合成財供給： } Z_i = Z_i(R_i, Q_i) \quad (9.c)$$

そして、利潤関数も

$$\text{利潤関数： } \Pi_i = \Pi_i(R_i, Q_i) \quad (10)$$

のように得られ、これより、企業の業務地選択確率が決定する。

c) 通勤トリップ分布

まず、立地均衡モデルより地域 i の世帯数 N_i および地域 j の企業の就業者数 E_j が以下のように得られる。

$$N_i = P_{a,i}^{HZ} \cdot P_a^{HA} N^T \quad (11.a)$$

ただし、添字 H ：家計を表す、 N^T ：総世帯数(固定)。

$$E_j = P_{a,j}^{FZ} \cdot P_a^{FA} E^T \quad (11.b)$$

ただし、添字 F ：企業を表す、 E^T ：総就業者数(固定)。

通勤トリップに関しては、世帯数 N_i を発生トリップ、就業者数 E_j を集中トリップと考えて、通常の分布交通量を求める問題と捉えることができる。そこで、二重制約型重力モデルを用いると、以下のように通勤トリップ分布 n_{ij} が求められる³⁾。

$$n_{ij} = \mu_i N_i \cdot \nu_j E_j \cdot (q'_{ij})^{-\rho} \quad (12.a)$$

$$\mu_i = \frac{1}{\sum_j \nu_j E_j \cdot (q'_{ij})^{-\rho}}, \nu_j = \frac{1}{\sum_i \mu_i N_i \cdot (q'_{ij})^{-\rho}} \quad (12.b)$$

ただし、 n_{ij} ：地域 i に居住し地域 j に就業する世帯数、 q'_{ij} ： ij 間の平均交通一般化価格、 μ_i, ν_j ：調整パラメータ、 ρ ：パラメータ。

(3) 交通均衡モデル

交通均衡モデルについては、式(6.c)において導き出

れた自由目的トリップ、および式(9.b)において導出された業務トリップの目的地・機関分担・経路選択に対し、それぞれの選択確率を求める問題と考えればよい。このような行動は、以下のような数理最適化問題として表現できる^{2),5)}。

$$\max_{\Phi_{ij,k}^D, \Phi_{ij,k}^S, P_{ij}^D} \left[\sum_j ZH_j^D (\Phi_{ij,k}^K, \Phi_{ij,k}^S, P_{ij}^D) - \frac{1}{\theta^D} \sum_j \{ P_{ij}^D \cdot \ln P_{ij}^D \} \right] \quad (13.a)$$

$$\text{s.t. } \sum_j P_{ij}^D = 1, \sum_k \Phi_{ij,k}^S = P_{ij}^D, \sum_r \Phi_{ij,C,r}^K = \Phi_{ij,C}^S, \quad (13.b)$$

$$\Phi_{ij,C,r}^K \geq 0, x_a = \sum_j \sum_r X_{ij,C} \Phi_{ij,C,r}^K \delta_{ij,ar} \quad (13.b)$$

$$\text{ここで, } ZV_j^D = \sum_k ZH_k^S - \frac{1}{\theta^S} \sum_k \left\{ \Phi_{ij,k}^S \cdot \ln \frac{\Phi_{ij,k}^S}{P_{ij}^D} \right\} \quad (14.a)$$

$$ZV_k^S = \sum_r ZH_r^K - \frac{1}{\theta^K} \sum_r \left\{ \Phi_{ij,k,r}^K \cdot \ln \frac{\Phi_{ij,k,r}^K}{\Phi_{ij,k}^S} \right\} \quad (14.b)$$

$$ZH_r^K = -\Phi_{ij,C,r}^K p_C - \mu \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega \quad (14.c)$$

ただし、 P_{ij}^D ：目的地 j の選択確率、 $\Phi_{ij,k}^S$ ：交通機関 k の選択確率、 $\Phi_{ij,C,r}^K$ ：自動車交通 ($k=C$) の経路 r の選択確率、 x_a ：リンク a の自動車交通量、 $X_{ij,C}$ ： ij 間の自動車交通量、 $\delta_{ij,ar}$ ：リンク-経路接続行列、 p_C ：自動車交通価格、 t_a ：リンク a の自動車交通所要時間、 $\theta^D, \theta^S, \theta^K$ ：ロジットパラメータ。

式(13)の目的関数は目的地選択に関する選択の基本公式を、そして、その中に組み込まれている ZV_j^D, ZV_j^S はそれぞれ交通機関選択、経路選択に関する選択公式を表している。また、 ZH_r^K の第一項は期待自動車交通価格、第二項は利用者均衡配分モデルにおけるリンクコスト関数積分形を表している。

式(13)を解くと、各選択確率が

$$\text{【目的地選択確率】 } P_{ij}^D = \frac{\exp[\theta^D \cdot S_{ij}^D]}{\sum_j \exp[\theta^D \cdot S_{ij}^D]} \quad (15)$$

【自動車交通選択確率】

$$P_{ij,C}^S = \frac{\exp[\theta^S \cdot S_{ij,C}^S]}{\exp[\theta^S \cdot S_{ij,C}^S] + \exp[\theta^S \cdot v_{ij,B}^S]} \quad (16)$$

$$\text{【経路選択確率】 } P_{ij,C,r}^K = \frac{\exp[-\theta^K \cdot q_{ij,C,r}^K]}{\sum_r \exp[-\theta^K \cdot q_{ij,C,r}^K]} \quad (17)$$

のように、Logit Model の形で得られる。

ただし、 $S_{ij}^S = \frac{1}{\theta^S} \ln \left\{ \exp[\theta^S \cdot S_{ij,C}^S] + \exp[\theta^S \cdot v_{ij,B}^S(q_{ij,B})] \right\}$

$$S_{ij,C}^K = \frac{1}{\theta^K} \ln \sum_r \exp[-\theta^K \cdot q_{ij,C,r}^K]$$

この $S_{ij}^S, S_{ij,C}^K$ はそれぞれ交通機関選択、経路選択にお

ける最大期待効用を表している。

また、式(13)の最適化問題に付随して、自由目的トリップおよび業務トリップに関する一般化価格 q_i (or Q_i) が求められる。

$$q_i = \sum_j q_{ij}^D \exp(S_{ij}^S - S_i^D) \quad (18.a)$$

$$q_{ij}^D = \sum_k q_{ij,k}^S \exp(S_{ij,k}^K - S_{ij}^S) \quad (18.b)$$

$$q_{ij,k}^S = \sum_r q_{ij,C,r}^K \exp(-q_{ij,C,r}^K - S_{ij,C}^K) \quad (18.c)$$

2.2.2 開発者の行動モデル

開発者は、資材 k_i と土地 l_i を投入して、利潤最大化の下で建物を供給しているとする。本研究では建物を居住用と業務用とに区別してモデル化しているが、ここでは居住用建物の供給行動のみを示す。

$$\pi_i = \max_{as_i} [r_i as_i - c(as_i)] \quad (19.a)$$

$$\text{s.t. } c(as_i) = \min(r_i^L l_i + h k_i), as_i = as_i(l_i, k_i) \quad (19.b)$$

ただし、 π_i ：開発者の利潤、 as_i ：居住用建物供給量、 $c(as_i)$ ：居住用建物生産費用、 r_i^L ：居住用建物地代、 h ：資材価格。

これを解くと、居住用建物供給 as_i 、居住用土地需要 l_i とともに利潤関数が求められる。

$$\text{居住用建物供給： } as_i = as_i(r_i, p_i) \quad (20.a)$$

$$\text{居住用土地需要： } l_i = l_i(r_i, p_i) \quad (20.b)$$

$$\text{利潤関数： } \pi_i = \pi_i(r_i, p_i) \quad (20.c)$$

2.2.3 土地供給者の行動モデル

土地供給者に関しては、以下のような土地供給関数に基づき土地供給を行うとする。なお、ここでも居住用土地についてのみ供給関数を示す。

$$l_i^S = \bar{l}_i^S \left(1 - \frac{\sigma_i}{r_i^L} \right) \quad (21)$$

ただし、 l_i^S ：地域 i における居住用土地供給量、 $\bar{l}_i^S$ ：地域 i における居住用土地供給可能面積、 σ_i ：パラメータ。

2.2.4 市場均衡条件

本モデルで、明示的に扱われる市場は建物市場と土地市場である。また、それぞれ居住用と業務用とにわけてモデル化したが、ここでも居住用の場合のみ示す。

【居住用】

$$\text{建物市場： } as_i(r_i, r_i^L) = N_i a_i(r_i) \quad (22.a)$$

$$\text{土地市場： } l_i^S(r_i^L) = l_i(r_i, r_i^L) \quad (22.b)$$

また、労働に関しては、本モデルでは賃金率を固定としており、市場均衡条件によって賃金率が決定される構造にはなっていない。しかし、二重制約型重力モデルによって通勤トリップを表したことによって、世帯は居住地や就業地を変更することが可能であり、よって通勤トリップの分布によって労働の需給バランスが実現されていると考えられる。

3. 数値シミュレーション結果

続いて、岐阜市を対象に本研究で構築したモデルを用いて数値シミュレーションを行った。ただし、ここでは、モデルの挙動を把握することを目的とし、地域は岐阜市を駅周辺部とそれ以外との2ゾーンに分割した単純なケースの結果を示すことにする。

政策としては、2-1 間にガイドウェイバスの導入を行った場合を考えた。その主要な結果は図2, 3の通りである。

これらの結果より、まず、交通量変化とともに世帯あるいは企業の立地変化も同時に把握できることが確かめられた。その影響が顕著であるのは、政策を行った2-1間の総トリップ数が大幅に増加している点である。これは、政策により、2ゾーンへ世帯の立地が進んだことにより大幅な誘発交通が発生したと考えられる。また、政策の影響によって、特に交通環境被害の

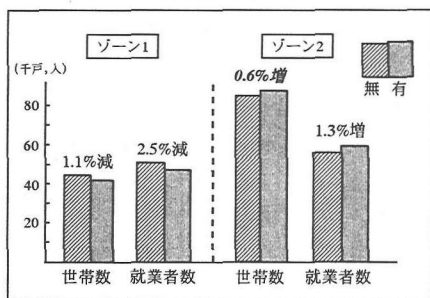


図2 人口分布変化

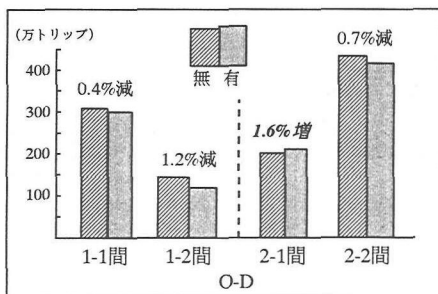


図3 総交通トリップ数変化

表1 便益帰着構成表

(100万円)

	交通企業	企業1	企業2	世帯1	世帯2	地主	合計
建設費用	-25,000						-25,000
運営費	-32,282						-32,282
料金収入	68,256						68,256
利用者便益					11,056		11,056
財価格変化1		391		-391			0
財価格変化2			-2,783		2,783		0
地代変化1		302		735		-1,037	0
地代変化2			-274		-1,651	1,925	0
外部不経済変化				230	441		671
合計	10,974	693	-3,057	574	12,629	888	22,701

激しい都心部(地域1)における交通量が減少していることがわかり、これより外部不経済による被害も軽減していることがわかる。

また、本政策による便益評価については以下の便益帰着構成表において表す。ただし、対象期間は30年を設定し、割引率は5%として計測した。

本表における外部不経済削減便益は、交通トリップに環境原単位をかけて求められる外部不経済的費用の政策有無での差額を取って求められたものであり、交通改善の効果のみならず環境改善による効果をも本モデルを用いて計測できることが示された。

4. 結論

本研究では、交通改善プロジェクトの評価を、交通体系に与える直接的影響のみならず、立地変化等の間接的影響まで評価するため、交通立地統合均衡モデルの開発を行った。また、本モデルを用いて、岐阜都市圏を対象にシミュレーション分析も行った。その結果、政策による交通変化、立地変化の状況を捉えることを示せたと共に、種々の外部不経済の削減便益まで計測できることを示した。

なお、本シミュレーションでは地域を2地域に限定して計測を行うにとどまっていたが、現在ゾーンを増やしてシミュレーションを行っている段階であり、講演時にそれらの結果を示す予定である。

【参考文献】

- 1) 上田孝行(1995): 交通・立地分析モデルによる都市交通プロジェクトの影響分析, 日交研シリーズ A-184, 日本交通政策研究会。
- 2) 宮城俊彦・奥田豊・加藤人士(1995): 数理最適化手法を基礎とした土地利用・交通統合モデルに関する研究, 土木学会論文集 No.518/IV-28, pp.95-105。
- 3) 小池淳司・上田孝行・小森俊文(1997): ミクロ行動理論に基づく交通—立地モデルの開発, 土木計画学研究・論文集 No.14, pp.259-267。
- 4) 宮城俊彦(1995): ネスティッド・エントロピーモデルとその応用, 土木計画学研究・講演集 No.18(2), pp.163-166。
- 5) 赤松隆・半田正樹(1996): Nested LOGIT 型交通・住居立地統合均衡モデルとその効率解法, 土木計画学研究・論文集 No.13, pp.279-287。