

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

宮城俊彦¹・奥田 豊²・加藤人士³

¹正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科 (〒501-11 岐阜市柳戸 1-1)

²正会員 工修 関西国際空港株式会社 (〒542 大阪市中央区南船場 3-11-10)

³正会員 工修 名古屋市役所 (〒460-08 名古屋市中区三の丸三丁目 1 番 1 号)

従来の交通需要予測方法は土地利用を与件としており、交通施設の整備が立地与える影響を評価するには不十分なモデル体系となっている。土地利用と交通の同時推定モデルは、一種の一般均衡モデルであり、複雑な非線形システムとなる。本研究では、非線形連立方程式体系として定式化するのではなく、ローリー型の土地利用モデルと機関分担-配分統合モデルを結合し、これを一つの数理最適化問題として定式化することによって土地利用・交通統合モデルがより簡便に解けることを明らかにしている。定式化された最適化問題はラグランジェ分解原理によって土地利用モデルと交通均衡モデルを交互に解く問題に置き換えることができ、これまでに開発されている手法を利用することができる。提案した統合モデルを実際の都市分析に適用し、その有効性を確認した。

Key Words: *land-use model, combined modal split and assignment model, Lagrangian decomposition method*

1. はじめに

本研究は、交通発生メカニズムを世帯の居住地選択行動および交通サービス水準との関連で捉え、ゾーン別人口および従業者数、そして発生交通量から配分交通量までを統合的に予測できるモデルの構築を目的としている。

土地利用と交通相互作用を扱うモデルは各国で数多く研究されており、各国の研究を集大成したものがISGL UTI (the International Study Group on Land-Use/Transportation Interaction) によって報告されている¹⁾。土地利用-交通相互作用モデルの中で、交通ネットワーク均衡モデルと土地利用モデルを統合し、単一の数理計画問題として記述するアプローチを特に統合モデルアプローチと呼ぶ²⁾。この種のアプローチの例としては、Boyce³⁾、Boyce and Southworth⁴⁾そしてLos⁵⁾等のモデルがよく知られている。また、Miyagi⁶⁾はSafwat and Magnantiの交通均衡モデル(S-Mモデル)⁷⁾とローリー型土地利用モデルを統合したモデルの提案を行っている。

本研究は、Miyagi⁶⁾によって提案されたモデルを基礎に、人口変数と交通需要を同時に予測するモデルの提案と適用結果について考察したものである。本研究ではMiyagiモデルの目的関数の設定の仕方によって、2つの立地選択モデルが定義できることを示す。第一のモデルは、職場が定まっている人々の立地選択が職場までの

通勤時間、居住ゾーンの魅力度、そのゾーンからのサービストリップのアクセシビリティおよびそのゾーンの人口規模などの要因に影響を受けるような構造をもっている。第二のモデルは、Coelho and Williams⁸⁾によって提案された立地選択モデル(C-Wモデル)と同じ構造をもち、上記要因のうち人口の項が取り除かれたものである。後者については、Wilson他⁹⁾によって確率選択理論の立場から、その行動的背景が明らかにされている。また、Prastacos¹⁰⁾は本研究で提案するモデルとは異なる数理最適化問題からC-Wモデルが導かれることを示している。第一の立地選択モデルを用いた人口予測は居住地選択において、立地対象ゾーンの人口規模も影響するモデル構造となるため現実的であるが非線形連立方程式を解く必要があり、推定が複雑である。第二のモデルはその必要はなく、活動配分モデル自体の反復計算の中で人口が逐次修正されていくという構造をもっている。本研究では計算が比較的容易である後者の方を採用している。そして、岐阜市への適用を通してモデルの妥当性や理論的側面の検証を行っている。

本研究の構成は以下のようなものである。まず、2.で土地利用と交通の均衡状態を記述する均衡条件式を示す。交通ネットワーク上の交通量は、短期的にみた場合、日々大きく変動することはなくある種の均衡状態を保っているように思える。交通が人々の種々の活動に伴って生ずる派生需要であることを考えるならば、このことは日々の活動もある種の定型的なパターンを保持していることの

表れだと推測できる。本研究で提示する均衡条件式はこのような均衡に至った状態を表現している。

土地利用モデルは、Willsonによって再構成され、Coelho and Williamsによって精緻化されたローリー型土地利用モデル基本とする。また、サービス活動の分布モデルは Sofwat and Magnanti が提案したモデルを使用する。このモデルは、サービストリップは交通混雑の影響を受け易いと考え、サービストリップ発生量の予測式を社会経済変数だけでなくアクセシビリティをも説明変数として含んだ線形関数として定式化している。これらの土地利用モデルは個別に開発されたものであり、互いに関連がないばかりか、以下に説明する交通モデルとも異なる脈絡の中で提案されたものである。2. で示される土地利用モデルは 3. で示される数理最適化問題の解として得られるモデルを示しており、厳密には C-W モデル、S-M モデルとは若干異なっている。

交通モデルは、交通機関分担にはロジット型モデルを用い、交通量配分では、道路ネットワーク上では Wardrop 均衡が成立していると仮定し定式化する。ただし、ネットワークにおけるマストラと自動車の相互作用は考慮せず、マストラのサービス水準は一定と仮定する。

3. では、2. で示す均衡条件式を得るための等価な数理最適化問題を示す。最適解として Wardrop の均衡条件を持つ数理最適化問題は、目的関数の行動論的意味づけは行えないが、最適化条件式が結果として Wardrop 均衡条件式を与えるため、“等価な数理最適化問題”と呼ばれる。また、C-W モデル、S-W モデルおよび交通ネットワーク均衡条件式で構成される均衡モデルは、不等式を含む非線形連立方程式体系となるため、これを直接解くための計算法を見いだすのは容易ではない。しかし、単一の数理最適化問題として定式化することができるならば、従来の技法を応用した計算法が比較的容易に開発でき、解の一意性、取束性を検討することができる。その結果、土地利用、発生交通量、分布交通量、機関分担、配分交通量が統一的に予測可能となる。本研究で用いる計算手法は土地利用モデルと交通モデルを結び付けている変数に着目し、これを調整変数として単一の数理最適化問題を2つのサブシステム、すなわち、土地利用サブシステムと交通ネットワーク均衡サブシステムに分解して解こうとするもので、本研究ではこれを相互反復平衡化手法と呼ぶ。このとき、個々のサブ問題は既存手法で容易に解くことができると同時に調整変数を介在にして2つのサブ問題を相互に関連させることができる。

4. は続く 5. の導入部として意味あいをもち、土地利用モデルおよび機関分担—交通統合モデルに用いられる各種モデルのパラメータ推定について検討したものである。最後に 5. において、居住人口を内生化したシステムとそうでないシステムをそれぞれ岐阜都市圏に適用し、

モデルの有効性を検討する。また、前述した2つのサブシステム間の相互関連を考慮する場合とそうでない場合についてもその差異を考察する。本研究では、モデルの適用にあたって居住立地に関するゾーンの魅力度としてゾーンの住宅地価を用いており、これを地価関数によって与えている。地価関数の説明変数にはモデル全体を通して内生変数として扱われる変数を用いているため、結果的には地価が内生的に求められることになる。

2. 土地利用と交通の均衡条件

本節では、3. に示す統合モデル達成される均衡状態を表現するモデルについて記述する。ここで述べる土地利用モデルは、1. で述べた人口を内生化した2つの統合モデルの第二のモデルである。

(1) ローリー型土地利用モデルと交通発生・分布モデルの結合

3. で提案される数理最適化問題を解くことによって得られるゾーン ij 間の通勤トリップ分布モデルは次の式で与えられる。

$$x_{ij} = \frac{\eta E_j W_i^w \exp(-\beta^w \bar{u}_{ij})}{\sum_i W_i^w \exp(-\beta^w \bar{u}_{ij})} \quad (1a)$$

$$\text{ここで、} \quad W_i^w = A_i^w \exp(\alpha_i x_i \beta^w \bar{s}_i) \quad (1b)$$

$$s_i = \frac{1}{\beta^*} \ln \sum_{j \in D_i} A_j^* \exp(-\beta^* \bar{u}_{ij}) \quad (1c)$$

D_i : ゾーン i のサービストリップ目的地集合

なお、通勤トリップは就業者1人当たりのトリップ数 η を用いて次式によって雇用変数と結び付けられる。

$$x_{ij} = \eta x_{ij}^* \quad (2)$$

$$\text{このとき、} \quad \sum_i x_{ij}^* = E_j \quad (3a)$$

$$\sum_i x_{ij}^* = x_i P_i \quad (3b)$$

が成立する。但し、本研究ではモデルの説明力を高めるために(3b)の代わりに人口変数とトリップ変数の関係を次のように設定している。

$$P_i = x_i \sum_j x_{ij} + x_2 \quad (4)$$

以上の式において各記号を次のように定義している。

x_{ij} : ゾーン間通勤トリップ数

x_{ij}^* : j ゾーンに職場を持ち i ゾーンに居住している就業者数

u_{ij} : ゾーン間所要時間

A_i^w : 住宅立地に伴う i ゾーンの魅力度

A_j^* : サービス活動の場所としての j ゾーンの魅力度

\bar{s}_i : サービストリップに関する i ゾーンの最大期待費用

P_i : ゾーン i の居住人口

E_j : ゾーン j の従業者数

η : 就業者1人当たりの通勤トリップ数

α : 就業率

$\beta^w, \beta^s, \alpha_1, \alpha_2$: パラメータ

本研究で用いられる通勤トリップ分布モデル(1)を式(2)で変形して得られる居住地選択モデルは、基本的には Wilson によって再構成され、その後 Coelho and Williams によって修正された Lowry 型の居住地選択モデルと同じであり、人は居住地選択に際し、ショッピングなどのサービストリップの関するアクセシビリティも地域の魅力度として考えるという仮定を反映している。ただし、人口を式(4)で与えている点、また、ゾーン間の所要時間が、次式で示されるように、自動車の所要時間 u_{ij} とマストラの所要時間 u'_{ij} のログサム変数で与えられる点異なる。

$$\bar{u}_{ij} = -\frac{1}{\theta} \ln[\exp(-\theta u_{ij}) + \exp(-\theta u'_{ij})] \quad (5)$$

θ : パラメータ

C-W モデルでは、通勤、サービストリップの各々について異なる所要時間を定義しているが、交通配分を内包した統合モデルでは、各トリップ目的が集計化された結果として生じるネットワークフローに対する所要時間でしか定義することができないことに留意する必要がある。実際、混雑を考慮した起終点間の所要時間の将来予測値をトリップ目的別に求めることは非現実的と言えよう。ところで、次節の数理最適化問題の解として得られるサービストリップ分布式は次のようである。

$$y_{ij} = (\alpha s_i + \alpha_1 P_i) \frac{A_j^s \exp(-\beta^s \bar{u}_{ij})}{\sum_j A_j^s \exp(-\beta^s \bar{u}_{ij})} \quad (6)$$

前と同様、サービストリップ分布はサービス従業者 1 人当たりのサービストリップ数 ρ を用いて、次のように雇用変数 y_{ij} に変換できる。

$$y_{ij} = \rho y_{ij}^* \quad (7)$$

このとき、次式が成立する。

$$\sum_j y_{ij}^* = \alpha P_i \quad (8a)$$

$$E_j^s = \sum_i y_{ij}^* \quad (8b)$$

総従業者数は次式で与えられる。

$$E_j = E_j^b + E_j^s \quad (9)$$

ここで、

y_{ij}^* : i ゾーンのサービス需要によって生ずる j ゾーンのサービス業の従業者数

E_j^b : 基礎的産業部従業者数

E_j^s : サービス部門従業者数

σ : 単位人口当りに必要とされるサービス従業者数

ρ : サービス従業者 1 人当たりのサービストリップ数

α, α_1 : パラメータ

式(6)は Sofwat and Magnanti の提案したモデルと同じ構造をもつ。 s_i は次式で定義されるアクセシビリティであり、式(1c)と本質的には同じものである。

$$s_i = \max[0, \ln \sum_{j \in D_i} A_j^s \exp(-\beta^s \bar{u}_{ij})] \quad (10)$$

S-M モデルは土地利用モデルと整合性を考慮したものではないが、本研究ではローリーモデルのフレームの枠内でサービストリップも考えるため、式(6)には人口 P_i を含ませている。なお、基幹産業部門の従業者数は外生的に与えられるものと仮定する。このように、本研究で用いられる土地利用モデルはローリー型モデルを踏襲している。

(2) 機関分担と交通量配分

OD ペア間のマストラジットと自動車の分担関係は次のロジット式で表現できるものとする。

$$q_{ij} = \frac{\bar{q}_{ij}}{1 + \exp[\theta(u_{ij} - u'_{ij}) + \phi]} \quad (11a)$$

$$q'_{ij} = \bar{q}_{ij} - q_{ij} \quad (11b)$$

ここで、

q'_{ij} : ij 間のトータル交通量

q_{ij} : ij 間の自動車分担量

q'_{ij} : ij 間のマストラ分担量

u_{ij} : ij 間の自動車の最小所要時間

u'_{ij} : ij 間のマストラの最小所要時間

ϕ, θ : 正のパラメータ

目的別に求められるトリップの合計は、トータルトリップ \bar{q}_{ij} と等しくなければならない。

$$\bar{q}_{ij} = x_{ij} + y_{ij} + z_{ij} \quad (12a)$$

ここに、 z_{ij} は通勤トリップ、サービストリップ以外のトリップを表す。ただし、サービストリップ以外のトリップ目的についても式(6)を適用する場合には(12b)が全トリップを表すことになる。すなわち、

$$\bar{q}_{ij} = x_{ij} + y_{ij} \quad (12b)$$

マストラと自動車ネットワークは独立に存在し、マストラのゾーン間所要時間は一定と仮定する。また、自動車ネットワーク上の交通流は Wardrop 均衡状態にあるものと仮定する。即ち、次の均衡条件式が成立している。

$$\begin{aligned} (c_{kij} - u_{ij})h_{kij} &= 0 \\ c_{kij} &\geq u_{ij} \\ \sum_k h_{kij} &= \pi q_{ij} \\ c_{kij} &= \sum_a \delta_{akij} t_a(f_a) \end{aligned} \quad (13)$$

ここで、

h_{kij}, c_{kij} : OD ペア ij 間を結ぶ自動車経路 k 上の経路交通量と所要時間

$\delta_{akij} = \begin{cases} 1: \text{リンク } a \text{ が経路 } k \text{ 上に存在するとき} \\ 0: \text{そうでないとき} \end{cases}$

$t_a(\cdot)$: リンク a のパフォーマンス関数

f_a : リンク a の交通量

π : 自動車の平均乗車人員の逆数

3. 人口を内生化した土地利用—交通相互作用モデルの定式化

前に述べた土地利用モデル, 交通発生・分布モデル, 機関分担モデル, ネットワーク均衡条件を得ることは次に示す数理最適化問題を解くことと等価である¹¹⁾. このとき人口を内生化した最適化問題は, 目的関数 Z の設定の仕方によって 2 種類の人口予測モデルを得ることができる.

(1) 等価な数理最適化問題

$$[P] \min. Z(s, P, x, y, \bar{q}, q, q', h) \\ = \Phi_1(s, P) + \Phi_2(x, y) + \Phi_3(\bar{q}, q, q') + \Phi_4(h) \quad (14a)$$

s.t.

$$P_i = x_1 \sum_j x_{ij} + x_2 (\nu_i), \quad \sum_i x_{ij} = \eta E_j \quad (\omega_j) \\ \sum_j y_{ij} = \alpha s_i + \alpha_1 P_i (\gamma_i), \quad x_{ij} + y_{ij} = \bar{q}_{ij} (\bar{u}_{ij}) \\ \bar{q}_{ij} = q_{ij} + q'_{ij} \quad (\mu_{ij}), \quad q_{ij} = \sum_k h_{kij} (u_{ij}) \\ s, x, y, \bar{q}, q, q', h \geq 0 \quad (14b)$$

ここで,

$$\Phi_1(s, P) = \frac{1}{\beta^s} \sum_i [as_i^2/2 + as_i + \alpha_1 P_i \\ - (as_i + \alpha_1 P_i) \ln(as_i + \alpha_1 P_i)] \quad (14c)$$

$$\Phi_2(x, y) = \frac{1}{\beta^w} \sum_i \sum_j x_{ij} \left(\ln \frac{x_{ij}}{A_i^w} - 1 \right) \\ + \frac{1}{\beta^w} \sum_i \sum_j y_{ij} \left(\ln \frac{y_{ij}}{A_j^w} - 1 \right) \quad (14d)$$

$$\Phi_3(\bar{q}, q, q') = -\frac{1}{\theta} \sum_i \sum_j \bar{q}_{ij} (\ln \bar{q}_{ij} - 1) \\ + \frac{1}{\theta} \sum_i \sum_j q_{ij} (\ln q_{ij} - 1) \\ + \frac{1}{\theta} \sum_i \sum_j q'_{ij} (\ln q'_{ij} - 1) \\ + \sum_i \sum_j q'_{ij} u'_{ij} \quad (14e)$$

$$\Phi_4(h) = \sum_a \int_0^{f_a(h)} t_a(f) df \quad (14f)$$

制約条件に対応した Lagrange 未定乗数は () 内のギリシャ文字で示す.

問題 [P] の目的関数の第 1 項から第 4 項は, それぞれ交通発生, 交通分布, 交通機関分担, 交通配分に関連する目的関数である. [P] の最適解に対する Kuhn-Tucker 条件より, 2.(1) に示した立地モデル・交通発生・交通分布モデル, 2.(2) の交通モデルを得ることができる. ところで, 式(6)の逆関数の線積分をとることによって, 式(14c)の代わりに次に示すような目的関数の第 1 項を得ることができる.

$$\Phi_1(s, P) = \frac{1}{\beta^s} \sum_i [as_i^2/2 + as_i + \alpha_1 P_i \\ - \frac{\alpha_1^2}{2\alpha} P_i^2 - (as_i + \alpha_1 P_i) \ln(as_i + \alpha_1 P_i)] \quad (15)$$

S-W モデルは式(15)において, P_i の項をゾーンに無関係な一定常数とおいた場合に得られるモデルである. Φ_1 をそのまま用いる場合をモデル I, Φ_1' を用いる場合をモデル II とすると, 各々に対応した人口予測モデルは次のようになる.

[モデル II の場合]

$$\sum_j \frac{\eta E_j W_i^w(P_i) \exp(-\beta^w \bar{u}_{ij})}{\sum_i W_i^w(P_i) \exp(-\beta^w \bar{u}_{ij})} = \frac{P_i - x_2}{x_1} \quad (16a)$$

ただし,

$$W_i^w(P_i) = A_i^w \exp \left[\frac{\alpha_1 \beta_1^w x_1}{\alpha \beta^s} (as_i + \alpha_1 P_i) \right] \quad (16b)$$

[モデル I の場合]

$$\sum_j \frac{\eta E_j W_i^w \exp(-\beta^w \bar{u}_{ij})}{\sum_i W_i^w \exp(-\beta^w \bar{u}_{ij})} = \frac{P_i - x_2}{x_1} \quad (17a)$$

ただし,

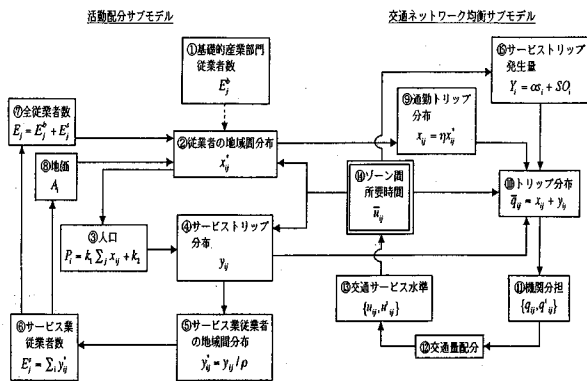
$$W_i^w = A_i^w \exp(\alpha_1 x_1 \beta^w \bar{s}_i) \quad (17b)$$

モデル II は, (16b) に示されるように, i ゾーンの魅力度 W_i に人口を含む形になっている. そして, サービストリップの発生量の推定 ($Y_i = as_i + \alpha_1 P_i$) に用いられる人口と整合するように, 居住地選択モデルで人口が推定されるので望ましい. しかし, 人口を求めるには, 非線形連立方程式を解く必要があり, 計算が面倒である.

モデル I は, 式(17b)に示されるように, W_i に人口を含まず, 居住地選択モデルから求められる人口はサービストリップの発生量に用いられる人口に一致するとは限らない. したがって, 式(17a)で得られる人口を用いて $\{y_{ij}\}$ を求めた後, 式(4)(5)によって, E_j を求め, 再度, 居住地選択モデルで P_i を推定し直すというプロセスを繰り返す必要がある. 本研究では, モデル I を用いる.

(2) 解の一意性

数理均衡問題 [P] が実行可能な範囲で唯一解を持つことを証明するためには, 実行可能な範囲で目的関数 Z が厳密に凸であることを示せば十分である. つまり, 目的関数のヘシアンが正値定符号行列であることを証明すれば良い. 目的関数のそれぞれの項に含まれる決定変数によって, 目的関数は分離可能である. したがって, ヘシアンの構造は $m \times m$ の行列のブロックで構成されるブロック対角行列となる. ここで, m は決定変数の次元を示す. ヘシアン H の構造は次のようになる.



図一 土地利用モデルと交通モデルの相互関係

整合性がとれるように調整していくわけである。

(4) 弱連結構造と強連結構造

3.(3)で示したように、交通均衡モデルで得られるゾーン間所要時間 $\{\bar{u}_{ij}\}$ と矛盾しないように活動配分サブモデルを解く場合、システムは“強い結合構造をもつ”と呼ぶことにする。

弱い結合関係とは、図一 1におけるマスタープログラムとサブプログラムの間の変数の受け渡しにおいて整合性を重要視せずに全体システムを解こうとする場合のサブシステム1と2の関係をさすものと定義する。最も極端な例はサブシステム1と2を独立に機能させる場合であり、サブシステム1からの output $\{x_{ij}, y_{ij}\}$ がサブシステム2に引き渡され、サブシステム2からの output $\{\bar{u}_{ij}\}$ はサブシステム1に伝達されない場合である。弱い結合関係の他の例としては、ゾーン間所要時間と $\{\bar{u}_{ij}\}$ を式(5)で表現される関係式でなく別の方法、たとえば、 u_{ij} と u'_{ij} の単純平均あるいは重み付け平均で求めたような場合である。弱い結合関係の成立を認める理由はいくつか存在する。第1に統合モデル [P] では、完全に均衡した状態における変数間の関係を記述しているが、立地における均衡と交通における均衡は均衡にいたる時間の長さが異なるであろうという推測である。したがって、立地均衡に達していなくてもある短い期間での交通均衡は存在しうる。この場合、実際の状況を再現するのにマスタープログラムで変数間の整合性をとる必要はないかもしれない。たとえば、立地均衡に用いられる $\{\bar{u}_{ij}\}$ とは別の値を想定して住宅の立地場所を選んでいるかもしれない。次に、モデルのパラメータ推定の結果、式(1)、(6)の所要時間弾力性が非常に小さいと判断できる場合、あるいは、所要時間よりも立地魅力度 W_i の方が強く効いていると判断できる場合なども弱い結合関係を認める理由となろう。そのような場合、サブシステム2からの所要時間変化の情報をサブシステム1に伝達しても全

表一 人口パラメータの推計結果

κ_1, κ_2 (t 値)	相関係数
$\kappa'_1 = 3.957$ (9.555)	0.906
$\kappa_2 = 2784.7$ (2.056)	

体的変動量は小さいので計算が無駄になることがある。

4. パラメータ推定

基準データは、昭和56年中京都市圏パーソントリップ調査データを集計し、作成した。対象地域は岐阜市とそれに関連した周辺地域であり、ゾーン区分は小ゾーンを基に集計し、岐阜市とさらにそれと結びつきが強いと思われる地域を内部ゾーン、また岐阜都市圏と強く関連があるとと思われる地域を外周ゾーンとし、それぞれ22ゾーン、14ゾーンの計36ゾーンとした。

(1) 人口モデル

式(4)を再録する。このときのパラメータの推定結果を表一に与える。

$$P_i = \kappa_1 \sum_j x_{ij} + \kappa_2$$

(2) 土地利用サブモデル

式(1)、(6)に含まれるパラメータをトリップデータを用い最尤法により推定する。この際、“出勤”目的のトリップデータを x_{ij} 、また、“自由”目的のトリップデータを y_{ij} とおいている。その他のトリップ目的は z_{ij} として、別途与えられるものとし分析対象外としている。ただし、交通ネットワーク均衡モデルに用いる \bar{q}_{ij} には z_{ij} を加えて計算を行っている。各々のモデルに含まれる魅力度 A_i^* 、 A_i^* については、

$$A_i^* = A_i^* \quad (20a)$$

$$A_i^* = \exp(\gamma A_i) \quad (20b)$$

と設定し、 A_i にはゾーン住宅地価、 A_i には第3次産業従業者数をそれぞれ用いることにする。

推定結果を表二に示す。bの値が負になっていることから、地価が高いほどそのゾーンの居住地としての魅力が下がることを示している。通勤トリップ分布の推定精度はあまり良くないが、サービストリップ分布につい

表一 2 活動配分モデルのパラメータ推定結果

	パラメータ	相関係数
通勤トリップ	$b = -0.583$ $\beta^w = 2.392 \times 10^{-2}$	R= 0.636
サービストリップ	$\gamma = 6.576 \times 10^{-6}$ $\beta^s = 0.241$	R= 0.859

表一 3 サービストリップの発生量パラメータ推定結果

	パラメータ (t 値)	相関係数
モデル A	$\alpha_1 = 0.097$ (2.015) $\alpha_0 = 1544.434$ (1.458)	R= 0.411
モデル B	$\alpha = 627.106$ (4.799) $\alpha_1 = 0.054$ (2.056)	R= 0.755
モデル C	$\alpha = 356.641$ (2.540) $\alpha_1 = 0.082$ (3.587) $\alpha_2 = 0.170$ (5.227) $\alpha_0 = -724.359$ (-1.002)	R= 0.915

() 内は t 値

ては比較的良好な結果となっている。

(3) サービストリップの発生量推定モデル

サービストリップの発生量推定にアクセシビリティを導入した場合の予測精度の向上について検討してみる。ここでアクセシビリティを決定する際に、ゾーン i の居住者がどのゾーンをサービストリップの目的地に選ぶかを限定しなければならない。本研究では、サービストリップの下限を定めその値以上のトリップが集中しているゾーンを目的地集合 D_i に含めた。

比較のため、次の 3 つのモデルを想定した。ただし、パラメータ推定において用いる Y_i にはゾーン内内トリップを除いた発生量を用いている。

モデル A $Y_i = \alpha_1 P_i + \alpha_0$

モデル B $Y_i = \alpha s_i + \alpha_1 P_i$

モデル C $Y_i = \alpha s_i + \alpha_1 P_i + \alpha_2 E_i^2 + \alpha_0$

結果を示したのが表一 3 である。モデル A の人口を説明変数とするモデルではうまく説明できなかったのが、アクセシビリティを導入することによって予測能力が大きく向上することが分かる。また、ゾーン内トリップを除いて発生量のパラメータ推定を行っているにも拘らず、モデル C のように第 3 次産業従業者数の導入によって結果が非常に良くなるのは、当該ゾーンのサービス産業の規模が他のゾーンのサービストリップに大きく関連することを示している。モデル C は説明力は高いが、統合モデルの内生変数である従業者数を含むため、均衡計算が複雑になる。この問題为了避免するため本研究ではモデル B を用いる。

表一 4 地価関数のパラメータ推定結果

説明変数	モデル 1	モデル 2
定数項	40402.2 (6.422)	41677.1 (9.495)
第 3 次従業者人口密度 (人/ha)	1582.6 (9.279)	1619.7 (14.899)
居住人口密度 (人/ha)	49.9 (0.290)	
相関係数	0.958	0.958

() 内は t 値

(4) 機関分担モデル

岐阜市内の主要な交通モードは自動車とバスである。一部の地域間で路面電車が運行しているが、利用交通機関に占める分担率は 8% 弱であり、バスが主要な公共交通機関となっている。本研究では、自動車とマストラ(ここではバスを用いる)の 2 手段を対象に、説明要因が所要時間のみの最も簡単なモデルを用いた。推定結果は、 $\theta = 3.202 \times 10^{-2}$ (t 値 = 14.784), $\phi = 14.055$ (t 値 = 8.171) であり、各ゾーンペアごとの自動車分担の相関係数は 0.956 という非常によい結果となった。

(5) 地価関数の設定

本研究では、住宅地価関数 R_j を次のような線形関数と仮定する。

$$R_j = \sum_k \beta_k r_{kj} \quad (21)$$

ここで、

r_{kj} : 居住地ゾーン j の k 番目の属性

β_k : k 番目のパラメータ

説明変数は土地利用-交通統合モデルで内生的に求めることが可能なものを取り上げ、第 3 次産業従業者人口密度と居住人口密度について分析した。その結果第 3 次従業者人口密度だけでも十分に説明できることが判ったので、より簡便な 1 変数モデル(モデル 2)を用いることにした。パラメータ推定結果を表一 4 に示す。このように宅地地価は第 3 次産業従業者人口密度と高い相関をもち、商業機能の集積が高い場所ほど高くなる傾向にある。

5. 統合モデルの岐阜市への適用結果

計算にあたって、居住人口を与件とするか内生変数として扱うかによって次の 3 つのケースを設定した。

各ゾーンの居住人口が与えられている場合をケース

1, 居住人口を内生化する場合をケース2, 分析対象地域の総人口のみが与えられている場合をケース3と設定した。ケース3は, 人口内生手法(ケース2)において推定されたゾーン人口の総和が, 与えられた総人口と一致しない場合, その誤差を調整するように各ゾーンに配分するようにした場合の方法である。ケース1は, 夜間人口が一定と仮定しても差し支えない短期的な均衡状態を表現することになり, 将来の計画人口が決定されていて, その計画人口に基づく交通需要予測を行う従来型の交通需要予測手法といえる。ただし, 第3次従業人口は変化するのでトリップの地域間分布は変化することになる。ケース2は, 制約が少なく一般的であり, 将来予測, 都市の成長を記述する場合のモデルである。ケース3は, 他のモデルによって分析対象地域の総人口が与えられた場合の, 立地均衡, 交通均衡状態を求めるためのモデルといえる。

(1) ネットワーク

対象ネットワークは, セントロイド以外のノードが161, リンク数が岐阜市外からのアクセスリンクを含めて714である。また, マストラネットワークについては, 特に想定せずゾーン間所要時間の実測値をそのまま用いている。

(2) リンクパフォーマンス関数の設定

交通均衡配分時に用いられる代表的なリンクパフォーマンス関数は, 米国道路局で開発されたモデルであり, BPR関数と呼ばれ, 次のような関数形を与えられる。

$$t_a(f_a) = t_a(0) \left\{ 1 + \alpha \left(\frac{f_a}{K_a} \right)^\beta \right\} \quad (22)$$

ここで,

$t_a(0)$: リンク a のゼロフロー時の所要時間

f_a : リンク a 上の交通量

K_a : リンク a の交通容量

溝上・松井¹²⁾は日本の道路条件に適したBPR関数のパラメータを推定している。これによるとパラメータは, 概ね $\alpha=0.96$, $\beta=1.20$ であるという分析結果を得ている。本研究では, この分析結果を用いて交通量配分を行うことにする。

(3) モデルの現況再現性に関する考察

分析対象地域は岐阜市とその周辺市町村を含む地域であるが, 現況再現性については岐阜市のみについて行っている。

表-5は強連結構造を仮定したモデルによる推定値と実績値の相関係数を示したものである。①~⑦は土地利用モデルによって求められる値であり, ⑧~⑩は交通均衡モデルによって求められる値である。[]内の数値は

表-5 土地利用-交通統合モデルの適用結果
(強連結構造)

	ケース1	ケース2	ケース3
	人口 固定	人口 内生	総人口 固定
①人口 (人)	---	0.837 [0.837]	0.837 [0.837]
②サービス業 従業者数(人)	0.840	0.836	0.839
③通勤トリップ 発生量	0.926 [0.919]	0.827 [0.819]	0.927 [0.819]
④サービス トリップ発生量	0.784 [0.784]	0.877 [0.841]	0.845 [0.849]
⑤通勤トリップ 分布	0.821 [0.763]	0.774 [0.722]	0.827 [0.722]
⑥サービス トリップ分布	0.744 [0.746]	0.751 [0.750]	0.749 [0.751]
⑦地価 (万円/m ²)	0.957 [0.957]	0.957 [0.957]	0.957 [0.957]
⑧自動車 分布交通量	0.882 [0.857]	0.892 [0.859]	0.887 [0.860]
⑨バス分布 交通量	0.739 [0.672]	0.720 [0.740]	0.735 [0.670]
⑩自動車所要 時間(分)	0.601 [0.599]	0.600 [0.593]	0.600 [0.592]

[]内は弱連結構造を仮定したときの相関係数

弱連結構造を仮定したモデルの結果を示している。ここでの弱連結構造とは土地利用モデルに用いる所要時間にマストラと自動車の実績値の平均値を用い, 交通均衡モデルで得られた所要時間を土地利用モデルにフィードバックせずに求めるケースを指している。

結果について, 3つの観点, すなわち, (a)各ケース(人口与件, 人口内生, 総人口与件)の比較, (b)強連結構造と弱連結構造と比較, そして(c)収束性, から考察する。

a) 3つのケースの比較

まず, 人口の与件とするケースとそうでない場合の大きな相違点は通勤トリップの推定精度に現れる。通勤トリップ発生量はトリップ分布を変換して得られるので, 分布量の推定が良好であるほど良い結果をもたらす。また, 通勤トリップパターンは人口が与件の場合は, 二重制約モデルで人口パターンが考慮されることになる。従って, 人口固定のケースが人口内生のモデルより, 通勤トリップ分布, 通勤トリップ発生量の推定値がともに良い結果となっている。総人口固定のケースもそういう意味では人口固定のケースと同様の結果を与える。人口内生モデルは通勤に関する推定値を除けば他のケースとほぼ同様の結果を得た。自動車のOD間所要時間の推定値は比較的良好な値を得たが, トリップ長の長い

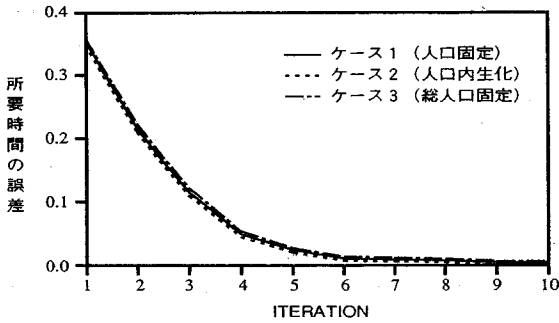


図-3 ゾーン間所要時間の誤差

OD ペアで過少推定となる傾向を示し、そのため相関係数は低くなっている。長距離トリップの所要時間の過少推定の結果、実績値を用いた分析では低い数値となっていた長距離 OD ペアの分布交通量が大きめに算出される結果となった。サービストリップはアクセシビリティ項の影響が大きく、かつ所要時間に係数が大きいので人口よりも所要時間の推定に影響を受け安い。サービストリップの分布量、発生量の推定において人口内生化モデルの結果が良くなっているのは、このためと考えられる。

総体的に見て、パラメータ推定時よりも統合モデルを通して全体の値をバランスさせた時の方が良い推定結果を与える点は注目すべきであろう。

b) 強連結構造と弱連結構造

土地利用サブモデルで得られた結果を交通統合モデルに引き渡すだけで、その結果を再度土地利用サブモデルにフィードバックさせない連結構造を弱連結構造と呼び、フィードバックをかける強連結構造との比較を行った。表-5の[]内の数値が弱連結構造を仮定したときの結果である。強連結構造を仮定した方が弱連結構造のモデルより良い結果を与える傾向にある。しかし、自動車およびバス分布交通量の推定値において有為な差が見られる程度で歴然としたものではない。したがって、予測という観点だけでは、トリップのサービス水準を調整しながら全体のバランスをとる均衡モデルが、特に優れているという結論は今回のシミュレーションからは得られなかった。

c) 収束性

図-3は各反復毎の、ゾーン間所要時間の値とその直前の反復時点での値との相対差の変化の状況を示したものである。図-2に示した本モデルの構造から、所要時間がある値に収束することは土地利用モデルに関連する量変数が収束していくことを意味するので、所要時間は収束性を見る一つの指標になる。実際、土地利用に関連する目的関数の第一項、第二項の和を示した図-4も比

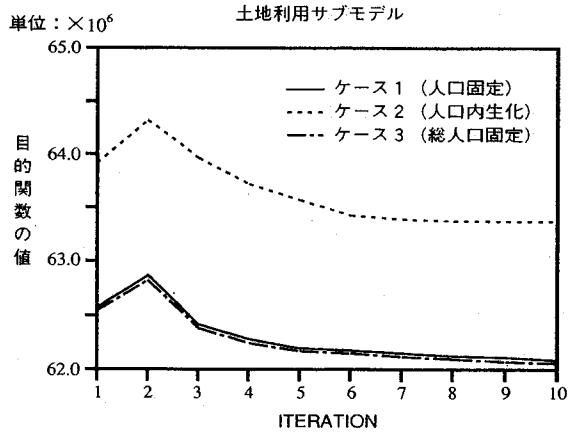


図-4 土地利用サブモデルの目的関数の値

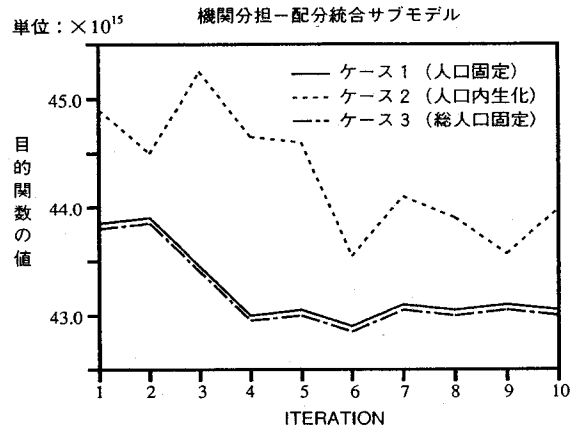


図-5 機関分担-配分統合サブモデルの目的関数の値

較的安定した収束傾向を示している。ただし、OD間の所要時間が安定してもモード毎の所要時間が安定する保証にはならず、従って、機関分担の量変数も確実に収束するわけではない。このことを示したのが図-5である。ケース1及びケース3は5、6回の反復で収束する傾向にあるが、ケース2は人口変数が微妙に変動するのでその影響で機関分担-配分統合モデルの収束が遅く、ケース1、3に較べ倍以上の反復計算が必要となる。

ところで、図-4、5より土地利用サブモデルの目的関数の値が機関分担-配分統合モデルの値に比して無視しうる程のオーダーであることがわかる。このことは目的関数の形状が機関分担、配分統合モデルの目的関数に支配されることを意味し、3.(2)で分析したような人口内生化モデルの解の一意性を裏付ける根拠となるものである。

6. まとめ

本研究で明らかにされた点は以下のようである。

(1) ローリー型土地利用モデルおよび交通ネットワーク均衡モデルを統合したモデルは単一の数理最適化問題として定式化することができ、解の一意性や解法の検討が統一的なフレームワークの中で行えることが可能になった。人口の与件とする場合は解の一意性が保証でき、人口を内生化する場合には、解の一意性の理論的な裏づけはない。しかし、数値計算上は多くの場合問題ないことを明らかにした。

(2) 数理最適化問題の目的関数の設定の仕方によって2つの異なる人口推定式が得られる。そのうちの1つは、これまでに既に提案されている Coelho and Williams のモデルと類似したモデルである。従来のローリーモデルと異なる点は立地選択関数にサービストリップに関するアクセシビリティが導入されている点である。

(3) 提案した数理最適化問題は調整変数を介在させることによって2つのサブシステムに分解できる。個々のサブシステムは既存手法を用いて解くことができ、2つのサブシステムを交互反復させ解くことによって全体システムを解くことができる。

(4) 調整変数を地域間分布交通量とした場合、2つのサブシステムはゾーン間所要時間で連結されることになる。全体システムを2つのサブシステムの交互反復で平衡化させる強連結構造を仮定したモデルの方が、過剰推定を抑える傾向にあり、特に交通モデルのアウトプットの現況再現性が向上する。しかし、今回の分析では強連結構造を仮定することがモデル全体の再現性の向上につながるという結論を得るまでには至らなかった。

(5) サービストリップ発生量推定モデルにアクセシビリティを導入したことにより予測精度は向上する。また、この指標の導入は、交通ネットワークの改善による誘発交通を推定できるので望ましい。

(6) 本研究で提案したモデルは、大規模な統合モデルにも係わらず比較的よい推定精度を示した。統合モデルでは地域間の交通サービス水準の予測が大きく影響するのでネットワークの作成、リンク・パフォーマンス関数の選択にはこれまで以上の注意が必要である。ただ、通勤トリップは交通サービス水準に対し、さほど鋭敏ではなく人口の推定結果に大きく影響を受ける。

(7) 地価の予測結果が非常に良いことから、交通サービス水準の改善が地価に与える影響を知る上で本研究のモデルが有効であることがわかった。

(8) 対象地域の総人口を与え、ゾーン別人口を内生的に与えるモデル(ケース3)は、ゾーン人口を外生的に与えるモデル(ケース1)と比較して、計算効率性、

現況再現性でも同等の機能を持ち、今回提示したモデルの中では最も推奨できる。

(9) 実際分析の結果、比較的少ない反復計算回数で均衡することがわかり、計算手法の有効性が確かめられた。

地方中心都市程度の人口規模、交通ネットワークをもつ地域に対しては、人口予測、交通需要予測を統一したフレームの下で行うことは可能である。こうした地域では大きな住宅団地、あるいは都心部再開発などの土地利用変化が交通パターンに与える影響は大きく、逆に、交通網の改善が住宅立地や企業立地に与える影響も大きい。ただし、本研究で提案した立地モデルは企業立地を含んでおらず、また、住宅立地モデルには地価を生内化したものの土地の供給者の行動はモデルには含まれてない。この点は今後の研究課題となろう。また、本研究で示した立地モデルは、世帯の立地経済理論に基づくものではない。このことは交通改善にともなう消費者の便益向上を経済理論に合致した形で測定する手法の開発に問題を残すことになり、この点でも改善の余地を残している。

参考文献

- 1) Webster, F.V., P.H. Bly and N.J. Paulley (Editors): Urban Land-Use and Transportation Interaction, Gower Publishing Company Ltd., 1988.
- 2) Berechman, J. and P. Gordon: Linked Models of Land-Use Transport Interactions: A Review, Advances in Urban Systems Modelling (Hutchinson B. and Batty M. Eds.), North-Holland, pp.109-131, 1986.
- 3) Boyce, D.E.: Equilibrium Solutions to Combined Urban Residential Location, Modal Choice and Trip Assignment Models, Competition Among Small Regions (Burth W. and Friedrich P. Eds.), Noman, Baden-Baden, pp.246-264, 1978.
- 4) Boyce, D.E. and F. Southworth: Qasi-Dynamic Urban-Location Models with Endogenously Determined Travel Costs, *Environment and Planning A*, Vol. 11, pp.575-584, 1979.
- 5) Los, M.: Combined Residential-Location and Transportation Models, *Environment and Planning A*, Vol. 11, pp.1241-1265, 1979.
- 6) Miyagi, T.: A Combined Residential-Location and Transportation Network Equilibrium model, Selected Proceedings of the 5th WCTR, Vol. IV, pp. 123-137, 1989.
- 7) Safwat, K.N.A. and T.L. Magnanti: A Combined Trip Generation, Trip Distribution, Modal Split, and Trip Assignment Model, *Transpn. Sci.*, Vol. 18, No. 1, pp.14-30, 1988.
- 8) Coelho, J.D. and Williams, H.C.W.L.: On the Design of Land Use Plans Through Locational Surplus Maxim-

- ization, *Papers of Regional Science Association*, Vol. 40, pp.71-85, 1978.
- 9) Wilson, A.G., J.D. Coelho, S.M. Macgill and H.C.W.L Williams: Optimization in Locational and Transport Analysis, John Wiley & Sons, 1981.
- 10) Prastacos, P.: An Integrated Land-Use-Transportation Model for the SanFrancisco Region: I. Designand Mathematical Structure, *Environment and Planning A*, Vol. 18, pp.307-322, 1986.
- 11) 宮城俊彦, 奥田豊: ローリーモデルを基礎とした土地利用-交通相互作用モデル, 土木計画学研究講演集, No. 12, pp.659-666, 1989.
- 12) 溝上章志, 松井寛: 日交通量配分に用いるリンクコスト関数の開発, 土木学会論文集, No. 401/IV-10, pp.99-107, 1989.

(1994.4.4 受付)

A MATHEMATICAL PROGRAMMING APPROACH TO THE COMBINED LAND-USE AND TRAVEL DEMAND FORECASTING MODELLING

Toshihiko MIYAGI, Yutaka OKUDA and Hitoshi KATOH

This paper presents a formulation and solution procedure for a model which combines residential-location into a combined modal split and assignment model. Main focus is put on how to determine zonal populations endogenously and two models derived from the proposed combined model are presented. The combined land-use and transportation equilibrium model presented here is then applied to Gifu city and its characteristics and validation are examined. The model is enable us to predict the impacts of transportation facilities, the changes in transit fares, etc. on residential location choice, and also the impacts of changes in residential location or employment location associated with supply of housing, new location of firms on the use and performance of transportation systems.