

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*

A Study on Land Use-Transportation Interaction Model Base on Lowry Framework

宮城 俊彦**・奥田 豊***

By Toshihiko MIYAGI and Yutaka OKUDA

This paper presents a formulation and a solution methodology of a model which combines residential-location into the transportation network equilibrium model. The model presented here will enable us to predict the impacts of transportation decisions such as investments for construction of new transportation facilities, changes in transit fares, etc. on residential location, and also the impacts of changes in residential location or employment location accompanying with the supply of housing, new location of firms on the use and performance of the transportation system.

1. はじめに

本論文は、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一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ISGRUT(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、これらのモデルが持つ問題を解決するため、Miyagi⁶⁾はSafwat and Magnantiの交通均衡モデル(S-W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。

本研究ではMiyagiによって提案されたモデルのうち、特に、人口を内生化したモデルを対象とし、目的関数の設定の仕方によって、2つのモデルが定義できることを示す。第一のモデルでは、職場が定まっている人々の立地選択がゾーン間所要時間、ゾーンの魅力度に加え、そのゾーンのサービストリップに対するアクセシビリティとそのゾーンの人口に影響を受けるとするものであり、第二のモデルは、上記要因のうち人口の項が取り除かれたものである。後者のモデルはCoelho and Williams⁸⁾によって提案されたものであり、また、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⁾も数理最適化問題の解として同様のモデルが導かれることを示している。本研究で扱うモデルも土地利用－

* キーワード：交通統合モデル、利用者交通均衡、

土地利用モデル

** 正会員 工博 岐阜大学助教授 工学部土木研究科

*** 学生会員 岐阜大学大学院工学研究科

(〒501-11 岐阜市柳戸 1-1)

交通統合モデルを数理最適化問題として定式化するものであるが、Prastacosとは全く異なる目的関数から同じモデルが導かれることを示す。

なお、最後に例題計算を通して提案モデルが均衡解に収束することを示す。

2 経済フレームと交通モデル:均衡条件

2.1 ローリー型経済フレームと交通モデル

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型の活動配分モデルは次のように整理することができる。

$$x^*_{ij} = \frac{E_i W^*_{ij} \exp(-\beta^* \bar{u}_{ij})}{\sum_j W^*_{ij} \exp(-\beta^* \bar{u}_{ij})} \quad (1a)$$

ここで、

$$W^*_{ij} = A^*_{ij} \exp\left(\frac{\beta^*}{\lambda} \bar{s}_i\right) \quad (1b)$$

ただし、

$$\lambda = \eta / \rho \kappa \sigma \quad (1c)$$

$$\bar{s}_i = \frac{1}{\beta^*} \ln \sum_j A^*_{ij} \exp(-\beta^* \bar{u}_{ij}) \quad (1d)$$

$$P_i = \kappa \sum_j x^*_{ij} \quad (2)$$

$$y^*_{ij} = \frac{\sigma P_i A^*_{ij} \exp(-\beta^* \bar{u}_{ij})}{\sum_j A^*_{ij} \exp(-\beta^* \bar{u}_{ij})} \quad (3)$$

$$E^*_{ij} = \sum_j y^*_{ij} \quad (4)$$

$$E_j = E^b_j + E^*_{ij} \quad (5)$$

ここで、

x^*_{ij} : jゾーンに職場を持ちiゾーンに居住している労働者数

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

A^*_{ij} : 住宅立地に伴うiゾーンの魅力度

A^*_{ij} : 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ゾーンの最大期待効用

E_j, E^b_j, E^*_{ij} : jゾーンの総従業者数, 基礎的産業部従業者数, サービス部門従業者数

κ : iゾーンの就業率の逆数

σ : 単位人口当りのサービス需要量

η, ρ : 通勤, サービストリップの生成原単位

$\bar{u}_{ij}$: iゾーンからjゾーンまでの所要時間

β^*, β^* : パラメータ

(1)式と(2)式によって表現される『居住地/勤務地サブモデル』と『居住地/サービスサブモデル』は、次の条件を満足する。

$$\sum_i x^*_{ij} = E_j \quad (6a)$$

$$\sum_j y^*_{ij} = \sigma P_i \quad (6b)$$

式(2), (4), (5)および(6)を満足する活動配分モデル式(1a), (3)は二重制約重力モデル式となる。また、Coelho and Williamsにおいて提案された『居住地/勤務地サブモデル』式(1)は、居住地選択に際し、人は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を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。

ところで、雇用変数 x^*_{ij} と y^*_{ij} はトリップ生成原単位 η と ρ を用いて、次のように通勤トリップ変数 x_{ij} とサービストリップ y_{ij} に変換できる。

$$x_{ij} = \eta x^*_{ij} \quad (7a)$$

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

したがって、交通需要モデルとして見たLowryモデルは、交通発生を原単位法で行い、分布交通量を二重制約重力モデルで求めるモデルとなっている。ただし、ゾーン間所要時間は与えられていることが前提となる。

ところで、トリップのゾーン間所要時間に対する弾力性が小さいならば、ローリー型モデルによる交通需要予測は妥当なものとなるが、サービストリップのように交通サービス水準に敏感なトリップは、そのゾーンのアクセシビリティをも考慮して定式化の方が望ましいであろう。したがって、本研究では、サービストリップの分布モデルを式(7b)ではなく、式(3)の居住人口に基づく発生量と、式(1d)のアクセシビリティに基づく発生量に分割したモデル式を適用する。すなわち、サービストリップの分布量を次式で与える。

$$y_{ij} = (\alpha s_i + \alpha_1 P_i) \frac{A^*_{ij} \exp(-\beta^* \bar{u}_{ij})}{\sum_j A^*_{ij} \exp(-\beta^* \bar{u}_{ij})} \quad (8)$$

ここで、 α, α_1 はデータから推定されるパラメータである。 s_i は次のように定義されるアクセシビリティであり、式(1d)と本質的には同じものである。

$$s_i = \max \left[0, \sum_{j \in D_i} A^* \exp(-\beta^* u_{ij}) \right] \quad (9)$$

ここで、 D_i は i のサービストリップ目的地集合である。

2.2 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。

$$q_{ij} = \frac{q_{ij}}{1 + \exp[\theta(u_{ij} - u'_{ij})]} \quad (10a)$$

$$q'_{ij} = q_{ij} - q_{ij} \quad (10b)$$

ここで、

q_{ij} : i, j 間のトータル交通量

q_{ij} : i, j 間の自動車分担量

q'_{ij} : i, j 間のマストラ分担量

u_{ij} : i, j 間の自動車の最小所要時間

u'_{ij} : i, j 間のマストラの最小所要時間

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 q_{ij} と等しくなければならない。つまり、次式によって表現される。

$$q_{ij} = x_{ij} + y_{ij} + z_{ij} \quad (11a)$$

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、本研究では z_{ij} は与件であると仮定する。したがって、以下では $(q_{ij} - z_{ij})$ を新たに q_{ij} を定義しなおし、次のように再定義する。

$$q_{ij} = x_{ij} + y_{ij} \quad (11b)$$

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。

$$\begin{aligned} (c_{kij} - u_{ij}) h_{kij} &= 0 \\ c_{kij} &\geq u_{ij}, \quad \sum_k h_{kij} = q_{ij} \\ c_{kij} &= \sum_a \delta_{akij} t_a(f_a) \end{aligned} \quad (12)$$

ここで、

h_{kij}, c_{kij} : ODペア i, j 間を結ぶ自動車経路 k 上の交通量, 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

以上にみるように、前に定義した z_{ij} は式(11b)で定義されるOD交通量の機関分担とは別個に行われ、また、配分も既に済んでいるものと仮定している。無論、 z_{ij} を y_{ij} に含めて行う方法もあり、その場合には式(11b)が本来の全目的トリップとなる。

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

ここでは、土地利用-交通相互作用モデルを数理最適化問題として定式化し、前に述べた交通需要モデル、機関分担関数、交通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ことを示す。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種類の定式化ができる。

3.1 サービストリップ需要関数の逆関数を含めたモデル(モデル1)

$$\begin{aligned} [P] \min Z(s, P, x, y, q, q', h) \\ = \Phi_1(s, P) + \Phi_2(x, y) + \Phi_3(q, q, q') + \Phi_4(h) \end{aligned} \quad (13a)$$

s, t

$$\sum_i x_{ij} = \lambda_1 P_i \quad (\nu_i), \quad \sum_i x_{ij} = \lambda_2 E_j \quad (\omega_j)$$

$$\sum_j y_{ij} = \alpha s_i + \alpha_1 P_i(\gamma_i), \quad x_{ij} + y_{ij} = q_{ij} \quad (u_{ij})$$

$$q_{ij} = q_{ij} + q'_{ij} \quad (\mu_{ij}), \quad q_{ij} = \sum_k h_{kij} \quad (u_{ij})$$

$$s, x, y, q, q, q, h \geq 0 \quad (13b)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \Phi_1(s, P) &= \frac{1}{\beta^*} \sum_i [\alpha s_i^2 / 2 + \alpha s_i + \alpha_1 P_i \\ &\quad - \frac{\alpha_1^2}{2\alpha} P_i^2 - (\alpha s_i + \alpha_1 P_i) \ln(\alpha s_i + \alpha_1 P_i)] \end{aligned} \quad (13c)$$

$$\begin{aligned}\Phi_2(x, y) = & \frac{1}{\beta^*} \sum_i \sum_j x_{ij} \left(\ln \frac{x_{ij}}{A^*_{ij}} - 1 \right) \\ & + \frac{1}{\beta^*} \sum_i \sum_j y_{ij} \left(\ln \frac{y_{ij}}{A^*_{ij}} - 1 \right)\end{aligned}\quad (13d)$$

$$\begin{aligned}\Phi_3(q, q, q) = & -\frac{1}{\theta} \sum_i \sum_j q_{ij} \left(\ln q_{ij} - 1 \right) \\ & + \frac{1}{\theta} \sum_i \sum_j q_{ij} \left(\ln q_{ij} - 1 \right) \\ & + \frac{1}{\theta} \sum_i \sum_j q_{ij} \left(\ln q_{ij} - 1 \right) \\ & + \sum_i \sum_j q_{ij} u_{ij}\end{aligned}\quad (13e)$$

$$\Phi_4(h) = \sum_i \int_0^{f_i(h)} t_i(f) df \quad (13f)$$

そして、 $\lambda_1 = \eta / \kappa$, $\lambda_2 = \eta$

制約条件に対応したLagrange未定乗数は()内のギリシヤ文字で示す。なお、式(13c)は式(8)の逆関数の線積分によって導かれた関数である。

問題[P]の最適解に対するKuhn-Tucker条件より、次のような関係式が得られる。

$$\begin{aligned}\frac{\alpha_1^2}{\alpha} P_i + \alpha_1 \ln(\alpha s_i + \alpha_1 P_i) \\ - \beta^* \lambda_1 \nu_i - \beta^* \alpha_1 \gamma_i = 0\end{aligned}\quad (14a)$$

$$s_i - \ln(\alpha s_i + S_0 i) + \beta^* \gamma_i = 0 \quad (14b)$$

$$\frac{1}{\beta^*} \ln \frac{x_{ij}}{A^*_{ij}} + \bar{u}_{ij} - \nu_i - \omega_j = 0 \quad (14c)$$

$$\frac{1}{\beta^*} \ln \frac{y_{ij}}{A^*_{ij}} + \bar{u}_{ij} - \gamma_i = 0 \quad (14d)$$

$$\frac{1}{\theta} \ln q_{ij} - \mu_{ij} + u_{ij} = 0 \quad (14e)$$

$$\frac{1}{\theta} \ln q_{ij} + u_{ij} - \mu_{ij} = 0 \quad (14f)$$

$$-\frac{1}{\theta} \ln q_{ij} - \mu_{ij} + \bar{u}_{ij} = 0 \quad (14g)$$

$$h_{kij}(c_{kij} - u_{ij}) = 0 \quad (14h)$$

$$c_{kij} - u_{ij} \leq 0 \quad (14i)$$

式(14a), (14b)より、Lagrange未定乗数 ν_i 次のように表せる。

$$\nu_i = \frac{\alpha_1}{\alpha \lambda_1 \beta^*} (\alpha s_i + \alpha_1 P_i) = \frac{\alpha_1}{\alpha \lambda_1 \beta^*} Y_i \quad (15)$$

式(14d)より、サービストリップ $\{y_{ij}\}$ は次式のようになる。

$$y_{ij} = A^*_{ij} \exp(\beta^* \gamma_i) \exp(-\beta^* \bar{u}_{ij}) \quad (16)$$

式(13b)の3番目の制約式と上式より、次のような式を得る。

$$\begin{aligned}\beta^* \gamma_i = & \ln(\alpha s_i + \alpha_1 P_i) \\ & - \ln \sum_j A^*_{ij} \exp(-\beta^* \bar{u}_{ij})\end{aligned}\quad (17)$$

したがって、式(14b), (17)より、次のようなアクセシビリティを表す式を得る。

$$s_i = \ln \sum_j A^*_{ij} \exp(-\beta^* \bar{u}_{ij}) \quad (18)$$

また、サービストリップの需要モデルは次のようになり、これは式(8)に示したモデルと同一である。

$$y_{ij} = (\alpha s_i + \alpha_1 P_i) \frac{A^*_{ij} \exp(-\beta^* \bar{u}_{ij})}{\sum_j A^*_{ij} \exp(-\beta^* \bar{u}_{ij})} \quad (19)$$

通勤トリップは、式(14c)と式(13b)の2番目の制約式より、

$$x_{ij} = \frac{\lambda_2 E_j \exp(\beta^* \nu_i) A^*_{ij} \exp(-\beta^* \bar{u}_{ij})}{\sum_i A^*_{ij} \exp(\beta^* \nu_i) \exp(-\beta^* \bar{u}_{ij})} \quad (20)$$

となる。ただし、式(15)より、

$$\exp(\beta^* \nu_i) = \exp\left[\frac{\alpha_1 \beta^*}{\alpha \gamma_i \beta^*} (\alpha s_i + \alpha_1 P_i)\right] \quad (21)$$

ここで、

$$W^*_{ij}(P_i) = A^*_{ij} \exp\left[\frac{\alpha_1 \beta^*}{\alpha \gamma_i \beta^*} (\alpha s_i + \alpha_1 P_i)\right] \quad (22)$$

とおくと、式(15)は

$$x_{ij} = \frac{\lambda_2 E_j W^*_{ij}(P_i) \exp(-\beta^* \bar{u}_{ij})}{\sum_i W^*_{ij}(P_i) \exp(-\beta^* \bar{u}_{ij})} \quad (23)$$

となる。つまり、通勤トリップに関する魅力度はアクセシビリティだけではなく人口による影響も考慮して

いるわけである。

ところで、式(14e), (14f), (14g)からゾーン間所要時間 $\bar{u}_{ij}$ は次のように定義できる。

$$\bar{u}_{ij} = -\frac{1}{\theta} \ln [\exp(-\theta u_{ij}) + \exp(-\theta u'_{ij})] \quad (24)$$

式(14h)より、 u_{ij} は自動車ネットワーク上において、Wardrop均衡状態のときの所要時間である。

また、式(14e), (14f), (14g)より、

$$\begin{aligned} q_{ij} &= q_{ij} + q'_{ij} \\ &= \exp(\theta \mu_{ij}) [\exp(-\theta u_{ij}) + \exp(-\theta u'_{ij})] \end{aligned} \quad (25)$$

となるから、自動車の分担交通量は次のように式(10)と同じロジット式で表現できる。

$$q_{ij} = \frac{\bar{q}_{ij} \exp(-\theta u_{ij})}{\exp(-\theta u_{ij}) + \exp(-\theta u'_{ij})} \quad (26)$$

式(14h), (14i)はよく知られたWardrop均衡条件式である。

3.2 修正モデル (モデル2)

2章で示した居住地選択モデルを得るためには、目的関数Zの Φ_i において、 P_i の2乗項を除去した次の目的関数を用いばよいことを示す。

$$\begin{aligned} \Phi_i^*(s, P) &= \frac{1}{\beta^2} \sum_i [\alpha s_i^2 / 2 + \alpha s_i + \alpha_i P_i \\ &\quad - (\alpha s_i + \alpha_i P_i) \ln(\alpha s_i + \alpha_i P_i)] \end{aligned} \quad (27)$$

このとき、Kuhn-Tucker条件(14a)は、次のようになる。

$$-\frac{1}{\beta^2} \ln(\alpha s_i + \alpha_i P_i) + \lambda_i \nu_i + \alpha_i \gamma_i = 0 \quad (28)$$

よって、式(15)は次のように変形できる。

$$\nu_i = \frac{\alpha_i}{\lambda_i \beta^2} s_i \quad (29)$$

したがって、式(29)より、次式を得る。

$$\exp(\beta^2 \nu_i) = \exp\left(\frac{\alpha_i}{\lambda_i} \beta^2 s_i\right) \quad (30)$$

居住地選択におけるゾーンの魅力度を

$$W^*_{ij} = A^*_{ij} \exp\left(\frac{\alpha_i}{\lambda_i} \beta^2 s_i\right) \quad (31)$$

と設定する。このとき

$$x_{ij} = \exp(\beta^2 \omega_{ij}) W^*_{ij} \exp(-\beta^2 \bar{u}_{ij}) \quad (32)$$

となり、この式と(13b)の2番目の制約式より、次式を得る。

$$\exp(\beta^2 \omega_{ij}) = \frac{\lambda_2 E_j}{\sum_i W^*_{ij} \exp(-\beta^2 \bar{u}_{ij})} \quad (33)$$

よって、通勤トリップは次式で与えられる。

$$x_{ij} = \frac{\lambda_2 E_j W^*_{ij} \exp(-\beta^2 \bar{u}_{ij})}{\sum_i W^*_{ij} \exp(-\beta^2 \bar{u}_{ij})} \quad (34)$$

この式で表される通勤トリップは、2章で示した『勤務地／居住地サブモデル』と同じである。

3.3 居住人口内生化モデルの特性

モデル1と2の居住人口の推定方法を比較してみると、

モデル1の場合

$$\sum_j \frac{\lambda_2 E_j W^*_{ij} (P_i) \exp(-\beta^2 \bar{u}_{ij})}{\sum_i W^*_{ij} (P_i) \exp(-\beta^2 \bar{u}_{ij})} = \lambda_1 P_i \quad (35)$$

ただし、

$$W^*_{ij} (P_i) = A^*_{ij} \exp\left[\frac{\alpha_i \beta^2}{\alpha_i \gamma_i \beta^2} (\alpha s_i + \alpha_i P_i)\right] \quad (36)$$

モデル2の場合

$$\sum_j \frac{\lambda_2 E_j W^*_{ij} \exp(-\beta^2 \bar{u}_{ij})}{\sum_i W^*_{ij} \exp(-\beta^2 \bar{u}_{ij})} = \lambda_1 P_i \quad (37)$$

ただし、

$$W^*_{ij} = A^*_{ij} \exp\left(\frac{\alpha_i}{\lambda_i} \beta^2 s_i\right) \quad (38)$$

によって P_i が内生的に与えられる。

モデル1は、サービストリップの発生量の推定 ($Y_i = \alpha s_i + \alpha_i P_i$) に用いられる人口と整合するよう、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2は、居住地選択モデルから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(37)で得られる人口を用いて

$\{y_{ij}\}$ 与えられた後、式(4)(5)を満足するように 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。このプロセスについては、次章で言及する。

4. 計算手法

この章には、3.2のモデルの解法について考える。Miyagiは統合モデル[P]のLagrange最適化問題を2つのサブ問題に分解する方法を提案した。すなわち、[P]のLagrangianは次のような2つのサブシステムに分解できる。

①サブシステム1:発生,分布変数で構成される一般的な空間相互作用問題

②サブシステム2:機関分担-配分統合問題

本論文では、状態変数 $\{q_{ij}\}$ を調整変数とした計算手法について検討する。

4.1 $\{q_{ij}\}$ を調整変数とした相互反復平衡化手法

変数 $\{q_{ij}\}$ を既知のパラメータとすると、最適化問題[P]のLagrangian L は、次のようにsub-Lagrangian L_1 と L_2 に分解できる。

$$\begin{aligned} L(s, x, y, q, q', h, v, \omega, \gamma, \mu, \bar{u}, u) \\ = L_1(s, x, y, v, \omega, \gamma, \bar{u}; q) \quad (39a) \\ + L_2(q, q', h, \mu, u; q) \end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned} L_1 &= \Phi_1(s) + \Phi_2(x, y) \\ &+ \sum v_{ij} (\lambda_i P_i - \sum x_{ij}) \\ &+ \sum \omega_j (\lambda_2 E_j - \sum x_{ij}) \quad (39b) \\ &+ \sum \gamma_i (Y_i - \sum y_{ij}) \\ &+ \sum \bar{u}_{ij} (x_{ij} + y_{ij} - q_{ij}) \\ L_2 &= \Phi_3(q, q'; q) + \Phi_4(h) \quad (39c) \\ &+ \sum \mu_{ij} (q_{ij} - q'_{ij} - q''_{ij}) \\ &+ \sum u_{ij} (q_{ij} - \sum h_{xij}) \end{aligned}$$

レベル1において、sub-Lagrangian L_1 と L_2 それぞれの平衡点の必要条件は、式(14a), (14b), (14c)と式(14e), (14f), (12)である。よって、sub-Lagrangian L_1 を解くことは、すなわちLowryの活動配分モデルによって最適点を求めることであり、 L_2 を解くことは機関分担-配分統合モデルによって最適点を得ることと等価である。

レベル2においては、total-Lagrangian L を使用す

る。ここで唯一の未知変数 $\{q_{ij}\}$ は、Lagrange未定乗数 $\{\mu_{ij}\}$ を含む式(14f)によって求められる。

$\{\bar{u}_{ij}\}$ は、式(14f), (14e), (14g)によって与えられるので、関係式(25)を得る。この計算手法を図1に示す。

したがって、次のような反復計算を用いたアルゴリズムとなる。

Step 0: $n=1$ 回目。 $\{q_{ij}^0\}$ を仮定する。

Step 1: $\{q_{ij}^0\}$ を使ってサブシステム2を解く。

ここで得られた解 $\{q_{ij}^1\}$, $\{q'_{ij}^1\}$, $\{u_{ij}^1\}$ と $\{u'_{ij}^1\}$ を使って、式(24)から $\{\bar{u}_{ij}^1\}$ を求める。

Step 2: $\{\bar{u}_{ij}^1\}$ を用いてサブシステム1を解く。よって、トリップ目的別分布交通量 $\{x_{ij}^1\}$, $\{y_{ij}^1\}$ が得られる。次式によって新たに解を更新する。

$$q_{ij}^{n+1} = \left[\sum_{k=1}^n q_{ij}^k + (x_{ij}^n + y_{ij}^n) \right] / (n+1)$$

Step 3: 最初に仮定した $\{q_{ij}^0\}$ と、新たに得られた解 $\{q_{ij}^{n+1}\}$ が一致する保証がない。よって、次のような収束条件を満足しない場合、Step1にもどる。

$$\sum_{ij} \frac{q_{ij}^{n+1} - q_{ij}^n}{q_{ij}^n} \leq e$$

ここで、 e は微小な正の定数である。

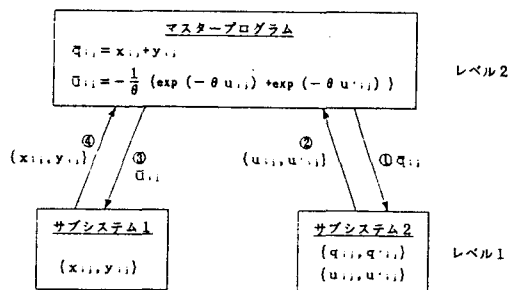


図1 $\{q_{ij}\}$ を調整変数とした相互反復平衡化手法

4.2 統合モデルとアルゴリズムの関係

土地利用と交通の相互作用を示した流れ図を図2に示す。この図を使って計算の流れを説明すると、まず、⑨において $\{q_{ij}\}$ を仮定し、⑩～⑫を反復させて均衡解を求める。次に、この均衡解を使って⑬でゾーン

間所要時間を求めた後、活動配分サブモデル①～⑦によって、反復計算を行い目的別発生量、分布量を求める。この目的別分布交通量を使って、④で「 q_{ij} 」を求める。つまり、交通ネットワーク均衡サブモデルと活動配分サブモデルを交互に解き、システム全体で整合性がとれるように調整していくわけである。

5. 仮想データを用いた例題への適用

ここでは、仮想データを使って、本研究で提案したモデルの等価問題が、数理最適化問題として機能することを確認する。モデルとしては、3.2で示した人口を内生化した場合について行い、変数 $\{q_{ij}\}$ をシステム全体の調整役とした計算手法を用いる。

計算に用いたネットワークは、ゾーン間が単一マストラネットワークと自動車ネットワークで結ばれた5ゾーンのネットワークである。自動車ネットワーク上ではリンクパフォーマンス関数を使用し、マストラは所要時間一定である。この例題の仮想ネットワーク図を図3に示す。

目的関数の値と反復回数との関係を図4に示す。この図から、目的関数の値が最初は大きく振動しているが、反復8回ぐらいからは振動も小さくなり、ほぼ収束し

ていると言える。目的関数値の振動原因は、Lowryモデルを基礎とした活動配分フレームと機関分担-配分統合問題の相互でやり取りされる変数 $\{q_{ij}\}$ が振動するためである。 $\{q_{ij}^{(n)}\}$ と更新された解 $\{q_{ij}^{(n+1)}\}$ との誤差と反復回数のグラフを図5に示す。誤差は数回の反復回数で急激に小さくなっているが、後半は減少が緩慢である。この理由は、4.1の計算手法Step2に示したように、各回で得られる $\{q_{ij}\}$ の調整を逐次平均化法によって行っているためである。この点に今後の改良の余地を残している。

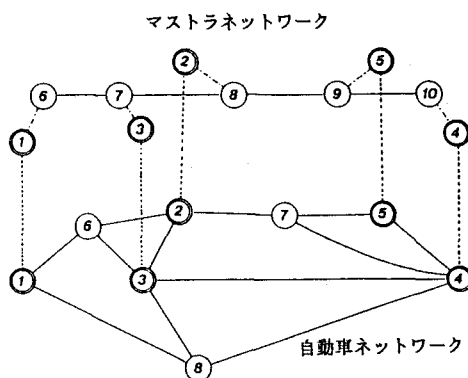


図3 仮想ネットワーク図

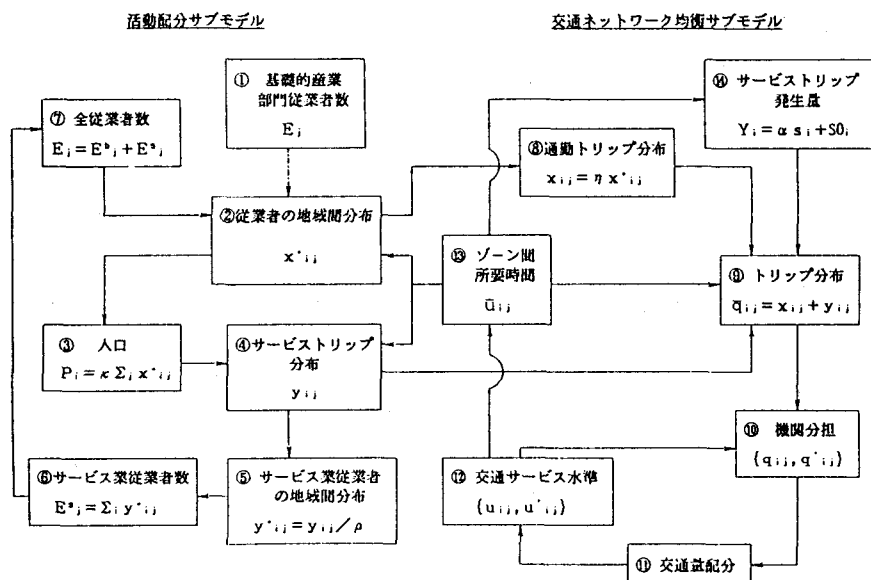


図2 土地利用と交通の相互作用

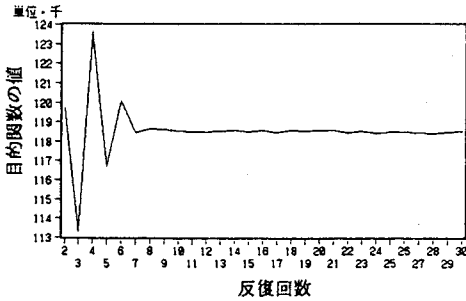


図4 目的関数の収束状況

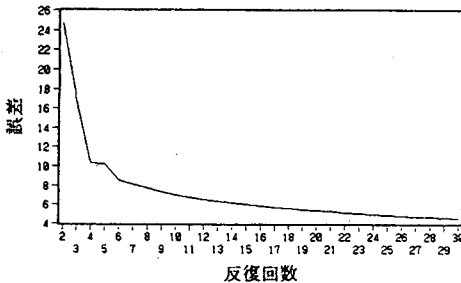


図5 $(\bar{q}_{ij})$ の誤差

6. おわりに

本論文では、MagnantiとSafwatによって提案された交通統合モデルの中にLowryタイプの土地利用モデルを統合した“土地利用-交通相互作用モデル”において、特に、人口を内生化したモデルについて検討した。このモデルは、数理最適化問題として定式化でき、その均衡条件から空間相互作用サブモデルと機関分担交通量を示すロジットモデルと自動車ネットワークのWardrop均衡条件が得られることを示した。さらに、分布交通量を調整変数とする分解原理に基づく計算手法を提案し、その収束性を例題計算を通して確認した。

人口内生化モデルで最も問題となるのは、居住地選択モデルによってどの程度人口推定が正確に行えるかという点であり、モデルの構造もさることながら、利用する魅力度変数やパラメータ推定法が問題となる。この点については、モデルの実際分析への結果を通して明らかにしていく必要がある。

また、本研究では居住地選択モデルのみを取り扱ったが、正確な人口予測を行うには供給側の条件をもモデルに組み込む必要がある。本研究で提案したモデルは数理最適化問題となっているため、この点については比較的容易に制約条件として取り込むことができよう。また、過去の人口のトレンドを利用する変分モデルについても検討する必要があるだろう。これらの点の検

討が今後の課題として残されている。

<参考文献>

- 1) Webster, f. v., P. H. Bly and N. J. Paulley (Editors), (1988), "Urban Land-Use and Transportation Interaction," Gower Publishing Company Ltd.
- 2) Berechman J. and P. Gordon, (1986), "Linked Models of Land-Use Transport Interactions: A Review," *Advances in Urban Systems Modelling*, in Hutchinson B. and Batty M. (Eds.), North-Holland, pp. 109-131.
- 3) Boyce D. E., (1978), "Equilibrium Solutions to Combined Urban Residential Location, Modal Choice and Trip Assignment Models," in Burth W. and Friedrich P. (Eds.), *Competition Among Small Regions*, Noman, Baden-Baden, pp. 246-264.
- 4) Boyce D. E. and F. Southworth, (1979), "Qasi-Dynamic Urban-Location Models with Endogenously Determined Travel Costs," *Environment and Planning A*, Vol. 11, pp. 575-584.
- 5) Los m., (1979), "Combined Residential-Location and Transportation Models," *Environment and Planning A*, Vol. 11, pp. 1241-1265.
- 6) Miyagi T., (1989), "A Combined Residential-Location and Transportation Network Equilibrium model," Paper presented at the 5th WCPR.
- 7) Safwat, K. N. A. and T. L. Magnanti, (1988), "A Combined Trip Generation, Trip Distribution, Modal Split, and Trip Assignment Model," *Transpn. Sci.*, Vol. 18, NO. 1, pp. 14-30
- 8) Coelho J. D. and Williams H. C. W. L., (1978), "On the Design of Land Use Plans Through Locational Surplus Maximization," *Papers of the Regional Science Association*, Vol. 40, pp. 71-85.
- 9) Wilson A. G., J. D. Coelho, S. M. Macgill and H. C. W. L. Williams, (1981), "Optimization in Locational and Transport Analysis," John Wiley & Sons
- 10) Prastacos P., (1986), "An Integrated Land-Use-Transportation Model for the San Francisco Region: 1. Design and Mathematical Structure," *Environment and Planning A*, Vol. 18, pp. 307-322.