

交通立地統合均衡モデルによる金沢外環状道路の便益評価*

Benefit evaluation of Kanazawa outer ring road by combined transportation and location equilibrium model*

中山晶一郎¹・高山純一²・古田拓也³・武藤慎一⁴・金森亮⁵

By Shoichiro NAKAYAMA¹・Jun-ichi TAKAYAMA²・Takuya FURUTA³・Shinichi MUTO⁴・Ryo KANAMORI⁵

1. はじめに

道路やその他の交通施設が都市の土地利用や個人や企業の立地に及ぼす影響は非常に大きい。したがって、交通と立地を同時に一つの理論フレームワークの中で取り扱うことが望ましい。これまで様々な土地利用モデルや応用都市経済モデルが開発されているが、本研究では、道路整備の便益評価を詳細に行うとともに、その道路整備が立地に及ぼす影響を把握することができるモデルの開発を目的とする。現在、道路の費用便益分析は、配分モデルにより行われており、配分モデルに企業立地や個人の住宅立地問題を取り扱うことができるように拡張することが一つのアプローチである。

これまでに交通ネットワーク均衡と立地を取り扱ったモデルとして、Anas(1985)や赤松・半田(1996)がある。しかし、これらのモデルでは、通常交通ネットワーク均衡で考慮されている経路選択に加えて、立地としては、個人の居住地選択のみしか取り入れられていない。本研究では、これらのモデルを拡張し、企業立地も考慮できるモデルを開発する。

2. モデル化に際する仮定・設定条件

本研究では、交通均衡と企業・個人の立地の両方を同時に取り扱う交通・立地統合均衡モデルの最も基本的なモデルを開発することを目的とする。それに際し、次のような仮定を設ける。

- 1) 一日のうち通勤交通が卓越しており、通勤交通のみを考慮する

*キーワード：応用都市経済モデル、金沢環状道路

¹正員、博(工)、金沢大学環境デザイン学系

(金沢市角間町、TEL:076-234-4614、

E-mail:snakayama@t.kanazawa-u.ac.jp)

²フェロー、工博、金沢大学環境デザイン学系

³学生員、金沢大学工学部土木建設工学科

⁴正員、博(工)、山梨大学大学院医学工学総合研究部

⁵正員、博(工)、東京大学都市持続再生研究センター

- 2) 単純化のために、各世帯には1名の従業者(労働者)がおり、その行動のみをモデル化する
- 3) 従業者の行動としては、勤務地選択・居住地選択・通勤の経路選択の3つのみを考える
- 4) 単純化のため、企業は1種類のみを考える
- 5) 企業行動としては、どのゾーンに立地するのかという立地のみとし、必要な従業者数や資本・土地は一定とする
- 6) 土地は、居住用・企業用・その他の3種類のみを考える
- 7) 従業者の3つの選択はネステッドロジット、企業立地と土地所有者の行動は多項ロジットとして定式化する

3. 交通立地統合均衡モデルの定式化

(1) 従業者行動

従業者の行動は、勤務地選択、居住地選択、経路選択の3つの選択によって構成され、図1に示すようなNested LOGIT型モデルによって表現されるとする。

経路の選択は、経路の所要時間によって以下の式のように表現する。これは、従業者は経路の所要時間が小さい経路を選択するというを表わしている。

$$f_k^{ij} = q_{ij} \frac{e^{-a_k c_k^{ij}}}{\sum_{k \in K} e^{-a_k c_k^{ij}}} \quad (1)$$

次に、居住地の選択であるが、居住地の選択は地代と居住地と勤務地とのゾーン間の期待最小コストによって決まるとする。これは、地代が小さく、期待最小コストが小さい居住地を選択するというを表わしている。

$$q_{ij} = y_i \frac{e^{-\theta_2(r_i + \sigma_{ij})}}{\sum_{j \in J} e^{-\theta_2(r_i + \sigma_{ij})}} \quad (2)$$

勤務地の選択確率は、以下の式によって与えられるとする。

$$y_i = n \frac{e^{-\theta_3(\sigma_i - W_j)}}{\sum_{i \in I} e^{-\theta_3(\sigma_i - W_j)}} \quad (3)$$

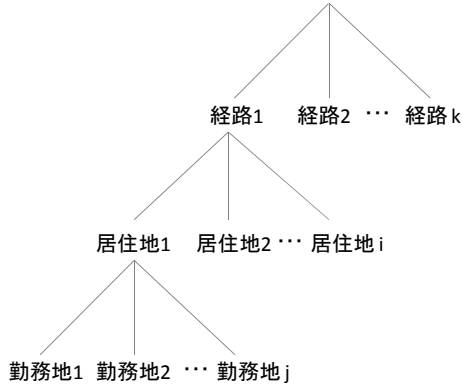


図1. 従業者の選択行動

ここで、 f_k^{ij} : ゾーン i からゾーン j への経路 k の交通量、 q_{ij} : OD_{ij} の交通量、 y_i : ゾーン i の従業者数、 σ_i, σ_{ij} : 期待最小コスト、 r_i : 地代、 W_j : 賃金率、 c_k^{ij} : ij 間の旅行時間、 n : 全世帯数、 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$: ロジットパラメータである。

(2) 企業行動

企業の仮定として、立地のみを考慮するとし、対象圏内の居住者のみが労働力になるとする。そして、企業の利潤最大化行動のもと、以下のように定式化する。

$$Y_i = N \frac{e^{\kappa \Pi_i}}{\sum_{i \in I} e^{\kappa \Pi_i}} = N \frac{e^{\kappa(pz_i - \beta W_i - \gamma R_i)}}{\sum_{i \in I} e^{\kappa(pz_i - \beta W_i - \gamma R_i)}} \quad (4)$$

ここで、 Y_i : ゾーン i の企業数、 N : 全企業数、ゾーン i の企業利潤 $\Pi_i = pz_i - \beta W_i - \gamma R_i$ 、 κ : ロジットパラメータである。ただし、 β : 1つの企業に必要な従業者数、 γ : 1つの企業に必要な土地面積、 z_i : ゾーン i 内企業の生産量である。

(3) 土地所有者の行動

土地所有者が居住地、業務地、その他の土地にそれぞれどのように配分するかを表わす式を以下のように定式化する。

$$l_i = \frac{e^{\mu l_i}}{e^{\mu l_i} + e^{\mu R_i} + e^{\mu \rho_i}} \quad (5)$$

$$L_i = \frac{e^{\mu R_i}}{e^{\mu l_i} + e^{\mu R_i} + e^{\mu \rho_i}} \quad (6)$$

$$m_i = \frac{e^{\mu \rho_i}}{e^{\mu l_i} + e^{\mu R_i} + e^{\mu \rho_i}} \quad (7)$$

ここで、 D_i : 全面積、 l_i : ゾーン i の居住地面積、 L_i : ゾーン i の業務商業地面積、 m_i : ゾーン i のその他の面積である。ただし、面積の単位として、1つの世帯が必要な土地面積を1単位として考える。

(4) 等価最適化問題

以下のような等価最適化問題として定式化することが可能である。

$$\begin{aligned} \min S = & \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega + \frac{1}{\theta_1} \sum_{k \in K} f_k^{ij} \ln \frac{f_k^{ij}}{q_{ij}} + \frac{1}{\theta_2} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} q_{ij} \ln \frac{q_{ij}}{y_i} \\ & + \frac{1}{\theta_3} \sum_{i \in I} y_i \ln \frac{y_i}{n} - p \sum_{i \in I} Y_i z_i + \frac{1}{\kappa} \sum_{i \in I} Y_i \ln \frac{Y_i}{N} \\ & + \frac{1}{\mu} \sum_{i \in I} \left(l_i \ln \frac{l_i}{D_i} + L_i \ln \frac{L_i}{D_i} + m_i \ln \frac{m_i}{D_i} \right) - \rho_i m_i \end{aligned} \quad (8)$$

s.t.

$$q_{ij} = \sum_{k \in K} f_k^{ij} \quad \forall i, \forall j \quad (9)$$

$$y_i = \sum_{j \in J} q_{ij} \quad \forall i \quad (10)$$

$$n = \sum_{i \in I} y_i \quad (11)$$

$$N = \sum_{i \in I} Y_i \quad (12)$$

$$\beta Y_i = y_i \quad \forall i \quad (13)$$

$$D_i = l_i + L_i + m_i \quad \forall i \quad (14)$$

$$\sum_{i \in I} q_{ij} = l_i \quad \forall j \quad (15)$$

$$\gamma Y_i = L_i \quad \forall i \quad (16)$$

式(9)は経路交通量の和がOD交通量となる制約、式(10)は居住人口(居住ゾーンの従業者数)に関する制約、式(11)はゾーンの従業者の和についての制約である。式(12)は全企業数は一定という制約である。式(13)は各ゾーンの従業者数と企業が必要とする労働者数は一致するという労働均衡を意味する制約式である。式(14)は各ゾーンの土地利用は居住・企業・その他のいずれかになることを意味している。式(15)と(16)はそれぞれ居住地・企業用地の土地均衡を意味する制約である。

4. モデル特性

式(8)の目的関数 z を用いて、以下のようなラグランジェ関数を定義する：

$$\begin{aligned}
L = & S + \sigma_{ij} \left(q_{ij} - \sum_k f_k^{ij} \right) + \sum_i \sigma_i \left(y_i - \sum_j q_{ij} \right) + \sigma \left(n - \sum_i y_i \right) \\
& + W \left(N - \sum_i Y_i \right) + \sum_i \mu_i (D_i - l_i - L_i - m_i) \\
& + \sum_j W_j \left(\beta Y_j - \sum_i q_{ij} \right) + \sum_i \{ r_i (y_i - l_i) + R_i (y Y_i - L_i) \}
\end{aligned} \tag{17}$$

ここで、 σ , σ_i , σ_{ij} , r_i , R_i , W_i , W , μ_i はラグランジェ係数である。式(1)~(7)から分かるように、通勤の期待最小コスト σ_{ij} 、住宅地の地価 r_i 、業務商業地の地価 R_i 、賃金 W_i はラグランジェ係数として、内生的に与えられる。

ここで、最適化問題の解の性質について考えてみよう。式(8)の目的関数は以下のように変形することができる：

$$\begin{aligned}
S = & \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega + \frac{1}{\theta_1} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} f_k^{ij} \ln f_k^{ij} \\
& + \left(\frac{1}{\theta_2} - \frac{1}{\theta_1} \right) \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} q_{ij} \ln q_{ij} + \left(\frac{1}{\theta_3} - \frac{1}{\theta_2} \right) \sum_{i \in I} y_i \ln y_i \\
& - p \sum_{i \in I} Y_i z_i + \frac{1}{\kappa} \sum_{i \in I} Y_i \ln \frac{Y_i}{N} \\
& + \frac{1}{\mu} \sum_{i \in I} \left(l_i \ln \frac{l_i}{D_i} + L_i \ln \frac{L_i}{D_i} + m_i \ln \frac{m_i}{D_i} \right) - \rho_i m_i
\end{aligned} \tag{18}$$

式(18)としての目的関数 S は、 $\theta_1 > \theta_2 > \theta_3$ であるならば、それぞれ線形もしくは凸関数の項により構成されているため、凸関数である。また、式(9)~(16)の制約は線形であり、制約も凸である。よって、最適化問題の解は一意的である。なお、 $\theta_1 > \theta_2 > \theta_3$ という関係は図1に示したネステッド構造が成立するために必要な条件となっている。

解の一意性に関しては、上記の最適化問題についてである。交通ネットワーク均衡では混雑が主要なテーマとなっており、凸な目的関数を構成しやすく、解が一意的になりやすい。しかし、立地に関しては、規模の経済等が卓越すると、凸な目的関数を作ることが難しくなると考えられる。

この最適化問題は、通常最適化アルゴリズムにより、計算可能である。交通均衡モデルの観点からは、ネステッド・ロジットによる統合均衡モデルとほぼ同じ形式であるため、統合交通均衡モデルの計算アルゴリズムを利用することができる。

5. 数値計算例

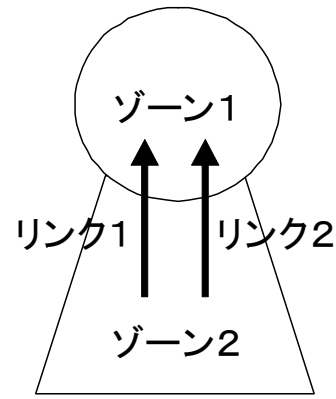


図2 数値計算例の地域・ネットワーク

構築した交通・立地統合均衡モデルの計算例を示す。経路選択と立地選択が存在するもっとも単純な設定を採用する。対象地域は2つのゾーンにより、構成されるとする。従業者数、つまり、全世帯数（各世帯の労働者は1名の身と仮定）は20.0千人、全企業数は1.0千企業とする。図2の通り、ゾーンは2つである。ゾーン1はCBDで、ゾーン2は郊外地を想定している。ゾーン1は10km²で、ゾーン2は20km²とする。

既に述べたように、従業者の行動は、勤務地ゾーン選択、居住地ゾーン選択、経路選択の3つである。また、2節で述べたように、1日の交通のうち、通勤交通が卓越しており、交通コストとしては、通勤時の交通コストを居住地選択に考慮するとする。居住地としては、ゾーン1かゾーン2かいずれかを選択することになる。郊外からCBDへのゾーン2からゾーン1の間に2つのリンクを利用可能である。また、各ゾーン内は細街路がある。ただし、ゾーン内のリンクは図2に記載していない、ゾーン2からゾーン1へのリンク旅行時間はBPR関数により与えられ、ゾーン内での移動は一定値とする。リンク1の旅行時間関数は

$$t_1 = 10 + \frac{x_1}{10} \tag{19}$$

であり、リンク2の旅行時間関数は

$$t_2 = 20 + \frac{x_2}{80} \tag{20}$$

とする。ここで、 x_1 と x_2 はそれぞれリンク1とリンク2の交通量、 t_1 と t_2 はそれぞれリンク1とリンク2の旅行時間である。また、ゾーン1に居住し、ゾーン1内企業に勤務する場合の通勤時間は15分とし、ゾーン2に居住し、ゾーン3内の企業に通勤する場合の通勤時間は30分とする。郊外地のゾーン2に居住し、CBDのゾーン1へ通勤することはできるが、逆のゾーン1に居住し、ゾーン2内企業に通勤することはないと仮定する。したがって、経路選択が存在するのは、ゾーン2からゾーン1へ勤務する場合のみであり、その場合リンク1か

リンク2かのいずれかを選択することになる。

企業はゾーン1に立地するのか、ゾーン2に立地するのかの選択を行う。企業には多種多様な業種があり、その業種内にも多数のタイプの企業が存在するものの、単純化のため、企業は同質であるとする。また、失業率等も考えず、全員が働くことができ、それにより、企業の労働需要を満たすものとする。したがって、全従業者数は20.0千人で、全企業数は1千であるため、1企業が必要な従業者数 $\beta = 20$ となる。

土地に関しては、単純のため、従業者のための居住地と企業のための業務商業用地の2種類のみとする。また、単純化のため、各世帯が必要な土地は一定とし、1千世帯当たりに必要な土地面積は1.0km²とする。各企業が必要な土地も一定とする。その他の土地利用はないため、自動的に1千の企業がに必要な土地面積は10.0km²となる。

外生的に与えるものとしては、 $p = 10.0$, $z_1 = 2.0$, $z_2 = 1.0$, $\theta_1 = 0.1$, $\theta_2 = 0.08$, $\theta_3 = 0.05$, $\kappa = 0.03$, $\mu = 0.1$ とした。ゾーン1はCBDであるため、ゾーン1に立地の企業の生産効率（生産能力）はゾーン2の2倍とした。

上記の設定で、3.（4）節での述べた最適化問題を解くが、最適化問題の決定変数は f, q, y, Y, l, L である。しかし、式(9)~(16)の制約によって、変数を減らすことができ、結局2つの変数のみの最適化問題まで単純化することができる。ここでは、ゾーン2に居住し、ゾーン1へ通勤する従業者数 q_{12} とそのうちリンク2を選択する経路交通量 f_2^{12} の2つの変数のみの最適化問題を解くことにする。他の変数は、制約式により、この2つの変数から自動的に計算される。

最適化問題を解くことによって、 $q_{12} = 8.72$, $f_2^{12} = 3.49$ となった。目的関数の形状は図3の通りである。図3からこの数値計算例の設定では明らかに目的関数は凸であることが確認できる。その他の変数の計算結果としては、表1のようにまとめた。郊外地であるゾーン2の居住者数（居住世帯数）がゾーン1に比べて圧倒的に大きい。逆に企業数はCBDであるゾーン1の方が多くなっている。

前節で述べたように、各ゾーンの賃金や地価は内生的に与えられる。その結果は表2の通りである。ロジットモデル（もしくはラグランジェ係数）によって賃金や地価は与えられるため、一意には決まらない。ロジットで与えられるため、各ゾーンの賃金の差が問題となるため、差が同じであることは必要であるが、各ゾーンの賃金は一意に決まらない。ただし、いずれかのゾーン賃金を決めると、賃金差は規定されているため、もう一方のゾーン賃金は決めることができる。ここでは、ゾーン1の賃金を20とした。CBDであるゾーン1の地価の方が住宅

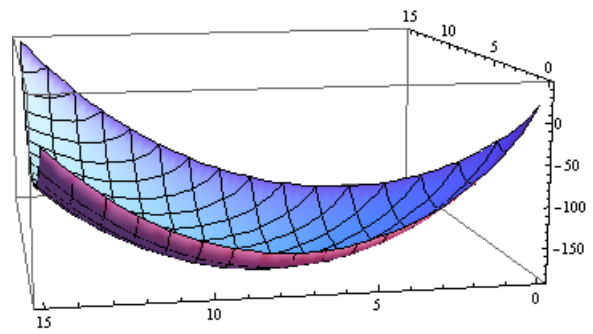


図3 数値計算例での目的関数の形状

表1 各ゾーンの世帯数と企業数

	居住世帯数	企業数
ゾーン1	3.76	0.624
ゾーン2	16.24	0.375
合計	20	1

単位は千人もしくは千企業

表2 各ゾーンの賃金と地価

	賃金	住宅地価	業務地価
ゾーン1	20	29.9	35.1
ゾーン2	33.4	23.5	8.9

地及び業務地ともにゾーン2よりも高くなった。しかし、賃金に関しては、ゾーン2の方が高くなった。これは、ゾーン2に立地する企業が少ない一方、ゾーン2の居住者数は多いことによると考えられる。

以上のように、実質2変数で計算可能なきわめて単純な問題設定であるが、交通・立地統合均衡モデルの計算を行うとともに、そのモデルに検証を行うことができた。今後、金沢都市圏にモデルの適用を行う予定である。

参考文献

- 1) Anas, A.: The combined equilibrium of travel networks and residential location markets, Regional Science and Urban Economics, Vol. 15, pp. 1-21, 1985.
- 2) 赤松隆, 半田正樹: 「Nested LOGIT型交通・住居立地統合均衡モデルとその効率的解法」, 土木計画学研究・論文集, Vol. 13, pp. 279-287, 1996.