交通立地統合均衡モデルのパラメータ推定：金沢市への LRT 導入影響分析を例に

土木学会論文集D3（土木計画学), Vol.78, No.5（土木計画学研究・論文集第40巻), I_459-I_467, 2023.

交通立地統合均衡モデルのパラメータ推定：金沢市へのLRT導入影響分析を例に

中山　晶一朗[1]・磯貝　優太[2]・山口　裕通[3]

[1]正会員　金沢大学教授　融合研究域融合科学系（〒920-1192 金沢市角間町無番地）
E-mail: nakayama@staff.kanazawa-u.ac.jp (Corresponding Author)

[2]学生会員　金沢大学大学院　自然科学研究科環境デザイン学専攻（〒920-1192 金沢市角間町無番地）
E-mail: isoyou@stu.kanazawa-u.ac.jp

[3]正会員　金沢大学助教　理工研究域地球社会基盤学系（〒920-1192 金沢市角間町無番地）
E-mail: hyamaguchi@se.kanazawa-u.ac.jp

LRT（次世代型路面電車）など新しい公共交通システムを都市内に導入することは交通や立地へ様々な影響を及ぼす．本研究では，金沢市へLRTを導入することによる交通や立地への影響について分析することが可能な交通立地統合均衡モデルのパラメータ推定法を提案する．そして，金沢市を対象としたパラメータ推定を行い，それによって，金沢市の中心市街地にLRTを導入することの影響がどのようなものになるのかなどが分析可能であるのかなどについての検討を行う．

Key Words: *unified transportation and landuse equilibrium model, LRT, parameter estimation*

1. はじめに

新交通システムを導入すると，都市圏内の人々の交通行動が変化しうる．所要時間の短縮やその信頼性等の新交通システムの特性により，交通行動のみならず，人々の居住地選択や企業立地等にも影響を及ぼすことが考えられる．都市間鉄道などとは異なり，新交通システムの導入の影響範囲は都市圏内など比較的狭く，既往研究においては，所要時間等も含めた交通費用の減少や交通混雑の解消などの直接的な効果を中心に評価されることが多かった．しかし，都市間鉄道などと比べて比較的狭い範囲ではあるものの，新交通システム沿線を中心として交通利便性が向上することなどによる企業の立地数の増加や雇用の創出，居住人口の増加といった間接的な効果を定量的に扱うことも既に述べたように重要である．

本研究では，新交通システムに着目するが，その直接効果は所要時間短縮などであるため，そのような直接効果を取り扱うことが必須となる．それに加えて，立地への影響など間接効果を定量的に扱うことが重要となる．そこで，著者らが開発した交通ネットワーク均衡モデルを基本にしてそれが立地も取り扱うことができるように拡張した交通立地統合均衡モデル[1)]を用いる．本研究では，その交通立地統合均衡モデルのパラメータ推定について，最小二乗法を用いた実用的な手法を提案し，金沢市を対象に実際にパラメータ推定を行う．そして，新しい公共交通システムとしてLRT（次世代型路面電車）を取り上げ，パラメータ推定した交通立地統合均衡モデルが金沢市にLRTを導入する事業の影響分析を行うことができるのかどうかなどの検討を行う．

2. 交通立地統合均衡モデルのパラメータ推定

これまでに交通ネットワーク均衡（交通均衡）と立地を一つの理論フレームワーク内で取り扱ったモデルとして，Anas[2)]をはじめとして様々なものがあり，それらについては，上田・堤[3)]などによって整理されている．宮城ら[4)]は交通均衡とローリー型土地利用モデルとを統合した数理最適化問題を定式化しており，宮城・澤田[5)]は交通均衡と立地均衡を非線形連立方程式としてシミュレーション的に解いている．応用都市経済モデル[6),7)]を交通均衡も扱えるように拡張してシミュレーション的に解く研究として武藤ら[8)]がある．ChangとMackett[9)]は確率付値（random bid-rent）による統合モデルを開発している．

Briceno ら [10]，Bravo ら [11]，Ma と Lo[12]も同様に付値による土地利用を交通均衡へ統合している．

赤松・半田 [13]は居住地選択と経路選択をネスティッドロジットモデルとして組み込んだ交通立地統合均衡モデルを提案している．Anderstig と Mattsson[14]は交通費用が固定の場合の居住地・勤務地選択の統合モデルを提案し，Boyce と Mattsson[15]はその交通費用を内生化している．

本研究は，LRT 導入によって自動車走行車線の減少による自動車交通への影響（交通環境・所要時間等の変化）及びそれらなどによる居住・企業立地の変化などを考慮して，LRT の導入の効果分析を実際の都市圏で行うことができるようになることを目指している．高速道路や幹線鉄道の整備とは異なり，LRT 導入が及ぼす影響は都市圏内のみであり，本研究では，交通・土地・労働のみを扱い，その他の財については考慮しない（その他の財の価格などの変化がなく，その他の財の影響を考える必要がないことを前提とする）．交通・土地・労働以外の財を扱わない（合成財・ニューメレール財も扱わない）という意味で，一般的な応用都市経済モデルよりも簡便なモデルとも言うことができる．繰り返しになるが，都市圏内の影響のみを考えれば十分な LRT の導入効果分析としては，応用都市経済モデルよりも簡便な交通立地統合均衡モデルで十分であると考えるのが本研究の立場である．上述の通り，本研究では，LRT 導入による自動車走行車線の減少による自動車交通への影響を考慮することが必要で，それには所要時間を内生的に扱う必要がある．交通費用を内生的に扱った交通立地統合均衡モデルとしては上述の Boyce と Mattsson[15]があり，そこでは（確定的）利用者均衡（経路選択としては最小費用経路の選択）下で居住・勤務地選択を単一の多項ロジットモデルで表現しているが，著者らが開発した交通立地統合均衡モデル [1]では確率利用者均衡（ロジットモデルによる経路選択）で経路選択・居住地選択・勤務地選択をネスティッドロジットモデルで表現しており，この著者らのモデル [1]は Boyce と Mattsson[15]を特殊形として含むもので，より一般的で柔軟性が高く，それゆえにパラメータ推定による現実世界への適合性が高いと考えられる．そのため，本研究では，著者らが開発した交通立地統合均衡モデル [1]を用いる．

以上のように，著者らの交通立地統合均衡モデルは LRT 導入など都市圏内のみで考えれば十分な交通政策等の影響評価に有用であるが，それを現実都市圏へ適用するためにはパラメータ推定が必要で，それを提案するとともに，金沢市へ LRT を導入することの影響評価を行うことが本研究の目的である．

(1) 仮定条件

本研究で用いる交通立地統合均衡モデルでは，次のような仮定を設ける．

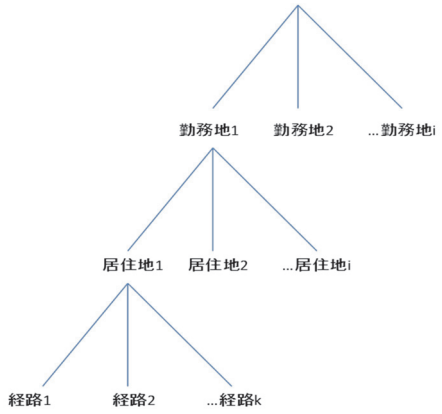


図-1 従業者の選択行動

1) 一日のうちでは通勤交通が卓越しており，通勤交通のみを考慮する
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つを考える
4) 単純化のため，企業は1種類のみとする
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行動のみとし，上述の通り，企業は代表的な1種類として，企業が必要な総従業者数や総土地面積は一定とする
6) 単純化のため，土地は，居住用・企業用の2種類のみを考える
7) 従業者の3つの選択はネスティッドロジット，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

(2) 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** に示すようなネスト構造を持つネスティッドロジットモデルによって表現する．なお，推定されたパラメータの大小によっては**図-1** と異なったネスト構造（階層構造）を持つこともあり得る．

経路選択は，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傾向があるということを表す．

$$f_k^{ij} = q_{ij} \frac{e^{-\theta_1 c_k^{ij}}}{\sum_{k \in K^{ij}} e^{-\theta_1 c_k^{ij}}} \tag{1}$$

なお，f_k^{ij} はゾーンiからゾーンjへの経路kの交通量，q_{ij} はゾーンiからゾーンjへの OD 交通量，c_k^{ij} はゾーンiからゾーンjへの所要時間，θ_1 はロジットパラメータ，K^{ij} はゾーンiからゾーンjへの経路集合である．

次に，居住地選択であるが，居住地の選択では，地代と居住地・勤務地とのゾーン間の（経路選択での所要時間についての）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傾向があるということを表わしている．

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

ここで，y_iはゾーン i で働く従業者数，σ_{ij} は（下位のネストからの）期待最小コスト，r_iはゾーン i の居住地代，θ_2 はロジットパラメータ，Iはゾーン集合である．

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．

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

ここで，σ_i は（下位のネストからの）期待最小コスト，W_i はゾーンiの賃金，nは全世帯数（全従業者数），θ_3 はロジットパラメータである．

(3) 企業行動

企業の行動としては立地のみを考慮するものとし，対象都市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．

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

ここで，Y_i はゾーンiの企業数，Nは全企業数，ゾーンiの企業利潤 $\Pi_i = pz_i - \beta W_i - \gamma R_i$，$R_i$ はゾーンiの企業が立地するための地代，κはロジットパラメータ，βは1つの企業が必要な従業者数，γは1つの企業が必要な土地面積，z_iはゾーンi内の企業の生産量，pは生産量1単位当たりの（販売）価格である．

(4) 土地所有者の行動

土地が居住地，（企業の）業務地のいずれに配分されるかについては以下のように定式化する．

$$l_i = D_i \frac{e^{\mu r_i}}{e^{\mu r_i} + e^{\mu R_i}} \tag{5}$$

$$L_i = D_i \frac{e^{\mu R_{ii}}}{e^{\mu r_i} + e^{\mu R_i}} \tag{6}$$

なお，D_iはゾーンiの全面積，l_iはゾーンiの居住地面積，L_iはゾーンiの業務地面積，μはロジットパラメータである．ただし，1 人の従業者が必要な土地面積を 1 単位として考える．なお，上記の 2 つに加えて，その他の土地利用を追加し，3 つの選択肢のロジットモデルへ拡張することは数理的には容易である．

(5) 均衡条件と内生変数

本研究では交通均衡と土地均衡及びそれに伴った労働均衡を扱っている．交通均衡は，式(1)で表した通り，OD 交通量q_{ij} が所要時間（内生変数）に依存して決まる多項ロジットの選択確率 $e^{-\theta_1 c_k^{ij}} \Big/ \sum_k e^{-\theta_1 c_k^{ij}}$ によって配分される確率的利用者均衡である．

交通均衡と同様に，土地均衡も式(5)と(6)から所与の土地面積 D_i を内生的に決まる居住地代 r_i と業務地代 R_i による多項ロジット選択確率で配分される．このように土地均衡は確率的利用者均衡と同じロジット型である．

交通均衡と土地均衡と整合を合わせる形で，各ゾーンで働く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も成立する．これに伴い，賃金 W_i は内生変数となる．労働均衡のために，各ゾーンの企業数が決まればそのゾーンの労働者数も連動して決まるものの，どのゾーンの居住者がそのゾーンで働くのかという観点での勤務地選択は必要となる．

式(1)～(6)で外生的に与えるのは，$\theta_1, \theta_2, \theta_3, \kappa, \mu$のパラメータで企業生産量 z_i と企業生産物価格pも外生的に与える．これらの与え方は後述の通りである．そして，n, N, β, γも所与であり，式(1)～(6)での上記以外の変数は全て内生変数である．ログサム変数 σ_1, σ_2 も一般的なネスティッドロジットモデルと同様に内生変数である．

(6) 等価最適化問題

以上で述べた行動のネスティッドロジットモデルもしくは多項ロジットモデルが成立する交通立地統合均衡モデルは，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 [1]．

$$\begin{aligned}\min S = &\sum_{a\in A}\int_0^{x_a} t_a(\omega)\,d\omega + \frac{1}{\theta_1}\sum_{i\in I}\sum_{j\in I}\sum_{k\in K^{ij}} f_k^{ij}\ln\frac{f_k^{ij}}{q_{ij}} \\ &+ \frac{1}{\theta_2}\sum_{i\in I}\sum_{j\in I} q_{ij}\ln\frac{q_{ij}}{y_i} + \frac{1}{\theta_3}\sum_{i\in I} y_i \ln\frac{y_i}{n} - p\sum_{i\in I} Y_i z_i \\ &+ \frac{1}{\kappa}\sum_{i\in I} Y_i \ln\frac{Y_i}{N} + \frac{1}{\mu}\sum_{i\in I}\left(l_i\ln\frac{l_i}{D_i} + L_i\ln\frac{L_i}{D_i}\right)\end{aligned} \tag{7}$$

s.t.

$$q_{ij} = \sum_{k\in K^{ij}} f_k^{ij} \quad \forall i\in I, \forall j\in I \tag{8}$$

$$y_i = \sum_{j\in I} q_{ij} \quad \forall i\in I \tag{9}$$

$$n = \sum_{i\in I} y_i \tag{10}$$

$$N = \sum_{i\in I} Y_i \tag{11}$$

$$\beta Y_i = y_i \quad \forall i\in I \tag{12}$$

$$D_i = l_i + L_i \quad \forall i\in I \tag{13}$$

$$\sum_{j\in I} q_{ij} = l_i \quad \forall i \in I \tag{14}$$

$$\gamma Y_i = L_i \quad \forall i \in I \tag{15}$$

ここで，x_aはリンクaの交通量（経路交通量の和として計算される），$t_a(\cdot)$はリンクの所要時間関数，Aはリンク集合である．式(8)は経路交通量の和がOD交通量となる制約でこの制約に対するラグランジュ係数がσ_{ij}，式(9)は居住人口（ゾーンに居住する従業者数）に関する制約でこれについてのラグランジュ係数がσ_i，式(10)は従業者の総和についての制約（全人口は一定），式(11)は全企業数は一定という制約である．式(12)は各ゾーンで働く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これについてのラグランジュ係数が賃金W_i，式(13)は各ゾーンの土地利用は居住地・企業業務地のいずれかになることを意味している．式(14)と(15)はそれぞれ居住地・業務地の土地利用と居住者数・従業者数との関係の整合性をとるための制約でこれらについてのラグランジュ係数がそれぞれ居住地代r_iと業務地代R_iである．

式(12)を式(10)に代入し，それを式(11)で割ると，$n = \beta N$ となる．よって，

$$\beta = \frac{n}{N} \tag{16}$$

となる．つまり，1つの企業が必要な従業者数βは全従業者数を全企業数で割ったものでなければならず，圏域内で労働需給が均衡するために必要な条件である．また，同様に，土地の需給が均衡するために，

$$\gamma = \frac{\sum_{i\in I}(D_i - y_i)}{N} = \frac{\sum_{i\in I}(D_i - l_i)}{N} \tag{17}$$

とする必要がある．なお，上述の通り，1従業者当たりの居住面積を土地面積の1単位と換算しており，$l_i = y_i$が成立している．

(7) パラメータ推定方法

上述のモデルを適用するために，地域やネットワークに合わせてパラメータを推計する必要がある．本研究では，最小二乗法を用いることとし，上記の(6)「等価最適化問題」で定式化した均衡制約下で以下の二乗誤差としての目的関数を最小にすることによってパラメータ推定を行う．

$$\begin{aligned}\min_{\mathbf{u}}.\ |I|^2 \sum_{i\in I}\left(\frac{q_{ij}}{\sum_{j\in J} q_{ij}} - \frac{\tilde{q}_{ij}}{\sum_{j\in J}\tilde{q}_{ij}}\right)^2 + |I|\sum_{i\in I}\left(\frac{y_i}{\sum_{i\in I} y_i} - \frac{\tilde{y}_i}{\sum_{i\in I}\tilde{y}_i}\right)^2 \\ + |I|\sum_{i\in I}\left(\frac{l_i}{\sum_{i\in I} l_i} - \frac{\tilde{l}_i}{\sum_{i\in I}\tilde{l}_i}\right)^2 + 2\sum_{i\in I}\left(\frac{y_i}{y_i + l_i} - \frac{\tilde{y}_i}{\tilde{y}_i + \tilde{l}_i}\right)^2\end{aligned} \tag{18}$$

ここで，$\mathbf{u} = (\theta_1, \theta_2, \theta_3, \kappa, \mu, z_2, \cdots, z_{|I|})$はパラメータベクトルで，$\tilde{q}_{ij}, \tilde{y}_i, \tilde{l}_i$はそれぞれ$q_{ij}, y_i, l_i$の実測値，$|I|$は対象圏内のゾーン数である．上の式の目的関数の4つの項はそれぞれOD交通量の構成割合の誤差，各ゾーンで働く従業者数のゾーンごとの構成割合の誤差，（居住面積は1従業者当たり1単位であるため）各ゾーンに居住する従業者数（世帯数）のゾーンごとの構成割合の誤差，土地配分の誤差である．ゾーン内の企業の生産量z_iは実測して外生的に与えることが難しいため，パラメータとして推定するが，ロジットモデル内では，z_iは定数項と同じ働きとなるため，そのうちの1つのz_1を固定し，$z_2, \cdots, z_{|I|}$を推定する．また，式(4)にはpz_iが含まれており，pもしくはz_iを固定しなければ不定となるため，pを固定する．

対象圏域内のゾーン数$|I|$が多い場合，式(18)の目的関数内の4つの項について，その括弧内の数値にかなり大きな違いが出ると考えられるため，単純な誤差にゾーン数などを乗じている．パーソントリップ調査等でOD交通量の実測値$\tilde{q}_{ij}$が得られていることを想定しているが，得られない場合の目的関数は式(18)の最後の3つの項のみとすることなどになるであろう．

3. 金沢市への適用設定とパラメータ推定

(1) 適用対象地域とネットワーク

本研究が対象とする金沢市のゾーン区分は**図-2**の通りである．金沢市は国勢統計区としては30に分割されているが，計算負荷を減らしつつ，LRT導入が金沢市に及ぼす交通体系や都市構造への影響を明瞭化するため，30の統計区のうち，山間部の統計区を除いた28個の統計区について，位置関係を基に，**図-2**のように，6ゾーンに整理した．以降では，整理した6ゾーンについて，ゾーン1,2を市街地，ゾーン3,4,5,6を郊外と呼称する．

また，仮定条件として既に述べた通り，計算の簡略化のため，土地利用について，居住地と業務地以外を考慮していない．そこで，整合性を確保するために，モデルで扱う面積は，実面積ではなく，第三回金沢都市圏PT（パーソントリップ）調査の発生・集中・分布交通量を

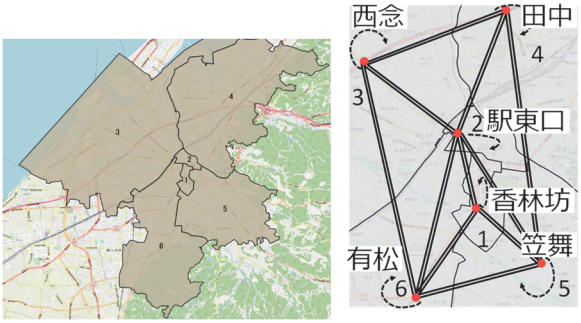


図-2　適用対象ゾーンとネットワーク

用いて相対的に算出したものを使うこととする．午前 6 時から午前 10 時までの PT 調査での OD 交通量を，ゾーン間の従業者の OD 交通量（以下，実測 OD 交通量）とみなす．また，午前 6 時から午前 10 時までの PT 調査での各ゾーンから発生する交通量の合計を，そのゾーンに居住する従業者の人口（以下，実測居住人口）とみなす．さらに，午前 6 時から午前 10 時まで，**図-2** の各ゾーンに集中する交通量の合計を，そのゾーンに勤務する従業者の人口（以下，実測勤務人口）とみなす．なお，実測 OD 交通量，実測居住人口，実測勤務人口は，同一のデータから算定しているので，相互の整合性が保たれる．

1 従業者あたりの居住地面積および業務地面積を 1 単位と基準化する．さらに，単純化のために，1 従業者が必要な勤務地面積を 1 単位と仮定する．各ゾーンにおける実測居住人口と実測勤務人口の和をゾーン面積とする．そして，1 企業当たりの従業者数については，平成 26 年金沢市経済センサス基礎調査を参考に，金沢市の従業者数 134,479 を事業所数 28,273 で除した値 9.5 を採用する．

交通ネットワークのノード数，リンク数が多すぎると計算負荷の関係上，計算にかなりの時間を要することになる．そこで，ノード及びリンクについては以下のような集約・簡略化を行う．まずノードに関しては，ゾーンの人口分布中心に近く，かつ，主要交差点に位置するノードを各ゾーンにつき 1 点，セントロイドとして設ける．次に，リンクに関しては，隣接するゾーンにおいて，セントロイド間を一つのリンクで結ぶ．ここで，計算に使用する金沢市の交通ネットワークを**図-2** の右図に示す．また，所要時間関数 $t_a(\cdot)$ としては BPR 関数を用いるが，Google Maps のルート探索機能を使用し，午前 3 時におけるセントロイド間の最短経路所要時間をリンクの自由走行時間とし，午前 8 時におけるセントロイド間の最短経路所要時間をゾーン間のリンク所要時間として所要時間関数の交通容量等を設定した．一方，ゾーン内々の所要時間に関しては，実際のデータを参考にして集計することが困難であるため，ゾーン間の所要時間のうち最小のものと同一であると仮定し，4.5 分（定数）とする．

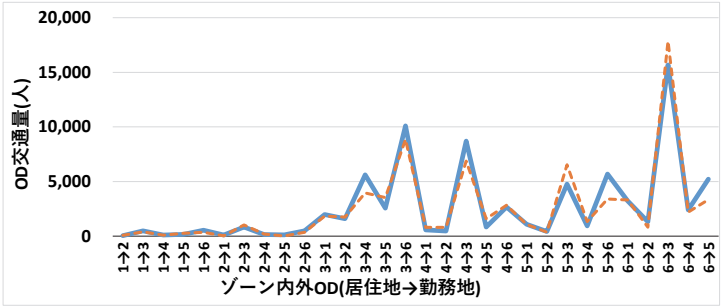
表-1　推定されたパラメータ

パラメータ	初期値	推定値
θ_1	0.90	0.112
θ_2	0.60	0.048
θ_3	0.30	0.019
κ	0.50	0.014
μ	0.50	0.676
p（固定）	1.00	1.000
z_1（固定）	0.00	0.000
z_2	0.00	–392.1
z_3	0.00	468.5
z_4	0.00	–307.5
z_5	0.00	–348.9
z_6	0.00	150.3

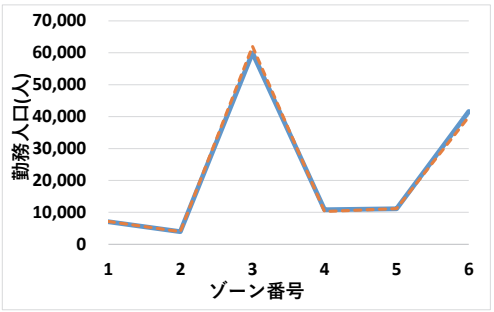
ゾーン間の経路としては，各 OD にて 3 つの経路，ゾーン内々経路については各々1 つの経路を与える．このとき，ゾーン間 OD に対する経路としては，ダイクストラ法によってセントロイド間の経路所要時間が最小となるようなリンク構成の経路（第一最小所要時間経路），第一最小所要時間経路を除いてダイクストラ法を行うことで得た第二最小所要時間経路，さらにそれらを除いてダイクストラ法を行うことで得た第三最小所要時間経路の 3 つとした．

(2)　パラメータ推定

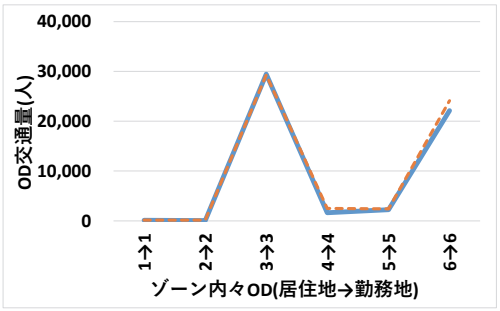
前章の(7)「パラメータ推定方法」で述べたように，最小二乗法でパラメータを推定する．最小化問題を解くための方法には様々なものがあるが，本稿では，ソルバーとして，MATLAB で展開されている，1 変数関数の最小値を求める関数fminbnd と多変数の制約付き最小化問題を解く関数 fmincon を使用した．$\theta_1, \theta_2, \theta_3, \kappa, \mu, z_2, \cdots, z_6$ の 10 個の推定パラメータを所与としたときの，均衡制約計算である式(7)-(15)の等価最適化問題は fmincon 関数を適用して算出していく．そして，式(18)で示した目的関数を最小化するために，10 個の推定パラメータを更新していく．ここでは，1 つのパラメータごとに，最小二乗誤差が最小となるパラメータ値を求め，そのパラメータの値を更新する．そして，次のパラメータも同様に行うという更新を繰り返していく．そして，$\theta_1, \theta_2, \theta_3, \kappa, \mu, z_2, \cdots, z_6$ の 10 個の推定パラメータについて一通り更新し，収束条件を満たしていなければ，さらにパラメータの更新を行った．これらを収束条件を満たすまで計算した．



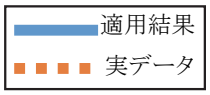
(a) ゾーン間OD交通量

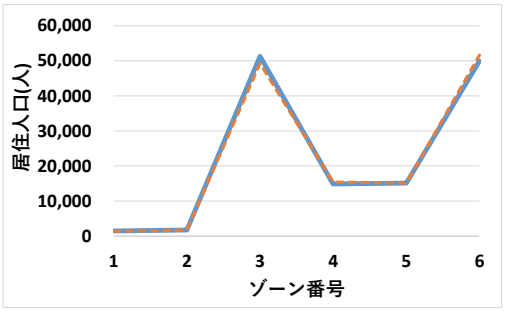


(c) 勤務人口



(b) ゾーン内々交通量





(d) 居住人口

図-3 パラメータ推定の適合結果

推定されたパラメータは**表-1**の通りである．従業者の経路・居住地・勤務地選択に関するロジットパラメータの値は $\theta_1=0.112$, $\theta_2=0.048$, $\theta_3=0.019$ であった．それぞれの関係は $\theta_1>\theta_2>\theta_3$ となっており，式(7)で示した目的関数が凸関数である条件およびネスティッド構造が成立するための条件を満たしている．

図-3は実測値（実データ）と推定したパラメータを用いて計算した値（適用結果）の比較である．ゾーン間OD交通量，ゾーン内々交通量，ゾーン勤務人口，ゾーン居住人口の実測値と計算値との相関係数はそれぞれ0.977, 0.998, 0.999, 0.999 で，これらの実測値と計算値はかなり近く，現況再現性は高いと言える．

ゾーンの生産力 z_i については，ゾーン3，6がいずれもゾーン 1 と比較して高い値を示した．これより，ゾーン3，6 に立地する企業の生産力は高く，地価など他の条件が同じならば企業は優先的にゾーン 3，6 に立地する傾向があると言える．

4. 金沢市へのLRT導入影響評価

前章で述べたパラメータ推定を行った交通立地統合均衡モデルによって，金沢市へ LRT を導入することの影響分析が可能であるのかなどについてここで検討しよう．

LRT の導入に関しては，市街地のゾーン 1-2 間に敷設する設定とした（**図-4**参照）．また，モデルの簡略化のため，自動車のガソリン料金や駐車料金などの自動車所有コストは LRT の運賃と同等であるとみなし，従業者は，所要時間のみを考慮して自動車か LRT の選択を行うとする．LRT導入に伴い，LRT を含む新たな経路を設定する．交通手段が自動車のみの場合には，リンク所要時間は，BPR 関数に従うと仮定しているため，リンク交通量の増加に伴って，リンク所要時間は増加する．一方で，LRT を導入した場合，LRT 導入区間における自動車のリンク交通容量は，車線数の減少割合に応じて減少する．一方，LRTは専用軌道を走行するためLRT利用者数の影響を受けず，LRT のリンク所要時間は定数とする．LRT の所要時間については，LRT 導入区間の運行距離が 2.0km であるため，富山市の富山駅と上本町間（運行距離: 2.0km）の LRT リンクの所要時間を参考に 10 分と設定した．また，LRT 導入前の自動車のみの経路に加え，上述の通り，自動車から LRT に乗り換えることを含めた新たな経路を追加した．

LRT導入における直接効果について，LRT利用者数，LRT導入前後の自動車リンク交通量の変化，LRT導入前後の自動車リンク所要時間の変化などを考える．LRT利用者数は 2,617.7 人と，全体の従業者数 134,479 人と比較して少なくなっている．これは，市街地の面積が郊外と比較して非常に小さいため，それに伴って限られてしまうことなどに起因すると考えられる．

LRT導入区間外においては，リンク交通容量が変化しないため，LRT導入前後のリンク交通量の変化率とリンク混雑度や所要時間の変化率には明らかに正の相関が出

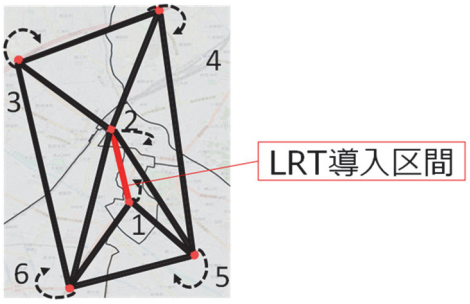


図-4　LRT 導入区間

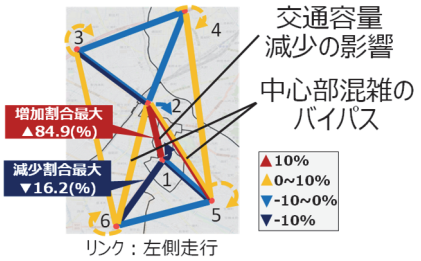


図-5　自動車旅行時間の変化（LRT 導入前後）

る．その一方で，LRT 導入区間内のリンク所要時間の変化は，自動車リンクの交通容量が減少しているため，リンク交通量の増減とリンク所要時間の増減の関係は必ずしも明らかではない．

自動車リンク交通量は，ゾーン 1→2 のリンク，ゾーン 2→1 のリンクにおいてそれぞれ 37.7%，40.8%減少し，リンク所要時間はそれぞれ 84.9%，57.9%増加した（**図-5** 参照）．リンク交通量の減少については，LRT を敷設したことにより，一定数の従業者が市街地間及び郊外から市街地への移動を自動車から LRT に移動手段を変更するとともに，迂回路に迂回したことなどが要因と考えられる．そして，リンク交通量の減少に対してリンク所要時間が増加することから，交通容量の減少は，リンク交通量の減少よりも自動車リンク所要時間に及ぼす影響が大きかったと言える．

次に，郊外と市街地間のリンク交通量の変化について，ゾーン 1-5，1-6，2-3，2-4 間のリンク交通量は 5.5%から 16.2%の範囲内で減少した．これは，市街地のリンク所要時間の増加により，ゾーン 3-5，3-6，4-5，4-6 間の移動について，市街地のリンクを回避する従業者が増加することなどを要因として挙げることができる．そして，ゾーン 2-5，2-6 間のリンク交通量は 4.2%から 10.9%の範囲内で増加する．これは，ゾーン 2-5，2-6 間のリンクが，市街地間のリンク混雑を回避するリンク（迂回路）として機能するためであるなどと考えられる．

郊外間のリンク交通量の変化について，ゾーン 3-6 間，4-5 間のリンク交通量は，0.9%から 3.0%の範囲内で増加する．これは，ゾーン 2-5，2-6 間のリンク同様，市街地間のリンク混雑を回避するリンクとして機能するためであると考えられる．また，ゾーン 3-4，5-6 間のリンク交通量が減少する．これはゾーン 1, 2 を終点とする OD 交通量が増加し，郊外間の移動量が減少するためであると推察できる．以上のように LRT 導入は，LRT 導入区間外のリンク交通量に対しても大きな影響を及ぼすと言える．

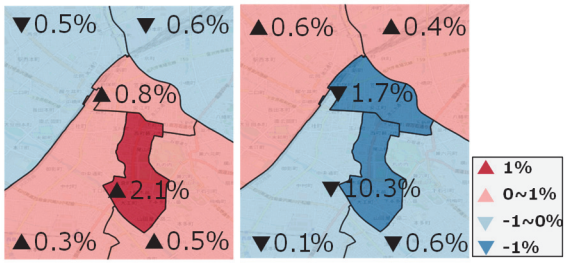


図-6　勤務・居住人口の変化

市街地間の OD 交通量はゾーン 1→2，ゾーン 2→1 において，それぞれ 2.1%，4.6%増加する．ゾーン 1→2，ゾーン 2→1 における自動車リンク所要時間はそれぞれ増加して 18.5 分，15.8 分となる一方で，ゾーン 1-2 間の LRT の所要時間は 10.0 分と一定であるため，所要時間に関しては LRT が自動車よりも優位である．そのため，市街地間の移動の LRT と自動車の両方を含めた期待最小コストとしては減少し，OD 交通量が増加したと考えられる．

次に市街地-郊外及び郊外間の OD 交通量は，ゾーン 1→3，1→4，2→5，2→6，3→5，3→6，4→5，4→6，5→3，5→4，6→3，6→4 において減少する．これら全ての OD については，各経路を構成するリンクについて，市街地間の自動車リンクを使用している．そのため，市街地間のリンク所要時間の増加に伴い，各 OD 間の期待最小コストが増加し，OD 交通量が減少する．

LRT 導入により，市街地（ゾーン 1, 2）における勤務人口が増加する（**図-6** 参照）．これは，直接効果で述べたように，終点をゾーン 1, 2 とする OD 間の期待最小コストが減少するためであると考えられる．

市街地以外のゾーンの勤務人口については，ゾーン 3, 4 の勤務人口が減少する一方で，ゾーン 5, 6 の勤務人口は増加する．ゾーン 1-2 間の市街地間の自動車リンク所要時間の増加によって，ゾーン 6→1→2 や 5→1→2 の経路交通量は減少する．そこで，先述したように，ゾーン 1-6 間，1-5 間のリンク所要時間が減少し，ゾーン 6→1→5 及び 5→1→6 の経路所要時間が小さくなる．そのため，ゾーン 5-6 間の期待最小コストが減少し，ゾーン 5, 6 における勤務人口が増加したものと考えられる．このように，LRT 導入により LRT 導入区間外においても土地利用が変化している．

5. おわりに

本研究では，公共交通のサービスレベル向上のための新交通システムとして，LRT を取り上げ，LRT 導入が交通や立地に及ぼす影響について分析可能な交通立地統合均衡モデルのパラメータ推定法を提案した．そして，それを金沢市に適用した．パラメータ推定結果としては，実測値と推定したパラメータを用いた計算値がかなり近くなったことから（少なくとも金沢への適用においては）推定法は妥当なものであることが分かった．さらに，金沢市への LRT 導入が及ぼす直接効果・間接効果を評価することが可能であるのかについても検討を行った．

本研究の今後の課題について整理する．まず本研究では，計算負荷を下げるために，金沢市を国勢統計区の区分けを参考にして 6 ゾーンに分割し，リンクについてはセントロイド間を結ぶことで簡略化した．しかし，簡略化によって，金沢市の実ネットワークにおける詳細な交通体系や都市構造の変化を求めることができず，その詳細な施策評価が十分ではない部分があった．また，現実には，バスを利用した従業者もおり，また，LRT 導入後は，自動車から LRT への乗り換えよりもバスを利用して LRT 導入区間は LRT へ乗り換えるという想定の方が適切であると考えられるため，バスなど他の公共交通機関を含めるモデルの拡張が必要である．このような拡張を行った後に LRT 導入評価結果が妥当であったのかの検証も必要である．さらに，本研究では，従業者のみの移動交通を考慮し，観光客やその他の移動交通は考慮していない．しかし，金沢市は観光都市であることから，市内の観光客移動による交通体系への影響は無視できず，それらを考慮することも今後必要である．パラメータ推定の簡略化のために，従業者の土地利用に関して，居住地と勤務地のみしか考慮していなかったので，土地利用としては，勤務地と居住地の利用転換のみしか表現できない．しかし，現実の土地利用では，農地や公共施設など，業務地・居住地以外の土地利用も存在し，LRT 導入によってそれらの土地が居住地や業務地に転換されることも十分に考えられるため，業務地・居住地以外の土地についても，その他として，土地所有者の行動のロジットモデルに選択肢として導入するなどして，モデルを拡張することも今後必要であると言える．等価最適問題では計算できない地代などの計算方法を確立することや企業の生産量 z_i など推定したパラメータを関連したデータから検証することも今後の課題である．

参考文献

1) 中山晶一朗，高山純一，古田拓也，武藤慎一，金森亮：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，土木計画学研究・講演集，Vol. 41，CD-ROM，2010.
2) Anas, A.: The combined equilibrium of travel networks and residential location markets, *Regional Science and Urban Economics*, Vol.15, pp.1-21, 1985.
3) 上田孝行，堤盛人：わが国における近年の土地利用モデルに関する統合フレームについて，土木学会論文集，No. 625/IV-44，pp. 65-78，1999.
4) 宮城俊彦，奥田豊，加藤人士：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.513 /IV-28，pp.95-105，1995.
5) 宮城俊彦，澤田理：交通戦略による都市発展過程のシミュレーション分析：土地利用・交通統合モデルの応用，岐阜大学地域科学部研究報告，Vol. 11，pp.53-66，2002.
6) 堤盛人，山崎清，小池淳司，瀬谷創：応用都市経済モデルの課題と展望，土木学会論文集 D3（土木計画学），Vol. 68，pp. 344-357，2012.
7) Ueda, T., Tsutsumi, M., Muto, S. and Yamasaki, K.: Unified computable urban economic model, *Annals of Regional Science*, Vol. 50, pp. 341-362, 2013.
8) 武藤慎一，上田孝行，高木朗義，冨田貴弘：応用都市経済モデルによる立地変化を考慮した便益評価に関する研究，土木計画学研究・論文集，Vol. 17，pp. 257-266，2000.
9) Chang, J. S. and Mackett, R. L.: A bi-level model of the relationship between transport and residential location, *Transportation Research Part B*, Vol. 40, pp. 123-146, 2006.
10) Briceno, L., Cominetti, R., Cortes, C. E. and Martinez, F.: An integrated behavioral model of land use and transport system: a hyper-network equilibrium approach, *Networks and Spatial Economics*, Vol. 8, pp. 201-224, 2008.
11) Bravo, M., Briceno, L., Cominetti, R., Cortes, C. E. and Martinez, F.: An integrated behavioral model of the land-use and transport systems with network congestion and location externalities, *Transportation Research Part B*, Vol. 44, pp. 584-596, 2010.
12) Ma, X. and Lo, H. K.: Modeling transport management and land use over time, *Transportation Research Part B*, Vol. 46, pp. 687-709, 2012.
13) 赤松隆，半田正樹：Nested LOGIT 型交通・住居立地統合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.
14) Anderstig, C. and Mattsson, L.-G.: An integrated model of residential and employment location in a metropolitan region, *Papers in Regional Science*, Vol. 70, pp. 167-184, 1991.
15) Boyce, D. and Mattsson, L.-G.: Modeling residential location choice in relation to housing location and road tolls on congested urban highway networks, *Transportation Research Part B*, Vol. 33, pp. 581-591, 1996.

(Received June 17, 2022)
(Accepted January 17, 2022)

PARAMETER ESTIMATION OF A UNIFIED TRANSPORTATION AND LANDUSE EQUILIBRIUM MODEL THAT IS APPLIED TO KANAZAWA CITY AND AN IMPACT ANALYSIS OF INTRODUCING LRT

Shoichiro NAKAYAMA, Yuta ISOGAI and Hiromichi YAMAGUCHI

Introducing a new transportation system such as LRT (Light Rail Transit) affects the traffic and landuse in the urban area. In this study, we propose a parameter estimation method for a unified transportation and landuse equilibrium model that enables an impact analysis of introducing LRT. Then, we apply the method to Kanazawa City, estimate the parameters, and examine the applicability of the method when introducing LRT in Kanazawa City.