

鉄道の路線・駅・結節交通手段の選択を含む 総合的な交通手段選択モデルの研究

吉田 朗¹・原田 昇²

¹正会員 工博 東北芸術工科大学 助教授 デザイン工学部 (〒990 山形市上桜田200)

²正会員 工博 東京大学 助教授 工学部 (〒113 文京区本郷7-3-1)

本研究では、都市圏における自動車と公共交通機関の複合的利用施策を評価するために、鉄道に結節する交通行動を考慮した、より広範囲な交通手段の選択モデルを提案する。多次元に及ぶ選択構造を単純化するため、鉄道の路線、乗車駅、降車駅、駅アクセス交通手段、駅イグレス交通手段がすべて選択可能な状況で、一般性の高い「鉄道経路」選択肢の生成とラベリングの方法を考案するとともに、駅アクセス交通手段と駅イグレス交通手段の選択構造の共通性に配慮している。実証分析の結果、様々な交通目的のトリップに対して、代表交通手段から、鉄道経路、駅アクセス・イグレス交通手段に至るNested Logitモデルの有意性が認められた。

Key Words : *mixed-mode, discrete choice analysis, railway route choice, labeling approach, nested logit model, travel demand model*

1. 研究目的

都市圏の交通政策において、自動車から公共交通機関へのモーダルシフトは、道路の渋滞対策、ひいては地球規模環境の保全という観点から常に重要な命題である。しかし、自動車が世帯毎に保有され、ますます身近な交通手段となった現在、対するバスや鉄道の利便性や快適性を向上させることは容易ではなからう。そこで短期的対策として、パーク&ライド、キス&ライドのように自動車と鉄道を組み合わせた利用形態、あるいはパーク&バスライドのように自動車とバスを組み合わせた利用形態が有効な手立てと考えられる。実際に都市近郊地域では、パーク&ライド、キス&ライドが自然発生的に行われていることから、その実効性も十分に期待される。さて、このような方策によって、部分的にでも公共交通機関の利用を高めるためには、まず、公共交通機関に結節する交通手段のサービスレベルを評価し、それが都市圏全体の交通行動にどのような影響を与えるかを解明しなければならない。例えば、パーク&ライド用の駐車場整備や、駅結節バスの運行頻度の上昇によって、結節交通を含む交通手段の分担がどのように変化するかを予測・評価しなければならない。

交通手段選択に関する研究は、離散選択モデルの登

場以来、数多く行われてきた。しかし、国内の研究事例は、分析対象をトリップの代表的な交通手段一つ（以下、代表交通手段という）に限定したものが多く、公共交通機関に結節する交通手段の選択を同時に扱ったものがほとんどない。これに対して、国外では複合交通手段 (mixed-mode) 選択の分析として、Clerq¹⁾、Ortuzar^{2),3)}、Van Der Hooft⁴⁾の報告がある。これらの研究では、鉄道やバスの結節交通手段の選択性を考慮した上で段階的選択モデルを適用している。しかし、どのモデルにも駅の選択が含まれておらず、利用駅の変更行動を予測・評価することができない。一方、パーク&ライドやキス&ライドなどの結節交通手段に限定した分析も報告されている（参考文献5)~8)）。甲斐ら⁷⁾や金ら⁸⁾の研究は、分析対象をキス&ライドに限定したものであるが、特に金の研究は、キス&ライドの発生を詳細に分析し、その非定常性を明らかにしている。さらに広範囲な分析は、鉄道駅と結節交通手段の同時選択に関するものである。先駆的研究として原田らの研究⁹⁾、近年では石田らの研究⁶⁾が報告されている。しかし、これらの研究は、特定のODトリップ（あるいは特定地域）を対象に、居住地側の駅と結節交通手段の選択行動だけを分析したものであり、駅選択の構造や選択肢の与え方がユニークであり、都市圏全体を対象とする分析では、さらに一般性

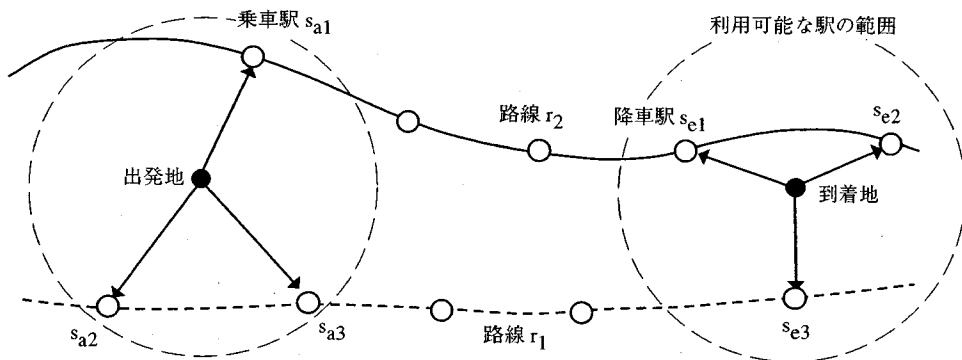


図-1 鉄道経路選択枝の模式図

の高いモデルが必要と考えられる。以上のように、これまでに適用された交通手段の選択モデルは限定的なものであり、都市圏の交通政策を評価するに十分とは言えない。

本研究では、都市圏の様々な交通目的のトリップに対して、パーク&ライドやキス&ライドのような自動車と公共交通機関の複合利用施策を評価するために、鉄道に結節する交通行動を考慮した、より広範囲な交通手段選択モデルの構築を目指す。以下、2.ではモデリングのポイントを整理した上で、有効なモデルを定式化する。3.でモデルの推定方法を述べた後、4.では実際のトリップデータからモデルを推定し、その有効性を評価する。最後に、5.では本研究の成果を整理するとともに、今後の研究課題に言及する。

2. モデル

本研究では、交通手段の選択行動を広範囲に記述するために、鉄道の結節交通を含む表-1のような交通行動を対象とする。また、モデルの適用範囲は、都市圏の交通政策の影響評価ができるように都市圏レベルとする。

このような多次元選択行動が、個人の一貫した選択行動であると考えれば、合理的な行動モデルはNested Logitモデル（以下、これをNLモデルという）である⁹⁾。しかし、実際に一つの都市圏において、6次元に及ぶNLモデルを適用することは、データの操作性、モデル推定とシミュレーションの計算負荷から判断して容易ではない。そのため、合理的なモデルを採用しつつも、選択次元の集約化によりできるだけ簡潔な選択構造を設定する必要がある。

以下、(1)~(3)では、簡潔なモデリングのために配慮したポイントを述べ、(4)で全体モデルを示す。

表-1 本研究で対象とする交通行動の範囲

選択行動	
目的地を先決として	1.代表交通手段の選択
	2.鉄道路線の選択
	3.乗車駅の選択
鉄道を選択した場合に	4.駅アクセス交通手段の選択
	5.降車駅の選択
	6.駅イグレス交通手段の選択

(1) 鉄道経路選択枝の生成とラベリング

鉄道の路線・駅・結節交通手段の選択に関するこれまでの研究は、特定ODパターン（あるいは地域）を対象に、出発地側または到着地側的一方だけを分析したものがほとんどである。よって、そこで扱う選択枝集合は限定的である。一方、本研究では、都市圏内の様々なODパターンに対して、表-1のように鉄道の路線、乗車駅、降車駅、駅アクセスおよびイグレス交通手段のすべてが選択的と仮定する。この場合、選択枝集合の肥大化に留意しなければならない。特に鉄道駅の選択に関して、原田ら⁵⁾のように個々の駅を独立な選択枝とみなした場合、一つの都市圏では選択枝（駅）の数が多大になり、効率的なモデル推定が困難になることが予想される。そこで、鉄道の路線、駅、アクセス・イグレス交通手段の選択枝集合を集約する方法が必要である。

まず、個人が鉄道を利用する際の行動規範を仮定する。本研究では、現実的な仮説として、個人は出発地から到着地までの所要時間ができるだけ短くなるように、路線、乗車駅、降車駅の組み合わせを同時に決定すると考える。これを定式化すると、個人が認知する選択枝は、乗車駅と降車駅を中継点とするネットワーク経路であり、その集合をつぎのように表わすことができる。本研究では、これを「鉄道経路」と呼ぶ。

$$W = R \times S_a \times S_e - W^* \quad (1)$$

ここに、 $W = \{\text{鉄道路線の選択肢集合}\}$

$R = \{\text{乗車駅の選択肢集合}\}$

$S_a = \{\text{降車駅の選択肢集合}\}$

$S_e = \{\text{存在しない鉄道路線の集合}\}$

$W^* = \{\text{存在しない鉄道路線の集合}\}$

そして、個人は、つぎの経路効用の最大化を規範として、経路を選択すると仮定する。

$$V_w = V_w^l + \Lambda_w^a + \Lambda_w^e \quad (2)$$

ここに、 V_w ：鉄道路線の確定効用

V_w^l ：駅間リンクの確定効用（乗車時間等）

Λ_w^a ：駅アクセスの確定効用

Λ_w^e ：駅イグレスの確定効用

ここで、駅アクセスおよびイグレスの確定効用は、ともに交通手段の選択性を考慮して、つぎの合成効用値で表わすことができる。これらは、それぞれ乗車駅、降車駅の効用とみなすことができる。

$$\Lambda_w^a = \frac{1}{\mu^a} \ln \sum_a \exp(\mu^a V_a) \quad (3)$$

$$\Lambda_w^e = \frac{1}{\mu^e} \ln \sum_e \exp(\mu^e V_e) \quad (4)$$

ここに、 V_a ：駅アクセス交通手段の確定効用

V_e ：駅イグレス交通手段の確定効用

μ^a, μ^e ：ガンベル分布のスケールパラメータ

この鉄道路線では、駅を単なる中継点とみなすために、式(2)に駅の効用項が明示されないのが特徴である。実際、駅の属性は、鉄道路線リンクの効用または駅アクセス・イグレスの効用に含まれる。例えば、ある駅に急行電車が止まるか否かは、乗車時間と運行頻度を左右するから、鉄道路線リンクの効用に帰着する。また、ある駅の駐車場容量やバス停の有無はアクセス手段の効用に他ならない。

具体的に、鉄道路線の生成方法を図-1の例で考えてみる。この例では、2つの路線があり、出発地側で3つの乗車駅が、到着地側で3つの降車駅がそれぞれ利用可能である。ここで、駅と路線の接続関係から利用不可能な（存在しない）経路集合を除けば、利用可能な鉄道路線はつぎの4つとなる。

$$W = \{(r_1, s_{a2}, s_{e3}), (r_1, s_{a3}, s_{e3}), (r_2, s_{a1}, s_{e1}), (r_2, s_{a1}, s_{e2})\} \quad (5)$$

つぎに、経路選択肢のラベルについて検討する。新駅の設定や新路線の整備に対しても、上述の方法で経路選択肢を生成することができる。しかし、分析者がその選択肢集合を限定するには経路選択肢のラベルが必要である。そもそも鉄道路線には「JR〇〇線××駅～△△駅」のようにユニークな名称が付けられている。それを選択肢ラベルとすることもできるが、駅の数によっては、選

表-2 経路選択肢の例（図-1の場合）

経路選択肢	路線と駅の組み合わせ			路線
	乗車駅	降車駅	路線	
最短時間のルート	w_1	s_{a1}	s_{e1}	r_2
2番目に短いルート	w_2	s_{a3}	s_{e3}	r_1
3番目に短いルート	w_3	s_{a1}	s_{e2}	r_2
4番目に短いルート	w_4	s_{a2}	s_{e3}	r_1

肢集合の肥大化は避けられない問題となる。そこで、本研究では、鉄道路線に普遍性の高い選択肢ラベルを付与する。一つの方法は、個人の利用実態に着目して選択肢ラベルを付与することである。例えば「最もよく利用する経路」、「つぎによく利用する経路」のようなラベルが考えられる。しかし、この方法では、経路が新設された場合、それがどちらの選択肢となるかを客観的に特定できないという欠点がある。これに対して、経路の属性に着目した「ラベリング・アプローチ」（Ben-Akivaら¹⁰⁾）は有効な方法である。これは、「最短のルート」、「最も眺めがいいルート」、「最も空いているルート」のように、ある経路を最も特徴づける属性によって、固有のラベルを付与する方法である。これを鉄道路線に適用した場合、「アクセスとイグレスが最も便利なルート」、「所要時間が最も短いルート」、「運賃が最も安いルート」などのラベルが考えられよう。ただし、鉄道路線の代替経路の数は、道路網ほど多くないため、同一経路に複数のラベルが付く可能性が高い。よって選択肢の独立性に配慮が必要である。そこで本研究では、選択肢の独立性を満たす最も単純なラベルとして、鉄道路線（駅間）の総所要時間（乗車待ち時間、乗車内時間、乗り換え時間の和）の順位を採用する。すなわち、経路の選択肢集合を、「最短時間のルート」、「2番目に短いルート」、…、「n番目に短いルート」のn個の独立な選択肢から構成する。図-1の例の場合、表-2のような4つの選択肢が生成できる。

このような鉄道路線選択肢の生成により、都市圏内の様々なODパターンに対して、鉄道の路線、駅、アクセス・イグレス交通手段の選択行動を簡潔に記述することができる。

なお、この経路選択に多項ロジットモデルを適用する場合、同一路線内で経路が部分的に重複するため、選択肢の独立性が満たされない可能性がある¹³⁾。この場合には、IIA特性を緩和するために路線の選択を上位とし、経路の選択を下位とするNLモデルへの拡張も必要である。あるいは、経路選択肢が序変数であることからオーダード・ロジスティックモデルの適用も有効と考えられる。また、本研究のNLモデル体系とは別に、屋井

らが提案した改良型の多項ロジットモデル¹¹⁾も注目している。しかし、本研究ではモデル全体の構造をできるだけ単純化するために、同一路線内の固定効果だけを考慮し、多項ロジットモデルの適用に留める。代替的なモデル構造の比較検討は今後の課題としたい。

(2) 駅アクセスと駅イグレスの関係

式(3),(4)では、アクセス交通手段の選択と、イグレス交通手段の選択が、互いに独立な局面として扱われる。しかし、両者が同一個人の行動である以上、一定の関係が想定される。一つの仮説は、同一個人の選択行動である以上、乗車駅、降車駅にかかわらず結節交通手段の評価構造が等しい、すなわちサービスレベル変数間のトレードオフ関係が等しいという考えである。具体的には、つぎのような駅アクセス交通手段の効用 V_a と駅イグレス交通手段の効用 V_e において、

$$V_a = \sum_k \theta_{ak} x_{ak}, \quad V_e = \sum_k \theta_{ek} x_{ek} \quad (6)$$

ここに、 x_{ak} ：駅アクセス手段のk番目の説明変数

x_{ek} ：駅イグレス手段のk番目の説明変数

θ_{ak}, θ_{ek} ：k番目の未知パラメータ

共通な説明変数のパラメータの間に、つぎの関係を仮定する。

$$\theta_{a1} = \theta_{e1}, \theta_{a2} = \theta_{e2}, \dots, \theta_{ak} = \theta_{ek}, \dots \quad (7)$$

ただし、駅アクセスとイグレスとで効用のランダム項の分散スケールが等しくなる理由はない。金ら⁸⁾が指摘したように、駅アクセス側でパーク&ライドやキス&ライドが随意的に選択されるとすれば、アクセス側の分散が大きくなる可能性がある。そこで、両者の分散スケールの比を未知パラメータとし、分散の違いを考慮する。

$$\mu^a / \mu^e = \omega \quad (8)$$

これは、駅アクセス効用のランダム項 ε_a の分散と、駅イグレス効用のランダム項 ε_e の分散とが、つぎの関係にあることを意味する。

$$\text{Var}[\varepsilon_a] = \frac{1}{\omega^2} \text{Var}[\varepsilon_e] \quad (9)$$

さらに、 $\mu^e = 1$ と基準化すれば、駅アクセス・イグレス交通手段の合成効用は、次式のように統合される。

$$\begin{aligned} \Lambda_w &= \Lambda_w^a + \Lambda_w^e \\ &= \frac{1}{\omega} \ln \sum_a \exp(\omega V_a) + \ln \sum_e \exp V_e \end{aligned} \quad (10)$$

ただし

$$V_a = \sum_k \theta_{ak} x_{ak}, \quad V_e = \sum_k \theta_{ek} x_{ek}$$

このように駅アクセス交通手段と駅イグレス交通手段の選択について、パラメータ間の整合、分散スケールの関係を定め、両者の一貫性に配慮する。この制約は、後述のようにパラメータ推定の段階で考慮する。

(3) 旅行時間の非線形性

通常、ロジットモデルでは、選択肢に対する個人 n の確定効用につぎのような線形関数を仮定する。

$$V_{in} = \sum_k \beta_k x_{ink} \quad (11)$$

ここに、 x_{ink} ：個人 n のk番目の説明変数

β_k ：k番目の未知パラメータ

この仮定は、モデルの単純化の上で極めて有効であるが、現実の行動を記述する上で制約となり得る。交通手段選択の分析では、特に旅行時間に関して知覚値の非線形性および知覚誤差の不均一分散性が想定され、線形制約の緩和が必要と考えられる（以下では、ある交通手段に対する個人 n の旅行時間計測値を単に x_n と表す）。

知覚値の非線形性についてはLeiserらの研究¹²⁾がある。彼らは、ドライビング・シミュレーターを使った実験によって、個人 n の旅行時間計測値 x_n とその知覚値 y_n とが、つぎの関係にあることを示した。ただし、パラメータは $\alpha > 0, 1 > \varphi > 0$ であり、 u_n は知覚誤差を表す。

$$y_n = \alpha x_n^\varphi + u_n \quad (12)$$

これは、旅行時間計測値に対して知覚値が漸増傾向にあることを意味する。同様の指摘は、これまで心理学者や地理学者によってもなされてきた¹²⁾。なおLeiserらの報告では指数パラメータ $\varphi = 0.74$ である。

つぎに、旅行時間（あるいは旅行距離）の増加にしたがって知覚値が曖昧になる可能性、言い替えれば、旅行時間による知覚誤差 u_n の不均一分散性が考えられる。これは、知覚誤差の分散を旅行時間計測値の単調増加関数と仮定することで対処できる。つまり、誤差項 u_n の分散 σ_n^2 がある関数 $h(\cdot)$ によって次式のように表わす（以下、これをスケール関数という）。

$$\sigma_n^2 = h(x_n) \quad (13)$$

式(12)の非線形性および式(13)の不均一分散を考慮すると、線形効用関数における旅行時間の確定効用項 $V(x_n)$ は次のように修正される。ただし、 β は効用の未知パラメータ、 $E(\cdot)$ は期待値を表す。

$$\begin{aligned} V(x_n) &= \beta \times E(y_n) / \sigma_n \\ &= \beta \times \alpha x_n^\varphi / h(x_n) \end{aligned} \quad (14)$$

式(14)から分かるように、効用と旅行時間計測値の非線形な関係は、単に指数パラメータ φ だけではなく、スケール関数 $h(\cdot)$ によっても生じ得る。

さらに、具体的なスケール関数を仮定すれば、非線形性の程度を考察できる。一般的な仮定として、知覚誤差の分散が旅行時間計測値 x_n に比例する場合を考えてみる。このスケール関数は次式である。ただし、 η は正のパラメータである。

$$\sigma_n^2 = \eta x_n \quad (15)$$

この場合、旅行時間の確定効用項 $V(x_n)$ は次式である。

$$V(x_n) = \beta \times \frac{\alpha}{\sqrt{\eta}} x_n^\varphi - 0.5 \quad (16)$$

Leiserらの報告より $\varphi = 0.74$ とすれば、上式の指数パラメータは0.24と得られる。同様に知覚誤差の分散が旅行時間の平方根に比例する場合には、指数パラメータは0.49である。このように非線形性の程度は、指数パラメータの大きさで0.2~0.5と想定され、線形制約の限界を指摘できよう。

ところで実際の推定にあたっては、スケール関数を先験的に特定できないから、式(16)の性質を含む柔軟な非線形関数を適用する。具体的な非線形変換の方法としてBox-Cox変換、より一般形であるBox-Tukey変換などが知られている¹⁶⁾。実際にBox-Cox変換の有意性を示唆した研究事例として、Mandelらの研究¹⁴⁾が報告されている。本研究では交通手段*i*の旅行時間 x_{in} に対して、つぎのBox-Cox変換を適用する。

$$x_{in}^{(\lambda)} = \begin{cases} \ln x_{in} & ; \lambda = 0 \\ (x_{in}^\lambda - 1) / \lambda & ; \lambda \neq 0 \end{cases} \quad (17)$$

この変換では、パラメータ λ の導入により、選択確率 P_{in} への影響が次式となる。

$$\frac{\partial P_{in}}{\partial x_{in}} = P_{in} (1 - P_{in}) \beta x_{in}^{\lambda-1} \quad (18)$$

これより、変数の単位変化量の影響は、 $\lambda = 1$ の場合を除き変数のレベルに依存し、ロジスティック曲線のもつ対称性は失われる。

本研究ではBox-Cox変換の対象を、代表交通手段の旅行時間に限定する。これは旅行時間が長くなるにつれ、上述の非線形性が大きく影響するからである。また、代表交通手段のうち鉄道は、列車運行ダイヤによって到着予定時刻が事前に与えられることから、他の交通手段と比べれば旅行時間の知覚バイアスや誤差の影響は少ないと考えられる。このため鉄道の旅行時間はBox-Cox変換を行わない。

(4) モデルの定式化

前述(1)の鉄道経路選択肢の導入により、表-1の交通行動について図-2の選択構造が仮定できる。この一連の選択行動の同時選択確率は、NLモデルの適用によって次式となる。この選択構造の特徴は、下位に2つの並列的な選択 $P(a|m,w)$ 、 $P(e|m,w)$ を含むことであるが、両者の関係は前述2.(2)で仮定したとおりである。

$$P(m,w,a,e) = P(m) \cdot P(w|m) \cdot P(a|m,w) \cdot P(e|m,w) \quad (19)$$

ここに、 m ：代表交通手段、 w ：鉄道経路

a ：駅アクセス交通手段

e ：駅イグレス交通手段

$P(m,w,a,e)$ ： m,w,a,e の同時選択確率

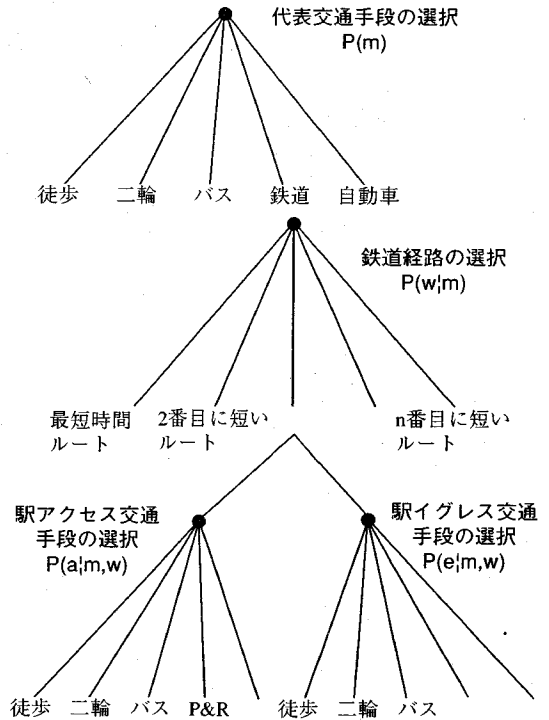


図-2 P(m,w,a,e)の選択構造

$P(x|y)$ ： y を与件とした時、 x の条件付き確率

$P(x)$ ： x の周辺確率

式(19)における各段階の選択モデルは、つぎのように定式化される。

$$P(m) = \frac{\exp\{\mu^m (V_m + \Lambda_m)\}}{\sum_m \exp\{\mu^m (V_m + \Lambda_m)\}} \quad (20)$$

$$P(w|m) = \frac{\exp\{\mu^w (V_w + \Lambda_w)\}}{\sum_w \exp\{\mu^w (V_w + \Lambda_w)\}} \quad (21)$$

$$P(a|m,w) = \frac{\exp(\omega V_a)}{\sum_a \exp(\omega V_a)} \quad (22)$$

$$P(e|m,w) = \frac{\exp V_e}{\sum_e \exp V_e} \quad (23)$$

ここに、 V_m ：交通手段*m*の効用の確定項

V_w ：鉄道経路*w*の効用の確定項

V_a ：駅アクセス交通手段*a*の効用の確定項

V_e ：駅イグレス交通手段*e*の効用の確定項

μ^m, μ^w, ω ：誤差項の分散スケール

また、 Λ は下位の選択段階の合成効用値であり、多次元選択行動の一貫性を表現する。ただし駅アクセスと駅イグレスの合成効用は、前述2.(2)の仮定より、式(10)のよ

うに統合される。

なお、本来であれば、鉄道以外の交通手段についても代替経路の存在を考慮すべきであるが、実際に個人の経路情報を収集することが困難であるため捨象する。

3. モデルの推定方法

モデルのパラメータ推定は、最尤推定法による。ただし、前述2.(2)のように駅アクセス交通手段と駅イグレス交通手段については、異なる分散スケールのもとで同一のパラメータベクトルを得る。ここで、駅アクセス交通手段選択の対数尤度を式(24)に、駅イグレス交通手段選択の対数尤度を式(25)に示す。ただし n は個人を表す。

$$L_a(\theta, \omega) = \sum_{n=1}^N \sum_a d_n(a) \left\{ \omega V_{an} - \ln \sum_a \exp(\omega V_{an}) \right\} \quad (24)$$

$$L_e(\theta) = \sum_{n=1}^N \sum_e d_n(e) \left\{ V_{en} - \ln \sum_e \exp V_{en} \right\} \quad (25)$$

ここに、 $d_n(x)$: 選択肢 x の選択実績ダミー
(個人 n が x を選択したときに1, その他0)

θ : V_{an}, V_{en} の未知パラメータベクトル

両式を共通パラメータの制約の下で同時に最大化するため、Ben-Akiva and Morikawa¹⁵⁾にしたがい、つぎのような3段階の推定を行う。まず、駅アクセス交通手段効用を次式とし、式(24)の対数尤度を最大化する。これより、推定パラメータ $\omega\theta_k$ を得る。ただし、 x_{ank} はアクセス交通手段 a に関わる個人 n の k 番目の説明変数である。

$$V_{an} = \sum_k \theta_k x_{ank} \quad (26)$$

つぎに、駅イグレス交通手段の効用を次式と置いて、式(25)の対数尤度関数を最大化する。これより、未知パラメータ γ が推定される。 x_{enk} はイグレス交通手段 e に関わる個人 n の k 番目の説明変数である。

$$V_{en} = \gamma \sum_k \hat{\omega}\theta_k x_{enk} \quad (27)$$

つぎに推定パラメータを次のように変換する。

$$\hat{\omega} = 1/\hat{\gamma} \quad (28)$$

これで、未知パラメータベクトルの一次推定値 θ が得られる。さらに推定精度を高めるために、駅アクセス交通手段選択の変数 x_{ank} をつぎのようにスケールリングする。

$$V_{an} = \sum_k \theta_k (\hat{\omega} x_{ank}) \quad (29)$$

駅アクセスと駅イグレスのプーリング推定によって、最終的な推定パラメータベクトル θ を得る。このような段階推定によって、一致性と漸近的有効性をもつ最尤推定値を得ることができる¹⁵⁾。

また、Box-Coxパラメータの推定については、同パラ

表-3 選択肢の選別基準

選択段階	選択肢	利用可能性の条件
代表交通手段	1.徒歩/二輪	道路距離8km未満
	2.自動車	道路距離500m以上
	3.バス	道路距離500m以上、バス停までの距離2km未満
	4.鉄道	利用可能な経路有り
鉄道経路	時間最短～第5位の経路	発着ゾーン両方で利用可能な駅有り
駅アクセス・イグレス手段	1.徒歩	道路距離3km未満
	2.二輪	道路距離8km未満
	3.バス	道路距離500m以上、バス停までの距離2km未満
	4.相乗り/送迎	道路距離500m以上
	5.P&R	利用可能な駐車場有り 道路距離500m以上 通勤、通学トリップのみ

メータの非線形性により他のパラメータとの同時推定が困難であるため、パラメータ λ を逐次的に外挿し、対数尤度が最大となる値で確定する。

4. モデル推定

(1) データと分析単位

仙台都市圏(仙台市を中心とする5市14町1村、人口規模140万人)における平日の交通行動データ93,183世帯サンプルがベースである。この調査は「仙台都市圏総合都市交通計画協議会」により、1992年10月に実施されたものである。

モデル推定に適用するサンプル単位は、交通目的別の発着ゾーン間のトリップ集計量とする。都市圏内は、236個のゾーンに分割され、トリップ目的は通勤、通学、買物・私事、業務、帰宅の5目的に区分されている。このうち、本研究では様々な交通目的についてモデルの有意性を評価するために、帰宅目的トリップを除く4つの目的別トリップを推定サンプルとする。ただし、ゾーン内々のトリップは交通サービスレベルの設定が困難であるため、推定サンプルから除く。

なお、鉄道沿線地域のゾーン分割は、駅アクセス・イグレス手段の交通サービスレベルが計測できるように配慮し、必要に応じて細分化している。

(2) 選択肢と交通サービスレベルの設定

各選択段階の選択肢は、利用実績をもとに代表交通手段が4手段、駅アクセス・イグレス交通手段がパーク&ライド(以下、P&Rという)を含む5手段とした。これ

表-4 説明変数一覧

選択肢	変数名	内容
徒歩/二輪 (代表・結節)	旅行時間	発着ゾーン間の徒歩時間/自転車走行時間 [分]
バス (代表)	乗車内時間	発着ゾーン最寄りバス停間の乗車時間 [分]
	アクセス・イグレス	ゾーンからバス停までのアクセス徒歩時間、バス停から目的地までのイグレス徒歩時間の合計 [分]
バス (結節)	乗車待ち時間	乗車待ち時間、乗換え時間の合計 [分]
	旅行時間	ゾーン最寄りバス停から駅バス停までの乗車時間、乗車待ち時間、乗換え時間の合計 [分]
鉄道 (経路)	アクセス・イグレス	ゾーンからバス停までのアクセス徒歩時間、バス停から駅までのイグレス徒歩時間の合計 [分]
	乗車内時間	駅間の乗車時間 [分]
	乗車待ち時間	駅での乗車待ち時間 [分]
	乗り換え時間	路線を乗り継ぐ場合の乗換え徒歩時間、および乗り継ぎ駅での乗車待ち時間の合計 [分]
	乗車料金/路線距離	駅間の片道運賃 (通勤や通学の場合は、定期運賃の日割) を駅間距離で除した変数 [円/km]
	乗り換え回数	路線を乗り継ぐ場合の乗換え回数 [回]
	JR線ダミー	JR線を利用した場合に1 (乗り継ぎを含む)、その他0をとるダミー変数。路線の固定効果として導入。
自動車 (代表)	乗車内時間	発着ゾーン間の幹線走行時間
	駐車場容量/従業者数	着ゾーンにおける従業者1人当たりの駐車場容量 [台/人]
	駐車場整備地区外ダミー	着ゾーンが駐車場整備地区外るとき1、その他0をとるダミー変数
相乗り/送迎 (結節)	乗車内時間	ゾーンから駅までの幹線走行時間 [分]
P&R (結節)	乗車内時間	ゾーンから駅までの幹線走行時間 [分]
	駅駐車料金	駅周辺 (半径150m以内) の月極め駐車場の平均料金 [千円/月]

注: 「代表」は代表交通手段、「結節」は駅アクセス/イグレス交通手段を表わす

らの選択肢が選択肢集合に選別されるか否かは、トリップ距離に応じた利用可能性で判断する (表-3を参照)。この基準により利用実績の約90%をカバーすることができる。なお、今回のサンプルは集計トリップであるため、個人の社会経済属性による利用制約 (自家用車の有無による自動車利用の可否など) は考慮できない。

また、鉄道経路の選択肢は、2.(1)で述べた方法によってODペア毎に設定する。現在、対象地域内の鉄道は、5路線 (JR線4、仙台市営地下鉄1) あり、駅は75箇所配置されている。まず、この駅の中から、ゾーン毎にアクセス可能な駅を利用実績より最大3駅選定する。つぎに、ODペア毎に可能な駅間経路の組み合わせを探索し、所要時間 (乗車待ち時間、乗車内時間、乗り換え時間の和) の短い順に並べる。このとき、経路選択肢の数は発着ゾーンで3駅づつ利用可能であれば最大9経路となるが、実際には利用実績の約90%をカバーする範囲として5経路を上限とした。

これら選択肢の交通サービスレベルは、乗車内時間と乗車外時間に大別し、つぎのように与えた。徒歩、二

輪、自動車 (P&R、相乗り/送迎を含む) の場合、乗車内時間を最短時間経路の走行時間とし、乗車外時間は捨象した。ただし、二輪や自動車の場合には、駐車場から目的地までの歩行時間 (乗車外時間) も重要であるが、これを一定とみなした (モデルでは選択肢固有定数)。バス利用の場合は、乗車内時間をバス運行系統上の最短経路時間とし、乗車外時間をゾーン~バス停間の徒歩時間、バス停での乗車待ち時間、乗り継ぎ待ち時間とした。なお、バス停での乗車待ち時間は、1日の平均運行間隔 (時間) と実際の乗車待ち時間 (回答値) の関係から推定した (およそ運行間隔の1/2)。また、鉄道経路の場合、乗車内時間を運行時刻表上の最短経路時間とし、乗車外時間を駅での乗車待ち時間、乗り継ぎ待ち時間とした。駅での乗車待ち時間は、バスと同様に、1日の平均運行間隔 (時間) から推定した。さらに、このようなネットワーク上の交通サービスレベルに加え、自動車利用には駐車場のサービスレベル (容量や料金)、鉄道利用には乗車料金を考慮した (表-4を参照)。

表-5 駅アクセス・イグレス交通手段選択モデルの推定結果 (WESML推定)

() : t値

選択肢	説明変数	通勤	通学	買物・私事	業務
徒歩	θ ₁ 旅行時間	-0.3199 (-9.56)	-0.2128 (-8.89)	-0.2387 (-8.61)	-0.2217 (-7.36)
	θ ₂ 定数項	7.563 (13.49)	6.124 (11.02)	5.224 (13.51)	4.145 (11.17)
二輪	θ ₃ 旅行時間	-0.5300 (-5.96)	-0.3684 (-6.42)	-0.3239 (-4.42)	-0.2709 (-3.45)
	θ ₄ 定数項	2.497 (4.35)	3.386 (6.44)	0.7576 (1.80)	-0.4740 (-0.90)
バス	θ ₅ 乗車内時間	-0.2031 (-3.99)	-0.1602 (-4.03)	-0.1140 (-2.65)	-0.0881 (-2.28)
	θ ₆ アクセス・イグレス	-0.1224 (-2.48)	-0.1565 (-3.94)	-0.0844 (-1.92)	-0.0881 (-2.28)
	θ ₇ 定数項	2.961 (4.97)	3.442 (5.91)	1.511 (3.22)	-0.0141 (-0.03)
	ω	0.5408 (5.85)	0.6109 (5.48)	0.7746 (5.78)	0.8396 (4.78)
相乗り/送迎	θ ₈ 乗車内時間	-0.4040 (-3.92)	-0.3538 (-4.39)	-0.2591 (-3.04)	-0.2486 (-2.98)
P&R	θ ₉ 乗車内時間	-0.2927 (-2.88)	-0.2356 (-2.55)	—	—
	θ ₁₀ 駅駐車料金	-0.7913 (-4.27)	—	—	—
	θ ₁₁ 定数項	3.851 (3.05)	-4.240 (-3.05)	—	—
	ω	0.5408 (5.85)	0.6109 (5.48)	0.7746 (5.78)	0.8396 (4.78)
	サンプル数*1	903	667	760	476
	ケース数*2	3,505	2,642	2,573	1,437
	尤度比 ρ ²	0.5622	0.4116	0.5675	0.5016
	的中率 %*3	85.65	69.91	90.56	83.48

*1 : ODグループ数、*2 : ODグループで利用可能な選択肢数の総和

*3 : ODグループ内で選択確率が最大となる選択肢に対する推計値 (選択確率) の的中率

(3) モデルの推定

パラメータ推定は、NLモデルの段階推定により行った。ただし、推定用サンプルがゾーン間集計トリップであるため、同一ODグループ g 内の個人 n が、同一の選択肢集合と効用関数を持つと仮定し尤度関数を構成する。さらに、ODグループのサンプル内シェアを補正する重み Q_g を考慮すれば、同時選択確率の対数尤度関数は次式である (WESML推定)。段階推定の結果、最終的に有意となった説明変数を表-4に掲げる。

$$L = \sum_{g=1}^G \sum_{(m,w,a,e)} \sum_{n=1}^{N_g} Q_g d_n(m,w,a,e) \ln\{P_n(m,w,a,e)\}$$

$$= \sum_{g=1}^G \sum_{(m,w,a,e)} Q_g T_g(m,w,a,e) \ln\{P_g(m,w,a,e)\} \quad (30)$$

ここに、 $d_n(m,w,a,e)$: 個人 n が選択肢 (m,w,a,e) の組み合わせを選択した時に1, その他0

$T_g(m,w,a,e)$: ODグループ g の中で (m,w,a,e) を選択したトリップ数

$P_n(\cdot), P_g(\cdot)$: それぞれ個人 n , グループ g の選択確率

Q_g : ODグループ g の母集団シェアをサンプル内シェアで除した値

N_g : ODグループ g のサンプル数

G : ODグループの数

a) 駅アクセス・イグレス選択モデル

駅アクセス・イグレス交通手段選択モデルの推定結果を表-5に示す。推定方法は、2.(3)に述べた3段階推定法である。表の中で、分散スケール比は2段階目の推定値、それ以外は最終 (3段階目) の推定パラメータを示す。すべてのパラメータは符号条件を満足し、t検定の信頼度は95%以上である。尤度比は、最も低い通学目的で0.4を越え、的中率も十分に高く、モデルの精度は良好と言えよう。通勤目的に設定されたP&Rをみると、駅周辺駐車場の料金がマイナスで有意に作用し、これがP&Rの利用制約となっていることがわかる。同様に、駅周辺駐車場の容量も重要と考えられるが、結果的に有意なパラメータが得られなかったことを付記しておく。

つぎに、駅アクセスと駅イグレスの分散スケール比 ω に着目する。すべての交通目的について、 ω のt値は信頼度99%以上である。また、どの交通目的も $\hat{\omega} < 1$ であるから、駅アクセス側の分散が大きいことがわかる。最も顕著なのは通勤目的であり、駅アクセス交通手段効用の標準偏差は、駅イグレスのそれと比べて、約2倍大きいことが分かる。これは、駅イグレスのトリップ長が駅アクセスに比べて短く、利用可能手段も限定されることからランダム性が小さくなることや、金らが指摘したアクセス交通手段選択の非定常性⁸⁾が一因と考えられる。いずれにしても、アクセス側とイグレス側の交通特性の違

表-6 駅アクセス・イグレス交通手段選択モデルの推定結果 (WESML推定) - $\omega=1$ のケース () : t値

選択肢	説明変数	通勤	通学	買物・私事	業務
徒歩	θ_1 旅行時間	-0.2073 (-9.82)	-0.1628 (-9.01)	-0.2055 (-8.85)	-0.1962 (-7.37)
	θ_2 定数項	5.108 (14.78)	4.455 (11.36)	4.577 (13.87)	3.749 (11.31)
二輪	θ_3 旅行時間	-0.3065 (-5.64)	-0.2785 (-6.55)	-0.2642 (-4.36)	-0.2418 (-3.53)
	θ_4 定数項	1.543 (4.38)	2.587 (7.01)	0.6941 (1.95)	-0.2112 (-0.46)
バス	θ_5 乗車内時間	-0.1172 (-3.62)	-0.1179 (-3.97)	-0.0912 (-2.56)	-0.0755 (-2.23)
	θ_6 アクセス・イグレス	-0.0665 (-2.03)	-0.1288 (-4.29)	-0.0731 (-2.00)	-0.0755 (-2.23)
	θ_7 定数項	1.829 (4.69)	2.615 (6.08)	1.327 (3.32)	-0.0038 (-0.01)
相乗り/送迎	θ_8 乗車内時間	-0.2321 (-3.65)	-0.2684 (-4.50)	-0.2092 (-2.97)	-0.2111 (-2.90)
P&R	θ_9 乗車内時間	-0.1816 (-2.91)	-0.1941 (-2.95)	—	—
	θ_{10} 駐駐車料金	-0.4323 (-4.28)	—	—	—
	θ_{11} 定数項	2.465 (3.47)	-2.320 (-2.60)	—	—
サンプル数*1		903	667	760	476
ケース数*2		3,505	2,642	2,573	1,437
尤度比 ρ^2		0.5353	0.3755	0.5622	0.5007
的中率 %*3		85.44	70.21	90.54	83.33

*1: ODグループ数、*2: ODグループで利用可能な選択肢数の総和

*3: ODグループ内で選択確率が最大となる選択肢に対する推計値 (選択確率) の的中率

いを反映した結果である。

一方、駅アクセスと駅イグレスの分散スケールの違いを考慮しない場合 ($\omega=1$ の場合)、すなわち、単なるプーリング推定の結果を表-6に掲げる。これを表-5と比較してみると、どの交通目的をみても、表-6のパラメータ推定値は小さい。両者のパラメータの違いは、 ω が端的に表している。つまり、通勤目的のように ω が0に近いほど、パラメータの乖離 (パラメータ比) は大きく、業務目的のように ω が1に近いほどパラメータの乖離は小さい。そこで、 ω を導入することの有意性を明らかにするため、帰無仮説: $\omega = 1$ について尤度比検定を行う。この検定統計量は次式である。

$$-2(L^R - L^U) \sim \chi^2_{df} \quad (31)$$

ここに、 L^R は制約付きモデルの対数尤度、 L^U は非制約モデルの対数尤度である。この場合は、

$$L^R = L_{ate}(\hat{\theta} | \omega=1), L^U = L_{ate}(\hat{\theta}, \hat{\omega})$$

自由度 (制約の数) df は1である。添字 $a+e$ は駅アクセスと駅イグレスの同時推定であることを示す。表-7には、尤度比検定の結果を示す。この表より、通勤、通学、買物・私事目的は、危険率5%で $\omega = 1$ を棄却できる。よって、分散スケールの違いを考慮することが有意であり、これによりモデルの精度は向上する。一方、業務目的は $\omega = 1$ の仮説を棄却できないことから、分散スケールは等しいと判断できる。以下のモデル推定では、すべての目的について $\hat{\omega}$ を含めた合成効用値を用いる。

表-7 駅アクセス・イグレス交通手段選択の分散スケールの等価性検定

	通勤	通学	買物等	業務
L^R	-559.2	-569.8	-400.7	-255.8
L^U	-526.9	-536.9	-395.9	-255.3
検定統計量	64.6	65.8	9.6	1.0
$\chi^2_{0.05}(1)$	3.84	3.84	3.84	3.84

また、駅アクセスと駅イグレスに共通するパラメータが等しいという仮説についても、尤度比検定が可能である。いま、駅アクセスのデータから推定されたパラメータを駅イグレスのデータに適用した場合の対数尤度を L^R とする。これは、式(27)の推定 (段階推定の第2段階) から得られる。一方、駅イグレスのデータによる最大対数尤度を L^U とする。結局、駅イグレスのデータセットについてつぎの対数尤度を比較する。

$$L^R = L_c(\hat{\theta}_a / \hat{\omega}), L^U = L_c(\hat{\theta}_e)$$

表-8に尤度比検定の結果を示す。表中の自由度は、駅アクセスと駅イグレスに共通するパラメータの数から1 (分散スケールパラメータによる自由度) を引いた値である。結果をみると、どの交通目的も危険率5%でパラメータが等しいという仮説を棄却できない。表のP-valueが示すように、危険率をよほど大きくしてもこの仮説は

表-8 駅アクセス・イグレス交通手段選択のパラメータの等価性検定

	通勤	通学	買物等	業務
L ^R	-90.74	-85.12	-108.9	-68.05
L ^U	-88.82	-82.79	-108.7	-67.04
検定統計量	3.84	4.66	0.4	2.02
自由度 df	4	4	3	2
$\chi^2_{0.05}(df)$	9.49	9.49	7.81	5.99
P-value	0.428	0.323	0.940	0.364

表-9 経路選択肢の集計選択確率%

	通勤	通学	買物等	業務
最短時間のルート	36.9	38.8	34.7	33.8
2番目に短いルート	30.9	30.1	35.0	33.7
3番目	16.3	13.4	15.6	14.6
4番目	9.4	11.1	8.6	11.6
5番目	6.5	6.6	6.1	6.3
経路計	100.0	100.0	100.0	100.0

表-10 鉄道経路選択モデルの推定結果 (WESML推定)

() : t値

説明変数	通勤	通学	買物・私事	業務
β_1 乗車内時間	-0.0714 (-6.11)	-0.0442 (-3.88)	-0.0469 (-2.92)	-0.0874 (-3.16)
β_2 乗車待ち時間	-0.3087 (-8.40)	-0.3020 (-8.08)	-0.2780 (-4.72)	-0.2140 (-2.15)
β_3 乗り換え時間	-0.1731 (-3.63)	-0.5406 (-6.97)	-0.4274 (-4.50)	—
β_4 乗車料金/路線距離	-0.0150 (-4.96)	-0.0161 (-2.51)	-0.0024 (-1.51)	-0.0053 (-2.15)
β_5 乗り換え回数	-0.9964 (-4.30)	-0.5474 (-2.14)	-0.7926 (-1.96)	-1.1490 (-3.31)
β_6 JR線ダミー	-0.5717 (-3.16)	0.3170 (1.15)	-0.3668 (-1.41)	-0.7972 (-1.80)
μ^w 駅アクセス・イグレス交通手段の合成効用	0.4583 (25.31)	0.5104 (19.36)	0.7284 (18.62)	0.7040 (10.11)
サンプル数*1	2,623	1,457	1,324	461
ケース数*2	10,204	5,978	5,170	1,710
尤度比 ρ^2	0.2812	0.3392	0.3103	0.2309
的中率 %*3	62.36	64.33	64.29	61.00

*1 : ODグループ数、*2 : ODグループで利用可能な選択肢数の総和

*3 : ODグループ内で選択確率が最大となる選択肢に対する推計値 (選択確率) の的中率

棄却できないことがわかる。よって、駅アクセスと駅イグレスに共通するパラメータが等しいという仮説が支持される。

b) 鉄道経路選択モデル

鉄道経路の選択肢は、駅間所要時間 (乗車待ち時間および乗り換え時間を含む) の順位をラベルとするものである。これに対する選択確率の実績 (推定サンプル内シェア) は表-9のとおりである。交通目的によらず、選択確率は、経路の所要時間ランクに符合して高くなっているが、第3位以降の経路も約30%利用されている。これは、鉄道経路の選択要因が駅間所要時間だけではないことを示している。

鉄道経路選択モデルの推定結果を表-10に示す。買物・私事目的で、「乗車料金/路線距離」のパラメータが統計的に有意とならなかったものの、すべてのパラメータは論理的に妥当な符号条件を示している。「JR線ダミー」は、車両のキャパシティや快適性など路線の固定効果を表わすと考えられるが、パラメータの推定バイアスを緩和することが目的であるから、統計的な有意性

は問わない。モデルの精度は、サンプル数の少ない業務目的で尤度比が0.23と若干低いが、五者択一の多肢選択であることを考えれば、十分な結果と言えよう。駅アクセス・イグレス交通手段の合成効用値のパラメータは、すべての交通目的について十分なt値を示している。これは、鉄道経路の選択において、駅アクセス・イグレス交通手段のサービスレベルが重要であることを示唆し、式(2)の妥当性を裏付けるものである。また、同パラメータは、すべての交通目的について[0,1]の範囲にあり、駅アクセス・イグレス交通手段の選択を下位とする選択序列の有意性が認められる。

さらに、このモデルでは、鉄道運行サービスに関わる多くの要因が組み込まれているが、「乗車内時間」、「乗車待ち時間」、「乗り換え時間」の3者について、推定パラメータの妥当性を考察する。パラメータの大小関係は概ね、乗車内時間 < 待ち時間 < 乗り換え時間であり、乗車内時間に対する抵抗が小さく、乗り換え時間に対する抵抗が最も大きいことがわかる。これは経験的に妥当な関係と言える。推定パラメータの比をとって

表-11 代表交通手段選択モデルの推定結果 (WESML推定)

() : t値

選択肢	説明変数	通勤	通学	買物・私事	業務
徒歩/二輪	δ_1 旅行時間(λ) ^{*1}	-0.7652 (-43.60)	-2.653 (-25.25)	-1.643 (-40.81)	-1.483 (-29.56)
自動車	δ_2 乗車内時間(λ)	-0.5477 (-28.18)	-2.263 (-20.73)	-1.052 (-23.58)	-0.8552 (-15.84)
	δ_3 ln [駐車容量/従業者数]	0.5309 (17.91)	0.4071 (2.96)	0.3416 (7.38)	0.4700 (9.10)
	δ_4 駐車場整備地区外ダミー	0.5534 (8.76)	0.1053 (0.74)	0.4843 (7.08)	0.2778 (3.15)
	δ_5 定数項	-3.556 (-27.47)	-7.539 (-25.87)	-5.070 (-38.59)	-3.032 (-19.00)
	バス	δ_6 乗車内時間(λ)	-0.5303 (-23.88)	-1.309 (-13.25)	-0.6456 (-13.82)
バス	δ_7 アクセス・イグレス	-0.0987 (-12.22)	-0.0755 (-6.59)	-0.0974 (-10.86)	-0.1052 (-5.78)
	δ_8 乗車待ち時間	-0.1061 (-10.31)	-0.1075 (-6.89)	-0.1424 (-10.91)	-0.1340 (-5.39)
	δ_9 定数項	-2.468 (-14.64)	-8.190 (-21.92)	-5.166 (-28.46)	-4.827 (-16.64)
	鉄道	μ^m/μ^w 鉄道経路の合成効用	0.6397 (31.82)	0.4999 (15.93)	0.6176 (22.87)
	δ_{10} 定数項	-8.312 (-44.58)	-15.40 (-26.59)	-11.86 (-40.55)	-9.802 (-29.56)
	λ	0.4	0.1	0.2	0.2
	サンプル数 ^{*2}	11,025	4,211	9,821	11,523
	ケース数 ^{*3}	38,038	14,752	35,330	40,192
	尤度比 ρ^2	0.3937	0.4561	0.3969	0.6915
	的中率 % ^{*4}	66.57	71.67	66.68	85.59

*1: $x(\lambda) = (x^\lambda - 1)/\lambda$ for $\lambda \neq 0, x > 0$

*2: ODグループ数、*3: ODグループで利用可能な選択肢数の総和

*4: ODグループ内で選択確率が最大となる選択肢に対する推計値(選択確率)の的中率

みると、乗車待ち時間1分は、乗車内時間に換算して2.4分(業務)~6.8分(通学)、同様に乗り換え時間1分は2.4分(通勤)~12.23分(通学)に相当することが分かる。

c) 代表交通手段選択モデル

代表交通手段選択モデルの推定結果を表-11に示す。この中で各交通手段の乗車内時間(徒歩/二輪では旅行時間)は、前述2.(2)のように効用に関する非線形性を仮定し、Box-Cox変換を行っている。推定結果をみると、通学目的で駐車場整備地区外のダミーが有意ではないものの、それ以外のパラメータは符号条件を満足し、t検定の信頼度は95%以上である。特に駐車場のサービスレベル「駐車容量/従業者数の対数」が、すべての交通目的で有意となり、自動車利用の制約要因となることが認められた。「駐車場整備地区外のダミー」は、駐車容量を駐車場整備地区内に限定することのバイアスを緩和する定数であるから、特に有意性を問題としない。また、鉄道経路の合成効用値のパラメータは、すべての交通目的について十分なt値を示し、かつ[0,1]の範囲にあることから、仮定した選択序列の妥当性が検証された。尤度比は、最も低い通勤目的でも0.39に達し、モデルの精度は良好と言える。

つぎに、Box-Coxパラメータ λ に注目する。パラメータ λ は、対数尤度が最大となるところで特定した結果で

表-12 乗車内時間に対する集計弾力性の比較

	通勤	通学	買物等	業務
$\hat{\lambda}$ の場合	徒歩/二輪 -1.206	-0.377	-0.862	-0.868
	自動車 -0.245	-0.968	-0.316	-0.071
	バス -0.713	-0.493	-0.459	-0.442
	鉄道 ^{*1} -0.159	-0.026	-0.100	-0.217
$\lambda=1$ の場合	徒歩/二輪 -1.004	-0.252	-0.572	-0.497
	自動車 -0.160	-0.504	-0.127	-0.026
	バス -0.586	-0.361	-0.286	-0.294
	鉄道 ^{*1} -0.150	-0.025	-0.086	-0.196

*1: 鉄道は全経路の乗車内時間が同時に変化した場合

あるが、すべての交通目的で[0,1]の範囲に収まっている。これは、乗車内時間が長くなるにつれ、時間の評価が緩やかになる傾向を表わし、Leiserらが示した式(12)と同様の特性をもつ。ただし、 λ は0.1~0.4であり、Leiserらの指数パラメータ0.74より小さい。これは式(16)で示したように、知覚誤差の不均一分散の影響と考えられる。

さらに、Box-Cox変換の有意性を検証するために、 $\lambda=1$ の場合(線形)と比較する。表-12は、乗車内時間(徒歩/二輪では旅行時間)に対する選択確率の集計弾力性を示す。 $\lambda=1$ の場合と比べ弾力性は総じて高くなっ

表-13 尤度比の比較

	通勤	通学	買物等	業務
$\lambda=1$ の場合	0.3884	0.4387	0.3832	0.6849
$\hat{\lambda}$ による場合	0.3937	0.4561	0.3969	0.6915

表-14 モデル全体の尤度

	通勤	通学	買物等	業務
初期対数尤度	-18,058	-8,085	-15,049	-15,269
最大対数尤度	-11,132	-4,671	-9,070	-5,073
尤度比 ρ^2	0.384	0.422	0.397	0.668

ていることがわかる。特に、どの交通目的でも自動車の弾力性は、 $\lambda=1$ の場合の約2倍である。結果的には、より感度の高いモデルが得られたと言える。また、 $\lambda=1$ の場合と尤度比を比較してみると、表-13のとおりであり、Box-Cox変換の導入によって、モデル精度の向上が確認できる。

d) 全体モデルの有意性

以上の段階推定によって得られた結果を整理する。表-14は、モデル全体の対数尤度を示したものであるが、尤度比を見ると、最も低い通勤目的で0.384、最も高い業務目的で0.668が得られており、モデルの精度は良好と言えよう。また、本モデルで仮定した選択構造(図-2)が成立するためには、各選択段階のスケールパラメータが駅アクセス、駅イグレスのそれぞれを基準として

$$\mu^m < \mu^w < \omega \quad \text{and} \quad \mu^m < \mu^w < 1.0 \quad (32)$$

を満たさなければならない。つまり、下位に2つの独立な選択を含むNested Logitモデルでは、つぎの条件を満たす必要がある。

$$\mu^m < \mu^w < \min(\omega, 1.0) \quad (33)$$

ここで、推定されたスケールパラメータを整理してみると、表-15のとおりであり、どの交通目的についても上記条件を満たしていることがわかる。これより、仮定したモデルの選択構造の有意性が検証された。また、あらためて選択段階間のスケールパラメータ比を見ると、 μ^w/ω の値が最も大きく、0.835(通学)~0.940(買物・私事)と1に近い値を示している。これは、駅アクセス交通手段の選択と鉄道経路の選択が、ほぼ同時であることを示唆し、駅アクセス交通手段に応じて乗車駅が使い分けられる状況を表わしている。今後、選択構造をより単純化するためには、駅アクセス交通手段と鉄道経路の同時選択を仮定することが一つの方策と考えられる。

表-15 選択段階別のスケールパラメータ

	通勤	通学	買物等	業務
駅イグレス手段	1.0	1.0	1.0	1.0
駅アクセス手段 ω	0.5408	0.6109	0.7746	0.8396
鉄道経路 μ^w	0.4583	0.5104	0.7284	0.7040
代表交通手段 μ^m	0.2932	0.2551	0.4499	0.4401

5. まとめと今後の課題

本研究では、都市圏レベルで自動車と公共交通機関の複合的利用を評価することを目的に、鉄道に結節する交通行動を考慮した、より広範囲な交通手段選択モデルを示した。本研究で得られた主な結論は、つぎのとおりである。

(1) 鉄道の路線、乗車駅、降車駅、駅アクセス交通手段、駅イグレス交通手段がすべて選択可能な状況に対して、選択次元の集約化により簡潔な選択構造を示した。具体的には、都市圏レベルの需要予測にも対処できるように、一般性の高い「鉄道経路」選択肢の生成方法と、効率的なラベリング方法の一案を示し、多項ロジットモデルを適用した。実証分析の結果、様々な交通目的のトリップについて統計的に有意なモデルが推定され、本方法の有効性が認められた。

(2) 駅アクセス交通手段と駅イグレス交通手段の関係について、パラメータの等価性、および分散スケールの違いを仮定し、一貫性のある選択構造を示した。実証分析の結果、この仮定の有意性が認められた。

(3) 代表交通手段の旅行時間について、知覚値の非線形性と知覚誤差の不均一分散を考慮するためにBox-Cox変換を導入した。結果的には、Box-Cox変換を行うことでモデルの精度が向上することを確認した。

(4) 本研究で仮定したNLモデルの全体構造、すなわち代表交通手段、鉄道経路選択、駅アクセスおよびイグレス交通手段の選択ツリーが、様々な交通目的のトリップに対して成立し、複合的な交通手段の選択モデルが有効であることを示した。このモデルにより、総合的な交通施策の評価が可能となる。例えば、都心部の駐車場対策と郊外部のP&R駐車場対策を、都市圏全体の駐車政策というフレームの中で、一元的に評価することができる。また、バス運行計画の立案に際して、代表交通手段としてのバスと、鉄道結節バスを同時に評価しうる。

一方、今後の研究課題も残されている。第一に本モデルのさらなる精練である。特に鉄道経路選択モデルに関して、本研究の鉄道経路選択肢が独立性を満たすか否かの検証が必要であり、今後、代替的モデルの比較検討を通じて明かにしたい。第二に、モデルの実用性を保ちつ

つも、より現実的な交通需要モデルへの展開が必要である。中でも、トリップ分布モデルとの統合、そして宮城から¹⁷⁾が提案するネットワーク均衡モデルへの展開が重要な課題と考えられる。

謝辞：本研究は仙台都市圏第3回パーソントリップ調査の需要予測モデルの検討段階で得られた成果であることを記し、このような貴重な研究機会を与えて頂いた仙台都市圏総合都市交通計画協議会の関係各位、(財)計量計画研究所東北事務所の林一成次長と西山良孝研究員に感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) Clerq,F.L.: A model for multimodal trips, *New Developments in Modelling Travel Demand and Urban Systems*, Jansen,G.R.M. et al. eds., Saxon House, pp.93-115, 1979.
- 2) Ortuzar,J.D.:Mixed-mode travel demand forecasting techniques, *Transpn. Planning and Technology*, vol.6, pp.81-96, 1980.
- 3) Ortuzar,J.D.:Nested logit models for mixed-mode travel in urban corridors, *Transpn.Res.-A*, vol.17, No.4, pp.283-299, 1983.
- 4) Van Der Hoorn,A.I.J.M. et al.: Mode choice and mode captivity in interlocal commuting:Two dutch studies on modal split in congested transportation corridors, *Transpn.Decision Making*, vol.2, pp.373-388, 1984.
- 5) 原田昇, 太田勝敏: Nested Logitモデルの多次元選択への適用一駅・アクセス手段同時選択の場合, *交通工学*, vol.18, No.6, pp.3-11, 1983.
- 6) 石田東生, 加藤勇樹, 谷口守: 大都市近郊地域における手段・駅選択の変更行動, *都市計画論文集*, No.28, pp.73-78, 1993.
- 7) 甲斐博幸, 中村文彦, 太田勝敏: 大都市郊外の鉄道駅におけるK&Rに関する研究, 第44回土木学会年次学術講演会, pp.304-305, 1989.
- 8) 金利昭, 佐藤尚稔, 肥田野登: キス&ライドの発生実態に関する研究, *国際交通安全学会誌*, vol.17, No.3, pp.180-188, 1991.
- 9) 原田昇, 吉田朗: 離散選択モデルによる多次元交通行動の分析とその応用, *行動計量学*, 第20巻1号, pp.21-28, 1993.
- 10) Ben-Akiva,M.,Bergman,M.J. and Ramaswamy,R.: Modeling inter-urban route choice behavior, *Proceedings 9th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*,Volmuller,J. and Hamerslag, R. eds., pp.299-330, 1984.
- 11) 屋井鉄雄, 岩倉成志, 伊東誠: 鉄道ネットワークの需要と余剰の推計方法について, *土木計画学研究・論文集*, No.11, pp.81-88, 1993.
- 12) Leiser,D.and Stern,E.:Determinants of subjective time estimates in simulated urban driving, *Transpn.Res.-A*, 22A, No.3, pp.175-182, 1988.
- 13) Bovy,P.H.L. and Stern,E.:Route Choice:Wayfinding in *Transport Networks*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp.194-201, 1990.
- 14) Mandel,B.,Gaudry,M. and Rothengatter,W.:Linear or non-linear utility functions in logit model? the impact on German high-speed rail demand forecasts, *Transpn.Res.-B*, 28B, No.2, pp.91-101, 1994.
- 15) Ben-Akiva,M. and Morikawa,T.:Estimation of travel demand models from multiple data sources, *Proceedings 11th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, Koshi,M. eds., pp.461-476, 1990.
- 16) Ben-Akiva,M. and Lerman,S.R.:*Discrete Choice Analysis*, MIT Press, Cambridge, Mass., pp.174-179, 1985.
- 17) 宮城俊彦, 水口晴男: 複合交通手段を考慮した交通ネットワーク均衡モデルに関する研究, *土木学会論文集*, No.512/IV-27, pp.25-33, 1995.

(1995. 5. 22 受付)

A MIXED-MODE CHOICE MODEL INCLUDING RAILWAY ROUTE, STATIONS, AND ITS ACCESS AND EGRESS MODES CHOICE

Akira YOSHIDA and Noboru HARATA

In this paper, we propose a extensive choice model for mixed-mode travel which includes railway line, station and its connected mode choice, in order to make possible us to evaluate intermodal transportation strategies combining public transportation with private one. Assuming the condition where is a good choice of railway lines, stations jointed, and its access and egress modes, we give attention to generating a choice set of inclusive railway routes and labeling each one efficiently, and we suppose a common structure between access and egress mode choice behavior. The result obtained by empirical study shows that the nested logit model of mixed-mode choice is statistically significant for any traveler with various kinds of trip purpose.