

鉄道ネットワークの需要と余剰の推計法について

Alternative Approaches in the Estimation of User Demand and Surplus of Rail Network

屋井 鉄雄*・岩倉 成志**・伊東 誠***

By Tetsuo YAI, Seiji IWAKURA & Makoto ITO

Although railway network in the metropolitan area should be remarkably improved, we have some difficulties to calibrate accurate effects by improved level of rail service and to identify the additional lines should be constructed. The purpose of this paper is to propose a new structure for Probit Model using variable covariance matrix and to establish user surplus indices based on random utility theory.

Using Metropolitan Census Data which was conducted in 1990, the above model and indices had been briefly estimated to demonstrate the efficiency of our methods. The results indicate that route choice behavior in complexed railway network should be expressed by considering similarity among routes, and user benefit for ordinary network should be calibrated using expected value of maximum utility.

1. はじめに

今後、ネットワークの概成期を迎える大都市域において、引き続き鉄道整備を効果的に進めるためには、従来にも増して予測精度の高い需要推計技法や利用者便益の的確な評価方法が必要になる。このため従来から多くの研究が行われているが、理論的かつ簡便で一般性を有するものとなるとまだ充分とは言えない。非集計ロジットモデルを用いて鉄道経路別の需要を予測する方法は、運輸政策審議会の予測で用いられて以来、各地方の都市鉄道整備等の予測方法として定着している。また、非集計モデルの効用関数を用いたショートカット理論による利用者便益の計算等は行われてきた。

そこで、本研究では、非集計モデルに乗換抵抗や混

雑等を含む多くの政策要因を導入し、選択実績を用いたモデル化の有効性を改めて示すと共に、新しい考え方を導入した需要モデルと利用者便益式との2つの方法論を提案する。すなわち、2. では非集計モデルにより混雑費用及び乗換抵抗を計量化する一方で、互いに重複しあう経路選択肢の相互関係を考慮した、従来にはないプロビットモデルを提案し、その基本特性を考察している。3. では経路選択モデルの最大効用の期待値を用いて利用者便益を貨幣タームで推計する2、3の方法を提案する。4. では3. で提示した方法を、仮想ネットワークに対するシミュレーション分析によって比較検討を行う。

鉄道の需要推計及び利用者便益の計測手法に関する従来の研究を整理すると概ね図-1の様になる。

需要推計法として非集計モデル、集計モデル、利用者均衡モデルの3種が研究されてきた。非集計ロジットモデルによる鉄道経路の選択モデルには、RPデータを利用した森地ら¹⁾、SPデータを利用した肥田野

キーワード：鉄道経路選択モデル、利用者便益計測

*正会員 工博 東京工業大学 助教授 工学部土木工学科
(〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

**正会員 工修 東京工業大学 助手 工学部土木工学科

***正会員 (財)運輸経済研究センター
(〒105 東京都虎ノ門1-3-6)

ら²⁾がある。非集計モデルの実務分野での適用は数多く、モデル精度や空間移転性等を向上させるアプリケーションの開発も進んでいる³⁾。また、集計ロジットモデルを用いた経路選択モデルも作成され⁴⁾、利用者均衡モデルを用いた研究では、混雑費用をリンク費用に取り入れた利用者均衡式を制約条件として観測リンク交通量から係数推定を試みた家田ら⁵⁾の研究等がある。一方、需要関数が作成できれば利用者便益の推計が可能であり、非集計ロジットモデルの最大効用の期待値から推計する方法、ショートカット理論によって推計する方法、利用者均衡配分法によって得られるリンク費用によって推計⁵⁾する方法等がある。第1の方法では効用関数を用いた評価が行える。住宅環境改善による便益計測のため森杉ら⁶⁾は、住宅立地を表す非集計ロジットモデルの所得と住宅価格にかかるパラメータを用いて便益を貨幣タームで推計する方法を示した。ショートカット理論による方法は需要関数により得られる一般化費用を用いて計測できる²⁾。同方法は貨幣タームで余剰計測ができるが、近似解の故に発生する誤差に注意が必要である。以上が既存の鉄道ネットワークの需要推計法と利用者便益の推計法の概要である。

2. 鉄道ネットワークの需要推計法

ここでは非集計ロジットモデルを用いた効用関数によって通勤交通の混雑及び乗換抵抗の評価値を考察すると共に、プロビットモデルを応用して、今後要求される高密度な鉄道ネットワークに対応した需要推計手法の開発を行う。

(1) 分析に用いたデータ

平成2年に実施された大都市交通センサスのうち東京圏における通勤目的のデータを分析に用いた。全データは膨大であるが、これより地域的なバランスを考慮しつつ首都圏内を発地とし、着地を東京都心に持つ854サンプル、神奈川県内、埼玉県内、千葉県内の226サンプルを抽出して、現実的な代替経路のデータを作成している。サンプルは地域ブロック間ODや年齢階層別にもほぼ母集団を反映する様ランダムに抽出している。(2)のモデル化には1080票の内、代替経路を設定しにくいサンプル69票を除いた1011票を用いた。

(4)では、1011票から選択実績と重複する区間を持つ代替経路を有すサンプルを再抽出して、第2の代替

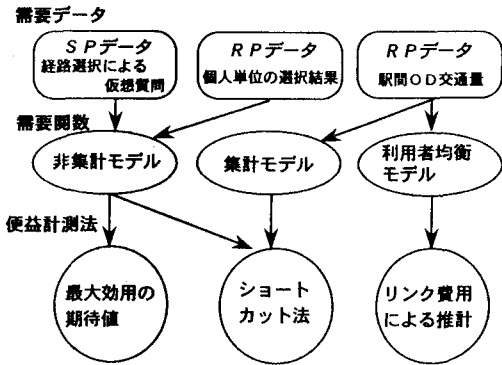


図-1 既存研究の適用データと推計手法の関係

経路とし、計3選択肢を持つデータを作成した。モデル特性を反映するため代替経路の設定は選択経路と各代替経路間の経路分岐点が基本的には異なっている。再抽出したサンプル数は275票である。モデル作成には通常300サンプル程度あれば良いとの判断から、データ作成の作業量の問題もあり、この程度の再抽出とした。

(2) ロジットモデルによる効用関数の考察

従来から実用的に用いられる2肢選択のロジットモデルを用いて、変数組の組み替えや変数変換を行いパラメータ推定を行った結果を以下に示す。

U=-0.00462 LHC-0.153 ACT-0.183 EGT-0.119 LHT -0.0972 TRS
(-3.62) (-7.61) (-7.38) (-8.79) (-3.68)
-0.106 TRL-0.208 WAT -0.000000262 COZ
(-3.28) (-6.04) (-1.79) ()t-value
ここで、LHC：ラインホル費用（円／回）
1カ月の定期代を50で割った値
ACT：アクセス時間（分）
EGT：イグレス時間（分）
LHT：ラインホル時間（分）
TRS：乗換時の昇り階段時間を2乗した値（分²）1.667段／秒で変換
TRL：水平歩行時間＋降り階段時間（分）
WAT：列車待ち時間（分）
COZ：区間別混雑度を2乗し区間所要時間をかけ経路全体で加算（分・％²）

全変数のt値は有意で、尤度比は0.20であった。この効用関数では、乗車時間の評価値が25.8円／分となり、従来の研究などと比較しても妥当な値になっている。また、アクセス時間33円／分、イグレス時間40円／分となり、いずれも乗車時間より大きな評価と言えそうである。ターミナルでの乗換抵抗の効用値と生理学的な分析を行った先行調査⁷⁾と比較した結果が図-2である。横軸の歩行時間の増加に伴って左側の縦軸の効用は下がり、右側の縦軸の消費エネルギーは増えることが表されている。黒丸は本モデルのパラメータを用いた効用の減少傾向を表しているが、全く別の調査で

別のデータであるにも関わらず、2種類の黒丸の右上がりの傾向はエネルギー消費の上昇傾向に比較的似ていることがわかる。なお、昇りの変数を2乗せずに導入したモデルでも同様な傾向を観測している。ただ選択経路だけをデータとして得るだけで、この様に詳細な影響要因のパラメータを特定できることは大変に有意義である。また次に、混雑要因だけを取り出して考察すると、図-3に示す様に効用に対して非線形な関係が表されていることが分かる。乗車時間に依存して不効用が変化する。たとえば、60分間乗車するとして、250%の混雑度が150%に改善されれば、一人当たりの支払意志額が140円ほどであることが読み取れる。混雑費用の先行研究では肥田野ら²⁾が意向データでモデル化した場合に250%から150%で40円~50円の評価値を得ている。以上に示したように、従来の鉄道経路選択データを用いれば、多くの政策要因を含む適用性の高いモデルが簡便に作成できることを示した。

(3) プロビットモデルによる経路選択モデルの提案

今後の都市鉄道の整備を考えると、既存路線と多くの駅で交差する新線の整備や高密度な駅配置等が予想されるが、この様な高密度なネットワークに応じた精緻な需要推計を行うためには、ロジットモデルによる選択経路間の独立性の仮定が強過ぎる制約条件となる場合も考えられる。また、ネスティッドロジットモデルを用いるためには図-4に示す分岐するMの位置が不変であることが要求される。そこで、本研究ではプロビットモデルの確率項を従来とは異なる仮定のもとで定式化することによって、選択経路間の類似性の任意の違いを包括的に表現可能なモデルの提案を行う。これにより、従来から課題とされてきた、非集計モデルによる経路選択行動のモデル化の実用性を格段に改善することが可能であると考えられる。

ランダム効用理論による選択確率は式(1)から式(4)で表現できる。

$$U_{jn} = V_{jn} + \varepsilon_{jn} \quad [j \in C_n] \quad (1)$$

ここでjは選択経路、 C_n は選択肢集合とする。また V_{jn} は確定項、 ε_{jn} はランダム項である。

$$P_n(i) = \Pr\{U_{in} \geq U_{jn}, \forall j \in C_n, i \neq j\} \quad (2)$$

$$P_n(i) = \Pr\{\eta_{ij} \leq V_{in} - V_{jn}, \forall j \in C_n, i \neq j\} \quad (3)$$

$$\eta_{ij} = \varepsilon_{jn} - \varepsilon_{in} \quad (4)$$

プロビットモデルは η が正規分布に従うと仮定し、3肢選択の場合の選択確率は式(5)になる。

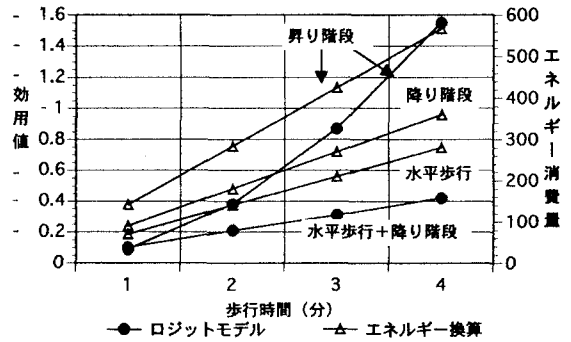


図-2 エネルギー消費量とパラメータ推計値の比較

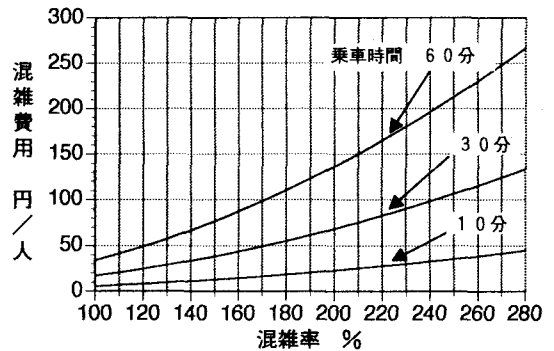


図-3 混雑率と乗車時間別の混雑費用推計値の関係

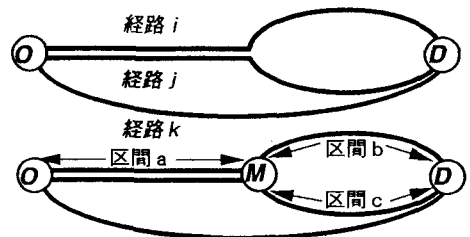


図-4 重複した鉄道経路及び区間の概念図

$$P_n(i) = \int_{-\infty}^{V_i - V_j} \int_{-\infty}^{V_i - V_k} \phi(\eta_{ij}, \eta_{ik}) d\eta_{ij} d\eta_{ik} \quad (5)$$

ε の分散共分散マトリックスは式(6)で表される。

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \delta_{ii} & \delta_{ij} & \delta_{ik} \\ \delta_{ji} & \delta_{jj} & \delta_{jk} \\ \delta_{ki} & \delta_{kj} & \delta_{kk} \end{pmatrix} \quad (6)$$

ここで(6)の各要素をパラメータとして同時に推定するのが従来のプロビットモデルである。従って、経路選択では各サンプルごと、また各ODごとに経路集合の組み合わせが異なり、経路間の類似性も任意に変わるため、このモデルを利用できなかった。そこで、本研究では共分散を経路集合ごとに一定の定義に従って設定して、経路間の類似性を表現可能とした。

ここで式(1)の誤差を経路の長さに依存する誤差 ε_i^{-1} と

経路固有の誤差 ε_i に分離して考える。

$$\varepsilon_i = \varepsilon_i^1 + \varepsilon_i^0 \quad (7)$$

経路の長さ依存する誤差項の分散が経路によらず一定であると考えれば、誤差の分散共分散行列は式 (8) で与えられる。

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \sigma^2 & \sigma_{ij} & \sigma_{ik} \\ \sigma_{ij} & \sigma^2 & \sigma_{jk} \\ \sigma_{ik} & \sigma_{jk} & \sigma^2 \end{pmatrix} + \sigma_0^2 \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

ここで、単位区間当たりの誤差が相互に独立に分布すると考えると、共分散 σ_{ij} は図-4 を例とすれば、各区間の分散共分散から、

$$\sigma_{ij} = \sigma_a^2 + \sigma_{ac} + \sigma_{ab} + \sigma_{bc} \quad (9)$$

と表されるが、独立性の仮定より $\sigma_{ac} = \sigma_{ab} = \sigma_{bc} = 0$ であり、結局、

$$\sigma_{ij} = \sigma_a^2 \quad (10)$$

となる。 σ_a^2 は σ^2 、全長 L 、 i, j の間の重複区間長 L_{ij} を用いれば、

$$\sigma_{ij} = \frac{L_{ij}}{L} \sigma^2 \quad (11)$$

と表される。しかし L は経路ごとに異なるため、これを幾何平均で代表し、

$$\sigma_{ij} = \frac{L_{ij}}{\sqrt{L_i L_j}} \sigma^2 = W_{ij} \sigma^2 \quad (12)$$

とした。よって誤差の分散共分散行列 Σ は、

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \sigma^2 + \sigma_0^2 & W_{ij} \sigma^2 & W_{ik} \sigma^2 \\ W_{ij} \sigma^2 & \sigma^2 + \sigma_0^2 & W_{jk} \sigma^2 \\ W_{ik} \sigma^2 & W_{jk} \sigma^2 & \sigma^2 + \sigma_0^2 \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$= (\sigma^2 + \sigma_0^2) \begin{pmatrix} 1 & \theta W_{ij} & \theta W_{ik} \\ \theta W_{ij} & 1 & \theta W_{jk} \\ \theta W_{ik} & \theta W_{jk} & 1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

ただし、

$$\theta = \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + \sigma_0^2} \quad (15)$$

である。 θW_{ij} を式 (16) のように表し、 η の分散共分散に変換すれば、

$$W'_{ij} = \theta W_{ij} \quad (16)$$

$$\Omega = \begin{pmatrix} 2-2W'_{ij} & \text{sym.} \\ 1-W'_{ij}-W'_{ik}+W'_{jk} & 2-2W'_{ik} \end{pmatrix} \quad (17)$$

を得る。式 (17) のマトリックスをモデルの誤差分散として導入すれば、経路間の選択肢の類似性を明示的に表現したモデル化が可能になる。選択肢集合次第で重複率が異なる点が考慮されるため、個人単位で類似性の違いを表せるモデルとなっている。

以上によって、式 (5) の Φ は平均 0、分散 Ω で与えられる。 Φ を正規化した選択肢 i の選択確率を次式で与える。

表-1 経路選択モデルのパラメータ推定結果
() 内七値

説明変数		PROBIT	LOGIT
ラインホール費用	(円)	-5.11e-3 (3.48)	-7.51e-3 (3.97)
アクセス時間	(分)	-1.24e-1 (3.45)	-1.86e-1 (3.78)
イグレス時間	(分)	-1.38e-1 (2.95)	-2.24e-1 (3.61)
ラインホール時間	(分)	-5.36e-2 (3.48)	-8.00e-2 (3.66)
乗換時間 [昇り階段]	(分 ²)	-5.01e-2 (2.09)	-8.96e-2 (2.41)
乗換時間 [水平+降り階段]	(分)	-2.46e-2 (0.871)	-2.22e-2 (0.525)
待ち時間	(分)	-1.78e-1 (4.43)	-2.67e-1 (4.88)
ラインホール時間×遅延率 (分・%)		-4.50e-8 (0.277)	-8.64e-8 (0.374)
始発駅数	(駅)	2.35e-1 (1.92)	3.87e-1 (2.34)
分散パラメータ θ		4.77e-1 (1.12)	
初期尤度 $L(0)$		-302.12	-302.12
最終尤度 $L(\theta)$		-261.14	-259.68
尤度比 ρ^2		0.136	0.140
サンプル数 N		275	275

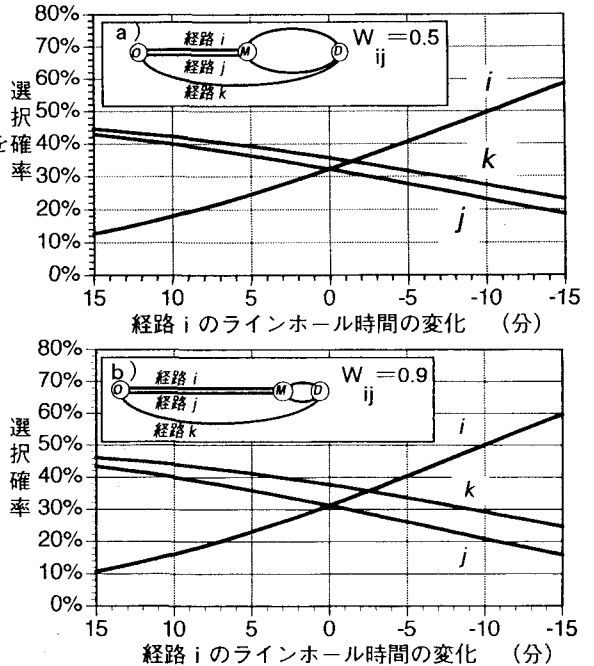


図-5 重複率とモデルの特性 a) b)

$$P_n(i) = \int_{-\infty}^{D_{ij}} \int_{-\infty}^{D_{ik}} \phi(\zeta_{ij}, \zeta_{ik}; \rho) d\zeta_{ij} d\zeta_{ik} \quad (18)$$

$$D_{ij} = (V_i - V_j) / (2-2W'_{ij})^{0.5} \quad (19)$$

$$D_{ik} = (V_i - V_k) / (2-2W'_{ik})^{0.5} \quad (20)$$

相関係数を ρ で表すと、

$$\rho = \frac{1-W'_{ij}-W'_{ik}+W'_{jk}}{(2-2W'_{ij})(2-2W'_{ik})^{0.5}} \quad (21)$$

である。パラメータの推定は式 (14) の対数尤度関数を最大にすることで求められる。

$$\ln L(\theta) = \sum_n \ln P_n(i) \rightarrow \max \quad (22)$$

以上、本方法によって鉄道経路選択モデルにプロビットモデルを用いることが可能になる。本方法の長所は、

新線整備により選択肢が増加した場合であっても空間的な重複率を同様に設定できるため容易に選択確率の計算が行える点にある。

(4) プロビットモデルによる経路選択モデルの構築

(3) で定式化した経路選択モデルを用いて3肢選択のモデルパラメータを推定した結果を表-1に示す。パラメータ推定計算にはGAUSS (V2.01)を用いた。右列は同じサンプルを用いてロジットモデルで推計した結果である。分散のパラメータは0.477であり、t値は幾分低いが、重複率が共分散項として影響することが分かる。

また、乗換えや混雑率等のパラメータの有意性が低い点は、今後サンプル数を増すなどして更に検討する必要がある。

図-5にはこのモデルを用いて図-4の経路i, j間の重複率が異なる場合に、各経路の選択確率がどのように変化するかを描いてみた。但し、経路j, kのラインホール時間は同一で一定であるが、経路iは+15分から-15分まで変化させている。i, j間の類似性が高い図-5(b)では、iとjとの競合が一層激しい様子が描かれている。これらの図では、3経路全てのラインホール時間が等しい場合にもk経路の確率が1/3より大きいことが明らかである。

3. 利用者便益の計測

経路選択モデルを用いた利用者便益の推計方法には、消費者余剰の概念を用いて一般化費用により求める方法と最大効用の期待値により求める方法との2通りが考えられる。従来の一般化費用を用いた計測はショートカット理論により次式で表される。

$$UB = \frac{1}{2} \sum_{i \in C} (C_i^0 - C_i^1) (Q_i^0 + Q_i^1) \quad (23)$$

ここで、Cは効用関数を費用パラメータにより除して得られる一般化費用、Qは経路毎の交通量である。この方法では、新線整備が行われた場合（選択肢が増えた場合）の余剰の計測にあたって、整備前の一般化費用の初期値設定や選択肢の増加による効用増大の計測理論等で若干の問題が残る。

そこで本研究では最大効用の期待値を用いて効用変化を貨幣換算する方法を提案する。従来、住宅立地モデルに所得項を導入しておくことにより、その項の変化分を用いて余剰額を金額換算する方法が提案されているが⁶⁾、本研究ではこれを経路選択モデルの運賃パ

ラメータで推計する方法として新たに導出している。なお、選択肢間の類似性の問題が顕在化する状況では、先に提案したプロビットモデル等の適用が考えられる。その場合にも最大効用の期待値に基づく便益計算は数値積分を用いれば可能であるが、本研究ではまず、従来から実用化が進んだロジットモデルに対する便益計算方法の確立が急務と考え、ロジットモデルに限定して展開を進めている。

(1) 最大効用の期待値を用いたEV、CVの測定

消費者の支払い意思額の算定には各選択経路に対して共通額を推計する方法と特定の選択肢に着目して推計する2通りの方法を考えた。後者の場合、最も効用の大きい経路に対する支払意思額、新線やサービス改善路線の支払意思額を推計する。

非集計ロジットモデルによる需要関数から得られる最大効用の期待値は式(24)で表され、式(25)(26)で与えられる。E⁰を改善前、E¹を改善後とすると、

$$E(\max_{j \in C} V_j + \epsilon_j) \quad (24)$$

$$E^0 = \ln \sum_{j \in C} e^{V_j^0} \quad (25)$$

$$E^1 = \ln \sum_{j \in C} e^{V_j^1} \quad (26)$$

である。ここでEV（等価変分）を考え、これを各選択肢に共通な支払意思額 $\Delta \bar{C}$ によって定義すれば、

$$E^1 = \ln \sum_{j \in C} e^{V_j^0 + \beta \Delta \bar{C}} \quad (27)$$

となり、結局 $\Delta \bar{C}$ は次式で示される。ここで β は経路選択モデルの費用パラメータである。

$$\Delta \bar{C} = (E^1 - E^0) / \beta \quad (28)$$

この場合EVの代わりにCVを考え改善前の効用水準に一致させる支払意思額を計算しても、(28)式と同一の結果となる。

一方、支払意思額を特定の経路kのみに着目した値として展開すると、

$$E^1 = \ln \left(\sum_{j \in C-1} e^{V_j^0} + e^{V_k^0 - \beta \Delta C_k} \right) \quad (29)$$

となる。ここで右辺第2項の V_k^0 は最も効用の大きい経路もしくはサービスが改善された経路の改善前の効用と考えられる。式(29)を展開すれば、

$$\sum_{j \in C} e^{V_j^1} = \sum_{j \in C-1} e^{V_j^0} + e^{V_k^0 - \beta \Delta C_k} \quad (30)$$

$$\Delta C_k = - \left(\ln \left(\sum_{j \in C} e^{V_j^1} - \sum_{j \in C-1} e^{V_j^0} \right) - V_k^0 \right) / \beta \quad (31)$$

式(31)によって、 ΔC_k が計算される。この方法でCVを導出すると式(32)となり、EVとは一致しない。

$$\Delta C_k = \left(\ln \left(\sum_{j \in C} e^{V_j^0} - \sum_{j \in C-1} e^{V_j^1} \right) - V_k^1 \right) / \beta \quad (32)$$

同様にして新線Sが整備された場合のCVの測定は、

サービス改善後の新路線 V_s に着目して、次式で計算できる。

$$E^0 = \ln \left(\sum_{j \in C} e^{V_j^0} + e^{V_s + \beta \Delta \bar{C}} \right) \quad (33)$$

$$\Delta \bar{C}_s = \left[\ln \left(\sum_{j \in C} \left(e^{V_j^0} - e^{V_j^1} \right) - V_s \right) \right] / \beta \quad (34)$$

OD間の利用者全体の便益の推計は、式(28)で得られた $\Delta \bar{C}$ に OD 交通量 Q を乗じて以下の様に算出することができる。

$$UB = Q^1 \Delta \bar{C} \quad (35)$$

この方法では経路別の交通量を必要とせず、発生する利用者全てに共通な効用の増加分を全交通量 Q に乗ずる点でショートカット法にない特徴がある。また式(31)(32)(34)の方法では特定の経路 j の交通量と支払意思額とを用いて次のように算出する方法が考えられる。

$$UB = Q^1 \Delta C_j \quad (36)$$

この考えは特定の経路のみが改善され、他は変化しない場合など、特定の選択肢に着目する必要性が高い場合に利用できると思われる。本方法の利用によってネットワーク整備による利用者便益の貨幣タムによる計測も可能になる。

また、サービス改善前後で分布パターンが変化する場合には、目的地選択モデルをNested Logit構造で作成しておき、経路選択モデルを用いた包括費用を組み込むことで対処できる。すなわち、サービス改善前の目的地選択の最大効用の期待値は、

$$E^0 = \ln \sum_{d \in M} e^{V_d^0 + \lambda \ln \sum_{j \in C} e^{V_j^0}} \quad (37)$$

で表される。ここで V_d^0 はアクセシビリティを除いた目的地の効用部分、第2項は目的地 d への鉄道サービスによるアクセシビリティを意味する。またサービス改善後は同様に、

$$E^1 = \ln \sum_{d \in M} e^{V_d^1 + \lambda \ln \sum_{j \in C} e^{V_j^1}} \quad (38)$$

と表される。ここで、鉄道サービスの改善に対する支払意思額を $\Delta \bar{C}$ として、式(27)と同様に考えれば、

$$E^1 = \ln \sum_{d \in M} e^{V_d^1 + \lambda \ln \sum_{j \in C} e^{V_j^1 + \beta \Delta \bar{C}}} \quad (39)$$

$$E^1 = \beta \Delta \bar{C} + \ln \sum_{d \in M} e^{V_d^1 + \lambda \ln \sum_{j \in C} e^{V_j^1}} \quad (40)$$

となり、結局 $\Delta \bar{C}$ は(28)式と同様に、

$$\Delta \bar{C} = \left(E^1 - E^0 \right) / \beta \quad (41)$$

となることがわかる。式(41)にゾーン別発生量 T を乗じることによって、整備前後で OD 量が変化した場合の便益額の推計が行えることになる。

$$UB = T \left(E^1 - E^0 \right) / \beta \quad (42)$$

(2) 本方法とショートカット理論の関係

先に述べたように本方法ではネットワークの効用水準を用いた支払意思額にゾーン間 OD 交通量を乗ずることによって利用者便益が推計できるが、ショートカット法では各経路の需要量と一般化費用との事前及び事後の値を推計することによって利用者便益が計算できる。

ここではショートカット理論により導出される式(23)と本方法で示した式(28)との関係を考える。式(28)を(35)に代入した後、ロジットモデル P_j を用いて書き換えると、利用者便益 UB_E は次式となる。

$$UB_E = \frac{\sum Q_j^0 V_j^0 - \sum Q_j^1 V_j^1}{\beta} - \frac{\sum Q_j^0 \ln P_j^0 - \sum Q_j^1 \ln P_j^1}{\beta} \quad (43)$$

右辺第1項は確定効用と経路 OD 交通量を乗じた数値の差を表す項である。右辺第2項はエントロピーの差と形式的に同一な項である。一方、式(23)のショートカット法を展開して、書き換えると、

$$UB_S = \frac{\sum Q_j^0 V_j^0 - \sum Q_j^1 V_j^1}{\beta} - \frac{\sum \left(V_j^0 + V_j^1 \right) \left(Q_j^0 - Q_j^1 \right)}{2\beta} \quad (44)$$

を得る。(43)式と(44)式の第1項が等しいことを用いて、(44)式を(43)式に代入すれば、 UB_E は次の様に書き換えられる。

$$UB_E = \frac{1}{2} \sum \left(C_j^0 - C_j^1 \right) \left(Q_j^0 + Q_j^1 \right) + \frac{\sum \left(V_j^0 + V_j^1 \right) \left(Q_j^0 - Q_j^1 \right)}{2\beta} - \frac{\sum Q_j^0 \ln P_j^0 - \sum Q_j^1 \ln P_j^1}{\beta} \quad (45)$$

これが両者の関係を表す式と言える。すなわち、本研究で示した便益(43)式は従来のショートカット法による便益(44)式とは(45)式で表されるような関係にあることが明らかになった。

4. 便益計算式の比較検討

ここでは以下に示す仮想的な簡単なネットワークを用いて、以上に示した需要モデルと便益推計法の簡単な適用方法と方法間の比較を試みることにした。なお、ここでを行っている計算は、当然ながら実際の複雑なネットワークにも適用可能である。

(1) 分析に用いたデータ及びケース設定

対象とする鉄道ネットワークは図-6に示した5つのゾーン(ノードと一致)と8つのリンクを持っている。ここを流れるゾーン間の OD 交通量は表-2に示

した通りと仮定する。また、各リンクの所要時間、列車の表定速度、運行車両数、輸送力を表-3に示した。ここで各ノードでの乗換抵抗は考慮しないため、どのゾーンからも目的ゾーンへ直通列車が運行している状況を仮定したことになる。

シミュレーションは現況（ケース0）に対して、所要時間の短縮（ケース1）と輸送力の増強（ケース2）との2種類のサービス改善の効果を推計することによって行った。ケース1ではリンク7の所要時間を10分から8分に2分間短縮し、ケース2ではリンク1の運行車両数を40両増やし、輸送力を26880人・両とした。

（2）ネットワークの需要予測方法

ネットワークの需要予測には2.（2）で示した効用関数を利用した。混雑率を含んでいるフローディペンデントな関数形である。したがって配分計算には確率的均衡配分法の考えを用い、(46)式を非線形最適化計算によって解くことにより各リンク交通量の均衡解を決定できる。

$$\min \left(C_a \omega_a (V_a, C_a) - \sum_{ijk} Q_{ij} P_{ijk} \delta_{ij}^{ak} \right) \quad (46)$$

$$P_{ijk} = f(\theta X, \beta \sum_a \omega_a (V_a, C_a) \delta_{ij}^{ak}) \quad (47)$$

P_{ijk} : ODペア ij の第 k 経路の選択確率

θ, β : パラメータ

X : 所要時間、運賃等のLOS変数

V_a : リンク a の交通量

C_a : リンク a の輸送力

δ_{ij}^{ak} : $\begin{cases} 1: ij \text{ 間の第 } k \text{ 経路がリンク } a \text{ を通る場合} \\ 0: \text{通らない場合} \end{cases}$

$\sum_a \omega_a (V_a, C_a) \delta_{ij}^{ak}$: ij 間の第 k 経路の混雑度

Q_{ij} : ij 間交通量

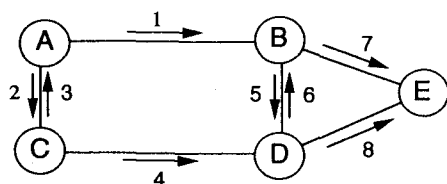


図-6 分析対象の仮想ネットワーク（ゾーン名とリンク番号）

表-2 OD交通量の設定値（人）

OD	A	B	C	D	E	発生量
A	-----	15000	5000	15000	30000	65000
B	-----	-----	-----	15000	30000	45000
C	5000	15000	-----	15000	30000	65000
D	-----	15000	-----	-----	30000	45000
E	-----	-----	-----	-----	-----	-----
集計量	5000	45000	5000	45000	120000	220000

表-3 各リンクのLOS設定

LINK NO.	時間 (分)	速度 (km/h)	車両数 (両)	輸送力 (人両)
1	20	60	200	22400
2	10	60	200	22400
3	10	60	200	22400
4	18	60	200	22400
5	5	35	240	33600
6	5	35	240	33600
7	10	35	240	33600
8	8	35	240	33600

表-4 均衡計算後の各リンクの混雑率 (%)

LINK NO.	ケース 0	ケース 1	ケース 2
1	248	250	211
2	81	80	78
3	61	62	64
4	288	288	282
5	155	145	156
6	142	152	140
7	183	203	183
8	234	214	234

表-5 所要時間短縮によるOD間の利用者便益の推計結果（円；リンクを2分短縮）

O/D	A	B	C	D	E
A		-13,956 (-0.93) -13,953 (-1.03) -13,956 457	457 (0.09) 457 (0.09) 457	6,957 (0.46) 6,961 (0.72) 6,957	915,597 (30.52) 983,964 (62.86) 915,438
B				12,760 (0.85) 12,760 (0.85) 12,760	1,386,994 (34.68) 1,451,391 (55.02) 1,386,537
C		-349 (-0.07) -349 (-0.07) -349	5,052 (0.34) 5,054 (0.46) 5,052	24,305 (1.62) 24,312 (1.73) 24,305	625,977 (20.87) 647,057 (35.52) 626,388
D		-12,505 (-0.84) -12,505 (-0.84) -12,505			763,818 (19.10) 782,645 (29.84) 764,392

上段：方法1【式(35)】（）内は一人当たりの支払意思額

中段：方法2【式(36)】／下段：ショートカット法【式(23)】

表-6 輸送力増強によるOD間の利用者便益の推計結果（円；リンクを4480人・両増強）

O/D	A	B	C	D	E
A		266,761 (17.78) 267,837 (19.55) 266,754	1,353 (0.27) 1,353 (0.27) 1,353	207,202 (13.81) 210,641 (21.04) 207,195	476,429 (15.88) 496,742 (34.31) 476,410
B				-1,588 (-0.11) -1,588 (-0.11) -1,588	-844 (-0.02) -844 (-0.04) -844
C		-919 (-0.18) -919 (-0.18) -919	118,185 (7.88) 119,088 (11.20) 118,194	66,067 (4.40) 66,117 (4.73) 66,073	162,163 (5.41) 163,296 (8.44) 162,179
D		1,563 (0.10) 1,563 (0.10) 1,563			4,024 (0.10) 4,025 (0.14) 4,024

上段：方法1【式(35)】（）内は一人当たりの支払意思額

中段：方法2【式(36)】／下段：ショートカット法【式(23)】

(3) シミュレーション分析結果の考察

式(46)による各ケースのリンク混雑率の計算結果を表-4に示す。現状ではリンク1、4、8で混雑率が200%以上であった。ケース1ではリンク7の所要時間を短縮することによってリンク6、7の交通量が増しているが、リンク8の混雑率は20%程低下していることがわかる。またケース2ではリンク1の輸送力が上がったために混雑率が37%低下しているが、他のリンクでも若干の上下が見られる。

次にケース1、2のサービス改善によって発生した利用者便益を推計してみた結果が表-5、6である。各セルは上段が3.の(28)式による推計値にOD交通量を乗じた数値である。これを方法1とする。()内は一人当たりの支払意思額 ΔC である。中段は式(32)により改善後に最も大きい効用を持つ経路を取り上げて計算した ΔC_k に、その経路のOD交通量を乗じた数値である。これを方法2とする。下段はショートカット法を用いて計算した便益額である。

ケース1の結果を示した表-5をみると、発生側のゾーンから着ゾーンEへの便益が大きく発生していることがわかる。直接改善されたBからEが最も大きいのは明らかである。一方、AB間やDB間で負の便益が推計されているのは、サービス改善によって当該リンクの混雑率が高くなったためである。各方法論間で総便益に大きな差は無いが、方法2が他の方法に比べ若干大きな値を示していることが分かった。さらに一人当たりの支払意思額に着目すると、方法1と方法2では1.0から2.1倍程度の相違がある。これは方法1が全選択肢の共通額であるのに対し、方法2が特定経路で全選択肢の効用水準を変えさせる方法であることによる。

ケース2では当然ながら発生ゾーンAの便益が非常に大きくなっている。なお、この場合も3つの方法で総額には大きな差がない。この点を考えると、方法1と2との数式上の関係をより深く考察することが必要と考えられる。なお、方法2をEVとCVとの両者で計算したところ最大で6%程度の差が認められた。

5. おわりに

本研究では、鉄道ネットワークの新たな分析方法を2つの視点から提案した。すなわち、第1は鉄道経路選択のモデルを今後の複雑なネットワーク構成に対応

可能な形式に発展させ、その適用可能性を実績データを用いて計算したことである。第2は、従来のショートカット法による便益計算に替わる方法として、ロジットモデルやネスティットロジットモデルに対応する新たな便益計算方法を複数提案し、仮想的ではあるが利用者均衡を考慮した計算により適用性を考察したことである。以上の分析を通して、実行動調査に基づくデータを用いたモデル分析によって、鉄道整備の効果分析を行う方法の有効性が従来に増して示せたと考えている。今後はプロビットモデルのための使用データを増すと共に、同モデルを用いた便益の推計を実際に行って今回の方法との比較検討を進める予定である。最後に本研究の遂行にあたり調査データをご提供を頂いた運輸省運輸政策局、データ作成にご協力を頂いた(株)ライテックの杉山茂雄氏、遠藤弘太郎氏、また計算作業に協力頂いた太田垣宏司氏(現JR東海)に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 森地茂・小泉啓・金利昭：非集計行動モデルによる鉄道需要予測手法に関する調査研究，東京工業大学土木工学科交通計画研究室，昭和60年
- 2) 肥田野登・篠原稜：鉄道サービスの質的評価に基づいた都市通勤輸送におけるハイグレードカーの導入可能性に関する研究，土木学会論文集，NO.413/IV-12，pp57-66，1990
- 3) 屋井鉄雄・森川高行：交通需要モデル研究のダイナミズム—10年の軌跡，土木計画学研究・講演集，NO.14(2)，pp.1-8，1991
- 4) 運輸省：昭和60年大都市交通センサス解析調査報告書，1988
- 5) 家田仁・赤松隆・高木淳・畠中秀人：利用者均衡配分法による通勤列車運行計画の利用者便益評価，土木計画学研究・論文集，NO.6，pp177-184，1988
- 6) 森杉壽芳・由利昌平：ランダム効用理論に基づく住環境便益の定義とその測定方法について，土木計画学研究・講演集，NO.10，pp267-273，1987
- 7) (財)運輸経済研究センター：スムーズに乗り継げる公共交通，昭和54年
- 8) (社)日本鉄道技術協会：鉄道相互間の乗継ぎ施設の適正化の研究報告書，平成元年
- 9) C.F.Daganzo: Multinomial Probit-The Theory and Its Application to Demand Forecasting, ACADEMIC PRESS, 1979
- 10) K.A.Small,H.S.Rosen: Applied Welfare Economics with Discrete Choice Models, Econometrica, Vol49, No.1, pp105-130, 1981
- 11) 森杉壽芳・林山泰久・小島信二：交通プロジェクトにおける時間便益評価—簡便化手法の実用化と精度の検討—，土木計画学研究・論文集，NO.4，pp149-157，1986
- 12) 桑原雅夫：交通量配分手法の実証的検討，交通工学，Vol.23, No.2, pp17-25, 1988