

Mixed Mode ネットワーク均衡モデルによる P & R システムの需要予測*

Demand Forecasting for Park and Ride System through Mixed-Modal Network Equilibrium Model

溝上章志** 河内 誠***

By Shoshi MIZOKAMI and Makoto KOUCHI

1. はじめに

地方都市圏においても、通勤・通学時の交通渋滞は深刻化しており、P&R システムなどの TDM 施策の導入が検討されている。人の交通行動そのものを調整する TDM 施策は、交通渋滞対策上、今後その重要性が増していくと考えられる。しかし、時間や経路の調整に対する利用者行動分析と交通ネットワーク上での需要分析の両面で、モデル化が困難であるため、施策導入時の需要予測と効果の分析手法については有効な方法が見い出されていない。本研究では、ネットワーク均衡分析手法を用いて、TDM 施策の 1 つである P&R システムの需要予測、便益評価を行う方法を提案する。

2. MixedMode ネットワーク均衡の定義

(1) MixedMode ネットワーク均衡モデル

P&R システムによるトリップは、自宅から P&R 駐車場までのアクセスは自動車、そこから都心バス停まではシステムバスというように、一つのトリップが複数の交通手段で形成される。このとき、アクセス部の自動車は、自動車を単一の代表手段とするトリップと道路ネットワークを共用する。このような交通手段を MixedMode として、自動車や鉄道、バスなどの単一の代表交通手段と区別する。従来、このような MixedMode を取り扱うネットワーク均衡分析¹⁾では、アクセス部分の自動車ネットワークを自動車を代表手段とするネットワークとは別個に取り扱ってきた。しかし、P&R システム路線や P&R 駐車場位置などを計画する際には、アクセス部における需要とネットワークパフォーマンスとの均衡を考慮する必要がある。このような問題を取り扱うネットワーク均衡モデルを MixedMode ネットワーク均衡モデルという。

図-1 は P&R システムが導入されている MixedMode ネットワークを模式的に示したものである。発地 r から着地 s までの交通手段は、自動車を単一の代表手段とするもの、P&R システム利用 (P&R 駐車場として t と t'

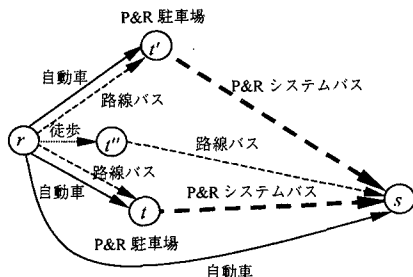


図-1 MixedMode ネットワーク

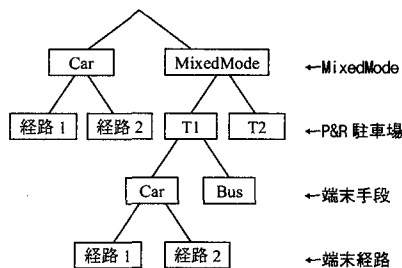


図-2 NLSUE/MixedMode モデルの選択構造

が、アクセス手段として自動車か路線バスが利用可能な Mixed-Mode)、路線バス利用 (バス停 t' までは徒歩) という 3 種類に分類できる。このような MixedMode と自動車の競合を考慮したネットワーク均衡モデルを構築するには、1) MixedMode の選択構造と、2) ネットワークフローの均衡状態の数学的記述が必要である。

1)については、P&R 駐車場と端末手段と経路との組合せ選択肢を、自動車の代替手段としての MixedMode の一つの経路選択肢と想定してモデル化する方法、および下位に P&R 駐車場とそこまでの端末手段、経路という段階的選択構造を想定し、MixedMode の合成費用と単一モードの費用によって最上位の MixedMode 選択を記述する方法などが考えられる。本研究では、図-2 のように段階的選択構造を明示的に表現する後者の方法を採用し、その記述には Nested Logit モデルを適用する。一方、2)のネットワークフローの均衡状態の記述については、利用者の効用に対する不確実性が反映される確率的利用者均衡状態 (SUE: Stochastic User

*キーワード: 複合交通手段、ネットワーク均衡分析

**正会員 工博 熊本大学工学部環境システム工学科

***正会員 熊本県芦北土木事務所

(〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1, TEL, FAX 096-342-3541)

Equilibrium) が有用であると考えられる。本研究では、交通手段選択に対しては段階的選択構造としているものの、自動車ネットワーク上の均衡状態は確定的利用者均衡を仮定して定式化された宮城²⁾のモデルを拡張した [NLSUE/MixedMode] モデルを提案する。

本モデルの定式化を行うに当たり、簡略化のために以下のような仮定を設けた。

- 1) 自動車は、単一の代表交通手段による発着地間、および MixedMode による発地と P&R 駐車場間で、確率的利用者均衡が成立する。
- 2) 自動車以外の代表交通手段としては、路線バスと P&R システムが存在するが、MixedMode 選択段階では両者を同一の手段とみなす。したがって、以後は P&R システム駐車場とバス停を乗り換えターミナルと記す。
- 3) 路線バスへのアクセスは徒歩のみとし、P&R システムへは自動車と路線バスが利用可能である。
- 4) アクセス手段としての自動車には P&R 駐車場で料金などのコストを別途加算することによって、アクセス路線バスと区別する。本モデルで扱う変数については付録を参照されたい。

(2) 解が満足すべき必要条件

[NLSUE/MixedMode] で達成される均衡状態において、端末手段、選択需要、ターミナル選択需要、MixedMode 選択需要、およびターミナルへのアクセスを含む自動車ネットワーク上での確率均衡交通量は以下のように表される。

1) 端末手段選択モデル

ターミナル t への路線バス、自動車の選択需要は、

$$\hat{q}_{rs,t}^b = \hat{q}_{rs,t} \frac{\exp(-\theta_2 \hat{c}_{rs,t}^b)}{\exp\{-\theta_2(\hat{c}_{rs,t}^a + \pi_t)\} + \exp(-\theta_2 \hat{c}_{rs,t}^b)} \quad (1)$$

$$\hat{q}_{rs,t}^a = \hat{q}_{rs,t} \frac{\exp\{-\theta_2(\hat{c}_{rs,t}^a + \pi_t)\}}{\exp\{-\theta_2(\hat{c}_{rs,t}^a + \pi_t)\} + \exp(-\theta_2 \hat{c}_{rs,t}^b)} \quad (2)$$

で表される。ここで、 θ_2 は未知パラメータ、 $\hat{c}_{rs,t}^b$ ($\hat{c}_{rs,t}^a$) は rt 間で路線バス (自動車)、 ts 間で P&R もしくは路線バス利用による rs 間 MixedMode 利用の所要時間で、

$$\hat{c}_{rs,t}^a = \hat{c}_{rs,t}^a + \hat{c}_{ts}^m = -\frac{1}{\mu_2} \ln \sum_{k \in K_{rs}^m} \exp(-\mu_2 C_k^m) + \hat{c}_{ts}^m \quad (3)$$

$$\hat{c}_{rs,t}^b = \hat{c}_{rs,t}^b + \hat{c}_{ts}^m \quad (4)$$

ここで、 μ_2 は未知パラメータ、 C_k^m は rs 間第 k 経路所要時間 ($k \in K_{rs}^m$)、 $\hat{c}_{rs,t}^b$ ($\hat{c}_{rs,t}^a$) は MixedMode 利用の rt 間路線バス (自動車) による合成費用、 $\hat{c}_{ts}^m$ は MixedMode 利用の ts 間 P&R、または路線バス利用の場合の所要時間である。端末手段選択需要は、 RT 間の費用とターミナル T での利用コスト (例えば、P&R 駐車場の駐車料金など) だけを考慮すればよいから、式(1)と(2)は

$$\hat{q}_{rs,t}^b = \hat{q}_{rs,t} \frac{\exp(-\theta_2 \hat{c}_{rs,t}^b)}{\exp\{-\theta_2(\hat{c}_{rs,t}^a + \pi_t)\} + \exp(-\theta_2 \hat{c}_{rs,t}^b)} \quad (5)$$

$$\hat{q}_{rs,t}^a = \hat{q}_{rs,t} \frac{\exp\{-\theta_2(\hat{c}_{rs,t}^a + \pi_t)\}}{\exp\{-\theta_2(\hat{c}_{rs,t}^a + \pi_t)\} + \exp(-\theta_2 \hat{c}_{rs,t}^b)} \quad (6)$$

のように書き換えられる。

2) ターミナル選択モデル

ターミナル t の選択需要は

$$\hat{q}_{rs,t} = \hat{q}_{rs} \frac{\exp\{-\beta(\hat{c}_{rs,t} + \pi_t)\}}{\sum_{t \in T_{rs}} \exp\{-\beta(\hat{c}_{rs,t} + \pi_t)\}} \quad (7)$$

で与えられる。ここで、 β は未知パラメータ、 $\hat{c}_{rs,t}$ はターミナル t を経由する MixedMode 利用による rs 間所要時間であり、次式の合成費用で与えられる。

$$\hat{c}_{rs,t} = -\frac{1}{\theta_2} \ln[\exp\{-\theta_2(\hat{c}_{rs,t}^a + \pi_t)\} + \exp(-\theta_2 \hat{c}_{rs,t}^b)] \quad (8)$$

3) MixedMode 選択モデル

rs 間の MixedMode 選択需要は次式で与えられる。

$$\hat{q}_{rs} = \bar{q}_{rs} \frac{\exp(-\theta_1 \Phi_{rs})}{\exp(-\theta_1 C_{rs}) + \exp(-\theta_1 \Phi_{rs})} \quad (9)$$

θ_1 は未知パラメータ、 C_{rs} は自動車利用による OD ペア rs 間所要時間であり、次式のような合成費用である。

$$C_{rs} = -\frac{1}{\mu_1} \ln \sum_{k \in K_{rs}^a} \exp(-\mu_1 C_k^a) \quad (10)$$

Φ_{rs} は次の MixedMode 利用による rs 間所要時間である。

$$\Phi_{rs} = -\frac{1}{\beta} \ln \sum_{t \in T_{rs}} \exp(-\beta \hat{c}_{rs,t}) \quad (11)$$

4) 経路選択モデル

OD ペア rs 間、 rt 間の確率均衡交通量は、次式のように与えられる。

$$f_k^{rs} = q_{rs} \frac{\exp(-\mu_1 C_k^{rs})}{\sum_{k \in K_{rs}^m} \exp(-\mu_1 C_k^{rs})} \quad (12)$$

$$\hat{f}_l^{rs,t} = \hat{q}_{rs,t} \frac{\exp(-\mu_2 C_k^{r,t})}{\sum_{k \in K_{rs,t}^m} \exp(-\mu_2 C_k^{r,t})} \quad (13)$$

ここで、 μ_1 は未知パラメータ、 $C_k^{r,t}$ は rt 間第 k 経路所要時間 ($k \in K_{rs,t}^m$) である。

3. 数理最適化問題としての定式化

(1) 等価な数理最適化問題

前述した必要条件と等価な数理最適化問題である [NLSUE/MixedMode] は以下のように表される。

$$\begin{aligned} \min : & Z(x_a, x_a^m, \hat{q}_{rs}, q_{rs}, \hat{q}_{rs,t}^a, \hat{q}_{rs,t}^b, \hat{q}_{rs,t}, f_k^{rs}, \hat{f}_l^{rs,t}, \hat{f}_k^{rs,t}) \\ = & \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega + \sum_{a \in M} t_a^m x_a^m + \frac{1}{\mu_1} \sum_{rs} \sum_{k \in K_{rs}^a} f_k^{rs} \ln \left(\frac{f_k^{rs}}{q_{rs}} \right) \\ & + \frac{1}{\mu_2} \sum_{rs} \sum_{t \in T_{rs}} \sum_{k \in K_{rs,t}^m} f_k^{rs} \ln \left(\frac{f_k^{rs}}{\hat{q}_{rs,t}} \right) + \sum_{rs} \int_0^{\hat{q}_{rs}} \frac{1}{\theta_1} \ln \frac{\omega}{q_{rs} - \omega} d\omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{rs} \sum_t \int_0^{\hat{q}_{rs,t}^b} \left(\frac{1}{\theta_2} \ln \frac{\omega}{\hat{q}_{rs,t} - \omega} - \pi_t + \hat{C}_{rs,t}^b \right) d\omega \\
& - \frac{1}{\beta} \sum_{rs} \hat{q}_{rs} (\ln \hat{q}_{rs} - 1) + \sum_{rs} \sum_t \hat{q}_{rs,t} \left\{ \frac{1}{\beta} (\ln \hat{q}_{rs} - 1) + \pi_t \right\} \quad (14) \\
& s.t. \quad q_{rs} + \hat{q}_{rs} = \bar{q}_{rs}, \quad \forall rs \quad (\lambda_{rs}) \quad (15) \\
& \sum_{k \in K_{rs}^a} f_k^{rs} = q_{rs}, \quad \forall rs \quad (\eta_{rs}) \quad (16) \\
& \sum_{l \in K_{rs,t}^a} \hat{f}_l^{rs,t} = \hat{q}_{rs,t}^a, \quad \forall rs, t \quad (\xi_{rs,t}) \quad (17) \\
& \sum_{rs} \sum_t \sum_{a \in A} \delta_{ak}^{rs,t} \hat{f}_l^{rs,t} \\
& + \sum_{rs} \sum_{k \in K_{rs}^a} \delta_{ak}^{rs} f_k^{rs} = x_a, \quad \forall a \in A \quad (\varepsilon_a) \quad (18) \\
& \sum_{rs} \sum_t \sum_{k \in K_{rs,t}^a} \delta_{ak}^{rs,t} \hat{f}_k^{rs,t} = x_a^m, \quad \forall a \in M \quad (\varepsilon_a^m) \quad (19) \\
& \sum_s \sum_{l \in K_{rs,t}^a} \hat{f}_l^{rs,t} + \sum_s \hat{q}_{rs,t}^b = \hat{q}_{rs,t}, \quad \forall r, t \quad (\omega_{r,t}) \quad (20) \\
& \sum_r \sum_{l \in K_{rs,t}^a} \hat{f}_l^{rs,t} + \sum_r \hat{q}_{rs,t}^b = \hat{q}_{t,s}, \quad \forall t, s \quad (\omega_{t,s}) \quad (21) \\
& \sum_s \hat{q}_{rs,t} = \hat{q}_{r,t}, \quad \forall r, t \quad (\varphi_{r,t}) \quad (22) \\
& \sum_r \hat{q}_{rs,t} = \hat{q}_{t,s}, \quad \forall t, s \quad (\varphi_{t,s}) \quad (23) \\
& \sum_t \hat{q}_{rs,t} = \hat{q}_{rs}, \quad \forall rs \quad (\phi_{rs}) \quad (24)
\end{aligned}$$

ただし、 $\beta = 1/\theta_2 - 1/\theta_3$ である。また、各制約条件の右側にある括弧内は Lagrange 乗数であり、式(15)~(24)はそれぞれ、自動車と MixedMode の OD 交通量、自動車の経路交通量、MixedMode 端末部分の自動車の経路交通量、MixedMode 端末部分を含む自動車リンク交通量、MixedMode のリンク交通量、MixedMode 端末部分の経

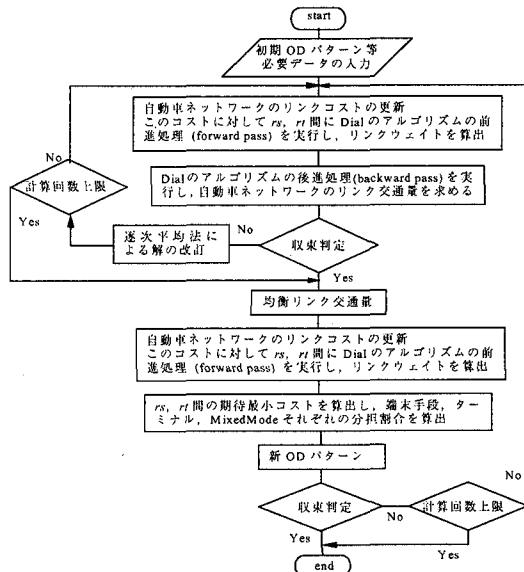


図-3 計算アルゴリズム

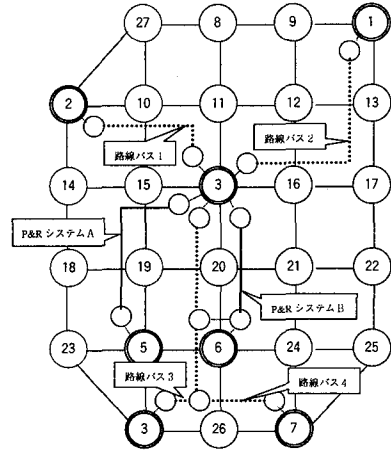


図-4 感度分析用モデルネットワーク

路交通量、MixedMode ラインホール部分の経路交通量、端末部分の MixedMode 交通量、ラインホール部分の MixedMode 交通量、OD ペア rs 間の MixedMode 交通量についての保存条件である。

上記の数値最適化問題の解が [NLSUE/MixedMode] 問題の必要条件を与えることは容易に証明できるので省略する。次に、本モデルの持つ意味について考察する。本モデルは、式(14)の第 3, 4 項の導入によって自動車ネットワーク上での確率的利用者均衡が表現されるが、パラメータ μ_1, μ_2 を $+\infty$ とすると、確定的利用者均衡も表現できることから、宮城らのモデルを包含した、より一般化されたモデルである。また、MixedMode 選択段階を自動車の一般道路と高速道路との選択段階に、ターミナル選択を高速道路利用条件下でのオンライン選択段階に置き換え、端末手段選択肢を自動車のみとした場合には、森川ら³⁾の高速道路を含むネットワークでの均衡配分モデルになる。このように、本モデルは過去に提案されている需要変動型均衡モデルを統一的に説明することができる。

4. NLSUE/MixedMode モデルの計算手法と感度分析

本モデルでは、OD 交通量は一定であるものの、均衡時のサービス水準によって、自動車と MixedMode、ターミナル、端末手段の分担需要がそれぞれ変化することによって自動車ネットワーク上での自動車 OD 交通量が変化することから、一種の需要変動型確率均衡配分問題である。解の計算アルゴリズムは図-3に示すとおりであり、図-4のモデルネットワークを対象にして、感度分析により本モデルと解法についての実用可能性の検討を行う。設定したネットワークは、郊外から都心への P&R システム 2 路線と既存路線バス 1 路

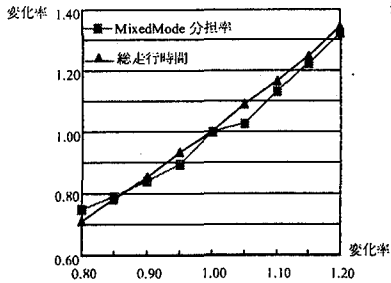


図-3 総トリップ数の変化に対する感度

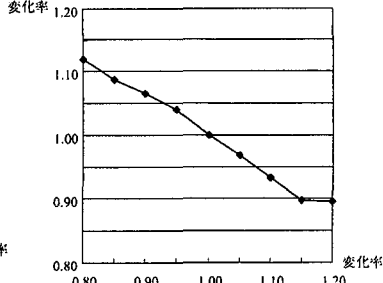


図-6 駐車場料金に対するP&R分担率

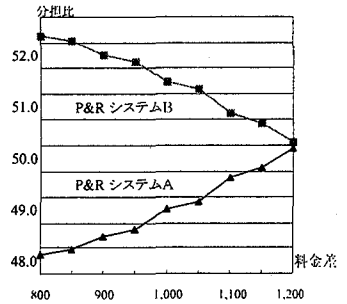


図-7 駐車場料金に対する駐車場分担比

線があり、P&R システムBには端末手段として自動車以外に路線バスの利用が可能である。P&R システムA、Bの駐車料金は、それぞれ4,000円と5,000円で差別化されている。

1) 総トリップ数による感度

基準の総トリップ数を5%きざみで変化させた場合のMixedMode分担率と総走行時間増加率を図-5に示す。総トリップ数が増加(減少)するにしたがってMixedMode分担率、総走行時間も増加(減少)するが、MixedMode分担率の変化率は総トリップ数の変化率以上に大きい。さらに、混雑の増加に伴う総走行時間の上昇が抑制されていることから、今後の都心への交通需要の増加に対してP&Rシステムの整備は有効な施策であると考えられる。

2) P&R 駐車場料金の変化による感度

2つのP&R駐車場の料金を5%きざみで±20%まで変化させた場合のP&R分担率、およびP&R駐車場分担比の感度について分析する。図-6にはP&R分担率の変化を示す。P&R駐車場料金が高くなるにしたがってP&R分担率が減少するが、その感度は-10%～-12%である。図-7は両システム(P&R駐車場)の分担状況を示す。両駐車場の分担比は料金差が拡大することによって相対的に高いP&RシステムBからAへ大きくシフトすることが分かる。

5. おわりに

本モデルから、1)都心への交通需要の増加に伴う総走行時間の増加率を抑制することが期待できることから、P&Rシステムの導入は有効な交通渋滞緩和施策であること、2)P&R駐車場料金の設定レベルはP&R駐車場の選択や端末手段の選択に大きな影響を及ぼす要因であることなどが明らかとなった。また、3)本モデルはP&Rシステムに重要な変数に対して感度を計測でき、現実の道路網での需要予測に適用が可能であるなどが明らかになった。

<付録>

■所要時間

$t_a(\omega)$: 自動車ネットワーク上のリンク a ($\in A$)の所要時間関数、 t_a^m : P&R、既存バスネットワーク上のリンク a ($\in M$)の走行時間(所与の定数)

■リンク交通量

x_a : 自動車ネットワーク上のリンク a ($\in A$)のリンク交通量、 x_a^m : P&R、および既存バスネットワーク上のリンク a ($\in M$)のリンク交通量

■OD交通量(r s間、 r t間、 t s間)

$\bar{q}_{rs}$: r s間の総トリップ数、 q_{rs} : r s間の自動車利用トリップ数、 $\hat{q}_{rs}$: r s間のMixedMode利用トリップ数、 $\hat{q}_{rs,i}$: r s間でターミナル i を利用するトリップ数、 $\hat{q}_{rs,i}^a$: r s間でターミナル i を利用する端末自動車トリップ数、 $\hat{q}_{rs,i}^b$: r s間でターミナル i を利用する端末バストリップ数、 $\hat{q}_{r,i}$: 起点 r とするMixedModeトリップのうち、ターミナル i を利用するトリップ数、 $\hat{q}_{t,s}$: 終点 s とするMixedModeトリップのうち、ターミナル i を利用するトリップ数

■経路交通量

f_k^{rs} : P&R利用者を除く自動車トリップで r s間第 k 経路の利用トリップ数、 $\hat{f}_{i,i}^{rs}$: P&R利用の端末自動車トリップで r t間第 i 経路の利用トリップ数、 $\hat{f}_{i,i}^{rs}$: P&Rと既存バスネットワーク上の r s間第 i 経路の利用トリップ数

■ダミー変数

δ_{ak}^{rs} : 自動車による r s間第 k 経路が自動車ネットワーク上のリンク a ($\in A$)を含むとき1、その他とき0をとるダミー変数、 δ_{ak}^{rt} : P&R利用の自動車トリップで自動車による r t間第 i 経路が自動車ネットワーク上のリンク a ($\in A$)を含むとき1、その他のとき0をとるダミー変数、 $\delta_{ak}^{rs,t}$: P&R、または既存バスネットワーク上の r s間第 k 経路がP&R、および既存バスネットワーク上のリンク a ($\in M$)を含むとき1、その他とき0をとるダミー変数

■利用可能経路集合

K_{rs}^a : 自動車ネットワーク上における自動車による r s間利用可能経路集合、 $K_{r,i}^a$: 自動車ネットワーク上における起点 r からターミナル i までの利用可能経路集合、 $K_{rs,i}^m$: P&R、または既存バスネットワーク上におけるターミナル i から終点 s までの利用可能経路集合

■P&R 駐車場関連

T_{rs} : r s間でP&R、または既存バス利用の場合の利用可能なターミナル集合、 τ_i : ターミナルの利用コスト(P&R駐車場の駐車料金など)

参考文献

- 1) E.Fernandez, D.C.Joaquin, Florian, M.and C.Enrique: Network Equilibrium Models with Combined Models, Transpn. Sci. Vol.28 No.3, 1994
- 2) 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, 1995
- 3) 森川高行・三輪富生: 複数の高速道路経路選択を考慮した均衡配分モデルに関する研究, 土木学会第53回年次学術講演会集 IV-299, 1998