誘発交通を考慮した時間帯別・統合均衡モデルの構築*

Semi-dynamic Combined Equilibrium Model considering induced traffic*

金森　亮**・三輪富生***・森川高行****

By Ryo KANAMORI**・Tomio MIWA***・Takayuki MORIKAWA****

１．はじめに

これまで増加し続けてきた我が国の人口は，少子化・高齢化の進展により減少局面を迎え，それに伴って交通需要そのものが減少していく時代に差しかかっている．このような背景から交通施策に関して言えば，人口増加に伴う交通需要増加を前提とした新たな交通施設拡充施策の実施は困難となり，既存の交通施設の有効活用やＰ＆Ｒ，ロードプライシングなどに代表される交通需要管理（TDM）施策の実施が有効となる．加えて，環境問題への対応から，自動車交通への過度の依存から脱却し，公共交通優先型の交通体系を形成することの重要性が増している．

交通施策検討の際に必要となる交通需要予測モデルは，都市圏レベルでは四段階推定法が広く適用されてきた．四段階推定法は交通需要の全体的動向を比較的簡単に捉えることが可能であり，これまでの交通施設拡充施策の検討に大いに貢献した．しかし，交通需要管理施策の検討では様々な政策評価が求められるため，この視点から四段階推定法の問題点が指摘されている．重要な指摘事項は，①ゾーン単位の統計量への集約による非効率なデータ利用，②行動論的基盤の欠落，③各段階間の交通ネットワークのサービスレベルの不整合，④誘発需要の把握不可，⑤時間軸の欠落，⑥トリップ単位の解析，である[1]．

これらの四段階推定法の問題点を解消しうる交通需要予測モデルの１つとして，（確率的）統合均衡モデルが挙げられる．統合均衡モデルは，四段階推定法の発生－分布－分担－配分の各段階モデルにおけるサービスレベルを利用者均衡の枠組みで整合したものである[2]．そのため，発生段階まで統合された統合均衡モデルであれば，四段階推定法の問題点③，④を解消することができる．また，利用者（個人）の合理的選択行動理論が仮定された非集計モデルをベースとした確率的統合均衡モデルは，集計モデルと比較して政策評価に適した説明変数を組み込みやすい．そのため，確率的統合均衡モデルは問題点①，②の問題を緩和することができる．

加えて，問題点⑤を緩和するモデルとして時間帯別均衡モデル[2) 3)]が開発されており，１時間程度の時間帯幅の計算を逐次的に繰り返すことで近似的に時間軸を導入することができる．また，問題点⑥を解消するモデルとしては，トリップチェインを考慮した均衡モデル[4)]が開発されている．

四段階推定法の問題点の大部分を解消/緩和できる確率的統合均衡モデルは理論的には構築されているものの，都市圏レベルの交通需要予測モデルとしての適用は極めて少ない．適用事例としては，東京都市圏を対象とした円山ら[5)]がある．円山らは発生段階までの確率的統合均衡モデルに，自動車ネットワークに加えて鉄道ネットワークにおいても混雑現象を考慮した上で，時間帯別にモデルを構築し（ただし，時間帯間の相互干渉は考慮していない），その有効性・実用性を確認している．

筆者らは確率的統合均衡モデルの有効性・実用性を確認する必要性は，現段階においても十分高いと認識している．本研究で構築する確率的統合均衡モデルは，四段階推定法の問題点①～④を解消/緩和することができる発生段階までを統合したモデルに，時間帯の相互干渉を考慮することができる時間帯別均衡モデルを組み込んだものである．そうすることで，近似的な時間軸の導入とトリップの空間的連続性（時間帯ごとの個人の滞在箇所の表現）を考慮することが可能となり，問題⑤，⑥の緩和を図ることができる．つまり，本研究の目的は，都市圏レベルの交通需要管理施策の政策評価に資する交通需要予測モデルとして，四段階推定法の問題点①～⑥の全てを解消/緩和した誘発交通を考慮した時間帯別・統合均衡モデルを構築するとともに，適用に向けた基本的な知見を得ることを目的とする．

*キーワーズ：誘発交通，時間帯別・統合均衡モデル
**学生会員，工修，名古屋大学大学院環境学研究科
（名古屋市千種区不老町，TEL052-789-3730，
E-mail：kanamori@trans.civil.nagoya-u.ac.jp）
***正会員，工博，名古屋大学大学院環境学研究科
（名古屋市千種区不老町，TEL052-789-3565，
E-mail：miwa@trans.civil.nagoya-u.ac.jp）
****正会員，Ph.D.，名古屋大学大学院環境学研究科
（名古屋市千種区不老町，TEL052-789-3564，
E-mail：morikawa@nagoya-u.jp）

２．誘発交通を考慮した時間帯別・統合均衡モデル

（１）時間帯別均衡モデル

本研究では，確率的統合均衡モデルへの組み込みが可能であること，従来の均衡モデルでは再現することが困難であった渋滞状態を明示的に表現でき，所要時間の再現性向上が見込まれることから，赤松らの時間帯別均衡モデル[3)]（需要が固定された場合）を採択する．

赤松らのモデルを概説する．時間帯は任意のODペア間の交通所要時間よりも長いTをもち，状態の変化は時間帯の間のみで起こり，時間帯内では定常状態にあると仮定する．また，各リンクは非渋滞領域での走行による出口までの移動を表す"走行リンク"と，リンク下流端で生じる渋滞待ち行列を表す"待ち行列リンク"という２種類のサブ・リンクから構成されていると考える．加えて，待ち行列は物理的な長さを無視した"point queue"モデルで考える．

時間帯間で生じる状態変化は，

$$\begin{cases} X_a^t = X_a^{t-1} + x_a^t - \mu_a & \text{if} \quad X_a^t > 0 \\ X_a^{t-1} + x_a^t \le \mu_a & \text{if} \quad X_a^t = 0 \end{cases} \tag{1}$$

X_a^t ：時間帯tにおけるリンクaの待ち行列台数（時間帯tにおいて，X_a^{t-1}は与件の定数となる）

x_a^t ：時間帯tにおけるリンクaの流入率（台数）

μ_a ：リンクaの（１時間当りの）最大流出率（台数）

と表される．このとき，時間帯tおけるリンクaの通過所要時間は，

$$t_a = t_a(x_a^t) + \max.(X_a^{t-1} + x_a^t - \mu_a, 0)/\mu_a \tag{2}$$

$t_a(\cdot)$ ：時間帯tにおけるリンクaの走行リンクの通過所要時間（BPR関数等）

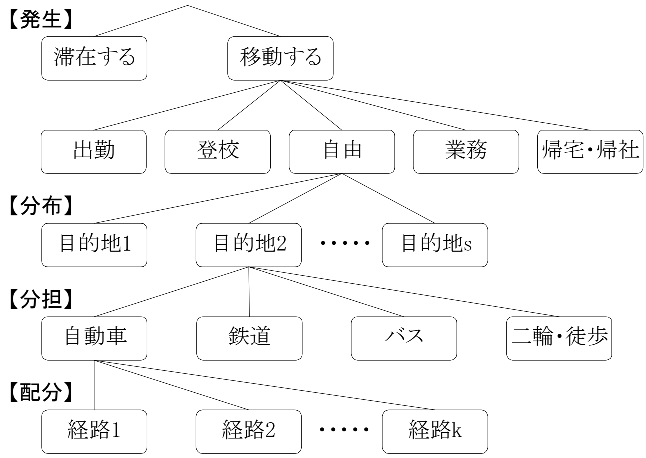
と表される．ここで，通常のリンクコスト関数をリンク通過所要時間に修正することで均衡交通量$\mathrm{x}^*=\{x_a^*\}$が得られることが分かる．また，均衡交通量が最大流出台数を超える場合（$x_a^* > \mu_a$），均衡状態での待ち行列台数X^*及び待ち行列遅れe^*は，各々

$$\begin{aligned} \mathrm{X}_a^* &= \max.(X_\mathrm{a}^{\mathrm{t\text{-}1}} + x_a^* - \mu_a, 0) \\ \mathrm{e}_a^* &= \mathrm{X}_a^*/\mu_a \end{aligned} \tag{3}$$

で与えられる．また，X_a^*は次の時間帯への残留交通量として扱われる．

（２）確率的統合均衡モデル

四段階推定法の発生－分布－分担－配分の各段階をNested Logitモデルにより表現する．本研究では，時間帯tにおけるゾーンrに滞在する個人の交通行動は，図－１に示すような5段階の選択ツリー構造で記述できると仮定する．以下では，各段階における選択確率を示す．



図－１　選択ツリー構造

a) 経路選択

時間帯tにおいて，移動目的iにてODペアrs間を交通手段mで移動する場合，経路kの選択確率は以下の式で表現できる．

$$\Pr[k \mid i, rs, m] = \frac{\exp[-\theta_1 c_{m,k}^{i,rs}(t)]}{\sum_k \exp[-\theta_1 c_{m,k}^{i,rs}(t)]} \tag{4}$$

$c_{m,k}^{i,rs}(t)$ ：時間帯tにおいて，移動目的iにてODペアrs間を交通手段mで移動するときの経路kの交通費用（ネットワークの混雑水準により変化，本研究では式(2)の通過所要時間を時間価値で交通費用に換算したものと通行料金との和となる）

θ_1 ：経路選択に関するスケールパラメータ

b) 交通手段選択

時間帯tにおいて，移動目的iにてODペアrs間を移動する場合，交通手段mの選択確率は以下の式で表現できる．

$$\Pr[m \mid i, rs] = \frac{\exp[-\theta_2 (V_m^{i,rs} + S_m^{i,rs}(t))]}{\sum_m \exp[-\theta_2 (V_m^{i,rs} + S_m^{i,rs}(t))]} \tag{5}$$

$$S_m^{i,rs}(t) = -\frac{1}{\theta_1} \ln \sum_k \exp[-\theta_1 c_{k,m}^{i,rs}(t)] \tag{6}$$

$V_m^{i,rs}$ ：移動目的iにてODペアrs間を交通手段mで移動するときのゾーン間交通費用以外の固有の要因

$S_m^{i,rs}(t)$ ：時間帯tにおいて，移動目的iにてODペアrs間を交通手段mで移動するときの期待最小費用

θ_2 ：交通手段選択に関するスケールパラメータ

c) 目的地選択

時間帯tにおいて，移動目的iにて出発地rから移動する場合，目的地sの選択確率は以下の式で表現できる．

$$\Pr[s \mid i, r] = \frac{\exp[-\theta_3 (V_s^i + S_{rs}^i(t))]}{\sum_s \exp[-\theta_3 (V_s^i + S_{rs}^i(t))]} \tag{7}$$

$$S_{rs}^i(t) = -\frac{1}{\theta_2} \ln \sum_m \exp[-\theta_2 (V_m^{i,rs} + S_m^{i,rs}(t))] \tag{8}$$

V_s^i ：移動目的iにて目的地sを選択するときのゾーン間交通費用以外の固有の要因

$S_{rs}^i(t)$ ：時間帯tにおいて，移動目的iにてODペアrs間を移動するときの期待最小費用

θ_3 ：目的地選択に関するスケールパラメータ

d）移動目的選択

時間帯tにおいて出発地rから移動する場合，移動目的iの選択確率は以下の式で表現できる．

$$\Pr[i\,|\,r]=\frac{\exp[-\theta_4(V_r^i+S_r^i(t))]}{\sum_i \exp[-\theta_4(V_r^i+S_r^i(t))]} \tag{9}$$

$$S_r^i(t)=-\frac{1}{\theta_3}\ln\sum_s \exp[-\theta_3(V_s^i+S_{rs}^i(t))] \tag{10}$$

V_r^i ：移動目的iにて出発地rを移動するときの交通費用以外の固有の要因

$S_r^i(t)$ ：時間帯tにおいて，移動目的iにて出発地rを移動するときの期待最小費用

θ_4 ：移動目的選択に関するスケールパラメータ

e）交通発生（移動/滞在）選択

時間帯tにおいて出発地rから移動するか滞在するかの選択確率は以下の式で表現できる．

$$\Pr[r]=\frac{\exp[-\theta_5(V_r+S_r(t))]}{\exp[-\theta_5(V_r+S_r(t))]+\exp[-\theta_5 V_{r0}]} \tag{11}$$

$$S_r(t)=-\frac{1}{\theta_4}\ln\sum_i \exp[-\theta_4(V_r^i+S_r^i(t))] \tag{12}$$

V_r ：出発地rを移動するときの交通費用以外の固有の要因

V_{r0} ：出発地rに滞在するときの固有の要因

$S_r(t)$ ：時間帯tにおいて，出発地rを移動するときの期待最小費用

θ_5 ：交通発生選択に関するスケールパラメータ

（３）等価最適化問題

（２）で表現した各段階の選択確率式を用いると，経路交通量$f_{m,k}^{i,rs}$，手段別（分担）OD交通量$q_m^{i,rs}$，OD（分布）交通量Q_{rs}^i，目的別発生量O_r^i，発生量O_rは次のように表される．

$$f_{m,k}^{i,rs}=q_m^{i,rs}\Pr[k\,|\,i,rs,m] \tag{13}$$

$$q_m^{i,rs}=Q_{rs}^i\Pr[m\,|\,i,rs] \tag{14}$$

$$Q_{rs}^i=O_r^i\Pr[s\,|\,i,r] \tag{15}$$

$$O_r^i=O_r\Pr[i\,|\,r] \tag{16}$$

$$O_r=N_r\Pr[r] \tag{17}$$

$$O_r+O_{r0}=N_r \tag{18}$$

O_{r0} ：時間帯tにおいて，出発地rを移動せず滞在し続ける利用者数

N_r ：時間帯tにおける出発地rの滞在利用者数

（時間帯$t-1$において，ゾーンrに滞在し続けた利用者数とゾーンrを目的地とした利用者で時間内に到着した利用者数との和）

このとき，発生－分布－分担－配分の各段階をNested Logitモデルで記述するとともに，時間帯別のネットワーク均衡条件を満足するような交通フローパターンを求める問題は，以下のように定式化できる．（ここで，時間帯tを表す上付添字は省略している）

$$\begin{aligned}Z=&\sum_{m,a}\int_0^{x_a^m} t_a^m(\omega)d\omega+\sum_{m,a}X_a^{m\,2}\Big/(2\mu_a^m)\\&+\frac{1}{\theta_1}\sum_{i,rs,m,k}f_{m,k}^{i,rs}\ln(f_{m,k}^{i,rs}\big/q_m^{i,rs})\\&+\frac{1}{\theta_2}\sum_{i,rs,m}q_m^{i,rs}\ln(q_m^{i,rs}\big/Q_{rs}^i)+\sum_{i,rs,m}q_m^{i,rs}V_m^{i,rs}\\&+\frac{1}{\theta_3}\sum_{i,rs}Q_{rs}^i\ln(Q_{rs}^i\big/O_r^i)+\sum_{i,rs}Q_{rs}^iV_{rs}^i\\&+\frac{1}{\theta_4}\sum_{i,r}O_r^i\ln(O_r^i\big/O_r)+\sum_{i,r}O_r^iV_r^i\\&+\frac{1}{\theta_5}\{\sum_r O_r\ln(O_r\big/N_r)+\sum_r O_{r0}\ln(O_{r0}\big/N_r)\}\\&+\sum_r O_r(V_r-V_{r0})\end{aligned} \tag{19a}$$

subject to
$$x_a^m=\sum_{i,rs,m,k,a}f_{m,k}^{i,rs}\delta_{m,k,a}^{i,rs} \tag{19b}$$

$$(\mu_a^m-X_a^{m(t-1)})-(x_a^m-X_a^m)\ge 0 \tag{19c}$$

$$\sum_{i,rs,m,k}f_{m,k}^{i,rs}=q_m^{i,rs} \tag{19d}$$

$$\sum_{i,rs,m}q_m^{i,rs}=Q_{rs}^i \tag{19e}$$

$$\sum_{i,rs}Q_{rs}^i=O_r^i \tag{19f}$$

$$\sum_{i,r}O_r^i=O_r \tag{19g}$$

$$O_r+O_{r0}=N_r \tag{19h}$$

$$\begin{aligned}&f_{m,k}^{i,rs}\ge 0,\quad X_a^m\ge 0,\quad q_m^{i,rs}\ge 0,\\&Q_{rs}^i\ge 0,\quad O_r^i\ge 0,\quad O_r\ge 0,\\&O_{r0}\ge 0\end{aligned} \tag{19i}$$

この問題の最適解が満足すべきKuhn－Tucker条件を求めると，先に示したNested Logitモデルの方程式群(4)～(18)を導出することができる．

また，目的関数の凸性をみると，

$$t_a^m(x_a^m)>0,\quad \frac{\partial t_a^m(x_a^m)}{\partial x_a^m}>0,\quad \theta_1>\theta_2>\theta_3>\theta_4>\theta_5>0$$

の条件下で狭義凸関数となることがわかる．加えて，制約条件による実行可能領域は凸集合であることから，目的関数(19)の解の一意性は保証される．

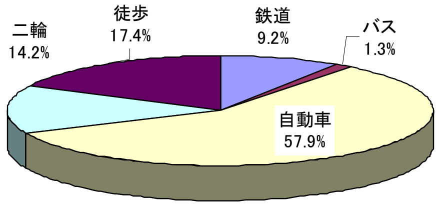
３．データの概要

２で構築した誘発交通を考慮した時間帯別・統合均衡モデルの有効性・実用性を確認するため，中京都市圏に適用する．中京都市圏では経年的にPT調査が実施されて

おり，平日における交通行動データを入手することができる．モデルのパラメータ推定に関わる交通行動データの主要な集計結果を以下に示す[6]．

a）代表交通手段構成

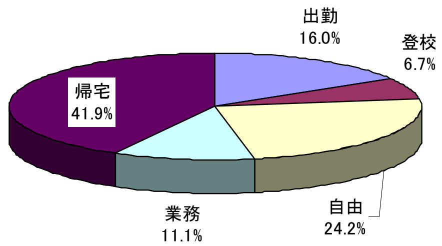
代表交通手段構成をみると，自動車分担率が58%と最も高いことがわかる．



図－２　代表交通手段構成

b）移動目的構成

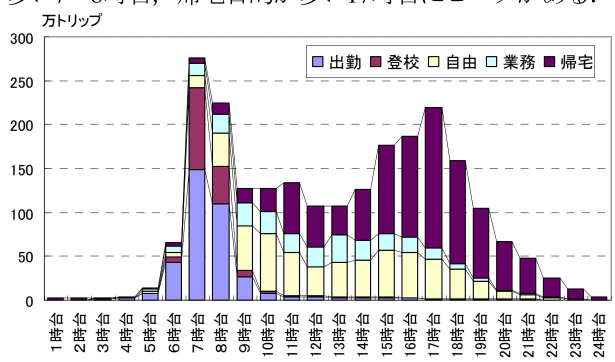
移動目的構成をみると，帰宅を除いて自由目的が24%と高くなっている．



図－３　移動目的構成

c）時間帯別移動目的構成

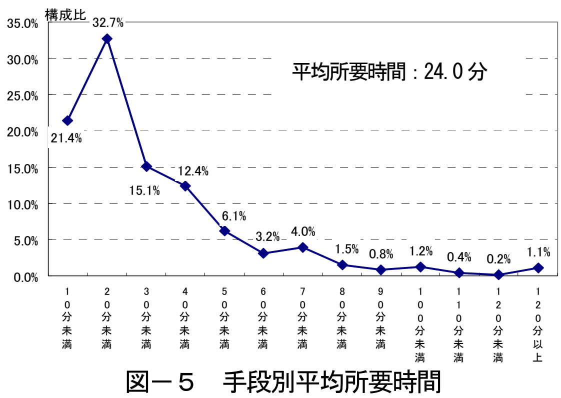
時間帯別移動目的構成をみると，出勤・登校目的の多い7～8時台，帰宅目的が多い17時台にピークがある．



図－４　時間帯別移動目的構成

d）所要時間分布

所要時間分布をみると，平均所要時間は24分，60分未満の割合は91%となっている．



図－５　手段別平均所要時間

e）同一時間内の複数トリップ発生率

今回構築したモデルは，対象時間帯内におけるトリップ発生は最大１回に限定している．対象時間を１時間とした場合，このようなサンプルは全体の85%であった．対象時間帯内に複数回のトリップ発生を考慮することは，今後の課題である．

４．おわりに

本稿では，都市圏レベルの交通需要管理施策の政策評価に資する交通需要予測デルとして，誘発交通を考慮した時間帯別・統合均衡モデルを構築した．モデルのパラメータは第4回中京都市圏PT調査データから推定することが可能であり，発表時までにパラメータ推定を行い，モデルの有効性・実用性を確認する予定である．

ここで，パラメータ推定に関する制約を挙げる．

・時間帯幅は時間変動や所要時間分布，同一時間内の複数トリップ発生率を勘案して，１時間と設定する．

・交通手段選択に関して，鉄道とバスは営業時間外では利用できない，二輪・徒歩はある程度の距離以上は利用できない制約を設ける．

・選択ツリー構造について，基本的には図－１に示すような5段階であるが，出勤，登校，帰宅/帰社においては，その下位の選択ツリー構造を次のように変更する．

- 出勤，登校目的では，目的地（勤務先・通学先）の短期的変更は無いと仮定し，目的地選択を省略する
- 帰宅/帰社目的では，目的地が唯一であること，交通手段は自宅/勤務先の移動時から変更する可能性が低いと仮定し，目的地選択と交通手段選択を省略する

以上の制約を考慮して，パラメータ推定を行っていく．

参考文献

1）北村隆一：交通需要予測の課題：次世代手法の構築に向けて，土木学会論文集，No.530 IV-30，pp.17-30，1996.

2）土木学会：交通ネットワークの均衡分析―最新の理論と解法―，丸善，1998.

3）赤松隆，牧野幸雄，高橋栄行:時間帯別OD需要とリンクでの渋滞を内生化した準動的配分，土木計画学研究・論文集，No.15，pp.535-545，1998.

4）円山琢也：トリップチェイン選択を内生化したネットワーク均衡モデル，土木計画学研究・講演集，Vol.29，CD-ROM講演番号-223，2004.

5）円山琢也，原田昇，太田勝敏：大規模都市圏への交通需要統合型ネットワーク均衡モデルの適用，土木計画学研究・論文集，Vol.19，No.3，pp.551-560，2002.

6）中京都市圏総合都市交通計画協議会：第4回中京都市圏パーソントリップ調査報告書，2003.