

高速道路を考慮した時間帯別均衡配分モデルの拡張に関する研究*

Development of Time-of-Day Traffic Equilibrium Assignment Model Including Expressways

藤田素弘**・松井 寛***・雲林院康宏****・田中孝和*****

By Motohiro FUJITA, Hiroshi MATSUI, Yasuhiro UJII and Takakazu TANAKA

1.はじめに

道路網を対象とした交通量配分モデルの中で近年利用者均衡配分モデルが注目されている。その理由として利用者均衡配分は、ドライバーが「自分にとって最も所用時間の少ない経路を選択する」という交通行動原理に基づいているため論理的かつ説得力をもつからといえる。また、特定時間帯（例えばピーク時間帯）を対象とした時間帯別の交通計画や高速道路を含む大都市圏ネットワークでの交通需要予測の必要性が高まってきている。よって本研究では、すでに開発されている時間帯別均衡配分モデルを高速道路を含む大都市圏ネットワークに適用するための幾つかの拡張モデルを提案し、その実用性を検証するものである。

ところで、利用者均衡配分理論では料金を含む一般化所要時間を扱うことはできる。しかし、高速道路を利用するか否かについての転換行動では個人属性等による分散要因がより大きくなる。よって、これを考慮可能な高速道路転換率モデルを均衡配分に組み込む方法が実用上意味のある方法として考えられよう。よって本研究ではまず、高速転換率を内生化した時間帯別均衡配分モデルを構築する。次に、高速転換率モデルを利用することなく、高速料金等を考慮できる従来型の時間帯別均衡配分モデルの拡張を行う。最後にこれらを実規模ネットワークに適用してその実績再現性を検証する。

2.終端時刻における残留交通量の修正方法

キーワード：配分交通

**正会員、工博、名古屋工業大学大学院都市循環システム工学専攻、名古屋市中区御器所町、Tel&Fax 052-735-5492

e-mail: fujita@doboku2.ace.nitech.ac.jp

***フェロー、工博、名古屋工業大学工学部社会開発工学科

****正会員、修士、名古屋市

*****正会員、学士、(株)東洋技研

時間帯別配分では、各時間帯の終端時刻において残留交通量が必ず発生する。残留交通量の分布は、OD間の経路上において図-1のような三角分布になる。本研究で開発する時間帯別均衡配分モデルは、既に関連されている一般道路のみのモデル（OD修正法）の方法と同様の残留交通量の修正方法を用いる。OD修正法は図-1のように残留交通量を経路上で平均的に処理するが、これは次式のようにOD交通量について修正すれば良いことが分かっている。

$$g_{rs}^n = q_{rs}^{n-1} + G_{rs}^n - \frac{C_{rs}^n}{2T} G_{rs}^n \quad (1)$$

ここで、

C_{rs}^n : n時間帯 OD ペア rs 間での最短経路所用時間

G_{rs}^n : n時間帯 OD ペア rs 間での OD 交通量

T : 時間帯の幅

q_{rs}^{n-1} : n-1 時間帯で修正された残留交通量

(n 時間帯においては定数)

g_{rs}^n : n時間帯 OD ペア rs 間での残留交通量修正後のOD交通量

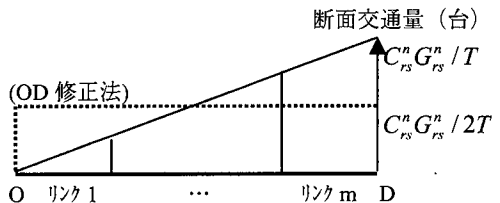


図-1 各リンクを通過していない交通量

3. 高速道路転換率を内生化した時間帯別交通均衡モデル

(1) モデルの構造

ここで扱うモデルは図-2 に示すように2段階で表

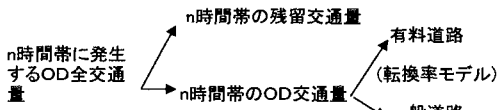


図-2 高速道路ネットワークにおける時間均衡配分モデル

現される。第一段階では、図-1で示したように、OD修正法の修正方法に基づいてn時間帯のOD交通量と残留交通量に分配される。第2段階では、高速利用経路と一般道利用経路の所要時間と高速料金の時間換算値を転換率モデルに代入して、一般道利用と高速利用のOD交通量をそれぞれ求めるものである。ただし、モデルが需要変動型利用者均衡配分モデルとして定式化されることから、このモデルを解くことによって、n時間帯OD交通量、残留交通量、高速転換率および高速利用OD交通量と一般道利用OD交通量、および全リンク交通量が同時に求められる。このとき一般道利用ODでは料金を含まない経路所要時間に基づいて利用者均衡が成立し、高速利用ODでは料金を含む一般化所要時間について利用者均衡が成立する。高速利用と一般道利用のOD割合は経路所要時間および料金の関係から求められる高速転換率モデルの割合と一致する。さらに、残留交通量は上記の均衡解として得られる料金を含まない高速利用経路所要時間と一般道利用経路所要時間の平均値で式(1)のように処理される。

高速料金は適当なリンクに負荷するが、リンクに分解できない場合は近似式を利用して分解し、車種別は平均的に扱うものとする。

(2) モデルの定式化

本モデルでは、n時間帯でODペアrs間におけるの高速道路・一般道路の転換率モデルは以下の2項ロジットモデルで与えるものとする。

$$Q_{rs}^n = \frac{1}{\exp(\theta(C_{rs}^{an} - C_{rs}^{en}) + \psi_{rs}) + 1} g_{rs}^n \quad (2a)$$

$$Q_{rs}^{an} = g_{rs}^n - Q_{rs}^{en} \quad (2b)$$

ここで、

Q_{rs}^{an} : n時間帯ODペアrs間での一般道路のOD交通量

Q_{rs}^{en} : n時間帯ODペアrs間での高速道路のOD交通量

C_{rs}^{en} : 有料道路の一般化所用時間

C_{rs}^{an} : 一般道路の所用時間

ψ_{rs} : ODペアrs間での固有パラメータ

このとき、高速道路転換率を内生化した時間帯別均衡配分モデルは次のような数理最適化問題として定式化される。

$$\begin{aligned} \min. Z = & \sum_a \int_0^{x_a^n} t_a(\omega) d\omega + \frac{1}{\theta} \sum_r \sum_s \{ Q_{rs}^{en} (\ln(Q_{rs}^{en} / g_{rs}^n) \\ & + \psi_{rs}) \} + \frac{1}{\theta} \sum_r \sum_s Q_{rs}^{an} (\ln(Q_{rs}^{an} / g_{rs}^n)) \quad (3) \\ & - \frac{1}{b} \sum_r \sum_s \int_0^{g_{rs}^n} \frac{2T}{G_{rs}^n} (q_{rs}^{n-1} + G_{rs}^n - z - \frac{G_{rs}^n}{2T} a) dz \end{aligned}$$

s.t

$$\begin{aligned} \sum_r \sum_s \sum_k f_{rsk}^{en} - Q_{rs}^{en} &= 0 & \forall n, r, s \\ \sum_r \sum_s \sum_k f_{rsk}^{an} - Q_{rs}^{an} &= 0 & \forall n, r, s \\ x_a^n &= \sum_{k \in K} \sum_{rs \in \Omega} (\delta_{ak}^{enrs} f_{rsk}^{en} + \delta_{ak}^{anrs} f_{rsk}^{an}) & \forall n, a \\ g_{rs}^n - Q_{rs}^{en} - Q_{rs}^{an} &= 0 & \forall n, r, s \\ f_{rsk}^{en} \geq 0, f_{rsk}^{an} \geq 0, x_a^n \geq 0, Q_{rs}^{en} \geq 0, Q_{rs}^{an} \geq 0, g_{rs}^n \geq 0 \end{aligned}$$

ここで、

x_a^n : リンクaのリンク交通量

$t_a(\cdot)$: リンクaの一般化所用時間関数
(一般道路部では所用時間関数)

f_{rsk}^{en} : Q_{rs}^{en} に対する経路kの経路交通量

f_{rsk}^{an} : Q_{rs}^{an} に対する経路kの経路交通量

δ_{ak}^{enrs} : (1:リンクaが高速道路を含む経路kに含まれるとき, 0:そうでないとき)

δ_{ak}^{anrs} : (1:リンクaが一般道路のみの経路kに含まれるとき, 0:そうでないとき)

G_{rs}^n : n時間帯ODペアrs間のOD交通量

上記の問題の最適化条件は、制約条件を取り込んだLagrange関数を定義することにより以下のよう導き出せる。Lagrange関数を一般道路部および高速道路部における経路交通量 f_{ik} , f_{il} に関するKuhn-Tucker条件より、利用者均衡の解を表現する最適化条件が得られ、一般道路利用経路は所要時間で、高

速道路利用経路は料金を含む一般化所要時間で、それぞれに利用者均衡が成立する。\$Q_{rs}^{gn}\$, \$Q_{rs}^{en}\$ に関する Kuhn- Tucker 条件より、一般道路と高速道路で成立する転換率モデル式(2)が導き出せる。また、\$g_{rs}^n\$ に関する Kuhn- Tucker 条件より、n 時間帯の残留交通量処理後の OD 交通量を与える関係式が次のように得られる。

$$g_{rs}^n = q_{rs}^{n-1} + G_{rs}^n - \frac{C_{rs}^n}{2T} G_{rs}^n \quad (4a)$$

ここで
 \$C_{rs}^n\$: 有料道路を含むネットワークにおける n 時間帯 OD ペア rs 間の平均化所用時間 \$a + bS_{rs}^n\$ で

$$S_{rs}^n = -\frac{1}{\theta} \ln(\exp(-\theta C_{rs}^{en} + \psi_{rs}) + \exp(-\theta C_{rs}^{gn})) \quad (4b)$$

上式において、\$S_{rs}^n\$ は転換率モデル式(2a)に関して得られる一般化所要時間の期待最小コストである。さて、式(4a)の第3項は n 時間帯の残留交通量を n 時間帯 OD 交通量から差し引く処理をしている。残留交通量は物理的に求められる量であるので、式(4a)の第3項 \$C_{rs}^n\$ は料金抵抗を含まない所要時間を利用する必要がある。\$C_{rs}^n\$ は厳密には、高速利用経路と一般道利用経路の所要時間(料金抵抗を含まない)を各利用 OD 交通量で加重平均した平均所要時間として求められる必要があることが証明される。その平均所要時間と \$S_{rs}^n\$ とはそれほど大きく変わらないが、料金抵抗の値によっては、\$S_{rs}^n\$ は実際よりも過大な交通量を残留交通量とすることが予想できる。よって式(4a)のパラメータ a, b は \$S_{rs}^n\$ から料金抵抗の影響を除いて平均所要時間に近似するためのものである。

パラメータ a, b は、一般道利用 OD と高速利用 OD が 1 対 1 の平均的な場合の \$C_{rs}^n\$ を求める場合には、以下のように与えられる。

$$a = -Cd_{rs}^n / 2 + (\ln 2) / \theta, \quad b = 1$$

ここで、\$Cd_{rs}^n\$ は OD ペア rs 間の料金コスト(分) 実際の配分計算では、交通量 0 状態の最短経路探索によって得られる \$Cd_{rs}^n\$, \$C_{rs}^{en}\$, \$C_{rs}^{gn}\$ から、高速利用 OD と一般道利用 OD の割合を求め、a の値を求めればよいと考えられるが、これは適用計算によって検証する必要がある。

さて、高速道路に料金抵抗がかけられず、\$\theta\$ が \$\infty\$ で所要時間のみに関する最短経路に交通量が流れることを仮定すれば、上式は既に定式化され

ている式(1)の一般道路部のみの残留交通量処理後の OD 交通量に等しくなる。よって、ここで構築された高速転換率を内生化した時間帯別均衡配分モデルは一般道路のみのネットワークにおける時間均衡問題を含んだ一般形として定式化されたことがわかる。

4. 高速転換率を用いない時間帯別交通均衡モデル

前章では転換率モデルによって高速利用 OD と一般道利用 OD を分配する方法を述べた。高速道路を考慮して時間帯別配分を行う他の方法は、転換率モデルを利用せずに、高速リンクに料金抵抗(一般化所要時間)を負荷するのみで、一般化所要時間に基づいた均衡配分を行う方法が考えられる。この方法では既存の時間帯別交通均衡配分を適用できるが、以下の点に配慮して一部改良する必要がある。

式(4)における考察において、時間帯別均衡モデルを高速道路を含む道路網に適用する場合、その残留交通量の処理は一般化所要時間ではなく料金抵抗を含まない所要時間を用いて行う必要があることを述べた。式(4)と同様な考え方を適用すれば、式(1)は \$C_{rs}^n\$ から料金抵抗を除くための修正項を加えて以下ようになる。

$$g_{rs}^n = q_{rs}^{n-1} + Q_{rs}^n - \frac{C_{rs}^n - Cd_{rs}^n \times \tau_{rs}^n}{2T} Q_{rs}^n \quad (5)$$

上式第3項内の \$\{C_{rs}^n - Cd_{rs}^n \times \tau_{rs}^n\}\$ は \$\{高速利用 OD / 一般道利用 OD\}\$ の割合が \$\tau_{rs}^n\$ の場合の、料金を含まない高速と一般道の平均所要時間である。このときの既存モデル(OD修正法)の目的関数は以下のように置きかえられる。

$$\min. Z = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega - \sum_r \sum_s \int_0^{g_{rs}^n} \frac{2T}{G_{rs}^n} \{q_{rs}^{n-1} + G_{rs}^n + (G_{rs}^n Cd_{rs}^n \tau_{rs}^n / 2T) - z\} dz \quad (6)$$

上式右辺第2項中の \$(G_{rs}^n Cd_{rs}^n \tau_{rs}^n / 2T)\$ が既存モデルに新たに加えられた項で、料金抵抗分 \$Cd_{rs}^n = 0\$ のとき上式は既存モデルに一致する。料金抵抗の残留交通量への補正を高速と一般道で平均的に考慮することにすれば、\$\tau_{rs}^n = 0.5\$ を与えればよいといえる。

表-1 RMS誤差による適合度比較

	転換率内生型	転換率無し
一般道	1423	1353
高速道	519	717
計	1942	2070

5. 配分結果と考察

本研究で構築した高速転換率を内生化した時間帯別均衡配分(転換率内生型モデル)と高速転換率を用いない時間帯別均衡配分(転換率無しモデル)の適用計算結果を比較検討する。適用するネットワークは名古屋圏道路ネットワーク(ノード数1241, セントロイド数279, 往復別リンク数4209)で、これにはOD所要時間の60分を超えるトリップが多く存在する。よって時間帯別配分の残留交通量の処理を適切に行えるように時間帯幅を120分として、配分開始時間帯を3-4時台として、2時間帯づつ順次配分した。以下の適合度検証ではピーク時間(7-8時台)について考察する。実績交通量は平成6年道路交通センサス(一般道路部128箇所)と都市内高速流入流出24時間データ(オンランプ41箇所)である。

リンク交通量のRMS誤差による適合度比較を表-1に示す。一般道では転換率無しモデルで精度が良いが、高速道路では転換率内生型モデルの精度が良くなった。全体としては転換率内生型がやや精度がよいといえる。

図-2に都市内高速のオンランプ部の実績交通量と推定交通量の散布図を示す。図-2より、転換率無しモデルの結果では、推定交通量が0となるオンランプ交通量が多くみられ、実績値の小さい範囲で過小に、大きい範囲で過大に推定するバイアスがみられた。都市内高速の場合、高速料金が一律650円(所要時間換算値10分)の料金抵抗が課せられている。転換率無しモデルでは、その所要時間差に満たない近距離帯ODペアでは、最短経路として高速利用経路が列挙されない。その結果として特に都市内高速の端部に位置するオンランプ交通量は0として推定される結果となったと考えられる。

しかし、転換率内生型モデルでは、トリップ長の短いODペアにおいても実績の転換率を再現可能なことから、転換率無しモデルのようなバイアスは生じていない。以上のことから、ネットワーク全体の

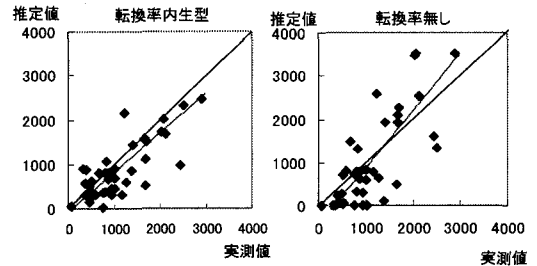


図-2 高速道オンランプ交通量の精度比較

予測精度で考えれば、転換率なしモデルにおいても実用的な精度を確保できる。しかし、高速道路交通量の予測が主要な課題となる場合には、高速道路の予測精度の高い転換率内生型モデルを適用する必要性が高いといえる。

6. 結論と今後の課題

本研究で得られた結論は以下のようになる。

- 1) 高速道路転換率を内生化した時間帯別均衡配分モデルの開発を行なった。このモデルは、均衡解において、高速道路と一般道路間の転換率モデルの関係、各道路の経路における等時間原則、および前時間帯の残留交通量を考慮したOD交通量の修正を同時に満たすものとなった。また残留交通量は料金を含まない高速と一般道の所要時間の平均値で修正する必要がある。
- 2) 転換率を利用しない時間帯別均衡配分モデルも構築したが、既存モデルのOD修正法を高速の料金抵抗を考慮して一部修正する必要があることがわかった。
- 3) 実績再現性を検証した結果、ネットワーク全体としては、転換率内生型モデルも転換率なしモデルも実用的であるといえる。しかし、高速道路交通量の予測が重要となる場合には、精度が高く、問題となるバイアスもないことから、転換率内生型モデルを適用する必要性が高いといえる。

<参考文献>

- 1) 松井・上田：有料道路を含むネットワークにおける利用者均衡配分問題 京大記念シンポジウム講演集 1997
- 2) 藤田素弘・松井寛・溝上章志：時間帯別交通量配分モデルの開発と実用化に関する研究 土木学会論文集4, No.389 1988