

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**・雲林院康宏***・松井 寛****

By, Motohiro FUJITA, Yasuhiro UJII, Hiroshi MATSUI

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要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、その実用化を検証するものである。

ところで、利用者均衡配分理論^{1)・2)}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の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。一方、配分対象地域において高速道路が1経路しかないようなケースなど、高速転換率モデルを新たに設定する労力が惜しまれるような場合は、高速転換率を用いずに料金抵抗をリンクコストに負荷して通常の均衡配分を行う方法も実用上意味があるであろう。

よって本研究では高速道路を考慮可能な2タイプの時間帯別均衡配分モデルを提案する。一つは、高速転換率を組み込んだ高速転換率内生型時間帯別均衡配分モデルである。他の一つは、高速転換率を利用することなく、従来型の時間帯別均衡配分モデルで高速料金が考慮できるように一部拡張したモデルである。本研究ではこれらを実規模ネットワークに適用して、その比較検証をおこない実用性の検証をするものである。

2. 従来の研究と本研究の構成

高速転換率モデルを利用者均衡配分モデルに内生的に組み込んだ研究として文献³⁾がある。そこでは日単位の高転換率内生型利用者均衡配分モデルの定式化と適用計算を行ったが、時間帯配分特有の残留交通量の影響は考慮していない。また、従来開発された時間帯別均衡モデル⁴⁾は高速

道路の料金抵抗を明示的に扱ったものではない。すなわち、高速道路の料金抵抗を考慮すると、料金を含む一般化所要時間で利用者均衡解を得ることになるが、時間帯別の残留交通量は料金を含まない実所要時間によって算定される必要がある。よって、従来モデルではその残留交通量の処理と均衡条件からくる一般化所要時間との関係が考慮されていない。赤松ら⁵⁾は、各リンクで残留交通量を扱う準動的モデルを提案しているが、これも高速道路と一般化所要時間及び高速道と一般道との転換行動に関する言及がなされていない。文献⁶⁾では実際に適用された配分モデルのレビューにおいて高速転換率内生型利用者均衡配分モデルの位置付けと基本的な定式化及び日均衡についての適用計算を行っており、その中で高速転換率内生型時間帯別均衡配分モデルを紹介している。しかしそこではモデル式の概観を示すのみにとどまる。

すなわち、高速転換率内生型時間帯別均衡モデルは、高速転換量を求める計算過程と、残留交通量の影響を考慮して時間帯別OD交通量を修正する計算過程があり、それらをどう整合させていくかという問題、解の唯一性の条件、時間帯別の転換率モデルの設定、アルゴリズム及び実際の適用計算による検証についての研究例はこれまでにないといえる。一方で、高速転換率を利用することなく、高速道路を考慮して、かつ残留交通量も処理できる時間帯別均衡配分モデルの開発についての研究例もまたこれまでにないといえる。

よって、本研究は次のような構成となる。まず高速転換率内生型の時間帯別均衡配分モデルの開発を行う。3.では時間帯別配分における仮定と残留交通量の修正方法について説明する。4.ではモデルの前提条件と定式化を行う。同時に利用者均衡は一般化所要時間で行い、残留交通量の処理は実所要時間で行うという点をどう整合させるかという点について述べる。5.では従来型の時間帯別均衡配分モデルの高速道路ネットワークへの拡張を行う。6.では時間帯別転換率モデルの設定、解の唯一性の条件及びアルゴリズムを考察し、開発された2つのモデルを実際の都市圏ネットワークに適用して精度検証を行う。

3. 時間帯別配分における仮定と残留交通量の修正方法

従来研究⁴⁾において時間帯別配分では以下の仮定を置いており、本研究もそれに従うものとする。

仮定1: 時間帯の幅(T) > 最長トリップ時間

仮定2: 各OD交通量はセントロイドから同一時間帯中で一様に発生し、経路上に一様に分布する。

さて、時間帯別配分では、各時間帯の終端時刻において

*キーワード: 配分交通, 高速転換率

**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, Tel&Fax 052-735-5492

***学生会員, 名古屋工業大学大学院工学研究科博士後期課程都市循環システム工学専攻

****フェロー, 工博, 名古屋工業大学工学部社会開発工学科

残留交通量が発生する。残留交通量の分布は、OD間の経路上（所要時間軸上）において図-1のような三角分布をとる。本研究で開発する2タイプの時間帯別均衡配分モデルはいずれも、既に開発されている一般道路のみのモデル（OD修正法³⁾⁴⁾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、このためには式(1)のようにOD交通量を修正すれば良い。

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

ここで、

C_{rs}^n : n時間帯 OD ペア rs 間での最短経路所要時間

G_{rs}^n : n時間帯に発生する OD ペア rs 間での OD 交通量

T: 時間帯の幅

q_{rs}^{n-1} : n-1 時間帯からの残留交通量（n時間帯では定数）

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

本研究ではこのOD修正方法を基本としてモデル開発を行うものである。

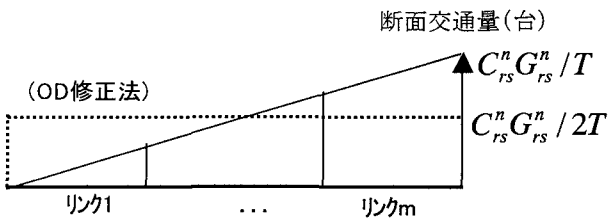


図-1 各リンクを通過していない交通量

4. 高速転換率を内生化した時間帯別均衡モデル⁷⁾

ここで扱うモデルは、一般道路のみの道路網による最短経路と高速道路を含めた道路網による最短経路をそれぞれ一般道利用経路と高速利用経路と定義する。同様にそれぞれの利用経路のOD交通量を高速利用OD交通量と一般道利用OD交通量として以下のモデリングを行う。

(1) モデル構造と前提条件

a) モデル構造と均衡状態

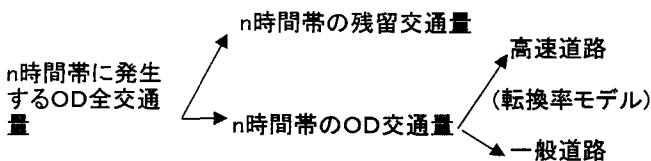


図-2 高速道路ネットワークにおける時間均衡配分モデル

ここで扱うモデルは図-2 に示すように2段階で表現される。第1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、高速利用経路の一般化所要時間（料金含む）と一般道利用経路の所要時間を高速転換率モデル

に代入して、高速利用と一般道利用のOD交通量を求めるものである。ただし、需要変動型利用者均衡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、経路所要時間と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と一般道利用の経路実所要時間の平均値によって式(1)のように処理される。

ところで本研究では図-2とは異なるツリー構造も考察した。それは、高速転換率モデルで全OD交通量を高速と一般道の利用ODに分配した後、高速と一般道のそれぞれで残留交通量を算定する構造である。その構造も詳細に検討したが、図-2の構造でのみ数理最適化問題としての定式化が可能であった。しかし、平均所要時間パラメータの設定（本章3節）で、それら両方の構造に関してほぼ同一の残留交通量の処理がなされるように検証を行う。

b) 高速と一般道利用経路における利用者均衡条件

本モデルでは、一般道利用経路内では料金を含まない経路所要時間に基づいて、また、高速利用経路内では料金を含む一般化所要時間に基づいて、それぞれ確定的な利用者均衡が成立するものと仮定する。

その均衡解から得られる一般道経路所要時間と高速経路一般化所要時間を高速転換率モデルに代入することによって、一般道利用ODと高速利用ODは確率的に分配されるものと仮定する。すなわち、所要時間と一般化所要時間の異なる尺度間での経路選択では各ドライバーの個人属性が強く影響する。その経路選択挙動の分布は、同一尺度内の経路選択に比べて、より大きな分散を持つと考えられる。よってモデルの簡略化と実用化を考慮して異なる尺度間での経路選択のみ確率的に扱うものと仮定する。ただし、この点については6章の適用計算で検討するものとする。

c) 時間帯別高速転換率モデル

時間帯別高速転換率モデルは式(2a)、(2b)のように表されるものとする。

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

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

ここで、

Q_{rs}^{an} : n時間帯 OD ペア rs 間の一般道利用OD交通量

Q_{rs}^{en} : n時間帯 OD ペア rs 間の高速利用OD交通量

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

交通量

C_{rs}^{an} : n時間帯 OD ペア rs 間の一般道利用経路の所要時間

C_{rs}^{en} : n時間帯 OD ペア rs 間の高速利用経路の

一般化所要時間

θ_{rs}, ψ_{rs} : OD ペア rs 間のパラメータ

(2) モデルの定式化

前節の前提条件に基づく高速転換率内生型時間帯別均衡モデルを、以下の数理最適化問題の均衡解に特性を利用して定式化することを考える。

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

$$\begin{aligned} \text{s.t.} \\ \sum_k f_{rsk}^{en} - Q_{rs}^{en} &= 0 \quad \forall n, r, s \\ \sum_k f_{rsk}^{an} - Q_{rs}^{an} &= 0 \quad \forall n, r, s \\ x_a^n &= \sum_{k \in K} \sum_{rs \in \Omega} (\delta_{ak}^{enrs} f_{rsk}^{en} + \delta_{ak}^{anrs} f_{rsk}^{an}) \quad \forall n, a \\ g_{rs}^n - Q_{rs}^{en} - Q_{rs}^{an} &= 0 \quad \forall n, r, s \\ f_{rsk}^{en} \geq 0, f_{rsk}^{an} \geq 0, x_a^n \geq 0, Q_{rs}^{en} \geq 0, Q_{rs}^{an} \geq 0, g_{rs}^n \geq 0 \end{aligned} \quad (3b)$$

ここで、

x_a^n : リンク a のリンク交通量

$t_a(\cdot)$: リンク a のリンクコスト関数

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時間帯に発生する OD ペア rs 間での OD 交通量

θ_{rs}, ψ_{rs} : 式(2)で定まるパラメータ

a, b : 平均所要時間パラメータ(本章(3)参照)で最適化問題においては、予め設定された定数として与えられる

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導き出せる。すなわち本モデルの最適解の導出については一般的な需要変動型利用者均衡モデル¹⁾²⁾の場合と同様に行えばよい。すると Lagrange 関数の高速および一般道における f_{rsk}^{en} , f_{rsk}^{an} に関する Kuhn-Tucker 条件より、利用者均衡の解を表現する最適性条件が得られ、一般道利用経路は所要時間で、高速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。この均衡条件式については日均衡モデル⁴⁾と同様である。 Q_{rs}^{an} , 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(2a)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が式(4)のように得られる。

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

ここで

$a + bS_{rs}^n$: 高速道路を含むネットワークにおける n時間帯 OD ペア rs 間の平均所要時間で、式(4)中の S_{rs}^n は次のような期待最小コストである。

$$S_{rs}^n = -\frac{1}{\theta} \ln(\exp(\theta C_{rs}^{en} - \psi_{rs}) + \exp(-\theta C_{rs}^{an})) \quad (5)$$

式(3a)は、その均衡解の特性として均衡条件から $a + bS_{rs}^n$ を含む式(4)中に g_{rs}^n を導出する。このパラメータ a, b を適切に設定しておけば、 $a + bS_{rs}^n$ は平均所要時間に対応するものとなる。よって、式(4)は式(1)に対応する残留交通量のため、修正後の OD 交通量を表す。残留交通量の修正のために平均所要時間を利用する妥当性、およびパラメータ a, b の設定の考え方と設定方法については次節で述べる。したがって、パラメータの適切な設定が行われれば、ここで定式化された最適化問題を解くことによって、n時間帯 OD 交通量、残留交通量、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とがわかる。

また、高速道路の料金抵抗が 0、 θ が ∞ であることを仮定すれば、式(4)は既に定式化されている一般道路部のみの残留交通量処理後の OD 交通量 {式(1)} に等しくなる。よって、本研究の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できる。

(3) 平均所要時間パラメータ (a, b)

a) パラメータ設定の考え方

式(5)の 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(4)の右辺第 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(4)の第 3 項は料金抵抗を含まない実所要時間を利用する必要がある。また、実所要時間で考えると、たとえ均衡下(一般化所要時間に基づく)であっても、一般道と高速利用では異なるため、両者は本来異なる残留交通量を持つ。よって、式(4)の第 3 項は、高速利用 OD 交通量と高速利用実所要時間で高速経路の残留交通量を求める項と、一般道利用 OD 交通量と一般道所要時間で一般道利用経路の残留交通量を求める項に分けることができる。これは転換率モデル式(2a)より、式(6)のように表される。

$$\begin{aligned} -\frac{a + bS_{rs}^n}{2T} G_{rs}^n = \\ -\frac{(C_{rs}^{en} - C_{rs}^d)}{2T} \frac{\exp(-\theta_{rs} C_{rs}^{en} - \psi_{rs})}{\exp(-\theta_{rs} C_{rs}^{en} - \psi_{rs}) + \exp(-\theta_{rs} C_{rs}^{an})} G_{rs}^n \end{aligned}$$

$$-\frac{C_{rs}^{an}}{2T} \frac{\exp(-\theta_{rs} C_{rs}^{an})}{\exp(-\theta_{rs} C_{rs}^{en} - \psi_{rs}) + \exp(-\theta_{rs} C_{rs}^{an})} G_{rs}^n$$

$$= -\frac{1}{2T} G_{rs}^n \times C_{rs}^n \quad (6)$$

ここで、

$$C_{rs}^n = \frac{(C_{rs}^{en} - C_{rs}^d) \exp(-\theta_{rs} C_{rs}^{en} - \psi_{rs}) + C_{rs}^{an} \exp(-\theta_{rs} C_{rs}^{an})}{\exp(-\theta_{rs} C_{rs}^{en} - \psi_{rs}) + \exp(-\theta_{rs} C_{rs}^{an})} \quad (7)$$

C_{rs}^d : OD ペア rs 間の料金抵抗(分)

この C_{rs}^n は高速と一般道の利用経路の実所要時間を交通量によって加重平均した平均所要時間である。

結局、高速と一般道で別々に残留交通量を処理した場合とこの平均所要時間 C_{rs}^n を用いて残留交通量の処理をした場合が等しいことがわかる。

したがって、パラメータ a 、 b は式(7)で示される C_{rs}^n を用いれば、次式が成り立つように求めればよい。

$$a + bS_{rs}^n \equiv C_{rs}^n \quad (8)$$

パラメータ a 、 b に関して式(8)のような関係が成立していれば図-2のツリー構造とは逆の構造(高速転換率モデルで全OD交通量を高速と一般道の利用ODに分配した後、高速と一般道のそれぞれで残留交通量を算定する構造)の場合と同一の残留交通量の処理が行えることになり、時間帯別均衡配分のモデル構造の違いによる解の相違を避けることができる。

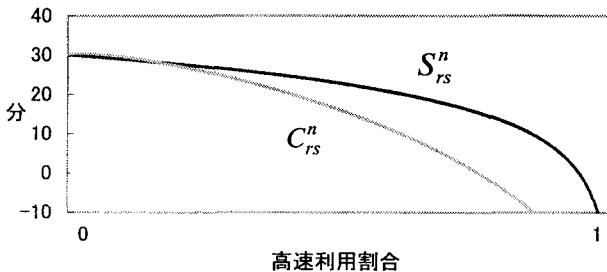


図-3 S_{rs}^n と平均所要時間(C_{rs}^n)との関係

b) パラメータ設定方法の検討

式(8)中の S_{rs}^n は式(5)より料金抵抗が負荷された一般化所要時間の期待最小コストとして定義されているのに対し、 C_{rs}^n は式(7)より料金抵抗 C_{rs}^d が除かれた実所要時間で定義されている。また、式形も異なることからそれらを完全に一致させるのは難しいが、実用化のため式(5)と(7)が大きく異ならないようなパラメータ設定方法を検討する。式(5)と(7)は所要時間変数で表現されているが、ここではそれらの変数を OD 交通量変数に適宜変換して議論する。

さて、転換率モデル(式(2a))を展開すると

$$C_{rs}^{en} = \frac{1}{\theta} \left(\ln \left(\frac{Q_{rs}^{en}}{g_{rs}^n} \right) - \psi \right) + C_{rs}^{an} \quad (9)$$

となり、これを用いれば $a + bS_{rs}^n$ と C_{rs}^n は次のように変換できる。

$$a + bS_{rs}^n = a + b \left(C_{rs}^{an} - \frac{1}{\theta} \ln \left(\frac{Q_{rs}^{en}}{g_{rs}^n - Q_{rs}^{en}} + 1 \right) \right) \quad (10)$$

$$C_{rs}^n = -\frac{Q_{rs}^{en}}{\theta_{rs} g_{rs}^n} \left(\ln \frac{Q_{rs}^{en}}{g_{rs}^n - Q_{rs}^{en}} + \psi_{rs} \right) - \frac{Q_{rs}^{en}}{g_{rs}^n} C_{rs}^d + C_{rs}^{an} \quad (11)$$

ここで、図-3 は、 $L=20$ km、 $C_{rs}^{an}=30$ 分および $C_{rs}^d=10$ 分とした OD ペアの場合において、式(8)中の S_{rs}^n のみと平均所要時間 C_{rs}^n が、高速利用割合に応じて変化する様子を示している。図-3 から、 S_{rs}^n と C_{rs}^n は大きくは異ならないが、料金抵抗の値や高速利用割合によっては差が生じることがみてとれる。

さて、式(10)、(11)を比較すると、最も平均所要時間に影響するとみられる一般道路の実所要時間 C_{rs}^{an} については、 $b=1$ の条件を与えることによって両式で同一の扱いができる。すると、式(8)が成立するためにはパラメータ a は式(10)に $b=1$ を代入して、それが式(11)と等しいとにおいて、以下のようになることがわかる。

$$a = -\frac{Q_{rs}^{en}}{g_{rs}^n \theta_{rs}} \left(\ln \left(\frac{Q_{rs}^{en}}{g_{rs}^n - Q_{rs}^{en}} \right) + \psi_{rs} \right) - \frac{Q_{rs}^{en}}{g_{rs}^n} C_{rs}^d + \frac{1}{\theta_{rs}} \ln \left(\frac{Q_{rs}^{en}}{g_{rs}^n - Q_{rs}^{en}} + 1 \right) \quad (12)$$

式(12)より、 n 時間帯 OD ペア rs 間の高速利用割合 Q_{rs}^{en}/g_{rs}^n が定まればパラメータ a の値も決定される。

高速利用割合は本来、配分結果として得られるが、パラメータ a は式(3)を定義するために予め初期設定される必要がある。図-3 と式(10)より、 a は S_{rs}^n の関数を上下に変化させる特性を持つ。式(12)で示される a は、初期設定で仮定された高速利用割合付近に置いて式(8)をほぼ満足させるパラメータとなる。よってより精度良く式(8)を満足させるためには、交通量 0 状態の最短経路探索によって得られる C_{rs}^d 、 C_{rs}^{en} 、 C_{rs}^{an} から、高速利用割合を高速転換率モデルより求め、 a の値を求める方法が考えられる。

結局のところ、これらの設定が、実用上どの程度精度に影響するかについては、適用計算によって検証する。

5. 高速転換率を用いない時間帯別交通均衡モデル

(1) モデルの定式化

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⁴⁾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。

4. (3) の考察において、時間帯別均衡モデルで高速道路を考慮する場合には、その残留交通量の処理は一般化所要時間ではなく、実所要時間を用いて行う必要があることを述べた。また、利用者均衡下(一般化費用に基づく)において、一般道と高速利用経路の実所要時間は異なるため、両経路はそれぞれ異なる残留交通量を持つ。一般道経路と高速経路のそれぞれで残留交通量の修正を行うことを考えると、式(1)は以下のように変換される。

$$g_{rs}^n = q_{rs}^{n-1} + G_{rs}^n - \frac{C_{rs}^{en} - C_{rs}^d}{2T} Q_{rs}^{en} - \frac{C_{rs}^{an}}{2T} Q_{rs}^{an} \quad (13)$$

ここで、 $\tau_{rs}^n = Q_{rs}^{en} / G_{rs}^n$ とし、次の関係式 $\{G_{rs}^n = Q_{rs}^{en} + Q_{rs}^{an}, (C_{rs}^{n'} =) C_{rs}^{en} = C_{rs}^{an}\}$ より、式(13)を整理すると

$$g_{rs}^n = q_{rs}^{n-1} + G_{rs}^n - \frac{C_{rs}^{n'} - C_{rs}^d \times \tau_{rs}^n}{2T} G_{rs}^n \quad (14)$$

式(14)第3項内の $\{C_{rs}^{n'} - C_{rs}^d \times \tau_{rs}^n\}$ は高速と一般道の平均実所要時間である。このときの既存モデル(OD修正法)の目的関数は式(15)のような数理最適化問題として定式化される。

$$\min Z = \sum_a \int_0^{x_a^n} t_a(\omega) d\omega - \sum_r \sum_s \int_0^{g_{rs}^n} \frac{2T}{G_{rs}^n} \{q_{rs}^{n-1} + G_{rs}^n + (G_{rs}^n C_{rs}^d \tau_{rs}^n / 2T) - z\} dz \quad (15)$$

s.t

$$\sum_k f_{rsk}^n - g_{rs}^n = 0 \quad \forall n, r, s$$

$$x_a^n = \sum_{k \in K} \sum_{rs \in \Omega} \delta_{ak}^{nrs} f_{rsk}^n \quad \forall n, a$$

$$f_{rsk}^n \geq 0, x_a^n \geq 0, g_{rs}^n \geq 0$$

ここで、

f_{rsk}^n : n 時間帯 OD ペア rs 間経路 k の経路交通量

δ_{ak}^{nrs} : (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)

$x_a^n, t_a(\cdot), g_{rs}^n, q_{rs}^{n-1}, G_{rs}^n, C_{rs}^n$ は式(1), (6)と同じである。

式(15)が高速を含めた全ネットワークにおいて、一般化所要時間に基づいて利用者均衡条件を満たすことと、解が唯一であることは既存モデルと同様に証明される⁴⁾。

式(15)右辺第2項中の $(G_{rs}^n C_{rs}^d \tau_{rs}^n / 2T)$ が既存モデルに新たに加えられた項で、料金抵抗分 $C_{rs}^d = 0$ のとき式(15)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。

(2) 計算アルゴリズムにおける C_{rs}^d の設定

ここでのモデルの配分計算は既存モデル⁴⁾のアルゴリズムと同様である。ただし、初期設定において料金抵抗 C_{rs}^d を各ODペアで求めておく必要がある。実用上 C_{rs}^d は初め的高速経路探索時に計算されたものを用いればよいであろう。しかし、4.の転換率内生型モデルと違って、このモデルでは高速利用経路を一般道利用経路と独立して探索しないため、初めの経路探索で必ずしも高速利用経路が列举されるとは限らない。高速利用経路が列举されなければ $C_{rs}^d = 0$ となるが、計算途中で高速利用経路が列举されることも少なくないと思われる。したがって、本モデルでは便宜上初期設定の経路探索時には、高速道路リンクであっても料金コストを課さないで、高速経路が有利な状態で経路探索する。そこで高速経路が列举されたODペアのみ C_{rs}^d を考慮して、

そうでないODペアでは高速経路の比重が少ない経路であるとして $C_{rs}^d = 0$ とおく。次の最短経路探索からは料金コストを高速道路リンクに課して行い、最適化計算を行うものとする。

6. 実ネットワークへの適用

(1) リンクコスト関数と高速料金の扱い

リンクコスト関数は式(16)を用いる。料金を含まない一般道路リンクでは式(16)右辺第2項の料金項は除かれる。

$$t_a = t_{a0} \left\{ 1 + \alpha \left(\frac{x_a}{C_a} \right)^\beta \right\} + tc_a / \gamma \quad (16)$$

ここに、

t_a : リンク a の単位距離当たり所要時間

t_{a0} : リンク a の単位距離当たりの自由走行時間

x_a : リンク a の時間交通量

C_a : リンク a の時間交通容量

γ : 時間価値

tc_a : リンク a の通行料金

α, β : パラメータ

t_{a0} と α, β のパラメータは日均衡配分⁴⁾で利用した時間リンクコスト関数のパラメータを用いる。それは日リンクコスト関数の交通容量以外のパラメータはもともと時間リンクコスト関数のパラメータをそのまま利用しているためである。時間価値は文献 8) の調査より得られた 6.5 円/分を使用した。

都市高速道路は均一料金制であるため、料金はオンラインリンクにのみ負荷した。都市間高速道路の料金は近似的に各リンク毎の料金に分解できるものとした。すなわち区間距離 x と料金 y の一次関数として回帰された式(17), (18)を利用してリンクごとに設定した。またここでの料金は、大型車混入率と車種別料金で平均した料金である。

東名名神 : (ゲ-タ数 29 個, $R = 0.99$)

$$y = 32.85x + 144.04 \quad (17)$$

東名阪 : (ゲ-タ数 7 個, $R = 0.99$)

$$y = 30.22x + 140.78 \quad (18)$$

(2) 時間帯別高速転換率モデル

本研究では、従来研究³⁾で設定された日単位的高速転換率モデルと同様にして、第7回名古屋高速道路自動車起終点調査⁸⁾のデータ(高速道所要時間と交通量)とPT調査データ(一般道所要時間と交通量)を用いて、大枠の時間帯(6-8時, 9-10時など)ごとに時間帯別高速道路転換率モデル(式(2a))のパラメータ θ, ψ を設定した。それらの転換率パラメータは従来研究³⁾と同様に OD 間距離 L_{rs} による回帰式 $\theta(L_{rs}), \psi(L_{rs})$ として高速道路転換率の再現性が最も良好な式(19), (20)を採用した¹⁰⁾。表に示す決定係数は、従来研究⁴⁾と同様に精度よく推定された距離帯別パラメータを距離 L_{rs} に置き換える時の値である。

$$\theta(L_{rs}) = cL_{rs}^d, \quad (19)$$

$$\psi(L_{rs}) = u \ln(L_{rs}) + v \quad (20)$$

L_{rs} : OD ペア rs の OD 間距離 (km)

c, d, u, v : 回帰係数

ここで設定された朝の時間帯の $\theta(L_{rs}), \psi(L_{rs})$ の係数を表-1 に示す. 表-1 に表す決定係数は、従来研究⁹⁾と同様に精度よく推定された距離帯別パラメータを距離 L_{rs} に置き換えるときの値である.

表-1 時間帯別高速道路転換率パラメータ

時間帯	c	d	u	v	決定係数
6-8	5.266	-1.334	-0.468	3.120	0.954
9-10	2.353	-0.918	-0.066	0.820	0.946

(3) 解の一意性とパラメータ

付録1: 解の一意性で示される式(27)は、数理最適化問題として定式化された本研究のモデルが唯一の解を持つ必要十分条件である. ここで、 T は時間帯の幅 (分単位) で b は平均所要時間パラメータである. 本研究の名古屋都市圏を対象とした交通量配分計算では、 $T=60$ または 120 、および $b=1$ であり、 θ は OD 間距離 L を説明変数とする時間帯別高速転換率モデルにおいて設定される. この本研究の適用に関する解の一意性について考察する.

図-4 は朝の時間帯 (6-8 時台と 9-10 時台) の高速転換率モデルに用いられているパラメータ θ と b/T との関係を示している. 高速転換率に用いられる θ は、表-1 で示す 6-8 時と 9-10 時のパラメータを用いたものである. また本研究の対象地域は半径 30 km 程度のエリアである. 図-4 から分かるように、本研究の適用計算においては、制約条件式(23)を満たしていることが分かる. よって目的関数式(3a)は狭義の凸関数となり、解の一意性が保証される.

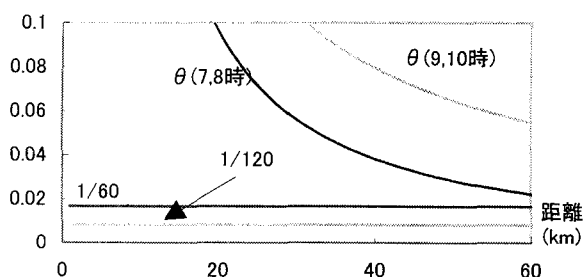


図-4 パラメータ θ と OD 間距離の関係

(2) 配分結果と考察

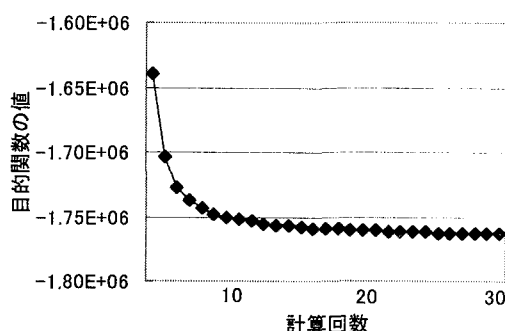
本研究で構築した高速転換率を内生化した時間帯別均衡配分 (転換率内生型モデル) と高速転換率を用いない時間帯別均衡配分 (転換率無型モデル) の適用計算結果を比較検討する. 適用するネットワークはノード数 1241、セントロイド数 279、往復別リンク数 4209 で構成される名古屋圏ネットワークである. 配分に用いる OD 交通量は「平成 3 年度中京都市圏パーソントリップ調査」¹¹⁾を一部補正して、各種実測データ (高速利用台数や転換率用データ) の平成 8 年時間帯別用に推計したもの¹²⁾を用いる. これには OD 間所要時間の 60 分を超えるトリップが多く存在する. よって時間

帯別配分の残留交通量の修正が適切に行えるように時間帯幅を 120 分とする. ただし、比較のために、時間帯幅を 60 分単位としたものについても同様に検証した. 配分計算はいずれのケースも開始時刻を午前 5 時として順次配分した. 時間帯幅 60 分と時間帯幅 120 分の各モデルの適合度比較では、時間帯幅 60 分の各配分リンク交通量を 2 時間帯で合計し、2 時間交通量として、時間帯幅 120 分とした場合の配分交通量と比較する. 実績交通量は平成 6 年道路交通センサス¹³⁾より得た一般道路交通量 (128 個) と車両検知器データとして入手した時間帯別高速道路交通量 (41 個) である.

a) 目的関数の収束状況

転換率内生型モデルの目的関数の収束状況を図-5 に示す. 目的関数は順調に収束しており、20 回ほどでほとんど収束している.

図-5 目的関数の収束状況



b) 転換率内生型モデルの初期設定と時間帯幅の比較

4. (3) において転換率内生型モデルは、パラメータ a, b の設定を適用計算によって検証する必要があることを示した. ここでは、以下 2 つの初期設定で適用計算し、時間帯幅 120 分としたものの適合度比較 (7-8 時間帯) を表-2、時間帯幅 60 分としたものを表-3 に示す.

初期設定 1 : 残留交通量を高速と一般道で平均的に扱うものとし、高速利用割合を $Q_{rs}^n / g_{rs}^n = 1/2$ にしてパラメータ a を設定する. 4. (3) (b) より $b=1$ とする.

初期設定 2 : ネットワーク交通量 0 フロー状態における、高速と一般道の利用経路所要時間を高速転換率モデルに代入して、各 OD 間の高速利用割合 Q_{rs}^n / g_{rs}^n を求める. これらを用いて OD ペアごとにパラメータ a を設定する.

4. (3) (b) より $b=1$ とする.

表-2 転換率内生型モデルの RMS 誤差による適合度比較 (時間帯幅 120 分)

時間帯幅 120 分	高速道	一般道	合計
初期設定 1	509.1	1468.7	1977.8
初期設定 2	518.8	1423.1	1941.9

表-3 転換率内生型モデルのRMS 誤差による
適合度比較(時間帯幅 60 分)

時間帯幅 60 分	高速道	一般道	合計
初期設定 1	643.4	1814.1	2457.5
初期設定 2	630.5	1776.8	2407.3

まず、時間帯幅の違いによる高速道と一般道の合計の適合度の比較から、時間帯幅 120 分のモデルが、2 つの初期設定ともに良い精度であることがわかった。この理由として、本研究で対象としたネットワークが 60 分以上のトリップを少なからず含むために、残留交通量の修正として 120 分とした方が 60 分よりも妥当であるということがいえるものと思われる。すなわち、時間帯別配分においては最長トリップ長が時間帯幅を超えないという定常性の仮定があり、120 分の時間帯幅がそれに合致したものと思われる。

一方、初期設定の違いによる適合度比較では、時間帯幅 60 分、120 分の両方において、初期設定 2 の設定方法が良い精度であった。初期設定 2 は、OD 間距離などの各 OD 間の特性を考慮して、高速 OD 割合及び平均化所要時間を表現できると考えられる。初期設定 1 は初期設定 2 よりもやや精度は落ちる。しかしながら、時間帯幅の違いによる精度差に比べて、初期設定の違いによる精度差は小さく、初期設定が残留交通量に与える影響は比較的小さいことがわかる。これらの結果より、以下の分析での転換率内生型モデルでは、初期設定 2 で時間帯幅 120 分の結果を比較検証する。

c) 転換率無型モデルの精度比較

転換率無型モデルでは残留交通量の処理において τ_{rs}^n を設定しておく必要がある。しかしこのモデルでは転換率内生型モデルのように、 τ_{rs}^n をあらかじめ初期設定しておくことはできない。よって 5. でも述べたように高速と一般道の残留交通量の処理を平均的に扱うものとして $\tau_{rs}^n = 1/2$ に設定する。転換率無型モデルでも時間帯幅 120 分と 60 分で配分を行った結果を表-4 (下 2 段) に示す。表より、転換率内生型モデルと同様に転換率無型モデルにおいても時間帯幅 120 分の配分結果が良い結果となっている。RMS 誤差で 2 割程度、時間帯幅 60 分の方が大きくなっていることがわかる。

d) 各モデルの精度比較

時間帯幅 120 分における転換率内生型モデルと転換率無型モデルのリンク交通量による適合度 (RMS 誤差) を表-4 より比較する。表-4 より、7-8 時間帯において高速では転換率内生型がよく、一般道では転換率無型が良くなった。9-10 時間帯では一般道・高速ともに転換率内生型が良いことがわかる。7-8 時間帯についての実績交通量と配分交通量の散布図を図-6 (転換率内生型モデル)、図-7 (転換率無型) に示す。

表-4 配分計算結果の適合度比較

<転換率内生型 時間帯幅 120 分>

	高速道	一般道	合計
7, 8 時	518.8	1423.1	1941.9
9, 10 時	412.5	874.6	1287.1
合計	931.3	2297.7	3229

<転換率内生型 時間帯幅 60 分>

	高速道	一般道	合計
7, 8 時	630.5	1776.8	2407.3
9, 10 時	512.4	1008.8	1521.2
合計	1142.9	2785.6	3928.5

<転換率無型 時間帯幅 120 分>

	高速道	一般道	合計
7, 8 時	609.9	1363.4	1973.3
9, 10 時	595.5	909.5	1505
合計	1205.4	2272.9	3478.3

<転換率無型 時間帯幅 60 分>

	高速道	一般道	合計
7, 8 時	773	1623	2396
9, 10 時	646.4	1023.6	1670
合計	1419.4	2646.6	4066

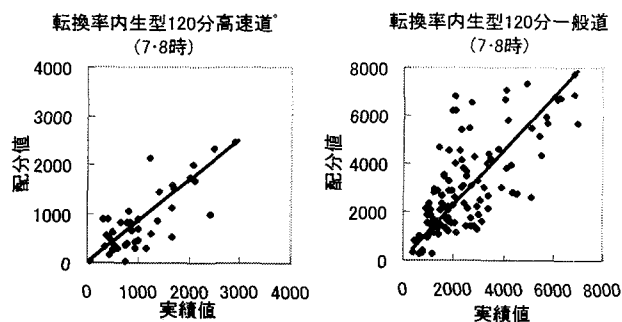


図-6 転換率内生型モデル散布図

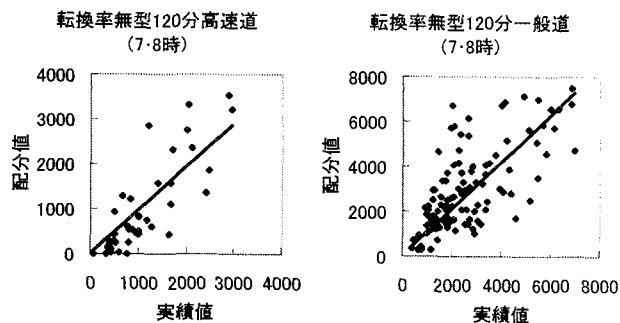


図-7 転換率無型モデル散布図

両モデルとも比較的精度良く実績交通量を推定しているといえる。転換率内生型モデルは高速道路においてやや過小推計している。この理由として、高速料金 (時間価値) の設定が考えられる。本研究の特に都市内高速通行料金は大型車混入率を考慮してはいるが、回数券などの割引利用者を考慮していないことなどの原因も考えられるが、転換率モデルの再考も含め課題といえる。転換率無型モデルでは、推定交通量が 0 となる交通量が幾つかみられ、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。転換率無型モデルでは一般道と高速経路の所要時間差が高速料金の所要時間換算値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リンクの交通量は 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、転換率無モデルのようなバイアスは生じていない。

e) 残留交通量の修正効果

本研究では残留交通量の修正をせず、転換率も用いない最も基本的な利用者均衡モデル（非修正モデル）を上記の 7-8 時間帯と 9-10 時間帯の時間帯幅で適用配分したところ図 - 8、表-5 のような適合度を得た。RMS 誤差で比較すると、非修正モデルではいずれかの修正を行っている転換率内生型・無型モデルに比べて合計値で 1.5 倍程度の誤差を生じている。散布図（図 - 8）をみても、非修正モデルは、残留交通量を修正していないために、7-8 時間帯において過大な推計がされていることがわかる。以上の結果から、残留交通量の修正の効果を確認できたと考える。

表-5 非修正モデルの適合度比較

	高速道	一般道	合計
7,8 時	995.9	1919.5	2915.4
9,10 時	717.3	1087.9	1805.2
合計	1713.2	3007.4	4720.6

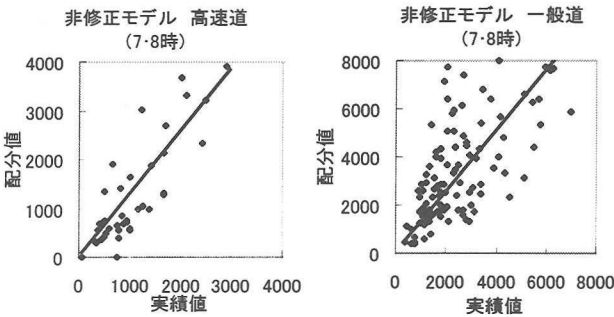


図 - 8 非修正モデル散布図

f) OD 間距離帯別高速利用交通量の適合度比較

時間帯幅 120 分の転換率内生型及び転換率無型モデルの OD 間距離帯別高速利用交通量の適合度を図 - 9 に示す。転換率内生型では幾分過小ではあるが、距離帯別実績交通量をよく追従している。一方、転換率無モデルでは 5km 前後の距離帯で過小に、15-20km 大きく過大に推計しており、よって、本研究で設定した高速転換率モデルは距離帯別の高速道路利用交通量でみると特に有効であることが確認されたと考えられる。

以上のことから、ネットワーク全体の予測精度で考えれば、転換率を用いない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。

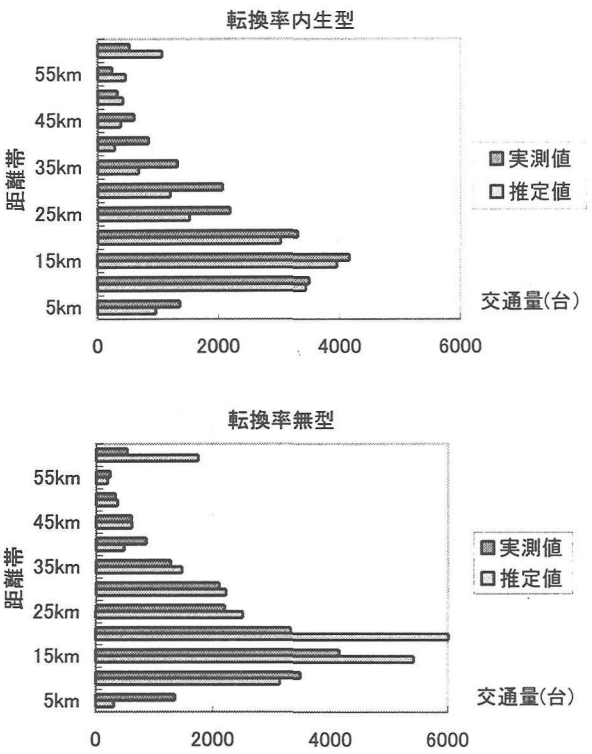


図 - 9 OD 間距離帯別高速利用交通量の適合度

7. おわりに

本研究で得られた結論は以下のようになる。
1) 高速道路転換率を生年化した時間帯別均衡配分モデルの開発をおこなった。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。また残留交通量の修正項については料金を含まない高速と一般道の実所要時間の平均値に近似するパラメータの設定方法を考察できた。

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ればよいことがわかった。

3) 実績再現性を検証した結果、残留交通量の修正の重要性が分かり、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無型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、距離帯別高速利用交通量もよく表現できることから、転換率内生型モデルの適用する必要性が高いと思われる。

精度の向上には、時間価値を含め転換率モデルの再考が重要である。信頼性を高めるためには、他の都市圏でも本モデルを適用して実績再現性の検証を行う必要がある。

最後に、本研究の適用計算において、名古屋高速道路公社、名古屋高速道路協会、(株) 日建設計より多大な協力を得ました。ここに感謝の意を表します。

付録 1：解の一意性

数理最適化問題として定式化された本研究のモデルが唯

一の解を持つためには、制約条件式によって示される変数の実行可能領域が凸で、かつ、目的関数式(3a)が狭義の凸関数であればよい^{2),3)}。制約条件式は、全て線形であることから変数の実行可能領域は凸である。目的関数式(3a)が狭義の凸関数となるには、4つの変数(リンク交通量、高速道路のOD交通量、一般道路のOD交通量、残留交通量修正後のOD交通量)に関する2次の偏微分マトリックス(Hessian)が正定値行列になっていることを調べればよい。

本論分の最後に示す付録の式(21a)～式(21j)で示す目的関数Zに関する各変数の2階偏微分値を用いて、2次の偏微分マトリックス(Hessian) $\nabla^2 Z$ は式(22)のように表される。

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial x_i^n \partial x_j^n} = \begin{cases} \frac{dt_i(x_i^n)}{dx_i^n} > 0 & (i=j) \\ 0 & (i \neq j) \end{cases} \quad (21a)$$

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial x_i^n \partial Q_u^{en}} = 0 \quad (21b)$$

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial x_i^n \partial Q_u^{an}} = 0 \quad (21c)$$

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial x_i^n \partial g_u^n} = 0 \quad (21d)$$

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial Q_u^{en} \partial Q_v^{en}} = \begin{cases} \frac{1}{\theta_u Q_u^{en}} > 0 & (u=v) \\ 0 & (u \neq v) \end{cases} \quad (21e)$$

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial Q_u^{en} \partial Q_v^{an}} = 0 \quad (21f)$$

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial Q_u^{en} \partial g_v^n} = \begin{cases} -\frac{1}{\theta_u g_u^n} < 0 & (u=v) \\ 0 & (u \neq v) \end{cases} \quad (21g)$$

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial Q_u^{an} \partial Q_v^{an}} = \begin{cases} \frac{1}{\theta_u Q_u^{an}} > 0 & (u=v) \\ 0 & (u \neq v) \end{cases} \quad (21h)$$

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial Q_u^{an} \partial g_v^n} = \begin{cases} -\frac{1}{\theta_u g_u^n} < 0 & (u=v) \\ 0 & (u \neq v) \end{cases} \quad (21i)$$

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial g_u^n \partial g_v^n} = \begin{cases} \frac{2T}{bG_u^n} > 0 & (u=v) \\ 0 & (u \neq v) \end{cases} \quad (21j)$$

$$\nabla^2 Z = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 Z}{\partial x_1^n} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial^2 Z}{\partial Q_1^{en}} & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial^2 Z}{\partial Q_1^{en} \partial g_1^n} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial^2 Z}{\partial Q_1^{an}} & 0 & \frac{\partial^2 Z}{\partial Q_1^{an} \partial g_1^n} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots \\ 0 & 0 & \frac{\partial^2 Z}{\partial Q_1^{en} \partial g_1^n} & 0 & \frac{\partial^2 Z}{\partial Q_1^{an} \partial g_1^n} & 0 & \frac{\partial^2 Z}{\partial g_1^n} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots \end{pmatrix} \quad (22)$$

このとき、 $\nabla^2 Z$ が正定値であるためには、任意のベクトル $h \neq 0$ に対して式(23)が式(24)を満足すればよい。

$$\begin{aligned} h'(\nabla^2 Z)h &= \frac{\partial^2 Z}{\partial^2 x_i^n} x_i^2 + \dots + \frac{\partial^2 Z}{\partial^2 Q_u^{en}} Q_u^{en2} + \dots + \frac{\partial^2 Z}{\partial^2 Q_u^{an}} Q_u^{an2} \\ &+ \dots + \frac{\partial^2 Z}{\partial^2 Q_u^{en}} Q_u^{an2} + \dots + \frac{\partial^2 Z}{\partial^2 g_u^n} g_u^{n2} + \dots + 2\left(\frac{\partial^2 Z}{\partial Q_u^{en} \partial g_u^n} Q_u^{en} g_u^n\right) \\ &+ \dots + \frac{\partial^2 Z}{\partial Q_u^{an} \partial g_u^n} Q_u^{an} g_u^n + \dots \\ &= \frac{\partial^2 Z}{\partial^2 x_i^n} x_i^2 + \dots + \frac{\partial^2 Z}{\partial^2 Q_u^{en}} (Q_u^{en})^2 + \frac{\partial^2 Z}{\partial Q_u^{en} \partial g_u^n} \frac{\partial^2 Z}{\partial^2 Q_u^{an}} g_u^{n2} \\ &+ \dots + \frac{\partial^2 Z}{\partial^2 Q_u^{an}} (Q_u^{an})^2 + \frac{\partial^2 Z}{\partial Q_u^{an} \partial g_u^n} \frac{\partial^2 Z}{\partial^2 Q_u^{en}} g_u^{n2} + \dots \\ &+ g_u^{n2} \left(\frac{\partial^2 Z}{\partial^2 g_u^n} - \left(\frac{\partial^2 Z}{\partial Q_u^{en} \partial g_u^n} \right)^2 / \frac{\partial^2 Z}{\partial^2 Q_u^{en}} - \left(\frac{\partial^2 Z}{\partial Q_u^{an} \partial g_u^n} \right)^2 / \frac{\partial^2 Z}{\partial^2 Q_u^{an}} \right) + \dots \quad (23) \end{aligned}$$

$$h'(\nabla^2 Z)h > 0 \quad (24)$$

式(23)では最初の展開式から二乗の項を作るために、割り算と引き算が生じている。式(23)を整理して条件式(24)は、任意のn時間帯ODペアrs間における条件式(25)に置き換えることができる。

$$\begin{aligned} &\frac{\partial^2 Z}{\partial^2 g_{rs}^n} - \left(\frac{\partial^2 Z}{\partial Q_{rs}^{en} \partial g_{rs}^n} \right)^2 / \frac{\partial^2 Z}{\partial^2 Q_{rs}^{en}} - \left(\frac{\partial^2 Z}{\partial Q_{rs}^{an} \partial g_{rs}^n} \right)^2 / \frac{\partial^2 Z}{\partial^2 Q_{rs}^{an}} > 0 \\ &\text{ここで,} \\ &\frac{\partial^2 Z}{\partial^2 g_{rs}^n} - \left(\frac{\partial^2 Z}{\partial Q_{rs}^{en} \partial g_{rs}^n} \right)^2 / \frac{\partial^2 Z}{\partial^2 Q_{rs}^{en}} - \left(\frac{\partial^2 Z}{\partial Q_{rs}^{an} \partial g_{rs}^n} \right)^2 / \frac{\partial^2 Z}{\partial^2 Q_{rs}^{an}} \\ &= \frac{2T}{bG_{rs}^n} - \frac{\theta_{rs} Q_{rs}^{en}}{\theta_{rs}^2 g_{rs}^{n2}} - \frac{\theta_{rs} Q_{rs}^{an}}{\theta_{rs}^2 g_{rs}^{n2}} \\ &= \frac{2T}{bG_{rs}^n} - \frac{1}{\theta_{rs} g_{rs}^n} \quad (25) \end{aligned}$$

よって、

$$\theta > \frac{bG_{rs}^n}{2Tg_{rs}^n} \quad (26)$$

OD交通量 G_{rs}^n と残留交通量修正後のOD交通量 g_{rs}^n との関係は、3.の仮定1と式(1)より $g_{rs}^n \geq G_{rs}^n/2$ であるから、式(26)は式(27)のようになる。

$$\theta > \frac{b}{T} \quad (27)$$

付録2：計算アルゴリズム

高速道路転換率を生内化した時間帯別均衡配分モデルの配分計算は、部分線形化法^{3),9)}を適用した以下のアルゴリズムによって行う。

Step0. 初期化 (通常は0フロー状態とする)。

ネットワーク上の交通量が最も少ない時間帯を選び、 $n=1$ とし、 $q_{rs}^{n-1} = 0$ とおく。

Step1. 初期実行可能解フローパターン $\{x_a^{n(1)}\}, \{g_{rs}^{n(1)}\}$ を設定する。 $m=1$ とする。

Step2. $\{x_a^{n(m)}\}$ に応じた所要時間を計算する。一般道利用

経路と高速利用経路を別々に探索する最短経路探索⁴⁾をおこない、それぞれの最短経路時間 $\{c_{rs}^{an}\}, \{c_{rs}^{en}\}$ を求める。

Step3. 式(4)より残留交通量修正後のOD交通量 $\{g_{rs}^{n'}\}$ を求める。

Step4. 高速転換率式を用いて $\{Q_{rs}^{en'}\}$ を求める。

Step5. 高速利用最短経路に $\{Q_{rs}^{en'}\}$ 、一般道利用最短経路に $\{g_{rs}^{n'} - Q_{rs}^{en'}\}$ をすべて負荷する all-or-nothing 法により $\{x_a^{n'}\}$ を求める。

Step6.

$$g_{rs}^{n(m+1)} = \alpha g_{rs}^{n'} + (1 - \alpha) g_{rs}^{n(m)}$$

$$Q_{rs}^{en(m+1)} = \alpha Q_{rs}^{en'} + (1 - \alpha) Q_{rs}^{en(m)}$$

$$x_a^{n(m+1)} = \alpha x_a^{n'} + (1 - \alpha) x_a^{n(m)}$$

とおき、次元探索によって目的関数式(3a)を最小とするステップサイズ $\alpha^{(m)}$ と $\{x_a^{n(m+1)}, Q_{rs}^{en(m+1)}, g_{rs}^{n(m+1)}\}$ を求める。

Step7. 解の更新

Step8. あらかじめ設定しておいた ε_1 に対して

$$\sum_a (x_a^{n(m+1)} - x_a^{n(m)}) C(x_a^{n(m)}) \leq \varepsilon_1$$

を満足していればStep9へ、そうでなければ $m=m+1$ としてStep2に戻る。

Step9. 対象となるすべての時間帯でリンク交通量を計算すれば終了する。そうでなければ、 q_{rs}^n を計算し、 $n=n+1$ としてStep1に戻る。

参考文献

- 1) Beckmann, M. J., Mc Guire, C. B. and Winsten, C. B.: Studies in the Economics of Transportation, Yale University Press, New Haven, 1956.
- 2) 土木計画学研究「交通ネットワーク」出版小委員会：交通ネッ

- トワークの均衡分析 —最新の理論と解法—, 土木学会, 1998.
- 3) 松井 寛・藤田素弘: 高速道路を含む都市圏道路網における利用者均衡配分モデルの実用化に関する研究, 土木学会論文集 No.653/IV-48, pp.85-94, 2000.
- 4) 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, pp.111-119, 1988.
- 5) 赤松隆・松本嘉司: 需要変動を考慮した交通ネットワーク確率的利用者均衡モデルとその解法, 土木学会論文集, No.401, pp.109-118
- 6) 松井 寛・藤田素弘: 大都市圏道路網を対象とした拡張型利用者均衡配分モデルの開発とその実用化, 土木計画学研究・論文集 No.17, pp.15-28, 2000.
- 7) 藤田素弘・松井寛・雲林院康宏・田中孝和: 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 土木計画学研究・講演集, No.23(2), pp.735-738, 2000.
- 8) 名古屋高速道路公社: 第7回名古屋高速道路自動車起終点調査, 1996.
- 9) Evans S.P.: Derivation and Analysis of Some Models for Combining Trip Distribution and Assignment, Transportation Research 10(1), pp.37-57, 1976.
- 10) 片桐充理: 都市圏における高速道路転換率モデルの開発とその応用, 名古屋工業大学修士論文, 2000.
- 11) 中京都市圏総合都市交通計画協議会: 第3回中京都市圏パーソントリップ調査報告書, 1993.
- 12) 名古屋高速道路公社・名古屋高速道路協会: 名古屋高速道路の交通量配分手法に関する実証的調査研究委員会報告書, 1997.
- 13) 建設省道路局編・(社) 交通工学研究会: 平成6年度道路交通センサス, 1995.

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

藤田素弘・雲林院康宏・松井 寛

特定時間帯の交通計画や交通需要予測を都市圏規模で行う必要性の高まりから、時間帯別交通均衡配分モデルの重要性が増している。しかし、時間帯別配分特有の残留交通量の影響を考慮しつつ、料金コストをもつ高速道路を考慮できる交通量配分モデルは未だないといえる。よって本研究では、高速道路を考慮可能な2つのタイプの時間帯別均衡モデルの開発を行った。本モデルを名古屋圏の実規模ネットワークに適用しその実績再現性を検証した結果、両モデルとも比較的精度良く交通量を予測できることがわかり、また、残留交通量修正の精度向上への効果や時間帯別高速転換率モデルの有効性等を示すことができた。

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

By, Motohiro FUJITA, Yasuhiro UJII, Hiroshi MATSUI

We propose two types of extended time-of-day user equilibrium assignment models for an urban road network including expressways in this paper. In time-of-day traffic assignment it is significant to modify traffic demand remained on route at the end of a study period. These models are able to modify the traffic demand in considering the toll load for expressway. In the models the user equilibrium conditions are also able to be held based on travel time for arterial road users but based on general travel time considering the toll load for expressway users. These new models are applied to the arterial road network and the results show good accuracy and practicability.