

# 高速道路の利用経路を考慮した 交通均衡配分モデルの開発

三輪 富生<sup>1</sup>・酒井 大輔<sup>2</sup>・山本 俊行<sup>3</sup>・森川 高行<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 名古屋大学准教授 エコトピア科学研究所 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

E-mail:miwa@nagoya-u.jp

<sup>2</sup>正会員 JR西日本

<sup>3</sup>正会員 名古屋大学教授 エコトピア科学研究所

<sup>4</sup>正会員 名古屋大学大学院教授 環境学研究科

近年、都市間高速道路の休日割引や上限料金、都市高速道路の対距離制や環境ロードプライシングなど、様々な高速道路通行料金施策が実施されてきている。これらの施策を評価・分析するためには、適切な交通量配分モデルが必要であるが、従来より用いられてきた配分モデルでは適切な評価が難しい場合がある。本研究では、様々な高速道路通行料金施策を評価するための交通量配分モデルを構築し、その実用性を検証する。構築した配分モデルは、高速道路上の利用経路を明示的に扱うものであり、同じオンランプ・オフランプペアであっても走行経路によって料金が異なるような状況を分析でき、また高速道路上の経路交通量も出力可能である。大規模ネットワークを対象とした分析結果から、従来の配分モデルより配分精度の向上が可能となることが示された。

**Key Words :** *traffic assignment, user equilibrium, route choice, expressway*

## 1. はじめに

近年、都市間高速道路での休日割引や上限千円制度、首都高速道路や阪神高速道路での対距離料金制や大型車を対象とした環境ロードプライシングなど、高速道路の通行料金に関する施策が多く実施されている。このような高速道路料金施策を詳しく評価するためには、施策の実施による高速道路利用状況の変化を適切に分析できる交通量配分法が必要である。また、ETCやGPS等の技術を活用すれば、同じオンランプ・オフランプペアであっても走行経路によって異なる料金を徴収することも可能となる。このため、今後はこのような柔軟な高速道路料金設定を評価できる交通量配分モデルが必要となると考えられる。

経路交通量の均衡解を求める場合は確率的均衡配分を用いることが適切である。ここで、交通量の配分計算を効率的に実行するためにDial法を用いる場合は、実際には利用可能な経路が計算対象から外れてしまったり、繰り返し計算の過程で経路集合が変わってしまうために厳密な解が得られないといった問題がある<sup>1)</sup>。また、経路

を明示的に扱わない場合は、完全な対距離料金制を除けば、経路ごとに異なる料金を設定することが困難となる。

高速道路上の利用可能経路集合は、一般道路網と比較してかなり小さく、列挙することが可能である<sup>2)</sup>。このため、高速道路上経路だけでも列挙しそれを用いて配分することができれば、高速道路上の経路ごとに異なる料金を設定でき、またその交通量の厳密な均衡解を算出することが可能となる。本研究では、そのような高速道路上経路を明示的に扱った均衡配分モデルを構築する。ここで、高速道路上経路は、オンランプ、オフランプ、およびランプ間の走行経路で表現される。

## 2. 既往研究

高速道路の利用を精緻に表現することを目的とした均衡配分モデルは、これまでも多く開発されてきた。松井・藤田<sup>3)</sup>は高速道路転換率を内生化した均衡配分モデルを提案し、名古屋圏ネットワークに適用しているし、中村ら<sup>4)</sup>は同様のモデルを首都圏ネットワークに適用し

ている。また、著者ら<sup>9)</sup>はランプペア選択を組み込んだ配分モデルを提案している。近年では、井上ら<sup>2)</sup>が高速道路のランプペア選択や高速道路上経路の選択確率を組み込んだ配分モデルを提案し、ランプペア選択を組み込んだモデルの実用性を示している。

本研究では、高速道路上経路の選択を考慮した均衡配分モデルを構築し、それを実ネットワークに適用することで、その実用可能性を検討する。

### 3. 高速道路上の経路選択行動を内生化した交通量配分モデル

#### (1) 経路選択行動の表現

本研究で構築する交通量配分モデルでは、高速道路上経路を図-1のように扱い、図-2に示すようなネスティッドロジットモデルで表現する。つまり、本モデルでは、明示的に扱う経路は高速道路上の経路のみである。一般道路のみを利用する交通量や各高速道路経路へのアクセスおよびイグレス交通量は、いずれも経路を明示的に扱わない確定的利用者均衡配分とする。また、高速道路上の経路はあらかじめ列挙されていることとし、前述のとおり、高速道路上経路は、オンランプ、オフランプ、ランプ間経路によって定義される。このように、高速道路上経路を明示的に扱えば、経路ごとに異なる料金を設定でき、かつ各高速道路上経路の交通量も正しく算出可能である。

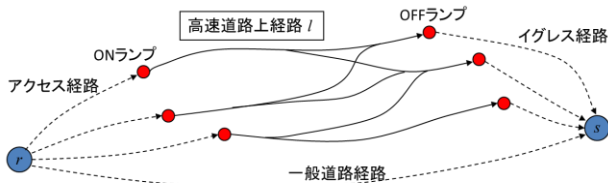


図-1 構築モデルにおける利用経路の取り扱い

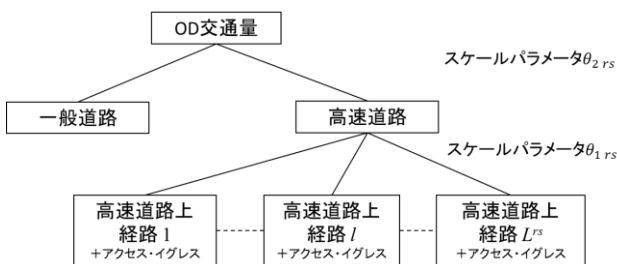


図-2 経路選択モデルの構造

#### (2) 経路選択モデル

経路選択行動を上記のように表現する場合、その経路選択モデルは以下のネスティッドロジットモデルで表現できる。

$$P_{rs}^b(e) = \frac{\exp\{\theta_{2,rs}(LS_{rs}^e + d^b)\}}{\exp\{\theta_{2,rs}(-\beta_1^b t_{rs}^{g*})\} + \exp\{\theta_{2,rs}(LS_{rs}^e + d^b)\}} \quad (1)$$

$$p_{rs}^{b,e}(l) = \frac{\exp\{\theta_{1,rs}(-\beta_1^b t_{rls} - \beta_2^b c_{rs,l}^b)\}}{\sum_{l'} \exp\{\theta_{1,rs}(-\beta_1^b t_{rl's} - \beta_2^b c_{rs,l'}^b)\}} \cdot P_{rs}^b(e) \quad (2)$$

$$LS_{rs}^e = \frac{1}{\theta_{1,rs}} \ln \sum_{l'} \exp\{\theta_{1,rs}(-\beta_1^b t_{rl's} - \beta_2^b c_{rs,l'}^b)\} \quad (3)$$

$$t_{rls} = t_{rs,l,ac}^{e*} + t_{rs,l}^e + t_{rs,l,eg}^{e*} \quad (4)$$

ここに、ODペア $rs$ 、車種 $b$ について、 $P_{rs}^b(e)$ は高速道路選択確率、 $p_{rs}^{b,e}(l)$ は高速道路上の経路 $l$ を選択する確率、 $t_{rs}^{g*}$ は一般道路の最短経路旅行時間、 $t_{rs,l,ac}^{e*}$ 、 $t_{rs,l,eg}^{e*}$ はそれぞれ高速道路上経路 $l$ を利用する場合のアクセス、イグレス区間の最短旅行時間、 $t_{rs,l}^e$ は高速道路上経路 $l$ の旅行時間、 $t_{rls}$ は高速道路上経路 $l$ を利用する場合の総旅行時間、 $c_{rs,l}^b$ は高速道路上経路 $l$ の料金、 $LS_{rs}^e$ は高速道路上経路選択に関するログサム変数（合成効用）、 $d^b$ は高速道路定数項、 $\theta_{1,rs}$ 、 $\theta_{2,rs}$ はそれぞれ下位レベル（高速道路上経路の選択）、上位レベル（高速道路／一般道路の選択）のスケールパラメータ、 $-\beta_1^b$ 、 $-\beta_2^b$ はそれぞれ旅行時間、高速道路料金に対するパラメータである。なお、ここでは、所要時間および高速道路料金のパラメータのみ車種別となっているが、スケールパラメータ $\theta_{1,rs}$ 、 $\theta_{2,rs}$ も車種別に設定可能である。また、高速道路定数項 $d^b$ はODペア別に設定可能である。

#### (3) 等価数理最適化問題

(2)で示した経路選択モデルを内生化した均衡配分モデルは、以下の式(5)によって等価数理最適化問題として表せる。なお、式中の定数（例えばOD交通量 $Q_{rs}^b$ ）の扱いによって異なる式形でも表現できることに注意されたい。なお、ここでは環境ロードプライシングのように車種によって異なる料金施策の評価を想定して、車種別の交通量による定式化を行っている。ただし、多くの既往研究と同様、交通量の増加に伴うリンク旅行時間の増加は車種による違いを考慮しないため、リンクコスト関数は1種類としている。

$$\min. Z = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(w) dw$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{\theta_2} \sum_{rs} \sum_b \frac{1}{\beta_1^b} \left( q_{rs}^{b,e} \ln \frac{q_{rs}^{b,e}}{Q_{rs}^b} + q_{rs}^{b,g} \ln \frac{q_{rs}^{b,g}}{Q_{rs}^b} \right) \\
& + \frac{1}{\theta_1} \sum_{rs} \sum_b \sum_l \frac{1}{\beta_1^b} f_{rs,l}^{b,e} \ln \frac{f_{rs,l}^{b,e}}{q_{rs}^{b,e}} \\
& + \sum_{rs} \sum_b \sum_l f_{rs,l}^{b,e} \frac{\beta_2^b}{\beta_1^b} c_{rs,l}^{b,e} - \sum_{rs} \sum_b q_{rs}^{b,e} \frac{d^b}{\beta_1^b} \quad (5. a)
\end{aligned}$$

Subject to

$$q_{rs}^{b,e} + q_{rs}^{b,g} = Q_{rs}^b \quad \forall b, rs \quad (5. b)$$

$$\sum_l f_{rs,l}^{b,e} = q_{rs}^{b,e} \quad \forall b, rs \quad (5. c)$$

$$\sum_k f_{rs,k}^{b,g} = q_{rs}^{b,g} \quad \forall b, rs \quad (5. d)$$

$$\sum_{k'} f_{rl(s),k'}^{b,e} = f_{rs,l}^{b,e} \quad \forall b, rs, l \quad (5. e)$$

$$\sum_{k''} f_{(r)ls,k''}^{b,e} = f_{rs,l}^{b,e} \quad \forall b, rs, l \quad (5. f)$$

$$\begin{aligned}
x_a = & \sum_b \sum_{rs} \sum_k \delta_{k,a}^{rs} f_{rs,k}^{b,g} + \sum_b \sum_{rs} \sum_l \delta_{l,a}^{rs} f_{rs,l}^{b,e} \\
& + \sum_b \sum_{rs} \sum_{k'} \delta_{k',a}^{rl(s)} f_{rl(s),k'}^{b,e} + \sum_b \sum_{rs} \sum_{k''} \delta_{k'',a}^{(r)ls} f_{(r)ls,k''}^{b,e} \\
& \forall a \quad (5. g)
\end{aligned}$$

$$x_a \geq 0, q_{rs}^{b,e} \geq 0, q_{rs}^{b,g} \geq 0, f_{rs,l}^{b,e} \geq 0, f_{rs,k}^{b,g} \geq 0,$$

$$f_{rl(s),k'}^{b,e} \geq 0, f_{(r)ls,k''}^{b,e} \geq 0 \quad \forall a, b, rs, l, k', k'' \quad (5. h)$$

ここに、 $x_a$ はリンク $a$ の交通量、 $t_a(\cdot)$ はリンクコスト関数である。また、ODペア $rs$ 、車種 $b$ について、 $Q_{rs}^b$ はOD交通量、 $q_{rs}^{b,e}$ は高速道路を利用する交通量、 $q_{rs}^{b,g}$ は一般道路のみを利用する交通量、 $f_{rs,l}^{b,e}$ は高速道路上経路 $l$ を利用する交通量、 $f_{rs,k}^{b,g}$ は一般道路のみを通る経路 $k$ を利用する交通量、 $f_{rl(s),k'}^{b,e}$ はODペア $rs$ で高速道路上経路 $l$ を利用するアクセス経路 $k'$ の交通量、 $f_{(r)ls,k''}^{b,e}$ はイグレス経路 $k''$ の交通量、 $\delta_{k,a}^{rs}$ 、 $\delta_{l,a}^{rs}$ 、 $\delta_{k',a}^{rl(s)}$ 、 $\delta_{k'',a}^{(r)ls}$ は各経路がリンク $a$ を利用するとき1となる変数である。

上記の等価数理最適化問題において、右辺第2項および第5項が高速道路選択モデルに対応しており（図-2における上位レベル）、第3項および第4項が高速道路経路

選択モデル（図-2における下位レベル）に対応している。また、第4項の高速道路上経路料金 $c_{rs,l}^{b,e}$ に乘じられた $\beta_2^b/\beta_1^b$ は、推定されたモデルパラメータによって算出される時間価値の逆数である。

ここで、目的関数と制約条件からラグランジュ関数を定義し、Kuhn-Tucker条件から均衡解の最適性条件を求めると、均衡解の最適性条件として式(1)～(4)が得られる。この条件の導出および解の唯一性については、それぞれ付録1および付録2を参照されたい。また、上記の目的関数と選択モデル式（式(1)および式(2)）は、表記の方法が既往研究<sup>2,3,4</sup>と異なっているが、例えば、スケールパラメータと所要時間パラメータを区別しない式に書き換えることも可能である。これについては付録3を参照されたい。

### (3) 配分計算フロー

ここで示したモデルにおいても、既往研究と同様に部分線形化法による計算フローが適用できる（図-3）。部分線形化法については文献<sup>6</sup>に詳しく記載されているとおりであるが、図-3に示したフローは既往研究<sup>2</sup>と同じである。

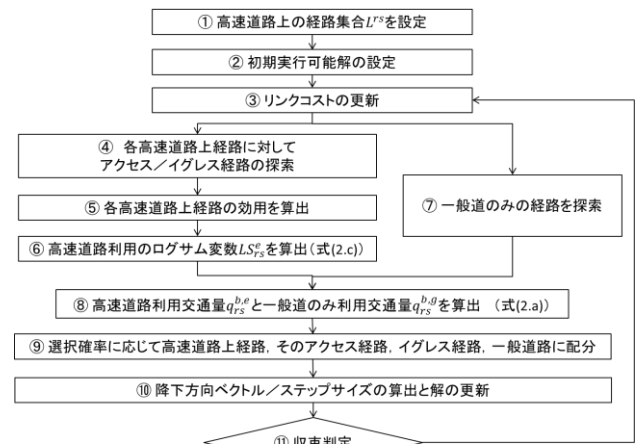


図-3 提案するモデルの配分計算フロー

### (4) 時間帯別配分問題への適用について

高速道路の料金施策においては、ETC車などを対象に時間帯で料金を変動させるものが多い。このため、時間帯別配分に対するニーズは高いと考えられる。藤田ら<sup>7</sup>はある時間帯で発生した交通量のうち次の時間帯に残留する交通量を内生的に求めるOD修正法を提案している。しかし、一般に、通常の利用者均衡配分は高速道路料金を時間価値によって時間換算した一般化費用によって配分計算を行うため、残留交通量の算出も実所要時間では

なく一般化費用に基づいて算出されてしまう。また、藤田ら<sup>9)</sup>は松井・藤田の転換率内生型モデルを時間帯別配分が可能なモデルへと拡張している。しかし、この場合、残留交通量を算出するためのOD間平均所要時間は、一般道路と高速道路の選択に関するログサム変数（合成效用）に基づいて算出され、やはり実所要時間に基づく残留交通量の算出とはならない。また、これらの方法では、すべてのトリップが時間帯幅より短い旅行時間で目的地に到達することを仮定しているが、大規模なネットワークを対象とする場合はその仮定が満たされない場合が多い。なお、本研究で示した配分モデルにおいても、藤田ら<sup>9)</sup>と同様の拡張は可能である（詳細は付録4を参照）。

円山ら<sup>9)</sup>は、あらかじめOD交通量を修正しておく簡便な方法を提案しており、本研究でもこれを用いる。この方法は、時間帯をまたぐトリップについて、そのトリップの総走行時間のうち各時間帯が占める時間比で、その交通量を時間帯に振り分けるものである。例えば、あるODにおいて、8:30発、10:10着のトリップが拡大係数100として与えられた場合、そのトリップの総走行時間（100分）は、8時台の走行時間が30分間、9時台が60分間、10時台が10分間であるので、8時台のOD表に30台、9時台に60台、10時台に10台を振り分ける<sup>9)</sup>。

#### 4. 使用データとモデル構築の手順

##### (1) 対象エリアと使用データ

本研究では中部地方整備局管内を対象としたH17配分ネットワークを用い、リンク数32,330（両方向）、ノード数11,351である（図-4）。OD表についても平成17年度道路交通センサスODマスターデータを、上記のネットワークに対応するよう集計した。中部地方整備局管内はBゾーン、その他は集約ゾーンとし、総ゾーン数は1049（中部地整管内969ゾーン、その他80ゾーン）である。

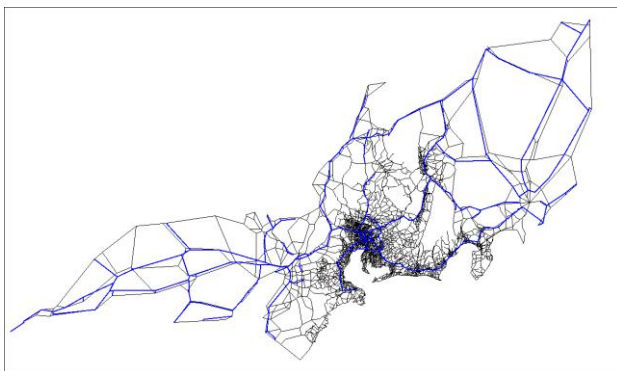


図-4 配分ネットワーク（青線：高速道路）

この際、車種は2車種（普通車、大型車）とした。

また、本研究では高速道路を都市間高速道路および都市高速道路とし、一般有料道路は一般道路として扱うこととした。

リンクコスト関数はBPR関数とし、式(6)のようにパラメータは土木学会<sup>10)</sup>による標準パラメータ（全道路種別共通）とした。

$$t_a(x_a) = t_{a0} \left\{ 1 + 0.48 \left( \frac{x_a}{C_a} \right)^{2.82} \right\} \quad (6)$$

ここに、自由走行時の旅行時間 $t_{a0}$ は規制速度を基準に設定している。また、可能交通容量 $C_a$ は、道路交通センサス箇所別基本表の情報より、高速道路・一般道別、および2車線・多車線別に4種類の平均値を算出し、これを用いることとした。

##### (2) モデル構築の手順

本研究では、図-5に示す手順でモデル構築を行う。まず、①経路選択モデル構築用のLOSデータを作成するため、時間帯別に交通量を仮配分する。この際の時間価値は、平成15年費用便益分析マニュアル<sup>11)</sup>から、乗用車62.86円/分、大型車87.44円/分とした。次に、②この結果を用いて、ODペア別に利用可能オンランプ・オフランプ、および各オンランプ-オフランプ間の高速道路上経路の集合を作成する。また、③作成された高速道路上経路の所要時間や料金の集計、一般道路経路およびアクセス・イグレス経路の最短所要時間を計算する。この際、一般道路として含まれる一般有料道路等の料金は、時間価値により所要時間に換算して用いる。④計算された情報を用いて経路選択モデルのパラメータ推定を行う。⑤推定されたモデルパラメータを用いて、ODペアごとに高速道路上の各経路や一般道路のみを利用する確率を算出し、それぞれの利用交通量と所要時間から、残留交通

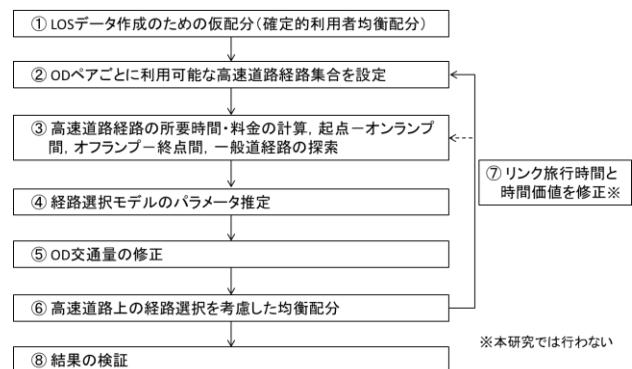


図-5 配分ネットワーク（青線：高速道路）

量を考慮しOD交通量を修正する。⑥経路選択モデルパラメータおよび時間価値と修正されたOD交通量を用いて均衡配分を行う。⑦配分の結果を用いて再度②～⑥の処理を行う。この繰り返し計算が収束したら、⑧配分結果の検証を行う。

ここで、⑦の繰り返し計算は、①の仮配分で設定した時間価値やOD交通量およびリンク交通量と、⑤や⑥で算出されるこれらの値とを一致させるための処理である。これにより、使用データに適した経路選択モデルパラメータと適切な再現性が得られるものと考えられる。また、高速道路上経路の選択肢集合が、旅行時間の変化によって変わらないと仮定する場合は、②の処理は繰り返し計算には含める必要はない。

ただし、本研究では時間の都合上繰り返し計算は行わない。また、②における高速道路上経路の列挙方法については5.で説明する。

## 5. 経路選択モデルの推定

### (1) 高速道路経路集合の作成

高速道路上の経路選択肢集合を設定するためには、同じオンランプーオフランプペア間での利用可能経路を列挙する方法が必要となる。本研究では、加藤ら<sup>12), 13)</sup>の方法を用いた。この方法は遅小樹育法と呼ばれ、設定したリンクコストに関する最短経路に加え、コストの小さい順に経路を列挙する方法である。

各ODペアに設定される利用可能な高速道路上経路集合は以下のとおりである。まず、起点から一般化費用の小さな15個のオンランプと終点までの一般化費用が小さな15個のオフランプを探索する。各オンランプーオフランプペア間で最大5本の高速道路上経路を、探索した。高速道路上経路の探索基準（リンクコスト）は距離とした。この結果、最大1,125の高速道路経路が作成される。本研究では、その中からODペアごとに最大45本の高速道路経路を、一般化費用の小さい順に選んだ。その上で、一般道路のみを利用した経路より2倍以上の距離を持つ高速道路経路は経路集合から削除した。

ここで、オンランプ、オフランプについて、それぞれ15個ものランプを抽出した理由は、道路交通センサスオーナーインタビュー調査から、各起点、各終点について、実際の利用ランプをできるだけカバーできるように設定した結果である。また、オンランプーオフランプ間の経路探索基準を最短距離とした理由は、図-5の①の仮配分の精度が高速道路上で低かったためである。さらに、経路数を45本とした理由は、名古屋市周辺のODを考えた

場合、オンランプとオフランプがそれぞれ3つ、ランプ間の経路が5本程度存在するケースが存在したためである（ $3 \times 3 \times 5 = 45$ ）。ただし、本研究ではこれらを機械的に処理しており、本来は実際の利用状況を考慮しながらODペアごとに適切な経路を設定すべきである。

### (2) 推定データの作成とパラメータ推定結果

平成17年度道路交通センサスオーナーインタビュー調査データを用いてモデルパラメータの推定を行う。使用するデータは、中部地方整備局管内に発着ゾーンがあり、出発時刻、オンランプ、オフランプに欠損のないデータとした。この結果、565のサンプルデータを抽出した。さらに、一般道路のみ利用トリップをランダムに500サンプル抽出しこれに加えた。その上で、ODペアごとに作成した45本の高速道路経路集合に、トリップで実際に使用されたオンランプとオフランプが含まれていないものを削除した。さらに、一般道路のみ利用トリップにおいても、代替案として作成した45本の高速道路経路がすべて一般道路のみ利用経路より2倍以上の距離であるサンプルを削除した。その結果、579サンプルとなった（高速道路利用387、一般道路のみ利用192）。ここで、上記のように、一般道路のみ利用データをランダムに抽出して用いた理由は、センサスデータをそのまま使う場合は、一般道路のみ利用データが多すぎて適切にパラメータ推定が行えなかったためである。

また、モデルに含まれる2つのスケールパラメータは、OD間距離を用いて下式のように設定した。

$$\theta_{1rs} = (D_{rs})^{-\gamma} \quad (7)$$

$$\theta_{2rs} = \mu(D_{rs})^{-\gamma} \quad (8)$$

ここに、 $D_{rs}$ はOD間距離（10km）、 $\gamma$ および $\mu$ は未知パラメータである。パラメータ $\mu$ は通常のネスティッドロジットモデルの推定と同じように、また、付録2に示した解の唯一性を保証するためにも、0～1の値を取らねばならない。式(7)、式(8)は、効用関数の誤差項の分散（ $= \pi^2/6\theta^2$ ）がOD間距離に応じて大きくなることを仮定していることによる。これは、OD間距離が長くなるほど、ドライバーの経路選択に関する不確実性が（認知誤差が）増大することを意味する。上式の構造化には、既往研究<sup>14), 15)</sup>を参考した。

また、通常、非集計モデルのパラメータ推定においては、スケールパラメータとその他の未知パラメータを区別して推定できない。しかし、ここではOD間距離で構造化したことで、OD間距離がある値（ここでは10km）の時に下位レベルのスケールパラメータ $\theta_{1rs}$ は1となる

ため、スケールパラメータとその他の未知パラメータを区別して推定できる。

さて、道路交通センサスオーナーインタビュー調査では、走行中に利用したインターチェンジ名は把握できるが、その間の高速道路経路までは把握できない。そこで、本研究では、最大45経路のうち、センサスオーナーインタビュー調査で回答されたオンランプおよびオフランプを利用する高速経路のすべてを下位レベルのロジットモデルの分子に配してパラメータ推定を行う。すなわち、対数尤度関数 $LL$ は以下のとおりである。

$LL$

$$= \sum_n \ln \left\{ \frac{P_{rs}^b(g)\delta_{n,g} + P_{rs}^b(e)\delta_{n,e}}{\sum_{l''} \exp\{\theta_{1rs}(-\beta_1^b t_{rl''s} - \beta_2^b c_{rs,l''}^b)\} \delta_{n,l''}} \times \frac{\sum_{l'} \exp\{\theta_{1rs}(-\beta_1^b t_{rl's} - \beta_2^b c_{rs,l'}^b)\}}{\sum_{l'} \exp\{\theta_{1rs}(-\beta_1^b t_{rl's} - \beta_2^b c_{rs,l'}^b)\}} \right\} \quad (9)$$

ここに $\delta_{n,e}$  ( $\delta_{n,g}$ ) はサンプル $n$ が高速道路を (一般道路のみを) 利用していたら1, そうでなければ0をとるダミー変数,  $\delta_{n,l''}$  は高速道路経路 $l''$ がサンプル $n$ で利用したオンランプとオフランプを利用している場合に1, そうでなければ0をとるダミー変数である。

表-1 高速道路経路選択モデルパラメータの推定結果

パラメータ：説明変数	推定値	(t値)
$-\gamma$ ( $D_{rs}$ : OD間距離 (10km) )	-0.634	(-6.1)
$\mu$ (スケールパラメータの比)	0.462	(10.2)
$-\beta_1$ : 所要時間 (普通車, 分)	-0.404	(-10.3)
$-\beta_1$ : 所要時間 (大型車, 分)	-0.235	(-4.0)
$-\beta_2$ : 料金 (普通車, 1000円)	-3.67	(-7.1)
$-\beta_2$ : 料金 (大型車, 1000円)	-0.928	(-1.5)
$d^{lb}$ : 高速道路定数項 (普通車)	0.0542	(0.1)
$d^{lb}$ : 高速道路定数項 (大型車)	-2.87	(-2.5)
サンプル数	579	
初期尤度	-1806.2	
最終尤度	-1477.2	
修正 $\rho_2$ 乗値	0.178	

推定結果を表-1に示す。普通車の高速道路定数項を除くすべてのパラメータで統計的にも有意に推定されている。推定結果から算出される時間価値は、普通車で110.1円/分、大型車で253.2円/分と算出され、前述の仮配分で使用した時間価値 (乗用車: 62.86円/分、大型車: 87.44円/分) と大きく異なっている。このため、本来であれば図-5の繰り返し処理⑦が必要である。先にも述べたとおり、本研究ではこの繰り返し処理を行っておらず、

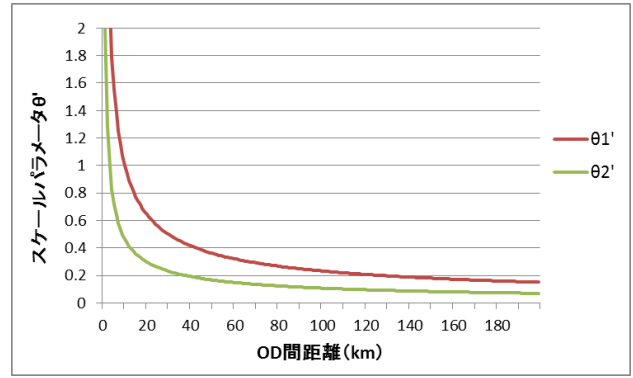


図-6 OD間距離に対するスケールパラメータの変化

この点は今後の課題とする。

また、スケールパラメータのOD間距離に対する変化を図-6に示す。図の通り、OD間距離の増加に伴って、スケールパラメータが小さくなっており、OD間距離が長くなるほど誤差項の分散が大きくなること、つまり選択の不確実性が大きくなることが表現できていることが分かる。

ここで、パラメータ推定に用いたデータでは、道路交通センサスオーナーインタビュー調査に含まれるパラメータ推定に利用可能な高速道路利用トリップと、ランダムサンプリングした一般道路のみ利用トリップで構成されている。すなわち、このデータは選択肢別標本抽出データであり、推定データ内では、高速道路利用交通量と一般道路のみ利用交通量のシェアが母集団 (OD交通量) と一致していない。この場合、交通量配分によって再現されるシェアはサンプル内シェアに従って再現されてしまい、母集団シェアとは一致しない。このため、交通量配分結果の高速道路・一般道路利用シェアを母集団シェアと一致させるため、高速道路定数項を補正する必要がある。本研究では、簡便法<sup>10)</sup>により高速道路定数項の補正を行う。補正項は式(10)のように算出する。また、選択モデルには式(1)に対して、式(11)のように導入する。

$$d_{rs}^b = -\ln\left(\frac{H_{rs}^e}{Q_{rs}^e}\right) + \ln\left(\frac{H_{rs}^g}{Q_{rs}^g}\right) \quad (10)$$

$$P_{rs}^b(e) = \frac{\exp\{\theta_{2rs}(LS_{rs}^e + d^b) + \hat{d}_{rs}^b\}}{\exp\{\theta_{2rs}(-\beta_1^b t_{rs}^{g*})\} + \exp\{\theta_{2rs}(LS_{rs}^e + d^b) + \hat{d}_{rs}^b\}} \quad (11)$$

ここに、 $H_{rs}^e$  ( $H_{rs}^g$ ) は推定サンプルにおけるODペア $rs$ 間の高速道路利用交通量シェア (一般道路のみ利用交通量シェア),  $Q_{rs}^e$  ( $Q_{rs}^g$ ) はセンサスOD交通量 (母集団) におけるODペア $rs$ 間の高速道路利用交通量シェア (一

般道路のみ利用交通量シェア)である。

さらに、この場合、目的関数には、以下のように新たに第6項が追加される。

$$\min. Z' = Z - \sum_{rs} \sum_b q_{rs}^{b,e} \frac{\hat{d}_{rs}^b}{\theta_{2rs} \beta_1^b} \quad (12)$$

なお、式(12)のように第6項を追加した目的関数 $Z'$ と制約条件式(5.b)～式(5.h)を用いて解の最適性条件を求めると、式(11)が得られる。

表-2に修正項の算出結果を示す。ここでは、推定サンプル内のデータ数に注意しつつ、ODペア間の距離帯別に算出を行った。この表から、今回の推定データでは、先に述べたようなデータ作成のために、短距離帯ほどサンプル内における高速道路利用シェアが母集団よりも高くなっていったことが分かる。

表-2 高速道路定数項の修正項

OD間 距離	普通車			大型車		
	高速 シェア*	一般 シェア*	修正 項 $\hat{d}_{rs}^b$	高速 シェア*	一般 シェア*	修正 項 $\hat{d}_{rs}^b$
0～ 10km	0.232	0.768	-5.21	0.400	0.600	-4.51
	0.002	0.998		0.007	0.993	
10～ 20km	0.759	0.241	-4.81	0.577	0.423	-3.32
	0.025	0.975		0.047	0.953	
20～ 30km	0.775	0.225	-3.49	0.630	0.370	-2.56
	0.095	0.905		0.117	0.883	
30～ 40km	0.857	0.143	-3.18	0.563	0.438	-1.60
	0.199	0.801		0.207	0.793	
40～ 50km	0.852	0.148	-2.46	1.000	0.000	-
	0.328	0.672		0.266	0.734	
50km ～	0.438	0.562	0.284	0.200	0.800	1.09
	0.508	0.492		0.427	0.573	

※上段：サンプルシェア $H$ ，下段：母集団シェア $Q$

## 6. 交通量配分結果の検証

### (1) ケース設定

本研究で構築した交通量配分モデルの実用可能性を確認する。ただし、高速道路上経路の設定以外にも、BPR関数やリンク可能交通容量の設定において、詳細な設定とはなっていない。そこで、(A) 通常の確定的利用者均衡配分(確定的配分)、(B) ランプペアのみを選択した場合の配分(ランプペア選択配分)、(C) 高速道路上経路選択を考慮した配分(高速道路上経路選択配分)の3種類の配分モデルの比較を通じて検証を行う。

(A) 確定的利用者均衡配分で適用した時間価値は、前述の仮配分と同様に乗用車62.86円/分、大型車87.44円/分とした。また、(B) ランプペア選択配分は、設定は異なるがモデル自体は井上ら<sup>2)</sup>と同様である。また、(C) と同様に高速道路定数項の補正項は適用している。各ODペアごとに設定される利用可能ランプペア集合は、すでに作成した高速道路上経路選択肢集合から作成した。また、その上で、ランプペアを選択対象とするネスティッドロジットモデルを別途推定してこれを利用した。パラメータ推定結果の詳細は割愛するが、各パラメータ値や適合度は表-1に示した高速道路上経路選択モデルと近い値となった。ただし、推定結果から算出される時間価値は、普通車で113.6円/分、大型車で280.8円/分とさらに高い値となった。最後に、(B) ランプペア選択配分や(C) 高速道路上経路選択配分では、すべてのODペアで高速道路上経路集合やランプペア集合を設定しなければならないが、使用する道路ネットワークデータやPCのメモリ容量の制約から、中部地方整備局管内(内々)のODペアのみについて高速道路上経路選択肢集合およびランプペア集合を設定し、その他のODペアには確定的利用者均衡配分を適用した。なお、全配分対象交通量のうち、中部地方整備局管内の内々トリップは64%である。

### (2) 配分結果と考察

図-7に朝7時～8時台の高速道路リンク交通量の配分結果を示す。この図より、いずれの配分モデルであっても高速道路利用交通量を過大に推計する傾向がある。この原因として、BPR関数の設定やリンク交通容量が適切でないことが考えられる。また、これらの影響で、時間帯別OD表の作成において、次の時間帯への残留交通量が適切に計算されていない可能性もある。ただし、BPR関数やリンク交通容量等を各リンクの状況に合わせて設定したり、図-5に示した繰り返し処理により大幅に改善可能であると考えられる。

この図からは、ランプペア選択や高速道路上経路選択を考慮することで、通常の確定的利用者均衡配分よりも高速道路上の配分精度を大幅に向上できることも分かる。(B) ランプペア選択配分と(C) 高速道路上経路選択配分を比べると、RMSEはほぼ同じかごくわずかに(B) ランプペア選択配分の方が高く、相関係数は(C) 高速道路選択配分の方が高い。ランプペア選択配分と高速道路上経路選択配分の違いは、高速道路ネットワーク上での確定的利用者均衡配分と確率の利用者均衡配分の違いと類似している。この結果は、高速道路上経路選択配分の方が高速道路上の交通流動を適切に再現できる可能性が高いことが示唆している。また、高速道路上経路選択配分では、

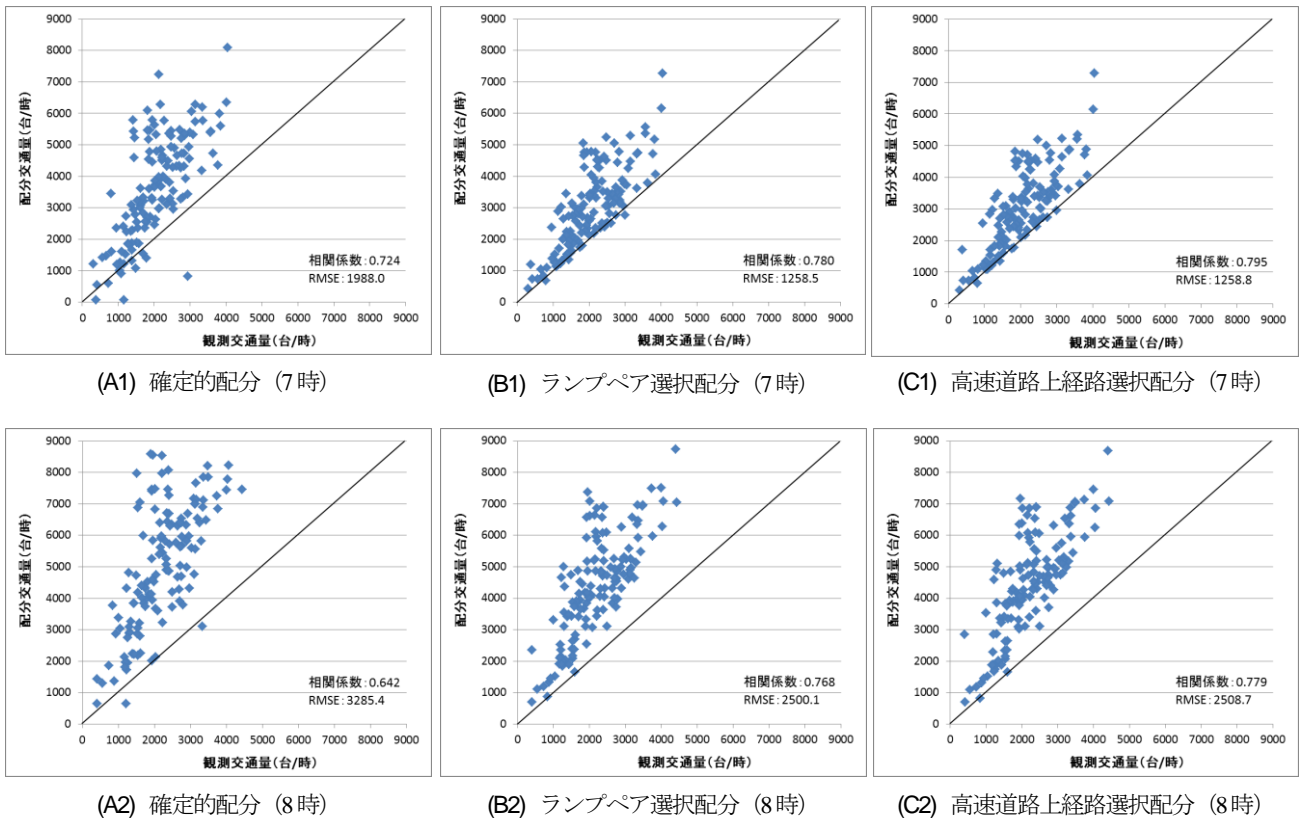


図-7 高速道路リンク交通量の配分結果(7時~8時台)

表-3 配分結果のまとめ

		相関係数				RMSE			
		7時台	8時台	9時台	日配分*	7時台	8時台	9時台	日配分*
(A) 確定的配分	高速道路	0.724	0.642	0.636	0.494	1,988.0	3,485.4	3,452.5	32,914.3
	一般道路	0.758	0.740	0.734	0.784	828.6	1,138.5	897.2	9,938.8
(B) ランプペア選択配分	高速道路	0.780	0.768	0.667	0.682	1,258.5	2,500.1	2,799.2	27,773.7
	一般道路	0.767	0.749	0.742	0.794	811.3	1,080.1	856.0	9,503.1
(C) 高速道路上経路選択配分	高速道路	0.795	0.779	0.696	0.712	1,258.8	2,508.7	2,804.5	24,215.4
	一般道路	0.767	0.750	0.742	0.795	812.8	1,082.7	857.2	9,501.8

\* “日配分”の結果は、リンクの可能交通容量を17倍して日交通量を1度に配分した結果であり参考値

経路ごとに異なる料金設定が可能であり、また経路交通量を算出可能である。このことは、これら2つのモデル間の大きな違いである。

また、表-3には、一般道路の配分結果や日交通量配分を行った結果も参考として示す。ただし、この結果は、時間帯別に24回の配分を繰り返したのではなく、既往研究等<sup>17), 10)</sup>を参考に日換算係数を一律17.0として、日交通量を一度に配分した結果である。この結果からは、構築したモデルは日交通量の配分にも利用可能であることが分かる。ただし、日交通量を配分するための経路選択モデルは、日交通量による仮配分を通じてモデルパラメ

ータの推定を行いそれを用いることで、より配分精度は高くなると考えられる。

### (3) 高速道路定数項のみの補正

上記のような高速道路交通量の不整合（ここでは、高速道路交通量の過大推計）は、高速道路定数項のみを修正することでも対応可能である。この場合、高速道路定数項の補正項は以下のようになる。

$$\hat{d}_{rs}^{b,n} = \hat{d}_{rs}^b + \sum_{n=1}^N \left\{ -\ln \left( \frac{H_{rs}^{e,n-1}}{Q_{rs}^e} \right) + \ln \left( \frac{H_{rs}^{g,n-1}}{Q_{rs}^g} \right) \right\} \quad (13)$$



ここに、 $n$ は高速道路定数項の補正回数、 $\hat{d}_{rs}^{b,n}$ は $n$ 回の補正を行った補正項、 $H_{rs}^{e,n-1}$  ( $H_{rs}^{g,n-1}$ ) は $n-1$ 回の補正後の配分結果における高速道路利用交通量シェア（一般道路のみ利用交通量シェア）、 $Q_{rs}^e$  ( $Q_{rs}^g$ ) は式(10)と同様にセンサスOD交通量（母集団）におけるODペア $rs$ 間の高速道路利用交通量シェア（一般道路のみ利用交通量シェア）である。

参考として、7時台の高速道路上経路選択配分の結果に対して、この補正を2回繰り返したところ、高速道路リンク交通量の散布図は図-8のようになった。図より、散布図が45度線に近づき、RMSEが大幅に低下していることが分かる。ただし、相関係数が低下している。これは、実際の高速道路利用シェア（および一般道路のみ利用交通量シェア）が時間帯別に得られなかったため、1日の利用シェアから補正項を算出したことや、距離帯の設定が十分でないこと、また上述したように、本来であれば所要時間や料金（およびそこから算出される時間価値）の修正から行うべきところを、高速道路定数項のみの補正によって再現性の向上を図っているためと考えられる。

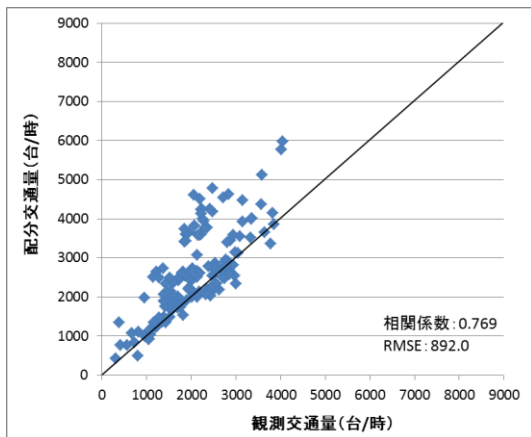


図-8 高速道路定数項のみの補正結果  
(高速道路上経路選択配分による7時の高速道路リンク交通量)

## 7. 高速道路料金施策の評価分析

### (1) ケース設定

ここでは、構築した配分モデルを用いて4つの高速道路料金施策の評価を行う。また、ここでの計算では、計算負荷のため評価は8時台のみの交通量に対して実施する。さらに、いずれの施策も中部地方整備局管内の内々交通のみを対象とする。つまり、中部地方整備局管外に

関連した交通は、施策とは無関係に確定的均衡配分が適用される。このため、施策の実施効果は、実際より小さく出ることに注意が必要である。

ここで適用した料金施策は以下の通りである。

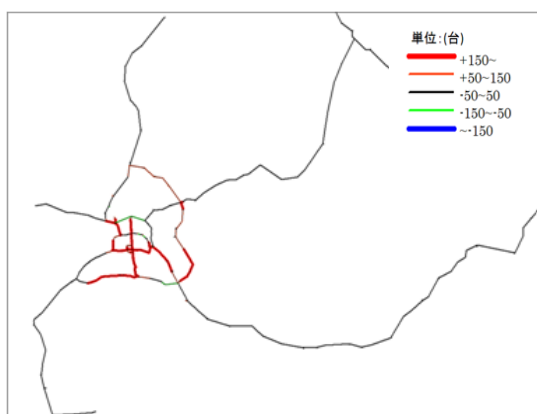
- 施策①：都市高速道路とその他高速道路との料金一体化
- 施策②：高速道路での普通車上限1000円制度
- 施策③：上限1000円制度の大型車への適用
- 施策④：高速道路の長距離低減割引の廃止

施策①では一律料金が適用されている名古屋高速道路（普通車750円、大型車1500円。ただし一部区間では、普通車350円、大型車700円）および名古屋第2環状道路（普通車500円、大型車800円）の均一料金制を廃止し、その他高速道路（NEXCO管轄）の対距離料金制度と一体的な料金に変更する（高速道路⇄名古屋高速道路・名古屋第2環状道路の乗り継ぎにおけるターミナルチャージも適用しない）。施策②では、以前に実施されていた、高速道路での休日上限1000円制度を平日にも導入する。但し施策対象は普通車のみとする。また、途中で名古屋高速、名古屋環状道路を通過する場合は別途それぞれの一律料金が徴収されるが、その前後で高速道路を利用する場合は乗り継ぎ利用として上限1000円を適用する。施策③では、施策2の料金施策を大型車に対しても適用する。施策④は現在NEXCO管内の高速道路で適用されている長距離低減割引（NEXCO管内の総走行距離が100km以上200km未満で以降25%割引、200km以上で以降30%割引）を無くした施策とする。

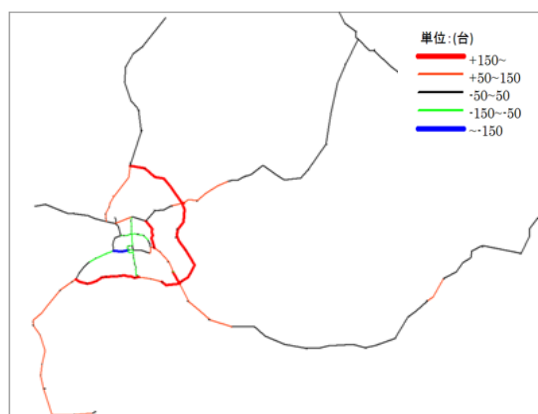
これらの施策は、様々な高速道路上経路に対して個別に設定した料金制度ではないが、いずれも従来のようなリンク単位に料金を付加する交通量配分では、必ずしも適切に分析することが困難であった施策である。

### (2) 結果の考察

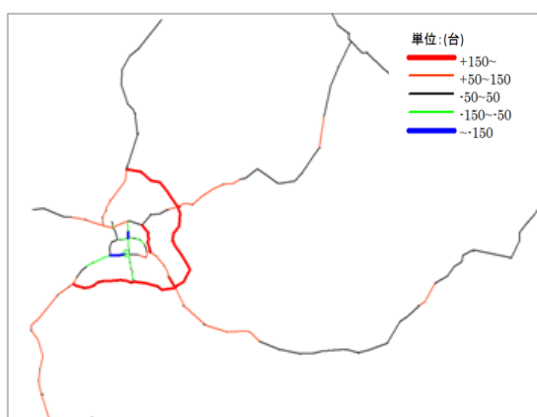
各施策を実施した場合といずれの施策も実施しない場合の結果を図-9および表-4に示す。図より、施策①の場合は、名古屋高速道路周辺の高速道路や名古屋高速道路の東西、南北方向で交通量の増加がみられる。これは、一体的な料金制度としたことで、なるべく距離の短い（所要時間の短い）経路を利用されるようになるためである。施策②および施策③では名古屋高速道路の交通量が減少し、周辺の高速道路で交通量が増加する。これは、高速道路料金のできるだけ安い経路を走行するように経路が選択された結果、別途料金が加算される名古屋高速道路を避けるためである。また、施策④の結果から、現行の長距離割引制度は、交通状況に大きな影響を与えていないことが分かる。



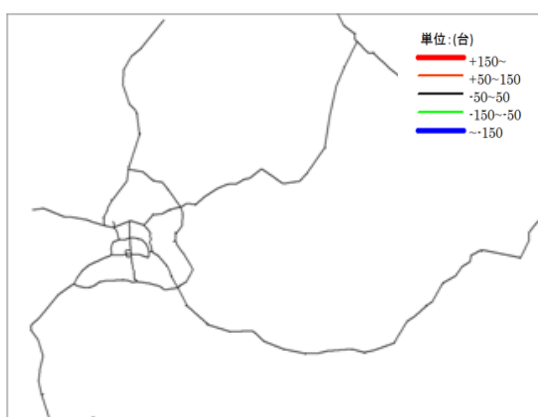
施策① 都市高速道路と高速道路の料金一体化



施策② 高速道路での平日普通車上限 1000 円制度



施策③ 高速道路での平日全車上限 1000 円制度



施策④ 高速道路の長距離低減割引の廃止

図-9 高速道路リンク交通量の変化(8 時台)

表-4 施策前後での交通状況の変化 (中部地方整備局管内, 8時台)

	総走行台キロ (千台キロ)			総走行台時 (千台時)			総料金収入 (万円)
	高速道路	一般道路	合計	高速道路	一般道路	合計	
施策無	4,492.6	18,800.7	23,293.3	62.5	1,273.8	1,336.3	12,058.9
施策① 都市高速道路と高速道路の料金一体化	4,574.1 (+81.5)	18,720.4 (-80.3)	23,270.3 (+1.2)	64.4 (+1.9)	1,266.8 (-7.0)	1,331.2 (-5.9)	10,401.0 (-1,657.9)
施策② 高速道路での平日普通車上限 1000 円制度	4,549.9 (+57.3)	18,766.7 (-34.0)	23,316.6 (+23.3)	63.3 (+0.8)	1,270.6 (-3.2)	1,333.9 (-2.4)	10,497.5 (-1,561.4)
施策③ 高速道路での平日全車上限 1000 円制度	4,567.9 (+75.3)	18,743.4 (-57.3)	23,313.3 (+18.0)	63.5 (+1.0)	1,268.6 (-5.2)	1,332.1 (-4.2)	9,076.4 (-2,982.5)
施策④ 高速道路の長距離低減割引の廃止	4,492.8 (-0.4)	18,800.8 (+0.1)	23,293.6 (-0.3)	62.5 (-0.0)	1,273.8 (+0.0)	1,336.3 (-0.0)	12,141.2 (+82.3)

表-4の結果から、いずれの施策も必ずしも大きな変化であるとは言えないが、施策①で最も高速道路利用が促進されることが分かる。これに伴い、一般道の混雑緩和も施策①で最も大きい。当然のことながら、大型車にも上限1000円を適用する施策③は普通車のみを対象とした施策②よりも変化が大きい。高速道路料金による総収入

を見ると、施策①～③ではいずれも減収となる。特に施策③は減収が大きい。ただし、普通車と同様に上限を1000円としたためであり、上限額を2000円とするなど、様々な施策の評価が必要であると考えられる。

## 8. おわりに

本研究では、高速道路の柔軟な料金施策を評価することを可能とする、高速道路上経路の選択を明示的に考慮した配分モデルを構築した。その適用結果より、高速道路上交通量の再現精度を大幅に向上できることを示した。ただし、本研究では、各ODペア間の利用可能高速道路上経路集合を機械的に作成しており、現実の利用に即した設定ができていない。また、仮配分や経路選択モデルの構築の繰り返し処理も行っていない。これらの実施により、さらに配分精度が向上することが期待できる。

構築したモデルでは高速道路上の経路交通量も唯一解として出力可能である。したがって、構築したモデルの適用可能性は高いと考えられる。本研究で示したいくつかの高速道路料金施策の分析結果からも、これまでの交通量配分手法では分析が困難であった料金施策が、比較的容易に分析可能であることが示された。今後は、構築したモデルを用いて様々な料金施策の有効性を分析する予定である。

**謝辞：**井上紳一氏（一般財団法人計量計画研究所）も同様の構造の均衡配分モデルを提案しており、本研究の実施に際しては、多くの有用な意見をいただいた。また、本研究は、高速道路調査会平成24年度研究助成（研究代表者：山本俊行）、および科学研究費補助金基盤研究A（課題番号：24246087、研究代表者：森川高行）の補助により実施されたものである。ここに記して謝意を表する。

### 付録1 均衡解の最適性条件

式(5)における制約条件式(5.b)~(5.f)のラグランジュ乗数をそれぞれ $\lambda_{rs}^b$ ,  $\lambda_{rs}^{b,e}$ ,  $\lambda_{rs}^{b,g}$ ,  $\lambda_{rs,l}^{1,b,e}$ ,  $\lambda_{rs,l}^{2,b,e}$ とし、ラグランジュ関数を以下のように定義する。ここで、式(1)の目的関数にはリンク交通量ベクトル $\mathbf{x}$ が含まれているが、これは式(5.g)のように経路交通量で表現できるので、以下でも経路交通量ベクトル $\mathbf{f}$ で表現している。

$$\begin{aligned} L(\mathbf{f}, \mathbf{q}, \boldsymbol{\lambda}) &= Z(\mathbf{f}, \mathbf{q}) + \sum_{b,rs} \lambda_{rs}^b (Q_{rs}^b - q_{rs}^{b,e} - q_{rs}^{b,g}) \\ &+ \sum_{b,rs} \lambda_{rs}^{b,e} \left( q_{rs}^{b,e} - \sum_l f_{rs,l}^{b,e} \right) + \sum_{b,rs} \lambda_{rs}^{b,g} \left( q_{rs}^{b,g} - \sum_k f_{rs,k}^{b,g} \right) \\ &+ \sum_{b,rs,l} \lambda_{rs,l}^{1,b,e} \left( f_{rs,l}^{b,e} - \sum_{k'} f_{rl(s),k'}^{b,e} \right) \end{aligned}$$

$$+ \sum_{b,rs,l} \lambda_{rs,l}^{2,b,e} \left( f_{rs,l}^{b,e} - \sum_{k''} f_{(r)ls,k''}^{b,e} \right) \quad (\text{A1})$$

さらに、Kuhn-Tucker条件より以下の式が得られる。

$$q_{rs}^{b,e} \frac{\partial L}{\partial q_{rs}^{b,e}} = 0 \text{ and } \frac{\partial L}{\partial q_{rs}^{b,e}} \geq 0 \quad \forall b,rs \quad (\text{A2})$$

$$f_{rs,l}^{b,e} \frac{\partial L}{\partial f_{rs,l}^{b,e}} = 0 \text{ and } \frac{\partial L}{\partial f_{rs,l}^{b,e}} \geq 0 \quad \forall b,rs,l \quad (\text{A3})$$

$$q_{rs}^{b,g} \frac{\partial L}{\partial q_{rs}^{b,g}} = 0 \text{ and } \frac{\partial L}{\partial q_{rs}^{b,g}} \geq 0 \quad \forall b,rs \quad (\text{A4})$$

$$f_{rs,k}^{b,g} \frac{\partial L}{\partial f_{rs,k}^{b,g}} = 0 \text{ and } \frac{\partial L}{\partial f_{rs,k}^{b,g}} \geq 0 \quad \forall b,rs,k \quad (\text{A5})$$

$$f_{rl(s),k'}^{b,e} \frac{\partial L}{\partial f_{rl(s),k'}^{b,e}} = 0 \text{ and } \frac{\partial L}{\partial f_{rl(s),k'}^{b,e}} \geq 0 \quad \forall b,rl,k' \quad (\text{A6})$$

$$f_{(r)ls,k''}^{b,e} \frac{\partial L}{\partial f_{(r)ls,k''}^{b,e}} = 0 \text{ and } \frac{\partial L}{\partial f_{(r)ls,k''}^{b,e}} \geq 0 \quad \forall b,ls,k'' \quad (\text{A7})$$

and (1.b)~(1.f)

ここで、円山<sup>18)</sup>に示される通り、 $q_{rs}^{b,e}$ ,  $f_{rs,l}^{b,e}$ ,  $q_{rs}^{b,g}$ ,  $f_{rs,k}^{b,g}$ ,

$f_{rl(s),k'}^{b,e}$ ,  $f_{(r)ls,k''}^{b,e}$ はいずれも0とならないため、(A2)から、

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial q_{rs}^{b,e}} &= \frac{1}{\theta_{2rs}\beta_1^b} (\ln q_{rs}^{b,e} + 1) - \frac{1}{\theta_{1rs}\beta_1^b} (\ln q_{rs}^{b,e} + 1) - \frac{d^b}{\beta_1^b} \\ -\lambda_{rs}^b + \lambda_{rs}^{b,e} &= 0 \end{aligned} \quad (\text{A2'})$$

また、(A3)から、

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial f_{rs,l}^{b,e}} &= \sum_a \delta_{l,a}^{rs} t_a(x_a) + \frac{1}{\theta_{1rs}\beta_1^b} (\ln f_{rs,l}^{b,e} + 1) + \frac{\beta_2^b}{\beta_1^b} c_{rs,l}^b \\ -\lambda_{rs}^{b,e} + \lambda_{rs,l}^{1,b,e} + \lambda_{rs,l}^{2,b,e} &= 0 \end{aligned} \quad (\text{A3'})$$

この式の右辺第1項 ( $\sum_a \delta_{l,a}^{rs} t_a(x_a)$ ) は高速道路上経路の所要時間であり、以降では $t_{rs,l}^e$ と表す。

次いで、(A4)より、以下の(A4)が得られる。

$$\frac{\partial L}{\partial q_{rs}^{b,g}} = \frac{1}{\theta_{2rs}\beta_1^b} (\ln q_{rs}^{b,g} + 1) - \lambda_{rs}^b + \lambda_{rs}^{b,g} = 0 \quad (\text{A4'})$$

さらに、同様に、(A5)~(A7)よりそれぞれ以下の(A5')~(A7')が得られる。

$$\frac{\partial L}{\partial f_{rs,k}^{b,g}} = \sum_a \delta_{k,a}^{rs} t_a(x_a) - \lambda_{rs}^{b,g} = t_{rs}^{g*} - \lambda_{rs}^{b,g} = 0 \quad (\text{A5'})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial f_{rl(s),k'}^{b,e}} &= \sum_a \delta_{k',a}^{rl(s)} t_a(x_a) - \lambda_{rs,l}^{1,b,e} \\ &= t_{rs,l,ac}^{e*} - \lambda_{rs,l}^{1,b,e} = 0 \end{aligned} \quad (\text{A6'})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial f_{(r)ls,k''}^{b,e}} &= \sum_a \delta_{k'',a}^{(r)ls} t_a(x_a) - \lambda_{rs,l}^{2b,e} \\ &= t_{rs,l,eg}^{e*} - \lambda_{rs,l}^{2b,e} = 0 \end{aligned} \quad (A7')$$

上式において、得られた $t_{rs}^{g*}$ 、 $t_{rs,l,ac}^{e*}$ 、 $t_{rs,l,eg}^{e*}$ にそれぞれ“\*”がついている。これは、上式においてラグランジュ乗数は経路 $(k, k', k'')$ 別に異なる値をとっていないことから、旅行時間 $(\sum_a \delta_{k,a}^{rs} t_a(x_a), \sum_a \delta_{k',a}^{rl} t_a(x_a), \sum_a \delta_{k'',a}^{ls} t_a(x_a))$ が(それぞれの対象区間で)全経路同じ値をとること、すなわち確定的均衡配分で算出される旅行時間(最短旅行時間)とみなせるためである。

(A6), (A7)を(A3)に代入すると、

$$\begin{aligned} t_{rs,l}^e + \frac{1}{\theta_{1rs}\beta_1^b} (\ln f_{rs,l}^{b,e} + 1) + \frac{\beta_2^b}{\beta_1^b} c_{rs,l}^b - \lambda_{rs}^{b,e} + t_{rs,l,ac}^{e*} \\ + t_{rs,l,eg}^{e*} = 0 \\ \therefore \ln f_{rs,l}^{b,e} \\ = -\theta_{1rs}\beta_1^b \left( t_{rs,l,ac}^{e*} + t_{rs,l}^e + t_{rs,l,eg}^{e*} + \frac{\beta_2^b}{\beta_1^b} c_{rs,l}^b \right) \\ + \theta_{1rs}\beta_1^b \lambda_{rs}^{b,e} - 1 \\ \therefore f_{rs,l}^{b,e} \\ = \exp\{\theta_{1rs}(-\beta_1^b t_{rls} - \beta_2^b c_{rs,l}^b)\} \exp(\theta_{1rs}\beta_1^b \lambda_{rs}^{b,e} - 1) \end{aligned} \quad (A8')$$

これを式(5.c)に代入すると、以下の式が得られる。

$$\begin{aligned} \exp(\theta_{1rs}\beta_1^b \lambda_{rs}^{b,e} - 1) \\ = q_{rs}^{b,g} / \sum_l \exp\{\theta_{1rs}(-\beta_1^b t_{rls} - \beta_2^b c_{rs,l}^b)\} \end{aligned}$$

さらに、これを式(A8)に代入すれば、以下の高速道路上の経路選択を表す式(A9) (=式(2)) が得られる。

$$f_{rs,l}^{b,e} = q_{rs}^{b,e} \frac{\exp\{\theta_{1rs}(-\beta_1^b t_{rls} - \beta_2^b c_{rs,l}^b)\}}{\sum_{l'} \exp\{\theta_{1rs}(-\beta_1^b t_{rl's} - \beta_2^b c_{rs,l'}^b)\}} \quad (A9')$$

次に、(A6), (A7), (A9)を(A3)に代入すると、

$$\begin{aligned} -\frac{1}{\theta_{1rs}\beta_1^b} \ln \sum_{l'} \exp\{\theta_{1rs}(-\beta_1^b t_{rl's} - \beta_2^b c_{rs,l'}^b)\} \\ + \frac{1}{\theta_{1rs}\beta_1^b} (\ln q_{rs}^{b,e} + 1) - \lambda_{rs}^{b,e} \\ = -\frac{1}{\beta_1^b} LS_{rs}^e + \frac{1}{\theta_{1rs}\beta_1^b} (\ln q_{rs}^{b,e} + 1) - \lambda_{rs}^{b,e} = 0 \end{aligned} \quad (A10')$$

さらに、(A2)に(A4), (A5), (A10)を代入してラグランジュ乗数を消去すると、

$$q_{rs}^{b,e} = q_{rs}^{b,g} \exp\{\theta_{2rs}(\beta_1^b t_{rs}^{g*} + LS_{rs}^e + d^b)\}$$

これに(5.b)を用いて $q_{rs}^{b,g}$ を消去すると、以下の式 (=式(1)) が得られる。

$$q_{rs}^{b,e} = Q_{rs}^b \frac{\exp\{\theta_{2rs}(LS_{rs}^e + d^b)\}}{\exp\{\theta_{2rs}(-\beta_1^b t_{rs}^{g*})\} + \exp\{\theta_{2rs}(LS_{rs}^e + d^b)\}}$$

が得られる。

## 付録2 解の唯一性

式(5)に定式化された数理最適化問題が唯一の解をもつためには、制約条件式による実行可能領域が凸で、かつ目的関数(式(5.a))が狭義の凸関数であればよい<sup>9)</sup>。

まず、制約条件式はすべて線形であることから変数の実行可能領域は凸である。目的関数については、目的関数に含まれるリンク交通量 $x_a$ 、ODペアごとの車種別高速道路利用交通量 $q_{rs}^{b,e}$ と一般道利用交通量 $q_{rs}^{b,g}$ 、高速道路上経路の交通量 $f_{rs,l}^{b,e}$ の4つの変数に関してヘシアン行列 $\nabla^2 Z$ が正定値行列となっていることを調べればよい。このヘシアン行列は以下の2階偏微分値を要素とする対角行列となる。

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial x_a \partial x_{a'}} = \begin{cases} \frac{\partial t_a(x_a)}{\partial x_a} & \text{if } a = a' \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial q_{rs}^{b,e} \partial q_{r's'}^{b,e}} = \begin{cases} \frac{1}{\beta_1^b} \left( \frac{1}{\theta_{2rs}} - \frac{1}{\theta_{1rs}} \right) \frac{1}{q_{rs}^{b,e}} & \text{if } rs = r's' \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial q_{rs}^{b,g} \partial q_{r's'}^{b,g}} = \begin{cases} \frac{1}{\theta_{2rs}\beta_1^b} \frac{1}{q_{rs}^{b,g}} & \text{if } rs = r's' \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial f_{rs,l}^{b,e} \partial f_{r's',l'}^{b,e}} = \begin{cases} \frac{1}{\theta_{1rs}\beta_1^b} \frac{1}{f_{rs,l}^{b,e}} & \text{if } rs, l = r's', l' \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

ここで、旅行時間のパラメータ“ $-\beta_1^b$ ”は負であるから、“ $\beta_1^b$ ”は正である。したがって、ヘシアン行列が正定値となるためには、以下の条件を満たす必要がある。

$$\frac{\partial t_a(x_a)}{\partial x_a} > 0, \theta_{1rs} > \theta_{2rs} > 0$$

以上から、上記の条件を満たせば、式(1)で定義された問題は唯一の解をもち、リンク交通量 $x_a$ 、車種別ODペア別の高速道路利用交通量 $q_{rs}^{b,e}$ 、一般道利用交通量 $q_{rs}^{b,g}$ 、高速道路上の経路交通量 $f_{rs,l}^{b,e}$ は解が一意に求まる。

なお、その他の変数 $f_{rs,k}^{b,g}$ 、 $f_{rl(s),k'}^{b,e}$ 、 $f_{(r)ls,k''}^{b,e}$ は一意な解が得られない。

## 付録3 選択モデルと目的関数の別の表記方法

既往研究で示される選択モデルでは、本研究とは異なり、スケールパラメータと所要時間パラメータを区別しない場合が多い。このような既往研究と同様の表記も可能である。既往研究にできるだけ沿った表現をすると、選択モデルは以下の式(A11)～式(A14)のように表せ、目的関数は式(A15)のように表せる。

$$P_{rs}^b(e) = \frac{\exp\{-\theta_{2rs}^b LS_{rs}^e + \psi_{rs}^b + \hat{\psi}_{rs}^b\}}{\exp\{-\theta_{2rs}^b t_{rs}^{g*}\} + \exp\{-\theta_{2rs}^b LS_{rs}^e + \psi_{rs}^b + \hat{\psi}_{rs}^b\}} \quad (A11)$$

$$p_{rs}^{b,e}(l) = \frac{\exp\{-\theta_{1rs}^b (t_{rls} + c_{rs,l}^b / \gamma^b)\}}{\sum_{l'} \exp\{-\theta_{1rs}^b (t_{rl's} + c_{rs,l'}^b / \gamma^b)\}} \cdot P_{rs}^b(e) \quad (A12)$$

$$LS_{rs}^e = -\frac{1}{\theta_{1rs}^b} \ln \sum_{l'} \exp\{-\theta_{1rs}^b (t_{rl's} + c_{rs,l'}^b / \gamma^b)\} \quad (A13)$$

$$t_{rls} = t_{rs,l,ac}^{e*} + t_{rs,l}^e + t_{rs,l,eg}^{e*} \quad (A14)$$

$$\begin{aligned} \min. Z = & \sum_a \int_0^{x_a} t_a(w) dw \\ & + \frac{1}{\theta_{2rs}^b} \sum_{rs} \sum_b \left( q_{rs}^{b,e} \ln \frac{q_{rs}^{b,e}}{Q_{rs}^b} + q_{rs}^{b,g} \ln \frac{q_{rs}^{b,g}}{Q_{rs}^b} \right) \\ & + \frac{1}{\theta_{1rs}^b} \sum_{rs} \sum_b \sum_l f_{rs,l}^{b,e} \ln \frac{f_{rs,l}^{b,e}}{q_{rs}^{b,e}} + \sum_{rs} \sum_b \sum_l f_{rs,l}^{b,e} \frac{c_{rs,l}^b}{\gamma^b} \\ & - \sum_{rs} \sum_b q_{rs}^{b,e} \frac{\psi_{rs}^b}{\theta_{2rs}^b} - \sum_{rs} \sum_b q_{rs}^{b,e} \frac{\hat{\psi}_{rs}^b}{\theta_{2rs}^b} \quad (A15) \end{aligned}$$

Subject to (5. b)~(5. h)

ここに、 $\theta_{1rs}^b$ 、 $\theta_{2rs}^b$ は経路の一般化費用に関するパラメータ、 $\psi_{rs}^b$ は高速道路定数項で（ここでは既往研究にならってODペア別に異なる値をとるとしている）、 $\hat{\psi}_{rs}^b$ は高速道路利用シェアを合わせるための補正項（推定サンプルの高速道路利用シェアが母集団と同じであれば不要）、 $\gamma^b$ は車種 $b$ の時間価値。ただし、 $\theta_{1rs}^b > \theta_{2rs}^b > 0$ となる必要がある。例えば、 $\theta_{1rs}^b = \alpha D_{rs}^\beta$ のように表現する場合<sup>4)</sup>は、本稿で示した様に、 $\theta_{2rs}^b = \mu \theta_{1rs}^b$ とし、 $\mu$ が0~1の値を取ればよい。また、 $\psi_{rs}^b$ 、 $\hat{\psi}_{rs}^b$ はどのような値でもよく、既往研究<sup>3,4)</sup>と同様の関数で表現してよい。

本研究で推定したパラメータを使用する場合は、一般車については $\theta_{1rs}^b = 0.404 * (D_{rs})^{-0.634}$ 、大型車は $\theta_{1rs}^b = 0.235 * (D_{rs})^{-0.634}$ であり、 $\theta_{2rs}^b$ は $0.462 * \theta_{1rs}^b$ 、また $\psi_{rs}^b = \theta_{2rs}^b * d^b$ 、 $\hat{\psi}_{rs}^b = \hat{d}_{rs}^b$ である。

#### 付録4 時間帯別配分への拡張について

式(1)に定式化された数理最適化問題を、藤田ら<sup>8)</sup>と同様の枠組みで時間帯別配分問題へと拡張すると、以下のような数理最適化問題となる。

$$\begin{aligned} \min. Z = & \sum_a \int_0^{x_a^n} t_a(w) dw \\ & + \frac{1}{\theta_{2rs}^b} \sum_{rs} \sum_b \frac{1}{\beta_1^b} \left( q_{rs}^{b,e,n} \ln \frac{q_{rs}^{b,e,n}}{g_{rs}^{b,n}} + q_{rs}^{b,g,n} \ln \frac{q_{rs}^{b,g,n}}{g_{rs}^{b,n}} \right) \\ & + \frac{1}{\theta_{1rs}^b} \sum_{rs} \sum_b \sum_l \frac{1}{\beta_1^b} f_{rs,l}^{b,e,n} \ln \frac{f_{rs,l}^{b,e,n}}{q_{rs}^{b,e,n}} \\ & + \sum_{rs} \sum_b \sum_l f_{rs,l}^{b,e,n} \frac{\beta_2^b}{\beta_1^b} c_{rs,l}^b - \sum_{rs} \sum_b q_{rs}^{b,e,n} \frac{d^b}{\beta_1^b} \\ & - \frac{1}{\rho_2} \sum_{rs} \sum_b \frac{1}{\beta_1^b} \int_0^{g_{rs}^{b,n}} \frac{2T}{Q_{rs}^{b,n}} \left( g_{rs}^{b,n-1} + Q_{rs}^{b,n} - z - \frac{Q_{rs}^{b,n}}{2T} \rho_1 \right) dz \end{aligned}$$

Subject to

$$\begin{aligned} q_{rs}^{b,e,n} + q_{rs}^{b,g,n} &= g_{rs}^{b,n} \quad \forall n, b, rs \\ \sum_l f_{rs,l}^{b,e,n} &= q_{rs}^{b,e,n} \quad \forall n, b, rs \\ \sum_k f_{rs,k}^{b,g,n} &= q_{rs}^{b,g,n} \quad \forall n, b, rs \\ \sum_{k'} f_{rl(s),k'}^{b,e,n} &= f_{rs,l}^{b,e,n} \quad \forall n, b, rs, l \\ \sum_{k''} f_{(r)ls,k''}^{b,e,n} &= f_{rs,l}^{b,e,n} \quad \forall n, b, rs, l \\ x_a^n &= \sum_b \sum_{rs} \sum_k \delta_{k,a}^{rs} f_{rs,k}^{b,g,n} + \sum_b \sum_{rs} \sum_l \delta_{l,a}^{rs} f_{rs,l}^{b,e,n} \\ & + \sum_b \sum_{rs} \sum_{k'} \delta_{k',a}^{rl(s)} f_{rl(s),k'}^{b,e,n} + \sum_b \sum_{rs} \sum_{k''} \delta_{k'',a}^{(r)ls} f_{(r)ls,k''}^{b,e,n} \quad \forall n, a \end{aligned}$$

$$x_a^n \geq 0, q_{rs}^{b,e,n} \geq 0, q_{rs}^{b,g,n} \geq 0, f_{rs,l}^{b,e,n} \geq 0, f_{rs,k}^{b,g,n} \geq 0,$$

$$f_{rl(s),k'}^{b,e,n} \geq 0, f_{(r)ls,k''}^{b,e,n} \geq 0 \quad \forall n, a, b, rs, l, k', k''$$

ここに、ここでの添え字の“ $n$ ”は時間帯を表す。また、 $Q_{rs}^{b,n}$ は時間帯 $n$ の発生交通量、 $g_{rs}^{b,n}$ は残留交通量修正後のOD交通量、 $\rho_1$ 、 $\rho_2$ はログサム変数（期待最小費用）を平均所要時間に補正するためのパラメータ<sup>8)</sup>である。

この問題においても均衡解の最適性条件として、付録1と同様に、高速道路経路の選択確率、高速道路選択確率が導出でき、残留交通量修正後のOD交通量 $g_{rs}^{b,n}$ は以下のように求められる。

$$g_{rs}^{b,n} = g_{rs}^{b,n-1} + Q_{rs}^{b,n} - \frac{\rho_1 - \rho_2 S_{rs}^{b,n}}{2T} Q_{rs}^{b,n}$$

$$S_{rs}^{b,n} = \frac{1}{\theta_2} \ln[\exp\{\theta_2 t_{rs}(-\beta_1^b t_{rs}^{g*})\} + \exp\{\theta_2 t_{rs}(LS_{rs}^e + d^b)\}]$$

上式から、残留交通量の計算が $\rho_1$ と $\rho_2$ を用いて補正されたログサム変数(期待最小費用) $S_{rs}^{b,n}$ に基づいており、実所要時間に基づいていないことが分かる。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：道路交通需要予測の理論と適用 第II編 利用者均衡配分の展開，丸善，2006.
- 2) 井上紳一，山口修一，鈴木裕介，円山琢也，森田綽之：高速道路上の経路選択を考慮した拡張型利用者均衡配分モデルの実証的研究，土木学会論文集 D3(土木計画学)，Vol.67，No.5，pp.1\_779-1\_786，2011.
- 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) 中村毅一郎，森田綽之，井上紳一，中野敦，遠藤弘太郎：首都高速道路における転換率内生利用者均衡配分モデルの適用，土木計画学研究・講演集，Vol.29，CD-ROM，2004.
- 5) 三輪富生，森川高行：複数の高速道路経路を考慮した確率的均衡配分法に関する研究，土木計画学研究・講演集，No.23(2)，pp.739-742，2000.
- 6) 土木学会：交通ネットワークの均衡分析ー最新の理論と解法ー，丸善，1998.
- 7) 藤田基弘，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，No.389/IV-8，pp.111-119，1988.
- 8) 藤田素弘，雲林院康宏，松井寛：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・論文集，Vol.18，No.3，pp.563-572，2001.
- 9) 円山琢也，室町泰徳，原田昇，太田勝敏：分担配分統合モデルを用いた東京圏における混雑料金政策評価，交通工学研究発表会論文報告集 21，pp.93-96，2001.
- 10) 土木学会：道路交通需要予測の理論と適用 第I編 利用者均衡配分の適用に向けて，丸善，2003.
- 11) 国土交通省 道路局 都市・地域局：費用便益分析マニュアル，2003.
- 12) 杉本克行，加藤誠巳：有向ネットワークにおいて閉路を含まない  $k$  個の最短経路を求めるための手法，情報処理学会論文誌，Vol.26，No.2，pp.356-364，1985.
- 13) 大西啓介，加藤誠巳：交差点内コストを考慮した道路網における経路探索の手法とそのマルチメディア型経路案内システムへの応用，情報処理学会論文誌，Vol.33，No.7，pp.970-979，1992.
- 14) 三輪富生，森川高行，倉内慎也：プローブカーデータを用いた動的な経路選択行動に関する基礎的分析，土木計画学研究・論文集，Vol.22，No.3，pp.477-486，2005.
- 15) Miwa, T., Okada, Y. and Morikawa, T.: Applying a structured dispersion parameter to multi-class stochastic user equilibrium assignment model, *Transportation research record*, No.2196, pp.142-149, 2010.
- 16) 土木学会：非集計モデルの理論と実際，丸善，pp.123-144，1995.
- 17) 溝上章志，松井寛，河知隆：日交通量配分に用いるリンクコスト関数の開発，土木学会論文集，No.401/IV-10，pp.99-107，1989.
- 18) 円山琢也：ネットワーク均衡モデルを応用した都市圏レベルの交通政策分析，東京大学学位論文，2004.

(2013.4 受付)