

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

松井 寛¹・藤田素弘²

¹フェロー会員 工博 名古屋工業大学教授 社会開発工学科 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

²正会員 工博 名古屋工業大学助教授 都市循環システム工学専攻 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

従来、わが国で利用されている高速道路を含む道路網を対象とした交通量配分手法として、高速転換率併用容量制限付分割配分モデルが知られている。本研究では、これに代わる新しい配分手法として、高速転換率を内生化した拡張型利用者均衡配分モデルを開発し、その実用化について検討した。配分理論の基本となる経路選択原理の証明に加え、実用化に向けた転換率モデルやリンクコスト関数を新たに設定した。また、高速道路を含む道路網上での効率的な経路探索手法の開発も行った。最後に、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が、高速道路、一般道路とも比較的高い精度で推定できることがわかった。

Key Words: user equilibrium, traffic assignment, diversion function, expressway

1. はじめに

道路網を対象とする交通量配分モデルとして、わが国では従来から分割配分モデルが広く実務分野で用いられてきたが、近年利用者均衡配分モデル^{1)~4)}が注目されるようになり、その実用化が図られつつある。利用者均衡配分は分割配分に代表される非均衡型配分と比べて、ドライバーの普遍的な経路選択行動原理に基づき、かつリンクコスト関数を介した道路網上での需要と供給の均衡理論として展開される配分理論であるから論理性があり、また配分計算結果の精度向上も期待できる。

ところで大都市圏内の広域道路網を対象とした交通量配分問題を考えたとき、対象道路網の中に有料制をとる高速道路が含まれることは通例である。これに対して利用者均衡配分理論では料金を含む一般化所要時間で扱うことはできる。しかし、2.でも述べるように、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。ここでは均衡配分のモデリング、転換率モデル、BPR 関数等の幾つかの配慮が必要となる。

そこで本研究では、このような高速道路を含むより一般的な道路網にも適用可能な利用者均衡配分手法として、高速道路転換率を内生化した拡張型利用者均衡配分モデルを新たに開発し、その実用化をめざす。また配分結果の精度には、配分理論の基本となる経路選択原理に加え、転換率モデルやリンクコスト関数の設定方法にも大

きく影響を受ける。またモデルの実用化にあたっては、高速道路を含む道路網上での効率的な経路探索手法の開発も不可欠である。本論文ではこれら一連の課題についても改めて考察を行い、実際の都市圏道路網への適用計算を通して本提案モデルの精度検証と実用性について検討する。ただし、本研究では車種別の料金の違いは考慮せず平均的に扱うこととする。

2. 従来の研究と本提案モデルの考え方

既往の利用者均衡配分モデルを高速道路を含む道路網に適用できるように改良する方法として3つの考え方がある。1つはリンクの所要時間と料金コストを時間価値によって統合した一般化所要時間を利用して均衡配分する方法である。ところが高速道路を利用するか否かという転換行動にはドライバーの個人属性が強く影響し、単に一般化所要時間を介した経路選択行動と同列に扱うことには無理がある。少なくともこのような高速転換行動のばらつきは別個に考慮すべきであろう。2つ目の方法はリンクコストに料金負荷を導入して得た経路評価値を確率的にとらえた確率的用户均衡配分理論を適用することである。しかしこの方法も不完全情報下における経路選択のランダム性のみで高速転換行動のばらつきも表現するには無理がある。3つ目の方法は、各需要 OD 交通量を高速道路転換率を用いてあらかじめ高速道路利用と一般道路利用に分離し、その後それぞれに配分計算を行う方法である。現在実務分野で広く用いられている高速転換率併用容量制限付分割配分モデル⁵⁾はこのアプローチによるものであり、本研究もこのアプローチによる。

表一 各都市高速道路の転換率モデル⁵⁾

首都高速道路公社	名古屋高速道路公社	阪神高速道路公社	福岡北九州高速道路公社
$\rho = \left(\frac{1}{1+\alpha^6} - 0.05 \right) \alpha$	$\rho = \frac{1}{1+\alpha^6} - 0.05$	$\rho = \frac{1}{1+\alpha^3} - 0.03$	$\rho = \left(\frac{1}{1+\alpha^2} - 0.005 \right) \alpha$
T: 走行時間比 α: 短トリップ低減係数 (α=0.047D+0.2696) D: 高速本線走行距離	T: 競合時間比	T: 競合時間比 α: パラメータ (α=3)	T: 走行時間比 α: 短トリップ低減係数 (α=(L-1)/4) L: 本線利用距離 (L<5km)

注) 走行時間比は高速利用経路走行時間に対する一般道利用経路走行時間の比
競合時間比は高速道路部走行時間に対する一般道利用経路走行時間の比

なお実務で一般的に用いられている高速道路転換率式を表一に示す。本研究で開発する均衡配分モデルと異なり、この分割配分モデルはあらかじめ仮定した転換率と分割配分を交互に繰り返すヒュリスティックな方法である。よってそれは、はじめに設定した転換率式から得られる割合と分割配分から得られる最終的な配分割合が一致せず、整合性がとれないこと、分割の方法や配分の際のODペアの計算順序によって得られる解が変わり、信頼性からも問題があることが指摘できる。

本研究は所要時間で定義される一般道路のネットワークと高速道路を含んだ一般化所要時間で定義されるネットワーク間での需要交通量と配分の統合モデルである。本研究のモデルはリンクコスト関数のヤコビ行列が対称となることから、既往の研究で報告されているより一般的な分担/配分統合モデル^{20,11)}の特殊ケースとなる。また、本研究のモデル定式化は以下で述べる統合モデル定式化の発想の枠組みに基本的に含まれる。Florian¹²⁾はリンクを共有して走行するバスと車の機関分担・配分統合問題を扱い、その解法を示している。バスと車ではリンクコスト関数のヤコビ行列が対称とはならず、数理最適化問題にはならないため、変分不等式条件として定式化し、緩和法による解法を示した。本研究のモデルは一般道利用経路交通量と高速利用経路交通量で一部リンクを共有するが、リンクコスト関数のヤコビ行列は対称であり、また、Beckmann¹³⁾が示した需要変動型の利用者均衡問題としての定式化を行うためにリンク毎にリンクコストを分離可能なように高速料金の負荷方法等を工夫している。また、本モデルでは自動車OD交通量に関する制約条件のみをもつ。よってFlorian¹²⁾、加藤・宮城¹⁴⁾のモデルのように、発生集中交通量の2重制約とはならず、それらのモデル形態、解法はともに本研究のモデルと異なる。本研究のモデルはFrank-Wolf¹⁵⁾法を需要変動型問題のために改良した部分線形化法^{16,17)}を利用することで解くことができる。これまでの研究は主に自動車と公共交通(鉄道・バス)を対象としていることから、自動車以外の交通モードでの利用経路がほとんど限定されていた。一方、本研究の場合では一般道利用も高速道利用も共に利用経路が限定されない。3. で議論するように一般道利用経路と高速利用経路を共に列挙して高速転換率モデルから高速転換量を得る必要があるため、本研

究のような場合には特に最短経路探索について幾つかの配慮が必要になる。また、モデルの実用化に向けて、リンクコスト関数、高速転換率モデル等を具体的に精度検証しながら設定したのち、都市高速道路をもつ大都市圏の実ネットワークにおいて、高速転換率モデルを内性化した利用者均衡配分モデルを適用した例はないといえる。

3. 高速道路転換率を生じた利用者均衡配分モデルの定式化¹⁸⁾

(1) モデルの構造と前提条件

ここで扱うモデルは従来の高速転換率併用容量制限付分割配分モデルと同様に、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。それらの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高速道路への転換量を計算し、それぞれの利用経路に一般道利用と高速利用のOD交通量を確率的に配分するものである。ここで、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して定式化する。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する。

本研究では車種別交通量は考慮しないが、高速料金の設定では、高速ネットワークの平均車種別混入率を先見値として考慮して、一台当たりの平均高速料金を設定する。料金は全てリンクごとに分解して式(8b)で説明するように与えるものとする。経路で料金が決められている場合はリンクごとに分解する式(式(8c,d)参照)を設定し近似的な値を与える。また、一般道利用交通量と高速利用交通量のリンクコスト関数は共通であるとし、単調増加なBPR型関数を利用するものとする。

(2) モデルの定式化

上記(1)のような構造・前提条件を持つ利用者均衡配分モデルは数理最適化問題として定式化できる。まず転換率モデルはロジットモデルとして以下のように定義する。

$$g_i^e = \frac{1}{e^{-\theta_i(\lambda_i - \lambda_i^*) + \psi_i} + 1} G_i \quad \forall_i \quad (1)$$

ここに、

λ_i : 一般道利用最短経路の所要時間

λ_i^e : 高速利用最短経路の一般化所要時間

θ_i, ψ_i : パラメータ

G_i : OD ペア i の全交通量

g_i^e : OD ペア i の高速利用のOD交通量

このとき高速転換率を生じた利用者均衡配分モデルは以下のように定式化される。

$$\min F = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(y) dy + \sum_i \int_0^{g_i^e} \frac{1}{\theta_i} \left(\ln \frac{w}{G_i - w} + \psi_i \right) dw \quad (2a)$$

subject to

$$\sum_k f_{ik} - (G_i - g_i^e) = 0 \quad \forall_i \quad (2b)$$

$$\sum_l f_{il}^e - g_i^e = 0 \quad \forall_i \quad (2c)$$

$$x_a = \sum_i \sum_k \delta_{ika} f_{ik} + \sum_i \sum_l \delta_{ila} f_{il}^e \quad \forall_a \quad (2d)$$

$$f_{ik} \geq 0, f_{il}^e \geq 0, g_i^e \geq 0, x_a \geq 0 \quad \forall_{a,i,k,l} \quad (2e)$$

ここに、

x_a : リンク a のリンク交通量

$t_a(y)$: リンク a のリンクコスト関数(料金を含む:式(8b)参照)

f_{ik} : OD ペア i の一般道利用経路 k の経路交通量

f_{il}^e : OD ペア i の高速利用経路 l の経路交通量

$\delta_{ika} (\delta_{ila})$: リンク a が OD ペア i 間の一般道利用経路 k (または高速利用経路 l) に含まれるとき 1, そうでないとき 0

式(2a)の第1項はリンクコスト関数の積分項であり、第2項は高速転換率モデルの所要時間変数に関する逆関数の積分項である。

ただし本モデルの場合は、一般道利用経路と高速利用経路が完全に分離されているわけではなく、一部リンクを共有している。したがって一般道利用の交通量と高速利用の交通量はリンクコスト関数を介して相互に干渉しあうことになる。このような非分離型のリンクコスト関数を用いるとき、その関数のヤコビ行列が対称な場合を除き数理最適化問題として定式化できない。しかし本モデルでは一般道利用交通量と高速利用交通量の共通のリンクコスト関数を用いることから、リンクコスト関数は対称となり定式化が可能となる^{11), 19)}。

式(2)として定式化された数理最適化問題は、非負条

件を除けば等式制約条件付最小化問題である。

ここで、目的関数と制約条件からラグランジュ関数を以下のように設定する。条件式(2d)をあらかじめ目的関数に代入したものとすると、ラグランジュ関数は

$$L(\mathbf{x}(\mathbf{f}), \mathbf{g}, \boldsymbol{\lambda}) = F(\mathbf{x}(\mathbf{f}), \mathbf{g}) + \sum_i \lambda_i \left((G_i - g_i^e) - \sum_k f_{ik} \right) + \sum_i \lambda_i^e \left(g_i^e - \sum_l f_{il}^e \right) \quad (3)$$

経路交通量 f_{ik} , f_{il}^e 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以下のように得られる^{4), 11)}。

$$f_{ik} (c_{ik} - \lambda_i) = 0 \quad \forall_{i,k}$$

$$c_{ik} - \lambda_i \geq 0 \quad \forall_{i,k} \quad (4)$$

$$f_{il}^e (c_{il}^e - \lambda_i^e) = 0 \quad \forall_{i,l}$$

$$c_{il}^e - \lambda_i^e \geq 0 \quad \forall_{i,l} \quad (5)$$

$$\text{ここに、} c_{ik} = \sum_a \delta_{ika} t_a(x_a), c_{il}^e = \sum_a \delta_{ila} t_a(x_a) \quad (6)$$

式(4)で考えると、利用される経路($f_{ik} > 0$)では c_{ik} と λ_i は等しいことが分かり、利用されない経路($f_{ik} = 0$)では c_{ik} は λ_i よりも大きい(かせいぜい等しい)。さらに λ_i よりも小さい値はないため λ_i は最短経路所要時間と解釈できる。式(5)からも同様に λ_i^e が高速利用経路の最短経路所要時間であると解釈できる。よって上式は、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していることがわかる。

また、高速利用の交通量 g_i^e に関する Kuhn-Tucker 条件より、高速道路転換率を表すロジットモデル式(1)を得ることができる^{4), 11)}。ここで式(1)中の λ_i と λ_i^e は式(4)(5)の議論より、それぞれ一般道利用経路所要時間と高速利用経路所要時間である。

以上のように式(2)で定義された数理最適化問題の解の最適性条件から、交通量に関する利用者均衡条件と高速利用転換率式を導くことができる。

リンクコスト関数を単調増加関数と仮定すると目的関数の第1項は、リンク交通量に関して狭義凸関数であることが証明される。また目的関数の第2項は $\theta > 0$ において OD 交通量に関して狭義凸関数である。

一方、制約条件式がすべて線形であることから変数の実行可能領域の凸性が保証されるので、OD 交通量およびリンク交通量に関して均衡解の存在と一意性が保証される。

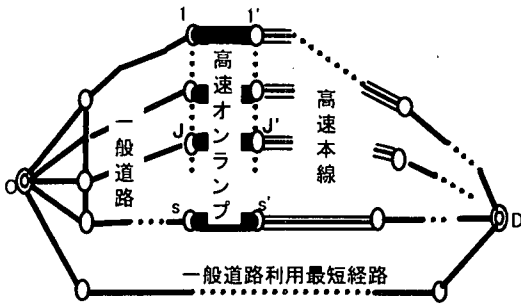


図-1 高速利用最短経路探索図

4. モデルの解法

(1) 高速道路利用最短経路探索の効率的な方法¹⁰⁾

高速転換率を内生化した利用者均衡配分モデルでは4.(2)の計算アルゴリズム Step2-4 で示されるように、目的関数の降下方向を得る目的で各 OD 間で一般道路のみの最短経路と、高速道路を含む最短経路の2本の経路が必要となる。前者の一般道路のみの最短経路探索は高速オンランプにリンクコスト ∞ を入力することで容易に達成できる。

後者の高速道路を含む最短経路探索はいくつかの方法が考えられる。簡便な方法としては、最短経路探索時に何らかの料金抵抗をオンランプおよび本線上のリンクコスト関数に導入し、一般道路のみの場合と同様の発セントロイドから着セントロイドまでの最短経路探索を行い、高速利用経路を出力することが考えられる。しかし、この方法では高速を含む経路が必ずしも抽出されとは限らず、高速利用経路が列挙されない場合が出現する。すなわち、高速利用経路が一般道利用経路よりも所要時間で十分短くても、料金抵抗を導入すると高速利用経路が一般道利用経路よりも長くなり、高速利用経路が列挙できないことが少なからず生じる。少なくともこのような高速利用経路は転換率モデルで需要量を決定すべきで最短経路探索時に削除されるのは望ましくない。オンランプに負またはゼロの料金抵抗を掛け、高速利用経路をできるだけ列挙することも考えられるが、高速道路に何度も乗るなどの非現実的な経路を列挙する問題が生じる。モデルの収束性についても、収束計算ごとに高速利用経路交通量が、転換率モデルだけでなく、最短経路探索結果にも依存して決定される状況は、連続関数である転換率モデルを考慮した目的関数の滑らかな収束にとっては好ましいとはいえない。また、高速利用経路を探索する際、先行して行う一般道路の最短経路探索の情報を利用しないので計算効率が非常に悪くなる。よって上記の方法は利用者均衡に基づく本モデルの最短経路探索法としては不適切であるといえる。

本研究では必ず高速利用最短経路を列挙できること、

一般道最短経路情報を利用して計算効率を上げることを目的として、以下の Step. A から C の手順で計算する方法を提案する。なお、ここで扱う最短経路探索には基本的に一つのセントロイドから全てのノードまでの最短経路を一度に列挙する Dijkstra 法を用いている。図-1 に最短経路探索模式図を示す。また本方法は式(8b-d)で説明するような料金を各リンクに分離可能なリンクコスト関数を利用する場合の方法である。

Step. A 一般道路のみの最短経路探索と発セントロイドから全高速オンランプまでの最短経路の記憶

高速オンランプにリンクコスト ∞ を入力した後、各 OD 間で一般道路ネットワークのみの最短経路探索を行う。同時に、発セントロイド O からすべての高速オンランプ一般道路側ノード J ($J=1..s$) (図-1 参照) までの最小所要コスト $V1(O, J)$ と最短経路上の各ノード K の先行ポイント $IP1(K, O)$ を記憶する。

Step. B 各高速オンランプから全着セントロイドへの最短経路探索

高速オンランプ高速側ノード J' を発セントロイドとして全ての着セントロイド D へ最短経路探索を行う。このとき、流入したオンランプ ($J \rightarrow J'$) の対向道路のオフランプから直に流出すること (J' を発とするため図-1 で $J' \rightarrow J$ 方向の流出) を防ぐため、 J' とするオンランプの対向オフランプ ($J' \rightarrow J$) のリンクコストに ∞ を入力しておく。同時にすべての着セントロイド D までの最小所要コスト $V2(J', D)$ と各ノード K の先行ポイント $IP2(K, J')$ を記憶する。ここで、発セントロイド J' の先行ポイントを高速オンランプ一般道路側ノード J とし、 $V2(J', D)$ に高速オンランプ ($J \rightarrow J'$) のリンクコストを加えておく。

Step. C 高速利用最短経路の決定 (step. A, B で記憶した高速利用経路の結合と最小コストを持つ経路の決定)

各 OD 間の高速道路を含む経路の所要コストを以下のように定義する。

$$V(O, J, D) = V1(O, J) + V2(J', D) \quad (7)$$

高速オンランプノード J (または J') の個数分だけ列挙された $V(O, J, D)$, ($J=1..s$) の中で、最小値をとる経路 (この経路上の高速オンランプノードを J_{\min} , J'_{\min} とする) を探索して各 OD 間の高速利用最短経路とする。O から J_{\min} までの経路の先行ポイントは Step. A で求められたものを用い、 J'_{\min} から D までの経路の先行ポイントは Step. B で求められたものを用いて、最短経路上のノードを O から D まで得る。

上記のようにすれば、一般道路のみの最短経路探索時の情報を利用できること、高速経路高速オンランプの個数分だけの最短経路探索を行えばよいことなどから全ネットワークで高速利用経路を探索するよりも効率的であ

るといえる。

後述の配分対象ネットワークの場合で考えると、発セントロイド数 279, 着セントロイド数 279, オンランプ 45 個であるが、一般道利用経路と高速利用経路の両方を発着セントロイドで最短経路探索した場合 279×279 (一般道路部) + 279×279 (高速道路部) = 155682 本の最短経路を探索する必要がある。上記の方法を用いると、 279×279 (一般道路部) + 45×279 (高速道路部) = 90396 本の最短経路を探索すればよく、42%の計算量を短縮できることになる。この結果は本方法を導入したときの他の計算の増加分を考慮していないので、実際には42%よりも低い計算効率になる。しかし交通量配分計算の殆どの計算時間が最短経路探索に費やされるため、本方法の利用はかなりの効率向上につながると思われる。また、この結果はセントロイド数に対するオンランプ数の比が小さくなるほど計算効率が上がることを示している。

(2) 計算アルゴリズム

問題 F {式(2)} は一般によく知られている需要変動型交通均衡問題と全く同形の最適化問題である。このような問題は利用者均衡配分の一般的な解法である部分線形化法^{9), 11)}によって最適解を得ることができる。最適解を得るための計算アルゴリズムは次のようになる。

Step 1 $n=1$ として初期実行可能解 $\{g_i^{e(n)}\}, \{x_a^{(n)}\}$ を与える。

Step 2 $\{x_a^{(n)}\}$ に応じた所要時間を計算し、4. (1) の StepA-C の最短経路探索をおこない、一般道利用と高速利用それぞれの最短経路所要時間 $\{\lambda_i, \lambda_i^e\}$ を求める。

Step 3 転換率式を用いて $\{g_i^e\}, \{G_i - \bar{g}_i^e\}$ を求める。

Step 4 一般道利用最短経路に $\{g_i^e\}$ を、高速利用最短経路に $\{G_i - \bar{g}_i^e\}$ をすべて負荷し all-or-nothing 法により $\{\bar{x}_a\}$ を求める。

Step 5
$$g_i^{e(n+1)} = \eta \bar{g}_i^e + (1-\eta) g_i^{e(n)}$$
$$x_a^{n(n+1)} = \eta \bar{x}_a + (1-\eta) x_a^{(n)}$$

とおき、1 次元探索によって目的関数式(2a)を最小にする結合パラメータ $\eta^{(n)}$ と $\{x_a^{(n+1)}, g_i^{e(n+1)}\}$ を求める。

Step 6 あらかじめ設定した ϵ_1 に対して、

$$(a) \text{MAX} \left| \frac{x_a^{(n+1)} - x_a^{(n)}}{x_a^{(n)}} \right| \leq \epsilon_1$$

$$(b) n > M \quad (M \text{は任意に与える})$$

のいずれかを満足するならば終了。そうでなければ、 $n=$



図-2 名古屋圏ネットワーク図

$n+1$ において Step 2 へ戻る。

Step 6 ではリンク交通量の変化によって収束基準を定める。

5. 実規模ネットワークへの適用

名古屋圏の実規模ネットワークを用いて配分計算をおこない、高速転換率を生内化した利用者均衡配分モデルの実証面からの検討をおこなう。ここではまずリンクコスト関数、転換率モデルの設定を行ったのち、配分モデルの実ネットワークへの適用を行う。配分対象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 である。ネットワーク図を図-2 に示す。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」¹²⁾ 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 年用に推計したものの¹³⁾ を用いる。

(1) リンクコスト関数の設定

Boyce¹⁵⁾ は BPR 関数をシカゴ都市圏道路網の利用者均衡配分に適用し BPR 関数の実配分での有効性を示したが、日単位の BPR 関数については示していない。本研究でのリンクコスト関数は、文献 14) のデータを用いて道路種別ごとに著者らが設定した日単位の BPR 型関数¹⁶⁾ を名古屋都市圏用に修正したものを使用する。この関数は時間所要時間と交通量データから作成される時間リンクコスト関数から 1 日の各時間帯の平均的な関数として導かれたものであり、次式のようになる。

$$t_a = t_{a0} \left\{ 1 + \alpha \left(\frac{Q_a}{C_a} \right)^\beta \right\} \quad (8a)$$

ここに、

表-2 リンクコスト関数のパラメータ値

	t_{a0}	α	β	t_{a0} (全国平均)
都市間高速道路	0.76	0.51	3.3	0.72
都市内高速道路	0.87	0.40	2.8	0.86
幹線道路(多車線)	1.86	0.54	2.4	1.84
幹線道路(2車線)	1.74	0.40	3.1	1.58
準幹線道路(多車線)	2.20	0.40	2.2	2.15
準幹線道路(2車線)	1.87	0.45	2.4	1.72

t_a : リンク a の単位距離当たり日平均所要時間
 t_{a0} : リンク a の単位距離当たりの自由走行時間で、
 $t_{a0} = \alpha_0 + \alpha_1 \bar{z}_1 + \alpha_2 \bar{z}_2 + \alpha_3 \bar{z}_3$ ($\bar{z}_1, \bar{z}_2, \bar{z}_3$ は対象地域内の信号交差点密度, DID 率, 指定最高速度の平均値, $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ は t_{a0} の回帰パラメータ¹⁶⁾)

α, β : パラメータ

Q_a : リンク a の日交通量

C_a : リンク a の日交通容量で、

$$C_a = c_a \left(\sum_{i=1}^{24} \eta_{ai}^{\beta+1} \right)^{-1/\beta}, \quad \eta_{ai} = q_{ai} / Q_a$$

および, q_{ai} はリンク a の時間帯 i の時間交通量, c_a

はリンク a の時間交通容量

ただし, 文献 16)における関数の説明変数の値は全国データの平均値が使用されている。よって, 本研究での配分対象地域が尾張地域であることを考慮して, 混雑度以外の説明変数 $\bar{z}_1, \bar{z}_2, \bar{z}_3$ には愛知県(名古屋市を含む)のデータの平均値を使用する。この値を信号交差点密度, DID 率および指定最高速度の各説明変数に代入し加えたものを自由走行時間 t_{a0} とする。パラメータ $\alpha, \alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta$ の値は地域差がそれほど大きくないとして文献 16)のものをそのまま用いることにする。

日単位と時間単位の関数の違いは主に交通容量の違いとして解釈できる。式(8a)中の日交通容量 C_a は厳密には各道路区間ごとの時間交通量の時間係数 η_{ai} より求める必要があるが, 本研究では前述した対象ネットワークにおいて既に与えられていた各道路種別ごとの一般的な日交通容量¹³⁾を利用することにした。これらをまとめると日リンクコスト関数のパラメータは表-2のようになる。表-2の t_{a0} でみると2車線よりも多車線の方が大きいのは多車線道路が信号交差点の多い市街地部に設置されることが多いためである。ただし, 表-2の t_{a0}, α, β の3つのパラメータ及び全車線交通容量で総合的に考

えれば多車線道路のリンク特性が2車線道路よりも優れていることは間違いない。表-2では比較のために $\bar{z}_1, \bar{z}_2, \bar{z}_3$ に全国平均データを入れた場合の t_{a0} を示している。それと比較すると本研究で用いた名古屋圏道路網の t_{a0} は全ての道路種別で大きくなっていることがわかる。

また, 本研究において料金を含むリンクは次式第2項のように料金額を負荷して用いる。

$$t_a = t_{a0} \left\{ 1 + \alpha \left(\frac{Q_a}{C_a} \right)^\beta \right\} + tc_a / \gamma \quad (8b)$$

γ : 時間価値, tc_a : リンク a の通行料金額

時間価値は文献 18)の調査より得られた65円/分を使用した。

都市高速道路は均一料金制であるため, 料金はオンランプリンクにのみ負荷すればよい。都市間高速道路は各オンオフランプのペア毎に料金が設定されている。本研究ではそれらの料金を, オンランプリンク, オフランプリンク, および高速道路上の本線リンクのそれぞれに分解することを考えた。5章の配分対象エリアにある都市間高速(東名名神と東名阪道)の各オンオフランプペアの料金(車種別料金を車種別交通量割合で平均したもの)を y とし, それらのオンオフランプ間の距離を x として回帰分析を行ったところ式(8c, d)が得られ, 精度も良好(最大±20円程度の誤差)であった。したがって, 各オンオフランプペアの料金は以下のようにすれば各リンク毎の料金に近似的に分解できるものとしてそれを5章の実配分で用いることとした。すなわち, オンランプリンクには次式の定数項の料金を負荷し, 高速道路本線上リンクにはそのリンクの区間距離 x に式(8c, d)の偏回帰係数を掛けて得られる料金を負荷し, オフランプリンクの料金抵抗は負荷しないことにした。

東名名神 : (データ数 29 個, $R = 0.9998$)

$$y = 32.85x + 144.04 \quad (8c)$$

東名阪 : (データ数 7 個, $R = 0.9891$)

$$y = 30.22x + 140.78 \quad (8d)$$

(2) 転換率モデルの設定

著者ら¹⁷⁾は既に高速道路の転換率モデルを提案しているが, そこでは料金が明示的にモデルに組み込まれていないなどの課題を残した。よってその点を考慮した新しい転換率モデルを設定し直す。モデルの推計には過去の研究同様「第7回名古屋高速道路自動車起終点調査」¹⁸⁾の高速利用OD交通量と「平成3年度中京都市圏パーソナトリップ調査」¹²⁾のH8年度補正済み全需要交通量¹⁸⁾の

表-3 距離帯別転換率モデル

距離帯	データ数	平均距離	θ_i	ψ_i	相関係数
0-10km	2665	7.6	0.342	1.362	0.948
10-20km	5689	14.7	0.149	1.866	0.925
20-30km	5455	24.7	0.092	2.027	0.845
30-40km	4012	34.7	0.080	2.038	0.821
40-50km	2741	44.8	0.052	2.086	0.673
50-60km	1841	54.6	0.054	2.526	0.804
60-70km	1111	64.5	0.038	2.307	0.477
70-80km	812	74.5	0.024	2.413	0.341
80-90km	508	85.0	0.052	0.469	0.436
90-100km	281	94.4	-0.001	1.794	0.005
100-120km	256	108.3	0.078	-0.241	0.469
120-140km	319	131.7	0.030	1.461	0.361
140-160km	266	149.2	-0.045	4.228	0.379
160-180km	163	171.1	0.002	1.614	0.048
180-200km	258	187.5	0.051	-0.154	0.542
200km以上	747	310.8	0.085	-1.099	0.822

$$\ln\left(\frac{g_i^e}{G_i} - 1\right) = -\theta_i(\lambda_i - (\lambda_i^e + C_i/\gamma)) + \psi_i \quad (10)$$

OD データをカテゴリーランクに分けるのは、個々の OD ペア内のデータ数が少なく信頼性の少ないペアも有効データとして利用するためである。なお距離帯は 10km 間隔ではあるが一般化所要時間を 1 分間隔にとって分析している。距離帯間隔がモデルの基本特性に与える影響は少ないと考えられる。

各距離帯におけるデータ数、平均距離、 θ_i 、 ψ_i と回帰分析の相関係数は表-3 のようになった。80km 以上ではデータ数が大きく減っており、 θ_i 、 ψ_i のばらつきや相関係数も小さくなっている。また、過去の研究¹⁷⁾ 同様に距離が大きくなると θ_i は小さくなる傾向にあり、 ψ_i については 80km まではやや大きくなる傾向にあることがわかる。したがって、過去の研究同様に表-3 における 70km 台までの距離帯のモデルパラメータ θ_i 、 ψ_i と平均距離 L との関係から回帰分析によって再度設定される $\theta(L)$ 、 $\psi(L)$ を全距離帯の転換率モデルとして用いることにする。OD 間距離 L の関数とした θ 、 ψ は以下ようになる。

$$\theta(L) = 2.20L^{-0.964} \quad (r=0.98) \quad (11)$$

$$\psi(L) = 0.442 \ln(L) + 0.552 \quad (r=0.93) \quad (12)$$

表-5 における距離帯別モデルのうち 70 km 台までの相関係数のデータ数加重平均値は 0.815 であり、上式の $\theta(L)$ 、 $\psi(L)$ の相関係数も 0.9 以上となっていることから精度は比較的高いと思われる。

よって利用者均衡モデルでは上記の $\theta(L)$ 、 $\psi(L)$ を式(1)に代入して OD 間距離を代入した各 OD ペアごとの転換率モデルを組み込むことにする。

(3) 配分計算結果

名古屋圏域ネットワークへ本配分モデルを適用し、実績再現性等を検証する。

a) 目的関数の収束状況

目的関数の収束状況を図-3 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。20 回以降も漸減を続けているが、これは均衡配分計算では比較的良好に見られる傾向といえる。

b) 高速利用の最短経路探索状況

本研究の高速利用最短経路探索では、全ての OD ペアで高速利用経路が列挙できる方法を採用している。図-4 はある都市内発セントロイドに注目し、それを起点とする OD ペアについて高速利用最短経路探索の状況をみた

実績 OD データを用いた。ゾーン区分には同パーソントリップ調査の基本ゾーンを用いる。33078 組の全 OD ペアの中で個々の OD ごとに分析に有効なもの(全需要交通量が高速利用 OD 交通量以上のもの)として 26509 組の OD ペアを用いることにする。

転換率モデルは式(1)のようになるが、高速利用経路の一般化所要時間 λ_i^e は以下のように定義される。

$$\lambda_i^e = \lambda_i^e + C_i/\gamma \quad (9)$$

ここに、

λ_i^e : 高速利用経路の最短経路所要時間(料金を含まない)

C_i : i OD ペアの高速道路の通行料金(円)で

$$C_i = \sum_l t_{c_{ol}} \delta_{ilo}^e$$

式(1)中の θ_i 、 ψ_i は次のように設定した。高速転換率は距離によって変化することが過去の研究より知られていた。まず各距離帯ごとに転換率モデルを作成する。距離帯は 100km までは 10km 間隔、100~200km は 20km 間隔および 200km 以上と 16 分割しこの距離帯ごとに転換率モデルを作成した。さらに各距離帯においては、モデルの説明変数である OD 間一般化所要時間の時間差の 1 分間隔(カテゴリーランクとよぶ)で OD ペアを集計し直した。そして各カテゴリーランクの高速利用台数と需要台数および高速利用料金と OD 間距離の平均値を集計した。カテゴリーランクごとの集計値をデータとし、式(1)を以下のように変形して重回帰分析を行い各距離帯 i の θ_i 、 ψ_i を推計した。

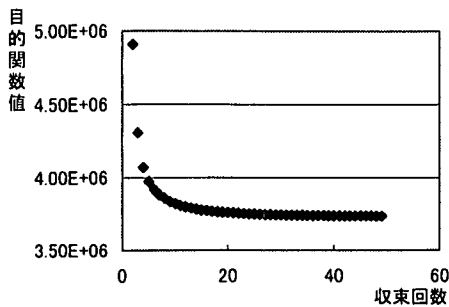


図-3 目的関数の収束状況

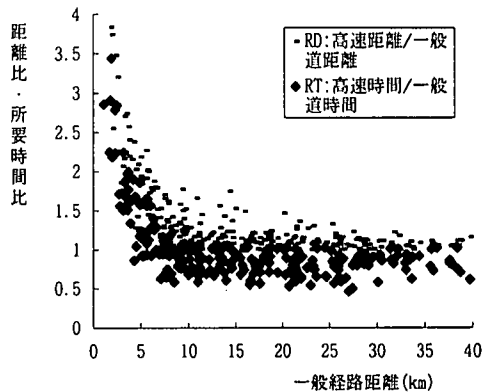


図-4 高速利用経路と一般道路利用経路の距離比と所要時間比 (料金抵抗を含まない)

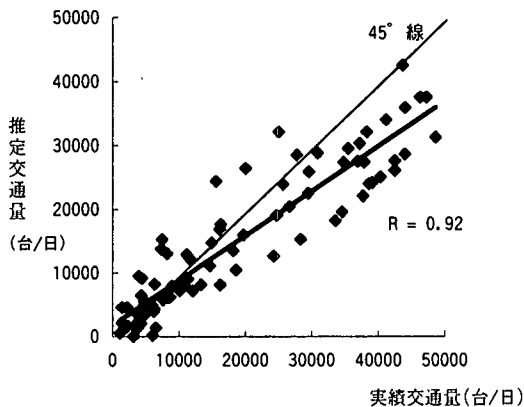


図-5 高速道路交通量の適合度分析

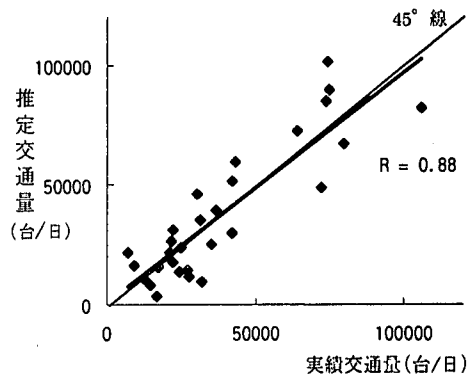


図-6 一般道路交通量の適合度分析

ものである。図では横軸に一般道路利用の経路距離をとり、縦軸に次のRDとRTをODペアごとに計算した値を示している。

$$RD = (\text{高速利用経路の距離}) / (\text{一般道利用経路の距離})$$

$$RT = (\text{高速利用経路の所要時間})$$

$$/ (\text{一般道利用経路の所要時間})$$

ここで、高速利用経路には高速へのアクセス道路部等を含む。高速利用経路の所要時間には料金を含まない。

図より5 km未満の短距離ODでは、RD、RTとも1.5を超えており、高速道路を利用する必要性がほとんどないことがわかる。これは、短距離のODペアでは高速道路を利用しようとするかえって遠回りな経路を選ぶことになることを示している。4. (1)で説明したようにオンランプに料金コストを導入して全ネットワークで最短経路探索する方法では、特にRTが1未満の値(所要時間では高速利用経路の方が短い場合)であっても、料金コスト導入によって高速利用経路の全ては抽出できなくなるが、本研究の方法では確実に抽出している。ただし配分計算において、このようなODペアは、転換率モデルによって高速利用確率が低くなるため現実的な配分がなされる。

5 km以上の距離帯では一般道経路の距離が長くなる

ほどRDは1に近づく傾向にあるが、RTに関しては横ばいである。これらからODペアと高速道路の位置関係によって、長距離ODペアであっても高速道路利用が必ずしも所要時間を短縮することにはならないケースが少なくないことがわかる。

図-4は計算の最終段階の状況であるが、この状況は各収束計算の段階毎に変化する。料金抵抗を掛けて最短経路を探索する方法では、高速利用最短経路が抽出できるかどうかは各収束回の交通混雑状況に強く依存している。よって本研究の最短経路探索法のように高速利用経路の列挙が確実になされる方法でないと、4. (1)でも述べたように、転換率モデルとの整合性がとれないことに加えて転換率モデルを考慮した目的関数の滑らかな収束にとって望ましくないといえる。

c) リンク交通量の適合度分析

実績交通量が存在するリンクについて、推定リンク交通量の適合度分析をおこなう。一般道路の実績交通量はH6道路交通センサス¹⁴⁾からリンク交通量の24時間観測地点(29箇所)を抽出した。高速道路の実績交通量は、文献18)より88個の日リンク交通量データを得た。図-5より高速道路の適合度をみると、交通量の多い領域で幾分過小推計している。この点から転換率モデルや時

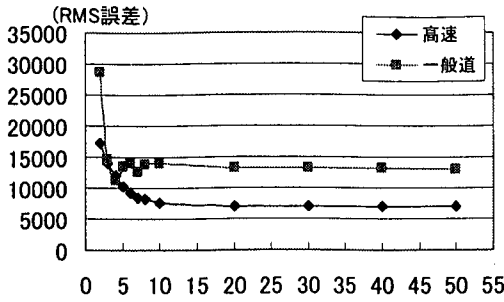


図-7 収束回数と配分精度 (リンク交通量のRMS誤差) (回)

表-4 高速転換率内生型均衡配分と分割配分の精度比較

	BPR10回 分割配分	BPR20回 分割配分	高速転換率 内生型均衡配分
RMS誤差(高速)	12622	12241	6998
RMS誤差(一般)	14041	13889	13086

間価値等の設定をさらに詳細に分析する必要があると考えられるが、相関係数は0.92となっており推定精度は比較的高いといえる。図-6の一般道路の適合度分析では、ほぼ45度線上に回帰線があり、相関係数0.88と良い精度で推定している。高速道路と一般道路の両方を合わせた同様の分析では相関係数0.91、回帰式： $(推定交通量) = 0.89 \times (実績交通量) - 4081$ であり、全体としても良好な精度であることがわかる。

図-7は、均衡配分の各収束計算回数(1回の収束計算には4章(2)に示すように1回の一般道と高速道の最短経路探索を含む)におけるリンク交通量の適合度 (RMS 誤差) を示している。リンク交通量の適合度は収束回数が増すほど高くなるが、10回程度の収束回数でも最終的な精度にかなり近い精度が得られていることがわかる。

d) 高速転換率 (高速利用OD) の適合度

本節(2)の転換率モデルを均衡配分に用いて推定される、高速利用 OD 交通量の適合度を検証する。表-3に示すように転換率モデルはまず10km ごとの距離帯でセグメントされたデータを回帰分析し、その後式(11)、(12)のように全距離帯で利用するパラメータに変換している。よって転換率モデルのベースとなるOD間距離10km ごとの推定高速利用 OD 交通量を集計して、実測 OD 交通量との比較を示したものが図-8である。図より中距離帯である40-50kmの推定値がやや過少のみではあるが、全体として45度線上にデータが散布している。中距離帯の転換率モデル等まだ改良の余地があるが、距離帯別高速利用ODでもおおよそ良好な精度を得られたと思われる。

e) 分割配分法との適合度比較

上記の均衡配分で適用した同じネットワーク、BPR 関数、転換率モデルについて、10分割、20分割の分割配分法を適用した。本節c)で利用したリンク交通量の実績値を利用して本研究の均衡配分モデルと分割配分法の適合度比較 (RMS 誤差) を行ったものを表-4に示す。

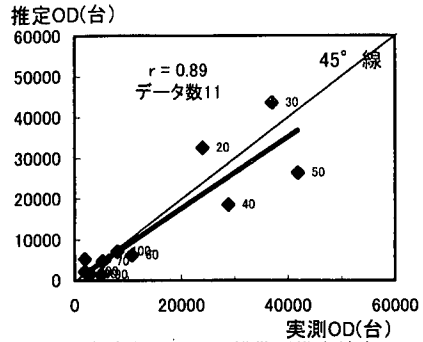


図-8 高速利用ODの距離帯別推定精度 (図中の数字は距離帯:10km間隔)

本研究の均衡配分モデルのRMS 誤差は高速、一般道ともに分割配分法よりも小さく精度が高いといえるが、特に高速の精度が高いことがわかる。図-7の収束回数との関係で見ると、20分割の分割配分法の精度には、均衡配分では5回程度の収束計算で達成されており、均衡配分では効率よく推計精度を向上させることがわかる。

本研究では、均衡配分モデル、転換率モデル、リンクコスト関数、最短経路探索法等、高速道路を含む道路網での日単位の利用者均衡配分モデルを総合的に分析してきた。まだいくつかの課題を残してはいるものの、上記の実績交通量との適合度分析から考えると、それら一連のシステムが十分実用化に足るものであると判断できる。

6. 結論

本研究では、高速転換率を生内化した拡張型利用者均衡配分モデルの開発と実用化について検討してきた。本研究の結論は以下になる。

(1) 内生化したロジットタイプ的高速転換率を用いて、高速と一般道のOD交通量を分割して配分する利用者均衡モデルを開発し、その特性について分析した。

(2) 転換率モデルで必要となる高速利用経路の最短経路の探索について、必ず列挙可能で効率の良い経路探索法を提案した。この方法によれば、単純に一般道路のみの最短経路探索と高速道路を含めた経路の最短経路探索を2回繰り返すのに比べて、計算量の低減が期待できる。

(3) リンクコスト関数と転換率モデルの新たな設定を行った。リンクコスト関数は名古屋圏の特性を考慮した関数を求めた。転換率モデルは距離帯でパラメータが異なることを考慮して、OD間距離の関数で表されるパラメータを含んだモデルとして精度良く構築できた。

(4) 本モデルを名古屋圏の実規模ネットワークに適用し実績再現性等を検証した。まず目的関数は滑らかに収束し、20回程度でほぼ収束することがわかった。また本研究で提案した高速利用の最短経路探索法によって効率良く高速利用経路を抽出できることがわかった。最後に

実績リンク交通量との比較から、高速道路、一般道路とも相関係数0.9前後の良好な精度となっており、実用化に足る精度が得られたものと思われる。

本研究のモデルでは経路に固有の料金体系があり、料金をリンク単位に分解する近似的な方法が適用できない場合への対応はできていない。また、車種別料金体系や時間価値が異なったグループに対しては平均的に扱ったが、厳密にはより詳細なモデリングが必要である。また、モデルの信頼性を検証するために適用事例を増やすことや、時間帯別利用者均衡モデルへの拡張、精度向上のための固定客の導入の是非の検討などが本研究の今後の課題として挙げられる。

謝辞: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、転換率データ、OD交通量データ等で多大な協力を得た。ここに感謝の意を表します。

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) Florian, M.: A Traffic Equilibrium Model of Travel by Car and Public Transit Modes, Transportation Science 11(2), pp. 166-179, 1977.
- 3) Florian, M. and Ngugen, S.: A Combined Trip Distribution Modal Split and Trip Assignment Model, Transportation Research 12(4), pp. 241-246, 1978.
- 4) Sheffi, Y.: Urban Transportation Networks, Prentice-Hall, Inc., 1985.
- 5) 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, 1996.
- 6) 松井寛, 上田聡:有料道路を含む道路ネットワークにおける利用者均衡配分問題, 京大土木 100 周年記念ワークショップ・論文集, pp. 17-22, 1997.
- 7) 加藤晃, 宮城俊彦, 吉田俊和:交通分布・配分統合モデルとその実用性に関する研究, 交通工学, Vol. 17(6), pp. 3-11,

1982.

- 8) LeBlanc, L.J., Morlok, E.K. and Pierskalla, W.: An Efficient Approach to Solving the Road Network Equilibrium Traffic Assignment Problem, Transportation Research 9, pp. 309-318, 1975.
- 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) 長棟一秀, 藤田素弘, 松井寛:有料道路を含む道路ネットワークにおける利用者均衡配分問題の実用化, 土木学会中部支部研究発表会講演概要集, pp.395-396, 1999.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) Boyce, D.E., Janson, B.N. and Eash, R.W.: The effects of equilibrium trip assignment of Different Link Congestion Functions, Transportation Research 15A, pp. 258-268, 1981.
- 16) 松井寛, 山田周治:道路交通センサスデータに基づくBPR関数の設定, 交通工学, Vol. 33, No. 6, pp. 9-16, 1998.
- 17) 松井寛, 片桐充理:都市高速道路を対象とする転換率モデルの構築, 第18回交通工学研究発表会論文報告集, pp. 149-152, 1998.
- 18) 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.
- 19) Abdulaal, M. and LeBlanc, L.J.: Methods for Combining Modal Split and Equilibrium Assignment Models, Transportation Science, Vol. 13, No. 4, pp. 292-314, 1979.
- 20) Fisk, C. and Nguyen, S.: Existence and Uniqueness Properties of an Asymmetric Two-mode Equilibrium Model, Transportation Science, Vol. 15, No. 4, pp. 318-328, 1981.

(1999. 6. 18 受付)

DEVELOPMENT OF AN USER EQUILIBRIUM ASSIGNMENT MODEL FOR AN URBAN ROAD NETWORK INCLUDING EXPRESSWAYS

Hiroshi MATSUI and Motohiro FUJITA

We propose an extended user equilibrium assignment model for an urban road network including expressways in this paper. In this model a diversion function for determining the ratio of traffic demand using expressways between each OD pair is determined endogenously from the equivalent optimization formulation, and the user equilibrium conditions can be held based on travel time for arterial road users but based on general travel time considering the toll load for expressway users. This new model is applied to the Nagoya metropolitan arterial road network and the results show good accuracy and practicability.