

需要変動型確率的利用者均衡配分モデルによる 都市高速道路の対距離料金の検討

井ノ口 弘昭¹・秋山 孝正²

¹関西大学 環境都市工学部 都市システム工学科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)
E-mail:hiroaki@inokuchi.jp

²関西大学 環境都市工学部 都市システム工学科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)
E-mail:akiyama@kansai-u.ac.jp

都市高速道路である首都高速道路・阪神高速道路は、平成24年1月に均一料金から対距離料金に移行した。都市高速道路の料金体系の変更は、高速道路利用者のみならず一般道路利用者にも多大な影響を与えるため、十分な検討が必要である。

都市高速道路の車種区分は、普通車と大型車の2車種区分で運用されている。本研究では、都市高速道路の車種別料金体系の設定について、交通量および便益面、環境面から検討する。このとき、車種別交通量の計算が可能な交通量配分モデルを用いる。これにより、便益面、環境面から適切な車種別料金体系を求めることを目的とする。

Key Words : urban expressway, traffic assignment model, toll of urban expressway

1. はじめに

都市高速道路である首都高速道路・阪神高速道路は、平成24年1月に均一料金から対距離料金に移行した。都市高速道路の料金体系の変更は、高速道路利用者のみならず一般道路利用者にも多大な影響を与えるため、十分な検討が必要である。

都市高速道路の車種区分は、普通車と大型車の2車種区分で運用されている。本研究では、都市高速道路の車種別料金体系の設定について、交通量および便益面、環境面から検討する。このとき、車種別交通量の計算が可能な車種別確率的交通量配分モデルを用いる。

また、都市間高速道路で用いられている料金体系の場合は、距離に比例する料金を近似的に高速道路の各リンクに付加することで、比較的容易に高速道路料金を考慮した配分計算が可能である。しかしながら、都市高速道路で採用されている上限・下限が設定されている階段状の料金体系の場合は、都市間高速道路と同様の計算方法を用いることが出来ない。そこで仮想リンクを用いた計算方法を採用する。

これにより、便益面、環境面からの適切な都市高速道路の車種別料金体系を求めることを目的とする。

2. 車種別交通量配分モデルの構築

本章では、都市高速道路の車種別対距離料金についての検討が可能な交通量配分モデルを構築する。

(1) 車種別交通量配分モデルの構築

本研究で用いる交通流解析手法について述べる。ここでは、都市高速道路の車種別の料金を検討するため、車種別交通量配分モデルを用いる。この際、通行料金が付加されるリンクでは、通行料金の算定のために車種別リンク交通量の情報が必要である。確定的利用者均衡配分モデルでは、リンク交通量の解の唯一性は保証される。しかしながら、これを車種別交通量の算定に利用した場合はリンク交通量の車種内訳についての解の唯一性が保証されない。そこで、本研究では車種別リンク交通量について解の唯一性が保証される確率的利用者均衡配分モデルを用いる¹⁾。

確率的利用者均衡配分モデルを車種別に拡張した車種別確率的利用者均衡配分モデルの等価最適化問題は、(1)式で示される²⁾。

$$\min : Z = \sum_{(i,j) \in L} \int_0^{x_{ij}} t_{ij}(\omega) d\omega + \sum_{(i,j) \in L} \sum_{c \in C} x_{ij}^c \cdot \frac{\pi_{ij}^c}{\xi^c} \quad (1)$$

$$- \frac{1}{\theta} \sum_{c \in C} \sum_{r \in R} \{HL(x^{c,r}) - HN(x^{c,r})\}$$

s.t.

$$\sum_{i \in N} x_{ik}^{c,r} - \sum_{j \in N} x_{kj}^{c,r} + \sum_{s \in N} q_{rj}^c \delta_{rk} - q_{rs}^c \delta_{sk} = 0$$

$$\forall k \in N, \forall r \in R, \forall c \in C$$

$$x_{ij} = \sum_{c \in C} \sum_{r \in R} E^c x_{ij}^{c,r}, \quad x_{ij}^{c,r} \geq 0$$

ただし,

$$HN(x^{c,r}) = - \sum_{j \in N} \left(\sum_{i \in N} E^c \cdot x_{ij}^{c,r} \right) \ln \left(\sum_{i \in N} E^c \cdot x_{ij}^{c,r} \right)$$

$$HL(x^{c,r}) = - \sum_{(i,j) \in L} E^c \cdot x_{ij}^{c,r} \ln(E^c \cdot x_{ij}^{c,r})$$

ここで,

x_{ij} : リンク i - j 間のリンク交通量,

$t_{ij}(x)$: i - j 間の交通量 x に対する所要時間,

HL, HN : エントロピー関数,

$\mathbf{x}^r$: 起点 r のリンク交通量ベクトル,

q_{rs} : r - s 間の OD 交通量,

L : 全リンク集合, N : 全ノード集合,

R : 起点ノード集合, θ : パラメータ

c : 車種, C : 全車種集合,

E^c : 車種 c の乗用車換算係数,

π_{ij}^c : リンク i - j 間の車種 c の通行料金,

ξ^c : 車種 c の時間価値,

$\mathbf{x}^{c,r}$: 車種 c ・ 起点 r のリンク交通量ベクトル,

q_{rs}^c : 車種 c の r - s 間の OD 交通量

この等価最適化問題では、確率的利用者均衡配分モデルの目的関数に含まれる2つのエントロピー項が車種ごとに分かれ、車種別交通量の計算を行う。本研究では、利用者行動の分散パラメータ θ を0.5とした。

この計算手順の特徴は、1つのセントロイドを車種で分割して計算することである。これにより、最適解は起点別リンク交通量に加え、車種に関して唯一に決めることができる。したがって、通行料金が付加されるリンクにおいてもリンクの通行料金総額が唯一に計算できる。

各リンクの所要時間を求めるリンクパフォーマンス関数は、入力変数であるリンク交通量の計算の際に乗用車換算係数を用いて単車種に変換して用いる。従って、車種の違いによる所要時間の差はないと仮定している。都

市間高速道路の場合は、大型貨物車は制限速度が異なるため、普通車と大型車の所要時間の差について検討する必要があるが、今回対象としている都市高速道路においては、制限速度が同じであるため、この仮定は合理的であると考えられる。

車種別交通量配分モデルの計算手順を図1に示す³⁾。

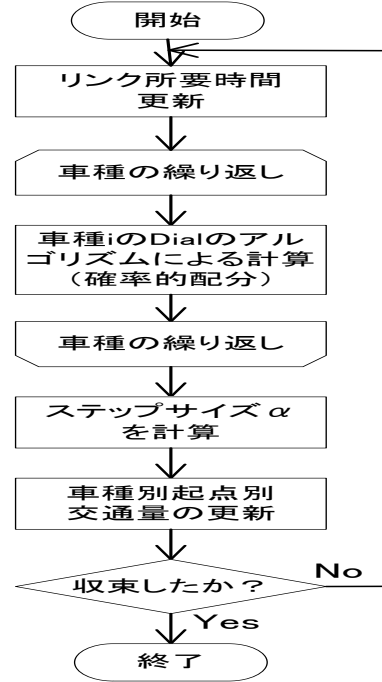


図-1 車種別交通量配分の計算手順

通常、確率的利用者均衡配分モデルと同様にDialのアルゴリズムによる確率的配分と一次元探索による目的関数最小化を繰り返す手順であるが、Dialのアルゴリズムによる計算に車種のループが加わっている点が異なる。

(2) 対距離料金を考慮した交通量配分モデル

ここでは、都市高速道路の対距離料金を考慮した交通量配分モデルの計算方法について検討する。均一料金制の場合は、ランプ入口あるいは出口に相当するリンクに通行料金を付加することで計算が可能である。また、都市間高速道路で用いられている距離に比例した対距離料金の場合は、高速道路のリンクに距離に応じた料金を付加し、インターチェンジに相当するリンクにターミナルチャージを付加することで計算が可能である。しかしながら、都市高速道路の料金は階段状になっていること、最大料金が設定されていることから、このような計算方法では料金を適切に考慮することが出来ない。そこで、本研究では仮想リンクを用いた計算方法を用いる⁴⁾。

仮想リンクは、図-2に示すように高速道路のそれぞれのランプ間に設定する。図-2の実線の道路網が現実のリンク、破線の道路網が仮想リンクである。したがって、

オンランプ数×オフランプ数の仮想リンクが生成される。仮想リンクを用いた交通量配分の計算手順は、以下の通りである。

- 1) ランプ間料金の設定：それぞれのオンランプ・オフランプペアについて、通行料金を仮想リンクに設定する。
- 2) 所要時間の設定：オンランプ・オフランプペアについて、都市高速道路のランプ間の所要時間を仮想リンクに設定する。
- 3) Dialのアルゴリズムを用いた計算：一般道路及び仮想リンクを対象に、交通量配分の計算を行う。この際、都市高速道路の実リンクは計算対象としない。
- 4) 実ネットワークへ反映：仮想リンクの交通量を実ネットワークへ付加する。

これにより、ランプ間の料金を任意に設定し、計算することが可能である。

本研究では、仮想リンクを用いた通行料金設定および車種別確率的利用者均衡配分モデルを用いることで、都市高速道路の対距離料金を考慮した交通量配分計算を実行する。

なお、本研究では転換率法ではなく、料金抵抗法を用いているため、高速道路を複数回利用する乗り継ぎ行動を表現することが可能である。特に、確率的利用者均衡配分モデルでは、起点別のリンク交通量を用いているため、経路交通量についても解の唯一性が保証される。これを用いて経路上の仮想リンクの本数を数えることで、乗り継ぎ回数の算定が可能である。

3. 都市高速道路の車種別料金の検討

本章では、2章で構築した交通量配分モデルを用いて、都市高速道路の車種別料金について検討する。

(1) 対象道路網の設定

本研究では、都市高速道路の1つである阪神高速道路を対象に検討する。阪神高速道路は、営業延長245.7km、入路180箇所、出路183箇所（平成24年1月現在）であり、平成22年度の通行台数は31,976万台であった⁹⁾。4料金圏による均一料金制で運用されていたが、平成24年1月に、路線が独立している京都線を除いて対距離料金制に移行した。阪神高速道路の普通車の対距離料金を表-1に示す。ETCを持たない車両に関しては、特定の区間を除いて、対距離料金の最高料金である普通車900円、大型車1800円としている。しかしながら、阪神高速道路のETC利用率は89%(平成24年4月13日-19日平均)である⁹⁾。このため、本研究では現金払車両を考慮せず、ETC車両のみを対象に検討する。また、基本的な料金体系を検討するため、ETCのポイント制度やその他の割引制度は考慮しない。

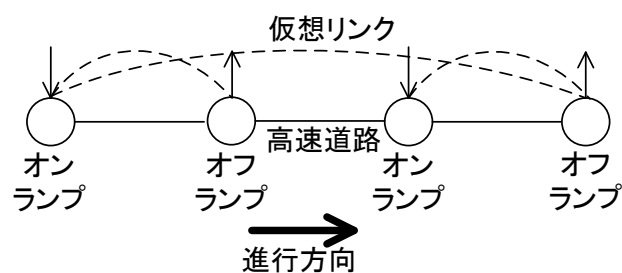


図-2 仮想リンクの設定

表-1 阪神高速道路の対距離料金

圏域	営業距離	普通車	大型車
阪神圏	6.0km 以下	500 円	1,000 円
	6.0km 超～12.0km	600 円	1,200 円
	12.0km 超～18.0km	700 円	1,400 円
	18.0km 超～24.0km	800 円	1,600 円
	24.0km 超	900 円	1,800 円
京都圏	均一料金	450 円	900 円

ここでは、平成22年を対象年次として基本的な検討を行なう。OD交通量は平成11年時点での平成22年の将来推計値を用いる。計算に用いる対象リンク数は7,826、ノード数は5,264、ゾーン数は786である。これには阪神高速道路の他に、都市間高速道路（名神高速道路など）および一般道路を含む。計算対象道路網を図-3に示す。



図-3 計算対象道路ネットワーク

図中の赤色のリンクは高速道路、黒色のリンクは一般道路を示す。都市高速道路・一般道路ともに、各リンク特性を表す走行時間関数(パフォーマンス関数)は、BPR関数で定義する⁷⁾。

なお、BPR関数を用いて走行時間を求める際は、大型車の普通車換算係数（大型車1台を普通車相当の台数に換算する係数）を2.0として算定する。すなわち、大型車の実交通量1台を計算上の車両台数2.0台としている。

通行料金を所要時間に換算して評価するため、時間価

値を用いる。時間価値の設定は、費用便益分析マニュアルに基づき、車種ごとに設定する⁹⁾。ここでは、普通車62.86円/分、大型車87.44円/分を用いる。

(2) 対象道路網の設定

阪神高速道路では、大型車の通行料金は普通車の2倍となっている。この料金設定の妥当性を料金収入および便益面から評価する。ここでは、便益として走行時間短縮便益を用いる。

今回は、大型車の通行料金を普通車の1.5倍から2.5倍の範囲で5ケースについて検討する。また、評価指標として、都市高速道路についての利用台数・料金収入・総走行時間等、一般道路についての総走行時間等、都市高速道路と一般道路を合わせた道路網全体の総走行時間等を用いる。このうち、都市高速道路の利用台数・料金収入は都市高速道路会社にとって重要な指標である。また、都市高速道路の運用は一般道路にも影響を与えるため、一般道路の評価指標および道路網全体の評価指標も合わせて検討する必要がある。

大型車通行料金と都市高速道路の利用台数との関係を図-4に示す。大型車の通行料金を低額にした場合、大型車の利用台数は増加する。しかしながら、この増加量は線形ではなく、比率が2.5から2.25の時の増加台数が1.3万台に対して、1.75から1.5の時の増加台数は1.9万台である。また、普通車の利用台数は大型車の増加とともに減少する。例えば、比率が1.5の時と2.5の時を比較すると、9.2万台の増加が観測される。総台数では、比率が2.5の時が利用台数が最も多くなる。

つぎに、都市高速道路の料金収入を図-5に示す。普通車の料金収入は、利用台数の増加とともに増加する。しかしながら、大型車については、料金比率を低率にした場合、利用台数は増加するが、料金収入は減少する。また、料金比率を高率にした場合、利用台数の減少の影響で料金収入が減少する。例えば、料金比率1.5の場合と2.0の場合を比較すると、2.0の場合に大型車の料金収入が3.3%多くなる。今回のケース設定では、大型車料金比率が2.5の時に料金収入が最大になる。この時、現行の設定である大型車料金比率2.0と比較すると、3.0%の増収となる。

都市高速道路の総走行時間を図-6に示す。大型車の総走行時間は、大型車料金比率の上昇に伴い、減少する。また、普通車の総走行時間は大型車料金比率の上昇とともに増加する。普通車と大型車を合わせた総走行時間は、現行の料金水準である料金比率が2.0の時に最小になる。また、大型車料金比率1.5と2.0の場合を比較すると、1.5の場合は1.0%総走行時間が増加する。一方、大型車料金比率2.5の時は2.0の時と比べて0.2%増加する。

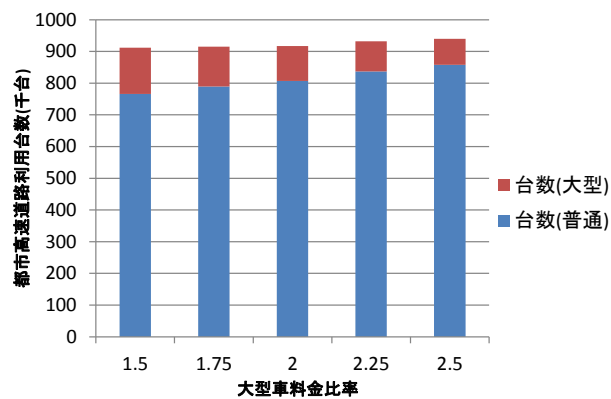


図-4 都市高速道路利用台数

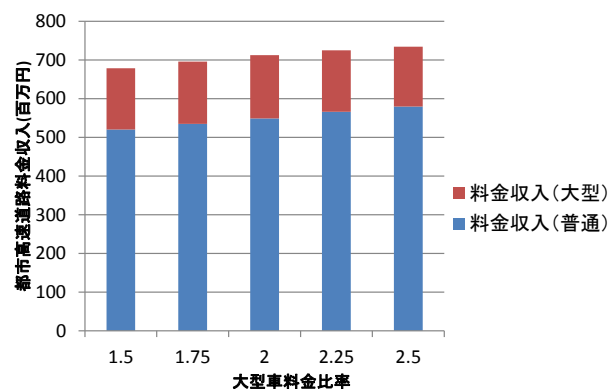


図-5 都市高速道路料金収入

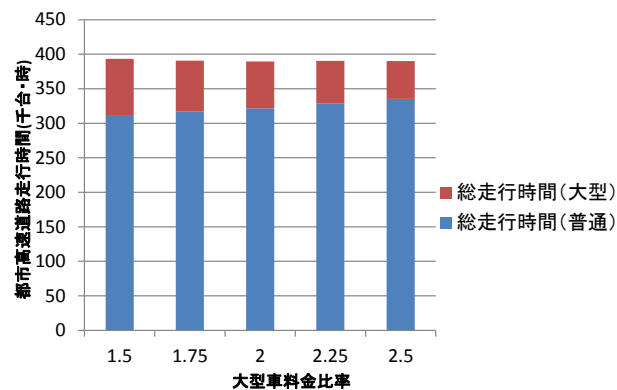


図-6 都市高速道路総走行時間

つぎに、都市高速道路の料金設定が一般道路に与える影響を分析する。一般道路の総走行時間を図-7に示す。都市高速道路の大型車料金比率が上昇した場合、一般道路の交通量が増加するため、大型車の総走行時間は増加する。普通車と大型車の合計の総走行時間は、必ずしも線形の変化ではなく、料金比率2.5の時に最も大きく、料金比率1.5の時に最も小さい。料金比率1.5の場合と2.5の場合の総走行時間の差は2.0%である。したがって、一般道路への影響も少なからずあると言える。

一般道路を含めた道路網全体の総走行時間を図-8に示す。一般道路の総走行時間と同様に、道路網全体の総走行時間は、必ずしも線形の変化ではない。ここでは、大型車料金比率が1.5の時に最小であった。また、最大は料金比率が2.5の場合であった。このとき、最小と最大の総走行時間の差は1.1%である。

総走行時間の変化から、走行時間短縮便益を算定することが可能である。ここでは、費用便益分析マニュアル3)を基に、現行の大型車料金比率2.0との差により算定する。総走行時間が最小であった大型車料金比率1.5の場合、普通車の走行時間短縮便益は△1.28億円に対して、大型車の便益は2.10億円であり、合計の便益は0.82億円である。

4. 車種別料金設定が環境負荷量に与える影響の分析

ここでは、3章で得られた料金案に対して、環境負荷量の検討を行う。環境負荷量として、地球環境に影響を与える二酸化炭素排出量と大気汚染物質である窒素酸化物排出量を取り上げる。

(1) 地球環境への影響の検討

ここでは、地球環境に与える影響として、二酸化炭素排出量を検討する。二酸化炭素排出量は車種別・速度別の排出係数を用いて排出量を算定する⁹⁾。排出係数は、2010年の車種構成での推計値を用いている。また、走行速度はリンクパフォーマンス関数で得られるリンク走行時間およびリンク長から求めた。

各ケースの二酸化炭素排出量を図-9に示す。二酸化炭素排出量は料金比率1.5の場合に最小である。料金比率が低い場合、大型車の都市高速道路利用が促進される。二酸化炭素排出係数は60km/h程度で最小になるため、大型車に対して都市高速道路利用を促進させることが二酸化炭素排出量の減少につながる。

(2) 大気汚染物質排出量の検討

つぎに、窒素酸化物の排出量を検討する。この場合も、二酸化炭素排出量の算定方法と同様に、車種別・速度別の排出係数を用いる¹⁰⁾。各ケースの窒素酸化物排出量を図-10に示す。窒素酸化物は、ディーゼル車が大半を占める大型車において排出量が多い。ここで、窒素酸化物についても走行速度が遅い場合に排出量は多くなり、60km/h程度での走行の場合に排出量が少なくなる傾向がある。したがって、大型車の都市高速道路利用を促進する料金比率1.5の場合に排出量は最も少なくなり、料金比率2.5の場合に最も多くなる。

以上の分析結果より、道路網全体の走行時間短縮便益、

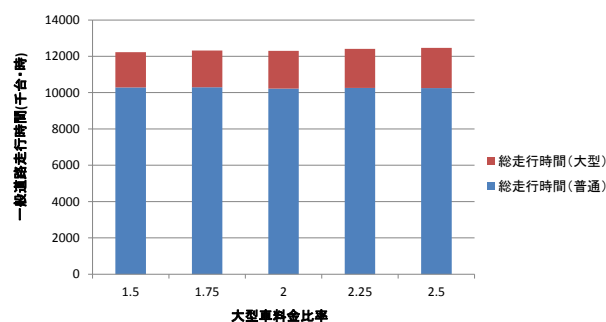


図-7 一般道路総走行時間

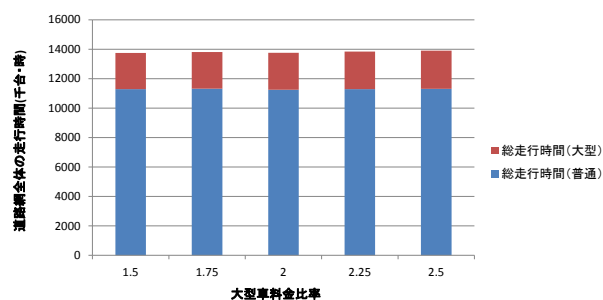


図-8 道路網全体の総走行時間

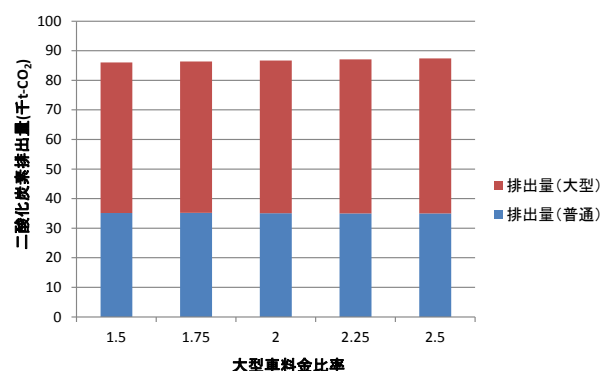


図-9 二酸化炭素排出量

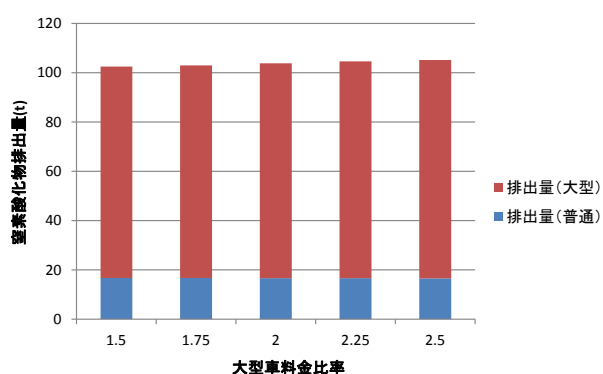


図-10 窒素酸化物排出量

二酸化炭素排出量、窒素酸化物排出量などの社会全体の観点での指標は、大型車の料金比率が低い場合に指標値が向上する。一方、都市高速道路の料金収入は料金比

率が低い場合に少なくなる。このため、都市高速道路会社における償還に必要な収入の確保・収支状況および都市高速道路の社会的役割を考慮した通行料金設定が必要である。

5. おわりに

本研究では、都市高速道路を対象に車種別料金体系を検討した。本研究の主要な成果を以下に示す。

- 1) 車種別確率的利用者均衡配分モデルおよび仮想リンクを用いた計算方法を採用することで、各ランプペア間で任意の車種別料金を設定した交通量配分計算を実行することが可能となった。
- 2) 大型車の料金水準を変化させたケースについて利用台数・総走行時間などの検討を実行した。その結果、都市高速道路利用台数、料金収入は大型車料金水準の上昇とともに増加することがわかった。また、道路網全体の総走行時間は大型車料金水準が1.5の時に最小であり、その時の走行時間短縮便益は0.82億円と算定された。
- 3) 大型車料金が環境に与える影響を分析した。その結果、大型車料金水準が低い場合に環境負荷量は低減されることがわかった。

これらのことから、高速道路会社にとっての最適な料金水準と社会的に最適な料金水準は異なることが分かった。したがって、高速道路の料金水準の設定は、高速道路会社の償還に必要な収入の確保、収支および社会面から適切に設定する必要があると言える。

最後に本研究を遂行するにあたり、資料収集および研究討議に関して、阪神高速道路株式会社、(株)地域未来研究所の御協力を得た。ここに記し感謝の意を表する次第です。また、本研究は、平成24年度独立行政法人日本学術振興会科学研究費補助金・基盤研究（C）（課題番号：23560636）の研究の一部であることを付記する。

参考文献

- 1) 井ノ口弘昭：環境負荷を考慮した都市高速道路の車種別料金設定について，土木計画学研究・講演集，Vol.39, No.117, 2009.
- 2) 井ノ口弘昭，秋山孝正：都市高速道路の車種別料金体系に関する検討，土木学会論文集 D3, Vol.67, No.5, pp.1173-1180, 2011.
- 3) 土木学会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，pp.73-102, 1998.
- 4) 秋山孝正，井ノ口弘昭，奥嶋政嗣：乗り継ぎ交通を考慮した都市高速道路の料金設定に関する研究，土木学会論文集 D3, Vol.67, No.5, pp.1225-1232, 2011.
- 5) 阪神高速道路：阪神高速道路ドライバーズサイト，<http://www.hanshin-exp.co.jp/drivers/index.html>
- 6) 国土交通省：ETC 利用状況の推移，<https://www.mlit.go.jp/road/yuryo/riyou.pdf>
- 7) 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.
- 8) 国土交通省 道路局・都市・地域整備局：費用便益分析マニュアル，2008.
- 9) 大城温，松下雅行，並河良治，大西博文：自動車走行時の燃料消費率と二酸化炭素排出係数，土木技術資料，Vol.43, No.11, pp.50-55, 2001.
- 10) 並河良治，高井嘉親，大城温：自動車排出係数の算定根拠，国土技術政策総合研究所資料，No.141, 2002.

(2013.8.2 受付)

EXAMINATION ON TOLL SETTING OF URBAN EXPRESSWAY CONSIDERING VEHICLE CLASS USING A STOCHASTIC TRAFFIC ASSIGNMENT MODEL

Hiroaki INOKUCHI and Takamasa AKIYAMA

In this study, the setting of vehicle class toll of urban expressway was examined including the user benefit and the environmental effect. The results are shown in the follows. 1) By adopting the calculation method using a stochastic user equilibrium traffic assignment model and a virtual link method, it is possible to calculate the traffic volume of each vehicle class of urban expressway. 2) The traffic volume and the total travel time was examined. As a result, the traffic volume of urban expressway and the toll income can be increased with the rise of toll level of heavy truck. 3) The effect of the vehicle class toll setting on global environment and regional environment was estimated. As the result, the CO₂ emission and the NO_x emission were minimized by the case of smallest toll level. From these results, it was found that the optimal toll level for the urban expressway company and the socially optimal toll level is different.