

有料道路複数回利用時の特別割引制度の評価 モデル：非加法型トリップチェーン交通均衡モ デルの拡張

富士 祥輝¹・円山 琢也²

¹学生会員 熊本大学大学院 自然科学研究科（〒860-8555 熊本市中央区黒髪2丁目39番1号）

E-mail:130d8829 @st.kumamoto-u.ac.jp

²正会員 熊本大学准教授 政策創造研究教育センター（〒860-8555 熊本市中央区黒髪2丁目39番1号）

E-mail:takumaru@kumamoto-u.ac.jp

多頻度割引は、1日の有料道路利用の回数に応じて料金を割り引くシステムである。多頻度割引を除く既存の高速道路料金割引の多くはトリップベース単位で評価することが可能である。しかし、多頻度割引は高速道路利用者の1日の行動を対象とするため、トリップチェーンベース単位での交通均衡配分モデルが必要である。

本研究では、高速道路の多頻度利用者向けの割引に関する評価方法の構築を行い、その有用性を確認することを目的とする。そして、多頻度割引の例として、1日の高速道路利用が2の倍数回目の利用者に対して、2回目の高速道路利用を1円とする「2回目1円」割引を考える。

Key Words : toll road, special discount, trip chain, link performance function, travel forecasting

1. はじめに

近年、高速道路の今後の料金制度のあり方として数多くの検討がなされている。今までは都市高速道路の多くは一定の区間で均一料金制をとっていたが、2012年1月に阪神高速道路が、距離に応じた料金が付加される対距離料金制へ移行したように、高速道路利用者の公正で合理的な受益者負担を期した料金制度へと変化しつつある。このような弾力的な料金設定を採用することで高速道路利用者の行動を増加させ、沿線道路の渋滞緩和や環境の改善等、都市ネットワークの有効活用化が目指されている¹⁾。

また、高速道路ではそれぞれの料金体系に対応した様々な割引制度が導入・評価されている。しかし、1日の有料道路利用の回数に応じて料金を割り引くシステムである多頻度割引に関しては、導入はされているが、評価方法が確立されていない。多頻度割引を除く既存の高速道路料金割引は全てトリップベース単位で評価することが可能であるが、多頻度割引は高速道路利用者の1日の行動を対象とするため、トリップチェーンベース単位での交通均衡配分モデル(Trip-Chain-based UE：以下TCUE)が必要となる。

本研究では、多頻度利用者向けの割引の例として、1日の高速道路利用回数が2の倍数の利用者に対して、2回目を1円とする「2回目1円」割引を考える。そして、高速道路の多頻度利用者向けの割引に関する評価方法の構築を行い、その有用性を確認することを目的とする。

2. 既存の高速道路料金割政策のまとめ

本章では、表-1に示した現実の料金政策に関する課題と新しい評価モデルに関する整理を行う。

表-1 料金体系とモデル対応表²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾

料金体系	対応可否	対応法
均一料金制	○	基本的なモデル
対距離料金制	○	基本的なモデル
IC間料金制	☆	非加法性料金モデル
乗継料金制	☆	非加法性料金モデル
ピークロードプライシング	☆	時間帯別配分
車種別料金の考慮	☆	車種別配分(マルチクラス配分モデル)
多頻度利用者向けの割引	×	配分モデルの枠組みでは対応困難

○：基本的なモデルで対応可

☆：応用モデルで対応可

×：対応が困難

(1) 料金政策の割引制度

有料道路の料金政策に対して、様々な割引制度が存在する。代表的なものに、休日や深夜等の基本的に交通量の少ない時間帯を割引とする休日・深夜割引がある。これらの割引制度は、道路を管理する道路会社によって異なる。

(2) 既存の高速道路料金政策

料金体系には様々あり、均一料金制や対距離料金制のように、距離に対して料金が線形な場合は基本的なモデルで評価できる。また、IC間料金制や乗継料金制等のように、距離に対して料金が非線形な場合は仮想リンク法や組み合わせ法等のような、それぞれの料金政策に対応した最短経路探索アルゴリズムで評価可能である。しかし、既存の評価モデルでは多頻度利用者向けの割引を評価できない。これは、多頻度割引以外の既存モデルがトリップベース単位であるためである。図-1に評価モデルの違いを挙げる。ある車両が1日に2回移動する場合、既存の評価モデルはこの2回の移動をそれぞれ独立したものとして交通配分を行う。多頻度割引以外の料金体系はそれぞれ1回分の移動に割引を課すため、この方法で十分評価可能である。しかし、多頻度割引の場合はこの2回分の移動を1セットとして捉えた割引を行うため、評価することができない。つまり、既存の配分モデルの枠組みでは対応が困難であり、トリップチェーンベース単位の評価モデルを構築する必要がある。

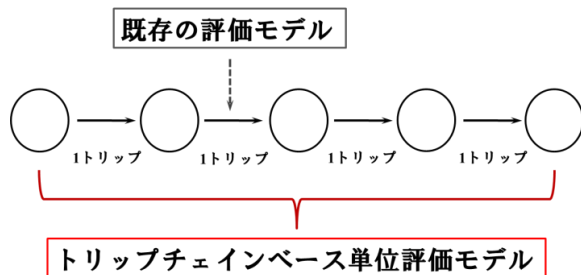
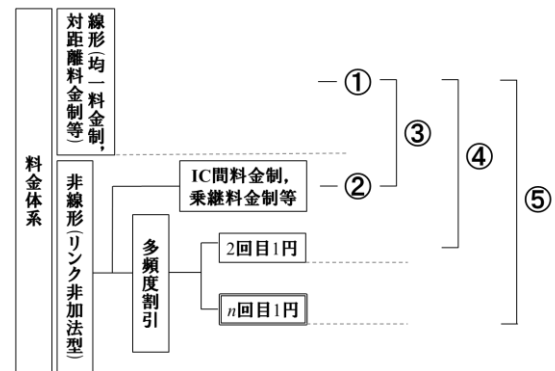


図-1 既存モデルと提案モデルの違い

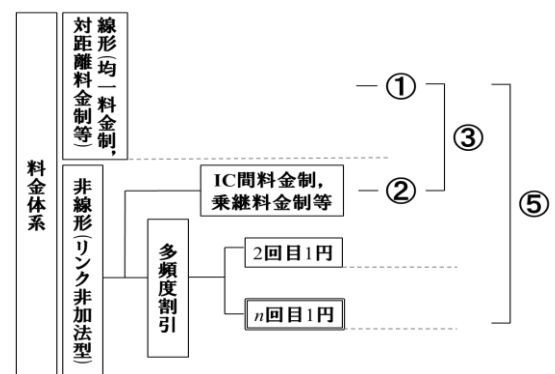
(3) 評価モデル

現在、数ある評価モデルのうち、本研究で扱うTCUEがどのような料金政策に対応しているのかを図-2に示す。①トリップチェーン型交通均衡配分モデルと②リンク非加法コストを考慮したTCUEが③Maruyama and Harata (2006)で提案・構築されている⁷⁾。④Lawphongpanich and Yin (2012)による非線型形UEモデル⁸⁾はトリップベースのモデルであり、「2回目1円」割引を評価することができる。本研究では、③のモデル設定を拡張し、⑤トリップチェーンベース単位での評価並びに「 n 回目1円」割引

の評価が可能なモデルを構築する($n = 2, 3, \dots, m$)。すなわち、既存のモデルをより一般化した手法の構築を提案する。



トリップ数1の場合



トリップ数2の場合

図-2 料金体系とそのモデル対応図

トリップ数1の場合は①～⑤の全てのモデルで評価が可能である。トリップ数2以上の場合、①～③はトリップ数1で行った計算と同様に繰り返して求めることができる。また、④は多頻度割引の評価がトリップ単位であるため、トリップ数が2以上の場合には評価できない。また、①や②のモデルは、特定の料金体系しか評価できないが、③～⑤のモデルに比べて計算時間が短いという利点がある。これは、③～⑤が様々な料金体系に対応している分、容量も相応に大きくなっているためである。

3. 評価モデルの基本設定

(1) 基本モデルの定式化

本研究で構築する評価モデルの具体的な流れを、単純ネットワークにおいて、非加法経路コストを考慮したトリップチェーン型ネットワーク均衡モデルにより定式化

できる．この均衡モデルは円山⁷⁾によって構築され，課金額や経路ベースで決定される料金体系で評価できる利用者均衡配分である．そのモデルの等価最適化問題を式(1)に示す．

$$\begin{aligned} \min. Z(g, h) = & \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega + \sum_n \sum_{m \in M} \tau g_n^m \\ & - \sum_n \int_0^{h_n} D_n^{-1}(\omega) d\omega \end{aligned} \quad (1)$$

subject to

$$\begin{aligned} h_n &= \sum_m g_n^m, \quad \forall n, \\ x_a &= \sum_{m,n} \delta_{a,n}^m g_n^m, \quad \forall a, \\ x_a &\geq 0, \quad h_n \geq 0, \quad g_n^m \geq 0 \end{aligned}$$

ここで， x_a ：リンク a 上の交通量， h_n ：トリップ・チェーン n の交通量， $D_n(\cdot)$ ：トリップチェーン n の需要関数， g_n^m ：トリップ・チェーン n の経路 m の交通量， M ：課金領域を通過する経路の集合， τ ：課金レベル， $\delta_{a,n}^m$ ：各経路がリンク a を利用する時に1，利用しないときは0となる変数である．

(2) 多様な割引制度に対応したアルゴリズムの拡張

既存の乗継割引の評価モデルは，高速道路の2回目以降の利用は常に一定金額を割引くことが想定されている．これを一般化し， n 回目以降利用時に，多様な割引額を想定しうるモデルとアルゴリズムを構築する．

交通均衡配分のサブアルゴリズムで，それら多様な割引額に対応した最短経路探索アルゴリズムが一般に必要なとなる．それを以下に記述しよう．非加法コストに対応した最短経路探索アルゴリズムは，最近も提案(Chen Nie⁹⁾)されているが，本アルゴリズムは，その拡張の一例となるだろう．

割引額が n 種類ある場合，まず，ネットワークを n 個，複製する．上から，1回目利用時，2回目， $\dots$ ， n 回目利用時の料金体系を表現するネットワークとする．2回目以降のネットワークには，上位のネットワークで高速道路を利用した場合のみに移動することができる設定とし，具体的には，高速道路の出口リンクの終点ノードから，下層のネットワークの同一ノードへ仮想リンクを張る．2回目以降のネットワークでは，それぞれの利用回数時に応じた高速道路の料金料金を設定する．具体的には，高速入口リンクの料金抵抗を，それぞれの料金に対応させる．

起点セントロイドからは，1回目利用時のネットワークにのみ，コネクタをつなぐが，終点セントロイドへ

は，すべてのネットワークからコネクタをつなぐ．

以上の設定をした， n 個に複製されたネットワーク(ハイパーネットワークと呼ぶ)上で，通常の最短経路探索を行えば，一般的な n 回目利用時の割引制度に対応した最短経路樹を求めることができる．交通量をハイパーネットワーク上に配分した後， n 個のネットワークの各リンクの交通量を合計して，本来のリンクの交通量を求めて，リンクコストを更新する．以上のような流れで，Frank Wolfe法を代表とした既存の交通配分のアルゴリズムが利用できる．

トリップ・チェーンを考慮する場合の拡張は，Maruyama and Harata⁷⁾に従えば可能であり，概略を以下に示す．あるODペア間で n 回高速道路を利用する場合の最小一般化費用を記憶する．そして，全体でどのような高速道路利用の選択を行うのが，最小一般化費用をもたらすのかを計算する．

多頻度割引によって，高速道路利用回数が増加する，トリップ数が増加する，トリップ・チェーンが変化するという変化は，式(1)のトリップ・チェーン需要関数 $D_n(\cdot)$ を適切に設定すれば，概念的には容易に表現可能である．

複数日にまたがった多頻度割引の評価も，トリップ・チェーンを日単位から週単位・月単位に拡張すれば，概念的には可能となる．一週間単位の時空間パスの均衡モデルを提示している円山⁹⁾を参考にされたい．

任意のトリップ・チェーンでの計算例は，複雑となるため，以下は，単一ODペアでのトリップ単位での計算例のみを示しておく．

4. 単純ネットワークでの試算の設定条件

(1) 高速道路と一般道路を交えた最短経路探索

一般道路のみの単純ネットワークに高速道路を加える(図-3)．高速道路上の記号は通行方向を示す．一般に，最短経路探索を行う場合，終点までの経路を全通り導き出し，その中で全体の所要時間の小さい経路を割り出すため，最短経路の算出に時間がかかる．そこで，起点から各IC間までの経路をダミーリンクに置き換える．これは，経路所要時間をダミーリンクのコストとして考えることで，最短経路探索の算出時間の短縮を図るためである．また，ネットワークの構成を考えるうえで，一部のリンクに抵抗を加える等をしてダミーリンクの設定を容易とする．

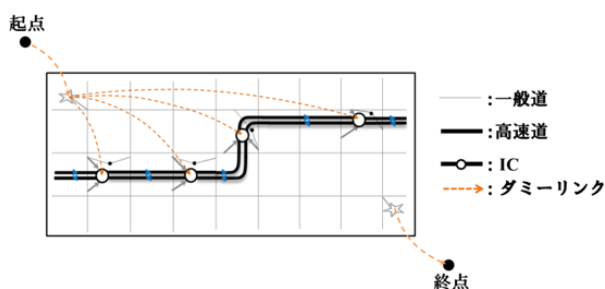


図3 高速道路を含む最短経路探索

(2) 簡単な多頻度割引を課した単純ネットワーク

多頻度割引は1つの単純ネットワークで表現することが難しい。そこで、「 n 回目1円」割引の政策評価が可能なモデルを図4のように構築する。

図4は、複数の単純ネットワークを作成し、ネットワーク同士をダミーリンクによって繋げることで、利用者が高速道路を何回利用したか分かるようになっている。ここで、ネットワーク名を上からネットワークA、B、C、Dとする。

基本的にネットワークA、B、C、Dのどこからも終点へ移動することはできるが、起点からネットワークB、C、Dに直接移動することはできない。一般に n 回目1円のモデルでは、 n 個にネットワークを複製し、そのネットワーク間のダミーリンクの繋ぎ方を工夫する必要がある。

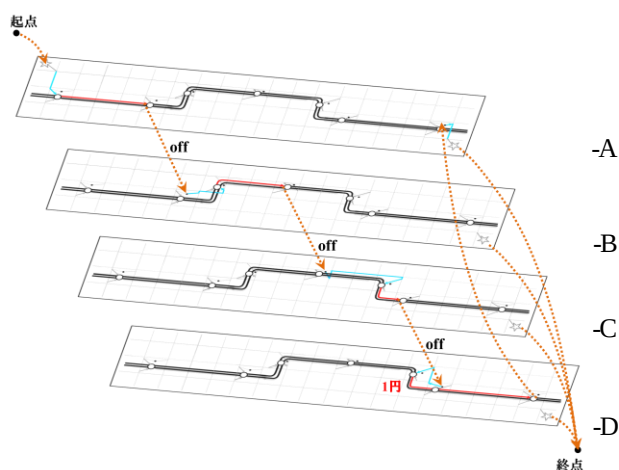


図4 「 n 回目1円」割引の流れ($n=4$ のとき)

(3) 料金制度

本研究では、均一料金制と対距離料金制の比較・検討を行う。両制度における設定料金は図5、6に示す。

均一料金制は、距離に関わらずネットワーク全体が一律料金であるため、料金徴収にかかるコストが少なく済む。また、料金所で精算する時間も短いため、渋滞の要因になりにくいという利点がある。単純ネットワークの場合、ICリンクのオンランプでのみ料金が発生する。

故に、「 n 回目1円」割引のような多頻度割引に関しては、 n 回目の高速道路利用が1円となるため、 n 回目のネットワークで高速道路を利用した長距離移動をする可能性が予想される。

対距離料金制は、距離に比例して料金が加算されるシステムである。各ICを通過する度に課金されるが、均一料金のように課金額は高くないため、利用者の需要に合った料金制度を実現している。また、対距離料金制は料金所での精算で時間がかかるという欠点があったが、ETCの普及に伴って料金所で精算する手間が省けたため、それほど時間を必要としなくなった。本ネットワークでは、各オンランプでの課金額と距離に比例する課金額は同額に設定している。

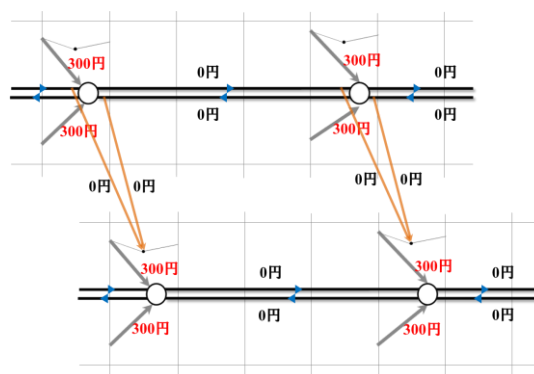


図5 均一料金制度

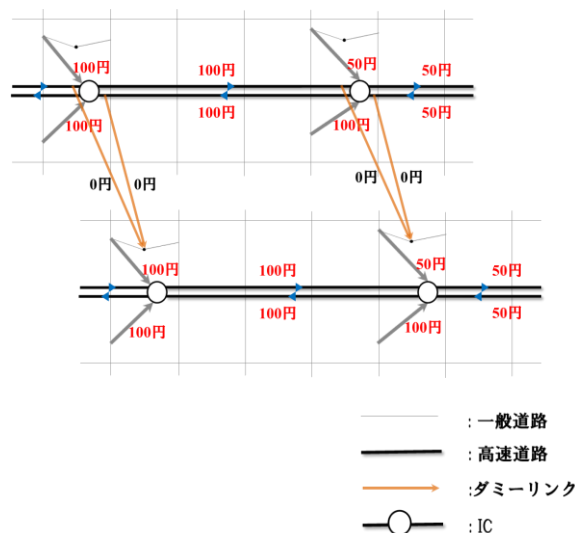


図6 対距離料金制

5. 単純ネットワークでの試算と考察

本章では実際にTCUEで計算を行った結果を示す。均一料金制下と対距離料金制下でどのような違いが見られるか、また、それぞれの料金制度において「2回目1円」割引を適用した場合としない場合の比較も合わせて

検証を行う。

(1) 各料金制度での交通量比較

(a) 均一料金制

ネットワークA、Bのオンランプにのみ300円の料金を課す。「2回目1円」割引が適用されるネットワークBはどのオンランプも1円として計算する。比較対象として「2回目1円」割引を用いない、通常の料金体系の場合での計算結果を図-7.8に示す。赤色のラインほど交通量が多いことを示しており、色が青くなるほど交通量が少なくなる。また、利用者が何回高速道路を利用したか分かりやすいよう、高速道路を利用している場合は黒の矢印で囲いをいれている。

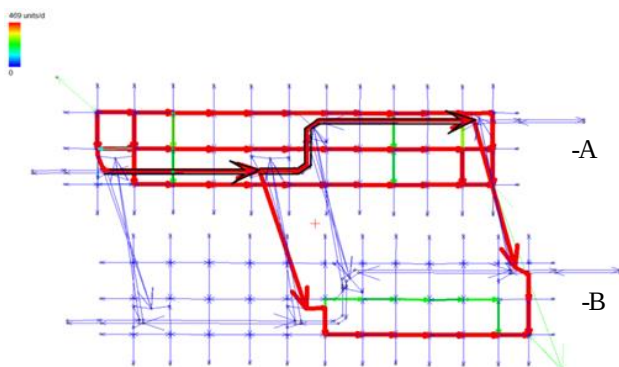


図-7 均一料金下での割引非適用時の交通量

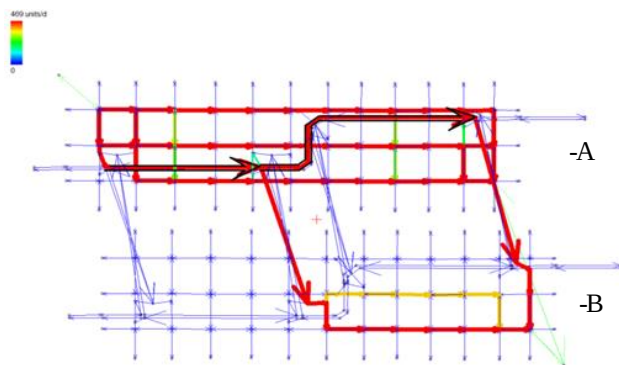


図-8 均一料金下での割引適用時の交通量

均一料金が300円の場合では、目立った変化は見られず、割引適用時は高速道路を2回利用した利用者数は僅か1(台/h)だった。また、均一料金を100円にして割引を適用した場合でも、2回目の高速道路利用者数は全体の交通量6,000(台/h)中の約150(台/h)であり、割引の効果が薄いことを示している。しかし、今回のネットワークでは規模が小さく、均一料金区間をネットワーク全体として計算しているため、料金を1回支払って高速道路を利用することで終点近くのICまで移動することができる。故に、ネットワーク中でどうしても高速道路を下りる必要

がある利用者を除けば、均一料金制に「2回目1円」割引を併用することは効果的ではない。

(b) 対距離料金制

ネットワークAのオンランプ及び高速道路に50円、100円を課す。課金の基準として、ネットワークのIC間距離が1.5kmより小さい場合は50円、1.5km以上の場合は100円としている。「2回目1円」割引が適用されるネットワークBはどのオンランプも1円として計算する。

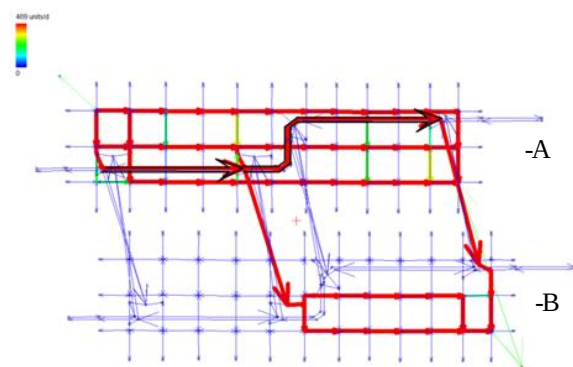


図-9 対距離料金下での割引非適用時の交通量

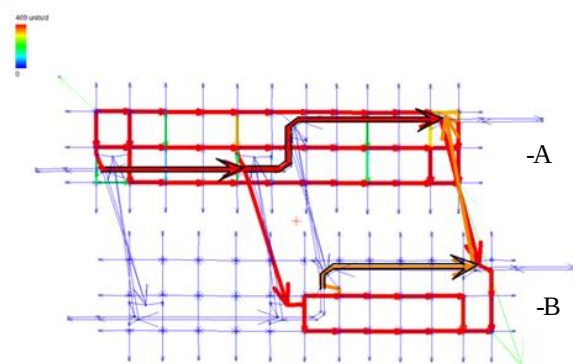


図-10 対距離料金下での割引適用時の交通量

「2回目1円」割引の適用時と非適用時では、2回目に高速道路を利用する交通量に差が生じた。全体の交通量6,000(台/h)中、2回目の高速道路利用者数は、割引適用時は407(台/h)であった。

(4) 利用者数の推移と収入の関係

5.(5).(a)と(b)の各料金制下で多頻度割引を適用した場合と適用しなかった場合において、利用者数の推移と道路会社の収入を算出した結果を表-4に示す。

表-4 利用者数の推移と道路会社の収入

	均一料金制		対距離料金制	
	割引非適用	割引適用	割引非適用	割引適用
高速道路利用者数 (台/h)	1,982	2,032	3,984	4,409 (+425)
高速道路2回目利用者数 (台/h)	0	1	0	407
収入 (円)	594,600	609,301	340,750	344,356 (+3,606)

均一料金制の下では、本研究の場合ではネットワーク全体を料金区間と設定しているため、わざわざネットワークBで高速道路に乗る必要がない。そのため、多頻度割引制度を適用しても効果がみられなかったと考えられる。

対距離料金制の下では、割引適用時の利用者数で「2回目1円」割引の利用者数は407(台/h)であった。これは、割引によって高速道路へ転換した利用者のうち、その大勢が「2回目1円」割引を利用したということである。収入に関しても増加しているため、このネットワークでの多頻度割引の実用性は十分にあると考えられる。

(5) 両料金制度の比較

対距離料金制では、均一料金と比較して「 n 回目1円」割引の効果がより高いことが確認された。 n 回目の高速道路料金が1円になるため、遠方へ出かける時に有効である。また、対距離料金制の方は n 回目の高速道路の利用者数が多く、かつ均一料金に比べて支払う料金も少ないと考えられる。どちらの料金制度を利用するにしても、大規模都市圏の場合は、混雑状況等の不確実的な要素も加わり、一般道路の旅行時間が増加し、高速道路へ転換して「 n 回目1円」割引の効果がより大きく出ると予想される。

6. おわりに

本研究では、高速道路の多頻度利用者向けの割引に関する評価方法の構築を行い、交通均衡配分による分析を実行した。以下に本研究の成果を示す。

- 1) 有料道路の多頻度割引のような料金制度を評価できるトリップチェーンベース単位の交通均衡配分モデルを構築した。
- 2) 構築したプログラムを、高速道路を含む単純ネットワークへ適用し、一般的な多頻度割引を例に性能を比較分析し、プログラムの有用性を確認した。
- 3) 多頻度割引適用時における均一料金制と対距離料金制による比較分析を行い、多頻度割引が対距離料金制下でより有効であることを確認した。

今後の展望として、実都市圏への適用が第一に挙げられる。単純ネットワークでは比較分析に用いるデータが不十分であるため、実都市圏に適用した場合の結果による有用性を確認する必要がある。また、単純ネットワークにおける評価に関しても、対距離料金制の料金設定が極端であったため、明確な基準を設けて再度分析を行いたい。

謝辞

本研究に際して、プログラミングの実行にあたり様々な指導を頂いた高木良太氏、基本的な扱い方やネットワーク構成の考え方等にご協力頂いた孫学強氏、溝上章志教授に深くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 高速道路のあり方検討有識者委員会：今後の高速道路のあり方 中間とりまとめ、
http://www.mlit.go.jp/road/ir/ircouncil/hw_arikata/chu_matome2/matome.pdf (2013年2月閲覧)
- 2) 土木学会：道路交通需要予測の理論と適用第二編，pp161-162, 173-176, 2006
- 3) 三輪富生，酒井大輔，山本俊行，森川高行：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，土木計画学研究・講演集，Vol47，CD-ROM，2013.
- 4) 秋山孝正，井ノ口弘昭，奥島政嗣：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，第40回土木計画学研究発表会・講演集，2009.
- 5) 井上紳一，山口修一，鈴木祐介，円山琢也，森田緯之：高速道路上の経路選択を考慮した拡張型利用者均衡尾配分モデルの実証的研究，土木学会論文集 D3(土木計画学)，Vol67，No.5，2011.
- 6) Peng Chen, Yu (Marco) Nie : Bicriterion shortest path problem with a general nonadditive cost, *Transportation Research Part B*, 2013.
- 7) Maruyama,T and Harata,N. : Difference between area-based and cordon-based congestion pricing:Investigation by trip-chain-based network equilibrium model with non-additive path costs, *Transportation Research Record*, No. 1964, 2006.
- 8) Lawphongpanich and Yin : Nonlinear pricing on transportation networks, *Transportation Research Part C*, pp.218-235, 2012.
- 9) 円山琢也：ピーク・ロード・デポジット制度の提案及びその評価モデル，第37回土木計画学研究発表会，2008.
- 10) 土木学会：道路交通需要予測の理論と適用第二編，pp34-35, 2006.

(2013. 8. 2 受付)

EVALUATION MODEL FOR TOLL ROAD POLICY OF MULTIPLE-USE SPECIAL DISCOUNT : EXTENSION OF TRIP-CHAIN-BASED NETWORK EQUILIBRIUM WITH NON — ADDITIVE COST

Shoki FUJI and Takuya MARUYAMA

The multi-frequency discount is the system that discounted the toll, according to the number of times of using toll road. Most of the toll discount for general multiple-frequency discount, can be evaluated by trip-based model. But, trip-chain based traffic assignment is required, because this discount target at usage of toll road in a day.

In this study, as an example, discount of “one yen to second use” is considered. This discounts the toll to one yen for second usage of toll road. Then, we develop the evaluation method to the multi-frequency discount of the expressway, and show the numerical example in a simple network.