

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*

Proposal and Evaluation Model of Peak Load Deposit System *

円山 琢也**

By Takuya MARUYAMA**

1. はじめに

交通混雑を緩和するための新たなプライシング政策としてピーク・ロード・デポジット制度を提案する。この制度は、既存の有料道路、ボトルネックを有する一般道路、あるいは混雑の激しい鉄道路線を対象としたものである。料金を変化させることにより交通混雑の解消を目指す施策は多いが、既存の料金を値上げすることは、利用者の反対に直面し、一般に導入は困難とされている。例えば、高速道路の社会実験はもっぱら料金割引のみが対象となっている。しかし、料金値上げを回避している施策の効果は限定的なものとなっている可能性が高い。

それに対して本研究で提案する制度は、ピーク時の料金値上げを実施するが、その値上げ分を利用者にデポジットとして付与し、そのデポジット額は、そのまま翌日以降のオフ・ピーク利用時の料金の割引に使用できるとするものである。この制度は、利用可能時間を限定しながらも、料金値上げ分を利用者に完全に還元することで、受容性が高いプライシング施策を目指している。同時に、ピーク時利用者について、1週間のうち数日のみをオフ・ピーク利用に転換してもらうことで、ピーク時の混雑緩和を目指す施策である。

本研究では、この施策を評価するための一つのネットワーク・モデルとして、一週間単位のトリップ・チェーン(以下TC)を考慮した交通均衡モデルを提示する。

2. 新しいプライシング施策に関する先行研究レビュー

混雑課金(ロード・プライシング)政策については、それが社会全体で見ると望ましい状態を導くと主張されても、課金により利用者の負担は増加するため、導入には住民の反対が避けられない。ここでは、政策の受容性の向上等を目的として、最近新たに提案されてきたプライシング施策に特に着目しながら、関連の先行研究をレビューすることを試みる。

Santos and Rojey¹⁾は、混雑課金の分配インパクトについて、逆進的にも、累進的にもなりうることを示している。Eliasson and Mattsson²⁾は、コードン課金の公平性へ

の効果をストックホルムでモデル分析している。Bureau and Glachant³⁾は、パリ都市圏を対象にしたシナリオ分析により、課金インパクトの分配パターンは、交通量の削減レベルに依存すること、などを明らかにしている。

DeCorla-Souza⁴⁾は、FAIR (Fast and Intertwined Regular) レーンと呼ぶ新たな仕組みを提案している。FAIR レーンとは、まず道路区間を「高速レーン」と「通常レーン」に区分する。そして高速レーンでは、動的に変化する課金がされる。その一方で、通常レーンを走行する車両には、同時刻の課金額に基づくクレジットが与えられるという仕組みである。このクレジットは、それを累積することで、翌日以降、高速レーンの料金や、公共交通機関の料金として利用できるという仕組みである。

Daganzo⁵⁾, Daganzo and Gracia⁶⁾は、課金と割当制の組み合わせによるパレート改善型混雑課金について単一ボトルネックを対象に分析している。早崎・赤松⁷⁾は、一般ネットワーク上で、彼らのモデルを経路選択行動に応用した分析フレームを提示している。Nakamura and Kockelman⁸⁾は、San Francisco Bay Bridge を対象に Daganzo⁵⁾ モデルの実証研究を試みている。これらの研究では、利用者を、課金を支払う必要の無いグループと支払う必要があるグループの2つに分け、課金によってもすべての利用者の効用水準が向上するような仕組みを探っている。ただ、これらの研究では、どのように課金対象利用者を2つのグループに割当てるかについては、研究の焦点とはなっていない。

また、クレジット型混雑課金という政策も提案され、実都市圏での分析も進められている^{9), 10), 11)}。この課金システムは、対象都市圏で登録された車両の所有者に、月単位で交通補助金がクレジットとして支給され、利用する道路区間の混雑外部不経済に応じた額が、クレジットから差し引かれていくという仕組みである。混雑課金の収入総額が、車両保有者に均等に分配され、課金の一部を相殺しているとみなすことができる。

さらに駐車デポジットシステムと呼ぶ新たな課金政策も提案されている。これは、課金対象地域に流入する全車両に対し、一時的に課金を徴収するが、地域内で買い物また駐車場に駐車したドライバーには、それらの代金の一部に充当するように、課金分から返金が行われるという仕組みである。このシステムは、受容性の向上を目指した課金政策の一例であり¹²⁾、大規模なモデルを用い

*キーワード: TDM, 交通ネットワーク分析

** 正会員, 博(環境学), 熊本大学 政策創造研究教育センター (〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1, Fax: 096-342-2042)

た導入評価も行われている¹³⁾。

関連した最近の研究では、ボトルネック通行権取引制度^{14), 15)}が提案されている。この制度は、特定のボトルネックを特定の時刻のみに通行できる権利を道路管理者が設定・発行し、その通行権を道路利用者が市場で自由に売買取引するものである。この制度は、需要関数などの利用者情報を利用せずに、渋滞の解消を目指すという、大変興味深いシステムであるが、今すぐに実装できる制度ではないであろう。

3. ピーク・ロード・デポジット制度の提案と本研究のモデルの基礎となるトリップ・チェーン均衡モデル

本研究で提案する制度は、ピーク時の料金値上げを実施するが、その値上げ分を利用者にデポジットとして付与し、そのデポジットは、そのまま翌日以降のオフ・ピーク利用時の料金の割引に使用できるとするものである。

この制度は、先述したFAIRレーンの考え方と一部類似するところがあるが、課金の支払いが先になる点が異なる。一部の利用者が、ピーク時利用とオフ・ピーク時利用を交互に繰り返すこと等を促進することで、ピーク時の混雑緩和を目指している。各利用者が支払う課金額はデポジットによって異なることになる。つまり、先述した割当制下に類似した状態が、複数日にまたがる課金システムにより実現しているとも解釈できよう。

以下、本研究では、筆者らが先行研究^{16), 17), 18)}で構築したTC型ネットワーク均衡モデルを改良することで、この制度の評価モデルの一試案を示していく。

この制度は、動的な課金システムであるので、ボトルネック・モデルの利用も検討の価値がある。しかし、今後、鉄道混雑問題への適用も念頭においていること、および現実都市圏で計算可能性も視野に置いて、本稿では、静的モデルを基本とした、準動的なモデルを示す。

筆者らの先行研究^{16), 17)}のモデルは、まず、TCを一日単位で、人が一連の活動を行うために必ず経由するノード集合で定義している。一日の移動を完結するためには、そのノード集合を経由しての、さまざまな経路がありうるが、それらの経路をTC経路とその研究では定義している。そして、エリア課金が非加法型TC経路コストと

して表現できることを明らかにしている。そして、それを考慮したモデルには、以下のような等価最適化問題が存在することが示されている^{16), 17)}。

$$\min Z_1(\mathbf{x}(\mathbf{g}), \mathbf{h}) = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega + \sum_n \sum_{m \in M} \tau g_n^m - \sum_n \int_0^{h_n} D_n^{-1}(\omega) d\omega \quad (1)$$

subject to

$$h_n = \sum_m g_n^m, \quad \forall n, \quad (2)$$

$$x_a = \sum_{m,n} \delta_{a,n}^m g_n^m, \quad \forall a, \quad (3)$$

$$x_a \geq 0, h_n \geq 0, g_n^m \geq 0. \quad (4)$$

ここで、

x_a : リンク a の交通量;

$t_a(\cdot)$: リンク a のリンクコスト関数;

τ : (所要時間単位に変換された) 課金額;

g_n^m : TC n における TC 経路 m の交通量;

M : 課金される TC 経路集合;

h_n : TC n の交通量;

$D_n^{-1}(\cdot)$: TC n に対応した逆需要関数;

$\delta_{a,n}^m$: TC n における TC 経路 m にリンク a が含まれれば 1, それ以外では 0 を取る変数;

とする。

4. 1週間単位の時空間ネットワーク均衡モデル

(1) 1週間単位の時空間ネットワーク

さて、毎日、通勤トリップを行う利用者を想定し、単純化のため、時間帯をピーク時間帯とオフ・ピーク時間帯の2つのみに区分する。また、デポジットによる効果を分析したいため、1週間単位の利用者の行動とそれによる交通均衡を考える。この単位を1ヶ月・1年単位等と読み替えても、以下の議論に本質的な差は生じない。

まず、対象都市圏のネットワークをピーク時とオフ・ピーク時の2つに複製し、さらに、それらを一週間の各曜日に対応するように複製したものを準備する。通勤トリップに分析対象を絞ることにして、ある一日のネットワークの終点ノードを翌日のネットワークの起点ノードにつなげる。これを繰り返すことで、図-1のような時空間ネットワークが構築される。この図では単純ため、1OD

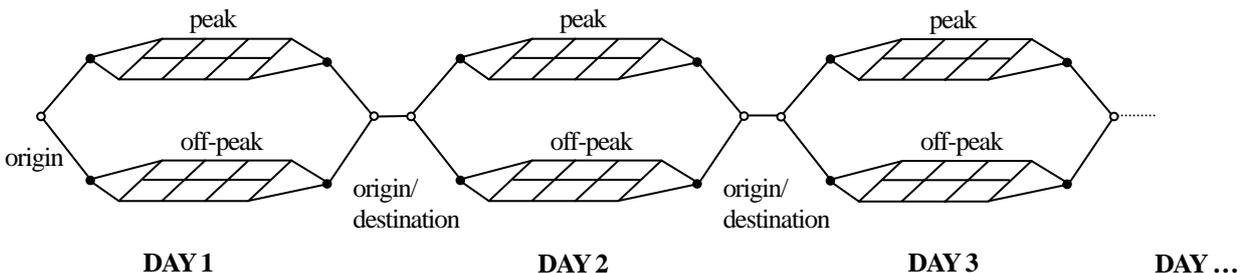


図-1 1週間単位の時空間ネットワーク

ペアの場合を示しているが、複数 OD ペアを考慮する場合にも、本研究のモデルは適用できる。

(2) 利用者の行動・均衡と支払い料金額

通勤者は、基本的にピーク時に会社に到着し始業することを希望するものとし、オフ・ピークに通勤した場合には、スケジュール・ディレイ (Schedule Delay) による不効用が生じるものとする。また、このスケジュール・ディレイには、個人差があるものとして、それを表現するためにマルチ・クラスの利用者層を考える。このスケジュール・ディレイに相当するクラス別のコストをオフ・ピーク ネットワークのアクセスリンクに付加する。

各利用者は、通勤時間、交通費用、スケジュール・ディレイを考慮して 1 週間単位の時空間パス (Weekly-based Time-Space Pass; 以降, WTSP) の最適な選択行動を行うものとする。結果として、利用者は通勤トリップを行う時間帯を、ピーク/オフ・ピークの2つより毎日選択することになる。完全な最適行動ではなく、例えば出発時刻選択に関しては確率化してもよいが、本研究では確定的なモデルを示す。また、通勤トリップを対象としているので需要固定型のモデルを示すが、需要変動型のモデルに拡張することは容易である。

また、通勤トリップなので、毎日の起終点は固定であり、それらで定義される 1 週間単位の時空間チェーンを WTSC (Weekly-based Time-Space Chain) と表記する。この WTSC は、先述した TC 型ネットワーク均衡モデルにおける TC に相当するため、そのモデルと同様な枠組みが適用できる。

以下、説明を容易にするため、課金対象施設がひとつの有料道路の場合を考える。そして、ピーク時の料金は、基本料金 τ_1 と割増料金 τ_2 の合計 $\tau_1 + \tau_2$ であるとし、オフ・ピーク時の料金は、基本料金 τ_1 のみであるとしよう。1 週間のうち、ピーク時の有料道路の利用回数を X 、同じくオフ・ピークの利用回数を Y とする。ここで、「課金パターン」として、1 週間あたりの総支払い額によって WTSP を分類する変数 p を導入する。この p は、 X, Y に依存するので、 $p(X, Y)$ と記述できる。

1 週間単位の利用者の選択行動が繰り返された結果、定常状態に達し、その均衡状態を記述すると考える。すると、1 週間で支払うピーク時の料金の総計は、 $(\tau_1 + \tau_2)X$ となる。オフ・ピーク時の料金の総計は、デポジット分 $\tau_2 X$ が一部充当できることを踏まえると、

$$\max.(0, \tau_1 Y - \tau_2 X) \quad (5)$$

と表現でき、結局、課金パターン p の 1 週間合計の料金支払い額 τ_p は、

$$\tau_{p(X, Y)} = (\tau_1 + \tau_2)X + \max.(0, \tau_1 Y - \tau_2 X) \quad (6)$$

と表現できる。

(3) 等価最適化問題

本モデルは、先行研究の TC 型モデルを改良したものであるので、以下のような等価最適化問題が構成できる。

$$\min .Z_2(\mathbf{x}(\mathbf{f})) = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega + \sum_i \sum_{a \in A} s_a^i x_a^i + \sum_i \sum_l \sum_p \sum_{k \in M_p} \tau_p f_{l,k}^i \quad (7)$$

subject to

$$q_l^i = \sum_k f_{l,k}^i, \quad \forall i, l, \quad (8)$$

$$x_a^i = \sum_{k,l} \delta_{a,l}^{i,k} f_{l,k}^i, x_a = \sum_i x_a^i \quad \forall i, a, \quad (9)$$

$$x_a \geq 0, x_a^i \geq 0, f_{n,k}^i \geq 0. \quad (10)$$

ここで、

A : スケジュール・ディレイが付加されている (時空間ネットワーク上の) リンク集合

s_a^i : リンク $a \in A$ に付加される利用者クラス i のスケジュール・ディレイ;

x_a^i : 利用者クラス i の (時空間ネットワーク上の) リンク a の交通量;

$f_{l,k}^i$: 利用者クラス i の WTSC $l, \text{WTSP } k$ の交通量;

M_p : 課金パターン p が賦課される WTSP 集合;

τ_p : 課金パターン p の一週間合計の料金支払い額;

q_l^i : 利用者クラス i の WTSC l の交通量 (所与);

$\delta_{a,l}^{i,k}$: 利用者クラス i の WTSP k にリンク a が含まれれば 1, それ以外では 0 を取る変数;

とする。

(4) アルゴリズム

アルゴリズムも先行研究^{16), 17)}と同様に部分線形化法が利用できる。 $f_{l,k}^i$ のうち課金パターン p が賦課される交通量の合計を

$$d_{l,p}^i = \sum_{k \in M_p} f_{l,k}^i, \quad \forall i, l, p, \quad (11)$$

と定義すると、式 (7) の目的関数は、WTSP 変数を利用せずとも表現でき、大規模ネットワークでも計算可能となる。

部分線形化問題の解法の途中で、補助解を得るためには、1 週間単位の時空間ネットワーク上で、その時点での最小交通費用の WTSP を探索する必要がある。この方法の一案を以下に記す。

まず、各 Day j について、利用者クラス別に、

[1] ピーク時に有料道路を利用しない場合の、料金分を含まない OD 間最小交通費用 C_1^j とそのパス

[2] ピーク時に有料道路を利用する場合の、料金分を含まない OD 間最小交通費用 C_2^j とそのパス

[3] オフ・ピーク時に有料道路を利用しない場合の、料金分を含まない OD 間最小交通費用 C_3^j とそのパス

[4] オフ・ピーク時に有料道路を利用する場合の、料金

分を含まないOD間最小交通費用 C_4^j とそのパスをそれぞれ求める。[1], [3] では、有料道路を通行不可に設定して最短経路探索をすればよい。[2], [4] は、通常の最短経路探索である。また、この [1]~[4] に対応した Day j の選択行動を、一般に $w(j)$ ($=1, 2, 3, 4$) と表記する。

次に料金パターン $p(X, Y)$ ごとに、 (X, Y) で示される有料道路利用回数の条件を満たしながら、

$$c_p = \sum_{j=1, \dots, 7} C_{w(j)}^j + \tau_{p(X, Y)} \quad (12)$$

が最小になるように、各 Day j の選択行動 $w(j)$ を決定する。最後に、 c_p の最小値を与える p を決定し、その WTSP に、 q_i^j を配分する。ここに示した手法は、最も確実であるが、計算時間がかかる方法であると考えられ、今後、この計算法の効率化も検討したい。

5. 結語と今後の展開

本研究では、まず混雑課金政策の最近の研究展開をレビューしたのちに、ピーク・ロード・デポジット制度という新たなプライシング施策を提案し、その評価モデルの一例を示した。この制度は、ピーク時の料金値上げ分を利用者にデポジットとして付与し、その額は、翌日以降のオフ・ピーク利用時の料金割引に使用できるとするものである。

現時点で判明している、この制度の問題点としては、毎日オフ・ピーク時のみを利用して利用者が、この制度の導入により、週に数日ピーク時に転換して、デポジットの恩恵を得ようとしてしまう可能性があげられる。これは、パーク・アンド・ライド駐車場を整備した場合に、今まで公共交通のみで移動していた利用者まで、一部、自動車を利用するようになる、といった現象と類似した問題といえよう。

また、このデポジットは、航空会社のマイレージに代表されるポイント制度とは性質が異なる点にも、制度設計上注意が必要である。すなわち、デポジットを貯めること自体に、利用者がおトク感などの価値を見出してしまうと、ピーク時の利用が増えてしまうという問題につながる。この問題は、デポジットした料金は、使用時には割引あるいは逆に割引増しするなどの設計で、一部対応可能と思われる。また、本稿では、デポジットは、翌日以降のオフ・ピーク割引にのみ使えらと設定したが、同じ交通機関のオフ・ピーク時の利用にとどまらず、代替公共交通機関の料金への充当許可の検討も興味深い。

さらに、本研究で示した1週間単位の時空間ネットワーク均衡モデルを下位問題として、上位問題を総交通費用最小化などに設定した、二段階最適化問題への展開も有用であろう。既存の混雑課金分析の知見を活かし、ピーク時の割増料金レベル及びデポジットの返金額の設定

の最適化問題が方法論の拡張としてありうる。

このシステムは、本稿の最初に紹介した通行権取引制度などと異なり、ETC や IC カード型乗車券の仕組みを少し改良すれば、既存の交通施設を利用しながら、すぐに実装できる点が特徴である。機会があれば、実用化の実験、利用者の受容性の分析および問題点・課題の抽出などに取り組んでいきたい。

参考文献

- 1) Santos, G. and Rojey, L.: Distributional impacts of road pricing: The truth behind the myth, *Transportation*, Vol. 31, No. 1, pp. 21-42, 2004.
- 2) Eliasson, J. and Mattsson, L.G.: Equity effects of congestion pricing, *Transportation Research Part A*, Vol. 40, Issue 7, pp.602-620, 2006.
- 3) Bureau, B. and Glachant, M.: Distributional effects of road pricing: Assessment of nine scenarios for Paris, *Transportation Research Part A*, in press, doi:10.1016/j.tra.2008.02.001
- 4) DeCorla-Souza, P.: FAIR lanes: A new approach to managing traffic congestion, *ITS Quarterly*, 8, 5-13, 2000.
- 5) Daganzo, C. F.: A pareto optimum congestion reduction scheme, *Transportation Research Part B*, Vol. 29, Issue 2, pp. 139-154, 1995.
- 6) Daganzo, C.F. and Gracia, R.C.: A pareto improving strategy for the time-dependent morning commuter problem, *Transportation Science*, Vol. 34, No.3, pp. 303-310, 2000.
- 7) 早崎俊和, 赤松隆: 混雑料金と割り当て制の合成スキームによるパレート改善, MPEC 研究会 編: MPEC にもとづく交通・地域政策分析, 中京大学経済学部附属経済研究所研究叢書, 第9輯, 第3章, pp. 37-59, 2003.
- 8) Nakamura, K. and Kockelman, K. M.: Congestion pricing and roadspace rationing: an application to the San Francisco Bay Bridge corridor, *Transportation Research Part A*, Vol. 36, Issue 5, pp. 403-417, 2002.
- 9) Kalmanje, S. and Kockelman, K.M.: Credit-based congestion pricing: travel, land value and welfare impacts, *Transportation Research Record*, 1864, pp. 45-53, 2004.
- 10) Kockelman, K. M. and Kalmanje, S.: Credit-based congestion pricing: A policy proposal and the public's response, *Transportation Research Part A*, Vol. 39, Issues 7-9, pp. 671-690, 2005.
- 11) Gulipalli, P. K. and Kockelman, K.M.: Credit-based congestion pricing: A Dallas-Fort Worth application, *Transport Policy*, Vol. 15, Issue 1, pp. 23-32, 2008.
- 12) 安藤章, 森川高行, 三輪富生, 山本俊行: ロードプライシングの受容意識構造を踏まえた駐車デポジットシステム (PDS) の有効性の検証, 都市計画学会論文集, No.42-3, pp.907-912, 2007.
- 13) 金森亮, 森川高行, 山本俊行, 三輪富生: 時間帯別・確率的統合均衡モデルを用いた駐車デポジットシステムの導入評価, 土木計画学研究・論文集, Vol.24, No.4, pp.915-926, 2007.
- 14) 赤松隆, 佐藤慎太郎, Long, N.X.: 時間帯別ボトルネック通行権取引制度に関する研究, 土木学会論文集 D, Vol. 62, No. 4, pp. 605-620, 2006.
- 15) 赤松隆: 一般ネットワークにおけるボトルネック通行権取引制度, 土木学会論文集 D, Vol. 63, No. 3, pp.287-301, 2007.
- 16) 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, pp.1-8, 2006.
- 17) Maruyama, T. and Sumalee, A.: Efficiency and equity comparison of cordon- and area-based road pricing schemes using a trip-chain equilibrium model, *Transportation Research Part A*, Vol. 41, Issue 7, pp. 655-671, 2007.
- 18) 円山琢也: エリア・プライシング政策の評価技術, 都市計画, 264, pp. 42-47, 2006.