

都市構造と次善混雑課金*

Urban Structure and Second-best Congestion Pricing*

円山 琢也**

By Takuya MARUYAMA**

1. はじめに

道路混雑課金 (ロード・プライシング) 政策の分析において、一部のリンク・一部の地域のみで料金が徴収可能とするセカンド・ベスト (次善) 課金は、理論的にも実務への応用の観点でも重要な研究課題の一つである^{1), 2)}。本研究は、都市空間構造が次善混雑課金の設定に与える影響を明らかにすることを最終的な目標としている。まず、既存のコードン型次善課金を再分類し、流入のたびに必ず課金されるのか、1日あたりの課金回数の上限が決まっているのか、流入だけでなく流出時も課金されるのかを区別する分析方法論を提示する。この方法論を用いて、次善課金の特性を実都市のネットワーク上で分析した結果を示す。また、最近都市解析の分野で提案された三重制約型エントロピーモデルを筆者が構築しているトリップ・チェーン (以下TC) 型均衡モデルと統合した新たなネットワーク均衡モデルを提示し、今後の研究展開例を考えたい。

2. 4つの次善課金

(1) 概念

実都市圏の都心部への導入を考えた場合、現実的な課金政策としては、課金区域への流入の都度課金されるコードン課金と、課金区域内の走行に対し1日単位で課金されるエリア課金の2つの次善課金政策が代表的である。筆者は既に先行研究^{3), 4), 5)}でTC型ネットワーク均衡モデルによるこれら2つの次善課金の比較分析を示している。

本章では、都心部の混雑緩和を目的とした次善の混雑課金は、より厳密には4つに区分できることを指摘する。4つの政策とは、課金対象地域を設定し、

- ① その区域に流入する度に課金される流入時コードン課金、
- ② 流入時だけでなく、区域内から流出する際にも課金される流出時コードン課金、
- ③ 課金の総額の上限が決まっている上限付コードン課金、

- ④ 区域内の走行に対して1日単位で課金されるエリア課金、
- である。

図-1で説明すると、①の流入時コードン課金は、課金区域に流入するときに課金されるが、区域内で移動が完結する場合や、区域内から外へ向かう移動については課金されない。②の流出時コードンは、流入時のみならず、流出時にも課金される。区域を通過する交通は、2回課金される可能性もある。内々で完結する移動は課金されない。③の上限ありコードン課金は、区域を横断するたびに課金されるが、その課金総額の上限が定められている政策である。④のエリア課金は、区域内の走行に1日単位で課金がなされる。一旦支払えば、区域内の走行は自由になるが、区域内で完結する移動も課金の対象になる。

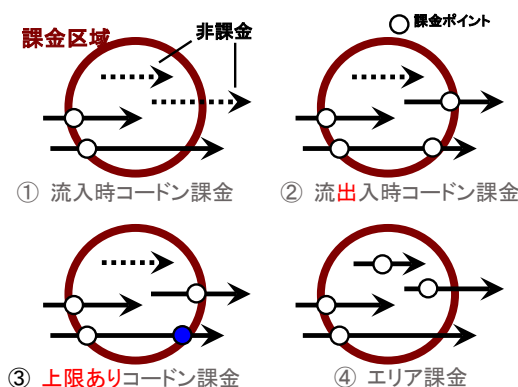


図-1 多様なコードン課金とエリア課金 (a)

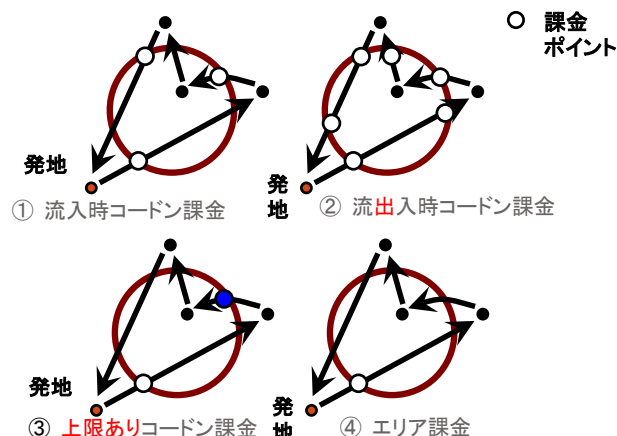


図-2 多様なコードン課金とエリア課金 (b)

*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)

図-2の例は、貨物車の配送など、1日で複数のトリップが行われ、TCで考える例である。①、②の課金方式は、それぞれ3回、6回の課金の可能性が出てくる。③の上限あり課金では、上限の設定次第で、支払う額が異なる。一方、④のエリア課金は、1回のみ支払いとなる。

交通ネットワーク・モデルの視点で考えると、①、②の課金方式は、区域境界を横断するリンクに課金抵抗を負荷すればよく、リンク加法型コストモデルとして表現できる。これは通常の配分ソフトで計算は容易である。一方、③、④の課金方式では、区域境界を横断するリンクで課金が発生するかどうかは、それまでの利用者の行動軌跡に依存するため、単純なモデルでは表現できない。リンク非加法型のモデルが必要となり、これは後述される。

(2) 現実都市の事例

現実課金政策を導入している都市でも、これらのうちどれを採用するのか違いが生じている(表-1)。

表-1 現実都市の混雑課金の比較

都市名	シンガポール	オスロ	ロンドン	ストックホルム
課金方式	流入トリップあたり €0.2; 変動課金, 月金 7.30-19.00	流入トリップあたり €1.5; 均一課金	一日あたり £8-10, 均一課金, 月金 7.00-18.30	流出入トリップあたり €1-2 変動課金 月金
年間収入	€40m	€50m	€22m (net)	€85m

出典: (EIU, 2006) <http://www.vtpi.org/tm/tm35.htm> を一部改変

シンガポールの現在のElectronic Road Pricingは、①流入時コードン方式であるが、導入当初のArea Licensing Schemeは、④のエリア型課金といえる。オスロなどの北欧の都市は、①流入時コードンといえよう。ロンドンには、④のエリア型課金である。ストックホルムは、基本的に②の流出入コードン(一回あたり10,15,20 SEK スウェーデン・クローナ)であるが、支払い上限がSEK 60となっている(Eliasson *et al.*⁶⁾)ので、③の上限付コードンとも言える。

これらの違いが適切なのか、都市の特性にあっているのかどうかの精査が必要である。また、新たな都市への課金政策の導入を考える際に、どの方式が望ましいのかという情報も求められる。したがって、これら4つの課金の差を的確に分析できる方法論が求められている。以降、そのための方法論の一つを提案し、実都市圏を対象とした分析の基礎的な結果を示していく。

3. トリップ・チェーン型ネットワーク均衡モデルの改良

本研究で扱う4つの次善課金も、基本的に、筆者らによる既存研究のモデルが適用できる。ただし、アルゴリズムを少し改良する必要がある。これらの点を中心に説明をしておこう。

(1) 定式化

筆者らの先行研究のモデルは、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。

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

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。

(2) アルゴリズムの改良

通常の Beckmann *et al.*モデルと同様に、部分線形化法が利用でき、アルゴリズムの流れは以下ようになる。

Step 0: (初期化) 初期実行可能解 $\mathbf{X}^{(1)} = \{\mathbf{x}^{(1)}, \mathbf{d}^{(1)}, \mathbf{h}^{(1)}\}$ を与え、 $l=1$ とおく。

Step 1: (リンクコスト更新) $t_a = t_a(x_a^{(l)})$, $\forall a$ を計算する。

Step 2: (方向探索)

部分線形化問題を解き補助解 $\mathbf{Y} = \{\mathbf{x}^{sub}, \mathbf{d}^{sub}, \mathbf{h}^{sub}\}$ を得る。

Step 3: (一次元探索) 以下の一次元探索を解いて を

決定.

$\min. Z(\mathbf{X}^{(l)} + \alpha(\mathbf{Y} - \mathbf{X}^{(l)})), \text{ subject to } 0 \leq \alpha \leq 1.$

Step 4: (解の改訂) $\mathbf{X}^{(l+1)} = \mathbf{X}^{(l)} + \alpha(\mathbf{Y} - \mathbf{X}^{(l)})$ を計算.

Step 5: (収束判定) 収束していれば終了, そうでなければ, $l := l+1$ として **Step 1** へ.

ここで, **Step 2** において最小 TC 経路を探索する必要がある(**Step 2.2** とする). 非リンク加法型の課金が課されている場合, これには工夫が必要となる. ④ エリア型課金は, 単一の課金区域を対象とした場合, 課金額はゼロかある一定額の 2 種類のみとなる. したがって, 課金パターン (総支払い額によって TC 経路を分類する変数) p の数 P は, 2 種類となることを利用すると, 大規模ネットワークでも計算は可能となる^{3),4)}.

一方, ③ 上限付コードン課金は, 一般的には, 課金額は n 種類となり, 課金パターン p の数も n 種類となる. この場合, 大規模ネットワークでも計算可能とする扱いは必ずしも容易ではない.

ここで, 一般の場合の解を求めることは, ひとまず目標とせず, 課金システムが, ある限定的な条件下では, 計算可能であることを示す. その条件とは, 課金地域がひとつで, ③ 上限付課金の上限が, コードン一回の課金額 τ の 2 倍 (以下) の場合である. このとき, **Step 2.2** を, 次のように変更する.

Step 2.2.1: 課金区域に課金額 τ のエリア課金が設定されたとして, その課金額を支払わない, TC 最短経路とそのときの TC 最小所要コスト TC_1 を求める.

Step 2.2.2: 課金区域に課金額 τ のエリア課金が設定されたとして, その課金額を支払う時の, TC 最短経路とそのときの TC 最小所要コスト TC_2 を求める.

Step 2.2.3: 課金区域に課金額 τ の流入時コードン課金が設定されたとして, その課金額を支払わない時の, TC 最短経路とそのときの TC 最小所要コスト TC_3 を求める.

Step 2.2.4: 課金区域に課金額 τ の流入時コードン課金が設定されたとして, その課金額を支払わない時の, TC 最短経路とそのときの TC 最小所要コスト TC_4 を求める.

Step 2.2.5: 各 TC について, 最小一般化コストをもたらす課金パターン $TC = \min_{i=1,2,3,4} (TC_i)$ を調べる.

この計算法は, ③ の上限付コードン課金は, 上限に達する額を支払えば, その後は自由に走行でき, 見かけ上, ④ エリア課金とみなせる, という性質を利用している.

4. 実都市圏への適用

以上で構築されたモデルを用いて実都市圏での分析を

進めていこう. 今回, ③ の上限付課金における上限額は, 上述したように, 流入時コードン課金の 2 倍と設定した. まず, Maruyama and Sumalee⁴⁾ と同一のパラメータなどの条件の下で宇都宮都市圏に適用した.

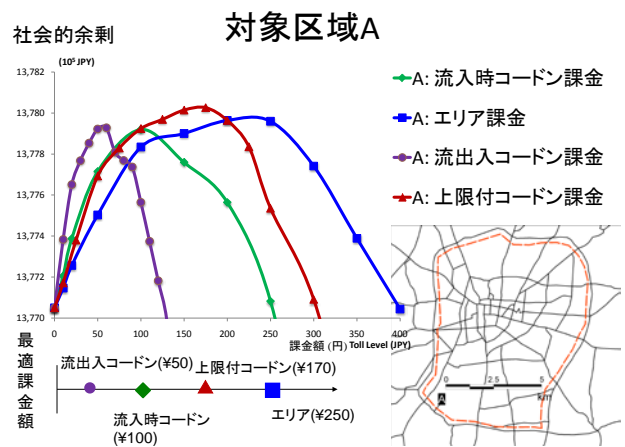


図-3 4つの次善課金による社会的余剰の変化

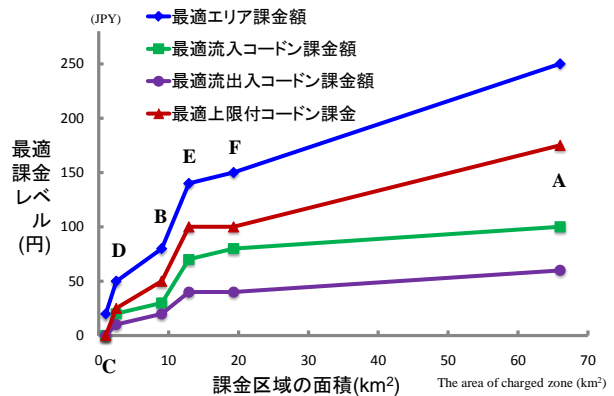


図-4 4つの次善課金の最適課金レベルの変化

課金区域 A を対象とした結果を図-3 に示す. ① 流入時コードンと④ エリア課金による社会的余剰の曲線は, 既存研究⁴⁾ のものと同一である. それらを比較して, まず, ② 流入時コードンによる曲線は, ① の流入時コードンの曲線を横方向におよそ半分に圧縮した形状となっている. これは, 大抵の TC は, 往復で 2 回 課金区域を横切るため, TC 全体で考えれば, 流入時コードンは, 流入時コードンの半額で, 同じ総課金額に相当することを表現している. また, ③ の上限付コードンの社会的余剰の曲線は, 課金額が少ない場合は, ① 流入時コードンに近い形状で, 課金額が増えるにしたがって ④ エリア課金に類似した形状になっている. この結果は, 上限付コードン課金の一つの特徴を反映していると考えられる.

図-4 は, これらの結果を, 課金区域の面積と最適料金レベルという視点でまとめている. 今回事例では, 次善の最適料金レベルは, どの区域でも,

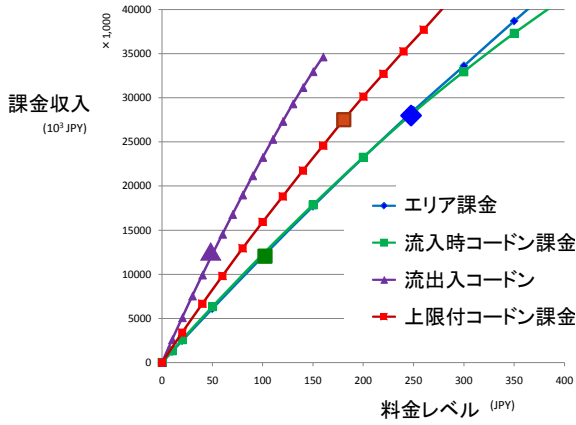


図-5 4つの次善課金による課金収入の変化(区域A)
注) 大きなシンボルは、それぞれの最適課金レベルを示す。

④ エリア課金 > ③ 上限コードン課金

> ① 流入コードン課金 > ② 流出コードン課金の順であることが示されている。また、課金区域の面積増加につれて、最適課金レベルはどの課金方式でも増加することが示されている。

図-5には、課金レベルを変化させたときの課金収入の変化を示している。この図からは、同じ課金レベル設定であれば、課金収入は、

② 流出コードン課金 > ③ 上限付きコードン課金 > ① 流入コードン課金 ≒ ④ エリア課金

の順であることが分かる。また、最適課金レベルでの課金収入は、

③ 最適上限コードン課金 ≒ ④ 最適エリア課金 >

① 最適流入コードン課金 ≒ ② 流出コードン課金となっていることが読み取れる。

5. 三重制約型トリップ・チェーン均衡モデル

TCを考慮したネットワーク均衡モデルは、筆者ら^{7),3)}のものを含めて、様々なもの⁸⁾が提案・構築されている。ここで、本研究の動機に対応した分析手法として、都市内の交通需要・人口分布などから簡潔にTC行動を表現しうる新たなモデルを提案しておきたい。これは、都市解析の分野で提案された三重制約型エントロピーモデル⁹⁾を、Boyce¹⁰⁾によるモデルも一部参考にして、非加法コストを考慮した均衡モデルに拡張したものである。

発ゾーン p 、経由ゾーン q 、着ゾーン r のTC交通量を h_{pqr} として、ゾーン p からの発生交通量 O_p 、ゾーン q への立ち寄り交通量 M_q 、ゾーン r への集中交通量 D_r が所与としよう。以下の最適化問題を考える。

$$\min Z_2(\mathbf{x}(\mathbf{g}), \mathbf{h}) = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega + \sum_{p,q,r} \sum_{m \in M} \tau g_{pqr}^m + \frac{1}{\theta} \sum_{p,q,r} h_{pqr} (\ln h_{pqr} - 1) \quad (5)$$

subject to

$$\sum_{qr} h_{pqr} = O_p, \quad \forall p, \quad (6)$$

$$\sum_{pr} h_{pqr} = M_q, \quad \forall q, \quad (7)$$

$$\sum_{pq} h_{pqr} = D_r, \quad \forall r, \quad (8)$$

$$h_{pqr} = \sum_m g_{pqr}^m, \quad \forall pqr, \quad (9)$$

and (3), (4)

θ はパラメータとする。この最適化問題の解は、

$$h_{pqr} = A_p O_p E_q M_q B_r D_r \exp(-\theta c_{pqr}), \quad (10)$$

となる。ただし、

$$A_p = \left(\sum_{q,r} E_q M_q B_r D_r \exp(-\theta c_{pqr}) \right)^{-1} \quad (11)$$

$$E_q = \left(\sum_{p,r} A_p O_p B_r D_r \exp(-\theta c_{pqr}) \right)^{-1} \quad (12)$$

$$B_r = \left(\sum_{p,q} A_p O_p E_q M_q \exp(-\theta c_{pqr}) \right)^{-1} \quad (13)$$

となる Balancing Factor であり、 c_{pqr} は、非加法コストとなりうる課金抵抗を含む TC 交通費用である。

この新たなモデルも用いた都市構造と次善課金の関係精査を今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 円山琢也: 都市域における混雑課金の政策分析: レビューと展望, 土木計画学研究・講演集, Vol. 38, CD-ROM, 2008.
- 2) Tsekeris, T. and VoB, S.: Design and evaluation of road pricing: state-of-the-art and methodological advances, *Nemomics*, in press. <http://dx.doi.org/10.1007/s11066-008-9024-z>
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) Eliasson, J., Hultkrantz, L., Nerhagen, L. and Rosqvist, L. S.: The Stockholm congestion - charging trial 2006: Overview of effects, *Transportation Research Part A*, Vol. 43, Issue 3, pp. 240-250, 2009.
- 7) Maruyama, T. and Harata, N.: Incorporating trip chaining behavior in network equilibrium analysis, *Transportation Research Record*, No. 1921, pp. 11-18, 2005.
- 8) 金森亮, 三輪富生, 森川高行: 活動選択を考慮した時間帯別・統合均衡モデルの構築と適用, 土木計画学研究・論文集, Vol.24(4), pp. 915-926, 2007.
- 9) 栗田 治, 本間裕大: 立ち寄りを伴うトリップのための空間的相互作用モデル—ウィルソンのエントロピー最大化法の一般化とその応用—, 都市計画論文集, No. 40, pp.109-114, 2005.
- 10) Boyce, D.: Urban Travel Forecasting Course Notes, 5.5 Extension to Tours, Northwestern University, 2007. <http://www.civil.northwestern.edu/people/boyce.html>