

段階型課金の適用される車線割合が 時間帯とともに変化する混雑課金制度 —出発時刻選択均衡モデルによる分析—

坂井 勝哉¹・朝倉 康夫²

¹正会員 神戸大学学術研究員 工学研究科 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1)

E-mail:k.sakai@port.kobe-u.ac.jp

²正会員 東京工業大学教授 環境・社会理工学院 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1-M1-20)

E-mail:asakura@plan.cv.titech.ac.jp

本稿では、朝の通勤混雑をモデル化した出発時刻選択均衡問題に基づいて、一定の混雑料金が一部車線のみ課され、その車線割合を時間帯毎に変化させる混雑課金制度を考える。本制度の利点は、道路利用者が「混雑料金を支払う」または「混雑料金を支払わない(混雑している車線)」を選択できることにある。

本制度適用前後での均衡状態を求め、それらを比較することにより、道路利用者の出発時刻選択へ与える影響を明らかにした。具体的には、道路利用者の時間価値とスケジュール柔軟性に異質性があることを想定し、全ての車線が課金される段階型課金制度(いわゆる step toll)との比較を行った。その結果、本研究の制度は、社会的総費用を減少させる効果は小さい反面、金銭的弱者の費用負担増加を抑えられることがわかった。

Key Words: Step toll, Pareto improvement, Congestion pricing, Departure time choice equilibrium

1. 序論

混雑課金とは、需要ピーク時間帯の通行に対して料金を課することである。これは、様々な交通マネジメント施策のなかでも、金銭的な観点から社会全体を最適状態にできるポテンシャルがあるという利点がある。その反面、問題をお金で解決する方法であるため、例えば道路利用者間に所得格差がある場合には個人にとって必ずしも良い施策とは言えない。出発時刻選択均衡問題¹⁾に基づく分析として、たとえば、Amott et al.(1994)²⁾は時間価値の低い道路利用者と高い道路利用者が混在すれば、時間価値の低い道路利用者の通勤費用は増加し、時間価値の高い道路利用者の通勤費用は減少することを示している。このことは、金銭的弱者から強者への所得移転が発生していることを意味している。この所得移転を問題意識とした研究として、坂井ら³⁾は少なくともどの道路利用者も費用が増加しないという条件(パレート改善)を達成しうる混雑課金制度について分析している。

本研究の目的は、混雑料金が一部車線のみ課され、その車線割合が時間帯によって変化する混雑課金制度

(以下、本研究の制度とよぶ)が、道路利用者の選択行動と通勤費用の変化を分析することである。具体的には、段階型料金制度との比較を行い、金銭的弱者の費用負担と社会的効率性の観点から分析を行う。本研究の制度の利点は、道路利用者に「混雑料金を支払う」または「混雑料金を支払わない(混雑している車線)」という選択の自由を残すことができる点にある。

本稿の構成は次の通りである。第1章では背景と目的を述べた。第2章では対象とする問題について記述する。第3章では、課金制度を適用した場合の均衡解の特性を解析的に説明する。第4章では数値的な解を段階型料金制度と比較することにより、本課金制度の道路利用者へ与える影響について分析する。最後に第5章で結論を述べる。

2. 課金モデル

この章では本研究で分析する課金モデルについて説明する。まず、第1節で問題の仮定を述べ、第2節で定式

化を行う。第 3 節では数値的な解法を示す。

(1) 問題設定

1 起点 1 終点 1 ボトルネックのネットワークにおける出発時刻選択均衡問題を考える。ピーク時間帯に階段状に混雑料金が変化する課金制度で遅着を考慮する場合には、均衡状態において無限大の流入が発生するという問題⁹⁾があるため、本研究では遅着を考えずに早着のみ考える。ボトルネック容量を μ とする。本研究では High Occupancy Toll (HOT) レーンのように、一部車線に混雑料金を課する制度を考える。段階型課金制度では、すべての車線が課金対象であり、ピーク時間帯になるにつれて課金額が高くなる制度である。一方、本研究の制度は、課金額は時間帯によらず一定であるものの、一部の車線のみが課金対象となり、ピーク時間帯になるにつれて、課金される車線割合が多くなる制度である。これらの違いを図 1、図 2 に示す。横軸に時刻、縦軸に課金される車線の割合を取る。図中の黒色が濃いほど課金額が高いことを意味している。

道路利用者の通勤に関する一般化費用を

$$TC_i(r,t) = \alpha_i w(r,t) + \beta_i(t_0 - t) + p(t) + \text{const.} \quad (1)$$

と仮定する。ここに、 TC は通勤費用、 i は道路利用者の異質性グループ、 r は課金または非課金車線、 t は時刻、 α は時間価値、 w はボトルネックでの待ち時間、 β は早着の限界費用、 p は課金額である。出発時刻選択問題では、時刻による変動項のみを考慮するため、以下では、定数項を省略して記述する。なお、道路利用者の異質性とは、時間価値 α および早着の限界費用 β が異なることを言い、異質性グループとはそれらの値が共通する利用者集団のことを指す。

(2) 出発時刻選択均衡問題の定式化

前節で述べた仮定に基づく出発時刻選択均衡問題は以下のように定式化できる。

a) 出発時刻選択および経路選択均衡条件

Wardrop の第一原理⁹⁾に基づく均衡の考え方であり、需要がある場合には通勤の一般化費用が均衡費用に等しく、需要がない場合には均衡費用以上であるという条件である。需要をボトルネック通過流率で表すと、この条件は以下のよう

$$\begin{cases} TC_i(r,t) \equiv \rho_i & \text{if } q_i(r,t) > 0 \\ TC_i(r,t) \geq \rho_i & \text{if } q_i(r,t) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

ここに、 ρ は均衡費用、 q はボトルネック通過流率である。

b) ボトルネック容量制約

単に流率はボトルネック容量以下でなければならない

という条件であるが、ボトルネック遅れ時間との関連性を付加して表すと、遅れ時間が発生している場合には容量がすべて使われており、遅れ時間が発生していない場合には

$$\begin{cases} \sum_r \sum_t q_i(r,t) = \mu & \text{if } w(r,t) > 0 \\ \sum_r \sum_t q_i(r,t) \leq \mu_r(t) & \text{if } w(r,t) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\sum_r \mu_r(t) = \mu \quad (4)$$

ここに、 $\mu_r(t)$ は時刻 t に課金・非課金車線へ割り当てられるボトルネック容量である。

c) 保存則

車両が突然出現または消滅しない条件であり、

$$\sum_r \sum_t q_i(r,t) = Q_i \quad (5)$$

である。ここに、 Q_i は利用者グループごとの総需要であり、与件である。

d) 非負制約

流率はゼロまたは正の値のみ取りうるので、

$$q_i(r,t) \geq 0 \quad (6)$$

である。

(3) 等価な最適化問題

前節で定式化された均衡問題を数値的に求められるよう、等価な最適化問題として記述する。井料ら(2005)⁷⁾は

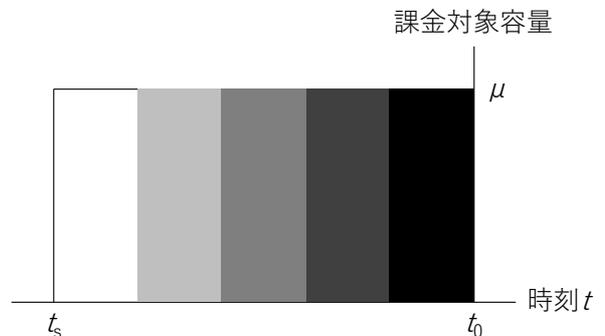


図 1 段階型料金制度

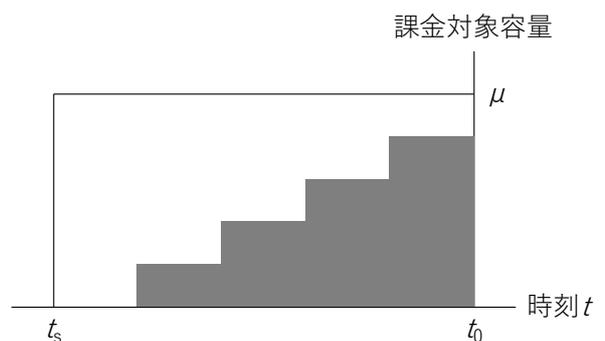


図 2 本研究で提案する制度

均衡問題と等価な最適化問題を定式化している。その手法は、複数経路の場合にも同様に記述することができ、本研究の問題にも適用可能である。いま、以下の最適化問題を考える。

$$\min_{\{q_i(r,t)\}} \sum_i \sum_r \sum_t \frac{\beta_i s(t) + p(t)}{\alpha_i} q_i(\mathbf{x}, t) \quad (7)$$

$$\sum_r \mu_i(t) = \mu$$

$$\sum \sum q_i(r,t) = Q_i \quad (\mathbf{y})$$

$$q_i(r,t) \geq 0 \quad (8)$$

証明は省略するが、この最適化問題の KKT 条件は、前節の均衡条件と等価であることから、この問題の解が前節の均衡問題の解と等価であることがわかる。なお、Lagrange 乗数 \mathbf{x}, \mathbf{y} はそれぞれ「ボトルネックでの遅れ時間」と「ボトルネック遅れ時間の単位に換算された均衡費用」に対応している。

3. 2 グループの道路利用者による定性的分析

本研究で取り扱う課金制度の変数は p と $\mu(t)$ であり、課金額、課金車線割合、課金開始時刻の 3 つを決めることに他ならない。本章では 1 段階の課金制度において 2 グループの道路利用者を想定し、課金額が均衡解へ与える影響について整理する。

(1) 仮定

Amott et al. (1994)³⁾の研究に倣い 2 種類の労働者、white-color と blue-color の 2 グループの道路利用者を想定する。ボトルネック容量 μ に対して各グループの通勤者を $N/2$ 人とし、全員が同一の希望到着時刻 t_0 を持つとする。white-color の通勤費用に関するパラメータ α_1, β_1 と blue-color のそれら α_2, β_2 との関係を、

$$\alpha_1 > \alpha_2 \quad (9)$$

$$\beta_1 < \beta_2 \quad (10)$$

と仮定する。以上の仮定より

$$\frac{\beta_1}{\alpha_1} < \frac{\beta_2}{\alpha_2} \quad (11)$$

であるので、課金されない場合には、図 3 のように、white-color は希望到着時刻から遠い時間帯、blue-color は希望到着時刻に近い時間帯にそれぞれ到着する。

(2) 課金額 p による均衡状態の変化

課金額の変動による影響を分析するため、課金車線割合は 50% とし、流入開始時刻 t_s と終了時刻 t_0 との中央の時刻に課金を開始することを考える。このときの均衡状態を図 4 に示す。段階型料金が課される時刻では、料金支払い分と等価な待ち時間分が減少する。その待ち時間減少量について考えると、 $\alpha_1 > \alpha_2$ であるため、white-color にとっての待ち時間減少分のほうが blue-color にとってのそれよりも小さい。したがって、課金直後には white-color が到着することになる。なお、時刻 $(t_s+t_0)/2$ における非課金車線と課金車線の遅れ時間の差は p/α_1 となる。その結果、blue-color の到着時間帯幅が大きくなる。そのこ

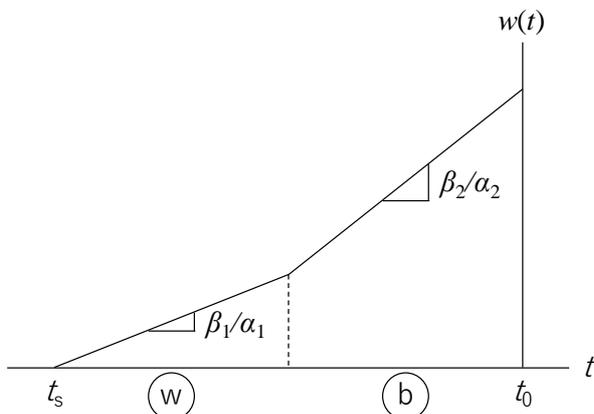


図 3 非課金時の均衡状態

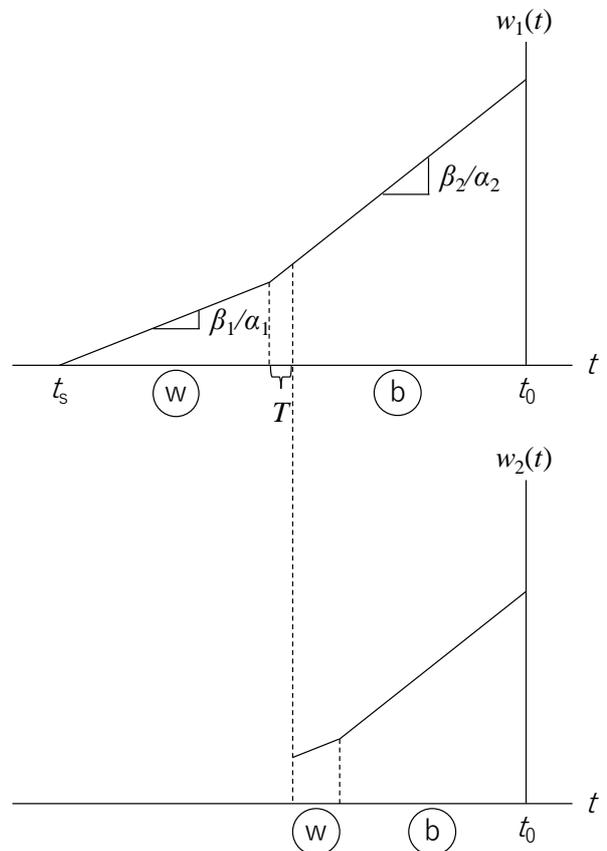


図 4 課金時の均衡状態

とによる均衡費用の増分は、スケジュール費用の増加分から待ち時間の減少分を差し引いた値であり、到着時間帯増加幅 T を用いて

$$\left(\beta_2 - \frac{\alpha_2 \beta_1}{\alpha_1} \right) T \tag{12}$$

と記述できる。式(11)より、カッコ内が正であるため、blue-color の費用は増加することがわかる。なお、 T は、課金額 p の関数であり、

$$T = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 \beta_2 - \alpha_2 \beta_1} p \tag{13}$$

である。次に、white-color の費用変化について考える。課金が行われた場合でも、非課金車線で初めに到着する利用者の費用は変化しないので、white-color の均衡費用は変化しないことがわかる。

本研究の制度を適用した結果、blue-color の均衡費用を増大させ、パレート改善は達成できないが、半分の車線割合のみに課金をを行っているため、均衡費用の増大量が半分に抑えられる。また、White-color の均衡費用については変化せず、金銭的強者を優遇する制度にはなっていないことがわかる。

4. 数値解による分析

この章では、段階型料金制度と本研究の制度との違いについて数値解に基づく比較を行う。第 1 節では計算の入力値について述べ、第 2・3 節ではそれぞれ段階型料金制度・本研究の制度を適用した場合の均衡状態における各道路利用者の均衡費用を示す。第 4 節では、段階型料金制度下で実現する均衡と本研究の制度下で実現する均衡との比較を行い、混雑課金制度としての本研究の制度の特徴を考察する。

(1) 入力値

時間価値とスケジュール柔軟性について各々 2 種類の値を持つ道路利用者を想定し、 $2 \times 2 = 4$ グループの道路利用者を想定する。そのパラメータ値は、表-1 で示す通りとする。そのほかの入力値に関しては、以下の通りとする。

- ボトルネック容量 μ : 90 台/分

表-1 利用者間の異質性に関する入力値

	時間価値 α (円/分)	早着限界費用 β (円/分)
Group 1	100	5
Group 2	100	20
Group 3	25	5
Group 4	25	20

- 希望到着時刻 t : 9:00
- 道路利用者の総需要: 2500 台/Group

以上の入力値に基づいて、1 分刻みで時間帯を離散化し、出発時刻選択均衡の数値解を求める。

(2) 段階型料金制度の影響分析

本節では、段階型課金制度の影響を分析する。段階型課金制度は具体的に、以下のような設定で課金することを考える。

- 第 0 課金時間帯 (7:00~8:00) : この時間帯は非課金とする。
- 第 1 課金時間帯 (8:01~8:30) : この時間帯の課金額を p_1 とする。
- 第 2 課金時間帯 (8:31~9:00) : この時間帯の課金額を第 1 課金時間帯の課金額の 2 倍とする。すなわち、課金額は $2p_1$ とする。

課金額 p_1 を 0 円から 1000 円まで変化させた場合の各道路利用者グループの費用変化を図 5 に示す。課金額 p_1 が約 150 円以下の時には、課金額が増加すると group2 (時間価値が高く、スケジュール制約が厳しい道路利用者) の均衡費用は減少する。課金額 p_1 が大きくなるにつれて、group4 (時間価値が低く、スケジュール制約が厳しい道路利用者、すなわち blue-color) の均衡費用は次第に増加する。課金額 p_1 が約 600 円を超えると全ての道路利用者の均衡費用が増加する。この原因は、課金額が高すぎるために、課金額が引き上げられる時刻の直後の時間帯に課金車線の容量が有効に使われないことにある。

(3) 本研究の課金制度の影響

本節では、本研究で提案する課金制度の影響を分析する。具体的に、以下のような設定で課金することを考える。

- 第 0 課金時間帯 (7:00~8:00) : この時間帯はすべての車線を非課金とする。
- 第 1 課金時間帯 (8:01~8:30) : この時間帯は 1/3 の車線割合を課金対象とし、課金額を p とする。

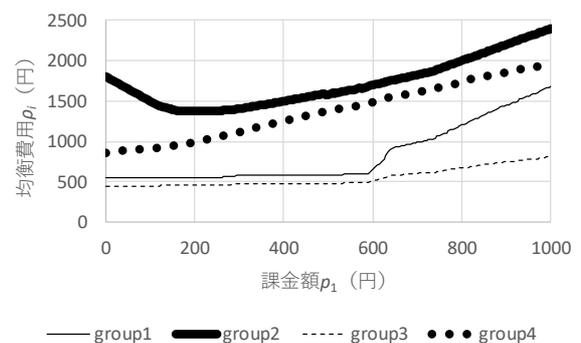


図 5 段階型料金制度の料金が均衡費用に及ぼす影響

- 第 2 課金時間帯 (8:31~9:00) : この時間帯は 2/3 の車線割合を課金対象とする. 課金額は第 1 課金時間帯と同様に p である.

課金額 p を 0 から 1000 まで変化させた場合の各道路利用者グループの費用変化を図 6 に示す. 段階型料金制度での結果と比較して, 異なるのは次の 2 点である.

- group2 の均衡費用は減少しない. このことは, 金銭的強者に有利な制度とはなっていないことを意味している.
- 課金額 p_1 が大きくなるにつれて, group4 の均衡費用は次第に増加するが, その程度は小さい. つまり, 道路利用者が課金・非課金を選択できる枠組みとなっていることにより, 金銭的弱者の費用増加が抑えられる.

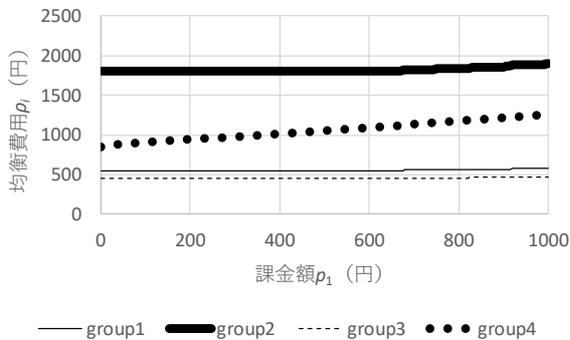


図 6 本研究の制度の料金が均衡費用に及ぼす影響

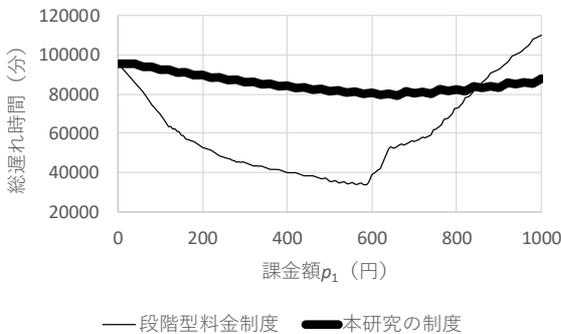


図 7 総遅れ時間の比較

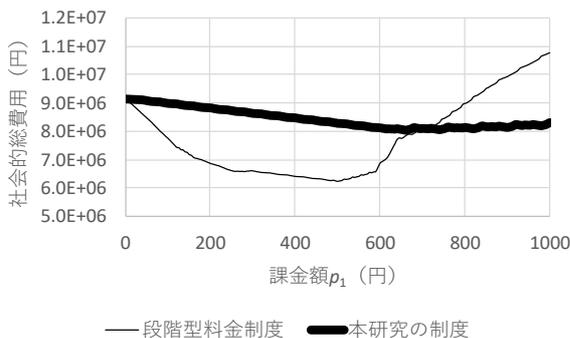


図 8 社会的総費用の比較

(4) 段階型料金制度との比較

課金による混雑の解消に関して, 段階型料金制度と本研究の制度との比較を行う. 図 7 は課金額に対する総遅れ時間の変化を示している. 段階型料金制度では 60% 以上の遅れ時間を削減できる一方で, 本研究の制度ではその削減量が 20% 以下にとどまっている.

図 8 は課金額に対する社会的総費用の変化を示している. 段階型料金制度では 30% 程度の費用が削減できる一方で, 本研究の制度ではその削減量が 10% 程度にとどまっている. 社会的総費用は遅れ時間の減少によって削減されるため, グラフの概形は遅れ時間の変化とほぼ同じである.

以上のことから, 本研究の制度は段階型料金制度に比して混雑緩和効果が小さいことがわかる. しかし, 前節で述べたように, 金銭的強者に利益を与えることなく, 金銭的弱者への費用負担が抑えられるという利点がある. このことは, 混雑課金制度の「公平性」と「効率性」とのトレードオフを考えると, 本研究の制度は効率的というよりは, より公平性の高い制度であるといえる.

5. 結論

本研究では, ある割合の車線に対して混雑料金が課され, その車線割合が時間帯に応じて変化するという課金制度について定式化を行った. また, 数値的解法に基づく段階型料金制度との比較を行った. その結果, パレート改善を達成できる枠組みではないものの, 段階型料金制度と比べて, 金銭的弱者の交通費用の増分を抑制できる制度であることが示された.

本研究で提案した制度は, 渋滞緩和の観点からはあまり有効ではない. その理由は, 混雑課金によってボトルネックでの待ち時間を解消させるためには, ピーク時間帯に“料金差”をつくる必要があるからである. 本研究の制度では, 一定の料金を設定しているため, 課金対象となる車線割合を変化させているものの, 1 段階の料金差分しか渋滞緩和効果が作用していない.

本研究では, 希望到着時刻を一定とした計算のみ行ったが, 第 2 章で示した均衡問題の定式化とその解法が一般的であることから, 希望到着時刻が分布している場合も分析が可能である.

参考文献

1) Vickrey, W. S. Congestion Theory and Transport Investment The American Economic Review, 1969, 59, 251-260.

- 2) Small, K. A. The Scheduling of Consumer Activities: Work Trips The American Economic Review, American Economic Association, 72, 467-479, 1982.
 - 3) Arnott, R. J., de Palma, A. and Lindsey, R., The Welfare Effects of Congestion Tolls with Heterogeneous Commuters. Journal of Transport Economics and Policy, University of Bath and The London School of Economics and Political Science, 28, 139-161, 1994.
 - 4) 坂井勝哉, 日下部貴彦, 朝倉康夫, ボトルネック通行権取引制度が利用者の効用に及ぼす影響とパレート改善—スケジュール制約と料金抵抗の異質性に着目して—, 土木学会論文集 D3(土木計画学), 72(5), I_607-I_616, 2016.
 - 5) Arnott, R., de Palma, A., and Lindsey, R., Economics of a bottleneck, Journal of Urban Economics, 27, 111-130, 1990.
 - 6) Wardrop, J. G., Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1, 325-362, 1952.
 - 7) 井料隆雅, 吉井稔雄, 朝倉康夫, 出発時刻選択問題の均衡状態に関する数理的解析, 土木学会論文集, 779, 105-118, 2005.
- (2017. ?? ?? 受付)

**A STEP TOLL SCHEME IN WHICH THE PROPORTION OF CHARGING LANES
CHANGES: ANALYSIS BASED ON DEPARTURE TIME CHOICE EQUILIBRIUM
MODEL**

Katsuya SAKAI and Yasuo ASAKRA