

## 代替ルートを考慮したロード・プライシングの分析

An Analysis of Road Pricing Considering an Alternative Route

05-09614 小嶋秀人 Shuto Kojima  
指導教員 日引聡 Adviser Akira Hibiki

### 1. 研究の背景と目的

現在、過剰な交通量によってもたらされる自動車混雑は、世界中の都市で大きな問題となっている。それは、混雑によって生じる時間の損失をはじめ、様々な経済的損失を発生させる要因となっている。交通量が社会的に最適な水準より過大になってしまうのは、道路利用者によって混雑という負の外部性が発生し、他の利用者の費用負担を増やしているからである。近年、このような混雑による問題を緩和するために注目されているのが、道路使用に対して課金を行う「ロード・プライシング」という政策手段である。課金技術の発達により、現実的な政策手段として注目されるようになり、海外の一部の都市で導入が始まっている。

ロード・プライシングにも様々な方式が存在するが、一定地域内に流入する交通に対して一律に課金を行うコードン・プライシングはその単純な方式から一般的である。Mun et al. (2003) では、このコードン・プライシングを実施する際にどのように課金額と課金範囲（コードンの位置）を決めるかを分析した。本論文は、Mun et al. (2003)を拡張し、ロード・プライシングの適用されない代替ルートが存在する場合について、セカンドベストな課金額とコードンの位置について明らかにすることを目的としている。

### 2. モデル

#### モデルの概要

都心を中心に同心円状に広がった都市を仮定する。都市内の各地点を表す属性は都心からの距離  $x$  であり、交通需要は各地点から都心を目的地としたもののみを考える。分析においては都市の端点から都心へ1本の道が通っていると仮定し、途中の各地点から交通が流入してくると考える。

逆需要関数は以下のように表される。ここでの価格は利用者が負担する費用を表し、 $q(x)$ は地点  $x$  での需要量である。

$$p(q(x)) = a - bq(x) \quad a, b > 0(\text{const}) \quad (1)$$

地点  $x$  から都心へ向かう際の費用は以下ようになる。

$$C(x) = \int_0^x t(Q(y)) dy \quad (2)$$

$Q(x)$ は地点  $x$  における交通量であり、以下のように表せる。

$$Q(x) = \int_x^L q(y) dy \quad (3)$$

ただし、 $L$ は都市の端点で、 $t(Q)$ は単位距離あたりの交通費を表し、以下のように定義できる。

$$t(Q(y)) = f + c(Q(y) - \bar{Q}) \quad (4)$$

$f$ は交通量に関係なくかかる一定の費用を表す定数であり、 $c$ は交通量が $\bar{Q}$ を超えた場合に発生する混雑によって、どれだけ費用が増えるかを表す係数である。

#### 代替ルートが存在しない場合

代替ルートが存在しない場合に、都心から  $x_m$  の距離にコードン・ラインを設定し、外側から流入する交通に対して、 $\tau$  の課金を行った場合の均衡条件は以下ようになる。コードンの外側では課金額  $\tau$  が私的費用に含まれるため、コードンの内側と需要関数が異なる。ただし、添字  $i$  および  $o$  はコードンの内側と外側を表す。

$$p(q_i(x)) = C(x) \quad (5a)$$

$$p(q_o(x)) = C(x) + \tau \quad (5b)$$

また、このときの社会的余剰は以下のように定義できる。

$$S = \int_0^{x_m} \left[ \int_0^{q_i(x)} p(q) dq - C(x)q_i(x) \right] dx + \int_{x_m}^L \left[ \int_0^{q_o(x)} p(q) dq - C(x)q_o(x) \right] dx \quad (6)$$

この社会的余剰を最大化するための  $x_m$  および  $\tau$  の1階条件を導き、整理すると以下ようになる。ただし、 $E(x)$  は式(9)のように定義され、限界外部費用を表す関数である。

$$\int_{x_m}^L (p(q_o(x)) - C(x)) \frac{\partial q_o(x)}{\partial x_m} dx + \int_0^{q_i(x_m)} p(q) dq - C(x_m)q_i(x_m) - \left[ \int_0^{q_o(x_m)} p(q) dq - C(x_m)q_o(x_m) \right] = \int_0^{x_m} E(x) \frac{\partial q_i(x)}{\partial x_m} dx + \int_{x_m}^L E(x) \frac{\partial q_o(x)}{\partial x_m} dx \quad (7)$$

$$\tau = \frac{\left( \int_0^{x_m} E(x) \frac{\partial q_i(x)}{\partial \tau} dx + \int_{x_m}^L E(x) \frac{\partial q_o(x)}{\partial \tau} dx \right)}{\int_{x_m}^L \frac{\partial q_o(x)}{\partial \tau} dx} \quad (8)$$

$$E(x) =$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_0^x t'(Q_i) Q_i(y) dy (0 < x \leq x_m) \\ \int_0^{x_m} t'(Q_i) Q_i(y) dy + \int_{x_m}^x t'(Q_o) Q_o(y) dy (x_m < x \leq L) \end{array} \right\} \quad (9)$$

#### 代替ルートが存在する場合

一般道路に対して並行して都心へ向かう有料道路（ルート2）が存在し、一般道路（ルート1）上でコードン・プライシングを行う場合を考える。ただし、ルート2はロード・プライシングの課金対象外であるとする。均衡の条件は以下ようになる。ただし、 $T$ はルート2で課金される一律の料金で、添字1,2はそれぞれルート1,2を表している。また、需要  $q(x)$ はルート1,2のどちらかに入るので式(10c)のようになる。

$$p(q_i(x)) = C_1(x) = C_2(x) + T \quad (10a)$$

$$p(q_o(x)) = C_1(x) + \tau = C_2(x) + T \quad (10b)$$

$$q(x) = q_1(x) + q_2(x) \quad (10c)$$

また、社会的余剰は以下のように定義できる。

$$S = \int_0^{x_m} \left[ \int_0^{q_i(x)} p(q) dq - \{C_1(x)q_{i1}(x) + C_2(x)q_{i2}(x)\} \right] dx + \int_{x_m}^L \left[ \int_0^{q_o(x)} p(q) dq - \{C_1(x)q_{o1}(x) + C_2(x)q_{o2}(x)\} \right] dx \quad (11)$$

$x_m$  の1階条件を導き、整理すると以下ようになる。

$$\begin{aligned} & \int_0^{q_i(x_m)} p(q) dq - \{C_1(x_m)q_{i1}(x_m) + C_2(x_m)q_{i2}(x_m)\} \\ & - \left[ \int_0^{q_o(x_m)} p(q) dq - \{C_1(x_m)q_{o1}(x_m) + C_2(x_m)q_{o2}(x_m)\} \right] \\ & + \int_{x_m}^L (p(q_{o1}(x)) - C_1(x)) \frac{\partial q_{o1}(x)}{\partial x_m} dx \\ & + \int_0^{x_m} (p(q_{i2}(x)) - C_2(x)) \frac{\partial q_{i2}(x)}{\partial x_m} dx \\ & + \int_{x_m}^L (p(q_{o2}(x)) - C_2(x)) \frac{\partial q_{o2}(x)}{\partial x_m} dx \\ & = \int_0^{x_m} \left[ E_1(x) \frac{\partial q_{i1}(x)}{\partial x_m} + E_2(x) \frac{\partial q_{i2}(x)}{\partial x_m} \right] dx \\ & + \int_{x_m}^L \left[ E_1(x) \frac{\partial q_{o1}(x)}{\partial x_m} + E_2(x) \frac{\partial q_{o2}(x)}{\partial x_m} \right] dx \quad (12) \end{aligned}$$

式(7)および(12)は  $x_m$  を変化させた際に各ルートにおいて道路利用の効用が費用を上回る分および境界上の利用者の純便益変化分の和と外部費用の変化分が等しくなるように、 $x_m$  を設定するべきであることを表している。

$\tau$  の1階条件を導き、整理すると以下ようになる。

$$\begin{aligned} \tau = & \left\{ \int_0^{x_m} E_1(x) \frac{\partial q_{i1}(x)}{\partial \tau} dx + \int_{x_m}^L E_1(x) \frac{\partial q_{o1}(x)}{\partial \tau} dx \right\} / \int_{x_m}^L \frac{\partial q_{o1}(x)}{\partial \tau} dx \\ & + \left\{ \int_0^{x_m} E_2(x) \frac{\partial q_{i2}(x)}{\partial \tau} dx + \int_{x_m}^L E_2(x) \frac{\partial q_{o2}(x)}{\partial \tau} dx \right\} \\ & - T \left( \int_0^{x_m} \frac{\partial q_{i2}(x)}{\partial \tau} dx + \int_{x_m}^L \frac{\partial q_{o2}(x)}{\partial \tau} dx \right) / \int_{x_m}^L \frac{\partial q_{o1}(x)}{\partial \tau} dx \quad (13) \end{aligned}$$

式(8)および(13)は  $\tau$  を設定する際には、 $\tau$  を変化させた際の外部費用の変化分と料金収入の変化分の和を料金負担者の変化分で除したもののすなわち限界外部費用と等しく設定するべきであることを表している。式(8)では代替ルートが存在しないためその道路の外部性のみに着目して課金額を決定しているが、式(13)では代替ルートの存在を考慮しているため、ルート2での外部費用および料金収入を含んだ式となっている。

### 3. 考察

#### 代替ルートを考慮した際の料金水準

代替ルートを考慮した際に、望ましい料金水準がどのようになったか分析を行う。式(13)において、ルート2に関する外部費用などの効果を表す第2項を除くと、第1項はルート1に関して式(8)の条件をあてはめたものと同じになる。ここで、式(13)の第2項の分子の符号で、代替ルートを考慮しない場合との大小比較ができる。つまり、料金Tがルート2の限界外部費用である  $T^*$  と比べて、大きい(小さい)とき、コードンで課金すべき額は代替ルートを考慮しない場合と比較して大きく(小さく)なる。また、Tが  $T^*$  と等しく設定されている場合は考慮しない場合と同じになる。

$$T^* = \frac{\int_0^{x_m} E_2(x) \frac{\partial q_{i2}(x)}{\partial \tau} dx + \int_{x_m}^L E_2(x) \frac{\partial q_{o2}(x)}{\partial \tau} dx}{\int_0^{x_m} \frac{\partial q_{i2}(x)}{\partial \tau} dx + \int_{x_m}^L \frac{\partial q_{o2}(x)}{\partial \tau} dx} \quad (14)$$

このようなことが起こるのはルート1に対して課金を行うことで、ルート2に交通が流出するため、その効果も考慮して課金額を決定する必要があるからである。

#### 代替ルートを考慮した際のコードンの位置

代替ルートを考慮した際に、望ましいコードン・ラインの都心からの距離を分析する。式(11)を  $x_m$  で微分し、式(7)の条件をルート1についてあてはめた式を代入する。整理すると以下ようになる。

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dx_m} = & C_2(x_m)(q_{o2}(x_m) - q_{i2}(x_m)) \\ & + T \left( \int_0^{x_m} \frac{\partial q_{i2}(x)}{\partial x_m} dx + \int_{x_m}^L \frac{\partial q_{o2}(x)}{\partial x_m} dx \right) \\ & - \left\{ \int_0^{x_m} E_2(x) \frac{\partial q_{i2}(x)}{\partial x_m} dx + \int_{x_m}^L E_2(x) \frac{\partial q_{o2}(x)}{\partial x_m} dx \right\} \quad (15) \end{aligned}$$

ここで、式(15)の第1項は負である。したがって、以降の項によって式全体の符号が決まる。需要の価格弾力性が大きく、課金位置を外側にすることによりルート2の交通量が増加する場合には、Tが以下に示したルート2の限界外部費用に等しく設定した水準  $T^{**}$  と等しく、あるいはそれより低いときに式全体の符号が負となる。すなわち、コードンの位置は代替ルートの存在を考慮しない場合と比較して都心側にすることが望ましくなる。逆に、需要の価格弾力性が小さく、課金位置を外側にすることでルート2の交通量が減少する場合には、Tが  $T^{**}$  と等しく、あるいはそれより高いときに式全体の符号が負となり、より都心側にすることが望ましくなる。

$$T^{**} = \frac{\int_0^{x_m} E_2(x) \frac{\partial q_{i2}(x)}{\partial x_m} dx + \int_{x_m}^L E_2(x) \frac{\partial q_{o2}(x)}{\partial x_m} dx}{\int_0^{x_m} \frac{\partial q_{i2}(x)}{\partial x_m} dx + \int_{x_m}^L \frac{\partial q_{o2}(x)}{\partial x_m} dx} \quad (16)$$

### 4. 結論

本論文では、代替ルートの存在する場合にコードン・プライシングを実施する際、どのような政策を施せばよいかということを分析した。代替ルートが存在する場合には、課金によって代替ルートへ流出する効果も考慮しなければならないため、最適な課金額は代替ルートの料金の大小によって変化するということが明らかになった。また、課金する場所についても、代替ルートの通行料金と需要の価格弾力性によって最適な場所が異なってくるということが明らかになった。

#### 主要参考文献

- Se-il Mun, Ko-ji Konishi, and Kazuhiro Yoshikawa(2003), "Optimal Cordon Pricing," *Journal of Urban Economics*, 54, 21-38.
- Verhoef, E. T., P. Nijkamp, and P. Rietveld(1996), "Second-best congestion pricing: The case of an untolled alternative," *Journal of Urban Economics*, 40(3), pp.279-302.