

道路ネットワークにおける 財源調達と道路混雑を考慮した最適料金水準

池下 英典¹・森杉 壽芳²・福田 敦³

¹学生会員 日本大学大学院 理工学研究科社会交通工学専攻 (〒274-8501 船橋市習志野台七丁目24-1)
E-mail: cshil1002@g.nihon-u.ac.jp

²正会員 日本大学特任教授 (〒274-8501 船橋市習志野台七丁目24-1)
E-mail: morisugi.hisayoshi@nihon-u.ac.jp

³正会員 日本大学教授 理工学部交通システム工学科 (〒274-8501 船橋市習志野台七丁目24-1)
E-mail: fukuda.atsushi@nihon-u.ac.jp

本稿では、財源調達と道路混雑を考慮した上で、有料道路と一般道路からなる道路ネットワーク全体を対象とした有料道路の料金水準設定について定式化を行い、明示的に提示する。このとき予算および時間制約のもとで、いくつかのルート間選択が不完全代替である準線形効用を最大化する利用者行動を定式化する。一般的には、料金を課すことによって発生する限界費用が最適なリンク混雑課金となる。その最適な課金について、道路利用者行動の定式化を行い、次に社会的余剰を最大にするように財源調達と建設費および維持管理費を考慮した効率的な有料道路の料金水準を求める定式化を行う。

Key Words: *optimal road pricing, general road network, utility function, MCF*

1. はじめに

わが国では、高速道路は有料、一般道路は無料という料金が設定されている。高速道路などの有料道路は、道路の整備や維持の財源を確保する観点から、収入によって道路整備の借入金を返済する償還主義に基づく料金水準が設定されている。この考え方は、道路の建設や維持管理等の費用は、その道路利用者が負担すべきという受益者負担の原則に基づいている。しかし、その無料開放が原則であり、償還を終えた複数の有料道路は無料開放または維持管理分の料金のみを徴収している。一般道路については、料金水準を設定し、徴収することは利用者の特定が不可能であり、実施した場合も費用がかかるため、その道路建設や維持管理の費用は税金で賄う納税者負担の原則を用いている。

わが国における料金制度は、道路整備や維持管理の財源確保の観点から償還主義に基づき考えられているが、高速道路の利用やそれに伴う混雑の発生などの需要管理の観点からはほとんど考慮されていない。よって、道路を社会的に有効活用することは難しい。そこで、財源調達の観点からと道路ネットワークを一体的に考慮した料金設定を行うことが必要となる。本研究では、財源調達に伴う厚生損失を考慮した社会的に望ましい料金水準の

設定について、一般的な道路ネットワークを対象に定式化を行うことを目的とする。

2. 既存研究

本研究は道路課金と交通インフラ整備の財源調達の観点について扱っている。これまでの最適料金水準の導出に関する研究は、この2つの観点で整理できる。

1つ目の道路課金は、高速道路の利用やそれに伴う混雑の発生などの需要管理の観点である。これは、道路交通混雑の解消等を目的としたロードプライシングなどの施策が当てはまり、この観点から最適な道路料金水準を求める研究が盛んである。一般的に最適な水準の道路料金は、社会的限界費用に一致するべきとされている。この社会的限界費用について上田(2009)¹⁾は、既に他の利用者が道路を走行している状況において、道路利用者が1単位だけ追加的に増したことによって社会的費用がどれだけ増加するかというその増分であるとしている。実際、混雑現象を経済理論の立場から解釈すると、私的限界費用と社会的限界費用が乖離した状態を指し、その差に等しい額を混雑している道路の利用者に課すことで、社会的に最適な交通フローが実現されることは知られている

2). しかしその一方で、交通ネットワーク均衡分析のモデルでは、経済学的意味を与えるのは難しいとされている均衡問題の目的関数を用いているが、リンクに限界費用原理に従う料金が課せられている場合、経済学的意味を持つということが明らかになっている。そこで限界費用原理に基づき、混雑課金や最適な道路料金水準についての研究が行われているが、未だその設定方法に関して多くの問題が残されているとされ、さまざまな研究が行われている³⁴⁾。本研究では、その比較のため利用者均衡モデルの完全代替モデルや確率的利用者均衡モデルに代表されるロジット型代替モデルについて検討を行う。

2つ目は、道路整備や維持管理の財源確保の観点である。1つ目の道路課金に加えて、道路整備の財源調達について、税金の問題に関連して議論が行われている。財源調達の方法は、わが国では償還主義に基づく高速道路料金で賄うように考えている。一方海外においては、米国、ドイツ、イタリア南部は燃料税、フランスは一般財源により、高速道路を整備している。つまり、世界的な財源調達方法に関する基準は存在しない。この状況の中、財源調達に伴う厚生損失を考慮した道路課金に関する研究は、森杉、河野、大村(2009)⁹⁾や森杉、河野(2012)⁶⁾等を除いてほとんど存在しない。この財源調達に伴う厚生損失は、公的資金の限界費用(Marginal cost of public funds, 以下、MCF)として計測される。森杉(2008)⁸⁾によると MCF は、公的資金を道路建設に投入する際に、既存の財源からは使うことができないという想定のもとで新たに投入額に等しい税収を確保するための増税が必要と仮定した上で、その1円の税収当たりの消費者余剰の減少分を MCF としている。つまり、1円あたりの税金投入のコストを表す数値である。この MCF の値について、実際の海外の道路事業評価においては、スウェーデン、フランスでは1.3、ノルウェーでは1.2の値を採用しており、これらの意味するところは、1円の税収増加の便益は、1.2(1.3)とし1円の税金投入のコストは1.2(1.3)円ということである。これらの定義から分かるように、公的資金の限界費用は所得税、消費税、固定資産税、燃料税などの税の種類によって異なる。この後、道路事業の費用便益分析について桐越、青木、森杉(2009a,b)⁹⁾¹⁰⁾が議論している。費用便益分析で用いるべき経済理論と整合的な費用は、単なる名目的では費用ではなく、その名目的な費用に、資金の調達方法に起因して発生する厚生損失を考慮した MCF を乗じて求める値を計上するべきであるとしている。つまり、MCF を考慮した料金水準を求めることは、社会全体の余剰を最大化する料金水準を求めることであると考えられる。本研究では、一般的な道路利用者を仮定した不完全代替モデルを用いて、有料道路整備の財源として、料金収入に加えて他の燃料税などの税金からの補助を想定し、その限界費用を考慮した上で、社

会的余剰を最大にするような料金水準を求める定式化を行う。

3. 道路利用者行動の定式化

道路の利用者均衡配分に関する効用関数は、社会経済状況を考慮して、不完全代替、完全代替、ロジット型代替の3つに分けて考える。

- ① 計画者は、道路利用者に対して各道路リンクに“料金”を課することができる。
- ② 道路利用者は、予算と時間の制約のもとで、自己の効用を最大にするよう交通量配分を行う。
- ③ 道路利用者は、自己の行動が交通混雑に影響しないと認識する。
- ④ リンクの所要時間は、単調増加な凸関数であるリンク交通量として表現する。
- ⑤ 計画者は、短期間の建設費用に関してMCFを考慮する。

以上の条件の下で、ネットワーク均衡状態での最適な料金水準の設定の方法について、定式化を行う。このため、まず利用者均衡の定式化を行い、次に社会的余剰を最大にする効率的なリンク混雑料金を求める定式化を行う。

(1) 不完全代替モデル

上述の条件の下で、均一な道路利用者を想定し、道路利用者である消費者が効用を最大にする関数 U を式(1)で表す。このとき、予算制約の式(2)と時間制約の式(3)をそれぞれ表す。

$$\max_{l, f_k^{rs}, x_a} U = z + u(\dots, f_k^{rs}, \dots, l) \quad (1)$$

s.t.

$$z + \sum_a P_a x_a = wL + y, \quad a \in A, \quad (2)$$

$$l + \sum_a t_a(\bar{x}_a) x_a + L = T, \quad a \in A, \quad (3)$$

$$x_a = \sum_{rs} \sum_k \delta_{a,k}^{rs} f_k^{rs} \quad a \in A, k \in K, \quad (4)$$

$$f_k^{rs} \geq 0 \quad k \in K, rs \in R. \quad (5)$$

ここで、 z は合成財の消費、 l は余暇時間、 f_k^{rs} は rs 間における経路 k の交通量、 P_k^{rs} は rs 間における経路 k の料金 P 、 w は賃金率、 L は労働時間、 y は資産所得、 t_k^{rs} は rs 間における経路 k の所要時間 (それは、経路交

通量ベクトル f の関数としている) , T は総利用可能時間である. $t_a(\bar{x}_a)$ の \bar{x}_a は, 均衡時の合計した交通量であり, 個人の視点から所与である. このことが自分の交通が他人の交通状況に影響を与えること無視していると仮定する. この取り扱いが外部性としての混雑を表現している. これらの式を, ラグランジュ未定乗数法とその解の一階条件より, 余暇需要と経路交通需要の関数, そしてリンク交通需要関数から, 間接効用関数 V の式(6)を得る.

$$V = wT + y + v \left(1, w, \sum_a (P_a + wt_a(\bar{x}_a)) \delta_{a,k}^{rs} \right) \quad (6)$$

このとき, 包絡線定理を式に適用し, 均衡時のリンク交通量について表すと式の通りとなる.

$$\frac{\partial V}{\partial P_a} = -x_a - w \sum_{a'} x_{a'} \frac{\partial t_{a'}(x_{a'})}{\partial x_{a'}} \frac{\partial x_{a'}}{\partial P_a} \quad (7)$$

道路利用者の厚生の変化, つまり料金の変化による消費者余剰は, リンク交通量のみで表現できるため, 経路交通量で厚生変化を計算する必要がないことが分かる.

(2) 完全代替モデル

ルート間選択が完全代替であるモデルについて不完全代替モデルと同様に, 道路利用者が効用を最大にするような式(8)で表す. このとき, 予算と時間の制約式は, さきの不完全代替モデルと同様に設定し, 経路間交通量の関係は式(9)から式(11)で表す.

$$\begin{aligned} \max_{l, f_k^{rs}, x_a, d^{rs}} U = & wT + y - wl \\ & - \sum_a (P_a + wt_a(\bar{x}_a)) x_a \\ & + u(\dots\dots d^{rs} \dots\dots, l) \end{aligned} \quad (8)$$

s.t.

$$x_a = \sum_{rs} \sum_k \delta_{a,k}^{rs} f_k^{rs}, \quad a \in A, k \in K, \quad (9)$$

$$d^{rs} = \sum_k f_k^{rs}, \quad k \in K, rs \in R, \quad (10)$$

$$f_k^{rs} \geq 0, \quad k \in K, rs \in R. \quad (11)$$

このとき, d^{rs} は OD ペア rs 間の総経路交通量であり, 経路交通量の合計である. 部分効用関数の変数は経路交通量ではなく配分交通量である. これは不完全代替とは区別され, この仮定こそが完全代替である.

(3) ロジット型代替モデル

ルート間選択がロジット型代替モデルでは, 道路利用者の効用関数を最大化するような式(12)で表す. このとき, 予算と時間の制約式は, さきの不完全代替モデルと同様に設定する.

$$\begin{aligned} \max_{l, f_k^{rs}, x_a} U = & wT + y - wl - \sum_a (P_a + wt_a(\bar{x}_a)) x_a \\ & + u_1(l) - \frac{1}{\theta} \sum_{rs} \bar{d}^{rs} \sum_k \frac{f_k^{rs}}{\bar{d}^{rs}} \ln \frac{f_k^{rs}}{\bar{d}^{rs}} \end{aligned} \quad (12)$$

s.t.

$$x_a = \sum_{rs} \sum_k \delta_{a,k}^{rs} f_k^{rs}, \quad a \in A, k \in K_0 = (0, K), \quad (13)$$

$$\bar{d}^{rs} = \sum_k f_k^{rs}, \quad k \in K_0 = (0, K), rs \in R, \quad (14)$$

$$f_k^{rs} \geq 0, \quad a \in A, k \in K_0 = (0, K). \quad (15)$$

このとき, 実際の交通状態を表現するため, 内生化した OD 交通量 $\sum_{k \neq 0} f_k^{rs}$ を得るため, 料金が 0 で, 時間費用も

0 である経路 $k=0$ が rs 間の OD ペアで存在して経路交通量 f_0 を含むときの合計 OD 交通量 \bar{d}^{rs} を設定している.

結果として, よく知られている下記のロジットモデルを得る.

$$l = l(w) \quad (16)$$

$$f_0^{rs} = \frac{\bar{d}^{rs}}{1 + \sum_{k' \neq 0} \exp[-\theta \sum_a (P_a + wt_a(\bar{x}_a)) \delta_{a,k'}^{rs}]} \quad (17)$$

$$f_k^{rs} = \frac{\bar{d}^{rs} \exp[-\theta \sum_a (P_a + wt_a(\bar{x}_a)) \delta_{a,k}^{rs}]}{1 + \sum_{k'} \exp[-\theta \sum_a (P_a + wt_a(\bar{x}_a)) \delta_{a,k'}^{rs}]} \quad (18)$$

各 OD に関する効用関数 V のログサムは,

$$V^{rs} = -\frac{\bar{d}^{rs}}{\theta} \ln \left[1 + \sum_{k'} \exp[-\theta \sum_a (P_a + wt_a(\bar{x}_a)) \delta_{a,k'}^{rs}] \right] \quad (19)$$

となり, 間接効用関数は,

$$V = Tw + y + v(w) + \sum_{rs} V^{rs} \quad (20)$$

となる. これは, 一般的な不完全代替型の式(6)の特殊形である.

4. 社会的厚生関数

社会的厚生関数は, 道路利用者の総消費者余剰である準線形効用関数と道路建設費から道路課金収入を引いた収入に関する納税者の厚生損失からなる式(21)で表す.

$$W = V + MCF \left[\sum_{a'} (I_{a'} - P_{a'} x_{a'}) \right] \quad (21)$$

このとき、 V は間接効用関数、 MCF は財源調達に
 限る費用、 I_a は対象道路の建設費であり、維持管理費用を
 考慮する場合もこの項に含めることで考慮することがで
 きる。道路課金問題は、その道路の建設費財源調達と道
 路課金による規制の2つの目的を持っている。道路建設
 費の財源は、道路課金収入と燃料税、所得税、消費税な
 どの税金からなり、このとき MCF は、財源調達は公共
 支出総額のとても小さい割合を占めているため、一定で
 あると仮定する。また、最適料金水準は社会的厚生関数
 を最大にするような式(22)を満たす必要がある。

$$\begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial P_a} &= \frac{\partial V}{\partial P_a} - MCF \left(x_a + \sum_{a'} P_{a'} \frac{\partial x_{a'}}{\partial P_a} \right) \\ &= \left(\frac{\partial V}{\partial P_a} - MCF \right) \left(x_a + \sum_{a'} P_{a'} \frac{\partial x_{a'}}{\partial P_a} \right) = 0 \end{aligned} \quad (22)$$

この式が示しているのは、最適料金は限界費用課金が
 財源調達に伴う公的資金の限界費用による課金と等しい
 ことを述べている。この式(22)にロアの定理を適用し、
 式(7)を代入することで、一般的な式(23)を得る。

$$\begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial P_a} &= \frac{\partial V}{\partial P_a} - MCF \left(x_a + \sum_{a'} P_{a'} \frac{\partial x_{a'}}{\partial P_a} \right) \\ &= -x_a - w \sum_{a'} x_{a'} \frac{\partial t_{a'}(x_{a'})}{\partial x_{a'}} \frac{\partial x_{a'}}{\partial P_a} - MCF \left(x_a + \sum_{a'} P_{a'} \frac{\partial x_{a'}}{\partial P_a} \right) \\ &= -(1 + MCF)x_a - MCF \sum_{a'} \left(P_{a'} + \frac{w}{MCF} \frac{\partial t_{a'}(x_{a'})}{\partial x_{a'}} x_{a'} \right) \frac{\partial x_{a'}}{\partial P_a} = 0 \end{aligned} \quad (23)$$

5. 最適料金水準の導出

さきに述べた社会的厚生関数を最大化することで最適
 料金水準を求めるものとする。財源調達に伴う厚生損失
 である MCF が-1とそれ以外の場合について、全ての道路
 と一部の道路それぞれを対象として、最適な料金水準を
 導出する。

(1) $MCF = -1$ の全ての道路に課金の場合

社会的厚生関数 W を最大にするリンクの料金水準の
 解を式(24)に示す。

$$dW = \sum_a \frac{\partial W}{\partial P_a} dP_a = 0 \quad (24)$$

ここで、式(23)と式(7)を適用し、 $MCF = -1$ として、

$\sum_a \frac{\partial x_{a'}}{\partial P_a} dP_a = dx_{a'}$ を考慮することで式(25)を得る。

$$dW = \sum_{a'} \left(P_{a'} - w \frac{\partial t_{a'}(x_{a'})}{\partial x_{a'}} x_{a'} \right) dx_{a'} = 0 \quad (25)$$

つまり、最適な道路料金水準は、式(26)の通りである。

$$P_{a'} = w \frac{\partial t_{a'}(x_{a'})}{\partial x_{a'}} x_{a'} \quad (26)$$

これまでよく知られている限界費用原理に基づく料金水
 準の式と同様な結果となった。

(2) $MCF = -1$ の一部道路に課金の場合

この場合は、対象とする道路以外の料金は、何れかの
 水準に同定されており、対象とする道路料金のみを最適
 化することを意味している。このとき、社会的厚生関数
 W を最大にする一部道路の最適料金水準についての解
 は、式(27)に示す通りである。

$$\begin{aligned} P_a &= w \frac{\partial t_a(x_a)}{\partial x_a} x_a \\ &- \sum_{a' \neq a} \left(P_{a'} - w \frac{\partial t_{a'}(x_{a'})}{\partial x_{a'}} x_{a'} \right) \frac{\partial P_{a'}}{\partial P_a} \frac{\partial x_{a'}}{\partial P_a} \end{aligned} \quad (27)$$

式(27)の右辺第1項は、(1)の場合と同じ限界混雑
 外部性である社会的限界費用を考慮した式である。右辺
 第2項は、料金 P_a の社会的限界費用から乖離している
 ことによって発生している歪みを、少なくするようにリ
 ンク a の料金を高く（あるいは低く）していることが分
 かる。

(3) $MCF \neq -1$ の全ての道路に課金の場合

社会的厚生関数 W を最大にするような全ての道路に
 課金した場合の料金水準は、式(23)を解くことで得られ
 る。ここでは、単一リンクおよび2リンクの場合の料金
 水準式を示す。単一リンクの料金水準は、式となり、森
 杉、河野(2012)⁹が導出と計算に成功している通りである。

$$P = -\frac{1}{MCF} w \frac{\partial t(x)}{\partial x} x - \left(1 + \frac{1}{MCF} \right) \frac{x}{\partial P} \quad (28)$$

また、2リンクの場合の料金水準は、式(29)と式(30)に示
 す通りとなる。

$$P_1 = -\frac{1}{MCF} w \frac{\partial t_1(x_1)}{\partial x_1} x_1 - \frac{\left(1 + \frac{1}{MCF} \right) \left(\frac{\partial x_2}{\partial P_2} x_1 - \frac{\partial x_2}{\partial P_1} x_2 \right)}{\frac{\partial x_1}{\partial P_1} \frac{\partial x_2}{\partial P_2} - \frac{\partial x_2}{\partial P_1} \frac{\partial x_1}{\partial P_2}}, \quad (29)$$

$$P_2 = -\frac{1}{MCF} w \frac{\partial t_2(x_2)}{\partial x_2} x_2 - \frac{\left(1 + \frac{1}{MCF}\right) \left(\frac{\partial x_1}{\partial P_1} x_2 - \frac{\partial x_1}{\partial P_2} x_1\right)}{\frac{\partial x_1}{\partial P_1} \frac{\partial x_2}{\partial P_2} - \frac{\partial x_2}{\partial P_1} \frac{\partial x_1}{\partial P_2}} \quad (30)$$

この一般的な道路ネットワークを対象とした導出は、既存研究では存在していない。

(4) MCF ≠ -1 の一部道路に課金の場合

一部道路に課金する場合は、式(23)を解くことで式(31)を得られる。

$$P_a = -\frac{1}{MCF} \left(w \frac{\partial t_a(x_a)}{\partial x_a} \right) x_a - \sum_{a' \neq a} \left(P_{a'} + \frac{w}{MCF} \frac{\partial t_{a'}(x_{a'})}{\partial x_{a'}} x_{a'} \right) \frac{\frac{\partial x_{a'}}{\partial P_a}}{\frac{\partial x_a}{\partial P_a}} - \left(1 + \frac{1}{MCF} \right) \frac{x_a}{\frac{\partial x_a}{\partial P_a}} \quad (31)$$

この場合、MCFが-1である場合は、さきに示した式(27)と一致し、式(31)が一般形であることが分かった。また式(31)の内容を解釈すると、右辺第1項に示す交通量が1台増加したことにより増加する利用者全体の費用から、右辺第2項で示した他のリンク全てで発生する渋滞などの混雑分だけ乖離している状態を表している。この導出は森杉、河野(2012)⁹の並行リンクを対象とした研究を除いて、既存研究では存在していない。

6. おわりに

本研究では、既存研究で行われていなかった道路ネットワークへと拡張した場合の財源調達に伴う厚生損失と

道路混雑を考慮した最適料金水準を明らかにした。MCFを考慮した場合の最適な料金水準は、一般的な形の導出であることを示した。特殊な形が、既存研究で取り扱われているMCFを考慮しなかった場合の料金水準であることが明らかとなった。今後は、導出した料金水準の式を用いた道路ネットワークにおける試算を行い、本研究での定式化について検証を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 上田孝行：高速道路料金変更政策の費用便益分析，運輸政策研究，Vol.12，No.3，pp.30-36，2009.
- 2) 山内弘隆，竹内健蔵：混雑税理論の展望—経済学の視点，土木学会論文集，第449号/IV-17，pp.17-26，1992.
- 3) 文世一，秋山孝正，奥嶋政嗣：道路ネットワークにおける次善の混雑料金—都市高速道路の役割に着目して—，応用地域学研究，No.12，pp.15-25，2007.
- 4) 円山琢也，原田昇，太田勝敏：Nested Logit型確率的利用者均衡条件下での最適混雑料金，土木計画学研究・論文集，Vol.20，pp.555-562，2003.
- 5) 森杉壽芳，河野達仁，大村洋平：道路特定財源調達の限界費用を考慮した効率的な高速道路料金水準と財源調達，高速道路と自動車，Vol.52，No.2，pp.20-29，2009.
- 6) 森杉壽芳，河野達仁：道路整備財源調達に伴う厚生損失を考慮した高速道路料金の効率的水準，日本経済研究，No.67，pp.1-20，2012.
- 7) 別所俊一郎，赤井伸郎，林正義：公的資金の限界費用，日本経済研究，No.47，pp.1-19，2003.
- 8) 森杉壽芳：海外の道路事業評価と費用便益分析，交通工学，Vol.43，No.1，pp.26-32，2008.
- 9) 桐越信，青木優，森杉壽芳：道路投資の費用便益分析における公的資金の限界費用(1)，交通工学，Vol.44，No.2，pp.93-100，2009.
- 10) 桐越信，青木優，森杉壽芳：道路投資の費用便益分析における公的資金の限界費用(2)，交通工学，Vol.44，No.3，pp.118-124，2009.

(2013.8.2 投稿)

OPTIMAL ROAD PRICING FOR THE GENERAL ROAD NETWORK TAKING INTO ACCOUNT FUND PROCUREMENT AND ROAD CONGESTION

Hidenori IKESHITA, Hisayoshi MORISUGI and Atsushi FUKUDA