【土木計画学研究・講演集 No.18(1) 1995年12月】

不完備情報下における混雑料金の情報的役割に関する研究*

The Informational Role of Road Prices under Incomplete Information*

小林潔司** ・安野貴人***

By Kiyoshi KOBAYASHI** and Takato YASUNO***

1. はじめに

従来の混雑料金に関する研究は、単一のしかも均質な道路区間を対象とし、混雑料金を通じて混雑による社会的費用を内部化することにより社会的に望ましい需給関係を実現することに主眼が置かれてきた。しかし、現実には道路はネットワークとして構成されており、混雑料金の課徴を交通量配分と無関係に考察することはできない。このような観点から、近年では望ましい交通量配分を達成するための手段としての混雑料金の役割に着目した研究がなされるようになってきた。たとえば、赤松は確率均衡配分の枠組みの中で混雑料金の設定問題を考察している[1]。文は高速道路の料金設定問題に対して混雑料金の視点からアプローチを試みている[2]。

近年、情報技術の進歩により経路誘導システムが実用化の段階に入ってきた。交通情報の提供により、ドライバーの経路選択におけるリスクを減少しより合理的な選択行動を誘導することが可能となる。最近の研究では、情報提供がかえって交通流の効率性を悪化させる場合があることが判ってきた[3]。この場合、効率的な交通流を達成するためには経路誘導情報の提供と同時に混雑料金を徴収することが必要となる。このような視点から文等は混雑料金と交通情報の提供を組み合わせたような経路誘導システムに関する研究を行っている[4]。そこでは完全情報に基づいた経路誘導効果に関する分析に止まっている。しかし、情報技術がいかに進歩しても完全情報を提供することは不可能である。現実的な経路誘導問題を分析するためには情報の不完全性を考慮に入れたアプローチが必要となる。

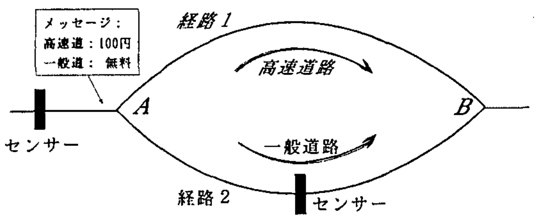
本研究では高速道路の料金を道路ネットワークの混雑状態に応じて差別化するような変動料金システムについて考察する。高速道路の料金が道路ネットワークの混雑状態に応じて差別化され、それが事前にドライバーに通知される。この時、高速道路料金は道路ネットワークの状態をドライバーに通知する交通情報としての役割を果たしうる。当然のことながら、このようなメッセージを通じて道路ネットワークの状態を完全には伝えることはできない。このように混雑料金は必ずしも完全情報を伝達しないが、部分的にはドライバーの経路選択リスクを解消すると同時に、経路誘導に対する直接的な誘因を与えるだろう。以上の問題意識に基づいて、本研究では高速道路の変動料金システムが有する交通情報としての役割に着目するとともに、不完備情報下で繰り返されるドライバーの経路選択行動をより望ましい方向へ誘導しうるような変動料金システムを設計する方法について考察する。以下、2．で分析の基本的枠組みを、3．でモデルの定式化を行う。4．ではモデルの解法について言及する。

2. 分析の枠組み

(1) 問題設定

図－1に示すような単一のOD交通と2つの経路から構成されるネットワークを考える。時間軸を離散化する。簡単のために各期 $t(t=1,2,\cdots)$ を通じて一定の OD 交通量 Q がネットワークを通過すると考える。経路1は高速道路であり利用料金が課徴される。経路2は一般道路であり、通過交通と各期を通じて変動する内々交通が利用する。通過ドライバーは、その期に実現する内々交通量を事前に知ることはできないが、公共主体はその値を観測できる

*キーワーズ：交通行動分析、経路情報、混雑料金
**正員、工博、鳥取大学工学部社会開発システム工学科
(鳥取市湖山町南4丁目101、TEL 0857-31-5309、FAX 0857-31-0882)
***学生会員、工修、鳥取大学大学院工学研究科博士課程
(同上)



図－1　対象ネットワーク

ものとする。一般道路の走行には混雑料金は課徴されないが高速道路では利用料金が課徴される。一般道路の内々交通量は各期の期首に確定し、その値は各期の中では変化しないものと考える。交通管理者は期首に観測された内々交通量に基づいて道路ネットワークの状態を混雑時 $(s=1)$、非混雑時 $(s=2)$ に区別するとともに、道路ネットワークの混雑状態 s に応じて2つの異なる料金 $\tau^s(s=1,2)$ を利用者から徴収する。交通管理者は分岐点に到達した通過ドライバーにその期における高速料金を通知する。高速料金は道路ネットワークの混雑状態と対応して変化するため、通過ドライバーは高速料金の額を通じてネットワークの混雑状態を事前に知ることができる。すなわち、高速料金はドライバーの経路選択を誘導するための直接的な誘因を与えると同時に、道路ネットワークの混雑状態に関する情報をドライバーに伝達する役割を同時に果たすことになる。本研究ではこのような高速道路料金の情報的役割を考慮に入れたような変動料金システムについて考察する。

(2) 情報提供ルールと変動料金

交通管理者は各期の期首で観測される内々交通量に基づいて当該期の混雑状態を判定する。本研究では一般道路の内々交通量 N_t と閾値 h との大小関係により混雑状態を判別する。すなわち、内々交通量が $N_t \geq h$ ならば「混雑状態 $(s=1)$」、$N_t < h$ ならば「非混雑状態 $(s=2)$」と判断する。交通管理者は、このように判断された状態に応じて「高速道路の利用料金は τ^s 円である」というメッセージ e_s をドライバーに提供する。状態 s の生起と利用料金 τ^s は1対1に対応しており、ドライバーは利用料金を通じて混雑状態の生起状態を知ることができる。この種の情報提供ルールとしては多様な種類が考えられるが、本研究では内々交通量に基づいて混雑状態を判定するという簡単なルールを採用する。簡単化のために基本モデルでは閾値 h は外生的に与えられていると考えよう。のちに、閾値 h を変数に含んだような拡張モデルを定式化する。

(3) 料金情報と合理的期待

ドライバーは料金情報を通じて混雑状態を知ることができるものの、両経路の経路走行時間を確定的に把握することはできない。ドライバーは与えられた料金情報に基づいて各経路の走行時間を主観的に予測する。いま、「τ^s円」という料金情報の下でドライバーが主観的に予測する経路 i の走行時間分布を確率密度関数 $\pi_i^s(t_i^s|\tau)$ で表現する。ドライバーはメッセージ「τ^s円」という情報を受け取ることにより、混雑状態を知ることができるので、主観的期待を状態 s ごとに形成することが可能である。また、変動料金システム τ が異なれば、通過ドライバーの経路選択行動が異なり、結果的に各経路の走行時間分布が異なる。したがって、$\pi_i^s(t_i^s|\tau)$ は変動料金システム τ に依存することになる。小林等は長期学習を通じてドライバーの主観的期待が実際に実現する客観的な確率分布に一致するという合理的期待形成仮説に基づいた期待均衡モデルを提案している[5]。本研究でも合理的期待均衡モデルを採用し、ドライバーの主観的期待を長期的に実現する合理的期待 $\pi_i^{s*}(t_i^s|\tau)$ を用いて表現することとする。紙面の都合により、合理的期待均衡モデルに関する詳細は参考文献[5]に譲る。

3. 料金設計問題の定式化

(1) ランダム効用モデルの定式化

ランダム効用モデルを用いて状態 s が生起した場合の経路 i に対するドライバーの効用関数を

$$V = v(t_i^s, c_i^s) + \varepsilon_i^s \tag{1}$$

と定式化する。ここに、t_i^s:経路走行時間、c_i^s は経路走行費用である。状態 s が生起した場合の各経路の走行費用を次式で表現しよう。

$$c_1^s = w_1 + \tau^s, \quad c_2^s = w_2 \tag{2}$$

ここに、$w_i(i=1,2)$ は経路 i の走行費用である。簡単のために w_i は混雑状態の生起のいかんに関わらず

経路ごとに一定値をとると考える。厳密にいえば、走行費用 w_i は状態に対応して変化する。この種のモデル化はもちろん可能であるが、問題の本質に何等の影響を及ぼさない。ここでは、記述の簡便化のために w_i は経路ごとに一定と考えて以下議論を進める。私的情報 ε_i^s は経路選択の直前に確定しているものの、各期を通じてその値は変動すると考える。

(2) 期待効用モデルの定式化

ドライバーは経路選択の直前において私的情報 ε_i^s の値を確定的に把握することができるものの、経路走行時間 t_i^s を確定的に把握することはできない。そこで、状態 s が生起した時の通過交通の各経路に対する期待効用関数を

$$\begin{aligned} EU_i^s &= \overline{EU}_i^s(c_i^s:\tau)+\varepsilon_i^s \\ &= \int_0^\infty v(t_i^s,c_i^s)\pi_i^s(t_i^s:\tau)dt_i^s+\varepsilon_i^s \end{aligned} \tag{3}$$

と定義しよう。ここに、$\pi_i^s(t_i^s:\tau)$ は変動料金の組 τ の下で状態 s が生起した時（メッセージ e_s が提示された時）にドライバーが認知する経路 i の走行時間 t_i^s の分布に対する主観的期待である。合理的期待形成仮説の下では主観的期待 π_i^s は客観的に実現する経路走行時間分布に関する確率密度関数 π_i^{s*} で表現できる[5)]。また、ε_i^s は私的情報であり $E[\varepsilon_i^s]=0$ を仮定する。この時、ドライバーは、状態 s が生起した場合、期待効用を最大にする経路

$$i^*=arg\max_i\{EU_i^s\} \tag{4}$$

を選択する。ここで、各期を通じて ε_i^s がそれぞれ独立で同一の確率密度関数 $\psi(\varepsilon_i^s)$ に従うと仮定する。この時、ドライバーが選択した経路のランダム期待効用の事前の期待値は次式のように表現できる。

$$\begin{aligned} &E[\max_i\{EU_i^s\}] \\ &= \sum_i\int_{-\infty}^\infty\{\overline{EU}_i^s(c_i^s:\tau)+\varepsilon_i^s\}\phi(\varepsilon_i^s:\tau)d\varepsilon_i^s \end{aligned} \tag{5}$$

なお, $\phi(\varepsilon_i^s:\tau)=\psi(\varepsilon_i^s)\int_{-\infty}^{\overline{EU}_i^s(\tau)-\overline{EU}_j^s(\tau)+\varepsilon_i^s}\psi(\varepsilon_j)d\varepsilon_j$ である。ただし、$i,j=1,2;i\neq j$ である。各メッセージ e_s が提示される確率 ζ^s は閾値 h を用いて

$$\zeta^1=\mathrm{Prob}\{N\geq h\},\quad \zeta^2=\mathrm{Prob}\{N<h\} \tag{6}$$

と表現できる。各期を通じて一定量 Q のドライバーが経路選択を繰り返すという仮定より、全通過ドライバーの1期当たりの総厚生水準の期待値 $W_1(\tau)$ は

$$W_1(\tau)=Q\sum_s\zeta^sE[\max_i\{EU_i^s\}] \tag{7}$$

と表わすことができる。一方、内々交通は経路選択を制限されており（経路2のみが利用可能であり）、メッセージも通知されない。したがって、状態 s の生起状態を知ることはできない。したがって、内々交通のドライバーの期待効用の事前の期待値 $E[EU_2]$ は $E[\varepsilon_2^s]=0$ であることを考慮すれば

$$\begin{aligned} E[EU_2] &= \overline{EU}_2(c_2:\tau) \\ &= \int_0^\infty v(t_2,c_2)\pi_2(t_2:\tau)dt_2 \end{aligned} \tag{8}$$

で表せる。$\pi_2(t_2:\tau)$ は状態の生起を問わず全期間を通じて実現する経路2の走行時間の確率密度関数である。いま、内々交通のドライバーがすべて合理的期待を有しておりランダムに経路2を利用すると仮定する。いま、内々交通量 N の確率密度関数が $g(N)$ で与えられたとしよう。さらに、内々交通量が $\bar{N}$ の場合に実現する経路2の走行時間分布を条件付き確率密度関数 $\xi(t_2^s|\bar{N})$ で表現する。ここで、$\pi_2^*=\sum_s\zeta^s\xi(t_2^s|N)g(N)$ と表現できることに留意すれば、1期あたりの内々交通の総厚生水準の事前の期待値は次式で表現できる。

$$\begin{aligned} &W_2(\tau) \\ &=\sum_s\zeta^s\int_0^\infty\int_0^\infty Nv(t_2^s,c_2^s)\xi(t_2^s|N)g(N)dt_2^sdN \end{aligned} \tag{9}$$

(3) 基本モデルの定式化

交通管理者は経路1を利用するドライバーにネットワークの混雑状態に応じて変化する変動利用料金 $\tau=(\tau^1,\tau^2)$ を課徴する。交通管理者の目的は内々交通を含めた全ドライバーの厚生を最大化するような変動料金の組 τ を求めることにある。目的関数を経路選択1回当たりの平均的な総厚生水準を用いて定式化する。

$$z=W_1(\tau)+W_2(\tau) \tag{10}$$

上式の第1項は通過交通、第2項は内々交通に関わるドライバーの総厚生水準を表わす。一方、制約条件として高速道路の料金収入の期待値をある一定水準 Y に保つことを考える。高速道路の料金制約は次式で定式化される。

$$\sum_s\zeta^s\tau^sE[x_1^s:\tau]=Y \tag{11}$$

ここで、$E[x_1^s:\tau]$ は料金システム τ の下で状態 s が生起した時の経路1の交通量の期待値である。すなわち、$E[x_1^s:\tau]=\int_0^Q x_1^sf(x_1^s:\tau)dx_1^s$ である。ここ

で $f(x_1^s:\tau)$ は料金システムτの下で状態 s が生起した場合に実現する経路１の交通量の分布に関する確率密度関数である。基本モデルは制約条件 (11) の下で目的関数 (10) を最大にするようなτを求める問題として定式化される。

$$\max_{\tau}\{W_1(\tau)+W_2(\tau)\}$$
$$\text{subject to}\quad \sum_s \zeta^s\tau^s E[x_1^s:\tau]=Y \qquad (12)$$

(4) 拡張モデルの定式化

基本モデルでは道路ネットワークの混雑状態を判定するための閾値 h を与件として取り扱っていた。しかし、混雑状態を判定するための閾値自体、変動料金システムを設計するうえで重要な設計変数であると考えることができる。h の値を変化させれば混雑状態の生起頻度が変化し、結果として最適な変動料金の組み合わせも変化する。ドライバーの総厚生水準の最大化に資するような最適な閾値 h^* も存在しよう。仮に、最適な閾値が $h=\infty$ あるいは $h=0$ になった場合は、変動料金システムを導入せずに各期を通じて同一の料金を徴収した方が望ましいことになる。最適な情報提供ルールを設計する問題は基本問題を拡張することに容易に定式化できる。閾値 h が変化すれば、合理的期待π_i^{s*}、メッセージの生起頻度ζ^s、経路２の走行時間分布に関する条件付き確率密度関数$\xi(t_2^s|N)$ が変化する。このことを明示的に表現するために、問題 (12) に新しく変数 h を導入する。この時、拡張モデルは以下のようになる。

$$\max_{\tau,h}\{W_1(\tau,h)+W_2(\tau,h)\}$$
$$\text{subject to}\quad \sum_s \zeta^s(h)\tau^s E[x_1^s:\tau,h]=Y \qquad (13)$$

4. モデルの解法

基本モデル、拡張モデルを解くためには確率密度関数π_i^{s*}、$\xi(t_2^s|N)$,、及び確率ζ^sを設計変数τ,h のそれぞれに対して明示的に求める必要があるが、これらの確率密度関数を解析的に求めることは不可能である。したがって、目的関数値あるいは制約条件の係数値をシミュレーションによって求めざるを得ない。この種の問題に対しては、コンプレックス法等の直接探索法の内部にシミュレーションモデルを組み込んだいわゆるハイブリッド型のアルゴリズムを適用することにより最適解を求めることができる。基本モデルの場合、設計変数はτ^1,τ^2の２個であり、かつ等号制約式を持っていることを配慮すれば、基本的には１次元最適化問題であることが理解できる。したがって、１次元探索アルゴリズムを準用することにより最適解を求めることができる。シミュレーション方法としては内々交通量を乱数発生させたモンテカルロシミュレーションを用いる。その際、合理的期待を求める必要があるが、それに関しては小林・井川が開発した合理的期待の形成シミュレーション[5]を用いることができる。直接探索法を用いた求解手順を簡単に示す。１）１次元探索の初期点τ_0^1の集合をセット。$k=1$。２）直接探索法により新しい探索点τ_k^1を求める。３）τ_k^1に対して等号制約を満足するτ_k^2を求めるための初期点集合$\tau_{k,0}^2$をセット。$l=1$。４）直接探索法のための新しい探索点$\tau_{k,l}^2$を求める。５）シミュレーションを実施。６）等号制約を十分に満足していればステップ７へ。そうでなければ、$l=l+1$としてステップ４へ戻る。７）十分な精度で最適解が求まっていれば終了。それ以外は $k=k+1$ としてステップ２へ戻る。

5. おわりに

本研究では高速道路の利用料金が道路ネットワークの混雑状態に応じて差別化されるような変動料金システムについて考察した。高速利用料金が混雑状態に応じて差別化されることにより、混雑料金そのものが経路誘導情報としての役割を果たすことに着目し、最適な混雑料金を設計するための計画モデルを定式化した。また、その解法についても言及した。紙面の都合により省略した計算結果については講演時に説明したいと考える。

参考文献

1) 赤松隆, 桑原雅夫, 確率利用者均衡条件下での最適混雑料金, 土木学会論文集, 389, pp. 121-129, 1988.
2) 文世一, 混雑料金と交通量配分, 土木計画学研究・論文集, No. 11, pp. 113-120, 1993.
3) 小林潔司, 文世一, 多々納裕一, 交通情報による経路誘導システムの経済便益評価に関する研究, 土木学会論文集, 506, pp. 77-86, 1995.
4) 文世一, 小林潔司, 安野貴人, 価格情報による経路誘導に関する理論的研究, 土木学会論文集, （投稿中）.
5) 小林潔司・井川修, 交通情報によるドライバーの経路誘導効果に関する研究, 土木学会論文集, 470, pp. 185-194, 1993.