論　文

環境制約下における都市高速道路料金格差の経済分析

竹 内 健 蔵*
（東京女子大学文理学部社会学科助教授）

1．はじめに

近年，国民の生活の質の向上に伴って，環境の質に関する人々の要求も高まりつつある。さらに最近，尼崎や名古屋における公害訴訟の結果が明らかになるにともない，自動車交通が環境に与える負荷についての人々の意識はより明確になってきている。道路交通が環境に与える影響を極力抑えるための方策として，自動車に対する直接的な排気ガス規制はもちろんのこととして，環境への影響が大きいルートから環境への影響がそれほど問題にならないルートへ需要を誘導することによって環境問題を解決しようとする試みが俎上に上しつつある。たとえば，都市高速道路の料金に格差をつけることによって，住宅地を走る高速道路の交通量を減らし，その交通量減少部分を環境への負荷の少ない湾岸部分の高速道路に誘導しようとする試みがそれにあたり，阪神高速道路公団や首都高速道路公団はそうした施策について関心を持っている。

しかしながら，こうした政策は理念的には理解できるものであるものの，その実際の料金の決定については多くの問題が残されている。仮に環境に関する費用が計測できたとしよう。それでもなお，どれだけの料金格差をつければ交通量がどれだけ転換するのか，環境の質を維持することはできたとしても，それは社会的に見て最適であるのか，あるいは償還主義に基づく料金制度の中で実施した料金格差が投下資本に関する費用を回収できるのか，というような問題がある。こうした問題の原因は，当該道路がネットワークを形成しているという点にその多くを負っている。そこで本稿では，環境制約を考慮に入れながら，都市高速道路ネットワークにおける最適な料金格差とはどのようなものであるかについて論じ，さらにこうした料金制度の実行に伴って，政策担当者はどのような観点からこの料金格差の制度を評価し，吟味するべきかについて述べることを目的とする。

本稿の構成は以下のとおりである。２．では交通ネットワークの有する重要な性質である均衡交通量の理論を中心として，本稿で展開される定性的分析モデルの基礎的部分を考察する。３．では，２．に基づいて，４．におけるシミュレーション分析の中心となるモデルについて述べ，最適な料金格差について定

*1958年生まれ。一橋大学大学院商学研究科博士後期課程単位修得，オックスフォード大学経済学部大学院（M. Litt.）。長岡技術科学大学工学部専任講師，助教授を経て，94年より現職。専門は交通経済学，公共経済学。日本交通学会，公益事業学会，日本経済政策学会，日本海運経済学会，世界交通学会所属。主な論文は，「道路混雑における社会的限界費用曲線の反転問題について」，『一橋論叢』，第106巻，第６号，1991年，“Viewpoints of Regulatory Policies for Land Transport: How does Deregulation as Marketisation function？” *IATSS Research,* Vol. 21, No. 1, 1997, “The Problem of the Chicken and the Egg in Deteriorating Public Transport: The Mechanism of Downs-Thomson Paradox and Its Examination,” *International Journal of Transport Economics,* Vol. 26, No. 1, pp. 91-108, 1999，など。

性的な結論を得る。この節においては交通需要は価格（費用）に関して弾力的であるという緩い仮定が用いられる。4．では，3．で述べた最適料金格差に関する知見を用いて，仮想的な数値例を使ってシミュレーション分析を行い，それぞれの料金格差のシナリオにおいてどのような数値の変化が得られるかを検証する。ここでは技術的な制約から，交通需要は価格（費用）に関して非弾力的であるという状況を想定する。5．では，環境制約がある場合の料金形成について述べ，シミュレーション分析を行う。6．では，以上の考察から，この政策に関与する政策担当者が，この新しい料金制度についてどのような観点から注意するべきかについて述べる。7．では本稿の意義をまとめ，今後の残された問題点を整理する。

2．モデルの設定―交通ネットワークの性質

最適な道路料金に関する研究はWalters（1961）やMinistry of Transport（1964）までさかのぼることができる。以来，道路料金（特に混雑税，混雑料金）に関する理論的な展開は単一ルートにおける最適な料金の設定が中心的な議論であった。そこでは通常の交通経済学のテキストが教えるように，最適な道路（混雑）料金は私的限界費用と社会的限界費用との乖離部分を料金として徴収される，といういわゆる「ピグー的課税」の議論が主体である。しかしながら，いうまでもなく，道路交通とはネットワークサービスである。単一のルートだけではなく，複数のルートが道路利用者の前に存在しているのが通常であり，道路利用者はその中から自分にとって最適なルートを選択する。しかしこれに関する経済学的な議論はそれほど多いとはいえない。古くはMarchand（1968）の周辺から近年ではVerhoef（1996）まで，いくつかの文献はあるものの，交通経済学者によってそれほど議論されているテーマであるとは言いがたい。しかし本稿で論じられる都市高速道路はまさにネットワークであり，しかもそれに加えて通行料金の存在しない一般道路も代替的なルートとして機能している。このような状況下で道路利用者はどのような基準で最適なルートを選択しているのであろうか。

「Wardropの原理」はそれに対する１つの解答を与えている。Wardropの原理に従えば，代替的な２つのルートがある場合には次のような定理が成立する[1)]。

⑴　起終点間に存在する可能な経路のうち，利用される経路については所要時間がみな等しく，利用されないどの経路のそれよりも小さい。

⑵　道路網中の総走行時間は最小である。

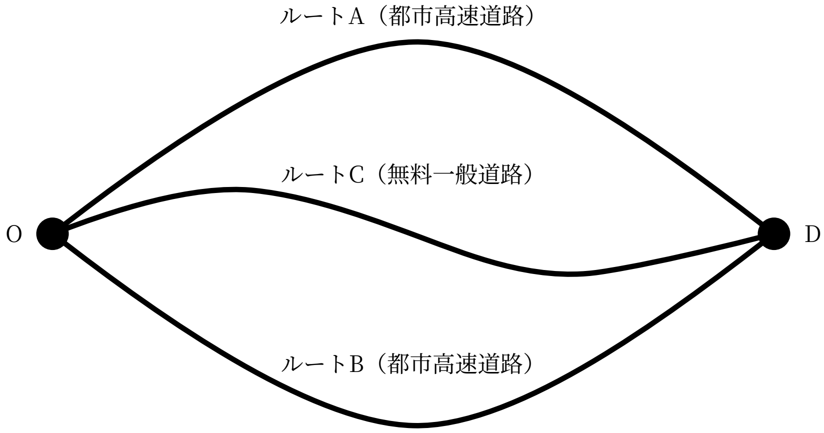
これらはそれぞれWardropの第１原理，第２原理と呼ばれるが，本稿でとりわけ重要なのは第１原理である。すなわち，複数ルートがある場合，道路利用者はその走行時間（費用）がより少ないルートを選択するが，道路利用者がそのように行動するならば，最終的には各ルートにおける走行時間（費用）は均等化し，そのようにして交通量は配分され，均衡に至る[2)]。もちろん車の走行は，沿線にSPMやNO_xなどの環境汚染（費用）を与えるが，それは道路利用者の考慮外におかれている。ここでは都市高速道路ネットワークとそれと代替的な関係にある無料の一般道路を考えるので，（図１）のようなネットワークを考えることにしよう。道路利用者は起点のO点から終点のD点までのトリップを行うこととし，３つの走行ルートが与えられているものとする。このうち，ルートAとルートBは都市高速道路であり，同じ組織に

1）Wardrop（1952）pp. 344-348.

2）もちろん，道路利用者は走行時間（これは混雑によって大幅に増加するであろう）だけではなく，燃料消費に関する費用や車両の傷みに関する費用などをも考慮に入れるであろう。この意味では一般化費用（Generalized　Cost）という用語で述べる方が正確には正しい。しかし本稿で簡単化のため，モデルで考察されるのは時間費用（混雑費用）と後述の金銭費用（料金），そして環境費用だけとする。

よって運営されているネットワークの一部である。ルートAはたとえば住宅地の中を走行する高速道路であり，そのため道路の形状がそれほど良くなく，同じ交通量でもルートBよりも多くの混雑を発生させ，時間費用の上昇が大きい。一方，ルートBはたとえば湾岸部分を走行する高速道路であり，そのため道路の形状も良く，同じ交通量ならばルートAほどの混雑費用の上昇を招かない。また，ルートCは都市高速道路と並行して走る無料の一般道路であり，料金を払いたくない道路利用者は一般道路を走行することによって目的地のD点まで走行することが可能である[3)]。ここでは道路利用者の道路サービス利用に関する需要が価格（費用）に関して弾力的であると仮定する。すなわち，道路利用者はこの３つのルートのどれかを選択することができると同時に，トリップそのものをあきらめることも可能である。また，逆に道路利用に関する費用が安ければ潜在的な道路利用者が顕在化することもある。つまり，転換交通だけではなく，発生交通も考慮に入れられる。

（図１）　交通ネットワークモデル



以上のような状況の下では，道路利用者は高い料金のルートを選択すれば混雑は少ないので，走行時間に関する費用は少なくできるが，高い料金を支払わなくてはならず，その一方で，無料の一般道路を選択すれば料金は支払わなくても良いが，かわりにひどい混雑で時間費用が大きくなる可能性がある。そうした中で，道路利用者は時間費用（所要走行時間）と金銭費用（道路利用料金）を合計した費用が最小になるルートを選択する。こうした道路利用者の行動の結果，最終的には全てのルートにおける費用が等しくなり，そのように交通量は配分される。これがWardropの原理（厳密にはその応用）である。

環境ロードプライシングは，当該道路における環境負荷を一定の水準以下に抑えるということを目的として行われるので，一定の交通量以下に当該ルートの交通量が抑制されるような料金水準を設定することが期待されている。ここではルートAに環境基準を超えた交通量が発生しているものとしよう。このとき，ルートAでは一定量以下の交通量となるように料金が設定されるであろうが，これは交通ネットワークにおける均衡交通量配分に影響をもたらす。ルートAの需要抑制のための高料金は，ルートAの時間費用＋金銭費用の総額を変化させるので，それにより，これまで均衡していたルートB，ルートCの交通量も同時に変化する。ルートAの交通量が抑制されたので，ルートBやルートCの交通量は増加して混雑が激化し，道路利用者全体にとっては不利益を被る可能性もある。

3）高速道路はその建設計画において，通常並行した無料道路が整備されていることが前提である。たとえば，道路整備特別措置法第３条には建設，料金徴収の条件として，「通常他に道路の通行又は利用の方法があって，当該道路の通行又は利用が余儀なくされるものでないこと。」とある。

3．料金格差モデル―需要が弾力的なときの最適料金格差

以上のような交通量均衡の理論を基礎として，本節では都市高速道路の料金格差は社会的な観点からどのようなものであるべきかについてモデルを構築し，定性的にその性質を調べることにする。

３つのルートA，B，Cを利用する道路利用者数をそれぞれN_a，N_b，N_cとし，当該起終点間の総利用者数をNとすると，$N=N_a+N_b+N_c$となる。道路利用者の道路の利用に関する需要曲線をD(N）とする。ここでD(N）は見方を変えれば，各道路利用者のトリップに対する限界評価を示していることに注意しておこう。ルートAとルートBにおける道路利用者はそれぞれトリップの所要時間を時間価値で換算した時間費用と，高速道路利用料金である金銭費用の合計を費用として認識する。そして，自己の効用の最大化のためには自己の道路利用の費用がその限界評価と等しくなくてはならない。したがって，次の式が成立する。

$D(N)=t_a(N_a)+f^a$　（ルートAの利用者行動）

$D(N)=t_b(N_b)+f^b$　（ルートBの利用者行動）

また，無料の一般道路であるルートCにおいては，道路利用者は時間費用のみを負担すればよいから，次の式が成立する。

$D(N)=t_c(N_c)$　（ルートCの利用者行動）

ここで，$t_a(N_a)$，$t_b(N_b)$，$t_c(N_c)$ はルートA，B，Cにおいて，車両１台が負担するそれぞれの時間費用である。時間費用は混雑によって増加するので，それぞれの時間費用はそのルート上の利用者数の関数であり，$t_a'(N_a)>0$，$t_b'(N_b)>0$，$t_c'(N_c)>0$であると考えられる。また，f^a，f^bはルートA，Bにおけるそれぞれの高速道路利用料金である。現行の料金体系では通常，$f^a=f^b$であるが，料金格差があるときは$f^a\neq f^b$となる。上の３式の左辺はいずれもD(N）であるので，

$t_a(N_a)+f^a=t_b(N_b)+f^b=t_c(N_c)$

が成立している。これは各ルート間で利用者の費用が均等する点で交通量が配分されるというWardropの原理を示している。つまり外生的にf^a，f^bが与えられれば自動的に上式を満たすように交通量N_a，N_b，N_cが決定され，それが均衡交通量である。

また，ルートAとルートBは都市高速道路ネットワークの一部を形成している。わが国の都市高速道路においては償還主義が料金決定の原則となっており，それは都市高速道路の利用料金によってその建設に関する諸費用を回収することを目的としている。言い換えれば，これは都市高速道路ネットワーク内での内部補助を意味しており，この両ルートも償還主義の立場から一定の料金収入をあげなくてはならない，という要請を受けている。したがって，この両ルートによって回収されなくてはならない利用料金の総額をRとすると，当該都市高速道路には次のような関係が課されている。

$N_af^a+N_bf^b=R$

いま，環境に関する規制がないとすると（環境規制がある場合については５．のシミュレーション分析において言及する），資源配分上最も望ましいのは，道路利用者の支払い意思の合計から，各ルートに要する時間費用の合計と，環境費用の合計を差し引いた純便益を最大にすることである。したがって，目的関数は，

$$\int_0^N D(n)\,dn-N_at_a(N_a)-N_bt_b(N_b)-N_ct_c(N_c)-N_ak-N_bk-N_ck$$

となる。ここでkは車両１台当りが発生させる環境費用である。上式からわかるように，このモデルでは

各ルートにおける環境費用は道路利用者数に関して線形の関係にある。つまり，車両１台当りが発生させる環境汚染物質が全体としての環境費用を決定する。

先に述べたルートA，B，Cにおける利用者行動の式において，簡単化のためにD(N) を消去しておくと，最適な料金の決定のためには次のような制約条件付き極値問題を解けばよいことになる。

$$\max \quad \int_0^N D(n)\,dn - N_a t_a(N_a) - N_b t_b(N_b) - N_c t_c(N_c) - N_a k - N_b k - N_c k$$

$$s.t. \quad t_c(N_c) = t_a(N_a) + f^a$$

$$t_c(N_c) = t_b(N_b) + f^b$$

$$N_a f^a + N_b f^b = R$$

したがって，ラグランジュ関数は,

$$\mathrm{L} = \int_0^N D(n)\,dn - N_a t_a(N_a) - N_b t_b(N_b) - N_c t_c(N_c) - N_a k - N_b k - N_c k$$

$$+ \lambda_a [t_c(N_c) - t_a(N_a) - f^a] + \lambda_b [t_c(N_c) - t_b(N_b) - f^b] + \mu\,[N_a f^a + N_b f^b - R]$$

となる。ここでλ$_a$，λ$_b$，μはそれぞれラグランジュの未定乗数である。１階の条件は次のようになる[4)]。

$$\frac{\partial L}{\partial N_a} = D(N) - t_a(N_a) - N_a t_a'(N_a) - k - \lambda_a t_a'(N_a) + \mu f^a = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial L}{\partial N_b} = D(N) - t_b(N_b) - N_b t_b'(N_b) - k - \lambda_b t_b'(N_b) + \mu f^b = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial L}{\partial N_c} = D(N) - t_c(N_c) - N_c t_c'(N_c) - k + \lambda_a t_c'(N_c) + \lambda_b t_c'(N_c) = 0 \tag{3}$$

$$\frac{\partial L}{\partial f^a} = -\lambda_a + \mu N_a = 0 \tag{4}$$

$$\frac{\partial L}{\partial f^b} = -\lambda_b + \mu N_b = 0 \tag{5}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_a} = t_c(N_c) - t_a(N_a) - f^a = 0 \tag{6}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_b} = t_c(N_c) - t_b(N_b) - f^b = 0 \tag{7}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \mu} = N_a f^a + N_b f^b - R = 0 \tag{8}$$

⑴式に⑷，⑸式を代入してλ$_a$，λ$_b$を消去し，さらにルートAの利用者行動の式から$D(N) - t_a(N_a)$をf^aで置き換える。同様に⑵式にも⑷，⑸式を代入してλ$_a$，λ$_b$を消去し，ルートBの利用者行動の式から$D(N) - t_b(N_b)$ をf^bで置き換える。この両者の式をμについて解き，μを消去することによって次の式を求めることができる。

$$f^a - f^b = N_a t_a'(N_a) - N_b t_b'(N_b) \tag{9}$$

この関係式を解釈することは容易である。ルートA，ルートBでの社会的総費用（STC）は

$$STC_a = N_a t_a(N_a) + N_a k \qquad STC_b = N_b t_b(N_b) + N_b k$$

4）なお，２階の条件は，通常のように需要曲線が右下がりであり，費用曲線が右上がりのときは満たされる。このことについては，Verhoef（1996） p. 36を参照のこと。

であるから，それぞれの社会的限界費用（SMC）は，

$$SMC_a = t_a(N_a) + N_a t'_a(N_a) + k \qquad SMC_b = t_b(N_b) + N_b t'_b(N_b) + k$$

となる。また，それぞれの私的限界費用（PMC）は，

$$PMC_a = t_a(N_a) \qquad PMC_b = t_b(N_b)$$

であるから，⑼式の右辺第１項と第２項はそれぞれルートA，Bの外部費用（混雑費用）であることがわかる。つまり，社会的余剰を最大化するような高速道路料金格差は，それぞれのルートで発生する混雑による時間費用の格差に等しい，ということが⑼式の意味である。この式には，環境に関する外部費用が現れていないことに注意しよう。この⑼式と都市高速道路の料金収入制約を連立させて解くと次式が得られる。

$$f^a = \frac{N_b}{N_a + N_b}[N_a t'_a(N_a) - N_b t'_b(N_b)] + \frac{1}{N_a + N_b}R \tag{10}$$

$$f^b = \frac{N_a}{N_a + N_b}[N_b t'_b(N_b) - N_a t'_a(N_a)] + \frac{1}{N_a + N_b}R \tag{11}$$

⑽式と⑾式の右辺第２項は当該都市高速道路における道路利用者１単位当りに必要とされる料金収入額であり，いわば平均収入である。また右辺第１項のカッコの中はそれぞれのルートにおける混雑の外部費用の差額分である。つまり，各ルートの最適な料金とは，混雑の外部費用の格差を他方の高速道路利用者数で加重したものに平均収入を加えたものに等しい。もしルートAにより多く混雑が発生しているならば，$N_a t_a(N_a) > N_b t_b(N_b)$が成り立つので，

$$f^a > \frac{1}{N_a + N_b}R > f^b \tag{12}$$

が成り立つ。すなわち，両ルートの最適料金は道路利用者１単位当りの収入をはさんでその上下に位置する。具体的にいえば，より混雑しており，その結果環境汚染もより大きく発生している道路では，混雑が発生していないときに支払うべき料金よりも高めの料金が設定され，より混雑が少なくその結果環境負担も少ないルートでは，混雑が発生していないときに支払うべき料金よりも低めの料金が設定される，ということである。

⑽式と⑾式の２つから得られる知見は次のようなものである。第１に，最適な料金設定に関して無料の一般道路の利用者数は影響を与えないということ，第２に，環境費用が線形の関数関係にある本モデルの場合，環境費用は最適な料金設定には直接の影響を与えないということ[5]，第３に，道路利用者のトリップに関する需要の価格弾力性は最適な料金形成に影響を与えないということ，第４に，ルートA（B）の最適料金の決定には自ルートではなく，他ルートであるルートB（A）によって加重された混雑費用の格差が反映されるということ，である。

以上が定性的な最適料金格差に関する分析の結論である。しかし，実際にはデータの利用可能性もあり，不確実性も伴うので正確な料金格差を設定することはなかなか難しい。場合によっては便宜的な格差をつける必要があるかもしれないし，あるいは，利用者に対する配慮から，一方の料金は現行のままとして，他方の料金のみを上げることによって需要を誘導せざるを得ないこともあるかもしれない。このようなさまざまな状況によって最適な料金が歪むとき，それは社会に対してどのような影響を与えるのか，あるいは料金収入を確保することができるのか，という問題がある。これらの問題に答えるためには定量的な分析が不可欠である。そこで次節では仮想的な数値例を導入することによってシミュレーションを行

5）第２の知見は，環境に関する関数が線形であることによる。もし，環境に関する関数が非線形であるときは，最適料金の導出は極めて技術的に困難になる。

い，それぞれの数値の変化を見てみることにしよう。

4．シミュレーションモデル―需要が非弾力的な場合

3．で述べたモデルに関して具体的にシミュレーション分析をする場合には，各ルートにおける時間費用に関する式，$t_a(N_a)$，$t_b(N_b)$，$t_c(N_c)$，道路利用者１単位当りの環境費用k，要請される料金収入R，そして需要曲線D(N）が特定化されることが必要である。ところが需要が弾力的な上記のモデルにおいてD（N）を特定化してモデルに組み込むと単に技術的な理由によって，そのシミュレーションの結果を導き出すことが極めて困難になる[6]。そこで止むを得ない措置として，ここでは需要が非弾力的な場合，つまり転換交通のみが存在するときの状況をシミュレーション分析することとする。需要が完全に非弾力的であるので，需要曲線の傾きは無限大となり，社会的厚生は需要曲線の下側の面積で単純に示すことはできない。そこでここではそれに替わるものとして，社会的厚生の増加を社会的総費用の最小化という観点から考える。したがって，本節においては３．のモデルは次のように書き換えることができる。

$$\min \quad N_a t_a(N_a)+N_b t_b(N_b)+N_c t_c(N_c)+N_a k+N_b k+N_c k$$

$$\begin{aligned} s.t.\quad & t_c(N_c)=t_a(N_a)+f^a \\ & t_c(N_c)=t_b(N_b)+f^b \\ & N_a f^a+N_b f^b=R \\ & N_a+N_b+N_c=N \end{aligned}$$

つまり，目的関数は時間費用と環境費用の合計を最小化することであり，制約条件には新たに外生的に与えられる一定の総利用者数を各ルート間で配分するという条件が付け加わる。その他は変化はなく，変数は３．と同様にN_a，N_b，N_c，f^a，f^bの５つである。この制約条件付き極値問題を解くと，最適な料金の式は３．において示した⑽式，⑾式と一致する。これはこの制約条件付き極値問題における需要が完全に非弾力的であるとする仮定が，３．で示したモデルにおける特殊な形であることに過ぎないことに留意すれば特別驚くにはあたらない。

さて，上記のようなモデル設定に従って，次のような仮想的な数値例を考えることにしよう。ルートA，B，Cにおける時間費用関数はそれぞれ，

$$t_a(N_a)=\frac{1}{200}N_a^2+N_a \qquad t_b(N_b)=\frac{1}{1000}N_b^2+N_b \qquad t_c(N_c)=\frac{1}{500}N_c^2+N_c$$

であるとする。また，道路利用者１単位当りの環境費用（原単位）はk＝５，当該都市高速道路が達成するべき料金収入はR＝1,000,000，道路利用者総数はN＝2000とする。したがって，最適料金は，具体的には，

$$f^a=\frac{N_b}{N_a+N_b}\left(\frac{1}{100}N_a^2+N_a-\frac{1}{500}N_b^2-N_b\right)+\frac{1000000}{N_a+N_b}$$

$$f^b=\frac{N_a}{N_a+N_b}\left(\frac{1}{500}N_b^2+N_b-\frac{1}{100}N_a^2-N_a\right)+\frac{1000000}{N_a+N_b}$$

となる。

これに基づいて計算を行うと，最適な料金は，ルートAが927.1341739，ルートBが806.5576158となり，

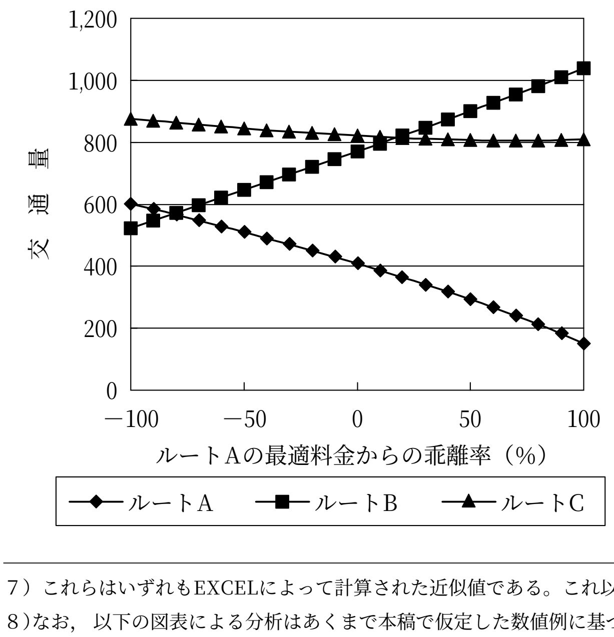
6）なお，無料道路の存在を前提としない２ルート（ルートAとルートBのみ）の場合にはシミュレーション分析によって社会的余剰を計測することは可能である。その理由は単純に計算が容易であるということのみによる。これについては竹内（2000c）を参照のこと。

このときの交通量は，ルートAが408.5179271，ルートBが770.2476016，ルートCが821.2344713となる。そして発生する環境費用は，ルートAが2042.589636，ルートBが3851.238008，ルートCが4106.172357である。それぞれのルートでの利用者が負担する費用は等しく，2170.086585となり，社会的総費用は，3350173.17となる[7)]。

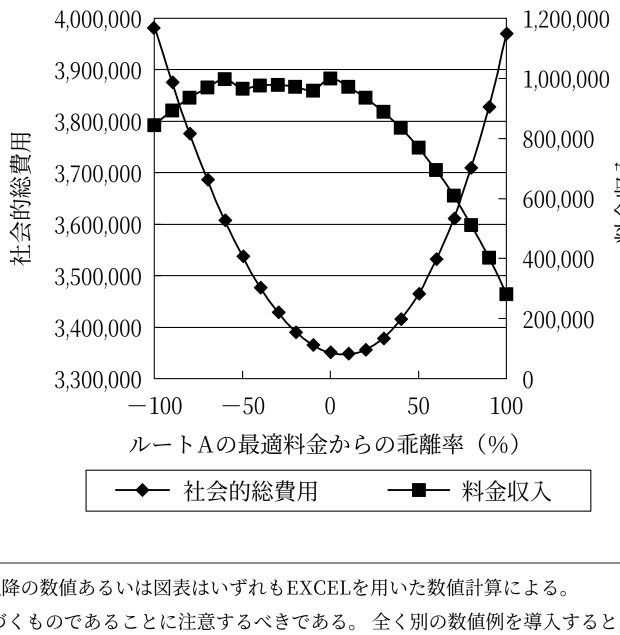
前節の最後に述べたように，この数値を実現することは実際にはかなり難しいかもしれない。実際には，この最適な料金格差の周辺で試行錯誤が行われつつ料金が決定されると考えることが現実的である。また従来の均一料金の場合にはどのような結果がもたらされるのかを知ることも重要である。そこで，ここでは次の３つのシナリオにおいてシミュレーション分析を行うことにする。すなわち，⑴最適料金から一定割合ずつ乖離を大きくした場合の数値の変化，⑵ルートBは従来の料金水準を維持したまま，混雑あるいは環境の悪化のひどいルートAの料金を変えていったときの数値の変化，⑶均一料金のときの数値の変化，の３つである。

まず，最適料金から一定割合ずつ乖離を広げていく場合の諸数値の変化を見ていくことにしよう[8)]。具体的な数値は（付表１）において示されている。（付表１）では，最適料金水準をはさんで，10%ごとにルートAが値上げし，ルートBが値下げする場合と，ルートAが値下げし，ルートBが値上げする場合の料金格差の場合の各数値が示されている。いうまでもなく，ルートAが値下げし，ルートBが値上げしている場合は逆の格差がついている。この（付表１）から交通量配分の変動についてグラフで示したものが（図２）である。これを見てわかることは，ルートAとBの料金格差が拡大するにつれて，ルートBの交通量の増加とルートAの交通量の減少が著しく，ルートCの交通量の変動は余りない。すなわち，この数値例に関する限り，ルートBの交通量の増加はそのほとんどがルートAの交通からの転換によってもたらされていることがわかる。（付表１）の社会的総費用と料金収入を示したものが（図３）である。この図において，確かに最適料金格差のときは社会的費用はかなり小さくなっているが，しかしそれは最小値ではない。というのは最小値をとるような交通量の場合には料金収入が目標値を下回るからである。また，ここで想定したような料金格差の場合はいずれの場合でも料金収入が目標値を上回ることはない。

（図２）　料金格差による交通量の変化



（図３）　料金格差による社会的総費用の変化

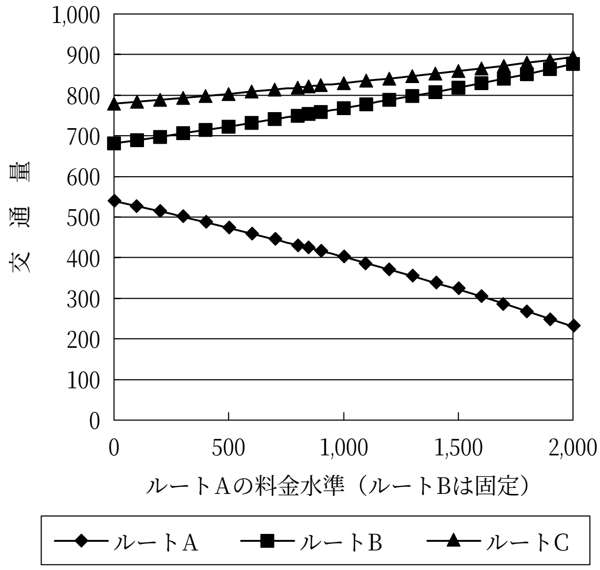


7）これらはいずれもEXCELによって計算された近似値である。これ以降の数値あるいは図表はいずれもEXCELを用いた数値計算による。

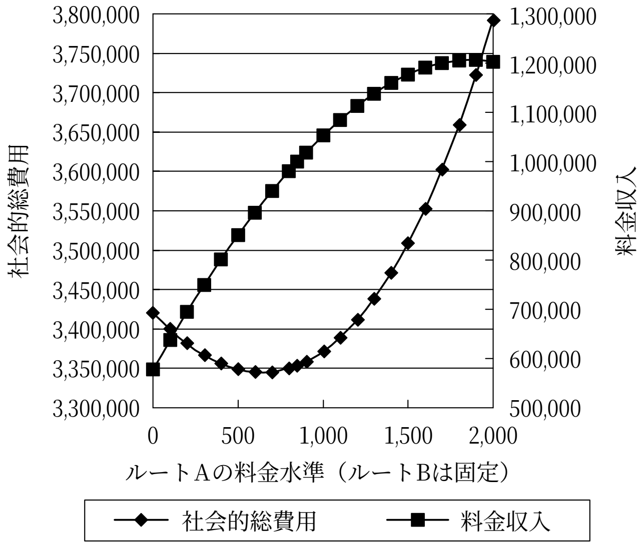
8）なお，以下の図表による分析はあくまで本稿で仮定した数値例に基づくものであることに注意するべきである。全く別の数値例を導入すると，本稿と異なる結果が生じる可能性は十分ある。同様のことは５．においても当てはまる。

（付表２）は，最適格差の場合の，道路利用単位当りの収入（848.3451337）をルートBに課し，その料金を不変とする前提で，ルートAの料金水準を変化させることで格差をつけるときの諸数値をまとめたものである。このうち交通量配分についてグラフ化したものが（図４）であるが，ルートAの交通量の一貫した減少に対してルートBとルートCは一貫して交通量が増加する。しかもルートAの高料金により相対的に安価となったルートBの料金により，格差が大きくなるとルートBとルートCの交通量がかなり近似することが観察できる。社会的総費用と料金収入をグラフにしたものは（図５）であるが，料金格差が拡大するにつれて社会的総費用は加速度的に増加するものの，料金収入に関しては収入の増加は期待できるがその収入の増加は頭打ちとなる。また，ルートAの料金がルートBを下回るときはほとんど全ての場合料金収入は目標値を下回ることがわかる。

（図４） 一方的料金格差による交通量の変化

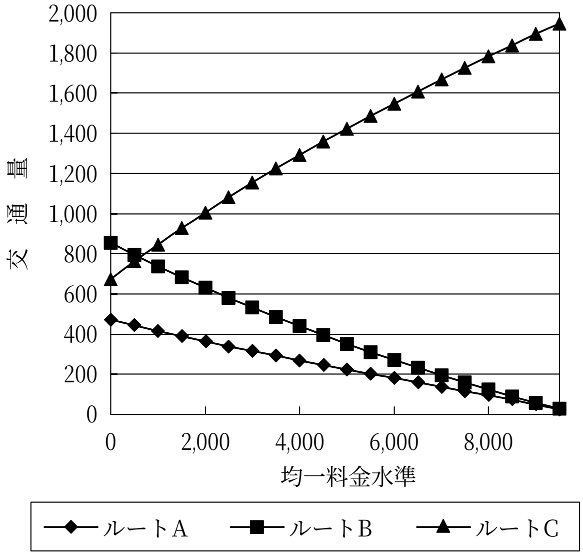


（図５） 一方的料金格差による社会的総費用の変化

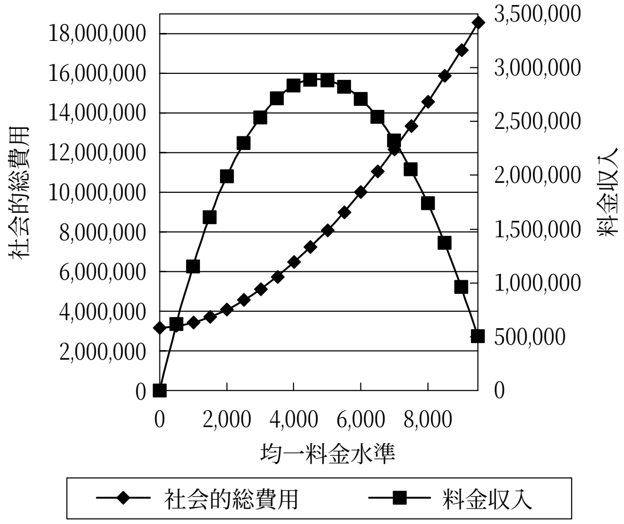


（付表３）は，均一料金とした場合の諸数値の変化を見たものである。交通量配分は（図６）に示され，社会的総費用と料金収入の変化は（図７）に示されている。（図６）においてわかることは，料金水準が上がるにつれてルートAとルートBの交通量はゼロに近づくが，ルートBの交通容量の方が大きいので，交通量の減少の割合がルートAよりも大きいということである。また，（図７）においてわかることは，均一料金が禁止的に高くなるまで，一貫して社会的費用が大きくなるということである。これはルートCの交通量が一貫して上昇するため，無料の一般道路においてかなり激しい混雑が発生しているからであろう。また，料金収入に関しては料金水準が4000程度で収入が減少に転ずる。このような都市高速道路ネットワークで収入最大化戦略をとる場合，均一料金では4000程度を徴収することが最適となる。

（図６）　均一料金の変化による交通量の変化



（図７）　均一料金の変化による社会的総費用の変化



５．環境規制制約下におけるモデルと数値シミュレーション

４．において示したシミュレーションモデルは当該道路ネットワークにおいて一切環境に関する制約がない場合，つまり環境ロードプライシングがない場合という想定に基づいて行われている。このとき，社会的費用が最小になる料金格差として，ルートAでは927.1341739という料金が，ルートBでは806.5576158という料金が最適であるということが示された。しかしながら現実には環境による制約が求められ，その制約において料金格差をつけるということが問題とされている。たとえばルートAにおいて前述の最適料金がつけられたとしても，もしその結果として生じた交通量（それによって発生した環境費用）が規制値を超えているならば，それは最適な料金格差としては是認されないことになる。環境規制が行われる場合には，シミュレーションモデルのために書き換えた（需要が非弾力的な）定性的分析におけるモデルはさらに次のように改める必要があるであろう。

$$\min \quad N_a t_a(N_a)+N_b t_b(N_b)+N_c t_c(N_c)+N_a k+N_b k+N_c k$$

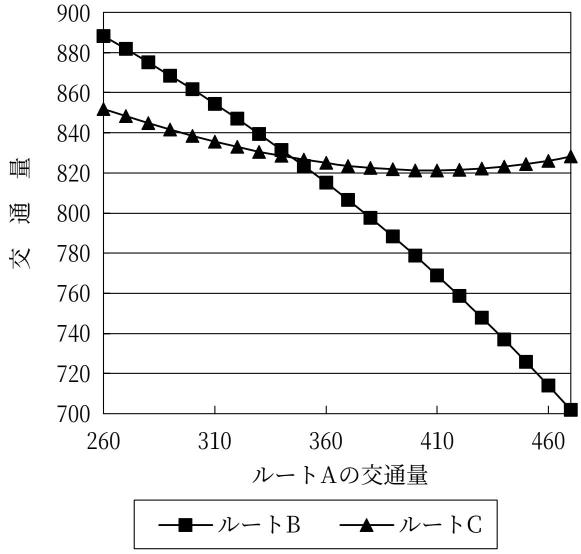
$$\begin{aligned} s.t.\quad & t_c(N_c)=t_a(N_a)+f^a \\ & t_c(N_c)=t_b(N_b)+f^b \\ & N_a f^a+N_b f^b=R \\ & N_a+N_b+N_c=N \\ & N_a \leq K \end{aligned}$$

この制約条件付き極値問題が前のものと異なる点は，制約条件が新たに１つ付け加わった点である。環境制約があるということは，あるルート（ここではルートA）における沿線の環境費用が一定の水準以下であることを要求する。それが$N_a k$であるならば，それは$N_a k \leq \bar{k}$であることを意味する。$K=\bar{k}/k$としたものが上記の制約条件のうち最後の式である。この問題はクーン＝タッカー条件などを用いて解く必要があるが，もしN_aが内点解であるならば，それは３．で述べた最適な料金水準の式⑽，⑾式と一致する。もしN_aが端点解である場合は，$N_a=K$となるが，この場合は注意が必要である。上記の問題で変数となっているのは，N_a，N_b，N_c，f^a，f^bの５つであるが，$N_a=K$であるので変数は４つである。そして制約条件は最

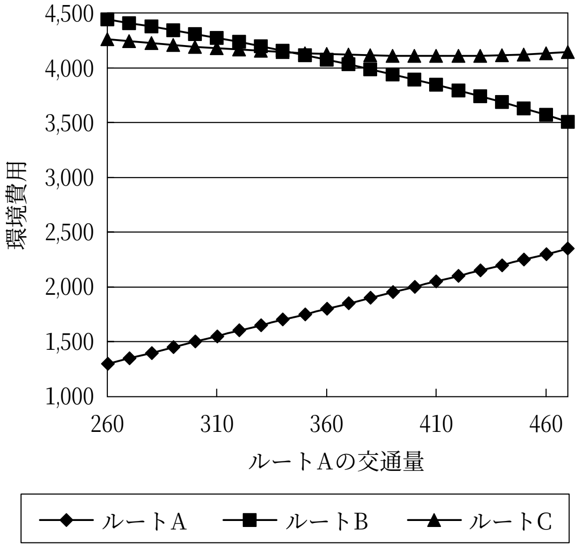
後のものを除くと４つである。つまり，上記のモデルに関する限り，N_aが端点解の場合は制約条件のみによって自動的に均衡交通量と料金水準が決定されてしまう。言い換えれば，社会的費用を最小にするような値は政策的に決定され得ない，ということになる。

以上のことを考えて，３．における数値例でルートＡにおける環境制約が課されている場合の各ルートの交通量，社会的総費用などの諸数値を示したものが（付表４）である。（付表４）の第１列のルートＡの交通量はそれぞれの交通量を上限とする場合のものであり，それぞれの上限交通量におけるその他のルートの交通量などの数値が各行において示されている。一例をあげると，いま，k＝５としているので，その社会が環境費用を第９行にあるように1700に抑えたいと思うならば，それはルートＡの交通量を340に抑えるということを意味し，そのときのルートＡの料金は1283.03206，ルートBの料金は677.9592783にならなければならない等々である。ルートＡが環境規制下にあるときのルートの交通量と環境費用についてグラフで示したものがそれぞれ（図８），（図９）である。本稿では環境費用は交通量に関して線形であり，（図８）の交通量を定数倍したものが（図９）の環境費用となっているので，その形状は変わらない。いずれの図にしても，ルートＡの規制の強化によって，グラフの横軸を右から左に見ると，ルートBの交通量はかなりの割合で増加し，その環境費用は増加するのに対して，ルートCはルートＡの規制が比較的緩いときは交通量は減少し，環境費用も逓減するものの，規制強化が進むと逆にルートCの交通量は増加し，環境が悪化することがわかる。（付表４）から明らかなように，環境規制を厳しくすると，ルートＡの料金はかなり高額にしなくてはならず，それによる転換交通量をある程度ルートBが処理しなくてはならないので，ルートBの料金を低めにして需要を誘導しなくてはならないが，それでも収容しきれない交通量がルートCに流れ込むために，上記のような傾向が出てくるものと考えられる。社会的総費用の変化のグラフは（図10）に示されている。社会的総費用はルートＡの交通量が410あたりに規制されるときに最小となる。しかし，これが社会が受忍する沿線の環境費用であるかどうかはわからない。たとえば社会がルートＡの交通量を350であることが必要であるとし，そのための需要誘導を行うとすれば，道路利用者の社会的総費用は45000強ほど増加する。料金水準をグラフに示したものは（図11）に示されている。ルートＡでの環境規制の強化により，ルートＡの料金は高額となるが，その一方で，前述のように，ルートBの料金は低下し，両ルートの料金格差は環境規制が厳しくなるほど拡大する。それはルートＡからの転換交通をルートBが引き受けなくてはならないという事情と，料金収入一定という制約から，ルートＡにおける収入変化を相殺するためにルートBの料金が下がっていると考えることもできる。ルートCへ転換する交通量も存在するから，料金収入を都市高速道路利用者数で割った単位当り料金収入はルートＡでの環境規制が厳しくなるにつれて増加する。

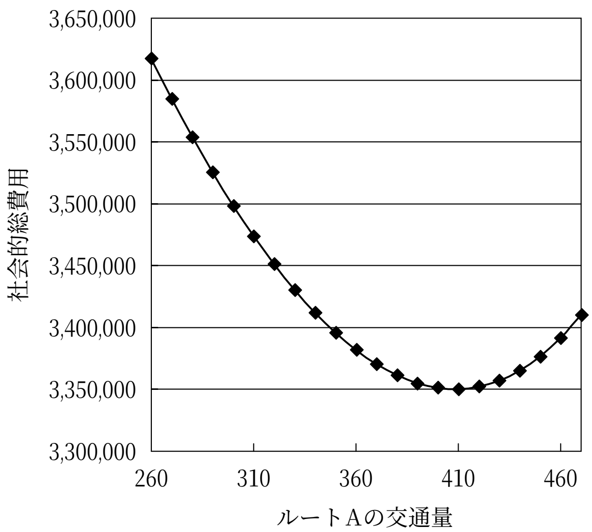
（図８）　環境規制による交通量の変化



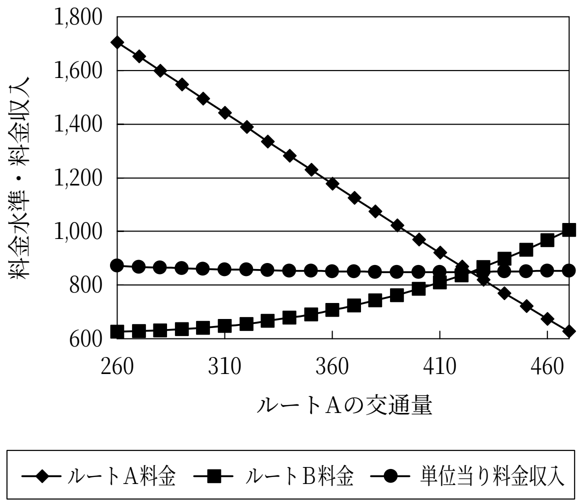
（図９）　環境規制による各ルートの環境費用の変化



（図10）　環境制約による社会的総費用の変化



（図11）　環境規制による料金水準の変化と単位当り料金収入



６．政策的含意

これまで述べてきたシミュレーション分析は実際の政策担当者に対してどのような示唆を与えるのであろうか。それは実際の道路行政に携わる政策担当者のみならず，ロードプライシングという新しい制度の導入に伴って従来の観点からのみでは対処しきれなくなるであろう，行政を監督する立場の政策担当者にとっても重要であろう。

先に述べたように，通常のロードプライシングにおいては，教科書的な説明に従うと，社会的便益を最大にするような最適交通量を実現するために料金は設定される，いうのが通常の主張である。本稿におけるシミュレーションでは技術的制約から，需要が完全に非弾力的な場合を取り上げ，社会的総費用の低下という観点から社会にとっての資源配分上の望ましさを考えている。シミュレーションの結果によれば，

環境規制を行うことによって実現できる社会的総費用は，必ずしも道路利用者にとって最適なものではないということであり，また逆に，道路利用者にとって最小となっている社会的総費用が必ずしも要求される環境規制に合致しない可能性があるということである。政策担当者は政策の目標をどこに設定するかについてのジレンマ，つまり，沿線住民の環境の保護なのか，あるいは道路利用者の利便性の追求なのか，というジレンマに直面する。あるいは合意点を求めるために，どれだけ沿線住民に環境悪化を受忍してもらい，逆に道路利用者に利便性を失うことを受忍してもらうかという選択が求められる。もし仮に司法によって強制的に交通量が制限される場合には，おそらく，道路利用者のみならず，社会はそのためにある程度の利便性の喪失という負担をすることは不可避である。しかし，それが社会の判断であるならばそれは公正の問題であり，価値判断の問題となる。

これまでの均一料金による都市高速道路料金は基本的に償還主義を中心として考えられてきた。したがって，都市高速道路サービスの提供にあたってはそれが適正な費用をかけた工事であり，その費用に基づいた料金であることを確認すればそれで道路行政は着実に遂行されていると判断することができた。しかし，それぞれの高速道路に料金格差がつき，しかもそれが混雑費用，あるいは環境費用などの要因に基づいて設定されたものであるということになれば，この新しいロードプライシングの提案は行政サービスのチェックに難しい問題を突きつけることになる。償還主義による費用の算定のみが関わる料金という従来の考え方が，環境・混雑といった要因が料金算定に関わった考え方に拡大すれば，行政はこれまでのチェックとは異なるアプローチを取らなくてはなるまい。もし，このモデルにおいて設定されたような料金が課されるとするならば，混雑費用をどのように見積もるか，ということが重要であり，その情報を十分に認識した上での行政のチェックが求められることになる。

7．まとめにかえて—今後の課題

本稿では都市高速道路における料金格差という新しいロードプライシングの提案に対して経済学の立場から分析を試みた。それにより最適な料金格差をつけた定性的な料金水準を求めることができ，仮想的な数値例を用いたシミュレーションによって定量的な料金水準も求めることができた。言い換えれば，本稿は，このモデルに基づく限りではあるが，２次関数に近似した時間費用関数，環境費用原単位，目標料金収入などが決定されれば最適料金水準が求められることを示している。そして，料金格差は混雑費用の格差によって表すことができ，需要曲線が直接的に関与するものではないこと，環境制約を入れた場合には，社会的総費用の最小化は不可能になるかもしれないことなどが明らかになった。

もちろん本稿の分析においては多くの問題が残されている。まず第１に，シミュレーション分析においては転換交通しか扱えない，需要が完全に非弾力的な場合しか取り扱っていないということである。３．で示したように確かに需要が弾力的な場合の料金を求めることは可能であるが，シミュレーション分析によるその観察には限界があった。第２に，環境に関する費用が交通量に関して線形の関係にあるという仮定は単純にすぎるかもしれない。線形でない場合には最適料金格差に環境費用の項目が影響を与えるかもしれないことは十分に考えられることである。第３に，シミュレーションの数値はあくまで仮想例であって，実際の時間費用関数を使用したものではなく，１つの数値例に過ぎないということである。本モデルに関する限り，現実の料金算定には３つの時間費用関数を実際のデータから推計することが必要である。しかしそれは非常に難しいかもしれない。

この他にも，今後解決しなくてはならない問題はたくさんあるが，本稿における分析の意義をまとめる

ならば，それは道路をネットワークとしてとらえ，各ルートでの交通量の相互依存関係の中で最適な料金格差を求めたという点で，近年理論面よりもむしろ現実面での展開の著しい，新しいロードプライシングについての研究のための１つの手がかりとなるのではないか，ということである。

［参考文献］

Marchand, M. (1968), " A Note on Optimal Tolls in an Imperfect Environment, " *Econometrica,* Vol. 36, No. 3, pp. 575–581

Ministry of Transport (1964), *Road Pricing: The Economic and Technical Possibilities,* H.M.S.O.

竹内健蔵（2000a），「代替的鉄道サービスの運賃規制が次善の道路価格形成に与える影響について―大都市地域の交通ネットワーク分析」，日本交通政策研究会（日交研シリーズA-280）.

竹内健蔵（2000b），「鉄道運賃規制と次善の道路料金形成との関係について―数値例によるシミュレーションを中心に」，未定稿.

竹内健蔵（2000c），「都市高速道路料金格差の余剰分析」，未定稿.

Verhoef, E. (1996), *The Economics of Regulating Road Transport,* Edward Elgar.

Wardrop, B. A. (1952), " Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research, " *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Part 2,* 2. pp. 325–378.

Walters, A. A. (1961), " The Theory and Measurement of Private and Social Cost of Highway Congestion, " *Econometrica,* Vol. 29, No. 4, pp. 676–697.

（付表１）　最適料金格差からの一定割合の乖離による諸数値の変化

ルートAの交通量	ルートBの交通量	ルートCの交通量	総交通量	乖離	乖離	ルートAの料金	ルートBの料金	交通量１単位当り収入	総時間費用	ルートAの環境費用	ルートBの環境費用	ルートCの環境費用	ルートABCの一般化費用	社会的総費用	総収入
N_a	N_b	N_c	N	Aの乖離率（%）	Bの乖離率（%）	f^a	f^b	$1000000/(N_a+N_b)$	$N_a*t_a+N_b*t_b+N_c*t_c$	N_a*k	N_b*k	N_c*k	t_a+f^a t_b+f^b t_c	$N_a*t_a+N_b*t_b+N_c*t_c+N_a*k+N_b*k+N_c*k$	$N_a*f^a+N_b*f^b$
601.3546064	522.9253091	875.720085	2000	−100	100	0	1613.115232	889.458209	3975444.059	3006.773032	2614.626545	4378.600425	2409.49142	3985444.059	843538.7811
583.6229068	547.356358	869.020735	2000	−90	90	92.71341739	1532.45947	884.1895083	3865918.512	2918.114534	2736.78179	4345.103675	2379.414811	3875918.512	892911.1085
565.6098567	571.8234617	862.5666815	2000	−80	80	185.4268348	1451.803708	879.1724172	3766163.815	2828.049284	2859.117309	4312.833408	2350.609242	3776163.815	935054.6678
547.2959587	596.335987	856.3680543	2000	−70	70	278.1402522	1371.147947	874.4071935	3676311.186	2736.479794	2981.679935	4281.840272	2323.100543	3686311.186	969889.9001
528.65969	620.9043284	850.4359815	2000	−60	60	370.8536696	1290.492185	869.8950071	3596509.828	2643.29845	3104.521642	4252.179908	2296.918699	3606509.828	997327.5696
509.677192	645.5400716	844.7827363	2000	−50	50	463.567087	1209.836424	865.6380332	3526929.496	2548.38596	3227.700358	4223.913682	2272.098479	3536929.496	965200.9367
490.3218965	670.2561897	839.4219136	2000	−40	40	556.2805044	1129.180662	861.6395673	3467763.583	2451.609482	3351.280949	4197.109568	2248.680212	3477763.583	975536.8165
470.5640706	695.0672846	834.3686447	2000	−30	30	648.9939218	1048.524901	857.9041697	3419232.853	2352.820353	3475.336423	4171.843224	2226.710715	3429232.853	978127.3959
450.3702592	719.9898816	829.639859	2000	−20	20	741.7073391	967.869139	854.4378479	3381589.987	2251.851296	3599.949408	4148.199295	2206.24445	3391589.987	972827.5812
429.7025938	745.0427978	825.2546084	2000	−10	10	834.4207565	887.2133774	851.2482851	3355125.191	2148.512969	3725.213989	4126.273042	2187.344946	3365125.191	959472.7061
408.5179271	770.2476016	821.2344713	2000	0	0	927.1341739	806.5576158	848.3451337	3340173.17	2042.589636	3851.238008	4106.172357	2170.086585	3350173.17	1000000
386.7667375	795.6291988	817.604064	2000	10	−10	1019.847591	725.9018542	845.7403898	3337121.914	1933.833687	3978.145994	4088.02032	2154.556875	3347121.914	971991.8363
364.3917203	821.2165854	814.3916944	2000	20	−20	1112.561009	645.2460926	843.448882	3346423.904	1821.958602	4106.082927	4071.958472	2140.859358	3356423.904	935294.8129
341.3259547	847.0438324	811.6302128	2000	30	−30	1205.274426	564.5903311	841.4889127	3368610.633	1706.629773	4235.219162	4058.151064	2129.117417	3378610.633	889624.2019
317.4904724	873.1513926	809.358135	2000	40	−40	1297.987844	483.9345695	839.8831163	3404311.716	1587.452362	4365.756963	4046.790675	2119.479316	3414311.716	834646.9169
292.7909756	899.5878698	807.6211546	2000	50	−50	1390.701261	403.2788079	838.6596289	3454280.524	1463.954878	4497.939349	4038.105773	2112.125013	3464280.524	769969.5026
267.1133062	926.4124683	806.474225	2000	60	−60	1483.414678	322.6230463	837.8537115	3519429.34	1335.566531	4632.062342	4032.371125	2107.275576	3529429.34	695121.8118
240.3170352	953.6984671	805.9844975	2000	70	−70	1576.128096	241.9672847	837.5100642	3600878.776	1201.585176	4768.492335	4029.922488	2105.206518	3610878.776	609534.2596
212.226114	981.5382956	806.2355903	2000	80	−80	1668.841513	161.3115232	837.6862235	3700029.302	1061.13057	4907.691478	4031.177952	2106.267244	3710029.302	512505.1867
182.6147621	1010.05122	807.3340175	2000	90	−90	1761.55493	80.65576158	838.4577199	3818668.513	913.0738103	5050.256101	4036.670088	2110.910449	3828668.513	403152.3849
151.1852313	1039.395482	809.4192867	2000	100	−100	1854.268348	0	839.9262551	3959138.911	755.9261567	5196.97741	4047.096434	2119.73845	3969138.911	280337.9891

（付表２） ルートBの料金を固定し，ルートAのみの料金を変化させたときの諸数値の変化

ルートA の交通量	ルートB の交通量	ルートC の交通量	総交 通量	ルートA の料金	ルートB の料金	交通量 １単位当り 収入	総時間費用	ルートA の環境費用	ルートB の環境費用	ルートC の環境費用	ルート ABCの 一般化費用	社会的 総費用	総収入
N_a	N_b	N_c	N	f^a	f^b	$1000000/(N_a+N_b)$	$N_a*t_a+N_b*t_b+N_c*t_c$	N_a*k	N_b*k	N_c*k	t_a+f^a t_b+f^b t_c	$N_a*t_a+N_b*t_b+N_c*t_c+N_a*k+N_b*k+N_c*k$	$N_a*f^a+N_b*f^b$
408.5179271	770.2476016	821.2344713	2000	927.1341739	806.5576158	848.3451337	3340173.17	2042.589636	3851.238008	4106.172357	2170.086585	3350173.17	1000000
539.360769	681.3406922	779.298539	2000	0	848.3451337	819.2011165	3409809.869	2696.803845	3406.703461	3896.492695	1993.910965	3419809.869	578012.0606
526.598358	689.4462484	783.9553935	2000	100	848.3451337	822.3382553	3388706.817	2632.99179	3447.231242	3919.776968	2013.127511	3398706.817	637548.2056
513.6382477	697.6703893	788.691363	2000	200	848.3451337	825.5534299	3370926.061	2568.191238	3488.351947	3943.456815	2032.759495	3380926.061	694592.9292
500.4709454	706.018925	793.5101296	2000	300	848.3451337	828.8507219	3356564.559	2502.354727	3530.094625	3967.550648	2052.826781	3366564.559	749089.0029
487.086174	714.4981453	798.4156806	2000	400	848.3451337	832.2345622	3345726.263	2435.43087	3572.490727	3992.078403	2073.350879	3355726.263	800975.4942
473.4727781	723.1148771	803.4123448	2000	500	848.3451337	835.7097749	3338522.897	2367.363891	3615.574386	4017.061724	2094.355136	3348522.897	850187.3762
459.6186147	731.8765507	808.5048346	2000	600	848.3451337	839.2816262	3335074.86	2298.093074	3659.382753	4042.524173	2115.86497	3345074.86	896655.079
445.5104267	740.7912776	813.6982956	2000	700	848.3451337	842.9558825	3335512.282	2227.552133	3703.956388	4068.491478	2137.908128	3345512.282	940303.9741
431.1336942	749.8679417	818.9983642	2000	800	848.3451337	846.738878	3339976.236	2155.668471	3749.339708	4094.991821	2160.515005	3349976.236	981053.7745
424.0822699	754.3169967	821.600733	2000	848.3451337	848.3451337	848.3451337	3343623.24	2120.41135	3771.584984	4108.003665	2171.656262	3353623.24	999689.2834
416.472459	759.1163056	824.4112352	2000	900	848.3451337	850.6375955	3348620.172	2082.362295	3795.581528	4122.056176	2183.719005	3358620.172	1018817.837
401.509118	768.5471388	829.9437432	2000	1000	848.3451337	854.6597604	3361611.611	2007.54559	3842.735694	4149.718716	2207.556977	3371611.611	1053502.343
386.2241738	778.172368	835.603458	2000	1100	848.3451337	858.8139556	3379134.139	1931.120869	3890.86184	4178.01729	2232.069736	3389134.139	1085005.333
370.5959383	788.0052609	841.398801	2000	1200	848.3451337	863.1097575	3401389.817	1852.979691	3940.026304	4206.994005	2257.302686	3411389.817	1113215.554
354.6001699	798.0606453	847.3391847	2000	1300	848.3451337	867.5579032	3428602.059	1773.00085	3990.303227	4236.695924	2283.306573	3438602.059	1138011.086
338.2096336	808.3551816	853.435185	2000	1400	848.3451337	872.1704928	3461019.159	1691.048168	4041.775908	4267.175925	2310.138415	3471019.159	1159257.672
321.3935544	818.9076939	859.6987516	2000	1500	848.3451337	876.9612429	3498918.588	1606.967772	4094.538469	4298.493758	2337.862639	3508918.588	1176806.689
304.1169397	829.7395877	866.143473	2000	1600	848.3451337	881.9457982	3542612.365	1520.584698	4148.697938	4330.717365	2366.552505	3552612.365	1190492.645
286.3397202	840.875372	872.7849075	2000	1700	848.3451337	887.1421319	3592453.739	1431.698601	4204.37686	4363.924538	2396.291897	3602453.739	1200130.054
268.0156578	852.3433323	879.6410098	2000	1800	848.3451337	892.5710498	3648845.742	1340.078289	4261.716661	4398.205049	2427.177622	3658845.742	1205509.502
249.0909252	864.1763949	886.7326797	2000	1900	848.3451337	898.2568534	3712252.143	1245.454626	4320.881975	4433.663399	2459.32237	3722252.143	1206392.597
229.5022397	876.4132724	894.0844877	2000	2000	848.3451337	904.2282065	3783211.845	1147.511199	4382.066362	4470.422439	2492.85863	3793211.845	1202505.414

（付表３）　均一料金水準を変化させたときの諸数値の変化

ルートA の交通量	ルートB の交通量	ルートC の交通量	総交通量	ルートA の料金	ルートB の料金	交通量１単位当り収入	総時間費用	ルートA の環境費用	ルートB の環境費用	ルートC の環境費用	ルートABCの一般化費用	社会的総費用	総収入
N_a	N_b	N_c	N	f^a	f^b	$1000000/(N_a+N_b)$	$N_a*t_a+N_b*t_b+N_c*t_c$	N_a*k	N_b*k	N_c*k	t_a+f^a t_b+f^b t_c	$N_a*t_a+N_b*t_b+N_c*t_c+N_a*k+N_b*k+N_c*k$	$N_a*f^a+N_b*f^b$
408.5179271	770.2476016	821.2344713	2000	927.1341739	806.5576158	848.3451337	3340173.17	2042.589636	3851.238008	4106.172357	2170.086585	3350173.17	1000000
471.59799	854.1127394	674.2892705	2000	0	0	754.3123683	3167242.622	2357.98995	4270.563697	3371.446353	1583.621311	3177242.622	0
443.1886306	794.322001	762.4893684	2000	500	500	808.0738657	3231783.569	2215.943153	3971.610005	3812.446842	1925.269442	3241783.569	618755.3158
415.9234031	737.2892908	846.787306	2000	1000	1000	867.1427268	3408556.884	2079.617015	3686.446454	4233.93653	2280.884789	3418556.884	1153212.694
389.645911	682.6942084	927.659881	2000	1500	1500	932.5399488	3689021.003	1948.229555	3413.471042	4638.299405	2648.765591	3699021.003	1608510.179
364.2265166	630.2792989	1005.494184	2000	2000	2000	1005.524537	4066050.956	1821.132583	3151.396495	5027.470922	3027.531294	4076050.956	1989011.631
339.55522	579.8351529	1080.609627	2000	2500	2500	1087.677258	4533611.981	1697.7761	2899.175764	5403.048134	3416.043957	4543611.981	2298475.932
315.5364929	531.1900332	1153.273474	2000	3000	3000	1181.018864	5086526.19	1577.682464	2655.950166	5766.367369	3813.352885	5096526.19	2540179.578
292.0853617	484.2025474	1223.712091	2000	3500	3500	1288.181857	5720301.627	1460.426809	2421.012737	6118.560455	4218.654654	5730301.627	2717007.682
269.124281	438.7564509	1292.119268	2000	4000	4000	1412.667353	6431004.421	1345.621405	2193.782254	6460.596341	4631.263674	6441004.421	2831522.928
246.5804736	394.7570193	1358.662507	2000	4500	4500	1559.241446	7215161.529	1232.902368	1973.785096	6793.312536	5050.590123	7225161.529	2886018.718
224.3834884	352.128651	1423.48786	2000	5000	5000	1734.568852	8069685.778	1121.917442	1760.643255	7117.439302	5476.123238	8079685.778	2882560.697
202.4627501	310.8135272	1486.723722	2000	5500	5500	1948.268495	8991817.625	1012.31375	1554.067636	7433.618612	5907.418576	9001817.625	2823019.525
180.744857	270.7712848	1548.483858	2000	6000	6000	2214.760243	9979079.894	903.7242848	1353.856424	7742.419289	6344.088374	9989079.894	2709096.851
159.1503179	231.9798059	1608.869877	2000	6500	6500	2556.693896	11029243.07	795.7515894	1159.89903	8044.349383	6785.794436	11039243.07	2542345.805
137.5892727	194.4374072	1667.97332	2000	7000	7000	3011.806161	12140299.86	687.9463634	972.1870358	8339.8666	7232.243312	12150299.86	2324186.759
115.955472	158.1670225	1725.877505	2000	7500	7500	3648.004158	13310448.95	579.7773602	790.8351126	8629.387525	7683.18383	13320448.95	2055918.709
94.11723701	123.223482	1782.659281	2000	8000	8000	4601.070635	14538089.27	470.5861851	616.11741	8913.296407	8138.407509	14548089.27	1738725.752
71.9030198	89.70606328	1838.390917	2000	8500	8500	6187.771015	15821829.27	359.515099	448.5303164	9191.954583	8597.753241	15831829.27	1373677.206
49.07674995	57.78076955	1893.142481	2000	9000	9000	9358.255785	17160521.1	245.3837497	288.9038477	9465.712405	9061.119387	17170521.1	961717.6755
25.29225568	27.72222491	1946.98552	2000	9500	9500	18862.77087	18553343.93	126.4612784	138.6111246	9734.927598	9528.490747	18563343.93	503637.5656

（付表４）　ルートAの環境制約下における諸数値の変化

ルートAの交通量	ルートBの交通量	ルートCの交通量	総交通量	ルートAの料金	ルートBの料金	交通量１単位当り収入	総時間費用	ルートAの環境費用	ルートBの環境費用	ルートCの環境費用	ルートABCの一般化費用	社会的総費用	総収入
N_a	N_b	N_c	N	f^a	f^b	$1000000/(N_a+N_b)$	$N_a*t_a+N_b*t_b+N_c*t_c$	N_a*k	N_b*k	N_c*k	t_a+f^a, t_b+f^b, t_c	$N_a*t_a+N_b*t_b+N_c*t_c+N_a*k+N_b*k+N_c*k$	$N_a*f^a+N_b*f^b$
260	888.075451	851.9245485	2000	1705.475421	626.7219636	871.0228924	3606950.841	1300	4440.377255	4259.622743	2303.475421	3616950.841	1000000
270	881.7588925	848.2411075	2000	1652.76706	628.0094234	868.237273	3574534.121	1350	4408.794463	4241.205538	2287.26706	3584534.121	1000000
280	875.243759	844.7562413	2000	1599.982456	630.6870591	865.6181799	3543964.912	1400	4376.218795	4223.781207	2271.982456	3553964.912	1000000
290	868.5230776	841.4769224	2000	1547.143744	634.7883302	863.1679587	3515287.488	1450	4342.615388	4207.384612	2257.643744	3525287.488	1000000
300	861.589546	838.4104543	2000	1494.274634	640.3485422	860.8892904	3488549.269	1500	4307.94773	4192.052271	2244.274634	3498549.269	1000000
310	854.435504	835.5644958	2000	1441.400549	647.4050145	858.7852196	3463801.097	1550	4272.17752	4177.822479	2231.900549	3473801.097	1000000
320	847.05291	832.9470897	2000	1388.548798	655.9972559	856.8591804	3441097.596	1600	4235.26455	4164.735449	2220.548798	3451097.596	1000000
330	839.433307	830.5666926	2000	1335.748754	666.1671706	855.1150322	3420497.508	1650	4197.166535	4152.833463	2210.248754	3430497.508	1000000
340	831.567791	828.4322094	2000	1283.03206	677.9592783	853.5570948	3402064.122	1700	4157.838955	4142.161047	2201.03206	3412064.122	1000000
350	823.44697	826.5530297	2000	1230.432851	691.4209691	852.1901931	3385865.702	1750	4117.23485	4132.765148	2192.932851	3395865.702	1000000
360	815.060928	824.9390724	2000	1177.988019	706.6027746	851.0197013	3371976.039	1800	4075.30464	4124.695362	2185.988019	3381976.039	1000000
370	806.39917	823.6008303	2000	1125.737485	723.5586941	850.0516028	3360474.972	1850	4031.99585	4118.004151	2180.237485	3370474.972	1000000
380	797.450575	822.5494245	2000	1073.724536	742.3465414	849.2925489	3351449.071	1900	3987.252875	4112.747123	2175.724536	3361449.071	1000000
390	788.203335	821.7966648	2000	1021.996181	763.0283489	848.7499316	3344992.362	1950	3941.016675	4108.983324	2172.496181	3354992.362	1000000
400	778.644884	821.355116	2000	970.6035693	785.67083	848.4319693	3341207.139	2000	3893.22442	4106.77558	2170.603569	3351207.139	1000000
410	768.761823	821.2381767	2000	919.6024623	810.3458988	848.3478006	3340204.924	2050	3843.809115	4106.190883	2170.102462	3350204.924	1000000
420	758.539833	821.4601672	2000	869.0537797	837.1312684	848.5075956	3342107.56	2100	3792.699165	4107.300836	2171.05378	3352107.56	1000000
430	747.963569	822.0364309	2000	819.0242184	866.1111489	848.9226885	3347048.437	2150	3739.817845	4110.182155	2173.524218	3357048.437	1000000
440	737.016547	822.9834527	2000	769.5869797	897.3770421	849.6057278	3355173.959	2200	3685.082735	4114.917264	2177.58698	3365173.959	1000000
450	725.681005	824.3189948	2000	720.8226053	931.0286792	850.570857	3366645.21	2250	3628.405025	4121.594974	2183.322605	3376645.21	1000000
460	713.937744	826.0622565	2000	672.8199597	967.1751134	851.8339283	3381639.921	2300	3569.68872	4130.311282	2190.81996	3391639.921	1000000
470	701.765938	828.2340616	2000	625.6773831	1005.936013	853.4127572	3400354.765	2350	3508.82969	4141.170308	2200.177383	3410354.765	1000000