土木学会論文集 No. 562／IV-35, 57-67, 1997.4

価格情報による経路誘導に関する理論的研究

文 世一[1]・小林 潔司[2]・安野 貴人[3]

[1]正会員 工博 東北大学助教授 大学院情報科学研究科（〒980 仙台市青葉区片平 2-1-1）
[2]正会員 工博 京都大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻（〒606 京都市左京区吉田本町）
[3]学生員 工修 鳥取大学大学院博士後期課程 社会開発工学専攻（〒680 鳥取市湖山町南4丁目101）

本研究ではその時々の交通状況に依存して変動する混雑料金を用いた経路誘導問題について考察する．混雑料金が価格情報として事前にドライバーに通知されれば，それは交通情報としての機能を有する．本研究では，事前に告知される変動料金によりネットワーク均衡の効率性を改善できることを示すとともに，ゼロ収支制約を考慮した混雑料金によりドライバーの厚生状態を常に改善できることを示す．

Key Words: *road pricing, route navigation, traffic information systems, Ramsey pricing*

1．はじめに

情報技術の進歩は，交通情報システムの精度の向上や費用の低下をもたらし，交通管理手段としてのロードプライシングの実現可能性を大きく高めた．ロードプライシングについては技術的問題がほぼ解決され，残された課題は社会的合意の問題のみであるかのような見解がしばしばみられる．しかし，個々の車両を認識しいかに料金を徴収するかというハード的な問題に関してはかなりの程度研究が進展したものの，どの道路でいくらの料金を課するべきかというソフトな問題に関する研究は十分に行われているとはいいがたい．

従来，ロードプライシングに関する研究は，単一リンクを対象に混雑税の徴収を通じて混雑という外部不経済を内部化する方法について検討してきた．実際のネットワークでは，各リンクの混雑現象と交通流の非効率性という2つの外部不経済性が生じる．後者の問題は，総費用最小化配分と等費用配分の間のかい離という形で現われる．ロードプライシングはこれら2つの外部不経済性を同時に是正する手段である．しかし，後者の問題や不確実性により生じる非効率性に関してはほとんど研究が進展していない．本研究では外部不経済性と不確実性に直面する交通量配分を効率化する金銭的手段として混雑料金に着目する．

文は混雑料金を交通流のパレート改善の手段と位置づけ，完全情報を有するドライバーの経路誘導の可能性を議論した[1]．本研究では，混雑料金により不確実性下のドライバーの経路選択を誘導する問題を分析する．その際，ドライバーから徴収される利用料金が交通状況に応じて設定され，それが事前にドライバーに価格情報として通知されると考える．この場合，利用料金はドライバーの経路選択を誘導する直接的なインセンティブを与えると同時に交通状況の生起状態をドライバーに通知する交通情報としての機能を果たす．著者らの知る限り，交通情報としての機能に着目して混雑料金にアプローチした研究事例は見あたらない．

本研究では混雑料金が有する交通情報機能に着目したような経路誘導問題にアプローチを試みる．本研究では，等期待効用原則，総期待効用最大化原則，混雑料金下での等期待効用原則という3つの配分原則に基づいた交通量配分モデルを提案し，不確実性下における混雑料金の経路誘導効果について分析する．以下，2．で本研究の基本的な考え方を述べ，3.4.5．では上記の交通量配分モデルを定式化する．6．では異なる混雑料金の下で達成されるドライバーの総厚生水準の改善効果を議論し，7．で数値計算事例を紹介する．

2．従来の研究概要と本研究の考え方

（1）従来の交通量配分モデル

従来のネットワーク均衡に関する多くの研究は完全情報を有するドライバーの経路選択を前提としていた．確率利用者均衡モデル[2)-4)]は経路選択に関わる確率的変動を導入しているが，不確実性に対するドライバーの反応行動をモデル化している訳ではなく，情報提供の効果を分析するには限界がある[5)]．旅行時間の不確実性を考慮した経路選択行動を分析した研究事例も存在する[6)]．そこでは，情報提供を受けたドライバーの選択行動が交通量配分の結果に影響を及ぼし，それが旅行時間の不確実性に影響を及ぼす効果を無視している．情報提供の効果を分析するためにはドライバーの学習行動も考慮に入れた均衡論的な枠組みのもとで分析することが不可欠である．この種の均衡論を欠く分析は，交通情報システムの効果を正しく把握したことにはならない．小林等は期待

効用最大化仮説に基づいた経路選択モデルを定式化し，合理的期待均衡を求める方法を開発した[5),7)]．Arnott等，Mirchandani等はそれとは異なる方法で交通情報の提供が混雑に及ぼす影響を分析した[8),9)]．以上のモデルは，不確実性下での経済理論と整合的であり，情報提供がドライバーの知覚の変化に及ぼす影響を厳密に分析することが可能である．これらの研究では，情報提供が常に混雑を改善するとは限らず，場合によっては総旅行時間の増加を招く可能性があると指摘している[10)]．このことは情報システムの導入により交通混雑が改善されるという一般的な期待を裏切るものであるが，周知のように完全情報下でも等時間配分がシステム最適な交通量配分と一致しないことを考えれば不思議なことではない．交通量配分の効率性を抜本的に改善するためには情報提供だけでは不十分であり，その他の施策を併用する必要がある．

(2) ロードプライシングと経路誘導

Kanafani等は経路誘導によってシステム最適配分を達成した場合と利用者均衡の場合の差額に基づいて経路誘導の便益を測定する方法を提案した[11)]．しかし，システム最適配分をいかに達成するかに関しては不問に付している．もし管理者が個々のドライバーに選択すべき経路を指示することによりシステム最適配分を実現しようとした場合，一部のドライバーはより長時間の走行を強いられる．このことはいずれドライバーの知るところになり，やがて管理者の指示に従わないドライバーが現われるだろう．システム最適配分を達成するためにはドライバーの誘因と整合的であるような手段を導入する必要がある．本研究ではそのための手段としてロードプライシングに着目する．

Walters[12)]以来，ロードプライシングに関する研究は交通需要の抑制を通じて混雑の外部不経済を改善することを目的としてきた．旅行時間の不確実性を考慮した料金の設定方法や，それが交通需要の水準に及ぼす影響についても分析されている[13),14)]．最近では，混雑の外部不経済がドライバーの経路選択を歪ませる効果が認識されるようになり，それを是正するための手段としてロードプライシングの役割について研究されるようになってきた[1),9)]．しかし，これまでの研究は完全情報を仮定しており，情報提供による経路誘導の効果を分析する枠組みになっていない．赤松らは確率利用者均衡モデルに基づいて混雑料金を求める方法を提案している[15)]．しかし，前述したように確率的利用者均衡モデルは不確実性下の経路選択行動を明示的に考慮しておらず，情報提供の効果を経済理論と整合のとれた形で分析することは困難である．

(3) 危険回避行動と配分原則

従来の混雑料金に関する研究では危険中立型ドライバーが暗黙裡に想定され，ドライバーの危険回避行動はほとんど無視されてきた．交通情報の提供はドライバーの経路選択に関わる不確実性を軽減する．危険回避性は効用理論として極めて自然な仮定であるが，従来のネットワーク均衡の研究においてほとんど採用されてこなかった．しかし，本論文でのちに指摘するように，ドライバーが危険中立的であるか，危険回避的であるかによって混雑料金の設定に関して異なる政策的知見を得ることになる．したがって，交通情報や混雑料金に対するドライバーの反応行動を分析するためには危険回避行動を明示的に考慮する必要がある．

一方，配分原則としてはWardropの等費用原則，総費用最小化原則が提案されてきた．前者はネットワークで分権的に（ドライバーの自由な選択にまかせた結果として）達成される均衡である．後者はドライバーの選択行動を何らかの強制的な手段により拘束（誘導）することにより，システム全体として総費用を最小化にするような配分原則である．以下では，ドライバーの自由な経路選択により分権的に達成される配分状態をネットワーク均衡と呼ぶ．これらの配分原則では費用（時間）尺度を用いて交通流の効率性を議論することになる．しかし，ドライバーの危険回避的効用関数を考慮した場合，総走行費用が同一でも，各ドライバーの走行費用が異なればドライバーの効用の総和が異なる可能性がある．本論文における議論の見通しをよくするために，ここで危険回避的効用関数を明示的に導入したような配分原則を提案しておこう．

まず，各経路を利用する期待効用が等しくなるような配分原則を等期待効用原則と，ドライバーの総期待効用を最大にする配分原則を総期待効用最大化原則と呼ぶ．総期待効用最大化配分ではドライバーから混雑料金を徴収することを考慮していない．この場合には，総期待効用最大化配分により等期待効用配分よりドライバーの総期待効用をパレート改善することができる．しかし，ドライバーから金銭を徴収したり，逆に補助金を与えることが可能であれば，総期待効用最大化配分よりさらに総期待効用を改善できる可能性がある．この種の金銭的な授受を人為的に実現する手段として混雑料金に着目しよう．本研究では，ドライバーの総期待効用を最大にするような最適混雑料金システムの下で分権的に達成されるような配分を混雑料金下での等期待効用配分と呼ぶ．すなわち，1）等期待効用原則，2）総期待効用最大化原則，3）混雑料金下での等期待効用原則という3つの配分原則を導入する．危険中立的な場合，原則1）2）はそれぞれWardropの等費用原則，総費用最小化原則に一致する．また，6. で示すように，総期待効用最大化原則とゼ

ロ収支制約を用いた混雑料金下での等期待効用配分も一致する．しかし，危険回避的な場合には上述の3つの配分原則を用いた配分結果は互いに異なった結果となる．

3. 交通情報とネットワーク均衡

(1) 問題設定

空間的に離れた2つの地点の間に n 本の代替的な経路が存在する場合を考える．2地点間の交通需要は M でありその値は固定されている．各ドライバーは，上記の n 本の道路のいずれかを通って目的地へ向かう．本研究では，道路ネットワークで生じる不確実性を Arnott 等に従ってモデル化する[9]．すなわち，確率的な変動を K 個の離散的な状況の生起により表現し，それぞれの状況に対応して各経路の走行時間関数が変化すると考える．内々交通量の変化を状況に対応させれば，走行時間関数の変化は内々交通量の変化によって生じると考えることができる．状況の生起は外生的に与えられ，交通管理者は状況の生起に関して完全情報を持つと仮定する．すなわち，交通管理者は状況の生起をいち早く知り，そのことを利用者に情報として提供することができる．一方，各ドライバーはその情報によって各道路の走行時間関数を知り経路選択を合理的に行う．このようなモデル化の方法は，不確実性に関して極めて単純な仮定を置いていることは否めない．しかし，この方法により，混雑料金に関する価格情報の提示がネットワーク均衡に及ぼす本質的なメカニズムを効果的に分析できる．本研究では混雑料金の情報効果を理論的に分析することを目的としており，Arnott 等の方法を踏襲する．ネットワーク均衡のモデル化にあたっては伝統的な交通量配分モデルによるアプローチを採用する．すなわち，各ドライバーはネットワーク均衡において割り当てられた経路を利用し，一度均衡状態に到達すればもはや選択した経路を変更する誘因を持たない．近年の合理的期待均衡モデル[5),10)]の発展を考えれば，本アプローチが過度に単純化された問題設定であることは否めないが，本研究ではむしろ伝統的な交通均衡モデルを採用することにより，筆者らの問題意識をより明確な方法で表現したいと考える．

(2) 不確実性下でのネットワーク均衡

ドライバーがどのような状況が生起するかが判らない不確実な環境で経路選択する場合を考える．ドライバーは状況の生起状態を区別できないため，ネットワーク均衡状態においてドライバーは状況のいかんを問わず同一の経路を選択する．換言すれば，状況全体を通じてある1つのネットワーク均衡が成立する．k 番目の状況が生じる確率を π^k ($k=1, 2, \cdots, K$) と表す．Arnott 等に従い，状況 k が生じた場合の一般化交通費用 c_i^k を

$$c_i^k(x_i^k)=p_i^k+\omega t_i^k(x_i^k) \tag{1}$$

と定義する．ここに，p_i^k は走行費用，$t_i^k(x_i^k)$ は所要時間，ω は時間価値，x_i^k は交通量である．走行時間関数 $t_i^k(x_i^k)$ ($i=1, \cdots, n; k=1, \cdots, K$) は2階連続微分可能な1価関数であり，閉区間 $[0, M]$ において条件

(条件1) $dt_i^k(x_i^k)/dx_i^k>0$

(条件2) $d^2t_i^k(x_i^k)/dx_i^{k^2}\geq 0$

(条件3) $0\leq t_i^k(x_i^k)<\infty$ (2)

を満足すると仮定する．ドライバーは，期待効用が最大となる経路を選択する．ドライバーは状況の生起について正確な情報を持たないが，経験を通じて合理的期待を形成し，各状況の生じる確率分布，及び各状況が生じた場合に実現する経路走行費用を知っていると仮定する．経路 i に対する期待効用 EU_i を

$$EU_i(x_i)=E\left[U(c_i^k(x_i))\right]=\sum_k \pi^k U(c_i^k(x_i)) \tag{3}$$

と表わす．上式では，交通量が状況 k に依存しないことに注意されたい．ドライバーは事前にどの状況が起きているか知らず，状況に応じて経路を変更することができない．式(3)における $U(c_i^k)$ は，c_i^k に依存する基数的効用関数であり，

$$U'(c_i^k)<0,\ U''(c_i^k)\leq 0 \tag{4}$$

を満足すると仮定する．なお，$U''(c_i^k)\leq 0$ はドライバーが危険回避的（等号の時は危険中立的）であることを意味する．危険中立的な場合，ドライバーの行動は期待費用最小化行動と等価である．すべてのドライバーが同質であると仮定すると，ネットワーク均衡は

$$EU_i(x_i)=U^*,\ \ if\ \ x_i>0 \tag{5a}$$

$$EU_i(x_i)\leq U^*,\ \ if\ \ x_i=0 \tag{5b}$$

$$\sum_i x_i=M,\ x_i\geq 0 (i=1, \cdots, n) \tag{5c}$$

と定義できる．U^* は均衡期待効用であり内生的に決定される．上式ではドライバーがどの経路を選んでも同一の期待効用を獲得しており，等期待効用原則によるネットワーク均衡が達成されている．期待効用の単位で評価したドライバーの総厚生水準は次式のようになる．

$$V^*=MU^* \tag{6}$$

(3) 交通情報下でのネットワーク均衡

交通管理者が生起している状況 k をメッセージとしてドライバーに通知する場合を考える．ドライバーは状況の生起状態を知ることができるため，状況のそれぞれに対してネットワーク均衡が成立する．交通情報が提供された場合，ネットワーク均衡において

$$U(c_i^k(x_i^k))=U_k^{**},\ \ if\ \ x_i^k>0 \tag{7a}$$

$$U(c_i^k(x_i^k))\leq U_k^{**},\ \ if\ \ x_i^k=0 \tag{7b}$$

$$\sum_i x_i^k=M,\ x_i^k\geq 0 \tag{7c}$$

$$(i=1, \cdots, n; k=1, \cdots, K)$$

が成立する．ここに，U_k^{**} は均衡効用水準であり，各状

況 k の下で等期待効用配分が成立する．情報提供下で達成される総厚生水準を次式で表わす．

$$V^{**}=M\sum_k \pi^k U_k^{**} \tag{8}$$

4．総期待効用最大化配分と混雑料金

(1) 混雑料金の情報的役割

本研究では，ロードプライシング方式として固定料金と変動料金の2種類を考える．固定料金制とはそのときどきの状況に関わらず，各経路ごとに設定されたある一定の料金をドライバーから徴収する方式である．一方，変動料金制とはそのつどの状況の生起状態に対応して徴収する料金を差別化する方式である．混雑料金の価格情報としての役割を考える場合，徴収する料金を経路選択の前にドライバーに通知するのか，事後に通知するのかが決定的に重要となる．ドライバーが経路選択を行う以前に徴収する料金を通知する場合，料金自体が状況の生起状態に関する情報の役割を果たすことになる[16]．この意味において，固定料金の提示は交通情報としての役割を果たさないが，変動料金はドライバーに事前に告知されることにより交通情報としての機能を果たす．本研究では料金が経路選択の事前に告知されることを前提として以下議論を進める．

(2) 固定料金と総期待効用最大化配分

固定料金の場合，状況を通じてドライバーに同一の価格情報が提示される．価格情報はどのような状況が生起しているかに関する情報を伝達しない．ここで，以下に示す総期待効用最大化問題（問題 F）を考える．

$$\max_{x_i}\sum_i x_i EU_i(x_i) \tag{9a}$$

$$s.t.\ \sum_i x_i=M,\ x_i\geq 0\ (i=1,\ \cdots,\ n) \tag{9b}$$

この問題の最適条件を求めると，次のようになる．

$$EU_i(x_i)+E[U_i^{k\prime}c_i^{k\prime}]x_i=U^o,\ \ if\ \ x_i>0 \tag{10a}$$

$$EU_i(x_i)+E[U_i^{k\prime}c_i^{k\prime}]x_i\leq U^o,\ \ if\ \ x_i=0 \tag{10b}$$

$$\sum_i x_i=M,\ x_i\geq 0\ (i=1,\ \cdots,\ n) \tag{10c}$$

ただし，$E[U_i^{k\prime}c_i^{k\prime}]=\sum_k \pi^k dU/dc_i^k\cdot dc_i^k/dx_i$ である．効用関数，走行時間関数が条件 (2)，(4) を満足する場合，期待効用関数は凹関数であり[17]，2階の最適性の十分条件を満足する．式 (10a)，(10b) の左辺第2項は，経路 i の交通量が1台増加した場合にその経路を利用するすべての利用者の期待効用水準に及ぼす外部効果である．最適な交通量配分を分権的に達成するためには，このような外部効果に応じた料金（ピグー税）を各経路で徴収すればよい．上式は効用タームで定義されているため，金銭タームで料金を求めるためには条件

$$EU_i(x_i^o)+E[U_i^{k\prime}c_i^{k\prime}(x_i^o)]x_i^o$$
$$=E[U(c_i^k(x_i^o)+\tau_i)] \tag{11}$$

を満足する τ_i を求めればいい．式 (11) を満足する料金 τ_i は一意的に求まるが，同様の交通量配分を達成する料金 τ_i の組み合わせはそれ以外にも無数にありうる．式 (11) で定義した料金は，それらのうち外部効果の金銭的評価値に等しいものである．$\boldsymbol{x}^o=(x_1^o,\ \cdots,\ x_n^o)$ は問題 F の最適解である．総期待効用最大化配分の下で混雑料金を払わずに達成される総厚生水準は

$$W^F=\sum_i x_i^o EU_i(x_i^o) \tag{12}$$

で評価される．さらに，式 (11) で求めた混雑料金が課徴された場合の総厚生水準は次式のようになる．

$$V^F=MU^o \tag{13}$$

(3) 変動料金と総期待効用最大化配分

交通管理者が交通状況を完全に把握し，状況に応じた最適な交通量配分の達成を企てる場合を想定する．交通管理者が状況に応じた混雑料金をドライバーに価格情報として事前に通知すれば，それによりドライバーは状況の生起状態を知ることができる．変動料金の事前通知は交通情報を提供した場合と同じ役割を果たす．交通管理者の解くべき問題（問題 V）は，

$$\max_{x_i^k}\sum_i \pi^k x_i^k U(c_i^k(x_i^k)) \tag{14a}$$

$$s.t.\ \sum_i x_i^k=M,\ x_i^k\geq 0 \tag{14b}$$
$$(i=1,\ \cdots,\ n\,;k=1,\ \cdots,\ K)$$

となる．最適性の必要十分条件は次式で与えられる．

$$U(c_i^k(x_i^k))+U_i^{k\prime}c_i^{k\prime}x_i^k=U_i^{oo},$$
$$if\ \ x_i^k>0 \tag{15a}$$

$$U(c_i^k x_i^k))+U_i^{k\prime}c_i^{k\prime}x_i^k\leq U_i^{oo},$$
$$if\ \ x_i^k=0 \tag{15b}$$

$$\sum_i x_i^k=M,\ x_i^k\geq 0 \tag{15c}$$
$$(i=1,\ \cdots,\ n\,;k=1,\ \cdots,\ K)$$

ここに，$U_i^{k\prime}=dU/dc_i^k$，$c_i^{k\prime}=dc_i^k/dx_i^k$，$U_i^{oo}=\lambda_k/\pi_k$，$\lambda_k$ は状況 k 下での制約条件 (15c) のラグランジュ乗数である．このような交通量配分を分権的に達成するためには，その日の交通状況に対応する混雑料金を提示すればよい．その値は k ($k=1,\ \cdots,\ K$)，i ($i=1,\ \cdots,\ n$) のそれぞれに対して

$$U(c_i^k(x_i^{koo}))+U_i^{k\prime}c_i^{k\prime}(x_i^{koo})x_i^{koo}$$
$$=U(c_i^k(x_i^{koo})+\tau_i^k) \tag{16}$$

を解くことにより求まる．ここに，τ_i^k は状況 k に依存して変化する変動料金，x_i^{koo} ($i=1,\ \cdots,\ n\,;k=1,\ \cdots,\ K$) は問題 V の最適解である．混雑料金が課徴されないで

達成される総厚生水準は次式で評価される．

$$W^V=\sum_k\sum_i \pi^k x_i^{k\infty} U(c_i^k(x_i^{k\infty})) \quad (17)$$

式（16）で求めた混雑料金が課徴された場合の総厚生水準は次式により計算される．

$$V^V=M\sum_k \pi^k U_k^{\infty} \quad (18)$$

5．混雑料金下での等期待効用配分

（1） 混雑料金システムの考え方

以上では，混雑という外部不経済の内部化を含めた限界費用価格形成原理に基づいた混雑料金の設定方法について考察した．この方法によれば，道路利用の効率化を達成できるが，後に示すように混雑料金を徴収することによりドライバーの総厚生水準は従前の水準より低下する．それは徴収した混雑料金がドライバーに還元されないからである．一方，料金収入を一括してドライバーに還元すれば，ドライバーの厚生は改善される．しかし，それよりもさらに高い厚生を達成するような料金システムを構築することも可能である．本研究では，交通管理者が全体の期待料金収入がゼロとなるように，社会的限界費用の大きい道路の利用者から料金を徴収し，それが小さい道路の利用者に還付金を支払うような混雑料金システムを考える．特に，変動料金を適用した場合，状況に応じて差別化された状況依存的な料金体系[18]が導入されることになる．このような価格差別を通じてドライバーの総期待効用を最大化するような分権的なネットワーク均衡を求める問題を定式化する．

（2） 混雑料金下でのネットワーク均衡モデル

混雑料金収入をゼロにするゼロ収支制約の下で，ドライバーの総厚生水準を最も大きくするような分権的ネットワーク均衡を求める問題 RF を定式化しよう．

$$\max_{x_i,\tau_i,\overline{EU},s_i} \overline{EU} \quad (19a)$$

$$s.\,t.\ E[U(c_i^k(x_i)+\tau_i)]-\overline{EU}+s_i=0 \quad (19b)$$

$$s_i x_i=0 \quad (19c)$$

$$\sum_i \tau_i x_i=0 \quad (19d)$$

$$\sum_i x_i=M,\ x_i\geq 0\ s_i\geq 0 \quad (19e)$$

$$(i=1,\ \cdots,\ n)$$

ただし，$s_i\geq 0$ はスラック変数，$\overline{EU}$ は均衡効用水準であり内生的に決定される．式（19b），（19c）は分権的ネットワーク均衡の達成を表現する制約条件，式（19d）はゼロ収支制約条件である．混雑料金に関して非負条件を課していない．τ_i が負の場合にはドライバーに対して対価が支払われることになる．最適解を $(\bar{x}^F,\ \bar{\tau}^F)=\{\bar{x}_i^F,\ \bar{\tau}_i^F:(i=1,\ \cdots,\ n)\}$ で表す．$\bar{\tau}^F$ をゼロ収支固定料金と呼び，総厚生水準を次式で表す．

$$\bar{V}^F=M\overline{EU} \quad (20)$$

状況の生起に依存して課徴される変動料金に着目する．交通管理者が日々の交通状況を完全に把握し，その日の交通状況 k に応じた最適な混雑料金をドライバーに通知する．ドライバーはその時に実現する状況 k を知ることができる．この時，ゼロ収支変動料金を求める問題 RV は以下のように定式化できる．

$$\max_{x_i^k,\tau_i^k,\bar{U}^k,s_i^k} \sum_k \pi^k \bar{U}^k \quad (21a)$$

$$s.\,t.\ U(c_i^k(x_i^k)+\tau_i^k)-\bar{U}^k+s_i^k=0 \quad (21b)$$

$$s_i^k x_i^k=0 \quad (21c)$$

$$\sum_k\sum_i \pi^k \tau_i^k x_i^k=0 \quad (21d)$$

$$\sum_i x_i^k=M,\ x_i^k\geq 0,\ s_i^k\geq 0 \quad (21e)$$

$$(i=1,\ \cdots,\ n\,;k=1,\ \cdots,\ K)$$

ただし，$s_i^k\geq 0$ はスラック変数，$\bar{U}_k$ は均衡効用水準である．最適解を $(\bar{x}^V,\ \bar{\tau}^V)=\{\bar{x}_i^{k^V},\ \bar{\tau}_i^{k^V}:(i=1,\ \cdots,\ n\,;k=1,\ \cdots,\ K)\}$ で，ドライバーの総厚生水準を次式で表す．

$$\bar{V}^V=M\sum_k \pi^k \bar{U}^k \quad (22)$$

（3） ゼロ収支固定料金の性質

問題 RF の最適性の1次の必要条件は

$$\lambda_i E[U_i^{k\prime} c_i^{k\prime}]+\eta_i s_i-\mu\tau_i-\xi=0$$

$$(if\ x_i>0) \quad (23a)$$

$$\lambda_i E[U_i^{k\prime} c_i^{k\prime}]+\eta_i s_i-\mu\tau_i-\xi\leq 0$$

$$(if\ x_i=0) \quad (23b)$$

$$\lambda_i E[U_i^{k\prime}]-\mu x_i=0 \quad (23c)$$

$$\lambda_i-\eta_i x_i=0 \quad (23d)$$

$$1-\sum_i \lambda_i=0 \quad (23e)$$

$$(i=1,\ \cdots,\ n)$$

及び式（19b）−（19e）で表わされる．また，λ_i，η_i，μ，ξ はそれぞれ制約条件（19b），（19c），（19d），（19e）に対応するラグランジュ乗数である．なお，問題 RF は凸計画問題ではなく最適性の2次の十分条件を満足する保証はない．したがって，実用的には大域的な最適解を求めるためのアルゴリズムを開発する必要があるが，この問題に関しては今後の課題としたい．以下，着目している解 x_i，τ_i が大域的な最適解であると仮定し議論を進める．式（23a），（23c）より次式を得る．

$$\tau_i = \frac{E[U_i^{k\prime} c_i^{k\prime}] x_i}{E[U_i^{k\prime}]} - \frac{\xi}{\mu} \tag{24}$$

なお，$x_i=0$ となる経路では条件（23b）の範囲内で τ_i は任意の値をとれるが，ここでは $\tau_i=0$ に設定することとしておく．上式の右辺第1項の分子は他のドライバーに及ぼす（効用水準で評価した）社会的外部効果の期待値，分母は一般化費用（所得）に関する限界効用であり，第1項は道路利用がもたらす（金銭タームで評価した）限界的社会費用の期待値を表している．式（24）の右辺第2項における ξ と μ は上の定義より，それぞれ収支制約および総交通需要の制約に関するラグランジュ乗数である．すなわち，最適な料金は限界的社会費用の期待値（第1項）から収支水準と需給関係によって定まる定数項（第2項）を差し引いた値になる．混雑料金が負の場合にはドライバーへの還付金と解釈できる．ゼロ収支固定料金は社会的費用を内部化する料金と収支水準に対応する固定料金によって構成されている．従来の交通量配分モデルにおいては，最適な交通量配分を達成するためのリンク別料金の絶対水準は決まらず，料金差のみが意味をもっていた．すなわち，同一の交通量配分を達成する料金の組み合わせは無数に存在する．しかし，本研究で提案するゼロ収支固定料金は最適交通量配分に対して一意的に決定される（付録I参照）．このような違いが生じた理由は，均衡効用レベル $\overline{EU}$ を目的関数に採用するとともに，ゼロ収支条件という形で料金の取りうる値に制約を加えたためである．

（4） ゼロ収支変動料金の性質

問題 RV の最適性の必要条件は

$$\bar{\lambda}_i^k U_i^{k\prime} c_i^{k\prime} - \bar{\mu}\pi^k \tau_i^k - \bar{\xi}^k = 0 \quad (if \;\; x_i^k > 0) \tag{25a}$$

$$\bar{\lambda}_i^k U_i^{k\prime} c_i^{k\prime} - \bar{\mu}\pi^k \tau_i^k - \bar{\xi}^k \leq 0 \quad (if \;\; x_i^k = 0) \tag{25b}$$

$$\bar{\lambda}_i^k U_i^{k\prime} - \bar{\mu}\pi^k x_i^k = 0 \tag{25c}$$

$$\bar{\lambda}_i^k - \bar{\eta}_i^k x_i^k = 0 \tag{25d}$$

$$\pi^k - \sum_i \bar{\lambda}_i^k = 0 \tag{25e}$$

$$(i=1, \cdots, n\,; k=1, \cdots, K)$$

及び式(21b)－(21e)で表わされる．ただし，$U_i^{k\prime} c_i^{k\prime}$ は限界私的費用，$U_i^{k\prime}$ は一般化費用に関する限界効用である．また，$\bar{\lambda}_i^k$, $\bar{\eta}_i^k$, $\bar{\mu}$, $\bar{\xi}_k$ はそれぞれ制約条件（21b），（21c），（21d），（21e）に対応するラグランジュ乗数である．本ケースでも大域的な最適解の存在を仮定して議論を進める．式（25a），（25c）より次式を得る．

$$\tau_i^k = c_i^{k\prime} x_i^k - \frac{\bar{\xi}^k}{\bar{\mu}\pi^k} \tag{26}$$

ゼロ収支変動料金は限界社会的費用から状況・経路に対応した定数項を差し引いた値になる．走行時間関数の勾配 $c_i^{k\prime}$ や利用交通量の大きいリンクでは1単位当たりの交通量増加がもたらす社会的費用の限界的な増加が大きく，混雑料金も相対的に大きな値をとる．このようなリンクに交通が誘導されると社会的費用が増加する危険性があるため，混雑料金により当該リンクの利用コストを大きくし当該経路の利用者数を抑制することが必要となる．交通需要，期待収支額の潜在価格はそれぞれ $\bar{\xi}^k \leq 0$, $\bar{\mu} \leq 0$ であり，$\bar{\xi}^k$ が大きくなれば，あるいは $\bar{\mu}$ が小さくなれば，定数項 $\bar{\xi}^k/\bar{\mu}\pi^k$ は大きくなる．ゼロ収支変動料金は社会的費用を内部化する料金と状況・経路に応じて料金を差別化する変動料金を組み合わせており，状況・経路を通じた価格差別によりドライバーの総厚生水準を改善する仕組みになっている．

つぎに，問題 RV の最適解における状況別の効用水準について検討する．状況 k のもとでは，利用されている各経路の効用 $U(c_i^k(x_i^k)+\tau_i^k)$ が等しいので，その導関数 $U_i^{k\prime}$ も各経路間で等しくなる．このことを考慮しながら，式（25c）を（25e）に代入して λ_i^k を消去すると

$$U_i^{k\prime} = \bar{\mu}M \tag{27}$$

が成立する．上式の右辺は定数であり，これは $U_i^{k\prime}$ があらゆる状況 k，経路 i において等しくなることを意味している．このことから，効用水準 $\bar{U}^k$，さらには一般化費用 $c_i^k(x_i^k)+\tau_i^k$ があらゆる状況，経路について一定の値をとることになる．すなわち，変動料金における状況ごとの定数項（式（26）の右辺第2項）は状況間での効用水準を均等化させる役割を果たす．なお，$x_i^k=0$ となる経路において $\tau_i^k=0$ を仮定すれば，ドライバーが危険中立的な場合を除いて変動料金は最適交通量配分に対して一意的に決定される（付録I参照）．危険中立的な場合には効用関数の性質より（$U_i^{k\prime}=\zeta$（一定値））をとるため，状況間での効用水準を均衡化させる条件（27）が機能しない．この場合，目的関数の最適値を達成しうるような均衡効用水準 $\bar{U}^k$ が複数個存在しうるため，変動料金は一意的に決定できない（付録I参照）．

（5）ラムゼイ混雑料金との関係

従来より，収支制約の中で経済厚生を最大化するようなラムゼイ料金に関する研究が蓄積された[19),20)]．混雑料金の文脈においても，たとえば山内等は収支制約を考慮したラムゼイ混雑税に関する研究を行っている．しかし，そこでは不確実性は考慮されておらず経路誘導という視点は考慮されていない[14)]．本研究で提案するゼロ収支混雑料金は，異なる経路を利用するドライバーの間での価格差別を混雑料金の徴収を通じて達成することにより，ネットワーク均衡の効率性を改善しようとする目的を持っている．また，ゼロ収支制約条件（19d），（21d）

において，混雑料金収入をある有限の値に設定した問題を考えよう．この場合，混雑料金下での等期待効用配分問題はラムゼイ混雑料金問題に形式的に一致する．通常，ラムゼイ混雑料金はある収支制約条件という限られた範囲の中で望ましい料金体系を求めるという意味において次善の料金体系である．しかし，交通量配分問題では総交通量が固定されており，通常のラムゼイ価格が有するような価格弾力値の違いを通じた価格差別という機能は働かない．特に，ゼロ収支制約という条件を課した場合は固定費用がゼロとなり，通常のラムゼイ料金に特有な固定費用の負担という問題が存在しない．そもそも，ラムゼイ料金における収支水準はネットワークの容量と交通需要水準の間の望ましい需給水準に関する議論を通じて検討すべき課題であろう．以上で提案した混雑料金は状況依存的料金により不確実性下の交通量配分を是正することを目的としており，交通需要水準の制御という意図は持っていない．のちに示すように，ドライバーが危険中立的な場合には，ゼロ収支混雑料金とラムゼイ混雑料金を組み合わせた混雑料金により交通量配分と交通需要水準の是正を同時に達成することが可能となる．本研究では不必要な概念上の混乱を避けるために，以上で提案した混雑料金をゼロ収支混雑料金と呼ぶ．

6. ネットワーク均衡の厚生比較

(1) 等期待効用配分と厚生水準

混雑料金が課徴されない場合を考える．交通情報を提示しない場合のドライバーの総厚生水準を式 (6) で，交通情報を提示した場合のそれを式(8)により評価しよう．交通情報システム導入の背景には，交通情報の提供によりドライバーの総厚生水準が改善されるという社会的期待が存在する．しかし，小林等[10]は交通情報システムの提供が必ずしもドライバーの総厚生水準の改善をもたらさないことがあることを示した．そこでは，交通情報にノイズのある場合を想定していたが，命題1に示すようにドライバーが状況の生起に関して完全情報を持つ場合にも，交通情報の提供が総厚生水準の向上につながらない場合が存在しうる．交通情報システムの導入がドライバーの総厚生水準の改善に資するか否かは，ネットワーク特性や交通需要のパターンに依存する．ここに，次の命題が成立する．

［命題1］ 交通情報の提供が常にドライバーの総厚生水準を改善できるとは限らない．

この命題を証明するには，$V^* < V^{**}$，$V^* > V^{**}$ の双方が成立する事例を示せば必要十分であろう．7. ではそれぞれの事例を紹介する．交通情報システムの有効性はネットワーク特性に依存する．ネットワーク特性によっては交通情報の提供がネットワーク均衡の効率性を低下させる危険性があり，外部不経済性を内部化する混雑料金を併用することが必要となる．

(2) 総期待効用最大化配分と厚生水準

不確実な条件下における経路配分は 1) 情報の不確実性，2) 混雑という外部不経済性，という 2 種類の要因が存在するため効率的な配分結果が達成できない．交通情報の提供は，情報の不確実性に起因する非効率性を解消するが，混雑という外部不経済性を解消できない．一方，固定料金では情報の不確実性により生じる非効率性を解消できない．変動料金は，非効率性の原因となる 2 つの要因を同時に解消することが期待できる．混雑料金を課徴しない場合，課徴する場合において達成されるドライバーの総厚生水準を比較してみよう．この時，以下の命題が成立する（付録II参照）．

［命題2］ 条件 (2) を満足する任意の走行時間関数に関して $W^V \geq W^F$，$W^F \geq V^*$，$W^V \geq V^{**}$ が成立する．しかし，V^F と V^V の間の大小関係は一意的に決定できない．

命題 2 は，価格情報を通じてドライバーの経路誘導を行う変動料金の方が，価格情報を提示しない固定料金よりも混雑料金の課徴前の総厚生水準は改善されることを主張している．しかし，残念ながら混雑料金を課徴した場合の総厚生水準 V^F，V^V の大小関係に関しては決定的なことは何も言えない．混雑料金を含まずに定義された総期待効用を最大化するような交通量配分結果が，混雑料金を含めた総期待効用に関しても最適であるという保証はない．命題の後半部分に関しては，$V^F < V^V$ が成立する場合と $V^F > V^V$ が成立する事例を示せば必要十分であろう．7. では双方の場合が生起する事例を紹介する．混雑料金の導入は交通量配分状態の効率性を増加させるが，料金が徴収されるためにドライバーの厚生状態は従前の場合より低下する（付録II参照）．

［命題3］ 条件 (2) を満足する任意の走行時間関数に関して $V^* \geq V^F$，$V^{**} \geq V^V$ が成立する．

従来より，混雑税の導入により資源配分上の効率性は増加するものの，ドライバーの総厚生水準は従前より低下することが指摘されている．以上で提案した混雑料金においても同様の結果が生じる．混雑税収入を道路の容量拡幅の財源とみなすことにより，混雑税徴収を正当化しようとする議論がみられる．しかし，本研究で議論している混雑料金はネットワーク利用の効率性改善を目的として決定され，必ずしも個々の道路における望ましい需給水準に関する議論を通じて求まったものではない．このような混雑料金の徴収の正当化に関しては，なお多側面からの検討が必要であろう．混雑料金収入を，たとえば一括還付金としてドライバーに還元すれば，混雑料金の導入によるドライバーの総厚生水準の悪化を防ぐこと

表–1　数値計算事例

Case 1	Case 2
$c_1^1(x_1^1)=1.0000+0.0016x_1^1$	$c_1^1(x_1^1)=1.0000+0.0006x_1^1$
$c_2^1(x_2^1)=1.5000+0.0006x_2^1$	$c_2^1(x_2^1)=1.5000+0.0012x_2^1$
$c_1^2(x_1^2)=1.0000+0.0004x_1^2$	$c_1^2(x_1^2)=1.0000+0.0004x_1^2$
$c_1^1(x_2^2)=1.5000+0.0001x_2^2$	$c_2^2(x_2^2)=1.5000+0.0001x_2^2$

ができる．しかし，ドライバーが還付金の存在を事前に知れば，ドライバーが認知する混雑料金は還付金を差し引いた水準となることに着目する必要がある．この場合の効果を分析するためには，還付金の存在をあらかじめ考慮したようなアプローチが必要となる．この課題を達成するために，混雑料金下での等期待効用配分について考察する．

（3）　ゼロ収支混雑料金下と厚生水準

ゼロ収支混雑料金下での等期待効用配分は，交通管理者が全体の期待料金収入がゼロとなるように，社会的限界費用の大きい道路の利用者から料金を徴収し，それを小さい道路の利用者に還付金を支払うことにより経路誘導を行うという役割を持っている．この混雑料金は以下の命題に示す特性を持っている（付録II参照）．

［命題4］　条件（2）を満足する任意の走行時間関数の下でゼロ収支変動料金を用いてドライバーの厚生水準を常に改善できる．すなわち，1）$\bar{V}^F \geq V^*$，2）$\bar{V}^V \geq V^{**}$，3）$\bar{V}^V \geq V^F$，4）$\bar{V}^F \geq W^F$，5）$\bar{V}^V \geq W^V$ が成立．

命題4は，状況依存的な人為的市場を導入することによりドライバーの総厚生水準を常に改善できることを主張している．問題 RV は状況依存型市場の存在を想定しており，問題 F, V とは本質的に構造が異なる．しかし，このような人為的市場の導入により，市場内での金銭の賦存量を変化させずに総期待効用最大化配分の結果よりさらにドライバーの総厚生水準を改善できることは特筆に値しよう．このことはドライバーが危険回避的な場合に該当するが，ドライバーが危険中立的な場合には次の命題が成立する（付録II参照）．

［命題5］　危険中立的なドライバーの場合，総効用最大化配分とゼロ収支下での等期待効用配分は一致する．

ドライバーが危険中立的な場合，$\bar{V}^F=W^F$，$\bar{V}^V=W^V$ が成立し配分結果も一致する．ゼロ収支混雑料金は総期待効用最大化原則で徴収した混雑料金を総料金収入がゼロとなるようにドライバーに還付した結果と同一になる．命題5の証明より，かりに収支水準がゼロではなく他の値をとったとしてもドライバーと交通管理者の間で金銭の移転が生じるだけでネットワーク均衡の効率性は影響を受けないことは明白である．危険中立的な場合，ネットワーク均衡の効率化と最適な交通需要に関する議論を互いに分離して検討することができる．つまり，不確実性下の交通量配分の効率化を達成するゼロ収支混雑料金と交通需要を制御するラムゼイ混雑料金を組み合わせた混雑料金を用いることにより，不確実性下における交通量配分と交通需要水準の制御を同時に達成することができる．この種の混雑料金は交通需要の変化を内生化したような分析枠組みの中で検討できるが，これに関しては今後の課題としたい．

（4）　若干の留保事項

ゼロ収支混雑料金は混雑状態に応じて料金を差別化することによりドライバーの総厚生水準を改善できるという非常に望ましい性質を持っている．もちろん，以上で述べた命題は，あくまでも単一ODに着目した簡単なネットワークにおいて証明されたものである．一般のネットワークにおいても同様の議論が成立するかどうかに関して研究する必要がある．価格弾力値が異なる財の間でラムゼイ料金を徴収すれば異なる財の消費者の間での公平性の問題が生じる可能性があることが指摘されている[20]．特に，複数ODを対象としたゼロ収支混雑料金問題を議論する場合，OD間での公平性に関する議論が新たな問題として浮上してこよう．また，ゼロ収支混雑料金は一種の差別化料金であるが，その他の料金体系の中でゼロ収支混雑料金よりも望ましい結果を与えるものが存在する可能性を否定できない．したがって，以上の命題は，本研究でとりあげたような混雑料金設計問題の中で，ゼロ収支混雑料金を徴収することによりドライバーの厚生状態を従前の状態よりも改善することが可能であると述べているに過ぎないことを再度確認しておきたい．

7．数値計算事例

本研究で得られた5つの命題は条件（2）を満足する任意の走行時間関数に対して成立する．以下で示す数値計算事例はあくまでも命題の内容について理解を深めるためのものである．ここでの主たる目的は，命題1，命題2に示したパラドクスを示すことにある．簡単のために，線形一般化費用関数 $c_i^k(x_i^k)=\alpha_i^k+\beta_i^k x_i^k$ を考える．表–1に示す2つのケースを考えよう．状況 k の数は2，$\pi^1=0.5$，$\pi^2=0.5$，交通需要 $M=3\,000$ であるとし，各状況に応じて走行時間関数のパラメータは表–1のように変動するとしよう．

1）　危険中立型な場合（ケース1）　危険中立型効用関数 $U\ (y)=-0.1y$ を用いる．前述したように，ドライバーが危険中立的な選好を持つ場合，ゼロ収支変動料金は一意的に決定できないため，ここでは $\bar{\tau}_2^{2V}$ をゼロに基準化した結果を示す．ケース1は経路2の β_i^k が状況に

表-2　数値計算の結果（ケース1）

不確実性下での	x_1^*	x_2^*	-	-	V^*
等期待効用配分	1148.1	1851.9	-	-	-644.4
	x_1^{1**}	x_2^{1**}	-	-	
交通情報下での	1045.5	1954.5	-	-	V^{**}
等期待効用配分	x_1^{2**}	x_2^{2**}	-	-	-646.9
	1600.0	1400.0	-	-	
	x_1^o	x_2^o	r_1	r_2	W^F
総効用最大化配分	963.0	2037.0	.96	.71	-639.8
（固定料金）	-	-	-	-	V^F
	-	-	-	-	-877.8
	x_1^{1oo}	x_2^{1oo}	r_1^1	r_2^1	W^V
総効用最大化配分	931.8	2068.2	1.49	1.24	-639.2
（変動料金）	x_1^{2oo}	x_2^{2oo}	r_1^2	r_2^2	V^V
	1100.0	1900.0	.44	.19	-879.3
ゼロ収支固定料金	$\bar{x}_1^F$	$\bar{x}_2^F$	$\bar{r}_1^F$	$\bar{r}_2^F$	$\bar{V}^F(0)$
	963.0	2037.0	.17	-.08	-639.8
等期待効用配分	$\bar{x}_1^{1V}$	$\bar{x}_2^{1V}$	$\bar{r}_1^{1V}$	$\bar{r}_2^{1V}$	
ゼロ収支変動料金	931.8	2068.2	.08	-.17	$\bar{V}^V(0)$
等期待効用配分	$\bar{x}_1^{2V}$	$\bar{x}_2^{2V}$	$\bar{r}_1^{2V}$	$\bar{r}_2^{2V}$	-639.2
	1100.0	1900.0	.25	.00	

表-3　数値計算の結果（ケース2）

不確実性下での	x_1^*	x_2^*	-	-	V^*
等期待効用配分	2229.1	770.9	-	-	-562.1
	x_1^{1**}	x_2^{1**}	-	-	
交通情報下での	2277.8	722.2	-	-	V^{**}
等期待効用配分	x_1^{2**}	x_2^{2**}	-	-	-521.5
	1600.0	1400.0	-	-	
	x_1^o	x_2^o	r_1	r_2	W^F
総効用最大化配分	2166.9	833.1	.60	.51	-557.2
（固定料金）	-	-	-	-	V^F
	-	-	-	-	-1757.2
	x_1^{1oo}	x_2^{1oo}	r_1^1	r_2^1	W^V
総効用最大化配分	2212.5	787.5	.65	.53	-510.9
（変動料金）	x_1^{2oo}	x_2^{2oo}	r_1^2	r_2^2	V^V
	1222.2	1777.7	.34	.15	-1572.9
ゼロ収支固定料金	$\bar{x}_1^F$	$\bar{x}_2^F$	$\bar{r}_1^F$	$\bar{r}_2^F$	$\bar{V}^F$
等期待効用配分	2109.1	890.9	.06	-.13	-552.9
	$\bar{x}_1^{1V}$	$\bar{x}_2^{1V}$	$\bar{r}_1^{1V}$	$\bar{r}_2^{1V}$	
ゼロ収支変動料金	2138.9	861.1	-.31	-.56	$\bar{V}^V$
等期待効用配分	$\bar{x}_1^{2V}$	$\bar{x}_2^{2V}$	$\bar{r}_1^{2V}$	$\bar{r}_2^{2V}$	-387.5
	1100.0	1900.0	.54	.29	

よってかなり変化し，交通情報の提供により総厚生水準の悪化をもたらす場合を想定している．表-2 は本ケースにおけるネットワーク均衡，混雑料金，及び評価値を示している．本ケースでは $V^*>V^{**}$，$V^F>V^V$ が成立しており情報提供によりドライバーの総厚生水準が悪化する．本ケースのように混雑しやすい（β_i^s の大きい）経路が存在している場合，情報提供が経済厚生の低下を招く可能性がある．この場合，式（26）に示すように β_i^s の大きい経路に相対的に大きな混雑料金を課徴して利用料金が相対的に割高になるように配慮する必要がある．さらに，本ケースでは $W^F=\bar{V}^F$，$W^V=\bar{V}^V$ が成立し，ネットワーク配分結果においても $\boldsymbol{x}^o=\bar{\boldsymbol{x}}^F$，$\boldsymbol{x}^{oo}=\bar{\boldsymbol{x}}^V$ となり命題5が成立する．

2）危険回避的な場合（ケース2）　危険回避的効用関数 $U(y)=-\exp(-r(s-y))$ を用いた計算結果を表-3 に示す．r は危険回避度を表わすパラメータである．計算では $s=3$，$r=2$ とした．本ケースでは交通情報が総厚生水準の増加をもたらす．命題3, 4の結果は本ケースでも確認できる．本ケースでは $W^F\neq\bar{V}^F$，$W^V\neq\bar{V}^V$，$\boldsymbol{x}^o\neq\bar{\boldsymbol{x}}^F$，$\boldsymbol{x}^{oo}\neq\bar{\boldsymbol{x}}^V$ となる．危険回避型の場合には，総期待効用最大化原則とゼロ収支混雑料金下での等期待効用原則を用いた配分結果が一致する保証はない．

8．おわりに

本研究では，各経路で課徴される混雑料金がドライバーに対して経路誘導に関する直接的なインセンティブを与えると同時に交通状況の生起状態を通知する交通情報としての機能を有していることを指摘し，この種の情報機能に着目したような混雑料金について考察を試みた．その結果，ゼロ収支変動料金を徴収することにより，ドライバーの総厚生水準を常に改善できることが明らかとなった．もちろん，以上の命題は本研究でとりあげたような単純なネットワークにおいて成立する事項であり，一般のネットワークにおいても同様に成立するかに関しては今後の研究に委ねたい．

なお，多くの研究課題が今後に残されている．第1に，本研究ではIOD・並行リンク型ネットワークにおける固定需要型静的均衡モデルという極めて単純化かつ限定的な設定での混雑料金に関する議論にとどまっていることがあげられる．今後はOD交通量の変動も含めた一般ネットワークでの同時均衡モデルによる解析が必要である．第2に，本研究では同質なドライバーに対する混雑料金設計問題をとりあげているが，今後は異質な選好を有するドライバーが混在する場合の混雑料金に関する議論も必要となろう．第3に，本研究では外生的に与えられた不確実性のみをとりあげている．不確実性のメカニズムも極めて簡略化されたものとなっている．もちろん，料金制度の効率性比較に関する理論的研究という目的のためには，本研究で採用した仮定は正当化しうる．しかし，今後実用的な混雑料金の設定問題を議論するためには，ドライバーの経路選択の変動，経路交通量や内々交通の変動といったリスクを明示的に考慮する必要がある．この場合，価格情報も確定的には設定できず，価格情報自体にもノイズが介入する．このような不完備な情報下での混雑料金の設定問題にアプローチするためには，合理的期待均衡モデル[5]を用いるのが効果的であろう．第4に，リアルタイムの交通制御を行なうためには，混雑料金もリアルタイムに変化させる必要がある[21]．この場合，現在のドライバーの経路選択が将来の

ドライバーの経路選択に影響を及ぼす．この種の動学的外部不経済性[22]の克服が今後に残された大きな研究課題になっている．最後に，混雑料金のスキームとしては，本研究でとりあげた料金システム以外にも多様な方法が考えられる．今後はラムゼー料金を含めた代替的な混雑料金スキームに関する研究を蓄積していく必要がある．

付録Ⅰ　補足証明

ゼロ収支混雑料金の一意性： 1）固定料金の一意性：最適解において $x_i>0$ の経路で $E[U(c_i^k(\hat{x}_i+\tau_i)]=\overline{EU}$ が成立．$\hat{x}_i>0$, $\overline{EU}$ が与えられれば固定料金 τ_i が一意的に決定されるのは明白．2）変動料金の一意性：危険回避型ドライバーを想定する．最適変動料金 τ_i^k に対して新しい料金 $\tilde{\tau}_i^k=\tau_i^k+\iota_i^k$ を定義する．新料金が依然として最適であるためには，状況に関わらず効用水準が等しくなければならず，$\iota_i^k=\bar{\iota}$ $(\neq 0)$ が成立．しかし，新料金の下では $\sum_k\pi^k\bar{\iota}\neq 0$ となりゼロ収支制約を満足せず矛盾する．したがって，変動料金は一意的である．一方，危険中立的効用関数（$U_i^k=\zeta_0$ $(c_i^k+\tau_i^k)+\zeta_1$）の場合，最適交通量配分において達成される均衡効用を $\bar{U}^k$ とする．$\sum_k\pi^k\iota^k=0$ を満足する任意の料金 $\tilde{\tau}_i^k=\tau_i^k+\iota^k$ の下での状況別均衡効用を $\bar{U}^{k*}$ とする．この時，$\sum_k\pi^k\bar{U}^k=\sum_k\pi^k\bar{U}^{k*}$ が成立．すなわち，危険中立的な場合には均衡水準 $\bar{U}^k$ は一意に定まらず変動料金も一意ではない．

付録Ⅱ　命題の証明

命題2： 問題 V の最適解ベクトルを $\boldsymbol{x}^{koo}$，目的関数の最大値を $T_i^{oo}=\sum_i x_i^{k^{oo}}U(c_i^k(x_i^{k^{oo}}))$ と表わそう．変動料金と固定価格の下で達成可能な期待効用の総和の最大値を比較する．x^{koo} が $\sum_i x_i^k U(c_i^k(x_i^k))$ を最大にすることより，$W^V=\sum_k\pi^k T_i^{oo}\geq\sum_k\pi^k T_k^o=W^F$ が成立する．ここに，$T_k^o=\sum_k x_i^o U(c_i^k(x_i^o))$ である．$W^F\geq V^*$, $W^V\geq V^{**}$ も同様に示すことができる．

命題3： 制約条件（5a），（5b）の左辺と制約条件（10a），（10b）の左辺を比較する．$U'<0$, $c'>0$ より任意の $x_i\in[0, M]$ に対して必ず $E[U'c']\ x_i<0$ が成立する．$\sum_i x_i=M$ が2つの問題に共通する限り $V^*\geq V^F$ が成立することは自明．同様に，$V^{**}\geq V^V$ も成立．

命題4： 1）2）条件（5a）−（5c），条件（7a）−（7c）を満足する解はそれぞれ問題 RF, RV の実行可能解集合に含まれる．この問題の最適解を用いて定義した $\bar{V}^F$, $\bar{V}^V$ はそれぞれ V^*, V^{**} よりも小さくなることはない．3）問題 RF の任意の実行可能解 x_i, τ_i と対応する $\overline{EU}$ が常に問題 RV の実行可能解で表現できることを示す．$\sum_k\pi^k U(c_i^k(\hat{x}_i)+\hat{\tau}_i)=\overline{EU}$ が成立する実行可能解 $\hat{x}_i$, $\hat{\tau}_i$ に着目する．すべての経路 i $(i=1, \cdots, n)$ に対して

$$U(c_i^k(\hat{x}_i)+\hat{\tau}_i+\tau_i^k)=\bar{U}_i \qquad (\text{Ⅱ}.1\text{a})$$

$$\sum_k\pi^k\tau_i^k=0 \qquad (\text{Ⅱ}.1\text{b})$$

を同時に満足する τ_i^k, $\bar{U}_i$ $(k=1, \cdots, K)$ が存在することを示そう．凹計画問題

$$\max_{\tau_i^k}\sum_k\int_{-c_i^k(\hat{x}_i)-\hat{\tau}_i}^{\tau_i^k}\pi^k U(c_i^k(\hat{x}_i)+\hat{\tau}_i+s_i^k)\ ds_i^k$$
$$s.t.\ \sum_k\pi^k\hat{x}_i(\hat{\tau}_i+\tau_i^k)=0 \qquad (\text{Ⅱ}.2)$$

には最適解 $(\hat{\tau}_i+\tau_i^{k*})$ $(i=1, \cdots, n; k=1, \cdots, K)$ が存在し式（Ⅱ.1a）を満足する．$\hat{x}_i$, $\hat{\tau}_i$ が問題 RF の実行可能解であるため $\sum_i\sum_k\pi^k\hat{x}_i\hat{\tau}_i=0$ が成立．これと式（Ⅱ.2）より条件（Ⅱ.1b）が成立することは明白．ここで，式（Ⅱ.1a）において $c_i^k(\hat{x}_i)+\hat{\tau}_i+\tau_i^k=\sum_k\pi^k$ $\{c_i^k(\hat{x}_i)+\hat{\tau}_i+\tau_i^k\}$ $=\sum_k\pi^k$ $\{c_i^k(\hat{x}_i)+\hat{\tau}_i\}$ が成立することに着目しよう．この時，条件 $U'(c_i^k)<0$, $U''(c_i^k)\leq 0$ より，$\overline{EU}=\sum_k\pi^k U(c_i^k(\hat{x}_i)+\hat{\tau}_i\leq U$ $(\sum_k\pi^k\{c_i^k(\hat{x}_i)+\hat{\tau}_i\}=\bar{U}_i$ が成立．同様の議論によりすべての k に対して，

$$U(c_i^k(x_i)+\hat{\tau}_i+\tau_i^k+\xi_i^k)=\bar{U}^k \qquad (\text{Ⅱ}.3\text{a})$$

$$\sum_i\xi_i^k\hat{x}_i=0 \qquad (\text{Ⅱ}.3\text{b})$$

を満足する ξ_i^k が存在する．この時，$\nu_i=\hat{x}_i/M$ を用いれば $c_i^k(\hat{x}_i)+\hat{\tau}_i+\tau_i^k+\xi_i^k=\sum_i\nu_i\{c_i^k(\hat{x}_i)+\hat{\tau}_i+\tau_i^k\}$ を得る．すなわち，$\sum_i\nu_i\bar{U}_i=\sum_i\nu_i U(c_i^k(x_i)+\hat{\tau}_i+\tau_i^k)\geq U(\sum_i\nu_i\{c_i^k(\hat{x}_i)+\hat{\tau}_i+\tau_i^k\})=\bar{U}^k$ が成立．以上の解 $(\hat{x}_i,\ \hat{\tau}_i+\tau_i^k+\xi_i^k)$ は問題 RV の実行可能解であることは明白．すなわち，問題 RF の任意の実行可能解に対して常に $\overline{EU}\leq\bar{U}^k$ $(k=1, \cdots, K)$ を満足するような問題 RV の実行可能解を構成できる．この逆が成立しないことは以上の議論から明白．$\hat{x}_i$, $\hat{\tau}_i$ の任意性より $\bar{V}^V\geq\bar{V}^F$ が成立する．4）5）以下の問題 FF を考える．

$$\max_{x_i,\tau_i}\sum_i x_i EU_i(x_i) \qquad (\text{Ⅱ}.4\text{a})$$

$$s.t.\ (19\text{b}), (19\text{c}), (19\text{d}), (19\text{e})$$

3）と同様の方法で，問題 F の任意の実行可能解 $\boldsymbol{x}$ に対して制約条件（19b），（19c），（19d），（19e）を満足する τ', $\overline{EU}$ が存在することを示すことができる．問題 F と FF は同一の目的関数を持つ．ゆえに，問題 FF の最適解を (x', τ') とすれば $\sum_i x_i' EU_i$ $(x_i')\geq\sum_i x_i^o EU_i$ (x_i^o) が成立．ここに，$\boldsymbol{x}^o$ は問題 F の最適解である．一方，問題 RF は問題 FF と同一の制約条件のもとで，目的関数 $\sum_i x_i E[U_i(c_i^k(x_i)+\tau_i)]$ を最大化する問題と等価である．効用関数 U の危険回避性の仮定より，3）と同様に問題 F の任意の実行可能解 x_i に対して常に $\sum_i x_i E$ $[U_i(c_i^k(x_i)+\tau_i)]\geq\sum_i x_i EU_i(x_i)$ を達成する τ_i が存在する．ゆえに性質4）が成立する．性質5）も同様に証明できる．

命題5： 危険中立的な効用関数は $U'=\zeta$（一定）となる．一般性を損なうことなく $\zeta=1$ を仮定する．問題 F におけるピグー税は式（11）より $\tau_i^o=E[c_i^{k\prime}]\ x_i$．ゼロ収

支混雑料金は式 (24) より $\tau_i=E[c_i^{k\prime}]\ x_i-\xi/\mu$ となる. 問題 F で一定額 ξ/μ をドライバーに還付しても最適条件 (10a), (10b) は変更を受けない. また, ゼロ収支制約下では $\sum_i E[c_i^{k\prime}]\ x_i-\xi/\mu=0$ であり $\bar{V}^F=W^F$ が成立する. 変動料金の場合も, 同様に証明できる.

参考文献

1) 文世一 : 混雑料金と交通量配分, 土木計画学研究・論文集, 11, 113-120, 1993.
2) Daganzo, C.F. and Sheffi, Y. : On stochastic models of traffic assignment, *Transportation Science*, 11, 253-255, 1977.
3) Fisk, C. : Some developments in equilibrium traffic assignment, *Transportation Research*, 14B, 243-255, 1980.
4) Sheffi, Y. : *Urban Transportation Networks*, Prentice-Hall, New York, 1985.
5) Kobayashi, K. : Information, rational expectations, and network equilibria – An analytical perspective for route guidance systems, *The Annals of Regional Science*, 28, 369-393, 1994.
6) 飯田恭敬, 内田敬 : リスク対応行動を考慮した道路網経路配分, 土木学会論文集, 464, 63-72, 1993.
7) 小林潔司 : 不完備情報下における交通均衡に関する研究, 土木計画学研究・論文集, 8 : 81-88, 1990.
8) Mirchandani, P. and Soroush, H. : General traffic equilibrium with probabilistic travel time and perceptions, *Transportation Science*, 21(3), 133-152, 1987.
9) Arnott, R., de Palma A. and Lindsey R. : Does providing information to drivers reduce traffic congestion?, *Transportation Research*, 25A, 309-318, 1991.
10) 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, 77-86, 1995.
11) Kanafani, A. and Al-Deek, H. : A simple model for route guidance benefits, *Transportation Research*, 25B, 191-201, 1991.
12) Walters, A.A. : The theory and measurement of private and social cost of highway congestion, *Econometrica*, 29, 676-699, 1961.
13) d'Ouville, E. L. and McDonald, J. F. : Effects of demand uncertainty on optimal capacity and congestion tolls for urban highways, *Journal of Urban Economics*, 28, 63-70, 1990.
14) 山内弘隆, 竹内健蔵 : 混雑理論の展望—経済学の視点, 土木学会論文集, 449, 17-26, 1992.
15) 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, 121-129, 1988.
16) Grossman, S. : *The Informational Role of Prices*, The MIT Press, 1989.
17) たとえば, 今野浩, 山下浩 : 非線形計画法, 日科技連, 1978.
18) Laffont, J.-J. : *The Economics of Uncertainty and Information*, The MIT Press, 1989.
19) Ramsey, F. P. : A contribution to the theory of taxation, *Economic Journal*, 37, 47-61, 1927.
20) 清野一治 : 規制と競争の経済学, 東京大学出版会, 1993.
21) Ben-Akiva, M., de Palma, A. and Kaysi, I. : Dynamic network models and driver information systems, *Transportation Research*, 25A, 251-266, 1991.
22) Mun, S. : Traffic jams and the congestion toll, *Transportation Research*, 28B, 365-375, 1994.

(1996.10.2 受付)

ROUTE NAVIGATION BY PROVIDING ROAD PRICE INFORMATION : A THEORETICAL APPROACH

Se-il MUN, Kiyoshi KOBAYASHI and Takato YASUNO

In this paper, network equilibria under state-dependently varying road pricing are analyzed. Our focus are upon the informational role of road prices ; road prices convey information about road states to drivers, if they are announced to drivers ex ante. We show that drivers' welfare improvement can be always made by variable road pricing under zero-balanced constraints, while the Pareto improvement of network equilibria can be achieved by levying Pigouvian variable road prices.