

混雑料金の経路交通需要に及ぼす情報効果に関する研究*

THE INFORMATIONAL IMPACTS OF CONGESTION TOLLS UPON ROUTE TRAFFIC DEMANDS *

太田勝久**・安野貴人***・小林潔司****

By Katsuhisa OHTA**, Takato YASUNO*** and Kiyoshi KOBAYASHI****

1. はじめに

近年、交通情報の提供がドライバーの経路選択行動に及ぼす影響に関する研究が蓄積された。特に、on-trip 情報によるドライバーの経路誘導効果に関しては多側面からのアプローチが試みられている。ドライバーに on-trip 情報のみを提供する場合、必ずしもドライバーの社会的厚生改善に資するとは限らない¹⁾。このような視点から、文等は混雑料金を併用した on-trip 情報システムにより交通流のパレート改善を常に実現することが可能であることを示した²⁾。

本研究では、on-trip 情報システムの不完全性を克服する手段として、在宅のドライバーに事前に経路誘導情報を提供する pre-trip 情報システムに着目する。路車間情報システム等の on-trip 情報システムでは、トリップを生成した後の経路選択の段階で経路情報が提供されるため、ドライバーのトリップ生成を直接誘導できない。pre-trip 情報システムでは、ドライバーがトリップを生成する段階で道路網の情報が提供されるため、トリップ生成段階にさかのぼってドライバーの交通行動を誘導することが可能となる。

pre-trip 情報が提供された場合、ドライバーは1) トリップ生成の有無、2) 出発時刻の決定という2つの意思決定問題に直面する。pre-trip 情報の効果を検討するためにはこれら2つの交通行動を同時に検討する必要があるが、本研究では静学分析の枠組みの中で、pre-trip 情報による交通需要の制御効果のみに着目することとする。多くの日常交通のように交通情報が出発時刻の決定に及ぼす影響を検討する

場合には、動学的な分析枠組み³⁾が必要となろう。この意味で、本研究では pre-trip 情報のある一部の効果のみに着目していることは否めない。しかし、一部の非日常交通のように、交通情報によりその日のトリップをとりやめるか否かを判断することが問題となっている局面に関しては、静学分析によるアプローチも重要な知見を提供しうるものと考えられる。

本研究では on-trip 情報、pre-trip 情報の下におけるネットワーク均衡を定式化し、交通情報の提供によるドライバーの社会的厚生改善効果について分析する。以下、2. ではモデルの基本的な考え方を、3. では交通情報のみを与えた場合の交通量配分モデル、4. では交通情報と混雑料金を併用した場合の交通量配分モデルを提案する。5. で配分結果について比較考察し、6. で数値計算の結果を示す。

2. 本研究の基本的考え方

(1) 従来の研究の概要

Walters⁴⁾以来、混雑料金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⁵⁾。旅行費用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⁶⁾⁷⁾。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、混雑料金を用いた経路配分に関する研究が進展している²⁾³⁾⁸⁾。たとえば、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⁹⁾。しかし、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。一方、混雑料金の情報的役割に関しても研究が進展してきている。Emmerink 等は種々のタイプの状況依存的な混雑料

*キーワード：経路選択、交通情報、配分交通

**正会員、工修、(株)東海総合研究所(〒460-8621 名古屋市中区錦3-20-27, TEL 052-203-5321)

***正会員、工博、(株)ニュージエック(〒542-0082 大阪府中央区中之島1-20-19 06-245-4901)

****正会員、工博、京都大学大学院工学研究科土木工学専攻(〒606-8501 京都市左京区吉田本町, TEL/FAX 075-753-5071)

金が、経路交通需要に及ぼす影響について包括的に分析している¹⁰⁾。また、文等は、固定的需要の枠組みの中ではあるが、ドライバーの危険回避選好を考慮したより一般的な分析枠組みの中で、状況依存的な混雑料金の経路誘導効果について検討している²⁾。Emmerink¹⁰⁾らは連続的に差別化されたドライバーにより構成される需要関数を定義し、混雑料金の提示のタイミングが経路誘導効果や消費者余剰に及ぼす影響を分析している。その際、無限に差別化された選好を持つドライバーを想定したがゆえに、ドライバーの選好の同質性や異質性が混雑料金の経路誘導効果に及ぼす影響を検討できないという限界がある。本研究では、ドライバーの効用関数を明示的に考慮したネットワーク均衡モデルを定式化し、選好の異質なドライバーの混在がネットワーク均衡や混雑料金の経路誘導効果に及ぼす影響について分析する。

(2) pre-trip 情報と on-trip 情報

pre-trip 情報と on-trip 情報の本質的な差異は、それがドライバーに提供されるタイミングにある。on-trip の経路誘導情報は、すでにトリップを生成したドライバーに対してより効率的な経路選択を誘導することを目的として提供される。路車間誘導システムや路側情報板により提供される情報はこのカテゴリーに分類される。一方、pre-trip 情報は、家庭・事業所に配置された情報機器により潜在的なトリップメーカーに提供される。トリップの生成が義務づけられておらず、状況のいかんによってトリップをとりやめる意思のあるドライバーにとっては、情報提供のタイミングが重要となる。pre-trip の段階で情報が提供されれば、トリップの生成自体に直接影響を及ぼすことが可能となる。一方、トリップが義務づけられているドライバーにとっては、出発時刻の決定問題を除けば、情報提供のタイミングはそれほど重要ではないだろう。本研究では出発時刻の選択の自由がなくドライバーはトリップを行なうか否かという選択のみが許されている場合をとりあげているため、トリップが義務づけられているドライバーにとって on-trip 情報と pre-trip 情報の間に本質的な差異はない。このように、トリップが義務的かそうでないかということは、交通情報の効果に本質的な違いを与えることになる。

3. ネットワーク均衡モデルの定式化

(1) モデル化の前提条件

モデルの基本的な枠組みは参考文献²⁾と同様である。すなわち、2地点を n 本の並行経路で結ぶ道路網を想定する。経路で生じる不確実性を K 個の離散的な状況の生起により表現し、各状況に応じて交通費用が変化すると考える。たとえば、リンクの局所交通の変化を状況に対応させれば、走行時間関数の変化は局所交通の変化によって生じると考えることができる²⁾。交通管理者は状況 k ($k = 1, \dots, K$) の生起に関して完全情報をもち生起した k をメッセージとしてドライバーに通知する。状況 k の生起は外生的に与えられ状況 k の生起確率を π^k とする。トリップを生成しないドライバーの行動を表現するために、ネットワーク上に無限大の容量をもつ第 0 番目の仮想経路を想定する。危険中立型選好¹¹⁾を有する Q 種類のドライバーを想定し、タイプ j ($j = 1, \dots, Q$) のドライバーの総数を M_j ($j = 1, \dots, Q$) で表す。危険中立型の場合、費用タームに基づいた配分原則と等価となる²⁾。タイプ j のドライバーの経路 i に対する間接効用関数を

$$U_i^j = Y + w^j - c_i - \tau_i \quad (1)$$

と表す。ここに、 Y は所得、 w^j はタイプ j のトリップ便益 (定数)、 c_i は経路 i の一般化走行費用、 τ_i は経路 i の混雑料金である。 c_i は次節で述べるように経路交通量 X_i の関数として表され、すべてのタイプのドライバーに対して同一の値をとると考える。ドライバーの異質性をトリップ便益の差異により表現し、

$$u^1 > \dots > u^{j-1} > u^j > \dots > u^Q \quad (2)$$

を仮定する。添字 j が大きくなるほど、トリップ便益が小さいドライバーであることを示している。ここで各ドライバーがトリップをとりやめた時に得られる効用水準はドライバーのタイプを問わず一定値 U_0 をとると考える。この時、各タイプのドライバーが少なくともトリップを行う意思を持つためには

$$\max_i \{u^j - c_i - \tau_i\} \geq U_0 \quad (3)$$

が成立する必要がある。以下、表記の簡略化のために保留費用を $\bar{U}_j = w^j - U_0$ と定義する。保留費用はドライバーがトリップをとりやめた場合に発生する効用損失費用を表す。保留費用はドライバーがトリップを行うために許容する費用の最大値を表し、トリッ

プ生成に伴う費用が保留費用より小さい限りドライバーはトリップを生成する。すなわち、

$$\text{if } c_i + \tau_i < \bar{U}_j \text{ then } x_{ij} > 0. \quad (4)$$

が成立する。ただし、 x_{ij} は経路*i*を選択したタイプ*j*の交通量を表す。

(2) 無情報下でのネットワーク均衡

情報提供がない場合、ドライバーは状況*k*の生起状態を把握できない不確実な環境下で経路選択を行なう。ドライバーは状況の生起状態を区別できないため、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。ここでは単一ODを結ぶ並行経路で構成されるネットワークを考え、状況*k*が生じた場合の経路*i*の一般化走行費用 c_i^k を経路*i*の交通量 $X_i = \sum_j x_{ij}$ の関数として

$$c_i^k(X_i) = p_i + w \cdot t_i^k(X_i) \quad (5)$$

と表現する²⁾³⁾¹⁰⁾。ここに、 p_i は走行費用であり状況を問わず一定と仮定する。 $t_i^k(X_i)$ は所要時間関数、 w は時間価値、走行時間関数 $t_i^k(X_i)$ ($i = 1, \dots, n; k = 1, \dots, K$)は2階連続微分可能な1価関数であり、閉区間 $[0, M]$ において次の条件を満足すると仮定する。

$$\text{(条件 1) } dt_i^k(X_i)/dX_i > 0$$

$$\text{(条件 2) } d^2t_i^k(X_i)/dX_i^2 \geq 0$$

$$\text{(条件 3) } 0 \leq t_i^k(X_i) < \infty \quad (6)$$

なお、ドライバーのタイプが異なれば時間価値 w も異なるが、議論の見通しをよくするため時間価値はタイプによらず一定であると仮定する。時間価値の異質性の問題は5. で改めて議論する。

ドライバーは、期待費用が最小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*の期待走行費用を

$$E[c_i^k(X_i)] = \sum_{k=1}^K \pi^k c_i^k(X_i) \quad (7)$$

と表す。無情報下でのネットワーク均衡 (EN) は

$$E[c_i^k(X_i)] = U_j \text{ if } x_{ij} > 0 \quad (8)$$

$$E[c_i^k(X_i)] \geq U_j \text{ if } x_{ij} = 0 \quad (9)$$

$$U_j = \bar{U}_j \text{ if } x_{0j} > 0 \quad (10)$$

$$U_j \leq \bar{U}_j \text{ if } x_{0j} = 0 \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} + x_{0j} = M_j, \quad x_{ij} \geq 0 \quad x_{0j} \geq 0 \quad (12)$$

$$(i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, Q)$$

と定義できる。ここに、 U_j は各タイプの均衡費用水準であり内生的に決定される。また、 x_{0j} 、 \bar{U}_j はタイプ*j*のドライバーの保留需要、保留費用を表す。式(8),(9)は1)あるタイプの利用交通量がある ($x_{ij} > 0$ が成立する) 限り当該経路間の期待走行費用が一致する(経路間の等期待費用原則)、2)当該経路を利用するすべてのタイプのドライバーの間で当該経路の期待費用が一致する(タイプ間の等期待費用原則)が同時に成立することを要求している。したがって、結果的に $x_{ij} > 0$ となるすべてのタイプ、経路の期待走行費用はある均衡費用水準 U^* に一致する。式(10)はトリップ生成を保留するドライバーが存在する場合、各タイプの均衡費用水準は保留費用に等しくなることを表す。一方、式(11)は保留需要が消滅(すべてのドライバーがトリップを生成)する場合、当該タイプの均衡費用水準は保留費用より大きくなることを表す。タイプ間の等期待費用原則により、トリップを生成しているタイプの期待費用はすべてある均衡費用水準 U^* に一致する。均衡費用 U^* が保留費用 \bar{U}_j より大きくなるタイプでは、式(9)において任意の*i*に対して $E[c_i^k(X_i)] > \bar{U}_j$ が成立し、すべての経路において $x_{ij} = 0$ となる。すなわち、タイプ*j*のドライバーはトリップを生成しない。また、上式において各経路交通量 X_i 、及び保留需要 x_{0j} は一意的に求まるがタイプごとの経路交通量 x_{ij} は一意的に求まらない。ここで、均衡経路交通量、均衡保留需要を X_i^* 、 x_{0j}^* と表そう。この時、ネットワーク均衡 EN における総費用 W_{EN} は次式で与えられる。

$$W_{EN} = \sum_{i=1}^n X_i^* E[c_i^k(X_i^*)] + \sum_{j=1}^Q x_{0j}^* \bar{U}_j$$

$$= \sum_{i=1}^n X_i^* U^* + \sum_{j=1}^Q x_{0j}^* \bar{U}_j \quad (13)$$

(3) on-trip 情報提供の場合

ドライバーに on-trip 情報のみが提供される場合を考える。ドライバーがトリップを行なうか否かを決定する時点では状況*k*の生起状態は判らないが、経路選択の時点では状況の生起状態は判明する。一度、トリップを生成したドライバーは、on-trip 情報を得

たのちにトリップをとりやめる（自宅へ引き返す）ことはないとする。トリップの生成段階では状況 k の値を知ることはできないため、トリップの発生総数は状況 k の如何を問わず一定値をとる。一方、ドライバーは経路選択の直前には各状況の生起状態を知ることができるので、各状況ごとに以下のネットワーク均衡が成立する。状態 k の下で経路 i を利用するタイプ j の交通量を x_{ij}^k とすれば、on-trip 情報下でのネットワーク均衡 (EO) は次式のように表せる。

$$c_i^k(X_i^k) = U_j^k, \quad \text{if } x_{ij}^k > 0 \quad (14)$$

$$c_i^k(X_i^k) \geq U_j^k, \quad \text{if } x_{ij}^k = 0 \quad (15)$$

$$E[U_j^k] = \bar{U}_j, \quad \text{if } x_{0j} > 0 \quad (16)$$

$$E[U_j^k] \leq \bar{U}_j, \quad \text{if } x_{0j} = 0 \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij}^k + x_{0j} = M_j, \quad x_{ij}^k \geq 0, \quad x_{0j} \geq 0 \quad (18)$$

$(i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, Q; k = 1, \dots, K)$

ここに、 U_j^k は状況 k の時に成立するタイプ j の均衡費用水準、 $X_i^k = \sum_j x_{ij}^k$ は状況 k が生じた時の経路 i の交通量である。式 (14)、(15) は各状況ごとに経路間、タイプ間の等費用原則が成立することを表す。ドライバーはトリップを生成するか否かを決定する段階では、状況 k の生起状態を知ることができないため、トリップを行なうことによる期待費用 $E[U_j^k] = \sum_{k=1}^K \pi^k U_j^k$ に基づいてトリップ生成の有無を決定している。このため、式 (17) では保留費用 \bar{U}_j は状況に依存しない。式 (17) は期待費用が保留費用より小さい限りトリップを生成するインセンティブを有することを表す。ネットワーク均衡 EO におけるドライバーの総費用 W_{EO} は

$$W_{EO} = E \left[\sum_{i=1}^n X_i^{k**} c_i^k(X_i^{k**}) \right] + \sum_{j=1}^Q x_{0j}^{**} \bar{U}_j \quad (19)$$

と表せる。ここに、 X_i^{k**}, x_{0j}^{**} は状況ごとの均衡経路交通量、均衡保留需要を表す。

(4) pre-trip 情報提供の場合

pre-trip 情報を獲得したドライバーは、トリップ生成時点の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応して 1) トリップを取りやめるか、2) トリップを行なうとすればどの経路を利用するかを同時に決定することができる。pre-trip 情報下でのネットワーク均衡 (EP) は

$$c_i^k(X_i^k) = U_j^k, \quad \text{if } x_{ij}^k > 0 \quad (20)$$

$$c_i^k(X_i^k) \geq U_j^k, \quad \text{if } x_{ij}^k = 0 \quad (21)$$

$$U_j^k = \bar{U}_j, \quad \text{if } x_{0j}^k > 0 \quad (22)$$

$$U_j^k \leq \bar{U}_j, \quad \text{if } x_{0j}^k = 0 \quad (23)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij}^k + x_{0j}^k = M_j, \quad x_{ij}^k \geq 0, \quad x_{0j}^k \geq 0 \quad (24)$$

$(i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, Q; k = 1, \dots, K)$

と表せる。 x_{0j}^k は状況 k の下におけるタイプ j の保留需要である。式 (20)、(21) より、pre-trip 情報が与えられた時、各状況、各経路の間に等費用原則が成立する。さらに、式 (22) より保留需要が存在する場合には状況間の等費用原則が成立する。ネットワーク均衡 EP におけるドライバーの総費用 W_{EP} は、

$$W_{EP} = E \left[\sum_{i=1}^n X_i^{k***} c_i^k(X_i^{k***}) + \sum_{j=1}^Q x_{0j}^{k***} \bar{U}_j \right] \quad (25)$$

と表せる。ここに、 $X_i^{k***}, x_{0j}^{k***}$ は状況 k の下での均衡経路交通量、均衡保留需要を表す。

4. 総期待費用最小化配分の定式化

(1) 情報提供なしの場合

混雑という外部不経済性が存在する時、各ドライバーの自由な経路選択により実現されるネットワーク均衡がパレート最適となる保証はない。混雑料金の課徴を通じて効率的な交通量配分を達成する問題を考える。そこで、各ドライバーの総期待費用を最小にする問題 (PN) を考える。

$$\min_{x_{ij}, x_{0j}} \sum_{j=1}^Q \left\{ \sum_{i=1}^n x_{ij} E[c_i^k(X_i)] + x_{0j} \bar{U}_j \right\} \quad (26)$$

subject to eq.(12)

この問題の最適化条件は式 (10)、(11)、(12)、及び

$$E[c_i^k] + X_i E[c_i^{k'}] = U_j, \quad \text{if } x_{ij} > 0 \quad (27)$$

$$E[c_i^k] + X_i E[c_i^{k'}] \geq U_j, \quad \text{if } x_{ij} = 0 \quad (28)$$

で表せる。なお、 $E[c_i^k] = \sum_{k=1}^K \pi^k c_i^k(X_i)$ 、 $E[c_i^{k'}] = \sum_{k=1}^K \pi^k dc_i^k(X_i)/dX_i$ である。式 (27)、(28) 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全ての利用者の期待費用水準に及ぼす外部効果である。最適な交通量配分は、このような外部効果を内部化できるような混雑料金

$$\tau_i = X_i E[c_i^{k'}] \quad (29)$$

を各経路で徴収することにより分権的に達成される。混雑料金はドライバーから交通管理主体への所得移転である。したがって、混雑料金は総社会的費用には計上されない。混雑料金 (29) が課徴された時に達

成される総社会的費用 W_{PN} は次式で表される。

$$W_{PN} = \sum_{i=1}^n X_i^\circ E[c_i^k] + \sum_{j=1}^Q x_{0j}^\circ \bar{U}_j \quad (30)$$

ただし、 X_i° 、 x_{0j}° はそれぞれ問題 PN の最適解、 $E[c_i^k] = \sum_{k=1}^K \pi^k c_i^k(X_i^\circ)$ である。また、ドライバーが負担する総費用 V_{PN} を次式で表す。

$$V_{PN} = \sum_{i=1}^n X_i^\circ \{E[c_i^k] + \tau_i\} + \sum_{j=1}^Q x_{0j}^\circ \bar{U}_j \quad (31)$$

(2) on-trip 情報提供の場合

on-trip 情報を提供する場合、ドライバーはトリップ生成時点では未知であった状況 k の生起状態を経路選択時点で把握できる。このとき、変動料金が経路選択時点で提示されれば、これは交通情報としての役割を果たす。この時、保留需要を除いた各経路の交通量が状況に応じて配分される。ここに以下の問題 (PO) を定式化する。

$$\min_{x_{ij}^k, x_{0j}^k} \sum_{j=1}^Q \left\{ E \left[\sum_{i=1}^n x_{ij}^k c_i^k(X_i^k) \right] + x_{0j} \bar{U}_j \right\} \quad (32)$$

subject to eq.(18)

最適化条件は式 (16),(17),(18) および

$$c_i^k + X_i^k c_i^{k'} = U_j^k \quad \text{if } x_{ij}^k > 0 \quad (33)$$

$$c_i^k + X_i^k c_i^{k'} \geq U_j^k \quad \text{if } x_{ij}^k = 0 \quad (34)$$

で表される。ただし、 $c_i^k = c_i^k(X_i^k)$ 、 $c_i^{k'} = dc_i^k/dX_i^k$ である。状況 k の下でトリップ生成後に要するタイプ j のドライバーの走行費用を U_j^k とする。 U_j^k は内生的に決まる。このような交通量配分を分権的に達成するためには、その時の交通状況に応じた変動料金

$$\tau_i^k = X_i^k c_i^{k'} \quad (35)$$

を経路選択の時点で提示すればよい。on-trip 情報下における総期待費用最小化配分の下で達成される社会的総費用 W_{PO} は

$$W_{PO} = \sum_{i=1}^n E \left[X_i^{k^\circ} c_i^{k^\circ} \right] + \sum_{j=1}^Q x_{0j}^{\circ} \bar{U}_j \quad (36)$$

で評価される。ここに、 $X_i^{k^\circ}$ 、 x_{0j}° は問題 PO の最適経路交通量、最適保留需要である。また、 $c_i^{k^\circ} = c_i^k(X_i^{k^\circ})$ である。さらに、ドライバーが負担する総費用 V_{PO} は次式のようなになる。

$$V_{PO} = \sum_{i=1}^n E \left[X_i^{k^\circ} (c_i^{k^\circ} + \tau_i^k) \right] + \sum_{j=1}^Q x_{0j}^{\circ} \bar{U}_j \quad (37)$$

(3) pre-trip 情報提供の場合

pre-trip 情報を提供する場合、ドライバーはトリッ

プ生成時点で状況 k の生起状態を把握できるため、状況に応じてトリップ生成および経路選択に関する意思決定を行う。このときトリップ生成時点で状況 k に応じた変動料金が提示されれば、これは on-trip 情報と同様に交通情報としての役割を果たす。この場合、保留需要も状況に応じて配分される。ここに、問題 (PP) を定式化する。

$$\min_{x_{ij}^k, x_{0j}^k} \sum_{j=1}^Q \left\{ E \left[\sum_{i=1}^n x_{ij}^k c_i^k(X_i^k) + x_{0j}^k \bar{U}_j \right] \right\}$$

subject to eq.(24)

x_{0j}^k は状況 k が生起した時のタイプ j のドライバーの保留需要である。このとき 1 階の最適化条件は式 (22),(23),(24) 及び (33),(34) で表される。混雑料金 τ_i^k は on-trip 情報の場合と同様に式 (35) を解くことにより求められる。混雑料金が課徴された場合の社会的総費用 W_{PP} は

$$W_{PP} = E \left[\sum_{i=1}^n X_i^{k^\circ} c_i^{k^\circ} + \sum_{j=1}^Q x_{0j}^{k^\circ} \bar{U}_j \right] \quad (38)$$

となる。ここに、 $X_i^{k^\circ}$ 、 $x_{0j}^{k^\circ}$ は問題 PP の最適経路交通量、最適保留需要である。ドライバーが負担する総費用 V_{PP} は次式で表わされる。

$$V_{PP} = E \left[\sum_{i=1}^n X_i^{k^\circ} (c_i^{k^\circ} + \tau_i^k) + \sum_{j=1}^Q x_{0j}^{k^\circ} \bar{U}_j \right] \quad (39)$$

5. 社会的総費用の比較

すべてのドライバーが同質であり、保留費用がすべて等しい場合を考える。ネットワーク均衡 EN 、 EO 、 EP において達成される社会的総費用 W_{EN} 、 W_{EO} 、 W_{EP} 及び、総期待費用最小化問題 PN 、 PO 、 PP において達成されるドライバーの負担する費用 V_{PN} 、 V_{PO} 、 V_{PP} をそれぞれ比較してみよう。すなわち、ドライバーのタイプが 1 種類 ($Q = 1$) であり、ドライバーの総数 M_1 が十分に大きい (ドライバーの保留需要が正となる) 場合を考える。この時、以下の命題が成立する (付録参照)。

[命題 1] $Q = 1$ で保留需要が存在する場合、ネットワーク均衡の社会的費用と総期待費用最小化配分のドライバーの負担費用の間には、 $W_{EN} = W_{EO} = W_{EP} = V_{PN} = V_{PO} = V_{PP}$ が成立する。

命題 1 はすべてのドライバーが同一の選好を持ち、かつドライバーの一部が自由にトリップを行うか否

かを選択できる（保留交通需要が存在する）場合には、交通情報の提供や混雑料金の課徴を行ってもドライバーの総厚生を変化させることはできないことを主張している。もちろん、6. で示すように、それぞれのネットワーク均衡において配分結果や保留交通量は異なった値をとる。なお、ネットワーク均衡 EN , EO , EP のいずれかにおいて保留需要が存在しない場合には命題 1 は成立しない。特に、すべてのケースにおいて保留需要が存在しない（すべてのドライバーが義務的トリップを行う）場合、交通情報は交通需要の制御効果をもたずネットワーク均衡 EO , EP は一致する。保留需要が存在しない（すべてのドライバーが義務的トリップを行う）場合、文等²⁾ が詳細に考察しているように、命題 1 は成立せず交通情報の提供や混雑料金の課徴により社会的費用やドライバーの総負担費用は変化する。

交通情報や混雑料金が交通需要管理効果を持つためには、情報や料金の内容によりトリップの生成をとりやめたり、逆にトリップを生成するようなドライバーが存在するような弾力的なトリップ生成が不可欠である。いま、ドライバーのタイプが複数 ($Q \geq 2$) 存在する場合を考える。異質性の仮定 (2) よりドライバーの保留費用はドライバーのタイプを表す添字 j に関して単調に減少することに着目しよう。ネットワーク均衡 EN を考えれば、

$$\bar{j}_{EN} = \arg\{x_{0j}^* = 0 \ (j = 1, \dots, \bar{j} - 1), x_{0j}^* \geq 0, \text{ and } x_{0l}^* = M_l \ (l = \bar{j} + 1, \dots, Q)\} \quad (40)$$

となるような臨界タイプ \bar{j}_{EN} が存在する。ここに記号 $\arg\{\cdot\}$ は括弧内が成立するような添字を指示する記号である。臨界タイプより保留費用の高いタイプ j ($j = 1, \dots, \bar{j} - 1$) のドライバーは全員トリップを生成し、保留費用の低いタイプ l ($l = \bar{j} + 1, \dots, Q$) のドライバーは全員トリップを保留する。同様に、ネットワーク均衡 EO , EP に対して

$$\bar{j}_{EO} = \arg\{x_{0j}^{**} = 0 \ (j = 1, \dots, \bar{j} - 1), x_{0j}^{**} \geq 0, \text{ and } x_{0l}^{**} = M_l \ (l = \bar{j} + 1, \dots, Q)\} \quad (41)$$

$$\bar{j}_{EP}^k = \arg\{x_{0j}^{k***} = 0 \ (j = 1, \dots, \bar{j} - 1), x_{0j}^{k***} \geq 0, \text{ and } x_{0l}^{k***} = M_l \ (l = \bar{j} + 1, \dots, Q)\} \quad (42)$$

を定義する。 $Q \geq 2$ の場合にも、命題 1 と同様に以下の系が成立する（付録参照）。

[系] $Q \geq 2$ の場合にも、以下の条件が成立すれば、ネットワーク均衡 EN に対して、on-trip 情報、pre-

trip 情報はドライバーの総費用を変化させない。

$$\left. \begin{array}{l} x_{0\bar{j}_{EN}}^* < M_{\bar{j}_{EN}}, x_{0\bar{j}_{EO}}^{**} < M_{\bar{j}_{EO}} \\ \bar{j}_{EN} = \bar{j}_{EO} \end{array} \right\} \quad (43)$$

$$\left. \begin{array}{l} x_{0\bar{j}_{EN}}^* < M_{\bar{j}_{EN}}, x_{0\bar{j}_{EP}}^{***} < M_{\bar{j}_{EP}} \\ \bar{j}_{EN} = \bar{j}_{EP}^k \ (k = 1, \dots, K) \end{array} \right\} \quad (44)$$

また、総期待費用最小化配分に関しても、以下の条件が成立すれば、ネットワーク均衡 EN に対して、混雑料金は社会的総費用を変化させない。

$$\left. \begin{array}{l} x_{0\bar{j}_{EN}}^* < M_{\bar{j}_{EN}}, x_{0\bar{j}_{PN}}^{\circ} < M_{\bar{j}_{PN}} \\ \bar{j}_{EN} = \bar{j}_{PN} \end{array} \right\} \quad (45)$$

$$\left. \begin{array}{l} x_{0\bar{j}_{EN}}^* < M_{\bar{j}_{EN}}, x_{0\bar{j}_{PO}}^{\circ\circ} < M_{\bar{j}_{PO}} \\ \bar{j}_{EN} = \bar{j}_{PO} \end{array} \right\} \quad (46)$$

$$\left. \begin{array}{l} x_{0\bar{j}_{EN}}^* < M_{\bar{j}_{EN}}, x_{0\bar{j}_{PP}}^{\circ\circ\circ} < M_{\bar{j}_{PP}} \\ \bar{j}_{EN} = \bar{j}_{PP}^k \ (k = 1, \dots, K) \end{array} \right\} \quad (47)$$

この系は、交通情報や混雑料金により社会的総費用が変化するためには、臨界タイプのドライバーの保留需要がゼロになるか、臨界タイプが異なることが必要となることを主張している。なお、以上の議論は時間価値 w がすべてのタイプのドライバーを通じて一定であるという仮定に依存している。時間価値の異質性を認めた場合、どのタイプのドライバーがトリップを生成するかは添字 j の大きさは単調に対応せず、ネットワーク均衡の状態に応じて多様に変化する。しかし、交通情報や混雑料金を課徴しても保留需要が正となるような臨界的なドライバーのタイプが変化しなければ社会的総費用は変化しない。このことは系の証明が効用関数の形に依存していないことから明らかである。つぎに総期待費用最小化配分に関して以下の命題が成立する（付録参照）。

[命題 2] ネットワーク均衡の社会的総費用 W_{EN} , W_{EO} , W_{EP} の間の関係は一意に決まらない。総期待費用最小化配分の社会的費用の間には $W_{PN} \geq W_{PO} \geq W_{PP}$ が成立する。ネットワーク均衡と総期待費用最小化配分の社会的費用の間には $W_{EN} \geq W_{PN}$, $W_{EO} \geq W_{PO}$, $W_{EP} \geq W_{PP}$ が成立する。

命題の前半は、交通情報の提供により社会的総費用が必ずしも減少しない場合がありうることを主張している。このことは、交通情報システムの導入により社会的総費用を減少しうるという期待を裏切るものである。on-trip 情報、pre-trip 情報が提供される場合、等費用配分が達成される。周知のとおり、等費用配分が社会的最適となる保証がないことを考えれば、交通情報の提供が必ずしも社会的総費用のパ

表-1 道路ネットワークの経路特性

ネットワーク1	ネットワーク2
$t_1^1 = 2.0 + 10.0 \times 10^{-6} X_1^{1.2}$	$t_1^2 = 2.0 + 10.0 \times 10^{-6} X_1^{1.2}$
$t_2^1 = 3.0 + 6.0 \times 10^{-6} X_2^{1.2}$	$t_2^2 = 3.0 + 1.0 \times 10^{-6} X_2^{1.2}$
$t_1^2 = 2.0 + 5.0 \times 10^{-6} X_1^{2.2}$	$t_1^2 = 2.0 + 5.0 \times 10^{-6} X_1^{2.2}$
$t_2^2 = 3.0 + 3.0 \times 10^{-6} X_2^{2.2}$	$t_2^2 = 3.0 + 0.5 \times 10^{-6} X_2^{2.2}$

レート改善をもたらすとは限らないことは当然の結果であると言えよう。この命題の前半が成立することはのちに数値計算事例で示す。一方、命題の後半は混雑料金を課徴することにより、常にネットワーク均衡より社会的総費用が減少することを示している。このことは、ネットワーク均衡 EN, EO, EP の間では社会的総費用の大小関係が一意的に決まらなかったことと対照的である。さらに、総期待費用最小化配分の中では pre-trip 情報による方法がもっとも効果的である。ここで、留意すべきことは、社会的総費用がドライバーの総負担費用と一致しないことである。混雑料金を課徴することによりドライバーの総負担費用は増加する。ドライバーの総負担費用を増加させないためには、課徴した混雑料金をドライバーに還付する必要がある。還付の方法は種々あるが、例えば混雑料金収入の総額をトリップを生成したドライバーに均等割で還付する方法を考える。このような方法で、ドライバーに混雑料金が還付されたときのドライバーの総負担費用を $V'_{PN}, V'_{PO}, V'_{PP}$ とする。ドライバーが危険中立的な場合、混雑料金収入をドライバー間で配分する方法を変えても、ドライバーの総負担費用は変化しない。ここに、次の命題が成立する（付録参照）。

[命題3] 総期待費用最小化配分の社会的総費用とドライバーが負担する費用の間には、 $V_{PN} \geq W_{PN}, V_{PO} \geq W_{PO}, V_{PP} \geq W_{PP}$ が成立する。混雑料金の総収入をトリップ生成したドライバーに還付する場合には $V'_{PN} = W_{PN}, V'_{PO} = W_{PO}, V'_{PP} = W_{PP}$ が成立する。さらに、 $Q \geq 2$ 、かつ混雑料金がドライバーに還付される時、ドライバーの総負担費用の間には $V'_{PN} \geq V'_{PO} \geq V'_{PP}$ が成立する。また $W_{EN} \geq V'_{PN}, W_{EO} \geq V'_{PO}, W_{EP} \geq V'_{PP}$ が成立する。

命題3の後半部分は、混雑料金がトリップを生成したドライバーに還付されれば、変動料金制度の導入によりドライバーの負担費用は必ず減少し、しかも pre-trip 課徴方式によりドライバーが負担する総費用は最小化できることを主張している。以上の命題の証明は効用関数の形に依存しておらず、時間価値 w の異質性を認めても同様に成立する。

なお、以上の議論はドライバーがすべて危険中立的であるという仮定の下に成立する。危険回避選好を有する場合には、文等²⁾が示したように $V'_{PN} =$

$W_{PN}, V'_{PO} = W_{PO}, V'_{PP} = W_{PP}$ が成立する保証はない。もちろん、ドライバーの危険回避選好を考慮したような混雑料金の設計とその性質について考察することは可能である。しかし、ドライバーのタイプはドライバー本人のみが知り得る私的情報であり、交通管理者がそれを知ることはできない。ドライバーの危険回避選好の異質性に応じて混雑料金を差別化するためには、自己選抜メカニズム¹¹⁾を考慮したような料金体系の設計が必要となろう。また、以上の結論は1OD、並行ネットワークを対象として導出されたものである。一般のネットワークにおいて、同様の結果が得られるかどうかに関しては今後の研究課題としたい。

6. 数値計算事例

(1) 問題設定

本数値計算では、数値計算を通じて命題の内容について確認するとともに、命題2の前半部分が成立することを数値事例により示すこととする。いま、トリップ生成地点Aと目的地Bを結ぶ2本の代替経路を有する道路ネットワークを対象とし、その2地点間の潜在的な総交通需要を $M = 3000$ とする。計算ケースとして、1) 同質なドライバーのみを想定した場合 (Case A)、2) 2種類のタイプのドライバーを想定した場合 (Case B, Case C) をとりあげる。その際、各タイプのドライバーの総数は $M_1 = 1000, M_2 = 2000$ とする。保留費用水準を $\bar{U}_1 = 5.0, \bar{U}_2 = 4.5$ とする。交通状況の数を $K = 2$ とし、状況の生起確率を $(\pi^1, \pi^2) = (0.5, 0.5)$ とする。一般化走行費用関数は式(5)で表し、各経路の走行費用を $(p_1, p_2) = (1.0, 1.2)$ 、時間価値を $w = 1.0$ とする。ここで、走行時間関数を $t_i^k(X_i) = \alpha_i^k X_i^2 + \beta_i$ と特定化する。 α_i^k は混雑度を表すパラメータ、 β_i は状況に無関係な各経路の走行時間を表す。本事例では、表-1に示すように、走行時間関数が異なる2

表-2 配分結果 (Case A)

ネットワーク均衡						
問題	発生交通需要		保留需要	混雑料金		総費用水準
情報なし	X_1	X_2	x_{01}	-	-	W_{EN}
EN	515.6	418.9	2065.5	-	-	15000
on-trip	X_1^1	X_2^1	x_{01}	-	-	W_{EO}
EO	489.7	446.4		-	-	
	X_1^2	X_2^2	2063.9	-	-	15000
	567.7	368.4	-	-	-	
pre-trip	X_1^1	X_2^1	x_{01}^1	-	-	W_{EP}
EP	448.3	366.2	2185.5	-	-	
	X_1^2	X_2^2	x_{01}^2	-	-	15000
	633.9	518.7	1847.4	-	-	
総期待費用最小化配分						
問題	発生交通需要		保留需要	混雑料金		総費用水準
情報なし	X_1	X_2	x_{01}	τ_1	τ_2	W_{PN} V_{PN}
PN	298.3	243.4	2458.3	1.33	0.53	14473 15000
on-trip	X_1^1	X_2^1	x_{01}	τ_1^1	τ_2^1	W_{PO} V_{PO}
PO	282.5	257.3		1.60	0.79	
	X_1^2	X_2^2	2460.2	τ_1^2	τ_2^2	14468 15000
	327.1	212.7	-	1.07	0.27	
pre-trip	X_1^1	X_2^1	x_{01}^1	τ_1^1	τ_2^1	W_{PP} V_{PP}
PP	257.6	201.4	2533.0	1.33	0.53	
	X_1^2	X_2^2	x_{01}^2	τ_1^2	τ_2^2	14448 15000
	365.8	298.5	2335.6	1.33	0.53	

表-3 配分結果 (Case B)

ネットワーク均衡							
問題	発生交通需要		保留需要	混雑料金		総費用水準	
情報なし	X_1	X_2	x_{01}	x_{02}	-	W_{EN}	
EN	516.4	421.8	61.8	2000.0	-	14000	
on-trip	X_1^1	X_2^1	x_{01}	x_{02}	-	W_{EO}	
EO	489.2	445.8			-		-
	X_1^2	X_2^2	65.0	2000.0	-	13999	
	566.5	368.4	-	-	-		
pre-trip	X_1^1	X_2^1	x_{01}^1	x_{02}^1	-	W_{EP}	
EP	447.5	365.2	187.3	2000.0	-		
	X_1^2	X_2^2	x_{01}^2	x_{02}^2	-	13858	
	585.7	414.3	0	2000.0	-		
総期待費用最小化配分							
問題	発生交通需要		保留需要	混雑料金		総費用水準	
情報なし	X_1	X_2	x_{01}	x_{02}	τ_1	τ_2	W_{PN} V_{PN}
PN	298.2	243.6	458.3	2000.0	1.33	0.53	13473 14000
on-trip	X_1^1	X_2^1	x_{01}	x_{02}	τ_1^1	τ_2^1	W_{PO} V_{PO}
PO	282.5	257.4			1.60	0.80	
	X_1^2	X_2^2	460.1	2000.0	τ_1^2	τ_2^2	13468 14000
	327.3	212.7	-	-	1.07	0.27	
pre-trip	X_1^1	X_2^1	x_{01}^1	x_{02}^1	τ_1^1	τ_2^1	W_{PP} V_{PP}
PP	258.0	210.8	531.3	2000.0	1.33	0.53	
	X_1^2	X_2^2	x_{01}^2	x_{02}^2	τ_1^2	τ_2^2	13449 14000
	365.2	298.2	336.5	2000.0	1.33	0.53	

種類のネットワークを想定するが、いずれのネットワークにおいても経路1の方が経路2よりも走行距離は短い混雑しやすいような経路を想定している。

(2) 計算結果の考察

a) ドライバーのタイプが同質な場合

表-2は、ネットワーク1におけるネットワーク均衡、総期待費用最小化配分の結果(上表がネットワーク均衡モデル、下表が総期待費用最小化配分モデルの結果と対応する)を示している。同表より、本ケース (Case A) では、 $W_{EN} = W_{EO} = W_{EP} = V_{PN} = V_{PO} = V_{PP}$ (命題1) が成立していることを確認できる。つまり、ドライバーのタイプが同一で保留需要が存在する場合、交通情報の提供や混雑料金の課徴がドライバーの総厚生水準を変化させないことを示している。ただし、配分結果や保留交通量は各問題の間で異なった値をとっている。

b) ドライバーのタイプが異質な場合

ネットワーク1 (Case B), ネットワーク2 (Case C) における計算結果をそれぞれ表-3, 表-

4に示している。表-3に示すように、Case Bでは $W_{EN} > W_{EO} > W_{EP}$ が成立し、ネットワーク均衡におけるドライバーの総費用水準は情報提供によって低減している。それに対し、表-4では $W_{EN} = W_{EO} < W_{EP}$ が成立しており、on-trip 情報を提供した場合には情報提供のない場合と変わらないが、pre-trip 情報の提供によってドライバーの総費用水準が逆に増加している。これより、ネットワーク均衡の社会的総費用の間の関係が一意に決まらないこと(命題2の前半部分)を確認できる。on-trip 情報の提供によりドライバーの厚生水準が低下する事例に関しては、参考文献¹⁾²⁾を参照して欲しい。

一方、総期待費用最小化配分モデルの場合は、表-3, 表-4ともに $W_{PN} \geq W_{PO} \geq W_{PP}$ が成立しており交通情報の提供により総費用水準が低減している。また、それぞれの配分モデルの社会的総費用の間では $W_{EN} \geq W_{PN}, W_{EO} \geq W_{PO}, W_{EP} \geq W_{PP}$ が成立している。これは、混雑料金の課徴により常にネットワーク均衡の社会的総費用が減少すること(命題2の後半部分)を示している。そして、命題3の後

表-4 配分結果 (Case C)

ネットワーク均衡							
問題	発生交通需要		保留需要		混雑料金	総費用水準	
情報なし	X_1	X_2	x_{01}	x_{02}	-	W_{EN}	
EN	447.1	631.0	0	1921.9	-	13499	
on-trip	X_1^1	X_2^1	x_{01}	x_{02}	-	W_{EO}	
EO	405.7	668.1			-	-	13499
	X_1^2	X_2^2			0	1926.2	-
	520.3	553.6	-	-	-	-	
pre-trip	X_1^1	X_2^1	x_{01}^1	x_{02}^1	-	W_{EP}	
EP	395.2	604.8	0	2000.0	-	-	
	X_1^2	X_2^2	x_{01}^2	x_{02}^2	-	13547	
	551.1	805.3	0	1643.7	-	-	

総期待費用最小化配分							
問題	発生交通需要		保留需要		混雑料金	総費用水準	
情報なし	X_1	X_2	x_{01}	x_{02}	τ_1	W_{PN}	
PN	298.1	596.7	105.2	2000.0	1.33	V_{PN}	
on-trip	X_1^1	X_2^1	x_{01}	x_{02}	τ_1^1	V_{PO}	
PO	278.8	614.1			1.55	0.75	V_{PO}
	X_1^2	X_2^2			107.1	2000.0	τ_1^2
	333.6	559.3	-	-	1.11	0.31	
pre-trip	X_1^1	X_2^1	x_{01}^1	x_{02}^1	τ_1^1	W_{PP}	
PP	257.7	513.6	228.8	2000.0	1.33	V_{PP}	
	X_1^2	X_2^2	x_{01}^2	x_{02}^2	τ_1^2	13256	
	349.5	650.5	0	2000.0	1.22	13914	

半部分 $V_{PN} \geq V_{PO} \geq V_{PP}$ の成立も表-4より確認できる。さらに、混雑料金収入の全額をドライバーに還付した時、 $W_{PN} = V'_{PN}, W_{PO} = V'_{PO}, W_{PP} = V'_{PP}$ が成立することに留意すれば、表-3、表-4から $V_{PN} \geq W_{PN}, V_{PO} \geq W_{PO}, V_{PP} \geq W_{PP}$ 及び、 $W_{EN} \geq V'_{PN}, W_{EO} \geq V'_{PO}, W_{EP} \geq V'_{PP}$ (命題3の残りの部分) が成立することも確認できる。

7. おわりに

本研究では on-trip 情報、pre-trip 情報が提供された場合におけるネットワーク均衡問題を定式化するとともに、交通情報の提供によるドライバーの総負担費用の改善効果について比較検討した。その結果、pre-trip 情報と変動混雑料金を併用することにより必ずドライバーの総負担費用を最小化できることを明らかにした。当然のことながら、以上で得られた結論は、1) 1 OD・並行リンクという簡単なネットワークを採用している、2) 情報システムの導入・管理費用を無視している、3) トリップの生成時刻の

変更可能性を無視している、という極めて単純化された仮定の下でのみ成立する事項である。今後、より一般的なネットワークを対象としても同様の命題が成立するかどうかを検討する必要がある。また、交通情報が出発時刻の決定に及ぼす影響を検討する場合には、動学的な分析枠組みが必要となる。さらに、本研究では交通管理者が完全情報を提供する場合を想定していた。しかし、現実には交通情報はノイズを含んでいる。このような不完全情報の下での交通需要の誘導方策に関する研究も今後に残された課題となっている。

付録 命題の証明

[命題1・系] 問題 EN を考える。 $Q = 1$ で保留需要が存在するから式 (10) より $U_1 = \bar{U}_1$ が成立。保留ドライバーが存在する限り、均衡費用水準は保留費用に等しく、 $E[c_i^k(X_i)] = \bar{U}_1$ となる。 $W_{EN} = \sum_{i=1}^n X_i^* \bar{U}_1 + x_{01}^* \bar{U}_1 = \bar{U}_1 (\sum_{i=1}^n X_i^* + x_{01}^*) = \bar{U}_1 M_1$ 。問題 EO では、 $W_{EO} = \sum_{k=1}^K \pi^k \sum_{i=1}^n X_i^{k**} c_i^k(X_i^{k**}) + x_{01}^{**} \bar{U}_1 = \sum_{k=1}^K \pi^k U_1^k \sum_{i=1}^n X_i^{k**} + x_{01}^{**} \bar{U}_1 = \sum_{k=1}^K \pi^k U_1^k (M_1 - x_{01}^{**}) + x_{01}^{**} \bar{U}_1 = \bar{U}_1 M_1$ が成立。社会的総費用 $W_{EP}, V_{PN}, V_{PO}, V_{PP}$ についても同様。どの問題についても保留費用、総交通需要は一定であり総社会的費用は常に一定。よって、 $W_{EN} = W_{EO} = W_{EP} = V_{PN} = V_{PO} = V_{PP}$ が成立。系に関しても臨界タイプの保留費用を \bar{U}_1 と考えれば同様の議論が成立する。 [命題2] $W_{PN} \geq W_{PO}$ を示す。 $T_k = \sum_{i=1}^n X_i^k c_i^k(X_i^k) + \sum_{j=1}^Q x_{0j} \bar{U}_j$ を定義する。問題 PO の最適解 $(X_i^{k\circ\circ}, x_{0j}^{\circ\circ})$ に対して $T_k^{\circ\circ} = \sum_{i=1}^n X_i^{k\circ\circ} c_i^k(X_i^{k\circ\circ}) + \sum_{j=1}^Q x_{0j}^{\circ\circ} \bar{U}_j$ を定義する。変数 $X_i^1 = X_i^2 = X_i^\circ$ を定義すれば X_i^1, X_i^2 は式 (18) を満足する。したがって問題 PO の解は問題 PN の実行可能解である。 $(X_i^{k\circ\circ}, x_{0j}^{\circ\circ})$ が $\sum_{k=1}^K \pi^k T_k$ を最小にすることにより、 $W_{PO} = \sum_{k=1}^K \pi^k T_k^{\circ\circ} \leq \sum_{k=1}^K \pi^k T_k^\circ = W_{PN}$ が成立することがわかる。ただし、 $T_k^\circ = \sum_{i=1}^n X_i^\circ c_i^k(X_i^\circ) + \sum_{j=1}^Q x_{0j}^\circ \bar{U}_j$ である。同様に、問題 PO の解は問題 PP の実行可能解である。問題 PP において $T_k^{\circ\circ\circ} = \sum_{i=1}^n X_i^{k\circ\circ\circ} c_i^k(X_i^{k\circ\circ\circ}) + \sum_{j=1}^Q x_{0j}^{k\circ\circ\circ} \bar{U}_j$ を定義すれば $W_{PP} = \sum_{k=1}^K \pi^k T_k^{\circ\circ\circ} \leq \sum_{k=1}^K \pi^k T_k^{\circ\circ} = W_{PO}$ 。つぎに、 $W_{EN} \geq W_{PN}$ を示す。ネットワーク均衡 EN の解は問題 PN の実行可能解に含まれる。

問題 P_N は社会的総費用の最小化問題であり、その目的関数の最小値 W_{PN} とネットワーク均衡 EN の社会的総費用の間には $W_{EN} \geq W_{PN}$ が成立。同様にして、 $W_{EO} \geq W_{PO}, W_{EP} \geq W_{PP}$ も成立。【命題 3】
 まず、前半部分が成立することを示す。式 (30), (31) より、 $W_{PN} + \sum_{i=1}^n X_i^\circ \tau_i = V_{PN}$ を得る。 $c_i^k > 0$ より $\tau_i > 0$ となる。これにより任意の X_i に対して必ず $\sum_{i=1}^n X_i^\circ \tau_i > 0$ 。よって、 $V_{PN} \geq W_{PN}$ 。同様に $V_{PO} \geq W_{PO}, V_{PP} \geq W_{PP}$ も成立。ドライバーに混雑料金を還付することにより、 $V_{PN} = \sum_{i=1}^n X_i^{**} \{E[c_i^{k**}] + \tau_i\} + \sum_{j=1}^Q x_{0j}^{**} \bar{U}_j - \sum_{i=1}^n X_i^{**} \tau_i = W_{PN}$ が成立する。同様に、 $V_{PO} = W_{PO}, V_{PP} = W_{PP}$ も成立。前半部分の証明より、後半部分 ($V'_{PN} \geq V'_{PO} \geq V'_{PP}, W_{EN} \geq V'_{PN}, W_{EO} \geq V'_{PO}, W_{EP} \geq V'_{PP}$) が成立することは自明。

参考文献

- 1) 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, No. 506, pp. 77-86, 1995.
- 2) 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, No. 562, pp. 57-67, 1997.

- 3) Arnott, R., de Palma, A., and Lindsey, R.: Departure time and route choice for the morning commute, *Transportation Research*, Vol.24B, pp. 209-228, 1990.
- 4) Walters, A.A.: The theory and measurement of private and social cost of highway congestion, *Econometrica*, Vol. 29, pp. 676-699, 1961.
- 5) 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.
- 6) d'Ouille, E. L. and McDonald, J. F.: Effects of demand uncertainty on optimal capacity and congestion tolls for urban highways, *Journal of Urban Economics*, Vol. 28, pp. 63-70, 1990.
- 7) 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, No. 449, pp. 17-26, 1992.
- 8) Arnott, R., de Palma A., and Lindsey R.: Does providing information to drivers reduce traffic congestion?, *Transportation Research*, Vol.25A, pp. 309-318, 1991.
- 9) 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, No.389, pp. 121-129, 1988.
- 10) Emmerink, R., and Verhoef, E. et al.: Endogenous demand for information in road transport, *The Annals of Regional Science*, Vol.30, pp. 201-222, 1996.
- 11) 酒井泰弘: 不確実性の経済学, 有斐閣, 1982.

混雑料金の経路交通需要に及ぼす情報的効果に関する研究

太田勝久・安野貴人・小林潔司

本研究では、情報提供のタイミングとドライバーの異質性を考慮したモデルの定式化を行い、状況依存的な混雑料金を用いた経路誘導問題について考察する。交通情報がドライバーの pre-trip の段階で事前に通じられるか、on-trip の時点で通知されるかによって異なった経路誘導効果を発揮することを指摘する。また、社会的限界費用に応じた混雑料金を課徴することにより社会的総費用をパレート改善できることを示す。さらに、変動料金システムを導入することによりドライバーの総費用を常に減少できることを示す。

THE INFORMATIONAL IMPACTS OF CONGESTION TOLLS UPON ROUTE TRAFFIC DEMANDS

Katsuhisa OHTA, Takato YASUNO and Kiyoshi KOBAYASHI

In this paper, the authors formulate traffic assignment models under uncertainty to investigate how network equilibria with heterogeneous drivers can be manipulated by route guidance information as well as state-dependent congestion tolls. Our major questions are: how network equilibria can be differentiated when road prices are announced to drivers at pre- or on-trip stages. We show that drivers' welfare improvement can be always made by variable road pricing, while the Pareto improvement of network equilibria can be achieved by levying Pigouvian variable road prices.
