

混雑料金の経路交通需要に及ぼす情報の効果に関する研究\*

The Informational Impacts of Congestion Toles 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進展している。交通情報の提供が必ずしも道路交通の効率化に資するとは限らない場合もありうることが指摘されている<sup>1)</sup>。このことより、文らは混雑料金と交通情報の提供を併用したような経路誘導策を提案している<sup>2)</sup>。しかし、そこでは固定的な交通需要が仮定されており、混雑料金が交通需要に及ぼす効果を分析できる枠組みになっていない。交通需要が混雑料金により弾力的に変化する場合、交通情報をドライバーの一連の移動行動の中のどの時点で提供するかによって、情報提供がドライバーの経路誘導に及ぼす影響は多様に異なる。たとえば、走行中のドライバーに対して経路選択の直前に提供される on-trip 情報と、トリップ生成の時点に遡って提供される pre-trip 情報とでは交通情報がドライバーの行動に及ぼす影響は多様に異なるだろう。特に、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生成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交通生成に直接的な影響を及ぼす。本研究では、状況に応じて差別化される混雑料金を用いた経路誘導効果を分析する。この場合、混雑料金の提示が各経路の状況に関する情報をドライバーに伝達する経路誘導情報の役割を発揮する。その際、混雑料金を on-trip 情報、あるいは pre-trip 情報として提供することにより、混雑料金がドライバーの厚生水準に及ぼす影響について分析する。

2. 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<sup>2)</sup>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。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。 $k$  の生起は外生的に与えられ  $k$  の生起確率を  $\pi^k$  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  $M_j$  で表す。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次式で表現する。

$$U_i^j = Y + u^j - c_i \tag{1}$$

ここに、 $Y$  は所得、 $u^j$  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はトリップ便益の差異により表現され、

$$u^1 > \dots > u^{j-1} > u^j > \dots > u^Q \tag{2}$$

が成立すると仮定する。添字  $j$  が大きくなるほど、保留費用が小さい(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、タイプ  $j$  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

$$\max_i \{u^j - c_i - \tau_i\} \geq U_0 \tag{3}$$

が成立しなければならない。以下、表記の簡略化のために保留費用を  $\bar{U}_j = u^j - U_0$  と定義する。これはド

\*キーワード：交通情報システム、混雑料金、経路誘導

\*\*学生員、京都大学大学院工学研究科修士課程

(京都市左京区吉田本町、TEL/FAX 075-753-5073)

\*\*\*学生員、工修、鳥取大学大学院工学研究科博士後期課程

(鳥取市湖山町南4丁目101、TEL 0857-31-5311 FAX

0857-31-0882)

\*\*\*\*正会員、京都大学大学院工学研究科土木工学専攻

(京都市左京区吉田本町、TEL/FAX 075-753-5071)

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。また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、次式が成立する。

$$\min_i \{c_i + \tau_i\} \leq \bar{U}_j \quad (4)$$

## (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。そこで、経路 $i$ の経路を選択したタイプ $j$ の交通量を $x_{ij}$ と表そう。Arnott等に従って状況 $k$ が生じた場合の経路 $i$ の一般化交通費用 $c_i^k$ を次式のように定式化する。

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

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、 $X_i = \sum_j x_{ij}$ は経路 $i$ の交通量である。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 $[0, M]$ において条件

$$\begin{aligned} \text{(条件1)} \quad & dt_i^k(X_i)/dX_i > 0 \\ \text{(条件2)} \quad & d^2t_i^k(X_i)/dX_i^2 \geq 0 \\ \text{(条件3)} \quad & 0 \leq t_i^k(X_i) < \infty \end{aligned} \quad (6)$$

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 $i$ の走行に関する期待費用を次式のように表す。

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

情報提供がない場合のネットワーク均衡(EN)は次式のように定義できる。

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

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

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

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

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

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

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小さいことを表す。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 $E[c_i^k(X_i)] > U_j$ 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における総社会的費用 $W_{EN}$ は次式で与えられる。

$$W_{EN} = \sum_{i=1}^n X_i^* E[c_i^k(X_i^*)] + \sum_{j=1}^Q x_{0j}^* \bar{U}_j \quad (13)$$

## (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)ことはないと考え、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 $E[U_j^k] = \sum_k \pi_k U_j^k$ に基づいてトリップ生成の有無を決定している。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要することを表す。ネットワーク均衡 $EO$ における総社会的費用 $W_{EO}$ 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、均衡保留交通量を表す。

#### (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。ネットワーク均衡 $EP$ は次式のように定式化できる。

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

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

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

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

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

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

$x_{0j}^k$ 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 $EP$ における総社会的費用 $W_{EP}$ は、次式で与えられる。

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

### 3. 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(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

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} + x_{0j} = M_j, \quad x_{0j} \geq 0, \quad x_{ij} \geq 0 \quad (27)$$

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

この問題の最適化条件は式(10),(11),(12)、及び

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

$$E[c_i^k] + X_i E[c_i^k] \geq U_j, \quad \text{if } x_{ij} = 0 \quad (29)$$

ただし、 $E[c_i^k] = \sum_k \pi^k c_i^k(X_i)$ 、 $E[c_i^k] = \sum_k^K \pi^k dc_i^k(X_i)/dX_i$ である。式(28)-(29)の左辺第2項は、経路 $i$ の交通量が一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効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に応じた料金を各経路で徴収することにより分権的に達成される。すなわち、次式が成立する。

$$\tau_i = X_i E[c_i^k] \quad (30)$$

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(30)が課徴された時に達成される総社会的費用は次式で表される。

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

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

$$\bar{V}_{PN} = \sum_{i=1}^n X_i^{**} \{E[c_i^{**}] + \tau_i\} + \sum_{j=1}^Q x_{0j}^{**} \bar{U}_j \quad (32)$$

#### (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

ブ生成時点では未知であった状況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。ここに以下の問題(P0)を定式化する。

$$\begin{aligned} \min_{x_{ij}^k, x_{0j}} \sum_{j=1}^Q \left\{ E \left[ \sum_{i=1}^n x_{ij}^k c_i^k(X_i^k) \right] + x_{0j} \bar{U}_j \right\} \\ \text{subject to} \\ \sum_{i=1}^n x_{ij}^k + x_{0j} = M_j, \quad x_{ij}^k \geq 0, \quad x_{0j} \geq 0 \\ (i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, Q; k = 1, \dots, K) \end{aligned}$$

最適化条件は式(16),(17),(18)および

$$c_i^k + X_i^k c_i^{k'} = U_j^k, \quad \text{if } x_{ij}^k > 0 \quad (35)$$

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

で表される。ただし、 $c_i^k = c_i^k(X_i^k)$ ,  $c_i^{k'} = dc_i^k(X_i^k)/dX_i^k$ 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混雑料金を提示すればよい。その料金は次のように求められる。

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

$\tau_i^k$ は、状況kに依存して変化する変動料金を表す。on-trip 情報下における総期待費用最大化配分の下で達成される社会的総費用は

$$\bar{W}_{P0} = \sum_{i=1}^n E[X_i^{k**} c_i^{k**}] + \sum_{j=1}^Q x_{0j}^{**} \bar{U}_j \quad (36)$$

で評価される。ここに、 $X_i^{k**}$ ,  $x_{0j}^{**}$ は問題P0の最適経路交通量、最適保留交通量である。また、 $c_i^{k**} = c_i^k(X_i^{k**})$ である。さらに、ドライバーが負担する総費用は次式のようになる。

$$\bar{V}_{P0} = \sum_{i=1}^n E[X_i^{k**} (c_i^{k**} + \tau_i^k)] + \sum_{j=1}^Q x_{0j}^{**} \bar{U}_j \quad (37)$$

### (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。ここに、以下の問題(PP)を定式化する。

$$\begin{aligned} \min_{x_{ij}^k, x_{0j}} \sum_{j=1}^Q \left\{ E \left[ \sum_{i=1}^n x_{ij}^k c_i^k(X_i^k) + x_{0j} \bar{U}_j \right] \right\} \\ \text{subject to} \\ \sum_{i=1}^n x_{ij}^k + x_{0j} = M_j, \quad x_{ij}^k \geq 0, \quad x_{0j} \geq 0 \end{aligned}$$

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

ここに、 $x_{0j}^k$ 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

$$c_i^k + X_i^k c_i^{k'} = U_j^k \quad \text{if } x_{ij}^k > 0 \quad (38)$$

$$c_i^k + X_i^k c_i^{k'} \geq U_j^k \quad \text{if } x_{ij}^k = 0 \quad (39)$$

で表される。混雑料金は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は次式のようになる。

$$\bar{W}_{PP} = E \left[ \sum_{i=1}^n X_i^{k**} c_i^{k**} + \sum_{j=1}^Q x_{0j}^{k**} \bar{U}_j \right] \quad (40)$$

ここに、 $X_i^{k**}$ ,  $x_{0j}^{k**}$ は問題(PN)の最適解である。ドライバーが負担する総費用は次式で表わされる。

$$\bar{V}_{PP} = E \left[ \sum_{i=1}^n X_i^{k**} (c_i^{k**} + \tau_i^k) + \sum_{j=1}^Q x_{0j}^{k**} \bar{U}_j \right] \quad (41)$$

## 4. 社会的厚生水準の比較

**[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、 $W_{EN} = W_{EO} = W_{EP} = \bar{V}_{PN} = \bar{V}_{PO} = \bar{V}_{PP}$ が成立する。

**[命題2]**  $Q \geq 2$ の時、総期待費用最小化配分の社会的費用の間には $\bar{W}_{PN} \geq \bar{W}_{PO} \geq \bar{W}_{PP}$ が成立する。また、ネットワーク均衡と総期待費用最小化配分における社会的費用の間には $W_{EN} \geq \bar{W}_{PN}$ ,  $W_{EO} \geq \bar{W}_{PO}$ ,  $W_{EP} \geq \bar{W}_{PP}$ が成立する。

## 5. おわりに

本研究では、状況に応じて差別化される混雑料金を用いたモデルの定式化と、経路誘導効果の分析を行った。その結果、ネットワーク均衡モデルよりも総期待費用最小化配分モデルの方が、社会厚生水準を改善できることが明らかになった。今後の課題は、情報の不完全性や料金徴収の時間的相違について考慮したモデルを検討する必要がある。なお、数値計算結果等の詳細は講演時に紹介することにする。

## 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/IV-35, 1997.