

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

小林潔司¹・文 世一²・多々納裕一³

¹正会員 工博 鳥取大学教授 工学部社会開発システム工学科(〒680 鳥取市湖山町南 4-101)

²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 2-2-1)

³正会員 工博 鳥取大学助教授 工学部社会開発システム工学科

交通情報の提供は、経路走行時間の不確実性に対するドライバーの主観的認知方法に影響を及ぼし、ドライバーの経路選択メカニズムに影響を及ぼす。さらに、長期的には経路走行時間の不確実性、交通情報の信頼性自体を変化させる。本研究では、交通情報の信頼性とドライバーの反応行動の相互関係を合理的期待均衡モデルにより表現し、交通情報システムの導入がもたらす経済効果を評価するための分析モデルを提案する。

Key Words : rational expectations equilibrium, traffic information systems, economic benefit evaluation, route navigation

1. はじめに

交通情報システムは、公共主体がすべての(一部の)ドライバーに経路の走行条件に関する情報を事前に与え、経路選択行動を間接的に誘導することを目的とする。交通情報の提供は走行条件の不確実性に関するドライバーの認知方法を変化させる。その結果、ドライバーの経路選択行動が変化し、走行条件の不確実性自体が変化する。交通情報システムの経済効果を評価するためには、走行条件の不確実性の変化に対するドライバーの支払意思額を計測することが必要となる。しかし、不確実性の減少という立場から交通情報システムの経済効果を分析した事例は著者らの知る限り見あたらない。

交通情報による経路誘導効果を分析した研究事例はいくつか存在する。例えば、リスク分析の立場から経路誘導システムの効果を分析した研究¹⁾、情報提供による交通主体の行動変化の計測を試みた研究^{2),3)}等がある。これら既存の研究では、1)ドライバーの行動の完全制御可能性を仮定したり、2)交通情報の有無により直接効用水準が変化することを想定しており、「情報」としての交通情報の機能を評価しているわけではない。交通情報システムの経済便益を計測するためには、交通情報がもたらす走行条件の不確実性の変化に対するドライバーの厚生変化を測定することが不可欠である。

一方、不確実性下における便益評価に関しては、すでに多くの研究の蓄積があるが、そこでは外生的に与えられた不確実性の変化に対する家計の支払意思額を求めることを目的としている。交通情報の提供はドライバーの

期待形成、経路選択行動を変化させ、結果として不確実性の発生自体を変化させる。交通情報システムの経済効果を測定するためには「交通情報の提供—不確実性の認知方法の変化—経路選択行動の変化—不確実性の変化」という一連の変化を明示的に考慮する必要がある。

本研究では合理的期待均衡(以下、REEと略す)モデル⁴⁾⁻⁶⁾を用いて、ドライバーの学習行動による交通情報の信頼性の変化を内生化したような交通情報システムの経済便益評価モデルを提案する。REEモデルはドライバーの期待形成、経路選択という行動を合理的期待仮説(以下、RE仮説と略す)のもとで統一的にモデル化しており、交通情報システムの経済便益をドライバーの交通行動と整合のとれた形で分析することが可能となる。なお、本研究では路側の可変情報板やラジオを用いた交通情報の提供のように、公共主体がある地点を通過するすべてのドライバーに情報を提供するような交通情報システムをとりあげる。以下、2.で分析の枠組みを示し、3.で便益測定上の問題点を整理する。4.では交通情報の便益評価モデルを提案する。5.では、シミュレーション実験を通じて便益評価モデルの有効性を示す。

2. 本研究の概要

(1) 便益指標に関する既存の研究

新厚生経済学の分野では不確実性下の経済便益評価指標に関して多くの研究が進んだ⁷⁾⁻¹¹⁾。また、離散型選択行動を通じたプロジェクト便益の計測方法に関してもいくつかの研究が蓄積されている¹²⁾⁻¹³⁾。ランダム効用モデル

を用いた便益測定方法に関しても研究が進展した¹⁰⁻¹⁷⁾。REE モデル⁹⁾は、形式的にはランダム効用モデルを拡張したランダム期待効用モデルとなっている。筆者らの知る限りランダム期待効用モデルを用いて支払意思額を測定した事例は見あたらない。情報システムの経済効果を測定するためには、個々のメッセージの価値やシステム自体の経済価値を測定する必要がある。REE モデルの場合、情報提供により不確実性を支配している確率分布そのものが変化するため、従来の研究で提案されてきた情報の価値計測手法¹⁰⁾をそのままでは用いることができない。本研究では期待支払意思額、オプション価格の概念^{9), 10)}をREE モデルを用いた経済便益測定問題に適用し、REE における情報システムおよび個々のメッセージの経済価値を計測する方法を提案する。なお、不確実性下における支払意思額指標には、期待支払意思額、オプション価格の他に、certainty point 指標、fair point 指標⁹⁾等が考えられる。これらの指標は、個々の状態生起のもとでの支払意思額をシステムの状態に依存した多元的ベクトルとして定義するという特徴を持っている¹⁰⁾。これらの指標はリスクの生起を担保する保険機能を有するシステムの設計問題に用いられる場合が多い。経路誘導のための交通情報システムの場合、その時々メッセージが有する価値、メッセージの集合としての交通情報システムの価値に対する支払意思額を測定することを目的としており、支払意思額が一意的に求まる期待支払意思額、オプション価格系の指標に着目する。

(2) 経路誘導問題の基本構成

記述の便宜を図るため経路誘導問題⁹⁾の基本構成について概説しておく。図-1に示す簡単なネットワークを考える。時間軸を離散化する。各経路の走行時間の変動が各経路上に現われる各期ごとの内々交通量の変動によってもたらされると考えよう。分岐点にさしかかったドライバーはその期に実現する内々交通量を知ることができない。公共主体は、ネットワーク上にセンサーを配置し、交通状態を観測する。さらに、モニタリング地点で当該期の期首までに観測された交通情報に基づいて、当該期に実現するであろう各経路の走行時間を予測する。そのうえで、公共主体は、当該期にある地点（例えば、図-1の分岐点A）を通過するドライバーに交通情報を提供する。モニタリング情報に基づいて各経路の走行時間を予測するメカニズム Γ を予測メカニズムと呼ぶ。公共主体は予測結果を用いてドライバーに提供すべきメッセージの内容を決定する。予測結果に基づいてメッセージを決定するルール Λ を情報提供ルールと呼ぶ。このように情報システム θ は、予測メカニズム Γ 、情報提供ルール Λ により特徴づけることができる。そこで、情報システムを $\theta=(\Gamma, \Lambda)$ と表現しよう。

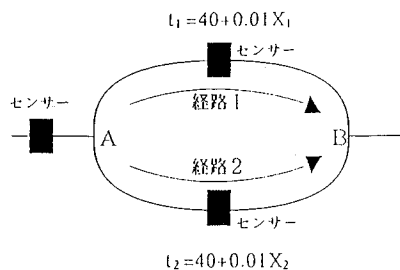


図-1 経路誘導問題

(3) 意思決定環境の定型化

情報システムの差異はメッセージの内容と生起確率、メッセージの下で生起する経路走行時間の確率分布の組により記述できる。情報システム θ のメッセージ集合を可算有限集合 $\eta(\theta)$ により定義する。ドライバーがメッセージ $e \in \eta(\theta)$ を受け取る相対頻度を $\zeta_e(e)$ で定義すれば、 $\sum_{e \in \eta(\theta)} \zeta_e(e) = 1$ が成立する。利用可能な m 個の経路に対してメッセージ e が提供された時に実現する経路走行時間の分布を確率密度関数の組 $\pi(e; \theta) = \{\pi_1(t_1; e), \dots, \pi_m(t_m; e)\}$ で表わそう。ここに、 $\pi_i(t_i; e)$ は経路 i の走行時間 t_i の分布に関する確率密度関数である。情報システム θ の下での意思決定環境 $\Psi(\theta)$ をメッセージ集合 $\eta(\theta)$ 、メッセージの生起確率 $\zeta_e(e)$ 、各メッセージ $e \in \eta(\theta)$ の下で実現する経路走行時間に関する確率密度関数 $\pi(e; \theta)$ を用いて

$$\Psi(\theta) = \{\eta(\theta), (\zeta_e(e), \pi(e; \theta); e \in \eta(\theta))\} \quad (1)$$

と表わす。情報システムが異なればメッセージの内容、その生起確率、走行時間に関する確率密度関数も変化する。情報が提供されない場合の意思決定環境 $\Psi(\phi)$ を、null 情報を提供する仮想的情報システム ϕ を用いて

$$\Psi(\phi) = \{\eta(\phi), (\zeta(\phi), \pi(\phi))\} \quad (2)$$

と定義する。情報システムは確率 $\zeta(\phi) = 1$ でnull 情報を提供する。 $\pi(\phi) = \{\pi_1(t_1; \phi), \dots, \pi_m(t_m; \phi)\}$ は、情報が提供されない場合の各経路走行時間に関する確率密度関数である。情報システム θ の経済便益は、意思決定環境が $\Psi(\phi)$ から新しい意思決定環境 $\Psi(\theta)$ に変化することに対する家計の支払意思額により計測できる。

3. 経済性便益の評価問題

(1) ランダム期待効用モデル

ドライバーは経路所要時間の分布に関して主観的期待を形成し、期待効用を最大にする経路を選択する。ドライバーの選択行動をランダム期待効用モデルを用いて定式化する。経路 i に対する間接効用関数を準線形型

$$V_i(Y, \omega_i, t_i, \varepsilon_i) = \gamma Y + v(\omega_i, t_i) + \varepsilon_i \quad (3)$$

に特定化する。ここに、 γ は所得の限界効用(定数)、 $v(\omega_i, t_i)$ は経路 i に特有な変数 ω_i と経路走行時間 t_i に依

存する部分間接効用関数である。 t_i は確率変数でありドライバーはその値を制御できない。一方、 ε_i はその時々により変動する状況依存的な私的情報であり $E[\varepsilon_i] = 0$ を仮定する。 Bishop の定義⁹⁾に従えば、経路走行時間は供給側の不確実性に該当し、私的情報は需要側の不確実性に該当する。 2つの確率変数は全く異なったメカニズムで生起するため、確率変数 t_i 、 ε_i の独立性を仮定する。独立性が成立しない場合の便益測定は過度に錯綜した内容になり、理論の複雑化は得策ではない。

式(3)は所得 Y に関して準線形であり、所得の限界効用は一定値 γ をとる。準線形効用関数を仮定すれば等価変分、補償変分が一致する。また、本研究で定義する便益指標を陽的に関数として表現できるため、指標値を容易に算定できるという利点がある。所得の限界効用の可変性を考慮した便益指標も定義できるが、便益指標の算定に数値計算が必要となり操作性に問題が生じる。以下では効用関数(3)を用いて議論を進めるが、このことは所得の限界効用が一定値をとるという仮定が成立する範囲にのみ有効であることは言うまでもない。

情報システム θ が導入され意思決定環境が $\Psi(\theta)$ から $\Psi(\theta)$ に変化したと考える。メッセージ $e \in \eta(\theta)$ が提供された際のドライバーの経路選択をモデル化する。 e の下でドライバーが予測する経路 i の走行時間 t_i の主観的期待を確率密度関数 $\bar{\pi}_i(t_i; e)$ で表わす。この時、経路 i に対するランダム期待効用関数は

$$\begin{aligned} EU_i(Y, \omega_i, \varepsilon_i; e) &= \gamma Y + \overline{EU}_i(\omega_i; e) + \varepsilon_i \\ &= \gamma Y + \int_{-\infty}^{\infty} v(\omega_i, t_i) \bar{\pi}_i(t_i; e) dt_i + \varepsilon_i \end{aligned} \quad (4)$$

と表せる。 $\overline{EU}_i(\omega_i; e)$ は e の下での経路 i の主観的期待効用の確定項(以下、確定期待効用と呼ぶ)である。

(2) 主観的期待の計測問題

ランダム期待効用モデルに基づいて経済便益を測定する場合、1)供給側の不確実性に関する家計の主観的期待 $\bar{\pi}(e; \theta) = \{\bar{\pi}_1(t_1; e), \dots, \bar{\pi}_m(t_m; e)\}$ 、2)需要側の不確実性を表わす私的情報 ε_i という分析者には観測できないドライバーの内部情報が存在する。このうち、主観的期待はドライバーの意思決定環境の不確実性と密接に関連している。主観的期待 $\bar{\pi}(e; \theta)$ はドライバーが推定した意思決定環境の不確実性を表わしているが、それが客観的に観測できる確率密度関数 $\pi(e; \theta) = \{\pi_1(t_1; e), \dots, \pi_m(t_m; e)\}$ に一致する必然性はない。RE仮説では、学習過程を通じてドライバーの主観的期待が実際に実現する客観的な確率分布に近似的に一致すると主張する⁹⁾。もちろん、RE仮説は一つの行動仮説にすぎないが、主観的期待を先験的に設定する ad hoc な方法と比較すればより妥当な考え方であろう。

不確実性下における経済便益評価を行なう場合、1)供

給側の不確実性が確定しない段階における事前の主観的期待効用 $EU_i(Y, \omega_i, \varepsilon_i; e)$ 、2)事後における確定効用 $V_i(Y, \omega_i, \bar{t}_i, \bar{\varepsilon}_i)$ のいずれに注目するかにより異なった支払意思額指標を定義できる。一般に事前の期待効用値と事後の確定効用値は一致しない。事後の効用値を計測するうえで問題となることは、主観的期待、私的情報を直接観察できない点にある。RE仮説の下では、ドライバーの主観的期待は客観的に実現する t_i の確率分布に一致し、分析者は t_i の客観的分布を用いて確定期待効用 $\overline{EU}_i(\omega_i; e)$ を計測することができる。 t_i の客観的分布を用いて求めた事後の確定効用の期待値 $E[v(\omega_i, t_i; e)] (= \int_{-\infty}^{\infty} v(\omega_i, t_i) \pi_i(t_i; e) dt_i)$ は、REに基づいた確定期待効用 $\overline{EU}_i(\omega_i; e)$ に一致する。ドライバーがREを形成していない場合、分析者はドライバーの主観的期待を観測できない。事前の主観的期待効用と事後の確定効用値の期待値は一致せず、支払意思額の算定は著しく困難になる。ドライバーは供給側の不確実性に関してREを形成すると仮定して以下では議論を進める。

(3) 私的情報項の解釈

ドライバーが経路選択に用いる情報は、道路網情報、交通情報、天候・曜日等の外的条件のような共有情報とその時々局所的な条件やドライバーに固有な属性等の私的情報に分類できる。共有情報とは公共主体とドライバーが共有できる情報である。一方、私的情報は個々のドライバーが私的に占有する情報であり、他人がその内容を知ることはできない。ドライバーは交通情報に必ずしも常に従うわけではない。その時々気まぐれや局所的な私的情報がドライバーの経路選択に影響を及ぼす。式(3)では、このような私的情報を一括して確率変数 ε_i により表現している。一般に、ランダム効用モデルの確率変動項 ε_i に対しては、1)分析者が観測できない潜在変数、2)個人の効用に対する認知変動(その時々状況依存的な効用変動)等の解釈が可能である。ランダム効用理論の代表的な見解^{10), 16)}は1)の立場に立つ。この場合、選択を行なう個人にとって効用値は常に確定的であり、不確実性は選択行動を観察する分析者の方に存在する。1)の解釈が該当する選択行動としては、耐久財の消費や住み替えのように選択行動が一度だけなされる場合があげられる。2)の立場によれば、個人効用は変動し、分析者・家計の双方ともその値を事前に確定できないと解釈する。選択が繰り返され選択パターンがそのつど変化する場合、私的情報が状況依存的な効用変動²⁰⁾を表わすと解釈した方が好都合である。この場合でも、選択行動の直前には私的情報項は確定し、選択の瞬間において個人は完全に合理的な選択を行なっている。いずれにせよ、ランダム効用モデルの私的情報項は、分析者と被分析者間の情報の非対称性に基づくものであり、分析者の

観測誤差を表示していると解釈できる。

(4) 支払意思額の計測方法

ランダム期待効用モデル(4)では需要側と供給側の双方に不確実性が存在し、支払意思額の測定時点と不確実性の生起時点の時間的順序関係が問題となる。経路選択においては、1)交通情報システムの導入決定、2)経路情報の提示、3)私的情報の確定、4)経路選択の決定、5)経路走行時間の確定という論理的順序関係が存在する。ドライバーの経路選択は1回のみでなく、時間軸上で経路選択が繰り返される。システムの便益評価は交通情報システムの導入決定がなされる前の段階で行なわれるが論理的時間軸上のどの時点の支払意思額に着目するかによって異なった便益指標が定義できる。

一方、情報システムの経済便益の測定方法としては、1)その時々メッセージの経済価値を測定し、それをすべてのメッセージにわたって集計化する方法と2)情報システム全体の経済価値を測定する方法がある。前者は、5)が終了した時点における事後の確定効用に基づいて求めた支払意思額を集計化する。経路選択の事後においては、私的情報、経路走行時間はすでに確定しておりドライバーにとって不確実性は存在しない。しかし、分析者はその時々経路走行時間、私的情報を確定的に把握できず、観測に伴う不確実性が存在する。情報システムの経済便益を求める場合、経路走行時間、私的情報の確率分布に基づいてメッセージに対する支払意思額(消費者余剰の変化)の期待値を推定し、それを集計化する必要がある。本研究では、このように算定した支払意思額を期待消費者余剰と呼ぶこととする(正確には消費者余剰の変化の期待値と呼ぶべきであるが、表記の簡略化のために「期待消費者余剰」と呼ぶ)。

このように期待消費者余剰は、支払意思額の計測時点の不確実性が確定した事後に置いている。これに対して支払意思額の測定時点を経路情報が提示される以前にシフトさせ、供給側、需要側の不確実性の双方を含めたシステム全体の不確実性の変化に対するドライバーの支払意思額(以下、オプション価格と呼ぶ)を定義することもできる。オプション価格は、交通情報システムの導入により変化する不確実性そのものに対する支払意思額を計測する。このようにメッセージ、情報システムに対する支払意思額を事後の確定効用、事前の期待効用のいずれに基づいて計測するかによって期待消費者余剰、オプション価格という異なった支払意思額指標が定式化できる。一般に、両者が一致する保証はないが、4.で示すように準線形効用関数を用いた場合、情報システムに対する期待消費者余剰とオプション価格は一致する。ただし、メッセージに対する支払意思額は一致しない。

4. 支払意思額指標の定式化

(1) モデル化の前提

時間軸を離散化し、各単位期間($n=1, 2, \dots$)中には同一メッセージが通知される。ドライバーはすべての単位期間において経路選択を行なうと仮定する。この仮定は記述を簡便化するためのものであり、仮定を緩めても以下の議論は本質的には変わらない。各単位期間をその期間に提供されたメッセージに着目して分類し、メッセージ $e \in \eta(\theta)$ が提供された単位期間の集合を $\Delta(e; \theta) \in \Delta(\theta)$ と表わす。 $\Delta(\theta)$ は単位区間集合のクラスである。メッセージ $e \in \theta$ のもとで実現した経路走行時間の客観的な確率密度関数 $\pi(e; \theta)$ は、単位期間集合 $\Delta(e; \theta)$ 上で観測された経路走行時間の分布を表わす確率密度関数として定義される。一方、情報提供がない意思決定環境 $\Psi(\phi)$ に対してはnull情報を提供する仮想的情報システムを考える。null情報システムはすべての期間を通じてnull情報を提供すると考える。そこで、すべての期間を通じた経路走行時間の客観的確率分布を求め、それを確率密度関数 $\pi(\phi) = \{\pi_1(t_1; \phi), \dots, \pi_m(t_m; \phi)\}$ により記述する。また、null情報システム下で実現する経路走行時間に対しても単位期間集合のクラス $\Delta(\theta)$ を適用し、走行時間の分布に関する確率密度関数を定義する。メッセージ $e \in \eta(\theta)$ が提供された単位期間集合 $\Delta(e; \theta)$ に対して、null情報システム下で実現する経路走行時間の客観的分布状況を求め、それを確率密度関数 $\pi^e(e; \theta) = \{\pi_1^e(t_1; e), \dots, \pi_m^e(t_m; e)\}$ として記述する。すなわち、 $\pi^e(e; \theta)$ はメッセージ $e \in \eta(\theta)$ が提供された期間だけを抜き出して、その時に実現する経路走行時間の確率分布を求めたものである。RE仮説を採用し、ランダム期待効用関数におけるドライバーの主観的期待 $\bar{\pi}(\phi)$ 、 $\bar{\pi}(e; \theta)$ は、走行時間の客観的確率密度関数 $\pi(\phi)$ 、 $\pi(e; \theta)$ に一致すると考える。ただし、ドライバーはnull情報の下で公共主体が決定する $\Delta(e; \theta)$ を知り得ず、 $\pi^e(e; \theta)$ を知ることができない。 $\pi^e(e; \theta)$ は公共主体のみが知り得る情報である。

情報システムが変化すればメッセージの種類が異なり実現するREEも異なる。同一のメッセージであってもそれが異なったメッセージ集合に含まれる場合、メッセージの経済価値は異なる。メッセージの価値はそれが含まれるメッセージ集合の中での相対的な価値比較によって求まり、異なったメッセージ集合に含まれる個々のメッセージの経済価値を互いに比較することは不可能である。異なる情報システムの経済効果を評価するためには、個別メッセージの経済価値をそれが提供される相対頻度を考慮に入れながら集計化した期待消費者余剰、あるいは情報システム全体の経済価値を評価するオプション価格を用いる必要が生じる。なお、本研究では所

得の限界効用が定数をとる準線形効用関数を仮定しており、等価変分、補償変分、消費者余剰の変分が一致する。以下では3つの指標を総称して消費者余剰と呼ぶ。また、情報はドライバーに無料で提供されドライバーの所得は情報システムの導入の前後で変化しないと仮定する。準線形効用関数の仮定の下では、仮に所得変化があったとしても支払意思額に所得変化の影響 $-\Delta Y$ を加えることによりネットの支払意思額が容易に求まる。

(2) 期待消費者余剰

経路を選択した事後の時点に着目し、メッセージ $e \in \eta$ (θ) に対する便益指標を定義する。 $\Delta(e; \theta)$ に属する単位期間を対象として、経路走行時間の確率密度関数が null 情報システム下の $\pi^0(e; \theta)$ から情報システム θ の下での $\pi(e; \theta)$ に変化することに対する期待消費者余剰を定式化する。メッセージの有無に応じて私的情報が $\bar{\varepsilon}_i = \{\bar{\varepsilon}_{i_1}, \dots, \bar{\varepsilon}_{i_m}\}$, $\bar{\varepsilon}_0 = \{\bar{\varepsilon}_{i_0}, \dots, \bar{\varepsilon}_{m_0}\}$ に確定し、ドライバーがそれぞれ以下の経路を選択したと考える。

$$\begin{aligned} i_0^* &= \arg \max_{i_0} \{ \overline{EU}_{i_0}(\omega_{i_0}; \phi) + \bar{\varepsilon}_{i_0} \} \\ i_1^* &= \arg \max_{j_1} \{ \overline{EU}_{j_1}(\omega_{j_1}; e) + \bar{\varepsilon}_{j_1} \} \end{aligned} \quad (5)$$

ここに、 $\overline{EU}_{i_0}(\omega; \phi)$, $\overline{EU}_{j_1}(\omega_{j_1}; e)$ は、それぞれ主観的期待 $\bar{\pi}(\phi)$, $\bar{\pi}(e; \theta)$ の下での確定期待効用である。添字 0, 1 はそれぞれ状況 $\Psi(\phi)$, $\Psi(\theta)$ を意味する。事後の実走行時間をそれぞれ $\bar{t}_{i_0}^*$, $\bar{t}_{j_1}^*$ と表わそう。この時、事後における効用値は、状況 $\Psi(\phi)$, $\Psi(\theta)$ に対して

$$\begin{aligned} V_{i_0}^*(Y, \omega_{i_0}, \bar{t}_{i_0}^*, \bar{\varepsilon}_{i_0}; \phi) &= \gamma Y + \nu(\omega_{i_0}, \bar{t}_{i_0}^*) + \bar{\varepsilon}_{i_0} \\ V_{j_1}^*(Y, \omega_{j_1}, \bar{t}_{j_1}^*, \bar{\varepsilon}_{j_1}; e) &= \gamma Y + \nu(\omega_{j_1}, \bar{t}_{j_1}^*) + \bar{\varepsilon}_{j_1} \end{aligned} \quad (6)$$

となる。式(6)より経路走行時間 $\bar{t}_{i_0}^*$, $\bar{t}_{j_1}^*$, $\bar{\varepsilon}_{i_0}$, $\bar{\varepsilon}_{j_1}$ を与件としたときの消費者余剰の変分は

$$\begin{aligned} V_{i_0}^*(Y + CS(\bar{t}_{i_0}^*, \bar{t}_{j_1}^*, \bar{\varepsilon}_{i_0}, \bar{\varepsilon}_{j_1}; e), \omega_{i_0}, \bar{t}_{i_0}^*, \bar{\varepsilon}_{i_0}; \phi) \\ = V_{j_1}^*(Y, \omega_{j_1}, \bar{t}_{j_1}^*, \bar{\varepsilon}_{j_1}; e) \end{aligned} \quad (7)$$

を満足する CS として定義できる。準線形効用関数(3)を用いた場合、消費者余剰の変分は

$$\begin{aligned} CS(\bar{t}_{i_0}^*, \bar{t}_{j_1}^*, \bar{\varepsilon}_{i_0}, \bar{\varepsilon}_{j_1}; e) \\ = \frac{1}{\gamma} \{ v(\omega_{j_1}, \bar{t}_{j_1}^*) - v(\omega_{i_0}, \bar{t}_{i_0}^*) + \bar{\varepsilon}_{j_1} - \bar{\varepsilon}_{i_0} \} \end{aligned} \quad (8)$$

となる。事後の時点で、消費者余剰の変分は個々のドライバーにとっては確定しているが、分析者は確率変数 $t_{i_0}^*$, $t_{j_1}^*$, ε_{i_0} , ε_{j_1} を特定できず消費者余剰の変分を確定できない。そこで、消費者余剰の変分 CS ($\bar{t}_{i_0}^*$, $\bar{t}_{j_1}^*$, $\bar{\varepsilon}_{i_0}$, $\bar{\varepsilon}_{j_1}; e$) の期待値を確率変数 $t_{i_0}^*$, $t_{j_1}^*$, ε_{i_0} , ε_{j_1} の確率分布に基づいて推定する。確率変数 $t_{i_0}^*$, $t_{j_1}^*$ がそれぞれ独立な確率密度関数 $\pi_{i_0}^*(t_{i_0}^*; e)$, $\pi_{j_1}^*(t_{j_1}^*; e)$ に従う場合、私的情報値 $\bar{\varepsilon}_{i_0}$, $\bar{\varepsilon}_{j_1}$ を与件とした時の消費者余剰の変分の期待値は条件付き期待消費者余剰 CS ($\bar{\varepsilon}_{i_0}$, $\bar{\varepsilon}_{j_1}; e$)

$$\begin{aligned} CS(\bar{\varepsilon}_{i_0}, \bar{\varepsilon}_{j_1}; e) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} CS(t_{i_0}^*, t_{j_1}^*, \bar{\varepsilon}_{i_0}, \bar{\varepsilon}_{j_1}; e) \\ \cdot \pi_{i_0}^*(t_{i_0}^*; e) \pi_{j_1}^*(t_{j_1}^*; e) dt_{i_0}^* dt_{j_1}^* \end{aligned} \quad (9)$$

として求まる。つぎに、私的情報 $\bar{\varepsilon}_{i_0}$, $\bar{\varepsilon}_{j_1}$ に関して平均化操作を行なう。分析者はドライバーにとって既知である私的情報を確定的には把握できず、ドライバーの選択行動 (i_0^* , j_1^*) と私的情報の確率分布のみが観測できる。分析者はこれらの情報に基づいてドライバーの CS ($\bar{\varepsilon}_{i_0}$, $\bar{\varepsilon}_{j_1}; e$) を推定する。いま、私的情報 ε_i が互いに独立な確率密度関数 $\phi(\varepsilon) = \{\phi(\varepsilon_1), \dots, \phi(\varepsilon_m)\}$ に従って分布すると考えよう。状況 $\Psi(\phi)$, $\Psi(\theta)$ の単位期間集合 $\Delta(e; \theta)$ において i_0^* , j_1^* を選択したという事実から、分析者は $\varepsilon_{i_0}^*$, $\varepsilon_{j_1}^*$ は次式を満足するという情報を得る。

$$\begin{aligned} \overline{EU}_{i_0}^*(\omega_{i_0}; \phi) + \varepsilon_{i_0}^* &= \max_{k_0} \{ \overline{EU}_{k_0}(\omega_{k_0}; \phi) + \varepsilon_{k_0} \} \\ \overline{EU}_{j_1}^*(\omega_{j_1}; e) + \varepsilon_{j_1}^* &= \max_{k_1} \{ \overline{EU}_{k_1}(\omega_{k_1}; e) + \varepsilon_{k_1} \} \end{aligned} \quad (10)$$

この情報を利用すれば、確率密度関数 $\phi(\varepsilon_i)$ ではなく、以下の条件付き確率密度関数 $f(\varepsilon_{i^*}; e)$ を用いることにより期待消費者余剰の推計精度を向上できる。

$$\begin{aligned} f(\varepsilon_{i^*}; e) = \\ \frac{\phi(\varepsilon_{i^*}) \prod_{j \neq i^*} \int_{-\infty}^{\overline{EU}_{j^*}^* - \overline{EU}_{i^*}^* + \varepsilon_{i^*}} \phi(\varepsilon_j) d\varepsilon_j}{\int_{-\infty}^{\infty} \phi(\varepsilon_{i^*}) [\prod_{j \neq i^*} \int_{-\infty}^{\overline{EU}_{j^*}^* - \overline{EU}_{i^*}^* + \varepsilon_{i^*}} \phi(\varepsilon_j) d\varepsilon_j] d\varepsilon_{i^*}} \end{aligned} \quad (11)$$

ここに、 $\overline{EU}_{i^*}^* = \overline{EU}_i(\omega_{i^*}; e)$ は事前の確定期待効用であり、上式はメッセージ e の下で経路 i が選択されたという条件下での私的情報 ε_{i^*} に関する条件付き確率密度関数である。この時、CS ($\bar{\varepsilon}_{i_0}^*$, $\bar{\varepsilon}_{j_1}^*; e$) を用いれば、単位期間集合 $\Delta(e; \theta)$ において選択行動 i_0^* , j_1^* を観測した場合の条件付き期待消費者余剰の平均値 $E[CS(i_0^*, j_1^*; e)]$ を求めることができる。

$$\begin{aligned} E[CS(i_0^*; j_1^*; e)] \\ = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} CS(\varepsilon_{i_0}^*, \varepsilon_{j_1}^*; e) f(\varepsilon_{i_0}^*; \phi) f(\varepsilon_{j_1}^*; e) d\varepsilon_{i_0}^* d\varepsilon_{j_1}^* \\ = \frac{1}{\gamma} \{ \bar{\mu}_0(\omega_{i_0}^*; e) - \bar{\mu}_\phi(\omega_{i_0}^*; e) \} \end{aligned} \quad (12)$$

ただし、 $\bar{\mu}_0$, $\bar{\mu}_\phi$ はそれぞれ次式で定義される。

$$\begin{aligned} \bar{\mu}_0(\omega_{j_1}^*; e) &= \int_{-\infty}^{\infty} \{ E[v(\omega_{j_1}, t_{j_1}^*; e)] + \varepsilon_{j_1} \} f(\varepsilon_{j_1}^*; e) d\varepsilon_{j_1}^* \\ \bar{\mu}_\phi(\omega_{i_0}^*; e) &= \int_{-\infty}^{\infty} \{ E_\phi[v(\omega_{i_0}, t_{i_0}^*; e)] + \varepsilon_{i_0} \} f(\varepsilon_{i_0}^*; e) d\varepsilon_{i_0}^* \end{aligned} \quad (13)$$

なお、 $E_\phi[v(\omega_{i_0}, t_{i_0}^*; e)] = \int_{-\infty}^{\infty} v(\omega_{i_0}, t_{i_0}^*) \pi_{i_0}^*(t_{i_0}^*; e) dt_{i_0}^*$ である。また、 $\bar{\mu}_\phi(\omega_{i_0}^*; e)$, $\bar{\mu}_0(\omega_{j_1}^*; e)$ は状況 $\Psi(\theta)$, $\Psi(\phi)$ の単位期間集合 $\Delta(e; \theta)$ に経路 i_0^* , j_1^* を選択したドライバーの事後効用の平均値である。さらに、単位期間集合 $\Delta(e; \theta)$ におけるすべての選択行動 i_0^* , j_1^* に対して条件付き期待消費者余剰を集計化する。 $\Delta(e; \theta)$ において、経路 i_0^* , j_1^* を選択する確率をそれぞれ $p_{i_0}^*(\phi)$, $p_{j_1}^*(e)$ とすれば、メッセージ e に対する

条件付き期待消費者余剰を次式で表わせる。

$$E[CS(e; \theta)] = \frac{1}{\gamma} \left\{ \sum_{j_1^* = 1}^m p_{j_1^*}(e) \bar{\mu}_{\theta}(\omega_{j_1^*}; e) - \sum_{i_0^* = 1}^m p_{i_0^*}(\phi) \bar{\mu}_{\theta}(\omega_{i_0^*}; e) \right\} \quad (14)$$

さらに、 ε_i が互いに独立な確率密度関数 $\phi(\varepsilon)$ に従う確率変数であることに着目すれば、メッセージ e の下で経路 i^* が選択される確率 $p_{i^*}(e)$ は次式のようになる。

$$p_{i^*}(e) = P_{00}[\overline{EU}_{i^*}(\omega_{i^*}; e) + \varepsilon_{i^*} \geq \overline{EU}_j(\omega_j; e) + \varepsilon_j] \\ = \int_{-\infty}^{\infty} \phi(\varepsilon_{i^*}) \left[\prod_{j \neq i^*} \int_{-\infty}^{\overline{EU}_{i^*} - \overline{EU}_j + \varepsilon_{i^*}} \phi(\varepsilon_j) d\varepsilon_j \right] d\varepsilon_{i^*} \quad (15)$$

私的情報 ε_i が分散 $\pi^2/6\lambda^2$ の極値分布

$$\phi(\varepsilon_i) = \lambda \exp(-\lambda\varepsilon_i + \iota) \exp[-\exp(-\lambda\varepsilon_i + \iota)] \quad (16)$$

に従うと仮定する。なお、 ι はオイラー定数である。この時、選択確率 $p_{i^*}(e)$ は多項ロジットモデル

$$p_{i^*}(e) = \frac{\exp\{\lambda \overline{EU}_{i^*}(\omega_{i^*}; e)\}}{\sum_{k=1}^m \exp\{\lambda \overline{EU}_k(\omega_k; e)\}} \quad (17)$$

で表わせる。主観的期待が RE に一致している時、事後の確定効用の平均値 $E[v(\omega_{j^*}, t_{j^*}; e)]$ は事前の確定期待効用 $\overline{EU}_{j^*}(\omega_{j^*}; e)$ に一致することに着目しよう。この時、式 (13) の積分を実行すれば、各メッセージの価値を表わす条件付き期待消費者余剰 (14) を次式のように表わすことができる (付録参照)。

$$E[CS(e; \theta)] = \frac{1}{\lambda\gamma} \ln \left\{ \frac{\sum_{j_1^* = 1}^m \exp[\lambda \overline{EU}_{j_1^*}(\omega_{j_1^*}; e)]}{\sum_{i_0^* = 1}^m \exp[\lambda \overline{EU}_{i_0^*}(\omega_{i_0^*}; \phi)]} \right\} \\ - \frac{1}{\gamma} \left\{ \sum_{i_0^* = 1}^m p_{i_0^*}(\phi) \{ \overline{EU}_{i_0^*}^{\phi}(\omega_{i_0^*}; e) - \overline{EU}_{i_0^*}(\omega_{i_0^*}; \phi) \} \right\} \quad (18)$$

ただし、 $\overline{EU}_{i_0^*}^{\phi}(\omega_{i_0^*}; e) = E_{\theta}[v(\omega_{i_0^*}, t_{i_0^*}; e)]$ である。最後に、メッセージの条件付き期待消費者余剰をすべてのメッセージにわたって集計化しよう。いま、経路選択を繰り返すドライバーの経路選択行動全体に対する効用を 1 回の経路選択に際し獲得する効用の加法和で表現できると仮定する。この時、各メッセージの条件付き期待消費者余剰をメッセージの出現頻度 $\zeta_{\theta}(e)$ により加重平均し、交通情報システムの期待消費者余剰 $CS(\theta)$ を定義する。RE 仮説の下で $\sum_{e \in \gamma(\theta)} \zeta_{\theta}(e) \overline{EU}_{i_0^*}^{\phi}(\omega_{i_0^*}; e) = \overline{EU}_{i_0^*}(\omega_{i_0^*}; \phi)$ が成立することより、式 (18) の第 2 項は集計化操作の過程で互いにキャンセルされ、期待消費者余剰 $E[CS(\theta)]$ は次式で表わせる。

$$E[CS(\theta)] = \sum_{e \in \gamma(\theta)} \zeta_{\theta}(e) E[CS(e; \theta)] \\ = \frac{1}{\lambda\gamma} \sum_{e \in \gamma(\theta)} \zeta_{\theta}(e) \ln \left\{ \frac{\sum_{j_1^* = 1}^m \exp[\lambda \overline{EU}_{j_1^*}(\omega_{j_1^*}; e)]}{\sum_{i_0^* = 1}^m \exp[\lambda \overline{EU}_{i_0^*}(\omega_{i_0^*}; \phi)]} \right\} \quad (19)$$

換言すれば、メッセージの (事後的) 経済価値は単位期

間集合 $\mathcal{A}(e; \theta)$ の相対的な (事後的) 経済価値を表わす式 (18) の第 2 項を用いて期待消費者余剰 $E[CS(\theta)]$ を補正した値になることが理解できる。

(3) オプション価格

オプション価格は、供給側、需要側の不確実性の双方を含めたシステム全体の不確実性の変化に対するドライバーの支払意思額を意味している¹¹⁾。私的情報はその時々に変動する確率変数だと考え、私的情報 ε_i が互いに独立な確率密度関数 $\phi(\varepsilon) = \{\phi(\varepsilon_1), \dots, \phi(\varepsilon_m)\}$ に従って分布するとしよう。メッセージ e の下で経路選択を繰り返すドライバーの事前の期待効用の平均値 $W(Y, \omega_1; e)$ は、

$$W(Y, \omega_1; e) = E[\max_j \{\gamma Y + \overline{EU}_{j_1}(\omega_{j_1}; e) + \varepsilon_{j_1}\}] \\ = \sum_{j_1 = 1}^m \int_{-\infty}^{\infty} \{\gamma Y + \overline{EU}_{j_1}(\omega_{j_1}; e) + \varepsilon_{j_1}\} g(\varepsilon_{j_1}; e) d\varepsilon_{j_1} \quad (20)$$

となる。 $g(\varepsilon_j; e) = \phi(\varepsilon_j) \prod_{i \neq j} \int_{-\infty}^{\overline{EU}_j - \overline{EU}_i + \varepsilon_j} \phi(\varepsilon_i) d\varepsilon_i$ である。私的情報 ε_i がそれぞれ独立な極値分布 (16) に従うと仮定しよう。この時、メッセージ e に対する期待効用の平均値 $W(Y, \omega_1; e)$ は次式で表せる。

$$W(Y, \omega_1; e) = \gamma Y + \frac{1}{\lambda} \ln \left\{ \sum_{j_1 = 1}^m \exp[\lambda \overline{EU}_{j_1}(\omega_{j_1}; e)] \right\} \quad (21)$$

一方、null 情報の下における事前の期待効用の平均値 $W(Y, \omega_0; \phi)$ は以下のようになる。

$$W(Y, \omega_0; \phi) = \gamma Y + \frac{1}{\lambda} \ln \left\{ \sum_{i_0 = 1}^m \exp[\lambda \overline{EU}_{i_0}(\omega_{i_0}; \phi)] \right\} \quad (22)$$

e に対する等価オプション価格 $OP(e; \theta)$ は

$$W(Y + OP(e; \theta), \omega_0; \phi) = W(Y, \omega_1; e) \quad (23)$$

を満足する $OP(e)$ として定義できる。準線形効用関数の場合、等価オプション価格と補償オプション価格は一致するので、ここでは両者をまとめてオプション価格と呼ぶ。式 (21), (22) よりメッセージ e に対する条件付きオプション価格 $OP(e; \theta)$ は

$$OP(e; \theta) = \frac{1}{\lambda\gamma} \ln \left\{ \frac{\sum_{j_1 = 1}^m \exp[\lambda \overline{EU}_{j_1}(\omega_{j_1}; e)]}{\sum_{i_0 = 1}^m \exp[\lambda \overline{EU}_{i_0}(\omega_{i_0}; \phi)]} \right\} \quad (24)$$

と表わせる。各メッセージ e に対する期待効用の平均値 $W(Y, \omega_1; e)$ を生起頻度 $\zeta_{\theta}(e)$ を用いて加重平均することにより、情報システム θ の下で達成されるドライバーの期待効用の平均値 $W(Y, \omega_1; \theta)$ を定義する。

$$W(Y, \omega_1; \theta) = \sum_{e \in \gamma(\theta)} \zeta_{\theta}(e) W(Y, \omega_1; e) \quad (25)$$

この時、ドライバーの交通情報システム θ に対する支払意思額を表わすオプション価格 $OP(\theta)$ は、

$$W(Y + OP(\theta), \omega_0; \phi) = W(Y, \omega_1; \theta) \quad (26)$$

を満足する $OP(\theta)$ として定義できる。情報システム θ のオプション価格 $OP(\theta)$ は次式で表現できる。

$$OP(\theta) = \frac{1}{\lambda \gamma} \sum_{e \in \eta(\theta)} \zeta_e(e) \ln \left\{ \frac{\sum_{j=1}^m \exp[\lambda EU_j(\omega_j : e)]}{\sum_{i_0=1}^m \exp[\lambda EU_{i_0}(\omega_{i_0} : \phi)]} \right\} \quad (27)$$

オプション価格 $OP(\theta)$ はメッセージに対する条件付きオプション価格 $OP(e : \theta)$ の加重平均で表わされ、期待消費者余剰 $E[CS(\theta)]$ と一致する。以上の結果は、準線形のランダム期待効用モデルを用いたことの理論的帰結であり、一般的な非線形効用関数を用いた場合両者が一致する保証はない。一方、事前の期待効用に基づいて選択した経路が事後においても最適である保証はなく、事後の確定効用と事前の期待効用に基づいて計測したメッセージに対する支払意思額は一致しない。

5. シミュレーションモデルと数値計算

(1) 経路選択モデルの特定化

本研究では、RE 形成を考慮したランダム期待効用モデルを用いる。交通情報に対するドライバーの学習過程を表現したシミュレーションモデルの詳細は参考文献⁵⁾に譲り、ここでは最低限の記述にとどめる。さらに、既存の研究成果²¹⁾に基づいて、間接効用関数を次式のように特定化する。

$$V_i = -0.00049(Y + \omega_i) - 0.0246t_i + \varepsilon_i \quad (28)$$

この場合、時間価値は $0.0246/0.00049 = 50.5$ 円 / 分である。 ω_i は経路走行費用であり確定値をとる。経路走行時間 t_i は確率変数である。線形式は間接効用関数として必ずしも望ましい性質を持っていないが、既往の交通行動モデルに関する研究においてよく用いられてきた関数形であり、任意の間接効用関数の1次近似と考えることができる。線形間接効用関数の重要な欠点の1つは、ドライバーの危険回避行動を表現できない点にある。危険回避行動を表現しようとするれば、例えば絶対危険回避型効用関数⁹⁾を用いる必要がある。線形間接効用関数以外の関数形を用いても、シミュレーション方法等に本質的な違いが生じるわけではない。線形間接効用関数(28)を用いてランダム期待効用モデルを求めれば、

$$EU_i = -0.00049(Y + \omega_i) - 0.0246\tau_i(e) + \varepsilon_i \quad (29)$$

となる。 $\tau_i(e) = \int_{-\infty}^{\infty} t_i \bar{\pi}(t_i : e) dt_i$: メッセージ e の下で実現する走行時間の主観的期待値である。ドライバーは期待効用(29)を最大にする経路を選択する。ドライバーの学習過程を n 期の新しい経験情報 $\bar{\pi}_n$ を用いて主観的期待 $\tau_i^n(e)$ を逐次更新するルールとして記述する⁹⁾。

$$\tau_i^{n+1}(e) = \tau_i^n(e) + \frac{1}{\nu_n + n_i(e)} \cdot (\bar{\pi}_n^n - \tau_i^n(e)) \quad (30)$$

ここに、 $n_i(e)$: 当該期までに e の下で当該経路を走行

した回数、 ν_n : 定数である。当該期で選択しなかった残りの経路 $j \neq i$ の主観的期待は、その経路が利用されるまで更新されない。参考文献⁵⁾では、このような逐次学習過程により合理的ドライバーの主観的期待が RE に収束する条件を示している。それによれば、走行時間関数がリフシット連続性を満足し意思決定環境が定常性を満足していれば、合理的ドライバーが経路選択を十分多く繰り返すことにより RE を形成することが保証される。

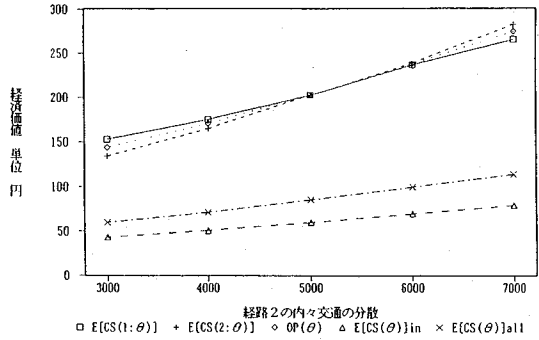
(2) シミュレーションモデル

交通情報システムに対するドライバーの支払意思額を計測するためには、情報システム $\theta = (\Gamma, \Lambda)$ と意思決定環境 $\Psi(\theta) = \{\eta(\theta), \zeta(e : \theta), \tau(e : e \in \eta(\theta))\}$ の関係を明示的にモデル化する必要がある。両者の関係を解析的に求めることは不可能でありシミュレーションにより意思決定環境を再現する。参考文献⁶⁾では3つの予測メカニズムを提案しているが、そのうち本研究では RE 形成を考慮した経路選択モデルを用いる方法を採用する。この予測メカニズムは公共主体は私的情報を観測できないが、RE は観測できると考えた実際的な予測メカニズムである。一方、情報提供ルールは、メッセージ集合 $\eta(\theta)$ とその中からドライバーに通知するメッセージ e を選択するルールにより表現される。その際、表-1 に示すように、1) 各経路の期待走行時間を(5分刻みで)離散化し、それぞれの経路の走行時間の組み合わせた16通りのメッセージの中から最適なメッセージを選択するルール Λ_1 。(たとえば、メッセージ $e=2$ では「経路1、経路2の走行時間がそれぞれ130分、140分」とドライバーに通知される)、2) 選択を推奨する経路を通知するルール Λ_2 。(たとえば、メッセージ $e=1$ は「経路1を利用せよ」という情報が通知される)、3) 経路1に関する渋滞情報を提示するルール Λ_3 。(メッセージ $e=1$ では「経路1が渋滞中」という情報が通知され、メッセージ $e=2$ では情報は通知されない) という3種類を想定する。

RE 形成を考慮した経路選択モデルを用いたシミュレーションの方法に関しては参考文献⁶⁾に説明しているが、ここでは説明の便宜上簡単にその概要を説明しておくこととする。1) 初期期待 $\tau^0(e)$ を設定する。2) 各期ごとに私的情報には極値分布、内々交通量に正規分布に従う乱数をわりあてる。3) メッセージ $e \in \eta$ の下で、ドライバーが各経路に対して想定する確定的期待効用 EU を式(29)を用いて算定する。4) e の下でのドライバーの経路選択確率 $p_i(e)$ をロジットモデル(17)で算定する。5) 各ドライバーの経路選択の結果を集計し、各経路の期待走行時間を算定する。6) e に対してドライバーが事後に獲得する確定効用値を計算する。7) 事後の確定効用値を集計し、その値がもっとも大きくなるメッセージを選択する。8) 式(30)を用いて主観的期待を更新する。

表一 情報システムの経済価値

	メッセージの内容	$E[CS(e;\theta)]$ 円	$OP(e;\theta)$ 円	$OP(\theta)$ 円	$E[CS(\theta)]_{in}$ 円	$E[CS(\theta)]_{all}$ 円
Aa	e = 1 (130, 130) 経路1が130分 経路2が130分	0.0	2709.9	231.5	64.2	88.5
	e = 2 (130, 140) 経路1が130分 経路2が140分	107.6	1836.5			
	e = 3 (130, 150)	192.7	1663.7			
	e = 4 (130, 160)	558.9	886.1			
	e = 5 (140, 130)	107.6	1836.5			
	e = 6 (140, 140)	0.0	898.2			
	e = 7 (140, 150)	8.1	626.3			
	e = 8 (140, 160)	163.6	-310.9			
	e = 9 (150, 130)	192.7	1663.7			
	e = 10 (150, 140)	8.1	626.3			
	e = 11 (150, 150)	0.0	386.9			
	e = 12 (150, 160)	106.1	-82.0			
	e = 13 (160, 130)	558.9	886.1			
	e = 14 (160, 140)	163.6	-310.9			
	e = 15 (160, 150)	106.1	-82.0			
	e = 16 (160, 160)	0.0	-1905.1			
Ab	e = 1 経路1を 利用せよ	202.4	202.4	202.4	59.9	85.0
	e = 2 経路2を 利用せよ	202.4	202.4			
Ac	e = 1 経路1が 渋滞	119.4	-917.3	111.4	31.7	42.1
	e = 2 no!!情報	102.7	1059.6			



図二 不確実性と経済便益の関係

はないが、ここでは数値計算事例をできるだけ分かりやすくするために式(31)を用いることとする。なお、一般的な非線形走行時間関数を用いても上述した手順と同様の方法で経済効果を測定できることは言うまでもない。各期の期首に内々交通量が確定するが、ドライバーはその値を知りえず公共主体のみがその値を知ることができる。なお、内々交通のドライバーには交通情報は与えられず、通過交通のみに交通情報が与えられる。内々交通には経路選択の自由度がないと考える。通過交通と内々交通のドライバーの経済厚生を比較を容易にするために、内々交通は図一の分岐点Aで発生し分岐点Bで吸収され、通過交通と同一の走行時間関数に直面すると考える。

(3) 数値計算の概要

図一に示した例題で、分岐点Aを通過するドライバーに交通情報を提供する問題を考える。各期の通過交通量は確率変数であるが、経路誘導システムの経済評価に分析の焦点を絞るため、各期を通じて通過交通量は一定(10,000台)と考える。これらの交通は同時に経路選択を行ない、期間中に経路利用を終了すると考える。各ドライバーの経路1、経路2に対する初期期待を $N(160, 0)$ 、 ϵ_i は極値分布 $W(0, 2)$ 、各経路の内々交通は互いに独立な正規分布 $N(10000, 5000)$ に従うと仮定する。各経路の走行時間関数を線形関数で表現する。

$$t_i = l_i + v_i X_i \quad (31)$$

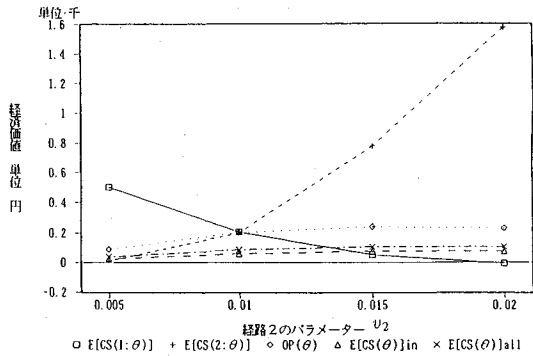
なお、 t_i : 経路実走行時間、 l_i, v_i : 定数、 X_i : 経路交通量である。各リンクの特性は図一に示したとおりである。各経路の特性は同一であり、その時々によって内々交通量が独立に変動すると考える。独立性を仮定しない場合も同様の方法で分析できるが、紙面の都合上独立性を仮定した場合の分析結果のみを示す。また、実用上の面から考えれば、線形走行時間関数を用いることは合理的で

(4) 経済便益の計測結果

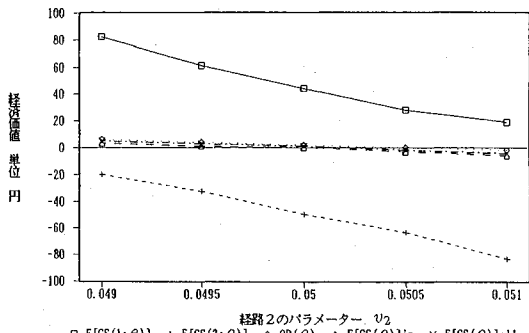
経済便益指標として、1)メッセージの事後の経済便益を表わす条件付き期待消費者余剰 $E[CS(e;\theta)]$ 、2)メッセージの事前の経済便益を表わす条件付きオプション価格 $OP(e;\theta)$ 、3)情報システムの経済便益全体を評価するオプション価格 $OP(\theta)$ (=期待消費者余剰 $E[CS(\theta)]$) に着目する。経路誘導が内々交通に及ぼす影響を分析するため、4)内々交通のドライバーの1人当たりの期待消費者余剰の平均値 $E[CS(\theta)]_{in}$ 、5)内々交通を含めた全ドライバーの1人当たりの期待消費者余剰の平均値 $E[CS(\theta)]_{all}$ も評価指標として用いる。以下では1トリップ当たりの経済便益を評価する。

a) メッセージの種類と経済便益

3種類の情報提供ルール ($\Lambda_a, \Lambda_b, \Lambda_c$) と経済便益の関係を表一に示す。情報システム $\Lambda_a, \Lambda_b, \Lambda_c$ の順にオプション価格、内々交通の期待消費者余剰、全ドライバーの期待消費者余剰はいずれも増加している。換言すれば、情報システムのメッセージ内容が豊富ほど、情報システムの経済効果は大きくなる。本ケースの場合、情報システム Λ_a のメッセージ1単位当たりの価値は約230円となる。ここでは、内々交通は経路選択の余地が



a) 走行時間関数 (経路 1: $t_1=40+0.01X_1$, 経路 2: $t_2=40+v_2X_2$) のパラメータ v_2 を変化させた場合



b) 走行時間関数 (経路 1: $t_1=45+0.01X_1$, 経路 2: $t_2=40+v_2X_2$) のパラメータ v_2 を変化させた場合

図-3 経路特性と経済便益の関係

ないと仮定しているため、内々交通の厚生水準は通過交通のドライバーほどは大きくない。しかし、混雑時に通過交通を他の経路へ誘導することにより内々交通の厚生水準は増加する結果となっている。メッセージ価格に着目すれば、条件付き期待消費者余剰 $E[CS(e; \theta)]$ は正となるが、条件付きオプション価格 $OP(e; \theta)$ は負となる場合が存在する。 $OP(e; \theta)$ は情報提供しない場合の期待効用水準を基準として個々のメッセージの経済価値を測定するため、混雑時にはドライバーの厚生は低い水準にとどまり、結果的に負の値を示す場合が生じる。しかし、混雑時であっても情報提供によりドライバーの厚生を改善できれば、メッセージ価格は正となるべきだろう。したがってメッセージの経済価値指標としては、当該メッセージが提供された単位期間集合 $\mathcal{A}(e; \theta)$ に限定してメッセージの事後的な経済価値を計測する $E[CS(e; \theta)]$ の方が望ましい。以下では、メッセージの経済価値として $E[CS(e; \theta)]$ のみに着目する。

b) 不確実性の程度と経済便益

情報提供ルールとして Λ_0 を採用し、経路 2 の内々交通量の変動を表わす正規分布の分散と経済便益指標との

関連を分析した。図-2 に示すように、内々交通量の変動が大きくなれば、経路走行時間の不確実性は大きくなり、経済便益 ($OP(\theta)$, $E[CS(\theta)]$) は増加する。一方、個々のメッセージの経済価値 $E[CS(e; \theta)]$ も同様の傾向を示し、内々交通量の分散が大きくなれば、メッセージの経済価値は増加する傾向が見られる。

c) 経路特性と経済便益

情報提供ルール Λ_0 の下で経路 2 の限界走行時間 (走行時間関数 (31) のパラメータ v_2) を変化させ、経済便益との関連について分析した結果を図-3a) に示す。経路 2 のパラメータ値 v_2 が v_1 に対して相対的に大きくなる程、「経路 1 を利用せよ」というメッセージの経済価値 ($E[CS(1; \theta)]$) が減少し、逆に $E[CS(2; \theta)]$ は増加する。限界走行時間の相対的な関係によりメッセージの経済価値は大幅に変動する。オプション価格はそれぞれのメッセージの経済価値の加重和で表現されるため、限界走行時間の変化に対してオプション価格は必ずしも単調に変化しない。図-3b) には経路情報システムの導入が逆効果となるような計算事例を示している。本ケースでは両経路の限界走行時間に大きな差異があるネットワークを想定している。この場合、限界走行時間の大きい経路 (経路 2) の利用を推奨するメッセージの経済価値が負となり、情報システムの経済価値も負の値を示すケースが現われている。内々交通、全ドライバーの期待支払意思額も負となっている。以上の例は、情報システムの設計如何によっては、従前よりも悪い結果をもたらす場合がありうることを示している。また、情報システムの経済価値はネットワーク特性やメッセージの内容に応じて大きく変動することを考慮すれば、情報システムの設計には慎重な対応が必要であることが理解できる。

6. おわりに

交通情報の提供は、ドライバーの期待形成、経路選択行動を誘導し、結果として不確実性の発生を変化させる。本研究では、ドライバーの期待形成とそれによる不確実性の変化を RE 形成を考慮したランダム期待効用モデルを用いてモデル化し、交通情報の提供による不確実性の変化に対するドライバーの支払意思額を計測する方法を開発した。また、簡単な数値実験を通じて支払意思額の計測モデルの適用性を例示した。もとより、本研究で行なった数値実験は、線形走行時間関数を用いるなど限られた条件の下で実施したものであり、実用的な経済評価モデルを開発するためには今後の検討課題もいくつか残されている。本研究で提案したモデルは実際の経済評価モデルの開発のためのプロトタイプとなりえるものであり、今後実際例への適用研究を通じてモデルの汎用性、実用性を高めていきたいと考える。

本研究を通じて、今後に残された理論的な研究課題もいくつか抽出できた。特に、交通情報の提供が必ずしもドライバーの厚生状態を改善しない場合がありうるということが判明した点が重要である。ドライバーの厚生状態のパレート改善に資するような情報システムの設計のための方法論開発が不可欠である。この種の研究は多方面への展開が可能であろう。たとえば、1)市場メカニズムを通じた交通情報提供方法の検討、2)交通情報システムの最適設計問題の定式化とその実用的な解法の検討、3)望ましい経路誘導パターンに関する規範的分析、4)交通情報と混雑税との関連に関する研究等があげられる。これまでの混雑税による経路誘導に関する議論²²⁾は、主として交通流のパレート改善を目的としていた。これに対して、交通情報は情報の非対称性による経済損失を改善する役割を果たしている。もし、混雑税がドライバーに事前に通知されれば混雑税も経路誘導情報としての役割を果たすことが期待される。筆者らの知る限り、混雑税に関する情報経済学的なアプローチはなされておらず、この種の研究は今後より体系的な経路誘導システムを開発していくための基礎研究になると考える。

(付録)：期待消費者余剰の導出

$\bar{u}_s(e)$ の定義より $\bar{\mu}_s(e) = \int_{-\infty}^{\infty} \{E_s[v_i : e] + \varepsilon_i\} f(\varepsilon_i : e) d\varepsilon_i = \int_{-\infty}^{\infty} \{[E[v_i : \phi] + \varepsilon_i] + [E_s[v_i : e] - E[v_i : \phi]]\} f(\varepsilon_i : \phi) d\varepsilon_i$ を得る。REの下では $E[v_i : \phi] = \overline{EU}_i(\phi)$ が成立する。したがって、次式が成立する。 $\Sigma p_i(\phi) \bar{\mu}_s(e) = \Sigma p_i(\phi) \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \{\overline{EU}_i(\phi) + \varepsilon_i\} f(\varepsilon_i : e) d\varepsilon_i + \overline{EU}_s^*(e) - \overline{EU}_i(\phi) \right\} = \lambda^{-1} \ln \Sigma^* \exp[\lambda \overline{EU}_i(\phi)] + \Sigma p_i(\phi) \{\overline{EU}_s^*(e) - \overline{EU}_i(\phi)\}$ 。すなわち、式(18)を得る。

参考文献

- 1) 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, No. 464/IV-19, pp. 63-72, 1993.
- 2) 森津秀夫他: 経路誘導による交通ネットワークフローの変化に関する分析, 土木計画学研究・論文集, No. 9, pp. 37-44, 1991.
- 3) 室町泰徳, 兵藤哲朗, 原田昇: 交通情報による駐車場選択行動変化のモデル分析, 土木学会論文集, No. 470/IV-20,

- pp. 145-154, 1993.
- 4) 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, No. 8, pp. 81-88, 1990.
- 5) 小林潔司, 藤高勝巳: 合理的期待形成過程を考慮した経路選択モデルに関する研究, 土木学会論文集, No. 458/IV-18, pp. 17-26, 1993.
- 6) 小林潔司, 井川修: 交通情報によるドライバーの経路誘導効果に関する研究, 土木学会論文集, No. 470/IV-20, pp. 185-194, 1993.
- 7) Mäler, K.-G.: *Environment Economics, A Theoretical Inquiry*, John Hopkins University Press, 1974.
- 8) Small, K. A. and Rosen, S.: Applied welfare economics with discrete choice models, *Econometrica*, No. 49, pp. 105-130, 1981.
- 9) Graham, D. A.: Cost-benefit analysis under uncertainty, *Amer. Econ. Rev.*, Vol. 71, pp. 715-725, 1981.
- 10) Bishop, R. C.: Option value: An exposition and extension, *Land Economics*, Vol. 58, pp. 1-15, 1982.
- 11) Johansson, P.-O.: *The Economic Theory and Measurement of Environmental Benefits*, Cambridge University Press, 1987.
- 12) Hau, T. D.: A Hicksian approach to cost-benefit analysis with discrete-choice models, *Economica*, Vol. 52, pp. 479-490, 1985.
- 13) Hanemann, M.W.: Welfare evaluations in contingent valuation experiments with discrete responses, *Amer. J. Agri. Econ.* No. 66, pp. 332-341, 1989.
- 14) McFadden, D.: Conditional Logit Analysis of Qualitative Choice Behavior, in Zarembka, P. (ed.), *Frontiers of Econometrics*, Academic Press, 1973.
- 15) Feenberg, A. and Mills, E. S.: *Measuring the Benefits of Water Pollution Abatement*, Academic Press, 1980.
- 16) Ben-Akiva, M. and Lerman, S.: *Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Predict Travel Demand*, The MIT Press, 1985.
- 17) 森杉壽芳, 大野栄治, 宮城俊彦: 住環境整備による住み替え便益の定義と計測モデル, 土木学会論文集, 第425号/IV-4, pp. 117-125, 1991.
- 18) 宮沢光一: 情報決定理論序説, 岩波書店, 1971.
- 19) 多々納裕一: 濁水リスクの経済的評価法に関する研究-濁水対策プロジェクトに着目して-, 土木学会論文集, No. 464/IV-19, pp.73-82, 1993.
- 20) Hirshleifer, J.: Investment decision under uncertainty: Application of the state-preference approaches, *Quarterly J. Economics*, Vol. 80, pp. 252-277, 1966.
- 21) 太田勝敏他: 時間価値の理論とその計測手法の研究, 日交研シリーズ A-123, 1988.
- 22) 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.

(1994.2.23 受付)

ECONOMIC EVALUATION OF INFORMATION SYSTEMS FOR AUTOMOBILE NAVIGATION

Kiyoshi KOBAYASHI, Se-il MUN and Hirokazu TATANO

This paper presents a unified framework to measure the economic values of information systems for route navigation. Welfare measurement is made by use of random expectations utility models with rational expectations. Two alternative indices to measure the economic values of informational messages are proposed. The expected consumer surplus and the option price, can be used to evaluate the economic benefit of information systems for route navigation. The numerical examples illustrate how these indices can be applied to route navigation problems.