

多種流確率均衡配分理論を用いた VICS情報の利用率予測と効果計測の方法

溝上 章志¹・本田 秀太²

¹正会員 工博 熊本大学教授 工学部環境システム工学科 (〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1)

E-mail:smizo@gpo.kumamoto-u.ac.jp

²正会員 工修 (株)富士通九州システムエンジニアリング (〒814-8589 福岡市早良区百道浜2-2-1)

E-mail:honda.h@fqs.fujitsu.com

本研究では、1)ドライバーを交通情報利用と非利用のセグメントに分割し、これらの経路選択規範の相違を考慮に入れた多種流ネットワーク均衡解を求めると同時に、VICS情報の均衡利用率を推定する数理モデルを構築する。2)このモデルは情報利用率変動型の多種流確率均衡配分モデルであり、この需要予測モデルに論理整合した便益計測法によってVICSの効果を評価する。また、3)システム評価指標として総所要時間を用いた場合には、所要時間情報提供がシステム全体の効率性を減少させることがあること、4)情報提供コストの負荷は必ずしもシステム全体の効率性を減少させないことなどを数値シミュレーションによって示し、これらの結果が生起する原因について考察を行う。

Key Words : ITS, in-vehicle navigation, travel time information, multiple user stochastic equilibrium

1. はじめに

ITS (Intelligent Transport Systems) の中核的システムの一つである VICS (Vehicle Information and Communication System) は、近年、都市間・都市内高速道路だけでなく、主要都市の一般道路においてもその運用を開始している。VICS は目的地までの最短経路とその所要時間、ネットワーク上での混雑区間や駐車場の満空情報など、ドライバーが必要とする最新の交通情報をナビゲーションシステムに提供する。VICS はナビゲーションシステムに付属した VICS-unit と情報の送・受信のための路上ビーコン、および VICS センターから成る。VICS-unit はビーコンから交通情報を受信すると同時に、当該車両のビーコン直下通過時刻をビーコンに送信し、VICS センターでこれらの情報の編集と配信を行う。交通情報をドライバーが一方向的に受信するのではなく、車両が最新の情報を送信しているという意味で、双方向通信機能を備えていること、および交通情報だけに限らず多種多様の付加価値情報を送・受信できることが VICS の最大の特徴であり、その潜在的利用可能性は非常に大きいと考えられる。

しかし、課題1：提供されるべき交通情報の内容や、アップリンク数と提供情報精度との関係の分析、課題2：提供される交通情報とドライバーの経路選

択行動との関係分析、課題3：情報提供下におけるネットワーク上での情報利用率と交通フローの予測手法、課題4：VICS 情報が交通システム全体に与える効果を定量的に計測・評価する方法については、十分な検討がなされないままに、我が国ではシステムの運用や VICS 関連デバイスの普及が先行しているくらいがある。

課題1については、これまで VICS 情報の公開制約のために、学術ベースでの検証はほとんどなされていないのが現状である。しかし、道路交通情報に対する社会的ニーズの高度化・多様化に対応して、2001年6月下旬より交通渋滞の状況や道路の規制状況などがオンラインで提供されるようになったことから、今後はこの課題に関する研究が急速に進むことが期待される。課題2については、実道路網状での検証はなかなか困難であることから、室内における仮想的条件下での経路選択実験による検証が1990年代初頭から国内外で精力的に行われてきており^{1)・2)・3)}、ネットワーク分析で利用可能な情報提供下での経路選択モデルは既に準備されているといっても良いだろう。一方で、課題3と課題4については、合理的期待形成仮説やベイズ価値評価法を用いた分析の枠組み^{4)・5)}が提案されてきているものの、これらを実道路網に適用することは容易ではないであろう。

本研究では上記の2つの課題に焦点を当て、実道路網への適用を想定した規範的なネットワーク均衡モデルによる需要予測と効果計測モデルを提案し、その適用可能性の検討を行うことを目的とする。元来、ドライバーの持つ私的な経路情報には不確実性が含まれる。しかし、VICSは各経路に対して確実性の高い実経路所要時間情報をドライバーに提供するため、VICS情報利用者はより確定的な状況下での合理的経路選択、つまり最短所要時間経路選択を行うことが可能になる。一方、VICS情報を利用しないドライバーは各経路の知覚所要時間に基づいた効用最大化経路選択行動を行うしかないであろう。このような状況下では、VICSが提供する経路所要時間情報を利用するか否かによって、経路所要時間の不確実性、ここでは知覚経路所要時間のばらつきの度合いが異なる2種のドライバーがネットワーク上で同時に経路選択を行うことになる。本研究では、1) 全ドライバーを上記の2種のセグメントに分割し、これらの経路選択規範の相違を考慮に入れた2種流ネットワーク均衡フローと同時に、VICS情報の均衡利用率を推定する数理モデルを構築する。2) このモデルは情報利用率変動型の多種流確率均衡配分モデルとなり、この需要予測モデルに理論整合した提供情報の効果の評価法によってVICSの効果を計測する。さらに、3) システム効率性評価指標として良く使われる総所要時間を用いた場合、所要時間情報の提供がシステム効率性を減少させる場合があること、および、4) 情報提供コストの負荷は必ずしもシステム全体の効率性を減少させないことがあることなどを数値計算例によって示し、これらの結果が生起する原因について解析的な考察を行う。

2. 情報提供による交通フロー予測と情報提供効果に関する研究のレビュー

上記の課題3と4に対して、ネットワークを明示的に取り扱った従来の研究を整理し、本研究の位置付けと意義を明確にする。

交通情報提供下におけるネットワーク上での交通需要の予測と効果の評価を行うツールには、主として交通量累積曲線、マイクロシミュレーション、およびネットワーク均衡分析の3種があろう。このうち、交通量累積曲線やマイクロシミュレーションを用いて経路誘導や所要時間提供時の交通需要や効果を分析した研究は1990年初頭から中盤にかけて活発に行われた。代表的な研究について、情報提供効果の評

価方法や分析から得られた結果を表-1に示し、それらの特徴と課題について簡潔に述べる。

(a) 交通量累積曲線による方法^{6)・7)}は種々の行動規範に基づく出発時刻や経路の選択に関する動学的分析を可能にする。また、待ち時間などの効用が解析的に評価でき、種々の要因の変動に対する効果の比較静学分析が可能となる点でも有用である。しかし、適用可能なネットワークは、ODペア数が1、経路数もたかだか2であり、実道路網上での交通需要予測や効果計測には適さない。

(b) 計算機能力の飛躍的な向上によって、動学的なマイクロシミュレーション^{8)・9)}は実規模の道路網へも適用可能になった。しかし、情報利用者と非利用者などの層別化の方法や経路選択規範などについては製作者固有の仮説やモデルに依存しているために、規範性や他手法との比較可能性に欠ける。

(c) マイクロシミュレーションでは、たとえ経路選択などの交通行動モデルが内装されているものであっても、情報提供の効果は提供情報の有/無の場合の所要時間指標で評価されている場合が多く、需要予測と便益評価との整合性を意識した検討を行っている研究は少ない。

(d) 情報提供の効果については、交通混雑が激しくなるにつれてその効果は増加し、情報の利用者比率が増加するにしたがって低下するという結果が多くの研究で報告されている。しかし、これらの理由についての演繹的な検証はできず、あくまで設定された条件下で生じた結果の傾向にすぎない。

(e) リアルタイム交通情報下の交通需要と効果を分析するためには、動学的なネットワーク分析モデルが有用であろう。動的交通均衡(DUE: Dynamic User Equilibrium)モデルの数学的定式化¹⁰⁾には既に成功しているものの、多OD多経路ネットワークに対して有効な解法や、提供情報に従う動的利用者最適(DUO: Dynamic User Optimum)経路利用者の行動¹¹⁾をDUEと統合する方法などについては未解決である。

(f) これに対して、情報提供下での定常的交通状況におけるシステムの評価を行うことを目的とした静的なネットワーク分析法がいくつか提案されている。たとえば、経路誘導システム導入時にはシステム最適配分、非導入時は確率均衡配分に従うとし、両交通状況のもとでの総旅行時間の節約量によって経路誘導システムの評価を行った例¹²⁾がある。これらの例は、高速道路を含む数本の平行経路を対象とした解析的分析モデルを提案したものであった。

(g) 経路所要時間情報を取得できる車載機を装備しているか否かによって、経路所要時間の知覚のばら

表一 情報提供による交通フロー予測と情報提供効果に関する代表的研究

タイプ	論文	方法	評価項目と結論
交通量累積曲線分析	吉井稔雄・桑原雅夫・リアルタイム交通情報の提供効果, 土木学会論文集, No.653/IV-48, pp.39-48, 2000.7. ⁹⁾	交通需要の変動による情報提供効果を10D2経路のネットワーク上でのVertical Queueを考慮した交通量累積曲線により動的に分析	情報提供取得による事後的 shortest route 経路選択行動 (DUE) 結果と平均的交通需要時の経路選択行動結果との損失時間の差を評価。 ある平均的交通需要よりも需要が減少した場合、提供情報がないときの方が提供したときよりも損失時間が小さくなり、逆効果になることがある。
	Arnott, R. De Palma A. & Lindsey R. : Dose Providing Information to Driver Reduce Traffic Congestion?, Transpn. Res., Vol.25A, No.5, pp.309-318, 1991. ⁷⁾	ドライバーに与える day-to-day の交通情報の完全/不完全/非提供を、経路容量の上・下限値を確率で与えた並行2路線上で、利用者均衡となる出発時刻と経路の選択フローを交通量累積曲線により動的に分析	交通情報の完全/非完全/非提供によるドライバー1人当たりの期待費用を評価。 完全/非完全な交通情報が与えられても、それがドライバーに対して共通なものであればドライバー1人当たりの期待費用は減少する。
マイクロシミュレーション	飯田敬恭・藤井聡・内田敬: 動的交通シミュレーションを用いた道路網における情報提供効果に関する分析, 交通工学, Vol.31, No.6, pp.19-29, 1996. ⁸⁾	多OD多経路モデルネットワーク上で、経路固定、経験利用、情報利用セグメントごとに設定された経路選択ルールに基づく経路選択シミュレーションとフローシミュレーションを用いて、路車間情報システムの効果を動的に分析	確率変数で定義された見込み走行費用の分散の大きさとその構成によってセグメント化された情報利用層の比率変化に伴うOD間所要時間平均値の変動を評価。 情報利用率が小さいときには、情報提供は混雑解消に有効であるが、利用率の増加に伴ってその降下は減少する。また、混雑が激しいネットワークほど大きな混雑解消効果が見込まれる。一方、ドライバーが提供情報に完全に従った場合、平均OD間所要時間は情報利用率の増加に伴って増加する。
	Mahmassani, H. S. & Jayakrishnan, R. : System Performance and User Response under Real-Time Information in the Congested Traffic Corridor, Transpn. Res., Vol.25A, pp.293-307, 1991. ⁹⁾	多発地1目的地間の転換可能な3平経路ネットワーク上で、所要時間情報により経路変更を行う経路選択層と固定層という2種のドライバーのフローを、出発時刻と経路について均等、およびDUE負荷シミュレーションによって動的に分析	提供情報利用率と経路転換性向に対する総走行時間、平均旅行時間を評価。 提供情報取得のための車載機の装着比率とドライバーの最適行動からの乖離度効果は依存する。
交通ネットワーク分析	Kanafani, A. & Al-Deek, H. : A Simple Model for Route Guidance Benefits, Transpn. Res., Vol.25B, No.4, pp.191-201, 1991. ¹⁰⁾	高速道路を含むグリッド型ネットワーク上で、OD需要固定型のシステム最適化と確率均衡配分を行い、各種システムパラメータの変化に伴う旅行時間節約量の感度を分析	経路誘導システムの導入によって達成できるシステム最適配分フローと非導入平常時の確率均衡配分フローとの総旅行時間の節約量を比較。 便益は一般街路の速度に依存し、速度が小さいときは高速道路の利用率が増えて効果が大きくなる。また、高速道路、トリップの発生密度が密の場合には経路誘導の効果は小さい。
	Yang, H.: Multiple Equilibrium Behaviors and Advanced Traveler Information Systems with Endogenous Market Penetration, Transpn. Res., Vol.32B, No.3, pp.205-218, 1998. ¹³⁾	提供情報を受信できる車載機を装備した場合と装備しない場合のOD間所要時間の節約量の関数である車載機普及率モデルと情報利用可/不可の多種流ネットワーク均衡モデルとによるパラメトリック数理最適化手法による普及率とフローの均衡値計算	知覚費用の分散パラメータとネットワーク上の混雑度に対する車載機普及率均衡値を評価。システム効率性などについては検討していない。 均衡普及率は主として知覚費用の分散パラメータに依存する。

つきが異なる2種のセグメントにドライバーを分割し、これらの経路選択規範の相違を考慮した2種流ネットワーク均衡フローと車載機市場普及率を推計する静的ネットワーク分析モデル¹³⁾が提案された。

本研究で提案するVICS情報提供下での交通需要予測と効果計測モデルは下記のような特徴を有する。

- (a) 本モデルは、リアルタイムに提供される交通情報下でのドライバーの経路選択行動結果としての動的な交通フローを記述するものではなく、day-to-dayに提供情報を参照することで得られる効用値に依存したVICS利用率、およびVICS利用率変動下でのネットワークフローを求める静的な統合型ネットワーク均衡モデルである。
- (b) 本需要予測モデルは文献13)のモデルを参考にしているが、VICS導入効果の計測モデルとの理論整合性を図るために、ドライバーのVICS利用と経路選択行動を確率効用理論によって統合した同時確率均衡モデル¹⁴⁾に拡張している。
- (c) ミクロシミュレーションによる種々の分析より、交通情報の導入効果は提供情報利用率に依存することが明らかになっている。しかし、我々の興味はそ

の情報利用率の将来平衡値にもある。本モデルは最終的な出力としてVICS利用率の平衡値、およびそのときのVICS導入効果を求めることができる。

- (d) 本モデルは数理最適化問題として定式化された規範モデルであり、与えられたネットワークと外生パラメータに対応した均衡解が一意に得られる。実規模の道路網に対する計算可能性も十分に高い。
- (e) ネットワーク均衡モデルに経路選択肢相互の誤差相関¹⁵⁾などを導入することは重要であるが、それによってフローの予測が困難になる。また、種々のパラメータの導入はモデルの持つ本質的な構造や特性を見失わせる。本モデルの主要なパラメータは提供情報の利用/非利用によってその大きさが異なると仮定した知覚費用の分散パラメータだけである。

3. 多種流確率均衡理論によるネットワークフローの表現とVICS利用率の定義

- (1) 多種流確率均衡理論によるフローの記述¹³⁾
経路所要時間情報を提供するVICSを利用するド

ライバーは各経路に対して正確な実経路所要時間情報を入手することができることから、最短所要時間経路選択を行うことが可能になる。一方で、VICS情報を利用しないドライバーは各経路の知覚所要時間に基づいた経路選択行動を行うであろう。このような知覚所要時間のばらつきの程度が異なる2種の経路選択主体を経路効用の分散パラメータ θ_1, θ_2 の大きさにセグメント ($g=1, 2$) 化する。また、両者はネットワーク上の同一のリンクを相互干渉なしに共有すると仮定する。このような2種のセグメントによる確率的効用最大化経路選択行動から得られる均衡フローは、以下の多種流確率均衡配分モデルの解として求めることができる¹³⁾。

min: $Z(x, f_1, f_2)$

$$= \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega + \sum_{g=1,2} \frac{1}{\theta_g} \sum_{rs} \sum_{k \in K} f_{g,k}^{rs} \ln(f_{g,k}^{rs} / q_{rs}^g) \quad (1)$$

$$s.t. \quad \sum_{k \in K} f_{g,k}^{rs} = q_{rs}^g, \forall r \in R, s \in S, g=1,2 \quad (2)$$

$$x_a = \sum_{rs} \sum_{k \in K_{rs}} \sum_{g=1,2} f_{g,k}^{rs} \delta_{a,k}^{rs}, a \in A \quad (3)$$

$$f_{g,k}^{rs} \geq 0, \forall k \in K_{rs}, r \in R, s \in S, g=1,2 \quad (4)$$

ここで、 x_a はリンク交通量、 f_{gk}^{rs} は rs OD 間 g セグメント第 k 経路交通量、 q_{rs}^g は rs OD 間セグメント g 交通量、 $t_a(x_a)$ はリンク a のリンクコストである。また、 $\delta_{a,k}^{rs}$ は rs OD 間第 k 経路がリンク a を含むとき 1、その他のとき 0 の値をとるダミー変数である。このモデルは、Fisk 型確率均衡モデルをリンクフローに相互干渉がないと仮定して多種流に拡張したモデルである。

このモデルの解が2種流の確率均衡フローを与えるのは、その最適性条件より rs 間第 k 経路の選択確率が

$$P_{rs,k}^g = \exp(-\theta_g c_k^{rs}) / \sum_{k \in K_{rs}} \exp(-\theta_g c_k^{rs}) \quad (5)$$

となることから明らかである。ここで、 c_k^{rs} は rs OD 間第 k 経路所要時間である。証明の詳細は文献 13) に譲る。

(2) VICS情報の利用率の定義方法

VICS 情報を利用しないセグメント ($g=1$) と利用するセグメント ($g=2$) の2種のセグメントのうち、後者は VICS により OD 間の最小経路時間に関する情報を取得できることから、より確定的な経路選択を行うことができる。一方、前者は経路に関する

所要時間の情報がなく知覚時間のばらつきが大きいため、前者より確率的な経路選択を行うことになろう。これらの知覚所要時間のばらつきを経路選択時の分散パラメータの大小関係 $0 < \theta_1 < \theta_2$ によって区別する。 $\theta_2 \rightarrow \infty$ の場合には最小所要時間経路選択、つまり確定的均衡配分状態になる。一方、 $\theta_1 \rightarrow 0$ の場合はランダム均衡配分状態になる。

rs OD 間の VICS 情報利用率 $\Pr[g=2 | rs]$ は、経路所要時間情報を利用しない場合の効用 S_{rs}^1 と利用する場合の効用 S_{rs}^2 を変数とする以下のロジットモデルで決まると仮定できよう。

$$\Pr[2 | rs] = \frac{\exp(\beta S_{rs}^2)}{\exp(\alpha + \beta S_{rs}^1) + \exp(\beta S_{rs}^2)} \quad (6)$$

ここでは、効用 S_{rs}^g を、(1)OD 間平均所要時間と、(2)OD 間所要時間の確実性という2つの方法で定義したときの VICS 情報の均衡利用率と均衡フローの同時決定モデルを示す。

a) OD間平均所要時間による定義 (定義1)

両セグメントの OD 間平均所要時間は以下のよう表わされる。

$$S_{rs}^g = \sum_{k \in K_{rs}} P_{rs,k}^g (c_{rs}(f_1, f_2)) \cdot c_k^{rs} \quad (g=1,2) \quad (7)$$

この方法は文献 13) でも示されている。しかし、この OD 間平均所要時間の算出方法では、経路コスト c_k^{rs} を変数としているために大規模ネットワークへの適用は容易でない。本研究では、Dial 法によって任意の VICS 情報利用率時の確率均衡フローを求める際に得られる rs OD 別 g セグメント別のリンクフロー $x_{a,rs}^g$ を用い、

$$S_{rs}^g = \sum_{a \in A} \sum_{rs} x_{a,rs}^g t_a(\sum_{rs} \sum_{g=1,2} x_{a,rs}^g) / q_{rs}^g \quad (g=1,2) \quad (8)$$

より OD 間平均所要時間を算出する方法を提案する。

b) OD間所要時間の確実性による定義 (定義2)

VICS 情報の利用/非利用による OD 間所要時間の不確実性を表す指標として、下記のような関数を導入する。

$$S_{rs}^g = \min_k \{c_k^{rs}\} - \left\{ -\frac{1}{\theta_g} \ln \sum_{k \in K_{rs}} \exp(-\theta_g c_k^{rs}) \right\} \quad (g=1,2) \quad (9)$$

周知のように、この関数の第2項は期待最小所要時間であり、通常は期待不効用値として利用される。一方で、この期待最小所要時間は最小所要時間 $\min_k \{c_k^{rs}\}$ より常に小さい値を取る凹関数であり、 $\theta \rightarrow +\infty$ のとき最小所要時間に一致するが、 θ の値が

小さくなるにつれてその値も小さくなるという性質を持つ。また、有効経路集合 K_{rs}^g の数が増加するにつれて、その値は小さくなる。これらの性質を利用すると、同一 OD 間で c_k^g は g に依らず同じであるから、 S_{rs}^g は期待最小所要時間の最短所要時間からの偏差となり、情報の利用/非利用によって異なる θ と K_{rs}^g の値に依存した OD 間所要時間の不確実性の程度を示す指標として利用できるであろう。

OD 間の最小所要時間 $\min_k \{c_k^g\}$ は g にかかわらず一定であるので、式(9)を

$$S_{rs}^g = -\frac{1}{\theta_g} \ln \sum_{k \in K_{rs}^g} \exp(-\theta_g c_k^g) \quad (g=1,2) \quad (9')$$

とすると、 S_{rs}^g は OD 間所要時間の確実性指標と見なすことができる。このとき、式(6)の $S_{rs}^1 - S_{rs}^2$ は、前者の定義では VICS 情報を利用することによる OD 間平均所要時間の節約量を、後者では OD 間所要時間の確実性の増加量を表す。 α と β は VICS 利用率に関する実態調査などから推定されるべき未知パラメータである。 β の符号は前者の定義では S_{rs}^g の値が小さいほど効用が大きくなるので負値、後者の式(9')を用いた場合にはその値が大きいくほど効用も大きくなるので正値をとるのが論理的である。

4. 数理最適化問題による定式化¹⁶⁾

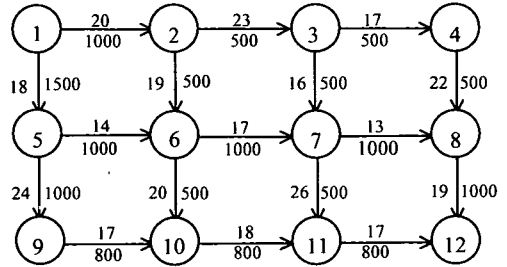
(1) 等価な数理最適化モデル

VICS 情報の利用率モデルを平均所要時間の節約量の関数として定義した場合、VICS 情報の利用率とフローの均衡値は式(1)~(4)の多種流確率均衡モデルと式(6)の VICS 利用率モデルとをパラメトリックに解くしかない。これに対して、OD 間所要時間の確実性の増加量によって VICS 情報の利用率モデルを定義した場合、利用者の行動を VICS 利用と経路選択の 2 段階 Nested Logit モデルで記述した VICS 情報利用率とフローの同時均衡モデルに帰着する。この VICS 情報利用率とフローの均衡値は以下の数理最適化問題の解として求めることができる。

$$\text{Min: } Z(\mathbf{x}, \mathbf{f}_g, \mathbf{q}^g)$$

$$= \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega + \sum_{g=1,2} \frac{1}{\theta_g} \sum_{rs} \sum_{k \in K_{rs}^g} f_{g,k}^{rs} \ln(f_{g,k}^{rs} / q_{rs}^g) - \frac{1}{\beta} \sum_{rs} \int_0^{q_{rs}^g} (\ln \frac{\omega}{q_{rs}^g} + \alpha) d\omega \quad (10)$$

$$\text{s.t. } \sum_{g=1,2} q_{rs}^g = \bar{q}_{rs}, \quad \forall r \in R, s \in S \quad (11)$$



注) 各リンクの上下 (左右) の数字はゼロフロー時所要時間とリンク容量を表す。

図-1 シミュレーション分析用モデルネットワーク

表-2 シミュレーション条件

分析	ODペア	総トリップ数	θ_1	θ_2
1	1→12	1,500	0.00~0.1	0.1~1.0
2	1→12	0~1,600	0.01,0.05,0.1,0.5	∞
3	短:1→7 長:1→12	2,000のうち 長短の比率を 10%ずつ変化	定義1:0.01	0.2
			定義2:0.1	∞

$$\sum_{k \in K_{rs}^g} f_{g,k}^{rs} = q_{rs}^g, \quad \forall r \in R, s \in S, g=1,2 \quad (12)$$

$$x_a = \sum_{rs} \sum_{k \in K_{rs}^g} f_{g,k}^{rs} \delta_{a,k}, \quad \forall a \in A \quad (13)$$

$$q_{rs}^g \geq 0, \quad \forall r \in R, s \in S, g=1,2 \quad (14)$$

$$f_{g,k}^{rs} \geq 0, \quad \forall k \in K_{rs}^g, r \in R, s \in S, g=1,2 \quad (15)$$

ここで、 $\mathbf{x}, \mathbf{f}_g, \mathbf{q}^g$ は解ベクトル、 \bar{q}_{rs} は既知の rs 間 OD 交通量である。このモデルは、交通手段選択段階と経路選択段階とを結合した統合型確率均衡モデル¹⁴⁾と構造的に全く同一となる。この問題の解が VICS 情報の利用率とフローの均衡条件を満足することは、その最適性条件より、経路交通量と OD 間 VICS 利用交通量に関して

$$f_{g,k}^{rs} = q_{rs}^g \frac{\exp(-\theta_g c_k^g(\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2))}{\sum_{k \in K_{rs}^g} \exp(-\theta_g c_k^g(\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2))} = q_{rs}^g \cdot P_{rs,k}^g \quad (16)$$

$$\frac{q_{rs}^g}{q_{rs}^g} = \frac{1}{1 + \exp[\alpha + \beta \{S_{rs}^1(c_k^g) - S_{rs}^2(c_k^g)\}]} \quad (17)$$

なる関係が得られることから明らかである。詳細は文献 14)などに譲る。

(2) 数値シミュレーションによる感度分析

ここでは、図-1 のような文献 13)で適用されたものと同じネットワークと修正 BPR 型のリンクコ

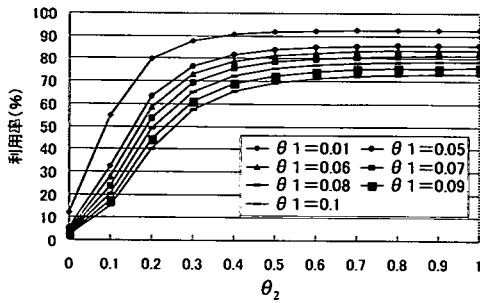


図-2 θ_1, θ_2 の変化による情報利用率の変化 (平均所要費用の節約量による定義)

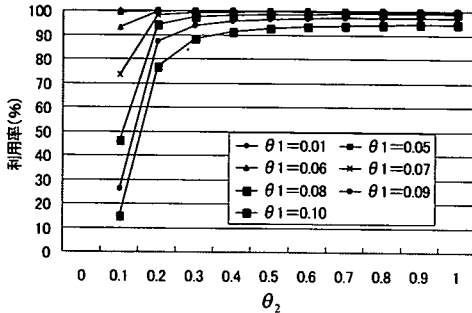


図-3 θ_1, θ_2 の変化による情報利用率の変化 (確実性指標の増加量による定義)

スト関数を用いて、各種外生的パラメータの変化に対する本モデルの感度と特性を分析する。

数値シミュレーションは表-2に示す3通りの条件のもとで行った。分析1では2種のセグメントの知覚所要時間のばらつきの相違、分析2では総トリップ数(混雑度)の変化によるVICS情報利用率の変化を分析する。分析3ではトリップ長が異なるODが同一ネットワーク上に混在する場合のそれぞれのOD間VICS利用率の変化を分析する。

VICS利用率を特定化する式(6)のパラメータ α は両定義とも1.75、 β については符号の論理性を維持しつつもVICS利用率の感度が明瞭になるように、定義1では-0.5、定義2では0.3と、絶対値は若干異なって設定している。なお、VICS情報利用ODによって達成される確定的利用者均衡フローはMEAA (Mixed Equilibrium Assignment Algorithm) によって求めるのが適切であるが、ここでは両セグメントともDial法による確率的ネットワーク負荷とMSA (Method of Successive Average) による均衡フロー収束計算法を組み合わせたアルゴリズムを適用して近似解を求めている。

数値シミュレーションによる感度分析より、以

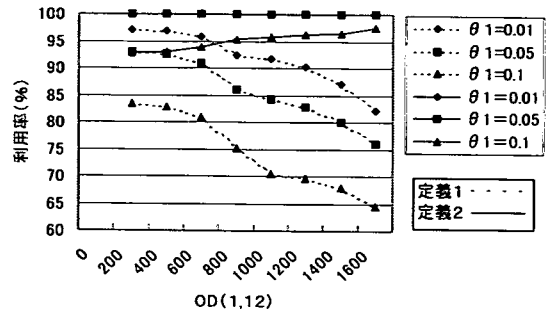


図-4 総トリップ数の増加に伴う情報利用率

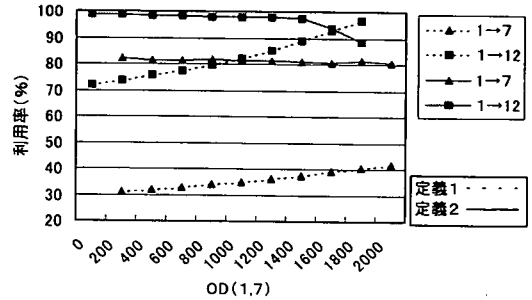


図-5 長・単トリップ比率の変化に伴う情報利用率

下の興味ある結果が得られた。

(a) OD間所要時間の確実性によってVICS利用率モデルを定義した場合(定義2)、 θ_2 の値が0.1~0.2の範囲では θ_1 の大きさによってVICS利用率には大きな差が生じているが、 θ_2 が大きくなると θ_2 による感度、および θ_1 の値ごとの差は共に減少する。これに対して、OD間平均所要時間の節約量によってVICS利用率モデルを定義した場合(定義1)は、VICS利用率はどのような θ_1 についても θ_2 に対して単調、かつなだらかに増加する傾向がある。(図-2、図-3参照のこと)。

(b) 総トリップ数が増加してネットワークの混雑度が増加するのにしたがって、定義1ではVICS利用率は減少し、定義2では逆に増加する(図-4参照)。これは、ネットワークが飽和状態に近づくとき各経路の所要時間に差がなくなるために、定義1のOD間平均所要時間節約量は減少する。これに対して、OD間所要時間の確実性の増加量による定義2の場合、式(9)の値は主として知覚所要時間のばらつきを表す θ だけに依存するようになる。したがって、交通量が増加してOD間所要時間が大きくなるほど両セグメントの値の差も大きくなることから、VICS利用率は増加する。

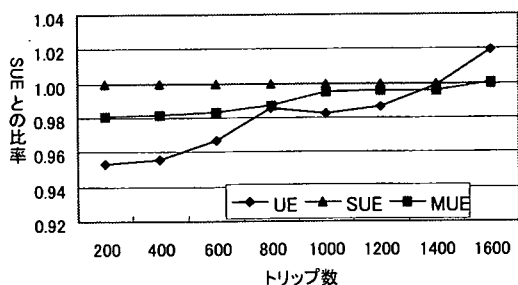


図-6 トリップ数増加に伴う総走行時間の変化

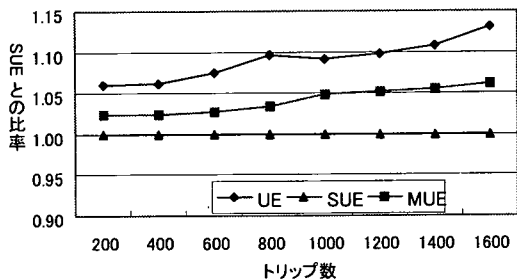


図-7 トリップ数増加に伴う総合効用値の変化

(c) 長・短 OD が同一ネットワーク上に混在する場合には、VICS 情報の利用率は短トリップよりも長トリップの方が高くなる (図-5参照)。その理由は、長トリップは短トリップに比べて利用可能な有効経路が多く、それらの中から確定的な経路を選択するため VICS 情報を利用することにより得られる効用が短トリップよりも大きいからである。

5. VICS 導入効果の分析

(1) VICS の効果の評価指標

図-8 のモデルネットワークを用いて、UE：全ての OD 需要が VICS 情報利用者であることを想定して $\theta_1 = \theta_2 \rightarrow \infty$ とした確定的利用者均衡モデル，SUE：全ての OD 需要が VICS 情報の非利用者であることを想定し、 $\theta_1 = \theta_2 \rightarrow 0$ とした確率均衡モデル，および、MUE：2 種流情報利用率変動型均衡モデル，つまり $\theta_1 \rightarrow 0, \theta_2 \rightarrow \infty$ とした本モデルの 3 種のモデルにより数値シミュレーションを行い、VICS 導入効果を、式(8)から得られる総走行時間

$$S = \sum_{rs} \sum_g q_{rs}^g S_{rs}^g \quad (18)$$

および、式(9')から得られるセグメント別効用値の

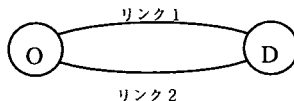


図-8 モデルネットワーク

表-3 モデルネットワークのリンク特性

		C_a	t_{a0}
ネットワーク1	リンク1	700	15.0
	リンク2	1,200	20.0
ネットワーク2	リンク1	200	20.0
	リンク2	1,200	15.0

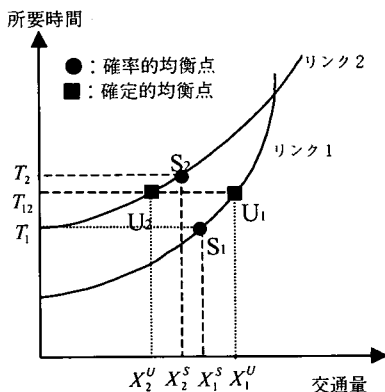


図-9 ネットワーク1の均衡

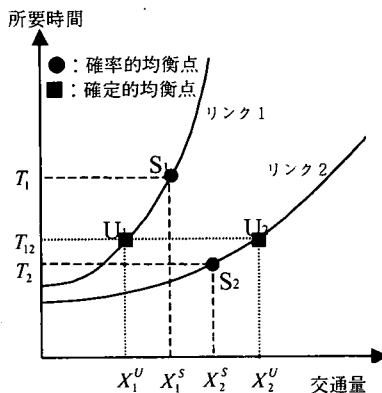


図-10 ネットワーク2の均衡

合成値を OD 交通量によって重み付き総和した

$$S = \frac{1}{\beta} \sum_{rs} q_{rs} \ln \{ \exp(\alpha + \beta S_{rs}^1) + \exp(\beta S_{rs}^2) \} \quad (19)$$

という 2 つのシステム効率性評価指標によって計測する。式(19)による評価指標は需要モデルが立脚す

る確率効用理論に整合している。OD は 1→12 だけであり、総トリップ数を 200 から 1,600 トリップまで 200 刻みに増加させて混雑度を変化させながら、両システム効率性指標値の SUE による評価値に対する比率を比較する。

総走行時間を評価指標に用いた場合、図-6に示すように、総トリップ数が小さいうちは UE, MUE の評価値は SUE に比べて小さいが、総トリップ数の増加に伴ってそれらの差は減少していき、1,400 トリップ付近で総走行時間値が SUE のそれと逆転するというパラドックスが生じている。これは、VICS による経路所要時間情報の提供が、かえって総走行時間を増加させ、システムの効率性を低下させることを意味する^{17)・18)・19)}。これに対して、合成効用値の総和をシステム効率性の評価指標として用いた場合には、図-7に示すように常に $SUE < MUE < UE$ が維持されている。また、SUE に対する MUE, および UE の評価値の比率は、総トリップ数の増加に伴って単調に増加することが分かる。

以上より、情報提供の効果をネットワークの効率性指標で評価する際、総走行時間をシステム導入の評価指標にとることは短絡的に誤りとは言えないものの、需要予測モデルと理論整合的な評価指標、本研究のように確率効用理論に立脚した需要予測モデルを用いた場合には、総合成効用値を評価指標として用いる必要がある。

(2) パラドックスの発生メカニズム

総走行時間に影響を及ぼすリンクコスト関数の形状に着目して、上記のパラドックスの発生メカニズムを考察する。ここでは、図-8に示す 1OD2 経路の簡単なネットワークを用いてパラドックスを再現し、その発生原因を明らかにする。表-3に示すように、両リンクのコスト関数が交差するネットワー

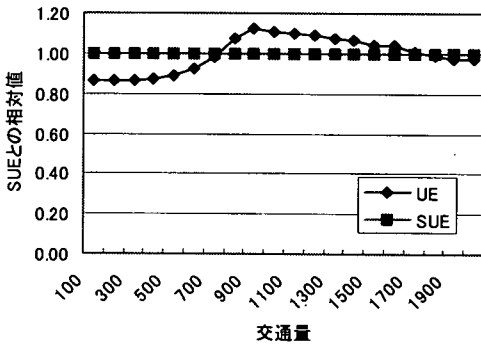


図-11 交通量の増加に伴う総走行時間の変化 (ネットワーク 1)

ク 1 (図-9) と交差しないネットワーク 2 (図-10) の 2 通りの条件を設定している。

図-9を用いて、ネットワーク 1 の均衡解が確率的利用者均衡点 (S_1, S_2) から確定的利用者均衡点 (U_1, U_2) へ移動する際の所要時間の変化を追跡する。まず、リンク 1 では均衡点が S_1 から U_1 へ移動すると所要時間は $T_{12} - T_1$ だけ増加する。一方、リンク 2 では S_2 から U_2 へ移動すると所要時間は $T_2 - T_{12}$ だけ増加する。 $S_1 \sim U_1$ 間のリンク 1 のコスト関数の傾き $dt(x_1)/dx_1$ は $S_2 \sim U_2$ 間におけるリンク 2 の $dt(x_2)/dx_2$ より大きいので、 $T_{12} - T_1 > T_2 - T_{12}$ となる。したがって、均衡解が確率的利用者均衡点から確定的利用者均衡点へ推移することにより、走行時間は増加する。よって、 $UE > SUE$ というパラドックスは理論的に生じうることが証明された。

このことは以下からも検証できる。図-11 はネットワーク 1 において総トリップ数を順次、増加させたときの SUE で基準化された UE の総走行時間である。総トリップ数が小さい領域では上記パラドックスは生じておらず、800 付近で逆転現象が生じている。これは、リンク 1 の交通量が 855 未満ではリンク 1 の所要時間がリンク 2 のゼロフロー時の所要時間より小さく、UE ではリンク 1 だけが利用されるためである。総トリップ数が 1,782 以上になると、再びパラドックスが生じなくなる。これは、リンク 1 と 2 のコスト関数の交点 (両リンクの交通量とも 891) よりも右側の領域に入り、上記のメカニズムが再び成立しなくなったためである。

一方、ネットワーク 2 においては総トリップ数が 1,465 を境にして総走行時間に明らかな違いが見られる (図-12 参照)。これは、UE では、総トリップ数が 1,465 以下の場合にはリンク 2 だけが利用されるが、1,465 を越えるとリンク 1 にもフローが生じ

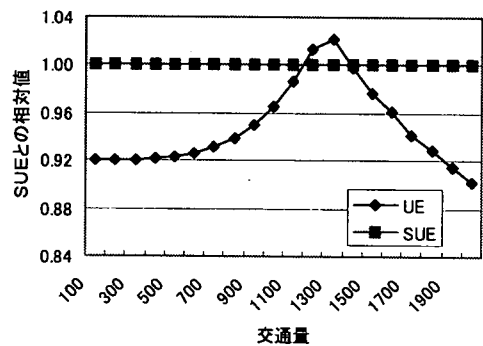


図-12 交通量の増加に伴う総走行時間の変化 (ネットワーク 2)

るようになる。このとき、OD間のコスト関数はリンク1と2との合成コスト関数になり、その傾きはリンク2のリンクコスト関数よりも小さくなるためである。また、総トリップ数が1,465以下の場合には、両リンクの所要時間の平均値を表す関数(=SUE時の平均所要時間関数)の傾きよりもリンク2のコスト関数(=UE時の平均所要時間)の傾きの方が大きいので、SUEとUEの総走行時間の差は小さくなる。これに対して、総トリップ数が1,465以上では両リンクの所要時間の平均値を表す関数(=SUE時の平均所要時間関数)の傾きよりも両者の合成コスト関数(=UE時の平均所要時間関数)の傾きの方が小さいので、SUEとUEの総走行時間の差は大きくなる。

このように、VICSによる所要時間情報の提供によって総所要時間が増加する原因の一つは、利用されるリンクコスト関数の形状にあることが明らかになった。しかし、ネットワークが複雑になって利用可能経路数が増えるとOD間合成コスト関数は複雑になるため、パラドックスの発生を解析的に判断することは困難である。

(3) 情報取得費用と便益の評価

渋滞解消や環境改善のための道路交通情報は無料で提供されるべき公共サービスとするのが一般的であるが、交通システムの効率性という視点から情報取得価格を検討する必要がある。そこで、交通情報取得価格の変化に伴う交通システムの便益評価数値シミュレーションを行う。

図-1のネットワークを用いて、式(9')の効用の単位に換算された情報取得価格 C_{info} を0から10まで1.0ずつ変化させたときのシステム全体の総費用と総合成効用値の変化を考察する。総費用は総走行時間と C_{info} の総和である。総合成効用値は、情報利用セグメント($g=2$)の確実性指標式(9')の代わりに

$$S_{rs}^g = -\frac{1}{\theta_g} \ln \sum_{k \in K_{rs}} \exp(-\theta_g c_k^r) - C_{info} \quad (20)$$

を用いて、式(19)から算出される理論整合的なシステム効率性評価値である。ODは1→12であり、総トリップ数を400から1,600まで400ずつ増加させた4ケースで数値シミュレーションを行った。

図-13は C_{info} の変化に伴うMUEの総費用をSUEによる総費用で基準化した相対値で示している。これより以下のようなことが明らかになった。(a)総トリップ数には関係なく、 C_{info} が大きくなると情

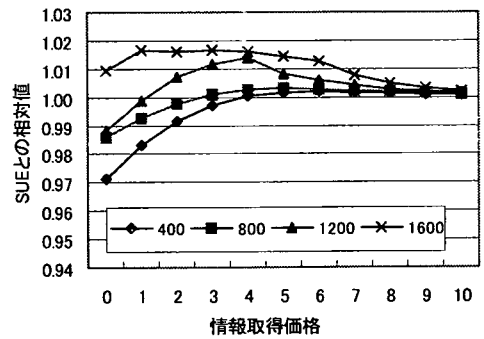


図-13 情報取得価格の増加に伴う総費用の変化

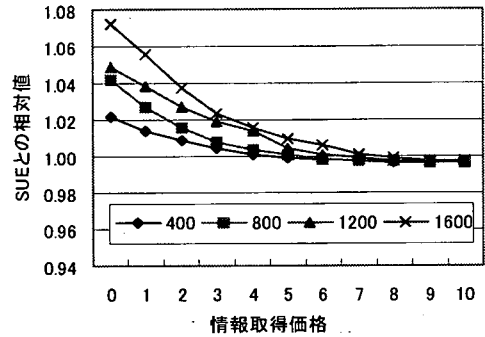


図-14 情報取得価格の増加に伴う合成効用値の変化

報利用者が減少してSUEの状態に漸近する。(b)総トリップ数が1,600以外では、SUEとの相対値が1.0以下となる C_{info} (たとえば総トリップ数が800の時には $C_{info}=0,1,2$) があり、この価格帯であればたとえ交通情報を有料にしても、交通情報を提供しない場合よりも総費用は安い。(c)総トリップ数が1,200の場合の $C_{info}=4$ のように、総費用が最大となる C_{info} が存在する。(d)総トリップ数が1,600の時は前述のパラドックスが生じている。このような場合は、情報取得のために適切な料金を課す、ここでは $C_{info} > 7$ とすることで情報利用率を抑制させ、情報を無料で提供する場合よりもシステムの総費用を減少させることが可能となる。

図-14は、情報取得価格の増加に伴うMUEによる総合成効用値をSUEによる結果で基準化した相対値で示したものである。総トリップ数の大きさに依存せず、 C_{info} の増加に伴って総合成効用値は単調に減少し、SUEの状態に漸近していく。情報取得価格が同じであればネットワークの混雑度が大きいほど情報を提供しない場合よりもシステムの効率性は

高い。この場合も、システム評価指標としての論理整合性に矛盾は生じない。

6. おわりに

本研究では、

- 1) ドライバーを VICS 情報の利用/非利用によって知覚所要時間のばらつきが異なる 2 種のセグメントに分轄し、彼ら各々の経路選択結果である交通フローと VICS 利用率の均衡値を同時に予測する VICS 利用率変動型多種流確率均衡モデルを提案した。
- 2) 需要予測モデルに理論整合的な VICS 利用率の定義、および VICS 導入効果の評価モデルを示した。
- 3) さらに、本モデルを用いた数値シミュレーション分析により、交通情報提供システムの導入効果に関する感度分析を行った。

その結果として本モデルから得られた成果と知見は以下のとおりである。

- 4) VICS 利用率の定義の違いによって、ネットワーク上の混雑度が増加した場合の VICS 情報利用率の変化に異なる傾向が生じる。
- 5) 多種流確率均衡需要予測モデルに理論整合的な情報提供システムの導入効果の評価指標を示した。
- 6) VICS の導入効果の評価する指標として便宜的な総走行時間を用いた場合には、ドライバーへの経路所要時間情報提供がかえってシステムの総所要時間を低下させることがあることを示した。
- 7) このような情報提供がシステム効率性パラドックスの発生メカニズムを解析的に証明した。
- 8) ネットワークの混雑レベルによっては、情報取得費用が無料の場合よりシステムの総費用を減少させるような情報取得価格が存在する。
- 9) しかし、需要予測モデルに理論整合的なシステムの評価指標である総合効用値を用いた場合には上記のようなパラドックスは発生しない。

一方で、本研究成果を現実の道路網に適用するに当たって解決すべき課題としては以下のものが挙げられよう。

- 1) 本モデルの本質的なパラメータである知覚所要時間のばらつきの大きさを表す分散パラメータ θ_1 と θ_2 、および VICS 利用率を定義する α と β の推定
- 2) 経路代替案の類似性、ドライバー相互の異質性を導入した場合のネットワーク均衡モデルの定式化と数値解法、およびその際の VICS 導入効果の計

測モデルの開発

- 3) 公共交通機関を含むインターモーダルネットワークにおける交通情報提供システムの導入効果の分析モデル開発など

参考文献

- 1) 飯田敬恭, 内田 敬, 宇野伸宏: 交通情報効果を考慮した経路選択行動の動的分析, 土木学会論文集, No.470/IV-20, pp.77-86, 1993.
- 2) Mahmassani, H.S. and Herman, R.: Interactive experiments for the study of trip maker behavior dynamics in the congested commuting systems, Developments in Dynamic and Activity-Based Approaches to Travel Analysis, edited by P. Jones, Avebury, 1990.
- 3) 溝上章志, 柿本竜治, 柴木雅也: 情報提供下での動的経路選択行動に関する実験的分析, 交通工学, Vol.35, No.3, pp.9-19, 2000.
- 4) 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.
- 5) 森地 茂, 兵藤哲朗, 小川圭一: 情報提供システム評価のための交通行動分析手法に関する研究, 交通工学, Vol.30, No.3, pp.21-29, 1995.
- 6) 吉井稔雄, 桑原雅夫: リアルタイム交通情報の提供効果, 土木学会論文集, No.653/IV-48, pp.39-48, 2000.
- 7) Arnott, R., De Palma, A. & Lindsey, R.: Dose Providing Information to Driver Reduce Traffic Congestion?, Trans. Res., Vol.25A, No.5, pp.309-318, 1991.
- 8) 飯田敬恭, 藤井 聡, 内田 敬: 動的交通シミュレーションを用いた道路網における情報提供効果に関する分析, 交通工学, Vol.31, No.6, pp.19-29, 1996.
- 9) Mahmassani, H. S. & Jayakrishnan, R.: System Performance and User Response under Real-Time Information in the Congested Traffic Corridor, Trans. Res., Vol.25A, pp.293-307, 1991.
- 10) 赤松 隆, 桑原雅夫: 渋滞ネットワークにおける動的利用者均衡配分, 土木学会論文集, No.488/IV-25, pp.21-30, 1994.
- 11) Kuwahara, M. and Akamatsu, T.: Dynamic User Optimal Assignment with Physical Queues for a Many-to-many OD Pattern, Trans. Res., Vol.35B, No.5, pp.461-480, 2001.
- 12) Kanafani, A. & Al-Deek, H.: A Simple Model for Route Guidance Benefits, Trans. Res., Vol.25B, No.4, pp.191-201, 1991.
- 13) Yang, H.: Multiple Equilibrium Behaviors and Advanced Traveler Information Systems with Endogenous Market Penetration, Trans. Res., Vol.32 B, No.3, pp.205-218, 1998.
- 14) 赤松 隆: 確率的均衡原理に基づく交通ネットワーク統合モデル, 東京大学学位論文, 1990.
- 15) Vovsha, P. and Bakhor, S.: Link-Nested Logit Model of Route Choice; Overcoming Route Overlapping Problem, Transportation Research Record, No.1645, pp.133-142, 1998.
- 16) 溝上章志・本田秀太: 多種流確率均衡モデルに基づいた VICS 情報の利用率予測と便益評価, 土木計画学研究・講演集, No.23(a), pp.759-762, 2000.
- 17) Harker, P. T.: Multiple Equilibrium Behaviors in Networks,

- Trans. Sci., Vol.22, pp.39-46, 1988.
- 18) Catoni, S. & Pallottino, S. : Traffic Equilibrium Paradoxes, Trans. Sci., Vol.25, No.3, pp.240-244, 1991.
- 19) 溝上章志, 本田秀太: VICS 利用率変動型の多種流確率均衡配分におけるパラドックス, 平成 11 年度土木

学会西部支部研究発表会講演概要集 vol.2, pp.680-681, 2000.

(2001.9.5 受付)

AN EVALUATION METHOD OF VICS USING MULTIPLE USER STOCHASTIC EQUILIBRIUM MODEL

Shoshi MIZOKAMI and Hideta HONDA

This paper aims to develop a mathematical model that is able to forecast the traffic flow on the transportation network where there are the system users and nonusers, and evaluate the system benefits.. This model is basically based on the ordinary multiple user network equilibrium model, but we can formulate the other equivalent mathematical optimization problem using an appropriate definition on VICS users share modeling. By using this model, we can measure the effectiveness that is consistent with the demand-modeling framework. Furthermore, we investigate the sensitivity not only of traffic flow but also of the share of VICS users by several numerical analyses. As a result, we can find the interest results that VICS information sometimes lessens the total travel time and that the social total cost can ameliorate even if we charge fee for VICS information.

i