

# アップリンク数に依存する所要時間情報の信頼性を考慮した 道路交通情報提供システムの評価\*

An evaluation method of VICS  
considering a reliance of travel time information depending on the number of uplink

溝上章志\*\*・馬場拓也\*\*\*  
By Shoshi MIZOKAMI\*\*・Takuya BABA\*\*\*

## 1. はじめに

道路交通情報提供システム（ATIS）の導入便益を評価するため、VICS 交通情報の利用者と非利用者分割されたドライバーの経路選択規範を考慮に入れて、これら 2 種流のネットワーク均衡フローと道路交通情報の均衡利用率を同時推定する VICS 情報利用需要変動型多種流確率均衡モデル [ MUSE/VICS-Demand ] を構築してきた。しかし、ビーコンから収集される所要時間情報は、その下を通過する VICS 装着車両数（アップリンク数）に依存した誤差を持つ。本研究では、アップリンク数に依存した情報誤差を内包したモデルに [ MUSE/VICS-Demand ] を拡張し、道路交通情報システムの社会的便益を評価する方法を提案する。

以下、2 章では VICS 装着比率に依存する所要時間の信頼性を考慮した道路交通情報システムの評価モデルについて述べる。3 章ではモデルネットワークを用いた感度分析について、4 章では VICS による情報提供の社会的便益評価を行なった。最後に 5 章では本研究の成果と今後の課題について述べる。

## 2. アップリンク数に依存する提供所要時間の誤差を考慮した VICS の便益モデル 1

### (1) VICS の概要と提供所要時間の信頼性

図 - 1 に VICS の仕組みを示す。周知のように、VICS とは警察庁と総務省および国土交通省が協力して進める事業であり、警察の収集する交通情報や道路管理者の収集する道路情報を、(財)日本道路交通情報センターを通じて VICS センターから光ビーコンなどの 3 つのメディアを活用して VICS

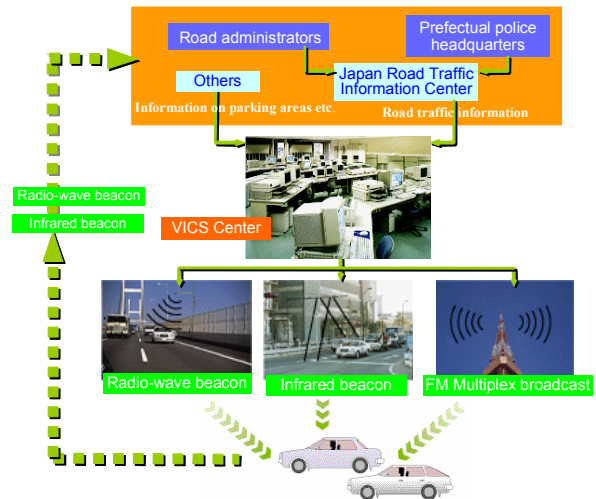


図-1 VICSの仕組み

車載機に対して提供する。3 つのメディアの中で、光ビーコンにはアップリンク（車載機から光ビーコンへの通信）機能が備わっており、車載の VICS ユニットによって直前に通過した光ビーコンとの通過所要時間を収集することができる。このように VICS は非常に高度な所要時間の収集、編集、提供を行う双方向のシステムとなっている。

しかし、VICS ユニットの装着率や光ビーコンの設置密度が低いとか、VICS 装着車両の通過台数が少ない場合は、収集されるアップリンク数は少なくなり、その分、収集される通過所要時間データの信頼性は低下する。そのために、提供される所要時間情報は光ビーコンユニット搭載車両の通過台数であるアップリンク数に依存した誤差を含むことになる。現在、アップリンク数の少ない区間では、AVI ( Automatic Vehicle Identification/車両自動認識 ) 端末が設置されている箇所では、AVI 端末間で計測した所要時間データによって補正された所要時間情報提供が行なわれている。また、AVI 端末が設置されていない箇所では、車両感知器で収集した交通データと信号現示を用いて推定された所要時間情報が提供されているが、共に提供される情報の信頼性は高いとはいえない。

\*キーワード VICS, ATIS 便益評価, 観測情報誤差  
\*\*正会員, 工博, 熊本大学工学部環境システム工学科  
( 熊本市黒髪 2-39-1, TEL:096-342-3541, FAX:096-642-3507 )  
\*\*\*正会員, 修(工), (株)長大

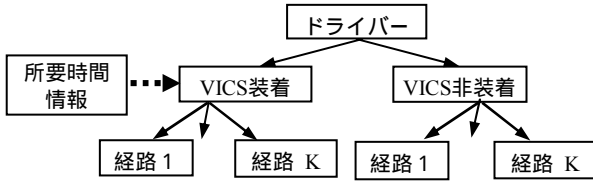


図-2 経路/情報利用統合モデルのツリー構造

VICS を装着した車両のドライバーはこのような提供情報の誤差を認識して経路選択行動を行なっていると考えられ、その結果として VICS 装着率と経路交通量は定常状態に落ち着くと考えられる。以下では、このような長期均衡状態を表現するモデルの定式化を行なう。

## (2) 提供情報の誤差を考慮した需要変動型多流確率均衡条件

### a) モデルの仮定と均衡条件

本モデルの基本は [MSUE/VICS-Demand]<sup>1)</sup> である。しかし、[MSUE/VICS-Demand] では VICS によって提供される所要時間情報は均衡後の最短経路の実所要時間であり、その値には誤差は含まれていない。しかし、前述したように、VICS によって収集されるビーコン間の通過所要時間はその間を通過するビーコンユニット装着車両数であるアップリンク数に依存した観測誤差を含む。したがって VICS によって提供される所要時間情報にも誤差が含まれる。この提供所要時間情報の誤差を考慮した VICS 装着車のドライバーの経路と VICS 装着の選択行動を図-2 のような 2 段階の階層的な選択行動で表現する。

セグメント  $g$  ( $g=1$ : VICS 非装着者,  $g=2$ : VICS 装着者) の  $rs$  間第  $k$  経路の選択確率  $P_{g,k}^{rs}$  は、確率変数である知覚経路所要時間を  $\tilde{C}_{g,k}^{rs}$  とすると以下のように表すことができる。

$$P_{g,k}^{rs} = \Pr\{\tilde{C}_{g,k}^{rs} < \tilde{C}_{g,j}^{rs}; k \neq j\} \quad (1)$$

$rs$  間のトリップのうちの VICS 装着率は、VICS 情報を利用する場合と利用しない場合の確率効用を  $\tilde{S}_{rs}^g$  とするとき、以下のように定義できる。

$$P[2/rs] = \Pr\{\tilde{S}_{rs}^1 < \tilde{S}_{rs}^2\} \quad (2)$$

### b) 経路選択確率

VICS 非装着者は経路の実所要時間を知らず、VICS 装着者よりも分散の大きい知覚誤差  $\xi_a$  を含む知覚所要時間に基づいて確率的に経路選択を行う。このとき、経路選択確率は以下となる。

$$P_{1,k}^{rs} = \frac{\exp(-\theta_1 c_k^{rs}(\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2))}{\sum_{k \in K_{rs}} \exp(-\theta_1 c_k^{rs}(\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2))} \quad (3)$$

一方、VICS 装着ドライバー ( $g=2$ ) の知覚リンク所要時間  $\tilde{t}_a$  は、実所要時間  $t_a$  にアップリンク数に依存する情報誤差  $\lambda_a$  を加えた VICS 提供所要時間、および知覚誤差  $\xi_a$  との和であると仮定する。

$$\tilde{t}_a = t_a + \lambda_a + \xi_a \quad (4)$$

ここで、情報誤差  $\lambda_a$  は各リンクで独立に平均 0、分散  $\sigma_a^2 = h(x_{a,2})$  を持つある確率分布に従い、 $h(x_{a,2})$  はアップリンク数  $x_{a,2}$  の減少関数とする。

このとき、よく使われる経路  $k$  の効用は

$$V_k^{rs} = c_k^{rs}(\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2) + \gamma \sigma_k^{rs}(\mathbf{f}_2) \quad (5)$$

であり、経路選択確率は次のように定式化される。

$$P_{2,k}^{rs} = \frac{\exp[-\theta_2 \{c_k^{rs}(\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2) + \gamma \sigma_k^{rs}(\mathbf{f}_2)\}]}{\sum_{k \in K_{rs}} \exp[-\theta_2 \{c_k^{rs}(\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2) + \gamma \sigma_k^{rs}(\mathbf{f}_2)\}]} \quad (6)$$

ここで、 $\theta_1, \theta_2$  は  $0 < \theta_1 < \theta_2$  なる知覚分散パラメータ、 $\gamma$  は経路所要時間情報の誤差の分散値  $\sigma_k^{rs}(\mathbf{f}_2)$  のウェイト、 $c_k^{rs}$  は  $rs$ OD 間第  $k$  経路の実所要時間である。

### c) 経路所要時間の不確実性指標による VICS 装着率

$rs$  間トリップのうちの、VICS 装着率  $P[2/rs]$  は、VICS 情報を利用しない場合と利用する場合の経路所要時間の不確実性指標を  $S_1^{rs}$  と  $S_2^{rs}$  とするとき、以下のように定義できる。

$$P[2/rs] = \frac{1}{1 + \exp[\alpha + \beta \{S_1^{rs} - S_2^{rs}\}]} \quad (7)$$

経路所要時間の不確実性指標として以下の関数を用いる。

$$S_1^{rs} = \min_{k \in K_{rs}} \{C_k^{rs}\} - \left\{ -\frac{1}{\theta_1} \ln \sum_{k \in K_{rs}} \exp(-\theta_1 c_k^{rs}) \right\} \quad (8)$$

$$S_2^{rs} = \min_{k \in K_{rs}} \{C_k^{rs}\} - \left\{ -\frac{1}{\theta_2} \ln \sum_{k \in K_{rs}} \exp(-\theta_2 \{c_k^{rs} + \gamma \sigma_k^{rs}(\mathbf{f}_2)\}) \right\} \quad (9)$$

## (3) 等価な最適化問題

経路選択と VICS 装着率の均衡条件が上記のように 2 段階の Nested Logit モデルで記述される場合、以下のような等価な最適化問題で置き換えることが可能である。

$$\begin{aligned} \min: Z(\mathbf{x}, \mathbf{f}_g, \mathbf{q}_g) &= \sum_{g=1,2} \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega \\ &+ \sum_{g=1,2} \frac{1}{\theta_g} \sum_{rs} \sum_{k \in K_{rs}} f_{g,k}^{rs} \ln(f_{g,k}^{rs} / q_g^{rs}) \\ &- \frac{1}{\beta} \sum_{g=1,2} \int_0^{q_g^{rs}} (\ln \frac{\omega}{q_g^{rs} - \omega} + \alpha) d\omega + \sum_{k \in K_{rs}} \int_0^{f_k^{rs}} \lambda \sigma_k^{rs}(\omega) d\omega \\ \text{s.t.} \quad &\sum_{k \in K_{rs}} f_{g,k}^{rs} = q_g^{rs}, \quad \forall r \in R, \forall s \in S, g=1,2 \end{aligned}$$

$$\sum_{g=1,2} q_g^{rs} = \bar{q}^{rs}, \quad \forall r \in R, \forall s \in S, g=1,2$$

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

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

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

ここで、 $\bar{q}^{rs}$  は  $rs$ -OD 間交通量である。制約条件式は、順にセグメント別経路交通量保存条件、VICS 装着車と非装着車の OD 交通量保存条件、リンク交通量保存条件、非負制約である。

### 3. 提供情報の誤差と知覚誤差の相関性を考慮した経路選択モデル

#### (1) アップリンク数に依存する所要時間の情報誤差を考慮した経路所要時間

前章では、提供所要時間情報の誤差を考慮した VICS 装着車のドライバーの経路と VICS 装着の選択行動モデルを、需要変動型多種流ロジット型確率均衡モデルによって定式化した。これは、式(5)に示すように、実経路所要時間とその分散値との線形和を経路  $k$  の効用の確定項としたためである。しかし、アップリンク数に依存する情報誤差は、提供情報の不確実性として確率的に定義するのが自然である。また、知覚誤差に加えてこの情報誤差を考慮する場合には、利用可能経路間の効用の誤差の相関性も無視できなくなる。

ここでは、提供される情報に含まれるアップリンク数に依存する情報誤差を確率分布と仮定し、経路選択モデル及び VICS 装着率モデルを定式化し直す。式(4)で定義された知覚リンク所要時間の観測誤差  $\lambda_a$  が、リンク毎に独立な  $N(0, h(x_{a,2}))$  に従うと仮定する。また、簡単のために、セグメント  $g$  別のドライバーの知覚誤差  $\xi_a$  の分散が実所要時間の大きさに比例する  $N(0, \beta_g t_a)$  に従うとする。これらの誤差の和  $\eta_a = \lambda_a + \xi_a$  は  $N(0, h_a(x_{a,2}) + \beta_g t_a)$  に従う。ただし、VICS 情報を利用しない  $g=1$  は、知覚所要時間の誤差だけが効用関数の誤差項であり、その分布は  $N(0, \beta_1 t_a)$  である。

このとき、VICS 提供情報の誤差を含む  $rs$  間経路  $k$  の知覚所要時間  $\tilde{C}_{g,k}^{rs} = \sum_a \tilde{t}_a \delta_{a,k}^{rs}$  は以下のような母数を持つ多変数正規分布に従う。

$$\tilde{C}_{g,k}^{rs} \sim MVN(E[\tilde{C}_{g,k}^{rs}], Var[\tilde{C}_{g,k}^{rs}]) \quad (10)$$

$$E[\tilde{C}_{g,k}^{rs}] = E\left[\sum_a \tilde{t}_a \delta_{a,k}^{rs}\right] = \sum_a t_a \delta_{a,k}^{rs} = c_k^{rs} \quad (11)$$

$$Var[\tilde{C}_{g,k}^{rs}] = \sum_a \{h_a(x_{a,2}) + \beta_g t_a\} \delta_{a,k}^{rs} \quad (12)$$

$$Cov(\tilde{C}_{g,k_1}^{rs}, \tilde{C}_{g,k_2}^{rs}) = \sum_a (h_a(x_{a,2}) + \beta_g t_a) \delta_{a,k_1}^{rs} \cdot \delta_{a,k_2}^{rs} \quad (13)$$

以上をマトリックス表示すると下記となる。

$$\tilde{C}_g^{rs} \sim MVN(\mathbf{c}^{rs}, \Sigma_{g,\eta}^{rs}) \quad (14)$$

$$\mathbf{c}^{rs} = \mathbf{t} \cdot \Delta^{rs} \quad (15)$$

$$\Sigma_{g,\eta}^{rs} = \Delta^{rsT} \cdot \Sigma_{g,\eta} \cdot \Delta^{rs} \quad (16)$$

ここで、 $\mathbf{t} = \{t_a\}$ 、 $\Sigma_{g,\eta} = \{h_a(x_{a,2}) + \beta_g t_a\} \cdot \mathbf{I}$ 、 $\Delta^{rs}$  は  $rs$ -OD 間リンク - 経路接続マトリックスである。

#### (2) 経路選択と VICS 装着確率の算出方法

式(1)の経路選択確率の算出には Monte Carlo Simulation による計算方法を適用する。この方法は、正値対称行列である  $\Sigma_{g,\eta}^{rs}$  を

$$\Sigma_{g,\eta}^{rs} = \mathbf{G}_{g,\eta} \cdot \mathbf{G}_{g,\eta}^T \quad (17)$$

のように Cholesky 分解により表現し、 $\mathbf{G}_{g,\eta}^T$  と標準正規乱数列ベクトル  $\mathbf{v} \sim N(0,1)$  を用いた以下のような線形変換を行なうことによって、 $MVN(\mathbf{c}^{rs}, \Sigma_{g,\eta}^{rs})$  を生成するという方法である。

$$\mathbf{v} \cdot \mathbf{G}_{g,\eta}^T + \mathbf{c}^{rs} \quad (18)$$

これによって  $K_{rs}$  個の乱数列を多数組生成させ、この中で最小の値、つまり  $\min_{k \in K_{rs}} \{\tilde{C}_{g,k}^{rs}\}$  となる success ルート  $k$  の生成割合を経路選択確率とする。

一方、 $rs$  間経路所要時間の不確実性を表す指標  $\tilde{S}_g^{rs}$  は、

$$\tilde{S}_g^{rs} = S_g^{rs} + \varepsilon_g^{rs} = \min_{k \in K_{rs}} \{C_k^{rs}\} - E[\min_{k \in K_{rs}} \{\tilde{C}_{g,k}^{rs}\}] + \varepsilon_g^{rs} \quad (19)$$

である。 $\varepsilon_g^{rs}$  が  $MVN(\mathbf{0}, \Sigma_\varepsilon)$  に従い、その分散は不確実性指標値  $S_g^{rs}$  の値に比例し、セグメント間での相互関係はない、つまり共分散はゼロとするのは自然であろう。

$$Var[\varepsilon_g^{rs}] = \sigma_g^2 = \gamma \delta_g^{rs} \quad (20)$$

$$Cov[\varepsilon_1^{rs}, \varepsilon_2^{rs}] = \sigma_{12} = 0 \quad (21)$$

このとき、VICS 装着率は、式(7)より、

$$P[2/rs] = \Pr[\tilde{S}_1^{rs} > \tilde{S}_2^{rs}] = \Phi\left(\frac{S_1^{rs} - S_2^{rs}}{\sqrt{\sigma^2}}\right) \quad (22)$$

ここで、 $\sigma^2 = \gamma(S_1^{rs} + S_2^{rs})$  であり、 $\Phi(\cdot)$  は標準正規分布関数である。

### 4. VICS による提供情報の社会的便益評価

#### (1) モデルネットワークによる感度分析

モデルから得られる解の特性を分析するため、図 - 2 のモデルネットワークにおいて感度分析を行なった。OD ペアは 1-6, 1-12, 6-12, 12-1, 12-6 の 6 つであり、OD 構成比は 1/8:1/4:1/8:1/8:1/4:1/8 とする。図 - 3 に均衡計算アルゴリズムを示す。ここでは、情報誤差による均衡状

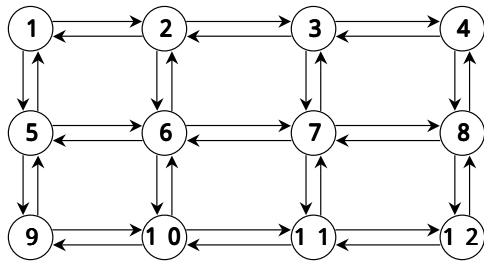


図-2 感度分析に用いたモデルネットワーク

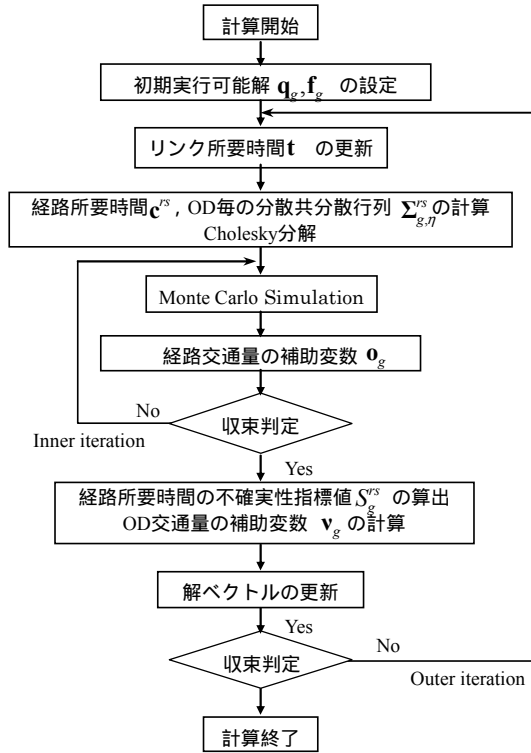


図-3 均衡解の計算アルゴリズム

態の変化を確認するため、知覚分散パラメータ  $\beta_1 = 0.1, \beta_2 = 0.02$  と固定し、情報誤差分散関数にはアップリンク数が増える程、誤差が小さくなり、かつ知覚誤差の大きさを超えないような以下の減少関数を用いた。

$$h_a(x_{a,2}) = \beta_2 \cdot t_a(x_a) / \gamma^{x_{a,2}} \quad (23)$$

図-4に総トリップ数の変化に伴う VICS 均衡装着率および各 OD 間別 VICS 装着率の関係を示す。VICS 装着率は総トリップ数が増加して、ネットワーク上の混雑度が大きくなるに従って増加すること、トリップ長が長いほど高くなることから分かる。図-5には情報誤差分散の大きさを示す  $\gamma$  と VICS 均衡装着率の関係を示す。 $\gamma$  が大きくなり情報誤差が小さくなるに従って VICS 装着率は増加する。これらの結果は当初想定した解の挙動を示しており、情報誤差を含む VICS の社会的便益評価モデルとして本方法は有用であるといえよう。

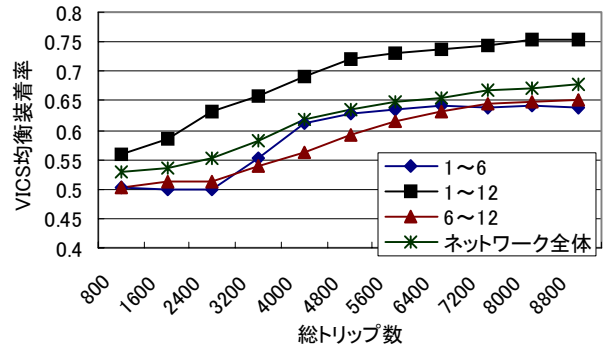


図-4 総トリップ数と VICS 装着率の関係

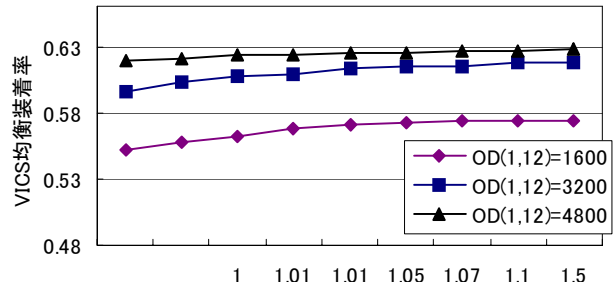


図-5 誤差減少パラメータと VICS 装着率の関係

表-1 ビーコン非設置時と設置時の便益の差

総トリップ数	1リンク設置時	7リンク設置時	全リンク設置時
3000 台	505.0	584.1	873.0
6000 台	2043.6	2281.8	3021.0

## (2) VICSによる所要時間提供の社会的便益

混雑度が異なる場合の便益額を比較するため、同様のネットワーク上で総トリップ数が 3,000 と 6,000 の 2 ケースを想定した。また、ビーコン設置数の違いによる効果の試算を行なった。このとき、VICS を利用したとしてもビーコンが設置されていないリンクには、 $\gamma = 1$  として一定値の誤差を生じさせている。便益は、需要予測モデルの立脚している確率効用理論に整合した式(19)の不確実性指標  $S_{rs}^g$  で計測する。総便益は以下の式で表すことができる。

$$TS = \varepsilon \sum_{rs} \sum_g q_{rs}^g \cdot S_{rs}^g \quad (24)$$

$\varepsilon$  は不確実性指標の限界効用値であり、ここでは 1.0 とした。試算結果を表-1に示す。これより、混雑度が小さいときは、提供情報の信頼性は社会的便益にそれほど影響しない。しかし、混雑度が高いときは便益に大きな差が生じており、提供情報の社会的価値は高い。

## 5. おわりに

アップリンク数に依存した所要時間情報の信頼性を考慮した道路交通情報提供システムの評価法を提案した。