

自己実現シグナルによる交通情報提供効果 に関する室内実験研究

鵜飼健太¹・福田 大輔²

¹学生会員 東京工業大学修士課程 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 (〒 152-8552 目黒区大岡山 2-12-1-M1-11)
E-mail: k.ukai@plan.cv.titech.ac.jp

²正会員 東京大学教授 大学院工学系研究科社会基盤学専攻 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)
E-mail: fukuda@civil.t.u-tokyo.ac.jp

ドライバーに不完全な交通情報を提供したときにハンチング現象という非効率な状況が発生することが知られている。Iwase et al.¹⁾はこれを回避する情報提供方式として、ビリーフデザインアプローチに基づく自己実現シグナルを提案した。しかし、数値シミュレーション上での検証に留まり、人が実際に選択したときの効果は確認されていない。本研究では、小規模室内実験により実際に人が経路選択を行ったときの自己実現シグナルの有効性を考察することを目的とする。簡単な仮想ネットワークにおける室内実験環境を新たに構築し、被験者が経路選択ゲームを行う室内実験を実施した。これより部分的ではあるもののシグナルの効果が確認された。

Key Words: congestion game, traffic information, hunting, laboratory experiment, route choice

1. 序論

交通情報は、電光掲示板、VICS (Vehicle Information and Communication System)、ナビゲーションアプリのような様々な媒体を通じて提供される。これらの交通情報は混雑緩和のために提供されるものであり、各ルートの状況を提供することで、ドライバーのルート選択行動を混雑を抑制する方向に間接的な誘導を行うことを企図している。

しかし、不完全な交通情報が提供される場合には、かえって非効率な状況が引き起こされることが知られている。例えば、Arnott et al.²⁾では、ドライバーが完全な情報を得る場合は情報のない場合に比べて移動コストが低下するのに対し、部分的な情報や不確定な情報のような質の悪い情報をドライバーが得る場合はかえって効率が悪化することを示している。また、小林ら³⁾では、合理的期待均衡モデルを用いて情報提供の経済価値を導出したところ、情報システムの設計次第では価値が負となり、便益を悪化させる効果をもたらす可能性があることが示されている。

情報の提供によって発生する非効率の例としてハンチング現象と呼ばれるものがある。あるルートが混雑したときに、そのルートが混雑しているという情報が送信されると仮定する。その情報を見た人はそのルートを避け、結果としてそれとは別のルートが混雑する。新たな混雑は新たな情報に反映され、新しい情報は次の混雑を生み出す。これが繰り返されることによって、

混雑するルートが一定時間間隔で移り変わり、交通量の振動が発生する。これがハンチング現象である。ハンチング現象が発生しているときは、一方のルートのみへの交通が集中することから道路の容量を十分に活用できず、非効率な状態となる。

長谷川ら⁴⁾では、VICSのような短期間(5分ごと)に更新される情報を基に経路選択を行った場合にハンチング現象が発生することをシミュレーションにより示し、解決策として車車間通信を用いた局所情報による意思決定システムを提案している。また大口ら⁵⁾では、東名高速道路下り大井松田IC~御殿場IC間の分岐区間を再現するシミュレーションモデルによって、ハンチング現象を抑制する情報提供手法の考察をしている。大口らでは、現在の渋滞情報を流した場合に発生するハンチング現象はドライバーの経験する交通状況に対して15分の遅れを伴うことによるものであること、ドライバーの実際に経験する交通状況の情報を提供できればハンチング現象は回避できることを示している。また、ハンチング現象を回避する情報提供方式として、一定時間ごとに情報の提供とその中断を繰り返す手法を提案している。

近年 Iwase et al.¹⁾は、ハンチング現象を回避するために伝えられる情報と同じ状況をドライバーが実際に経験するようになるシグナル(“自己実現シグナル”)の設計方法に関する理論的分析を行っている。この自己実現シグナルの考え方は、ゲーム理論の最適シグナルの枠組みにおけるビリーフデザインアプローチを活

用し、交通量の振動を回避するようなシグナルを設計したものである。Iwase et al. は、自己実現シグナルの条件を満たす情報を提供することでハンチング現象を抑えられることを理論的に示し、簡単な数値シミュレーションを行ってそれを確認した。しかしながら、自己実現シグナルに基づく交通情報が実際にドライバーに提供された際に、その人がどのような経路選択行動をとり、さらには経路交通量がどのようになるのかについての知見は得られていない。

そこで本研究では、自己実現シグナルが実際に人が経路選択を行ったときにも成立するかを検証する簡易な室内実験を行い、得られたデータの基礎分析を通じて、その妥当性を検証することを目的とする。

2. 理論モデル

(1) 自己実現シグナル

本節では、Iwase et al.¹⁾ の理論モデルの概要を述べる。

経路選択ゲームにおいて、ドライバーは経路情報が提供される前にもネットワークの状態に関する不完全な情報・予想を持っていると考える。この予想のことを事前信念と呼ぶ。ドライバー i の持つ全リンクの交通量 f に関する事前信念を、次の多次元正規分布で表現されると仮定する。

$$p_{0i}(f) = N(f; \mu_{0i}, \Sigma_0) \quad (1)$$

ここで、分散共分散行列 Σ_0 は全てのドライバーに共通の変数とする。平均交通量ベクトル μ_{0i} は各ドライバーごとに異なり、次の正規分布に従うとする。

$$p(\mu_{0i}) = N(\mu_{0i}; \mu_h, \Sigma_h) \quad (2)$$

ただし、 μ_h, Σ_h は全てのドライバーに共通の変数である。

この事前信念は、各ドライバーの予想に過ぎないから正確なものではない。これを修正するために情報提供者(例：交通管理者)がドライバーに向けたシグナル s を送信する。シグナルを受信したドライバーは、それを受けて信念を更新する。この更新後の信念が事後信念 $p_i(f|s)$ である。ドライバーは事後信念に基づいて経路選択をし、結果交通量 \hat{f} が形成される。

情報提供者が送信するシグナルは f によって定められており、シグナルは条件付き分布に従う。

$$\pi(s|f) = N(s; f, \Sigma_s). \quad (3)$$

しかし、交通管理者は先に f を観測することはできない。なぜならば、交通量はドライバーがシグナルを受信して経路選択をした結果として表れるものであるからである。ゆえに、情報提供者は交通量とは独立にシグナルを決定する必要がある。よって、シグナルの分布は、交通量とは無関係に定められたパラメータ μ_s, Σ_s

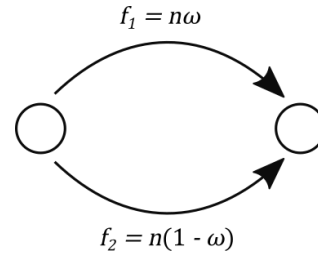


図-1 1OD2 経路ネットワーク

を用いて、

$$p(s) = N(s; \mu_s, \Sigma_s) \quad (4)$$

とする。

ここで、シグナルが嘘にならないために次の式が成り立つことが望まれる。

$$s \sim \pi(s|\hat{f}) \quad (5)$$

式(5)は、ドライバーの提供される情報と経験する交通量を一致させることを意味しており、よってこの式を満たすようなシグナルが自己実現シグナルである。

(2) 1OD2 経路ネットワーク

本研究の実験では最も単純なネットワークである1OD2経路のネットワーク(図-1)を使用する。このネットワークに理論モデルを適用させることを考える。

ゲームに参加するドライバーの人数を n とする。このネットワークではドライバーのルート選択肢が2つのみであることから、交通量はルート1が選択された割合 $\omega \in [0, 1]$ を用いて表現ができる。このとき、交通量は

$$f = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n\omega \\ n(1 - \omega) \end{pmatrix} \quad (6)$$

のように表される。同様の考えに基づき、式(1), (2), (4)に用いられている正規分布のパラメーターも、スカラーの変数 $(\mu_{0i}, \sigma_0), (\mu_h, \sigma_h), (\mu_s, \sigma_s)$ としてそれぞれ表現される。

各リンクのコスト関数は線形関数として設定し、正の値を持つパラメーター $\Lambda_1, \Lambda_2, b_1, b_2$ を用いて

$$c(f) = (c_1, c_2) = (\Lambda_1 f_1 + b_1, \Lambda_2 f_2 + b_2) \quad (7)$$

とした。

このとき、繰り返しゲームにおいてシグナルが交通量を収束させ、式(5)を満たすようになる自己実現シグナルとなる条件は、式(8)である。

自己実現条件:

$$\sigma_s^2 > \frac{-2\pi\sigma_0^4 + \sqrt{4\pi^2\sigma_0^8 + 2\pi(\sigma_0^2 + \sigma_h^2)}}{2\pi(\sigma_0^2 + \sigma_h^2)} \equiv \Psi \quad (8)$$

ここで、不等式 (8) の右辺の値 Ψ は、事前信念に関する変数 (σ_0, σ_h) のみから規定されていることが分かる。すなわち、事前信念を設定できれば、シグナル分散 σ_s の値が Ψ より大きくなるように設計することで、自己実現条件を満たすシグナルを送ることができる。

3. 室内実験

(1) 実験方法

2020年1月9日から17日にかけて東京工業大学にて室内実験を実施した。被験者は述べ90名の学生である。実験は9回実施し、各回ごとに条件を変えた。1回の実験ごとに10名の被験者を同一の室内に集め、10名が同時に参加する経路選択ゲームを実施した。実験の方式としては、被験者は実験者による説明を聞いたうえで仮想ネットワークの経路選択ゲームを繰り返すという形を取った。経路選択は、被験者が持参した端末（スマートフォンなど）を用いて参加者全員が同時に専用Webサイト上にアクセスして行うこととした。それぞれのルートの名前は、分かりやすくするために「ルートA」「ルートB」と被験者に表示しており、以後ルートの名称はこれを用いるものとする。

この実験のルート選択ゲームはフェーズ1とフェーズ2の2段階に大きく分かれる。実験の流れを図-2に示す。

フェーズ1のゲームは、被験者がネットワークの特徴を把握し事前信念を形成するためのものであり、以下のような内容となっている。

- フェーズ1ではルート選択ゲームをすると、ゲームの結果交通量に応じたコストが各被験者ごとに示される。これを十分な数（実験では11回）繰り返すことで、被験者は事前信念を持つと考える。
- 同時に、実験者はゲームの結果から事前信念のパラメータ μ_h, σ_h を観測された経路選択結果より推定する。ここで、簡単のため、 $\sigma_0 = \sigma_h$ と仮定した。

フェーズ2では、フェーズ1の結果に基づき推定された事前信念に基づいてシグナルを送信し、経路選択ゲームを行う。詳細は以下の通りである。

- フェーズ2のゲームは10回ごとに条件を変えて3条件分の計30回行う。
- シグナルは被験者にカーナビやナビゲーションアプリなどで見られるような予想所要時間などの交通情報の形式で表示される。この交通情報はシグナル分布によって計算される各経路のコストに基づいて被験者に表示される。
- シグナル分布は、フェーズ1の結果より得られた $\mu_h, \sigma_h, \sigma_0$ を使い、 μ_s を直前のゲームの結果交通量

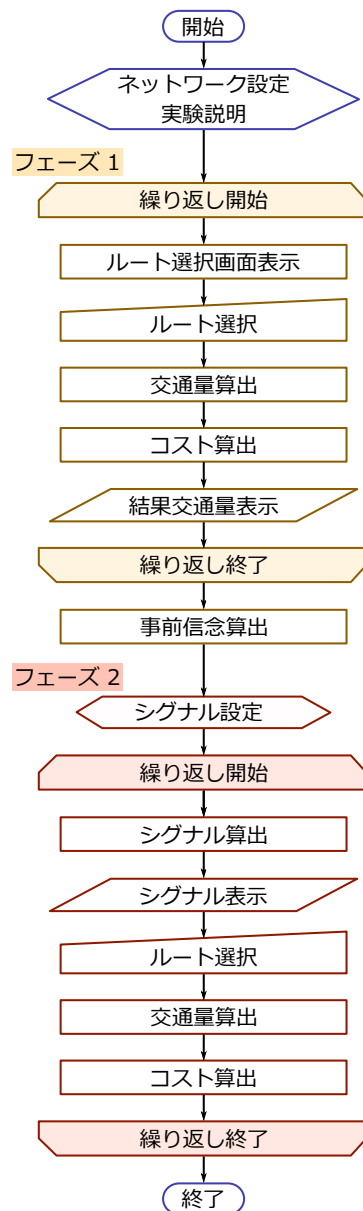


図-2 実験の流れ

であるとして計算される。

- 被験者は表示された交通情報を見て確認をした上で、フェーズ1での経験と情報を総合してより所要時間が小さくて済むと思うルートを選択する。
- フェーズ2においては、事前信念の変更を防ぐために経路選択終了後に経路選択の結果の所要時間は表示しない。

このフェーズ2のゲームを通じて、自己実現シグナルの効果を確認する。

(2) 実験条件

実験条件として人為的に変化させるパラメータは、a) コスト関数、b) ハンチング条件、c) シグナル提供形式の3つである。1回の実験で同一被験者グループの異なる

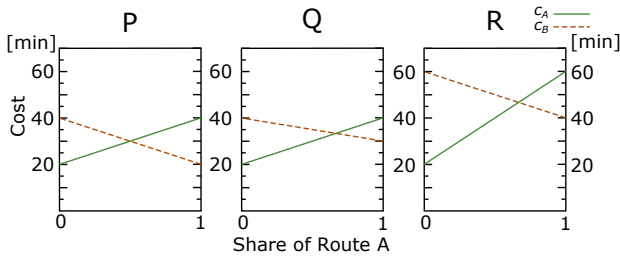


図-3 コスト関数

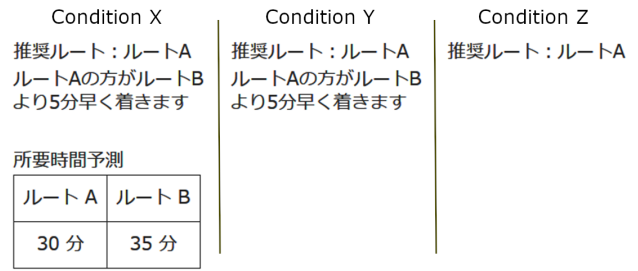


図-4 各シグナル提供形式の例

る 3 条件を提示しており, a), b), c) の組み合わせとして考えられる計 27 条件を 9 回の実験で行った。

a) コスト関数

コスト関数は異なる道路状況を表現するために次の 3 通りを使用した。これらは図-3 のようなグラフで表される。

$$P: \begin{cases} c_1 = \frac{20}{n}f_1 + 20 = 20\omega + 20 \\ c_2 = \frac{20}{n}f_2 + 20 = 20(1 - \omega) + 20 \end{cases} \quad (9)$$

$$Q: \begin{cases} c_1 = \frac{20}{n}f_1 + 20 = 20\omega + 20 \\ c_2 = \frac{10}{n}f_2 + 30 = 10(1 - \omega) + 30 \end{cases} \quad (10)$$

$$R: \begin{cases} c_1 = \frac{40}{n}f_1 + 20 = 40\omega + 20 \\ c_2 = \frac{20}{n}f_2 + 40 = 20(1 - \omega) + 40 \end{cases} \quad (11)$$

b) ハンチング条件

自己実現シグナルの効果を確認するために、 σ_s の値によってシグナルの種類を人為的に変化させる。これを“ハンチング条件”と称する。 σ_s が Ψ に対して十分に小さくハンチング現象が発生するとされるシグナルを条件 H とする。具体的には、シミュレーションにおいて 1~5 回目と 6~10 回目におけるルート A の交通量の割合の分散の値が等しくなるような σ_s の値を使用した。 $\sigma_s = \Psi$ とし、自己実現シグナルの境界にあたるシグナルを条件 E とする。条件 S は σ_s が十分に大きく自己実現シグナルとなるものとする。具体的には、シミュレーションにおいて 6~10 回目におけるルート A の交通量の割合の分散の値が 0.015 となるような σ_s の値を使用した。このように σ_s の値の異なる 3 種類のシグナルを送信した。

c) シグナル提供形式

交通情報を示す際の表示形式に 3 つのパターンを用意し、表示される情報量が多いものから順に条件 X, 条件 Y, 条件 Z とした。各条件での情報の表示例として、ルート A の所要時間が 30 分、ルート B の所要時間が 35 分となるようなシグナルが発せられたときに提供される交通情報を図-4 に示す。

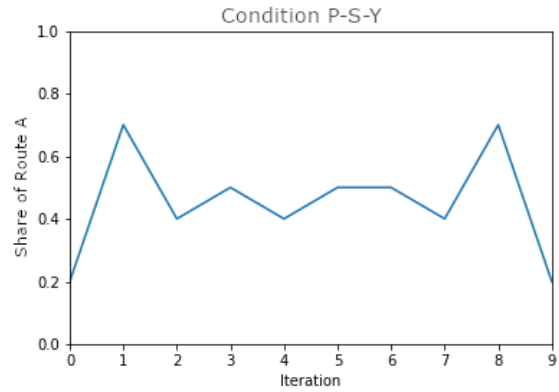


図-5 収束する傾向が見られた結果の例

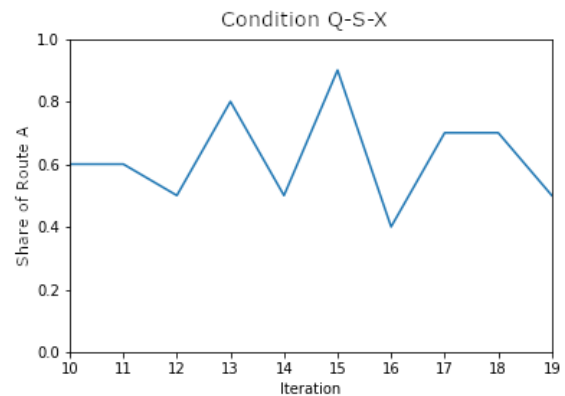


図-6 振動する傾向が見られた結果の例

(3) 結果と考察

a) 全体の集計結果に関する分析

フェーズ 2 における繰り返しゲームの結果 (実験における 10 人の被験者の選択の集計結果) と数値シミュレーションを比較したところ、シミュレーションのように交通量が継続的に収束することはなかった。但し、条件 S の結果のいくつかは、一部に収束の傾向が見られた (図-5) が、逆に振動する傾向にあるものも見られた (図-6)。さらに条件 H でも、多くは交通量が振動したが、していないものも 1 例あった。

そこで、より緩い条件の元で考察を行うため、次の

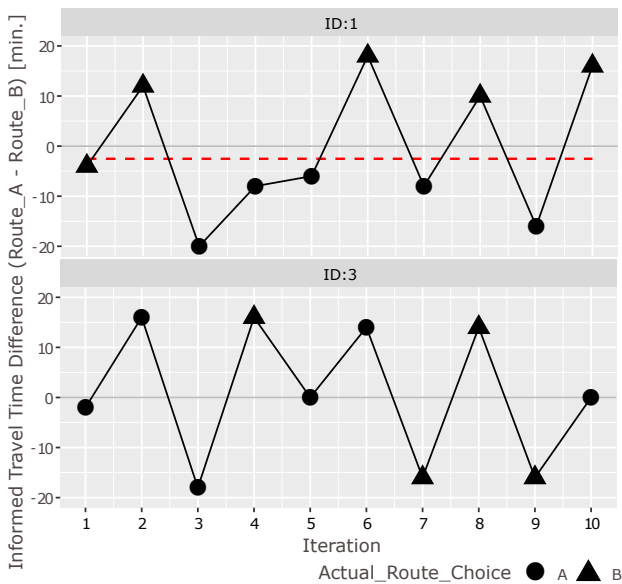


図-7 経路選択行動の例

条件を満たす場合を「部分的に収束」していると定義することとする。

- 連続する 2 ゲーム以上において、交通量が直近 2 回のゲームの交通量のいずれかと同じ、またはその間である。
- 上の条件が成立する連続ゲームにおいて、最後の 2 回のゲームの交通量の差が 1 人以下である。
- 上の条件が成立する連続ゲームにおいて、最後の 3 回のゲームの交通量の差が 2 人以下である。

この部分的な収束が見られたかどうかをハンティング条件ごとに比較し、自己実現シグナルの効果を検証する。その結果、部分的な収束が見られたのは条件 H で 3 つ、条件 E で 5 つそして条件 S で 5 つであった。条件 E, S における部分的な収束の数が相対的に多いことから、自己実現シグナルに一定の効果があつたものと考えられる。しかしながら、他の条件に付いては収束が見られたケースに傾向はみられず、どの条件が収束に関連しているのかは明確に判断できなかった。

b) 被験者個人単位での分析

次に、被験者の選択行動の違いが収束に影響を及ぼしたのではないかと考え、各被験者の選択行動を個人レベルで分析した。

図-7 はある 2 人の被験者 (ID:1, ID:3) による繰り返しゲームでの経路選択行動の例を示している。図より、ID:1 のように提供された旅行時間差が一定の値以下ならばルート A を選び、以上ならばルート B を選ぶ傾向にある人が一定数 (述べ 180 人中 141 人) 存在することが分かった。こうした被験者については、交通状態に関する主観的な信念 (両経路の旅行時間差がある一定値以上であればある特定の経路を選択するという自己

の経路選択規範) が形成されている可能性がある。本研究では、これが先述の事後信念であると仮定し、その値を旅行時間差に関する主観的な閾値 θ_i と称することとする。この θ_i を各ルートに対して表示された所要時間の線形判別分析を行うことにより被験者ごとに推定した。例えば、図-7 の ID:1 における破線が推定された θ_i である。ただし、誰もがこの法則に当てはまるわけではなく、例えば図-7 の ID:3 のように θ_i が推定できない被験者も存在した。

この推定された事前信念に応じて被験者がどのようにルート選択をしたのかをさらに精査した。特に、条件 S のもとでなぜシミュレーションのような収束が見られなかったのかについて考察する。

第一の可能性は事後信念に従っていない人が多かったことが考えられる。あえてシグナルとは逆のルートを選び続けた人が複数見られた他、気まぐれで想定される信念とは違うルートを選択したとみられる人もいくらかいた。彼らの行動は理論モデルの想定とは異なり、ゆえに、推定とは違った結果をもたらしたものと考えられる。結果としてこれにより、収束が早まる場合もあつたが振動が拡幅される場合も見られた。このようになった原因としては、 $\pi(s|f)$ が被験者に正確に認知されていなかったことが考えられる。

第二の可能性は被験者の人数が少なかったことが理由として考えられる。1 ゲームにおける被験者の人数が 10 人であるから、1 人の選択が全体から 1/10 の影響を持つこととなる。これによって、1 人の選択がシグナルに大きく影響を及ぼすこととなった。また、人数が少ないことによってシグナルを均一に送信することが難しくなっていたことも問題点として挙げられる。

4. 結論と今後の課題

実験を通じ、部分的にはあるものの自己実現シグナルによる交通状態の収束の確認を行うことができた。また、実験条件は非常に制限されていることから、理論的な予測と実際の実験結果の間にいくつかの差異を観測した。そして、このような不一致の理由を、個人レベルの結果の詳細な分析を通じて部分的に明らかにした。

今後の展開としては、より一般的で現実的な条件下で実験を行うことを考えている。また、実際の人間の選択行動をより詳細に考慮して、これらの実験結果に基づいてシミュレーションを実施する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) Iwase, T., Tadokoro, Y. and Fukuda, D.: Self fulfilling signal of an endogenous state in network congestion games, *Netw Spat Econ*, Vol. 17, pp. 889–909, 2017.
- 2) Arnott, R., de Palma, A. and Lindsey, R.: Does providing information to drivers reduce traffic congestion? *Transportation Research Part A: General*, Vol. 25, No. 5, pp. 309–318, 1991.
- 3) 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, Vol. 1995, No. 506, pp. 77–86, 1995.
- 4) 長谷川泰久, 竹藤和弘, 池本有助, 福田敏男: 大域道路情報および局所通信による交通車両の動的経路分散手法(機械力学, 計測, 自動制御), 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 69, No. 677, pp. 97–103, 2003.
- 5) 大口敬, 佐藤貴行, 鹿田成則: 渋滞時の代替経路選択行動に与える交通情報提供効果, 土木計画学研究・論文集, Vol. 22, pp. 799–804, 2005.

(Received)

(Accepted)

LABORATORY EXPERIMENTS OF SELF-FULFILLING SIGNAL FOR TRAFFIC INFORMATION PROVISION

Kenta UKAI, Daisuke FUKUDA

It is known that an inefficient situation called a hunting phenomenon occurs when incomplete traffic information is provided to a driver. Iwase et al.¹⁾ proposed self-fulfilling signal based on the belief design approach as an information provision method to avoid this. Although verification was performed on numerical simulations, the effect of actual selection by humans has not been confirmed. The purpose of this study is to consider the effect of self-fulfilling signal when people actually select a route by a small-scale laboratory experiment. We constructed a new laboratory experiment environment in a simple virtual network, and conducted an experiment in which subjects played a route choice game. From this, the effect of the signal was confirmed partially.