

# Anticipatory Stigmergy による経路情報提供への ドライバー選択行動の影響分析

Evaluation of Offering Anticipatory Stigmergy Routes Considering Driver's Behavior

高橋 淳\*<sup>1</sup> 金森 亮\*<sup>2</sup> 伊藤 孝行\*<sup>3</sup>  
Jun Takahashi Ryo Kanamori Takayuki Ito

\*<sup>1,3</sup>名古屋工業大学大学院工学研究科産業戦略工学専攻

School of Techno-Business Administration, Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology

\*<sup>2,3</sup>名古屋工業大学しくみ領域, 名工大グリーン・コンピューティング研究所

Nagoya Institute of Technology, Center for Green Computing

In recent years, traffic control system based on information gathered from probe vehicles is processing for the purpose of smoothly traffic flow and reduction the lost time of traffic congestion. The information including travel time and position are gathered at real-time and accumulated. In this paper, we propose and evaluate a novel information with anticipatory stigmergy which shares the position in near-future. Moreover we discuss assignment strategies with anticipatory stigmergy. Assignment Strategy reflects uncertain adoption of route considering driver's route choice which followed yesterday's route or short-sighted traffic condition. The strategy based on anticipatory stigmergy is more effective on those currently in use at the total travel time using basic test network.

## 1. はじめに

### 1.1 背景・目的

多くの国民の日常生活に欠かせない交通手段となった自動車であるが、混雑・渋滞発生による（経済）効率性の低下、大気汚染や温暖化などの環境悪化、交通事故発生など解決すべき問題も多い。これらの諸問題を解決する方法として電気自動車など次世代自動車の普及促進に加えて、ITS（Intelligent Transport Systems：高度道路交通システム）による交通運用・管理施策が注目されている。近年ではGPS（Global Positioning System）を装備した車両をセンサーとして時刻別の位置情報や速度を観測し、リアルタイムに交通状況の変化を捉え、過去の所要時間パターンを踏まえて経路探索・情報提供が行われている。[森川 07]。

本研究では更なる ICT（Information and Communications Technology：情報通信技術）の進展を背景として、所要時間や位置情報を自由にやり取りできる環境を想定し、交通情報は間接的に混雑・渋滞解消を全体目標とする協調性を促進するもの、Stigmergy[Dorigo 97]として扱う。そして、自動車交通流の円滑化に資する経路情報提供手法として、従来の所要時間の実績値のデータ利用だけでなく、数分後の各車両の予測位置情報を収集し、これら交通量情報を元にした予見的経路情報提供手法を提案する。

### 1.2 関連研究

経路情報提供に関する既存研究は数多いが、その多くは過去の所要時間の実績データの利用を対象としている。[Ando 06]はリンク通過速度を Stigmergy として取り扱い、リアルタイム交通情報提供方法について検証している。また、[Yamashita 05]、[Claes 11]は、本研究と同じく近未来の交通状況（位置情報）を Anticipatory Stigmergy として取り扱っているが、ハンチング現象を回避するための割当戦略が存在しなかったり[Yamashita 05]、複数の経路代替案から実際に到着予定とな

連絡先：高橋 淳，〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町 名古屋工業大学大学院工学研究科産業戦略工学専攻，  
takahashi.jun@itolab.nitech.ac.jp

るリンク割当に関してある種の予約制を導入しているが、変更される場合は時間経過に伴って自動的にキャンセルされるなど、交通量管理の精度が低い[Claes 11]。

## 2. 経路情報提供手法と、ドライバーの経路選択行動

### 2.1 経路情報収集・提供手法

経路情報収集・提供手法による自動車交通流の効率性の比較評価のため、本研究ではプローブカーにより収集される過去の所要時間の蓄積データ（Long-Term Stigmergy）、現在（直近数分間）の通過状況と所要時間（Short-Term Stigmergy）、数分後の各車両の予測位置情報（Anticipatory Stigmergy）を取り上げ、以下の Case0~4 の 5 ケースを設定する。

【Case0:プローブ情報なし】

最も単純な経路情報として、各リンクの距離と規制速度より自由走行時間を算出し（式 1 参照）、これらをリンク評価値（ $v_0$ ）として（所要時間）最短経路探索を行い、経路情報を提供する。経路探索は出発時のみに行う。

$$v_0 = t_0(l) = \text{int}\left(\frac{|l|}{v_{\max}(l)}\right) \quad (1)$$

ここで、 $t_0(l)$ ：リンクの自由走行時間（=通過セル数）、 $|l|$ ：リンクの距離、 $v_{\max}(l)$ ：リンクの規制速度本ケースではリンク評価値は交通量の影響を受けないため、同一 OD（Origin-Destination：出発地-目的地）であれば、全てのドライバーが同一経路を利用することとなる。

【Case1:長期、短期 Stigmergy】

プローブカーの時刻別の車両の位置情報から、各リンクの通過所要時間を算出することができる。これらの通過所要時間の実績値を蓄積することで、該当リンクの時間帯別通過所要時間を統計的に把握し、リンク通過所要時間の蓄積データを Long-Term Stigmergy として考える。各リンクの通過所要時間は交通状況に応じて変動しているため、本研究では蓄積データの平均値と標準偏差の和をリンク評価値（ $v_l$ ）と設定する。

なお、蓄積データの更新間隔は24時間(1日)とし、平均値に対する標準偏差のウェイトは事前の感度分析から0.01と設定する。一方、より動的な交通状況下での情報提供を想定し、各プローブカーは直近数分間のリンク通過所要時間(Short-Term Stigmergy)を共有できると想定する。ただし、数分間では統計的に十分なサンプル数が得られない可能性があるため、リンク所要通過時間の平均値のみをリンク評価値とする。また、直近数分間に1台もリンクを通過しなかった(平均値が得られない)場合、自由走行時間をリンク評価値とする。

なお、リンク評価値( $v_s$ )の更新間隔は10分とし、経路探索は移動途中でもデータ更新時(10分間隔)で再探索を行い、本ケースでは、Long-Term Stigmergyのリンク評価値( $v_l$ )とShort-Term Stigmergyのリンク評価値( $v_s$ )を上手く統合し、リンク通過所要時間の実績値を最大限に利用したリンク評価値( $v_{ls}$ )を算出する。

$$v_{ls} = \omega \times v_l + (1 - \omega) \times v_s \quad (2)$$

ここで、 $\omega$ : Long-Term Stigmergyのリンク評価値に対するウェイト( $0 \leq \omega \leq 1$ )  $v_l$ の更新間隔は24時間(1日)、 $v_s$ の更新間隔は10分であり、経路探索は10分間隔で行う。そのため、各ドライバーに提供される経路情報は、動的環境下で異なる最短経路となる。またウェイト  $\omega$  はある程度の学習期間を経た均衡状態での最適解を算出することが望まれるが、本研究では、予め設定したウェイト別(0.1区切り)に50日間の計算を実行し、総所要時間が小さく、ハンチング現象が最も少なかった0.8を $\omega$ として設定する。

#### 【Case2:Anticipatory Stigmergy 及び割当戦略なし】

本ケースではさらに数分後に存在するであろう位置情報を共有できると想定し、数分後のリンク交通量から混雑・渋滞発生箇所を推計し、ドライバーのリンク割当を行う。ここで、数分後の収集されたリンク交通量をAnticipatory Stigmergyと定義する。

Anticipatory Stigmergyを利用した経路探索では、経路情報に従い数分後に存在(到着)するであろうリンクの位置情報が自動的に送信され、数分後のリンク交通量、Anticipatory Stigmergyが集計される。そして、集計された見込み交通量からリンク通過所要時間を以下のリンクパフォーマンス関数(式3)にて推計する。

$$v_a = t_0(l) \left( 1.0 + \alpha \left( \frac{vol(l)}{\gamma \times Cap(l)} \right)^\beta \right) \quad (3)$$

ここで、 $v_a$ :見込み交通量から推計されたリンク通過時間(リンク評価値)、 $t_0(l)$ :自由走行時間、 $Vol(l)$ :数分後のリンクの見込み交通量、 $Cap(l)$ :リンクの交通容量、 $\alpha, \beta$ :パラメータ(BPR関数を参考にして $\alpha = 0.48, \beta = 2.82$ [土木学会 03])、 $\gamma$ :交通容量補正パラメータ(物理的制約や交通流シミュレーターの計算条件などに応じて設定、本研究では $\gamma=0.4$ と設定)。なお、数分後のリンク交通量が0台の場合、式3からリンク評価値は自由走行時間となる。最後に、リンク評価値( $v_a$ )に基づき(所要時間)最短経路探索を行い、数分後の推計された交通状況下における最短経路情報を取得する。

本研究では、プローブカーより発信される数分後のリンク交通量が閾値を超える場合、何らかの割当戦略が必要であると、閾値を超えたリンクを通過予定のプローブカーを基準に従って割当てることとする。

本ケースの閾値を超えた場合の割当戦略は、該当する車両から半数をランダムに割当るものである。なお、割当比率を事前に決定することは難しいが、単純化のため、本研究では50

%と設定している。

本研究では10分後の交通状況を共有するものとし、10分間隔で予見的経路情報提供を行う。従って、移動途中も含めて10分間隔でCombined Long- and Short-Term Stigmergyによる経路探索結果を用い、Anticipatory Stigmergyによる経路探索・割当が実行される。

【Case3:Anticipatory Stigmergy 及び目的地までの残距離を考慮した割当戦略】

本ケースではCase2と同様、10分間隔でAnticipatory Stigmergyのリンク評価値による経路探索を行うが、閾値を超えた際の割当戦略として、“現地地点から目的地までの残距離”を考慮する。具体的には、各プローブカーの現在の存在位置(あるリンク中のセル)から目的地までの直線距離が算出され、残距離となる。10分後の見込みリンク交通量が閾値を超えた場合、該当リンクに送信を行った車両群を残距離の“降順”に並び替え、上位50%に対してAnticipatory Stigmergyによる代替経路の情報提供を行う。

【Case4:Anticipatory Stigmergy 及び渋滞損失時間を考慮した割当戦略】

本ケースもCase2, Case3と同様、10分間隔でAnticipatory Stigmergyのリンク評価値による経路探索を行うが、閾値を超えた際の割当戦略として、“出発時からの混雑・渋滞による遅れ時間”を考慮する。具体的には10分間毎に各プローブカーの出発時刻から現在までのリンク通過所要時間の合計値と自由走行時間の合計値から、式4の通り、渋滞損失時間を算出する。

$$t_{congestion} = \sum(t_{travel}(l) - t_0(l)) \quad (4)$$

ここで、 $t_{congestion}$ :渋滞損失時間、 $t_{travel}(l)$ :各リンクの通過所要時間、 $t_0(l)$ :自由走行時間そして、10分後の見込みリンク交通量が閾値を超えた場合、該当リンクに送信を行った車両群を渋滞損失時間( $t_{congestion}$ )の“昇順”に並び替え、上位50%に対してAnticipatory Stigmergyによる代替経路の情報提供を行う。

## 2.2 ドライバーの経路選択行動

### 【Logit モデル】

本研究では、各ドライバーが情報提供された経路に従うか否か、どの経路を選択するかを表現するモデルとしてLogitモデルを適用する。これにより、ドライバーの行動・判断を考慮することができ、より現実的な環境下での情報提供手法の比較評価が可能となる。

### 【経路選択モデル】

本研究では、多くのドライバーは提供された経路情報に基づいて経路選択を行うが、状況に応じては自己判断するような、より現実的な環境を表現するため、経路選択モデルを導入する。

本研究ではLogit型の経路選択モデルの説明変数として、以下を考える。

(a) 最短経路からの迂回率( $x_1$ )

ドライバーはなるべく早く目的地に到着したいため(所要時間)最短経路を主に選択するが、時間差が小さければ最短経路以外も選択する可能性がある。そのため、各経路の最短経路からの所要時間を基準化したものを迂回率と定義する。

なお、これらの所要時間はCase1で設定した $v_{ls}$ 、つまりLong-Term Stigmergyのリンク評価値( $v_l$ )とShort-Term Stigmergyのリンク評価値( $v_s$ )を統合したリンク評価値に基

づいて算出される。

(b) 情報提供への信頼度 ( $x_2$ )

多くのドライバーは提供された経路情報に疑いなく従うが、懐疑的なドライバーもいる。本研究では懐疑的なドライバーは2割程度いると仮定し、経路選択枝数が3つ、所要時間差がない場合に Logit モデルにて算出される選択確率が再現されるよう、情報提供されたリンクに対して1、情報提供されていないリンクに対して-1と設定した。

(c) 経験に基づく後悔 ( $x_3$ )

経験に基づく後悔を説明変数として取り入れ、式5の通り、前日に利用したリンクの所要時間と想定所要時間(自由走行時間)との差を後悔と定義する。

$$x_3 = \frac{(t_{travel}^{yesterday}(l) - t_0(l))}{t_0(l)} \quad (5)$$

ここで、 $t_{travel}^{yesterday}(l)$ : 前日のリンク通過所要時間、 $t_0(l)$ : リンクの自由走行時間(式1)なお、前日に利用していないリンクは、後悔はない( $x_3=0$ )と設定している。

(d) 近視眼的な状況判断 ( $x_4$ )

提供される経路情報は目的地までの最短経路などであり、全体の交通状況を把握できないドライバーにとって直感に反するリンクが案内される可能性もある。ここではドライバーが目視しうる状況に応じた経路選択行動の反映として、選択可能なリンクの混雑率(式6)を設定する。

$$x_4 = \frac{Vol^{now}(l)}{Cap(l)} \quad (6)$$

ここで、 $Vol^{now}(l)$ : 経路選択時のリンク交通量、 $Cap(l)$ : 交通容量 Logit 型経路選択モデルの確定項は各説明変数((a)~(d))に対応するパラメータを  $\beta_1 \sim \beta_4$  とすると、経路  $i$  の選択確率は式7の通りとなる。

$$P_i = \frac{\exp(-\beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} - \beta_3 x_{i3} - \beta_4 x_{i4})}{\sum_j \exp(-\beta_1 x_{j1} + \beta_2 x_{j2} - \beta_3 x_{j3} - \beta_4 x_{j4})} \quad (7)$$

各パラメータはアンケート調査など実データから推定されるべきであるが、本研究ではドライバーの経路選択行動に関するデータがないため、感度分析にて影響を把握する。

### 3. 交通流シミュレータ

#### 3.1 セルラ・オートマタ・モデル(CA)

本研究では、個々の車両の走行挙動や他との相互関係を簡単に再現できるセルラ・オートマタ(CA: Cellular Automata)に基づいて構築する。具体的な車両の挙動規則はルール184と同様に設定する。本研究の交通流シミュレータは混雑・渋滞を回避するための経路情報提供下の総所要時間など指標の比較を主目的としており、実際の車両挙動や所要時間の再現は目的としていないため、非常に単純な規則を設定している。交通シミュレータの精緻化は今後の課題である。

#### 3.2 テストネットワーク

評価実験で用いる道路ネットワークは図1の通り、ノード数: 49個、上下別リンク数: 168本のグリッド・ネットワークである。リンク長は一律2.5kmとし、車線数は中央環状部は2車線、その他は1車線とする。また、各リンクの規制速度は1車線区間: 15~25km/h、2車線区間: 20~30km/hでランダムに設定しており、セル数は式1に従い算出される。なお、本研究で適用するセルラ・オートマタに基づく交通流シミュレータでは、今回は1タイムステップを1分とし、所要時間等を算出している。

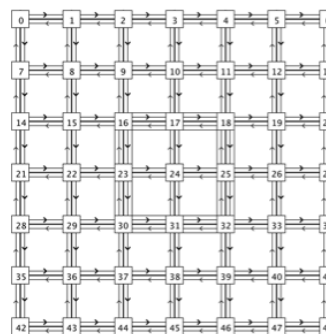


図1: 道路ネットワーク

### 3.3 OD交通量

経路選択の多様性と混雑・渋滞の発生を考慮し、本研究のOD交通量はそれぞれ0 48: 200台, 2 45: 200台, 4 45: 200台, 6 42: 200台を設定した。

本研究ではGPS等を装備したプローブカーが様々なStigmergyに基づく経路情報を享受できることを想定している。そのため、プローブカーの混入率は結果に影響を及ぼすことが予想されるが、今回は混入率100%とし、情報提供通りに統制された状態とドライバーの経路選択行動を考慮した状態で交通マネジメントとしての情報提供効果を分析していく

## 4. 評価実験

2.1で設定したCase0~Case4の経路情報収集・提供手法による自動車交通流の効率性、割当戦略の必要性和有用性について考察する。また、2.2で設定したドライバーの経路選択行動を考慮せず、全ドライバーが自動的に提供される経路情報に確定的に従う「Deterministic」、ドライバーの経路選択行動を考慮する場合は「Stochastic」とし、比較評価を行う。

#### 【総所要時間の比較】

自動車交通流の効率性の代表的な指標として総所要時間があり、Case1~Case4の結果を整理したものが図2である。ドライバーの経路選択行動を考慮しない、経路情報提供手法について比較すると、交通量の影響を受けずに自由走行時間をリンク評価値とするCase0[Deterministic]は484,306分と、予想通り、プローブカー・データを活用するCase1~Case4よりも悪い結果となった。

今回の評価実験では、現在のナビゲーションシステムのサービスレベルである蓄積データなど実績データを最大限利用したCase1[Deterministic]よりもAnticipatory Stigmergyを活用したケースの効率性が高くなった。

ドライバーの経路選択行動を考慮した場合(経路選択モデルのパラメータ( $\beta_1 \sim \beta_4$ )は1.0と設定)、Case1[Stochastic]よりもAnticipatory Stigmergyを活用するCase2~Case4[Stochastic]の方が効率性は高くなることが確認できる。確定的な[Deterministic]よりも不確実性を考慮した[Stochastic]の方がAnticipatory Stigmergyを活用する効果は大きい、割当戦略の違いは大きくないことが分かる。以上より、総所要時間の比較評価結果から、割当戦略の更なる検討は必要であるが、数分後の位置情報を共有できると想定したAnticipatory Stigmergyによる予見的経路情報提供手法は、従来の経路情報提供手法よりも効率的であるといえる。また、予見的経路情報提供手法はドライバーの経路選択行動など不確実性を考慮したより現実的な環境下で、その有効性はさらに強まることを確認した。

#### 【ドライバー経路選択モデルのパラメータ感度】

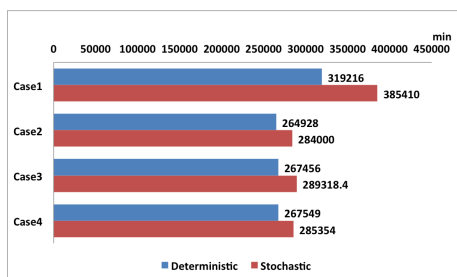


図 2: 総所要時間の比較

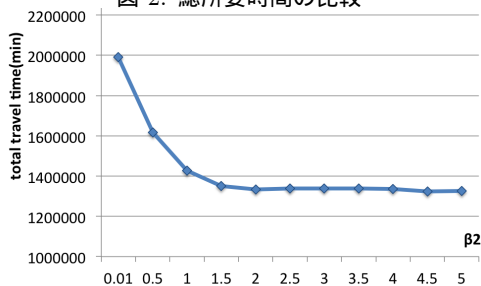


図 3: 感度分析 ( $\beta_2$ )

ドライバーの経路選択行動を表現するため、本研究では4つの説明変数を導入している。これまではこれらのパラメータ ( $\beta_1 \sim \beta_4$ ) を 1.0 と固定して分析してきたが、本節ではこれらのパラメータ感度を総所要時間でみていく。

4つの説明変数に対するパラメータは (a) 最短経路からの迂回率 ( $\beta_1$ ) (b) 情報提供への信頼度 ( $\beta_2$ ) (c) 経験に基づく後悔 ( $\beta_3$ ) (d) 近視眼的な状況判断 ( $\beta_4$ ) である。なお、最短経路からの迂回率 ( $\beta_1$ ) のパラメータを大きくすれば、最短経路に集中しやすくなり、Case0 の様に総所要時間が大きくなるのが予想されるため、感度分析から除外している。また、ケース間でパラメータ感度の違いはなかったため、Case4[Stochastic] の結果を考察する。図3は情報提供への信頼度 ( $\beta_2$ ) の総所要時間への感度 ( $\beta_1, \beta_3, \beta_4$  は 1.0 で固定) である。図3より、パラメータが大きくなる程総所要時間が小さくなり  $\beta_2$  の値が 1.5 から収束する傾向にある。値が 0 に近づくとき、ドライバーは状況に応じた経路選択の判断を重要視するため、結果としてネットワーク効率が悪化してしまっていることがわかる。図4は経験に基づく後悔 ( $\beta_3$ ) と近視眼的な状況判断 ( $\beta_4$ ) 総所要時間への感度 ( $\beta_1, \beta_2$  は 1.0 で固定) である。経験に基づく後悔 ( $\beta_3$ ) では、値が大きくなるとこのドライバーの経験に経路が依存してしまうため、道路ネットワーク全体としては効率的ではなく、総所要時間が大きくなっていることがわかる。一方、近視眼的な状況判断 ( $\beta_4$ ) は値が小さくなると等確率でリンク選択を行うようになり、非合理的な経路を選択する確率が高くなることから、パラメータの感度としては大

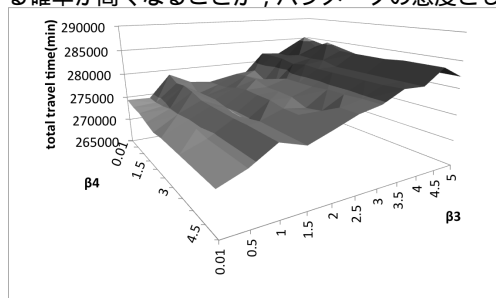


図 4: 感度分析 ( $\beta_3, \beta_4$ )

きくなく、総所要時間は大きくなる傾向にはあるが変化量は小さい。

## 5. まとめ

本研究では自動車交通の円滑化を目標にプローブカーの特長を活かした経路情報提供手法について分析を行った。評価実験を通じて、現在のナビゲーションのサービス提供レベルである過去の蓄積データと直近数分間の交通状況下からリンク通過所要時間の実績値を統計的処理することは有効であることを確認した。さらに数分後の到着位置を共有し、予見的な交通量から渋滞・混雑箇所を回避する代替経路探索を行い、経路割当てを行う Anticipatory Stigmergy による経路情報提供手法を提案し、評価実験結果から効率性の向上を確認した。また、ドライバーの経路選択行動を考慮すると、Anticipatory Stigmergy による経路情報提供手法の有効性は高まることを確認した。今後は現況再現を目指した交通流シミュレーターの開発や評価実験のネットワーク大規模化、など、本研究で提案した Anticipatory Stigmergy による経路情報提供手法の有効性の確認を行うこと、実際のドライバーの経路選択行動を把握し、シミュレーションに反映していくことが課題である。

## 謝辞

本研究の一部は、内閣府の先端研究助成基金助成金（最先端・次世代研究開発プログラム）により助成を受けています。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- [Ando 06] Ando, Y., Fukazawa, Y., Masutani, O., Iwasaki, H., and Honiden, S.: Performance of pheromone model for predicting traffic congestion, *Proceedings of the Fifth International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS)* (2006)
- [Claes 11] Claes, R., Holvoet, T., and Weyns, D.: A Decentralized Approach for Anticipatory Vehicle Routing Using Delegate Multiagent Systems, *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, Vol. 12, No. 2, pp. 364–373 (2011)
- [Dorigo 97] Dorigo, M. and Gambardella, L. M.: *Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem*, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* (1997)
- [Yamashita 05] Yamashita, T., Izumi, K., Kurumatani, K., and Nakashima, H.: Smooth Traffic Flow with a Cooperative Car Navigation System, *Proceedings of the fourth international joint conference on Autonomous agents and Multiagent systems (AAMAS)* (2005)
- [森川 07] 森川 高行, 山本 俊行, 三輪 富生, 王 立暁: 動的経路案内システム「PRONAVI」の開発と性能評価実験, 第 42 巻, 交通工学 (2007)
- [土木学会 03] 土木学会 土木計画学研究委員会交通需要予測技術検討小委員会: 道路交通需要予測の理論と適用 第 1 編 利用者均衡配分の適用に向けて, 土木学会 (2003)