

# 自動車交通円滑化のための Anticipatory Stigmergy を用いた 予見的経路情報提供手法の提案

金森 亮<sup>†1</sup> 高橋 淳<sup>†2</sup> 伊藤孝行<sup>†3</sup>

渋滞損失時間減少や環境改善を目指して自動車交通の円滑化が求められており、近年、プローブカーにより収集された所要時間の蓄積データやリアルタイムデータから生成した経路情報が提供されている。本研究では更に数分後の各車両の予測位置情報 (Anticipatory Stigmergy) を収集し、これらの交通量情報を元にした予見的経路情報提供手法を提案し、その効果をシミュレーションにて把握する。

## A proposal of Route Information Provision with Anticipatory Stigmergy for Traffic Management

RYO KANAMORI<sup>†1</sup> JUN TAKAHASHI<sup>†2</sup> TAKAYUKI ITO<sup>†3</sup>

Traffic control/operation systems based on information gathered from probe vehicles have attracted a lot of attentions. In this paper, we propose and evaluate a novel information provision with anticipatory stigmergy which shares the position in near-future and searches an alternative route to detour congestion.

### 1. はじめに

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、経路情報提供、ロードプライシングや交通状態に応答型する信号制御など、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。なかでも経路情報提供は車両感知器やナビゲーションシステムの普及に伴い、その技術も高度化しており、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<sup>1)</sup>。

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<sup>2)</sup> 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 (Anticipatory Stigmergy) 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。

さらに、評価実験にて予見的経路情報提供の有用性、経路情報提供による交通集中を分散させる割当戦略の必要性和戦略毎の有用性について考察する。

### 2. 関連研究と本研究の位置づけ

著者らは Anticipatory Stigmergy に基づく経路情報提供を提案し、テストネットワークにて有用性や一定期間の工事実施による交通容量減少の影響を分析してきた<sup>3) 4)</sup>。本研究はこれらの研究に対し、ネットワークや対象交通量の大幅な規模化、予見的経路情報提供時の割当戦略の検討を新たに実施している。

また Chen and Cheng<sup>5)</sup> は交通マネジメントとして Agent Technology を適用した事例を包括的にレビューしており、動的経路情報提供は重要な研究分野であることを示している。さらに交通情報を Stigmergy として取り扱う先行研究もあるが<sup>6) 7)</sup>、本研究のように割当戦略について議論は行われていない。

### 3. 交通流シミュレータ

自動車交通流シミュレータには、広域な地域の交通流を再現するために流体近似して計算効率を優先したメソシミュレーションや、車両の追従や車線変更など細かな走行挙動を再現できるマイクロシミュレーションがあるが、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) に基づいて構築した。

具体的な車両の挙動規則は以下の通りである。

- ネットワークを構成するノードを繋ぐリンク (交差点

<sup>†1</sup> 名古屋工業大学, 名工大グリーンコンピューティング研究所  
Center for Green Computing, Nagoya Institute of Technology

<sup>†2</sup> 名古屋工業大学大学院産業戦略工学専攻  
School of Techno-Business Administration, Nagoya Institute of Technology

<sup>†3</sup> 名古屋工業大学大学院産業戦略工学専攻/情報工学科  
School of Techno-Business Administration, Nagoya Institute of Technology

間の道路区間に相当)には、それぞれ距離と規制速度が設定されており、1タイムステップで1セル移動可能な場合に自由走行時間(=距離/規制速度)と等しいセル数に分割する。なお、本研究では1タイムステップを1分と設定する

- 1つのセルには車両1台が入ることができ、各車両はタイムステップ毎に1つ前のセルの車両存在状況に応じて移動可否を判断する
- 1つ前のセルに車両が存在する場合、当該タイムステップでは移動することができず、自分の存在するセルに留まる
- 一方、1つ前のセルに車両が存在しない場合、当該タイムステップにて前方セルに移動する。ただし、移動できるセルは直進方向のみであり、車線変更を意味する斜め方向への移動はできない

本研究の交通流シミュレータでは渋滞・混雑を回避するための経路情報提供下の総所要時間の比較を研究目的としており、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。

#### 4. 経路情報提供手法

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を目的として、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を元にした経路探索(Anticipatory Stigmergy)と割当戦略を取り上げ、以下のCase0~6のケースを設定する。

##### (1) Case0 : No information

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い、移動途中での再探索は行わない。

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

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。

##### (2) Case1 : Long-Term Stigmergy

GPS等を装備した車両であるプローブカーは時刻別の車両の位置情報(緯度・経度)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することが可能となる。

本ケースではプローブカーによるリンク通過所要時間の蓄積データを活用した経路探索・情報提供を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、本研究では式(2)の通り、蓄積データの平均値( $ave_l$ )と標準偏差( $sd$ )の和をリンク評価値( $v_l$ )と設定する。

$$v_l = ave_l + \rho \times sd \quad (2)$$

ここで、 $\rho$ :平均値に対する標準偏差のウェイト

本研究ではより静的環境下での情報提供を想定し、蓄積データ更新間隔は24時間(1日)とする[a]。ウェイト $\rho$ は感度分析結果から $\rho = 0.05$ と設定した。また、経路探索はCase0と同様、出発時のみに行い、移動途中での再探索は行わないと仮定する。

##### (3) Case2 : Short-Term Stigmergy

本ケースでは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を共有できると想定する。実際にVICS(Vehicle Information and Communication System)データは5分間隔で更新されており<sup>8)</sup>、本設定は現実的である。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。ここで、直近数分間の動的環境下のリンク評価値による経路探索・情報提供をShort-Term Stigmergyと定義し、リンク評価値( $v_s$ )は以下の式(3)の通りとなる。

$$\begin{cases} v_s = ave_s, & \text{if リンク通過台数} > 0 \\ v_s = t_0(l), & \text{if リンク通過台数} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 $ave_s$ :数分間のリンク通過所要時間の平均値、 $t_0(l)$ :リンクの自由走行時間

本研究ではリンク評価値の更新間隔は10分とし、過去のデータは蓄積されないとする。また、経路探索は移動中でもデータ更新毎(10分間隔)で再探索を行い、動的環境下での最短経路を利用すると仮定する。

##### (4) Case3 : Combined Long- and Short-Term Stigmergy

プローブカーの時刻別の車両の位置情報を利用することでCase1やCase2のような経路探索・情報提供は可能であり、本ケースではプローブカーから得られるリンク通過所要時間を最大限に利用することを考える。つまり、Case1のLong-Term Stigmergyのリンク評価値( $v_l$ )とCase2の

a)曜日別や特異日別、天候別に数分~数時間間隔など時間変動を考慮した更新も可能であるが、より単純なケース比較を目指して設定している

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からリンク評価値 ( $v_{ls}$ ) を算出する。

$$v_{ls} = \omega \times v_l + (1 - \omega) \times v_s \quad (4)$$

ここで、 $\omega$  : Long-Term Stigmergy のリンク評価値に対するウェイト ( $0 \leq \omega \leq 1$ )

本研究ではこれまでの設定と同様に、 $v_l$  の更新間隔は 24 時間 (1 日)、 $v_s$  の更新間隔は 10 分である。また、経路探索は移動途中でも 10 分間隔で再探索を行い、動的環境下での最短経路を利用すると仮定する。

#### (5) Case4 : Anticipatory Stigmergy

これまではプローブカーによるリンク通過所要時間の実績値を上手く利用した情報提供手法を考えましたが、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渋滞・混雑発生箇所を把握し、これらの回避経路探索とドライバーの割当てを行う。これら一連の予見的経路情報提供手法を Anticipatory Stigmergy と定義する。

具体的な情報収集・提供手法は次の通りである。

- 各プローブカーのドライバーは Case3 で説明した通り、リンク通過所要時間の実績値に基づく経路情報に従い利用リンクを選択する
- ここで、経路情報に従い数分後に存在するであろうリンクに位置情報を送信する
- 各プローブカーから送信された位置情報に基づき、数分後のリンク交通量を集計する
- 集計された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 (5)) にて推計する

$$v_a = t_0(l) \left( 1.0 + \alpha \left( \frac{Vol(l)}{\gamma \times Cap(l)} \right)^\beta \right) \quad (5)$$

ここで、 $v_a$  : 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、 $Vol(l)$  : リンクの数分後のプローブカー交通量、 $Cap(l)$  : リンクの交通容量 (=セル数×車線数)、 $\alpha, \beta$  : パラメータ (BPR 関数<sup>9)</sup> を参考にして  $\alpha = 0.48$ 、 $\beta = 2.82^{10}$ )、 $\gamma$  : 交通容量補正パラメータ (プローブカー混入率や物理的制約などに応じて、本研究では  $\gamma = 0.4$  と設定)

- また、数分後のリンク交通量が 0 台の場合、式 (5) からリンク評価値は自由走行時間となる
- 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、数分後の交通状況下における最短経路情報を取得する

Anticipatory Stigmergy の具体的な計算手順は以上の通りであるが、全てのドライバーが新たな代替最短経路を選択しては別リンクで渋滞・混雑が発生することとなる。従っ

て Case3 の Combined Long- and Short-Term Stigmergy における最短経路と本ケースの Anticipatory Stigmergy における最短経路とにプローブカーを上手く割当てて必要がある。

本研究では、プローブカーより送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し、閾値を超えたリンクに送信したプローブカーをある基準に従って割当てることとした。本研究ではセルラ・オートマタに基づく交通流シミュレーションを用いており、自由走行時間にて混雑なくリンクを通過するには等間隔で車両が存在することが必要となる。従って本研究では混雑を判断する基準である閾値として交通量容量の半分 (=セル数×車線数×0.5) とする。

また、本ケースの閾値を超えた場合の割当戦略は、該当するプローブカー群から  $x\%$  をランダムに割当るものである。割当比率  $x$  に関しては、事前に決定することは難しく、感度分析にて近似最適解を求める。

ここで本ケースの情報収集・提供手法を整理する。プローブカーは Case3 の Combined Long- and Short-Term Stigmergy のリンク評価値に基づいて探索された最短経路の数分後に到着するリンクを送信し、そのリンク毎の集計値 (数分後の交通量) が閾値 (交通容量の半分) 以上であれば、代替経路として Anticipatory Stigmergy のリンク評価値における最短経路探索が実行される。その後、割当比率  $x$  に応じて、 $x\%$  のプローブカーには Anticipatory Stigmergy による代替経路の情報提供を行う。本研究では 20 分後の交通状況を共有するものとし、20 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、20 分間隔で Anticipatory Stigmergy も含めた経路探索が実行されることとなる。

#### (6) Case5 : Anticipatory Stigmergy with Allocation Strategy considering Residual Distance

本ケースでは Case4 と同様、20 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を算出し、残距離とする。20 分後の予想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プローブカー群を残距離の降順に並び替え、上位  $x\%$  に対して Anticipatory Stigmergy による代替経路の情報提供を行う。本ケースも事前に割当比率  $x$  を決定することは難しく、感度分析にて近似最適解を求める。

#### (7) Case6 : Anticipatory Stigmergy with Allocation Strategy considering Lost Time of Traffic Congestion

本ケースも Case4, Case5 と同様、20 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、出発時からの渋滞・混雑による遅れ時間を考慮する。

具体的には、20 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から、渋滞損失時間を式(6)より算出する。

$$t_{congestion} = \sum(t_{travel}(l) - t_0(l)) \quad (6)$$

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、20 分後の予想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プローブカー群を渋滞損失時間 ( $t_{congestion}$ ) の降順に並び替え、上位  $x\%$  に対して Anticipatory Stigmergy による代替経路の情報提供を行う。本ケースも事前に割当比率  $x$  を決定することは難しく、感度分析にて近似最適解を求める。

## 5. 評価実験

### 5.1 実験設定

#### (1) ネットワーク

評価実験で用いる道路ネットワークは交通量配分の研究分野でテストネットワークとして有名な Sioux-Falls Network<sup>11)</sup> を利用する。ネットワークは図 1 の通りノード数: 24 個、上下別リンク数: 76 本であり、別途、リンク毎に距離、交通容量、規制速度が用意されている。

本研究ではセルラ・オートマタに基づく交通流シミュレータを適用するため、リンクを適切にセルに分割する必要がある。今回は 1 タイムステップを 1 分としているため、リンク距離と規制速度から自由走行時間 (式 (1) を参照) と等しいセル数/車線を設定する。車線数は各リンクの総セル数が交通容量と等しくなる、つまり、交通容量=セル数/車線数×車線数、の関係から設定した。

#### (2) OD 交通量

OD 交通量は各ノード間 ( $24 \times (24-1)$  マトリックス) に設定されているが、本研究ではシミュレーション実行計算コスト削減のため交通量を 1/10 倍にし、また、経路選択が行われない隣接 OD (例えば図 1 中の  $1 \leftrightarrow 2$ ) は削除した。その結果、総 OD 交通量は 2,523 台となった。

本研究では GPS 等を装備したプローブカーが様々な Stigmergy を利用した経路情報を享受できることを想定している。ただし、全車両がナビゲーションシステムなどを装備してプローブカーとなることは現実的ではなく、また、地域差もあろう。プローブカーの混入率は自動車交通流の効率化に大きく影響を及ぼすが、本研究では各 OD 交通量の一律 75% がプローブカーと設定した。なお、混入率は出発順序に対してランダムに設定している。

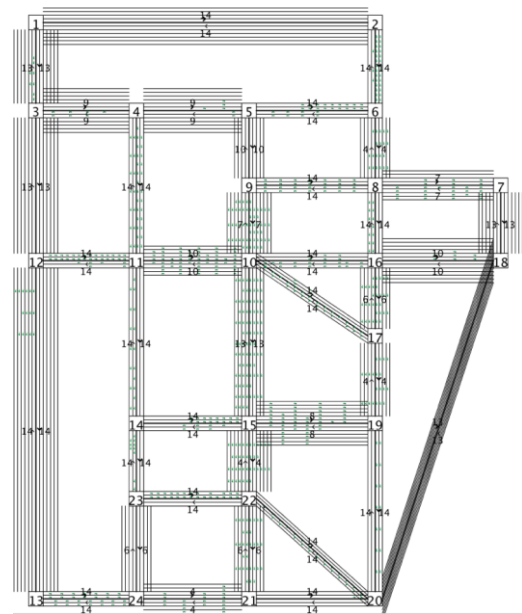


図 1 道路ネットワーク

Figure 1 Road Network

### 5.2 評価

5.1 で設定した実験環境の下、Case0~Case6 の経路情報提供手法による自動車交通流の効率性、手法の有用性について考察する。各ケースの特徴は以下の通りである。

- Case0 : No information
- Case1 : Long-Term Stigmergy
- Case2 : Short-Term Stigmergy
- Case3 : Combined Long- and Short-Term Stigmergy
- Case4 : Anticipatory Stigmergy
- Case5 : Anticipatory Stigmergy with Allocation Strategy considering Residual Distance
- Case6 : Anticipatory Stigmergy with Allocation Strategy considering Lost Time of Traffic Congestion

ここで、1 回のシミュレーションは全車両が目的地に到着するまでであり、ケース別に 50 回のシミュレーションを実行している。また、プローブカーはケースごとの経路情報提供手法に応じた経路を利用するが、非プローブカーは Case0 の交通量によって変化しない自由走行時間をリンク評価値とした最短経路を利用する。

#### (1) 総所要時間

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、ケース別にシミュレーション回数 41~50 回の平均値を整理したものが図 2 である。今回の評価実験では効率性は Case0 が最も悪く、Case6 が最も良い結果となった。なお Case3 の  $\omega$  : Long-Term Stigmergy のリンク評価値に対するウェイト、Case4~Case6 の  $x$  : 割当比率に関しては、後で説明する感度分析における最小値となっている。

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 は予想通り、最も悪い結果であった。プローブカーのリンク通過所要時間の実績値の利用方法としては、蓄積データのみ Case1 と直近 10 分間のみの Case2 では、Case2 の方が総所要時間は小さくなる。ただし Case3 の結果から、これらを適切に統合することで効率性はさらに高くなることが明らかになった。Case3 は現在の最新のナビゲーションのサービス提供レベルであり、Case0 の様な従来型に比べて効率性の高い現行モデルの普及は自動車交通の円滑化資する。

数分後の位置情報を共有できると想定した Anticipatory Stigmergy による情報提供手法である Case4~6 は、Case3 よりも総所要時間が短くなった。ただし、Case3~Case6 の結果に統計的有意差は確認できなかった。しかしながら、本研究で提案する Anticipatory Stigmergy を用いた予見的経路情報提供手法は、従来手法よりも効率的であるといえる。Case4~Case6 は割当戦略が異なるが、本評価実験では Case6 の渋滞損失時間を考慮する場合は Case4 のランダム割当てよりも悪い結果となった。これらの結果の違いについては (3) 割当戦略にてさらに分析を行う。

## (2) 統合比率の感度分析 (Case3)

Case3 では各プローブカーのリンク通過所要時間の実績値の利用として、蓄積データのみ Case1 と直近 10 分間のみの Case2 の統合を図る。統合化は式 (4) の通りであり、Case1 の Long-Term Stigmergy のリンク評価値に対するウェイトを  $\omega$  ( $0 \leq \omega \leq 1$ ) を 0.1 刻みで変化させ、総所要時間を比較する。

図 3 はウェイト  $\omega$  別のシミュレーション 41~50 回の総所要時間の平均値であり、図 4 はシミュレーション 50 回分の結果である。図 3 より、今回の評価実験では Long-Term Stigmergy と Short-Term Stigmergy との統合比率が 0.4 の時に最も効率性が高い結果となり、それぞれ独立に用いた Case1, Case2 よりも統合することで総所要時間は小さくなるということが分かった。ただしウェイト  $\omega$  は 0.2~0.8 では大きな差はなく、統合することが重要であるといえる。

一方、本研究ではセルラ・オートマタに基づく交通流シミュレータを適用しているため、車両 1 台の挙動がメソシミュレーション等と比べて所要時間に及ぼす影響が大きい。そのため、シミュレーションを 50 回実行しても均衡状態に収束はせず、図 4 の  $\omega = 1.0$  や  $\omega = 0.9$  では回数毎に大きく変動している。これはリンク通過所要時間の更新によって情報提供される経路が大きく変化するためである。ただし、直近の交通状況を考慮できる Short-Term Stigmergy のウェイトが高くなるに連れて総所要時間の変動は小さくなり、平均値が最小値となった  $\omega = 0.4$  (図 4 中の赤線) では、総所要時間の変化は小さく、安定している。

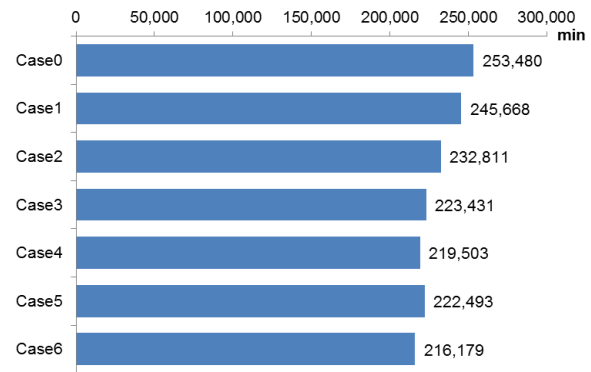


図 2 ケース別総所要時間

Figure 2 Total travel time in all cases

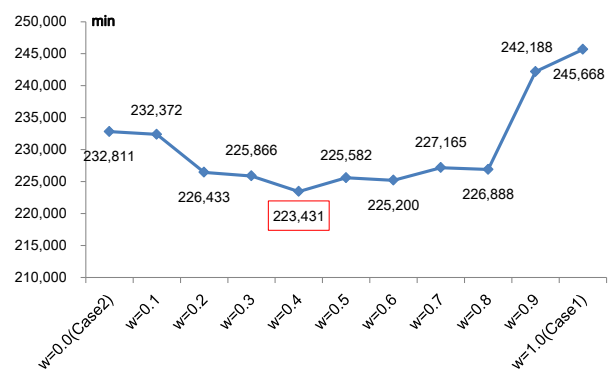


図 3 Case3 のウェイト別総所要時間 (統合比率別)

Figure 3 Result of sensitivity analysis (combination rate)

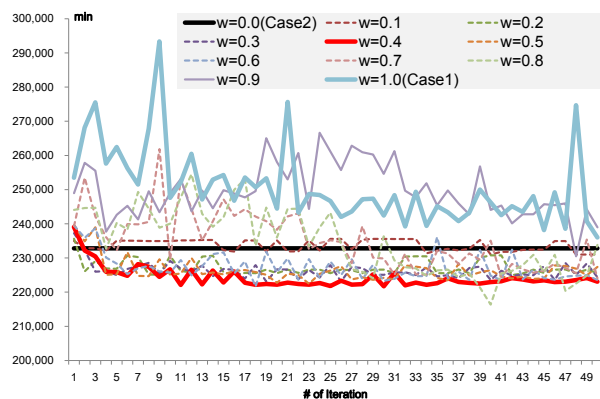


図 4 Case3 のウェイト別総所要時間 (50 iterations)

Figure 4 Results of sensitivity analysis in case 3 (50 iterations)

## (3) 割当戦略の感度分析 (Case4~6)

Anticipatory Stigmergy を用いた予見的経路情報提供手法における割当戦略の分析として、割当比率別の総所要時間を整理したものが図 5 である。割当比率 100% は、混入率 75% にて全プローブカーが 20 分後の交通量を基に算出される Anticipatory Stigmergy のリンク評価値による経路情報に従う場合であるが、この場合は予想通り、Case3 よりも

効率性は低下し、割当戦略を導入することが必要であることを示す。各ケースにおける最適な割当比率は、ランダム割当である Case4 では 30%、残距離を考慮する Case5 では 50%、渋滞損失時間を考慮する Case6 でも 50%となった。ただし中程度の割当比率での総所要時間に大差はなく、割当戦略を導入すれば良いことが伺える。

ここで総所要時間に加えて、シミュレーション 41~50 回における各ケースの渋滞損失時間を比較する。割当戦略の違いを明確にするため、割当比率 50%の渋滞損失時間の平均値は Case4 : 42.1 分, Case5 : 40.8 分, Case6 : 40.3 分となり、Case6 が最も短くなった。総所要時間と共に渋滞損失時間の結果からも Case6 が最も有用であり、明確な基準を設けた割当戦略導入が Anticipatory Stigmergy を用いた予見的経路情報提供手法には必要であるといえる。

一方、各プローブカーの Case6 と Case4 における渋滞損失時間の差分 (Case6-Case4) を示した図 6 から、赤色部分のマイナスが多い程削減されたことを意味する。1 台当りの渋滞損失時間は-1.7 分削減されているが、青色部分のプラスの車両も多く、今後、更なる割当戦略を検討していく必要がある。

## 6. まとめ

本研究では自動車交通流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示した。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、より合理的な割当戦略の検討の必要性を確認した。

今後は現況再現を目指した交通流シミュレータの開発や評価実験の大規模化、さらにプローブカーの混入率の影響やドライバーの経路選択行動の考慮が必要である。

**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る。

## 参考文献

- 1) 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, 交通工学, Vol.42, No.3, pp.65-75, 2007.
- 2) M. Dorigo and L.M. Gambardella: Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol.1, No.1, pp.53-66, 1997.

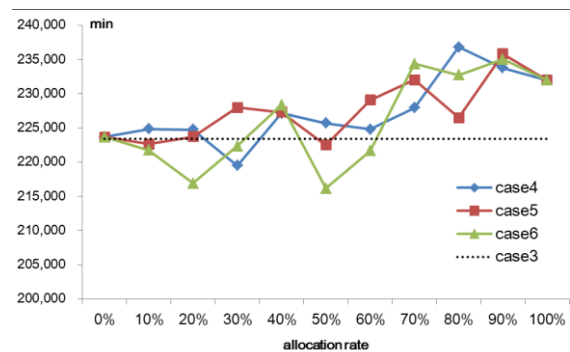


図 5 ケース別割当比率別総所要時間

Figure 5 Result of sensitivity analysis (allocation rate)

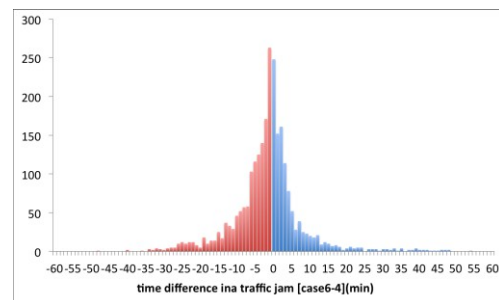


図 6 渋滞損失時間の変化[Case6-Case4]

Figure 6 Histogram of time difference in congestion

- 3) T. Ito, R. Kanamori, J. Takahashi, I. M. Maestre, and E. de la Hoz: The Comparison of Stigmergy Strategies for Decentralized Traffic Congestion Control: Preliminary Results, Proceedings of The 12th Pacific Rim International Conference on Artificial Intelligence (PRICAI2012), 2012.
- 4) T. Ito, R. Kanamori, J. Takahashi, I. M. Maestre, and E. de la Hoz: Effect of Anticipatory Stigmergy on Decentralized Traffic Congestion Control, Proceedings of the 15th International Conference on Principles and Practice of Multi-Agent Systems (PRIMA2012), 2012.
- 5) B. Chen and H. H. Cheng: A review of the applications of agent technology in traffic and transportation systems, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol.11, No.2, pp.485-497, 2010.
- 6) W. Narzt, U. Wilflingseder, G. Pomberger, D. Kolb, and H. Hortner: Self-organising congestion evasion strategies using ant-based pheromones, Intelligent Transport Systems, IET, Vol.4, No.1, pp.93-102, 2010.
- 7) R. Claes, T. Holvoet, and D. Weyns: A decentralized approach for anticipatory vehicle routing using delegate multiagent systems, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol.12, No.2, pp.364-373, 2011.
- 8) 財団法人道路交通情報通信システムセンター: <http://www.vics.or.jp/index1.html>
- 9) Y. Sheffi, Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods. Prentice-Hall, 1985.
- 10) 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.
- 11) L.J. LeBlanc, E.K. Morlok, W.P. Pierskalla: An efficient approach to solving the road network equilibrium traffic assignment problem, Transportation Research, Vol.9, pp.309-318, 1975.