

ドライバー間の経路変更交渉を組み込んだ経路割当戦略の評価 Evaluation of Route Assignment Strategy with Drivers' Route Change Negotiation

高橋 淳[†] 金森 亮[‡] 伊藤 孝行^{†‡}
Jun Takahashi[†] Ryo Kanamori[‡] Takayuki Ito^{†‡}

1. はじめに

多くの国民の日常生活に欠かせない移動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、交通事故増加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、交通情報提供、ロードプライシング（課金政策）や交通状態に応答した信号制御など、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。なかでも交通情報や経路情報の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いる。近年では GPS（Global Positioning System：全地球測位システム）を装備した車両をセンサーとして時々刻々と位置情報や速度等を観測でき、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たプローブカー・データを利活用した経路探索・情報提供も行われている[1]。また、東日本大震災直後に民間各社が取得したプローブカーの通行実績を一元化し、地図上で情報公開・更新した事例は記憶に新しく[2]、状況変化に応じた情報収集・配信手法として、プローブカー・データは有用である。

本研究では更なる ICT（Information and Communications Technology：情報通信技術）の進展を前提とし、各車両の通行実績（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[3]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として、従来の所要時間の実績データの利用だけでなく、数分後の各車両の予測位置情報を収集し、これらの見込み交通量（Anticipatory Stigmergy）を基に経路探索を行う予見的経路情報を考える。ここで所要時間の実績データに基づく経路と Anticipatory Stigmergy に基づく経路の 2 つの経路選択肢を持つ車両（ドライバー）に対して、交通混雑・渋滞を回避する経路割当戦略を検討する。

本研究では、各ドライバーは各経路の所要時間を把握し、提供される経路情報に従うが、その一方でポイント収集性向を持つと仮定する。基本的な経路割当戦略は、Anticipatory Stigmergy が混雑・渋滞が発生する交通量以上である場合、その混雑区間を通過予定のドライバーを所要時間の実績データに基づく経路と Anticipatory Stigmergy に基づく経路とに分散させる。基本的に Anticipatory Stigmergy に基づく経路は迂回路となり、ドライバーは所要時間の実績データに基づく経路の利用を希望するため、

本研究では新たに“ドライバー間のポイント交換を伴う経路変更交渉”を割当戦略に組み込む。つまり、経路変更に伴う所要時間の増加がドライバーのポイント価値以下であれば、最短経路ではない経路を選択し、ポイント収集する行動を考慮する。本研究ではドライバー間の経路割当変更交渉に基づく経路割当戦略の検討として、テストネットワークを対象に 1) Anticipatory Stigmergy に基づく経路割当戦略の有用性検証、2) Anticipatory Stigmergy に基づく経路への割当比率の感度分析、3) ドライバー間の経路割当変更交渉を行った場合に、経路間の所要時間差に対するポイント価値に基づくドライバーの合理性の感度分析を行い、考察する。そして、経路間の所要時間差に対するポイント価値を導入することで、ドライバー自身が経路を選び、希望する経路に変更されるので、提供された経路に従わないという不確実性が小さくなる。

2. 関連研究

Chen and Cheng[4]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。

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。Dallmeyer et al[7]は渋滞の回避に Ant Colony Optimization を導入しているが、リアルタイムの交通情報提供手法については導入していない。Narzt et al.[8]は各車両のリンク（特定の道路区間）通過所要時間を、Ando et al.[9]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 et al.[10]、Claes et al.[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なかったり[10]、複数の経路代替案から実際に到着予定とな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[11]。割当戦略としては、例えば、Dresner and Stone[12]が信号制御に予約制を応用し、赤松[13]が橋などのボトルネック通行権をオークションなどで取引するシステムを提案しており、高度化している。また、Vasirani and Ossowski[15]も予約ベースで道路を利用する為に、オークションの理論を導入している。

著者らは数分後の到着予定車両数を収集することで近未来の交通状況を Anticipatory Stigmergy として取り扱い、混雑・渋滞を未然に回避する予見的経路情報の有用性、割当戦略の必要性を示し、さらに一定期間の工事実施による交通容量減少の影響などを分析している[16]、[17]。ただし、本研究で実施する経路割当に対するドライバーの行動については検討されていない。

[†] 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

[‡] 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, Green Computing

3. 経路情報提供手法とドライバーの経路変更交渉

3.1 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 Case0～2 の 3 ケースを設定する。

【Case0：プローブ情報の利用なし】

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、 $|l|$ ：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：Long- and Short- Term Stigmergy】

GPS 等を装備した車両である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、該当リンクの時間別通過所要時間を統計的に把握することが可能となる。この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 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するため、本研究では式 (2) の通り、蓄積データの平均値 ($ave_{l[\square\square\square]}$) と標準偏差 (sd) の和をリンク評価値 (v_l) と設定する。

$$v_{long} = ave_{l[\square\square\square]} + \rho \times sd \quad (2)$$

ここで、 ρ ：平均値に対する標準偏差のウェイト

なお、蓄積データの更新間隔は 24 時間 (1 日) とし、ウェイト ρ 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。ここで、リンク評価値 (v_{short}) の更新間隔は 60 秒とし、経路探索は移動途中でもデータ更新時 (60 秒間隔) 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。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 [18]、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、リンク通過所要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。つまり、Short-Term Stigmergy に基づくリンク評価値 (v_{short}) は以下の式 (3) の通りとなる。

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

ここで、 ave_{short} ：直近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 (式 (1))

なお、リンク評価値 (v_{short}) の更新間隔は 60 秒とし、経路探索は移動途中でもデータ更新時 (60 秒間隔) 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。

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、Long-Term Stigmergy のリンク評価値 (v_{long}) と Short-Term Stigmergy のリンク評価値 (v_{short}) 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 ($v_{longshort}$) を算出する。

$$v_{longshort} = \omega \times v_{long} + (1 - \omega) \times v_{short} \quad (4)$$

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

v_{long} の更新間隔は 24 時間 (1 日)、 v_{short} の更新間隔は 60 秒であり、経路探索は 60 秒間隔で行う。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 ω 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、予め実施した感度分析にて総所要時間が最も小さくなった 0.3 を設定する。

【Case2：Anticipatory Stigmergy】

これまでプローブカーによるリンク通過所要時間の実績値を利用した情報提供手法を考えたが、本ケースではさらに数分後に存在すると予測される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、これらの回避経路探索とドライバーの経路割当を行う。ここで、収集された数分後のリンク交通量を Anticipatory Stigmergy と定義する。

Anticipatory Stigmergy を利用した経路探索手順は次の通りである。

- ✓ 各ドライバーは Case1 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が提供される
- ✓ ここで、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
- ✓ 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 (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 ：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、 α, β ：パラメータ (BPR 関数 [19] を参考にして $\alpha = 0.48$, $\beta = 2.82$ [20])、 γ ：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 (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

Anticipatory Stigmergy に基づく具体的な経路探索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すると別リンクで混雑・渋滞が新たに発生する可能性がある (ハンチング現象). 従って Case1 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ドライバ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し, 閾値を超えたリンクを通過予定のプローブカーを割当比率に応じて各経路に分散させることにする.

本研究では次章で説明する通り, セルラ・オートマタに基づく交通流シミュレータを用いており, 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. 閾値を交通容量の半分 (=セル数×車線数×0.5) とする.

本ケースの閾値を超えた場合の割当戦略では, 該当するドライバーは Case1 の Combined Long- and Short-Term Stigmergy に基づく最短経路と本ケースの Anticipatory Stigmergy に基づく最短経路の 2 経路を選択肢として持ち, それぞれの予想所要時間を把握できると仮定する. ここで, 経路が異なるとは, 現在地又は出発地点から目的地まで, 1 つでも通過リンクが異なることを指し, 順序が異なる場合も同様に異なる経路としてみなす. そして, プローブカーより発信される数分後にリンク交通量が混雑している (交通容量の半分) と判断されたリンクに対して, リンクの交通容量に割当比率を乗算した車両数を上限としてランダムに Anticipatory Stigmergy に基づく最短経路に割当る. 経路が異なる車両がリンクの交通容量に割当比率を乗算した車両数に満たなかった場合は, 経路が異なる車両は全て Anticipatory Stigmergy の経路に割り当てている. 今回, 割当比率は 10% 区切りで実行している.

ここで本ケースの情報収集・提供手法を整理する. 各プローブカーは Case1 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共有し, その集計値である見込み交通量 (Anticipatory Stigmergy) 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 (v_a) による最短経路探索が実行される. その後, 割当比率に応じて, ランダムに選定された車両は Anticipatory Stigmergy による代替経路の情報提供を行い, 残りの車両には Combined Long- and Short-Term Stigmergy のリンク評価値に基づく最短経路が情報提供される.

本研究では 60 秒後の交通状況を共有するものとし, 60 秒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 60 秒間隔で 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.

3.2 ドライバー間の経路変更交渉

【Logit モデル】

Logit モデルはミクロ経済学の効用理論に基づく離散選択モデルの 1 つであり, 交通行動分析や交通計画の研究分野での適用が多い ([21], [22]). 本研究では, ドライバー

が経路所要時間差とポイント価値を考慮して, 迂回路である Anticipatory Stigmergy による経路への変更依頼に対して承諾するか否かを選択するドライバー判断行動の表現として Logit モデルを適用する.

Logit モデルは以下の様に定式化される. 各ドライバーの選択肢 i に対する効用 (U_i) は, 第 3 者が測定可能な要因の確定項 (V_i) と測定不可能な要因の誤差項 (ε_i) に区別でき, $U_i = V_i + \varepsilon_i, \forall i$ と表現できるとする. 一般的には確定項の説明変数を線形和と仮定した線形効用関数を適用することが多く, $V_i = \beta x_i$, 選択肢 i に関する説明変数ベクトル (x_j), 未知パラメータ・ベクトル (β), と設定される. 経路選択問題を対象とする場合, x_i は目的地までの所要時間や費用, 心理的な不満度などが該当し, 誤差項 (ε_i) には測定自体の誤差や測定不可能な要因が含まれる. ここで, 誤差項 (ε_i) に正規分布に似たガンベル (Gumbel) 分布を仮定すると, 各選択肢の選択確率は以下の式 (6) の様に表現できる.

$$P_i = \frac{\exp(\beta x_i)}{\sum_j \exp(\beta x_j)}, \forall i \quad (6)$$

【経路変更交渉モデル】

本研究では, 基本的にドライバーは提供された経路情報に従うが, 最短経路を選択したいドライバーが情報提供された経路に対して, 変更依頼できる仕組みを考える. また, 変更依頼の受入可能性は経路間の所要時間差と変更承諾によってドライバー間で譲渡されるポイントに応じて変化し, これらの要因を考慮した Logit モデルを経路変更交渉モデルとして導入する.

経路割当交渉モデルは, 所要時間の実績データに基づく経路の利用を希望するドライバーが Anticipatory Stigmergy に基づく経路である迂回路に割り当てられた場合に経路の変更を行うものである. 具体的には, Case1 の Combined Long- and Short-Term Stigmergy における最短経路と Anticipatory Stigmergy における最短経路を求めた際に, 経路が異なっている車両が交通容量と割当比率の乗算である割当数を超えている場合を対象にする. そして, Anticipatory Stigmergy に割り当てられた車両において, 下記の流れに沿って車両の経路変更の交渉が行われる.

- 該当するリンクに存在する車両を無作為に並び替える
- Anticipatory Stigmergy に割り当てられる上位の車両は Case1 の Combined Long- and Short-Term Stigmergy による経路に割り当てられた車両に対して経路変更依頼を出す
- 経路変更依頼を受けた車両は 2 つの異なる経路の予測所要時間とポイントから求まる式(7)に基づいて,

†† 見込み交通量によるリンク通過所要時間は式 (5) にて推計されるが, 混雑率 (=見込み交通量/交通容量) が精度に大きな影響を及ぼす. そのため, 見込み交通量はプローブカーの普及率や通過車両混入率, 交通容量 (最大車両存在可能台数) は道路構造や交通流シミュレータの計算条件によって適切に補正することが望まれる. 本研究ではプローブカーの普及率 100% の前提で数値実験をしているため, 見込み交通量の補正は行わない. 一方, 自由走行するには車両前方セルに他の車両が存在しないことが条件となる単純なセルラ・オートマタのルールに基づいた交通流シミュレータを構築しており, 等間隔で車両が存在しない限り, 交通容量の半分程度で混雑が発生する (つまり, 車両数が交通容量の半分以上の場合, 全車両が自由走行することはできない). そのため, 混雑発生の判断基準の閾値を交通容量の半分と設定し, 通過所要時間はさらにその 8 割程度の車両台数で増加していくと想定し, 交通容量補正パラメータを 0.4 と設定した.

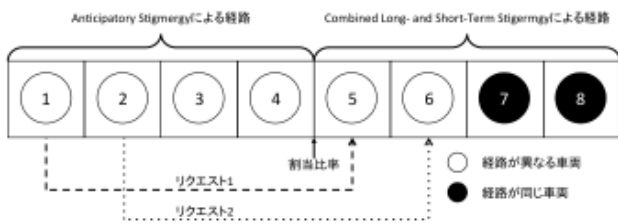


図 1 リクエストの流れの例
Figure 1 Example of Request Flow

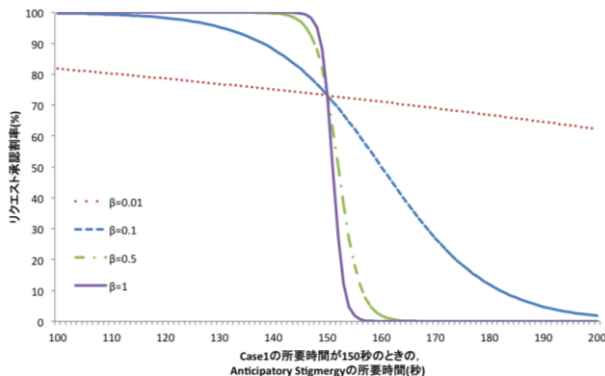


図 2 リクエスト承認率の変化
Figure 2 Variation of Approval Request

経路変更依頼を承認するかを決定する

- (d) 承認された場合は、経路変更依頼を出した車両は Case1 の Combined Long- and Short-Term Stigmergy によって求められた経路に割り当てられ、経路変更依頼を承認した車両は Anticipatory Stigmergy によって得られた経路に割り当てられる。
- (e) 経路変更交渉が成立した場合は、依頼を出した車両から承認した車両にポイントが送信される。

$$P = \frac{\exp(-\beta_0 T_2 + P_0)}{\exp(-\beta_0 T_1) + \exp(-\beta_0 T_2 + P_0)} \quad (7)$$

ここで、 β_0 : 所要時間差に対する感度パラメータ、 T_1 : Case1 の Combined Long- and Short-Term Stigmergy における最短経路の予測所要時間、 T_2 : Anticipatory Stigmergy によって得られた経路の予測所要時間、 P_0 : ポイントとし、今回は 1 とした。また、リクエストを依頼できる総数は、経路を 2 つ持っている車両のうち、Case1 の最短経路に割り当てられた車両の台数である。なお、 β_0 のパラメータは Case1 の Combined Long- and Short-Term Stigmergy における最短経路と Anticipatory Stigmergy によって得られた経路との所要時間の差に対する合理性を示しており、パラメータ値が大きくなる程、所要時間が短くなる経路を嗜好するようになる。

図 1 は、経路割当交渉におけるリクエストの流れの例である。振られている数字は(a)の無作為に並び替えた結果の番号であり、Case1 の Combined Long- and Short-Term Stigmergy における最短経路と Anticipatory Stigmergy における最短経路が異なっている車両が割当

比率から求まる上限台数 4 より大きい 6 である場合の例である。

(b) の Anticipatory Stigmergy に割り当てられた上位の車両である車両 1、及び 2 は Case1 の Combined Long- and Short-Term Stigmergy によって求められた経路に割り当てられ、かつ経路を 2 つ持っている車両 5、及び 6 にリクエストを出す。このとき、車両 7 は同一の経路である為、車両 3 はリクエストを出すことができない。

(c) では、リクエストを受けた車両は 2 つの異なる経路の予測所要時間から求まる式(7)に基づいて、経路割当変更のリクエストを承認する。今回、所要時間に対するパラメータ(β_0)が 0.1 とし、Anticipatory Stigmergy によって得られた経路の予測所要時間が 175 秒だったとする。すると Case1 の Combined Long- and Short-Term Stigmergy における最短経路が 125 秒の場合、リクエスト承諾率は 1.8% であり、極めて低い。しかし、Case1 の Combined Long- and Short-Term Stigmergy における最短経路が 160 秒と Anticipatory Stigmergy によって得られた経路の予測所要時間との差が小さくなるとリクエスト承諾率は 37.8% となり、大きくなり、よりリクエストに対して承認しやすくなる。また、所要時間に対するパラメータ(β_0)が 0.5 であった場合には、Case1 の Combined Long- and Short-Term Stigmergy における最短経路が 160 秒であったとしても、0.2% であり、リクエストの承認を受けにくいことがわかる。図 2 は、Case1 の所要時間が 150 秒だったときのリクエスト承認率の変化を、Anticipatory Stigmergy によって得られた経路の所要時間及び、パラメータ(β_0)の変化に基づいて整理したものである。

以上のような計算に基づいてリクエストの承認が行われた場合、(d)に従って、リクエストを行った車両とリクエストを承認した車両は交換される(例えば、車両 1 と車両 5)。このとき、図 1 の車両の順序には、位置情報の様な意味は含まれていない。

そして、(e)において、リクエストを行った車両(車両 1)はリクエストを承認した車両(車両 5)の間でポイントの交換が行われる。

今回、車両が発発時に持つポイント数は一律 5 ポイントと設定し、ポイントが 0 となった車両は経路変更依頼を出すことができない。車両が持つポイント数の分配方法の検討や車両が保有するポイントを利用可能な経路選択行動の考慮などは今後の課題である。

4. 交通流シミュレータ

4.1 セルラ・オートマタ・モデル

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) に基づいて構築する。

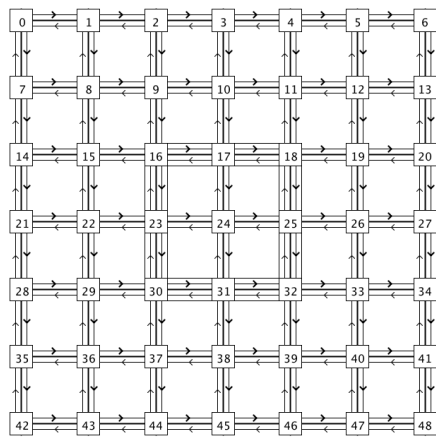


図3 道路ネットワーク
Figure 3 Road Network

具体的な車両の挙動規則は以下の通り，ルール 184[24]と同様に設定する．

- ネットワークを構成するノードを繋ぐリンク（交差点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秒と設定する
- 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
- つまり，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．

4.2 ネットワーク

評価実験で用いる道路ネットワークは図3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100mとし，車線数は中央環状部（16⇔17⇔18，16⇔23⇔30，18⇔25⇔32，30⇔31⇔32）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秒とし，所要時間等を算出している．

4.3 O-D 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．

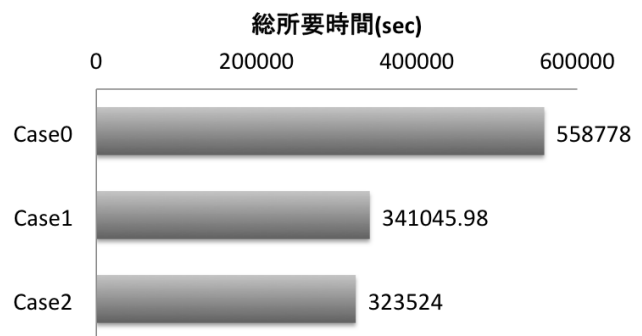


図4 総所要時間の比較
Figure 4 Total Travel Time

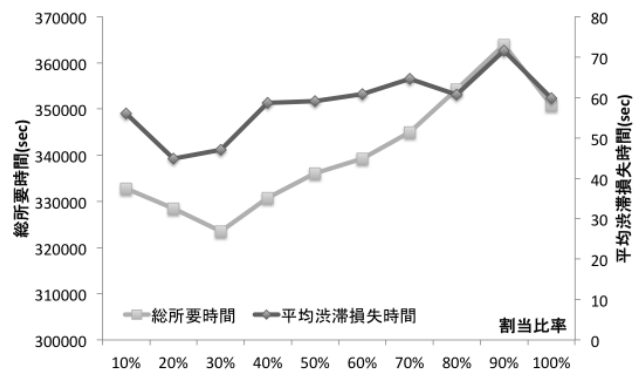


図5 割当比率の感度分析
Figure 5 Assignment Analysis

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75%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．

5. 評価実験

2.1で設定したCase0～Case2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．各ケースの特徴は以下の通りである．

Case0：プローブ情報なし

Case1：Long- and Short- Term Stigmergy

Case2：Anticipatory Stigmergy

また，Case2では，2.2で設定したドライバーの経路割当行動交渉における，Case1のCombined Long- and Short-Term Stigmergyによって得られた最短経路とAnticipatory Stigmergyを活用した最短経路の推定所要時間の差への応答に対する比較評価を行う．ここで，シミュレーションの回数は200日分を行っており，経路交渉のリクエストの承認確率を反映させる為，5パターンの一様乱数を用いている．今回の比較分析では，200日の出力結果のうち最後の100回分の平均を用いている．

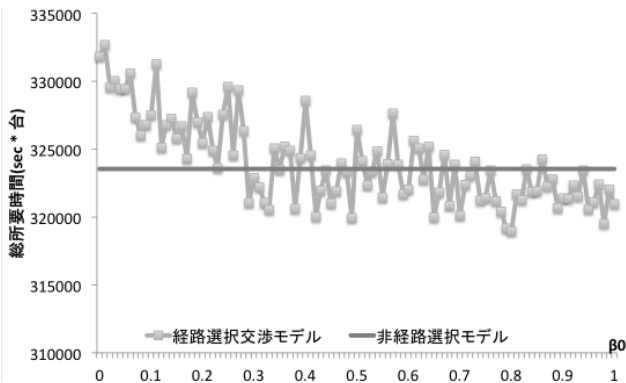
5.1 総所要時間の比較

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，Case0～Case2の結果を整理したものが図4である．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，プローブカー・データを活用する

表1 ドライバーの渋滞損失時間の比較

Table 1 Total Travel Time

	Time Loss in Congestion		
	Average [min]	Standard Deviation [min]	Coefficient of Variation
Case0	96.3	50.4	0.5
Case1	67.4	30.6	0.5
Case2	47.1	38.1	0.8

図6 リクエスト承認の感度分析
Figure 6 Request Approval Analysis

Case1, 2 よりも総所要時間が大きく、悪い結果となった。また、Anticipatory Stigmergy を活用した Case2 が最も良い結果となり、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 よりも効率性が高くなった。

さらに、Anticipatory Stigmergy を活用した Case2 における混雑リンクに対する車両の割当比率の感度分析を整理したものが図5である。今回は割当比率を30%、つまり Anticipatory Stigmergy を活用した経路に対してリンクの交通容量の30%を上限として割り当てると設定した場合が最も効率性が高くなったことが確認できた。そして、割当比率が100%、つまり全ての車両が Anticipatory Stigmergy を活用した経路に割り当てられた場合、Case1 よりも総所要時間が大きくなっており、非効率である。そこで、本研究で導入している車両の経路割当が必要である。

従って、総所要時間の比較評価結果から、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効率性であるといえる。

5.2 渋滞損失時間の比較

総所要時間の他の指標として、渋滞損失時間を調べる。渋滞損失時間は具体的には60秒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(8)の通り、渋滞損失時間を算出する。

$$t_{congestion} = \sum(t_{travel}(l) - t_0(l)) \quad (8)$$

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、 $t_0(l)$: 自由走行時間とする。

渋滞損失時間の現象は所要時間の短縮に加え、心理的負荷軽減効果も期待され、交通事故の削減効果にもつながるといえる。重要な評価指標の1つである。図5において、Anticipatory Stigmergy を活用した Case2 における混雑リンクに対する車両の割当比率の感度分析を行っている。今回は割当比率を30%、つまり Anticipatory Stigmergy を活用した経路に対してリンクの交通容量の30%を上限として割り当てると設定した場合が最も効率性が高くなったことが確認できた。

また、ドライバーの渋滞損失時間の平均値、標準偏差、変動係数を表1に整理した。各ドライバーの渋滞損失時間の平均値を見ると、Anticipatory Stigmergy を活用する Case2 が最も小さく、交通量の情報を反映していない Case0 は最も渋滞時間が大きくなっている。しかし、Case2 の車両割当比率が90%の場合のドライバーの渋滞損失時間の平均値は71.6秒と Case1 より大きくなっている。このことから、渋滞損失時間はドライバーの出発時からの交通状況に依存し、割当に関して適切な調整を行うことで質的なサービスレベルが向上することを意味することがわかる。ここで、Case2 の車両の割当比率は図5の割当比率の感度分析において、総所要時間の指標において、最も効果的であった30%を用いた。

5.3 経路交渉のリクエスト承認の感度分析

ドライバーの経路経路割当交渉モデルを表現するため、本研究では1つの説明変数を導入している。具体的には、Case1 によって得られた経路と Anticipatory Stigmergy を活用することによって得られた経路との所要時間差度(β_0)である。

図6は Anticipatory Stigmergy によって得られた経路を割り当てられた車両からのリクエストを承認するかどうかを Case1 の Combined Long- and Short-Term Stigmergy によって得られた経路と Anticipatory Stigmergy を活用することによって得られた経路との所要時間差度(β_0)に対する感度である。なお、所要時間差度(β_0)を大きくすると経路間の所要時間の差に敏感になり、所要時間差が大きい際にリクエストを承諾しにくくなる。図6より、パラメータが大きくなる程総所要時間が小さくなる。また、所要時間差度(β_0)が0.29からリクエストを行わない非経路選択モデルより総所要時間が小さくなり、ドライバー自身が Anticipatory Stigmergy を活用して得られた経路が Case1 の Combined Long- and Short-Term Stigmergy によって得られた経路よりも予想される所要時間差が大きく、リクエストに対して拒絶するような行動を取るようになると総所要時間が小さくなることが確認できた。従って、ドライバーの合理的な判断がシミュレーション上で反映されていることが確認できた。

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生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、評価実験の結果から効率性の向上を確認した。

また、ドライバーが提供された経路に従うインセンティブとして、経路選択交渉を考慮した場合、Case1 の Combined Long- and Short-Term Stigmergy における最短経路と本ケースの Anticipatory Stigmergy における最短経路の所要時間差に対して、ドライバーが合理的に判断した交渉が行われることによって、効率性が向上した。このことから、ドライバー自身の合理的な判断がシミュレーション上で実装できていることが確認できた。

今後は、現況再現を目指した交通流シミュレータの精緻化を目指した開発や評価実験のネットワークの大規模化、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用性の確認を行うこと、そして、本研究で実現したポイントに基づく経路割当て交渉に加えて、与えられた経路に対してドライバーが従わない、または、前日の渋滞経験に対する後悔や直近の交通状況に左右されてしまうといった経路選択行動を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

- [1] 森川高行, 山本俊行, 三輪富生, 王立曉, “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] ITS Japan, “通行実績・通行止情報”, <http://www.its-jp.org/saigai/>.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Marianne Hatzopoulou, Jiang Y. Hao, Eric J. Miller, “Simulating the impacts of household travel on greenhouse gas emissions, urban air quality, and population exposure”, Transportation, 2011.
- [6] MATSIM, <http://www.matsim.org/>.
- [7] J. Dallmeyer, R. Schumann, A. Lattner and I. Timm, “Don’t Go with the Ant Flow: Ant-inspired Traffic Routing in Urban Environments”, Proceedings of the 7th. International Workshop on Agents in Traffic and Transportation (ATT 2012) held at AAMAS 2012.
- [8] W. Narzt, U. Wilflingseder, G. Pomberger, D. Kolb, and H. Hortner, “Self-organising congestion evasion strategies using ant-based pheromones”, IET Intelligent Transport Systems, Vol.4, No.1, pp.93-102, 2010.
- [9] Y. Ando, Y. Fukazawa, O. Masutani, H. Iwasaki, and S. Honiden, “Performance of pheromone model for predicting traffic congestion”, Proceedings of the Fifth International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS), pp.73-80, 2006.
- [10] T. Yamashita, K. Izumi, K. Kurumatani, H. Nakashima, “Smooth Traffic Flow with a Cooperative Car Navigation System”, Proceedings of the fourth international joint conference on Autonomous agents and Multiagent systems (AAMAS), pp.478-485, 2005.
- [11] 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.
- [12] K. Dresner and P. Stone, “Sharing the road: Autonomous vehicles meet human drivers”, Proceedings of 20th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI), pp. 1263-1268, 2007.
- [13] 赤松隆, “一般ネットワークにおけるボトルネック通行権取引制度”, 土木学会論文集 D, Vol. 63, pp.287-301, 2007.
- [14] Reshef Meir, Jeffery Rosenschein, “A Game-theoretic Approach to Leasing Agreements can Reduce Congestion”, The Sixth Workshop on Agents in Traffic and Transportation (ATT’10), at The Ninth International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2010.
- [15] Matteo Vassirani and Sascha Ossowski, “A market-based approach to accommodate user preferences in reservation-based traffic management”, AAMAS ’09 Proceedings of The 8th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2009.
- [16] 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 12th Pacific Rim International Conference on Artificial Intelligence (PRICAI), 2012.
- [17] R. Kanamori, J. Takahashi, and T. Ito, “Evaluation of Anticipatory Stigmergy Strategies for Traffic Management”, Proceedings of IEEE Vehicular Networking Conference (VNC), 2012.
- [18] 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>.
- [19] Y. Sheffi, “Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods”, Prentice-Hall, 1985.
- [20] 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.
- [21] M. Ben-Akiva and S. R. Lerman, “Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand”, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1985.
- [22] K. E. Train, “Discrete Choice Methods with Simulation”, Cambridge University Press, New York, 2003.
- [23] E. Cascetta, “Transportation system Analysis –models and applications (2nd edition)”, Springer, 2001.
- [24] S. Wolfram, “Theory and application of cellular automata”, World Scientific, Singapore, 1986.