Vol.2014-ICS-175 No.17
2014/3/14

プローブカーの普及に基づく動的経路割当手法の評価

高橋 淳[1,a)]　金森 亮[†1,b)]　伊藤 孝行[1,c)]

概要：本稿では，GPS を搭載し，リアルタイムに交通状況を把握することができるプローブカーの普及にあわせて，動的な経路情報の提供手法を提案する．各プローブカーは，収集された近未来の予測位置情報によって得られた代替経路と過去の実績値に基づいた最短経路に割当てられる．そして，プローブカーの合理的な判断のもと経路割当変更の交渉が行い，最割当が行われる．より現実的な実施環境としてプローブカーの普及率に応じた予測交通情報，及び経路割当数を導入することによって，完全統制下でない場合において，自動車交通流の効率化について提案手法の有効性を確認する．

1. はじめに

本稿では，次世代交通システムのための自動交渉に基づく経路割当機構を提案し，マルチエージェントシミュレーションによりその有効性を検証する．自動車が解決すべき問題を解決する方法として，交通情報提供，ロードプライシング，及び交通状態に応答した信号制御など，ITS による次世代交通システムが注目されている．特に，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．

本稿では，交通システムにおいて，車々間で渋滞や混雑解消を目的として間接的に共有する交通情報を Stigmergy[10] と呼ぶ．既存の通行ゲートによる，「長期の過去の通過所用時間」の実績データを蓄積し，統計に処理したものを Long-Term Stigmergy と呼ぶ．また，実世界では，実用化段階であるプルーブカーなど動的な交通状況において，「最近の過去の通過所要時間」の実績データを利用したものを Short-Term Stigmergy としている．

本研究では過去に，予見的な交通情報（Anticipatory Stigmergy）を共有することで，効率的な交通マネージメントの可能性を示した [11][12]．ここでは，上であげた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，見込み交通量を基に経路探索を行う予見的経路情報の共有方法を提案した．特に，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，交通混雑や渋滞を回避する経路割当戦略を導入することで効率的な交通マネジメントが実現できることを示した．

一方，予見的な交通情報を共有する場合，ドライバーはお互いの意思決定の情報が分からないため，経路選択についての振動現象が観察されている [17]．つまり，車はお互いの意思決定に関する情報が分からず，多くの車が混雑がない予想される経路 X を選択する．さらに，X が混雑すると分かると，多くの車が異なる経路 Y を選び，その結果今度は経路 Y が混雑してしまう．以上のような，人間のグループの予想に基づく振る舞いの振動現象は，El Farol Bar Problem[3]，マイノリティゲーム [5]，混雑ゲーム [15] などで研究されている．特に，混雑ゲームでは，過去の所要時間の実績値に基づく最短経路を多くの車両が利用することによる混雑，渋滞状態 (負のコスト) が増加するような現象が研究されている．

上のような振る舞いの振動現象を解決するためにいくつかの基礎的な研究が行われている．Klein et al.[13] は，情報遅延によって，緊急時のリソースが効率的に利用できず，振動がおこってしまう問題を，マイノリティゲーム [5] と関連づけている．そして，リソース利用の振動を緩める為に，情報をあえて与えないという戦略の効果を示している．本稿が対象とする交通システムにおいても，情報を与えない戦略は考えられるが，ドライバー間での不公平感が問題である．

本稿では，経路を再割り当てするために “ 車両間の経路変更交渉 ” を提案する．ここでは，ドライバーの経路間の所要時間差に対する合理的判断に基づいて交渉を行う．本

1 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
†1 現在，名古屋工業大学
Presently with Nagoya Institute of Technology
a) takahashi.jun@itolab.nitech.ac.jp
b) kanamori.ryo@itolab.nitech.ac.jp
c) ito.takayuki@nitech.ac.jp

ⓒ 2014 Information Processing Society of Japan

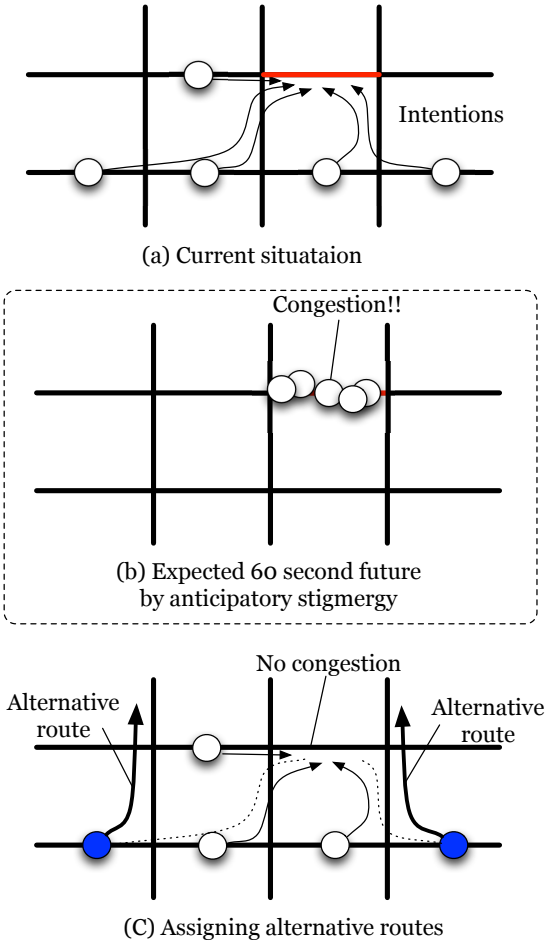

図 1 渋滞が予測されたリンクでの動的経路割当

稿では，交通流シミュレータを用いた評価実験において，Anticipatory Stigmergy による代替経路を用いた車両割当戦略，及び経路割当変更交渉の有効性を総所要時間，渋滞損失時間の点で示し，プローブカーの普及率が変化した場合の総所要時間の有効性を検証する．

本稿の構成を以下に示す．まず，2 章では，Anticipatory Stigmergy による代替経路を活用した経路割当戦略，及び車両間の自動交渉の概要，及び具体的な経路情報の提供手法を述べる．3 章では，評価実験の設定を述べる．4 章で，評価実験の結果について述べ，考察を行う．5 章では，経路情報提供手法に関する先攻研究を述べる．最後に 6 章で，本稿のまとめを示し，今後の課題を示す．

2. 自律型車両による動的経路割当手法

2.1 動的経路割当手法

動的経路割当手法は，図 1 に示されるような，過去の実績値において最短経路，及び Anticipatory Stigmergy を用いた予見的な経路である代替経路に車両を割り当てるものであり，混雑ゲームの考え方を組み込んだものである．

混雑ゲームは，施設の利用者が増加するにつれて，負のコストが増大するモデルであり [15]，交通渋滞の近郊配分

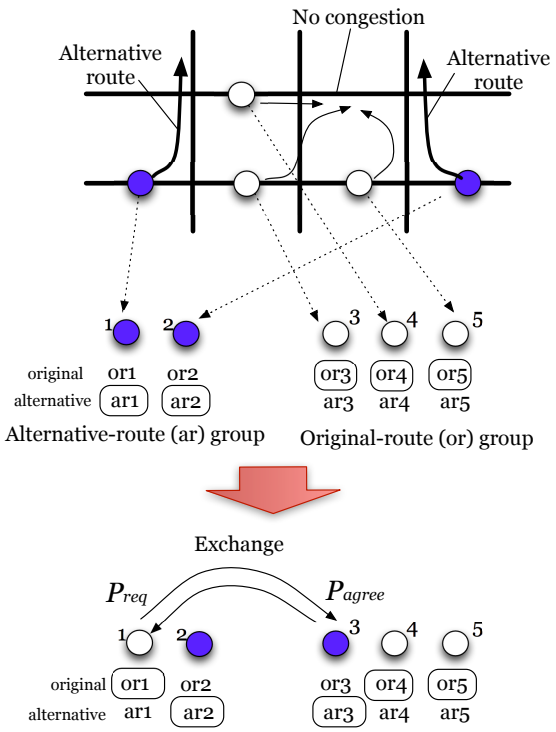

図 2 経路割当の変更交渉

にも適用例が存在する [6]．混雑ゲームは，n 人のエージェントの行動によって決定され，混雑状態に応じて，負の報酬が増える．現在のカーナビゲーションシステム等の経路情報提供手法は，各リンクにおける過去の通過実績を統計処理を行ったもの，及びリアルタイムの通過実績の処理である．これら過去の通過実績値によって得られた最短経路に従うと，リンクコスト以上に通過時間がかかってしまうことがある．さらに，過去の実績値では最短経路ではない代替経路を進んだ方がより短い時間で到着してしまうことがある．これは，各車両が最も短い時間で出発地から目的地までたどり着きたいと考えており，リンク (施設) を利用する車両が増加する為，負のコスト (所要時間) が増大しているからである．

2.2 経路割当交渉

本稿では，基本的に車両は提供された経路情報に従うが，最短経路を選択したい車両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．具体的には，図 2 に示されるような，実績データに基づく経路の利用を希望する車両が迂回路に割当てられた場合に経路の変更交渉を行うものである．

経路変更交渉モデルとして Logit モデルを導入する．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 [4]．

本稿では，車両が経路所要時間差と譲歩定数を考慮して，代替経路への変更依頼に対して承諾するか否かを選

ⓒ 2014 Information Processing Society of Japan

択する車両の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．車両 i の選択肢 k に対する効用 ($U_i(k)$) は，第 3 者が測定可能な要因の確定項であるノード r からノード s までの推定所要時間 (c_k^{rs}) と測定不可能な要因の誤差項 (ε_k) に区別でき，$U_i(k) = -c_k^{rs} + \varepsilon_k$ と表現できるとする．. 経路選択問題を対象とする為，目的地までの所要時間を確定項とする．誤差項 (ε_k) 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_k) に正規分布に似たガンベル (Gumbel) 分布を仮定する．

代替経路に割当られた車両は実績データに基づく経路と比べて大きな時間的損失を被る場合，経路割当の依頼を行う．代替経路に割当てられた車両の実績データに基づく経路 $past$ への依頼確率 P_{req} は以下の式 (1) の様に表現できる．

$$P_{req} = \frac{exp(-\beta_0 c_{past}^{rs})}{exp(-\beta_0 c_{past}^{rs}) + exp(-\beta_0 c_{ant}^{rs})} \tag{1}$$

ここで， β_0 は経路間の予測所要時間差に対するパラメータ，c_{past}^{rs} は実績データに基づく経路の予測所要時間，c_{ant}^{rs} は代替経路の予測所要時間とする．

全車両が最短経路を選択すると渋滞が発生してしまうので，代替経路を選んだ場合の損失を考慮し，交渉を受け入れるか判断する．経路変更依頼を受けた車両は経路間の所要時間差，及び譲歩係数を考慮した式 (2) に基づく代替経路 ant の選択確率 P_{ant} に基づいて，経路変更依頼を承認するかを判断する．ここで，経路を変更することで被る時間的損失が小さく，依頼を受け入れると合意した場合，経路割当が交換される．

$$P_{ant} = \frac{exp(-\beta_0 c_{ant}^{rs} + P)}{exp(-\beta_0 c_{past}^{rs}) + exp(-\beta_0 c_{ant}^{rs} + P)} \tag{2}$$

ここで，P は譲歩係数とし，1 秒と設定した．

【Case 1：Past Stigmergy】

Case 1 の特徴を以下に示す．

- 通過所要時間の実績値を蓄積し，該当リンクの時間帯別通過所要時間を統計に処理 (Long-Term Stigmergy)
- 動的な交通状況下での非集中型の情報提供下で直近 60 秒間のリンク平均通過所要時間を利用 (Short-Term Stigmergy)
- Long-Term Stigmergy と Short-Term Stigmergy に重みづけを行い，効果的利用

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．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，本稿では式 (3) 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．

$$v_l = ave_l + \rho \times sd \tag{3}$$

ここで，ρ は平均値に対する標準偏差のウェイトとする．

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 60 秒間のリンク通過所要時間 (Short-Term Stigmergy) を最寄りの固定インフラによって限られた範囲内で，共有できると想定する．ただし，60 秒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 60 秒間に 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，リンクの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_s) は以下の式 (4) の通りとなる．

$$v_s = \begin{cases} ave_s, & if PV > 0 \\ t_0(l), & if PV = 0 \end{cases} \tag{4}$$

ここで，ave_s，$t_0(l)$，及び PV は，それぞれ直近 60 秒間のリンク通過所要時間の平均値， リンクの自由走行時間 (式 (5))，及びリンク通過台数とする．

リンク評価値の更新間隔は 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) で再探索を行う．また，本研究では，非集中型マネジメントを想定しており，動的な交通状況の情報提供は限られた範囲からのみとする．従って，リンク評価値を得ることができないリンクはリンクの自由走行時間である以下の式を用いる．

$$v_0 = t_0(l) = int(\frac{|l|}{v_{max}(l)}), \tag{5}$$

ここで，$t_0(l)$，$|l|$，及び $v_{max}(l)$ は，それぞれリンクの自由走行時間，リンクの距離，及びリンクの規制速度とする．つまり，非集中型マネジメント下における Short-Term Stigmergy に基づくリンク評価値 (v_s) は以下の式 (6) の通りとなる．

$$v_s = \begin{cases} ave_s, & if\ PV > 0\ and\ l\ \in IA \\ t_0, & if\ PV = 0 \end{cases} \tag{6}$$

ここで，ave_s，$t_0(l)$，IA，及び PV は，それぞれ直近 60 秒間のリンク通過所要時間の平均値，リンクの自由走行時間 (式 (5))，動的な交通状況の提供範囲，及びリンク通過台数とする．

さらに，下記の式 (7) で重み付けを行うことで Short-Term Stigmergy 及び Long-Term Stigmergy を効果的に利用する．

$$v_{ls} = \omega \times v_l + (1 - \omega) \times v_s \tag{7}$$

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

【Case 2：Anticipatory Stigmergy】

Case 2 の特徴を以下に示す．

- Case 1 を用いて, 60 秒後の予測位置情報 (Anticipatory Stigmergy) を収集し，共有
- 推定リンク交通量から渋滞発生箇所を推計し，回避経路 (代替経路) 探索
- 混雑が予想されたリンクの通過予定の車両を，プローブカーの普及率に応じて回避経路に割当

ここで, 60 秒後の収集された予測位置情報を 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．

(a) 各ドライバーは Case 1 による，リンク通過所要時間の実績値に基づく経路情報が固定インフラから提供される

(b) 経路情報に従い 60 秒後の存在 (到着) リンクの位置情報が固定インフラに送信され, Anticipatory Stigmergy が集計される

(c) 集計された見込み交通量からリンク通過所要時間をリンクパフォーマンス関数である式 (8) にて推計する．なお，本研究では非集中型マネジメント下における動的な交通状況の提供を扱っているので，Anticipatory Stigmergy を得ることができないリンク及び，60 秒後のリンク交通量が 0 台の場合，自由走行時間を用いる．そして，プローブカーの普及率を評価する為に，60 秒後の見込み交通量が装備率によって変化する．つまり，プローブカーの普及率が低い場合，見込みより多くの車両が存在する可能性が高いので，見込交通量が増加する．

$$v_a = \begin{cases} t_0(l)\left(1+\alpha\left(\dfrac{\frac{vol(l)}{Sat}}{\gamma \times Cap(l)}\right)^{\beta}\right), & l \in IA \\ t_0(l), & l \notin IA \end{cases} \tag{8}$$

ここで，v_a，$t_0(l)$，Sat，$Vol(l)$，$Cap(l)$，α，β，及び γ は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)，自由走行時間，プローブカーの普及率，60 秒後のリンクの見込み交通量，リンクの交通容量， パラメータ (BPR 関数 [16] を参考にして，$\alpha = 0.48, \beta = 2.82$)， 及び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，本稿では $\gamma = 0.4$ と設定) とする．

(d) 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，60 秒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．

全てのプローブカーが新たな代替最短経路を選択すると別リンクで混雑や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 Case 1 の最短経路と本ケースの Anticipatory Stigmergy による最短経路とにプローブカーを上手く割当てる必要がある．

本研究では，プローブカーより発信される 60 秒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．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．

本ケースの閾値を超えた場合の割当戦略では，該当するプローブカーは Case 1 の Past Stigmergy に基づく最短経路と本ケースの AnticipatoryStigmergy 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．そして，プローブカーより発信される 60 秒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．

ただし，本稿では，プローブカーの普及率を考慮して，割当比率を変動させる．道路ネットワークに存在する車両が，全てプローブカーの場合は Anticipatory Stigmergy の精度が高く割当比率の台数分から超えた分を Anticipatory Stigmergy による代替経路に割当る．しかし, プローブカーの普及率が低い場合は，Anticipatory Stigmergy よりも多くの車両が存在する可能性が高い．そこで，式 (9) で得られた台数を代替経路に割当る．

$$\frac{Vol(l)}{Sat} - \gamma \times Cap(l) \tag{9}$$

ここで，$Vol(l)$，$Cap(l)$，γ，及び Sat は，それぞれ 60 秒後のリンクの見込み交通量，リンクの交通容量，交通容量補正パラメータ，及びプローブカーの普及率とする．

【Case 3：経路変更交渉モデル】

本稿では，基本的に車両は提供された経路情報に従うが，最短経路を選択したい車両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．具体的には，経路割当交渉モデルは，Case 1 による経路の利用を希望する車両が Anticipatory Stigmergy による代替経路に割当られた場合に経路の割当変更を依頼するものである．

Case 3 の特徴を以下に示す．

- Anticipatory Stigmergy による代替経路に割当られた車両が Case 1 による経路に割当られた車両と割当変

更の交渉を行う

- 経路変更依頼確率は，経路間の所要時間差によって変化
- 経路変更依頼受入確率は，経路間の所要時間差，及び譲歩係数によって変化

そして，渋滞が予想されたリンクにおいて，下記の流れに沿って車両の経路変更の交渉が行われる．

(a) 該当するリンクを通過予定の車両をランダムに割当る．ここで，Anticipatory Stigmergy に割当られた車両を車両 AS，Case 1 に割当られた車両を車両 P とする．

(b) 車両 AS は経路間の予測所要時間差から求まる式 (1) に基づいて，経路変更依頼を出すか判断し，車両 P に対して依頼を出す．ここで，β_0，T_1，及び T_2 は，それぞれ経路間の予測所要時間差に対するパラメータ，Case 1 におけるの予測所要時間，Anticipatory Stigmergy による代替経路の予測所要時間とする．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，Case 1 の最短経路に割り当てられた車両の台数である．

(c) 経路変更依頼を受けた車両 P は経路間の所要時間差及び，譲歩係数を考慮した式 (2) に基づいて，経路変更依頼を承認するかを判断する．ここで，P_0 は譲歩係数とし，1 秒と設定した．

(d) 承認された場合は，車両 P に対する交渉成功リストに登録する．

(e) 交渉成功リストの中で，車両 AS の予測所要時間を最も削減する車両は Case 1 に割当られ，経路変更依頼を承認した車両 P は Anticipatory Stigmergy による代替経路に割当られる．

今回，車両が経路変更依頼を承認する際，譲歩係数を 1 秒としたが．車両にポイントを持たせ，行程中に車両間でポイントのやりとりを行う等の，車両の経路遵守の為のメカニズムは今後の課題である．

3. 交通流シミュレーション

3.1 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，本稿では，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以下の通り，ルール 184[18] 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，本稿では 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稿の交通流シミュレータは混雑や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 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：81 個，上下別リンク数：288 本のグリッドネットワークである．リンク長は一律 200m とし，車線数は中央環状部 (20 ⇔ 21 ⇔ 22 ⇔ 23 ⇔ 24，20 ⇔ 29 ⇔ 38 ⇔ 47 ⇔ 56，24 ⇔ 33 ⇔ 42 ⇔ 51 ⇔ 60，56 ⇔ 57 ⇔ 58 ⇔ 59 ⇔ 60) 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：10〜25km/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，本稿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．

3.3 リアルタイムデータ取得範囲

リアルタイムの情報を各車両が受信できる範囲は車両が現在向かっているノードから 2 リンク先までである．ここで，リアルタイムデータとは直近数分間のリンク通過所要時間 (Short-Term Stigmergy)，及び数分後の収集されたリンク交通量 (Anticipatory Stigmergy) を指す．また，車両が所属しているノードは車両が通過しているリンクの進行方向側のノードのことである．

3.4 O-D 交通量

経路選択の多様性と混雑や渋滞の発生を考慮し，本稿の OD 交通量はそれぞれ 0 → 80：100 台，2 → 78：100 台，5 → 74：100 台，6 → 74：100 台，8 → 72：100 台，9 → 71：100 台，13 → 66：100 台，14 → 66：100 台，15 → 65：100 台，16 → 63：100 台を設定した．

本稿では 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送受信できることを想定してい

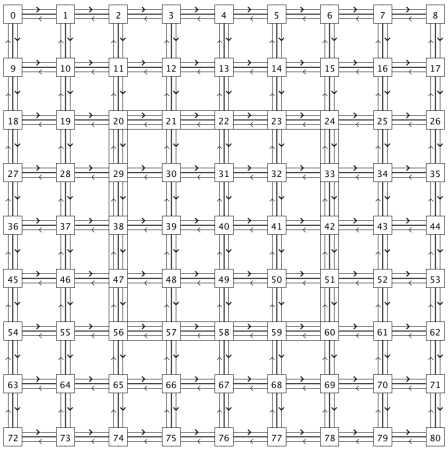

図 3 network

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．そこで，混入率に応じた，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

Case 1，Case 2，及び Case 3 の経路情報収集及び提供手法による自動車交通流の効率性，割当戦略の必要性と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．

- Case 1：Combined Long- and Short-Term Stigmergy
- Case 2：Anticipatory Stigmergy
- Case 3：経路変更交渉モデル

ここで，シミュレーションの回数は 500 日分を行っている．今回の比較分析では，500 日の出力結果のうち最後の 100 回分の平均を用いている．後の章で感度分析を行う，長期 Stigmergy の重み ω を 0.6，Anticipatory Stigmergy に基づく予見的経路情報への車両割当比率を 50%とし，プローブカーの普及率を 100%とする．

4.1 総所要時間のケース間比較

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，Case 1，Case 2，及び Case 3 の結果を整理したものが図 4 である．

Case 1 の総所要時間が 615,182(秒*台) に対して，Case 2 の総所要時間が 597,218(秒*台) であり効率的であるので，Anticpatory Stigmergy による代替経路を用いた経路割当が有効であることが確認された．そして，Case 1 と Case 2 の間には，5%の統計的有意差が確認された．また，Case 3 の総所要時間は 595,208(秒*台) であり，Case 2 と比べ，効率的であり，経路割当変更交渉が有効であることが確認された．ただし，統計的有意差を確認することはできなかった．

以上のことから，Anticipatory Stigmergy による代替経路は有効であり，経路割当変更交渉が総所要時間において更に有効的に働くといえる．

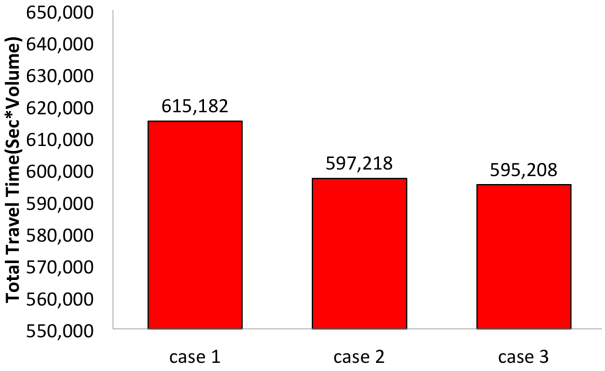

図 4 総所要時間のケース間比較

表 1 交渉導入における渋滞損失時間の削減

削減した渋滞損失時間 (秒)	1-10	11-20	21-30	31-40	合計
台数	393	151	36	2	582

4.2 渋滞損失時間のケース間比較

総所要時間による比較から，Anticipatory Stigmergy による代替経路を活用した経路情報提供手法は，普及率に応じて従来手法よりも効率的になることを確認したが，本節では，経路割当戦略での経路割当変更交渉導入に関する分析として，式 (10) によって求められた渋滞損失時間について考察する．渋滞損失時間を削減することは心理的な負荷軽減効果が期待され，交通事故の削減効果も期待され，重要な指標の 1 つとなる．

$$t_{congestion} = \Sigma(t_{travel}(l) - t_0(l)) \tag{10}$$

表 1 は，Case 2 と Case 3 の渋滞損失時間の差分のうち，経路割当変更交渉の導入によって渋滞損失時間の削減効果があったものを示している．評価実験の結果，1000 台のうち 582 台の車両が Case 2 と比べて Case 3 にした場合の渋滞損失時間が削減していた．従って，経路割当変戦略において，経路割当変更交渉は有効であるといえる．

本経路割当変更交渉は，非集中型マネジメント下で，自律型車両が自動的に交渉を行うので，現実的なモデルであるといえる．ただし，車両の経路割当変更交渉の組み合わせを記憶しておくための固定インフラが交差点に必要となり，本稿では，これらの通信コストやセキュリティ等は考慮していないので，実世界への導入は今後検討していく必要がある．

4.3 プローブカーの普及率に対する総所要時間の比較

今までは，プローブカーの普及率を 100%として，検証してきたが，図 5 では，プローブカーの普及率別に総所要時間を Case 1， Case 2，及び Case 3 の結果を整理した．

図 5 に示されているように，プローブカーの普及率が 70%以上の場合，Anticipatory Stigmergy による代替経路を利用した Case 2 及び Case 3 が効率的になっていること

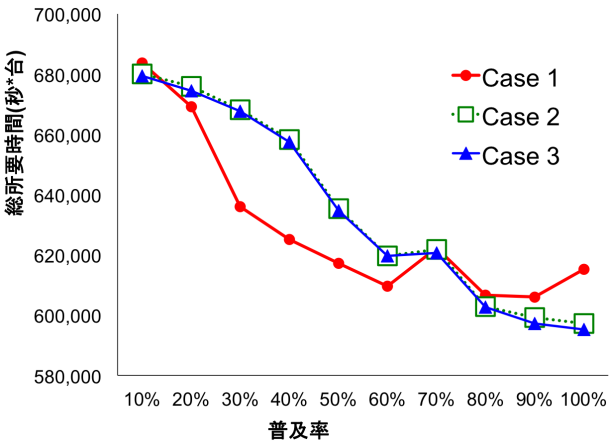

図 5 プローブカーの普及率に対する総所要時間の変化

が確認できた．60 秒後の予測位置情報である Anticipatory Stigmergy がプローブカーの普及率に応じて変化するため，動的な車両割当戦略が，普及率が 100%でない状態においても有効であることが確認できた．普及率が 90%以上では，5%の統計的有意差が確認されている．

プローブカーの普及率が 60%以下の場合は，Case 1 の方がより効果的であった．原因として，プローブカーの普及率が低い場合，Anticipatory Stigmergy による代替経路に割当られた車両が通過する道路に，固定インフラが把握できない車両 (自由走行時間による経路を選択) が存在した為，迂回路を選択したにも関わらず，渋滞に巻き込まれていることがあげられる．

また，経路割当変更交渉は統計的有意差は確認できなかったものの，全ての装備率でランダムの割当と比べて効果的であることが確認された．

5. 関連研究

Chen et al.[7] 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[9] は渋滞を回避に 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.[14] 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.[2] 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．Claes et al.[8] 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，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．Adler et al.[1] は，所要時間やスケジュール遅延といった時間に対する目標，距離や右左折数といった運転の複雑さに対する目標，キャパシティに対する車両の割合や自由走行時間で走行できているリンクの割合といった交通マネジメントに対する指標をエージェント毎に設定し，エージェントは交通マネージャーとの中間者に対して自身の走りたい経路を提出し，実際に走るかどうか交渉を行う．ただし，リアルタイムな割当を狙っているものの，基本的には過去の情報を利用し，エージェントや交通マネージャーの指標によって代替経路を探索している．

交通シミュレータを用いた評価実験によって，Anticipatory Stigmergy による予見的経路の有用性，割当戦略の必要性を示した，そして，非集中型マネジメントを導入した Anticipatory Stigmergy による代替経路への割当戦略が有効であることを確認している．ただし，本研究で実施するプローブカーの普及率に応じた車両割当台数の変化や，Anticipatory Stigmergy の計算はプローブーの普及率が変化しても固定である．

6. まとめと今後の課題

本稿では，プローブカーの普及率に応じた，60 秒後の予測位置情報 (Anticipatory Stigmergy) による代替経路を活用した経路情報提供手法，及び自律型プローブカーによる所要時間差に応じた経路割当交渉を提案した．そして，動的な交通情報を非集中型マネジメント下で扱い，シミュレーションを行った．

評価実験の結果，Anticipatory Stigmergy による代替経路を活用した車両割当は総所要時間において有効である．また，経路割当変更交渉はランダムによる割当よりも総所要時間，及び渋滞損失時間において削減効果があることを確認した．そして，プローブカーの普及率が 70%以上になると，車両割当戦略が効率的に働くことを確認した．

本稿の新規性及び有用性は以下の通りとなる．

- プローブカーの普及率を Anticipatory Stigmergy，及び割当台数に反映させることで，本手法の導入評価
- Anticipatory Stigmergy による代替経路への割当で，交通渋滞や混雑を回避
- 自律型車両の自動交渉による車両の不公平感の解消及び自動車交通流を効率化

今後の課題として，Anticipatory Stigmergy による代替経路を活用した経路情報提供手法を精緻化された交通シミュレータで実際の大規模なネットワークによって有効性を確認することが挙げられる．また，ドライバーの経路選択の不確実性，及び提供された経路に遵守する為のメカニズムを導入する．

6.0.1 Acknowledgments.

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] Adler, J. L., Satapathy, G., Manikonda, V., Bowles, B. and Blue, V. J.: A multi-agent approach to cooperative traffic management and route guidance, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 39, No. 4, pp. 297 – 318 (online), DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.trb.2004.03.005 (2005).

[2] 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)*, pp. 73–80 (2006).

[3] Arthur, W. B.: Inductive Reasoning and Bounded Rationality, *American Economic Review*, Vol. 84, No. 2, pp. 406–11 (online), available from ⟨http://ideas.repec.org/a/aea/aecrev/v84y1994i2p406-11.html⟩ (1994).

[4] Ben-Akiva, M. and Lerman, S. R.: Discrete Choice Analysis:Theory and Application to Travel Demand, *MIT Press, Cambridge, Massachusetts* (1985).

[5] Challet, D. and Zhang, Y.-C.: Emergence of cooperation and organization in an evolutionary game, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 246, No. 3—4, pp. 407 – 418 (online), DOI: http://dx.doi.org/10.1016/S0378-4371(97)00419-6 (1997).

[6] Charnes, A. and Cooper, W.: Management models and industrial applications of linear programming, No. 2, pp. 785–797 (online), available from ⟨http://books.google.co.jp/books?id=uUE9M4Um7usC⟩ (1961).

[7] Chen, B. and Cheng, H. H.: A Review of the Applications of Agent Technology in Traffic and Transportation Systems, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, pp. 485 – 497 (2010).

[8] 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).

[9] Dallmeyer, J., Schumann, R., Lattner, A. D. and Timm, I. J.: Don't Go with the Ant Flow: Ant-inspired Traffic Routing in Urban Environments, *In the Proceedings of the 8th Workshop on Agents in Traffic and Transportation (ATT2012)*, pp. 59–68 (2012).

[10] Dorigo, M. and Gambardella, L. M.: Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem, pp. 53 – 66 (1997).

[11] Ito, T., Kanamori, R., Takahashi, J., Maestre, I. M. and de la Hoz, E.: The Comparison of Stigmergy Strategies for Decentralized Traffic Congestion Control: Preliminary Results, *In the Proceedings of The 12th Pacific Rim International Conference on Artificial Intelligence (PRICAI2012)*, pp. 146–156 (2012).

[12] Kanamori, R., Takahashi, J. and Ito, T.: Evaluation of Anticipatory Stigmergy Strategies for Traffic Management, *Proceedings of IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, pp. 33 – 39 (2012).

[13] Klein, M., Metzler, R. and Bar-Yam, Y.: Handling Emergent Resource Use Oscillations, *Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems* (Negoita, M., Howlett, R. and Jain, L., eds.), Lecture Notes in Computer Science, Vol. 3215, Springer Berlin Heidelberg, pp. 809–816 (2004).

[14] Narzt, W., Wilflingseder, U., Pomberger, G., Kolb, D. and Hortner, H.: Self-organising congestion evasion strategies using ant-based pheromones, *Intelligent Transport Systems, IET*, Vol. 4, No. 1, pp. 93–102 (2010).

[15] Rosenthal, R.: A class of games possessing pure-strategy Nash equilibria, *International Journal of Game Theory*, Vol. 2, No. 1, pp. 65–67 (online), DOI: 10.1007/BF01737559 (1973).

[16] Sheffi, Y.: Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods, Vol. 1, No. 1, pp. 53–66 (1985).

[17] Takahashi, J., Kanamori, R. and Ito., T.: Stability Evaluation of Route Assignment Strategy by a Foresight-Route under a Decentralized Processing Environment, *WI/IAT2013*, pp. 405–410 (2013).

[18] Wolfram, S.: Theory and application of cellular automata, *World. Scientific, Singapore* (1986).

ⓒ 2014 Information Processing Society of Japan