

人工社会システムを適用した部分情報共有とローカル通信に基づくカーナビ開発



谷本 潤 (Jun Tanimoto, Dr. Eng.)

九州大学 総合理工学研究院 環境理工学部門 教授
(Professor, Kyushu University, Faculty of Engineering Sciences)

受賞: Best Paper Award at IEEE/CEC (2009年), 日本建築学会 学会賞
(論文) (2006年), 日本建築学会 奨励賞 (1998年), 空気調和衛生
工学会 学会賞 (学術論文) (1995年) 他

著書: Sociophysics Approach to Epidemics, Springer (2021年),
Evolutionary Games with Sociophysics: Analysis of Traffic Flow
and Epidemics, Springer (2019年), Fundamentals of
Evolutionary Game Theory and its Applications, Springer (2015
年) 他

研究専門分野: 社会物理学, 進化ゲーム理論, 都市環境工学

あらまし

実在都市に近い、すなわち経路選択組み合わせがきわめて莫大となる交通網を前提に、地図情報すなわち地理上最短経路情報だけ付与するカーナビシステム (CNS)、時間距離最短経路情報を教示する CNS、(3) 同戦略車両の目的地、現在地情報を互いにグローバルに共有して、その情報に基づき将来混雑情報を予測し、フィードバックする CNS、(4) 目的地に向かって先行する直近先行車両から数えて有限数の車両とだけローカルな情報共有を行って、その情報に基づき将来混雑情報を予測し、フィードバックする CNS の優劣特性を詳細に比較したところ、部分情報共有する(4)が系内の渋滞による旅行時間期待値の悪化を防ぐ上で最も優れていることが明らかとなった。以上により、ITS にサポートされたローカル通信にサポートされた、中央サーバーでの情報処理を要請せずローカルに共有した情報で個別分散的予測プロトコルに基づき最適経路選択するカーナビゲーション戦略が社会ジレンマ制を緩和し、社会全体の効率性を高めうることが実証的に示された。

1. 研究の目的および背景

現代社会において道路交通システムは、産業・生活の重要な基盤である。そのため、自動車による円滑な都市内交通システムの構築は「都市再生」上も重要な政策課題といえる。

しかし、道路ネットワークとその経路上の移動を試みる自動車エージェントとのアンバランスにより引き起こされる「渋滞」は単に都市内の移動効率を低減させるだけでなく、排ガス、排熱による汚染物拡散を通じて都市環境にも影響を付与し、定常的あるいは定期的に発生する渋滞は災害時の緊急輸送上の障害となる可能性があり、都市防災の観点からもきわめて重大な問題であると思われる。そのために、渋滞の発生を押さえることは社会的に重要な課題といえる。

これらの様々な問題を最先端の情報通信や制御の技術、つまり「情報化」と「知能化」により抜本的に解決する施策として、ITS (Intelligent Transport Systems) が提案されている。これは、最先端の情報通信技術を用いて、人と道路と車両とを情報でネットワークし、交通事故、渋滞などといった道路交通問題の解決を目指したインフラを意味する。

この提案の柱の一つに道路交通情報通信システム VICS (Vehicle Information and Communication System) を用いた混雑緩和があげられている。VICS とは警察が収集した一般路の情報と道路公団が収集した高速道路の情報を FM 多重放送、電波ビーコン、光ビーコン、無線通信により発信し、個々の車両のカーナビゲーションシステムがそれらの情報を受信、目的地までの経路選択に利用するというシステムである。

しかしこのカーナビゲーションシステムは、個人の効用の最大化のみを目指しており、社会全体の混雑緩和にはつながらないとの指摘がある。

具体的には、次のような現象が起これば考えられている。まず、現在の渋滞情報を元に各個のカーナビゲーションシステムでは最短経路を提示する。しかし、画一的な渋滞情報を元に経路を探索するため、同じような経路を多数のカーナビゲーションシステムが選択してしまい、混雑が発生してしまう ([1] - [4])。また混雑が起きていない経路をカーナビゲーションシス

人工社会システムを適用した部分情報共有とローカル通信に基づくカーナビ開発

テムが選択したとしても、その経路を通るまでに時間のずれがあるため、経路決定後に混雑が発生してしまうことも考えられる。このように画一的な情報を元に多数のエージェントが行動した場合、予期せぬ混雑が発生するという現象は、遊園地などの巨大集客施設における誘導モデルなどでも観察されている[5]。

このような現象が発生する要因は、集団において共有される情報が、或る限られた資源への集中を促すものであることだと考えられる。この場合、ある行動を行う（ある経路を選択する）ことのメリットが、集団内で同様にそれを行う個体の割合に対し、負の依存関係にあると見なすことができる。このような状況では、いかにして集団内の行動の多様性を適度に維持するかが全体の効用が維持されるための鍵であり、カーナビゲーションシステムの例は、情報共有によって行動の多様性が過度に減少してしまうケースであると考えられる。系に生じる多様性の適応性やその起源・維持のメカニズムは、複雑系科学における主要な研究テーマの一つとして議論されてきた。

社会的集団における、有限の資源をめぐる複数のエージェント間の競争に関しては、El farol bar 問題[6]やMinority game[7]をはじめとする一般的資源割り当て問題として様々な領域で議論されている。

Minority game とは、複数のエージェントによって構成される集団において、各エージェントがステップごとに、同時に2つの選択肢のうちどちらかを選択し、選択者数が少ない方を選択したエージェントが勝者となる繰り返しゲームである。2つの選択肢は、例えば、裏道を使う・使わない、株取引における売り・買いといった、二者択一の状況において少数派を選択した方が有利になる状況が当てはまる。

供示情報を制御することでMinority gameにより社会ジレンマを排除すれば、カーナビゲーションシステムの高度情報化により、社会全体の効用を高めることは可能となる。が、そのカーナビゲーションシステムを採用した個々の車両の効用がその他の車両の効用より劣ってしまう事態が生じるならば、社会的浸透性、すなわち普及のインセンティブの点では疑問が残る。社会効用を高めつつ、既往のカーナビゲーションシステムより優越なシステム（すなわち経路選択戦略）は

構築し得ないのであろうか？

本研究は、カーナビゲーションシステムの経路選択戦略によって引き起こされる渋滞のメカニズムについて考察し、車両個々の効率を向上させ、かつシステム全体の効率を向上させる経路選択戦略を考案することを目的としている。

2. 研究方法

2.1 シミュレーションモデル

本研究における交通流動シミュレーションでは、スケールの異なるミクロ的な経路選択とマクロ的な現象である交通渋滞とを同時に扱う。時間および空間はマルチエージェントに基づく離散型モデル、速度については最適速度模型 (Optimal Velocity Model, OV モデル[8]) に基づく連続型モデルで扱う。また、信号 (赤信号による停止)、交差点での右折車待ち、交差点以外でのUターン、追い越しといった要素は考慮しない。

2.1.1 街路モデル

交通網は道路を表すリンクと交差点を表すノードで構成されている (図1参照)。各リンクは車両が流れる方向が決まっており、ノード間は上りと下りの2つのリンクによって接続される。

リンクはいくつかのメッシュに区切られており、一つ一つの区画をブロックと呼ぶ。各ブロックの長さ L は一定で、後述する理想速度で単位時間ステップ間に車両が進む距離に設定する。

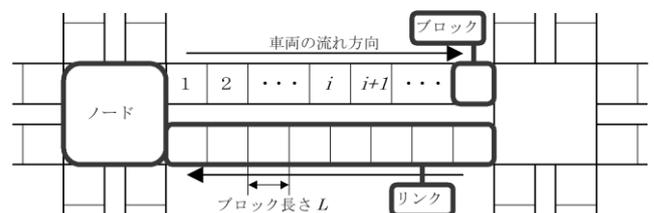


図1 道路モデルの模式図

2.1.2 車両エージェント

ブロックごとに定義される交通流特性に基づいて、ある時刻の車両密度から各車両エージェントの速度を求めて、単位時間ステップ間に走行する距離だけリンク下流側から順次移動させていく。各時間ステップにおける系内の車両エージェントの更新順序はランダム

人工社会システムを適用した部分情報共有とローカル通信に基づくカーナビ開発

とする。

車両エージェント i の走行速度は現在車両が滞留しているブロックの車両密度をもとにして設定される。ブロックの車両密度は次の式で表される。

$$D_i = \frac{N_i}{N_{jam}} \quad (1)$$

ただし、 N_i [台]：ブロックの車両数、 N_{jam} [台]：一車線当たりの飽和車両数。

山下らは[1]、この車両速度に Greenshields のモデル[9]を用いて、式(2)のような線形関数を仮定している。

$$V_i = \begin{cases} V_{ideal}(1-D_i) & \text{if } V_{min} < V_{ideal}(1-D_i) \\ V_{min} & \text{if } V_{min} \geq V_{ideal}(1-D_i) \end{cases} \quad (2)$$

ただし、 V_{ideal} [m/s]：理想速度、 V_{min} [m/s]：最低速度。 V_{min} の意味するところは、実際には渋滞が発生していたとしても、車はわずかながら前進するため、車両速度は最低速度以下にはならないというものである。図2に(2)式の車両密度と流量の関係を示す。流量は低密度領域にピークを持つ分布になり、(2)式のモデルではその特性を模擬し得ない。そこで本研究では、0Vモデル[9]の一樣流解を速度式として用いる。

$$V(N_i) = \frac{V_{ideal}}{2} \left[\tanh m \left(\frac{1}{N_i} - d \right) - \tanh m(l_c - d) \right] \quad (3)$$

$$V_i = \begin{cases} V(N_i) & \text{if } V_{min} < V(N_i) \\ V_{min} & \text{if } V_{min} \geq V(N_i) \end{cases}$$

ただし、 l_c ：車両長さ、 d ：0V関数の変曲点、 m ：変曲点での傾き。 $l_c=5$ [m]、 $d=25$ 、 $m=0.2$ を仮定した特性曲線を図2に示した。以下、本論モデルではこのパラメータ設定を適用する。

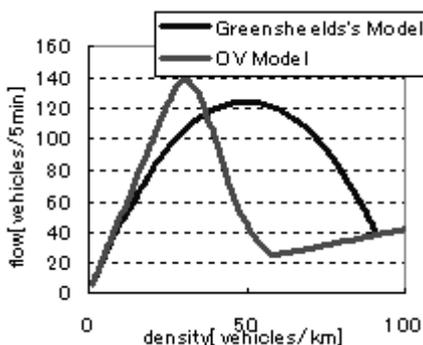


図2 (2)式と(3)式による密度-流量関係

車両エージェントのブロックからブロックへの移動は次のような手順で行われる。

まず、ステップの最初に一定の行動時間 INT が各車両エージェントに割り当てられる。現在のブロックにおいて、 $V_i \times INT$ が1ブロックの長さより大きく、かつ次のブロックの密度が飽和状態にない、つまりブロックの密度が1以下の場合、次のブロックに進むことができる。次のブロックに進んだ場合、1ブロック進むのに必要な時間を INT から引いた時間が次のブロックにおける行動時間となる。これを INT が0になるまで繰り返す。なお、ブロックの途中で INT が0になった場合、それまで移動した距離は次のステップに引き継がれる。

2.1.3 車両エージェントのナビゲーション戦略

各車両エージェントは経路選択戦略を有する。本研究では以下の戦略を想定した。

最短距離経路戦略 Shortest Distance (SD) 戦略

この戦略を採るドライバーは、目的地までの経路でもっとも経路長が短くなる経路を選ぶ。プログラム上では経路間の重み I_{ij} にノード間の距離をとり、A*アルゴリズム^{注1)}により最短距離経路を算出する。なお、各経路が等距離の場合は、距離が等しい経路からランダムで最短経路を選択する。

混雑経路記憶型最短距離経路戦略 Shortest Distance and Congestion Memorize (SD-CM) 戦略

この戦略をとるドライバーは記憶サイズ M のメモリを持つ。最初のトリップの間、通過したリンクの中で車両密度が上位 M 個のリンクとそのリンクの車両密度を記憶する。次回のトリップでは、記憶したリンクを通らないという条件で最短距離となる経路を選択し、記憶したそれぞれのリンクの車両密度にある一定の忘却率 τ ($0 \leq \tau \leq 1$) を掛ける。そのトリップの間に通過したリンクと記憶したリンクの中で車両密度が上位 M 個のリンクを記憶し、これを繰り返す。

SD 戦略(出発地と目的地を決定した時点で利用する経路が決まる)は一般の地図を持ったドライバー(あるいは地図機能提示型カーナビゲーションシステム)を仮定しているが、実際のドライバーは単純に最短経路を通るわけではなく、ある程度混雑を予測して、それを回避しようとすると考えられる。主にその混雑予想は過去の経験によるものと考えられるので、SD-CM 戦略は、より実際のドライバーの経路選択に近いもの

人工社会システムを適用した部分情報共有とローカル通信に基づくカーナビ開発

になると思われる。

最短時間経路戦略 Shortest Time (ST) 戦略

この戦略をとるドライバーは、各経路の渋滞情報を元に目的地に到達するまでの時間が最短になるような経路を選択する。そのためにはプログラム上では、経路間の重み I_{ij} に予想所要時間をとって、A*アルゴリズムにより最短時間経路を算出する。リンク l に対する予想所要時間は次のようにして算出する。

$$ETT_l = \sum_{i \in B_l} \frac{L}{V_i} \quad (4)$$

ここで、 ETT_l : リンク l を通過する予想所要時間[s]、 L : ブロック長さ[km]、 B_l : リンク l にあるのブロックである。

SD 戦略と異なり ST 戦略では、各車両エージェントは渋滞情報の変化に合わせて、最短時間経路の再計算を行う。再計算を行う頻度を GS [step] (混雑情報の更新を同程度の頻度で行わなければ、経路再計算の意味が無いので、混雑情報の更新頻度も GS とする) とする。ここで、注意しなければならないのは、実際に経路を通る際、道路の混雑状況はリアルタイムで変動するため、常に(4)式の予想所要時間で通行できるとは限らない点である。また、シミュレーションモデル上、車両エージェントが飽和状態のブロックに進入できなくなる状況は考慮されているが、(4)式で定義される予想所要時間には、ブロックが飽和状態になって先のブロックに進めなくなる状況は考慮されていない。

ST 戦略は現在の混雑情報を元にして経路選択を行うことができるため、通常の場合 SD に比べ短時間で目的地に到達できる。現実社会で言えば、VICS を搭載したカーナビゲーションにより経路決定するドライバーを模擬しているといえる。

経路共有型最短時間経路戦略 Shortest Time and Route Information Sharing (ST-RIS) 戦略

この戦略をとるドライバーは各経路の渋滞情報と合わせて、ST-RIS 戦略をとるドライバーの通過予定経路を集積した情報を用いて経路を選択する。

具体的には、次の手順で経路を選択する。まず、ST-RIS 戦略をとるドライバーは ST 戦略の場合と同様に混雑情報を元に目的地までの最短時間経路を算出する。それらの情報を集積し、各リンクにおける通過確信度

PA_i を算出する。まず、出発点から最初に経路選択されたリンクには $PA_0=1$ を割り当て、最短時間経路で想定される通過予定経路上のノードにおいては PA_{i-1} をそのノードにつながっているリンク数 r_i でわって $PA_i = PA_{i-1} / r_i$ を割り当てる。概念的には、 PA_i は現在位置から目的に向かって割り引いたノード通過確率を意味する。こうして車両エージェントごとに各リンクに割り当てられた通過確信度をそれぞれのリンクごとに通過車両エージェントについて合計した値を TPA_i とする (図3)。これを基に、以下により定義する予想所要時間 ETT'_l [s] を経路間の重み I_{ij} にとって、A*アルゴリズムにより最短時間経路を算出する。

$$N_i' = \frac{TPA_i}{L \cdot b_l} \quad (5)$$

$$N_i^* = \min(rs \cdot N_i + (1-rs) \cdot N_i', N_{jam}) \quad (6)$$

$$ETT'_l = \sum_{i \in B_l} \frac{BL}{V_i^*} \quad (7)$$

ここで、 V_i^* : N_i^* を用いて(3)式より求めた速度、 b_l : リンク l のブロック数[Block]である。

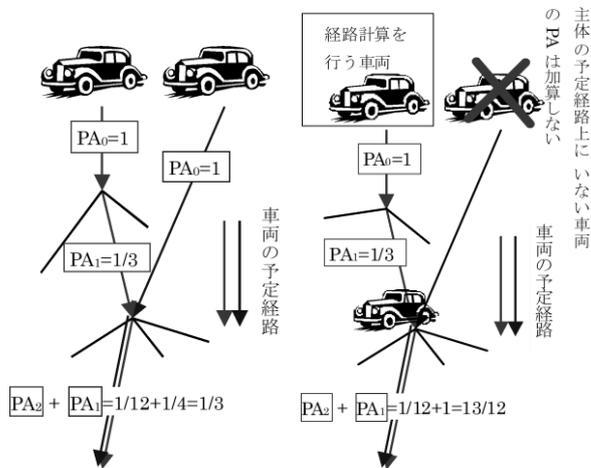


図3 PA算出例

図4 ST-pRISのPA算出例

(6)式の N_i^* は、①現在の渋滞の影響 (得られている渋滞情報から与えられるブロック i の車両台数 N_i [1/s])、②ST-RIS 戦略を共有する車両エージェントにより引き起こされる将来の混雑の影響 (リンク始点を通過する ST-RIS 戦略エージェント数をリンク l 全体に均等分布していると仮定して TPA_l を処理した結果求まる平均台数 N_i [1/s]) の重み平均 (rs がその按分

人工社会システムを適用した部分情報共有とローカル通信に基づくカーナビ開発

比)した予想車両台数[1/s]を意味する。ただし、 TPA_i の定義上、ある車両エージェントについて PA_i のトリップ和を取ると1以上になるので、 N_i 算出に当たっては、車両台数上限が N_{jam} を超えない条件を入れる必要がある。(1- rs): rs はST-RIS戦略による将来影響(ST-RISの現在状況を $PA_0=1$ により含んでいる)と現在混雑の影響の比を意味する。現実社会において rs が常に既知であるとは限らないけれど、数値実験では適当な値を付与するものとする(本研究では $rs=0.5$ とした)。さらに、(5)式ではST-RIS以外の戦略の将来的影響が考慮されていない点を留意する必要がある(つまり(6)式右辺が現在混雑と将来混雑の影響を意味するためにはST-RIS戦略以外の将来混雑何らかの方法で考慮する必要がある)。

経路部分共有型最短時間経路戦略 ST and partial RIS (ST-pRIS) 戦略

情報画一化はカーナビゲーションシステムを介して付与する情報にばらつきを与えることで回避できる。そこで、この戦略では同じST-RIS戦略を取る車両エージェントの情報共有の範囲を制限することで、各個エージェントの持つ情報にばらつきを与える。具体的には、自身が現在保持している予定経路上にいる先行車両の内、前方 N_f 台のST-pRIS車両の将来経路情報(TPA_i)だけを収集し、ST-RISと同様に予想混雑度を計量する(図5)。この戦略は、進行方向後方車両エージェントの情報は無駄情報である可能性が高く(追い越しがないので)、一方、前方車両の情報はこれから自身が通る予定経路に関するものであり有用である可能性が高いことを前提にしている。ただし、現在混雑情報と情報共有車両エージェントの将来混雑情報との按分比 rs は0.8とし、 $N_f=50$ [台]とした。

2.2 各戦略の効率評価

異なる移動距離の車両エージェントの移動効率を評価するために、(8)式で定義される旅行時間効率を考える。

$$TTE = \frac{TT}{V_{ideal} \times Sd} - 1 \quad (8)$$

ここで、 TTE :旅行時間効率、 TT :初期位置から目的地間の移動(トリップ)所要時間[s]、 Sd :トリップ最短

距離[km]とする。 TTE は各車両エージェントのトリップ毎に定義され、この値をさらに同じ戦略をとる全てのエージェントで平均した値を $ATTE_k$ ($k \in$ 全戦略)と定義し、各戦略の評価パラメータとする。これが0に近い程、理想的な経路を通ったことになる。

2.3 シミュレーションの流れ

シミュレーションの大まかな流れは次の通りである。

まず、戦略毎の初期台数比に応じて、車両エージェントを発生させる。車両エージェントはエピソード当初、各ノードにランダムに配置され、目的地もランダムに決定される。各エージェントは、出発地・目的地決定→移動→目的地到着(1トリップ)を1エピソードが終わるまで繰り返す。トリップ毎に次出発地、目的地はランダムに定める。また、GSステップ毎に各戦略が経路選択に用いる情報を更新する。1エピソード終了した時点で、各戦略の $ATTE$ を算出する。解析は5試行アンサンブルの評価とする。

社会システムの時間推移において、各戦略のシェアがどう変容していくか(シェア増減の推移)を考えるために、進化ゲーム理論で一般的なレプリケータ・ダイナミクス¹³⁾を導入する。レプリケータ・ダイナミクスとは、“その時点の期待利得に比して高利得(高適合度)の戦略ほど次世代で殖え、その増減変化率は平均利得との差分に比例する”というアイデアを微分方程式に表したもので、本モデルに当てはめると、戦略シェアの時間変化は(9)式となる。

$$St_k|_{new} = St_k - \frac{ATTE_k}{\sum_{k \in \text{全戦略}} ATTE_k} \quad (9)$$

ただし、 St_k :現在の戦略 k の戦略比、 $St_k|_{new}$:次世代における戦略 k の戦略比。(9)式により求まる St_k は後述のベクトル図のデータを供する。

2.4 数値実験条件

シミュレーションのパラメータは、表1のように設定した。

人工社会システムを適用した部分情報共有とローカル通信に基づくカーナビ開発

表 1 シミュレーションのパラメータ設定

パラメータ	変数名	設定値
総車両数	N_{car}	5000 [vehicles]
理想速度	V_{ideal}	60 [km/h]
最低速度	V_{min}	5 [km/h]
ブロック長さ	BL	60 [m]
1 車線の飽和車両数	N_{jam}	6 [vehicles/block]
最短経路の再計算と混雑情報の更新頻度	GS	10、1 [step]
1 ステップ当たりの時間	INT	0.0001 [h/step]
1 世代のステップ数		10000 [step]

シミュレーションでは街路形状として図 5 に示す 9×9 の歪格子モデルを用いた。図 5 の街路形状の中央が歪んでいるのは、完全正角格子の場合、同一距離の最短経路が多数発生するため、ランダムな経路選択が行われる状況が頻出するからである。

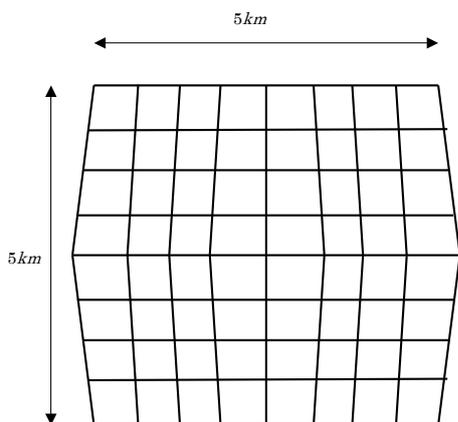


図 5 街路形状

数値実験では、現在の社会に新型カーナビが導入される状況を想定し、3 つの戦略シェアを 10%ずつ変化させ、そのシェアにおける各戦略の増減と社会全体効用を観る。まず、SD-CM (カーナビ非搭載) と ST (カーナビ搭載) と ST-RIS の組み合わせで、 GS を変化 (すなわち最短経路の再計算と渋滞情報の更新頻度を変えた) させた実験を行った (Case1, Case2)。Case2 では Case1 ($GS=10$) に対して経路再計算 (情報更新) を高頻度 ($GS=1$; 毎ステップ更新) の設定とする。次に、Case3 では ST-RIS に変わって ST-pRIS を導入した場合、社会のシェア構成にどのような変化が見られるか

を検討した ($GS=10$)。

3. 結果および考察

Case1 : SD-CM, ST, ST-RIS の組み合わせ

ST-RIS が混入しない場合 (ST-RIS のシェアはゼロ) における、SD-CM 対 ST の対戦結果を図 6 に示す。横軸は初期に SD-CM 戦略が全車両数 5000 台中に占める数、縦軸はそのときの SD-CM および ST 戦略の $ATTE$ である。SD-CM、ST とともに、自戦略比が小さいときに相手戦略より高利得 ($ATTE$ が小さい) になっており、所謂、マイノリティゲームの様相を示している。最短距離経路を譲る (自分の最短距離経路と他車両のそれとが重なる場合にはそのことにより生じる渋滞を避ける) ST を SD-CM に対する協調戦略と見るならば、このゲーム構造は Chicken 型ジレンマを有するゲームと云うことも出来る (自戦略比が低いと他戦略を食うことが出来るが、高くなると出来なくなる。最悪は自他共に裏切り戦略を採ること)。この様相は他戦略間の組み合わせにおいても観察された。Chicken ゲームで云う内部均衡点は、SD が 1300 台 (図 6 中①のライン) の付近であり、図 6 からわかるように社会全体効用最大点とは一致しない (一般に Chicken ゲームでは内部均衡点と社会利得最大点とは一致しない)。

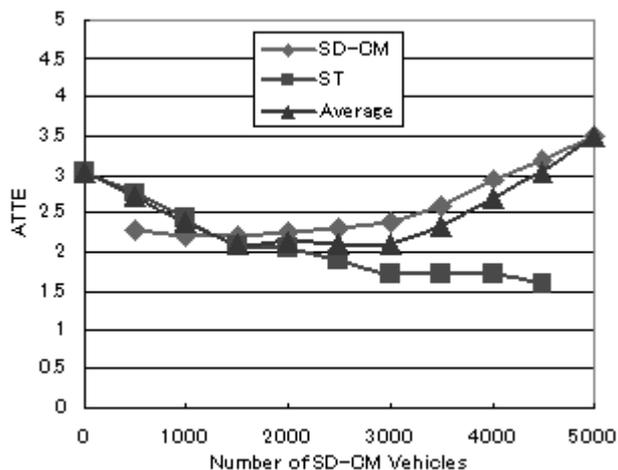


図 6 Case1 における SD-CM と ST の $ATTE$

図 7 に SD、ST と ST-RIS の対戦組み合わせにおける戦略分布の変化ベクトルと社会全体効用を重ね併せた

人工社会システムを適用した部分情報共有とローカル通信に基づくカーナビ開発

結果を示す。図の横軸、縦軸はSD-CM、STのシェアを示し、総台数5000から両シェアを差し引いた第3戦略（すなわちST-RIS）のシェアは図中右上から左下へ-45deg線に沿った軸で表され、原点は第3戦略が5000台を意味する。コンターは白ほどATTEの値が低い（すなわち社会全体効用は高い）ことを意味する。図7の-45deg線上の断面図が図6に相当する。図7より、戦略比は最終的には前述したSTとST-RISの内部均衡点（図中②）に吸引されることがわかる。つまり、SD-CMはST-RISが存在しない社会（情報共有型カーナビゲーションシステム導入前の時代）においては、図6で示した内部均衡点①（図7の①）に吸引され、SD-CMとSTの安定な併存状況が実現する。しかし、ST-RISが少しでも混入すると、最終的には淘汰され、STとST-RISの併存平衡（図7の内部均衡点②）となる。Case2、Case3でも同様に、第3の戦略が混入すると、SD-CMは淘汰されている。

社会効用最大点（図中③）と内部均衡点（図中②）はほぼ一致している。

Case2 : SD-CM、ST、ST-RISの組み合わせで最短経路の再計算と渋滞情報の更新頻度が頻繁な場合

結果を図8に示す。更新頻度がより頻繁になると、最終的な均衡点（図中④）では、ST-RISに対するST戦略の占める割合がCase1より大きくなる。更新により情報の確度が増進すると、ST-RISと同戦略エージェントの将来予測をする意義が逡減し、相対的には現在の混雑状況だけで経路選択をするSTが強くなることを意味する。このことは、Case1ではST-RISが混入しなければ、SD-CMとSTとの併存平衡があり得たのに、Case2ではST-RISの存否に不拘、SD-CMが淘汰されてしまうことから理解される。また、Case1と比較すると社会効用最大点（図中⑤）と内部均衡点（図中④）の乖離が大きくなる（ある種の社会ジレンマが深甚になる状況）。

Case3 SD-CM、ST、ST-pRISの組み合わせ

対戦結果を図9に示す。第3の戦略であるST-pRISが混入するとSD-CMが淘汰される状況は前二者と同様である。また、STとST-pRISの内部均衡点（最終的な内部均衡点、図中⑥）は、前二者と異なりSTが少ない側に大きくシフトしている。さらに、社会効用最大点（図

中⑦）も内部均衡点（図中⑥）の近傍に存在し、ATTEの絶対値も前二者に比べて小さい（効用大）。つまり、最終的なシェアの推移は第3の戦略であるST-pRISがSTに対して優勢な状況に落ち着き、かつ前二者の第3戦略の場合よりも社会全体の効用は向上している。

ST-pRIS戦略では、部分情報共有により、STと異なる経路を通るため、STエージェントが多数派を占めることによって引き起こされる情報の画一化による渋滞を回避している。このことにより、STより低いATTEを上げることが出来ていると考えられる。

Case1の結果より、現在の社会、“現在普及途上にあるカーナビゲーションシステム（ST）は存在するが、情報共有型のカーナビゲーションシステム（ST-RIS）は存在しない状況（SD-CM戦略とST戦略のみの社会）”では、ST戦略のシェアはある均衡点までしか伸長できないことがわかる。これは、ST戦略がある程度多くなると、ST戦略は画一的な渋滞情報を元に経路を探索するため、同じような経路を多数のカーナビゲーションシステムが選択してしまい、混雑が発生する状況が再現されていることを示している。

しかし、これにST-RIS戦略が混入すると、様相は一変し、SD-CM戦略は最終的には淘汰されてしまう。つまり、将来、VICS搭載型カーナビゲーションシステムのシェアの伸長が停滞したとしても、情報共有型のカーナビゲーションシステム（ST-RIS）を導入することにより、カーナビゲーションシステム全体としては、VICS搭載車両のシェアを伸ばすことができると考えられる。

しかし、図7の社会全体効用に注目し、SD-CM戦略とST戦略の内部均衡点（図6、図7の①）における社会全体効用と最終的な内部均衡点（図7の②）におけるそれを比較すると、やや後者が大であるが大きな差異はない。このことから、情報共有型カーナビゲーションシステム導入による社会全体としてみた便益は必ずしも著しく増大するわけではないことを示唆している。

また、Case2の結果より、渋滞情報の更新頻度が頻繁になると、ST戦略が比較優勢な戦略になることがわかる。現在のVICS情報はリアルタイムの情報とはい

人工社会システムを適用した部分情報共有とローカル通信に基づくカーナビ開発

えない。しかし、今後、技術が進歩し、渋滞情報がリアルタイムに受け取れるようになれば、情報共有機能のない VICS 搭載型カーナビゲーションシステム (ST) で混雑を解消することが可能であり、情報共有型のカーナビゲーションシステム (ST-RIS) が導入される余地は無くなると考えられる。

ST-pRIS の導入は、独占には至らないが、シェアを 8 割近くにまで伸ばすことができ、それが社会全体効用の向上にも繋がっている。これは、部分情報の共有が、個別情報に基づく経路選択を促し、予定経路上の近傍先行車両に関する情報のみを参照するため、時間遅れの影響が少なく、不必要な情報を排除して経路探索を行うため、より確度の高い情報による効率的経路選択が可能になったためと考えられる。

また、この戦略は現実社会に対するアプリケーションとしても実現可能性がある。

ST-RIS は情報を一極集中的に管理するため、大量の経路情報と渋滞情報を重ね合わせて予測渋滞情報を計算する巨大なコンピュータリソースが必要であると考えられる。これによる情報処理時間が VICS 情報のフレッシュネス (更新頻度による情報の質) に重畳された時間遅れを系に惹起するため、さらなる情報画一化をもたらし、効率的な経路探索が出来なくなる可能性がある。

ST-pRIS の場合、ローカルな情報のみを要するから渋滞情報の処理は各車両個々のカーナビゲーション機器に任せた個別分散処理が可能となる。これを裏付ける組込型コンピュータの性能は年々向上している。また、現在 ITS の重要なプロジェクトとして車両間のアドホックな通信システムの構築¹⁴⁾が考えられている。これはサーバーとの通信圏外にいるときも通信を可能にするため、他の車両を中継ポイントとするローカル通信のネットワーク機構である。この技術を用いれば、近隣車両の経路情報の取得は可能であろう。既にこの通信ネットワークを用いて、渋滞情報を交換するシステムが実験されている^{注 1)}。これらの点から、ST-pRIS カーナビゲーションシステムは十分実現可能性が高いと思われる。ただし、情報共有型カーナビゲーションには、個人情報の扱いやフリーライダー問題など実用化にはクリアすべき課題もある。

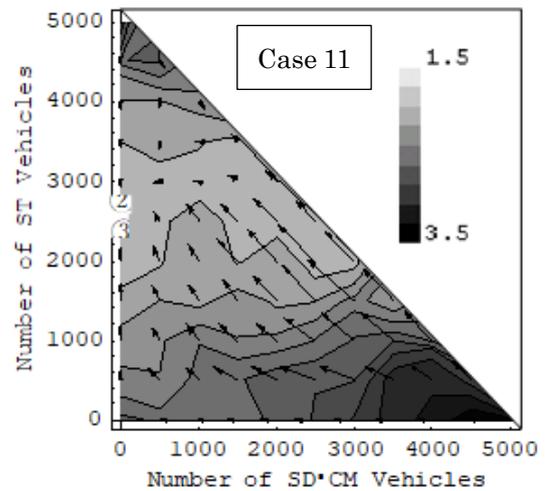


図 7 SD-CM, ST, ST-RIS の戦略組

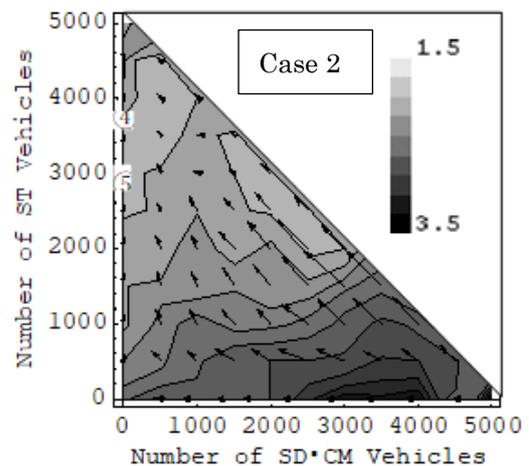


図 8 SD-CM, ST, ST-RIS の戦略組 (更新頻度大)

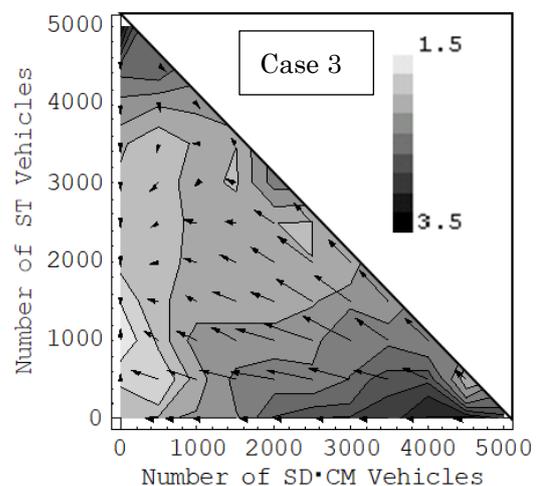


図 9 SD-CM, ST, ST-pRIS の戦略組

人工社会システムを適用した部分情報共有とローカル通信に基づくカーナビ開発

4. 結論

カーナビゲーションシステムの経路選択戦略によって引き起こされる渋滞のメカニズムについて考察し、車両個々および社会全体の効用を向上させる経路選択戦略を提示した。

- (1) マクロな交通流動とミクロな現象である経路選択を同時に取り扱うマルチエージェントシミュレーションモデルと構成した。
- (2) このシミュレーションモデルを適用して経路部分共有型最短時間経路戦略 (ST-pRIS) の特性を解析し、この戦略が既存のカーナビゲーションシステムや系全体で情報を共有する戦略と異なり、社会全体の効用を下げることなく、個人効用を高めうることを示した。

おわりに

今後の課題としては、これらの戦略の道路形状依存性やマップ上の車両数の多寡、つまり平均車両密度が各戦略の有効性に及ぼす影響を検討する必要があると思われる。

注 1)

最も基本的な経路探索アルゴリズムとして、ダイクストラ法が挙げられる。しかし、経路探索を行う際、全方向に探索の手を伸ばしてしまうため、非効率である。そこで、探索の手を伸ばすかどうかを決定する値に残り距離を考慮すれば、目的方向への探索を行うことが出来る。このようなアルゴリズムを一般に A*アルゴリズムと呼ぶ。

参考文献

- [1] 山下倫央、和泉潔、車谷浩一、“交通流における経路情報の共有に基づいた経路選択の効果の検証”、知能と複雑系研究会、pp. 71-76, (2004, 3)
- [2] H. S. Mahmassani, R. Jayakrishnan, "System Performance and User Response under Real-Time Information in a Congested Traffic Corridor", Transportation Research 25A(5) (1991) 293-307
- [3] T. Yoshii, H. Akahane, M. Kuwahara, "Impacts of the Accuracy of Traffic Information in Dynamic

Route Guidance Systems", The 3rd Annual World Congress on Intelligent Transport Systems, Orlando, CD-ROM, 1996

- [4] 三好博昭, "ITS の外部性と最適普及水準 -VICS の社会的便益と最適普及水準の計測", ITEC Research Paper Series 04-11(2004, 12)
- [5] H. Kawamura, K. Kurumatani, A. Ohuchi, "Modeling of Theme Park Problem with Multiagent for Mass User Support", In Working Note of The International Joint Conference of Artificial Intelligence 2003, Workshop on Multiagent for Mass User Support I-7 (2003)
- [6] W. B. Arthur, "Inductive reasoning and bounded rationality", American Economic Association Papers Proceedings, vol. 84, no. 2, pp. 406-411 (1994)
- [7] Challet, D, Zhang, Y. C., "Emergence of Cooperation and Organization in an Evolutionary Game", Physica A, vol. 246, pp. 407-418 (1997)
- [8] I. Tanahashi, H. Kitaoka, M. Baba, H. Mori, S. Terada, E. Teramoto, "NETSTREAM, a Traffic Simulator for Large-scale Road Networks", R & D Review of Toyota CRDL, 37(2) 47-53 (2003)
- [9] 杉山雄規, "交通流の物理", ながれ, 22, pp. 95-108 (2003) MS 明朝 10/Century10

この研究は、平成 29 年度 S C A T 研究助成の対象として採用され、平成 30 ~ 令和元年度に実施されたものです。