

情報共有型カーナビゲーションによる都市内交通渋滞の 緩和プロトコル開発

Development of a novel protocol for Car Navigation System helping mitigation of
urban traffic jams by sharing information

2041019



研究代表者

九州大学大学院

教授

谷 本

潤

[研究の目的]

道路交通情報通信システムに対応した次世代カーナビゲーションシステム（CNS）では、道路の混雑情報を無線通信等により発信し、個々の車両のCNS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システムである。しかし、このシステムでは、個々の車両エージェントの効用最大化（旅行時間最小化）が目的関数にされるため、都市交通システム全体としてみると、必ずしも混雑緩和に繋がらない可能性がある。これは道路という有限の資源を「意志」を有する人間エージェントが奪い合うことで社会ジレンマが発生するためである。本研究ではこのメカニズムを機構的理解に理解し、ジレンマを克服する頑強なCNSプロトコルを開発する。

[研究の内容・成果]

本節で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。

数値実験モデル

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モデル（Optimal Velocity Model, OV モデル）に基づく連続型モデルで扱う。

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。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。

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とする。

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。

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 l_{ij} にノード間の距離をとり、 A^* アルゴリズムにより最短距離経路を算出する。

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 l_{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。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。

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だけを収集し、ST-RIS と同様に予想混雑度を計量する。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、一方、前方車両の情報はこれから自身を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。

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、旅行時間効率を考える。

数値実験では、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、各戦略の旅行時間効率の全エージェント平均 *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・ダイナミクスを導入する。

結果及び考察

Case1：図1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。戦略比は最終的には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、内部均衡点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（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。

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を図2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

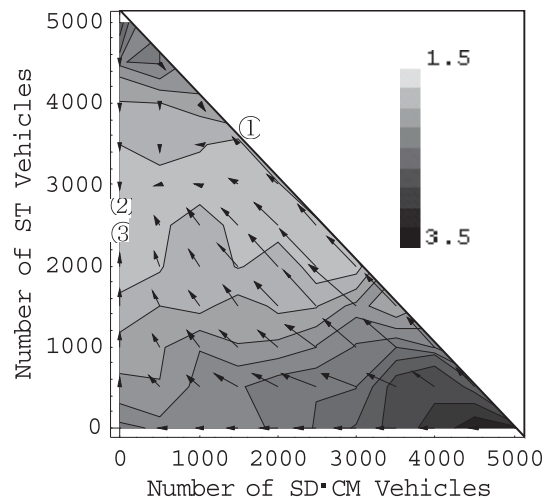


図1 SD-CM, ST, ST-RISの戦略組 (Case1)

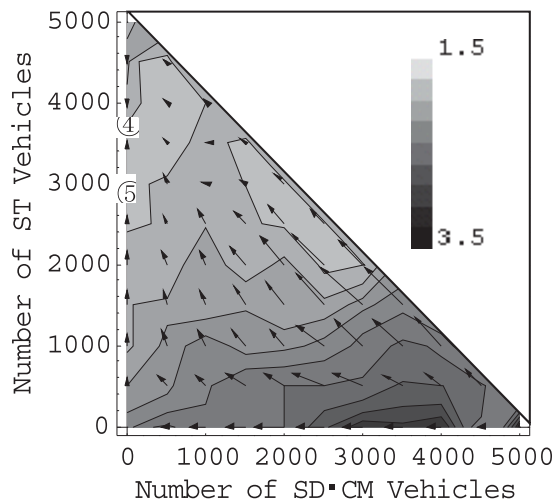


図2 SD-CM, ST, ST-RISの戦略組 (更新頻度大) (Case2)

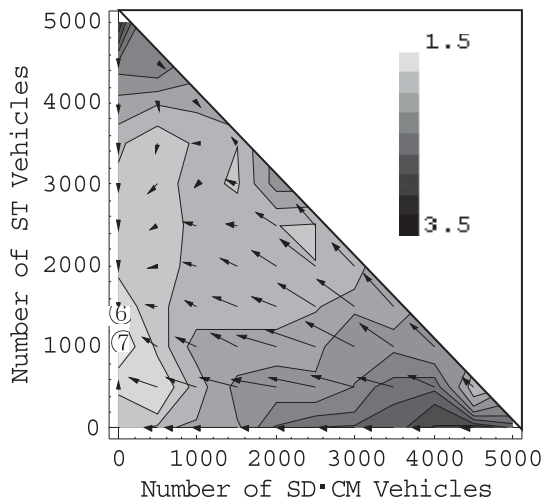


図3 SD-CM, ST, ST-pRISの戦略組 (Case3)

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の組み合わせの結果を図3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2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1、図2の①）における社会全体効用と最終的な内部均衡点（図2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-pRIS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。

[今後の研究の方向・課題]

応用面々から云えば、本論で明らかになったプロトコルのフィージビリティを担保するローカル通信機構を含めハードウェアの開発が課題である。また、研究面では、交通流動がもたらす社会ジレンマ機構には未だ未解明の部分が多く、統計物理学的にも興味のある課題であるため、この点の研究展開が望まれる。

[成果の発表・論文等]

- Tanimoto, J.; Impact of deterministic and stochastic updates on network reciprocity in prisoner's dilemma game, *Physical Review E* 890, 022105, 2014. 8.
- Tanimoto, J.; Dynamics of spatial traveler's dilemma games, *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, P11010, 2014.
- Tanimoto, J, Fujiki, T., Wang, Z., Hagishima, A., Ikegaya, N.; Dangerous drivers foster social dilemma structures hidden behind a traffic flow with lane changes, *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, P11027, 2014.