

マルチエージェント・シミュレーションを用いた コネクテッドカー普及による渋滞緩和に関する初歩的実験

井上 寛規¹ 平松 燈² 加藤 康彦³

An Experiment of Traffic Congestion Mitigation By the Diffusion of Connected Cars Using Multi-Agent Simulation

Hiroki INOUE, Tomoru HIRAMATSU & Yasuhiko KATO

Abstract

Under the catchphrase “Society 5.0,” Japan aims to realize a new society that solves economic and social problems by integrating cyber and physical spaces using Information and Communication Technology (ICT) and the Internet of Things (IoT). With this background, the development and introduction of Intelligent Transport Systems (ITS) are contributing greatly to the realization of “smart cities” that combine convenience, safety, and economy, one of the Sustainable Development Goals (SDGs).

In this study, we performed a preliminary experiment to obtain insights into the impact of the diffusion of connected cars, which can share traffic information immediately and locally, to reduce traffic congestion in urban areas. The results show that it is not always the case that the higher the diffusion rate of connected cars in society, the more traffic congestion is reduced and also imply that there is an appropriate diffusion rate.

KEY WORDS: Multi-Agent Simulation, Society 5.0, ITS, SDGs, Traffic Congestion Mitigation, Smart Car

概要

現在、日本は、“Society 5.0”をキャッチフレーズとして、情報空間と現実空間をICT（情報通信技術、Information and Communication Technology）とIoT（もののインターネット、

1 久留米大学経済学部（Faculty of Economics, Kurume University）

2 関西学院大学総合政策学部（School of Policy Studies, Kwansei Gakuin University）

3 熊本学園大学経済学部（Faculty of Economics, Kumamoto Gakuen University）

Internet of Things) を利用して融合することで、経済・社会的問題の解決をする未来創造型社会の実現を目指している。このような背景のもと、SDGs (持続可能な開発目標, The Sustainable Development Goals) の1つでもある利便性・安全性・経済性を兼ね備えた“スマート都市”の実現に、ITS (高度道路交通システム, Intelligent Transport System) の開発および導入が大きく貢献している。

そこで本研究では、都市部における交通渋滞が経済活動や環境に悪影響を及ぼしていることを憂慮して、即時・局所的に交通情報を共有できるコネクテッドカーの普及が渋滞緩和に与える影響に関する知見を得るために、初歩的なコンピュータ・シミュレーション実験を試みた。その結果、コネクテッドカーの社会における普及割合が高いほど渋滞が緩和されるのではなく、適切な導入率（普及率）があることが示唆された。

キーワード：

マルチエージェント・シミュレーション, Society 5.0, ITS, SDGs, 交通渋滞緩和, コネクテッドカー

1. はじめに

近年、ITS (高度道路交通システム, Intelligent Transport System) は、日本国家の重点政策の1つとして推進され、2030年を目標に「世界一安全で円滑な道路交通社会」の構築を目指している^{1), 2)}。ITSは、最先端のICT (情報通信技術, Information and Communication Technology) を活用し、人・道路・自動車の間で情報の送受信を行い、交通事故や交通渋滞を減少させるだけに留まらず、交通渋滞の減少がCO₂^{3), 4)} やNO_x⁵⁾ の削減に貢献することで環境保全の一助にもなっている。さらに、物流や人の移動を円滑にすることで経済の活性化に寄与するシステムとしても期待されている。またITSは、Society 5.0^{6), 7)} が目指す未来創造型社会の重要な構成要素の1つであり、SDGs (持続可能な開発目標, The Sustainable Development Goals) の1つである“スマート都市の実現”に大きな役割を担っている。

本研究では、カーナビシステムを通じてITSの要素技術であるVICS (道路交通情報通信システム, Vehicle Information and Communication System) から発信される交通情報を赤外線技術を応用して、走行中に車路間で双方向通信を行うことが可能な光ビーコンやFM多重放送で受信できる自動車と、車両間でWi-Fiなどの無線通信により即時・局所的に交通情報の共有もできる自動車 (以下、本研究ではコネクテッドカーと呼ぶ) の2種類の自動車がどのような割合の時に交通渋滞の緩和を最適化するのかを、初歩的なコンピュータ・シミュレーションにより明らかにする。

本研究の構成は以下のとおりである。第2節でマルチエージェント・シミュレーションにおける自動車エージェントの行動ルールを定義する。第3節でシミュレーションの設定を説明し、第4節でシミュレーションの結果から導き出されるコネクテッドカー普及による渋滞緩和の効果を考察する。最後に、第5節で結論と今後の課題について述べて、それを本研究のむすびとする。

2. マルチエージェント・シミュレーションモデル

ここではマルチエージェント・シミュレーションモデルにおける自動車エージェントの行動について述べる。マルチエージェント・シミュレーションは、意思決定主体であるエージェントを多数用意し、その相互作用によって引き起こされる現象を再現する事が可能なため、しばしば交通現象の分析に適用される。交通現象の分析用のツールとしては、MATSim⁸⁾などが知られている。本研究では、渋滞緩和に対するコネクテッドカー普及の効果を検証するため、Artisoc⁹⁾を使って、実際の地図上ではなく仮想の道路ネットワーク上でのシミュレーションを行う。

2.1. 自動車エージェントの走行ルール

時点 t における自動車エージェントは、前方の車との距離 d_t 、現在速度 v_t 、加速度 a 、最高速度 v_{\max} をパラメータとして持ち、前方の自動車に衝突しないように走行する (Fig. 1)。現在速度での走行距離に加速による走行距離の増加分を加味したとき、前方の車との距離が安全な車間距離 (最低車間距離 d_{\min})を下回るようであれば、最低車間距離 d_{\min} を確保するように次期の走行距離 Δd_t を調整する。これを「ブレーキをかけて減速する」と表現する。現在速度 v_t を単位時間 Δt (1 Step)あたりの位置の変化量、加速度 a を単位時間 Δt (1 Step)あたりの速度の変化量とすると、ブレーキをかける条件は、「 $v_t\Delta t + \frac{1}{2}a\Delta t^2 + d_{\min} > d_t$ 」となる。もし、「 $v_t\Delta t + \frac{1}{2}a\Delta t^2$ 」が最高速度 v_{\max} での走行距離を超える場合には、「 $v_{\max}\Delta t + d_{\min} > d_t$ 」がブレーキをかける条件となる。

よって、時点 t から時点 $t+1$ における自動車エージェントの走行距離 Δd_t は次式で求められる。

$$\Delta d_t = \begin{cases} d_t - d_{\min} & \text{if } \min\left\{v_t\Delta t + \frac{1}{2}a\Delta t^2, v_{\max}\Delta t\right\} + d_{\min} > d_t \\ v_t\Delta t + \frac{1}{2}a\Delta t^2 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

なお、コンピュータ・シミュレーションを行う際の単位時間 Δt を1とする。

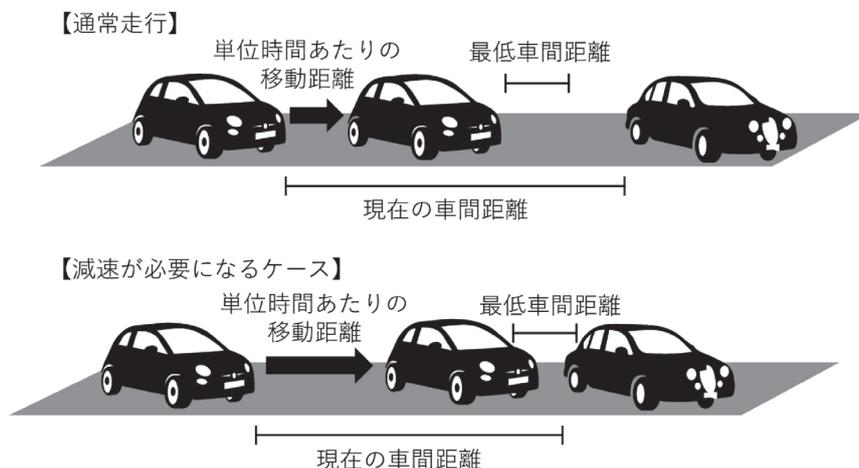


Fig. 1. 自動車エージェントの走行イメージ

2.2. 自動車エージェントの種類

自動車エージェントは出発地から目的地まで所要時間が最小となるようルート選択を行う。自動車エージェントには従来車とコネクテッドカーの2種が存在するものとし、その種類によって利用できる交通情報が異なる (Table 1)。

Table 1. 自動車の種類と利用可能な交通情報

種別	基準所要時間	トラフィック カウンターの情報	コネクテッド カー間の情報
従来車	○	○	×
コネクテッドカー	○	○	○

a) 従来車

自動車エージェントは、その種類に関わらず、任意の地点から目的地までの最短所要時間 (基準所要時間) の情報を所持している。また、道路の各所に設置された車両感知器や光ビーコン (以下、本研究ではこれらの機器をトラフィックカウンターと総称する) で集められた道路交通情報 (模擬的な VICS 情報) を入手することができる。

道路交通情報 (VICS 情報) とは、道路上に設置された車両感知器や光ビーコンで収集された情報を、VICS センターで統合したものである。従って、従来車も、各所のトラフィックカウンターで集められた情報を統合した道路交通情報を利用できるものとした。(Fig. 2)



Fig. 2. 道路交通情報 (VICS 情報) の収集と共有

b) コネクテッドカー

コネクテッドカーは、従来車が得られる情報に加えて、コネクテッドカー間でローカル通信して得られた情報を利用できる。コネクテッドカー間で共有される情報は、現在の道路の

渋滞状況である。具体的には、通行中の道路の入口から現在位置までにかかった時間を他のコネクテッドカーから受信し、その道路を通過するのにかかる予想時間を計算して利用する (Fig. 3)。

ただし、コネクテッドカー間で通信ができるのは、無線通信が可能な短い距離に限られるものとする。通信範囲に同じ道路を通行中の複数のコネクテッドカーが存在すれば、その情報を平均化して用いる。

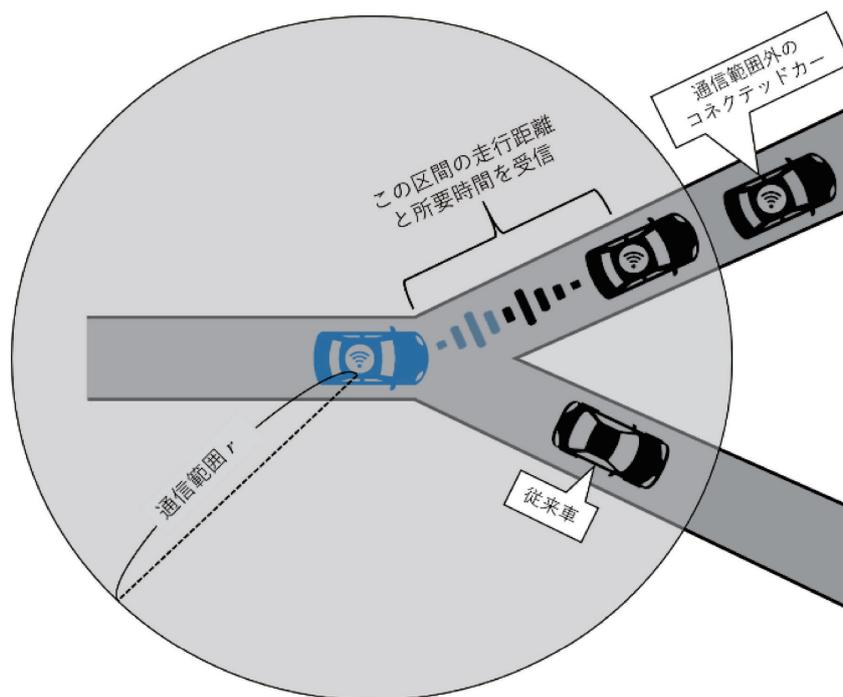


Fig. 3. コネクテッドカーの情報共有

3. シミュレーション設定

3.1. マップ

シミュレーションに使うマップは、中央を河川で分断された格子型の道路網とする (Fig. 4)。道路の各所にトラフィックカウンターが設置されており、周辺の自動車の現在速度を計測する。目的地はマップ右下の1箇所とし、すべての自動車エージェントがその一点に向かって移動する。

自動車エージェントは橋と目的地以外の全てのポイントからステップ毎に発生する。また、渋滞緩和の評価にあたり、左上のブロックから生成された自動車エージェントをサンプルデータとして用いた。

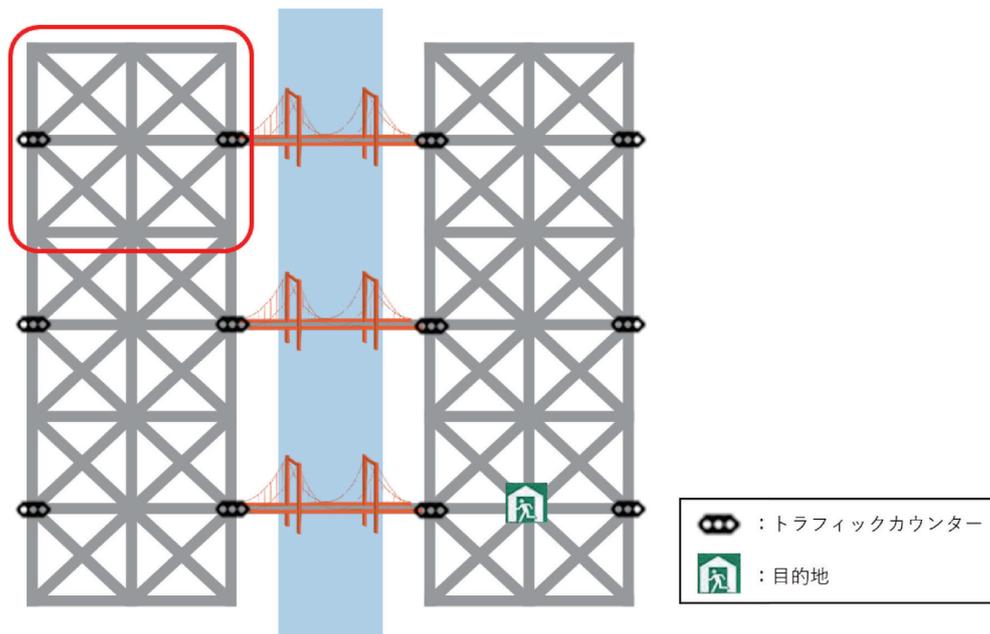


Fig. 4. マップ

3.2. パラメータ

コネクテッドカーの情報共有範囲を25 (約2ブロック)、トラフィックカウンターの情報共有範囲を1とする。データの記録開始は100ステップ経過後とし、Fig.4の赤枠内からの100台の自動車の目的地到着をシミュレーションの終了条件とする。ただし、複数の自動車が同時に到着することがあるため、終了時の到着台数がちょうど100台になるとは限らない。

自動車エージェントの走行に関するパラメータは、最高速度 $v_{\max} = 1$ 、加速度 $a = 0.334$ 、最低車間距離 $d_{\min} = 1$ とする。

4. シミュレーション結果

シミュレーションではコネクテッドカーの普及率（生成割合）を0%から100%まで10%ずつ変化させて、その影響を検証する。

Fig.5はシミュレーターの画面である。■のエージェントが従来車、●のエージェントがコネクテッドカーを表している。低速走行時には、エージェント色は赤く表示される。

従来車が最短経路で渋滞に巻き込まれているのに対し、コネクテッドカーが迂回路を利用している様子がわかる。コネクテッドカーが交通情報を共有して、渋滞を避けている。

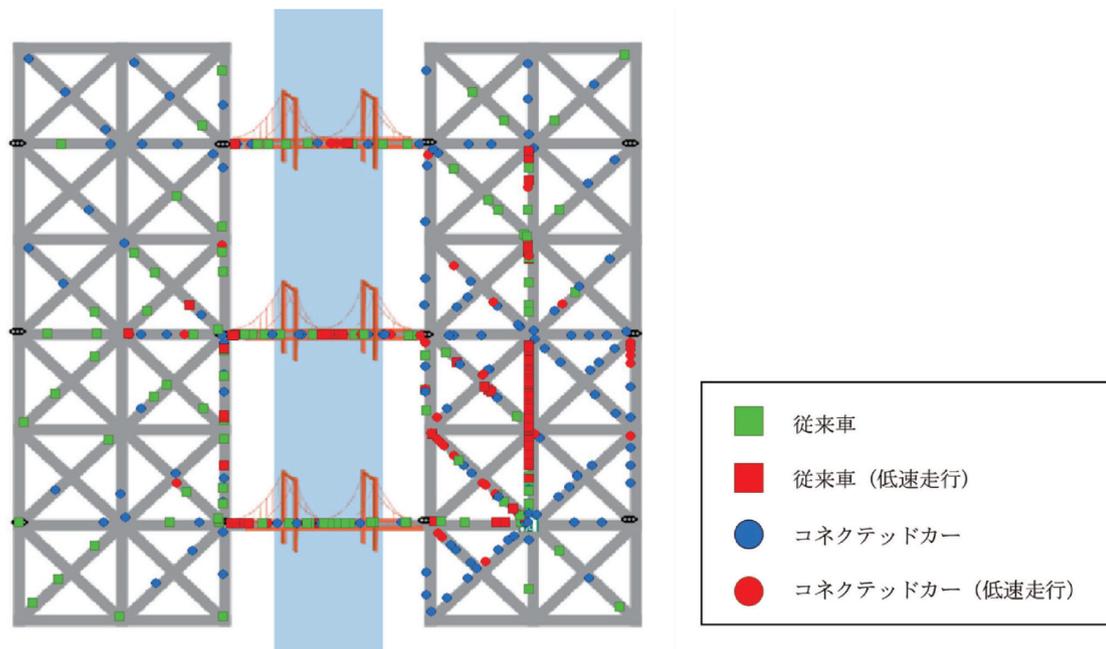


Fig. 5. シミュレーション画面

4.1. 損失時間

まず、渋滞による損失時間を用いてコネクテッドカー普及による渋滞緩和効果を確認する。任意の地点 x から目的地までの自動車エージェントの損失時間 l_x は、実際にかかった所要時間 t_x から基準所要時間 s_x を引いたものとして計算する¹¹⁾。

$$l_x = t_x - s_x \quad (2)$$

基準所要時間 s_x はマップ上を1台の自動車エージェントに走らせることで予め測定している。これは、渋滞が無く最短経路を利用したときの最短所要時間である。

Table 2は、コネクテッドカーの普及率と渋滞緩和効果の関係を示しており、コネクテッドカーの普及率が0%から100%まで10%ずつ変化させたときの、コネクテッドカーの平均損失時間、従来者の平均損失時間などを表している。これらの値は、それぞれシミュレーション実験を10回おこなった平均値を示している。

シミュレーション終了までの所要時間（ステップ数）と平均損失時間は、コネクテッドカーの普及率が90%付近で最小となる。適度にコネクテッドカーが普及すると、渋滞による損失時間を減らせることがわかる。

しかし、コネクテッドカーが多すぎると逆効果となり、所要時間や損失時間が増えることになる。これは、多くのコネクテッドカーが迂回路を同時に選択した結果、迂回路側で渋滞が発生した結果だと考えられる。

コネクテッドカーの普及率が低い水準であるほど、コネクテッドカーの平均損失時間は小さくなる傾向から、コネクテッドカーが従来車よりも優位であることがわかる。ただし、コネクテッドカーの普及率が低すぎると、情報共有機能が活かせないため、コネクテッドカーの優位性が発揮されない。

さらに、コネクテッドカーの普及率と（コネクテッドカーの到着台数） / （全自動車台数）の比較からも、後者が前者を上回っているのと同じことが言える。コネクテッドカーの普及率が低い水準でのコネクテッドカーの優位性は、従来車が渋滞に巻き込まれている間に、混雑していない迂回路を使い目的地に到着することができたからである。

Table 2. コネクテッドカーの普及率と平均損失時間

コネクテッドカーの普及率	所要時間 (Steps)	コネクテッドカーの到着台数	従来車の到着台数	コネクテッドカーの平均損失時間	従来車の平均損失時間	平均損失時間
0%	200.80	- (-)	100.1 (100%)	-	98.851	98.851
10%	198.30	12.3 (12%)	88.2 (88%)	76.893	97.534	94.921
20%	191.40	29.3 (29%)	71.1 (71%)	73.092	96.828	89.876
30%	184.70	33.7 (34%)	66.8 (66%)	81.503	88.636	85.965
40%	181.70	47.2 (47%)	53.6 (53%)	77.585	90.397	84.212
50%	178.10	57.5 (57%)	42.9 (43%)	78.653	89.421	82.982
60%	177.20	65.3 (65%)	35 (35%)	82.666	85.875	83.678
70%	176.10	69 (69%)	31.3 (31%)	83.285	81.431	82.651
80%	173.80	79.4 (79%)	21.7 (21%)	85.597	77.931	84.031
90%	174.20	88.8 (89%)	11.3 (11%)	83.687	69.527	82.122
100%	180.30	100 (100%)	- (-)	86.515	-	86.515

4.2. 渋滞状況

次に、渋滞状況を指標としてコネクテッドカーの普及による渋滞緩和効果を評価する。渋滞の定義は各道路の特性やその道路の管理者によって異なるが、警察庁では一般道において20km/h以下を混雑、10km/h以下を渋滞と定めている¹²⁾。本研究では、渋滞状況の指標を最高速度の1/3以下の車の台数とする。自動車エージェントの最高速度60km/hを1に標準化すれば、シミュレーションにおける現在速度が1/3以下のとき20km/h以下で走行していることを意味する。

Table 3は、コネクテッドカーの普及率と渋滞指標の関係を示しており、コネクテッドカーの普及率を0%から100%まで10%ずつ変化させたときの、20km/h未満の車の台数、1Stepあたりの20km/h未満の車の台数などについて表している。これらの値は、それぞれシミュレーション実験を10回おこなった平均値である。

渋滞状況の指標をみると、コネクテッドカーの普及率が80%程度で最も渋滞が解消されている。この時、自動車エージェントが最短経路と迂回路に、社会的に最適な比率に配分された結果として、渋滞に巻き込まれる自動車の台数が最小となっている。

また、コネクテッドカーの普及率が低い間は、コネクテッドカーは空いている迂回路を走ることができ、走行速度が速くなる。そのため、低速走行している自動車の多くが従来車となっている。一方で、コネクテッドカーの普及率が高くなると、低速走行しているコネクテッドカーの比率とその生成割合（普及率）がほぼ等しくなり、迂回路と最短経路共に渋滞が発生していることがわかる。他のコネクテッドカーも迂回路を走行するため、渋滞が発生するが、低速走行している自動車の台数自体は減少しているため、全体としては渋滞が緩和されている。

これらのシミュレーション実験の結果から、社会的に望ましいコネクテッドカーの普及率の付近では、費用対効果を考慮すると、コネクテッドカーに買い替えることで受けられる恩恵の見込みはほとんどない。現実の社会での個人の選択行動においても、他者がコネクテッドカーに買い替えるのを待ち、自分自身は従来車に乗り続ける可能性が高いと考えられる。すなわち、従来車を利用している者はコネクテッドカーの普及による渋滞緩和の効果にフリーライドするインセンティブが高まるために、従来車を利用し続ける可能性が高くなる。これらのことから判断すると、社会的に最適なコネクテッドカーの普及率は自然達成されないと考えられる。そこで、コネクテッドカーの利用に対する補助金や従来車の利用に対する課税など、コネクテッドカーの普及率を最適水準に導く政策が必要となる。

Table 3. コネクテッドカーの普及率と渋滞

コネクテッドカーの普及率	所要時間 (Steps)	20km/h未満の車の台数	1Stepあたりの20km/h未満の車の台数	20km/h未満のコネクテッドカーの台数	1Stepあたりの20km/h未満のコネクテッドカーの台数	20km/h未満の従来車の台数	1Stepあたりの20km/h未満の従来車の台数
0%	200.80	55679	277.3	-	-	55679	277 (100%)
10%	198.30	50236	253.3	2110	10.6 (4%)	48126	243 (96%)
20%	191.40	42931	224.0	4008	21 (9%)	38923	203 (91%)
30%	184.70	37383	202.4	5997	32.5 (16%)	31385	170 (84%)
40%	181.70	32126	176.8	7580	41.7 (24%)	24546	135 (76%)
50%	178.10	28658	160.9	10186	57.2 (36%)	18473	104 (64%)
60%	177.20	26743	150.9	13204	74.5 (49%)	13539	76 (51%)
70%	176.10	24734	140.4	15373	87.2 (62%)	9361	53 (38%)
80%	173.80	22690	130.5	17951	103.3 (79%)	4740	27 (21%)
90%	174.20	22893	131.4	20880	119.8 (91%)	2012	12 (9%)
100%	180.30	25416	141.0	25416	141 (100%)	-	-

5. おわりに

本研究では、コネクテッドカー間の情報共有システムが交通渋滞に与える影響をコンピュータ・シミュレーションによって検証した。その結果、コネクテッドカーの普及率が高いほど交通渋滞が緩和されるとは限らず、80%付近に適切な普及率があることが示唆された。その理由として、情報を共有するコネクテッドカーが増加しすぎると、その情報により行動を変えるコネクテッドカーが多くなるため、共有された情報による予測と実現する状況に乖離が生じてしまうことが考えられる。また、渋滞の解消を期待したはずが、情報を共有するコネクテッドカーが多すぎる場合には、逆に損失時間の増加や渋滞の悪化を招くパラドックスに陥る可能性も実験結果から推察された。

そこで今後の研究では、普及率80%付近を詳細分析することで、適切な普及率を明らかにする。次に、本シミュレーション実験ではコネクテッドカーが無線通信を利用して、ある一定範囲の自動車間でしか情報共有ができないという制限があったが、障害物がある環境でも、広範囲の交通情報の共有ができるように、一定範囲内の複数の自動車間でマルチホップ無線通信技術を利用してアドホックネットワークを分散協調的に形成する機能（アルゴリズム）をコネクテッドカーに組み込む (Fig.6)。さらに、減災や渋滞緩和を目的としたときの、自動車密度に対する最適な自動車間の通信距離 r (Fig.6) をシミュレーション実験により明らかにする。また、マシーンラーニングを用いて、コネクテッドカーのルート選択をより

知的なものにする。これらの結果を実際の大阪などの沿岸部のデータを用いて検証する。

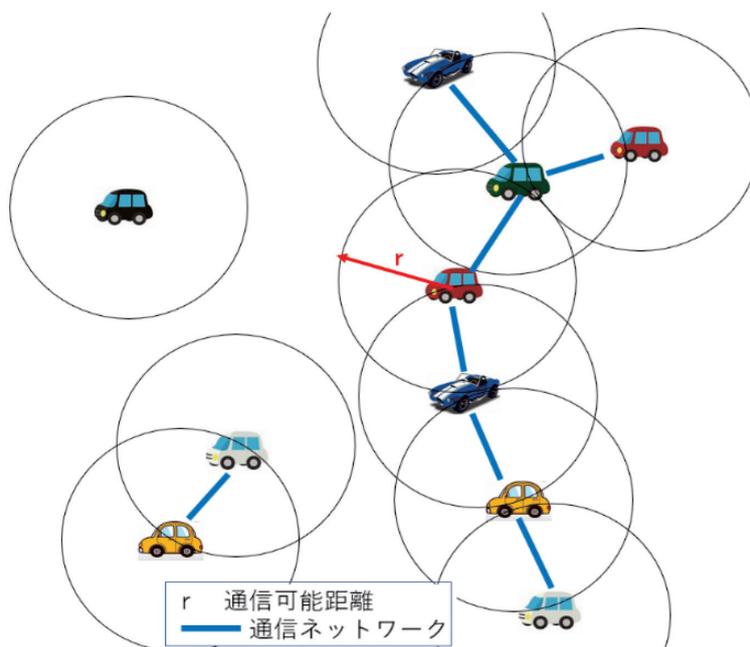


Fig. 6. アドホックネットワークのイメージ

謝辞

本研究は科学研究費補助金（21K01515、代表：平松燈）の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 首相官邸 高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部：「官民 ITS 構想・ロードマップ 2015」(2015.6) https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/iinkai/jidousoukou_14/shiryo14-2-2-1.pdf (2022年9月10日最終アクセス)
- 2) 国土交通省：「ITS 全体構想」 <https://www.mlit.go.jp/road/ITS/j-html/5Ministries/> (2022年9月10日最終アクセス)
- 3) 総務省：「資料9 ITSによるCO2排出削減量の試算」, 『情報通信による地球環境保全のための政策提言(答申)』 <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h11/press/japanese/tsusin/0601j2s9.htm> (2022年9月20日最終アクセス)
- 4) 大口敬・片倉正彦・谷口正明：「都市部道路交通における自動車の二酸化炭素排出量推定モデル」, 『土木学会論文集』, No.695/IV-54, pp.125-136 (2002)

- 5) 国土交通省：「自動車排出ガス対策（NO_x, PM）」
https://www.mlit.go.jp/kisha/oldmot/kisha00/21koutu/kankyous7_htm（2022年9月20日最終アクセス）
- 6) 文部科学省：「令和3年版 科学技術・イノベーション白書 Society 5.0の実現に向けて」
https://www.mext.go.jp/b_menu/hakusho/html/hpaa202101/1421221_00023.html（2022年9月10日最終アクセス）
- 7) 内閣府：「科学技術基本計画及び科学技術・イノベーション基本計画 第5期科学技術基本計画（平成28～平成32年度）」
<https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/index.html>（2022年9月10日最終アクセス）
- 8) MATSim Community：“MATSim” <https://www.matsim.org/>（2022年9月20日最終アクセス）
- 9) 山影進：『人工社会構築指南（シリーズ人工社会の可能性1）』，書籍工房早山（2008）
- 10) VICS：「FM多重放送とビーコン」
<https://www.vics.or.jp/know/structure/beacon.html>（2022年9月20日最終アクセス）
- 11) 国土交通省：「渋滞損失時間の算出方法」
<https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-data/pdf/traffic-loss-time.pdf>（2022年9月20日最終アクセス）
- 12) 警察庁：「国家公安委員会告示第12号」
<https://www.npa.go.jp/bureau/traffic/seibi2/shinsei-todokede/jouhou/guideline.pdf>（2022年9月20日最終アクセス）

An Experiment of Traffic Congestion Mitigation By the Diffusion of Connected Cars Using Multi-Agent Simulation

Hiroki INOUE, Tomoru HIRAMATSU & Yasuhiko KATO

Abstract

Under the catchphrase “Society 5.0,” Japan aims to realize a new society that solves economic and social problems by integrating cyber and physical spaces using Information and Communication Technology (ICT) and the Internet of Things (IoT). With this background, the development and introduction of Intelligent Transport Systems (ITS) are contributing greatly to the realization of “smart cities” that combine convenience, safety, and economy, one of the Sustainable Development Goals (SDGs).

In this study, we performed a preliminary experiment to obtain insights into the impact of the diffusion of connected cars, which can share traffic information immediately and locally, to reduce traffic congestion in urban areas. The results show that it is not always the case that the higher the diffusion rate of connected cars in society, the more traffic congestion is reduced and also imply that there is an appropriate diffusion rate.

KEY WORDS: Multi-Agent Simulation, Society 5.0, ITS, SDGs, Traffic Congestion Mitigation,
Smart Car