

車車間通信を用いた車線変更と脇道にともなう交通流の円滑化を図るモデルの提案と実装

高砂 智紀^{†1,*1} 高橋 和子^{†1}

本研究は、幹線道路の交通状況において、車線変更を行う情報と脇道から幹線へ進入する情報を、その影響を受ける車が事前に共有することにより交通流の円滑化を図るものである。安全な走行はもちろんのこと車線変更、幹線進入時に全体の交通流をスムーズなものにするべく、方向指示器による車線変更の意思表示をする以前に、車線変更や幹線進入に関する情報を隣接する車線にいる車に受け渡し、意志疎通による協調を可能にしたモデルを提案する。交通シミュレータを実装して試行を行った結果、車線変更、脇道から幹線への進入に関する双方の通信をとまなうモデルが有効であるということが分かり、提案手法によって交通流の円滑化が図れることが示された。

Modeling and Simulation of the Traffic Flow with Lane Changing and Sudden Arrival/Exit of Vehicles Based on Inter-vehicle Communications

TOMOKI TAKASAGO^{†1,*1} and KAZUKO TAKAHASHI^{†1}

This paper describes the modeling and simulation of the traffic flow with lane changing and sudden arrival/exit of vehicles based on inter-vehicle communications. We construct a simple traffic model in which some vehicles change lanes. We propose a new method for a vehicle to change lanes in which it tells the neighboring vehicles its intention beforehand, shares information with them, and determines the lane change time in cooperation with the other vehicles. We extend this model so that we can treat that sudden arrival and exit of vehicles in the midst of traffic. The result of simulating these models showed that early communication of intentions is effective in avoiding traffic jams and supporting smooth transportation.

1. はじめに

交通渋滞が発生する主な原因として、上り坂や合流部での速度低下、料金所での対応待ちなどがあげられている。そのほかにも、自動車が車線変更を行う際、急な割込みが後続車の徐行を引き起こし、交通流の滞りの原因の1つとなると考えられる。従来、交通シミュレーションに搭載する車線変更のモデル化については研究されてきたが^{(1),(2)}、それらは安全性の重視や、現実の交通状況にいかにも近づけるかが主な目的だった。また、車線変更を行う車どうしが隣接する場合に、どちらが優先して変更するのかを判断するのに必要な時間がタイムラグとして発生するのだが、このモデルについても考えられていない。

ITS (高度道路交通システム, Intelligent Transport Systems) の分野では、交通シミュレータを使い、車車間で通信ができる機能が搭載されている車の走行についての研究が注目されている^{(2),(3)}。このような研究の多くは、事故を起こさずいかに安全に走行できるかを目的とし、協調や相互作用などの手法についてはあまり明らかにされていない。人工知能 (AI) の分野でも車をエージェントと見立てたいくつかの交通モデルが提案されているが、車線変更を考慮した研究は少ない。Ehlert らは車をエージェントと環境との通信機能を持たせてはいるが、車車間の通信は考えていない⁽⁴⁾。Dresner らも車と交差点をエージェントとし、双方が通信機能を持つ交通モデルを提案している⁽⁵⁾。Nagel らは交通流のセルオートマトンモデルを提案した⁽⁶⁾。それ以後、車線変更を含む交通流のセルオートマトンに基づいたモデル化については多くの研究がなされている^{(7),(8)}。これらの研究の主な目的はいかに現実の交通流に近づけるかで、協調や相互作用などのモデル化ではなかった。

ミクロな交通モデルとして、運転者の動きをモデル化する研究は過去にも行われている⁽⁹⁾。しかし、これらの研究でモデル化されているのは人間の行動規範であり、単独の車とそれが環境から認知する状況の関係は考えられていても車車間における意思の伝達という観点はない。運転者の意思は、運転する車の示す行動によって他車に示されるものとされており、その行動の理由を伝えるということまでは考慮されていない。しかし、行動の理由まで分からないと、他の車は自分がどのような行動をとるべきか判断に迷う場合も多い。

たとえば、図 1 のような状況で、車 B が車線変更して隣接車線のあいているスペースに

†1 関西学院大学

Kwansei Gakuin University

*1 現在、富士通テン株式会社

Presently with Fujitsu Ten Limitid.

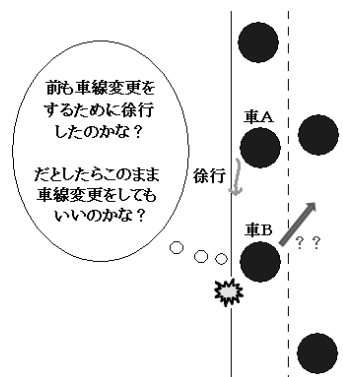


図 1 通信の重要性
Fig. 1 Importance of communication.

入りたいと思っているときに、前を走る車 A が減速したとする。この減速の理由が、車 A の前が混雑してきたからなのか、あるいは車 A も隣接車線のあいているスペースに車線変更したいと思ってその準備として減速したのか車 B には分からない。前者の場合は、車 B は即座に車線変更をすることで、車 A との衝突を回避できるが、後者の場合は、減速して自分の車線変更の機会を待つことになる。車 A の減速の理由によって、車 B のとるべき行動が変わるが、理由が分からない場合は安全策として減速するため、余分な時間がかかってしまう。これは、ある車の行動を引き起こした意図が相手に伝わっていないために交通の円滑性が損なわれることを示す例である。

本研究では、車線変更時に早めの車車間通信をすることによってこの問題を解決する。すなわち、車線変更したいと思っている車は、前もって周囲の車に自分の意図を伝える。それを受けた車は、その目標を達成させるように協力する、というモデルである。

著者らは、安全な走行はもちろんのこと、車線変更と全体の交通流の流れを円滑にするべく、方向指示器による車線変更の意思表示をする以前に、車線変更情報を隣接する車線にいる車に受け渡し、十分な車間距離を提供するモデルを提案し、直進の幹線道路上のシミュレーションによってその有効性を検証した¹⁰⁾。この交通モデルはマルチエージェントシステムに基づいて構成され、車は同一の通信プロトコルを持つエージェントと見なされている。この研究では、実際に車線変更する位置からどのくらい前に通信を行えば効果的かを調べたが、通信のタイミングを変えるだけでは結果にあまり差がでなかった。また、通信の有

効性は認められたものの、車線変更時によりタイミングを見出せない車も少なからず出現した。これらの原因は、車線ごとの交通状況を考慮せずに通信相手を決めていたためである。

そこで、本論文では、通信相手を選択する方法も実際の交通状況を示す公式を用いて正確に決める方法を提案し、シミュレーションによってその有効性を検証する。

また、脇道から出現する車が幹線へ進入する場合でも、脇道から出現する車は幹線へ進入する瞬間に理想的な車間距離を与えなければ急停止を余儀なくされてしまい、幹線を走る車は急に出現した車に対応するために急激な速度低下を強いられたり、自分が走行している車線に来るとは思わずに、すぐには対応しきれない状態に陥ってしまったりすることがある。車線変更同様、脇道から幹線への進入も交通流の滞りの原因の 1 つとなると考えられる。

そこで、脇道のある幹線道路という交通状態で脇道から幹線へと進入する車にも、幹線へと完全に進入するまでの間に幹線道路へ走る車へと通信を行い、十分な車間距離を提供するモデルを提案し、交通流を円滑にできるのかについて考察する。

最終的に、上記双方の交通モデルをコンピュータ上でシミュレーションを行い、今回提案したシステムの妥当性を示す。

また、運転者の心理や個性を考慮することは難しいため、今回はモデル内の車はすべて自動走行であると想定している。

本論文の構成は次のとおりである。2 章は、本シミュレーションで使用した道路と車のモデルについて説明する。3 章は、前章で作成したモデルを用いて、幹線道路モデルで実験を行った結果とその評価について述べる。4 章は、2 章で紹介する基本交通モデルから脇道ありの道路へ拡張したモデルについて述べ、5 章は、4 章で作成したモデルを用いて、脇道に出入りする車を含めた実験を行った結果とその評価について述べる。6 章では、関連研究との比較を行う。最後に 7 章で結論を述べる。

2. 基本交通モデル

本研究では、実世界での車線変更の状況の特徴を把握しながらも、コンピュータ上でも実装可能になるよう簡略化した交通モデルを作成し、シミュレーションを行う。このモデルはマルチエージェントシステムに基づき、車をエージェントと見立て、周囲の状況から自らの行動を判断できる知能と相手を選択して通信を行う機能を持つとする。実装は Java 言語を使用し、アプレットで可視化して動作を確認できるものとする。

2.1 道路モデル

道路は 2 車線で南北方向に伸びているものと考え、交差点間の直進道路として想定し、シ

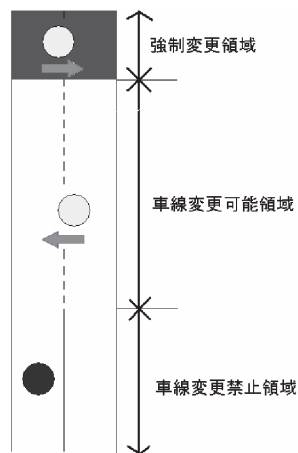


図 2 道路モデルと 3 つの領域
Fig. 2 Road model and its three zones.

ミュレーションの開始も信号が変わった時点で開始したと考える。したがって、赤信号での信号待ちは考えないものとする。さらに、左車線優先、U ターン、追い越しという要素はとりにあらず考えないものとする。この 2 つの車線を各車は直進および車線変更をして移動することとなる。

また、この 2 車線の道路を図 2 のように車線変更禁止領域、車線変更可能領域、強制変更領域の 3 つの領域に分け、すべての車が事故のないよう、通信を用いて目的の車線にたどりつけるようにさせる。

2.1.1 車線変更禁止領域

車線変更禁止領域は道路の始点から一定の長さで設けられている、車線変更ができない領域である。車線変更を要する車はこの領域を走行している間に、通信相手を探し出して車線変更の告知を行えるものとし、通信の結果によって通信をした車、あるいは通信を受けた車が速度を変化をさせることができる。

2.1.2 車線変更可能領域

各車が車線変更禁止領域を抜けた後に、車線変更可能領域が設けられている、車線変更を要する車が車線変更を行って目的の車線に移ることができる領域である。ただし、車線変更をする際には周囲の車との車間距離を見なければならないものとする。

2.1.3 強制変更領域

強制変更領域は道路の最後に一定距離だけ設けられている。車線変更可能領域で車間距離の条件を満たせずに車線変更ができなかった車がこの領域に達したとき、最後に強制的に車線変更を行わせるものとする。すべての車が目的の車線に移動できるための配慮である。

2.2 車モデル

前述の 2 車線の道路モデルに以下の機能を持つ車を走らせる。車はすべて、同じ車長、同じ機能を持つものとする。

2.2.1 所有パラメータ

前述の道路モデルを走る車は、所属車線や進行状況を表す座標、停止・徐行・自由速度（実際の道路条件のもとで、他の交通の影響を受けない状態で運転者が選ぶ速度）・追い越し速度（自由速度より速い速度）の 4 段階の速度、出発前・進行中・車線変更 2 種・到着を表す車の状態、送信・受信・了解を表す通信の状態、そして、出発予定時刻をパラメータとして持つ。また、各車が 1 つの行動を判断、起こすまでの時間を 1 ステップ [step] と定義する。そして、始発車線と目的の車線が異なる場合、車線変更が可能な領域で周囲の状況を判断して最終的に必ず目的の車線に入る動作を行うものとする。

各車の速度は同じ車線にいる車との車間距離や車線変更を要する車との接触の回避を考慮して変化する。車の車間距離は一定値以上の距離を保つものとするが、前の車が停止している場合は、徐行しながら近づいていき、極限まで近づいた後に停止する。先行車との距離が適切である（45 px 以下、35 px より上）のときには自由速度（2.5 px/ステップ）、先行車との距離が十分でない（35 px 以下、5 px より上）のときには徐行速度（1.0 px/ステップ）、さらにそれ以下の距離である（5 px 以下）のときには停止する。また、先行車との距離が空きすぎている場合（45 px より上）は追い越し速度（3.0 px/ステップ）をとるものとする。この追い越し速度で走行ができるための最短車間距離を判定車間距離とよぶ。各車は始発車線と目的の車線を持ち、出発予定時刻を過ぎなおかつ始発車線の一番後ろにいる車との車間距離が十分とれる状態になれば出発する。時刻は離散時間で経過するものとし、各車は 1 ステップ前の状態から判断して走行するものとする。

方向指示器については、「車線変更を行えると判断した直後に点ける」ものと定義する。

2.2.2 車線変更ができる条件

車線変更をしないと目的の車線に到達できない車は、車線変更可能領域で車線変更を試みる。しかし、その際に安全のため周囲の車間距離の条件を満たさないと行動に移れないものとする。以下、車線変更に必要な車間距離の条件を図 3 とともに示す。

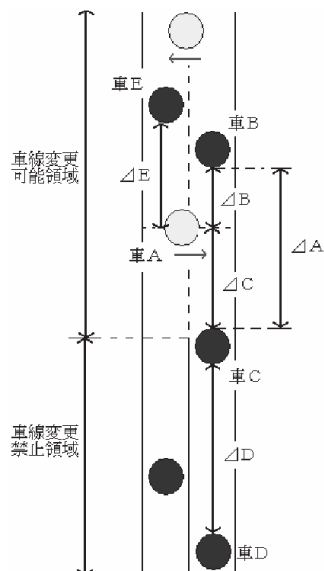


図3 車線変更ができる条件
Fig. 3 Condition of changing lanes.

車線変更をしようと考えている車 A はまず先行している車 E との距離 ΔE を確認する。次に、隣接する車線で直前を走る車 B との距離 ΔB とその直後を走る車 C との距離 ΔC 、それらを合計した ΔA の間隔をそれぞれ確認する。そして次状態で $\Delta A, \Delta B, \Delta C$ がそれぞれ一定値以上の距離を保てれば車線変更を開始する。車線変更可能領域に達しても、 $\Delta A, \Delta B, \Delta C$ がそれぞれ一定値未満の値であった場合、徐行をして変更のタイミングを計るものとする。前隣の車が方向指示器を出したことを確認した車は（車 C を主体と見て、車 A が方向指示器を点けた場合）徐行をして間隔を空け譲歩する状態になるか、接触するのであれば前の車（車 B）との車間距離を確認してから速度を上げ、すみやかに後ろの幅（車 C と車 D の間）に入るように促す。

以上の条件でも車線変更が行えなかった場合、道路の最後の直前で強制的に車線変更を行うものとする。ただし、そのような車が複数台存在する場合、先着した順番で優先して 1 台ずつ変更させる。

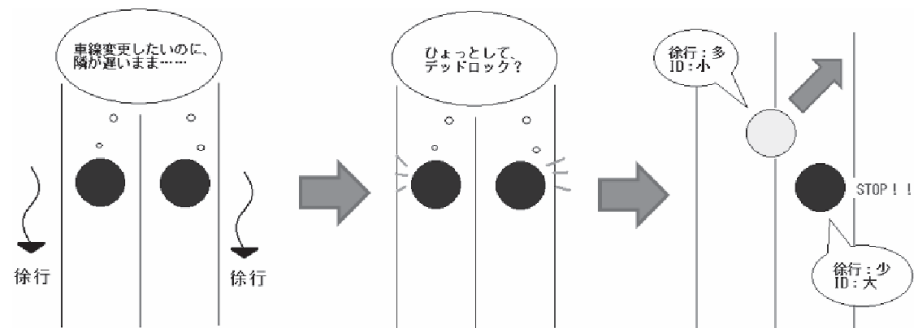


図4 車線変更のデッドロック
Fig. 4 Deadlock of changing lanes.

2.2.3 車線変更のデッドロック

上記の車線変更の条件において、お互いほぼ真隣にいる車どうしが車線変更を行いたい場合、お互いに徐行を始めてタイミングを計ってしまい、罅が明かない状態になる。この状態を車線変更のデッドロックと定義する。

車線変更のデッドロックが発生した場合、後続車への影響が大きいため、一定時間後もまだ互いに徐行しているのであれば図4のように両車が気づくものとし、デッドロックを解消する。デッドロックを解消する方法として、徐行していた時間が長いほうを優先し、さらにそれが同時であるのであれば各車に割り振ってある ID ナンバが若い方を優先して車線変更を行うようにする。

2.3 通信プロトコル

車線変更を要する車は、車線変更可能領域に達したときに、速やかに目的の車線に移ることを理想とする。自車、後続車、ともにタイミングを計るように停車や徐行をすることなく、円滑に車線変更をさせたい。そのため、各車には車線変更に関する通信機能を搭載するものとし、車線変更禁止領域の中間で通信を行って相手の速度変化を促すものとする。車線変更可能領域に達したときには周囲の車間距離が十分であり、車線変更を行いたい車どうしが互いに並走しないよう、相手の車線変更の意志を通信によって知り、双方の車が接近しないことでデッドロックをあらかじめ排除させ、速やかに車線変更ができる環境を用意させる。

2.3.1 通信相手の選択法

車線変更を要する車は、まず速度変化を要求する車を選択しなければならない。幹線を走

行しているとき、どの車の間に入るのが妥当かを予測し、その前後の車に対して自分がその間に入ることを告げて速度を変えてもらい、スペースをあけてもらう。

まず、車線変更禁止領域の中間に達した時点で、自車の南北方向の一定距離以内にいて、隣接する車線にいる車を通信相手とする。この方法を基本通信相手選択法とする。

しかし、この基本通信相手選択法では左右の車線での交通状況の偏りの影響を受け、車線変更禁止領域で並走していた車が車線変更可能領域の始点に着いたときでも並走しているとは限らない。そこで、左右の交通状況を考慮した正確な通信相手の別の選択法、応用通信相手選択法を提案する。この選択法は、交通工学の理論に基づいている¹¹⁾。

応用通信相手選択法は、それぞれの車線の現在の交通状況より交通密度を計測し、そこから平均速度を求め、この状況のまま走行すると車線変更可能領域に突入した直後に近隣にいる可能性が高い車を割り出す方法である。交通密度とは、「ある瞬間における道路の単位区間に存在する車の台数」のことを指し、通常 [台/km] の単位で表される。

車線変更をしたい車 C のいる車線を走る車の平均速度 v が判明したとする。 C のいる位置が C_y 、通信が終わったときにいる地点から車線変更可能領域までの距離を CP とすると、 C が車線変更可能領域に達するまでの期待時間 t は

$$t = \frac{CP - C_y}{v}$$

で求めることができる。隣接する車線でも同様に交通密度を計測し、そこから平均速度 v' を算出する。そして上記で求めた期待時間 t を用いると、 C の理想の通信相手がいる座標 C'_y は

$$C'_y = CP + v' \times t$$

となる。この C'_y から一定誤差以内にいる車を通信相手とする選択法を応用通信相手選択法とする。

2.3.2 時間オキュパンシ

交通密度 k を実際に計測することはそれほど容易ではないため、代わりに交通密度に類似した尺度であるオキュパンシ (occupancy) を計測する。

時間オキュパンシ (O_t) は「ある道路断面において自動車占有した時間の計測時間に対する百分率」として表され、次式によって与えられる。

$$O_t = \frac{1}{T} \sum_i t_i \times 100[\%]$$

ここで、 T は計測時間、 t_i は車両 i が計測時間内で感知された時間である。

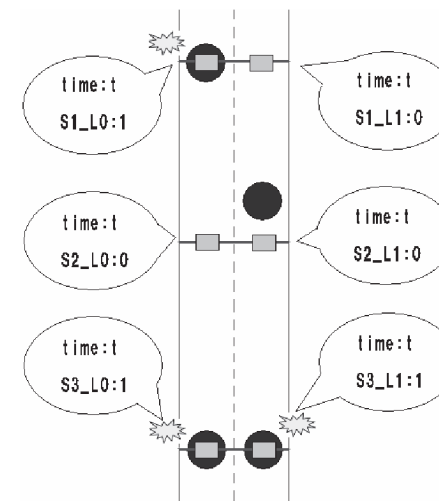


図5 超音波センサの配置と車の感知
Fig. 5 Allocation of sensors and perception of passing cars.

道路の一面を単位時間に通過する車の台数を交通量 q 、ある瞬間で道路の単位区間に存在する車の速度の平均値を空間平均速度 \bar{v}_s とする。また、すべての車長が等しいと仮定し、その車長を \bar{l} とする。すると、上式は、

$$O_t = 100 \frac{q}{\bar{v}_s} \bar{l} = 100k\bar{l}$$

となり、時間オキュパンシと交通密度の関係が明らかとなる。したがって、

$$k = \frac{O_t}{100\bar{l}}$$

と、交通密度 k を求めることができる。

時間オキュパンシ O_t の計測は幹線上に超音波センサを置いて観測すると仮定する。幹線上に3カ所の計6個、等間隔にセンサを配置し、任意の時間で車がセンサの下を通過したときにそれを感知する(図5参照)。感知した時刻とその時刻に車がセンサの下を通過したかを過去100ステップ分データに格納する。時間オキュパンシ O_t の計算はこれらのセンサが格納したデータを参照し、100ステップの中で車を感知した割合をセンサごとに計測、さらに配置されている車線が同じセンサの割合を平均することで求められる。

2.3.3 Edie の式

道路が混雑すると、交通密度が増えてくる。交通密度が増えてくると、車間距離が短くなるため、各車は速度を低下させざるを得なくなる。このような交通密度と平均速度との関係を曲線の式で与えたものが k - v 曲線である。

k - v 曲線については古くから研究され、実際の観測に基づいて多くの式が提案されている。しかしながら、各車が比較的自由に走行できる自由流領域と、各車が相互に干渉し合って追従走行している渋滞領域では、その交通流特性がかなり異なり、単一の関係式では両者の領域での交通流特性を表すことは困難ともいわれている。そこで、Edie は各領域ごとに交通密度 k から速度 v を求める式を以下のように別々に適用することで新しい k - v 曲線を提案した¹¹⁾。

$$\begin{cases} v = v_f e^{k/k_c} & (k < k_c \text{ のとき}) \\ v = v_c \ln(k_j/k) & (k \geq k_c \text{ のとき}) \end{cases}$$

以上の式において、 v_f は自由速度、 k_j は最大交通密度（飽和密度）、 v_c は、ある道路において交通量が最大となるときの平均速度（臨界速度）と定義されている、また、 k_c は最大交通量を与えときの交通密度で臨界密度（critical density）とよばれ、計測結果から求められる。

本研究では、時間オキュパンシにより交通密度 k を求めたのち、Edie の式によって平均速度 v を求めることにより、応用通信相手選択法を使う。

時間オキュパンシで求めた平均速度は通信相手を確定するためにのみ用いる。モデル上では車は前述の座標、停止・徐行・自由速度・追い越し速度の4段階の速度のうちいずれかをとりものとする。この4段階の速度と時間オキュパンシで求めた平均速度に差があると思われるが、4段階の速度は1ステップごとに变化するので、通信が終了してから車線変更可能領域に達するまでの速度の平均の近似値として、時間オキュパンシで求めた平均速度を求めている。

2.3.4 通信プロトコル

上記の2種の通信相手選択法により通信相手が確定すると、車線変更を要する車は相手に速度を変更するように要求する。ただし、要求を受信した相手は現在の前後の車間距離の状況を見て加速するか減速するかを選択することができ、両方とも無理なら送信した車に拒否を示すことができる。その際、始点から終点までたどり着くまでの時間（旅行時間）を短くするように加速から考慮するものとし、先行車との距離をまず確認する。

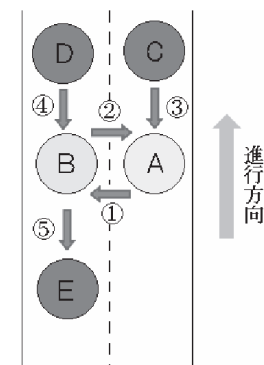


図6 通信相手と内容

Fig. 6 Communication partner and messages.

また、通信の結果、速度を上げることが決まった車の後続車は、車線変更を行う車がより間隔を得ることができるよう、徐行を要求する。この先行車からの徐行要求は、自車から発信する通信や隣接する車線からの速度変化要求よりも優先度が高いものと見なす。

通信プロトコルの詳細を図6と簡条書きにして示す。図で、車Aが車線変更をしたいとき、車Bが理想の通信相手だと計算結果が出た場合を想定している。また、プロトコル内の「加速」は判定車間距離を45pxから25pxとすることの意味であり、「減速」は先行車と5px以上の車間距離があれば徐行を行い、それ以下であれば停止するという意味である。「そのまま走行を行う」は車線変更を考慮に入れず、先行車との車間距離のみを考えて速度を決めることを意味している。

- 車Cから徐行要求③があった 車Aは車Cの要求に従い、徐行。
- 車Cからの徐行要求③がなかった 車Aは車Bに速度変化を要求①。
 - 車Dからの徐行要求④がない場合
 - * 車Bが直進する場合
 - ・ 車Dと十分距離があれば車Bは加速し、車Eに徐行要求⑤。
 - ・ 車Dと距離がなく、車Eと距離が十分あれば車Bは徐行。
 - ・ 車D、車Eとも距離が十分でない場合、車Bは車Aに無理だと通信②拒否を受け取った車Aは、加速、減速の順に速度変化を考える。
 - * 車Bも車線変更を要する場合
 - ・ 車Bは加速、減速の順に速度変化を考え、必ず速度変化する。

－ 車 D から徐行要求があった場合

* 車 B は車 D から通信がある場合徐行を行い，車 A はそのまま走行を行う．

3. 幹線シミュレーション

前章で紹介した交通モデルにおいて，車線変更に関して通信を行わない車，基本通信相手選択法を用いて通信を行う車，応用通信相手選択法を用いて通信を行う車がそれぞれ車線を占めたとき車がどのように動かシミュレーションを行う．

3.1 実験設定

3.1.1 初期設定

表 1 は今回行うシミュレーションの各パラメータの設定値を示している．

それぞれの車が目的の車線の末端にたどりつくために，表 1 の数値と前章のプロトコルに沿って走行する．

応用通信相手選択法を適用する際に車長分に 1 台が入るという幅を飽和密度とし，臨界密

表 1 基本交通モデルのパラメータ設定
Table 1 Parameters of simulation for a basic model.

パラメータ	設定値
総走行車両数 (N)	50 [台]
道路の長さ	700 [px]
車線変更禁止領域の長さ	350 [px]
強制変更領域の長さ	40 [px]
車長 (l)	6 [px]
通常時に保つ車間距離	40 [px]
車線変更時，入り込むのに理想的な間隔	40 [px]
車線変更時，安全だと確認するときの前後の車との間隔	20 [px]
車線変更可能領域にセンサを配置する間隔	125 [px]
徐行速度 (v_s)	1 [px/ステップ]
自由速度 (v_f)	2.5 [px/ステップ]
追い越し速度 (v_h)	3 [px/ステップ]
車線変更時の x 成分の速度 (v_{change_x})	0.5 [px/ステップ]
車線変更時の y 成分の速度 1 (v_{change_y1})	1.5 [px/ステップ]
車線変更時の y 成分の速度 2 (v_{change_y2})	0.8 [px/ステップ]
臨界密度 (k_c)	1/30 [台/px]
飽和密度 (k_j)	1/6 [台/px]
車線変更を要する車の割合	50 [%], 30 [%], 全車の目的の車線が同じで 50 [%]
出発予定時刻	0 [ステップ目] (すべての車は先行車との距離が十分になると, ID 順に出発する)

度については阪神高速道路，豊中 I.C. のオフランプで観測された時間オキュパンシと交通量の関係を示したグラフを参考にしている¹¹⁾．これによると，時間オキュパンシが 20%以下は交通関係と比例関係にあり，交通流が円滑であると考えられる．しかし 20%を超えると交通量が不安定となり，オキュパンシの増加とともに交通量が逆に減少し，交通が渋滞しはじめていると考えられる．そこで，オキュパンシが 20%のときに臨界密度を迎えるものとし，前章の式に $O_t = 20$ のときの k の値を臨界密度として用いる (図 7)．

3.1.2 評価方法

車線変更に関する通信をあらかじめ行うことへの交通流の影響と有効性，通信をする相手の決め方の違いによる交通流の変化を見るため，同じ条件下ですべて通信機能のない車と，



図 7 シミュレーション画面
Fig. 7 Screenshot of a simulator.

すべて基本通信相手選択法を持つ通信機能のある車と、すべて応用通信相手選択法を持つ車の異なる性能を持つ3種の車が走る状況を観察する。各実験ではすべての車が車線の終点に着くまでシミュレータを走らせる。

複数の状況で観測するために、車線変更を要する車の割合を50%と30%の2種の状況を用意し、さらにすべての車が同じ車線を目的の車線とする状況下でも試行を行う。計測する値は、デッドロックに遭った台数 *dead*、最後に車線変更した台数 *last*、各車の出発予定時刻からの遅れの平均 *delay_ave* と標準偏差 *delay_SD*、各車の旅行時間の平均 *travel_ave* と標準偏差 *travel_SD* である。この実験ではすべての車の出発予定時刻が0ステップ目となっているため、すべての車は前を走る車との車間距離が十分になった瞬間にID順に出発する。そのため、幹線が混み合っているほど次の車は出発しにくくなり、出発遅れが渋滞の評価につながってくる。そのため、出発予定時刻からの遅れも評価値として考える。それぞれの状況下で100回のシミュレーションを行い、その平均をとる。

3.2 実験結果

3種の状況での実験結果を表2、表3、表4に示す。

まず、通信の有無の結果を比較する。通信のある2種の結果の方が通信なしの結果と比べ、3種すべての状況において、デッドロックに遭遇した台数、最終変更台数、平均旅行時間の数値が小さい。また、目的車線が同一ではない2種の状況（車線変更を要する車の割合が50%、30%の状況）では、平均旅行時間の標準偏差の数値も小さい。車線変更を要する車の割合が高くなると、旅行時間の平均と標準偏差の数値の下げ幅は大きくなり、出発遅れの平均も下がってくる。しかし、目的車線が同一である状況だと、旅行時間の平均値は高くなる。

次に、2種の通信相手選択法の結果を比較する。応用通信相手選択法の方が基本通信相手選択法の結果と比べ、3種すべての状況において、最終変更台数の数値が高い。しかし、目的車線が同一である状況だと、出発遅れの平均と標準偏差の数値が非常に小さく、旅行時間の標準偏差も低くなっている。目的の車線が同一ではない2種の状況だと、最終変更の台数以外の数値はあまり変わらない。ここでも、車線変更を要する車の割合が高い状況の方が、応用通信相手選択法が出発遅れに関する数値を抑えることができている。

3.3 考察

3種の状況において、通信がない状態よりも通信がある状態の方がデッドロックの発生が少ないことが分かる。このことから、あらかじめ通信をしておくことにより、車線変更を要する者同士が並走する状態を回避していることが分かる。最終的な車線変更も防いでいる

表2 基本交通モデルの実験結果：車線変更を要する車の割合が50%の場合

Table 2 The experimental result for a basic model: 50% vehicles change lanes.

	dead [台]	last [台]	delay_ave [step]	delay_SD	travel_ave [step]	travel_SD
通信なし	1.03	8.34	217.18	147.07	405.80	64.36
基本通信相手選択法	0.00	1.19	215.40	147.48	366.61	47.26
応用通信相手選択法	0.01	2.04	213.27	145.23	364.21	47.59

表3 基本交通モデルの実験結果：車線変更を要する車の割合が30%の場合

Table 3 The experimental result for a basic model: 30% vehicles change lanes.

	dead [台]	last [台]	delay_ave [step]	delay_SD	travel_ave [step]	travel_SD
通信なし	0.28	4.00	201.55	128.56	331.85	29.57
基本通信相手選択法	0.00	1.00	201.58	129.40	318.43	25.04
応用通信相手選択法	0.00	1.13	201.87	130.12	315.58	24.71

表4 基本交通モデルの実験結果：すべての車の目的の車線が同一である場合

Table 4 The experimental result for a basic model: 50% vehicles in the left lane change lanes to the right lane.

	dead [台]	last [台]	delay_ave [step]	delay_SD	travel_ave [step]	travel_SD
通信なし	0	21.94	201.02	131.28	541.67	155.41
基本通信相手選択法	0	19.21	207.50	138.75	514.11	168.31
応用通信相手選択法	0	21.07	197.76	125.16	531.50	162.33

ことも判明した。また、平均旅行時間が大幅に減っていることから、車線変更に必要な適切な幅を通信によって得ることができていると推測できる。変更を要する車の割合が50%と30%のとき、旅行時間の分散も減少していることから、急な割り込みなどの不平等さも制限できていることが分かる。ただし、すべての車の目的の車線が同一であるという偏りがある状況だと、やはり無理に割り込む事態が増えてしまうのは避けられないと考えられる。また、平等に譲り合った結果として、出発遅れに関する数値が上がったと考えられる。

目的の車線が同一である状況では、応用通信相手選択法が基本通信相手選択法よりもほぼすべての評価値において良い結果を出していることから、応用通信相手選択法の交通状況をふまえたうえで通信相手を探すという機能が、偏りのある状況で交通流の円滑化に有効であったと考えられる。

以上により、事前に車線変更を通知することで交通流の円滑化を図ることを示すことができた。また、応用通信相手選択法が有効であることを示すことができた。

4. 脇道のある交通モデルへの拡張

2章で提案した幹線モデルに脇道を追加し、幹線から出入りする車の動きを取り入れたものに拡張する。

4.1 交通モデルの追加と変更

前述の基本交通モデルに以下の要素を加える。

4.1.1 脇道

幹線道路の終点付近に、東西方向へと伸びる脇道を追加する。脇道は車1台が走行できる幅を持ち、幹線から脇道へ、脇道から幹線へと移動することができるようにする。脇道の一方通行は考慮に入れないものとするが、脇道から幹線へと進入した場合は幹線を走る車の流れに沿って走行するものとする。

4.1.2 IN車

脇道を始発車線とし、幹線のいずれかの車線を目的車線とするため、脇道から幹線へと進入することを要する車をIN車とする。幹線を走る従来の車と同様に、IN車は出発予定時刻が来ると幹線を走る車の様子を見て安全なタイミングを計り、安全な状況と判断した場合に脇道の始点から出発する。

以下、幹線へと出るために必要な車間距離の条件を図8とともに示す。

幹線に出ようと考えているIN車は、幹線と隣接する点で方向指示器を点けて一時停止をする。そして、脇道と接する車線で先行している車Aとの距離 ΔA と、車Aの後続車でありこれから脇道付近へとさしかかる車Bとの距離 ΔB をそれぞれ確認する。これら2つの値が一定値以上になると、安全であるとIN車は判断し、幹線へ進入する。ただし、IN車の目的の車線が脇道と隣接していない、さらに奥の車線である場合、IN車はさらに奥の車線のすぐの先行している車Cとの距離 ΔC と、車Cの後続車でありこれから脇道付近へとさしかかる車Dとの距離 ΔD をそれぞれ確認する。この場合、これら4つの値が一定値以上になるとIN車は安全であると判断し、幹線に進入したと同時にそのまま車線変更をしよう試みる。しかし、一定時間以上この条件が満たされない場合、IN車は ΔA と ΔB のみの値から出発できるかどうかを判断し、とりあえず幹線へ進入することを、このモデルでは優先する。

幹線を走行する車を優先するものとし、幹線を走る車はIN車に故意に幅を譲ることはないものとする(後述する通信を行う場合は除く)。したがって、IN車は状況が変化のを待たなくてはならない。

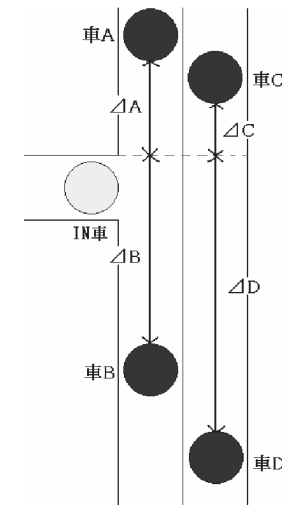


図8 IN車が幹線進入できる条件
Fig.8 Condition of entering.

幹線へと出ることができたIN車は、その後は幹線を走行する車と同様の動きをする。そして、目的の車線の終点にたどりついた場合に到着したものと見なす。

4.2 OUT車

幹線のいずれかの車線を始発車線とし、脇道を目的車線とするため、幹線から脇道へと出ることを要する車をOUT車とする。

OUT車は脇道と隣接する幹線を走っているとき、脇道の存在する座標と同じ位置に来たら脇道へ入る。そのため、脇道と隣接しない車線から出発したOUT車は脇道が存在する座標まで北上するまでの間に必ず隣の車線に移っておかなければならない。もし、車線変更可能領域の間にOUT車が脇道に隣接する車線に移れていなかった場合、脇道への距離が一定値以内になると強制的に停止、車線変更を行わせるものとする(図9)。その際、周囲の車もOUT車に道を譲るものとする。基本交通モデルの強制変更領域と同様の動きである。

脇道に入ることのできたOUT車は、そのまま脇道を自由速度で進み、脇道の終点にたどりついた場合に到着したものと見なす。

4.3 IN車、OUT車の通信

脇道のあるモデルへと拡張したことによるIN車、OUT車の出現が与える幹線を走る車

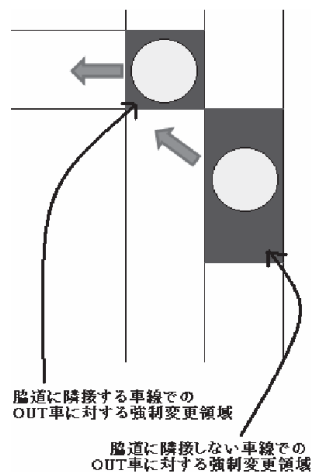


図9 OUT車が脇道へ出る動き
Fig.9 Action of OUT-vehicle.

への影響は無視できない。幹線走る車を優先しているが、IN車が無理に割り込むような形で幹線に進入してきた場合、後続車は急に速度を変化させなければならない。また、OUT車が脇道に出るのであれば、脇道に隣接する車線の交通密度が減ることになり、現在OUT車がいる車線に移りたいと考えている車にそのことを伝え、安全でスムーズな車線変更が可能になる。

そこで、平等性と円滑さを求めるために、従来の通信モデルを拡張してIN車とOUT車に対応できるようにする。その方式を以下に示す。

4.3.1 IN 車

IN車は出発したと同時に幹線にいる車へ、自分が入るためのスペースを空けてくれるように要求する。そのために、適切な通信相手を2章で述べた応用通信相手選択法に基づいて探す。

まず、IN車が脇道と幹線との合流地点 EP に差しかかるまでの期待時間 t を求める。これはIN車がいる地点の x 座標を OUT_x 、合流地点の x 座標を EP_x 、脇道走るIN車の速度を OUT_v とすると、

$$t = \frac{EP_x - OUT_x}{OUT_v}$$

で求めることができる。

ただし、参照するセンサは脇道よりも北に設置している1台のみとする。合流地点の y 座標を EP_y 、センサから計測したオキュパンシから算出した脇道に隣接する車線の平均速度を v とし、上記で求めた期待時間 t を用いて、IN車の理想の通信相手がいる座標 C_y は

$$C_y = EP_y + v \times t$$

となる。この C_y から一定誤差以内にいる車を通信相手とする。

もしIN車の目的の車線が脇道と隣接している車線ではなく、さらに奥の車線であった場合、IN車はさらに奥の車線にいる車にも速度変化を要求する。通信相手の決め方は応用通信相手選択法による。この場合も同様に脇道より北に設置している1台のセンサのみを参照して奥の車線の時間オキュパンシを計算、交通密度を算出する。そして、Edieの式を用いて奥の車線走る車の平均速度 v' を算出する。IN車の奥の車線にいる理想の通信相手がいる座標 C'_y は

$$C'_y = EP_y + v' \times t$$

となる。この C'_y から一定誤差以内にいる車をIN車のもう1台の通信相手とする。

通信相手が確定した場合、IN車は相手に速度を変更するように要求する。通信プロトコルは基本交通モデルとほぼ同じだが、要求を受信した車は拒否を示すことはできないという点のみ異なる。IN車は幹線に合流する地点で安全とする車間距離の条件を満たされないと停止してタイミングを見計らわないといけなため、IN車が幹線へ出ることは幹線にいる車が通常走行することよりも優先度を高くしている。

通信プロトコルの詳細を図10と箇条書きにして示す。図は、IN車が幹線へ出たいとき、車Aと車C(IN車の目的の車線が奥の車線である場合)が理想の通信相手だと計算結果が出た場合を想定している。また、プロトコル内での「加速」は判定車間距離を45pxから25pxとすることの意味であり、「減速」は先行車と5px以上の車間距離があれば徐行を行い、それ以下であれば停止するという意味である。「そのまま走行を行う」は車線変更を考慮に入れず、先行車との車間距離のみを考えて速度を決めることを意味している。

- IN車が車Aに速度変化を要求①
 - － 車Aが終点までこのまま幹線を直進する場合
 - * 車Aが車線変更による通信を終わらせている場合
 - ・ 車Aの先行車との距離に余裕がある 車Aは加速、車Bに徐行を要求②。
 - ・ 車Aの先行車との距離に余裕がない 車Aは減速。

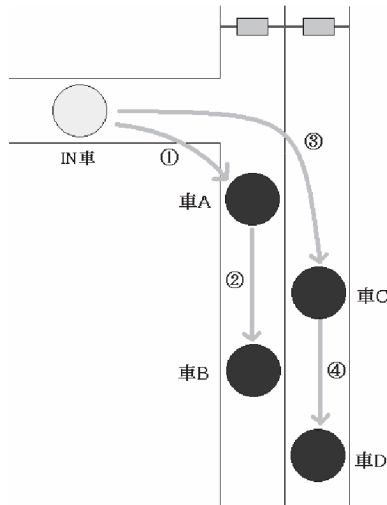


図 10 IN 車の通信相手と内容

Fig. 10 Communication partner of IN-vehicle and messages.

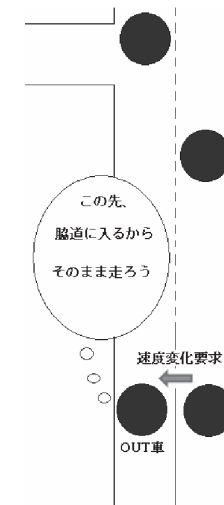


図 11 OUT 車の通信の変更

Fig. 11 Change of OUT-vehicle's communication.

* 車 A が車線変更による通信を行っている最中で、速度変化をしている場合
車 A の速度はそのまま。

– 車 A が車線変更をまだ行っていない場合 車 A の車線変更により交通密度が低くなる可能性があるため、速度はそのまま。

もし IN 車の目的の車線が奥の車線である場合は、上記のプロトコルを車 C、車 D に対しても行う。奥の車線に関しては、車 A に対するのが車 C、車 B に対するのが車 D になり、IN 車からの速度変化要求は ③、車 C から車 D への速度変化要求は ④ で図示されている。

IN 車は幹線との合流地点で一時停止をするまで通信相手を探し、IN 車からの要求を受け入れた車は脇道を過ぎるまで、あるいは IN 車が幹線へ出るまで速度を変化させる。

4.3.2 OUT 車

OUT 車が脇道と合流しない車線から出発した場合、他方の車線に移らなければ脇道へと出ることができないので、出発後、車線変更禁止領域にいる間は、車線変更による通信を行って車線変更ができるように速度変化を要求しなければならない。逆に、OUT 車が脇道と合流している車線から出発した場合、車線変更禁止領域内で OUT 車と並走し、車線変更を要している車から通信を持ちかけられ、速度変化を要求されてしまう場合がある。OUT

車はいずれ脇道へと出てしまうため、車線の交通密度を減らし、車線変更に必要な車間距離を自然に隣の車線にいる車に与えてしまう。このときに後続車の交通流を滞らせる可能性がある。たとえば図 11 で、車 A が OUT 車に徐行要求を出し、車線変更可能領域に突入した瞬間に備えて OUT 車が減速すると、車 B も減速する。しかし、OUT 車はすぐに脇道に出るので、これは無駄な動作となる。

この問題を解決するためにプロトコルを変更して、OUT 車が車線変更に関する通信を受けてしまった場合、OUT 車と通信相手の車双方ともそのままの速度で走らせることにする。これを満たすために、2 章で提示した通信プロトコルを拡張したものを図 12 と箇条書きにして示す。図で、車 A が車線変更をしたいとき、車 B が理想の通信相手だと計算結果が出た場合を想定している。また、プロトコル内での「加速」は判定車間距離を 45 px から 25 px とすることの意味であり、「減速」は先行車と 5 px 以上の車間距離があれば徐行を行い、それ以下であれば停止するという意味である。「そのまま走行を行う」は車線変更を考慮に入れず、先行車との車間距離のみを考えて速度を決めることを意味している。

- 車 C から徐行要求 ③ があった 車 A は車 C の要求に従い、徐行。
- 車 C からの徐行要求 ③ がなかった 車 A は車 B に速度変化を要求 ①。

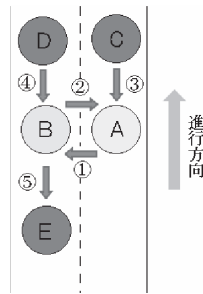


図 12 OUT 車の通信相手と内容

Fig. 12 Communication partner and messages of OUT-vehicle.

表 5 拡張モデルのパラメータ設定
Table 5 Parameters of simulation for an extended model.

パラメータ	設定値
幹線の終点から脇道までの距離	130 [px]
脇道の長さ	50 [px]
1 台目の IN 車の出発予定時刻	250 (IN 車 1~3 台のとき), 200 (IN 車 4~5 台のとき) [ステップ目]
IN 車が脇道を走る速度	1 [px/ステップ] (徐行速度)
OUT 車が脇道を走る速度	2.5 [px/ステップ] (自由速度)

5.1 実験設定

5.1.1 初期設定

幹線道路と車線変更に関する通信機能を持った車の初期設定は 3 章で行った幹線シミュレーションと同じもので、応用通信相手選択法を使うものとする。脇道、IN 車、OUT 車に関する設定については表 5 に示す。

IN 車が 1~5 台の状況と、OUT 車と IN 車が 1 台ずついる状況の計 6 種の状況で試行する。車の総台数は IN 車と OUT 車を合わせて 50 台とする。IN 車が出発する条件として、最初の 1 台は出発予定時刻のとおりに出発し、次の IN 車は、1 つ前に出発した IN 車が幹線の終点にたどりついた後で出発するものとする。ただし、OUT 車と IN 車が 1 台ずつ混在している状況では、OUT 車は 15 台目に幹線から出発し、IN 車は OUT 車が脇道の終点にたどりついたときに発出するものとする。

5.1.2 評価方法

前述の 6 種の状況それぞれについて、幹線を走る車で車線変更を要する車の割合を 50% と 30% の 2 種の状況について全車の通信機能を変えた実験を行い、脇道へ出入りする車が事前にそれを伝えることの有効性を調べる。通信機能は no_Com, half_Com, all_Com の 3 種類を考える (図 13)。

まず、50 台すべてまったく通信を行わない車を走らせた場合 (no_Com) である。これは 2 章で定義した車線変更に関する通信も、前章で定義した脇道進入に関する通信も行わない車のことを指す。次に、50 台すべて車線変更に関する通信のみを行う車を走らせた場合 (half_Com) である。これは 2 章で定義した通信機能だけを備えている車である。しかし、幹線を走る車にのみ通信機能があり、IN 車はまったく通信機能を持たないことになる。最後に、50 台すべて 2 章で定義した車線変更に関する通信、前章で定義した脇道進入に関する通信の双方の通信機能を持つ車を走らせた場合 (all_Com) である。

計測する値は、幹線を走る車に対しては、デッドロックに遭った台数 *dead*、最後に変更

車 D からの徐行要求 ④ がいない場合

* 車 B が直進する場合

- ・ 車 D と十分距離があれば車 B は加速し、車 E に徐行要求 ⑤。
- ・ 車 D と距離がなく、車 E と距離が十分あれば車 B は徐行。
- ・ 車 D、車 E とともに距離が十分ない場合、車 B は車 A に無理だと通信 ② 拒否を受け取った車 A は、加速、減速の順に速度変化を考える。

* 車 B も車線変更を要する場合

- ・ 車 B は加速、減速の順に速度変化を考え、必ず速度を変化させる。

* 車 B がいずれ脇道に入る場合

- ・ 車 B はそのままの速度で走行し、車 A にもそのままの速度で走るようにさせる。

車 D から徐行要求があった場合

- * 車 B は車 D から通信がある場合徐行を行い、車 A はそのまま走行を行う。

5. 拡張モデルにおけるシミュレーション

前章で設定した脇道、IN 車、OUT 車を追加したモデルで通信機能をまったく搭載していない車のみを走らせた場合と、車線変更による通信機能しか搭載していない車のみを走らせた場合と、幹線進入に関する通信機能も搭載した車のみを走らせた場合とでどのように動かすかシミュレーションを行う。



図 13 拡張モデルのシミュレーション画面

Fig. 13 Screenshot of a simulator for an extended model.

した台数 $last$ 、各車の出発予定時間との遅れの平均 $delay_ave$ と標準偏差 $delay_SD$ 、各車の旅行時間の平均 $travel_ave$ と標準偏差 $travel_SD$ である。そして、IN 車に関して出発予定時間との遅れの平均 in_delay と旅行時間の平均 in_travel をとる。それぞれの状況下で 100 回のシミュレーションを行い、その平均をとる。

5.2 実験結果

実験の結果から車線変更を要する車の割合が 30% のもので、IN 車が 1 台、IN 車が 5 台、OUT 車と IN 車が各 1 台走るという状況で試行した結果を表 6、表 7、表 8 に示す（すべての結果は、付録として掲載している）。

すべての状況に対し、no_Com よりも half_Com および all_Com の方がデッドロック発

表 6 拡張モデルの実験結果：IN 車が 1 台、車線変更を要する車の割合が 30% の場合
Table 6 The experimental result for an extended model: 30%, one IN-vehicle.

	dead [台]	last [台]	delay_ave [step]	delay_SD	travel_ave [step]	travel_SD	in_delay [step]	in_travel [step]
no_Com	0.22	4.04	196.65	125.31	333.53	31.88	0.00	228.10
half_Com	0.00	1.95	196.57	125.54	323.20	27.38	0.00	164.35
all_Com	0.00	1.52	196.54	125.58	321.71	27.11	0.00	150.77

表 7 拡張モデルの実験結果：IN 車が 5 台、車線変更を要する車の割合が 30% の場合
Table 7 The experimental result for an extended model: 30%, five IN-vehicles.

	dead [台]	last [台]	delay_ave [step]	delay_SD	travel_ave [step]	travel_SD	in_delay [step]	in_travel [step]
no_Com	0.26	3.68	180.68	116.29	333.09	30.64	373.60	161.60
half_Com	0.00	1.60	179.14	114.83	321.35	27.01	308.83	141.43
all_Com	0.00	1.73	179.95	116.04	327.29	29.09	298.76	140.19

表 8 拡張モデルの実験結果：IN 車と OUT 車が各 1 台、車線変更を要する車の割合が 30% の場合
Table 8 The experimental result for an extended model: 30%, one IN-vehicle and one OUT-vehicle.

	dead [台]	last [台]	delay_ave [step]	delay_SD	travel_ave [step]	travel_SD	in_delay [step]	in_travel [step]
no_Com	0.18	3.45	198.92	126.83	332.55	31.47	420.73	265.47
half_Com	0.02	1.38	197.82	125.96	320.83	28.09	406.32	171.91
all_Com	0.00	1.39	199.58	128.53	323.63	29.31	412.12	165.26

生台数と最終変更台数、IN 車の出発遅れと旅行時間の平均の数値が小さい。all_Com は half_Com に比べて幹線走る車の出発遅れの平均と標準偏差、旅行時間の平均と標準偏差の値がわずかに上がっているが、IN 車の出発遅れと旅行時間の平均の値は下がっている。ただし、IN 車の台数が少ないほど、また、幹線走る車の車線変更を行う確率が高いほど、IN 車の出発遅れと旅行時間の平均の値の下がり幅が小さくなっていく。

5.3 考察

no_Com より half_Com、all_Com の方が、幹線走る車と脇道に出入りする車双方に短時間かつ平等な交通流を生み出している。幹線シミュレーションで、すみやかに事前の通信を行うことにより交通流が円滑になるということがすでに示されており、脇道を加えたモデルでもこれが有効であることが分かった。

half.Com と all.Com を比較すると、幹線を走る車の平均旅行時間と標準偏差が上がったのは幹線を走る車が IN 車の幹線進入のために適切な距離を譲ったからだと考えられる。その分、IN 車の平均旅行時間と出発遅れが減少しているのがそれを証明している。half.Com のシミュレーションの表示画面では、幹線を走る車を優先的に走らせるというルールに従って、IN 車は脇道に出る前に立ち往生しているが、all.Com の場合は、作られたスペースに入る IN 車の様子を確認できている。以上により、この通信プロトコルが有効であることが示された。

half.Com と all.Com を比較したとき IN 車の平均旅行時間と幹線を走る車の平均旅行時間にあまり大きな差が出なかった原因として、以下の 2 つが考えられる。まず、IN 車のために用意されたスペースに車線変更を要する車が入ってくる場合である。スペースが用意された瞬間に車線変更可能領域の始点でも車線変更ができない車が入り込み、結局 IN 車が入り込む余裕をなくしてしまう。このことはシミュレーション画面からも確認できた。次に、用意された幅がタイミングよく合流地点に現れない場合である。この場合、IN 車のために速度を変化させても、その行為が無駄になってしまうので脇道からのスムーズな出入りをさせるという目的には逆効果になる恐れがある。これは、モデル上では時間、速度を離散的にとっているのに対して、実際の連続値をとる速度に基づいた公式を適用したことで、位置の予測に誤差が出てしまったためだと考えられる。

この対処として、考案したモデルを公式に適用できるほど現実に近づけるか、逆に簡略化したモデルでも適用できるよう、公式を変えることが考えられる。

6. 関連研究

車線変更を含む自動運転の研究は多く行われており、これらは通常車車間通信をとまなっている。

車線変更を要する車の一連の動作は、目的の車線にいる 2 台の車の間の幅が十分なものであるか確認し、方向指示器を点けて車線変更の意思を伝え、そして車線変更を始めるものである。Gipps は車線変更の手順をこのように分析し、基本的なモデルを提案している¹²⁾。

Hidas は Gipps の提示した交通モデルは混雑した道路では適用できないと指摘し、独自の新しい交通モデルに基づいたシミュレータ、SITRAS (Simulation of Intelligent TRAnsport Systems) を構築している^{1),13)}。このモデルは、通信機能を搭載したマルチエージェントシステムに基づき、車車間通信のある交通状況をシミュレートする。彼は本研究同様車線変更に関する通信機能を用いている。彼は通信によって他車の行動に関する情報を得た結果、

とるべき行動を道を譲るか譲らないかの場合に分けて試行している。試行した交通モデルは災害時を想定したもので、高速道路内で特定の車線が進行方向の先で封鎖されているという状況である。3 車線のうち封鎖なし、1 車線だけを封鎖、連続する 2 車線を封鎖しているという 3 種の状況で、道を譲るような行動規範を持つ車とそうでない車の 2 種を走らせている。各車は封鎖されている領域に達する前に、車線変更を行わなければならない。シミュレーションでは、道が封鎖されている状況において譲歩をした方が、全車の平均旅行時間の平均と分散が下がるという結果になった。この実験では車線数が先で少なくなる状況下では、車線変更による通信が有効であるという結果が得られている。

Hidas のモデルと我々のモデルの重要な相違点は以下の 3 つである。まず、車線変更ができないときの車の行動が異なる。Hidas のモデルでは目的とする車線にいる車と車線変更を要する車が通信を行い、車線変更ができない場合には車線変更を要する車はタイミングを計ったままで何もしない。我々のモデルでは、この間に通信を行う双方どちらかの車がスピードを変更させながらタイミングを計っている。次に、我々のモデルは交通流の円滑化という全体の目的があるため、通信しあう双方の車の協調性がある。最後に、Hidas のモデルでは通信は車線変更の直前でを行うのに対し、我々のモデルは事前に通信を行うという点も異なる。

7. おわりに

本研究では、幹線を走る車の車線変更を要することの事前の通信と、脇道に出入りする車との事前の通信を提案し、その有効性を調べた。その結果、車線変更を行う車にあらかじめ適度な車間距離を与えることができ、車線変更のデッドロックを起こす車と最後まで車線変更ができない車の台数が減り、交通流全体の流れを円滑にすることができた。また、交通状況に沿って通信相手を決めることの有効性も示した。

今後の課題としては、脇道、超音波センサの配置場所、時間オキュパンシの算出方法を変え、車間距離を開ける行為が無駄にならないために、適切な通信相手を見つけるように精度を上げることが考えられる。こうすることにより、旅行時間の平均と分散を下げることができ、今回提案したモデルの妥当性が明確になると期待できる。次に、車の台数を増やしてシミュレーションを行い、さらに混雑を発生しやすい場合でも今回の式が適用できるか確認をしたい。これによって今回提案した簡易な交通モデルに適した、より厳密な臨界密度を観測することができ、算出方法の精度が上がると期待できる。

さらなる展開としては、脇道を増やす、各車の速度の設定、信号や横断歩道と歩行者の存

在の要素などを増やした, より現実に近い道路モデルへの拡張をしていきたい. また, 各車の速度変化の決定を今回提案したプロトコルに任せず, 個体間の交渉によって決定させても良い結果を得られるか, 交通流に影響しないよう交渉する時間を制限させてシミュレーションを行いたい.

また, 今回のモデルでは自動走行を想定したうえでシミュレーションを行っている. 車の操縦の完全自動化などは自動車業界で現在研究中の段階であり, 今回提案した手法はすぐに実用できるとは考えにくい. また, 実用化を考えると, 超音波センサや車車間通信においてノイズが生じる可能性や通信遅れについても考慮する必要がある. 本論文では, 簡略化された理想的な状態での車車間通信による意思の伝達の有効性は示した. 今後はこのような点についても考慮していきたい.

参 考 文 献

- 1) Hidas, P.: Modelling lane changing and merging in microscopic traffic simulation, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.10, No.5 (2002).
- 2) Hedrick, J.K., Sengupta, R., Xu, Q., Kang, Y. and Lee, C.: Enhanced AHS Safety Through the Integration of Vehicle Control and Communication, *California PATH Research Report (UCB-ITS-PRR-2003-4)* (2003).
- 3) Kanaris, A., Kosmatopoulos, E.B. and Ioannou, P.A.: Strategies and spacing requirements for lane changing and merging in automated highway systems, *IEEE Trans. Vehicular Technology*, Vol.50, No.6, pp.1568–1581 (2001).
- 4) Ehlert, P.A.M. and Rothkrantz, L.J.M.: Microscopic traffic simulation with reactive driving agents, *Proc. Intelligent Transportation Systems*, pp.860–865 (2001).
- 5) Dresner, K. and Stone, P.: Multiagent traffic management: An improved intersection control mechanism, *AAMAS05*, pp.25–29 (2005).
- 6) Nagel, K. and Schreckenberg, M.: A cellular automaton model for freeway traffic, *Journal of Physique*, Vol.I, No.2, pp.2221–2229 (1992).
- 7) Su, X., Jin, X., Min, Y. and Peng, B.: Study on asymmetric two-lane traffic model based on cellular automata, *5th International Conference on Computational Science (ICCS05)*, pp.599–606, *Physica A*, Springer, Vol.265, pp.614–633 (2005).
- 8) Jin, W., Zheng, Y. and Li, J.: Microscopic simulation of traffic flow at signalized intersection based on cellular automata, *Proc. IEEE International Vehicle Electronics Conference, IVEC99*, pp.106–109 (1999).
- 9) Al-Shihabi, T. and Mourant, R.: A framework for modeling human-like driving behaviors for autonomous vehicles in driving simulators, *Proc. 5th International Conference on Autonomous Agents*, pp.286–291 (2001).

- 10) Takasago, T. and Takahashi, K.: Lane changing model with early communication of intentions, *International Conference on Agents and Artificial Intelligence*, pp.455–461 (2009).
- 11) 河上省吾, 松井 寛 (著): 交通工学 第2版, pp.91–115, 森北出版 (2004).
- 12) Gipps, P.G.: A model for the structure of lane-changing decisions, *Transportation Research*, 20B, pp.107–120 (1986).
- 13) Hidas, P.: Modelling vehicle interactions in microscopic simulation of merging and weaving, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.13, No.1 (2005).
- 14) Ammoun, S., Nashashibi, F. and Laugeau, C.: An analysis of the lane changing manoeuvre on roads: the contribution of inter-vehicle cooperation via communication, *Intelligent Vehicles Symposium, 2007 IEEE*, pp.1095–1100 (2007).
- 15) Kato, S., Tsugawa, S., Tokuda, K., Matsui, T. and Fujii, H.: Vehicle control algorithm for cooperative driving with automated vehicles and intervehicle communications, *IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems*, Vol.3, No.3, pp.155–161 (2002).
- 16) Knospe, W., Santen, L., Schadschneider, A. and Schreckenberg, M.: Disorder effects in cellular automata for two-lane traffic, *Physica A*, Vol.265, pp.614–633 (1999).

付 録

A.1 拡張モデルのシミュレーション結果

パラメータを変えて実験した全結果を表 9, 表 10, 表 11, 表 12, 表 13, 表 14 に示す.

表 9 拡張モデルの実験結果: 1N 車が 1 台の場合

Table 9 The experimental result for an extended model: one 1N-vehicle.

(a) 車線変更を要する車の割合が 50%の場合

	dead [台]	last [台]	delay_ave [step]	delay_SD	travel_ave [step]	travel_SD	in_delay [step]	in_travel [step]
no_Com	0.71	9.08	210.89	142.52	410.88	66.56	0.00	284.03
half_Com	0.05	2.44	207.95	141.40	369.42	50.26	0.00	133.63
all_Com	0.04	2.74	209.83	144.30	368.44	50.71	0.00	129.43

(b) 車線変更を要する車の割合が 30%の場合

	dead [台]	last [台]	delay_ave [step]	delay_SD	travel_ave [step]	travel_SD	in_delay [step]	in_travel [step]
no_Com	0.22	4.04	196.65	125.31	333.53	31.88	0.00	228.10
half_Com	0.00	1.95	196.57	125.54	323.20	27.38	0.00	164.35
all_Com	0.00	1.52	196.54	125.58	321.71	27.11	0.00	150.77

125 車車間通信を用いた交通流の円滑化を図るモデルの提案と実装

表 10 拡張モデルの実験結果 : IN 車が 2 台の場合

Table 10 The experimental result for an extended model: two IN-vehicles.

(a) 車線変更を要する車の割合が 50%の場合

	dead [台]	last [台]	delay_ave [step]	delay_SD	travel_ave [step]	travel_SD	in_delay [step]	in_travel [step]
no_Com	0.91	8.08	205.92	138.95	405.71	62.41	139.41	227.91
half_Com	0.02	2.08	203.02	138.08	368.00	48.08	73.56	141.28
all_Com	0.03	1.83	201.87	136.19	367.61	48.57	69.29	140.27

(b) 車線変更を要する車の割合が 30%の場合

	dead [台]	last [台]	delay_ave [step]	delay_SD	travel_ave [step]	travel_SD	in_delay [step]	in_travel [step]
no_Com	0.24	3.64	192.92	123.60	327.54	29.55	107.86	225.09
half_Com	0.00	1.77	192.81	123.92	322.29	27.52	83.43	162.22
all_Com	0.02	1.56	192.54	123.55	322.81	28.35	75.32	164.16

表 11 拡張モデルの実験結果 : IN 車が 3 台の場合

Table 11 The experimental result for an extended model: three IN-vehicles.

(a) 車線変更を要する車の割合が 50%の場合

	dead [台]	last [台]	delay_ave [step]	delay_SD	travel_ave [step]	travel_SD	in_delay [step]	in_travel [step]
no_Com	0.79	8.20	200.04	134.43	401.56	62.66	226.36	208.70
half_Com	0.03	2.34	196.83	132.71	370.07	50.17	142.27	144.99
all_Com	0.05	2.61	197.78	134.61	372.96	51.32	136.06	144.61

(b) 車線変更を要する車の割合が 30%の場合

	dead [台]	last [台]	delay_ave [step]	delay_SD	travel_ave [step]	travel_SD	in_delay [step]	in_travel [step]
no_Com	0.29	4.26	187.32	119.03	334.64	31.14	242.08	200.57
half_Com	0.00	1.88	187.39	119.57	321.14	27.40	159.35	156.82
all_Com	0.01	1.59	189.00	122.08	323.10	27.49	163.98	155.87

表 12 拡張モデルの実験結果 : IN 車が 4 台の場合

Table 12 The experimental result for an extended model: four IN-vehicles.

(a) 車線変更を要する車の割合が 50%の場合

	dead [台]	last [台]	delay_ave [step]	delay_SD	travel_ave [step]	travel_SD	in_delay [step]	in_travel [step]
no_Com	0.86	7.80	196.78	133.52	400.31	58.75	304.17	186.95
half_Com	0.00	2.45	192.01	129.64	366.44	49.32	209.75	139.17
all_Com	0.03	1.95	193.25	131.43	370.68	50.08	198.77	136.26

(b) 車線変更を要する車の割合が 30%の場合

	dead [台]	last [台]	delay_ave [step]	delay_SD	travel_ave [step]	travel_SD	in_delay [step]	in_travel [step]
no_Com	0.24	4.73	183.90	117.55	340.01	32.76	331.06	185.55
half_Com	0.00	1.55	182.76	116.39	320.25	25.96	232.14	146.46
all_Com	0.01	1.81	183.79	118.12	328.68	30.01	226.41	148.90

表 13 拡張モデルの実験結果 : IN 車が 5 台の場合

Table 13 The experimental result for an extended model: five IN-vehicles.

(a) 車線変更を要する車の割合が 50%の場合

	dead [台]	last [台]	delay_ave [step]	delay_SD	travel_ave [step]	travel_SD	in_delay [step]	in_travel [step]
no_Com	0.76	7.64	190.27	128.09	396.85	60.19	390.15	170.19
half_Com	0.00	2.28	189.10	129.51	367.87	49.62	289.24	138.01
all_Com	0.04	2.39	186.32	125.37	369.61	50.70	274.47	133.22

(b) 車線変更を要する車の割合が 30%の場合

	dead [台]	last [台]	delay_ave [step]	delay_SD	travel_ave [step]	travel_SD	in_delay [step]	in_travel [step]
no_Com	0.26	3.68	180.68	116.29	333.09	30.64	373.60	161.60
half_Com	0.00	1.60	179.14	114.83	321.35	27.01	308.83	141.43
all_Com	0.00	1.73	179.95	116.04	327.29	29.09	298.76	140.19

表 14 拡張モデルの実験結果：IN 車と OUT 車が各 1 台の場合

Table 14 The experimental result for an extended model: one IN-vehicle and one OUT-vehicle.

(a) 車線変更を要する車の割合が 50%の場合

	dead [台]	last [台]	delay_ave [step]	delay_SD	travel_ave [step]	travel_SD	in_delay [step]	in_travel [step]
no_Com	0.75	7.19	210.84	141.58	395.98	60.53	456.91	280.57
half_Com	0.02	2.37	209.02	140.86	370.76	49.94	441.49	172.42
all_Com	0.03	1.47	209.81	142.29	366.66	48.98	451.27	148.13

(b) 車線変更を要する車の割合が 30%の場合

	dead [台]	last [台]	delay_ave [step]	delay_SD	travel_ave [step]	travel_SD	in_delay [step]	in_travel [step]
no_Com	0.18	3.45	198.92	126.83	332.55	31.47	420.73	265.47
half_Com	0.02	1.38	197.82	125.96	320.83	28.09	406.32	171.91
all_Com	0.00	1.39	199.58	128.53	323.63	29.31	412.12	165.26

(平成 21 年 2 月 5 日受付)

(平成 21 年 3 月 13 日再受付)

(平成 21 年 5 月 20 日採録)



高砂 智紀

1984 年生。2007 年関西学院大学理工学部情報科学科卒業。2009 年関西学院大学大学院理工学研究科情報科学専攻修了。同年富士通テン株式会社入社。マルチエージェントシステムに基づく交通モデル作成の研究に従事。



高橋 和子（正会員）

1982 年京都大学理学部卒業。同年三菱電機株式会社入社。同社中央研究所、先端技術総合研究所、産業システム研究所を経て、2000 年 4 月関西学院大学理学部（2002 年理工学部へ改組）助教授。2006 年 4 月関西学院大学理工学部教授。京都大学博士（工学）。1997 年から 1999 年 ATR 音声翻訳通信研究所研究員。システムのモデル化と検証、時空間の扱いに関する知識表現・推論機構に興味を持つ。電子情報通信学会、日本ソフトウェア科学会および人工知能学会各会員。