

運転者が保持する車間時間に着目した 交通流シミュレーションによる交通流と 交通事故防止についての解析

隅田 康明^{1,a)} 林 政喜¹ 合志 和晃¹ 松永 勝也²

受付日 2019年4月5日, 採録日 2019年10月3日

概要: 本研究では, 運転者が走行中に保持しようとする車間時間と道路交通における交通流の関係について, セル・オートマトン方式による交通流シミュレーションによって解析した結果について報告する. 高速道路上のサグなどでは, 通過時に緩やかな減速が生じる箇所を起点とする自然渋滞が発生することがある. こうした交通渋滞は, 先行車両の減速に対してより強い減速を行う車両が連続する状況で発生することが報告されており, 先行車の減速に対して緩やかな減速で対応可能とするためには, 十分な車間距離(車間時間)保持が必要となる. そこで, 実測した車間時間分布に基づいて, 各車両が設定した保持車間時間以上の車間時間を保持するモデルによって, 現実の車間時間分布をシミュレーション環境内で再現し, 各車両が保持する車間時間と流量との関係を調べた. その結果, 3秒以上の車間時間を保持する運転者が増えると, 衝突事故防止効果が高まるだけでなく, 交通流の円滑化効果も高まることを示した.

キーワード: 交通流シミュレーション, 車間時間, セル・オートマトンモデル, 交通流解析, 交通事故防止

Traffic Flow and Accident Prevention Analysis by Traffic Flow Simulation Focusing on Drivers' Headway Holding Time

YASUAKI SUMIDA^{1,a)} MASAKI HAYASHI¹ KAZUAKI GOSHI¹ KATSUYA MATSUNAGA²

Received: April 5, 2019, Accepted: October 3, 2019

Abstract: In this paper, the relation between traffic flow and drivers' headway holding time using the results of a cellular automaton simulation is presented. At sag sections, natural traffic congestion may occur, and it may start from a point where moderate deceleration occurs at the time of passing. Such traffic congestion occurs in situations where vehicles perform considerable deceleration because of deceleration preceding vehicles. To prevent this, driving at a sufficiently long headway time is required. Therefore, we measured headway time distribution and reproduced actual headway time distribution based on simulation by a cellular automaton model that held the headway time more than the headway holding time set by each vehicle. As a result of the simulation experiment, we identified that maintaining a headway time of more than 3s would not only improve traffic flow but also prevent traffic accidents.

Keywords: traffic flow simulation, headway time, cellular automaton model, traffic flow analysis, traffic accident prevention

1. はじめに

人や物の輸送は自動車に大きく依存しており, 自動車道路において発生する渋滞による損失は膨大なものとなっている. 日本での2012年時点における渋滞での損失時間は年間で50億時間に達すると推計されており, その経済的

¹ 九州産業大学
Kyushu Sangyo University, Fukuoka 813-8503, Japan

² 九州大学
Kyushu University, Fukuoka 819-0395, Japan

^{a)} y.sumida@kyudai.jp

損失額は約 11 兆円 [1], 米国においても 2014 年には 69 億時間の時間的損失, 1,600 億米ドルの経済的損失が発生していると見積もられている [2]. 渋滞時においては多重衝突事故や玉突き事故といった重大事故に発展する危険性も高くなる. わが国における追突事故は依然として高い水準で発生しており, 平成 29 年中においては約 17 万件の発生件数である [3]. 交通渋滞が発生した場合には, 渋滞の最後尾の車両は停止状態, または低速状態での走行となる. 追突事故の約 90% は停止状態の車両に対するものであり, 渋滞の発生は追突事故の発生可能性も高くする. 交通渋滞は経済的損失だけでなく多くの人的損失も生じさせるものであり, 渋滞の防止・解消は現代の自動車社会における大きな課題である.

1.1 関連研究

高速道路などの自動車専用道路においてはトンネルやサグ (道路縦断線形の凹部) などがボトルネック箇所となる自然渋滞の発生が問題となっている. 前方車両との車間距離 (車両間の距離) が短い状態で前方車両が減速した場合, 後続する車両のそれに対応した減速操作には認知反応時間分の遅れが生じる. そのため, 後続車両が前方車両と同じ速度を保つためには前方車両よりも強い減速制動によって対応する必要がある. さらに後続する車両があった場合には, その車両はさらに大きな減速を必要とすることになる. これが次々と伝播していくことが自然渋滞発生の一因となっている.

こうした自然渋滞を防止するためには, 緩やかな減速で対応可能な車間距離を保持しておくことが有効であり, 車両群のなかに長い車間距離で走行する車両が存在した場合, その車両が減速波の伝播を吸収する役割を果たし, 渋滞の発生を抑制することができるとするシミュレーション実験報告がある [4], [5], [6]. 萬屋らは, 先行車両の速度が低速になったときに, より長い車間距離をとる車両によって, 渋滞を緩和するモデルを [7], 石川らは車両が先行車の持つ情報を共有し, 先行車の予測速度に合わせて減速を行う GNS モデルを提案している [8]. また, 近年では自動運転自動車の実現に向けた研究開発が活発であり, 他車との相互通信 (車車間通信) や前方の道路状況を把握可能な機能 (路車間通信) を備えた自動運転車によって渋滞を解消できるとする報告もある [9], [10]. また, 先行車両との車間距離に応じて自動的に速度と車間距離を調整する機能を持つ ACC (Adaptive Cruise Control) 機能を搭載した車両も, 渋滞の防止や解消に有用であることが示されている. たとえば, 星野らは車間距離を自動調整する ACC 車両を投入した交通流モデルによる解析を行っており [11], ACC 車両を一定割合導入することによって, 交通流量を増加させる効果があるとしている. ACC 車両に路車間通信機能や車車間通信機能を持たせた CACC (Cooperative

Adaptive Cruise Control) 車両についても同様の研究結果が示されている. たとえば鈴木らは CACC 車両が保持する車頭時間を現状よりも長くすることで, より高い渋滞解消効果が得られるとしている [12]. また, Liu ら [13] も CACC 車両の市場浸透率が高まると交通量を増加させる効果があると報告している. しかしながら, こうした機能を持つ自動車が十分に普及するまでは, 人が自動車を運転する状況が継続する. そのため, 渋滞の解消, 緩和においては人が緩やかな減速で対応可能な車間距離を保持した運転を行うことが重要であり, 人の車間距離保持特性を考慮したシミュレーションによる交通流解析が必要と考えられる. これらの提案モデルは, 車間距離を長くする, 先行車の情報を共有する, ACC 機能を利用することによって人間運転者が無意識的に行う減速を防止する, などの方法で緩やかな減速を行わせることにより渋滞の防止や解消が可能としている. これらの先行研究では, 先行車情報共有モデルや ACC モデルといった特別な処理を行うモデル以外の各車両は, 先行車両に衝突しない範囲において可能な限り車間距離を詰める行動をとるものや, 1.5 秒程度の短い車間時間 (先行車両の車尾がある地点を通過してから, 後続車両の車頭が同地点に到達するまでの時間) での走行を行うもの (文献 [13] など) がほとんどであり, 短い車間距離での走行によって大きな減速が生じやすい.

これに対して, 玉城らは車両速度 v^i の車両が必ず保持する安全車間距離 G_s^i を, 自動車検査業務実施要領の定める制動装置の基準である式 (1) を用いて算出し, 速度 v^i で必ず停止できる距離以上の車間距離を保持する車両群を仮定したモデルによって, 車両の加速度, 車両が最低限保持する車間距離による交通流への影響を調べている [14]. このモデルでは, 式 (1) によって計算される車間距離を安全車間距離 (文献 [14] 中の定義) と定義し, 各車両がそれ以上先行車両に接近しないルールを設けている. この安全車間距離と, 空走距離と制動距離の和からなる停止距離, 安全車間時間 (車両が停止するために必要な距離を時間に置き換えたもの) を速度別に示すと図 1 のようになる (ただし, 停止距離と安全車間時間は摩擦係数 0.65, 運転者の認知反応時間 1.5 秒で計算). ここで定義された安全車間距離と停止距離は, 前方車両がその場で停止したとしても追突を回避できる距離であり, 追突事故を防止するために必要な距離であるといえる. しかしながら, 現実には安全車間距離や停止距離よりも長い車間距離を保持している運転者は少なく, より現実の状況に近い交通シミュレーションによる解析が必要と考えられる.

$$G_s^i = \begin{cases} 0.15 \times (v^i)^2 & (v^i > 0) \\ 0 & (v^i = 0) \end{cases} \quad (1)$$

ただし, 最高速度が 125 km/h を超え, かつ, 車両の総重量が 3.5 t を超え 12 t 以下の自動車の基準値.

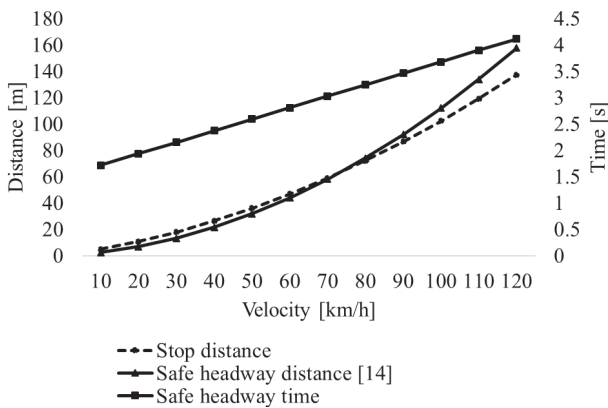


図 1 停止に必要な距離と時間

Fig. 1 Required distance and time to stop.

1.2 運転者の車間時間保持特性

図 2 は福岡県の国道上の一地点を走行する車両の車間時間を計測した結果のうち、車間時間 4 秒未満であった車両の速度と車間時間の分布を示したものである (2017 年 2 月に国道 3 号線 (車線分離帯のある片側 3 車線道路) で計測 [15])。車間時間 1 秒未満においても広い範囲の速度で分布しており、現実には多くの車両が不安全な車間時間 (車間距離) での走行をしている。0.5 秒刻みの車間時間での度数分布図で示すと図 3 の実測値のようになり、車間時間 1 秒~1.5 秒での走行を行っている車両が最も多く、約 42.2%の車両が 1.5 秒未満の車間時間での運転を行っていた。また、約 14.2%の車両が 1 秒未満の車間時間であり、約 0.6%は 0.5 秒未満の車間時間での走行であった。これは、同じく公道上での運転者の保持車間時間を調べた他の研究と近い分布である [16], [17], [18]。図 2 の計測結果は、法定速度 60 km/h の道路におけるものであるが、60 km/h を超える速度の車両も多く存在しており、そのような高い速度であっても運転者が保持する車間時間は 0.5 秒未満~4 秒程度までの広い範囲で分布している。このように、現実の交通流においては、運転者はそれぞれ異なる車間時間保持特性を持ち、車両速度にかかわらず広い分布となっており、このような車間時間保持特性を考慮した交通流シミュレーションが必要と考えられる。

1.3 研究目的

これまでの研究では、交通量の最大化を目指した分析が行われることがほとんどであり、道路を走行する運転者の時間的損失についての検討は十分とはいえない。交通流において交通量が最大となるのは、車両密度が高い (車間距離が短い) 状態にあって車両が平均的に高い速度で走行している状態である。こうした状態は交通流においてメタ安定分岐状態と呼ばれ、高い速度かつ短い間隔で車両が計測地点を通過することから交通量が増加しやすい。その一方で、速度が高く車間距離が短い状態は減速波の伝播現象が

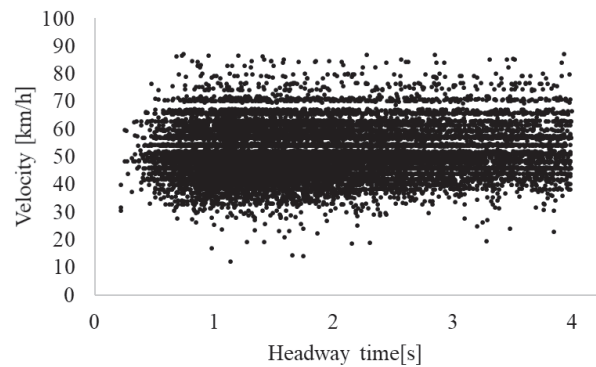


図 2 公道での車両速度と車間時間計測結果

Fig. 2 Result of velocity and headway distance measurement on public roads.

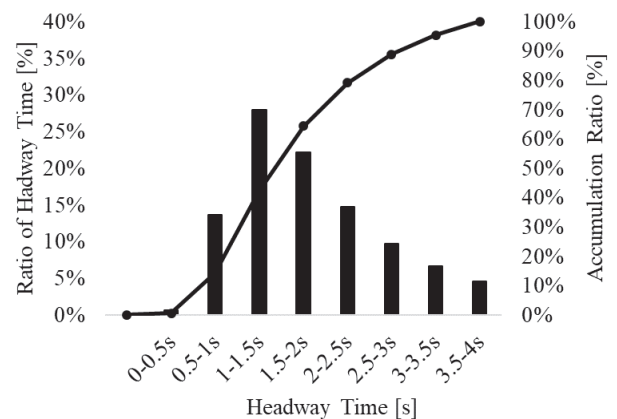


図 3 車間時間分布の実測値とシミュレーション値

Fig. 3 Measured value and simulated value of headway time.

発生しやすく、1 台の車両の減速行動によって渋滞が発生する可能性がある不安定な状態である。渋滞中であっても、交通流が停滞しない範囲であれば高い交通量となることもあるが、個々の車両の旅行速度は低下し、渋滞による時間的損失は大きなものとなる。運転者の時間損失を減らし、安定して交通が流れる交通量を調べることによって、道路のボトルネック対策を行う取り組みも行われている [19]。渋滞発生時には追突事故の発生可能性も高くなり、事故渋滞につながることもあることから、運転者の時間損失を減らす、すなわち、車両の旅行速度を低下させない範囲において高い交通量を維持することは道路全体の輸送効率を向上させるために有効であると考えられる。

以上に述べたようなことから、本研究では、人間の運転者の車間時間保持特性を考慮した交通流シミュレーションによって、運転者の保持車間時間と交通量や渋滞損失時間の関係を調べることにした。また、シミュレーションの解析結果をもとに、現実実現可能な渋滞の防止・解消に向けた施策を検討、提案する。

2. 交通流シミュレーションモデル

本研究では、減速波の伝播による自然渋滞の解析を個々

の車両が保持する車間時間に着目して行うために、車両1台1台の行動を記述できるセル・オートマトンによるシミュレーションを採用した。シミュレーションはセル・オートマトンモデルのなかでも代表的なモデルである Nagel-Schreckenberg モデル [20] (以降、NS モデル) を参考に、これを拡張したモデルによって行った。

2.1 NS モデルの基本ルール

NS モデルは解析領域となる道路をセル単位に分割し、1つのセルは車が存在するか、存在しないかのいずれかの状態をとる。セル上の車両はそれぞれ速度 (v_n) のパラメータを持ち、各車両は最高速度 (V_{max}) を超えない範囲内において加減速を行う。また、セル上のすべての車両は自身の前方に存在する車両との衝突を避けるように減速を行い、先行車両を追い抜くことはできない。さらに、各車両は一定の確率 (p) で減速を行い、これによって自然渋滞の発生を促す。そして、すべての車両の速度変更を行った後に車両位置を一括で変更する。この一連の流れを毎ステップ実行して交通流を表現する。各車両の速度は、1ステップ前の状態を参照して決定するため、前方車両の速度変化への対応は1ステップ遅れて実行される。前方車両の減速への対応が1ステップ遅れることから、後続車両が衝突しないためのセル間隔を保つためには前方車両よりも強い減速制動が必要となる。これによって、人の認知反応時間の遅れによる減速波の増幅、伝播現象がシミュレーション上で再現されることになる。そして、すべての車両の速度変更を行った後に車両位置を一括で変更する。解析領域となるセルは周期条件と開放条件があり、周期条件の場合には終点セルと始点セルがつながったゴールのない循環道路のような構造になる。開放条件では始点セルから車両を送り出し、終点セルに到達した車両は解析領域内から順に出ていくことになる。周期条件では解析領域内の車両密度 (車両数/セル数) をつねに一定とすることができ、開放条件では流入させる車両と流出する車両の比によって車両密度は変動する。サグや信号といった特定の場所を起点とする渋滞現象を解析する場合、周期条件ではサグ箇所などで渋滞が発生し交通流が停滞すると、終点セルから始点セルに移動する車両も少なくなるため、道路上流からの車両の流入も停滞してしまう。また、本研究では各車両の車間時間と旅行時間や旅行速度などの関係についても調べるため、始点と終点が明確になる開放条件でのシミュレーションを選択した。

2.2 車間時間保持ルールの追加

各車両はそれぞれ保持車間時間 (車両が保持する車間時間) のパラメータを持ち、設定された保持車間時間未満の車間時間になった場合に、保持車間時間を維持するために減速するルールを追加した。このルールについては、玉城

ら [14] が提案した『車両は前方車両との車間距離をあらかじめ与えられた距離に保とうとする』安全車間距離ルールを参考とし、安全車間距離を保持車間時間に置き換えた。安全車間距離ではなく車間時間を用いたのは、安全車間距離ルールでは現実に存在する短い車間距離で走行する車両に対応できないこと、運転者に対する教育を行う場合には速度による変化が大きい車間距離ではなく車間時間を用いることが多いことなどが理由である。また、玉城らの手法では各車両の車間距離は安全車間距離未満には絶対にならないが、本研究では車間時間が保持車間時間未満となったときに減速するために、各車両の車間時間が保持車間時間未満となる場合がある。また、低速時に車間時間不足による減速によって停止と発進を繰り返す状況は不自然と考えられるため、車間時間による速度変更は1を下限とした。車間時間保持のための減速は、確率的減速処理の前に行うこととした。一連の処理をまとめると、次の手順となる。

- (1) 加速: $v_n \leftarrow \min(v_{n+1}, V_{max})$
- (2) 減速: $v_n \leftarrow \min(v_n, d_n)$
 $d_n \leftarrow x_{n+1} - x_n$
- (3) 保持車間時間による減速:
車間時間が保持車間時間未満の場合に、
 $v_n \leftarrow \max(v_{n-1}, 1)$
- (4) 確率的減速: 確率 p で $v_n \leftarrow \max(0, v_{n-1})$
- (5) 車両位置更新: $x_n \leftarrow x_n + v_n$

2.3 実測データをもとにした車両生成

一般的な周期境界条件での NS モデルによるシミュレーションでは、車両は定められた車両密度となるようにセル上にランダムに配置されることがほとんどである。各車両の最高速度などについても定められた規則のうでランダムに決定されるのが一般的である。しかしながら、実際に走行する車両の速度や車間時間は単純な一様分布ではなく、図3に示すような分布となる。実際に走行する車両の情報を利用した車両群を生成することによって、より現実の状態に近い交通流シミュレーションを行えるようになると考えられる。そこで本研究では、公道において実際に測定した車両の車間時間と速度をもとに車両を生成することにした。測定地点通過時点の車両の車間時間と速度を計測し、記録したデータを車両の生成時に利用する。各車両には初期速度、最高速度、保持車間時間をそれぞれ設定する。初期速度は測定データの速度をそのまま設定した。各車両の最高速度については、実測データの速度をもとに設定することとし、実測データの車両速度を最高速度とした。ただし、各車両の最高速度は下限速度～上限速度の範囲とし、実測データの車両速度がこの範囲外である場合にはそれぞれ下限速度、上限速度に設定した。今回は、最高速度は 54 km/h (下限速度: 1セルを 5m とした場合の 3セル/ステップの速度)～90 km/h (上限速度: 1セルを 5m とし

表 1 車間時間設定の確率分布表

Table 1 Probability distribution of headway time.

設定車間時間 [ms]	確率
500	0.58%
500 + r	13.67%
1000 + r	27.92%
1500 + r	22.18%
2000 + r	14.77%
2500 + r	9.66%
3000 + r	6.63%
3500 + r	4.59%
r : 0~500 の一様乱数	

た場合の5セル/ステップの速度)の範囲とし、図3に示した速度と車間時間計測結果をもとに車両を生成することとした。保持車間時間は実測データが4秒以下の場合には測定時の車間時間をその車両の保持車間時間とし、4秒よりも大きい場合には測定した車間時間データの車間時間の確率分布から最小保持車間時間を設定した。また、計測車間時間が4秒よりも大きい場合には、表1に示す車間時間の確率分布に従って保持車間時間を決定した。表1は図3の度数分布図のデータから求めたものであり、これに0~500ミリ秒のランダムな値を加えることで図3の車間時間分布に従うように各車両の保持車間時間を設定した(ただし、500ミリ秒を下限とする)。なお、本研究では実測データが4秒以下の場合には測定時の車間時間をそのまま利用したが、すべての車両の車間時間を表1の確率分布をもとに生成しても図3に近い車間時間分布が得られる。なお、表1の車間時間確率分布は、一般道で計測したデータから得たものであるが、前述したように公道上での運転者の保持車間時間についての報告では測定道路が異なっても近い結果である。したがって、表1の車間時間確率分布によって、人間の運転者が保持する車間時間の分布に近いものを得られると考えられる。この処理によって、解析領域内を走行する車両の速度分布と車間時間分布が現実のものに近いものになり、車間時間の初期値が実測値となることで、現実に近い車群をシミュレーション上で再現することができる[21]。

2.4 サグによる減速ルールの追加

解析領域内通過時に確率 p_s で減速するセルを設定し、サグにおける渋滞現象を再現する。サグによる減速は、確率 p による場所を問わない確率的減速の後に処理するが、サグ部での先行車両の有無によらない急な減速を防止するために、確率的減速が行われたステップではサグによる減速は行わない設定とした。

3. シミュレーション実験

実装した車間時間保持モデルによって、シミュレーショ

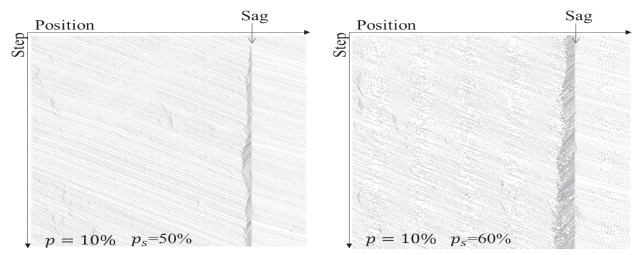


図 4 サグでの減速確率 50%と 60%での交通流の遷移

Fig. 4 Transition of traffic flow with 50% and 60% probability of deceleration in sag.

ン実験を行った。車両の生成については、実測した車間時間データ(図3)と速度データを使用し、保持車間時間と最高速度を設定した。シミュレーション結果の記録を開始する前には十分なステップ数(道路長ステップ分)を進め、シミュレーション内の環境が安定してから記録を開始した。

3.1 渋滞が発生するサグでの減速確率

サグの存在する自動車専用道路を想定し、1セルの長さ:5m、1ステップ:1秒、道路長:5km(1,000セル)、サグの配置:3km地点、減速確率 $p=40%$ 、ステップ数:600ステップとした。サグでの減速確率 p_s については、渋滞の原因となるほとんどのサグは60%以上の高い割合で速度を低下させるとの古市らの研究[22]から引用して、サグでの減速確率 p_s は60%の設定とした。 $p_s=60%$ としたときに、現実と近い現象をシミュレーション上で再現できるかを確認するために、 p_s の値を40%・50%・60%に設定し、各100回シミュレーションを行い渋滞が発生した回数を調べたところ、 $p_s=40%$ までは渋滞の様相は確認できなかったが、 $p_s=50%$ では100回中39回サグ位置での交通流の停滞が発生、 $p_s=60%$ のときには100回中100回、サグ位置での交通流の停滞が発生していた。図4に $p_s=50%$ と $p_s=60%$ の場合におけるシミュレーション結果の一例を示す(縦軸:時間経過、横軸:車両位置、図中の黒点が車両を表す)。 $p_s=50%$ の場合にはサグ部において交通流の停滞が生じても、その後の流れによって解消されることもあるが、 $p_s=60%$ では交通流の停滞が発生した後に、徐々に渋滞の車列が長くなっている。こうした交通流の停滞が $p_s=60%$ としたときに確実に発生することから、以降に述べるシミュレーションにおいてもサグでの減速確率は60%とした。

3.2 車両の保持車間時間と交通流量の関係

車両が保持する車間時間と交通流の関係を調べるために、車両の保持車間時間を0.5秒~4秒まで0.1秒刻みで変化させてシミュレーションを行った。シミュレーションの設定は、1セルの長さ:5m、1ステップ:1秒、道路長:5km(1,000セル)、サグの配置:3km地点、減速確率 $p=10%$ 、サグでの減速確率 $p_s=60%$ 、ステップ数:3,600ステップとして、各車間時間ごとに10回シミュレーションを行い、

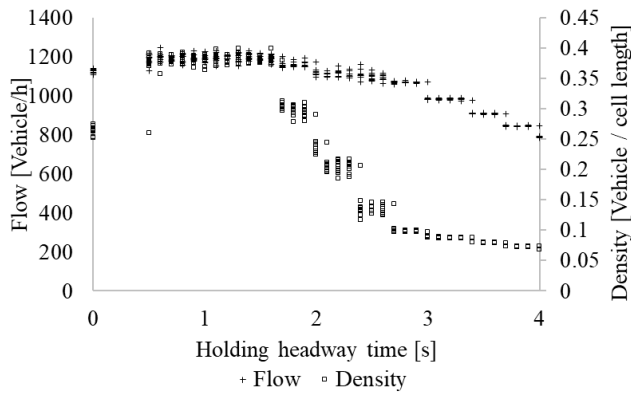


図 5 保持車間時間と交通密度，交通量の関係

Fig. 5 Relationship between holding headway time, traffic density and traffic flow.

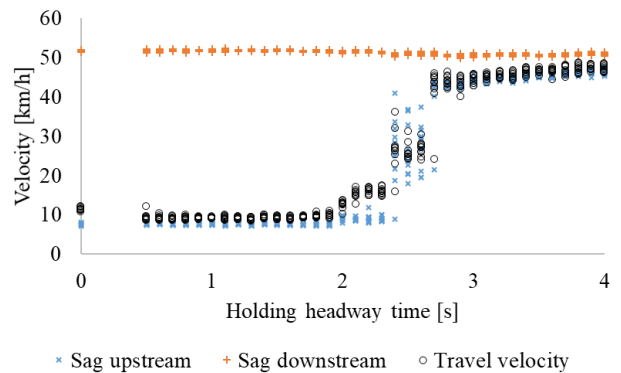


図 6 保持車間時間ごとのサグ上流と下流の平均速度

Fig. 6 Relationship between holding headway time and velocity of sag up and down stream.

3,600 ステップ中に終点セルに到達した車両数（交通量），各車両の旅行速度，旅行時間の平均値，サグの上流 1km 地点と下流 1km 地点での平均速度を記録した．なお，以降のシミュレーションについては，特に記載しない限り上述の設定としている．図 5 に保持車間時間ごとの車両密度（車両台数 [台]/セル数）と交通量（終点セルを通過した 1 時間あたりの車両数）を示す．ただし，実測車間時間分布でのシミュレーション結果を保持車間時間 0 秒として示している．実測車間時間分布では，1 時間あたりの交通量の平均値は約 1,125.2 台，車両密度の平均値は約 0.26 であった．交通量は全車両の保持車間時間を 1.5 秒とした場合に最も多く，1 時間あたり約 1,203.4 台であった．保持車間時間 1.5 秒までは交通量は徐々に増加し，それ以降は保持車間時間が大きくなるにつれて交通量が減少する傾向がみられた．最も交通量が少なかったのは保持車間時間を 4 秒とした場合であり，その平均は約 788.7 台であった．車両密度についても同様の傾向であった．図 6 は旅行速度，サグ上流 1km 地点と下流 1km 地点を通過した車両の平均速度を保持車間時間別に示したものである．ただし，実測車間時間分布でのシミュレーション結果を保持車間時間 0 秒として示している．サグ下流の平均速度は全体的に 50 km/h を超えており，渋滞が発生していても 1km 下流では車両の速度は回復している．しかしながら，サグ上流 1km の平均速度は保持車間時間によって大きな差が生じており，保持車間時間が 2.4 秒までは 10 km/h を下回る状態となっている．保持車間時間を固定しない場合には，明らかに渋滞による交通流の停滞が生じており，実際に 60% 程度の確率で速度を減少させるサグによって，多くの渋滞が発生している現実の状況とも一致する．保持車間時間 2.4 秒～2.6 秒の範囲においてサグ上流の平均速度が不安定となっており，保持車間時間 2.7 秒から安定して高い速度で通過できるようになっている．また，変化が小さくグラフでは分かりにくいですが，保持車間時間 1.7 秒でサグ上流の平均速度の変化が大きくなっており，これは図 5 の車両密度

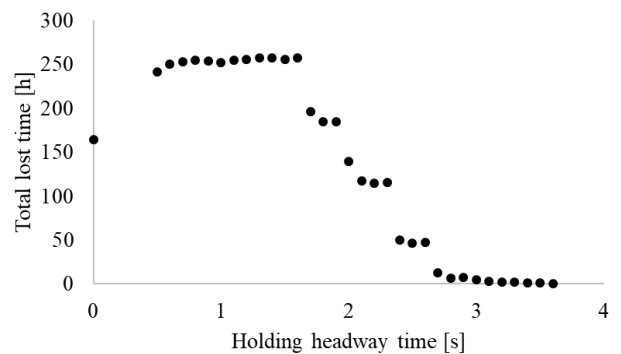


図 7 保持車間時間と累計損失時間の関係

Fig. 7 Relationship between holding headway time and cumulative loss time.

が小さくなるポイントと同じである．車両密度のグラフとあわせてみると，保持車間時間 1.7 秒～2.6 秒の範囲で車両密度が同じであって速度が高い状態と低い状態が混在している．こうした状態は交通流においてメタ安定分岐状態と呼ばれ，渋滞が発生する場合と発生しない場合が生じる不安定な状態である．一方で保持車間時間 2.7 秒からは密度の低下に応じて交通量は減少傾向となるものの，速度が高くなる自由走行相であり，自由走行相における交通量は安定して流すことができる交通量であるといえる．旅行速度については，サグ上流での速度低下の影響を大きく受けており，安定して高い旅行速度となるのはサグ上流の速度と同様に 2.7 秒以上の車間時間を保持した場合となっている．

次に，渋滞によって生じる時間的損失について調べた．車両 1 台あたりの渋滞損失時間は式 (2) によって算出した．基準旅行時間は渋滞が生じなかった場合の旅行時間であり，今回はサグでの減速確率を 0% としたシミュレーションを 10 回行い，その平均値 385.2 秒 (6.42 分) を基準として渋滞損失時間を算出した．なお，今回は乗車人数については考慮せず，車両単位での損失時間として評価を行った．保持車間時間別の累計損失時間を図 7 に示す．ただし，実測車間時間分布でのシミュレーション結果を保持車間時間 0 秒として示している．5 km 区間における実測車間時間分

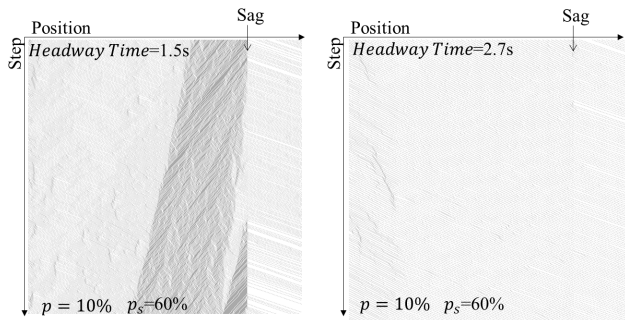


図 8 保持車間時間 1.5 秒と 2.7 秒における交通流の遷移
 Fig. 8 Transition of traffic flow at holding headway time 1.5 seconds and 2.7 seconds.

布での累計渋滞損失時間は 164.1 時間であり、車両 1 台あたりでは約 8.75 分の損失であった。累積損失時間が最大となったのは、保持車間時間 1.6 秒の場合であり、その累計は 258.5 時間、車両 1 台あたりでは約 13.1 分であり、非渋滞時の 3 倍以上の旅行時間を必要としていた。また、渋滞損失時間においても旅行時間と同様に、保持車間時間 2.7 秒から損失時間が大きく減少し、サグでの減速がない状態と同程度の時間で解析区間を通過できている。最も多くの車両を通過させることができるのは保持車間時間を 1.5 秒に設定した場合であったが、旅行速度が低くなり、渋滞による時間損失も大きくなっている。メタ安定分岐現象が生じなくなる保持車間時間 2.7 秒以上での交通量の平均値は約 1,069.2 台であり、これは保持車間時間を 1.5 秒とした場合の約 90.5%にあたる。一方で、保持車間時間 1.5 秒の条件での損失時間は保持車間時間 2.7 秒の場合の約 35.6 倍であり、交通量は多くなる一方でその道路を走行する車両の時間的損失が大きく増加する結果となった。図 8 に交通量が最大となった保持車間時間 1.5 秒の場合と、自由走行相となる保持車間時間 2.7 秒での交通流遷移図の一例を示す。保持車間時間を 2.7 秒とした場合には、サグでの減速が生じた場合でも十分な車間距離があることから渋滞波の伝播は生じず、交通流の停滞は起こらない。それに対して、保持車間時間 1.5 秒の場合には、交通流の停滞が起こり渋滞の車列が時間経過とともに長くなっている。サグでの確率的減速が一定時間発生しなかった場合には、図のように一時的にサグ部での渋滞が解消されることもあるが、その後再び渋滞の様相を示している。このように、保持車間時間が短い場合には、解析領域内に多くの車両が配置されることから交通量は増大するが、渋滞の発生によって個々の車両の速度が大きく低下し、個々の車両が受ける時間的損失も大きなものとなっている。

3.3 保持車間時間延長の啓発運動の効果検証

追突事故の防止を主な目的とし、車間時間を 2 秒または 3 秒を保つことを推奨する啓発運動が都道府県警察などによって行われている。たとえば、大分県においては 2015

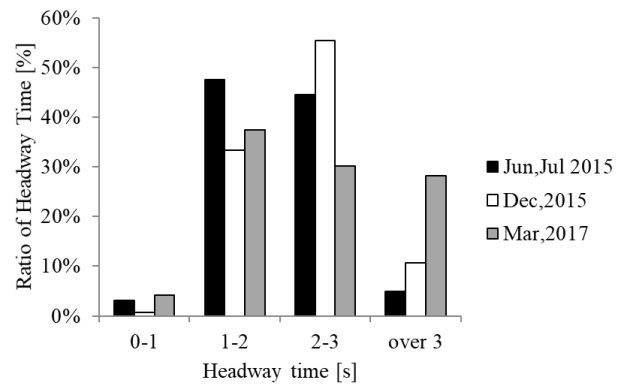


図 9 大分県における保持車間時間延長の啓発運動の効果
 Fig. 9 Changes of histogram of headway time before and after the awareness campaign.

年より 3 秒の車間時間保持を推奨する啓発運動が行われており、啓発運動の前後において運転者の保持車間時間の延長が確認できている (図 9, 文献 [21] Fig. 16 のデータより作成)。しかしながら、車間時間 1 秒未満の運転者の割合は大きく変化していない。すなわち、すべての運転者に対して啓発運動が有効なわけではなく、啓発運動を行ったとしても短い車間時間での運転を行う運転者をゼロにすることはできないものと考えられる。

たとえば、実測車間時間分布で生成した車両のうち、保持車間時間 1.5 秒未満であった全車両の保持車間時間を 3 秒に変更してシミュレーションを行った場合には、平均交通量は約 1,120.6 台、平均旅行速度は約 37.7 km/h と高い交通流量を得られる結果となった (車間時間以外は前節と同条件で 10 回実行)。このように、保持車間時間が短い車両がない場合には交通流を大きく改善することができるが、すべての車両の車間時間を 2.7 秒以上とすることや、短い車間時間の車両を完全に排除することは現実的な提案ではない。そこで、実測車間時間分布で生成した車両群のうち、短い車間時間保持の車両に対して、3 秒の車間時間を保持する教育や啓発運動の効果があつた状況を仮定し、全体のどの程度の運転者が十分な車間時間をとれば交通流量が改善されるかについて検討した。

実測車間時間分布で生成した車両のうち、保持車間時間が 3 秒未満の車両の保持車間時間を確率 p_e で車間時間保持教育に成功したものと仮定し、保持車間時間を 3 秒に設定し直してシミュレーションを行った。確率 p_e は 0% から 10% 刻みで変化させ、それぞれについて 10 回シミュレーションを実行した。確率 p_e ごとの交通量、サグ上流と下流の平均速度を図 10 に示す。 $p_e=0\%$ は図 6 の旅行速度と同値であり、 p_e の増大に合わせてサグ上流の速度が速くなる関係がみられる。 $p_e=30\%$ で速度のばらつきが大きくなっており、渋滞相からメタ安定相となっているものと考えられる。 $p_e=60\%$ からサグ上流速度も安定して高い速度となり、渋滞が発生しない状態となっている。交通量について

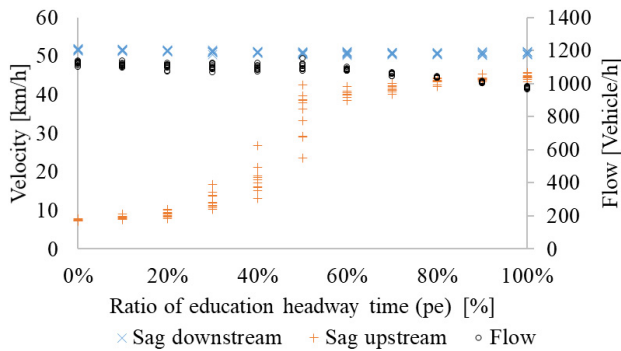


図 10 車間時間教育の成功確率と交通流量改善効果

Fig. 10 Transportation efficiency improvement effect of success probability of headway time education.

は、 p_e の増大によって低下する傾向がみられるが、旅行速度が安定する $p_e=60\%$ でも最大値 (1,150 台、 $p_e=50\%$ の場合)の約 94.5%であり、交通流量に大きな影響を与えるほどの低下ではなかった。なお、 $p_e=30\%$ における保持車間時間の平均値は約 2.2 秒、 $p_e=60\%$ では約 2.6 秒であった。

4. 考察

運転者が保持する車間時間に着目し、保持車間時間を変化させたシミュレーションを行った結果、保持車間時間が短い車両を減少させ、十分な車間時間を保持させるようにすることで、旅行速度の改善が期待できることが確認できた。すべての車両が 1.7 秒の車間時間を保持した場合にはメタ安定状態となり、交通量が最大値に近づく可能性が高くなるが、その一方で渋滞の発生確率が高まり、車両の速度は大きく低下し、各車両の損失時間も増大する。車間時間 1.7 秒は車頭時間にすると 2.0 秒程度になるため (ただし、車両の長さや速度により変動)、渋滞が発生しない条件下においては 1,800 台/h/車線の交通量となる。同様に、交通流の停滞が生じる可能性が低くなる車間時間 2.7 秒では、車頭時間は 3.0 秒程度となり 1,200 台/h/車線の交通量を見込める。渋滞による損失を十分に小さくしたうえで、サグのある道路においても約 1,069.2 台/h/車線の交通量を見込めることから、2.7 秒以上の車間時間を保持することによる利益は大きいものと考えられる。また、この交通量と渋滞発生割合の関係については、大口らの調査・分析結果 (文献 [23], p.219, 図 3)ともよく一致しており、渋滞発生条件の解明においては車間時間条件 (または車頭時間)による解析は有効なものと考えられる。

すべての車両の保持車間時間を同一にすることは現実的ではないことから、短い車間時間で運転している運転者に対して、車間時間保持教育が成功した状況を仮定したシミュレーションを行った。交通流が明確に改善するのは、現時点で 3 秒未満の車間時間で運転している運転者のうち、60%以上の運転者が 3 秒の車間時間を保持するようになった場合であり、サグのある道路においても渋滞が発生しな

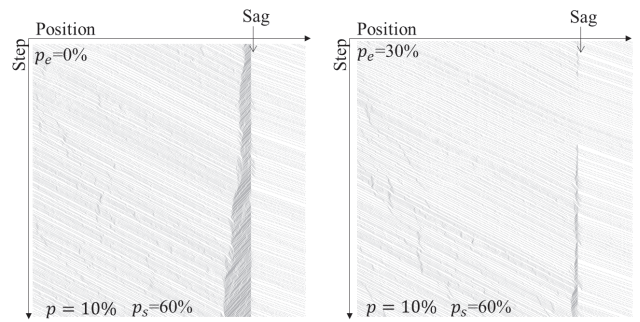


図 11 車間時間教育の成功確率 30%での交通流量改善効果

Fig. 11 Traffic flow improvement effect with 30% success probability of headway time education.

い状況となる。ただし、車間時間保持教育の達成率 30%~40%程度でも交通流の改善はみられるため、現実的な指標としては車間時間保持教育の達成率 30% (平均 2.2 秒の保持車間時間)を第 1 の目標とするのが妥当と考えられる。参考として、車間時間保持教育の達成率 30%における交通流遷移図の一例を図 11 に示す。教育達成率 (p_e)=0%では図 4 の左図と同様に渋滞車列が長くなる様相となっているが、 $p_e=30\%$ では部分的にサグでの交通流の停滞がみられるものの、全体としては渋滞様相の形成はみられず自由走行相に近いものとなっている。ただし、図 11 の結果はあくまで一例であり、 $p_e=30\%$ はメタ安定相であってサグ部での確率的減速の発生回数によっては交通流の停滞が起こる可能性もある。車間時間保持教育の達成率 30%は現実的な目標値として示しているが、理想的には自由走行相となる 60%を目指すのが望ましいと考えられる。

また、今回のシミュレーションでは交通需要が十分に高い状況を想定し、始点セルから新たな車両が発車可能な状況になれば即座に次の車両をスタートさせた。このような高い交通需要は、都市部の自動車専用道路以外では多くは発生しないので、都市部以外の多くの道路では 30%よりも低い車間時間保持教育の達成率であっても、交通流を改善できる可能性が高い。大分県における保持車間時間延長の啓発運動では、車間時間 3 秒以上の車両の割合は啓発前後で約 23.3%の増加であり、教育達成率 30%は妥当な目標と考えられる。ただし、同じ 30%の教育達成率であっても、車間時間保持教育の結果を 3.5 秒とした場合の平均旅行速度は約 23.6 km/h、4 秒とした場合には約 35.4 km/h となった (前節と同条件で教育後の車間時間のみを変更)。啓発・教育を行う目標車間時間を 3.5 秒や 4 秒とした方が渋滞解消の効果も高くなることから、保持車間時間延長の啓発運動を行う場合には、その地域の運転者の車間時間保持特性を調査のうえで、目標とする保持車間時間を設定することが望ましい。また、今回はシミュレーションの単純化のために運転者の認知反応時間を 1 秒と仮定したが、人の認知反応時間は突発的に遅れる場合がある。このことから、実際に啓発・教育を行う場合には 3 秒よりも長い車間時間

を推奨することでより高い交通流の改善効果が期待できると考えられる。

本研究ではサグのある道路を想定し、3秒以上の車間時間を保持することでサグ部での減速行動に起因する自然渋滞の防止・解消を望めることを示した。ただし、短い車間時間で運転する車両の減速を起点とする渋滞は、その車両の上流で発生するため、循環道路を周回するような状況以外では、渋滞を引き起こす起点となった運転者自身は渋滞による不利益を受けない。したがって、3秒以上の車間時間を推奨する場合には、車間距離の短い運転で得られる利益は小であることを説明することによって、全体の不利益だけでなく、事故防止や疲労軽減など運転者個人の利益を説明していくことが重要と考えられる。

5. おわりに

本研究では運転者が保持する車間時間に着目したセル・オートマトンによる交通流シミュレーションによって、次にあげる知見を得た。(1) 現実に近い車間時間分布に基づいた車両生成手法によって、各車両が保持する車間時間を設定することによって、現実に近い車間時間分布と近い分布をシミュレーション環境内で再現可能であった。(2) 全車両の保持する車間時間を統一した場合、所持する車間時間が1.5秒で最大の交通量となるが、サグでの渋滞が発生することで旅行速度は大きく低下する。すべての車両が2.7秒の車間時間を保持した場合には、サグの存在する道路であっても渋滞を発生させず、交通量も最大量の約90.5%を維持可能である。(3) 現実的な渋滞解決策の提案として、車間時間保持の啓発運動を行った場合の効果シミュレーションによって検討した。その結果、3秒未満の車間時間で運転する運転者の30%を3秒の車間時間を保持するように教育・啓発できた場合には、交通量の改善が得られ、60%の教育成功によって、サグでの渋滞発生を解消できる可能性が高い。

運転者が保持する車間時間を延長させることは、追突事故を防止する可能性を高くするとともに、道路の交通量を改善させる効果も期待できる。3秒以上の車間時間を保持するように啓発する運動は事故防止だけでなく渋滞防止においても効果的であり、30%の運転者の車間時間を3秒以上に改善させることが現実的な目標として妥当であり、渋滞そのものの防止のためには60%の運転者の車間時間を改善させることが望ましい。ただし、運転者は自身の保持する車間時間を過剰に長く評価する傾向があるため [17]、十分な車間時間を保持することによって得られる利益を説明し、適切な車間時間のとり方を教育していくことや、運転者に適切な車間時間を保持させる車載装置の研究・開発を行っていくことが重要と考えられる。

本研究では、サグのある自動車専用道路のみを対象としたが、信号のある一般道路においても同様の解析が必要と

考えられる。今後は、信号周期や信号のある交差点での車両の流入・流出状況を調査し、一般道における最適な車間時間についての検討を行っていく予定である。また、今回は法定速度60km/hの道路での車間時間計測結果をもとにしたシミュレーションを行ったが、より高い速度での計測結果を用いた場合には、より長い車間時間が必要となる可能性もある。高速道路での車間時間計測を行い、実測値に基づいたシミュレーションによる解析を行うことも今後の課題の1つである。

参考文献

- [1] 国土交通省：都市圏の交通渋滞対策—都市再生のための道路整備平成13年度—平成14年度プログラム評価書(2003).
- [2] Texas A&M Transportation Institute: 2015 Urban Mobility Scorecard (online), available from (<https://static.tti.tamu.edu/tti.tamu.edu/documents/mobility-scorecard-2015.pdf>) (accessed 2019-03-13).
- [3] 独立行政法人統計センター：平成29年中の交通事故の発生状況(オンライン), 入手先 (<https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&lid=000001202708>) (参照 2019-03-13).
- [4] 金子哲也, 大口敬, 飯田克弘, 渡邊亨: ドライビング・シミュレータを用いた追従挙動特性の研究, 土木計画学研究・講演集, Vol.23, pp.801–804 (2000).
- [5] 大口敬, 飯田克弘: 高速道路サグにおける追従挙動特性解析におけるドライビング・シミュレータ技術の適用性, 交通工学, Vol.38, No.4, pp.41–50 (2003).
- [6] 葛西誠: ドライビングシミュレータ追従積重ね試験と階層ベイズ法による縦断線形の影響の抽出, 土木学会論文集D3 (土木計画学), Vol.71, No.5, pp.L917–L929 (2015).
- [7] 萬屋賢人, 菅原俊治: 渋滞緩和エージェントモデルによる渋滞緩和の提案と評価, 情報処理学会研究報告バイオ情報学, Vol.2010-BIO-23, No.5, pp.1–6 (2010).
- [8] 石川翔太, 荒井幸代: 先行車情報の共有が自然渋滞に与える影響の解析, 人工知能学会論文誌, Vol.31, No.2, pp.1–8 (オンライン), DOI: <https://doi.org/10.1527/tjsai.D-F32> (2016).
- [9] 石川翔太, 荒井幸代: 自動運転車の協調型運転戦略の導入による渋滞抑制, 2016年度人工知能学会全国大会(第30回)論文集, pp.1–4 (オンライン), DOI: <https://doi.org/10.11517/pjsai.JSAI2016.0.1H4OS05a4> (2016).
- [10] Qin, W.B. and Orosz, G.: Scalable stability analysis on large connected vehicle systems subject to stochastic communication delays, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.83, pp.39–60 (2017).
- [11] 星野貴弘, 坪井一洋, 浜松芳夫: 自動運転技術を考慮した交通流のモデル化と解析, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.112, No.202, pp.51–54 (2012).
- [12] 鈴木一史, 山田康右, 堀口良太, 岩武宏一: 高速道路サグ部渋滞対策に資するACCの将来性能と渋滞緩和効果, 交通工学論文集, No.1, Vol.2, pp.B.60–B.67 (2015).
- [13] Liu, H., Kan, X., Shladover, S.E. and Lu, X.: Using Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC) to Form High-Performance Vehicle Streams: Simulation Results Analysis, UC Berkeley: California Partners for Advanced Transportation Technology, available from (<https://escholarship.org/uc/item/31w2f555>) (accessed 2019-03-13).
- [14] 玉城龍洋, 安江里佳, 北栄英輔: セル・オートマトンによる自動車専用道路の交通シミュレーション, 情報処理学

- 会論文誌数理モデル化と応用 (TOM), Vol.46, No.SIG10 (TOM12), pp.30-40 (2005).
- [15] 隅田康明, 林 政喜, 合志和晃, 松永勝也: 追突事故の安全性評価のための公道における車間時間調査と分析, 自動車技術会論文集, Vol.49, No.3, pp.623-629 (2018).
 - [16] 谷口 実: 高速道路の車間距離, 自動車技術, Vol.37, No.5, pp.518-523 (1983).
 - [17] 太田博雄: ASV 開発への交通心理学からの提言, 国際交通安全学会誌, Vol.36, No.1, pp.50-56 (2011).
 - [18] Evans, L. and Wasieleski, P.: Do accident-involved drivers exhibit riskier everyday driving behavior?, *Accident Analysis & Prevention*, No.14, Vol.1, pp.57-64 (1982).
 - [19] 国土交通省: 新たな国土構造を支える道路交通のあり方について (オンライン), 入手先 (<http://www.mlit.go.jp/common/001046643.pdf>) (参照 2019-07-14).
 - [20] Nagel, K. and Schreckenberg, M.: A cellular automaton model for freeway traffic, *Journal de Physique I*, Vol.2, No.12, pp.2221-2229 (1992).
 - [21] 隅田康明, 林 政喜, 合志和晃, 松永勝也: 公道における自動車の保持可能車間時間の検討 (第2報), 自動車技術会 2018 年春季大会学術講演会講演予稿集, No.65-18, pp.1-6 (2018).
 - [22] 古市朋輝, 山本修司, 小谷益男, 岩崎征人: 都市間高速道路サグ区間での速度変動特性と隘路についての考察, 土木学会論文集, Vol.2003, No.744, pp.151-161 (オンライン), DOI: <https://doi.org/10.2208/jscej.2003.744.151> (2003).
 - [23] 大口 敬, 中村英樹: 日本における交通容量・サービスの質に関する研究の概観と展望, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.67, No.3, pp.217-229 (2011).



合志 和晃 (正会員)

1997 年九州大学大学院博士課程修了。博士 (情報科学)。同年九州大学助手。1998 年英国北アイルランドベルファストクイーンズ大学 (The Queen's University of Belfast) で在外研究。2002 年九州産業大学情報科学部助教授 (准教授)。2009 年同大学教授。自動車技術会, 日本バーチャルリアリティ学会, 日本交通心理学会, 日本靴医学会各会員。



松永 勝也

1972 年九州大学大学院文学研究科博士課程 (心理学専攻) 退学, 文学博士。九州大学文学部心理学講座助手, 助教授, 教授, 1996 年九州大学大学院システム情報科学研究院教授, 2005 年定年退職, 九州大学名誉教授, 九州産業大学情報科学部教授, 2012 年九州産業大学定年退職。自動車技術会, 日本交通心理学会, 日本生理心理学会, 日本職業・災害医学会, 日本靴医学会各会員。



隅田 康明 (正会員)

2016 年九州大学大学院システム情報科学府博士後期課程修了。博士 (情報科学)。現在, 九州産業大学非常勤講師, 筑紫女学園大学非常勤講師。日本靴医学会, 日本自動車技術会各会員。



林 政喜 (正会員)

2013 年九州産業大学大学院情報科学研究科博士後期課程修了。博士 (情報科学)。現在, 九州産業大学基礎教育センター特任講師。日本靴医学会, 日本自動車技術会各会員。