

# 追従挙動における加減速の大きさの 交通流率に対するシミュレーション感度分析

松山 奈々海<sup>1</sup>・柳原 正実<sup>2</sup>・小根山 裕之<sup>3</sup>

<sup>1</sup>非会員 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)  
E-mail: matsuyama-nanami@ed.tmu.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)  
E-mail: yanagihara@tmu.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)  
E-mail: oneyama@tmu.ac.jp

交通集中渋滞が発生する過程において、個々の車両の加減速挙動は無視できない要因である。渋滞の要因と考えられている減速波は、個々の車両の加減速挙動が組み合わさった結果として発生していると捉えることができる。特に加減速挙動が渋滞発生に大きく影響する状況としては追従時と車線変更車両の受入時が考えられる。車線変更車両の受入時の急減速が減速波の発生・伝播を引き起こし交通流を低下させる現象が実際に観測されており、事故や渋滞の要因となっている場合がある。一方、車線変更に関する既往研究において車線変更を受け入れる車両の挙動については十分な知見が得られておらず、車線変更による減速波の発生・伝播についても明らかとなっていない。車線変更による交通流率への影響を明示するうえではこれらの知見は重要となる。

本研究では車線変更及び追従時の加減速挙動による交通流率への影響を明らかにするため、単純な加減速挙動を設定したモデルを構築し、加減速の大きさ等と交通流率との関係についてマイクロ交通シミュレーションを用いた感度分析を行った。その結果より、加減速の大きさや車線変更といった車両挙動と交通流率との関係性についての示唆を得た。

**Key Words :** *acceleration behaviors, simulation model, microscopic simulation*

## 1. はじめに

都市間高速道路における渋滞現象を明らかにするための方法の一つとして、追従や車線変更といったミクロな運転挙動の解析が行われているが、その結果とマクロな交通現象との対応に関しての知見は少ない。さらに、渋滞現象の要因となる減速波と密接な関係にある加減速挙動と交通流率との関係についても明らかになっていることは少ない。

また、車線変更に関しても、車線変更車両が追越車線を走行する後方車両の急減速を誘発し、減速波の発生・伝播を引き起こす<sup>1)</sup>現象が交通流率低下と密接な関係にあるため、交通流率の把握には車線変更の頻度などを考慮する必要があると考えられる。しかし、車線変更挙動に関する既往研究<sup>2)3)</sup>などでは車線変更を実行する車両の挙動自体について着目している例が多い。車線変更自体を単純な選択行動として捉えているため、その選択が車両挙動及び加減速挙動に与える影響までは考慮されていない。このことから車線変更を受け入れる車両および追越車線を走行する後方車両の挙動については知見が乏

しい。

一方、近年普及している自動運転システムやアシストシステムでは車両応答に対応するドライバの運転挙動を考慮する必要があり、車線変更挙動についても重要な知見の一つとして注目されている。また、自動運転システムやアシストシステムの目的は事故と渋滞という自動車交通問題を解決し、自動車交通の最適化を図ることであるため、車線変更行動の制御をより効率的に行う方法を明らかにすることが求められている。よって、本研究で分析対象となる車線変更を受け入れる車両の挙動についても交通流率の変動に関わるという点で重要な知見となり得る。

以上をふまえ、本研究では加減速挙動から生じる減速波の発生・伝播の影響について明らかにすることを目的とする。具体的には、車両の加減速挙動と渋滞の延伸を考慮した車両挙動モデルを用いる交通マイクロシミュレーションを実行し、交通流率及び減速波への影響とモデル内のパラメータ値の関係性について考察した。

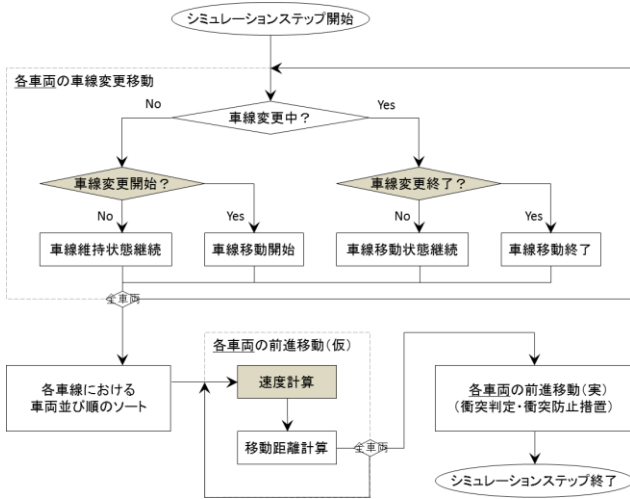


図-1 シミュレーションの枠組み

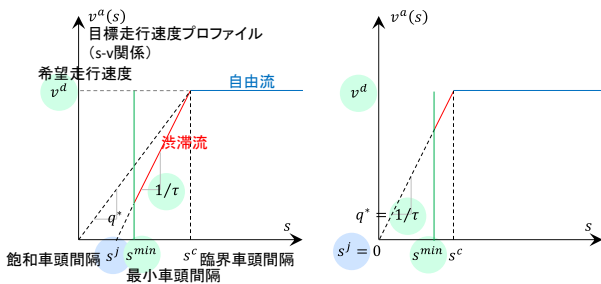


図-2 s-v関係図  
(左：渋滞有，右：渋滞未考慮)

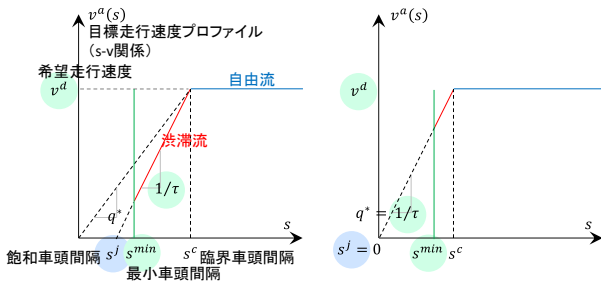


図-3 q-k関係図  
(左：渋滞有，右：渋滞未考慮)

## 2. 分析手法

### (1) シミュレーションモデルの枠組み

分析に利用したシミュレーションは時々刻々車両の位置を算出する単純なモデルを組み合わせたものである。多くのマイクロ交通シミュレーションモデルの中では車線変更は瞬時に起こる現象として扱われているが、本研究では車線を跨いでいる状態も考慮した車線変更モデルを構築した(図-1)。これにより、車線変更車両の後方車両の加減速挙動への影響を記述できるようにした。

### (2) 追従モデル

本研究で導入した追従モデルでは、走行速度に応じた追従車頭距を与える関係(s-v関係、図-2)を仮定する。ここのs-v関係は各車両に個別に与えられ、飽和車頭間

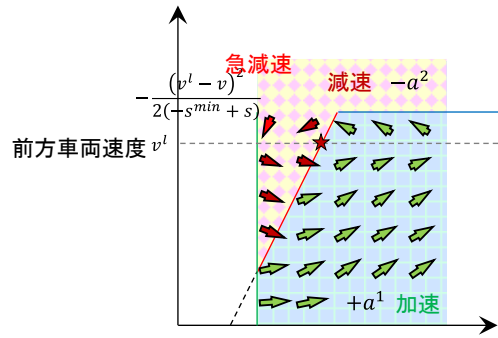


図-4 加減速挙動モデル

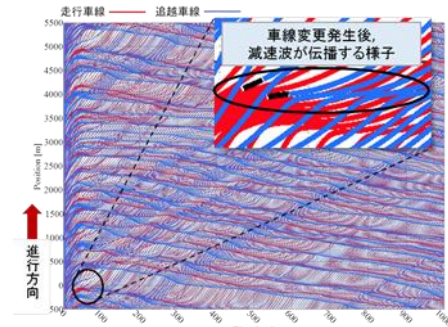


図-5 time-space図

隔 $s^j$ 、および希望走行速度 $v^d$ 等で規定される。さらに臨界車頭間隔以上であれば希望走行速度で走行する折れ線状の関数となっている。また、s-v関係に従って追従モデルを考えるにあたり、q-k関係を考慮することで自由流、渋滞流での追従挙動の変化を記述することができる。

上述したs-v 関係に関して、全ての車両の車頭距離と走行速度が均一な状況にあると仮定すると、図-3の左側のような、容量と飽和交通密度 $k^j$ を与えた一般的なq-k関係図が導かれる。なお、単純なs-v関係を仮定した車線変更挙動モデル<sup>4)</sup>では加減速挙動および渋滞延伸を考慮していないため、s-v関係図、q-k関係図はそれぞれ図-2、図-3の右図になる。本研究ではモデルに与えたs-v関係を図-3のq-k関係図に当てはめて考察することで、交通流率への影響に関して深い洞察を加えられるように上述したモデルを用いている。

### (3) 加減速挙動モデル

本研究で導入した加減速挙動モデル(図-4)は各車両の前方車両との車頭距離 $s$ に応じた走行速度 $v$ を与えるs-v関係を基準に速度調整を行うモデルとして導入した。十分に車頭距離が長い場合には、対応する走行速度はその車両の希望走行速度となる。具体的な加減速度は基準となるs-v関係に従う速度を下回ると一定に加速し、反対に上回ると減速するようになっている。但し衝突を回避するため大きな減速を要する場合は急減速が生じるように設定した。なお、s-v関係に従った車両挙動を考える理由として、マクロな集計指標である交通流率 $q$ と交通

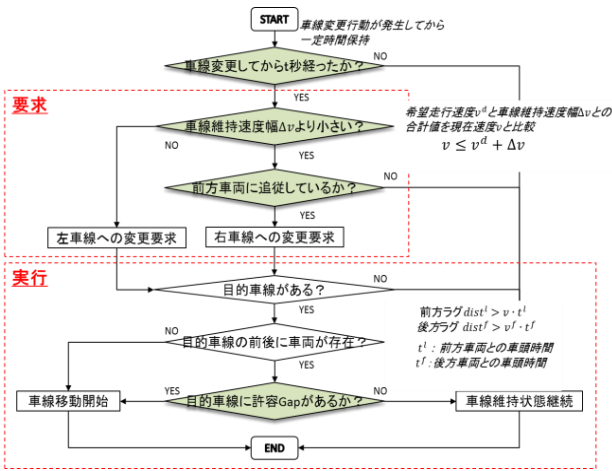


図-6 車線変更の意思決定プロセス

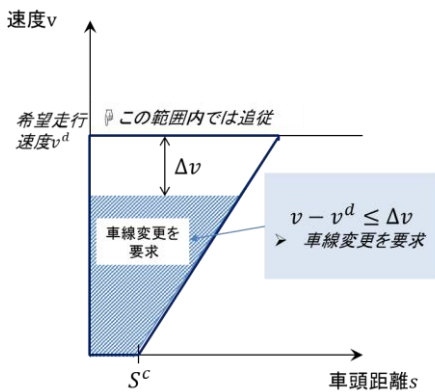


図-7 車線変更の要求に関する指標

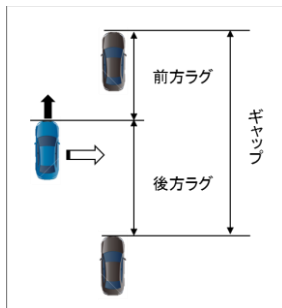


図-8 前方・後方ラグ イメージ

パラメータ	設定値	単位
臨界車頭距離	$s^c$	50 [m]
飽和車頭距離	$s^f$	10 [m]
最小車頭距離～車長	$s^{min}$	10 [m]
反応時間相当値	$\tau$	2.0 [sec]
交通容量	$\eta^{max}$	0.5 [veh/sec/lane]
最大交通密度	$k^{max}$	100 [veh/km]
加速度: 加速時	$a^{d1}$	0.2 [m/sec <sup>2</sup> ]
減速度: 減速時	$a^{d2}$	0.3 [m/sec <sup>2</sup> ]
車線変更開始 車線維持速度幅	$\Delta v$	0 [m/sec]
車線変更開始 車頭時間閾値	$h^l, h^f$	2.0 [sec]
希望走行速度	$v^d$	$N(20, 2.5^2)$ [m/sec]
車線変更所要時間	$\tau^{LC}$	4.6 [sec]
車線変更間隔時間	$\tau^{LCI}$	3 [sec]

表-1 パラメータの基本設定値

密度 $k$ との関係 ( $q$ - $k$ 関係) とマイクロな指標である $s$ - $v$ 関係とを対応させて分析ができるという点がある。上述し

た加減速挙動モデルのシミュレーション上での挙動を確認した結果では、Time-space図(図-5)上に車線変更発生後の速度低下が減速波として上流側に伝播している様子が確認できた。

#### (4) 車線変更モデル

従来のモデル<sup>4)</sup>における車線変更行動は、「要求」と「実行」といった2つの階層によって車線変更までの意思決定がなされるものである。車線変更モデルを適用する上で車線変更挙動に関する再現性を重視し、パラメータを複雑化させると、交通流率に影響を与える車線変更挙動を判断することが困難となる。よって、車線変更挙動について最低限を考慮した比較的単純なロジックによるモデルが適切であるとして図-6の意思決定プロセスを採用した。この意思決定プロセスは、現在速度 $v$ と希望走行速度 $v^d$ の差によって車線変更をするか否かを判断する。また、現在速度 $v$ と希望走行速度 $v^d$ との差を許容し得る間を車線維持速度幅 $\Delta v$ と定義する。この車線維持速度幅 $\Delta v$ を現在速度 $v$ が下回ることが車線変更の要求につながる指標のひとつとなる。これについては、図-7のモデル内に図示する。

また、車線変更の要求があった際の車線変更の可否について目的車線の前後方車両とのギャップを確認する。目的車線のギャップから車線変更が可能であると判断された場合には車線変更を実行する。前方車両、後方車両との位置関係については図-8に示す。

### 3. 交通マイクロシミュレーション分析の概要

加減速挙動がもたらす交通流への影響は複雑な現象であり、時々刻々と変化する各車両の車両挙動による相互作用とマクロな現象との関係を把握する必要があるため、非常に多くの条件のデータを収集する必要がある。そこで本研究では加減速挙動モデルを導入したマイクロ交通シミュレーションを実行し、解析を行った。

本研究では初期状態の影響がなくなった状態を分析の対象とする。そのため、2車線、全長5kmの環状道路を設定し、十分な時間が経過した後の車線利用が均衡している状態を分析対象とした。また、その際本研究で採用した加減速挙動モデルの交通流に対する感度分析を主目的とするため、希望走行速度以外のパラメータは全車両共通の値を設定した。パラメータの基本的な設定値については表-1に示す。

一方、希望走行速度分布は正規分布を仮定し、平均や分散を設定できるようにした。また、希望走行速度を正規分布とする際には完全な正規分布にすると極端に低い速度まで生成され、衝突につながるような希望走行速度



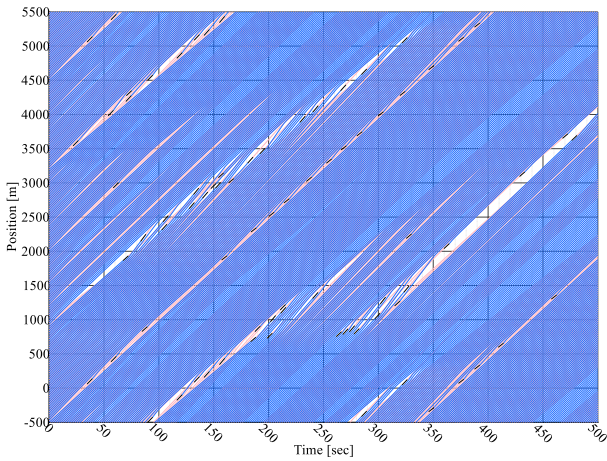


図-9 time-space図(条件 I : 加減速無・減速波無)

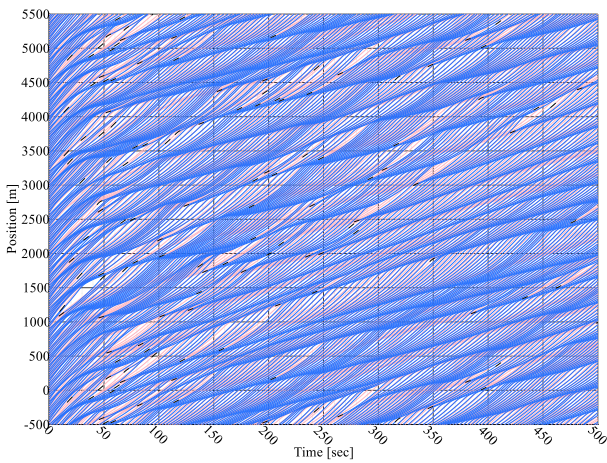


図-10 time-space図(条件 II-1 : 加減速有・減速波無)

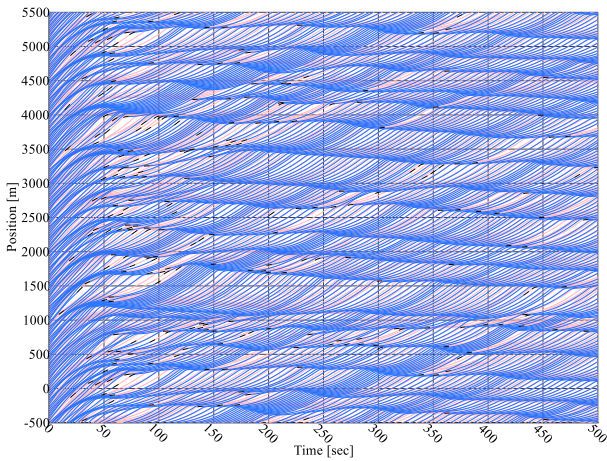


図-11 time-space図(条件 II-2 : 加減速有・減速波有)

も算出される。そのため、完全な正規分布の両極端な値を除き、正規分布中99%のデータを含む、標準偏差の6倍の区間のみを分析に用いた。さらに、車線変更における分析では、交通密度を2~50 [台/km/lane] の25段階に対して感度の分析を行った。

分析では、シミュレーションの状態を125秒毎に1レコードとして出力し、各条件に対して12500秒間の100個の

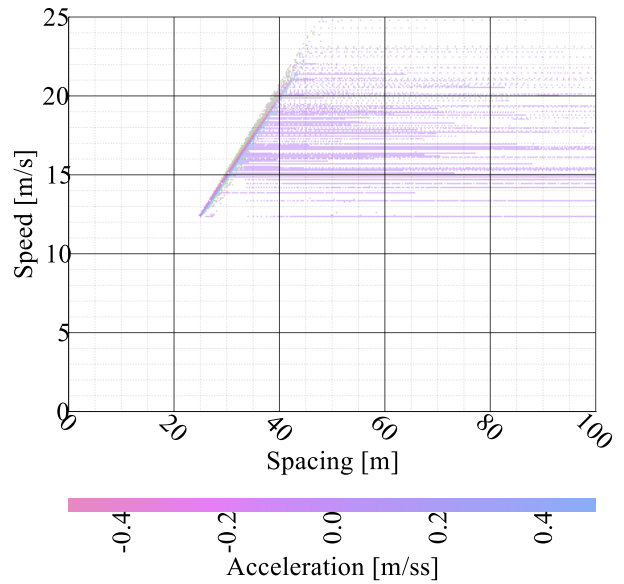


図-12 s-v図(条件 I)

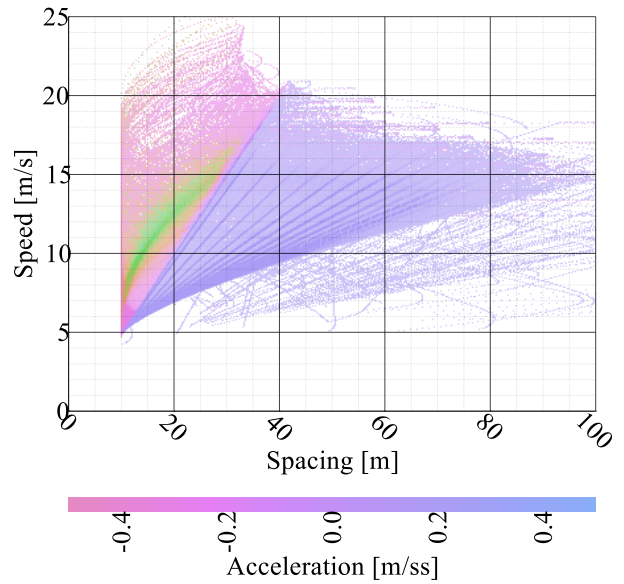


図-13 s-v図(条件 II-1)

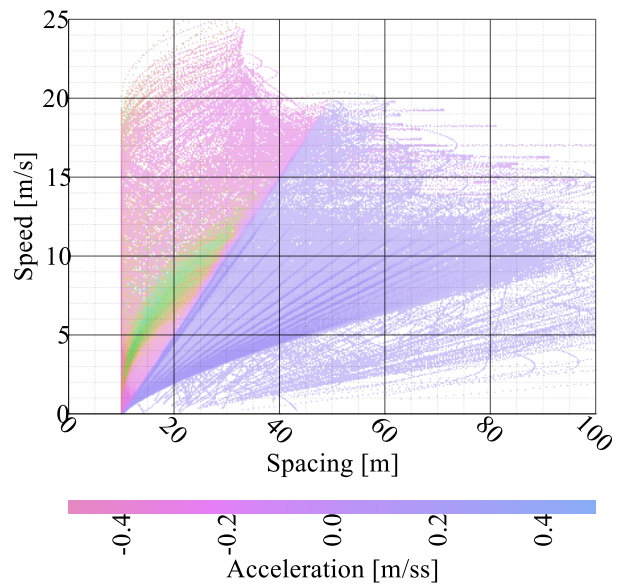


図-14 s-v図(条件 II-2)

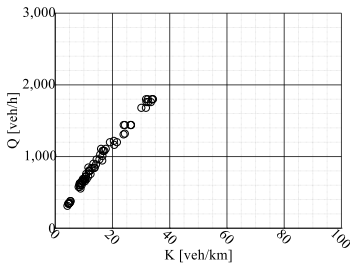


図-15 s-v図(条件 I)

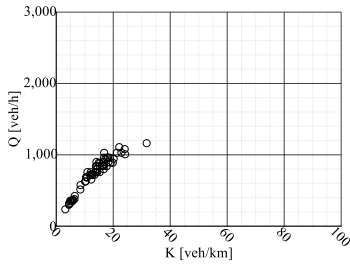


図-16 s-v図(条件 II-1)

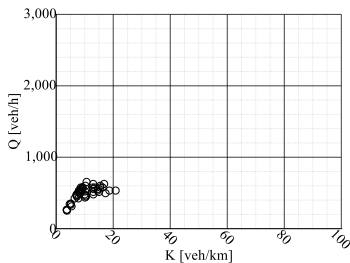


図-17 s-v図(条件 II-2)

データを取得した。その結果について次章で示す。

## 4. 分析結果

### (1) time-space図

交通密度30[veh/km]における単純なs-v関係に従う場合<sup>4)</sup>と加減速を考慮した本モデル、およびその中間のモデルのtime-space図をそれぞれ図-9, 図-11, 図-10に示す。各車両の走行軌跡を表す曲線の傾きから走行速度、また、隣接する曲線の間隔から車頭時間(横方向)や車頭距離(縦

方向)を把握するとともに、加減速挙動の検証を行った。

図-9は単純なs-v関係に従う場合のモデルで減速波が発生しない条件(飽和車頭間隔 $s^j = 0$ )を設定した結果(以下、条件 I とする)であり、モデルに加減速挙動を導入していないため、time-space図(図-9)上の折れ線の傾きがほとんど変化していない。このことから速度変化がほとんど起こっていないことがわかる。また、図-10は加減速挙動を導入したモデルによる減速波が発生しない条件を設定した結果(条件 II-1)である。図-10の条件 II-1では曲線の傾きから速度変化が見られるものの減速

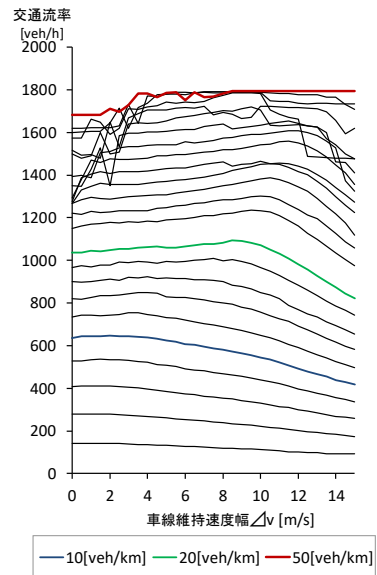


図-18 車線維持速度幅 $\Delta v$ と交通流率 (条件 I)

波のようなものが後方に伝播していないことを確認した。図-11は加減速挙動を導入した減速波が発生する(飽和車頭間隔 $s^j > 0$ )本モデルの結果(条件 II-2)である。図-10の条件 II-2では急減速が発生し、その影響が減速波として後方に伝播している現象が再現できている。

### (2) s-v 図

条件別にs-v図(図-12, 図-13, 図-14)を示す。条件 I (図-12)では加減速挙動を考慮していないことから全体の速度が平均的に高い。一方、加減速挙動を考慮した条件 II では低速度の車両が存在する。また、条件 II-1, 条件 II-2の減速波の有無(図-13, 図-14)で比較すると減速波が発生する場合には低速度の車両が多く存在し、全体の速度も平均的に低下している。これは、減速波が発生することにより車頭距離が短くなり、速度を落とす車両が多く発生することに起因している。

### (3) Q-K図

条件別にq-k図(図-15, 図-16, 図-17)を示す。これらは初期の交通密度を変化させた条件下でのシミュレーション結果をまとめたものである。条件 I (図-15)では加減速挙動を考慮していないことから交通密度が高くなるにつれ交通流率も高くなり、渋滞流が仮定通り見られないような結果となっている。一方、加減速挙動を考慮した条件 II-1, 条件 II-2では交通流率が平均的に低くなる。特に減速波を考慮した場合には交通密度が増加するにつれ交通流率が低下している渋滞流領域が結果に表れてきている。これは図-13のs-v図に示したように減速波の影響で低速度の車両が存在することにより、交通流率が低下することと関連した結果であると考えられる。



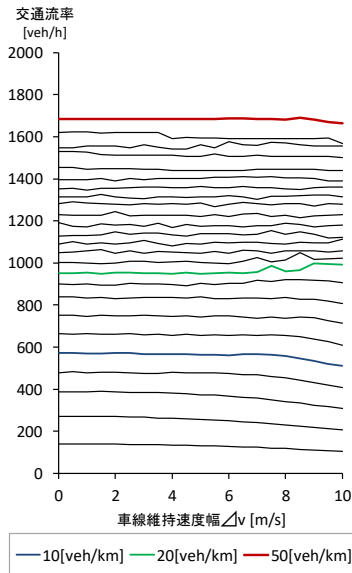


図-19 車線維持速度幅 $\Delta v$ と交通流率 (条件II-1)

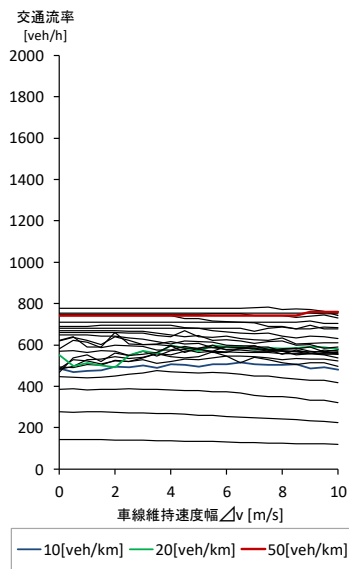


図-20 車線維持速度幅 $\Delta v$ と交通流率 (条件II-2)

#### (4) 車線維持速度幅 $\Delta v$ と交通流率の関係

車線維持速度幅 $\Delta v$ と交通流率の関係を交通密度が2~50[veh/km]の25段階別に各条件で示す(図-18, 図-19, 図-20)。図-18から交通密度10[veh/km]以上では $\Delta v$ の変化に伴って交通流率の変動がみられるが、10[veh/km]以下になるとほぼ一定となる。これは交通流率レベルが低い状態にあるとほぼ全ての車両は自由走行し、車線維持速度幅 $\Delta v$ の大小に限らず全体の交通流率が一定となるためである。また、交通流率レベルが高くなると車頭距離が小さくなり、いずれも車線変更を実行することが困難となるため車線維持速度幅 $\Delta v$ に関わらず交通流率は一定となる。

また、単純なs-v関係を仮定した場合(図-18)と加減速を考慮した場合(図-19, 図-20)の双方で、車線維

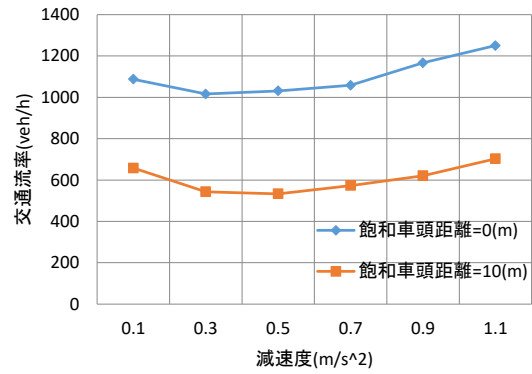


図-21 減速度と交通流率

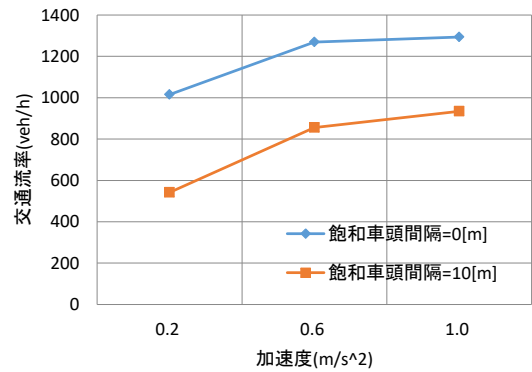


図-22 加速度と交通流率

持速度幅 $\Delta v$ に対する交通流率の値に極大値が存在し、交通流率レベルが高くなるほど極大値を示す車線維持速度幅 $\Delta v$ が大きくなっていることがわかる。これは交通流率が大きくなるようにうまく車線変更させるときの条件が交通流率レベルによって異なることを意味している。また、同様に単純なs-v関係を仮定した場合と加減速を考慮した場合を比較すると、単純なs-v関係を仮定した場合は密度が高くなるまで、交通流率の変動が小さいが、加減速を考慮した場合では密度が低い状態から交通流率の変動がみられる。さらに、加減速挙動を考慮した場合 $\Delta v$ に対する交通流率の変化があまり見られないことから交通流率の変化は $\Delta v$ に依存しないといえる。

#### (5) 加減速度と交通流率の関係

加減速度の交通流率に対する感度分析の結果を示す(図-21, 図-22)。図-21は交通密度(20[veh/km])と加速度(0.2[m/s<sup>2</sup>])を一定値とし、減速度の値を0.1[m/s<sup>2</sup>]~1.1[m/s<sup>2</sup>]で変化させた結果である。また、加減速挙動モデルにおける減速波の有無(無:飽和車頭間隔 $s^j = 0$ , 有:飽和車頭間隔 $s^j = 10[m]$ )でも比較を行うことで急減速による交通流率への影響についても併せて分析を行った。図-21から減速度が高い程交通流率が高くなる傾向にある。これは減速度がある程度大きいと前方車両との車間が詰まる前に加速状態に入るため交通流率が下

がりにくくなることが考えられ、このような状況は図-14 のs-v 図からも見てとれる。一方、加減速挙動モデルにおける減速波の有無の有無(有: 臨界車頭間隔 $S^c=10\text{m}$ ,無: 臨界車頭間隔 $S^c=0\text{m}$ )で交通流率の平均値が大きく異なるのは、急減速が起きた際にその影響が減速波となって後続車両に伝わり交通流を阻害していることが原因として考えられる。また、本研究で導入したモデルによるシミュレーション結果を基にした加速度と交通流率に対する感度分析を減速度 $0.3[\text{m/s}^2]$ を一定とし、図-22に示す。図-22から加減速挙動モデルにおける減速波の有無で比較すると、減速波が無い場合(飽和車頭間隔 $s^j = 0$ )であると急減速が発生せず、車間が詰まることがないため交通流率は平均的に高くなる傾向にある。一方、加速度が大きい程交通流率は高くなる傾向にある理由は加速度が大きい程、速度回復しやすく比較的速度が高い状態で走行することになり、結果的に交通流率も上昇することが考えられる。

## 5. おわりに

今回の分析で得られた結果より、加減速挙動と交通流の関係は加減速度の大きさによって交通流に変動があり、さらにミクロに見ると速度変化や車頭距離にも変化が生じていた。このように各車両のミクロな変化の交通流全体へのマクロな影響が定量的に明らかにすることができた。さらにこれらの影響は減速波の有無でも異なり、減速波が発生する場合には急減速後の影響が加減速度の大きさによって異なる影響をもたらすことが明らかとなった。その際、単純に減速度を大きくするだけでなく、ある一定の値によって交通流が極大値を見せる。このことから、加減速度の大きさと急減速の有無によって交通流に変動をもたらすことが明らかとなった。

今後の課題として、本研究の加減速モデルおよび車線変更モデルの再現性について、実観測データを用いた検証を行い、本研究の結果が実現証への程度応用可能かを検討してゆく必要がある。そのうえで、モデルの妥当性についてもさらに検討する必要があると考える。

謝辞：本研究はJSPS科研費・若手研究(B)「戦略的車線変更意思決定メカニズムを考慮した交通流解析」(研究代表者：柳原正実) 17K14741の助成を受けたものです。

## 参考文献

- 1) 越正毅, 桑原雅夫, 赤羽弘和: 高速道路のトンネル, サグにおける渋滞現象に関する研究, 土木学会論文集, No.458, pp.65-71, 1993.
- 2) 谷口知己, 塩見康博, 宇野伸宏, 嶋本寛: 車線交通量のメカニズムを内生化した単路部多車線交通流モデルの構築, 土木学会論文集, No.530/IV-30, pp.31-40, 1996.
- 3) 塩見康博, 谷口知己, 宇野伸宏: 車線交通量のメカニズムを内生化した多車線交通流モデルの構築, 交通工学論文集, Vol.1, No.3, pp.1-10, 2015.
- 4) 劉彬, 柳原正実, 小根山裕之: 車線変更挙動と交通流の関係に関するシミュレーション分析, 第 37 回交通工学研究発表会論文集, 2017.
- 5) 柳原正実, 小根山裕之, 朱慧珺: 車両追従挙動における走行型視線誘導システムのドライバー別影響分析, 第 53 回土木計画学研究発表会・講演集, pp.2844-2850, 2016.
- 6) 中村英樹, 小林正人, Jerome L. CATBAGAN: 追従車交通密度を考慮した往復 2 車線道路における付加追越車線の設置水準に関する研究, 土木学会論文集, No.3, Vol.67, pp.272-282, 2011.

(2018. 4. 27 受付)

## SIMULATION ANALYSIS OF EFFECTS OF ACCELERATION BEHAVIORS CORRESPONDING TO MACROSCOPIC FLOW-RATE

Nanami Matsuyama, Masami Yanagihara and Hiroyuki Oneyama