

## 700MHz 帯車々間通信を利用した 2車線高速道路における渋滞解消運転支援

渡邊 拓哉<sup>†</sup> 森野博章<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 芝浦工業大学大学院理工学研究科 〒135-8548 東京都江東区豊洲 3-7-5

E-mail: † {ma16101, morino}@shibaura-it.ac.jp

**あらまし** 高速道路では道路構造上の問題により生じる渋滞(自然渋滞)が頻繁に発生する。自然渋滞はサグ部と呼ばれる区間で特に多く生じる事が知られている。この問題への対策として筆者らは 700MHz 帯を用い通信距離を 1km 程度に設定した車々間通信により渋滞区間での車群の位置と速度の情報を後続車両に通知し、これに基づいて渋滞原因となっている車両と後続車両のドライバーに渋滞解消運転を促す手法を提案しており、単一車線を対象にシミュレーション評価を行いその有効性を示している。本論文ではさらに現実的なモデルとして 2 車線の道路モデルを定義して評価を行う。シミュレーション評価の結果、速度制御を行わない場合に比べ、渋滞解消運転の中でも特に渋滞吸収運転(JAD:Jam-Absorption Driving)が、車載器搭載率が低い場合においても車両の走行速度向上に効果があり、全体の 30%の車両が渋滞吸収運転を行う事で平均走行速度が約 15%向上することが分かった。

**キーワード** サグ部, 車々間通信, DSRC, 700MHz, 複数車線

## Assisting resolution of traffic congestion at sags consisting of 2lanes using 700MHz inter-vehicle communication

Takuya WATANABE<sup>†</sup> Hiroaki MORINO<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Engineering and Science, Shibaura Institute of Technology

3-7-5 Toyosu, Kouto-ku, Tokyo, 135-8548 Japan

E-mail: † {ma16101, morino}@shibaura-it.ac.jp

**Abstract** In expressways, natural traffic congestions are frequently caused by the problem of road structures. Especially, many natural traffic congestions are known to happen at sag sections. For this problem, we proposed a scheme to use vehicle-to-vehicle communication using 700MHz wireless systems which transmit information for the vehicle at the head of congestion car group to recommend recovery of velocity and also transmit for following vehicles running behind the congestion car group to recommend reduce velocity. We have confirmed the effectiveness of the scheme for alleviation of congestions on single lane. In this paper, we define multi-lane road model as a more realistic model and we evaluate the proposed scheme using IDM+ car following model. From the simulation result, we revealed Jam absorption driving (JAD) takes good effect for alleviation of congestions on multi-lane simulation.

**Keywords** sag sections, vehicle-to-vehicle communications, DSRC, 700MHz, multi-lane

### 1. はじめに

近年、日本の高速道路における交通渋滞の原因の多くは交通集中に因る自然渋滞である事がわかっている。交通集中の大きな要因とされていた料金所通過は ETC の導入により解消され、サグ部における交通集中が高速道路における渋滞の約 47%と大きな割合を占めており、早期解決が求められている。高速道路サグ部とは、道路の構造上たわみとなっている部分であり、ドライバーは下り坂から上り坂への勾配変化に気づかず、そのままの速度で上り坂に差し掛かり、自然に車両速度

が低下してしまう。勾配変化に気づかない車両がサグ部進入以前と変わらない運転をし続けている限り自然に速度低下し、後続の車両は先行車両の速度低下を受け、衝突を避けるためにブレーキを踏む。車間距離の詰まった状態では、このブレーキは後続車両に連鎖的に増幅され、停止に至る事もある。

複数車線ではさらに、この減速波が原因で早く目的地に到着したいドライバー等は追い越し車線を利用するため、車線変更を行うことが増える。結果的に、追い越し車線の利用率が高くなり、追い越し車線から渋滞

が発生するとされている[1]. こうして発生した, 車両密度の高い車群に渋滞を認知していない車両が流入する事によって渋滞の長期化, 渋滞車群の増大に繋がり, 解消はより一層困難になっていく.

渋滞の早期解消には, 渋滞車群先頭の車両に対して速度回復を促すことや, 渋滞車群より後方を走る車両が速度を落として車群に近づく渋滞吸収運転[2]を行うことが有効であるとされているが, 対象となる車両に当該運転の開始をタイミングよく知らせる手法は確立されていない. その速度低下が後続車両に増幅・伝播することで渋滞に繋がり, 密な車群が形成される. このような渋滞はドライバーの運転心理に因る影響が大きく, 電光掲示板等を用いた注意喚起ではドライバー全員が認識できるとは限らず, 解決は難しい. 著者らは, これを解消する手法としてサグ部における自車の速度低下を検知した後に, 700MHz 帯の通信方式 ARIB-T109[3]を用い通信距離を 1km 程度に設定した車々間通信による情報伝搬により渋滞車群前方に存在する速度低下車両に対しては速度を回復するような運転を, 渋滞車群より後方を走行する車両に対しては速度を低下させるような, 渋滞吸収運転を促すことで, 渋滞の長期継続を解消する手法を提案し, 単一車線での有効性を示している[4].

本論文では, 上記の方式をより現実的な 2 車線からなる道路モデルで, 一般的な車両追従モデルである IDM+[5]を用いて性能評価を行った. 評価の結果, 複数車線では特に渋滞吸収運転が速度向上に効果的であることが明らかになったのでこれを報告する.

## 2. 700MHz 帯の通信方式を利用した車々間情報伝播方式

提案手法では, 各車両は自車の速度や位置情報を含んだパケット(CAM: Cooperative Awareness Message)を 100m 程度の通信距離の車々間通信(本稿では以降これを SCS(Short-range Communication System)と呼ぶ)で定期的に 1 ホップブロードキャストして前後車両と交換し, 周囲の交通状況を認識する. 渋滞の定義とされている, 時速 40km を下回った車両は ARIB-T109 を用いた最大 1km 程度の通信距離の車々間通信(これを LCS(Long-range Communication System)と呼ぶ)により一定周期で渋滞予見情報を含んだパケット(CEM: Congestion Expectation Message)を 1 ホップブロードキャストし前後車両に送信する. これを受け取った車両が送信元車両より前方に位置している場合, 上述の SCS による定期的な情報交換を通してその車よりさらに前方に車両があることを認識していれば, LCS により CEM を中継し, 前方車両が確認できなかった場合は自車が渋滞の原因車両であると判断して目標速度ま

で加速する速度回復運転(VRD:Velocity-Recovery Driving)をドライバーに促す. CEM を受け取った車両が送信元車両の後方を走行している場合は, 自車速度が時速 60km 未満であれば CEM を更に後方に中継し, それ以上の速度であれば, 自車が渋滞車群よりも後方を走行していると判断して時速 60km になるまで速度低下させるような, 渋滞吸収運転(JAD: Jam-Absorption Driving)を促す. このように渋滞車群の先頭及び後尾車両に対して情報伝播を行い, 各々に渋滞が悪化しない運転を促すことにより渋滞を早期に解消する手法である. [4]では単一車線で実施した場合, 平均速度が向上することが示されている. なおこの文献では LCS に ARIB-T109, SCS に 5.8GHz 帯の DSRC を用いるとして評価しているが, 一台の ARIB-T109 の装置の送信電力を制御し LCS と SCS を切り替えて本方式を実現することも可能であり, 装置コスト面ではこちらの方が有利であるため本稿では ARIB-T109 のみを用いるものとして議論を進める.

## 3. 渋滞解消運転の設定及び性能評価

性能評価は Scenargie[6]を用いたシミュレーションにより行った. Scenargie は交通流シミュレータとネットワークシミュレータを内包しており, 車々間通信を通じて各車両が速度制御を行った結果を交通流に反映させる事が出来る.

### 3.1. 車両発生データ

シミュレーションにおける車両発生データとして, 高速道路のサグ部付近に設置された車両測定器で測定された走行車線及び追い越し車線の時刻及び車両の通過速度を使用した. 車両測定器は東北自動車道矢板インターチェンジ 119.672kp の上り坂手前に設置されているもので, データは渋滞が発生した平成 18 年 11 月 4 日に測定された. 図 1 は実際に用いた走行車線の車両のデータセットである. 時刻 16:11 よりどちらの車線においても時速 40~60km の車両が存在する事から渋滞を確認する事が出来る. このデータセットにおいて時刻 15:57 から 16:13 までの, 通常走行車線 348 台, 追い越し車線 426 台の計 774 台をシミュレーションに用いた.

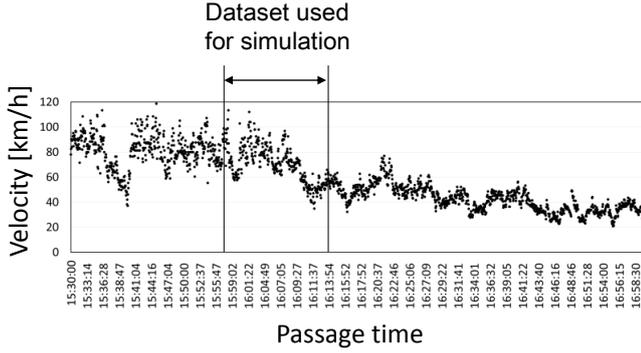


図 1 東北自動車道矢板 IC で測定された通過時間及び速度

### 3.2. 道路設定及び車両追従モデル

車両追従モデルには Schakel らによって考案された非線形追従走行モデル IDM+を用いた。以下に IDM+の加速度算出式を示す。

$$\frac{dv}{dt} = a \cdot \min \left[ 1 - \left( \frac{v}{v_d} \right)^4, 1 - \left( \frac{s^*}{s} \right)^2 \right] \quad (1)$$

$$s^* = s_0 + vT + \frac{v\Delta v}{2\sqrt{ab}} \quad (2)$$

ここで、 $a$ : 最大加速度[m/s<sup>2</sup>],  $b$ : 希望減速度[m/s<sup>2</sup>],  $v$ : 走行速度[km/h],  $v_d$ : 希望速度[km/h],  $s$ : 車間距離[m],  $s^*$ : 希望車間距離[m],  $s_0$ : 停止時最低車間距離[m],  $T$ : 安全車頭時間[s]である。希望車間距離や加減速度はドライバーによって異なるものであるから、表 1 に示すようにばらつきを持たせて設定した。同様に、希望速度は、3.1 で述べたデータセットの車両速度( $v_{measure}$ )がそのドライバーの希望速度であるとは限らない事から表 1 に示すような条件を元に設定した。

表 1 追従挙動モデルのパラメータ設定

最大加速度 $a$ [m/s <sup>2</sup> ]	0.45~0.75
希望減速度 $b$ [m/s <sup>2</sup> ]	2.6~3.8
安全車頭時間 $T$ [s]	1.0
停止時最低車間距離 $s_0$ [m]	1.65
希望速度 $v_d$ [km/h]	$v_d = 90.0 \sim 100.0$ $(v_{measure} < 80.0)$ $v_d = 100.0$ $(80.0 \leq v_{measure} \leq 100.0)$ $v_d = v_{measure}$ $(v_{measure} > 100.0)$

さらに、サグ部におけるドライバーの特性に応じて上り勾配の影響を受けない車両と、勾配の影響を受けて自然に速度低下してしまう車両の 2 種類があるとし、それぞれ type 1, type 2 車両と呼ぶ。

道路は全長 5000m からなる 2 車線道路で、1000m~3400m の 2400m を上り坂とし、各区間での車両の走行形態を以下のように設定した。

- 0m 地点(車両発生)  
3.1 で述べた実データの時刻及び車両走行速度を元に車両を発生させる。各車線において、一定割合  $\beta_{type2}$  が前述した type2 車両、残りが type1 車両であるとし、いずれかに乱数で割り当てる。
- 0~1000m(通常走行区間)  
前述した式(1)により加速度を算出して走行する。
- 1000~3400m(上り坂区間)  
この区間では、type2 車両はまず矢板インターチェンジの上り勾配から算出された減速度  $-0.294$ [m/s<sup>2</sup>]で 60km/h まで速度が低下し、その後、前述の式(1)によって算出された加速度に  $-0.294$ [m/s<sup>2</sup>]を加えた値を元に走行する。一方、type 1 車両には勾配による減速は発生せず、通常走行区間と同様に式(1)で算出される加速度により走行する。
- 3400~5000m(通常走行区間)  
0~1000m 区間と同様の挙動を行う。

車線変更アルゴリズムは岩崎ら[7]による車線変更モデルにおける判断ロジックに基づいて設定し、上記区間によらず行われるものとする。

### 3.3. 提案方式の設定

#### 3.3.1. 通信方式

既に述べた通り、提案手法における各車両の SCS と LCS は 1 台の ARIB-T109 の装置の送信電力を制御する事で実現する。表 2 に詳細を示す。

表 2 通信方式に関するパラメータ

	LCS	SCS
周波数	760MHz	
チャンネル帯域幅	10MHz × 1	
伝送速度	12Mbps	
変調方式	16QAM-OFDM(R=1/2)	
通信範囲	およそ 100m	およそ 1km
MAC プロトコル	CSMA/CA	

#### 3.3.2. 運転制御

ここでは 2 で述べた提案方式の 2 種類の渋滞解消運転、VRD と JAD の各設定について述べる。

SCS を用いた CAM の送信、及び LCS を用いた CEM の送信は情報送信間隔  $T_p$  で行われ、過去  $T_{th-cong}$  の時間以上、速度が渋滞予見閾速度  $v_{th-con}$  を下回った車両が CEM を発信する。VRD の対象になった車両は、こ

れ以降自車の希望速度を $v_{tar-vrd}$  に変更し、上り坂に差し掛かっていても勾配の減速度 $-0.294[m/s^2]$ は加わらず、式(1)によって算出された加速度のみに従って走行する。

JAD の対象になった車両は、希望速度を $v_{tar-jad}$ に変更し、この速度になるまで一定の減速度 $v_{tar-jad}$ で減速するものとする。

CAM, CEM には有効期間  $T_e$ を設定する。パケットを受信する各車両はこの有効期間内でのみ運転制御を行う。表 3 に各パラメータの詳細を示す。

表 3 渋滞解消運転における各パラメータ

$T_p$	1~30[sec]
$T_e$	10[sec]
$T_{th-cong}$	10[sec]
$v_{th-con}$	50[km/h]
$v_{tar-vrd}$	100[km/h]
$v_{tar-jad}$	70[km/h]
$\alpha_{dec-jad}$	$-0.4[m/s^2]$

#### 4. サグ部渋滞の再現検証

図 2 に type2 車両の割合 $\beta_{type2}$ を変化させた際の平均走行速度の変化を示す。平均走行速度は 1 回のシミュレーション試行で 3.1 に述べた 774 台の各車両が道路モデルの終点に到達するのに要した時間の平均値をさらに 10 回の試行で平均し、道路長 5000m をこの値で割って求めている。エラーバーは標準偏差を表している。

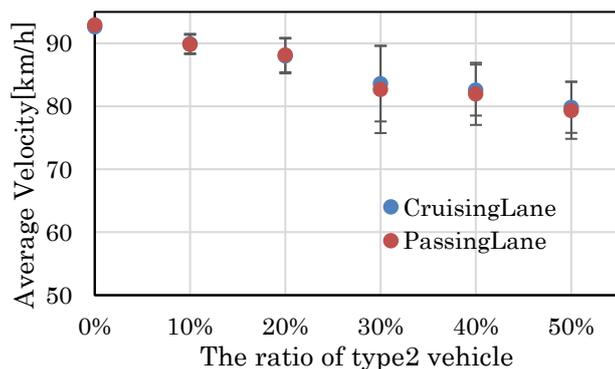


図 2 type2 車両の割合 $\beta_{type2}$ と平均走行速度の関係

図 2 から、 $\beta_{type2}$  が 10%から 20%の範囲では高い平均走行速度となっており、0%の平均走行速度と比較すると渋滞を再現する事が出来てないと考えられる。40%~50%の割合では平均走行速度が 80[km/h]を下回ることもあり、0%の値と比べると渋滞発生の影響が見られる。本論文では $\beta_{type2}=40\%$ として評価を行っている。

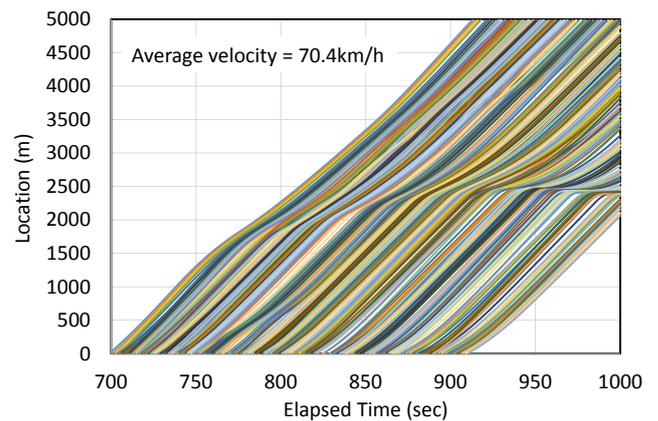


図 3 type2 40%におけるタイムスペースダイアグラム

図 3 は $\beta_{type2} = 40\%$ における走行車線及び追い越し車線に存在する車両のタイムスペースダイアグラムである。横軸はシミュレーション経過時間、縦軸は車両の位置を示している。色分けされたそれぞれの曲線が各車両のシミュレーションにおける走行軌跡である。各時刻・位置における線の傾きが車両速度、線の密度が車両密度を表す。グラフからシミュレーション開始から 800s 当たりで傾きが緩やかになり速度低下の兆候が見られ、以降はそこで発生した後方車両へのブレーキの伝播による減速波の影響を受けて全ての車両が速度低下しているのが見て取れる。900s~950s 辺りでは傾きが殆ど無くなり、また、線の密度が高くなっている。これは車両と車両の距離が短く、速度が低下している事によるものであるから、渋滞となっていることが分かる。本論文ではこの結果を持ってサグ部における渋滞とする。

#### 5. 提案方式の評価結果

次に、提案手法により該当車両が渋滞緩和運転を行う場合の渋滞解消効果を評価する。

図 4 は、本提案方式を適用時のタイムスペースダイアグラムである。上述した減速波が経過時間 800s で発生しているものの図 3 で示した速度制御を行わない場合と異なり、それが後方車両へ伝播していない結果となっている。また、図 5 に車載器搭載率(Penetration)を変化させた場合の平均走行速度の特性を示す。図 5 から、特に VRD については適用非適用に関わらず、全体の平均走行速度に変化が見られず、単一車線で行った評価[4]とは傾向が異なる結果となった。[4]とは異なり、複数車線では type2 車両の割合がより多い状況でない渋滞が生じないことが分かっており、この条件では type2 車両がサグ部で速度低下してこの車両を先頭に渋滞車群が形成され、その後、提案方式によりこの車

両が後方から CEM を受け取り、「速度回復対象車両」となっても、その後続の車両がやはりもともとの速度が低い type2 車両である可能性が高いため場合には直ぐには渋滞の解消には至らないということが理由の一つとして考えられる。一方で、JAD については車載器搭載率が 10%,20%でも平均走行速度の改善が見られる結果となった。これは 1000m という広域な情報伝播によって多くの後方車両に対して情報伝播を行う事が出来、数台が JAD 対象車両となれば後方の渋滞見認識車両全てが JAD をする必要なく、平均走行速度を向上させることが出来るということである。

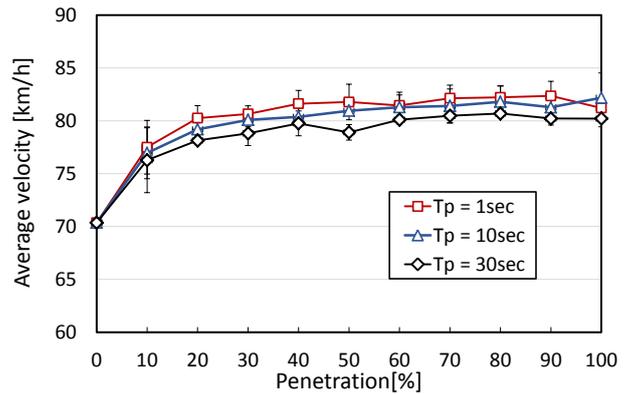


図 6  $T_p$  の値の変化による平均走行速度への影響

最後に今回特に効果が見られた JAD について詳細に調査していく。図 7 はある特定の JAD 対象車両のシミュレーション軌跡を表したものである。図の 800 秒～810 秒の間で傾きが一定となり、減速しているのが見て取れる。これはこの ID 車両が JAD 対象車両と認識され、制御時間である 10s 間減速している結果である。JAD なしにおけるこの車両の最低速度は 850 秒の 48[km/h]であるが、JAD を適用した場合、870 秒における 60[km/h]となっており、減速が小さくなっている事が分かる。これは JAD によって渋滞車群に巻き込まれる時間が遅れることで、減速波の影響を少なくする事が出来ているからであると考えられる。このことから後続車両の最低速度も JAD なしの場合に比べて、高くなっていると想定され、結果的に平均走行速度の増加及び渋滞の解消に繋がっていることが読み取れる。

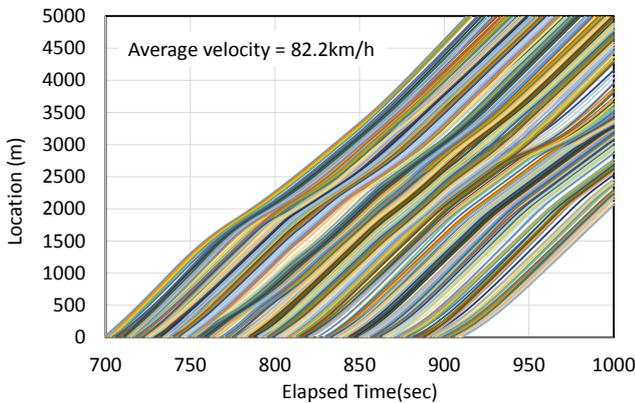


図 4 渋滞緩和運転適用時のタイムスペースダイアグラム

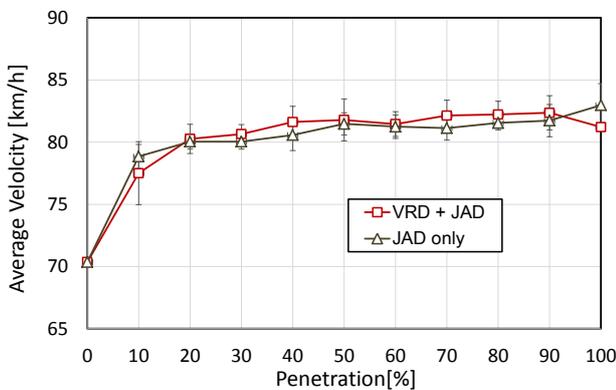


図 5 VRD 及び JAD による平均走行速度への影響

次に、情報送信間隔  $T_p$  を変化させた場合の結果を図 6 に示す。 $T_p$  が 1s の時に比べて、20s, 30s とインターバルが長くなるにつれて、平均走行速度が遅くなる結果となった。30s の条件では、周辺の道路状況認識に時間がかかってしまい  $T_e$  が今回 10s である事から、次の CEM が送信されるまでの間に渋滞解消運転を終了してしまうことで結果的に渋滞に巻き込まれてしまう事が原因であると考えられる。

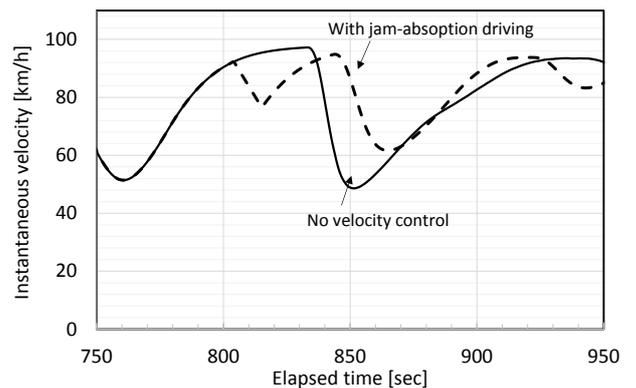


図 7 特定 JAD 車両の瞬時走行速度特性

## 6. 関連研究

サグ部における渋滞の早期解消手法の既存研究として[8,9,10]が挙げられる。文献[8,9,10]は渋滞発生後、車群後方の車両に対して速度を抑制するシステムを考案している。[8]は道路に制御区間を設けて前方状況のフィードバックを行う制御である。サグ部ボトルネックの交通容量を検知し、その交通容量に応じて制御区間における速度の上限値を決定し、渋滞車群に流入す

る事を防ぐものである。文献[9]はある特定の車両に対して JAD を促し、前方車両との車間距離に応じて JAD の影響に起因する渋滞を生じさせないように速度制御を行うものである。文献[10]は、後方への減速波が発生した車両から後方  $n$  台目を渋滞吸収運転対象車両とし、対象になった車両は現在の位置と減速波の情報から、目標とする位置を特定し、その位置に到達するまで速度を減速させながら走行することで JAD を行う手法を提案している。

これらの文献はどれも JAD の有効性を示しているが、どのような車両が後方への車両に JAD を促すのかを、事前の道路状況から車々間通信を用いてリアルタイムで設定しているものはなく、また複数車線での評価は行われていない。

## 7. まとめと今後の課題

本論文では、ARIB-T109 を用いた車々間通信による渋滞緩和運転支援方式について、新たに 2 車線からなる複数車線の上で評価を行った。

評価の結果、VRD(速度回復運転)であるはあまり効果を見ることが出来なかったのに対して、JAD(渋滞吸収運転)は複数車線においても良い結果が見られた。車載器搭載率が 20~30% 等の低い状況においても平均走行速度が 15% 向上するなど JAD の効果が見ることが出来た。

今後の課題として、今回は速度低下閾値  $v_{tar-jad}$  を 70[km/h] と設定したが渋滞吸収運転対象車両から減速波が生じない範囲で適切な速度低下閾値を探すなどの、より詳細な JAD 対象車両の挙動を制御対象時間や固定減速度のパラメータを変化する事で確立させると共に、今回効果を見ることが出来なかった VRD が効果的に働く条件についても検討する。また複数車線の重要な車両挙動である、車線変更挙動に着目した手法を考案していく。

## 参考文献

- [1] 牧野浩志 鈴木一史 鹿野島秀行 山田康右 堀口良太, 「車線変更行動に着目したサグ部渋滞発生要因の分析と渋滞対策アプローチ」, 土木学会論文集 D3(土木計画学), Vol.71, No.5(土木計画学研究・論文集第 32 巻), I\_1001-I\_1009, 2015.
- [2] 西成活裕, 「よくわかる渋滞学」, 株式会社ナツメ社, 2009 年 8 月 10 日初版
- [3] “700 MHz BAND INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEMS”  
[http://www.arib.or.jp/english/html/overview/doc/5-STD-T109v1\\_2-E1.pdf](http://www.arib.or.jp/english/html/overview/doc/5-STD-T109v1_2-E1.pdf), Accessed Sep. 6, 2015.
- [4] 稲船喬志 森野博章, 「自然渋滞緩和を目的とした異種 RF 併用車々間情報伝播方式の実データを用いた性能評価」, 電子情報通信学会技術研究報告 ASN2014-118 2015 年 1 月
- [5] Schakel, W. J., Arem, B. and Netten, B. D., “Effects of Cooperative Adaptive Cruise Control on Traffic Flow Stability”, 13<sup>th</sup> International IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation Systems, 2010.
- [6] Scenargie, [www.spacetime-eng.com/jp](http://www.spacetime-eng.com/jp), Accessed on Sep 14, 2015.
- [7] 岩崎健, 金澤文彦, 坂井康一, 鈴木一史, 「高速道路サグ部における ACC 車両の混入状況に応じた渋滞緩和効果」, 第 10 回 ITS シンポジウム 2011 論文集, 2011.
- [8] B. Gonioros, V. L. Knoop, B. Vanarem, S. P. Hoogendoorn, “Mainstream traffic flow control at sags”, Journal of the Transportation Research Board, vol. 2470, Nov 2013.
- [9] Y. Taniguchi, R. Nishi, T. Ezaki, K. Nishinari, “Jam-absorption driving with a car-following model”, Physica A: Statistical Mechanics and its applications, Vol. 433, pp.304-315, September 2015.
- [10] Zhengbing He, Liang Zheng, Liying Song, and Ning Zhu, “A Jam-Absorption Driving Strategy for Mitigating Traffic Oscillations”, IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS, VOL. 18, NO. 4, APPIL 2017.