

## 路車間通信を用いた合流支援システムによる車両挙動安定性の評価

## Evaluation of Stability of Vehicle Behavior by Merging Support System Based on Vehicle to Infrastructure Communications

菊池 典恭<sup>†</sup> 矢野 貴大<sup>†</sup> 中林 昭一<sup>†</sup> 金子 富<sup>†</sup> 浜口 雅春<sup>†</sup>  
 Noriyasu Kikuchi Takahiro Yano Shoichi Nakabayashi Yutaka Kaneko Masaharu Hamaguchi

## 1. まえがき

高速道路では交通渋滞が度々発生しており、様々な施策が講じられているが、近年でも十分に解決されたとは言えない。国土交通省の報告によれば、年末年始の高速道路の交通損失時間は 546 万人・時間に及ぶとされており[1]、交通渋滞の緩和は急務となっている。

一方、自動運転の研究開発が進み、今日では実用化に向けて実証実験等が行われる段階に至った[2]。自動運転が普及すれば、ドライバーの負担が減るだけでなく、高速道路の交通渋滞の緩和が期待できる。現在検討が進められている自動運転車両の多くは、レーザレンジファインダ等の自律系センサーによる実現を想定している[3]。レーザレンジファインダは見通し内の物体を検知できるが、障壁等があれば、その先にある物体を検知することはできない。高速道路の交通渋滞を起こす要因の一つとされる合流シーンにおいて、合流側を走行する車両（以下、合流車両）は、建造物等に遮られ、本線側を走行する車両（以下、本線車両）を確認できない状況となることが予想される。したがって、自律系センサーのみから構成される自動運転車両の場合、合流シーンにおいて近隣から得られる情報は、人間が運転する場合と本質的に変わらないと考えられ、合流における交通渋滞の課題に対しては改善効果が限定的となる可能性がある。当該課題を解決するためには、自律系センサーのみでは得られない本線車両の情報を提供する新たな支援システムが必要であると考えられる。

そこで本稿では、交通流をより円滑にすることを目的とした路車間通信による合流支援システム（以下、本システム）を提案し、本システムの導入効果を確認するために、合流時の車両挙動がどのように安定するのかをシミュレーションにより評価する。具体的には、典型的な高速道路の合流シーンを想定し、車両検出装置により取得する本線車両の情報を路車間通信により合流前に合流車両に伝え、合流車両は本線車両が存在しない時刻に合わせて本線に到達するように速度を調整するシステムを考え、これが合流シーンの車両挙動の安定化に有効であるかを検証する。

以降の 2. ではシステム構成について説明し、3. では現実シミュレーションを流す上での車両制御モデルについて説明する。4. ではシミュレーションによる評価を行い、最後に 5. で本稿をまとめる。

## 2. システム構成

本システムの構成を図 1 に示す。本システムは、センシングエリア内の本線車両の位置、速度及び車長の情報を取得する手段と、合流車両へ当該車両情報を伝達する手段から構成される。情報を取得する手段としてはレーザレンジ

ファインダ等の車両検出装置を適用し、本線側に設置する。また、取得した車両情報は有線通信等を経由し合流側の路側機まで伝送され、路側機の通信エリアに進入した合流車両に向けて路車間通信により伝送される。なお、本検討で扱う車両は高速道路上における自動運転レベル 2・3（SAE Society of Automotive Engineers International の定義による）の自動運転車両を対象とする[4]。

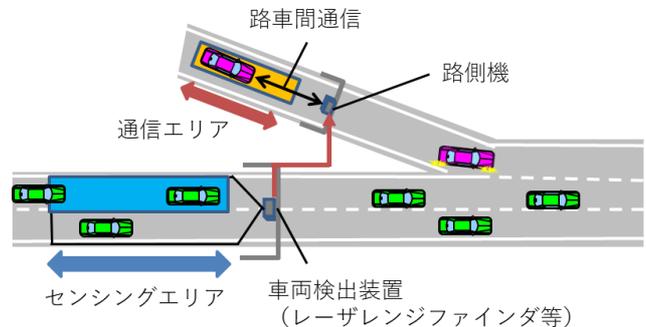


図 1: 本システムの構成

次に、本システムを導入する場合としない場合における車両挙動の違いについて図 2 に示す。まず、本システムを導入する場合は、合流車両がセンシングエリア内を走行する本線車両の状況を把握できるため、路側機を通過する地点から望ましい合流地点に到達するための速度調整を開始することができる。

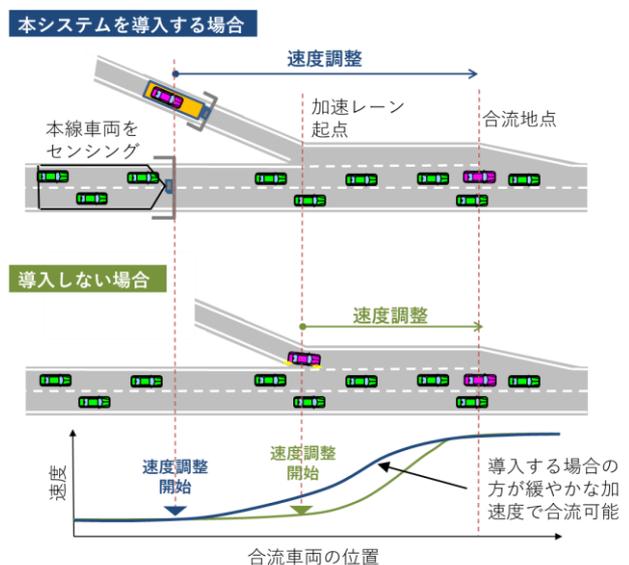


図 2: 本システムの導入による車両挙動の違い

<sup>†</sup> 沖電気工業株式会社 Oki Electric Industry Co.,Ltd.

一方、導入しない場合では、加速レーン起点に到達してから本線車両の位置、速度及び車長を確認し、合流のための速度調整を開始しなければならない。このとき、加速レーンの終端までに本線に合流する必要があるため、本線車両が存在する位置、速度、車長及び加速レーン長によっては、合流車両は大きな加減速を伴い合流せざるを得ない場合が発生する。この状況を更に確認すると、合流車両が加速レーン起点に到達したときに本線車両と横並びになる場合に大きな加減速が発生すると考えられる。横並びを回避するためには、本線車両が存在しない時刻に合わせて合流車両が加速レーン起点に到達すればよい。本システムを導入することで加速レーン起点に到達する前に本線車両の情報が取得できるため、この情報を利用して横並びを回避するように速度調整すれば、合流時の急激な加速度が回避できると考えられる。

3.では本線車両の情報を利用し、できる限り緩やかな加減速度で本線車両と速度を合わせつつ、本線車両が存在しない時刻に加速レーン起点に到達するように合流車両の加速度を調整する車両制御モデルについて考える。

### 3. 車両制御モデル

#### 3.1 概要

本稿では、現実シミュレーションを流す上で、本線車両と合流車両の走行地点に応じて車両制御モデルを選択することを考える。適用する車両制御モデルを図 3 に示す。

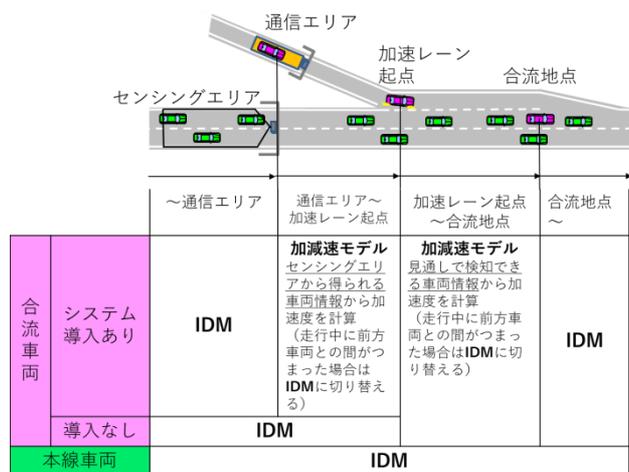


図 3：適用する車両制御モデル

合流車両は通信エリアに進入するまで IDM(Intelligent Driver Model)を適用して走行する[5][6]。IDM は車間制御を行う際に一般的に利用されており、「自車両の速度」「前方車両の速度」「自車両と前方車両との車間」から、前方車両との車間を調整するための加減速度を求める車両制御モデルである。

合流車両は通信エリアから加速レーン起点までは、本システムを導入する場合と、しない場合で車両制御モデルを変更する。導入しない場合は IDM により走行を継続する。導入する場合は横並びを回避するための車両制御モデルを適用し走行する。この車両制御モデルのことを加減速モデルと呼ぶことにし、合流時の適切な加減速度を求めるために利用する。具体的な計算手順は 3.2 に示す。なお、加減

速モデルに従って各車両が独立して走行すると、前方車両との車間が著しく狭くなる場合が発生する。このような場合には加減速モデルでの走行を諦め、IDM に切り変えて以降の走行を継続する。

合流車両は加速レーン起点に到達すると、本システムの導入に限らず、再び、加減速モデルにより合流位置を計算する。このとき、レーザレンジファインダ等の自律系センサーにより半径 100m 以内に存在する全ての本線車両を検出できることを前提とし、検出した本線車両の位置と速度から合流位置を再計算する。なお、加速レーン起点に到達した時点で既に横並びが回避されている状況では、再計算しても結果は変わらず、加速レーン起点到達直後に本線に合流することができる。合流が完了すると以降は IDM により走行する。

また、本線車両は本システムの導入の影響を受けなため、本線の全域において IDM を適用し走行する。

#### 3.2 加減速モデル

加減速モデルは、事前に取得する本線車両の情報を基に、横並びを回避するための複数の走行パターンを想定して加減速度を計算し、それぞれの走行パターンで計算された加減速度の中から最も加減速度が低くなる場合の走行パターンを選び、その走行パターンに従って走行する車両制御モデルである。合流車両は横並びを回避して加速レーン起点に到達するためには図 4 に示すいずれかの走行パターンになると考えられる。桃色にハッチされた領域はいずれの走行パターンでも同じ面積となり、加速レーン起点までの走行距離を意味する。

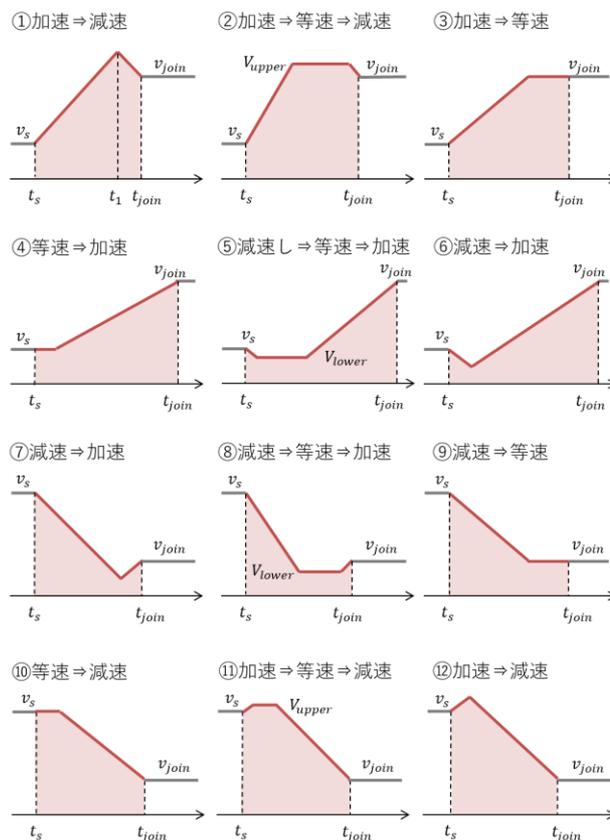


図 4：加減速モデルにおける走行パターン

どの走行パターンの場合が最も加減速度が低くなるかは、合流車両の速度、本線車両の現在位置及び速度によって決まる。以下では、便宜上、走行パターン①の計算手順について説明する。ただし、その他の走行パターンも走行パターン①と同様の手順で計算できる。

合流車両は車両検出装置によりセンシングエリア内を走行する本線車両の位置、速度、車長及びこれらの情報を取得した時刻について取得できる。本線車両の位置の時間変化は、取得した車両位置に対して、取得してから経過した時間に当該車両が等速で進んだ変位を加算することで推定できる。また、全ての車両情報はスナップショットのように一括で取得できるものとし、センシングエリアのサイズ  $L$  はあらかじめ把握できることを前提とすれば、センシングエリア内に存在する全ての本線車両の情報から逆算して、加速レーン起点に本線車両が存在しない時刻も推定できる。この時刻から見積もった本線車両が存在しない範囲のことを候補位置  $x_c$  と呼ぶ。

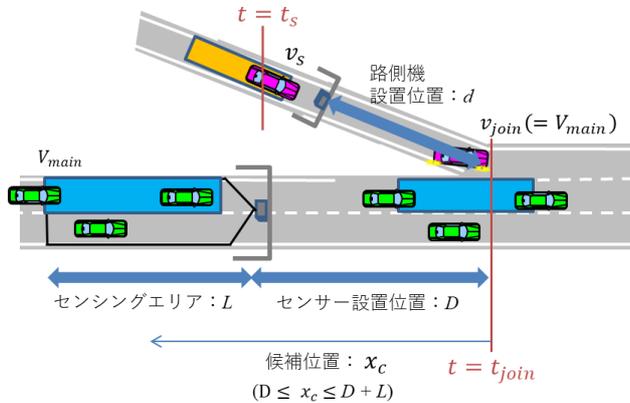


図5：加減速モデルのパラメータ

合流車両における加速レーン起点での車両速度  $v_{join}$  は、路側機通過の時刻を  $t_s$ 、その時の速度を  $v_s$ 、加速レーン起点の到達時刻を  $t_1$  とし、加速と減速が切り替わる時刻  $t_1$  とすれば、式(1)として導ける。このとき、最も低い加減速の値となるためには、加速と減速の絶対値が同じになる必要がある。つまり、加速を  $a$  とすれば、減速は  $-a$  となる。

$$v_{join} = V_{main} = v_s + a(t_1 - t_s) - a(t_{join} - t_1) \quad (1)$$

更に通信エリアから加速レーン起点までの走行距離は路側機設置位置までの距離  $d$  と同じになるため、式(2)が導ける。

$$d = v_s(t_1 - t_s) + \frac{1}{2}a(t_1 - t_s)^2 + (v_s + a(t_1 - t_s))(t_{join} - t_1) - \frac{1}{2}a(t_{join} - t_1)^2 \quad (2)$$

ここで、 $T = t_{join} - t_s$  とおき、(1)(2)式から加速度  $a$  について解くと、式(3)が導ける。

$$a = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - AC}}{A} \quad (3)$$

ただし、 $A$ 、 $B$  及び  $C$  は下記とする。

$$\begin{cases} A = T^2 \\ B = v_{join}T + v_sT - 2d \\ C = -(v_{join} - v_s)^2 \end{cases}$$

また、本線車両が等速  $V_{main}$  で走行することを仮定した場合、車両が存在しない候補位置  $x_c$  も同様に移動し、 $T$  秒後には加速レーン起点に到達することから、式(4)が導ける。

$$T = \frac{x_c}{V_{main}} \quad (4)$$

ここで、 $x_c$  を変更しながら式(3)(4)に代入していき、出力された加速度の中から最も低くなる値を走行パターン①での加速度  $a_1$  とする。この計算を各走行パターンで実施し、求められた加速度  $a_1$  から  $a_{12}$  の中から最も低い加速度の走行パターンを選択する。

なお、後述する道路ケースの法定速度等を考慮すれば、車両速度は上限  $V_{upper}$  と下限  $V_{lower}$  が設けられるため、走行パターン②⑤⑧⑩のように途中で等速の区間が発生する場合がある。ただし、いずれの走行パターンも同様の手順で方程式を立てれば加速度  $a$  を求めることができる。

## 4. シミュレーション評価

### 4.1 概要

本稿で検討対象とする道路ケースは、都市高速道路及び都市間高速道路とし、4.2 では各道路ケースにおける本線車両、合流車両の速度範囲及びシミュレーションの条件を整理する。4.3 では本システムに適用する路車間通信について説明し、4.4 では車両挙動安定性の評価方法を定義する。更に、4.5 では路側機及びセンサーの設置位置を設計する。以上の設計値を用いて、4.6 では都市高速道路、4.7 では都市間高速道路のシミュレーション結果について示す。

また 4.8 では本システムを導入するにあたり、普及の途中の段階でも本システムの有効性が期待できるものか、あるいは、普及が進んだ段階でないと期待できないものかを確認するため、通信機の搭載率が与える影響について評価する。更に 4.9 では設置コストの観点から高度なセンシング機器の必要性について評価する。最後に 4.10 で路側機を新たに追加する効果について評価する。

### 4.2 道路ケースとシミュレーション条件

本稿のシミュレーションでは、都市高速道路及び都市間高速道路の道路ケースにおける本線車両、合流車両の速度範囲について表 1 に示す値とする。また、シミュレーションで用いる各パラメータについて表 2 に示す。

表1：道路ケースと各位置における速度

パラメータ	都市高速道路		都市間高速道路	
	上限 $V_{upper}$	下限 $V_{lower}$	上限 $V_{upper}$	下限 $V_{lower}$
本線車両 走行速度 [km/h]	60	40	120 <sup>※1</sup>	40
合流車両 通信時の走行速度 [km/h]	60	20 <sup>※3</sup>	100 <sup>※2</sup>	40
				速度制御中の走行速度範囲 [km/h]
		加速レーン到達時の走行速度 [km/h]	40	

※1：最高速度が将来に引き上げられた場合を想定

※2：ランプ上の合流車両の最高速度が、※1の引き上げに伴い見直された場合を想定

※3：ETCゲート通過速度と同程度を想定

表 2: シミュレーションの評価条件

パラメータ		値		備考
		普通車	大型車	
通信エリア		33.3m		120km/h×1sに相当
センシングエリア: L		200m		
車両	車長	5m	12m	IDMの計算で利用
	最大加速度	0.2G	0.15G	IDMの計算で利用
	最大減速度	0.25G	0.15G	IDMの計算で利用
	発生頻度	80%	20%	
車両制御	処理時間	1.5s		センシング、通信による処理遅延含む
	最小車間距離	5m		IDMの計算で利用

G:重力加速度

### 4.3 路車間通信

自動運転への活用を目的とした ITS 無線通信として、ITS-FORUM RC-005、ARIB STD-T109 及び ARIB STD-T75 をベースとした無線通信方式が検討されている[7]。実環境における通信成功確率や通信エリアサイズ等の通信性能は各方式で異なるが、本稿では車両の挙動に主眼を置いた基本的な評価を行うため、4.6 から 4.10 までの評価は、理想的な環境を想定して路車間通信の通信成功確率を 100%として実施する。

なお、4.8 では搭載率の評価を行うが、本稿のシミュレーション上では、搭載率と通信成功確率は同様の影響として評価できるため参照されたい。

### 4.4 車両挙動安定性の評価方法

本稿において「車両の挙動が安定する」とは、低い加減速度で車両が合流できることであると定義する。ただし、特定の車両のみが安定すれば良いのではなく、全体の車両挙動が安定する必要がある。すなわち、図 6 に示すように、合流に伴う各車両の最大加減速度を統計的に求め、それを累積分布関数で表し、本システムを導入した場合の累積分布関数が、導入しない場合より加速度が低い方向に移動すれば、全体の車両挙動が安定したと評価する。

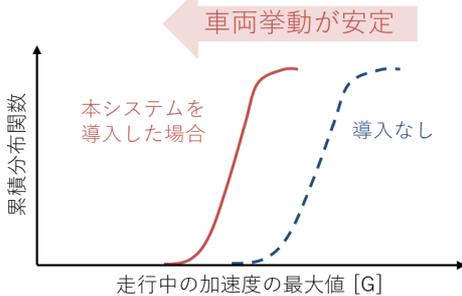


図 6: 車両挙動安定性の評価方法

### 4.5 路側機及びセンサーの設置位置

次に、路側機及びセンサーの設置位置を設計する。式(3)によれば、加減速モデルにより計算される加速度は、式(5)に示すように、本線車両の走行速度 $V$ 、合流車両の走行速度 $v$ 、路側機設置位置 $d$ 及び候補位置 $x_c$ に影響を与えるセンサー設置位置 $D$ により計算される。

$$a = f(d, D, V, v) \quad (5)$$

ここで目標とする最大加減速度を設定する。文献[8]によ

れば、ドライバーが不快に感じず、車両が安定的とみなせる走行において、最大加減速度が概ね 0.2G 以下となっている。また、普通車とトラックなどの大型車では挙動が安定した走行が可能となる最大加減速度も異なる[9]。これらを考慮し、最大加減速は 0.15G 以下となるように設計する。

更に $v$ 及び $V$ は表 1 に示す範囲の値をとる必要がある。以上のパラメータの値を各範囲の中で変えていき、そのときのセンサーの設置位置  $D$  と路側機の設置位置  $d$  の値をプロットした結果を図 7 に示す。青色にハッチされた領域が都市高速道路の場合に設置可能な範囲を示す。同様に、橙色にハッチされた領域が都市間高速道路の場合に設置可能な範囲を示す。

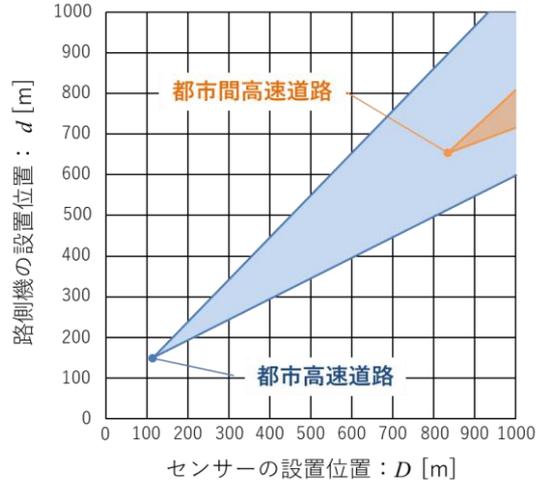


図 7: 路側機とセンサーの設置位置の関係

各領域の中から、設置位置が加速レーン起点から可能な限り短くなるように選定することを考慮し、都市高速道路と都市間高速道路の路側機設置位置及びセンサー設置位置を表 3 に示す値に決める。

表 3: 路側機とセンサーの設置位置

パラメータ	都市高速道路	都市間高速道路
センサー設置位置: $D$	110m	842m
路側機設置位置: $d$	154m	662m

### 4.6 都市高速道路の結果

以降では、シミュレーションによる評価結果を示す。まず、都市高速道路において、走行開始時の本線速度を 40km/h 及び合流速度を 40km/h とした場合の合流車両の速度と加速度の変化の一例を図 8 に示す。シミュレーションでは本線車両及び合流車両を連続的に発生させるが、図 8 は発生させた車両の中から特定の合流車両に注目したものである。

本システムを導入しない場合では、加速レーン起点に到達するまでは本線車両の情報が得られないため、加速レーン起点到達後に速度調整を開始する。加速レーン起点到達時に本線車両が存在しなければ、そのままの速度で合流できるが、図 8 に示す例のように、本線車両が偶々存在した場合には、横並びしたままでは合流できないため、一度速度を落としてから、再度、速度を上げて本線車両の速度に合わせる必要がある。このとき合流車両は大きな加減速度が生じてしまう。

一方、本システムを導入する場合には、路側機設置位置から速度を調整することで、加速レーン起点到達時において横並びが回避されるため、そのまま合流することができる。路側機設置位置から加速レーン起点までは速度調整により加減速が生じるが、十分に長い距離の中で速度調整がされるため、導入しない場合に比べて加減速度が低くなる。

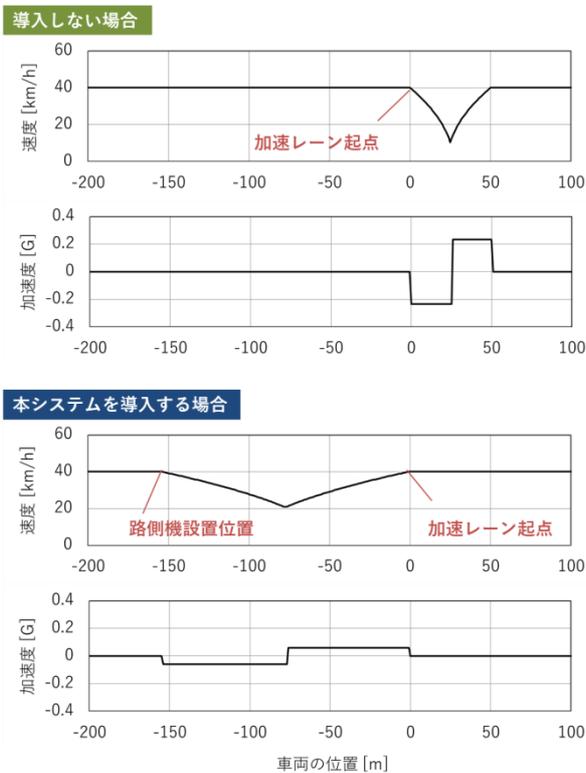


図 8：速度と加速度の一例

次に、走行中の加速度の最大値について累積分布関数を確認する。これは図 8 に示す 1 台の結果だけではなく、シミュレーションで走行させた 1000 台の合流車両の加速度を統計的に取得したものである。また、車両発生間隔は 6 秒車間、9 秒車間、12 秒車間及び 15 秒車間で実施し、本線側と合流側で同じ車両発生間隔に統一した。図 9 に示すように、本システムを導入する場合には、いずれの車両発生間隔においても、累積分布関数が加速度の低い方に移動することが確認できる。この条件では、車両発生間隔が 6 秒車間の場合を除けば、全ての車両において設計の目標とした最大加減速 0.15G 以下を満足することができる。また、車両発生間隔が 6 秒車間の場合も改善が確認できる。

同様に、本線速度が 40km/h 及び合流速度が 40km/h の場合についても、本システムを導入する場合の方が、累積分布関数が加速度の低い方に移動することが確認できる (図 10)。ただし、車両発生間隔が 6 秒車間の場合は、本システムを導入する場合としない場合で累積分布関数が近づき、明確な効果が確認できなくなる。この理由については 4.7 で示す。

4.7 都市間高速道路の結果

都市間高速道路についても同様に確認した (図 11 及び図 12)。本システムを導入する場合の方が、累積分布関

数が加速度の低い方に移動する傾向は変わらない。ただし、車両発生間隔が 6 秒車間の場合では、図 10 と同様に、明確な効果が確認できない。

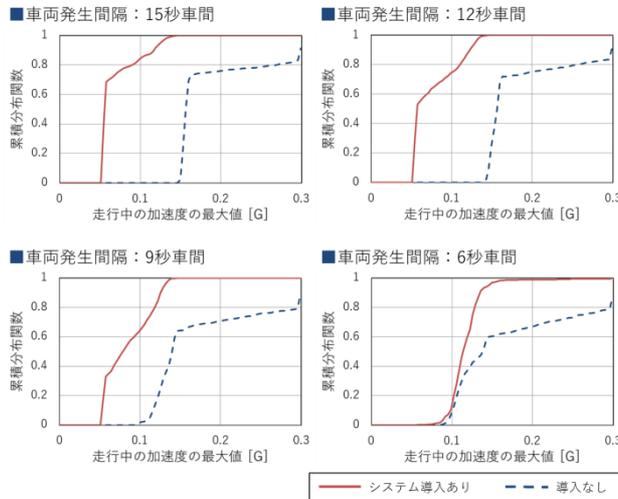


図 9：都市高速道路 (本線 60km/h、合流 40km/h)

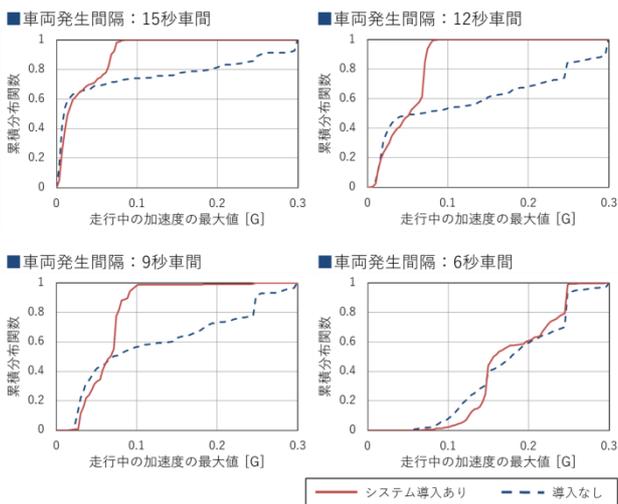


図 10：都市高速道路 (本線 40km/h、合流 40km/h)

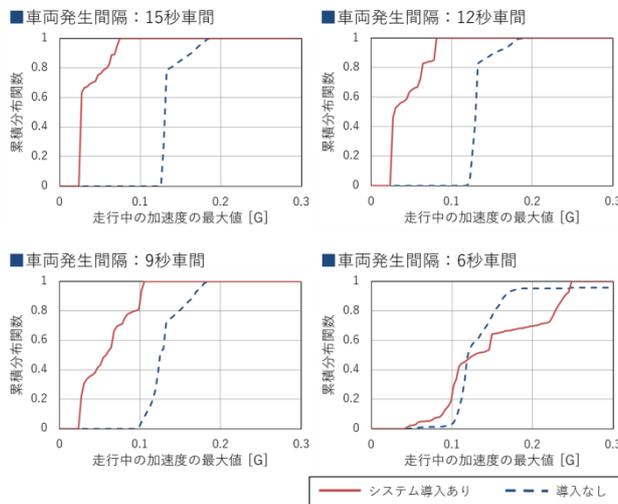


図 11：都市間高速道路 (本線 80km/h、合流 40km/h)

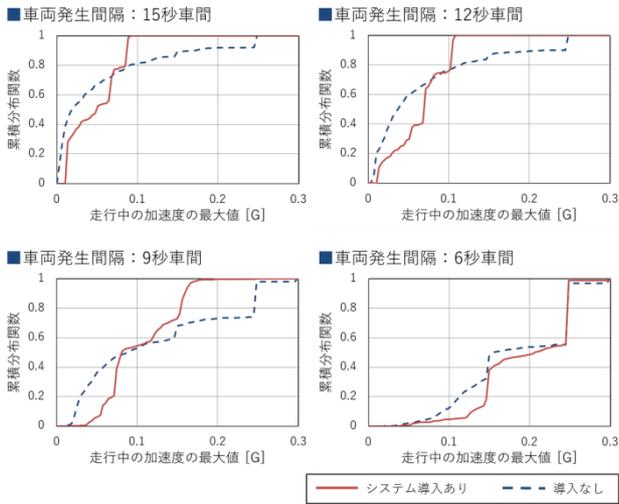


図 12：都市間高速道路（本 40km/h、合流 40km/h）

本稿で適用した IDM は、合流後の前方車両との車間が十分に空いている場合には、更に車間を空ける動作をしない。例えば、車両発生間隔が 9 秒車間、12 秒車間及び 15 秒車間の場合では、車両密度が低く、合流後も十分に車間が空いている可能性が高いため、更に車間を空けようとしな。しかし、車両発生間隔が 6 秒車間の場合では、図 13 に示すように、車両密度が高くなり、合流後の車間が十分ではない場合に前方車両との車間を空け始める。このとき、後続する本線車両もその影響を受け、車間を空け始める。

■合流により後続車両が次々と減速を開始する

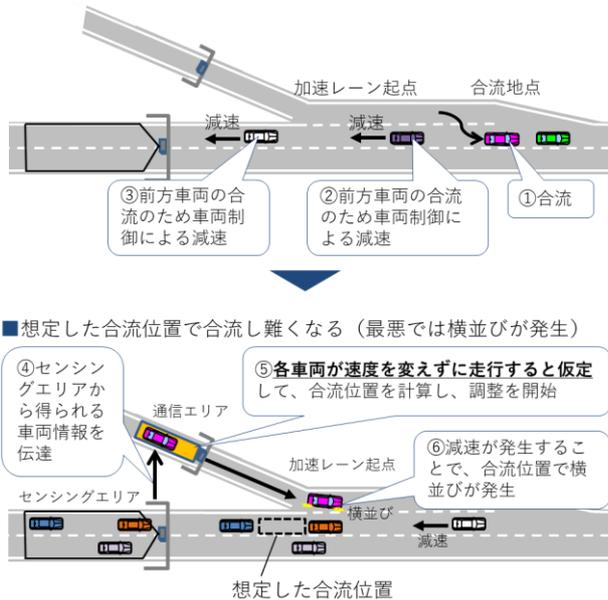


図 13：狭い車両発生間隔の場合に効果が得られない要因

本システムにおいて、本線車両が車間を空けることは、合流時刻に加速レーン起点に本線車両が存在してしまう確率が上がることを意味する。合流車両はセンシングエリアから得られる本線車両の位置と速度情報をもとに、各本線車両が速度を変えずに等速で走行することを仮定し、合流位置を計算する。しかし、本線車両が車間を空け始めるこ

とで減速が生じると、等速を仮定して計算した合流位置との誤差が生じるため、横並びが発生する確率が増加する。このとき、導入しない場合と同じように、大きな加減速度を伴った速度調整が必要となる。車両発生間隔が 6 秒車間の場合では横並びの影響が顕著に現れる。

#### 4.8 搭載率の評価

本評価では、合流車両の搭載率を 0% から 100% の間で 20% 刻みに変更してシミュレーションを実行する。通信機を搭載する車両は、設定した搭載率になるように確率的に決める。なお、搭載率の評価は通信成功確率の評価と同様に扱うことができる。例えば、搭載率 60%（及び通信成功確率 100%）の条件で評価した結果は、通信成功確率 60%（及び搭載率 100%）の条件で評価した結果と同じになる。

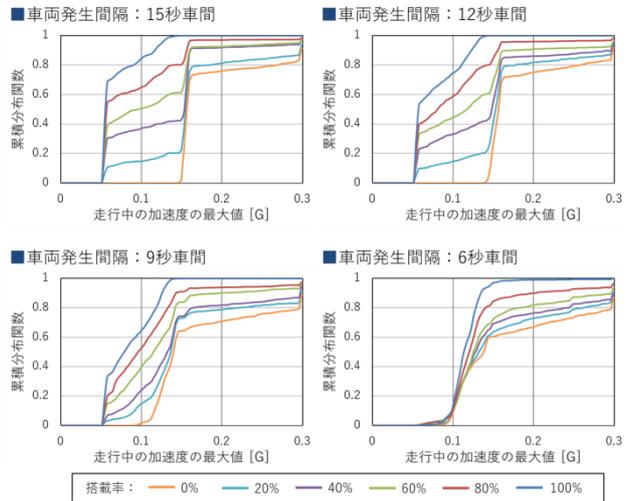


図 14：搭載率の影響：都市高速道路（本線 60km/h、合流 40km/h）

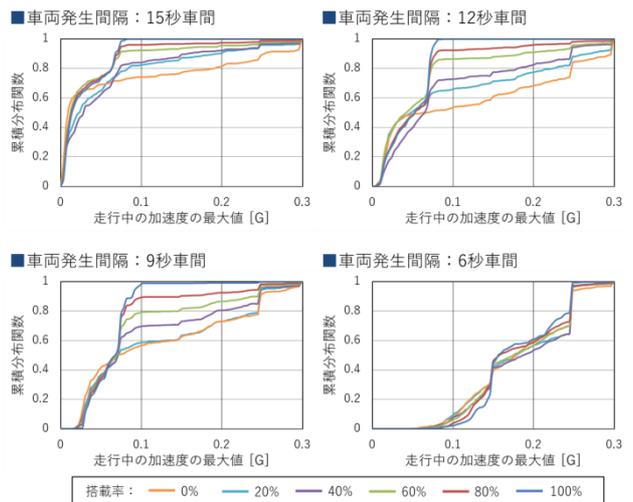


図 15：搭載率の影響：都市高速道路（本線 40km/h、合流 40km/h）

都市高速道路におけるシミュレーション結果を図 14 及び図 15 に示す。いずれの車両発生間隔の場合においても搭載率が上がることで、累積分布関数が徐々に加速度が低

い方向に移動することが確認できる。この結果から本システムは通信機が普及する途中の段階においても、搭載率に依拠して有効性が期待できるものと考えられる。

#### 4.9 高度なセンシング機器の必要性の評価

本線車両の位置と速度を正確に取得するためには高度なセンシング機器が必要となる。正確な情報が取得できないまでも、平均的な速度の値のみを取得し、この情報を合流車両に伝えるだけで車両安定化の効果が期待できるのであれば、システムの敷設規模が小さくなるという点で実用化にとって有利である。そこで、平均速度の情報のみを提供する場合の効果について評価する。ここで、本線側の平均速度の情報のみを提供する場合、所定の計算により一定の加速度を加えることで、加速レーン起点までに本線速度に合わせることはできるが、各本線車両の位置と正確な速度が把握できないため、加速レーン起点到達時に横並びになることが発生する。すなわち、本評価は、横並びが発生することによる有効性への影響を確認することと同じである。

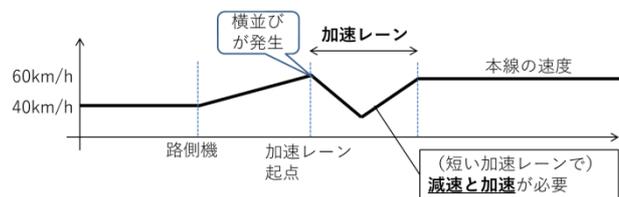
速度調整のみを行った場合の結果について図 16 に示す。車両発生間隔が 9 秒車間、12 秒車間及び 15 秒車間の場合では、横並びを回避した場合に比べれば劣化こそするが、累積分布関数が加速度の低い方向に移動することから、効果は期待できると考えてよい。ただし、車両発生間隔が 6 秒車間の場合においては、本システムを導入した方がむしろ悪くなる場合がある。

この原因についての概要を図 17 に示す。本評価条件において、速度調整のみを行った場合、40km/h から 60km/h に加速して加速レーン起点に到達する。ここで、横並びが発生した場合、本線の速度と同じ 60km/h のまま走行を続けても合流できないため、一度、減速し、横並びの状態を避けたいうえで、加速し合流しなければならぬ。

一方、導入しない場合では、本線の情報が取得できないため、40km/h のまま加速レーン起点に到達する。ここで、横並びが発生した場合、40km から加速のみを利用して合流することになる。つまり、同じ速度で横並びになってしまう方が、短い加速レーンの中で加速と減速の両方を行わなければならない分、合流時の加減速度が高くならざるを得なくなってしまう。

以上より、速度情報のみの場合では効果が低下するため、横並び回避機能まで実装の方が望ましいと考えられる。つまり、本線車両の位置と速度を正確にセンシングできる機器を備えるシステム構成が望ましいと考えられる。

■本線の速度と同じ速度で横並びになる場合



■本線の速度と異なる速度で横並びになる場合



図 17：加速度が大きくなってしまいう原因

#### 4.10 路側機及びセンシングエリアの設置位置

表 3 に示すように、都市間高速道路では、路側機やセンシングエリアは加速レーン起点から大きく離れた位置に敷設する必要がある。これは、都市間高速道路の場合、本線車両及び合流車両の取り得る走行速度の幅（最大値と最小値の差）が大きく、様々な走行速度に対応して設計する必要があることに起因する。

しかし、これほど離れた場所に路側機やセンシングエリアを設置するのは、設置場所が限定されるという点で実用化に課題がある。また、現実の走行では等速を仮定できないため、離れた場所での車両情報を取得しても、加速レーン起点に到達したときには大きな誤差が生じ、車両情報が役に立たないことも考えられる。

ここで、路側機やセンシングエリアを遠方に設置しなければならないのは、様々な走行速度に対応させるためであるので、通信エリアに進入する速度を限定し、走行速度の幅を小さくできれば、これらを遠方に設置しなくてもよくなる。例えば、合流車両が通信エリアに進入する時点で、常に本線速度の±20km/h 程度の範囲に収まる走行速度となるように制御できれば、走行速度の幅が小さくなるため、路側機やセンシングエリアを近傍に設置できるようになる。

このとき、本線を通る車両群の平均走行速度を算出しておき、これを合流車両が通信エリアに到達する前に提供しておけば、合流車両は速度調整の処理を進めておくことができる。例えば、図 18 に示すように、新たに通信エリア B (従来の通信エリアを通信エリア A とする) を設ける方法を考える。通信エリア B 内を走行中の合流車両は本線の平均走行速度を得ることができるため、通信エリア A に進入するまでに本線速度の±20km/h 程度になるように速度調整を行うことができる。更に、通信エリア A に進入すると、センシングエリアから得られる本線車両の正確な位置と速度情報が取得できるため、これまでも同様に、加減速モデルを利用して横並び回避と本線との最終的な速度調整を行うことができる。なお、本線の平均走行速度の情報は概算で良いことから、従来のセンシングエリアで取得で

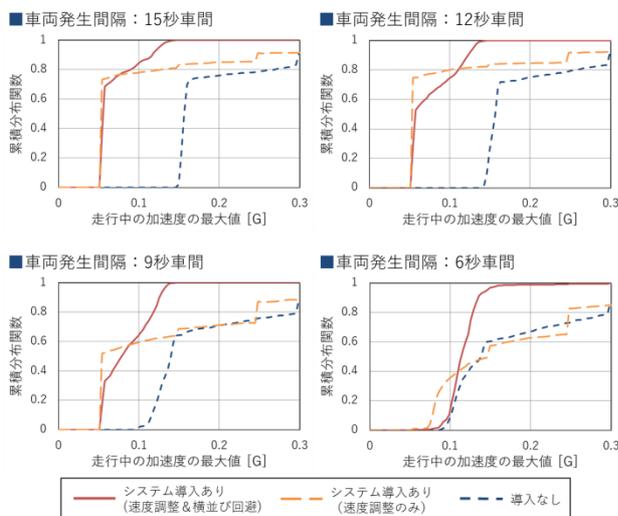


図 16：速度調整のみの効果

きる本線車両の速度情報を用いて計算できるため、通信エリア B に対応して、新たにセンシングエリアを敷設する必要はない。

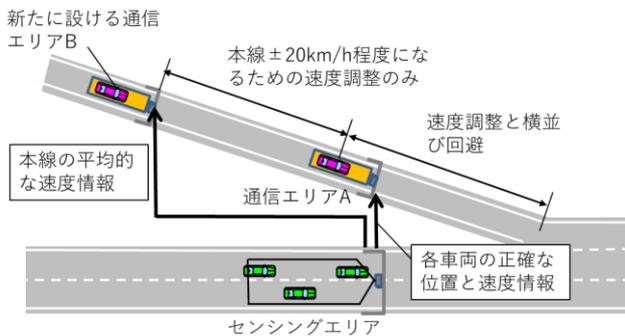


図 18：新たに通信エリアを設ける方法

以下では、効果を確認するために典型的な例について評価する。通信エリア B は路側機から 300m 離れた場所に設定する。本線速度を 100km/h とし、合流車両は平均走行速度の情報を受け、速度を 40km/h から 80km/h まで上げて通信エリア A まで走行する。通信エリア A に進入すると、センシングエリアから得られた本線車両の正確な位置と速度情報を基に合流位置を計算し、80km/h から本線速度である 100km/h に速度を上げながら加速レーン起点まで走行する。

累積分布関数の結果を図 19 に示す。平均走行速度の情報を事前に提供することで、累積分布関数が加速度の低い方向に移動することを確認した。これにより、路側機やセンシングエリアを加速レーン起点から大きく離れた位置に敷設せずとも、車両挙動の安定化が期待できる可能性を示した。

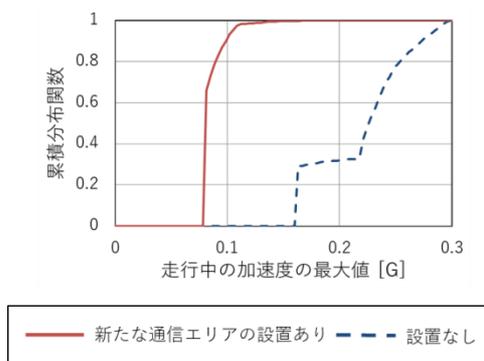


図 19：新たに通信エリアを設けた場合の効果

## 5. むすび

本稿では、路車間通信を用いた合流支援システムを導入することで、導入しない場合に比べて、車両が安定して走行できるようになるかをシミュレーションにより確認した。都市高速道路及び都市間高速道路の道路ケースで検証したところ、車両発生間隔が 9 秒車間、12 秒車間及び 15 秒車間の場合は、本システムを導入することで合流に伴う加速度がドライバーにとって不快に感じない 0.15G 以下となる傾向となり、本システムが車両挙動の安定化に繋がるこ

とを確認した。これにより、高速道路の合流シーンにおける渋滞の改善策の一つとして、本システムを適用できる可能性を示した。

一方で、車両発生間隔が 6 秒車間のように車両密度が高い場合には、近傍の車両が減速を始めることから、本線車両位置の推定に誤差が生じ、横並びが発生するため、本システムだけでは交通流の円滑化に対して十分な改善が見込めないことを確認した。当該課題は合流地点近傍で車両間の速度情報を交換することで対処できると考えられ、例えば、情報交換の手段として車車間通信[10][11]を利用すれば改善できる可能性がある。

また、新たに路側機を追加し、2 段階で速度を調整する方法を提案し、路側機設置の位置が限定されてしまう課題について解決できる可能性を示した。

なお、本稿のシミュレーション評価では一般的に利用されている IDM を実装したが、車両間隔が短い場合の挙動については実際との乖離が大きくなることが報告されており[6]、より現実的な挙動に近づけるためには、IDM を別の車両制御モデルに変更する、あるいは IDM を改良する必要がある。

## 謝辞

本研究は、SIP (戦略的イノベーション創造プログラム) 「実環境を想定した自動走行支援通信のメッセージセット及びプロトコルに関する調査検討」によって実施された。

## 参考文献

- [1] 国土交通省, “高速道路の交通状況ランキング (平成 27 年 年末年始)”, [http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-data/pdf/ranking\\_5.pdf](http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-data/pdf/ranking_5.pdf)
- [2] 内閣官房 IT 総合戦略室, “ITS・自動運転を巡る最近の動向”, 2017.
- [3] 津川 定之, “自動運転技術の発展”, 国際交通安全学会誌, Vol.40, No.2(2015).
- [4] “SAE J3016: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles”, [https://www.sae.org/standards/content/j3016\\_201609/](https://www.sae.org/standards/content/j3016_201609/)
- [5] M. Treiber, A. Hennecke and D. Helbing, “Congested Traffic States in Empirical Observations and Microscopic Simulations,” *Physical Review E*, Vol.62, No.2, pp.1805-1824, 2000.
- [6] A. Kesting, M. Treiber, and D. Helbing, “Enhanced intelligent driver model to access the impact of driving strategies on traffic capacity,” *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 368, no.1928, pp.4585-4605, 2010.
- [7] “自動走行支援通信のメッセージセット及びプロトコルに関する調査検討”, [www.sip-adus.go.jp/file/503\\_s.pdf](http://www.sip-adus.go.jp/file/503_s.pdf)
- [8] 田中 裕章, 竹森 大祐, 宮地 智弘, 入部 百合絵, 小栗 宏次, “自動車の制動時の安心感に関する研究”, *DENSO TECHNICAL REVIEW*, Vol.21 (2016).
- [9] 橋本 博, 川越 麻生, 岡山 巧, “大型トラックの制御時減速度調査”, *JARI Research Journal*, Vol.30, No.11 (2008).
- [10] 小川 伯文, “SIP 自動走行システムにおけるコネクテッド・ピクルへの取り組み”, 国際交通安全学会誌, Vol.43, No.3(2019).
- [11] 吉川 潤, 湯 素華, 小花 貞夫, “狭域交通情報共有のための車車間通信における車両位置情報に基づく効率的な中継転送方式の提案”, *情報処理学会論文誌*, Vol.57, No. 1, pp.43-53, 2016.