

# 都市高速における追従応答性を考慮した 車両制御技術の適用可能性に関する研究

佐野 正彦<sup>1</sup>・松永 弘明<sup>2</sup>・入江 喜朗<sup>3</sup>・  
高本 聡<sup>4</sup>・橋本 洋介<sup>5</sup>・塩見 康博<sup>6</sup>

<sup>1</sup>正会員 株式会社地域・交通計画研究所 (〒540-0031 大阪府大阪市中央区北浜東 2-19)  
E-mail:sano@rtp.co.jp

<sup>2</sup>非会員 株式会社地域・交通計画研究所 (〒540-0031 大阪府大阪市中央区北浜東 2-19)  
E-mail:hiro@rtp.co.jp

<sup>3</sup>非会員トヨタ自動車株式会社 自動運転・先進安全開発部 (〒102-0074 東京都千代田区九段南 2-3-18)  
E-mail:yoshiaki\_irie@mail.toyota.co.jp

<sup>4</sup>非会員トヨタ自動車株式会社 電動パワトレ制御機能開発部 (〒471-8571 愛知県豊田市トヨタ町 1)  
E-mail:satoshi\_takamoto@mail.toyota.co.jp

<sup>5</sup>非会員トヨタ自動車株式会社 電動パワトレ制御機能開発部 (〒471-8571 愛知県豊田市トヨタ町 1)  
E-mail:yohsuke\_hashimoto@mail.toyota.co.jp

<sup>6</sup>正会員 立命館大学准教授 理工学部環境都市工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)  
E-mail:shiomi@fc.ritsumei.ac.jp

近年、画像センシング技術の精度向上によって走行軌跡データが普及しつつある。これらのデータを活用し、渋滞の原因を明らかにすることで、交通流阻害要因を考慮した車両制御技術によって円滑な交通流実現に寄与できる。従来、都市高速における交通流阻害要因に関する研究は多数行われてきたが、車群を走行する追従応答性に着目した速度低下メカニズム、および追従応答性を考慮した車両制御技術の提案・効果検証に関する研究は詳細な解析用データが入手出来ず、進んでいなかった。本稿では Zen Traffic Data により追従応答性と速度低下の関係を分析し、交通流阻害要因を明らかにすることで、車両制御技術を適用した渋滞緩和の効果を検証するものである。Zen Traffic Data の分析結果から、追従応答性と車群の速度低下の相関性を確認した。またマイクロ交通シミュレータを用いた実験により、追従応答性を向上させた車両の投入によって総走行台時間が減少することを明らかとした。これらの結果より、車両制御による渋滞緩和施策の可能性が示された。

**Key Words:** *continuous vehicle trajectory data, car-following, sensitivity, microscopic simulation, adaptive cruise control*

## 1. はじめに

### (1) 研究の背景と目的

日本における高速道路の渋滞損失は、年間約 50 億人時間、約 280 万人分<sup>1)</sup>の労働力に匹敵し、多大な経済的損失を被っている。また、渋滞発生時には環境負荷や事故リスクの増加要因になるなど、渋滞対策は極めて重要性の高い課題である。

他方、近年では画像センシング技術の精度が向上し、広範囲で長時間の走行軌跡データが普及しつつある。これらのデータ分析によって、道路の実容量低下箇所の特

定や速度低下メカニズムを把握することができれば、ポイントの渋滞対策実施の可能性が高まる。定量的な把握が困難であった速度低下と、その原因となる個々の車両挙動の関係を明らかにし、その原因対策を ACC (Adaptive Cruise Control) に織り込むことで、渋滞低減を期待できる。

以上の背景から本稿では、まず、個々の車両挙動特性に着目した速度低下のメカニズムを明らかにする。その結果に基づいて、速度低下を緩和させる追従性能を定義し、それを搭載した車両を投入することによる渋滞緩和効果についてのシミュレーション評価を行う。

### (2) 研究の位置づけ

高速道路ボトルネックの交通流に関する既往研究として、越ら<sup>2)</sup>は渋滞発生メカニズムを以下の通りに説明している。すなわち、i) 交通量が増加すると、追越車線に偏りが生じ、ii) 低速車両を先頭にした密で大きな車群が形成される。その際、iii) 先頭車両の僅かな速度低下が後続車両に伝播し、iv) 車群後方で大きな速度低下が生じる。v) その結果として渋滞が発生する。これを受け、速度低下と車群の関係を定量化する研究<sup>4)5)</sup>はこれまでも多くなされているが、それらは定点観測データに基づくものであり、交通流の時間的・空間的なダイナミクスを捉えられていない、という課題があった。

玉井・宇野<sup>7)</sup>は、車両軌跡データを用いて、追従行動特性の多様性と、追従行動特性と速度低下の関係性について分析を行った。その結果、低速状態の中で追従した車両の内には一定程度、前方車両との関係の変化に対して敏感には反応しない車両が存在することを明らかとしている。ここで、前方車両の変化に対する俊敏性や同調性を「追従応答性（詳細な定義は後述）」と定義すると、当該論文では、追従応答性と速度低下の関係性を示唆する結果は得られているものの、車群内の速度低下・回復の原因車両の追従応答性は明らかにされていない。

追従応答性に関して、鈴木ら<sup>8)</sup>は交通流に及ぼす ACC の効果をシミュレーションにより検証しているが、交通流効果の視点のみならず製品としての必要な要件を考慮しつつ、追従応答性悪化の原因を排除できる ACC 設定値については言及がない。

以上を踏まえ、本稿では下記 2 点の特徴が挙げられる。

- ① 車両軌跡データから速度低下・回復原因車両の特定を試み、追従応答性の関係を明らかにすること。
- ② ACC 制御における製品として必要な要件を織り込み、車両制御技術で対応可能な効果を検証すること。

## 2. 使用データの概要

### (1) 対象区間・データ構成

本稿では、阪神高速道路株式会社の「Zen Traffic Data」<sup>9)</sup>の阪神高速 11 号池田線上り塚本合流付近（約 2km）の片側 2 車線区間を使用する（図-1）。

Zen Traffic Data は、阪神高速道路株式会社が画像センシング技術を用いて、対象区間を走行する車両の走行軌跡データを 0.1 秒単位で生成したものである。車両軌跡データベースは、車両軌跡、車両属性情報、路面線形情報に区分され、うち車両軌跡のデータ項目は車両 ID、時刻、速度、緯度、経度、対象区間のキロポストである。当該区間では、5 日×1 時間のデータが提供されており、本稿では、速度低下に関するデータ分析では 1 日で最も混雑している朝 7 時台の 1、2 日目を使用し、このうち 1

日目をマイクロ交通シミュレータを用いた追従応答性に関する各種実験に使用した。

対象区間は、曲線半径が小さい S 字カーブに、塚本入口からの本線合流といった複雑な道路環境である。また、サグ渋滞が頻発している東名高速道路下り大和サグ部の 2% 超と比べると緩やかであるが、対象区間内には 0.5% 程度のサグがある。

### (2) 交通状況

1 日目の追越車線における速度低下開始後のタイムスペース図（TS 図）を図-2 に示す。同図より、車線変更禁止区間解除直後の 3.4~3.5KP では、車線変更がみられるが、後続車両が減速度 3m/s<sup>2</sup> 以上の急減速までに至っていない。他方、車線変更禁止区間内の 3.7KP から上流にかけて、複数車両による急減速が発生しているが、車線変更は僅かである。

以上より、当該車線では車線変更以外の要因で速度低下が生じているものと推察される。



図-1 阪神高速道路11号池田線上り塚本合流付近（対象区間）

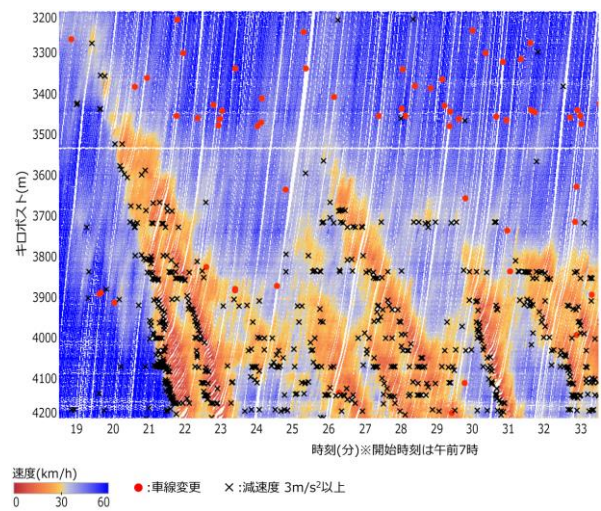


図-2 1日目追越車線のTS図（07:18:30~07:33:30）

### 3. 車群走行車両の速度低下に関する分析

本章では、データ分析を通して追越車線における車線変更禁止区間内の速度低下要因を明らかにする。具体的には、車線変更禁止区間内の車群を抽出し、車群先頭車両をはじめとする車群走行車両の追従・減速状況から速度低下要因を推定する。

#### (1) 追従応答性の定義

追従応答性とは、「追従走行状態時における先行車に対する迅速かつ正確な加減速の同調」であり、以下の方法で応答性を評価する。

- ① 先行車の速度変化が生じてから、それに対応して後続車両の速度が変化するまで時間
- ② 先行車に対する自車の速度および車間距離の差  
すなわち、これらの値が小さいほど、追従応答性が高いと考えられる。

ここで、追従走行状態については、大口・片倉<sup>10)</sup>および玉井・宇野<sup>7)</sup>の車頭・車尾時間 3 秒の定義から車両通過時間を勘案した、「車線変更禁止区間の平均車間時間 2.7 秒以下」として定義している。

#### (2) 分析車群・車両の選定

以下では、Zen Traffic Data から車線変更禁止区間内の追越車線を走行する追従走行状態の基準を満たす車群を抽出し、30 台以上の車両で構成される車群を対象に分析を行う。これらの条件に該当する車群は、1, 2 日目あわせて 24 車群 (1,123 台) となる (図-3)。

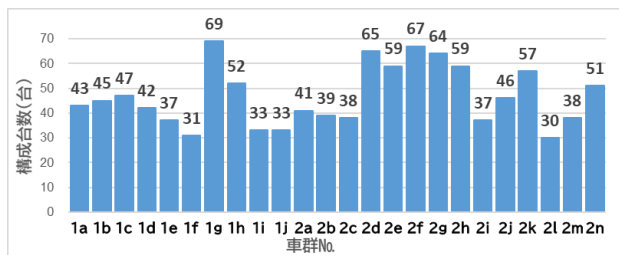


図-3 車群の抽出と構成台数

速度低下に関する分析においては、車群内で発生した速度低下について追従応答性の有無を明らかにするため、以下の条件を全て満たす車群を対象に実施する。

- ① 先行車の影響を受けていない車群先頭車両
- ② 先頭車両に対して速度低下が生じた最後尾車両
- ③ 車線変更が無い車群

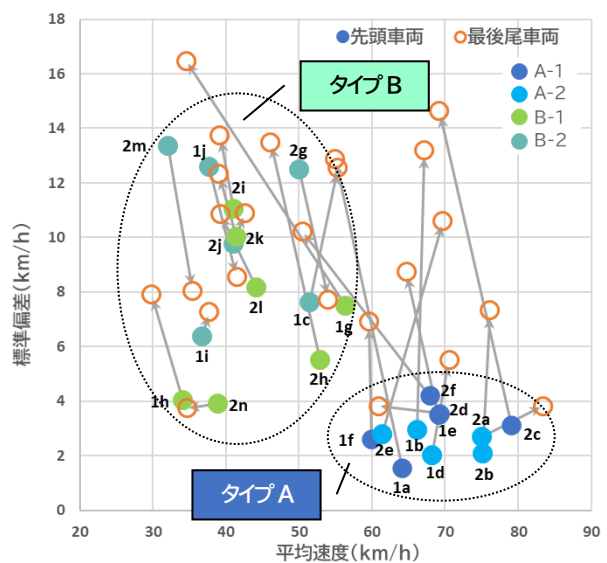
図-4 は、条件①, ②を判定するため、各車群の先頭および最後尾車両の平均速度と、車群内走行中における速度のばらつきを示す標準偏差を調査したものである。

条件①は、図-4 に示す先頭車両の標準偏差の分布状

況を勘案し、先頭車両の平均速度 60km/h 付近を閾値としてタイプ A, B に分類し、タイプ別の先頭車両の車間距離 (S) と速度 (V) の遷移図 (図-5) から先行車の影響有無を判断した。

図-5 より、タイプ B は、先行車の影響を受けた形で S-V が大きく変動しているのに対し、タイプ A は、先行車の影響を受けずに S-V が安定している。ここで、タイプ A で 20km/h 程度の速度差が生じているのは、曲線半径が小さい S 字カーブや緩やかなサグといった道路構造や隣の左車線で塚本入口から本線合流している状況に、ドライバーの技量・集中力が対応しきれず、無意識な速度低下が生じているものと推察される。

以上より、条件①に該当するタイプ A は、24 車群中 11 車群である。



※( )内は該当車群数 N=24

タイプ	先頭・最後尾車両の平均速度	
	先頭 > 最後尾	先頭 ≤ 最後尾
先頭車両の平均速度	60km/h以上	60km/h未満
	A-1 (6)	A-2 (5)
	B-1 (7)	B-2 (6)

図-4 先頭・最後尾車両の走行状態と車群のタイプ分類

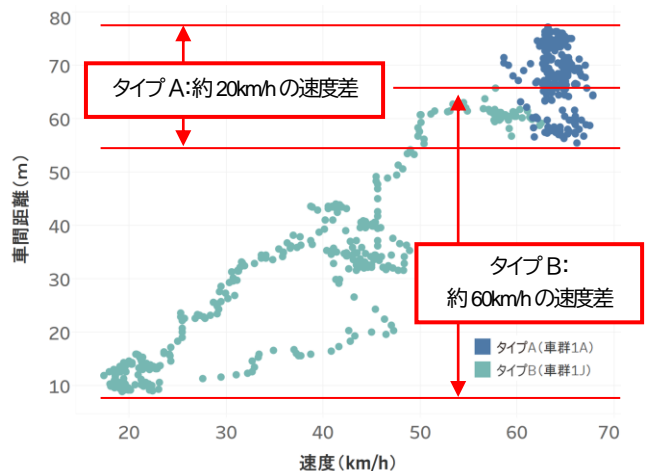


図-5 車群先頭車両の速度・車間距離遷移図 (車群1a, 1j)

条件②は、**図-4** に示す最後尾車両の平均速度が先頭車両から低下しているか否かで分類した。最後尾車両の平均速度が低下している条件②は 11 車群であり、①、②いずれも該当するタイプ A-1 は 6 車群である。

Zen Traffic Data から車線変更の有無を確認した結果、条件③は 24 車群中 6 車群であり、うち A-1 は車群 1a のみである。なお、車線変更 18 車群のうち 6 車群は、車線変更禁止区間起終点前後 100m 内の車線変更であり、中間部の車線変更はタイプ B で多く散見される。

以上より、本稿は車群 1a を分析車群として選定する。車群 1a は、3.5~3.7KP の 200m で全 43 台が減速しており、概ね当該区間の最高速度が観測された時点を減速開始時点、最低速度が観測された時点を減速終了時点とよぶ。

**図-6** には、車群先頭車両 (No.1) から最後尾車両 (No.43) まで 1 台毎の減速開始・終了時の速度を示す。これより、先頭車両の僅かな速度低下が後続車両に伝播し、車群後方で大きな速度低下が生じる傾向が確認できる。

次に、**図-6** の減速終了時の自車速度  $V_a$  と先行車速度  $V_b$  の速度変化量  $dv$  が  $-1\text{km/h}$  以下を「速度低下車両」、同  $1\text{km/h}$  以上を「速度回復車両」とした (**図-7**)。 **図-7** より、車群 1A における「速度低下車両」は 18 台、「速度回復車両」は 12 台である。

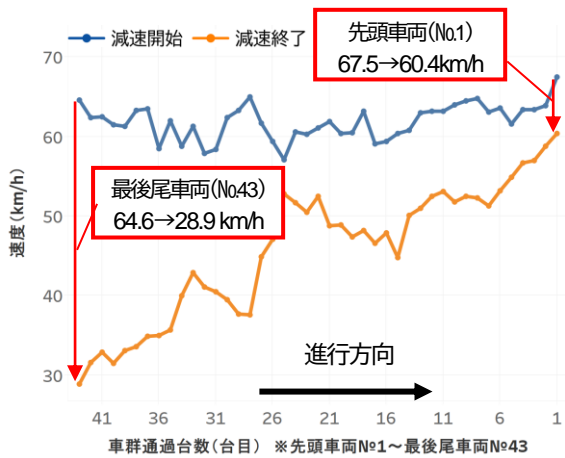


図-6 分析車群の減速開始・終了速度 (車群 1a : 3.5~3.7KP)

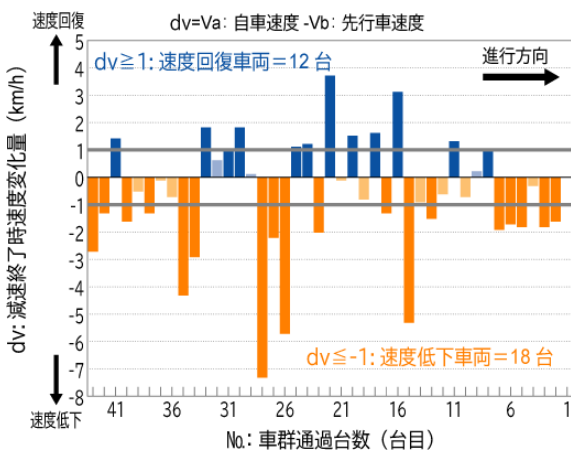


図-7 速度低下・回復車両の選定 (車群 1a : 3.5~3.7KP)

### (3) 速度低下・回復要因

前項で選定した車群 1A における速度低下・回復車両の要因と追従応答性との関係について分析する。

速度低下要因は、減速中の自車及び先行車の速度・車間距離データから **図-8** に示す 2 つの車両挙動を確認した。 **図-9** は、これら 2 つの減速車両挙動の事例を示したものである。

**図-9** より、速度低下要因①の「反応遅れ」は、自車の減速終了時間が先行車の減速終了から 1 秒以上遅れた状況と位置付けた。同要因②の「同調失敗」は、減速中に自車速度が先行車速度を上回って車間距離が 5m 以上減少した後、車間回復で減速する車両挙動とした。

速度低下要因①、②いずれも該当するのは、18 台中 9 台と全体の半数を占めている。このうち、7 台は先頭から 26 番目以降の車群後方車両である。車群後方は速度低下が大きいため、減速同調に失敗し易く、かつ速度回復の反応遅れが生じているものと推察される。

なお、速度低下要因③の「自然速度低下」は、車群先頭から 2、3 番目の車両である。要因としては、先行車の速度低下が小さく、かつ車間距離が 20~30m と先行車と余裕がある状況から、車群先頭車両と同じく無意識な速度低下に陥ったものと想定される。

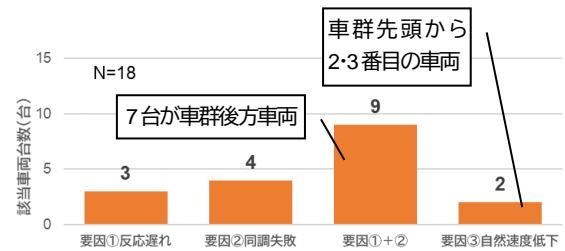


図-8 速度低下車両の要因内訳 (車群 1A)

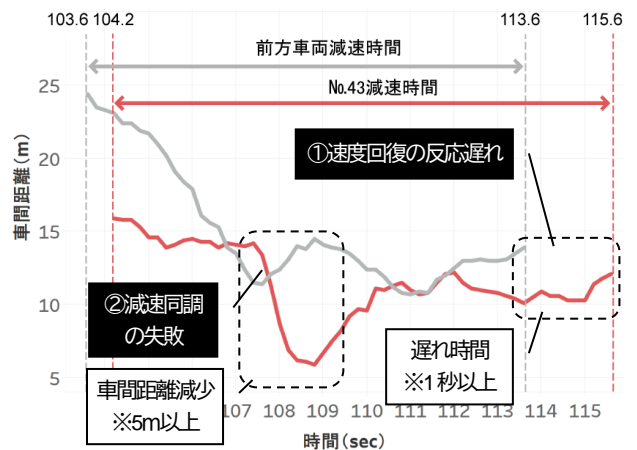


図-9 減速要因①+②の事例 (車群 1a : 車両 No.43)

他方、速度回復要因は、減速中の自車及び先行車の速度・車間距離データから **図-10** に示す 2 つの車両挙動を確認した。 **図-11** および **図-12** は、これら 2 つの速度回

復車両挙動の事例を示したものである。

図-11 より、先行車の車間距離変動に自車も同調する速度回復要因①「車間距離の同調」が確認できる。

図-12 より、前述の速度低下要因②と同じ減速同調の失敗で車間距離が 5m 以上減少するが、一定速度を保持して減速を抑制する速度回復要因②「減速同調失敗後のリカバリー」が確認できる。

以上のデータ分析から、車群先頭付近における無意識な速度低下が、反応遅れや減速時の同調失敗によって減速伝播が増幅する一連のプロセスを把握した。その際、追従応答性が高い車両は、車群内の減速伝播緩和に寄与する結果も得られた。このように、本稿では、車群内の速度低下と追従応答性の関係を確認した。

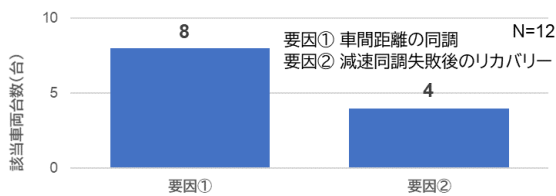


図-10 速度回復車両の要因内訳 (車群 1a)

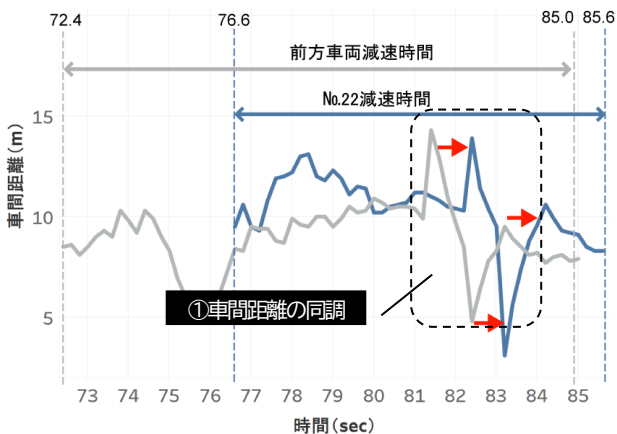


図-11 速度回復要因①の事例 (車群 1a : 車両No.22)

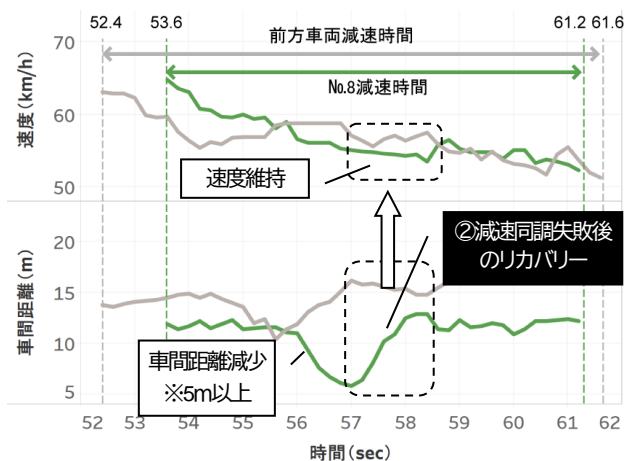


図-12 速度回復要因②の事例 (車群 1a : 車両No.8)

#### 4. シミュレーションによる追従応答性の検証

本章では、交通シミュレーションモデルの概要と Zen Traffic Data 1 日目の現況再現結果、および追従応答性に関する感度分析結果について説明する。

##### (1) 交通シミュレーションモデルの概要

本稿では、交通シミュレータとして VISSIM (ドイツ PTV 社製) を用い、追従モデルはシミュレータ内挿の高速道路に適した Wiedemann 99<sup>11)</sup>を用いる。このモデルは、精神心理学に基づくドライバーの行動モデルに基づいたものであり、先行車との車間距離と速度差に応じて、加減速などの運転モードを決定する (図-13)。

ここで、先行車との速度差が小さい追従走行時は、車間距離に依存する所が大きい。最大希望追従距離 (SDX) と最小希望追従距離 (BX) との差は、無意識で反応する追従領域であり、CC2 のパラメータで決定する。この CC2 が大きいと追従領域が広くなり、先行車加減速時の追従応答性が鈍くなる。

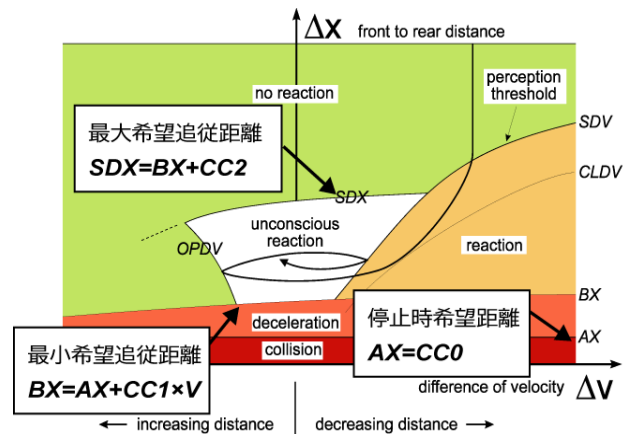


図-13 Wiedemann追従概念図

##### (2) 現況再現結果

本稿では、Zen Traffic Data 1 日目から希望速度、追従・車線変更に関するパラメータを取得・調整し、Random Seed が異なる 20 回のシミュレーションを実行した。実行結果から表-1 の選定基準を満たす再現性が高い 3 ケース (R54, R56, R69) を選定した。

表-1 現況再現選定基準

選定項目	単位	基準値
車両検知器交通量	5分	相関係数0.93以上
合流前(4.1KP)・合流後(3.8KP)最大交通量	1分	誤差±10%以内
合流前・合流後追越車線最大利用率	1分	誤差±3%以内
ショックウェーブ	-	開始時刻7時20分頃 発生地点3.5~3.8KP

塚本入口合流前（4.1KP）追越車線の Q-K-V は、Zen Traffic Data と 3つの推定値は近似している（図-14）。

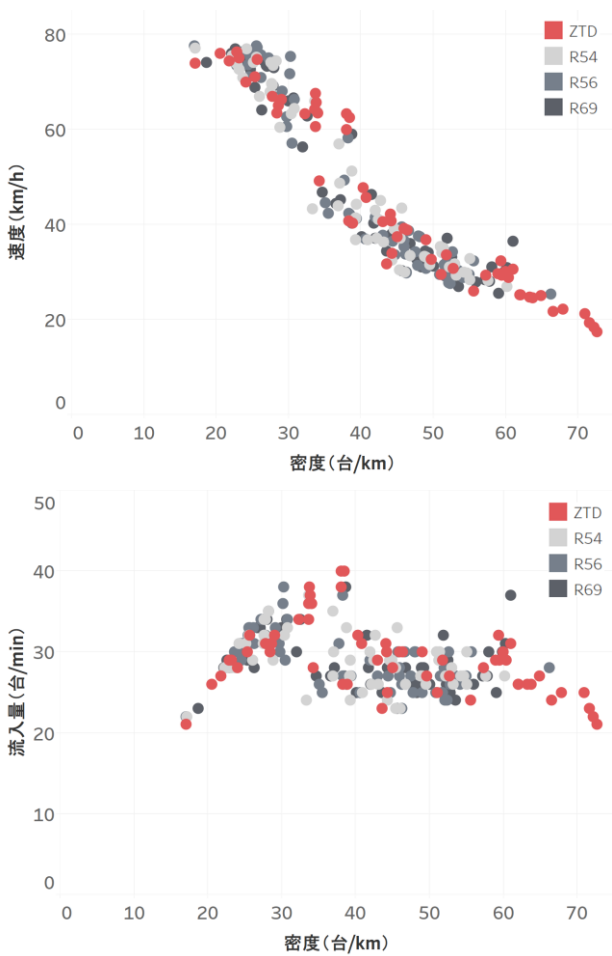


図-14 合流前（4.1KP）追越車線のQ-K-V図

さらに、平均車間時間 2.7 秒以下の基準を満たす追従車両の車群は、30 台前後で構成しており、25 台以上の車群を検証対象とした（図-15）。図-16 は、抽出した車群の先頭・最後尾車両の速度特性である。同図より、最後尾車両における速度のばらつきが過大傾向であるが、先頭車両の平均速度に応じたばらつき、最後尾車両の速度低下など、Zen Traffic Data から調査した図-4 と同じ 4つの車群タイプが確認できる。なお、グループ A 全体 12 車群のうち 5 車群の先頭車両は、速度の標準偏差が 0 と、自然な速度の増減が再現されていない。これは、現在のシミュレーションで再現できない技術的課題であり、今後改善が必要である。

以上より、現況再現結果は、1 車群当りの構成台数や車両挙動レベルで一部現実との乖離が散見されるが、全体としての再現性は確保されている。

ここで、追従応答性に相当する CC2 については、Zen Traffic Data から差異がみられる発生地点、車線、車種、速度別のパラメータでキャリブレーションを行い、設定している（図-17）。

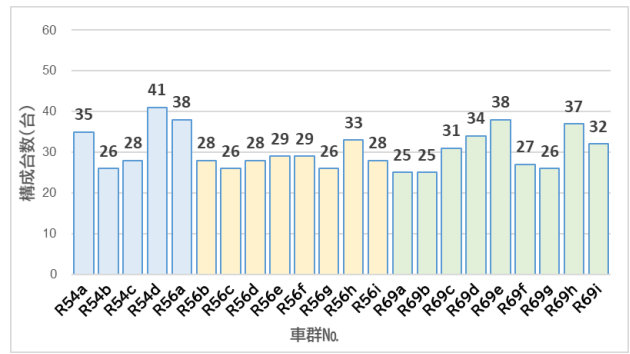
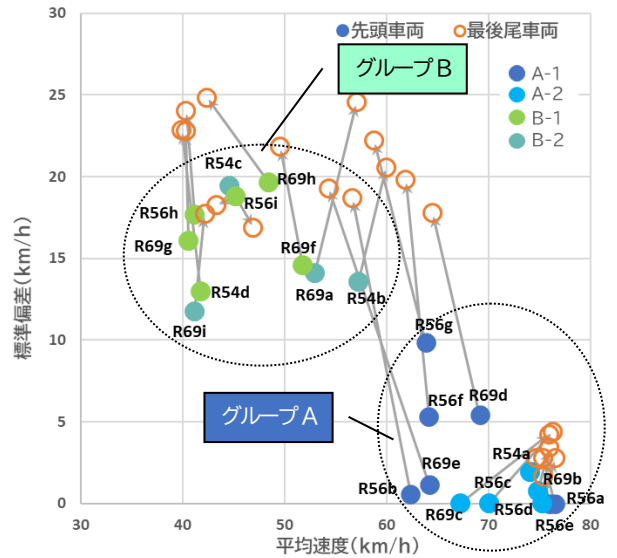


図-15 現況再現時における車群の発生状況



※( )内は該当車群数

N=22

タイプ	先頭・最後尾車両の平均速度		
	先頭 > 最後尾	先頭 ≦ 最後尾	
先頭車両の平均速度	60km/h以上	A-1 (7)	A-2 (5)
	60km/h未満	B-1 (6)	B-2 (4)

図-16 現況再現時の車群別先頭・最後尾車両の速度特性

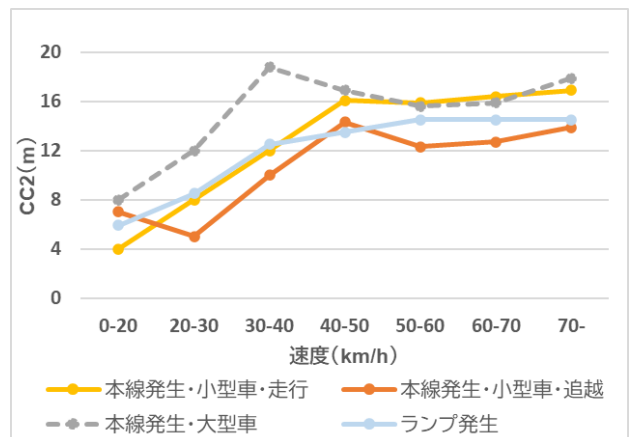


図-17 CC2の設定値（現況再現）

### (3) 追従応答性に関する感度分析

CC2 変動による交通影響および効果を把握するため、上記図-17 の CC2 の設定値を基準として、これに増減率

0.2 単位で 0.2 から 1.4 までを乗じた感度分析を実施し、走行台時間の変化を検証する。具体的には、需要を固定した CC2 変動のシミュレーションを実行し、流入車両の対象区間 (3.0~5.0KP) における総旅行時間により、交通状況の評価した。すなわち、総旅行時間が小さくなると、渋滞が緩和したと評価できる。

CC2 の感度分析結果を図-18 に示す。同図より、Random Seed による差があるものの、総じて CC2 増減に応じて走行台時間も増減している。現況再現設定値の±0.2 に該当する増減率 0.8 から 1.2 にかけて走行台時間の影響が顕著となっており、交通円滑化に与える CC2 の感度の大きさの影響が確認できる。

図-19 は、各ケースの 3 つの Random Seed を平均化し、塚本入口合流前 (4.1KP) 追越車線における 5 分間の速度と交通量の変動を表したものである。同図より、CC2 減少に応じて高い流率の臨界状態を持続していることがわかる。

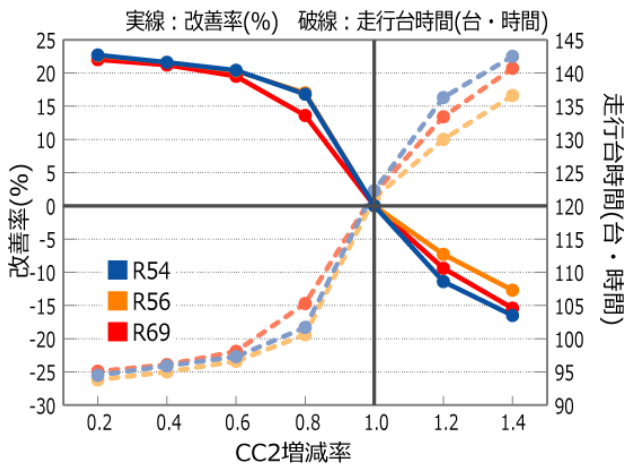


図-18 CC2の感度分析結果

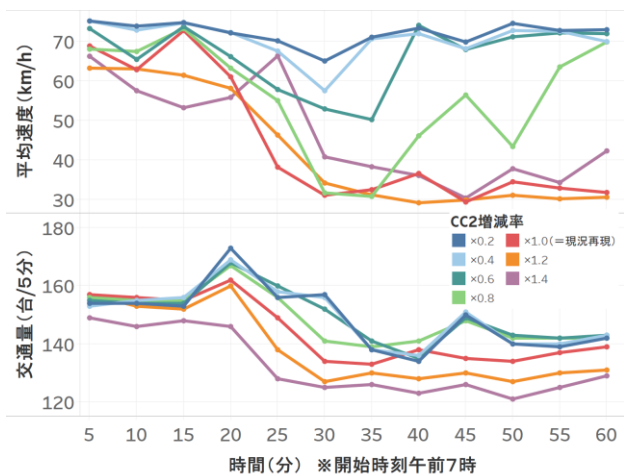


図-19 CC2変更ケースの速度と交通量の変動 (合流前: 4.1KP追越車線)

## 5. 車両制御効果のシミュレーション評価

以上の追従応答性の検証結果から、CC2を小さくすることで渋滞抑制の効果が期待出来る。しかしながら、この車両追従性を不特定多数の一般ドライバーに強いることは出来ず、また期待も出来ない。そこで、本章では普及が進むACCを用いることで実現することを想定し、検証を行う。

### (1) ACCの制御パラメータの設定

ここではその仮説を前提に、ACCの使用を想定した効果検証をすることを目的とする。ACCの制御定数を設定するにあたり、交通流に影響を与える大きな要素として、目標車間時間と先行車に対する追従応答性があげられる。前章までで検討し効果が大きいと判断した追従応答性を検証する目的とし、目標車間時間は、実際の交通流の車間時間、つまり現況再現の希望車間とし、約1秒に設定した。なお、ここでは全車速域で動作するACCを想定している。

追従応答性の効果検証として、車両制御に取り入れた場合の効果検証を以下に記す。製品化を想定するならば、官能的な指標である安心感、乗り心地に加えて、システムフェイル時の信頼性を考慮した要素を織り込む必要がある。これらの要素に前項までの検討結果であるCC2をACC設定に織り込み、一例として式(1)の特性を想定し、ACC車両のCC2を設定した(図-20)。

$$CC2 = \alpha V + \beta \quad (1)$$

ただし  $\alpha$ : 補正時間,  $\beta$ : 補正距離 であり、  
 $\alpha = 0.1[\text{sec}]$ ,  $\beta = 1[\text{m}]$  とした。

実際の製品における本式のパラメータの設定は、車種や運転モードなどで異なったものとなるが、一般的に製品化を想定できる官能的要素、信頼性要素を考慮した値である。

また、ACCによる効果を期待するにはその普及率と使用率に大きく依存するため、ACCの作動率割合も考慮して効果検証した。

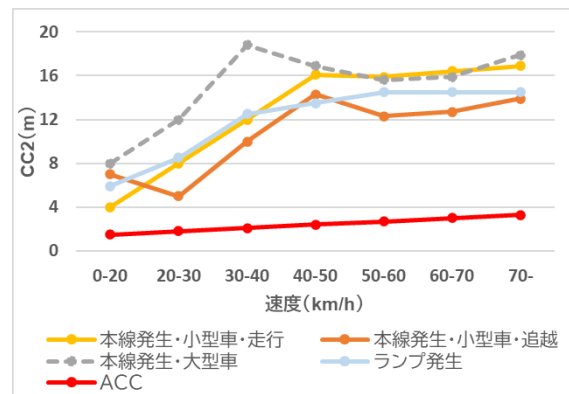


図-20 ACC・非ACC車両のCC2設定値

(2) ACC の効果検証

図-21 に想定する ACC 車両の投入率と走行台時間の関係のシミュレーション結果を示す。これより、ACC を投入することで総走行台時間を減少させることが分かる。その改善の程度は、投入率の増加に伴い低下傾向にあるものの、初期 10% の投入で総走行台時間を約 15 台・時間減少できることの効果は大きい。

本稿執筆時点の ACC の普及率<sup>12)</sup>と本検討結果から推測すれば、その効果が既に現れているように思えるが、i) 想定する使用シーンから全車速域で動作する ACC の装備とその使用率の増大が必要であること、ii) 現在の ACC 制御に本稿提案の CC2 要件が必ずしも織り込まれていないこと、から統計上の数字で示される ACC 普及率ほどの効果はないものと推測される。

ACC 効果を発揮するには、本稿で提案する CC2 設定を織り込んだ全車速で動作する ACC 導入が必要であり、その使用率の向上により交通流改善は期待できるものである。

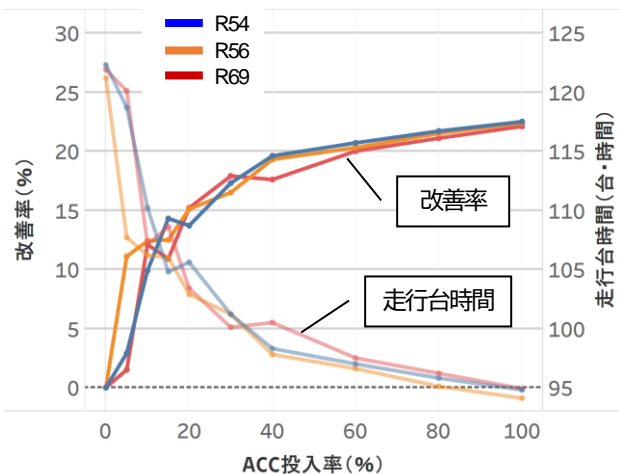


図-21 ACC投入率と走行台時間の関係

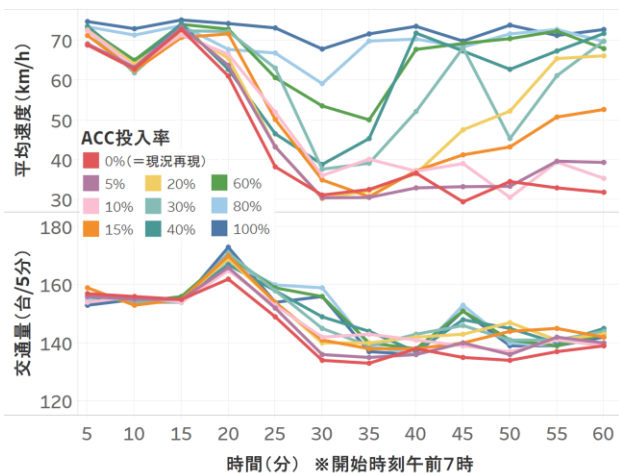


図-22 ACC投入ケースの速度と交通量の変動  
(合流前：4.1KP追越車線)

6. おわりに

(1) 結論

本稿では、車両軌跡データを用いて車群内の速度メカニズムを解析し、特定した速度低下・回復車両から追従応答性の関係を分析した。その上で、マイクロ交通シミュレータを用いて追従応答性に関するパラメータの変動傾向と、追従応答性を高めた ACC 車両の投入効果を検証した。得られた成果は以下のとおりであり、自動運転の普及に備えた車両制御のあり方を示唆する。

- ① 車群内の速度低下や速度回復には、追従応答性が大きく影響すること
- ② 追従遅れ対策を織り込んだ ACC による追従走行で交通流円滑化を可能とし、投入率 20%以上で安定した効果が見込めること

(2) 今後の課題

本稿では、阪神高速 11 号池田線上り塚本合流付近における朝 7 時台の車両軌跡データから車両レベルで速度低下と追従応答性の関係を明らかにした。しかし、車群先頭車両が先行車の影響を受けていない 11 車群のうち実際に速度低下したのは 6 車群であり、残り 5 車群について、速度低下に至らなかったかは不明である。今後は、速度低下した車群だけでなく、速度低下に至らなかった車群も分析対象に加えることで、速度低下の発生条件を明らかにする必要があると考える。さらに、Zen Traffic Data で無償提供している阪神高速 4 号湾岸線上下大浜～三宝付近 (約 1.7km) や、他の時間帯を分析対象に加えることで、区間・時間特性に応じた速度低下の発生条件や対策の方向性を明らかにすることが可能になる。

また、シミュレーションモデルの CC2 について、本稿では、発生地点、車線、車種、速度別に設定している。しかし、車両軌跡データからは、車間距離に応じて CC2 が変化する傾向がみられる。このため、今回提案した CC2 に加えて、混雑シーンでの適切な車間時間を設定することで、現況再現精度と投入効果の信頼性を高められる。

謝辞：本稿において Zen Traffic Data を貸与頂いた阪神高速道路株式会社に謝意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省：国土交通省生産性革命プロジェクト、<https://www.mlit.go.jp/common/001123977.pdf>, 閲覧日 2021 年 10 月 1 日。
- 2) 越正毅：高速道路のボトルネック容量, 土木学会論文集, No.371/IV-5, pp.1-7, 1986.
- 3) 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, IV-18, pp.65-71, 1993.
- 4) 塩見康博, 吉井稔雄, 北村隆一: 新しく提案する渋滞判定手法に基づいた渋滞発生確率推定モデルの構築, 土木計画学研究・講演集, Vol.33, No.304, 2006.
  - 5) Jian XING, 鶴元史, 石田貴志, 村松栄嗣: 車両感知器パルスデータを用いた渋滞発生時交通現象分析, 土木計画学研究・講演集, Vol.41, No.265, 2010.
  - 6) 邢健, 鶴元史, 石田貴志, 村松栄嗣: 渋滞を引き起こす交通流の車群特性分析, 第 42 回土木計画学研究発表会・講演集 CD-ROM, 2010.
  - 7) 玉井魁人, 宇野伸宏: 連続車両軌跡データを用いた個車追従モデルの推定と車両挙動多様性の分析, 第 62 回土木計画学研究発表会(秋大会)講演集, CD-ROM, 2020.11.
  - 8) 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, 第 34 回交通工学研究発表会, 2014.8.7-8.
  - 9) 阪神高速道路株式会社: Zen-Taffic Data, <https://ZenTrafficData.net/>, 閲覧日 2021 年 10 月 1 日.
  - 10) 大口敬, 片倉正彦, 鹿田成則: 高速道路単路部をボトルネックとする渋滞発生特性に関する実証的研究, 高速道路と自動車, Vol.44, No.12, pp.27-34, 2001.
  - 11) PTV Group, PTV VISSIM 2020 User Manual, Karlsruhe, Germany, 2020.
  - 12) 小篠耕平, 菅原宏明, 石井明, 邢健, 糸島史浩, 甲斐穂高: 高速道路における ACC 搭載車両の利用実態および安全性・交通容量に及ぼす影響の考察, 第 17 回 ITS シンポジウム, 2019.

(2021.9.29 受付)