

ソフト的渋滞対策の段階的導入による高速道路サグ部渋滞の削減可能性 Possibility of Congestion Reduction at Expressway Sag Sections by the Stepwise Introduction of Soft Countermeasures

鈴木 一史¹, 山田 康右², 堀口 良太³, 鹿野島 秀行⁴, 牧野 浩志⁴

Kazufumi SUZUKI¹, Kosuke YAMADA², Hideyuki KANOSHIMA³ and Hiroshi MAKINO⁴

都市間高速道路の渋滞の約6割を占める高速道路サグ部の渋滞対策として、速度に応じて一定の車間を維持可能なACCの活用が期待されている。ACC混入時の渋滞緩和効果については、既往研究においてミクロ交通シミュレーションによる試算等が行われているものの、中型車、大型車の車両挙動特性を含めた性能の異なる多様な車両が混在する環境等が考慮されておらず、また、既往の多様な渋滞対策との組み合わせ導入による相乗効果等も明らかにされていない。そこで、本研究では、高速道路サグ部に特有の車両挙動を車種別に精緻に再現し、かつ、車線運用規制、車線利用適正化情報提供、ACC活用等の各種対策を車種別・車線別にきめ細かく考慮可能なミクロ交通シミュレーションを用いて、それら渋滞対策単体及び複合的な組み合わせ導入による渋滞緩和効果の評価を行った。

Keywords: 高速道路サグ部, 渋滞対策, ACC, 追従挙動, シミュレーション

1. はじめに

都市間高速道路の渋滞の約6割はサグ部で発生しており、その対策が急務である。近年、自動車メーカ各社からACC(Adaptive Cruise Control)と呼ばれる、速度に応じて一定の車間を維持可能なシステムを搭載した車両が既に市販され、車両生産台数に対するACCの装着率は乗用車で約4%、大型車で約18%(2013年単年)に達しており¹⁾、その渋滞対策への活用が期待されている²⁾。このような背景の下、国土技術政策総合研究所では、ETC2.0による情報提供等の道路インフラ技術とACC等の自動車技術を連携させた渋滞対策サービスの検討を進めてきた³⁾。このサービスは3つに大別され、渋滞前は、1)車線利用適正化サービスにより車線利用を平準化した上で、2)車間適正化サービスにより車間を適正化して交通流の整流化を図ることで渋滞発生を抑制するとともに、渋滞後は、3)追従・速度回復サービスにより先行車に遅れずに追従しつつ、渋滞先頭位置通過後の加速を促して速やかに速度回復することで渋滞緩和を図るものである。

ACCの活用が期待される車間適正化サービスについては、既往研究においてミクロ交通シミュレーションによる渋滞緩和効果の試算³⁾等が行われているものの、中型車、大型車の車両挙動特性を含めた性能の異なる多様な車両が混在する環境等が考慮されていない。

一方、都市間高速道路サグ部においては、既に道路インフラ側単独でのソフト的対策、ハード的対策が取り組まれてきており、今後、それらの対策と上記のような路

車間連携による渋滞対策サービス等を戦略的に組み合わせた渋滞対策シナリオを策定し、推進することが必要不可欠と考えられる。

そこで、本研究では、高速道路サグ部に特有の車両挙動を車種別に精緻に再現し、かつ、車線運用規制、車線利用適正化情報提供、ACC活用等の各種対策を車種別・車線別にきめ細かく考慮可能なミクロ交通シミュレーションを用いて、それら渋滞対策単体及び複合的な組み合わせ導入による渋滞緩和効果の評価を行い、戦略的な渋滞対策シナリオの策定に資することを目的とする。

2. シミュレーションモデルの概要と現況再現性検証

2.1 シミュレーションモデルの概要

本研究では、既往研究において構築されたサグ部交通流シミュレータ³⁾を用いた。このシミュレータは、一般的な追従挙動、車線変更挙動に加え、サグ部に特有な上り坂での無意識な速度低下、渋滞巻き込まれ時間の増大による追従挙動の鈍化等を再現可能⁴⁾であり、東名高速下り大和サグ部を対象に現況再現が実施されている。追従挙動モデル式にはIDM+⁵⁾に対して、自由走行時と追従走行時で異なる最大加速度パラメータを適用し、さらに重力加速度の縦断勾配による抵抗成分を加えた式(1)(2)を採用しており、車種別にモデル式のパラメータ分布(正規分布)を適宜設定することで、個別車両の挙動のばらつきを表現している。

1 正会員, 博士(工学), 群馬工業高等専門学校 環境都市工学科
〒371-8530 群馬県前橋市鳥羽町 580 e-mail: ksuzuki@cvl.gunma-ct.ac.jp Phone: 027-254-9179
2 正会員, 修士(工学), パシフィックコンサルタンツ(株) 交通政策部
3 正会員, 博士(工学)・TOE, (株)アイ・トランスポート・ラボ
4 正会員, 修士(工学), 国土交通省国土技術政策総合研究所 高度道路交通システム研究室

$$\frac{dv}{dt} = \begin{cases} a_f \{1 - (v/v_d)^\delta\} - g \sin \theta; & \text{if } (v/v_d)^\delta > (s^*/s)^2 \\ a_c \{1 - (s^*/s)^2\} - g \sin \theta; & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

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

ここに、 a_f : 自由走行時最大加速度[m/s²], a_c : 追従走行時最大加速度[m/s²], b : 希望減速度[m/s²], v : 自車速度[m/s], v_d : 先行車との相対速度[m/s], v_d : 希望速度[m/s], δ : 加速項のべき乗数, s : 車間距離[m], s^* : 希望車間距離[m], s_0 : 停止時最小車間距離[m], T : 安全車間時間[s], g : 重力加速度[m/s²], θ : 縦断勾配[rad]である。

また、ACC 車両については、車間時間保持と車頭時間保持の 2 種類の制御規範の違いを表現するため、IDM+ に対してより厳密に車間時間ならびに車頭時間を保持する制御が実現できるよう、式(2)の希望車間距離を修正した Designed IDM+⁶⁾で表現する。

2.2 ビデオ観測データによる追従パラメータの調整

追従挙動モデルのパラメータ調整にあたっては、まず表 1 に示した大和サグ部における渋滞開始時刻を含む時間帯のビデオ解析で得られた、車両 1 台ごとの走行軌跡データ (1 秒毎の走行位置と走行車線、及び速度、加速度) を用いて、車種別に以下のパラメータの分布を設定した。ただし、ここでの設定は運転挙動の実態に沿った目安を与えるための調整であり、2.3 で後述する通り、現況再現ケースでの渋滞状況の再現性が得られるよう、さらにパラメータ分布の調整を加える。

(1) 希望速度パラメータの分布

ドライバーの希望速度は外部から観測できないため、渋滞開始時刻より 30 分以上前の比較的交通量が少ない時間帯で、サグ底部において追従走行していないと思われる、車頭時間が 4 秒以上の車両について、車種別、車線別に走行速度の平均値と標準偏差を求めた。

(2) 自由走行時最大加速度パラメータの分布

自由走行時最大加速度 (以下、自由最大加速度) a_f は、先行車との距離が十分に離れている場合に、自車の希望速度に到達するまでの加速度を決めるパラメータである。すなわち、ある速度域で出現する加速度の最大値を決めるものといえる。ここでは、走行軌跡データの 1 秒毎の速度と加速度を車種別にプロットしたとき、各速度帯での 99% タイル値が(1)式上側で求められる加速度の期待値 $\pm \sigma$ の範囲に含まれるよう、 a_f の分布を設定した。図 1 に小型車での設定例を示す。

(3) 追従走行時の過渡応答特性

追従走行時の先行車速度変化に対する応答特性については、安全車間時間 T 、追従最大加速度 a_c 、希望減速度 b の 3 つのパラメータが関与する。ここでは、ビデオ観測で得られた追従走行データから、安定して先行車に追従している状態と見なされるデータを抽出した。その際、大型車と中型車についても、少なくとも数十台程度

表 1 ビデオ解析の対象とした渋滞発生日

年月日	渋滞開始	解析時間帯
2010/11/06 (土)	6:10	5:25~6:25
2010/12/04 (土)	6:45	6:00~7:00
2010/12/11 (土)	6:35	5:50~6:50
2011/08/17 (水)	7:00	6:15~7:15
2011/08/18 (木)	7:00	6:15~7:15

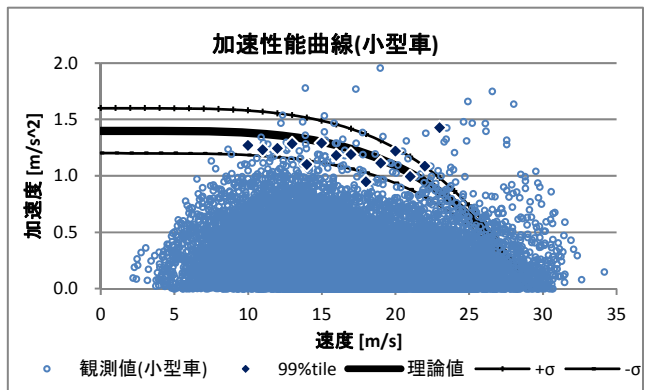


図 1 自由走行時最大加速度パラメータの設定例

のデータが得られることに留意して、できるだけ長い時間追従状態にあり、かつ速度変動が見られるものを選んだ。具体的には、30 秒以上同じ車線を連続して走行し、その間先行車が変わらず、かつ車間距離が常に 80m 未満で、20km/h 以上の速度変動があったものとした。その結果、971 台分 (うち、小型 860 台、中型 61 台、大型 50 台) の走行データを得た。

パラメータ調整にあたっては、データ開始時刻の自車と先行車の位置・速度を初期条件とし、その後の先行車の位置・速度を(1)式に逐次入力して、自車位置と速度を求めた。このとき、希望速度には車種別・車線別の期待値を設定し、追従式で求めた自車位置と観測追従走行データの自車位置との二乗誤差を最小にする 3 つのパラメータを求めた。なお、数値探索の範囲は T [0.2, 4.0], a_f [0.2, 6.0], b [0.2, 6.0] とした。

推定結果の位置誤差は、ほとんどが前後 $\pm 15m$ の範囲に収まっており、おおむね良好な再現性を得た。一例として、図 2 に相対速度と車間距離の追従ヒステリシスを比較したものを示す。全般に、走行時間が短い場合の精度は良好で、長くなると精度が低下するが、これは、人間のドライバーはその間に目標とする車間や速度が変化するためと推察される。表 2 にビデオ観測データを元に調整した追従パラメータを示した。

2.3 現況再現性の検証結果

次に、2.2 で設定したパラメータで、東名高速下り・大和サグ部での現況ケースを実施し、渋滞状況が再現されるかどうかを確認した。現況ケースでは、大和サグ部の上流 7km から下流 1km までの 8km 区間を対象とし、ビデオ観測対象日である 2011/08/17 (水) の渋滞発生時間帯を比較対象とした。その際、交通需要は同区間内の感知

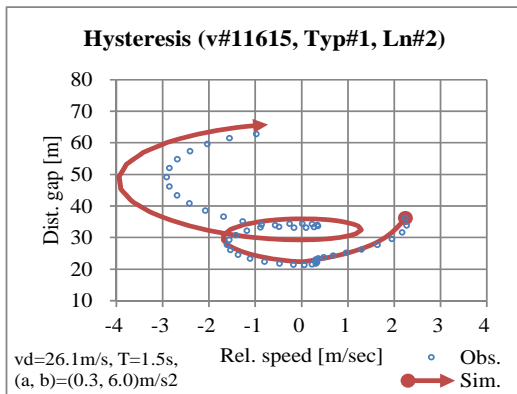


図2 過渡応答特性調整時の追従ヒステリシス再現例

表2 ビデオ観測データで調整した追従特性パラメータ

モデルパラメータ		小型車	中型車	大型車
車長 L [m]		5.0	8.0	12.0
最小車間 s_0 [m]		2.0	2.0	2.0
希望速度 v_d [km/h]	第1走行車線	88.9 (11.4)	78.8 (7.9)	79.2 (6.3)
	第2走行車線	93.5 (8.7)	88.9 (8.0)	86.3 (5.7)
	追越車線	106.7 (9.2)	103.9 (11.4)	99.3 (10.2)
安全車間 T [s]		1.41 (0.67)	1.55 (0.73)	1.69 (0.98)
自由走行時加速度 a_f [m/s ²]		1.40 (0.20)	0.80 (0.15)	0.70 (0.10)
加速項べき乗数 δ		4	4	4
追従最大加速度 a [m/s ²]		1.10 (0.50)	0.88 (0.53)	0.88 (0.44)
希望減速度 b [m/s ²]		1.62 (0.72)	1.84 (0.84)	1.83 (1.58)

()は標準偏差

器5分間データを用い、ボトルネック通過交通量累積曲線に上流区間の推定存在台数(交通量÷速度×区間長)を上積みして求めた。また、車線変更に関するパラメータは、既往研究³⁾の設定を踏襲した。

図3にサグ底部における渋滞前後での交通量と速度及び交通量の再現性を示した。当日の渋滞発生時刻は7:00前後とされるが、シミュレーション結果でも7:00に、サグ部付近(21.5KP)の走行速度が渋滞の目安とされる60km/hを下回っている。また、交通量も観測値とほぼ同じ推移を示した。

図4に渋滞直前の15分間における、車種別・車線別交通量と車線利用率を比較した。感知器では車長が10m以上の車両を大型としているため中型と区分できないが、およその構成や車線利用率が再現されていることが確認できた。また、図5に渋滞発生直前での車線別走行速度の分布を示した。走行車線の速度分布は良好に再現されていることがわかる。追越車線での走行速度が観測値よりやや低いものの、平均で110km/hに近く、かつ走行2よりも高く推移していることから、この程度の差は許容されると考えた。

以上の再現性を得たパラメータ諸元を表3に整理した。これは、表2で示した個別車両の走行データに基づくパラメータ調整結果から、シミュレーションを繰り返して、良好な再現性が得られるよう以下の考えに基づいて変更したものである。

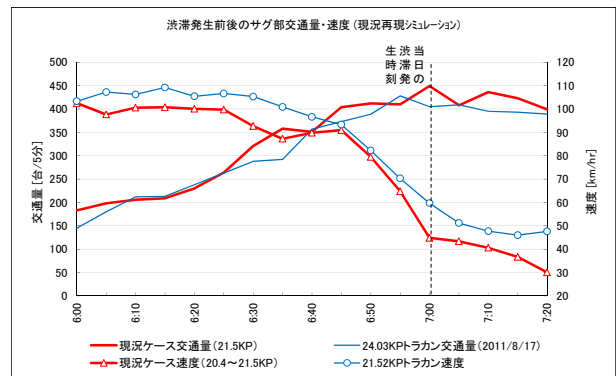


図3 渋滞発生前後のサグ部交通量と速度の再現性

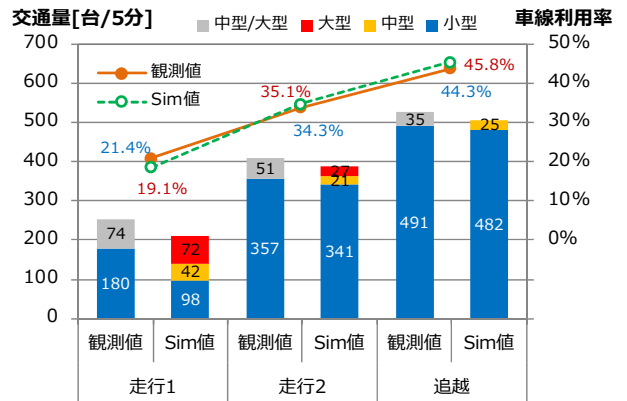


図4 渋滞発生前の車線別・車種別交通量の再現性

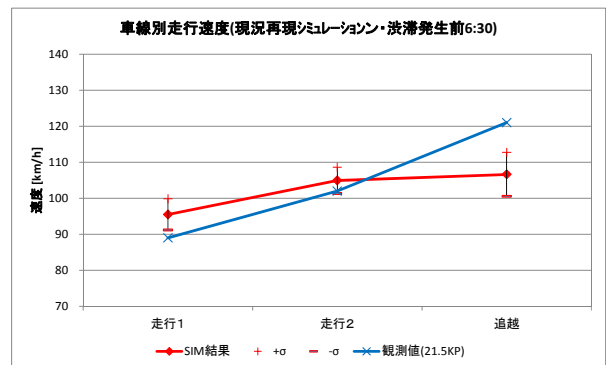


図5 渋滞発生前の車線別走行速度の比較

車群中で追従している車両の希望速度分布は、表2で示した車群先頭車のそれよりも高いと考えられるため、15~20km/hの範囲で希望速度が高くなるよう、車種別・車線別の希望速度の期待値を大きくした。これに伴い、渋滞前の車線別速度分布が再現されるよう、希望速度の標準偏差も調整した。この期待値が小さかったり、標準偏差が大きかったりすると、低速車が混入する頻度が高くなり、渋滞発生が早まる傾向が認められた。

比較的安定した追従状態のデータを元に調整した表2の安全車間は、長めになっていると考えられるため、期待値を0.05~0.15秒の範囲で短くした。また、標準偏差も表2の値の半分とした。この期待値が大きかったり、標準偏差が大きかったりすると、車間を空けすぎる車両が混入する頻度が高くなり、渋滞発生

表3 現況再現検証後の追従特性パラメータ

モデルパラメータ		小型車	中型車	大型車
車長 L [m]		5.0	8.0	12.0
最小車間 s_0 [m]		2.0	2.0	2.0
希望速度 v_d [km/h]	第1 走行車線	108.0 (5.4)	102.6 (7.6)	97.2 (7.6)
	第2 走行車線	120.0 (8.4)	114.0 (10.8)	108.0 (10.8)
	追越車線	132.0 (11.2)	125.4 (13.9)	118.8 (13.9)
安全車間 T [s]		1.26 (0.33)	1.45 (0.37)	1.65 (0.49)
自由走行時の加速度 a_f [m/s ²]		1.60 (0.20)	1.00 (0.15)	0.90 (0.10)
加速頂べき乗数 δ		4	4	4
追従最大加速度 a [m/s ²]		1.30 (0.13)	1.09 (0.13)	1.08 (0.11)
希望減速度 b [m/s ²]		1.62 (0.18)	1.85 (0.21)	1.83 (1.39)

()は標準偏差

が早まる傾向が認められた。

個別車両の走行データで調整した自由最大加速度は、上り勾配による重力加速度抵抗（大和サグでは約 0.2m/s^2 ）の分だけ過小になっている可能性があるため、期待値を 0.2 増やした。同じく、追従最大加速度も、期待値を 0.2 増やした。この期待値が小さいと、加速性能の低い車両が混入する頻度が高くなり、渋滞発生が早まる傾向が認められた。

希望減速度の標準偏差を、追従最大加速度に合わせて、一律 $1/4$ にした。この標準偏差が大きいと、車群を不安定にする傾向がある希望減速度の大きい車両が混入する頻度が高くなり、渋滞発生が早まる傾向が認められた。

3. ACC 搭載車両の現行性能と将来性能の設定

ケーススタディに先立ち、施策の一つに挙げられる ACC による車間適正化の評価に必要な ACC 車両の現行性能及び将来性能を車種別に設定した。

3.1 ACC 搭載車両の現行性能のキャリブレーション

現行性能の ACC については、H26 年度に国総研試験走路で行われた走行実験データ⁷⁾から、自車の速度・加速度、先行車との車間距離・相対速度を時系列で記録したデータを用いた。これは、小型 ACC 車と大型 ACC 車の 2 車種について、それぞれ約 1.8 秒及び約 2.0 秒の「車間 M」を保持するように設定し、各車種について先行車の加減速状況を含む 3 回の追従走行を行ったものである。以下、パラメータ設定の考え方を示す。

(1) 設定速度（追従モデルでは希望速度パラメータ）

ACC 車両の設定速度は、各車種の法定速度とした。

(2) 自由走行時最大加速度

自由走行時最大加速度 a_f は ACC 車を単独で設定速度まで加速させたときの速度別の加速度データを用い、(1) 式上側で求められる加速度が観測データのプロットのほぼ中央を通るように a_f を定めた。図 6 は小型 ACC 車の例である。

(3) 追従走行時の過渡応答特性

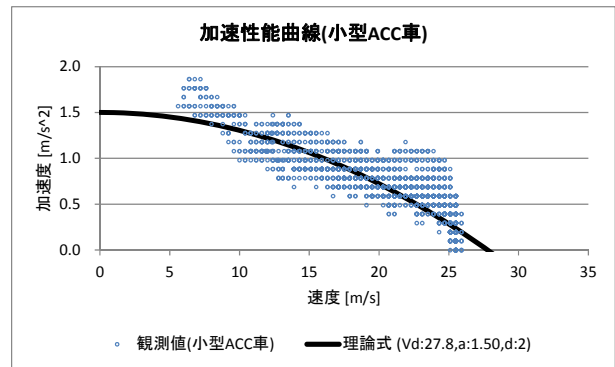


図 6 現行性能 ACC の加速性能曲線（小型 ACC 車の例）

ACC 車についても、一般車と同様に、追従走行時のデータを追従モデル式に当てはめ、追従挙動関連パラメータを数値探索した。ただし、実験データでは追従走行時でも自由走行時とほぼ同程度の加速度を示す結果が認められたため、追従最大加速度は自由最大加速度と同じとし、安全車間と希望減速度のみを探索した。ACC 車についても、推定した自車位置の誤差が $\pm 15\text{m}$ の範囲に収まり、追従走行時のヒステリシスも良好に再現された。

表 4 に調整した現行性能 ACC の追従挙動関連パラメータを示した。安全車間時間 T は、小型 ACC 車で平均約 1.55 秒、大型 ACC 車で平均約 1.85 秒となったが、シミュレーションスタディでは、別途車間 M 相当の値を用いる。追従最大加速度パラメータは、自由走行時の加速度に合わせて小型 ACC 車が 1.5m/s^2 、大型 ACC 車が 0.8m/s^2 とそれぞれ一般車と比べて緩慢な加速となっている。一方、希望減速度パラメータは、小型 ACC 車で 6.0m/s^2 となり、小型一般車よりも大きい。IDM では、希望減速度パラメータが大きいと、先行車が減速して車間が縮まっても、すぐには反応しない挙動になり、「車間距離の保持よりも、相対速度の保持を重視した設定」となっている。なお大型 ACC 車は $1.9\sim 3.9\text{m/s}^2$ の範囲で、大型一般車と同程度となった。なお中型車については、データがないため、目標車間時間は大型車と同じ値、自由最大加速度と追従最大加速度は大型車より若干大きい値、希望減速度は大型車と小型車の中間とした。

3.3 ACC 搭載車両の将来性能の設定

次章で述べるケーススタディでは、ドライバーの受容性が高いとされる「車間 M」設定で ACC 車両が混入することを想定しているが、既出の研究報告⁴⁾では、車間 M 設定の ACC 混入率が高くなると、渋滞発生が早まるなど、不利な結果が得られている。そのため、現行性能での目標車間時間の代わりに、目標車頭時間を保持する制御方式とし、かつ自由最大加速度パラメータと追従最大加速度パラメータを現行性能よりも大きく、希望減速度パラメータを小さく設定した「将来性能」を想定したケーススタディも実施する。将来性能では、最大加速度パラメータが一般車よりも大きな値となっており、これ

表4 ACC車両の追従特性パラメータ

モデルパラメータ	小型ACC	中型ACC	大型ACC
車長 L [m]	5.0	8.0	12.0
最小車間 s_0 [m]	2.0	2.0	2.0
設定速度 v_d [km/h]	100.0	100.0	80.0
目標時間 g_d [s]	1.85	2.10	2.10
制御目標	車間時間 車頭時間		
自由最大加速度 a_f [m/s^2]	1.50 1.60	0.90 1.20	0.80 1.20
加速項べき乗数 d [m/s^2]	2	2	2
追従最大加速度 a [m/s^2]	1.50 1.60	0.90 1.20	0.80 1.20
希望減速度 b [m/s^2]	6.00 3.00	4.00 2.00	3.00 1.50

上段の数値は現行性能ACC、下段は将来性能ACCの値

は上り坂での速やかな加速による車間拡大の防止を狙ったものである。また、希望減速度パラメータを小さく設定することで、先行車の減速に対して速やかに反応し、緩やかな減速度で追従して車群安定化に寄与することを狙ったものである。

4. ソフト的渋滞対策の渋滞緩和効果

以上で構築した交通シミュレーションモデルを用いて、東名高速下り・大和サグ部を対象に、交通流円滑化のためのハード的対策及びソフト的対策を実施した場合の渋滞前の渋滞抑制効果、渋滞後の捌け交通流率の改善効果を把握した。

4.1 検討対象とする渋滞対策と段階的導入シナリオ

以下に、サグ部での渋滞発生要因と対応する円滑化対策メニューを表5に整理した。

(1) 車線利用適正化

大和サグ部での渋滞発生直前の状況では、3車線のうちの追越車線に4割を超える交通が集中し、追越車線から速度低下が始まることが知られている⁸⁾。車線利用適正化は、ETC2.0等で走行車線への復帰やキープレフトを依頼する情報を提供し、走行車線の利用率を高めることで断面全体での捌け交通量の最大化を図るものである。ケーススタディでは、右へは車線変更しづらく、左へは車線変更しやすいよう車線変更挙動関連のパラメータを変更して評価した。

(2) 低速走行車の分離

また、追越車線に交通量が集中している状況で、低速車両が追越車線に車線変更することで、交通流の乱れが生じて、渋滞発生を引き起こす懸念も指摘されている⁹⁾。大和サグ部においては、高速道路3車線区間での原則的な運用方針に沿って、大型車の通行帯を第1走行車線(以下、走行1)と第2走行車線(以下、走行2)に指定しているが、ケーススタディでは、これをより厳格化し、大型車は走行1に、また中型車についても走行1と走行2に、通行帯を指定することを想定した。

(3) 追従挙動改善

表5 評価対象とした対策メニュー

目的	対策メニュー	実施イメージ
車線利用適正化	全車車線変更禁止	サグ部手前1kmから上り坂終了までの区間で右への車線変更を禁止
	車線利用適正化サービス	ETC2.0等による車線復帰誘導通知
低速車の分離	大型車通行帯区分規制	大型車は走行1に限定、中型車は走行1と2に限定
	車線別最低速度規制	自由走行時は、走行2は80km/h以上、追越は90km/h以上で走行可能な車両に限定
追従挙動改善	車間適正化サービス 現行将来性能ACC	ETC2.0等によるACC推奨設定通知
	ACCキープレフト	現行性能ACCは走行1と2を走行
ボトルネック容量増	付加車線設置	サグ部手前約1kmから上り坂終了までの区間で左側に付加車線を設置

特に、渋滞発生直前の追越車線では、車間を空け過ぎた低速走行車を先頭に、車間を詰めすぎた密な車群が形成され、上り坂での先行車の速度低下が後続車に増幅伝播して、渋滞が発生する¹⁰⁾。これらの車間を詰めすぎた車両や、車間を空けすぎた車両がACCに置き換わることで、車間が適正化され、車群の安定化や流率の改善が期待される。また、上り坂での無意識の速度低下や、渋滞巻き込まれ時間の長期化に伴う緩慢な追従走行の防止効果も見込まれるため、追従・速度回復サービスの効果も伴ったものとなる。

ただし、現行性能ACCでは、高混入率のときに流率低下への影響が懸念されるため、ACC車はキープレフト(大型ACCは走行1、小・中型ACCは走行1と走行2を通行)を行ってもらおう走行方法(以下、「ACCキープレフト」という)を組み合わせることとする。将来性能ACCでは、特にACCキープレフトは前提とせず、通常車種別の通行帯指定に従うこととする。

(4) ボトルネック容量増

ハード対策でボトルネック容量を増加させるには、動的な路肩解放や暫定4車線運用など、いくつかの方式が考えられる。また、付加車線を設置する場合でも、左側付加車線、右側付加車線、オフセット付加車線(右側に付加して左車線を絞る)等のパターンがあるが、シミュレーションでそれらの違いによる効果を評価するには、4車線断面における知見が不足しているため、ここでは左側付加車線設置を対象とした。なお、現状のサグ部シミュレータでは、付加車線終了位置の絞り込み部で発生する合流挙動のモデル化が十分に検証されていないため、ケーススタディでは対象範囲としたサグ部上り坂区間を過ぎて、十分に離れた位置で付加車線が終了し、そこでの合流は対象範囲に影響しないとした。

図7に、対象とした各対策の導入時期を想定した施策組み合わせパターンを示す。組み合わせシナリオでは、ハード対策を長期的なものとして位置づけ、ソフト対策のみで円滑化を図る場合と、ハード対策のみで図る場合、及びソフト・ハードの組み合わせで図る場合を想定した。

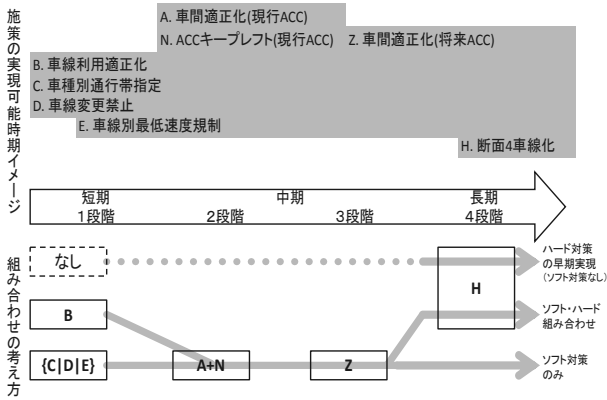


図7 各種円滑化対策の導入時期と組み合わせシナリオ

なお、各対策には図中に示したアルファベットのコードを付しており、以降の結果説明では、これらの対策コードを用いて組み合わせパターンを示すこととする。

4.2 評価方法

ケーススタディでは、2.の現況再現で用いた大和サグ部を対象とし、対策メニュー組み合わせの各シナリオに対して、表1に示した5日間の渋滞発生日における交通需要で、それぞれ3回ずつ乱数系列を変えた試行を計15回行って評価した。評価では、全ての車線の走行速度が60km/hを下回った状態が5分以上継続した場合を渋滞発生と見なし、その直前5分間の交通量を「渋滞発生時交通量 (BDF: Break Down Flowrate)」として、それ以前の5分間交通量出現頻度から、累積ワイブル分布の渋滞発生確率曲線を最尤法で求めて対策毎に比較する。また、渋滞発生後の15分間の交通量について、「捌け交通量 (QDF: Queue Discharge Flowrate)」として比較する。

4.3 各渋滞対策単体での渋滞発生確率曲線の比較

(1) ACC 車間適正化 (現行性能)

図8に現行性能ACCによる車間適正化サービス実施時の渋滞発生確率分布を、ACC混入率パターン毎に示した。この場合は、ACCの混入率が高くなるほど、分布が左にシフトしており、低い交通量で渋滞が発生しやすくなる傾向が認められた。

これは、以下のように説明される。即ち、現行性能ACCが(小型20%/中・大型50%)で混入したケースで見ると、速度の低い大型ACC車が走行1と走行2を走行するため、図9のように、渋滞発生前はいずれもほぼ80km/hに律速される。追越も小型ACC車もしくは中型ACC車のために、現況より低い約100km/hに律速されるが、走行車線の速度が低いため、図10で見るように、追越やキープレフトで車線利用が平準化されず、走行車線が有効に利用されない。加えて、相対的に遅いACC車が先頭になって大きな車群が形成され、それが上り坂にかかって車群中で減速波が生じるが、車間時間を一定に保つ現行ACCでは速度が低下すると流率も低下するため、減速波を増幅してしまい、結果として現況よりも早い時間

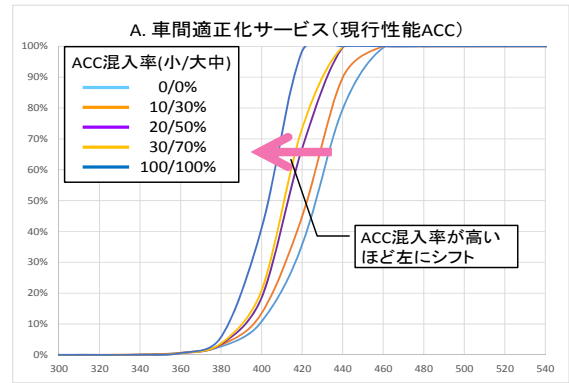


図8 車間適正化 (現行 ACC) 実施時の渋滞発生確率

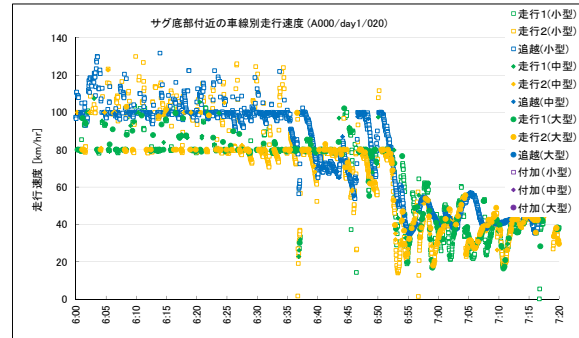


図9 サグ底部付近の車線別走行速度変動 (現行 ACC)

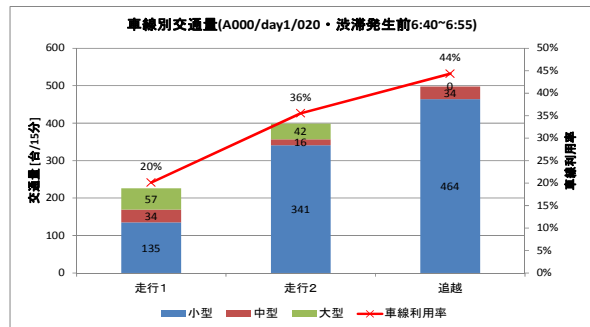


図10 渋滞発生前の車線別交通量 (現行 ACC)

帯で渋滞が発生すると考えられる。

(2) ACC 車間適正化 (将来性能)

図11に将来性能ACCによる車間適正化サービス実施時の渋滞発生確率分布を、ACC混入率パターン毎に示した。この場合は、ACCの混入率が高くなるほど、分布が右にシフトしており、渋滞発生が抑制される効果が認められた。この場合は、各車線の走行速度がACC車に律速される状況や、車線利用が平準化されない状況、ACC車が先頭になって大きな車群が形成され、それが上り坂にかかって車群中で減速波が生じる状況は、現行性能ACCの場合と変わらないが、将来性能ACCでは速度が低下しても流率が低下しないため、減速波の増幅伝播が抑制され、渋滞発生が遅れると考えられる。

(3) 各種ソフト的渋滞対策の単独実施

図12にその他の対策実施時の渋滞発生確率分布を示した。この場合は、車線別最低速度規制(E)を除いた施策で分布が右にシフトしており、渋滞発生の抑制効果が認められた。対策Eでは、各車線に設定した最低速度以下

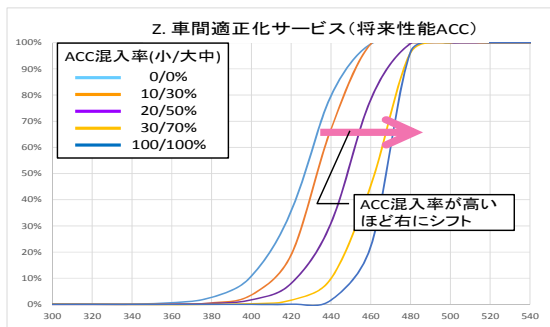


図 11 車間適正化 (将来 ACC) 実施時の渋滞発生確率

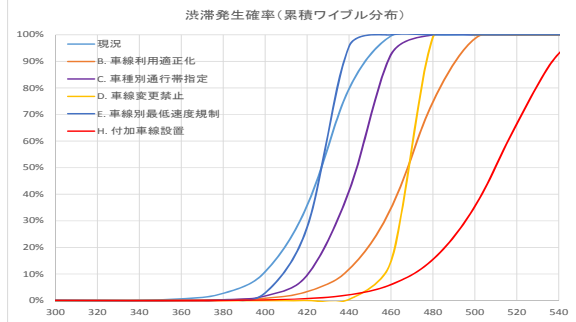


図 12 各種施策実施時の渋滞発生確率

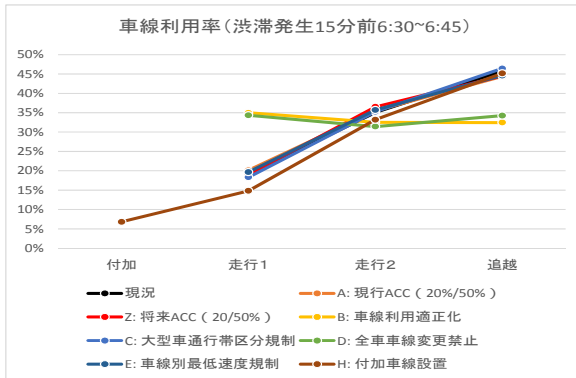


図 13 対策実施時の車線利用率比較

の希望速度を持つ車両が現況ケースにおいてほとんど存在しなかったため、規制の効果が得られなかったものと考えられる。また、車線利用適正化(B)と車線変更禁止(D)に関しては、図 13 のとおり、車線利用率がほぼ均等に標準化されており、断面容量を有効に活用できたことで、渋滞発生が抑制されたものと考えられる。大型車通行帯区分規制(C)については、意図した通り追越車線の速度が高く維持され、渋滞発生が抑制されたと考えられる。付加車線設置(H)では、左側付加車線の利用率は7%であるが、低速の大型車と中型車が付加車線を走行しており、その他の車線の走行速度が高く維持され、かつ本線3車線分に対する需要が減少したため、渋滞発生が抑制された。

4.4 対策の組み合わせシナリオによる比較

(1) 渋滞発生確率 10%での比較

各対策の組み合わせパターンでの効果の優劣を示すため、各組み合わせパターンで求めた渋滞発生確率分布曲線から確率が 10%になるときの交通量を指標とした。渋滞発生確率が 10%の交通量は、その区間の平均的な容量に対応しているとされており、この交通量が大きいほど、分布曲線が右にシフトして渋滞発生が抑制される。

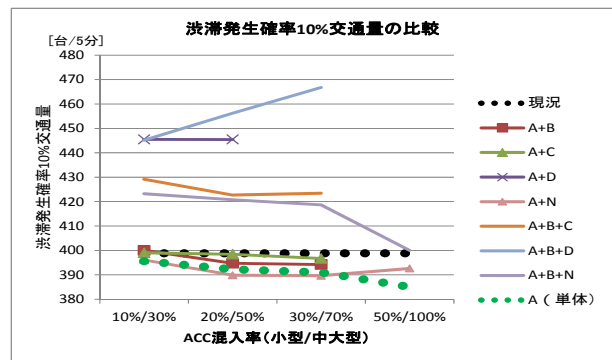


図 14 渋滞発生確率 10%交通量での比較(現行性能 ACC)

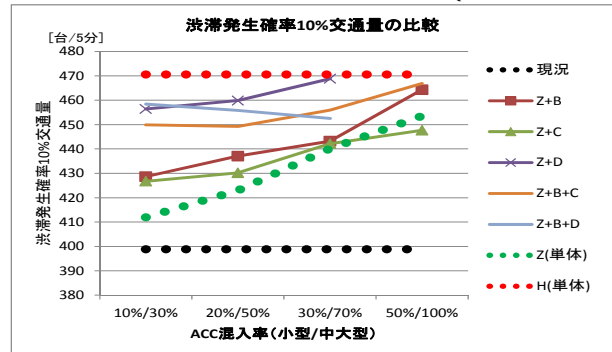


図 15 渋滞発生確率 10%交通量での比較(将来性能 ACC)

図 14 に、現況と同じ 3 車線区間で、現行性能 ACC による車間適正化(A)と各施策を組み合わせたときの、渋滞発生確率 10%交通量を比較した。A 単体では、すでに見たとおり、ACC 車両が混入するほど 10%交通量が小さくなり、渋滞抑制の面で不利になる。B~D については、単独実施では現況より大きい交通量を示すにも関わらず、A との組み合わせ(A+B, A+C)では、ACC が混入すると効果がなくなってしまふ。ACC キープレフト(N)との組み合わせ(A+N)も、効果が見られない。一方、D(車線変更禁止)と組み合わせた場合の 10%交通量は大きく推移している。組み合わせパターン(A+B+C)では、ACC 混入率が(小型 30%/中大型 70%)までであれば、10%交通量が現況よりも大きく維持されており、渋滞発生抑制効果が期待できると考えられる。また、B 及び N の組み合わせ(A+B+N)でも、10%交通量が現況よりも大きく維持されている。

図 15 に、現況と同じ 3 車線区間で、将来性能 ACC(Z)と各施策を組み合わせたときの、渋滞発生確率 10%交通量を比較した。この場合は(Z)の単独実施でも ACC 車両が混入するほど 10%交通量が大きくなり、渋滞抑制効果が期待できる。この傾向はいずれの施策と組み合わせた場合も同様に見られ、ACC 混入率が(小型 50%/中大型 100%)になると、付加車線設置の単独実施ケース(H)と同程度のレベルとなり、ソフト施策の組み合わせだけでも一定程度大きな効果が得られると期待できる。また、将来 ACC の混入率が低い場合でも、B 及び C か D を組み合わせたケース(Z+B+C, Z+B+D)では、高い 10%交通量が得られており、これらも一定程度大きな効果が期待で

きる。

(2) 渋滞発生後捌け交通流率の比較

図 16 に、現況と同じ 3 車線区間で、現行性能 ACC(A) と各施策を組み合わせたときの、渋滞後捌け交通量と現況に対する改善率を比較した。全般に、ACC 混入率が大きくなると 捌け交通量が現況ケースよりも小さくなり、渋滞緩和の観点では不利な結果となる。

図 17 に、現況と同じ 3 車線区間で、将来性能 ACC(Z) と各施策を組み合わせたときの、渋滞発生確率 10% 交通量を比較した。将来性能 ACC による車間適正化は、単独実施(Z) でも ACC 車両が混入するほど 10% 交通量が大きくなり、渋滞抑制効果が期待できる。この傾向はいずれの施策と組み合わせた場合も同様に見られ、ACC 混入率が(小型 50%/中大型 100%)になると、付加車線設置の単独実施ケース(H)と同程度のレベルとなり、ソフト施策の組み合わせだけでも一定程度大きな効果が期待できる。また、将来 ACC の混入率が低い場合でも、B 及び C か D を組み合わせたケース(Z+B+C, Z+B+D)では、高い 10% 交通量が得られており、大きな効果が期待できる。

5. おわりに

本研究では、高速道路サグ部に特有の車両挙動を精緻に再現可能な交通シミュレーションを用い、車線運用規制、車線利用適正化情報提供、ACC 活用等の各種対策の単体及び複合的な組み合わせの適用による渋滞緩和効果の評価を行った。その結果、以下の点が明らかとなった。

- 1) 現行性能 ACC による車間適正化サービス導入時は、ACC の混入率が高くなるほど、低い交通量で渋滞が発生しやすくなる傾向が認められる。一方、車頭時間制御による将来性能 ACC では ACC の混入率に応じて渋滞発生が抑制される傾向が認められる。
- 2) その他の渋滞対策の単体実施では、車線別最低速度規制を除く車線利用適正化、全車車線変更禁止、大型車通行帯区分規制、断面 4 車線化(付加車線設置)において渋滞発生の抑制効果が認められる。
- 3) 現行性能 ACC 導入時は、現況よりも渋滞が悪化することが予想されるものの、現行性能 ACC 利用時のキープレフトルールを組み合わせた場合は、正の渋滞緩和効果が得られることが確認された。このため、短・中期的な渋滞対策として、ACC 車による適正な走行ルールの導入が不可欠であることが示唆された。

今後、本研究で得られた知見に基づき、費用対効果等を含めた戦略的な渋滞対策シナリオの策定を進める必要がある。また、現行性能 ACC の普及状況を踏まえつつ、道路インフラ側の対策の着実な実施展開と併せて、ACC を活用した車間適正化サービス等を、適正な ACC の利用ルールやその広報・啓発活動、キープレフト走行への

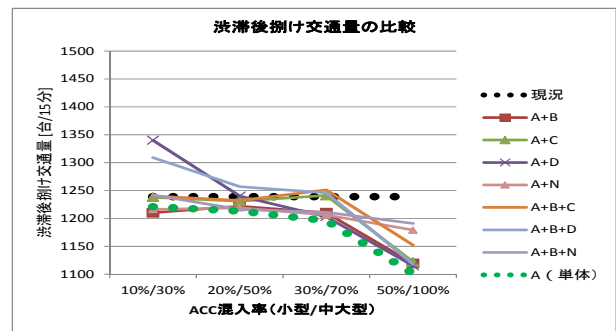


図 16 渋滞後捌け交通量の比較 (現行 ACC)

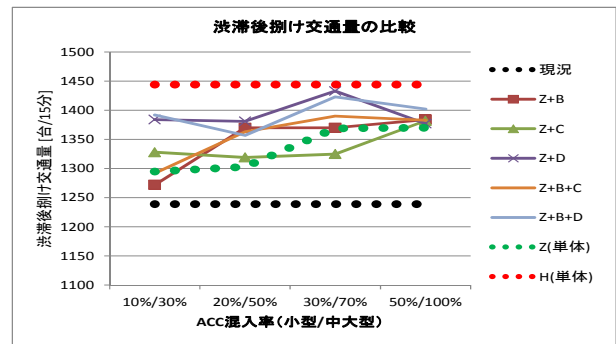


図 17 渋滞後捌け交通量の比較 (将来 ACC)

協力行動に対するインセンティブ付与等と組み合わせると効果的に推進することが求められる。

謝辞

本研究の実施にあたっては、「高速道路サグ部等交通円滑化研究会(座長:大口敬東京大学教授)」において、委員の皆様より貴重なご意見をいただくとともに、自動車メーカ、高速道路会社の関係各位より関連データ等の提供にご協力頂いた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) ASV(先進安全自動車)技術普及状況調査,国土交通省,2013.
- 2) 大口敬:高速道路における交通渋滞緩和策の最新動向-特集『進化する道路関連技術』,自動車技術,Vol.67, No.10, pp.11-16, 2013.
- 3) 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,Vol.1(2015)No.2 特集号 p.B_60-B_67, 2015.
- 4) 金澤文彦・坂井康一・鈴木一史・岩崎健:高速道路サグ部における ACC 車両との路車間連携による交通円滑化,第 32 回交通工学研究発表会論文集, pp.31-34, 2012.
- 5) Shackel, W.J., van Arem, B. and Netten, B.D.: Effects of Cooperative Adaptive Cruise Control on traffic flow stability, 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, pp.759-764, 2010.
- 6) Horiguchi, R. and Oguchi, T.: A Study on Car Following Models Simulating Various Adaptive Cruise Control Behaviors, International Journal of Intelligent Transportation Systems Research, 2014.
- 7) 車線利用適正化サービスのドライバ受容性等調査業務報告書,国土技術政策総合研究所,2015
- 8) 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.
- 9) 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に関する一考察,第 50 回土木計画学研究発表会(秋大会)講演集, CD-ROM, 2014.
- 10) 武藤憲弘・赤羽弘和:車両の走行軌跡の精密観測に基づくサグ渋滞の分析,土木計画学研究・講演集, Vol.40, 2009.