

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 Impact Assessment of Future Performance of Adaptive Cruise Control for Congestion Mitigation at Expressway Sag Sections

○鈴木 一史¹, 山田 康右², 堀口 良太³, 岩武 宏一⁴

○Kazufumi SUZUKI¹, Kosuke YAMADA², Ryota HORIGUCHI³ and Koichi IWATAKE⁴

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。しかしながらどのようなACC性能が交通円滑化に寄与するかは、必ずしも明らかではない。そこで、サグ部の渋滞緩和に資するACCの性能を制御規範（車間時間制御または車頭時間制御）、制御目標、加速性能、過渡応答特性の観点から検討し、渋滞発生前の車線利用適正化および車間適正化、渋滞発生後の速度回復を図る渋滞対策サービスについて、マイクロ交通シミュレーションにより各性能案のACC車を混入させたときの渋滞発生確率、渋滞発生後捌け交通量を評価した。また、東名高速道路下り大和サグ部を対象に、各渋滞対策サービスを実施した際のACC車の混入率に応じた渋滞損失時間の削減率を各性能別に試算した。

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、その対策が重要な課題となっている。高速道路サグ部における渋滞要因として、渋滞発生前では、追越車線への交通集中による車線利用の偏り、密な車群の形成による減速波の増幅伝播、上り勾配での無意識な速度低下による流率低下等があり、渋滞発生後では、渋滞先頭位置を通過後の速度回復の遅れ、渋滞巻き込まれ時間の増大による追従意欲の鈍化等が既往研究^(例えば1)2)において指摘されている。これら要因の多くはドライバの運転挙動特性によるものであり、ドライバへの運転支援により望ましい運転挙動に改善できればサグ部における渋滞の抑制あるいは緩和に繋がる可能性がある。

一方で近年、自動車メーカ各社からACC(Adaptive Cruise Control)と呼ばれる、速度に応じて車間を一定に維持することでドライバの疲労低減・快適性向上に寄与する装備を搭載した車両が既に市販化されており、その交通渋滞対策への応用が期待されている³⁾。これに対して国土技術政策総合研究所では、2010年に「高速道路サグ部等交通円滑化研究会」を設置し、国内の自動車メーカ、高速道路会社も含め、ACC等の自動車技術と連携した渋滞対策サービス(図1)について検討を進めてきた。このサービスは既往知見に基づき大きく3つに分けられ、渋滞発生前には、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、車間適正化サービスにより車間を適

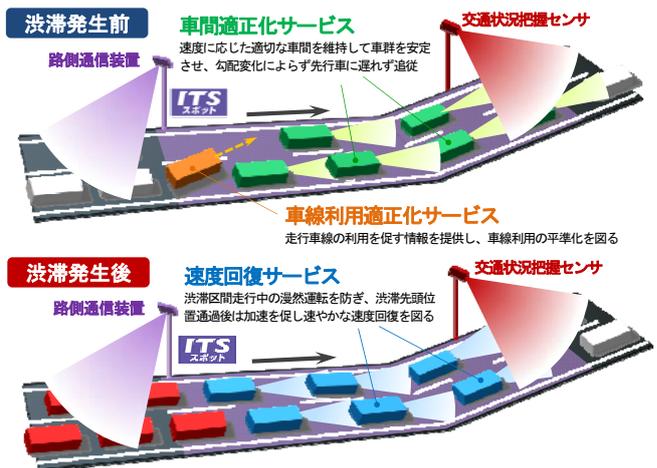


図1 ACCを活用した高速道路サグ部渋滞対策サービス

正化して交通流の整流化を図ることで渋滞発生を抑制し、渋滞発生後には、速度回復サービスにより先行車に遅れずに追従するとともに、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。車線利用適正化サービスについては、既に2014年1月より東名高速(上り/下り)大和サグ付近において、ITSスポット対応カーナビを通じて情報提供が開始されている。車間適正化サービスおよび速度回復サービスについては、ボトルネック手前の路側から情報提供を受けたドライバがACCを作動させることで、ドライバには困難な適正車間の維持や勾配変化区間での無意識な速度

1 正会員, 博士(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 〒305-0804 茨城県つくば市旭1 e-mail: suzuki-k92td@nilim.go.jp Phone: 029-864-4496
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), (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

表1 本研究で検討対象とするACCの性能案

	現行性能 (参考)	将来性能 A	将来性能 B	将来性能 C
設定速度	設定速度 100km/h			
制御規範および 制御目標	車間時間制御		車頭時間制御	
	車間時間 1.85 秒 (M 設定) 臨界時 1,700 台/時 渋滞時 1,560 台/時	車間時間 1.55 秒 臨界時 1,990 台/時 渋滞時 1,800 台/時	車頭時間 2.00 秒 どの速度域でも 流率 1,800 台/時	車頭時間 1.80 秒 どの速度域でも 流率 2,000 台/時
加速性能	全速度域での穏やかな加速	低速度域ではエコドライブの「ふんわり加速」相当		
過渡応答特性	a=0.60 m/s ² b=2.80 m/s ²	a=1.20 m/s ² b=1.60 m/s ²		
減速波の増幅率 (隊列シミュレーション)	いずれも 1 より大	1-2 台目 : 0.92 7-8 台目 : 0.98	1-2 台目 : 0.84 7-8 台目 : 0.80	1-2 台目 : 0.94 7-8 台目 : 0.98

低下の防止により渋滞緩和が期待できる。

これらACCを活用した渋滞対策サービスの実現には、ACCの有する速度に応じて適切な車間を維持する特性がドライバーよりも優れていることが前提であるが、高速域での乗り心地を重視した設計となっている現行のACCの性能(以下、現行性能)では、必ずしも十分な渋滞緩和効果は認められないことが既往研究^{例えは 4)5)}等において報告されている。したがって、ACCを活用した渋滞対策サービスの実現に向けては、交通円滑化の観点からも新たにACCの性能(以下、将来性能)を検討することが必要である。

そこで本研究では、高速道路サグ部渋滞対策に資するACCの将来性能を複数案検討した上で、マイクロ交通シミュレーションによりその効果を確認し、東名高速下り大和サグ部を対象に、渋滞対策サービスの効果を各将来性能のACC車混入率に応じて試算することを目的とする。

2. 高速道路サグ部渋滞対策に資するACCの性能要件

現在市販されているACCは、車間時間を一定に維持する制御(以下、車間時間制御)により、ドライバーが設定した目標車間時間を維持するよう設定速度を上限として速度調整するものである。車間時間の目標値は、一般的にS/M/Lの3段階(それぞれ1.35秒/1.85秒/2.35秒、各社カタログ参考値)で設定可能である。ACCを渋滞対策という視点で考えた場合、現行性能では課題が大きく3点挙げられる。

1点目は、車間時間を一定に維持する現行のACCでは、速度が低くなるほど車両の長さ分の影響が大きくなり車頭時間が増大してしまう点である。つまり、上り勾配区間のような速度低下が起きやすい場所では、車間時間制御では交通流率が低下しがちである。したがって、低速域でも流率を低下させない新たな制御規範として、車頭時間を一定に維持する制御(以下、車頭時間制御)が必要となる。

2点目は、現行のACCは高速域での乗り心地を重視し

ており、ドライバーによる運転に比べて加速が緩慢な点である。そのため、上り勾配や渋滞先頭付近など、低速域から加速する際には速度回復が遅れがちになると懸念される。したがって、低速域での俊敏な加速と高速域での穏やかな加速を両立する加速性能が求められる。

3点目は、先行車が一時的に減速したときに、減速波を増幅させてしまう点¹⁰⁾である。減速波を増幅伝播させない過渡応答特性が必要となる。

なお、現在市販されているACCの多くは高速域での利用を想定したものであるが、渋滞発生後での活用を考えれば、低速域でも動作可能な全車速域ACCであることが望ましい。全車速域ACCについても既に実用化され、一部市販化されつつあり、本研究でもこの全車速域ACCを前提とする。

3. ACCの将来性能案の検討

3.1 将来性能案の評価方法

将来性能案の検討にあたっては、既往研究において構築されたサグ部交通シミュレータ⁴⁾を用いる。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。追従挙動モデルにはIDM+⁶⁾を採用しており、将来性能案の検討は、このIDM+のモデル式およびパラメータを適宜変更することで実施する。

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

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

ここに、 a : 最大加速度[m/s²]、 b : 希望減速度[m/s²]、 v : 自車速度[m/s]、 Δv : 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

車頭時間[s]である。

3.2 ACCの将来性能案の設定

2. で述べた制御規範・制御目標、加速性能、過渡応答特性の観点から、ACCの将来性能案を設定する。本研究では、現行性能に比べ加速性能の向上は必須と考え、制御規範および制御目標の違いによる効果を評価できるように表1に示す通り、現行の車間時間制御を踏襲した上で目標車間時間を小さめに設定した将来性能A、制御規範を車間時間制御から車頭時間制御に変更した上で、目標車頭時間の違いを考慮した将来性能BおよびCの合計3案を設定した。以下、これら3案の具体的なパラメータの設定根拠、およびシミュレータでの実装方法を述べる。

(1) 制御規範

制御規範の違いは、Horiguchi and Oguchi⁷⁾が提案する追従挙動モデルにより表現する。これは、より厳密に車間時間ならびに車頭時間を保持する制御規範となるよう、目標車間時間を $g_d[s]$ 、目標車頭時間を $T_d[s]$ として、IDM+における式(2)の希望車間距離を式(3)~(6)のように置き換えたものである。

○車間時間保持の場合

$$s^* = \begin{cases} s_0 + \frac{v\Delta v}{2\sqrt{ab}} & (v < v_s) \\ vg_d + \frac{v\Delta v}{2\sqrt{ab}} & (v \geq v_s) \end{cases} \quad (3)$$

$$v_s = \frac{s_0}{g_d} \quad (4)$$

○車頭時間保持の場合

$$s^* = \begin{cases} s_0 + \frac{v\Delta v}{2\sqrt{ab}} & (v < v_s) \\ -L + vT_d + \frac{v\Delta v}{2\sqrt{ab}} & (v \geq v_s) \end{cases} \quad (5)$$

$$v_s = \frac{s_0 + L}{T_d} \quad (6)$$

なお、目標車頭時間 T_d については、先行車の正確な車長を知ることは現実には困難であることから、シミュレーション上では先行車の末尾位置から自車の末尾位置までの車尾時間を制御目標値として用いる。

(2) 制御目標

制御目標の設定にあたっては、いずれの制御規範でも現況と同程度の捌け交通流率を確保する必要がある。例えば東名高速下り大和サグ付近の現況をみると、渋滞発生直前の臨界状態にある追越車線では、走行速度が70km/h(以下、臨界速度)で1,800~2,100台/時、渋滞発生後は走行速度が40km/h(以下、渋滞速度)で、1車線あたり1,500~1,800台/時の捌け交通流率となっている。

そこで、各将来性能別に走行速度に応じて実現する車間時間と車間距離、および車頭時間と交通流率の関係を図2および図3に示した。車間時間制御では車間時間は

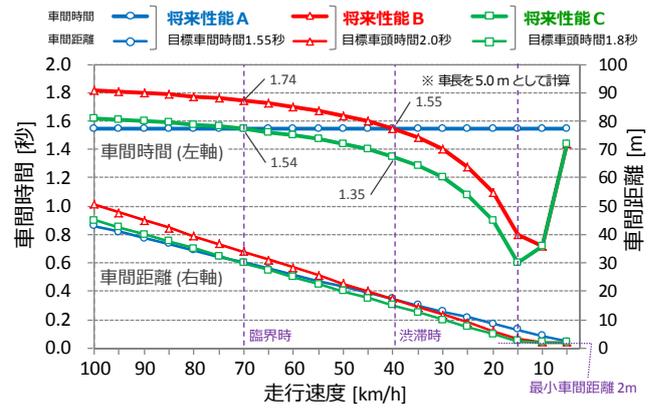


図2 各将来性能の走行速度別の車間時間と車間距離

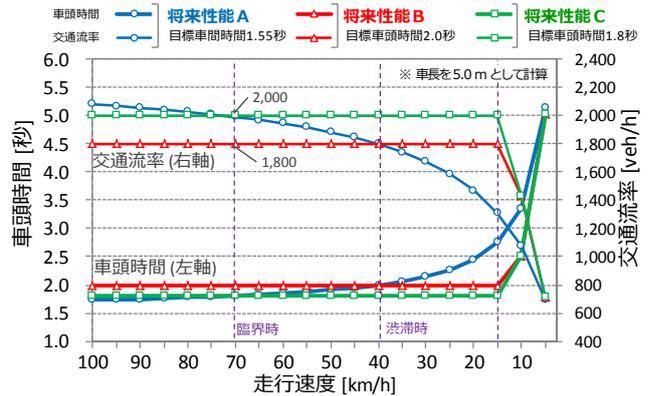


図3 各将来性能の走行速度別の車頭時間と交通流率

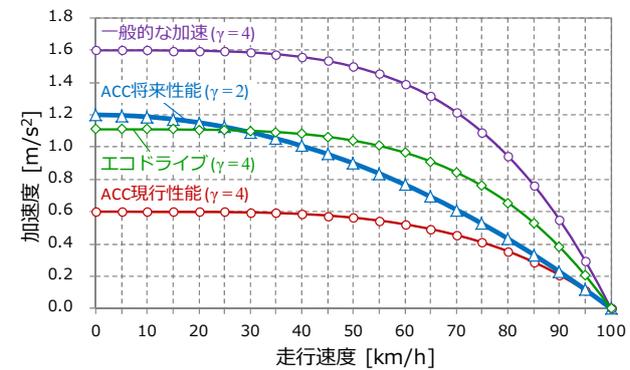


図4 自由走行時の加速性能の比較
一般的な加速：一般道の信号交差点における発進時の加速度⁸⁾より
エコドライブ：「ふんわりアクセル」で推奨される「発進して5秒後に20km/h」になる加速度⁹⁾より
ACC現行性能：市販ACC車両を用い、新東名高速道路で実施されたACC隊列走行実験データ¹⁰⁾より

図4 自由走行時の加速性能の比較

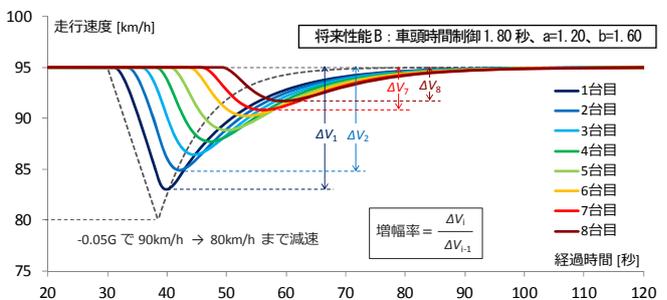


図5 ACC隊列走行シミュレーションでの速度変化と増幅率

一定であるものの、速度が低下するに従い車頭時間が増大し、交通流率が低下する。一方、車頭時間制御では、速度に応じて車間時間は変化するものの、速度が低下しても車頭時間、交通流率はいずれも一定に維持される。

これらを踏まえ、現行の車間時間制御を踏襲した将来性能 A では、現況の渋滞時の捌け交通流率 1,800 台/時を下回らないよう、目標車間時間を現行 ACC の車間時間設定の S (1.35 秒) と M (1.85 秒) の中間相当である 1.55 秒に設定し、かつ臨界速度での流率 2,000 台/時を確保することで渋滞発生直前の流率改善にも寄与するものとした。

一方、低速域でも流率が低下しない車頭時間制御では、現況の渋滞時の捌け交通流率を下回らないよう目標車頭時間を 2.0 秒 (いずれの速度域でも 1,800 台/時の流率) とする将来性能 B、これより車頭時間を短くし、現況の臨界時における追越車線の交通流率の向上にも寄与できるよう目標車頭時間を 1.8 秒 (いずれの速度域でも 2,000 台/時の流率) とする将来性能 C の 2 案を設定した。

(3) 加速性能

加速性能は様々な走行シーンで実現されうる加速性能曲線を参考に決定する。図 4 の加速性能曲線は、設定速度を 100km/h とした場合に、ある速度で前方が空いたときの加速度の上限値を次式に従って示したものである。

$$\frac{dv}{dt} = a \left[1 - \left(\frac{v}{v_0} \right)^\gamma \right] \quad (7)$$

ここに、 v : 走行速度、 v_0 : 希望速度 (ACC の設定速度)、 a : 最大加速度パラメータ、 γ : べき乗数である。

既往知見に基づき設定された「一般的な加速」「エコドライブ」「ACC 現行性能^{*)}」の加速性能曲線を参考に、低速域での俊敏な加速と高速域での穏やかな加速を両立させるべく、ここでは最大加速度 a に 1.2m/s^2 を採用した。

(4) 過渡応答特性

速度低下時の過渡応答特性の指標として、ここでは先行車の速度低下量 ΔV_1 に対する後続車の速度低下量 ΔV_2 の比率で定義される「増幅率」を用いる。増幅率が 1 より大きければ減速波を増幅伝播させることから、1 未満となる過渡応答特性が求められる。そこで、ACC 車両 8 台の隊列走行シミュレーションを実施し、サグ部での先行車のブレーキングによる一時的な速度低下を模擬したときに、増幅率が 1 未満となるパラメータ a 、 b の組み合わせを探索した。具体的には、図 5 のように制御規範・制御目標値ごとに車群先頭車を 95km/h から 80km/h まで減速度 0.05G で減速させたときの後続 1 台目と 2 台目、後続 7 台目と 8 台目の増幅率を $a=1.2\text{m/s}^2$ の下、 b を網羅的に変化させながら探索することで $b=1.6\text{m/s}^2$ を得た^{*)}。このときの増幅率は、将来性能 A および C で $0.92\sim 0.98$ 、将来性能 B で $0.80\sim 0.84$ となった。

以上 (1)~(4) を踏まえ決定された表 1 の ACC の将来性能案について、次章以降で効果評価を行う。

4. ACC の将来性能による交通流改善効果の確認

3. で整理された ACC の将来性能案について交通流の

表 2 現況再現性の確認対象とした渋滞イベント

	渋滞発生日	発生時刻	継続時間	解析対象時間帯
①	2010/12/04(土)	6:45	00:30	6:00~7:00
②	2010/12/11(土)	6:35	01:00	5:50~6:50
③	2011/08/17(水)	7:00	06:50	6:15~7:15
④	2011/08/18(木)	7:00	07:00	6:15~7:15
⑤	2010/11/06(土)	6:10	09:05	5:25~6:25

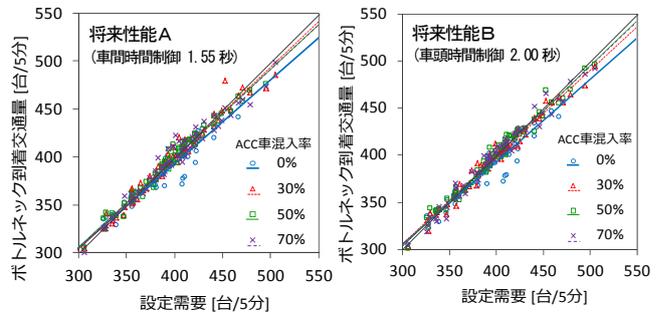


図 6 ACC 車混入率ごとのボトルネック到着交通量の比較



図 7 サービス提供時のシミュレーション上での車両挙動

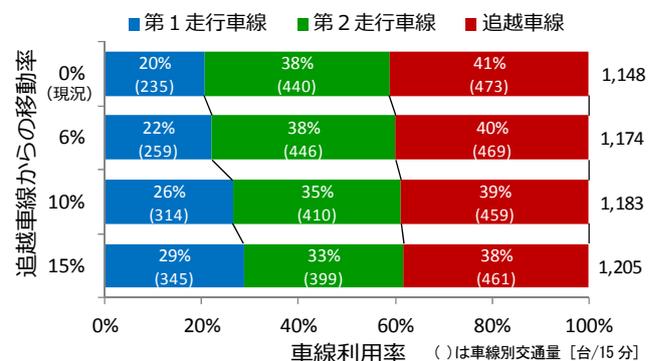


図 8 追越車線からの移動率に応じた車線利用率 (渋滞発生前 15 分間)

改善効果を確認する。ここで期待される効果は、渋滞発生前の車線利用適正化サービスおよび車間適正化サービスによる交通流の整流化がもたらす渋滞抑制効果、渋滞発生後の速度回復サービスによる渋滞中の捌け交通流率の向上がもたらす渋滞緩和効果が挙げられる。効果試算にあたっては、3.1 で述べたサグ部交通シミュレータを用いる。

4.1 シミュレーション現況再現性と到着交通量の検証

本研究で用いるサグ部交通シミュレータは、東名高速下り大和サグ部 (3 車線) において、2011 年 8 月 17 日 (水) を対象に現況再現性 (渋滞発生時刻、最大渋滞長、渋滞時間、車線別交通量/速度、車頭時間分布、車線変更回数等) が既に確認されている。ここでは、他の様々な渋滞発生

日においても再現性を確認するため、表2に示す③を除く渋滞規模が異なる4つの渋滞発生日を対象に現況再現性を確認した。渋滞発生前後の車線別交通量、車線別速度、渋滞発生時刻の観点から検証したところ、いずれの渋滞発生日も良好に再現できることが確認された。

また、ACC車が混入することで、車両が発生してからボトルネック断面(サグ底部)に到着するまでに、到着流率や車群形成状況が変わると考えられる。そこで、到着需要が現況よりも低下すると考えられる将来性能AおよびBについて、ACC車混入率別にシミュレーションで与えた5分ごとの設定需要とボトルネック断面に到着する交通量との関係を非渋滞時を対象に比較した。その結果が図6であるが、比較的高い交通需要下でACC車混入率が増加しても現況(混入率0%)の到着交通量を下回ることではなく、設定した交通需要が到着していることが確認された。

4.2 サービスによるシミュレーション上での車両挙動

各サービス提供時のシミュレーション上での車両挙動を図7に示す。車間適正化サービスおよび速度回復サービスでは、上流2kmの地点で情報提供が開始され、ACC車は直ちにACCを作動させ、表1の性能案にて上限速度100km/hで走行する。一度ACCを作動させた車両は車線変更を行わず、ACCを作動させるまではACCを搭載しない一般車両と同様の挙動をとる。車線利用適正化サービスでは、ACC車に対する情報提供位置において、目標とする車線移動率(追越車線から走行車線へ車線変更した車両の割合)が達成されるよう、対象区間に流入すると同時に全ての車両が走行車線の利用を促す情報提供を受け、車線変更を行うものとする。なお、使用したシミュレータでは車線移動率を外生的に与えることはできないため、追従挙動モデルのパラメータは変えずに、車線変更をしても速やかに走行車線に復帰するキープレフトの傾向が強まるよう、車線変更挙動モデルのパラメータを調整する。

4.3 車線利用適正化サービスおよび車間適正化サービスによる渋滞発生確率

(1) 車線利用適正化サービス

車線利用適正化サービスによる車線利用適正化の効果を確認するため、車線移動率の各目標値(5%、10%、15%)において、シミュレーションのパラメータ調整を繰り返し、渋滞発生15分前の車線利用率を計測した結果(3回試行のサグ底部における平均値)が図8である。例えば、車線移動率の目標値を5%とした場合、結果的に $\{(446+259)-(235+440)\}/473 = 30/473 = 6.3\%$ の車両が追越車線から走行車線へ移動している。いずれの車線移動率においても、追越車線の利用率は1~3%程度しか変化していない。これは追越車線の車両が車線変更しても、上流から次々に希望速度の高い車両が到着して空いたスペ

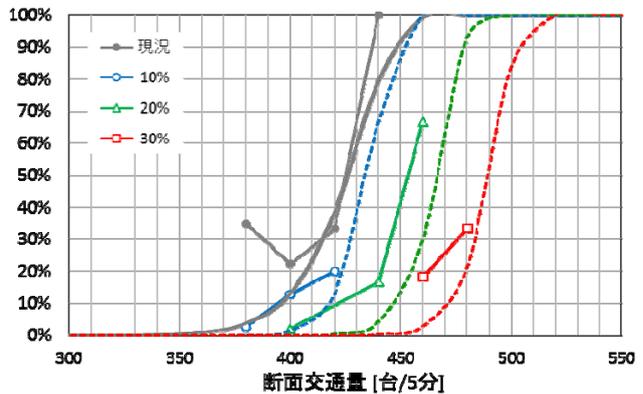


図9 渋滞発生確率(車線移動率0%、将来性能B)

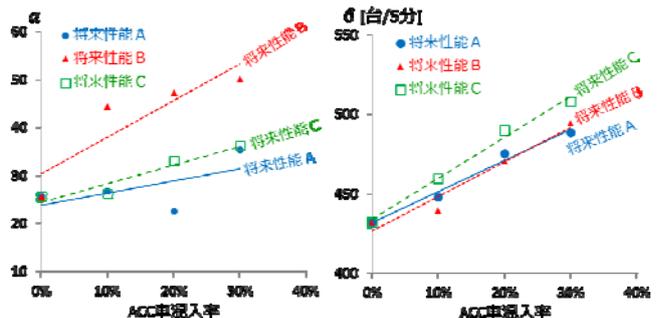


図10 混入率に応じたワイル分布パラメータ(移動率0%)

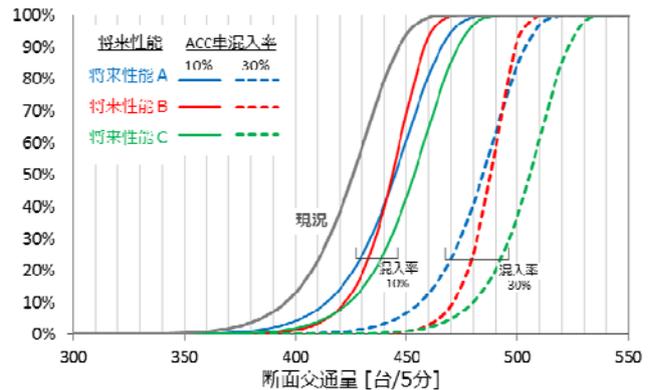


図11 将来性能×混入率別の渋滞発生確率(移動率0%)

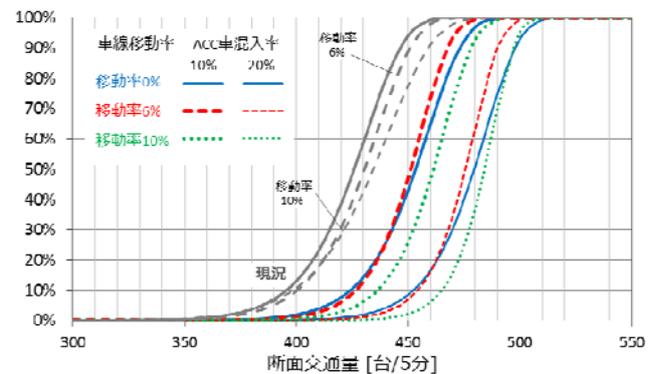


図12 将来性能Cの移動率×混入率別の渋滞発生確率

ースを埋めるため、追越車線の交通量に大きな変化が生じないためである。その結果、第1走行車線の利用率が増加することで断面全体の交通流率が増加している。

(2) 車間適正化サービス

渋滞発生は確率的現象であることが知られている。車間適正化サービスは渋滞発生を抑制する効果があると考え

えられることから、本研究では既往研究¹¹⁾を参考に、渋滞発生確率により評価する。交通量ランク別の渋滞発生頻度と非渋滞発生頻度を用い、最尤推定法により渋滞発生確率の分布形を推定する。ここでの分布形には、既往研究において当てはまりがよいとされる式(8)のワイブル分布を用いる。

$$F(q) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{q}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (8)$$

ここに、 q : 断面交通量[台/5分]、 α : 形状パラメータ、 β : スケールパラメータである。 α が大きいほど分布の傾きが急になり、 β が大きいほど分布位置が右にシフトする。

推定にあたっては、表2の渋滞発生日5パターンの交通需要について、乱数系列を変えた3回試行の計15回分から得られるサグ底部の交通量出現頻度分布を用いた。なお、渋滞判定の基準は大口ら¹²⁾を参考に、サグ底部において速度が60km/h未満の車両が3台以上連続した場合とした。

図9に将来性能Bの下、車間適正化サービスを単独実施(車線移動率0%)した場合のACC車混入率に応じた渋滞発生確率の最尤推定結果を示す。ここで得られるワイブル分布のパラメータ α 、 β は、必ずしも十分とはいえないデータ数から推定されたものであるが、本研究では混入率に応じた渋滞発生確率の傾向を捉えることを重視して、図10に示すように将来性能別の混入率に応じて α 、 β を線形回帰した結果で評価する。

図11は各将来性能の下、車間適正化サービスを単独で実施(車線移動率0%)した場合のACC車混入率に応じた渋滞発生確率である。ACC車混入率が増えるに従い曲線は右にシフトしており、渋滞発生確率が抑えられている。また、同一の混入率では、将来性能AおよびBは同程度の渋滞発生確率であるが、増幅率の小さい将来性能Bの方がAよりもばらつきは小さい傾向にある。さらに、臨界時の流率および増幅率が同程度の将来性能AおよびCを比較すると、車頭時間制御の将来性能Cの方が渋滞抑制効果は高いといえる。

(3) 車線利用適正化サービスと車間適正化サービスの併用

同様にして車線利用適正化サービスと車間適正化サービスを併せて実施した場合の渋滞発生確率を求めた。

図12は将来性能Cにおいて、車線移動率、ACC車混入率に応じた渋滞発生確率を示したものである。同一の混入率では、車線移動率6%目標と0%目標(車間適正化サービスを単独で実施したとき)との間に大きな差はみられない。これは、ACCの設定速度が100km/hであるのに対し、追越車線では希望速度が100km/hを超える車両が多くを占めていると考えられ、そのような車両がACCの設定速度に抑制されて走行車線に変更することで、副次的な効果として車線利用の均等化が生じていると考え

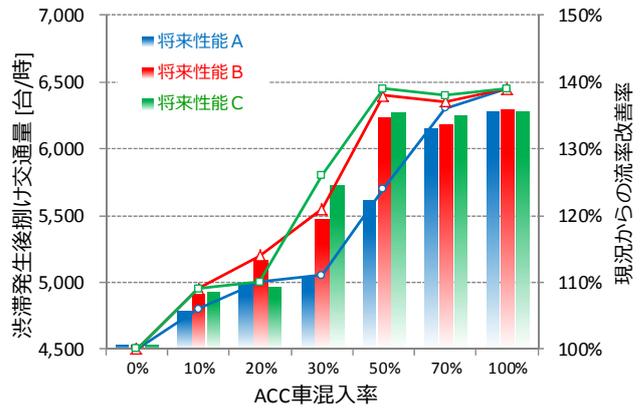


図13 ACC車混入率に応じた渋滞発生後捌け交通量

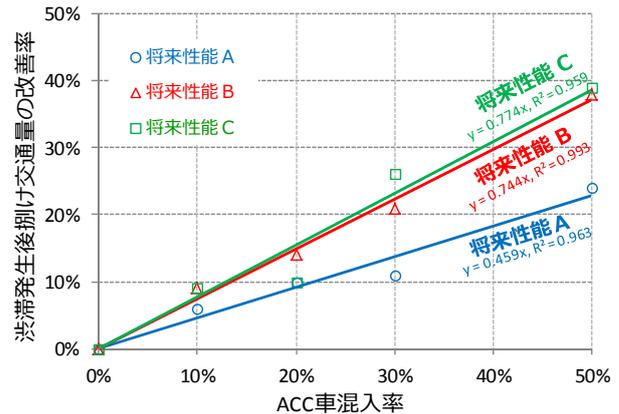


図14 ACC混入率に応じた流率改善率(線形近似)

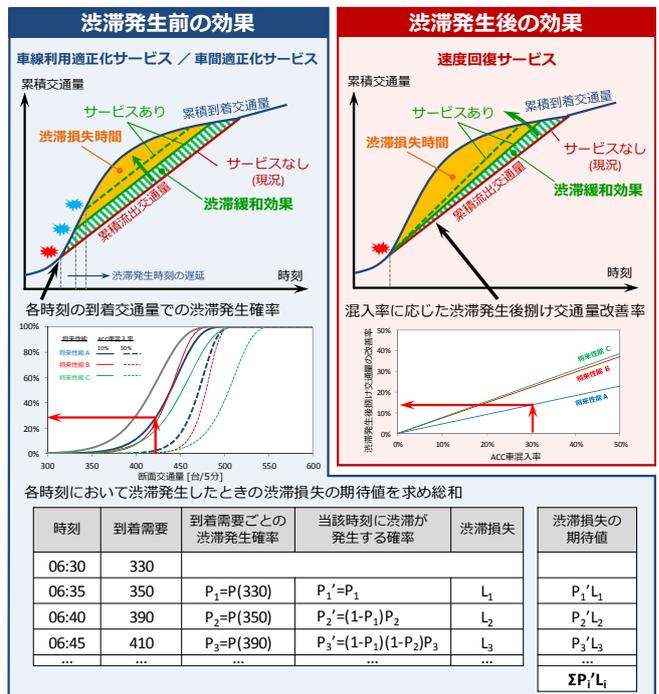


図15 渋滞緩和効果の試算方法

られる。したがって、車線利用適正化サービスとの相乗効果を見込むには、車線移動率は10%を目標とする必要があるといえる。

4.4 速度回復サービスによる渋滞発生後捌け交通量

渋滞発生後の速度回復サービスによる渋滞発生後捌け交通量を確認する。図13は各将来性能についてシミュ

レータ上で ACC 車混入率別に段階的に交通需要を増加させ渋滞が発生してから1時間経過後30分間の交通流率(乱数系列を変えた3回試行の平均値)を計測したものである。将来性能 B および C は混入率 50%で、将来性能 A は混入率 70%で、単路部の基本交通容量にほぼ達し渋滞が発生しなくなる。図 14 は 10%~50%の混入率で捌け交通量改善率を混入率に応じ線形回帰して比較したものである。改善効果は、将来性能 C > 将来性能 B > 将来性能 A の順に高く、低速域においても車頭時間制御により流率を一定に維持可能な将来性能 C および B において高い流率改善効果が得られている。

5. ACC を活用した渋滞対策サービスの効果試算

4. で得られた車線利用適正化サービスおよび車間適正化サービスの渋滞発生確率、速度回復サービスの渋滞発生後捌け交通量改善率に基づき、東名高速下り大和サグ部を対象にトラカンデータを用いて渋滞緩和効果を試算する。

5.1 試算方法

効果試算は図 15 に示すように、対象とする渋滞発生日においてトラカンデータより交通需要を推定し、当該ボトルネックにおける累積到着交通量図(4.1 で述べた ACC 混入率に応じたボトルネックへの到着交通量の関係も考慮)を作成した上で、渋滞発生前および渋滞発生後それぞれのサービスについて実施した。

渋滞発生前では、車線利用適正化サービスおよび車間適正化サービスの提供を受けた ACC 車の混入により渋滞発生が遅延することで渋滞損失が削減すると考えられる。そこで、評価対象時間帯の5分ごとの交通需要に対して、4.3 の渋滞発生確率から当該交通需要で渋滞が発生する確率と渋滞損失を計算し、これらに乗じることで当該時刻に渋滞が発生した場合の渋滞損失の期待値を算出する。これを評価対象時間帯の全ての時間帯について総和をとることで当該渋滞発生日での渋滞損失とし、現況の渋滞損失からの削減率を試算した。なお、評価対象時間帯は、サービスの提供開始タイミングである断面交通量が 350 台/5 分を超過した時刻から現況の渋滞解消までの時刻とし、渋滞発生後は現況の渋滞発生後捌け交通量を適用する。

渋滞発生後では、速度回復サービスの提供を受けた ACC 車の混入により、渋滞発生後捌け交通量が改善することで渋滞損失が削減すると考えられる。そこで、渋滞発生時刻は同一のまま、現況の渋滞発生後捌け交通量に対して ACC 車の混入に応じて 4.4 で得られた流率改善率を適用することで、渋滞損失の削減効果を試算する。

5.2 試算結果

サービス導入による渋滞緩和効果の試算は、表 3 に示す 2010 年の 1 年間に東名高速下り大和サグ部のボトルネ

表 3 東名高速下り大和サグ部の渋滞イベント

	年間(2010)	試算対象
渋滞発生回数 [回]	41	16
平均渋滞時間 [時間/回]	2.3	3.8
平均最大渋滞長 [km/回]	9.5	8.1
総渋滞損失時間 [台・時]	78,539	46,269
総渋滞量 [km・時]	621	327

表 4 渋滞発生前のサービスによる渋滞緩和効果

渋滞損失時間削減率[%]		車間適正化サービス(ACC 車混入率)					
		0%	3%	5%	10%	20%	30%
車線利用適正化サービス(車線移動率)	0%	将来性能 A	2.3	5.8	14.7	32.4	49.3
		将来性能 B	4.9	9.4	20.2	39.1	56.3
		将来性能 C	5.7	10.6	22.7	46.6	64.0
	6%	将来性能 A	7.1	10.2	18.0	32.8	46.8
		将来性能 B	4.5	9.0	19.8	38.0	53.4
		将来性能 C	6.7	11.9	24.1	46.4	64.0
	10%	将来性能 A	8.6	12.9	22.7	38.3	51.4
		将来性能 B	11.7	16.7	27.3	44.9	60.2
		将来性能 C	12.7	18.8	32.3	54.0	67.8

■10~20% ■20~30% ■30~40% ■40~50% ■50~60% ■60~70%
 (※) 渋滞量が 0~5[km・h] の小規模渋滞の場合の削減率。これを超える規模の渋滞の場合は、削減効果はほとんどみられない。

表 5 渋滞発生後のサービスによる渋滞緩和効果

渋滞損失時間削減率[%]	速度回復サービス(ACC 車混入率)				
	3%	5%	10%	20%	30%
将来性能 A	19.0	30.5	54.6	80.9	92.6
将来性能 B	29.8	46.5	73.5	94.3	99.2
将来性能 C	32.0	49.5	76.3	95.8	99.6

■20~40% ■40~60% ■60~80% ■80~100%

ック付近(21.52KP)を先頭に発生した交通集中による渋滞 41 回のうち、事故等による影響が含まれるものを除く 16 回分の渋滞発生日(全て休日のみ)を対象に実施した。

表 4 は、渋滞発生前の車線利用適正化サービスおよび車間適正化サービスによる渋滞損失時間の削減率を示したものである。削減率の傾向は 4.3 で確認された渋滞発生抑制効果と同様の傾向を示しており、特に車頭時間制御により渋滞発生直前まで高い流率を維持可能な将来性能 C において効果が高く、混入率 10%で 32%の削減率となっている。また、車線移動率 0%と 6%では、ACC 車混入率によらず削減率に大きな差はみられず、車線移動率 10%でサービス併用による削減率の向上がみられる。

表 5 は、渋滞発生後の速度回復サービスによる渋滞損失時間の削減率を示したものである。削減率の傾向は 4.4 で確認された渋滞発生後捌け交通量の改善効果と同様の傾向を示しており、ACC 車混入率 10%の場合、将来

性能 A では 50%強、将来性能 B および C では 70~80% の削減率となっている。

6. おわりに

本研究では、高速道路サグ部の渋滞対策に資する ACC の将来性能を制御規範・制御目標、加速性能、過渡応答特性の観点からミクロ交通シミュレーションにより検討した結果、渋滞発生確率は、臨界時に期待される交通流率および過渡応答特性(増幅率)が同程度の場合、車間時間制御よりも車頭時間制御の方が渋滞抑制効果は高いこと、渋滞発生後捌け交通量の改善率は、低速域においても流率を一定に維持可能な車頭時間の方が車間時間制御よりも高いことがわかった。

また、東名高速下り大和サグ部を対象に各渋滞対策サービスによる渋滞損失時間の削減率を試算したところ、渋滞発生前に車間時間適正化サービスを車線利用適正化サービス(目標移動率 10%)と併用した場合、将来性能 C の ACC 車 10%の混入で 32%の削減率が得られ、渋滞発生後に速度回復サービスを適用した場合、特に車頭時間制御の将来性能 B および C の ACC 車 10%の混入で、70~80%の削減率が得られることが示された。

本研究では低速域でも動作が可能な全車速域 ACC を前提としたものであるが、現状では低速域の ACC の挙動については知見が不足しており、今後のデータ蓄積が必要である。また、今回想定した将来性能でのドライバ受容性については、ボトルネック付近の限定された区間・時間帯でのみ ACC を作動させることを想定すれば比較的高いと考えられるものの、安全性等の観点も含めてドライビングシミュレータ、走行実験等により検証が必要である。その上で今後は、円滑性の効果に加え、ACC による渋滞末尾追突事故等の抑制や、それに伴う事故渋滞の削減効果等、円滑性と安全性の両面から渋滞対策サービスの効果について検討を進めていきたい。

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。

補注

*1 ACC の現行性能については、市販の ACC 車両を用いて供用前の新東名高速で実施された ACC 隊列走行実験¹⁰⁾データ(60km/h 以上)に基づきキャリブレーションされたものであり、低速域での加速性能は現行の全車速域 ACC の性能と同一とは限らない。

*2 ここで定義した増幅率は、前提とする目標車間や先行車の

減速状況により異なるため、3つの将来性能が同程度の減速性能であることを重視して共通とした上で、いずれの将来性能においても増幅率が 0.9 ± 0.1 の範囲内に収まる b を探索した。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 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) Kesting, A., Treiber, M., Schönhofa, M. and Helbinga, D.: Adaptive cruise control design for active congestion avoidance, Transportation Research Part C, Vol.16, pp.668-683, 2008.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 植野文高・高木相: 交差点における車両列の挙動に関する研究—測定結果とその検討—、計測自動制御学会東北支部第 171 回研究集会、1997.
- 9) 省エネルギーセンターホームページ「ふんわりアクセラスタート」: <http://www.eccj.or.jp/idstop/funwari>
- 10) 日高健・北岡広宣・北浜謙一・志田充央・藤本浩・金須則之・小池弘之・江口純司・加世山秀樹・加藤哲也: ACC を活用した高速道路サグ部の交通流円滑化、自動車技術会論文集、Vol.44, No.2, pp.765-770, 2013.
- 11) Jiang Xing・佐藤久長・高橋秀喜・吉川良一: 高速道路のボトルネック交通容量分布及び渋滞発生確率の推定、第 26 回交通工学研究発表会論文報告集、pp.49-52, 2006.
- 12) 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.