

サグ部における先々行車両加減速情報提供の渋滞緩和効果

松本 修一¹・櫻井 宏樹²・大門 樹³

1正会員 文教大学准教授 情報学部 情報社会学科 (〒253-8550 神奈川県茅ヶ崎市行谷1100)
E-mail: shuichi@shonan.bunkyo.ac.jp

2学生会員 慶應義塾大学大学院 理工学研究科開放環境科学専攻
(〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉3-14-1)
E-mail: h.s-fjsw0816@z6.keio.jp

3非会員 慶應義塾大学 理工学部 管理工学科
(〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉3-14-1)
E-mail: daimon@ae.keio.ac.jp

近年、ETCの普及により料金所付近での渋滞は減少し、高速道路における渋滞の6割がサグ部で発生するようになった。サグ部渋滞の解消は重要な課題であり、様々な対策が施されているが未だ解決には至っていない。そこで本研究では、サグ部における渋滞対策の新たな手法の一つとして先々行車両加減速情報の活用を提案するとともに、加減速情報の提供による渋滞発生初期における車頭時間増大伝播の抑制効果についてドライビングシミュレータを用いて検討した。その結果、サグ部において情報提供により、車頭時間4.1秒以上の割合が減少することが明らかになった。この結果をもとに交通容量を試算すると、情報提供によって交通容量は5.8%増加すると推定された。以上より、先々行車両加減速情報の提供が、サグ部における車頭時間の増大を抑え、交通容量の増加に寄与することが示唆された。

Key Words : ITS, Traffic Flow, Driving Simulator, Acceleration and Deceleration Information

1. はじめに

ETCの普及により料金所付近での渋滞は減少し、都市間高速道路における渋滞の6割がサグ部で発生するようになった。サグ部をボトルネックとする交通渋滞の発生メカニズムについて、大口¹⁾は、1. 交通需要増大、2. 内側車線利用偏在、3. 内側車線における車群形成、4. サグによる微小擾乱、5. 車群中車頭時間増大波上流増幅伝搬、6. 継続的低速列の形状、7. 勾配変化による緩慢増速挙動、8. サグ下流の増幅区間固定化、9. 渋滞中走行の飽きと疲れの9段階に整理している。この中には、ドライバの運転特性に起因するものが多く、ドライバに対し適切な情報支援を行うことで運転行動を変化させ、渋滞の抑制に繋げることが重要である。

また、政府が閣議決定した「日本再興戦略」²⁾や「世界最先端IT国家創造宣言」³⁾のもとドライバ支援型の自動運転の実現に向け、車車間、路車間通信を活用したCACC (Cooperative Adaptive Cruise Control) などによる交通流円滑化が期待されている。このような技術は、「繋が

る」という自動車の新しい機能としても注目が集まっており、先行車両のみでなく先々行車両に対する計測技術も確立され、今後様々な活用が期待されている。

先行車両、先々行車両を加味したドライバへの動的な情報提供に関しては、近年多くの研究がなされてきている。佐藤らは、トラックの後方にLEDパネルを設置し、加減速情報を提示し、ドライバが先行車両の挙動を予測することで、後続車両の無駄な加減速を減らすシステムを提案した⁴⁾。また、丸茂らは、ドライビングシミュレータ(以下、「DS」と記す)を用いた追従実験により、先々行車両を視認できることで、先行車両に対する運転操作の予測が可能になり、無駄な加減速が少なくなることを実証している⁵⁾。

松本らはエコドライブや加減速度に関する情報共有に関してDS実験を行い、先行車両の車両情報(以下「先行車両情報」と記す)を提供することより先々行車両の車両情報(以下「先々行車両情報」と記す)を提供する方が効果的であることを確認している^{6) 7)}。櫻井らは、

先々行車両の加減速に着目し、発進時に追従車両のドライバーに加減速情報を提供することが、燃費の向上および円滑な発進に有用であるとの結果を得ている⁹⁾。

また、田中らにより、先行車両より前方の情報から、早めの加減速を予測した運転の支援を行うことが重要であると指摘をされている⁹⁾。この研究では、PRE3(PREdiction by PRE-PREdeding vehicle)という先々行車両と先行車両の車頭時間および先行車両と自車両の衝突余裕時間を考慮した評価指標を提案し、この情報をドライバーに提供することで予測運転を促し、1) 無駄な加減速が少なく安定した追従が可能になること、2) 衝突リスクを低く保つ安全な追従を行うことができること、3) 燃料消費率の向上にも繋がることをDS実験によって確認している。さらに、平坦路のテストコースにおいて、先行車両、先々行車両の速度、車間距離をもとにPRE3を算出し、リアルタイムに提示することで、上記1), 2)が3台の実車両を用いても再現可能であることを確認している¹⁰⁾。このようにこれまでの研究では、実車両またはDS、一般道路または高速道路の違いはあるが、すべて平坦路での実験結果である。

そこで本研究では、高速道路における渋滞の主要因であるサグ部における渋滞緩和に対する対策の1つとして、加減速情報の提供を提案し、その有用性をDS実験を通して検証する。

2. 実験概要

(1) 実験環境

本実験では、DS(図-1 参照)を活用し、仮想空間上に高速道路を模擬した道路を作成して実験を行った。DSからは、速度、加速度、アクセル踏み量、ブレーキ踏み量、車両の位置などをアウトプットとして得ることが出来る。DSのシステム構成は、27インチ液晶ディスプレイ3面、主計算機1台、映像発生用計算機2台、情報提供用計算機1台、情報提供用の8インチ液晶ディスプレイ1台、座席の背後にはコンソール用の計算機などが配置されている。アクセルなどの入力に使用するペダルは、足元に3つ設置したが、本研究はAT車を対象に実施したので、右側のペダルをアクセル、中央のペダルをブレーキの入力として使用した。

実験走行コースは、高速道路サグ部を模擬した図-2に示すような縦断勾配変化を含む平面線形が直線の片側1車線道路で総距離は10000mとした。勾配変化の詳細は、4000m地点から-0.5%の下りが1000m続き、その後6500m地点まで1.5%の上りとした。

(2) 情報提供

本実験では、先行研究⁹⁾の表示形式を参考に、前方車

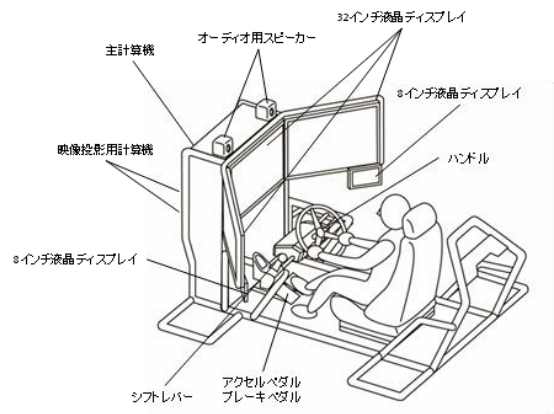


図1 DS概観図

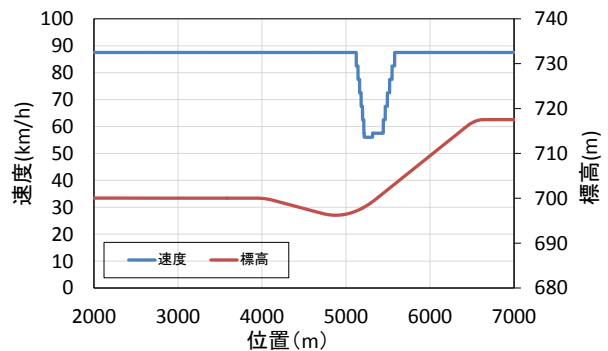


図2 実験走行コースの縦断勾配と先頭車両の走行軌跡

表1 加減速情報の表示形式

加速度 $a[m/s^2]$	表示
$0.4 \leq a$	▲
$-0.4 < a < 0.4$	■
$a \leq -0.4$	▲

群の加減速に応じた加減速情報を表-1のように3段階で表示し、ドライバー正面の左側に設置した8インチ液晶ディスプレイ上に1Hzで情報を提示した。緑色の三角形は前方車両が加速している状態、白い横棒は加減速がほとんど無い状態、赤色の三角形は前方車両が減速している状態を表す。

(3) 追従積重ね実験の概要

本研究では、DSでの運転に慣れるための練習走行、車間距離の感覚に慣れるための車間距離確認走行を実験参加者が充分習熟するまで行い、後述する情報提供実験における交通状況を作成するために追従積重ね実験¹¹⁾を行い、サグ部における微小な擾乱を引き起こす可能性のある先行車両の減速が大きな交通状況と減速が小さな交通状況をそれぞれ2パターン抽出を行った。

追従積重ね実験では、1走行目として図-3に示す走行軌跡の後方を10走行分の追従積重ね走行を行った。実験の前には、実験開始前のインフォームドコンセントにおいて、全実験参加者に対し、1) 実験により生じる実

験参加者への不利益, 2) プライバシーへの配慮, 3) 実験に参加しない自由の確保, に関して十分な説明を行い, 実験に参加することの同意を得た. 実験参加者は, 19 歳~41 歳の 8 名 (男性 4 名, 女性 4 名) であり, 平均年齢は 27.6 歳 (標準偏差 11.1 歳), 平均免許保有年数は 7.4 年 (標準偏差 8.4 年) であった.

(4) 情報提供実験の概要

情報提供実験では, 表-2 に示す実験参加者に対し, 追従積重ね実験から選定した 4 パターンの交通状況において追従走行を行い加減速情報を提供することによって, サグ上り部における加減速情報の有用性を検証する. 走行実験の前に練習走行として, 1) 情報提供を行わないシナリオ, 2) 加減速情報を提供するシナリオ, 3) 車間距離の感覚に慣れてもらうシナリオを走行してもらうことで, DS 環境ならびに運転操作に慣れてもらった. 情報提供実験では, 各実験参加者が先行車両が減速が大きい車両挙動を行う走行パターンと減速が小さい車両挙動を行う走行パターンに対し, 加減速情報を提供する場合と提供しない場合の 2 種類のシナリオ, 減速を行わない走行パターンのシナリオに対して, 追従走行実験を行った. シナリオの走行順序は, 順序効果を抑制するために各実験参加者でランダムとした. 走行実験後にアンケートを実施した. 情報提供実験の, 実験参加者は 14 名 (男性 7 名, 女性 7 名) であり, 平均年齢は 32.8 歳 (標準偏差 11.2 歳), 平均免許保有年数は 12.3 年 (標準偏差 9.5 年) であった. 表-2 に実験参加者の属性をまとめる.

実験参加者には, 実験開始前のインフォームドコンセントにおいて, 全実験参加者に対し, 1) 実験により生じる実験参加者への不利益, 2) プライバシーへの配慮, 3) 実験に参加しない自由の確保, に関して十分な説明を行い, 実験に参加することの同意を得た. また, 走行ごとに以下のような教示を毎回行った.

- ・「車線変更を行わず, 道なりに走行すること」
- ・「交通ルールを守り, 安全運転を行うこと」
- ・「先行車両に追従すること」
- ・「車間を空け過ぎないようにすること」

なお, 情報提供を行うシナリオに対しては, 「必要に応じて情報を参考にして運転すること」を追加で教示を行った.

4. 結果・考察

(1) 先行車両走行軌跡の抽出

情報提供実験における 4 つの走行パターンの車両軌跡と各走行時の加減速情報の提示状況を図-3~5 にまとめる.

この車両軌跡は, 追従積重ね実験において, 1)1 台目

表 2 実験参加者属性

ID	年齢	性別	免許取得年数	高速道路運転頻度
A	20	男	2年3ヶ月	月1~2回
B	38	女	14年9ヶ月	月1~2回
C	32	男	13年4ヶ月	年1~2回
D	44	男	21年1ヶ月	月1~2回
E	41	女	17年	月1~2回
F	46	女	23年	年1~2回
G	21	男	2年4ヶ月	月1~2回
H	25	女	2年1ヶ月	年1~2回
I	47	女	27年	週1~2回
J	21	女	3年4ヶ月	年1~2回
K	19	男	1年	週3~4回
L	39	女	20年5ヶ月	月1~2回
M	21	男	3年3ヶ月	月1~2回
N	45	男	21年2ヶ月	ほぼ毎日

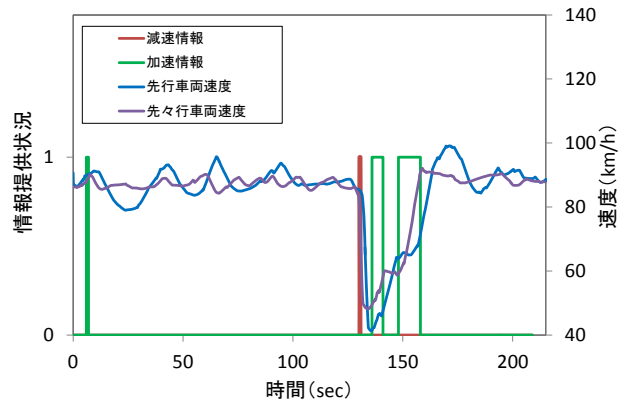


図 3 減速大の先行車両速度パターンと情報提供状況

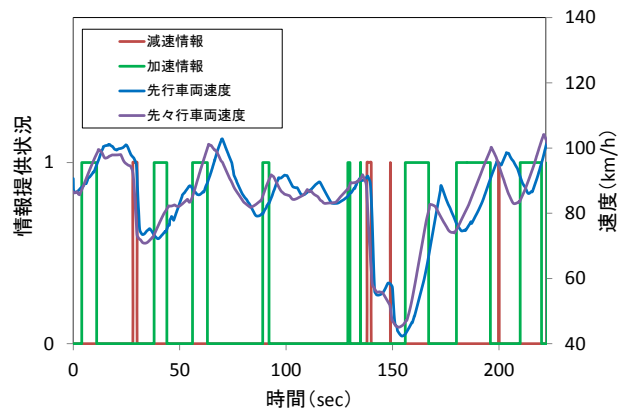


図 4 減速大の先行車両速度パターンと情報提供状況

の走行でないこと, 2)最低速度の地点が先行車両の最低速度位置の前後 100m 以内であること, 3) 最低速度を観測した時刻が先行車両の最低速度時刻の 2 秒前以降であること, 4)減速前の平均車頭距離が 80m 以内であること, の 4 つの条件をもとに, 減速波の増幅が生じる最低速度

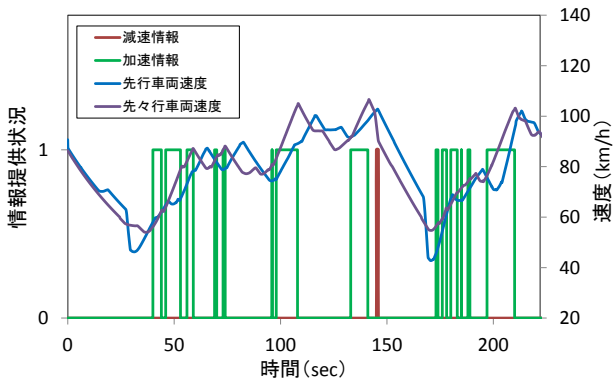


図5 減速小の先行車両速度パターンと情報提供状況

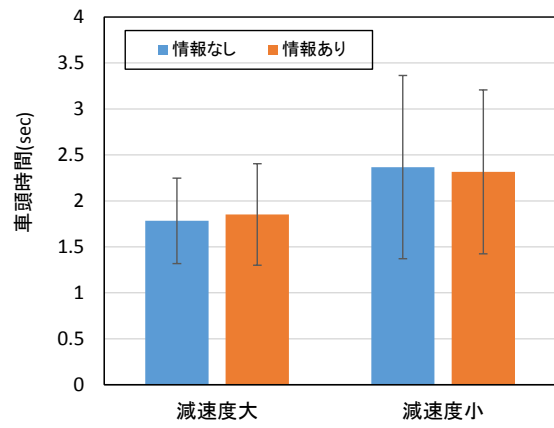


図7 情報提供による平均車頭時間の変化

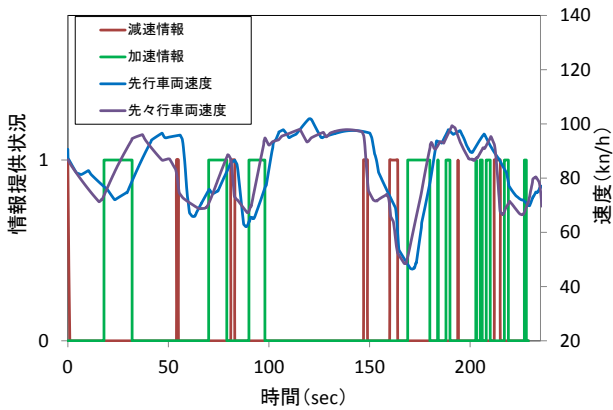


図6 減速小の先行車両速度パターンと情報提供状況

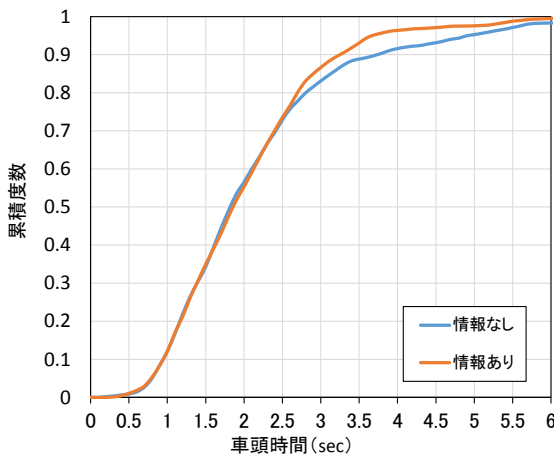


図8 車頭時間の累積度数分布

がほぼ等しい4つのデータから作成した。このデータにおける最大減速度が大きい走行軌跡（以下、「減速大」と記す）と最大減速度が小さい走行軌跡（以下、「減速小」と記す）に対する追従を行う際の車両挙動などを解析した。

(2) 車頭時間の変化

情報提供実験における追従走行において、平均車頭時間が3秒以上の被験者（被験者 D, F, G, I）に対しては、自由走行の傾向があると考え、本解析の対象外とし、10名の被験者の走行データに対して解析を行った。

まず、図-7に「減速度大」、「減速度小」における情報提供の有無による車頭時間の変化を示す。従属変数を平均車頭時間とし、独立変数を情報提供の有無、先行車両挙動、実験参加者として2要因被験者内計画にもとづく分散分析を行った。その結果、先行車両挙動の主効果に有意差が認められた ($F(1,40) = 4.85, p < 0.05$)。

次に、車頭時間の累積度数分布を図-8に示す。この図から2.5秒までは、情報による分布の差は見ることができない。車頭時間2.5秒を超えると情報の有無による分布の差があることが確認できた。なお、95%タイル値で比較すると、情報提供を行った場合の車頭時間が5.0秒、情報提供を行わなかった場合、3.7秒であった。

図-8をもとに、累積度数分布の1パーセント値から99パーセント値を1パーセントごとに各車両の車頭時間として仮定し、本実験の結果からサグ部を走行する際の情報提供の有無による交通容量を試算し、比較する。この結果を図-9に示す。情報なしでは1656台/hだったが、情報ありでは1752台/hとなり、情報提供によって交通容量が5.8%増加することがわかる。

(3) 運転行動の変化

本節では、減速波が伝播する状況での情報提供の影響に着目するため、最初に減速情報が提示される区間に焦点を当てて考察を行う。

減速情報提供前後の平均アクセル踏み込み量の推移を図-10に示す。図中の赤い四角は、情報ありの走行において減速情報が提示された時間を表している。図-10(a), (b)に示すように減速小の走行では、減速情報が提示された後もアクセル踏み込みが継続されることが見てとれる。一方、図-10(c), (d)に示すように減速大の走行では、情報の有無に関わらず、減速情報が提示されるタイミングで、アクセル踏み込みを終了していることが見てとれる。これは、減速度の大きい速度変化に対応する

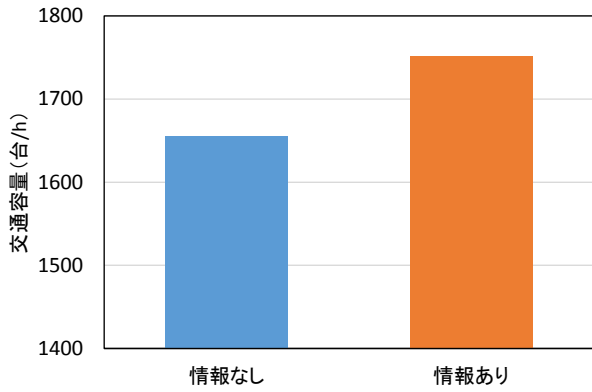


図9 情報提供によるサグ部交通容量の変化

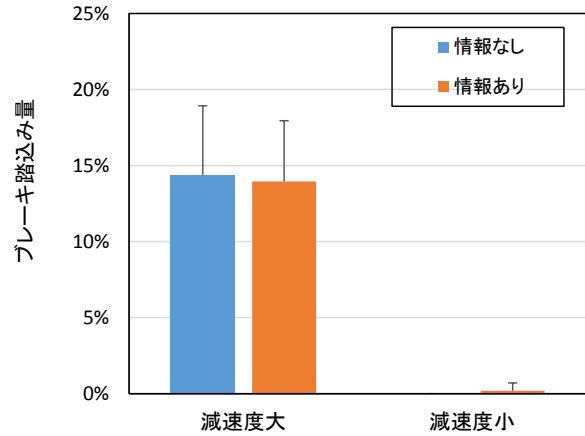


図11 減速情報提示後のブレーキ踏込み量

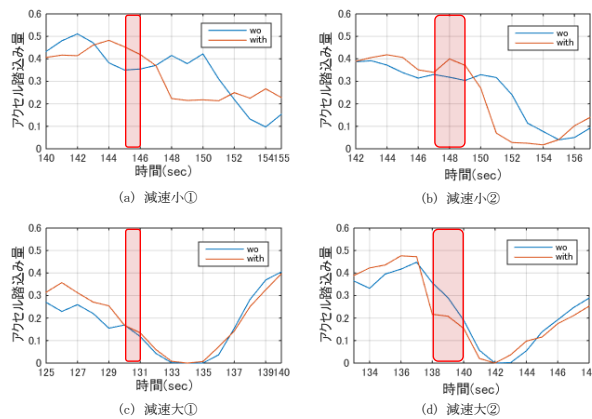


図10 減速情報提供前後でのアクセル踏込み量

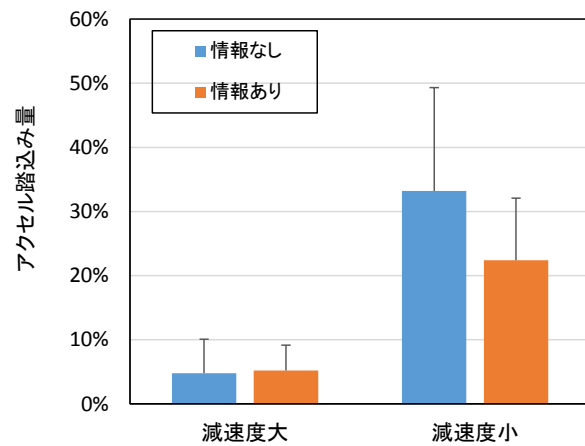


図12 減速情報提示後のアクセル踏込み量

ためには、情報の有無によらずアクセル踏込みを終了していたと考えられる。

次に、減速情報提示後のペダル操作量について確認した。減速情報提示後のブレーキ踏込み量、アクセル踏込み量をそれぞれ図-11、図-12に示す。減速情報提示後のペダル踏込み量は、情報が提示された後、情報に反応する時間として1秒の余裕を持たせ、情報提供が終わった後の1～5秒の間の平均値と定義した。

図-11に示すようにブレーキペダル踏込み量は、減速小の走行ではほとんど確認されなかったが、減速大の走行では、先行車両の減速度が大きい減速に対応するため、情報の有無によらずブレーキペダルの踏込みがあったと推察される。このことは、急な減速に対応する際には、情報提供を参考にする必要がないことが原因であると考えられる。

図-12に示すように減速小における減速情報提示後のアクセル踏込み量は、先行車両の減速度が大きい場合は、情報提供の影響は殆どみられない。その一方、減速度が小さい場合、情報提供を行うことで32.6%減少した(図-11参照)。

減速小の走行を対象に、独立変数を情報提供と実験参加者とし、従属変数を減速情報提示後の平均アクセル踏込み量として1要因被験者内計画に基づいた分散分析を行った。その結果情報提供の主効果に有意差が認められた($F(1,20)=6.34, p<0.05$)。

以上より、ブレーキ操作を必要としないような小さな減速において、加減速情報の提供が、アクセル踏込みの抑制を促すことが示唆された。

6. まとめ

本研究では、DSを用いてサグにおいて、先行車両が減速を行う際の加減速情報に対する交通流や運転行動に着目し、先々行車両の加減速情報の効果について分析した。その結果、以下の知見が得られた。1)情報提供によって車頭時間4.1秒以上の割合が減少することが明らかになった。2)先々行車両の減速度が小さい走行において、情報提供がドライバーのアクセル踏込みを抑制することが示唆された。

本研究を通して得られた結果は、先々行車両加減速情報の提供が、サグ部における車頭時間の増大を抑制し、間接的に交通容量の増加に寄与することを示唆するものである。先々行車両の加減速情報はサグ部における渋滞対策の新たな手法の一つとして一定の効果を期待できると言える。

今後の課題としては、本実験で使用したシナリオとは異なる道路線形において同様の結果が得られることを確認すること、情報提供を活用できる車両が混入する割合が交通流に与える影響を検討することなどが挙げられる。

謝辞：本研究を行うに際し、慶應義塾大学川嶋弘尚名誉教授、慶應義塾女子高等学校国府方久史教諭、株式会社フォーラムエイト松田克己氏より多大なご助言等を得ました。ここに、あらためて感謝の意を表します。なお、本研究は、科学研究費補助金（若手B 課題番号25870712）による研究の一部である。

参考文献

- 1) 大口敬: 進化する道路関連技術 高速道路における交通渋滞緩和策の最新動向, 自動車技術, Vol.67, No.10, pp.11-16, 2013.
- 2) 「日本再興戦略」改定 2015-未来への投資・生産性革命-, http://www.soumu.go.jp/main_content/000370350.pdf [2016, April, 11]
- 3) 世界最先端 IT 国家創造宣言, <https://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20150630/siryou1.pdf> [2016, April, 11]
- 4) 佐藤宏明, 伊丹誠, 齊藤裕一, 橋本尚久, 加藤晋: 追従車両に対する加減速情報の提示効果, 電気学会 ITS 研究会資料, Vol. ITS-12, No. 1-10, pp.51-56, 2012.
- 5) 丸茂喜高, 田中健太, 福山雄大, 鈴木宏典: 先々行車の挙動を考慮したドライバの追従制御モデルの検討, 自動車技術会論文集, Vol.44, No.5, pp.1281-1286, 2013.
- 6) 松本修一, 川嶋弘尚: 前方車両情報が車群の燃費低減に与える影響に関する基礎的研究, 土木学会論文集 D3, Vol.69, No.5, pp.I_433-pp.I_440, 2013.
- 7) 加茂碧唯, 松本修一: 前方車群の加減速情報が後続車両の燃料消費率に与える影響に関する基礎的研究, 土木計画学研究・講演集, CD-ROM, 2013.
- 8) 櫻井宏樹, 松本修一, 葛西誠, 平岡敏洋: 先々行車両の加減速情報が追従車両に与える影響, 土木学会論文集 D3, Vol.71, No.5, pp.I_857-pp.I_864, 2015.
- 9) 田中健太, 丸茂喜高, 鈴木宏典: 先々行車の挙動を考慮した評価指標の呈示が運転行動に及ぼす影響, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 15, No. 2, pp. 131-140, 2013.
- 10) 中野堯, 丸茂喜高, 鈴木宏典, 河合俊岳: 先々行車両の挙動を考慮した予測運転支援システムの実験的検討, 日本機械学会論文集, Vol.81, No.828, p.15-00196, 2015.
- 11) 伏屋和晃, 葛西誠, 寺部慎太郎: ドライビングシミュレータを用いた高速道路サグ部の追従挙動解析に向けた実験設計, 土木計画学研究発表会・講演集, Vol.44, pp.145-151, 2011.

(2016.?.?? 受付)

EFFECT OF ACCELERATION AND DECELERATION INFORMATION OF PRE-PRECEDING VEHICLE ON RELIEVING TRAFFIC CONGESTION IN SAG SECTIONS

Shuichi MATSUMOTO, Hiroki SAKURAI and Tatsuru DAIMON

ETC become widely used in Japan and as a result of the ETC have succeeded to cut down on traffic congestion around highway toll booths. On the other hand, in spite of successful effect of such ETC, 60% of all traffic congestion on intercity expressways in Japan has occurred in their sag sections and therefore it has become a very important issue of many intercity expressways in Japan. This study aims to propose a system with the acceleration/deceleration information of the pre-preceding vehicle as one of new traffic congestion countermeasures using ITS and moreover to verify that such information has an effect to relieve traffic congestion in sag sections.

The result show that the proposed information contributes to reduce the percentage of time headway of more than 4.1 seconds in the sag section. Also based on the result, the proposed information can lead traffic capacity raise up to 5.8 percent. The result obtained through the experiments imply that the acceleration/deceleration information of the pre-preceding vehicle indirectly contributes to relieve traffic congestion in sag sections.