

前方車群の加減速情報が後続車両の燃費に 与える影響に関する基礎的研究

加茂 碧唯¹・松本 修一²

¹非会員 慶應義塾大学大学院 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: aoiaoi@ae.keio.jp

²正会員 慶應義塾大学講師 理工学部 (〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉3-14-1)

E-mail: shuichi@ae.keio.ac.jp

エコドライブなど環境に配慮した運転行動は、広く世間に認知されるようになってきている。そこで本研究では、エコドライブを効率的に促すため、先行車両および先々行車両の加減速情報を追従車両に提供し、ドライバの運転行動の変化と燃費に対する有用性を検証した。その結果、1) 情報提供により燃料消費率が改善する可能性がある。2) 燃費が改善した被験者は、燃費が低下した被験者よりも先々行車両の加減速情報を重視する傾向があった。3) 先々行車両の発進時の加速情報を視認することで、発進のタイミングを早めに察知する行動が見られた。4) 発進時における加速情報によりクリープ走行時間の増加やアクセル踏込量の減少など運転行動の変化が確認された。以上より、前方車群の加減速情報を追従車両へ提供する事の有用性が示唆された。

Key Words : ITS, Traffic Flow, Eco-Driving, Driving simulator

1. はじめに

地球温暖化問題の主要因は、産業革命以降の化石燃料消費の急激な増加によるものとされており、地球温暖化問題とエネルギー消費との間には密接不可分な関係がある。我が国のCO₂排出量は約12億トンにおよび、運輸部門はその19.1%を占めている。そのため、自動車交通においては、CO₂削減や省エネ

ルギー走行といった環境やエネルギーへの対策が重要な課題となっている^{1),2)}。

このような背景を踏まえ、エコドライブ普及推進協議会などは、環境に配慮した運転である「エコドライブ10のすすめ」を推進している。「エコドライブ10のすすめ」では、緩やかな発進であるふんわりアクセル「e-スタート」や加減速の少ない運転行動などが推奨されている³⁾。

2. 本研究の目的

近年、エコドライブを継続的に長期間実行するには、モチベーションの向上⁴⁾や情報提供・情報共有によるサポートの重要性が指摘されている^{5),6)}。そこで、燃料消費率に関する情報を提供することでドライバの動機付けに寄与し、運転行動を変化させるシステムの検討も進められており、エコドライブインジケータなど多くのシステムが開発されている。これらのシステムを今後さらに発展させるためには、自車両だけでなく、さらに前方車群の情報を察知することで、ドライバに対してより交通流に協調した運転を支援することが重要である⁷⁾。佐藤らは、加減速情報を先行車両の後部にパネルにして視覚的に後続車に提示する事で、燃料消費率の向上を試みた。その結果、情報提供によって無駄な加速度変化の少ない理想的な追従が行いやすく、燃料消費率も向上する可能性が示唆されると報告している⁸⁾。

本研究では、これらの研究結果や情報通信技術の動向を踏まえ、先行車両だけでなく先々行車両も含めた前方車群の加減速情報を同時に提示し、これがドライバの運転行動および視認行動、燃料消費率に与える影響を定量化した。

3. 実験概要

(1) 実験設備

実験設備の様子を図-1に示す。実験では、42インチモニタからは走行状況が、8インチモニタからは加減速情報が表示されるようになっている。また、カメラ①,②は被験者の視認行動を、カメラ③は42インチモニタに映し出される走行状況を、カメラ④は加減速情報をそれぞれ撮影している。

(2) 実験環境

本実験では、同一走行環境下において複数の被験者に運転を行ってもらふ必要があるため、UC-win/Road（株式会社フォーラムエイト製、以下「DS」と記す）を活用し、仮想空間上に周辺に建物

等の全く無い直線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。実験コース上には、4台の車両（以後、先頭から順に「先々行車両」、「先行車両」、「自車両」、「後続車両」、先々行車両と先行車両をまとめて「前方車群」と記す）を走行させた（図-2参照）。なお、自車両は先行車両に遮られて先々行車両を見ることができない。先々行車両は市街地を想定した低速域の10モードで走行するよう設定した。走行距離は約700mであり、一回の走行にかかる時間は約3分であった。先々行車両の走行軌跡を図-3に示す。また、先行車両には、20代の一般男性（運転取得後年数4年、運転頻度週3〜4回）に先行車両への追従をしてもらい、その走行データを記録し、先行車両の走行データとした。その先行車両の走行軌跡を図-4に示す。後続車両は、既存の研究⁵⁾を参考に、自車両が先行車両と車間距離を取り過ぎないようにするため、自車両の挙動に従って後方を追従するようにした。なお、前方車群のブレーキランプは点灯しないよう設定した。これは、ブレーキランプの点灯による減速情報と8インチモニタに提示される減速情報とが重複すると視認回数が正確に定量化できない可能性があるためである。

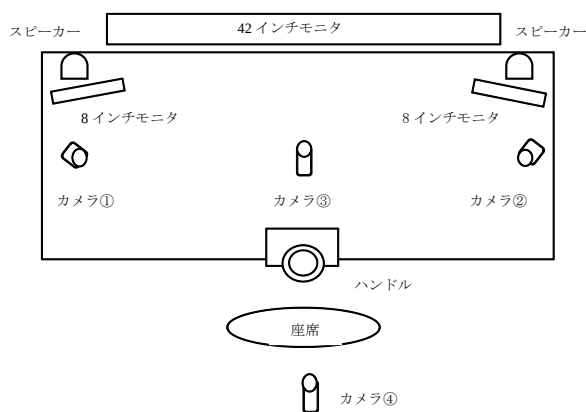


図-1 実験設備

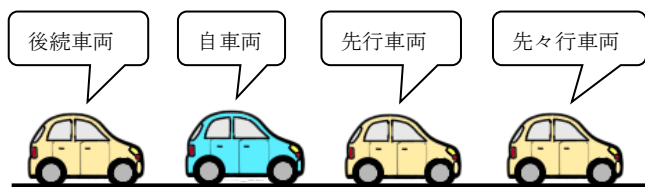


図-2 車両の位置関係

表-1 加減速報の表示形式

加速度 $a(\text{m/s}^2)$	表示
$0.4 \leq a$	▲
$-0.4 < a < 0.4$	—
$a \leq -0.4$	▲

(3) 情報提供

予備実験より先行研究⁸⁾の表示形式と加速度の閾値を参考に表-1のような3段階の情報提供を行った。本研究では、左右2つの8インチモニターを用い1Hzで左側のモニターに先行車両の右側に先々行車両の加減速情報を提示した。緑色の三角形は先行車両および先々行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、赤色の三角形は先行車両および先々行車両が減速している状態を表している。先々行車両および先行車両の加減速情報の提示区間は図-3、図-4 ようになる。なお、情報提供状況に関しては、右軸の1が情報提供を行っている時間帯、0が情報提供を行っていない時間帯である。情報提供を行っている時間は、先々行車両では走行時間の34.7%(内、加速情報が40.4%、減速情報が59.6%)を占め、先行車両では走行時間の27.3%(内、加速情報が43.9%、減速情報が56.1%)を占めていた。

(4) 実験条件

練習走行として、「情報提供無し」と「情報提供有り」のシナリオをそれぞれ走行してもらい、本実験環境での運転には十分に慣れてもらった。本実験では、

- ・「情報提供無し」の場合

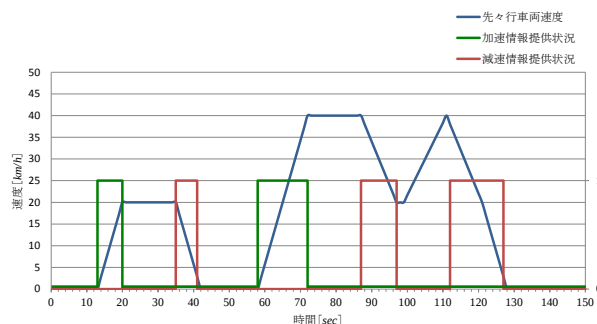


図-3 先々行車両の走行軌跡と加減速情報

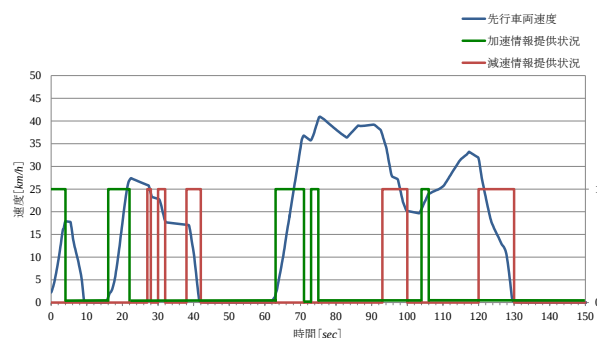


図-4 先行車両の走行軌跡と加減速情報

- ・「情報提供有り」の場合

の2水準を各被験者に対してそれぞれ2回走行実験を実施した。走行実験は順序による効果を少なくするため、各被験者に対してランダムに行った。実験後には、「情報提供無し」と「情報提供有り」の走行の違いについてアンケートを実施した。

(5) 被験者

本実験には被験者として20代前半から40代後半の一般ドライバ7名(男性6名、女性1名)に協力して頂いた。表-2に各被験者の属性をまとめた。また、被験者の運転特性を把握するため、運転負担感受性チェックシート(WSQ: Workload-Sensitivity Questionnaire)と運転スタイルチェックシート(DSQ: Driving Style Questionnaire)^{9),10),11)}の質問に回答してもらった。図-5、図-6に7名の実験参加者のDSQおよびWSQの各項目の得点を示す。なお、図中の網

掛けは人間生活工学研究センター(HQL) から公表されている全国平均値±SD の範囲を示す。これらの結果から、平均的なドライバの運転特性から外れている被験者もいるが、これらは部分的であり運転が出来ない程度の不安や負担を受ける被験者は見られなかった。

表-2 被験者属性

ID	年齢	性別	免許取得年数	運転頻度
A	22	男性	2	週に1〜2回
B	34	男性	26	ほぼ毎日
C	22	男性	3	週に1〜2回
D	21	男性	3	週に3〜4回
E	22	男性	4	週に1〜2回
F	46	女性	25	月に1回
G	47	男性	27	月に1回

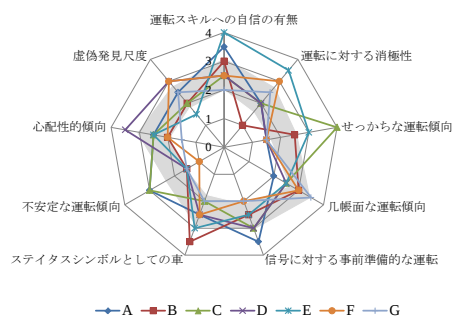


図-5 DSQ 得点

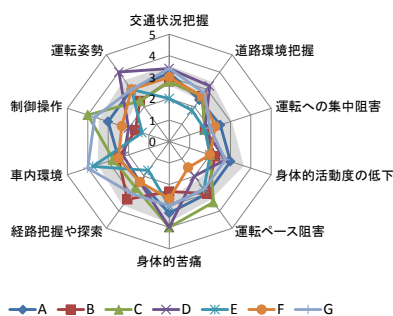


図-6 WSQ 得点

実験における各走行時の被験者に対しては、十分なインフォームドコンセントを行い、1)実験による生じる被験者への不利益、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後、走行毎に以下のような教示を毎回行った。

- 日本の交通法規に従うこと
- 安全運転を行うこと
- 前方者群の追い越しはせず、先行車両に追従すること
- 車線変更をしないこと
- 車間を空け過ぎないようにすること

また、情報提供を行う走行では、「加減速情報を必要に応じて参考にして運転すること」を追加で教示した。なお、実験は一日に2〜3名に対して実施した。

(6) 燃料消費率の計算

燃料消費量: Q [cc] の計算には、以下の計算式を用いた¹²⁾。 AEE [m^2/s^2] は「加速エネルギー当量 (Acceleration Energy Equivalent)」という走行中の車速の変動を評価する指標であり、速度増大時(加速時)に車両が獲得する運動エネルギー [$\text{kg m}^2/\text{s}^2$] に相当する変量である。

$$Q = 0.3T + 0.028D + 0.056AEE$$

$$= 0.3T + 0.028D + 0.056 \sum_{k=1}^K \delta_k (v_k^2 - v_{k-1}^2) \quad (1)$$

ここで、旅行時間: T [sec]、旅行距離: D [m]、計測周期: $k=1, 2, \dots, K$ (K は T を計測周期 0.1[sec] で割ったもの)、各周期毎の瞬間速度: v_k [m/s]、ダミー変数: δ_k (加速時は $\delta_k = 1$ 、その他の場合は $\delta_k = 0$)

また、燃料消費率: M [km/l] の計算には、以下の計算式を用いた。

$$M = Q/D \quad (2)$$

I:±SD

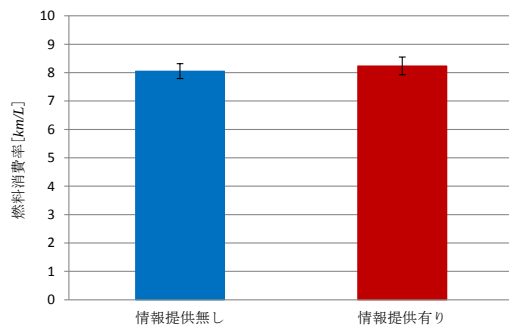


図-7 燃料量消費率

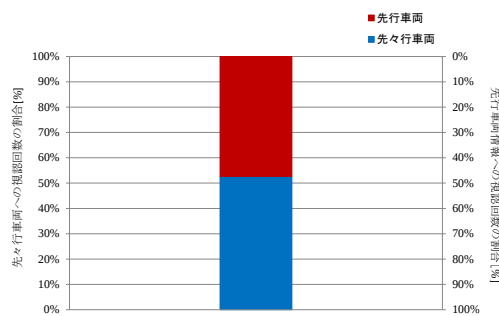


図-8 前方車群の加減速情報への視認回の割合

4. 実験結果

(1) 燃料消費率

「情報提供無し」と「情報提供有り」の実験における走行全体の燃料消費率の違いを図-7に示す。

「情報提供有り」では「情報提供無し」に比べ、2.3%の燃料消費率の改善傾向が観測された ($p=0.1006$)。

(2) 先々行車両と先行車両の加減速情報の視認回数割合

前方車群の加減速情報の視認回数の割合を図-8に示す。先々行車両、先行車両の視認回数の割合は、それぞれ 53%、47%となった。

5. 考察

本実験環境下において、前方車群の加減速情報の

表-3 被験者ごとの燃費改善効果

(単位 : km/l)

	被験者 ID	情報提供無し	情報提供有り
燃費改善群	A	8.0	8.4 (+5.6%)
	B	8.0	8.2 (+2.0%)
	C	7.9	8.4 (+5.9%)
	D	7.9	8.3 (+4.9%)
	E	8.1	8.4 (+3.6%)
低下群 燃費	F	8.4	8.3 (-1.0%)
	G	8.1	7.7 (-4.7%)

提供を行うことで、走行全体の燃料消費率が平均で2.3%改善する傾向が示唆された。そこで、燃費が向上した被験者と低下した被験者との加速度情報の視認の違いをもとに、情報提供によるドライバの運転行動と燃費改善の関係を探ることにした。表-3は、各被験者の燃料消費率を示しており、燃費が向上した被験者A、B、C、D、Eを燃費向上群、低下した被験者F、Gを燃費低下群としてグループ分けをした。なお、括弧内は「情報提供無し」を基準とした燃費の増減率を表している。

まず、前方車群の加減速情報の視認回数の割合を図-9に示す。図-9より燃費向上群では、先々行車両と先行車両の視認回数の割合は、それぞれ56%、44%であったのに対し、燃費低下群では先々行車両、先行車両の視認回数の割合は、それぞれ45%、54%となっており、燃費向上群は燃費低下群と較べて先々行車両の加速度情報をより多く視認する傾向があることが分かった。また、先々行車両と先行車両の参考度合いに関するアンケート結果を図-10に示す。被験者全体では平均で先々行車両、先行車両の視認回数の割合は、それぞれ40%、60%であったのに対し、燃費向上群では5人中4人が先々行車両の加減速情報を平均の40%より強く参考にしたと回答していた。一方、燃費低下群では2人中2人ともが先行車両の加減速情報を平均の60%より参考にしたと回答していた。次に先々行車両の加速情報と減速情報の視認回数の割合の結果を図-11に示す。その結果、燃費改善群

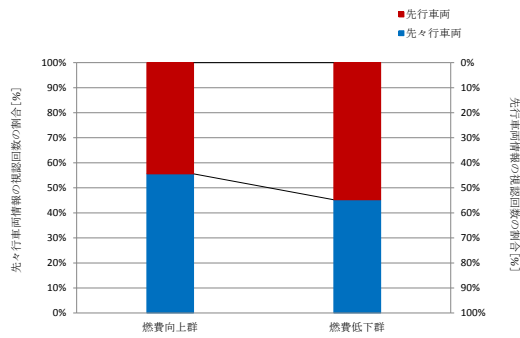


図-9 前方車群の視認回数の割合

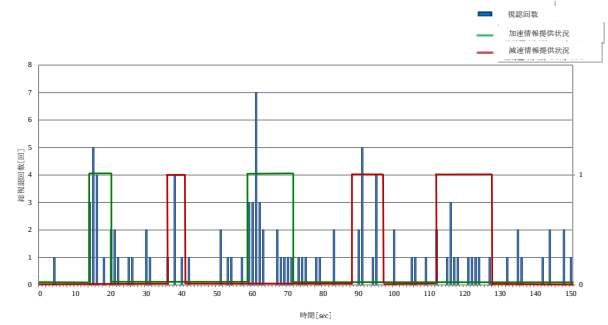


図-12 先々行車両の加減速情報と被験者の総視認回数の関係

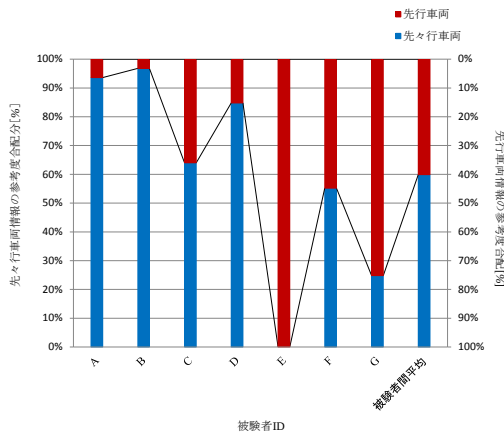


図-10 先行車群の加減速情報の参考度合に対するアンケート結果

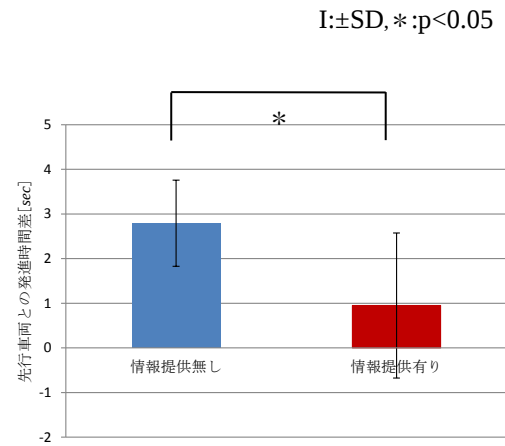


図-13 先行車両との発進時間差

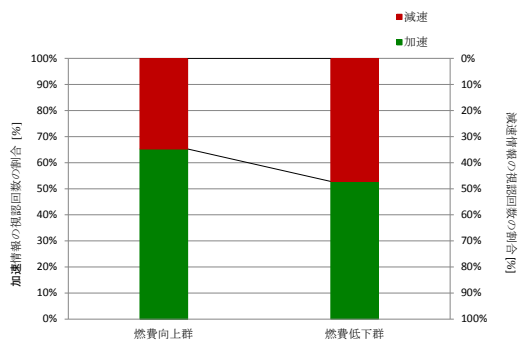


図-11 先々行車両の加減速情報の視認回数の割合
エコドライブ普及連絡協議会によると、「エコドライブ10のすすめ」において、ふんわりアクセル「e-

スタート」を行うと、10%程度燃費が改善し、「加減速の少ない運転」では市街地において2%程度燃費が悪化すると指摘されている³⁾。そこで本研究では、燃料書比率改善効果が大きく期待できる発進時における加速域でのドライバの運転方法の具体的な違いを分析した。

まず、先々行車両の加速情報をどのタイミングにおいて多く視認しているのか調べるため、図-12として1秒毎の全被験者の視認回数（以下「総視認回数」と記す）を集計した結果をプロットした。これを見ると先々行車両の発進タイミングである14秒および61秒からの3数秒間に視認回数が多くなっていることが分かる。この時間帯は、先々行車両の加速情報が提示されている時間であり、加速情報提示時間における総視認回数の64.1%を占めていることが分かった。

そこで、先行車両が発進してから自車両が発進するまでの時間（以下「発進時間差」と記す）を調べた。その結果を図-13に示す。これより、「情報提供無し」の場合に比べて「情報提供有り」の場合では、先行車両との発進時間差が 1.9sec 縮まっていた ($p<0.05$)。これは、佐藤らの先行研究における加減速情報の提示により、自車両と先行車両の発進時間差が 1sec 程度早くなったという結果⁸⁾よりもさらに 1sec 程度発進時間差が短くなっていたことになる。

次に、発進時におけるドライバの運転行動に変化について解析した。発進時におけるエコドライブには穏やかにアクセルを踏んで発進する運転方法であるふんわりアクセル「e-スタート」やクリープ現象を用いて発進する「クリープ発進」などが挙げられる。ふんわりアクセル「e-スタート」は、「最初の 5 秒で、20km/h 程度が目安」とされている³⁾。そこでこの値を参考に、発進時にどれだけゆっくり発進しているのかを評価するため、発進から速度が 20km/h になるまでの時間（以下「20km/h 到達時間」と記す）を調べた。その結果を図-14に示す。これより、情報提供によって発進から速度が 20km/h に達するまでの時間は全体として 2.1sec 増加していることが分かる ($p<0.01$)。また、20km/h 到達時間における、平均アクセル踏込量を求めた。その結果、図-15のように「情報提供有り」の場合には、平均アクセル踏込量が「情報提供無し」の場合に比べて 22.6%減少していた ($p<0.05$)。

発進してからアクセルを踏み込むまでの時間をクリープ走行時間として定義し、各走行に対するクリープ走行時間を図-16に示す。本実験のシナリオにおいて発進を行うタイミングは 1 走行に対して、実験開始から約 14 秒および 61 秒後の 2 ヶ所ある（図-4 参照）。ただし、完全に停止せずに発進していた 4 回（被験者 A の走行 2 回目、被験者 E の走行 1 回目および 2 回目、被験者 F の走行 1 回目の各実験開始から約 14 秒後）に関しては、解析から除外している。その結果、「情報提供有り」の走行の中で発進を行った 24 回のうち 16 回において、先々行車両を視認した後に、クリープ走行を行っていたことが観測され、

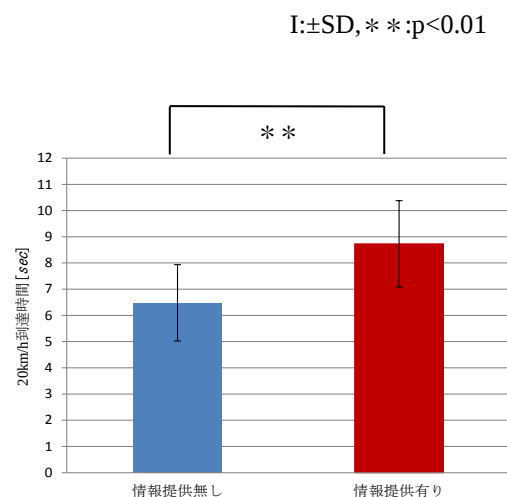


図-14 20km/h 到達時間

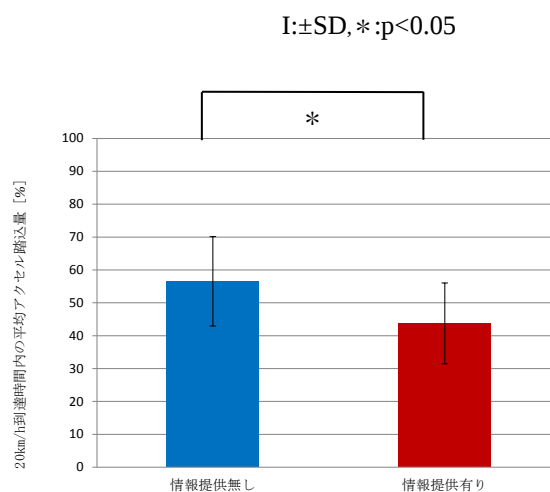


図-15 20km/h 到達時間内の平均アクセル踏込量

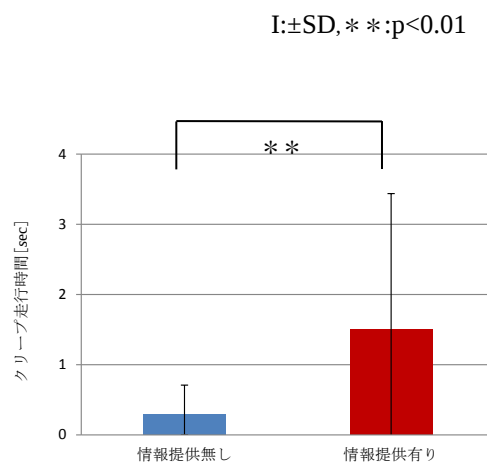


図-16 クリープ走行時間

I: ±SD, *: p<0.05

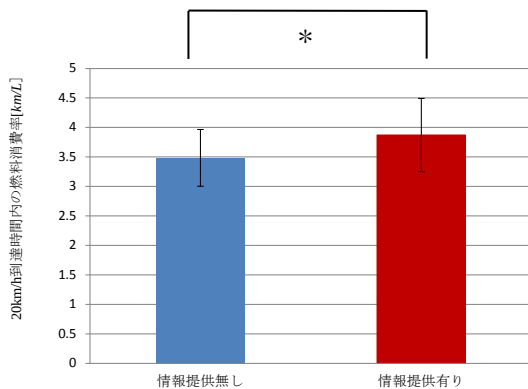


図-17 20km/h 到達時間内の燃料消費率

その結果、クリープ走行時間は平均で 1.3sec 伸びていた(p<0.01)。

次に、加速域での情報提供による運転行動の変化が燃費に対してどの程度有効に働いているのかについて、各走行に対し、20km/h 到達時間の燃費を計算した結果を図-17 に示す。情報提供により、20km/h 到達時間までの時間の燃料消費率は 7.3%向上していた(p<0.05)。上記の結果は、「e-スタート」によって、燃料消費率は 10%程度少なくなると言われていること³⁾と比較的近い値を示しており、本手法が詳細な運転ルールを課すことなく、情報提供を行うだけで、燃料消費率改善に比較的有效であることが分かる。

6. まとめ

近年、先行車両の燃費や安全に関する情報を提供することで、ドライバに対して運転支援を行う研究は多くなされてきているが、先行車両よりもさらに前の車両の情報も提供する必要性が指摘されている⁶⁾。

そこで本研究では、DS を用いて先車両だけでなく先々行車両の加減速情報もドライバに対して同時に提示することによって、燃料消費率や視認行動、および運転行動に対する影響に関して定量的な評価を行った。

その結果、情報提供により燃料消費率が改善する可能性が示された。また、燃費が改善した被験者は、燃費が低下した被験者よりも先々行車両の加減速情報を重視する傾向があり、特に先々行車両の発進時における加速情報を視認することで発進タイミングを早めに察知する行動が見られ、1.9 秒程度の発進が早くなった。さらに、発進時における加速情報がクリープ走行時間の増加やアクセル踏込量の減少といったエコドライブの運転行動に似た傾向に変化する可能性が確認された。以上より、前方車群の加減速情報を追従車両へ提供する事の有用性が示唆された。

今後の課題としては、さらに被験者数を増やしデータの信頼性を高めること、先々行車両と先行車両の加速情報を個別に提供する実験を行い、それぞれの情報提供が燃費やドライバの運転行動にどのような影響を与えるのかをより明確にすることなどが挙げられる。

謝辞：本稿の執筆にあたっては、本研究を行うに際し、慶應義塾大学川嶋弘尚名誉教授、慶應義塾大学大門樹教授、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。

参考文献

- 1) 環境省：日本の温室効果ガス排出量の算定結果，
<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/2010ghg.pdf>
[2013, March 28]
- 2) 交通エコロジー・モビリティ財団，2009 年度 運輸・交通と環境，pp.2-14，2009.
- 3) エコドライブ普及推進協議会：
http://www.ecodrive.jp/eco_10.html [2013, March 28]
- 4) 平岡敏洋，野崎敬太，高田翔太，塩瀬隆之，川上浩司：エコドライブ支援システムにおける能動的工夫の余地が運転技能の習熟に与える影響，人工知能学会全国大会論文集(CD-ROM)，Vol.26th.1P2-OS-9A-3，2012.
- 5) 松本修一，PARK Taehwi，川嶋弘尚：エコドライブ走行の燃料消費率低減効果に関する研究，土木計画学研究・論文集，Vol.27，N0.5，pp.991-998，2010.

- 6) 平岡敏洋, 西川聖明, 川上浩司, 塩瀬隆之, 自発的な省燃費運転行動を促すエコドライブ支援システム, 計測自動制御学会論文集, Vol.48, No.11, pp.754-763, 2012.
- 7) 松本修一, 戸澤毅, 平岡敏洋, 山邊茂之, 川嶋弘尚 : エコドライブ走行が追従車両に与える影響に関する基礎的研究, 土木学会論文集 D3, Vol.6, No.5, pp67-72, 2011.
- 8) 佐藤 宏明, 斉藤 裕一, 橋本 尚久, 伊丹 誠, 加藤 晋 : “追従車両に対する加減速情報の提示効果” 電子情報通信学会信学技報 IEICE Technical Report Vol.111、No. 486, ITS2011-63, pp.51-56, 2012.
- 9) 石橋基範, 大桑政幸, 赤松幹之 : 運転者特性把握のための運転スタイル・運転負担感受性チェックシートの開発, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.55-02, pp.9-12, 2002.
- 10) 社団法人人間生活工学研究センター(HQL) : HQL 式運転スタイルチェックシート解説書, 2003.
- 11) 社団法人人間生活工学研究センター(HQL) : HQL 式運転負担感受性チェックシート解説書, 2003.
- 12) 大口 敦, 片倉 正彦, 谷口 正明 : “都市部交通における自動車の二酸化炭素排出推定モデル” 土木学会論文集, No.695/IV-54, pp.125-136, 2002.

Fundamental Study on Effect of Acceleration and Deceleration Information from

Leading Vehicle Group to the Fuel Consumption of the Following Vehicle

By Aoi Kamo, Shuichi MATSUMOTO

Eco-driving has been widely known as the environmentally friendly driving behavior.

In order to encourage eco-driving efficiently, this study looked at the effect of preceding and pre-preceding vehicle's acceleration-deceleration information on the following vehicle's gasoline mileage.

As a result, the followings were found: 1. By providing information to a following vehicle, the fuel consumption rate of the following vehicle can be reduced. 2. The Subjects that improved in gasoline mileage tended to value pre-preceding vehicle information than those that decreased in it. 3. The vehicle starts moving earlier. 4. Pre-preceding vehicle's acceleration information caused the following vehicle to increase its creeping time and acceleration gradually when the vehicle starts moving.

Therefore, it was suggested that sharing the information on preceding and pre-preceding vehicles were effective.