

ドライビングシミュレータを用いた情報提供に おける車両挙動解析 -先行車両と先々行車両情報の比較-

西元 崇¹・長澤 俊範²・松本 修一³・葛西 誠⁴・岩瀬 幸一⁵

1学生会員 文教大学 情報学部 情報システム学科 (〒253-8550 神奈川県茅ヶ崎市行谷1100)

E-mail: b2p31122@shonan.bunkyo.ac.jp

2非会員 文教大学 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: b4p41075@shonan.bunkyo.ac.jp

3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

4正会員 東京理科大学PD研究員 理工学部 土木工学科 (〒270-8510 千葉県野田市山崎2641)

E-mail: kasai@rs.noda.tus.ac.jp

5非会員 元文教大学 情報学部 情報システム学科 (〒253-8550 神奈川県茅ヶ崎市行谷1100)

E-mail: b1p31019@shonan.bunkyo.ac.jp

協調ITSにおいて、路車間通信と車車間通信の両システムが連携することで様々なITSサービスアプリケーションが実現可能になってきている。また、従来の「走る、曲がる、止まる」に加えて、自動車の新たな機能の一つとして「繋がる」に注目が集まっている。近年、前方車両の情報提供に関する研究がなされており、平坦路において環境に優しく効率的な発進が可能になることがわかっている。そこで、本研究では「繋がる」に着目し、先行車両と先々行車両の加減速情報をドライバに提示した際の追従挙動に与える影響についてドライビングシミュレータを用いてデータを収集し、解析した。その結果、先々行車両情報の方が1)アクセル踏み込み量が11.1%、発進遅れが8%減少する、2)燃料消費率が改善される傾向にある、3)IDMのパラメータの比較により加減速がしやすい走行になる、という知見が得られた。この結果は、既存の研究での先々行車両単独での実験結果を踏まえ、情報無しの走行、先行車両情報との比較もでき、改めて先々行車両情報の方が有用であることを確認することが出来た。

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

1. はじめに

2014年に閣議決定された科学技術イノベーション総合戦略、日本再興戦略に基づき自動走行などの開発を支援する"SIP-Automated Driving for Universal Services (SIP-adus)"という取り組みがはじまった¹⁾。この中で、「つながる車” Connected Vehicles”」という考え方の重要性が示されており、近年の情報通信技術の発展とともに「繋がる」という自動車の新しい機能に注目が集まっている。この機能に必要な技術として、車車間通信があり、車間距離や

速度を自動制御するCACC (Cooperative Adaptive Cruise Control) を活用した交通流の円滑化などで実用化がはじまっている。また、車車間通信などを用いた車両の情報化に関する効果・評価を実車やドライビングシミュレータ (以下「DS」と記す) を用いた研究が近年盛んに行われるようになってきた。佐藤らは、トラックの後方にLEDパネルを設置し、加速や減速など後続車両のドライバが前方車両の車両挙動を予測し、運転操作が出来るような情報提供を行うことで、後続車両の無駄な加減速を

減らすことを提案した²⁾。また、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^{3) 4)}。先々行車両まで加味した情報提供に関しては、田中らにより、先行車両より前方の情報から、早めの減速など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⁵⁾。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。

また、櫻井らの研究により、先々行車両の加減速情報を追従車両に提供し、発進時の燃費と車両挙動に与える影響を検証し、先々行車両の加減速情報を追従車両のドライバーに提供することが、発進時に有用であるとの結果が得られている⁶⁾。しかし、この研究では先々行車両の加減速情報のみを提供したために、先行車両および先々行車両の情報が単体で与える影響を比較できないという課題があった。

そこで本研究では、1) 先行車両情報、先々行車両情報に対して、それぞれ単独で情報提供の実験を行い、既存の知見も踏まえ発進時に関して、その効果を定量化すること、2) 追従挙動の比較検証の方法として、追従モデルへのあてはめを行ない、そのパラメータ値の違いをもとに、追従特性の評価を試行することを目的とする。

2. 実験概要

(1) 実験環境

本実験では、同一走行環境下において複数の実験参加者に運転を行ってもらふ必要があるため、DS（株式会社フォーラムエイト製（図-1参照））を活用し、仮想空間上に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。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。

実験コース上では、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

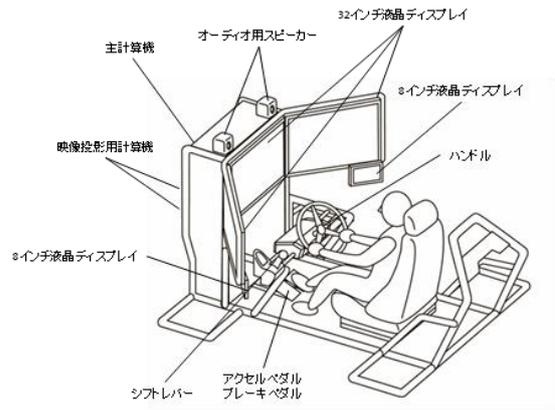


図-1 DS概観図



図-2 車両の位置関係

表-1 加減速情報の表示形式

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

両」とする。また、先々行車両、先行車両をまとめて「前方車群」と記す。）が走行する（図-2参照）。なお、先行車両に遮られて、自車両からは先々行車両を見ることができない。

前方車群の加減速パターンは、20代の男性（運転取得後年数3年、運転頻度週4~5回）が追従した際の走行データとした。後続車両は、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、既存の研究⁷⁾を参考にし、自車両の挙動に従って後方を追従するようにした。

(2) 情報提供

本実験では、先行研究⁸⁾の表示形式を参考に、前方車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。

前方車群の走行パターンと加減速情報の提供状況を図-3、4に示す。この図において、緑色および赤色の三角形で加減速情報の提供を行っている時間帯を1、白い横棒で情報提供を行っている時間帯を0として表している。また、横軸の時間は、本実験における各走行のシナリオ開始時間を0秒としている。以降、本稿における時間軸

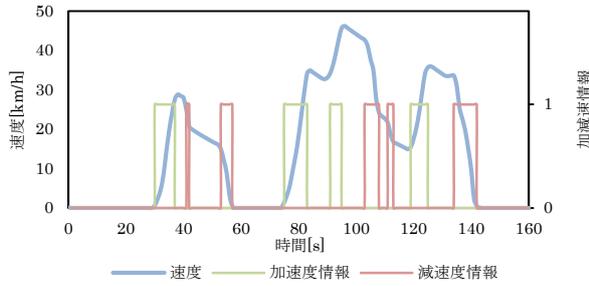


図-3 先行車両の走行パターンと加減速情報提供状況

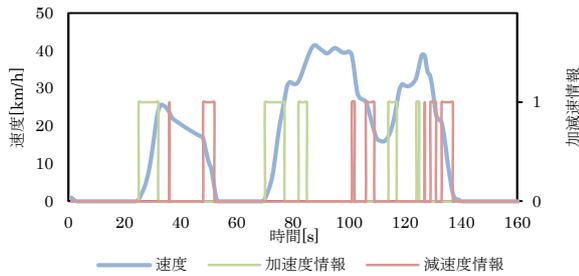


図-4 先々行車両の走行パターンと加減速情報提供状況

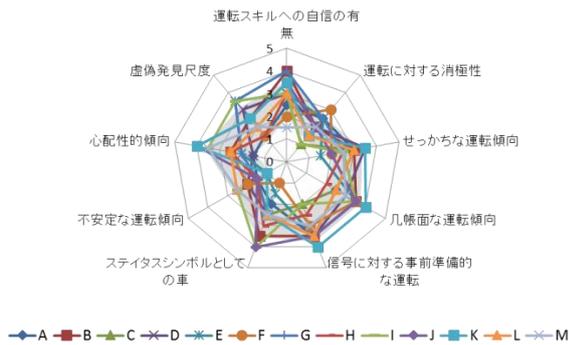


図-5 DSQ 得点

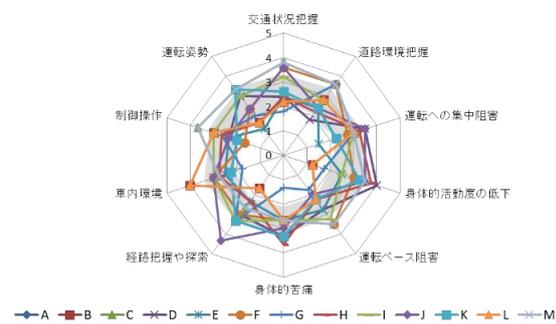


図-6 WSQ 得点

はシナリオの開始を 0 秒として設定した。

(3) 実験条件および実験参加者

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をそれぞれ 1 度ずつ走行してもらうことで、DS 環境ならば

表-2 実験参加者属性

ID	年齢	性別	免許取得年数	運転頻度
A	20	女性	1年7ヶ月	月に1回
B	22	男性	3年2ヶ月	週に3~4回
C	20	女性	2年1ヶ月	週に3~4回
D	21	男性	3年9ヶ月	月に1回
E	22	女性	1年3ヶ月	月に1回
F	21	男性	1年7ヶ月	週に1~2回
G	20	男性	1年8ヶ月	月に1回
H	21	男性	3年	週に3~4回
I	21	男性	2年11ヶ月	ほぼ毎日
J	22	男性	2年6ヶ月	ほぼ毎日
K	19	男性	1年	週に1~2回
L	24	男性	1年4ヶ月	週に3~4回
M	21	男性	2年5ヶ月	2~3ヶ月に1回

に運転操作に慣れてもらった。本実験では、各実験参加者が

- ・「情報なし」
- ・「先行車両の加減速情報を提示」
- ・「先々行車両の加減速情報を提示」

の 3 水準それぞれを 2 回ずつ走行した。走行実験の順序は、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。本実験の、実験参加者は 20 歳前後のドライバ 13 名（男性 10 名、女性 3 名）であった。表-2 に実験参加者の属性をまとめる。

また、実験参加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 13 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±1SD 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実験参加者もいるが、これらは部分的であり運転に支障を来す程度の不安や負担を受ける実験参加者は見られなかった。

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」
- ・「必要に応じて情報を参考にして運転すること」

3. 分析方法

以下、2通りの方法によって、先々行車情報および先行車両情報の提供の影響を考察する。

1つは、発進時など着目する場面を限定し、燃料消費率やアクセル踏み込み量などの諸量が情報提供の違いによって影響をどの程度受けているかである。これは情報が提示されている瞬間の挙動にどのようなインパクトがあるかを見積もる狙いがある。

一方で、先々行車両情報は常時提示されるわけではないものの、結果として追従走行全体を円滑にする効果も期待される。走行全体の追従挙動を端的に表すのは追従モデルであるから、取得されたデータを元に追従モデルへのあてはめを行ない、パラメータ値の違いに情報提供の違いが反映すると考えることが可能である。

(1) 発進時の車両挙動

加茂らの研究により、先々行車両情報および先行車両情報を同時に提示することで、先々行車両情報を重視する実験参加者の方が、先行車両情報を重視する実験参加者より、1) 車両発進時に先々行車両情報を視認することで、発進タイミングが早くなる。2) クリープ時間の増加、アクセル踏み込み量の減少などの運転行動の変化が確認された。3) 燃費が走行全体で2.3%、発進時で7.3%改善された。櫻井らの研究では、先々行車両情報のみをドライバに提供する実験を行い、発進時にフォーカスにおいて解析を行った。その結果、加茂らの研究に類似した結果として、1) ドライバは発進時に加減速情報を視認することが多く、発進時の燃料消費率が改善する。2) 発進時の加減速情報により、発進遅れの短縮やアクセル踏み込み量の減少など運転行動の変化が確認されるとともに3) 加速終了時には、先行車両に調和した車両挙動になることが示された。

本研究では、これらの研究で課題となっていた、先々行車両情報と先行車両情報をドライバに提供した際の効果を比較する。

先述の通り、検証の対象となる場面を限定するが、最も燃料消費率に影響の大きいとされる発進時に着目する。検証の指標は、1) アクセル踏み込み量、2) 発進遅れ時間、3) クリープ走行時間、4) 加速に要する時間（すなわち、先行車が速度0から単調に速度増加をしているのに反応して追従車も加速していくが、その追従車が加速している時間長）、5) 燃料消費量である。

(2) 追従モデルへのあてはめ

情報提供による有無を定量的に比較する方法の1つとして、追従モデルへ取得データのあてはめを行ない、推定されたパラメータ値を考察の材料とすることも方法の

1つとして考えられる。基本的な方針は、先々行車両情報を与えた場合の追従走行における追従モデルのパラメータ値と、先行車両情報を与えた場合のパラメータ値との比較によって、与えられた情報が円滑走行に寄与しているかそうでないかについて考察することとなる。

上記(1)が、瞬間値の諸量に基づいた考察であるのに対し、この(2)はいわば追従全体への情報のインパクトを評価していることと言え、相補的な分析を意図している。

あてはめの候補となる追従モデルは様々な分野で様々な目的意識により多数提案されている（詳しくは大口¹²⁾、Brackstone & McDonald¹³⁾を参照）。本論文では、サグ部の容量上のボトルネック現象モデル化の基礎として用いられたり¹⁴⁾、サグ部等円滑化の効果推定¹⁵⁾に用いられるなど近年盛んに利用されるようになってきている Intelligent Driver Model(IDM)¹⁶⁾の改良版、通称 IDM+¹⁷⁾を用いることとする。

IDM+は以下の通りである：

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

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

ここに、 v ：自車両の速度[m/s]、 Δv ：先行車両との相対速度[m/s]、 v_d ：希望速度[m/s]、 a ：最大加速度[m/s²]、 b ：希望減速度[m/s²]、 δ ：指数定数（一般に4と固定）、 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。パラメータ推定は、DSにより取得された実車頭距離に対して、推定車頭時間の1走行における中等誤差が最小となるようなパラメータ組 (a, b, v_d, s_0, T) を求める問題となる。ただしこの種類の問題は、非線形最適化問題でありかつ中等誤差が追従モデルパラメータによって微分不可能であるとされている¹⁸⁾ため Newton-Raphson法が適用できず、Simplex法¹⁹⁾を用いる。

4. 結果

(1) 発進時の車両挙動

本実験において停止状態からの発進は前半と後半の計2回ある。ただし、本解析における「発進時」とは自車両が発進してから20km/hに達するまでと定義した。

発進時アクセル踏み込み量を図-7に示す。先々行車両情報により、情報なしと比較して8.6%、先行車両情報と

比較して 11.1%減少した. ($F(1,12)=5.48, p<0.01$).

次に, 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「発進遅れ」と記す) を図- 8 に示す. 先々行車両情報により, 情報なしと比較して 14.4%, 先行車両情報と比較して 8%減少した($F(1,12)=3.8, p<0.05$).

さらに, 停止状態からブレーキをオフにして, アクセルペダルを踏むまでのクリープ走行時間を図- 9 に示す. 先々行車両情報により, 情報なしと比較して 41.3%, 先行車両情報と比較して 50%増加した($F(1,12)=4.7, p<0.011$).

停止状態からブレーキを離し, 20km/h まで加速した時間を図- 10 に示す. 先々行車両情報により, 情報なしと比較して 14.9%, 先行車両情報と比較して 15%増加した ($F(1,12)=5.44, p<0.01$).

発進時における燃料消費量を図- 11 に示す. 統計的に有意ではなかったが, 先々行車両情報により, 情報なしと比較して 3.1%, 先行車情報と比較して 4.2%改善した.

(2) 追従特性の解析

情報提供を行わない走行, 先行車両情報を提供した走行, 先々行車両情報を提供した走行のデータについて, 1 走行回毎に IDM+へのあてはめを行ない, それぞれについて追従モデルのパラメータ推定値が得られる. パラメータ 1 つについて, その値の分布を観察することは意味のある分析と言えるかどうかは厳密には議論すべき余地があるが, ここではおおよその傾向を概観することに主眼を置き, 情報提供の種類 (情報なし, 先行車両情報の提供, 先々行車両情報の提供) によって, パラメータ推定値を比較する.

IDM+の構造上, 先行車への反応の特徴を表すパラメータは主として a, b であり, その他の, 希望速度, 安全車頭時間等はそもそも推定の対象とならないか, 推定してもその人固有の追従特性を表すものと考えられる. したがって, 以下では a, b のみ着目して結果を議論する. IDM の追従モデルの結果を図- 12, 13 に示す. 最大加速度 a , 希望減速度 b の値が先々行車両の情報提示により大きくなる傾向がわかった.

もっとも, 推定されたパラメータ値は, 一般に知られている値よりもかなり大きな値 (例えば, 金澤ら²⁰⁾や, 鈴木ら¹⁵⁾の ACC 車性能に比べても大きな値である) である. これらは, DS 実験による条件を反映している可能性があることも付記しておく.

5. 考察

先々行車両情報をドライバーに提示することで発進時に有用になると既存研究で判明している⁶⁾が, 3 章より先行車両情報と比較して先々行車両情報の方がゆるやかな

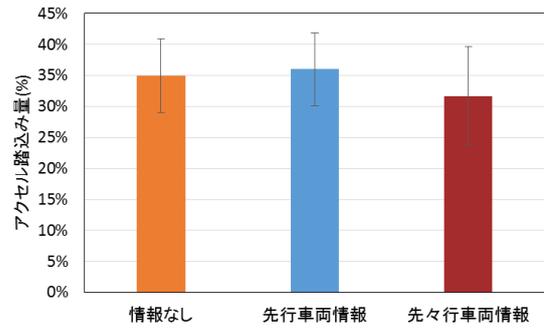


図-7 発進時におけるアクセル踏み込み量

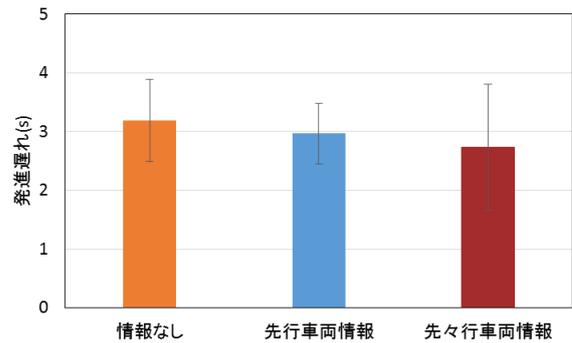


図-8 発進時における発進遅れ時間

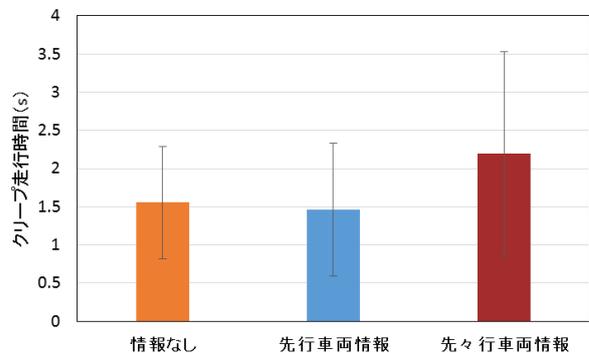


図-9 クリープ走行時間

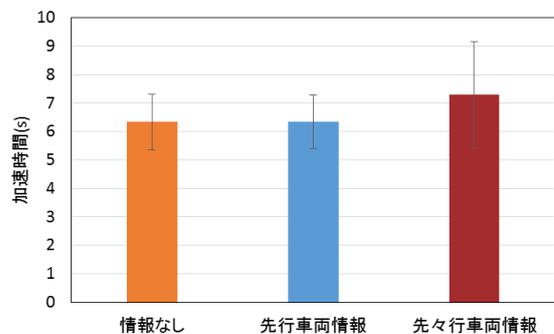


図-10 加速時間

な発進を促し、加減速もしやすくなると考えられる。具体的には、図-8のように発進時の運転行動では、発進遅れの減少により、素早く前方の車両の挙動に対応できるようになった。図-7、図-9、図-10のアクセル踏み込み量の減少や、クリープ走行時間、加速時間が増加した結果、エコドライブのふんわりアクセル e スタートに近い発進方法になり、環境に優しい発進をドライバに促す可能性が示唆された(図-11 参照)。このことから、先々行車両情報によりドライバの運転行動に変化があると考えられる。

IDM+による追従特性の解析結果では、パラメータ a 、 b 共に先々行車両の情報提示により値が増加しており、追従時の加減速をしやすい傾向になる可能性が示唆された。

6. まとめ

本研究では、先々行車両および先行車両の加減速情報をドライバに提供する実験を行い、車両挙動や運転行動の変化を検証した。実験の結果、以下の結果を得た。

- ・先行車両情報と比較して、先々行車両情報の方が発進遅れが8%減少し、効果的な発進になることが示唆された。
- ・発進時における解析では、先行車両情報と比較して、先々行車両情報の方がアクセル踏み込み量が11.1%減少、加速時間が15%増加、クリープ走行時間が50%増加した。この結果として燃料消費量が向上することが見込まれ、環境にやさしい発進になることが示唆された。
- ・IDM+による追従特性の解析により、先々行車両情報により追従時に加減速をしやすくなる傾向になる。

本実験では、平坦路において追従する車両に対して加減速情報を提供する実験を行ったが、サグなど異なる道路環境下においても加減速情報が有用であるか検証する必要がある。また、急減速などを行う車両に追従する場合などの安全性の評価なども行っていく必要がある。さらには、自動車への実装も視野に入れたインタフェースの検討も重要である。今後は上記のような課題を検証していく予定である。

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、慶應義塾大学大門樹教授、慶應義塾女子高等学校国府方久史教諭、京都大学大学院平岡敏洋助教、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。

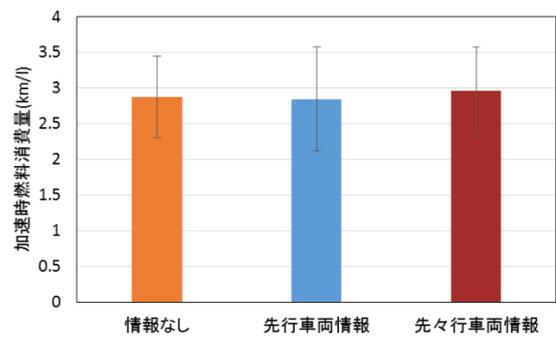


図-11 燃料消費量

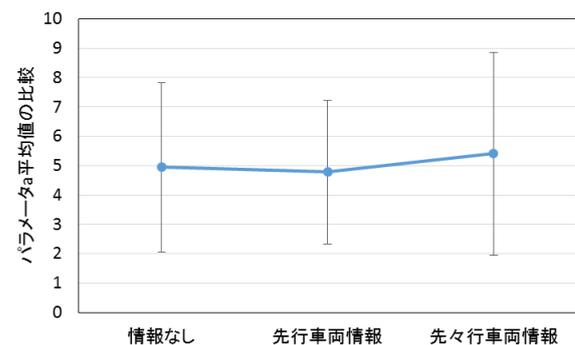


図-12 パラメータ a の比較

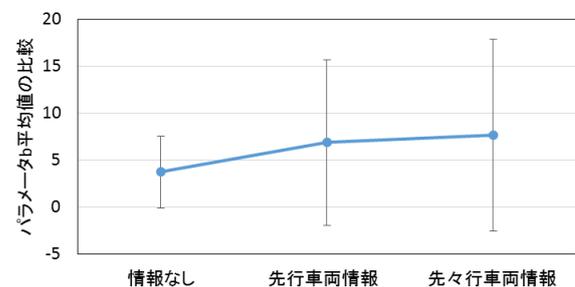


図-13 パラメータ b の比較

参考文献

- 1) SIP-adus HP, <http://www.sip-adus.jp/> [2015., July 9]
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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提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.

- 6) 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 (印刷中)
- 7) 松本修一, PARK Tachwi, 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, No.5, pp.991-998, 2010.
- 8) 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.
- 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) 大口敬: 高速道路単路部渋滞発生解析ー追従挙動モデルの整理と今後の展望ー, 土木学会論文集, No.660/IV-49, pp.39-51, 2000.
- 13) Brackstone, M. and McDonald, M.: Car-following: a historical review. *Transportation Research Part F*, Vol.2, pp.181-196, 1999.
- 14) Goni Ros, B., Knoop, V.L., Shiomi, Y., Takahashi, T., van Arem, B. and Hoogendoorn S. P.: Modeling traffic at sags, *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, (online first), 2014.
- 15) 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, No.2, pp.B_60-B_67, 2015.
- 16) Treiber, M., Hennecke, A. and Helbing D.: Congested traffic states in empirical observations and micro-scale simulations, *Physical Review E*, Vol. 62, pp. 1805-1824, 2000.
- 17) Schakel, W., Arem, B. and Bart, N.: Effects of cooperative adaptive cruise control on traffic flow stability, *Proceedings of 13th International IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation Systems*, pp.19-22, 2010.
- 18) 尾崎晴男: 車両の追従挙動とサグ部の隘路現象, 東京大学博士(工学)論文, 1994.
- 19) S.L.S.ジャコビ, J.S.コワリク, J.T.ピンズ (関根智明訳): 非線形最適化問題の反復解法, 培風館, pp.81-84, 1976.
- 20) 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 (実務論文), pp.31-34, 2012.

(2015.?.?? 受付)

EFFECT OF ACCELERATION AND DECELERATION INFORMATION
PROVISION ON CAR-FOLLOWING BEHAVIOR ON DRIVING SIMULATOR

Takashi NISHIMOTO, Toshinori NAGASAWA, Shuichi MATSUMOTO, Makoto
KASAI and Koichi IWASE