

Webサイトと車載インジケータを用いた 情報提供によるエコドライブ促進効果の分析

三輪 富生¹・川杉 尚之²・浪崎 隆裕³・森川 高行⁴・山本 俊行⁵

¹正会員 名古屋大学准教授 エコトピア科学研究所 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)
E-mail: miwa@nagoya-u.jp

²学生会員 名古屋大学大学院 環境学研究科 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)
E-mail: kawasugi.naoyuki@f.mbox.nagoya-u.ac.jp

³学生会員 名古屋大学大学院 工学研究科 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)
E-mail: namizaki.takahiro@b.mbox.nagoya-u.ac.jp

⁴正会員 名古屋大学大学院教授 環境学研究科 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)
E-mail: morikawa@nagoya-u.jp

⁵正会員 名古屋大学教授 エコトピア科学研究所 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)
E-mail: yamamoto@civil.nagoya-u.ac.jp

自動車の利用に起因するCO₂の削減対策の一つとして、エコドライブが注目されている。エコドライブはドライバーの運転操作の変更のみで実現でき、既に多くの効果が報告されている。本研究では、エコドライブを促進させ、より大きな効果を得ることを目指して、ドライバーがエコドライブ実施状況を確認できる情報提供システムを構築し、その効果を検討した。構築したシステムは、走行中に燃料消費量に関する情報を提供するLEDインジケータと、走行後にエコドライブ実施状況を確認できるWebシステムで構成される。本研究では、LEDインジケータの点灯方法について分析を行った後、豊田市にて社会実験を実施し、システムの効果を検証した。実験結果から、LEDインジケータの点灯指標には燃料消費量が効果的であること、情報提供によって運転操作に変化が与えられ、エコドライブが促進されることが示された。

Key Words : eco-driving, information provision, fuel economy

1. はじめに

エコドライブは、自動車からのCO₂排出量を削減する運転方法であるが、ドライバー個人が比較的容易に実施できるため、国内外で様々な取り組みが行われている。例えば、エコドライブ普及連絡会が策定した“エコドライブ10のすすめ”は、多くの社会実験やキャンペーン等で利用されており、ふんわりアクセルやアイドリングストップなどは既に広く認識されてつつある。しかし、エコドライブを実施したことによるCO₂や燃料消費量の削減効果は、ドライバーには認識しやすいとはいえない。市販されている車種には、走行中の燃料使用状況に関する情報が表示される場合も多くなってきたが、情報の表示方法や表示内容が車種によって異なっているほか、経済性や環境負荷を示していない場合も多い。このような、実施効果の分かりにくさが、エコドライブ実施の継続性

を低下させる要因となっていると考えられる。

そこで本研究は、エコドライブ実施効果に関する情報をドライバーに提示するシステムを開発し、それによるエコドライブ促進効果を把握することを目的としている。開発したシステムは、走行中の燃料消費状況に応じてライト点灯数が変化する“LEDインジケータ”，および走行後にインターネット経由でエコドライブ実施状況の診断結果を提供する“エコドライブ診断システム”（以下、“Webシステム”）によって構成されている。特に、本研究では、LEDインジケータの点灯方法の検討と、上記システムの適用効果の検証に焦点を当てる。

本稿の構成は以下のとおりである。第2章では、エコドライブに関する既往研究をレビューする。第3章では、開発したシステムの概要を説明する。第4章では、LEDインジケータ点灯方法を検討するための走行実験および、事前分析結果について述べる。第5章では、開発したシ

システムを豊田市民へ適用し、効果の検証を行う。最後に第6章でまとめと今後の課題を述べる。

2. 既往研究レビュー

運転操作と燃料消費量の関係についての既往研究は多い。Evansは、都市内走行においていくつかの運転方法による燃料消費量を比較し、瞬間燃料消費量計に従うことは必ずしも効果的ではなく、前方の交通状況や信号停止を予測しつつ、アクセルやブレーキの使用を控えることが効果的であると示している¹⁾。また、Chang and Hermanも、試験走行データから穏やか運転ほど燃料消費量を削減できることを示している²⁾。Hooker, El-Shawarbyら、加藤・小林も都市内での走行においてゆったり運転したほうが燃費が良くなることを示している^{3) 4) 5)}。また、加藤らは、交通シミュレータを用いて一般道における走行速度の変化と経済速度の関係を分析しており、最高速度の抑制によってもCO₂排出量が削減できることを示している⁶⁾。しかし一方で、Larsson and Ericssonは、スウェーデンにおいて、郵便配達車にアクセルの強い踏込を抑制する機器 (Acceleration advisor) を適用した結果、HCやCOなどは削減できるが、緩やかなアクセル操作へと強制するのみでは、必ずしも燃料消費量は削減できないことを示しているなど、走行環境による影響も存在することも示されている⁹⁾。

その他にも、Wuらは、信号が赤になる際に車両がそれを停止せず通過できるかを判断し、通過できない場合にスムーズに停止させるシステムについて、その燃料削減効果をシミュレーション上で分析している。その結果、規制速度が高い場合ほど、システムの燃料削減効果が大きいことを示している⁷⁾。また、Fonsecaらは、都心の混雑した地域でアイドリングストップ機能の効果を分析しており、12%のCO₂削減効果があることを示しているなど⁸⁾、新しい技術による運転操作支援に関する研究もみられる。

このように、既往研究で示された運転操作と燃料消費量の関係からは、都市内での走行ではゆったりとした加減速や、前方の交通状況や信号の切り替わりを予想しながらの運転が、燃料消費量の削減に効果があることが分かる。

また、エコドライブを支援する実験に関する既往研究も多い。van der Voortらは、車両の走行状況を判断しつつ、推奨する運転方法をディスプレイ表示するエコドライブ車載器を開発し、その効果を検証している。結果として、都市内ほど効果が高く、また早めのシフトアップが効果的であることを示している⁹⁾。鹿島らは、東京都内の直線的なルートを走行する実験において、走行中にエコド

ライブを促すアドバイスの効果を検証し、平均で3.6%の燃料削減効果があったことを報告している¹⁰⁾。また、竹内らは、速度やエンジン回転数などからあらかじめ設定した基準値を超える運転操作をした場合に、音声指導を行える車載器を用いた場合の、エコドライブ促進効果について実験を行っており、燃費が3~15%改善することを報告している¹¹⁾。新田・藤岡も同様のシステムを用いて、6~9%の燃費改善効果があることを示しており、加えて、ドライバーの努力のみではなく、管理者による情報把握などの継続的な努力によって効果が維持できることを示している¹²⁾。

さらに、ServinらおよびBarth and Boriboonsomsinは、速度制御システム (ISA, Intelligent Speed Adaptation) による燃料消費削減効果をマイクロシミュレータ上で分析しており、ISA装備車の速度抑制によって周辺の交通についても速度が抑制され、燃料消費量が削減されることを示している^{13) 14)}。また、Zarkadoulaらは、バスドライバーへのエコドライブ訓練によって平均で10%の燃費が削減し、訓練後も4%程度の燃費削減効果があることを示している¹⁵⁾。しかし、af Wählbergは、バスドライバーへのエコドライブ訓練と長期間にわたる観測結果から、エコドライブ訓練の効果は訓練後長続きしないことを示している¹⁶⁾。また、Beusenらは、一般のドライバー10名に対して、10か月以上に渡って日々の走行データを収集し、エコドライブの効果を分析している。ここでは、エコドライブ訓練の事前、事後期間がそれぞれ5か月程度設定されており、GPSデータおよびCAN (controller area network) データを収集している。分析結果からは、燃料消費量は平均で6%減少し、燃費が減少した被験者においては、加減速や慣性走行などの運転操作も変化したことが報告されている。また、訓練後もエコドライブを継続する被験者や、実施しなくなってしまう被験者が存在することも示されている¹⁷⁾。ただし、被験者数がやや少なく、車両やドライバーの属性に関連した分析が十分ではない。

このように、被験者にエコドライブ訓練を行ったり、走行中に実施を支援するシステムを活用する研究は多い。しかし、実験の枠組みはそれぞれ異なっており、効果や訓練後の効果継続についても様々である。

その他の関連する既往研究として、Brundell-Frej and Ericssonは、道路環境と走行パターンとの関係を分析し、信号交差点密度、規制速度、道路種別や沿道環境が走行パターンに強く影響していることを示している¹⁸⁾。また、Stillwater and Kuraniは、プラグインハイブリッド車を用いて、燃料消費状況に関する情報提供が、運転操作に与える影響を分析している。実験の結果、走行後にWebを通じて情報提供する場合は、ログイン作業や情報の確認が面倒となりやすく、リアルタイム情報の方が行動変化に影響しやすいことを示している¹⁹⁾。さらに、Wuらは、

燃料消費量を目的関数、信号停止線までの距離を制約条件とした最適化問題により、エコドライブインジケータの点灯方法を検討している。ドライビングシミュレータを用いた実験から、その効果を示している²⁰⁾。ただし、車両位置と信号停止線位置の正確な把握が必要であり、実際の適用は容易ではない。

3. エコドライブ促進システム

(1) CANデータ収集用車載器

本研究では、一般社団法人交通工学研究会が開発した車載器を用いて、車両の走行位置（GPS）情報や走行中の燃料消費量等に関する情報を収集する。この車載器は、OBD (On-Board Diagnostics) 2コネクタからCAN (Controller Area Network) 情報を取得するもので、車載器本体に取り付けたSDカードにデータを記録できる。また、GPSが内蔵されており、車載器をダッシュボード上に設置することで、走行位置も合わせて計測・記録できる。収集したデータは、SDカードをPCに接続することで、SDカード内にインストールされたプログラムによって、センターサーバに送信される仕組みとなっている。

車載器は速度、加速度、燃料消費量、ブレーキ使用、アクセル開度、エアコン使用など様々な情報を取得できる。ただし、取得できる項目は車種によって異なるため、本研究では主に速度、加速度、燃料消費量を使用する。また、車載器では1秒ごとに情報を取得・記録する。記録される車速、加速度は、収集タイミングでの瞬間値であるが、燃料消費量については、総燃料消費量を得る必要があるため、毎秒記録される情報も1秒間に噴射した燃料積算値となっている。ただし、以降では簡単のため“瞬間燃料消費量”と呼ぶことにする。

(2) LEDインジケータ

LEDインジケータは、走行中に環境負荷状況に関する

情報を提示することで、被験者にエコドライブを促す目的で開発された。LEDインジケータは、車載器に組み込まれたプログラムにより、設定した環境負荷指標値に応じてLEDを点灯させることができる。6個のLEDが横方向に配置されており、計算されるLED点灯用指標値が大きいほど、左から順にLEDライト点灯数が増加する。視認性やまぶしさ等を考慮して、ライトの色はオレンジ色が採用された。また、指標値の計算式や点灯数を変化させる時間間隔（LED点灯数更新周期）、LED点灯数を変化させる指標値の閾値は、組み込まれたプログラムを修正することで変更することができる。

(3) エコドライブ診断システム

エコドライブ実験の被験者が、SDカードに蓄積されたデータをセンターサーバにアップロードすると、センターサーバはデータを集計、解析し、表-1に示す5つの指標を計算する。また、被験者は、被験者ごとに割り当てられたパスワードを使ってシステムにログインする。診断システムでは、①過去の走行軌跡、②日ごとの走行距離、走行時間、平均速度、③日ごとの燃料消費量と平均燃費、④トリップごとの各指標値（表-1）、⑤被験者全体におけるランキング（各指標ごとの順位で、日ごとのデータによる順位と過去2週間のデータによる順位）に関する情報を提供する。また、これらの情報については、日ごとの推移も確認できる。

このシステムは、日々の運転がどの程度の環境負荷を及ぼしているかや、自らのエコドライブ実施状況が全体でどの程度の位置にあるかを確認することで、エコドライブの実施意図を向上を狙ったものである。

4. LEDインジケータ点灯方法の検討

(1) 検討方法

社会実験に先立ち、より効果的なLEDインジケータ点灯

表-1 Webシステムにおけるエコドライブ診断の指標

走行状態	指標	定義
発進時	ふんわり発進の割合	発進後の最大速度が20km/hを超える場合で、発進から5秒以内に速度変化量が5km/h/s（1秒間に5km/h）以上加速しない発進の割合
巡航時	定速走行時間の割合	時速20km以上の走行中に、加速・減速が4km/h/s（1秒間に4km/h）を超えない走行時間の割合
減速時	惰性走行で減速する時間の割合	減速中に、ブレーキを踏まずに減速している時間の割合
停止時	アイドリングストップの割合	停止中に、燃料噴射量がゼロとなっている時間の割合
全体	燃費	総瞬間燃料噴射量と走行距離の比率



図-1 試験走行とLED点灯指標検討の流れ

表-2 被験者と車両の情報

	被験者A	被験者B
性別/年齢/職業	男/22/大学生	男/23/大学院生
免許保有歴	3年3か月	3年8か月
自動車運転頻度	6日/月	20日/月
試験車両	マークX	クラウンロイヤル
初度登録年	平成22年	平成22年
排気量	2.49リットル	2.99リットル
車両重量	1795kg	1875kg
燃料の種類	ガソリン	ガソリン

方法を検討するため、車載器を用いて試験走行を実施した。試験走行と検討の実施フローを図-1に、被験者及び使用車両の情報を表-2に示す。試験走行の被験者はどちらも学生（男性）であり、ほぼ同様の運転歴となっている。自動車の運転は被験者Bの方が頻繁であるが、被験者Aも日常的に自動車を運転している。試験走行に用いた車両は、どちらも普通乗用車である。

図-1に示すように、まず試験走行に先立って、2名の被験者に簡単なエコドライブ指導を行った。ここでは、「エコドライブ10のすすめ²⁰⁾」から、ふんわりアクセル、加減速の少ない運転、早めのアクセルオフについて、その方法を口頭で指導した。これは、社会実験の被験者にも同様に、事前にエコドライブを指導することを予定しているためである。なお、信号停止時のアイドリングストップは、ここでの分析の対象とはせず、被験者にも指導を行わなかった。その上で、第1回から4回の走行で得られるデータをできるだけ比較可能とするため、経路や走行車線を確認するための事前走行を行った。

第1回走行以降では、いずれも13:00~16:00に実施した。

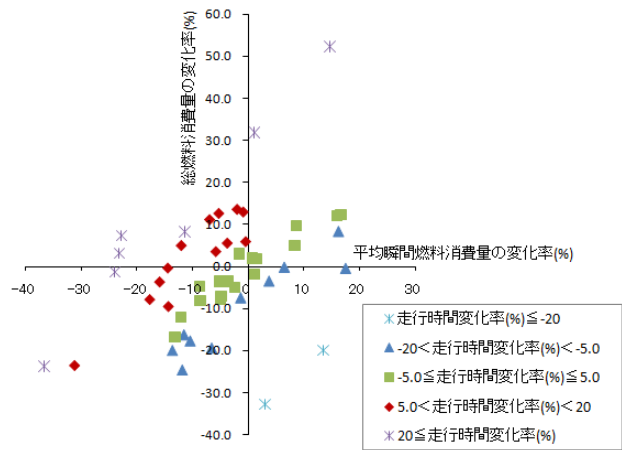


図-2 走行区間ごとの燃料消費状況

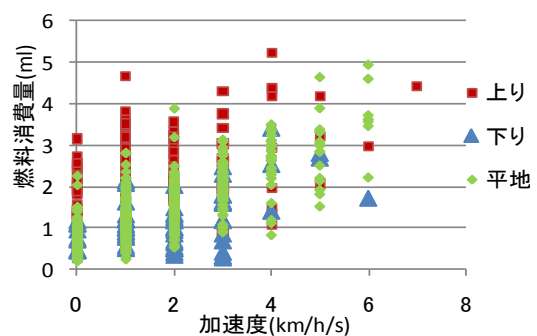


図-3 加速度と瞬間燃料消費量の関係(車速:30~40km/h)

第1回走行ではLEDインジケータを用いず、第2回走行ではLEDインジケータを瞬間燃料消費量を指標として点灯させた。また、この際、LED点灯数の更新周期は0.5secとしている。その後、得られたデータの分析に基づいて新たな指標を検討し、この指標を用いて第3回走行（LED点灯数更新周期1.0sec）を行い、最後に、再度、瞬間燃料消費量によって第4回走行（同1.0sec）を行った。

第2回走行ではLED点灯数更新周期を0.5secとしているのに対して、第3回走行と第4回走行では1.0secとしているのは、点灯数の更新頻度が視認性や運転操作に影響を与えると考えたためである。なお、第3回走行および第4回走行では、被験者Bのみの実施となっている。

試験走行ルートは様々な道路条件によるデータを収集するよう計画されており、名古屋大学を起終点とし、都市高速道路、都心や郊外の道路、比較的急な上り勾配などを通る約47kmとした。なお、途中4回の休憩をばさんで所要時間は3時間前後であり、天候は晴れまたは曇りであった。

(2) 試験走行データの分析

まず、分析にあたっては、停止中のデータを除き、走行中のデータのみを用いることとする。これは、LEDインジケータは、走行中のアクセル操作に影響を与えることを主な目的としているためである。

表-3は、試験走行におけるふんわり発進の割合および定速走行時間の割合の変化を示している。なお、試験走行で使用した車載器は試作段階のものであったため、ブレーキ使用の有無が確認できなかった。このため、惰性走行で減速する時間の割合は確認できていない。表からは、LEDインジケータで瞬間燃料消費量を示すことで、どちらの被験者も走行挙動が変化し、エコドライブが促進されたことが分かる。

また、表-4は、試験走行データの集計結果である。表より、どちらの被験者においても走行時間は増加している。これは、LEDインジケータの設置によって、アクセルを強く踏むことが抑制されたためであり、このことは表中最下段の平均瞬間車速の低下からも分かる。ただし、総燃料消費量は1~3%程度減少し、燃費も上昇している。また、瞬間燃料消費量の平均値も4~5%程度削減されている。したがって、エコドライブを事前時指導していても、LEDインジケータによる情報提供で、アクセルワークがさらに緩やかとなり、エコドライブが促進されたことが分かる。

さらに、走行環境とLEDインジケータの影響を詳細に分析するため、試験走行ルートを複数の区間に分割することとした。走行区間は、高速道路上はインターチェンジやジャンクションで、一般道路は道路種別や大きな交

差点等で分割し、できるだけ走行区間内の交通環境が同じになるよう配慮した。図-2は、分割した走行区間ごとに、平均瞬間燃料消費量の変化率と総燃料消費量の変化率（第1回走行から第2回走行での変化率）をプロットしたものである。また、プロットの色は走行時間の変化率を示している。

図より、平均瞬間燃料消費量の増加によって総燃料消費量が増加することが分かる。さらに、走行時間が増加するほど、総燃料消費量は増加、平均瞬間燃料消費量が減少しやすい傾向がうかがえる。多くのデータが、図中第2象限と第3象限にプロットされている。第3象限は、平均瞬間燃料消費量、総燃料消費量ともに減少するケースであり、最もプロット数が多いことから、エコドライブが適切に促進された走行区間であることが分かる。次いでプロット数の多い第2象限は、平均瞬間燃料消費量は減少するが、総燃料消費量が増加してしまう走行区間であり、上り勾配の道路の道路が多く含まれていた。つまり、道路環境によってはLEDインジケータの設置によって、かえって燃費が悪くなる場合があることが分かる。また、第1象限や第4象限は、平均瞬間燃料消費量が増加する区間であり、LEDインジケータによる情報が運転挙動に影響を与えにくい状況であると考えられる。このようなケースは高速道路上の走行区間が多く含まれていた。

ただし、いずれもわずか2名の被験者による限られたデータによる分析であるため、走行環境とLEDインジケータの関係を把握するためには、より多くのデータによる分析が必要である。

表-3 試験走行における運転挙動の変化
(第1回走行と第2回走行の差)

<被験者A>		
	LEDなし	LEDあり
ふんわり発進の割合	81.3%	85.1%
定速走行時間の割合	63.0%	66.0%

<被験者B>		
	LEDなし	LEDあり
ふんわり発進の割合	95.1%	98.8%
定速走行時間の割合	69.9%	72.2%

表-4 試験走行における各種データの変化
(第1回走行と第2回走行の差)

<被験者A>			
	LEDなし	LEDあり	変化率
走行時間(sec)	4525	4585	1.3%
総燃料消費量(ml)	4030	3895	-3.4%
燃費(km/l)	11.7	12.1	3.5%
平均瞬間燃料消費量(ml/sec)	0.89	0.85	-4.6%
平均瞬間車速(km/h)	36.8	36.3	-1.2%

<被験者B>			
	LEDなし	LEDあり	変化率(%)
走行時間(sec)	4851	5043	4.0%
総燃料消費量(ml)	4060	4012	-1.2%
燃費(km/l)	11.6	11.7	1.2%
平均瞬間燃料消費量(ml/sec)	0.84	0.80	-4.9%
平均瞬間車速(km/h)	33.8	32.6	-3.7%

(3) 点灯方法の提案と検証

まず、第1回走行のデータを用いて、車速、加速度と燃料消費量の関係を確認する。図-3は、車速が30km/h~40km/hのデータを抽出し、横軸に加速度、縦軸に瞬間燃料消費量を取ったものである。また、先ほどの分析から、道路勾配が燃料消費量に与える影響が強いことが把握できたため、図中でも勾配によってプロット色を変えている（上り：道路勾配>1.0%、下り：道路勾配<-1.0%）。なお、走行データは、GPS位置を走行ルート（DRM）上にマップマッチングしており、DRMに名古屋市都市計画図から得た道路上の標高を対応付けることで、各リンクの道路勾配を算出した²⁾。

図より、勾配が燃料消費量に与える影響は大きく、同じ加速度、同程度の車速であっても、上り勾配ほど燃料消費量が高くなることが分かる。ただし、開発された車載器では、走行中に道路勾配を得ることができないため、分析においては平坦な道路からのデータのみを用いることとする（図中の緑プロット）。その上で、図より、燃料消費量は加速度の増加とともにやや指数関数的に増加

していることが分かる。これは、どの速度帯であっても同様の傾向であった。また、同じ加速度のデータから、車速と瞬間燃料消費量との関係を確認した場合も、やや直線的にはなるものの、車速の上昇に伴って、瞬間燃料消費量が増加することが確認された。

また、図からは、同じ加速度であっても、瞬間燃料消費量は大きくなる傾向があることが分かる。もちろん、限られたデータであり、またここでは考慮していない多くの要因が存在するものの、ある車速、加速度を実現するための最小燃料消費量が存在し、過度なアクセル操作等により、実際にはそれより大きな燃料消費が生じていると考えられる。そこで、各車速帯、加速度について、瞬間燃料消費量が最小となるデータを抽出し、これを式(1)によってモデル化することを試みる。

$$f = \exp(\beta_0 + \beta_1 v + \beta_2 a + \varepsilon) \quad (1)$$

ここに、 v は車速、 a は加速度、 f はその速度、加速度に対応する1秒間最小燃料消費量、 β_0 、 β_1 、 β_2 はパラメータ、 ε は正規分布に従う誤差項である。

推定結果を表-5に示す。サンプル数が少ないものの、いずれのパラメータも統計的に有意に推定されており、決定係数も高い推定結果が得られた。

表-5 最小燃料消費量モデルの推定結果

	推定値	t値
定数項	-2.46	-14.6
車速 (km/h)	0.0276	13.0
加速度 (km/h/sec)	0.365	10.1
サンプル数	57	
修正R ² 値	0.785	

さらに、これを用いてLEDインジケータを点灯量を決定する指標を以下の式(2)のように定義する。

$$Z = f^*/\hat{f} \quad (2)$$

ここに、 Z は新たなLED点灯指標、 f^* は車載器で計測された1秒間の燃料消費量（瞬間燃料消費量）(ml)、 \hat{f} は式(1)に基づく最小燃料消費量 (ml) である。この新たな

指標値は、ある走行状態（速度、加速度）を実現させるための最小燃料消費量と実際の燃料消費量の比を表しており、燃料消費の効率性を意味している。無駄な燃料消費が大きいほど、この指標値は大きな値をとる。以降では、この指標を“効率性指標”と呼ぶこととする。

(4) 効率性指標の検証

効率性指標の適用効果とLED点灯数更新周期の影響を確認するため、第3回および第4回走行を実施した。被験者は1名のみであり、前述の被験者B（表-2）である。実施日は2011年1月24日（第3回走行）、同1月31日（第4回走行）であるが、走行経路上の一部で道路工事が行われていたため、走行速度が低下するなどの影響があると思われる区間のデータは分析から除外した。

表-6に得られた実験結果を示す。まず、同じ瞬間燃料消費量でLEDを点灯させた場合であっても、点灯数更新周期が1.0秒となると、多くの指標でエコドライブが促進されていることが分かる。これは、1秒間隔でLED点灯数を更新する方が、視認性が高いためではないかと考えられる。また、効率性指標と瞬間燃料消費量(1.0sec)を比較すると、効率性指標の方がエコドライブが促進されていることが分かる。特に、効率性指標は、全4回の走行中、全ての項目でエコドライブに関する指標が高くなっている。つまり、走行時間が最も長く、燃料消費量が最も少ない結果となっている。

ただし、被験者数が1名であり、かつ走行日が異なるため、信頼性はかならずしも高くはないことに注意が必要である。より信頼性の高い知見を得るためには、多くの被験者による実験が必要である。

5. 社会実験によるエコドライブ促進効果の検証

(1) 社会実験の概要

社会実験は、豊田市の協力のもと、以下の①～⑤ような条件を満たす被験者を募集した。①豊田市内在住もしくは在勤、②パソコンを所有し自宅にインターネット環境がある、③パソコンを所有しEメールアドレスが使用

表-6 LEDインジケータ点灯方法による比較（被験者B）

	LEDなし*	瞬間燃料消費量*		効率性指標		瞬間燃料消費量	
		0.5sec	1.0sec	1.0sec	1.0sec	1.0sec	
ふんわり発進の割合	93.9%	98.8%		100%		100%	
定速走行時間の割合	70.5%	71.8%		75.4%		74.9%	
走行時間(sec)	4746	4995 (+5.2%)		5167 (+8.9%)		5150 (+8.5%)	
総燃料消費量(ml)	3933.1	3930.4 (-0.1%)		3651.7 (-7.2%)		3761.0 (-4.4%)	
燃費(km/l)	11.4	11.4 (0.0%)		12.3 (7.9%)		11.9 (+4.4%)	
平均瞬間燃料消費量(ml/sec)	0.829	0.787 (-5.1%)		0.707 (-14.7%)		0.730 (-11.9%)	
平均瞬間車速(km/h)	33.0	31.6 (-4.2%)		30.3 (-8.2%)		30.8 (-6.7%)	

()内はLED無からの変化率

*LEDなし、瞬間燃料消費量(0.5sec)はそれぞれ第1回、第2回走行データから道路工事区間を除いて計算し直した

表-7 実験フレーム(各タームの開始日, 2011年)

被験者数	有効被験者数*	第1ターム	第2ターム	第3ターム
		通常走行	エコドライブ診断のみ	エコドライブ診断 + LEDインジケータ
146	58	2/27~3/31	4/1~4/30	5/1~

*すべてのタームに参加した被験者

表-8 被験者の概要(被験者数: 58)

性別	男性: 55名, 女性: 3名
職業	会社員: 18名, 公務員・団体職員: 27名, その他・不明: 13名
年齢	20代: 4名, 30代: 14名, 40代: 7名, 50代: 25名, 60代~: 8名
エンジン	ガソリン: 19, ハイブリッド: 39
車重	~1000kg: 5, ~1500kg: 41, 1500kg~: 12
LED点灯指標	瞬間燃料消費量: 28, 効率性指標: 30

可能(携帯アドレスは不可), ④エコドライブ車載機が取り付け可能な車種, ⑤対人, 対物無制限の自動車保険に加入している。ここで, ④の条件は, 開発した車載器ではすべての車種を対象としてデータ収集することができないためである。最終的に実験に参加した総被験者数は422名であったが, 参加時期が同一の146名の被験者から得られたデータを分析対象とする(表-7)。社会実験には, その他にも276名の被験者が参加したが, 実験開始日が大きく異なること, 第2タームの期間が2週間と短いこと, エコドライブランキング等の情報が共有されていないこと等の理由で, 本研究では使用しない。

実験で予想されるエコドライブ促進効果は, 自宅等でエコドライブ診断システムを閲覧することによる情報提供の効果と, 走行中にLEDインジケータを通じて行われる情報提供の効果が存在する。そこで, これらの効果をできるだけ混同せず把握するため, 表-7に示される手順(第1ターム~第3ターム)で実験を実施した。第1タームは通常走行期間とする。ただし, エコドライブ診断システムへのログインにより, 自らが行ったトリップの走行経路, 走行距離, 走行時間, 走行速度は確認できる。第2タームからは, エコドライブ診断システムによって, トリップや日ごとの燃料消費量, 燃費, エコドライブランキングなど, エコドライブを促進させる情報が提供される。第3タームからは, エコドライブ診断システムによる情報提供に加え, LEDインジケータの点灯を開始する。

ここで, 上記のような実験手順では, LEDインジケータが運用された際には既にエコドライブ診断システムによる情報提供が行われているため, LEDインジケータ単独の効果が把握できない。しかし, 被験者によって情報提供方法の順番を入れ替える場合, エコドライブランキ

表-9a 燃料消費量の変化(走行時)

ターム	総走行距離(km)	総燃料消費量(l)	単位距離当たり燃料消費量(ml/km)
1	47,261.5	2,412.1	51.0 (-)
2	42,264.5	2,149.9	50.9 (-0.3%)
3	44,778.6	2,178.5	48.7 (-4.7%)

(-)内は第1タームからの変化率

表-9b 燃料消費量の変化(トリップ中の停止時)

ターム	総停止時間(sec)	総燃料消費量(l)	単位停止時間当たり燃料消費量(ml/sec)
1	1,502,011	182,116.7	0.121 (-)
2	1,342,798	129,089.5	0.096 (-20.7%)
3	1,380,428	121,096.6	0.088 (-27.3%)

(-)内は第1タームからの変化率

ングの計算等において, 被験者間での情報共有ができなくなる。このため, 本研究では, エコドライブ促進効果が高くなると想定した上記手順で実験を行った。

本研究では, 146名の被験者のうち, 第1~第3タームまでの全ての期間でデータアップロードがあった58名の被験者のみを対象として分析を行う。被験者の属性を表-8に示す。表より, 性別では女性が非常に少ないこと, 公務員・団体職員が約半数を占めること, 50歳代以上が半数以上を占めること, ハイブリッド車が7割近くを占めることが分かる。なお, LED点灯指標(瞬間燃料消費量 or 効率性指標)およびLED点灯数更新周期(0.5sec or 10sec)は被験者の性別と車種間で均等になるように割当てている。

(2) エコドライブ促進効果の検証

(a) 燃料消費量の変化

表-9は各タームの燃料消費量の変化を示している。ただし, LEDインジケータの直接的な効果は走行中を意図しているため, 走行時(表-9a)と停止時(表-9b)に分けて集計している。なお, 第3タームについては5月31日までのデータから算出した。

集計にあたっては, 得られたデータを120秒以上の停止により分割し, これを1トリップとしている。この際, 走行距離が200m未満のトリップは誤差の影響が大きいと考え削除した。また, トリップ中の停止時における燃料消費量の変化はアイドリングストップ行動によるものである。しかし, ごく短時間の停止においてはアイドリングストップが行いにくいと考え, ここでは5秒未満の停止は走行時データの一部として集計している。

表-9aより, 走行時の燃料消費量の変化をみると, 被験者全体では, エコドライブ診断システムにより情報提供を行った期間に0.3%, エコドライブ診断システムとLEDインジケータの両方により情報提供を行った期間で4.7%の燃料使用量が減少したことが分かる。この燃料消

表-10 単位距離当たり燃料消費量モデルの推定結果

x_i	β	$\Delta\beta_2$	$\Delta\beta_3$	$\Delta\beta_{3'}$
定数項	22.2*	2.92	1.04	-4.02
車重 (1000kg)	61.9*	-2.36	-1.24	1.96
HVダミー	-40.0*	1.61	-0.163	0.671
効率性指標ダミー	-	-	3.83*	-0.206
会社員ダミー	4.65*	-0.814	0.780	0.0323
50歳以上ダミー	3.98*	-0.319	-2.09*	1.69*

y_i	γ
走行速度 (-1乗) ((km/h) ⁻¹)	-397.7*
走行速度 (km/h)	-1.50*
走行速度 (2乗) ((km/h) ²)	0.0152*
発進回数 (回/km)	2.07*
多車線道路走行割合	-1.64*
休日ダミー	1.40*
気温の2乗 (°C ²)	0.0361*
気温 (°C)	-1.32*

サンプル数: 19,165 修正R²値: 0.693

*5%有意水準を満たす

費量削減の要因については、以降でさらに詳細に分析を行う。

表-9.bより、停止時の燃料消費量の変化をみると、第2ターム以降で20%以上の燃料消費量削減となっており、第2タームより第3タームの方が大きな値となっている。実際に、ガソリン車の1停止当たりのアイドリングストップ割合は、第1タームで0.5%であったが、第2タームでは2.4%、第3タームでは4.0%と上昇していた。これらの結果より、エコドライブ促進システムの実施によって、ドライバーはアイドリングストップを行うより行うようになったことが分かる。

次いで、各タームでの情報提供方法や、その他の種々の要因が燃料消費量に与える影響を確認するため、式(3)のような帰帰モデルを推定する。

$$F_i = (\beta + \Delta\beta_2\delta_{i,2} + \Delta\beta_3\delta_{i,3} + \Delta\beta_{3'}\delta_{i,3'})x_i + \gamma y_i + \varepsilon_i \quad (3)$$

ここに、 F_i はトリップ*i*の走行時のみから算出した単位距離あたり燃料消費量 (ml/km) , x_i はターム間で燃料消費量に与える影響が変化すると仮定する説明変数、 y_i はターム間で影響が変化しないと仮定する説明変数、 $\delta_{i,t}$ はトリップ*i*が行われたタームが第*t*ターム以降の時に1となるダミー変数であり、特に $\delta_{i,3'}$ は6月に行われたトリップで1となるダミー変数である。つまり、 $\delta_{i,2}$ は第2～第3タームで行われたトリップに対し1をとり、 $\delta_{i,3}$ は第3タームのトリップに、 $\delta_{i,3'}$ は第3タームのうち6月のトリップに1をとる。また、 β 、 $\Delta\beta_t$ 、 γ は未知パラメータ、 ε_i は正規分布に従う誤差項である。

導入した変数(表-10)について説明する。ターム間で燃料消費量に与える影響が変化すると仮定した説明変

表-11 トリップ開始時の気温 (豊田市, °C)

	平均	分散	最高	最低
第1ターム (3月)	9.2	24.2	22	-2
第2ターム (4月)	14.9	18.1	27	-1
第3ターム (5月)	19.9	12.9	31	5
第3ターム (6月)	24.2	23.8	36	14

数 (x_i) において、HVダミーはハイブリッド車で1をとるダミー変数である。効率性指標ダミーはLEDインジケータを効率性指標で点灯させた車両のダミー変数であるが、LEDインジケータは第3タームから点灯させているため、 $\delta_{i,3}$ および $\delta_{i,3'}$ のみ適用する。また、車重やHVダミーの影響がターム間で変化すると仮定した理由は、これらの変数が、観測されていないドライバーの属性と関連があると考えたためである。

次いで、ターム間で燃料消費量に与える影響が変化しないと仮定した説明変数 (y_i) について、走行速度 (トリップ中の停止時間を含めず算出) は、既往研究²²⁾を参考に-1乗から2乗までの多項式としている。走行時間多車線道路走行割合は、トリップ中にそれらの道路を走行した距離のトリップ距離に対する割合である。また、吸気温度がエンジンの燃焼効率に与える影響やエアコンディショナーの使用などを理由として、気温と燃費には関係があることが知られている。この関係は線形関係とは限らないため、ここでは2次関数として気温を説明変数に加えた。

推定結果を表-10に示す。まず、 $\Delta\beta$ を除くパラメータ β および γ の値より、導入した全ての説明変数が統計的に有意に燃料消費量に影響を与えることが分かる。特に、車重およびHVダミーの影響が強く、大半を説明できること、会社員や50歳代以上の被験者ほど普段の燃料消費量が高くなることが分かる。また、同じ走行速度でも、発進回数が多いほど燃料消費量が高くなる。また、多車線道路を多く走るほど燃料消費量が少なく、さらに休日のトリップほど燃料消費量が多くなる。

次いで、気温のパラメータから、平方完成により18.3°C (=1.32/20.0361) の気温の際に燃料消費量が最も小さくなることが分かる。ここで、実験中のトリップ開始時刻での気温の分布をまとめたものが表-11である。各タームでのトリップ開始時刻での温度は当然ばらついているが、第3ターム (5月) の気温が19.9°Cと、燃料消費量が小さくなる温度に最も近くなっている。先の分析結果も合わせると、単位距離あたり燃料消費量の平均値が第3タームで最も小さくなったこと(表-9.a)は、気温が強く影響していたためと考えられる。

さらに、パラメータ $\Delta\beta$ の推定値について、車重、HVダミー、会社員ダミーではいずれも有意ではない。しかし、情報提供による燃料消費量の変化をみると、第3タ

ーム5月の効率性ダミー ($\Delta\beta_3 = 3.83^*$) が正值として有意に推定されていることから、LEDインジケータの点灯には効率性指標を用いる方が、瞬間燃料消費量を用いるより効果が低いことが分かる。また、同様に第3ターム5月の50歳以上ダミー ($\Delta\beta_3 = -2.09^*$) が有意な負の値に推定されていることから、50歳以上の被験者においてLEDインジケータ適用の効果は高いことが分かる。ただし、第3ターム6月の50歳以上ダミー ($\Delta\beta_3 = 1.69^*$) が有意な正の値に推定されており、50歳以上の被験者へのLEDインジケータの効果 (他のドライバーと比較した効果の差) は、1か月程度でかなり小さくなってしまふことが分かる。

以上の結果より、本研究で得られたデータからは、ターム間での燃料消費量の変化には気温の変化が与える影響が強いこと、ただし、50歳以上の被験者ほど、短期的ではあるがLEDインジケータを用いた情報提供によりエコドライブがより促進されることが示された。また、LED点灯数の変更には効率性指標より瞬間燃料消費量を用いたほうが効果的であることが示された。

(b) 運転挙動の変化

エコドライブ促進システムが、燃料消費量以外の走行特性に与える影響を分析する。データはトリップごとに分割されたものを用いる。分析の対象とした走行特性は以下のとおりである。

- ① トリップ中の最高速度 (km/h)
- ② アイドリングストップ率 (%)
(= アイドリングストップ回数 / 停止回数 × 100)
- ③ ふんわり発進率 (%)
(= ふんわり発進回数 / 発信回数 × 100)

- ④ 定速走行率 (%)
(= 定速走行時間 / トリップ走行時間 × 100)

表-12に各走行特性の平均値、表-13には、情報提供方法 (第1~3ターム, 3水準), 車種 (ハイブリッドかガソリン車か, 2水準), 年齢 (50歳以上か50歳未満か, 2水準) を要因とした、3要因分散分析の結果を示す。なお、ここでの分析においては、第3タームのデータとして5月分のみを使用した。

まず、表-12より、情報提供によって、アイドリングストップ率、ふんわり発進率の上昇がみられる。ただし、最高速度は低下しておらず、情報提供が高速走行行動に与える影響は小さいようである。次いで、車種による違いでは、アイドリングストップ率が顕著であるが、これはハイブリッド車では自動的にアイドリングストップするためである。ただし、定速走行率はハイブリッド車の方が高くなっている。また、年齢による違いをみると、アイドリングストップ率、定速走行率に差がみられる。

表-13より、情報提供方法も年齢もトリップ中の最高速度への主効果は有意ではない。しかし、車種を含めたこれら要因の交互作用については有意となっており、情報提供方法による高速走行の変化は車種や年齢によって異なることが分かる。上述のとおり、アイドリングストップはハイブリッド車で自動的に行われるため車種の主効果は当然の結果であるが、情報提供方法の主効果や情報提供方法と年齢の交互作用も有意となっており、エコドライブ促進システムによってアイドリングストップが実施されること、また年齢によってその効果が異なることが分かる。さらに、ふんわり発進や定速走行についても、情報提供方法や年齢によって変化が大きいことが分

表-12 各走行特性の平均値

	情報提供方法			車種		年齢	
	情報提供なし	エコドライブ診断システム	エコドライブ診断システム+LEDインジケータ	ガソリン車	ハイブリッド車	50歳未満	50歳以上
トリップ中の最高速度 (km/h)	60.6	60.4	60.4	57.9	61.5	60.7	60.4
アイドリングストップ率 (%)	60.0	65.6	68.0	2.2	90.4	49.6	74.4
ふんわり発進率 (%)	60.5	62.1	63.5	62.3	61.9	62.9	61.4
定速走行率 (%)	67.7	67.1	68.0	64.7	68.8	65.6	68.9
サンプル数 (トリップ数)	5,134	4,545	4,702	4,240	10,141	5,811	8,570

表-13 運転挙動に関する3要因分散分析

	主効果			交互作用		
	情報提供方法	車種	年齢	情報提供方法・車種	情報提供方法・年齢	車種・年齢
トリップ中の最高速度 (km/h)		**		**	**	**
アイドリングストップ率 (%)	**	**	**		**	
ふんわり発進率 (%)	**		**	**	*	**
定速走行率 (%)	*	**	**	**	**	

*5%有意, **1%有意

かる。

以上より、エコドライブ診断システムによる情報提供によって、アイドリングストップやふんわり発進、定速走行などの運転操作を改善できること、この変化は特に50歳以上のドライバーで効果が大きいことが示された。

6. まとめと今後の課題

本研究では、ドライバーにエコドライブの実施を促すためのシステムを構築し、その効果を分析した。特に、LEDインジケータの点灯方法の検討およびその試験走行による検証を行った。また、開発したシステムを、豊田市民を対象とした社会実験に適用し、エコドライブ教育後のさらなるエコドライブ促進可能性について検証と分析を行った。

LEDインジケータの点灯方法については、瞬間燃料噴射量以外のより効果的な点灯指標を検討した。試験走行によって得られたデータから、走行中の速度および加速度に対応した最少燃料消費量をモデル化し、これを用いて、走行中の燃料消費の効率性をLEDインジケータ点灯用の指標とすることを提案した。1名の被験者による試験走行の結果からはその適用効果がみられたものの、社会実験の結果からは効果がみられなかった。このことから、LEDインジケータの点灯指標には、燃料消費量の方が直感的に理解しやすく、また効果的であることが示唆された。さらに、単位距離当たりの燃料消費量について重回帰分析を行った結果、実験時期の異なる燃料消費量の変化には気温の変化が強く影響していること、また50歳以上の被験者はLEDインジケータを用いることでエコドライブが促進されやすいことが示された。さらに、分散分析の結果から、エコドライブ促進システムによる情報提供によって、アイドリングストップやふんわり発進、定速走行などの運転操作に変化が与えられ、エコドライブが促進されることが示された。

今後の課題として、開発したシステムによるエコドライブの長期的な継続可能性を検証する必要がある。本研究でも、第3タームについて2か月間の変化を確認し、エコドライブ実施が低下してしまう可能性が示されているが、より長期的なデータを用いることで、詳細な知見を得る必要がある。さらに、エコドライブ診断システムやLEDインジケータの効果についても、提供された情報（エコドライブランキングやLEDライト点灯数など）と詳細な運転操作（アクセル開度など）の変化を分析することで、より効果的なエコドライブ促進システムの開発が可能となると考えられる。

謝辞

本研究に用いたデータは、（一社）交通工学研究会における「CO2排出量の可視化技術の開発」によるものである。ここに記して、関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) Evans, L. : Driver behavior effects on fuel consumption in urban driving, *Human Factors* 21(4), pp.389-398, 1979.
- 2) Chang, M.F. and Herman R. : Driver response to different driving instructions: effect on speed, acceleration and fuel consumption, *Traffic engineering and control* 21, pp.545-550, 1980.
- 3) Hooker, J.N. : Optimal driving for single-vehicle fuel economy, *Transportation Research Part A*, Vol.22A, No.3, pp.183-201, 1988.
- 4) El-Shawarby, I., Ahn, K. and Rakha, H. : Comparative field evaluation of vehicle cruise speed and acceleration level impacts on hot stabilized emissions, *Transportation Research Part D* 10, pp.13-30, 2005.
- 5) 加藤秀樹, 小林伸治, 近藤美則, 松橋啓介 : 一般道における最高速度抑制のエコドライブ効果に関する評価, 第 29 回交通工学研究発表会論文集, pp.209-212, 2009.
- 6) Larsson, H. and Ericsson, E. : The effects of an acceleration advisory tool in vehicles for reduced fuel consumption and emissions, *Transportation Research Part D* 14, pp.141-146, 2009.
- 7) Wu, G., Boriboonsomsin, K., Zhang, W.B., Li, M. and Barth, M. : Energy and Emission Benefit Comparison of Stationary and In-Vehicle Advanced Driving Alert Systems, *Transportation Research Record* 2189, pp.98-106, 2010.
- 8) Fonseca, N., Casanova, J. and Valdes, M. : Influence of the stop/start system on CO2 emissions of a diesel vehicle in urban traffic, *Transportation Research Part D* 16, pp.194-200, 2011.
- 9) van der Voort, M., Dougherty, M.S. and van Maarseveen, M. : A prototype fuel-efficiency support tool, *Transportation Research Part C* 9, pp.279-296, 2001.
- 10) 鹿島茂, 横田久司, 国領和夫, 柴田直俊 : 燃料消費情報の提供による燃料消費量削減効果の分析, *交通工学*, Vol.40, No.3, pp.76-83, 2005.
- 11) 竹内雄亮, 新田保次, 松村暢彦, 吉田雄亮, 藤江徹 : 車載機を用いたエコドライブ支援の効果, *土木計画学研究・論文集*, Vol.22, No.2, pp.305-314, 2005.
- 12) 新田保次, 藤岡太造 : 車載機を用いたエコドライブ支援による貨物自動車の燃費・環境改善および安全性向上効果の分析, *土木学会論文集 D*, Vol.65, No.3, pp.293-302, 2009.
- 13) Servin, O., Boriboonsomsin, K. and Barth, M. : An Energy and Emissions Impact Evaluation of Intelligent Speed Adaptation, *Proceedings of 2006 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, 2009.
- 14) Barth, M. and Boriboonsomsin, K. : Energy and emission impacts of a freeway-based dynamic eco-driving system, *Transportation Research Part D* 14, pp.400-410, 2009.
- 15) Zarkadoula, M., Zoidis, G. and Tritopoulou, E. : Training

- urban bus drivers to promote smart driving: A note on a Greek eco-driving pilot program, Transportation Research Part D 12, pp.449-451, 2007.
- 16) af Wählberg, A.E. : Long-term effects of training in economical driving: Fuel consumption, accidents, driver acceleration behavior and technical feedback, International Journal of Industrial Ergonomics 37, pp.333-343, 2007.
 - 17) Beusen, B., Broekx, S., Denys, T., Beckx, C., Degraeuwe, B., Gijssbers, M., Scheepers, K., Govaerts, L., Torfs, R. and Panis, L.I. : Using on-board logging devices to study the longer-term impact of an eco-driving course, Transportation Research Part D 14, pp.514-520, 2009.
 - 18) Brundell-Freij, K. and Ericsson, E. : Influence of street characteristics, driver category and car performance on urban driving patterns, Transportation Research Part D 10, 213-229, 2005.
 - 19) Stillwater, T. and Kurani, K. : Field Test of Energy Information Feedback, Transportation Research Record 2252, pp.7-15, 2011.
 - 20) Wu, C., Zhao, G. and Ou, B. : A fuel economy optimization system with applications in vehicles with human drivers and autonomous vehicles, Transportation Research Part D 16, pp.515-524, 2011.
 - 21) エコドライブ普及連絡会 : エコドライブ 10 のすすめ, http://www.ecodrive.jp/eco_10.html.
 - 22) 三輪富生, 尾形信一, 山本俊行, 森川高行 : 低コストプローブカーデータを用いた道路交通流からの二酸化炭素排出状況の把握, 第 30 回交通工学研究発表会論文集, pp.141-144, 2010.
 - 23) 大城温, 松下雅行, 並河良治, 大西博文 : 自動車走行時の燃料消費率と二酸化炭素排出係数, 土木技術資料, Vol.43, No.11, pp.50-55, 2001.