

ドライバーの認知・判断・操作プロセスを考慮した自由走行速度プロファイルの推定

塩見 康博¹・梅野 紘斗²

¹正会員 立命館大学准教授 理工学部環境システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)
E-mail: shiomi@fc.ritsumei.ac.jp

²非会員 元・立命館大学 理工学部環境システム工学科 (同上)

地形的要因のため、我が国の高速道路ではサグやトンネルなどの道路線形・道路構造に起因する微少な速度低下を原因とする渋滞が頻発する。渋滞発生時には交通事故リスクが上昇することも明らかとなっており、速度変動を抑制し移動の効率性を向上させる道路設計指針の検討の必要性は高い。また、これらの点を解決するためには、道路構造特性がドライバーの速度調整に及ぼす影響を適切に把握することが重要となる。そこで本研究では、モバイル型運転挙動計測システムを用い、車間距離、車速、アクセルスロットル開度などのデータを収集する。それに基づき、ドライバーの道路線形に対する認知・判断・操作プロセスをモデル化し、線形に対応した自由走行速度プロファイルを推定する手法を提案する。

Key Words : free speed profile, driving behavior, road geometry, human-machine system

1. はじめに

地形的要因のため、我が国の高速道路ではサグやトンネルなどの道路線形・道路構造による微少な速度低下を原因とする渋滞が頻発する。国土交通省の試算では、都市間高速道路における渋滞損失時間は1.9億人・時間(年間で約10万人分の労働力に相当)と推計されており、多大な経済的損失を被っている。また、渋滞発生時には交通事故リスクが上昇することも明らかとなっており、速度変動を抑制し移動の効率化に寄与する道路設計指針の検討の必要性は高い。一方、モータリゼーション2.0とも謳われる次世代の交通社会を考えた場合、自動走行車両のエネルギーマネジメントや乗員の安全・安心確保の観点からも、道路構造に対する適切な加減速制御を行うアルゴリズムの開発が求められている。これらの点を解決するためには、道路構造特性がドライバーの速度調整に及ぼす影響を適切に把握することが重要となる。

これまでも道路構造が自由走行速度に及ぼす影響を分析した事例は多く存在する¹⁾²⁾³⁾⁴⁾が、それらの多くは定点観測データに基づくものであり、車両感知器設置地点周辺の道路影響しか考慮されていないのが現状である。また、近年では、ETC2.0などによるプローブデータを用い、連続的な走行速度の変動要因を分析することも可能となりつつある。しかしながら、それらのデータでは、当該車両の挙動は把握できたとしても、周辺の交通状況は未知となる。そのため、例えば自由走行速度を分析するのであれば、他のデータソースを用いて交通量の少な

い時間帯のみを分析対象とするなど、大きな仮定を設けた上で分析を進める必要が生じる。

そこで本研究では、可搬型、かつ一般的な車両に設置可能なモバイル型運転挙動計測システムを用いた走行データを収集し、それに基づいて高速道路における自由走行時の速度変動要因を特定・モデル化し、自由走行速度プロファイルを推定する手法を構築する。当該の計測システムでは、先行車両との車間距離、緯度・経度、アクセルスロットル開度などのデータが1秒間隔で収集される。そこで、車間距離の情報を用いて当該車両が自由走行状態にあるデータのみを選別し、ドライバーのアクセル操作挙動、およびそれに伴って生じる車両への加減速状況について分析を行う。また、道路線形・道路構造との関係性を把握することにより、線形要因に対応した自動走行速度プロファイルを推定する。

なお、本稿では、提案するモデルの概要と採用するアプローチの意義、調査概要、および取得データの基礎分析結果のみをまとめる。学会時に、詳細なモデル推定結果などについて報告する予定である。

2. 認知・判断・操作系の運転挙動モデル

(1) モデルの概要と方法的意義

自動車はHMI (Human-Machine Interface) の一種として捉えられる。ドライバーは周辺状況や自車両の走行状態を認知し、車両をどのような状態にすべきかを判断した上で、アクセル・ブレーキ・ハンドルなどの操作を行う。

それが、自動車の動力・操舵として出力され、自車両の状態が更新される。これらのプロセスがフィードバックループとして繰り返される（図-1 参照）。

すなわち、個々の車両の運動を適切に捉えるためには、ドライバーの認知・判断・操作プロセスを明示的に考慮したモデル化のアプローチが有効であると考えられる。とりわけ、近年では Connected な環境での個別ドライバーへの情報提供⁶⁾や、あるいは、走光型視線誘導灯⁷⁾にみられるようなドライバーの認知に影響を及ぼすような交通流マネジメント方策が実用化されつつある中、ドライバーの運転に関わる一連のプロセスがマクロとしての交通流に及ぼす影響を捉えることが可能なモデル体系の重要性は高まりつつあると言えよう。また、村上ら⁸⁾が明らかとしたボトルネック容量の経年的低下傾向の要因の一つとして、高齢ドライバー、軽自動車・エコカーの増加などが挙げられるが、それらが交通流に及ぼす影響を議論するためにも、各種影響を分離して捉える分析アプローチが必要となる。

(2) 自由走行時運転挙動モデルの概要

高速道路を自由走行する際、ドライバーは走行区間の道路線形や視距、付帯構造物の存在などを考慮した希望速度を設定し、それを目標として、実走行速度が低い場合にはアクセルを踏み込み、走行速度が高い場合にはアクセルを緩めるといった挙動を取るものと考えられる。それが、自動車の動力として出力され、重力や空気抵抗・転がり抵抗などの力学的影響を受け、加速度が決定され、走行速度が更新されることとなる。このプロセスの概念図に図-2 に示す。

このように本研究で構築するモデルは、アクセル開度を調整する過程を記述する「アクセル開度モデル」と、アクセル操作がエンジン出力を決定し、道路線形や走行状態に起因する走行抵抗との関係で加速度が調整される過程を記述する「加速度モデル」によって構成されると仮定する。各プロセスは以下の通りに記述される。

速度の更新

$$v(t) = v(t-1) + a(t-1) \tag{1}$$

アクセル開度モデル

$$A(t + \Delta t) = f(v(t) - \hat{v}_{des}(t) | \theta, \rho, \Sigma) \tag{2}$$

加速度モデル

$$a(t + \Delta t) = g(A(t), v(t) | \theta, \mu, \lambda, \varsigma) \tag{3}$$

ただし、それぞれ以下を表す。

- $v(t)$: 時刻 t における走行速度
- $a(t)$: 時刻 t における加速度
- $A(t)$: 時刻 t におけるアクセル開度
- $\hat{v}_{des}(t)$: 時刻 t における希望走行速度（潜在変数）
- θ : 道路勾配要素ベクトル
- ρ : 曲率要素ベクトル

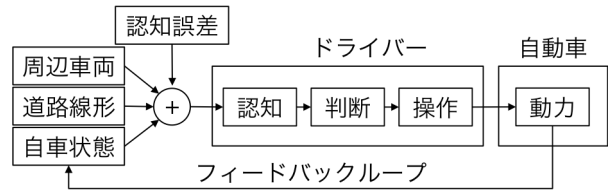


図-1 自動車運転に関わるフィードバック・プロセス

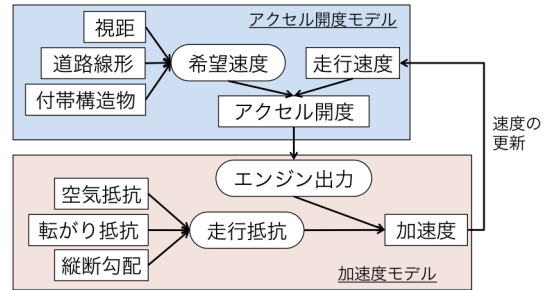


図-2 自由走行時運転挙動モデルの概要

- Σ : 道路構造物要素ベクトル
- μ : 空気抵抗係数
- λ : ころがり抵抗係数
- ς : 車両諸元ベクトル

(3) 既往研究と本研究の位置づけ

ドライバーの認知・判断に関しては交通心理学の分野で数多くなされている。また、追従走行状態における認知・判断・操作プロセスのモデリングは、これまでも多様な研究蓄積がある。これらの多くは、ドライビングシミュレータや実験車両を用いた走行実験よりデータが収集されることが多い。実験条件による差異を議論するには差し支えはないと考えられるが、ドライバーの日常的な運転環境とは異なり、必ずしも通常時の運転挙動が観測されているとは限らないという疑義が生じる。それに対して、本研究で用いるモバイル型運転挙動計測システムでは、ドライバーが利用する車両に容易に設置することができ、日常的な運転挙動を計測できるという点で利点がある。これは、ドライバーへの刺激が少ない自由走行時の運転挙動を計測するためには、極めて重要なことであると考えられる。

加えて、本研究では、これまでに追従走行時の運転挙動のモデリングにも適用される枠組みを自由走行時の運転挙動のモデリングに活用するという点で、新規性がある。これにより、自由走行～追従走行にいたるまで、シームレスなモデル化が可能となる。例えば、高速道路サグ部での渋滞現象を分析する場合、従来のアプローチであれば、自由走行している車群先頭車両の速度低下を条件とする必要があった。対して、本研究で提案するモデルをマイクロ交通流シミュレーションに実装することにより、自由走行車両の速度低下現象も含めて再現すること

表-1 被験者属性と取得データ数

id	性別	年齢層	車種	調査期間	走行区間	上り区間		下り区間	
						有効数	欠損数	有効数	欠損数
1	男	40代	ステップワゴン	2015/11/13 - 2015/12/4	三田西IC～福知山IC	10	0	9	1
2	男	50代	セレナ	2015/12/4 - 2015/12/25	三田西IC～福知山IC	11	1	10	2
3	男	40代	ビッツ	2015/12/4 - 2015/12/25	丹南篠山IC～福知山IC	0	12	0	12
4	男	40代	エクストレイル	2015/12/4 - 2015/12/25	三田西IC～福知山IC	8	1	9	1

が可能になると考えられる。

3. 調査方法とデータの概要

(1) モバイル型運転挙動計測システム

本調査では、(株) トクテム製 CAN データロガー、および(株) カーメイト製の iPhone 用のドライブレコーダーアプリを用いる。CAN データロガーからは GPS データが 1 秒毎、車速、エンジン回転数、スロットル開度などの車両状態に関するデータが 0.1 秒間隔で収集される。また、ドライブレコーダーアプリからは記録日時、緯度・経度・高度、車間距離などのデータが 1 秒間隔で収集される。いずれのデータも GPS 時計をベースに記録されるため、両データを同期させることで、周辺道路状況と自車両の状況を併せて把握することができる。

本システムは OBD-II ポートを有する車両であれば容易に設置が可能であり、煩雑な操作を行うことなく、データの取得が可能となる。そのため、従来の専用の計測車両を用いた調査に比べて、格段に利用しやすく、とりわけ、被験者が普段利用する車両を用いた調査が可能であるため、日常的な運転挙動が計測できるものと考えられる。

(2) 分析対象区間と道路線形のデータ化

分析対象区間を選定するにあたり、交通量が比較的少ない区間として、都市間高速道路の舞鶴若狭自動車道の三田西 IC-福知山 IC 間を対象とした。当該区間の全長エリア・パーキングエリア、4 箇所 IC・JCT が存在する。全区間において、設計規格は第一種第 3 級 A、設計速度は 80km/h、最小曲線半径は $R=400$ 、最急縦断勾配が 5% となっている。

対象区間の道路線形データを整理するにあたっては、路線図面にに基づき、曲率半径 R 、クロソイドパラメータ A 、および縦断勾配 θ を 25m 精度で読み取った。その上で、モバイル型運転挙動計測システムから取得される GPS 情報と統合することにより、走行データと道路線形データを併せて分析できるデータベースを構築した。

(3) 調査の概要

本研究では上述の対象区間を通勤目的で日常的に利用するドライバー 4 名を被験者として募り、自家用車両にモバイル型運転挙動計測システムを搭載し、走行データを収集した。被験者の概要、および取得データ数を表-1 に整理する。表中、id3 の被験者については、機材の不調のため、データが収集できなかった。また、その他の被験者でも、機材の操作ミス、その他の要因のため、データが取得されていないケースが存在する。しかしながら、総計で 57 件の走行データが収集されており、以降の分析には特段影響はないものと判断した。

4. 基礎分析結果

(1) 自由走行状態の抽出とデータクレンジング

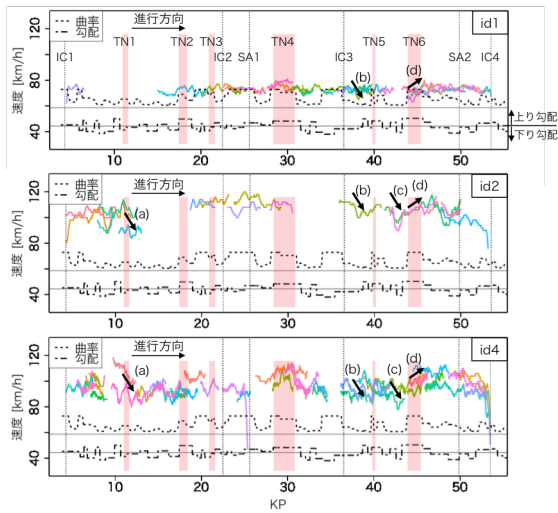
ドライブレコーダーアプリにより計測された車間距離データを用いて、本研究での分析対象とする自由走行状態を判別する。ただし、カーブやクレストなど見通しの悪い区間では前方車両の識別ができないなど、必ずしも 100% の精度で前方車両を認識・車間距離を計測できるわけではない。そこで、車間距離計測した時点から前後 5 秒間は先行車両が存在すると見なして分析対象外とした。その上で 60 秒間以上連続して先行車両が認識されていない状況を自由走行状態と定義し、分析対象とした。

また、CAN データから収集された各データはランダム誤差を含むため、変動傾向を明確化するため、10 秒間隔の移動平均を取り平滑化処理を行った。

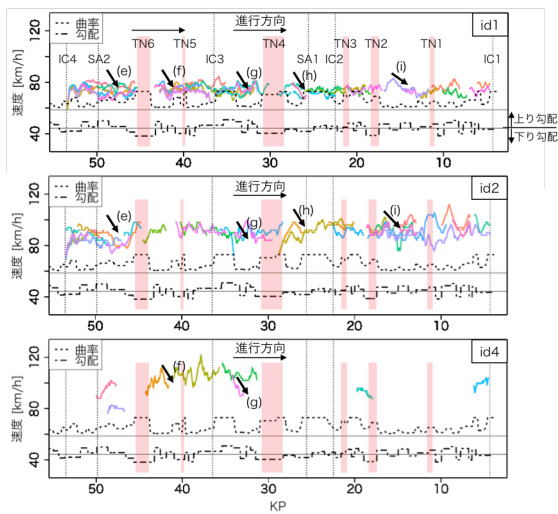
(2) 自由走行速度の変動傾向

図-3 に被験者毎の自由走行速度の変動を方向別に整理したものを示す。図中、曲線の色の違いは観測日時が異なることを表している。言い換えると、同じ色で描かれた曲線は同一トリップ中の速度変動を表している。また、図中には点線で曲線半径、破線で縦断勾配、縦方向の点線で IC・JCT・PA/SA の位置、そしてピンク色のハッチでトンネルをそれぞれ示している。

それぞれのトリップ時間帯は被験者により異なり、id1 の通勤トリップは 8 時台、帰宅トリップは 17 時～22 時台、id2 の通勤トリップは 7 時台、帰宅トリップは 14

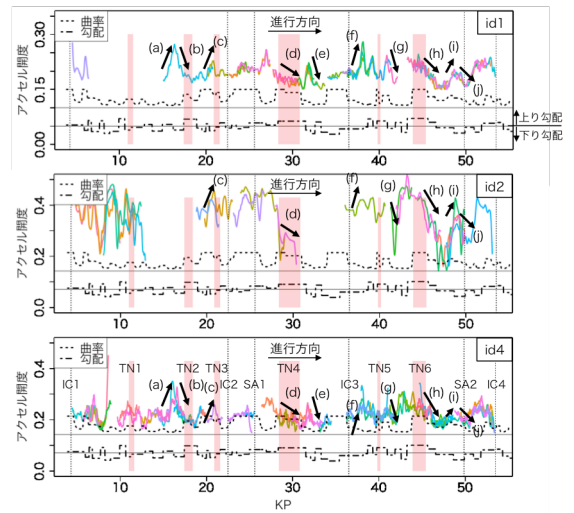


(a) 下り方向 (通勤時トリップ)

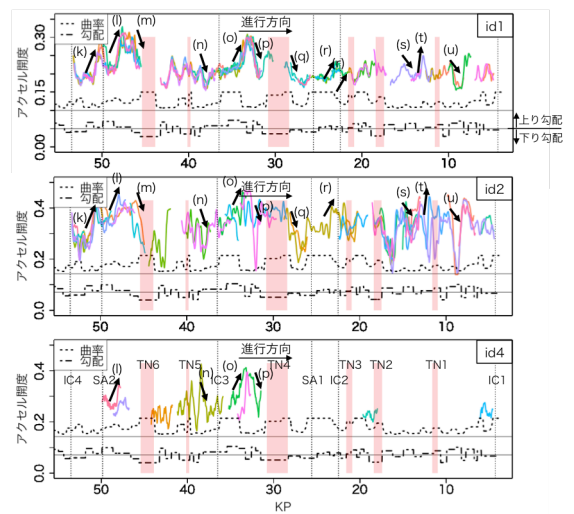


(b) 上り方向 (帰宅時トリップ)

図-3 被験者別の自由走行速度の変動



(c) 下り方向 (通勤時トリップ)



(d) 上り方向 (帰宅時トリップ)

図-4 被験者別のアクセルスロットル開度の変動

時～19 時台, id4 の通勤トリップは 6 時～7 時台, 帰宅トリップは 19 時～21 時台に行われている。

図より, 被験者による自由走行速度の差異は顕著であること, 自由走行時の速度の高い id2 の通勤時トリップ, id4 の帰宅時トリップでは自由走行状況の観測数が少ないことが分かる。また, 同一被験者・同一時間帯・同一地点でのトリップであっても, id4 の通勤時トリップや id2 の帰宅時トリップでは速度の差が大きいことが伺える。これは, 走行車線を走行中に前方車両を視認し, 追越車線に車線変更して前方車両を追い越すために加速した結果である可能性が考えられるが, 今回収集されたデータからは確認することができない。

次に, 被験者に共通する地点毎の速度変動傾向に着目すると, 図中の(a)～(i)の箇所にて, 地点に依存して速度低下, あるいは上昇している様子が読み取れる。これより, 必ずしも上り勾配部, あるいは急カーブ部で速度が低下するというわけでは無く多様な要因が自由走行速度の決定の影響している可能性が伺える。

(3) アクセルスロットル開度の変動傾向

図-3に被験者毎の自由走行速度の変動を方向別に整理したものを示す。これより, 自由走行速度の変動との比較で, 同一被験者・同一地点におけるアクセル開度値の分散が比較的小さいことが読み取れる。すなわち, ドライバーのアクセル操作は自由走行状態にある限りは地点依存性が高いと言える。

次に被験者間の比較を行う。アクセル開度の分布域が被験者によって大きくことなり, id1は0.15～0.30, id2は0.15～0.50, id4は0.15～0.35となっている。これは車種に依存するものであると考えられ, モデル化の際に考慮する必要がある。また, 被験者によらず共通したアクセル開度の変動傾向が見られる地点を図中(a)～(u)に示した。これより, 自由走行速度の変動との比較で, 共通した変動傾向が確認できる地点が多く存在することが分かる。特に, 上り勾配区間の終端部でアクセルスロットル開度が急上昇し, 曲線半径が急激に低下する地点などで急減少する傾向が

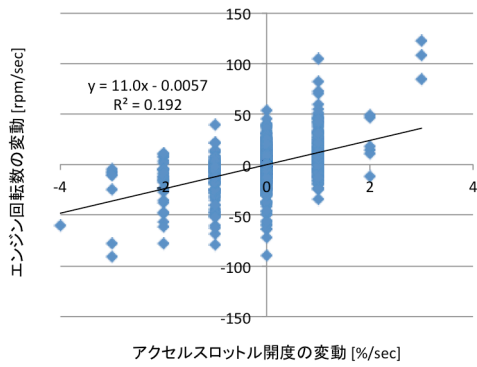


図-5 アクセルスロットル開度の変化とエンジン回転数の変化の関係

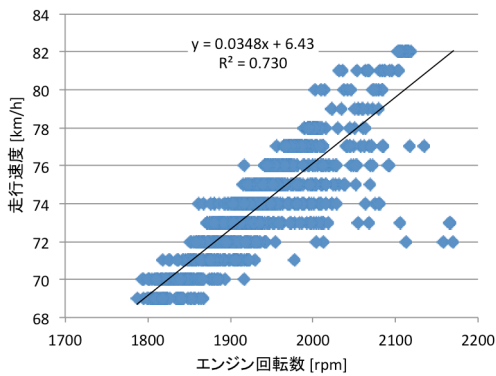


図-6 エンジン回転数と走行速度の関係

読み取れる。

(4) アクセルスロットル開度と速度変動の関係

最後に、アクセルスロットル開度と速度変動との関係を整理する。図-5に1秒毎のアクセルスロットル開度の変化率 [%/sec]とエンジン回転数の変化率 [rpm/sec]の関係を、図-6にエンジン回転数と走行速度の関係を示す。これより、ばらつきは存在するものの、いずれも線形の相関性を持つことが分かる。

すなわち、ドライバーがアクセルを踏み込む／緩めることにより、それがエンジン回転数の増加／減少につながり、その結果として走行速度が決定されるという自動車の機構が概ね線形性を持って記述されることが分かる。

5. おわりに

本稿では、高速道路における自由走行速度プロファイルを推定することの意義、認知判断操作系のモデリングアプローチを採用して自由走行時の速度調整過程を表現することの有用性と展望を述べた。その上で、前方車両との車間距離と CAN データ、GPS データを収集するモバイル型運転挙動計測システムを用いた走行調査の概

要を述べた。その上で、取得されたデータの基礎分析結果として、自由走行速度プロファイルのモデル化に資する種々の傾向を整理した。

学会発表時には、具体のモデル構造、およびモデル推定結果を併せて報告する予定である。

謝辞

本研究を実施するにあたり、一般社団法人 日本デジタル道路地図協会の研究助成をいただきました。また、データ収集にあたっては西日本高速道路(株)、西日本高速道路ファシリティーズ(株)、住友電工システムソリューション(株)、ドライブレコーダーアプリの開発にあたっては(株)カーメイトのご協力を賜りました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Fitzpatrick, K. and Collins, J. M.: Speed-Profile Model for Two-Lane Rural Highways. Journal of Transportation Research Board: Transportation Research Record Vol. 1737, TRB, pp.42-49, 2000.
- 2) Ottesen J.L., Krammes, R.A.: Speed-Profile Model for a Design-Consistency Evaluation Procedure in the United States. Journal of Transportation Research Board: Transportation Research Record Vol. 1701, TRB, pp. 76-85, 2000.
- 3) 新井寿和, 割田博, 桑原雅夫: 都市高速道路における自由流速度への影響要因に関する研究, 交通工学 Vol. 43, No. 5, pp.37-47, 2008.
- 4) 洪性俊, 大口敬: 多車線高速道路における統合型速度推定モデル, 土木学会論文集 D3 (土木計画学) Vol. 67, No.3, pp. 244-260, 2011.
- 5) Rothery, R.W.: Car Following Models (Chap. 4) in Revised Monograph on Traffic Flow Theory (eds. Nathan Gartner, C.J. Messer, and A.K. Rathi), Special Report by the Transportation Research Board of the National Research Council, 2005.
- 6) Farah, H., Koutsopoulos, H.N., Saifuzzaman, M., Kölbl, R., Fuchs, S., and Bankosegger, D.: Evaluation of the Effect of Cooperative Infrastructure-to-Vehicle Systems on Driver Behavior. Transportation Research Part C Vol. 21, No.1, pp. 42-56, 2012.
- 7) 亀岡弘之, 小根山裕之, 渡部義之, 櫻井光昭: 路側発光体の動的点滅制御による渋滞発生後の渋滞緩和に関する効果検証, 高速道路と自動車 Vol. 58, No.2, pp. 28-36, 2015.
- 8) 村上友基, 井料隆雅, 中田諒, 萩原武司: 車両検知器データによる交通容量の長期変動モニタリング, 土木計画学研究発表会講演集 CD-ROM Vol. 51, 2015.

(2016. **. ** 受付)

ESTIMATING FREE SPEED PROFILES ON FREEWAYS BASED ON DAILY DRIVING
BEHAVIORAL DATA: PERCEPTION-DECISION-OPERATION SYSTEM APPROACH

Yasuhiro SHIOMI and Hiroto UMENO