

追従時の相対速度変動に着目した 走光型視線誘導灯の影響分析

田平 優太¹・塩見 康博²

¹学生会員 立命館大学大学院 理工学研究科 環境都市専攻 (〒525-8577滋賀県草津市野路東1-1-1)
E-mail: rd0046vi@ed.ritsumei.ac.jp

²正会員 立命館大学准教授 環境都市工学科 (〒525-8577滋賀県草津市野路東1-1-1)
E-mail: shiomi@fc.ritsumei.ac.jp

近年、走光型視線誘導灯 (PML) の運用による渋滞軽減効果が報告されつつあるが、その詳細なメカニズムは把握されておらず、PMLが前方車両に追従する車両の動きに与える影響は不明確な点が多い。そこで、本研究ではPMLが設置された阪神高速神戸線深江サグを対象に実道追従走行実験を行った。得られたデータからPMLの運用条件別による相対速度変動に関する定量分析を行った上で、実際とドライバーの認知による相対速度の乖離を考慮した追従挙動モデルを構築し、パラメータを推定した。その結果、定量分析からPMLがドライバー全体にて追従挙動の均一化に寄与すること、追従挙動モデルによる分析から、PMLの運用により相対速度変化の認知感度が高まり、シミュレーションにより追従車両群の対象区間の通過時間がやや短縮することが確認された。

Key Words : *pace-maker light, car-following behavior, sag, relative speed, cognition*

1. はじめに

高速道路の渋滞は深刻な社会問題の一つである。国土交通省によると、渋滞損失時間に関して都市間高速道路のみで年間 2 億人・時間とされており、年間約 10 万人分の労働力に相当する¹⁾。中でも、道路の下り坂から上り坂への遷移区間であるサグは主要な渋滞の原因となっている。近年、サグをボトルネックとして発生する渋滞に対するソフト的な対策として走光型視線誘導灯 (以下 PML (Pace-maker Light) と表記) が提案されている。PML とは、高速道路沿いに設置されている LED 灯を順々に点滅させ、車と併走する光の流れを作り出すことにより、ドライバーの速度感覚をコントロールさせ、下り坂における速度超過の抑止する効果や上り坂やサグ部で速度の回復を促す効果を期待するシステムである²⁾。

当該システムにより、車両感知器とビデオ映像を用いて速度変化と車群構成台数の分析を行うことで、PML 点灯時には走行車線において“車群がバラける”、“車群間の速度差が小さくなる”といった現象が、また追い越し車線では“急速な車群化の抑制”、“車群間の速度差が小さくなる”といった現象が確認され、交通渋滞要因の緩和につながる可能性が示唆されている³⁾。また、塩見・北村⁴⁾は、PML 導入による渋滞発生確率のパーセ

ンタイル値、捌け交通量の変動に着目した分析を行った。その結果、PML の導入により、渋滞発生確率 5% タイル値が漸減傾向でかつ捌け交通量の平均値が改善することを明らかとした。

実際この PML を運用させることで東京湾アクアラインでは、自由流においてピーク 15 分間交通流率の増加、渋滞流においては渋滞発生後走行速度の増加が報告され⁵⁾、また、阪神高速では、PML が設置後、点灯パターンを考慮することで、渋滞時間が 6-7 割、渋滞量が約 7 割削減されたと報告され⁶⁾、PML には一定程度、渋滞の緩和に寄与することが確認されている。

一方、微視的には井垣・内田⁷⁾は、PML 設置区間を走行したドライバーのデータを基に運転挙動に特徴を持たせ、同じ特徴のパラメータをもつ車両を連続的に追従走行させるシミュレーションを行った。その結果、目標車間距離が小さいドライバーが連なると渋滞量が小さくなり、捌け交通量が大きくなることや PML の影響が大きい、もしくは先行車両の影響が小さいドライバーが連なると渋滞量が小さくなることが明らかとなった。田平・塩見⁸⁾は、阪神高速道路 3 号神戸線より深江サグを対象とした実道追従走行実験を行い、ドライバーの追従挙動の変化について、主に PML 導入による車間距離の変化に着目して分析した。その結果、個人差はあるが、PML

導入により車間距離に差異が生じること、とりわけ PML に合わせたいと感じたドライバーは交通容量が増大すること、追従走行状態で追突のリスクは上がらず、走行安全性が担保されていることを確認した。

本研究では、PML が設置されている高速道路において実道追従走行実験を行い、PML の運用条件別の相対速度変動の差異に着目した分析を行う。田平・塩見⁸⁾は、PML 導入による車間距離の差異を示唆したが、相対速度変動の推移の変化には、言及していない。車間距離変化が相対速度変化に起因する可能性があり、ドライバーの中には、追従実験的环境下では、追従挙動を決定する要因として車間距離ではなく、前方車両の速度差に依存する可能性もある。そのため、PML 導入による相対速度変動に着目した分析を行う意義は少なくない。

そこで、本研究では、相対速度変動の定量分析を行った上で、客観的な数値で表される相対速度とドライバーが認知するとされる相対速度の乖離を考慮した追従挙動モデルを用いた分析を行う。従来のモデルでは、観測された相対速度を入力するが、相対速度が微小な場合などは、ドライバーがその速度差を認知しているとは限らず、現実的とは言い難い。特に、追従実験环境下では、追従義務ゆえに微小な相対速度を観測することが想定され、ドライバーが認知する相対速度の変化は、運転挙動を決定する大きな要因と成りうる。本研究では、追従挙動モデルベースにおいて、推定されたパラメータから、PML が設置されたことによる相対速度変化に対する認知の差異を検証した上、走行シミュレーションを行い、PML 運用の有用性について整理することを目的とする。

本稿の構成は以下の通りである。まず、本章では研究の背景、既存研究を整理するとともに、本研究の目的を述べた。第 2 章では、実道追従走行実験およびデータ概要、第 3 章では、相対速度の定量分析、第 4 章では、モデルベースにおける分析、第 5 章では、本研究のまとめを述べる。

2. 実道追従走行実験の概要

(1) 実道追従走行実験の概要

分析対象区間は、阪神高速 3 号神戸線より深江サグ (20.5kp~19.5kp) とする。当該区間には、2015 年 6 月より、サグ渋滞の緩和を目的として PML が導入されている。実験は、2015 年 7 月 13 日~7 月 21 日と 9 月 10 日~9 月 17 日の各々平日 5 日間で、各日程で前半 (午前 7 時頃) と後半 (午前 10 時頃) に分け、ピーク時間帯を避けるように、同一被験者を対象に実道追従走行実験を行った。被験者は、阪神高速を月数回以上利用し、運転歴 10 年以上の 30~60 代男性 20 名とした。図-1~3 は被験者

属性である。一人当たり、魚崎 IC→深江サグ→西宮 IC の経路で、PML なし、PML 運用速度が 60km/h, 80km/h の状況下で走行車線を 3 回走行した。図-4 において、青の線は走行経路、黒の矢印は追従走行実験の進行方向、赤の線は PML 設置区間を示している。また、順序効果を排除するため、3 回走行する上での各被験者の PML 点灯の順序に関しては、ランダム化した。本研究の実験では車両 2 台を使用し、走行車線において先行車は、実験実施者が制限速度の 60km/h を維持して運転し、追従車には被験者が乗り、先行車両に追従するように指示されている。ただし、この 60km/h は、スピードメーターで

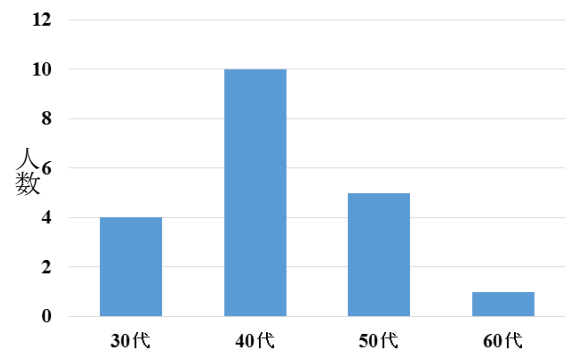


図-1 被験者属性 (年代別)

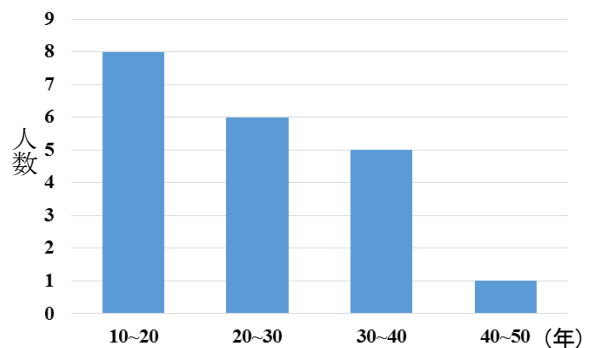


図-2 被験者属性 (運転歴)

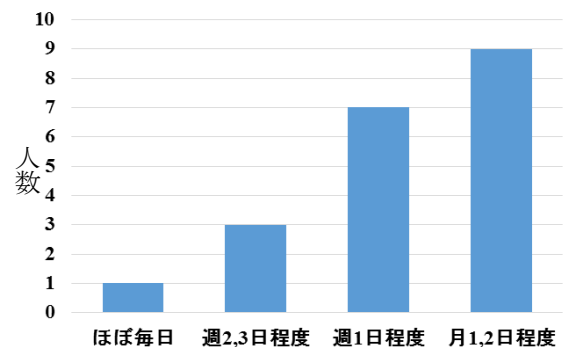


図-3 被験者属性 (神戸線利用頻度)



図-4 走行経路概要図

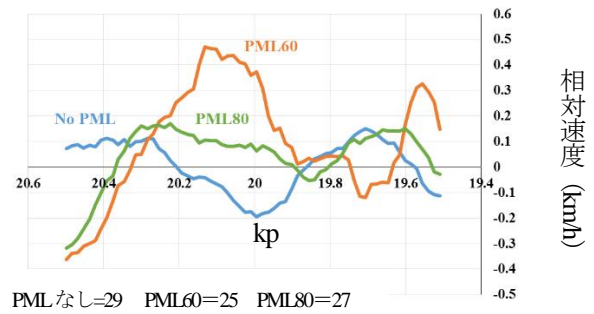


図-5 相対速度推移結果 (全サンプル平均)

表-1 エラー除去前後の ID 数

		エラー除去前のID数	エラー除去後のID数 (車間推定可能数)
PMLなし	7月	16	16
	9月	14	13
PML60km/h	7月	16	14
	9月	14	11
PML80km/h	7月	16	14
	9月	14	13

目視したものであり、実際の速度とは、厳密に一致するとは限らない。また、PML は周囲が明るい状況でも視認性は十分確保されており、追い越し車線には、他の車両が走行している状況にて実験を行った。なお、各試行で追い越し車線の交通量や速度は同一ではないが、非渋滞時のみを対象とし、渋滞時の走行データは除外した。

(2) データの概要

相対速度、車間距離等を推定するデータとして、実験に使用する車両2台に記録されたGPSデータを使用する。GPS データには1秒刻みで車両の位置が記録されており、同時刻における先行車両の位置から追従車両の位置を差し引くことで車間距離、1秒ごとにおける位置の変化により、車両の速度を計測することが可能である。ただし、GPS データは誤差を含むため、マップマッチングを行うことでGPS点列を当該リンクに吸着させ、車両位置の修正を行った。さらに、画像データ等と照合し、車両位置の更なる補正を図った。その詳細、エラーデータの取り扱いについては、田平・塩見⁸⁾の論文を参照されたい。なお、エラー除去前後のID数は、表-1の通りである。

3. 実道追従走行実験における相対速度定量分析

(1) データクレンジング

本節では、実道追従実験で使用された2車両に搭載されたGPSデータを用いて各々走行速度を推定し、その速度差から求められる相対速度の推移結果を全般的な傾

向として整理する。1.で言及した通り、田平・塩見⁸⁾は、車間距離の変化に着目した分析にフォーカスしており、PML がドライバーの相対速度変化に与える影響に対して知見を得られていない。故に、PML 導入により相対速度の安定化などの可能性も考えられるため、本章の分析意義は少なくない。

本研究では、相対速度を「先行車速度-追従車速度」と定義し、分析対象区間を車間距離分析と同様 PML が設置されている20.5kp~19.5kpとした。2車両共にGPSデータには、1秒ごとに車両の位置が記録されているため、位置と時間の関係から、相対速度を算出することが可能であるが、GPS のデータをそのまま用いて相対速度を算出すると、推移の変動幅が過大となり、現実的な動きと乖離した結果となる。そのため、GPS データで算出された相対速度推移について、カルマンスムージングを適用した。GPS で得られたデータの推移には、観測誤差と状態誤差の2種類が含まれると考えられる。そのため、最尤推定法を用いて、この2種類の誤差が最も小さくなるように値を決定し、スムージングの処理を行った。

(2) 平均値でみた相対速度の推移傾向

スムージング処理後の相対速度推移について7月、9月合わせて推定可能であったデータの平均をPMLの有無及び運用速度別で算出した。結果は図-5の通りである。図-5からPML60km/hでは20.1kp付近で他の条件に比べて相対速度の変動幅が顕著に大きく、また、19.9kpより下流側ではより小刻みに推移していることが確認できる。一方、PMLなしとPML80km/hを比較して、PML60km/hほど顕著ではないものの、変動幅の違いや推移の周期にずれがあり、安定した走行であることが確認できる。この結果から、全体の平均にて、PMLの有無及び運用速度が異なると相対速度の変動幅、周期幅にて傾向の違いが発現する可能性が指摘できる。

(3) 個人単位での相対速度変動幅と周期性の整理

全般的な傾向として、PMLの有無及び運用速度別で相対速度の推移傾向に違いあることを確認した。本節で

は個人単位での相対速度変動の分析を行い、定量的に評価する。具体的には、対象区間における相対速度の変動を波形と捉え、波形の振幅（相対速度の変動幅）と周波数（相対速度の周期性）を被験者毎に指標化する。振幅は、先行車両との速度差になるため、小さいほど先行車両の速度変化に対して機敏に反応している、と解釈できる。一方、周波数については、周波数が小さい（周期が大きい）ほど、先行車両との速度差の変動が緩慢となり、過度な速度調整を行っていないと解釈できる。その上で、全被験者の指標値の分布を求め、PML の運用パターンによる分布特性の差異を分析する。

相対速度は、正負にまたがり推移することから、相対速度の数値を二乗平均し、平方根を取った値の平均振幅（式(1)）を振幅に関わる指標とした。ただし、 Δv は、相対速度、 N は数値が記録された回数を表す。

$$\bar{x} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum \Delta v^2} \quad (1)$$

一方、周波数については、フーリエ変換（FFT、 $N=64$ ）を用いてパワースペクトル分布に変換した後、代表化を行った。本研究では代表周波数として、中間周波数を採用した⁹⁾。中間周波数とは、周波数軸とパワースペクトル分布で囲まれた面積を2つの等しいエリアに分ける周波数のことで、式は(2)で表現される。周波数の代表値

$$\int_{f_{min}}^{f_{med}} P(f)df = \frac{1}{2} \int_{f_{min}}^{f_{max}/2} P(f)df \quad (2)$$

f_{med} : 中間周波数 (Hz)
 f_{min} : 観測される最小周波数 (Hz)
 f_{max} : 観測される最大周波数 (Hz)
 $P(f)$: パワースペクトル

がパワースペクトル分布の面積を二等分する際は、パワースペクトルが piece-wise linear に分布すると仮定した。

図-6、図-7 に平均振幅と中間周波数の分布を箱ヒゲ図で示した。周波数については、PML の有無及び運用速度別で有意差は発現しなかったものの、PML なしに比べて PML ありの方が周波数の観測幅が小さくなる傾向が確認された。一方、振幅については、観測幅に大きな差異はないが、中央値が PML60km/h および PML80km/h の方が PML なしと比較してやや大きい値となった。つまり、傾向としては、観測幅はほぼ同等であるが PML なしよりも PML ありの方が、振幅が大きい被験者が偏っていることが分かる。したがって、全体の傾向として、PML が存在することで周期の均一化がある一方、相対速度の変動幅がやや増す可能性があることが示唆される。

(4) 加減速変化特性による追従挙動均一化の評価

本節では、(3)で PML 導入により、振幅、周期の観測幅が縮小することが一部で確認されたため、PML が導

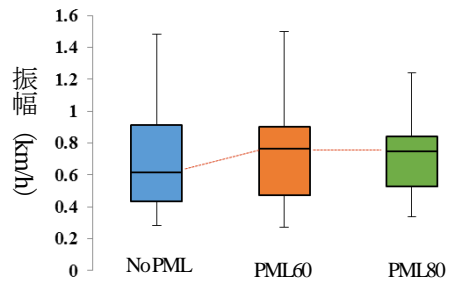


図-6 平均振幅分布

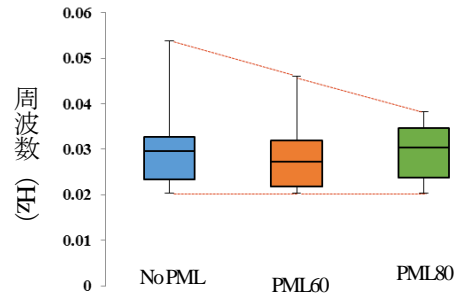


図-7 中間周波数分布

入により相対速度変動が全体で均一化されているのか検証を行う。そのため、(3)で求めた中間周波数と平均振幅から、加減速変化特性を定義し、この特性値の分散結果を基にして、PML がドライバー全体の追従挙動の均一化に及ぼす影響について考察する。定義するにあたり、本研究では、横軸を周期(分)、縦軸に振幅(km/h)とした座標平面を作成し、(3)で求めた値を基にして、被験者ごとに座標平面上に点をプロットした。そして、図-8のように、プロットした点と原点を結んだ線と周期軸となす角度で加減速変化特性値を定義した。例えば、 θ_1 のように角度が小さいと周期が大きく、振幅が小さくなるため、単位時間あたりの加減速変化は小さくなると考えられる。本研究では、PML がドライバーに及ぼす追従挙動の均一化を評価するため、PML の有無及び運用速度別で、角度値に加えて、分散値の検証を行った。分散が小さいほど、全体的にドライバーは単位時間あたりで同等の加減速変化を行っているとして解釈でき、全体として追従挙動が均一化されていることが示せると判断した。以上より、記録された角度のヒストグラムを PML の運用条件毎で図-9に、角度の分散値を図-10に記載する。

図-9 のヒストグラムを見ると、定性的ではあるが PML なしは他の条件と比較してばらつきが大きく分布していることが分かる。また、図-10 の分散値の比較をすると、PML 無点灯時に比べて PML 点灯時の方が、分散値が小さくなることを確認された。分散値の差異に関する有意差は確認できなかったが、PM 無点灯時に比べ PML 点灯時の方が全ドライバーの追従挙動の均一性を

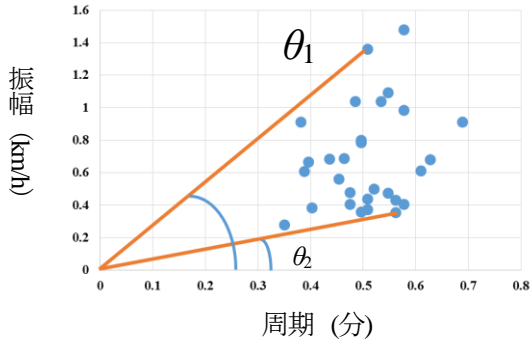


図-8 加減速変化特性について

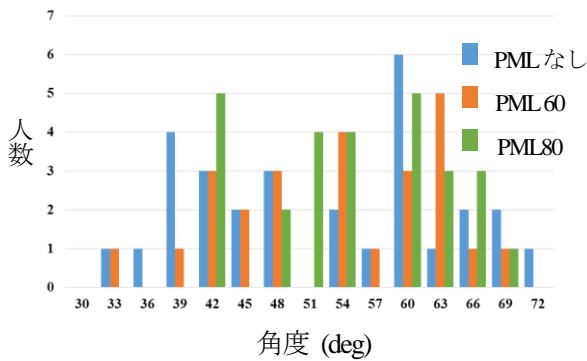


図-9 運用条件ごとの角度値

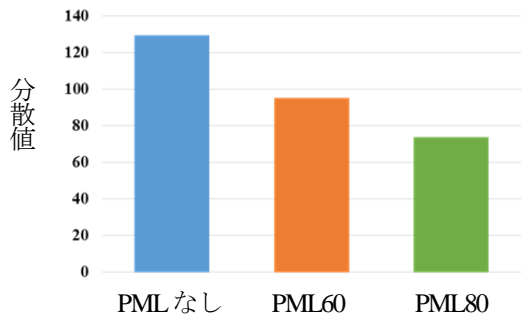


図-10 運用条件ごとの角度の分散値

改善する傾向がみられた。

(5) 分散共分散行列を用いた追従挙動安定性の評価

本節では、PMLの運用条件別でデータ全体における振幅、周期の分散共分散行列に着目する。これまでの分析より、PMLの影響で、相対速度変動特性の個人間差異が縮小化（均一化する）傾向にあることが確認された。しかしながら、振幅と周期をそれぞれ独立のものとして分析をしているが、個人ごとの追従特性を考える場合、振幅と周期にはそれぞれ相関性があることが考えられる。そこで、振幅と周期、それに加えてそれらの相関性を分散共分散行列で表し、PMLの運用パターンによる分散共分散行列の異質性を分析する。

PMLなしとPML60km/h、PML80km/hの2通りで分散

表-2 χ^2 乗値結果

	PML60km/h	PML80km/h
PMLなし	2.46	16.3

共分散行列の異質性を評価する。異質と判定され、分散および共分散が小さいと、相対評価としてドライバー全体における追従挙動が均一であると解釈できる。その異質性を評価するにあたり、ボックスのM検定を使用する。ボックスのM検定¹⁰⁾は、対象とする2データの分散共分散行列を行列式で表示し、その値を基に χ^2 乗値を算出することで、異質か否かの統計的有意性の検証を行い、有意ならば分散共分散行列は異質と判定される。

PMLなし、PML60km/h、PML80km/hでの分散共分散行列の値を(3)~(5)に、各々の χ^2 乗値の結果を表-2に示す。なお分散共分散行列は、1行1列目が振幅の分散、1行2列目、2行1列目が振幅と周期の共分散、2行2列目が周期の分散である。

$$S_{noPML} = \begin{bmatrix} 20.9 & 0.75 \\ 0.75 & 0.087 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$S_{PML60} = \begin{bmatrix} 22.3 & 0.36 \\ 0.36 & 0.097 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$S_{PML80} = \begin{bmatrix} 20.3 & 0.26 \\ 0.26 & 0.051 \end{bmatrix} \quad (5)$$

表-2より、PMLなしとPML60km/hでは、有意差が見られない結果となったが、PMLなしとPML80km/hの間では、有意水準1%で有意と判定され。その上で、(3)と(5)を比較して(5)の方が、値が小さいことが確認されるため、PML80km/hで運用することにより、追従挙動のばらつきを抑制し、均一性を向上させる可能性が示唆される結果となった。

4. 認知相対速度を考慮した追従モデル上の評価

(1) 認知相対速度の概念

これまでの分析により、PMLによって相対速度の変動特性に差異が生じ、均一化する可能性が示唆された。本研究では、PMLはドライバーの相対速度認知に影響を与える、という仮説のもと、PMLの影響を考慮した追従挙動モデルを構築する。ドライバーが一定の車間距離において追従挙動を行う際に、前方車両との速度差を認知した上で、加速、減速を繰り返すことが考えられる。ただ現実的には、相対速度の大きさによっては、ドライバーの認知度合いに差異が生じることが考えられる。また、速度差がある一定以上の場合、その速度差の値に限らず、ドライバーから見ておおよそ同等に感じられ、正確な速度差を認知することなく、加速もしくは減速を

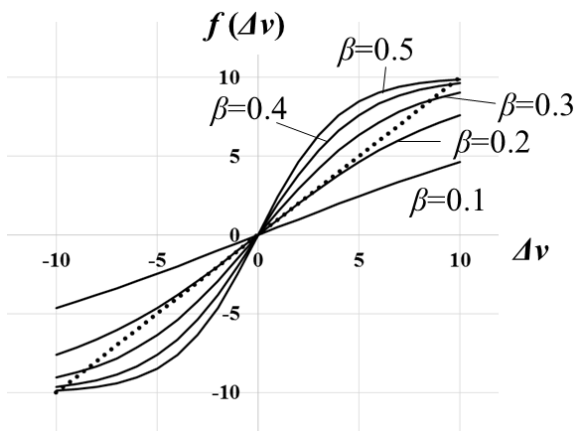


図-11 βの値によるロジスティック関数の分布 (K=10)

行うことが考えられる。しかし、研究に用いられる追従挙動モデルでは、これらの考慮がなされておらず、相対速度の客観的数値が入力される場合が多い。そこで、本研究では、実際に観測された客観的数値に基づく相対速度ではなく、ドライバーが認知する相対速度を考慮し、追従挙動モデルに取り入れ、パラメータの推定を行う。さらに、PMLの有無により、相対速度に認知差が生じるのか検証を行う。

(2) 認知相対速度に使用する関数

本研究では、使用する認知相対速度の関数として、ロジスティック関数を使用する。式は(6)のように表現される。Kは、ロジスティック関数の飽和点であり、予め

$$f(\Delta v) = \frac{2K}{1 + \exp(-\beta * \Delta v)} - K \quad (6)$$

Kを定めた上で、認知相対速度は、 $-K \leq f(\Delta v) \leq K$ の区間において値を取る。また、式の中にある増加係数βは、ロジスティック関数の傾きの大きさを表現する指標と解釈できる。先述した通り、相対速度がドライバーの加減速に及ぼす影響の大きさには上限・下限があると考えられることは合理的であるため、ロジスティック関数はその条件に適する。また、βによってドライバーの相対速度の認知度合いを表現することが可能である。図-11のようにβが大きいと、相対速度の認知に敏感であり、βが小さいと認知に鈍感と解釈することが可能である。

(3) 使用する追従挙動モデルとパラメータ推定方法

本研究では、使用する追従挙動モデルとして、HellyモデルおよびIntelligent Driver Model+ (以下、IDM+)の2つのモデルを採用する。これらのモデルに対して、(2)で示した認知相対速度をモデルに組み込む。Hellyモデルは構造が単純でパラメータの解釈が容易である一方、IDM+はシミュレーションの際、追従の再現精度が高いのが特長である。

Hellyモデル¹¹⁾の概念は、車間距離が大きくなるもしくは前方車両の方が、速度が大きくなる挙動を取ると、追従車両に正の加速度が入力される仕組みである。本研究では、サグを対象とした分析を行っているため、サグ勾配の影響による抵抗成分を、越モデル¹²⁾を参考にして、式に組み込んだ。以上より、本研究で扱う追従挙動モデル式は、(7)のように表現される。

$$\ddot{x}_0(t+T) = a_1 \Delta x(t) + a_2 f(\Delta v(t)) - a_3 \sin \theta + a_4 \quad (7)$$

- \ddot{x}_0 : 追従車の加速度 (m/s²)
- T : 反応遅れ時間 (s)
- $\Delta x(t)$: 時刻tにおける車間距離 (m)
- $\Delta v(t)$: 時刻tにおける相対速度 (m/s)
- θ : 縦断勾配 (rad)
- a : 係数パラメータ

一方、IDM+は、IDMが原型となっている¹³⁾。IDMは、前方車両との相対速度や車間距離に応じて、自由走行、追従走行(加速、減速など)の行動状態を切り換えて、加速度を表現するモデルである。このIDMに対して、鈴木ら¹⁴⁾は、サグの縦断勾配による重力加速度を用いた抵抗成分や自由走行時と追従走行時でモデル式を分離し、異なる最大加速度パラメータを使用したモデルIDM+を提案した。本研究では、追従走行実験によるデータを使用するため、このIDM+の中で、追従走行時の際に使用されるモデルのみを採用した。本研究で使用するモデル式は、式(8)で表される。

$$\dot{v}(t+T) = a_c \left\{ 1 - \left(\frac{s}{s^*} \right)^2 \right\} - g \sin \theta \quad (8)$$

$$s^* = s_0 + v T_s + \frac{v f(\Delta v)}{2\sqrt{a_c b}}$$

- \dot{v} : 追従車両の加速度 (m/s²)
- T : 反応遅れ時間 (s)
- a_c : 追従走行時最大加速度 (m/s²)
- 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_s : 安全車間時間 (s)
- v : 追従車両の走行速度 (m/s)
- Δv : 相対速度 (m/s)
- b : 希望減速度 (m/s²)
- g : 重力加速度 (m/s²)
- θ : 縦断勾配 (rad)

使用する追従挙動モデルについて、予め設定する諸条件として、認知相対速度に用いるロジスティック関数の飽和点は、ドライバーが意識して前方車両に追従する義務があるという特殊な環境下である点、走行条件ごとによる増加係数の差異を明確化する点を勘案しK=5とした。反応遅れ時間については、Hellyモデル、IDM+両者で、T=1(s)と統一し、IDM+における停止時最小車間距離 s_0 は、鈴木ら¹⁴⁾のシミュレーションで使用した $s_0=2$ (m)を参考に、本研究でもその数値で予め設定した。

実際のパラメータを推定するにあたり、観測値と推定値における最小の RMSE 値を算出する。RMSE 値を算出するにあたり、関数系が非線形であり、単純な凸関数でないことが想定されるため、本研究ではパラメータ推定において SA (Simulated Annealing) 法と準ニュートン法の一種である BFGS 法を併用し、最適化を図る。SA 法は、繰り返し計算を行う際に初めは、近傍の点の大小に関わらず、大胆な動きを行うが、繰り返し計算を経るに値が小さくなる方に更新する確率が高まり、大域最適解に対して良い近似値に収束する。そのため局所解から抜け出せる可能性が十分にあり、本研究で採用した。さらに、その値を初期値とした BFGS 法を併用することでより、適切なパラメータの推定を行うことが可能となる。

(4) パラメータ推定結果

本研究では、PML が相対速度変化の認知に影響を与えるのか検証するため、認知相対速度に関わるパラメータ β に着目して結果を提示する。Helly モデルにより推定された β の分布は図-12、IDM+により推定された β の分布は図-13 の通りである。両モデルともに多少は分布形状が異なるものの、 β のピークの範囲について PML なし、PML80km/h、PML60km/h の順で大きくなることとなった。また、 β の分布を箱ヒゲ図で表現したのが、Helly モデル、IDM+のおおの図-14、15 の通りである。観測の幅はモデルによりやや異なるが中央値で比較すると、PML なし、PML80km/h、PML60km/h の順で大きいことが分かる。以上より、 β の結果を 5% 有意水準の分散分析および多重比較で有意差を検証したところ、PML なしと PML60km/h の間では、両モデルとも有意差が発現し、PML なしと PML80km/h の間では、Helly モデルにおいて有意差が発現する結果となった。ただ、PML の運用速度の違いによる有意差は発現しなかった。

次に、3.における定量分析にて、PML80km/h 時に加減速がドライバー全体で均一化されたことが示されたため、IDM+で推定された加減速に関わるパラメータ値の分散を比較した。なお、対象とするパラメータは、追従走行

時最大加速度 a_c ならびに希望減速度 b である。その結果を図-16 に示す。これより、PML80km/h 時の方が、有意差は無いものの、分散が減少傾向であり、定量分析で得られた結果と整合することが示された。

以上の結果より、PML を運用させることで相対速度変化の認知が向上する可能性が示唆される。また、運用速度の違いでは統計的観点からの差異は無いものの PML80km/h との比較で、PML60km/h の方が、認知感度が

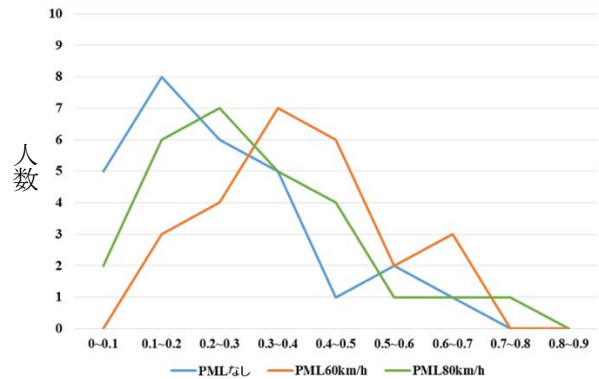


図-13 IDM+より推定された β の分布 (折れ線グラフ)

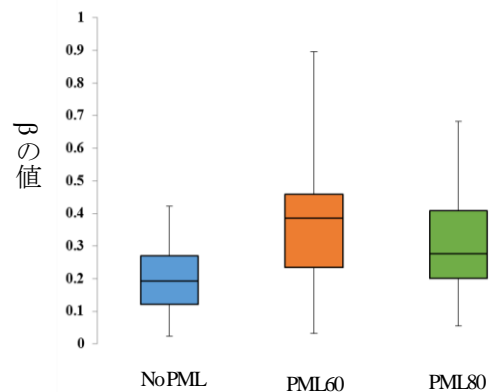


図-14 Helly モデルより推定された β の分布 (箱ヒゲ図)

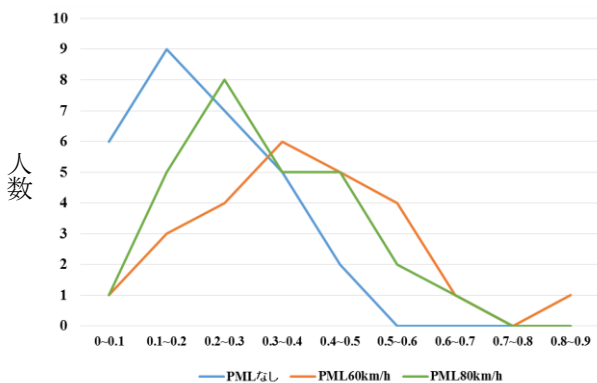


図-12 Helly モデルより推定された β の分布 (折れ線グラフ)

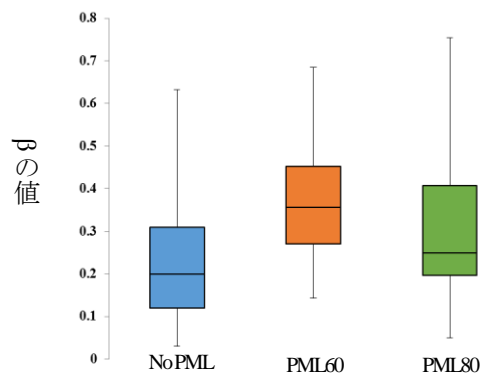


図-15 IDM+より推定された β の分布 (箱ヒゲ図)

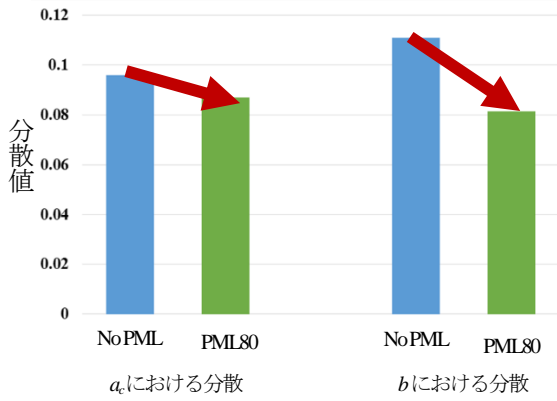


図-16 加減速に関わるパラメータの分散比較

高くなることが示された。これは、PML の運用速度と運転する車両の速度差の乖離が小さいことが相対速度変化認知の向上に対する 1 つの要因だと推察される。加えて、加減速のパラメータの分散に着目すると、PML80km/h 運用時は、無点灯時と比較して分散が減少傾向にあり、第 3 章の分析と整合する結果が得られた。

(5) シミュレーション分析

(4)で推定されたパラメータを基に走行シミュレーションを行い、PML の運用条件別で走行挙動に差異が発現するのか、検証を行う。

走行シミュレーションについて、IDM+で推定されたパラメータ値から加速度が表現される車両を PML の運用条件別で 15 台連続で追従走行させる。推定されるパラメータの値については、おのおの中央値を用いた。シミュレーションの分析区間は、実験で走行してもらった阪神高速道路 3 号神戸線深江サグ付近 (20.5kp~19.4kp) の線形を想定して行った。先頭車両は、実験で観測されたデータ (7 月分 ID1 PML なし) を使用し、連続して追従走行させる車両の条件として、データの精度の都合上、追突が発生しないように十分考慮し、初期の速度を約 55km/h、車間距離を 20m と設定した。図-17~19 が各条件におけるシミュレーション結果である。縦軸は分析始点である 20.5kp からの距離 (m)、横軸はシミュレーション経過時間 (s) である。各条件の差異を分かりやすくするため、X=350~1100 (m)、つまりサグ底以後 (20.25kp~) の上り坂区間の結果を示す。追従走行実験において先頭車両は可能な限り一定速度を維持してそうしているため、いずれのシミュレーション結果でも大きな速度の攪乱は見受けられない。しかしながら、図-17 の無点灯時では、分析最終地点に行くにしたがって、各車両の軌跡の幅が広がっていることが確認されたものの、図-18, 19 における、PML 点灯時は軌跡の各幅が一定に保たれているのが分かる。とりわけ PML60km/h 時は、均等な幅で軌跡が観測されていることが分かる。各

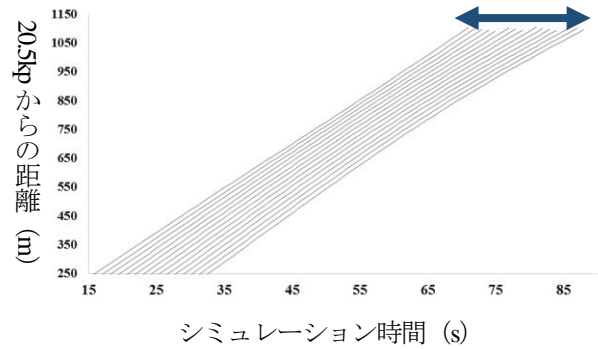


図-17 PML 無点灯時におけるタイムスペース図

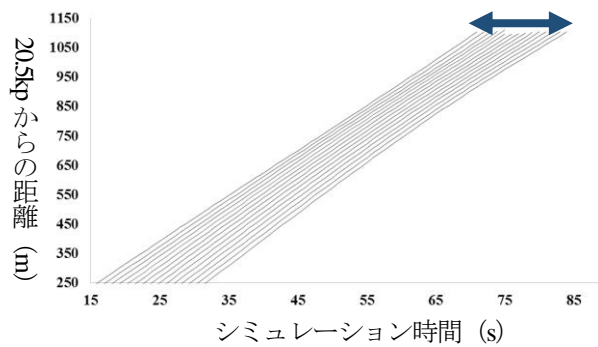


図-18 PML60km/h 時におけるタイムスペース図

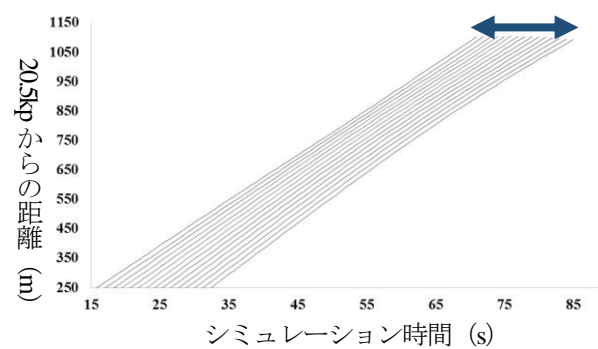


図-19 PML80km/h 時におけるタイムスペース図

条件における車両の 15 台目 (最後尾) における分析最終地点である 19.4kp の到達時間を比較すると、PML 無点灯時が 88 秒、PML60km/h 時が 84 秒、PML80km/h 時が 85 秒となり、PML 点灯時の方が、到達時間がやや短縮されることが確認された。これより、シミュレーションの結果から、PML が運用されることにより、ドライバーの追従挙動の精度が向上し、速度低下の抑制に寄与することが示唆された。

5. 本研究のまとめと今後の課題

本研究では阪神高速神戸線深江サグを対象に実道追従実験を実施し、得られたデータから PML の有無および

運用速度の違いによる相対速度の変動に関する定量分析を行った上で、実際と認知による相対速度の乖離を考慮した追従挙動モデルを構築し、パラメータの推定、連続的に車両を追従走行させるシミュレーションを行った。その結果、定量分析から PML が 80km/h で運用されている状態でドライバー全体において追従挙動の均一化に寄与すること、追従挙動モデルによる分析から、PML を運用することで相対速度変化の認知に関するパラメータの認知感度が高まり、走行シミュレーションにより追従車両群の対象区間の通過時間が短縮することが確認された。運用速度による顕著な差異は必ずしも大きくはないものの、追従挙動モデルの分析の範囲では、PML60km/h でより大きい効果が確認された。

本研究の課題として、ドライバーの認知を考慮する追従挙動モデルをより確立するために、車間距離項についても認知の関数を導入するべきであろう。次に、認知相対速度に関する関数について、パラメータ推定の行いやすさを考え、相対速度正負まとめて 1 つの関数系を用いたが、実際には前方車両に近づく認知と、離れる認知で乖離がある可能性があるため、相対速度の正負で別々の関数系を設定することが望ましいだろう。

謝辞：本研究を実施するにあたり、阪神高速道路株式会社、阪神高速技研株式会社、株式会社地域未来研究所には、走行実験の遂行、データの提供など、多大な協力を賜りました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省, <http://www.mlit.go.jp/common/001130029.pdf>
- 2) 高速道路サグ部等交通円滑化研究会：高速道路サグ部等の渋滞箇所への効果的な交通円滑化の実現に向けて(201510_sag_report.pdf), 2015.
- 3) 亀岡弘之, 小根山裕之, 渡部義之, 櫻井光昭：走光性を活用した路側発光体の動的点滅制御による渋滞発生緩和の効果検証, 第 48 回土木計画学研究発表会・講演集, 2013.
- 4) 塩見 康博, 北村彩菜：交通容量の経年変動を考慮した速度回復誘導灯設置効果の分析, 交通工学論文集, Vol. 3, No.2, pp. A_92-A_100, 2017.
- 5) 遠藤元一, 中川浩, 深瀬正之, 橋本弾：東京湾アクアライン渋滞対策について, 第 34 回交通工学研究発表論文集, pp. 255-261, 2014.
- 6) 増本裕幸, 飛ヶ谷明人, 兒玉崇, 北澤俊彦, 鈴木健太郎：阪神高速道路における走光型視線誘導システムの運用と発現効果の体系化について, 第 55 回土木計画学研究発表会・講演集, 2017.
- 7) 井垣貴弘, 内田敬：速度回復誘導灯による渋滞対策検討のためのマイクロ交通シミュレーション, 平成 30 年度土木学会関西支部年次学術講演会, 第 IV 部門, 2018.6
- 8) 田平優太, 塩見康博：走光型視線誘導灯によるドライバーの追従挙動への影響分析, 土木計画学研究・論文集, Vol. 74, pp. 301-313, 2018.
- 9) 馬場南実, 嵯峨智, 志筑文太郎, 高橋伸：肩の筋疲労測定を用いた姿勢改善支援システムの検討, 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI), 2017-HCI-171, pp. 1-8, 2017.
- 10) 菅民郎：多変量解析 回帰分析・判別分析・コンジョイント分析編, オーム社, 2015
- 11) Helly, W. (1958). Dynamics of Single-Lane Vehicular Traffic Flow. Research Report No. 2, Center for Operations Re-search, MIT. Cambridge, Mass.
- 12) 越正毅：高速道路のボトルネック容量, 土木学会論文集, No.371/IV-5., pp.1-7, 1986.
- 13) Treiber, Martin; Hennecke, Ansgar; Helbing, Dirk (2000), "Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations", Physical Review E, 62 (2): 1805–1824,
- 14) 鈴木一史, 山田康右, 堀口良太, 鹿野島秀行, 牧野浩志：ソフト的渋滞対策の段階的導入による高速道路サグ部渋滞の削減可能性, 第 35 回交通工学研究発表会論文集, pp.323-330, 2015

(2019. 2. 24 受付)

CONSTRUCTION OF CAR-FOLLOWING BEHAVIOR MODEL CONSIDERING THE INFLUENCE OF PACE MAKER LIGHT

Yuuta TABIRA and Yasuhiro SHIOMI

There has been an increase in the cases of installation of the Pace-maker light (hereafter, PML) as a countermeasure against traffic congestion at sag bottlenecks of freeways in Japan. PML creates a flow of LED light traveling with constant speed alongside the car. It intends drivers to perceive the speed gap between PML and their own vehicles and encourage the spontaneous speed recovery on uphill section at sag. It has been reported that traffic congestion at some bottlenecks were mitigated due to the installation of PML, though its influence on the driving behavior and the mechanism of congestion-mitigation were still unrevealed. In this study, based on a car-following experiment conducted on the Hanshin Expressway Route 3. From the obtained data, in the first, we analyzed quantitatively the relative speed by PML operation conditions. Next, the car following-behavior model was constructed in consideration of the deviation of the relative speed due to the driver's cognition and then the parameters were estimated. As a result, by operating PML, 1) from the quantitative analysis, PML contributes to the stabilization of following behavior in the

whole driver. 2) From the analysis by the car following-behavior model, it is confirmed that the parameters related to the cognition of the relative speed change are improved and the passing time of the target section of the car-following group is shortened by running simulation.