

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

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 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

近年、走光型視線誘導灯（以下 PML）の運用による渋滞軽減効果等が報告されつつあるが、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のが現状である。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、前方車両との車間距離変化に着目して PML がドライバーの運転挙動に及ぼす影響を分析した。PML の有無および運用速度の違いによる車間距離変化を縦断勾配の関係を考慮しつつ分析した結果、PML が上り坂区間で及ぼす影響について、1) 運用速度に関わらず、車間距離変化を及ぼしやすい、2) 60km/h で運用時、車速を PML の動きに合わせたいと感じたドライバーは車間距離が減少しやすく、交通容量の改善傾向がある、3) PML 運用時には PICUD 値の平均が PML 無点灯時より大きく推移する、ことを明らかとした。

Key Words: Pace-maker light, car-following behavior, sag, following distance

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効果や上り坂やサグ部における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、実際このシステム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るなど、PML には一定の渋滞緩和効果も確認されている⁴⁾。一方、微視的な観点から、PML が前方車両に追従する車両の動きに与える影響は、これまでに明らかにされていないのが現状である。サグ部における渋滞の原因となる速度低下を抑制するためにも、追従挙動の円滑化・安定化は肝要であり、PML による追従挙動への影響を検証する必要がある。そこで本研究では、PML が設置されている高速道路において、追従走行実験を行い、PML がドライバーの追従挙動にどのような影響を与えているのか検証する。本研究では、追従挙動特性を示す指標として、追従時の車間距離の変動に焦点を当てる。具体的には、PML 設置区間において、PML の有無及び運用速度を区別して、1)測定された車間距離の全サンプルの平均を用いた分析、2)縦断勾配を考慮した被験者ごとの車間距離の変動の分析、を行った。追従走行実験中、先行車両は一定速度（60km/h）を維持して走行するように設定しているため、車間距離の変化は、交通容量の変動と直接的な関係を持ち、交通容量の変動を検証するにも重要な指標となる。さらに車間距離の推定に加え、PML の動きに合わせたいと感じたドライバーと特に何も感じなかったドライバーにおける車間距離の傾向の違いや PML 運用による安全性の観点から、全被験者の傾向として PML の有無により PICUD の値に差が出るのかを下

り、上り勾配に分けて検証を行う。

本稿の構成は以下の通りである。第 1 章では、本研究の背景と目的について述べた。第 2 章では、実道追従実験の概要、車間距離の推定の方法、第 3 章では、車間距離の分析方法及び結果、第 4 章では、アンケート結果と車間距離分析とのクロス集計、第 5 章では、追従モデルを用いた PML の有無による交通容量の変動に関する検証、第 6 章では、PML が及ぼす走行安全性の検証、第 7 章では、本稿のまとめを述べる。

2. 実道追従実験及び車間距離推定方法

(1) 実道追従実験の概要

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、各日程で前半と後半に分け、同一被験者を対象に実道追従実験を行った。

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。表-1 は被験者属性の一覧である。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 3 回走行した。図-1 において、青の線は走行経路、緑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。順序効果を排除するため、3 回走行する上での PML の点灯の順序に関しては、表-2 のようにランダム化した。本研究の実験では車両 2 台を使用し、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。また、走行実験終了後は、走行実験に関するアンケートを行った。アンケート項目を表-3 に示す。

(2) 車間距離推定方法

車間距離を分析するにあたって、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。先行車両・後続車両共に GPS データを計測、後続車両は車間距離を計測するドライブレコーダーを搭載し、車間距離と走行速度などを計測している。ただし、7 月時にはドライブレコーダーの不具合で車間距離が計測できていなかったため、7 月、9 月ともに、車間距離を GPS データより算出した。GPS の精度については、9 月時に計測されたドライブレコーダーの車間距離データと対照し、分析に耐えるレベルであることは確認している。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の位置から追従車の位置を差し引くことで

表-1 被験者属性の一覧

被験者ID	年齢 (代)	運転歴 (年)	阪神高速利用頻度	阪神高速神戸線利用頻度
1	30	10	週に1日程度	週に1日程度
2	40	29	週に2~3日程度	週に2~3日程度
3	40	15	月に1~2日程度	月に1~2日程度
4	40	29	週に2~3日程度	月に1~2日程度
5	60	44	週に1日程度	週に1日程度
6	50	35	週に1日程度	月に1~2日程度
7	30	10	月に1~2日程度	月に1~2日程度
8	40	24	月に1~2日程度	月に1~2日程度
9	50	32	週に1日程度	週に1日程度
10	50	38	週に2~3日程度	週に1日程度
11	40	20	週に1日程度	週に1日程度
12	30	15	週に1日程度	月に1~2日程度
13	40	20	月に1~2日程度	月に1~2日程度
14	40	28	週に2~3日程度	週に2~3日程度
15	40	15	週に2~3日程度	週に2~3日程度
16	40	19	ほぼ毎日	ほぼ毎日
17	50	30	週に2~3日程度	週に1日程度
18	40	11	週に1日程度	月に1~2日程度
19	30	17	月に1~2日程度	月に1~2日程度
20	50	32	週に2~3日程度	週に1日程度



図-1 走行経路経路概要図

表-2 各日程における PML 点灯パターン

	1 日目	2 日目	3 日目	4 日目	5 日目	
前半	1 回目	無灯	60km/h	60km/h	80km/h	無灯
	2 回目	60km/h	80km/h	無灯	60km/h	80km/h
	3 回目	80km/h	無灯	80km/h	無灯	60km/h
後半	1 回目	80km/h	無灯	80km/h	無灯	60km/h
	2 回目	60km/h	80km/h	無灯	60km/h	80km/h
	3 回目	無灯	60km/h	60km/h	80km/h	無灯

表-3 アンケート項目

質問項目	回答
実験走行中「青い光の流れ (PML)」に気がつくきましたか?	1. 気づいた
	2. 気づかなかった
	3. 写真を見せて気づいた
	4. 写真を見せても気づかなかった
PML に対してあなたは、どのように感じましたか?	1. 車の速度を PML の動きに合わせていたと感じた
	2. 特に何も感じなかった
	3. その他
PML の色 (青色) についてどう感じましたか?	1. 眩しく感じた
	2. 意識した
	3. 特に何も感じなかった
	4. その他
PML が運転に支障が出るようなことはありませんでしたか?	1. 支障が出た
	2. 支障が出なかった
走行中に運転車両の速度低下を感じましたか?	1. 感じた 2. 感じなかった

表4 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	14
PML60km/h運用時	7月	16	14
	9月	14	11
PML80km/h運用時	7月	16	14
	9月	14	13

車間距離の推定を行う。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、分析区間の始点である 20.5kp における GPS データの車間距離と 7 月分は画像データ、9 月分はドライブレコーダーに記録されている車間距離データを基に誤差を算出し、GPS データの車間距離の補正を行った。

また、実験走行中に渋滞に巻き込まれた場合は、エラーデータとして除外した。加えて、画像データやドライブレコーダーの車間距離が正確に表示されていないデータに関して、車間距離補正ができないため除外した。さらに、7 月 16 日、9 月 11 日の午前と午後、9 月 14 日の午後における実験のデータが欠損していた。その結果、エラー除去前後の ID 数は、表4 のようになり、エラー除去後の ID 数が車間距離の推定可能であった被験者数となる。

3. PML 設置区間における車間距離分析

(1) 全般的な傾向分析

被験者全般的に、速度回復誘導灯の有無及び運用速度の違いにより車間距離にどのような差異が生じるかを分析する。速度回復誘導灯設置区間 (20.5kp~19.5kp) における一秒おきの車間距離データの平均を被験者全データから算出し、図-2、図-3 のようにグラフとして表示した。グラフは PML なし、PML の運用速度 60km/h、運用速度 80km/h における 3 種類の車間距離(m)と標高(m)で構成されており、図-2 は 7 月の実験データ、図-3 は 9 月の実験データである。グラフの横軸は kp、左の縦軸は車間距離(m)、右の縦軸はその地点での標高(m)を示す。サンプル数は、データ欠損を除いて 7 月 9 月ともにそれぞれの条件で 10~15 前後である。全般的な分析では、7 月と 9 月で PML に対する慣れの効果が発現するか検証するため、7 月と 9 月のデータは合算せず、別々でグラフ化した。図-2 では、PML60km/h において、図-3 では、PML60km/h、PML80km/h において、PML なしと比較して、サグ底 (20.25kp 付近) 以後で車間距離が平均して上部で推移していることから、PML は下り坂よりも上り坂で車間距離変化を及ぼしやすいことが分かる。しか



図-2 車間距離全サンプル平均 (7月)



図-3 車間距離全サンプル平均 (9月)

し、7 月と 9 月の傾向の違いに顕著な差がなく、曖昧な結果となり、7 月では、PML なしと PML80km/h における車間距離平均の差や、下り坂区間では、7 月 9 月共に PML の有無及び運用速度の違いで車間距離の平均に有意差が出なかったため、被験者ごとに PML 設置区間を細分化して、詳細に車間距離分析を行う必要がある。

(2) 個人別の傾向分析

全サンプルの車間距離の平均では、PML の有無及び車間距離変化の傾向を詳細に掴めない箇所があったため、個人別で車間距離変化の分析を行う。分析の際、PML がドライバーの追従挙動に及ぼす影響を、道路の縦断勾配との関係で整理するため、図-4 のように PML 設置区間を下り坂区間を 2 分割、上り坂区間を 3 分割して細分化を行った。GPS 観測点列数は各被験者、下り坂で約 10、サグ底直前、直後で 5~10 程度、上り坂前半で 20~25 程度、上り坂後半で約 20 となっており、平均して PML 設置区間を約 50~60km/h で走行している。また、表-5 に各被験者における区間ごとの車間距離(m)と車間距離の分散を示した。表の左半分は 7 月分、右半分は 9 月分のデータとなっている。その上で、区間別に同一被験者において、PML なしと PML60km/h 及び PML なしと PML80km/h における車間距離を比較し、分散分析と多

表-5 各被験者の区間ごとの車間距離平均(m)と分散 (左半分は7月分,右半分は9月分)

	7月										9月											
	平均(分散)	平均(分散)	平均(分散)	平均(分散)	平均(分散)	平均(分散)	平均(分散)	平均(分散)	平均(分散)	平均(分散)	平均(分散)	平均(分散)	平均(分散)	平均(分散)	平均(分散)	平均(分散)	平均(分散)	平均(分散)	平均(分散)			
	ID1	ID2	ID3	ID4	ID5	ID6	ID7	ID8	ID9	ID10	ID1	ID2	ID3	ID4	ID5	ID6	ID7	ID8	ID9	ID10		
下り坂	PMLなし	30.75 (4.41)	21.33 (0.82)	29.89 (1.36)	23.41 (1.46)	23.21 (3.09)	32.6 (3.45)	-	-	25.04 (1.72)	20.2 (0.74)	PMLなし	24.59 (8.16)	-	20.75 (5.62)	21.77 (1.64)	26.78 (3.83)	-	22.5 (47.31)	19.12 (7.87)	-	28.45 (0.54)
	PML60km/h	43.84 (5.25)	25.98 (1.44)	30.87 (1.19)	17.98 (2.16)	20.74 (0.55)	20.11 (7.27)	-	-	-	-	PML60km/h	-	-	20.24 (3.44)	32.8 (2.29)	-	-	17.52 (1.65)	15.59 (0.79)	-	16.96 (1.77)
	PML80km/h	28.12 (5.06)	16.79 (0.72)	-	15.71 (1.99)	30.97 (3.09)	29 (2.67)	-	-	24.92 (2.27)	25.06 (9.1)	PML80km/h	12.03 (5.02)	-	30.56 (0.54)	25.82 (0.76)	23.89 (3.9)	-	23.21 (5.32)	11.61 (2.78)	-	18.2 (0.91)
		ID11	ID12	ID13	ID14	ID15	ID16	ID17	ID18	ID19	ID20		ID11	ID12	ID13	ID14	ID15	ID16	ID17	ID18	ID19	ID20
サグ底直前	PMLなし	30.31 (1.1)	23.94 (3.2)	26.62 (2.6)	25.88 (0.84)	25.17 (0.92)	20.79 (3.75)	-	-	41.78 (0.78)	26.02 (1.59)	PMLなし	-	-	16.86 (1.43)	30.22 (23.6)	31.32 (10.08)	18.79 (3.78)	39.45 (0.61)	23.71 (0.91)	-	-
	PML60km/h	28.26 (0.56)	37.95 (15.13)	23.25 (0.58)	29.04 (1.27)	27.56 (0.9)	21.09 (0.61)	-	-	31.17 (0.93)	22.91 (18.67)	PML60km/h	-	-	21.34 (0.83)	22.53 (2.82)	29.25 (24.3)	22.94 (0.69)	30.97 (3.51)	16.56 (38.04)	-	-
	PML80km/h	30.35 (2.12)	28.62 (0.67)	-	29.44 (4.21)	21.38 (10.03)	14.76 (0.53)	-	-	40.68 (1.05)	30.95 (0.82)	PML80km/h	-	-	18.29 (1.29)	26.28 (1.21)	30.5 (0.89)	17.99 (63.79)	33.42 (4.16)	29.33 (10.65)	-	-
		ID1	ID2	ID3	ID4	ID5	ID6	ID7	ID8	ID9	ID10		ID1	ID2	ID3	ID4	ID5	ID6	ID7	ID8	ID9	ID10
サグ底直後	PMLなし	35.88 (1.93)	19.94 (42.22)	34.21 (0.85)	21.2 (2.02)	24.47 (0.96)	29.18 (3.44)	-	-	27.1 (2.59)	19.62 (0.67)	PMLなし	28.55 (1.01)	-	12.71 (29.84)	21.55 (0.42)	28.31 (1.96)	-	32.09 (30.16)	13.05 (33.16)	-	27.62 (0.93)
	PML60km/h	51.14 (12.36)	23.44 (1.02)	29.18 (0.69)	19.47 (1.66)	21.83 (0.29)	18.48 (1.76)	-	-	-	-	PML60km/h	-	-	18.49 (1.82)	30.15 (1.11)	-	-	17.6 (1.23)	15.63 (0.63)	-	16.38 (0.32)
	PML80km/h	28.56 (2.58)	16.94 (0.58)	-	20.19 (3.39)	32.23 (0.96)	21.93 (1.53)	-	-	26.2 (42.49)	21.4 (0.38)	PML80km/h	15.77 (1.51)	-	28.85 (1.04)	24.74 (0.29)	19.05 (1.17)	-	26.95 (0.77)	13.43 (4.12)	-	19.35 (0.84)
		ID11	ID12	ID13	ID14	ID15	ID16	ID17	ID18	ID19	ID20		ID11	ID12	ID13	ID14	ID15	ID16	ID17	ID18	ID19	ID20
上り坂前半	PMLなし	31.63 (0.58)	25.85 (0.45)	28.1 (2.8)	26.33 (1.2)	26.4 (0.91)	19.73 (0.72)	-	-	41.2 (0.63)	25.9 (0.77)	PMLなし	-	-	18.05 (0.56)	22.2 (1.27)	21.82 (6.08)	22.33 (1.6)	36.73 (31.31)	34.29 (1.25)	-	-
	PML60km/h	30.16 (0.53)	40.61 (37.16)	23.23 (0.57)	27.49 (0.7)	25.37 (0.57)	21.09 (1.26)	-	-	33.93 (0.24)	24.64 (1.65)	PML60km/h	-	-	26.62 (4.7)	19.8 (0.32)	21.13 (3.3)	19.61 (7.36)	27.95 (0.59)	25.01 (5.66)	-	-
	PML80km/h	31.24 (0.51)	24.66 (0.3)	-	33.38 (5.23)	20.09 (5.6)	16.03 (0.48)	-	-	44.09 (0.52)	31.51 (1.13)	PML80km/h	-	-	21.32 (1.93)	18.42 (2.57)	26.34 (2.37)	18.42 (2.57)	31.98 (2.91)	24.28 (0.77)	-	-
		ID1	ID2	ID3	ID4	ID5	ID6	ID7	ID8	ID9	ID10		ID1	ID2	ID3	ID4	ID5	ID6	ID7	ID8	ID9	ID10
上り坂後半	PMLなし	37.91 (1.72)	22.36 (2.91)	34.83 (0.55)	23.34 (3.81)	24.06 (0.64)	27.57 (0.79)	-	-	29.5 (1.26)	18.79 (0.91)	PMLなし	26.29 (1.43)	-	14.94 (1.85)	20.34 (0.87)	28.52 (0.84)	-	28.78 (32.39)	19.13 (3.58)	-	25.96 (1.52)
	PML60km/h	57.64 (1.87)	23.05 (0.54)	28.27 (0.49)	19.35 (0.45)	22.2 (0.56)	21.97 (3.1)	-	-	-	-	PML60km/h	-	-	24.24 (32.89)	28.96 (0.97)	-	-	19.42 (1.82)	15.57 (0.64)	-	18.59 (3.57)
	PML80km/h	33.36 (0.53)	17.93 (0.31)	-	23.14 (0.7)	31.83 (0.64)	24.74 (5.88)	-	-	20.61 (3.96)	25.45 (0.7)	PML80km/h	19.49 (0.97)	-	27.85 (1.23)	27.93 (3.21)	18.87 (1.71)	-	25.65 (0.68)	17.04 (0.68)	-	21.03 (0.7)
		ID11	ID12	ID13	ID14	ID15	ID16	ID17	ID18	ID19	ID20		ID11	ID12	ID13	ID14	ID15	ID16	ID17	ID18	ID19	ID20

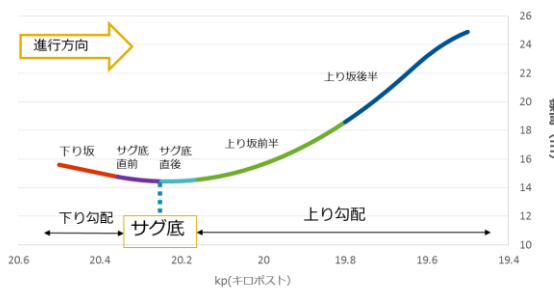


図-4 対象区間の道路形状と区間分け

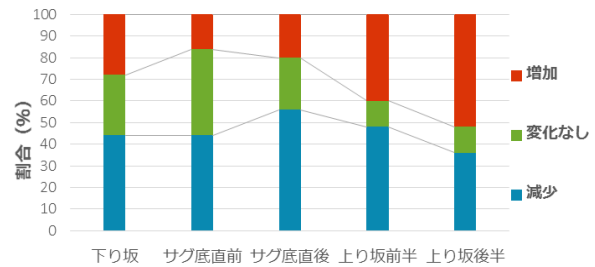


図-5 車間距離分析 PML なしと PML60km/h の比較 (n=25)

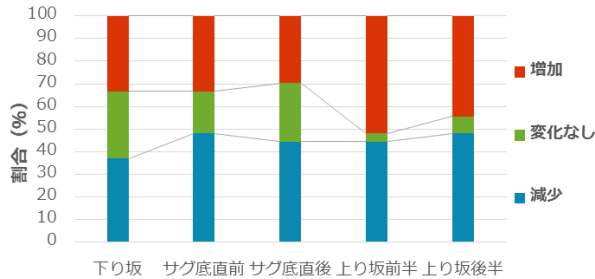


図-6 車間距離分析 PML なしと PML80km/h の比較 (n=27)

重比較法を用いて 5%有意水準で車間距離の変化を「増加」「変化なし」「減少」の 3 種類に大別した。その結果を基に、細分化した区間ごとの車間距離変化の内訳をグラフ化した。PML60km/h との比較を図-5, PML80km/h との比較を図-6 に示す。

図-5 から、PML60km/h ではサグ底直後では、PML なしとの比較で車間距離減少の割合が大きく、一般にサグ底直後で起こりやすい前方車両への過剰な車間距離増加を抑止する可能性が考えられる。一方、図-6 から、PML80km/h の場合、PML 無しと比較して上り坂区間での車間距離変化なしの割合が極めて小さく、車間距離増加、減少の割合がほぼ同等であるため、上り坂では、車間距離変化に影響を与えやすいものの、変化の仕方に一定の傾向は発現しなかった。また、図-5, 6 共通して、下り坂よりも上り坂の方が車間距離変化なしの割合が小さいことから、PML は下り坂よりも上り坂の方が車間距離変化に影響を及ぼしやすいことがいえる。

4. 車間距離変化とアンケート結果のクロス集計

(1) 車間距離とアンケート結果のクロス集計結果

第 4 章では、どのような属性のドライバーに有意な差があるかを検証するため、実験の際に実施した表-3 のアンケートとの関係に着目した分析を行う。表-3 の通り、アンケートでは、被験者に対し PML の動きに合わせたいと感じたか否かを質問しており、PML の動きに合わせたいと感じたドライバーと特に何も感じなかったドライバーに大別して上り坂全体での車間距離変化の内訳を PML60km/h, PML80km/h 別で算出し、その結果を図-7, 図-8 に示す。図-7 より PML60km/h の場合、車間距離減少の比率が大きく、上り坂では前方車両への渋滞が起こる一因となる過剰な車間距離増加の抑止効果に繋がる可能性が考えられる。ただ、PML80km/h の場合、車間距離変化の内訳にばらつきが見られた。実際の車速との乖離が大きいために一因と考えられる。図-8 より PML に対して特に何も感じなかった被験者に関しては、運用速

度に関わらず、車間距離変化の内訳にばらつきが大きい結果となり顕著な傾向は発現しなかった。

(2) 統計的有意性の検証

図-7 より、PML60km/h で「車の速度を PML に合わせたいと感じた」と回答した被験者の車間距離変化の内訳を見ると、車間距離減少の割合が大きいたことが確認できた。そこで、PML に対する認識の違いと車間距離減少の間に統計的な有意性があるのかを検証するため、車間距離が減少となる確率を被説明変数とする有意水準 5% のロジスティック回帰分析を行った。モデル式は、式(1)となる。対象としたデータは、7 月、9 月の実験で PML60km/h での走行データが取れた被験者全員とする。

$$\ln\left(\frac{p}{1-p}\right) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 \quad (1)$$

- x_1 PML に合わせたいと感じた被験者ダミー
- x_2 特に何も感じなかった被験者ダミー
- x_3 運転歴(年)
- x_4 年齢(年代)
- x_5 神戸線高頻度利用者ダミー

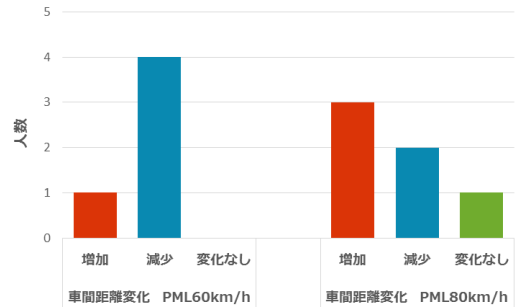


図-7 PML に合わせたいと感じた被験者の車間距離変化内訳

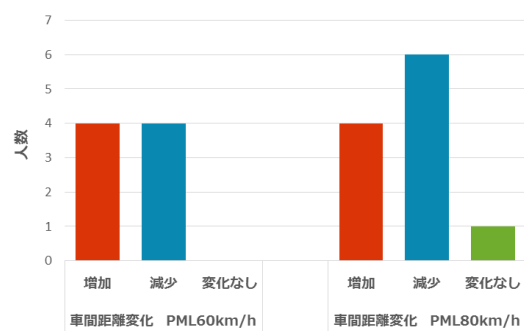


図-8 特に何も感じなかった被験者の車間距離変化内訳

x_1 は、車の速度をPMLの動きに合わせたいと感じたと回答した被験者を1とし、それ以外で回答した被験者を0とするダミー変数とした。同様に、 x_2 も特に何も感じなかったと回答した被験者に対するダミー変数を設定した。 x_3 は、運転歴(年)、 x_4 は年齢(年代)、 x_5 は分析対象区間を頻繁に利用する被験者をダミー変数としたものである。頻繁に利用するかの判断は、表-1に記載した被験者の個人属性から、阪神高速の利用頻度と阪神高速神戸線利用頻度が一致した場合を神戸線高頻度利用者とした。 $b_0 \sim b_5$ は、パラメータでありロジステック回帰分析により数値を推定する。表-6にロジステック回帰分析の結果を示す。

表-6より、車の速度をPMLに合わせたいと感じた被験者ダミー(x_1)と神戸線高頻度利用者ダミー(x_5)については、p値が0.05未満となり5%で有意差があると判定された。したがって、 x_1 のパラメータ b_1 は正の値を示しているの、車の速度をPMLの動きに合わせたいと感じた場合、PML設置区間で車間距離が減少しやすくなり、 x_5 のパラメータ b_5 は負の値を示しているの、神戸線を頻繁に利用する人ほどPML設置区間で車間距離が減少しにくくなるのが分かる。

5. 追従モデルによる交通容量の検証

(1) 用いる追従モデルの概要

本章では、記録された車間距離、速度データを用いて、個人ベースで交通容量を推計した。車間距離の変化には、PMLの影響が考えられるが、必ずしも交通容量の増大につながるとは限らないため、追従モデルからの分析を行った。追従モデルは、式(2)のモデルを採用した。このモデルは、速度、車間距離等のデータから、巨視的に交通密度と交通量の関係を推計することが可能なのが特長である。本研究では、実験で取得された車間距離データと実験走行の際に記録された速度データを用いた。また、高嶋ら⁹⁾の分析によると、深江サグにおける渋滞のボトルネックが19.8kp付近と報告されているため、本研究では分析区間をサグ底(20.25kp付近)~19.8kpとした。以後に追従モデル式と交通容量の関係を示す。

表-6 ロジステック回帰分析結果

説明変数	回帰係数	標準誤差	z値
定数項	-2.75	3.70	-0.742
車の速度をPMLに合わせたいと感じた被験者ダミー	3.73	1.76	2.12*
特に何も感じなかった被験者ダミー	1.79	1.36	1.31
運転歴(年)	-0.0281	0.110	-0.255
年齢(年代)	0.0968	0.131	0.740
神戸線高頻度利用者ダミー	-2.79	1.40	-1.99*

AIC=36.4 N=25 *p<0.05

$$\ddot{x}_{n+1}(t) = \lambda \frac{[\dot{x}_{n+1}(t)]^4}{[x_n(t) - x_{n+1}(t)]^3} [\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)] \quad (2)$$

$\ddot{x}_{n+1}(t)$ は追従車の加速度、 $\dot{x}_n(t)$ 、 $\dot{x}_{n+1}(t)$ は先行車、追従車の速度、 $x_n(t)$ 、 $x_{n+1}(t)$ は先行車、追従車の位置、 λ はパラメータを表している。式(2)で変数分離を行い、微分方程式を解くと、式(3)が導出される。

$$\ln v = -\frac{\lambda}{2} k^2 + \ln v_f \quad (3)$$

ただし、 v は追従車の速度、 k は交通密度であり $k=1/(x_n(t)-x_{n+1}(t))$ が成立する。 v_f は自由流速度で、 $k=0$ のとき $v=v_f$ が成立すると仮定する。さらに、臨界密度 k_0 で $q=kv$ の関係において q が最大値をとることから、式(3)の左辺を v にし、式(4)のように整理した。式(4)の両辺に k を掛け、 k について微分し、最大値の条件を当てはめることで、 $k=k_0$ のとき $\lambda=1/k_0^2$ の関係が得られる。交通容量 Q_{max} は、 $q=kv$ で $k=k_0$ のときの交通量とし、同様に式(4)に両辺 k_0 を掛け $\lambda=1/k_0^2$ の関係を用いることで、式(5)が導出される。

$$v = v_f \cdot \exp\left(-\frac{1}{2}k^2\right) \quad (4)$$

$$Q_{max} = k_0 \cdot v_f \cdot \exp\left(-\frac{1}{2}\right) \quad (5)$$

したがって、式(3)でパラメータ λ 、 v_f を推定することで、 Q_{max} を推計することが可能となる。

(2) 交通容量の評価

4.においてPMLに対する認識の違いで車間距離変化の内訳に差異があることが確認できたので、走行時にPMLの動きに合わせたいと感じた被験者と特に何も感じなかった被験者で大別して交通容量の比較を行った。

各被験者でパラメータ推計した際の決定係数一覧を表-7に記載した。×は、渋滞や機材の不良等により車間距離測定ができなかったもの、不適は、算出された交通容量が異常値を取ったものである。これらは、交通容量分析の対象外とした。なお、本研究ではパラメータ推計で表-7に記載された決定係数が0.20以上のサンプルを対象にして分析を行った。モデルの決定係数が0.20以上で推計された交通容量の全サンプルの平均をPMLに合わせたいと感じた被験者と特に何も感じなかった被験者に分けたものを図-9に示す。本研究ではサンプル数の都合上、PML60km/h、80km/hのデータ及び7月9月のデータを合算して分析した。なお、PMLに合わせたいと感じた被験者のサンプルは5、特に何も感じなかった被験者のサンプル数は4であった。

図-9よりPMLの動きに合わせたいと感じた被験者は、

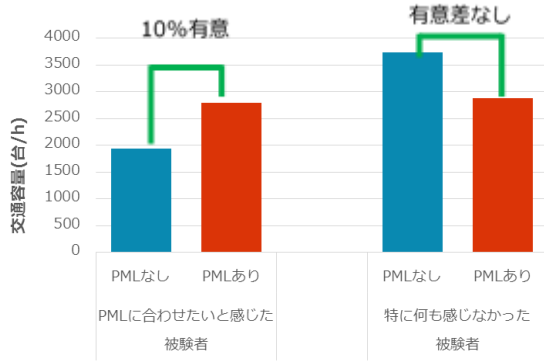


図-9 PMLの有無による交通容量の比較

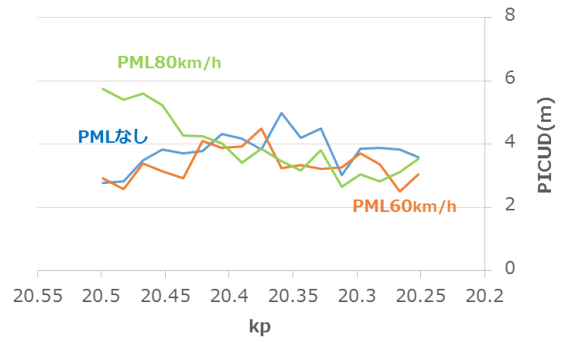


図-10 下り坂区間におけるPICUDの推移

表-7 追従モデル決定係数一覧

	7月時の実験				9月時の実験			
	PMLなし	PML60	PML80	PML認知*	PMLなし	PML60	PML80	PML認知*
D1	0.721	0.364	0.320	1	0.662	×	0.029	1
D2	不適	0.074	0.560	0	×	×	×	×
D3	0.009	不適	不適	0	0.231	不適	0.090	0
D4	不適	不適	不適	0	0.691	不適	0.551	0
D5	0.328	0.280	0.321	0	0.477	×	不適	0
D6	0.475	0.200	0.679	1	×	×	×	×
D7	×	×	×	×	0.017	不適	0.762	1
D8	×	×	×	×	0.003	不適	0.155	0
D9	0.338	×	0.003	0	×	×	×	×
D10	0.122	×	0.153	0	0.005	不適	0.329	0
D11	0.396	0.221	不適	0	×	×	×	×
D12	0.615	0.000	0.131	0	×	×	×	×
D13	0.325	0.382	×	0	不適	不適	0.000	0
D14	0.292	不適	0.868	0	0.583	0.045	0.358	1
D15	0.066	不適	0.005	0	不適	0.017	不適	1
D16	0.095	0.499	0.001	0	0.654	不適	0.005	0
D17	×	×	×	×	0.482	不適	0.034	0
D18	×	×	×	×	0.348	不適	0.497	0
D19	0.290	不適	不適	0	×	×	×	×
D20	0.303	0.716	0.128	0	×	×	×	×

* 0: PMLに合わせたいと感じた, 1: 特に何も感じなかった, ×: 対象外

交通容量が改善傾向となり、t検定において10%で有意であった。一方、特に何も感じなかった被験者は、逆に交通容量がやや減少する結果となった。交通容量の値でPML点灯時同士を比較すると両者ほぼ同等であり、PMLによりドライバー全体において交通容量が安定化する可能性も考えられるため、今後もサンプル数を増やし、モデルの改善を行うなどして分析を深める必要がある。

6. PICUDによる安全性の評価

PMLにより多数の被験者に車間距離の変化が確認されたため、本章ではPMLが交通流改善のみならず、走行の安全性にも寄与しているのではないかと考え、検証を行った。

本研究では、安全性指標として宇野ら⁹⁾が開発したPICUDで分析を行う。PICUD指標は、前方を走行する

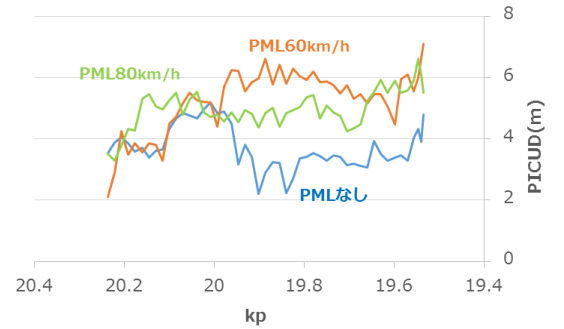


図-11 上り坂区間におけるPICUDの推移

車両が急減速した場合に、後続車両が反応遅れを伴いながら急減速を行い、両車が停車した際の車両間の距離と定義される。つまり、PICUD指標が0以下の値を示すと、後続車が急減速をしても前方車両への衝突が回避できないことを示す。PICUD指標は、式(6)で表される。

$$PICUD = \frac{V_1^2}{-2a} + s_0 - \left(V_2 \Delta t + \frac{V_2^2}{-2a} \right) \quad (6)$$

V_1 は前方車の減速開始時の速度(m/s)、 V_2 は前方車の減速時における後続車の速度(m/s)、 a は減速時での加速度(-3.3m/s²と仮定)、 s_0 は前方車の減速開始時での車間距離(m)、 Δt は、反応遅れ時間(1.5sと仮定)であり、PMLなし、PML60km/h、PML80km/h別でPICUDの推移を検証した。PICUDの推移は、車間距離が測定された被験者全員の平均値とし、図-5、6から、PMLによる車間距離変化の影響が下り坂と上り坂で異なることが分かったため、分析区間をサグ底前後で分割した。下り坂区間の結果を図-10、上り坂区間での結果を図-11に示す。

図-10より下り坂区間(20.5kp~20.25kp)では、PMLの有無及び運用速度に関わらず、PICUDの推移に大きな差が無く、分散分析の結果5%有意水準で非有意であることが確認された。一方、図-11より上り勾配(20.25kp~19.5kp)では、PMLが無点灯時に比べPML運用時の方がPICUDが大きく推移していることが読み取れ、5%有意水準における分散分析と多重比較の結果、PMLなし、PML60km/h及びPMLなし、PML80km/hの間

で有意差が確認された。PICUD が上部に推移しているほど、前方車両が急減速を行ったとしても、後続車の追突事故を防ぐ可能性が高まるといえる。したがって、図-11 の結果より上り坂区間で、PML は運用速度に関わらず、前方車両に追従する状況において走行安全性に寄与する可能性が示唆される。

7. おわりに

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、前方車両との車間距離変化に着目して PML がドライバーの運転挙動に及ぼす影響を分析した。PML の有無および運用速度の違いによる車間距離変化を縦断勾配の関係を考慮しつつ分析した結果、PML が上り坂区間で及ぼす影響について、1) 運用速度に関わらず、車間距離変化を及ぼしやすい、2) 60km/h で運用時、車速を PML の動きに合わせていたと感じたドライバーは車間距離が減少しやすく、交通容量の改善傾向がある、3) PML 運用時には PICUD 値の平均が PML 無点灯時より大きく推移する、ことが明らかとなった。今後は比較できるサンプル数を増やし、精度の高い車間距離推定値を使用して分析を行うことや本研究で明らかとなった PML の動きに合わせていたと感じたドライバーが交通流改善に寄与する影響について、詳細に追従実験などを通

して検証する必要がある。

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(2015)「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
- 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) 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.
- 5) 高嶋望都, 塩見 康博: データ同化を用いた高速道路サグ部における渋滞現象の分析, 第 54 回土木計画学研究発表会・講演集, 2016.
- 6) 宇野伸宏, 飯田恭敬, 安原真史, 菅沼真澄: 車線変更時のコンフリクトを考慮した速度調整モデルの構築, 土木計画学研究・論文集 vol.20, pp.989-996, 2003.

(2017.4.28 受付)

A study on effect of pace maker light on car-following behavior

Yuuta TABIRA and Yasuhiro SHIOMI