

走光型視線誘導システムが 車線変更に及ぼす影響の実証分析

渡邊 秀¹・柳原 正実²・小根山 裕之³

¹非会員 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)
E-mail: watanabe-suguru@ed.tmu.ac.jp

²正会員 首都大学東京大学院助教 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)
E-mail: yanagihara@tmu.ac.jp

³正会員 首都大学東京大学院教授 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)
E-mail: oneyama@tmu.ac.jp

近年、高速道路サグ部における渋滞対策の一つとして、走光型視線誘導システムの導入が全国各地の高速道路で行われている。走光型視線誘導システムが渋滞頻発区間における捌け台数の増加に一定の効果をもつことは過去の研究によって既に明らかになっているが、渋滞発生の一要因とされる車線変更挙動との関連性については未解明の部分が多い。そこで本研究では、走光型視線誘導システムの導入と走行車両の車線変更との関連性についての知見を得ることを目的として、実交通流データを用いた分析を行った。その結果、走光型視線誘導システムの車線変更に対する直接的な効果は、その区間における交通状態に応じて車線変更率の増加方向にも減少方向にも変化する可能性が示唆された。

Key Words : moving light guide system , lane change, traffic congestions, expressway

1. 研究背景・目的

東日本高速道路（NEXCO東日本）の報告によると、高速道路において発生する渋滞の約7割は交通集中に起因するものであり、さらにそのうち6割強が上り坂およびサグ部において発生している。そこで近年では、サグ部における渋滞対策の一つとして走光型視線誘導システムの導入が全国各地で進んでいる。走光型視線誘導システムとは、道路側面やトンネル上部等に一定間隔でLED式の移動発光体を設置し、光が進行方向に流れるように点滅パターンを制御するシステムである。これは生物が光刺激に反応して移動する特性「走光性」や、一定方向に運動する視覚パターンを観察した場合に自分が逆方向に運動しているかのように錯覚する現象「視覚誘導性自己運動感覚（Vection）」を利用したものであり、運転者が無意識に光に追従することで、サグ部における速度低下の抑制や渋滞流における走行速度の早期回復、適正車間距離の維持を図るものである。2011（平成23）年の三陸自動車道を皮切りに、現在では東京湾アクアラインや首都高速道路、阪神高速道路などでシステムの導入が行

われている。実際に発光体が設置された区間を対象とした交通流の分析から、走光型視線誘導システムの導入が渋滞流における捌け台数増加に一定の効果をもつことは既に明らかになっている¹⁾。また、走光型視線誘導システムが走行車両の車群間速度差を縮小させる可能性があること²⁾、さらに前方車両との車頭時間を短縮させる可能性があること³⁾が既往研究から示唆されている。加えて、サグ部での走行車両の車線変更挙動が周辺の交通流に影響を与え、高速道路上における渋滞発生の要因となっている可能性も現在までに明らかになっている⁴⁾。

高速道路を走行する車両が車線変更を実行する事由について、前方車両との走行速度に乖離が生じて車間距離が縮小されることにより、前方車両に追従する状態となることを回避するため行う場合が多いと考えられる。走光型視線誘導システムに上述のような車両走行速度の上昇、車群間の速度差縮小効果があるとすれば、走光型視線誘導システムの導入はサグ部における減速波発生、あるいは事故発生の一因とされる車線変更の抑制にも繋がっていることが予想される。しかし、これまでに走光型

視線誘導システムが車線変更に対してどのような影響を及ぼしているか研究された事例は少ない

そこで本研究は、走光型視線誘導システムの導入と走行車両の車線変更との関連性についての知見を得ることを目的とする。車線変更は、走光型視線誘導システムが運転者に与える光刺激や、光刺激からもたらされる交通流の変化によってそのメカニズムが変化する現象であることが予想される。したがって、走光型視線誘導システムと交通流との関係、走光型視線誘導システム導入前後の交通流と車線変更の関係のそれぞれに対してマクロな観点からの分析を行う。

2. 研究手法

本研究で対象としている走光型視線誘導システムは、東名高速道路下り線、三ヶ日JCT～新城PA間の宇利トンネル（L=910m）付近に導入されたものである（図-1）。三ヶ日JCTから静岡・愛知県境付近までの約2.7km区間が長い上り坂となっており、途中にサグ部を有するため宇

利トンネル入口付近を先頭とした渋滞が発生しやすい。なお当該区間は走行車線と追越車線の片側2車線で運用されている。この上り勾配区間のうち、走光型視線誘導システムはサグ部を含む延長約2.2kmの区間に導入されている。発光体は左側路肩部に、明り部では4m間隔、トンネル部では5m間隔で設置された。発光体の形状は横80mm×縦200mmの矩形であり、発光色は緑色、流光速度は100km/hに設定されている。システム導入区間内にはトラフィックカウンターおよび複数のビデオカメラが設置され、これを交通量および車線変更の観測に用いた。

本研究では、2014（平成26）年3月の土曜日および日曜日、計4日間の観測データを用いた。いずれも渋滞発生直前の30分間を読み取り対象時間としており、30分間交通量がほぼ同一になるような時間帯が選択されている（表-1）。またシステム導入区間は観測に用いたビデオカメラの設置位置により区間A～Cの3区間に分割した。観測データから、各区間における車両通過時刻、通過台数、地点速度、車間距離といった交通流に関する情報、

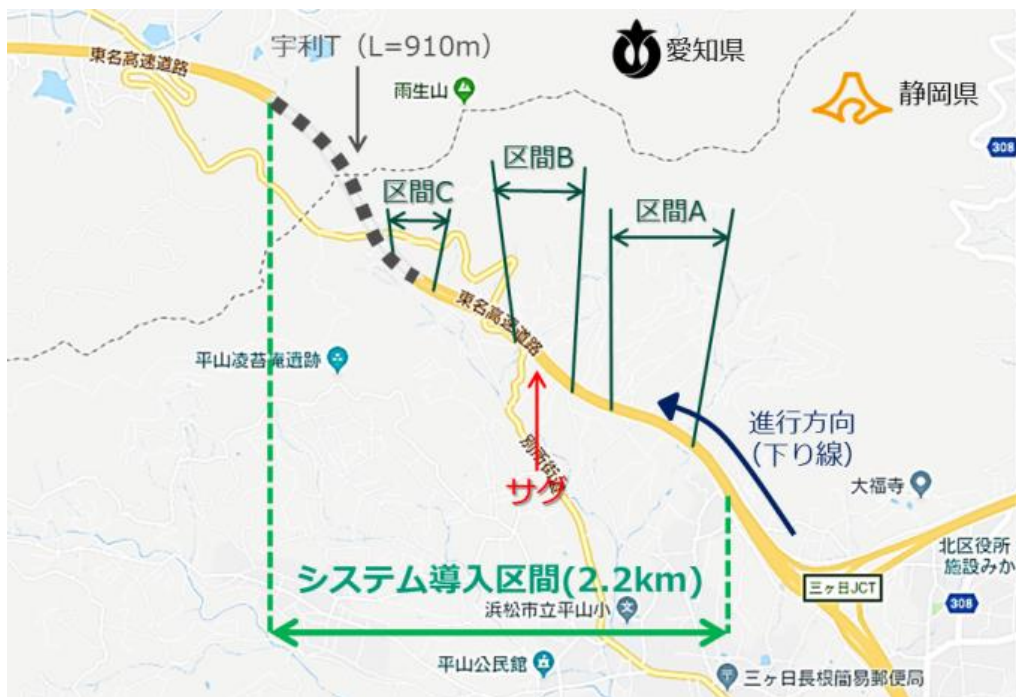


図-1 東名高速道路宇利トンネル付近分析範囲

表-1 分析対象日時と交通量、点灯状況

読み取り対象日	読み取り時間	交通量	点灯状況
2014（平成26）年3月16日（日）	14：35～15：05（30分間）	1237台/30分	点灯
2014（平成26）年3月22日（土）	15：10～15：40（30分間）	1282台/30分	消灯
2014（平成26）年3月23日（日）	13：30～14：00（30分間）	1301台/30分	消灯
2014（平成26）年3月29日（土）	15：00～15：30（30分間）	1316台/30分	点灯

ならびに車線変更実行車両の車種や車線変更方向、時刻などの車線変更に関する情報を取得し、1分単位で集計した。車線変更については、観測区間長や交通量が異なる複数のデータについて統一した指標を用いて分析するため、1台km当りの車線変更数を算出した。この値をある1分間における車線変更率と定義し、被説明対象として分析に用いることとした。

3. 走光型視線誘導システムによる交通流変化

はじめに、本研究で対象とした日時および区間における走光型視線誘導システムの導入が交通流にどのような変化を与えているか明らかにするため、走光型視線誘導システム導入前後の走行速度、走行速度の標準偏差、車間距離の値を車線毎に比較した(表-2)。

走光型視線誘導システムの導入後は、導入前と比較して車両走行速度が低下するとともに、同一車線内での速度の標準偏差が大きくなることが確認された。また、走行車線の速度減少幅に対して追越車線の速度減少幅が大きいため、結果として車線間の走行速度差が減少していることも明らかとなった。さらに、走行車線では車間距離の拡大が見られた一方、追越車線では車間距離の縮小が確認された。

本研究で確認された同一車線内で速度偏差や車間距離が拡大する現象は、既往研究とは異なる結果である。これは、発せられる光に対する反応車両と非反応車両の混在が結果的に走行状態の不整化に繋がった可能性が要因として考えられる。

4. 車線変更分析結果

(1) 概要

交通流の変化は車線変更は何らかの影響を与えることが予想される。両者の関連性について把握するため、走行速度および車間距離と車線変更率との相関を分析した。走行速度および車間距離については車線別の値のほか車線間の平均値や差分値を用いることとした。ここで「差分値」とは、追越車線の値から走行車線の値を減じた値である。また車線変更率についてはこれ以降、走行車線から追越車線への車線変更を「L→R方向」、追越車線から走行車線への車線変更を「R→L方向」と記述する。

(2) 交通流状態量—車線変更率

走行速度および車間距離に関する種々の値の中から1変数を選択し、その1変数と車線変更率の関係性について分析した。

表-2 システム導入前後の交通流比較

(a) 走行車線

走行車線	導入前	導入後
走行速度(m/s)	22.461	22.405
速度偏差(m/s)	1.571	1.672
車間距離(m)	64.924	67.996

(b) 追越車線

追越車線	導入前	導入後
走行速度(m/s)	27.208	26.464
速度偏差(m/s)	2.338	2.966
車間距離(m)	64.196	63.235

図-2は、車線間の走行速度差分とL→R車線変更率の関係を示したものである。これより、車線間の走行速度差分が大きくなるほどL→R車線変更率が大きくなる傾向が確認された。追越車線の走行速度が走行車線の走行速度に対して相対的に大きい場合、走行車線を走行中の各車両は希望走行速度を維持するために追越車線へ車線変更を実行することが予想されるため、この結果は論理的にも整合性のあるものと考えられる。一方、両車線の走行速度差分とR→L車線変更率について、その関係性は不明瞭であった。

図-3は、車線間の車間距離差分とL→R車線変更率の関係を示したものである。車線変更先の車間距離が大きい場合ほど余裕のある車線変更を実行できるため車線変更率が増加すると考えられるが、今回はそのような傾向を明瞭に確認することはできなかった。これより、渋滞発生直前の交通流における車線変更は、変更先車線の車間距離よりも走行速度の低下が主な動機となって実行されている可能性が示唆された。

(3) 車線変更率を推定する非線形モデルの導出

交通流と車線変更率の相関を定量的に分析するため、走行速度や車間距離といったマクロな交通状態から車線変更率を算出するモデルを構築した。そして、走光型視線誘導システムの導入が車線変更のメカニズムに与える影響に関する知見を得るため、モデルのパラメータ値をシステム導入前後で比較した。このとき、導入前後におけるパラメータ値の差分は、走光型視線誘導システムが直接的に車線変更率に与えている影響と換言することができる。

車線変更率は確率の形で表現することができるため、非線形モデルの関数形をロジット型(式-1)とし、この関数形に挿入するXの式について複数パターンの検討を行うこととした。

$$P = \frac{1}{1+\exp(X)} \quad (\text{式-1})$$

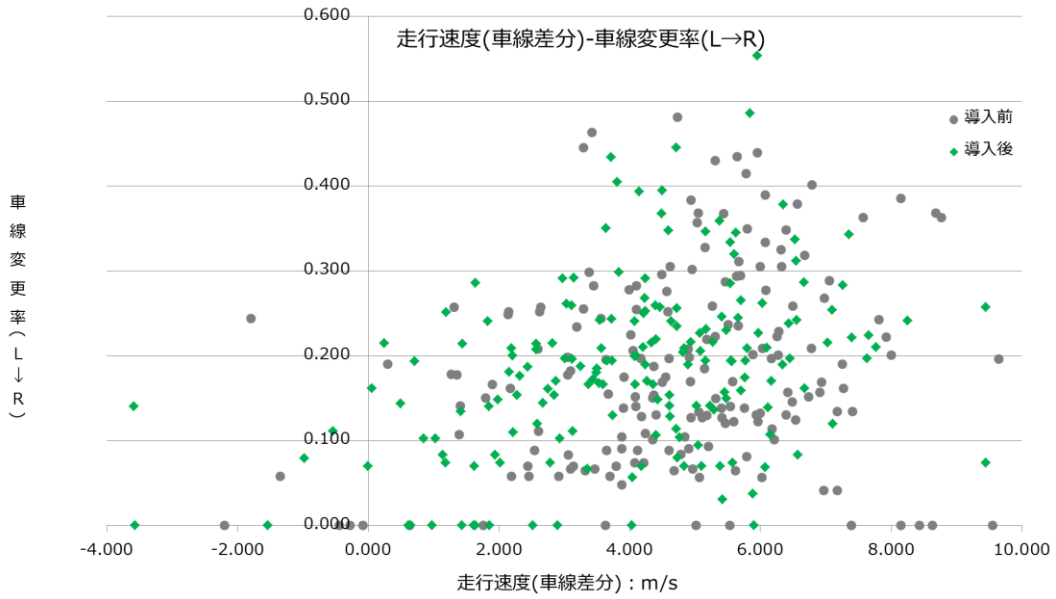


図-2 車線間走行速度差分—L→R方向車線変更率

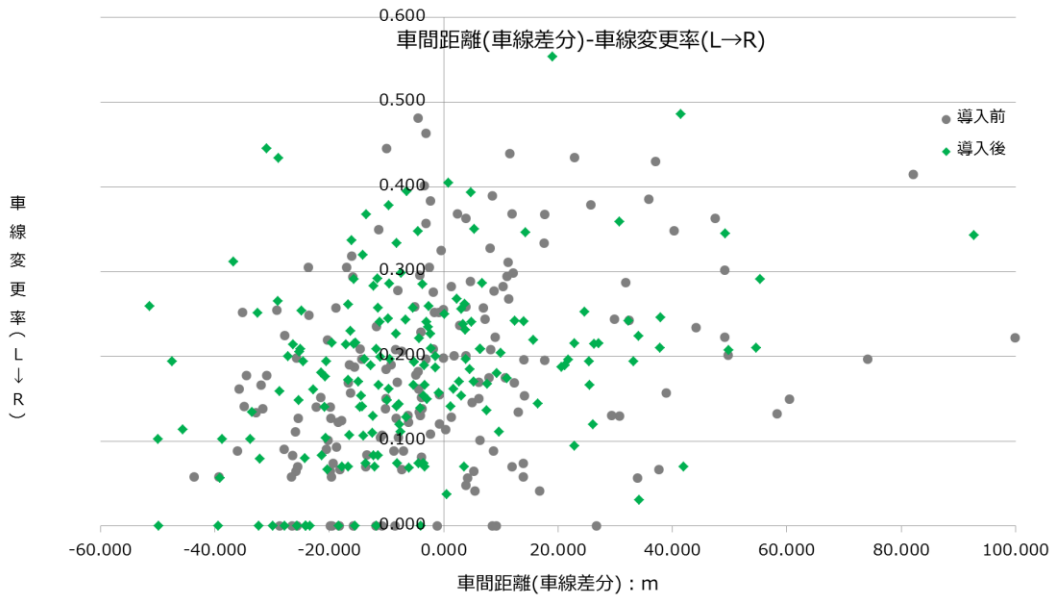


図-3 車線間車間距離差分—L→R方向車線変更率

Xの式内で用いる交通流の状態量については、前節までの分析結果から車線変更率に比較的大きな影響を与えていると考えられる「車線間平均走行速度」「車線間平均車間距離」「車線間走行速度差分」「車線間車間距離差分」の4変数を用いることとした。式の形については、車線間平均値および車線間差分値を和の形、積の形で様々に表現し、合計14種の非線形モデル式を用意した。

表-3には用意した14モデルのうち最尤推定法によって

パラメータが一定値に収束した8モデルのモデル式を示し、表-4には各モデルのパラメータ値推定結果を車線変更の方向別に示している。ここで、 v は走行速度、 s は車間距離を意味し、車線間平均値は上横線、車線間差分値は Δ で表現されている。 s_1 と s_2 はそれぞれ走行車線と追越車線の車間距離を示し、L→R方向の分析では s_2 、R→L方向の分析では s_1 を式に挿入した。また残差SEとは残差の標準誤差 (Residual standard error) を意味している。

表-3 非線形モデルのモデル式

モデル名	モデル式
モデル1	$P = \frac{1}{1 + \exp(\alpha\Delta v + \beta\Delta s + \gamma)}$
モデル2	$P = \frac{1}{1 + \exp(\alpha\Delta v\Delta s + \beta\bar{v}s + \gamma)}$
モデル3	$P = \frac{1}{1 + \exp(\alpha\Delta v\bar{v} + \beta\Delta s\bar{s} + \gamma)}$
モデル4	$P = \frac{1}{1 + \exp(\alpha\Delta v\bar{s} + \beta\Delta s\bar{v} + \gamma)}$
モデル5	$P = \frac{1}{1 + \exp(\alpha\frac{\Delta v}{\bar{v}} + \beta\frac{\Delta s}{\bar{s}} + \gamma)}$
モデル6	$P = \frac{1}{1 + \exp(\alpha\frac{\bar{v}}{\Delta v} + \beta\frac{\bar{s}}{\Delta s} + \gamma)}$
モデル7	$P = \frac{1}{1 + \exp(\alpha\Delta v\bar{v} + \beta\Delta s + \gamma)} \times \frac{1}{1 + \exp(\delta s_1, s_2 + \varepsilon)}$
モデル8	$P = \frac{1}{1 + \exp(\alpha\Delta v + \beta\Delta s\bar{v} + \gamma)} \times \frac{1}{1 + \exp(\delta s_1, s_2 + \varepsilon)}$

表4 非線形モデルパラメータ推定結果

(a) L→R

L→R		導入前				導入後			
	パラメータ	推定結果	t値	P値	有意	推定結果	t値	P値	有意
モデル1	α	-0.057	-1.629	0.105	n.s.	-0.038	-1.433	0.154	n.s.
	β	-0.006	-2.707	0.008	***	-0.002	-0.755	0.451	n.s.
	γ	1.860	10.145	0.000	***	1.758	13.469	0.000	***
	残差SE	0.581				0.509			
モデル2	パラメータ	推定結果	t値	P値	有意	推定結果	t値	P値	有意
	α	-0.002	-3.534	0.001	***	5E-04	0.968	0.335	n.s.
	β	2E-04	1.396	0.165	n.s.	0.000	-3.772	0.000	***
	γ	1.285	5.632	0.000	***	2.252	11.968	0.000	***
残差SE	0.587				0.495				
モデル3	パラメータ	推定結果	t値	P値	有意	推定結果	t値	P値	有意
	α	-0.003	-2.218	0.028	**	-0.002	-1.683	0.094	*
	β	-5E-05	-1.827	0.070	*	-3E-05	-1.156	0.250	n.s.
	γ	1.937	11.182	0.000	***	1.787	14.100	0.000	***
残差SE	0.585				0.506				
モデル4	パラメータ	推定結果	t値	P値	有意	推定結果	t値	P値	有意
	α	2E-04	0.447	0.656	n.s.	-0.001	-2.761	0.006	***
	β	-3E-04	-2.971	0.003	***	3E-05	0.254	0.800	n.s.
	γ	1.525	10.375	0.000	***	1.882	15.477	0.000	***
残差SE	0.587				0.502				
モデル5	パラメータ	推定結果	t値	P値	有意	推定結果	t値	P値	有意
	α	-0.850	-0.959	0.339	n.s.	-0.746	-1.097	0.274	n.s.
	β	-0.638	-3.665	0.000	***	-0.111	-0.641	0.522	n.s.
	γ	1.738	9.347	0.000	***	1.716	12.821	0.000	***
残差SE	0.575				0.511				
モデル6	パラメータ	推定結果	t値	P値	有意	推定結果	t値	P値	有意
	α	0.005	0.397	0.692	n.s.	-1E-04	-0.976	0.331	n.s.
	β	0.001	1.288	0.199	n.s.	0.002	0.899	0.370	n.s.
	γ	1.547	18.153	0.000	***	1.581	31.538	0.000	***
残差SE	0.605				0.510				
モデル7	パラメータ	推定結果	t値	P値	有意	推定結果	t値	P値	有意
	α	-0.003	-1.460	0.146	n.s.	-0.022	-0.798	0.426	n.s.
	β	-0.019	-1.860	0.065	*	-0.037	-0.467	0.641	n.s.
	γ	1.279	1.161	0.247	n.s.	-2.340	-0.893	0.373	n.s.
	δ	0.017	0.895	0.372	n.s.	-0.005	-1.907	0.058	*
ϵ	-1.580	-0.449	0.654	n.s.	1.846	9.079	0.000	***	
残差SE	0.569				0.505				
モデル8	パラメータ	推定結果	t値	P値	有意	推定結果	t値	P値	有意
	α	-0.055	-1.275	0.204	n.s.	-0.080	-0.302	0.763	n.s.
	β	-0.001	-1.981	0.049	**	4E-04	0.339	0.735	n.s.
	γ	1.277	1.281	0.202	n.s.	-0.497	-0.137	0.891	n.s.
	δ	0.018	0.954	0.341	n.s.	-0.009	-1.502	0.135	n.s.
ϵ	-1.767	-0.515	0.607	n.s.	1.711	1.088	0.278	n.s.	
残差SE	0.571				0.502				

(b) R→L

R→L		導入前				導入後			
	パラメータ	推定結果	t値	P値	有意	推定結果	t値	P値	有意
モデル1	α	-0.050	-1.920	0.057	*	-0.068	-2.349	0.020	**
	β	-0.003	-1.356	0.177	n.s.	0.005	1.745	0.083	*
	γ	2.496	17.567	0.000	***	2.693	17.894	0.000	***
	残差SE	0.423				0.434			
モデル2	パラメータ	推定結果	t値	P値	有意	推定結果	t値	P値	有意
	α	-1.E-04	-0.284	0.777	n.s.	0.001	2.431	0.016	**
	β	-3.E-04	-2.131	0.035	**	-3.E-04	-2.458	0.015	***
	γ	2.647	13.865	0.000	***	2.855	15.255	0.000	***
残差SE	0.427				0.428				
モデル3	パラメータ	推定結果	t値	P値	有意	推定結果	t値	P値	有意
	α	-0.002	-2.450	0.015	**	-0.002	-1.833	0.069	*
	β	-3.E-05	-0.958	0.340	n.s.	1.E-04	2.319	0.022	**
	γ	2.547	19.210	0.000	***	2.675	18.218	0.000	***
残差SE	0.422				0.431				
モデル4	パラメータ	推定結果	t値	P値	有意	推定結果	t値	P値	有意
	α	-6.E-04	-1.661	0.099	*	-0.001	-2.849	0.005	***
	β	-9.E-05	-0.957	0.340	n.s.	3.E-04	2.711	0.008	***
	γ	2.431	19.959	0.000	***	2.755	21.059	0.000	***
残差SE	0.425				0.424				
モデル5	パラメータ	推定結果	t値	P値	有意	推定結果	t値	P値	有意
	α	-0.890	-1.307	0.193	n.s.	-1.262	-1.687	0.094	*
	β	-0.292	-1.815	0.071	*	0.423	1.936	0.055	*
	γ	2.413	16.428	0.000	***	2.690	17.092	0.000	***
残差SE	0.424				0.434				
モデル6	パラメータ	推定結果	t値	P値	有意	推定結果	t値	P値	有意
	α	1.E-03	0.533	0.581	n.s.	-0.002	-1.351	0.179	n.s.
	β	-0.007	-3.318	0.001	***	1.E-03	0.810	0.420	n.s.
	γ	2.249	46.040	0.000	***	2.439	41.914	0.000	***
残差SE	0.436				0.438				
モデル7	パラメータ	推定結果	t値	P値	有意	推定結果	t値	P値	有意
	α	-0.011	-1.645	0.102	n.s.	-0.002	-1.328	0.186	n.s.
	β	-0.022	-1.105	0.271	n.s.	0.005	1.565	0.120	n.s.
	γ	-0.251	-0.384	0.702	n.s.	2.140	3.572	0.000	***
	δ	-0.003	-0.858	0.392	n.s.	-0.029	-0.894	0.373	n.s.
ε	2.186	7.676	0.000	***	1.214	1.469	0.144	n.s.	
残差SE	0.419				0.422				
モデル8	パラメータ	推定結果	t値	P値	有意	推定結果	t値	P値	有意
	α	-0.260	-1.535	0.127	n.s.	-0.042	-1.356	0.177	n.s.
	β	-0.001	1.042	0.299	n.s.	2.E-04	1.454	0.148	n.s.
	γ	-0.296	-0.430	0.668	n.s.	2.126	3.617	0.000	***
	δ	-0.003	-0.948	0.344	n.s.	-0.030	-0.938	0.350	n.s.
	ε	2.205	7.408	0.000	***	1.283	1.598	0.112	n.s.
残差SE	0.422				0.422				

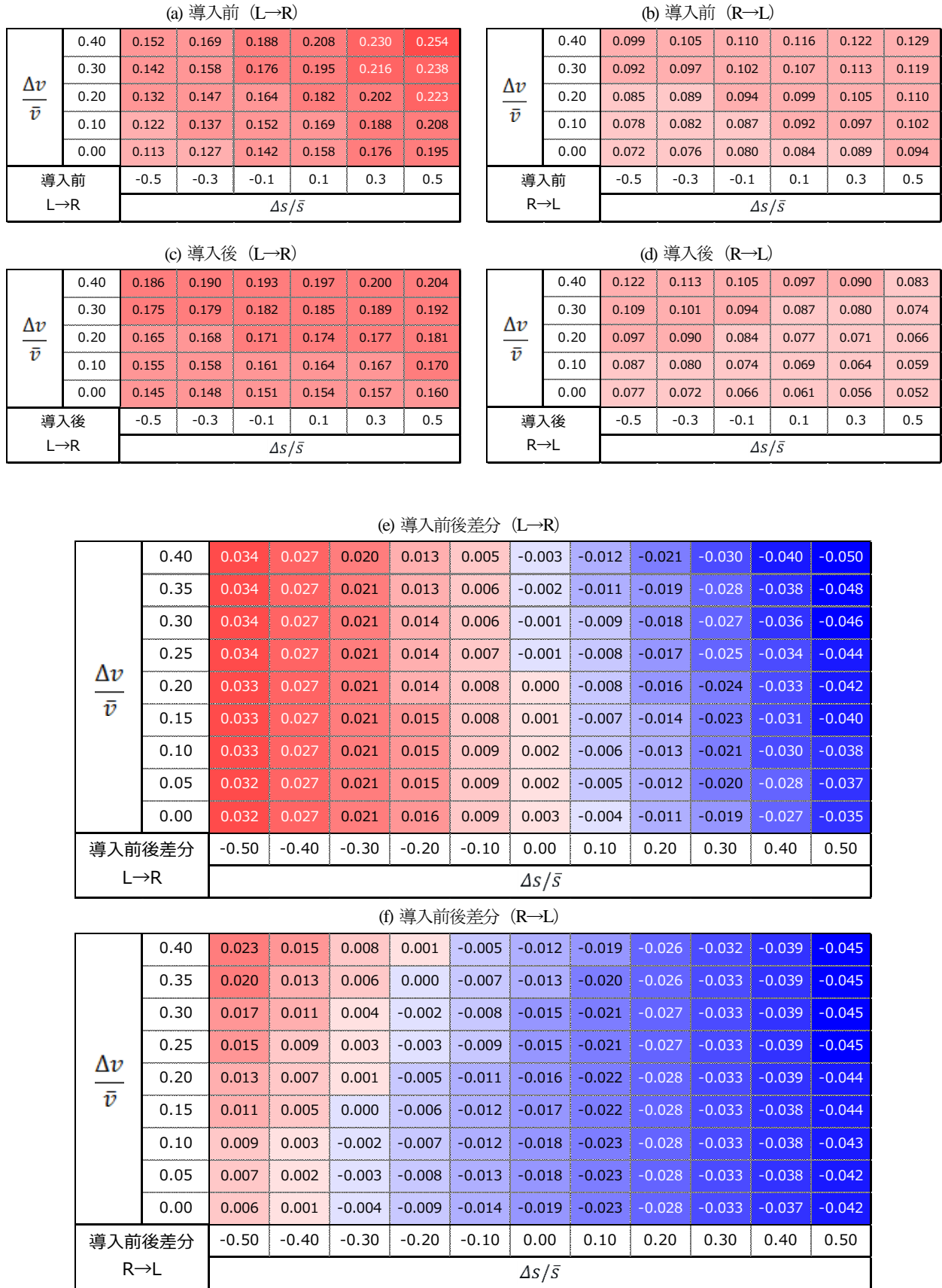


図4 モデル5を適用した際の推定車線変更率

さらにこのうちモデル5について、推定されたパラメータ値を用いて、走行速度項および車間距離項に一定の数値を入力した際の車線変更率を計算した。図-4は、モデル5を適用した際の走光型視線誘導システムの導入前と導入後の推定車線変更率、および導入前後の差分を車線変更の方向別に示したものである。なおここでは縦方向に車線間走行速度差分を車線間平均走行速度で除した値、横方向に車線間車間距離差分を車線間平均車間距離で除した値を任意に入力している。車間距離差分を平均車間距離で除した値は、L→R方向ではおよそ0、R→L方向ではおよそ-0.3を境界として、正方向に増加するほど導入後の車線変更率が導入前と比較して減少し、逆に負方向に増加するほど導入後の車線変更率が導入前と比較して増加していることが明らかとなった。すなわち、走光型視線誘導システムの車線変更に対する直接的な効果は、その区間における交通状態に応じて増加方向にも減少方向にも変化する可能性が示唆された。

5. 結論と課題

本研究では、東名高速道路の走光型視線誘導システム導入区間において観測された実交通流データを用いて、走光型視線誘導システムの導入と走行車両の車線変更挙動との関連性について分析した。その結果、走行車線と追越車線の走行速度の差分が大きくなるほどL→R方向の車線変更率が大きくなる傾向が確認された。また、渋滞発生直前の交通流においては、車線間の車間距離差分に比べて車線間の走行速度差分が車線変更率の上昇により大きな影響を与えている可能性が示唆された。さらに、車線変更率を被説明対象、交通流の状態量を説明変数とした非線形モデルのパラメータ推定結果から、走光型視線誘導システムの車線変更に対する直接的な効果は、その区間における交通状態に応じて増加方向にも減少方向にも変化する可能性が示唆された。

本研究で得られた結果は、ある4日間を対象とした局地的かつ限定的な交通流から得られたデータを基に導出されたものである。これらの結果は走光型視線誘導シ

テム導入区間の地理的条件や運用方法によっても大きく変化することが予想される。本研究の結果が様々な条件変化に対しても普遍的に述べられるためには、複数の走光型視線誘導システム導入区間に対して同様の分析を行う必要があると考えられる。また、車線変更はその意思決定から実行まで様々な要因が干渉する複雑な現象であり、メカニズムの全容を解明するためにはそれらの個々のプロセスについて実態をより精密に観測、分析する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 遠藤元一, 中川浩, 深瀬正之, 橋本弾: 東京湾アクアラインの渋滞対策について, 交通工学論文集, Vol. 1, No. 4 特集号, pp.B1-B8, 2015.
- 2) 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, 高速道路と自動車第 58 巻(2), pp.28-36, 2015.
- 3) 渡邊秀, 柳原正実, 小根山裕之: 渋滞時の加速挙動に着目した走光型視線誘導システムの影響分析, 交通工学論文集, Vol.4, No.1, pp.A88-A96, 2018.
- 4) 牧野浩志, 鈴木一史, 鹿野島秀行, 山田康右, 堀口良太: 車線変更行動に着目したサグ部渋滞発生要因の分析と渋滞対策アプローチ, 土木学会論文集 D3, Vol.71, No.5, I.1001-I.1009, 2015
- 5) 岩崎真純, 野中康弘: 高速道路における車線変更モデルに関する研究レビュー, 第 55 回土木計画学研究会・講演集, No.20, 2017.
- 6) 近藤啓介, 鈴木高宏: ミクロ・マクロ両視点からの高速道路における車線変更モデルの同定, 生産研究, Vol.59, No.3, pp.205-209, 2007.
- 7) 塩見康博, 小園達也: 車線交通量の均衡状態を仮定した高速道路サグ部の車線利用特性の分析, 交通工学論文集, 第1巻, 第2号(特集号A), pp.A_158-A_164, 2015.
- 8) Mehdi Keyvan-Ekbatani, Victor L.Knoop, Winnie Daamen: Categorization of the lane change decision process on freeways, Transportation research part C: emerging technologies, 69, 515-526, 2016.

(2019.?.?? 受付)

Empirical analysis of the influence of Moving Light Guide System on Lane Change

Suguru WATANABE, Masami YANAGIHARA and Hiroyuki ONEYAMA