

走光型視線誘導システムによる 加速挙動時の車頭時間変化要因分析

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

サグ部における渋滞対策の一つとして速度低下の抑制や渋滞の早期回復を目的に設置されている「走光型視線誘導システム」について、渋滞流中の捌け台数増加効果を高める発光要因に関する研究は未だ多くない。そこで本研究では、追従走行車両の車頭時間に影響を与える発光要因に関する知見を得ることを目的として、ドライビングシミュレータを用いて発光体の設置有無・発光体形状および輝度を変更して比較運転実験を行い、加速挙動時の車頭時間変化に影響を与えると考えられる発光体の発光要因について分析した。その結果、走光型視線誘導システムには明らかな捌け台数増加効果がみられ、特に発光体の形状変化は追従走行車両の車頭時間短縮に影響を与えやすい可能性が示唆された。

Key Words : moving light guide system , driving simulator, traffic congestions, expressway

1. 研究背景・目的

わが国の高速道路では、上り坂およびサグ部における交通集中に起因する渋滞が頻繁に発生しており、近年ではこれらの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、道路側面に一定間隔でLED式移動発光体を設置し、光が車の進行方向に流れるように動的点滅制御することで、運転者に刺激を与えるものである。運転者が一定方向に移動する視覚パターンを視認した場合に逆方向に運動しているかのように錯覚する特性を利用することで無意識下での走行速度の調整を意図している。

走光型視線誘導システム導入効果の検証事例として、遠藤らによる東京湾アクアラインに設置された走光型視線誘導システムによる渋滞対策の効果分析が行われている¹⁾。サグ部での速度低下抑制および渋滞流中における車両の早期速度回復を目的に設置した走光型視線誘導システムに関して、その光の流れる速度と渋滞対策効果との関係が検証されている。これにより、速度低下抑制と走行速度回復に効果的である光の流れる速度は「車両の

実走行速度+10~20km/h」であることが示唆された。また発光体設置後の運用結果から、自由流においてピーク15分間交通流率が約3.2%増加したこと、および渋滞発生時の捌け交通量が約2.2%増加したことが確認された。

また亀岡らは、東名高速道路三ヶ日JCT付近にて実施した走光型視線誘導システムの運用実験において、延長1.8km区間に設置された移動発光体についてその設置区間を5ブロックに分割し、ブロックごとに点灯パターンを変化させて効果を検証した²⁾。車両検知器データおよび宇利トンネル内CCTVデータから、発光体設置区間のうち一部区間のみ点灯した場合よりも全区間で点灯した場合のほうが捌け台数が増加すること、また全区間を同一速度で点灯した場合よりも、途中地点で流光速度を変化させたほうが捌け台数が増加することが確認された。

上述した区間を含む既設区間では移動発光体の様々な効果検証が行われているが、既設区間におけるLED発光体は小型かつ矩形のものがほとんどであり、発光体形状などの発光条件を様々に変化させた研究や、渋滞回復時の運転挙動変化に対して影響を与える発光要因に関してミクロな視点で分析を行った研究は少ない。そこで本研

究では、走光型視線誘導システムによる捌け台数増加効果にミクロな視点で着目し、車頭時間変化に影響を与えると考えられる発光体の発光要因に関する知見を得ることを目的とする。

2. 実験概要

本研究ではDSを用いた走行実験の結果に基づいて、渋滞解消地点における速度回復時の加速挙動に着目した走光型視線誘導システムの渋滞対策効果を比較分析する。DS実験は、周辺環境や道路構造など自車の走行に影響を与えると考えられる要因が同一であり、発光体の形状と輝度のみが異なる条件下で複数回行った。具体的には、発光体の効果を分析するための実験時の条件として、発光体の発光の有無に加え、発光体の形状と輝度の2つの条件が異なる12の点灯条件下の走行を行った。

発光体形状に関しては図-1のような「小型矩形」「大型矩形」「矢印型」「三角形」の4種類の形状を比較する。既設区間におけるLED発光体はそのほとんどが保守性や経済性の観点から小型矩形となっている。そこで本研究では、発光面の大きさや形状が走行車両の追従性に与える影響を分析するため、4種類の発光面を有する発光体について検証する。

発光体輝度に関しては、輝度の大きさ別に3つの条件を考慮する。道路側面を流れる光について考えるとき、生物は光刺激に反応する特性を有していることから、その光刺激の目立ちやすさは運転者による光への無意識な反応行動および走行車両の加速挙動に何らかの影響を与えることが予想される。本研究において実験時の発光体の明るさの違いはDS上における発光色の設定によって表現する。ディスプレイ上の色表現の1つであるHSL色空間は色相値・彩度値・輝度値から構成され、そのうちの輝度値は色の相対的な明るさを表し、最小値で黒、最大値で白となる0-100の値である。本研究では輝度値が60(小型矩形のみ12)・50・70の場合について比較を行う。以下ではそれぞれ輝度小、輝度中、輝度大として記述する。輝度値の大きさについては原色を表す輝度値50を基準とし、DSディスプレイ上で明確に明るさの変化が感じ取れることを条件として設定した。

DS実験に際しては、現実空間で速度変化時に感じる加減速度を仮想空間上の運転では感じる事ができない等、運転感覚について乖離が発生することが知られている。特に本研究において利用したDS装置では、ステアリング操作の再現性が比較的低い状態であった。このような再現性の低下を抑制するため、関東近郊でステアリング操作が容易な長大直線区間を有している点、かつ実空間において走光型視線誘導システムの設置による効果発現が確認されているという点から、全長7.70km、車線

幅員3.50m、片側2車線の東京湾アクアラインの高速道路空間を実験用道路空間として採用した。また、走行時に周辺環境から運転者が受ける視覚的刺激を最小限に抑えるため、比較分析の対象となる区間については全てトンネル内とした。道路空間上には図-2のような発光体を道路両側側面に設置した。また、渋滞回復時の挙動を分析するため、道路上の渋滞流を追従積み重ね方式を用いて2種類生成し、実験時の周辺車両として利用した。追従積み重ね方式とは、まず完成した仮想道路上を実際に単独走行して走行ログを取得することで渋滞流の先頭車挙動を設定したのち、この先頭車を前方車両として後続車の追従走行を実施し、その後続車のデータを得るという作業を繰り返し行うことで減速波の増幅伝播を発生させた渋滞流を単独の走行を複数回行うことで生成する方法である。実験時間の制約のため、表-1のような実験条件間の比較分析を行えるよう実験を行った。これらの実験では、被験者の渋滞への慣れを考慮して、「発光体消灯」「輝度中」の実験では前方車両の挙動を最終的に急加速するように、「輝度小」「輝度大」の実験では前方車両が渋滞流終端で緩やかな加速をするように設定した。

実験は20代12名、30代13名、40代5名の計30名の普通自動車免許を保有する男性に対して行った。被験者は月1日以上運転を行っている25～44歳の一般男性20名と20代の学生被験者10名である。実験に際しては初めに十分な練習走行を経たのち、発光体の形状・輝度が異なる走行と「発光体消灯」の走行を合わせて1人当たり4～5回の本実験を実施した。また実験終了後には自由記述回答を含むアンケートを実施し、被験者個人属性のほか、発光体に対して被験者が抱いた印象を尋ね、各発光体に対する被験者の主観的な評価を調査した。表-2は、被験者に対して行ったアンケートの主な調査項目を示したものである。なお、本実験は首都大学東京の研究安全倫理委員会の承認を得て行ったものである。

表-1 発光条件と渋滞流設定

走行条件	発光体消灯	輝度小	輝度中	輝度大
小型矩形	急加速	緩慢加速	急加速	緩慢加速
大型矩形	急加速	緩慢加速	急加速	緩慢加速
矢印型	急加速	緩慢加速	急加速	緩慢加速
三角形	急加速	緩慢加速	急加速	緩慢加速

表-2 主なアンケート調査項目

カテゴリ	主な質問内容
発光体	光が流れていることに気がついたか
	光の流れに追従しようと思ったか
	光の流れを邪魔だと感じたか
	どのような光が追従しやすいと思うか
個人属性	性別
	年齢
	職業
	ふだん運転する車種
	ふだん運転する目的
運転経験年数	
最近1年間の運転頻度	

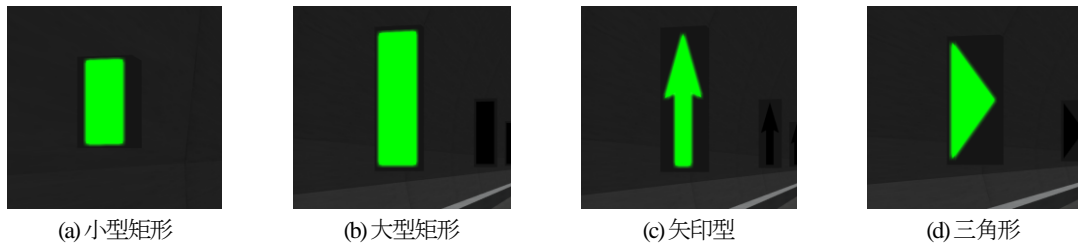


図-1 発光体形状

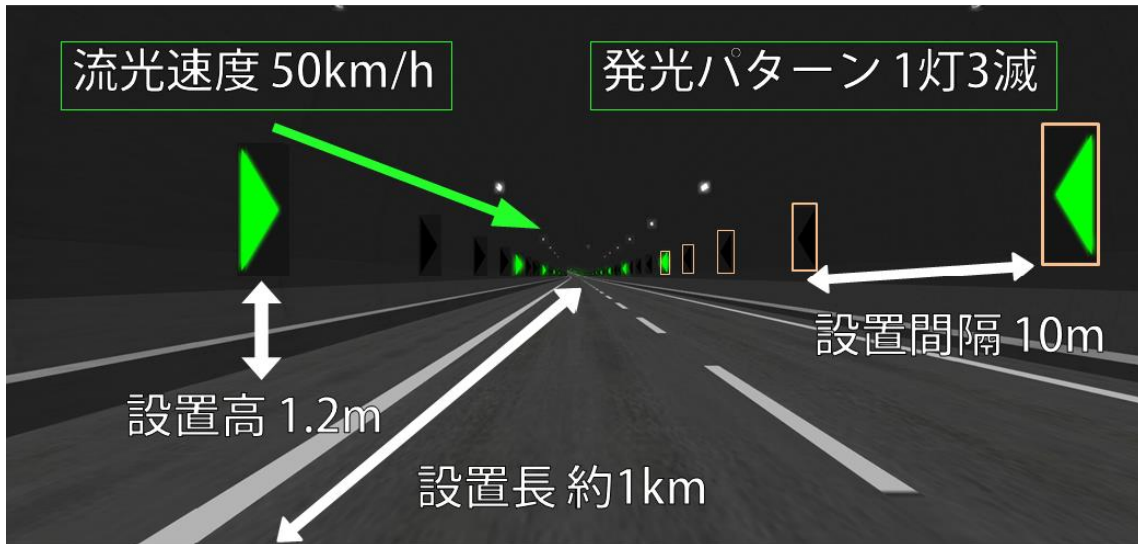


図-2 発光体点灯イメージ (三角形・輝度中)

3. 運転挙動分析結果

(1) 概要

走行実験により被験者30名、計147回分の走行ログが得られた。本研究では、走光型視線誘導システムの渋滞対策効果として、渋滞時の捌け台数の増加効果に焦点をあてる。道路上における車両捌け台数の増加というマクロな指標は、ミクロな視点では車頭時間の短縮と換言することができるため、各条件下における車頭時間の比較分析を行う。具体的には、発光体設置区間中の一定断面における実験車両と前方車両の間の車頭時間を求め、これを車両捌け台数の評価指標として用いることとした。以下では、走行道路における発光体設置区間始点を0mと定義する。発光体設置区間終点は1,030m地点であり、サグは600m地点に存在する。

(2) 発光体形状別比較

図-3は、すべての走行について、発光体設置区間内における走行速度と車頭時間の平均値推移を発光体輝度別に示したものである。消灯時との比較ができる「輝度中点灯時」の図に着目すると、いずれの形状で点灯させた場合も消灯時に比べて走行速度が上昇するとともに車頭時間は小さくなっており、走光型視線誘導システムによって渋滞中の捌け台数が増加することが明らかとなった。

また、矢印型の場合に最も車頭時間の減少幅が大きくなった。したがって、前進を想起させる形状の発光体を点灯させることは運転者に対して加速を促し、捌け台数の増加に結びつく可能性があると考えられる。

(3) 発光体輝度別比較

すべての走行回のうち「輝度小点灯時」「輝度大点灯時」の走行について、発光体設置区間内における走行速度と車頭時間の平均値推移を比較した。両者に大きな差は見られなかったが、車頭時間は「輝度大点灯時」のほうがわずかながら短縮されていることが判明した。したがって輝度の大きい、すなわち、より明るい光を用いた場合に捌け台数増加効果が大きくなる可能性があると考えられる。

(4) 車頭時間のばらつき分析

すべての走行回のうち「消灯時」「輝度中点灯時」の走行について、発光体点灯形状ごとのデータのばらつきを可視化するため、450m、600m、800m、1,000mの各地点を抽出し、形状別に車頭時間の箱ひげ図を作成した。図-4は、抽出した各地点における車頭時間の箱ひげ図である。被験者の運転挙動には個人差が大きく、いずれの形状の場合も車頭時間のばらつきが大きくなる傾向がみられた。

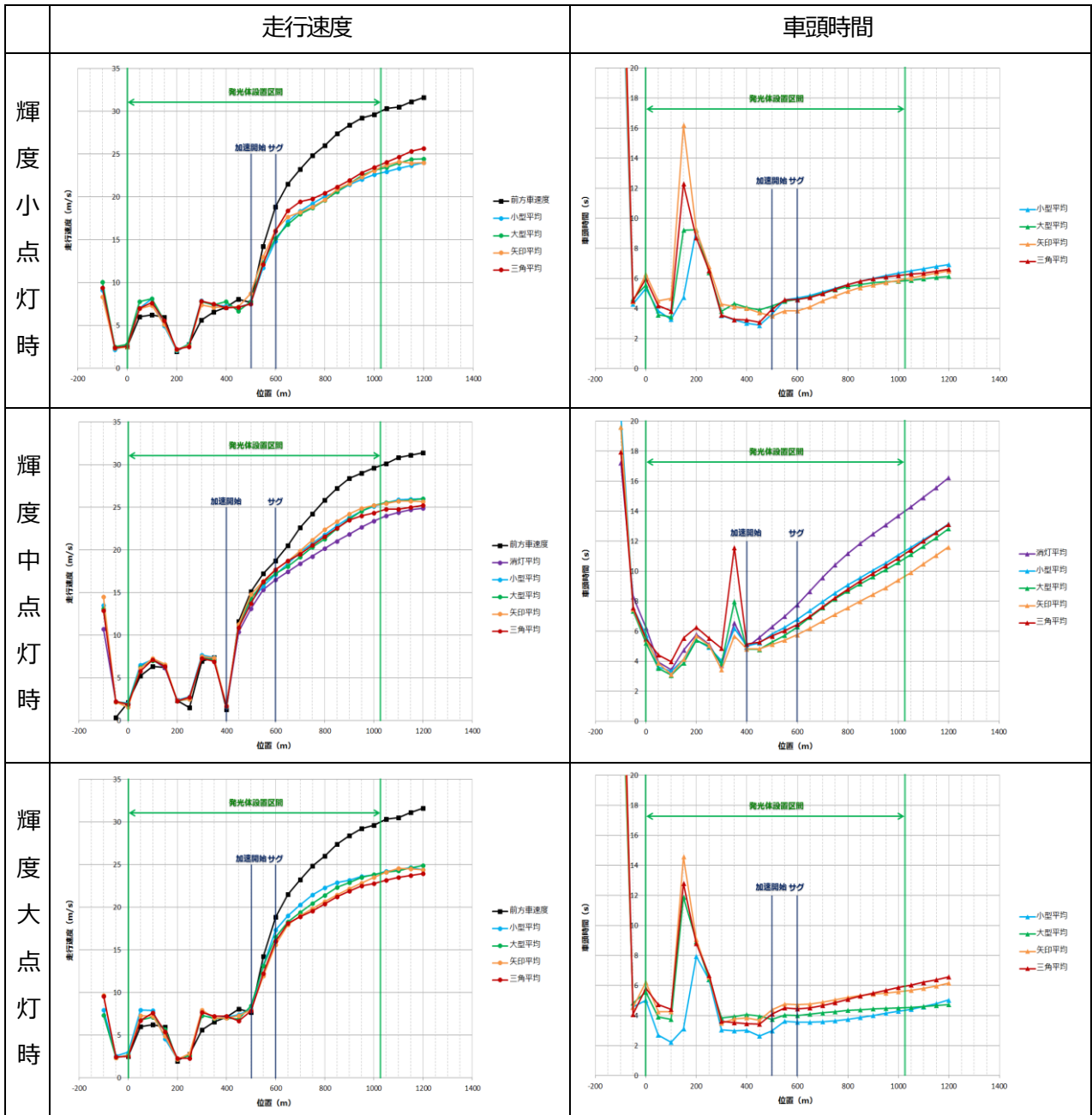


図-3 走行速度と車頭時間の推移

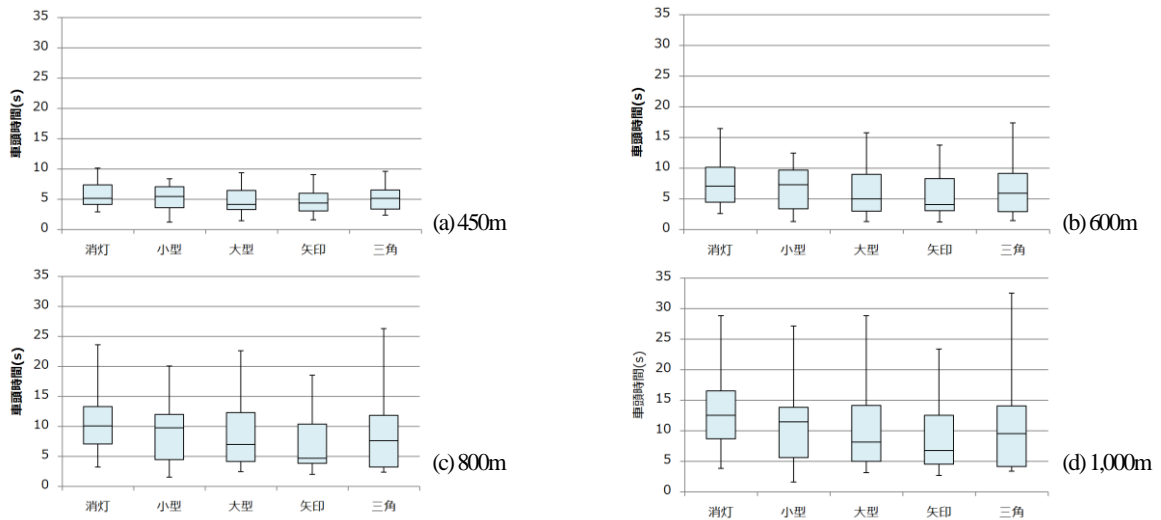


図-4 車頭時間のばらつき

(5) 車頭時間平均値の比較

「発光体消灯時」と各形状の発光体における「輝度中点灯時」の走行速度と車頭時間について、450m, 600m, 800m, 1,000mの各地点を抽出し、発光体形状別に整理した平均値の差を t 検定によって検定し、両者の値に有意な差が検出されているかを確認した。検定には 1%, 5%, 10%の有意水準を設定し、各水準で有意差が検出されるかどうかを確認した。表-3 は、抽出した各地点における走行速度と車頭時間の t 検定結果を示したものである。表中では、「***」は 1%有意、「**」は 5%有意、「*」は 10%有意、「n.s.」は有意水準 10%でも有意差が認められなかったことを示す。データのばらつきが大きいため、非有意となる検定結果が多くなったが、矢印型発光体では走行速度・車頭時間ともに比較的有意差が検出されやすい傾向が確認された。

4. 事後アンケート結果

運転中の被験者が実験中に視認した走光型視線誘導

システムについてどのように感じたかを、運転時を思い出して回答してもらった。質問内容は、1) 走行時に光が流れていることに気がついたか、2) 流れている光に追従して走ろうと思ったか、3) 流れている光を邪魔だと感じたか、という3項目であり、各項目に肯定または否定の選択肢を設けて被験者に回答を求めた。走行時に光が流れていることに気がついたと回答した被験者のうち、「光に追従して走ろうと思った」と回答したのは28名中8名であった。実験走行ログの分析ではいずれの発光体を点灯させた場合でも車頭時間の短縮が確認されていた。しかしアンケートの結果からは、およそ7割の被験者が光の流れに追従しようと思っていなかったことが明らかとなった。このことから、被験者が光に対する追従を意識的に行っていたとは言えず、観測された加速挙動が多くの場合無意識的に行われていた可能性が推察できる。また、28名中22名が「光の流れを邪魔だとは感じなかった」と回答しており、ほとんどの被験者は光の流れそのものを運転の妨げになるとは感じていなかったことが明らかとなった。

表-3 平均値に対する t 検定結果

(a) 走行速度(450m)					(b) 車頭時間(450m)				
発光条件	走行速度(m/s)	t値	P値	検定結果	発光条件	車頭時間(s)	t値	P値	検定結果
消灯	10.401				消灯	5.572			
小型(輝度中)	10.888	0.826	0.208	n.s.	小型(輝度中)	5.194	-0.570	0.286	n.s.
大型(輝度中)	11.188	1.352	0.094	*	大型(輝度中)	4.769	-1.245	0.111	n.s.
矢印(輝度中)	11.277	1.409	0.087	*	矢印(輝度中)	4.810	-1.092	0.143	n.s.
三角(輝度中)	10.868	0.833	0.206	n.s.	三角(輝度中)	5.259	-0.473	0.320	n.s.

(c) 走行速度(600m)					(d) 車頭時間(600m)				
発光条件	走行速度(m/s)	t値	P値	検定結果	発光条件	車頭時間(s)	t値	P値	検定結果
消灯	16.506				消灯	7.753			
小型(輝度中)	17.105	0.818	0.211	n.s.	小型(輝度中)	6.780	-0.802	0.214	n.s.
大型(輝度中)	17.206	1.120	0.136	n.s.	大型(輝度中)	6.272	-1.169	0.126	n.s.
矢印(輝度中)	17.688	1.866	0.037	**	矢印(輝度中)	5.755	-1.633	0.057	*
三角(輝度中)	17.664	1.456	0.080	*	三角(輝度中)	6.441	-1.095	0.141	n.s.

(e) 走行速度(800m)					(f) 車頭時間(800m)				
発光条件	走行速度(m/s)	t値	P値	検定結果	発光条件	車頭時間(s)	t値	P値	検定結果
消灯	20.137				消灯	11.156			
小型(輝度中)	21.789	1.894	0.034	**	小型(輝度中)	9.068	-1.164	0.127	n.s.
大型(輝度中)	21.271	1.567	0.063	*	大型(輝度中)	8.660	-1.387	0.088	*
矢印(輝度中)	22.358	2.967	0.003	***	矢印(輝度中)	7.535	-2.119	0.021	**
三角(輝度中)	21.564	1.433	0.082	*	三角(輝度中)	8.777	-1.280	0.105	n.s.

(g) 走行速度(1,000m)					(h) 車頭時間(1,000m)				
発光条件	走行速度(m/s)	t値	P値	検定結果	発光条件	車頭時間(s)	t値	P値	検定結果
消灯	23.384				消灯	13.674			
小型(輝度中)	25.121	1.856	0.037	**	小型(輝度中)	11.054	-1.149	0.130	n.s.
大型(輝度中)	25.232	2.340	0.012	**	大型(輝度中)	10.576	-1.386	0.088	*
矢印(輝度中)	25.207	2.138	0.020	**	矢印(輝度中)	9.379	-2.004	0.027	**
三角(輝度中)	24.330	0.918	0.183	n.s.	三角(輝度中)	10.848	-1.207	0.119	n.s.

5. 要因分析

確認された車頭時間の変化について、より大きな影響を与えていると考えられる要因に関しての知見を得るため、各発光条件や運転者の属性を説明変数とする重回帰分析を実施した。重回帰分析は、消灯時を含むすべての輝度における走行を対象とした。2種の渋滞流それぞれについて前方車加速開始地点を基準点とし、その地点からの走行距離500m地点まで、100m毎に計5地点を抽出して分析を行った。被説明変数は各地点における車頭時間である。説明変数には、「前方車」の挙動（前方車が渋滞解消地点において比較的急加速する場合1、緩慢な加速をする場合0）、「輝度大」、そして「小型矩形」「大型矩形」「矢印型」「三角形」の計4種の形状を示すダミー変数を設定した。さらに事後アンケートの結果から、被験者の運転経験年数（年）、年間運転頻度（回/年）、および、光に気がついたかどうか、光に追従しようと思ったか、光を邪魔だと思ったかの項目を示す3個のダミー変数を加えて計11項目とした。

表-4は、各渋滞流終端の加速開始地点から100m、200m、300m、400m、500m下流の各地点における重回帰分析の結果を示したものである。分析結果から、発光体形状が車頭時間短縮に与える影響が大きいことが判明した。特に矢印型発光体は他形状の発光体に比べ、車頭時間への影響が大きい結果となった。また、「光に気づいた」場合には車頭時間が増加する方向に影響を与え、逆に「光を邪魔だと感じた」場合には車頭時間が短縮される方向に影響を与えることが判明した。このことから、運転者が発光体から発せられる光に気づくことは必ずしも車頭時間の短縮につながらない可能性が示唆された。

表-4 重回帰分析結果(n : 147)

(a)加速開始地点から100m

重決定係数		0.207		
説明変数	係数	t	P-値	
切片	2.096	1.942	0.054	
前方車	1.116	2.075	0.040	
輝度大	-0.036	-0.057	0.955	
小型矩形	-0.845	-1.276	0.204	
大型矩形	-0.957	-1.453	0.149	
矢印型	-1.089	-1.668	0.098	
三角形	-0.185	-0.284	0.776	
運転年数	0.036	1.162	0.247	
運転頻度	0.000	0.024	0.981	
気づいた	3.041	3.828	0.000	
追従	0.043	0.091	0.928	
邪魔	-1.133	-2.164	0.032	

(b)加速開始地点から200m

重決定係数		0.201		
説明変数	係数	t	P-値	
切片	2.623	1.689	0.094	
前方車	1.507	1.961	0.052	
輝度大	-0.282	-0.314	0.754	
小型矩形	-1.500	-1.582	0.116	
大型矩形	-1.562	-1.647	0.102	
矢印型	-1.759	-1.869	0.064	
三角形	-0.799	-0.842	0.401	
運転年数	0.056	1.228	0.222	
運転頻度	-0.001	-0.460	0.646	
気づいた	3.592	3.130	0.002	
追従	0.308	0.459	0.647	
邪魔	-1.480	-1.990	0.049	

(c)加速開始地点から300m

重決定係数		0.221		
説明変数	係数	t	P-値	
切片	3.391	1.724	0.087	
前方車	2.090	2.147	0.034	
輝度大	-0.505	-0.443	0.659	
小型矩形	-2.266	-1.887	0.061	
大型矩形	-2.279	-1.897	0.060	
矢印型	-2.575	-2.161	0.032	
三角形	-1.365	-1.135	0.258	
運転年数	0.066	1.154	0.251	
運転頻度	-0.002	-0.576	0.566	
気づいた	4.079	2.806	0.006	
追従	0.577	0.677	0.499	
邪魔	-1.859	-1.974	0.050	

(d)加速開始地点から400m

重決定係数		0.242		
説明変数	係数	t	P-値	
切片	4.116	1.797	0.075	
前方車	2.790	2.461	0.015	
輝度大	-0.584	-0.440	0.660	
小型矩形	-2.814	-2.013	0.046	
大型矩形	-2.912	-2.081	0.039	
矢印型	-3.236	-2.331	0.021	
三角形	-1.777	-1.269	0.207	
運転年数	0.068	1.021	0.309	
運転頻度	-0.002	-0.641	0.522	
気づいた	4.340	2.564	0.011	
追従	0.826	0.833	0.406	
邪魔	-2.186	-1.993	0.048	

(e)加速開始地点から500m

重決定係数		0.255		
説明変数	係数	t	P-値	
切片	4.577	1.770	0.079	
前方車	3.508	2.740	0.007	
輝度大	-0.581	-0.388	0.699	
小型矩形	-3.196	-2.024	0.045	
大型矩形	-3.413	-2.160	0.033	
矢印型	-3.701	-2.361	0.020	
三角形	-2.066	-1.306	0.194	
運転年数	0.069	0.919	0.360	
運転頻度	-0.003	-0.651	0.516	
気づいた	4.576	2.393	0.018	
追従	1.035	0.924	0.357	
邪魔	-2.506	-2.024	0.045	

6. 結論と課題

本研究ではDSを用いて移動発光体の発光条件変更実験を行い、加速挙動時の車頭時間変化に影響を与えると考えられる発光体の発光要因について分析した。その結果、走光型視線誘導システムを点灯させた場合には、形状等に関わらず、消灯時と比較して明らかな捌け台数増加効果があることがわかった。特に矢印型発光体は車頭時間が短縮される傾向にあり、車両の進行方向を指し示す図形が捌け台数の増加により効果的である可能性が示唆された。しかし、走行結果は運転者による個人差が大きく、発光体設置区間内のいずれの地点においても、発光体消灯時と発光体点灯時の走行速度や車頭時間に有意差は検出されにくいという結果になった。重回帰分析からは、発光体の発光形状が車頭時間に与える影響が大きいことが判明した。今後の課題として、有意差を検出し本実験の信頼性を向上させるため、標本数を増加させて実験を重ねる必要がある。また、重回帰分析における重決定係数はおよそ0.20-0.25と低い値になっているため、車頭時間に影響を与えていると考えられる他の発光条件についても検討を行う必要がある。さらに、特に捌け台数増加効果の向上が確認された発光条件については実空間での検証を行い、実際の道路上での効果の再現性について検証

する必要があると考えられる。

謝辞：本研究はJSPS科研費・基盤研究（B）「高速道路における日本式アクティブトラフィックマネジメントの体系化」（研究代表者：塩見 康博）JP 16H04433の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 遠藤, 中川, 深瀬, 橋本: 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, 小根山, 渡部, 櫻井: 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緩和の効果検証, 第33回交通工学研究発表会論文集, 2013.
- 3) 植田, 玉川, 兒玉, 萩原: 深江サグ部における速度回復誘導灯を用いた渋滞対策について, 第53回土木計画学研究発表会・講演集, 2016.
- 4) 飯田, 三木, 森, 大口ほか: 実走実験とドライビングシミュレータを用いた室内実験によるサグ部の運転挙動分析, 土木計画学研究・講演集, No.22 (2), pp.967-970, 1999.
- 5) 境野広志: 速さの視覚表現についての研究, 第52回日本デザイン学会研究発表大会概要集, p.72, 2005.

(?????.?.?? 受付)

Effects of the Moving Light Guide System on Outgoing Volumes at Downstream of Congestion

Suguru WATANABE, Masami YANAGIHARA and Hiroyuki ONEYAMA