

走光型視線誘導システムの設置形態に着目した 渋滞流走行車両の挙動に関するDS実験

柳原 正実¹・齋藤 裕太²・小根山 裕之³

¹正会員 首都大学東京 都市環境学部 都市基盤環境学科 (〒192-0364 東京都八王子市南大沢1-1)
E-mail: yanagihara@tmu.ac.jp

²非会員 首都大学東京 都市環境学部 都市基盤環境学科 (〒192-0364 東京都八王子市南大沢1-1)
E-mail: oneyama@tmu.ac.jp

³正会員 首都大学東京 都市環境学部 都市基盤環境学科 (〒192-0364 東京都八王子市南大沢1-1)
E-mail: oneyama@ed.tmu.ac.jp.

高速道路において発生する渋滞の約45%が上り坂及びサグ部などにおける交通集中に起因するものである。そこで渋滞対策の1つとして、各高速道路会社は走光型視線誘導システムを導入している。このシステムは速度超過対策や速度低下の抑制、渋滞からの早期速度回復を目的としたもので、渋滞流中の捌け交通量の増加に効果があり渋滞流に影響を及ぼしていることが過去の研究によって明らかになっている。しかし、走光型視線誘導システムの設置形態、すなわちドライバーの視界に対してどの位置に光源を設置するかに関する研究は過去にほとんど行われていない。本研究では、ドライビングシミュレータを利用し走光型視線誘導システムの設置形態を変化させて実験を行うことにより、設置形態と運転挙動の関係についての知見を得た。

Key Words : moving light system, driving simulator, traffic congestion, new installation mode

1. 研究背景・目的

高速道路における渋滞の73%が交通集中に起因するもので、さらに交通集中の61%が上り坂及びサグ部で発生していると東日本高速道路は報告している¹⁾。上り坂及びサグ部では道路勾配の変化にドライバーが気づけず、前方車が無意識に速度低下し、後続車が連鎖的にブレーキを踏むことにより渋滞が発生する。そこで近年、上り坂及びサグ部の渋滞対策の1つとして「走光型視線誘導システム」が導入されている。走光型視線誘導システムとは、LED式の発光体を路肩などに設置し、進行方向に流れて見えるように発光体を点滅させドライバーに光を追いかけようと意識させることで、無意識の速度低下の抑制や渋滞の早期回復を促すシステムである。このシステムは、生物が光刺激に反応して移動する「走光性」という性質と、実際には停止しているはずが、視覚情報によって自身も動いていると錯覚してしまうといった「自己運動感覚 (ベクション)」を利用したものである。また岡田らの研究では、走光型視線誘導システムにより、捌け交通量が増加していることが明らかになっている²⁾。

人間の光に対する反応は視野内の光の位置にも影響を受けている可能性がある。そして、走光型視線誘導システムを路肩をはじめ道路のどの位置に設置するかという設置形態に関する研究は過去にほとんど行われていない。したがって本研究では、ドライビングシミュレータを利用しVR空間上にLED式の発光体を設置した道路空間再現し、周辺状況などの条件を統一させ、走光型視線誘導システムの設置形態を変化させて実験を行う。その結果をもとに走光型視線誘導システムの設置形態と運転挙動の関係についての知見を得ることを目的とする。

2. 既往研究

走光型視線誘導システムに関連する研究で加藤ら³⁾は東京湾アクアラインにおけるペースメーカーライトの運用と効果検証について分析を行った。東京湾アクアラインに設置されているLEDライトの速度設定にあたり、本運用に先立ち試行期間を設け、自由流時及び渋滞流時の最適速度を設定した。そこで効果検証を行った結果、自

由流時は80km/h, 渋滞流時では50km/hで運用することにより交通流率が増加することがわかった. さらに本運用の結果ピーク15分間交通流率, 渋滞発生時交通量, 混雑後走行速度, 渋滞時所要時間の指標に改善が確認された.

また渡邊ら⁴⁾の研究では, DSを用いて走行実験を行い, 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行ログを取得し, 分析を行った. この実験では発光体形状と発光体輝度を変化させ実験を行った. 結論として, 矢印・三角形など進行方向を指し示す図形, またより輝度値の大きい発光体が渋滞流中の捌け交通量を増加させることが明らかになった. さらに柳原らの研究⁵⁾⁶⁾では, 被験者の走光型視線誘導システムに関する認識や走光型視線誘導システムの設置区間を変化させてDS実験を行い, 個々の被験者の運転挙動がどのように変化するかを分析した. 特に発行体の設置区間については極端に長い場合も短い場合もその効果が弱まることが確認されている. これらの結果から, 走光型視線誘導システムの設置形態に関しても, 車両挙動に影響を与える可能性が高いと考えられる.

これまで発光体の速度, 形状, 輝度, 認識, 設置区間などを変化させた結果を得ているが, 現在実用化及び検証されている走光型視線誘導システムの設置位置は路肩がほとんどであり, 設置位置に関する影響分析は行われていない. 本研究では図-1のような路面設置型の走光型視線誘導システムを他の形態と比較することで, 設置位置に関する知見を得ることを目的としている.

3. 実験方法

(1) 実験概要

本研究では, 走光型視線誘導システムの設置形態を変化させて走行実験を行うが, 実際に設置形態を変えた時の交通流に及ぼす影響, また, 設置形態を変えるコストの面から考えても, 実道実験をすることは難しい. そこで本実験ではフォーラムエイト社の UC-win/Road ドライブシミュレータ (以下 DS) を利用し, VR 空間上で走行実験を行う. 本実験では, 渋滞流走行車両の走行ログを取得し, また実験終了後にはアンケート調査を実施した.

(2) 実験コース

本実験では東京湾アクアラインを模した実験コースを作成した. 東京湾アクアラインをモデルにした理由は, 実際に走光型視線誘導システムが導入され渋滞対策指標に改善が見られていて, 長大な直線でトンネル内ということで, 気象などの外的要因に左右されないといったことが挙げられる.

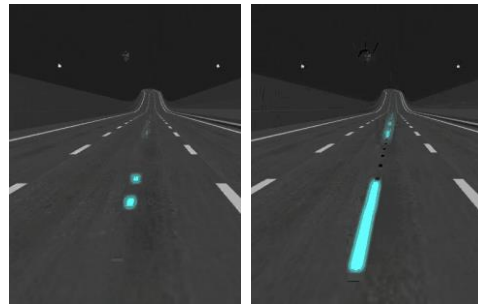


図-1 路面設置型の走光型視線誘導システムのVR再現画像 小・2灯6減(左) 大・2灯6減(右)

表-1 実験条件

設置形態	発光体形状(mm ³)	発光パターン	発光体速度
消灯	-	-	50km/h
路肩	110 × 20 × 200	1灯3減	
道路埋込型	20 × 100 × 1250(小) 20 × 100 × 5000(大)	2灯6減 or 1灯3減	

表-2 走行順α

走行順	渋滞流	PML設置位置	PML形状・発光パターン
1	C	消灯	-
2	B	埋込	大・2灯6減
3	C	埋込	小・2灯6減
4	B	埋込	大・1灯3減
5	C	埋込	小・1灯3減
6	B	消灯	-
7	C	埋込	大・2灯6減
8	A	消灯	-
9	C	埋込	大・1灯3減
10	A	埋込	大・2灯6減
11	C	路肩	-
12	A	路肩	-

表-3 走行順β

走行順	渋滞流	PML設置位置	PML形状・発光パターン
1	A	路肩	-
2	C	路肩	-
3	A	埋込	大・2灯6減
4	C	埋込	大・1灯3減
5	A	消灯	-
6	C	埋込	大・2灯6減
7	B	消灯	-
8	C	埋込	小・1灯3減
9	B	埋込	大・1灯3減
10	C	埋込	小・2灯6減
11	B	埋込	大・2灯6減
12	C	消灯	-

本実験では走光型視線誘導システムが, 片側3車線道路を走行する車両に及ぼす影響を見るため, 実験コースは片側3車線道路となっている. 実験コースの途中にはサグ部(勾配: 上り 0.2%から上り 4.0%に変化)を設けており, また発光体の設置区間はサグ部より600m上流から始まる1kmの区間である.

(3) 実験条件

本実験では, 発光体の設置形態・発光体形状・発光パターンの3つを実験条件とし, 表-1に示すように条件を変えて実験を行った. 以下道路埋込型の実験条件については「小・2灯6減」のように示す.

片側 3 車線道路で第 2 走行車線を走行する時、走光型視線誘導システムが路肩に設置されていると視認性が悪いためシステムの効果が発現されないことが懸念される。そこで本実験では設置形態の 1 つとして道路埋込型（第 2 走行車線のみを設置）の走光型視線誘導システムに着目し、その検証を行う。この道路埋込型の走光型視線誘導システムの効果を検証するにあたり、比較対象として発光体消灯時と路肩設置（両側）の走光型視線誘導システムの効果を確認する走行実験も行う。

(4) 渋滞流作成方法

本研究では、渋滞解消時における車両の加速挙動に着目し検証する。したがって渋滞流中を走行する区間を設定している。この渋滞流は渡邊ら⁴⁾の研究を参考に、コンピュータによる交通流の自動生成よりも実際の走行挙動に近くなると考えられる追従積み重ね方法を採用した。まず渋滞流の先頭車両を担当者が運転し DS 内で走行挙動を記録する。次に最初に走行挙動を記録した先頭車両を再生して、それを見ながら同じ担当者が 2 台目の車両を運転する。同様にして後続車両も運転・記録する。この時渋滞が発生するよう約 30km/h で先頭車を運転している。途中の渋滞解消地点以降は大きく加速するような挙動を行っている。

また被験者の渋滞流への慣れを防ぐため、渋滞解消地点を変更した 3 パターンの渋滞流を作成した。これらの渋滞解消地点は、渋滞流 A はサグ部付近、渋滞流 B はサグ部の 25 m 下流、渋滞流 C はサグ部の 10 m 上流とした。

(5) 実験実施

被験者については、運転免許を保有した学生 9 名と 20 代前半～40 代前半男性 20 名の計 29 名である。期間は 2018 年 11 月 21 日（水）～2018 年 12 月 13 日（木）のうちの 16 日間である。DS での運転は、実際の道路での運転と感覚が異なることがあるので、DS の操作に慣れてもらうため、実験走行の前に約 3 分の練習走行を行う。練習走行のコースは、「消灯」と同様のコースを走行する。実験走行は全被験者に、「消灯」、「路肩」、「小・2 灯 6 滅」、「小・1 灯 3 滅」、「大・2 灯 6 滅」、「大・1 灯 3 滅」の全 6 条件を走行してもらう。今回は渋滞流 C をメインに走行し、ダミー走行として渋滞流 A と渋滞流 B を走行する。実験走行は 1 回あたり約 3 分である 1 人あたり 12 回走行する。被験者はサグ部の 900 m 上流から初速 80km/h で走行を開始し、トンネル終点部のサグより 1 km 下流で走行は終了となる。本実験では、車線変更は禁止し第 2 走行車線のみを走行してもらった。また前方の車両に追従して走行し普段どおりの運転を心がけるよう被験者に指示した。また、走行順により走光型視線誘導シ

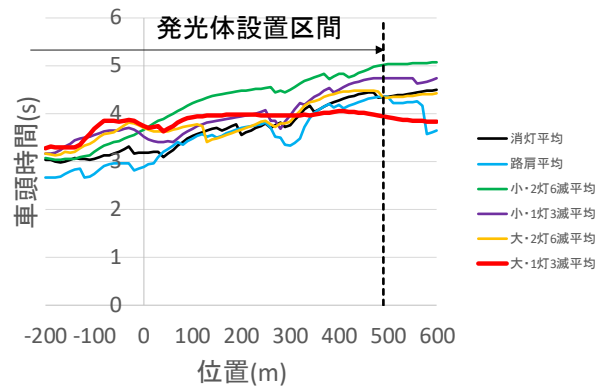


図-1 全被験者の実験条件ごとの車頭時間変化図

表-4 対応のある t 検定（区間差分）

パターン	区間差分(s)	t値	p値
消灯	1.095		
路肩	1.493	-0.664	0.256
小・2灯6滅	1.358	-0.635	0.265
小・1灯3滅	1.224	-0.233	0.409
大・2灯6滅	0.653	0.788	0.219
大・1灯3滅	0.218	1.645	0.056 *

※ * 10%有意

ステムの影響に差が出ないように、2通りの走行順を用意した。以下表-2、表-3に示す。

(6) アンケート調査

実験終了後に、被験者全員にアンケート調査を行った。1 つ目のアンケートは、被験者の属性や実験内容に関する内容である。属性については、被験者の性別・年齢・職業・保有免許・主運転車種・主運転目的・運転頻度などを調査し、実験内容については、発光体の設置形態や、道路埋込型の発光体の形状について、イラストを見ながら選択方式のアンケートとした。2 つ目のアンケートは、社団法人人間生活工学研究センターの HQL 式運転スタイルチェックシートを利用した。このアンケートによって、運転者の主観的な運転特性を知ることができる。

4. 分析結果

(1) 分析概要

本実験で得られたデータは、渋滞流 A, B, C を走行した時の走行ログとアンケート結果である。走行ログについては、車両の位置・速度・加速度・スロットル値・接線加速度などが取得できる。さらに渋滞流作成時に取得した前方車両の走行ログを利用して、被験者の車頭時間を算出することができる。マクロな視点でみた車両捌け台数の増加は、ミクロな視点では車頭時間の短縮とみる

ことができる。そこで本研究では車頭時間を主な評価指標とする。今回渋滞流Cをメインに走行したため、渋滞流Aと渋滞流Bについては渋滞流への慣れを防ぐためのダミー走行であったため、渋滞流Cの走行ログのみを分析する。渋滞流Cを走行した29名のうち、27名分の走行ログが欠損なく取得できた。渋滞解消地点と発光体設置区間終了地点（以下発光体終了点と呼ぶ）の間の車頭時間の差分（以下区間差分と呼ぶ）を各実験条件で比較する。また渋滞解消地点・サグ部・発光体終了点における各実験条件と消灯時の車頭時間の差分（以下消灯差分と呼ぶ）を比較する。

(2) 全被験者の平均車頭時間のグラフ

渋滞流 C を走行した実験条件ごとの全被験者の平均車頭時間を算出し、車頭時間の推移を可視化するため、車頭時間の変化図を図-2に示す。グラフについては渋滞解消地点を 0m と定義し、横軸は進行方向を正として渋滞解消地点からの距離とする。

(3) 区間差分検定結果

渋滞流Cを走行した全被験者の各実験条件の区間差分の平均値を表-4に示す。さらに各実験条件と消灯時との差について、対応のあるt検定の結果を表-4に加える。

「大・2灯6滅」と「大・1灯3滅」の結果は「消灯」に比べ区間差分が少ない。よって、前方車両に追従することができていると考えられる。また「大・1灯3滅」の区間差分の平均値と「消灯」の区間差分の平均値の差に有意水準10%で有意差が見られた。すなわち走光型視線誘導システムの効果があったと考えられ、車頭時間が短縮される傾向がみられた。この2つの条件のときに区間差分の平均値が「消灯」の結果に比べて小さくなる傾向がみられた理由の1つとして、発光体の視認性が良好であったことが挙げられる。本実験では片側3車線の高速道路を想定しているため、路肩に設置されている発光体よりも、道路埋込型の発光体の方が視認性が良いと考えられる。

(4) 消灯差分検定結果

渋滞流 C を走行した全被験者の各実験条件の各地点（渋滞解消点・サグ部・発光体終了点）における消灯差分を表-5、表-6、表-7に示す。さらに各実験条件と消灯時との差について、対応のあるt検定の結果を表-5、表-6、表-7に合わせて示した。ここで消灯差分とは各実験条件における車頭時間から消灯時における車頭時間を減じた値である。よって、消灯差分が負の値となった時、消灯時と比較して各実験条件の車頭時間が短縮されていると考えてよい。

表-5と表-6を見てわかるように、渋滞解消地点及びサ

表-5 対応のあるt検定・渋滞解消地点（消灯差分）

パターン	消灯差分(s)	t値	p値	
路肩-消灯	-0.206	0.514	0.306	
小・2灯6滅-消灯	0.458	-2.132	0.021	**
小・1灯3滅-消灯	0.322	-1.114	0.138	
大・2灯6滅-消灯	0.517	-1.016	0.160	
大・1灯3滅-消灯	0.643	-1.432	0.082	*

※**5%有意, *10%有意

表-6 対応のあるt検定・サグ部（消灯差分）

パターン	消灯差分(s)	t値	p値	
路肩-消灯	-0.044	0.087	0.466	
小・2灯6滅-消灯	0.587	-3.239	0.002	***
小・1灯3滅-消灯	0.056	-0.229	0.410	
大・2灯6滅-消灯	0.219	-0.480	0.318	
大・1灯3滅-消灯	0.427	-1.020	0.158	

※***1%有意

表-7 対応のあるt検定・発光体終了点（消灯差分）

パターン	消灯差分(s)	t値	p値	
路肩-消灯	0.191	-0.235	0.408	
小・2灯6滅-消灯	0.721	-1.966	0.030	**
小・1灯3滅-消灯	0.451	-0.913	0.185	
大・2灯6滅-消灯	0.075	-0.112	0.456	
大・1灯3滅-消灯	-0.234	0.389	0.350	

※**5%有意

グ部において、有意差はないが「路肩」以外のすべての実験条件において車頭時間が長くなっている。このことから、渋滞解消地点からサグ部までの区間においては走光型視線誘導システムの影響を受けていない傾向があることがわかる。しかし表-7を見てみると、各実験条件の車頭時間の平均値と消灯時の車頭時間の平均値を比較した結果有意差はみられなかったが、「大・1灯3滅」の結果のみ車頭時間が短縮される傾向があることが確認できた。有意差がみられなかった理由の1つとして、被験者の消灯差分のばらつきが大きく走光型視線誘導システムの効果発現には個人差があること、またサンプル数が少なかったことが挙げられる。さらに「小・2灯6滅」の結果では、着目した3つの地点においていずれも車頭時間が長くなる傾向が見られた。また「小・2灯6滅」の車頭時間の平均値と「消灯」の車頭時間の平均値の差に、渋滞解消地点と発光体終了点では有意水準5%の有意差、サグ部では有意水準1%の有意差がみられた。「小・2灯6滅」は点滅間隔が短く、被験者の意識に与える影響が大きかったと考えられる。よって被験者が発光体を注視してしまい前方車に追従せず離されたため、負の影響が出た可能性がある。

表-8 発光体を邪魔と感じるかどうかで分けた時の消灯差分

パターン	感じる	感じない
路肩-消灯	0.926	-0.314
小・2灯6減-消灯	1.195	0.395
小・1灯3減-消灯	1.889	-0.538
大・2灯6減-消灯	0.927	-0.510
大・1灯3減-消灯	0.356	-0.640

(5) アンケートの分析結果

実験後に行った全被験者対象のアンケート調査の集計結果の一部を図3～図6に示す。図3、図4を見てわかるように、約7割の被験者が道路埋込型の発光体の方が視認性が良く追従しやすいと感じている。片道3車線道路においては、路肩設置の発光体は視認性が悪く道路埋込型の発光体の方が視認性が良いことがわかる。また図5、図6を見ると、約6割の被験者が「大・2灯6減」が視認性がよく追従しやすいと感じている。走行ログの分析では「大・1灯3減」の実験条件で車頭時間が短縮される傾向にあり有意差がみられたが、被験者は「大・2灯6減」が視認性が良いと感じている。このことから、被験者が感じる発光体の視認性の良さ、というものと走行挙動には関連性がない可能性があることがわかった。

(6) アンケートと走行ログの複合分析結果

実験後に実施したアンケートでの「発光体を邪魔と感じるか」という問いに対して、感じるか否かで被験者を分け、消灯差分の平均値を比較した。その結果を表8に示す。邪魔と感じると答えた被験者は全条件で「消灯」と比較して車頭時間が長くなったが、邪魔と感じないと答えた被験者は「小・2灯6減」以外の条件で車頭時間が短縮されている。発光体に対する印象によって走光型視線誘導システムの影響に差が出る傾向があることが確認できた。また「消灯」に比べて車頭時間が長くなり、さらに車頭時間の平均値の差に有意差がみられた「小・2灯6減」の結果については、発光体に対する印象が変わっても車頭時間が長くなる傾向がみられた。

5. 結論と課題

(1) 結論

走光型視線誘導システムの設置形態を変えて実験を行った結果、片側3車線道路においては、消灯時及び路肩設置の発光体点灯時よりも、道路埋込型の発光体点灯時の方が、車頭時間が小さくなる傾向があることが確認された。しかし、発光体形状・発光パターンによっては車頭時間が長くなる可能性もあった。

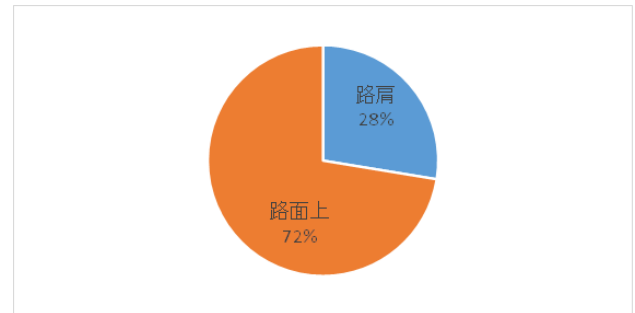


図-2 「視認性のよい発光体の設置形態はどちらか」の集計結果

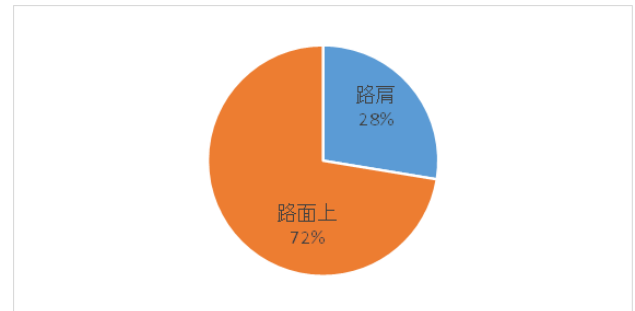


図-3 「追従しやすい発光体の設置形態はどちらか」の集計結果

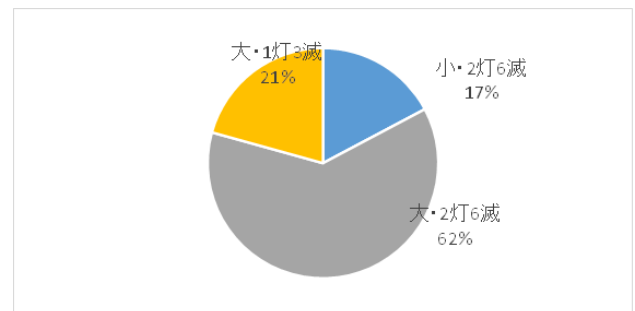


図-4 「視認性のよい発光体形状・発光パターンはどれか」の集計結果

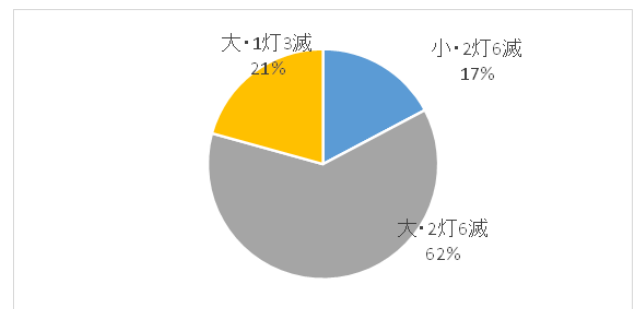


図-5 「追従しやすい発光体形状・発光パターンはどれか」の集計結果

発光体が大きい場合に良い結果が得られた本研究の結果に加え既存の研究⁹⁾を参考にしても、発光体が目立つ場合に車頭時間が短縮されていることから、走光型視線誘導システムに効果を発揮させるには、発光体自体をドライバーに強く認識させる必要がある可能性がある。一

方で、発光体を邪魔であると感じた場合の結果が悪いことが分かったため、発光体の設置形態として適切な形を設定することが望ましいといえる。

(2) 今後の展望

今回行った実験の被験者は、20代前半～40代前半の男性であり、運転頻度・実質運転年数に偏りが生じている。また被験者人数は29名ということもあり、サンプル数が少ない。今後はサンプル数を増やしデータの精度を上げて分析を行っていく必要がある。さらに今回「小・2灯6滅」の実験条件では車頭時間が長くなる傾向が見られたため、今後は様々な発光体形状・発光パターンを検討する必要がある。またDS実験のみではなく、実用化に向けて実道実験を行っていく必要もある。

参考文献

- 1) NEXCO 東日本, コーポレートサイト: https://www.enexco.co.jp/activity/safety/detail_07.html
- 2) 岡田若奈, 田子和利, 高橋秀樹, 亀岡弘之, 山本浩司, 小根山裕之, 辻光弘, 木香達英: ドライバ特性に着目したベクション刺激の効果, 第 11 回 ITS シンポジウム, 2012.
- 3) 加藤寛道, 多原裕二: 東京湾アクアラインにおけるペースメーカーライトの運用と効果検証について, 第 53 回土木計画学研究発表会・講演集, 2016.
- 4) 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(A), pp.A88-A96, 2018.
- 5) 柳原正実, 神田晴, 小根山裕之: DS 実験による走光型視線誘導システムの認識の違いと走行挙動の関係分析, 交通工学研究発表会論文集, CD-ROM, 2018.
- 6) 柳原正実, 鈴木大也, 小根山裕之: 走光型視線誘導システム設置区間に着目した渋滞流走行車両の挙動に関する DS 実験, 交通工学研究発表会論文集, CD-ROM, 2018.

(2019.10.4 受付)

THE EFFECT OF MOVING LIGHT GUIDE SYSTEM FOCUSED ON ACCELERATION BEHAVIORS FROM BOTTLENECK AND INSTALLED POSITION OF THE SYSTEM

Masami YANAGIHARA, Yuta SAITO and Hiroyuki ONEYAMA