

ドライビングシミュレータを使用したトンネル内視線誘導灯設置形態の評価

DRIVING SIMULATOR STUDY OF THE EFFECTS OF THE ARRANGEMENT OF ILLUMINATED ROADSIDE MARKERS ON DRIVING BEHAVIOR WHEN ENTERING A TUNNEL

後岡寿成*・濱中拓郎**・大元 守**・藤高勝己***

Hisanari USHIROOKA, Takuro HAMANAKA, Mamoru OOMOTO and Katsumi FUJITAKA

A driving simulator experiment was conducted to investigate the effects of light-emitting roadside marking systems on driving in a tunnel. Several design factors in the way lights can be arranged were examined. In the experiment, two different conditions were judged by subjects for ease of driving using the paired comparison method. The results showed that 5 meter intervals between lights and positioning at 1.2 meter height were preferred. The light emitting pattern that was perceived as a cluster of light moving toward the inner direction of the tunnel was recommended.

Key Words : driving simulator, roadside light emitting markers, tunnel

1. はじめに

トンネル部は主要な渋滞発生区間であり、図-1に示すように渋滞発生箇所の10%を占める。トンネル部の渋滞発生のはじめは入口付近で速度が低下するためであると既往の研究より報告されている^{1), 2)}。トンネル入口の速度低下は図-2に示すように、トンネル入口での暗がりや圧迫感から減速してしまうことが要因である。トンネル入口の速度低下対策に関する研究としては、内装板の設置やトンネル坑口形状の変更などがあり、速度低下を緩和させる効果が見られることが報告されている^{2), 3)}。その他の対策として、視線誘導施設を設けることによるトンネル視環境改善の検討事例⁴⁾がある。視線誘導施設のひとつである視線誘導灯は、走行中のドライバーに対して、道路線形や路肩位置を明示することで、適切な走行速度を維持させるとともに、安全で円滑な走行を支援するものである。しかし、トンネル内視線誘導灯においては、設置形態の仕様(設置高さ、設置間隔、発光色、発光パターンなど)に関する基準が定められていない。そのため、十分な効果を期待するためには、設置トンネル個々の特性に応じた、視線誘導灯の設置形態に関する詳細な検討が必要となる。

本稿では、道路走行環境模擬装置(以下、ドライビングシミュレータと称す)を使用して、トンネル内視線誘導灯の設置仕様の検討・評価を行った。

ドライビングシミュレータを用いた既往の研究には高速道路サグ部における追従挙動特性解析⁵⁾や霧中ガイドライトのインターフェイスデザインの検討⁶⁾などがある。これ

らの研究ではドライビングシミュレータの特性である容易な道路施設の変更(実際に実施すると多大な費用がかかる道路線形やガイドライトなどの変更が容易に可能)や安全性の確保(危険な状況、例えば、霧中下での実験が可能)を活かした実験が行われており、ドライビングシミュレータの有効性も確認されている。

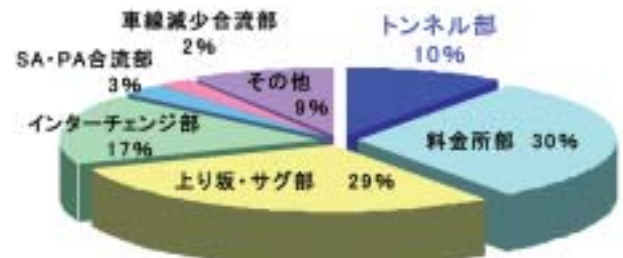


図-1 渋滞発生箇所(高速道路)³⁾



図-2 トンネル入口の減速メカニズム

* 中央研究所 総合技術開発部
 ** 首都圏事業部 統合情報技術部
 *** 大阪支店 技術部

2. ドライビングシミュレータの概要

ドライビングシミュレータは、道路施設などが、人や運転行動に及ぼす影響を把握・評価するための装置であり、図-3、4に示すように、擬似運転台(車)、その周辺に設置された画面(スクリーン)、制御用コンピュータにより構成される。

被験者である運転者が実際の運転に近い感覚で模擬走行できるほか、各種の評価用のデータ(例えば、走行位置、速度変化、アクセル踏量など)が出力される。

3. 視線誘導灯の設置仕様の検討の流れ

図-5に示すように、まず、ドライビングシミュレータと実道の走行挙動を比較して、ドライビングシミュレータ



図-3 ドライビングシミュレータ



図-4 ドライビングシミュレータシステム構成図

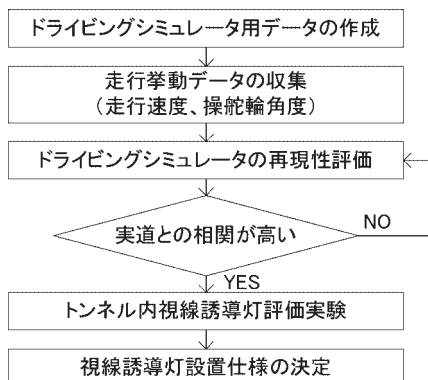


図-5 設置仕様の検討の流れ

の再現性評価を行う。再現性が確認されたドライビングシミュレータを用いて、視線誘導灯の設置形態の諸元ごとにアンケートによる一対比較による評価(主観的評価)および走行データを用いた走行行動的評価(客観的評価)を実施して、最適なトンネル内視線誘導灯の設置形態を決定する。

4. ドライビングシミュレータの再現性評価

ドライビングシミュレータを用いた場合の実走行の再現性を評価するために、実道の走行挙動とドライビングシミュレータの走行挙動を比較する再現性評価実験を実施した。

(1) 実験概要

1) ドライビングシミュレータ用データの作成

ドライビングシミュレータ用道路データの作成にあたっては、道路設計に使用したCADデータを活用した。また、山や建物などの周辺情報についてはデジタルカメラによる情報をフォトテクスチャとして貼り付け、周辺情報の再現性を高めた(図-6)。

トンネル内視線誘導灯設置形態の評価においては、トンネル坑口から坑内の路面などの見え方が重要な要因となるため、トンネル内に置かれた高さ10cmの立方体が坑口地点から瞬時に視認可能な坑内距離Xを図-7に示す現地実験に



図-6 実道とドライビングシミュレータの見え方

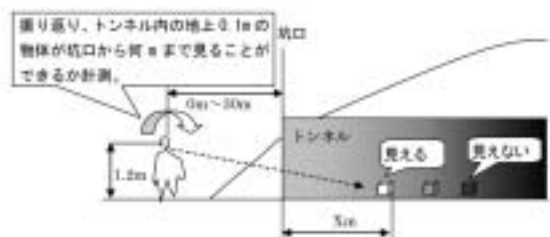


図-7 トンネル内見え方実験

て計測し、車が坑口に近づいていく際のトンネル内の見え方をCG映像で再現した。

2) 被験者

再現性評価実験の被験者は10名とした。

3) 評価手法

以下の2項目を用いて、上り方向と下り方向それぞれに対する再現性評価を行った。実道、ドライビングシミュレータともに1方向2回走行し、20走行の平均を比較した。

- ① 走行速度
- ② 操舵輪角度

(2) 再現性の評価

走行速度と操舵輪角度の比較結果を図-8に示す。

1) 走行速度

実道、ドライビングシミュレータともにほぼ同様の傾向が得られている。一部、下り方向のトンネル内で10km/h程度の差が生じているが、相関係数は上り方向が0.642、下り方向が0.478とこの種の実験では高い値を示した³⁾。これよりドライバーの運転挙動を示す「走行速度」の再現性については良好と判断できる。

2) 操舵輪角度

実道、ドライビングシミュレータともにほぼ同様の傾向が得られている。相関係数は上り方向が0.944、下り方向が0.970と非常に高い値を示した。これより、道路線形および操作性を示す「操舵輪角度」についても再現性があると判断できる。

5. トンネル内視線誘導灯評価実験

(1) トンネル内視線誘導灯実験仕様・条件の検討

視線誘導灯の実験仕様の決定にあたっては、「視線誘導標設置基準・同解説(S59.10) (社)日本道路協会」や類似事例、文献、施設管理・運用面を考慮して設定した。図-9に実

験での視線誘導灯の諸元を、表-1に諸元に対応した実験仕様・条件を示す。

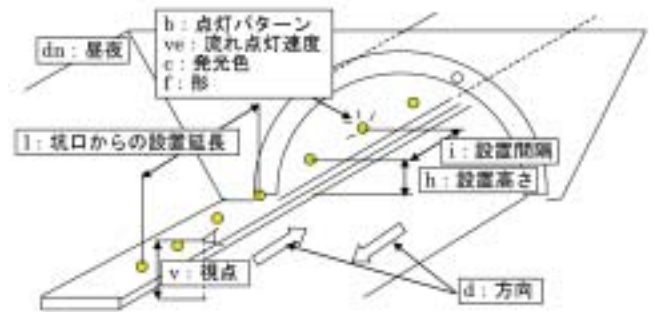


図-9 実験での視線誘導灯の諸元

表-1 実験での視線誘導灯の諸元・条件

項目	実験仕様・条件	
設置形態の諸元	設置高さ(h)	0.25m, 1.20m, 2.00m
	設置間隔(i)	5.0m, 15.0m
	点灯パターン(b) [*]	全点灯, 流れ点灯, 交互点灯
	流れ点灯の速度(ve)	60km/h, 120km/h, 180km/h
	坑口からの設置延長(l)	0m, 100m
	発光色(c)	橙, 赤, 青, 緑
条件	形(f)	四角, ライン
	視点(v)	乗用車, トラック
	方向(d)	上り, 下り
昼夜(dn)	昼, 夜	

*点灯パターン

- ◆全点灯 : 全灯輝点
- ◆流れ点灯: 輝点 2 灯消灯 3 灯・順方向
- ◆交互点灯: 1 灯おき交互点滅

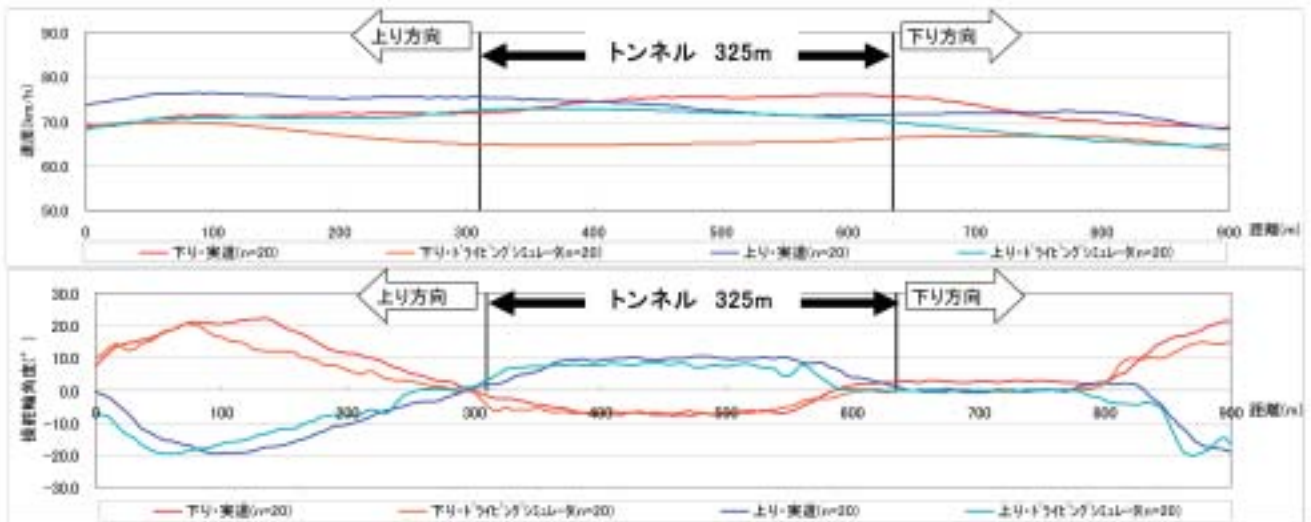


図-8 実道とドライビングシミュレータの比較

(2) 評価手法の検討

評価は以下に記す主観的評価と運転行動的評価の2つの観点から行った。

1) 主観的評価

シミュレータ上で視線誘導灯の設置諸元が異なるトンネルを2本作成し、連続走行後どちらの設置仕様が優位かを尋ねた被験者のアンケート結果に基づいて比較評価した。

2) 運転行動的評価

シミュレータ模擬走行時における計測速度の比較により行った。評価基準は設置仕様ごとに安定した走行がどの程度可能となるかを着眼点とした

(3) 被験者の抽出

前述の再現性評価実験とは別に、図-10に示すように、年齢構成、男女比率などが我が国の免許保有比率に近い構成となるように被験者を抽出した。延べ人数は150名である。



図-10 実験参加者と免許取得者の割合

6. 実験結果

(1) 主観的評価

1) 走りやすさ

アンケート結果を集計し、設置仕様ごとに走りやすさの優位性の判定割合を求めた。表-2に設置形態の諸元ごとの評価結果を示す。

以下の5項目において5%の有意水準で有意差があった。

- ・「1)有効性」上り・下りの視線誘導灯ありとなしの比較
⇒ 視線誘導灯ありの方が走りやすい
- ・「2)設置高さ」乗用車視点で設置高さ1.2mと2.0mの比較
⇒ 設置高さ1.2mの方が走りやすい
- ・「3)設置間隔」設置間隔5mと15mの比較
⇒ 設置間隔5mの方が走りやすい
- ・「6)坑口への設置延長」夜で坑口への設置延長0mと100mの比較
⇒ 坑口へ100m設置した方が走りやすい

・「7)発光色」橙と緑の比較

⇒ 橙の方が走りやすい

以上の主観的評価をまとめると、トンネル内の視線誘導灯は乗用車の視線高さ以上には設置せず、設置間隔は狭く、トンネル前後にも設置し、警戒色系統の発光色を用いることが望ましいという結果が得られた。

また、仕様細目ごとの結果で注目すべき点を概説すると、「4)点灯パターン」の評価結果が、上り方向と下り方向で異なった点が挙げられる。その要因としては、トンネルは平面曲線半径R=500mのカーブを有しているとともに、下り方向に向かって約2.3%程度の上り勾配となっていることが考えられる。上り方向の場合は左カーブとなり、視線誘導灯が先まで見通すことができないが、下り方向では右カーブとなり視線誘導灯が先まで見通すことができる。そのため下り方向では「導かれている感じがする」(自由意見より)流れ点灯の評価が高くなっているものと推量される。

表-2 主観的評価結果

設置形態の諸元等	実験条件	走りやすさの判定割合 ^(注1)		
		有	無	有意差 ^(注2)
1)有効性 (設置有無による 走りやすさ比較)	上り方向 (n=29)	有	82.8%	
		無	17.2%	
	下り方向 (n=30)	有	73.3%	
		無	26.7%	
2)設置高さ (0.25m, 1.20m, 2.00m)	乗用車 下り方向 (n=30)	0.25m	38.3%	-
		1.20m	81.7%	73.0%
		2.00m	-	25.0%
	トラック 下り方向 (n=30)	0.25m	30.3%	-
		1.20m	81.7%	41.7%
		2.00m	-	58.3%
3)設置間隔 (5.0m, 15.0m)	上り方向 (n=29)	5m	72.4%	
		15m	27.6%	
4)点灯パターン (全点灯, 交互, 流れ)	上り方向 (n=29)	全点灯	48.6%	80.3%
		交互点灯	53.4%	-
		流れ点灯	-	39.7%
	下り方向 (n=30)	全点灯	83.3%	33.3%
		交互点灯	46.7%	-
		流れ点灯	-	88.2%
5)流れ点灯の速度 (60km/h, 120km/h, 180km/h)	下り方向 (n=30)	60km/h	43.3%	-
		120km/h	58.7%	58.3%
		180km/h	-	41.7%
6)坑口への設置延長 (0m, 100m)	昼・下り (n=30)	0m	33.3%	
		100m	88.7%	
	夜・下り (n=30)	0m	23.3%	
		100m	78.7%	
7)発光色 (橙・赤・青・緑)	下り方向 (n=30)	橙	85.0%	83.3%
		赤	35.0%	-
		青	-	16.7%
		緑	-	48.3%
8)形状 (四角, ライン)	下り方向 (n=30)	四角	85.0%	
		ライン	35.0%	

注1)アンダーライン: 走りやすさの観点から最も好まれたもの。

注2)黄色: 5%の有意水準で有意差があったもの。

「5)流れ点灯の速度」では走行速度の2倍程度の120km/hが走りやすいとの結果が得られた。

「8)形状」の四角とラインの比較では四角の方が走りやすいとの結果になった。「3)設置間隔」では設置間隔は狭い方が走りやすいとの結果が得られているが、限りなく間隔を狭くした(連続した)視線誘導灯よりも、「めりはりがある」(自由意見より)四角の方が走りやすい結果となっている。

2) ドライバーに与える印象

設置仕様ごとに以下の4項目のアンケートを行った。

- ・ Q1: 道路の形や曲がり具合がわかりやすい感じがする (線形の確認しやすさ)
- ・ Q2: 前に進みやすいように誘導されている感じがする (誘導性)
- ・ Q3: トンネルの圧迫感が少ない感じがする (圧迫感緩和)
- ・ Q4: 遠く見通せる感じがする (見通し)

上下方向で走りやすさの評価が異なる設置仕様である点灯パターンの集計結果を図-11に示す。前述したとおり上り方向が左カーブ、下り方向が右カーブであり、それぞれ視線誘導灯がドライバーに与える印象が異なる。左カーブは項目ごとに評価の順位が入れ替わっているのに対して、右カーブは流れ点灯、交互点灯、全点灯の順で評価が高くなっている。視線誘導灯が見通すことのできる右カーブでは流れ点灯のように動きのある点灯パターンの方が走りやすく感じるこがうかがえる。

図-12は走りやすさの評価結果と異なる評価結果が得られた設置高さ(乗用車視点)と流れ点灯の速度の集計結果で

ある。設置高さは、視線高さである1.2mの方が走りやすく、視線高さより上の2.0mの方が見通しがよいという結果が得られた。流れ点灯は、走行速度の2倍程度の120km/hで流れている方が走りやすく、さらに速い180km/hで流れている方が、線形確認と見通しの面で効果があるという結果が得られた。

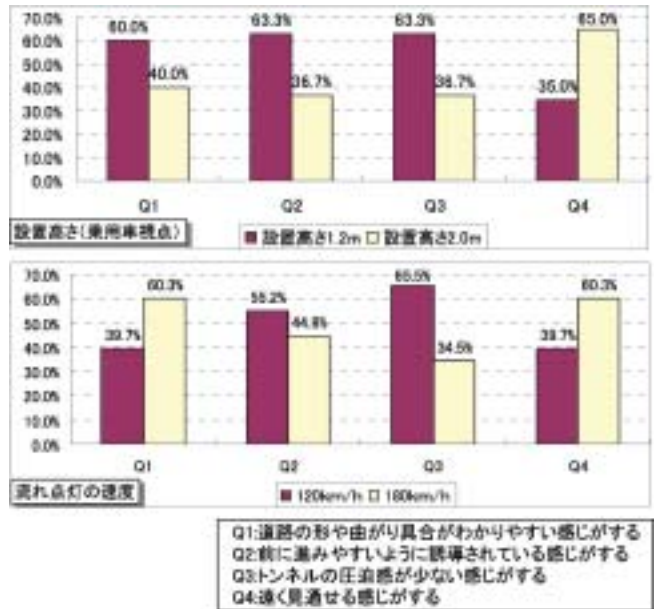


図-12 ドライバーに与える印象を尋ねたアンケート結果 (上:設置高さ(乗用車視点)、下:流れ点灯の速度)

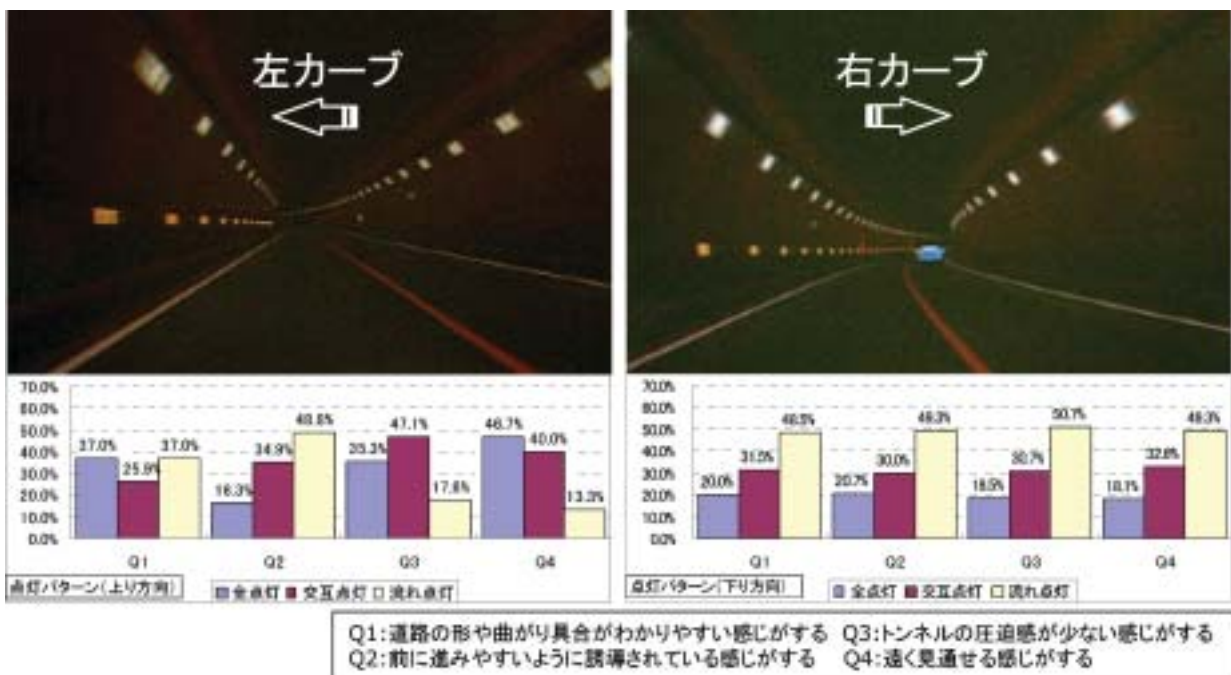


図-11 ドライバーに与える印象を尋ねたアンケート結果(点灯パターン)

(2) 走行行動的評価

下り方向の点灯パターンの実験結果を例にして、運転行動的評価における分析結果を示す。図-13は、トンネル入口から手前300mを基準(0)とした相対速度の変化を示したものである。トンネル入口付近では全点灯と流れ点灯が同様の推移であるが、トンネルに入ってから流れ点灯の速度上昇幅が大きく、トンネル出口付近では最も速度が上昇している。これは、アンケート結果からの知見である「流れ点灯は誘導性が高い」とも一致している。交互点灯は速度減少幅が最も大きい。主観的評価結果では流れ点灯、全点灯、交互点灯の順で走りやすい結果が得られており、それと整合した走行行動的評価結果となった。

7. まとめ

本稿では、ドライビングシミュレータを使用してトンネル内視線誘導灯の設置形態の評価を行った。表-3に評価結果をまとめた。また、アンケートによる主観的評価で走りやすいと判定された項目は、トンネル内の走行が安定、すなわち渋滞原因である走行速度変化の少ない走行であることが走行行動的評価データより確認できた。

参考文献

- 1) 越正毅：高速道路トンネルの交通現象、国際交通安全学会誌、Vol.10 No.1、pp.32-38、1984
- 2) 米川英雄：トンネル坑口部における走行性への影響要因、高速道路と自動車、第39巻 第5号、pp.28-34、1996
- 3) 松本晃一、古川健、野口雅弘、森康男、飯田克弘、池田武司：交通機能面から見たトンネル坑口のあり方に関する研究、交通工学、Vol.35 No.1、pp.28-37、2000
- 4) 牧野康孝：既存トンネルの視環境改善検討について、建設電

気技術 1999技術集、pp.13-19、1999

- 5) 大口敬、飯田克弘：高速道路サグにおける追従挙動特性解析におけるドライビング・シミュレータ技術の適用性、交通工学、Vol.38 No.4、pp.41-50、2003
- 6) 赤松幹之、池原圭一、小林保、大門樹：霧中を走行するためのガイドライトのインターフェイスデザイン、14th Symposium on Human Interface Sep.28-30 1998 Tokyo、pp.529-534、1998

表-3 トンネル内視線誘導灯に有意な設置形態

評価項目	比較内容	トンネル内視線誘導灯に有意な設置形態
有効性	・ 設置あり ・ 設置なし	設置あり
設置高さ	・ 0.25m ・ 1.20m ・ 2.00m	1.20m
設置間隔	・ 5m ・ 15m	5m
点灯パターン	・ 全点灯 ・ 交互点灯 ・ 流れ点灯	上り方向(左カーブ) ⇒全点灯 下り方向(右カーブ) ⇒流れ点灯
流れ点灯の速度	・ 80km/h ・ 120km/h ・ 180km/h	120km/h
坑口への設置延長	・ 0m ・ 100m	100m
発光色	・ 橙・青 ・ 赤・緑	橙
形状	・ 四角 ・ ライン	四角

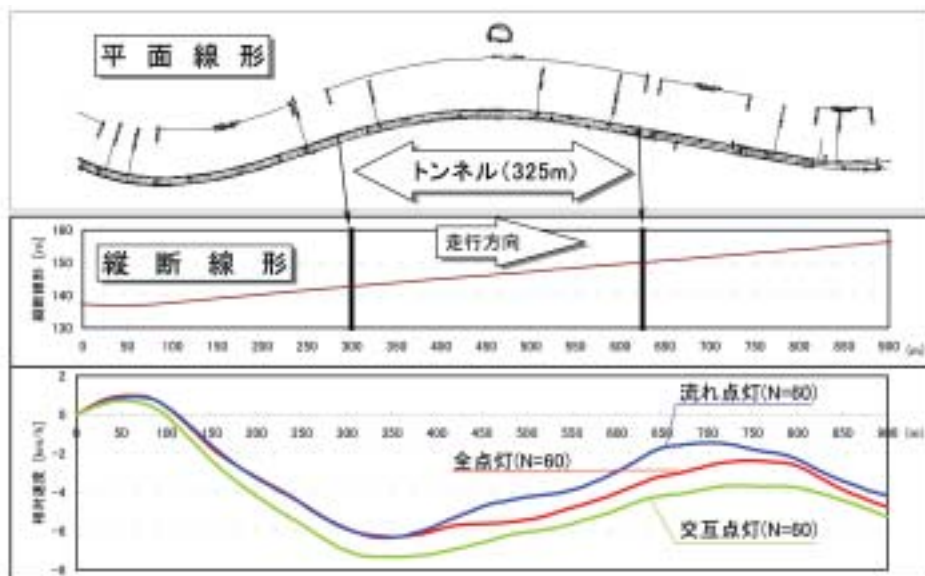


図-13 走行行動的評価結果の一例(相対速度結果：下り方向、点灯パターン)