

## ◆ 安全・安心を支える技術開発特集 ◆

## 道路トンネルの坑口形状・照明方式が走行性に及ぼす影響

石村利明\* 真弓英大\*\* 真下英人\*\*\*

## 1. はじめに

トンネルは明かり部と異なり、側壁および天井などにより閉鎖された空間となるため、自動車の運転者に心理的圧迫を与え、しばしば坑口付近での速度低下を招き渋滞の原因の一つと考えられている。今後より高速な交通に対応するためには、坑口付近での渋滞緩和対策とともに、安全で走行性に優れたトンネル内の視環境を確保することが重要である。

坑口付近での渋滞緩和対策の一つとして、トンネル進入時の走行性に最も影響を与えるものと考えられる坑口形状の検討が考えられる。現在、道路トンネルの坑口形状として面壁型が多く用いられているが、この坑口形状はトンネル進入時の走行性よりも、経済的に有利であることから採用されていると考えられる。したがって、運転者に圧迫感を与えない走行性の高いトンネル坑口形状を提案することが重要である。

一方、安全で走行性に優れたトンネル内の視環境を確保するためには内装板の設置による側壁の輝度(明るさ)を向上させる方法もあるが、トンネル内の照明方式の改善によって視線誘導性を向上させる方法も有効であると考えられる。現在のトンネル内の照明は、道路照明施設設置基準<sup>1)</sup>で定められている路面輝度を満足できるように照明器具をある一定の間隔で設置する点光源による照明方式が一般的であるが、視線誘導性が高いと考えられる

連続照明方式について検討することが重要である。

本研究では、トンネルの走行性に及ぼす坑口形状および照明方式の影響について把握することを目的として、坑口形状および視線誘導性の高いと考えられる連続照明方式について、以下の検討を行った。

- (1) 供用中のトンネルにおける視線挙動調査
- (2) 動画像による坑口形状および照明方式の検討

具体的には、(1)は道路トンネルにおける坑口付近での自動車の速度低下の原因を把握することを目的として、トンネル進入時に自動車の運転者がどこを注視しているかを供用中のトンネルで調査を行った。また、(2)は坑口形状およびトンネルの照明方式(照明器具間隔)を変化させた動画像を作成し、被験者によりトンネル進入時の走行性、視線誘導性などをアンケートにより調査を行い、坑口形状および照明方式と走行性との関係について把握を行った。

## 2. 供用中のトンネルにおける視線挙動調査

## 2.1 調査概要

調査は、既に供用されている高速道路のトンネルを用いて、自動車運転手がトンネル進入時にどの部分を注視しているかを確認するため、被験者にアイマークレコーダーを装着し、注視点を調査するとともに、同時に実験車両に取り付けたセンサーによりアクセル・ブレーキ踏量の運転挙動のデータをデータロガにより収集した。

表-1 調査対象トンネル

トンネルNo	トンネル名	延長(m)	車線数	走行車線	坑口形状	トンネ断面ル	トンネル内線形
1	高尾トンネル	569	3	第2走行車線	面壁	馬蹄形	R=1000(右)
2	桜平トンネル	482	3	第2走行車線	面壁	馬蹄形	R=1500(左)
3	北畠トンネル	328	3	第1走行車線	面壁	馬蹄形	R=600(左)
4	太郎ヶ尾トンネル	707	3	第1走行車線	面壁	馬蹄形	R=350(右)
5	新都夫良野トンネル	1715	3	第1走行車線	面壁	馬蹄形	R=5000(右)
6	新吾妻山トンネル	298	3	第1走行車線	面壁	馬蹄形	R=5000(右)
7	吾妻山トンネル	360	2	走行車線	面壁	馬蹄形	直線
8	都夫良野トンネル	1689	2	走行車線	面壁	馬蹄形	R=1000(左)

調査は、一方通行の3車線トンネルと2車線トンネルの走行性の違い、走行車線による走行性の違いを把握するため、表-1に示す2車線トンネル走行車線(2トンネル)、3車線トンネル第1走行車線(4トンネル)、3車線トンネル第2走行車線(2トンネル)の3条件の8トンネルとした。また、被験者は運転歴2~30年の22~53才までの男性9名とした。この区間のトンネル入口部の坑口形状は、全て面壁型である。

## 2.2 調査方法

### 2.2.1 注視点

アイマークレコーダを被験者に装着させ、通常の通行車両がある供用中の一方通行の道路を自由走行し、視線挙動のデータ収集を行った。視線挙動はアイマークレコーダから注視点を抽出して、データ解析を実施した。ここで言う注視点とは、注視点として一般的に用いられている<sup>2)</sup>被験者の眼球回転角が1度以内に1/30秒以上止まった点とした。視線挙動調査にあたっては、事前に各被験者の注視点とアイマークを一致させるための調整を行った。図-1に使用した調査機器の構成およびアイマークレコーダのシステム構成図を示す。調査走行中における被験者のアイマークの例

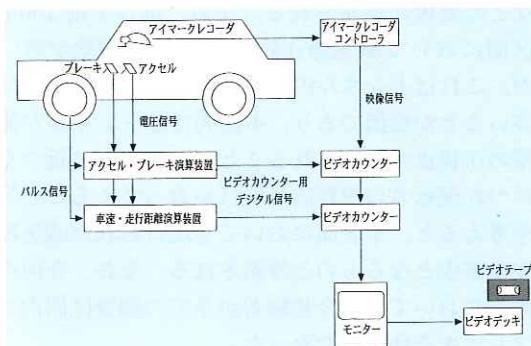


図-1 調査機器の構成



写真-1 走行時のモニター画像例

を写真-1に示す。なお、計測区間は、トンネル坑口部手前200mから坑口進入までの区間とした。

### 2.2.2 アクセル・ブレーキ踏量

調査走行中のアクセル・ブレーキ踏量は、図-1に示した調査機器によって各項目に対する演算装置および電圧信号によってビデオ画像とともに、記録(録画)を行った。また、調査開始前にアクセルおよびブレーキの各ペダルを最大に踏み込んだ時に100%となるように調整を行った。なお、計測区間は、トンネル坑口部手前200mから坑口進入後200mまでの区間とした。

## 2.3 視線挙動調査結果

### 2.3.1 注視点

2車線トンネル走行車線、3車線トンネル第1走行車線、3車線トンネル第2走行車線の3つの走行条件下について、運転者の注視点がどのように変化していくかの推移分布図を図-2~4に示す。これは、トンネル坑口手前200mから坑口までの50m毎のトンネル内、坑口付近、明かり部の注視点を分類し、各注視点の割合の変化をしたものである。

これより、いずれの条件でも全体的な傾向として前方路面を注視する割合が高く、トンネルに近づくにつれ、明かり部、坑口付近、トンネル内の各注視点へと移動していくことが分かる。

また、走行車線の違いによる傾向を見ると、2車線トンネル走行車線、3車線トンネル第1走行車線を走行している場合は、坑口付近の面壁、トンネル内の側壁、トンネル内の車道外側線の各注視位置では、右側よりも左側を注視する傾向があるのに対して、3車線トンネル第2走行車線を走行している場合は、2車線トンネル走行車線、3車線トンネル第1走行車線の場合と比べて、左側よりも右側を見る傾向がある。これより、2車線および3車線トンネルの各断面の大きさにあまり関係なく、第1走行車線を走行する運転者は、左側のトンネル側壁等の側方余裕の情報を入手しようとする傾向が強いと考えられる。走行車線走行時および第1走行車線走行時のこのような傾向は、3車線トンネルにおけるトンネル坑口部の速度低下が、照明レベルより側方余裕に影響しているとする報告とも一致している<sup>3)</sup>。

### 2.3.2 アクセル・ブレーキ踏量

道路を走行中の一般的な運転者の挙動を考えると、走行上の危険を感じた場合には、先

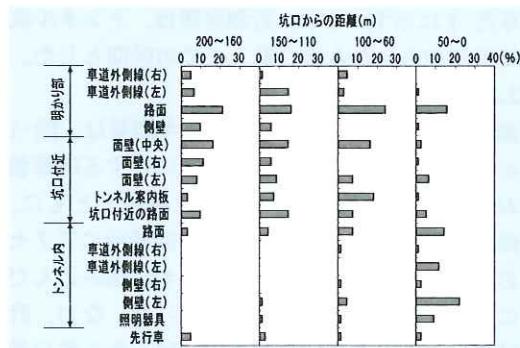
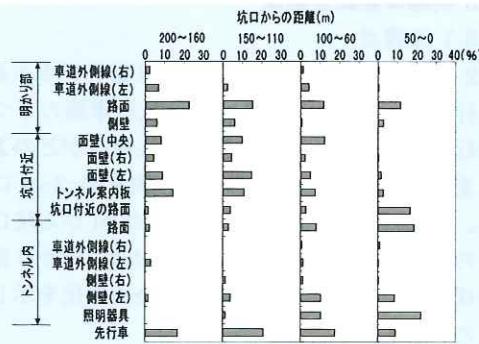
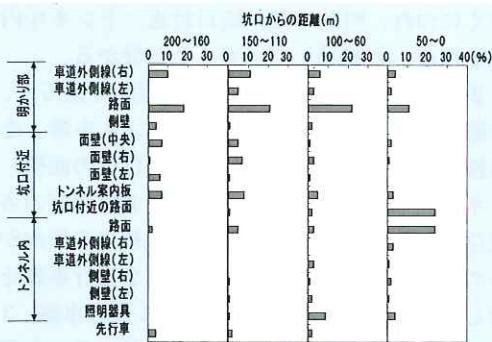
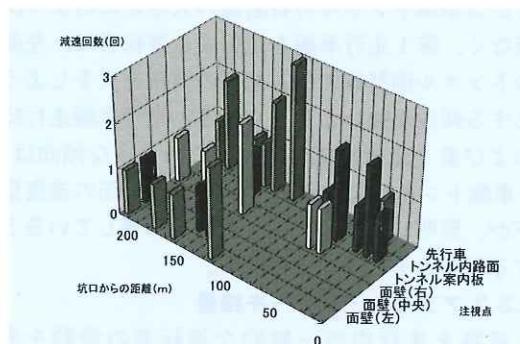
図-2 トンネル進入時の注視点の変化  
(2車線トンネル走行車線)図-3 トンネル進入時の注視点の変化  
(3車線トンネル第1走行車線)図-4 トンネル進入時の注視点の変化  
(3車線トンネル第2走行車線)

図-5 アクセル減速回数と減速時の注視点と坑口からの距離

ず第1にアクセルを緩めて、第2にブレーキを操作するといった手順になるものと考えられる。このような運転者の挙動を考えると、本調査時におけるアクセルによる減速操作は、運転者の視野内に何らかの要因があったものと考えることができる。そこで、アクセル踏量が大きく変化(ここではアクセル踏量が約10%以上減少した時)した時の注視点をトンネル坑口からの距離で整理したものを図-5に示す。

図より、トンネル坑口から100m以上離れた位置では、トンネル案内板(ここでは、トンネル名称案内標識とトンネル内点灯警戒標識(トンネル内点灯せよ)等をトンネル案内板と称す)、面壁、先行車を注視する回数が多く、坑口から100m以内では、トンネル内路面を注視する回数が多いことが分かる。これから、トンネル坑口手前100m前後で、運転者にアクセルの減速操作を行わせる要因が変化すると考えられ、具体的には、坑口手前100m以上離れた場合では、トンネル案内板からトンネルの情報を得ることや、面壁構造から受ける心理的影響、先行車との車間距離との影響等により、坑口手前100m以内では、状況が把握しづらいトンネル内路面の情報を得ようとするためなどの要因が推測される。なお、坑口手前100m区間ににおいて減速操作時の注視点に面壁が無いが、これはトンネル内路面の注視点数が絶対的に多いことが原因であり、本区間ではトンネル左側壁の注視点も認められること、トンネルに近づくにつれ運転者の視野内に坑口が迫ってくること等を考えると、本区間ににおいても坑口形状は減速操作の要因となるものと推測される。なお、今回の調査においては、全被験者が全ての調査区間内でブレーキを使用しなかった。

### 3. 動画像による坑口形状および照明方式の検討

#### 3.1 検討概要

本検討は、坑口形状および照明方式の条件が異なる動画像をコンピュータグラフィック(CG)により作成し、坑口形状とトンネル進入時の走行性およびトンネル内の照明設置間隔と視線誘導性の関係について被験者に対するアンケート調査を行った。坑口形状の条件設定にあたっては、視線挙動調査結果からトンネル進入時の運転者が側方余裕の情報を把握する傾向が明らかとなったことから、

側方余裕との関係を把握できるよう考慮した。

### 3.2 検討方法

CGは、走行車線を時速80km/hで走行したときの動画像として、表-2に示す坑口形状の種類・トンネル内の照明設置間隔を変化させた条件を作成した。坑口形状は、面壁型と竹割り型の2種類とし、竹割り型についてはトンネル坑口部での路肩幅員を若干広げ、トンネル内の路肩幅員へのすりつけ方法を変化させた3ケースを設定した。また、トンネル内の照明器具間隔は、10m、5m、0m(連続照明を想定)の3種類を設定した。作成したCGの代表的な条件での静止画像を写真-2~3に示す。

アンケート実施方法は、実運転状況に出来るだけ近い状態を再現するために以下のように実施した。建設省土木研究所内の実大トンネル実験施設内に普通乗用車を用意し、暗室状態で被験者に運転席に着座してもらい、さらにステアリングを握った状態でCG画像を見てもらい、坑口形状の

違いによるトンネル進入時の走行性およびトンネル内の照明器具の配列による走行性についてアンケート調査を行った。被験者は運転歴1~28年の21~46才までの男性15名、女性7名の22名とした。なお、アンケート内容は、坑口形状に関してトンネル進入直前の視線位置・緊張感、トンネル進入直後の圧迫感、トンネル進入時の走行性を調査した。また、照明設置間隔に関して走行時のちらつき感、トンネル内の視線誘導性について調査した。

### 3.3 動画像によるアンケート調査結果

#### 3.3.1 坑口形状

##### 1) トンネル進入直前の視点位置

図-6に全ケースを平均したトンネル進入直前の視点位置のアンケート結果を示す。

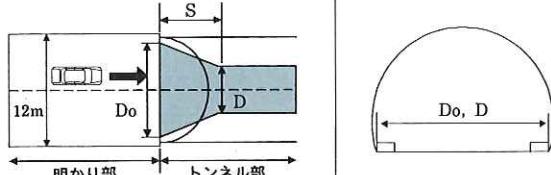
これは、被験者に「最もよく見ていた箇所」「よく見ていた箇所」「時々見ていた箇所」の3箇所を回答してもらい、それぞれ3, 2, 1の点数を与えた時の各箇所の割合を表示したものである。これより、トンネル坑口周辺、前方路面、トンネル入口、左側側壁の順に点数が多く、運転者はこれらの箇所がトンネル進入時に気になっているものと考えられる。これは、先に示したアイマークレコーダによる実走行での視線挙動調査で多かった注視点の前方路面、坑口付近、トンネル内左側壁などとも傾向は一致した。なお、視線位置は各条件ともに大きな差はみられなかった。

##### 2) トンネル進入直前の緊張感

図-7にトンネル進入直前の緊張感のアンケート結果を示す。これより、坑口形状が面壁の場合は、被験者の半数が緊張感が「ある」と回答したのに対し、竹割りの場合には約8割が「ない」と回答しており、竹割りの坑口形状では緊張感が少ないと明らかとなった。また、表-2に示したように坑口の横幅が異なる竹割り(0D)と竹割り(2D, 4D, 8D)では竹割り(0D)が若干「ある」と回答した被験者が多いものの、顕著な差は認められなかった。これは、トンネル進入直前にトンネル坑口幅の差およびすりつけ長の違いを明確に認識できなかったものと考えられる。

表-2 検討条件一覧表  
(a) 坑口形状のCG作成条件

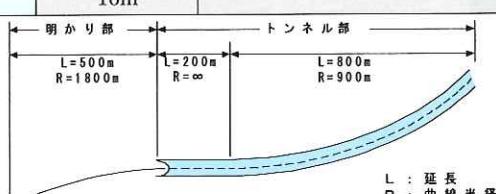
CASE	坑口形状	坑口条件			備考
		Do(m)	D(m)	すり付け長S(m)	
1	面壁	9.6	9.6	0(0D)	車線構成：3.5m×2車線 路肩幅員 ・明かり部
2	竹割り	9.6	9.6	0(0D)	(左右) : 2.5m
3		10.5	9.6	20(2D)	・トンネル部
4		10.5	9.6	40(4D)	(左右) : 0.75m
5		10.5	9.6	80(8D)	

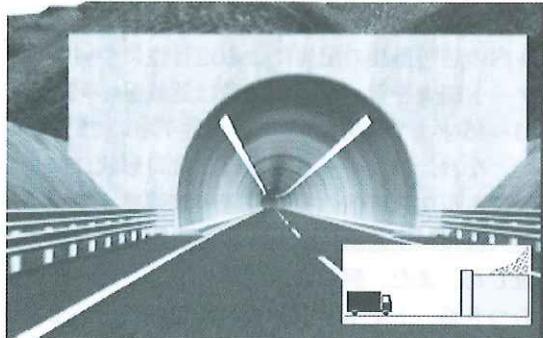


坑口付近平面図 トンネル断面図

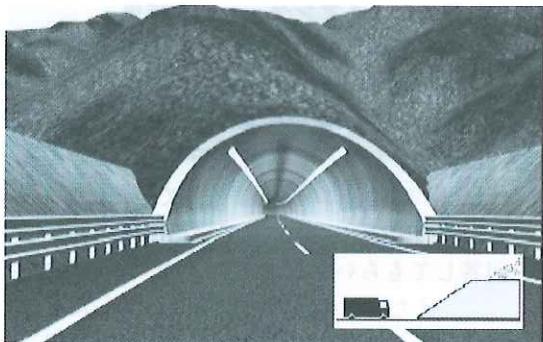
(b) 照明器具間隔のCG作成条件

CASE	照明間隔	備考
1	0m	取り付け高さ：5m 使用器具：高圧ナトリウム灯
2	5m	
3	10m	
平面線形		





(a) 面壁型

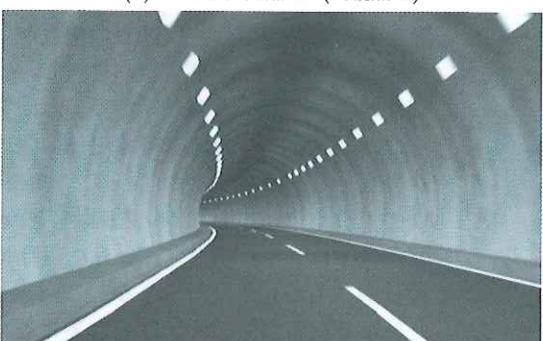


(b) 竹割り (0D)

写真-2 坑口形状の違い



(a) 照明設置間隔 0m(連続照明)



(b) 照明設置間隔 10m

写真-3 照明設置間隔の違い

## 3)トンネル進入時の走行性

図-8 にトンネル進入時の走行性のアンケート結果

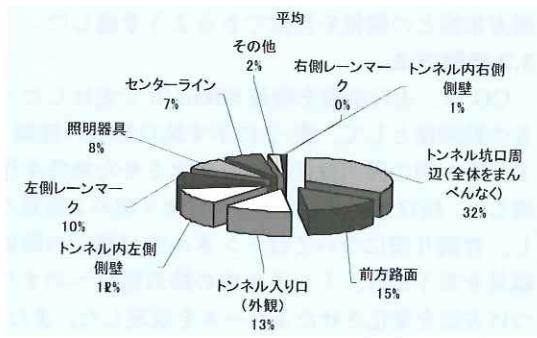


図-6 トンネル進入直前の視点位置

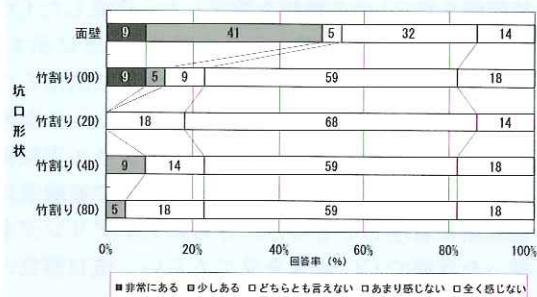


図-7 トンネル進入直前の緊張感

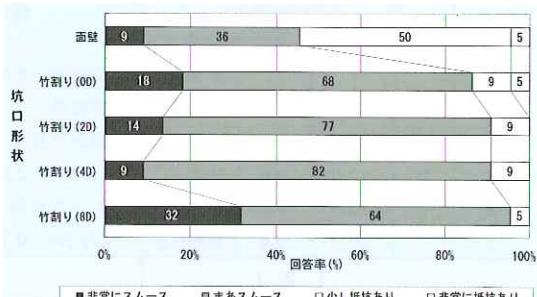


図-8 トンネル進入時の走行性

果を示す。このアンケート内容は、トンネル進入直前の緊張感を含めたトンネル進入時の走行性について調査したものである。これより、坑口形状が面壁の場合は、被験者の半数が「抵抗ある」と回答したのに対し、竹割りの場合には約9割が「スムーズ」と回答しており、竹割りの坑口形式の走行性が優れていることが明らかとなった。特に、竹割り(8D)は坑口の横幅が同じ他の竹割り(2D, 4D)の結果と比べて「非常にスムーズ」と回答した被験者が多く、トンネル断面へのすりつけ長が長いほうがトンネル進入時の走行性が高いことが分かった。

## 3.3.2 照明方式

## 1) トンネル内での照明のちらつき

図-9に照明器具のちらつき感のアンケート結果を示す。これより、間隔 10m および間隔 5m の

場合は、被験者の約3~4割が「感じた」と回答している。特に間隔5mで「非常に感じた」と回答した被験者もあり、この条件下ではちらつきが気になると考えられる。これは、走行速度80km/h時においてちらつきを避けるべき器具間隔の1.2~4.4m<sup>1)</sup>と間隔5mが比較的近い条件であることが考えられる。一方、連続照明の場合は、被験者の約3割が「あまり感じない」、約4割が「全く感じない」と回答しており、照明のちらつきに対して非常に有効であることが明らかとなった。

## 2) トンネル内での照明による視線誘導性

図-10にトンネル内の視線誘導性のアンケート結果を示す。これより、各条件で約6~7割で視線誘導性を「感じた」と回答しており、照明器具による視線誘導性は比較的高いことが分かった。特に、連続照明では約3割が「非常に感じた」と回答しており、視線誘導性が他の条件に比べて高いことが明らかとなった。

## 4.まとめ

本視線挙動調査および動画像による坑口形状および照明方式の検討結果から、以下のことが明らかとなった。

- 1) トンネル進入時の運転者はトンネル側方余裕の情報を入手しようとする傾向が強く見られる。特に、2車線トンネルであるか3車線トンネルであるかには関係なく、走行車線または第1走行車線を走行している場合はその傾向が強い。
- 2) トンネル坑口手前100m前後で、運転者にアクセルの減速操作を行わせる要因が変化すると考えられ、その要因として坑口手前100m以上離れた場合では、面壁とトンネル案内板と先行車、坑口手前100m以内では、前方路面状況などが推測された。
- 3) 竹割りの坑口形状は、トンネル進入時の緊張感が面壁よりも小さく、トンネル進入時の走行性

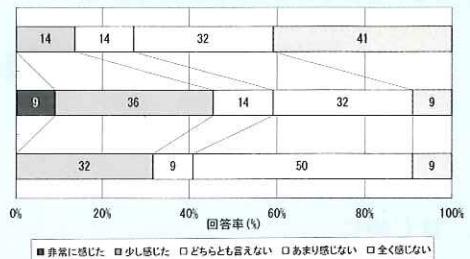


図-9 照明器具のちらつき感

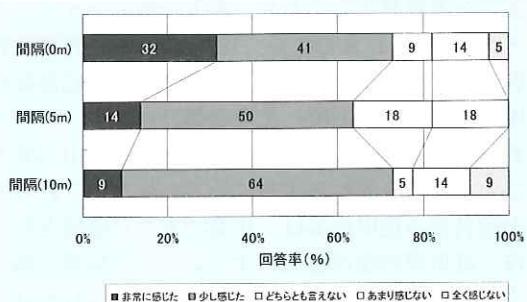


図-10 トンネル内の視線誘導性

が高いことが明らかとなった。

- 4) 竹割りの坑口形状において、トンネル坑口部の幅員を若干広げ、トンネル内の幅員へのすり付け長を十分にとることによって、運転者にとってトンネル進入時によりスムーズな走行性が得られることが明らかとなった。
- 5) トンネル内照明については、連続照明の場合は、他の条件に比べてちらつきに対して有効であるとともに、視線誘導性も高いことが分かった。

## 参考文献

- 1) (社)日本道路協会:道路照明施設設置基準・同解説, 1981.4
- 2) 濑尾卓也、赤木幸靖: 視環境の違いによる運転者の注視特性, 土木技術資料第36卷第9号, 1994.9など
- 3) 永瀬久信・米川英雄: 交通特性とトンネル内照明, 高速道路と自動車, 第35卷, 第10号, 1992.10

石村利明\*



建設省土木研究所道路部  
トンネル研究室主任研究員  
Toshiaki ISHIMURA

真弓英大\*\*



同 トンネル研究室研究員  
Hidemoto MAYUMI

真下英人\*\*\*



同 トンネル研究室長、工博  
Dr.Hideto MASHIIMO