

土 木 研 究 所 資 料

トンネルの走行性に及ぼす坑口形状・照明方式の
影響に関する研究報告書

平成12年 3 月

建設省土木研究所
道路部トンネル研究室

Copyright © (2000) by P.W.R.I

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

トンネルの走行性に及ぼす坑口形状・照明方式の 影響に関する研究報告書

トンネル研究室 室 長 真下 英人
主任研究員 石村 利明
真弓 英大

要 旨

本報告書は、供用中のトンネルにおける運転者の視線挙動調査、動画像による坑口形状のアンケート調査を行うとともに、視線誘導性の高いトンネル照明方式として考えられる連続照明について実大トンネルを用いて基本的な光学特性の把握、視標性の視認性に関するアンケート調査を行い、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の検討結果を報告するものである。

キーワード：道路トンネル、坑口形状、走行性、連続照明

まえがき

道路トンネルは、トンネル利用者に対して安全で快適な空間を確保するため、必要により照明設備等が設置されている。しかしながら、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。今後のより高速な交通に対応した安全で円滑な道路交通を確保するためには、運転者に心理的圧迫を与えないトンネルの坑口形状の検討を行うとともに、トンネル内での視線誘導性の高い新しい照明方式などの検討を行うことが重要である。

本報告書は、供用中のトンネルにおける運転者の視線挙動調査、動画像による坑口形状のアンケート調査を行うとともに、視線誘導性の高いトンネル照明方式として考えられる連続照明について実大トンネルを用いて基本的な照明特性の把握、視標物の視認性に関するアンケート調査を行い、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の検討結果を報告するものである。

本資料がトンネル坑口形状およびトンネル照明を設計する際の参考となることを願うものである。

平成12年3月

トンネル研究室

室長 真下 英人
主任研究員 石村 利明
真弓 英大

目次

第1章 研究概要	1
第2章 供用中のトンネルにおける視線挙動調査	2
2.1 視線挙動調査の概要	2
2.1.1 調査目的	2
2.1.2 調査方法	2
2.1.3 調査条件	2
2.1.4 測定項目および測定方法	4
2.2 視線挙動調査結果	8
2.2.1 注視点	8
2.2.2 運転挙動	18
2.3 まとめ	25
第3章 連続照明下の照明特性と視認性	26
3.1 研究概要	26
3.1.1 研究目的	26
3.1.2 研究方法	26
3.2 清浄空気中における連続照明方式の特性の把握・視標物の視認性	27
3.2.1 実験方法	27
3.2.2 実験条件	27
3.2.3 測定項目および測定方法	30
3.2.4 アンケート調査	32
3.2.5 実験結果	33
3.3 媒煙中における連続照明方式の特性の把握・視標物の視認性	46
3.3.1 実験方法	46
3.3.2 実験条件	47
3.3.3 測定項目および測定方法	49
3.3.4 アンケート調査	50
3.3.5 実験結果	51
3.4 まとめ	66
第4章 動画像による坑口形状・照明方式の検討	67

4.1 研究概要	67
4.1.1 研究目的	67
4.1.2 研究方法	67
4.1.3 検討条件	67
4.1.4 動画像の作成	72
4.1.5 アンケート調査	79
4.2 アンケート結果	84
4.2.1 坑口形状によるトンネル進入時の走行性	84
4.2.2 トンネル内の照明器具配列による走行性	91
4.3 まとめ	93
第5章 結論	94

参考資料

第1章 研究概要

道路トンネルは、トンネル利用者に対して安全で快適な空間を確保するため、必要により照明設備等が設置されている。しかしながら、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。今後のより高速な交通に対応した安全で円滑な道路交通を確保するためには、運転者に心理的圧迫を与えないトンネルの坑口形状の検討を行うとともに、トンネル内での視線誘導性の高い新しい照明方式などの検討を行うことが重要である。

本研究は、トンネルの走行性に及ぼす坑口形状・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、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) 連続照明下の照明特性と視認性
- (3) 動画像による坑口形状・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。これは、トンネル進入時に運転者が最も気になる箇所を注視しているものと考え、仮に坑口付近で特に注視している箇所があれば、その部分が何らかの原因の一つとして考えられ、その部分を改良することでトンネル進入時の走行性を高めることができると考えたものである。

(2)は、実大トンネル実験施設を用いて、連続照明方式および点光源による照明方式となるように、照明器具間隔を変化させた条件で照明器具を点灯させ、その際の照明特性の把握と視標物の視認性についてのアンケート調査を行うとともに、煤煙が存在するときの照明特性の把握と視認性についてアンケート調査を行った。

また、(3)は(1)の視線挙動の検討結果を踏まえて、現在、一般的に用いられている面壁型の坑口形状の他、近年採用されることが多くなってきている竹割り型の坑口形状について動画像を作成し、被験者によりトンネル進入時の走行性、圧迫感などをアンケートにより調査を行い、坑口形状と走行性との関係について把握を行った。また、(2)の連続照明方式および点光源による照明方式の条件となるように照明器具間隔を変化させた動画像を作成し、連続照明方式下を含めた照明器具間隔による走行性、視線誘導効果に関するアンケートも実施した。

第2章 供用中のトンネルにおける視線挙動調査

2.1 視線挙動調査の概要

2.1.1 調査目的

道路トンネルは、トンネル利用者に対して安全で快適な空間を確保するため、必要により照明設備等が設置されている。しかしながら、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。このトンネル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。これは、トンネル進入時に運転者が最も気になる箇所を注視しているものと考え、仮に坑口付近で特に注視している箇所があれば、その部分が何らかの原因の一つとして考えられ、その部分を改良することでトンネル進入時の走行性を高めることができると考えたものである。

2.1.2 調査方法

本調査は、既に供用されている路線（東名自動車道：大井松田I.C.～御殿場I.C.）で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を装着し、視線挙動として注視点を調査するとともに、同時に運転者の運転挙動を実験車両に取り付けたセンサーにより走行速度およびアクセル踏量の運転挙動のデータをデータログに収集を行った。

2.1.3 調査条件

調査は、東名自動車道（大井松田I.C.～御殿場I.C.）の上下線で実施した。被験者にアイマークレコーダを装着した状態で、図-2.1に示すように実験車を走行させた。調査区間である大井松田IC～御殿場IC間は既に改築工事が実施され、上り車線は3車線、下り車線は旧上り線（2車線）と旧下り線（2車線）を使用し4車線となっている。この区間のトンネル入口部の坑口形状は、全て面壁型となっている。

調査は、上り線の場合、白旗トンネル～桜平トンネル間で中央車線（第2走行車線）を走行し、北畑トンネル～新吾妻山トンネル間で走行車線（第1走行車線）を走行した。また、下り車線の場合、調査区間である大井松田IC～御殿場IC間の全線を旧上り線の走行車線（第1走行車線）を走行した。調査の対象としたトンネルは、この区間のトンネルの中から、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のトンネルとして表-2.1に示す8トンネルとした。その結果、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）、2車線トンネル走行車線（2トンネル）を走行した。被験者は表-2.2に示す合計9名とした。

調査時間の選定は、アイマークレコーダの特性上、太陽光の影響によって眼前においた光源の角膜表面による反射像を検出できなくなる。そのため、比較的太陽光の影響が少ない時間帯に実施した。

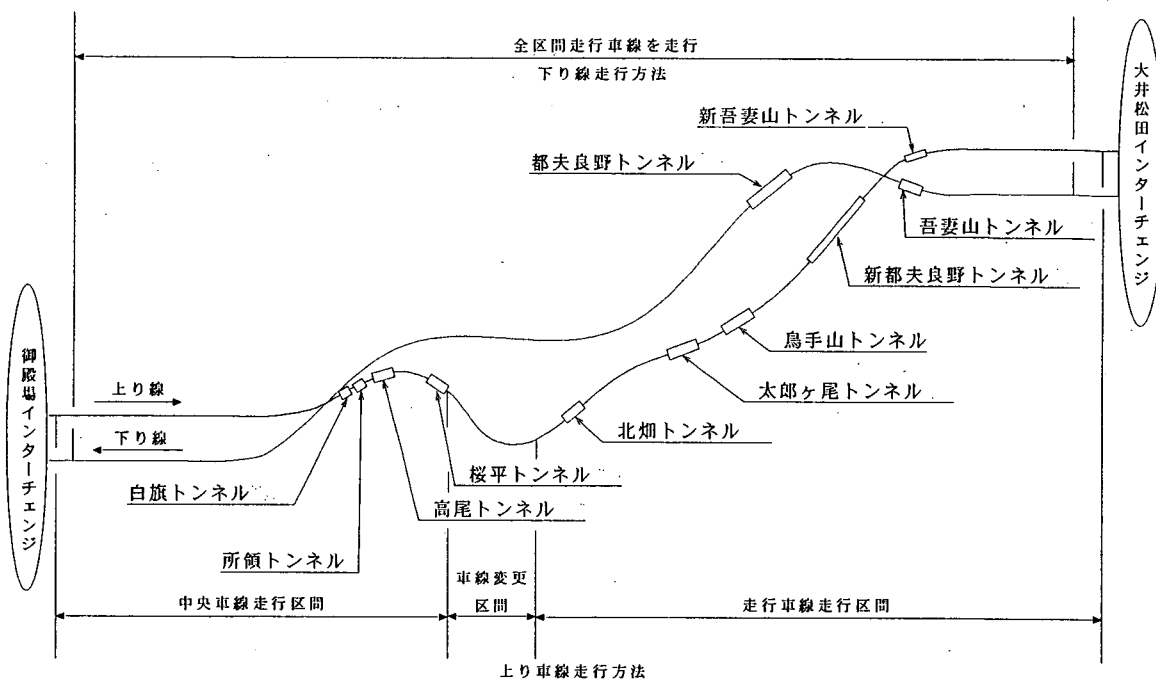


図-2.1 走行概要

表-2.1 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	トンネル断面	トンネル内線形 (m)	縦断勾配 (%)	内装	デリニエータ
1	高尾トンネル	569	3	第2走行車線	面壁	馬蹄形	R=1000 右	下り 2.5	内装板	無し
2	桜平トンネル	482	3	第2走行車線	面壁	馬蹄形	R=1500 左	下り 2.5	内装板	無し
3	北畑トンネル	328	3	第1走行車線	面壁	馬蹄形	A=600 左	下り 0.5	内装板	無し
4	太郎ヶ尾トンネル	707	3	第1走行車線	面壁	馬蹄形	A=350 右	下り 1.3	内装板	無し
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	下り 0.3	内装板	無し
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	下り 2.8	内装板	無し
7	吾妻山トンネル	360	2	第1走行車線	面壁	馬蹄形	直線	上り 2.4	内装板	無し
8	都夫良野トンネル	1689	2	第1走行車線	面壁	馬蹄形	R=1000 左	上り 1.4	内装板	有り

表-2.2 被験者属性

N0	名 前	年 齢	運転歴	使用車種	使用目的
1	TM	45	23	普通	業務
2	TM	21	2	普通	業務
3	SS	50	30	普通	業務
4	KH	27	9	普通	通勤
5	SO	47	20	普通	レジャー
6	YO	33	12	普通	通勤
7	YK	22	2	普通	通勤
8	SS	53	30	大型	業務
9	KK	26	8	普通	通勤

2.1.4 測定項目および測定方法

被験者がアイマークレコーダを装着して、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、その際にデータログとビデオを用い視線挙動、運転挙動のデータ収集を行った。ここで、視線挙動とは運転者の視線の動き、また、運転挙動とは運転者の運転時のアクセル踏量、ブレーキ踏量を指す。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、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。

以下に示す調査項目について測定方法を示す。

(1) 被験者の視線挙動（アイマーク）

視線挙動調査にあたっては、走行前に図-2.2に示すように目標物となる人物2名を前方に立たせ、その人物の頭、足等を被験者に注視させ、各被験者の注視点とアイマークを一致させるためのキャリブレーションを実施した。なお、キャリブレーションは、比較的遠方を見ている時と、近傍を見ている時の注視点とアイマークのズレをなくするため、目標物となる人物の距離を2ヶ所（8m、4m）に設定しキャリブレーションを行った。今回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それぞれ図-2.3、図-2.4に示す。また、アイマークレコーダの原理および詳細¹⁾を参考資料に示す。

調査走行中における被験者のアイマークの例を、図-2.5に示す。また、写真-2.1～写真-2.3に走行時のモニター画像、アイマークレコーダ・ヘッドユニット装着状況、データ収集機器の状況写真を示す。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。

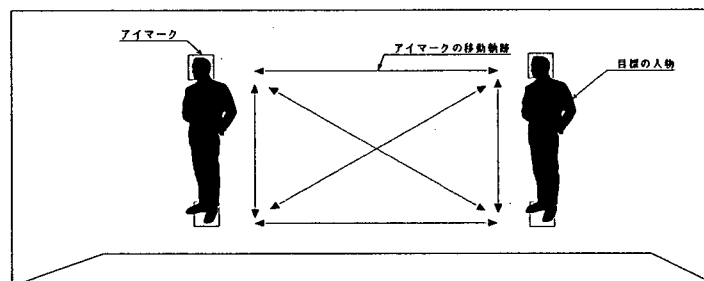


図-2.2 キャリブレーション方法

(2) 走行距離・走行速度及びアクセル・ブレーキ踏量

調査走行中の走行距離・走行速度及びアクセル・ブレーキ踏量は、図-2.3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・ブレーキの最大踏量の調整を行った。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。

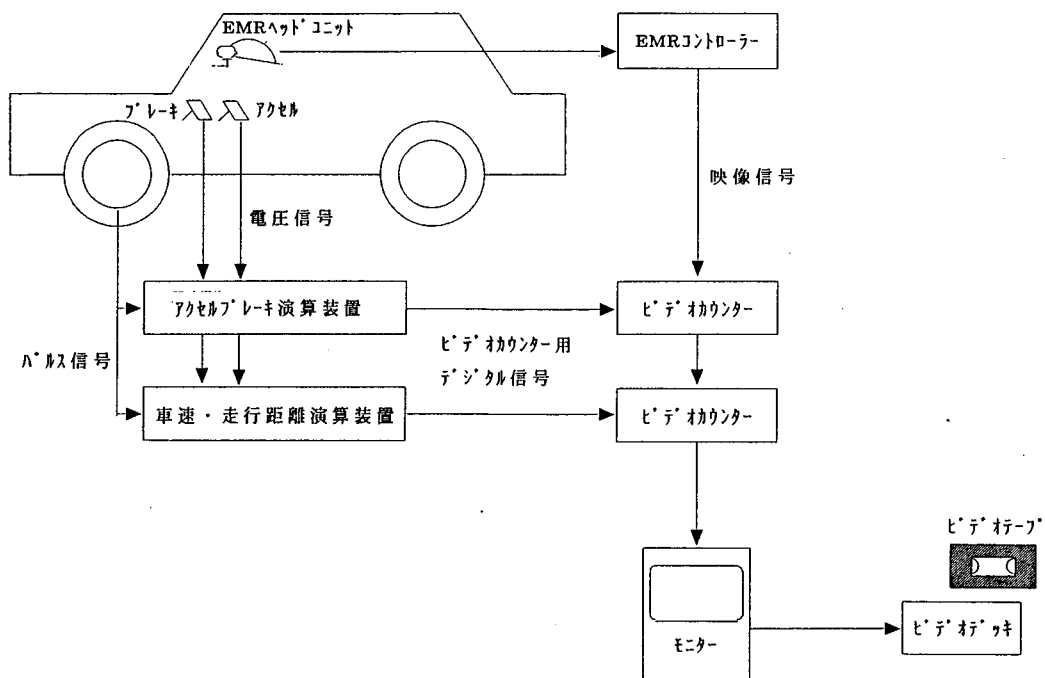


図-2.3 調査機器の構成

EMR-7 SYSTEM CONFIGURATION

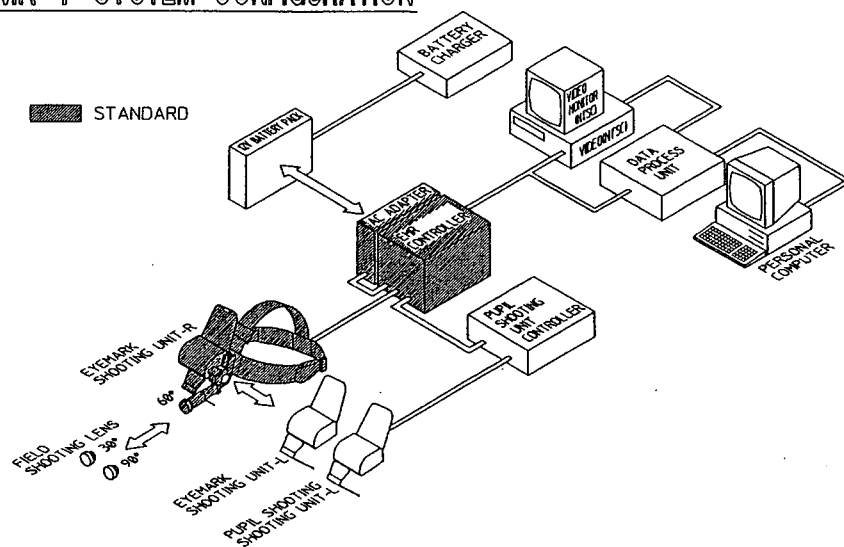


図-2.4 アイマークレコーダーのシステム構成図¹⁾

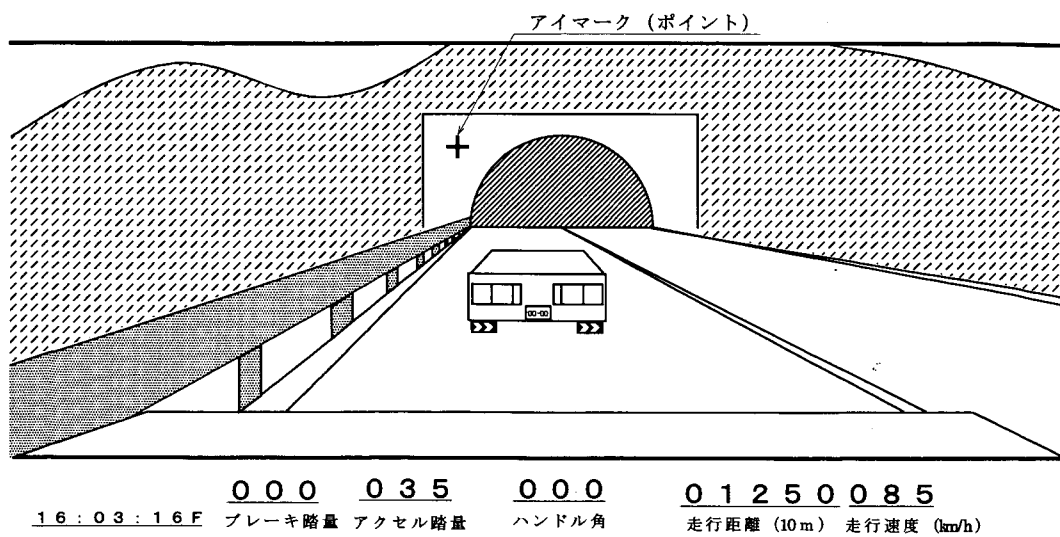


図-2.5 VTRデータ例



写真-2.1 走行時のモニター画像例



写真-2.2 アイマークレコーダー・ヘッドユニット装着状況



写真-2.3 調査機器の構成

2.2 視線挙動調査結果

2.2.1 注視点

各調査対象トンネル毎に、トンネル坑口手前200mからトンネル進入時までの区間の被験者の視線挙動（アイマーク）のデータから運転者が注視している箇所を把握するため、注視点を抽出した。ここで注視点とは、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て抽出した。この注視点として抽出された時の全被験者の注視箇所を、各トンネル毎にトンネル坑口から50m区間毎の注視点の総数で整理した図を図-2.6～図-2.13に示す。

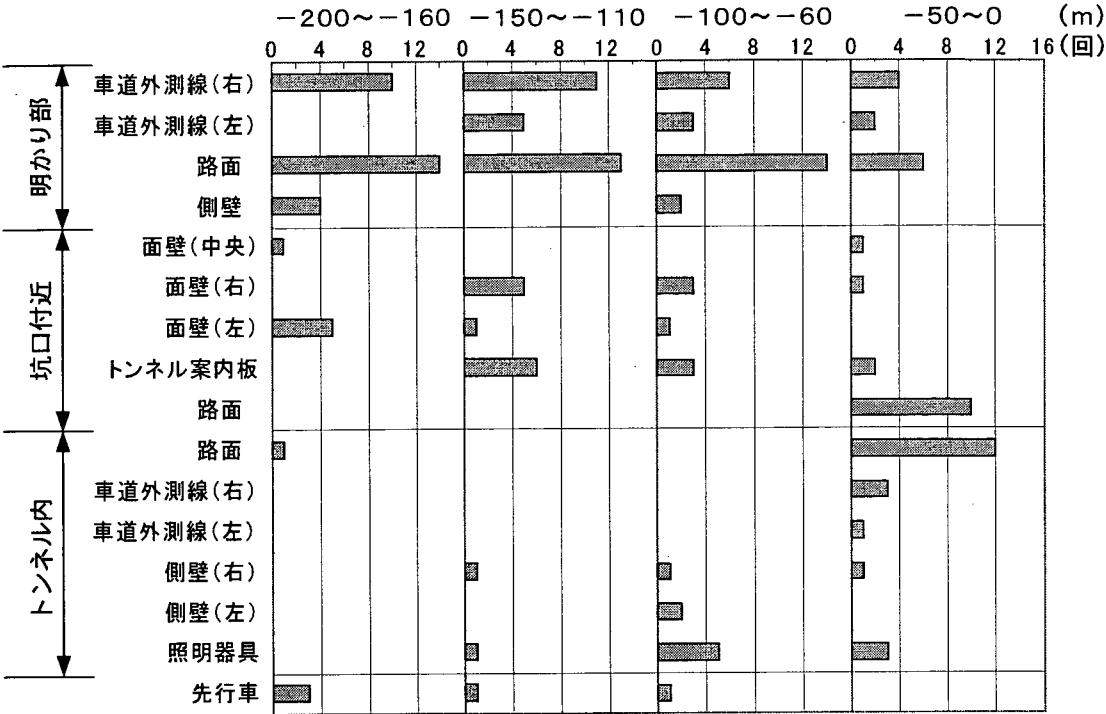
さらに、3車線トンネル第1走行車線、3車線トンネル第2走行車線、2車線トンネル走行車線の3つの走行条件下について、それぞれ代表的なトンネルについてのみ、運転者の注視点がどのように変化していったかの推移分布図を図-2.14～図-2.16に示す。これより、3車線トンネル第1走行車線、2車線トンネル走行車線の条件では、注視点が坑口部の面壁周辺、あるいはトンネル内に多くある傾向が見受けられる。この傾向は、2車線の場合に特に多いものと考えられる。一方、3車線トンネル第2走行車線の条件では、特に坑口の面壁周辺部に集中する傾向は見受けられず、前方路面を全体的に注視している傾向がある。このことから、第1走行車線を走行している場合は、断面の大きさ（2車線か3車線か）で注視点にあまり差がない傾向があることが分かった。また、同じ3車線でも走行車線が異なることにより、注視点が異なってくるものと考えられる。

そこで、全ての調査トンネルを対象として、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）、2車線トンネル走行車線（2トンネル）の走行条件（トンネル車線数、走行車線）が同じトンネルについて整理して、この3条件についてトンネル坑口から200m区間の50m毎のトンネル内・坑口付近・明かり部の注視点の割合の変化を図-2.17～図-2.19に示す。また、3条件毎について坑口から200m手前の全区間についてトンネル内・坑口付近・明かり部の注視点の割合を図-2.20に示す。さらに、トンネル坑口から200m区間の50m毎の各注視点の総数に対する割合を図-2.21～図-2.23に示す。

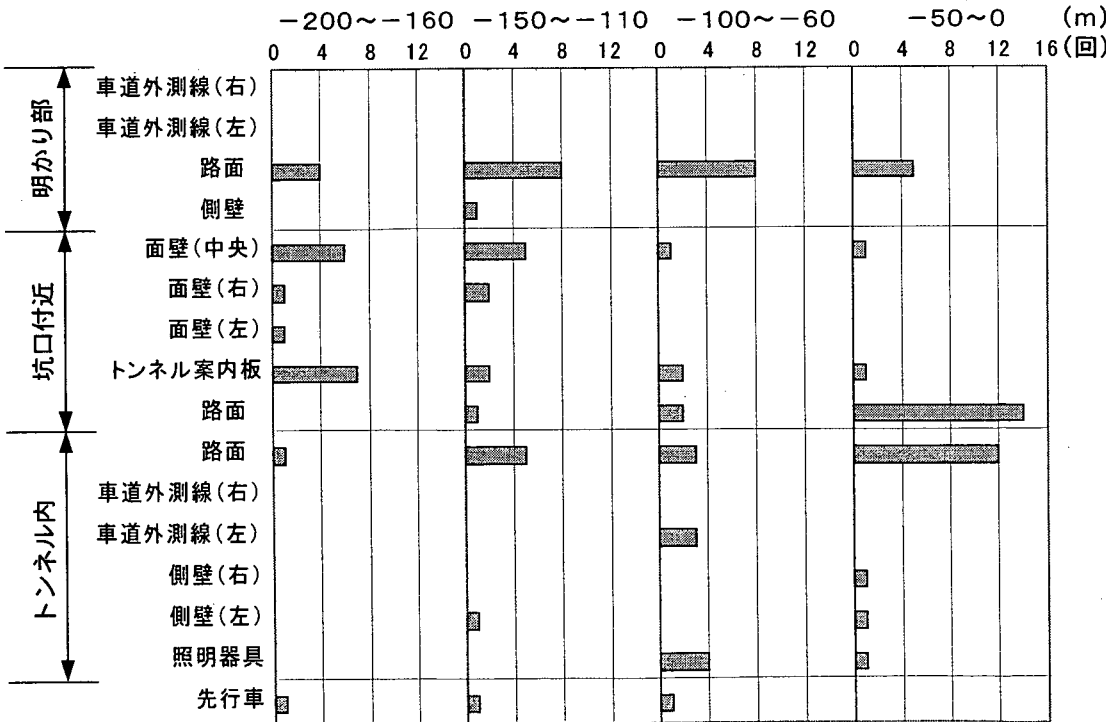
図-2.17～図-2.19より、注視点の挙動は、傾向的にはトンネル坑口に近づくにつれ、明かり部、坑口付近、トンネル内と注視点が移動していくことが確認できる。各走行条件ともに、50～0mの間は大きな差は認められないが、それ以前の区間では3車線トンネル第2走行車線で明かり部の注視点が多くなっている。図-2.20より、トンネル進入時には3車線トンネル第1走行車線、2車線トンネル走行車線ともに明かり部を約30%、坑口付近を約30%、トンネル内を約40%注視し、3車線トンネル第2走行車線では、明かり部を約45%、坑口付近を約20%、トンネル内を約35%注視していることが分かる。このことから、第1走行車線を走行している時にはトンネル内を、3車線トンネルの第2走行車線を走行時には明かり部を多く注視する傾向がわかった。

図-2.21～図-2.23より、いずれの条件でも明かり部では路面を注視する割合が高いことが分かる。また、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ことが分かる。一方、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・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走行車線を走行時の運転者は、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。このことは、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することと一致している²⁾。



図－2.6 トンネル進入時の注視点の変化（高尾トンネル：3車線トンネル第2走行車線）



図－2.7 トンネル進入時の注視点の変化（桜平トンネル：3車線トンネル第2走行車線）

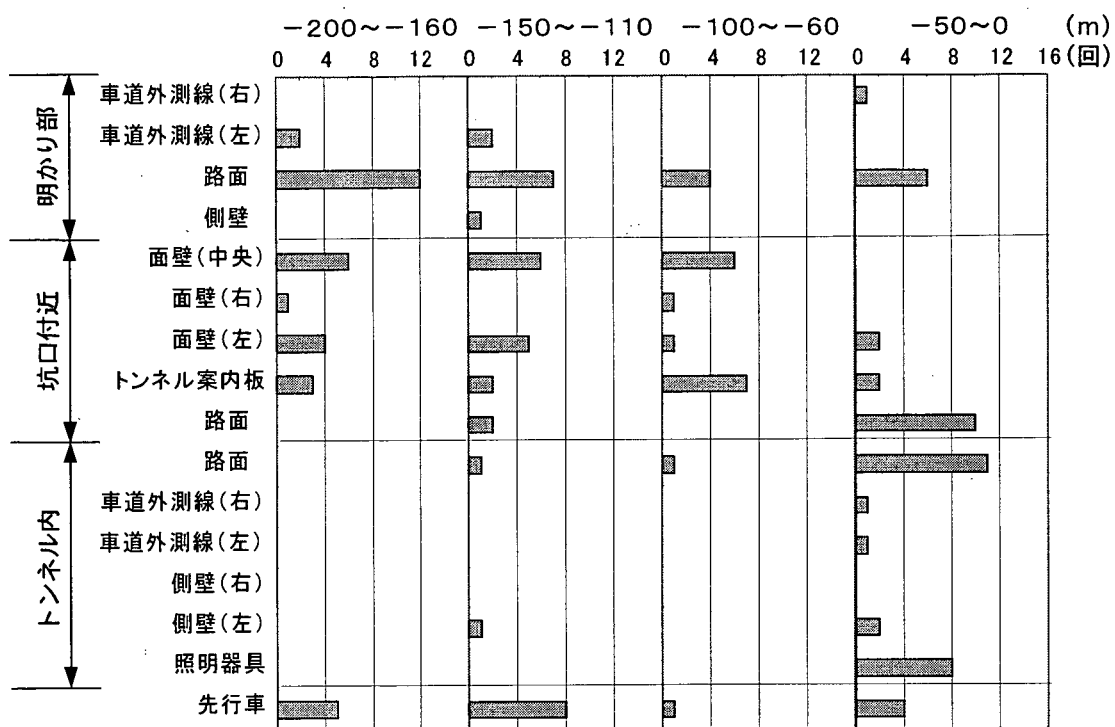


図-2.8 トンネル進入時の注視点の変化（北畑トンネル：3車線トンネル第1走行車線）

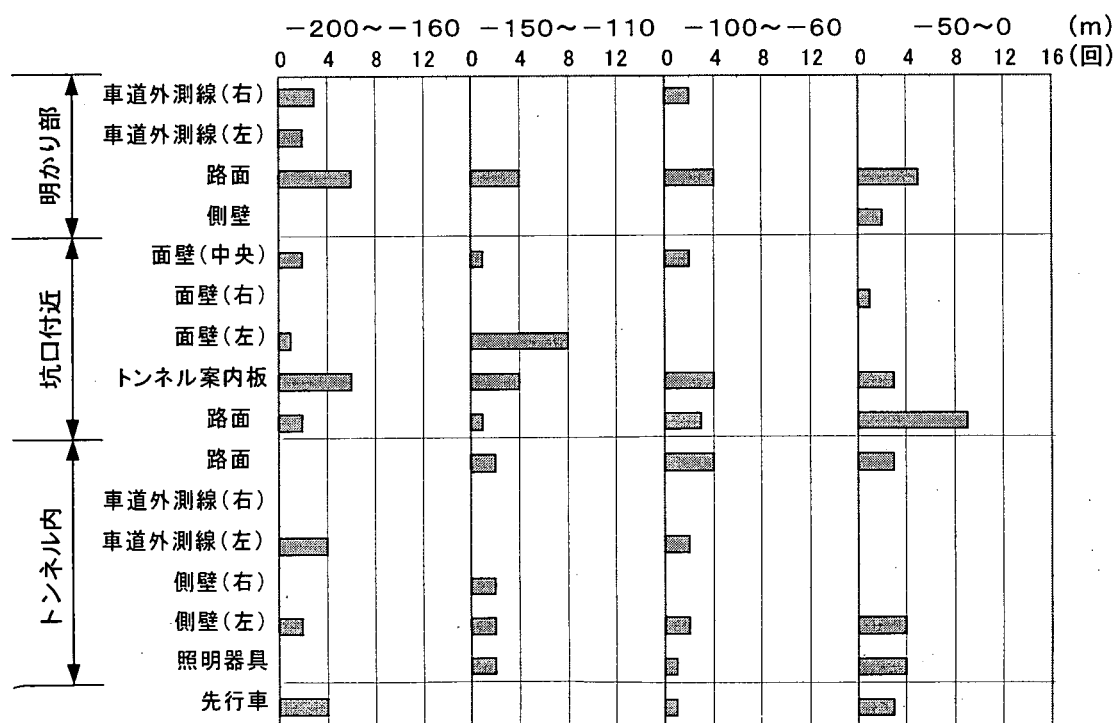


図-2.9 トンネル進入時の注視点の変化（太郎ヶ尾トンネル：3車線トンネル第1走行車線）

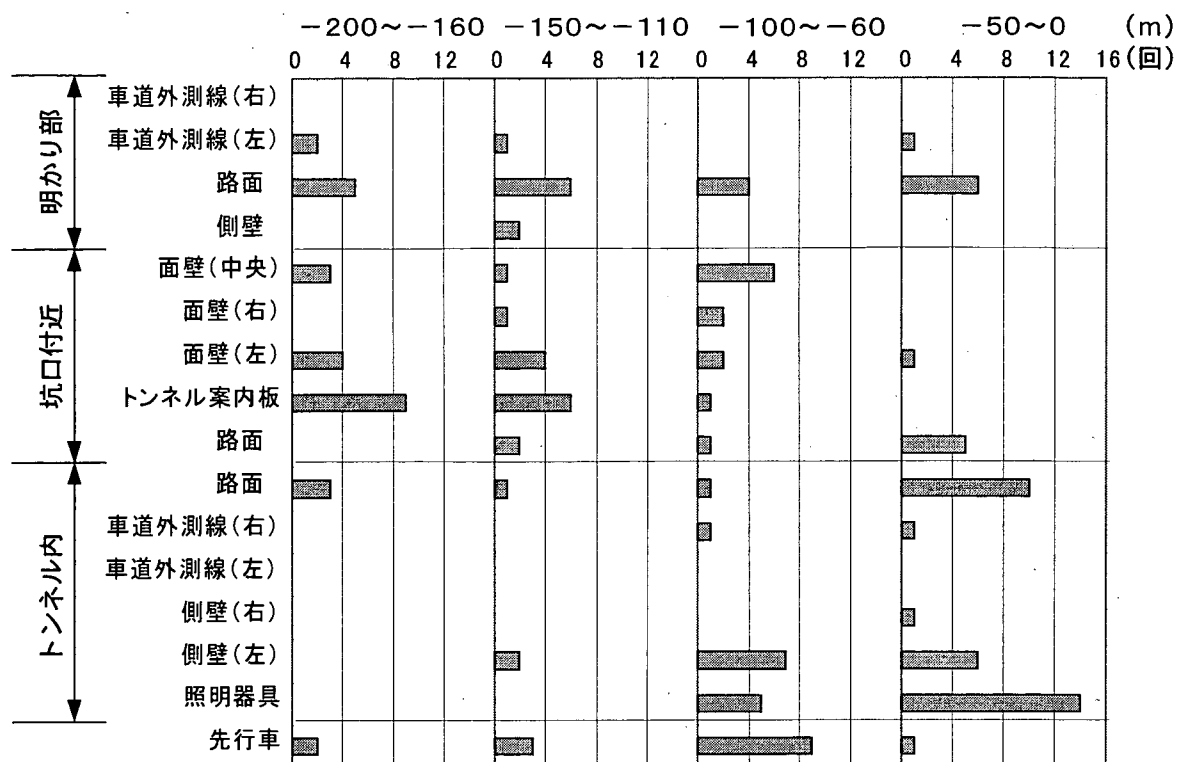


図-2.10 トンネル進入時の注視点の変化（新都夫良野トンネル：3車線トンネル第1走行車線）

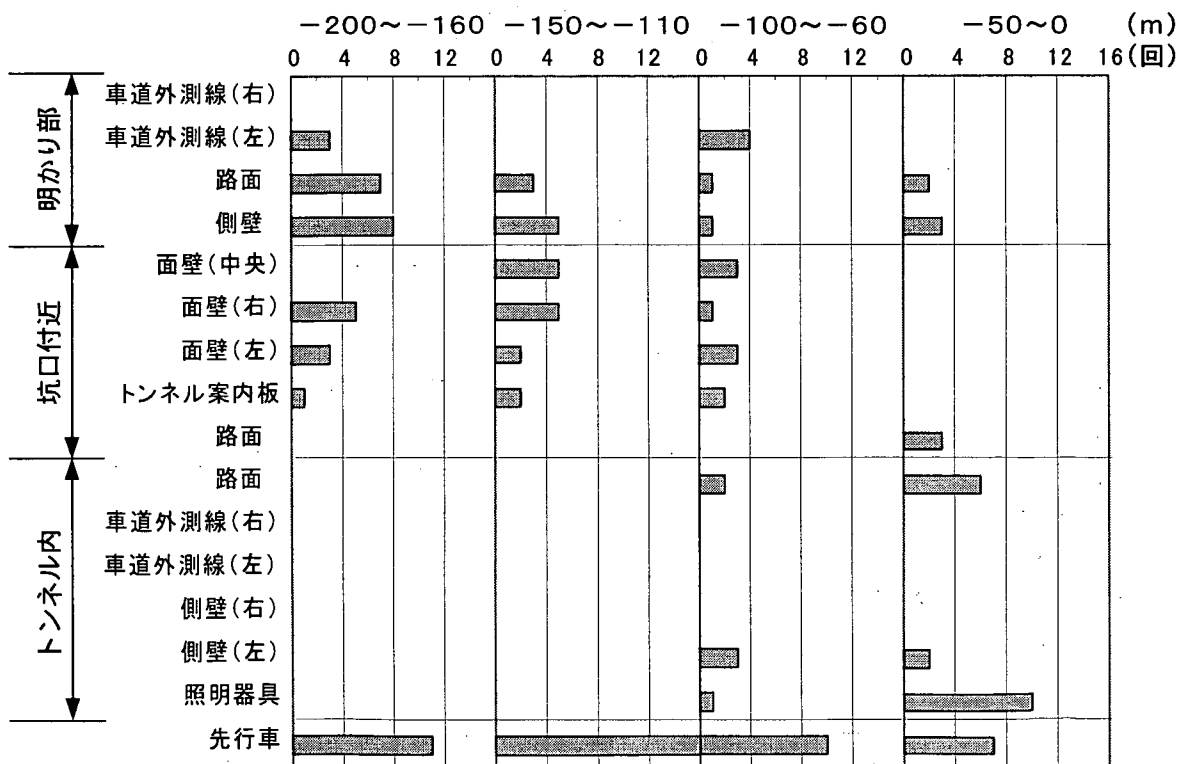


図-2.11 トンネル進入時の注視点の変化（新吾妻山トンネル：3車線トンネル第1走行車線）

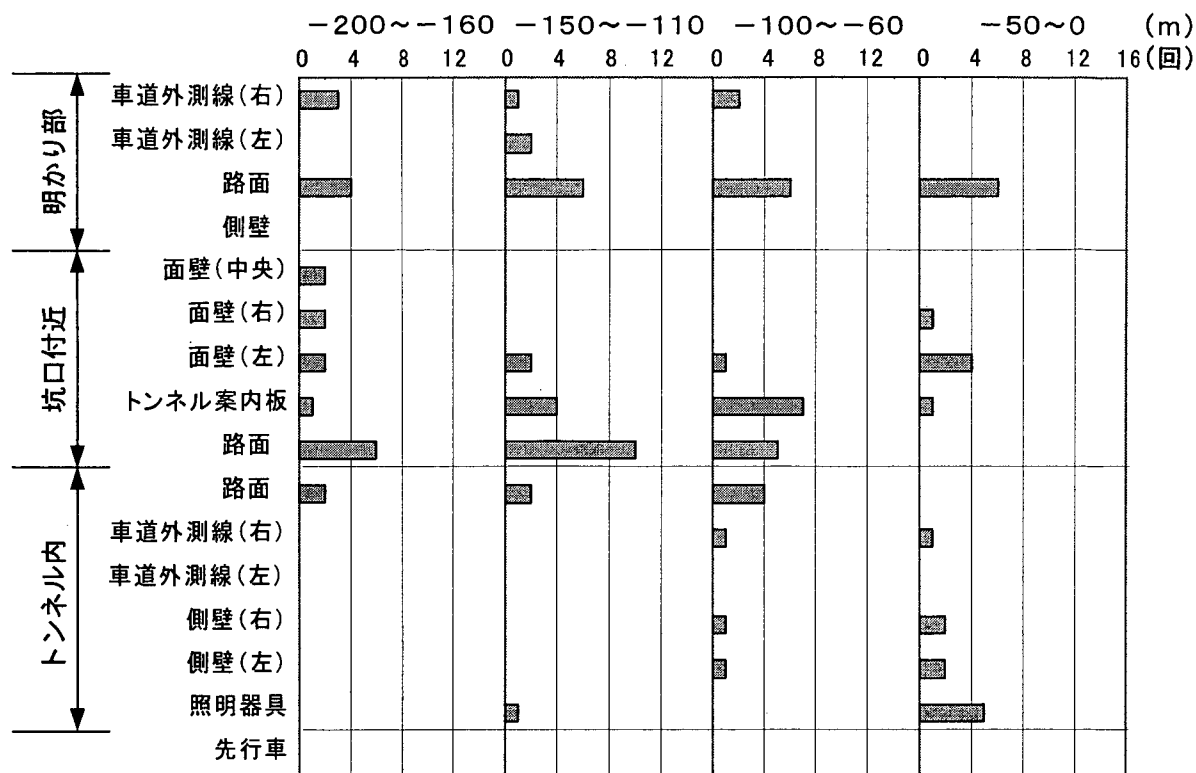


図-2.12 トンネル進入時の注視点の変化 (吾妻山トンネル：2車線トンネル走行車線)

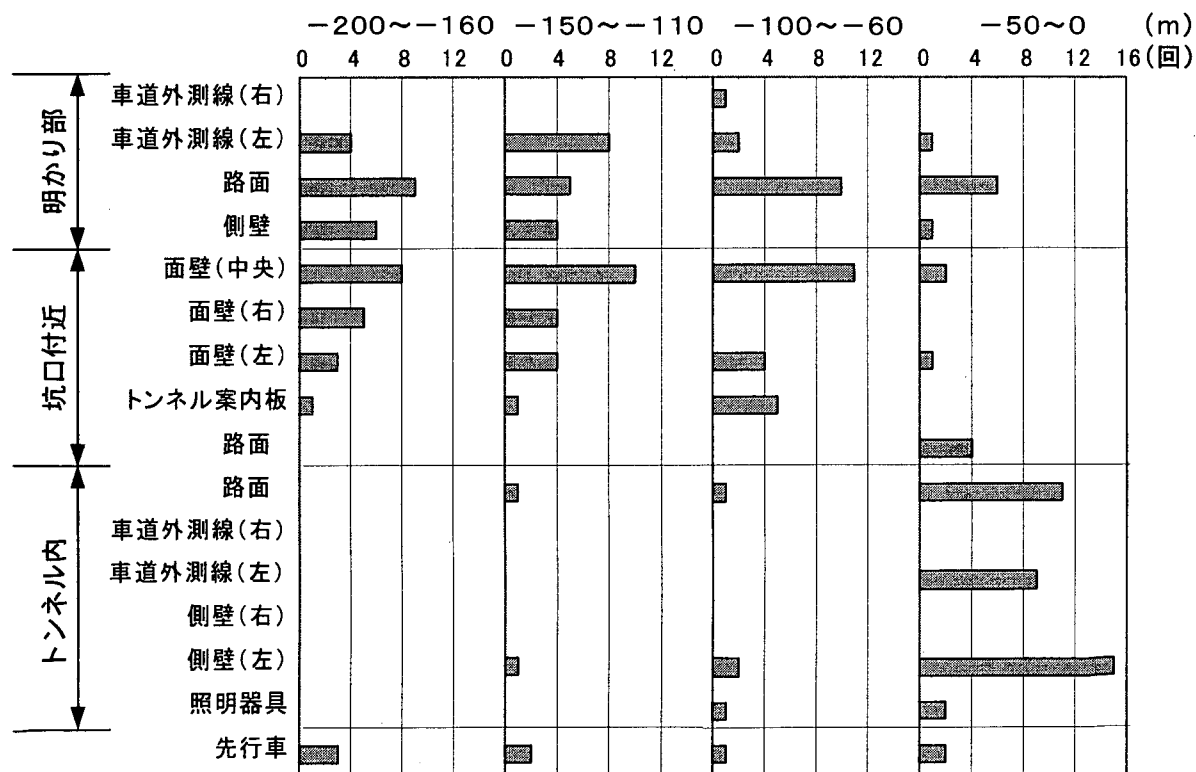


図-2.13 トンネル進入時の注視点の変化 (都夫良野トンネル：2車線トンネル走行車線)

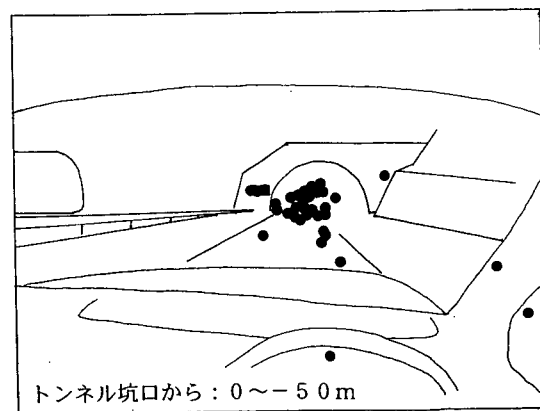
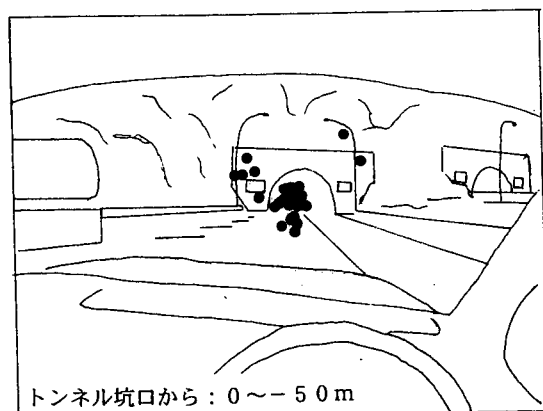
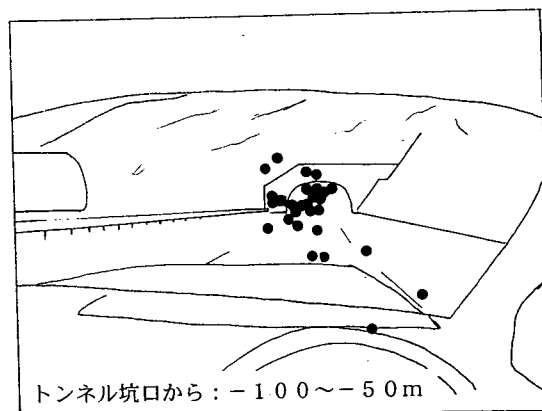
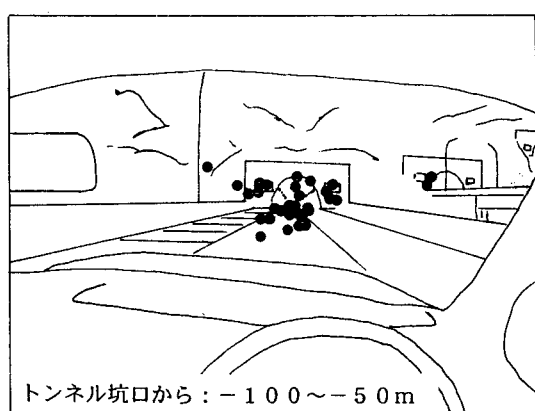
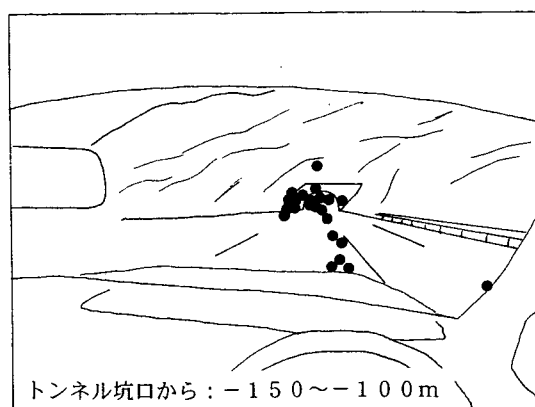
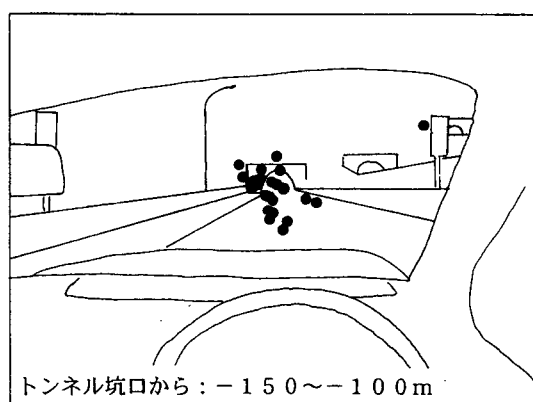
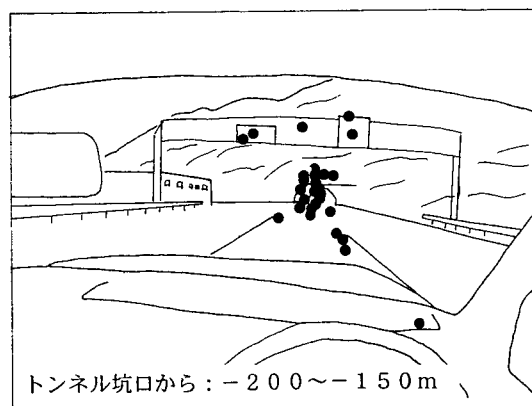
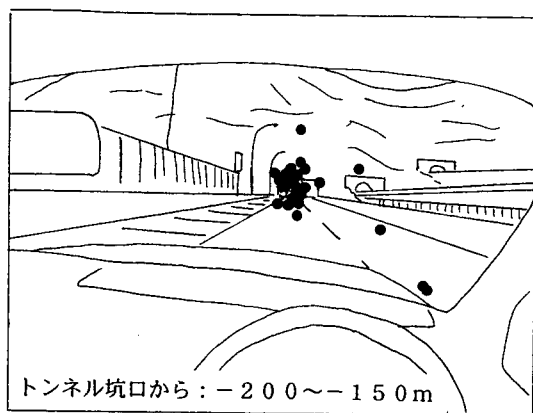


図-2.14 2車線トンネル（走行車線の例） 図-2.15 3車線トンネル（第1走行車線の例）

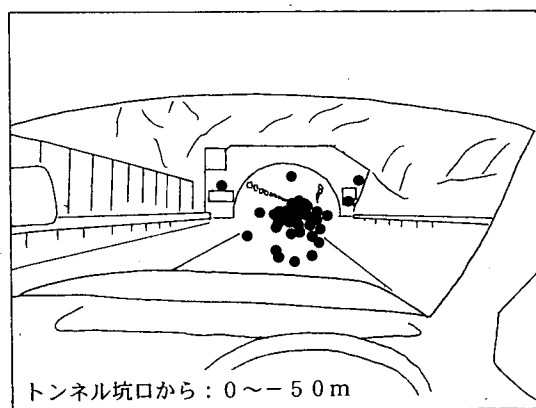
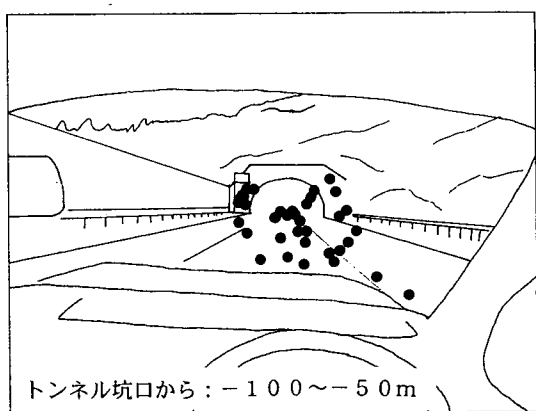
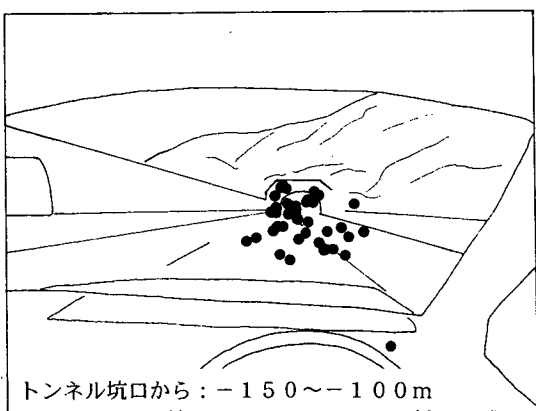
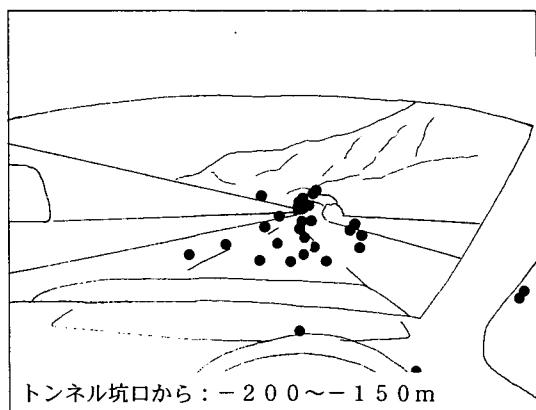


図-2.16 3車線トンネル（第2走行車線の例）

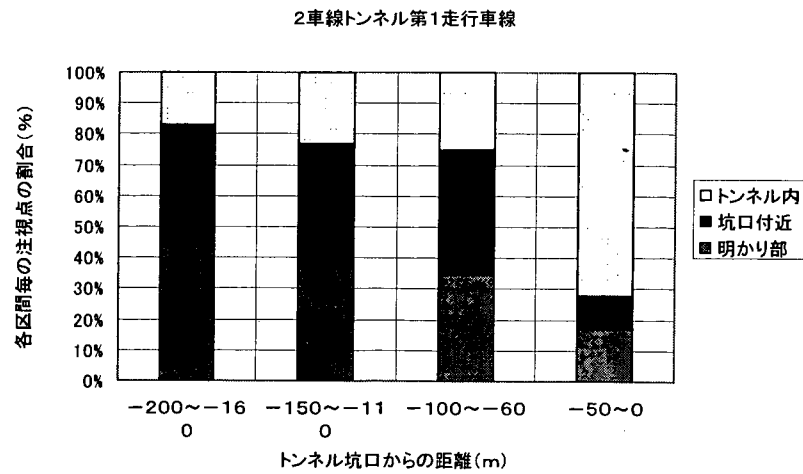


図-2.17 50m毎の注視点の割合の変化（2車線トンネル第1走行車線）

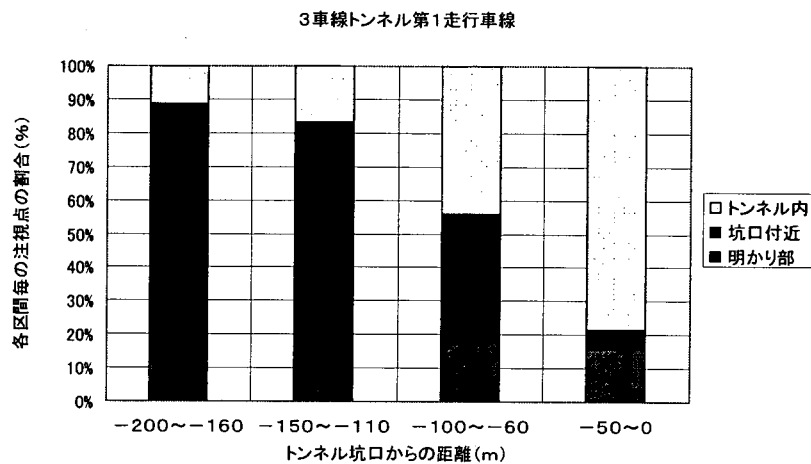


図-2.18 50m毎の注視点の割合の変化（3車線トンネル第1走行車線）

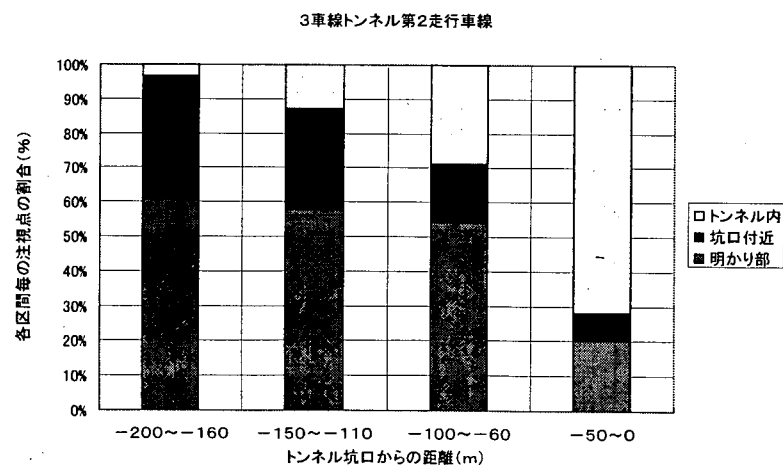


図-2.19 50m毎の注視点の割合の変化（3車線トンネル第2走行車線）

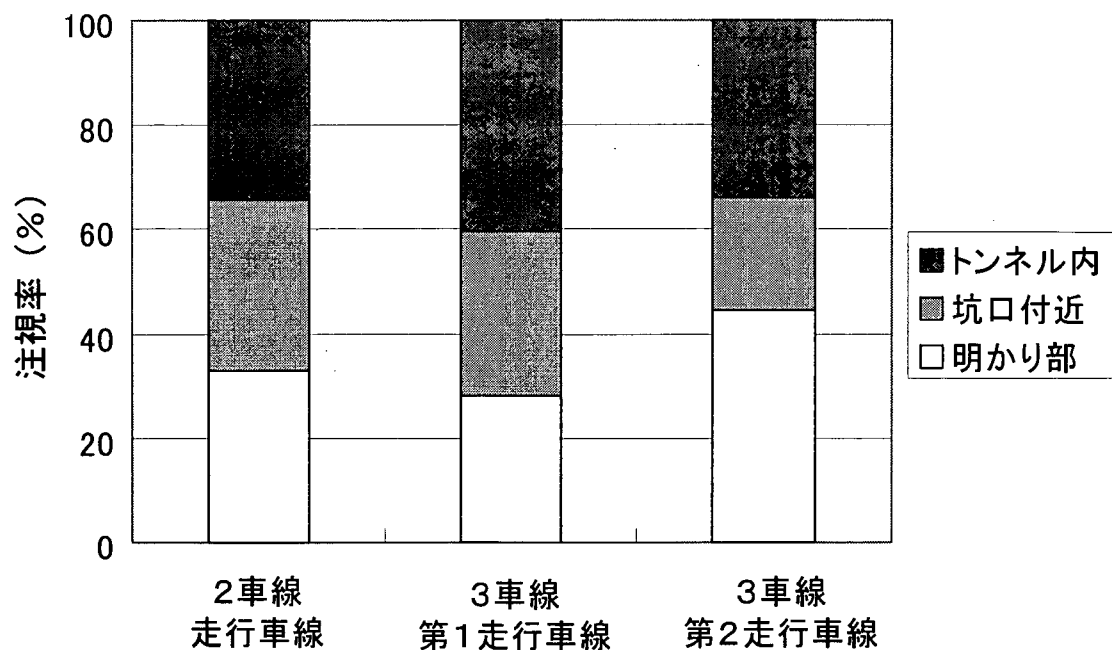


図-2.20 走行条件毎の注視率

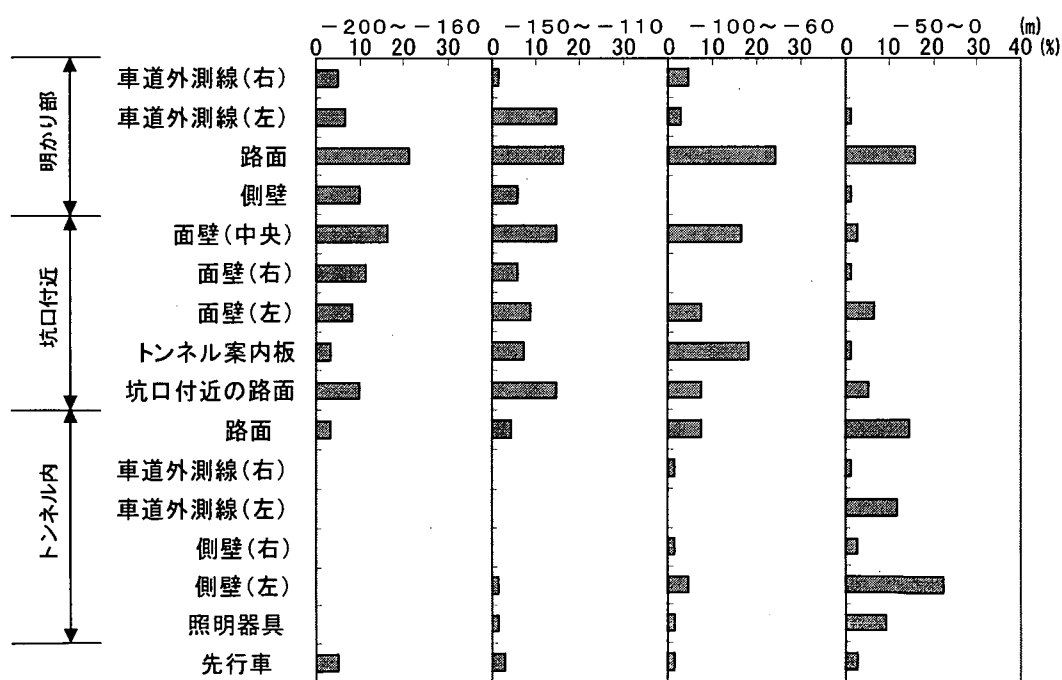


図-2.21 トンネル進入時の注視点の変化 (2車線トンネル走行車線)

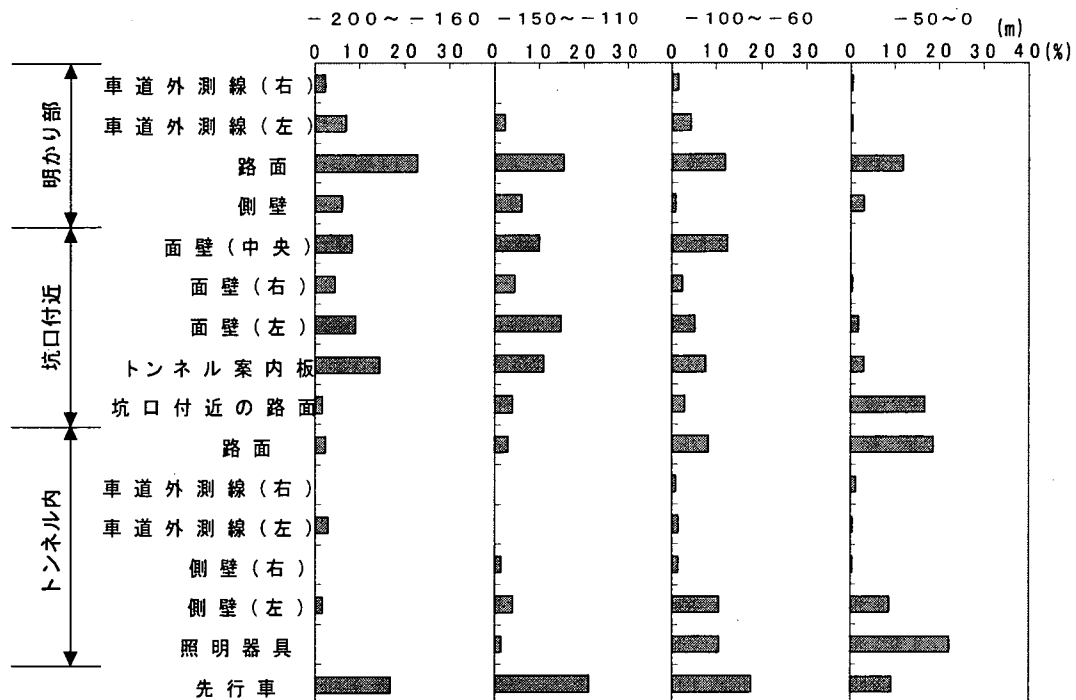


図-2.22 トンネル進入時の注視点の変化(3車線トンネル第1走行車線)

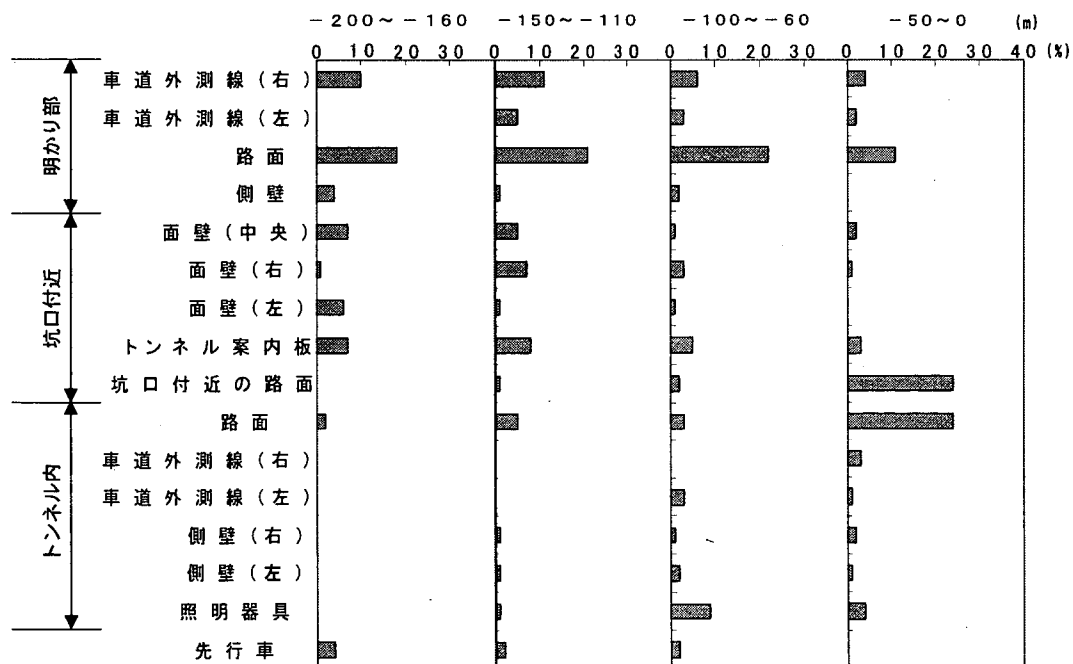


図-2.23 トンネル進入時の注視点の変化(3車線トンネル第2走行車線)

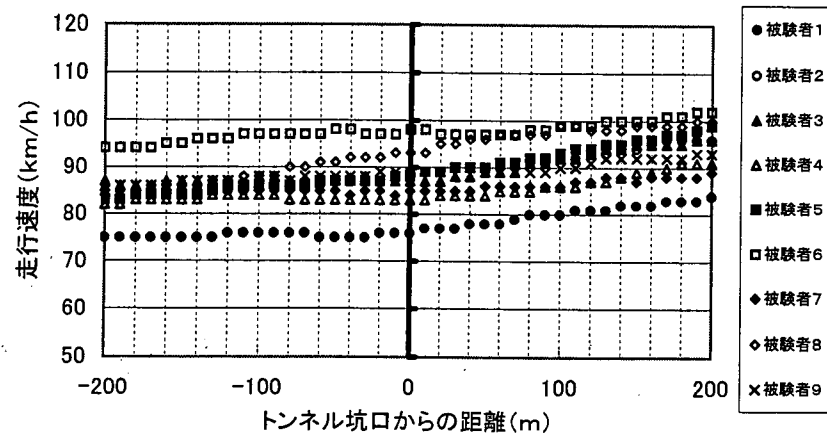
2.2.2 運転挙動

(1) 走行速度

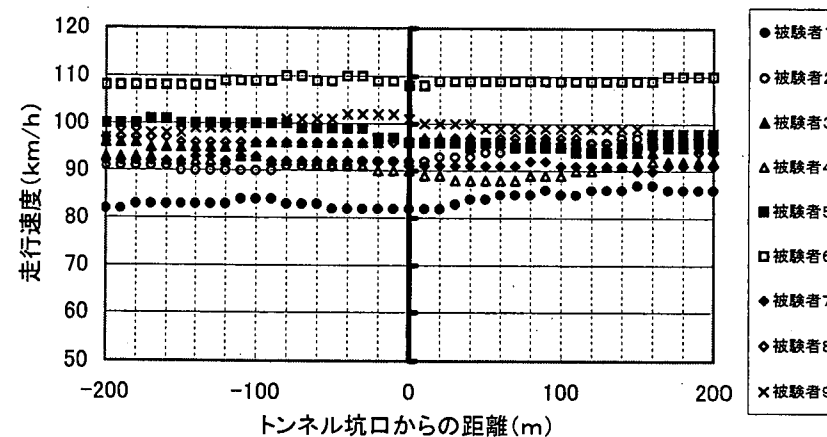
各調査対象トンネル毎に、トンネル坑口手前200mからトンネル進入後200mまでの区間の走行速度を、記録（録画）を行ったVTRより10m間隔で読み取り整理した。図-2.24（1）～（2）に各トンネル毎に、被験者の走行速度の変化を示す。これより、各トンネルともに被験者によって走行速度が大きく異なっていることが分かる。それぞれの速度データにばらつきはあるものの、高尾トンネル、桜平トンネル、太郎ヶ尾トンネル、新吾妻山トンネルは、トンネル進入前後に全体的に速度が上がっている傾向があり、特に高尾トンネルで顕著な傾向を示した。これらのトンネルは、いずれも縦断勾配が下り1.3%以上のトンネルであり、高尾トンネル、桜平トンネルは下り2.5%である。一方、縦断勾配が下り0.5%以下、もしくは上りの縦断勾配の他のトンネルは、トンネル進入前後の走行速度の変化は認められない。

図-2.25～図-2.27に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、2車線トンネル走行車線の3つの走行条件について50m区間毎の全被験者の平均走行速度を示す。これより、桜平トンネルを除き、縦断勾配が下り1.3%以上のトンネルでは、トンネル進入前後の走行速度の上昇は認められるものの、走行条件の違いによるトンネル坑口付近における顕著な走行速度の変化は認められない。

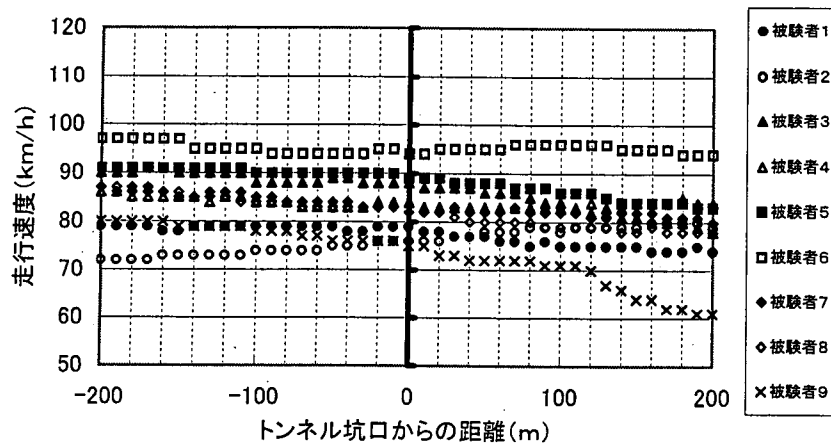
以上より、今回の調査結果からでは、被験者による個人差による速度の変化はあるものの、トンネル坑口付近の速度変化があまり大きくないことから、走行速度と運転者の挙動との関係を把握することは困難であるものと考えられる。ただし、縦断勾配が下りのトンネルでは、進入前後の走行速度の上昇の可能性があることが確認された。



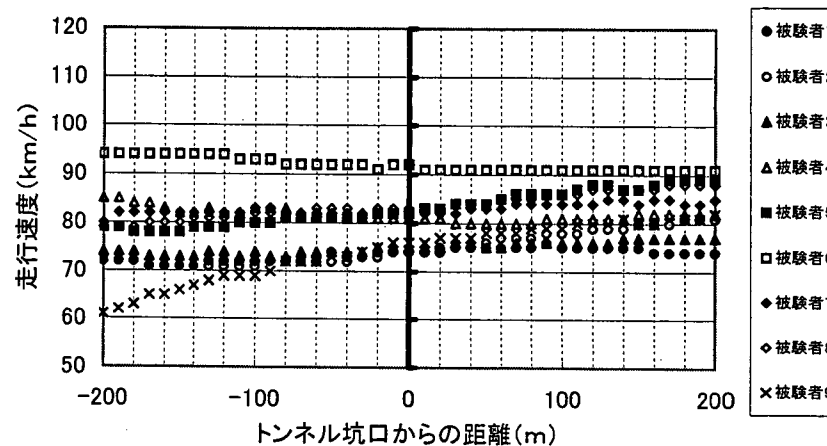
走行中の走行速度の変化(高尾トンネル:3車線トンネル第2走行車線)



走行中の走行速度の変化(桜平トンネル:3車線トンネル第2走行車線)

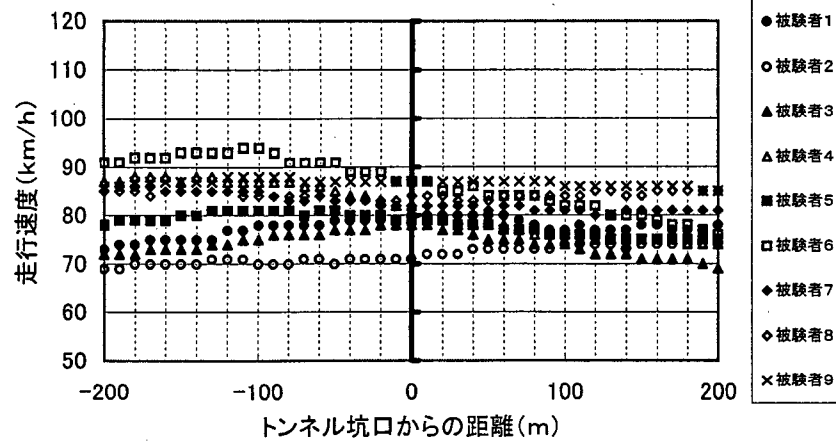


走行中の走行速度の変化(北畑トンネル:3車線トンネル第1走行車線)

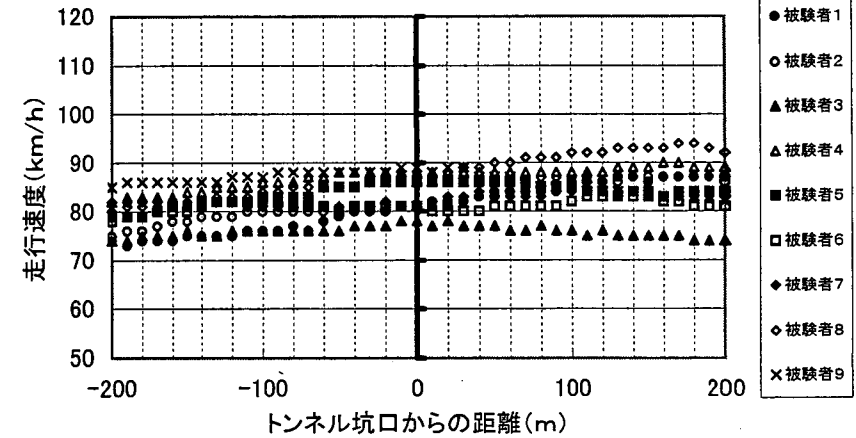


走行中の走行速度の変化(太郎ヶ尾トンネル:3車線トンネル第1走行車線)

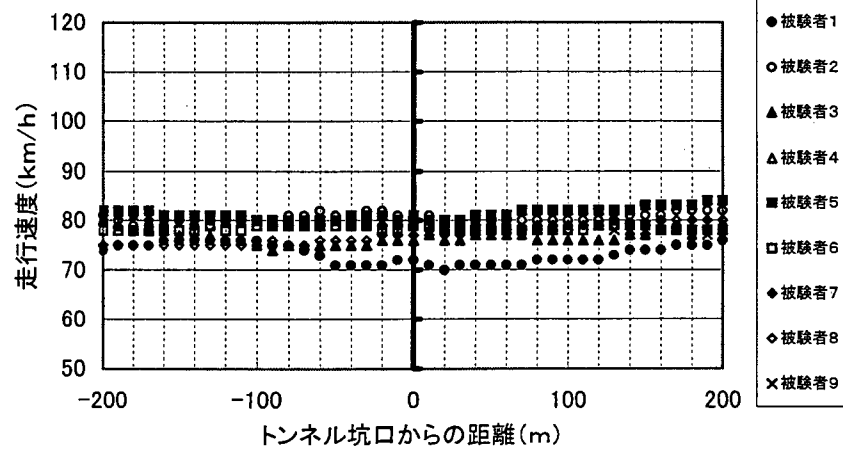
図-2. 24(1) 走行中の走行速度の変化



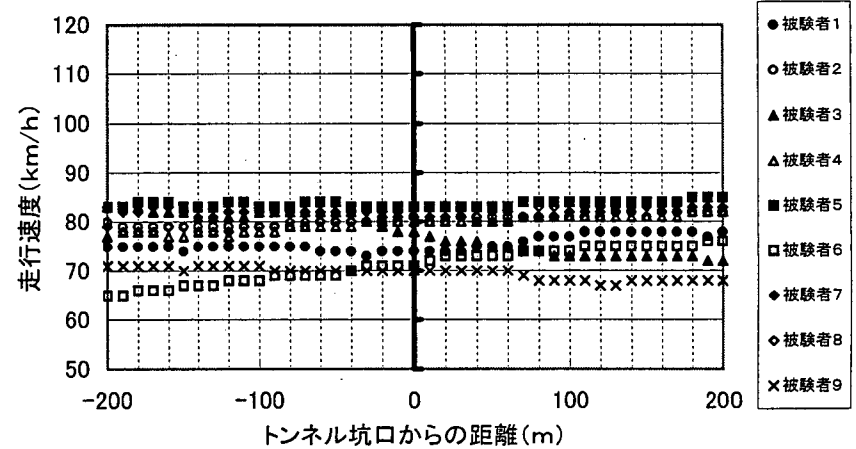
走行中の走行速度の変化(新都夫良野トンネル:3車線トンネル第1走行車線)



走行中の走行速度の変化(新吾妻山トンネル:3車線トンネル第1走行車線)



走行中の走行速度の変化(吾妻山トンネル:2車線トンネル走行車線)



走行中の走行速度の変化(都夫良野トンネル:2車線トンネル走行車線)

図-2. 24(2) 走行中の走行速度の変化

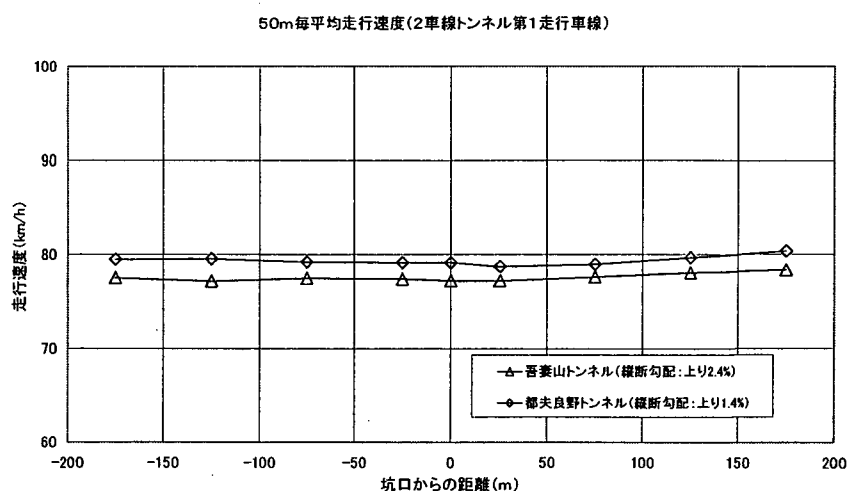


図-2.25 走行中の走行速度の平均値 (2車線トンネル第1走行車線)

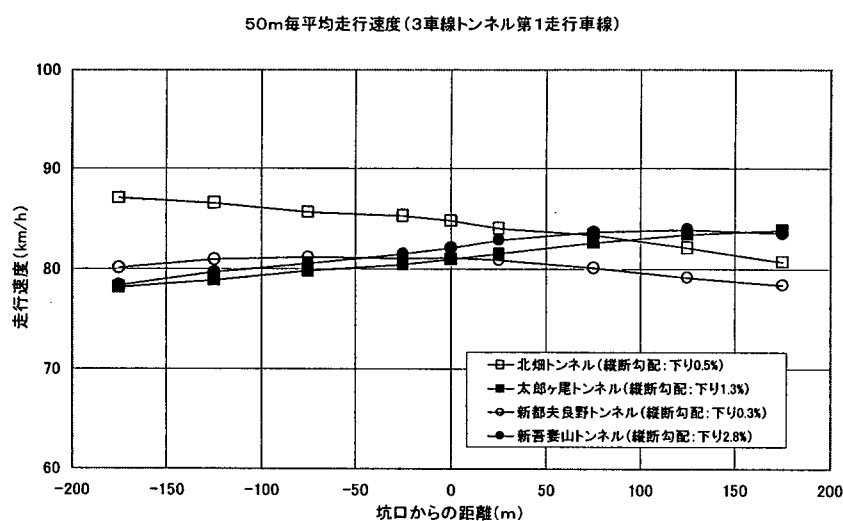


図-2.26 走行中の走行速度の平均値 (3車線トンネル第1走行車線)

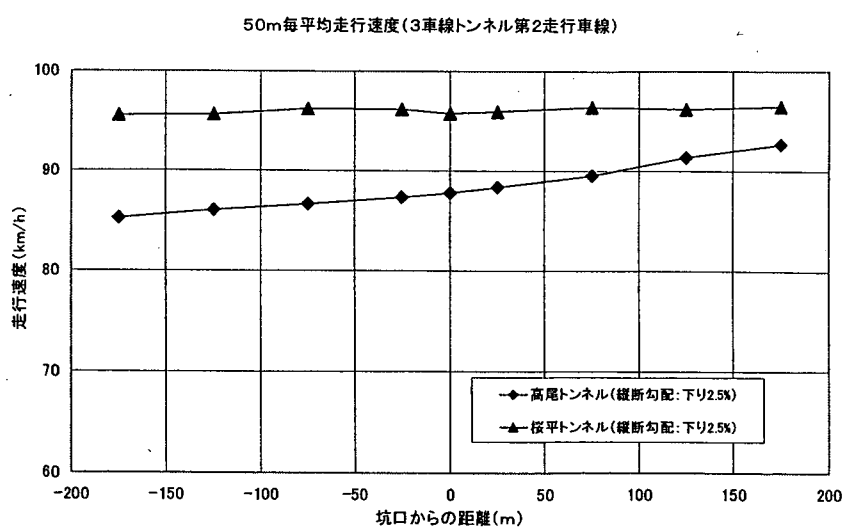


図-2.27 走行中の走行速度の平均値 (3車線第2走行車線)

(2) アクセル・ブレーキ踏量

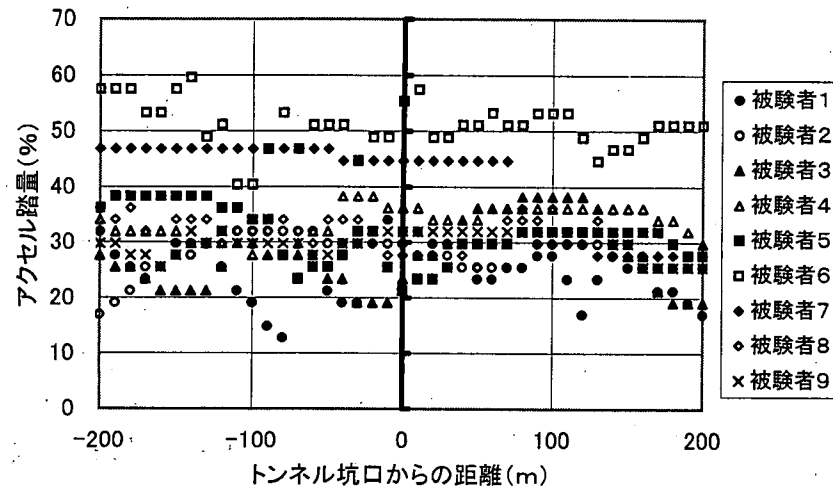
各調査対象トンネル毎に、トンネル坑口手前200mからトンネル進入後200mまでの区間のアクセル・ブレーキ踏量を、記録(録画)を行ったVTRより10m間隔で読み取り整理した。

アクセル踏量は、調査開始前に実施した調整によって、開放時の値(アクセルから足をはなした状態でエンジンが始動しているとき)および最大に踏み込んだ時の値を用いて、0%および100%と定義している。従って、調査時に、アイドリング時および走行時にアクセルを開放した状態であれば0%を示し、最大に踏み込めば100%を示すこととなる。一方、ブレーキ踏量もアクセル踏量と同様に調査開始前に確認を行った値を用いて0%および100%を定義しているため、開放時には0%を示し、最大に踏み込めば100%を示すこととなる。

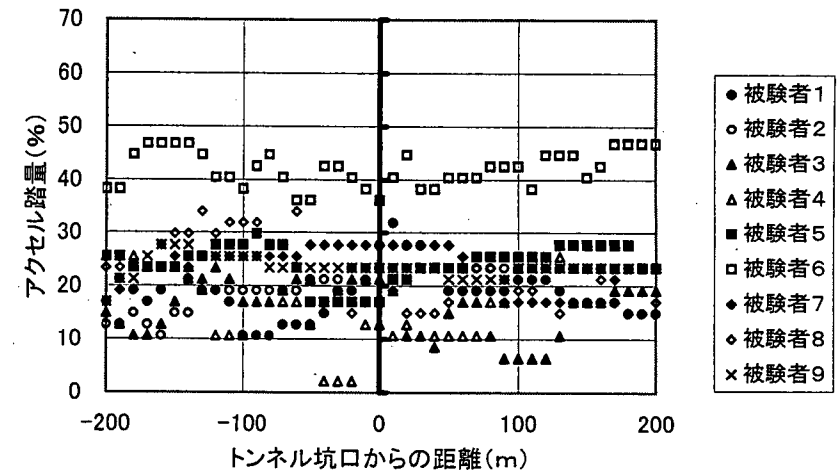
アクセル踏量の変化を図-2.28(1)～(2)に示す。これより、被験者によって変化の程度は異なるが、走行速度の変化に比べて顕著な変化がみられることが分かる。道路を走行中の一般的な運転者の挙動を考えると、運転者の視野前方に走行上の危険を感じていない場合は、アクセルによる減速操作およびブレーキペダルを踏むことはないものと考えられる。しかし、視野前方の道路上に落下物などの障害物の存在により、走行上の危険を感じた場合には、先ず第1にアクセルを緩めて、第2にブレーキを操作するといった手順となると考えられる。このような運転者の挙動を考えると、今回のアクセル踏量の変化は、運転者の視野内に何らかの危険を感じうる要因が存在したものと考えられることができる。

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の変化量が約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-2.29に示す。これより、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等(トンネル内点灯せよ)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、運転者が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ため、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、前方路面状況を把握するためなどが推測される。ここで、坑口手前100m区間において減速操作時の注視点でトンネル内路面が多いのはトンネル内路面の注視点数が多いため、また、本区間で減速操作時の注視点に面壁が無いが本区間の注視点で左側のトンネル側壁が多いこと、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、本区間においても坑口形状から何らかの要因はあるものと推測される。

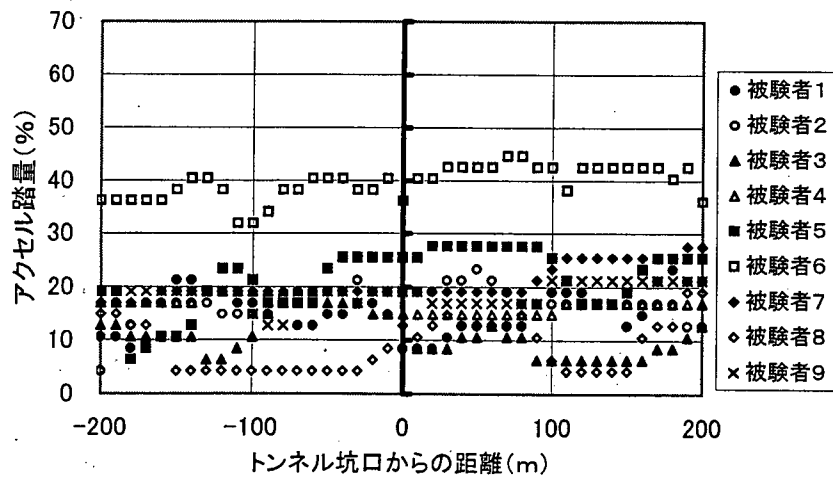
なお、今回の調査においては、全被験者が全ての調査区間内でのブレーキは使用しなかった。



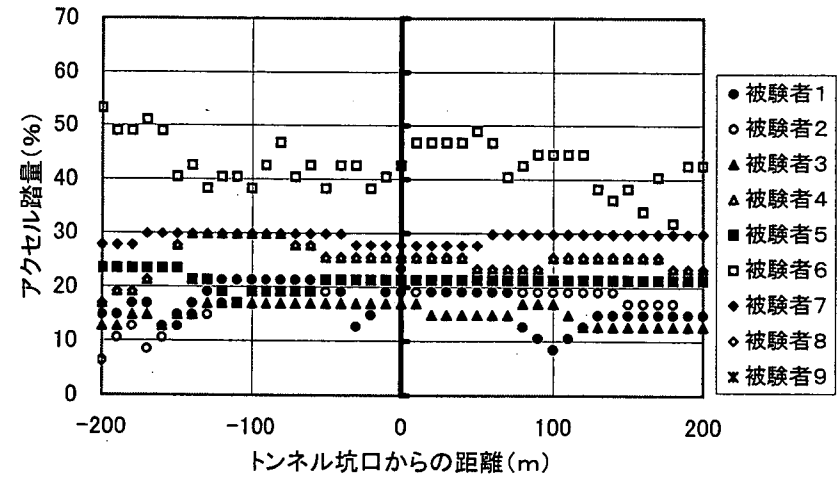
走行中のアクセル踏量の変化(高尾トンネル)



走行中のアクセル踏量の変化(桜平トンネル)

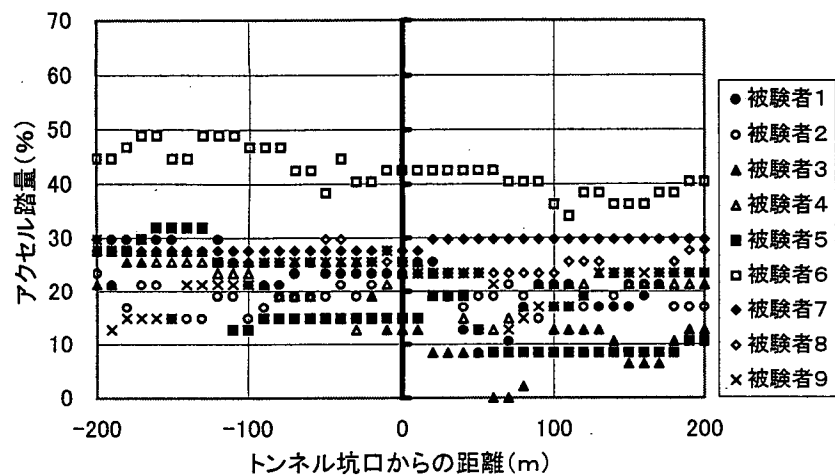


走行中のアクセル踏量の変化(北畑トンネル)

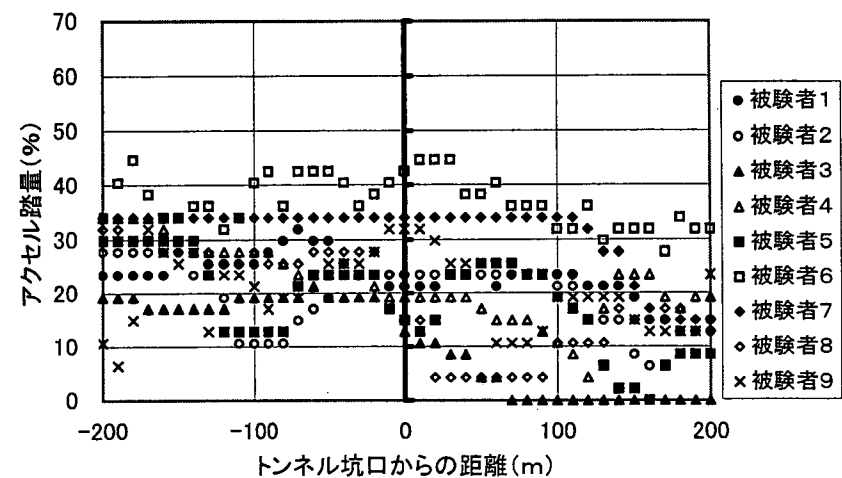


走行中のアクセル踏量の変化(太郎ヶ尾トンネル)

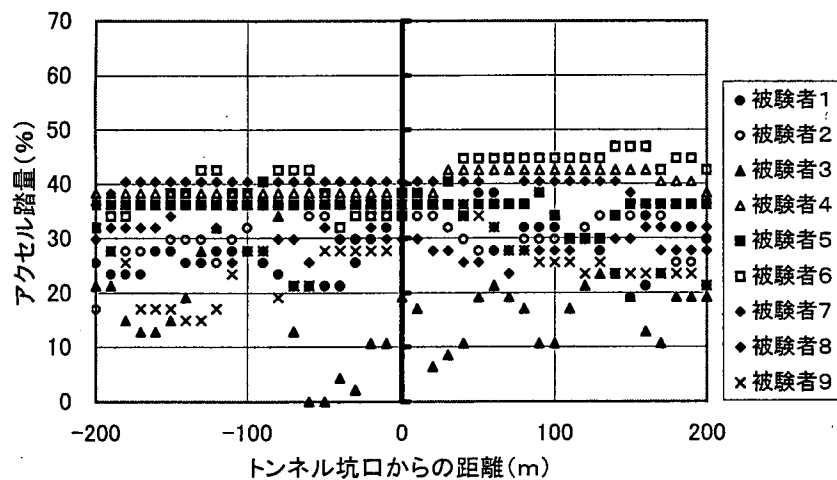
図-2. 28(1) 走行中のアクセル踏量の変化



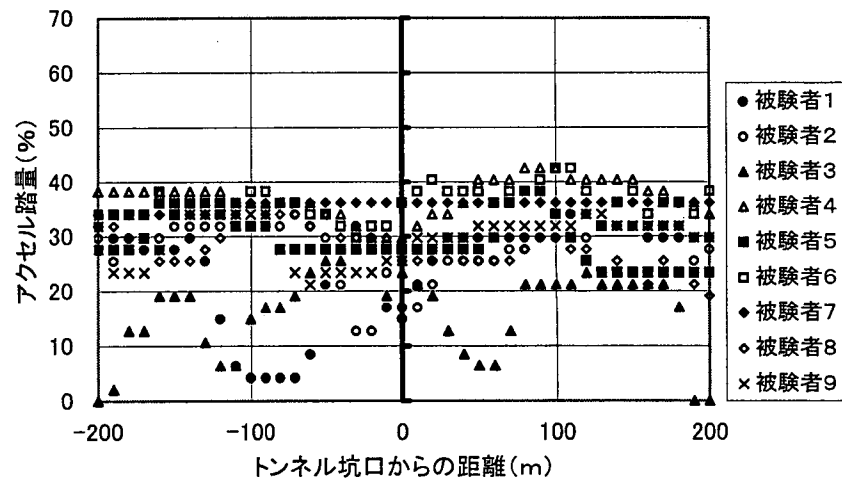
走行中のアクセル踏量の変化(新都夫良野トンネル)



走行中のアクセル踏量の変化(新吾妻山トンネル)

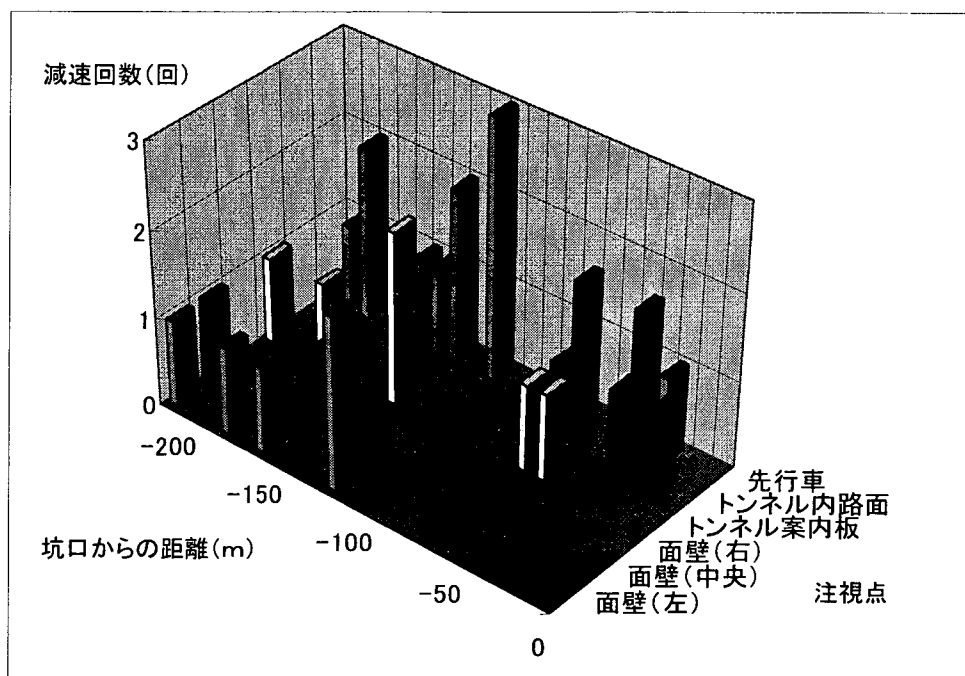


走行中のアクセル踏量の変化(吾妻山トンネル)



走行中のアクセル踏量の変化(都夫良野トンネル)

図-2. 28(2) 走行中のアクセル踏量の変化



図－ 2. 2 9 アクセル減速回数と減速時の注視点と坑口からの距離

2. 3 まとめ

本視線挙動調査の結果から、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、3車線トンネルにあまり関係なく、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ことが分かった。また、運転挙動の結果からトンネル坑口手前100m前後で、運転者が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ため、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、前方路面状況を把握するためなどが推測された。

今後検討すべき事項として、今回の坑口形状は全て面壁であったため、他の坑口形状について調査し、運転者に影響の少ない坑口形状の検討の必要がある。また、側方余裕についての調査を行い、運転者により安心感を与える側方余裕についての検討、さらには、トンネル案内板による影響が見られるため、トンネル案内板の設置位置（坑口からの距離、高さ等）などについても検討の必要があると考えられる。

参考文献

- 1) (株) ナック：「取扱説明書 EMR-7アイマークデータ解析ソフトウェア (Ver. 1.0)」、1993年
- 2) 永関久信・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巻第10号、1992年10月

第3章 連続照明下の照明特性と視認性

3.1 研究概要

3.1.1 研究目的

今後のより高速な交通に対応した安全で円滑な道路交通を確保するためには、道路トンネル内での視線誘導性の高い新しい照明方式の検討が重要であると考えられる。道路トンネルの照明は、路上の落下物を十分な距離で視認できることを目的として設置されており、このときに必要な路面の輝度（明るさ）は、落下物の輝度対比が高いほど小さくて済むことが知られている¹⁾。本章は、視線誘導性の高い照明方式の検討の一つとして、連続的な照明方式を想定した時の視標物の視認性について把握することを目的として、煤煙の有無による基本的な照明特性についての光学測定を行うとともに、被験者による視標物の視認性についてのアンケート調査を行った。

3.1.2 研究方法

連続的な照明方式下における照明特性および視認性を把握するため、建設省土木研究所内にある実大トンネル実験施設を用いて、清浄空気中および煤煙中下での種々の照明条件下における光学測定および視標物の視認性のアンケート調査を実施した。以下に、清浄空気中および煤煙中下で実施した検討概要を示す。

(1) 清浄空気中における照明特性の把握・視標物の視認性

実大トンネル内の約150m区間を実験区間とし、この実験区間の内の約20m区間については照明器具間隔が $S=1.4\text{m}$ 、 2.8m 、 5.6m 、 11.2m の4条件となるよう設定し、各照明器具間隔の各条件下での光学測定による照明特性の把握、および代表的な照明器具間隔下における視標物の視認性を被験者によるアンケートを実施した。これらの照明器具間隔の4条件はいずれも2種類のランプ（低圧ナトリウムランプ、蛍光ランプ）が点灯できるように設定した。照明レベルは、道路照明施設設置基準¹⁾で定められている設計速度60km/h時の路面輝度 2.3cd/m^2 を設定値とした。

光学測定は上記の8条件の状態において、反射率の異なる3種類（ $\rho=12\%$ 、 20% 、 30% ）の視標物について、視標物輝度及び背景路面輝度の測定を実施した。各測定結果をもとに、輝度対比の算出を行い各照明器具間隔ごとの照明特性の検討を行った。

被験者による視標物の視認性実験は、照明器具間隔が $S=1.4\text{m}$ 、 11.2m の状態です視標物から75m（設計速度60km/h時の視距相当距離）離れた位置の車内から観測実験を行い、3種類の視標物の見え方について評価を行った。また、照明器具間隔毎の輝度対比の変化との関係から各照明器具間隔の視認性について検討した。

(2) 煤煙中における連続照明特性の把握・視標物の視認性

実大トンネル内に所定の煤煙濃度（目標煤煙濃度： 100% 、 75% 、 50% 、 40% ）となるような状態を設定して、上記の（1）で示した方法と同様に照明特性の把握、視標物の視認性について評価を行った。なお、本実験では、照明器具がある程度連続した状態での煤煙中における照明特性の把握・視標物の視認性

を把握することを目的としていることから、照明器具間隔は2.8mと一定し、清浄空気中下の照明レベルとして 0.7cd/m^2 、 1.2cd/m^2 、 2.3cd/m^2 、 4.5cd/m^2 の4種類の路面輝度で実施した。また、視標物は反射率の異なる6種類($\rho=2\%$ 、 5% 、 12% 、 20% 、 30% 、 41%)の視標物を対象に実験を行った。

3.2 清浄空気中における連続照明方式の特性の把握・視標物の視認性

3.2.1 実験方法

光学測定は上記の8条件の状態において、反射率の異なる3種類($\rho=12\%$ 、 20% 、 30%)の視標物について、視標物輝度及び背景路面輝度の測定を行った。

各測定結果をもとに、輝度対比の算出を行い各照明器具間隔ごとの照明特性の検討を行った。

被験者による視標物の視認性実験は、照明器具間隔が $S=1.4\text{m}$ 、 11.2m の状態ですべて視標物から7.5m(設計速度60km/h時の視距相当距離)離れた位置の車内から観測実験を行い、3種類の視標物の見え方について評価を行った。また、照明器具間隔毎の輝度対比の変化の関係から各照明器具間隔の視認性について検討した。

3.2.2 実験条件

(1) 実験条件の設定

照明器具間隔は表-3.1に示すとおりとし、図-3.1に示す配置に照明器具を配置して各条件で点灯させた。

表-3.1 実験条件・照明器具間隔とランプの組み合わせ

ランプの種類	照 明 器 具 間 隔 (m)			
低圧ナトリウムランプ	S=1.4	S=2.8	S=5.6	S=11.2
蛍光ランプ				

(2) 視認性実験の路面輝度の設定

被験者による視標物の視認性実験を行う時の路面輝度(見かけの路面輝度)は、照明器具による調光とフィルターによる調光及びサングラスによる調光を組み合わせ調整し、表-3.2になるように設定した。

表-3.2 視認性実験の路面輝度の設定

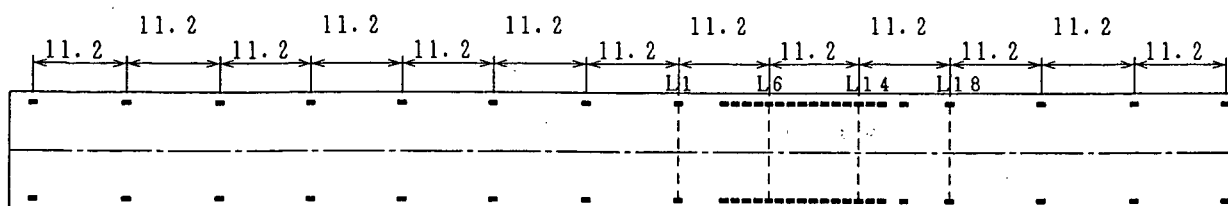
ラ ン プ の 種 類	照明器具 間 (m)	調光状態 調光率 (%)	フィルター ND番号	設 定 路面輝度 (cd/m^2)	サングラス の減光率 (%)	見かけの 路面輝度 (cd/m^2)
低圧ナトリウムランプ	1.4	50	210	5.6	50	2.8
蛍光ランプ		任意	211	2.7	無し	2.7
低圧ナトリウムランプ	11.2	50	210	3.0	30	2.1
蛍光ランプ		任意	211	2.1	無し	2.1

注) 上表の設定路面輝度は観測実験前に測定を行った結果を用いた。

(3) 視標物の設定

視標物は反射率がP1 : $\rho = 12\%$, P2 : $\rho = 20\%$, P3 : $\rho = 30\%$ の3種類を使用する。大きさは20 cm×20 cmの立方体とした。

照明器具配置図



点灯パターン図

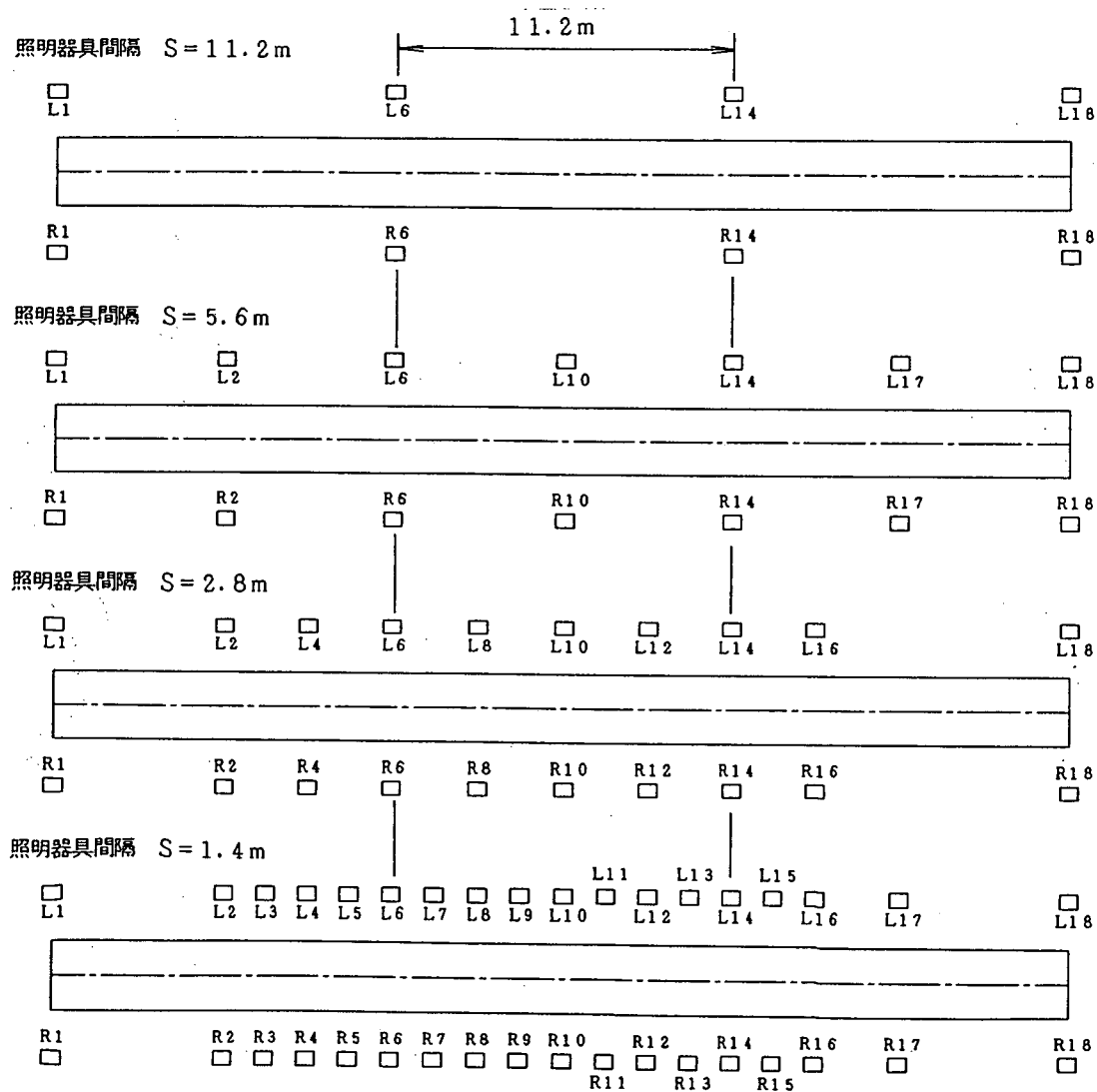


図-3.1 照明器具の配置及び点灯パターン図

(4) 実験ケース

被験者による視標物の視認性実験は光源2種類×照明器具間隔2種類の4ケースとし、光学測定は、光源2種類×照明器具間隔4種類の8ケースとする。表-3.3に実験ケースを示す。

表-3.3 実験ケース

	ランプ の 種 類	照明器具 間隔 (m)	視標物の 視認性実験	光学測定
1	低圧ナトリウムランプ	1. 4	○	○
2	蛍光ランプ		○	○
3	低圧ナトリウムランプ	2. 8	—	○
4	蛍光ランプ		—	○
5	低圧ナトリウムランプ	5. 6	—	○
6	蛍光ランプ		—	○
7	低圧ナトリウムランプ	11. 2	○	○
8	蛍光ランプ		○	○

(5) 被験者

被験者（20人）の個人属性一覧表を表-3.4に示す。

表-3.4 被験者個人属性一覧表

番号	氏名	視力	年齢	性別	運転
1	K. I	0.7	25	男	6
2	N. I	1.2	21	男	2
3	T. F	1.0	30	男	12
4	T. S	1.5	22	男	2
5	N. T	0.9	22	男	4
6	M. K	1.2	22	男	1
7	Y. N	0.9	27	女	3
8	T. T	1.0	27	男	7
9	S. T	0.9	24	女	6
10	K. H	1.5	25	男	5
11	T. T	1.5	23	男	3
12	Y. S	1.0	25	女	7
13	H. S	0.7	20	女	1
14	M. S	1.2	27	男	8
15	H. M	0.9	26	男	6
16	Y. N	1.5	20	女	1
17	R. Y	0.4	22	女	5
18	S. T	1.5	22	女	4
19	S. K	1.2	25	女	7
20	H. I	1.5	23	女	5

3.2.3 測定項目および測定方法

(1) 測定項目

測定項目は、表－3.5に示すように、照明器具間隔が4種類でランプが2種類の条件下（計8条件）において、実験区間の約20mの区間で西側車線に配置した3種類の視標物の視標物輝度1点及び背景路面輝度4点を測定した（測定断面位置は図－3.3を参照）。

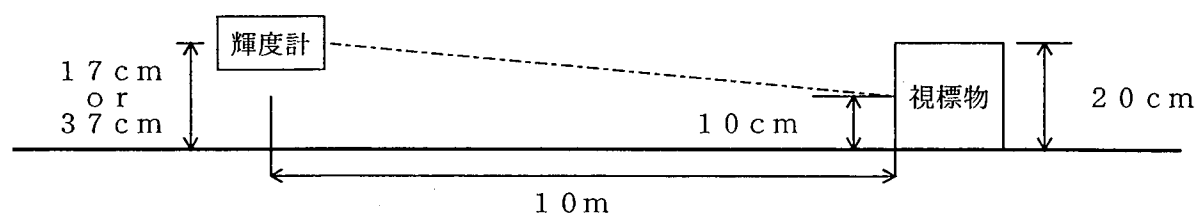
表－3.5 測定項目一覧表

照明器具間隔	S=1.4m	S=2.8m	S=5.6m	S=11.2m
ラ ン プ	低圧ナトリウムランプ	低圧ナトリウムランプ	低圧ナトリウムランプ	低圧ナトリウムランプ
測定項目	蛍光ランプ	蛍光ランプ	蛍光ランプ	蛍光ランプ
視 標 物 輝 度	1 点 測定断面 2 断面	1 点 測定断面 2 断面	1 点 測定断面 4 断面	1 点 測定断面 8 断面
視 標 物 の 背 景 路 面 輝 度	4 点 測定断面 2 断面	4 点 測定断面 2 断面	4 点 測定断面 4 断面	4 点 測定断面 8 断面

(2) 測定方法

① 視標物輝度及び背景路面輝度

視標物輝度（ L_o ）及び背景路面輝度（ $L_{左} \cdot L_{右} \cdot L_{上} \cdot L_{下}$ ）の測定は、図－3.2に示すように、各測定断面に視標物を設置し、俯角1度（JISで定められた方法²⁾に準拠）となるように10m離れた位置で17cmの高さから視角 $1/3^\circ$ の輝度計（LS-110）で測定した。ただし、視標物の背景路面輝度（ $L_{上}$ ）の測定は視標物の高さを考慮して37cmの高さから測定を行った。なお、測定箇所は図－3.3に示す。



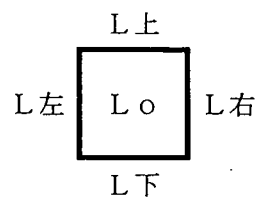
ここで、 L_o ：視標物輝度

$L_{左}$ ：背景路面輝度

$L_{右}$ ：背景路面輝度

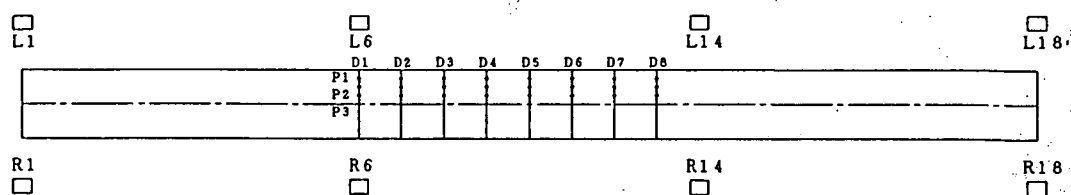
$L_{上}$ ：背景路面輝度

$L_{下}$ ：背景路面輝度

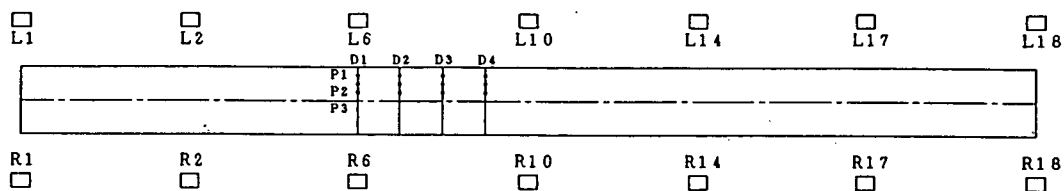


図－3.2 視標物輝度・背景路面輝度測定法

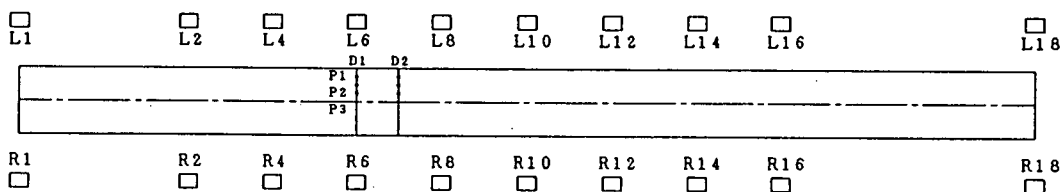
照明器具間隔 $S = 11.2\text{ m}$



照明器具間隔 $S = 5.6\text{ m}$



照明器具間隔 $S = 2.8\text{ m}$



照明器具間隔 $S = 1.4\text{ m}$

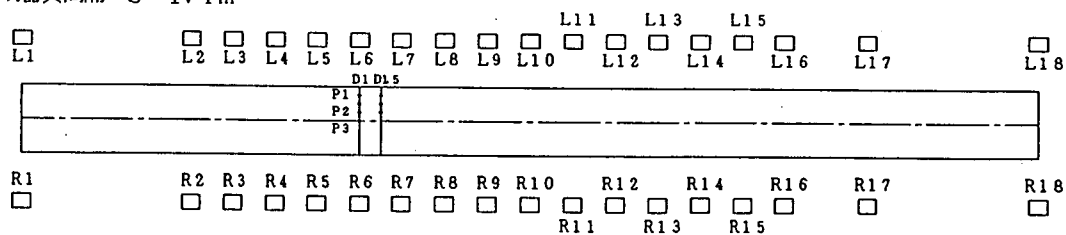


図-3.3 視標物輝度・背景路面輝度測定位置図

3.2.4 アンケート調査

アンケート調査は図-3.4に示す様式で作成し、被験者には視標物の見方について記入させた。

照明器具間隔に関する実験

アンケート用紙

氏名： _____

実験日時：平成 年 月 日 ()

実験条件：照明器具間隔 m

光源：

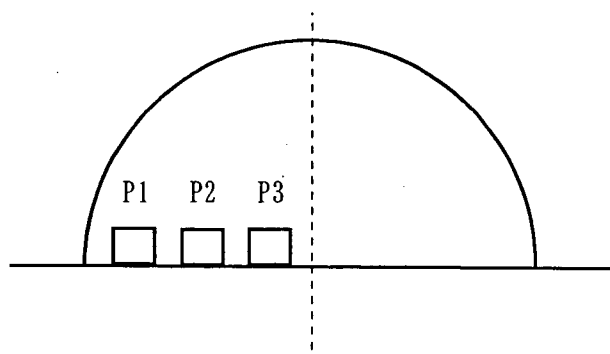
乗車位置：運転席・助手席

運転席後部・助手席後部

実験上の注意

1. 視標は左側の車線上に3個設置してあります。
2. 観測地点から前方に設置した視標物の評価を7段階で行い、該当する欄に○印を記入して下さい。
3. 乗車位置に○印を記入して下さい。

位置	評価	全見な	くえい	見えにくい	や見えにくい	や見えにくい	普通に	よく見える	非常に
		くえい	見えにくい	や見えにくい	や見えにくい	普通に	よく見える	非常に	非常に
D 1	P 1								
	P 2								
	P 3								
D 1.5	P 1								
	P 2								
	P 3								



P1	
P2	
P3	

図-3.4 アンケート調査票（2断面の場合）

3.2.5 実験結果

(1) 視標物の輝度対比

各照明条件毎の視標物の輝度および背景路面輝度測定結果を表-3.6～表-3.13に示す。なお、表中の測定結果は、表-3.2に示した視認性実験の設定路面輝度下での値であり、サングラスによる減光はされていない値である。視認性実験時の被験者がサングラスによる減光した状態で見える視標物の輝度対比は、視標物の輝度および背景路面輝度ともにサングラスによって同率の減光となるため、減光されていない状態で測定した値で求めた輝度対比と理論上は同一となる。したがって、ここでは、減光されていない値を用いて表中に示した計算式に従って輝度対比を算出した。照明器具間隔が短い場合は測定断面が少ないため、照明器具間隔と輝度対比の関係を検討するために最も長い照明器具間隔時（11.2m）の測定結果に測定値を置き換えて整理を行った。したがって、照明器具間隔が $S=1.4\text{m}$ の場合は、実験時に測定を0.7mピッチで2断面について行っているため、この2断面が繰り返し連続するものとして扱った。他の照明器具間隔についても同様に取り扱い整理した。

各断面と輝度対比の関係を図-3.5～図-3.6に示す。これより、低圧ナトリウムランプの照明器具間隔2.8mを除き、照明器具間隔と輝度対比の関係は照明器具間隔が長くなるほど輝度対比の最小値と最大値の差が大きくなることが分かる。ばらつきはあるものの、光源が蛍光ランプ・低圧ナトリウムランプともに、照明器具間隔が、11.2mの場合に輝度対比の結果が大きくばらついている。一方、照明器具間隔5.6m以下ではあまり顕著な差は認められない。特に、光源が蛍光ランプの場合にその傾向が強いことが分かる。

具体的には、光源が蛍光ランプの条件で、反射率20%、照明器具間隔11.2mの場合では、視標物の輝度対比は提示位置により0.38～0.78の間で大きく変化することが分かる。一方、照明器具間隔が5.6m以下の場合、視標物の輝度対比の最大値が11.2mの場合に比べて若干低くなるものの、輝度対比は0.6～0.7程度と比較的高く安定することが分かった。

蛍光ランプと低圧ナトリウムランプとの結果の相違は、低圧ナトリウムランプの照明器具の配光は、トンネル縦断方向へも照射される照明器具を使用しているため、それほど大きな差は生じていないが、蛍光ランプの照明器具の配光はトンネル縦断方向に少ないためにこのような結果となったと考えられる。低圧ナトリウムランプの2.8mの輝度対比の変化が大きい原因としては、照明器具の配光特性等によるものが考えられる。

各光源、各視標物の反射率ごとに輝度対比の差（最大値－最小値）を求めて、照明器具間隔と輝度対比の差の関係を図-3.7に示す。これより、いずれの反射率の条件でも照明器具間隔が長くなると輝度対比の差が大きくなる傾向がある。通常、視標物の視認性は輝度対比と密接な関係があることから、照明器具間隔が長い場合は視標物の位置によって視標物の視認性が大きく変化することが推定される。

表-3.6 視標物の輝度及び背景路面輝度測定結果

照明器具間隔	1.4 m
光源	低圧ナトリウムランプ

断面	視標物	背景輝度 (cd/m ²)						輝度対比 $C = (L_b - L_o) / L_b$
		L _o	L _左	L _右	L _上	L _下	平均 L _b	
D1	P1: $\rho=12\%$	1.11	4.40	4.05	3.95	3.62	4.01	0.72
	P2: $\rho=20\%$	1.80	4.85	5.10	4.83	3.82	4.65	0.61
	P3: $\rho=30\%$	2.67	5.78	5.66	5.06	5.81	5.58	0.52
D1.5	P1: $\rho=12\%$	1.09	4.40	3.33	3.28	4.49	3.88	0.72
	P2: $\rho=20\%$	1.76	4.94	5.35	4.74	4.79	4.96	0.64
	P3: $\rho=30\%$	2.67	5.25	5.79	4.96	5.59	5.40	0.51

平均 $L_b = (L_{左} + L_{右} + L_{上} + L_{下}) / 4$

表-3.7 視標物の輝度及び背景路面輝度測定結果

照明器具間隔	1.4 m
光源	蛍光ランプ

断面	視標物	背景輝度 (cd/m ²)						輝度対比 $C = (L_b - L_o) / L_b$
		L _o	L _左	L _右	L _上	L _下	平均 L _b	
D1	P1: $\rho=12\%$	0.35	0.99	1.04	1.08	1.20	1.08	0.68
	P2: $\rho=20\%$	0.60	1.56	1.96	1.34	1.78	1.66	0.64
	P3: $\rho=30\%$	0.91	2.18	2.62	1.36	2.28	2.11	0.57
D1.5	P1: $\rho=12\%$	0.42	1.72	1.10	0.82	1.57	1.30	0.68
	P2: $\rho=20\%$	0.66	1.92	1.92	1.06	1.82	1.68	0.61
	P3: $\rho=30\%$	0.98	2.30	2.31	1.52	2.58	2.18	0.55

平均 $L_b = (L_{左} + L_{右} + L_{上} + L_{下}) / 4$

表-3.8 視標物の輝度及び背景路面輝度測定結果

照明器具間隔	2.8 m
光源	低圧ナトリウムランプ

断面	視標物	背景輝度 (cd/m ²)						輝度対比 $C = (L_b - L_o) / L_b$
		L _o	L _左	L _右	L _上	L _下	平均 L _b	
D1	P1: $\rho=12\%$	1.54	6.62	5.73	4.71	9.51	6.64	0.77
	P2: $\rho=20\%$	2.81	8.35	7.48	5.50	8.93	7.57	0.63
	P3: $\rho=30\%$	4.25	5.28	6.93	5.96	10.44	7.15	0.41
D2	P1: $\rho=12\%$	1.74	3.87	2.93	4.26	8.52	4.90	0.64
	P2: $\rho=20\%$	3.14	7.16	7.52	4.84	9.20	7.18	0.56
	P3: $\rho=30\%$	4.59	4.72	6.24	5.18	11.70	6.96	0.34

平均 $L_b = (L_{左} + L_{右} + L_{上} + L_{下}) / 4$

表-3.9 視標物の輝度及び背景路面輝度測定結果

照明器具間隔	2.8 m
光源	蛍光ランプ

断面	視標物	背景輝度 (cd/m ²)						輝度対比 $C = (L_b - L_o) / L_b$
		L _o	L _左	L _右	L _上	L _下	平均 L _b	
D1	P1: $\rho=12\%$	0.28	1.30	1.42	0.65	1.49	1.22	0.77
	P2: $\rho=20\%$	0.46	1.63	1.72	0.81	1.67	1.46	0.68
	P3: $\rho=30\%$	0.80	1.76	1.88	1.06	2.01	1.68	0.52
D2	P1: $\rho=12\%$	0.28	1.33	1.38	0.56	1.63	1.23	0.77
	P2: $\rho=20\%$	0.50	1.31	1.33	0.76	1.57	1.24	0.60
	P3: $\rho=30\%$	0.90	1.72	1.82	0.99	1.88	1.60	0.44

平均 $L_b = (L_{左} + L_{右} + L_{上} + L_{下}) / 4$

表-3.10 視標物の輝度及び背景路面輝度測定結果

照明器具間隔	5.6m
光源	低圧ナトリウムランプ

断面	視標物	背景輝度 (cd/m ²)						輝度対比 $C = (L_b - L_o) / L_b$
		L _o	L _左	L _右	L _上	L _下	平均 L _b	
D1	P1: $\rho = 12\%$	0.94	4.95	4.90	4.11	5.35	4.83	0.81
	P2: $\rho = 20\%$	1.57	5.13	5.63	4.46	5.05	5.07	0.69
	P3: $\rho = 30\%$	2.28	6.00	5.84	5.04	5.86	5.69	0.60
D2	P1: $\rho = 12\%$	1.06	4.70	4.91	4.07	5.94	4.91	0.78
	P2: $\rho = 20\%$	1.85	5.19	5.75	4.69	5.80	5.36	0.65
	P3: $\rho = 30\%$	2.72	6.10	6.00	4.79	6.01	5.73	0.52
D3	P1: $\rho = 12\%$	1.09	4.70	4.74	3.70	5.57	4.68	0.77
	P2: $\rho = 20\%$	1.91	5.05	5.59	4.06	5.13	4.96	0.61
	P3: $\rho = 30\%$	2.81	6.09	5.95	4.61	6.05	5.68	0.50
D4	P1: $\rho = 12\%$	1.11	4.96	4.77	3.42	5.36	4.63	0.76
	P2: $\rho = 20\%$	1.82	5.10	5.77	3.79	5.23	4.97	0.63
	P3: $\rho = 30\%$	2.63	5.66	5.77	4.58	5.76	5.44	0.52

$$\text{平均 } L_b = (L_{\text{左}} + L_{\text{右}} + L_{\text{上}} + L_{\text{下}}) / 4$$

表-3.11 視標物の輝度及び背景路面輝度測定結果

照明器具間隔	5.6m
光源	蛍光ランプ

断面	視標物	背景輝度 (cd/m ²)						輝度対比 $C = (L_b - L_o) / L_b$
		L _o	L _左	L _右	L _上	L _下	平均 L _b	
D1	P1: $\rho = 12\%$	0.30	1.59	1.51	1.31	1.59	1.50	0.80
	P2: $\rho = 20\%$	0.50	1.60	1.90	1.35	1.78	1.66	0.70
	P3: $\rho = 30\%$	0.80	2.03	2.22	1.71	2.17	2.03	0.61
D2	P1: $\rho = 12\%$	0.33	1.45	1.53	1.20	1.86	1.51	0.78
	P2: $\rho = 20\%$	0.59	1.61	1.85	1.19	1.99	1.66	0.64
	P3: $\rho = 30\%$	0.98	1.98	2.07	1.54	2.25	1.96	0.50
D3	P1: $\rho = 12\%$	0.32	1.47	1.51	1.12	1.62	1.43	0.78
	P2: $\rho = 20\%$	0.60	1.64	1.80	1.37	1.77	1.65	0.64
	P3: $\rho = 30\%$	1.02	1.77	2.08	1.41	2.14	1.85	0.45
D4	P1: $\rho = 12\%$	0.29	1.47	1.52	1.22	1.57	1.45	0.80
	P2: $\rho = 20\%$	0.55	1.50	1.77	1.21	1.67	1.54	0.64
	P3: $\rho = 30\%$	0.92	1.90	2.12	1.42	2.13	1.89	0.51

$$\text{平均 } L_b = (L_{\text{左}} + L_{\text{右}} + L_{\text{上}} + L_{\text{下}}) / 4$$

表- 3. 1 2 視標物の輝度及び背景路面輝度測定結果

照明器具間隔	1 1. 2 m
光 源	低圧ナトリウムランプ

断面	視標物	背景輝度 (cd/m ²)						輝度対比 C= (Lb-Lo) /Lb
		Lo	L左	L右	L上	L下	平均 Lb	
D1	P1: ρ=12%	0.46	2.54	2.50	2.34	2.80	2.55	0.82
	P2: ρ=20%	0.70	2.69	2.94	2.75	2.89	2.82	0.75
	P3: ρ=30%	0.94	2.95	3.07	2.90	2.96	2.97	0.68
D2	P1: ρ=12%	0.60	2.49	2.49	1.92	3.22	2.53	0.76
	P2: ρ=20%	1.20	2.66	2.63	2.53	2.88	2.68	0.55
	P3: ρ=30%	1.73	3.15	2.89	2.79	3.34	3.04	0.43
D3	P1: ρ=12%	0.79	2.10	2.32	1.96	2.75	2.28	0.65
	P2: ρ=20%	1.16	2.47	2.70	2.98	3.48	2.91	0.60
	P3: ρ=30%	1.74	2.81	3.07	3.10	3.21	3.05	0.43
D4	P1: ρ=12%	0.64	2.37	2.43	2.40	2.53	2.43	0.74
	P2: ρ=20%	1.08	2.54	2.87	2.31	3.05	2.69	0.60
	P3: ρ=30%	1.62	2.93	2.94	2.82	3.29	3.00	0.46
D5	P1: ρ=12%	0.65	2.38	2.32	2.99	2.60	2.57	0.75
	P2: ρ=20%	1.02	2.15	2.56	2.73	1.81	2.31	0.56
	P3: ρ=30%	1.41	3.43	3.35	2.81	2.04	2.91	0.52
D6	P1: ρ=12%	0.50	2.61	2.67	1.96	1.91	2.29	0.78
	P2: ρ=20%	0.82	2.94	3.34	2.49	2.20	2.74	0.70
	P3: ρ=30%	1.15	3.39	3.28	3.04	2.47	3.05	0.62
D7	P1: ρ=12%	0.47	2.82	2.72	1.98	2.92	2.61	0.82
	P2: ρ=20%	0.67	3.03	2.96	2.00	2.38	2.59	0.74
	P3: ρ=30%	0.97	3.41	3.19	2.65	2.24	2.87	0.66
D8	P1: ρ=12%	0.46	2.70	2.75	1.98	2.80	2.48	0.81
	P2: ρ=20%	0.64	2.94	3.32	2.11	2.55	2.79	0.77
	P3: ρ=30%	0.92	3.49	3.32	2.66	2.80	3.16	0.71

平均 Lb= (L左+L右+L上+L下) /4

表- 3. 1 3 視標物の輝度及び背景路面輝度測定結果

照明器具間隔	1 1. 2 m
光 源	蛍光ランプ

断面	視標物	背景輝度 (cd/m ²)						輝度対比 C= (Lb-Lo) /Lb
		Lo	L左	L右	L上	L下	平均 Lb	
D1	P1: ρ=12%	0.36	1.11	1.11	1.09	1.32	1.16	0.69
	P2: ρ=20%	0.52	1.01	1.03	1.35	1.76	1.29	0.60
	P3: ρ=30%	0.74	1.24	1.42	1.81	1.63	1.53	0.51
D2	P1: ρ=12%	0.41	0.76	0.63	1.04	1.32	0.94	0.56
	P2: ρ=20%	0.76	0.91	0.98	1.36	1.65	1.23	0.38
	P3: ρ=30%	1.20	1.28	1.19	1.74	2.08	1.57	0.24
D3	P1: ρ=12%	0.45	0.78	0.97	0.91	1.51	1.04	0.57
	P2: ρ=20%	0.89	1.63	2.08	1.87	2.01	1.90	0.53
	P3: ρ=30%	1.41	2.07	2.28	2.11	2.80	2.32	0.39
D4	P1: ρ=12%	0.38	1.45	1.51	1.64	1.73	1.58	0.76
	P2: ρ=20%	0.77	1.58	1.94	1.74	1.87	1.78	0.57
	P3: ρ=30%	1.26	2.08	2.15	2.27	2.44	2.24	0.44
D5	P1: ρ=12%	0.31	1.39	1.44	1.64	1.37	1.46	0.79
	P2: ρ=20%	0.58	1.56	1.92	1.85	1.35	1.67	0.65
	P3: ρ=30%	0.99	2.09	2.10	2.46	1.84	2.12	0.53
D6	P1: ρ=12%	0.26	1.33	1.42	1.57	1.19	1.38	0.81
	P2: ρ=20%	0.48	1.62	1.81	1.73	1.40	1.64	0.71
	P3: ρ=30%	0.79	2.15	2.19	2.55	1.74	2.16	0.63
D7	P1: ρ=12%	0.23	1.42	1.46	1.65	1.27	1.45	0.84
	P2: ρ=20%	0.41	1.64	1.97	1.80	1.44	1.71	0.76
	P3: ρ=30%	0.66	2.16	2.32	2.40	1.85	2.18	0.70
D8	P1: ρ=12%	0.25	1.29	1.40	1.63	1.52	1.46	0.83
	P2: ρ=20%	0.39	1.68	1.96	1.77	1.60	1.75	0.78
	P3: ρ=30%	0.63	2.22	2.33	2.15	2.16	2.22	0.72

平均 Lb= (L左+L右+L上+L下) /4

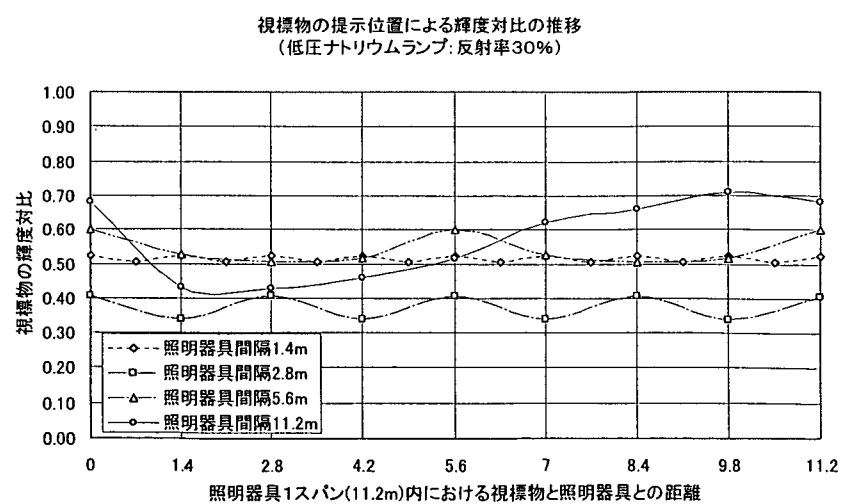
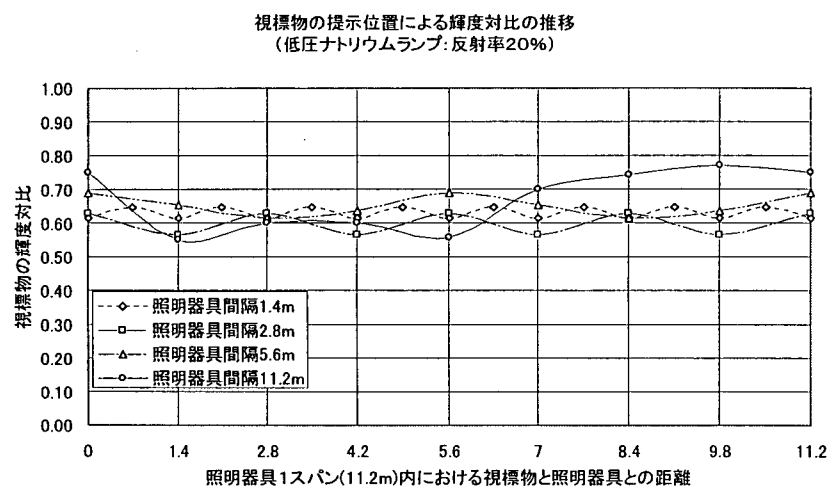
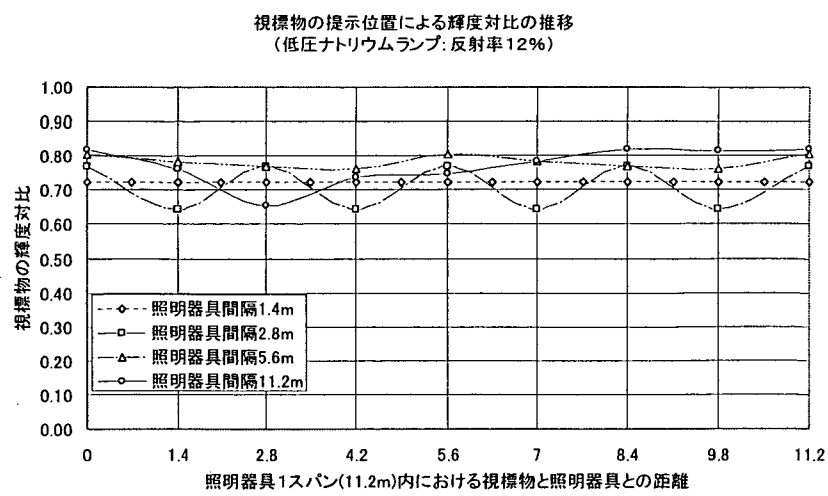


図- 3. 5 視標物の提示位置と輝度対比の関係 (低圧ナトリウムランプ)

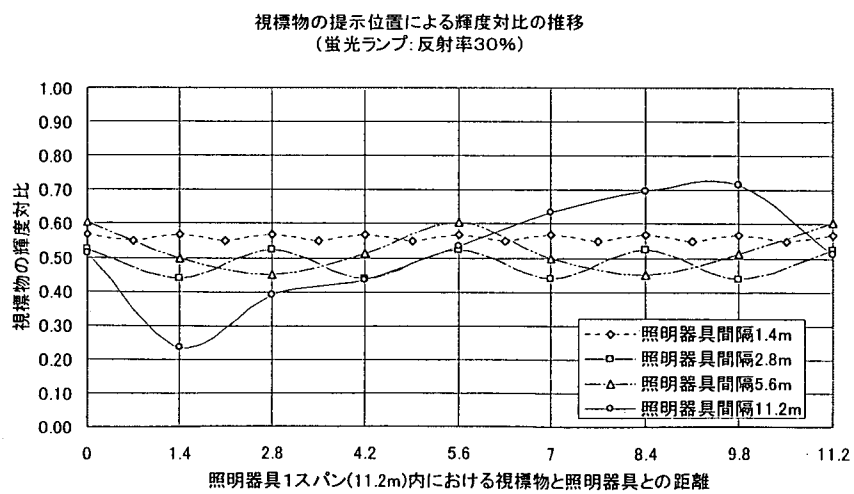
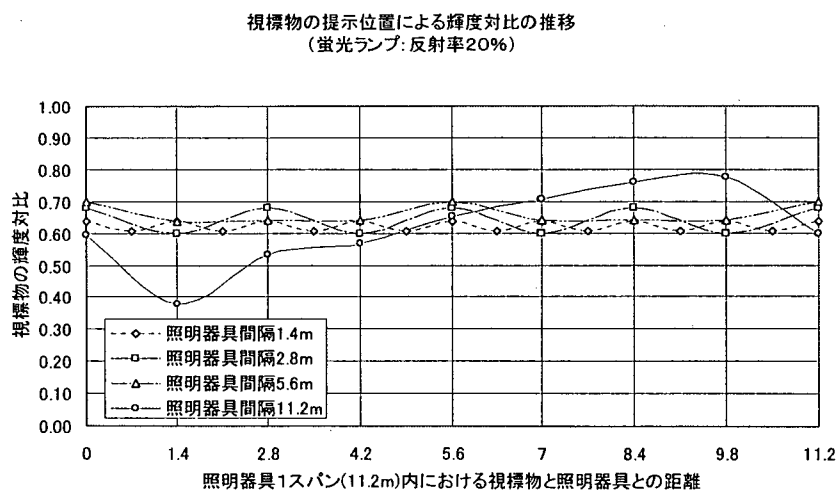
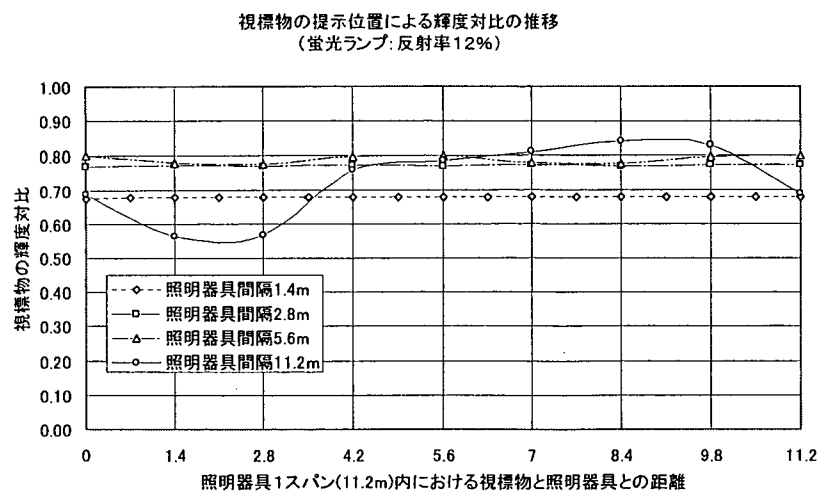


図-3.6 視標物の提示位置と輝度対比の関係 (蛍光ランプ)

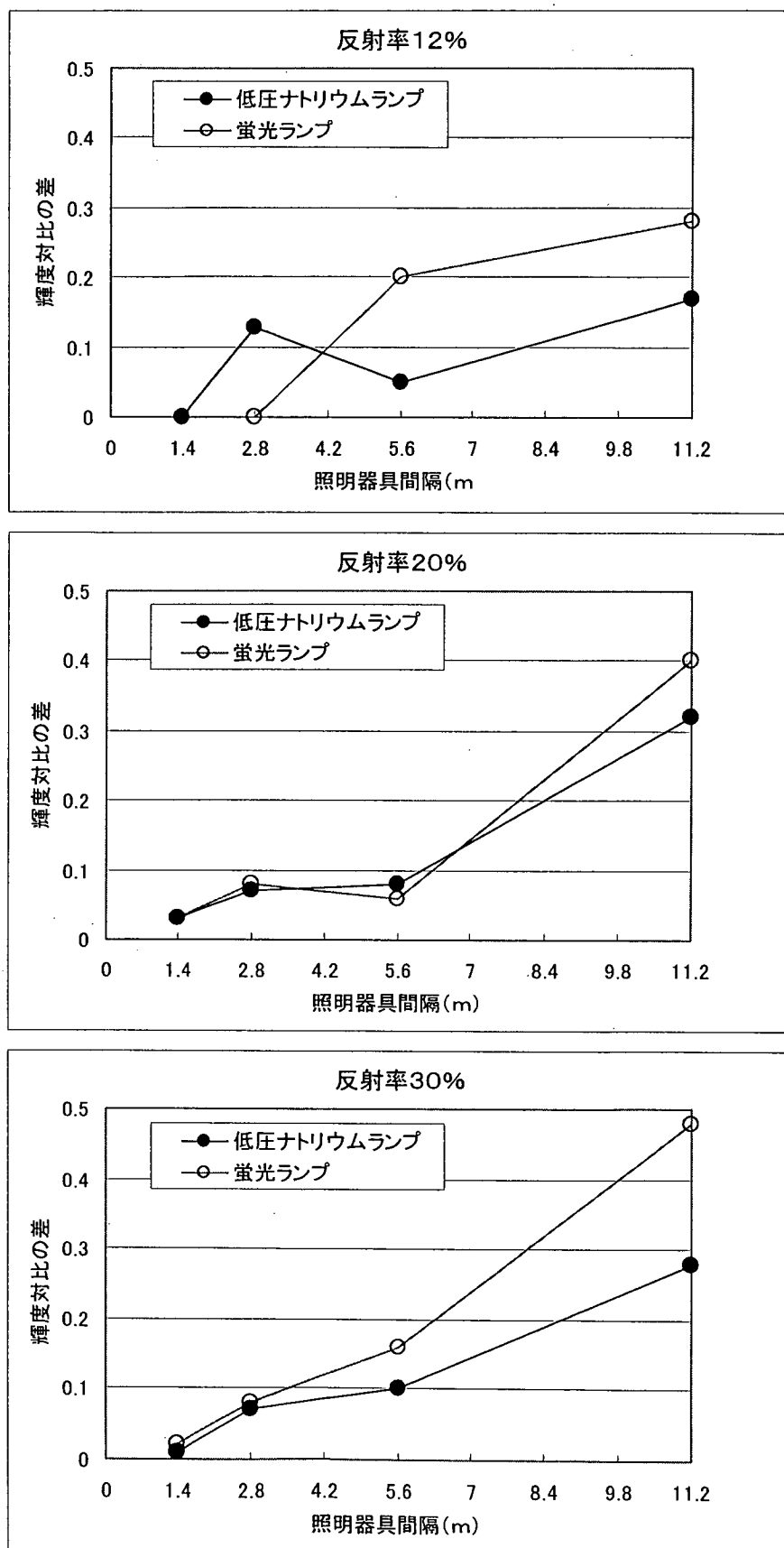


図-3.7 照明器具間隔と輝度対比の差の関係

(2) 視標物の視認性評価

照明器具間隔が1.4mおよび11.2mの場合について、視標物の視認性のアンケート調査結果をもとに、表-3.14のように被験者が回答した評価に対して点数をつけ、全被験者の平均値で整理した結果を表-3.15に示す。

照明器具間隔11.2mの場合の視標物の位置と照明器具とのトンネル縦断方向の距離との関係を図-3.8に示す。図より、低圧ナトリウムランプ、蛍光ランプともに、トンネル縦断方向の視標物の位置、視標物の反射率の違いにより視認性が異なっていることが分かる。いずれも、視標物が照明器具の後方に近い位置(1.4~4.2m)付近で見えにくく、次の照明器具の直前の位置(8.4~9.8m)付近で見えやすい評価となった。このことは、11.2mの照明器具間隔の場合では、視標物の位置によって見え方が大きく異なることを意味している。この見え方の違いは、照明器具からの照射光が観測している視標物にどの程度照射されているか、また、視標物の背景の明るさによって大きく影響している。

表-3.14 評価に対する点数

	全く 見えない	見え にくい	やや 見え にくい	普通に 見える	やや 良く 見える	良く 見える	非常に 良く 見える
点 数	1 点	2 点	3 点	4 点	5 点	6 点	7 点

図-3.9、図-3.10に評価の平均値と輝度対比の関係を示す。図より、視標物の輝度対比が高い場合に視標物が見えやすく、低い場合に見えにくいことが分かる。また、視認性は、視標物が比較的黒い反射率12%で見えやすく、比較的白い視標物の30%で見えにくい結果となっている。両図より、視標物の視認性の違いは、照明器具間隔の違い、反射率の違いの条件によって異なっている。しかし、視標物の視認性の評価と輝度対比との相関が比較的よいことから、輝度対比が視標物の見え方に大きく影響していることが分かる。

本照明条件下では、両光源ともに、視標物が「見えにくい」ものの最低でも視認するために必要な輝度対比は概ね0.3~0.4程度が必要であることが分かった。

表-3. 15 視標物の視認性評価結果

照明器具間隔 (m)	光源	断面	照射物	アンケート結果																								各評価の集計												各評価の割合(%)							最大値	最小値	平均値				
				提示位置	反射率(%)	X I N J T F T S N T M A N T T T S T S H T T T Y S B S M S H M T M R Y T S T S K I I																								1 2 3 4 5 6 7												1 2 3 4 5 6 7								合計			
						K	I	N	J	T	F	T	S	N	T	M	A	N	T	T	S	T	S	H	T	T	Y	S	B	S	M	S	H	M	T	M	R	Y	T	S	T	S	K	I	I	1					2	3	4
1.4	低圧ナトリウムランプ	D1	P1	12	3	4	4	6	6	6	3	5	3	4	5	4	3	6	3	3	7	5	5	0	0	7	4	4	4	1	0	0	35	20	20	5	100	7	3	4.40													
			P2	20	2	4	4	6	5	7	2	4	5	4	4	4	2	5	4	2	5	1	8	3	1	2	0	25	5	10	15	5	10	100	7	2	4.00																
			P3	30	2	3	3	5	5	6	2	3	6	3	4	3	2	4	2	2	2	3	4	3	0	6	7	3	2	2	0	0	30	35	15	10	10	0	100	6	2	3.35											
		D1.5	P1	12	3	6	5	5	7	7	4	4	5	3	5	4	3	6	2	4	3	7	4	5	0	1	4	6	2	1	0	0	5	20	20	30	10	15	100	7	2	4.65											
			P2	20	3	6	5	4	7	7	3	5	5	4	5	4	2	4	2	4	3	7	3	5	0	2	4	5	1	3	0	10	20	25	25	5	15	100	7	2	4.40												
			P3	30	3	6	3	6	7	3	6	4	4	3	2	3	2	3	2	3	3	3	3	3	0	2	12	2	0	3	1	0	10	60	10	0	15	5	100	7	2	3.65											
	蛍光ランプ	D1	P1	12	2	4	6	6	5	4	3	4	5	4	4	4	3	5	3	3	2	4	4	4	0	2	3	10	3	1	0	0	10	15	50	15	10	0	100	6	2	4.11											
			P2	20	2	5	6	5	5	4	3	3	3	4	4	3	5	2	2	2	3	5	3	0	3	9	3	4	1	0	0	15	45	15	20	5	0	100	6	2	3.63												
			P3	30	2	5	4	4	3	2	3	2	3	3	3	4	2	2	3	2	3	3	0	6	9	4	1	0	0	30	45	20	5	0	0	100	5	2	3.05														
D1.5		P1	12	3	4	5	6	4	5	4	4	4	4	3	3	5	2	3	2	4	4	4	0	2	4	10	3	1	0	0	10	20	50	15	5	0	100	6	2	3.89													
		P2	20	3	3	5	4	3	5	3	4	3	3	3	3	4	2	2	2	3	3	3	0	3	12	3	2	0	0	15	60	15	10	0	0	100	5	2	3.71														
		P3	30	2	2	5	3	4	3	4	3	2	3	3	2	2	3	2	2	2	2	2	0	10	8	1	1	0	0	50	40	5	5	0	0	100	5	2	2.68														
低圧ナトリウムランプ	D1	P1	12	2	4	7	7	6	3	5	6	5	4	3	6	4	4	2	5	4	4	2	5	4	0	2	2	8	3	2	0	10	10	40	15	15	10	100	7	2	4.45												
		P2	20	2	4	4	7	6	6	3	5	6	4	4	4	3	5	4	4	2	4	3	4	0	2	3	9	2	3	1	0	10	15	45	10	15	5	100	7	2	4.20												
		P3	30	2	4	3	6	5	6	2	4	6	4	4	4	3	4	3	4	3	3	2	3	0	5	6	7	1	3	0	15	30	35	5	15	0	100	6	2	3.75													
		D2	P1	12	3	4	4	7	7	3	5	6	4	4	3	3	5	4	4	2	4	3	4	0	1	5	8	2	1	3	0	5	25	40	10	5	15	100	7	2	4.30												
			P2	20	2	4	4	6	6	7	3	5	4	4	4	3	2	4	3	4	2	3	2	3	0	4	5	7	1	2	1	0	20	25	35	5	10	5	100	7	2	3.75											
			P3	30	2	3	3	5	6	6	2	4	3	3	3	2	2	3	3	3	2	2	2	2	0	7	9	1	1	2	0	35	45	5	5	10	0	100	6	2	3.10												
	D3	P1	12	3	4	4	6	7	7	3	5	6	4	4	2	3	5	4	4	3	4	3	4	0	1	5	8	2	2	2	0	5	25	40	10	10	100	7	2	4.25													
		P2	20	3	3	5	6	7	3	4	4	4	3	2	2	3	3	3	3	3	3	3	0	2	12	3	1	1	1	0	10	60	15	5	5	100	7	2	3.50														
		P3	30	2	2	3	3	5	6	2	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	11	7	0	1	1	0	55	35	0	5	5	0	100	6	2	2.70													
		D4	P1	12	3	4	4	6	6	7	4	5	6	4	4	2	3	6	4	4	3	4	4	4	0	1	3	10	1	4	1	0	5	15	50	5	20	5	100	7	2	4.35											
			P2	20	3	3	3	4	6	7	3	5	4	4	3	2	3	4	4	3	3	3	3	0	1	11	5	1	1	1	0	5	55	25	5	5	100	7	2	3.65													
			P3	30	3	3	3	5	7	2	4	3	3	3	2	2	3	2	2	2	2	2	2	3	0	8	9	1	1	0	1	10	40	45	5	5	0	100	7	2	2.95												
	D5	P1	12	3	5	4	6	7	7	4	6	6	5	4	3	3	5	4	4	3	5	4	5	0	0	4	6	5	3	2	0	70	30	25	15	10	100	7	3	4.65													
		P2	20	3	4	3	5	6	7	4	5	5	5	3	3	2	4	4	4	2	5	3	4	0	2	6	6	5	1	1	0	10	25	30	25	5	100	7	2	4.05													
		P3	30	2	4	4	6	7	3	5	3	4	2	3	2	3	3	3	3	4	2	3	0	5	8	4	1	1	1	0	25	40	20	5	5	100	7	2	3.40														
		D6	P1	12	4	6	3	7	7	4	6	6	5	2	3	6	4	4	3	5	6	6	0	1	3	4	3	6	3	0	5	15	20	15	30	15	100	7	2	4.95													
			P2	20	4	5	3	6	7	7	4	6	6	5	4	2	3	5	4	4	3	5	5	6	0	1	4	4	5	4	2	0	5	20	20	25	20	10	100	7	2	4.65											
			P3	30	3	5	2	6	6	7	3	5	4	4	2	3	4	3	4	3	4	4	4	0	2	5	7	3	2	1	0	10	15	35	15	10	5	100	7	2	4.05												
	D7	P1	12	4	7	4	7	7	7	5	6	6	5	2	3	6	5	3	6	6	5	0	1	2	5	6	4	0	5	10	10	25	30	20	100	7	2	5.25															
		P2	20	4	7	4	7	7	4	6	6	5	2	3	5	4	5	2	6	8	5	0	2	1	4	5	4	4	10	5	20	25	20	20	100	7	2	5.00															
		P3	30	4	7	4	6	6	6	4	6	4	4	2	3	5	4	4	2	6	5	4	0	2	1	8	2	6	1	0	10	5	40	10	30	5	100	7	2	4.60													
		D8	P1	12	5	7	5	7	7	7	5	7	6	5	3	4	5	5	6	4	7	7	6	0	0	1	2	7	3	7	0	0	5	35	15	35	100	7	3	5.65													
			P2	20	5	7	5	7	7	5	6	6	5	4	3	4	5	6	4	7	7	6	0	0	1	4	5	4	6	0	0	5	20	25	20	100	7	3	5.50														
			P3	30	4	7	4	7	6	7	4	6	6	4	4	3	3	3	4	5	4	7	6	5	0	0	3	7	2	4	4	0	0	15	35	10	20	100	7	3	4.95												
蛍光ランプ	D1	P1	12	3	5	4	5	5	3	4	4	5	3	4	3	5	4	5	2	7	4	4	0	1	4	7	7	0	1	0	5	20	35	0	5	100	7	2	4.20														
		P2	20	3	4	4	4	5	3	4	4	3	4	4	4	2	4	4	5	2	6	4	3	0	2	4	11	2	1	0	0	10	70	55	10	5	0	100	6	2	3.80												
		P3	30	3	4	4	3	4	5	2	4	3	3	4	2	4	3	4	2	4	3	1	5	3	3	2	7	8	2	0	0	5	10	35	40	10	0	100	5	1	3.40												
		D2	P1	12	3	4	4	4	5	3	4	3	5	4	4	2	4	4	4	2	6	3	3	0	2	5	9	3	1	0	0	10	15	45	15	5	0	100	6	2	3.80												
			P2	20	3	3	3	4	5	3	3	2	4	3	3	2	2	4	3	2	2	4	2	0	6	9	4	1	0	0	30	45	20	5	0	0	100	5	2	3.00													
			P3	30	2	2	2	3	4	2	3	2	3	3	2	1	2	3	2	2	3	2	2	2	0	12	6	1	0	0	0	5	60	30	5	0	0	100	4	1	2.35												
	D3	P1	12	2	3	4	4	5	3	4	2	5	4	2	2	4	6	4	3	2	2	0	2	6	4	7	2	1	0	0	30	30	35	10	5	0	100	6	2	3.40													
		P2	20	2	3	2	3	3	4	2	3	2	3	3	2	2	3	4	3	2	3	2	2	0	9	9	2	0	0	0	0	45	45	10	0	0	100	4	2	2.65													
		P3	30	2	2	2	2	3	2	1	2	2	1	1	2	3	2	1	1	1	1	1	0	7	11	2	0	0	0	0	35	15	0	0	0	100	3	1	1.75														
		D4	P1	12	3	3	5	3	3	4	5	3	2	2	5	6	4	2	4	4	2	0	4	5	6	4	1	0	0	0	20	25	30	20	5	0	100	6	2	3.65													
			P2	20	2	3	2	4	3	5	3	3	3	2	2	1	3	5	3	2	3	3	2	1	6	10	1	2	0	0	5	30	50	5	10	0	100	5	1	2.85													
			P3	30	2	2	2	2	4																																												

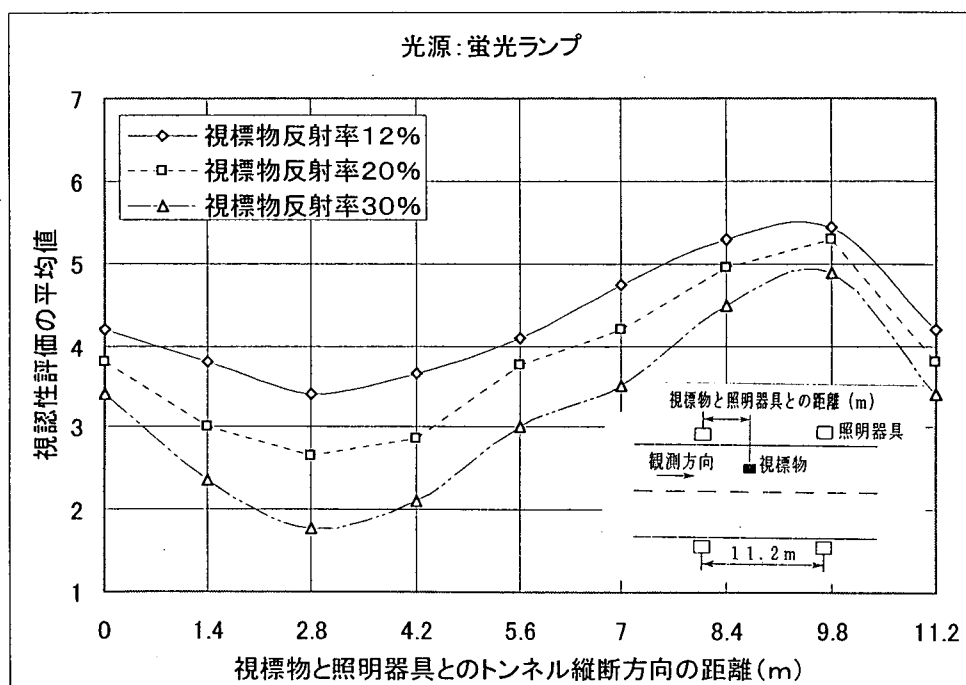
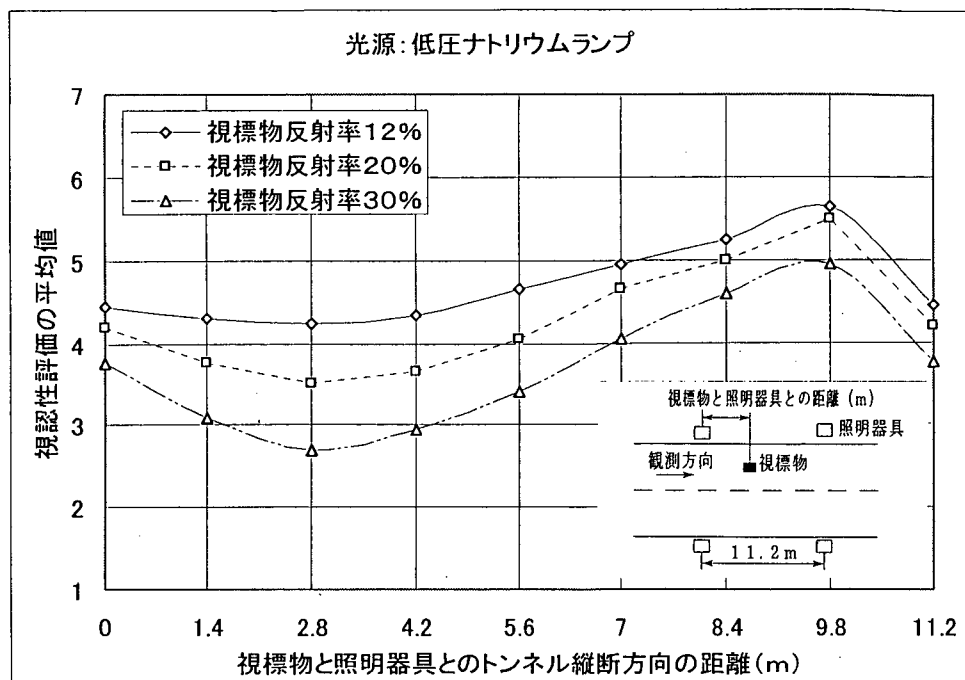
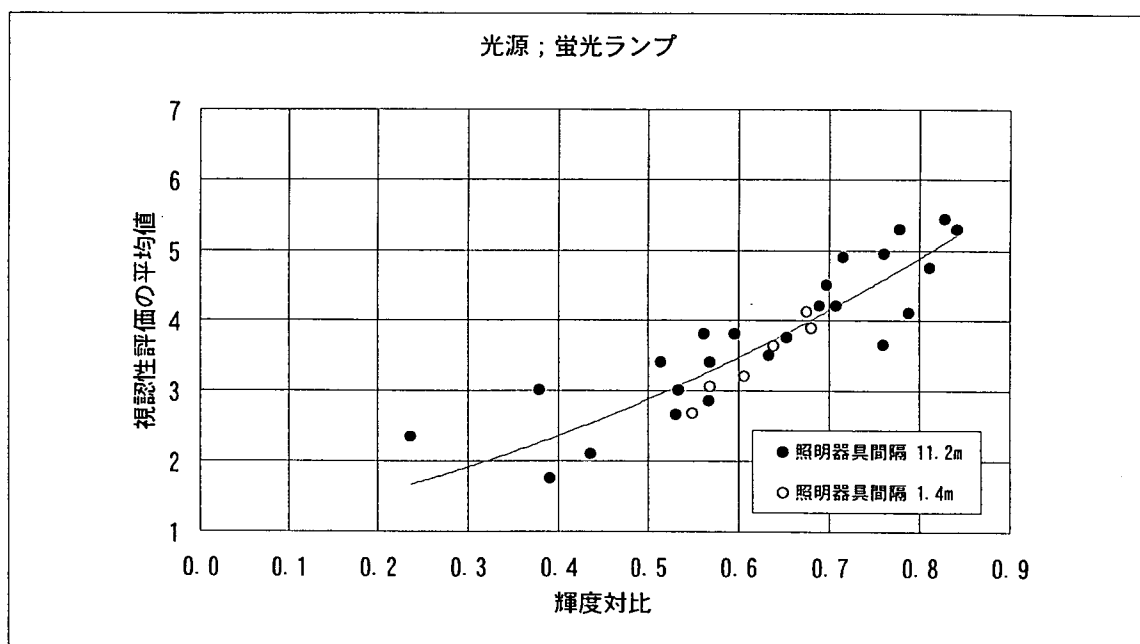
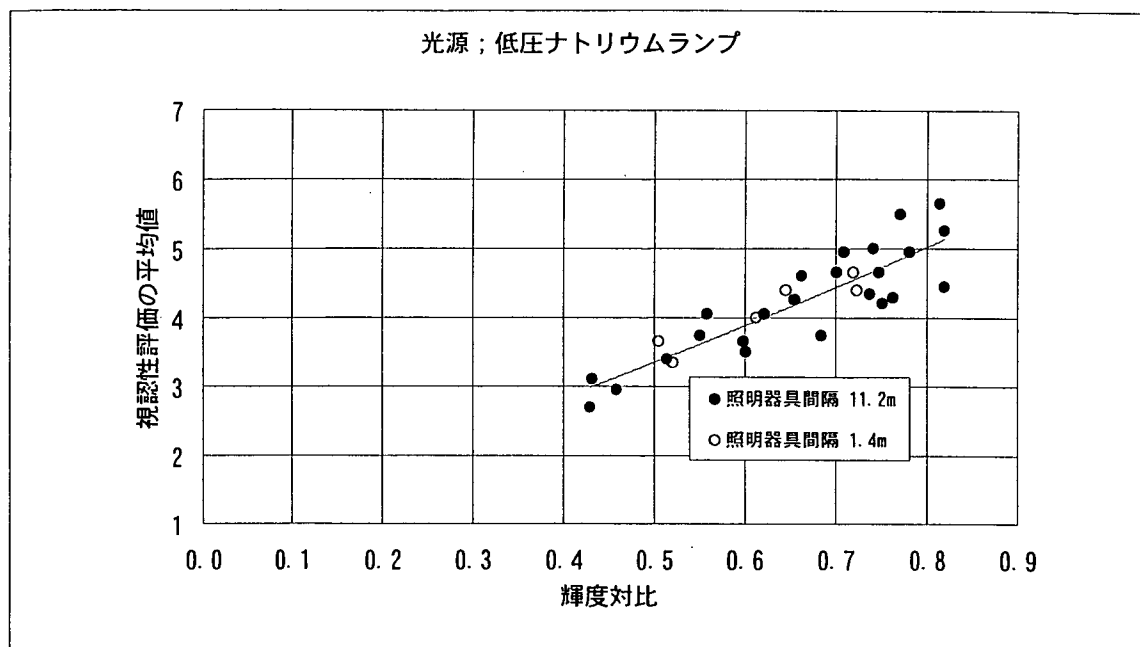
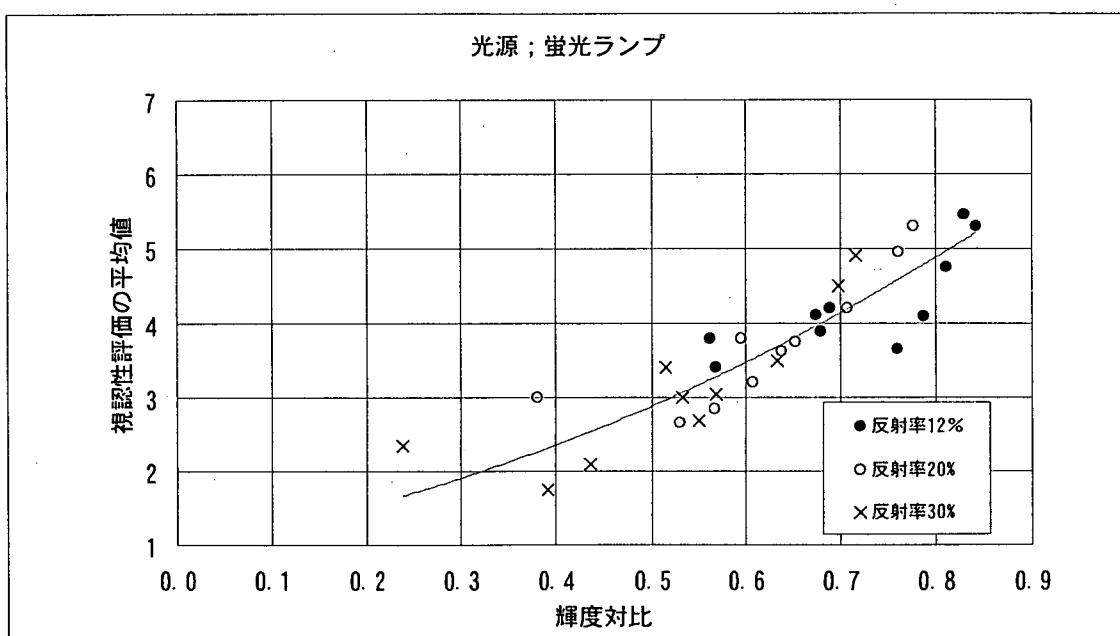
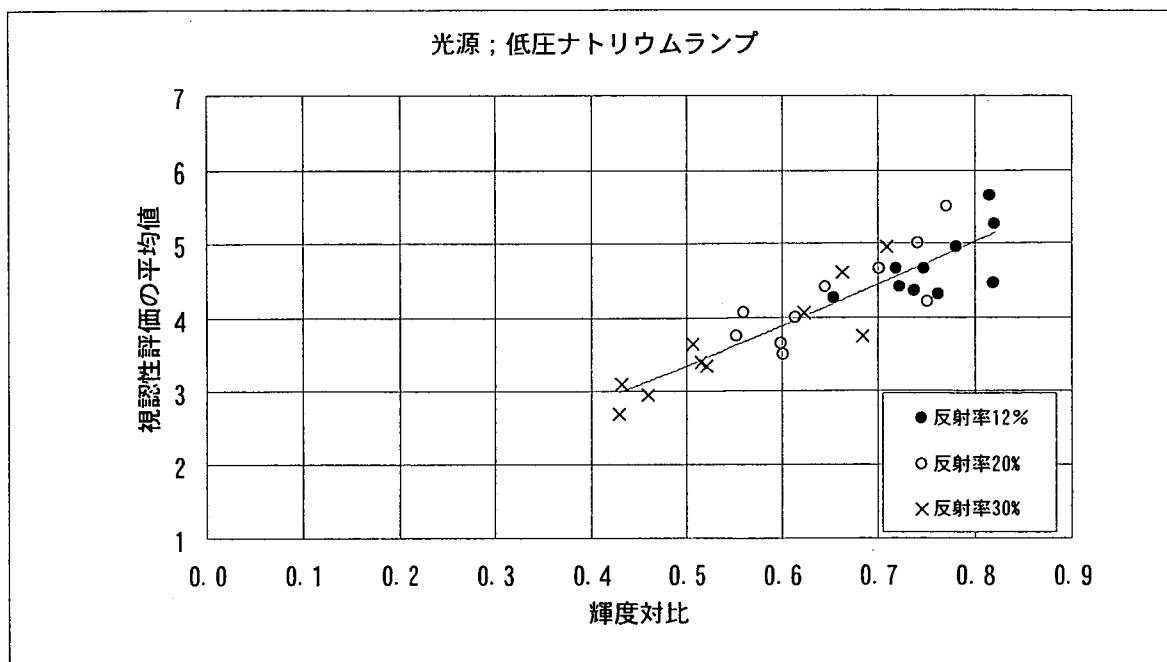


図-3.8 視標物の提示位置と視認性評価の関係 (照明器具間隔 11.4 m)



図一 3. 9 視標物の輝度対比と視認性評価の関係（照明器具間隔の違い）



図一 3. 1 0 視標物の輝度対比と視認性評価の関係（反射率の違い）

(3) まとめ

清浄空気中において同一の路面輝度になるような条件で照明器具間隔を変化させた時の照明特性について輝度対比およびアンケート調査結果について検討を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

照明器具間隔による照明特性・視認性は、照明器具間隔によって大きく変化することが明らかとなり、視標物の見え方は、視標物の反射率、視標物の位置（照明器具との位置関係）でも変化することが明らかとなった。また、同一の路面輝度下では視標物の輝度対比と見え方に良い相関が認められ、輝度対比で視標物の見え方が評価できることが確認された。照明器具間隔が5m程度以下の短い場合では、路面上の視標物の輝度対比は比較的高い値で安定し、その最大値と最小値の差が小さく、照明器具間隔が11.2mと長い場合では、路面上の視標物の輝度対比の高い結果を示す箇所もあるが、輝度対比の低い値を示す箇所もあることから安定した輝度対比が得られないことが明らかとなった。したがって、視標物の見え方が輝度対比で評価できることを考えると、照明器具間隔が短い場合では視標物の見え方は安定するが、照明器具間隔が長い場合では安定した視標物の見え方は得られにくいことが明らかとなった。

今回の照明条件下では、照明器具間隔が5m程度以下であれば、輝度対比の変化が少なく比較的高い輝度対比で安定することが明らかとなった。

3.3 煤煙中における連続照明方式の特性の把握・視標物の視認性

3.3.1 実験方法

実大トンネル内に所定の煤煙濃度（目標煤煙濃度：100%、75%、50%、40%）となるような状態を設定して、清浄空気中における照明特性の把握・視標物の視認性で検討した方法と同様に実施した。なお、本実験では、照明器具がある程度連続した状態での煤煙中における照明特性の把握・視標物の視認性を把握することを目的にしていることから、照明器具間隔は2.8mと一定し、清浄空気中の照明レベルが0.7cd/m²、1.2cd/m²、2.3cd/m²、4.5cd/m²の4種類の路面輝度で実施した。また、視標物は反射率の異なる6種類（ $\rho=2\%$ 、5%、12%、20%、30%、41%）の視標物を対象に実験を行った。

実験機器の配置図および測定区間について、図-3.11に示す。

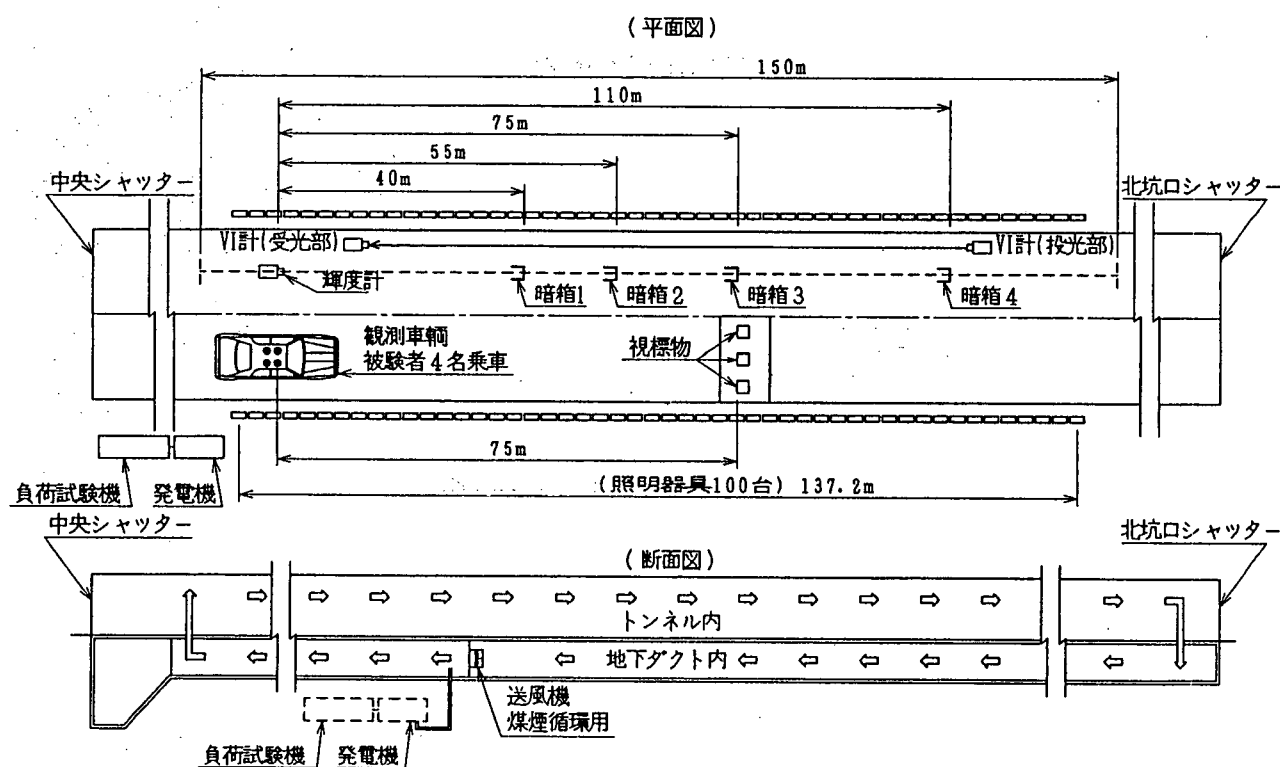


図-3.11 実験機器の配置図

3.3.2 実験条件

(1) 照明条件の設定

実大トンネル内の約150mの区間を対象に、蛍光ランプの光源の照明器具を用いて、照明器具間隔が2.8mとなるように設置した。

(2) 路面輝度の設定

路面輝度は、実験区間の約150mが所定の明るさとなるように4つのブロック毎にライトコントローラにより調整を行い、表－3.16に示す4段階の輝度とした。

表－3.16 路面輝度の設定

光源	照明器具間隔 (m)	路面輝度 (cd/m ²)
蛍光ランプ	2.8	0.7
		1.2
		2.3
		4.5

(3) 視標物の設定

視標物は表－3.17に示すように6種類とした。視標物の大きさは一辺が20cm×20cmの立方体とした。

表－3.17 視標物の反射率

視標物番号	反射率 (%)	備考
1	2	フェルト
2	5	Black on Black
3	12	U433
4	20	U431
5	30	U430
6	41	Cool Gray-3U

備考欄の記号は、使用した材料の規格 (PANTON by Letraset colorpaper/Uncoated Made in Englandwo) を示す。

(4) 煤煙条件の設定

煤煙は、図－3.11に示すように実大トンネル内を密閉状態としてディーゼル発電機を用いて発生させ、実大トンネル実験施設の地下ダクトへ送り込み、送風機11台によりトンネル内を循環させ、煤煙濃度計 (VI計) の値を確認しながら発電機負荷装置およびディーゼル発電機の排気パイプに取り付けたバルブにより調整を行った。

表－3.18 煤煙透過率の設定

煤煙透過率 (%)
100. (清浄空気)
75
50
40

(5) 実験ケース

実験は、煤煙透過率および路面輝度を組み合わせて、表-3.19に示す16条件で実施した。

表-3.19 実験ケース

実験ケース	煤煙透過率 (%)	路面輝度 (cd/m ²)	反射率 (%)
1	100	0.7	2
2		1.2	
3		2.3	
4		4.5	
5	75	0.7	5
6		1.2	
7		2.3	
8		4.5	
9	50	0.7	12
10		1.2	
11		2.3	
12		4.5	
13	40	0.7	20
14		1.2	
15		2.3	
16		4.5	

(6) 被験者

被験者は、運転免許証を所有し、両眼視力が0.7以上のものとした。被験者(24人)の個人属性一覧表を表-3.20に示す。

表-3.20 被験者個人属性一覧表

番号	氏名	視力	年齢	性別	運転
1	M. S	2.0	22	女	3
2	T. T	1.5	22	女	3
3	C. M	1.5	21	女	3
4	Y. F	2.0	22	女	3
5	T. H	1.2	24	男	5
6	N. T	1.2	23	男	5
7	M. K	1.5	23	男	1
8	K. K	0.9	25	男	7
9	D. M	1.5	23	男	3
10	H. I	1.5	22	男	3
11	S. I	1.5	25	男	4
12	Y. Y	1.5	22	男	2
13	Y. N	2.0	21	女	2
14	T. N	1.5	20	男	2
15	Y. K	1.5	21	女	1
16	T. N	1.5	20	男	1
17	T. I	1.5	39	男	21
18	M. I	1.5	28	男	8
19	S. T	1.5	22	男	4
20	H. M	0.9	26	男	6
21	T. T	1.5	23	男	3
22	T. O	1.0	21	男	3
23	T. F	1.2	22	男	2
24	K. A	1.5	25	女	6

3.3.3 測定項目および測定方法

(1) 測定項目

煤煙透過率が100%（清浄空气中）の状態で、実験区間内の路面輝度を測定した。さらに、視標物の視認性実験をする際の視標物の提示位置毎に、視標物の輝度、背景路面輝度を測定した。また、煤煙透過率の計測を煤煙透過率計で測定するとともに、煤煙中における輝度対比を算出するために必要な光幕輝度の測定を行った。機器の配置図は、図-3.11に示したとおりである。

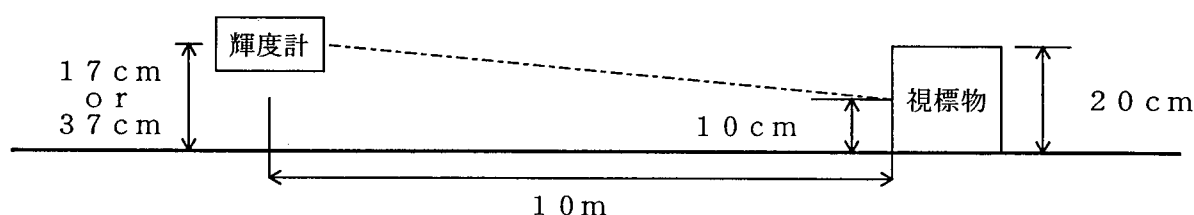
(2) 測定方法

①実験区間の路面輝度

路面輝度は、煤煙透過率100%（清浄空气中）において、実大トンネル実験施設の実験区間の1車線を用いて俯角1度（JISで定められた方法²⁾に準拠）となるように、輝度計（BM-3:台形マスク）を高さ85cmに三脚で固定し、40m前方の路面を測定をした。測定範囲は、ライトコントローラで区分される各4ブロック毎の中心付近の20mの範囲とした（図-3.14参照）。

②視標物輝度、背景路面輝度

視標物輝度（L_o）及び背景路面輝度（L_左・L_右・L_上・L_下）の測定は、図-3.12に示すように、6種類の視標物を測定位置に設置し、俯角1度（JISで定められた方法²⁾に準拠）となるように、10m離れた位置で17cmの高さから視角1/3°の輝度計（LS-110）で測定した。ただし、視標物の背景路面輝度（L_上）の測定は視標物の高さを考慮して37cmの高さから測定を行った。



ここで、L_o：視標物輝度

L_左：背景路面輝度

L_右：背景路面輝度

L_上：背景路面輝度

L_下：背景路面輝度

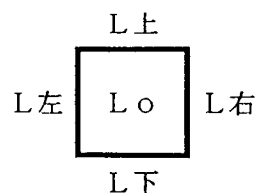


図-3.12 視標物輝度・背景路面輝度測定法

③光幕輝度

光幕輝度は、被験者による視認性実験を行う車線で高さ1mの高さから視角0.2度の輝度計（MODEL1980-0P）を三脚に固定し、所定の位置に設置した暗箱を視準し、路面上1mの光幕輝度を測定した。光幕輝度を測定する距離は、40、55、75、110mの4種類とし、各照明レベル、各煤煙透過率毎に測定を行っ

た。

④煤煙透過率

煤煙透過率は、煤煙透過率計の投稿部と受光部を対向させて設置し、清浄空気中における状態を100%として、実験区間内の100m区間の平均的な煤煙透過率を測定した。

3.3.4 アンケート調査

アンケート調査は図-3.13に示す様式で作成し、被験者には視標物の見方について記入させた。

アンケート用紙

氏名：_____

実験日時：平成 年 月 日（ ）

実験条件：

乗車位置：運転席・助手席

運転席後部・助手席後部

実験上の注意

1. 視標は右側の車線上に3個設置してあります。
2. 観測地点から前方に設置した視標物の評価を7段階で行い、該当する欄に○印を記入して下さい。
3. 乗車位置に○印を記入して下さい。

(1) 障害物

路面輝度		位置	評価							
			全見 ない	く えい	見 え にくい	や見 にくい	やえい	普通に 見える	やや 見える	よく 見える
A	P 1									
	P 2									
	P 3									
B	P 1									
	P 2									
	P 3									
C	P 1									
	P 2									
	P 3									
D	P 1									
	P 2									
	P 3									

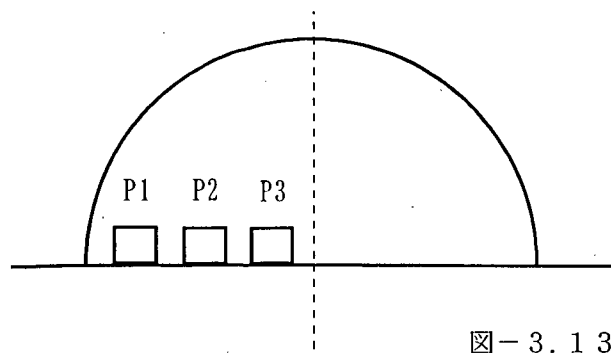


図-3.13 アンケート調査票

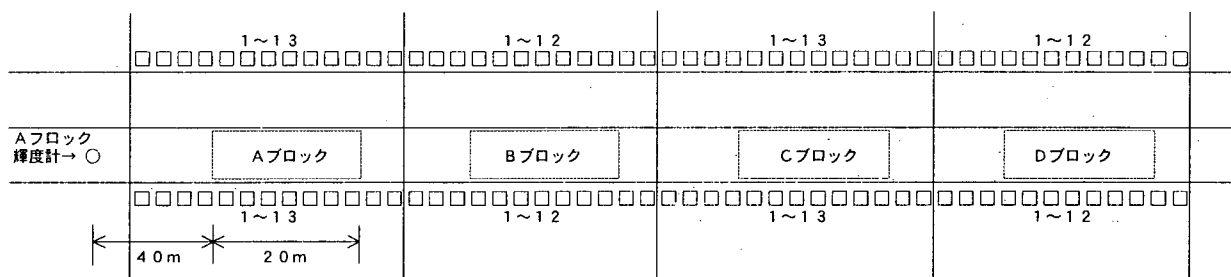
3.3.5 実験結果

(1) 実験区間の路面輝度

トンネルの縦断方向の路面輝度の測定結果を表－3.22に示す。4つのブロックともに概ね設定輝度どおりの結果が得られた。

表－3.22 路面輝度測定結果

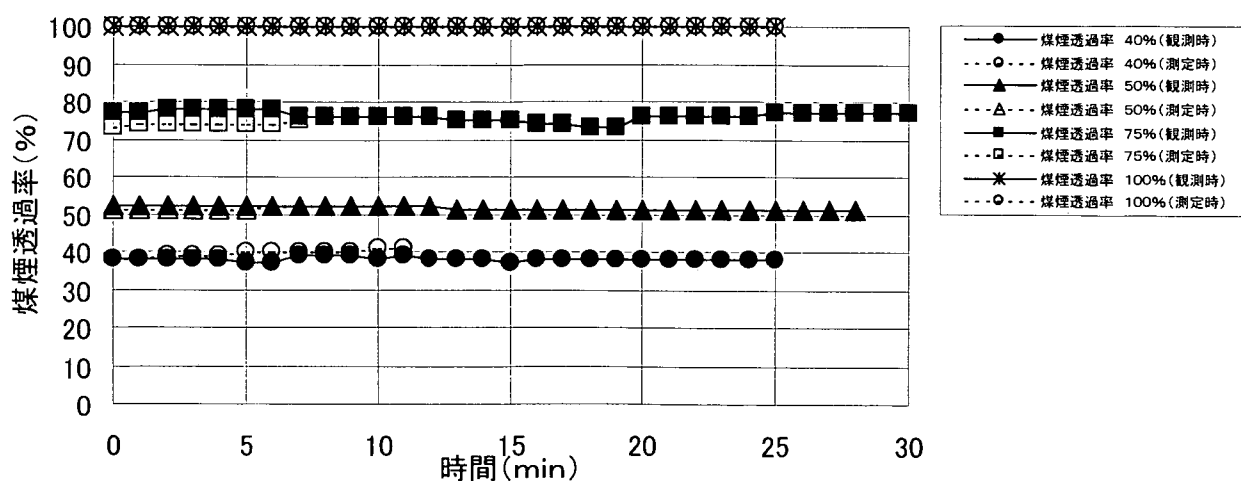
設定輝度	測定輝度 (cd/m ²)				平均輝度
(cd/m ²)	Aブロック	Bブロック	Cブロック	Dブロック	(cd/m ²)
0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
1.2	1.19	1.20	1.21	1.20	1.2
2.3	2.29	2.30	2.31	2.31	2.3
4.5	4.49	4.52	4.51	4.50	4.5



図－3.14 測定ブロック、測定区間、測定位置

(2) 煤煙透過率

実験時の煤煙透過率は、図－3.15に示すようにほぼ目標値の煤煙透過率となる状態で測定できた。



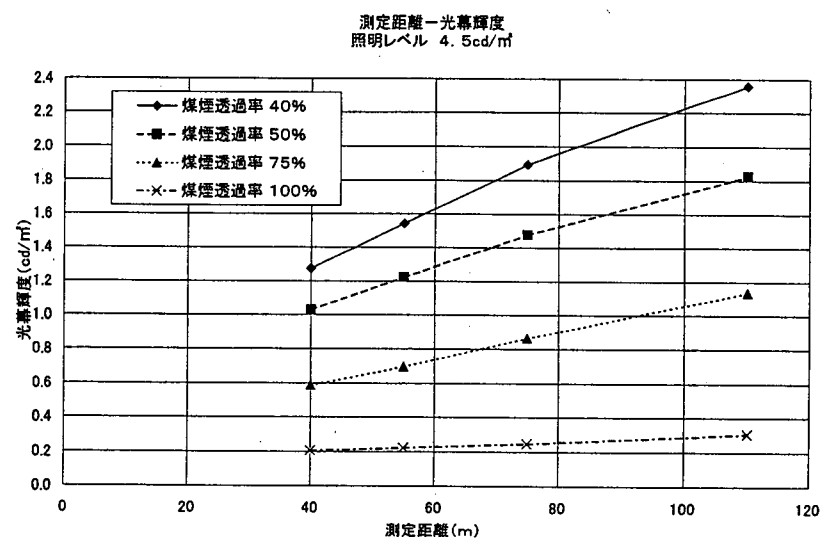
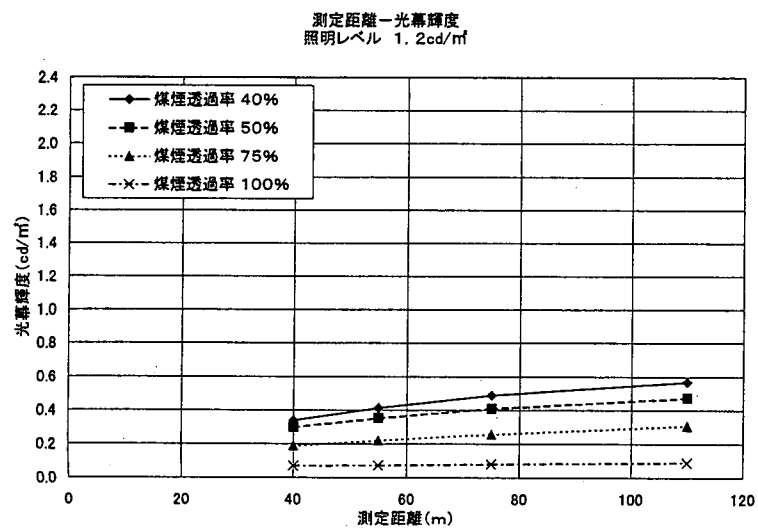
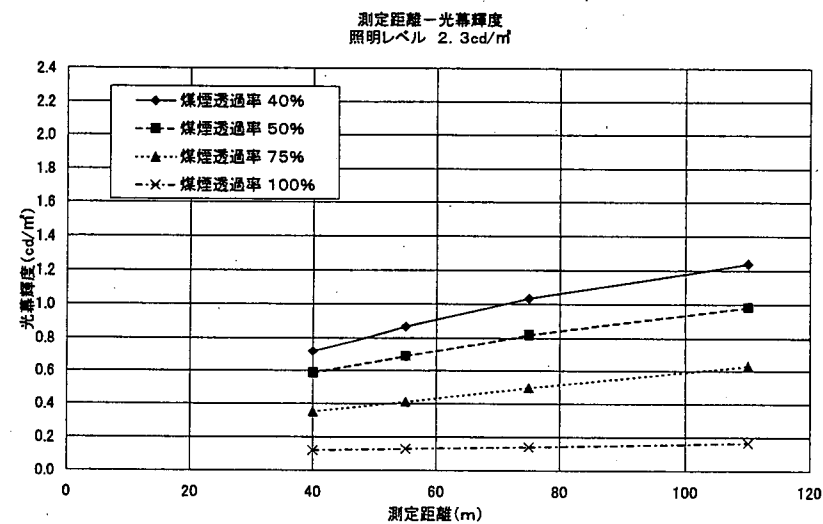
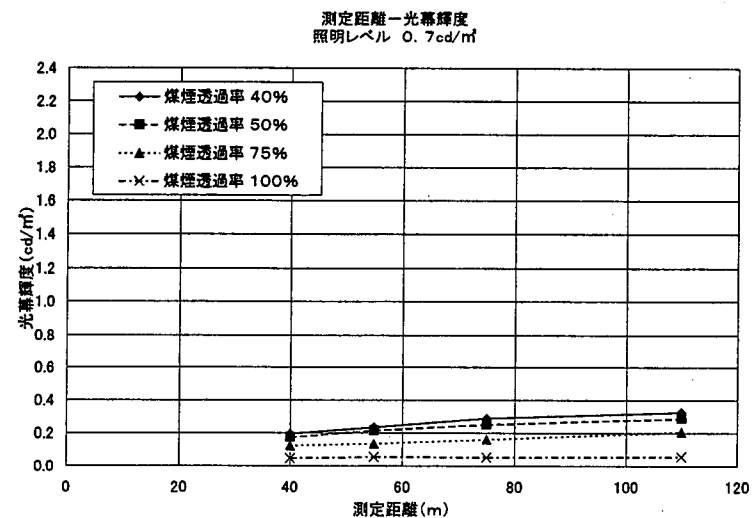
図－3.15 測定時および視標物の観測時の煤煙透過率の変化

(3) 光幕輝度

光幕輝度の測定結果を表－3.22に示す。図－3.16に光幕輝度と測定距離との関係を示す。図より、光幕輝度は、測定距離が長くなるほど増加し、また、照明レベルが高いほど、煤煙透過率が悪くなるほど光幕輝度が増加することが分かる。

表－3.22 光幕輝度の測定結果

煤煙透過率 設定 (%)	照明レベル (cd/m ²)	煤煙透過率 τ (%)	光幕輝度 (cd/m ²)			
			4.0 m 区間 暗箱 1	5.5 m 区間 暗箱 2	7.5 m 区間 暗箱 3	11.0 m 区間 暗箱 4
40	0.7	38	0.197	0.233	0.289	0.329
	1.2	38	0.340	0.412	0.488	0.570
	2.3	38	0.718	0.864	1.035	1.240
	4.5	39	1.274	1.543	1.894	2.360
50	0.7	51	0.176	0.216	0.252	0.290
	1.2	51	0.301	0.353	0.409	0.472
	2.3	51	0.587	0.688	0.819	0.984
	4.5	52	1.031	1.224	1.476	1.827
75	0.7	74	0.123	0.136	0.163	0.208
	1.2	74	0.190	0.221	0.259	0.309
	2.3	74	0.354	0.412	0.499	0.631
	4.5	74	0.589	0.697	0.865	1.136
100	0.7	100	0.047	0.057	0.054	0.058
	1.2	100	0.071	0.074	0.080	0.091
	2.3	100	0.121	0.130	0.142	0.168
	4.5	100	0.206	0.223	0.249	0.307



図—3.16 光幕輝度と測定距離との関係

(4) 視標物の輝度対比

煤煙透過率 100% (清浄空气中) 下における視標物の輝度および背景路面輝度の測定結果を表-3.23に示す。

表-3.23 視標物の輝度および背景路面輝度測定結果

照明レベル (cd/m ²)	反射率 ρ (%)	視標物輝度 L _o (cd/m ²)	背景輝度					輝度対比 C
			L _{b1} (cd/m ²)	L _{b2} (cd/m ²)	L _{b3} (cd/m ²)	L _{b4} (cd/m ²)	平均(cd/m ²)	
0.7	2	0.06	0.67	0.74	0.69	0.56	0.67	0.91
	5	0.08	0.67	0.67	0.61	0.49	0.61	0.87
	12	0.13	0.59	0.60	0.60	0.40	0.55	0.76
	20	0.19	0.62	0.60	0.55	0.51	0.57	0.67
	30	0.30	0.62	0.69	0.58	0.49	0.60	0.50
	41	0.72	0.65	0.74	0.65	0.56	0.65	-0.11
1.2	2	0.08	0.98	1.11	1.09	0.93	1.03	0.92
	5	0.13	0.96	1.02	0.87	0.79	0.91	0.86
	12	0.18	0.85	0.87	0.83	0.85	0.85	0.79
	20	0.28	0.96	1.02	0.87	0.76	0.90	0.69
	30	0.45	1.00	1.02	0.98	0.80	0.95	0.53
	41	1.11	0.99	1.16	1.09	0.90	1.04	-0.07
2.3	2	0.21	2.57	2.83	2.60	2.56	2.64	0.92
	5	0.33	2.30	2.64	2.44	2.17	2.39	0.86
	12	0.47	2.21	2.24	2.26	2.16	2.22	0.79
	20	0.71	2.14	2.25	2.24	2.11	2.19	0.68
	30	1.13	2.40	2.65	2.42	2.35	2.46	0.54
	41	2.69	2.57	2.85	2.59	2.58	2.65	-0.02
4.5	2	0.44	5.59	6.03	5.89	5.74	5.81	0.92
	5	0.67	5.44	5.46	5.33	4.85	5.27	0.87
	12	1.05	4.73	4.79	4.89	4.45	4.72	0.78
	20	1.57	4.76	4.87	4.98	4.54	4.79	0.67
	30	2.45	5.23	5.52	5.30	4.85	5.23	0.53
	41	5.72	5.62	6.10	5.82	5.99	5.88	0.03

トンネル内に煤煙が存在する場合の視標物の輝度対比は、被験者が視標物を見たときの観測位置から視標物までに存在する煤煙粒子によって、様々な光学的な影響を受けるため、補正が必要となる。

被験者が視標物を観測したときの見かけの輝度対比は、以下のように計算することができる。

$$C' = (Lb' - Lo') / Lb' \quad \dots\dots\dots \text{式 (3.1)}$$

$$Lb' = Lb \times (\tau/100)^{1/100} + LV$$

$$Lo' = Lo \times (\tau/100)^{1/100} + LV$$

ここで、 τ : 観測距離100mあたりの煤煙透過率

LV : 観測距離あたりの光幕輝度

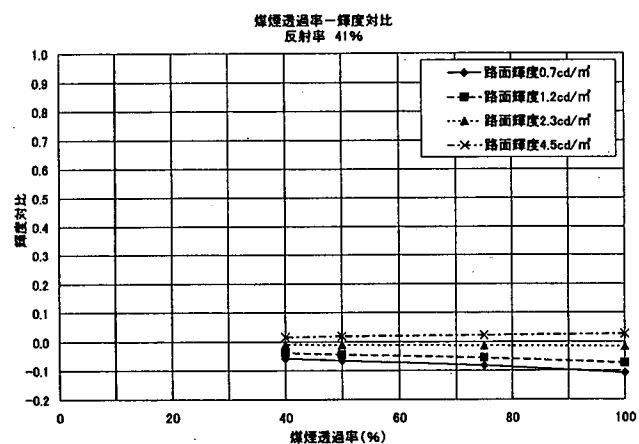
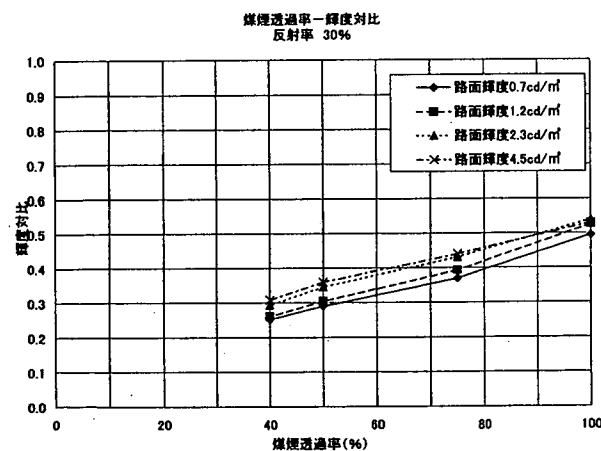
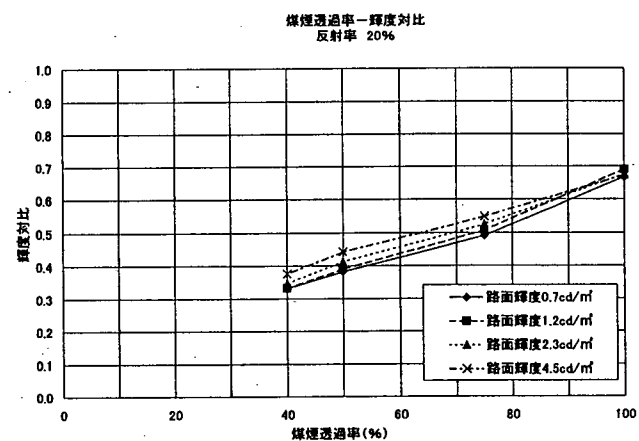
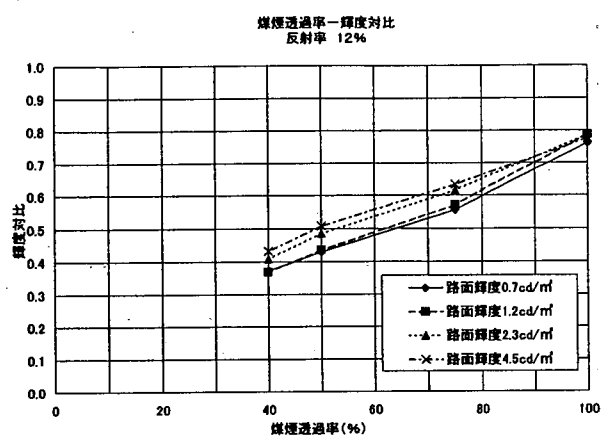
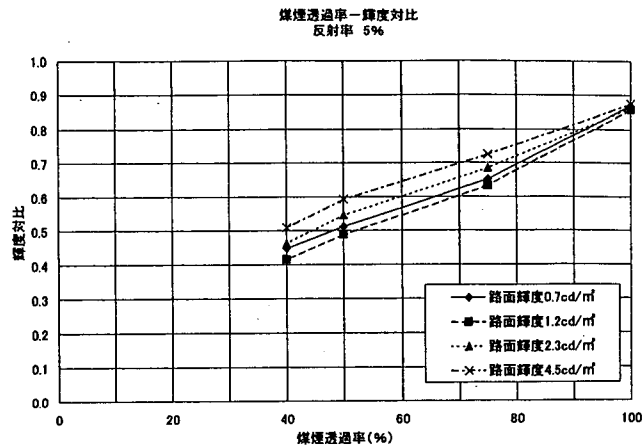
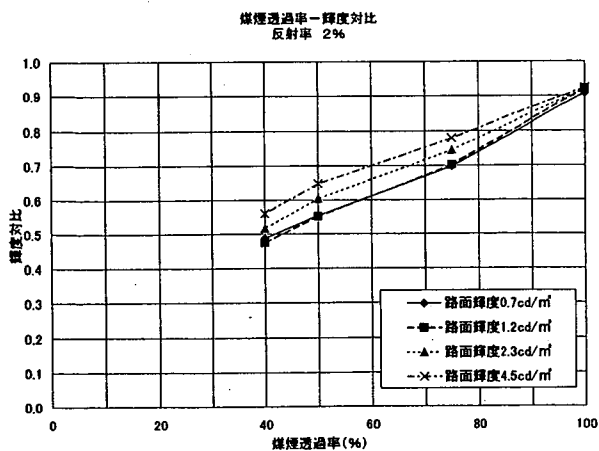
l : 観測距離 (75m)

上記式 (3.1) により、補正を行った各煤煙透過率時の視標物の輝度対比を表-3.24に示す。以下の検討にあたっては、補正後の輝度対比を用いた。煤煙透過率と輝度対比の関係を図-3.17に示す。これより、どの照明条件下においても、煤煙透過率が低くなるに従って輝度対比が低下していることが分かる。こ

の傾向は、いずれの条件でも同一である。例えば、視標物の反射率 20 % では、煤煙透過率 40 % の輝度対比は、煤煙が存在しない 100 % の輝度対比に比べて約 1/2 になることが分かる。また、図-3.17 から本照明条件下における路面輝度の範囲では、路面輝度が高くなることにより、若干の輝度対比の増加が認められる。

表-3.24 各煤煙透過率時における輝度対比結果

煤煙透過率		100%			75%			50%			40%		
照明 レベル (cd/m ²)	反射率 ρ (%)	視標物 輝度 L _{o'} (cd/m ²)	背景 輝度 L _{b'} (cd/m ²)	輝度 対比 C'	視標物 輝度 L _{o'} (cd/m ²)	背景 輝度 L _{b'} (cd/m ²)	輝度 対比 C'	視標物 輝度 L _{o'} (cd/m ²)	背景 輝度 L _{b'} (cd/m ²)	輝度 対比 C'	視標物 輝度 L _{o'} (cd/m ²)	背景 輝度 L _{b'} (cd/m ²)	輝度 対比 C'
0.7	2	0.11	0.72	0.84	0.21	0.70	0.70	0.29	0.65	0.56	0.32	0.62	0.49
	5	0.13	0.66	0.80	0.23	0.65	0.65	0.30	0.61	0.51	0.33	0.60	0.45
	12	0.18	0.60	0.69	0.27	0.60	0.56	0.33	0.58	0.43	0.35	0.56	0.37
	20	0.24	0.62	0.61	0.32	0.62	0.49	0.36	0.59	0.38	0.38	0.58	0.33
	30	0.35	0.65	0.45	0.40	0.64	0.37	0.43	0.61	0.29	0.44	0.59	0.25
	41	0.77	0.70	-0.10	0.74	0.69	-0.08	0.68	0.64	-0.07	0.65	0.62	-0.06
1.2	2	0.16	1.11	0.86	0.32	1.09	0.70	0.46	1.02	0.55	0.53	1.00	0.47
	5	0.21	0.99	0.79	0.36	0.99	0.63	0.49	0.95	0.49	0.55	0.95	0.41
	12	0.26	0.93	0.72	0.40	0.94	0.57	0.52	0.91	0.44	0.58	0.92	0.37
	20	0.36	0.98	0.63	0.48	0.99	0.51	0.58	0.95	0.39	0.63	0.94	0.33
	30	0.53	1.03	0.49	0.62	1.02	0.39	0.68	0.97	0.31	0.71	0.97	0.26
	41	1.19	1.12	-0.07	1.15	1.09	-0.06	1.07	1.02	-0.04	1.05	1.01	-0.04
2.3	2	0.35	2.78	0.87	0.67	2.63	0.75	0.94	2.39	0.60	1.14	2.36	0.52
	5	0.47	2.53	0.81	0.76	2.42	0.68	1.02	2.24	0.55	1.20	2.24	0.46
	12	0.61	2.36	0.74	0.88	2.29	0.62	1.10	2.14	0.49	1.27	2.15	0.41
	20	0.85	2.33	0.63	1.07	2.26	0.53	1.24	2.12	0.41	1.39	2.13	0.35
	30	1.27	2.60	0.51	1.41	2.48	0.43	1.49	2.28	0.35	1.60	2.27	0.29
	41	2.83	2.79	-0.02	2.67	2.63	-0.01	2.42	2.39	-0.01	2.39	2.37	-0.01
4.5	2	0.69	6.06	0.89	1.22	5.55	0.78	1.74	4.93	0.65	2.12	4.82	0.56
	5	0.92	5.52	0.83	1.40	5.11	0.73	1.87	4.61	0.59	2.23	4.54	0.51
	12	1.30	4.96	0.74	1.71	4.66	0.63	2.10	4.28	0.51	2.42	4.27	0.43
	20	1.82	5.04	0.64	2.13	4.72	0.55	2.41	4.32	0.44	2.68	4.30	0.38
	30	2.70	5.47	0.51	2.84	5.08	0.44	2.93	4.58	0.36	3.13	4.52	0.31
	41	5.97	6.13	0.03	5.47	5.61	0.02	4.88	4.97	0.02	4.77	4.85	0.02



図一 3.17 煤煙透過率と輝度対比の関係

（５）視標物の視認性

視標物の視認性のアンケート調査結果をもとに、表－３．２５のように被験者が回答した評価に対して点数をつけ、全被験者の平均値で整理した結果を表－３．２６（１）～表－３．２６（２）に示す。また、図－３．１８から図－３．２０に輝度対比と視認性評価（各被験者の評価の平均値）の関係を示す。

図－３．１８より、輝度対比と視認性評価の関係は、同一の路面輝度の場合は、煤煙透過率が低くなると輝度対比が低くなる傾向はあるものの、視標物の視認性は輝度対比との関係で決定されることが分かる。このことより視標物の視認性は、煤煙透過率に関係なく輝度対比との関係で決定されることが明らかとなった。

図－３．１９に各反射率の視標物毎に輝度対比と視認性評価の関係を示す。これより、視標物の反射率が低い（比較的黒い視標物）ほど輝度対比が高く、視認性評価も高い傾向となっていることが分かる。一方、反射率が高い（比較的白い視標物）ほど輝度対比が低く、視認性評価も低い結果となっていることが分かる。また、路面輝度との関係で見ると、各反射率の視標物ともに路面輝度の増加に伴って輝度対比が若干増加の傾向がある。その変化に伴って視認性評価が高くなるが、輝度対比の増加に比べて視認性評価の増加が顕著であることが認められる。これらのことより、本路面輝度の条件下では、路面輝度が高いほど視認性評価が高く、路面輝度が低い場合は視認性が低くなることが分かった。

図－３．２０に各煤煙透過率における輝度対比と視認性評価の関係を示す。また、図中（右下の図）に全データを整理して示すとともに、清浄空気中下での見え方評価も示した。図より、煤煙透過率が低下すると、視標物の輝度対比は全体的に低下し、それに伴い見え方の評価が低くなっていることが分かる。また、全データの結果から、路面輝度が高い場合は、低い場合に比べて同じ輝度対比の視標物でも視標物の視認性が高くなることが分かる。また、３．２で示した空気清浄下の結果とも整合していることが分かる。これより、同じ視標物の視認性を確保したい場合、高い輝度対比の視標物は比較的低い路面輝度で視認できるが、低い輝度対比の視標物は高い路面輝度が必要になることを意味している。例えば、路面輝度４．５，２．３，１．２，０．７ cd/m^2 で「やや見えにくい」程度の評価を確保するためには、それぞれ０．４，０．５，０．６２，０．６７の輝度対比が必要となる。

以上より、路面輝度が低い場合に路面輝度が高い場合と同一の視認性評価を得るためには、高い輝度対比が必要となることが明らかとなった。

表－３．２５ 評価に対する点数

	全く 見えない	見え にくい	やや 見え にくい	普通に 見える	やや 良く 見える	良く 見える	非常に 良く 見える
点 数	１ 点	２ 点	３ 点	４ 点	５ 点	６ 点	７ 点

表-3.26(1) 視標物の視認性評価結果

煤煙透過率(%)	照明レベル (cd/m ²)	視標物 反射率(%)	アンケート結果																	各評価の集計							各評価の割合(%)							評価の 最大値	評価の 最小値	評価の 平均値	標準 偏差					
			M.S	T.T	C.M	Y.F	T.H	N.T	M.K	K.K	S.I	T.N	Y.K	T.N	T.I	H.M	S.T	N.I	T.F	T.O	T.T	KA	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4					5	6	7	合計	
100	0.7	2	4	5	4	6	3	4	3	3	4	4	4	4	3	5	4	5	3	4	5	0	0	5	10	4	1	0	0	0	25	50	20	5	0	100	6	3	4.05	0.58		
		5	3	5	4	4	4	3	2	4	4	4	4	4	4	2	4	3	5	3	3	4	0	3	6	9	2	0	0	0	15	30	45	10	0	0	100	5	2	3.50	0.75	
		12	3	3	3	4	3	4	3	3	3	3	3	4	3	3	2	3	4	4	3	3	0	1	14	5	0	0	0	0	5	70	25	0	0	0	100	4	2	3.20	0.40	
		20	2	3	2	4	3	2	2	2	3	3	2	2	3	2	3	3	4	3	2	3	0	9	9	2	0	0	0	0	45	45	10	0	0	0	100	4	2	2.65	0.59	
		30	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	0	18	2	0	0	0	0	0	90	10	0	0	0	0	100	3	2	2.10	0.18	
	41	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	20	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	100	1	1	1.00	0.00		
	1.2	2	4	6	4	6	4	5	4	4	4	5	4	5	4	3	5	5	5	4	5	5	0	0	1	9	8	2	0	0	0	5	45	40	10	0	0	100	6	3	4.55	0.65
		5	3	3	4	6	4	4	4	3	4	5	4	4	4	3	5	4	4	4	4	4	0	0	4	13	2	1	0	0	0	20	65	10	5	0	0	100	6	3	4.00	0.40
		12	3	3	3	4	4	4	4	3	3	4	3	3	3	3	4	4	4	3	3	3	0	0	12	8	0	0	0	0	0	60	40	0	0	0	0	100	4	3	3.40	0.48
		20	2	2	2	6	4	4	4	3	3	4	3	3	3	2	4	3	3	4	3	4	0	4	8	7	0	1	0	0	20	40	35	0	5	0	100	6	2	3.30	0.76	
		30	2	2	2	3	2	2	3	3	2	2	1	2	3	2	3	3	3	3	2	2	1	11	8	0	0	0	0	5	55	40	0	0	0	0	100	3	1	2.35	0.52	
	41	1	1	1	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	18	2	0	0	0	0	0	0	90	10	0	0	0	0	0	100	2	1	1.10	0.18	
	2.3	2	5	6	7	7	3	4	4	4	6	5	5	6	6	4	7	5	7	4	5	5	0	0	1	5	6	4	4	0	0	5	25	30	20	20	100	7	3	5.25	1.00	
		5	7	6	7	7	5	4	5	4	5	6	5	6	5	4	6	4	7	3	4	4	0	0	1	6	5	4	4	0	0	5	30	25	20	20	100	7	3	5.20	1.04	
		12	4	4	4	7	4	4	4	4	5	4	4	4	5	3	6	5	5	4	4	4	0	0	1	13	4	1	1	0	0	5	65	20	5	5	100	7	3	4.40	0.66	
		20	4	5	4	6	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	3	6	3	3	4	0	0	5	12	1	2	0	0	0	25	60	5	10	0	0	100	6	3	4.00	0.50
		30	3	3	2	5	2	2	3	3	3	3	3	2	3	3	2	4	3	3	2	3	3	0	6	12	1	1	0	0	0	30	60	5	5	0	0	100	5	2	2.85	0.51
	41	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	20	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	100	1	1	1.00	0.00	
	4.5	2	7	7	7	7	5	5	6	5	6	7	6	7	7	4	7	6	7	4	6	6	0	0	0	2	3	6	9	0	0	0	10	15	30	45	100	7	4	6.10	0.81	
		5	7	7	7	7	6	4	6	5	6	7	5	7	5	4	7	6	7	4	5	5	0	0	0	3	5	4	8	0	0	0	15	25	20	40	100	7	4	5.85	0.98	
12		6	6	5	7	5	5	6	4	5	6	4	6	5	3	6	6	7	4	5	6	0	0	1	3	6	8	2	0	0	5	15	30	40	10	100	7	3	5.35	0.85		
20		5	4	4	7	5	4	6	4	4	5	4	5	4	3	4	6	6	4	4	4	0	0	1	11	4	3	1	0	0	5	55	20	15	5	100	7	3	4.60	0.82		
30		4	4	4	3	4	4	4	4	3	4	3	4	3	2	5	4	4	3	3	5	0	1	6	11	2	0	0	0	5	30	55	10	0	0	0	100	5	2	3.70	0.59	
41	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	18	2	0	0	0	0	0	0	90	10	0	0	0	0	0	100	2	1	1.10	0.18		
75	0.7	2	3	2	4	5	4	3	2	2	3	2	3	4	3	4	4	3	4	3	4	0	5	8	6	1	0	0	0	25	40	30	5	0	0	100	5	2	3.15	0.70		
		5	3	2	2	5	3	3	2	2	3	3	3	2	3	3	2	2	4	2	4	3	0	8	9	2	1	0	0	0	40	45	10	5	0	0	100	5	2	2.80	0.64	
		12	3	1	2	3	5	2	2	2	2	3	3	2	2	3	2	2	3	2	3	3	1	10	8	0	1	0	0	5	50	40	0	5	0	0	100	5	1	2.50	0.65	
		20	2	1	2	3	4	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	17	1	1	0	0	0	5	85	5	5	0	0	0	100	4	1	2.10	0.28	
		30	2	1	1	2	2	2	1	2	1	1	1	1	2	2	1	2	2	2	2	2	1	9	11	0	0	0	0	45	55	0	0	0	0	100	2	1	1.55	0.50		
	41	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	20	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	100	1	1	1.00	0.00		
	1.2	2	3	4	4	5	4	4	2	3	3	2	2	5	5	4	3	4	3	5	3	0	3	6	7	4	0	0	0	15	30	35	20	0	0	0	100	5	2	3.60	0.84	
		5	3	2	3	6	4	4	3	3	3	2	2	3	3	4	4	3	4	3	3	4	0	3	10	6	0	1	0	0	15	50	30	0	5	0	100	6	2	3.30	0.69	
		12	3	2	3	3	3	3	2	2	3	2	2	4	3	2	2	3	2	3	3	3	0	9	10	1	0	0	0	0	45	50	5	0	0	0	100	4	2	2.60	0.54	
		20	2	1	2	4	3	4	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	3	1	14	3	2	0	0	0	5	70	15	10	0	0	0	100	4	1	2.30	0.55	
30		2	1	2	2	2	2	1	1	2	1	1	1	3	2	1	1	2	1	2	2	9	10	1	0	0	0	0	45	50	5	0	0	0	100	3	1	1.60	0.54			
41	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	20	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	100	1	1	1.00	0.00			
2.3	2	4	4	6	6	5	5	5	4	4	4	5	3	5	5	4	6	7	4	5	4	0	0	1	8	7	3	1	0	0	5	40	35	15	5	100	7	3	4.75	0.78		
	5	6	3	5	7	4	4	3	4	4	3	5	4	4	4	4	3	6	3	4	2	0	1	5	9	2	2	1	0	5	25	45	10	10	5	100	7	2	4.10	0.85		
	12	3	2	4	6	4	5	3	4	4	3	4	3	4	3	4	4	3	4	3	3	0	1	7	10	1	1	0	0	5	35	50	5	5	0	100	6	2	3.70	0.66		
	20	4	2	4	6	4	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	2	4	3	3	3	0	3	12	4	0	1	0	0	15	60	20	0	5	0	100	6	2	3.20	0.60		
	30	2	1	2	3	2	3	2	3	3	2	3	2	3	3	2	3	3	2	2	2	1	10	9	0	0	0	0	5	50	45	0	0	0	0	100	3	1	2.40	0.54		
41	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	20	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	100	1	1	1.00	0.00			
4.5	2	7	5																																							

表-3.26(2) 視標物の視認性評価結果

煤煙透過率(%)	照明レベル (cd/m ²)	視標物 反射率(%)	アンケート結果																	各評価の集計							各評価の割合(%)							評価の 合計	評価の 最大値	評価の 最小値	評価の 平均値	標準 偏差				
			M.S	T.T	C.M	Y.F	T.H	N.T	M.K	K.K	S.I	T.N	Y.K	T.N	T.I	H.M	S.T	N.I	T.F	T.O	T.T	K.A	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4						5	6	7	
50	0.7	2	3	2	3	3	2	3	2	2	3	2	2	2	3	3	3	3	2	3	3	0	8	12	0	0	0	0	0	40	60	0	0	0	0	100	3	2	2.60	0.48		
		5	3	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	3	2	0	16	4	0	0	0	0	0	80	20	0	0	0	0	100	3	2	2.20	0.32		
		12	2	2	2	2	3	3	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	3	3	0	15	5	0	0	0	0	0	75	25	0	0	0	0	100	3	2	2.25	0.38		
		20	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	18	0	0	0	0	0	10	90	0	0	0	0	100	2	1	1.90	0.18			
		30	1	1	1	2	1	1	1	2	2	2	1	1	2	1	2	1	1	2	1	13	7	0	0	0	0	0	65	35	0	0	0	0	100	2	1	1.35	0.46			
	1.2	41	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	20	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	100	1	1	1.00	0.00		
		2	3	3	3	3	3	4	2	3	3	3	3	2	4	3	3	3	3	2	4	3	0	3	14	3	0	0	0	0	15	70	15	0	0	0	100	4	2	3.00	0.30	
		5	3	2	3	3	2	3	2	3	2	2	2	2	3	2	2	3	2	2	3	3	0	11	9	0	0	0	0	55	45	0	0	0	0	100	3	2	2.45	0.50		
		12	2	2	2	2	2	3	2	3	2	2	3	1	3	2	2	2	3	1	3	3	2	11	7	0	0	0	0	10	55	35	0	0	0	100	3	1	2.25	0.53		
		20	2	1	2	2	3	2	2	2	2	2	1	1	3	2	2	2	2	1	2	2	4	14	2	0	0	0	0	20	70	10	0	0	0	100	3	1	1.90	0.36		
	2.3	30	1	1	2	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	2	1	2	2	1	2	2	8	12	0	0	0	0	0	40	60	0	0	0	0	100	2	1	1.60	0.48		
		41	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	20	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	100	1	1	1.00	0.00		
		2	4	4	4	4	4	4	3	4	3	4	3	4	6	4	3	5	4	3	4	4	0	0	5	13	1	1	0	0	25	65	5	5	0	0	100	6	3	3.90	0.45	
		5	3	3	3	3	4	4	3	3	3	3	3	3	4	3	3	3	3	3	3	0	0	17	3	0	0	0	0	0	85	15	0	0	0	0	100	4	3	3.15	0.26	
		12	3	3	3	3	3	4	3	4	3	3	3	3	5	3	2	3	4	2	3	4	0	2	13	4	1	0	0	0	10	65	20	5	0	0	100	5	2	3.20	0.50	
	4.5	20	2	2	2	2	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	17	3	0	0	0	0	0	85	15	0	0	0	0	100	3	2	2.15	0.26	
		30	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	3	3	1	2	3	1	14	5	0	0	0	0	5	70	25	0	0	0	0	100	3	1	2.20	0.40	
		41	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	19	1	0	0	0	0	0	95	5	0	0	0	0	0	100	2	1	1.05	0.10		
		2	6	4	5	5	5	4	5	4	3	4	4	4	7	5	4	6	6	3	6	5	0	0	2	7	6	4	1	0	10	35	30	20	5	100	7	3	4.75	0.88		
		5	4	5	4	5	5	4	4	3	3	3	4	4	5	5	4	5	4	3	5	3	0	0	5	8	7	0	0	0	0	25	40	35	0	0	0	100	5	3	4.10	0.63
50	12	3	3	4	4	5	3	5	4	3	4	4	3	5	4	3	4	4	3	4	4	0	0	7	10	3	0	0	0	0	35	50	15	0	0	0	100	5	3	3.80	0.56	
	20	3	4	3	4	3	4	4	3	2	3	3	3	4	3	3	4	3	1	4	3	1	1	11	7	0	0	0	5	5	55	35	0	0	0	100	4	1	3.20	0.56		
	30	3	3	2	3	3	2	3	3	2	2	3	2	4	3	2	3	3	2	3	3	0	7	12	1	0	0	0	0	35	60	5	0	0	0	100	4	2	2.70	0.49		
	41	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	20	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	100	1	1	1.00	0.00			
	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	1	3	2	2	2	3	2	1	16	3	0	0	0	0	5	80	15	0	0	0	0	100	3	1	2.10	0.27		
40	0.7	5	2	1	2	3	2	2	1	1	2	2	2	2	2	1	3	2	2	2	2	2	4	14	2	0	0	0	0	20	70	10	0	0	0	0	100	3	1	1.90	0.36	
		12	1	2	2	2	2	1	1	2	2	2	1	2	1	2	2	2	2	1	2	2	6	14	0	0	0	0	0	30	70	0	0	0	0	0	100	2	1	1.70	0.42	
		20	1	1	1	2	2	1	1	1	2	2	2	1	2	1	2	2	2	1	2	2	10	10	0	0	0	0	0	50	50	0	0	0	0	0	100	2	1	1.50	0.50	
		30	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2	1	18	2	0	0	0	0	0	90	10	0	0	0	0	0	100	2	1	1.10	0.18	
		41	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	19	0	1	0	0	0	0	95	0	5	0	0	0	0	100	3	1	1.10	0.19		
	1.2	2	2	2	2	3	2	3	1	2	2	3	3	2	3	2	4	3	2	1	3	2	2	10	7	1	0	0	0	10	50	35	5	0	0	0	100	4	1	2.35	0.62	
		5	2	2	2	3	2	2	1	1	2	3	2	2	2	1	2	3	2	2	2	2	3	14	3	0	0	0	0	15	70	15	0	0	0	0	100	3	1	2.00	0.30	
		12	1	2	2	2	2	2	2	1	2	2	1	2	1	2	3	2	1	3	2	5	13	2	0	0	0	0	25	65	10	0	0	0	0	100	3	1	1.85	0.43		
		20	1	1	2	2	2	2	1	1	1	2	2	1	2	1	2	2	2	1	2	1	9	11	0	0	0	0	0	45	55	0	0	0	0	0	100	2	1	1.55	0.50	
		30	1	1	1	1	2	1	2	1	1	2	1	1	1	1	2	2	1	1	2	1	14	6	0	0	0	0	0	70	30	0	0	0	0	0	100	2	1	1.30	0.42	
	2.3	41	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	19	1	0	0	0	0	0	95	5	0	0	0	0	0	100	2	1	1.05	0.10		
		2	3	4	3	4	3	3	2	3	3	4	3	3	3	2	5	4	3	2	4	3	0	3	11	5	1	0	0	0	15	55	25	5	0	0	0	100	5	2	3.20	0.58
		5	3	2	3	4	3	3	2	2	2	3	3	2	3	2	4	3	3	2	3	3	0	7	11	2	0	0	0	0	35	55	10	0	0	0	0	100	4	2	2.75	0.53
		12	2	3	2	3	3	2	2	3	3	3	3	2	3	2	4	3	3	1	3	2	1	7	11	1	0	0	0	5	35	55	5	0	0	0	100	4	1	2.60	0.58	
		20	2	2	2	2	3	2	2	2	3	3	2	2	2	2	2	3	2	1	2	2	1	16	3	0	0	0	0	5	80	15	0	0	0	0	100	3	1	2.10	0.27	
4.5	30	1	1	1	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	1	3	2	2	2	2	2	6	13	1	0	0	0	0	30	65	5	0	0	0	0	100	3	1	1.75	0.45		
	41	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	19	0	0	1	0	0	0	95	0	0	5	0	0	0	100	4	1	1.15	0.29			
	2	3	5	3	4	3	4	3	3	4	5																															

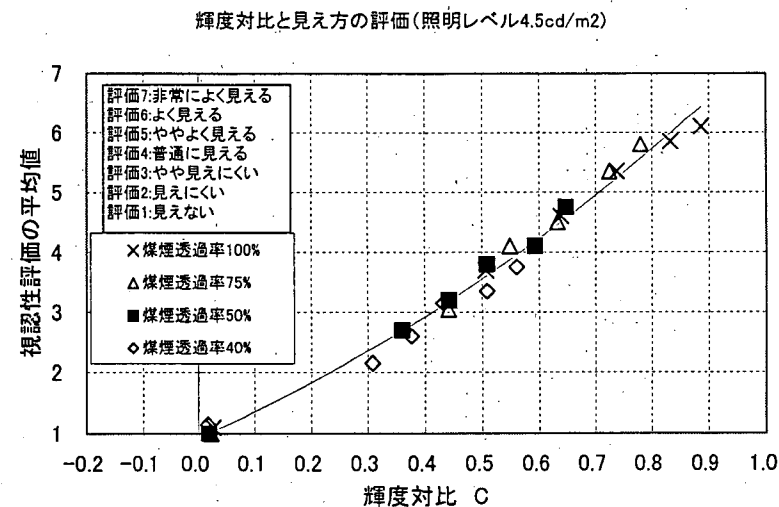
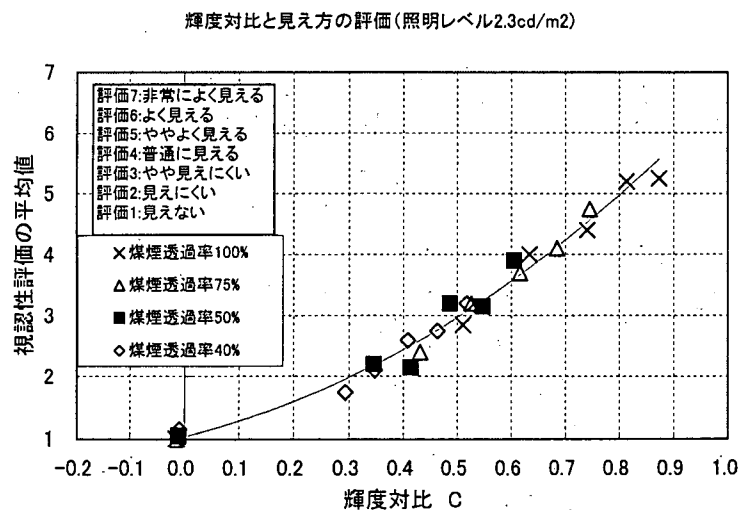
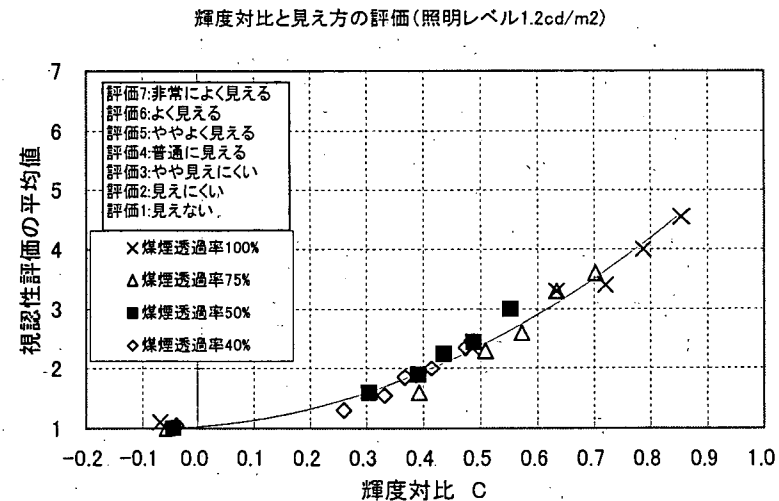
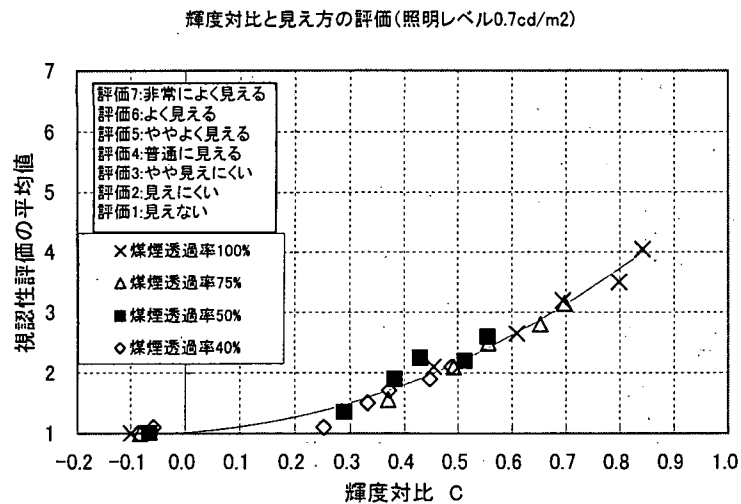
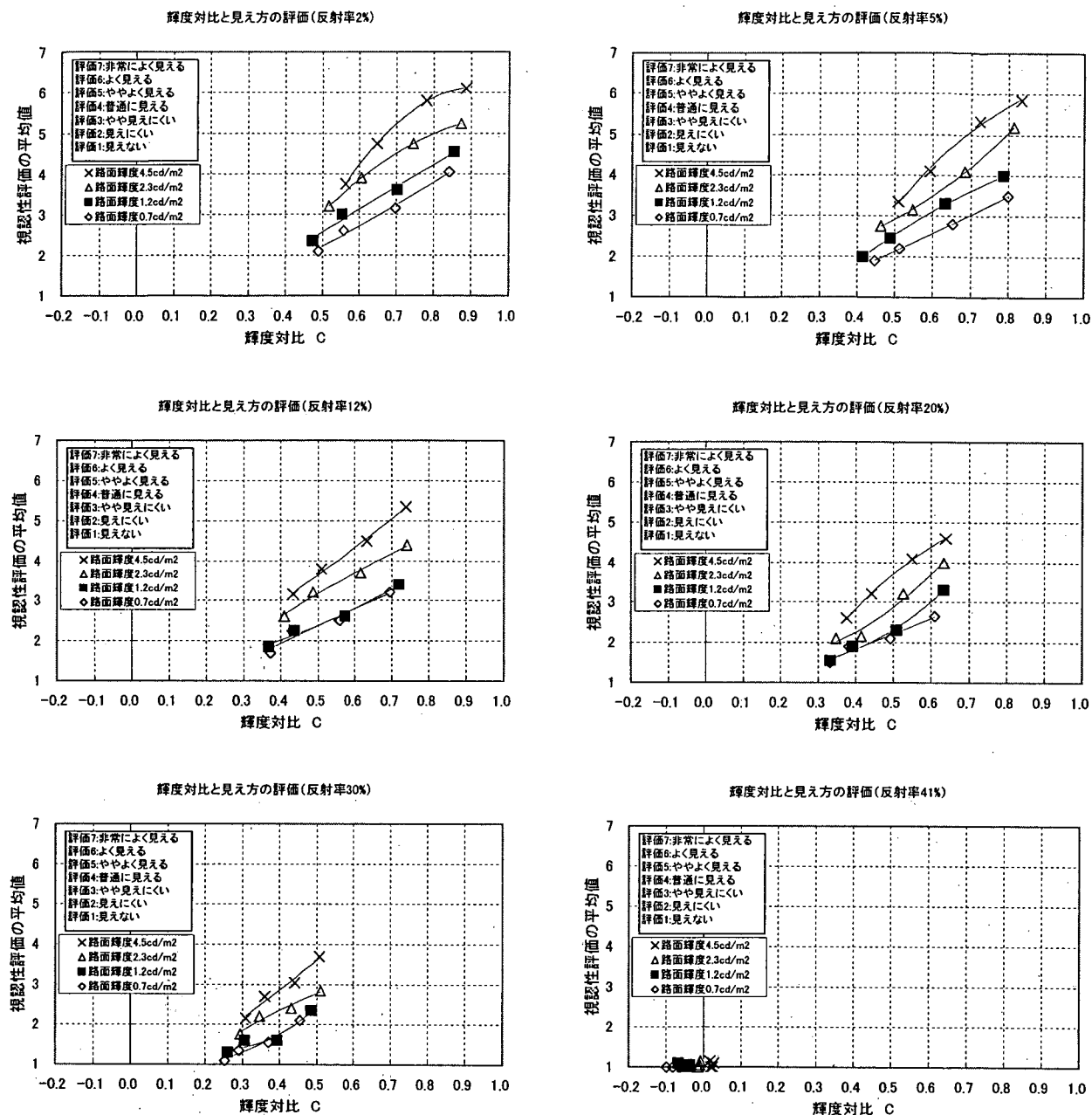
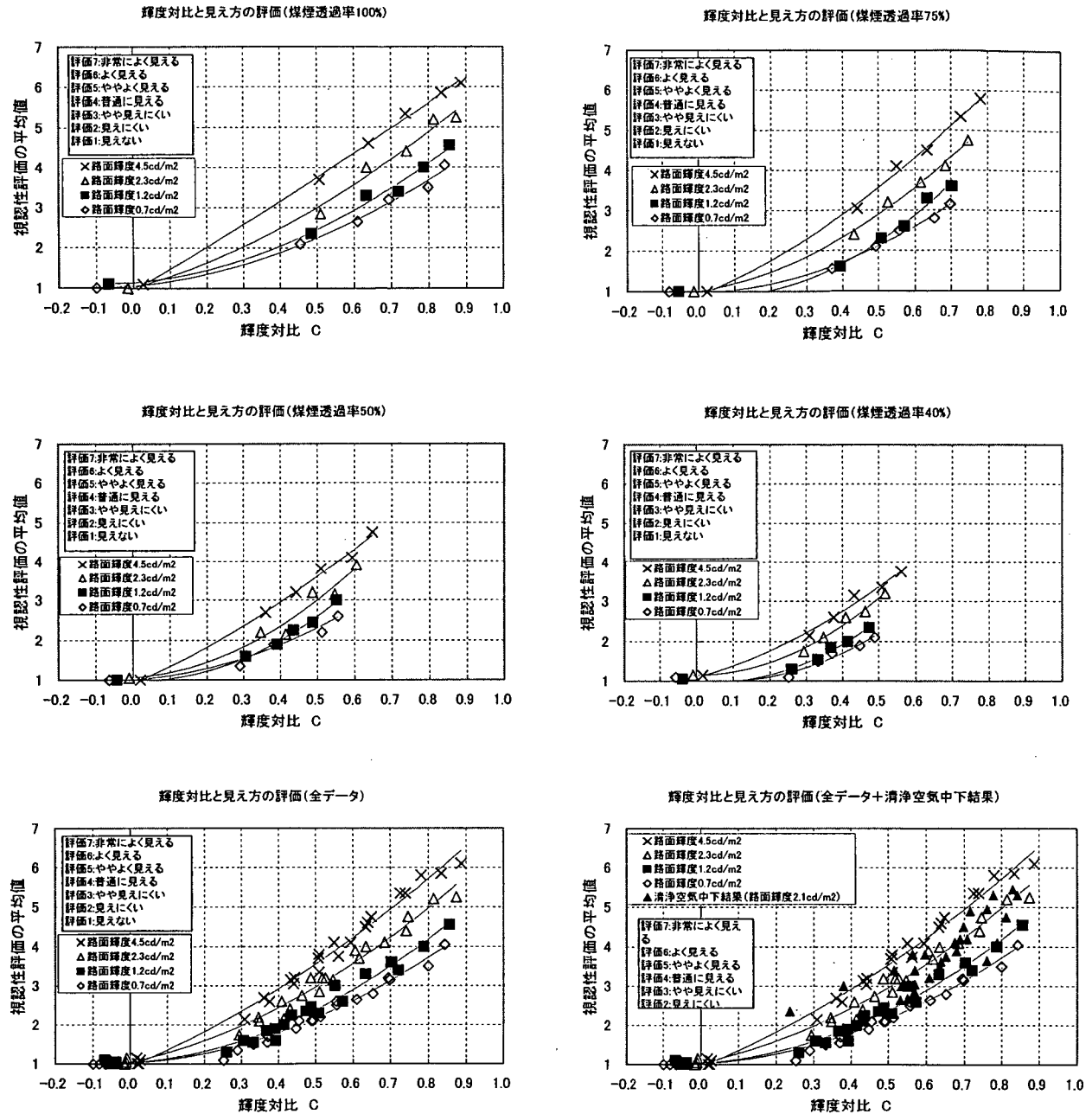


図-3.18 輝度対比と視認性評価の平均値(各被験者の評価の平均値)の関係



図一 3. 1 9 輝度対比と視認性評価の平均値 (各被験者の評価の平均値) の関係 (反射率の違い)



図一 3. 2 0 輝度対比と視認性評価の平均値 (各被験者の評価の平均値) の関係 (煤煙透過率による違い)

(6) 従来の照明方式と連続的な照明方式での視標物の視認性

図-3.21 (1) ~ (2) に視標物が路上に存在した場合のその視標物がとりうる最大・最小輝度対比と煤煙透過率の関係を示す。これは、3.2で示した清浄空気中での照明特性の把握で行った各照明器具の設置間隔時の3種類の反射率(12%、20%、30%)の各視標物の輝度対比の最大値と最小値をもとに、各煤煙透過率毎の光幕輝度の測定結果から、前述の(3.1)式を用いて煤煙中での輝度対比の最大値と最小値を求めたものである。煤煙中での輝度対比を求めるにあたっては、過去の実験結果³⁾から、同一の照明器具を用いた同一の路面輝度下においては照明器具間隔を変化させても単位照度あたりの光幕輝度はほぼ同程度であることから、照明器具間隔による光幕輝度は変化しないものとして算出した。

図-3.21より、各路面輝度の条件においても煤煙透過率の低下に伴い輝度対比が低下する傾向があり、その低下の減少の程度は、路面輝度が高い条件(発生する光幕輝度が高い条件)で大きいことが分かる。なお、連続的な照明方式に近い視標物の視認性が得られると考えられた照明器具の設置間隔5.6mは、煤煙が存在する場合においても輝度対比の変動幅が小さく、かつ比較的高い輝度対比を確保できることが明らかとなった。

(7) まとめ

同一の視標物の視認性は、路面輝度が高いほど高く、路面輝度が低い場合に路面輝度が高い場合と同一の視認性評価を得るためには、高い輝度対比が必要となることが明らかとなった。また、照明器具間隔の違いによる光幕輝度が変化しない条件で理論上から算定した煤煙中における視標物の輝度対比は、連続的な照明方式下でも比較的高い輝度対比が得られた。

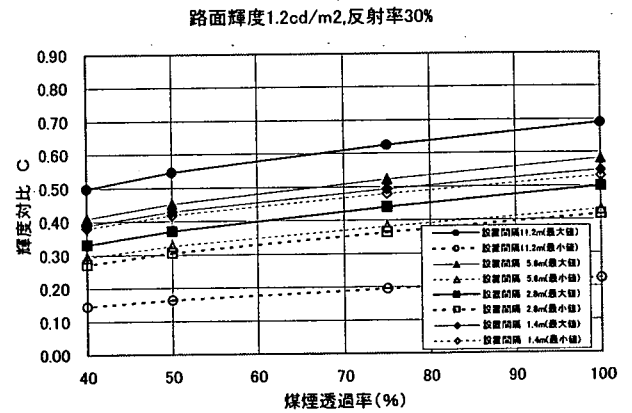
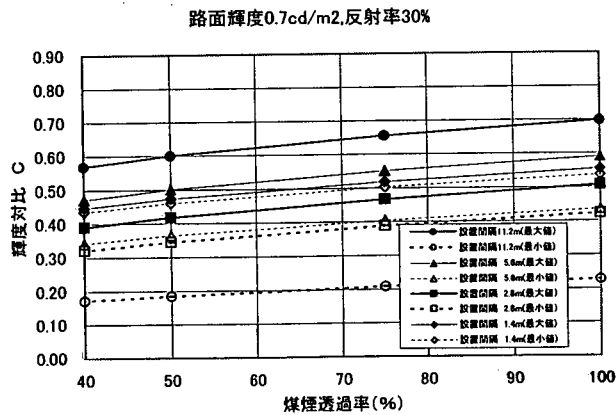
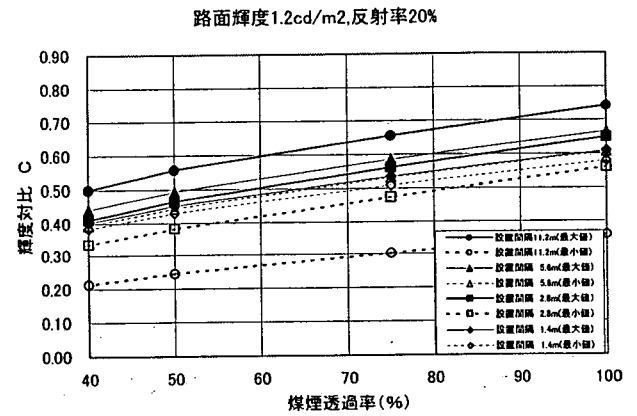
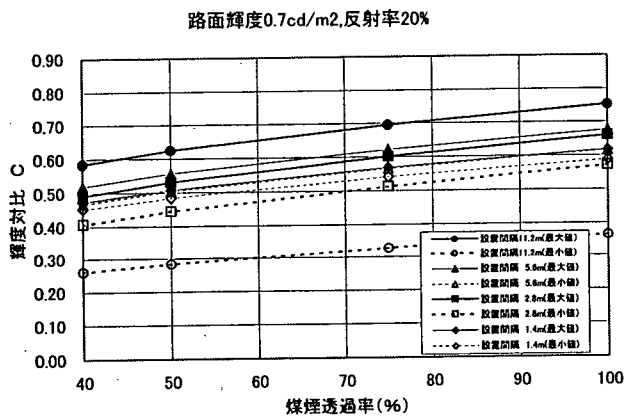
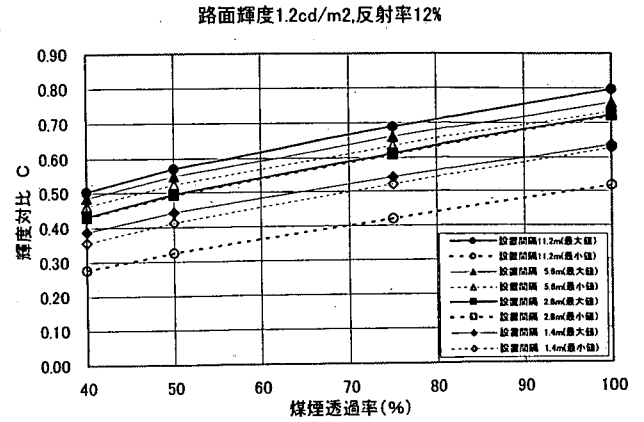
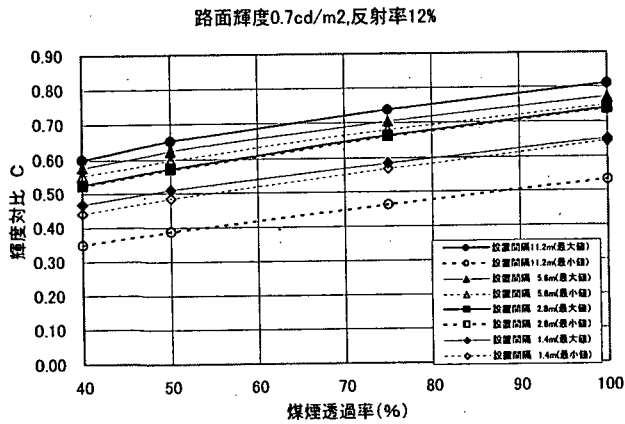


図-3.21(1) 照明器具間隔による最大・最小輝度対比と煤煙透過率の関係

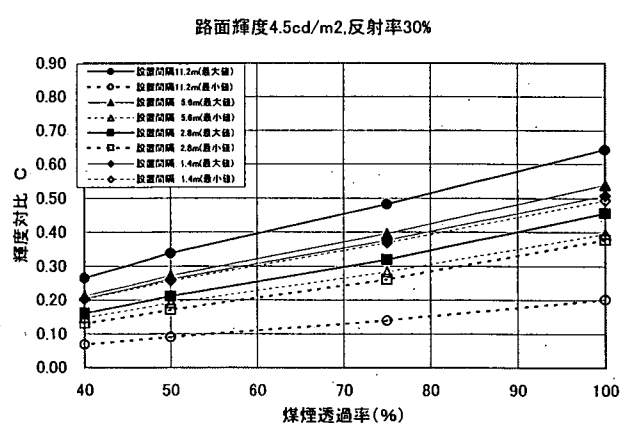
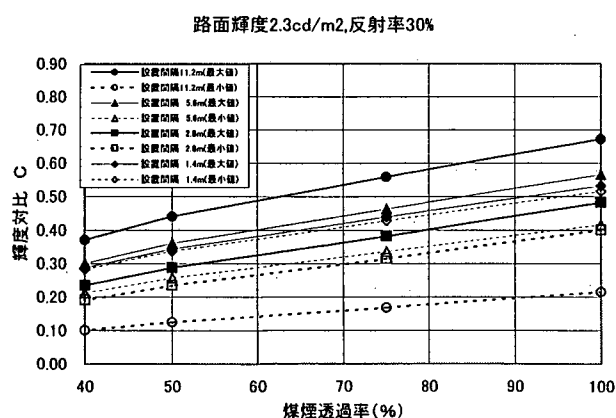
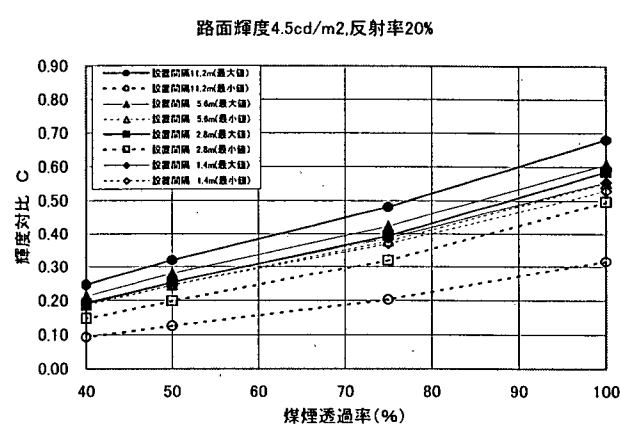
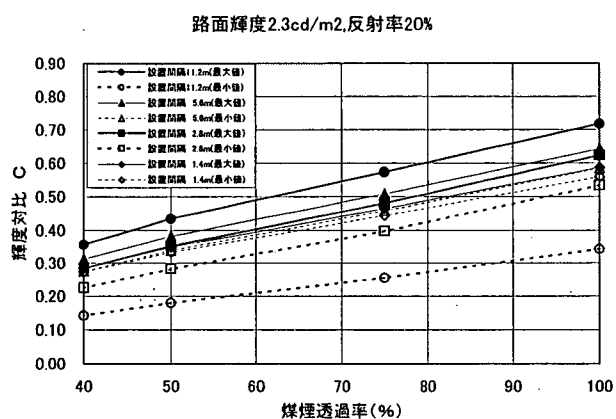
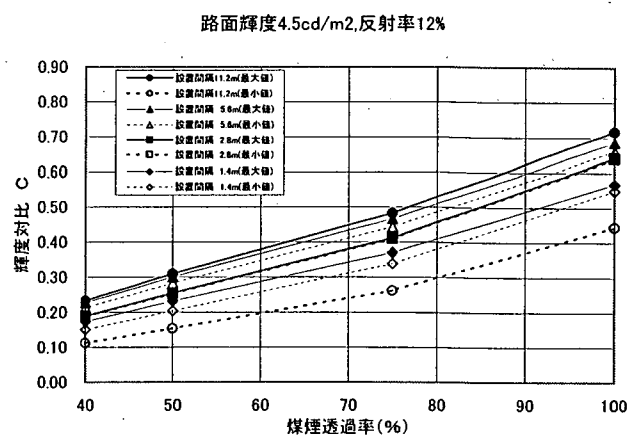
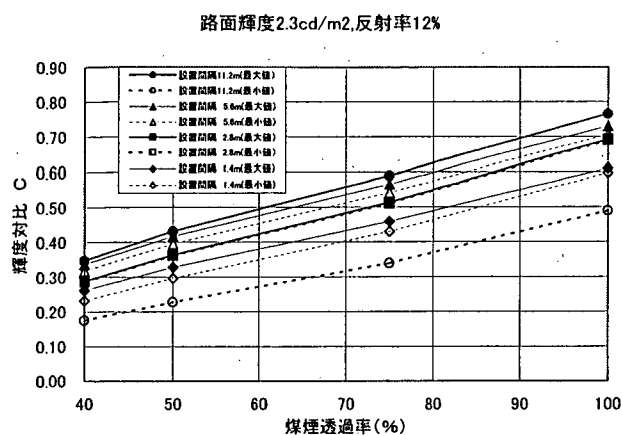


図-3.21(2) 照明器具間隔による最大・最小輝度対比と煤煙透過率の関係

3.4 まとめ

本条件下における清浄空気中および煤煙中における連続照明の照明特性の把握・視認性の評価の結果、以下のことが明らかとなった。

- ① 照明器具間隔による照明特性・視認性は、照明器具間隔によって大きく変化することが明らかとなり、視標物の見え方は、視標物の反射率、視標物の位置（照明器具との位置関係）でも変化することが明らかとなった。また、同一の路面輝度下では視標物の輝度対比と見え方に良い相関が認められ、輝度対比で視標物の見え方が評価できることが確認された。
- ② 照明器具間隔が5m程度以下の短い場合では、路面上の視標物の輝度対比は比較的高い値で安定し、その最大値と最小値の差が小さく、照明器具間隔が11.2mと長い場合では、路面上の視標物の輝度対比の高い結果を示す箇所もあるが、輝度対比の低い値を示す箇所もあることから安定した輝度対比が得られないことが明らかとなった。したがって、視標物の見え方が輝度対比で評価できることを考えると、照明器具間隔が短い場合では視標物の見え方は安定するが、照明器具間隔が長い場合では安定した視標物の見え方は得られにくいことが明らかとなった。
- ③ 同一の視標物の視認性は、清浄空気中および煤煙中のいずれの条件下において、路面輝度が高いほど高く、路面輝度が低い場合に路面輝度が高い場合と同一の視認性評価を得るためには、高い輝度対比が必要となることが明らかとなった。

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年4月
- 2) (財)日本規格協会：「日本工業規格 道路照明基準JIS Z9111-1988」、昭和63年4月
- 3) 水谷敏則、堀内浩三郎、石村利明、富田敦子、平岡弘志：「道路トンネルの照明と煤煙濃度に関する研究報告書」、土木研究所資料第2096号、1984年3月

第4章 動画像による坑口形状・照明方式の検討

4.1 研究概要

4.1.1 研究目的

道路トンネルの坑口形状として面壁型があるが、この坑口形状はトンネル進入時の走行性を考慮したものではなく、経済的に有利であることから一般的によく用いられているものと考えられる。一方、トンネル内の照明は、道路照明施設設置基準¹⁾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り、入口部の照明を除き照明器具の効率がよく、経済的な低圧ナトリウムランプを用いて場合が多い。今後のより高速な交通に対応するためには、安全で走行性に優れた坑口形状や新たな照明方式について提案することが必要である。

本章では、トンネル進入時およびトンネル内の走行性と坑口形状・照明方式との関係について把握することを目的として、コンピュータグラフィック（CG）による動画像を作成し、坑口形状によるトンネル進入時の走行性とトンネル内の照明器具配列による視線誘導性の関係について被験者によるアンケート調査を行った。

4.1.2 研究方法

研究方法は、擬似的な走行状態を作成し、被験者に疑似走行を体験して、その際に受ける印象をアンケートしてもらう方法を採用した。具体的には、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トンネルを走行車線を時速80 kmで走行したときの動画像のCGを作成し、眼鏡型画像表示装置を被験者に装着しCGを見せ、坑口形状の違いによるトンネル進入時の走行性についてアンケート調査を行った。被験者は22名で、被験者がCG画像を見る際には、実運転状況に出来るだけ近い状態を再現するために、暗室内（建設省土木研究所内の実大トンネル実験施設）に普通乗用車を用意し、被験者はその運転席に着座してステアリングを握った状態でCG画像を見るようにした。

4.1.3 検討条件

動画像のCG作成にあたり、以下の検討条件を設定した。表-4.1に検討条件一覧表を示す。

(1) 道路構造

- ①道路規格：第1種3級
- ②トンネル断面：日本道路公団標準断面²⁾（標準断面図集Ⅲ-b内空断面）（図-4.1）
- ③トンネル線形：生成延長1000m（直線延長200m、曲線延長800m）
- ④トンネル幅員構成：0.6+3.5+3.5+0.6m
- ⑤トンネル坑口形状：
 - ・面壁型
 - ・竹割り型（竹割り型は、明かり部幅員からトンネル内幅員にすりつける際の距離を変化させた4つの

型を作成)

⑥明かり部平面線形：R=1,800m,延長500m

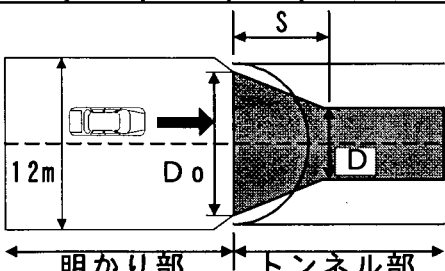
⑦明かり部幅員構成：2.5+3.5+3.5+2.5m (図-4.2)

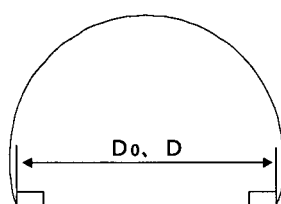
⑧道路生成総延長：1500m

表-4.1 検討条件一覧表

(a) 坑口形状のCG作成条件

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

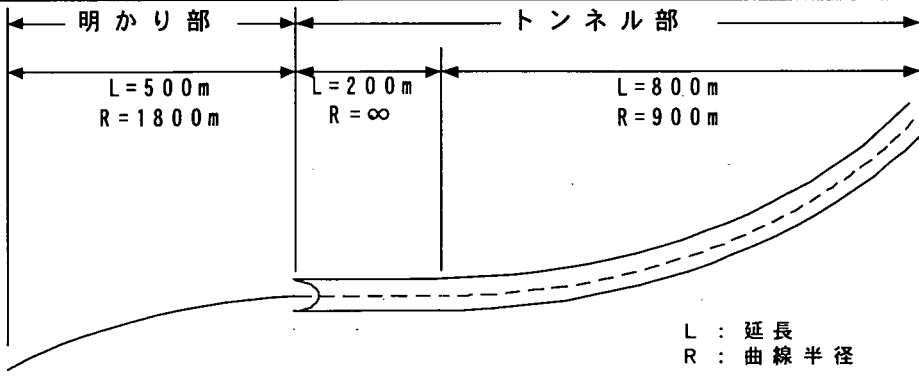




坑口付近平面図	トンネル断面図
---------	---------

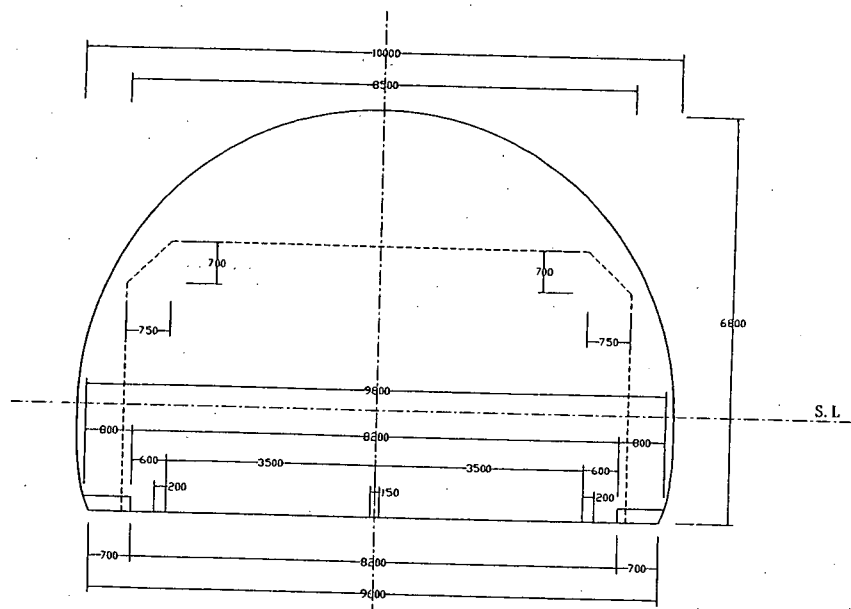
(b) 照明器具間隔のCG作成条件

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



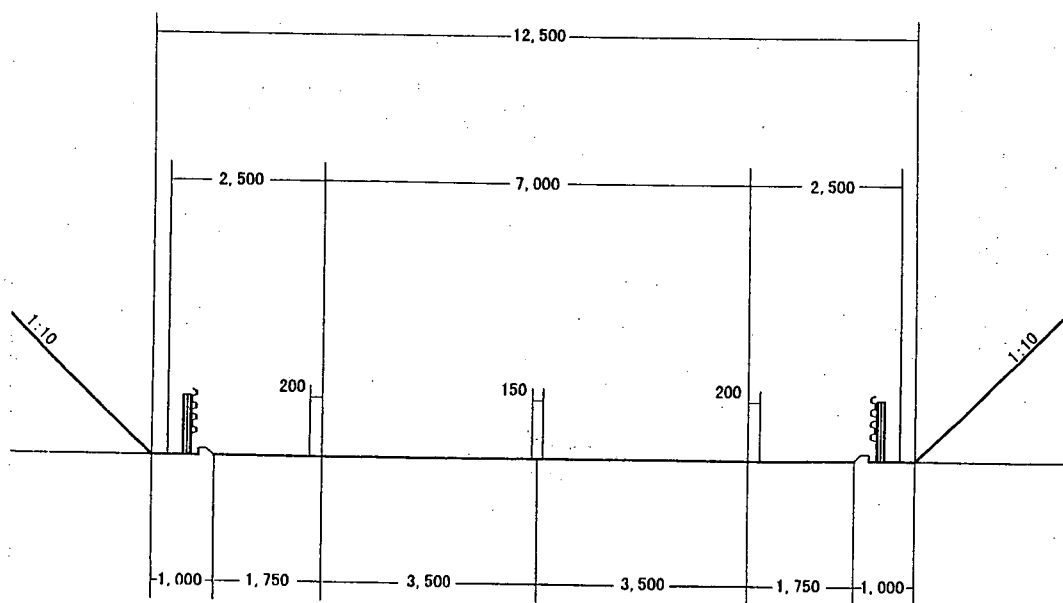
L：延長
R：曲線半径

縦断線形



単位：mm

図－4.1 トンネル標準断面図



単位：mm

図－4.2 明かり部幅員構成

(2) 後背山地生成データ作成条件

トンネル坑口の後背地形は、後背地形に威圧感のないような高さ、規模となるように考慮し、静岡県清水市興津側上流の河内周辺の地形図(1:25000)よりコンターのトレースを行った。

(3) トンネル照明データ生成条件

①光源：高圧ナトリウムランプ(NHT-180L)

②照明器具：建電協仕様³⁾(KH-180B)

③配光データ：入口照明ならびに基本照明は、走行速度80km/h時の道路照明施設設置基準を満足できるような照明とした。入口照明区間は境界部80m、移行部100m、緩和部100mを設けて徐々に路面輝度を低下させ、基本部照明区間の路面輝度の4.5cd/m²にすりあわせた。

④トンネル照明器具設置間隔：0, 5, 10m

トンネル照明器具およびトンネル内の設置位置図を図-4.4に示す。

(4) 視線位置

運転者の視点の位置は、図-4.5に示すように明かり部、トンネル内ともに走行車線側の中央車線から1.5m、高さ1.2mの位置とした。

(5) その他の条件

動画中に80km/h相当の明かり部およびトンネル部内の実走行音響を収録したものを入力した。

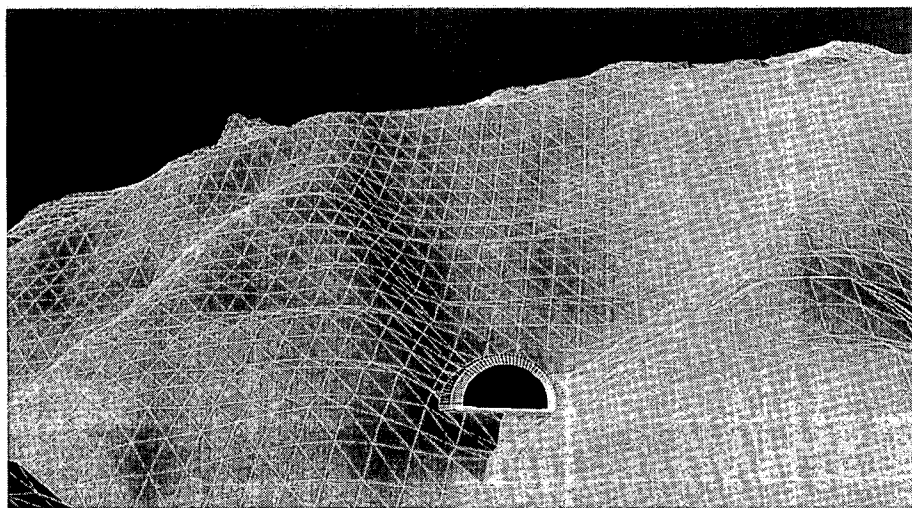
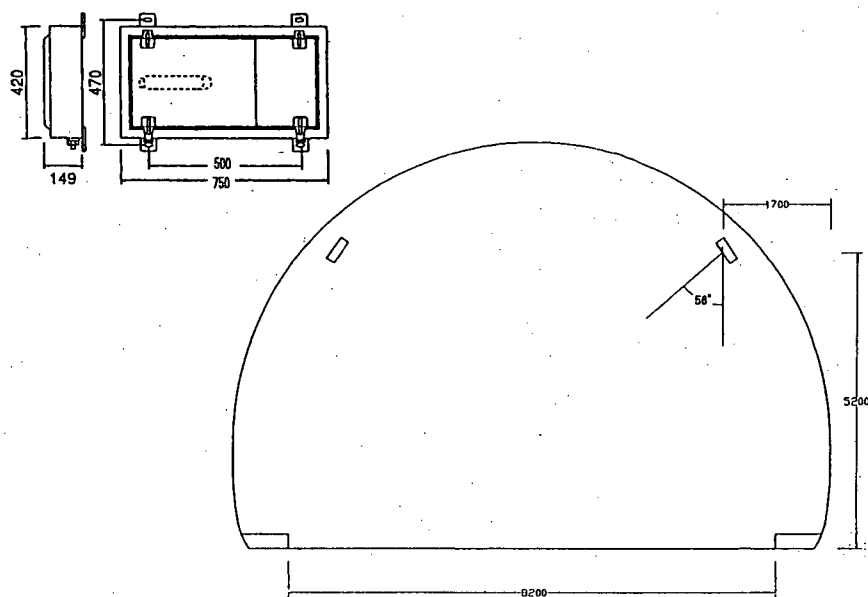


図-4.3 後背地形の鳥瞰図

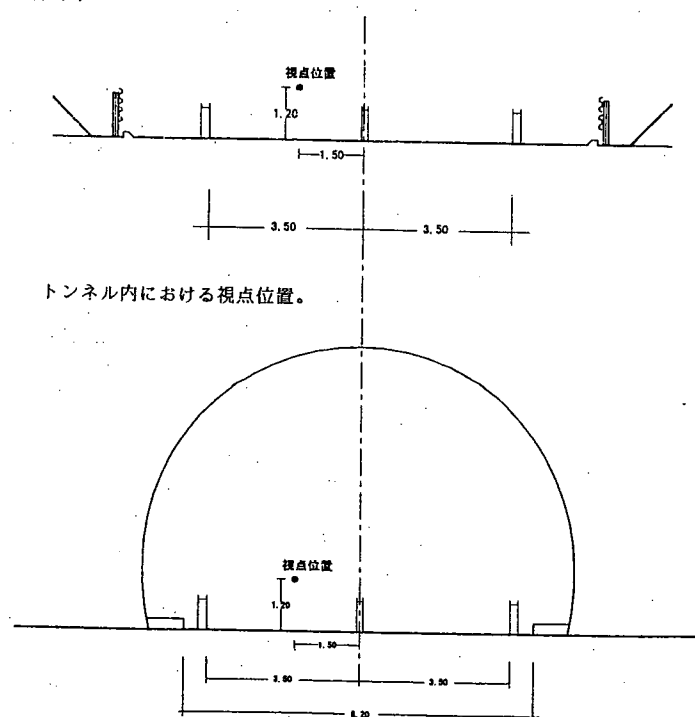


単位：mm

図－4.4 トンネル照明器具および設置位置

明かり部における視点位置。

単位 (m)



単位：mm

図－4.5 運転者の視点位置

4.1.4 動画像の作成

(1) 動画像作成方法

動画像データ作成とは、コンピュータにより生成した3次元形状の物体、照明光源などを設定した3次元空間内を仮想カメラ（眺望視点）により覗き、「動きながらみえる」であろう動的シーンを2次元スクリーン面に投影した映像（アニメーション映像）のかたちでコンピュータ内においてデータ化することである。CG動画像データでは、物体の形状、物体表面の質感、光源特性、仮想カメラの位置・方向ならびに画角などを数値化あるいは数式化アルゴリズム（アプリケーション プログラム）により入力した画像生成情報の計算・処理・生成をおこなう。動画像データ（CGアニメーション）作成は、モデリング・レンダリング、アニメーション計算の3つの工程があり、また、生成したCGアニメーションをコンピュータのCRT以外で再生して見るためにはビデオテープ等に媒体化をおこなう必要がある。

動画像作成方法は、図-4.6に示すようにモデリング、レンダリング、アニメーション計算の3つの工程にしたがって実施した。図中のレンダリング処理には空間、物体のフォトリリスティックな表現のための、光り（照明）の視対象表現での作用（輝度・反射等）を、ほぼ正確に再現するため光線追跡法（レイ＝トラッキング）と相互反射計算法（ラジオシティ）の二つのアルゴリズムを併用することが出来るソフトウェアを使用することが好ましいと考えられている。なお、用語解説を参考資料に示した。

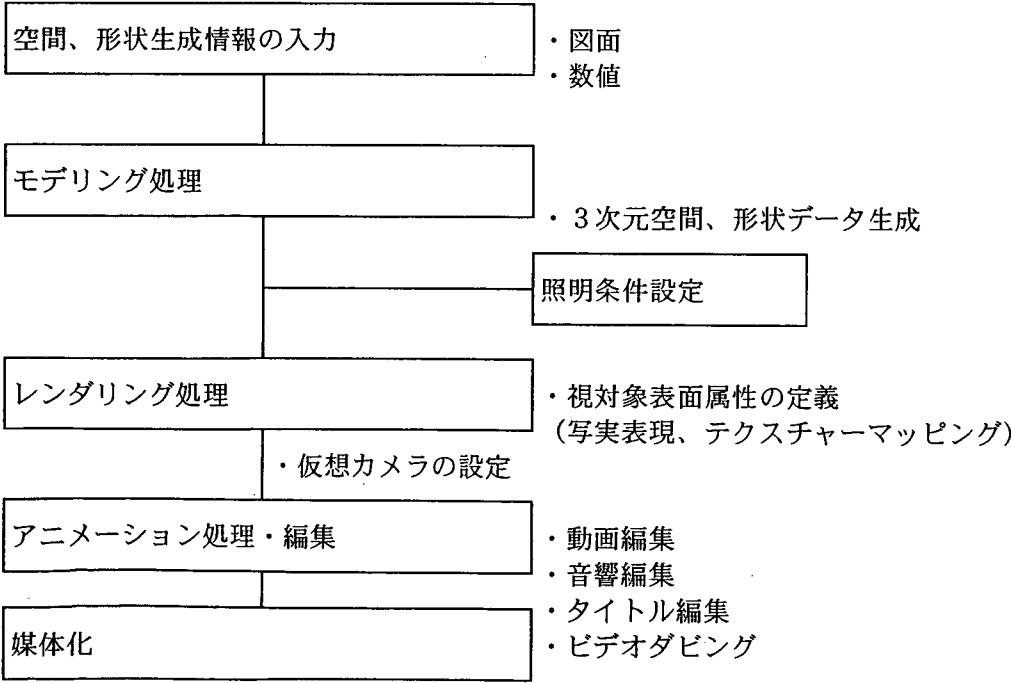


図-4.6 動画像作成の概略フロー

(2) 動画像データ作成.

動画像データ作成工程を図-4.7に示す。

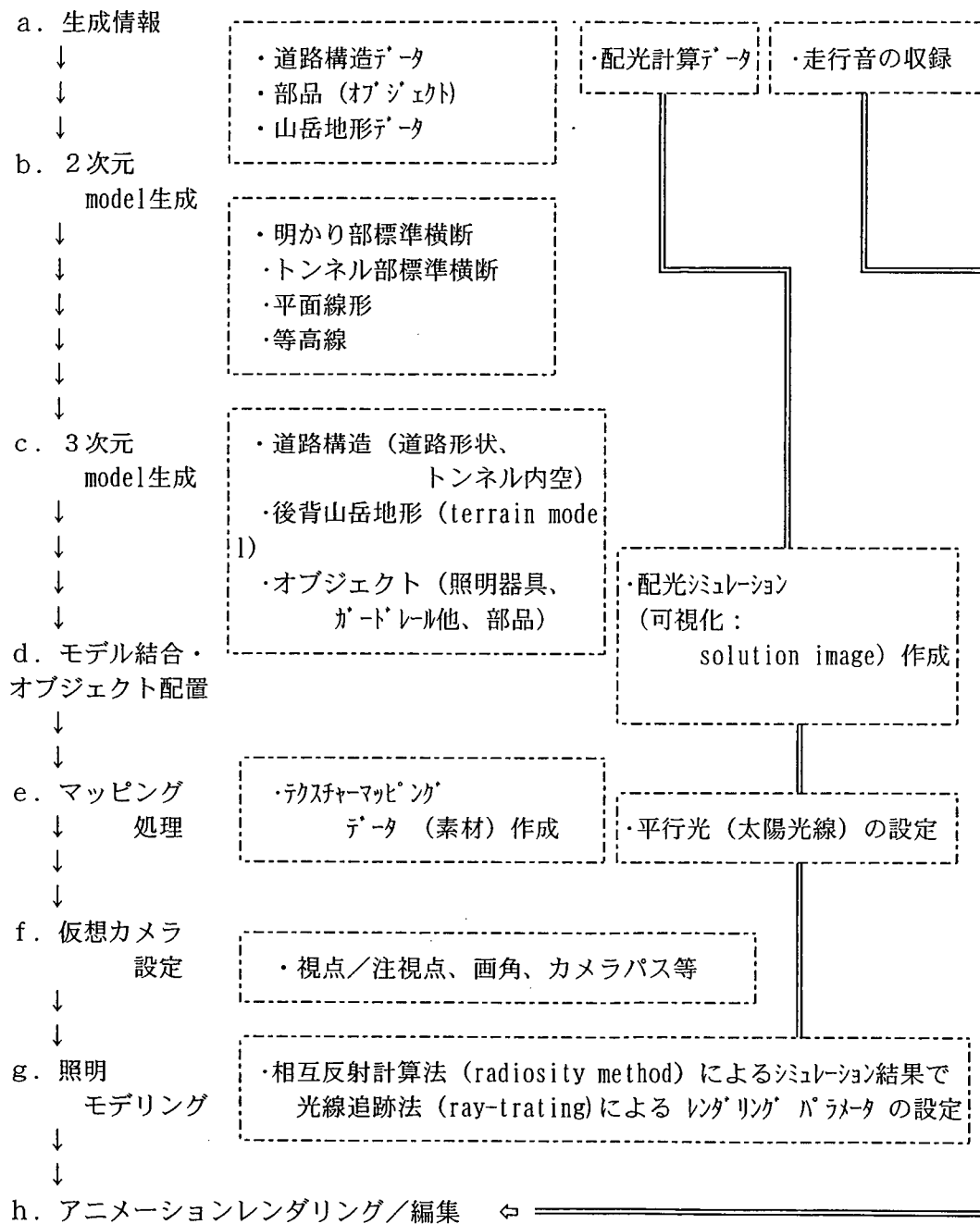


図-4.7 動画像作成の手順

(3) 動画像データ作成機器およびOS、アプリケーションプログラム等、仕様緒元.

①動画像データ作成およびOS.

a. パソコン本体 : 4台×Apple Macintosh G3 M6665J/A

400MHz G3 プロセッサ

512MHz SDRAM , 9.0GB 2 wide SCSI HDD ×2 内蔵

ATI RAGE 256 グラフィックカード

使用OS : Ver 8.5 J mac os

b. パソコン本体 : 2台×Fujitsu FMV-DESKPOWER T VIII 457

450MHz Pentium II プロセッサ

256MHz SDRAM , 8.4GB Ultra 2 wide SCSI HDD×2内蔵

使用OS : Microsoft windows NT Workstation ver, 3.51

②モデリングおよびレンダリング用アプリケーションプログラム.

a. 3次元ソリッドモデラー : form Z ver 2.9.5 J

autdesys, Inc. USA

b. 3次元レンダリング・アニメーションソフト : ElectricImage™ ver 2.8

ElectricImage, Inc. USA

③アニメーション編集用アプリケーションプログラム.

a. デジタルビデオ編集ソフト : Media 100™

Media 100, Inc. USA

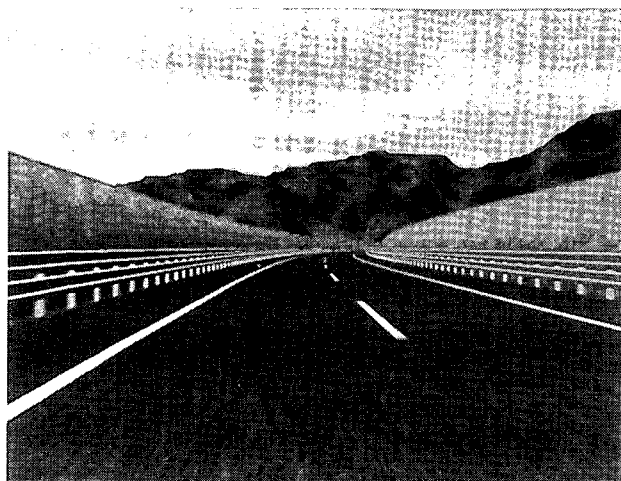
④配光シミュレーション用アプリケーションプログラム.

a. ラジオシティレンダラー : Lightscape™ visualization System

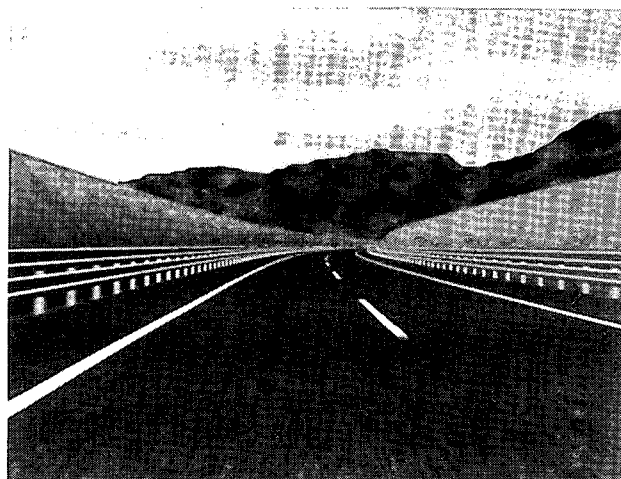
Lightscape Technologies, Inc. USA

(4) 作成した動画像

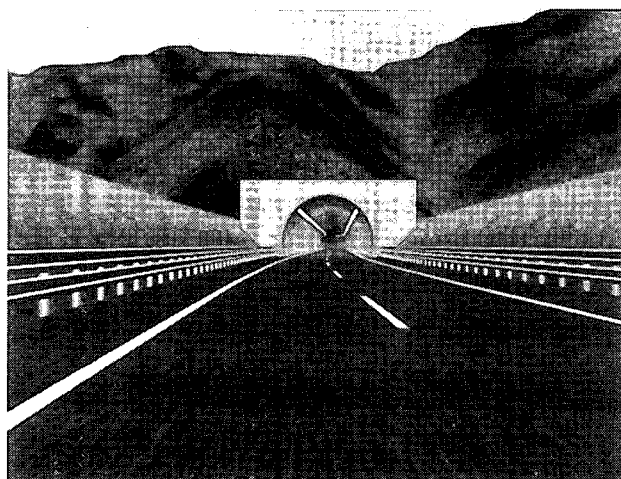
前記の過程で作成した動画像の一部分を静止画像で示したものを写真－4.1～写真－4.6に示す。



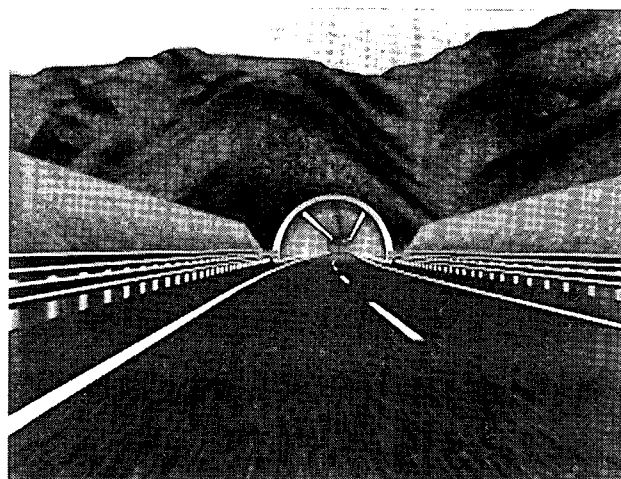
スタート地点



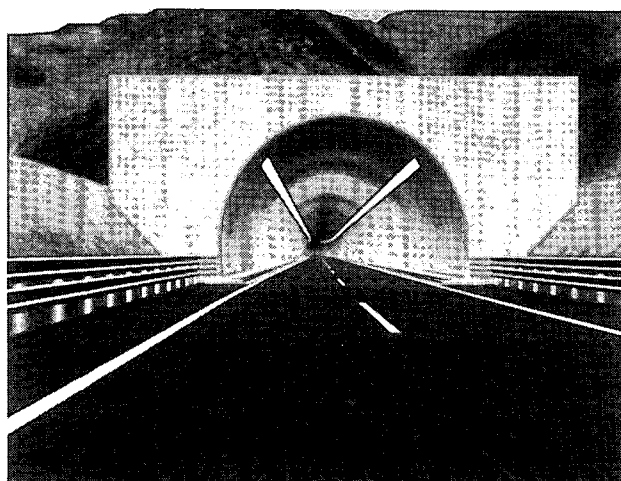
スタート地点



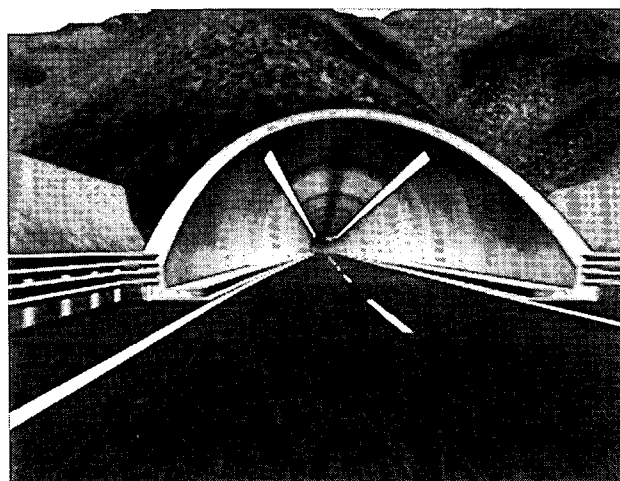
坑口手前120m



坑口手前120m



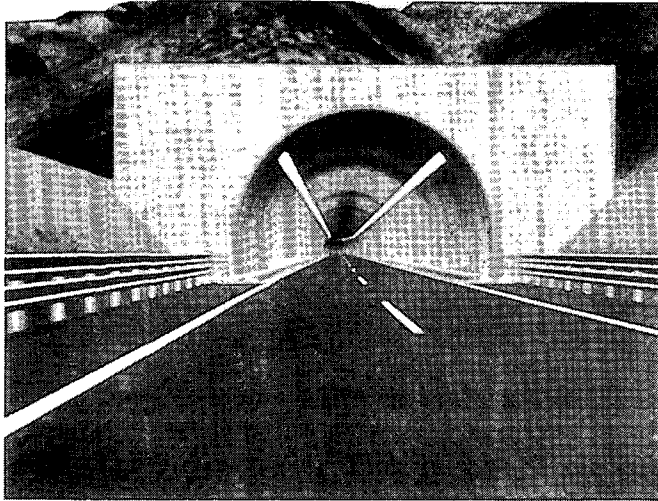
坑口手前60m



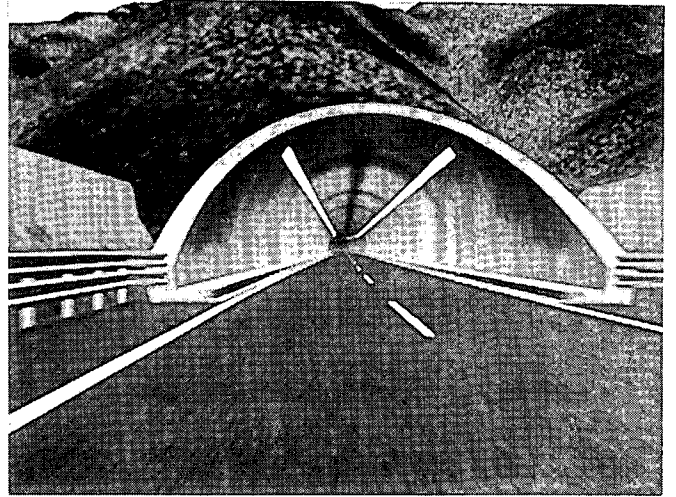
坑口手前60m

写真－4.1 面壁型の坑口形状

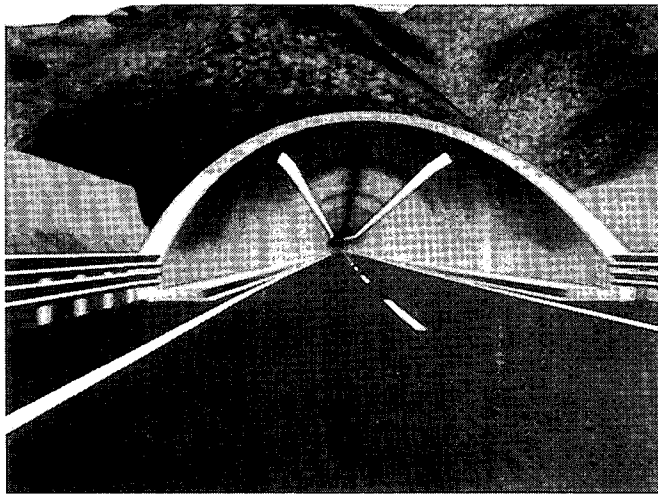
写真－4.2 竹割り型の坑口形状（竹割り0Dの場合）



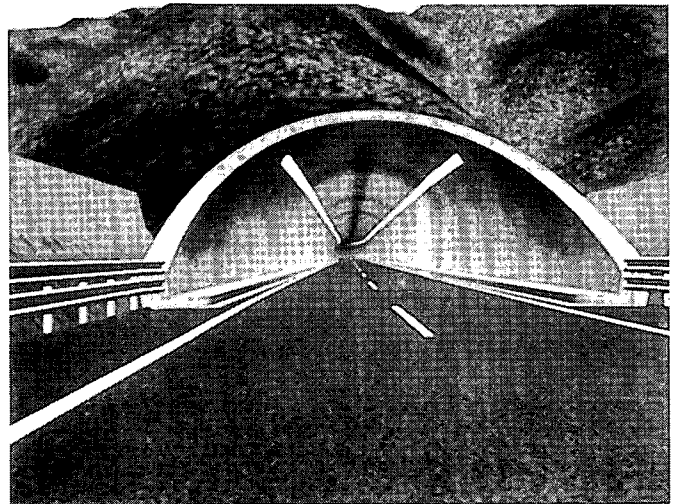
(a) 面壁型の坑口形状



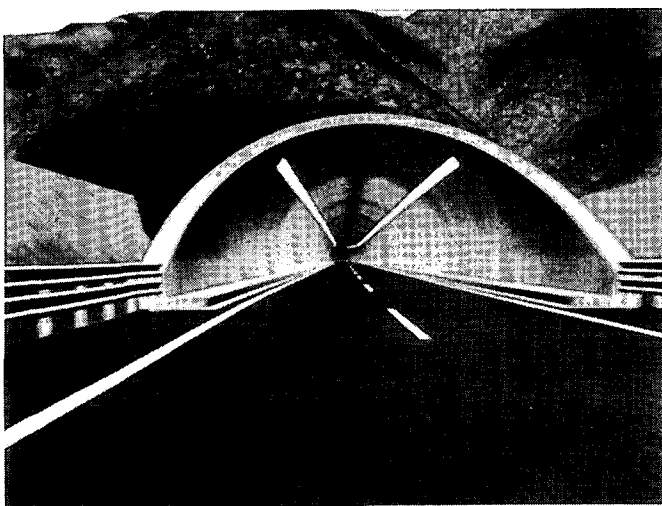
(b) 竹割り型の坑口形状 (竹割り0D)



(c) 竹割り型の坑口形状 (竹割り2D)

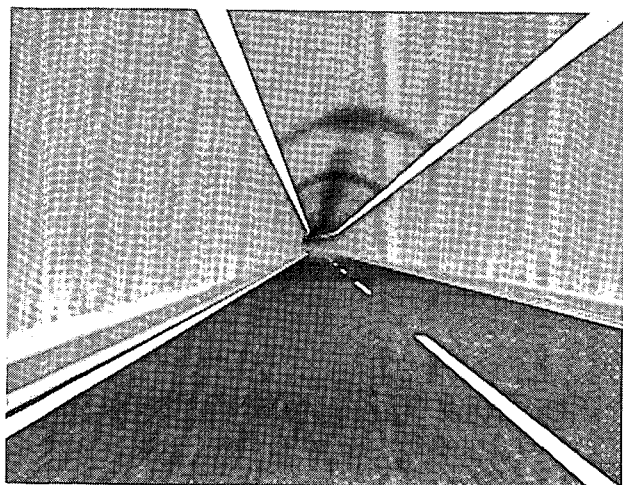


(d) 竹割り型の坑口形状 (竹割り4D)

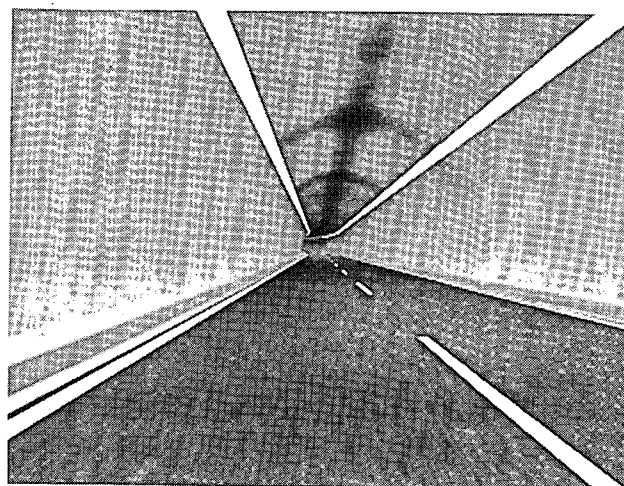


(e) 竹割り型の坑口形状 (竹割り8D)

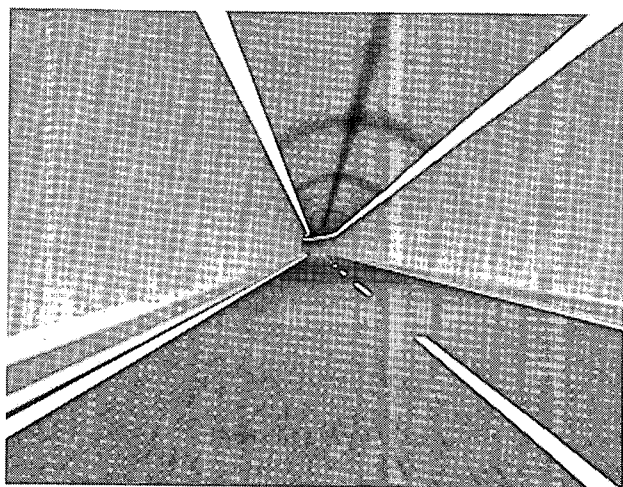
図-4.3 坑口形状の違い



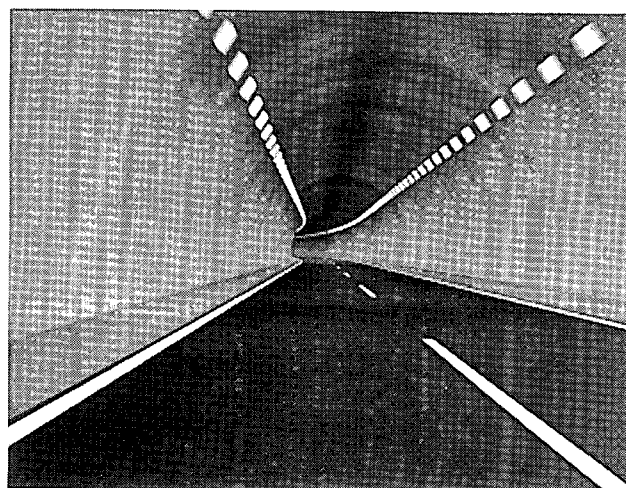
境界部・緩和部



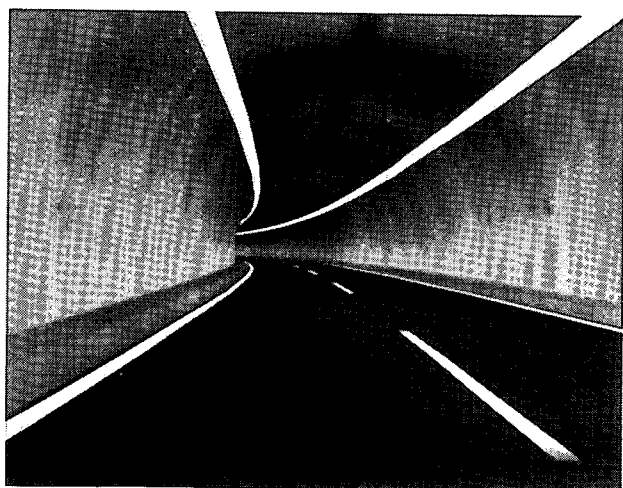
境界部・緩和部



移行部

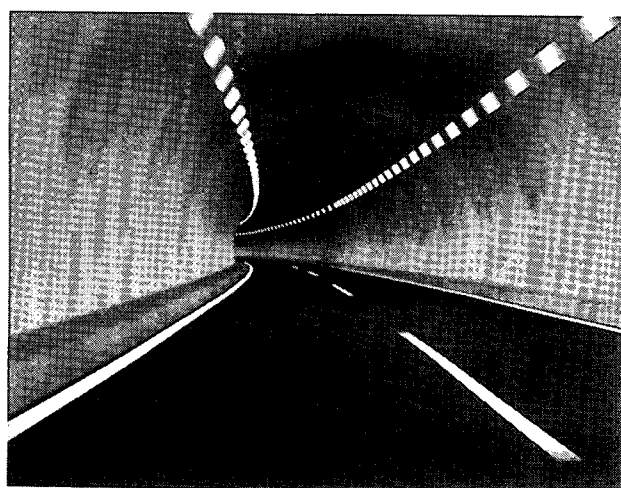


移行部



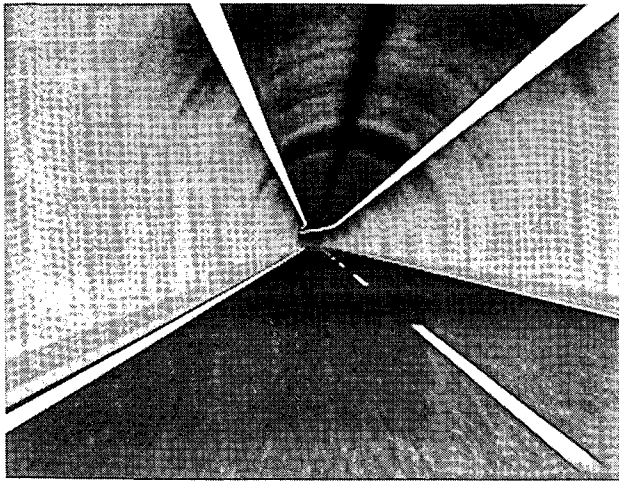
基本部

写真-4.4 照明器具間隔 (0 m)

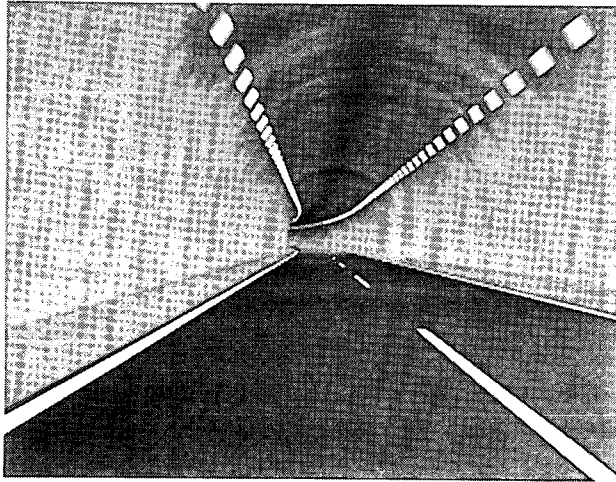


基本部

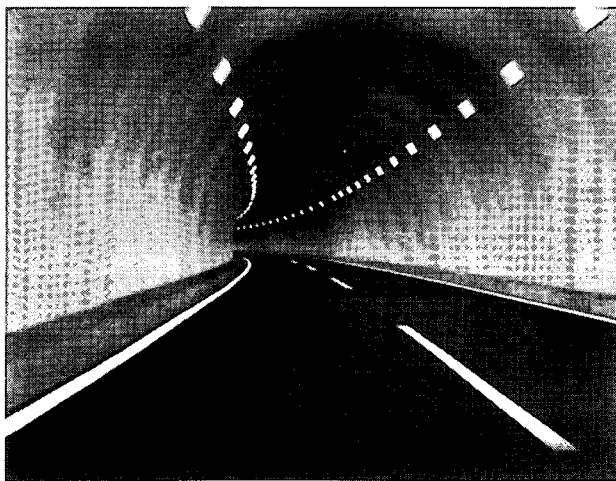
写真-4.5 照明器具間隔 (5 m)



境界部・緩和部



移行部



基本部

写真-4.6 照明器具間隔(10m)

4.1.5 アンケート調査

(1) アンケート調査方法

アンケート調査は、建設省土木研究所内の実大トンネル実験施設内で被験者22名（男性17名、女性5名）に対し実施した。被験者の属性を表-4.2に示す。アンケートは、被験者が動画像を見る際には、実運転状況にできるだけ近い状況を再現するために、実大トンネル内を暗くした状態で、運転席に着座してステアリングを握った状態で実施した。実際は、2台の車両を実大トンネル内に設置し、2名の被験者にそれぞれの車両の運転席に座り、眼鏡型映像表示装置を装着してもらい、同時に同じ映像を見てもらい、検討条件で示した坑口形状の異なる画像、トンネル内の照明条件が異なる画像をそれぞれ見せた後に、調査票に記入回答してもらった。各被験者には、動画像に慣れるためのプレビュー用映像として調査用の映像を短縮して編集した20～40秒の映像を事前に見てもらった後で、調査用の映像を見てもらう方法とした。アンケート調査項目を図-4.8(1)～(2)に示す。なお、被験者には全て表-4.3に示す順番で映像を見てもらった。実験時の写真を写真-4.7～写真-4.9に示す。

表-4.2 被験者の属性一覧表

被験者番号	年齢(才)	性別	運転歴(年)	矯正視力	
1	23	男	3	1.0	1.0
2	42	男	24	0.7	1.2
3	27	男	8	1.0	1.0
4	42	男	23	0.8	0.8
5	36	男	17	0.7	0.7
6	36	男	17	1.0	1.0
7	41	男	23	1.2	1.2
8	29	男	10	0.0	0.0
9	46	男	28	0.7	0.7
10	30	男	12	0.9	0.9
11	44	男	25	1.0	1.0
12	30	男	10	0.9	0.9
13	21	女	1	0.7	0.7
14	25	女	2	1.0	1.0
15	22	女	2	1.5	1.5
16	25	女	1	0.3	1.0
17	24	男	5	0.8	0.8
18	25	女	7	1.2	1.2
19	25	男	3	1.0	1.0
20	27	男	3	1.2	1.2
21	40	男	15	1.5	1.5
22	28	男	9	1.5	1.5

トンネル坑口部での走行性の評価 本編 (R-1)

(1) トンネルへの進入直前の印象についてお尋ねします。

①. トンネルへの進入直前、主にどこを見ていましたか。

Q 1-1. (ケ-スAの映像) をご覧になった印象をお聞かせください。

1. トンネル入口 (外観)
2. 前方路面
3. 照明器具
4. 右側レーンマーク
5. 左側レーンマーク
6. トンネル内右側壁面
7. トンネル内左側壁面
8. トンネル坑口周辺 (全体をまんべんなく)
9. その他

見ていた箇所の
番号を記入して下さい。→

a. 最もよく 見ていた	b. よく 見ていた	c. 時々 見ていた
-----------------	---------------	---------------

その他、と答えた方
具体的にお聞かせ下さい。→

②. トンネルへの進入直前、緊張感がありましたか。

Q 2-1. (ケ-スAの映像) をご覧になった印象をお聞かせください。

※該当項目に○印をつけて下さい。

- | | | | | |
|--------------|-------------|------------------|----------------|-----------------|
| a. 非常に
ある | b. 少し
ある | c. どちらとも
言えない | d. あまり
感じない | e. まったく
感じない |
|--------------|-------------|------------------|----------------|-----------------|

非常にある、少しある、と答えた方
緊張感を与えたものは何だと思えますか、具体的にお聞かせ下さい。

(2) トンネルへの進入直後の印象についてお尋ねします。

①. トンネルへの進入直後、主にどこを見ていましたか。

Q 1-1. (ケ-スAの映像) をご覧になった印象をお聞かせください。

1. 前方線形 (カーブ)
2. 前方路面
3. 右側壁面
4. 左側壁面
5. 天井
6. 照明器具
7. 右側レーンマーク
8. 左側レーンマーク
9. その他

見ていた箇所の
番号を記入して下さい。→

a. 最もよく 見ていた	b. よく 見ていた	c. 時々 見ていた
-----------------	---------------	---------------

その他と答えた方、
具体的にお聞かせ下さい。

②. トンネルへの進入直後、圧迫感を感じますか。

Q 2-1. (ケ-スAの映像) をご覧になった印象をお聞かせください。

※該当項目に○印をつけて下さい。

- | | | | | |
|---------------|--------------|------------------|----------------|-----------------|
| a. 非常に
感じた | b. 少し
感じた | c. どちらとも
言えない | d. あまり
感じない | e. まったく
感じない |
|---------------|--------------|------------------|----------------|-----------------|

非常に感じた、少し感じた、と答えた方
圧迫感を感じられるのはどちらの方向からでしたか。

1. 左側より
2. 右側より
3. 上部より
4. 下方より
5. 前方より
6. その他

圧迫感を感じた箇所の
番号を記入して下さい。→

a. 非常に 感じた	b. 少し 感じた
---------------	--------------

その他と答えた方、
具体的にお聞かせ下さい。

③. トンネルへの進入直後、左側壁との距離感についてお聞かせ下さい。

※該当項目に○印をつけて下さい。

Q 3-1. (ケ-スAの映像) をご覧になった印象をお聞かせください。

- | | | | | |
|--------------|-------------|------------------|-------------|--------------|
| a. 非常に
遠い | b. やや
遠い | c. どちらとも
言えない | d. やや
近い | e. 非常に
近い |
|--------------|-------------|------------------|-------------|--------------|

④. トンネルへの進入直後、右側壁との距離感についてお聞かせ下さい。

※該当項目に○印をつけて下さい。

Q 4-1. (ケ-スAの映像) をご覧になった印象をお聞かせください。

- | | | | | |
|--------------|-------------|------------------|-------------|--------------|
| a. 非常に
遠い | b. やや
遠い | c. どちらとも
言えない | d. やや
近い | e. 非常に
近い |
|--------------|-------------|------------------|-------------|--------------|

トンネル坑口部での走行性の評価 プレビュー編 (R-1)

(3) トンネルへの進入時の印象についてお聞かせ下さい。

①. トンネルへの進入が、スムーズと思われたか、あるいはなんらかの抵抗感があったと思われたかお聞かせ下さい。
各、映像ごとに該当項目に○印をつけて下さい。

Q 1-1. (ケ-スAの映像) をご覧になった印象をお聞かせください。

- | | | | |
|------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|
| a. 非常に
スムーズ
と感じた | b. まあ
スムーズ
と感じた | c. あまり
スムーズ
と感じない | d. なんらか
の抵抗感
があった |
|------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|

②. トンネルへの進入が、スムーズと思われた〈映像〉の順位をつけて下さい。

- 順位
- | | |
|------------|------------|
| () 〈Aの映像〉 | () 〈Bの映像〉 |
| () 〈Cの映像〉 | () 〈Dの映像〉 |
| () 〈Eの映像〉 | () 〈Eの映像〉 |

③. (ケ-スA～Eの映像) をご覧になって何か気が付かれたことがありましたらお聞かせ下さい。

気が付かれたこと:

図-4.8 (1) アンケート調査内容 (坑口形状に関する内容)

トンネル内の走行性の評価 本編（R-2）

〔1〕トンネルを走 行 中 の印象についてお尋ねします。

①. トンネル内（基本照明区間）を走 行 中 、どの箇所を見ていましたか。

Q 1-1. 〈ケースAの映像〉をご覧になった印象をお聞かせください。

- | | |
|--------------|--------------|
| 1. 前方線形（カーブ） | 5. 右側レーンマーク |
| 2. 前方路面 | 6. 左側レーンマーク |
| 3. 照明器具 | 7. トンネル内右側壁面 |
| 4. 天井 | 8. トンネル内左側壁面 |
| | 9. その他の箇所 |

a. 最もよく 見ていた b. よく 見ていた c. 時々 見ていた

見ていた箇所の
番号を記入して下さい。→

その他の箇所、と答えた方
具体的にお聞かせ下さい。→

②. トンネル内（基本照明区間）を走 行 中 、圧迫感を感じましたか。

Q 2-1. 〈ケースAの映像〉をご覧になった印象をお聞かせください。

※該当項目に○印をつけて下さい。

- | | | | | |
|------------|-----------|---------------|-------------|--------------|
| a. 非常に 感じた | b. 少し 感じた | c. どちらとも 言えない | d. あまり 感じない | e. まったく 感じない |
|------------|-----------|---------------|-------------|--------------|

非常に感じた、少し感じた、と答えた方
圧迫感を感じられるのはどちらの方向からでしたか。

- | | | |
|---------|---------|---------|
| 1. 左側より | 3. 上部より | 5. 前方より |
| 2. 右側より | 4. 下方より | 6. その他 |

a. 非常に 感じた b. 少し 感じた

圧迫感を感じた箇所の
番号を記入して下さい。→

その他と答えた方、
具体的にお聞かせ下さい。

③. トンネル内を走行している時、照明のチラツキを感じましたか。

Q 3-1. 〈ケースAの映像〉をご覧になった印象をお聞かせください。

※該当項目に○印をつけて下さい。

- | | | | | |
|------------|-----------|---------------|-------------|--------------|
| a. 非常に 感じた | b. 少し 感じた | c. どちらとも 言えない | d. あまり 感じない | e. まったく 感じない |
|------------|-----------|---------------|-------------|--------------|

トンネル内の走行性の評価 プレビュー編（R-2）

〔2〕トンネルを走 行 中 の印象についてお尋ねします。

①トンネル内での走行が、スムーズと思われるケース〈映像〉に順位を付けて下さい。

順位
() 〈ケースAの映像〉
() 〈ケースFの映像〉
() 〈ケースGの映像〉

②トンネル内を走行時に印象の良かった照明器具配列のケース〈映像〉に順位を付けて下さい。

順位
() 〈ケースAの映像〉
() 〈ケースFの映像〉
() 〈ケースGの映像〉

③トンネル内を走行している時、照明器具による視線誘導効果を感じましたか。

Q 3-1. 〈ケースAの映像〉をご覧になった印象をお聞かせください。

※該当項目に○印をつけて下さい。

- | | | | | |
|------------|-----------|---------------|-------------|--------------|
| a. 非常に 感じた | b. 少し 感じた | c. どちらとも 言えない | d. あまり 感じない | e. まったく 感じない |
|------------|-----------|---------------|-------------|--------------|

④トンネル内を走行している時に関してのご意見をお聞かせ下さい。

図－4.8（2） アンケート調査内容(照明方式に関する内容)

表－4.3 映像の順序

(a) 坑口形状の検討

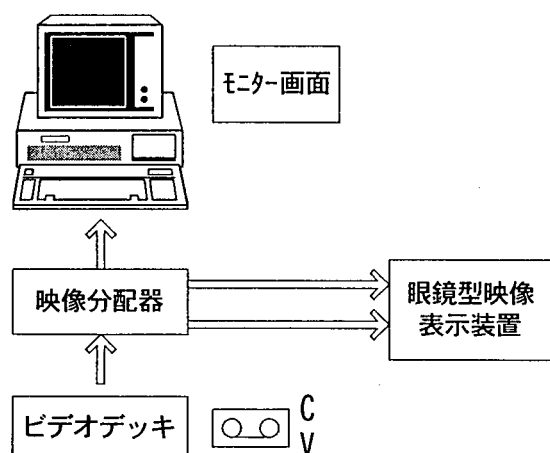
映像の順序	坑口形状
1	面壁型
2	竹割り4D
3	竹割り0D
4	竹割り2D
5	竹割り8D

(b) 照明器具間隔の検討

映像の順序	坑口形状
1	照明器具間隔10m
2	照明器具間隔0m
3	照明器具間隔5m

(2) アンケート調査に使用した機器構成

アンケート実施時の機器構成は、図－4.9に示すとおりであり、眼鏡型映像表示装置の仕様は下記に示すとおりである。



眼鏡型映像表示装置の主な仕様

- ・映像信号：NTSC日米標準方式
- ・映像素子：デルタ配列のTFT液晶パネル×2
- ・画素数：18万画素
- ・画角：水平35度、垂直26.6度
- ・ディスプレイユニット：170×50×30mm

図－4.9 アンケート実施時の映像再生機器構成



写真-4.7 眼鏡型映像表示装置



写真-4.8 実大トンネル実験施設内および実験車両

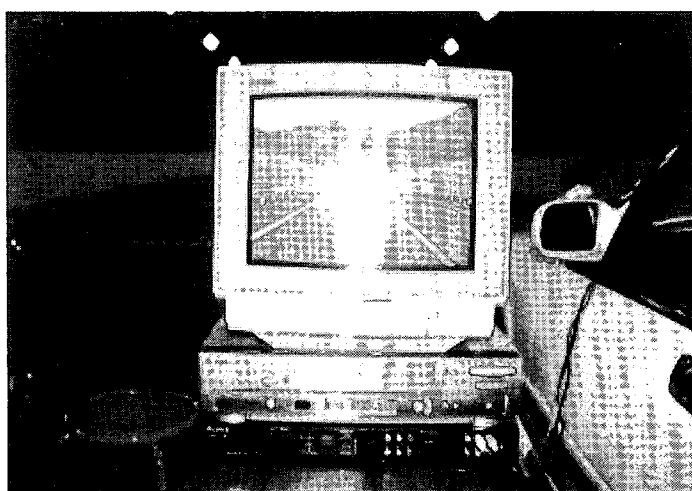


写真-4.9 モニター画像

4.2 アンケート結果

4.2.1 坑口形状によるトンネル進入時の走行性

(1) トンネル進入直前・直後の視線

図－4.10、図－4.11にトンネル進入直前および直後の視点位置のアンケート結果を示す。これは、各条件毎および全ケースを対象に平均した結果を示す。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。

図－4.10のトンネル進入直前の視点位置は、各条件ともに大きな差はみられない。平均値で見ると、トンネル坑口周辺、トンネル入口、前方路面、左側側壁の順に点数が高く、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、第2章で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傾向が一致していることが分かった。

また、図－4.11のトンネル進入直後の視点位置も、トンネル進入直前の結果と同様に各条件下の大きな差はみられない。平均値で見ると、トンネル内に進入した直後は、左側側壁、前方線形（カーブ）、センターラインの順に点数が高く、運転者はこれらの箇所が気になっているものと考えられる。

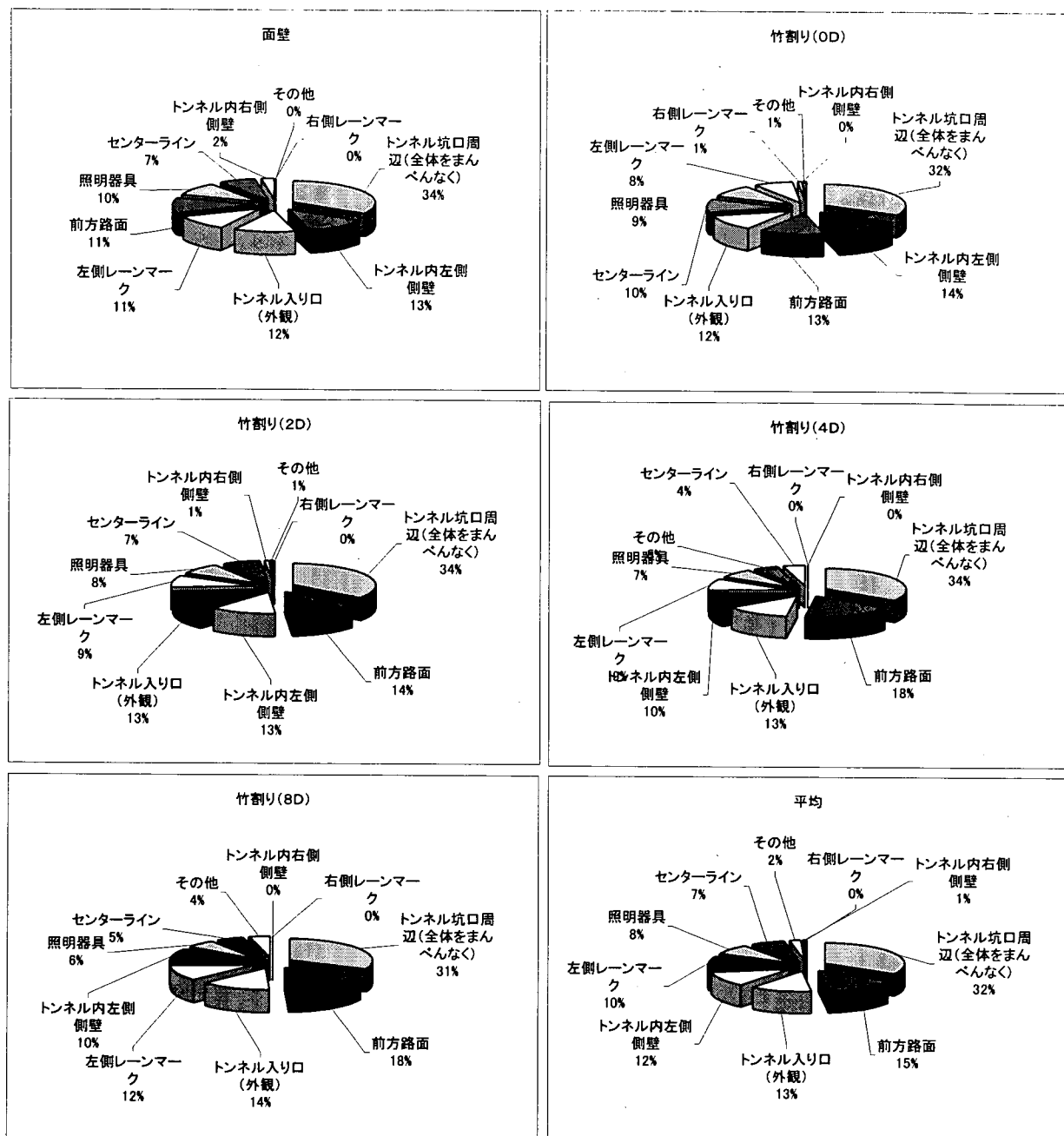


図-4.10 トンネル進入直前の視線位置

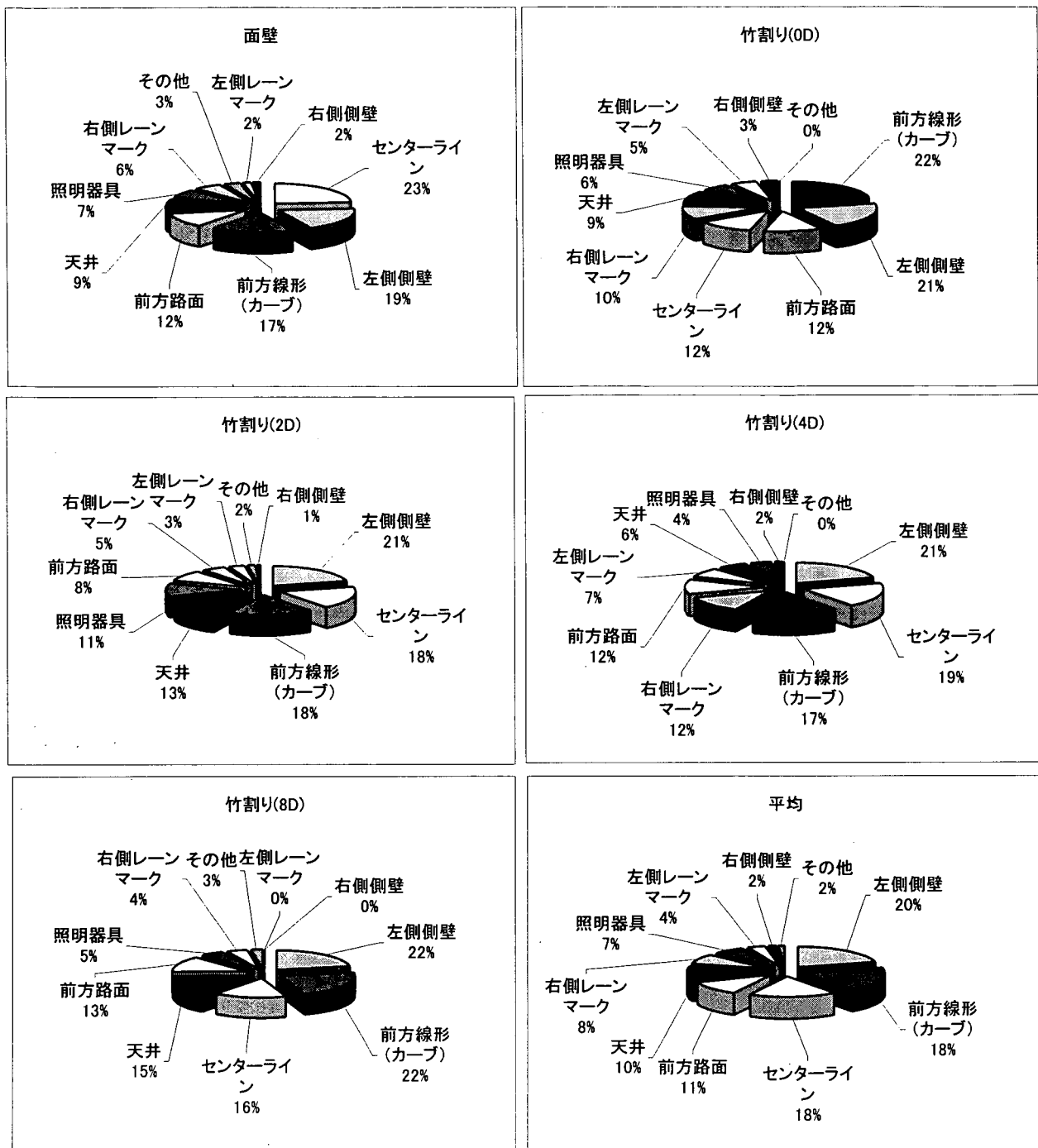


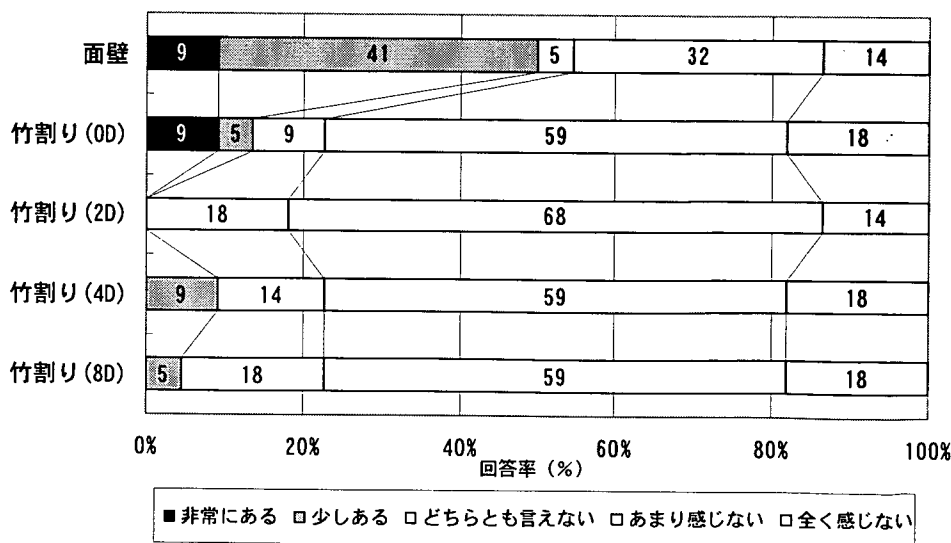
図-4.11 トンネル進入直後の視線位置

(2) トンネル進入直前・直後の緊張感・圧迫感

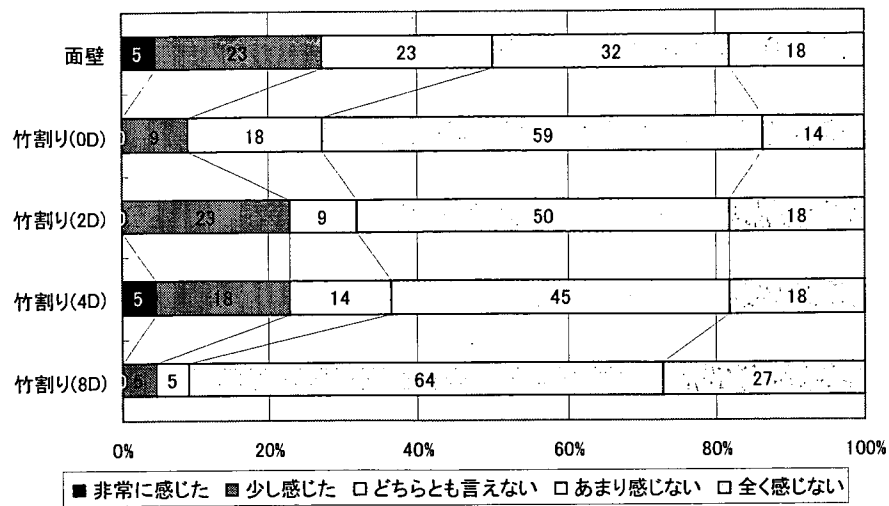
図－4.12にトンネル進入直前の緊張感のアンケート結果を示す。これより、坑口形状が面壁の場合は、被験者の半数が緊張感が「ある」と回答したのに対し、竹割りの場合には約8割が「ない」と回答しており、竹割りの坑口形状が緊張感が少ないことが明らかとなった。また、竹割り（0D）と坑口の横幅が若干広い竹割り（2D、4D、8D）では竹割り（0D）が若干「ある」と回答した被験者が多いものの、顕著な差は認められなかった。これは、トンネル進入直前にトンネル坑口幅の差およびすりつけ長の違いを明確に認識できなかったものと考えられる。

図－4.13および図－4.14にトンネル進入時の圧迫感、および圧迫感を受けたと感じた被験者に対する圧迫感を受けた方向についてのアンケート結果を示す。図－4.13より、面壁、竹割り（4D）が圧迫感が若干高くなっているものの、顕著な差は見られなかった。また、図－4.14より圧迫感を受けた方向は、全ての条件で左側もしくは右側から圧迫を受けるとの回答率が高く、この2方向の合計はそれぞれ60%以上の回答となっている。傾向的には、面壁型および竹割り0Dの場合で左右両側から圧迫を受けるのに対して、竹割り2Dから竹割り8Dになるにしたがって、その方向は左側のみから圧迫を受ける回答率が高くなる。

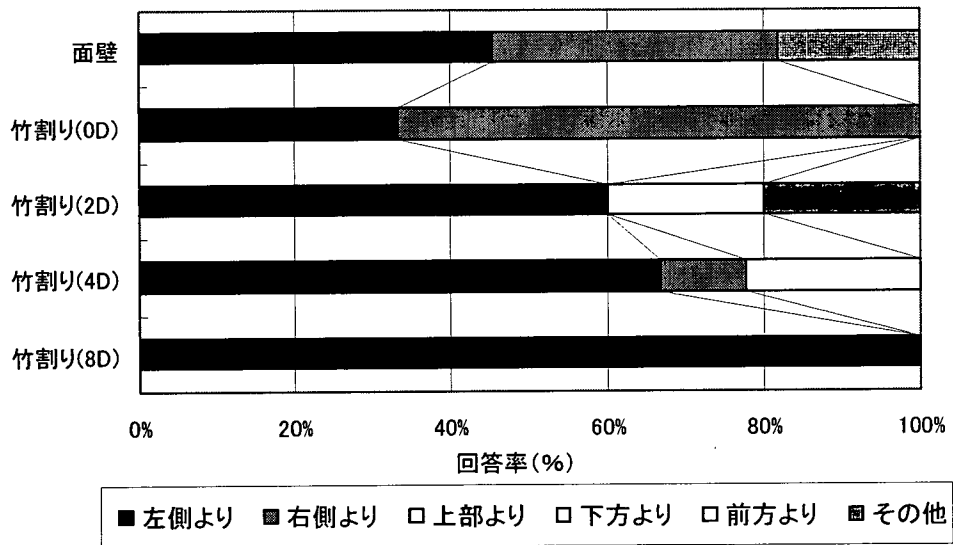
また、トンネル進入直後の右側側壁・左側側壁との距離については、図－4.15、図－4.16に示すように「どちらとも言えない」に回答した割合が非常に多いものの、右側側壁との距離については「やや近い」と「やや遠い」と回答した割合で見ると若干遠く感じられる傾向が認められる。左側側壁との距離については、竹割り（4D）が他の竹割りの結果と若干異なるが、傾向としては竹割りの付け長が長いほどやや遠く感じてくる結果となった。



図－4.12 トンネル進入直前の緊張感



図－4.13 トンネル進入直後の圧迫感



図－4.14 トンネル進入直後の圧迫感を受けた方向

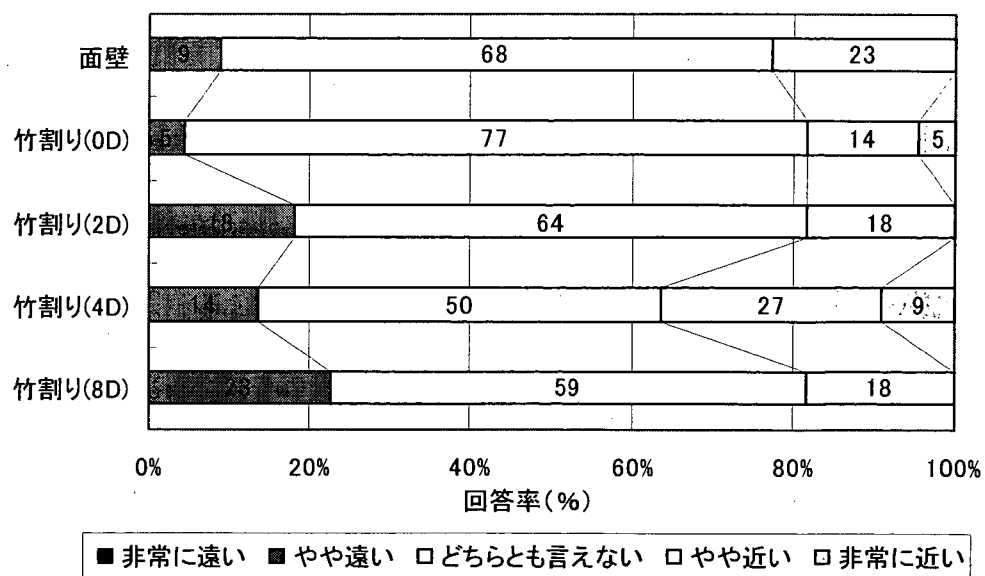


図-4.15 トンネル進入直後の左側側壁との距離

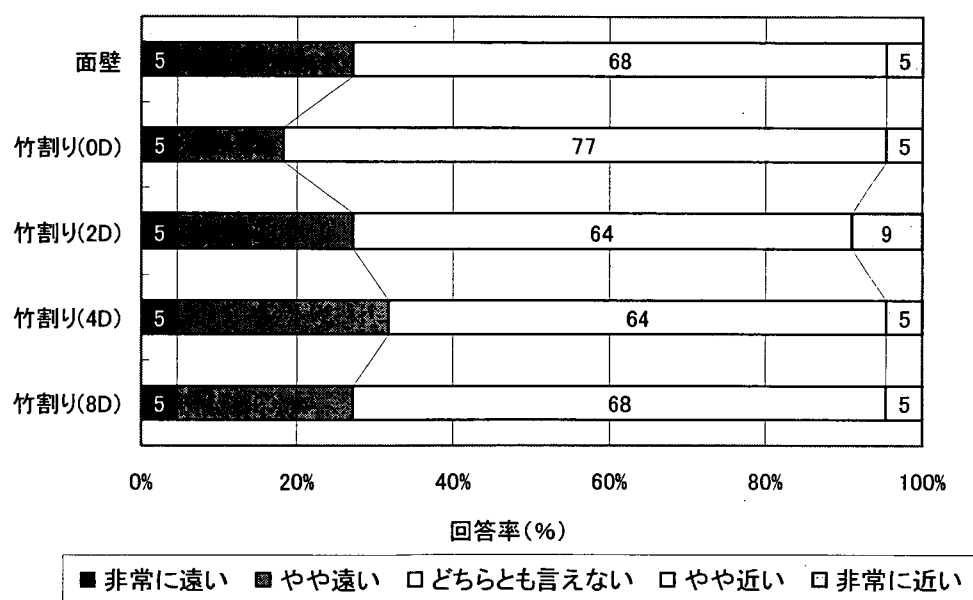


図-4.16 トンネル進入直後の右側側壁との距離

(3) トンネル進入時の走行性

図-4.17にトンネル進入時の走行性のアンケート結果を示す。このアンケート内容は、トンネル進入直前・直後の緊張感・圧迫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「抵抗あり」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)はトンネル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。また、図-4.18に各条件毎にトンネル進入時のスムーズ感としてどの坑口条件が走りやすかったかについて順位をアンケートした結果を示す。この図からも面壁型の坑口の順位が低く、竹割り型で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つけ長が長くなるほどスムーズで走りやすい結果となった。

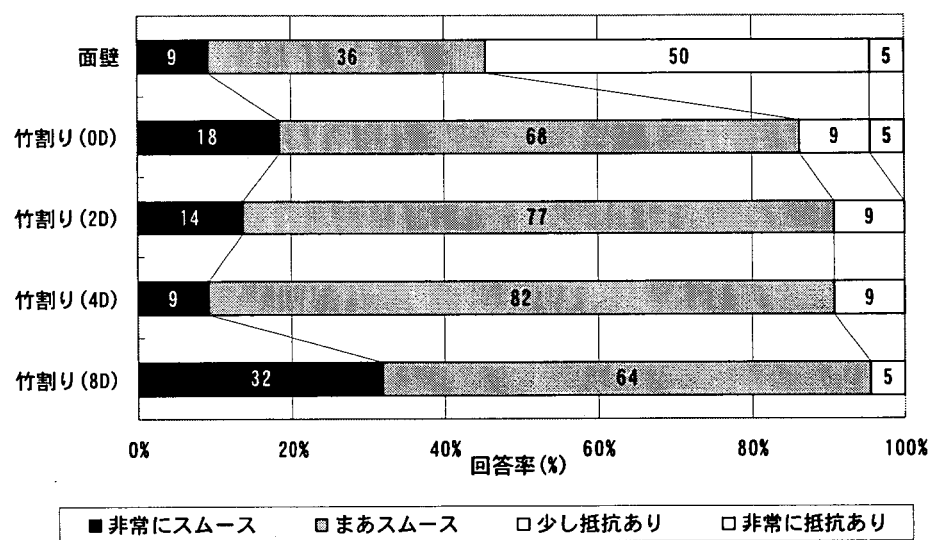


図-4.17 トンネル進入時の走行性

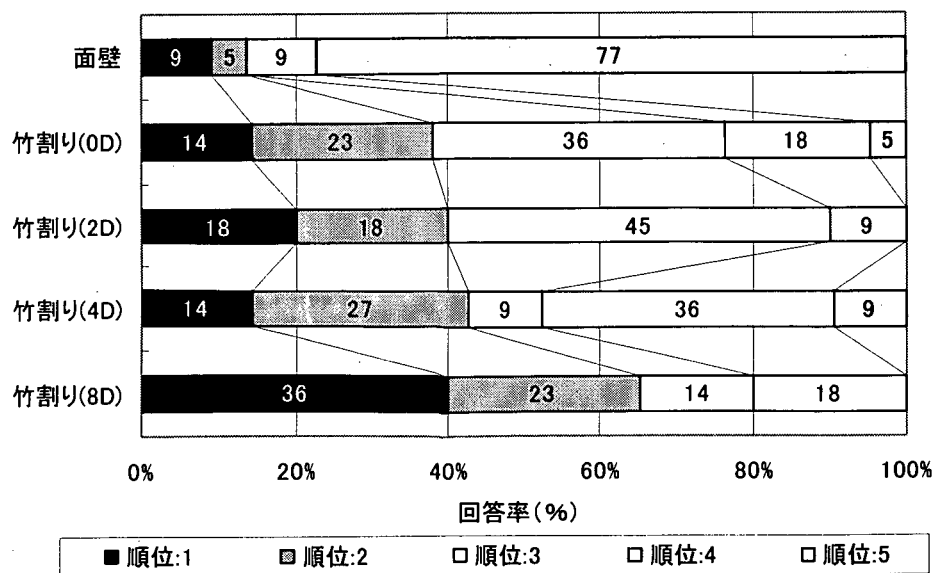


図-4.18 トンネル進入時のスムーズ感

4.2.2 トンネル内の照明器具配列による走行性

(1) トンネル内での視線位置

図-4.19に、トンネル内における被験者の視線位置に関するアンケート結果を示す。これは、各条件毎および全ケースを対象に平均した結果を示す。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。視線位置の割合は、いずれの照明器具間隔においても照明器具、前方路面、前方線形を多く見ていることが明らかとなった。なお、照明器具間隔の違いによる視線挙動は認められない。照明器具を運転者は多く見ていることより、照明器具はトンネル内の走行性に何らかの影響を与えるものと考えられる。

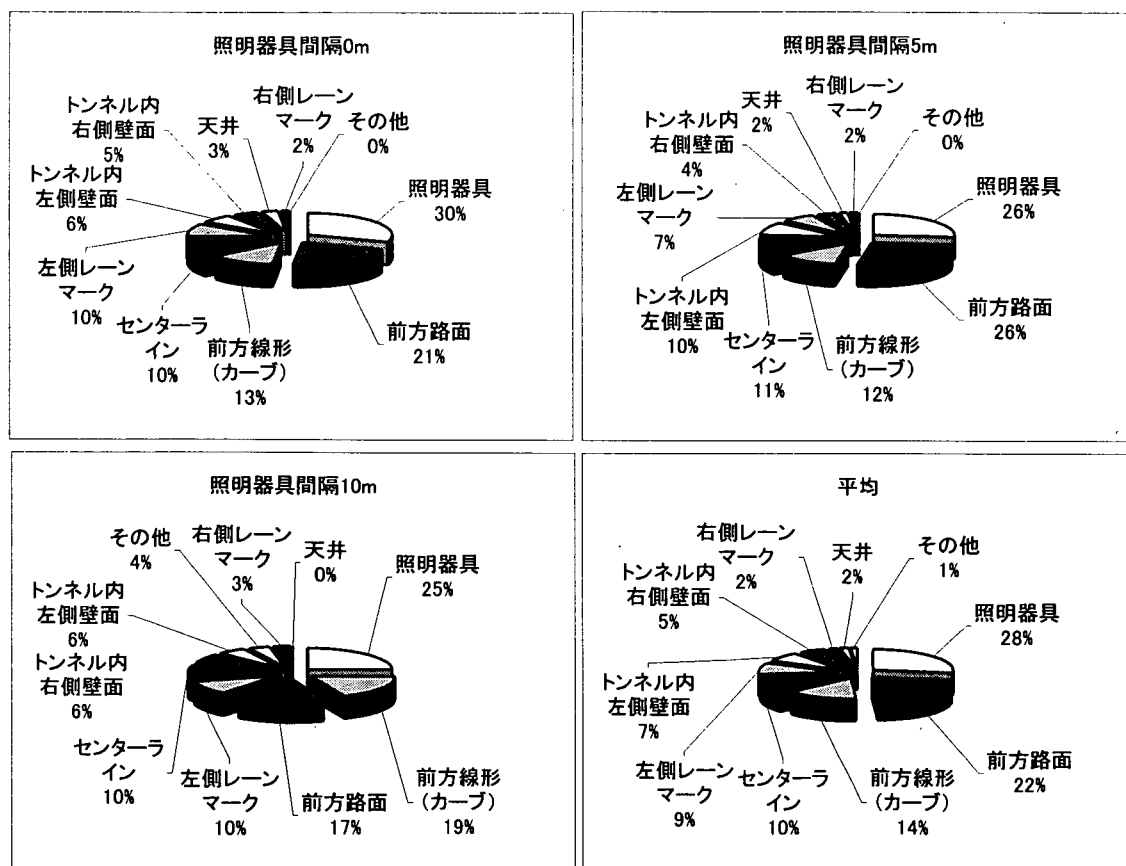


図-4.19 トンネル内における被験者の視線位置

(2) トンネル内での路面・照明のちらつき

図-4.20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、照明間隔10mおよび照明間隔5mの場合は、被験者の約3～4割が「感じた」と回答している。特に照明間隔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1.2～4.4m¹⁾と照明間隔5mが比較的近い条件であり、アンケート結果とも一致する。一方、連続照明（照明間隔0m）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。

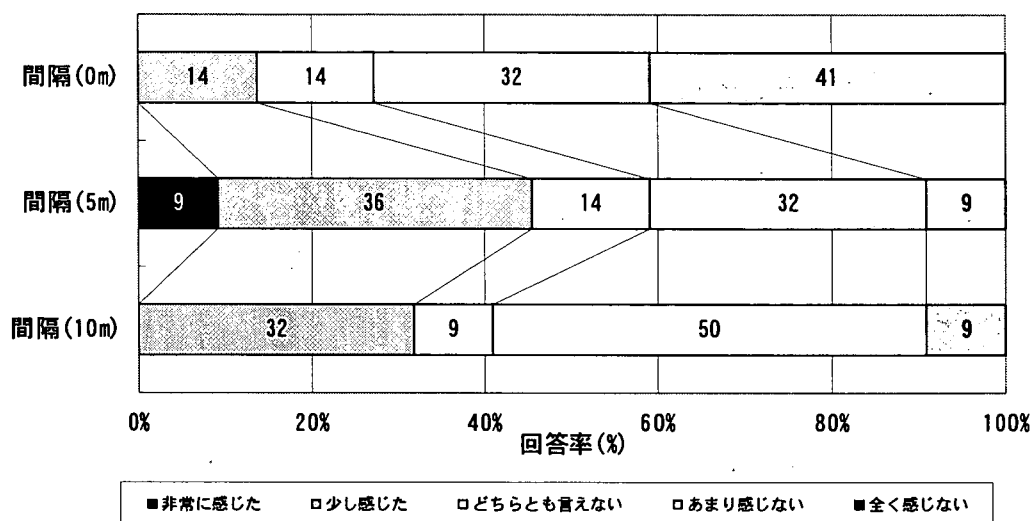


図-4.20 照明器具のちらつき感

(3) トンネル内での照明による視線誘導性

図-4.21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、照明間隔0m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。

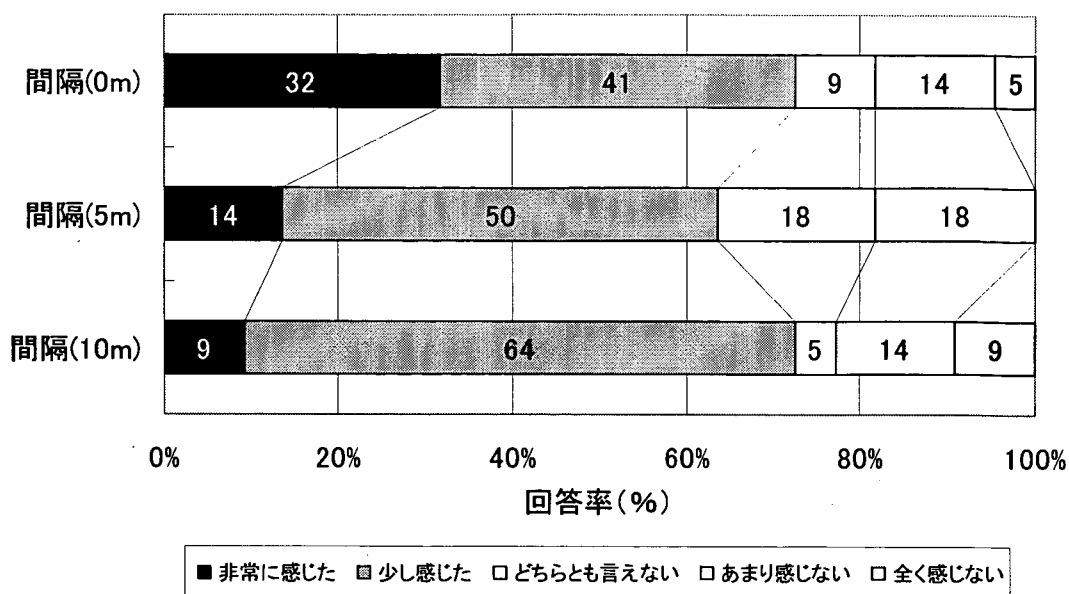


図-4.21 トンネル内の視線誘導性

4.3 まとめ

本調査から、運転者はトンネル進入時にはトンネル坑口、トンネル内では照明器具が最も気になっていることが分かった。

坑口形状については、坑口形状が竹割りの場合には、トンネル進入時の緊張感、圧迫感が面壁よりも小さく、トンネル進入時の走行性も高いことが明らかとなった。また、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の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。

トンネル照明については、連続照明（照明間隔が0m）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：「道路道路照明施設設置基準・同解説」、1981年4月
- 2) 日本道路公団：「トンネル標準設計図集」、平成9年12月
- 3) (社)建設電気技術協会：「トンネル照明器材仕様書」、平成5年

第5章 結論

本研究は、トンネルの走行性に及ぼす坑口形状・照明方式の影響について把握することを目的として、
(1) 供用中のトンネルにおける運転者の視線挙動調査、(2) 連続照明下の照明特性・視認性の検討、
(3) 動画像による坑口形状・照明方式の検討を行った。

(1) 供用中のトンネルにおける運転者の視線挙動調査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、3車線トンネルにあまり関係なく、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、運転者が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以上では、面壁とトンネル案内板と先行車、坑口から100m以内では前方路面状況などが推測された。

(2) 連続照明下の照明特性・視認性の検討から以下のことが明らかとなった。

- ①照明器具間隔による照明特性・視認性は、照明器具間隔によって大きく変化することが明らかとなり、視標物の見え方は、視標物の反射率、視標物の位置（照明器具との位置関係）でも変化することが明らかとなった。また、同一の路面輝度下では視標物の輝度対比と見え方に良い相関が認められ、輝度対比で視標物の見え方が評価できることが確認された。
- ②照明器具間隔が5m程度以下の短い場合では、路面上の視標物の輝度対比は比較的高い値で安定し、その最大値と最小値の差が小さく、照明器具間隔が11.2mと長い場合では、路面上の視標物の輝度対比の高い結果を示す箇所もあるが、輝度対比の低い値を示す箇所もあることから安定した輝度対比が得られないことが明らかとなった。したがって、視標物の見え方が輝度対比で評価できることを考えると、照明器具間隔が短い場合では視標物の見え方は安定するが、照明器具間隔が長い場合では安定した視標物の見え方は得られにくいことが明らかとなった。
- ③同一の視標物の視認性は、清浄空気中および煤煙中のいずれの条件下において、路面輝度が高いほど高く、路面輝度が低い場合に路面輝度が高い場合と同一の視認性評価を得るためには、高い輝度対比が必要となることが明らかとなった。

(3) 動画像による坑口形状・照明方式の検討から以下のことが明らかとなった。

- ①運転者はトンネル進入時にはトンネル坑口、トンネル内では照明器具が最も気になっていることが分かった。
- ②坑口形状については、坑口形状が竹割りの場合には、トンネル進入時の緊張感、圧迫感が面壁よりも小さく、トンネル進入時の走行性も高いことが明らかとなった。また、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つ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の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。

- ③トンネル照明については、連続照明（照明間隔が0 m）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。

謝辞

本調査を実施するにあたり、ご協力いただいた日本道路公団の関係各位に深甚の謝意を表します。

参考資料

アイマークレコーダー (EMR-7)

(1) 原理と計算式

一般に被験者がどこを見ているかを測定するものの1つにアイカメラと呼ばれる装置がある。このアイカメラの眼球運動を検出する代表的方式としては、以下に示す角膜反射方式と強膜反射方式とがある。

①角膜反射方式

眼前においた光源（通常目に刺激を与えない様に赤外 LED が用いられる）の角膜表面による反射像（プルキニエ像）が、眼球運動と共に上下左右に移動するので、これを撮影してその移動量を検出し眼球回転角に換算する方法。

②強膜反射方式（リンパストラッカー方式）

強膜（白目）と虹彩の反射率の違いを利用する方法。赤外 LED で眼球を照射し、受光角の狭い複数のセンサーで角膜と強膜の境界（リンバスという）付近からの反射光を受光する。眼球が移動するとセンサー間の光量比が変わるので、これを検出し眼球運動量に演算する。

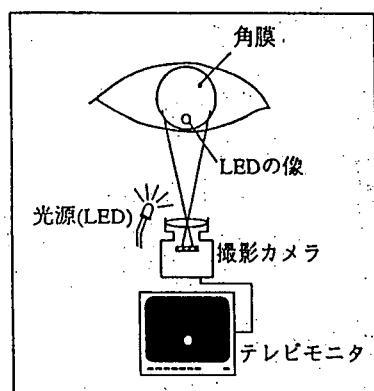


図-1 角膜反射方式

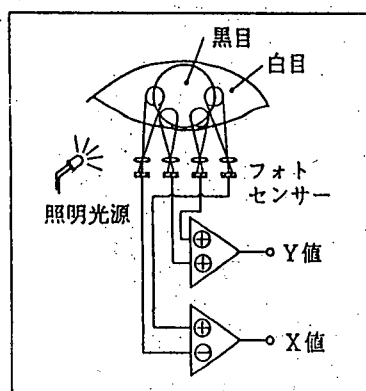


図-2 強膜反射方式

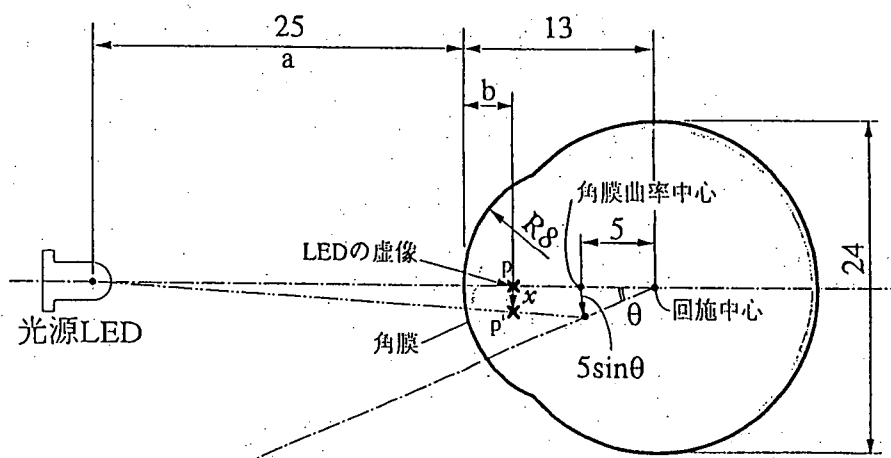


図-3 アイマークレコーダーの眼球運動検出の原理

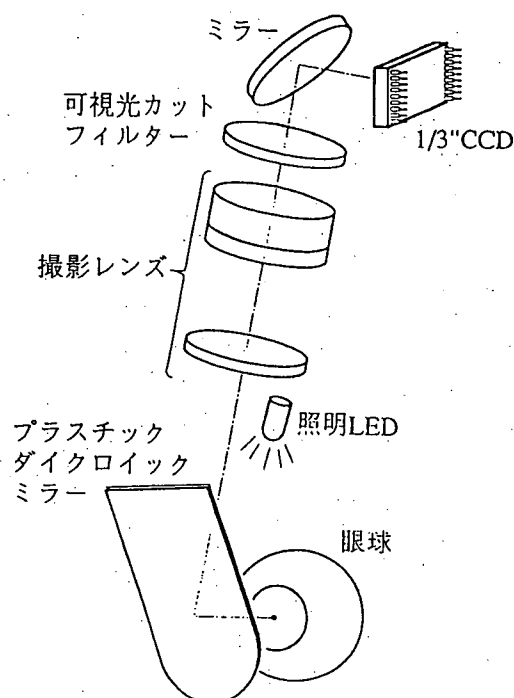


図-4 EMR-7の光学系

アイマークレコーダーEMR-7は頭部に装着する普及タイプのアイカメラであるが、次の理由から角膜反射方式の眼球運動検出方法を採用している。

- ①外来光の変化や瞳孔径の変化等からの影響が少ない為検出データが安定している。
- ②眼球そのものの映像を見ながら調整できるため装着が容易で、初心者でも楽に使うことができる。また、フィールドでの使用も可能。

(2) アイマークレコーダーEMR-7の原理

角膜反射方式の検出の原理は以下に示すとおりである。

今、眼の前方 a mmの位置に光源LED置いたとする。眼球を正面から撮影すると、LEDの光は角膜により反射されて、瞳の内部の点PにLEDの虚像が生じる。角膜頂点とPとの距離を b mmとして角膜の曲率半径 $2f$ mmの凸球面 (f mm) とすると

$$\frac{1}{b} = \frac{1}{f} + \frac{1}{a}$$

となる。このとき眼が移動して θ 方向を見たとなると、瞳孔内の虚像も移動して P' の位置となる。このときの移動量 u mmは簡単な比例関係から次の式で与えられる。(図-3参照。図では u のかわりに x となっている。) 即ち

$$u = \frac{a+b}{a+8} \times 5 \sin \theta$$

実際には、角膜は正確な眼球ではない為、回旋点の距離や回旋移動が個人個人で異なる。この補正をキャリブレーションという操作で個人差によるズレを補正し、正しい視線方向を算出する。

即ち、EMR-7のキャリブレーションは、次のようになる。被験者が視野内の決まった点(X, Y)を見たとき、眼球の移動量(u, v)とすると、補正函数として共3次方程式G_u, G_vを考えると

$$X = G_u(u, v)$$

$$Y = G_v(u, v)$$

で表され、キャリブレーションによる補正処理を施すと、G_u, G_vの関数が決定される。従って、眼球移動量(u, v)から一義的にアイマークデータ(X, Y)が求まる。EMR-7では、前式で表されたa, b, fは次の式で設計されている。

$$f = 3.9 \text{ mm}$$

$$a = 25.0 \text{ mm}$$

$$b = 3.37 \text{ mm}$$

(3) アイマークレコーダーEMR-7の信号の流れ

アイマークレコーダーの構成と信号の流れを中心に図-5に示す。図中、X, Y座標検出回路はセンサーからの画像信号によりLED輝点の写し込まれているX, Yを検出するブロックである。データコード化回路はX, Yのデータを出力画像信号中に2進のデジタルデータとして挿入するための処理ブロックである。こうして視野カメラからの画像信号に、視方向を表すポインターとしてのアイマークキャラクター(アイマークの位置を示す+ / □マーク)とコード化されたXおよびYの座標値を重畳して出力される。

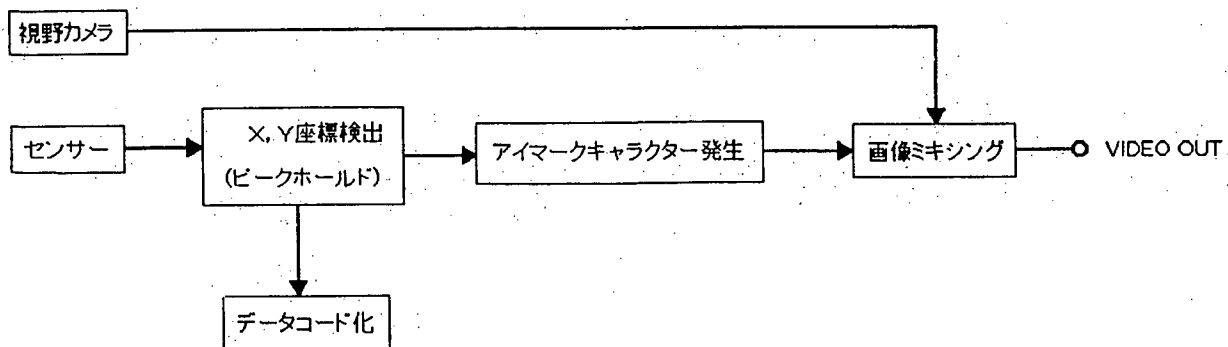


図-5 アイマークレコーダーEMR-7の信号の流れ

用語解説

1. モデル (model)

モデリングプログラムで生成された幾何データセットのこと。モデルは点、線、ポリゴン等で表現されています。 ※モデリング=幾何データの生成

1. レンダリング (Rendering)

モデル、光線（照明）の状況、仮想カメラの情報から統合的な画像を生成する処理のこと

2. マッピング手法

2次元の画像を3次元データに貼りつけ質感を変える技術。

たとえば、多面体、球体などに模様を3次元グラフィックスで扱う場合、処理が複雑になるので、別々に造ったかたちと模様を合成したり、それに色や明度の調整、輝度の処理などを行うピクチャーマッピングとかカラーマッピングとよばれる手法や、物体の表面に凹凸があるように見せる法線ベクトル・マッピングとかバンプ・マッピング（これら称してラクスチャー・マッピングと呼ばれる）がある。また、マッピングは貼りつける質感によって、テクスチャー、リフレクションなど呼び方も変わる。

3. オブジェクト モデル (Object model : 部品)

トンネル坑門工、壁高覧、ガードレール、標識、遮音壁、植栽など構造体本体とは別途、交換出来得る部品として作成するモデル データのこと。

4. レイ・トレーシング (視線探索法あるいは光線追跡法)

シェーディング、陰影処理視点から見た物体の表面の状態（輝度・色彩）をCRTのドット（ピクセル）ごとに計算し表現する方法。

5. ラジオシティー

完全拡散反射面の相互反射計算手法 (ラザリス・リファインメント・ラジオシティー・アルゴリズム) のこと。

6. 後背山岳地形 (terrain model)

後背山岳地形は、地形測量図よりコンターをデジタイザーなど図面の読みとり装置により二次元地形情報としてコンピュータへ入力した、コンター データの主曲線間隔（高さ）値を入力し、生成された三次元地形モデルより坑門工、トンネル内空等の削り取りを施した三次元背景のこと。