



共同研究報告書

整理番号第174号

トンネル内の新照明方式に関する 共同研究報告書

カウンタービーム照明に関する研究（その2）報告書

平成9年3月

建設省土木研究所
トンネル研究室
日本道路公団
首都高速道路公団
岩崎電気株式会社
建電設備株式会社
小糸工業株式会社
東芝ライテック株式会社
松下電器産業株式会社

Copyright © (1997) 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。

トンネル内の新照明方式に関する 共同研究報告書

カウンタービーム照明に関する研究（その2）報告書

建設省土木研究所	トンネル研究室室長	真下 英人
	トンネル研究室研究員	石村 利明
日本道路公団	施設部施設建設課	相馬 隆治
	施設部施設企画課	稲見 寛昭
首都高速道路公団	保全施設部電気通信課課長補佐	宮川 勝海
	保全施設部電気通信課班長	小林 浩之
岩崎電気株式会社	技術開発室	内田 和夫
	技術開発室営業技術部課長	赤坂 人司
建電設備株式会社	東京支店技術部担当部長	関口 芳夫
	大阪支店技術部次長	乗松 幸生
小糸工業株式会社	電気営業本部室理事	荒井 弘志
	照明技術部次長	森永 晃
	照明技術部	永井 渉
	照明技術部	角 建志
東芝ライテック株式会社	セールスエンジニアリングセンター部長代理	大山 敬
	セールスエンジニアリングセンター	皆川 考司
松下電器産業株式会社	照明研究所首席研究員	坂本 正悦
	照明研究所	山中 泰彦
	東京エンジニアリングセンター課長	大橋 利彦

要 旨

近年、道路トンネルの供用本数・総延長が増加しており、これに伴う維持管理費も増加してきている。今後、快適性、経済性の面から道路トンネルの合理化を図って行くためには、照明効率の高い照明方式について検討する必要がある。本共同研究報告書は、カウンタービーム照明を国内に適用するため、設計速度60km/hを対象として基本部照明へのすり付け、路面サンプル板による平均照度換算係数の把握、大型車による影響、照明器具のグレア、自然光の入射状況、先行車による視認性についての検討結果を取りまとめたものである。

キーワード：道路トンネル、カウンタービーム照明、視認性、輝度対比、グレア

はじめに

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に、換気・照明設備が設けられている。近年、道路トンネルの総延長、本数が増加しており、これに伴って道路トンネルの換気・照明施設にかかる費用、維持管理費も増加する傾向にある。今後は、これらの諸施設に対する省エネルギー化への対応とともに、快適性の面、あるいは交通の高速化に対応するため、効率的かつ合理的な道路トンネルの照明について検討が必要となってきた。

本共同研究「トンネル内の新照明方式に関する研究」は、海外の一部で実用化が図られているカウンタービーム照明を我が国においても新しい照明方式として採用するため、国内での適用性、照明器具の開発、照明器具の設置方法、必要照明レベル等の検討および設計ガイドライン（案）の作成を目標に、平成5年度から平成7年度の3カ年で実施したものである。

本共同研究報告書は、平成5年度の補足実験として実施した基本部照明へのすり付け、路面サンプル板による平均照度換算係数の把握、大型車による影響、照明器具のグレア、自然光の入射状況、先行車による視認性についての成果を取りまとめたものである。

目 次

はじめに

1. 研究の概要	1
2. 基本部とのすり付け状況	2
2.1 入口部照明の明るさ	2
2.2 路面の光学特性	8
2.3 照明器具の配列とすり付け	13
2.4 まとめ	13
3. 路面サンプルの特性	15
4. 障害物の視認性	19
4.1 実験目的	19
4.2 実験方法	19
4.3 実験結果	20
4.4 まとめ	31
5. 大型車による遮光の影響確認実験	34
5.1 実験方法	34
5.2 実験結果	35
5.3 まとめ	40
6. 照明器具からのグレア (T I 値)	41
6.1 目的	41
6.2 測定方法	41
6.3 測定結果	43
6.4 まとめ	46
7. 自然光下での輝度対比	47
7.1 目的	47
7.2 測定方法	47
7.3 測定結果	49
7.4 まとめ	58
8. 先行車の見え方	59
8.1 測定方法	59
8.2 測定結果	61
8.3 ブライトネスの算出および考察	66
8.4 まとめ	68
9. まとめ	69

おわりに

1. 研究の概要

本報告書は、「トンネル内の新照明方式に関する研究」の共同研究で、新しい照明方式としてカウンタービーム照明の国内への適用する場合の諸課題について補足的な実験、測定により検討を加えたものである。カウンタービーム照明は自動車の進行方向と逆方向に光を照射し、比較的少ない光束で高い路面輝度を得ることができる照明方式である。この照明方式は、既にスイスの道路トンネルの入口照明として用いられているが、国内に適用するには日本の交通状況や路面の状態などに適した照明方式として導入する必要がある、そのための検討が必要である。

平成5年度にはカウンタービーム照明用の照明器具の開発を行い、実大トンネル実験施設において設計速度60km/hを対象とした照明レベルの条件でカウンタービーム照明と対称照明との比較実験・測定を行った。具体的には、①照明特性の把握（光学測定）として障害物の視認性、照明器具からのグレア、路面の種類による効率、自然光の影響を、また、②障害物の視認性実験として被験者によるアンケートにより静止状態で視距だけ離れた位置から障害物の視認性（静止実験）の評価を行うとともに、速度60km/hの走行状態でトンネル内の障害物の視認性（走行実験）の評価を行った。その他、③先行車の視認性実験として被験者によるアンケートにより大型車、小型車が先行車として存在する場合の先行車の視認性の評価を行った。

上記の実験・測定から視認性の向上が確認されるとともに、照明器具からのグレアはカウンタービーム照明による特別なグレアは生じておらず、問題とにならないことが分かった。また、先行車の視認性についても、対称照明とほぼ同等な視認性が得られるなど、概ね良好な結果が得られた。なお、詳細については、共同研究報告書「カウンタービーム照明に関する研究報告書」¹⁾を参照されたい。

本報告書は、平成5年度に実施したこれらの成果を補足するため、上記の照明条件と同一の条件で以下に示す実験・測定を行ったのでその結果を報告するものである。

- ・基本部照明へのすり付け

- 入口照明の終端部の照明レベルと基本照明の照明レベルの比率の設定についての検討

- ・路面サンプル板の平均照度換算係数の把握

- アスファルト舗装の新しい状態での平均照度換算係数の把握

- ・野外輝度の影響

- 野外の輝度の条件の違いによる視認性の評価

- ・大型車による影響

- 大型車の存在による遮光の影響の把握

- ・照明器具からのグレアの評価

- グレアの評価としてのT I 値の測定

- ・自然光の入射状況

- 坑口の方位による自然光の入射状況の把握

- ・先行車の視認性

- 光学測定による再確認

2. 基本部とのすり付け状況

入口照明の緩和部（末端部）と基本照明との滑らかなすり付けを検討するため、照明器具の配列および点灯状況（調光点灯／全光点灯）を変えて入口部照明の明るさ、路面の光学特性の把握を行い基本照明とのすり付け状況について検討した。

2.1 入口部照明の明るさ

入口部照明の明るさを確認するため、以下の測定を行った。

(1) 測定項目

測定は、下記の項目とする。測定結果より入口部照明全線における平均照度換算係数についても算出を行う。

照明方式	測定の種類
カウンター・ビーム照明 (向き合わせ配列) (千鳥配列) (片側配列)	水平面照度 路面輝度

(2) 測定区間

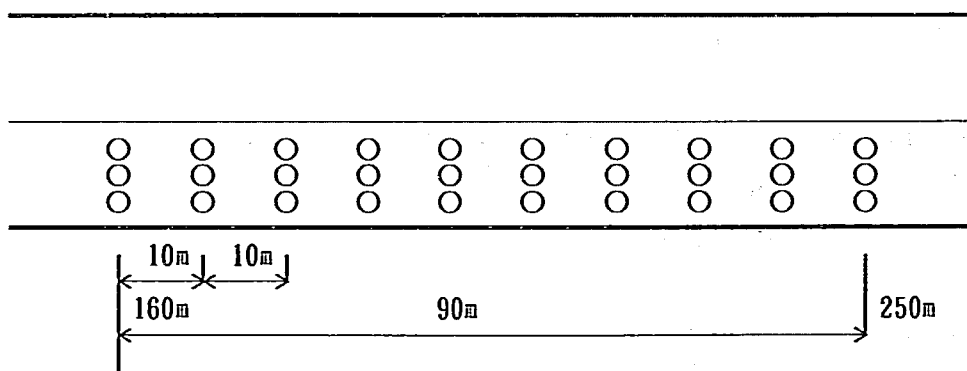
測定区間は下記のとおりとする。

水平面照度：南側坑口より160m～250m

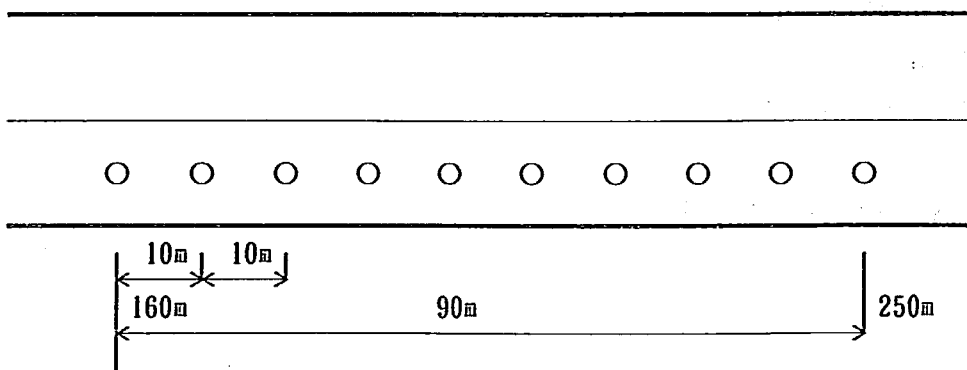
路面輝度：南側坑口より160m～250m

(3) 測定位置

測定位置は、図－2.1のとおりとする。



図－2.1 水平面照度測定ポイント



図－2.2 路面輝度測定ポイント

(4) 測定方法

水平面照度は、東側車線でセンターラインより、車線中央、路肩の3点で受光部が水平になるようにして行う。
路面輝度測定は、俯角を 1° に保ち、車線中央部で10m毎に測定する。路面の輝度測定方法は図-2.3のとおりとする。

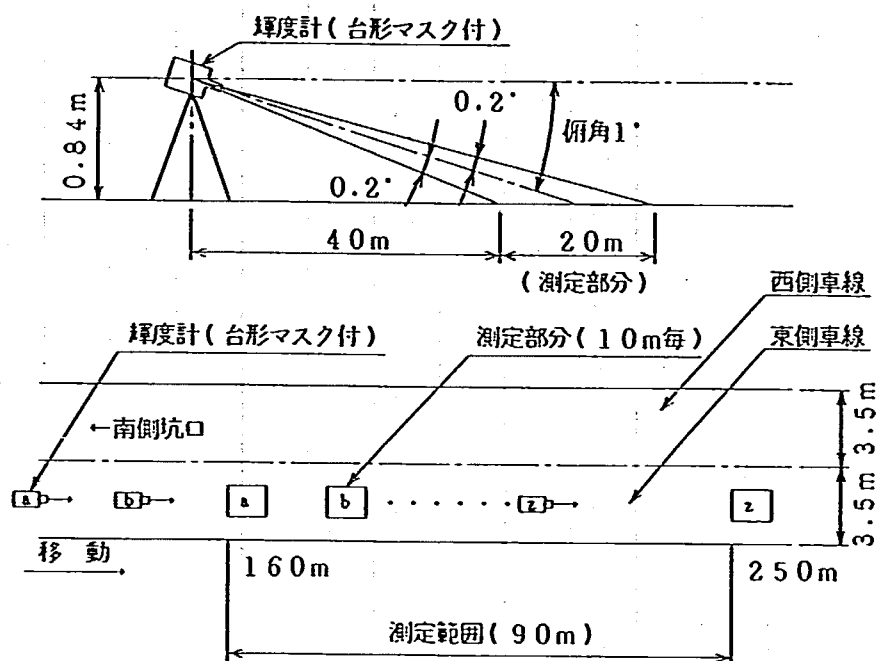


図-2.3 路面輝度測定方法

(5) 測定機器

測定機器は次のとおりとする。

照度計：トプコン IM-3形

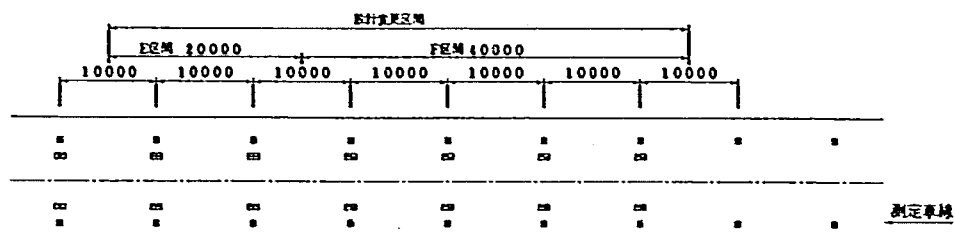
輝度計：トプコン BM-3形 (改造・台形マスク付)

(6) 測定結果

測定結果を表-2.1および図-2.4～図-2.6に示す。

表-2. 1 水平面照度・路面輝度測定結果・照明方式：カウンタービーム照明

向 き 合 わ せ 配 列		1 6 0 m	1 7 0 m	1 8 0 m	1 9 0 m	2 0 0 m	2 1 0 m	2 2 0 m	2 3 0 m	2 4 0 m	2 5 0 m
	センターライン より 1x	292.0	204.0	184.0	99.0	107.0	113.0	107.0	41.2	39.5	34.0
	東側車線中央 1x	242.0	146.0	142.0	81.1	85.5	94.1	87.2	35.1	33.2	29.1
	東側車線路肩 1x	192.0	122.0	111.0	56.2	65.7	73.3	65.7	27.4	24.2	20.7
	平均照度 1x	242.0	157.3	145.7	78.8	86.1	93.5	86.6	34.6	32.3	27.9
	路面輝度 cd/m ²	18.3	14.7	11.2	10.2	8.6	7.7	6.4	3.8	2.9	2.7
千 鳥 配 列		1 6 0 m	1 7 0 m	1 8 0 m	1 9 0 m	2 0 0 m	2 1 0 m	2 2 0 m	2 3 0 m	2 4 0 m	2 5 0 m
	センターライン より 1x	301.0	218.0	178.0	98.0	104.0	109.0	114.0	42.0	39.1	34.5
	東側車線中央 1x	252.0	155.0	142.0	70.9	100.0	76.6	109.0	35.8	33.3	29.1
	東側車線路肩 1x	207.0	128.0	119.0	46.3	92.2	50.0	96.3	29.9	26.3	22.2
	平均照度 1x	253.3	167.0	146.3	71.7	98.7	78.5	106.4	35.9	32.9	28.6
	路面輝度 cd/m ²	22.2	17.6	14.1	11.0	9.7	10.1	9.1	6.4	3.5	3.2
片 側 配 列		1 6 0 m	1 7 0 m	1 8 0 m	1 9 0 m	2 0 0 m	2 1 0 m	2 2 0 m	2 3 0 m	2 4 0 m	2 5 0 m
	センターライン より 1x	393.0	197.0	175.0	88.8	102.0	109.0	111.0	41.1	38.8	34.2
	東側車線中央 1x	244.0	155.0	141.0	85.0	98.4	108.0	108.0	35.5	33.1	28.7
	東側車線路肩 1x	202.0	126.0	119.0	77.4	91.0	100.0	99.3	29.6	26.3	22.7
	平均照度 1x	279.7	159.3	145.0	83.7	97.1	105.7	106.1	35.4	32.7	28.5
	路面輝度 cd/m ²	21.8	17.8	14.3	12.6	11.5	12.2	10.3	6.4	3.6	3.2



凡 例	
■	基本照明 NX55
□	入口照明 NHT180L
▣	入口照明 NHT110L
◻	入口照明 NHT110L(調光)

設計条件	
設計速度	60 Km/h
野分照度	4000 cd/m ²
低減係数	1

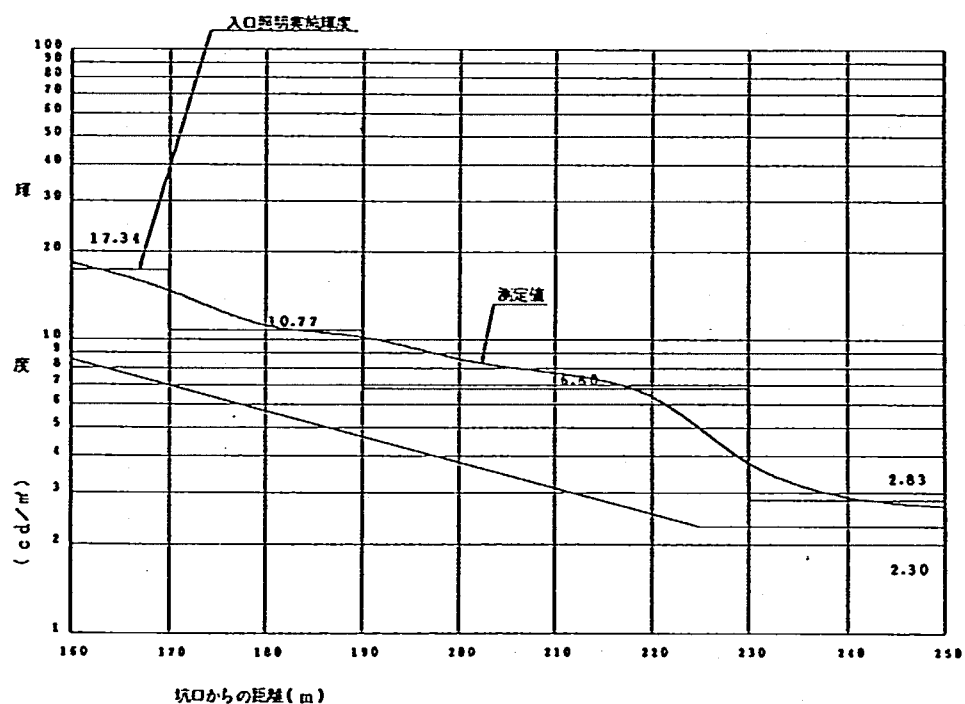
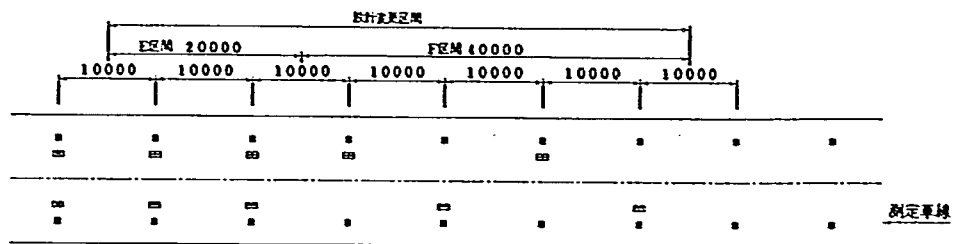


図-2.4 路面の輝度分布(車線中央取付・向き合わせ配列・調光)



凡 例	
■	基本照明 NX55
□	入口照明 NHT180L
□	入口照明 NHT110L

設計条件	
設計速度	60 Km/h
軒外照度	4000 cd/m ²
反射係数	1

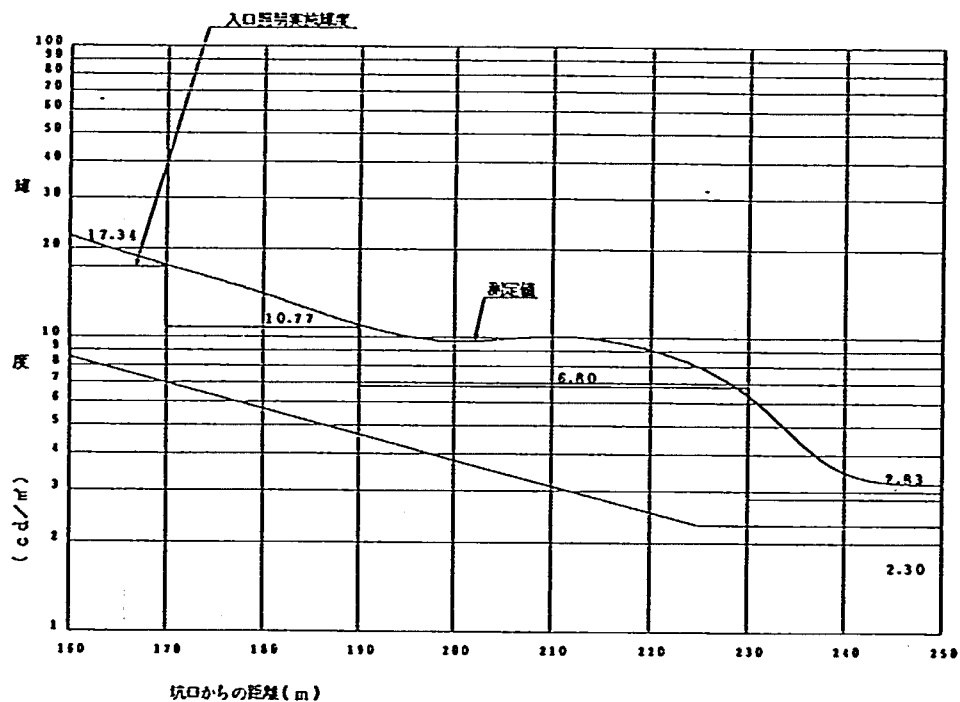
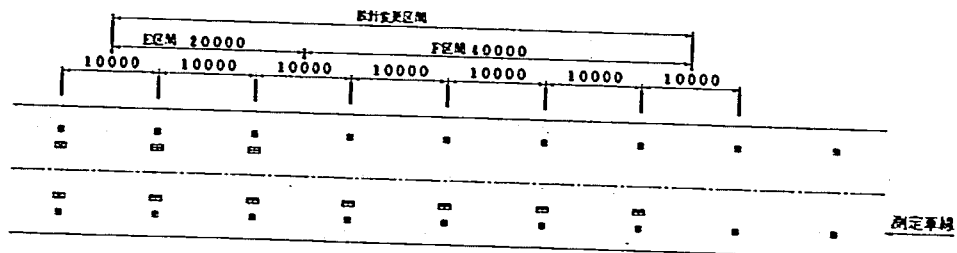


図-2.5 路面の輝度分布 (車線中央取付・千鳥配列)



凡 例	
■	基本照明 NX55
□	入口照明 NHT180L
□	入口照明 NHT110L

設計条件	
設計速度	60 Km/h
野点輝度	4000 cd/m ²
低照度数	1

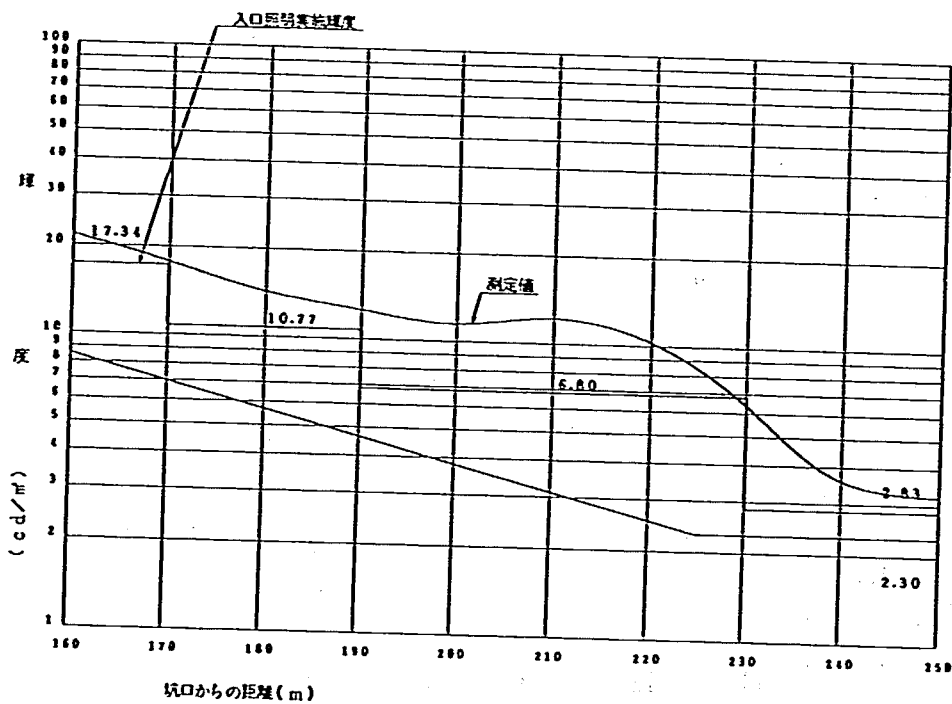


図-2.6 路面の輝度分布 (車線中央取付・片側配列)

2.2 路面の光学特性

各照明条件におけるコントラスト係数、平均照度換算係数について把握するため以下の測定を行った。

(1) 測定項目

測定は、下記の項目とする。

照明方式	路面の種類	測定の種類
カタビーム照明 (向き合わせ配列) (千鳥配列) (片側配列)	コンクリート舗装 (実大トンネル実験施設: 粗面仕上げ)	水平面照度 鉛直面照度 路面輝度

(2) 測定区間

測定範囲は、図-2.7のとおりであり、南側坑口より205m～215mの区間の10mとする。

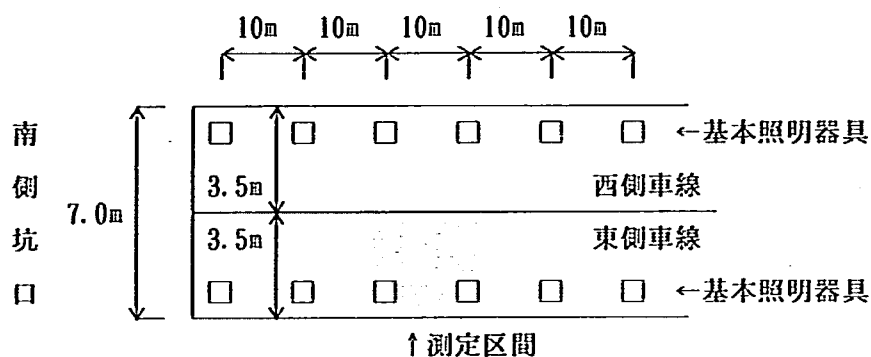


図-2.7 測定区間

(3) 測定位置

測定位置は、図-2.8 (東側車線拡大図) のとおりとする。

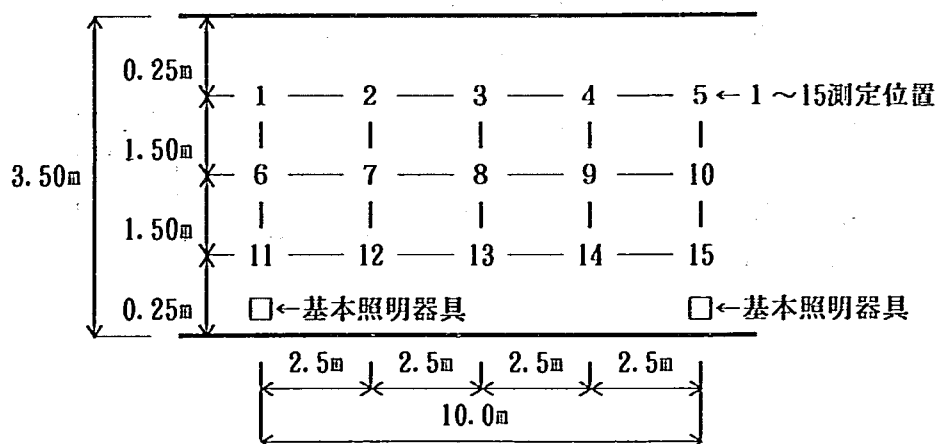


図-2.8 東側車線測定位置

(4) 測定方法

鉛直面照度測定は、路面上10cmで行う。路面輝度測定は、俯角を 1° に保ち進行方向について行う。路面輝度測定方法は図-2.9、測定位置図は図-2.10のとおりとする。

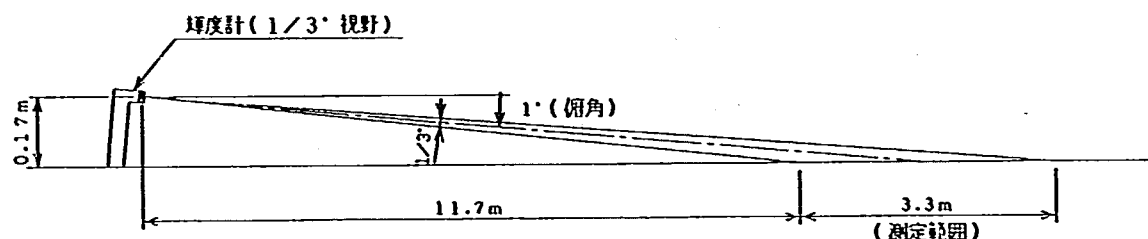


図-2.9 路面輝度測定方法

(5) 測定機器

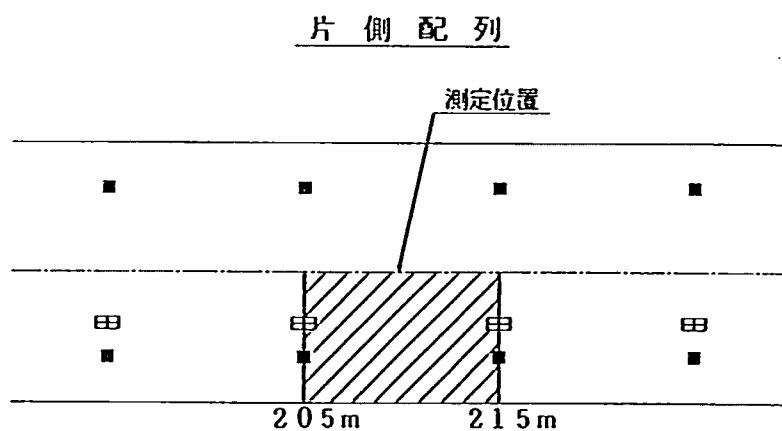
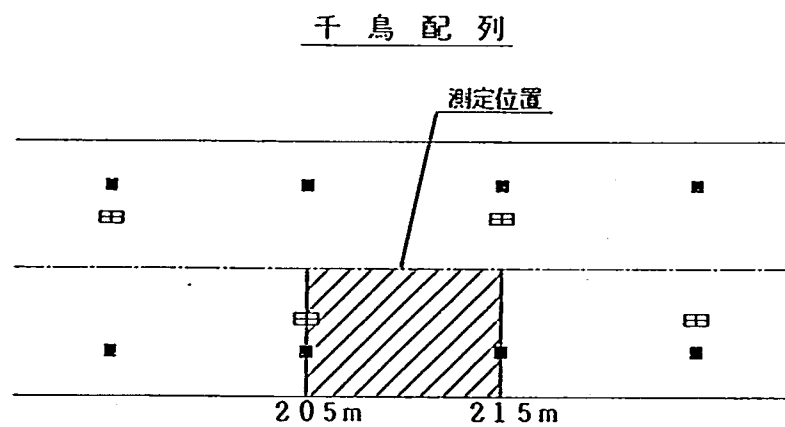
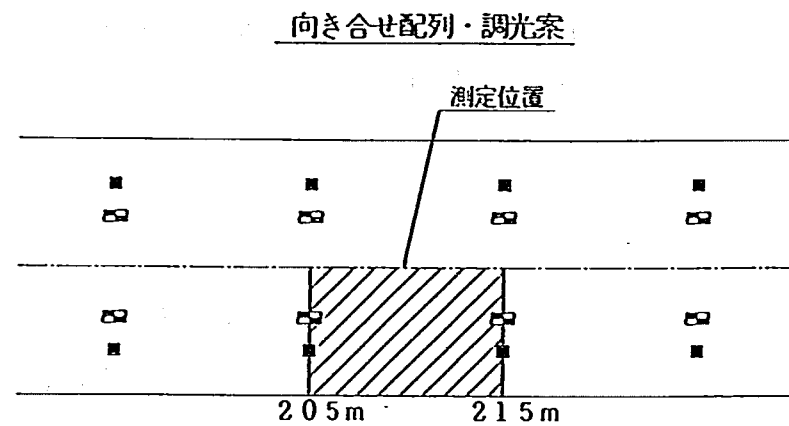
測定機器は次のとおりとする。

照度計：トプコン IM-3形

輝度計：ミノルタ LS-110

(6) 測定結果

測定結果を表-2.2～表-2.5に示す。平均照度換算係数については、ほぼ設計通りの値となったが、コントラスト係数 L_r/E_v については、CIE(国際照明委員会)およびCEN(欧州標準化委員会)でカウンタービーム照明を定義している0.6以上を満足しないことが分かった。基本部とのすり付け区間では、基本照明の影響が境界部より強いため、カウンタービーム照明の特性が弱くなっているものと考えられる。



図－2.10 各照明条件における路面特性測定位置と照明器具との関係図
(南側坑口より205m～215m)

表-2.2 路面特性測定結果

照明方式：カウンタービーム照明／向き合わせ配列				
舗装の種類：コンクリート舗装				
水平面照度測定結果			平均値 91.2	単位：lx
① 94.2	② 97.5	③ 109.9	④ 124.2	⑤ 97.7
⑥ 83.1	⑦ 86.2	⑧ 91.1	⑨ 104.1	⑩ 87.5
⑪ 68.1	⑫ 71.8	⑬ 72.3	⑭ 84.6	⑮ 70.1
鉛直面照度測定結果			平均値 29.5	単位：lx
① 28.1	② 42.2	③ 37.5	④ 30.0	⑤ 25.8
⑥ 25.9	⑦ 38.0	⑧ 33.5	⑨ 27.8	⑩ 24.6
⑪ 22.5	⑫ 31.7	⑬ 28.4	⑭ 24.4	⑮ 22.3
路面輝度測定結果			平均値 8.3	単位：cd/m ²
① 10.57	② 10.33	③ 10.26	④ 9.55	⑤ 9.63
⑥ 10.24	⑦ 8.69	⑧ 9.21	⑨ 8.94	⑩ 9.34
⑪ 5.64	⑫ 5.80	⑬ 5.26	⑭ 5.51	⑮ 5.47

表-2.3 路面特性測定結果

照明方式：カウンタービーム照明／千鳥配列				
舗装の種類：コンクリート舗装				
水平面照度測定結果			平均値 81.6	単位：lx
① 88.2	② 94.5	③ 107.8	④ 122.6	⑤ 96.3
⑥ 83.1	⑦ 81.6	⑧ 75.0	⑨ 86.2	⑩ 82.4
⑪ 68.6	⑫ 58.6	⑬ 51.2	⑭ 59.5	⑮ 67.9
鉛直面照度測定結果			平均値 28.6	単位：lx
① 27.1	② 41.6	③ 37.0	④ 29.9	⑤ 25.7
⑥ 26.5	⑦ 39.0	⑧ 32.1	⑨ 26.2	⑩ 22.9
⑪ 24.2	⑫ 32.0	⑬ 25.0	⑭ 20.5	⑮ 19.6
路面輝度測定結果			平均値 7.6	単位：cd/m ²
① 9.32	② 9.82	③ 9.72	④ 8.82	⑤ 8.51
⑥ 7.81	⑦ 6.89	⑧ 7.24	⑨ 8.19	⑩ 10.66
⑪ 4.92	⑫ 4.45	⑬ 4.38	⑭ 5.38	⑮ 7.66

表-2.4 路面特性測定結果

照明方式：カウンタービーム照明／片側配列				
舗装の種類：コンクリート舗装				
水平面照度測定結果			平均値 101.0	単位：lx
① 91.0	② 95.9	③ 107.4	④ 125.9	⑤ 98.0
⑥ 86.9	⑦ 93.6	⑧ 104.3	⑨ 121.1	⑩ 94.6
⑪ 77.3	⑫ 88.7	⑬ 99.0	⑭ 105.5	⑮ 80.6
鉛直面照度測定結果			平均値 30.3	単位：lx
① 27.1	② 41.5	③ 37.0	④ 29.7	⑤ 25.8
⑥ 26.4	⑦ 39.5	⑧ 34.5	⑨ 28.2	⑩ 25.7
⑪ 24.1	⑫ 33.4	⑬ 30.1	⑭ 27.4	⑮ 24.3
路面輝度測定結果			平均値 9.6	単位：cd/m ²
① 10.09	② 10.42	③ 9.65	④ 9.14	⑤ 10.01
⑥ 10.69	⑦ 10.92	⑧ 10.97	⑨ 11.21	⑩ 10.85
⑪ 8.26	⑫ 8.33	⑬ 7.64	⑭ 7.72	⑮ 7.76

表-2.5 路面特性測定結果まとめ

	舗装の種類：コンクリート舗装	
カウンタービーム照明 向き合わせ配列 調光点灯	水平面照度 E _h	91.2 lx
	鉛直面照度 E _v	29.5 lx
	路面輝度 L _r	8.3 cd/m ²
	コントラスト係数 L _r /E _v	0.28
	平均照度換算係数 E _h /L _r	11.0 lx/cd/m ²
カウンタービーム照明 千鳥配列 非調光点灯	水平面照度 E _h	81.6 lx
	鉛直面照度 E _v	28.6 lx
	路面輝度 L _r	7.6 cd/m ²
	コントラスト係数 L _r /E _v	0.27
	平均照度換算係数 E _h /L _r	10.7 lx/cd/m ²
カウンタービーム照明 片側配列 非調光点灯	水平面照度 E _h	101.0 lx
	鉛直面照度 E _v	30.3 lx
	路面輝度 L _r	9.6 cd/m ²
	コントラスト係数 L _r /E _v	0.31
	平均照度換算係数 E _h /L _r	10.5 lx/cd/m ²

2.3 照明器具の配列とすり付け

基本照明とのすり付けについては理論上、向き合わせ配列の調光点灯が最も良いと考えられる。ただし、実際の設備で入口部照明の曇天時の制御は千鳥配列となる場合が多い。本測定では上記の内容を考慮して下記に示す条件で検討を行った。

- (1) 向き合わせ配列(車線中央取付)・調光点灯
- (2) 千鳥配列(車線中央取付)・非調光点灯
- (3) 片側配列(車線中央取付)・非調光点灯

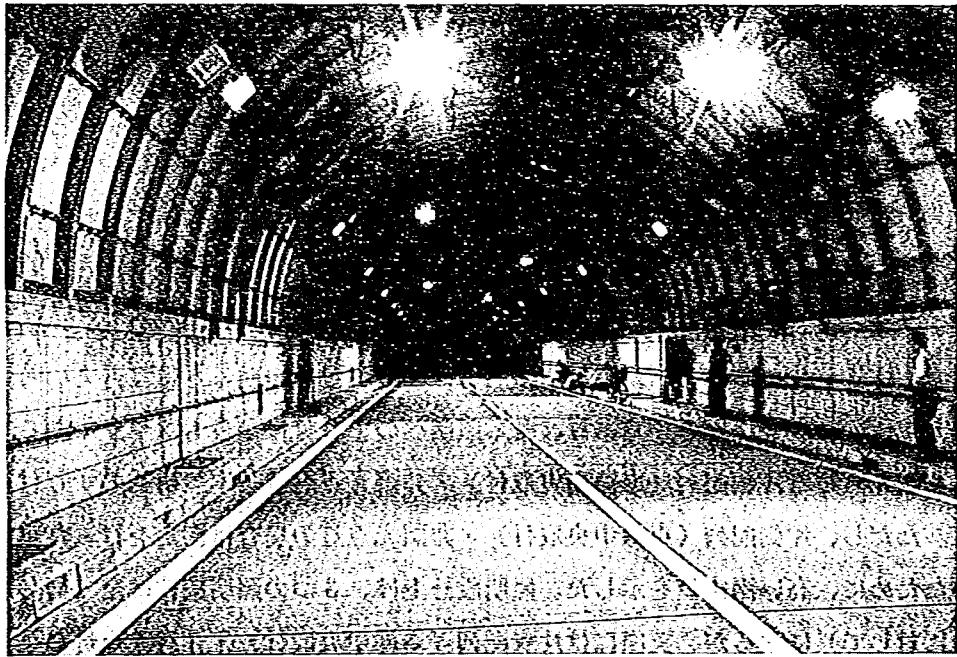
図-2.4～図-2.6を比較すると、基本照明の明るさの3倍程度の明るさになっているのは、向き合わせ配列(車線中央取付)・調光点灯のみであり、基本照明へのすり付けが最も緩やかである。千鳥配列(車線中央取付)・非調光点灯と片側配列(車線中央取付)・非調光点灯は基本照明へのすり付け状況が殆ど同じ結果となった。ただし、片側配列(車線中央取付)・非調光点灯の場合は測定を行った車線上に照明器具が配置されていたために、高い測定値を示した。照明設計上は、3つの照明条件は全て同じ設計路面輝度(車道幅員7mに対して)になるが、実際には片側配列(車線中央取付)・非調光点灯の場合の測定車線の輝度が一番高くなってしまい、殆ど前回¹⁾の設計区間の輝度と同じになってしまうので、基本照明との輝度差が大きくなってしまう。

以上のことから、基本照明へのすり付けに関しては向き合わせ配列(車線中央取付)・調光点灯が最も良いと考えられる。千鳥配列・片側配列については交通形態(一方通行・対面通行)、保守点検、設計輝度等を勘案して配列を検討する必要がある。

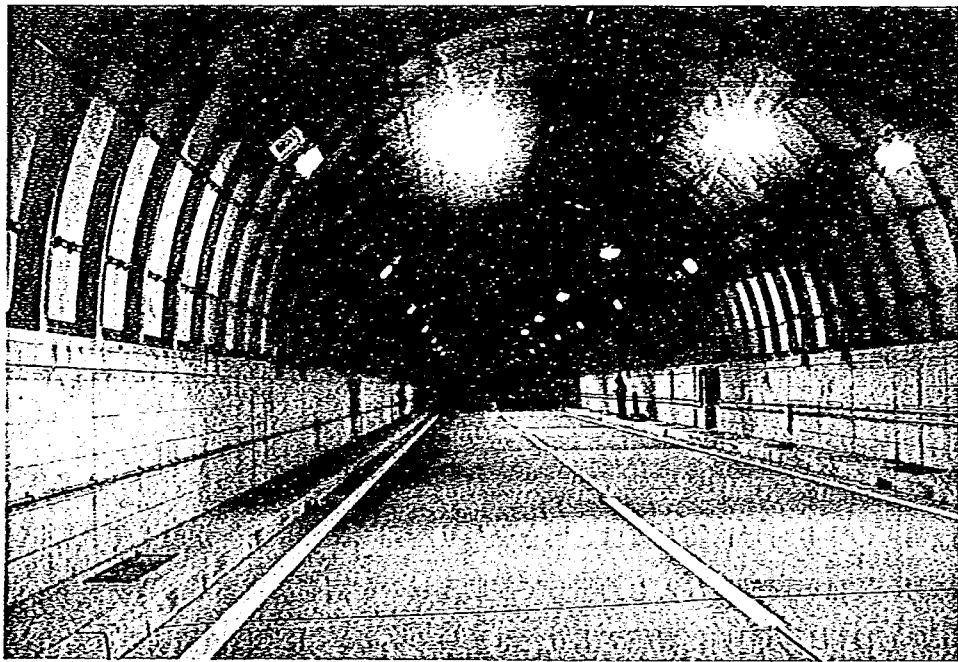
実際の設備の設計では向き合わせ配列(車線中央取付)・調光点灯は、千鳥配列(車線中央取付)に比べて、調光用照明器具、調光用制御線等が必要になるため設備費が割高になり、これらを十分考慮して設計を行う必要がある。なお、本検討は車線中央取付によるもので、路肩近傍取付に対する検討も今後必要であると考えられる。写真-2.1に向き合わせ配列(車線中央取付)・調光点灯と千鳥配列(車線中央取付)・非調光点灯の基本部へのすり付け状況を示す。

2.4 まとめ

向き合わせ配列(調光点灯)、千鳥配列(非調光点灯)、片側配列(非調光点灯)の条件で照明特性を比較すると、基本照明とのすり付けに関しては、向き合わせ配列(調光点灯)が最も優れていることがわかった。実際の設計においては、設備費なども勘案して照明器具の配列を決定する必要がある。また、緩和部終端のコントラスト係数は何れの配列に置いても0.3前後であり、CIE(国際照明委員会)等でカウンタービーム照明を定義している値である0.6以上²⁾³⁾を下回っていた。これは、緩和部終端部では入口照明のカウンタービーム照明による照明レベルに対して対称照明を採用している基本照明の照明レベルの影響が大きいためと考えられた。



(1) 千鳥配列（車線中央取付）・非調光点灯



(2) 片側配列（車線中央取付）・非調光点灯

写真－ 2. 1 基本部へのすり付け状況

3. 路面サンプルの特性

アスファルト舗装のカウンタービーム照明における平均照度換算係数の初期の特性を調査するために路面サンプルを用いて実験を行った。前回¹⁾アスファルト舗装の表面研磨処理を施したものについて実験を行っているので、今回は表面研磨処理を施していないものについて実験を行い結果を比較した。

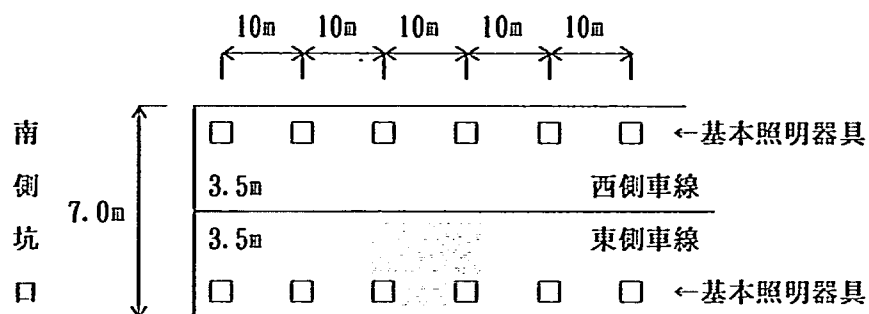
(1) 測定項目

測定は、下記の項目とした。

照明方式	路面の種類	測定の種類
カウンタービーム照明	アスファルト舗装	水平面照度 鉛直面照度 路面輝度
対称照明	アスファルト舗装	水平面照度 鉛直面照度 路面輝度

(2) 測定区間

測定区間は、図-3.1に示すように南側坑口より25m～35mの区間とした。



↑ 測定区間
図-3.1 測定区間

(3) 測定位置

測定位置は、図-3.2（東側車線拡大図）のとおりとした。

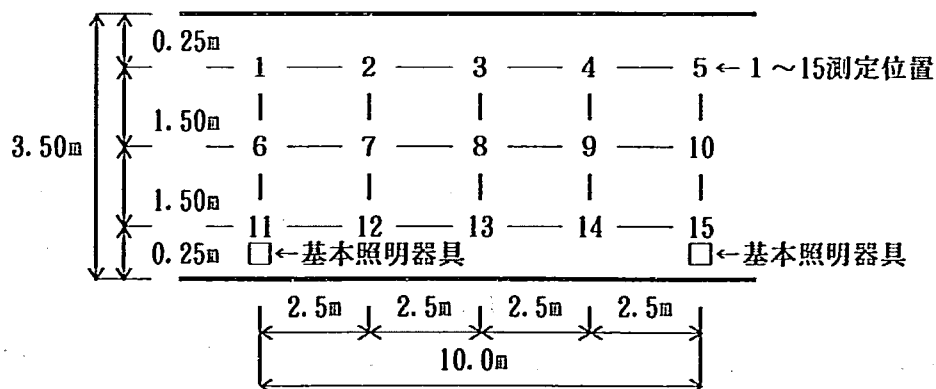


図-3.2 東側車線測定位置

(4) 測定方法

鉛直面照度測定は、路面上10cmで行った。路面輝度測定は、路面サンプルの寸法の関係で俯角を 1° による測定が困難であったため、俯角 1.4° に保ち進行方向について行った。路面輝度測定方法は、図-3.3のとおりとした。

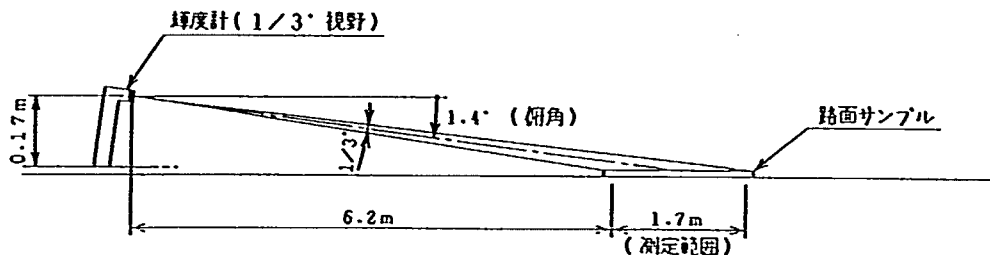


図-3.3 路面輝度測定方法

(5) サンプル板

サンプルの仕様は次の通りとした。

寸法：90cm×180cm（厚さ4cm程度）

なお、サンプル板は実験用に製作したものであり、未使用のものである（表面研磨加工無し）。

施工方法は、以下に示すとおりである。

- ① 混合物敷き均し
- ② ハンドガイドローラによる転圧
- ③ ビブロプレートによる仕上げ転圧

(6) 測定機器

測定機器は次のとおりとする。

照度計：トプコン IM-3形

輝度計：ミノルタ LS-110

(7) 測定結果およびまとめ

測定結果を表-3.1～表-3.3に示す。

路面サンプルのアスファルト舗装について表面研磨有り（前回実施した実験¹⁾）と比較すると表-3.4のとおりとなる。サンプル路面の表面研磨の有無は、平均照度換算係数の結果から分かるようになりかなり影響があることが明らかである。ただし、表面研磨については、実際の車両によるものと異なる。アスファルトの平均照度換算係数は、一般的には経年変化により年々減少傾向にあるので、本実験結果は傾向としては合致している。水平面照度については、同じポイントにも関わらず8～10%程度高い値となっている。これは、測定の誤差と高圧ナトリウムランプの電源電圧変動特性等に起因するものと推測される。

表-3.1 路面サンプル測定結果

照明方式：カウンタービーム照明				
舗装の種類：アスファルト舗装（表面研磨加工無し）				
水平面照度測定結果			平均値 721.2	単位：lx
① 949	② 806	③ 735	④ 891	⑤ 837
⑥ 838	⑦ 748	⑧ 604	⑨ 791	⑩ 767
⑪ 645	⑫ 597	⑬ 497	⑭ 607	⑮ 599
鉛直面照度測定結果			平均値 92.1	単位：lx
① 92.5	② 106.3	③ 99.6	④ 96.1	⑤ 90.1
⑥ 91.9	⑦ 106.5	⑧ 91.9	⑨ 93.6	⑩ 90.4
⑪ 85.5	⑫ 94.5	⑬ 84.5	⑭ 79.5	⑮ 79.2
路面輝度測定結果			平均値 50.5	単位：cd/m ²
① 55.22	② 55.80	③ 52.83	④ 59.25	⑤ 57.58
⑥ 60.49	⑦ 57.62	⑧ 54.53	⑨ 52.59	⑩ 61.11
⑪ 38.35	⑫ 37.13	⑬ 36.88	⑭ 38.26	⑮ 39.63

表-3.2 路面サンプル測定結果

照明方式：対称照明				
舗装の種類：アスファルト舗装（表面研磨加工無し）				
水平面照度測定結果			平均値 1160.4	単位：lx
① 1188	② 1220	③ 1156	④ 1115	⑤ 1078
⑥ 1318	⑦ 1317	⑧ 1275	⑨ 1195	⑩ 1149
⑪ 926	⑫ 1015	⑬ 993	⑭ 967	⑮ 927
鉛直面照度測定結果			平均値 470.0	単位：lx
① 492	② 501	③ 496	④ 479	⑤ 478
⑥ 486	⑦ 525	⑧ 576	⑨ 503	⑩ 498
⑪ 384	⑫ 403	⑬ 408	⑭ 405	⑮ 409
路面輝度測定結果			平均値 28.0	単位：cd/m ²
① 27.20	② 28.20	③ 25.90	④ 25.80	⑤ 26.20
⑥ 32.10	⑦ 31.20	⑧ 29.40	⑨ 29.60	⑩ 27.80
⑪ 26.70	⑫ 28.10	⑬ 28.50	⑭ 27.40	⑮ 26.50

表-3.3 路面サンプル測定結果まとめ

		舗装の種類：アスファルト舗装（表面研磨無し）		
カウンタービーム照明 向き合わせ配列 車線中央取付	水平面照度	E _h	721.2	lx
	鉛直面照度	E _v	92.1	lx
	路面輝度	L _r	50.5	cd/m ²
	コントラスト係数	L _r /E _v	0.54	
	平均照度換算係数	E _h /L _r	14.3	lx/cd/m ²
対称照明 向き合わせ配列	水平面照度	E _h	1160.4	lx
	鉛直面照度	E _v	470.0	lx
	路面輝度	L _r	28.0	cd/m ²
	コントラスト係数	L _r /E _v	0.06	
	平均照度換算係数	E _h /L _r	41.4	lx/cd/m ²

表-3.4 路面サンプルの表面研磨の有無による比較

		舗装の種類：アスファルト舗装		
		表面研磨の有無	有り	無し
カウンタービーム照明 向き合わせ配列 車線中央取付	水平面照度	E _h	666.4 lx	721.2 lx
	鉛直面照度	E _v	91.8 lx	92.1 lx
	路面輝度	L _r	67.2 cd/m ²	50.5 cd/m ²
	コントラスト係数	L _r /E _v	0.73	0.54
	平均照度換算係数	E _h /L _r	9.9 lx/cd/m ²	14.3 lx/cd/m ²
対称照明 向き合わせ配列	水平面照度	E _h	1051.5 lx	1160.4 lx
	鉛直面照度	E _v	451.9 lx	470.0 lx
	路面輝度	L _r	59.7 cd/m ²	28.0 cd/m ²
	コントラスト係数	L _r /E _v	0.13	0.06
	平均照度換算係数	E _h /L _r	17.6 lx/cd/m ²	41.4 lx/cd/m ²

4. 障害物の視認性

4.1 実験目的

設計速度 60 km/h の場合の障害物の視認性は「カウンタービーム照明に関する研究報告書」¹⁾により、明らかにされているが、前回実施した実験時は野外輝度 $4,000 \text{ cd/m}^2$ に対して、実際に測定された 105 m 手前からの 20° 視野の野外輝度が全般に $4,000 \sim 5,000 \text{ cd/m}^2$ と高かったため、野外輝度が前回よりも低い場合におけるカウンタービーム照明の障害物の視認性について明らかにすることを目的として行った。

4.2 実験方法

実大トンネル実験施設内部の西側車線上に反射率の異なる障害物 3 個を提示し、試験車両となる普通乗用車 3 台を設計速度 60 km/h の視距に相当する障害物より 75 m 手前に停車させておき、被験者はその試験車両の車内よりその提示された障害物の視認性について主観調査による 5 段階評価を行った。

また、同時に被験者の観測条件として障害物輝度と障害物の背景となる路面輝度、障害物の観測者から見える面の鉛直面照度及び輝度についての光学測定を、中央の 1 個については各障害物提示位置毎に、それ以外の障害物については計算により求めた。

障害物輝度と背景路面輝度は図-4.1 に示すように障害物輝度測定ポイント (L_0) は 1 点、背景路面輝度については障害物の周辺輝度 4 点 ($L_1 \sim L_4$) の算術平均値とした。

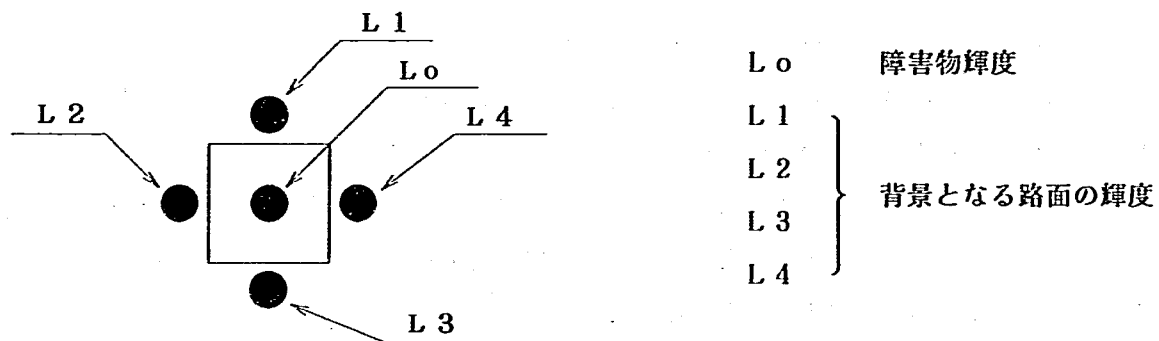


図-4.1 障害物と背景となる路面の輝度測定ポイント

- | | |
|-----------|--|
| ①照明条件 | : カウンタービーム照明、対称照明 |
| ②観測距離 | : 75 m (固定) |
| ③障害物 | : 一辺 20 cm の立方体で表面は光沢のない灰色
表面の反射率 12%、20%、30% 相当各 1 個 |
| ④障害物の提示位置 | : 南坑口より 0, 20, 40, 60, 80, 120, 160 m の西側車線中央 |
| ⑤被験者数 | : 12 名 (4 名 × 3 グループ) |
| ⑥測定機器 | : 視野 4° 輝度計 ミノルタ LS-110 1 台 |

(障害物輝度、障害物の背景路面輝度測定用)

: 照度計 トプコン IM-3 1台

(障害物観測面の鉛直面照度測定用)

4.3 実験結果

(1) 野外輝度および野外水平面・鉛直面照度

観測実験を実施している時間帯における自然光の状態を把握するために野外輝度、野外水平面・鉛直面照度を連続測定した。測定結果を表-4.1、図-4.2(a)～(c)に示す。

表-4.1 実験時の野外輝度、野外水平面・鉛直面照度

実験開始後の経過時間	野外輝度(cd/m ²)		野外水平面照度(lx)		野外鉛直面照度(lx)	
	カウンタービーム	対称照明	カウンタービーム	対称照明	カウンタービーム	対称照明
0分	2900	2800	71000	16600	36500	9500
5分	3000	2800	73000	16600	36500	9600
10分	3200	2800	75000	16600	37500	9400
15分	3200	2700	78000	17000	39000	9400
20分	3300	2600	78000	18000	38000	10000
25分	3400		80000		40000	
30分	3400		80000		40500	

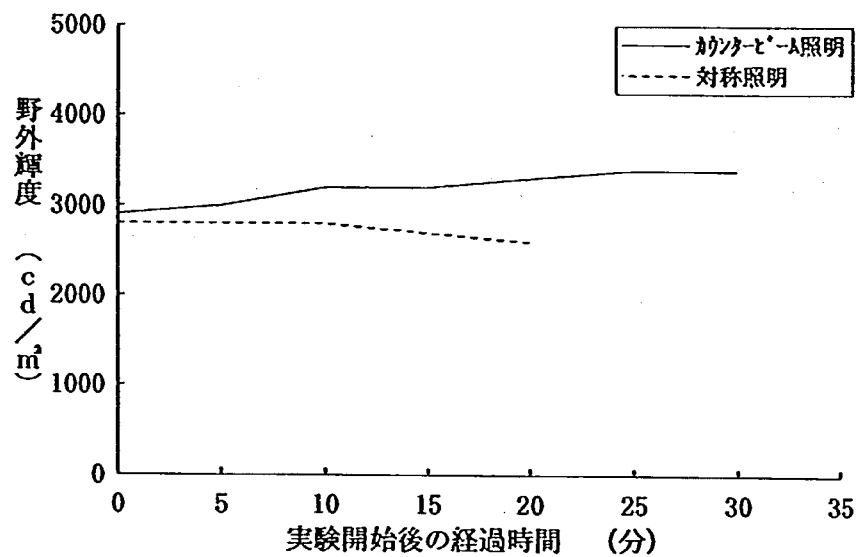
通常、トンネルの入口部照明の設計輝度は、設計速度、トンネル延長、野外輝度等に応じて設計されていることから、実験時の野外輝度の条件は重要な要素である。特に今回のように実験日程の都合上各照明方式により、日時が異なっている場合は各々の観測条件を比較検討するために必要となる。

なお、今回測定した野外輝度は、実大トンネル実験施設南坑口手前105m、地上高1.5mの東側車線中央から20°視野の野外輝度計での測定値である。なお、坑口手前105mを測定点としたのは坑口手前を横断している高架橋が輝度計視野内に入るのを避けるためである。

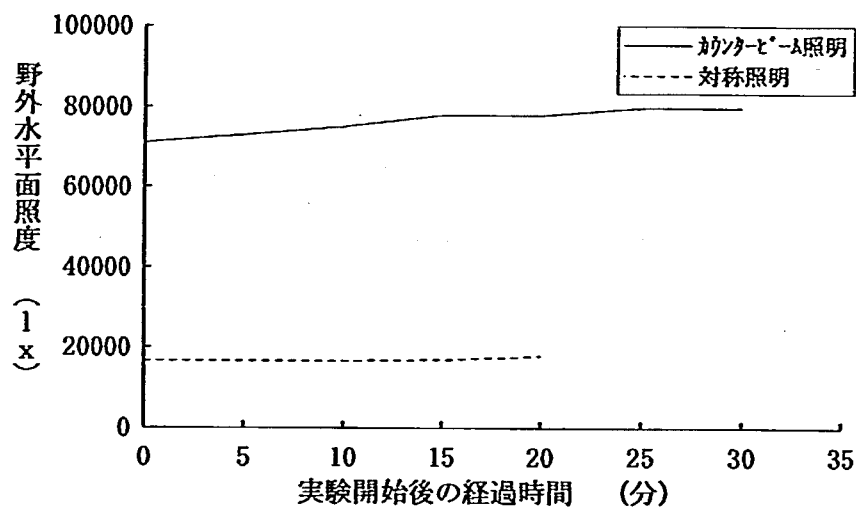
野外の水平面・鉛直面照度についても同時に実大トンネル実験施設南坑口手前113.8m地点にて測定し、水平面照度は地上高1.07m、鉛直面照度はトンネル内に差し込む方向の自然光を地上高0.83mに受光部を設置して測定した。

表-4.2 観測時の野外輝度 L_{20} の平均値

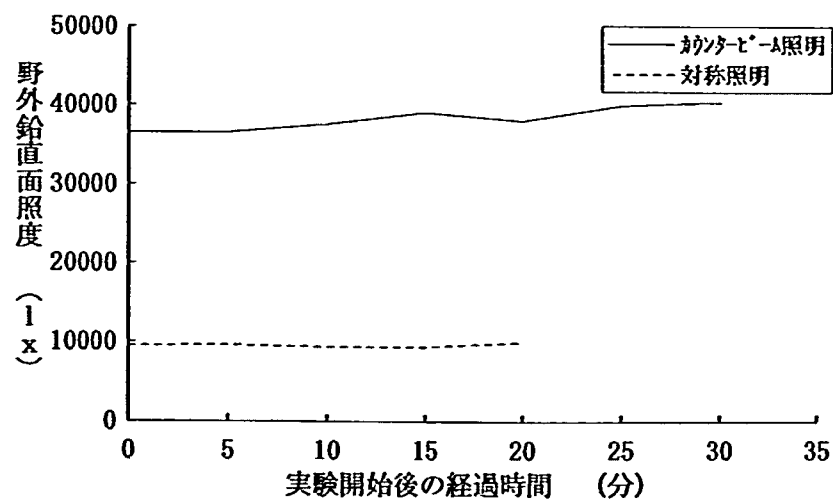
	カウンタービーム	対称照明
L_{20} 平均値 (cd/m ²)	3,200	2,740



図一 4. 2 (a) 野外輝度変動状況



図一 4. 2 (b) 野外水平面照度変動状況



図一 4. 2 (c) 野外鉛直面照度変動状況

(2) 障害物の輝度対比

被験者が観測している時の障害物の視認性を定量的に判断するためにそれぞれの障害物の輝度対比Cを以下の方法により求めた。なお、ここで扱う輝度対比は、通常その絶対値により表されるが、本報告書では背景路面より障害物が明るく見えている状態（以後便宜上これを負の輝度対比と呼ぶ）から背景路面より障害物が明るく見えている状態（以後これを正の輝度対比と呼ぶ）へと変化するトンネル特有の状態を明らかにするために±の表現を付加して検討をしている。

また、提示された3個の障害物の内、反射率12%、30%の2個については実験中に測定をしていないため、以下の方法により求めた。

反射率 ρ (%)を有する完全拡散面で、観測面が観測方向に対し直角に位置している面の輝度Lは、その面の鉛直面照度 E_v 及び反射率 ρ から(4.1)式により求められる。

$$L = (\rho \times E_v) / (100 \times \pi) \quad [\text{cd/m}^2] \quad \dots\dots (4.1)$$

今回実験に使用した障害物は光沢のない表面でほぼ一様な反射率を有することから、完全拡散面と仮定し、観測面も観測方向に対して直角に位置しているため(4.1)式を使用した。測定と計算により求めた障害物の輝度 L_o 及びその背景となる路面の輝度 L_b より輝度対比Cを算出し、その結果を照明方式毎に表-4.3(a)～(c)及び表-4.4(a)～(c)に示し、その推移状況を図-4.3(a)、(b)に示す。

表-4.3 (a) カウンタービーム照明 反射率12% (計算値)

障害物の提示位置 (m)	障害物の鉛直面照度 E _v (lx)	障害物の輝度 L _o (cd/m ²)	背景となる平均路面輝度 L _b (cd/m ²)	輝度対比 C
0 m	31100.0	1188.0	633.8	-0.87
20 m	1092.0	41.7	94.6	0.56
40 m	355.0	13.6	71.1	0.81
60 m	207.0	7.9	59.5	0.87
80 m	142.0	5.4	50.2	0.89
120 m	83.5	3.2	27.9	0.89
160 m	61.3	2.3	15.7	0.85

表-4.3 (b) カウンタービーム照明 反射率20% (測定値)

障害物の提示位置 (m)	障害物の鉛直面照度 E _v (lx)	障害物の輝度 L _o (cd/m ²)	背景となる路面輝度 L _b (cd/m ²)					輝度対比 C
			L1	L2	L3	L4	平均	
0 m	31100.0	2260.0	134.7	199.8	1975.0	225.5	633.8	-2.57
20 m	1092.0	96.0	79.1	84.8	120.2	94.3	94.6	-0.01
40 m	355.0	31.9	64.7	66.4	76.7	76.5	71.1	0.55
60 m	207.0	18.7	55.9	61.9	53.8	66.5	59.5	0.69
80 m	142.0	12.9	38.3	48.3	59.6	54.5	50.2	0.74
120 m	83.5	7.2	22.8	24.9	38.4	25.4	27.9	0.74
160 m	61.3	5.5	12.8	13.6	20.6	15.7	15.7	0.65

表-4.3 (c) カウンタービーム照明 反射率30% (計算値)

障害物の提示位置 (m)	障害物の鉛直面照度 E _v (lx)	障害物の輝度 L _o (cd/m ²)	背景となる平均路面輝度 L _b (cd/m ²)	輝度対比 C
0 m	31100.0	2969.9	633.8	-3.69
20 m	1092.0	104.3	94.6	-0.10
40 m	355.0	33.9	71.1	0.52
60 m	207.0	19.8	59.5	0.67
80 m	142.0	13.6	50.2	0.73
120 m	83.5	8.0	27.9	0.71
160 m	61.3	5.9	15.7	0.63

表-4.4 (a) 対称照明 反射率12% (計算値)

障害物の 提示位置 (m)	障害物の 鉛直面照度 E _v (lx)	障害物の輝度 L _o (cd/m ²)	背景となる 平均路面輝度 L _b (cd/m ²)	輝度対比 C
0 m	7980.0	304.8	297.0	-0.03
20 m	990.0	37.8	96.1	0.61
40 m	620.0	23.7	81.3	0.71
60 m	510.0	19.5	58.3	0.67
80 m	410.0	15.7	51.8	0.70
120 m	185.0	7.1	21.1	0.67
160 m	78.0	3.0	8.6	0.65

表-4.4 (b) 対称照明 反射率20% (測定値)

障害物の 提示位置 (m)	障害物の 鉛直面照度 E _v (lx)	障害物の輝度 L _o (cd/m ²)	背景となる路面輝度 L _b (cd/m ²)					輝度対比 C
			L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	平均	
0 m	7980.0	587.9	102.7	131.1	772.0	182.0	297.0	-0.98
20 m	990.0	76.5	90.4	94.9	106.3	92.7	96.1	0.20
40 m	620.0	46.1	63.9	87.2	87.4	86.5	81.3	0.43
60 m	510.0	37.3	54.5	56.6	68.3	53.7	58.3	0.36
80 m	410.0	29.5	45.9	53.3	56.5	51.6	51.8	0.43
120 m	185.0	13.4	15.0	18.4	28.4	18.6	21.1	0.36
160 m	78.0	5.6	6.7	7.9	11.9	8.6	8.6	0.35

表-4.4 (c) 対称照明 反射率30% (計算値)

障害物の 提示位置 (m)	障害物の 鉛直面照度 E _v (lx)	障害物の輝度 L _o (cd/m ²)	背景となる 平均路面輝度 L _b (cd/m ²)	輝度対比 C
0 m	7980.0	762.1	297.0	-1.57
20 m	990.0	94.5	96.1	0.02
40 m	620.0	59.2	81.3	0.27
60 m	510.0	48.7	58.3	0.16
80 m	410.0	39.2	51.8	0.24
120 m	185.0	17.7	21.1	0.16
160 m	78.0	7.4	8.6	0.13

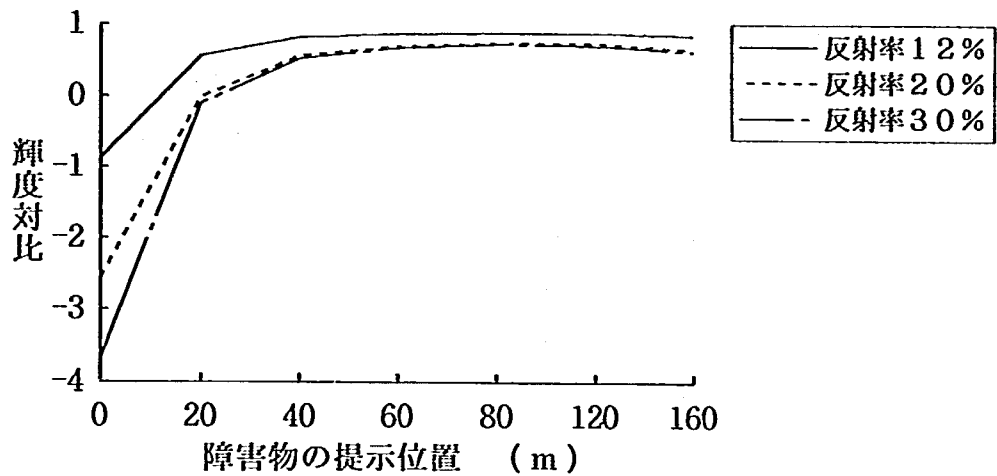


図-4.3 (a) 障害物の反射率の差異による輝度対比の関係 (カウンタービーム照明)

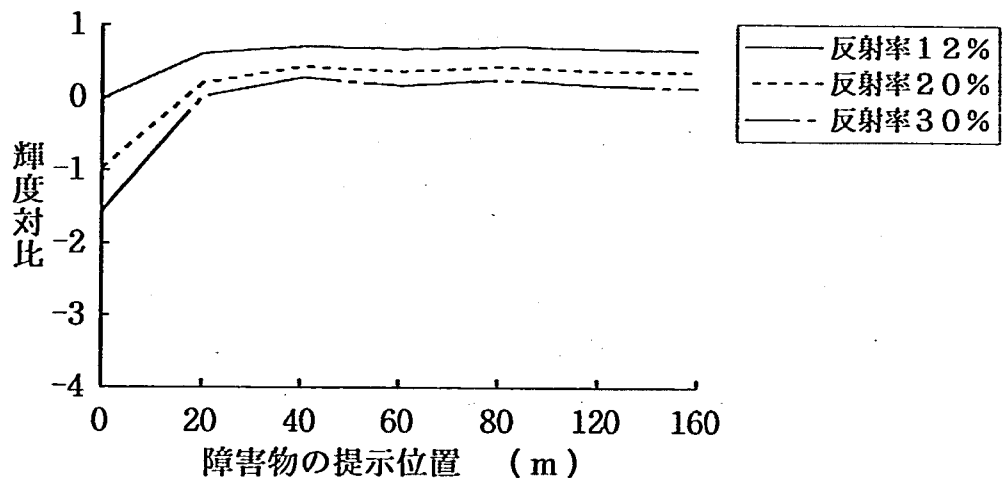


図-4.3 (b) 障害物の反射率の差異による輝度対比の関係 (対称照明)

図-4.3 (a)、(b)より、障害物を0m (トンネル坑口) の位置に提示した場合では自然光の影響を非常に顕著に受けており、照明方式とは関係なく、障害物の反射率によって負の輝度対比で見えている。すなわち、カウンタービーム照明と対称照明で0mの輝度対比が異なっている原因は、そのまま実験時の自然光の差異が輝度対比の差異となって現れている。

障害物提示位置が20、40mとトンネル内部に移行していくと自然光の影響が少なくなり、以下のような照明方式による違いが現れている。

対称照明では、路面と同時に障害物にも光を照射するため、背景となる路面の輝度は等しくても障害物の反射率の差異により、トンネル内部での輝度対比が異なってくる。一方、カウンタービーム照明では障害物の運転者から見える面には光を照射しない特徴を有しているため、障害物の反射率に関わらず対称照明と比較して高い輝度対比を持って安定している。

(3) 被験者による見え方の評価

被験者が反射率の異なる3種類の障害物の視認性について評価した結果、評価尺度の「非常によく見えた」という評価を評点5として以下のように評点に換算し現行の照明方式である対称照明との比較検討を行った。

まったく見えない	-----	評点	1
かろうじて見えた	-----	評点	2
ふつうに見えた	-----	評点	3
よく見えた	-----	評点	4
非常によく見えた	-----	評点	5

表-4.5(a)、(b)に被験者による見え方評価の結果を示す。また、図-4.4(a)～(c)に障害物の反射率別の換算評点の平均値の推移を示す。

実験結果をまず障害物の反射率別で整理すると、対称照明では反射率が高くなるにつれて評点が低下してきており、障害物の視認性はその障害物の反射率により大きく影響を受けることを表している。これに対してカウンタービーム照明ではその傾向が少なくなってきたおり反射率の影響をあまり受けず安定している。

また、野外条件の影響を受けないトンネル内部においてカウンタービーム照明は対称照明と比較して高い評点を得ている結果となった。

図-4.5(a)、(b)に照明方式別の換算評点の平均値の関係を示す。これらの結果から、カウンタービーム照明は対称照明と比較して全体的に高い評価を得ており、特に障害物の反射率による影響を受けにくく、緩和部においても見え方の低下が対称照明よりも少ないことがわかる。

表-4.5(a) 被験者による見え方評価結果(カウンタービーム照明)

障害物提示位置及び反射率		評点1	評点2	評点3	評点4	評点5	平均点	標準偏差
0 m	反射率12%		1	5	5	1	3.5	2.0
	反射率20%			2	5	5	4.3	1.4
	反射率30%			1	5	6	4.4	2.2

障害物提示位置及び反射率		評点1	評点2	評点3	評点4	評点5	平均点	標準偏差
20 m	反射率12%	2	10				1.8	4.0
	反射率20%	1	11				1.9	5.0
	反射率30%		9	3			4.4	3.0

障害物提示位置及び反射率		評点1	評点2	評点3	評点4	評点5	平均点	標準偏差
40 m	反射率12%		4	7	1		2.8	2.4
	反射率20%		4	8			2.7	2.0
	反射率30%		4	8			2.7	2.0

障害物提示位置及び反射率		評点1	評点2	評点3	評点4	評点5	平均点	標準偏差
60 m	反射率12%		1	8	3		3.2	2.9
	反射率20%		1	8	3		3.2	2.9
	反射率30%		1	9	2		3.1	3.6

障害物提示位置及び反射率		評点1	評点2	評点3	評点4	評点5	平均点	標準偏差
80 m	反射率12%		1	3	5	3	3.8	1.4
	反射率20%		1	2	5	4	4.0	1.6
	反射率30%		1	2	7	2	3.8	2.3

障害物提示位置及び反射率		評点1	評点2	評点3	評点4	評点5	平均点	標準偏差
120 m	反射率12%		1	2	7	2	3.8	2.3
	反射率20%		1	2	7	2	3.8	2.3
	反射率30%		2	2	7	1	3.6	2.3

障害物提示位置及び反射率		評点1	評点2	評点3	評点4	評点5	平均点	標準偏差
160 m	反射率12%		1	5	4	2	3.6	1.6
	反射率20%		2	7	4	1	3.2	2.3
	反射率30%		3	6	2	1	3.1	1.9

表－４．５（ｂ） 被験者による見え方評価結果（対称照明）

障害物提示位置及び反射率		評点 1	評点 2	評点 3	評点 4	評点 5	平均点	標準偏差
0 m	反射率 1 2 %		1	1 0	1	1	3.2	3.9
	反射率 2 0 %			2	8	3	4.1	2.6
	反射率 3 0 %			2	5	6	4.3	1.7

障害物提示位置及び反射率		評点 1	評点 2	評点 3	評点 4	評点 5	平均点	標準偏差
2 0 m	反射率 1 2 %	1	7	3	2		2.5	2.3
	反射率 2 0 %	2	8	3			2.1	2.6
	反射率 3 0 %	5	8				1.6	1.5

障害物提示位置及び反射率		評点 1	評点 2	評点 3	評点 4	評点 5	平均点	標準偏差
4 0 m	反射率 1 2 %		4	6	3		2.9	1.2
	反射率 2 0 %		8	5			2.4	1.5
	反射率 3 0 %	4	9				1.7	2.5

障害物提示位置及び反射率		評点 1	評点 2	評点 3	評点 4	評点 5	平均点	標準偏差
6 0 m	反射率 1 2 %		4	5	4		3.0	0.5
	反射率 2 0 %	1	7	5			2.3	2.5
	反射率 3 0 %	4	9				1.7	2.5

障害物提示位置及び反射率		評点 1	評点 2	評点 3	評点 4	評点 5	平均点	標準偏差
8 0 m	反射率 1 2 %			7	5	1	3.5	2.5
	反射率 2 0 %		2	1 1			2.8	4.5
	反射率 3 0 %	2	1 1				1.8	4.5

障害物提示位置及び反射率		評点 1	評点 2	評点 3	評点 4	評点 5	平均点	標準偏差
1 2 0 m	反射率 1 2 %		5	7	1		2.7	2.5
	反射率 2 0 %	2	1 1				1.8	4.5
	反射率 3 0 %	1 2	1				1.1	5.5

障害物提示位置及び反射率		評点 1	評点 2	評点 3	評点 4	評点 5	平均点	標準偏差
1 6 0 m	反射率 1 2 %	1	1 0	2			2.1	4.0
	反射率 2 0 %	4	9				1.7	2.5
	反射率 3 0 %	1 2	1				1.1	5.5

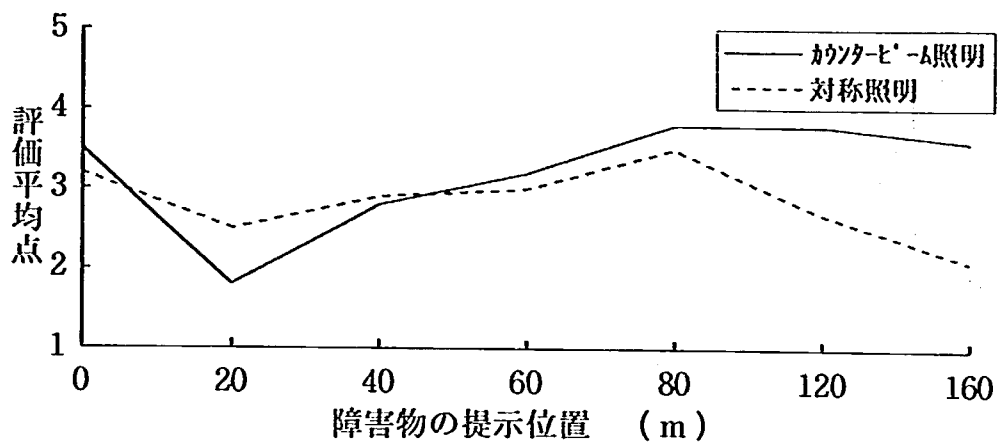


図-4.4 (a) 反射率の差異による障害物の見え方 反射率12%

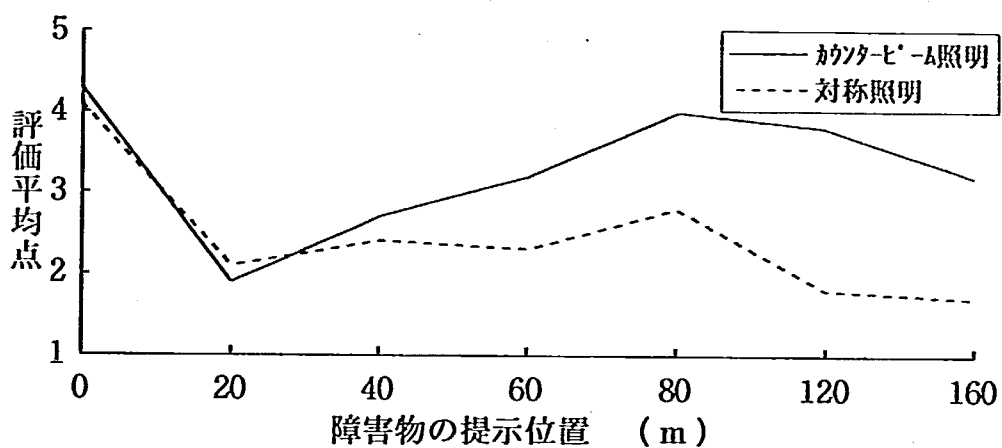


図-4.4 (b) 反射率の差異による障害物の見え方 反射率20%

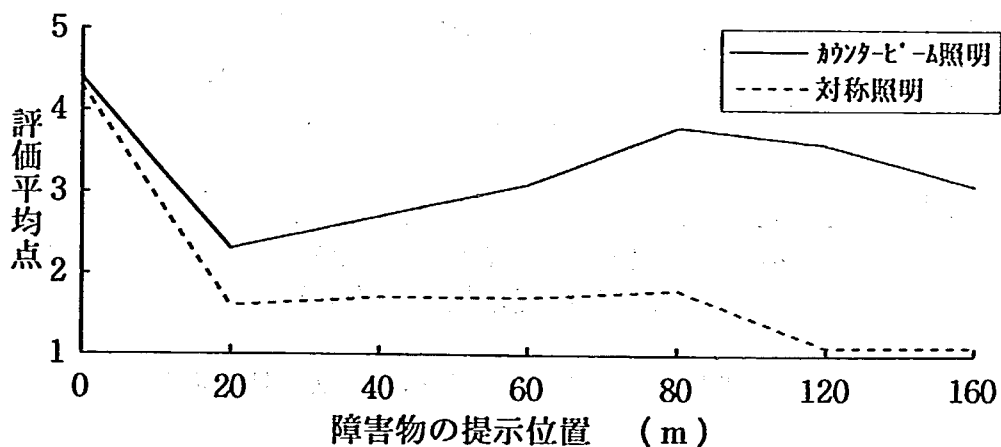


図-4.4 (c) 反射率の差異による障害物の見え方 反射率30%

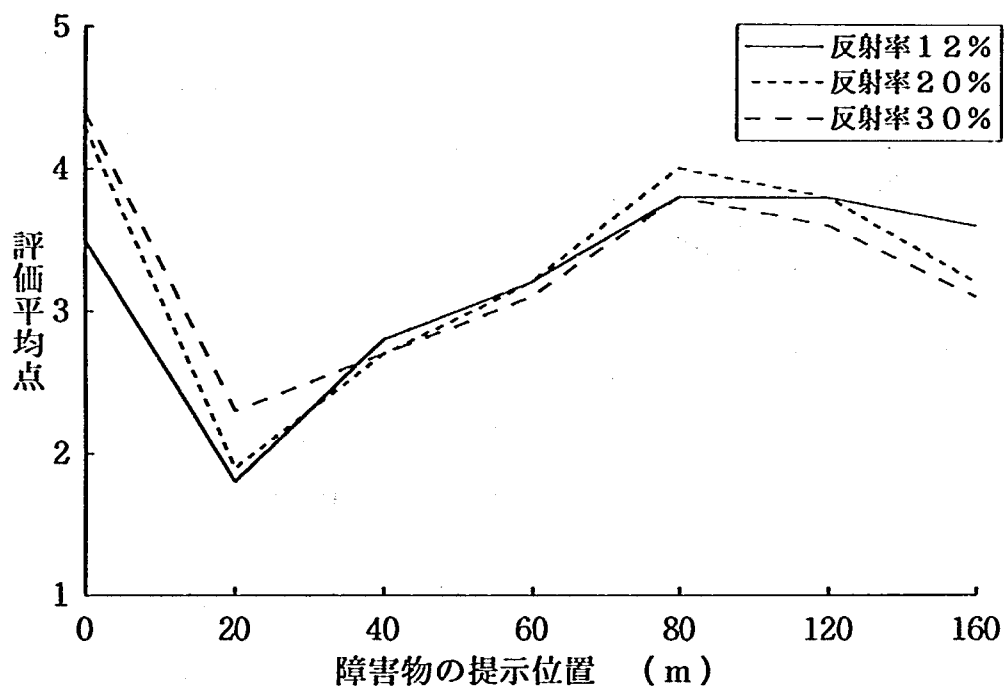


図-4.5 (a) 照明方式の差異による障害物の見え方 カウンタービーム照明

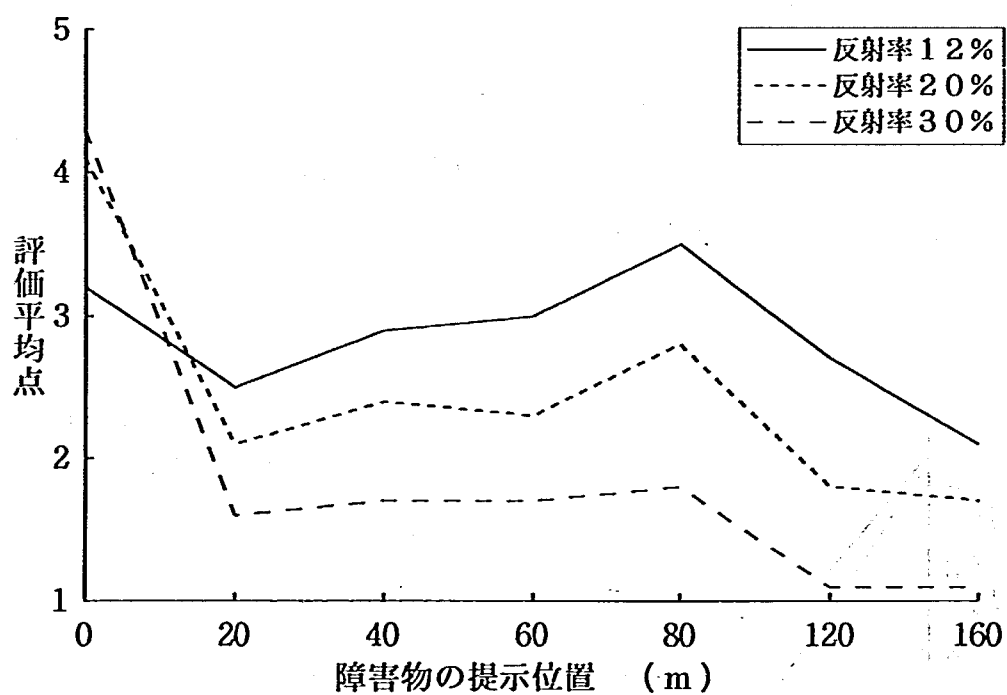


図-4.5 (b) 照明方式の差異による障害物の見え方 対称照明

4.4 まとめ

これまでの実験結果をもとに検討を重ねていくと、カウンタービーム照明は障害物の輝度対比の測定で、障害物の反射率に関わらず対称照明と比較して高い輝度対比を持って安定しており、また、被験者による見え方の評価でも障害物の反射率に関わらず高い評価で安定している。この両者の間には相関関係が存在することと思われる。

そこで、被験者による見え方の評価結果の平均値と障害物とその背景となる路面の輝度対比の関係により検討を加えた。ここでは、障害物の反射率の区別はしておらず、全てのデータを使用した。ただし、坑口付近において負の輝度対比となる結果については自然光により輝度対比が1を越える突出値を削除し整理した。

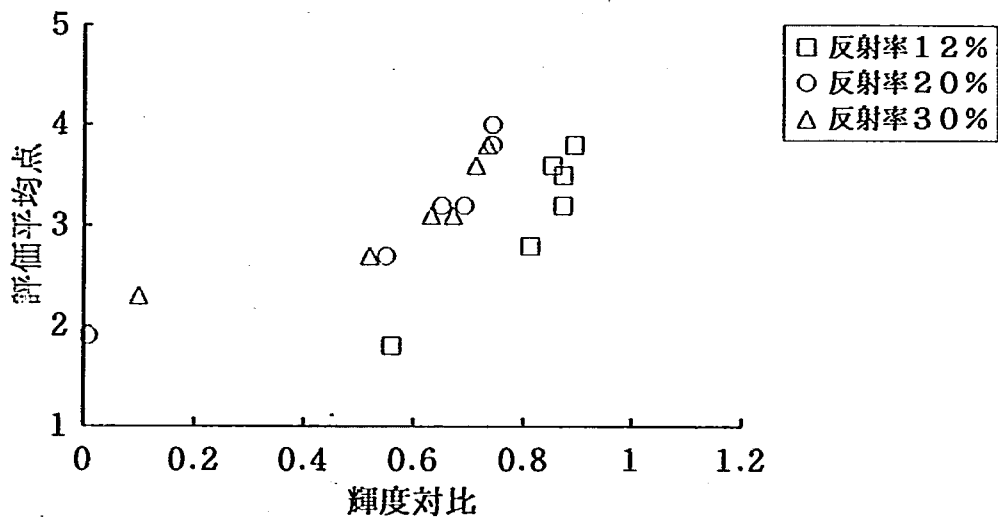


図-4.6 (a) 見え方と輝度対比の関係 カウンタービーム照明

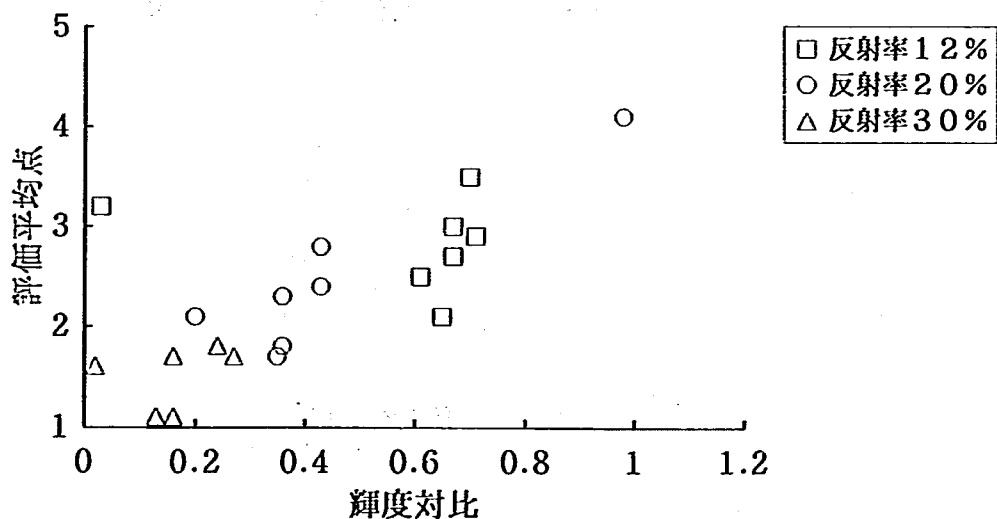


図-4.6 (b) 見え方と輝度対比の関係 対称照明

図-4.6 (a)、(b)は、それぞれの照明方式別で、障害物の反射率の違いによる輝度対比と評点平均値の関係を表したものである。カウンタービーム照明では多くのデータが輝度対比0.6以上、評点の平均値3から4に集中しているのに対して、対称照明では輝度対比0から0.7付近までばらついており、評点もそのほとんどが3以下の値となっている。

また、障害物の反射率に注目すると、カウンタービーム照明の12%で、0.8以上と高くなっており、20%、30%については輝度対比は幾分低下するが、被験者の評価としては低下することはなかった。それに対して、対称照明では反射率の低下に従い輝度対比、見え方とともに低下する傾向となり、広範囲に分布する結果となった。

また、野外輝度が高い場合に行った「カウンタービーム照明に関する研究報告書」¹⁾の実験結果と比較するために図-4.7 (a)に照明方式毎にまとめた後、回帰直線を求めた結果を示し、図-4.7 (b)に「カウンタービーム照明に関する研究報告書」¹⁾の実験結果及び回帰直線を示す。

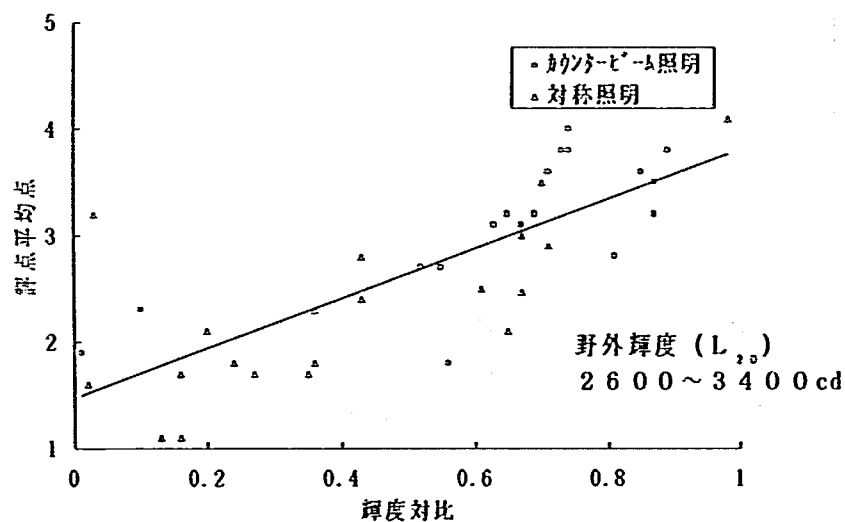


図-4.7 (a) 見え方と輝度対比の関係(今回実験結果)

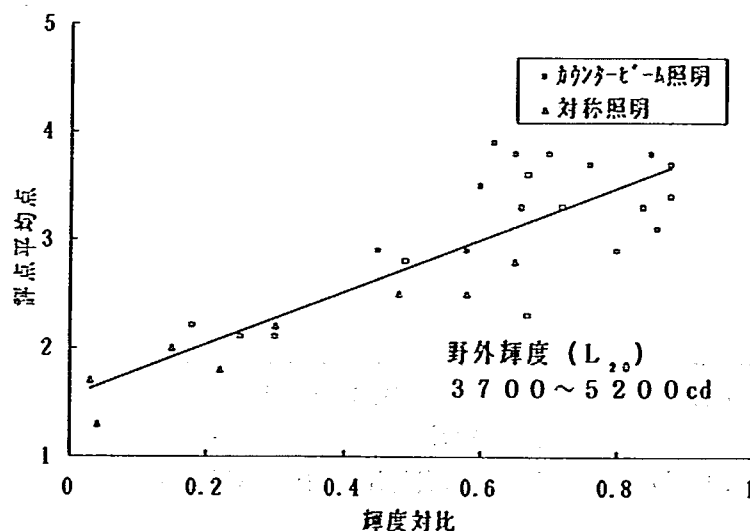


図-4.7 (b) 見え方と輝度対比の関係(前回実施した実験結果¹⁾)

今回実験時の回帰直線の相関係数は0.79であり、同じく、「カウンタービーム照明に関する研究報告書」実験時における相関係数は0.82であった。

また、「カウンタービーム照明に関する研究報告書」¹¹の実験結果である図-4.7(b)と、今回の実験結果である図-4.7(a)とを比較すると傾きがほぼ等しく、被験者による見え方の評価結果の平均値と障害物とその背景となる路面の輝度対比の間に相関関係があることは確認されたが、その差異は少なく、今回の実験からは野外輝度の差異による障害物の視認性についての有意差を見いだすことは出来なかった。

5. 大型車による遮光の影響確認実験

大型車が連続して走行する場合に、後続する車は先行する大型車の影に障害物が入ると障害物の存在が分かりにくくなることが懸念される。そこで、大型車による遮光の影響によって、障害物の視認性がどのように変化するかの実験を行った。以下にその実験概要を示す。

5.1 実験方法

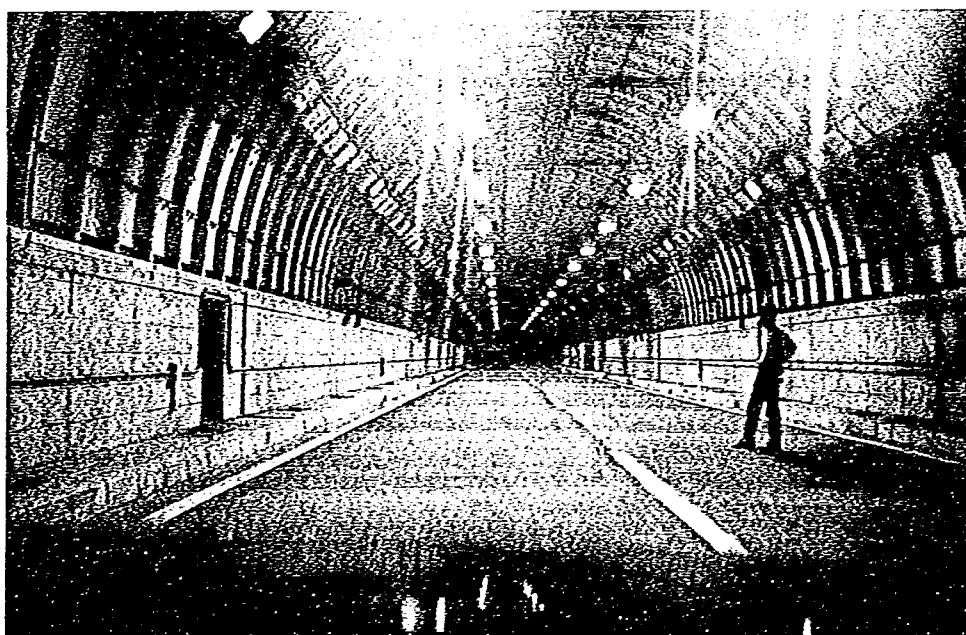
大型車による遮光の度合いによって、障害物の視認性にどのように影響するかを確認するため、静止実験による観測確認を行なった。

- ・実験車線：西側（走行）車線を使用した。
- ・観測距離：観測位置から75m前方に大型車を停止させ、大型車の後方3mに障害物を提示し観測実験を行なった。
- ・設定状況：表－5.1に示すとおり、トンネル内の代表的な3点を設定した。

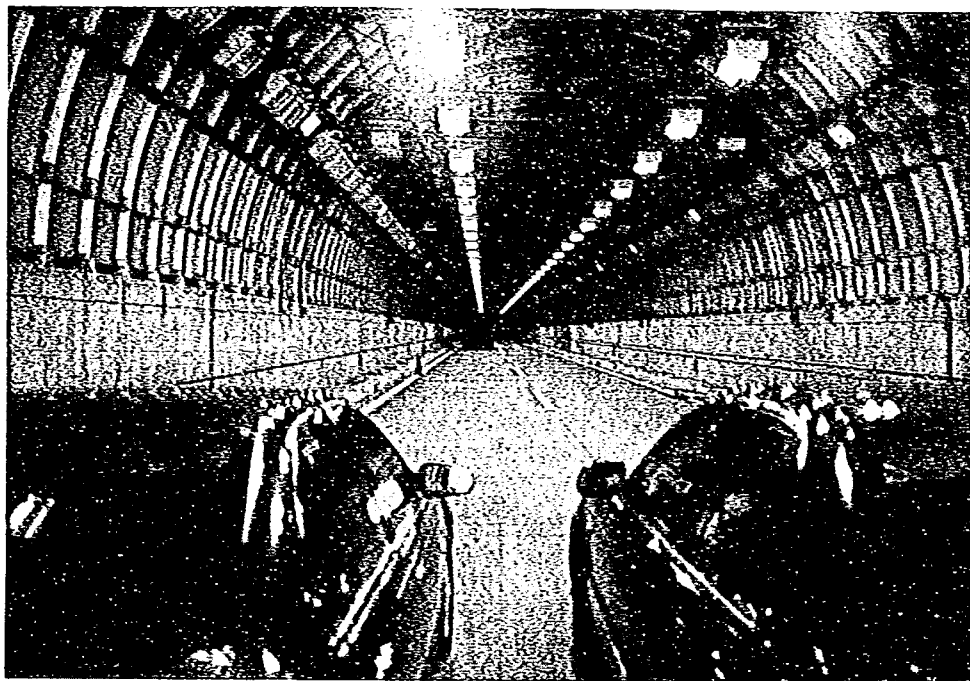
表－5.1 障害物の設定

実験No	大型車の停止位置	障害物の提示位置	観測位置
1	坑口より 23m(観測下)	坑口より 20m	坑口手前 55m
2	” 90m(観測側)	” 87m	坑口より 13m
3	” 160m(観測側)	” 157m	” 85m

- ・障害物：一辺20cmの反射率の異なる立方体3種類（N4，5，6）
 - ・輝度測定：障害物（反射率：N5）を測定した。測定器は、ミノルタ輝度計視角 1/3度を使用した。
- 写真－5.1～5.2にその実験状況写真を示す。



写真－5.1 運転席からの観測状況(カウンタービーム照明)



写真－5.2 観測位置（車の位置）からの状況（カウンタービーム照明）

5.2 実験結果

遮光の状況は反対側車線の器具からの照射により、予想された以上に少ないことがわかった。障害物の提示位置による測定結果と、視認性アンケートの結果を表－5.2～表－5.4に示す。また、その測定状況を写真－5.3～写真－5.5に示す。影の発生状況を写真－5.6、写真－5.7示す。

カウンタービーム照明は、対称照明よりも大型車の影が生じやすかったが、その影は写真－5.6、写真－5.7に示すように予想した以上に小さく、大型車の後方3 m程であった。これは反対側車線の器具からの照射により、生じる影が小さくなっていたことによる。大型車の後部の遮光された部分での障害物は、カウンタービーム照明が対称照明に比べて若干低いものの、両照明方式ともに視認しにくくなることが分かった。特に、反射率の小さい障害物でその傾向が強いことが分かる。これは、背景となる部分の路面輝度が影の影響により低くなり、反射率の高い比較的明るい障害物が視認しやすくなるものと考えられる。アンケート結果から障害物が見えにくくなるのは、影の中に状況および影の中に障害物が存在する場合と考えられるが、実際の車両の走行時は、大型車等により遮光される影は常に移動していること、影の範囲は狭いことなどから、走行時の大型車による遮光の影響は実際の走行に支障はないと考えられる。

表－ 5. 2 障害物の提示位置による測定結果および視認性アンケートの結果

(カウンタービーム照明：車線中央)

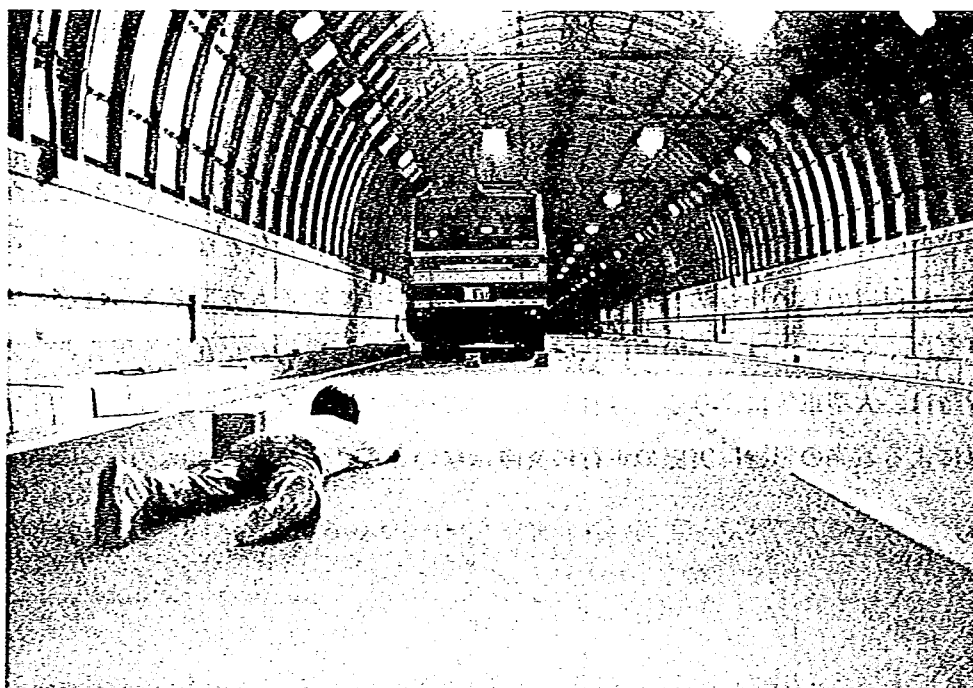
(a) 障害物の提示位置による測定結果

測定日時：平成6年 8月 2日(火) 14:15～ 15:15 天候：うす曇り

障害物の 提示位置 (距り)	障害物の 鉛直面照度 (lx)	障害物の 輝度L _o (cd/d)	背景の輝度 (cd/d)					輝度対比 C=L-L _o /L
			①	②	③	④	平均L	
20m	900.0	77.0	53.2	27.7	36.3	98.0	53.8	--0.43
87m	118.0	9.9	31.4	4.0	38.7	4.3	19.6	0.49
車無し "	119.0	10.1	39.6	45.9	50.8	48.7	46.3	0.76
157m	68.0	5.4	10.3	1.7	12.9	9.0	6.7	0.19

(b) 視認性アンケート結果

障害物の 提示位置 (距り)	障害物の反射率		評 価 内 容					合 計	平均値
			まったく 見えない	ほとんど 見えない	やや見 えない	よく見 える	非常に よく見 える		
20m	N4	12%		5	1			6名	2.2
	5	20%		3	3			6	2.5
	6	30%		1	2	3		6	3.8
87m	N4	12%	4	2				6	1.3
	5	20%	4	2				6	1.3
	6	30%	1	4	1			6	2.0
157m	N4	12%	2					2	1.0
	5	20%	2					2	1.0
	6	30%		2				2	2.0



写真－ 5. 3 観測時の状況写真

表－ 5. 3 障害物の提示位置による測定結果および視認性アンケートの結果

(カウンタースピーム照明：車線中央)

(a) 障害物の提示位置による測定結果

測定日時：平成6年 8月 3日(水)

9：10～ 9：50

天候：晴

障害物の 提示位置 (距路肩側)	障害物の 鉛直面照度 (lx)	障害物の 輝度L _o (cd/m ²)	背景の輝度 (cd/m ²)					輝度対比 C=L-L _o /L
			①	②	③	④	平均L	
20m	1,084.0	90.9	72.0	23.2	105.2	20.6	55.3	-0.64
87m	131.8	11.8	38.5	3.1	34.1	3.1	19.7	0.40
車無し "	144.0	13.1	34.8	42.4	48.1	47.5	43.2	0.70
157m	62.3	5.3	12.5	1.2	15.5	1.4	7.7	0.31
車無し "	68.2	5.7	13.3	12.9	22.7	17.5	16.6	0.66

(b) 視認性アンケート結果

障害物の 提示位置 (距路肩側)	障害物の反射率		評 価 内 容					合 計	平均値
			まったく 見えない	ほとんど 見えない	ほとんど 見えた	よく 見えた	よく見えた		
20m	N 4	12%	1	11	1			13名	2.0
	5	20%	1	10	2			13	2.1
	6	30%		5	8			13	2.6
87m	N 4	12%	10	3				13	1.2
	5	20%	8	5				13	1.4
	6	30%	5	6	1	1		13	1.8
157m	N 4	12%	12	1				13	1.1
	5	20%	9	4				13	1.3
	6	30%	3	10				13	1.8



写真－ 5. 4 観測時の状況写真

表－５．４ 障害物の提示位置による測定結果および視認性アンケートの結果（対称照明）

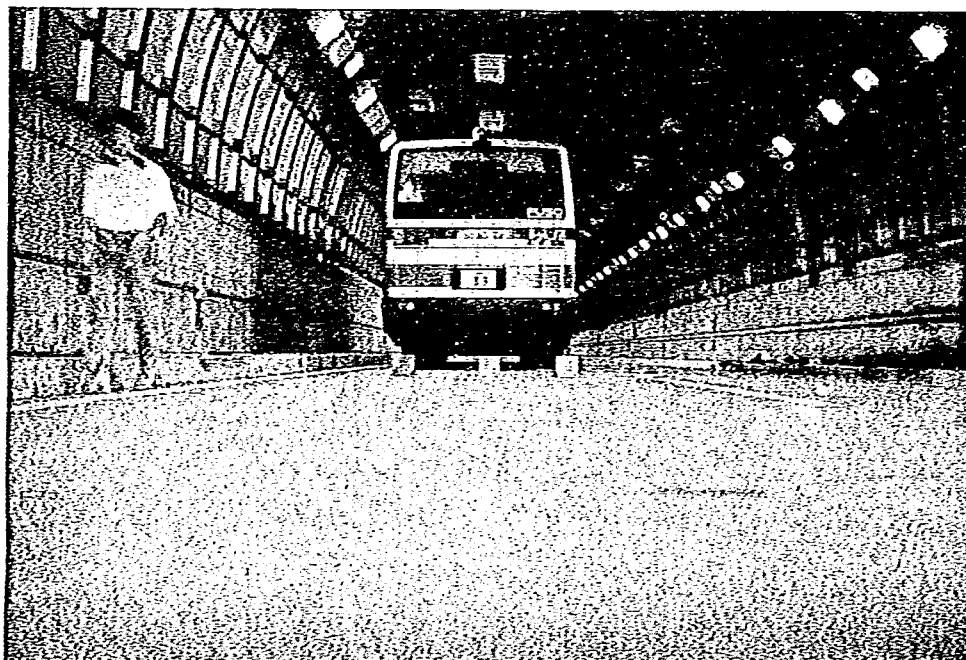
（ａ）障害物の提示位置による測定結果

測定日時：平成６年 ８月 ３日（水） １５：４７～ １６：０９ 天候：晴

障害物の 提示位置 (距路肩距離)	障害物の 鉛直面照度 (lx)	障害物の 輝度 L_o (cd/m ²)	背景の輝度 (cd/m ²)					輝度対比 $C=L-L_o/L$
			①	②	③	④	平均 L	
２０m	1,065.0	82.4	65.7	16.9	110.0	12.6	51.3	-0.61
８７m	345.0	25.5	41.8	3.5	53.6	3.3	25.6	0.004
車無し "	341.0	24.8	43.2	46.4	52.5	46.7	47.2	0.47
１５７m	101.0	7.4	5.9	1.1	13.4	0.9	5.3	-0.40
車無し "	102.0	7.4	6.6	9.2	13.2	9.1	9.7	0.24

（ｂ）視認性アンケート結果

障害物の 提示位置 (距路肩距離)	障害物の反射率	評 価 内 容					合 計	平均値
		まったく 見えない	ほとんど 見えない	やや見 えない	よく見 える	非常に よく見 える		
２０m	N 4 12%	3	9				12名	1.8
	5 20%		10	2			12	2.1
	6 30%		3	9			12	2.8
８７m	N 4 12%	2	8	2			12	2.0
	5 20%		8	4			12	2.3
	6 30%	3	5	4			12	2.1
１５７m	N 4 12%	7	5				12	1.4
	5 20%		12				12	2.0
	6 30%	1	7	4			12	2.3



写真－５．５ 観測時の状況写真

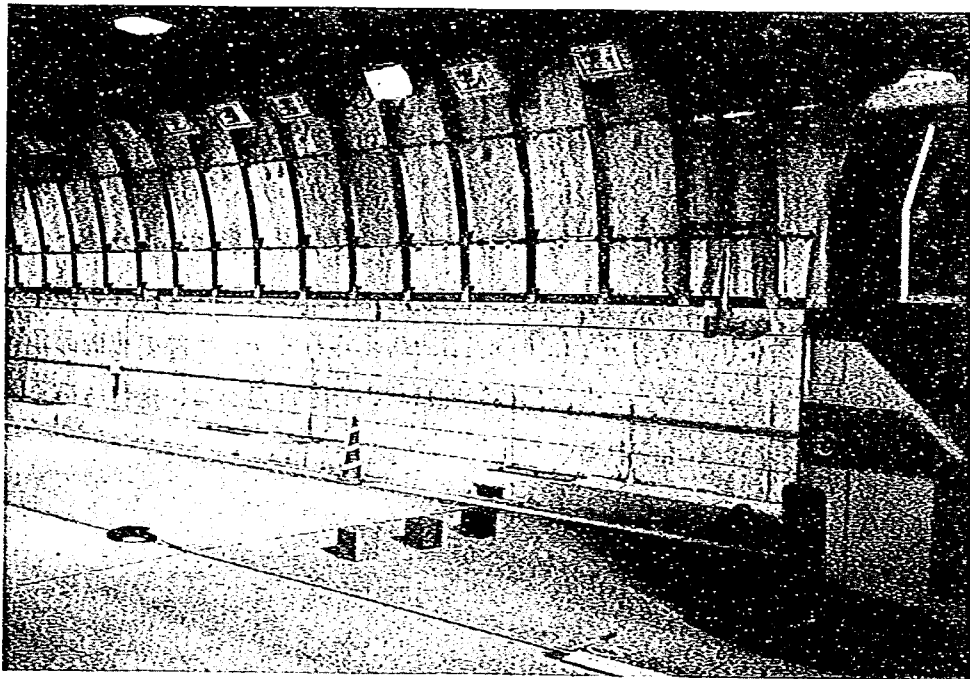


写真- 5. 6 カウンタービーム照明時の影の発生状況

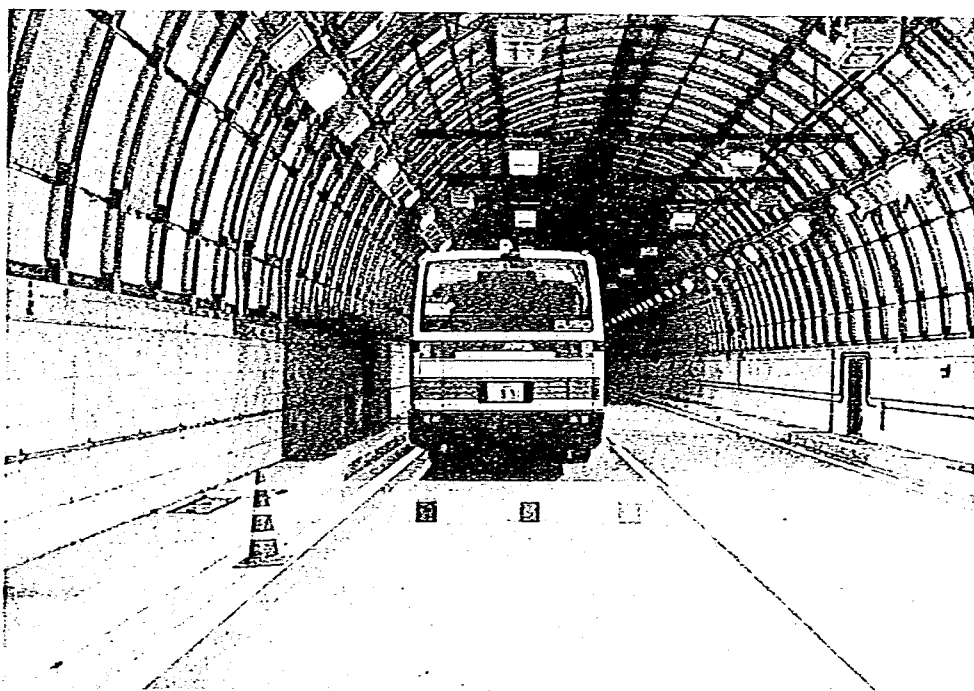


写真- 5. 7 対称照明時の影の発生状況

5.3 まとめ

カウンタービーム照明は、対称照明よりも大型車の影が生じやすかったが、その影の範囲は予想した以上に小さく、大型車の後方3 m程度であった。これは反対車線の器具からの照射により、生じる影が小さくなっていたことによる。大型車の後部の遮光された部分での障害物は、カウンタービーム照明が対称照明に比べて若干低いものの、両照明方式ともに視認しにくくなることが分かった。特に、反射率の小さい障害物でその傾向が強いことが分かる。これは、背景となる部分の路面輝度が影の影響により低くなり、反射率の高い比較的明るい障害物が視認しやすくなるものと考えられる。アンケート結果から障害物が見えにくくなるのは、影の中に状況および影の中に障害物が存在する場合と考えられるが、実際の車両の走行時は、大型車等により遮光される影は常に移動していること、影の範囲は狭いことなどから、走行時の大型車による遮光の影響は実際の走行に支障はないと考えられる。

6. 照明器具からのグレア (T I 値)

6.1 目的

実験は、入口照明と基本照明のすり付け区間の路面輝度を前回の照明条件と変更したことにより、どの程度のグレア (T I 値) の差異が生じるかの測定を行い、その測定結果から求めた T I 値への影響を比較検討し、基本照明とのすり付け方法について検討することを目的に行う。

6.2 測定方法

(1) 測定場所

測定場所及び舗装は次に示すとおりである。

- ・ 場所 建設省 土木研究所 実大トンネル
- ・ トンネル坑口の方位 南
- ・ 舗装の種類 コンクリート舗装 (粗面仕上げ)

(2) 照明方式

- ・ カウンタービーム照明 (照明器具を車線中央に配置した場合)
- ・ 対称照明

(3) 測定項目・方法

1) 等価光幕輝度の測定

等価光幕輝度の測定は、乗用車内の運転者の目の高さ (地上高さ 1.2 m) の取付け台に測定器の受光部を俯角 1 度に設置し、人工照明のみで照明されている条件下における乗用車の進行方向の等価光幕輝度の測定を行った。

2) 路面輝度の測定

路面輝度の測定は、乗用車外で地上高さ 1.2 m になるよう測定計器を保持し、俯角約 1 度となる 60 m 前方の人工照明のみで照明されているトンネル内路面の輝度の測定を行った。

測定範囲は坑口部からトンネル内部の 230 m までとし、測定間隔は坑口部から 140 m までは 20 m、160 m から 230 m までは 10 m 間隔にて測定を行った。測定位置は東側車線中央にて測定を行い、また測定中は自然光の影響を受けないように、坑口のシャッターは閉鎖した状態にて測定を行った。図-6.1 および写真-6.1 に測定状況を示す。

(4) 測定器

測定には次の測定器を使用した。

- (1) 等価光幕輝度測定・・・等価光幕輝度計 (岩崎電気製 20DP 形)
- (2) 路面輝度測定・・・トプコン輝度計 (BM-3 形 視角 0.2 度)

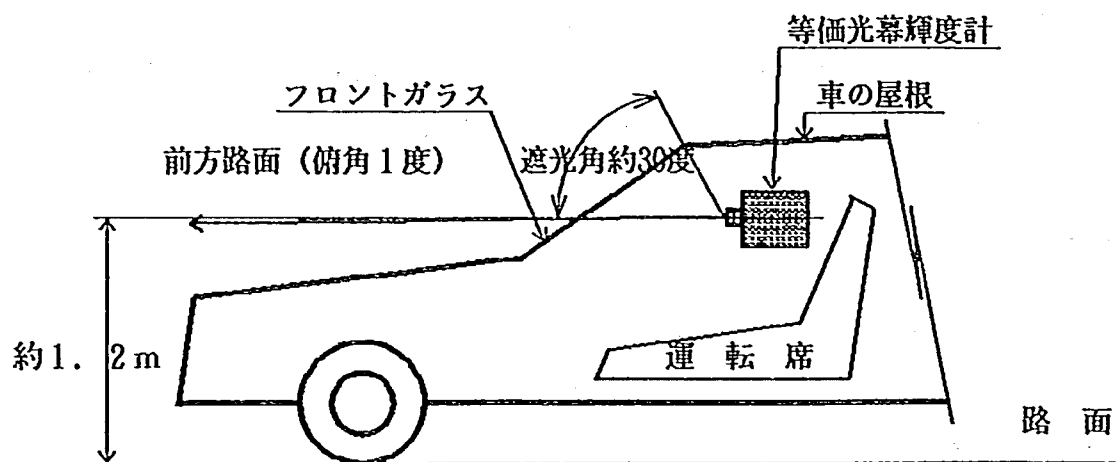


図-6.1 等価光幕輝度の測定（車の屋根による遮光の影響あり・遮光角約30度）

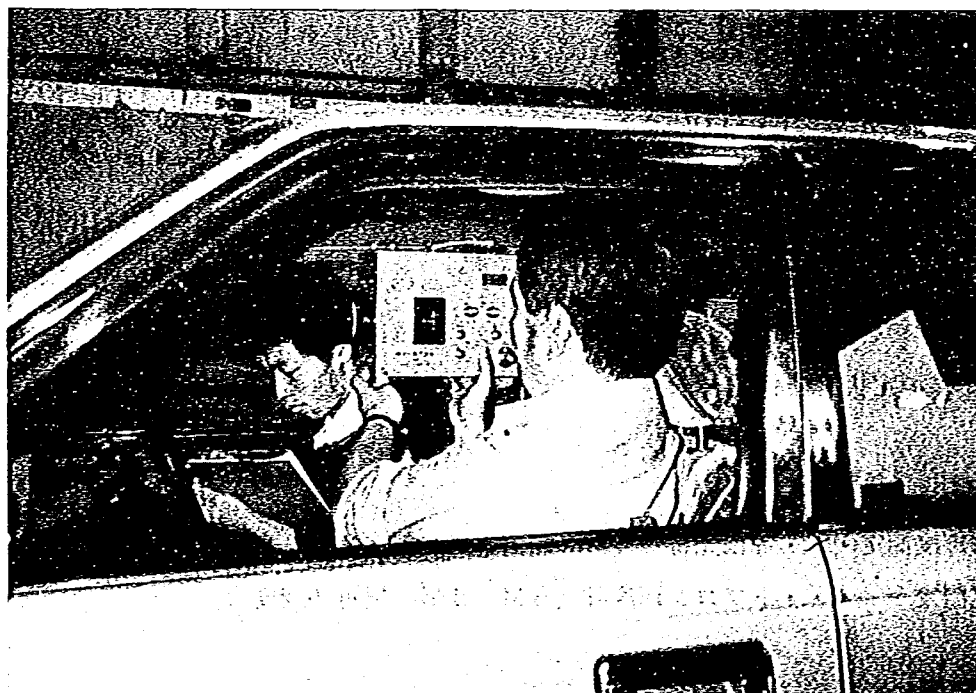


写真-6.1 等価光幕輝度測定状況

6.3 測定結果

等価光幕輝度および路面輝度の測定結果、および結果をもとに算出したT I 値を表- 6. 1 から表- 6. 3 に示す。

乗用車の屋根による遮光の影響なしの測定条件下におけるカウンタービーム照明（車線中央）の照明器具によるT I 値の算出結果と、前回実施したT I 値の算出結果¹⁾を比較したものを図- 6. 2 に示す。前回実施した実験結果と比較して、入口照明が設置されていない区間（トンネル坑口から230m以降）の路面輝度値を測定する170m以降の区間のT I 値が小さい値を示し、入口照明の終端と基本照明のすり合わせ部（200～230m）でのT I 値も小さい値を示している。これは、入口照明の終端と基本照明との照明レベルの差（前回約4倍）を3倍以内におさえたことが一因と考えられる。

車の屋根により遮光した場合のT I 値の算出結果を図- 6. 3 に示す。遮光した場合には、遮光なしの図- 6. 2 と比べて若干低い値を示している。これは、測定結果から判断すると、遮光することにより等価光幕輝度が低くなることによりT I 値が減少するためである。遮光しない場合の照明器具からのグレア（T I 値）は、C I E（国際照明委員会）、CEN（欧州標準化委員会）でそれぞれ推奨している15%²⁾、30%³⁾に対して高い値を示すことが分かった。しかし、遮光した場合は等価光幕輝度が低くなることによりT I 値が低くなる傾向を示しており、今後、T I 値の評価とともに、測定器と乗用車内の運転者の眼の位置との関係、遮光角を変化させた時にT I 値がどのように変化するか、あるいは、路面輝度の測定方法等によりT I 値がどのように変化するかを検討を行うことが重要と考える。

表-6.1 照明器具によるT I 値

- ・測定日 : 1994年 8月 2日
- ・測定条件 : 車の屋根による遮光の影響なし
- ・照明方式 : カウンタービーム照明(車線中央)

測定位置 (m)	測定時刻	路面輝度 (cd/m ²)	等価光幕輝度 (cd/m ²)	T I 値 (%)
0 (60)	17:00	61	11.0	13.9
20 (80)	17:03	56	11.0	15.2
40 (100)	17:05	45	12.0	20.9
60 (120)	17:07	42	9.7	18.2
80 (140)	17:08	27	9.1	27.1
100 (160)	17:09	23	5.8	20.4
120 (180)	17:11	14	5.3	31.6
140 (200)	17:12	10	3.7	31.8
160 (220)	17:13	10	3.0	25.4
170 (230)	17:15	6	2.1	30.4
180 (240)	17:16	4	1.7	36.4
190 (250)	17:18	4	1.0	21.2
200 (260)	17:19	3	1.2	32.5
210 (270)	17:20	3	1.3	35.2
220 (280)	17:22	3	1.1	29.7
230 (290)	17:23	3	0.4	10.8

注) () 内の数値は、路面輝度の測定対象とした路面の位置である。

表-6.2 照明器具によるT I 値

- ・測定日 : 1994年 8月 2日
- ・測定条件 : 車の屋根による遮光の影響あり(遮光角度30°)
- ・照明方式 : カウンタービーム照明(車線中央)

測定位置 (m)	測定時刻	路面輝度 (cd/m ²)	等価光幕輝度 (cd/m ²)	T I 値 (%)
0 (60)	17:01	61	7.3	9.2
20 (80)	17:04	56	7.3	10.1
40 (100)	17:06	45	7.3	12.7
60 (120)	17:09	42	6.2	11.6
80 (140)	17:10	27	5.2	15.5
100 (160)	17:12	23	3.4	12.0
120 (180)	17:13	14	2.8	16.7
140 (200)	17:14	10	2.0	16.9
160 (220)	17:16	10	1.5	12.7
170 (230)	17:17	6	1.1	15.9
180 (240)	17:18	4	0.9	19.3
190 (250)	17:19	4	0.5	10.7
200 (260)	17:20	3	0.6	16.2
210 (270)	17:21	3	0.6	16.2
220 (280)	17:23	3	0.5	13.5
230 (290)	17:24	3	0.2	5.4

注) () 内の数値は、路面輝度の測定対象とした路面の位置である。

表-6.3 照明器具によるT I 値

・測定日 : 1994年 8月 3日
 ・測定条件 : 車の屋根による遮光の影響あり(遮光角約30°)
 ・照明方式 : 対称照明

測定位置 (m)	測定時刻	路面輝度 (cd/m ²)	等価光幕輝度 (cd/m ²)	T I 値 (%)
0 (60)	14:24	67	3.0	3.4
20 (80)	14:26	56	3.4	4.7
40 (100)	14:28	43	3.4	6.2
60 (120)	14:29	30	2.7	7.2
80 (140)	14:31	17	2.4	11.6
100 (160)	14:32	12	1.5	10.5
120 (180)	14:33	10	1.0	8.4
140 (200)	14:35	8	0.7	7.5
160 (220)	14:37	6	0.5	7.2
170 (230)	14:38	4	0.4	8.6
180 (240)	14:40	4	0.3	6.4
190 (250)	14:41	4	0.3	6.4
200 (260)	14:43	4	0.3	6.4
210 (270)	14:45	4	0.2	4.3
220 (280)	14:46	3	0.2	5.4
230 (290)	14:47	3	0.2	5.4

注) () 内の数値は 路面輝度の測定対象とした路面の位置である。

測定条件: 車の屋根による遮光なし
 ●: 今回の測定結果 ○: 前回の測定結果

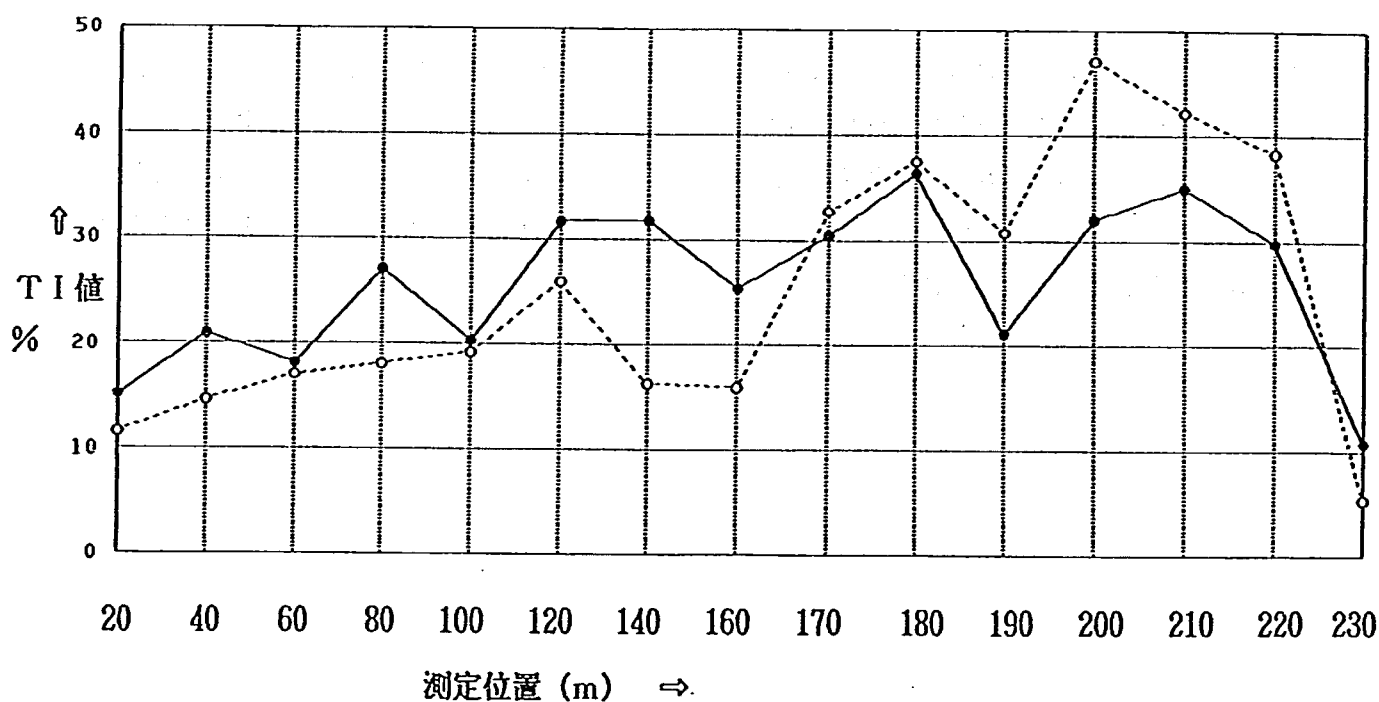


図-6.2 照明器具によるT I 値の比較 (カウンタービーム照明:車線中央)

測定条件: 車の屋根による遮光あり
 ●: 遮光角約 30° (車内からの測定結果)
 ○: 遮光角約 20° (車外からの測定結果¹⁾)

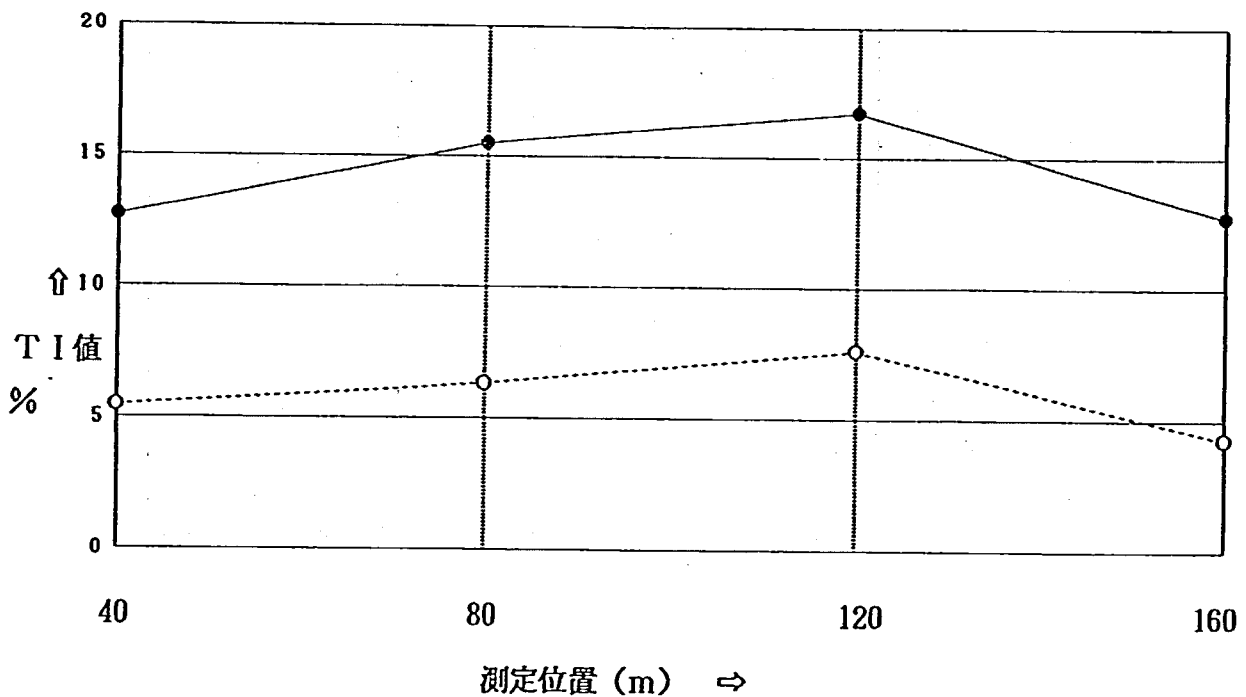


図-6.3 遮光した場合の T I 値の比較 (カウンタービーム照明: 車線中央)

6.4 まとめ

本実験結果により、入口照明の終端と基本照明との照明レベルの差を 3 倍以内にすることで、グレア (T I 値) が小さな傾向を示すことが明らかとなった。また、遮光の有無により T I 値が増減することが分かった。今後、T I 値の評価とともに、測定器と乗用車内の運転者の眼の位置との関係、遮光角を変化させた時に T I 値がどのように変化するか、あるいは、路面輝度の測定方法等により T I 値がどのように変化するかの検討を行うことが重要と考えられる。

7. 自然光下での輝度対比

7.1 目的

坑口の方位および坑口高さの違いによるトンネル内への自然光の射し込みの影響を調べることを目的に実験を行った。北坑口および南坑口の測定により方位の影響を、南坑口において坑口の高さを変えた測定により坑口の高さによる影響を調べる実験を行った。

7.2 測定方法

(1) 測定場所

測定場所および舗装は次に示す。

- | | |
|------------|--------------------|
| ・場所 | 建設省土木研究所実大トンネル実験施設 |
| ・トンネル坑口の方位 | 南坑口および北坑口 |
| ・舗装の種類 | コンクリート舗装（粗面仕上げ） |
| ・天候条件 | 晴れおよび曇り |

(2) 測定項目

坑口の方位および坑口の高さの違いによるトンネル内への自然光の射し込みの影響を調べるために、①南坑口では坑口の高さを $H = 6.87\text{m}$, $H = 5.15\text{m}$, $H = 3.43\text{m}$ の3段階に変え、②北坑口・南坑口では方位による影響を調べるために、障害物の輝度、障害物の背景路面の輝度、障害物の鉛直面照度の測定を行った。写真-7.1～写真7.3に南坑口部の状況を示す。

(3) 測定方法

トンネル内の人工照明を消灯した状態にて自然光の射し込みによる障害物と背景路面の輝度および障害物の鉛直面照度を東側車線の中央路上に障害物を提示し測定する。輝度の測定は、視角 $1/3$ 度の輝度計を使用し、障害物の提示位置から 10m 離れた点より俯角 1 度を維持し、障害物および背景となる周辺4ヶ所の輝度を測定する。障害物の提示位置は道路軸方向の $10\sim 12$ カ所、道路横断方向1ヶ所（車線中央）とした。

なお、背景路面輝度の測定点と障害物との位置関係などは4章に示す方法と同様とし、測定値の安定を図るため太陽位置が最も高い位置にある正午から測定を行うこととした。

(4) 測定器

測定には次の測定器を使用した。

- ・輝度測定・・・ミノルタ輝度計（LS-110 視角 $1/3$ 度）
- ・鉛直面照度・・・トプコン照度計（IM-3）

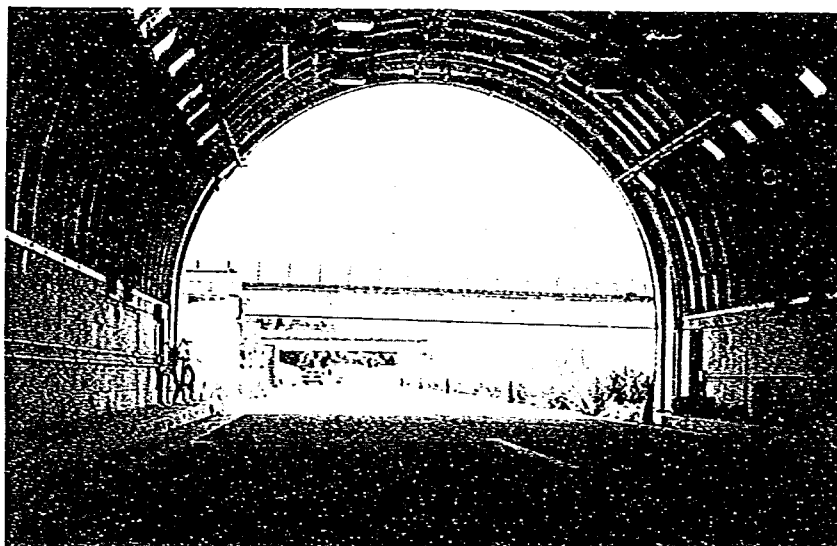


写真-7.1 南坑口シャッター全開

坑口の高さ : $H = 6.87 \text{ m}$
坑口断面 : $A = 57.1 \text{ m}^2$

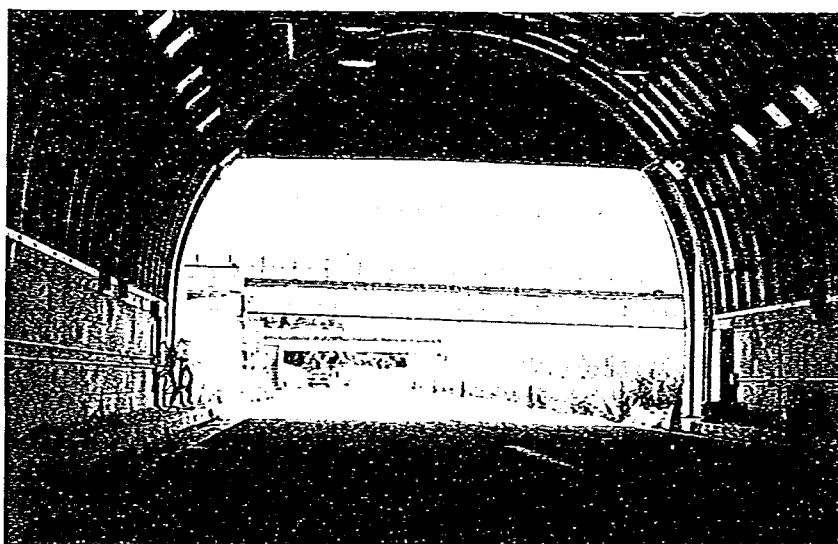


写真-7.2 南坑口シャッター3/4開

坑口の高さ : $H = 5.15 \text{ m}$
坑口断面 : $A = 48.1 \text{ m}^2$

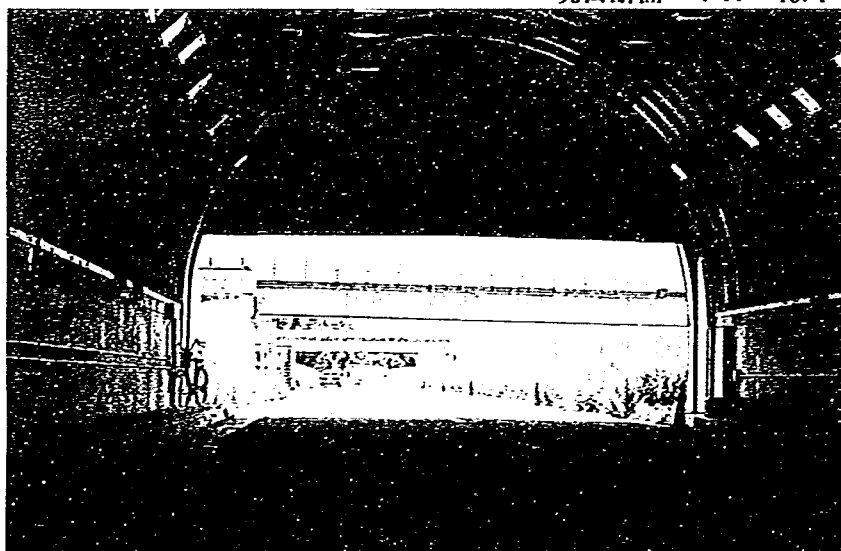


写真-7.3 南坑口シャッター1/2開

坑口の高さ : $H = 3.43 \text{ m}$
坑口断面 : $A = 33.4 \text{ m}^2$

7.3 測定結果

坑口の高さの異なる場合の自然光のトンネル内への射し込みによる影響の測定結果を表-7.1に示す。表-7.1は坑口の高さ $H=6.87\text{ m}$ 、表-7.2は坑口の高さ $H=5.15\text{ m}$ 、表-7.3は坑口の高さ $H=3.43\text{ m}$ について示す。坑口の方位の異なる場合の自然光のトンネル内への射し込みによる影響の測定結果を表-7.4に示す。今回の測定結果と前回実施した人工照明のみによる測定結果¹⁾をもとにして、坑口および照明方式別に算出した輝度対比の計算結果を、表-7.5～表-7.7に示す。なお、表-7.5～表-7.6のトンネル南坑口での測定結果は、坑口の高さを変えて自然光のトンネル内への入射量を変化させた場合の輝度対比の計算結果を示したものであり、表-7.7は、北坑口での輝度対比の計算結果を示したものである。

南坑口で行なった坑口の高さの異なる場合のトンネル内への自然光（晴天時）の射し込みによる路面および障害物の輝度変化を図-7.1に示す。また、南坑口で行った障害物および路面に生ずる輝度と坑口からの距離による関係を、トンネル坑口0mの地点の輝度で正規化したものを図-7.2に示す。これらの図より坑口の高さが低くなるほど、自然光のトンネル内への影響が少なくなることが分かる。これは、自然光の直射分として坑口断面を発光面と想定した場合、トンネル坑口の高さが低いほど、坑口断面が小さいほど、坑口内部に入り込む光の絶対量が少なくなることによると考えられる。また、トンネル北坑口における路面・障害物の輝度変化を図-7.3に示す。障害物および路面に生ずる輝度の関係を、トンネル坑口0mの地点での輝度で正規化したものを図-7.4に示す。自然光によるトンネル内の路面輝度は、図-7.2および図-7.4より、北坑口（坑口断面 46.3 m^2 ）と同程度の坑口断面積の南坑口のシャッター3/4開（坑口断面 48.1 m^2 ）を比較した場合、北坑口より南坑口の方が若干大きいことが分かる。これは南坑口のほうが北坑口より、直射光による影響が大きいことによるものと推測される。

トンネル南坑口において、開口の大きさ（坑口の高さの異なる場合）が変化することによる自然光のトンネル内への射し込みによる輝度対比の変化を図-7.5、図-7.6に示す。これらの図より、坑口の高さが高いほど逆シルエット（負の輝度対比）からシルエット（正の輝度対比）に移る移行点（輝度対比がゼロ）の位置が坑口からの距離が長くなることが分かった。移行点は、対称照明の場合でトンネル坑口から概ね40m、カウンタービーム照明の場合で概ね20m～30m付近の位置となる。

また、トンネル開口が変化することによる自然光による輝度対比への影響範囲は、カウンタービーム照明および対称照明とも、トンネル坑口からの距離120m付近で人工照明のみによる輝度対比と概ね等しくなることから、自然光による輝度対比の変化に対する影響は、坑口の高さの変化に係わらず坑口から約120m程度まで及んでいることが分かる。

以上のことより、トンネル坑口の高さが高いほど、坑口の断面積も大きくなることから、坑口断面全体が一つの発光面として坑口内部に影響を与えるが、逆シルエットからシルエットに移る移行点に強い影響を与えている要因としては直射光成分であることが推測される。また、坑口の高さ（開口の大きさ）が変化し自然光のトンネル内への射し込み量も変化しても、図-7.5および図-7.6より、カウンタービーム照明においては坑口からの距離が50m以上における輝度対比が概ね0.5以上の値となり、一方、対称照明では-0.1～0.1の範囲にあることから、トンネル坑口の高さが変化した場合においてもカウンタービーム照明は対称照明に比較して高い輝度対比になることが分かった。

表-7.1 自然光の射し込みによる効果の測定

- ・測定日時 : 1994年8月2日 12時10分~12時42分
- ・測定時の天候 : 晴れ
- ・測定場所 : 南坑口 (シャッター全開, H=6.87m)
- ・測定中の野外輝度又は照度の変化
 - 野外輝度 4,700 ~ 4,800 (cd/m²) (測定時間内の最小値/最大値)
 - 鉛直面照度 36,500 ~ 40,000 (L_x) (測定時間内の最小値/最大値)
 - 水平面照度 95,000 ~ 97,000 (L_x) (測定時間内の最小値/最大値)

坑口からの距離 (m)	障害物の位置	障害物の鉛直面照度 (L _x)	障害物の輝度 (cd/m ²)	背景の輝度 (cd/m ²)				
				①	②	③	④	平均
0	車線中央	42,300.0	3,714.0	55.0	2,361	2,311	2,350	1,769
5	車線中央	10,820.0	1,113.0	44.8	220.0	730.0	240.0	308.0
10	車線中央	4,500.0	494.0	28.0	135.0	330.0	165.0	164.0
15	車線中央	2,170.0	240.0	13.5	66.0	135.0	80.0	73.6
20	車線中央	1,256.0	137.0	8.5	41.5	75.0	47.0	43.0
25	車線中央	759.0	89.0	5.5	25.0	40.0	33.0	25.8
30	車線中央	511.0	60.0	4.5	20.0	29.5	22.5	19.1
40	車線中央	258.0	29.0	2.5	8.0	10.5	9.5	7.6
60	車線中央	91.0	10.8	1.2	3.2	4.2	3.4	3.0
80	車線中央	39.7	4.4	0.6	1.1	1.5	1.5	1.1
100	車線中央	20.3	2.3	0.3	0.5	0.6	0.6	0.5
120	車線中央	11.0	1.1	0.2	0.3	0.2	0.3	0.3

表-7.2 自然光の射し込みによる効果の測定

- ・測定日時 : 1994年8月2日 12時44分~13時13分
- ・測定時の天候 : 晴れ
- ・測定場所 : 南坑口 (シャッター3/4開, H=5.15m)
- ・測定中の野外輝度又は照度の変化
 - 野外輝度 4,400 ~ 4,800 (cd/m²) (測定時間内の最小値/最大値)
 - 鉛直面照度 31,000 ~ 37,000 (L_x) (測定時間内の最小値/最大値)
 - 水平面照度 85,000 ~ 98,000 (L_x) (測定時間内の最小値/最大値)

坑口からの距離 (m)	障害物の位置	障害物の鉛直面照度 (L _x)	障害物の輝度 (cd/m ²)	背景の輝度 (cd/m ²)				
				①	②	③	④	平均
0	車線中央	39,400.0	3,610.0	40.0	2,320.	2,270.	2,305.	1,733.
5	車線中央	9,900.0	1,005.0	34.0	220.0	850.0	300.0	351.0
10	車線中央	3,790.0	425.0	18.0	110.0	350.0	150.0	157.0
15	車線中央	1,807.0	203.0	9.0	54.0	125.0	85.0	68.2
20	車線中央	986.0	110.0	5.5	27.0	58.0	45.0	33.8
25	車線中央	578.0	68.0	3.5	18.5	32.0	27.0	20.2
30	車線中央	379.0	44.5	3.1	14.5	21.0	18.0	14.1
40	車線中央	178.0	21.0	2.1	5.3	7.5	6.5	5.3
60	車線中央	63.1	7.4	0.7	1.6	2.7	2.3	1.8
80	車線中央	27.4	3.1	0.4	0.8	1.0	0.8	0.7
100	車線中央	14.0	1.5	0.2	0.4	0.4	0.4	0.3
120	車線中央	8.2	0.8	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2

表-7.3 自然光の射し込みによる効果の測定

- ・測定日時 : 1994年8月2日 13時15分~13時40分
- ・測定時の天候 : 晴れ
- ・測定場所 : 南坑口 (シャッター1/2開, H=3.43m)
- ・測定中の野外輝度又は照度の変化
 - 野外輝度 4,800 ~ 5,300 (cd/m²) (測定時間内の最小値/最大値)
 - 鉛直面照度 30,500 ~ 32,000 (L_x) (測定時間内の最小値/最大値)
 - 水平面照度 82,000 ~ 89,000 (L_x) (測定時間内の最小値/最大値)

坑口からの距離 (m)	障害物の位置	障害物の鉛直面照度 (L _x)	障害物の輝度 (cd/m ²)	背景の輝度 (cd/m ²)				
				①	②	③	④	平均
0	車線中央	32,500.0	3,130.0	34.0	1,850.	2,150.	1,930.	1,491.
5	車線中央	7,410.0	760.0	26.5	350.0	1,600.	400.0	594.0
10	車線中央	2,520.0	290.0	12.0	70.0	195.0	80.0	89.2
15	車線中央	1,115.0	127.0	4.5	28.5	70.0	36.0	34.7
20	車線中央	577.0	63.0	3.0	20.5	34.5	27.0	21.2
25	車線中央	332.0	39.0	1.5	10.5	17.8	13.9	10.9
30	車線中央	203.0	24.0	1.3	6.5	10.0	8.5	6.5
40	車線中央	93.2	11.1	0.7	2.5	3.7	3.4	2.5
60	車線中央	27.5	3.4	0.5	0.9	1.1	1.0	0.9
80	車線中央	14.9	1.5	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4
100	車線中央	9.3	0.9	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
120	車線中央	6.1	0.5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

表-7.4 自然光の射し込みによる効果の測定

- ・測定日時 : 1994年8月2日 15時18分~15時45分
- ・測定時の天候 : 晴れ
- ・測定場所 : 北坑口 (シャッター全開)
- ・測定中の野外輝度又は照度の変化
 - 野外輝度 1,108 ~ 2,730 (cd/m²) (測定時間内の最小値/最大値)
 - 鉛直面照度 19,810 ~ 6,550 (L_x) (測定時間内の最小値/最大値)
 - 水平面照度 57,200 ~ 20,600 (L_x) (測定時間内の最小値/最大値)

坑口からの距離 (m)	障害物の位置	障害物の鉛直面照度 (L _x)	障害物の輝度 (cd/m ²)	背景の輝度 (cd/m ²)				
				①	②	③	④	平均
0	車線中央	17,200.0	1,430.0	32.0	1,299.	1,510.	1,350.	1,047.
5	車線中央	6,810.0	705.0	20.0	260.0	745.	290.0	328.0
10	車線中央	2,730.0	301.0	8.5	65.0	225.0	75.0	93.3
15	車線中央	1,135.0	128.0	4.5	32.0	65.0	35.0	34.1
20	車線中央	464.0	55.3	2.2	12.0	20.0	15.0	12.3
25	車線中央	225.0	27.5	1.8	5.5	9.2	5.8	5.5
30	車線中央	132.2	15.8	1.2	3.4	4.5	3.6	3.1
40	車線中央	63.6	7.6	0.5	1.5	2.1	1.6	1.4
60	車線中央	20.8	2.4	0.3	0.5	0.6	0.5	0.5
80	車線中央	8.7	1.0	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2

表－ 7. 5 自然光の入射量を変化させた場合の輝度対比の変化

(自然光データは、8月2日、天候 晴を使用)

照明方式		カウンタービーム (車線中央)								
開口部の状況 及び開口高さ		シャッター全開 H=6.78m A= 57.1m ²			シャッター 3/4開 H=5.15m A= 48.1m ²			シャッター 1/2開 H=3.43m A= 33.4m ²		
抗口 からの 距離 (m)	障害物 の位置	障害物 の輝度 L _o cd/m ²	背景の 輝度 L _b cd/m ²	輝度 対比 C _o	障害物 の輝度 L _o cd/m ²	背景の 輝度 L _b cd/m ²	輝度 対比 C _o	障害物 の輝度 L _o cd/m ²	背景の 輝度 L _b cd/m ²	輝度 対比 C _o
0m	車道中央	3714.5	1784.2	-1.08	3610.5	1748.2	-1.07	3130.5	1506.2	-1.08
	車線中央	3714.6	1787.9	-1.08	3610.6	1751.9	-1.06	3130.6	1509.4	-1.07
	路 肩	3714.6	1784.3	-1.08	3610.6	1748.3	-1.07	3130.6	1506.3	-1.08
20m	車道中央	154.2	107.5	-0.43	125.4	98.3	-0.28	78.4	85.7	0.09
	車線中央	152.2	101.09	-0.49	125.2	92.7	-0.35	78.2	80.1	0.02
	路 肩	150.7	87.8	-0.72	123.7	78.6	-0.57	76.7	66.0	-0.16
40m	車道中央	49.1	70.8	0.31	41.1	68.5	0.4	31.2	65.7	0.53
	車線中央	47.3	59.0	0.20	39.3	56.7	0.31	29.4	53.9	0.45
	路 肩	43.7	50.3	0.13	35.7	48.0	0.26	25.8	45.2	0.43
60m	車道中央	26.6	55.9	0.52	23.2	54.7	0.58	19.2	53.8	0.64
	車線中央	25.4	47.4	0.46	22.0	46.2	0.52	18.0	45.3	0.60
	路 肩	24.5	37.7	0.35	21.1	36.5	0.42	17.1	35.6	0.52
80m	車道中央	18.5	47.9	0.61	17.2	47.5	0.64	15.6	47.2	0.67
	車線中央	17.5	41.7	0.58	16.1	41.3	0.61	14.6	41.0	0.64
	路 肩	16.7	34.7	0.52	15.4	33.9	0.55	13.8	33.6	0.59
120m	車道中央	10.0	31.3	0.68	9.7	30.2	0.68	9.4	30.1	0.69
	車線中央	9.5	27.3	0.65	9.2	27.2	0.66	8.9	27.1	0.67
	路 肩	8.9	22.1	0.60	8.6	22.0	0.61	8.3	21.9	0.62

表-7.6 自然光の入射量を変化させた場合の輝度対比の変化(南抗口)

(自然光データは、8月2日、天候 晴を使用)

照明方式		対 称 照 明								
開口部の状況 及び開口高さ		シャッター全開 H=6.78m A= 57.1m ²			シャッター 3/4開 H=5.15m A= 48.1m ²			シャッター 1/2開 H=3.43m A= 33.4m ²		
抗口 からの 距離 (m)	障害物 の位置	障害物 の輝度 L _o cd/m ²	背景の 輝度 L _b cd/m ²	輝度 対比 C _o	障害物 の輝度 L _o cd/m ²	背景の 輝度 L _b cd/m ²	輝度 対比 C _o	障害物 の輝度 L _o cd/m ²	背景の 輝度 L _b cd/m ²	輝度 対比 C _o
0m	車道中央	3714.7	1790.1	-1.08	3610.7	1754.1	-1.06	3130.7	1512.1	-1.07
	車線中央	3714.6	1792.5	-1.07	3610.6	1756.5	-1.06	3130.6	1514.5	-1.07
	路 肩	3714.6	1790.3	-1.07	3610.6	1754.3	-1.06	3130.6	1512.3	-1.07
20m	車道中央	181.4	112.2	-0.62	154.4	103.0	-0.50	107.4	90.4	-0.19
	車線中央	183.8	114.49	-0.61	156.8	105.2	-0.49	109.8	92.6	-0.19
	路 肩	181.0	107.5	-0.68	154.0	98.3	-0.57	107.0	85.7	-0.25
40m	車道中央	77.7	74.6	-0.04	6971	72.3	0.04	59.8	69.5	0.14
	車線中央	78.1	73.3	-0.07	70.1	71.0	0.01	60.2	68.2	0.12
	路 肩	76.1	67.0	-0.14	68.1	64.7	-0.05	59.2	61.9	0.04
60m	車道中央	53.1	57.8	0.08	49.7	56.6	0.12	45.7	55.7	0.18
	車線中央	55.0	56.9	0.03	51.6	55.7	0.07	47.6	54.8	0.13
	路 肩	54.7	53.4	-0.02	51.2	52.2	0.02	47.3	51.3	0.08
80m	車道中央	43.0	46.7	0.08	41.7	46.3	0.10	40.1	46.0	0.13
	車線中央	46.5	50.9	0.09	45.2	50.5	0.11	43.6	50.2	0.13
	路 肩	38.0	41.2	0.08	36.7	40.8	0.11	35.1	40.1	0.12
120m	車道中央	19.9	19.7	-0.01	19.6	19.6	0.	19.3	19.5	0.01
	車線中央	20.3	18.6	-0.09	20.0	18.5	-0.08	19.7	18.4	-0.07
	路 肩	18.3	15.8	-0.16	18.0	15.7	-0.15	17.7	15.6	-0.13

表-7.7 自然光の入射量を変化させた場合の輝度対比の変化（北抗口）
（自然光データは、8月2日、天候 晴を使用）

照明方式		対称照明（車線中央）			対 称 照 明		
開口部の状況 及び開口高さ		シャッター全開 H=4.73m A= 46.3m ²			シャッター全開 H=4.73m A= 46.3m ²		
抗口 からの 距離 (m)	障害物 の位置	障害物 の輝度 L _o cd/m ²	背景の 輝度 L _b cd/m ²	輝度 対比 C _o	障害物 の輝度 L _o cd/m ²	背景の 輝度 L _b cd/m ²	輝度 対比 C _o
0m	車道中央	1430.5	1062.2	-0.35	1430.7	1068.1	-0.34
	車線中央	1430.6	1065.9	-0.34	1430.6	1070.5	-0.34
	路 肩	1430.6	1062.3	-0.35	1430.6	1068.3	-0.34
20m	車道中央	70.7	76.8	0.08	99.7	81.5	-0.22
	車線中央	70.5	71.2	0.01	102.1	83.7	-0.22
	路 肩	69.0	57.1	-0.21	99.3	76.8	-0.29
40m	車道中央	27.7	64.6	0.57	56.3	68.4	0.18
	車線中央	25.9	52.8	0.51	56.7	67.1	0.15
	路 肩	22.3	44.1	0.49	54.7	60.8	0.10
60m	車道中央	18.2	53.4	0.66	44.7	55.3	0.19
	車線中央	17.0	44.9	0.62	46.6	54.4	0.14
	路 肩	16.1	34.2	0.53	46.3	50.9	0.09
80m	車道中央	15.1	47.0	0.68	39.6	45.8	0.14
	車線中央	14.1	40.8	0.65	43.1	50.0	0.14
	路 肩	13.3	33.4	0.60	34.6	40.3	0.14

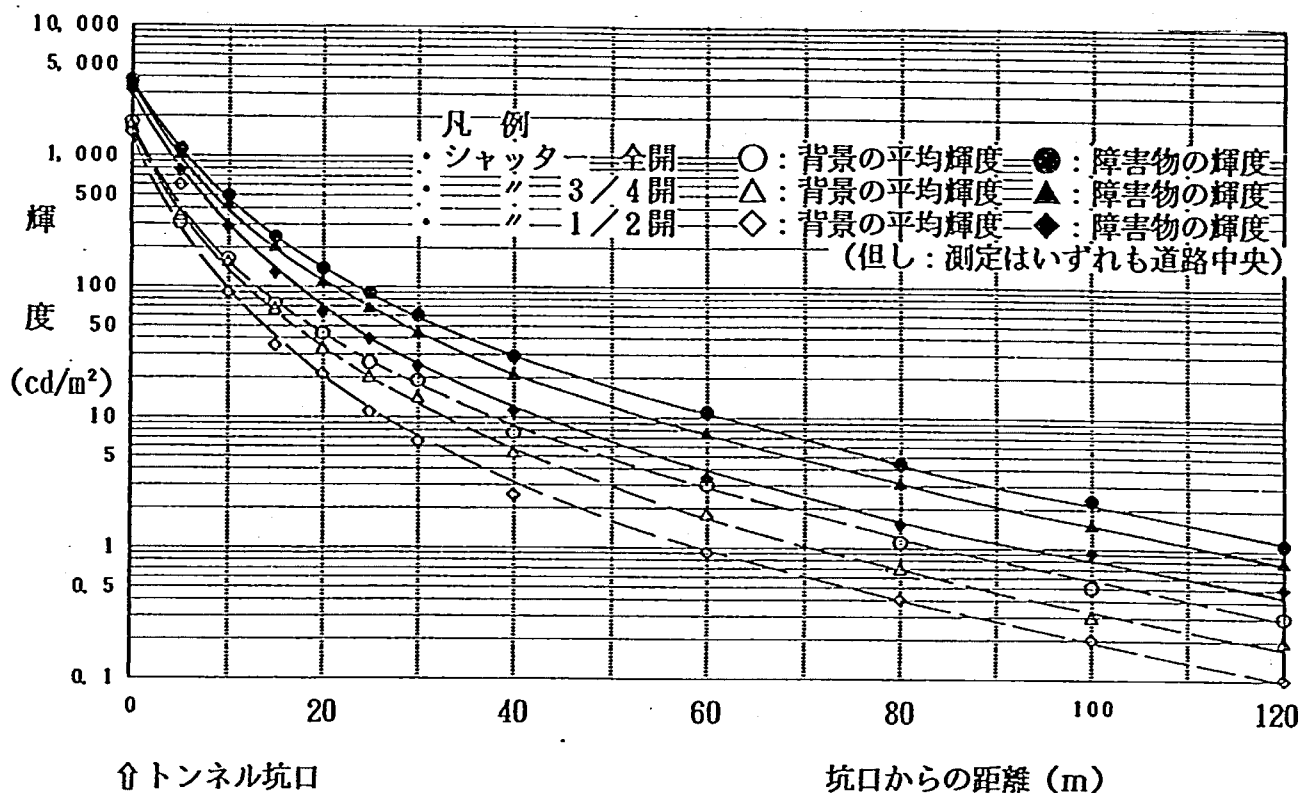


図-7.1 自然光のトンネル内への影響 (南坑口: 晴天時の路面・障害物の輝度変化)

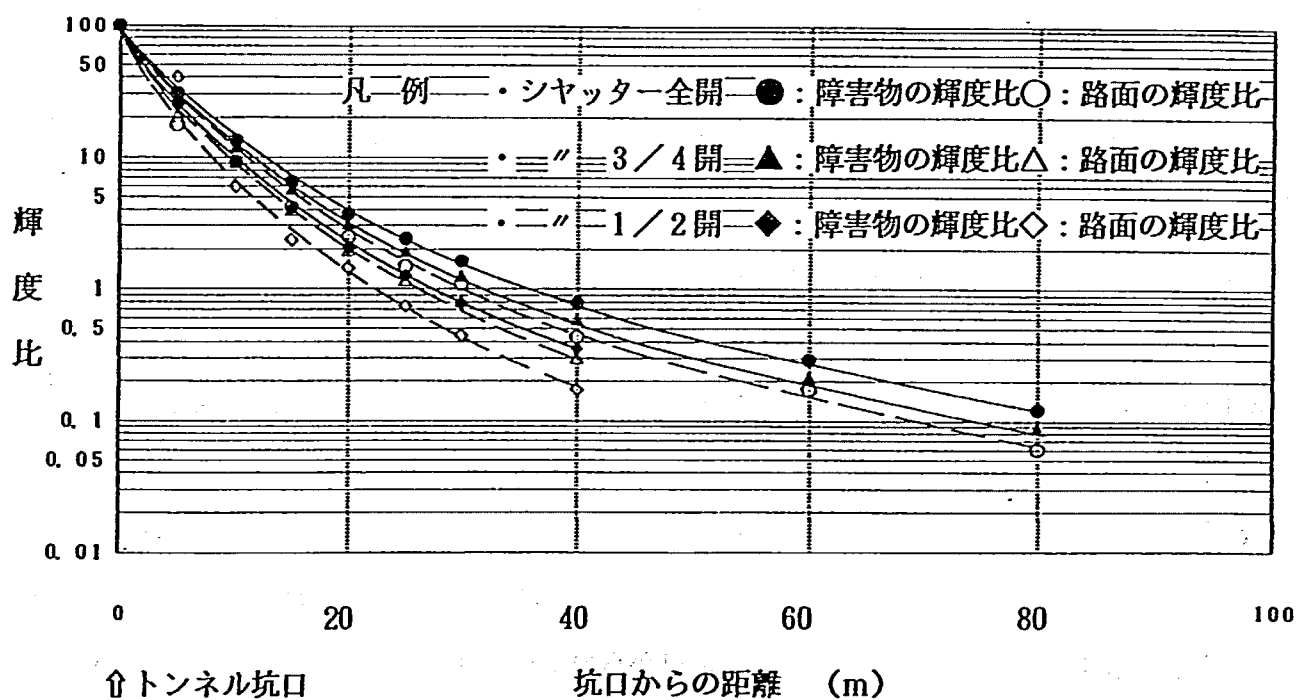


図-7.2 トンネル坑口輝度を基準とした輝度比の変化 (南坑口)

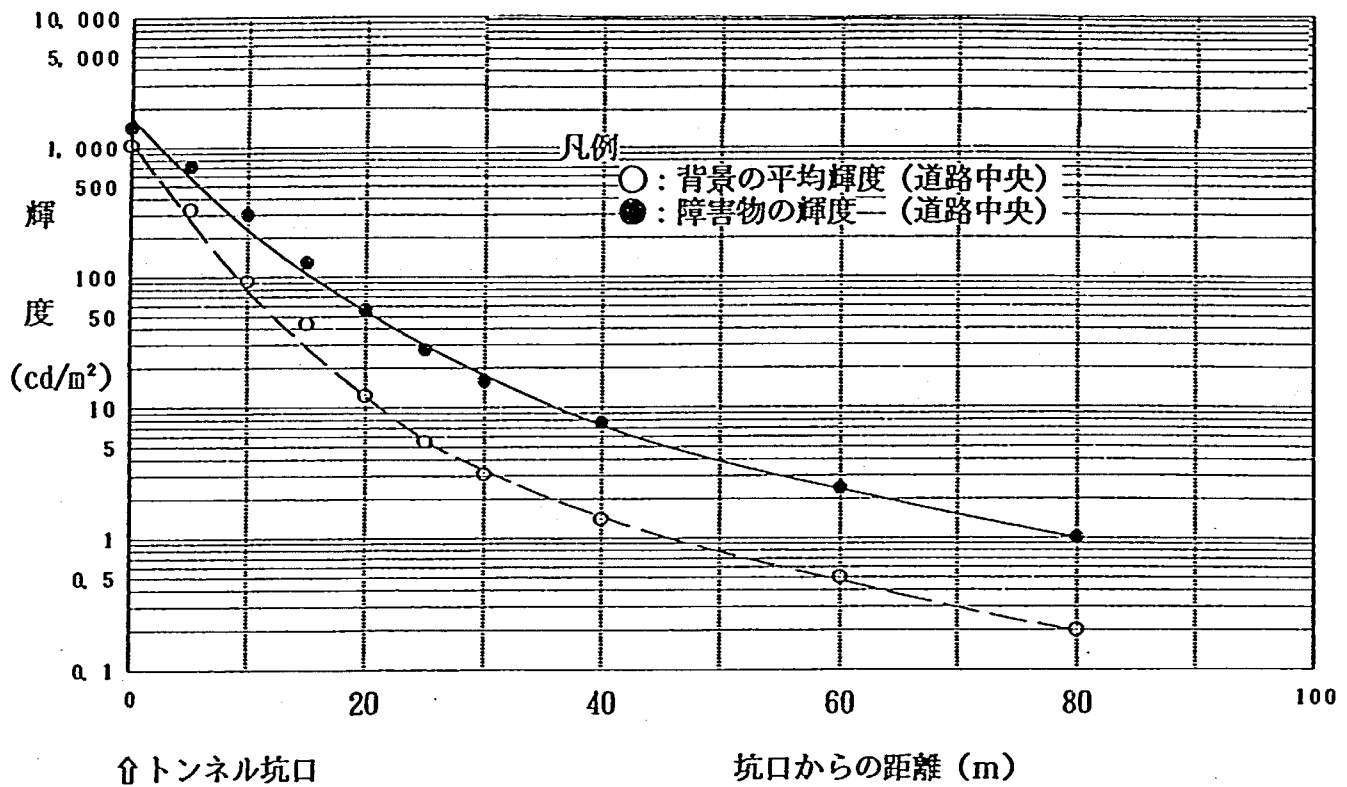


図-7.3 自然光のトンネル内への影響 (北坑口: 晴天時の路面・障害物の輝度変化)

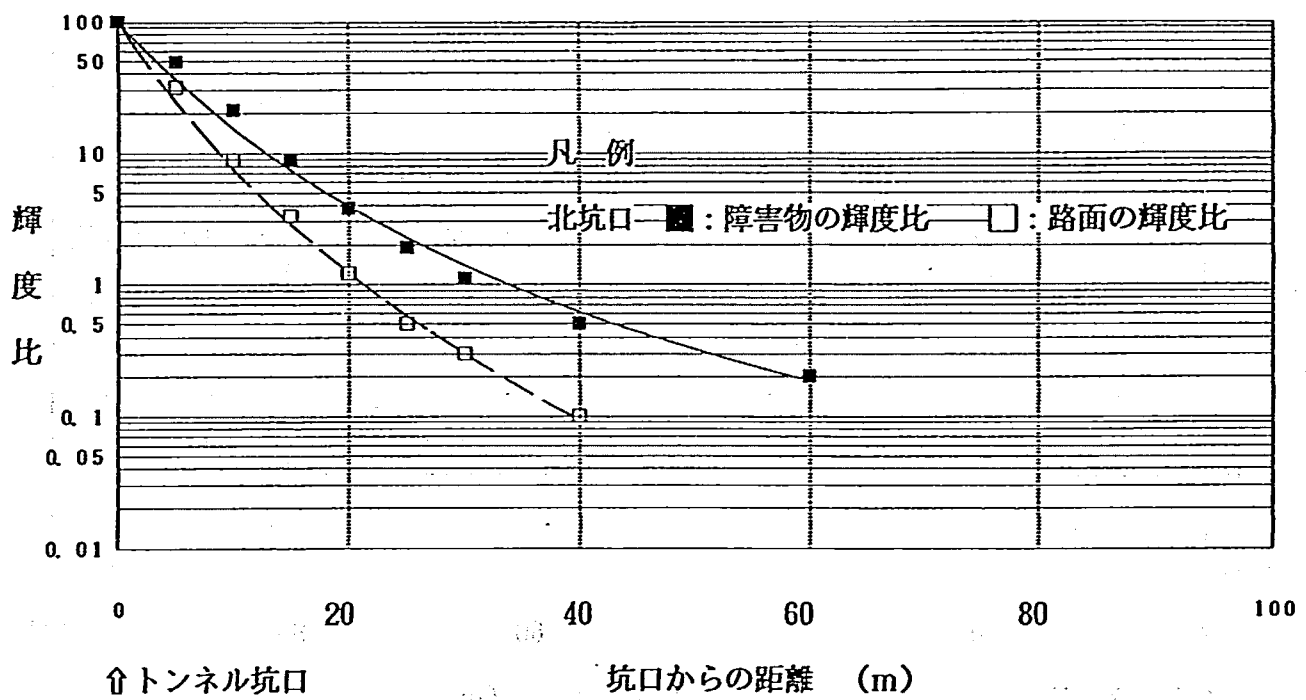


図-7.4 トンネル坑口輝度を基準とした輝度比の変化 (北坑口)

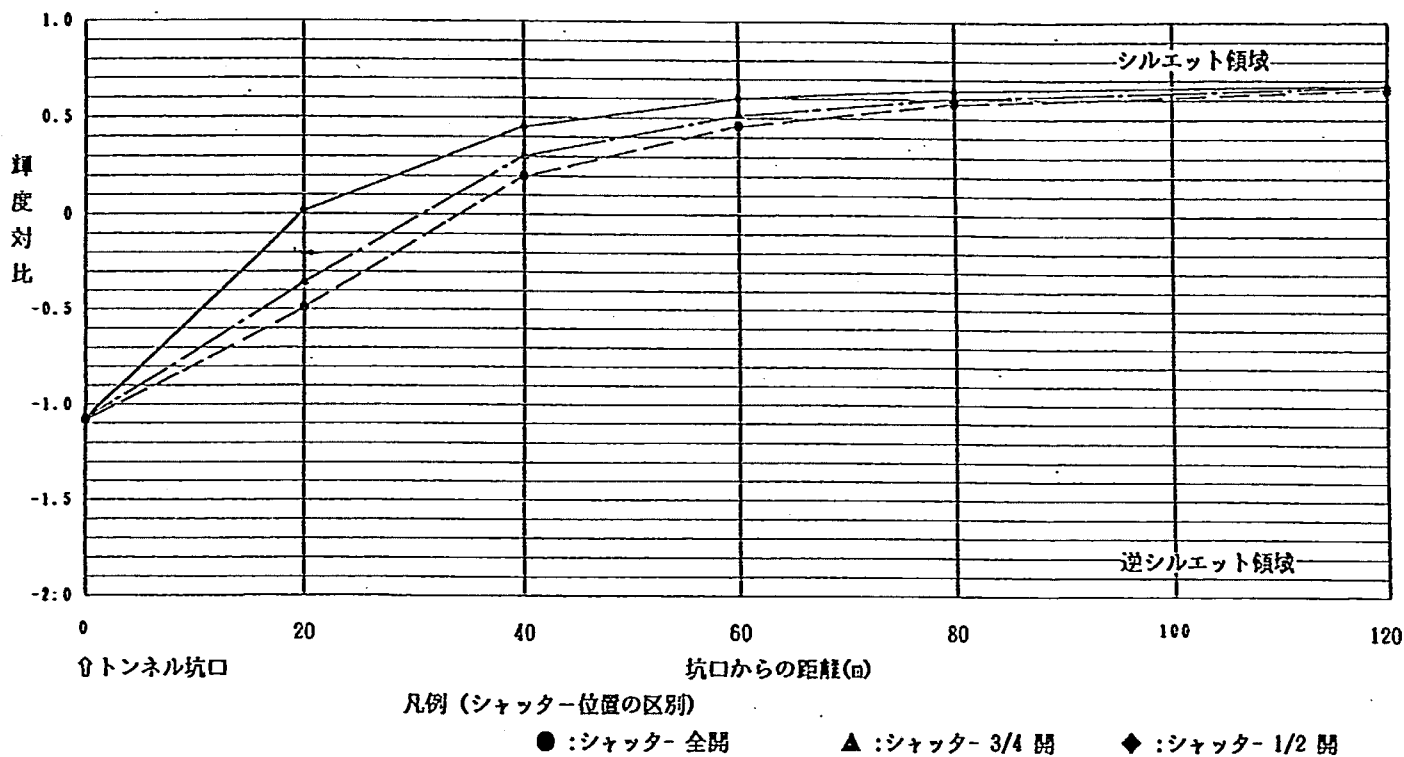


図-7.5 トンネル開口の大きさによる輝度対比の変化 (カウンタービーム照明)

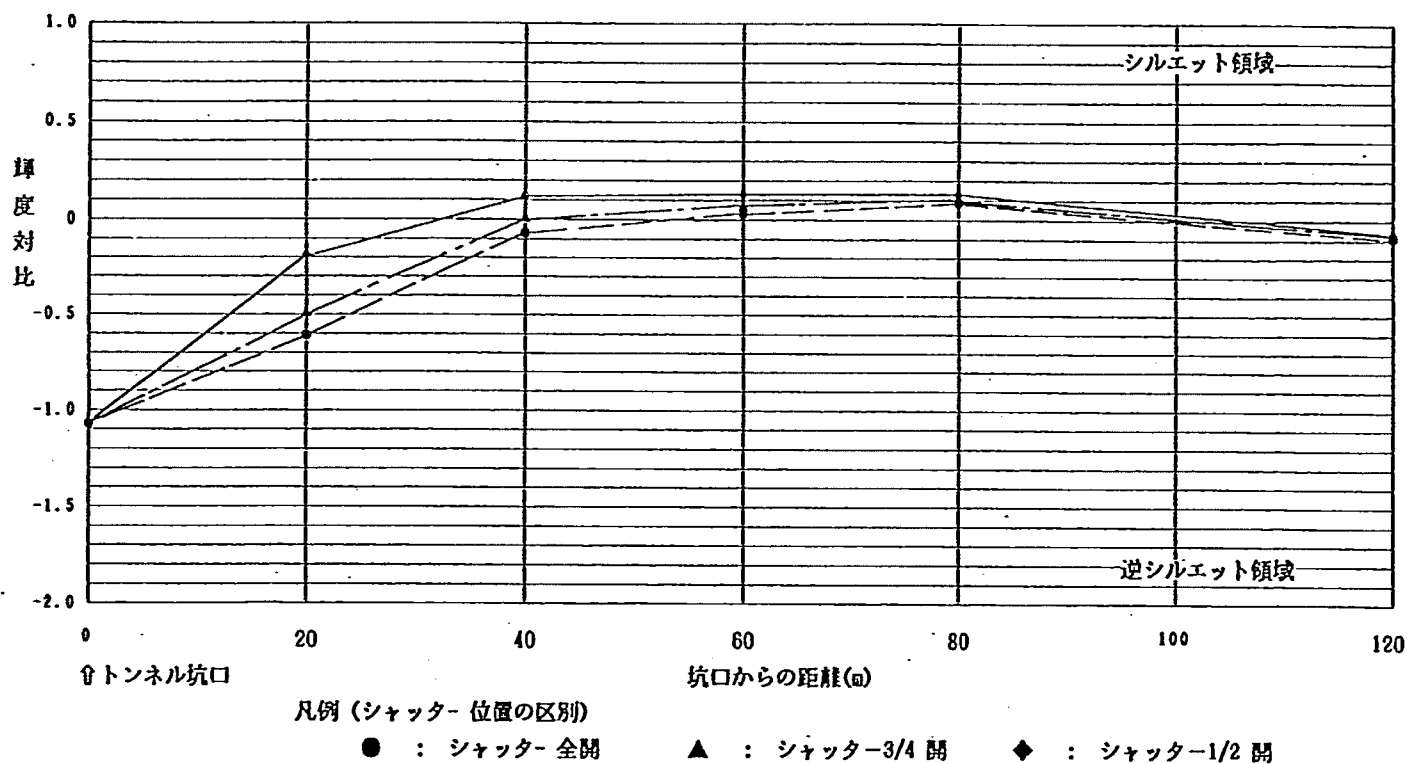


図-7.6 トンネル開口の大きさによる輝度対比の変化 (対称照明)

7.4 まとめ

トンネル坑口の高さが高いほど、坑口の断面積も大きくなることから、坑口断面全体が一つの発光面として坑口内部に影響を与えるが、逆シルエットからシルエットに移る移行点に強い影響を与えている要因としては直射光成分であることが推測される。また、坑口の高さ（開口の大きさ）が変化し自然光のトンネル内への射し込み量が変わっても、カウンタービーム照明においては坑口からの距離が50m以上における輝度対比が概ね0.5以上の値となり、一方、対称照明では $-0.1 \sim 0.1$ の範囲にあることから、トンネル坑口の高さが変化した場合においてもカウンタービーム照明は対称照明に比較して高い輝度対比になることが分かった。また、坑口の方位の影響は、北坑口より南坑口の方が路面輝度が若干高くなることが分かった。

8. 先行車の見え方

先行車の見え方をカウンタービーム照明と対称照明とで比較検討することを目的として、先行車相当の視標を使用し、(1) 先行車のブライトネスの測定、(2) 先行車の明るさ感と見え方の主観評価、の2つの測定、実験を行った。

8.1 測定方法

先行車相当の視標は、反射率18.3%の無彩色(灰色紙)の縦140cm×横170cmの長方形の板を鉛直に立てて設定した。視標の設置および測定、観測はすべて西側車線中央付近において行った。

(1) 先行車相当視標のブライトネスの算出のための測定

先行車相当の視標の輝度測定、および運転者の位置での等価光幕輝度等の測定をもとに、「ブライトネス」⁴⁾を算出して、先行車の明るさを評価した。ブライトネスは、人間が見ている対象物の明るさの感覚を定量的に表わすもので、算出の方法など詳細は付録「ブライトネスの解説」に示す。

測定項目、測定方法は以下の通りとした。

1) 視標とその背景の輝度

視標の15m程度手前から円形2度視野の輝度計により、図-8.1に示す視標5箇所、背景4箇所を測定した。

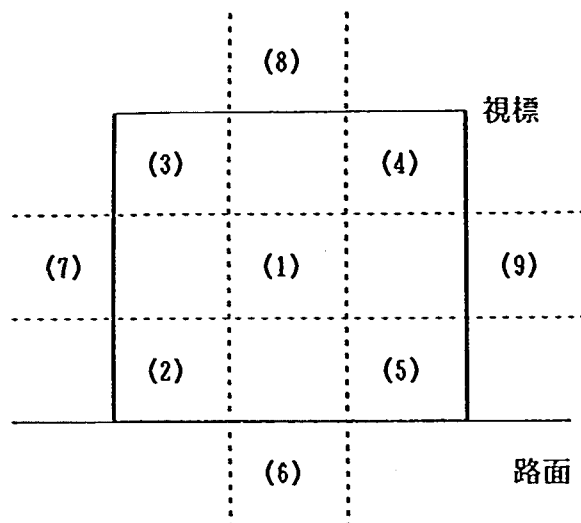
2) 視標の鉛直面照度

視標面の鉛直面照度を、図-8.2に示す3箇所について測定した。

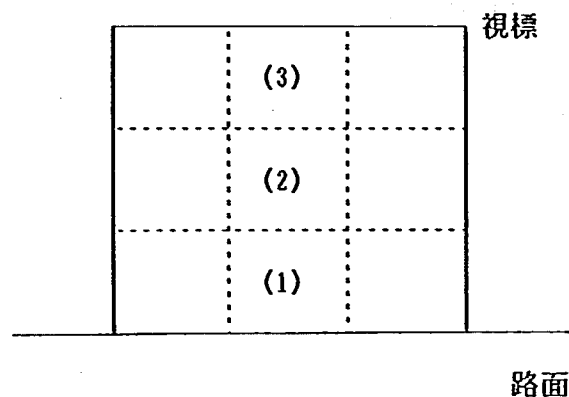
3) 運転者の位置での等価光幕輝度、路面輝度

等価光幕輝度は、地上高さ1.2mに設置し、道路軸方向に照準を合わせた等価光幕輝度計により測定した。路面輝度は、地上高さ1.2mに設置し、60m前方の路面に照準を合わせた円形2度視野の輝度計により測定した。

なお、1)と2)は、トンネル内0~75mにおいて12.5mごとに視標を順次移動して測定し、3)は、坑口の外0~75mを運転者の位置として12.5mおきに測定した。なお、坑口の外75m地点では、機器のケーブル延長の都合上、等価光幕輝度の測定が困難であったため、70m地点の測定でこれを代用した。以上の測定結果をもとに、運転者から先行車までの距離を75mとして、先行車がトンネル坑口からトンネル内部に進入するときのブライトネスを算出した。



図－8.1 視標の輝度、視標の背景輝度の測定位置



図－8.2 視標の鉛直面照度の測定位置

(2) 先行車の明るさ感および見え方の主観評価

運転者の位置から先行車相当の視標を見たときの視標の明るさ感と見え方を被験者による主観評価により求めた。視標の明るさ感は、無彩色で反射率の異なる複数の色票を先行車相当の視標と比較させ、表－8.1に示す評価尺度（1～7）により、視標の明るさと同じ明るさに見える色票を回答させた。

視標の見え方は、被験者が自動車の運転者として先行車である視標を見たときに、視標の見え方を表－8.2に示す評価尺度に従って、「非常によい」から「非常に悪い」までの7段階で評価をさせた。

ここでは、これらの主観評価実験を「明るさ評価」および「見え方評価」と表現する。被験者は、自動車免許取得に必要な視機能を有する表－8.3に示す5名とし、乗用車の車内から、7.5 m前方の視標を観測し上記の評価を行った。各測定、評価項目の測定位置を図－8.3に示す。

表－8.1 明るさ評価の尺度

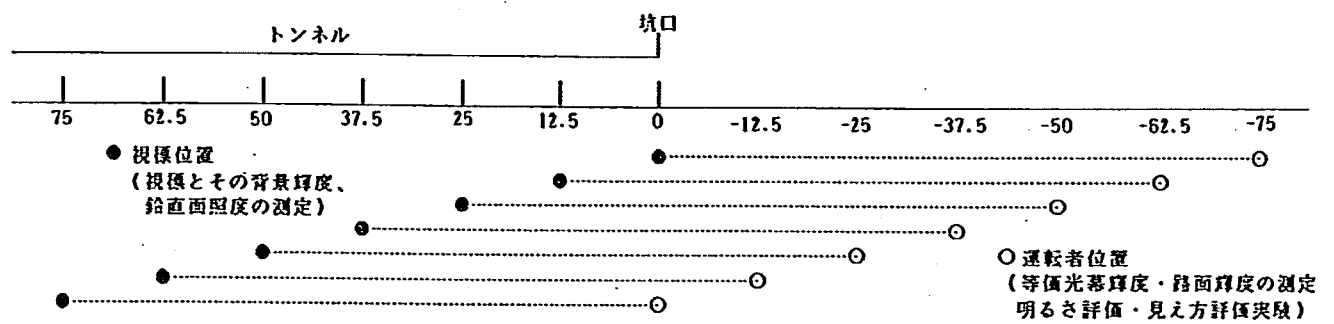
評価尺度	反射率%
7	43
6	30
5	20
4	12
3	6.6
2	3.1
1	1.2

表－8.2 見え方評価の尺度

評価尺度	評価カテゴリー
7	非常によい
6	かなりよい
5	ややよい
4	よくも悪くもない
3	やや悪い
2	かなり悪い
1	非常に悪い

表－8.3 先行車の明るさ評価および見え方評価の被験者一覧

記号	氏名	年齢	性別	視力	
				左	右
A	T.O	38	男性	1.0	1.0
B	S.S	44	男性	1.0	0.6
C	H.A	43	男性	1.0	1.0
D	T.S	23	男性	1.2	1.2
E	Y.Y	28	男性	0.8	1.0



図－8.3 各測定項目の位置

8.2 測定結果

(1) 先行車相当視標のブライトネスの算出のための測定結果

視標の輝度、視標の背景の輝度と輝度対比の測定結果を照明方式別に表－8.4、表－8.5に示す。視標の鉛直面照度の測定結果を照明方式別に表－8.6、表－8.7に示す。等価光幕輝度と路面輝度の測定結果を照明方式別に表－8.8、表－8.9に示す。

(2) 先行車の明るさ評価および見え方評価

観測評価結果を照明方式別に表－8.10、表－8.11に示す。

また、上記の測定を行った時間帯の水平面照度、鉛直面照度、野外輝度の測定結果を表－8.12に示す。実験時の天候条件を表－8.12により比較すると、カウンタービーム照明と対称照明とで、水平面照度、鉛直面照度は2倍以上の差があるが、野外輝度は $3,000 \sim 4,000 \text{ cd/m}^2$ で大きな差は見られない。また、表－8.8～8.9の等価光幕輝度もカウンタービーム照明と対称照明とで大きな差はなく、両照明方式の測定時の順応状態はほぼ等しいと考えることができる。

表- 8.4 視標の輝度・視標の背景の輝度と輝度対比（カウンタービーム照明）

視標位置 [m]	測定時刻	視標の輝度 [cd/m ²]						視標の背景の輝度[cd/m ²]					輝度 対比C
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	平均Lo	(6)	(7)	(8)	(9)	平均Lb	
0	8/3 10:10	2890	2750	3390	3260	2960	3050	2150	1420	322	300	1290	-1.36
12.5	10:07	211	217	209	205	215	211	247	116	25.7	107	157	-1.34
25.0	10:04	64.9	66.4	64.1	66.7	66.3	65.7	92.4	58.5	25.1	73.2	75.3	0.13
37.5	10:02	32.5	32.1	32.7	34.7	32.1	32.8	53.7	52.1	15.4	63.4	56.4	0.42
50.0	10:01	21.0	19.3	22.1	23.4	20.4	21.2	41.1	41.6	12.3	55.2	46.0	0.54
62.5	10:00	13.9	12.4	15.6	16.2	13.7	14.4	38.7	43.4	10.3	50.1	44.1	0.67
75.0	9:58	10.7	9.9	12.1	12.7	10.7	11.2	43.9	38.4	12.1	42.7	41.7	0.73

(注) 背景の輝度の平均Lbは、背景がトンネル天井面となる(8)を除く(6)(7)(9)の平均とした。
輝度対比Cは、 $C=(Lb-Lo)/Lb$ より算出した。

表- 8.5 視標の輝度・視標の背景の輝度と輝度対比（対称照明）

視標位置 [m]	測定時刻	視標の輝度 [cd/m ²]						視標の背景の輝度 [cd/m ²]					輝度 対比C
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	平均Lo	(6)	(7)	(8)	(9)	平均Lb	
0	8/3 15:02	896	819	930	931	860	887	1340	240	204	210	597	-0.49
12.5	15:04	139	136	137	148	142	140	174	88.9	16.1	103	122	-0.15
25.0	15:05	80.8	76.3	78.1	84.6	73.0	78.6	116	80.9	12.8	87.5	94.8	0.17
37.5	15:06	57.6	54.6	58.6	61.0	50.6	56.5	93.7	85.9	9.6	89.1	89.6	0.37
50.0	15:09	53.0	53.0	45.9	55.7	49.3	51.4	96.8	57.8	9.1	70.8	75.1	0.32
62.5	15:11	42.1	41.9	38.3	44.8	38.5	41.1	78.3	41.9	6.6	59.8	60.0	0.32
75.0	15:12	34.2	31.3	33.9	38.3	30.1	33.6	57.7	50.1	6.8	64.2	47.5	0.29

(注) 背景の輝度の平均Lbは、背景がトンネル天井面となる(8)を除く(6)(7)(9)の平均とした。
輝度対比Cは、 $C=(Lb-Lo)/Lb$ より算出した。

表－8.6 視標の鉛直面照度（カウンタービーム照明）

視標位置 [m]	測定時刻	視標の鉛直面照度 [lx]				視標輝度 [cd/m ²]
		(1)	(2)	(3)	平均	
0	8/3 10:10	43500	43100	43900	43500	2530
12.5	10:07	2840	2840	2780	2820	164
25.0	10:04	823	827	810	820	47.8
37.5	10:02	391	408	409	403	23.5
50.0	10:01	243	266	277	262	15.3
62.5	10:00	157	176	189	174	10.1
75.0	9:58	122	136	146	135	7.58

(注) 視標輝度は、視標が完全拡散面であると仮定して、視標の反射率（18.3%）と鉛直面照度の平均から算出したものである。

表－8.7 視標の鉛直面照度（対称照明）

視標位置 [m]	測定時刻	視標の鉛直面照度 [lx]				視標輝度 [cd/m ²]
		(1)	(2)	(3)	平均	
0	8/3 15:02	11570	12520	13120	12400	722
12.5	15:04	1770	1820	1870	1820	106
25.0	15:05	980	1050	962	997	58.1
37.5	15:06	693	773	786	751	43.7
50.0	15:09	646	743	740	710	41.4
62.5	15:12	514	583	581	559	32.6
75.0	15:13	415	467	533	472	27.5

(注) 視標輝度は、視標が完全拡散面であると仮定して、視標の反射率（18.3%）と鉛直面照度の平均から算出したものである。

表－ 8. 8 路面輝度と等価光幕輝度（カウンタービーム照明）

測定位置 [m]	測定時刻	路面輝度 [cd/m ²]	等価光幕輝度 [cd/m ²]
-98.0 (-38)	10:12	3860	180
-70.0 (-10)	10:09	3710	170
-62.5 (-2.5)	10:05	3520 / 182	168
-50.0 (10)	10:00	3160 / 186	163
-37.5 (22.5)	9:56	172	149
-25.0 (35)	9:55	133	129
-12.5 (47.5)	9:54	102	104
0 (60)	9:52	76.1	42.3

(注) 測定位置の()内は、路面輝度の測定対象とした路面の位置である。
測定位置が-62.5m、-50mの場合、路面輝度の測定視野がトンネル外、
トンネル内の両方にまたがったため、測定視野をまたがらない位置
に移動してトンネル外／トンネル内の両方の路面輝度を測定した。

表－ 8. 9 路面輝度と等価光幕輝度（対称照明）

測定位置 [m]	測定時刻	路面輝度 [cd/m ²]	等価光幕輝度 [cd/m ²]
-100 (-40)	8/3 15:05	2650	184
-70.0 (-10)	15:07	2510	179
-62.5 (-2.5)	15:09	2470 / 165	166
-50.0 (10)	15:10	2150 / 168	151
-37.5 (22.5)	15:20	163	144
-25.0 (35)	15:22	118	124
-12.5 (47.5)	15:22	87.8	80.9
0 (60)	15:23	64.8	14.7
5.0 (65)	15:24	62.0	13.6

(注) 測定位置の()内は、路面輝度の測定対象とした路面の位置である。
測定位置が-62.5m、-50mの場合、路面輝度の測定視野がトンネル外、
トンネル内の両方にまたがったため、測定視野をまたがらない位置
に移動してトンネル外／トンネル内の両方の路面輝度を測定した。

表－8.10 先行車の明るさ評価、見え方評価（カウンタービーム照明）

視標位置 [m]	測定時刻	測定項目	明るさ評価、見え方評価					
			A	B	C	D	E	平均
0	10:23	明るさ評価	6	6.5	6	6	6	6.1
		見え方評価	6	6	6	6	6	6
12.5	10:25	明るさ評価	4	4	4	4.5	4	4.1
		見え方評価	4	4	5	4	4	4.2
25.0	10:27	明るさ評価	3	3.5	3	3.5	3	3.2
		見え方評価	3	3	3	3	3	3
37.5	10:28	明るさ評価	2	2.5	3	3	2.5	2.6
		見え方評価	3	2	3	3	2	2.6
50.0	10:28	明るさ評価	2	2	2.5	2.5	2	2.2
		見え方評価	2	2	2.5	2	2	2.1
62.5	10:29	明るさ評価	2	2	2	2	2	2
		見え方評価	2	2	2	1	2	1.8
75.0	10:30	明るさ評価	2.5	2.5	2	2.5	2.5	2.4
		見え方評価	4	4	4	4	3	3.8

(注) A、B、C、D、Eは各被験者を表わす。

表－8.11 先行車の明るさ評価、見え方評価（対称照明）

視標位置 [m]	測定時刻	測定項目	明るさ評価、見え方評価					
			A	B	C	D	E	平均
0	8/3 15:30	明るさ評価	4	4.5	6	5	5.5	5
		見え方評価	6	6	6	6	6	6
12.5	15:32	明るさ評価	3	4	5.5	4	3.5	4.9
		見え方評価	5	5	5	5	5	5
25.0	15:33	明るさ評価	3.5	4	4	4	3.5	3.8
		見え方評価	4	4	4	3	4	3.8
37.5	15:34	明るさ評価	3.5	3.5	3.5	4	3.5	3.6
		見え方評価	3	4	3	3	4	3.4
50.0	15:35	明るさ評価	3.5	3.5	3	3.5	3.5	3.4
		見え方評価	3	3	3	3	4	3.2
62.5	15:35	明るさ評価	4	3	3	3.5	4	3.5
		見え方評価	3	3	3	3	4	3.2
75.0	15:40	明るさ評価	3.5	3.5	4	4	4	3.8
		見え方評価	4	5	4	4	5	4.4

(注) A、B、C、D、Eは各被験者を表わす。

表－8.12 先行車の見え方実験時の水平面照度・鉛直面照度・野外輝度

種類	時間帯	水平面照度 [lx]	鉛直面照度 [lx]	野外輝度 [cd/m ²]
C B L 測定	8/3 9:52～10:12	90000～95000	44000～46000	3800～4100
主観評価	8/3 10:23～10:30	94000～96500	45500～46500	4000～4100
S Y M 測定	8/3 15:02～15:24	19500～32000	12600～13900	3300～3700
主観評価	8/3 15:30～15:40	18000～20000	10800～12100	3200～3500

8.3 ブライツネスの算出⁴⁾および考察

ブライツネスを求めるための要素は以下の通りである。

- ・中心窩順応輝度 L_{af} ：運転者が先行車（視標）を注視しており、運転者の眼の中心窩の部分が先行車の輝度に順応していると考え、表－8.4～8.5に示す視標の輝度の平均値とした。
- ・等価光幕輝度 L_{eq} ：表－8.8～8.9の測定結果を用いた。
- ・対象物輝度 L_o ：表－8.4～8.5に示す視標の輝度の平均値とした。

これらの要素からブライツネスを算出した結果を、表－8.13、図－8.4に示す。また、先行車の明るさ評価、見え方評価について、被験者5名の平均値と視標位置との関係を図－8.5、図－8.6に示す。

表－8.13 ブライツネスの計算

照明方式	視標位置 [m]	等価光幕輝度 [cd/m ²]	中心窩順応 輝度 [cd/m ²] (視標輝度)	対象物輝度 [cd/m ²] (視標輝度)	ブライツネス	明るさ評価	見え方評価
ワンタートーン 照明	0	170	3050	3050	7.9	6.1	6
	12.5	168	211	211	1.7	4.1	4.2
	25	163	65.7	65.7	0.61	3.2	3
	37.5	149	32.8	32.8	0.24	2.6	2.6
	50	129	21.2	21.2	0.1	2.2	2.1
	62.5	104	14.4	14.4	0.027	2	1.8
	75	42.3	11.2	11.2	0.304	2.4	3.8
対称照明	0	179	887	887	4	5	6
	12.5	166	140	140	1.2	4.9	5
	25	151	78.6	78.6	0.8	3.8	3.8
	37.5	144	56.5	56.5	0.59	3.6	3.4
	50	124	51.4	51.4	0.63	3.4	3.2
	62.5	80.9	41.1	41.1	0.76	3.5	3.2
	75	14.7	33.6	33.6	2.1	3.8	4.4

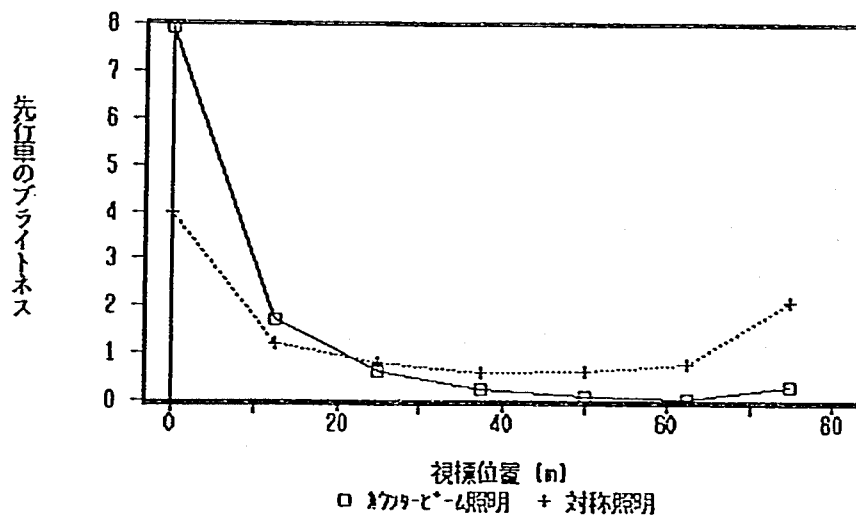


図-8.4 先行車のブライトネス

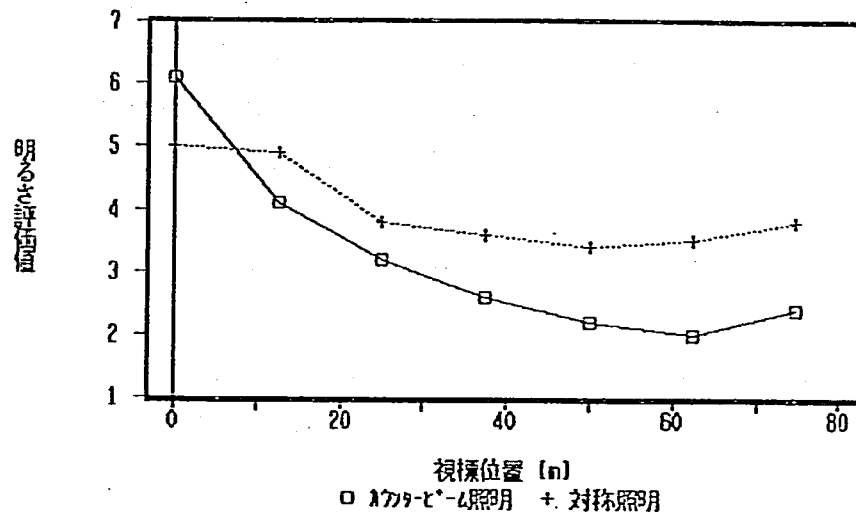


図-8.5 明るさ評価の観測結果

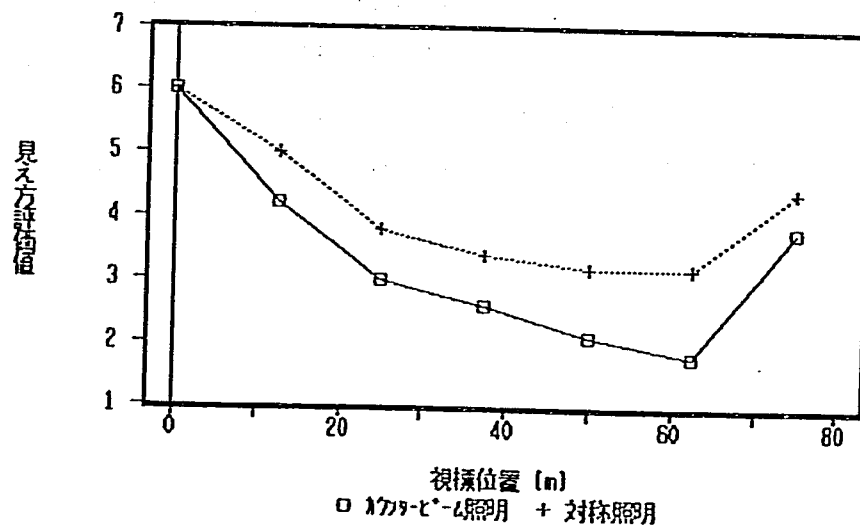


図-8.6 見え方評価の観測結果

一般にトンネルに進入する先行車を見たときの先行車の見え方は次のように変化すると考えられる。

- ①先行車がトンネルに進入する以前は、運転者は野外の高い輝度に順応しているが、先行車も自然光で明るく照らされるため、先行車を明るく感じる。
- ②先行車がトンネルに進入すると、運転者は野外の高い輝度に順応した状態でトンネル内の先行車を見ることになり、先行車を非常に暗く感じる。
- ③運転者が坑口に近づくに従って、トンネル坑口の暗い輝度に順応しはじめ、先行車を徐々に明るく感じるようになる。
- ④運転者が坑口内部に進入すると、運転者がトンネル内の低い輝度に順応するため、先行車を明るく感じる。

今回の測定は、上記①～③の範囲について観測、評価を行ったものであるが、図-8.4～8.6によれば、ブライトネスの変化、明るさ評価、見え方評価とも、上記①～③のトンネル進入時の先行車の見え方とよく一致していることがわかる。カウンタービーム照明と対称照明を比較すると、対称照明の方がブライトネス、明るさ評価、見え方評価の何れで評価しても、カウンタービーム照明に比べて先行車の視認性が高いという結果が得られた。特に見え方評価では、対称照明が最低でも「よくも悪くもない」と「やや悪い」の間であるのに対し、カウンタービーム照明では「かなり悪い」にまで評価が低下していることが分かる。このように先行車の見え方に関しては、カウンタービーム照明よりも対称照明の方が優れているという結果が得られた。なお、表-8.4～8.5の視標の輝度対比を比較すると、視標位置が25mの場合を除き対称照明の方がカウンタービーム照明に比べ輝度対比の絶対値が小さい。このように輝度対比の絶対値が小さくても先行車の視認性が低いとは限らず、先行車の視認性評価に対して、輝度対比を用いることは必ずしも適当でないことが分かった。

8.4 まとめ

運転者の眼の順応輝度および先行車相当の反射率約18%の視標（高さ1.4m×幅1.7m）の輝度の測定データをもとにした「ブライトネス⁴⁾」の計算と、先行車相当視標の主観評価実験（明るさ評価、見え方評価）を行なった。その結果、ブライトネス、明るさ評価、見え方評価の何れで評価した場合にも、対称照明のほうがカウンタービーム照明よりも先行車の視認性が高いことが明らかになった。

9. まとめ

平成5年度に実施した設計速度60km/hを対象としたカウンタービーム照明に関する実験の補足実験として、今回の実験を実施し、以下に示す結果を得た。

(1) 基本部照明へのすり付け

入口部照明の緩和部終端と基本部照明との照明特性上の滑らかなすり付けを検討するため、照明器具の配列および点灯条件（調光点灯／全点灯）を変えて、照明特性の測定を行なった。向き合わせ配列（調光点灯）、千鳥配列（非調光点灯）、片側配列（非調光点灯）の条件で照明特性を比較すると、基本照明とのすり付けに関しては、向き合わせ配列（調光点灯）が最も優れていることがわかった。実際の設計においては、設備費なども勘案して照明器具の配列を決定する必要がある。また、緩和部終端のコントラスト係数は何れの配列においても0.3前後であり、CIE（国際照明委員会）等でカウンタービーム照明を定義している値である0.6以上²⁾³⁾を下回っていた。これは、緩和部終端部では入口照明のカウンタービーム照明による照明レベルに対して対称照明を採用している基本照明の照明レベルの影響が大きいためと考えられた。

(2) 路面サンプル板の平均照度換算係数

アスファルト舗装の路面について、表面研磨を施した場合（平成5年度実施¹⁾）と表面研磨をしない場合との比較を行なった。その結果、平均照度換算係数は、表面研磨を施さない場合の方が高いことがわかった。今回の路面サンプルは、供用所期の状態（研磨なし）と、人工的に表面を研磨した場合であり、実際に供用中のトンネルの路面の光反射特性とは異なる可能性がある。

(3) 輝度対比および野外輝度と障害物の視認性との関係

全体的にカウンタービーム照明の輝度対比が高く、トンネル坑口からの距離にかかわらず輝度対比が安定しているため、障害物の視認性についても対称照明に比べて高い評価が得られた。

前回実施した実験結果¹⁾と本実験結果を比較検討した結果、輝度対比と視認性の評価値との関係に対する野外輝度の影響は認められなかった。

(4) 大型車による遮光の影響

大型車の影となる区間に障害物が存在する場合、障害物が視認しにくいことが懸念されたため、確認実験を行なった。その結果、カウンタービーム照明および対称照明の両照明方式ともに大型車による遮光部分の障害物は視認しにくいものの、大型車により影が生じる区間はカウンタービーム照明の場合でも大型車の後方3m程度までであり、実際の走行への支障は生じないと考えられる程度であった。

(5) 照明器具からのグレア

照明器具からのグレア相対閾値増加（TI値）について検討を行った。その結果、車の屋根による遮光の

影響を考慮しない場合は、T I 値が最大値で約36%となったが、運転者の眼の位置とフロントガラス上端部との位置関係から遮光されることを考慮した状態では遮光を考慮しないT I 値よりも低い値を示すことが分かった。また、基本部とのすり付け区間におけるT I 値は、入口部照明の終端と基本照明との照明レベルの差を3倍以内程度にすることで前回実施した実験結果¹⁾に比べて低い値となることが分かった。

(6) 自然光の射込みの影響

自然光の射し込みによる影響を南坑口および北坑口において坑口の方位・坑口高さとの関係について検討した。その結果、北坑口に比べて南坑口のほうが自然光の射込みの影響により路面輝度が若干大きいことがわかった。また、南坑口において、シャッターの開度を変化させて、自然光の射込みの程度を比較測定した結果、坑口の天井高さを低くして開口断面積を縮小することにより、自然光の射込みを減少でき、これによって、逆シルエットに転換する地点を坑口に近い位置に移動できることが明らかになった。

(7) 先行車の視認性

運転者の眼の順応輝度および先行車相当の反射率約18%の視標(高さ1.4m×幅1.7m)の輝度の測定データをもとにした「ブライトネス⁴⁾」の計算と、先行車相当視標の主観評価実験(明るさ評価、見え方評価)を行なった。その結果、ブライトネス、明るさ評価、見え方評価の何れで評価した場合にも、対称照明のほうがカウンタービーム照明よりも先行車の視認性が高いことが明らかになった。

【参考文献】

- 1) 建設省土木研究所ほか、「トンネル内の新照明方式に関する共同研究報告書-カウンタービーム照明に関する研究報告書-」、土木研究所共同研究報告書第173号、平成9年3月
- 2) CIE, Publication NO. 26/2 "GUIDE FOR THE LIGHTING OF ROAD TUNNELS AND UNDERPASS", 1988
- 3) CEN/TC169/WG6, Standard for the lighting of road traffic tunnels. February. 1994
- 4) Inofara M., Narisada K., Takeuchi T., Yoshimura Y.: Scaling of brightness an object seen in complex luminance fields, Proceeding of CIE 20th Session, (1983)E33/1

おわりに

本報告書は、現行の照明方式である対称照明と新しい照明方式であるカウンタービーム照明の両照明方式の条件下において、設計速度 60 km/h を対象として平成 5 年度に実施した実験の補足実験として、基本部照明すり付け、路面サンプル板による平均照度換算係数の把握、大型車による遮光の影響、照明器具のグレア、自然光の入射状況、先行車の視認性について検討したものである。

今後は、各設計速度毎の照明方式の適用性、舗装路面の種類による照明効率の確認などの検討を行い、実トンネルへの適用を行いその効果の確認を行うことが重要である。最後に、本報告書が今後のカウンタービーム照明の研究の参考となれば幸いである。

付録

・実験期間中の野外輝度および野外水平面照度・鉛直面照度

4章、5章、7章、8章の実験を行った8月2日および8月3日の実験時間帯の野外輝度および野外での水平面・鉛直面照度をバックデータとして測定した。測定条件は以下のとおりである。測定結果を表-1～表-2に示す。

- (1) 野外輝度：坑口手前105m、地上1.5mの高さ、東側車線中央に輝度計を設置し、トンネル坑口中央を中心とする直径20度の円形視野の平均輝度を測定した。坑口手前からの距離を注視開始点の150mとしなかったのは、坑口手前100m付近の上方に存在する高架道路が視野内に入るのを避けるためである。
- (2) 水平面照度・鉛直面照度：坑口手前113.8m地点、東側車線中央において、水平面照度は地上高さ1.07m、鉛直面照度はトンネル坑口と反対側に受光部を向け地上高さ0.83mに受光部を設置し測定した。鉛直面照度の測定結果は、トンネル坑口での鉛直面照度と等しいものと考えられる。

表-1 野外輝度、野外の水平面照度・鉛直面照度(8月2日)

時刻		水平面照度	鉛直面照度	野外輝度
時	分	[lx]	[lx]	[cd/m ²]
11	50	102000	51000	4900
	55	105000	44500	5000
12	0	96000	42000	4900
	5	96000	40500	4800
	10	95000	40000	4800
	15	96000	39500	4800
	20	97000	39000	4800
	25	95000	37000	4700
	30	97000	37500	4800
	35	95000	36500	4700
	40	98500	37000	4800
	45	98000	37000	4800
	50	92000	35000	4600
	55	90000	34000	4600
13	0	91000	34000	4600
	5	85000	31000	4400
	10	87000	32000	4600
	15	87000	32000	4800
	20	85000	31000	4900
	25	86000	31000	4900
	30	86000	31000	5200
	35	89000	31500	5300
	40	82000	30500	4900
	45	78000	30000	4900
	50	35000	19000	3300
	55	25000	14500	2600
14	0	55000	23000	3600
	5	25500	15500	2800
	10	26000	15500	2700
	15	24000	14500	2700
	20	20000	13000	2700
	25	46000	19000	4000
	30	59000	19500	4300
	35	54000	19000	4200
	40	54000	19000	3500
	45	40000	18000	3800
	50	22000	12500	3000
	55	21500	12500	3000
15	0	38000	13500	3500
	5	22500	14500	4300
	10	22000	14000	4300
	15	21500	13500	4100
	20	20500	12500	3900
	25	20000	12000	3700
	30	20500	12000	3600
	35	18500	11000	2800
	40	13500	6700	1800
	45	13500	6000	1700
	50	14000	6000	1700
	55	13500	6000	1600

表-2 野外輝度、野外の水平面照度・鉛直面照度（8月3日）

時刻		水平面照度	鉛直面照度	野外輝度
時	分	[lx]	[lx]	[cd/m ²]
8	15	65000	36000	2900
	20	65000	36000	2900
	25	67500	37000	2900
	30	71000	36500	2900
	35	73000	36500	3000
	40	75000	37500	3200
	45	78000	39000	3200
	50	78000	38000	3300
	55	80000	40000	3400
9	0	80000	40500	3400
	5	81000	41000	3200
	10	83500	41500	3500
	15	85000	42000	3500
	20	87000	43000	3600
	25	88000	42500	3600
	30	90000	44000	3800
	35	90000	44000	3800
	40	92000	44500	3900
	45	92000	44500	3800
	50	92000	45000	3800
	55	92000	45000	3900
10	0	91000	44500	3800
	5	90000	44000	3800
	10	94000	46000	4000
	15	95000	46000	3900
	20	94000	46000	4100
	25	96500	46500	4000
	30	94500	45500	4000
	35	97000	46500	4200
	40	99000	47000	4600
	45	100000	47300	4700
	50	99000	46300	4600
	55	102000	47000	4800
11	0	102000	46500	4700
	5	100000	45500	4700
	10	102000	46000	4800
	15	103000	46000	4800
	20	102000	45500	4800
	25	100000	45000	4800
	30	106000	47500	5000
	35	100000	45000	4500
	40	100000	44500	4300
	45	99000	44000	4400
	50	96000	42500	4300
	55	100000	44000	4500
12	0	98000	43000	4500
	5	94000	41500	4400
	10	93000	40000	4300
	15	93000	40000	4300
	20	95000	40000	4500

・ブライトネスの解説⁴⁾

(1) ブライトネスとは

日常、昼間の屋外のように明るい視環境から、夜間の屋外のように暗い視環境までの、様々な明るさの視環境の中で適切にものが見えるように、私たちの目は光に対する感度を変化させている。このため、たとえば同じ輝度の対象物を見ていた場合でも、目が輝度の高い視野に順応して感度が低く調整されているときには暗く見え、目が輝度の低い視野に順応して感度が高く調整されているときには明るく見える。このように、人間がある対象物を見て感じる明るさは、その対象物の輝度だけでなく、それを見る目の順応状態によって変化する。この対象物の輝度と目の順応状態によって決まる”明るさ”を数値化するものがブライトネスである。

(2) ブライトネスの測定

前述のように、ブライトネスの値は、対象物の輝度と目の順応状態によって決まる。このうち、対象物の輝度は輝度計を用いて測定できる。一方、目の順応状態は、そのまま数値化できない。これに関して、目の順応状態は、その目で識別できる最小の輝度差（輝度差弁別閾と呼ばれる）と対応することが知られている。（現在のトンネル入口照明に関する順応理論でも、この輝度差弁別閾を応用して運転者の順応状態を定量化している。）したがって対象物のブライトネス B は、対象物輝度（ L_o ）と輝度差弁別閾（ ΔL_{min} ）との関数として表わされる。

この関数としては、次式が報告されている。

$$B = 0.8 \{ (L_o / \Delta L_{min})^{0.5} - 1 \} \quad \dots\dots\dots (1)$$

このうち、ある視野に順応しているときの輝度差弁別閾は、そのときに網膜の中心窩が順応している輝度（中心窩順応輝度）と、等価光幕輝度とから求められる。

すなわち、ある視野に順応しているときの輝度差弁別閾 ΔL_{min} は以下のプロセスによって求められる。

- 1) 中心窩順応輝度 L_{af} を測定する。
- 2) 等価光幕輝度 L_{eq} を測定する。
- 3) L_{af} の値から、図－1の関係を用いて中心窩順応輝度に対応する輝度差弁別閾の成分 $\Delta L_{min}(L_{af})$ を求める。
- 4) L_{eq} の値から、図－2の関係を用いて等価光幕輝度に対応する輝度差弁別閾の成分 $\Delta L_{min}(L_{eq})$ を求める。
- 5) その視野に対する輝度差弁別閾 ΔL_{min} を次式から求める。

$$\Delta L_{min} = \Delta L_{min}(L_{af}) + \Delta L_{min}(L_{eq}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

以上より求めた輝度差弁別閾の値と、対象物輝度の値を（1）式に代入して対象物のブライトネスを算出する。

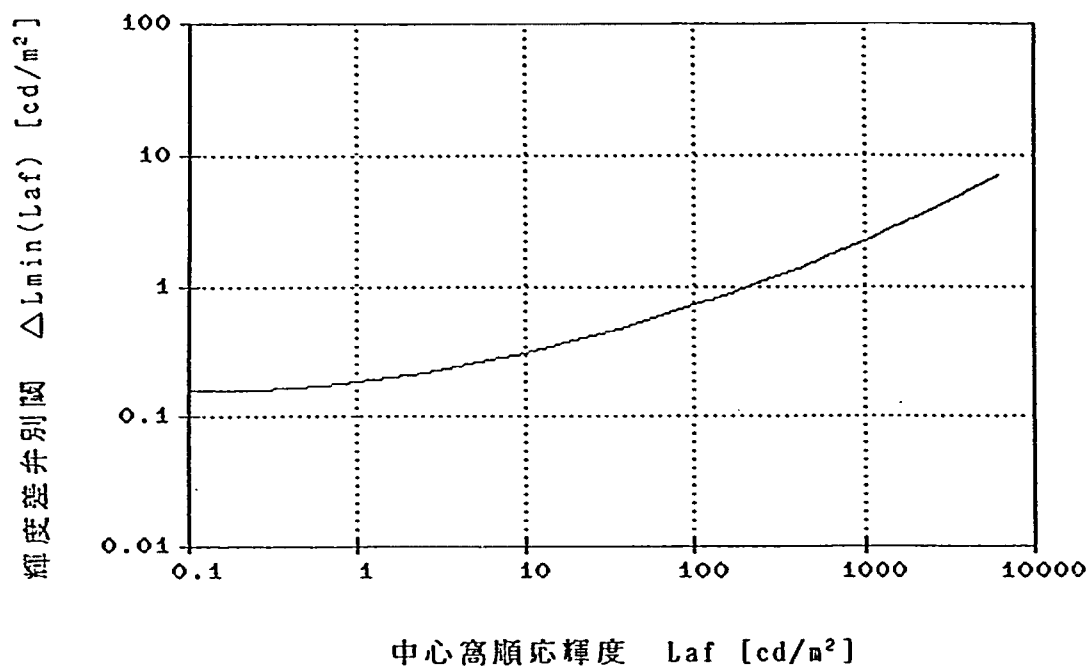


図-1 中心窩順応輝度と輝度差弁別閾の関係

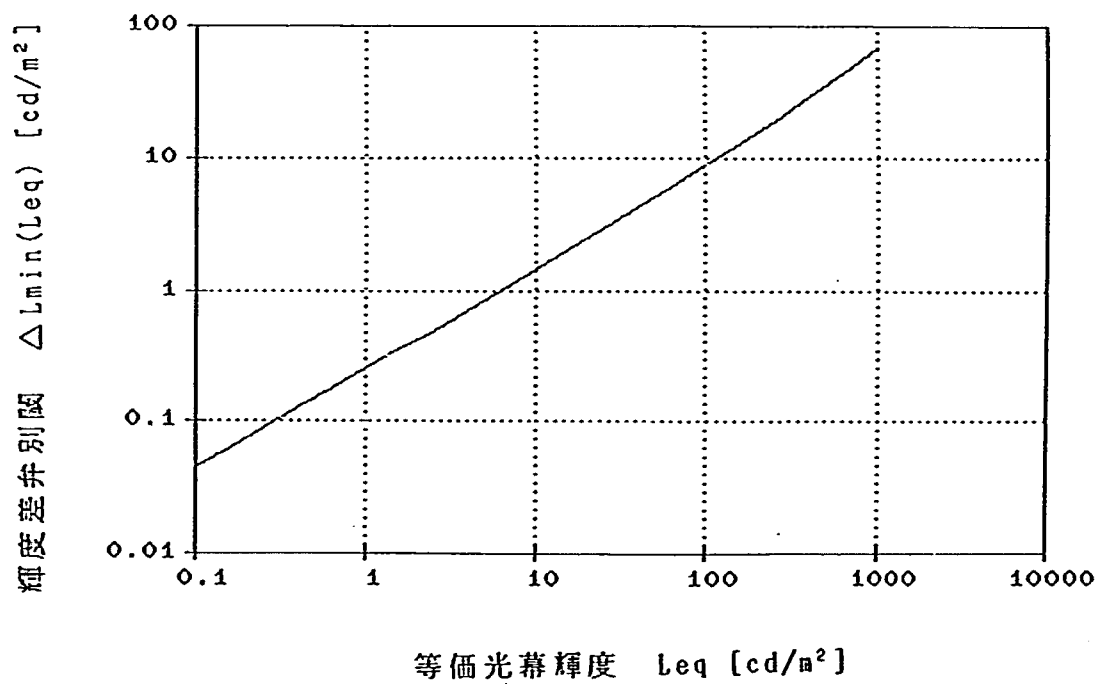


図-2 等価光幕輝度と輝度差弁別閾の関係