

# 道路トンネルのばい煙

その許容濃度に関する一考察

蛭丸  
トンネル

田島利男\*

**要 旨** 従来の道路トンネルの換気の目的は、自動車がエンジン駆動中に排出する一酸化炭素 (CO) ガスの毒性を薄めることであったが、最近ではディーゼル自動車、軽自動車などのばい煙を発生させる自動車の激増や、一方、自動車のスピードアップに対する十分な視野の確保、安全性の要求などから、ばい煙を薄めることが、その目的となってきた。本文は、このばい煙を薄める場合、その濃度をどの程度まで薄めればよいか、トンネル照明、走行条件によってその許容される濃度はどう変わるか、いろいろの実験データをもととして、その理想とする値を論じたものである。

## 1. ま え が き

終戦直後の昭和 21 年わが国の自動車登録台数は約 17 万台であったが、高度の経済成長とともにその数は驚異的に伸び、33 年 11 月には約 560 万台を越えた。一方、道路事情は追われる立場とはなっているが、新 5 ヵ年計画、高速縦貫道などの道路整備計画が打ち出され、現在、国をあげて道路建設の途上にある。

これらの道路建設に当たって、道路トンネルの建設は高価な代金を要求されることは知りつくされているが、貴重な平地が少なく、山岳部の多いわが国では、トンネルはさげられない現状となっている。

このトンネルが高価となる原因は、特に道路トンネルであるがため、一般工事としての掘削、巻立のほか、この長いトンネルの換気、照明などの施設が加わるためである。これらの施設を合理的、かつ経済的に計画することは、諸外国をふくめ各方面で研究がなされ、また建設された例も現在数多く各国に見られているが、いずれも推定した交通量が相当少ないか、一部をのぞきそのほとんどが自動車的高速快適運転などは考えずに計画、建設されたものようである。

つまりトンネル換気は自動車排気ガス中にふくまれる一酸化炭素 (CO) ガスを安全濃度以下に薄めることのみを目的とし、ばい煙に対する換気は考えず、照明も快適性を考えた明るいトンネルはごくわずかであった。

しかしながらわが国では、当初に述べた自動車の驚異的增加に加えてディーゼル車、混合油使用の軽自動車な

どのばい煙を排出する自動車が大量に出現し、換気の対象は CO 換気より大量の換気量を必要とするばい煙換気に移らなければならなくなり、照明もトンネル内のばい煙中の物の見え方をよくするという目的を新たにうることとなった。

しからば、そのばい煙はどの程度まで薄める必要があるか、また、そのときのトンネル照明は、その許容濃度を定めるうえにどのような役割をはたすだろうか、本文はこのようなことがらを知るために行なった試験研究資料の紹介と、その許容濃度を定めるについての一考察を述べたもので、今後のトンネル換気、照明計画あるいは諸研究などに対しならかの参考になれば幸いである。

なお、本文は名神高速道路トンネルの換気、照明計画の基礎とした部分もあり、蛇足ではあるが同トンネルについての関係設備の一部の紹介もあわせて行なった。

## 2. 研究概要

許容濃度をどんな条件を満足するときの値とするかは本調査で最も重要なことであるが、ここではばい煙によるくもり具合が、人におよぼす感じ、あるいは不快感の程度、安全感、快適性などをその条件とし、その具体的表現は、物の見え方とした。つまりトンネル内のばい煙許容濃度は、必要な物の見え方を満足したときの値とすることとした。さて、必要な物の見え方であるが、これは非常にむずかしい問題で、例えばある物体がある距離はなれて見えるときの、ばい煙濃度であればある速度での走行状態では不安感はないとか、快適であるとか、場合場合によって、複雑な様相を呈するものである。

本研究では、このような物の見え方をいろいろな条件下で調べ最終的に自動車走行速度、ばい煙濃度、トンネル照明などの関係を考察してみた。以下本文では最初にいろいろな場合の見え方を紹介するが、その内容を列記すると、① 模型トンネル内における、明るさと物の見え方の関係およびそのばい煙中における場合、② いろいろな種類の光源下における、ばい煙中の物の見え方の差異 (トンネル模型中におけるもの)、③ 実物トンネルにおける、走行車上よりの物の見え方、などである。これらの見え方は、別に動的なもの、静的な研究とにわけられるが、ここでは③が前者となりそれ以外は後者に

\* 正員 日本道路公園企画調査部技術課

属した考え方となる。

なお、結論となる許容濃度は実用上、動的な考え方のうえに立って出したものである。

### 3. ばい煙中における物の見え方

#### (1) 模型試験の結果 (その 1)

どんな研究、調査にしろなるべくイミテーションでなく、実物での調査が最も理想的であるが、費用などの関係でなかなか実行できないのが現状である。この調査もまず、模型による調査から始められた。

**a) 実験装置と方法** 実験装置は写真-1,2に見られるようなもので光源はけい光灯を路面水平照度が 50 lx になるように設置してある。また、この模型中にばい煙を送り込むことができるような装置が設けられてあり、また送り込んだばい煙濃度を測定する透過率計も備えつけられた\*。なお、トンネル内照度を 50 lx に定めた理由は別の調査により、霧の中でけい光灯を光源とするとき、約 50 lx 以上の明るさとする、光幕現象(霧が光ってくる)をおこし、見え方はあまりよくなるまいとの結果が出たためである。このような装置の中で、人形、自動車、落下物相当の小さな箱をトンネルの中に置き、トンネル内にばい煙を送り込み、それらの位置を動かしたりして見え方を調べた。なお、見え方を調べた人の視力は、標準視力の者と自動車運転免許最低資格者(視力 0.7)の者についても行なわれた。また、人形などはトンネル同様の縮尺で縮められてあり、見え方がよくなるまいよう、全部黒く塗ってある。

#### b) 結果

図-1 は、その調査結果である。なお図中、可視距離、確認距離とあるが、前者は物の存在がわかる距離(注意を喚起する距離)で、後者は、物の形、動きが確認できる距離である。この図から、ばい煙濃度と、物の見え方の関係についての一断面を知ることができよう。もし、この関係から許容濃度を考え出すとすれば、走行上の必要視距内にすべての物が可視または確認できるようなばい煙濃度を指すこととなる。

#### (2) 模型試験の結果 (その 2)

前回の試験は光源をけい光とし見え方をしらべたが、

\* 透過率とばい煙濃度：両者とも濃度の値を示すもので、透過率とは煙霧中にある離れた位置に、発光部、受光測定部を間い合わせて置き、その受光部で測定した光源の輝度の煙霧が全くなかったときの輝度に対する百分率で表わしたものである。一般に受光部、発光部との距離間隔は 100 m である。

また、透過率とばい煙濃度との関係はつぎの式で示される。

$$\tau = \frac{E}{E_0} = 10^{-\alpha l} \quad \text{あるいは} \quad \alpha = -\frac{1}{l} \log \tau$$

ただし、 $\alpha$  : ばい煙濃度

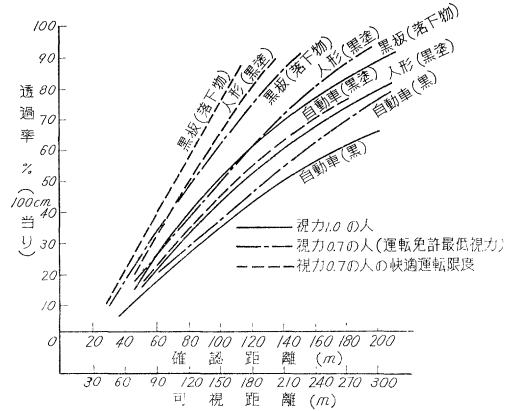
$E$  : 煙霧がないときの光源輝度

$E_0$  : 煙霧があるときの光源輝度

$\tau$  : 透過率

$l$  : 光源と受光測定部との距離

図-1 確認、可視距離とばい煙透過率 (模型)



煙霧中では黄、黄赤、赤色などの光源がよく、その中をとおして物を明示するのに有効である。そこでこんどはいろいろな有色光源をトンネル模型に備えつけて物の見え方を調べてみた。

**a) 実験装置と方法** 実験装置は前回と全く同様であるが、光源についてはつぎの 6 種類と前回との比較のため、白色けい光灯が追加された。

140W ナトリウム灯 NAL-140 黄赤色の単光色

400W 水銀灯 HF 400 青白色

400W けい光水銀灯 HF 400 冷白色

400W 黄色けい光水銀灯 HF 400 Y 黄色

40 W 緑色けい光灯 FL-40 G 緑色

40 W 温白色けい光灯 FL-40 WW-A 温白色

比較 40 W 白色けい光灯 FL-40 W 白色

実験方法は前回と変わらないが、特に彩色したものの見え方を調べるために、彩色した色視標をトンネル内に移動できるように置き、ばい煙中、各種光源下でこれを見て、各光源の特性を調べた。

**b) 結果** 結果は表-1のとおりで、灰地に七色の色視標および白地に黒の視標のばい煙中での見え方は、ナトリウム灯 F が一番よい見え方を示した。ただし、演色性については最も悪い。

#### (3) 模型試験の結果 (その 3)

以上の 2 つの試験ではいずれも照度を 50 lx と固定し煙の濃度のみ変化させて見え方を調べたが、この試験では照度も変えて調べてみた。

表-1 各種光源による有彩色視標 7 種 (灰地) のばい煙中における見え方の平均

(数値は各視標の見える限界におけるばい煙透過率の平均値で + $\alpha$  は透過率 100% (ばい煙なし) でも見えなかった視標があったためのもの、なお視標の大きさはすべて同一で視力 0.7 相当のもの)

光源の種類	可視限界透過率	光源の種類	可視限界透過率
FL-40W	68.7 + $\alpha_1$	H-400	48.7 + $\alpha_4$
FL-40WW-A	57.6 + $\alpha_2$	HF-400	44.9 + $\alpha_5$
FL-40G	77.2 + $\alpha_3$	HF-400Y	46.4 + $\alpha_6$
NAL-140	39.5		

写真-1 実験用トンネル模型内部  
(大きさは名神トンネル断面の 1/40 略)  
(面の孔は照度測定用のもの)

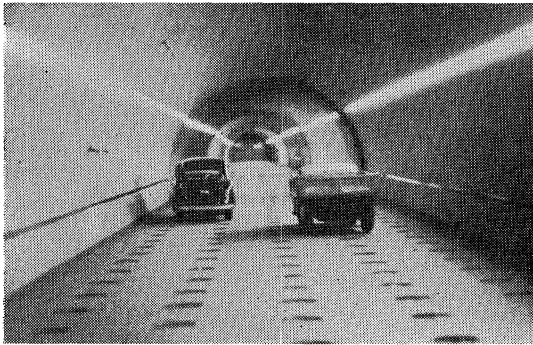
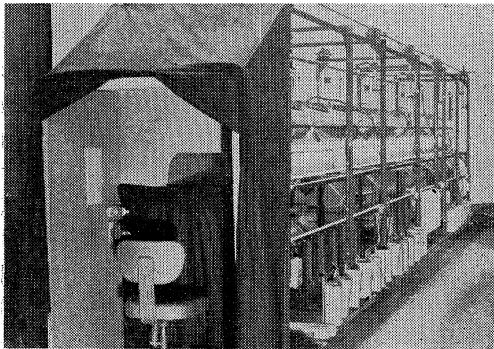


写真-2 トンネル模型全形  
(左部椅子の位置からトンネル内を観測する)



**a) 実験装置と方法** 装置は前回とほとんど変わらないが、精度を期すため、模型トンネルを縮尺 1/25 と一まわり大きくし、天井部を水平とし換気トンネルを模した。また、光源はナトリウム灯、けい光灯の二種としいつでもただちに交換できるように設備された。

試験方法も前回と全く同様であるが、ただ照度変化が条件に加えられている。

**b) 結果** トンネル照明条件、ばい煙濃度変化(トンネル換気条件)と物の見え方の関係は図-2のようになった。なお、図-2は対象物が落下物となっているが、ほかの人形などにくらべ、これは一番見にくいものであった。ここでもナトリウム灯下の見え方はよい。

**(4) 実物実験**

以上の実験はすべて模型使用の実験であったが、ここに紹介するのは実物のトンネルにおける結果である。一般に模型では観測者は静止し、視線あるいは障害物を前後に動かし見え方を調べているが、実際はこれと逆で動きながら物を見ることとなる。では動きながら物を見るのとどのようになるか、模型実験との相違はどうか名神トンネルなどで調べた結果はつぎのとおりである。

**a) 試験方法など** 写真-3のようにトンネル両坑口をふさぎ、この中にディーゼル自動車を走らせばい煙

図-2 照度-濃度-見え方の関係(立方体)

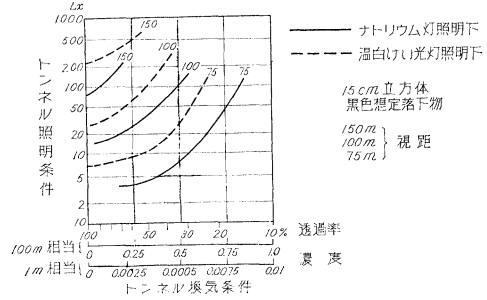


写真-3 試験準備中の名神高速道路梶原トンネル上り線  
(トンネル入口面壁は、トンネル進入時に、目の暗順応を助けるため、暗灰色に吹付けてある。内部に増灯照明が見える。)

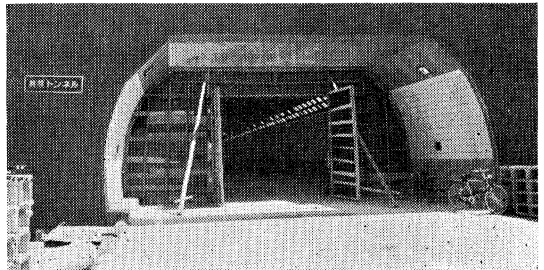
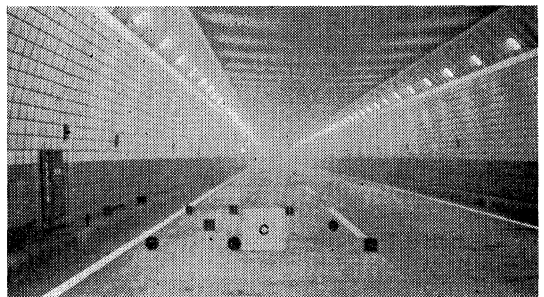


写真-4 試験中のトンネル内部

光源ナトリウム灯(60W)灯間隔4m、内壁は吸音質のパーライト・ブロック張り、天井部は、デッキプレートで張られ、その上はトンネル換気用送気ダクトになっている。なお、トンネル内にはこのほか、新しい方式による火災感知器(両側中央部に見える)ばい煙濃度自動測定記録機などが設備されている。開通式昭和38年7月15日



を貯え、いろいろな障害物を置き、走行速度、障害物の視認、確認位置などの必要データを収録できる装置をそなえた自動車を、その中に走らせた。なお、障害物の視認、確認は、運転者、同乗者に行なわせ、条件としての照度は30~120 lx、ばい煙は100m透過率で10~90%の範囲でそれぞれ変化させた。

**b) 結果** 使用したトンネルが開通直前のあわただしい時期であったため、落ついて十分資料をうることができず、はなはだ遺憾とするところもあったが、一応のデータを示すと図-3のとおりとなる。なお、この試験はナトリウム灯照明下の試験であるが一般に普及され使用されているけい光灯下の実態について、建設省土木研究所で調査された資料がある。試験方法など、両者ほと

んど似ており、考察資料として貴重なものである(図-4)。

以上いろいろな物の見え方を列記したが、おおよそのばい煙中の物の見え方について知ることができよう。

また、ここでは省略したがトンネル照明光源としてはナトリウム灯、けい光灯が経済的であることがわかり、したがって、このような見え方に関する考察も特に新しい光源でもできない限り、この両光源下について行なえ

図-3 ばい煙濃度と視距の関係  
ナトリウム灯下

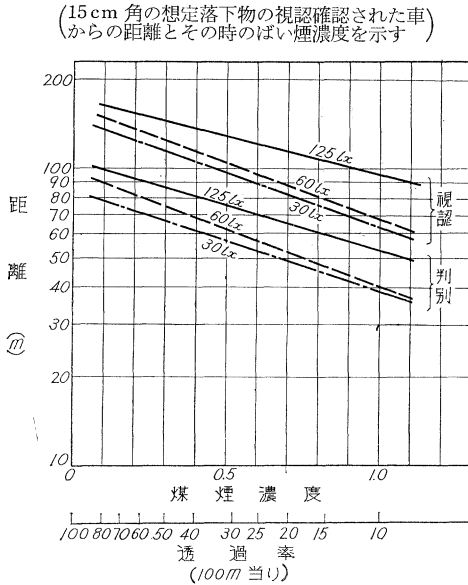
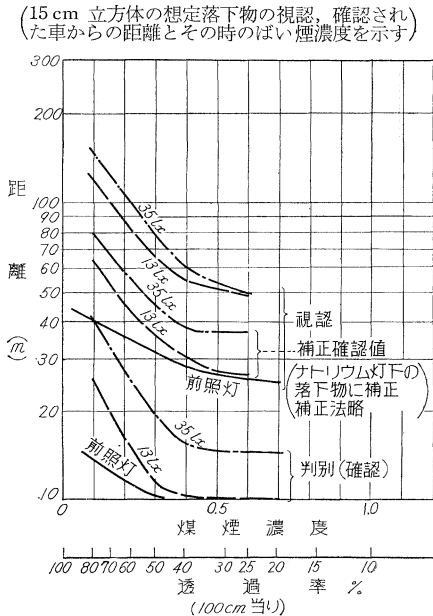


図-4 ばい煙濃度と視距の関係  
けい光灯下



ばい煙による。

#### 4. ばい煙許容濃度

以上トンネル内ばい煙中の物の見え方について、いろいろ資料を得たが、それではどのくらいの濃度のときをばい煙許容濃度とすればよいか。最初に述べた安全感、快適性を満足する値はどのくらいにおさえればよいだろうか。それは、走行中の自動車が、まず十分安全な視距が得られるような濃度とすべきであるということに要約される。それでは、その車から要求される安全視距は、ばい煙中何がどのような見え方をするときを得られるものであろうか。実験資料などから考察してみよう。

##### (1) 車から要求される安全視距

自動車が安全に走行するためには、その走行する前方がよく見とおせなくてはならない。この見とおせる距離(視距)は道路設計上の条件となっており、道路構造令できびしく規定してある。つまり、安全視距は走行中の車が障害物を発見したとき、その障害物に突当ることなく、障害物以前に安全に停止または、避走できるあらかじめ走行中から見えている自動車前方の可視距離としてゐる。そしてその距離の物理的内訳をつぎの3項目にわけて説明している。すなわち、

- ① 障害物を発見してから制動をかけるかどうか判断する間に走行する距離(時間にして1.5秒)…… $l_1$
- ② 判断をしてからブレーキペダルを踏み、ブレーキがかかる間に走行する距離(時間にして1秒)…… $l_2$
- ③ 道路面の状態(路面の乾湿、路面材)が急停止するのに最悪の状態では制動により停止または避走できる距離……… $l_3$

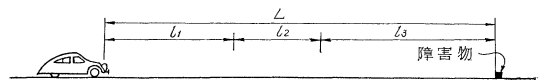
したがって、自動車から要求される安全視距は  $l_1 + l_2 + l_3$  ということ、この値を速度別に示すと表-2のようになる。それでは、この安全視距はトンネル内では、どう扱われたらよいであろうか。

##### (2) 物の見え方と安全停止距離(視距)

一般にばい煙中の物の見え方の現象は、ある障害物と

表-2 安全視距内訳

速度	安全視距 $L (l_1 + l_2 + l_3)$	$L - l_1$
40 km/h	55m	40 m
50	70	50
60	80	55
70	100	70
80	110	80
100	160	120



観測者との距離を縮めるか、あるいはばい煙を薄めることにより、次第にその存在を知り、形を認め、はっきりとした確認がおこなえるようになってくる。そうする

と安全停止距離だけ離れた位置での見え方、あるいは見る物はどうでなければならないだろうか、例えば、ぼんやり見える状態でのいいのか。はっきり見えなければいけないのか、この決め方により安全視距をうるためのばい煙許容濃度は大きく変わってくる。では、まず障害物は何とすればよいだろうか。これは安全側より要求される条件として、ばい煙中あまり見え方のよいものであっては困まる。図-1で、ばい煙中最も見えにくいものは落下物(実物相当 15 cm 立方体)であることがわかる。一方、走行上障害物と考えられる最小のもの(見え方から考えると最も見えにくいもの)の大きさはどのくらいであろうか。道路構造令ではこの障害物の大きさを高さ 15 cm としている。これは 15 cm より小さい障害物ならば車は容易に避けることができるし、もし避けそこねても乗り越えてしまうと考えられること。国外でも同様な理由でその高さを 4" (AASHO), 15 cm (ドイツ) としているなどの理由によるものである。したがって、15 cm 角の落下物を障害物としても危険はないと考えられる。

つぎに、この障害物は、どのような見え方をしていなければならないか。模型試験、あるいは実物試験ではその見え方を詳細に知るために、視認、確認と見え方を二通りにわけて調べている(その見え方の状況は 3.(1) b) に示した)。一方、道路構造令における自動車が障害物の手前で停止するまでの経緯はどうか。その経緯の中に視認、確認の考え方がそう入されていることを発見できる。つまり、何かを発見したときが、視認となり、その何であるかを判断したときが確認と考えられる。従って、道路構造令に示された安全停止距離が視認範囲内にあり、 $l_2 + l_1$  の長さが確認範囲内にあるような見え方をすれば安全走行が可能であると考えられる。

以上から最小障害物や、その見え方とばい煙中の安全走行との関係を要約してみると、「ばい煙中で、自動車が安全走行しうるためには、その走行速度における安全停止距離以前に 15 cm 角の黒色障害物が視認され、構造令というブレーキペダルを踏む以前にそれが確認できるような見え方の内容でなければならない」となる。

### (3) ばい煙許容濃度

以上の考え方をもととして実験結果をながめ自動車が安全に走行しうるばい煙許容濃度を案出してみる。

まず、表-1の有色照明試験結果を見ると、光源の種類によって、同じ条件のばい煙下でも見え方が違っている。これは、光源の種類によって、ある自動車走行のためのばい煙許容濃度は異なるということがわかる。

つぎに図-2,3でわかるようやはり同じ条件下のばい煙中でも、明るさの違いが見え方に相当影響していることがわかる。したがって、ここでばい煙許容濃度を案出するとすれば、それは光源の種類とその照明による明る

さに区別し、走行速度条件別に示さなければならないこととなる。ではつぎに、トンネル照明光源としてナトリウム灯、けい光灯を採用することとし、前説にしたがい、実験結果(図-3,4)を参考としてばい煙許容濃度を求めると、表-3のようになった。なお、図-2も参考となるが静的な試験結果なので、いろいろと使用上問題があると思われる、その傾向を参考とした。表-3からばい煙許容濃度は走行速度によっても異なる、照明の種類、照度によっても大きく違うことがわかる。

表-3 ばい煙許容濃度(透過率)(100 m 当り%)  
ナトリウム灯照明下 けい光灯照明下

速度	km/h					%	速度	km/h						
	40	50	60	70	80			40	50	60	70	80		
照度							照度							
30 lx	(20)	25	30	60	—	—	15 lx	(55)	65	70	85	—	—	—
60 lx	(15)	20	25	45	(65)	—	35 lx	(40)	60	65	75	(80)	—	—
120 lx	—	—	15	25	(40)	(90)	—	—	—	—	—	—	—	—

注:実験資料が速度約 60 km/h におけるもののため ( ) 内の値は推定される値となる。

## 5. 残された問題点

以上で、一応の考察は終ったが、まだ不足と考えられる問題点をとりあげると、つぎのとおりとなる。

① 障害物として、15 cm 角の黒色板としたが、一般的障害物の代表(安全側の)として、その色、形状が適当であったかどうか。今後の調査として必要である。② 動的な試験としての実物試験で、走行速度が 60 km/h 未満のため、許容濃度表の高速度部分の値は再検討の必要はないだろうか。動視力の低下を考慮する必要がある。③ この考察と直接の関係ではないが、ばい煙発生量を交流量の内容、トンネル形態から正確に知るための調査を進める必要があり、さらにまた、自動車工学上からのばい煙処理に関する研究をうながし、煙突のばい煙同様、野ばなしを規制することも重要である。

## 6. あとがき

この考察は非常にとぼしい資料をもととして行なったので、これで完全であるとは思えないが、このような資料、あるいは考え方をあしがかりとし、いろいろの研究検討等が行なわれ、より合理的な諸値を生み出すことができれば、筆者の喜びとするところである。紙面の都合で、一部詳述できない所があり、明りょうを欠く所があったと思うが、読者のご賢察を期待する次第である。

### 参考資料

- 1) 日本道路公団:トンネル照明試験報告書 昭和34年3月, 有色照明試験報告書 昭和35年3月, トンネル換気照明総合調査報告書 昭和38年7月, トンネル総合(照明)調査試験報告書 昭和38年10月
- 2) 伊達英夫・今田 徹:トンネル内の物の見え方について, 設省土木研究所:土木技術資料 5-7
- 3) 高野 務:道路構造令解説, 日本道路協会

(1964.1.6・受付)