

区画線の夜間雨天時における視認性低下の 要因分析と視認性向上策

A FACTOR ANALYSIS ON DECREASE IN THE VISIBILITY OF ROAD MARKINGS AT RAINY NIGHTS AND IMPROVEMENTS OF THE VISIBILITY

今田寛典*・門田博知**・児島武男***

By Hirofumi IMADA, Hirokazu MONDEN and Takeo KOJIMA

It is well known that the visibility of road markings at rainy nights remarkably decreases. Many studies on this problem have been carried out. However, most of them have not dealt with the effect of rainfall on the visibility of road markings by means of analytical approaches.

In this paper, firstly we chose dominant factors effecting on the visibility of road markings at rainy nights, secondly made clear each effect of them by means of experimental and theoretical approaches, and finally discussed the methods of improving the visibility of road markings at rainy nights.

We were able to make clear the effect of factors on the decrease in the visibility quantitatively, and propose some improvements of the visibility.

Keywords : road marking, rainy night visibility, traffic safety, rainfall

1. はじめに

欧米では、区画線が自動車走行の視線誘導に大きな効果を示すことは明らかにされている¹⁾。また、事故多発区間に区画線を設置した結果、事故の大幅な減少、特に、夜間事故の減少に大きな効果がみられた^{2)~4)}。わが国でも区画線の設置効果の大きいことが確かめられている。交差点や車線数が急変するような地点および曲線区間での設置効果は大きい^{5)~7)}。

このように区画線は視線誘導、道路交通の安全性や円滑化に大きな効果を示している。夜間の視認性を高めるため区画線にガラスビーズ（以降本論文ではビーズと略す）を添加し、区画線から再帰反射する光の量を多くする工夫がなされている。

しかし、夜間雨天時には区画線の視認性が大きく低下することはよく知られ、大きな問題となっている。1975年オランダのデルフト大学で区画線の視認性に関するシンポジウムが開催され、夜間雨天時の視認性が大きな問題として提起された⁸⁾。これまで多くの国で夜間雨天時

の視認性に関する研究がなされてきているが、視認性向上のための解析的な研究は少ない。

そこで、本研究は、区画線の夜間雨天時における視認性低下の主要な要因とその特性を明らかにする。なお、本研究では夜間の視認性について述べているので、昼間の視認性については言及しない。

2. 従来の研究と本研究の目的

(1) 区画線の視認性に関する従来の研究

区画線の視認性を改善する方策として区画線へのビーズの添加、区画線表面への凹凸の設置、高屈折ビーズの使用等の効果が明らかにされてきている⁹⁾。

満田は¹⁰⁾、区画線の再帰反射はビーズの添加量に左右されることを示し、混入率として20%以上を推奨している。

著者ら¹¹⁾や安藤¹²⁾はビーズの混入および散布量には限度があることを示している。安藤は散布量として20g/m、混入率として30%を推奨している。著者らは大きな再帰反射輝度が得られる飽和散布固着量は15g/m、混入率は40~50%であることを解析的に求めた。

東芝パロティエニ¹³⁾、ユニオン¹⁴⁾、阿部¹⁵⁾は高屈折ビーズ使用の効果を数値計算や実験により明らかにしている。

* 正会員 工修 広島大学助手 工学部第Ⅳ類（建設系）
（〒724 東広島市西条町大字下見）

** 正会員 工博 広島大学教授 工学部第Ⅳ類（建設系）
（同上）

*** 日立化成工業（株）（〒160 新宿区西新宿1-1）

一方、雨天時における区画線の視認性向上に関するさまざまな研究も精力的になされている。

Gorkum¹⁶⁾は湿潤時における区画線の視認性を光学実験により明らかにしている。彼は溶融型区画線の視認性が高いこと、区画線に水を排水する溝を付けること、区画線に若干の凹凸を付けること、反射板を設置すること等が視認性向上に大きな効果をもたらすことを示している。

ユニオン¹⁷⁾や満田¹⁸⁾は、高屈折ビーズの湿潤時における使用効果が大いことを実験や簡単な数値計算により示した。しかし、区画線の表面を水膜が覆ってしまうと、高屈折ビーズを散布、混入した区画線の再帰反射は大きく低下し、高屈折ビーズの効果は小さくなる。

これらの研究は湿潤時の結果であり、降雨強度の違い、雨滴が区画線の視認性低下に及ぼす影響等については言及されていない。

満田は¹⁹⁾、夜間雨天時を再現した室内で複数の被験者による区画線の視認性評価を行い、降雨強度が区画線の視認性低下に及ぼす影響を明らかにし、視認性向上について検討した。これによると、径の大きいビーズを用いる、区画線に凹凸を付ける、環境照度を高める等が視認性向上に効果的である。しかし、物理的な指標は明らかにされていない。

このように区画線の視認性に関する研究は多くなされているが、解析的な研究は少ない。元来、雨天時の視認性低下には多くの要因がかかわっている。たとえば、降雨強度、区画線表面を覆う雨水膜、フロントガラス表面を流れる雨水、雨滴、混入および散布ビーズ等が考えられる。これらの要因個々の特性を明らかにすることが必要であり、これによって視認性の向上策を検討することが可能になる。

(2) 本研究の目的

本研究の目的は、区画線の夜間雨天時における視認性低下に影響を及ぼす主要な要因の特性を数量的に明らかにし、視認性向上について検討することにある。

本研究では、区画線の夜間雨天時における視認性に影響を及ぼす要因を取り上げ、それらの要因の影響を実験および数値解析により降雨強度別に検討する。

3. では、室内および屋外での光学実験の方法について述べる。実験では、区画線の形状、散布ビーズ、環境光等が視認性に及ぼす影響、さらに、区画線表面および自動車のフロントガラス表面を流れる雨水が区画線の視認性に及ぼす影響等が明らかにされる。

4. では、光学実験の結果を整理し、区画線の視認性に影響を及ぼす要因の特性を明らかにする。

5. では、前照燈に照らし出される雨滴が区画線の視認性に及ぼす影響を解析する数値計算法について述べ

る。

6. では、5. の数値計算例とその結果について考察する。

7. では、4. および6. の結果を要約し、区画線の夜間雨天時における視認性向上策について考察する。

(3) 降雨強度と降雨継続時間の分布

降雨量は地域によりかなり変動する。降水量でみると、広島は日本の78都市中43番目の降水量である²⁰⁾。しかし、広島より降水量が多い北陸、山陰、内陸部の都市では降雪の影響が大いので、広島は降雨量の少ない地域ではない。むしろ、広島は日本の平均的な地域である。本研究では、広島気象台が測定している過去20年間の降雨データを整理し、降雨特性を検討する。

Table 1は20年間の全降雨を対象とし、1年間当たりの降雨量および降雨継続時間を算出したものである。

1年間の総降雨継続時間は約840時間となり、1年間の約10%の時間は雨天である。したがって、年間約5%の時間は夜間の雨天である。

ところで、降雨強度が交通施設の視認性に及ぼす影響を検討する場合、短時間の降雨強度が問題になる。そこで、Fig. 1は日最大10分間降雨量を時間降雨強度に換算し、降雨強度別に降雨日数の頻度分布を示したものである。降雨強度30~35 mm/hが90%確率に相当する。雨量の多い地域の90%確率は30~35 mm/hより大きいと考えられるが、本研究では、30 mm/h時でも区画線の視認性が確保されることを1つの目安とした。

Table 1 Characteristics of yearly rainfall.

Number of rain-fall in a year	Rainy duration in a year (hour)	Rate of rainy duration (%)
114.8 (18.0)	837.4 (137.6)	9.55 (1.57)

Numbers in parentheses indicate standard deviation of rainy data for past twenty years.

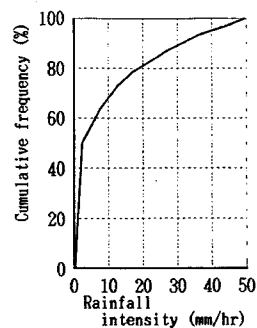


Fig. 1 Cumulative frequency distribution of rainfall intensity.

Table 2 Occurrence rates of road traffic accidents (Number/hour).

Year	1981		1982		1983	
	Fine	Rain	Fine	Rain	Fine	Rain
Day time	2.18 (100)	2.57 (118)	2.29 (100)	3.01 (131)	2.40 (100)	2.84 (118)
Night time	0.70 (100)	1.16 (166)	0.71 (100)	1.26 (177)	0.75 (100)	1.54 (205)
24 hours	1.44 (100)	1.87 (130)	1.50 (100)	2.14 (143)	1.58 (100)	2.19 (138)

Numbers in parentheses indicate indices when number of road traffic accidents per an hour at fine are 100.

Table 3 Outline of optical experiments.

Test Pieces	Three kinds of thermoplastic plates are used, as shown in table 4.
Lamp	In order to unify illuminance, a 150W lamp and a lens are used.
Photometer	A luminance meter and an illuminance meter are used.
Set-up of Experimental Apparatus	We assume that a driver looks at road markings 30m ahead, and set up photometers, test pieces, a lamp and a rainfall equipment, as shown in figure 2.
Measuring Angle	Test piece surfaces are set up six slopes, such as 0, 5, 15, 30, 45 and 60 degrees.
Measuring Item	Vertical illuminances to light axes and luminances of 0.2° visual field.
Rainfall intensity	Rainfall intensity is set up dry, wet, 10mm/hr and 30mm/hr.

(4) 夜間雨天時における道路交通の危険性

道路交通事故の発生割合を天候・時間別に整理してみる。Table 2 は昭和 56, 57, 58 年に広島県内で発生した 1 時間当たりの交通事故発生件数を示す。なお、晴天および雨天時間は Table 1 の降雨継続時間割合をもとに算出したものである。

道路交通の危険性は走行台キロ当たりの事故件数で示されるのが一般的であるが、晴天時と雨天時の走行台キロの差は明らかにされていないのが現状である。このため、限られた観測地点であるが、広島市の交通量常時観測資料と広島気象台の降雨データをもとに昼間の晴天、雨天、夜間の晴天、雨天時の交通量を整理した結果、晴天と雨天時の交通量に大きな差はないことがわかった。そこで、本論では危険性指標として時間当たりの件数を用いることとする。

夜間晴天時の時間当たり事故件数を 100 とすると、夜間雨天時のそれは 166~205 になる。この数値は、昼間雨天時の 118~131 に比べると、大きな値であり、夜間雨天時の事故発生確率は高い。夜間雨天時の事故発生原因としてはさまざまな要因が考えられるが、区画線の視

認性低下も一要因であると考えられる。

3. 実験の概要

(1) 室内での光学実験

a) 実験方法の概要

夜間雨天時、区画線表面上を流れる雨水が区画線の視認性低下に及ぼす影響を明らかにするため、室内で光学実験を行う。実験は室内の天井、壁、床、実験機器、実験機等を黒い布で覆った暗室内で行われた。Table 3 および Fig. 2 に実験方法の概要を示す。

実験では再帰反射輝度、光軸に対する垂直照度を測定する。再帰反射輝度は照度により大きく変化するので、再帰反射輝度を照度で基準化した再帰反射係数を求める。

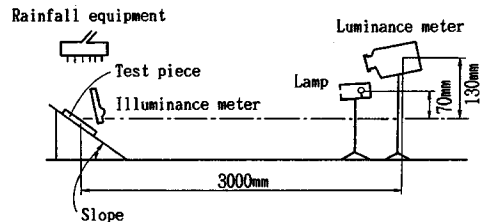


Fig. 2 Set-up for determining the properties of road markings at rainy night with a luminance, an illuminance meter, a lamp and a rainfall equipment installed in a dark room.

Table 4 Test pieces (The refractive index of a glass bead is 1.5.).

Test piece code	Sprayed density (numbers/cm ²)	Buried ratio *1 (%)
2-1*2	5.04	52.0
2-2	1.04	58.0
2-3	0.44	58.0
S-1*3	8.5g/m**4	Unknown
S-2	12.3	
S-3	25.1	
S-4	38.4	
S-5	60.0	
P-1	Yellow test piece without glass beads	

*1 Ratio = 100 × buried depth/diameter.

*2 2mm diameter glass beads are sprayed on yellow thermoplastic plates of 15cm-square with 1cm thickness.

*3 Standard glass beads are sprayed on yellow thermoplastic plates of 15cm-square with 1mm thickness. And the diameter of standard glass beads distributes among 0.1 and 0.8mm.

*4 Numbers indicate sprayed glass beads weight on test pieces.

$$\text{再帰反射係数} = \frac{\text{再帰反射輝度}}{\text{光軸に対する垂直照度}}$$

再帰反射係数は、輝度を水平照度で基準化するの一般的である²⁰⁾。しかし、傾斜した区画線の視認性、雨滴や環境光が視認性に及ぼす影響、フロントガラスおよび雨滴の透過率等を数量的に検討するためには、同一の係数でデータを整理しておくことが必要である。さらに、本研究では表面を傾斜させた区画線の再帰反射係数を求めることも大きな目的の1つであるから、垂直照度で基準化した再帰反射係数を用いることとする。

b) 試験片

Table 4 に光学実験に用いた区画線の試験片についてまとめる。

c) 降雨装置

雨滴の生成にはスプリンクラー、ノズル、紡績糸、注射針等を用いる方法が考えられる。本研究では、降雨範囲が 30×20 cm 程度の小規模であること、さまざまな降雨強度を容易に再現できること、比較的簡単な装置でよいこと等の理由により注射針を用いる。

Fig. 3 は降雨装置の概要を示している。用いた注射針は内径 0.1 mm の鋭針である。この注射針を用いると、自然降雨に存在する約 2 mm 径の雨滴²¹⁾を生成することができる。

ところで、本実験は道路の直線区間の中央線を解析対象としたものであり、雨水は道路の両端に排水される。また、縦断的にはクレストの部分の排水条件に該当する。これは、表面を傾斜させた区画線の視認性を明らかにすることが解析の大きな目的の1つであることによる。したがって、一般道路や外側線上の排水条件はもっと厳しいけれども、同降雨条件下の優劣順位に変化を及ぼすものではない。

自然降雨では雨滴が落下する位置はランダムである。そこで、乱数を利用して注射針の固定位置を決定する。なお、注射針を固定するための工作上的の制約、10 mm/h 時でも 0.2° 視野内の区画線表面が雨滴で濡れている部分と濡れていない部分が存在しないことを考慮し、2, 3 の予備実験を行った結果、注射針の固定密度を 0.45 本/cm² とした。

d) 環境光

満田²³⁾は、夜間雨天時の視認性向上策として道路照明

の効果を挙げている。本研究ではこの環境光の効果を定量化するため、路面上で 10 lx に相当する光源を試験片上方に設置する。この 10 lx に相当する照度 E_{10} は以下のように設定できる。

$$E_{10} = \frac{10 E_L}{E_R}$$

E_L : 自動車の前照燈に相当する光源 (Fig. 2 中) が照らす試験片上での照度

E_R : 自動車に照らす実道路上での照度

(2) 屋外実験および方法

フロントガラスおよびフロントガラス上を流れる雨水が再帰反射光を遮る度合い、前照燈光の距離減衰を測定するため、夜間、環境光の影響が小さい場所で照度および輝度を測定した。

a) 透過率の測定

まず、フロントガラスが再帰反射光を遮る影響を定量的に検討する。A 2 版のケント紙を 60×60 cm のボードに張りつけ、60° の傾斜角度で前照燈から 30 m 離れた地点に設置する。その地点での照度、ケント紙の輝度を車内および車外から測定し、再帰反射係数を求める。フロントガラスの透過率 T_o は次のように定義できる。

$$T_o = \frac{R_i}{R_o} \times 100$$

R_i : 車内から測定した再帰反射係数

R_o : 車外から測定した再帰反射係数

次に、フロントガラス表面を流れる雨水が再帰反射光を遮る影響を定量的に検討する。Fig. 3 に示す降雨装置をフロントガラス上方に設置し、30 m 先のケント紙の輝度および照度を測定し、再帰反射係数を求める。雨水の透過率 T_r は次のように定義できる。

$$T_r = \frac{R_r}{R_o} \times 100$$

R_r : 雨天時、車内から測定した再帰反射係数

b) 光の距離減衰の測定

前照燈の光の距離減衰を測定する。一般には路面上を照らし出す照度の距離減衰が測定されている。しかし、本研究では、ドライバーの視準線上の照度の距離減衰を測定する。そこで、まず、車内のドライバーの目の位置に輝度計を設置し、30 m 先の路面を視準する。この視準線上に照度計を設置し、その点の照度を測定する。測定間隔は 5 m とした。

4. 実験結果と考察

(1) 雨天時の視認性低下

Fig. 4 に降雨強度と JIS R 3301-1 号ビーズ (本論文では標準ビーズと略す) 25 g/m を散布した現行の水平な区画線 (現行区画線と略す) の再帰反射係数の関係を

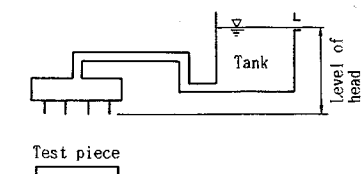


Fig. 3 Outline of rainfall equipment.

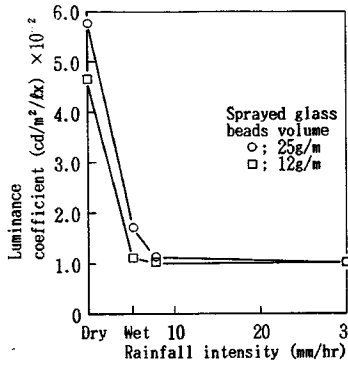


Fig. 4 Effect of rainfall intensity on reduction of visibility.

示す。

湿潤時の再帰反射係数は晴天時の約 30 % になり、大きく低下する。降雨強度が 10 mm/h になると、再帰反射係数はさらに低下し、晴天時の約 17 % になる。さらに、降雨強度が 30 mm/h になると、再帰反射係数は 10 mm/h 時のそれと大きな差はなくなる。

一方、ビーズ散布量を 12 g/m にすると、湿潤時の再帰反射係数はビーズ 25 g/m を散布した現行区画線の晴天時の約 17 % となり、視認性は大きく低下する。

すなわち、降雨時には区画線表面は雨水で覆われるので、区画線からの再帰反射光は小さくなる。雨があがっても、区画線表面は湿潤状態が続き、区画線の視認性が低下した状態は継続する。夜間雨天時の区画線の視認性向上は重要な課題である。

(2) 傾斜角度が再帰反射係数に及ぼす影響

区画線表面上を覆う雨水膜への光の入射角度が大きければ、入射光の多くは雨水膜表面上で反射してしまう。逆に、入射角度が小さくなれば、雨水膜下に透過する光量は多く、再帰反射光も多くなる。このため路面に対して区画線表面を傾斜させることにより前照燈の光の入射角度を小さくすることが考えられる。

Fig. 5 は、区画線表面の路面に対する傾斜角度が再帰反射係数に及ぼす影響を降雨強度別に示す。降雨条件は晴天時、湿潤時、10、30 mm/h の 4 種類である。

区画線表面の傾斜角度を大きくすれば、視認性は大きく向上する。すなわち、湿潤時、雨天時の再帰反射係数は傾斜角度にほぼ比例して大きくなり、20~30° の傾斜角度にすれば、晴天時の現行区画線と同程度以上の再帰反射係数が得られる。

このように雨天時には約 20~30° の傾斜角度をもった凸部を区画線表面に設置すれば、視認性は大きく改善される。

この種の区画線を外側線に用いるためには二輪車の走行安定性や歩行時の安全性を明らかにしなければならな

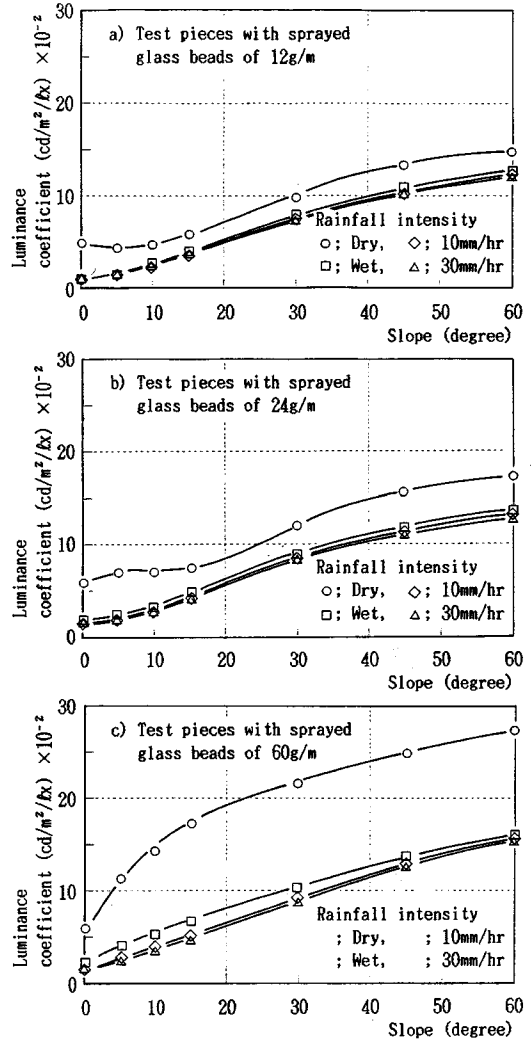


Fig. 5 Effect of slope of road marking surface on retro-reflective luminance coefficient of road markings at rainy night.

いが、中央線として用いることは十分考えられる。

(3) 散布量が再帰反射に及ぼす影響

ここでは、ビーズ散布量が雨天時における区画線の視認性に及ぼす影響を検討する。Fig. 6 は区画線表面の傾斜角度を 0 および 30° にした場合のビーズ散布量と再帰反射係数の関係を示す。

晴天時には、散布量の増加とともに再帰反射係数も大きくなる。特に、30° の傾斜角度をもった区画線の再帰反射係数は大きく増加する。

湿潤時においても散布量の増加は視認性向上に効果を示している。しかし、その効果は晴天時のものよりは小さい。

降雨強度 10 mm/h 時には、散布量の増加は視認性向

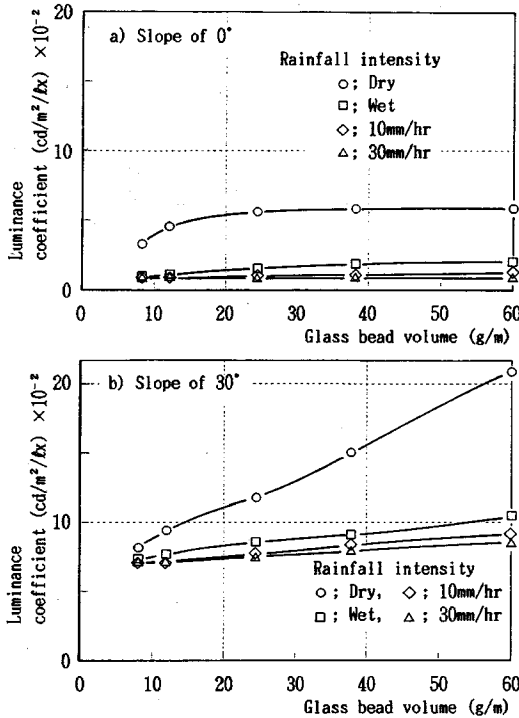


Fig. 6 Effect of sprayed glass bead volume on retro-reflective luminance coefficient of road markings at rainy night.

上にわずかながら寄与している。しかし、30 mm/h になると現行区画線では散布量の効果は認められない。ところが、区画線表面を 30° 傾斜させると、散布効果が若干認められる。

すなわち、降雨強度が大きくなれば、散布量増加による視認性向上に大きな期待はできない。

(4) ビーズ径が再帰反射に及ぼす影響

Table 5 に 2 mm 径ビーズおよび標準ビーズを散布した現行区画線の再帰反射指数を降雨強度別に示す。この指数は現行区画線の晴天時における再帰反射係数を 100 としている。

2 mm 径ビーズを散布した水平な区画線の雨天時再帰反射指数は現行区画線のそれよりもかなり大きい値である。特に、散布密度が 5.04 個/cm² の区画線では、30 mm/h 時でも現行区画線の晴天時の再帰反射係数が得られる。すなわち、水平な区画線の場合、標準ビーズを散布した区画線の湿潤時および雨天時における視認性は大きく低下するが、径の大きいビーズを散布すれば、視認性は向上する。

次に、2 mm 径ビーズを散布した区画線の表面を傾斜させた場合について考察してみる。晴天時の場合、傾斜角度を大きくすることは必ずしも再帰反射指数の増加にはならない。これは、表面を傾斜させると、再帰反射係

Table 5 Effects of diameter of glass beads on retro-reflective indices of road markings.

Diameter (mm)	Density of sprayed glass beads	Rainfall intensity (mm/hour)	Indices (%)		
			Slope (degree)		
			0	10	30
2mm glass beads	5.04 *	Fine	393	496	379
		Wet	267	297	315
		10	148	215	280
		30	112	198	248
		Fine	255	128	154
		Wet	93	65	154
	1.04 *	10	65	62	140
		30	45	59	139
		Fine	128	78	137
		Wet	50	49	130
		10	40	51	128
		30	33	47	120
Standard glass beads	25g/m	Fine	100	121	203
		Wet	29	53	149
		10	19	44	130
		30	17	42	128

* Numbers indicate number of sprayed glass beads per square centimeter.

数の大きいビーズが視野内で占める射影面積割合は小さくなり、逆に再帰反射係数の小さい塗料部分の面積割合が大きくなるためである。しかし、雨天時には表面を傾斜させることが視認性向上に大きな効果を示している。散布量が非常に少ない区画線でも現行区画線の晴天時における再帰反射係数以上が得られる。

大きい径のビーズを散布し、表面に凹凸を付けた区画線は非常に視認性が優れている。

(5) フロントガラスの透過率

フロントガラス自体の透過率は車種により異なる。著者が 3 車種について調査した結果、透過率は 61~68% の範囲に分散していた。これは、フロントガラスの傾斜角度および材質の違いによるものと考えられる。本研究では 3 車種の測定値を平均、整理したものである。

Table 6 はフロントガラスおよび雨水が再帰反射光を

Table 6 Transmittance of light at window shield for vehicles under various conditions.

Observational conditions		Retro-reflective coefficient (cd/m ² /lx)	Transmittance (%)
Outside of vehicle		24.6	100.0
Inside of vehicle	Rainfall intensity	Dry	63.8
		Use*	61.0
		Not*	56.5

* Use and Not indicate using wiper and non-using one, respectively.

透過する割合を示す。

ビーズから反射してドライバーの目に入ってくる光はフロントガラスで反射、吸収され、約36%減衰する。

フロントガラス表面を覆う水滴や雨水膜が再帰反射光を反射、吸収する割合は7%程度であり、目に入る光は約43%減衰することになる。しかし、ワイパーを使用すると、反射および吸収割合は夜間晴天時のものと大きな差はなくなる。結局、雨水が再帰反射光を吸収、反射する割合は7%であり、フロントガラスのそれよりも非常に小さい。

水滴や雨水膜が区画線の視認性低下に及ぼす影響は小さいが、ドライバーには水滴や雨水膜により区画線や路上の障害物がゆがんで見え、このゆがみが視認性低下の大きな原因になると考えられる。この点については被験者による心理学実験を行い、検討することが必要である。

5. 水滴が視認性低下に及ぼす影響に関する解析

雨天時、ドライバーが前照燈に照らし出された明るい水滴を目にする経験はよくある。降雨強度が大きくなれば、ドライバーの視野内には明るい水滴の数が多くなり、区画線は相対的に見えにくくなる。この水滴の影響のみを屋外実験で定量的に検討することは困難である。

そこで、水滴がドライバーの目に入る再帰反射光の輝度に及ぼす影響を数値計算により求める。まず、ドライバーの視野を水滴が占める部分とその他の部分に分ける。水滴の部分に関しては、水滴1粒の反射係数を測定し、これをもとにドライバーと区画線の間にある水滴部分の平均再帰反射輝度を理論的に求める。一方、その他の部分の再帰反射輝度は0とする。結局、ドライバーの目に入る再帰反射輝度は水滴の再帰反射輝度を視野内で水滴が占める面積割合で重み付けしたものになる。

(1) 降雨強度と水滴径および落下速度の関係

自然降雨における平均水滴径 d と降雨強度 I との関係は Laws²⁴⁾の式で示される。

$$d = 1.24 I^{0.182} \dots\dots\dots (1)$$

空気中を落下する水滴は、ある落下距離を経た後、水滴重量と水滴の終末形状時の空気抵抗による抗力とが等しくなり、式(2)の落下速度となる²⁵⁾。

$$V_t = (4 \omega d / 3 \rho C_d d_L^2)^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

V_t : 水滴終末落下速度 (m/s)

ω : 水の単位体積重量 (kg/m³)

d : 水滴径 (m)

d_L : 水滴終末形状の直径の分布 (1.0~1.25) d

ρ : 空気密度 (kg · s²/m⁴)

C_d : 抵抗係数 (レイノルズの関数)

(2) 降雨強度と水滴の再帰反射輝度

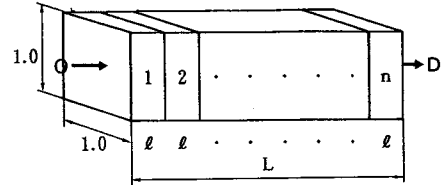


Fig. 7 Outline of raining space.

水滴を径 d の球、時間降雨強度を I とすれば、式(1)、(2)より水滴の落下速度 v が求められる。単位面積に降る t 秒間の降雨量は、地面より vt 上に存在する水滴が地面に落下する間に降った量であり、 $It/3600$ になる。したがって、空間 vt 中には平均 $It/3600q$ 個の水滴が存在する。ただし、 q は1水滴の平均体積である。

Fig. 7 に示される単位断面積と長さ L の空間には平均 $IL/3600vq$ 個の水滴が存在する。いま、ドライバーの視準線は図中の単位断面に垂直であるとすれば、水滴の表面で反射する再帰反射光は水滴の投影面積分の光量になる。ここで、区間 L を n 個の微小区間に分割し、水滴の存在位置は Poisson 分布に従うとすれば、微小区間1には平均 $IL/3600vq$ 個の水滴が存在する。1水滴の平均投影面積を a とすれば、水滴の総投影面積 A_1 は、

$$A_1 = a \frac{IL}{3600vq} \dots\dots\dots (3)$$

になる。また、この A_1 は単位視野内で占める水滴の面積割合になる。ただし、 l は微小区間長である。

次に、Fig. 7 のO側からみた場合、微小区間2に存在する水滴のいくつかは区間1中に存在する水滴に遮られる。これは、次のように数式化できる。総投影面積 A_1 中に存在する区間2中の平均個数 n_2 は、

$$n_2 = \frac{IA_1}{3600vq} \dots\dots\dots (4)$$

である。したがって、O側からみえる1~2区間に存在する平均水滴数は

$$\frac{IL}{3600vq} + \left(\frac{IL}{3600vq} - \frac{IA_1}{3600vq} \right)$$

となり、総投影面積 A_2 は、

$$A_2 = a \frac{IL}{3600vq} + a \left(\frac{IL}{3600vq} - \frac{IA_1}{3600vq} \right) = A_1 + A_1 - A_1 A_1 \dots\dots\dots (5)$$

となる。同様に

$$A_3 = A_2 + A_1 - A_1 A_2$$

$$A_i = A_{i-1} + A_1 - A_1 A_{i-1} \dots\dots\dots (6)$$

と書き表わされる。すなわち、O側からみえる区間 i に存在する水滴の総投影面積は $A_i - A_1 A_{i-1}$ となる。

いま、区間 i に存在する1水滴の再帰反射係数を r_i 、照度を E_i とすると、 L 区間に存在する全水滴の平均再

帰反射輝度 R (cd/m^2) は

$$R = \sum_i^n r_i E_i (A_i - A_i A_{i-1})$$

$$= A_1 \sum_i^n r_i E_i (1.0 - A_{i-1}) \dots \dots \dots (7)$$

となる。ただし、 $A_0 = 0.0$ である。

一般に雨滴の平均径は 2 mm 前後であるので、微小区間長 l は大きな値として考えてもよい。実際には雨滴径程度の値とすればよい。したがって、対象区間長によって異なるが、計算機を利用すれば、かなり長い距離の場合でも数値計算は可能である。

(3) 計算結果の検証とその実験

雨滴の再帰反射輝度の計算結果を検討するため、計算値と測定値とを比較する必要がある。降雨装置、輝度計、光源、測定対象物等を Fig. 2 のように配置する。降雨装置は Fig. 3 に示したものを 5 ユニット直列に並べ、さらに測定対象物は黒の布を張った板を用いた。降雨強度を 13, 34, 43, 57, 78 mm/h の 5 種類再現し、それぞれの降雨強度 I の輝度 R'_i を測定する。降雨強度 I における雨滴の平均再帰反射輝度 (2° 視野) R_i は R'_i と降雨強度 0 時の輝度 R'_0 の差で表わされる。

6. 数値計算例と結果の考察

(1) 計算値と測定値との比較

上記の計算手順に従い、雨滴の再帰反射輝度を求める。Fig. 8 に理論値と測定値との関係を示す。測定値はばらついているが、計算値は測定値の傾向を示している。また、計算値と測定値のオーダーは一致している。なお、理論計算に用いたパラメーターを Table 7 に示す。

(2) 雨滴が再帰反射輝度に及ぼす影響

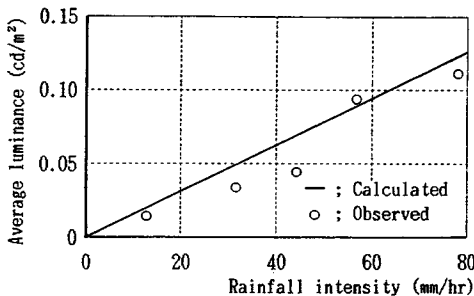


Fig. 8 Comparison of calculated average retro-reflective luminance of rain drops and observed one.

Table 7 Used parameters for calculations.

Variables	Parameters
Rain drop diameter (d)	2.21 mm
Retro-reflective coefficient (c)	0.011 $\text{cd/m}^2/\text{lx}$
Dropping speed (v)	2.3 m/sec

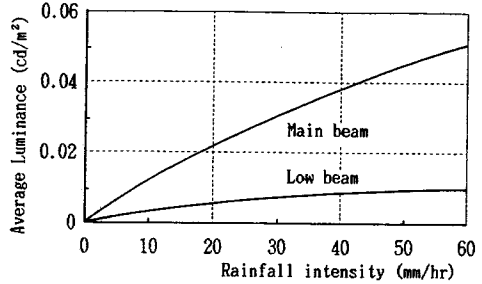


Fig. 9 Effect of rainfall intensity on calculated average retro-reflective luminance of rain drops existing between a driver and markings 30 m ahead.

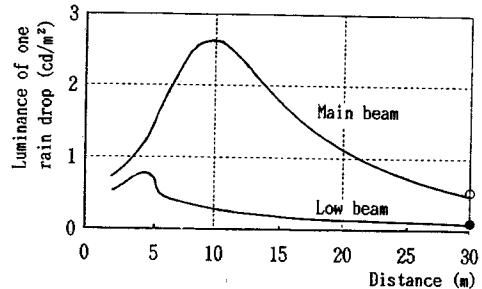


Fig. 10 Relation between calculated retro-reflective luminance of one rain drop and distance from headlight in rainfall intensity of 30 mm/h. The marks of \circ and \bullet indicate the retro-reflective luminance of marking 30 m ahead by low and main beam of vehicles respectively.

Fig. 9 は、ドライバーと 30 m 先の区画線との間に存在する雨滴が再帰反射輝度に及ぼす影響の計算値と降雨強度との関係を示す。降雨強度の増加とともに雨滴の平均再帰反射輝度は大きくなっている。特に、走行ビームによって照らし出される雨滴の影響は大きい。これは、走行ビームの光軸はすれ違いビーム光軸より上側を向いているので、ドライバーの視線上での照度は走行ビームの方がすれ違いビームより大きくなるためである。しかしながら、再帰反射輝度そのものの値は小さい。

次に、降雨強度 30 mm/h のとき、走行ビームで 30 m 先をみると雨滴の平均再帰反射輝度は約 0.03 cd/m^2 になる。一方、すれ違いビームでのそれは 0.006 cd/m^2 である。これらは、30 mm/h の雨天時、走行ビームによって照らし出される区画線の再帰反射輝度 0.44 cd/m^2 に比べて非常に小さい。さらに、すれ違いビームによる区画線の 0.07 cd/m^2 よりも小さい。平均再帰反射輝度の指標でみれば限りでは、雨滴が区画線の視認性低下に及ぼす影響はかなり小さい。

このように、ドライバーの視野内で雨滴が占める面積割合は微小であるため雨滴の平均再帰反射輝度は小さい。しかし、前述したように雨滴自体は明るく見える。

Fig. 10 は、雨滴のみの再帰反射輝度の計算値と前照燈からの距離の関係を示している。雨滴自体の再帰反射輝度は前照燈からの距離減衰に大きく影響され、走行ビームの場合 10 m 点で最大 2.7 cd/m² になり、区画線の雨天時における再帰反射輝度 0.44 cd/m² よりも大きい。このように、1 つ 1 つの雨滴がまぶしくみえることはグレアの大きな原因になり、グレアによる区画線の視認性低下は十分考えられる。この点については今後被験者による心理実験を行い、明らかにしなければならない。

7. 視認性の向上策

これまでの、区画線の雨天時における視認性に影響を及ぼす要因の個々について解析を行ってきた。この結果、20~30°の傾斜角度をもった凸部を表面に設置した区画線の視認性は優れていることが明らかになった。しかし、この凸部が二輪車の走行安定性に及ぼす影響は大きく、この種の区画線が設置される場所はかなり限定される。そこで、現在一般に施工されている水平な区画線に対する改善策を中心に検討する。特に、ビーズの散布量、散布ビーズの径、環境光等の効果を検討する。

ここでは、それらの要因を改善することにより区画線の視認性向上がどの程度期待できるかを評価するため、各要因の指標化を行い、要因間の比較を行う。指標化にあたっては現在一般に施工されている区画線の夜間晴天時の視認性が確保されることを条件にする。すなわち、標準ビーズを 25 g/m 散布した傾斜角度 0°の水平な区画線の夜間晴天時における再帰反射係数を 100 とし、指標

化したものである。Table 8 に指標化の結果を示す。

径の小さいビーズの散布量を増加しても、雨天時の視認性は向上しない。

しかし、径の大きいビーズの散布量を多くすれば、視認性は大きく向上し、雨天時でも夜間晴天時の再帰反射係数が確保できる。現在の区画線の膜厚は 1.0~2.0 mm であることを考慮すれば、2.0 mm 径ビーズを散布することは可能である。

湿潤時には環境光の効果は大きい。しかし、雨天時にはその効果は小さくなる。

参考として区画線面を傾斜させた区画線の効果も Table 8 に示す。この効果は非常に大きく、雨天時でも夜間晴天時の再帰反射係数が確保できる。

8. 結論

本研究は夜間雨天時における区画線の視認性に影響を及ぼす要因を分類し、各要因の特性を実験および数値計算により数値的に明らかにし、視認性向上策を検討した。以下明らかになった点を示す。

(1) 30 mm/h は短時間にはよく現われる降雨強度である。広島のような地域では 30 mm/h は区画線の視認性確保の 1 つの目安になり得る。しかし、降雨量の多い地域や少ない地域については、今後検討が必要である。

(2) 夜間雨天時における道路交通の危険性はかなり高い。

(3) 表面を 20~30°傾けた区画線は夜間雨天時における視認性向上に大きな効果をもたらす。しかし、対向車が存在する場合、対向車の前照燈光により雨水で覆われた路面上の背景輝度が大きくなり、ドライバーが区画線を識別しにくい問題がある。このような場合表面を傾けた区画線の視認性の向上については今後研究する必要がある。

(4) 径の大きいビーズを散布することは、夜間雨天時における区画線の視認性向上に大きな効果をもたらす。しかし、膜厚が 2 mm 以下の現行区画線に 2 mm 径ビーズを混入することは不可能である。一方、表面に凹凸を付けた区画線の凸部にこのビーズを混入することは可能である。このとき、現在一般に用いられている 0.1~0.8 mm 径ビーズに大きい径のビーズを混ぜ、散布および混入ビーズとして利用することも考えられる。

(5) 環境光は、夜間湿潤時における区画線の視認性向上には大きな効果を示す。しかし、夜間雨天時におけるその効果は小さくなる。

(6) 降雨強度の小さい降雨が長時間続けば、区画線には雨水が溜まるので、雨水をすばやく排水することが非常に重要である。このため、道路の横断勾配や排水溝の整備等道路の構造からの考慮も必要である。

Table 8 Improvements of rainy night visibility.

Improvement			Visibility index			
Diameter	Density	Slope	Fine	Wet	Rain (30mm/hr)	
0.1	25g/m	0°	100	29	17	
		10°	121	53	42	
		30°	203	149	128	
0.8mm	38g/m	0°	101	33	18	
		60g/m	0°	105	38	18
Road lighting 10lx (25g/m, 0°)			131	59	15	
0.1 0.3mm	32g/m	0°	102	18	14	
0.3 0.6mm	40g/m	0°	102	23	18	
0.6 0.8mm	37g/m	0°	98	23	18	
2mm	5.04 *	0°	393	267	112	
		1.04 *	0°	255	93	45
		0.44 *	0°	128	50	33

* Numbers indicate number of glass beads per square centimeters.

(7) フロントガラスの表面上を流れる雨水が再帰反射光を減衰する割合はガラス自身の減衰率に比べて非常に小さい。雨天時でもワイパーを使用すれば、雨水とガラスの双方による平均透過率は60%以上あり、自動車の保安基準を満足している。

(8) 前照燈によって照らし出される雨滴が再帰反射輝度に及ぼす影響は大きくないことがわかった。しかし、明るい雨滴がドライバーの目にグレアとして感じられる度合いについては今後心理学実験を行い、明らかにする必要がある。

最後に本研究を実施するにあたり、光学実験および数値計算に協力をいただいた日名田高志氏(現・西日本旅客鉄道)、木村達郎氏に謝意を表します。また、本研究は日立化成工業(株)との共同研究成果であり、日立化成工業の協力を受けたことを付記し、謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) The safety construction program-success, American transportation builder, Nov/Dec, 1980.
- 2) Denys Burrell Charnock: Carriageway edgeline and the effects on road safety, 13th IRF World Meeting Tokyo Documentation B, pp.43~46, 1977.
- 3) Road marking industry group: The South Yorkshire test of the use of edgelines in reducing accidents, August, 1977.
- 4) 東芝パロティーニ: 交通事故多発区間の道路標示の効果, 1980.
- 5) 門田博知・石原 清・吉岡洋二: 交差点処理における安全施策について, 第13回日本道路会議特定課題論文集, pp.313~315, 1979.
- 6) 浜野勝茂: 路面標示による交通流の案内・誘導及び管理に関する一考察, 交通工学, Vol.11, No.6, pp.19~29, 1976.
- 7) 岡 尚並・洲鎌清晃・久米隆弘: 交通事故対策からみた路面標示改良に関する一考察, 道路, No.12, pp.55~63, 1975.
- 8) Drs. F. van Gorkum: Night-time visibility of seven road-marking materials, Traffic engineering and control, April, pp.176~181, 1984.
- 9) OECD: Road marking and delineation, Paris, 1975.
- 10) 満田 喬・高木正幸・金子英雄: 区画線の視認性に及ぼすガラスピーズ量の影響, 土木技術資料, Vol.25, No.2, pp.39~44, 1983.
- 11) 門田博知・今田寛典・児島武男: 区画線の再帰反射特性に関する数値解析とその適用, 高速道路と自動車, Vol.32, No.2, pp.22~31, 1989.
- 12) 安藤和彦・有岡 孝: 区画線のガラスピーズ量と反射輝度について, 第17回日本道路会議一般論文集, pp.974~975, 1987.
- 13) 東芝パロティーニ: 道路用ガラスピーズについて, 東芝レビュー, Vol.22, No.8, pp.956~970, 1974.
- 14) ユニオン: 高反射ユニオン, ユニオン技術資料, 1986.
- 15) 阿部公一・成富正文: 再帰性反射材料の交通安全施設への適用, 高速道路と自動車, Vol.31, No.5, pp.50~54, 1988.
- 16) 前出8)
- 17) 前出14)
- 18) 満田 喬・高木正幸・金子英雄: 降雨時における区画線の視認性, 土木技術資料, Vol.23, No.2, pp.3~8, 1981.
- 19) 前出18)
- 20) 東京天文台編: 理科年表, 丸善, pp.208~209, 1983.
- 21) 照明学会: 照明ハンドブック, pp.342, 1978.
- 22) 松本順吉: 気象, 共立出版, pp.71.
- 23) 前出18)
- 24) Laws, J. O. and Parsons, D. A.: The relation of rain-drop size to intensity, Am. Geophysical union, 24, 1943.
- 25) 寺西靖治: 市街地排水に関する表面工種特性の研究, 京都大学学位論文, pp.227, 1972.

(1988.10.31・受付)