

区画線に添加するガラスビーズの再帰反射特性に関する三次元解析

A THREE-DIMENSIONAL ANALYSIS ON RETRO-REFLECTIVE CHARACTERISTICS OF GLASS BEADS FIXED IN ROAD MARKINGS

今田寛典*・門田博知**・児島武男***

By Hirofumi IMADA, Hirokazu MONDEN and Takeo KOJIMA

For the purpose of increasing visibility of road markings at night, glass beads are mixed in and sprayed on the road markings. Almost all past studies on the retro-reflective characteristics of the glass beads are executed by means of experimental approaches.

Here, a technique of three-dimensional numerical analysis is proposed, and the proposed method is developed to be applicable to various condition of road markings, such as: material of road markings, quality and quantity of glass beads, and geometric and traffic features of road.

It is ascertained that the numerical results are fairly well agree with the observed ones. And we make clear how to fix glass beads in road markings for the purpose of getting efficient visibility.

Keywords: road markings, numerical analysis, retro-reflection, glass bead

1. はじめに

本研究は、区画線に添加するガラスビーズ（以降本論文ではビーズと略す）の再帰反射特性を解析する三次元の数値計算法を開発し、その再帰反射特性を検討するものである。

白色と黄色の区画線は、道路交通流の円滑化と交通安全の確保に重要な役割を果たしている。特に、交差点や道路幅員が急変している区間および曲線区間等においては、区画線は錯綜する交通流の分離と適切な進行方向への誘導を促し、交通の円滑化と安全性の確保を図る。このため、区画線の夜間における視認性は重要な問題であり、区画線にビーズを散布、混入し、夜間の視認性向上が図られている。

OECD Road Research Group¹⁾は区画線の視認性についてさまざまな観点から調査研究を行い、区画線の視認性向上策の提案および問題点をまとめている。

ここで、区画線の視認性に関する従来の研究を整理、

* 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）

分類してみると、以下の4つに要約できる。

- ① 区画線に散布、混入するビーズの量および種類^{2)~7)}、
- ② 表面に凸部を付けた区画線^{8),9)}、
- ③ 高屈折ビーズの散布、混入^{3)~5)}、
- ④ 夜間雨天時、湿潤時の視認性^{8)~10)}。

著者ら^{6),10)}は、すでに夜間および夜間雨天時における区画線の視認性に関する解析的研究を行い、視認性の向上について論じた。その結果、区画線に散布、混入するビーズの量を多くすること、10から20°、雨天時には30°以上の傾斜角度を有した凸部を区画線表面に付けること、径の大きいビーズを散布すること等が区画線の視認性向上に大きな効果を示すことを明らかにした。同時に、ビーズの散布、混入量には限度があることも明らかにした。この量については安藤⁹⁾も実験的研究を行い、著者らとほぼ同じ量になることを報告している。従来、表面に凹凸を付けた区画線の視認性が大きく向上することは多く議論されてきたが、凸部の形状については多く議論されていないようである。この点についても著者らは議論をしている。

しかしながら、夜間における区画線の視認性は、区画線の材質、ビーズの種類や区画線表面上での露出状況、

道路の線形、道路照明、対向車の前照灯等によって変化するが、基本的には自車の前照灯光を再帰反射するビーズの特性に左右される。このビーズの再帰反射特性については、著者らの文献6)と10)では議論されていない。さらに、区画線上に露出しているビーズの混入および散布状態、区画線の表面に設置する凹凸の形状、自動車の前照灯とドライバーの目の相対位置等の変化による再帰反射輝度の変化を数値的に把握し、区画線の視認性の向上策を検討するためには、ビーズの再帰反射に関する三次元解析がぜひとも必要になる。これに関する既往の三次元の解析的研究は少ない。

そこで、本研究は、区画線に添加されるビーズの再帰反射特性を以下の方法で明らかにする。

1) ビーズの再帰反射特性を検討するため、新しく三次元の数値計算法を開発する。

2) 10 mm 径のビーズを用いた試験片を作製し、輝度および照度を測定し、数値計算結果と比較する。

3) 数値計算によりビーズの再帰反射特性および効率的な添加の仕方について考察する。

ところで、高屈折のビーズを区画線上に散布すれば、大きな再帰反射光が得られることが、二次元の数値計算や実験により報告されている²⁾。しかし、高屈折ビーズは高価格であり、劣下の問題もある。さらに、高屈折ビーズ上を雨水膜が覆うと高屈折ビーズの散布、混入効果は認められなくなる。このため、本研究では一般に用いられている屈折率 1.5 程度のビーズを中心に議論を進めることにする。

2. 解析方法の概要

(1) ビーズにおける光の伝播

ビーズへの入射光がビーズの表面に当たると、①反射するもの、②屈折してビーズ内に入射するものとに分かれる。ビーズ内に入射した光はビーズ裏面に達し、ビーズと塗料との境界面に到達する。塗料に当たった光は塗料の色をもった光として反射し、ビーズ、空气中を伝播し、ドライバーの目に到達する。このようにして、ドライバーは区画線とその色を確認することができる。

(2) 数値計算の基本的考え方

上述の光の伝播特性をもとに、ビーズに入射した光の再帰反射率を求める。

ビーズと接する塗料面は光束量の大きい光が到達する部分、光束量の小さい光が到達する部分、光が到達しない部分に分けられる。再帰反射光は、ビーズに入射した光が光源方向に反射したものであるから、入射光束量の大きい部分の面積が大きくなれば再帰反射光束量も大きくなる。再帰反射光束量は、入射光が到達するビーズと塗料の境界面を入射光束量と塗料面での反射率の積で重

み付けした面積で表わされることになる。この重みについては、計算で求める再帰反射率と測定される再帰反射係数が合うよう補正係数を用いることにより考慮する。ただし、入射光束量の違いを数値計算の中で考慮すれば、この補正係数は再帰反射率から再帰反射係数への換算係数の意味と塗料面での反射率の意味の双方を含んだものになる。

この計算に際し、以下の事項を仮定する。

① ビーズ表面での反射はビーズと空気との境界面における入射光を対象とする。

② 数値計算では塗料色の再帰反射を対象にするので、ビーズ露出表面での表面反射は対象としない。また、ビーズ内での光の吸収についてはここでは無視する。

③ ビーズと接する塗料面で光は反射する。

④ 入射光は平行である。

結局、再帰反射率は自動車からビーズまでの距離、塗料面の路面に対する傾斜角度、ビーズの埋め込み深さ、ビーズの屈折率等の関数で求めることができる。

(3) 輝度および照度の測定

数値計算結果の適用性を検討するため、計算値と測定値との比較が必要となる。計算値と正比例関係にある再帰反射係数を測定する。再帰反射率(計算値)に対応する再帰反射係数は式(1)で求められる。

$$\text{再帰反射係数} = \frac{\text{反射輝度}}{\text{垂直照度}} \dots\dots\dots (1)$$

一般に再帰反射係数は、反射輝度を水平照度で基準化したものである¹¹⁾。しかし、本研究では垂直照度で基準化する。これは、後述するが、ビーズを添加した塗料面を傾斜させた場合の再帰反射係数を求めることが大きな目的の1つであるため、垂直照度で基準化した再帰反射係数を用いることとした。

このため、暗室内で照度と輝度を測定する。Fig.1 および Table 1, 2 に測定機器および測定方法の概要を示す。なお、Fig.1 に示されるような測定機器の配置をすれば、0.2° 視野測定では 10 mm 径ビーズ 1 個の輝度が測定されることになる。したがって、実験では 0.2° 視

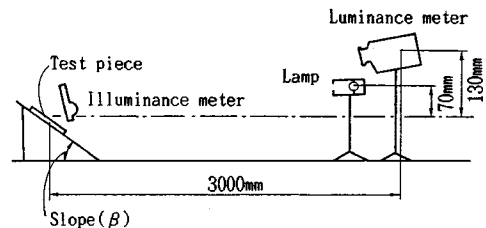


Fig.1 Set-up for determining the properties of a glass bead buried in thermoplastic road markings with a luminance, an illuminance meter and a lamp installed in a dark room.

Table 1 Outline of optical experiments.

Experimental Place	In a dark room, where a ceiling, a wall, a floor, experimental desks and equipments are covered with black cloth.
Test Pieces	Four kinds of test pieces with a 10mm diameter glass bead buried in a yellow thermoplastic plate of 15cm-square with 1cm thickness are used. In order to observe the retro-reflection of a glass bead, a part of thermoplast is painted in black, as shown in table 2.
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 the road markings 30m ahead, and set up photometers, test pieces and a lamp, as shown in figure 1.
Measuring Angle	Test piece surfaces are set up seven slopes, such as 0, 5, 15, 30, 45, 60 and 90 degrees.
Measuring Item	Vertical illuminances to light axes and luminances of 0.2° visual field.

Table 2 Test pieces (The refractive index of a glass bead is 1.5).

Test piece code	Buried ratio *1 (%)	Sprayed density (number/cm ²)
10-1	35.0	1 *2
10-2	51.7	
10-3	56.8	
10-4	71.1	

*1 Ratio=100×buried depth/diameter.

*2 One glass bead is buried in thermoplastic plate of 15cm-square with 1cm thickness. And diameter of a glass bead is 10mm.

野の測定を基本とする。

3. 再帰反射の数値計算法

ビーズの半径を r とすれば、ビーズの入射光軸に対する投影面積は πr^2 になる。再帰反射率はこの投影面に入射した光束量とドライバーの目に帰ってくる光束量との率と定義する。

本数値計算では、まず、前照灯からの光がビーズの裏側に到達し、塗料とビーズとの境界面を照らす範囲を三次元的に求める。次に、ドライバーがビーズ表面を通して見ることのできる塗料とビーズとの境界面を求める。この両者の共通部分がドライバーの確認できる再帰反射

部分である。したがって、再帰反射部分の面積が大きければ、再帰反射光は多くなる。

Fig. 2 に示すように入射光と塗料面がなす角 θ は、

$$\theta = \tan^{-1} \frac{h}{d} + \beta \dots \dots \dots (2)$$

と表わされる。ただし、 β は路面と塗料面がなす角度、 h はビーズと光源の高低差、 d は水平距離である。光源を前照灯とすれば、 $h=h_1$ 、 $d=x_1$ になる。また、光源をドライバーの目の位置にすれば、 $h=h_2$ 、 $d=x_1+x_2$ になる。

(1) 入射点と到達点の関係

Fig. 3 の (a) に示されるようにビーズは球であると仮定し、ビーズの中心 o を原点、光軸を x 軸とした座標系を考える。入射点 A の座標を (A_x, A_y, A_z) とし、ベクトル OA 、入射光の単位ベクトル u を次のように定義する。

$$\left. \begin{aligned} OA &= (A_x, A_y, A_z) \\ u &= (-1, 0, 0) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (3)$$

ただし、 u は yz 平面に垂直である。

到達点 B の座標を (B_x, B_y, B_z) とすれば、点 B は以下の条件を満たしている。

- ① B 点は球面 $x^2 + y^2 + z^2 = r^2$ 上にある。
- ② B 点は u と OA を含む平面上にある。
- ③ 屈折角を η とすれば、 AO と OB のなす角は 2η になる (Fig. 3 の (b))。

まず、②の平面の法線ベクトル v を (v_x, v_y, v_z) とすれば、 v と OA 、 v と u はそれぞれ垂直であるから、 v と OA および v と u の内積より式 (4) が得られる。

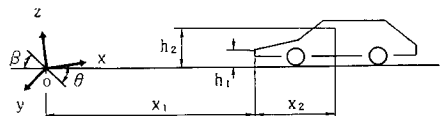


Fig. 2 Positions of headlight of a vehicle and a driver's eyes, and xyz coordinate are shown. Origin o of xyz coordinate is placed on the center of a glass bead.

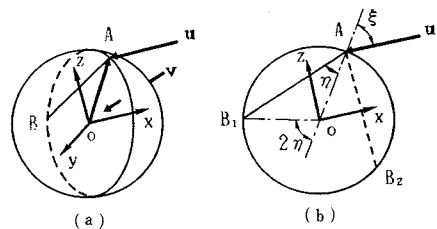


Fig. 3 Entrance and refraction of light.
(a) Entrance point and entrance vector.
(b) Refractive index and angle.

$$\left. \begin{aligned} v_x A_x + v_y A_y + v_z A_z &= 0 \\ v_x &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

v_y の解は、

$$\left. \begin{aligned} v_y &= \frac{-v_z A_z}{A_y} \\ A_y &\neq 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

である。ただし、 v は単位ベクトルである必要はないので、 $v_z = A_z$ とすると、

$$v = (0, -A_z, A_y) \dots\dots\dots (6)$$

になる。さらに、②の平面は原点および B 点を通るので、式 (7) が得られる。

$$-A_z B_y + A_y B_z = 0 \dots\dots\dots (7)$$

次に、条件③より点 A に入射した光が点 B に到達する経路の方程式を求める。入射角を ξ とすると、 ξ は OA と u のなす角であるから、OA と u の内積は式 (8) のようになる。

$$-(\mathbf{OA}, \mathbf{u}) = |\mathbf{OA}| |\mathbf{u}| \cos \xi \dots\dots\dots (8)$$

$|\mathbf{OA}| = r$ 、 $|\mathbf{u}| = 1$ であるから、式 (8) は、

$$A_x = r \cos \xi \dots\dots\dots (9)$$

となる。さらに、屈折角 η 、ビーズの屈折率 n 、入射角 ξ の関係は式 (10) で表わされる。

$$\sin \eta = \frac{\sin \xi}{n} \dots\dots\dots (10)$$

式 (9)、(10) より、

$$A_x^2 + n^2 r^2 \sin^2 \eta = r^2 \dots\dots\dots (11)$$

が得られる。また、OB と AO のなす角は 2η であるから、OB と AO の内積は、

$$(\mathbf{AO}, \mathbf{OB}) = |\mathbf{AO}| |\mathbf{OB}| \cos 2\eta \dots\dots\dots (12)$$

となる。 $|\mathbf{AO}| = |\mathbf{OB}| = r$ より、式 (12) は式 (13) のように整理できる。

$$A_x B_x + A_y B_y + A_z B_z + r^2 (1 - 2 \sin^2 \eta) = 0 \dots\dots\dots (13)$$

式 (11)、(13) より、 $\sin^2 \eta$ を消去すると、A 点から B 点に到達する光の経路方程式が式 (14) のように整理できる。

$$A_x B_x + A_y B_y + A_z B_z + r^2 - 2 \frac{r^2 - A_x^2}{n^2} = 0 \dots\dots\dots (14)$$

したがって、条件①、式 (7)、(14) より以下のように連立方程式をまとめることができる。

$$\left. \begin{aligned} B_x^2 + B_y^2 + B_z^2 &= r^2 \\ A_x B_x + A_y B_y + A_z B_z + r^2 - 2 \frac{r^2 - A_x^2}{n^2} &= 0 \\ -A_z B_y + A_y B_z &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (15)$$

この連立方程式を解いて、 B_x 、 B_y 、 B_z を求めれば、入射点と到達点の関係がわかる。方程式は 2 次式であるため、解は 2 つ得られるが、ビーズの屈折率は 1.0 より大きいので、Fig. 3 の (b) に示されるように小さい方 ($B_1 < B_2$) が求める解になる。

(2) 塗料面の方程式

Fig. 4 の (a) に示されるようにビーズの埋め込まれた塗料面が x 軸に対して $-\theta$ 傾いているとする。さらに、塗料面とビーズとの境界面における法線ベクトルを w とすると、

$$w = (\sin \theta, 0, \cos \theta) \dots\dots\dots (16)$$

になる。塗料面と $y=0$ の平面との交点 C の座標は $\{r \cos(\alpha - \theta), 0, r \sin(\alpha - \theta)\}$ となり、塗料面の方程式は、

$$\sin \theta |x - r \cos(\alpha - \theta)| + \cos \theta |z - r \sin(\alpha - \theta)| = 0 \dots\dots\dots (17)$$

と書くことができ、式 (18) のように整理できる。

$$x \sin \theta + z \cos \theta = r \sin \alpha \dots\dots\dots (18)$$

Fig. 4 の (a) および Fig. 5 に示されるように入射点 A が C 点より塗料面側であれば、その光はビーズに入射しない。一方、ビーズに入射した光の到達点が C' よりビーズと空気の境界面側であれば、その光は再帰反射しない。

すなわち、入射点の条件は、

$$A_x \sin \theta + A_z \cos \theta > r \sin \alpha \dots\dots\dots (19)$$

であり、到達点の場合は、

$$B_x \sin \theta + B_z \cos \theta < r \sin \alpha \dots\dots\dots (20)$$

である。ただし、 α は Fig. 4 の (b) に示すように定義したビーズの埋め込み率 ρ を表わす角度である。

(3) 前照灯光が当たるビーズと塗料の境界面

前照灯の光軸を x 軸とすると、ビーズ表面は、

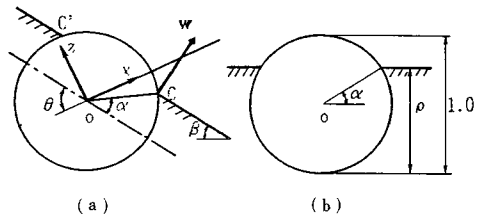


Fig. 4 A glass bead buried in thermoplastic road markings. (a) The slope of road markings surface. (b) Relation between buried depth and angle.

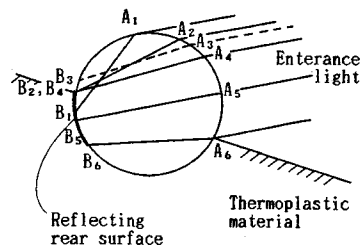


Fig. 5 Range of entrance points in front surface of a glass bead ($A_1 A_6$), and arrival points at rear surface ($B_1 B_6$). The range of $A_i A_j$ corresponds $B_i B_j$ ($i, j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$).

$$x^2 + y^2 + z^2 = r^2 \dots\dots\dots(21)$$

で表わされ、 yz 平面上の投影面では、

$$y^2 + z^2 < r^2 \dots\dots\dots(22)$$

の範囲になる。ただし、 $x > 0$ の範囲に限定される。後述するが、このビーズ表面から入射した光がビーズと塗料の境界面に到達する範囲を求めるための計算は複雑になる。そこで、本研究では数値計算を行うことによりその範囲を求めることとする。

まず、 yz 平面において、 y 軸、 z 軸方向の半径をそれぞれ m 等分し、ビーズの投影図を πm^2 個のメッシュに分割する。メッシュ ij の座標 (x_{ij}, y_i, z_j) は、

$$\left. \begin{aligned} y_i &= r(i-m)/m & (i=1 \dots 2m) \\ z_j &= r(j-m)/m & (j=1 \dots 2m) \\ x_{ij} &= r^2 - y_i^2 - z_j^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(23)$$

と表わせる。

ビーズ表面 (x_{ij}, y_i, z_j) に入射した光が到達する境界面の座標は、式 (15) の連立方程式の解を求めればよい。このとき、 (x_{ij}, y_i, z_j) は式 (19) を、解は式 (20) を満足していなければならない。

次に、ビーズと塗料の境界面もビーズ表面の場合と同様に πm^2 個のメッシュに分割する。求められた解はメッシュに変換され、光が到達するビーズと塗料との境界面の範囲が求められる。

また、次の (4) で述べるドライバーから見える境界面の範囲も同様な方法で考慮しなければならず、計算は複雑になる。

(4) ドライバーから見えるビーズ表面およびビーズと塗料の境界面の範囲

前節 (3) では入射光が到達する境界面の範囲を求めた。ドライバーがこの範囲を見ることができれば、その部分を再帰反射光としてみるができる。したがって、前節 (3) と同様な方法でドライバーが見ることができるビーズ表面の範囲および境界面の範囲を求める。

ドライバーの視軸を x' 軸にとった $x'y'z'$ 座標系を考える。 $y'z'$ 平面において、ビーズの投影図を πm^2 個のメッシュに分割する。このメッシュに入射した光がビーズと塗料との境界面に到達するメッシュを求める。

そこで、 $x'y'z'$ 座標系を xyz 座標系に変換し、ドライバーが見ることのできる範囲と前照灯光が照射する範囲の共通部分を求める。このため、 $x'y'z'$ 座標系を y' 軸を中心に $\theta_2 - \theta_1$ 回転した xyz 座標系に変換する。

$$\begin{bmatrix} x_{ij} \\ y_i \\ z_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma & 1 & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_{ij} \\ y'_i \\ z'_j \end{bmatrix} \dots\dots\dots(24)$$

ただし、 $\gamma = \theta_2 - \theta_1$ である。ここで、 θ_1 は式 (2) の $h = h_1$ 、 $d = x_1$ 、 θ_2 は $h = h_2$ 、 $d = x_2$ の場合を示す。

(5) 反射率

自動車の前照灯の光がビーズに当たると、Fig. 3 の (b) に示されるように入射点 A において、入射光の一部は反射する。入射点 A における反射率は式 (25) で表わされる。

$$R_{xyz} = 0.5 \times \left\{ \frac{\sin^2(\xi - \eta)}{\sin^2(\xi + \eta)} + \frac{\tan^2(\xi - \eta)}{\tan^2(\xi + \eta)} \right\} \dots\dots\dots(25)$$

ここに、 R_{xyz} : 入射点 (x, y, z) での反射率、 ξ : 入射角、 η : 屈折角。

ただし、入射角 $\xi = 0$ のとき、反射率は次式で表わされる。

$$R_{xyz} = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} \dots\dots\dots(26)$$

ここに、 n : 屈折率。

結局、A 点から B 点へ伝播していく光の透過率は $(1 - R_{xyz})$ になる。

(6) 再帰反射率

数値計算で求める再帰反射率は、前照灯からビーズに入射する光束量とドライバーの目に帰ってくる光束量との率として定義されている。ドライバーの目に帰ってくる光束量は、(3)、(4) 節で求められた共通部分からの反射光である。

いま、1 メッシュに単位光束量が入射しているものとする。再帰反射率 RET (Retro-reflective ratio) は次のように定義できる。

$$RET = \sum_i \sum_j \left\{ \frac{(1 - R_{x_{ij}y_i z_j}) \delta_L M_L(x_{ij}, y_i, z_j)}{\pi m^2} \times \delta_a M_a(x_{ij}, y_i, z_j) \right\} \dots\dots\dots(27)$$

ただし、

$$\delta_L = \begin{cases} 1 & \text{メッシュ } ij \text{ に入射した前照灯の光が境界面に到達する場合。} \\ 0 & \text{その他} \end{cases}$$

$$\delta_a = \begin{cases} 1 & \text{メッシュ } ij \text{ を通して } \delta_L = 1 \text{ の境界面をドライバーから見える場合。} \\ 0 & \text{その他} \end{cases}$$

$M_L(x_{ij}, y_i, z_j)$ は前照灯からの光が入射するビーズ表面のメッシュを、 $M_a(x_{ij}, y_i, z_j)$ はドライバーから見えるビーズ表面のメッシュを示している。

4. 結果および考察

(1) 再帰反射の測定結果と計算結果との比較

Photo 1 は、塗料に埋め込まれたビーズに入射した光がドライバーの目に反射してきた状態を示している。Fig. 6 は Photo 1 と同一条件に設定したビーズについて数値計算を行い、計算結果を塗料の色が明るく見える部分と暗く見える部分、再帰反射しない部分、さらにビー

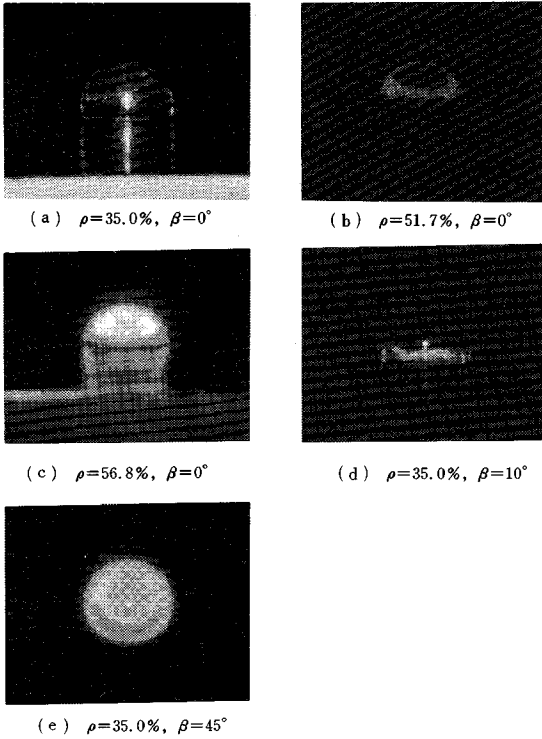


Photo 1 The observed retro-reflective characteristics of a glass bead.

ズを埋め込む塗料部分に分類し、示したものである。計算結果は写真の特徴をよく示している。

(2) 測定値と計算値の比較

Fig. 7 に計算で求めた再帰反射率と測定した再帰反射係数との関係を示す。測定値が計算値より全体的に高い値を示している。この理由として、数値計算は塗料の色が見える部分の再帰反射光のみを対象としているのに対して、測定値には塗料の色が見える部分の再帰反射光のほかに大きなものとして①ビーズの表面や裏面で反射する光、②ビーズからの再帰反射光のうち、艶消し黒を着色した塗料の表面で反射する光等が含まれていることが指摘される。特に、①はビーズの埋め込みが小さい場合、ビーズの埋め込みが大きくて塗料の表面の傾斜角度が大きい場合に現われる。逆に、②は塗料の表面の傾斜角度が小さい場合に現われる。Photo 1 の (a) と Fig. 6 の (a) はビーズの表面や裏面で反射する典型的な例、Photo 1 の (c) は②の典型的な例を示している。

次に、測定値の修正方法を検討し、再度数値を比較する。測定値の修正法は次のようである。

塗料の色をもった再帰反射光のみを測定することは困難であるから、まず対象とする光の影響を除いた光の反射を測定する。そのため塗料と接するビーズの部分を黒

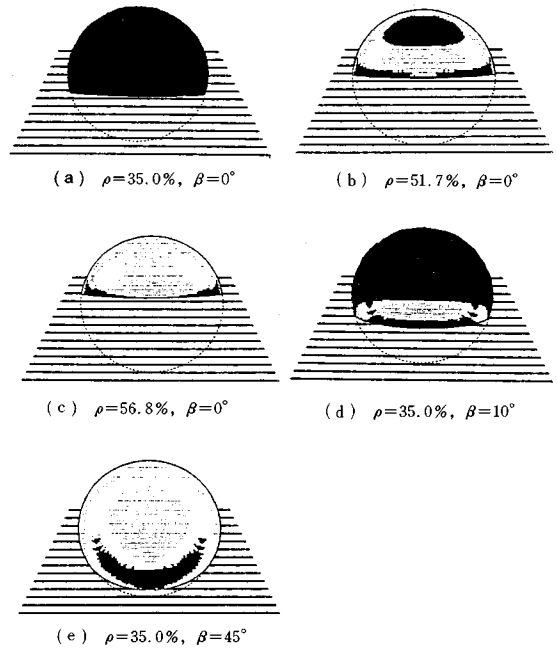


Fig. 6 The calculated retro-reflective characteristics of a glass bead. The white, the shadowed, the black and the lined portion indicate bright yellow retro-reflective, dark yellow retro-reflective, non-retro-reflective and thermoplastic portion, respectively.

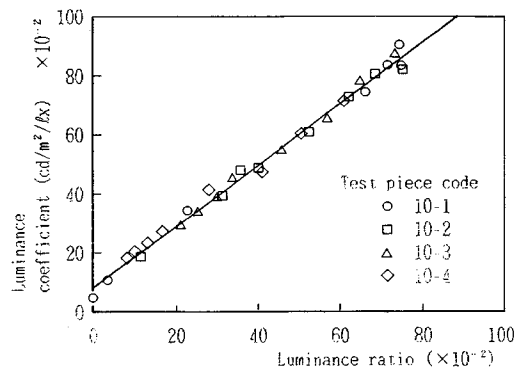


Fig. 7 Comparison of calculated retro-reflective ratios and observed retro-reflective luminance coefficients.

の布地で覆う。

これによりビーズと接する塗料面から再帰反射する塗料の色をもった光の影響を除いた反射係数 L_1 を測定することができる。

次に、艶消し黒を着色している塗料の表面を黒の布地で覆い、反射係数 L_2 を測定する。これは、着色した塗料の表面で反射する光の影響を除いた再帰反射係数を測定するためである。

これらの結果を利用して以下のとおり修正再帰反射係数 L を求める。

a) 表面や裏面で反射がある場合 $L=L_2-L_1$

b) 表面や裏面で反射がない場合 $L=L_2$

Fig. 8 は修正された測定値と計算値との関係を示す。両者は原点を通る直線関係にあることがわかる。この直線関係は χ^2 検定で 0.005 の有意水準で認められる。また、原点を通る回帰分析を行ったところ、

$$y=1.11x \dots \dots \dots (28)$$

ここに、 y : 測定値 (修正した再帰反射係数, $cd/m^2/lx$),

x : 計算値 (再帰反射率).

相関係数 0.995 の回帰式が得られ、測定値と数値計算結果とは正比例関係を保持しているといえる。求められた比例定数 1.11 は再帰反射率から再帰反射係数への換算係数と塗料の反射率の両方を含んだ補正係数を意味する。

本研究では黄色の塗料を用いたが、異なった塗料を用いれば、補正係数も変化する。この係数自体に関しては今後光学理論的な一層の研究が必要である。たとえば、ビーズ内での光の高次反射、ビーズと塗料の境界でのペイントの色が光を吸収および反射する率等を数値計算に組み込むような改良が必要である。

しかしながら、ここに提案した数値計算法は区画線の夜間の視認性の向上策を探り、それらの効果を相対的に判定するには十分耐え得るものである。

5. ビーズの再帰反射特性に関する数値計算例

計算値と測定値は比例関係にあり、ビーズの再帰反射特性はビーズの埋め込み率と塗料表面の傾斜角度に大きく左右されることがわかった。そこで、数値計算によりビーズの添加法について考察する。

(1)、(2) 節の数値計算例では、ドライバーが 30 m

前方のビーズを視準した場合について計算する。(3) 節ではドライバーとビーズ間の距離も変数として計算する。

なお、比較を容易にするため、求められた再帰反射率の最大値を 100 とした指数で再帰反射率を整理する。

(1) ビーズの埋め込み深さと再帰反射

埋め込み率とビーズの再帰反射指数との関係を Fig. 9 に示す。

まず、塗料面が水平の場合について考えてみる。埋め込み率が約 47% よりも浅くなると、前照灯光がビーズを照射してもビーズと接する塗料の色をもった光はドライバーの目に全く再帰反射しない。逆に、埋め込み率が約 47% より深くなると、ドライバーの目に再帰反射する光の量は急激に多くなる。特に、50~55% 間での再帰反射指数の増加率は大きく、約 55% のとき最大となる。55% よりもさらに深くなると、逆に再帰反射指数は小さくなる。ビーズを 50~60% 程度埋め込むと、非常に効率的であるといえよう。このことは、埋め込み率が約 50% になるよう科学処理されたフローテーションビーズ²⁾の効果が大きいことを示している。

次に、路面に対して傾斜をつけた塗料面にビーズを埋め込む場合について検討する。傾斜角度が 5, 10, 15, 30° と大きくなると、埋め込み率がそれぞれ 50, 48, 43, 30% のとき最大の再帰反射指数が得られる。このように傾斜角度が大きくなれば、ビーズの埋め込みを浅くすることが有利になる。しかし、埋め込みが浅ければ、ビーズは区画線から直ちに離脱するので、埋め込みを浅くすることは必ずしも現実的ではない。

光学的な観点から判断すれば、塗料面を傾斜させた区画線にビーズを添加する場合でも、埋め込み深さは 50% 以上が現実的であり、効果的であるといえる。

しかし、ビーズにはさまざまな力が作用するので、埋め込み率がビーズの離脱に大きな影響を及ぼすことは容

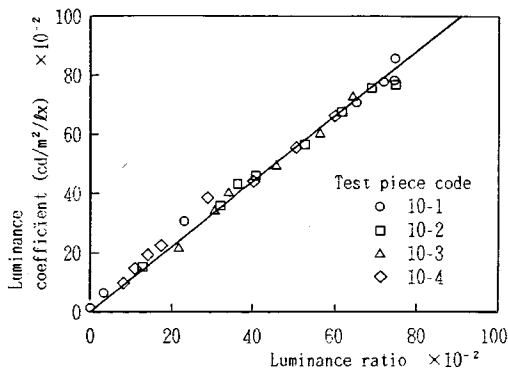


Fig. 8 Comparison of calculated retro-reflective ratios and corrected retro-reflective luminance coefficients.

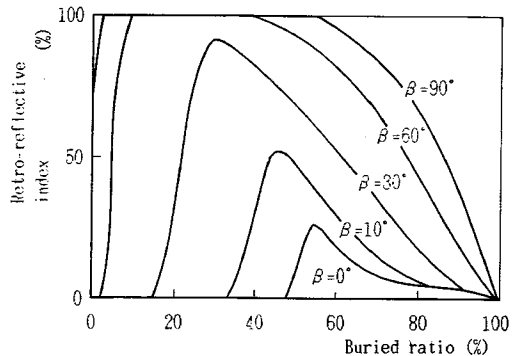


Fig. 9 Effect of buried ratio of a glass bead on retro-reflective characteristics of one.

易に想像される。本論文ではこの両者の関係については検討しておらず、今後明らかにしなければならない。この研究により現実的で、効果的なビーズの埋め込み率が明らかになる。

(2) 塗料面の傾斜と再帰反射

Fig. 10 は塗料面の傾斜角度とビーズ部の再帰反射指数の関係を示す。前述したように傾斜角度が大きくなると、埋め込みの浅いビーズが深いものよりも多くの光を再帰反射する。しかし、埋め込みの浅いビーズは区画線から直ちに離脱するので、50~60%程度の埋め込みが現実的である。

図中の破線は埋め込み率55%時の計算結果を示している。この場合、10°の傾斜をつけた塗料面に埋め込んだビーズの再帰反射指数は傾斜をつけない場合の約2.3倍になる。さらに、傾斜角度を10°より大きくした場合、再帰反射指数の増加割合は0°から10°までのそれより小さい。したがって、わずかな傾斜角度でも再帰反射光の増加に大きな効果をもたらすことがいえる。

(3) 前照灯からの距離が再帰反射特性に及ぼす影響

自動車からビーズまでの距離および塗料面の傾斜角度を変数とし、式(27)および(28)によりビーズの再帰反射指数を求めた。計算結果をFig. 11に示す。ただし、ビーズの埋め込み率は55%としている。

水平な塗料面に添加されたビーズの再帰反射指数は、距離が長くなると、低下するが、大きな低下は認められない。しかし、傾斜した塗料面に添加されたビーズの再帰反射指数は、距離が長くなると、増加し、ある値に漸近する。そのうえ、傾斜角度が大きくなれば、この値も大きくなっている。

塗料面の傾斜角度の変化がビーズの再帰反射特性に及ぼす影響は大きく、塗料表面を傾斜させた区画線は視認性の向上に大きな効果を示す。

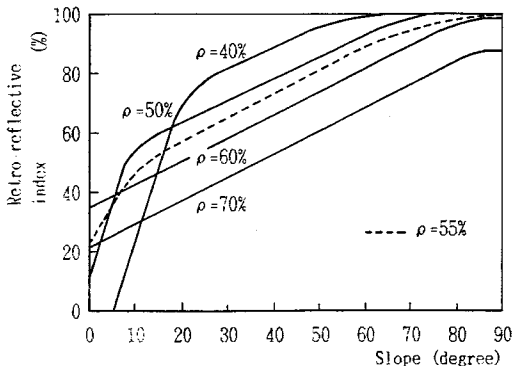


Fig. 10 Effect of slope of road marking surface on retro-reflection of a glass bead.

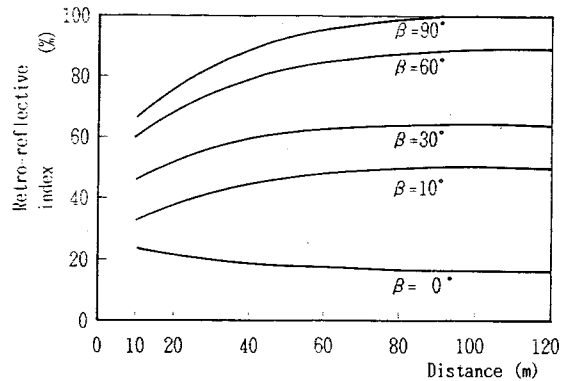


Fig. 11 Effect of distance from headlight of a vehicle on retro-reflection of a glass bead.

6. 結 論

夜間雨天時の区画線の視認性は夜間晴天時の視認性より大きく低下すること、その低下要因、夜間の視認性向上策、さらに夜間雨天時の視認性向上策等については文献6)と10)ですでに論じている。しかしながら、区画線の視認性は、基本的にはビーズの再帰反射特性に左右されることは事実である。それらの文献ではビーズ自体の再帰反射特性、ビーズの区画線への添加方法の違いがビーズの再帰反射特性に及ぼす影響、ドライバーの目と自車の前照灯およびビーズの相対位置の変化がビーズの再帰反射特性に及ぼす影響等については議論されていない。

そこで、本研究は、区画線の視認性を高めるために混入、散布するビーズの再帰反射特性を解析的に明らかにする三次元の数値計算方法を開発し、ビーズの再帰反射特性を明らかにしたものである。以下に、本研究で得られた知見をまとめる。

(1) 本研究で提案したビーズの再帰反射特性に関する三次元の数値計算法は、計算値と測定値とを比較した結果、ビーズの再帰反射特性をよく再現していることがわかった。また、この数値計算法はドライバー、前照灯、ビーズ等の三者の位置、ビーズを添加する塗料面と前照灯の光軸との交角等を入力データとしているので、夜間の区画線の視認性の向上策を検討することができる。

(2) 水平な区画線にビーズを添加する場合、ビーズの埋め込み率が約55%のときに最も多くの再帰反射光が得られる。このことは、フローテーションビーズの効果が大きいことを示している。

(3) 路面に対して塗料面を傾斜させた区画線にビーズを添加する場合、ビーズの埋め込みは浅い方が光学的には有利である。しかし、耐久性を考慮すると、埋め込みの浅いビーズは区画線から容易に離脱するため、ビー

ズの埋め込みは深い方が有利になる。この両者を考慮すると、ビーズの埋め込み率は約50～60%であることが望ましい。

(4) 塗料面を路面に対して傾斜させた区画線に添加したビーズの再帰反射率は、水平な区画線の再帰反射率より大きい。たとえば、ビーズの埋め込み率が55%の場合、表面を 10° 傾けると水平な区画線の約2.3倍の再帰反射率が得られる。

(5) 前照灯からビーズまでの距離が長くなると、水平な塗料面に添加されたビーズの再帰反射係数は減少する。しかし、塗料面に傾斜をつけると、ビーズの再帰反射係数は増加しており、塗料面の傾斜角度がビーズの再帰反射係数の向上に及ぼす影響は大きい。しかし、その距離が約60m以上になると、再帰反射係数に変化はみられず、ある値に漸近する。これは塗料面の傾斜角度にかかわらず同様な結果である。

本研究はビーズの再帰反射特性に関する理論的考察であるが、ビーズを添加するペイントの色が再帰反射輝度に及ぼす影響、ビーズの添加状態の不均一性の影響等については検討されていない。今後、ペイントの色やビーズの不均一性の影響を検討し、必要に応じて本数値計算法を改良していく予定である。さらに、本研究ではビーズの埋め込み深さと離脱との関係についても検討されていないので、この点について研究を進めることが必要である。

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いただいた西日本旅客鉄道の日名田高志氏(当時大学院生)、オリエンタルコンサルタントの岡本靖氏(当時学生)、貴重なコメントをいただいた査読の先生方に謝意を表します。また、本研究は日立化成工業

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) OECD: Road marking and delination, Paris, 1975.
- 2) 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ビーズ量の影響, 土木技術資料, Vol. 25, No. 2, pp. 39~44, 1983.
- 3) 東芝パロティニー: 道路用ガラスビーズについて, 東芝レビュー, Vol. 22, No. 8, pp. 956~970, 1974.
- 4) ユニオン(株): 高反射ユニビーズ, ユニオン技術資料, 1986.
- 5) 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.
- 6) 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. 18~26, 1989.
- 7) 安藤和彦・有岡 孝: 区画線のガラスビ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.
- 8) 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.
- 9) Drs. F. Gorkum: Night-time visibility of seven road marking materials, Traffic control and engineering, Vol. 25, No. 4, pp. 176~181, 1984.
- 10) 今田寛典・門田博知・児島武男: 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, 土木学会論文集, No. 407/IV-11, pp. 97~106, 1989.
- 11) 照明学会編: 照明ハンドブック, オーム社, pp. 342, 1978.

(1989. 10. 31・受付)