

区画線表面の凸部が視認性に及ぼす 影響に関する理論的研究

今田寛典¹・藤谷明文²

¹正会員 工博 呉大学助教授 社会情報学部社会環境情報学専攻 (〒724-07 呉市郷原町2411-26)

²非会員 日立化成工業(株)山崎工場開発部 (〒317 日立市東町四丁目13-1)

凹凸区画線の視認性向上は、凸部の傾斜部からの再帰反射光量を多くし、凸部の後ろにできる影部分を小さくすることが重要である。本研究は、入射光が凹凸区画線から再帰反射するメカニズムを理論的に明らかにし、凹凸区画線の性質を考察するものである。

得られた知見は以下のように要約できる。(1)凸部は区画線からの再帰反射光量を常に増加させるとは限らない。(2)再帰反射光量が大きくなるような凸部の形状のあることがわかった。(3)再帰反射光量が最大になる凸部の設置間隔はドライバーの注視点距離によって違う。(4)凸部をランダムに配列した場合の再帰反射光量は規則的に配列した場合のおよそ70から80%程度である。

Key Words : visibility, convexities on the surface of marking, retro-reflection, theoretical analysis

1. はじめに

区画線が交通の安全性と円滑性に果たす役割の大きいことは論を待たない。この効果を示した数多くの研究や報告を見るのは容易である。しかし、夜間雨天時、区画線が見えなくなることは事実であり、視認性の向上は依然として大きな問題である。これに対してさまざまな対策が考えられてきている。主なものとして、1)高屈折ガラスビーズの散布、2)大粒径ガラスビーズの添加¹⁾、3)区画線表面への凸部設置等は大きな効果のあることが示され、それらの対策が提案されている²⁾。

しかし、降雨時、雨水が区画線表面を覆うと、ヘッドライト光は雨水表面で鏡面反射してしまい、雨水下の区画線には到達しない。たとえ、高屈折ガラスビーズを散布してもその効果は認められなくなる。さらに、高屈折ガラスビーズの単価はかなり高いので、施工コストの上昇にもなる。

また、大粒径ガラスビーズを区画線表面に固着させるためには区画線を厚くするか、固着力の強いトラフィックペイントが要求される。しかし、現在のところ、大粒径ガラスビーズを固着するトラフィックペイントの力が弱く、離脱した大粒径ガラスビーズは路面上に散乱し、自動車の走行安全性を脅かすことになる。また、農地の土壌内に混入した大粒径ガラスビーズは農業従事者に嫌われるという指摘もある。さらに、湿潤時の滑り抵抗が大きく低下する問題もある³⁾。これらの特質のためか、1)と2)の実施例は多くみない。

一方、区画線と同じトラフィックペイントを用いた凸

部を表面に設置した凹凸区画線は多くみられ、大きな効果をあげている。しかしながら、その区画線の特性は十分に理解されていない。雨水面の上に区画線を突出させる方法として凸部を付けたものであり、科学的な説明を試みている研究は少ないのが現状であろう。

また、単に凸部を設置するだけでも多くの問題がある。たとえば、1)凸部の設置間隔も反射光量に影響を及ぼし、望ましい設置間隔があるのか。2)望ましい凸部の形状があるのか。また、3)凸部分だけトラフィックペイント量は多くなり、施工単価は上昇する。4)凸部を規則正しく設置する現在の施工速度は遅く、施工時の交通渋滞と作業員の安全性は大きな問題である。仮に凸部をランダムに設置すれば、簡単な方法で施工速度を大幅に上昇することができる報告もある。また、部分的な補修をする場合、規則正しく凸部を設置すれば新旧の凸部を合わせるのに時間を要するが、ランダムにすれば旧と新の合わせは不必要になる。しかし、ランダムに凸部を付けた場合の美観、汚れの付着、視認性の低下等の問題がある。

上述したようにそれぞれの視認性向上策には長短があり、特質を十分理解し、それらがもっとも適した場所に使われるべきであろう。

本研究は凸部が視認性の向上に及ぼす影響を数量的に明らかにし、凹凸区画線の性質を考察するものである。

2. 従来の研究と本研究の特徴

(1) 道路区画線の視認性に関する従来の研究

視認性に関する研究は多くみることができる。1章で

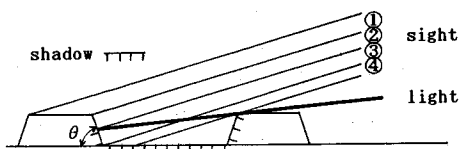


Fig.1 凸部と入射光軸および視線軸

も述べたが、以下の3つに要約できそうである。

a) 区画線に添加するガラスビーズ

高屈折ガラスビーズや大粒径ガラスビーズについては前述のとおりであるが、著者ら⁴⁾はガラスビーズの区画線への埋め込み量は6割弱が最適である、安藤ら⁵⁾も指摘しているが、散布ガラスビーズ量は20~25g/m、混入率は20%程度が望ましいことを明らかにした⁶⁾。

b) 夜間雨天時の視認性の向上策

路面に対して区画線表面を傾斜させた面、これは Fig. 1 に示されるような凸部の傾斜面に該当するが、この面からの再帰反射係数は、一般に用いられている表面が平坦な区画線（以降現行区画線と呼ぶ）からのものよりも大きく、その傾斜角 θ に強く影響される。特に、著者らは、たとえ区画線が雨水に覆われても、区画線表面を約30°傾ければ、その傾斜面からの再帰反射係数は晴天時における現行区画線からのものよりも大きくなることを明らかにしている⁷⁾。

c) 高速道路上での視認性の向上とその継続

わが国の高速道路上の区画線には液状のトラフィックペイントが用いられるのが一般的であるが、このペイントにはガラスビーズを混入することができず、散布ガラスビーズが離脱すると再帰反射係数は急激に低下する。一方、溶融型トラフィックペイントはガラスビーズを混入、散布することができ、夜間の視認性は液状のものより長期間継続する。さらに、即乾性も優れており、施工時の交通開放に要する時間が液状のものよりはるかに短い。溶融式トラフィックペイントを高速道路に用いるためには、区画線表面に路面の凹凸が現れるよう区画線の薄膜化を図り、滑り抵抗を増大させる必要がある⁸⁾。薄膜化で節約される材料を用いて区画線表面に凸部を付ければ、コスト上昇を抑えることが可能となり、さらに夜間雨天時の視認性も大きく向上する。また、凸部をつける高速施工法も検討されている。

しかし、表面に設置する凸部の詳細な効果は定量的には明らかにされていない。特に、一般道路上と高速道路上ではドライバーの注視位置もかなり違うので、同一の設置方法でよいのか等は明らかではない。

(2) 本研究の目的と意義

本研究は、一般道路はもちろん高速道路でも凹凸区画

線を施工することを念頭に置きながら凸部が再帰反射に及ぼす影響を数値計算により解析するものである。上述したように凸部は夜間雨天時に大きな効果を示すが、本研究は夜間晴天時における凸部の影響に焦点を絞ることとした。これは、凸部が区画線の視認性に及ぼす影響の基本的なメカニズムを研究するためには晴天時でも本研究の目的を十分達成できると考えるからである。もちろん、夜間雨天時の影響も今後検討する予定である。

研究結果は走行速度が遅い一般道、高速である高速道路での凹凸区画線の施工方法等に反映できるものと期待できる。すなわち、視認性の向上効果が最も大きくなるような凸部の配列の仕方が存在するはずであり、この凸部の設置法を求めるところを目的とする。自動車の走行速度が高くなれば、ドライバーの注視点は遠方になるので、最適な凸部の配列の仕方も一般道路と高速道路では異なってくる。

3. 凹凸区画線の再帰反射係数の算出

(1) 基本的考え方

光源に照らされている面からの反射輝度 L (cd/m^2) は、その面が放つ光度 I (cd) を輝度を測定する方向への正射影面積 A で除した単位面積当たりの光度で示される。

$$L = \frac{I}{A} \quad (1)$$

凹凸区画線の視認性は、凸部の大きさや密度、ドライバーと凸部との距離、凸部と凸部との間隔などに左右される。本研究は、それらが視認性に及ぼす影響を数値計算により調べる。解析の便宜上、凸部の形状を台形とする。後述するが、台形は凸部形状の一般形を表していると考えられる。

ヘッドライトの入射光軸、ドライバーの視線軸および区画線表面の凸部を横方向から見た状況を Fig.1 に示す。なお、運転中のドライバーの注視点を30m先、50m先、100m先としているので、入射光軸は平行であると仮定できる。また、ドライバーの視線軸も同様である。

ドライバーへの再帰反射光は、入射光が当たる①水平部分、②傾斜部分、当たらない③水平部分、④傾斜部分から反射したものである。反射光量は入射光量の大小によって大きく変動するので、一般には反射光量を入射光量 E (lx) で基準化した再帰反射係数 ($\text{ca}/\text{m}^2/\text{lx}$) で視認性が議論されている。いま、①、②、③、④部からの再帰反射係数 f_i ($i=1, 2, 3, 4$) が分かれば、ドライバーの目に入る単位幅反射光束量（反射輝度） L は式 (2) で表される。

$$L = \frac{\sum (E \cdot i \text{部からの反射光束幅} \cdot f_i)}{\sum i \text{部からの反射光束幅}} \quad (2)$$

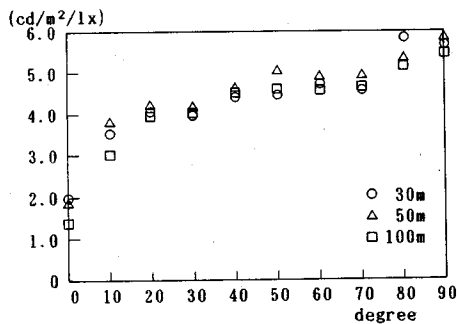
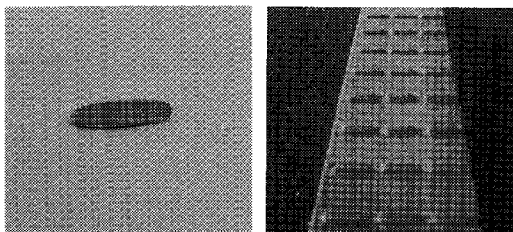


Fig.2 塗料面の傾斜角と再帰反射係数 (ガラスビーズ散布量は40g/m)



a) a circular convexity b) trapezoidal convexities

Phot.1 凸部の一般的な形状

結局, i 部からの反射光束幅および f_i を明らかにすることになる。

(2) 凸部の傾斜が再帰反射係数に及ぼす影響

現行区画線の再帰反射係数はガラスビーズの散布量や混入量および区画線の色等によって大きく変化する。また、光軸と視線軸、区画線表面と光軸、および区画線表面と視線軸との傾角によっても再帰反射係数は変化する。

一方, Fig.1 に示されるように凹凸区画線は区画線表面が路面に対して傾斜した面と水平な面に分解して考えることができる。この傾斜した面と水平な面からの再帰反射係数は異なっており, Fig.2 に示されるように塗料面の傾斜角 θ およびドライバーと区画線との距離 d が再帰反射係数に影響を及ぼしている。傾斜角が大きくなると, 再帰反射係数も大きくなる。傾斜角が 10° 以上になると, 再帰反射係数は 0° の場合の約2から3倍程度になる。一方, 距離は再帰反射係数に大きな影響を及ぼしていない。結局, 凸部の傾斜面からの再帰反射係数は θ の関数で示されることになる。

(3) 凸部形状の簡略化

Phot.1 は一般に用いられている凹凸区画線の凸部を

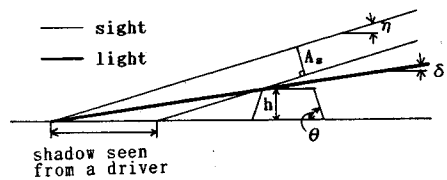


Fig.3 影の部分

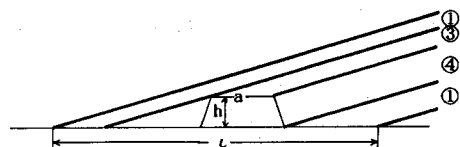


Fig.4 凸部への照射

示したものである。凸部は水平部と傾斜部で構成されており, 数値計算で凸部を台形として考えることは本研究の目的を達成するためには大きな問題ではないと考える。

(4) 凸部が造る影

ドライバーの目の位置がヘッドライト光源より上にあるので, ドライバーは凸部の背後にある影部分を見ることになる。この影は凸部の形, ドライバーと凸部間の距離, 設置間隔によって変化する。Fig.3 より影の部分の視線軸に垂直な投影面に対する幅 A_s は次式で表される。

$$A_s = h (\cot \delta - \cot \eta) \cdot \sin \eta \quad (3)$$

h : 凸部(台形)の高さ

δ : 光軸と水平軸がなす角度

η : ドライバーの視線軸と水平軸がなす角
 $\eta > \delta$

この影部分からの再帰反射光量は非常に小さいので, 計算では無視できる。

(5) 長さ l に凸部が1個存在する場合の再帰反射

まず, 入射光であるが, Fig.4 に示される長さ l の凹凸区画線を照射する光束幅 ϕ は,

$$\phi = l \sin \delta \quad (4)$$

である。また, 平坦な区画線表面部, 凸部の上面部, 傾斜部を照射する光束幅 ϕ_i は, それぞれ,

$$\left. \begin{aligned} \phi_1 &= (l - h \cot \delta - a - h \cot \theta) \sin \delta \\ \phi_2 &= 0.0 \quad (\text{影部分}) \\ \phi_3 &= a \sin \delta \\ \phi_4 &= h (\cot \delta + \cot \theta) \cdot \sin \delta \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

a : 凸部の上面部の長さ

θ : 凸部の傾斜角度

で示される。ただし, $\phi = \sum \phi_i = l \sin \delta$ である。

反射光については, Fig.5 に示されるように区画線表

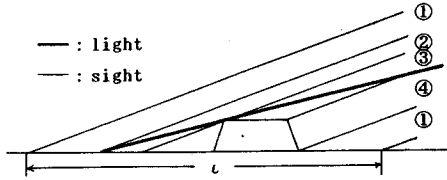


Fig.5 凸部が一つの場合

面上に凸部を1個配置したときの再帰反射光束幅 A_i はそれぞれ、

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= (l - a - h \cot \delta - h \cot \theta) \cdot \sin \eta \\ A_2 &= A_3 \\ A_3 &= a \cdot \sin \eta \\ A_4 &= h (\cot \eta + \cot \theta) \cdot \sin \eta \\ A &= \sum A_i = l \sin \eta \end{aligned} \right\} (6)$$

で示される。この A_i 部が大きければ、視認性は低下することになる。

水平部分の再帰反射係数を f_1 と傾斜部分の再帰反射係数を f_2 とすれば、 i 部からの再帰反射光束量 L_i は、

$$L_i = E \cdot A_i \cdot f_i \quad (7)$$

で表すことができる。ただし、 $f_1 < f_2$ である。結局、水平部分と傾斜部分の反射光束の和がヘッドライトに照らされた区画線からドライバーの目に帰ってくる。この再帰反射輝度 L は式(7)より式(8)のようになる。

$$L = \sum L_i / l \sin \eta = \frac{E}{l \sin \eta} \{ (l - h \cot \delta - h \cot \theta) \cdot \sin \eta \cdot f_1 + h (\cot \eta + \cot \theta) \cdot \sin \eta \cdot f_2 \} \quad (8)$$

一方、現行区画線は水平部分のみで構成されているので、現行区画線の再帰反射輝度 L_0 は、

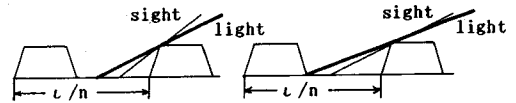
$$L_0 = f_1 E \quad (9)$$

と表される。したがって、凹凸区画線と凹凸のない現行区画線との輝度比 R は次のように表される。

$$\begin{aligned} R &= \frac{L}{L_0} \\ &= 1 + \frac{h}{l} \{ (\cot \eta + \cot \theta) \gamma - (\cot \delta + \cot \theta) \} \\ &= 1 + \frac{h}{l} (\alpha \gamma - \beta) \end{aligned} \quad (10)$$

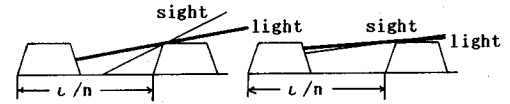
ただし、 $\alpha = \cot \eta + \cot \theta$ 、 $\beta = \cot \delta + \cot \theta$ 、 $\gamma = f_2 / f_1$ である。

式(10)の $\alpha \gamma - \beta$ が負になれば、 $R < 1.0$ となり、凸部を付けることが視認性低下の大きな原因になる。凸部を付けるのであれば、 $\alpha \gamma > \beta$ となるような凸部でなければならない。なお、 $\alpha \gamma$ と β が R に及ぼす影響については後述する。



a) case 1 b) case 2

Fig.6 影が凸部にかからない場合



c) case 3 d) case 4

Fig.7 影が凸部にかかる場合

(6) 長さ l に n 個の凸部を規則的に配置した場合

いま、単位距離 l に凸部を n 個配置したと仮定する。凸部の設置間隔が短くなると前方に存在する凸部の影が後方の凸部の傾斜部分にかかることになる。その部分への入射光束は0であり、反射光束も0になる。多くの光を反射する傾斜部分からの光が再帰反射しない。そこで、前方の凸部の影が後方の凸部にかかる場合とにかからない場合の2通りに分けて計算を行うことにする。

a) 凸部の影が後方の凸部にかからない場合

ドライバーに再帰する①、②、③、④部はケース1と2に分類できる (Fig.6)。

凸部が複数ある場合は l/n 間の再帰反射輝度を求め、それを n 倍すれば、 l からの反射光束になる。

まず、ケース1の場合の L は、

$$L = \frac{E n}{l \sin \eta} \left\{ \left(\frac{l}{n} - h \cot \delta - h \cot \theta \right) \cdot f_1 \cdot \sin \eta + (h \cot \eta + h \cot \theta) f_2 \cdot \sin \eta \right\} \quad (11)$$

となる。したがって、 R は、

$$\begin{aligned} R &= 1 + \frac{n h}{l} \{ (\cot \eta + \cot \theta) \gamma - (\cot \delta + \cot \theta) \} \\ &= 1 + \frac{n h}{l} (\alpha \gamma - \beta) \end{aligned} \quad (12)$$

である。ただし、間隔は、 $l/n \geq a + h (\cot \delta + \cot \theta) = a + h \beta$ である。

ケース2はケース1に含まれ、 $l/n = a + h \beta$ 場合である。この場合、式(12)は、

$$R = \frac{a + \alpha h \gamma}{a + \beta h} \quad (13)$$

になる。

結局、後述するb)の場合も同様であるが、 n 個の凸部からの再帰反射光束はFig.6に示されるように l/n 間

の1個の凸部からの反射光量を考察すればよい。

b) 凸部の影が後方の凸部にかかる場合

次に、前方の凸部の影が後方の凸部にかかる場合の様子を Fig.7 に示す。

ケース3の反射輝度Lは次のように示される(付録)。

$$L = \frac{E n}{l} \left(a f_1 + \frac{(l - n a) \alpha}{n \beta} f_2 \right) \quad (14)$$

したがって、Rは

$$R = \frac{1}{l} \left\{ n a + \frac{(l - n a) \alpha \gamma}{\beta} \right\} \\ = a \left(1 - \frac{\alpha \gamma}{\beta} \right) \frac{n}{l} + \frac{\alpha \gamma}{\beta} \quad (15)$$

になる。ただし、 $l/n \leq a + h \beta$ である。

ケース4は、凸部が非常に密に設置された場合である。この場合、影は凸部の頂点近くに達すると同時に視線も凸部の頂点近くに達するので、影および光が当たる傾斜部分の影響は小さくなる。さらに、凸部が粗に配置された場合でも、ドライバーと区画線との距離が大きくなると、同様なことがいえる。結局、ケース4は、現行区画線の反射光量に漸近する。

$$R \approx 1.0 \quad (16)$$

ところで、式(12)、(13)、(15)中の α 、 β 、 γ は、 $\gamma \geq 1$ 、 $\beta > \alpha > 0$ である。 $\alpha \gamma > \beta$ の場合、式(12)は n/l の増加関数、(15)は n/l の減少関数になる。逆に、 $\alpha \gamma < \beta$ の場合、式(12)は減少関数、(15)は増加関数になる。さらに、式(12)、(15)に $l/n = a + h \beta$ を代入すれば、それぞれのRは(13)に等しくなるので、(13)が最大値か最小値を示すことになる。

Fig.8 は式(12)、(13)、(15)を示したものである。

結局、Rは凸部の間隔、傾斜部と水平部の再帰反射係数の比、ドライバーの目とヘッドライトの位置によって変化し、最大、または最小の再帰反射光量が得られる凸部の密度があることになる。

ここで、 $\alpha \gamma$ と β が R に及ぼす影響を考察してみる。 $\alpha \gamma > \beta$ であれば、凸部が視認性向上に及ぼす影響は大きい。逆に、 $\alpha \gamma < \beta$ であれば、凸部は視認性低下の原因となる。凸部は常に視認性向上とは結びつかないことに注意しておかねばならない。

いま、 $\alpha \gamma > \beta$ を書き改めると、

$$(\cot \eta + \cot \theta) \gamma > \cot \delta + \cot \theta \\ \gamma \cot \eta - \cot \delta > (1 - \gamma) \cot \theta \quad (17)$$

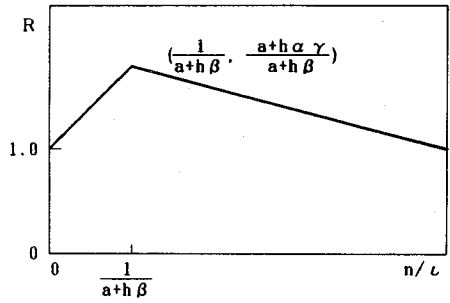
である。 $\gamma \geq 1$ であるから、右辺は常に負である。したがって、左辺は正、ゼロ、負にもなる。

まず、左辺が正の場合を考える。

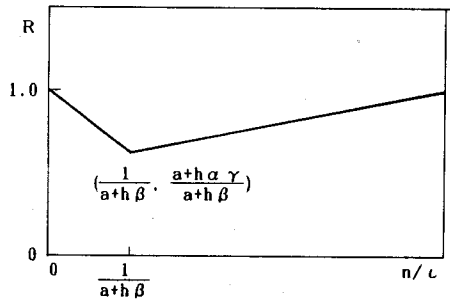
$$\gamma > \frac{\cot \delta}{\cot \eta} = \frac{\cot(0.7/d)}{\cot(1.3/d')} \quad (18)$$

d : ヘッドライトと凸部との距離、

d' : ドライバーと凸部との距離 (= d +



a) $\alpha \gamma > \beta$



b) $\alpha \gamma < \beta$

Fig.8 凸部の間隔が視認性向上に及ぼす影響

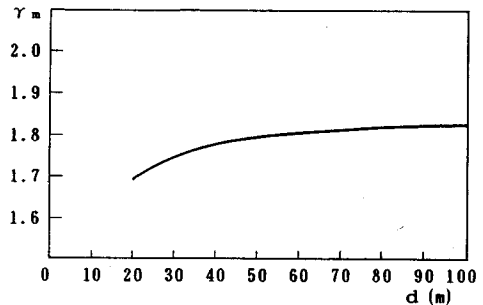


Fig.9 反射輝度に影響を及ぼす区画線とヘッドライトおよびドライバーまでの距離

ッドライトとドライバーとの距離、

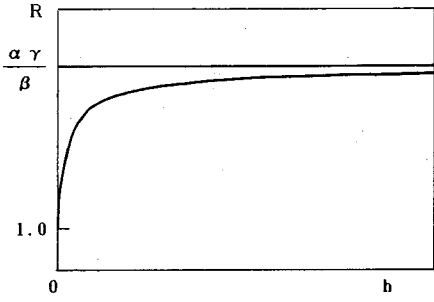
0.7 : ヘッドライトの高さ(m)、

1.3 : ドライバーの目の高さ(m)

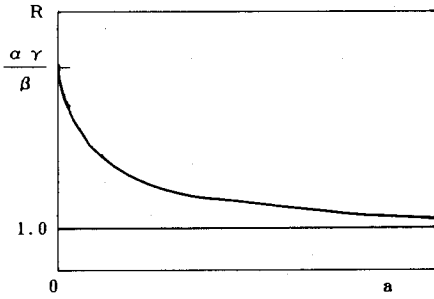
再帰反射係数の比 ($\gamma = f_2 / f_1$) が $\cot \delta / \cot \eta$ 以上確保されれば、凸部が視認性向上に果たす効果は大きい。

しかし、左辺が負の場合は、式(18)の不等号の向きが逆になり、式(12)は減少関数、(15)は増加関数となる。したがって、このような γ の凸部は設置しない方がよい。

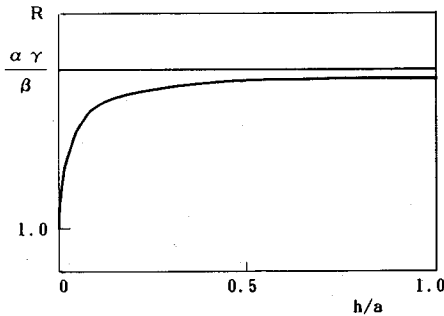
Fig.9 は再帰反射係数比の限界値 γ_m とdとの関係を示したものである。 γ が図中の限界係数比よりも上側であ



a) influence of height h



b) influence of width a



c) influence of h/a

Fig.10 凸部の形状が再帰反射に及ぼす影響

れば、凸部の効果があり、下側であれば、逆効果になる。距離 d が長くなれば、 γ_m も大きくなるが、さらに長くなると、一定値に漸近している。この γ_m は θ の関数であり、Fig.2 と 9 から必要な γ_m 以上となるような凸部の θ を決めることもできる。また、凸部が摩耗し、必要な γ が得られないような傾斜角になれば、補修が必要になる。

(7) 凸部の形状と再帰反射

次に、反射光量が大きくなる凸部の形状について考えてみる。簡単のため R が最大になるときを考察する。形状として考慮するのは a と h である。その他の変数は一定の場合を考える。ただし、凸部の設置効果を考察する

のであるから、 $\alpha\gamma > \beta$ である。

いま、式(13)の h をゼロから大きくするならば、 R は Fig.10 の a) のように示される。 h がゼロの場合は現行区画線を意味しており、 h が大きくなるにしたがって R は $\alpha\gamma/\beta$ に漸近する。

一方、 a をゼロから大きくすると、 R は Fig.10 の b) のように示される。 a がゼロに近くなれば、 R は $\alpha\gamma/\beta$ となる。 a がゼロより大きくなると、 R は小さくなる。 a がさらに大きくなれば、現行区画線の R に漸近する。

次に $c = h/a$ を変数とすると、式(15)は、

$$R = \frac{1 + \alpha\gamma c}{1 + \beta c} \quad (19)$$

と書き改められる。 Fig.10 の c) は、 c が変化した場合の R の変化を示す。 c がゼロから 0.1, 0.2 と変化すると、 R は $\alpha\gamma/\beta$ の約 76, 85% と大きくなる。さらに c が 0.3, 0.4, 0.5 と変化すると、 R のそれは 88, 91, 93% と増加するが、その割合は小さくなる。 c が 0.5 以上では R はほとんど変化しておらず、 $\alpha\gamma/\beta$ に漸近する。

結局、凸部の大きさは、1 辺長は小さいほど、また高さは大きいほど光の再帰反射は大きくなるが、凸部の高さとの比 h/a は少なくとも 0.2 以上が望ましい。

ただし、凸部の高さ h は通常の雨水膜厚よりも大きいことが条件である。この h の大きさについては今後の研究課題である。

(8) 凸部をランダムに配列した場合

これまで凸部が規則的に配列していた場合について考えてきたが、ここでは凸部がランダムに配列している場合の反射について考察する。

いま、 l 間に凸部が n 個ランダムに存在すれば、凸部と凸部との間隔が x 以下である確率 p_x は、

$$p_x = \int_0^x \lambda \exp(-\lambda x) dx \quad (20)$$

である。ただし、 λ は平均密度 n/l である。凸部と凸部の間隔が x のときの輝度比を R_x とすると、凸部が l 内に平均 n 個存在するときの R_n は以下のように示される。

$$R_n = \int_0^\infty p_x R_x dx \quad (21)$$

なお、凸部と凸部の間隔が $x \leq a$ の場合は凸部と凸部は重なっており、 $R_x = 1.0$ となる。また、 R_x は、式(12)、(13)、(15) のように間隔 x によっても異なってくるので、式(21) は以下のように整理できる。

(1) $x \leq a$

$$R_{n1} = \int_0^a \lambda \exp(-\lambda x) \times 1.0 dx \quad (22)$$

$$(2) a < x \leq a + h \beta$$

$$R_{n2} = \int_a^{a+h\beta} \lambda \exp(-\lambda x) \left(1 - \frac{\alpha \gamma}{\beta}\right) \frac{a}{x} + \frac{\alpha \gamma}{\beta} dx \quad (23)$$

$$(3) x > a + h \beta$$

$$R_{n3} = \int_{a+h\beta}^{\infty} \lambda \exp(-\lambda x) \left(1 + (\alpha \gamma - \beta) \frac{h}{x}\right) dx \quad (24)$$

$$R_n = R_{n1} + R_{n2} + R_{n3} \quad (25)$$

式(25)を展開、整理すると、以下ようになる。

$$R_n = 1 + \left(\frac{\alpha \gamma}{\beta} - 1\right) \left[\exp(-\lambda a) - \exp(-\lambda(a+h\beta))\right] + a \lambda \left(1 - \frac{\alpha \gamma}{\beta}\right) \int_a^{a+h\beta} \frac{1}{x} \exp(-\lambda x) dx + h \lambda (\alpha \gamma - \beta) \int_{a+h\beta}^{\infty} \frac{1}{x} \exp(-\lambda x) dx \quad (26)$$

式(26)の右辺の第3項、4項の積分は積分指数であるため、初等関数では示されないで、積分値を数値積分で求めることになる。

ところで、凸部の大きさもランダムであるとすれば、 a は、 $0 < a \leq a_{max}$ の範囲でランダムに変化すると考えることができる。しかし、式(26)でも示したように積分指数を求めることになり、より複雑な式の展開となる。これに関しては今後さらに研究を進めていく予定である。また、 h や θ もランダムに変化することについても今後研究しなければならない課題である。

5. 若干の計算事例と考察

(1) 計算結果を検証する光学実験とその結果

理論計算の妥当性を検討するため凹凸区画線の試験片を作成し、照度、および輝度を測定した。詳細な測定方法は著者らの文献(7)に記載されているので、本論文では測定方法については記述せず、試験片の作成について概説することに止める。

実験の都合上80mm×10mm×2mmの矩形の磨き鋼をFig.11のa)に示されるように並べ、現行区画線とした。次に、Fig.11のb)に示されるように矩形の磨き鋼を凸部と設定した。矩形の磨き鋼を用いた理由は、試験

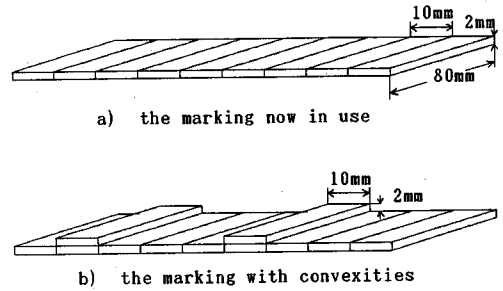


Fig.11 測定に用いた試験片

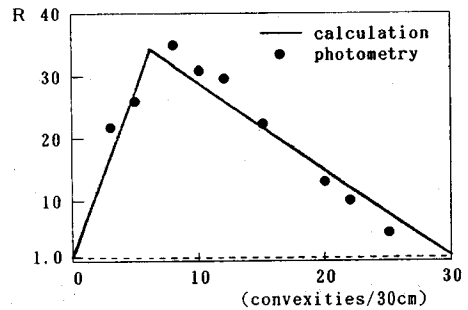


Fig.12 測光値と計算値

片の水平面と傾斜面の反射輝度を均一にでき、凸部の間隔を自在に変化させることができるためである。

式(18)中の $d=2.8m$, $d'=3.0m$, ヘッドライト(光源)の高さを15cm, ドライバーの目(輝度計)の高さを27cmとして測定した結果、磨き鋼の水平面と鉛直面の再帰反射係数の比 γ は、 $\gamma=70.3$ であった。この比はFig.2から求められる2~3程度の値に比べると非常に大きな値であるが、上述したように測定の容易さと精度を優先したためである。本研究の理論計算を検証するためには γ の値は大きな問題にならないと考える。なお、鉛直面からの鏡面反射光を測定しないため、光軸と鉛直面とは直交させていない。

実測値より求めた凸部を付けた試験片と凸部を付けない試験片との反射輝度比 R と理論計算より求めた反射輝度比 R をFig.12に示す。

計算値は実験値をよく再現していると考えられる。

(2) 計算事例の条件

現在、一般道の凹凸区画線の凸部の大きさはおよそ $a=1\sim 3cm$, $h=4mm$ 程度であるが、4章7節で述べたように a に対する h の比は少なくとも0.2以上が望ましいとしているので、 a は3cm, h は a の0.2と仮定する。

さらに、ドライバーは $d=30, 50, 100m$ 先を視準していると仮定した。これは、一般道路と高速道路ではド

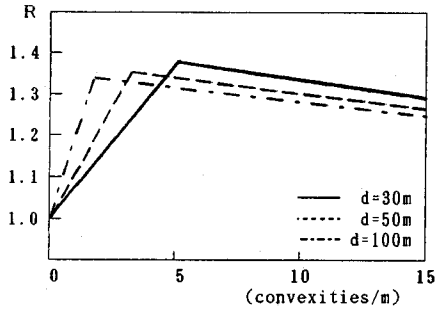


Fig.13 注視距離と凸部の密度が再帰反射輝度比に及ぼす影響（規則的配列）

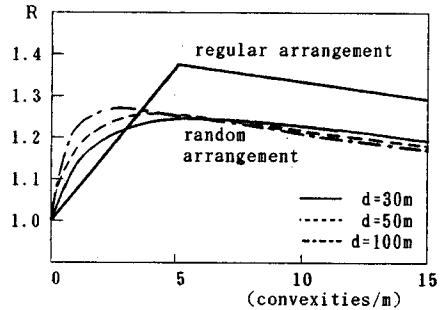


Fig.14 凸部をランダムに配列した区画線の再帰反射

ライバーが視準する距離が異なるためである。すると、式(11)、(12)、(15)中の δ 、 η は、

$$\begin{aligned} \delta &= \tan^{-1}(0.7/d) \\ \eta &= \tan^{-1}(1.3/d') \\ d' &= d + 2 \end{aligned} \quad (27)$$

で示される。また、凸部の傾斜角度 θ は 60° と仮定する。さらに、Fig.2の実測値より γ を求めると、 $\gamma = 2.37$ であった。

(3) 注視距離が変化した場合

Fig.13は凸部を規則的に配置し、注視距離 d を変化させた場合の計算結果を示している。いずれの d の場合にも再帰反射輝度比 R が最大になる凸部の密度がある。

その最適な密度(n/l)は、 $1/(a + h\beta)$ である。 $h = 0.2a$ であるので、 a が大きくなれば、最適な密度は小さくなる。また、式(13)を展開すると、 a と h は消去され、式は α 、 β 、 γ の関数になる。したがって、 d が一定の場合には a の変化に伴う最適な密度が変化しても R は常に一定である。

しかし、 β は d の関数であるので、 d が小さいほど凸部の最適密度は大きくなる。同時に反射輝度比 R の最大値も大きくなる。逆に、 d が小さくなれば、 R も小さくなるが、 R には漸近値がある。

距離が100mのときに最適になるように凸部を配置したときの30m先の R は、30mのとき最適になるように凸部を配置した場合の R よりもかなり小さくなる。50m先が最適になるように凸部を配置した場合も同様である。逆に、30mのとき最適になるよう凸部を配置したときの50m、または100m先の反射輝度の低下割合は小さい。凸部の配置はドライバーの注視距離を考慮して決めることも必要である。

(4) 凸部がランダムな場合と規則的な場合の比較

Fig.14は凸部をランダムに配列した場合の反射輝度比 R である。図の横軸は凸部の平均密度である。さらに、凸部を規則的に配置した場合とランダムに配置した場合

の反射輝度比 R を比較するため、Fig.14には規則的に凸部を配置し、ドライバーの注視点を30m先とした場合の結果も示している。

まず、凸部の密度が小さい場合であるが、注視距離が短くなると、ランダムな場合の R の方が規則的な場合のそれよりも大きくなる。逆に、注視距離が長くなれば、ランダムな場合と規則的な場合には大きな差はなくなる。さらに、注視距離の違いが R にも大きな影響を及ぼしている。

一方、凸部の密度が大きくなれば、規則的に凸部を配置した場合の R の方がランダムな場合のそれよりも大きくなっている。これは、密度が大きい場合、凸部をランダムに配列すると、複数の凸部が重なったり、凸部と凸部との間隔が短くなる場合が多く、反射輝度が大きい凸部の傾斜面が少なくなるためである。しかしながら、注視距離が R に及ぼす影響はランダムな場合も規則的な場合も小さい。

ランダムな場合、注視距離が長くなるとともに R は大きくなるが、逆に、規則的な場合には、注視距離の短い方が R は大きくなっている。しかしながら、ランダムな場合も規則的な場合も注視距離が長くなれば、 R が最大になる凸部の密度自体は小さくなる。

Fig.13と14を比較すると、ランダムな場合の R の最大値は規則的な場合の70~80%程度であることがわかる。この割合は密度が大きい場合にも当てはまる。

(5) 凸部の摩耗と視認性

Fig.2に示されるように凸部の傾斜面の再帰反射係数 f は θ の関数で示され、工学的には、

$$g(\theta) = a_0 + a_1\theta + a_2\theta^2 + a_3\theta^3 \quad (28)$$

で表すことができる。実測値をもとにパラメータ a_i を求めると、

$$\begin{aligned} a_0 &= 1.93 \quad (12.066), & a_1 &= 0.150 \quad (9.192), \\ a_2 &= -2.8 \times 10^{-3} \quad (-6.436), & a_3 &= 1.79 \times 10^{-5} \quad (5.649), \end{aligned}$$

寄与率は92.94%、()内は t 値

であり、上の関数の実用性の高いことがわかる。

Table 1 γ_m を確保するための凸部の傾斜角度とドライバーの注視点距離

d(m)	$\theta(^{\circ})$	d(m)	$\theta(^{\circ})$
20	11.0	70	13.5
30	12.0	80	13.6
40	12.6	90	13.7
50	13.0	100	13.8
60	13.3	-	-

いま、式(18)から導きだされる γ_m を $g(\theta)$ を用いて書き直すと、

$$\gamma_m = \frac{\cot(0.7/d)}{\cot\{1.3/(d+2.0)\}} \quad (29)$$

$$= g(\theta)/a_0$$

のようになる。したがって、 d が与えられたときの θ は、

$$\theta = g^{-1}\left\{a_0 \frac{\cot(0.7/d)}{\cot(1.3/d+2.0)}\right\} \quad (30)$$

で求められる。ここでは、式(29)から γ_m と d 、式(28)から γ_m と θ の関係を図示し、 θ を読み取ることにした。 θ と d との関係を**Table 1**に示している。

基本的には、ドライバーの注視点が遠くなれば、傾斜角度を大きくしなければならないが、注視点が70m以上になれば、傾斜角の変化は小さくなる。いま、100m先の γ_m が確保されることを基準にすれば、 θ は約14°以上でなければならない。 $d < 100m$ の場合、傾斜角14°の凸部を付けることは現行区画線の視認性を向上させる。しかし、 $d = 50m$ 時の γ_m を基準にして θ_{50} を決めれば、100m先の傾斜角 θ_{50} の凸部を付けることは現行区画線の視認性を低下させる。また、自動車の保安基準によると、ヘッドライトの性能は走行ビームの場合は100m先、すれ違いビームの場合は40m先の障害物を確認できなければならない。したがって、50m先よりも100m先での γ_m を基に θ を決めるべきである。現行区画線の視認性を向上させるためには、少なくとも凸部の傾斜角は14°以上でなければならない。逆に、傾斜角度が14°以下まで摩耗すれば、新たな凸部を設置しなければならない。

しかし、この θ は、式(17)、(18)、(29)から分かるように凸部が区画線の視認性向上に効果を示し始めるときの値である。また、著者らの文献(7)によると雨天時における凸部の上面部や傾斜部からの再帰反射係数は晴天時のそれに比べると大きく低下する。今後、雨天時の視認性も含めて多くのデータを収集し、研究する必要があるが、少なくとも晴天時において凹凸区画線の再帰反射係数が現行の区画線よりも低下することは避けなければならない。

(6) 若干の提案

遠くの注視距離が必要とされる高速道路の直線部では $d = 100m$ で最適な凸部密度を、近い視線が要求される曲線部では $d = 30m$ 、 $50m$ で最適な凸部密度をとるように凸部を設置することも一つの方策であろう。

4章6節や前節でも述べたように凸部が摩耗して凸部の傾斜角 θ が小さくなれば、凸部が視認性低下の原因になる。この傾斜角が、凸部の維持補修時期を知る一つの判断指標になる。道路上での測光はかなり困難な場合が多いので、目視による判断にこの指標を加えればよ的確に維持補修時期を知ることが可能になる。このためには**Fig.9**や**Table 1**が利用できる。

白色の凹凸区画線のごれは大きな問題の一つである。よごれは凸部自体とその周辺に付着する 경우가多く、凸部の密度に比例するので、よごれの側面から考えると、凸部は粗である方が有利である。高速道路上では注視距離が長いので、密度が粗でもよく、よごれに対しては有利である。

6. 結論

本研究は、区画線表面に凹凸をつけることによって、区画線の夜間の視認性向上にどのような効果をもたらすかを理論的に検討したものである。特に、凸部の密度が変化すると再帰反射係数がどのように変化するかを理論計算で検討し、検証実験を行って視認性に大きな効果を示す凸部の密度を確認した。

まず、理論的な数値解析の結果明らかになったことを以下にまとめる。

(1) 凸部が常に区画線からの再帰反射光量を増加させるとは限らないことが分かった。すなわち、凸部の傾斜面からの再帰反射係数が従来の平坦な区画線表面からの再帰反射係数よりも単に大きいだけではだめであり、限界値のあることがわかった。その値は、凸部の傾斜面の角度やドライバーの注視距離によって決まってくる。また、このことは凸部の摩耗による傾斜面の角度の低下が凸部の補修の時期を判断する基準の一つとなる。

(2) 再帰反射光量が大きくなるような凸部の形状がわかった。凸部の高さは少なくとも幅の20%以上であることが望まれる。一方、バイクや自転車および歩行者が踏みやすい外側線の場合には、高さをできるだけ低くすることが望ましいけれども、視認性を考慮すれば、高さは幅の20%以下にはしない方が望ましい。20%は一つの目安になる。

(3) 再帰反射光量が最大になる凸部の密度がある。これは凸部を規則的に配列する場合もランダムに配列する場合にもあてはまる。

次に、数値計算事例の結果より以下のことが明らかになり

れた。

(4) 凸部をランダムに配列した場合の再帰反射光量は規則的に配列した場合のおよそ70から80%程度である。反射光量だけからみると、凸部を規則的に配置することが圧倒的に有利であるが、凸部の設置速度、降雨時の凹凸区画線上の雨水の排水性、凸部の設置が美的感覚に与える影響等を明らかにしなければ、規則的配置とランダム配置の是非は結論付けられない。

(5) 遠くの視線が必要とされる高速道路の直線部では注視距離が100m先で最適な凸部密度を、近い視線が要求される曲線部では注視距離が30m先や50m先で最適な密度になるように凸部を設置することも一つの方策であろう。

本研究は研究結果の妥当性を検証するための光学実験を行い、理論解の妥当性を確かめているが、今後多くの実験的研究を積み重ねる必要があることも事実である。たとえば、再帰反射係数は散布・混入ガラスビーズ量、トラフィックペイント中の顔料の混入割合によって大きく変化するので、それらと反射係数の関係を詳細に調べ、式(28)を明らかにする必要がある。ただし、本研究は今後の実験的研究の方向性を明示することができたものと考えている。

さらに、凹凸区画線をより現実なものにするための今後の課題について以下に示す。

(1) 雨天時における再帰反射のメカニズムについて研究し、雨天時でも視認性が十分確保される凹凸区画線を提案する必要がある。特に、雨天時における凸部の高さは大きな研究課題である。

(2) 凸部の耐久性や滑り抵抗について検討する必要がある。

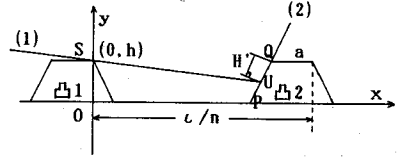
(3) 自動車が凸部を踏んだ場合の騒音、振動などについて検討する必要がある。

(4) 凹凸区画線の汚れが視認性低下とどのような関係にあるのか定量的な研究が必要である。

謝辞：本研究を進めるにあたって多くの人にお世話になり、謝意を表します。特に、広島工業大学門田博知教授には多くの示唆をいただいた。実験、データ整理においては、野浜慎介、前川拓也両君（研究時、広島大学工学部4年生）の労によるところが大きい。さらに、レフリーには適切なコメントをいただいた。

付録 前方の凸部の影が後方の凸部にかかる場合の再帰反射輝度の算出

いま、点Oを原点としたx-y座標を考える。凸1の



凸部の影が後方の凸部の傾斜面にかかる場合

S点を通る光軸は式(1),

$$y = -\frac{1}{\cot \delta} x + h \quad (1)$$

凸2の傾斜面は式(2)

$$y = \frac{1}{\cot \theta} \left(x - \frac{l}{n} + a + h \cot \theta \right) \quad (2)$$

で示される。光軸と傾斜面の交点Uのy座標vは、

$$v = h - \frac{l/n - a}{\cot \delta + \cot \theta} \quad (3)$$

で示される。UQの高さh'は

$$h' = \frac{l/n - a}{\cot \delta + \cot \theta} \quad (4)$$

と表される。結局、ドライバーから見える光の当たる傾斜面の長さd(UQ)は $d = h' / \sin \theta$ で示さる。ここで、反射幅H'とdとの関係は、

$$H' / d = \sin(\eta + \theta) \quad (5)$$

になるので、H'は、

$$H' = \frac{h' \sin(\eta + \theta)}{\sin \theta} \quad (6)$$

になる。したがって、図中の l/n から再帰反射する光量Lは、

$$L = E(a f_1 \sin \eta + H' f_2) \frac{n}{l \sin \eta} \quad (7)$$

である。ここで、式(7)に(4)、(6)のh'とH'を代入し、整理すると、

$$\begin{aligned} L &= E \left(a f_1 + \frac{l - n a}{n} \frac{\cot \eta + \cot \theta}{\cot \delta + \cot \theta} f_2 \right) \\ &\quad \cdot \sin \eta \cdot \frac{n}{l \sin \eta} \\ &= \frac{E n}{l} \left(a f_1 + \frac{(l - n a) \alpha}{n \beta} f_2 \right) \quad (8) \end{aligned}$$

になる。

参考文献

- 1) James Kalchbrenner: Large glass beads for pavement markings, Transportation Research Record 1230.
- 2) 河島正治: 路面表示—雨天(夜間)時に視認できる区画線の開発, 交通工学, Vol. 26, No. 4, pp. 3-6, 1991.
- 3) 今田寛典, 景山篤弘, 門田博知: 大粒径ガラスビーズ散布

- 区画線の特性について，土木学会第47回年次学術講演会講演概要集第4部，pp. 376-377，1992.
- 4) 今田寛典，門田博知，児島武男：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，土木学会論文集，IV-12/No. 413，pp. 39-47，1990.
- 5) 今田寛典，門田博知，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.
- 6) 安藤和彦，有岡孝：区画線の視認性に及ぼすガラスビーズ量の影響，第17回日本道路会議一般論文集，pp. 974-975，1987.
- 7) 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，IV-11/No. 407，pp. 97-106，1989.
- 8) 今田寛典，門田博知，児島武男，藤谷明文：溶融型トラフィックペイントを用いた区画線の薄膜化とその効果，高速道路と自動車，Vol. 36，No. 9，pp. 23-29，1993.
- (1995. 2. 13受付)

THEORETICAL STUDY ON EFFECTS OF CONVEXITIES PLACED ON THE SURFACE OF ROAD MARKING ON THE VISIBILITY

Hirofumi IMADA and Akifumi FUJIYA

In order to improve the visibility of road markings with convexities it is important to increase the reflected light from a part of slope of convexities and to decrease a part of shadow behind them. This study deals with investigating the principle of the retro-reflection from the markings with convexities. The obtained results are summarized as follows: firstly convexities do not always improve the visibility of the markings, secondly the shape of a convexity affects the retro-reflective luminance, thirdly the optimum interval among convexities depends on the visibility distance of drivers, and finally the retro-reflective luminance from the markings with randomly placed convexities in the range from about 70 to 80% of it with uniformly placed them.