

道路の平面線形と視距の関係に関する研究*

*A Study on Relationship between Horizontal Alignment and Sight Distance on Roadways**

大口敬**・富士田昌栄***・片倉正彦**・鹿田成則****

By Takashi OGUCHI**・Masateru FUJITA***・Masahiko KATAKURA****・Shigenori SHIKATA****

1. はじめに

道路の平面線形の緩和曲線に関しては、「道路で直線部から円曲線、又は大円部から小円部に円滑に自動車が走行していくためには、緩和曲線を設ける必要がある」¹⁾とされる。しかし、緩和曲線長は、調和の取れた視覚的にも滑らかな曲線となるような経験則²⁾などにより設計されているのが実状である。

より合理的な道路線形の設計基準確立のためには、「運転者－車両－道路」という「マン－マシン－環境系」に関する分析・研究が必要である。ここで運転者が道路環境から得る知識のほとんどが目からの情報と考えられることから、視覚情報の認知特性と、これにもとづく判断・挙動動作の解明が重要となる。

道路上で直線部から曲線部に進入する場合、その線形の変化を運転者は目でとらえてステアリングを操作する。運転者は、直線部ではステアリングを直進に保ち、緩和曲線部ではある一定の角速度でステアリングを回転操作し、円曲線部では一定角度でステアリングを維持しながら走行する。しかし道路上の線形の変化を運転者が目的的確に捉えられなければ、適切なステアリング操作ができず、最悪の場合重大な事故につながるものと考えられる。

本研究では、「視距」が運転者による視覚情報の取得可能な道路平面上の範囲であることから、任意の地点の視距を算定できるアルゴリズムを作成して、平面線形条件と視距との関係を分析する。特に緩和曲線長と視距の関係を分析し、新たな緩和曲線長の設定の考え方の基礎となる知見を示す。

2. 視距の算出方法

制動停止視距と道路線形の関係については Olson ら³⁾による研究があるが、縦断線形(縦断勾配区間と縦断曲線区間)の場合と、平面線形の円曲線区間と円と直線が接続する区間の場合、という解析的に解ける場合しか分析されておらず、平面緩和曲線のクロソイド曲線については定量化されていない。

本研究では、クロソイド区間も含む道路上の任意点における視距を算出し、その空間的な変化特性や特定の条件を満たす線形条件などを分析する。そのために、道路環境を簡略にモデル化する。

(1) 道路構造と視距のモデル化

本研究における平面線形と視距のモデル化は、大口ら⁴⁾によるものをベースとして、計算の便宜上さらに単純化したものを用いている。本研究では、道路線形として平面線形に焦点を絞り、縦断線形は考慮しない。平面線形条件と単純な側方余裕条件が視距に与える影響を分析する。視界を遮断するものは側方条件の側壁のみとし、側壁の上を越えて見通すことはできない(側壁の高さを無限大とする)ものとする。この状態を図-1に示す。

(2) 平面線形要素

平面線形要素は、「直線」、「円」、「クロソイド曲線」からなる。

区間長: L の直線区間は、始点を原点とし、 $(x, y) = (x, 0)$ (但し、 $0 \leq x \leq L$) で表現される。

半径: R 、区間長: L の円弧区間は、始点を原点とし、原点における接線方向を x 軸、原点から円の中心へ向けて y 軸をとって、 $(x, y) = (R \sin \theta, R(1 - \cos \theta))$ (但し、 $0 \leq \theta \leq L/R$) で表現される。ここに θ は、原点位置からの回転角で車両の転向角度と等しい。

*キーワード: 道路計画, 交通流, 交通安全, 交通容量

** 正会員 博(工) 東京都立大学大学院工学部助教授

(192-03 八王子市南大沢1-1, TEL:0426-77-1111(代), FAX:0426-77-2772)

*** 学生会員 東京都立大学大学院工学部助教授(同上)

**** 正会員 工博 東京都立大学大学院工学部助教授(同上)

***** 正会員 工修 東京都立大学大学院工学部助教授(同上)

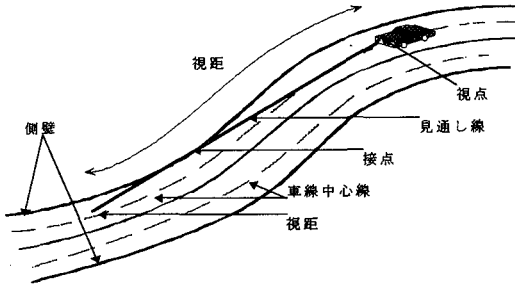


図-1 平面線形条件と視距

クロソイド曲線は、曲率0となる点を原点とし、その接線方向に x 軸、 x 軸方向と直交しクロソイドの曲率中心のある側を y 軸の正方向にとると、クロソイドパラメータを A として、次式で表される。

$$x = \frac{A}{\sqrt{2}} \int_0^{\tau} \frac{\cos \tau}{\sqrt{\tau}} d\tau, \quad y = \frac{A}{\sqrt{2}} \int_0^{\tau} \frac{\sin \tau}{\sqrt{\tau}} d\tau \quad (1)$$

ここで接線角： τ は、クロソイド曲線上の点 (x, y) における接線と x 軸のなす角度であり、車両の転向角度に等しい。また原点からの曲線長： l とその地点の曲率： r 、 A 及び τ には以下の関係がある。

$$r l = A^2 ; l^2 = 2 A^2 \tau \quad (2)$$

運転者の視点は車線中心線上にあるものとし、視距は車線中心線上の道のり距離として求める。クロソイド曲線は本来道路の測線のなす形状であるが、ここでは便宜上車線中心線をクロソイド曲線とし、視距を決定づける側壁をその平行線（「クロソイド平行曲線」⁵⁾）とする。

(3) 座標変換

図-1 に示すように、運転者の「視点」、見通し線と側壁の「接点」、及び見通し線と車線中心線との「交点」、以上3点の位置が特定されれば視距は計算できる。これらの3点が全て同一の平面線形要素内にある場合には、同一の座標系上で計算できるが、一般には2つ以上の平面線形要素にまたがって存在する。この場合、各平面線形要素を表現する座標系上に各点を変換する必要がある。

表-1 は、各平面線形要素同士の接続関係を整理したものである。表では車両の進行方向手前側の線形要素を縦に、接続する奥側の線形要素を横に示す。設計の基本原則と照らし合わせて接続できる関係を○、条件付きで接続可能な関係を△、接続できない関係を×で示す。ここで曲率増加クロソイド曲線と

表-1 平面線形要素の接続条件

奥側区間 手前側区間	直線	同方向屈曲部				逆方向屈曲部	
		円弧	クロソイド		円弧	クロソイド	
			曲率増加	曲率減少		曲率増加	曲率減少
直線	—	△	○	○	←	←	←
円弧	△	△	○	○	△	×	×
クロソイド	曲率増加	×	○※	×	×	×	×
	曲率減少	○	○	×	△	○	×

は、車両進行方向へ進むにつれて曲率が増加する曲線、曲率減少クロソイド曲線とは逆に車両の進行に伴い曲率が減少する曲線を意味する。

表-1 の○と△の全ての場合について座標変換公式が必要となる。一般にこの座標変換は平行移動変換と回転変換の合成変換であり、手前側区間の座標系 (x, y) で示される点を奥側区間の座標系 (X, Y) へ座標変換する場合、次式のようになる。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_x & 0 \\ 0 & \delta_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_e \\ y_e \end{pmatrix} \quad (3)$$

α は回転角度、 (x_e, y_e) は手前側区間の終点を手前側区間の座標系で表したものである。 δ_x は手前側又は奥側一方だけに曲率減少クロソイド曲線がある場合に-1、その他の場合には1を取る。 δ_y は手前側と奥側の屈曲方向が異なる場合に-1（但し奥側が直線の場合はもう一つ奥側の平面線形要素の屈曲方向で考える）、その他の場合には1を取る。

例として表-1 に※で示すクロソイド曲線（区間長： L_l ）から円弧へ接続する場合を考えると、 α は式(2)の l を L_l とおいた τ に等しく $\alpha = L_l^2 / (2A^2)$ となる。また (x_e, y_e) は $\tau = \alpha$ を式(1)に代入した場合の (x, y) の値となり、 $\delta_x = 1$ 、 $\delta_y = 1$ となる。

(4) 視距算出アルゴリズム

平面線形が直線・円曲線のみから成る場合は、見通し線と側壁との接点、見通し線と車線中心線との交点を解析的に代数式として解くことができ、これを用いて視距が算出できる。しかしクロソイド曲線上に接点又は交点が存在する場合は、これらの点の座標を解析的に陽に解くことができない。そこでコンピュータアルゴリズムを用いて接点、交点を探

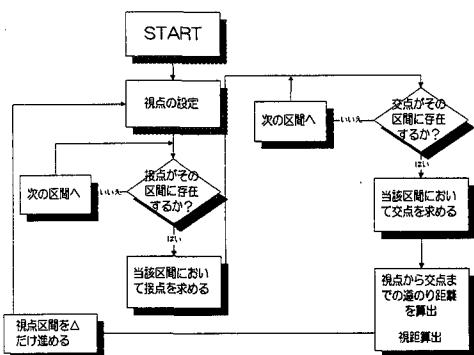


図-2 アルゴリズム

索し、視距を算出する⁶⁾。図-2はアルゴリズムの概略のフローチャートを示す。

一つの平面線形要素区間に接点が存在するかどうかの判定は次のようにして行う。当該区間の始点を $S = (x_s, y_s)$ 、終点を $E = (x_e, y_e)$ 、運転者の視点を $V = (x_v, y_v)$ とする。ベクトル $\vec{VS}$ の傾き: $t_v^s = (y_s - y_v) / (x_s - x_v)$ 、点 S における接線の傾き: t_i^s として、 $t_d^s = t_v^s - t_i^s$ を求める。またベクトル $\vec{VE}$ の傾き: $t_v^e = (y_e - y_v) / (x_e - x_v)$ 、点 E における接線の傾き: t_i^e として、 $t_d^e = t_v^e - t_i^e$ を求める。 t_d^s と t_d^e の符号が異なれば、求めたい接点はこの区間に存在し、区間縮小法⁷⁾による探索により接点が求まる。 t_d^s と t_d^e の符号が一致する場合には、接点は当該区間には無く、次の平面線形要素区間へ探索を進め、座標変換を行う。

交点の有無については、当該区間座標系で視点と接点を結ぶ直線の方程式: $f(x) = 0$ を立て、区間始点の $f(x)$ 値と区間終点の $f(x)$ 値に中間値の定理をあてはめて判定できる。交点が直線区間にある場合には直接座標が算定できるが、それ以外は接点の場合と同様の探索により求められる。

視距は、視点から交点までの道のり距離として算定される。

3. 視距図の例による分析

横軸に道路道のり方向の視点の位置、縦軸にその視距をとったものを、「線形図」に倣って「視距図」と呼ぶことにする。視距図は視点の横断方向の位置や車両の進行方向によって異なる⁶⁾。ここで道路横断面は、片側2車線の第1種第1級の高速自動車道を想定し、片勾配、排水勾配及び車線の拡幅は無

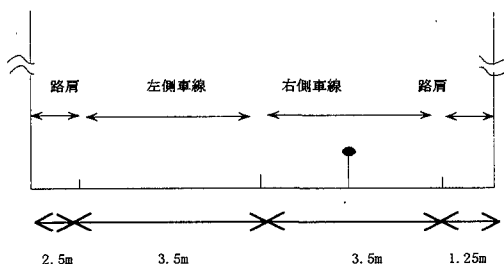


図-3 道路横断面図

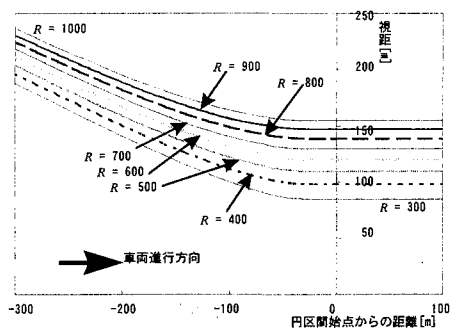


図-4 右カーブ円半径[m]別の視距の変化特性

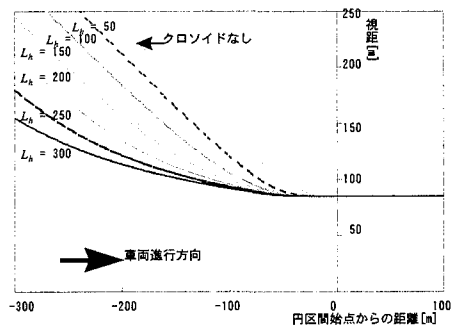


図-5 左カーブ円緩和曲線長[m]別の視距の変化特性

く、車両は右側車線を走行するものとする。図-3はこの設定条件を示す。視距には、直線から円区間に入る際には緩やかに減少し、出口付近で急激に増加する、という特徴がある⁶⁾。

図-4は、直線区間から右カーブの円区間に直接接続する場合について、円半径別に視距図を示す。円区間で実現する視距の最小値は、簡単な方程式を解けば求まる⁴⁾。直線区間における視距はこの最小値よりも大きな値となるが、円区間始点の直前では変化が少なくなり、円半径が大きいほどその部分は長くなる。 $R=1,000$ [m]の時の最小視距は155 [m]となるが、

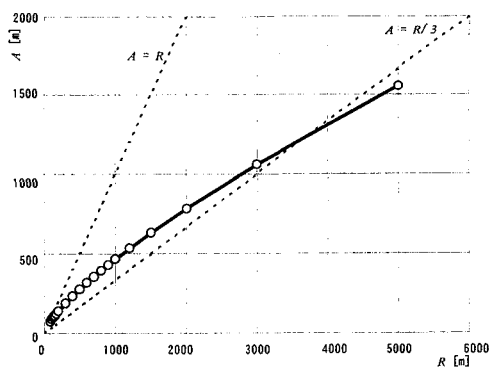


図-6 緩和区間始点で円半径が認識できる A と R の関係

これは $R=500$ [m] では円区間始点の約 100 [m] よりも手前区間でしか実現しない視距となっている。

図-5 は、直線区間と左カーブ円区間 ($R=300$ [m]) の間にクロソイド曲線を入れた場合について、緩和区間長: L_v [m] 別に視距図を示す。図-4 の場合と比較して、同じ $R=300$ [m] でクロソイドなしの場合、右カーブと左カーブではかなり様子が異なることがわかる。また緩和区間長が長く、クロソイドパラメータ: A が大きいほど、視距はより手前の位置から低い値を示す傾向があることがわかる。

4. 緩和曲線長と視距の関係

運転者は、視距の範囲内に見えている平面線形の形状より前方のカーブを認識してステアリングを切る。カーブ手前でそのカーブの円半径が認識できなければ、カーブに入った後も、運転者はどこまでステアリングを切るべきか分からぬまま、ステアリングを切り続けることになる。このようにステアリングの最大切れ角を分からぬままステアリング操作し続けることは、速度調節についても誤操作などの悪影響を与える可能性が想像される。

そこで円半径に応じて、円区間の手前の直線区間との間に適切な長さの緩和区間を挿入して、緩和区間始点において円区間の始点まで見通せる、すなわち緩和区間始点における視距が緩和区間長と一致するようなクロソイドパラメータを求めてみる。

図-6 は、横軸に円半径、縦軸にクロソイドパラメータ: A を取って、視距が緩和区間長と一致する点を太線で結んで示す。太線よりも右下の領域では、

緩和区間始点から円半径が認識できず、逆に左上の領域ではさらに上流の直線区間からも円半径が認識できることになる。

一方、これまで半径: R [m] の円区間の前後のクロソイドパラメータ: A [m] は、次の範囲内が良いとされてきた²⁾。

$$R \geq A \geq R/3 \quad (5)$$

この不等式の範囲についても点線で図-6 に示す。図より、ごく小さな半径では、 R より大きな A を取らないと緩和区間始点から円半径が認識できないこと、逆に $R > 3,500$ [m] 程度の大きな円半径では、 $R/3$ よりも小さな A をとつても緩和区間始点から円半径が認識できる可能性があること、などがわかる。

5. まとめ

本報告では、緩和区間も含めた任意の点で視距を計算できるアルゴリズムを作成し、平面線形条件と視距の関係を分析した。特に視距と関連づけて緩和曲線長の設計基準に関連する新たな知見を得た。今後は、縦断線形も含めた道路線形と視距の関係を理論・実証面より検討するとともに、視覚環境との関連のもとで、運転挙動、実勢速度、事故率、単路部ボトルネック現象などを分析したいと考えている。

参考文献

- 1) 道路構造令の解説と運用, 日本道路協会, pp. 226, 1983.
- 2) 同上, pp. 235.
- 3) Olson, P. L., Cleveland, D. E., Fancher, P. S., Kostyniuk, L. P. and Schneider, L. W.: Parameters Affecting Stopping Sight Distance, NCHRP Report, No. 270, TRB, 1984.
- 4) 大口敬, 片倉正彦, 鹿田成則: 道路線形と見通し視距の関係に関する考察, 土木計画学研究・講演集, No. 19(2), pp. 585-588, 1996.
- 5) 佐藤信武: 実用クロソイド曲線の設計と計算例, 現代理工学出版, pp. 112-118, 1984.
- 6) 富士田昌栄, 大口敬, 片倉正彦, 鹿田成則: 道路線形を用いた視距図作成アルゴリズムの開発, 第52回土木学会年次学術講演会講演概要集, 1997 (投稿中)。
- 7) 堀洋一: 直線探索付き最大傾斜法による最適化問題の数値計算プログラム, OHM, pp. 77-80, 1986.