

系統信号区間における車群 と遅れ時間に関する一考察

A Consideration on Platoon patterns and Delay Functions
of the Synchronized Traffic Signal Systems

久井 守 *

By Mamoru HISAI

Delay functions are required to obtain the delay-minimizing offsets of the synchronized traffic signal systems. This paper describes the features of delay functions resulting from various platoon models and observed platoons. It is found that the delay function for a link in arterial roads is affected by platoon pattern, distance between signals and cycle length, and that minimal values of delay are at the points where offsets are 0 or 0.5, or are at both of them. If platoons contain two or more peaks, the delay functions become more complicated.

1. まえがき

遅れ時間最小化を基準とした交通信号系のオフセット最適化では、まず遅れ時間とオフセットの間の関数について検討することが必要である。遅れ時間については従来多くの検討がなされているが、ここでは主に1つの信号区間に着目して、従来の研究成果もふまえながら遅れ時間とオフセットの間の関数関係について検討し、オフセット最適化のための基礎的資料を得ることを目的とする。

信号交差点における交通流の遅れ時間は、交差点に到着する車群のパターンに関係し、また信号区間における上下両方向交通の合計遅れ時間の関数形は信号区間距離と信号周期にも大きく関係すると考えられる。したがって、遅れ時間に及ぼすこれらの諸要素の影響をみるため、いくつかの車群モデルを用い

て多くのケースについて遅れ時間を求め、また一部実測車群について遅れ時間を求め、これらの結果から遅れ時間の関数形の特徴について検討する。

2. 飽和矩形波モデル

まず飽和矩形波モデルによって遅れ時間を求める。飽和矩形波モデルは車群を図-1(a)に示すような

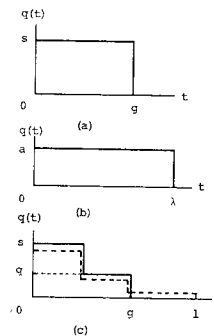


図-1 車群モデル

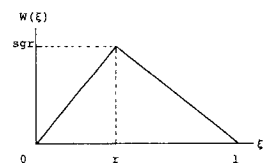


図-2 拡散のない飽和矩形波の遅れ時間

*正会員 工博 山口大学講師 工学部土木工学科
(〒755 宇部市常盤台 2557)

矩形波で表わした車群モデルである。図の縦軸は交通量（台／s）、 s は飽和流量（台／s）、 g は青時間（対周期比）である。このモデルは解析的取扱いが可能なほとんど唯一のモデルである。飽和矩形波モデルの遅れ時間はすでに猪瀬らによって求められているが¹⁾、それを一部修正して表わしたのが図-2である。図の縦軸は1交差点の遅れ時間、横軸の ξ は車群後端が交差点に到着した時点から青終了時点までの時間（対周期比）、 τ は信号の赤時間（対周期比）である。遅れ時間 $W(\xi)$ は ξ の関数であり、交差点の待ち台数 $q_1(t, \xi)$ を積分したものになり、図-3の場合では台形の面積となる。

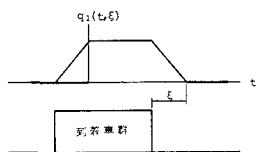


図-3 遅れ時間の計算法

結局、1交差点の遅れ時間は ξ の関数としてつぎのようになる。

$$0 \leq \xi \leq \tau \text{ のとき } W(\xi) = sg\xi \quad (1)$$

$$\tau \leq \xi \leq 1 \text{ のとき } W(\xi) = sr(1-\xi) \quad (2)$$

いまオフセットを x とすると、図-4より

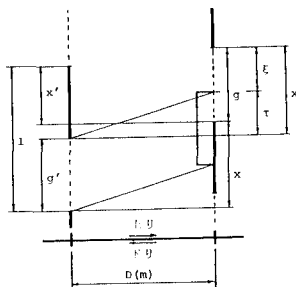


図-4 相対オフセットの定義

$$x = \xi + \tau \pmod{1} \quad (3)$$

となる。ここに τ は信号区間の時間距離である。すなわち、区間距離 $D(m)$ の走行所要時間を信号周期 $T(s)$ で規準化したものであり、

$$\tau = D/Tv \quad (4)$$

となる。ここに v は走行速度（m/s）である。上り方向の x 、 ξ 、 W に対して、下り方向についても同様に x' 、 ξ' 、 W' を定義すると、図-4より $x + x' = 1$ であるから

$$\xi' = 1 - 2\tau - \xi \quad (5)$$

が得られる。信号区間の上下両方向の合計遅れ時間

を $W_T(\xi)$ とすると

$$W_T(\xi) = W(\xi) + W'(1 - 2\tau - \xi) \quad (6)$$

となる。この W_T を最大にする最適オフセット x^* は猪瀬らによって図-5のように求められている²⁾

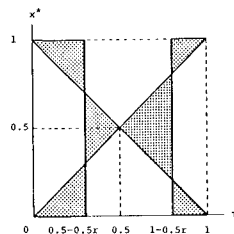


図-5 飽和モデルによる最適オフセット

この図は τ の値すなわち信号区間距離によって最適オフセットが異なることを示している。

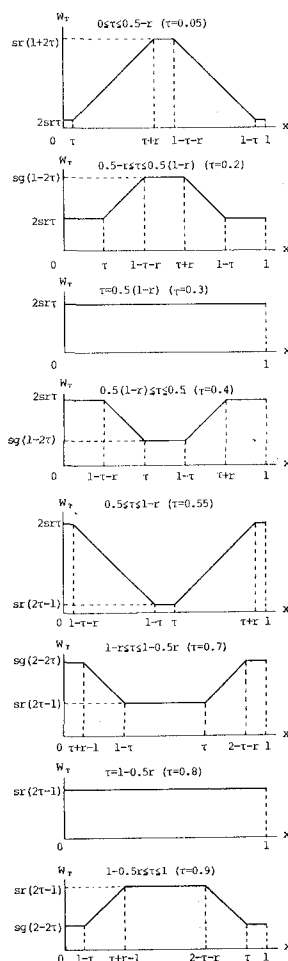


図-6 飽和モデルの遅れ時間

そこで τ のいろいろな値に対して遅れ時間 $W_1(x)$ を求め、その関数形が τ とともにどのように変化するかを示したのが図-6である。これは式(6)に従って図-2の遅れ時間を重ね合わせて求めたものである。この図-6から、遅れ時間の極小点は τ の増加とともにグラフのx軸の両端→中央→両端と変化していることがわかる。すなわち τ が0か1に近い場合、最適オフセット x^* は0または1の近傍にあり、 τ が0.5に近い場合、 x^* は0.5付近にあることを示している。

飽和矩形波モデルによる遅れ最小化オフセットとスルーバンド法による平等オフセットを比較するため、2信号間の平等オフセットを図-7に示す。これを図-5と比較すると、飽和矩形波モデルによる遅れ最小化オフセットは、 $r=0.5$ のとき、スルーバンド法による平等オフセットを完全に包含していることがわかる。すなわち2信号間の平等オフセットは飽和矩形波モデルによる遅れ最小化オフセットでもあることを示している。なお参考のために図-8に2信号間の平等オフセットによるスルーバンドの例を示す。

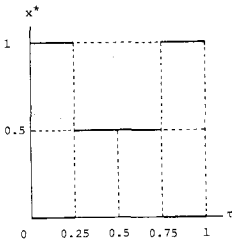


図-7 平等オフセット

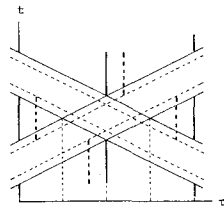


図-8 スルーバンド

つぎに拡散を考慮した飽和矩形波モデル(図-1(b))について考える。図中の λ は車群長さ(対周期比)、 a (台/s)は車群内のフローレートである。拡散を考慮しているので $\lambda > g$ 、 $a < s$ であり、また飽和流であるから $a\lambda = sg$ と考える。この場合の遅れ時間は図-9のようになる。

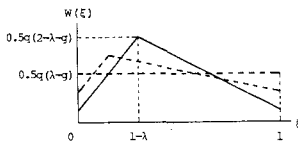


図-9 拡散のある飽和矩形波の遅れ時間

$0 \leq \xi \leq 1 - \lambda$ のとき

$$W(\xi) = q\xi + 0.5q(\lambda - g) \quad (7)$$

$1 - \lambda \leq \xi \leq 1$ のとき

$$W(\xi) = -a(1 - \lambda)\xi + a - 0.5q(2 - \lambda + g) \quad (8)$$

この場合、上下両方向の合計遅れ時間を最小にするオフセット、および遅れ時間とオフセットの関数関係はそれぞれ図-5および図-6とほぼ同じ傾向を示す。

3. 拡散を考慮した不飽和矩形波モデル

図-1(b)と同様の車群パターンであるが、不飽和モデルでは $a\lambda < sg$ である。この場合の遅れ時間は4通り求められるが³⁾、 $\lambda > g$ 、 $\varphi \leq r$ の場合の例を図-10に示す。図中の $W_1 \sim W_5$ はつぎのとおりである。

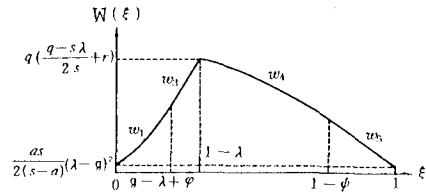


図-10 不飽和矩形波の遅れ時間

$$W_1(\xi) = 0.5as(\xi + \lambda - g)^2 / (s - a)$$

$$W_3(\xi) = q(\xi - g) + 0.5q(s\lambda + q)/s$$

$$W_4(\xi) = 0.5a(-s - a)\xi^2 + 2(sg - a)\xi + sr - sg + a / s$$

$$W_5(\xi) = (a - q)(1 - \xi) + 0.5as(\lambda - g)^2 / (s - a)$$

ここに φ は図-11に示すように、到着車群と発進車

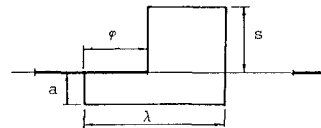


図-11 φ の定義

群の後端が一致するという条件下で、到着車群の前端が赤時間にかかる量である。遅れ時間が図-10で示される関数の場合、最適オフセットについてはすでに図-12に示すように得られている³⁾。この図か

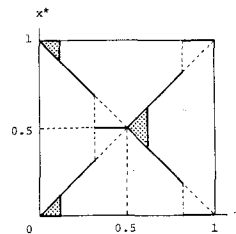


図-12 不飽和モデルによる最適オフセット

ら最適オフセットは平等オフセット、上り優先オフセット ($x^* = \tau$) あるいは下り優先オフセット ($x^* = 1 - \tau$) のいずれかとなっており、平等オフセットあるいは優先オフセットがつねに最適であるということにはならず、飽和矩形波モデルの場合 (図-5) とは異なり、最適オフセットの範囲が狭くなっている。

不飽和矩形波モデルでは、上下両方向の合計遅れ時間とオフセットとの関係を解析的に求めるのはやや困難であるので数値計算によって遅れ時間を求めたのが図-13である。この図は τ の増加とともに遅

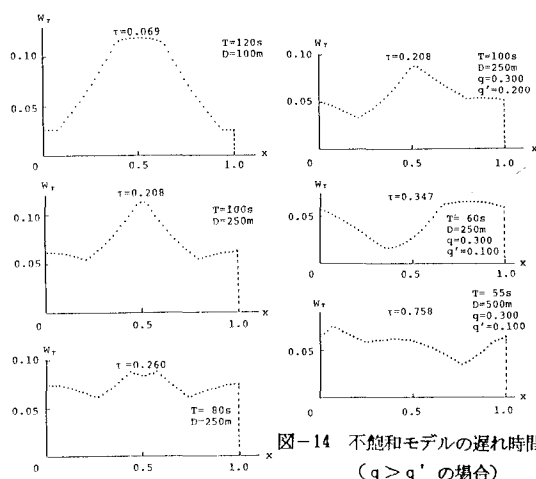


図-14 不飽和モデルの遅れ時間
($q > q'$ の場合)

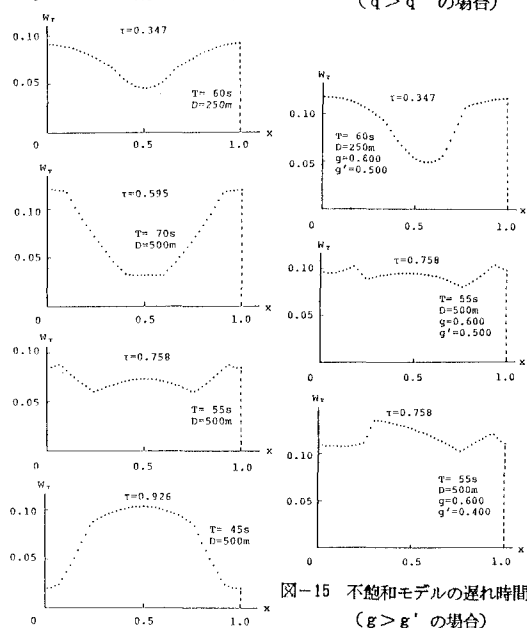


図-15 不飽和モデルの遅れ時間
($g > g'$ の場合)

図-13 不飽和モデルの遅れ時間
($q = q'$ の場合)

れ時間の関数形がどのように変化するかを示しているが、必ずしも飽和矩形波モデルの遅れ時間と同様ではない。また図-14は上り交通量 q (台/s) と下り交通量 q' (台/s) が異なる場合、図-15は上り側信号の青信号 g と下り側信号の青信号 g' が異なる場合について遅れ時間の関数形を示したものである。この場合、遅れ時間の関数は $x=0.5$ の軸に対して左右対称とはならず、交通量の多い方向、あるいは青時間の小さい方向を優先するオフセットにおいて遅れ時間が小さくなる傾向を示している。

4. 階段波モデル

階段波モデルは、図-1(c) に示すように交差点発進時の車群が青開始後に飽和流量、その後は平均交通量となるモデルである。右左折で交差道路への流出入がある場合は図-1(c) の破線のような3段のパターンになると考えたモデルである。

このモデルを用いた場合は解析的取扱いがさらに困難となるので、やはり数値計算によって、上下両方向の合計遅れ時間とオフセットの関数関係を求め

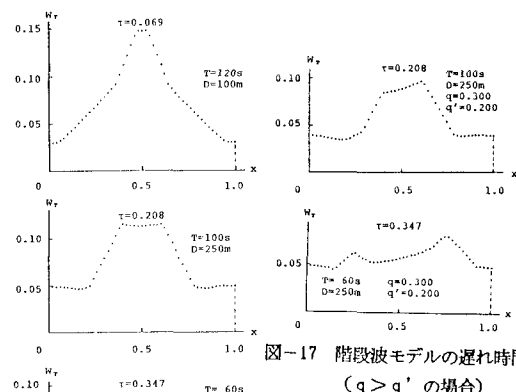


図-17 階段波モデルの遅れ時間
($q > q'$ の場合)

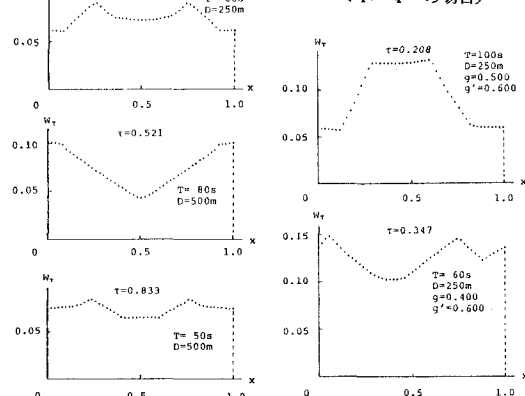


図-16 階段波モデルの遅れ時間
($q = q'$ の場合)

図-18 階段波モデルの遅れ時間
($g < g'$ の場合)

る。求めた遅れ時間を図-16に示す。この図は、不飽和矩形波モデルの場合と同様に τ の増加とともに遅れ時間の関数形がどのように変化するかを示しているが、不飽和矩形波モデルの場合とほぼ同様な変化を示している。図-17には上り下りの交通量が異なる場合の遅れ時間関数を、図-18には両端信号の青信号が異なる場合の遅れ時間をそれぞれ示しているが、この両図から、やはり交通量の多い方向または青信号の小さい方向のオフセットを優先するオフセットが有利になるように関数形がそれぞれ変形していることがわかる。

5. TRANSYT 交通流モデル⁴⁾

(1) 2信号間の遅れ時間

TRANSYT 交通流モデルは1周期を50の時間間隔に分割し、その時間間隔ごとのフローレートをヒストグラムで表わした交通流モデルであり、交通流のランダム性を考慮していないものの、実際の交通現象をかなりうまく表現できるモデルであると考えられる。このモデルは一種の交通流シミュレーションで、解析的な取扱いはまったく不可能であるが、上流信号の影響や車群の変形拡散を扱うことができる。TRANSYT 交通流モデルによる車群の拡散変形の例と遅れ時間の計算法を図-19に示す。

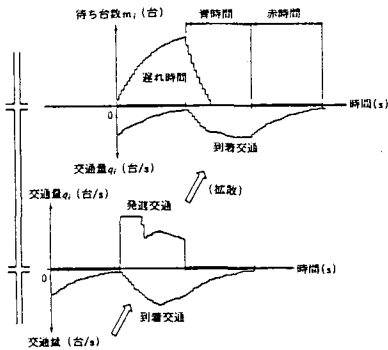


図-19 TRANSYT モデル

このTRANSYT モデルで2信号間の遅れ時間を求めたのが図-20である。この図は上下方向の交通量が等しい場合で、 $x=0.5$ を軸として左右対象の図になっている。また τ が小さい場合は $x=0$ または1の付近で遅れ時間が極小となり、 τ が0.5に近づくと $x=0.5$ で遅れ時間が極小となるのに対して、 $\tau=0.3$ 前後では $x=0.5$ および0（または1）付近の2点で遅れ時間が極小になるという結果となっている。

図-21は上下両方向の交通量が異なる場合、および両端信号の青時間が異なる場合の遅れ時間関数の変化の様子を示したものであるが、この条件の場合では対称性がなくなり、交通量の多い方向または青時間の小さい方向にオフセットが有利になるように極小点が移動していることがわかる。

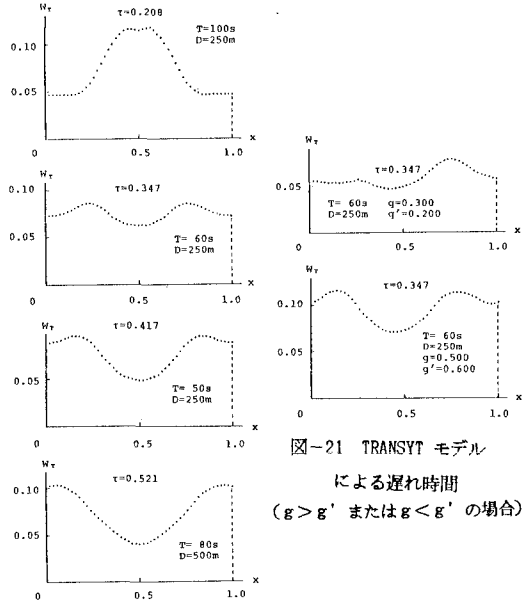


図-21 TRANSYT モデルによる遅れ時間
($g > g'$ または $g < g'$ の場合)

図-20 TRANSYT モデルによる遅れ時間
($q = q'$ の場合)

(2) 上流区間のオフセットの影響

つぎに上流区間のオフセットが下流区間の遅れ時間にどのように影響するかについてみてみる。いま図-22に示すような3信号2区間からなる道路につ

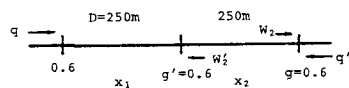


図-22 道路1

いて、第1区間のオフセット $x_1=0.4$ および $x_1=0.8$ のそれぞれの場合について、第2区間の遅れ時間 $W_1=W_2+W_2$ を図示すると図-23のようになる。

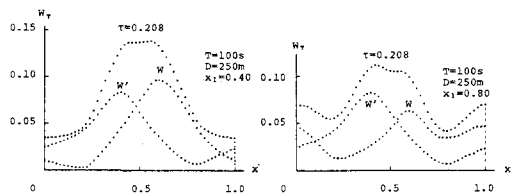


図-23 上流オフセットの影響 (道路1)

x_1 の値によって、第2区間の上り方向車群の遅れ時間の関数が大きく変化していることがわかる。これは上り方向の発進車群パターンが、第2区間のオフセット x_1 によって大きく変化しているためである。

つぎに図-24に示す5信号4区間の道路について

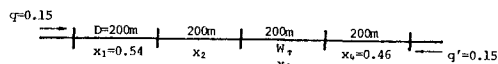


図-24 道路2

第2区間のオフセット $x_2=0$ および $x_2=0.8$ の場合のそれぞれについて第3区間の遅れ時間関数をみたのが図-25である。 $x_2=0$ の場合の遅れ時間 W_T に

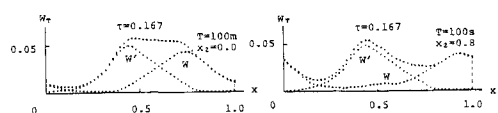


図-25 上流オフセットの影響 (道路2)

比べて $x_2=0.8$ の場合の遅れ時間 W_T は極大極小がおおのこの2点ずつあり複雑な関数形となっているが、これは $x_2=0.8$ の場合は、第3区間の上り方向発進交通パターンが2つの車群に分断されているためである。

つぎに図-26の道路交通条件について第3区間の

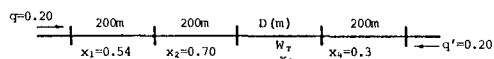


図-26 道路3

リンク長 $D=200m$ および $D=350m$ の2通りの場合について第3区間の遅れ時間関数をそれぞれプロットしたのが図-27である。 $D=350m$ の場合の遅れ時間

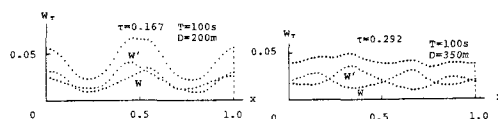


図-27 上流オフセットの影響 (道路3)

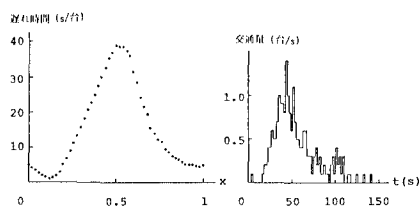
は明瞭な極大極小がもはやみられない関数形となっている。この場合の第3区間の発進交通パターンは上下両方向とも車群がそれぞれ2つずつある場合であり、このように車群の数が増えると遅れ関数が複雑な多峰性の関数となり、オフセットの最適化がきわめて困難になると考えられる。

6. 実測車群の遅れ時間

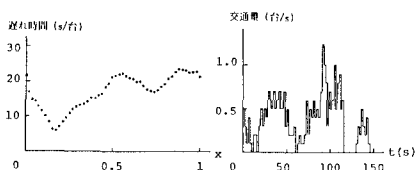
交差点下流部で車頭時間観測を行ない、得られた

車頭時間データについて遅れ時間を計算すれば、実際の車群の遅れ時間が求められることになる。すなわち、交差点下流 $D(m)$ の地点で車群の観測を行なった場合には、この地点に仮想信号交差点があると考えて遅れ時間を計算するのである。

徳山市の周南バイパス(国道2号)の楠町交差点上り方向交通、同じく国道188号遠石一丁目交差点下り方向交通の車群を実測し、この車群について遅れ時間を求めた。その結果を図-28に示す。この図では車群パターンと遅れ時間を示している。車群のピークが1つの場合には遅れ時間の極大極小もそれぞれ1つ、車群のピークが2つの場合は極大極小もそれぞれ2つとなり複雑な関数形となっていることがわかる。なお、両交差点の交通調査日時と条件はつぎのとおりである。



(a) 楠町交差点



(b) 遠石一丁目交差点

図-28 実測車群の遅れ時間

楠町：昭和58年10月12日(水) 晴 13:40 ~

250m地点、 $T=142s$ 、青時間=90s

遠石一丁目：昭和58年10月15日(火) 晴 9:45 ~

240m地点、 $T=145s$ 、青時間=87s

観測データは信号5周期分のみを集計して図示し、またこれを遅れ時間の計算に用いた。

7. まとめ

本研究ではいくつかの車群モデルと、一部実測車群データを用いて、遅れ時間の計算を数多く行ない

それらの結果から、1つの信号区間の遅れ時間とその区間の相対オフセットとの関数関係の特徴について検討を行なった。その結果つぎの点が明らかになった。

(1) 車群のピークが1つの場合は一方向の遅れ時間の極大極小はそれぞれ1つとなる。

(2) 1つの信号区間の上下両方向交通の合計遅れ時間の関数形は信号区間の時間距離 τ によって変化する。

(3) 上流信号の影響を考慮せず、上下両方向とも単一車群で、かつ上下両方向の交通条件、信号条件が等しい場合は、遅れ時間はオフセット $x=0.5$ の軸に対して左右対称となる。

(4) このとき τ が0または1に近い値をとるとき、遅れ時間はオフセット $x=0$ または $x=1$ の近傍で極小となる。また τ が0.5前後の値をとるときは、 $x=0.5$ の近傍で遅れ時間が極小となる。

(5) 片方向交通の遅れ時間が単峰性の凸関数であっても、上下両方向の合計遅れ時間は必ずしも凸とはならず、 $\tau=0.2\sim 0.3$ および $\tau=0.7\sim 0.8$ のとき、 $x=0.5$ および0 (または1) の付近で極小値となる場合がある。

(6) 上下両方向の交通量や、両端信号の青時間が異なる場合は、遅れ時間関数の左右対称性はくずれ、交通量の多い方向または青時間の長い方向を

優先するオフセットの位置に極小点が移動する傾向がある。

(7) 上流信号区間の影響を考慮した場合には、一般に遅れ時間関数の対称性はなくなる。

(8) 上流信号区間のオフセットの影響で当該信号区間に流入する車群が2つに分割される場合は遅れ時間は複雑な関数形になる。特に上下両方向の車群がともに2つになる場合、上下両方向の合計遅れ時間は多峰性の関数となり、また、はなはだしい場合には極大極小がまったく不明瞭な関数形になる場合がある。

参考文献

- 1) 猪瀬・藤崎・浜田：一連の交差点における交通流の待合せおよび信号機制御、総合試験所年報、第24年、第1号、pp.9~17、1965年
- 2) 猪瀬・藤崎・浜田：巨視的交通流モデルに基づく道路交通制御の理論、電気学会雑誌、Vol.87-8、No.947、pp.153~162、1967年
- 3) 枝村・久井：系統式信号制御パラメーターに関する一考察、交通工学、Vol.5、No.5、pp.24~33、1970年
- 4) D.I.Robertson :TRANSYT :A Traffic Network Study Tool, RRL Report LR253, 1969年