【土木計画学研究・講演集 No.11 1988年11月】

飽和方形波モデルによる車群分割・二信号交差点連続停止と交通信号オフセットの関連解析

A STUDY ON THE EFFECTS OF TRAFFIC SIGNAL OFFSETS ON PLATOON DIVISION AND CONTINUOUS STOPS USING SINGLE SATURATED RECTANGULAR WAVE MODEL

中村英樹*・越正毅**
by Hideki NAKAMURA and Masaki KOSHI

Generally, delay or number of stops are adopted as criteria for traffic signal coordination. However, not only these aspects but traffic safety and drivers' mentality should be also taken into consideration. In this study, platoon division and continuous stops at adjacent signalized intersections reflect such aspects. Relationships between these criteria and traffic signal offsets are analyzed, applying single saturated rectangular wave model. As a result, although the possibility of avoiding platoon division without sacrificing delay or number of stops is denied, it is proved that complete elimination of continuous stops is possible only by applying preferential offsets in turn to opposing directions of adjacent links.

Keywords : platoon division, continuous stops, single saturated rectangular wave model

1. まえがき

従来から、交通信号系統制御の一般的な目的は、主として遅れや停止回数等に代表される経済効果の追求にあった。国際的に見ても、評価基準としては遅れと停止回数が主として採用されている。しかしながら、交通公害や交通事故の抑制やドライバーの心理的側面についても考慮することが課題となっている。

そこで本研究では、次の二点について考える。

(1) 信号交差点における到着車群の分割

これは上流交差点をある青現示内に一群となって発進、あるいは通過した車群が、その下流に隣接する交差点において主としてオフセットの設定が早過ぎるために、前部は通過できるが後部は赤信号にかかって停止を余儀なくされ、二つに分割されることを示すものである。これは特にドライバーの心理的側面に対する効果を考えるものであると同時に、速度超過や交通事故等に対しても間接的に関連する。車群の定義のしかたや、車群のどの部分で分割されたかということによっても評価は変化するものと考えられ、さらに全車が赤信号で停止した場合においても車群の分割は生じないことなどから、経済的便益との兼ねあいも難しいものである。

(2) 同一車両の二信号交差点連続停止

信号系統制御される街路区間において、隣接する二交差点において車が連続して停止することを示すものであり、停止した時間や区間全体での停止回数を問題としない点が、遅れなどとは根本的に異なっている。特に信号間隔が短い場合に、ドライバーは連続して停止することを嫌う傾向があるため、これが心理的側面を代表する評価基準のひとつとして考えられるものである。

これらの制御目的の実現手段は、主としてオフセット

* 学生会員 工修 東京大学大学院 工学系研究科
(〒113 文京区本郷7-3-1)
** 正会員 工博 東京大学生産技術研究所教授
(〒106 港区六本木7-22-1)

の設定にある。しかし、これらの評価基準と交通信号制御との間の関係については明らかにされていないため、現在遅れを最小化するべく求められているオフセットがこれらに対しても最適解であるという保証はもちろんない。これらを考慮することにより、経済効果に与えるであろう損失の程度も明らかでない。

そこで本研究では、上記の二つの評価基準について交通信号制御との関係を明らかにする基礎的方法を探り、さらに遅れ・停止回数との両立が可能であるかどうかを検討することを目的としている。

2．単一飽和方形波モデル

ある信号交差点における遅れ、停止回数あるいは待ち行列などは、その信号交差点に到着する交通の密度波形、オフセット、スプリットおよびその進入路の飽和交通量から決まる。しかしその信号交差点への到着交通の波形は、その交通がそのときまでに経てきたすべての信号及び流出入交通、その他の要素の過程を辿らなければ定まらない。特に系統制御される場合には、到着交通が周期性を持っており、一般に信号サイクルに等しくなる。そこで簡単のために、本研究においては古くから遅れや停止回数の算出に用いられてきた単一飽和方形波モデルを用いた。適用にあたって、次の単純化の仮定を設け、図1のような発生交通を考える。

①各信号のサイクル長、スプリット、および飽和流量はそれぞれ等しく、ここではサイクル長C＝1、スプリットg＝r＝0.5とする。

②方形波は完全に飽和している。

③両方向の交通量は等しく直進交通のみであり、速度は一定で車群の拡散はない。

④待ち行列の延伸によるリンクのオーバーフローは考えない。

以上のモデルを用いて、リンク内における各サイクル毎の総遅れ、停止台数、車群分割回数および同一車両の二回連続停止について考える。二回連続停止台数以外については、それぞれのリンクについて独立して考えても差し支えない。なぜなら、単一飽和方形波という仮定より、あるリンクにおける遅れ、停止台数、及び車群分割は、その上流リンクとは関係なく独立に決まるものだからである。

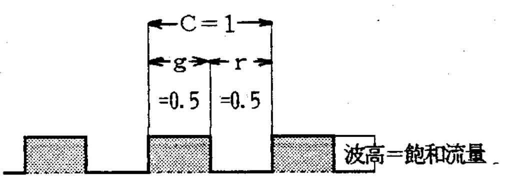


図1．　単一飽和方形波モデルによる発生交通

表1．　各評価基準に対する最適オフセット

リンク片道旅行時間 ℓ	車群分割が生じないオフセット	停止台数最小オフセット	最小停止台数 N_{min}	総遅れ最小オフセット	最小遅れ d_{min}
0～0.25	$0.5-\ell \leq t \leq \ell+0.5$	$t \leq \ell$, $t \geq 1-\ell$	2ℓ	$t \leq \ell$, $t \geq 1-\ell$	ℓ
0．25	$0.25 \leq t \leq 0.75$	$t=0.25$ $t=0.75$	2ℓ (=0.5)	不　定	ℓ (0.25)
0.25～0.5	$\ell \leq t \leq 1-\ell$	$t=\ell$、$t=1-\ell$	0．5	$\ell \leq t \leq 1-\ell$	$0.5-\ell$
0．5	$t=0.5$	$t=0.5$	0	$t=0.5$	0
0.5～0.75	$t \leq \ell+0.5$ $t \geq 1.5-\ell$	$1-\ell \leq t \leq \ell$	$2\ell-1$	$1-\ell \leq t \leq \ell$	$\ell-0.5$
0．75	$t \leq 0.25$, $t \geq 0.75$	$t=0.25$ $t=0.75$	$2\ell-1$ (=0.5)	不　定	$\ell-0.5$ (=0.25)
0.75～1	$t \leq 1-\ell$, $t \geq \ell$	$t=\ell$、$t=1-\ell$	0．5	$t \leq 1-\ell$, $t \geq \ell$	$1-\ell$
1	$t=0, 1$	$t=0, 1$	0	$t=0, 1$	0

3．到着車群の分割と遅れ、停止台数の関係

単一リンクにおいて、下流交差点への到着交通を考えた場合、このリンクの片道旅行時間ℓと相対オフセットtが与えられると、リンク内における遅れ、停止台数、及び車群分割は容易に求めることができる[1]。各評価基準に対する最適オフセットは領域として存在し、これらを表1に整理した。ここに、

t：西側信号機に対する東側信号機の相対オフセット（サイクル長で正規化）

ℓ：リンク片道旅行時間（サイクル長で正規化）、すなわち、

$$\ell=\frac{\text{リンク長}\,[\mathrm{L}]}{\text{系統速度}\,[\mathrm{LT}^{-1}]\times\text{サイクル長}\,[\mathrm{T}]} \qquad (1)$$

である。

これより、$0.25<t\leqq 0.5$ 及び$0.75<t\leqq 1$では総遅れ最小オフセットと車群分割が生じないオフセットが完全に一致するのに対して、それ以外の範囲では全く排反となってしまうことがわかる。これは、完全飽和の場合に車群を分割しないということは、全車通過もしくは全車停止を意味することから理解できよう。また停止台数最小オフセットの領域は、総遅れ最小オフセットの領域に完全に含まれている。したがって、これら三つの評価基準を同時に満足するオフセットが存在するのは、$\ell=t=0.5$、あるいは$\ell=t=1$のときだけであり、これはそれぞれ交互式（$t=0.5$），同時式（$t=0$）を用いればよいことを示している。

以上より、総遅れと車群分割、及び総遅れと停止台数を同時最適化することのできるようなオフセットの範囲は、それぞれ図2、図3に示された領域となる。

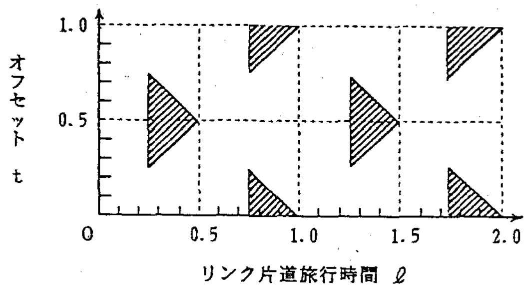


図2．　車群分割が生じず、かつ遅れが最小となるオフセット（斜線部）

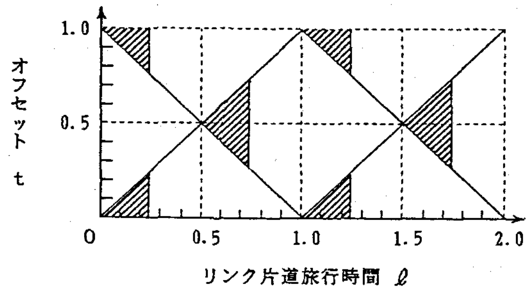


図3．　遅れ、停止台数を同時最小化するオフセット（斜線部及び太線部）

4．二回連続停止台数と総遅れ・停止台数との関係

(1)　二回連続停止台数と相対オフセット

同一車両の二信号交差点連続停止を考えるにあたっては、図4に示されたような二連リンクABCを用いて考える。このリンクの東方向〈EB〉について、下流交差点BおよびCへの到着交通を考えた場合、このリンクの片道旅行時間ℓ_i（$i=1,2$）と相対オフセットt_iの組合せによって、それぞれ二回連続停止台数が求まり、横軸にリンクABの相対オフセットt_1、縦軸にリンクBCの相対オフセットt_2をとって示すと、図5のような等高線が得られる。ここに、二回連続停止台数の単位は、方形波の波長で示しており、全車が二回連続停止する場合は 0.5（青時間）となる。また、$t_1\rightarrow 1-t_1$、$t_2\rightarrow 1-t_2$と置換することにより、反対方向の〈WB〉についても同様にして求めることができる。相対オフセットは、t_1、t_2ともに周期1を持つため、図5のような1×1の正方形がt_1t_2平面上で無限に格子を形成していることがわかる。以下、この正方形を「単位正方形」と呼ぶことにする。

〈WB〉についての単位正方形は〈EB〉のものと点対称な図形となるが、単位正方形の左下頂点の座標が〈EB〉では（ℓ_1，ℓ_2）であるのに対し、〈WB〉では（$-\ell_1$，$-\ell_2$）となり、一致させることができない。したがって両方向を同じ座

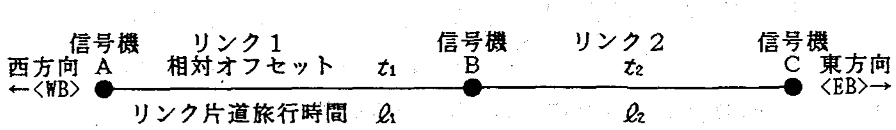


図4．二連リンク

標軸上で同時に考える場合には、ℓ_1、ℓ_2の値によって東西各方向の単位正方形の相対的な位置関係が変わるため、これらを平行移動させてから重ね合わせなければならない。すなわち、それぞれのリンクの片道旅行時間ℓ_1、ℓ_2が与えられない限り、両方向についての二回連続停止台数を同一座標軸上で表すことはできないのである。

(2)　他の評価基準最小化オフセットと二回連続停止

次に、遅れ、停止台数、および車群分割最小化オフセットを用いた場合について、それぞれ二回連続停止台数を考える。各方向の単位正方形を合成することを考えると、得られる図はτ_1方向、τ_2方向とも周期0.5 を持つことがわかる。これは、片方向のオフセットを正の方向に動かすと、他方では同量だけ負の方向に動くためである。そこでここでは表1を参照して、ℓ_1、ℓ_2の組合せを以下の四つの場合に分けて考えれば良い。

a)　$0<\ell_1\leqq 0.25$　かつ　$0<\ell_2\leqq 0.25$ の場合（図6）

表1より、

①遅れ最小化オフセット

$$0\leqq\tau_1\leqq\ell_1、1\geqq\tau_1\geqq 1-\ell_1$$
$$0\leqq\tau_2\leqq\ell_2、1\geqq\tau_2\geqq 1-\ell_2 \qquad (2)$$

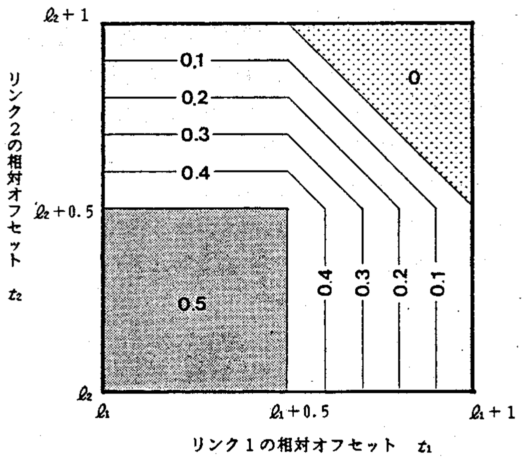
②停止台数最小化オフセット

この場合は、遅れ最小化オフセットと完全に一致する。

③車群分割が生じないオフセット

$$0.5-\ell_1\leqq\tau_1\leqq\ell_1+0.5、0.5-\ell_2\leqq\tau_2\leqq\ell_2+0.5 \quad (3)$$

車群分割が生じないオフセットを用いた場合は、両方向の全車が二回連続停止することが、図6から明らかである。



（注：単位正方形の四辺上は、すべて二回連続停止台数＝０である。）

図5.　二回連続停止台数の等高線（東方向<EB>）

また遅れ最小オフセットを用いると、特に図中●印で示した六角形の二頂点と、その内部の領域、

$$\ell_1+\ell_2-0.5\leqq\tau_1+\tau_2\leqq-(\ell_1+\ell_2-0.5) \qquad (4)$$

において、二回連続停止台数は０となる。

前者の二頂点は、各方向の二つの単位正方形の辺と辺との交点（$1-\ell_1$, ℓ_2）、（ℓ_1, $1-\ell_2$）である。単位正方形の四辺上は、二連リンクのうち少なくとも一方で優先オフセットを用いることを示しているものであり、それらの交点では明らかに二回連続停止は生じない。すなわちこれら二組のオフセット解は、

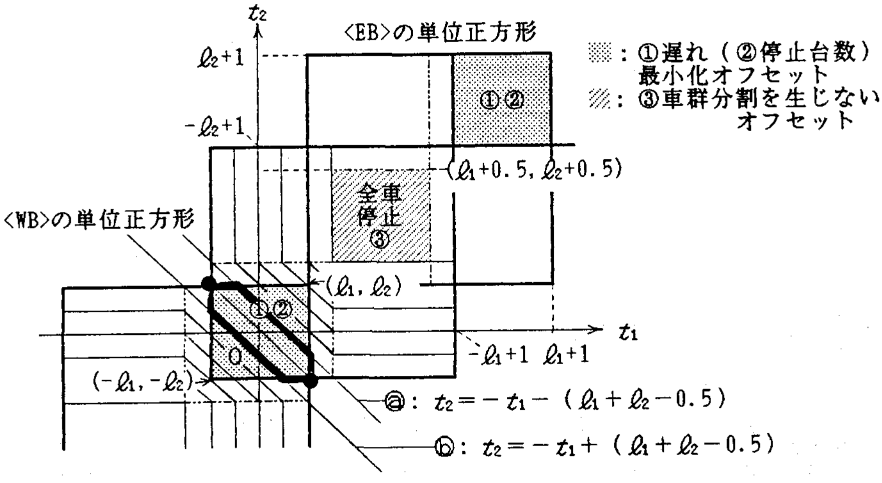


図6.　二回連続停止台数の等高線の両方向合成図

（$0<\ell_1\leqq 0.25$　かつ　$0<\ell_2\leqq 0.25$）

・$t_1=1-\ell_1$、$t_2=\ell_2$：
リンク1で<WB>を完全優先、リンク2で<EB>を完全優先
・$t_1=\ell_1$、$t_2=1-\ell_2$：
リンク1で<EB>を完全優先、リンク2で<WB>を完全優先
という、いわば「交互優先オフセット」にほかならない。

また後者は例えば、二つのリンクがいずれも非常に短い場合に、同時オフセット、あるいはそれを若干修正したものによって二回連続停止を防ぐことができるという場合に相当する（図7）。この領域では、ℓ_1、ℓ_2の組合せによっては、遅れ最小オフセットの領域内全体で二回連続停止が生じない場合も有り得る。このための条件として、図6の直線ⓐ、ⓑに挟まれた領域の内部に点（ℓ_1, ℓ_2）、（$-\ell_1, -\ell_2$）がくるようにすればよいことから、

$$\ell_2 \leqq -\ell_1-(\ell_1+\ell_2-0.5)$$

$$\therefore\quad 0<\ell_1+\ell_2\leqq 0.25 \qquad (5)$$

を得る。

b）$0<\ell_1\leqq 0.25$ かつ $0.25\leqq\ell_2\leqq 0.5$ の場合（図8）

①遅れ最小化オフセット

$$0\leqq t_1\leqq\ell_1、1\geqq t_1\geqq 1-\ell_1$$
$$\ell_2\leqq t_2\leqq 1-\ell_2 \qquad (6)$$

②停止台数最小化オフセット

$$0\leqq t_1\leqq\ell_1、1\geqq t_1\geqq 1-\ell_1$$
$$t_2=\ell_2、t_2=1-\ell_2 \qquad (7)$$

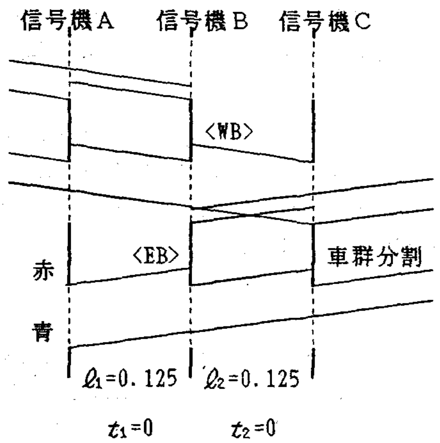


図7．　短い二連リンクにおける同時オフセット

③車群分割が生じないオフセット

$$0.5-\ell_1\leqq t_1\leqq\ell_1+0.5$$
$$\ell_2\leqq t_2\leqq 1-\ell_2 \qquad (8)$$

この場合もa）と同様に、車群分割が生じないオフセットを用いた場合は両方向全車が二回連続停止をすることがわかる。また遅れ最小化オフセットの領域内では、二回連続停止台数は一定値（≠0）をとるが、この場合も例外的に交互優先オフセットの場合のみ、二回連続停止は生じず、停止台数も最小となる（図9）。

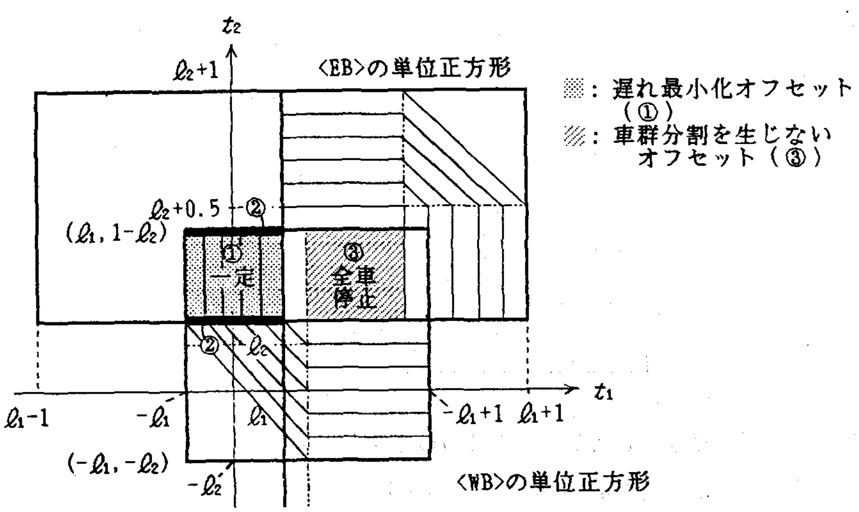


図8．　二回連続停止台数の等高線の両方向合成図
（$0<\ell_1\leqq 0.25$　かつ　$0.25<\ell_2\leqq 0.5$）

c) $0.25 \leqq \ell_1 \leqq 0.5$ かつ $0 < \ell_2 \leqq 0.25$ の場合

この場合は、b)でt_1とt_2を交換して全く同様にして考えればよい。

d) $0.25 \leqq \ell_1 \leqq 0.5$ かつ $0.25 \leqq \ell_2 \leqq 0.5$ の場合

この場合（図10）は図2においてすでに示したように、遅れ最小化オフセット（①）と車群分割が生じないオフセット（③）の領域が一致し、

$$\ell_1 \leqq t_1 \leqq 1-\ell_1、\ \ell_2 \leqq t_2 \leqq 1-\ell_2 \qquad (9)$$

となる。この領域内部の四頂点においては、停止台数（②）はこの場合の最小値となる。さらに領域内部では全車が二回連続停止をすることがわかるが、この場合も点（ℓ_1, $1-\ell_2$）および（$1-\ell_1$, ℓ_2）においては二回連続停止は生じないため、この二組の交互優先オフセットを用いれば遅れ、停止台数、車群分割回数、及び二回連

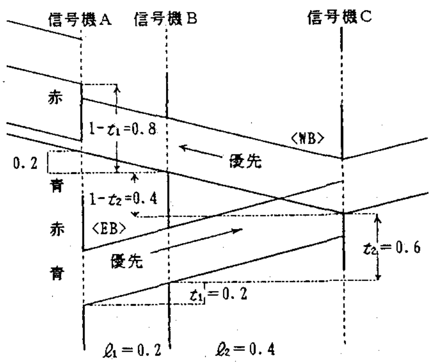


図9. 遅れ・停止台数最小の条件下で二回連続停止の生じない「交互優先オフセット」

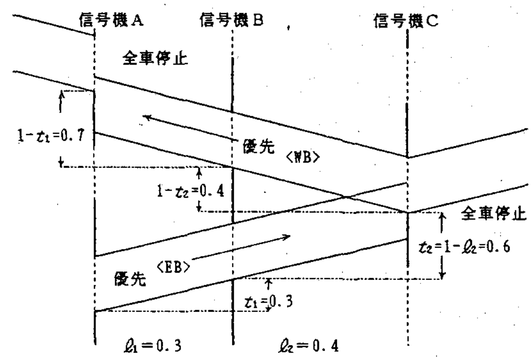


図11. 四つの評価基準を同時最小化する交互優先オフセット

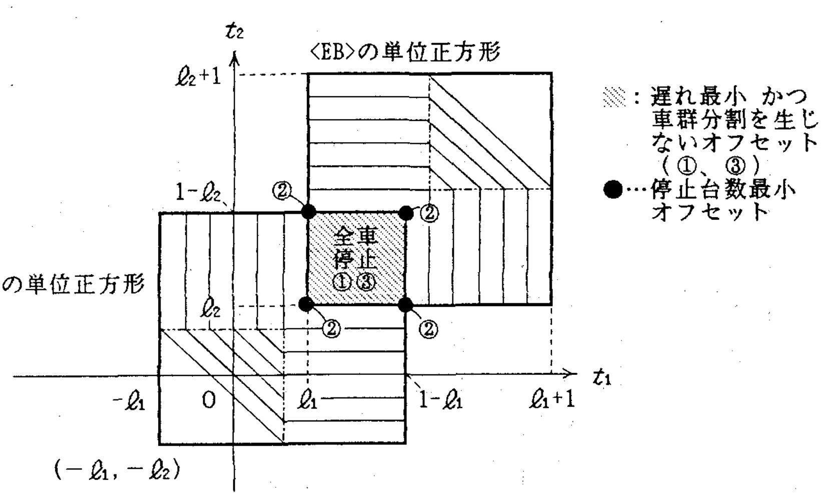
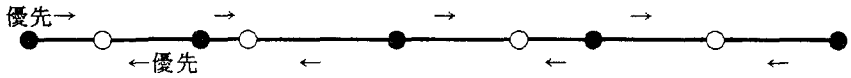


図10. 二回連続停止台数の等高線の両方向合成図

（$0.25 \leqq \ell_1 \leqq 0.5$ かつ $0.25 \leqq \ell_2 \leqq 0.5$）



○：両方向とも通過する交差点

図12. 多連リンクにおける「交互優先オフセット」

続停止台数の四つの評価基準を同時に最小化できることになる。なおこのとき二連リンクの中央の交差点では、両方向とも全車停止、もしくは通過することになる（図11）。

以上で、すべてのℓ_1、ℓ_2の組合せについての二回連続停止台数を考えたことになり、二連リンクにおいてそれぞれのリンク片道旅行時間を問わずに、総遅れと停止台数、および二回連続停止台数の三つの評価基準を同時最適化できるオフセット解は、交互優先オフセットのほかには存在しないことが証明された。なおこれらの解が車群分割に対する最適解と一致するのは、表1より両リンクの片道旅行時間がともに、

$$1/4+m/2\leqq\ell_i\leqq1/2+m/2\ (m=0,1,2,\cdots) \quad (10)$$

である場合に限られる。

5．まとめ

本研究で信号制御と車群分割・二回連続停止台数との関連を、定量的に明らかにすることができた。得られた結論を、以下にまとめて示す。

①一般に、系統制御される街路区間において、従来用いられてきた評価基準である遅れ・停止台数に損失を与えずに、二回連続停止台数を最小化することは可能であるが、それには隣接したリンクで交互に優先権を与えるようなオフセットを設定することが必要である。また、二つのリンク片道旅行時間のいずれもが$m<\ell_i\leqq1/4+m$（$i=1,2$、$m=0,1,2,\cdots$）である場合には、解はこれらの交互優先オフセットのほかにも面として次のような範囲に存在する。

$$\ell_1+\ell_2-m-0.5\leqq t_1+t_2\leqq-(\ell_1+\ell_2-m-0.5)$$
$$(m=0,1,2,\cdots) \quad (11)$$

②車群分割を生じさせないことと、遅れ・停止台数とは排反の傾向がみられ、リンク片道旅行時間が$1/4+m\leqq\ell\leqq1/2+m$（$m=0,1,2,\cdots$）の範囲にある場合以外には、同時最適化は不可能である。

以上の結果から、図12に示すような多連リンクにおいても、総遅れ、停止回数及び二回連続停止台数の三つの評価基準を同時最適化することのできるオフセットの組合せが、少なくとも二つは存在すると言える。このとき一交差点おきに、両方向とも通過できることになるが、車群分割は必ずしも防止できない。

6．あとがき

本研究では非常に単純化されたモデルを用いて考えたが、実交通では必ずしも交互優先オフセットが最適であるとは限らないと思われる。今後は諸条件を加味して、実交通流への適用可能性を検討してゆきたい。また、各評価基準の重みを考え、それらを組み合わせた総合的な評価を行うことも大きな課題である。

参考文献

1） 越正毅：系統交通信号におけるサイクル制御の研究、土木学会論文報告集第241号, pp125～133, 1975年9月

2） 越正毅：交通信号の系統制御オフセット・パタンの一解法、土木学会論文報告集第147号, pp40～47、1967年11月