

路線系統化の理論とその応用

THE THEORY AND APPLICATION OF PROGRESSIVE SIGNAL SYSTEMS

毛利正光*・本多義明**・遠藤賢三***

By Masamitsu Mori, Yoshiaki Honda and Kenzō Endō

要　旨 本研究は單一路線の交通信号系統化に関する理論とその応用について考察したもので、理論的考察は系統路線におけるサイクル整合の決定を Through Band Width を最大にするという観点から述べたもので主として J.T. Morgan¹⁾ の手法を取り入れた。また実際問題への適用としては、名古屋市内の西部環状線に関する最適 Offset を電子計算機 (HITAC 5020) で計算した。その結果、自動感応式系統信号を用いるための 6 種類の Offset が決定された。

1. 概　　説

都市域における街路交通事情は年々混雑をきわめ、交通渋滞も慢性化の様相を呈してきている。これらの解決策として、近年大都市においては都市高速道路などによる立体交差方式が採用されてはいるが、これも都市全域を網羅するまでには至っていない。それゆえ円滑なる交通の流れを保つためにはなお平面交差街路の信号処理にたよらざるを得ないのが実情である。

従来、平面交差の信号制御方法として考えられてきたものとしては、定周期信号 (Fixed-time Signal) と自動感応式信号 (Vehicle-Actuated Signal) がある。前者は現在最も広く用いられてはいるが、短時間の交通変動に対応できず、また後者はこれらの変動には対応できるものの、それは単一交差点だけにかぎられ、他の交差点との相互関係は無視している。しかし現代の都市交通においては、もはや交通渋滞は点から線へ、線から面へと広がっているから、これらの信号処理方式では十分交通混雑を解消できなくなっている。この要請に答えるのが系統信号方式である。

系統化の目的は信号機間の現示時間のずれの設定によって信号相互間の干渉ができるだけ減らし、各交差点個有の能力まで十分に交通を処理させることである。そしてその方法は広範囲にわたる交通状況を系統化の対象となる路線や地域の交通状況を代表すると思われる地点で測定し、最適な信号現示を行なうことである。最適化の

基準としては種々考えられるが、本研究では従来、最も広く使われている Through Band Width 最大という基準を用いる。

2. 系統化の効率と Through Band

路上を流れる交通流は一般に時間-距離図として表現できる。一方街路の場合には System 内において最適 Offset を決定することは比較的容易である。しかし、二方向街路に関しては最適 Offset の決定はもはやそれほど容易でなく、なんらかの規準を尺度にしてそれを最適化するという配慮が必要となる。すなわちここで最も効率的な系統化のための尺度として何を選ぶかという問題が生じてくる。

この尺度としては、System 内の平均通過時間、交差点における遅れ時間、停止回数、Through Band Width などが考えられるが、従来、時間-距離図に関する解析方法としては Through Band Width を最大にするという基準での最適化が行なわれてきた。しかし一般に、Band Width は一様な密度を有するわけではなく、普通 Band の前端で交通流は車団波を形成しており、また Band の後端では自由走行の状態の場合であり、そのため Through Band Width が最大になれば必ずしも最小遅滞となるという保証があるわけでもない。

Through Band Width の効率的な設置は今後の重要な問題であり、Band Width の変化と遅滞との関係もいまだ十分に研究されぬままに、なお最適性の規準として Through Band を用いているのが実状である。

以下、Through Band を最大にする Offset の設定を目的として論述するが、今後これに代わる規準の研究が必要なことはいうまでもない。

3. 最適 Offset の決定

以下に示す時間-距離図において各記号はつきの量を示すものとする。

S_i : i 番目の信号の位置

r_i : 信号 S_i の赤信号時間

$b(\bar{b})$: 上り (下り) の Through Band Width

$t_{ij}(\bar{t}_{ij})$: 上り (下り) 方向の S_i から S_j への走行時間

* 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 名古屋大学助手 工学部土木工学科

*** 正会員 中日本建設コンサルタント

θ_{ij} : S_i と S_j の Offset で、 S_i の赤信号時間の中央から、 S_j の赤信号時間の中央までの時間としてはかる。

またこれらのうち、 r, b, t, θ はすべてサイクル長で除し、サイクル長 c に対する比で表わすものとする。

(1) 平等 Offset の場合

図-1, 図-2において信号 S_i の赤時間の一端がある方向の Band に接触し、他端が他方向の Band に接触するとき信号 S_i を Critical 信号と称すると、System 内のすべての Critical 信号は赤信号が上りの前端と下りの後端に接触する信号と赤時間が下りの前端と上りの後端に接触する信号とにわけられる。

図-1 時間距離図

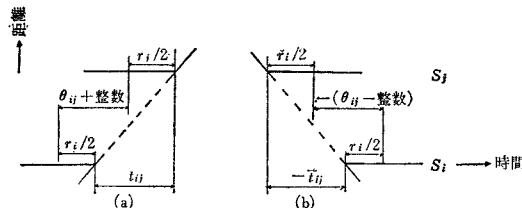


図-2 時間距離図

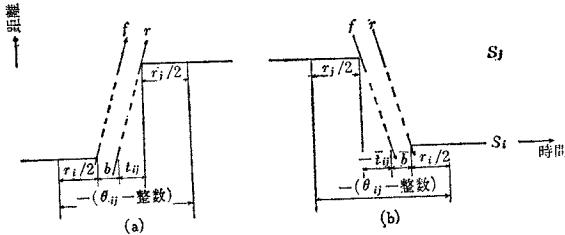


図-1 に示す S_i, S_j はともに同じ性質の Critical 信号である。

図-1(a) より、

$$\frac{1}{2}r_i + t_{ij} = \frac{1}{2}r_j + \theta_{ij} + (\text{整数})$$

図-1(b) より、

$$\frac{1}{2}r_i - \bar{t}_{ij} = \frac{1}{2}r_j - \theta_{ij} + (\text{整数})$$

ゆえに、

$$\theta_{ij} = \frac{1}{2}(t_{ij} + \bar{t}_{ij}) + \frac{1}{2}(\text{整数}) \quad (1)$$

ここで、 $0 \leq \theta_{ij} \leq 1$ を考え、 $\delta_{ij} = 0, 1/2$ を使うと、式(1)はつぎのように表わすことができる。

$$\theta_{ij} = \text{man}^* \left[\frac{1}{2}(t_{ij} + \bar{t}_{ij}) + \delta_{ij} \right] \quad (2)$$

式(2)によって表わされる phasing を 1/2 整数サイクル整合または、交互 Offset 方式といふ。

つぎに 図-2(a) より、

* man は、manitissa を表わし、man Z は、Z が正の場合には小数部分を表わし、Z が負の場合には小数部分に 1 を加えたものである。たとえば、

$$\text{man}(5.2) = 0.2, \text{man}(-5.2) = 0.8$$

$$\frac{1}{2}r_i + b + t_{ij} + \frac{1}{2}r_j = \theta_{ij} + (\text{整数}) \quad (3)$$

図-2(b) より、

$$\frac{1}{2}r_i + \bar{b} - \bar{t}_{ij} + \frac{1}{2}r_j = -\theta_{ij} + (\text{整数}) \quad (4)$$

式(3), (4)において平等 Through Band を仮定して、 $b = \bar{b}$ とおくと、

$$\theta_{ij} = \frac{1}{2}(t_{ij} + \bar{t}_{ij}) + \frac{1}{2}(\text{整数}) \quad (5)$$

式(5)は、式(1)と同じである。

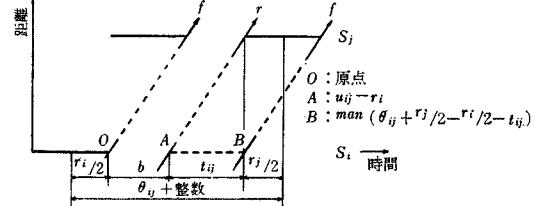
以上の考察により、すべての Critical 信号について、 $b = \bar{b}$ すなわち平等 Through Band を仮定すれば Offset は式(2)に示す 1/2 整数サイクル整合で設定されることがわかる。以下において最大平等 Through Band のための最適 Offset を求めるが、そのための計算は 1/2 整数サイクル整合の場合に適応すればよく、また一方向の交通流(上りまたは下り)について行なえば十分である。

ここに、 $b_i = S_i$ の赤時間が上り Band の前端に接触する場合において i 番目交差点を規準にとったときの Band Width

$$B = \text{最大平等 Band Width}$$

とする。

図-3 時間距離図



つぎに図-3において、原点を S_i の赤時間の右側にとると、 S_j の赤時間の右側に接触する Band はつぎの時間に S_i を通過していると考えられる。

$$\text{man}[\theta_{ij} + (r_j/2) - (r_i/2) - t_{ij}]$$

さて信号 S_i が Critical となりむだな青時間をなくすためにはこの値を 0 とするのが最も望ましいのであるから、そのとき $u_{ij} = 1$ となるような u_{ij} を考えると、

$$u_{ij} = 1 - \text{man}[-\theta_{ij} - (t_j/2) + (r_i/2) + t_{ij}]$$

上式に式(2)を代入し δ_{ij} を用いると、

$$u_{ij}(\delta_{ij}) = 1 - \text{man}$$

$$\times \left[\frac{1}{2}(r_i - r_j) + \frac{1}{2}(t_{ij} - \bar{t}_{ij}) - \delta_{ij} \right]$$

S_j の赤時間の左側に接触する Band は $u_{ij} - r_j$ に S_i を通過しているから、最良の δ_{ij} はつぎの条件から求められる。

$$\max[u_{ij}(0) - r_j, u_{ij}(1/2) - r_j]$$

ゆえに b_i は、

$$b_i = \min_j \max_{\delta=0, 1/2} [u_{ij}(\delta) - r_j]$$

また B は基準交差点を変化させることにより $B =$

$\max_i b_i$ により与えられるから、

$$B = \max_i \min_j \max_{\delta=0, 1/2} [u_{ij}(\delta) - r_j] \quad \dots (6)$$

B を最大にするときの i を c とし、 $\delta_{c1}, \delta_{c2}, \dots, \delta_{cn}$ をそれぞれの交差点に対する δ の値とする。式(2)に δ_{ij} を代入すれば最大平等 Offset のためのサイクル整合による Offset $\theta_{c1}, \theta_{c2}, \dots, \theta_{cn}$ を計算できる。

すなわち式(2)において $t_{ij} = \bar{t}_{ij}$ とすれば、

$$\theta_{cj} = \delta_{cj} \quad \dots \dots \dots (7)$$

(2) 不平等 Offset の場合

平等 Offset 方式による系統化は上り、下り両方向の交通量を等しいと考える基本的な仮定によって解が求められた。したがって得られた最大 Through Band は両方向の交通量が等しいとみなされる場合にのみ成立することになる。しかし現実の交通状態を観測するとこの仮定が常に用いられるわけではなく、上り、下りの交通量が異なる場合が多い。

このため、以下では不平等 Offset 方式により得られた Offset を両方向の車団波長に比例させて再計算することにより、より合理的な Offset を見出そうとする不平等 Offset 方式について論述する。

一般に交通量が増加するにつれて、交通の混雑度は増加するものと考えられるが、系統化を行なった場合、個々の車はランダムな走行をするのではなくて、むしろ規則的な車群となって走行するものと思われる。同じ交通量の場合においてはランダムな走行状態よりも、車団波を形成して走行する状態の方が混雑は少ないと考えられるから、系統化が交通の混雑を緩和することを目的としている以上不平等 Offset の解析のために用いる量として交通量そのものの大小を比較するよりもむしろ車団波長の大小を判断の基準にしたほうがより効果的な解が期待できるものと考えられる。

以下の計算に用いる車団波長は、先頭の右折車が車群を形成している対向直進車の通過を待つ時間であり秒の単位で示す。以下不平等 Offset のための解析手順を述べる。

a) シフト量の決定 上りの車団波長が下りの車団波長よりも大きい場合にはまず上りの Band Width b の調整を行なうわけであるが、 b のとる値の範囲について考えると、当然 $b \geq B$ が成り立つことになる。しかし B が負になることも考慮に入れると、その場合には $b \geq 0$ となる。しかし b の増加には制限があり、決して最小青時間より大きくなることはない。

すなわち上り Band Width b は、

$$\max(0, B) \leq b \leq g$$

そのとき \bar{b} は短縮される。

$$\bar{b} = \max(2B - b, 0)$$

つぎに図-4によって、信号 S_j のシフト量を求めてみると、シフトによって上り Band の前端は $u=B-b$

図-4 上り Band の拡大

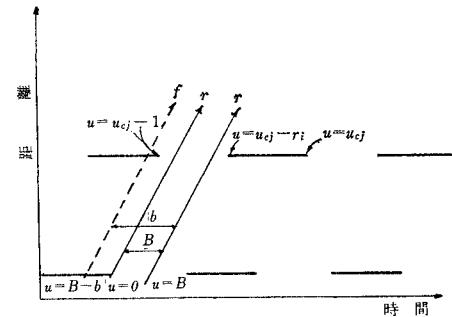
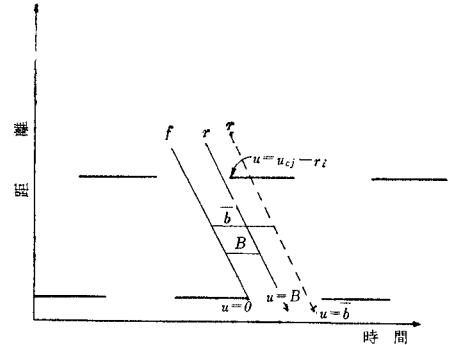


図-5 下り Band の拡大



まで左に移されるから S_j のシフト量は、

$$a_j = \max[(u_{cj} - 1) - (B - b), 0]$$

また $b < \bar{b}$ の場合は図-5によって、

$$a_j = \max[\bar{b} - (u_{cj} - r_j), 0]$$

b) Band の分割

$P(\bar{P}) = L/T(\bar{L}/T)$: 上り(下り)方向の車団波長(サイクル)

ただし、 $L(\bar{L})$: 上り(下り)方向の車団波長(秒)

T : 信号サイクル長

とする。

ここで $P = \bar{P}$ が前に述べた平等の Offset にあたるわけである。つぎに、両方向の車団波長の和と、最大平等 Band Width との関係によって場合をわけて考えると、

① $P + \bar{P} \leq 2B$ のとき: この場合には上り、下り各方向の車団波長の和が最大平等 Band Width を越えないで両方向の車団波を十分収容できる Band Width が確保できる。上り、下り方向の Band Width をそれぞれ車団波長に比例させて計算すると、

$P > \bar{P}$ の場合

$$b = \min[g, 2BP/(P + \bar{P})]$$

$$\bar{b} = \max[2B - b, 0]$$

$P < \bar{P}$ の場合

$$b = \max(2B - \bar{b}, 0)$$

$$\bar{b} = \min[g, 2B\bar{P}/(P + \bar{P})]$$

② $P + \bar{P} > 2B$ のとき: この場合には、車団波長の和が最大平等 Band Width を越えているので、両方向

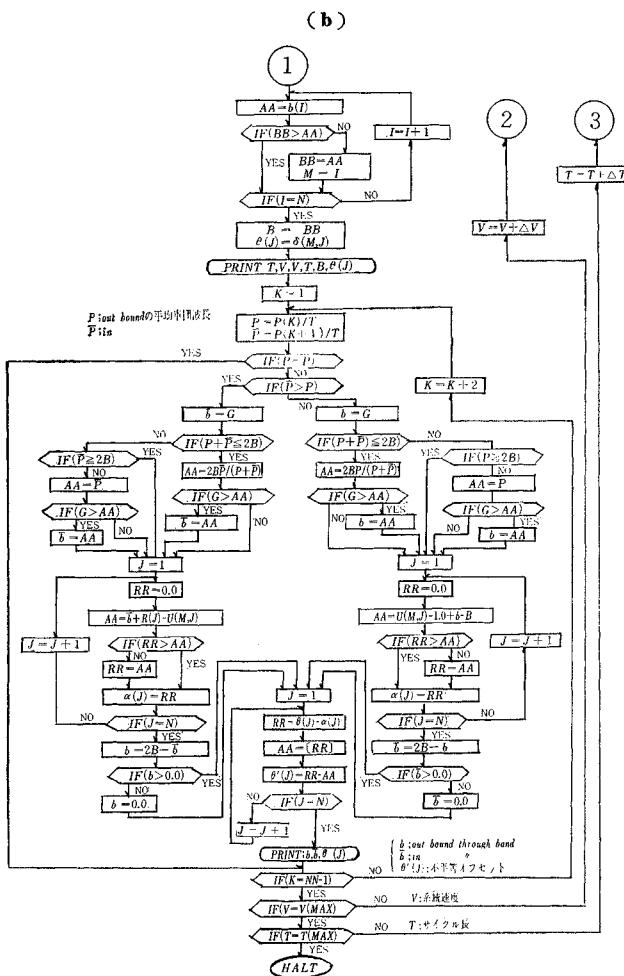
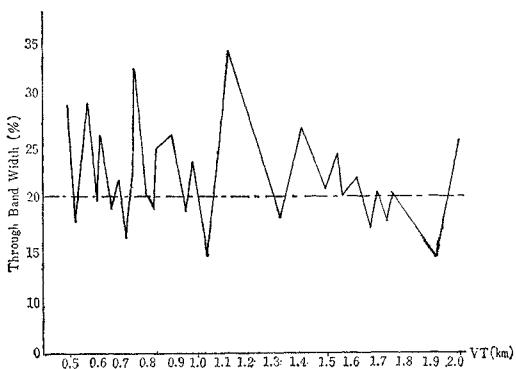


図-9 VT-B 図



ためにはこの Through Band の安定性に注意せねばならない。

もし、大きな Through Band Width が得られるような VT の値があるとしても VT のわずかの変化によって Through Band Width が急激に減少する場合、換

言すれば、速度のわずかの変化によって、Through Band Width が急減するような Offset は不安定であるといえる。それゆえ、この Offset を最適 Offset として採用することは好ましくない。

この関係をつぎの 2 つの例によって説明すると、

(1) $VT = 1111 \text{ m} (4000 \text{ km} \cdot \text{sec}/\text{h})$ の場合

図-9 より、 VT の有効区間 (Through Band の有効区間を 20% 以上とすれば) は、

$$1070 \text{ m} < V < 1290 \text{ m}$$

または、

$$3825 (\text{km} \cdot \text{sec}/\text{h}) < VT < 4644 (\text{km} \cdot \text{sec}/\text{h})$$

ここでもし、サイクル時間を 100 秒とすると 系統速度の有効区間は、

$$38.3 (\text{km}/\text{h}) < VT < 46.4 (\text{km}/\text{h})$$

となる。ゆえに系統速度の有効区間は $40 \text{ km}/\text{h}$ を中心として、 $-1.7 \sim +6.4 (\text{km}/\text{h})$ の範囲で Through Band Width が 20% 以上になっていいると考えられる。

(2) $VT = 650 \text{ m} (2270 \text{ km} \cdot \text{sec}/\text{h})$ の場合

図-9 より VT の有効区間は、

$$740 \text{ m} < VT < 800 \text{ m}$$

または、

$$2664 (\text{km} \cdot \text{sec}/\text{h}) < VT < 2880 (\text{km} \cdot \text{sec}/\text{h})$$

ここでサイクル時間を 100 秒とすると、系統速度の有効区間は、

$$26.6 (\text{km}/\text{h}) < VT < 28.8 (\text{km}/\text{h})$$

となる。ゆえに系統速度の有効区間は $27.3 \text{ km}/\text{h}$ を中心として $-0.7 \sim +1.5 (\text{km}/\text{h})$ の範囲である。

これらの結果を比較すると、(2) では Offset が速度変化にほとんど対応できないのにくらべて (1) ではある程度速度変化に対応でき、(2) にくらべて (1) の Offset は安定しているといえる。

(2) 最適 Offset の選定

最適 Offset の選択条件として、系統速度 $40 \text{ km}/\text{h}$ サイクル長 90 秒から系統速度 $50 \text{ km}/\text{h}$ サイクル長 100 秒の範囲を考えれば、最適 Offset として、図-9 より表-10 の 3 種類を選ぶことができる。

しかし、これらの Offset 以外に、 $VT = 750 \text{ m}$ 付近に Through Band Width が 30% 以上になるかなりよい

表-10 最適 Offset

VT (m)	VT (km · sec/h)	(Offset)	太平洋4丁目 ← → 西消防署前
889	3200	0 1/2 0 1/2 1/2 1/2 1/2 0 1/2 1/2 1/2 1/2 0 1/2 0 0 1/2 0 0	
1111	4000	1/2 0 1/2 0 1/2 0 1/2 0 0 1/2 1/2 0 1/2 1/2 1/2 0 1/2 0	
1400	5040	1/2 0 1/2 0 1/2 1/2 0 1/2 1/2 0 0 0 1/2 1/2 0 0 1/2 0	

表-11 平等 Offset と不平等 Offset

(平等 Offset)

TA	VA	VT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	BB
70	40	777	0	0.50	0.50	0	0.50	0	0	0.50	0	0	0.50	0	0	0.50	0	0	0.50	0.24	

(不平等 Offset)

LO	LI	PO	PI	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	BO	BI
60	50	0.86	0.71																				
50	40	0.71	0.57	0.88	0.50	0.37	0.84	0.50	0	0	0.50	0	0	0.50	0	0.50	0.92	0	0.45	0	0	0.40	0.08
40	30	0.57	0.43																				
30	20	0.43	0.29																				
20	10	0.29	0.14	0.94	0.50	0.44	0.92	0.50	0	0	0.50	0	0	0.50	0	0.50	0	0	0.50	0	0	0.32	0.16
10	20	0.14	0.29	0	0.50	0.50	0	0.43	0	0	0.43	0	0.92	0.50	0	0.50	0	0	0.47	0.97	0.96	0.16	0.32
20	30	0.29	0.43																				
30	40	0.43	0.57																				
40	50	0.57	0.71	0	0.50	0.50	0	0.36	0.96	0	0.35	0	0.84	0.50	0	0.44	0	0	0.40	0.89	0.89	0.08	0.32
50	60	0.71	0.86																				

注) TA : サイクル長(秒), VA : 系統速度(km/h), BB : 最大平等 Through Band Width (%), LD : 上り車団波長(秒), LI : 下り車団波長(秒), PO : 上り車団波率(%), PI : 下り車団波率(%), BO : 上り Band Width (%), BI : 下り Band Width (%).

表-12 3種の最適 Offset の不平等 Offset

VT (%)	P (%)	\bar{P} (%)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
889	0.75	0.63	0.82	0.43	0	0.50	0.37	0.50	0.47	0.89	0.34	0.50	0.50	0	0.50	0.99	0	0.43	0	0.85	
	0.38	0.25	0.85	0.50	0	0.50	0.40	0.50	0.49	0.91	0.36	0.50	0.50	0	0.50	0	0	0.46	0	0.87	
	0.25	0.13	0.93	0.50	0	0.50	0.48	0.50	0.50	0.99	0.44	0.50	0.50	0	0.50	0	0	0.50	0	0.95	
	0.13	0.25	0	0.50	0	0.50	0.50	0.50	0.50	0	0.50	0.50	0.48	0.93	0.43	0	0	0.49	0	0	
	0.25	0.38	0	0.50	0.99	0.50	0.50	0.43	0.50	0	0.50	0.50	0.40	0.85	0.35	0	0.99	0.41	0.99	0	
	0.63	0.75	0	0.50	0.97	0.48	0.50	0.40	0.50	0.97	0.50	0.50	0.37	0.82	0.32	0	0.96	0.39	0.97	0	
1111	0.75	0.63	0.50	0	0.50	0	0.50	0	0.50	0.91	0	0.50	0.50	0	0.98	0.47	0.50	0.50	0.95	0.50	0
	0.38	0.25	0.50	0	0.50	0	0.50	0	0.50	0.94	0	0.50	0.50	0	0.49	0.50	0.50	0.97	0.50	0	
	0.25	0.13	0.50	0	0.50	0	0.50	0	0.50	0.91	0	0.50	0.50	0	0.98	0.47	0.50	0.50	0.95	0.50	0
	0.13	0.25	0.50	0.95	0.46	0	0.48	0	0.50	0	0.91	0.50	0.50	0	0.50	0.50	0.46	0.97	0.50	0.92	
	0.25	0.38	0.50	0.97	0.48	0	0.50	0	0.50	0	0.94	0.50	0.50	0	0.50	0.50	0.48	0.99	0.50	0.95	
	0.63	0.75	0.50	0.95	0.46	0	0.48	0	0.50	0	0.91	0.50	0.50	0	0.50	0.50	0.46	0.97	0.50	0.92	
1400	0.67	0.56	0.50	0	0.50	0.88	0.42	0.50	0	0.33	0.50	0.82	0.93	0	0.50	0.50	0.83	0.94	0.46	0.86	
	0.33	0.22	0.50	0	0.50	0.94	0.49	0.50	0	0.40	0.50	0.88	0	0	0.50	0.50	0.89	0	0.50	0.93	
	0.22	0.11	0.50	0	0.50	0.98	0.50	0.50	0	0.44	0.50	0.93	0	0	0.50	0.50	0.93	0	0.50	0.97	
	0.11	0.22	0.43	0.96	0.50	0	0.50	0.50	0	0.50	0.50	0	0	0.93	0.50	0.50	0	0.98	0.50	0	
	0.22	0.33	0.38	0.91	0.50	0	0.50	0.50	0.99	0.50	0.50	0	0	0.89	0.50	0.47	0	0.94	0.50	0	
	0.56	0.67	0.32	0.85	0.47	0	0.50	0.48	0.92	0.50	0.45	0	0	0.82	0.50	0.40	0	0.88	0.50	0	

Offset があるが、この Offset では VT の変動により急激に Band Width が減少するうえ、系統速度を 40 km/h とするとサイクル長が 67 秒となるので今後の交通量のびを考えると、サイクル長 67 秒はやや短かく、前述の最適 Offset の選択条件よりはずれるので、これは最適 Offset から除外する。

つぎに平等 Offset のモデル計算で得られた Offset に関する上り、下りの車団波長を種々変化させたときの不平等 Offset の値を計算したのが表-11 である。表によれば、両方向の車団波長の和が Through Band Width を越えない場合には得られる Band Width は車団波長に比例しているが、そうでない場合には Band Width は一方的に車団波長の大きい方に有利となる。さらに表-10 の 3種の平等 Offset に関して、不平等 Offset を計算すると表-12 のようになる。

7. 結論

本研究においては、系統化の効率を Through Band Width によって判定し、実際に名古屋市内の西部環状線の場合に応用してみた。その結果最適な Offset が、平等 Offset、不平等 Offset の場合についてそれぞれ得られた。

しかし、研究を進めるにしたがってつぎのような諸点について今後さらに研究を続行していく必要があると痛感した。

(1) Through Band の価値

系統化の効率として果たして Through Band だけを判断の基準にしてよいかという問題がある。そのため、他に考えられる基準を考慮する必要があるので、シミュレーションを行なってある程度の成果を得たので、つぎの機会に発表したい。

(2) 優先 Offset の有効性について

方向別交通量の異なる場合不平等 Offset を与える式を本研究では用いたが、交通量比が大きくなれば当然優先 Offset が有利と思われる所以、その限界を求める必要があると考えられる。

(3) Floating method について

系統速度を求めるための Floating Method の精度について考察し、街路計画に十分応用できるような実測計画を研究する必要がある。

(4) 面制御

本研究では単一路線の系統化問題を取り扱ったが、今後の都市交通の複雑化を考えると、都市を一体として考えた広域的な系統化問題についての解決が必要になると考えられる。

最後に、本研究中終始適切なご助言をいただいた防衛大の高田 弘助教授に感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) Morgan, J.T., Little, J.D.C. : Synchronizing Traffic Signals for Maximal Bandwidth. *Opsns. Res.* 6, pp. 896-911 (1964)
- 2) Matson, T.M., Smith, W.S., Hurd, F.W. : *Traffic Engineering*, McGraw-Hill, New York (1955)
- 3) Wardrop and Charles : A method of estimating speed and flow of traffic from a moving vehicle, *Journal Institution of Civil Engineering*, PART 3, pp. 158-171 (1964)
- 4) 岸 尚・高田 弘・栗木 譲：系統式信号 System の Offset に関する一考察，[I]，[II]，防衛大学校和文紀要（理工学編）第1号，5号別冊

(1967. 2. 2・受付)