

動的計画法による街路網における 交通信号オフセットの最適化

OPTIMIZATION OF TRAFFIC SIGNALS OFFSET IN A NETWORK THROUGH DYNAMIC PROGRAMMING

奥 谷 巖*

By Iwao Okutani

1. ま え が き

一連の交差点における信号オフセットの合理的設定により、待ち時間をはじめとする交通損失の減少を図ることが可能であることについては、あらためていうまでもないが、これを1路線における信号機を対象として行なったものが、いわゆる路線系統制御であり、きわめて一般化された信号制御方式の1つである。これに対して、ループを含む街路網を対象としたものは面制御とよばれ、これも大都市においてはすでに定着した信号制御の方法となっている。後者の場合のオフセット設定の方法として、街路網の中から適当に選び出された何本かの路線あるいはツリーに対して前者の方法が適用される場合が現実問題としては多いが、かかる制御方法においては、系統制御の対象からはずされた路線における停滞は原則的には顧みられないのが普通である。これに対し、現実にはあまり用いられていないが、街路網全体の総交通損失を最小にするオフセット設定法があり、この方法では上記の方法に比べ、ある特定の路線が特に円滑化されることはないものの、前述したような問題は理論的には解消される。

このような街路網全体での総交通損失を最小にするオフセットの設定法としてはすでに多くのものが開発されているが^{1)~9)}、本稿ではこのうちの動的計画法を用いた方法について、その利用範囲の拡張を図るとともに、シミュレーションによって求めた交通損失とオフセットの関係を利用して、小規模街路網を対象にオフセット最適化の計算を実行し、先に述べた路線系統制御を基盤とした従来の制御方法との比較対比によってその効果を定量的に評価する。

2. 街路区間相互の交通損失の独立性が成立する場合^{8), 9)}

ある街路区間で発生する交通損失が、その街路区間の両端交差点のオフセット、換言すればその街路区間に対応する相対オフセットにのみ影響され、そのほかのいかなる交差点のオフセットにも影響されないという前提のもとにおけるオフセット設定であるが、現在までに開発されているほとんどの方法においてはこのような前提が用いられている。これは1つには解析の便宜性という要素も原因しているが、対象街路網における交通需要が多い場合には、上述の前提はむしろ実際のでもあるからであろう。

さて、いま対象街路網を図-1に示したような格子状街路網として各交差点にマトリックス形式の番号を付し、網を1, 2, ..., Nの合計N個の区間に分割する。

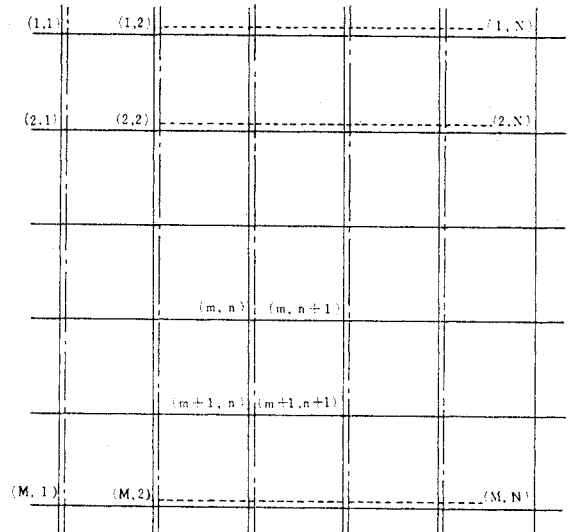


図-1 対象格子状街路網

* 正会員 工博 信州大学助教授 工学部土木工学科

以後、単に区間と呼ぶ場合には、この区間を意味するものとする。次に、記号を以下のように定義する。

$h_{\theta}^{m,n}$ ：交差点 (m, n) の水平方向のリンクに対する青信号開始時刻の基準時からのずれ $\xi^{m,n}$ すなわち交差点 (m, n) の絶対オフセットから、交差点 $(m, n+1)$ の水平方向のリンクに対する青信号開始時刻の基準時からのずれ $\xi^{m,n+1}$ を差し引いた値、すなわち両交差点間の相対オフセット ($m=1, 2, \dots, M; n=1, 2, \dots, N-1$)

$v_{\theta}^{m,n}$ ：交差点 (m, n) の垂直方向リンクに対する赤信号開始時刻の基準時からのずれ (これは上に説明した $\xi^{m,n}$ に等しい) から、交差点 $(m+1, n)$ の垂直方向リンクに対する赤信号開始時刻の基準時からのずれを差し引いた値 ($m=1, 2, \dots, M-1; n=1, 2, \dots, N$)

$h_{q_1}^{m,n}(h_{\theta}^{m,n}, h_{q_1}^{m,n})$ ：交差点 (m, n) から交差点 $(m, n+1)$ に向かう交通 $h_{q_1}^{m,n}$ が、当該 2 交差点間の相対オフセットが $h_{\theta}^{m,n}$ のときに被る損失

$v_{q_1}^{m,n}(v_{\theta}^{m,n}, v_{q_1}^{m,n})$ ：交差点 (m, n) から交差点 $(m+1, n)$ に向かう交通 $v_{q_1}^{m,n}$ が、当該 2 交差点間の相対オフセットが $v_{\theta}^{m,n}$ のときに被る損失

$h_{q_2}^{m,n}(h_{\theta}^{m,n}, h_{q_2}^{m,n})$ ： $h_{q_1}^{m,n}$ の対向交通 $h_{q_2}^{m,n}$ が被る損失

$v_{q_2}^{m,n}(v_{\theta}^{m,n}, v_{q_2}^{m,n})$ ： $v_{q_1}^{m,n}$ の対向交通 $v_{q_2}^{m,n}$ が被る損失

ところで、上記交通損失関数のうち $v_{q_1}^{m,n}(v_{\theta}^{m,n}, v_{q_1}^{m,n})$ ($\nu=1, 2$) は、その独立変数 $v_{\theta}^{m,n}$ が上に示した定義のように 2 交差点間の赤信号開始時刻の差にとられており、本来の意味における相対オフセットとの間の関数関係という形では与えられていない。そこで、本来の相対オフセットでこの交通損失関数を表わすとすればどのようなかをここで調べておこう。

いま、対象リンクに対応する本来の相対オフセットを $v_{\theta}^{m,n'}$ とすると、交通損失関数は $v_{q_1}^{m,n}(v_{\theta}^{m,n'}, v_{q_1}^{m,n})$ のように表わされる。ここに、 $v_{\theta}^{m,n'}$ は交差点 (m, n) の垂直方向リンクに対する青信号開始時刻の基準時からのずれを $\eta^{m,n}$ 、交差点 $(m+1, n)$ の垂直方向リンクに対する青信号開始時刻の基準時からのずれを $\eta^{m+1,n}$ としたとき

$$v_{\theta}^{m,n'} = \eta^{m,n} - \eta^{m+1,n} \dots\dots\dots (1)$$

のように表わされる。

ところで、いま交差点 (m, n) の垂直方向リンクに対する赤信号の周期長 C に占める比率を $S^{m,n}$ とすると、 $\xi^{m,n}$ と $\eta^{m,n}$ の関係は

$$\eta^{m,n} = \xi^{m,n} + S^{m,n} \cdot C \dots\dots\dots (2)$$

のようになる。したがって、式 (2) を式 (1) に代入すると

$$\begin{aligned} v_{\theta}^{m,n'} &= (\xi^{m,n} + S^{m,n} \cdot C) - (\xi^{m+1,n} + S^{m+1,n} \cdot C) \\ &= (\xi^{m,n} - \xi^{m+1,n}) + (S^{m,n} - S^{m+1,n}) \cdot C \end{aligned}$$

が得られ、さらにここで $v_{\theta}^{m,n} = \xi^{m,n} - \xi^{m+1,n}$ であったことを考慮すると、結局

$$v_{\theta}^{m,n'} = v_{\theta}^{m,n} + (S^{m,n} - S^{m+1,n}) \cdot C$$

となる。

したがって、交通損失関数が $v_{\theta}^{m,n}$ との関係で $v_{q_1}^{m,n}(v_{\theta}^{m,n}, v_{q_1}^{m,n})$ のように表わされていれば、それを本来の相対オフセット $v_{\theta}^{m,n'}$ で表わすと $v_{q_1}^{m,n}(v_{\theta}^{m,n'} - (S^{m,n} - S^{m+1,n}) \cdot C, v_{q_1}^{m,n})$ になるわけであり、それはつまり $v_{q_1}^{m,n}(v_{\theta}^{m,n'}, v_{q_1}^{m,n})$ を相対オフセット軸に沿って $(S^{m,n} - S^{m+1,n}) \cdot C$ だけ右に平行移動しただけの形になっているということである。ところが、オフセット設定は周期およびスプリットは所与という条件のもとに行なわれるのが普通であるから、 $(S^{m,n} - S^{m+1,n}) \cdot C$ はこの場合定数と考えられるのである。このようなことから、解析の便宜上垂直方向リンクに対する相対オフセットを赤信号を基準としたものにとってもならん支障がないことがわかる。

さて、図-1 に示したような格子状街路網全体で発生する交通損失を最小にするオフセットパターン決定に際し、まず分割された N 個の区間を動的計画法における段階に対応させ、次のような関数を定義する。

$f_n(v_{\theta}^{n-1})$ ：第 $(n-1)$ 区間の垂直方向リンクに対する相対オフセットが $v_{\theta}^{n-1} = (v_{\theta^1, n-1}, v_{\theta^2, n-1}, \dots, v_{\theta^{M-1}, n-1})$ であるという条件のもとで第 n 区間から第 N 区間までの相対オフセットを最適化した場合に、それら $(N-n+1)$ 個の区間で発生する総交通損失 そうすると、第 n 区間と第 $(n+1)$ 区間との間の最適性の原理にしたがう繰り返しの関係は次式のように表わされる⁹⁾。

$$\begin{aligned} f_n(v_{\theta}^{n-1}) &= \min_{h_{\theta}^{n-1}} \left[\sum_{m=1}^M \{ h_{q_1}^{m,n-1}(h_{\theta}^{m,n-1}, h_{q_1}^{m,n-1}) \right. \\ &\quad \left. + h_{q_2}^{m,n-1}(h_{\theta}^{m,n-1}, h_{q_2}^{m,n-1}) \right] \\ &\quad + \sum_{m=1}^{M-1} \{ v_{q_1}^{m,n}(v_{\theta}^{m,n}, v_{q_1}^{m,n}) \\ &\quad \left. + v_{q_2}^{m,n}(v_{\theta}^{m,n}, v_{q_2}^{m,n}) \right] + f_{n+1}(v_{\theta}^n) \\ &\quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

式 (3) の最適化は $h_{\theta}^{n-1} = (h_{\theta^1, n-1}, h_{\theta^2, n-1}, \dots, h_{\theta^{M-1}, n-1})$ についてのみになされており、一見 v_{θ}^n については最適化が行われていないようにみえるが、相対オフセットの性質として街路網の基本ループに沿う実現可能条件があり、それによると v_{θ}^n は v_{θ}^{n-1} と h_{θ}^{n-1} によって表わされてしまうので、最適化を h_{θ}^{n-1} について行なえば、それはとりもなおさず v_{θ}^n についても最適化を行なっていることになるのである。すなわち、相対オフセット θ をいま絶対オフセット ξ によって表わすものとする、

$$v_{\theta}^{m,n-1} = \xi^{m,n-1} - \xi^{m+1,n-1}$$

$$h_{\theta}^{m+1,n-1} = \xi^{m+1,n-1} - \xi^{m+1,n}$$

$$v_{\theta m,n} = \xi^{m,n} - \xi^{m+1,n}$$

$$h_{\theta m,n-1} = \xi^{m,n-1} - \xi^{m,n}$$

となるから、交差点 $(m, n-1)$, (m, n) , $(m+1, n-1)$ $(m+1, n)$ によって構成される基本ループに沿って、4つの相対オフセットは次のような等式を満たすことになる。

$$v_{\theta m,n-1} + h_{\theta m+1,n-1} - v_{\theta m,n} - h_{\theta m,n-1} = 0 \dots (4)$$

$$(m=1, 2, \dots, M-1; n=2, 3, \dots, N)$$

式(4)がとりもなおさず相対オフセットの実現可能条件式であるが、この式より

$$v_{\theta m,n} = v_{\theta m,n-1} + h_{\theta m+1,n-1} - h_{\theta m,n-1}$$

なる関係式が得られるので、先にも述べたように最適化は $h_{\theta n-1}$ についてのみ行なえばよいことがわかる。

最適化の計算は式(3)の繰り返しの関係を用いて第 N 区間から第1区間に向かって行なわれ、その過程において各区間の条件付き最適オフセットが決定される。求める各区間の絶対最適オフセットは、上述の計算が終了した段階で、第1区間から第 N 区間に向かって順次決定されてゆく。

このようにして、まず街路区間相互の交通損失の独立性が成立する場合には、動的計画法における段階を分割された街路網の区間に対応させることによって、総交通損失最小の観点からみた最適オフセットパターンの決定が行なわれることがわかった。

3. 隣接区間の相対オフセットの影響を考慮した場合

さて、次にある街路区間で発生する交通損失が、当該街路区間の相対オフセットのみならず、隣接街路区間の相対オフセットにも影響を受けると仮定した場合の街路網の総交通損失最小の規準によるオフセットパターン決定法について検討してみる。面制御が必要とされる程度に交通需要が多い場合には、一般には街路区間相互の交通損失の独立性がほぼ成立することから^{10)~12)}、このような前提によるオフセット設定は現実の制御にはあまり用いられないと予想されるが、将来に起りうる特定のケースについては利用に供される可能性がないとはいえないので、以下にその理論的骨子を記すものである。

記号は原則として 2. と同じものとするが、交通損失関数については、ここでの前提が隣接街路区間の相対オフセットの影響を考慮しているので、新たに次のように定義しておく。

$$h_{g_1}^{m,n}(h_{\theta m,n-1}, h_{\theta m,n}, v_{\theta m-1,n}, v_{\theta m,n}, h_{q_1}^{m,n}) : h_{q_1}^{m,n}$$

が、当該街路区間の相対オフセットが $h_{\theta m,n}$ 、関連隣接街路区間の相対オフセットが $h_{\theta m,n-1}$, $v_{\theta m-1,n}$, $v_{\theta m,n}$ であるときに被る損失

$v_{g_1}^{m,n}(v_{\theta m-1,n}, v_{\theta m,n}, h_{\theta m,n-1}, h_{\theta m,n}, v_{q_1}^{m,n}) : v_{q_1}^{m,n}$ が、当該街路区間の相対オフセットが $v_{\theta m,n}$ 、関連隣接街路区間の相対オフセットが $v_{\theta m-1,n}$, $h_{\theta m,n-1}$, $h_{\theta m,n}$ であるときに被る損失

上の定義において、 m, n がある値のときには対象街路網中のリンクに対応しない相対オフセットが生ずる場合があるが、かかるときにはそれを取り除いたものを考えるものとする。また、 $h_{g_2}^{m,n}(\)$, $v_{g_2}^{m,n}(\)$ については上の定義に準ずるものとする。

さらに、動的計画法によって最適化を行なうために、次のような関数を定義する。

$f_n(h_{\theta}^{n-2}, v_{\theta}^{n-1})$: 第 $(n-1)$ 区間における相対オフセットが h_{θ}^{n-2} , v_{θ}^{n-1} であるという条件のもとで、第 n 区間から第 N 区間の相対オフセットの最適化を行なった場合に、それら $(N-n+1)$ 個の区間内において発生する総交通損失 $(n=3, 4, \dots, N)$

さて、最適化の計算は第 N 区間から始める。すなわち、関数 f_n の定義より

$$f_N(h_{\theta}^{N-2}, v_{\theta}^{N-1}) = \min_{h_{\theta}^{N-1}} \left[\sum_{m=1}^M \{ h_{g_1}^{m,N-1}(h_{\theta m,N-2}, h_{\theta m,N-1}, v_{\theta m-1,N-1}, v_{\theta m,N-1}, h_{q_1}^{m,N-1}) \right. \\ \left. + h_{g_2}^{m,N-1}(h_{\theta m,N-1}, v_{\theta m-1,N}, v_{\theta m,N}, h_{q_2}^{m,N-1}) \} \right. \\ \left. + \sum_{m=1}^{M-1} \{ v_{g_1}^{m,N}(v_{\theta m-1,N}, v_{\theta m,N}, h_{\theta m,N-1}, v_{q_1}^{m,N-1}) \right. \\ \left. + v_{g_2}^{m,N}(v_{\theta m+1,N}, v_{\theta m,N}, h_{\theta m+1,N-1}, v_{q_2}^{m,N}) \} \right] \\ \dots \dots \dots (5)$$

となる。式(5)の最適化の過程において、 h_{θ}^{N-2} と v_{θ}^{N-1} が一組与えられた場合の第 N 区間における条件付き最適相対オフセット h_{θ}^{N-1} , v_{θ}^N がすべて求められる。いま、それを h_{θ}^{N-1} , v_{θ}^N と表わすものとするが、詳細には $h_{\theta}^{N-1}(h_{\theta}^{N-2}, v_{\theta}^{N-1})$, $v_{\theta}^N(h_{\theta}^{N-2}, v_{\theta}^{N-1})$ と書くこともできる。

第 N 区間以降の最適化は次に示すような繰り返しの関係を用いることによって行われる。

$$f_n(h_{\theta}^{n-2}, v_{\theta}^{n-1}) = \min_{h_{\theta}^{n-1}} \left[\sum_{m=1}^M \{ h_{g_1}^{m,n-1}(h_{\theta m,n-2}, h_{\theta m,n-1}, v_{\theta m-1,n-1}, v_{\theta m,n-1}, h_{q_1}^{m,n-1}) \right. \\ \left. + h_{g_2}^{m,n-1}(h_{\theta m,n}, h_{\theta m,n-1}, v_{\theta m-1,n}, v_{\theta m,n}, h_{q_2}^{m,n-1}) \} \right. \\ \left. + \sum_{m=1}^{M-1} \{ v_{g_1}^{m,n}(v_{\theta m-1,n}, v_{\theta m,n}, h_{\theta m,n-1}, h_{\theta m,n}, v_{q_1}^{m,n}) \right. \\ \left. + v_{g_2}^{m,n}(v_{\theta m+1,n}, v_{\theta m,n}, h_{\theta m+1,n-1}, h_{\theta m+1,n}, v_{q_2}^{m,n}) \} \right. \\ \left. + f_{n+1}(h_{\theta}^{n-1}, v_{\theta}^n) \right] \dots \dots \dots (6)$$

$$(n=3, 4, \dots, N-1)$$

式(6)の関係を用いることによって、 h_{θ}^{n-2} , v_{θ}^{n-1} のすべての組み合わせに対する $f_n(h_{\theta}^{n-2}, v_{\theta}^{n-1})$ およびそのときの第 n 区間の条件付き最適相対オフセット h_{θ}^{n-1} , v_{θ}^n が求められる。それをここでは h_{θ}^{n-1} , v_{θ}^n のよう

に表わす。

式(6)を利用して、各区間の最適化の計算が次々に行なわれ、最後に f_2 を求める段階に到達する。この段階においては、第1区間より前に区間が存在せず、かつそこで発生する交通損失は第1区間と第2区間の相対オフセットによって決定されることを考えて、特に次のような繰り返しの関係式をつくる。

$$\begin{aligned}
 f_2(v\theta^1) = & \min_{h\theta^1} \left[\sum_{m=1}^{M-1} \{v g_{1,m,1}(v\theta^{m-1,1}, v\theta^{m,1}, h\theta^{m,1}, v q_{1,m,1}) \right. \\
 & + v g_2^{m,1}(v\theta^{m+1,1}, v\theta^{m,1}, h\theta^{m+1,1}, v q_2^{m,1}) \} \\
 & + \sum_{m=1}^M \{h g_{1,m,1}(h\theta^{m,1}, v\theta^{m-1,1}, v\theta^{m,1}, h q_{1,m,1}) \\
 & + h g_2^{m,1}(h\theta^{m,2}, h\theta^{m,1}, v\theta^{m-1,2}, v\theta^{m,2}, h q_2^{m,1}) \} \\
 & + \sum_{m=1}^{M-1} \{v g_{1,m,2}(v\theta^{m-1,2}, v\theta^{m,2}, h\theta^{m,1}, h\theta^{m,2}, v q_{1,m,2}) \\
 & + v g_2^{m,2}(v\theta^{m+1,2}, v\theta^{m,2}, h\theta^{m+1,1}, h\theta^{m+1,2}, v q_2^{m,2}) \} \\
 & \left. + f_3(h\theta^1, v\theta^2) \right] \dots\dots\dots (7)
 \end{aligned}$$

すなわち、 $f_2(v\theta^1)$ は $v\theta^1$ が一組与えられた場合の対象街路網内で発生する総交通損失の最小値を表わす。

したがって、この最後の段階で式(7)によって計算された $f_2(v\theta^1)$ のうち、最も小さい f_2 を求めると、それに対応する $v\theta^1$ は第1区間における絶対最適相対オフセットとなる。いまこれを $v\theta^*$ と表わす。そうすると第2区間における最適相対オフセットは $f_2(v\theta^*)$ に対応する $h\theta^1, v\theta^2$ として求められる。これを、 $h\theta^*$ 、 $v\theta^*$ と表わす。以下同様にして、第 N 区間に向って、先に求めてあった f_3, f_4, \dots, f_N とそれらに対応する各区間の条件付き最適相対オフセット θ を調べてゆくことにより、すべての区間における最適相対オフセット $h\theta^{*n-1}, v\theta^{*n}$ ($n=2, 3, \dots, N$) が決定される。すなわち、ある街路区間内で発生する交通損失が、当該街路区間に対応する相対オフセットのみならず隣接街路区間に対応する相対オフセットにも影響されると仮定した場合の、街路網内で発生する総交通損失を最小にするオフセットパターンが理論的には求められることになる。

しかしながら、各段階における最適化の次元数が2の場合に比べてかなり多くなるので、現実の街路網に適用する場合には、対象とする街路網の規模がたとえ小さくても計算量は膨大となるであろうし、また現実在即した形で交通損失関数 $g(\)$ を決定することは非常な困難を伴うことが予想されるので、実際問題への適用は必ずしも容易ではない。

4. 任意街路区間の相対オフセットの影響を考慮した場合

次に、ある1つの街路区間で発生する交通損失が、対

象街路網に属する任意の街路区間に対応する相対オフセットに影響を受ける場合におけるオフセットパターンの決定方法について検討してみる。この特別な場合としては、ある街路区間で発生する交通損失がすべての街路区間の相対オフセットに影響を受けるといった場合が考えられよう。

さて、いま θ を対象街路網中に含まれる各リンクに対応する相対オフセットのすべてから成るベクトルとすると、目的関数である街路網で発生する総交通損失は一般的に $F(\theta)$ と表わされる。

ここで、 $F(\theta)$ が次のようにいくつかの関数に分解される場合について考えてみる。すなわち、

$$\begin{aligned}
 F(\theta) = & F_1(\theta_1, \theta_2) + F_2(\theta_2, \theta_3) + \dots + F_{K-1}(\theta_{K-1}, \theta_K) \\
 & \dots\dots\dots (8)
 \end{aligned}$$

のように表わされる場合である。ただし、 $F_1 \sim F_{K-1}$ は任意関数、また $\theta_i (i=1, 2, \dots, K)$ は相互に共通要素をもたない θ の部分ベクトルで、一般性を失うことなく、
 $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_K)$

と書けるものとする。

このような場合の $F(\theta)$ の最小化は、いま $f_i(\theta_i)$ なる関数を、 θ_i を一組固定したという条件下で $\theta_{i+1} \sim \theta_K$ を最適化したときの $\sum_{j=i}^{K-1} F_j(\theta_j, \theta_{j+1})$ の値と定義したとき、以下のようにして行なえばよい。

すなわち、まず

$$f_{K-1}(\theta_{K-1}) = \min_{\theta_K} [F_{K-1}(\theta_{K-1}, \theta_K)]$$

なる関係式より、 θ_{K-1} のあらゆる組み合わせに対する f_{K-1} および θ_K (これを θ_K と表わす) を求める。

次に、この f_{K-1} を利用して $K-2, K-3, \dots, 1$ の順に次式のような繰り返しの関係を用いて、次々に f_i を計算する。

$$\begin{aligned}
 f_i(\theta_i) = & \min_{\theta_{i+1}} [F_i(\theta_i, \theta_{i+1}) + f_{i+1}(\theta_{i+1})] \dots (9) \\
 & (i=1, 2, \dots, K-2)
 \end{aligned}$$

式(9)を利用することにより、 θ_i に対する f_i と θ_{i+1} (これを θ_{i+1} と表わす) がすべて求められる。ところが、最後に求められる $f_1(\theta_1)$ は定義によれば θ_1 を一組固定したという条件下における $F(\theta)$ の最小値である。したがって、この $f_1(\theta_1)$ を最小にする θ_1 を見つければ、それはとりもなおさず絶対最適オフセットとなる。いま、それを θ_1^* と表わすことにする。このようにして、まず θ_1 の最適値が求められると、 θ_2 の最適値 θ_2^* は $f_1(\theta_1^*)$ に対応する θ_2 として求められるというように、先に計算してあった f_2, f_3, \dots, f_{K-1} を利用することにより、すべての θ_i の最適値 θ_i^* が決定される。したがって、 $F(\theta)$ が式(8)のように表わされる場合の最適オフセットパターンが得られたことになる。

このようにして、 $F(\theta)$ が式(8)のように表わされる

場合には、たとえある街路区間で発生する交通損失が、対象街路網のすべての相対オフセットの影響を受けるとしても最適オフセットパターンを求めることがわかったが、上に示したものはあくまでも原理的な方法論の展開であって、 $\theta_i (i=1, 2, \dots, K)$ の次元数が大きい場合には計算量が膨大になることは避けられない。なお、2. および 3. の場合は、 $F(\theta)$ が式 (8) のように表わされる場合の特別な場合であることを付言しておく。

$F(\theta)$ が式 (8) のように表わされない場合には動的計画法によって $F(\theta)$ の最小化を図ることは不可能となるので、かかる場合にはラグランジュの未定乗数法による方法¹³⁾あるいは傾斜法による方法¹³⁾などの適用を考えなければならないが、その場合には $F(\theta)$ の凸性が問題となろう。

ある街路区間で発生する交通損失が数交差点以遠のオフセットにも影響されるということは、原理的には成り立つ考え方であるが、街路区間途中での車の発生吸収、タクシーあるいはバスの発車停車、さらにはそれが原因となる走行速度の乱れなどの種々の攪乱要因を考慮するとき、このような前提はむしろ非現実的になるおそれもある。したがって、ここで述べた方法は、かりに $F(\theta)$ が式 (8) のように表わされたとしても、実際問題に適用する価値は必ずしも高いとは限らない。

5. 小規模街路網を対象とした最適オフセットパターンの決定と制御効果の評価

(1) 対象街路網と交通条件

計算例の対象街路網としては図-2 に示したような9交差点を含む格子状街路網を考える。各街路区間に付されている数値はその街路区間の長さ (m) を、また丸で

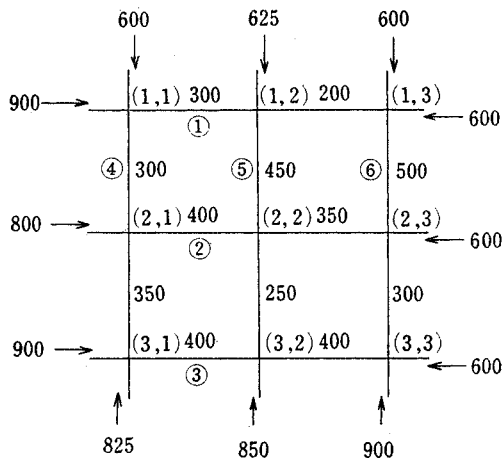


図-2 計算例の対象街路網

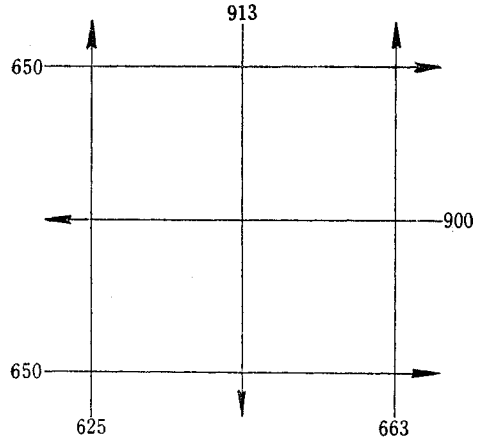


図-3 一方通行の方向と配分交通量

囲まれた数字は説明の便宜上の路線番号をそれぞれ表わしている。なお交差点幅は 50 m とし、道路は片側 2 車線とする。

街路網の周辺に矢印とともに記してある数値は、その方向の 1 車線あたりの 1 時間交通量であり、それらの交通はすべて直進交通のみとする。

図-3 はこの街路網に一方通行規制を制した場合の交通量とその方向であるが、この場合の交通量配分について説明しておく、たとえば西→東の交通ならば、図-3 の当該方向の交通量は図-2 の中央路線②の西から東に向う交通の半分ずつをその両わきの路線①、③に転換させた結果であり、また図-3 の中央路線②を東から西に向う交通量は図-2 における当該方向の交通量の総計である。南北方向についてもまったく同様である。

(2) 交通損失とオフセットの関係¹²⁾

図-2 に示したような街路網の最適オフセットパターン決定に先だち、交通損失とオフセットの関係を表わす交通損失関数を与えておく必要がある。ここではそのために 2 つの異なるモデルを用いて行なわれたシミュレーションの結果について要約しておく。

まず、シミュレーションの対象街路モデルとしては図-4 に示したような a, b, c 3 つの交差点がそれぞれ 300 m ずつ離れて存在する街路を考える。街路は一方通行 1 車線で、交差点幅は 50 m とし、交通の交差点における右左折はないものとする。なお、各交差点の信号周

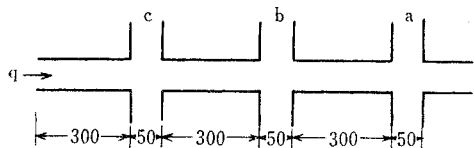


図-4 シミュレーションの対象街路

期は100秒、スプリットは50%とする。また、交通発生は交差点cの上流側300mの地点から行われるものとする。

車の移動の表現には流体的モデルと追従理論モデルの2つを使ってそれぞれ別個にシミュレーションを実行したが、まず前者のモデルでは街路を50mの小区間に分割し、それら小区間相互間の車の移動を密度-速度曲線を用いて行なっている。このモデルにおいては、交通損失として次のような量を考えた。すなわち、小区間に番号を付すとして、その第*i*区間における車の速度を v_i としたとき、当該区間内の車1台あたりの損失 S_i を

$$S_i = 1 - (v_i / v_{max}) \dots \dots \dots (10)$$

のように与えるのである。ただし、 v_{max} は車の最高速度である。式(10)で与えられる交通損失をここでは速度損失とよぶことにし、たとえば交差点*a*, *b*間で発生する総速度損失を S_{ab}^v のような記号で表わすものとする。

後者のモデルすなわち追従理論モデルにおいては車を1台1台取り扱い、その挙動を追従理論式¹⁴⁾で規定する。交通損失としては、待ち時間、走行所要時間および停止回数の3つを考える。

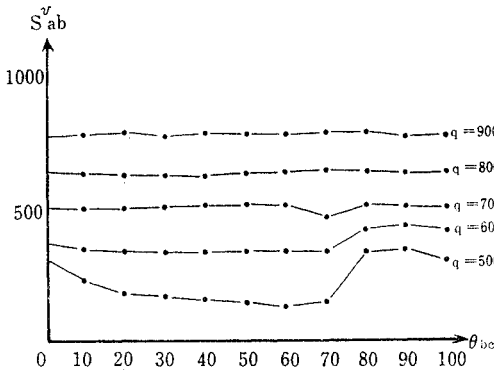


図-5 速度損失 S_{ab}^v と θ_{bc} の関係

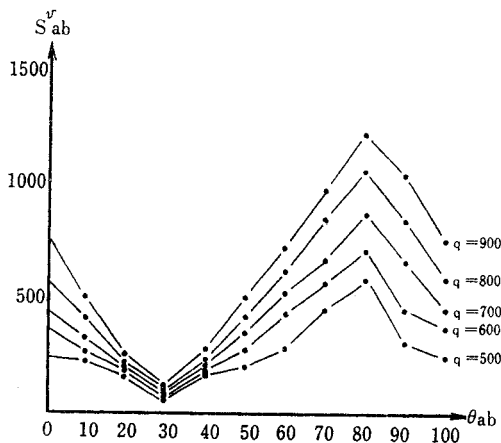


図-6 速度損失 S_{ab}^v と θ_{ab} の関係

以上2つのモデルによって、まず街路区間相互の交通損失の独立性が成立するか否かを検討すべく、交差点*ab*間の相対オフセット θ_{ab} を一定に保った状態で交差点*bc*間の相対オフセット θ_{bc} を変化させて、交差点*ab*間で発生する交通損失の変動状態を調べてみた。図-5は速度損失 S_{ab}^v について、結果をグラフ表示したものであるが、これより600台/時間以上の交通量については街路区間相互の交通損失の独立性がほぼ成立するとみなしてもよいことがわかる。ただし、図中の q は1時間あたりの交通量を表わすものとする。追従理論モデルによるシミュレーションから得られる3つの交通損失についてもほぼ同様の結果を得た。

このようにして、街路区間相互の交通損失の独立性がある程度以上の交通量についていえると、次にある街路区間で発生する交通損失がその街路区間に対応する相対オフセットによっていかなる影響を受けるかが問題となる。このために、次に交差点*bc*間の相対オフセットを一定とした状態で、交差点*ab*間で発生する交通損失と当該区間に対応する相対オフセット θ_{ab} の関係調べてみた。速度損失についてその結果を示すと図-6のようになり、 S_{ab}^v が θ_{ab} によって顕著な影響を受けていることがわかる。後の最適化の計算に資するべく、図-6の関係を便宜的に余弦関数で近似しておく、次式のようになる。

$$S_{ab}^v = (0.893q - 150.5) - (0.800q - 149.5)$$

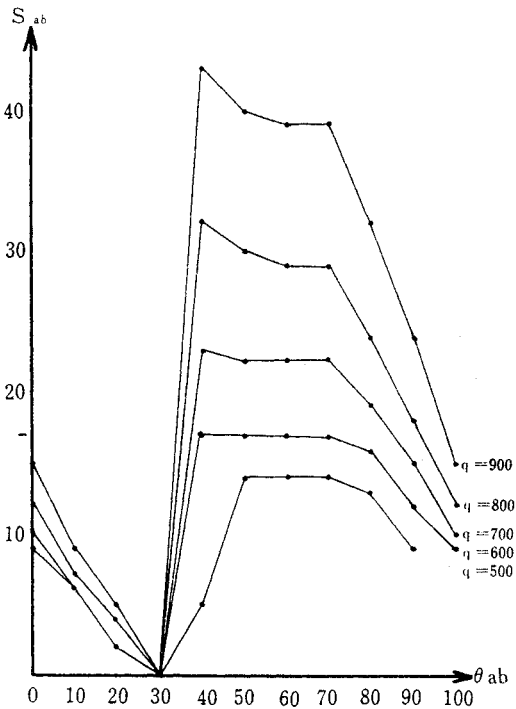


図-7 停止回数損失 S_{ab}^s と θ_{ab} の関係

$$\cdot \cos \left[\frac{2\pi}{C} \cdot (\theta_{ab} - \theta_{ab}^*) \right] \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 q は1車線あたりの1時間交通量であり、また θ_{ab}^* は交通損失が最小になる相対オフセットで、図-6 の場合 30 秒である。

図-6 と同様の関係は待ち時間損失および走行所要時間損失についても成立したので、それらの関係をやはり後の計算に供するために余弦関数で表わしておく、まず待ち時間損失 S_{ab}^w については

$$S_{ab}^w = (3.360 q - 1360) - (3.360 q - 1360) \cdot \cos \left[\frac{2\pi}{C} \cdot (\theta_{ab} - \theta_{ab}^*) \right] \dots\dots\dots (12)$$

のような式が書ける。走行所要時間損失 S_{ab}^t については

$$S_{ab}^t = (6.073 q - 1969) - (3.360 q - 1155) \cdot \cos \left[\frac{2\pi}{C} \cdot (\theta_{ab} - \theta_{ab}^*) \right] \dots\dots\dots (13)$$

となる。なお、これら2つの損失の単位は秒である。

停止回数損失 S_{ab}^s は、 θ_{ab} に対してほかの3つの交通損失とは若干異なった傾向を示し、図-7 のようになった。すなわち、停止回数損失はある相対オフセットを境に急激な変化を示し、かつある範囲の相対オフセットに対しては一定値をとる傾向がある。

(3) オフセットパターンの決定と制御効果の算定¹³⁾

対象街路網における各交差点の信号周期は100秒、スプリットは50%とし、また交通損失については街路区間相互の独立性を前提として、(2)で得られた式(11)~(13)の交通損失関数を最適化の計算に用いる。停止回数損失については図-7のような複雑な変化を、あえて余弦関数などの単純な関数で表現することをせずに、各オフセットに対応するシミュレーションから得られた停止回数をそのまま用いることとした。その場合、シミュレーションによって与えられていない交通量については、内挿法によって損失値を与えた。なお、いずれの交通損失についても、シミュレーションは300mの長さをもつ街路区間についてののみ行われているので、300m以外の長さをもつ街路区間における交通損失関数を決定するには、本来、逐一シミュレーションを実行すべきであるが、ここでは便宜的に損失最小に対応する相対オフセット θ^* を隣接2交差点の走行所要時間と仮定し、300mの街路区間に対する交通損失曲線を相対オフセット軸に沿

って平行に移動した曲線を用いることとした。使用計算機はFACOM 230-60で、オフセットの探索格子間隔は10秒である。

動的計画法を用いた街路網の総交通損失最小の規準によるオフセット設定がもたらす制御効果を知るためには、総交通損失値の比較の基準が必要である。ここではその比較の基準として3つのものを考えた。すなわち、ランダム・オフセットパターンに対応する総交通損失、①,②,③の路線をそれぞれ独立に系統制御した場合の総交通損失および①,②,③,⑥の路線を系統制御した場合の総交通損失である。

まず、ランダム・オフセットパターンであるが、これは各交差点のオフセットをまったくランダムに設定した場合であり、現実の問題では系統制御をまったく行わない場合に相当する。計算は交通損失ごとに100個のランダム・パターンについて総交通損失を求めたが、表-1にそのうちの最大値、最小値および平均値を掲げている。なお、系統制御を行なった場合との比較に供するものとしては平均値を採用することにする。

次に、①,②,③の路線の系統制御であるが、街路区間相互の交通損失の独立性が成立することを前提としているので、それらの路線に対するオフセット設定は各街路区間ごとに独立に最適化を行うことによって可能である。

①,②,③,⑥の路線の系統制御についても、それらの路線がツリー状をなしていることから、オフセット設定は各街路区間ごとに独立に行なえばよく問題はない。4つの路線で形成するツリーは対象街路網のすべての交差点を含んでいることから、最大ツリーとよばれる。1つの街路網に対してとりうる最大ツリーの数は多く、信号制御の立場からはそのうちで最も系統制御効果のあがるものを選ぶべきであって、そうしたツリーを形成することも、最も制御効果の大きい街路区間から順次ループが生じないように街路区間を選んでゆけばよいというように¹⁵⁾、理論的にはきわめて容易なことであるが、ここでは交通量の多いものから順次選ばれた4つの路線からなる最大ツリーを比較の対象とした。

さて、2.に示した方法によって決定されたオフセットパターンを、交差点(1,1)の水平方向リンクに対する青信号開始時刻を基準時とした絶対オフセットの形で示

表-1 ランダム・パターンの交通損失値

項目	損失種別 通行システム		速度損失		走行所要時間損失(秒)		待ち時間損失(秒)		停止回数損失(回)	
	二方通行	一方通行	二方通行	一方通行	二方通行	一方通行	二方通行	一方通行	二方通行	一方通行
最大値	28 292	33 894	135 688	145 200	67 384	77 556	1 107	1 114		
最小値	19 438	14 005	105 602	87 130	40 689	28 282	608	500		
平均値	24 181	23 941	119 270	118 367	53 056	52 164	813	794		

表-2 最適オフセットパターン (単位: 秒)

交差点名	損失種別		速度損失		走行所要時間損失		待ち時間損失		停止回数損失	
	通行システム		二方通行	一方通行	二方通行	一方通行	二方通行	一方通行	二方通行	一方通行
	二方通行	一方通行	二方通行	一方通行	二方通行	一方通行	二方通行	一方通行	二方通行	一方通行
(1, 1)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(1, 2)	30	20	40	20	40	20	30	30	30	30
(1, 3)	70	50	70	50	70	50	50	50	50	50
(2, 1)	60	80	50	80	50	80	70	70	70	70
(2, 2)	90	50	90	50	90	50	90	50	90	50
(2, 3)	40	20	30	20	30	20	20	20	20	20
(3, 1)	10	40	10	40	10	40	40	40	40	40
(3, 2)	50	70	60	70	60	70	70	70	70	70
(3, 3)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

すと表-2 のようになる。本表より、まず走行所要時間損失と待ち時間損失に対するオフセットパターンがまったく一致しており、一方通行システム下では速度損失に対するオフセットパターンもそれらに一致していることがわかる。オフセットパターン設定に対して、動的計画法という数学的方法を使い得る前提条件として、交通損失関数 $g(\theta, q)$ がかなりの厳密性、安定性をもって与えられる必要があるように見えるが、上述のことからすれば、交通損失関数形がある程度異なっても街路網全体としての最適オフセットパターンは安定する可能性があるといえる。停止回数損失に対するオフセットパターンは、他の3つの損失に対するオフセットパターンより若干異なっているが、これは(2)でも述べたように、オフセットに対する停止回数損失の変化の状態がほかの交通損失に比べて著しく異なっていることに起因していると考えられる。

表-3 には制御効果の評価のために、各種制御方式に対する1周期あたりの街路網全体で発生する交通損失値とその相対値および参考に資するべく計算時間が示されている。本表において、ランダム・パターンというのは先に述べたランダム・オフセットパターンのことであり、交通損失値としては平均値が採用されている。また、路線系統は①、②、③の路線について系統制御をしたものであり、最大ツリーはそれに⑥の路線の系統制御を加えたものである。さらに、全体的最適は2. に示し

た方法によってオフセットの系統制御をしたものである。なお、相対値は二方通行システム下のランダム・パターンに対応する交通損失を100としたものである。

この表より、まず独立した路線の系統制御による交通損失の減少割合が予想外に少なく、一方通行システム下の走行所要時間損失の場合はかえって大幅に増加しているという奇妙な結果がでていることがわかる。これは系統制御が行われない垂直方向の路線に対するオフセットがまったくランダムに設定されるので、そのパターンがあまり好ましくないのもであると、一方通行下では一方方向に大量の交通が流れるために、そこで発生する損失が予想以上に多くなって、系統路線での交通損失の減少分を相殺し、さらにはそれを上回ってしまうこともあるからであると判断される。

これに対し、最大ツリーの系統制御では明確な制御効果がみられ、このことから路線系統制御を基盤として街路網の制御を行うのであれば、独立した何本かの路線に対し個々に系統制御を行うのではなく、必ずツリー状路線を対象とし、系統化する路線相互間に関連をもたせて制御することが望ましいことがわかる。

本研究で問題としている動的計画法による全体的最適制御は、当然のことではあるが最も小さい交通損失を与えている。すなわち、ランダム・パターンの平均損失と比較した場合、二方通行システム下では速度損失、待ち時間損失、停止回数損失の各損失はいずれも約50%、走行所要時間損失は約30%それぞれ減少しており、また一方通行システム下では前3者が約75~85%、後者が約50%減少している。最大ツリーの系統制御との比較では、二方通行システム下の速度損失、走行所要時間損失および一方通行システム下の走行所要時間損失、停止回数損失が約10%、二方通行システム下の待ち時間損失が約20%、一方通行システム下の速度損失が約30%、待ち時間損失が約50%それぞれ減少している。すなわち、路線系統制御を基盤とした制御のうちでは最も効果的と思われる最大ツリーの系統制御と比較しても、全体的最適制御は依然としてかなりの程度有利であることが

表-3 各種制御方式の損失値・計算時間比較

項目 制御方式	損失種別 通行システム	速度損失			走行所要時間損失			待ち時間損失			停止回数損失		
		損失値	相対値	計算時間(秒)	損失値	相対値	計算時間(秒)	損失値	相対値	計算時間(秒)	損失値	相対値	計算時間(秒)
		ランダム・パターン	二方通行	24 181	100	3	119 270	100	3	53 055	100	3	813
	一方通行	23 941	99.0	3	118 367	99.2	3	52 164	98.3	3	794	97.7	3
路線系統	二方通行	22 610	93.5	2	118 526	99.4	2	50 963	96.1	2	591	72.7	4
	一方通行	17 484	72.3	2	157 222	131.8	2	52 238	98.5	2	608	74.8	4
最大ツリー	二方通行	16 561	68.5	6	94 046	78.9	5	29 714	56.0	5	464	57.1	4
	一方通行	8 950	37.0	6	73 267	61.4	6	14 012	26.4	5	136	16.7	4
全体的最適	二方通行	13 737	56.8	344	85 141	71.4	340	22 713	42.8	336	456	56.1	54
	一方通行	5 973	24.7	366	64 527	54.1	364	6 735	12.7	360	121	14.9	71

わかるのである。

しかしながら、計算時間は最大ツリーの場合と比べてもかなり多く、いわゆるプログラム形成制御を行う場合には不利となるおそれはある。

6. オフセット最適化手法の応用例

ここでは動的計画法による街路網のオフセット最適化手法の、現実の信号制御において発生すると思われるいくつかの問題に対する適用ないしは拡張方法について述べる。以下に示す個々の例は 2. に示した方法を前提としているが、まったく同様な考え方は 3., 4. に示した方法についてもあてはまる。

(1) 重要交差点あるいは重要街路区間がある場合

対象街路網の中に、大型車の集中、右左折者、横断歩行者、交差点構造の欠陥などが原因して渋滞が生じやすい交差点すなわちここでいう重要交差点があったり、あるいは車の発生吸収、タクシー、バスの発車停車が多く、車の円滑な流れが阻害されやすい街路区間、交差点間距離が短い区間など重要街路区間があったりする場合が少なくない。

かかる場合、重要交差点の隣接交差点との関連におけるオフセット設定あるいは重要街路区間の相対オフセット設定は微妙であり、最適オフセットが存在するとした場合、そのオフセット以外のオフセットを設定することは、混乱を招く大きな危険性をはらむことになる。しかるに、街路網の全体的観点からそうした街路区間に設定される相対オフセットは、必ずしもその街路区間独自の最適相対オフセットに一致するという保証はない。

したがって、このような場合にはまず問題となる街路区間の相対オフセットを優先的に与えてしまい、その条件のもとに 2. の方法を使えばよい。すなわち、いま交差点 $(m, n-1)$ と交差点 (m, n) にはさまれる街路区間が問題となる街路区間としたとき、式 (3) に対応する繰り返しの関係式として、

$$f_n(v^{\theta^{n-1}}) = \min_{h_{\theta^{n-1}}} [\dots] \dots \dots \dots (14)$$

を考えるのである。ここに

$$h_{\theta^{n-1}} = (h_{\theta^{1,n-1}}, h_{\theta^{2,n-1}}, \dots, h_{\theta^{m-1,n-1}}, h_{\theta^{m+1,n-1}}, \dots, h_{\theta^{M,n-1}})$$

であり、 $h_{\theta^{n-1}}$ に比べて要素が1つ少ないベクトルである。このことはすなわち、第 n 区間の最適化に関する次元数が減少することであるから、計算量は 2. の場合に比較して少なくなることがわかる。

したがって、ある定められた値にオフセットを設定しなければならないような街路区間が多くあればあるほど、動的計画法では計算が容易になるだけであって、2.

表-4 3つの相対オフセットが固定された場合のパターン

交差点名	(1,1)	(1,2)	(1,3)	(2,1)	(2,2)	(2,3)	(3,1)	(3,2)	(3,3)
オフセット(秒)	0	10	40	30	60	0	0	50	90

の方法の適用上における問題はまったく発生しないことがわかる。

例として、図-2の街路網において $h_{\theta^{1,1}}=90$ (秒)、 $v_{\theta^{2,2}}=10$ (秒)、 $v_{\theta^{2,3}}=10$ (秒) のように、3つの相対オフセットが固定された場合について最適化の計算を行ってみた。ただし、通行システムは二方通行とし、交通損失は走行所要時間とする。まず、オフセットパターンは表-4のようになり、 $h_{\theta^{1,1}}$ 、 $v_{\theta^{2,2}}$ 、 $v_{\theta^{2,3}}$ が与えられた値になっている反面、他の相対オフセットで表-2のパターンより若干くずれているものがあることがわかる。また、総交通損失は95250(秒)となり、表-3の値より10%あまり増加した。しかしながら、計算時間は予想どおり139秒と表-3の値に比べて大幅に減少した。

上では、 $h_{\theta^{m,n-1}}$ がただ1つの値に固定されてしまう場合を考えたが、 $h_{\theta^{m,n-1}}$ に上下限が付されるような場合には、式 (14) にかわる式として

$$f_n(v^{\theta^{n-1}}) = \min_{\substack{h_{\theta^{n-1}} \\ \theta_i \leq h_{\theta^{m,n-1}} \leq \theta_u}}$$

を考えればよく、この場合にも $h_{\theta^{m,n-1}}$ の探索領域がせばめられることから計算はかえって容易となる。ただし、上式の θ_u 、 θ_l はそれぞれ $h_{\theta^{m,n-1}}$ の上限値および下限値である。この種の問題の代表例は、交差点間距離が短く、ある範囲のオフセットに対しては待ち行列の後尾が上流側交差点にまで伸長する場合で、かかる場合には当該街路区間の相対オフセットの探索領域を待ち行列の後尾が上流側交差点に及ばないような相対オフセットに限定する必要がでてくる。たとえば、いまある街路区

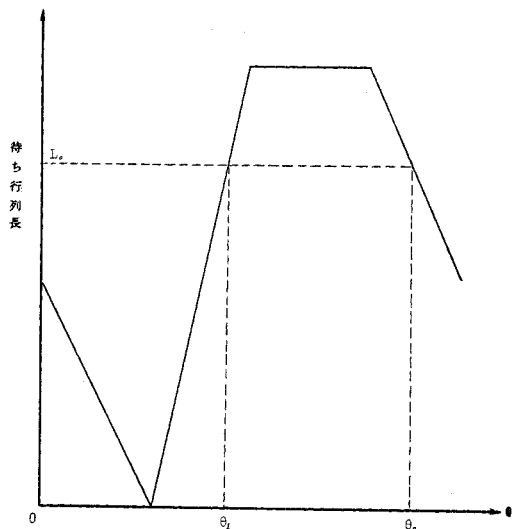


図-8 待ち行列長とオフセットの関係

間における待ち行列長と相対オフセットの関係が図-8のようになったものとし、当該街路区間における待ち行列長の許容限界が $L_0(m)$ であるとする、この場合の相対オフセットの条件式は $0 \leq \theta \leq \theta_1$ および $\theta_2 \leq \theta \leq C$ となる。ここに、 θ_1, θ_2 は図-8 に示したように、 L_0 に対応する相対オフセット値である。

(2) 主要交差点間に小交差点がある場合

普通われわれが目にする街路では、主要交差点間に小交差点がある場合が多い。こうした場合の 2. の方法の適用法としては、最初の対象街路網として小交差点、小街路を含むものを考えれば問題はないが、その場合には計算量が不必要に多くなるという欠点が生じてくる。

このようなことから、他の有効な方法について考えなければならないが、まず一方通行の場合には、上流側主要交差点から、下流側主要交差点の1つ上流の小交差点まで局所的な路線系統オフセットを設定するのである。小交差点におけるスプリットは主要街路の交通流に対して、より長い青信号時間が表示されるように設定されることを考え合わせると、こうすることによって上流側主要交差点を流出した交通は途中の小交差点ではほとんど交通損失を被ることなく下流側主要交差点に到達しうることになり、したがって小交差点を無視した形での 2. の方法はそのまま適用できることになる。

次に二方通行の場合の処理は、小交差点の主要流方向に対する青信号時間を十分に長く設定し、上下流の主要交差点のオフセットがすでに与えられているという条件のもとに、その街路区間全体にわたって路線系統オフセットを与えるという方法をとることにすれば、主要交差点を流出した交通が途中の小交差点で交通損失を被ることは少なくなり、したがって 2. の方法がそのまま適用できることになる。なお、対象街路区間の両端交差点におけるオフセットが与えられているという条件下における損失最小のオフセット設定は動的計画法を用いることによって行なえる。

また、より望ましい方法としては、小交差点の影響をも含んだ形で対象街路区間の交通損失関数を始めから与えておくという方法があるが、この場合には 5. (2) で検討したような最大値、最小値を1つずつ有する損失関数が得られない可能性もある。しかしながら、このことは次に述べるように 2. の方法を使う上でまったく問題はない。

(3) 交通損失関数が不連続な場合

2. における理論展開では、あたかも損失関数 $g(\theta, q)$ が連続かつ1つの既知関数でなければならないような印象を与えるが、実際には不連続関数であっても、また極

端な場合としてまったく関数として評価できない場合であってもいこうにさしつかえないのである。

すなわち、まず不連続関数の場合について考えてみると、いま J 個の不連続点があるとした場合には $g(\theta, q)$ は一般的に

$$g(\theta, q) = \begin{cases} {}^1g(\theta, q) & 0 \leq \theta < {}^1\theta \\ {}^2g(\theta, q) & {}^1\theta \leq \theta < {}^2\theta \\ \vdots \\ {}^{J+1}g(\theta, q) & {}^J\theta \leq \theta < C \end{cases}$$

ただし、 ${}^j\theta$ ：関数が不連続となる相対オフセットの値
 ${}^jg(\theta, q)$ ：各領域の関数

のように与えられる。したがって、この関係を計算プログラムの中に組み込んでおいて、該当する街路区間が含まれる区間の最適化の過程において、その街路区間の交通損失関数を探索する θ の値に応じて適宜変えつつ計算を実行すればよいわけである。このことによって計算量は若干増加するであろうが、各区間の最適化の次元数はもとのままであるから、さしたる問題ではない。

例として、5. (2) で検討した停止回数関数として図-9のような曲線を用いる場合が考えられる¹²⁾。ちなみにこの曲線の式を示しておく以下のとおりである。

$$S_{ab}^s = \begin{cases} \frac{-(0.0803q - 32.3)}{60} \cdot (\theta_{ab} - \theta_{ab}^*), & 0 \leq \theta_{ab} < \theta_{ab}^* \\ \frac{(0.0803q - 32.3)}{10} \cdot (\theta_{ab} - \theta_{ab}^*), & \theta_{ab}^* \leq \theta_{ab} < \theta_{ab}^* + 10 \\ 0.0803q - 32.3, & \theta_{ab}^* + 10 \leq \theta_{ab} < \theta_{ab}^* + 40 \\ \frac{-(0.0803q - 32.3)}{60} \cdot (\theta_{ab} - C - \theta_{ab}^*), & \theta_{ab}^* + 40 \leq \theta_{ab} < C \end{cases}$$

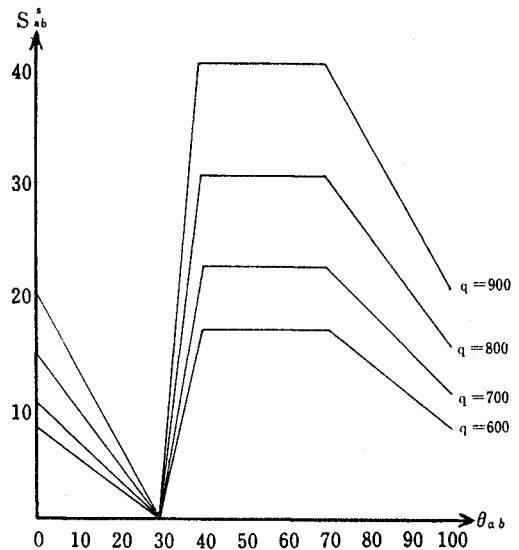


図-9 S_{ab}^s と θ_{ab} の修正曲線

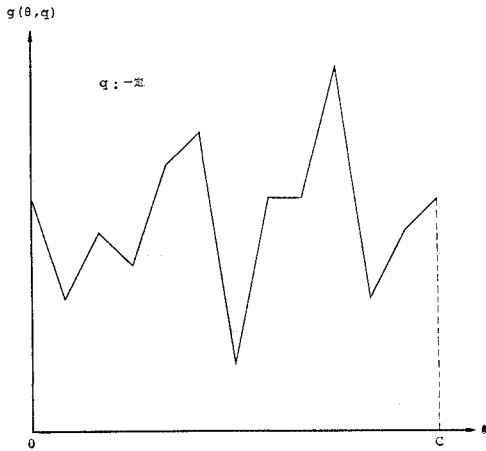


図-10 $g(\theta, q)$ が関数形を構成しない例

図-2 の街路網で二方通行システムの場合について実際に計算を行なってみると、まずオフセットパターンは表-2 に示したものとまったく一致した。また、総停止回数損失は 455 回となり、これも表-3 に示した値とほぼ一致した。しかしながら、計算時間は 384 秒となり激増した。

次に、部分的にしらまったく関数が使用できないような場合、たとえば θ の変化に対する交通損失が図-10 のようにまったくでたらめに変化している場合についてであるが、このような場合には $g(\theta, q)$ をもはや関数としてとらえずに、 θ と q の一組に対して与えられる数値と解釈して計算を行なえばよいのである。すなわち、実験あるいはシミュレーションによって、 θ の探索間隔に対応して交通損失 $g(\theta, q)$ が図-10 のように与えられたならば、そのおのおのの値を θ の値との関連でプログラム中のデータとして記憶しておき、最適化の計算過程でそれらの値を逐一ひき出す方法を講ずればよい。このためには $g(\theta, q)$ を記憶するためのメモリーが多く必要となるが、そのかわりいわゆる関数形を用いる場合のように $g(\theta, q)$ をそのつど計算しなければならない事がなくなり、従って最適化の計算量はかなり減少することが期待できる。5.(3) における動的計画法による停止回数損失の最小化にはこの方法を用いており、実際に計算時間は他の損失の場合に比べて著しく少なくなっている。

(4) 路線にウェイトをつける場合

対象街路網の中に、特に疎通能力を高めるよう制御したいと考えられる路線あるいは逆に他の路線のために戦略的に犠牲にしたいと考える路線が何本かある場合がある。このような場合には、そうした路線に含まれる街路区間の損失関数 $g(\theta, q)$ に適当な重み係数 w を乗じて、 $w \cdot g(\theta, q)$ を新たな損失関数と考え、この状態で 2. の方法をそのまま適用すればよい。そうすれば、疎通能力

表-5 路線にウェイトをつけた場合のパターン

交差点名	(1,1)	(1,2)	(1,3)	(2,1)	(2,2)	(2,3)	(3,1)	(3,2)	(3,3)
オフセット(秒)	0	40	60	50	90	30	10	50	90

を高めたい路線にはおのずから有利なオフセット設定が行われるであろうし、逆に犠牲にしたい路線には不利なオフセットが設定されることになる。

例として、通行システムが二方通行である図-2 の街路網について、①,②,③の3つの路線の損失関数をすべて 20 倍して最適化の計算を行ってみた。ただし、交通損失は走行所要時間損失である。

まず、表-5 に示したものは計算の結果得られたオフセットパターンであるが、これを表-2 のパターンと比較してみると、4つの街路区間における相対オフセットを除いてすべての相対オフセットが変化しており、特にウェイトをつけた①,②,③の路線に関しては、街路網の西から東に向う交通に対して優先オフセットに近いと思われるオフセットが設定されていることがわかる。

また、街路網の総交通損失は 86 993 (秒) であり、表-3 に示した最小値よりも若干多くなった。なお計算時間は表-3 の値と比べて、あまり大きい差異はなかった。

別の方法として、(1) で述べたようにそうした路線のオフセットをあらかじめ設定してしまっておいたり、または戦略的に、望ましいオフセットの範囲を限定しておくという方法もある。この場合には(1) で述べた理由と同じ理由によって、計算量は減少するはずである。

(5) 路線系統制御の効果を生かした全体的制御

(1) あるいは(4) の特別な場合とも考えられるが、なんらかの判断によって、ある路線には街路網の全体的バランスに左右されることなく、優先的に路線系統オフセットを設定したい場合がある。たとえば、該当路線が一方通行で、かつ道路条件がきわめてすぐれているとき、その路線の系統オフセットを維持することが、制御効率を発揮する上で不可欠の要件であると判断されるような場合などである。

このような場合には、(1) と同様にして対象路線を構成する街路区間の相対オフセットをあらかじめ与えておいて、その条件のもとで 2. の方法による最適化を行なえばよいのである。その場合、すでに与えられている街路区間の相対オフセットについてはいささいの探索を要しないので、計算量が減少することは言をまたない。

この特別な場合として、図-1 に示した対象街路網で、垂直方向の路線すべてに路線系統制御を行なうという場合が考えられるが、このような場合にはループに沿う相対オフセットの実現可能条件式より、たとえば第 n 区間における最も北よりの水平方向街路区間に対応する

相対オフセット $h_{\theta^1, n-1}$ が与えられると、同一区間における他のすべての相対オフセットがそれによって決定されてしまう。すなわち、まず $h_{\theta^2, n-1}$ は

$$h_{\theta^2, n-1} = h_{\theta^1, n-1} + v_{\theta^1, n} - v_{\theta^1, n-1}$$

として、 $h_{\theta^1, n-1}$ とあらかじめ与えられる垂直方向の街路区間の相対オフセットによって与えられる。次に、 $h_{\theta^3, n-1}$ は

$$\begin{aligned} h_{\theta^3, n-1} &= h_{\theta^2, n-1} + v_{\theta^2, n} - v_{\theta^2, n-1} \\ &= (h_{\theta^1, n-1} + v_{\theta^1, n} - v_{\theta^1, n-1}) + v_{\theta^2, n} - v_{\theta^2, n-1} \\ &= h_{\theta^1, n-1} + (v_{\theta^1, n} - v_{\theta^1, n-1}) + (v_{\theta^2, n} - v_{\theta^2, n-1}) \end{aligned}$$

として、やはり $h_{\theta^1, n-1}$ と垂直方向の相対オフセットによって表わされる。

同様にして、一般に $h_{\theta^m, n-1}$ は

$$h_{\theta^m, n-1} = h_{\theta^1, n-1} + \sum_{i=1}^{m-1} (v_{\theta^i, n} - v_{\theta^i, n-1})$$

となる。

さらに各区間の水平方向の相対オフセットにはなんらの関係もない。したがって、このような場合における街路網全体の総損失の最小化は、各区間ごとに独立して、かつ最も北よりの水平方向街路区間に対応する相対オフセットのみについて行なえばよく、2.の方法を使う必要がないことがわかる。このことを式で表わすと、

$$\begin{aligned} \min_{h_{\theta^1, n-1}} \left[\sum_{m=1}^M \{ & h_{\theta^1, n-1} \{ h_{\theta^1, n-1} (h_{\theta^1, n-1} + \sum_{i=1}^{m-1} (v_{\theta^i, n} - v_{\theta^i, n-1}), \right. \\ & h_{\theta_1, n-1}) + h_{\theta_2, n-1} (h_{\theta^1, n-1} + \sum_{i=1}^{m-1} (v_{\theta^i, n} - v_{\theta^i, n-1}), \\ & \left. h_{\theta_2, n-1}) \} \right] \quad (n=2, 3, \dots, N) \end{aligned}$$

となり、上式を満たす $h_{\theta^1, n-1}$ を求めることによって街路網のオフセットパターンは完全に決定される。

このように、垂直方向路線すべてに路線系統オフセットを設定するという条件のもとにおける街路網の総損失最小化規準によるオフセットパターン決定の問題はきわめて容易である。

例として、図-2 に示した街路網において①,②,③の3つの路線の相対オフセットを路線系統オフセットに固定するという条件のもとで街路網全体の総交通損失を最小にするオフセットパターンを求めてみた¹²⁾。ただし、通行システムは二方通行で、交通損失は走行所要時間とする。

計算の結果得られたオフセットパターンは表-6 のようになり、指定した3つの路線の相対オフセットは、本稿には示さなかったが路線系統制御の場合のオフセット値に等しくなっており¹²⁾、④,⑤,⑥の路線に対する相対

表-6 路線系統の効果を生かしたパターン

交差点名	(1,1)	(1,2)	(1,3)	(2,1)	(2,2)	(2,3)	(3,1)	(3,2)	(3,3)
オフセット(秒)	0	40	60	50	90	20	10	60	70

——— : 系統制御をする街路
 - - - - : 系統制御をしない街路

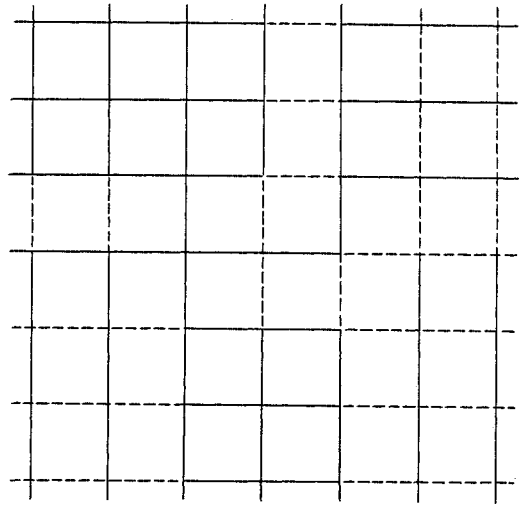


図-11 各種制御方式が混在する街路網

オフセットは交差点 (2,3) と交差点 (3,3) には含まれる街路区間を除いて表-2 に示したものと一致した。

総交通損失は 92 023 (秒) で、単に路線系統制御だけを行なった場合に比べ約 20% 減少しており、さらに最大ツリーの系統制御に対する総交通損失をも若干ながら下回っている。

(6) 路線系統およびループの最適化を基盤とする制御が混在する場合

図-11 に示したように、1つの街路網を各部分ごとに路線系統制御、ツリーの系統制御あるいは動的計画法によるループの最適化を基盤とする制御というように3つの異なる制御方式を混在させた形で制御しようとする場合には、2. に述べた方法はどのように適用できるであろうか。

まず、最も簡単な方法としては、ループを基盤としている部分に局部的に 2. の方法を適用して、そこにおけるオフセットパターンを決定してしまい、残るツリーおよび路線の部分におけるオフセットパターンはそれぞれ独自に決定するという方法が考えられる。この方法は最も計算時間のかからない有効な方法であろう。

これに対して、計算量は多くなるが 2. の方法をそのまま機械的に適用できる方法として、系統制御を行わない街路区間の交通損失関数をすべての θ の値について一定値とおく方法が考えられる。これによってその街路区間は最適化の計算過程で自動的に制御対象からはざされることになり、したがって系統制御の対象となる街路区間のオフセットは優先的に有利なパターンを与えられるように決定される。

(7) 街路網が任意形状をしている場合

対象街路網が秩序正しい格子状をしていない場合においても、適当な区間分割を施すことにより 2. と同様な方法によって最適オフセットパターンの決定を行うことができる。すなわち、たとえば 図-12 に示したような形状の街路網に対しては、一点鎖線で示したような6つの区間に分けるという分割方法が考えられよう。この例は同一区間にループが含まれないように配慮した分割の一例であって、そのほかにもいろいろな分割方法が考えられることはいうまでもない。このように対象街路網が分割されてしまえば、基本的に格子状街路網と同様の考え方に従って定式化を行えばよいのである。

(8) 制御効率からみた交差点立体化の問題

対象街路網の中のどの交差点を立体化すれば全体としての制御効率が最も向上するかという問題であるが、このためには交差点を1つ1つ立体化したものとして、そのつど 2. の方法によって最適化を行ないそれに対応する総交通損失を求めて、最も小さい総交通損失に対応する交差点の立体化をもって解とすればよい。立体化すべき交差点が2つ以上の場合についても同様である。

以上、2. の方法が各種の問題に適用されることを示したが、上述の8つの場合が複合している問題についても同様に適用可能であることについてはいうまでもない。また、先にも述べたが、3. および 4. の方法の適用方法は 2. の場合に準ずればよい。

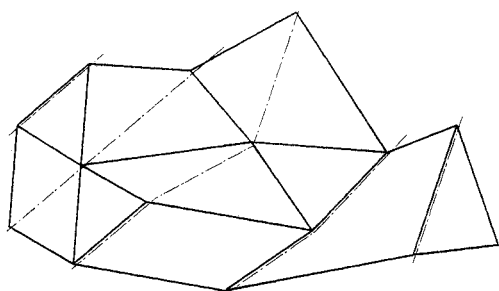


図-12 複雑な街路網の区間分割例

7. む す び

本稿においては、ある街路区間で発生する交通損失が当該街路区間の相対オフセットのみに影響される場合、隣接街路区間の相対オフセットにも影響される場合および任意街路区間の相対オフセットに影響される場合の3つの場合について、動的計画法による街路網のオフセットパターンの決定方法を示し、ついで最初の場合について小規模街路網を対象とした計算例を示した。計算例で用いた交通損失関数を決定したシミュレーションモデル

はそれほど精緻なものではなく、また対象とした街路網および交通条件が特定のものであることから、計算の結果得られた数値自身はそれほど意味のあるものではないし、したがってここでの結論が一般的な街路網に対しても成立するものではない。しかしながら、単なるオフセット設定のいかんによって交通損失が意外とも思われる大きさで変化することは興味ある事実であろう。

最後に、街路区間相互の交通損失の独立性が成立する場合の方法について、それが各種問題に適用可能であることを示したが、ここに述べられている問題以外の問題についても若干のくふうをこらすことによって応用ができるであろう。

今後の課題としては、現実の街路におけるつぶさなる観測および実験をとおして交通損失関数を決定し、それをういた制御の効果を確かめることが最も重要なことであると考えられる。

参 考 文 献

- 1) Hiller, J.A. : Appendix to Glasgow's Experiment in Area Traffic Control, Traffic Engineering and Control, 7 (9), 1966.
- 2) Allsop, R.E. : Selection of Offsets to Minimize Delay to Traffic in a Network Controlled by Fixed-Time Signals, Transportation Science, 1967.
- 3) Allsop, R.E. : Choice of Offsets in Linking Traffic Signals, Traffic Engineering and Control, 1968.
- 4) Gartner, N. : Optimum Synchronization of Traffic Signal Networks by Dynamic Programming, Proceedings of the Vth International Symposium on the Theory of Traffic Flow and Transportation, 1971.
- 5) Chang, A. : Synchronization of Traffic Signals in Grid Networks, IBM Journal, 1967.
- 6) Robertson, D.I. : TRANSYT, Proceedings of the IVth International Symposium on Traffic Flow Theory, 1969.
- 7) 越 正毅 : 交通信号の系統制御 オフセット パターンの一解法, 土木学会論文報告集, 147号, 昭和42年2月
- 8) 奥谷 巖 : 面制御に関する基礎的考察, 交通工学, 第3巻4号, 昭和43年7月
- 9) Okutani, I. : Synchronization of Traffic Signals in a Network for Loss Minimizing Offsets, Proceedings of the Vth International Symposium on the Theory of Traffic Flow and Transportation, 1971.
- 10) Newell, G.F. : Traffic Signal Synchronization for High Flows on a Two-Way Street, ITTE Research Report No. 46, 1967.
- 11) Schalkwijk, W.F. : Simulation of Traffic Flow through Large Traffic Nets, Proceedings of the IVth International Symposium on Traffic Flow Theory, 1969.
- 12) 奥谷 巖 : 街路網における交通信号制御の 効果に関する一考察, 交通科学, 第2巻1号, 1971年6月.
- 13) 奥谷 巖 : 街路網のオフセットパターンの決定方法に関する一提案, 道路, 1970年7月.
- 14) 佐佐木綱 : 交通流理論, 技術書院, 昭和40年4月
- 15) Berge, C. : The Theory of Graph, John Wiley & Sons Inc., New York, 1962.

(1973.4.18・受付)