

# DPによる系統信号システムの制御パターン 切り替え政策の最適化計算

久井 守 (知能情報システム工学科)

山本 耕作 (知能情報システム工学専攻)

## Optimization of Switching Policy of Control Patterns for Signal Coordination by Using DP Technique

Mamoru HISAI(Department of Computer Science and Systems Engineering)

Kousaku YAMAMOTO(Graduate Student of Computer Science and Systems Engineering)

In this paper, a coordinated signal control based on pattern selection was chosen as the subject of the research and the relationship between control efficiency and frequency switching control pattern according to traffic fluctuation was studied. The switching policy was optimized by using DP, and total delay as a criterion was evaluated through time-scanning simulation. From some computational examples, it was found that switching control that is responsive to traffic demand improves control efficiency. However, it was also found that the avoidance of excessive switching was better except for remarkable traffic fluctuation because the reverse effect by the excessiveness was recognized.

**Key Words:** *pattern selection, cycle length, offset transition, DP, total delay*

### 1. はじめに

ITS が進展する中で、例えば UTMS にみられるように交通信号制御の高度化の試みがいくつも実行されるようになってきた。最新の通信技術と情報処理技術を活用した信号制御の高度化は今後さらに進められるものと思われる。しかしながら、信号制御の高度化においては、幅広い多様な信号制御技術のどの部分をどのように高度化していくのがひとつの大きな課題であると考えられる。また投資額とその効果の両面を考慮してどの部分から優先的に高度化していくかといった優先順位の問題も重要な課題であるといえよう。

国内の系統制御、特にオフセット制御はそのほとんどがパターン選択制御である。そこで本研究では、パターン選択型の交通応答式系統制御を高度化する検討課題としてとりあげる。パターン選択制御というのは交通状況の変動に応じて制御パターンを切り替えて行う制御のことである。制御パターンというのは、系統信号の共通サイクル長、オ

フセットおよび青時間からなる一組の制御パラメータをいう。本研究では、制御の高度化を意図して制御パターン切り替え政策を最適化する方法を提案する。切り替え政策というのは制御に用いる制御パターンとその切り替え時刻の系列をいう。ここで提案する最適化法によってモデル計算を行い、これを通して交通量変動に応じて制御パターンをきめ細かく切り替えた場合の効果について検討する。

本研究では次のような前提を設ける。①交通量変動パターンは予め予測され完全に既知である。②予め適切な制御パターンが必要なだけ用意されている。③オンライン制御への適用を考慮したものではなく、オフラインでの検討を目的とする。④交通量の計測と制御の間の時間遅れは考慮しない。⑤各交差点では主道路と交差道路の交通量比は一定と仮定し、したがって望ましい現示率は既知で一定とする。

具体的には、M組の制御パターンが与えられ、また切り

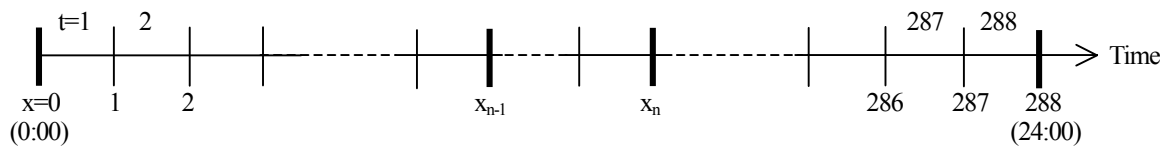


Fig. 1 Definition of Time of Day x and Time Interval t

替え回数Nが指定されたという条件で制御パターン切り替え政策を最適化するが、この問題はDPによって定式化できることを示す。またDPによって最適切り替え政策を具体的に計算する。最適化の評価指標としては、系統制御路線の系統方向全体の総遅れ時間とする。この総遅れ時間はシミュレーションによって求める。シミュレーションではオフセットの追従処理も内蔵している、オフセット追従時の交通流の乱れを自動的に考慮できるようにしている。

2. 研究の背景

本研究ではパターン選択制御を対象として、その切り替え制御の高度化について検討するが、パターン選択制御とは異なる制御として SCOOT<sup>1)</sup> のように到着車群に応答してリアルタイムでサイクルごとにオフセット調整を行う制御がある。また交差点への到着交通の計測値およびその短期予測に基づいて時々刻々信号現示の切り替え判断を行う UTOPIA<sup>2)</sup> や OPAC<sup>3)</sup> などの制御方式がある。この両方式はもはやサイクル長や青時間長の概念をもたない制御方式である。これらの制御では、局所的な交通状況の変化を考慮することは可能であるが、系統全体の制御効率をどのようにして維持するかがひとつの課題であり、また従来の交通応答制御と比較して有利かどうかも課題として考えられる。

パターン選択制御に関する研究としては、交通量変動パターンといくつかの制御パターンが与えられたという条件で、多段系統制御の制御パターン切り替え政策をDPで最適化した研究がある<sup>4)</sup>。ただしこの研究では、切り替え時の交通混乱は考慮していない。したがって制御パターンをできるだけ多く用意しかつできるだけ頻繁に切り替えを行うのがよいというやや非現実的な結果にならざるを得なかった。それに対して、本研究では、オフセット追従時の交通の乱れによる遅れ時間の増加を考慮している点と、シミュレーションで遅れ時間を求め実現象の再現性を改善している点が大きな特徴であり新しい点である。

また自動感應系統制御の切り替え基準<sup>4)</sup> について検討した研究もあるが、やはりオフセット切り替え時の混乱を考慮していない点がひとつの課題である。

さらにオフセット追従問題について検討した研究がある<sup>5), 7)</sup>。これについては本研究とも関連して今後さらに検討すべき課題である。

3. 制御パターン切り替え政策の最適化

総遅れ時間最小の観点からすると、一般に交通量が大きくなるとサイクル長を大きくし、逆に交通量が小さくなるとサイクル長を小さくするのが望ましい。サイクル長を変更すると、それに対応して最適オフセットも変化する。したがって交通量変動がある場合には、それに応じてサイクル長およびオフセット、すなわち制御パターンを切り替えていくのが望ましい。

また上り下り両方向の交通量の比率が変化すると、それに応じて上り優先、下り優先、平等オフセットなどオフセットの切り替えを行うのが望ましい。

このように交通状況の変化がある場合には、それに応じて制御パターンを切り替えることが重要となり、またそれによって制御効率を高めることが期待される。ただし切り替え政策を誤るとかえって逆効果となるおそれがあり、したがってここに切り替え政策を最適化することの必要性があり、その重要性があるのである。

そこでまず制御パターン切り替え政策はDP (ダイナミックプログラミング) の手法を用いて最適化できることを示す。ここではM組の制御パターンが与えられたとして1日24時間を最適化の対象とし、この対象時間帯で生じる総遅れ時間を評価指標と考えた場合の定式化を示す。また制御パターンの切り替え回数がN回と指定されたものとする。このような前提に立つと、総遅れ時間を最小にする最適な切り替え政策は次のようなDPの1次元配分過程として定式化することができる。

$$f_n(x_n, P_k) = \min_{i, x_{n-1}} \{ f_{n-1}(x_{n-1}, P_i) + \sum_{t=x_{n-1}+1}^{x_n} D(P_i, P_k, t) \} \quad (1)$$

(n = 1, 2, ..., N)

ただし、 $f_0(x_0, -) = 0, x_0 = 0$

ここに、

t : 5分間隔で表した時間帯の番号

(t = 1, 2, ..., 288)

$x_n$  : 第n回目の切り替え時刻

$P_k$  : 第k番目の制御パターン (k = 1, 2, ..., M)

( $P_k$  はサイクル長, 絶対オフセット, 現示率を要素とするベクトル)

$D(P_i, P_k, t)$  : 時刻  $x_{n-1}$  で制御パターン  $P_i$  から制御パターン  $P_k$  へ切り替えた場合に時間帯 t において生じる遅れ時間 (秒または時間)

$f_n(x_n, P_k)$  : 時間帯 0 ~  $x_n$  を n 分割し、第 n 分割目を

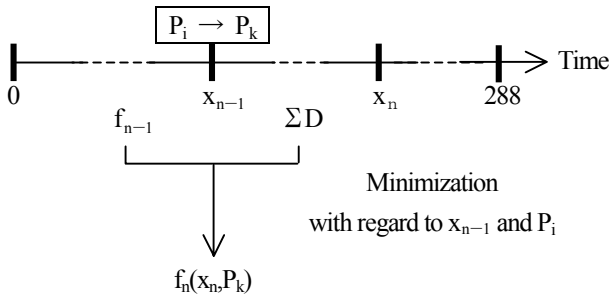


Fig. 2 Meaning of Functional Equation

制御パターン  $P_k$  で制御した場合に時間帯  $0 \sim x_n$  において生じる総遅れ時間の最小値

時刻  $x$  と時間帯  $t$  は Fig. 1 に示すように定義する. 時間帯  $t$  ごとの交通需要, すなわち交通量変動パターンは与えられたものとし, これは上り下りで異なるものとする. 式 (1) の関数方程式の意味は Fig. 2 に示すように, 時刻  $x_{n-1}$  までの最適政策による最小遅れ時間  $f_{n-1}$  と, 時刻  $x_{n-1}$  で制御パターンを  $P_i$  から  $P_k$  に切り替えた場合に  $x_{n-1}$  から  $x_n$  までの時間帯で生じる遅れ時間の和を,  $x_{n-1}$  と  $P_i$  について最小化したものをあらためて  $f_n$  とし, これを  $x_n$  および  $P_k$  の関数として表すという意味である. この関数方程式に基づいて第 1 段から第  $N$  段まで計算すればよい. 各段の計算では, Fig. 3 に示すように 2 レベルの階層型の計算過程をとる. すなわち上位レベルから  $x_n, P_k, x_{n-1}, P_i$  を計算条件として指示し, 下位レベルではその条件の下でシミュレーションを行い遅れ時間  $\Sigma D$  を求めて上位レベルへ返すという計算方式である.

### 4. 遅れ時間を求めるシミュレーション

遅れ時間  $D$  を計算するために Fig. 4 に示すように  $K$  信号からなる系統信号路線を対象として車両の走行挙動を再現する Time Scanning 方式のシミュレーションを作成した. これに制御パターン切り替え政策を与えて系統路線方向の総遅れ時間を計算できるようにした. このシミュレーションを実行して求めた車両走行軌跡の 1 例を Fig. 5 に示す. この図では 2 台おきの車両について走行軌跡を描いている. シミュレーションでは各車両の停止時間を累積することによって遅れ時間を計算する. またサイクル長の切り替えとオフセット追従ができるようにしている. シミュレーションの要点は次のとおりである.

- ① 時刻の原点は信号 1 の青開始時点とする.
- ② リンク長, 車線数, 上下両方向の流入交通需要, 共通サイクル長, 現示率, 絶対オフセットなどの道路条件, 交通条件および信号条件は任意に与えることができる.
- ③ 各車両の速度は一定で加速, 減速は考えない.
- ④ 停止時の車頭距離はこれを考慮し, したがって物理的な待ち行列長および先詰まりは自動的に考慮できるようにしている.

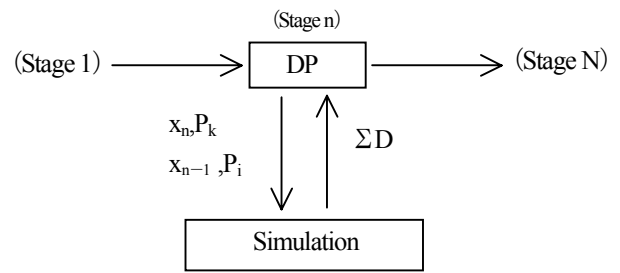


Fig. 3 Hierarchy of Calculation Process

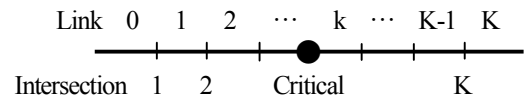


Fig. 4 Study Section of Signal Control

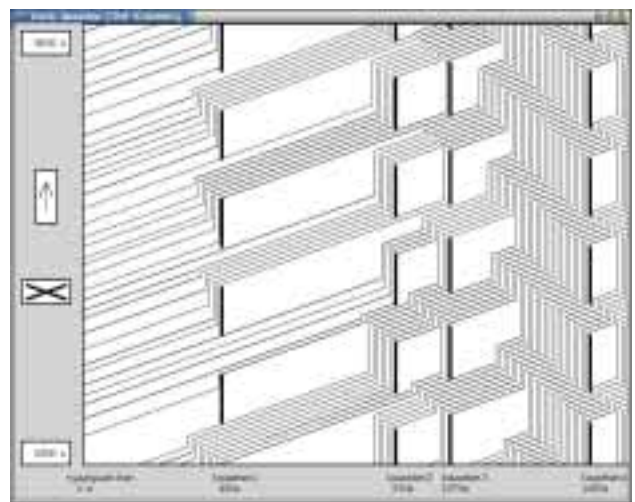


Fig. 5 Example of Vehicle Trajectories

- ⑤ 各車両の進行方向は直進のみとし, 右左折流出と交差道路からの流入は考慮しない.
- ⑥ 両端からの流入交通はポアソン分布に従う.
- ⑦ 信号が青に変わって発進する先頭車両は発進遅れを受け, 後続の待ち行列車両は飽和流とし, 飽和交通流率は入力データで与える.
- ⑧ 絶対オフセットは基準信号 (信号 1) に対する青開始時刻の時間的ずれで定義する.
- ⑨ 黄時間は赤時間に含まれるものとする.

### 5. オフセット追従方法

#### (1) オフセット追従問題とその解法

制御パターンを切り替える場合, 共通サイクル長とスプリットは 1 度に切り替えることができるが, オフセットは交通安全などの理由で数サイクルにわたって徐々に切り替えていく必要がある. このようなオフセット切り替え動作はオフセット追従といわれている<sup>6)</sup>.

オフセット追従は, 交差点ごとの絶対オフセットを変更するという方式で行う. その場合サイクル長を伸ばす

方向に変更するプラス追従と、逆にサイクル長を縮める方向に変更するマイナス追従がある。各交差点ごとにこの追従方向を決定する問題がオフセット追従問題である。

オフセット追従の途中では交通流に乱れが生じる。また追従の途中で相対オフセットが変更後の相対オフセットと位相が  $180^\circ$  ずれるような状態をオフセット反転というが<sup>6)</sup>、このオフセット反転が発生すると交通流の乱れが大きくなるおそれがある。したがってできるだけこのオフセット反転を避けるのが望ましい。

本研究ではすでに提案されている次の2通りの方法で追従問題を解くようにしている。

### ① 総追従量最小化法

これはオフセット反転箇所数を最小にするという条件でオフセット総追従量が最小になるように総当たり法で追従方向を決定する方法である。ただし、組合せ数を少なくするために井上らの研究で示されたリンクの連結グループの考え方を用い、連結グループごとに総当たり法を用いた<sup>7), 8)</sup>

### ② 絶対オフセット補正法

これは変更後の各信号の絶対オフセットに共通の補正をほどこし、オフセット追従量を低減する方法である<sup>6)</sup>。この方法は基準信号を信号1から他のいずれかの信号に変更することに相当する。この方法ではオフセット反転を回避することはできない。

## (2) オフセットの追従方法

オフセット追従に必要なサイクル数は各交差点でそろえること、および1回の追従量の上限をサイクル長の1/8とすること、という2つの条件からオフセットの追従方法を定める。そのためにまず1回の追従量が上限を越えないように各交差点の必要サイクル数を求める。その中で必要サイクル数が最も多い交差点の必要サイクル数を全交差点共通の必要サイクル数とする。

各交差点の1回の追従量は、全交差点共通の必要サイクル数と追従量から求める。各交差点のオフセット追従は、共通サイクル長の切り替え終了後、青開始時刻と同時に開始する。

## 6. 制御パターン切り替え政策の具体的な計算法

### (1) 切り替え政策の計算法の概要

DP 計算法は、M 組の制御パターンを与え、切り替え回数 N を指定した上で、式 (1) を用いて第1段から第N段まで順に行う。ここで切り替え回数というのは、対象時間帯の分割個数すなわち用いる制御パターンの延べ回数のこととし、したがって実質の切り替え回数は(N-1)回となる。

一般の第n段の計算、すなわち時間帯  $0 \sim x_n$  を n 個

の時間帯に最適分割した場合の  $f_n(x_n, P_k)$  の値をシミュレーションで求める計算過程は次のとおりである。(n-1)回目の切り替えで制御パターンを  $P_k$  に切り替えるときの可能な切り替え時刻  $x_{n-1}$  は(n-1)から  $(x_n - 1)$  まで  $(x_n - n + 1)$  とおり存在し、また切り替え前の制御パターン  $P_i$  が(M-1)とおおり存在する。したがって時刻  $x_n$  までの総遅れ時間を  $(x_n - n + 1) \times (M - 1)$  とおり求め、その中の最小値を  $f_n(x_n, P_k)$  とし、そのときの  $x_{n-1}$  と  $P_i$  が最適な切り替え時刻と切り替え前の制御パターンとなる。第n段以降の計算に備えて、M個の制御パターン  $P_k$  と  $x_n = n \sim 288$  に対して求めた最小遅れ時間  $f_n(x_n, P_k)$  と、それに対応する切り替え時刻  $x_{n-1}$  および切り替え前の制御パターン  $P_i$ 、すなわち切り替え政策を記憶しておく。

$f_n(x_n, P_k)$ , ( $n, n + 1, \dots, 287, 288$ ) を求めるために24時間シミュレーションを  $(x_n - n + 1) \times (M - 1)$  回実行する必要がある。そのシミュレーションでは、すでに記憶している第n段以前の切り替え政策を用いて実行する。また5分間集計の遅れ時間  $D(P_i, P_k, x_n)$  を求める。

第1段から第N段までの計算が終了すれば、逆向きに  $n = N \rightarrow 1$  まで遡っていくことにより最適切り替え政策、すなわち最適な切り替え時刻と制御パターンの系列が得られる。また総遅れ時間の最小値は  $f_N(x_N, P_k)$  の中で遅れ時間が最小となる制御パターン  $P_k$  に対応するものとして得られる。

### (2) 最適切り替え政策の計算手順

- ①  $n = 1$  の場合、式 (1) を用いて各制御パターン  $P_k$  ( $k = 1, 2, \dots, M$ ) について  $f_1(1, P_k)$  から  $f_1(288, P_k)$  までの計算を行う。
- ②  $n = 2$  の場合、①で求めた  $f_1(x_1, P_i)$  を用いて時刻  $x_1$  で制御パターンを  $P_i$  から  $P_k$  に切り替えた場合の  $f_2(x_2, P_k)$  ( $x_2 = 2 \sim 288$ ) を計算する。この場合  $f_2(x_2, P_k)$  は  $x_1$  と  $P_i$  のすべての組合せの中から最適の組合せを選びその値を求める。 $f_2(x_2, P_k)$  とそれに対応する  $x_1$  および  $P_i$  を記憶する。
- ③  $n = 3$  の場合、②で求めた  $f_2(x_2, P_i)$  を用いて時刻  $x_2$  で制御パターンを  $P_i$  から  $P_k$  に切り替えた場合の  $f_3(x_3, P_k)$  ( $x_3 = 3 \sim 288$ ) を計算する。この場合  $f_3(x_3, P_k)$  は  $x_2$  と  $P_i$  のすべての組合せの中から最適の組合せを選びその値を求める。 $f_3(x_3, P_k)$  とそれに対応する  $x_2$  および  $P_i$  を記憶する。
- ④  $n = N$  まで同様の計算を行う
- ⑤  $f_N(288, P_k)$  の値を最小にする制御パターン  $P_k$  を求める。
- ⑥  $f_N(288, P_k)$  に対応する切り替え時刻  $x_{N-1}$  およ

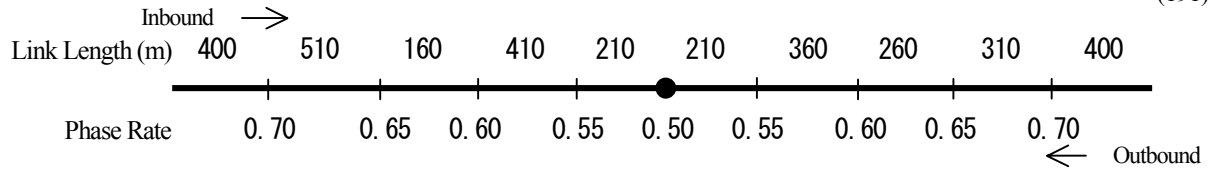


Fig. 6 Link Lengths and Phase Rates of Test Network

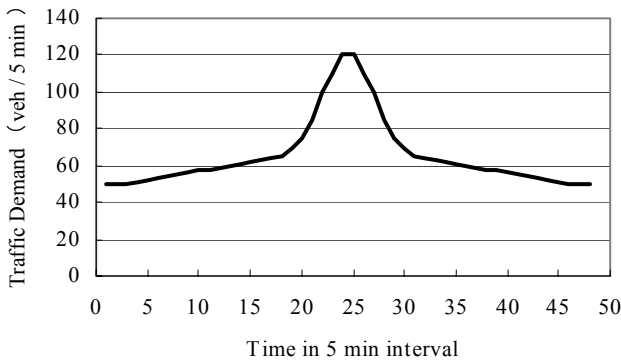


Fig. 7 Fluctuation of Traffic Demand

び制御パターン  $P_i$  を①～④で求めた計算結果から求める。

⑦ 同様の作業を繰り返し  $x_1$  まで求める。

以上の作業から  $N$  回の最適切り替えのタイミング  $x_1, x_2, \dots, x_N$  ( $=288$ ) が求められるので、この値から時刻を計算すれば制御パタンの最適切り替え時刻を求めることができる。

## 7. 計算例

### (1) 計算対象路線

制御パタンの最適切り替え政策を具体的に計算する。そのために、Fig. 6 に示すようにリンク長にばらつきのある 9 信号 10 リンクの系統信号路線を作成し、これを計算対象路線とする。路線中央部の交差点をクリティカル交差点と想定する。各交差点の現示率はクリティカル交差点に近づくにつれて小さくなるように与えた。対象時間帯は 1 日 24 時間ではなく、計算時間を考慮し、また 4 時間程度で十分と判断して 4 時間とした。交通条件としては、上下両方向の交通量変動が等しい場合と異なる場合の 2 とおりの場合を対象として計算した。

### (2) 上下両方向の交通量変動が等しい場合

まず上下両方向の交通量変動が等しい場合について計算する。この場合については、交通量変動は朝の立ち上がりと夕方の減少を考慮に入れて Fig. 7 のように昼間の時間帯は省略した形とした。この場合は交通量変動に応じて共通サイクル長の切り替えを中心に考える。ただし共通サイクル長が変化すると一般に最適オフセットも変化するので共通サイクル長とオフセットは一体のものとして取り扱う。

#### (a) 制御パタンの設定

制御パタンの最適化は本研究の目的ではないが、共通

Table 1 Control Pattern Used for Optimization of Switching Policy ( $M=12$ )

Control Pattern	Cycle Length (s)	Absolute Offset
1	40	0.00 0.02 0.66 0.86 0.34 0.84 0.56 0.08 0.54
2	50	0.00 0.02 0.84 0.26 0.92 0.26 0.78 0.26 0.76
3	60	0.00 0.46 0.24 0.68 0.42 0.68 0.14 0.88 0.30
4	70	0.00 0.46 0.48 0.00 0.72 0.54 0.96 1.00 0.54
5	80	0.00 0.50 0.48 0.98 0.96 0.14 0.72 0.78 0.28
6	90	0.00 0.70 0.54 0.08 0.00 0.82 0.34 0.34 0.82
7	100	0.00 0.48 0.48 0.10 0.98 0.10 0.44 0.52 0.74
8	110	0.00 0.44 0.52 0.10 0.16 0.38 0.50 0.62 0.88
9	120	0.00 0.46 0.54 0.20 0.10 0.16 0.30 0.42 0.68
10	130	0.00 0.56 0.56 0.30 0.22 0.28 0.42 0.56 0.78
11	140	0.00 0.52 0.48 0.33 0.28 0.36 0.50 0.74 0.98
12	150	0.00 0.24 0.10 0.90 0.82 0.92 0.12 0.28 0.18

サイクル長とオフセットは道路交通条件に対して最適化したものが望ましい。しかし厳密に最適化することは必ずしも容易ではない。そこでまず共通サイクル長については、幅広い交通条件に対応するために 40 秒から 150 秒まで 10 秒きざみで 12 とおり用意した。またオフセットについては GA<sup>9)</sup> を用いて概略の最適設計を試みた。設計条件としては、各共通サイクル長に対して、交通需要条件を 0.1 台/秒から 0.025 きざみで 0.4 台/秒まで 13 ケース与えて合計 156 組のオフセットを求めた。交叉確率は 70%、突然変異確率は 5%、再生産確率は 25%、個体数は 50 とした。また評価指標 (適応度関数) は TRANSYT で求め、これは遅れ時間と停止回数の加重和である。停止回数の重み係数は 25 とした。平滑化係数は 0 とし車群の拡散はないものとした。飽和交通流率は 0.9 台/青秒、損失時間は 10 秒とした。以上のようにして概略設計した制御パターンから Table 1 に示す  $M=12$  個の制御パターンを

選択した. 表の中のサイクル長は秒単位, 絶対オフセットの単位は対サイクル長比である. この制御パタンの選択では, 交通量変動に応じた遅れ時間の変化をシミュレーションであらためて評価し, 幅広い交通量水準に対応できるように考慮して選択した. 40 秒, 50 秒など小さいサイクル長も含めているが, これは夜間など交通量が少ない時間帯では遅れ時間を小さくする望ましいサイクル長になるという理論的な判断によるものである.

制御パタンの特徴を調べるために, Table 1 の中から, パタン 1, 3, 5, 7, 10 の 5 種類の制御パタンを選び, これと Fig. 7 の交通量変動を条件としてそれぞれ 4 時間のシミュレーションを行い, 総遅れ時間を 5 分ごとに集計したものを Fig. 8 に示す. 計算条件は, 飽和交通流率 0.9 台/青秒, 系統速度 12m/秒とし, 損失時間は発進遅れも考慮して 20 秒とした. この図から, 交通量が少ない時間帯ではサイクル長の小さい方が総遅れ時間も小さくなり, 交通量が多い時間帯ではサイクル長の大きい方が総遅れ時間が小さくなるということがわかる.

**(b) 最適切り替え政策**

これら 5 種類の制御パタンが与えられたの場合 (M=5) について 4 時間の時間帯を対象として DP 計算を行い, 最適切り替え政策を求めた. この場合, 制御パタンの切り替え開始から次の切り替え開始まで最低 15 分は待たなければならないという制約を設けた<sup>10)</sup>. またオフセット追従については, ①の総追従量最小化法によって追従方向を決定しオフセット追従を行った. この計算結果から切り替え回数 N = 1 ~ 5 回の場合の切り替え時刻と制御パタンを示したのが Fig. 9 である. この図から, 最適切り替え政策の特徴として, 交通量の少ない時間帯においてはサイクル長の小さい制御パタンが使われ, 交通量の多い時間帯においてはサイクル長の大きい制御パタンが使われていることがわかる. またこの例のように短時間の間に交通量が大きく変動するような場合には, その時間帯を細かく区切って制御パタンを切り替えるのがよいという結果となっていることがわかる.

Table 1 の制御パタン 12 個をすべて用いた場合 (M=12) についても最適切り替え政策を求めた. その結果, N=3 および N=4 の場合では 30~48 の時間帯でパタン 2 を用いるのがよいという点を除いて, 5 種類の制御パタンを用いた場合とほぼ同様の結果が得られた. なお当然のことではあるが, M=12 の場合で採用された制御パタン 5 個のみを用いて最適切り替え政策を求めた結果, M=12 の場合とまったく同じ結果が得られた.

**(c) 交通量の増減が緩やかな場合**

次に 5 分間交通量の変動幅は 20~120 の範囲とし, 増減率を緩やかにした交通量変動を対象とした場合についても計算した. その結果, Fig. 10 に示すように制御パタンの切り替え時刻は Fig. 9 ほど集中せず, それよりも分散

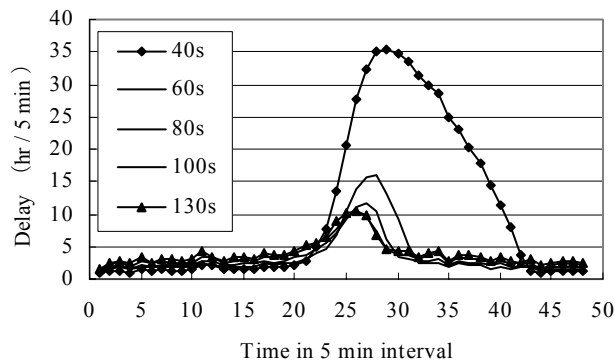


Fig. 8 Variation of Delay

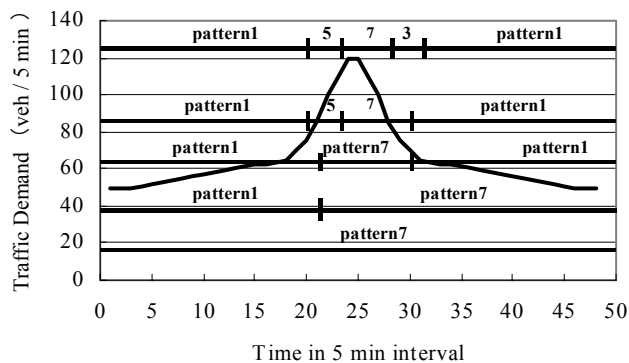


Fig. 9 Switching Policy Optimized (M=5)

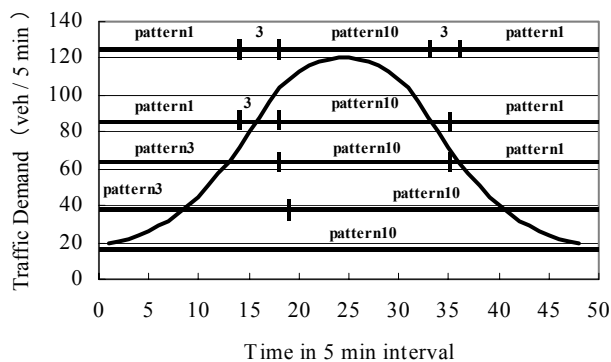


Fig. 10 Switching Policy Optimized (M=5)

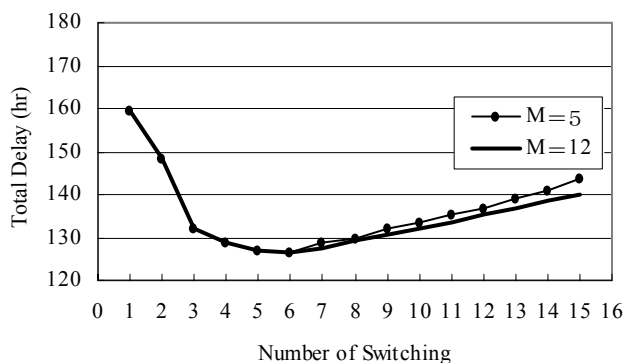


Fig. 11 Relationship between Number of Switching and Total Delay

するという結果となった. このように交通量変動パタンによって最適切り替え政策は微妙に異なることがわかった.

**(d) 切り替え回数と総遅れ時間の関係**

Fig. 7 の交通量変動を対象とした場合について, 制御パタンの切り替え回数と総遅れ時間の関係を Fig. 11 に示し

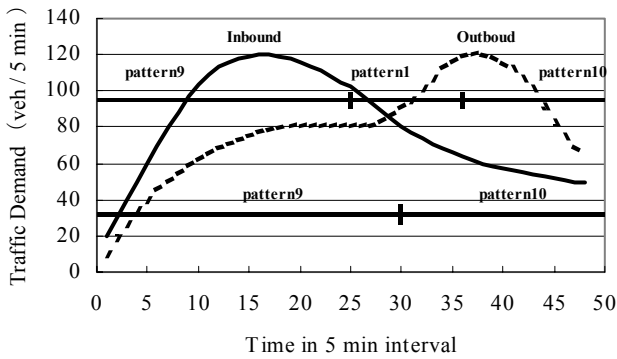


Fig.12 Switching Policy Optimized (M=10)

た. この図から交通変動にあわせて切り替えを行えば総遅れ時間は小さくなり, 制御効率が改善されることがわかる. しかし切り替え回数をあまり多くすると逆に交通流の乱れによる遅れ時間が卓越することとなり, 総遅れ時間は大きくなるということがわかる.

久井の研究<sup>11)</sup>では制御パタン切り替え時の交通混乱を考慮していなかったため, 切り替え回数を増やせば増やすほど総遅れ時間は減少するという結果であった. 本研究では切り替え時の交通流の乱れを考慮し, 実際の交通現象を反映させた結果, 切り替え回数を増やしすぎると逆に総遅れ時間は増加するという結果となった. このようにして総遅れ時間を最小にする最適切り替え回数が存在することがわかった. 用意した制御パタン数M=5の場合, 最適切り替え回数は6回となった. また総遅れ時間の改善効果は, 切り替えを行わない場合すなわちN=1の場合に比較して改善量で 159.7-126.5=33.2 時間, 改善率で 20.8%であった. この計算例では, M=12の場合も, 最適切り替え回数および総遅れ時間の改善効果はM=5の場合とまったく同じとなった.

Fig.11よりM=5の場合とM=12の場合を比較すると, 用意する制御パタンを多くすれば, 制御効率を改善できる可能性は高くなるということがわかる. しかしその改善効果は用意する制御パタンのよしあしに左右されるものと考えられる.

次に Fig.10 の交通量変動を対象とした場合の最適切り替え回数は5回となった. しかし制御の改善量は 232.7-207.4=25.3 時間, 改善率は 10.9%となり, いずれも Fig. 9 の場合より小さい. M=12とした場合でも, 制御の改善量は 232.7-205.2=27.5 時間, 改善率は 11.8%にとどまる. このように交通量変動パターンによって切り替え制御による改善効果は微妙に異なることがわかった.

**(e) 交通量変動が小さい場合の切り替え回数**

次に朝のピーク時を過ぎた時刻から夕方までの時間帯, すなわち交通量は多いがその変動幅が比較的小さい場合の4時間の時間帯を想定して検討した. その結果, 5分間交通量の変動幅を 115~120 とした場合には, 切り替えを行わない方がよいという結果が得られた. また変動幅

Table 2 Control Pattern Used for Optimization of Switching Policy (M=10)

Control Pattern	Cycle Length (s)	Traffic Demand for Offset Optimization (vps)	
		Inbound	Outbound
1	50	0.2	0.1
2	50	0.2	0.3
3	60	0.2	0.1
4	60	0.2	0.3
5	70	0.3	0.2
6	70	0.2	0.3
7	119	0.3	0.2
8	119	0.2	0.3
9	130	0.4	0.3
10	130	0.25	0.4

Table 3 Control Pattern Used for Optimization of Switching Policy (M=10)

Control Pattern	Cycle Length (s)	Absolute Offset				
1	50	0.00	0.28	0.92	0.32	0.64
2	50	0.00	0.78	0.28	0.92	0.52
3	60	0.00	0.04	0.58	0.08	0.26
4	60	0.00	0.00	0.56	0.26	0.96
5	70	0.00	0.08	0.58	0.88	0.16
6	70	0.00	0.98	0.48	0.22	0.88
7	119	0.00	0.34	0.50	0.72	0.90
8	119	0.00	0.68	0.60	0.40	0.18
9	130	0.00	0.24	0.42	0.62	0.76
10	130	0.00	0.80	0.68	0.52	0.34

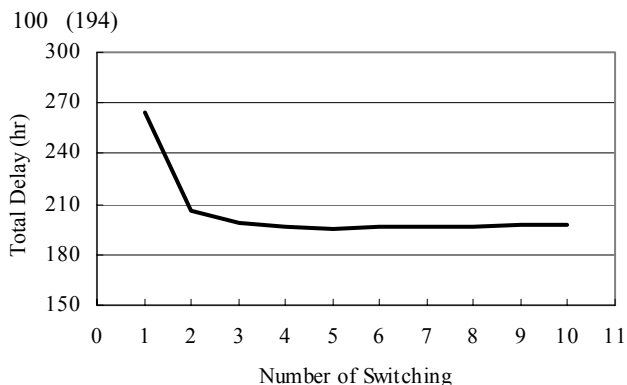
を 100~120 とした場合では, 最適切り替え回数は5回となり, また総遅れ時間の改善量は 384.3-368.9=15.4 時間で, 改善率は 4.0%にとどまるという結果となった.

**(3) 上下両方向の交通量変動が異なる場合**

次に上下両方向の交通量変動が異なる場合について計算する. この場合については, Fig.12 に示すように4時間の時間帯の中で交通量の卓越する方向が逆転するような場合を想定して検討を行った.

**(a) 制御パタンの設定**

制御パタンは Table 2 に示すような共通サイクル長と



**Fig.13** Relationship between Number of Switching and Total Delay

上下両方向の交通量を条件として、GAを用いてオフセットの概略設計を行った。交叉確率は70%、突然変異確率は10%、再生産確率は20%、個体数は50とした。評価指標(適応度関数)はTRANSYTで求めた。ただし停止回数の重み係数は0とし、損失時間は13秒とした。これによって得られた10個の制御パターンをTable 3に示す。この制御パターンを用いて最適切り替え政策の計算を行った。

#### (b) 最適切り替え政策

Table 3の制御パターンを用いて4時間の時間帯を対象としてDP計算を行い、最適切り替え政策を求めた。この場合、シミュレーションでは各信号の損失時間は10秒、発進遅れは3秒とした。またオフセット追従については、②の絶対オフセット補正法によって追従方向を決定しオフセット追従を行った。計算結果から、N=2~3回の場合切り替え時刻と制御パターンをFig.12に示した。この図から上り方向の交通量が多い時間帯は上り優先オフセットを用い、下り方向の交通量が多い時間帯では下り優先オフセットが用いるのがよいという結果となった。

#### (c) 切り替え回数と総遅れ時間の関係

Fig.12の交通量変動を対象とした場合について、制御パターンの切り替え回数と総遅れ時間の関係をFig.13に示す。この図から切り替え回数は2回か3回程度で十分であり、それ以上に切り替え回数を増やしてもほとんど総遅れ時間の改善はないことを示している。切り替え回数2回の場合の総遅れ時間の改善量は $264.1 - 206.0 = 58.1$ 時間で、改善率は22.0%となった。

#### (4) 考察

切り替え回数と総遅れ時間の関係からみると、交通量変動幅がある程度以上ある場合には、4時間あたりでみて数回程度の切り替えで総遅れ時間がかなり減少し、さらに切り替え回数を増やしてもその効果は次第に逓減し、過度に切り替え回数を増やすと逆に制御効率が悪化することがわかる。したがって交通量変動にあわせて頻繁にきめ細かく制御パターンを切り替えるような制御方式をと

る場合には慎重な配慮が必要である。例えば、あらゆる可能な交通条件に対して厳密な最適制御パターンを多数用意し、しかも切り替え時に生じる交通流の乱れを少なくできるような制御パターンの組合せまたは追従方法をとること、さらに短期交通量予測を行い、それに基づいて制御遅れの影響を最小限にとどめるというような方向性をもって制御システムの高度化を指向することが望まれる。あるいは系統信号の中でクリティカルとなっている交差点のマイクロ制御など高度化の効果が期待される部分を模索していくことも重要である。

## 8. 結論

本研究ではパターン選択型の系統信号制御を対象とし、制御の高度化を意図した制御パターン切り替え政策がDPによって最適化できることを示した。またいくつかの計算例を行い、その結果から交通量の変動に応じて制御パターンを切り替えていくと制御効率がよくなることがわかった。交通量変動幅がある程度以上ある場合、総遅れ時間を最小にする最適切り替え回数は対象時間4時間で5~6回程度またはそれ以下という結果が得られた。また切り替え政策の最適化による効果は、短い時間に交通量が大きく変動する場合に大きくなる。交通量変動幅が小さい場合や、変動幅が大きくても変化が緩やかな場合にはその効果は相対的に小さくなることがわかった。

交通量変動がある場合でも、切り替え回数を増やしていくと次第にその効果が逓減し、過度に切り替え回数を増やすと逆に制御効率が悪化する。したがって頻繁にきめ細かく制御パターンを切り替えるような制御方式をとる場合には、用意する制御パターンとオフセット追従方法を改善し、また交通量の短期予測を制御にとり入れるなどの方向性をもって制御システムの高度化を指向することが望まれる。

残された課題は、交通条件やオフセット追従方法など多様な計算条件について計算例を蓄積することである。例えば、交通条件でいえば上り下り両方向の交通量変動パターンが異なる場合の計算例の蓄積である。またオフセット追従方法や、オフセット切り替え時の交通流の乱れが少なくすむようなオフセットパターンの作成についても検討し、それらの結果から得られる知見を体系化していきたい。

## 参考文献

- 1) P.B.Hunt, D.I.Robertson and R.D.Bretherton : Split,Cycle and Offset Optimisation Technique, Traffic Engineering & Control, pp.190-192, 1982, April.
- 2) N.H.Gartner : OPAC : A Demand-Responsive Strategy for Traffic Signal Control, Transportation Research Record 906, pp.75-81,



- 1983.
- 3) V.Mauro and C.Di Taranto:UTOPIA, IFAC Control, Computers, Communications in Transportation, pp.245-252, 1989.
- 4) 市原薫, 枝村俊郎共編:道路施設工学, 森北出版, pp.191-197, 1976.
- 5) 荒井, 片倉, 大口, 鹿田:信号制御におけるオフセット追従が交通に与える影響, 土木学会第 56 回年次学術講演会, pp.778-779, 2001.
- 6) 交通工学研究会:交通信号の手引, pp.81-85, 1994.
- 7) 井上 健士, 横田 孝義:U型伝送を使用した道路交通信号におけるオフセット追従問題の最適解法, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J81-A, No. 4, pp.562-577, 1998.
- 8) 久井 守, 小田原 正和, 森川 雅之:系統信号システムの制御パターン切り替え戦略に関する研究, 山口大学工学部研究報告, Vol.50, No.1, pp.53-60, 1999.
- 9) 小田原 正和, 久井 守:GAによる系統交通信号の共通サイクル長に関する研究, 山口大学工学部研究報告, Vol.49, No.2, pp.65-71, 1999.
- 10) 交通工学研究会:交通信号の制御技術, p. 108, 1983
- 11) 久井 守:複数信号機の最適制御に関する基礎的研究, pp.123-131, 1975.

(平成13年12月27日受理)