

# 重交通時を対象としたシミュレーションモデルと 交通信号系の最適制御について

久井 守\*・岡本 哲典\*\*

## On a Simulation Model in Heavy Traffic and Its Application to Optimal Control of Traffic Signals

Mamoru HISAI and Tetsunori OKAMOTO

### Abstract

It is important to optimize the splits as well as the offsets of signal coordination in heavy traffic. The traffic model considering the queues at signalized intersections is required to analyze the optimization of signal control under the condition that the traffic is nearly saturated. Since the existing traffic models, such as TRANSYT, do not contain the modelling of the queues. Therefore in this paper, a traffic flow model considering the existence and the dynamic fluctuation of the queue lengths is developed. The traffic flow model is a macro simulation in which the traffic flow is supposed to be a compressible fluid. By using this simulation model, the traffic phenomena on the study section of the street are reproduced, the criterion such as the total delay is evaluated and the optimization of the offsets is performed so as to minimize the total delay.

### 1. はしがき

交差点の交通容量前後の交通需要がある場合の系統式信号制御では、系統制御に必須のパラメータであるオフセットだけではなく、クリティカル交差点のスプリット制御もまた重要な要素となる。このような容量前後の重交通時を対象として系統制御の最適化を検討するためには、交差点における待ち行列の存在とその動的な変化を考慮した交通流モデルを用いることが必要となる。ところが、たとえば現在世界中で広く用いられているTRANSYT<sup>1)</sup>の交通流モデルなどは、待ち行列の存在を考慮したモデルではないため、基本的にはこのような交通流モデルを重交通時の交通制御の検討に用いることはできない。したがって重交通時の交通制御を検討するためには、待ち行列の存在を考慮し、

かつ操作性の高い交通流モデルを用いることが必要である。しかしそのような交通流モデルを構築することは必ずしも容易であるとはいえない。したがって本研究では、交通流を圧縮性流体と考え、交差点における待ち行列の動的な変化と、待ち行列の後端が上流交差点にまで達するような重交通現象をも扱うことができるシミュレーションモデルを構築した<sup>2),3)</sup>。さらに、本研究ではこのシミュレーションモデルを用いて対象路線上の交通現象を再現し、遅れ時間または交通処理量を求め、これを評価指標としてオフセットの最適化を行い、得られたオフセットについて検討を行ったものである。

### 2. 交通流シミュレーション

オフセットの最適化を行うためには、評価指標である遅れ時間または交通処理量をオフセットパタンの関数として求めることが必要である。しかしながら、これを理論的または解析的にもとめることはきわめて困

\*土木工学科

\*\*建設省山口工事事務所

難であることから、ここでは1本の系統化路線を対象としてシミュレーションモデルを作成し、これによって、与えられたオフセットパターンに対して遅れ時間または交通処理量を求めることとする。

対象路線の道路交通条件、信号条件およびその他の計算条件を任意に与えて計算できるようなシミュレーションモデルを作成する。すなわちFig. 1に示すよう

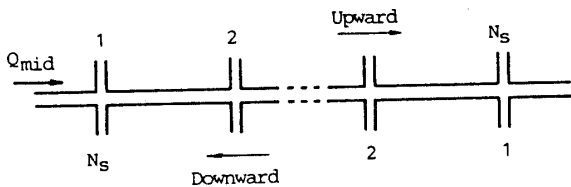


Fig. 1 Study section of traffic simulation and signal control

に信号数(交差点数)  $N_s$ 、各信号区間の区間距離  $DIS$  (m)、交通需要  $Q_{mid}$  (台/s) (上下両方向で異なる)、交差道路への右左折流出率  $RO$  (各交差点, 上下両方向で異なる)、交差道路からの右左折流入交通量  $QI$  (台/s) (各交差点, 上下両方向で異なる)、最大速度  $V_{max}$  (m/s) (上下両方向で異なる)、交差点の飽和交通流率  $Q_{max}$  (台/s) (上下両方向で異なる)、信号周期  $T$  (s)、各信号の現示率  $\pi$  (各信号ごとに異なる)、ロスタイム  $L$  (s) (各信号ごとに異なる)、各信号区間の相対オフセット  $OFFSET$  (対周期比) は任意に与える。ここに相対オフセットは青信号開始時の時間差とする。各交差点の主道路方向の青時間  $GT$  (s) は次式で求める。

$$GT = \pi(T - L) \quad (1)$$

シミュレーションの基本的方法は次のとおりである。

- 1) 交通流は圧縮性流体として扱う。
- 2) 道路を上下両方向とも長さ10mのブロックに分割し、

Fig. 2に示すようにブロック番号を与える。

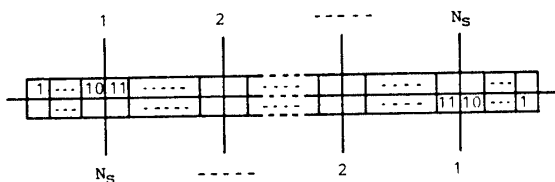


Fig. 2 Division of the study section into blocks and their numbering

- 3) 各ブロックの速度比  $V$  と交通密度  $K$  (台/m) の関係はFig. 3に示すような線形関係を仮定する。すなわち、

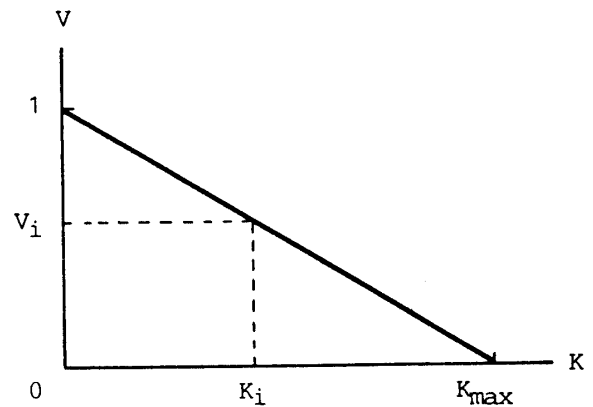


Fig. 3 Assumption on the relationship between traffic density  $K$  and speed  $V$

$$V = 1 - \frac{K}{K_{max}} \quad (2)$$

ここに

$V$ : ブロックの最大速度に対する速度比

$K_{max}$ : ブロックの最大交通密度 (台/m)

- 4) ブロックの最大交通密度  $K_{max}$  (台/m) は道路の片側車線数に応じて任意に与えることができる。
- 5) シミュレーションにおける時間の進め方はタイムスキューニング方式とし、スキャンサイクル  $\Delta t$  は1ブロックを最大速度で走行できる程度の大きさとし、ここでは  $\Delta t = 0.8$  s とする。
- 6) 対象路線両端には、それぞれ長さ100mの流入リンクを設ける。
- 7) 主道路流入リンクへの流入交通はポアソン到着で与える。
- 8) 交差道路から主道路への右左折による流入は歩行者または対向直進車に妨げられることはなく、また交差道路青信号の間のみ  $QI$  の割合で流入するものとする。
- 9) 交差道路への右左折流入交通は歩行者または対向直進車に妨げられることはないとする。
- 10) 主道路の隣接する  $i \rightarrow j$  ブロック間の移動台数  $\Delta Q_{ij}$  は次式により決定する<sup>2)</sup>。

$$\Delta Q_{ij} = \frac{1}{2} (V_{max} V_i + V_{max} V_j) \Delta t Q_i / l \quad (3)$$

ここに

$V_i, V_j$ : 第  $i$  および第  $j$  番目のブロックの速度比

$Q_i$ : 第  $i$  ブロックの存在台数 (台)

$l$ : ブロック長 (m)

ただし  $\Delta Q_{ij} > Q_i$  のときは  $\Delta Q_{ij} = Q_i$  とする

- 11) 信号交差点の前後のブロックは次のように考える。すなわち、主道路が青信号の場合は式(3)で求めた移

動台数 $\Delta Q_{ij}$ に右左折流出率を乗じて右左折流出台数を求め、これを $\Delta Q_{ij}$ から差し引いて直進台数を求める。また移動台数 $\Delta Q_{ij}$ が飽和交通流率を越える場合は、飽和交通流率に対応した値とする。主道路が赤信号で、交差道路が青信号の場合は、 $\Delta Q_{ij}=0$ とし、交差道路からブロック $j$ への流入台数は $QI\Delta t$ とする。スキャンサイクル $\Delta t$ の途中で信号が変わる場合は、 $\Delta t$ のうち主道路方向または交差道路方向の青時間の割合を $\Delta Q_{ij}$ または $QI\Delta t$ に乗じて移動台数および流入台数を求める。以上のようにして上流から下流ブロックへの移動台数を求める。

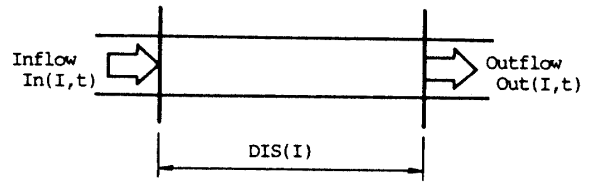


Fig. 4 Inflow traffic to and outflow traffic from the Ith link

- 12) このようにして求めた上流から下流への移動台数を上流ブロックから差し引き、下流ブロックに加えて各ブロックの存在台数を求める。その結果、各ブロックの存在台数がブロックの最大交通密度を超過しないかどうかのチェックを下流ブロックから行い、超過する場合はその超過分を上流ブロックに戻す逆流計算を行う。
- 13) 交差点前後のブロック間での逆流計算は次のようにして行う。すなわち主道路が青信号の場合は直進台数のうちの超過分を戻す。交差道路が青信号の場合は、右左折流入台数のうちの超過分を交差道路に戻す。スキャンサイクル $\Delta t$ の途中で信号が変わる場合は、まず先に青信号であった方向に超過分を戻して最大交通密度に一致させ、次に青信号であった方向からの流入は行わないようにする。
- 14) 遅れ時間は次のようにして求める。すなわち、たとえば第 $I$ 信号区間上り方向の遅れ時間 $W(I)$ は

$$W(I) = \sum_{t=0}^{ET} \{In(I, t) - Out(I, t)\} \Delta t + \sum_{J=SN(I)}^{EN(I)} Q_{ET}(J) \cdot D(J) / V_{max} - DIS(I) \cdot In(I, ET) / V_{max} \quad (4)$$

ここに

$In(I, t)$  : 時刻 $t$ までに第 $I$ 信号区間上流端に流入する累積台数 (Fig. 4)

$Out(I, t)$  : 時刻 $t$ までに第 $I$ 信号区間下流端に流出する累積台数 (Fig. 4)

$SN(I)$  : 第 $I$ 信号区間上流端のブロック番号

$EN(I)$  : 第 $I$ 信号区間下流端のブロック番号

$Q_{ET}(J)$  : シミュレーション終了時刻に第 $J$ ブロックに存在する台数

$DIS(I)$  : 第 $I$ 信号区間の区間長(m)

$D(J)$  : 第 $J$ ブロックから当該信号区間下流端までの距離(m)

で求める (単位は台・s)。また下り方向の遅れ時

間についても同様にして求める。第 $I$ 信号区間の遅れ時間を上下両方向について合計したものが第 $I$ 信号区間の遅れ時間であり、さらに全信号区間の流れ時間を合計したものが路線全体の総遅れ時間となる。評価指標として用いる遅れ時間 (単位は台・s) はこの総遅れ時間である。

- 15) 評価指標として用いる交通処理量 $Q$ は次のように定義する。

$$Q = \sum_{I=1}^{N_s-1} In(I, ET) / (N_s - 1) \quad (5)$$

- 16) ランについては流入リンクを最高速度で8回走行するのに要する時間をフィルタイムとし、その後 $ET$ (s)のオブザーブタイムに入るものとする。

### 3. オフセットの最適化

オフセットの最適化は、2次収束勾配法の1つであるFR法(Fletcher-Reeves法)によって行う。この方法による一般的計算手順は佐山により示されており、それを多少修正して示すと次のとおりである。

- (1)初期オフセット $x_0$ を適当に与え、探索方向ベクトル $s_0$ を次式により求める。

$$s_0 = -g_0 = -\nabla^T F(x_0) \quad (6)$$

ここに

$F(x_0)$  : シミュレーションで求めた総遅れ時間

- (2) $F(x_k + \alpha^k s_k)$ を極小とする $\alpha^k$ を求める。

- (3)次式により、 $x_{k+1}$ が定まる。

$$x_{k+1} = x_k + \alpha^k s_k \quad (7)$$

- (4) $s_k$ を次式により修正する。

$k \neq m+1$ のとき

$$s_{k+1} = -g_{k+1} + \frac{g_{k+1}^T \cdot g_{k+1}}{g_k^T \cdot g_k} s_k \quad (8)$$

ここに

$$g_{k+1} = \nabla^T F(x_{k+1}) \quad (9)$$

$k = m+1$ のとき

$$s_{m+1} = -g_{m+1} \quad (10)$$

(5)次式に示す停止基準を満たすまで(2)-(4)を繰り返す。

$$\|x_{k+1} - x_k\| / (N_s - 1) \leq \epsilon \quad (11)$$

探索方向ベクトルを求めるときは各オフセットを0.025だけ変化させ、それぞれについてシミュレーションを行い、総遅れ時間を $(N_s - 1)$ 通り求め、勾配ベクトル $\nabla^T F(x_k)$ を求める。 $\alpha^*$ の一変数探索の場合についても、 $\alpha^*$ を変化させるたびごとにシミュレーションを行い、総遅れ時間を求める。

4. 計算例

(1) 3 信号路線

まずFig. 5に示すような、3信号からなる路線についてオフセットの最適化を行った。計算に用いた道路交通条件、信号条件およびその他の計算条件は次のとおりである。

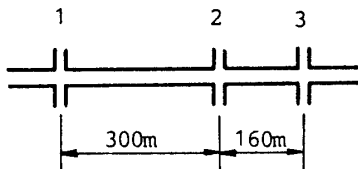


Fig. 5 Example of 3-signal street

- 交通需要量  $Q_{mid} = 0.9$ 台/s (上下両方向とも)
- 飽和交通流率  $Q_{max} = 1.0$ 台/s (片側2車線)
- 最大交通密度  $K_{max} = 4$ 台/ブロック
- 最大速度  $V_{max} = 12$ m/s
- 信号周期  $T = 80$  s
- 損失時間  $L = 0$  s
- 現示率  $\pi_1 = 0.65, \pi_2 = 0.58, \pi_3 = 0.60$
- 各交差点の右左折流出率 20%(上下両方向とも)
- 各交差点の右左折流入台数 0.2台/s (〃)
- オフセットの探索幅 0.025
- $\alpha$ のステップ幅 0.00001
- 収束判定値  $\epsilon = 0.0001$
- シミュレーション時間  $ET = 500$  s

まずシミュレーションによって求めた遅れ時間関数を空間座標系に示したのがFig. 6である。これは第1信号区間のオフセット1 ( $\gamma_1$ )および第2信号区間のオフセット2 ( $\gamma_2$ )をそれぞれ0.025間隔の値を与えて行ったシミュレーションの結果であり、マイコンのグラフィック画面をハードコピーしたものである。遅れ時間の大小に応じた5色の色分けによって描画している。作図プログラムは守川のプログラム<sup>5)</sup>を多少修正して用いた。

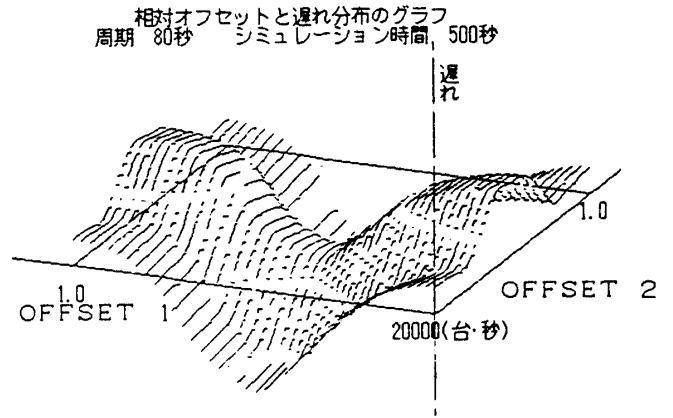


Fig. 6 Example of delay function shown in three dimensional space

Table 1 Initial offsets and final offsets obtained by FR method (3-signal street, T=80s)

No.	Offsets	$\gamma_1$	$\gamma_2$	Total delays (veh · s)	No. of iterations
1	Initial	0.000	0.000	21224	2
	Final	0.503	0.100	15481	
2	Initial	0.000	0.500	23313	2
	Final	0.491	0.044	15423	
3	Initial	0.489	0.565	19105	2
	Final	0.442	0.849	16170	
4	Initial	0.900	0.500	23335	2
	Final	0.689	0.185	17964	
5	Initial	0.900	0.900	20785	2
	Final	0.569	0.754	16124	
6	Initial	1.000	1.000	21224	2
	Final	0.503	0.100	15481	

遅れ時間はオフセットの周期を1とする周期関数である。この図では原図の黄色の線が消えているが、少なくともこの図から遅れ時間の極小点は2箇所にあることがわかる。

つぎにいくつかの初期オフセットを与えてオフセット ( $\gamma_1, \gamma_2$ ) の最適化を行った結果をTable 1に示す。この結果からみると得られた最終オフセットはFig. 6に示す2つの極小点のいずれか一方の近傍に収束していることがわかる。ただしいずれの極小点に収束するかは、勾配法の性質上、初期オフセットに依存することとなる。

(2) 7 信号路線

つぎにFig. 7に示す7信号からなる路線を対象としてオフセットの最適化を行った。7信号のスプリットは左からそれぞれ

0.65, 0.58, 0.60, 0.58, 0.63, 0.60, 0.65

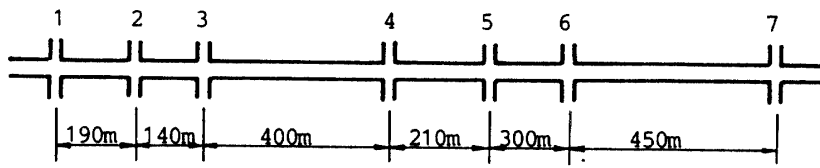


Fig. 7 Example of 7-signal street

とし、またシミュレーション時間は $ET = 1800$  sとした。それ以外の信号条件、道路交通条件および計算条件は3信号路線の場合と同様である。

信号周期80 sの場合の計算結果の1例をTable 2に示す。この表では初期オフセットを0.000, 0.250, 0.500, 0.750の4通りについて計算を行っているが、初期オフセットが異なると、最適化によって得られる最終オフセットも異なることがわかる。これは得られる最終オフセットが局所的な最適オフセットであり、勾配法では全域的最適オフセットが保証されないことを示したものとしよう。

つぎに、信号周期60 s, 80 s, 90 s, 100 sの4通り

についてオフセットの最適化を行った結果をTable 3に示す。信号周期以外の条件はTable 2の場合と同様である。この場合の初期オフセットはすべて0.0としていた。これらの場合においても、それぞれの初期オフセットに対応した局所的最適解が得られているものと思われる。全域的最適解を求めるには、たとえば多数の初期オフセットを与えて最適化を行い、得られた最終オフセットの中から最も遅れの小さいオフセットを選ぶというような方法が必要である。いずれにしてもここで構築したシミュレーションによれば任意の道路交通条件、信号条件を与えてオフセットの最適化を行うことができることがわかった。

Table 2 Initial offsets and final offsets obtained by FR method (7-signal street,  $T = 80$  s)

No.	Offsets	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_3$	$\gamma_4$	$\gamma_5$	$\gamma_6$	Total delays (veh · s)	No. of iterations
1	Initial	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	216128	4
	Final	0.447	0.977	0.304	0.941	0.884	0.277	186378	
2	Initial	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	194985	2
	Final	0.274	0.832	0.599	0.119	0.422	0.585	171830	
3	Initial	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	192380	2
	Final	0.402	0.447	0.627	0.524	0.577	0.347	190564	
4	Initial	0.750	0.750	0.750	0.750	0.750	0.750	211237	2
	Final	0.955	0.044	0.369	0.830	0.556	0.487	168577	

Table 3 Initial offsets and final offsets obtained by FR method for various cycle times (7-signal street)

No.	Cycle times (s)	Offsets	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_3$	$\gamma_4$	$\gamma_5$	$\gamma_6$	Total delays (veh · s)	No. of iterations
1	60	Initial	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	184415	3
		Final	0.487	0.121	0.162	0.263	0.507	0.251	154685	
2	80	Initial	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	216128	4
		Final	0.447	0.977	0.304	0.941	0.884	0.277	186378	
3	90	Initial	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	225865	3
		Final	0.365	0.829	0.351	0.750	0.893	0.629	206064	
4	100	Initial	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	233871	4
		Final	0.837	0.089	0.622	0.894	0.017	0.330	200673	

#### 4. むすび

本研究では、一連の信号交差点が連続する1本の路線を対象として、飽和に近い重交通時の交通現象を再現することができるシミュレーションモデルを作成し、これによって路線全体の遅れ時間を求めるようにした。このシミュレーションモデルを、遅れを求めるサブモデルとし、勾配法によってオフセットの最適化を行った。その結果、任意の道路交通条件および信号条件についてオフセットの最適化が実行できた。最適化によって得られたオフセットは局所的な最適解にすぎないので、全域的最適解に近い解を求める工夫が必要である。また交差道路の交通流をモデル化すること、および感知器の配置とそれによる感知機能を付加し交通感应型のスプリット制御をシミュレーションできるようにす

ることなどが今後の課題である。

#### 参 考 文 献

- 1) D.I.Robertson: TRANSYT: A Traffic Network Study Tool, RRL Report LR253, 1963年
- 2) 津田孝夫: モンテカルロ法とシミュレーション, 培風館, pp.186-192, 昭和57年10月
- 3) 平田忠土, 松井 寛: 緊急時制御のシミュレーションによる比較検討, 第8回交通工学研究発表会論文集, pp.21-23, 昭和61年11月
- 4) 高松武一郎編著: プロセスシステム, 日刊工業新聞社, pp.163-166, 昭和47年3月
- 5) 守川 穰: 3D Graphics (第3次元グラフィックス入門), 月刊ASCII, Vol.10, No.11, pp.161-169, p.252, 昭和61年11月

(昭和62年10月15日受理)