

系統信号システムのファジィ制御シミュレーション

久井 守*・高橋 昌之**

Traffic Simulation on Fuzzy Control of Coordinated Signal Systems

Mamoru HISAI and Masayuki TAKAHASHI

Abstract

This paper describes a fuzzy control of offsets on coordinated signal systems. The aim is to control the relative offsets of each link in a way of on-line real time basis. By repeating the fine adjustment of offsets corresponding to both upstream and downstream traffic flow measured by detectors every cycle, it is expected that desired offsets are attained and maintained so as to minimize total delay. Many cases of traffic simulation on the roads consisting of 5 signals are executed under various conditions. As a result, some effective offsets are obtained which make the delay smaller than balanced offsets, though it depends on the calculation condition such as traffic flow and cycle length.

1. はじめに

交通信号を互いに関連づけて制御する系統制御では、制御パラメータとして信号周期、現示率およびオフセットがある。このうちオフセットは交通流を円滑化するのに最も重要な制御パラメータである。本研究は、系統信号系のシミュレーションモデル開発し、それを用いてオフセットのファジィ制御を行いその効果を評価したものである。シミュレーションの手法を用いて交通信号のファジィ制御を試みた研究としてはいくつかある^{1),2),3)}。これらは孤立交差点のスプリット制御を行ったもの^{1),2)}、または一方通行道路のオフセット制御を扱ったものである³⁾。いずれも限られた条件の道路を対象としたものである。これに対して、本研究は一般の二方通行路線のオフセット制御を対象としたものである。シミュレーションは路線上の一連の信号群を対象とし、

追従走行を考慮して実際の交通現象を再現したものである。また各リンクの上下両方向に感知器を配置して交通流を計測するようにモデル化した。

ところで、オフセットの最適化には、オフラインによる方法とオンラインによる方法がある。オフラインによる方法は与えられた道路条件および交通条件をもとにオフラインで最適オフセットを求める方法である。またオンラインによる方法は車両感知器で交通流を計測しながら時々刻々の交通状況に対応したオフセットをオンラインで求める方法である。本研究のファジィ制御はオンラインで最適オフセットを求める方法に分類されるものである。本研究では遅れ時間を評価指標としてオフセット制御を行う。制御効果を評価するために、通過帯幅最大化基準による平等オフセットを与えた場合の遅れ時間と比較する。これは、平等オフセットは必ずしも遅れを最小にするものではないが、容量以下の交通条件下では遅れ最小化基準からみても優れたオフセットであると判断されるからである。系統制御では、系統路線内の各信号の周期は系統周期に統一される必要がある。したがってオフセットのファジィ

*知能情報システム工学科

**広島県庁

制御においては、系統周期を保ちながら毎周期オフセットの微調整を繰り返すという制御方法をとる。シミュレーションの計算条件として、道路条件(リンク長Lなど)、信号条件(信号周期T, 各現示時間G, 初期オフセットO) および交通条件(交通量Q, 希望速度Vなど)を与える。右左折による流入および流出は考えないものとし、また対象路線は片側1車線とする。

2. ファジィ制御ルール

ファジィ制御では、言語的制御ルールが中心的な役割を果たす⁴⁾。これはエキスパートがもっている制御のノウハウを言語的に表現したもので、どのような条件のときにどのような制御を行うかという制御論理を if~then の形式で表現したものである。本研究では、各リンクごとに、上り側信号の青終了前後の到着台数 (a_{u1}) と赤終了前後の到着台数 (a_{u2})、および下り側信号の青終了前後の到着台数 (a_{d1}) と赤終了前後の到着台数 (a_{d2}) から相対オフセット調整量 (o) を決定する制御ルールを作成し、これによってオフセット制御

```

IF       $a_{u1}$  = none      ELSE
AND     $a_{u2}$  = too many  IF       $a_{u1}$  = medium
AND     $a_{d1}$  = many      AND     $a_{u2}$  = few
AND     $a_{d2}$  = a few     AND     $a_{d1}$  = a few
THEN    $o$  = NB           AND     $a_{d2}$  = many
ELSE                                       THEN    $o$  = PM
IF       $a_{u1}$  = a few     ELSE
AND     $a_{u2}$  = many     IF       $a_{u1}$  = many
AND     $a_{d1}$  = medium   AND     $a_{u2}$  = a few
AND     $a_{d2}$  = few      AND     $a_{d1}$  = none
THEN    $o$  = NM           AND     $a_{d2}$  = too many
ELSE                                       THEN    $o$  = PB
IF       $a_{u1}$  = few
AND     $a_{u2}$  = medium
AND     $a_{d1}$  = few
AND     $a_{d2}$  = medium
THEN    $o$  = ZE
    
```

Fig. 1 Fuzzy control rules

を行った。その制御ルールは Fig. 1 に示すように5つのルールから構成する。この制御ルールは、青終了前後よりも赤終了前後に到着交通量が多くなる方向にオフセットを微調整すれば遅れ時間が小さくなるであろうという考えが基本になっている。このルールは入力 a_{u1} , a_{u2} , a_{d1} , a_{d2} と出力 o のファジィ関係である。接続詞「AND」と「ELSE」はそれぞれファジィ集合の演算における積集合の「min」と和集合の「max」に対応する。ファジィ推論は大別して直接法と間接法があるが、本研究では直接法のうちの min-max-重心法⁵⁾によってオフセット調整量を求めた。また到着台数のファジィ集合 none, a few, few, medium, many, too many とメンバーシップ関数の値を Table 1 に示し、オフセット調整量のファジィ集合 NB, NM, ZE, PM, PB とメンバーシップ関数の値を Table 2 に示す。

3. ファジィ推論によるオフセットの制御方法

オフセットの定義としては相対オフセットと絶対オフセットがある。相対オフセットは隣接信号間の時間ずれであり、絶対オフセットは基準信号からの時間ずれである。本研究の制御対象は各リンクの相対オフセッ

Table 1 Fuzzy sets on arrivals and their membership functions

Fuzzy sets	Arrivals (veh)					
	0	1	2	3	4	5
none	1.0	0.8	0.5	0.0	0.0	0.0
a few	0.8	1.0	0.8	0.5	0.0	0.0
few	0.5	0.8	1.0	0.8	0.5	0.0
medium	0.0	0.5	0.8	1.0	0.8	0.5
many	0.0	0.0	0.5	0.8	1.0	0.8
too many	0.0	0.0	0.0	0.5	0.8	1.0

Table 2 Fuzzy sets on offsets and their membership functions

Fuzzy sets	Offsets (s)								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
NB (negative big)	1	.8	.5	0	0	0	0	0	0
NM (negative medium)	.5	.8	1	.8	.5	0	0	0	0
ZE (zero)	0	0	.5	.8	1	.8	.5	0	0
PM (positive medium)	0	0	0	0	.5	.8	1	.8	.5
PB (positive big)	0	0	0	0	0	0	.5	.8	1

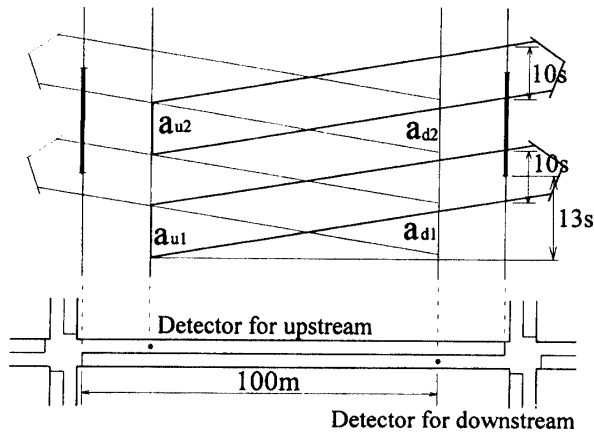


Fig. 2 Arrangement of detectors and measuring interval of traffic flow

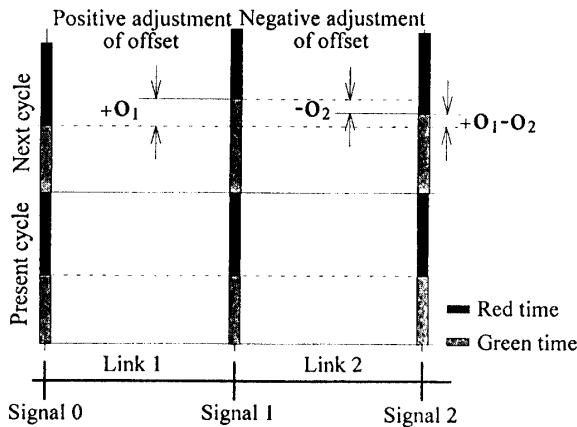


Fig. 3 Adjustment of offsets

トで青開始時の時間ずれ(秒単位)である。相対オフセットのファジィ制御を行うために、各リンクごとに上下両方向とも停止線から100m手前の地点に車両感知器を設けた。100mの区間の最大待ち台数は約17台である。待ち台数がそれを越える場合については考慮していないが、本研究における計算条件下ではそれを越えることはなかった。感知器の配置はFig. 2に示す。この感知器によって青終了時点前後各5秒合計10秒の間に停止線を通過する台数を上り a_{u1} 、下り a_{d1} としてカウントし、赤終了時点前後各5秒合計10秒の間に停止線を通過する台数は上り a_{u2} 、下り a_{d2} としてカウントする。感知器による交通量計測時間は各現示の終了13秒前から10秒間とし、本研究ではその計測台数に基づいてオフセットのファジィ制御を行うこととする。ここで交通量計測を各現示終了の13秒前から開始するのは、感知器から停止線まで100mの区間を希望速度

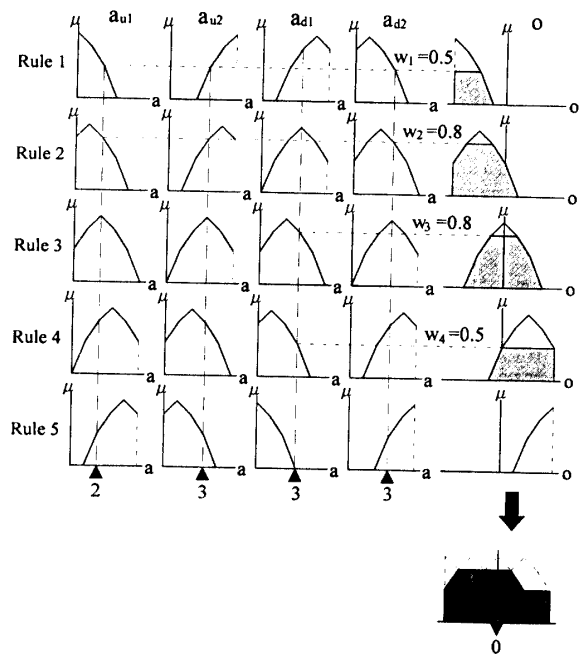


Fig. 4 Fuzzy reasoning of offset adjustment⁵⁾

12.5m/sで走行するのに8秒かかり、停止線を現示終了5秒前に通過する車両は、13秒前に感知器を通過することになるからである。

本研究では、各リンクごとに相対オフセットのファジィ制御を行うが、実際のオフセット調整は絶対オフセットによって行うことが必要になる。この絶対オフセットの調整は、オフセット調整量を決定した周期の次の周期において青時間を加減することによって行う。このオフセット調整方法をFig. 3に示す。例えばリンク1の相対オフセットの調整量が $+o_1$ であるとすると、1番目信号の青時間を $+o_1$ 秒だけ調整する。つぎにリンク2の相対オフセットの調整量が $-o_2$ であるとすると、2番目信号の青時間は、1番目信号のオフセット調整量 $+o_1$ と2番目信号の相対オフセットの調整量 $-o_2$ を累加した $(+o_1-o_2)$ 秒だけ調整する。このようにオフセットのファジィ制御は、毎周期各信号の絶対オフセットを微調整することによって行う。

次に、ある周期における到着台数が $\{a_{u1}, a_{u2}, a_{d1}, a_{d2}\} = \{2, 3, 3, 3\}$ である場合を例として、オフセット調整量 o のファジィ推論過程について説明する。まずTable 1およびTable 2のメンバーシップ関数の値を用いてFig. 1の5つの各制御ルールをグラフ化したのがFig. 4である。次に各ルールごとにmin演算によって適合度 w を求め、これをもとにオフセット調整量のメンバーシップ関数の頭切り⁴⁾を行う。ここで頭切

りとは、オフセット調整量のメンバーシップ関数を前件部の適合度以下にすることである。オフセット調整量の頭切りの位置は、ルール1では0.5、ルール2では0.8、ルール3では0.8、ルール4では0.5およびルール5では0.0である。これらの結果から各ルールの推論結果（塗りつぶし部分）を合成してオフセット調整量の重心位置を求めるが、本研究ではオフセットの横軸を8分割し、分割された各部分の面積および重心を求め、さらにメンバーシップ関数全体の重心を求めることによってルール全体の推論結果つまりオフセット調整量を得る。この例ではオフセット調整量は0となる。

4. シミュレーション⁶⁾

本研究で用いたトラフィックシミュレーションは、追従理論によって車速を計算する追従走行シミュレーションである。シミュレーションの仮定は次のとおりである。

- ① 主道路および交差道路ともに往復2車線である。
- ② シミュレーションの対象範囲は Fig. 5 の破線で示したエントリーポイント内とし、エントリーポイントは停止線手前120mの地点とする。
- ③ 信号はすべて2現示である。
- ④ 車両感知器は停止線の手前100mの地点に設置する。
- ⑤ 追従速度はつぎの安全車頭間隔の関係式によって決定する。

$$B < x_{i-1}(t-\Delta t) - x_i(t-\Delta t) < C \text{ の場合}$$

$$x_{i-1}(t-\Delta t) - x_i(t-\Delta t) = 0.00818 \{V_i(t)\}^2 + 0.139V_i(t) + B$$

$$x_{i-1}(t-\Delta t) - x_i(t-\Delta t) < B \text{ の場合}$$

$$V_i(t) = 0$$

ここに $x_i(t)$: 時刻 t における i 番目車両の座標位置 (m)

Δt : ドライバーの知覚反応時間 (s)

$V_i(t)$: 時刻 t における i 番目車両の速度 (km/h)

B : 停止時の最小車頭距離 (m)

C : 追従走行を行う最大車頭距離 (m)

⑥ 赤信号のとき停止線手前の先頭車は等減速度運動で停止線に接近し停車する。青信号になると希望速度に達するまで等加速度で発進する。

⑦ 交差点での右左折はなく直進交通のみである。また信号区間での交通の発生吸収はない。

⑧ エントリーポイントへの車の到着車頭時間は指数分布に従う。

⑨ 車の遅れ時間は実際の旅行時間と、希望速度による走行所要時間の差とする。したがってこれには赤信号による待ち時間はいうまでもなく交差点前後の加減速、追従走行にともなう遅れもすべて含まれることになる。

⑩ 主道路交通の遅れ時間はエントリーポイント流入直後から下流端交差点流出直後までに受けた全遅れ時間とし、交差側交通の遅れ時間はエントリーポイント流入直後から交差点通過直後までに受けた全遅れ時間とする。

これらの仮定のもとにシミュレーションプログラムを作成し、オフセットのファジィ制御を実行した。Fig. 6 に本研究のシミュレーションのイメージ図を示す。

5. テストラン

本研究のシミュレーションで用いた対象路線は Fig. 7 に示す通りであり、諸定数は以下の通りである。

- 主道路希望速度 V : 12.5m/s
- 交差道路希望速度 V_b : 10.0m/s
- 車の加速度 α : 1.2m/s²

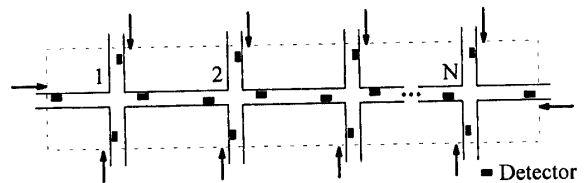


Fig. 5 Study section of simulation

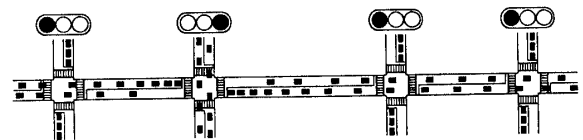


Fig. 6 Image description of traffic simulation

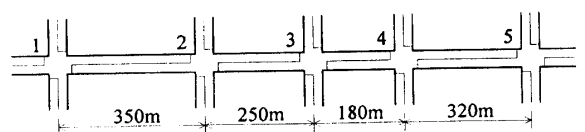


Fig. 7 Example of road

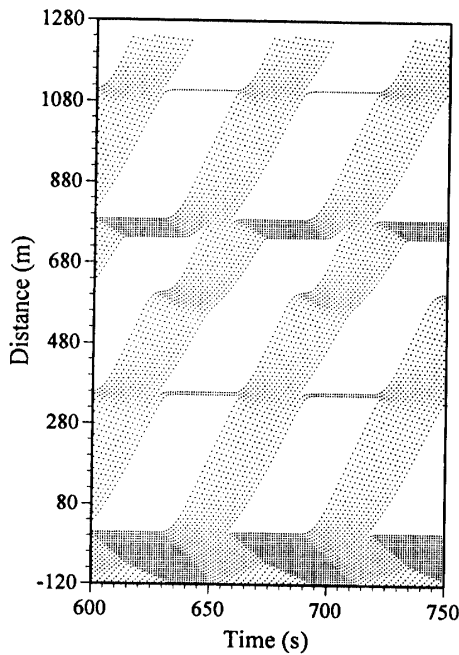


Fig. 8 Vehicle trajectories

- 停止時の車頭距離 B : 6.0m
- 追従走行を行う最大車頭距離 C : 40.0m
- 最小車頭時間 $t_c = 2.0s$
- スキャンサイクル (知覚反応時間) $\Delta t : 1.0s$

これらの定数を用いて、飽和交通流率を求めるため Fig. 7 に示す 5 信号 4 リンクからなる道路についてシミュレーションを行った。計算条件として信号周期は 60s、主道路の青時間は全信号 30s、主道路交通需要量は 1800 台/h (交通流率 0.5 台/s) とし、同時式オフセットを与えてシミュレーションを行い、40 周期にわたり 300 秒ごとに上り交通が 5 つの交差点の停止線を通過する車両台数をアウトプットした。このシミュレーションのはじめの 5 周期では通過台数が若干少ないものの、他の周期では 5 つの交差点を通過する台数はすべて同じ台数であり一定して青 150 秒あたり 70 台であった。このことから飽和交通流率は、 $s = 70 \times 3600 / 150 = 1680$ 台/h = 0.467 台/s となる。また、上りの走行軌跡を図示したのが Fig. 8 である。この図は経過時間 600~750 秒までの走行軌跡をプロットしたものであるが、この図から系統路線内を走行する車両の走行軌跡が信号によって整序化されていることが分かる。

6. シミュレーション結果

ファジィ制御シミュレーションは、Fig. 7 に示す 5 信号 4 リンクについて行った。シミュレーション時間は原則 3600 秒とした。交通量は飽和交通流率を参考にして過飽和にならないように考慮しつつ、次のような 6 通りの交通量パターンを与えた。

- ・交通量パターン 1 $Q_u = 828$ (台/h), $Q_d = 828$ (台/h)
- ・交通量パターン 2 $Q_u = 828$ (台/h), $Q_d = 540$ (台/h)
- ・交通量パターン 3 $Q_u = 540$ (台/h), $Q_d = 828$ (台/h)
- ・交通量パターン 4 $Q_u = 324$ (台/h), $Q_d = 324$ (台/h)
- ・交通量パターン 5 $Q_u = 324$ (台/h), $Q_d = 108$ (台/h)
- ・交通量パターン 6 $Q_u = 108$ (台/h), $Q_d = 324$ (台/h)

ここに、 Q_u は主道路上り交通量であり、 Q_d は主道路下り交通量である。また、交差道路は上り下りとも主道路上り交通量の 2/3 とした。

初期オフセットとしては、スルーバンド法によって求めた平等オフセットを用いた。これはファジィ制御と平等オフセットの制御効果を同一条件で比較するためである。またシミュレーション開始から 100 秒間は感知器による計測をしないようにした。これは、シミュレーション開始時は、系統路線内に車両が発生していないからである。遅れ時間は、主道路遅れと交差道路遅れに分け、主道路遅れは系統内遅れ時間と系統外遅れ時間に分けて集計した。系統内遅れ時間は系統制御区間内における遅れ時間であり、系統外遅れ時間は系統区間への流入リンクにおける遅れ時間である。交差道路遅れは、交差道路における遅れ時間である。また総遅れ時間は、主道路側の系統内遅れ時間と系統外遅れ時間の総和とする。遅れ時間は 300 秒ごとに出力した。

以上の条件で、周期は 50~100 秒まで 10 秒刻みとし全信号同一とした。主道路側青時間は交通量パターン 1~3 では周期の 0.5 倍、交通量パターン 4~6 では周期の 0.6 倍とした。また交差道路の青時間は (周期 - 主道路側青時間 - 4 秒) とした。黄時間は主道路交差道路ともに 2 秒とし、全赤時間は 0 とした。

(1) 上りと下りを総合した制御ルールの場合

上りと下りを総合した制御ルールというのは、Fig. 1 に示した制御ルールをそのまま用いるものであり、上り下り両方向の到着交通を同時に総合的に判断してオフセット調整量を決定するルールである。このルールによって、信号周期 50 秒および 60 秒で交通量パターン 1~3 の条件についてファジィ制御を行った結果、

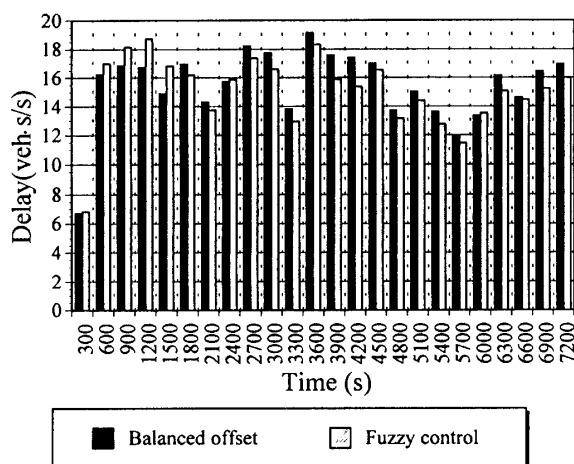


Fig. 9 Simulation result in case of cycle time 60s

平等オフセットより遅れ時間が小さくなりファジィ制御の有効性が確認できた。その中でも信号周期50秒で交通量パターン1の場合、系統内遅れが約19台・s/sと平等オフセットに比べ遅れ時間を5%も少ない結果となった。また信号周期60秒で交通量パターン3の場合、Fig. 9に示すように、経過時間1500秒までは平等オフセットに比べて、ファジィ制御の遅れ時間が大きくなったが、1800秒以降は逆に遅れ時間が小さくなった。したがってさらにシミュレーション時間を7200秒まで延長して遅れ時間を比較した。この図から3600秒～7200秒の区間で約10台・s/sと5%程度遅れ時間が小さくなっている。このことからファジィ制御が有効に機能していることが分かる。このシミュレーションでは、5番目信号のオフセットの調整が頻繁に行われた。それは系統内に流入してくる車両を的確に判断したことによるものであり、その結果遅れ時間の減少に貢献したものと考えられる。周期50秒および60秒の交通量パターン4～6では平等オフセットと遅れ時間が同じかまたは大きくなった。

信号周期70秒のとき、交通量パターン1～3で遅れ時間はすべて大きくなった。また周期70秒の交通量パターン4～6、および周期80秒、90秒、100秒の全パターンでは、ファジィ制御と平等オフセットの遅れ時間が同じ値であった。これはファジィ制御によるオフセットの調整量がすべて0であり、ファジィ制御は結果的に平等オフセットに一致し平等オフセットを維持することが最適と判断する結果となった。

(2) 上りと下りを分離した制御ルールの場合

上りと下りを分離した制御ルールというのは、上り方向の到着交通からオフセット調整量を求め、またこれとは別に下り方向の到着交通からオフセット調整量を独立に求める制御ルールである。この制御ルールは、Fig. 1の制御ルールを上りと下りに分離しただけのものであり、上りと下りの両者のオフセット調整量の差を調整するものである。この制御ルールは、平等オフセットをそのまま維持するような制御を改善するためのひとつの試みである。このルールによって、信号周期50秒で交通量パターン1の条件についてファジィ制御を行った結果、平等オフセットに比較して、系統内遅れ時間が約28台・s/sと8%減少した。しかし交通量パターン2および3では逆に遅れ時間が大きくなった。周期60秒、70秒、80秒、90秒および100秒で交通量パターン1～3の場合、すべて遅れ時間が大きくなり、遅れ時間を減少できなかった。次に交通量を少なくした交通量パターン4では、信号周期90秒の場合に遅れ時間が小さくなっただけで、その他の周期では遅れ時間が大きくなった。しかし、交通量パターン5および6では、ほとんどの信号周期で遅れ時間が小さくなり、20%以上遅れ時間が小さくなったものもあった。

以上のように、上りと下りを分離した制御ルールでは、交通量パターン2および3のすべての周期で遅れ時間が大きくなった。すなわち交通量が多くなるとファジィ制御の有効性は認められない。逆にファジィ制御の有効性が認められる条件は、交通量が少なくかつ上下両方向に差があるときである。また上りと下りを分離した制御ルールによる方法では、到着台数に対してオフセットが過敏に反応する結果となった。上りと下りを分離した制御ルールは、到着台数に対して敏感に反応することを意図して構築したルールであるが、はじめの意図をはるかに上回るほど過敏であった。したがって今後は適切な感度の制御ルールを構築することが望まれる。

7. まとめ

本研究では、オフセットのファジィ制御を行うシミュレーションプログラムを開発し、ファジィ制御実験を行い、その制御効果について検討した。制御ルールとして、上りと下りを総合したものと、分離したものの2通りを実験した。上りと下りを総合した制御ルールによれば、信号周期が短く交通量が比較的多い場合に、ファジィ制御の有効性が確認できた。しかし信号周期が長い場合、ファジィ制御と平等オフセットの遅れ時間が同じ値となった。これはファジィ制御によるオフ

セット調整量がすべて0であり、ファジィ制御は結果的に平等オフセットに一致し、平等オフセットを維持することが最適と判断した結果となった。一方、上りと下りを分離した制御ルールによる場合、交通量が少なくかつ上下両方向に差があるときにファジィ制御の有効性が認められた。

今後の課題としては、右左折を考慮したシミュレーションを行うこと、シミュレーションの交通流を詳細に検討して制御ルールの一層の改善を行うこと等が挙げられる。

参考文献

1) C. P. Pappis and E. H. Mamdani : A Fuzzy Logic Controller for a Traffic Junction, IEEE

Transaction on Sytem, Man and Cybernetics, Vol. SMC-7, No.10, pp.707~717, 1977

- 2) 大山明子・山名臣弘：ファジィ理論を応用した信号制御，第10回交通工学研究発表会論文集，pp. 85~88，平成2年11月
- 3) 中津山幹男・西塚典生・長橋宏：複数交差点のファジィ論理による位相制御，システムと制御，Vol.26, No.2, pp.97~105, 1982
- 4) 村上周太監修：ファジィシステム演習問題集，工業調査会，pp.114~130, 1992
- 5) 浅居喜代治編：ファジィ情報処理入門，オーム社，pp.46~61, 1993
- 6) 久井 守：複数信号機の最適制御に関する基礎的研究，pp.110~112, 昭和60年3月

(平成7年4月14日受理)