

シミュレーションによる混雑時の 系統交通信号の最適制御の検討

久井 守 (知能情報システム工学科)

田村洋一 (社会建設工学科)

岩永和大 (知能情報システム工学専攻)

Optimal Control of Coordinated Signal Systems under the Over-Saturated Conditions through Traffic Simulation

Mamoru HISAI(Department of Computer Science and Systems Engineering)

Youichi TAMURA(Department of Civil Engineering)

Kazuhiro IWANAGA(Graduate Student of Computer Science and Systems Engineering)

In this paper, some relationships between offsets and total delay were obtained from simple traffic simulation on small-scale signalized streets under the over-saturated conditions, from which some considerations were given about optimal offsets. Green times of each signal and common cycle length are given and only relative offsets are variables. Total delay is made up of delay at each link on main street. Findings are as follows: If only one direction is congested, preferential offset for uncongested direction is optimal. If both directions are congested, it is optimal to give preferential offset to each link of either direction. If traffic demands from cross streets through turning movements enter the main street and make it congested, it is difficult to optimize the offset from a viewpoint of total delay on main street. In addition, it was shown that such offsets that can maintain saturation flow during the green time at downstream signal are essential if the link is short and the storage capacity is lower than throughput capacity at the signal.

Key Words: *congestion, total delay, simulation, preferential offset*

1. はじめに

ITS が進展する中で、交通信号制御の高度化に対する期待も高まってきている。都市のネットワークのように信号が密に配置された道路網では、あくまでも系統制御を基本とし、できるだけ系統を維持しながら、その上でクリティカル交差点など容量上のネックとなる交差点については局所的な交通状況に応じたきめ細かなリアルタイム交通応答制御を行うのが望ましいと考えられる¹⁾。このように都市部の信号制御は系統制御を基本とすべきであるが、この系統制御においては、非飽和時よりむしろ交通混雑の著しい過飽和時の方が事態は深刻でかつそれに対する制御も重要であると考え

えられる。しかしながら、この過飽和時の望ましい系統制御については、いままでのところなお十分明らかにされているとはいえない。

そこで本研究では、過飽和条件下にある小規模な系統化路線を対象としてオフセットと遅れ時間の関係を求め、その結果から過飽和時の最適オフセットが具備すべき定性的な特性を求める。オフセットと遅れ時間の関係は単純なシミュレーションで求める²⁾。サイクル長およびスプリットは与えられたものとしてこれを一定とし、本研究ではオフセットのみを検討の対象とする。サイクル長およびスプリットは一定としているので、交差道路の交通が直進のみであれば遅れ時間は

オフセットに関係せず一定となり、系統方向すなわち主道路側の遅れ時間のみを考慮すればよい。ただし交差方向から主道路へ右左折で流入する交通があり、また特にその右左折交通需要が滞留して直進交通を妨害するような場合には交差方向の遅れ時間も考慮する必要がある。

さらに厳密に言えば渋滞の影響が及ぶ範囲はいうまでもなく、系統制御の制御パラメータが経路選択に影響するような範囲も含めたネットワークを対象として、例えば総旅行時間などを評価指標としてネットワーク全体の観点から混雑時の系統制御の最適化を検討するのが望ましいであろう。それについては渋滞リンクが1リンクのみという特別のケースについてごく基本的な立場から最適オフセットについてすでに検討している²⁾。したがってここでは、系統化路線内のみの総遅れ時間を評価指標として混雑時のオフセットについて検討することとする。

2. シミュレーションの概要

過飽和の系統化路線の場合には、リンクの遅れ時間とオフセットの関係は、車群を矩形波で近似的にするなどの取扱をすれば解析的に求めることも可能であるが、細かい場合分けが必要となったりして、かえって煩雑である。そこで本研究では、すでに開発済みの交通流シミュレーションを用いる²⁾。このシミュレーションは、ネットワークを対象としたものであり、リンクとノードからなるネットワークを与え、これに与えられたOD交通量を流して交通状況を再現する配分シミュレーションである。各ノードには信号があるものとしてこれを扱うことができるようにしている。したがって単一の系統化路線には容易に適用することができる。車は、1台1台個別に扱う。このシミュレーションは、ある程度大規模なネットワークでも適用できるように意図していて、車の移動は停止か走行のいずれかというように簡略化している。ただし、水平待ち行列を再現し渋滞の影響を考慮できるようにしている。したがって自動的に先詰まりを考慮することができる。

シミュレーションの機能と特徴を列挙すると次のとおりである。

- 1) 対象ネットワークはセントロイドノード、一般ノードおよびリンクからなる。
- 2) 交差点は一般ノードまたはセントロイドノードで表し、道路は有向リンクで表す。
- 3) リンクの車線数は1車線とする(任意設定可能)。
- 4) スキャニングタイムは1秒とする(任意設定可能)。
- 5) 個別車両を扱う。
- 6) 車両の発生間隔および発生時刻は与えられた OD

交通量から求める。

- 7) OD 交通の時間変動を考慮することができる。
- 8) シミュレーション経過時刻がこの車両発生時刻を過ぎると車両が発生する。
- 9) 車両は発生間隔に従って等間隔に発生する。
- 10) セントロイドノードで発生した車両が先詰まりによってリンクに流入できなかった場合、その車両はセントロイドノードで垂直待ち行列を形成する。
- 11) 車両は停止か自由走行のいずれかとする。
- 12) 停止時の最小車頭距離は任意に与えられるものとし、水平待ち行列とする。
- 13) したがって停止波と発進波を再現し、また先詰まりを考慮することができる。
- 14) リンク下流端でUターンすることはできない。
- 15) 各車両は信号に従って交差点を通過する。
- 16) 信号制御パラメータおよびリンク長などのデータはデータファイルで設定する。
- 17) 信号1周期中における黄時間と全赤時間の和、すなわち損失時間は初期データとして任意に設定する。本研究では損失時間を0秒とした。
- 18) 各リンク下流端に飽和交通流率 S (台/青時) を設定する。この飽和交通流率をもとに1周期中に流出できる車両数を求める。
- 19) 車両は、飽和交通流率より求めた飽和発進時間間隔を経過し、信号現示が青で、かつ先詰まりが起きていなければ、交差点を流出することができる。飽和発進時間間隔 t_s (秒) は次式から求めることができる。

$$t_s = \frac{3600}{S} \quad (1)$$

- 20) リンクで車両が渋滞し、新たな車両が流入できるだけの領域がない場合は先詰まりと判断し、このリンクに車両は流入できないものとする。
- 21) リンクの遅れ時間 T は式(2)に示すように、車両 i がリンク通過に要した時間 t_i から、自由速度で通過した場合に要する時間 t_i' を差し引いたものを累計し、リンク通過台数 m で割って求める。

$$T = \frac{\sum_i (t_i - t_i')}{m} \quad (2)$$

Fig.1 に自由速度 v_f (m/秒)、飽和発進時間間隔 t_s (秒)、発進時間間隔 t_s' (秒)、最小車頭距離 d_j (秒)、発進波の伝播速度 v_s (m/秒) の関係を示した。飽和発進時間間隔と発進時間間隔の間には次式の関係がある。

$$t_s' = t_s - \frac{d_j}{v_f} \quad (3)$$

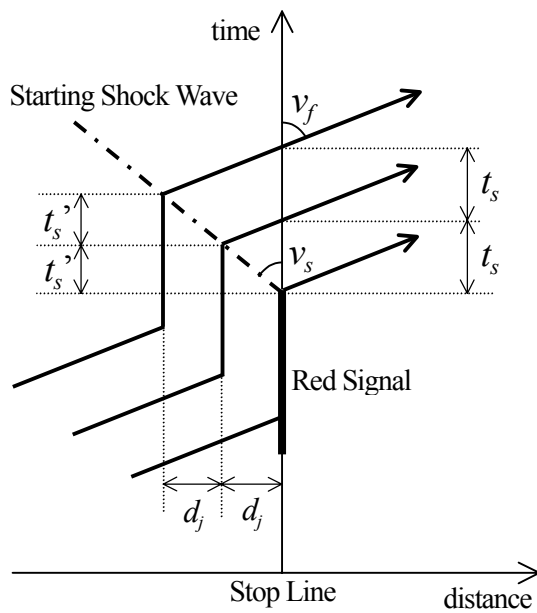


Fig.1 Vehicle Trajectories near Stop Line

発進波の伝播速度は次式から求めることができる。

$$v_s = \frac{d_j}{t_s} \quad (4)$$

- 22) 右折車と対向車の干渉を考慮することができる。
- 23) 24 時間のシミュレーションが実行可能である。
- 24) 道路網の各リンクの待ち行列長の変化を時々刻々画面に表示することができる。

本研究では使用しなかったが本シミュレーションには、次のような経路誘導機能も有する。

- 1) ひとつの OD ペア間に複数の経路が存在する場合、車両は最短経路情報を受け取り、その経路を走行する。
- 2) 車両は旅行時間最短あるいは距離最短の経路のいずれかを走行する。
- 3) 最短経路はダイクストラ法を用いて探索する。
- 4) 情報更新間隔を設定でき、情報更新間隔ごとに各リンクの平均旅行時間を求め、その値をもとに時間最短経路を探索する。
- 5) 時間最短経路を走行する車両は必ず経路誘導に従うものとする。
- 6) 情報の集計から提供までにかかる時間、すなわち情報伝達遅れを考慮することができる。
- 7) 終点までの経路誘導を内生化する。

3. 計算例による混雑時のオフセットの検討

ここでは、Fig.2 に示す 3 信号 2 リンクからなる小規模系統化路線を対象としてオフセットと遅れ時間の関係を求め、この結果から望ましいオフセットについて

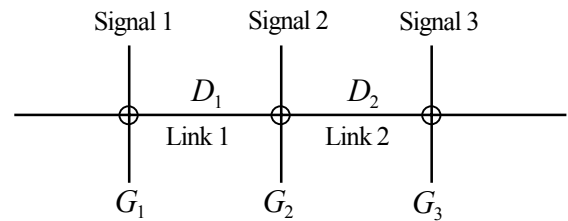


Fig.2 Test Network

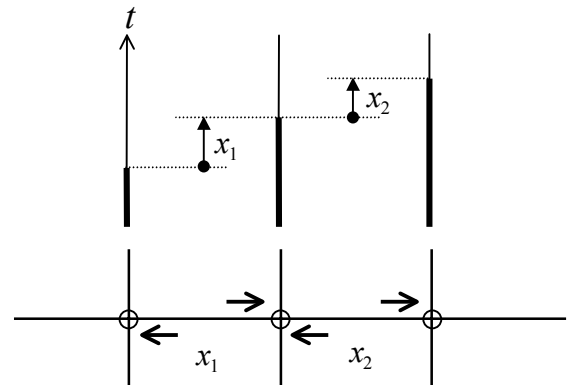


Fig.3 Relative Offsets and Evaluated Delay

考察する。図中の D_1 および D_2 はリンク長 (m), G_1 , G_2 および G_3 は主道路 (系統) 方向の青時間 (秒) である。Fig.3 にはリンク 1 およびリンク 2 の相対オフセット x_1 および x_2 を示している。計測対象の遅れ時間は図の矢印の 4 方向とし、これを合計したものを評価指標とする。これは相対オフセットの影響を受けるリンクの遅れ時間である。単位は 1 台当たりの秒数であり、2 つのリンクを往復した場合の遅れ時間と考えることができる。交通需要量は Fig.4 に示すとおりである。主道路の上り方向は q_m 、下り方向は q_m' とする。交差方向からの流入量は、図に示すように上り方向および下り方向それぞれ q_c および q_c' で信号 2 から左折によって流入するものとする。これを OD 表によって表わすと Table 1 のようになる。交通需要量は Fig.5 に示すように 30 分間一定とし、遅れ時間は 10 分経過後 30 分までの 20 分間集計したものとす。

次にいくつかの典型的なケースについて計算例からオフセットについて検討するが、各ケースに共通する計算条件は次の通りである。

飽和交通流量 $S=1600$ 台/青時

自由速度 $v_f=13.9\text{m/秒}=50\text{km/時}$

飽和密度 $k_f=135$ 台/km

(停止時の最小車頭距離 $d_j=7.4\text{m}$)

発進波の伝播速度 $v_s=4.3\text{m/秒}=15.5\text{km/時}$

サイクル長 $C=100$ 秒

$D_1=300\text{m}$, $D_2=300\text{m}$ ($\tau_1=0.216$, $\tau_2=0.216$)

ここに、 τ はリンクの走行所要時間 (単位は対サイクル長比) である。

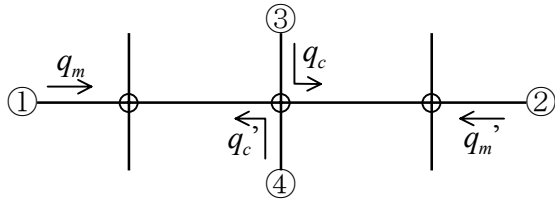


Fig.4 Traffic Demand

Table 1 OD Table

O \ D	①	②	③	④	sum
①		q_m			
②	q_m'				
③		q_c			
④	q_c'				
sum					

3.1 クリティカル交差点が中央にある場合 (ケース1)

まず信号2がクリティカル交差点となっている場合について検討する. この場合の計算条件は次に示すとおりである.

$$G_1=50 \text{ 秒}, G_2=45 \text{ 秒}, G_3=50 \text{ 秒}$$

$$q_m=q_m'=900 \text{ 台/時}$$

$$q_c=q_c'=0 \text{ 台/時}$$

信号2の青時間が短くクリティカル交差点であることを表している. このクリティカル交差点の上流側では渋滞が発生し, 下流側では非渋滞となるように条件を設定している.

この場合の遅れ時間と相対オフセットの関係を遅れ時間の等高線図で表したのが Fig.6 である. この図から遅れ時間の最小点は $x_1=0.8, x_2=0.2$ 付近にあることを読みとることができる. τ の値から判断してリンク1は下り優先オフセット ($x_1=1-\tau_1$), リンク2は上り優先オフセット ($x_2=\tau_2$) 付近が最適であると考えられる. すなわち渋滞リンクの対向方向が非渋滞であればその非渋滞方向を優先するオフセットが最適であることを示している.

3.2 クリティカル交差点が右端にある場合 (ケース2)

次に, 信号3がクリティカル交差点であり, 2リンクいずれも上り方向が渋滞する場合について検討する. この場合の計算条件は次に示すとおりである.

$$G_1=50 \text{ 秒}, G_2=50 \text{ 秒}, G_3=45 \text{ 秒}$$

その他の計算条件はケース1と同様である. この場合の遅れ時間と相対オフセットの関係を遅れ時間の等

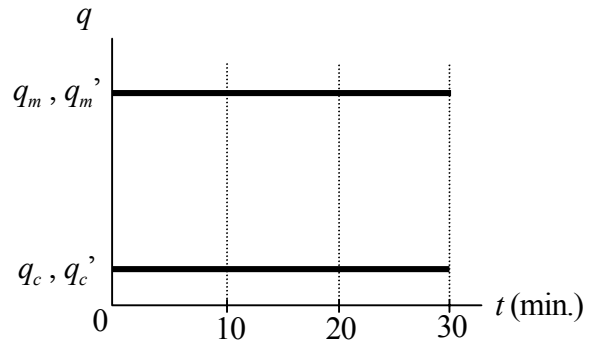


Fig.5 Time Fluctuation of Traffic Demand

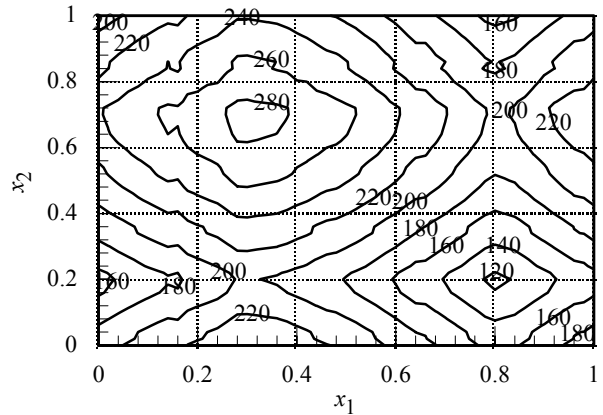


Fig.6 Contour Map of Total Delay(Case 1)

高線図で表したのが Fig.7 である. この図から遅れ時間の最小点は $x_1=0.8, x_2=0.8$ 付近にあることを読み取ることができる. リンク1, リンク2ともに非渋滞の下り方向を優先するオフセット ($x_1=1-\tau_1, x_2=1-\tau_2$) 付近が最適であることを示している.

3.3 両方向全リンクが渋滞する場合 (ケース3)

次に, 時差式信号を信号1および信号3に設置し, 両方向全リンクが渋滞する場合について検討する. 信号 i の上り方向の青時間を G_i , 下り方向の青時間を G_i' とすると, 計算条件は次に示すとおりである.

$$G_1=50 \text{ 秒}, G_2=50 \text{ 秒}, G_3=45 \text{ 秒}$$

$$G_1'=45 \text{ 秒}, G_2'=50 \text{ 秒}, G_3'=50 \text{ 秒}$$

$$q_m=q_m'=900 \text{ 台/時}$$

$$q_c=q_c'=0 \text{ 台/時}$$

すなわち, 信号1は下り方向, 信号3は上り方向に渋滞が発生するように条件を設定している.

この場合の遅れ時間と相対オフセットの関係を遅れ時間の等高線図で表したのが Fig.8 である. この図から遅れ時間の最小点は $x_1=0.8, x_2=0.8$ 付近および $x_1=0.2, x_2=0.2$ 付近にあることを読み取ることができる. このことから, 上り下り両方向とも渋滞している場合には上り優先あるいは下り優先のどちらかにオフセットを設定するのが最適であると考えられる.

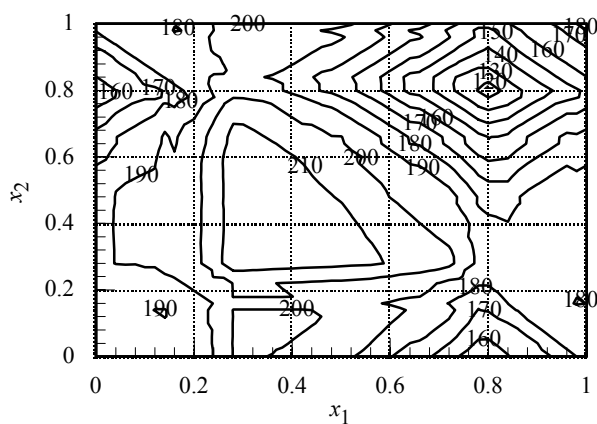


Fig.7 Contour Map of Total Delay (Case 2)

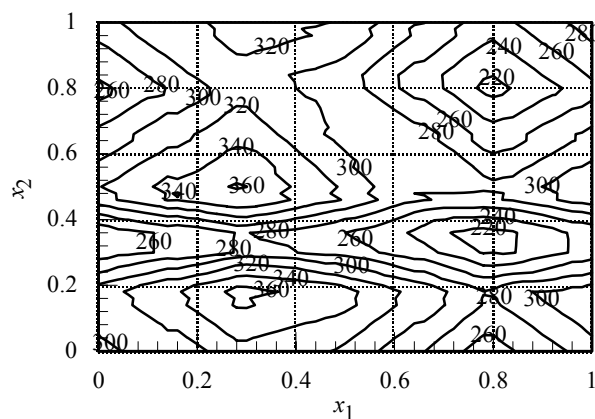


Fig.9 Contour Map of Total Delay (Case 4)

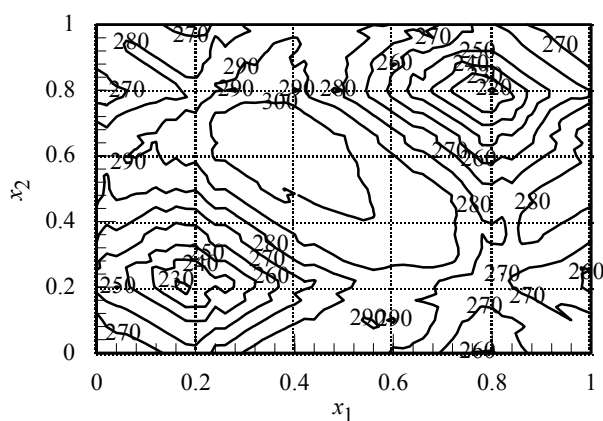


Fig.8 Contour Map of Total Delay (Case 3)

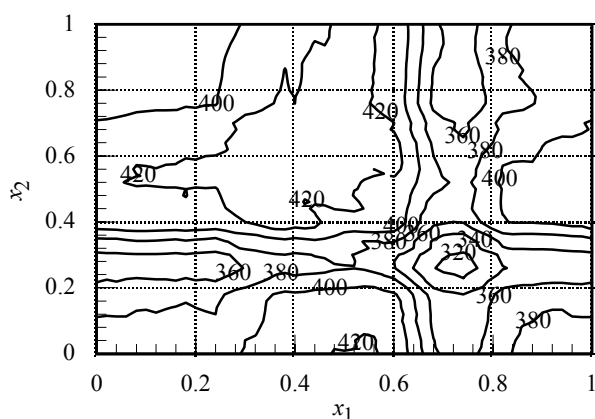


Fig.10 Contour Map of Total Delay (Case 5)

3.4 交差道路（1流入部）から流入需要がある場合（ケース4）

次に、信号3がクリティカル交差点となっており、信号2の交差道路1流入部から左折の流入需要がある場合について検討する。計算条件は次のとおりである。

$$G_1=50 \text{ 秒}, G_2=50 \text{ 秒}, G_3=45 \text{ 秒}$$

$$q_m=q_m'=900 \text{ 台/時}$$

$$q_c=200 \text{ 台/時}, q_c'=0 \text{ 台/時}$$

この場合の遅れ時間と相対オフセットの関係を表したのが Fig.9 である。遅れ時間の最小点は2点ある。そのうちの1点は $x_1=0.8, x_2=0.8$ 付近にあり、これはケース2と同じく非渋滞の下り方向を優先するオフセットが最適であることを示している。もうひとつの最小点は $x_1=0.8, x_2=0.32$ 付近にあり、この x_2 はいわゆるリバースオフセットである。信号3の待ち行列が信号2に到達して先詰まり状態になった時間と信号2の赤時間がほぼ一致するようなオフセットであり、交差方向からの流入を禁止するようなオフセットである。

3.5 交差道路（2流入部）から流入需要がある場合（ケース5）

次に、信号2がクリティカル交差点となっており、信号2の交差道路2流入部から左折の流入需要がある

場合について検討する。この場合の計算条件は次に示すとおりである。

$$G_1=50 \text{ 秒}, G_2=45 \text{ 秒}, G_3=50 \text{ 秒}$$

$$q_m=q_m'=900 \text{ 台/時}$$

$$q_c=q_c'=200 \text{ 台/時}$$

交差道路から上り方向と下り方向へ車両を流入させることで、計測対象のすべてのリンクで渋滞が発生するように条件を設定している。

この場合の遅れ時間と相対オフセットの関係が遅れ時間の等高線図で表したのが Fig.10 である。遅れ時間の最小点は $x_1=0.74, x_2=0.26$ 付近にある。この x_1 は下り方向主道路交通を優先するリバースオフセットであり、 x_2 は上り方向主道路交通を優先するリバースオフセットである。したがって交差方向からの流入をいずれも禁止するようなオフセットである。

3.6 リンク長が短い場合

次に、リンク長が短く、リンクの貯留容量が小さい場合について検討する。この場合の計算条件はケース1～5とは異なり、次に示すとおりである。

$$\text{飽和交通流量 } S=1800 \text{ 台/青時}$$

$$\text{自由速度 } v_f=16.7\text{m/秒}=60\text{km/時}$$

$$\text{飽和密度 } k_f=167 \text{ 台/km} \quad (d_f=6.0\text{m})$$

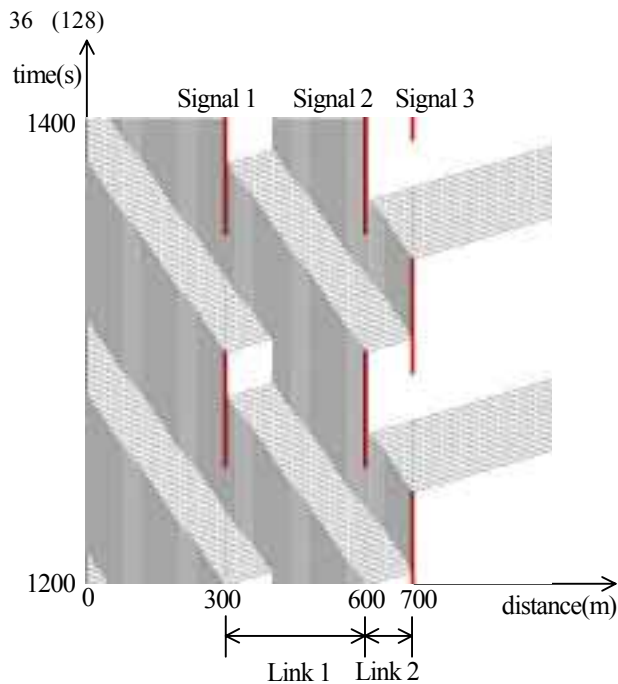


Fig.11 Relationship between Signal Timing and Traffic Flow

発進波の伝播速度 $v_s = 3.7\text{m/秒} = 13.2\text{km/時}$
 サイクル長 $C = 100$ 秒
 $G_1 = 50$ 秒, $G_2 = 50$ 秒, $G_3 = 50$ 秒
 $x_1 = 0.0$, $x_2 = 0.4$
 $D_1 = 300\text{m}$, $D_2 = 100\text{m}$ ($\tau_1 = 0.18$, $\tau_2 = 0.06$)
 $q_m = q_m' = 900$ 台/時, $q_c = q_c' = 0$ 台/時

この場合のシミュレーションから上り方向車両の走行軌跡を表したのが Fig.11 である。横軸は距離で車両流入地点を原点とし、縦軸は時間でシミュレーション経過時刻 1200 秒から 1400 秒までを示している。太い縦線は赤信号を示している。この図から、信号3の青時間後半に通過車両がない時間帯が存在していることが分かる³⁾。このことから、リンク長が短いリンクではリンク下流端の飽和流量が維持できるようなオフセットを設定することが重要であると考えられる。例えば Fig.12 に示すように $x_2 = 0.90$ とすると、他の条件がすべて同じでも渋滞の発生を回避することができる。

4. むすび

本研究は、過飽和条件下にある小規模な系統化路線を対象としてオフセットと遅れ時間の関係を求め、その結果から過飽和時の最適オフセットをシミュレーションによって求めた。その結果、渋滞が1方向の場合は、他方の渋滞していない方向に優先オフセットを設定するのが最適であること、両方向とも渋滞している場合はいずれかの方向を連続して優先オフセットとするのが最適であることがわかった。また交差道路から右左折流入需要があってこれが系統化路線の渋滞を起こすかまたはすでに渋滞しているような場合には、主

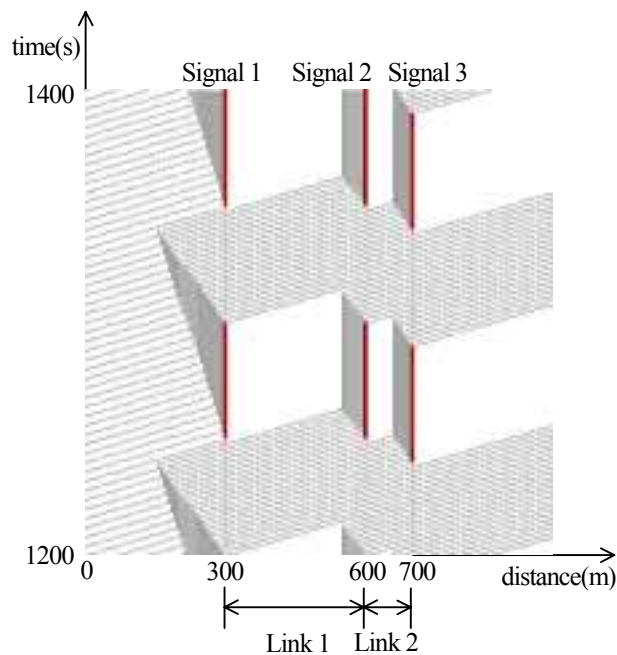


Fig.12 Relationship between Signal Timing and Traffic Flow

道路交通を優先し、交差方向から主道路への流入を抑制するようなオフセットも最適オフセットとなることがわかった。なおリンク長が短く、貯留容量が1サイクルの処理容量を下回るような場合は、リンク下流端の飽和流量が維持できるようなオフセットとすることが重要であることを示した。

今後の課題としては、主道路および交差道路を含め、渋滞が生じているネットワークの全範囲を対象とし、また系統化路線の制御が経路選択に影響するようなネットワークの全範囲まで対象を拡大して、ネットワーク全体の観点から混雑時の影響が解消するまでの全時間帯について最適制御のシナリオを構成するような検討が必要であると考えられる。さらにリンク長が短い場合以外にも交通処理容量を低下させるオフセット禁止領域というべきものを検討していきたい。

なお本研究は文部省科学研究費補助金の助成を受けて行った研究成果の一部である。記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 久井守：巻頭言 交通信号制御について思うこと，交通工学，Vol.35，No.6，pp.1-2，2000年11月
- 2) 久井守，岩永和大，南正昭，福島永士：交通配分による渋滞リンクのオフセットがネットワーク全体に及ぼす影響分析，山口大学工学部研究報告，Vol.51，No.1，pp.25-31，2000年10月
- 3) G.Abu-Lebdeh and R.F.Benekohal：Development of Traffic Control and Queue Management Procedures for Oversaturated Arterials，Transportation Research Record 1603，pp.119-127，1997

(平成12年12月27日受理)