

# 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

久井 守 (知能情報システム工学科)

岩永和大 (知能情報システム工学専攻)

南 正昭 (社会建設工学科)

福島永士 (菱光コンピュータシステム(株))

## An Analysis of the Effect of Signal Offset at Congested Link on the Whole Network through Traffic Assignment

Mamoru HISAI(Department of Computer Science and Systems Engineering)

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

Masaaki MINAMI(Department of Civil Engineering)

Eishi FUKUSHIMA(Ryoko Computer Systems CO.)

In this paper, static user equilibrium assignment is calculated by Frank-Wolfe algorithm and dynamic user optimal assignment through traffic simulation. Both the assignment are performed on a small-scale network which contains a congested link under the condition that inflow capacity into the link is subject to the relative offset. From the relationship between the offset and total travel time obtained through the traffic assignment based on the various offset conditions, it was found that the relative offset affect total travel time on the whole network and that optimal offset from a viewpoint of whole network exists.

**Key Words:** *spillback, traffic assignment, signal control, total travel time*

### 1. はじめに

交差点の待ち行列が隣接上流交差点に達するような、いわゆる先詰まりが発生するような渋滞リンクでは、そのリンクの相対オフセットによって上流交差点の主道路と交差道路間の優先非優先の関係が左右される。本研究では、このような渋滞リンクの相対オフセットが上流交差点の流入容量に与える制約を考慮に入れて交通配分を行う<sup>1)~5)</sup>。小規模なネットワークを対象とした計算結果から、渋滞リンクのオフセットがネットワークの交通流に及ぼす影響について検討し、総旅行時間を最小にするオフセットが存在するかどうかを検討する。

交通配分としては、①信号交差点による容量制約を明示的に取り込んだ静的利用者均衡配分<sup>6)</sup>および②シミュレーションによる動的利用者最適配分を求める。静的利

用者均衡配分の場合には、先詰まりの有無によって容量制約そのものが変化するという点をモデル化することが困難になる。それに対して配分シミュレーションでは先詰まりの有無、あるいはその程度を自動的に扱うことができるという利点がある。したがって本研究では、静的利用者均衡配分と動的利用者最適配分の両者によってオフセットがネットワーク全体に及ぼす影響を検討し、かつ両者の計算結果について比較を行う。本来、モデルの全体は、

上位レベル：オフセット→総旅行時間最小

下位レベル：交通配分

という2レベルの問題とすべきであるが、本研究では、オフセットの影響を検討するという目的に限定する。したがってオフセットは計算条件として与え多数の配分計

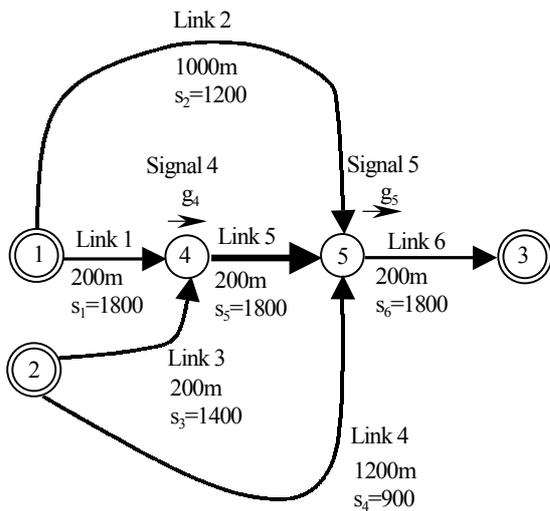


Fig.1 Test Network

算を行い、総旅行時間とオフセットの関係を求める。総旅行時間を最小にするオフセットはこれらの計算結果から判断する。

## 2. 既存の研究

本研究は、筆者らのこれまでの研究<sup>1)~5)</sup>をまとめたものである。これらの研究では、特にオフセットに注目し、渋滞リンクのオフセットがネットワークの総旅行時間に及ぼす影響について検討した。

信号交差点の青時間と交通配分の2レベル問題を扱った研究はいくつかあるが<sup>8)~17)</sup>、オフセットが交通配分、すなわちネットワークの交通流に与える影響を考慮した研究はほとんどない。

## 3. ペナルティー関数法による静的均衡配分

### 3.1 問題の設定

Fig.1に示すように、5ノード6リンクからなる小規模なネットワークを対象として静的利用者均衡配分を求める。ノード1、2および3はセントロイドノードである。ODは2起点1終点となる。ODペア①→③および②→③のいずれもリンク5を通る経路が距離的に最短路となるようにリンク長を設定している。したがって信号5における待ち行列が信号4に到達し、先詰まり状態になると想定する。図中のsはリンク下流端の飽和交通流率(台/青時)である。オフセットx(秒)はFig.2に示すように信号5からの発進波が信号4に到達した時点として定義する。図のようなオフセット状態では、リンク1、リンク3およびリンク5の交通量q(台/時)に対する容量制約は次のようになる。

$$q_1 \leq (g_5' - x)s_1 \quad (1)$$

$$q_3 \leq xs_3 \quad (2)$$

$$q_5 \leq g_5s_5 \quad (3)$$

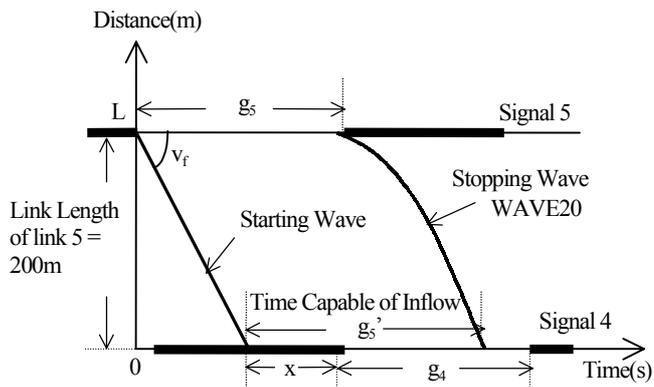


Fig.2 Starting Wave and Stopping Wave

ここで、sは飽和交通流率(台/青時)、g<sub>5</sub>'はリンク5への流入可能時間(秒)である。発進波は自由速度v<sub>f</sub>(m/秒)の直線とし、また停止波は波動理論より次式のような放物線とする<sup>7)</sup>。これはGreenshieldsのk-v式を仮定して導かれたものである。

$$x = v_f \sqrt{g_5 t} - v_f t + L \quad (4)$$

ここで

x: 距離 (m)

t: 時間 (秒)

v<sub>f</sub>: 自由速度 (m/秒)

(g<sub>5</sub>, L): 停止波の原点

である。

### 3.2 計算法

本研究では、内点ペナルティー関数法によって容量制約を考慮しFrank-Wolfeアルゴリズムで均衡配分を求めた。この計算法は井上博司が提案したもので、その特徴は、容量制約をペナルティー項として目的関数に加え制約なしの問題に変換する点と、ペナルティー項が待ち行列遅れを表すと解釈できる点にある<sup>6)</sup>。リンクaの所要時間t<sub>a</sub>は次式のように、①BPR関数によるリンク走行時間、②信号による遅れ(Websterの遅れ式の第1項)および③待ち行列遅れの和で与える。この式の第3項が待ち行列遅れ(ペナルティー項)である。

$$t_a(q_a) = t0_a \left\{ 1 + 0.15 \left( \frac{q_a}{s_a} \right)^4 \right\} + \frac{s_a}{2(s_a - q_a)} (1 - g_a)^2 C + \frac{f^n}{c_a - q_a} \quad (5)$$

ここで

t0<sub>a</sub>: リンクaを自由速度で走行したときの走行所要時間(秒)

q<sub>a</sub>: リンクaのリンク交通量(台/時)

s<sub>a</sub>: リンクaの飽和交通流率(台/青時)

g<sub>a</sub>: リンクaの下流信号のスプリット(0 ≤ g<sub>a</sub> ≤ 1)

C: サイクル長(秒)

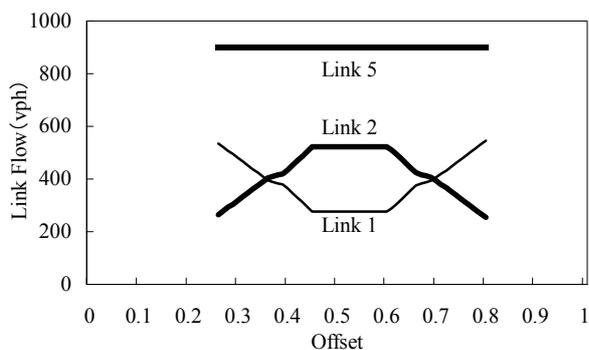


Fig.3 Link Flow and Offset

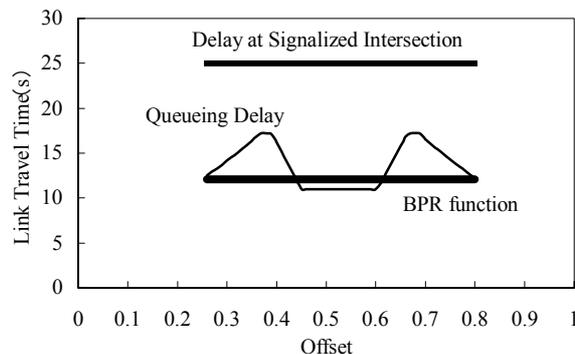


Fig.5 Link Travel Time and Offset of Link5

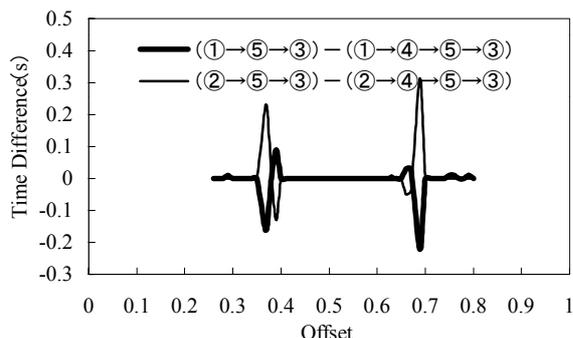


Fig.4 Difference of Travel Time along Alternative Path

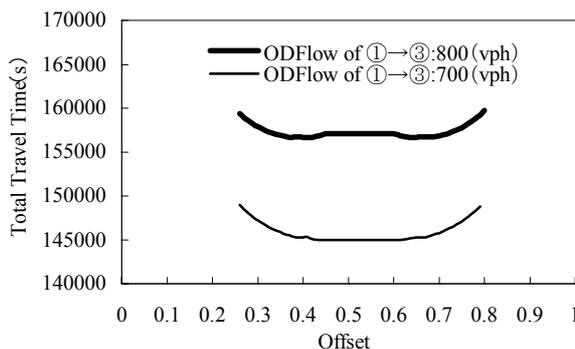


Fig.6 Total Travel Time(including Queuing Delay)

$c_a$  : リンク a の交通容量. 信号がない場合は  $s_a$ , 信号がある場合は  $g_a s_a$   
 $n$  : 均衡配分の反復回数  
 $f^n$  :  $f^1=1000, f^{n+1}=0.1f^n$   
 である.

### 3.3 計算条件

Fig.1 に示したネットワークを用いて配分を行った。ただし、OD 交通量は①→③, ②→③ともに 800 台/時とし、自由速度は  $v_f=60\text{km/時}$  とした。また信号 4 および信号 5 のスプリットはそれぞれ  $g_4=0.55$  および  $g_5=0.50$ , サイクル長は  $C=100$  秒, 損失時間は 0 秒とした。

### 3.4 計算結果

上述の計算条件で均衡配分を求めた結果の一部を Fig.3 に示す。オフセットによってリンク 1 およびリンク 2 のリンク交通量が大きく変化していることが確認できる。またリンク 5 はオフセットの変化にかかわらず 900 台/時でリンクの容量制約に等しい。

Fig.4 に同一の起終点をもつ代替経路の所要時間の差を示した。すなわち、経路①→⑤→③と①→④→⑤→③の差、および経路②→⑤→③と②→④→⑤→③の所要時間の差を示した。いずれもほとんど差のないことがわかる。これより等時間原則がほぼ成り立っていることを確認することができる。

Fig.5 にリンク 5 の所要時間の 3 構成要素とオフセッ

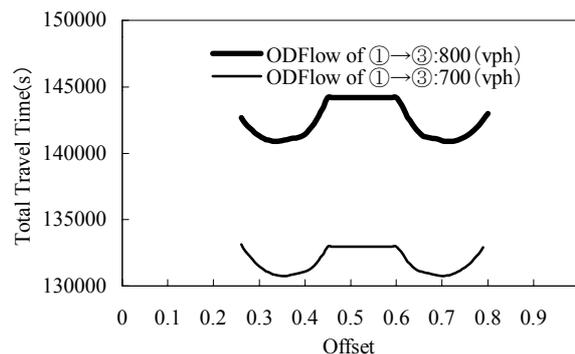


Fig.7 Total Travel Time(without Queuing Delay)

トの関係を示した。この図よりリンク 5 にはペナルティ一項、すなわち待ち行列遅れが発生していることが確認できる。このことからみても、リンク 5 はつねに渋滞しており容量状態にあることがわかる。したがって  $x$  によってリンク 1 とリンク 3 の優先非優先が左右される状態にあるということがいえる。

Fig.6 および Fig.7 にネットワーク全体の総旅行時間とオフセットの関係を示した。Fig.6 に示した待ち行列遅れを含む場合の総旅行時間はあまり変化していないが、Fig.7 の待ち行列遅れを含まない場合の総旅行時間は 2 つの極小点を持ち、それが最適オフセットであるということがいえる。待ち行列遅れは容量制約付きの均衡配分で所要時間を計算するのに必要であるが、式 (4) で信号遅れを考慮しており、また容量制約を満足しているため待ち行列遅れは考慮しない方がよいという判断に立っている。このネットワークと OD 条件では最適オフセット

$x$  は 0.34 および 0.72 付近にあるということになる。

#### 4. シミュレーションによる動的最適配分

3. で示したペナルティ関数法による静的利用者均衡配分に加えて、ここでは配分シミュレーションによる動的利用者最適配分を行った。

##### 4.1 問題設定

静的均衡配分を求めるのに用いたものと同様の小規模ネットワークを対象として配分シミュレーションによる動的最適配分を求める。対象ネットワークは Fig.1 および Fig.2 と同様のものである。ただし、リンク 2 およびリンク 4 のリンク長はそれぞれ 1300m および 1500m とし、また停止波は放物線ではなく、自由速度  $v_f$  (m/秒) の直線とする。これらが静的均衡配分の場合と異なる点である。ただし、リンク 5 が渋滞リンクとなり、リンク 5 の相対オフセットがネットワーク全体の総遅れ時間に及ぼす影響について検討するという問題設定は同じである。

##### 4.2 シミュレーションの概要

配分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) リンクの車線数は任意に与えることができる。
- 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) 車両は停止か自由走行のいずれかとする。
- 7) 停止時の最小車頭距離は 6 m とし、水平待ち行列とする。
- 8) 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。
- 9) 右折車と対向車の干渉を考慮することができる。
- 10) 車両はすべてのリンクにおいて Uターンすることはできない。
- 11) 各車両は信号に従って交差点を通過する。
- 12) 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。
- 13) 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。
- 14) 各リンクに飽和交通流率 (台/秒) 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。
- 15) OD 交通の時間変動を考慮できる。

- 16) 車両は発生間隔に従って等間隔に発生する。
- 17) 車両の発生間隔は式 (6) により決定する。

$$T_{ijt} = \frac{3600 \cdot 100}{Q_{\max} X_{ij} P_t} \quad (6)$$

ここで

$T_{ijt}$ : 時刻  $t$  におけるセントロイドノード  $i$  から  $j$  へ向かう車両の発生間隔 (秒)

$Q_{\max}$ : 1 時間最大発生交通量 (台/時)

$X_{ij}$ :  $i$   $j$  間の OD 交通量 (%)

$P_t$ : 時刻  $t$  における交通発生パターン

- 18) セントロイ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。
- 19) 終点までの経路誘導を内生化する。
- 20) 24 時間のシミュレーションが実行可能である。
- 21) 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。

##### 4.3 車両の動かし方と情報提供の詳細

車両の動かし方と情報提供の詳細を列挙すると次のとおりである。

- 1) 式 (6) で求めた発生間隔から次の車両発生時刻を求め、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。
- 2) 発生する車両は、最短経路情報を受け取り、その経路を走行する。
- 3) 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。
- 4) 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。
- 5) すべての車両は旅行時間最短の経路を走行する。
- 6) 最短経路はダイクストラ法を用いて探索する。
- 7) 情報更新間隔ごとに各リンクの平均旅行時間を求め、その値をもとに最短経路を探索する。
- 8) リンク平均旅行時間  $T$  は式 (7) に示すように、時刻  $t$  におけるリンク内車両台数  $n_t$  とスキャニングタイム  $dt$  の積の累計値をリンク通過台数  $m_t$  で割って求める。リンク通過台数が 0 台の場合は式 (8) に示すように、リンクを自由走行した場合の所要時間に信号の平均待ち時間を加えたものとする。

$$T = \frac{\sum_t n_t \cdot dt}{m_t} \quad (7)$$

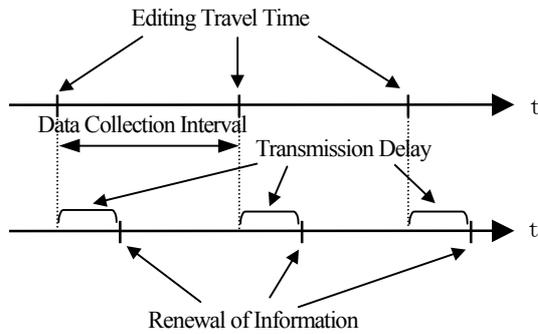


Fig.8 Traffic Information System

$$T = \frac{L}{v_f} + \frac{R^2}{2 \cdot C} \quad (8)$$

ここで

- L : リンク長 (m)
- $v_f$  : 自由速度 (m/秒)
- R : 赤時間 (秒)
- C : サイクル長 (秒)

- 9) すべての車両は必ず経路誘導に従うものとする.
- 10) Fig.8 に示す情報伝達遅れを考慮することができる.

### 4.4 右折抵抗を考慮した最短路探索法

最短路探索ではダイクストラ法を用いて時間最短路を探索する。その場合、直進・左折車両と右折車両のリンク平均旅行時間の違いを考慮する。そのために、本研究ではダイクストラ法に以下の改良を施した。

- ① リンク平均旅行時間は右折車両と直進・左折車両の2つに分けて集計する。
- ② 現リンク下流端で右折する場合には、次リンクの旅行時間に現リンクの右折旅行時間と直進・左折旅行時間の差を加える。

Fig.9 にその計算例を示す。この例ではノード1から各ノードへの最短路を探索する。ただし、各リンクの数値は左が直進・左折車両のリンク平均旅行時間、右が右折車両のリンク平均旅行時間である。また、括弧内の数値は左がそのノードへの所要時間、右が先行ノードである。ステップ1は初期設定である。ステップ2ではノード1からノード2およびノード4への所要時間が求められ、ノード2への所要時間は10、ノード4への所要時間は35となる。ステップ3ではノード2からノード3とノード5への所要時間が求められる。ノード3へはリンク3を通過して直進で行くことになるので、所要時間は、 $10 + 22 = 32$ となる。ノード5へはリンク4を通過して右折で行くことになるので所要時間は、 $10 + 17 + (14 - 10) = 31$ となる。このような計算をすべてのノードへの最短路が探索されるまで繰り返す。途中のステップは省略しているが、解は最終ステップに示すとおりである。

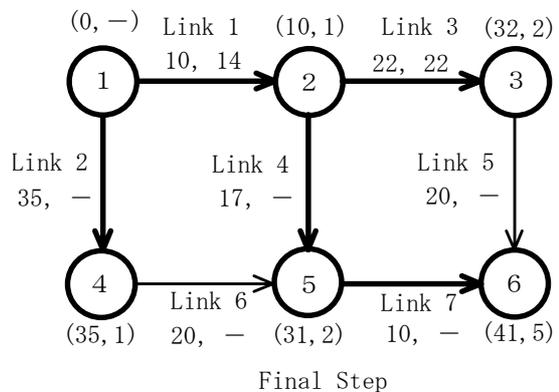
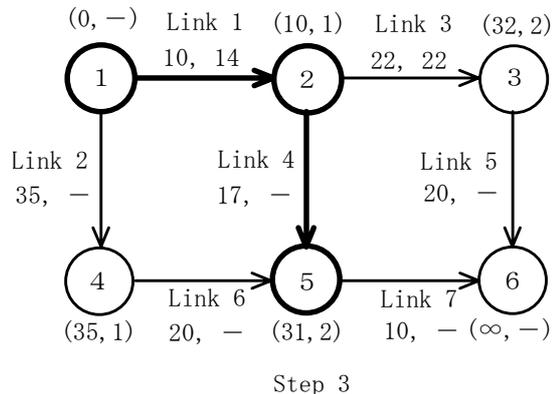
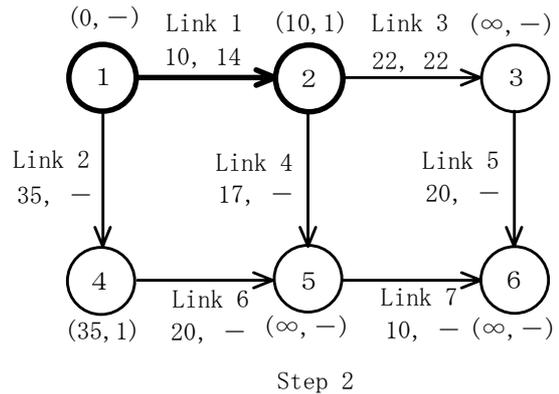
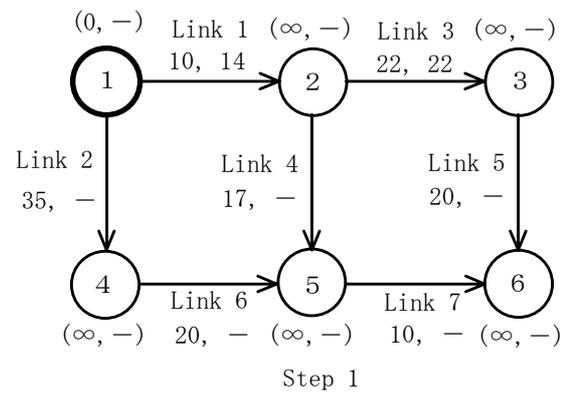


Fig.9 Search of Shortest Path

### 4.5 計算条件

Fig.1 に示す計算対象ネットワークを用いる。配分対象 OD 表は Table1 に示す。1 時間最大発生交通量  $Q_{max}$  は

Table1 O-D Matrix(%)

O \ D	1	2	3	合計
1	0	0	50	50
2	0	0	50	50
3	0	0	0	0
合計	0	0	100	100

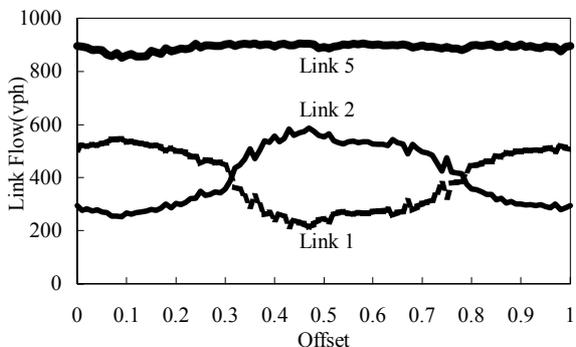


Fig.10 Relationship between Link Flow and Offset

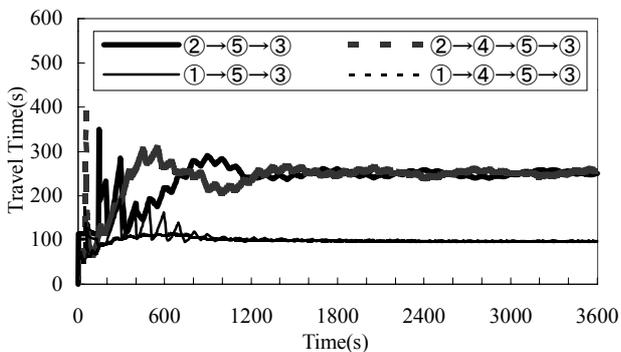


Fig.11 Variation of Travel Time along Alternative Path

1600 台/時, すなわち OD 交通量は①→③, ②→③の両 OD ペアともに 800 台/時とする. その他の計算条件は以下に示すとおりである.

- 信号サイクル長: 100 秒
- 損失時間: 0 秒
- シミュレーション時間: 3600 秒
- 情報伝達遅れ: 0 秒
- 自由速度: 60km/時
- 情報更新間隔: 5 秒

本シミュレーションでは, 利用者均衡配分が得られるように情報更新間隔を小さくした. また計算対象ネットワークのリンク 6 を 2 車線, その他のリンクを 1 車線とした. したがって交差点 5 で右折車と対向車の干渉は生じない.

#### 4.6 計算結果

Fig.10 にリンク 1, リンク 2 およびリンク 5 のリンク交通量の変化を示した. ここでリンク交通量とはリンク

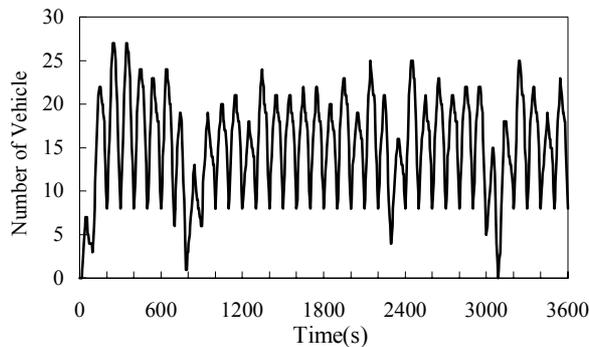


Fig.12 Variation of Number of Vehicle Being at Link5

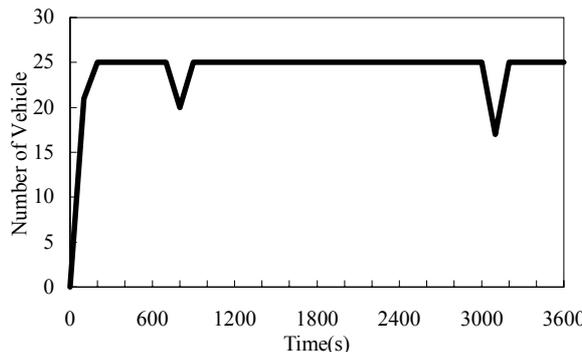


Fig.13 Variation of Number of Vehicle Departing from Link5

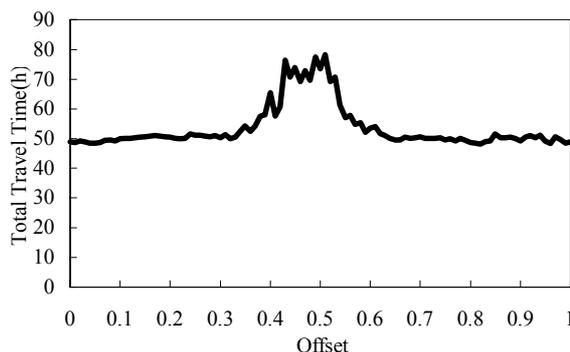


Fig.14 Total Travel Time

流入台数である. リンク 1 およびリンク 2 についてはオフセットによってリンク交通量に大きな変化があるが, リンク 5 のリンク交通量は, オフセットの変化にかかわらず, リンク容量の 900 台/時に近い値でほぼ一定となった.

Fig.11 にオフセットが 0.5 の場合の経路旅行時間の時間変化を示した. 同一の起終点をもつ経路, すなわち経路②→⑤→③と②→④→⑤→③および経路①→⑤→③と①→④→⑤→③の旅行時間はシミュレーションの経過とともにほぼ等しい値となった. この結果から, 本シミュレーションでは等時間原則がほぼ成り立っていると考えることができる.

Fig.12 および Fig.13 はオフセット 0.5 の場合についてリンク 5 の車両存在台数の推移と車両通過台数の推移を示したものである. この結果と Fig.10 をあわせて考えると, リンク 5 はほぼ交通容量に近い状態で車両が流入し

流出しているものと考えられる。

Fig.14 はネットワーク全体の総旅行時間を示したものである。オフセット 0.5 付近で総旅行時間が大きく、それ以外のオフセットでは総旅行時間は小さくほぼ一定の値となった。オフセットによって総旅行時間に差が出ることから、総旅行時間最小化を目的関数としてオフセットを最適化する意義はあるものと考えられる。

## 5. むすび

本研究では、渋滞リンクを含む小規模なネットワークを対象として、①ペナルティ関数を用いた静的な利用者均衡配分と②配分シミュレーションによる動的な利用者最適配分を行い、渋滞リンクの相対オフセットがネットワーク全体の総旅行時間に及ぼす影響について検討した。その結果、渋滞リンクの相対オフセットによってネットワークの総旅行時間が変化することがわかった。すなわち渋滞リンクの相対オフセットはネットワーク全体に影響を及ぼし、したがってネットワーク全体の観点から渋滞リンクのオフセットを最適化することの意義が確認された。ただし総旅行時間とオフセットの関係は、静的配分による結果と動的配分による結果ではかなり異なるものとなった。実際の交通現象の再現性、情報システムのモデル化および計算効率などの観点から配分計算の方法を検討する必要がある。

今後の課題としては、ネットワーク規模を拡大して、効率的な計算法を用いて計算例を蓄積することが重要である。また利用者最適配分を制約条件（または下位レベル）としてネットワーク全体の観点から信号制御の最適化を実現していくためにはリアルタイム OD が必要である。また UTMS 中の交通情報提供システム (AMIS) および動的経路誘導システム (DRGS) の発展と普及が重要となるであろう。

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。記して謝意を表したい。

## 参考文献

- 1) 久坂奈津江, 久井守: 渋滞リンクのオフセット制約を考慮した均衡交通配分, 土木学会中国支部研究発表会発表概要集, pp.489-490, 1997年5月
- 2) 久坂奈津江, 久井守: 利用者均衡配分を考慮した渋滞リンクのオフセットの検討, 土木学会第52回年次学術講演会講演概要集, pp.264-265, 1997年9月
- 3) 佐田安明, 久井守, 南正昭: 渋滞リンクへの流入制約を考

慮した均衡配分とオフセット最適化, 土木学会中国支部研究発表会発表概要集, pp.497-498, 1999年6月

- 4) 佐田安明, 久井守, 南正昭: ネットワーク全体からみた渋滞リンクのオフセット最適化, 土木学会第54回年次学術講演会講演概要集, pp.346-347, 1999年9月
- 5) 岩永和大, 久井守, 南正昭: 配分シミュレーションによる渋滞リンクのオフセット最適化への検討, 土木学会中国支部研究発表会発表概要集, pp.503-504, 2000年6月
- 6) 井上博司: 渋滞した流れを有する道路網における均衡交通配分法, 土木計画学研究・論文集, No.3, pp.177-184, 1986年1月
- 7) 久井守, 田村洋一: 複数リンクからなる系統信号システムの待ち行列と衝撃波の動的解析, 土木学会論文集, No.431/IV-15, pp.87-96, 1991年
- 8) H.Yang and S.Yagar: Traffic Assignment and Signal Control in Saturated Road Networks, Transportation Research Part A, Vol.29, No.2, pp.125-139, 1995
- 9) M.Al-Malik and N.H.Gartner: Development of a Combined Traffic Signal Control-Traffic Assignment Model, Urban Traffic Networks, Springer-Verlag, pp.155-186, 1995
- 10) S.Lee and M.Hazelton: Stochastic Optimization of Combined Traffic Assignment and Signal Control Junction Modelling, Transportation and Traffic Theory, pp.713-735, 1996
- 11) T.V.Vuren and D.V.Vliet: Route Choice and Signal Control, Avebury, 1992
- 12) M.J.Smith and M.B.Wisten: Optimal Time-Varying Peak-Period Signal Timings Allowing for Day-to-Day Route Choice, Traffic Engineering & Control, April 1996, pp.267-273, 1996
- 13) A.S.Abdelfatah and H.S.Mahmassani: System Optimal Time-Dependent Path Assignment and Signal Timing in Traffic Network, Transportation Research Record, No.1645, pp.185-193, 1998
- 14) N.H.Gartner and C.Stamatladis: Integration of Dynamic Traffic Assignment with Real-Time Traffic Adaptive Control System, Transportation Research Record, No.1644, pp.150-156, 1998
- 15) Y.Yin: Genetic-Algorithms-Based Approach for Bilevel Programming Models, Journal of Transportation Engineering, March/April 2000, pp.115-120, 2000
- 16) T.Hu and H.S.Mahmassani: Day-to-Day Evolution of Network Flows under Real-Time Information and Reactive Signal Control, Transportation Research Part C, Vol.5, No.1, pp.51-69, 1997
- 17) C.Lee and R.B.Machemehl: Local and Iterative Searches for Combined Signal Control and Assignment Problem, Transportation Research Record, No.1683, pp.102-109, 1999

(平成12年8月31日受理)