

都市道路網におけるリンク旅行時間の 解析と推定

藤井温子[†] 清水光^{††} 森藤義之^{††}

本稿では、動的経路誘導システムの基礎となる都市道路網におけるリンク旅行時間の解析と推定について考察する。最初に、平均リンク旅行時間の解析の基礎となる信号交差点における交通流ダイナミクスが、非線形ダイナミックシステムで記述される。つぎに、平均リンク旅行時間が、交通流ダイナミクスや信号制御パラメータ、下流側信号交差点における車の進行方向などを考慮して解析される。平均リンク旅行時間の測定は、試験車走行法の一つである平均テスト法を用いて実施した。さらに、本稿で提案した解析法に基づき平均リンク旅行時間をシミュレーションにより推定する。最後に、平均テスト法で求めた測定値とシミュレーションにより求めた推定値を比較することにより、推定精度について考察する。

Analysis and Estimation of Link Travel Time in Urban Road Networks

Haruko Fujii[†] Hikaru Shimizu^{††} and Yoshiyuki Morito^{††}

This paper studies the analysis and estimation of the link travel time in urban road networks. The traffic flow dynamics is described by a nonlinear discrete dynamic system at signalized intersections based on the volume balance. The mean link travel time are analyzed according to the classification of the traffic flow, offset control and moving direction at downstream signalized intersections in urban road networks. The mean link travel time are measured by the average rate of speed of the traffic stream which is one of test-car techniques. According to their analyses, the mean link travel time are estimated for two routes in Fukuyama city, Japan.

1. はじめに

我が国の自動車保有台数が増加の一途をたどってきた結果、交通量は増加し、朝夕のラッシュ時には主要幹線道路を中心に交通渋滞が日常的に発生している。交通渋滞は旅行時間の増加や燃料消費、排気ガスによる大気汚染や地球温暖化、騒音、交通事故などの社会的マイナス要因を発生させている。

与えられた道路条件と交通条件のもとで、都市道路網の各リンクにおける交通流ダイナミクスを制御するシステムとして、動的経路誘導システムがある。都市道路網の動的経路誘導システムは、ドライバーが車載入出力装置より目的地をオンライン入力し、交通情報と経路探索アルゴリズムを用いて最短平均 OD 旅行時間経路を含む幾つかの推奨経路を探索し、それらを平均 OD 旅行時間の短い順に車載入出力装置にリアルタイムで出力する。

現在まで、幾つかの旅行時間推定方法が提案されてきた。一つは、静的旅行時間推定法で、旅行時間に関する確率密度関数を 3 母数逆ガウス型分布で表現し、その母数を混雑度や信号交差点密度に関して推定している [1]。また、旅行速度モデルを停車時間モデルと走行速度モデルより求めている。停車時間は信号交差点密度に関する線形回帰式を用いて定式化し、走行速度は指定速度や市街化率、交通量に関する線形回帰式を用いて定式化している [2]。他の一つは動的旅行時間推定法で、光ビーコンと車の間で計測旅行時間や推奨経路、予測旅行時間を送受信する対話型動的経路誘導システムが開発されている [3]。

動的経路誘導システムでは平均 OD 旅行時間をリアルタイムで推定するため、信号交差点での信号制御や車の進行方向、交通流の変動などによる影響を考慮に入れ、平均リンク旅行時間を時々刻々精度よく推定することが望まれる。

本稿では、各リンクの旅行時間を走行時間と停止時間の総和より求める。ここで、走行時間は車が実際に動いている時間であり、停止時間は赤信号や渋滞、右折待ちなどにより車が静止している時間である。各リンクの走行時間と停止時間は、交通流ダイナミクスやオフセット制御の有無、信号表示、下流側信号交差点での車の進行方向などを考慮に入れて解析する。平均リンク旅行時間の解析に基づき、福山市内道路網においてシミュレーションを実行し、シミュレーションによる推定値と試験車走行法による測定値を比較し、平均リンク旅行時間の推定精度について考察する。

[†] 弓削商船高等専門学校
Yuge National College of Maritime Technology

^{††} 福山大学
Fukuyama University

2. 交通流ダイナミクスの解析

都市道路網のリンク旅行時間を解析するために、信号交差点の各流入路における交通流ダイナミクスを明確にしておかなければならない。

都市道路網の信号交差点の各流入路において、或る時間区間 ΔT (ここではサイクル長に等しい) に対して以下の交通量収支が各車線単位で成立する (図 1 参照)。

$$x_e(i, j, m, k) = x_e(i, j, m, k-1) + x_i(j, m, k) - x_o(i, j, m, k) \quad (1)$$

$$x_o(i, j, m, k) = \xi(i, j, m, k) \cdot c_x(i, j, m, k) \quad (2)$$

上式で、 i と j は都市道路網における信号交差点の位置、 m は信号交差点での車の流入路 (図 3 参照)、 $k=k\Delta T(k=1,2,\dots,k_p)$ は時刻をそれぞれ表す。 $x_e(i, j, m, k)$ 、 $x_i(i, j, m, k)$ 、 $x_o(i, j, m, k)$ は、超過流入交通量、流入交通量、捌け交通量をそれぞれ表す。また、 $c_x(i, j, m, k)$ は各流入路の交通処理量、 $\xi(i, j, m, k)$ はある交通流のもとで $x_o(i, j, m, k)$ を $c_x(i, j, m, k)$ で除した比率で捌け率とよぶことにする。流入交通量 $x_i(i, j, m, k)$ は交通需要や交通条件、信号制御条件の変動の影響を受けて不規則に変動する。

信号交差点の各流入路に対する交通容量は、実際の道路条件や交通条件のもとで、与えられた一定時間内に、車線または車道のある断面もしくは一様な区間を通過することが期待できる車両の最大数と定義される [4]。交通容量の値は道路要因や交通要因の影響を考慮に入れ補正して求める。各車線の交通容量に青信号スプリットをかけて信号交差点の各流入路に対する交通処理量が求められる。

各信号交差点の各車線単位の交通量収支に基づいて、都市道路網における渋滞長の信号制御システムは次式の離散形時変非線形ダイナミックシステムで表される [5]。

$$\begin{cases} x_e(i, j, m, k) = x_e(i, j, m, k-1) + x_i(j, m, k) - u(i, j, m, k) \\ y_e(i, j, m, k) = l_m(i, j, m, k) \cdot x_e(i, j, m, k) \end{cases} \quad (3)$$

ここで、捌け交通量 $x_o(i, j, m, k)$ は 3 つの信号制御パラメータで制御できると仮定し、制御入力 $u(i, j, m, k)$ でおき換えている。制御入力 $u(i, j, m, k)$ は、交通処理量 $c_x(i, j, m, k)$ に上限値が存在することにより、飽和特性を有する。渋滞長 $y_e(i, j, m, k)$ は状態変数 $x_e(i, j, m, k)$ に変換係数 $l_m(i, j, m, k)$ を乗じて求められる。この変換係数 $l_m(i, j, m, k)$ は待ち車列の平均車頭間隔に相当する。

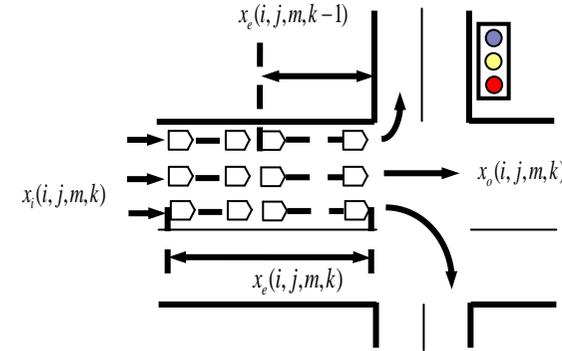


図 1 各流入路の交通量収支

3. 平均リンク旅行時間の解析

各リンクの走行時間と停止時間の平均値は、交通流ダイナミクスやオフセット制御の有無、下流側信号交差点での車の進行方向により異なるので図 2 で示すような場合分けに基づいて解析する [6]。都市道路網の渋滞長は信号により適切に制御されていると仮定する。また、信号交差点の流入路の各車線における待ち車列台数、並びに待ち車列長は、車線単位、サイクル長単位の交通量収支に基づいて求められると仮定する。

3.1 渋滞無し・オフセット制御有りの場合

オフセット制御により車は下流側信号交差点を青信号で通過し、最も円滑に走行できる。

- i) 下流側信号交差点を直進
 - ・走行時間
 リンク走行時間 t_{run} のみとなる。

$$T_r(i, j, m, k) = t_{run} \quad (4)$$

ここで、リンク旅行時間 t_{run} はリンク距離 d や待ち車列長 y_l 、リンク走行速度 v を用いて次式で求められる。

$$t_{run}(i, j, m, k) = (d - y_l) / v \quad (5)$$

ここで、式を簡潔に表現するために右辺の変数については i, j, m, k の添字を省略した。また、解析に用いる変数の意味と単位を表 1 に示す。

・ 停止時間

オフセット制御有りの場合でも全ての車が信号交差点で停止することなく通過できるわけではない。黄信号で交差点に到着した場合の停止時間と赤信号で到着した場合の停止時間の和に交差点停止割合 P_s を掛け、次式で求める。

$$T_s(i, j, m, k) = P_s \{ P_y (t_y / 2 + t_r + t_s) + P_r (t_r / 2 + t_s) \} \quad (6)$$

但し、信号交差点が近接している道路では、赤信号時間が半分以上経過した段階で信号交差点に車が到着することは少なく（上流側信号交差点を右左折で通過した場合や交差街路から流入した場合を除く）、赤信号の初期の段階から停止する場合が多い。このような場合、停止時間は以下のように表すことができる。

$$T_s(i, j, m, k) = P_s \{ P_y (t_y / 2 + t_r + t_s) + P_r (t_r + t_s) \} \quad (7)$$

ii) 下流側信号交差点を右折

・ 走行時間

リンク旅行時間 t_{nm} に右折待ち車列捌け時間を加え、次式で求める。

$$T_r(i, j, m, k) = t_{nm} + t_{cr} \quad (8)$$

ここで、右折待ち車列捌け時間 t_{cr} は、右折車線の待ち車列台数 x_r と右折車線の交通処理量 ψ_r を用いて次式で求められる。

$$t_{cr}(i, j, m, k) = x_r / 2\psi_r \quad (9)$$

・ 停止時間

対向直進交通量が多い場合、直進青現示から右折青現示までの遅れ時間 t_{dr} の 1/2 と発進遅れ t_s を加え、次式で求める。

$$T_s(i, j, m, k) = t_{dr} / 2 + t_s \quad (10)$$

iii) 下流側信号交差点を左折

・ 走行時間

下流側信号交差点を右折する場合と同様な考えで、リンク走行時間 t_{nm} に左折待ち車列捌け時間 t_{cl} を加え、次式で求める。

$$T_r(i, j, m, k) = t_{nm} + t_{cl} \quad (11)$$

ここで、左折待ち車列捌け時間 t_{cl} は次式で求められる。

表 1 変数の意味と単位

変数	意味	単位
T_r	リンク走行時間	(s)
T_s	リンク停止時間	(s)
P_s	交差点停止割合	
t_{cs}, t_{cr}, t_{cl}	直進・右折・左折待ち車列捌け時間	(s)
t_g, t_y, t_r	青・黄・赤信号時間	(s)
C_y	サイクル長	(s)
P_g, P_y, P_r	青・黄・赤信号の確率	
x_s, x_r, x_l	直進・右折・左折車線の待ち車列台数	(台)
ψ_s, ψ_r, ψ_l	直進・右折・左折車線の交通処理量	(台/s)
t_{dr}, t_{dl}	直進青現示から右折・左折青現示までの遅れ時間	(s)
t_s	発進遅れ	(s)
α_r, α_l	直進青現示で下流側信号交差点を右折・左折できない確率	

交通流の状態	オフセット制御の有無	下流側信号交差点での車の進行方向
渋滞無し	制御有り	直進 右折 左折
	渋滞無し	直進 右折 左折
渋滞有り		直進 右折 左折

図 2 平均リンク旅行時間解析の場合分け

$$t_{cl}(i, j, m, k) = x_l / 2\psi_l \quad (12)$$

・ 停止時間

横断歩行者が多い場合、直進青現示から左折青現示までの遅れ時間 t_{dl} の 1/2 と発進遅れ t_s を加え、以下のように表すことができる。

$$T_s(i, j, m, k) = t_{dl} / 2 + t_s \quad (13)$$

3.2 渋滞無し・オフセット制御無しの場合

車は下流側信号交差点で青・黄・赤のいずれかの信号に遭遇する。青信号で交差点に到着した場合はそのまま直進通過できるが、黄または赤信号で到着した場合は一度停止し、次の青信号で通過できる。

i) 下流側信号交差点を直進

・走行時間

黄または赤信号で交差点に到着した場合は、リンク走行時間 t_{run} に直進待ち車列捌け時間 t_{cs} を加え、以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} T_r(i, j, m, k) = & P_g \cdot t_{run} \\ & + P_y(t_{run} + t_{cs}) \\ & + P_r(t_{run} + t_{cs}) \end{aligned} \quad (14)$$

ここで、直進待ち車列捌け時間 t_{cs} は次式で求められる。

$$t_{cs}(i, j, m, k) = x_s / 2\psi_s \quad (15)$$

・停止時間

青信号で交差点に到着した場合の停止時間は 0 である。黄または赤信号で交差点に到着した場合は、各々の停止時間をそれぞれ加え、以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} T_s(i, j, m, k) = & P_y(t_y / 2 + t_r + t_s) \\ & + P_r(t_r / 2 + t_s) \end{aligned} \quad (16)$$

ii) 下流側信号交差点を右折

・走行時間

リンク走行時間 t_{run} に右折待ち車列捌け時間 t_{cr} を加え、以下のように表すことができる。直進青現示で交差点に到着する場合の内、対向直進車や横断歩行者などにより右折できない場合は右折待ち車列捌け時間 t_{cr} が加わる。

$$\begin{aligned} T_r(i, j, m, k) = & P_g(t_{run} + \alpha_r \cdot t_{cr}) \\ & + P_y(t_{run} + t_{cr}) \\ & + P_r(t_{run} + t_{cr}) \end{aligned} \quad (17)$$

・停止時間

直進青現示で交差点に到着する場合は、走行通過できる場合と停止する場合の期待値の和より求める。

$$\begin{aligned} T_s(i, j, m, k) = & P_g \{ \alpha_r(t_g / 2 + t_y + t_r + t_{dr} + t_s) + t_g(1 - \alpha_r) / 2 \} \\ & + P_y(t_y / 2 + t_r + t_{dr} + t_s) \\ & + P_r(t_r / 2 + t_{dr} + t_s) \end{aligned} \quad (18)$$

iii) 下流側信号交差点を左折

・走行時間

下流側信号交差点を右折する場合と同様な考えで、リンク走行時間 t_{run} に左折待ち車列捌け時間 t_{cl} を加え、以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} T_r(i, j, m, k) = & P_g(t_{run} + \alpha_l \cdot t_{cl}) \\ & + P_y(t_{run} + t_{cl}) \\ & + P_r(t_{run} + t_{cl}) \end{aligned} \quad (19)$$

・停止時間

下流側信号交差点を右折する場合と同様な考えで、以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} T_s(i, j, m, k) = & P_g \{ \alpha_l(t_g / 2 + t_y + t_r + t_{dl} + t_s) + t_g(1 - \alpha_l) / 2 \} \\ & + P_y(t_y / 2 + t_r + t_{dl} + t_s) \\ & + P_r(t_r / 2 + t_{dl} + t_s) \end{aligned} \quad (20)$$

3.3 渋滞の場合

ここでは、信号制御が適切に行われ、信号交差点に青信号で到着した場合、その青信号を 1 回見送り、次の青信号で通過できると仮定する。

i) 下流側信号交差点を直進

・走行時間

青・黄・赤のどの信号で交差点に到着した場合でも、リンク走行時間 t_{run} に直進待ち車列捌け時間 t_{cs} を加え、以下のように求められる。

$$\begin{aligned} T_r(i, j, m, k) = & P_g(t_{run} + t_{cs}) \\ & + P_y(t_{run} + t_{cs}) \\ & + P_r(t_{run} + t_{cs}) \end{aligned} \quad (21)$$

上式を整理して、

$$T_r(i, j, m, k) = t_{run} + t_{cs} \quad (22)$$

・停止時間

青・黄・赤の各信号で交差点に到着した場合の停止時間をそれぞれ加え、以下のように求められる。

$$T_s(i, j, m, k) = P_g(t_g/2 + t_y + t_r + t_s) + P_y(t_y/2 + t_r + t_s) + P_r(t_r/2 + t_s) \quad (23)$$

- ii) 下流側信号交差点を右折
・ 走行時間
青・黄・赤のどの信号で交差点に到着した場合でもリンク走行時間 t_{run} に右折待ち車列捌け時間 t_{cr} を加え、以下のように求められる。

$$T_r(i, j, m, k) = P_g(t_{run} + t_{cr}) + P_y(t_{run} + t_{cr}) + P_r(t_{run} + t_{cr}) \quad (24)$$

上式を整理して

$$T_r(i, j, m, k) = t_{run} + t_{cr} \quad (25)$$

- ・ 停止時間
青・黄・赤の各信号で交差点に到着した場合の停止時間をそれぞれ加え、以下のように求められる。

$$T_s(i, j, m, k) = P_g(t_g/2 + t_y + t_r + t_{dr} + t_s) + P_y(t_y/2 + t_r + t_{dr} + t_s) + P_r(t_r/2 + t_{dr} + t_s) \quad (26)$$

- iii) 下流側信号交差点を左折

- ・ 走行時間
下流側信号交差点を右折する場合と同様な考えで、以下のように求められる。

$$T_r(i, j, m, k) = t_{run} + t_{cl} \quad (27)$$

- ・ 停止時間
下流側信号交差点を右折する場合と同様な考えで、以下のように求められる。

$$T_s(i, j, m, k) = P_g(t_g/2 + t_y + t_r + t_{dl} + t_s) + P_y(t_y/2 + t_r + t_{dl} + t_s) + P_r(t_r/2 + t_{dl} + t_s) \quad (28)$$

3.4 平均 OD 旅行時間

都市道路網の或る出発地から目的地までの平均 OD 旅行時間 $T_{od}(k)$ は、3.1 から 3.3 までの平均リンク旅行時間の解析に基づき、その経路に沿った平均リンク旅行時間の総

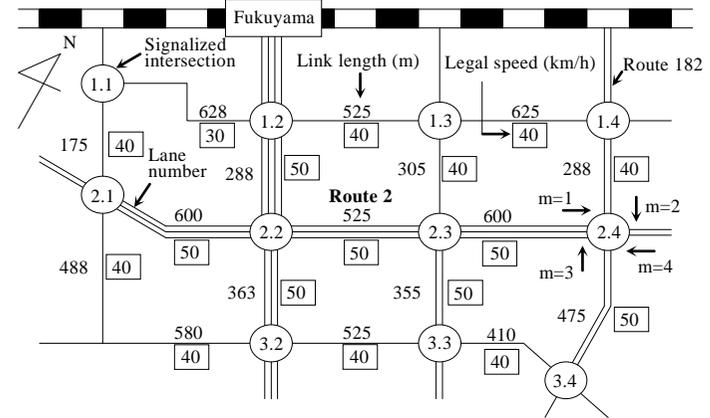


図 3 福山市内道路網

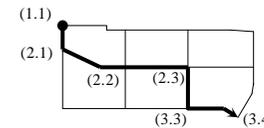


図 4 経路 1

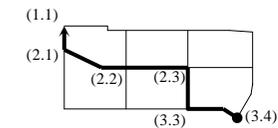


図 5 経路 2

和より次式で求められる。

$$T_{od}(k) = \sum_i \sum_j \sum_m \{T_r(i, j, m, k) + T_s(i, j, m, k)\} \quad (29)$$

4. リンク旅行時間の測定

リンク旅行時間の測定対象となる福山市内道路網における車線数やリンク長、法定速度、信号交差点の位置を図 3 に示す。信号交差点(2,1)、(2,3)、(2,4)の流入路においてリンク車線数が減少し、リンク交通処理量が低下している。

今回研究の対象とした走行経路について図 4～図 5 に示す。信号交差点(1,1)から(3,4)までの経路 1 と信号交差点(3,4)から(1,1)までの経路 2 では、直進走行と合計 3 回の右左折走行を含む。

各時間帯における各経路の平均リンク旅行時間の測定は、以下に述べる試験車走行法を用いて 10 回実施した。

旅行時間や区間速度の測定には多くの方法が提案されている。ここでは、最も広く用いられている試験車走行法を用いた[7]。この方法は、あらかじめ定めた道路区間を試験車で繰り返し走行し、旅行時間や停止時間を測るもので、平均テストとフローティングテストの2つの方法がある。ここでは、正確で一般性がある平均テストを用いた。

平均テストは、運転者が全交通の平均速度に近いと判断する速度で走行する方法である。測定者は、試験車が測定区間の起点を横切ったとき、ストップウォッチを作動させ、指定経路に従って走行し、途中チェック地点（信号交差点）通過の時間や停止時間、終了時刻をそのつど読み取り、現地測定用紙に記入する。このとき遅れ（停止や徐行）の位置及び原因、状況を合わせて記録する。この繰り返し作業が一定の測定回数に達したら測定を終了する。

5. リンク旅行時間の推定

平均リンク旅行時間のシミュレーションは、3.の解析に基づいて、広島県福山市内道路網の図4～図5で示される2つの経路について行った。また、試験車走行法によるリンク旅行時間の測定データ数の制約から15分単位でシミュレーションを行った。リンク旅行時間は、非ラッシュ時（16:00～17:00）とラッシュ時（17:00～18:00）の2つの時間帯について、平成21年11月から12月までの平日に、図4～図5で示される経路1と経路2の2つの経路に対して試験車走行法を用いて測定した。測定は各時間帯において10回行った。リンク旅行時間の解析の場合分けは、試験車走行法による測定結果に基づき以下のように行った。渋滞の有無は渋滞に起因する停止に基づき、また、オフセット制御の有無は赤信号に起因する停止に基づき、それぞれ判別した。リンク走行速度と待ち車列台数は、各経路、各時間帯におけるリンク毎の10回の測定値に基づいて設定した。発進遅れは待ち車列台数と発進遅れの散布図から得られた一次式に基づいて求めた。オフセット制御有の場合の交差点停止割合は、測定データ数の制約と簡単化のため非常に小さく無視できると仮定した。以上の解析に基づいて求めた平均リンク旅行時間の推定値と試験車走行法による測定値の相対誤差を比較すると図6から図9に示すようになった。誤差の要因を分析すると次のようになった。ラッシュ時における経路1の信号交差点(2.1)では、相対誤差が-28.2%になっている。この信号交差点では、赤信号停止割合が高く、赤信号表示時間が平均128.4秒に対し、赤信号停止時間の測定値の平均は124.8秒となっている。赤信号表示の初期から停止する場合の多かったことが影響している。信号交差点(3.4)については、相対誤差が+23.4%になっている。ここでは、赤信号表示時間が平均112.1秒に対し、赤信号停止時間の測定値の平均は39.5秒となっている。比較的短い赤信号停止時間の多かったことが影響している。非ラッシュ時の経路2の信号交差点(2.3)では、相対誤差が-21.8%に

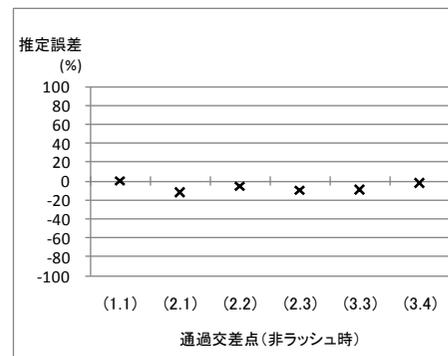


図6 経路1の非ラッシュ時におけるリンク旅行時間の推定誤差

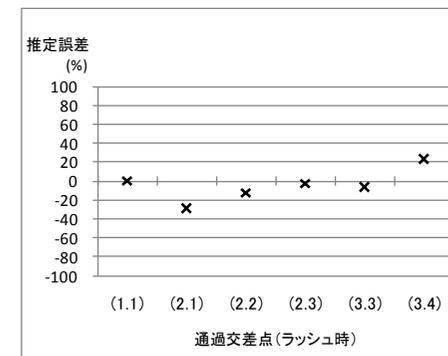


図7 経路1のラッシュ時におけるリンク旅行時間の推定誤差

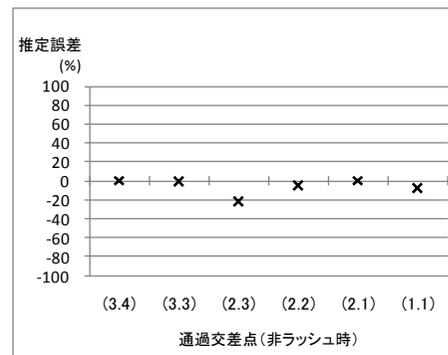


図8 経路2の非ラッシュ時におけるリンク旅行時間の推定誤差

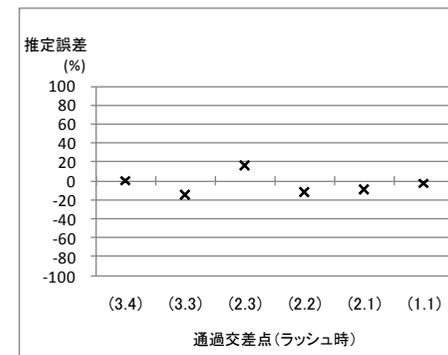


図9 経路2のラッシュ時におけるリンク旅行時間の推定誤差

なっている。この信号交差点では、赤信号表示時間が平均114.6秒であるのに対し、赤信号停止時間の測定値の平均が87.2秒となっている。ラッシュ時における経路2の信号交差点(2.3)の旅行時間については、相対誤差が+16.2%になっている。この信号交差点では、赤信号表示時間が平均110.9秒であるのに対し、赤信号停止時間の測定値の平均が46.7秒となっている。

6. まとめ

本稿では、交通流の円滑化の指標となる都市道路網における平均リンク旅行時間の

解析と推定について考察した。本稿の内容を要約すると以下のようになる。

- ① 平均リンク旅行時間の解析の基礎となる信号交差点における交通流ダイナミクスを非線形ダイナミックシステムで記述した。
- ② 平均リンク旅行時間を交通流ダイナミクスや信号制御パラメータ、下流側信号交差点での車の進行方向を考慮に入れて解析した。
- ③ 広島県福山市内道路網の2つの経路について試験車走行法を用いて平均リンク旅行時間を測定した。
- ④ 福山市内道路網におけるリンク旅行時間のシミュレーション結果より、幾つかの信号交差点で信号表示時間に片寄りがあり、それが誤差の要因となっていることを確かめることができた。

今後、リンク旅行時間の測定回数を増やすと共に、推定精度の向上について研究を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 岩瀬晃盛, 浦野隆: 都市道路における旅行速度(時間)の推定手法, 交通工学, Vol.18, No.1, pp.19-25 (1983).
- 2) 阿部幸康, 荻野治雄: 北海道における信号交差点のある2車線道路の旅行速度, 交通工学, Vol.21, No.5, pp.25-29 (1986).
- 3) 天目健二, 山口盛兄: 道路網の動的経路誘導システム, 計測と制御, Vol.14, No3, pp.211-216 (2002).
- 4) 米谷栄二 他: 交通工学, pp.103-132, 国民科学社 (1977).
- 5) 石川, 清水, 傍田, 小林: 交通ネットワークの渋滞長制御, 情報処理学会論文誌, Vol.45, No.4 pp.1154-1162 (2004).
- 6) 小林, 清水: 交通流の円滑性の解析, 計測と制御, Vol.41, No.3, pp.181-186 (2002).
- 7) 埴克郎 他: 交通調査マニュアル, pp.25-52, 鹿島出版会 (1976).