

都市交通ネットワークにおける交通流の円滑性の解析

清水 光⁺ 小林 正明⁺⁺ 米澤 洋⁺⁺ 馬屋原 功太郎⁺⁺⁺

⁺福山大学 工学部 情報処理工学科

⁺⁺福山大学 工学部 機械工学科

⁺⁺⁺福山大学 大学院 工学研究科 情報処理工学専攻

本稿では、都市交通ネットワークの交通流の円滑性についてそのダイナミクスに基づいて解析する。交通流の円滑性の尺度として信号交差点における捌け交通量と旅行時間を選ぶ。信号交差点の各流入路において交通容量に対する捌け交通量の比率をサイクル長単位で算定し、位置や車線、時間、交通流に関する変動特性について考察する。また、リンク旅行時間を交通流の状況やオフセット制御、下流側信号交差点での進行方向を考慮して走行時間と停止時間に分けて解析し、それらの算定精度について考察する。

An Analysis of Traffic Flow Smoothness in Urban Traffic Networks

Hikaru SHIMIZU⁺, Masa-aki KOBAYASHI⁺⁺, Yoh YONEZAWA⁺⁺ and Koutaro Umayahara⁺⁺⁺

⁺Department of Information Processing Engineering

⁺⁺Department of Mechanical Engineering

⁺⁺⁺Graduate School of Engineering

Faculty of Engineering, Fukuyama University

This paper studies an analysis of the traffic flow smoothness in urban traffic networks. The congestion mechanism which plays an essential role to control congestion lengths is described quantitatively based on the volume balance. The outgoing volume is an important element of the volume balance. Travel time consisting of running time and stopping time is a measure of traffic flows in the traffic networks. Varying characteristics of the outgoing volume are analyzed using the ratio of the outgoing volume to the capacity at two oversaturated signalized intersections in the traffic network. 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 the traffic networks. The mean OD travel time from one's origin to his destination is evaluated by summing up the mean link travel time along the route .

1. はじめに

近年、自動車交通は社会経済活動や産業活動をはじめ日常生活においても人や物の移動手段として重要な役割を担っており、我が国の自動車保有

台数は毎年直線的に増加してきた。それに伴って交通量が増加し、朝夕のラッシュ時には、主要道路を中心に渋滞が日常的に発生している。渋滞の発生により、旅行時間は増加し交通流の円滑性は

低下する。

交通工学の分野では道路の交通状況を表すのに混雑度、飽和度あるいは渋滞という指標を用いている^[1]。また、交通安全施設の整備に伴う円滑性に関する評価に旅行時間や停止時間、停止回数、旅行速度、渋滞長時間などが使われている^[2]。さらに、安全で円滑な交通秩序を確保する役割をもつ信号制御の評価に旅行時間や停止・発進回数、遅れ時間、捌け量、渋滞長時間などが使われている^{[3][4]}。上記の交通流の円滑性の指標は、交通条件や信号制御条件の変動の影響を受けて時々刻々と変動する。

本稿では、都市交通ネットワークにおける交通流の円滑性の尺度として、信号制御で重要な役割を果たす捌け交通量と感覚的に理解しやすい旅行時間を選んだ。信号交差点の捌け交通量は交通容量との比を用いてサイクル長単位で解析した。リンク単位の旅行時間は走行時間と停止時間に分け、六つの時間帯について解析した。

2. 円滑性の尺度

交通流の円滑性の尺度として用いられる旅行時間や遅れ時間、捌け交通量は以下のように定義される。旅行時間は、ある区間の走行に要した時間で、停止およびその他の遅れを含めた総所要時間と定義される。ただし、休憩や宿泊など路線を離れた時間を除く^[5]。遅れ時間は、車両が信号や待ち行列による遅れ（加減速を含む）を被らないで走行し得たとした場合の旅行時間と実際の旅行時間との差と定義される^[3]。捌け交通量は、実際の道路条件（流入路の形状、幅員、勾配等）、交通条件（車種構成、右左折車混入率、バス停の位置、駐車車両、など）、信号制御条件のもとで、一定時間に流入路の停止線を通過する車両台数と定義される。

3. 捌け交通量の解析

3.1 交通量収支

交通ネットワークの信号交差点の各流入路において、或る時間区間 ΔT に対して以下の交通量収

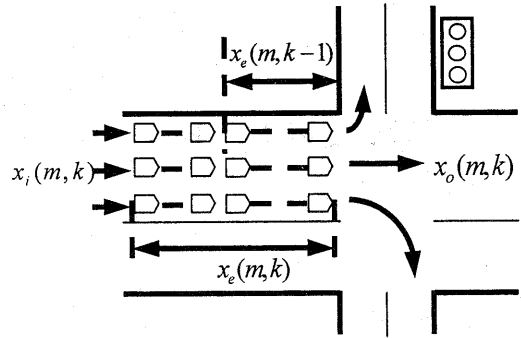


図1 信号交差点の交通量収支

支が各車線単位で成立する（図1参照）。

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

$$x_o(m, k) < c_x(m, k) \quad (2)$$

上式で、 m は信号交差点での車の流入路、 $k=k\Delta T$ は時刻をそれぞれ表す。 $x_e(m, k)$ 、 $x_i(m, k)$ 、 $x_o(m, k)$ は、時刻 $k=k\Delta T$ における超過流入交通量、流入交通量、捌け交通量をそれぞれ表す。また、捌け交通量 $x_o(m, k)$ は定義より交通容量 $c_x(m, k)$ より小さい。交通容量に対する捌け交通量の比率 $\xi(m, k)$ を用いて、捌け交通量は以下の式で表される。

$$\begin{cases} x_o(m, k) = \xi(m, k) \cdot c_x(m, k) \\ 0 \leq \xi(m, k) < 1 \end{cases} \quad (3)$$

3.2 交通容量の解析

道路の交通容量は、実際の道路、交通及び信号制御条件のもとで、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^[6]。

信号交差点の各流入路の交通容量は、車線別に以下のように解析される。

$$c_{xl}(m, k) = s_l n_l(m) \cdot r_l(m, k) \cdot r_b(m, k) \quad (4)$$

$$c_{xs}(m, k) = s_s n_s(m) \cdot r_l(m, k) \quad (5)$$

$$c_{xsl}(m, k) = s_s n_{sl}(m) \cdot r_l(m, k) \cdot r_b(m, k) \quad (6)$$

$$c_{xr}(m, k) = s_r n_r(m) \cdot r_l(m, k) \quad (7)$$

$c_{xl}(m,k)$, $c_{xs}(m,k)$, $c_{xr}(m,k)$, $c_{xl}(m,k)$ は左折、直進、直進・左折、右折の各車線の交通容量を表す。つぎに、 $r_l(m,k)$, $r_b(m,k)$, $r_r(m,k)$ は大型車混入率、バス運行頻度、左折率に関する補正率を表す。 s_l , s_s , s_r は左折、直進、右折車線の飽和交通量を表し、 $n_l(m)$, $n_s(m)$, $n_r(m)$ は各車線数を表す。

以上の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容量が求まる。左折、直進、右折車線から構成される流入路の交通容量は、各車線の青信号スプリット $r_{gl}(m,k)$, $r_{gs}(m,k)$, $r_{gr}(m,k)$ をかけて以下のように求まる。

$$\begin{aligned} c_x(m,k) = & r_{gl}(m,k) \cdot c_{xl}(m,k) \\ & + r_{gs}(m,k) \cdot c_{xs}(m,k) \\ & + r_{gr}(m,k) \cdot c_{xr}(m,k) \end{aligned} \quad (8)$$

以上のことから、各流入路の交通容量は或る交通条件のもとで車線数と青信号スプリットに比例する。

4. 旅行時間の解析

交通ネットワークの或る出発地 (Origin) から目的地 (Destination) までの平均 OD 旅行時間を、その OD を構成する各リンクの平均旅行時間の総和より求める。各リンクの旅行時間は、走行時間と停止時間の和より求められる。平均リンク旅行時間は、交通流の状況やオフセット制御の有無、下流側信号交差点での進行方向などによって異なるため、図2のように場合分けして解析する。

4. 1 渋滞無し・オフセット制御有りの場合

i) 下流側信号交差点を直進

・走行時間

$$T_r(i, j, m, k) = t_{run} \quad (9)$$

・停止時間

$$\begin{aligned} T_s(i, j, m, k) = & P_s \{ P_y (t_y / 2 + t_r + t_s) \\ & + P_r (t_r + t_s) \} \end{aligned} \quad (10)$$

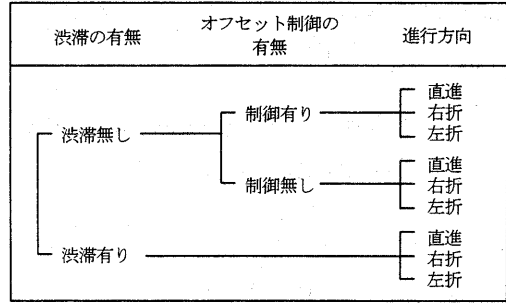


図2 平均リンク旅行時間解析の場合分け

ii) 下流側信号交差点を右折

・走行時間

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

・停止時間

$$T_s(i, j, m, k) = t_{dr} + t_s \quad (12)$$

iii) 下流側信号交差点を左折

・走行時間

$$T_r(i, j, m, k) = t_{run} + t_{cl} \quad (13)$$

・停止時間

$$T_s(i, j, m, k) = t_{dl} + t_s \quad (14)$$

ここで、

$$t_{run}(i, j, m, k) = (d - y_l) / v \quad (15)$$

$$t_{cs}(i, j, m, k) = q / 2\psi \quad (16)$$

$$P_g(i, j, m, k) = t_g / C_y \quad (17)$$

$$P_y(i, j, m, k) = t_y / C_y \quad (18)$$

$$P_r(i, j, m, k) = t_r / C_y \quad (19)$$

上式で、 T_r と t_{run} はリンク走行時間、 T_s はリンク停止時間、 P_s は交差点停止割合、 t_{cs} は直進待ち車列捌け時間、 t_g , t_y , t_r は青・黄・赤の各信号時間、 C_y はサイクル長、 P_g , P_y , P_r は各信号時間の確率、 d はリンク距離、 y_l は待ち車列長、 v はリンク走行速度、 q は待ち車列台数、 ϕ は交通容量、 t_{dr} は直進青現示から右折青現示までの遅れ時間、 t_{dl} は直進青現示から左折青現示までの遅れ時間、 t_s は発進遅れをそれぞれ表す。また、添字 i, j は交通ネットワークにおける信号交差点の位置を表す。な

お、式を簡潔に表現するために右辺の変数についてはこれらの添字を省略した。

4. 2 渋滞無し・オフセット制御無しの場合

i) 下流側信号交差点を直進

・走行時間

$$T_r(i, j, m, k) = P_g \cdot t_{run} + P_y(t_{run} + t_{cs}) + P_r(t_{run} + t_{cs}) \quad (20)$$

・停止時間

$$T_s(i, j, m, k) = P_y(t_y/2 + t_r + t_s) + P_r(t_r + t_s) \quad (21)$$

下流側信号交差点を右折、左折する場合も同様に解析する。

4. 3 渋滞の場合

i) 下流側信号交差点を直進

・走行時間

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

・停止時間

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

下流側信号交差点を右折、左折する場合も同様に解析する。

交通ネットワーク内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、その経路に沿った平均リンク旅行時間の総和より求められる。

平均 OD 旅行時間

$$T_{OD}(k) = \sum_i \sum_j \sum_m \{T_r(i, j, m, k) + T_s(i, j, m, k)\} \quad (24)$$

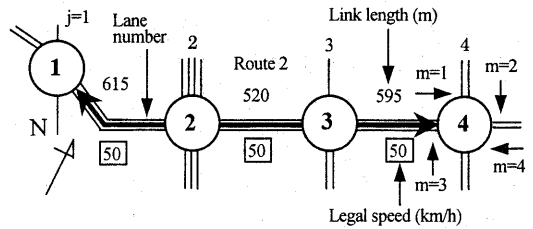


図3 福山市内交通ネットワーク

5. 捌け交通量の測定

捌け交通量は、実際の道路条件（流入路の形状、幅員、勾配等）、交通条件（車種構成、右左折車混入率、バス停の位置、駐車車両、など）、信号制御条件のもとで、一定時間に流入路の停止線を通過する車両台数を表す。

ここでは、福山市内国道2号線上の過飽和信号交差点である西桜町1丁目信号交差点(図3のj=1)と府中分かれ信号交差点(図3のj=4)を対象に捌け交通量を測定した。交通量がピークとなる午前と午後のラッシュ時の7:00~9:00と17:00~19:00

(府中分かれ信号交差点においては17:00~18:47まで)について、信号交差点全体が見える場所にビデオカメラを設置して測定した。国道2号線の東行き交通に対して、西桜町1丁目信号交差点で2車線から3車線に増加し、府中分かれ信号交差点では逆に3車線から2車線に減少する。この車線数の変化によって、二つの信号交差点を境に交通容量が大きく変動し、渋滞長の信号制御の観点から重要な信号交差点となる。

西桜町1丁目信号交差点の平成11年度現在における道路形状と現示を図4に示す。東西方向の国道2号線では、右折車線と導流島が設けられ右折の交通流の円滑化を図っている。この信号交差点では東西方向の国道2号線のみならず南北方向の右折交通量も多く、全ての流入路に右折車線が設けられている。現示は3現示で、国道2号線の右折車に対し第2現示2φで専用現示を設けている。破線の矢印は歩行者の現示を示す。つぎに、府中分かれ信号交差点の平成7年度現在における道路形状と現示を図5に示す。現示は4現示で、第2現示2φで東行き交通に対して右折と左折の

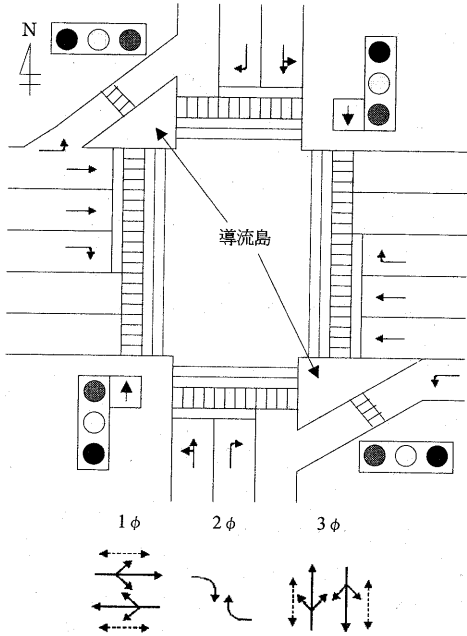


図4 西桜町1丁目信号交差点の道路形状と現示

現示を同時に表示している。

6. 捌け交通量の解析結果

信号交差点の各流入路における捌け交通量の変動特性についてサイクル長単位で解析する。ここでは、福山市内国道2号線上の二つの過飽和信号交差点を対象に、最初に車線単位の交通容量の変動特性について解析し、つぎに、捌け交通量の変動特性について解析する。使用した観測データは、西桜町1丁目信号交差点が平成11年11月16日(火)、府中分かれ信号交差点が平成7年12月6日(水)のものである。

6.1 西桜町1丁目

西桜町1丁目信号交差点の東行き流入路における直進・左折車線と直進車線の交通容量と捌け交通量、並びに、交通容量に対する捌け交通量の比率 $\xi(m,k)$ について解析した。サイクル長は150秒一定である。交通容量は41(台/サイクル長)から49(台/サイクル長)の範囲で不規則に変動するのに対し、捌け交通量は25(台/サイクル長)から42(台/

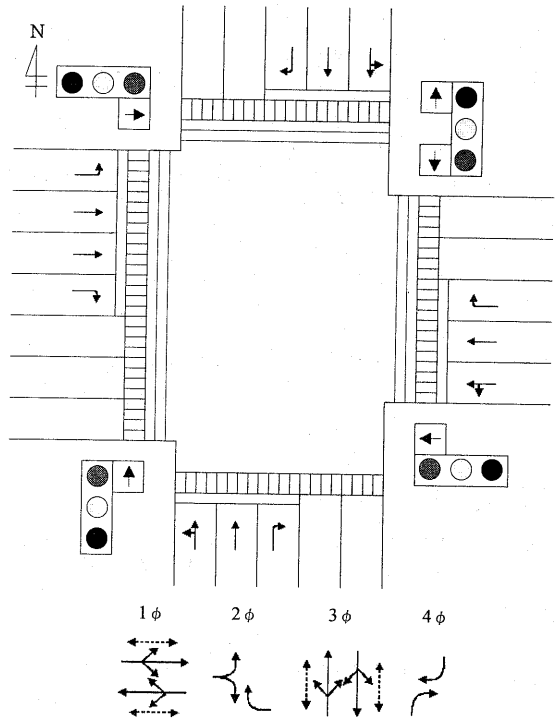
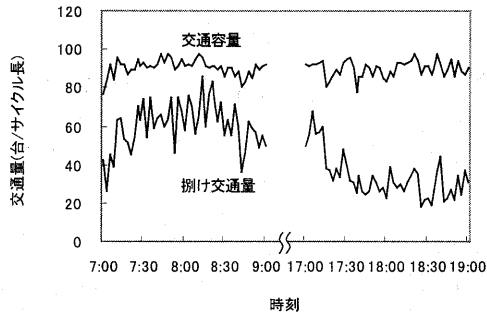


図5 府中分かれ信号交差点の道路形状と現示

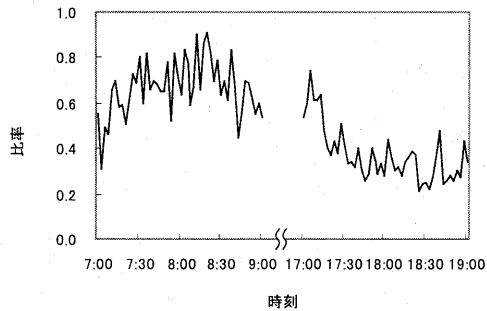
サイクル長)の広範囲で不規則に変動する。二つの車線をまとめた交通容量に対する捌け交通量の比率 $\xi(m,k)$ は、0.54から0.90の範囲で捌け交通量に類似して不規則に変動する。つぎに、西行き流入路の二つの直進車線の捌け交通量の変動特性について図6(a)、(b)に示す。解析より、夕方の17時15分以降において比率 $\xi(m,k)$ の値が大きく減少し、交通の流れが著しく低下し、渋滞が発生していることを表している。

6.2 府中分かれ

府中分かれ信号交差点の東行き流入路における二つの直進車線の捌け交通量の変動特性について解析した。サイクル長は150秒一定である。交通容量は青信号スプリットの制御の影響を受けて7時30分以降において増加している。交通容量に対する捌け交通量の比率 $\xi(m,k)$ の値は0.51から1.00の範囲で不規則に変動している。つぎに、西行き流入路における直進・左折車線と直進車線に対し



(a)直進車線の交通容量と捌け交通量



(b)直進車線の交通容量に対する捌け交通量の比率

図6 西桜町1丁目信号交差点の西行き流入路における捌け交通量の変動特性

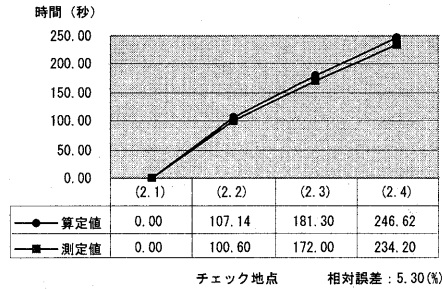
て、交通容量は青信号スプリットの制御の影響で7時30分以降において増加し、比率 $\xi(m,k)$ の値は8時40分付近で低下し交通の流れが悪くなっている。

7. 旅行時間の解析結果

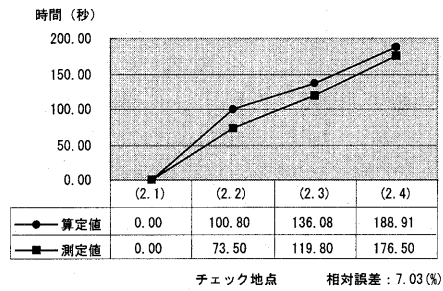
提案した平均OD旅行時間の解析精度を、福山市内交通ネットワークにおけるシミュレーション

表1 時間帯の分類

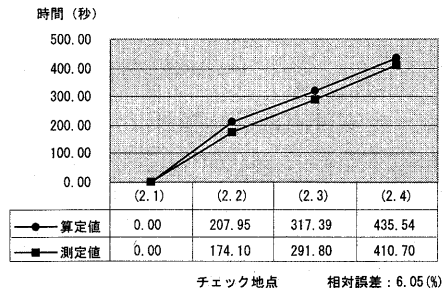
分類	時間帯	測定回数
A	7:30~9:00	10
B	9:00~11:00	10
C	11:00~13:00	10
D	13:00~15:00	10
E	15:00~17:00	10
F	17:00~19:00	10



(a)平均走行時間の測定値と算定値の比較



(b)平均停止時間の測定値と算定値の比較

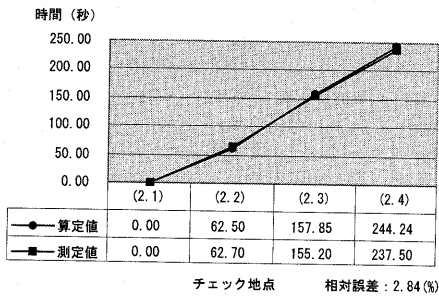


(c)平均旅行時間の測定値と算定値の比較

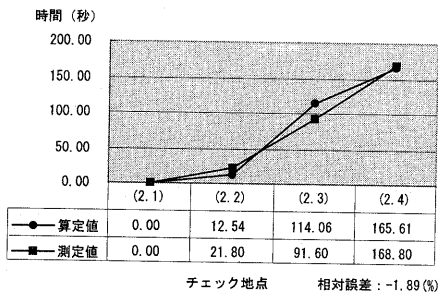
図7 経路1の午前のラッシュ時における走行時間、停止時間、旅行時間の比較

による算定値と測定値の比較に基づいて考察する。測定は、表1に示される六つの時間帯に分けて、平成11年9月から11月までの平日に福山市内国道2号線で試験車走行法を用いて行った。シミュレーションは、図3に示す二つの経路(信号交差点1→4および4→1)に対し、各時間帯毎に15分単位で行った。

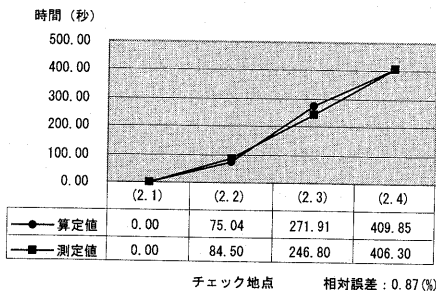
経路1(信号交差点1→4)の走行時間や停止時間、旅行時間についてシミュレーションにより算定した結果は以下の通りである。走行速度はラッ



(a)平均走行時間の測定値と算定値の比較



(b)平均停止時間の測定値と算定値の比較



(c)平均旅行時間の測定値と算定値の比較

図8 経路1の夕方ラッシュ時における走行時間、停止時間、旅行時間の比較

シユ時と非ラッシュ時で大きく変動し、法定速度を用いた場合の走行時間の六つの時間帯における相対誤差の平均値が-27.4%と大きいものに対して、測定値を用いた場合の走行時間の相対誤差の平均値は2.8%と小さくなった。また、ラッシュ時は非ラッシュ時より信号待ち時間が長くなるため停止時間も長くなり、OD旅行時間の算定精度に大きく影響する。走行速度に測定値を用いた場合の平均走行時間、平均停止時間、平均旅行時間に対する測定値と算定値を朝夕のラッシュ時について比

較した結果を図7(a)~図7(c)および図8(a)~図8(c)に示す。平均停止時間と平均OD旅行時間の六つの時間帯における相対誤差の平均値は、それぞれ0.19%、2.1%と良好な結果を得た。

つぎに、経路2(信号交差点4→1)に対して平均走行時間、平均停止時間、平均OD旅行時間の六つの時間帯における相対誤差の平均値を求めた結果、それぞれ5.2%、-11.8%、-1.2%となった。経路1に比べて平均停止時間の算定精度が悪くなっている。

8. おわりに

本稿では、都市交通ネットワークの交通流の円滑性について信号交差点の捌け交通量とOD旅行時間を用いて解析した。広島県福山市内交通ネットワークでこれらを解析した結果、以下のことが確かめられた。

- ①交通容量は、交通条件や信号制御条件の変動の影響を受けて不規則に変動する。
- ②捌け交通量は、交通条件や信号制御条件、交通需要の変動の影響を受けて広範囲で不規則に変動する。とくに、渋滞時には大きく低下する。
- ③渋滞時の比率 $\xi(m,k)$ の平均値は約0.67、標準偏差は約0.08となった。
- ④リンク走行時間は走行速度の変動の影響を強く受ける。
- ⑤リンク停止時間はオフセット制御に大きく依存する。

今後の課題として、交通容量に対する捌け交通量の比率 $\xi(m,k)$ の値は、標準化された値で交通流(自由流、渋滞流)を判別するのに役立つのかどうか交通量収支に基づき更に研究を進めることが考えられる。また、右折や左折を含む経路の旅行時間の算定精度について考察することが必要である。

参考文献

- [1] 高田邦彦“交通工学入門、3. 交通混雑(その2)”、交通工学、vol.24, No.3, pp.37-45、(1989-5).

- [2] 斎藤威 “第5次交通安全施設等整備事業五箇年計画の評価”、交通工学、vol.33, No.2、pp.11-21、(1998-10).
- [3] 交通工学研究会編 “交通信号の手引”、pp.10-12、(1994-7).
- [4] S. Miyata, M. Noda and T. Usami, “STREAM (Strategic Realtime Control for Megalopolis-Traffic) Advanced Traffic Control System of Tokyo Metropolitan Police Department”, Proc. of the 2nd World Congress on Intelligent Transport Systems, Yokohama, vol.1, pp.289-297,(1995-11).
- [5] 塙克郎 他 “交通調査マニュアル”、pp.39、(1976-5).
- [6] 藤田大二 “交通現象と交通容量”、交通工学研究所編、(1987-7).