

信号交差点における交通流ダイナミクスの解析

小林 正明⁺ 清水 光⁺⁺ 石川 洋⁺⁺

⁺福山大学 工学部 機械工学科

⁺⁺福山大学 工学部 情報処理工学科

〒729-0292 広島県福山市学園町1番地三蔵

E-mail: ⁺kobayasi@fume.fukuyama-u.ac.jp

⁺⁺{shimizu, h-ishika}@fuip.fukuyama-u.ac.jp

あらまし 本稿では、都市交通網の信号交差点における交通流ダイナミクスを交通量収支に基づいて解析する。最初に、信号交差点の流入路の各車線単位で成立する交通量収支を定式化する。つぎに、交通流円滑性の尺度として信号交差点における飽和度や渋滞長時間、捌け率を定義する。最後に、広島県福山市内国道2号線上の主要信号交差点において、これらの交通流円滑性の尺度や交通量収支を用いて交通流ダイナミクスを定量的に解析する。

キーワード：交通量収支、飽和度、渋滞長時間、捌け率

Analysis of Traffic Flow Dynamics at Signalized Intersections

Masa-aki Kobayashi⁺, Hikaru Shimizu⁺⁺ and Hiroshi Ishikawa⁺⁺

⁺Department of Mechanical Engineering

⁺⁺Department of Information Processing Engineering

Faculty of Engineering, Fukuyama University

1 Gakuen-cho, Fukuyama-shi, 729-0292, Japan

E-mail: ⁺kobayasi@fume.fukuyama-u.ac.jp

⁺⁺{shimizu, h-ishika}@fuip.fukuyama-u.ac.jp

Abstract This paper studies the analysis of the traffic flow dynamics at signalized intersections based on the volume balance. The volume balance is held for each lane at each signalized intersection for a certain duration. As the measure of the traffic flow smoothness, the saturation degree, congestion length time and outgoing ratio are defined in this paper. These measures of the traffic flow smoothness. The traffic flow dynamics is analyzed using these measures of the traffic flow smoothness and the volume balance.

Key words volume balance, saturation degree, congestion length time, outgoing ratio

1. はじめに

近年、自動車交通は社会経済活動や日常生活において人や物の移動手段として重要な役割を担っており、自動車の技術革新や道路網の整備に伴って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、とくに、朝夕のラッシュ時には主要道路を中心に交通渋滞が日常的に発生している。交通渋滞の発生は、車の走行速度の低下や出発地から目的地までの所要時間の増加、燃料消費の増加、さらに排気ガスによる大気汚染などの社会的問題の原因の一つとなっている。

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発進回数や遅れ時間、捌け量などが使われている^{3,4)}。上記の交通流円滑性の尺度の値は、道路条件や交通条件、信号制御条件の変動の影響を受けて、空間的および時間的に変動する。

本稿では、都市道路網の信号交差点における交通流ダイナミクスを交通量収支に基づいて解析する。最初に、信号交差点の流入路の各車線単位で成立する交通量収支を離散形時変非線形ダイナミックスシステムで表す。次に、信号交差点の交通流円滑性の尺度として用いられる飽和度や渋滞長時間、捌け率の定義と特性について述べる。本稿で解析の対象となる広島県福山市内主要信号交差点の道路形状と現示について整理し、最後に、サイクル長単位、車線単位の交通量データを用いて信号交差点における交通流ダイナミクスについて解析する。

2. 交通量収支

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)。

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

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

上式で、 i と j は交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、 $k=k \Delta T (k=1, 2, \dots, k_f)$ 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。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。また、捌け交通量 $x_o(i, j, m, k)$ は定義より交通処理量 $c_x(i, j, m, k)$ より小さくなる。

信号交差点の交通処理量は、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³⁾。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⁵⁾。

$$c_{sl}(i, j, m, k) = s_l n_l(i, j, m) \cdot r_l(i, j, m, k) \quad (3)$$

$$c_{ss}(i, j, m, k) = s_s n_s(i, j, m) \cdot r_l(i, j, m, k) \quad (4)$$

$$c_{xs}(i, j, m, k) = s_s n_d(i, j, m) \cdot r_l(i, j, m, k) \cdot r_b(i, j, m, k) \quad (5)$$

$$c_{sr}(i, j, m, k) = s_r n_r(i, j, m) \cdot r_l(i, j, m, k) \quad (6)$$

$c_{sl}(i, j, m, k)$ 、 $c_{ss}(i, j, m, k)$ 、 $c_{xs}(i, j, m, k)$ 、 $c_{sr}(i, j, m, k)$ はそれぞれ左折、直進、直進・左折、右折の各車線の交通容量を表す。次に、 $r_l(i, j, m, k)$ 、 $r_b(i, j, m, k)$ 、 $r_r(i, j, m, k)$

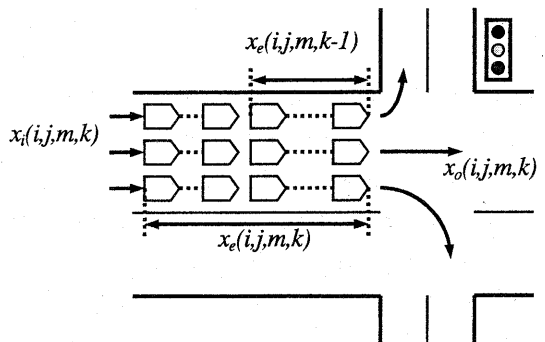


図1 信号交差点の交通量収支

はそれぞれ大型車混入率、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、 $n_l(i,j,m)$ 、 $n_s(i,j,m)$ 、 $n_r(i,j,m)$ はそれぞれ各車線数を表す。

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

$$\begin{aligned} c_x(i,j,m,k) = & r_{gl}(i,j,m,k) \cdot c_{xl}(i,j,m,k) \\ & + r_{gs}(i,j,m,k) \cdot c_{xs}(i,j,m,k) \\ & + r_{gr}(i,j,m,k) \cdot c_{xr}(i,j,m,k) \quad (7) \end{aligned}$$

以上のことから、各流入路の交通処理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。

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⁹⁾。

$$\begin{cases} x_e(i,j,m,k) = x_e(i,j,m,k-1) + \\ \quad x_i(i,j,m,k) - u(i,j,m,k) \\ y_e(i,j,m,k) = l_m(i,j,m,k)x_e(i,j,m,k) \end{cases} \quad (8)$$

上式で、 $u(i,j,m,k)$ はサイクル長や青信号スプリット、オフセットから成る3つの信号制御パラメータによる制御入力を表す。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。なお、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。

3. 交通流円滑性の尺度

信号交差点の交通流円滑性の尺度として用いられる飽和度や渋滞長時間、捌け率の定義と特性について以下に述べる。

3.1 飽和度

信号交差点の一つの流入路における飽和度

$\lambda(i,j,m,k)$ は、或る現示で流入交通量 $x_i(i,j,m,k)$ をその流入路の交通処理量 $c_x(i,j,m,k)$ で除した値で定義され、次式で表される⁷⁾。

$$\lambda(i,j,m,k) = \frac{x_i(i,j,m,k)}{c_x(i,j,m,k)} \quad (9)$$

上式で、 $\lambda > 1.0$ の状態を過飽和とよび、渋滞によって円滑性は著しく低下する。飽和度は、信号制御の一つの評価指標となっている。

3.2 渋滞長時間

信号交差点の或る流入路における渋滞長時間 $T_c(i,j,m)$ は、渋滞長とその継続時間の積の総和で定義され、次式で表される。

$$T_c(i,j,m) = \sum_{k=1}^{k_f} y_e(i,j,m,k) C_y(i,j,m,k) \quad (10)$$

ここで、 $C_y(i,j,m,k)$ はサイクル長を表す。渋滞長時間は渋滞の一つの定量的表現であり、信号制御の評価関数として用いることができる。

3.3 捌け率

信号交差点の1つの流入路において、捌け率 $\xi(i,j,m,k)$ を次式で定義する。

$$\begin{cases} \xi(i,j,m,k) = \frac{x_o(i,j,m,k)}{c_x(i,j,m,k)} \\ 0 \leq \xi(i,j,m,k) < 1.0 \end{cases} \quad (11)$$

ここで、捌け交通量 $x_o(i,j,m,k)$ は、実際の道路条件（流入路の形状、幅員、勾配等）や交通条件（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。捌け交通量は交通需要や交通処理量などの変動の影響を受けて一般に広範囲で不規則に変動する。

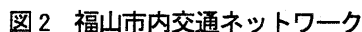
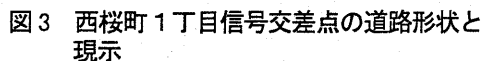
4. 交通量の測定

4.1 交通量の測定法

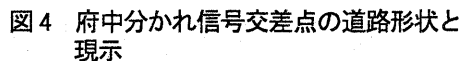
交通量とは、「道路の一断面を単位時間に通過する車の台数」と定義され、道路の利用状況を示す

本稿で使用する交通量は、図2で示される福山市内国道2号線上の主要信号交差点である西桜町1丁目信号交差点、福山郵便局前信号交差点、御船町交番前信号交差点、府中分かれ信号交差点の4つの信号交差点においてビデオ撮影よりサイクル長単位で測定した。交通量はピークとなる午前と午後のラッシュ時を含む7時から10時までと、16時から19時までについて信号交差点の各流入路において流入交通量や捌け交通量、超過流入交通量を車線単位で測定した。

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伴って交通処理量が大きく変動し、渋滞長の信号制御の



各信号交差点の道路形状と現示は以下のようになる。西桜町1丁目信号交差点では、東西方向の国道2号線で、右折車線と導流島が設けられ右左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



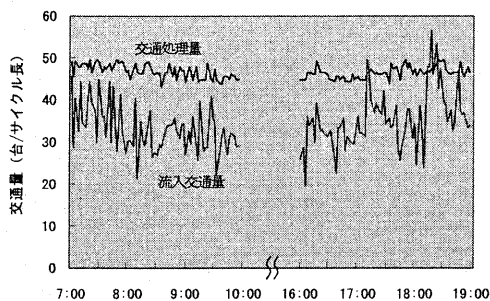
右折車に対し第2現示2φで専用現示を表示している(図3参照)。次に、福山郵便局前信号交差点では、現示は4現示で第2現示2φと第4現示4φで右折と左折の現示を同時に表示している。南北方向の交通量が多いため、車線数が他の信号交差点の南北方向の車線数より多い。また、左折専用車線が設けられている。御船町交番前信号交差点では、現示は4現示である。北行き方向流入路には左折専用車線が設けられているが、南行き方向流入路は車線数が少なく直進・左折車線となっている。最後に、府中分かれ信号交差点では、現示は4現示で、第2現示2φで東行き交通に対して右折と左折の現示を同時に表示している(図4参照)。

5. 交通流ダイナミクスの解析

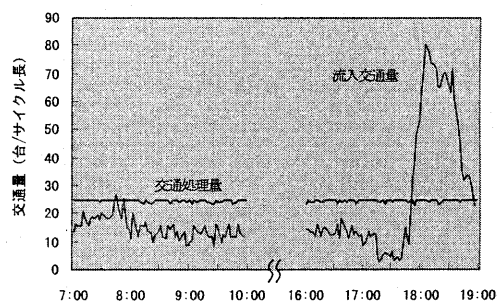
交通流円滑性の尺度として用いられる飽和度や渋滞長時間、捌け率の変動特性について、また、交通渋滞の発生、継続、消滅のメカニズムについて、広島県福山市内国道2号線上の2つの主要信号交差点において解析し、それらの結果について考察する。

5.1 飽和度

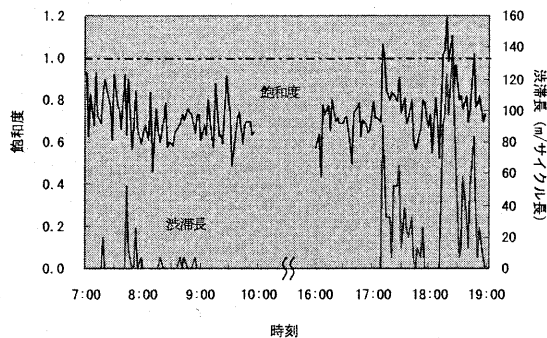
飽和度 $\lambda(i,j,m,k)$ は交通処理量に対する流入交通量の比で定義された。西桜町1丁目信号交差点での東行き流入路の直進車線における交通処理量と流入交通量のサイクル長単位の変動を図5(a)に示す。交通処理量は43(台/サイクル長)から50(台/サイクル長)の小さい範囲で不規則に変動しているのに対し、流入交通量は20(台/サイクル長)から57(台/



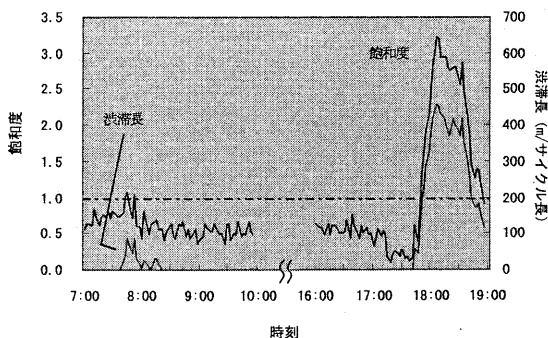
(a) 直進車線の交通処理量と流入交通量



(a) 直進車線の交通処理量と流入交通量



(b) 直進車線の飽和度と渋滞長



(b) 直進車線の飽和度と渋滞長

図5 西桜町1丁目信号交差点東行き流入路の直進車線における飽和度と渋滞長の変動特性

図6 府中分かれ信号交差点南行き流入路の直進車線における飽和度と渋滞長の変動特性

クル長)の広範囲で不規則に変動している。とくに、17時過ぎと18時過ぎには流入交通量が交通処理量を上回り、図5(b)に示すように飽和度の値が1.00を越えている。西桜町1丁目信号交差点では、飽和度の値は0.43から1.19の広範囲で流入交通量に類似して不規則に変動し、渋滞発生時の飽和度の値は0.52から0.92の広範囲に及び、渋滞消滅時の飽和度の値は0.64から0.78の範囲となっている。

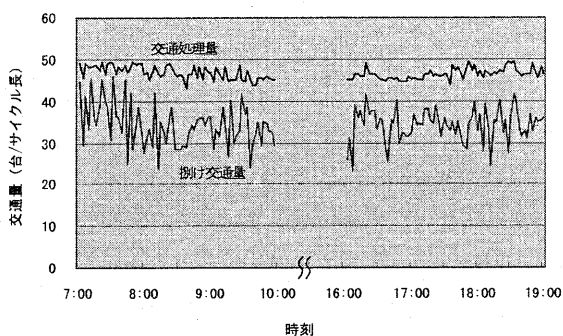
府中分かれ信号交差点の南行き流入路の直進車線における交通処理量と流入交通量のサイクル長単位の変動を図6(a)に示す。交通処理量は23(台/サイクル長)から25(台/サイクル長)の狭い範囲で変動しているのに対し、流入交通量は3(台/サイクル長)から81(台/サイクル長)と非常に広い範囲で不規則に変動している。とくに、18時前から流入交通量が急増

し、図6(b)に示すように飽和度の最大値は3.22に及んでいる。府中分かれ信号交差点においても、飽和度の値は流入交通量に類似して不規則に変動し、渋滞の発生時や消滅時のその値は広範囲で変動している。

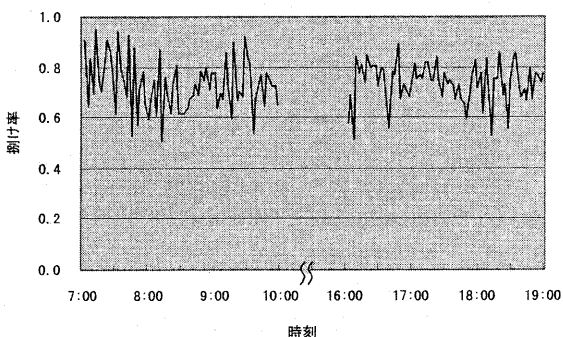
5.2 渋滞長時間

渋滞が発生すると車の走行速度は低下し停止時間は増加する。このような渋滞による交通流円滑性の低下を定量的に表現する尺度として渋滞長時間が提案された。

西桜町1丁目信号交差点の東行き流入路の直進車線における渋滞長は、図5(b)に示されるように午前に最大52(m)と小さいのに対し、午後には最大136(m)で渋滞の継続時間も長くなっている。(10)式で定義される渋滞長時間 $T_c(i,j,m)$ の値は午前が $21.3 \times 10^3(\text{m} \cdot \text{sec})$ 、午後が $244 \times 10^3(\text{m} \cdot \text{sec})$ と午

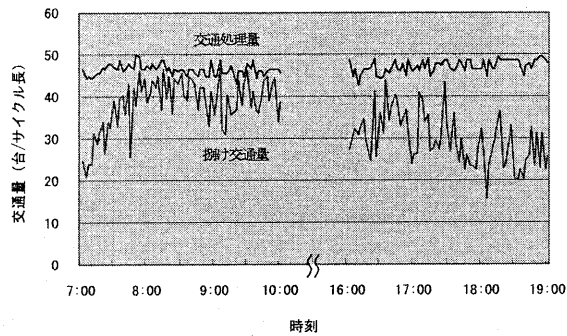


(a) 直進車線の交通処理量と捌け交通量

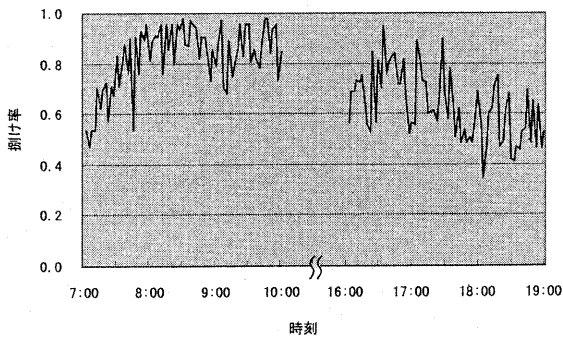


(b) 直進車線の捌け率

図7 西桜町1丁目信号交差点東行き流入路の直進車線における捌け交通量の変動特性



(a) 直進車線の交通処理量と捌け交通量



(b) 直進車線の捌け率

図8 西桜町1丁目信号交差点西行き流入路の直進車線における捌け交通量の変動特性

後の渋滞の大きいことがわかる。

府中分かれ信号交差点の南行き流入路の直進車線における渋滞長は、図 6(b) に示されるように午前最大 84(m)であるのに対し、午後最大 459(m)までに達している。渋滞長時間 $T_c(i,j,m)$ の値は、午前が $77.5 \times 10^3(\text{m} \cdot \text{sec})$ 、午後が $1.32 \times 10^6(\text{m} \cdot \text{sec})$ と午後大渋滞の発生していることを表している。

5.3 捌け率

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、最初に車線単位の交通処理量の変動特性について解析し、次に、捌け交通量の変動特性について解析する。

西桜町 1 丁目信号交差点の東西方向流入路における直進車線の交通処理量と捌け交通量、並びに、交通処理量に対する捌け交通量の比で定義される捌け率 $\xi(i,j,m,k)$ について解析する。サイクル長は 150(sec.) 一定である。図 7(a) に示すように交通処理量は 43(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 23(台/サイクル長) から 46(台/サイクル長) の広範囲で不規則に変動する。捌け率 $\xi(i,j,m,k)$ は、0.51 から 0.95 の範囲で捌け交通量に類似して不規則に変動する。次に、西行き流入路の 2 つの直進車線の捌け交通量の変動特性について図 8(a), (b) に示す。解析より、夕方の 17 時 30 分以降において捌け率 $\xi(i,j,m,k)$ の値が大きく減少し、交通の流れが低下して渋滞が発生していることを表している。

5.4 交通量収支

主要信号交差点の各流入路の車線単位における流入交通量や捌け交通量、超過流入交通量を用いて交通量収支についてサイクル長単位で検証し、渋滞メカニズムを定量的に解析する。

5.4.1 西桜町 1 丁目

最初に、西桜町 1 丁目信号交差点の東行き方向流入路における直進車線の流入交通量、捌け交通量、超過流入交通量の時間変動を示すと図 9 のようになる。午前は平成 12 年 7 月 24 日(月)に測定

し、午後は平成 12 年 7 月 25 日(火)に測定したものである。以下に、交通量の測定データに基づいて交通量収支をサイクル長単位で検証する。サイクル長は午前の初期の時刻を除き、150(sec.)を中心に変動している。17 時 13 分 26 秒に $x_i(k)=50$ (台/サイクル長)、 $x_o(k)=36$ (台/サイクル長)となる。 $x_e(k-1)=0$ で、つ $x_i(k)>x_o(k)$ が成り立ち、 $x_e(k)=14$ (台/サイクル長)となって渋滞が発生する。その理由は、捌け交通量 $x_o(k)$ に対し流入交通量 $x_i(k)$ が急激に増加したためである。

5.4.2 府中分れ

府中分かれ信号交差点の西行き方向流入路における右折車線の流入交通量、捌け交通量、超過流入交通量の変動を示すと図 10 のようになる。測定は、平成 12 年 8 月 31 日(木)に行った。サイクル長は午前の初期の時刻を除き、150(sec.)を中心に変動している。16 時 17 分 36 秒で $x_i(k)=9$ (台/サイクル長)

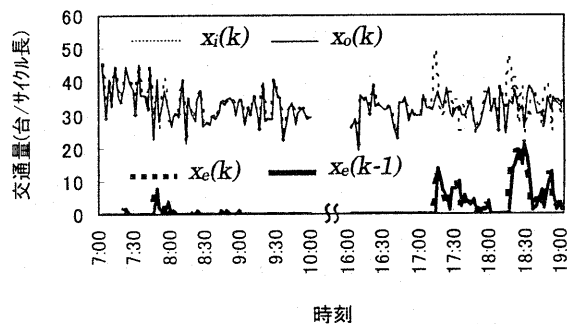


図9 西桜町 1 丁目信号交差点東行き流入路における交通量収支

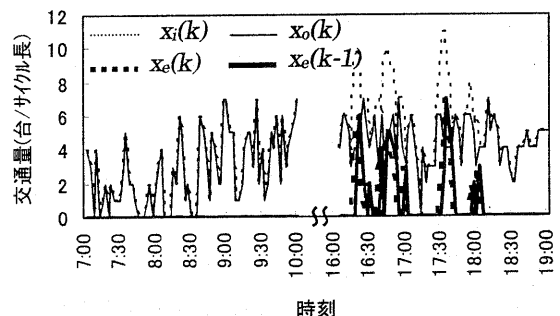


図10 府中分かれ信号交差点西行き流入路における交通量収支

長)、 $x_o(k)=4$ (台/サイクル長)となる。 $x_e(k-1)=0$ (台/サイクル長)で、かつ $x_i(k)>x_o(k)$ が成り立ち、 $x_e(k)=5$ (台/サイクル長)となって渋滞が発生する。16 時 22 分 36 秒まで $x_e(k)>0$ が成り立ち、渋滞が継続する。16 時 25 分 5 秒に $x_e(k-1)=2>0$ であり $x_e(k-1)+x_i(k)=7\leq x_o(k)=7$ (台/サイクル長)が成り立ち、 $x_e(k)=0$ (台/サイクル長)となり渋滞が消滅する。この渋滞の発生と消滅の現象がこの後も繰り返し発生する。

6. おわりに

本稿では、都市道路網の信号交差点における交通流ダイナミクスを、飽和度や渋滞長時間、捌け率、交通量収支を用いて定量的に解析した。広島県福山市内の主要信号交差点においてサイクル長単位、車線単位の交通量データを用いて解析した結果、以下のことが確かめられた。

- ①飽和度は流入交通量に類似して不規則に変動する。渋滞発生時や消滅時の飽和度の値は広い範囲で変動し、閾値の推定は難しい。
- ②渋滞長時間は、渋滞の時間変動特性グラフ上における面積に相当し、渋滞の一つの定量的表現となる。
- ③捌け率は捌け交通量に類似して不規則に変動する。渋滞発生時や消滅時の捌け率の閾値の推定は今後の課題である。
- ④交通量収支に基づき、渋滞の発生、継続、消滅を定量的に明らかにすることができる。

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, May.1989.
- 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, Oct.1998.
- 3) 交通工学研究会編 "交通信号の手引", 1994.
- 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, Nov.1995.

- 5) 清水, 小林, 米澤, 馬屋原: 都市交通ネットワークにおける交通流の円滑性の解析, 情報処理学会研究報告, vol.2001, No.47, pp.55-62, May.2001.
- 6) 清水, 真柴, 傍田, 小林: 幹線道路の渋滞長制御, 情報処理学会論文誌, 第42巻, 第7号, pp.1876-1884, July.2001.
- 7) A. D. May, "Traffic Flow Fundamentals", Prentice-all, pp.116-159, 1990.