

二方向交通幹線道路における最適信号制御

藤井温子*・清水 光**

An Optimal Signal Control along Two-Way Traffic Arterials

Haruko Fujii* and Hikaru Shimizu**

Abstract

This paper studies an optimal signal control method which control congestion lengths systematically along two-way traffic arterials. The signal control system of the congestion length is described by a nonlinear time-varying discrete dynamic system and synthesized by using the feedback control. A balance control algorithm is applied to control congestion lengths on two-way traffic arterials. From the comparison between simulation values and measurement values controlled by a pattern selection method, it is confirmed that the signal control system and the signal control algorithm work effectively to minimize the performance criterion.

Keywords : dynamic system, balance control algorithm, traffic arterial

キーワード : ダイナミックシステム, バランス制御アルゴリズム, 幹線道路

1. はじめに

自動車交通の特長は、ドア・ツ・ドアの輸送や時間の制約がない、快適な車内、高速走行などが挙げられる。また、近年の経済の発展や生活水準の向上、道路の整備、自動車の技術革新、女性ドライバーの増加などに伴って、我が国の自動車保有台数は増加の一途をたどっている。その結果、都市地域の主要道路を中心に朝夕のラッシュ時に交通量が増加し、交通渋滞が日常的に発生している。

交通渋滞の発生により、旅行時間や燃料消費、大気汚染などが増加し、交通事故の一因にもなっていると言われている。社会的にマイナス要因となる交通渋滞を解消、または軽減する対策として、道路の整備や交差点の改良、交通規制、信号制御、動的経路誘導、交通需要管理などが挙げられる。幹線道路における信号制御システムでは、信号交差点の流入交通量や待ち車列長などの時間変動に応じて、広範囲にきめ細かく3つの信号制御パラメータ(サイクル長、青信号スプリット、オフセット)を統一的にリアルタイムで探索できるアルゴリズムの開発が望まれている。

現在まで、SCOOT¹⁾(Hunt, et al, 1981) や分散制御²⁾(Davison and özgüner1983), MODERATO³⁾(Sakakibara, et al, 1999) のようなオンライン信号制御法が幹線道路の

渋滞制御に提案されてきた。各信号交差点における流入交通量と待ち車列長がラッシュ時に急激に増加するため、サイクル長や青信号スプリット、オフセットの3つの信号制御パラメータは、これまでの研究のように個別的にはなく、系統的に制御されることが望まれる。

本稿では、流入交通量や待ち車列長、走行速度の時間変動に従って、3つの信号制御パラメータを系統的・逐次的に制御する信号制御システムと信号制御アルゴリズムを提案する。また、提案した信号制御システムと信号制御アルゴリズムを用いて福山市内の幹線道路において朝夕のラッシュ時にシミュレーションを行い、その結果について考察する。

2. 信号制御システム

2.1 交通量収支

二方向交通幹線道路の信号交差点の各車線におけるサイクル長単位の交通量の変動を考慮すると、単位時間(サイクル長に等しい)で交通量収支が成立し、以下のように記述される(Fig.1参照)。

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

$$\begin{cases} x_o(k) = \xi(k) \cdot c_x(k) \\ x_e(k) \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

* 情報工学科

** 福山大学 工学部

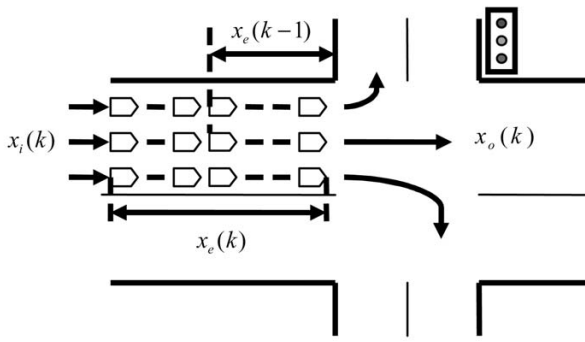


Fig.1 各流入路の交通量収支

ここで、 $k=k\Delta T$ ($k=1,2,\dots,k_f$)は時刻を表し、 $x_e(k), x_i(k), x_o(k)$ はそれぞれ超過流入交通量，流入交通量，捌け交通量を表す。また、 $c_x(k)$ は各流入路の交通処理量、 $\xi(k)$ はある交通流のもとで $x_o(k)$ を $c_x(k)$ で除した比率を表す。渋滞長制御で基本的な役割を果たす渋滞のメカニズムは、(1)式の交通量収支に基づいて定量的に記述される。

- i) 各信号交差点における渋滞は、超過流入交通量 $x_e(k)$ が零より大きくなると発生する。すなわち、

$$x_e(k-1) = 0 \quad \text{and} \\ x_i(k) > x_o(k)$$

- ii) 渋滞は、超過流入交通量 $x_e(k)$ が零以下になるときに消滅する。すなわち、

$$x_e(k-1) > 0 \quad \text{and} \\ x_e(k-1) + x_i(k) \leq x_o(k)$$

- iii) 渋滞は、超過流入交通量 $x_e(k)$ が正の間継続する。すなわち、

$$x_e(k-1) > 0 \quad \text{and} \\ x_e(k-1) + x_i(k) > x_o(k)$$

2.2 信号制御システム

二方向交通幹線道路における渋滞長の信号制御システムが構成される。幹線道路の各信号交差点における交通量収支は次式で記述される。

$$x_e(j,m,k) = x_e(j,m,k-1) + x_i(j,m,k) - x_o(j,m,k) \quad (3)$$

$$\begin{cases} x_o(j,m,k) = \xi(j,m,k)c_x(j,m,k) \\ x_e(j,m,k) \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

ここで、Fig.2に示されるように j は信号交差点の位置、 m は車の流入路をそれぞれ表す。各信号交差点の交通量収支において、流入交通量 $x_i(j,m,k)$ は車両感知器により時々刻々と測定され、捌け交通量 $x_o(j,m,k)$ は3つの信号制御パラメータにより制御されると仮定する。

$$x_o(j,m,k) = f[c_y(j,m,k), r_g(j,m,k), t_{off}(j,m,k)] \quad (5)$$

ここで、 $c_y(j,m,k), r_g(j,m,k), t_{off}(j,m,k)$ はそれぞれサイクル長、青信号スプリット、オフセットを表す。制御入力 $u(j,m,k)$ を次式で定義する。

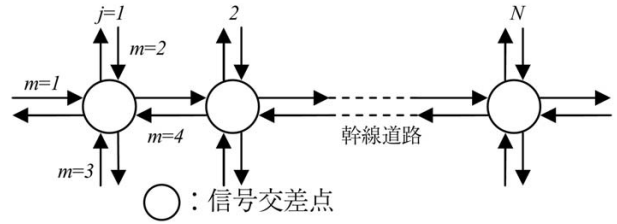


Fig.2 二方向交通幹線道路の交通流

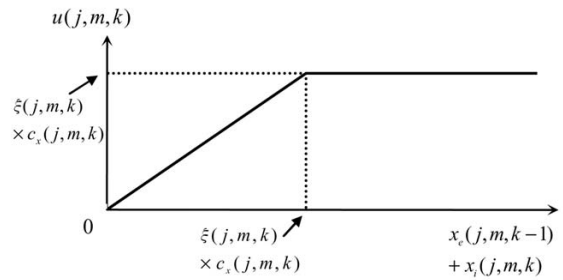


Fig.3 制御入力の特性

$$u(j,m,k) \triangleq f[c_y(j,m,k), r_g(j,m,k), t_{off}(j,m,k)] \quad (6)$$

制御入力は式 (4) によって決定され、Fig.3に示されるように飽和特性を有する。以上より、渋滞長の信号制御システムは次式で表される。

$$\begin{cases} x_e(j,m,k) = x_e(j,m,k-1) + x_i(j,m,k) - u(j,m,k) \\ y_c(j,m,k) = l_m(j,m,k)x_e(j,m,k) \end{cases} \quad (7)$$

渋滞長 $y_c(j,m,k)$ は状態変数 $x_e(j,m,k)$ に変換係数 $l_m(j,m,k)$ を乗じて求められる。

この制御システムにおいて、基準入力、制御入力および出力をそれぞれ許容渋滞長 $l_r(j,m,k)$ 、3つの信号制御パラメータ、渋滞長に対応させる。交通流の時間変動特性は (7) 式のダイナミックシステムにより表される。このように、渋滞長の信号制御システムは、各信号交差点においてフィードバック制御を用いて設計される (Fig.4参照)。二方向交通幹線道路の信号制御の目的は、以下の評価関数 $J_a(k)$ を最小にするような制御入力を探ることである。

$$J_a(k) = \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^4 g(j,m,k) \quad (8)$$

ここで、 N は幹線道路上の信号交差点数を表す。

関数 $g(j,m,k)$ と制御偏差 $e(j,m,k)$ は次式で定義される。

$$g(j,m,k) \triangleq \begin{cases} 0 & e(j,m,k) \geq 0 \\ |e(j,m,k)| & e(j,m,k) < 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$e(j,m,k) \triangleq l_r(j,m,k) - y_c(j,m,k) \quad (10)$$

関数 $g(j,m,k)$ の定義は、飽和度が各信号交差点の各流入路において異なることに起因している。

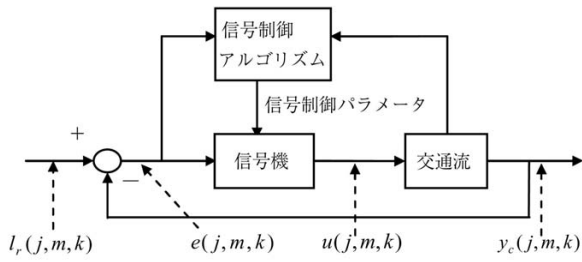


Fig.4 各信号交差点における渋滞長のフィードバック制御システム

また、ここで提案する信号制御システムは、次のLQ規範を最小にしている。

$$J(k) = \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^4 [x_e^2(j, m, k) + u^2(j, m, k)] \quad (11)$$

3. 信号制御アルゴリズム

二方向交通幹線道路の渋滞長制御のためにバランス制御アルゴリズムを提案する。バランス制御アルゴリズムでは、信号交差点において互いに交差する流入路の制御偏差の最大値を等しくし、かつ、評価関数 $J_a(k)$ を最小にするように3つの信号制御パラメータを系統的、逐次的に探索する。

Step 1. 各信号交差点における信号制御パラメータの初期値、上下限值、きざみ幅、ならびに比率 $\xi(j, m, k)$ や変換係数 $l_m(j, m, k)$ 、閾値 ε などを設定する。 $m=1$ とおいて以下の計算を行う。

Step 2. 時間区間 ΔT をサイクル長 $c_y^{(n)}(j, m, k)$ に等しく設定し、流入交通量 $x_i^{(n)}(j, m, k)$ を入力する。ここで、上付添字⁽ⁿ⁾は繰り返し計算回数を表す。

Step 3. 渋滞時の流入交通量を車線単位で再計算する。

$$x_i^{(n)}(j, m, k) = x_i^{(n)}(j, m, k) + x_e(j, m, k-1) \quad (12)$$

Step 4. 信号交差点の各流入路の交通処理量 $c_x^{(n)}(j, m, k)$ を、各車線交通処理量の総和より算定する。

$$c_x^{(n)}(j, m, k) = c_{xl}^{(n)}(j, m, k) + c_{xs}^{(n)}(j, m, k) + c_{xr}^{(n)}(j, m, k) \quad (13)$$

$$\begin{cases} c_{xl}^{(n)}(j, m, k) = r_{gl}^{(n)}(j, m, k) \cdot c_{xl}(j, m, k) \\ c_{xs}^{(n)}(j, m, k) = r_{gs}^{(n)}(j, m, k) \cdot c_{xs}(j, m, k) \\ c_{xr}^{(n)}(j, m, k) = r_{gr}^{(n)}(j, m, k) \cdot c_{xr}(j, m, k) \end{cases} \quad (14)$$

ここで、 $c_{xl}(j, m, k)$ 、 $c_{xs}(j, m, k)$ 、 $c_{xr}(j, m, k)$ はそれぞれ左折、直進、右折車線の交通容量を表し、 $r_{gl}^{(n)}(j, m, k)$ 、 $r_{gs}^{(n)}(j, m, k)$ 、 $r_{gr}^{(n)}(j, m, k)$ はそれぞれ各車線の青信号スプリットを表す。

Step 5. 各車線の青時間をサイクル長と青信号スプリットの積より算定する。

Step 6. 超過流入交通量 $x_e^{(n)}(j, m, k)$ を車線単位の交通量

収支に基づいて算定する。

$$x_e^{(n)}(j, m, k) = x_i^{(n)}(j, m, k) - x_o^{(n)}(j, m, k) \quad (15)$$

$$\begin{cases} x_o^{(n)}(j, m, k) = \xi(j, m, k) \cdot c_x^{(n)}(j, m, k) \\ x_e^{(n)}(j, m, k) \geq 0 \end{cases} \quad (16)$$

Step 7. 渋滞長 $y_c^{(n)}(j, m, k)$ を変換係数 $l_m(j, m, k)$ を用いて車線単位で算定する。

$$y_c^{(n)}(j, m, k) = l_m(j, m, k) \cdot x_e^{(n)}(j, m, k) \quad (17)$$

Step 8. 各信号交差点における信号制御パラメータの関係式に基づいて、全流入路の青信号スプリットや青時間などを車線単位で算定する。

Step 9. もし、次の制御指標

$$\begin{aligned} \max\{|e^{(x)}(j, 1, k)|, |e^{(y)}(j, 2, k)|, |e^{(u)}(j, 3, k)|, \\ |e^{(z)}(j, 4, k)|\} \leq \varepsilon \\ \varepsilon > 0 \end{aligned} \quad (18)$$

を満足すれば、得られたサイクル長と青信号スプリットを最適値としてStep12へ進む。ここで上付添字^(k)(^(ω))(^(μ))(^(λ))は各流入路に対する繰り返し計算回数を表す。

Step10. 一方、次の制御指標

$$\begin{aligned} \max\{|e^{(x)}(j, 1, k)|, |e^{(y)}(j, 2, k)|, |e^{(u)}(j, 3, k)|, \\ |e^{(z)}(j, 4, k)|\} > \varepsilon \\ \varepsilon > 0 \end{aligned} \quad (19)$$

が成立すれば、制御偏差が最大となった流入路の青信号スプリットをきざみ幅 $\Delta r_{gl}(j, m)$ 、 $\Delta r_{gs}(j, m)$ 、 $\Delta r_{gr}(j, m)$ だけそれぞれ微小増加させる。

$$\begin{cases} r_{gl}^{(n+1)}(j, m, k) = r_{gl}^{(n)}(j, m, k) + \Delta r_{gl}(j, m) \\ r_{gs}^{(n+1)}(j, m, k) = r_{gs}^{(n)}(j, m, k) + \Delta r_{gs}(j, m) \\ r_{gr}^{(n+1)}(j, m, k) = r_{gr}^{(n)}(j, m, k) + \Delta r_{gr}(j, m) \end{cases} \quad (20)$$

ここで、すべての流入路において直進交通が主流で $r_{gs}^{(n+1)}(j, m, k) \geq r_{gl}^{(n+1)}(j, m, k)$ 、 $r_{gs}^{(n+1)}(j, m, k) \geq r_{gr}^{(n+1)}(j, m, k)$ なる関係を仮定した。もし、 $r_{gs}^{(n+1)}(j, m, k) > r_{gs, \max}^{(n+1)}$ が成立すればStep11へ進み、 $r_{gs}^{(n+1)}(j, m, k) \leq r_{gs, \max}^{(n+1)}$ が成立する場合はStep 4へ帰る。ここで $r_{gs, \max}^{(n+1)}$ は直進青信号スプリットの上限值を表す。

Step11. サイクル長が次式によってきざみ幅 $\Delta c_y(j, m)$ だけ微小増加される。

$$c_y^{(n+1)}(j, m, k) = c_y^{(n)}(j, m, k) + \Delta c_y(j, m) \quad (21)$$

もし、 $c_y^{(n+1)}(j, m, k) > c_{y, \max}^{(n+1)}$ が成立すればStep12へ進み、 $c_y^{(n+1)}(j, m, k) \leq c_{y, \max}^{(n+1)}$ が成立する場合はStep 2へ帰る。ここで、 $c_{y, \max}^{(n+1)}$ はサイクル長の上限值を表す。

Step12. 探索されたサイクル長と青信号スプリットの最適値を用いて、幹線道路の連続通過帯幅を最大にする平等オフセットがFieserの方法により探索される。

このバランス制御アルゴリズムは、初期時刻 $k=1$ から最終時刻 $k=k_f$ まで、また、 $j=1$ から $j=N$ までの全信号

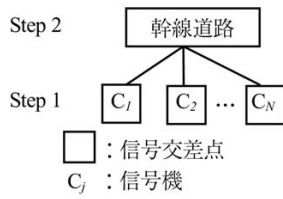


Fig.5 バランス制御アルゴリズムの階層構造

Table 1 バランス制御アルゴリズムの評価関数

Step	評価関数
Step 1	Minimize $J_a(k)$ c_y, r_g, t_{off}
Step 2	Minimize $J_a(k)$ r_g, t_{off}

交差点について逐次実行される。この信号制御アルゴリズムでは、サイクル長と青信号スプリットの初期値は下限値より出発し、式 (18) の制御指標が満足されるまで式 (20) と式 (21) によって修正される。また、オフセット制御の関係からサイクル長はN信号交差点の最大値が共通に設定され、各信号交差点の青信号スプリットは改めて再計算される。バランス制御アルゴリズムの階層構造と評価関数をFig.5およびTable1に示す。最初にStep1で全ての信号交差点に共通に設定されるサイクル長が決定される。つぎに、Step 2 で幹線道路上の青信号スプリットとオフセットが、評価関数を最小にするように探索される。

4. シミュレーション結果と考察

二方向交通幹線道路における渋滞長のバランス制御アルゴリズムを用いてFig.6に示される福山市内の信号交差点において朝夕のラッシュ時にシミュレーションを行った。各信号交差点の流入交通量は測定値を基に設定した。また、基準入力 $l_i(j,m,k)$ は、すべての流入路において 0 m に設定した。

まず、大型車混入率と平均車頭間隔の関係を線形で近似したものをFig.7に示す。変換係数 $l_m(j,m,k)$ は、このFig.7の関係をjを用いて求められる。次に、直進車線におけるサイクル長単位の流入交通量の変動をFig.8からFig.11に示す。また、渋滞は $j=1$ から $j=4$ の信号交差点において、夕方のラッシュ時に流入交通量の急激な増加により引き起こされている。

バランス制御アルゴリズムでは、サイクル長と青信号スプリットの積で求まる青時間は式 (8) の評価関数を最小にするように探索される。サイクル長は、指標 $x_i'(j,m,k)/c_x(j,m,k)$ が最大となる過飽和信号交差点の流入交通量の変動に対応して探索され、全信号交差点で共通

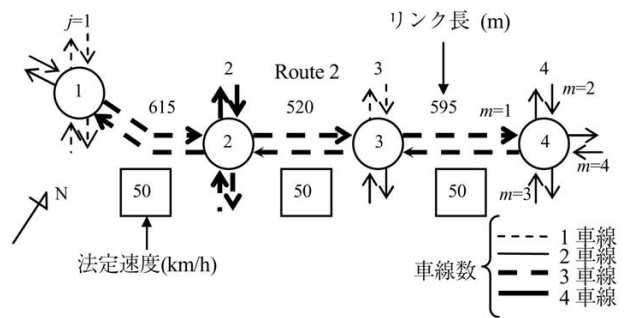


Fig.6 福山市内の二方向交通幹線道路

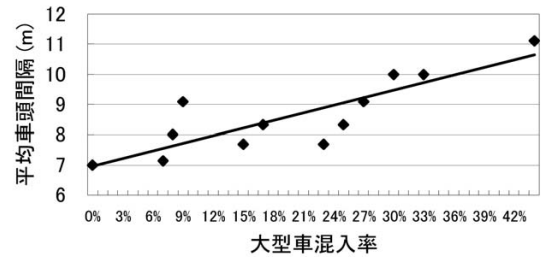


Fig.7 平均車頭間隔と大型車混入率の関係

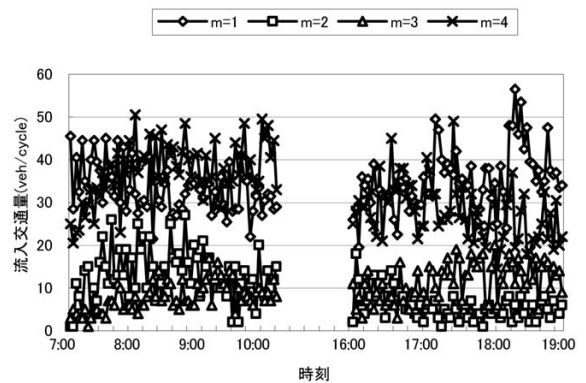


Fig.8 $j=1$ の信号交差点における直進車の流入交通量

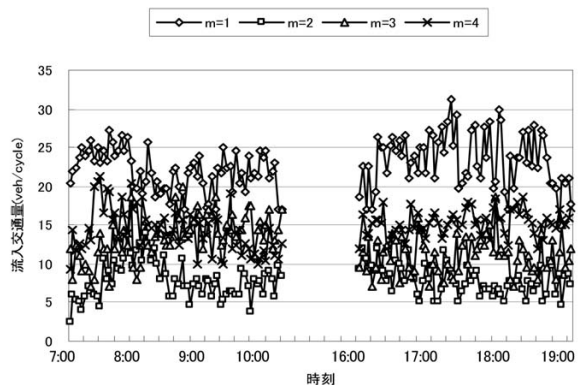


Fig.9 $j=2$ の信号交差点における直進車の流入交通量

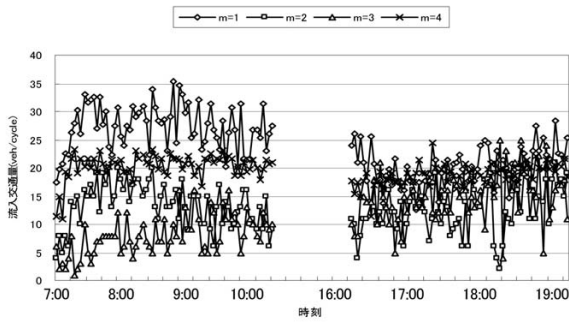


Fig.10 $j=3$ の信号交差点における直進車の流入交通量

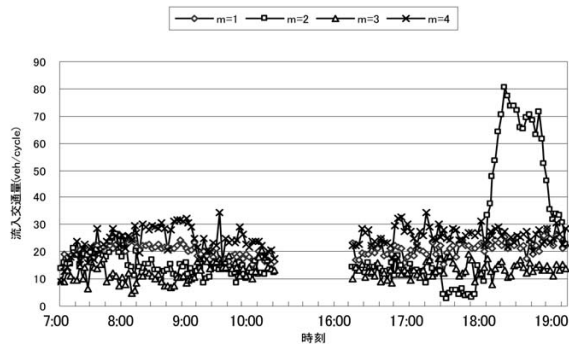


Fig.11 $j=4$ の信号交差点における直進車の流入交通量

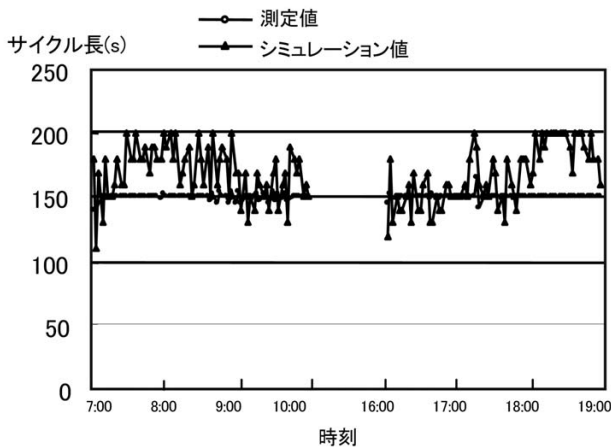


Fig.12 $j=4$ の信号交差点におけるサイクル長のシミュレーション値と測定値の比較

な値に設定される。 $j=4$ の過飽和信号交差点におけるサイクル長のシミュレーション値と測定値を比較すると Fig.12 のようになる。現実のパターン選択法では150秒を中心に小さく変動しているのに対し、シミュレーションでは流入交通量の変動に応じて広範囲に、また適応的に制御されている。 $j=4$ の信号交差点で南北方向直進車に対する青信号スプリットは、Fig.13 に示されるように測定値の変動が小さいのに対し、シミュレーション値が夕方の流入交通量の急激な増加に対応して広範囲に制御されている。

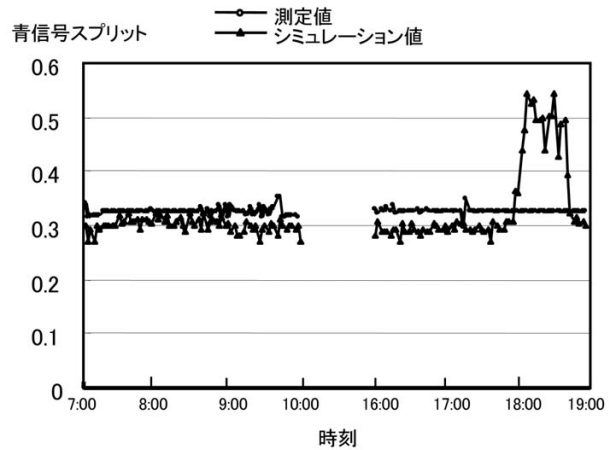


Fig.13 $j=4$ の信号交差点の $m=2,3$ における直進車に対する青信号スプリットのシミュレーション値と測定値の比較

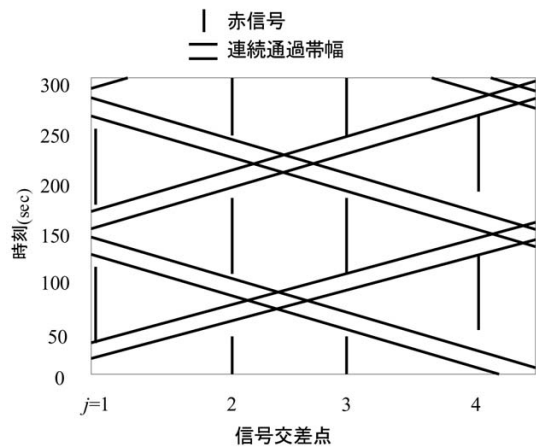


Fig.14 各信号交差点における直進車に対する平等オフセット

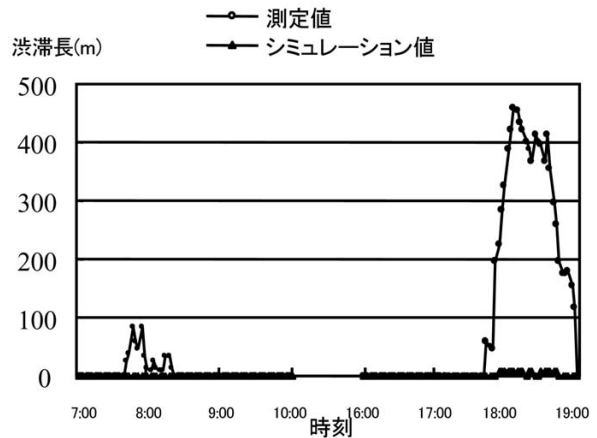


Fig.15 $j=4$ の信号交差点における $m=2$ の直進車線に対する渋滞長のシミュレーション値と測定値の比較

幹線道路の連続通過帯幅を最大にする平等オフセットをFieserの方法により18時30分においてシミュレーションした結果をFig.14に示す。サイクル長は140秒，走行速度は15.3m/sと設定され，得られた連続通過帯幅は17.5秒となった。

この結果，信号交差点の4流入路における渋滞長は，式(8)により定義された評価関数 $J_q(k)$ を最小にするように制御される。実際にいくつかの信号交差点において渋滞が発生しているにも関わらず，バランス制御アルゴリズムにより， $j=1$ と $j=4$ を含む全ての信号交差点の全流入路において渋滞長はほぼ0mになるように制御された。 $j=4$ の信号交差点における渋滞長のシミュレーション結果をFig.15に示す。

5. まとめ

本稿では，二方向交通幹線道路における渋滞長の信号制御システムと信号制御アルゴリズムが，交通流ダイナミクスに基づいてシステム理論的観点から提案された。主な結果は以下のようにまとめられる。

- i) 信号制御システムが二方向交通幹線道路に対し，フィードバック制御を用いて設計される。
- ii) 幹線道路の最適信号制御パラメータが，バランス制御アルゴリズムにより系統的・逐次的に探索される。
- iii) シミュレーション値と現実の幹線道路における測定値の比較から，ここで提案した信号制御システムと信号制御アルゴリズムが，福山市の幹線道路において評価関数を最小にするように有効に機能することを確かめた。

参考文献

- 1) Davison, E.J. and : Decentralized control of traffic networks, IEEE Trans., AC-28, pp.677-688 (1983)
- 2) Hunt, P.B., D.I. Robertson : R.D. Bretherton and R.I. Winton, SCOOT - A Traffic Responsive Method of Coordinating Signals, TRRL Laboratory Report, p.1014 (1981)
- 3) Sakakibara, H., Usami, T., Itakura, S. and Tajima, T.: MODERATO (Management by Origin-Destination Related Adaptation for Traffic Optimization), Proc. of IEEE/IEEJ/JSAI International Conference on Intelligent Transportation Systems, Tokyo, pp.38-43 (1999)