

## 交通ネットワークの渋滞長制御

石川 洋<sup>+</sup> 清水 光<sup>+</sup> 傍田 祐司<sup>++</sup> 小林 正明<sup>+++</sup>

<sup>+</sup>福山大学 工学部 情報処理工学科

<sup>++</sup>福山大学 大学院 工学研究科 情報処理工学専攻

<sup>+++</sup>福山大学 工学部 機械工学科

本稿では、交通需要のサイクル長単位の時間変動に対応して渋滞長をオンラインで制御する信号制御システムと信号制御アルゴリズムについて提案する。最初に、信号交差点の車線単位で成立する交通量収支に基づいて、渋滞長の信号制御システムを離散形時変非線形ダイナミックシステムで表現する。つぎに、渋滞長の総和に関する評価関数が最小化されるように3つの信号制御パラメータを系統的に探索するネットワーク制御アルゴリズムについて提案する。最後に、広島県福山市内交通ネットワークを対象に、提案した信号制御システムとネットワーク制御アルゴリズムのシミュレーション結果について考察する。

## Congestion Length Control for a Traffic Network

Hiroshi ISHIKAWA<sup>+</sup>, Hikaru SHIMIZU<sup>+</sup>, Yuji SOBATA<sup>++</sup> and Masa-aki KOBAYASHI<sup>+++</sup>

<sup>+</sup>Department of Information Processing Engineering

<sup>++</sup>Graduate School of Engineering

<sup>+++</sup>Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering, Fukuyama University

This paper studies a signal control method which controls congestion lengths systematically in a two-way traffic network. 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 network control algorithm in which the three signal control parameters consisting of the cycle length, green split and offset are searched systematically so as to minimize the sum of congestion lengths in the traffic network is presented. From the comparison of congestion lengths between measurement values and simulation values, it is confirmed that the network control algorithm works effectively to reduce the congestion lengths in the traffic network..

### 1. はじめに

近年、経済の発展や生活水準の向上、道路の整備、自動車の技術革新などに伴い、わが国の自動車保有台数はほぼ直線的に増加してきた<sup>1)</sup>。その

結果、交通量が増加し、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する一因になっている。交通渋滞は旅行時間や燃料消費の増加、排気ガスによる大気汚染、騒音などの

社会的マイナス要因を発生させている。交通渋滞を解消、又は軽減する最も有効な対策の1つとして信号制御システムが挙げられる。

信号制御システムの目的は、与えられた道路条件や交通条件のもとで、或る評価関数値を最適化するように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）を統一的に制御することであると考えられる。現在、交通ネットワークの各リンクの交通量や待ち車列長の時々刻々の変動に応じて3つの信号制御パラメータをオンラインで制御する信号制御法として、SCOOT<sup>2)</sup>やSCAT<sup>3)</sup>、STREAM<sup>4)</sup>などが実用化されている。これらのオンライン信号制御法は、3つの信号制御パラメータを個別に制御しており統一性に欠けている。現実の交通ネットワークにおいて、朝夕のラッシュ時に交通量が急激に増加する場合があります、3つの信号制御パラメータを統一、かつ協調的に探索することが望ましいと考えられる。

本稿では、交通需要のサイクル長単位の時間変動に対応して、渋滞長をオンラインで制御する信号制御システムと信号制御アルゴリズムについて提案する。最初に、渋滞長の信号制御システムを交通量収支に基づいて離散形時変非線形ダイナミックシステムで表現する。つぎに、渋滞長の総和に関する評価関数が最小化されるように、3つの信号制御パラメータを系統的に探索するネットワーク制御アルゴリズムについて提案する。最後に、広島県福山市内交通ネットワークにおいて、提案した信号制御システムとネットワーク制御アルゴリズムのシミュレーション結果について考察する。

## 2. 渋滞長制御システム

交通ネットワークの各信号交差点における交通量収支は次式で表される。

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

$$\begin{cases} x_o(i, j, m, k) = \xi(i, j, m, k)c_x(i, j, m, k) \\ x_e(i, j, m, k) \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 $i$ と $j$ は信号交差点の位置を表し、 $m$ は信号交差点への車の流入路（ $m=1$ は東行き、 $m=2$ は南行き、 $m=3$ は北行き、 $m=4$ は西行き）を、 $k$ は時刻をそれぞれ表す(図1参照)。また、 $x_e(i, j, m, k)$ 、 $x_i(i, j, m, k)$ 、 $x_o(i, j, m, k)$ 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。式(2)の $c_x(i, j, m, k)$ は各流入路の交通処理量、 $\xi(k)$ はある交通流のもとで $x_o(i, j, m, k)$ を $c_x(i, j, m, k)$ で除した比率を表す。本稿で対象とする2方向交通ネットワークの交通流を表すと図1のようになる。捌け交通量は、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で制御できるものと仮定し、次式で表す。

$$x_o(i, j, m, k) = f[c_y(i, j, m, k), r_g(i, j, m, k), t_{off}(i, j, m, k)] \quad (3)$$

捌け交通量を制御入力 $u(i, j, m, k)$ で置き換えると、渋滞長の制御システムは以下の非線形ダイナミックシステムで記述される。

$$\begin{cases} x_e(i, j, m, k) = x_e(i, j, m, k-1) + x_i(i, j, m, k) - u(i, j, m, k) \\ y_c(i, j, m, k) = l_m(i, j, m, k)x_e(i, j, m, k) \end{cases} \quad (4)$$

上式で、制御入力の上限は式(2)によって決定される。渋滞長 $y_c(i, j, m, k)$ は、待ち車列の平均車頭間隔 $l_m(i, j, m, k)$ に状態変数 $x_e(i, j, m, k)$ を乗じて求められる。

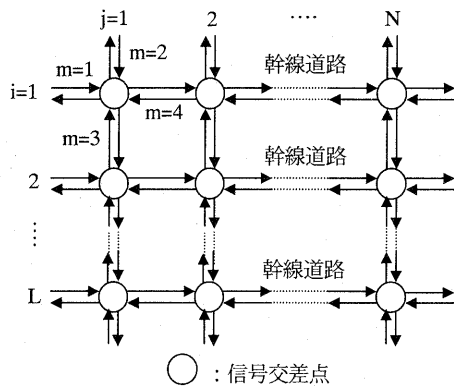


図1 2方向交通ネットワークの交通流

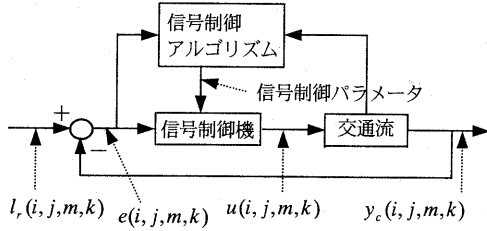


図2 各信号交差点における渋滞長のフィードバック制御システム

信号制御システムで、基準入力に許容渋滞長  $l_r(i, j, m, k)$  を、制御入力に3つの信号制御パラメータを、出力に渋滞長をそれぞれ対応させる。そのとき、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は図2で構成される。制御偏差  $e(i, j, m, k)$  を次式で定義する。

$$e(i, j, m, k) \triangleq l_r(i, j, m, k) - y_c(i, j, m, k) \quad (5)$$

各信号交差点の各流入路における飽和度は一般に一樣ではなく、飽和度が最大となる流入路を優先的に制御する考えより、以下の関数  $g(i, j, m, k)$  を定義する。

$$g(i, j, m, k) = \begin{cases} 0 & e(i, j, m, k) \geq 0 \\ |e(i, j, m, k)| & e(i, j, m, k) < 0 \end{cases} \quad (6)$$

2方向交通ネットワークの渋滞長の信号制御システムの目的は、次式の評価関数  $J_n(k)$  を最小にする制御入力を求めることである。

$$J_n(k) = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^4 g(i, j, m, k) \quad (7)$$

### 3. ネットワーク制御アルゴリズム

ネットワーク制御アルゴリズムは、バランス制御アルゴリズム<sup>9)</sup>を用い、式(7)で表される2方向交通ネットワークの評価関数値を最小化する3つの信号制御パラメータを段階的に探索する。

Step 1. 各幹線道路毎に、式(8)で表される幹線道

路の評価関数  $J_a(k)$  を最小にするように、3つの信号制御パラメータをバランス制御アルゴリズムを用いて探索する。

$$J_a(k) = \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^4 g(j, m, k) \quad i=1,2,\dots,L \quad (8)$$

Step 2. Step1で探索されたサイクル長の最大値を交通ネットワーク内における全ての信号交差点のサイクル長として共通に設定し、式(8)の評価関数  $J_a(k)$  を最小にする残り2つの信号制御パラメータをバランス制御アルゴリズムを用いて再度探索する。

Step 3. 隣接して並行する2つの幹線道路間を接続するリンクのオフセット値  $t_{off}^*(i, j, m, k)$  を、その制約条件のもとで式(7)の評価関数  $J_n(k)$  を最小にするように算定する。

i) 最初に、2つの並行する幹線道路間を接続するリンク間において指標  $x_i'(i, j, m, k)/c_x(i, j, m, k)$  が最大となる信号交差点間のオフセットを算定する。ここで、 $x_i'(i, j, m, k)$  は次式で表される流入交通量を表す。

$$x_i'(i, j, m, k) = x_c(i, j, m, k-1) + x_i(i, j, m, k) \quad (9)$$

ii) 次に、オフセットの制約条件<sup>10)</sup>のもとで残りの信号交差点間のオフセットを算定する。

以上の制御アルゴリズムを  $k=1$  から最終時刻  $k=k_f$  まで繰り返す。

ネットワーク制御アルゴリズムの階層構造と評価関数を図3と表1にそれぞれ示す。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  $c_y(i, j, m, k)$  が探索される。次に、Step2で幹線道路上の信号交差点の青信号スプリット  $r_g(i, j, m, k)$  とオフセット  $t_{off}(i, j, m, k)$  が、評価関数  $J_a(k)$  を最小にするように探索される。最後に、Step3で幹線道路間を接続するリンクのオフセット  $t_{off}^*(i, j, m, k)$  が、その制約条件のもとで

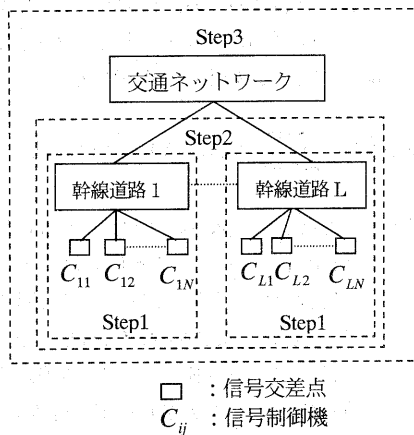


図3 ネットワーク制御アルゴリズムの階層構造

表1 ネットワーク制御アルゴリズムの評価関数

Step	Performance criteria
Step 1	Minimize $J_a(k)$ $c_y, r_g, t_{off}$
Step 2	Minimize $J_a(k)$ $r_g, t_{off}$
Step 3	Minimize $J_n(k)$ $t_{off}^*$

評価関数  $J_n(k)$  を最小にするように求められる。

#### 4. シミュレーション結果と考察

広島県福山市内交通ネットワークにおいて、提案した信号制御システムとネットワーク制御アルゴリズムのシミュレーションを実行した。まず、シミュレーションの対象となる広島県福山市内交通ネットワークにおける各信号交差点の渋滞の状況について述べる。つぎに、信号制御パラメータや渋滞長に関するシミュレーション値と測定値を比較し、提案した信号制御システムとネットワーク制御アルゴリズムの有効性について考察する。

##### 4.1 広島県福山市内交通ネットワーク

シミュレーションの対象となる広島県福山市内交通ネットワークを図4に示す。対象となる信号

交差点は全部で12個あり、渋滞の状況は以下に述べる通りである。最初に、(1.1)信号交差点では、南行き方向において朝夕のラッシュ時に流入交通量が増加し渋滞が発生している。次に、(1.4)信号交差点では、北行き方向において夕方のラッシュ時に若干渋滞が発生している。また、(2.1)信号交差点では、東行き方向の車線数が2車線から3車線に増加しているが、朝夕のラッシュ時における流入交通量の増加により、東行き方向において先詰まり現象が発生し渋滞が多発している。さらに、(2.3)信号交差点では、北行き方向において車線数が2車線から1車線に減少し、朝夕のラッシュ時に北行き方向において渋滞が発生している。(2.4)信号交差点では、南北方向において朝夕のラッシュ時に流入交通量が急激に増加し、特に南行き方向で渋滞が発生している。最後に、(3.4)信号交差点では、北行き方向において流入交通量が増加し、渋滞が発生している。

以上の調査結果より、福山市内交通ネットワークにおいて特に重要な信号交差点は、流入交通量が多い国道2号線上と、(2.4)信号交差点を中心とした南北の信号交差点であるといえる。

##### 4.2 測定値とシミュレーション値の比較

今回のシミュレーションに用いた交通量と各パラメータの測定は、国道2号線上の信号交差点については、7:00~10:00と16:00~19:00、他の信号交差点については、7:00~9:00と17:00~19:00の朝夕のラッシュ時にサイクル長単位で行った。ここでは、特に流入交通量が多く渋滞が発生している信号交差点において、測定値とシミュレーション値を比較し相違点について考察する。基準入力となる許容渋滞長は全流入路に対して  $l_r(i, j, m, k) = 0m$  と設定した。信号交差点の各流入路における直進1車線あたりの流入交通量を図5、6、7に示す。いずれの信号交差点においても流入交通量が或る値を超えて急激に増加し、渋滞が発生している(図10~図12参照)。特に流入交通量が多い国道2号線上の(2.1)、(2.2)、(2.3)、

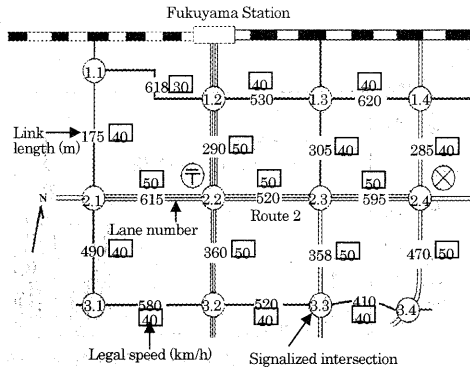


図4 広島県福山市内の2方向交通ネットワーク

(2.4)信号交差点におけるサイクル長の測定値とシミュレーション値を比較すると図8のようになる。現実のパターン選択法では150秒を中心に135秒から169秒の範囲で制御されているのに対し、シミュレーション値は、流入交通量の変動に対応して130秒から200秒までの広範囲で制御されている。サイクル長と青信号スプリットの積で求まる青時間の測定値は、流入交通量の変動に関係なくほぼ一定であるのに対し、シミュレーション値は、流入交通量の変動に即差に対応し、広範囲にきめ細かく制御されていることも確かめられた。平等オフセットをFieserの方法<sup>7)</sup>により18時15分においてシミュレーションした結果を図9に示す。サイクル長は200秒、走行速度は15.3m/sに設定され、得られた連続通過帯幅は33秒となった。以上のように、3つの信号制御パラメータをネットワーク制御アルゴリズムによって制御した結果、渋滞長は図10、11、12に示されるように、ほぼ0mに制御された。また、図13に示すように9つの信号交差点で渋滞が発生しているにも関わらず、ネットワーク制御アルゴリズムを用いると12の信号交差点の全流入路の渋滞長をほぼ0mに制御することができた。

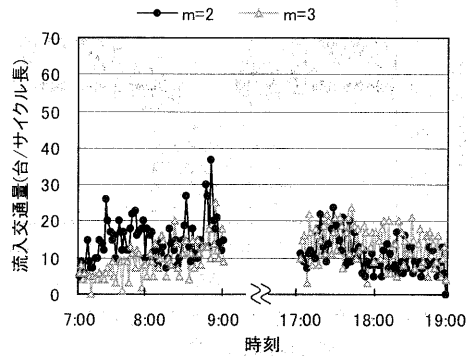


図5 (1.1)信号交差点の流入交通量

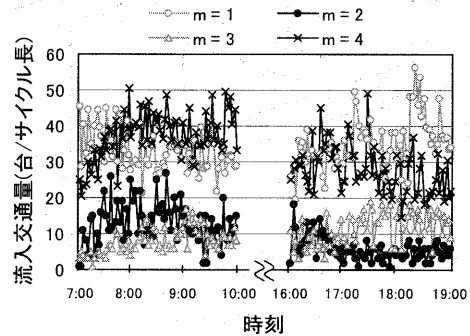


図6 (2.1)信号交差点の流入交通量

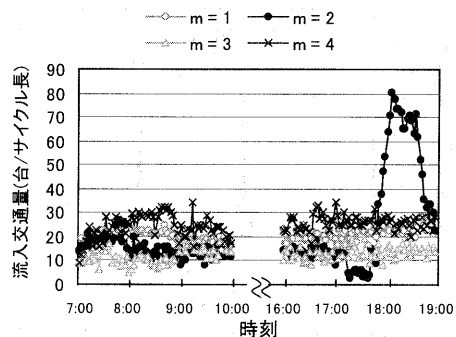


図7 (2.4)信号交差点の流入交通量

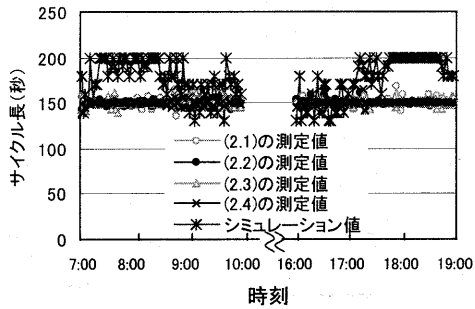


図8 各信号交差点におけるサイクル長のシミュレーション値と測定値の比較

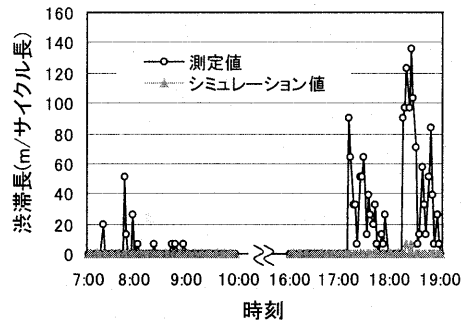


図11 (2.1)信号交差点における東行き方向に対する渋滞長のシミュレーション値と測定値の比較

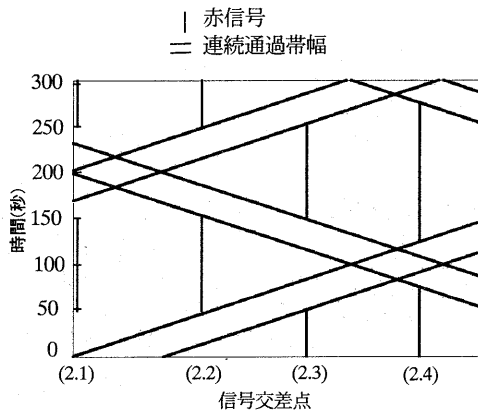


図9 各信号交差点における直進車に対する平等オフセット

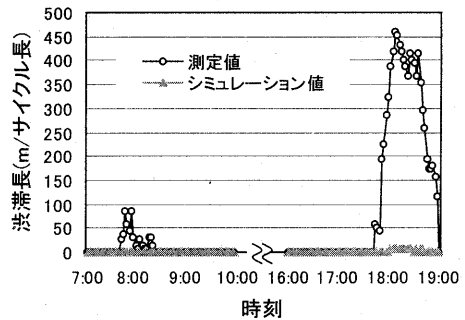


図12 (2.4)信号交差点における南行き方向に対する渋滞長のシミュレーション値と測定値の比較

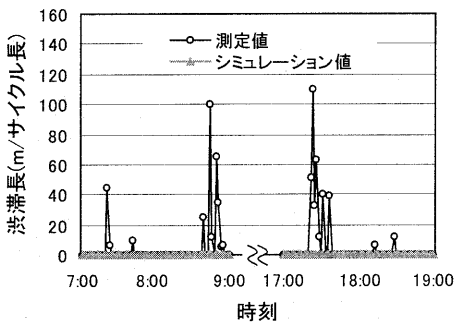


図10 (1.1)信号交差点における南行き方向に対する渋滞長のシミュレーション値と測定値の比較

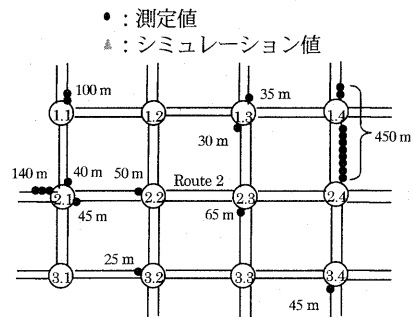


図13 渋滞長のシミュレーション値と測定値の比較

## 5. まとめ

本稿では、2方向交通ネットワーク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を確定的制御システムの観点から提案した。信号制御パラメータや渋滞長に関するシミュレーション値と測定値の比較より、提案した信号制御システムとネットワーク制御アルゴリズムが現実の交通ネットワークにおいて有効に働くことを確かめた。主な研究結果は以下のようにまとめられる。

- (1) 渋滞長の信号制御システムをサイクル長単位の交通量収支に基づいて、離散形時変非線形ダイナミックシステムで記述した。
- (2) 渋滞長の総和に関する評価関数が最小化されるように、3つの信号制御パラメータを系統的に探索するネットワーク制御アルゴリズムについて提案した。
- (4) シミュレーション結果より、提案した信号制御システムとネットワーク制御アルゴリズムは、2方向交通ネットワークの渋滞長制御に有効であると考えられる。

今後、より規模の大きい交通ネットワークへの適用を試みると共に、3つの信号制御パラメータ探索演算の高速化についても研究を進めていく必要があると思われる。

## 参考文献

- 1) 交通工学統計：交通工学, Vol.36, No.5, p.85, (2001).
- 2) P.B.Hunt, D.I.Robertson, R.D.Bretherton and R.I.Winton, "SCOOT-a Traffic Responsive Method of Coordinating Signals," TRRL Laboratory Report 1014, (1981).
- 3) A.G.Sims and K.W.Dobinson; "The Sydney Coordinated Adaptive Traffic (SCAT) System, Philosophy and Benefits" IEEE Trans, VT-29, No.2, pp.130-137, (1980).
- 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).
- 5) 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、Vol.42, No.7, pp.1876-1884, (2001).
- 6) 海老原 "交通システム工学(2)", コロナ社, pp.132-133, (1985) .
- 7) 塙 克郎 "交通信号", 技術書院, pp.56-67, (1966).