

都市道路網の渋滞長制御に関するシステム理論的考察*

A System-Theoretic Study of the Congestion Length Control in Urban Road Networks*

清水 光**・斎藤 威***・藤井温子****・小林正明*****

By Hikaru SHIMIZU**・Takeshi SAITOU***・Haruko FUJII****・Masa-aki KOBAYASHI*****

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、車の技術革新などに伴って、自動車利用者層は拡大し、わが国の自動車保有台数は直線的に増加してきた¹⁾。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、都市道路網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^{2),3)} や SCAT⁴⁾、STREAM^{5),6)} などが実用化されている。また、理想的に仮定された1方向交通ネットワークの各流入路の待ち車列をバランス化する青時間が分散コントローラを用いて求められている⁷⁾。これらのオンライン信号制御法では、3つの信号制御パラメータが各評価関数を最小化するように個別的に制御されている。現実の都市道路網では、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的、かつ協調的に制御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、都市道路網の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システム理論的観点から提案する。

2. 渋滞の解析

信号交差点における待ち車列の形成原理が到着流率(単位時間あたりの交通需要量)と飽和交通流率(台/青1時間)および各信号時間を用いて考察され、与えられた交通条件において待ち車列の消滅時間、遅れ時間などが解析されている^{2),8)}。

都市道路網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、時間単位 T (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。

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

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

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

*キーワード：交通量収支、渋滞長制御、ネットワーク制御アルゴリズム、シミュレーション

**非会員、工博、福山大学工学部情報処理工学科
(広島県福山市学園町1番地三蔵、
TEL084-936-2111(代)、FAX084-936-0080)

*** 正員、工博、警察庁科学警察研究所交通部
(千葉県柏市柏の葉6-3-1、
TEL04-7135-8001(代)、FAX04-7133-9187)

****非会員、弓削商船高等専門学校情報工学科
(愛媛県越智郡弓削町下弓削1000、
TEL0897-77-4665、FAX0897-77-4691)

*****非会員、工修、福山大学工学部機械システム工学科
(広島県福山市学園町1番地三蔵、
TEL084-936-2111(代)、FAX084-936-2023)

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役割を果たす渋滞メカニズムは、(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時発生する。すなわち、

$$\begin{aligned} x_e(k-1) &= 0 \quad \text{and} \\ x_i(k) &> x_o(k) \end{aligned} \quad (3)$$

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

$$\begin{aligned} x_e(k-1) &> 0 \quad \text{and} \\ x_e(k-1) + x_i(k) &\leq x_o(k) \end{aligned} \quad (4)$$

iii) 渋滞は、超過流入交通量 $x_e(k)$ が正値を保つ間継続する。すなわち、

$$\begin{aligned} x_e(k-1) &> 0 \quad \text{and} \\ x_e(k-1) + x_i(k) &> x_o(k) \end{aligned} \quad (5)$$

上式で流入交通量 $x_i(k)$ が与えられると仮定すると、信号交差点の渋滞制御は(4)式の条件を満足するように捌け交通量を制御する問題に帰着させることができる。

3. 渋滞長制御システム

本稿で対象とする2方向都市道路網の交通流を表すと図1のようになる。ここで、 i と j は信号交差点の位置、 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)をそれぞれ表す(図1参照)。捌け交通量は、或る交通流のもとで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。

$$x_o(i, j, m, k) = f[c_y(i, j, m, k), r_g(i, j, m, k), t_{off}(i, j, m, k)] \quad (6)$$

ここで、 $c_y(i, j, m, k)$ 、 $r_g(i, j, m, k)$ 、 $t_{off}(i, j, m, k)$ 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。なお、青信号スプリット $r_g(i, j, m, k)$ は各信号交差点の現示に基づいて設定され、対向方向の交通に対して同じ値が配分される。捌け交通量を或る交通

流のもとで3つの信号制御パラメータで制御できると仮定して、制御入力 $u(i, j, m, k)$ で置き換えると、渋滞長の信号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。

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

上式で、制御入力の上限は式(2)によって決定され、飽和特性を有する。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。

渋滞長の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が構成される⁹⁾。

制御システムにおいて制御偏差 $e(i, j, m, k)$ を次式で定義する。

$$e(i, j, m, k) = \Delta l_r(i, j, m, k) - y_c(i, j, m, k) \quad (8)$$

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。

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

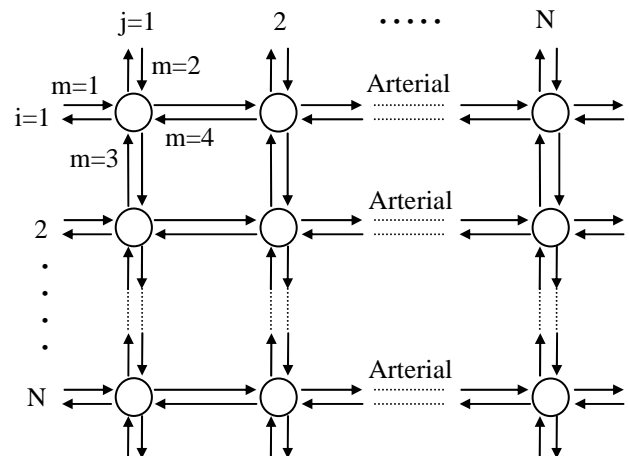


図 - 1 2方向都市道路網の交通流

2 方向都市道路網の渋滞長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統一的に求めることである。

$$J_n(k) = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^4 g(i, j, m, k) \quad (10)$$

2 方向都市道路網の渋滞長制御システムでは、幹線道路の場合と異なってオフセットの閉路に関する制約条件¹⁰⁾が付き、信号制御アルゴリズムも階層的になる。

4 . 信号制御法

ここでは、信号交差点の交通量収支に基づき、渋滞長の総和を最小化させるように3つの信号制御パラメータを系統的に探索する。このパラメータ探索は、現実の制約条件のもとで制御システムの評価関数 $J_n(k)$ を最小化する問題に帰着し、繰り返し計算により最適解が得られる。

Step 1. 各幹線道路毎に、式(11)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⁹⁾を用いて探索する。

$$J_a(k) = \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^4 g(i, j, m, k) \quad i = 1, 2, \dots, L \quad (11)$$

Step 2. オフセット制御の観点から、Step 1 で探索されたサイクル長の最大値を都市道路網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(11) 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、その閉路に関する制約条件のもとで式(10) 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

Fieserの方法¹¹⁾により算定する。ここで、 $x_i'(i, j, m, k)$ は次式で表される渋滞時の流入交通量を表す。

$$x_i'(i, j, m, k) = x_e(i, j, m, k-1) + x_i(i, j, m, k) \quad (12)$$

ii) 次に、オフセットの閉路に関する制約条件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初期時刻 $k=1$ から最終時刻 $k=k_f$ まで逐次繰り返す。

ネットワーク制御アルゴリズムは、最初に、Step 1 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、Step 2 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、Step 3 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、その閉路に関する制約条件のもとで評価関数 $J_n(k)$ を最小にするように求められる。

5 . シミュレーション結果と考察

図2 に示される広島県福山市内道路網の渋滞長制御のシミュレーションは、式(7)の渋滞長信号制御システムに基づき、4.の信号制御アルゴリズムを用いて行った。この時、福山市内道路網の道路条件や交通条件、信号制御条件の調査データをシミュレーションの入力データとして使用した。流入交通量や

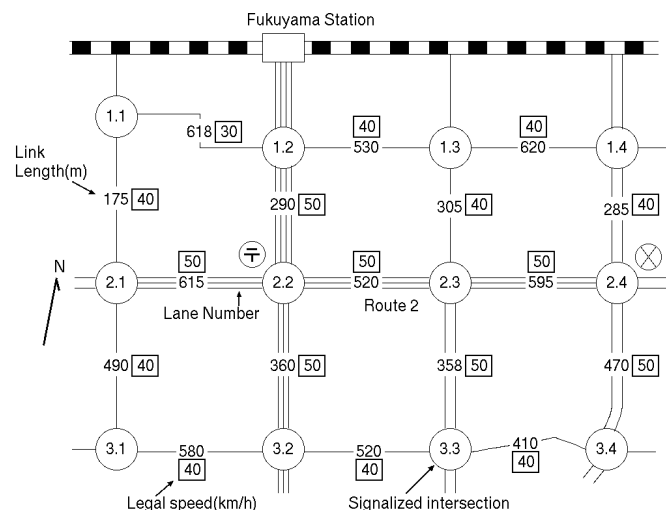


図-2 広島県福山市内の道路網

捌け交通量は、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サイクル長単位で測定した。このシミュレーションでは、入力データが同一であれば同一のシミュレーション結果が得られる。また、単一信号交差点において渋滞長が実用的な精度で再現できることを文献¹²⁾で示している。

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を用いて流入交通量や待ち車列台数の時間変動に対応して広範囲に、きめ細かく、また、評価関数 $J_n(k)$ を最小にするように統一的に制御した結果、(1.4) 信号交差点における南行き方向の直進車線で現実が発生している渋滞長をほぼ 0 m に制御することができた。また、合計9つの信号交差点で渋滞が発生しているにも関わらず、全ての信号交差点の全流入路の渋滞長をほぼ 0 m に制御することができた。

6. まとめ

本稿では、都市道路網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。都市道路網の渋滞長制御では、幹線道路の場合と異なってオフセットに閉路に関する制約条件が付き、信号制御アルゴリズムも階層的でより複雑になる。主な研究結果は以下のようにまとめられる。

- (i) 各信号交差点における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、フィードバック制御を用いて構成した。
- (ii) オフセットの閉路に関する制約条件のもとで、2方向都市道路網の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段階的、かつ統一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。
- (iii) 広島県福山市内の道路網におけるシミュレーション結果と現在使用されているパターン選択法による信号制御の測定値の比較より、提案した渋滞長の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方向都市道路網の渋滞長制御に有効であると考えられる。

今後の課題として以下の点が考えられる。本稿で用いた渋滞長信号制御システムのパラメータ $\xi(i,j,m,k)$ と $l_m(i,j,m,k)$ は交通流や車種別混入率によってそれぞれ変動する。また、車線単位の流入交通量や捌け交通量、リンク走行速度の測定には車両感知器が必要である。

謝辞 本研究を進めるにあたり貴重なご協力をいただいた広島県警察本部交通部の関係者の方々に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 交通工学統計: 交通工学, Vol.36, No.5, pp.85, 2001
- 2) Hunt, P.B., Robertson, D.I., Bretherton, R.D., and Winton, R.I.: SCOOT - A Traffic Responsive Method of Coordinating Signals, TRRL Laboratory Report 1014, 1981
- 3) Bretherton, R.D.: SCOOT - Current Development, Proc. of the 2nd World Congress on Intelligent Transport Systems, Yokohama, Vol.1, pp.364-368, 1995
- 4) Sims, A.G. and Dobinson, K.W.: The Sydney Coordinated Adaptive Traffic (SCAT) System, Philosophy and Benefits, IEEE Trans., VT-29, No.2, pp.130-137, 1980
- 5) Miyata, S., Noda, M. and Usami, T.: 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
- 6) 宇佐美, 榊原: 道路網の信号制御システム, 計測と制御, Vol.41, No.3, pp.205-210, 2002
- 7) Davison, E.J. and Özgüner, Ü.: Decentralized Control of Traffic Networks, IEEE Trans., AC-28, pp.677-688, 1983
- 8) 斎藤 威: 交通渋滞予測のための道路交通現象の再現, 電気学会誌, Vol.117, No.9, pp.600-603, 1997
- 9) 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
- 10) 海老原: 交通システム工学(2), コロナ社, pp.132-133, 1985
- 11) 塙克郎: 交通信号, 技術書院, pp.56-67, 1966
- 12) Shimizu, H. and Ikenoue, J.: Prediction of Traffic Congestion at A Signalized Intersection, Proc. of the First China-Japan International Symposium on Instrumentation, Measurement and Automatic Control, Beijing, pp.372-379, 1989