

広島市内幹線道路における信号制御システムの開発事例

梶田 温子*・清水 光**

A Case Study for System Development of Signal Control System along Arterials in Hiroshima City

Haruko Masuda * , Hikaru Shimizu**

Abstract

The signal control system is most effective to control congestion lengths along arterials. In this paper, the signal control system is described by a nonlinear discrete dynamic system and proposed as the parameter optimization problem which minimizes the sum of congestion lengths at the signalized intersections. The development procedure of the signal control system is proposed under the condition of the road design and the traffic regulation. A case study for the system development of the signal control system is considered along the route 54 in Hiroshima city.

1. はじめに

近年、自動車交通は経済の発展、生活水準の向上、道路網の整備、自動車の技術革新などに伴って発展してきた。自動車交通は、わが国の交通機関の中で年間の旅客総輸送量や貨物総輸送量が最も多く、その重要性を一段と増している^[1]。

一方、自動車交通の発展に伴い、都市道路網の幹線道路を中心とした朝夕のラッシュ時における交通渋滞の発生や、交通事故による死亡や負傷、有害化学物質の排出などの社会的問題が発生している。現在まで、交通流の円滑化や安全化、環境負荷の低減化を図るため、道路の整備や交通規制、信号制御^[2]~^[4]、動的経路誘導^[5]などについて研究開発が進められてきた。これらの対策の中で、信号制御システムは、交通量の時間変動に対応してサイクル長や青信号スプリット、オフセットから構成される3つの信号制御パラメータを評価関数が最適化されるようにオンラインで探索するため、交通渋滞を解消または軽減する最も有効なシステムの一つであると考えられる。ここで、3つの信号制御パラメータは以下のように定義される^[6]。サイクル長は信号表示によ

て与えられる現示が一巡する間の所要時間のことであり、青信号スプリットはサイクル長に対する青信号時間の比率を表し、オフセットは基準時点から各信号機の青信号開始時点のズレを絶対オフセット、隣接信号機間の青信号開始時点のズレを相対オフセットという。

現在実用化されている信号制御システムとして、SCAT^[2]やSCOOT^[3]、MODERATO^[4]などが挙げられる。これらは、遅れ時間の減少などで一定の効果のあることが確認されている。

本稿では、広島市内幹線道路の信号制御システムを開発するために、広島市内国道54号線における信号制御システムの一開発手法について提案する。最初に、3つの信号制御パラメータを渋滞長の総和が最小化されるように探索する信号制御システムを提案する。つぎに、道路設計と交通規制の条件が与えられたもとで、信号制御システムを体系的に開発する手順について提案し、最後に、国道54号線の複数信号交差点における道路特性や交通特性、信号制御特性について解析する。

*情報工学科

**福山大学

2. 信号制御システム

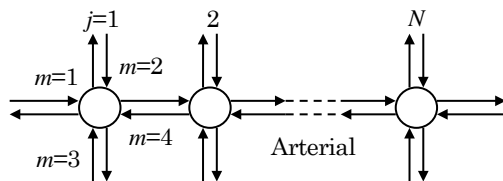
2.1 システムの記述

信号制御の対象となる交通流ダイナミクスを車線単位、サイクル長単位で記述する。図1に示される信号交差点の各車線において、時間 ΔT （ここではサイクル長に等しい）で以下の交通量収支が成立する。

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

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

ここで、 j は信号交差点の位置、 m は車の流入路($m=1$ は東行き、 $m=2$ は南行き、 $m=3$ は北行き、 $m=4$ は西行き)をそれぞれ表し、時刻 $k \cdot \Delta T$ ($k=1, 2, \dots, k_f$)は、表現を簡単にするために単に k と表すことにする。また、 $x_e(j, m, k)$ 、 $x_i(j, m, k)$ 、 $x_o(j, m, k)$ はそれぞれ超過流入交通量、流入交通量、捌け交通量を表し、 $\psi_x(j, m, k)$ は各流入路の交通処理量、 $\xi(j, m, k)$ はある交通流のもとで $x_o(j, m, k)$ を $\psi_x(j, m, k)$ で除した比率で捌け率と呼ぶことにする。(2)式の $x_e(j, m, k)$ に関する制約条件は、物理的な意味に基づいている。捌け交通量をある交通流のもとで信号制御パラメータで制御できると仮定して制御入力 $u(j, m, k)$ で置き換えると、渋滞長の信号制御システムは次式の非線形ダイナミックシステムで記述される。



○ : Signalized intersection

図1 二方向交通幹線道路

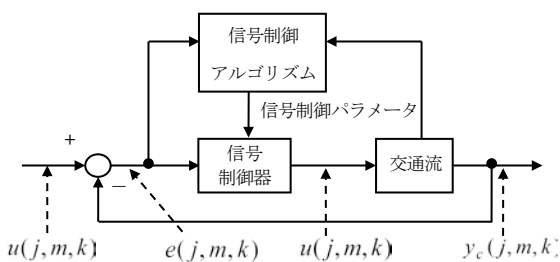


図2 各信号交差点における渋滞長のフィードバック制御システム

$$\begin{cases} x_e(j, m, k) = x_e(j, m, k-1) + x_i(j, m, k) - u(j, m, k) \\ y_c(j, m, k) = l_m(j, m, k) \cdot x_e(j, m, k) \end{cases} \quad (3)$$

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。ここで、変換係数 $l_m(j, m, k)$ は待ち車列の平均車頭間隔に相当し、車種構成によって変動する。制御入力 $u(j, m, k)$ は(2)式の捌け交通量 $x_o(j, m, k)$ に相等し、交通処理量 $\psi_x(j, m, k)$ の特性に基づき飽和特性を有する。信号制御システムで、基準入力に許容渋滞長 $l_r(j, m, k)$ 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図2で構成される。制御システムにおいて、制御偏差 $e(j, m, k)$ を次式で定義する。

$$e(j, m, k) \triangleq l_r(j, m, k) - y_c(j, m, k) \quad (4)$$

二方向交通幹線道路の信号制御システムは、流入交通量が車両感知器によりサイクル長単位で入力されると仮定すると、渋滞長の総和で定義される次式の評価関数 $J_a(k)$ を最小にする制御入力である3つの信号制御パラメータの最適化問題として記述される。

$$J_a(k) = \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^4 g(j, m, k) \quad (5)$$

ここで、 N は幹線道路の信号交差点数を示し、関数 $g(j, m, k)$ は制御偏差に基づいて以下のように定義される。

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

2.2 信号制御アルゴリズム

二方向交通幹線道路における信号制御法としてバランス制御アルゴリズムを使用する[7]。ここで、バランス制御アルゴリズムとは、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3つの信号制御パラメータを統一的、逐次的に探索する計算法である。バランス制御アルゴリズムでは、最初に、オフセット制御の観点から、 N 個の信号交差点におけるサイクル長の最大値がすべての信号交差点に共通に設定される。つぎに、各信号交差点の青信号スプリットとオフセットが評価関数 $J_a(k)$ を最小にするように探索される。

3. 信号制御システムの開発手順

幹線道路の交通流の円滑化と安全化を交通流ダイナミクスの制御の観点から実現する確定的信号制御システムの開発は、幹線道路の道路設計や交通規制が与えられていると仮定すると、図3に示される手順で行われる。

最初に、道路解析では、交通容量解析や信号制御に必要な幹線道路の各リンクのリンク長や車線数、車線幅員、側方余裕、設計速度、交通規制などをはじめ、各信号交差点の交差形状や車線構成などについて調査する。交通解析では、交通量収支や交通容量を解析するために必要な信号交差点の各流入路における流入交通量や待ち車列台数、大型車混入率、路線バスの運行頻度、捌け交通量、左折率などについて調査する。交通容量解析では、車線幅員、側方余裕、大型車混入率、路線バスの運行頻度などの補正率を用いて交通容量を算出する。信号制御システムの記述では、交通流ダイナミクスの表現や制御システムの構成、評価関数などについて決定する。信号制御アルゴリズムの開発では、幹線道路の信号交差点の各流入路における渋滞長の総和を最小にする3つの信号制御パラメータを統一的に探索する計算手順を求める。シミュレーションでは、対象とする幹線道路の道路条件や交通条件をはじめ、信号制御パラメータの上下限值やきざみ幅、初期値などを入

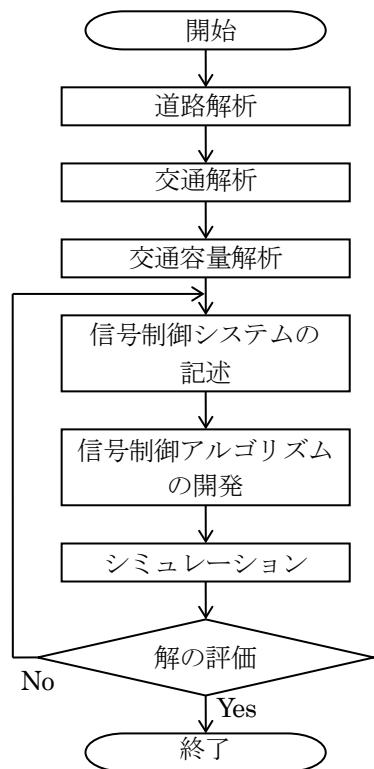


図3 信号制御システムの開発手順

力し、シミュレーションプログラムを用いて3つの信号制御パラメータの最適値や各流入路の渋滞長などを求める。最後に、求められた解が現実的に妥当で満足できるものであればシミュレーションは終了し、そうでなければ信号制御システムの記述に戻って再検討する。

4. 開発事例

ここでは、3章で述べた信号制御システムの開発手順のうち、最初の道路解析と交通解析について、広島市内国道54号線の4つの信号交差点を対象に考察する。4つの信号交差点の車線数とリンク距離、法定速度を図4に示す。車線数は3または4車線で、法定速度は、すべてのリンクにおいて50km/hとなっている。

信号交差点の名称は、 $j=1$ から $j=4$ の順に、それぞれ広島城南、紙屋町、白神社前、広島市役所前となっている。

4.1 道路解析

信号制御の対象となる4つの信号交差点の車線構成と現示について整理すると以下ようになる。図4の $j=1$ に位置する広島城南信号交差点の車線構成と現示を示すと図5のようになる。ここで、現示とは、信号表示によって通行権を与える或る交通流あるいは交通流の組み合わせと定義されている。この信号交差点はT形交差となっており、東行き流入路と南北方向の道路が国道54号線となっている。東行き流入路は、直進2車線、右折2車線の合計4車線から、また、西行き流入路は左折1車線、直進2車

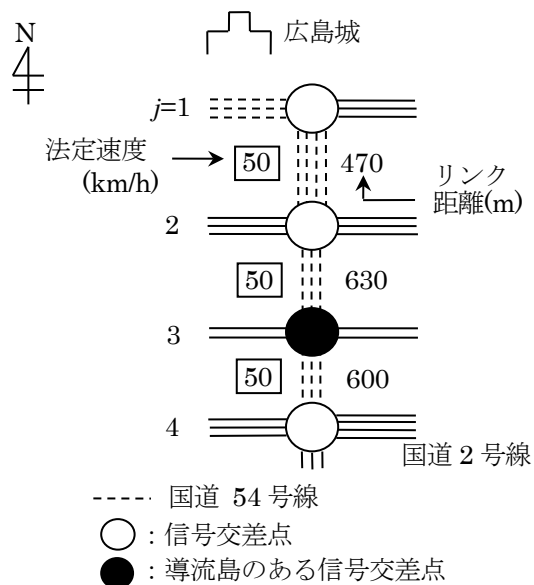


図4 国道54号線の道路特性

線の合計3車線からそれぞれ構成されている。北行き流入路は、左折2車線、右折2車線の合計4車線から構成されている。現示数は3現示で、1φでは西からの直進と右折の交通と東からの直進と左折の交通、また、歩行者の横断が認められている。2φでは西からの直進と右折、東からの左折、南からの左折の交通がそれぞれ認められている。また、3φでは西からの左折と南からの右左折の交通がそれぞれ認められており、全体的に工夫した現示になっていると考えられる。

次に、図4のj-2に位置する紙屋町信号交差点の車線構成と現示を示すと図6のようなになる。交差形状は十字交差で、南北方向に国道54号線が通り、東西方向および南方向に路面電車が通っている。東行き流入路と西行き流入路、北行き流入路は、いずれも直左1車線、直進1車線、右折1車線の合計3車線から構成されている。それに対し、南行き流入路は直左1車線、直進2車線、右折1車線の合計4車線から構成されている。現示数は4現示で、1φと3φで東西方向と南北方向の直進と右左折の交通がそれぞれ認められている。また、2φで東西方向の右折の交通が、4φで南北方向の右折の交通がそれぞれ認められている。

また、図4のj-3に位置する白神社前信号交差点の車線構成と現示を示すと図7のようなになる。交差形状は十字交差で、南北方向に国道54号線が通り、それに沿って路面電車が通っている。東行き流入路と西行き流入路は、直左1車線、直進1車線、右折

2車線の合計4車線から構成されている。それに対し、南行き流入路と北行き流入路は直左1車線、直進1車線、右折1車線の合計3車線から構成されている。現示数は4現示で、1φと3φで東西方向と南北方向の直進と右折の交通および歩行者の横断がそ

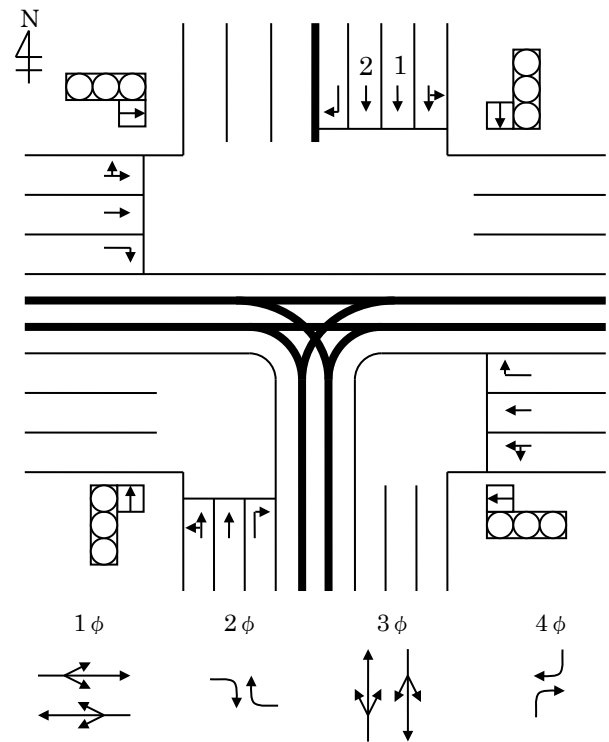


図6 紙屋町信号交差点の車線構成と現示

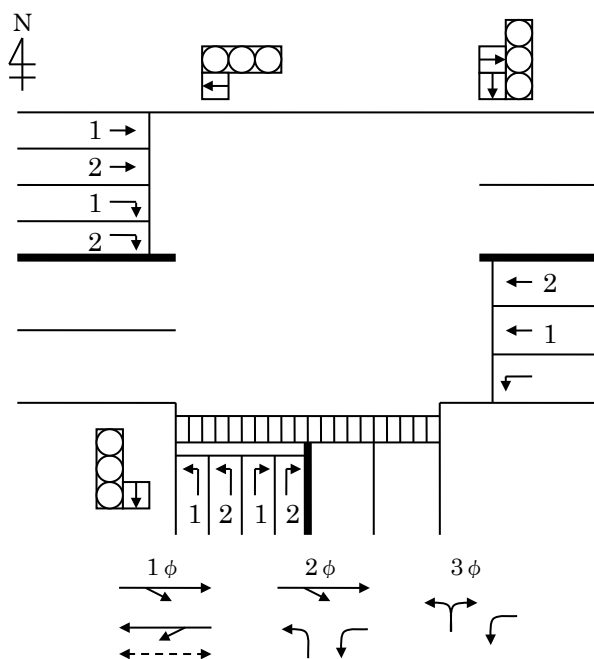


図5 広島城南信号交差点の車線構成と現示

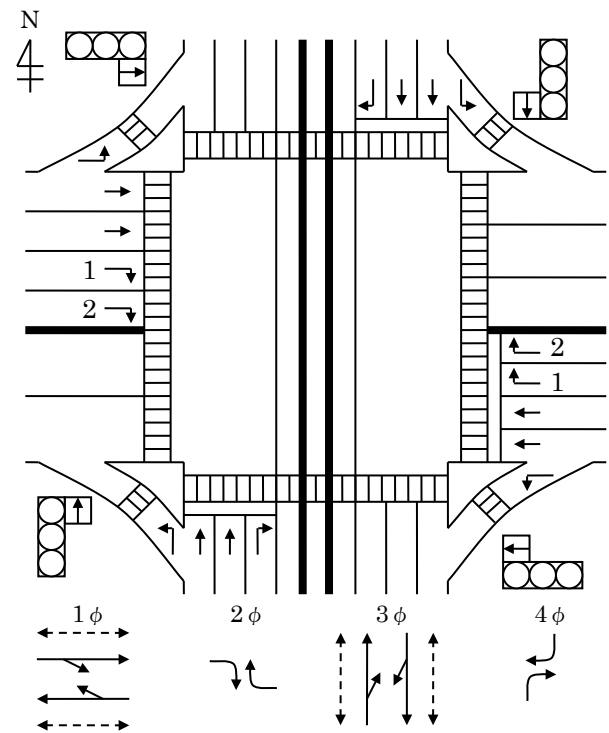


図7 白神社前信号交差点の車線構成と現示

れぞれ認められている。また、2φと4φで東西方向と南北方向の右折の交通が認められている。この信号交差点では全ての流入路に導流島が設置されており、他の通行を妨げなければどの現示においても左折の通行が認められている。

最後に、図4のj=4に位置する広島市役所前信号交差点の車線構成と現示を示すと図8のようになる。交差形状は十字交差で、東西方向に国道2号線が通り、南行き流入路が国道54号線の終点となっており、広島市内で交通量が最も多い信号交差点の一つである。東行き流入路は、左折1車線、直進3車線、右折2車線の合計6車線から、また、西行き流入路は直左1車線、直進2車線、右折2車線の合計5車線からそれぞれ構成されている。国道54号線からの流入路となる南行き流入路は、左折1車線、直進2車線、右折1車線の合計4車線から構成されている。それに対し、北行き流入路は直左1車線、直進1車線、右折1車線の合計3車線から構成されている。現示数は4現示で、1φと3φで東西方向と南北方向の直進と右左折の交通および歩行者の横断がそれぞれ認められている。また、2φで東西方向の右左折の交通が、4φで南行き方向の右左折の交通と北行き方向の右折の交通がそれぞれ認められている。

4.2 交通特性

上記の4つの信号交差点の全ての流入路において

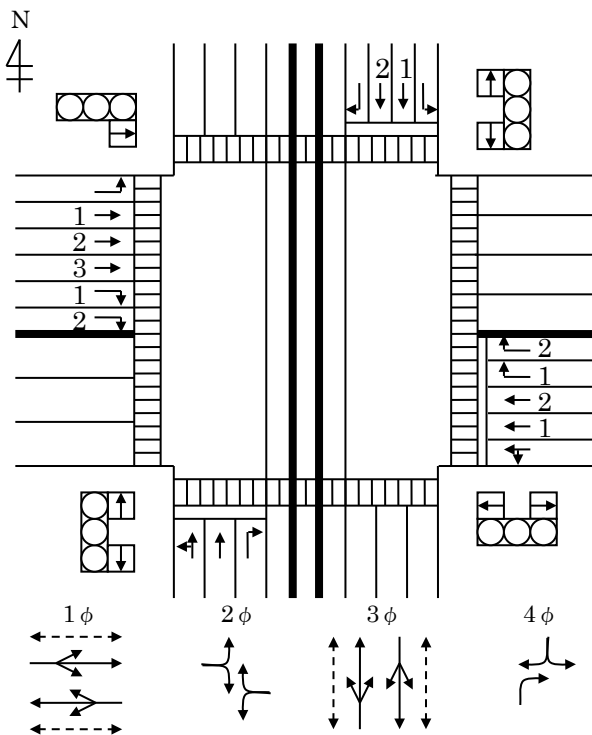


図8 広島市役所前信号交差点の車線構成と現示

交通量を車線単位、サイクル長単位で測定した結果について、超過流入交通量を用いて交通渋滞の発生状況を整理する。ここで、超過流入交通量は、各信号交差点の車線単位、サイクル長単位の交通量収支に基づき、青信号で信号交差点を通過できなかった捌け残り台数を表す。

最初に、広島城南信号交差点では、北行き流入路の右折1の車線において17時10分に超過流入交通量が最大値の5台となっている。

次に、紙屋町信号交差点では、東行き流入路の直左車線において17時20分に超過流入交通量が最大値の12台となった。また、西行き流入路では直左、直進車線ともに、程度は小さいが頻繁に渋滞が発生している。南行き流入路では右折車線で頻繁に渋滞が発生しており、18時35分に最大値の13台となっている。

また、白神社前信号交差点では、東行き流入路と西行き流入路の直左車線において、程度は小さいが頻繁に渋滞が発生している。南行き流入路の右折車線では、図9に示されるように17時40分頃から流入交通量が急激に増加し、図10に示されるように17時48分に最大17台の渋滞が発生した。

最後に、広島市役所前信号交差点では、東行き流入路の右折1の車線において、17時42分に超過流

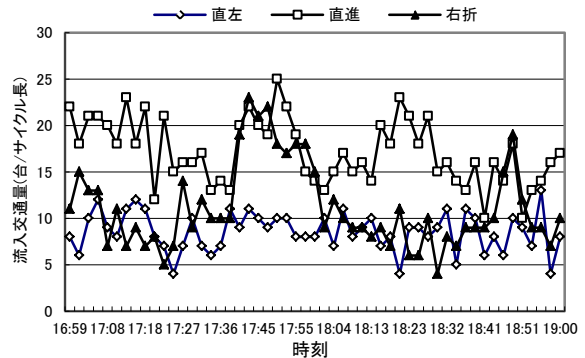


図9 白神社前信号交差点の南行き流入路における流入交通量の時間変動

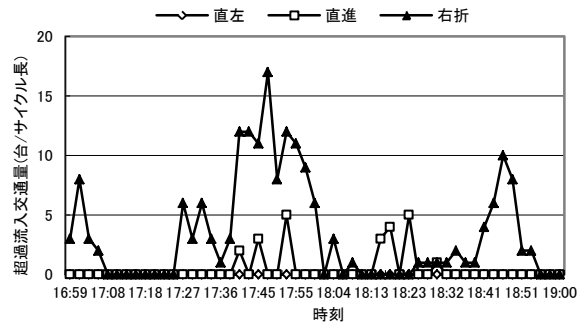


図10 白神社前信号交差点の南行き流入路における超過流入交通量の時間変動

入交通量が最大値の9台となった。また、南行き流入路では右折車線において、北行き流入路では直左車線において、程度は小さいが頻繁に渋滞が発生している。

以上の4つの信号交差点における渋滞発生の主原因は、いずれも流入交通量の急激な増加であることが分かった。

4.3 信号制御特性

上記の4つの信号交差点の全ての流入路において、サイクル長と青信号スプリットの2つの信号制御パラメータについて測定した。測定値に基づき、信号制御特性について考察する。

サイクル長は、現示が一巡する間の所要時間で、一つの信号交差点のいずれの流入路においても等しい。また、青信号スプリットは、青信号時間をサイクル長で除した値で、一つの信号交差点において流入路ごとに異なる。

最初に、広島城南信号交差点におけるサイクル長は、北行き流入路において多少変動しているが、平均すると140秒となっている。また、東行き流入路と西行き流入路の直進青信号スプリットの平均値はそれぞれ0.80と0.51となっている。東行き流入路のスプリット値が西行き流入路のスプリット値を上回っているのは、図5の現示を見れば明らかである。この信号交差点のスプリット値が他の信号交差点の値に比べて大きい理由として、この信号交差点がT形交差であることと交通流の特性に起因しているものと考えられる。

次に、紙屋町信号交差点のサイクル長は、すべての流入路において多少の変動はあるものの、平均すると140秒となっている。また、直進青信号スプリットは、国道54号線上の流入路が平均0.40であるのに対し、交差道路側は平均0.30と小さくなっており、交通量の比を反映しているものと考えられる。

また、白神社前信号交差点のサイクル長は、図11に示されるように、全ての流入路において平均すると140秒となっている。図11でサイクル長の測定値が流入路によって異なっているのは、測定日の違いに基づいている。直進青信号スプリットは、図12に示されるように、国道54号線上の流入路が平均0.34であるのに対し、交差道路側は平均0.42と大きくなっている。これは、交差道路が平和大通りであり、交通量が多くなっているためにスプリット値が大きく割り当てられているものと考えられる。

最後に、広島市役所前信号交差点のサイクル長は北行き流入路と西行き流入路で大きく変動しており、平均値は160秒と全ての信号交差点の中で最も大き

くなっている。この理由として、この信号交差点は国道2号線と国道54号線が交差しており、いずれの流入路も交通量が非常に多いためであると考えられる。また、直進青信号スプリットは、国道54号線上の南行き流入路が平均0.45であり、それに交差する国道2号線上の流入路が0.50となっている。このことから、より流入交通量の多い国道2号線に青信号時間をより多く割り当てていることが明らかになった。

5. まとめ

本稿では、幹線道路における信号制御システムの一開発手法について提案し、広島市内国道54号線の4つの信号交差点における道路特性や交通特性、信号制御特性について車線単位で解析した。その結果を要約すると以下ようになる。

- i) 渋滞は右折車線で多く発生しており、その原因は流入交通量の急激な増加によることが分かった。
- ii) サイクル長は、図4の $j=1$ から $j=3$ までの信号交差点において平均140秒であった。それに対

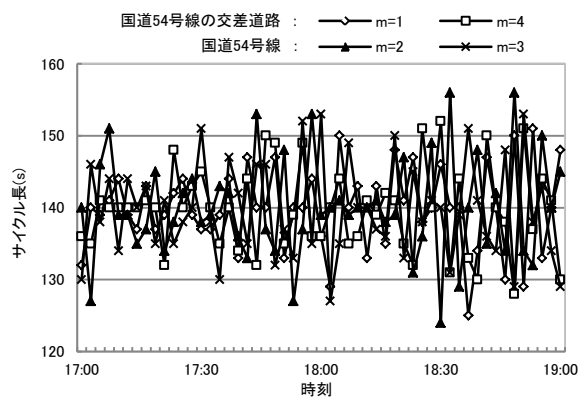


図11 白神社前信号交差点におけるサイクル長の時間変動

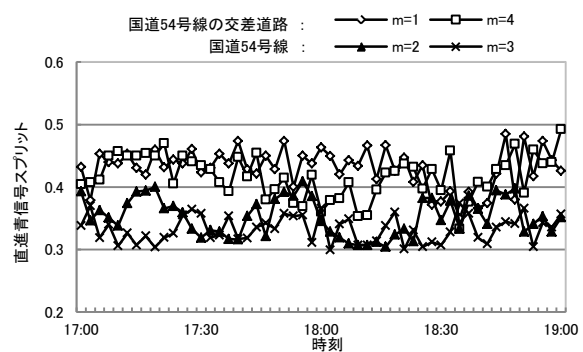


図12 白神社前信号交差点における直進青信号スプリットの時間変動

- iii) し、 $j=4$ の信号交差点では平均 160 秒と最大値を示した。これは、この信号交差点が主要幹線道路の国道 2 号線と国道 54 号線が交差しているためであると考えられる。
- iv) 青信号スプリットは、 $j=1$ と $j=2$ の信号交差点では国道 54 号線上の流入路により大きく割り当てられていた。それに対し、 $j=3$ と $j=4$ の信号交差点では交差道路の流入路により大きく割り当てられていた。これは、この交差道路がそれぞれ平和大通りと国道 2 号線となっており、交通量がより多いためであると考えられる。
- v) 現実の信号制御は、基本的に妥当性のあるものであることが分かった。

今後、国道 54 号線の 4 つの信号交差点を対象に図 3 の信号制御システムの開発手順に従ってシミュレーションを実行し、より有効な渋滞制御システムの開発を目指す。

参考文献

- [1] 国道交通省：国土交通白書，ぎょうせい（2008）
- [2] 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)
- [3] 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)
- [4] K. Hayashi and M. Sugimoto : Signal Control System (MODERATO) in Japan, Proc. of IEEE/ IEEJ/ JSAI International Conference on Intelligent Transportation Systems , pp.988-992 (1999)
- [5] 天目，山口：道路網の動的経路誘導システム，計測と制御，Vol.41, No.3, pp.211 -216 (2002)
- [6] 交通工学用語辞典，技術書院（1984）
- [7] 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)