

信号制御システムのための交通処理量の解析

梶田 温子*・清水 光**

Analysis of the Net Traffic Flow Rate for Signal Control System

Haruko Masuda*, Hikaru Shimizu**

Abstract

The signal control system is most effective to control congestion lengths along arterials. Then, the net traffic flow rate is the most important values needed to describe the volume balance. In this paper, the net traffic flow rate according to the variation of the traffic conditions is analyzed.

1. はじめに

自動車交通は、ドア・ツ・ドアの輸送や時間の制約がない、高機能化などの特長を有し、我が国の自動車保有台数はほぼ増加の一途をたどってきた。その結果、自動車交通量が増加し、交通渋滞や交通事故、燃料消費、CO₂排出量などの増加をもたらしてきた。

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、道路の整備や交差点の改良、交通規制の実施をはじめ、信号制御システム^{[1]-[4]}や動的経路誘導システム^[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、信号交差点への流入交通量やリンク走行速度などの時間変動に応じ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。

現在我が国で実用化されている MODERATO^[6]や我々が提案しているパラメータ最適化法^[4]では、交通流ダイナミクス^[7]の記述や渋滞のメカニズムの説明に交通容量や交通処理量を用いている。ここで、道路の交通容量には基本交通容量をはじめ可能交通容量や設計交通容量が定義されている^[8]。基本交通容量は、理想的な道路条件・交通条件下において、道路の単位断面を1時間に通過し得る乗用車の台数である。可能交通容量は、現実の対象道路における道路条件・交通条件下の交通容量であり、基本交通容量の値に車線幅員や側方余裕などの補正を行って求める。設計交通容量は、道

路の計画や設計時において、道路が提供すべきサービスの質として交通量の変動に着目した計画水準で代表させ、それに応じた低減率を可能交通容量に乗じて求めるものである。この値は、車線数の算定に使われる設計基準交通量や混雑度による評価の際に使われる評価基準交通量のベースとなるものである。ここで、設計基準交通量は、道路の車線数を決める際に用いられる基準値であり、道路の種級区分ごとに設定された道路条件や交通条件に応じて求められた設計交通容量を日単位に換算したものである。この値と道路を通過すると予想される交通量との比較で車線数が決定される。また、交通処理量は、実際の道路条件と交通条件、信号制御条件が与えられたもとで、単位青時間に道路の単位断面を通過し得る乗用車の台数と定義される。

本稿では、信号制御システムで最も基礎となる交通流ダイナミクスで重要な役割を果たす交通処理量を算定するプログラムを開発するための第一段階として、交通処理量を時間変動する交通状況に応じて解析する。まず、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し、渋滞のメカニズムを定式化する。そして、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処理量を車線単位、サイクル長単位で解析し、最後に、信号制御システムの開発における交通処理量の位置づけについて述べる。

2. 交通流ダイナミクス

*情報工学科

平成 27 年 11 月 30 日受理

**広島大学アジア持続可能なモビリティプロジェクト研究センター

2. 1 交通量収支

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。

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

$$\begin{cases} x_e(k) \leq \xi(k) \psi_x(k) \\ x_f(k) \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

ここで、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、 $x_e(k)$, $x_i(k)$, $x_o(k)$ はそれぞれ超過流入交通量, 流入交通量, 捌け交通量を表し, $\psi_x(k)$ 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 $\psi_x(k)$ で除した比率で捌け率と呼ぶことにする。(2) 式の $x_e(k)$ に関する制約条件は、物理的な意味に基づいている。

2. 2 渋滞のメカニズム

信号制御システムで基本的な役割を果たす信号交差点の渋滞のメカニズムは、(1)式の交通量収支に基づいて、以下のように定量的に記述される。ここで、渋滞は(1)式において $x_e(k) > 0$ なる状態と定義する。

- i) 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、

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

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

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

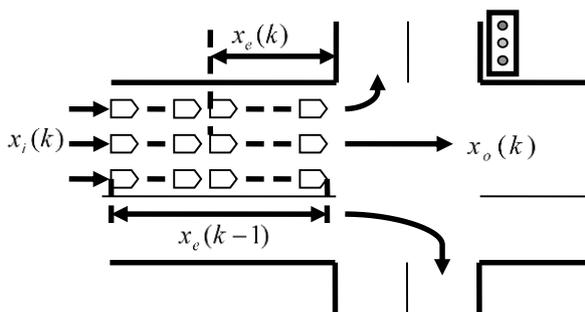


図 1 信号交差点における交通量収支

- 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、

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

上式で、流入交通量 $x_i(k)$ が車線単位、サイクル長単位で車両感知器により測定されると仮定すると、信号交差点の信号制御は(4)式の条件を満足するように捌け交通量 $x_o(k)$ を制御する問題に帰着させることができる。

3. 交通処理量の算定

交通処理量は交通量収支の捌け交通量を決める要因であり、前述したように交通流ダイナミクスの記述において欠くことのできないものである。この交通処理量は交通容量に青信号スプリットを乗じて算定されるため、ここでは交通容量の算定方法について述べる。

交通容量算定の最も基礎となる飽和交通流率の基本値は、車線別に表 1 のように与えられる^{[7],[8]}。この飽和交通流率の基本値は、道路と交通の条件が理想的な場合、すなわち、平坦で標準的な道路幅員で構成されている道路において、横断歩行者による影響がなく、同一方向のみからなる乗用車群で構成される場合に、1 車線当たり青 1 時間当りに通過し得る最大の乗用車換算台数 (PCU : Passenger car unit) を意味する。

つぎに、交通容量に影響を及ぼす諸要因は、道路要因と交通要因、周辺要因の 3 つに大別される。これらの諸要因は、それぞれが複合した状態で作用するものであり、飽和交通流率の基本値の補正は、関連する諸要因の組合せとして行い、それぞれの要因が他の要因に独立して影響すると仮定して、交通容量の算定は、次式より行う。

$$(\text{交通容量}) = (\text{飽和交通流率の基本値})$$

$$\times \alpha_w \times \alpha_{LT} \cdots \times \alpha_B \quad (6)$$

ここで、 α_w , α_{LT} , ..., α_B は道路要因, 交通要因, 周辺要因等による補正值を表す。

表 1 信号交差点の飽和交通流率の基本値

車線の種類	飽和交通流率 (PCU/青 1 時間)
直進車線	2,000
左折車線	1,800
右折車線	1,800

3. 1 道路要因

交通容量に影響を及ぼす要因として、最初に道路要因について述べる。ここでは、車線幅員と縦断勾配、側方余裕幅による補正について述べる。

車線幅員による補正は、標準車線幅員を 3.0m とし、表 2 の補正係数を用いて行う。なお、右折専用車線については、車線幅員 2.75m 以上で 1.00 と設定する。縦断勾配による補正は、基準縦断勾配を 0% として表 3 の補正率を用いて行う。側方余裕とは、車線端より路側にある障害物（建築物、擁壁、電柱、ガードフェンス、駐車車両など）までの距離をいい、それが 0.75m 未満になると表 4 に示す補正を行う⁶⁾。

3. 2 交通要因

ここでは、大型車混入と左折車混入による交通容量の補正について述べる。

車種構成による交通容量の違いは、大型車によるものが最も顕著であるため、表 5 に示すように大型車のみを対象として補正を行う。

つぎに、直進車線に左折車が混入することによる交通容量の補正は、次式を用いて行う。

$$\alpha_{LR} = \frac{100}{(100 - P_L) + E_{LR} \cdot P_L} \quad (7)$$

ここで、 α_{LR} は左折車混入による補正率を、 E_{LR} は左

折車の直進乗用車換算係数を、 P_L は左折車混入率 (%) をそれぞれ表す。

(7)式で示される左折車の直進乗用車換算係数は、左折車 1 台を捌くのに相当する直進乗用車の処理台数であり、この値は横断歩行者の影響がある場合とない場合で異なる。横断歩行者の影響がない場合の左折車の直進乗用車換算係数は、直進車の飽和交通流率の基本値の左折車の飽和交通流率の基本値に対する比として

$E_{LR} \cong 1.11$ とする。横断歩行者の影響がある場合の左折車は、横断歩行者の間隙を縫って左折することになる。横断歩行者の間隙を縫って左折車が左折し得る確率を f_L とすると、横断歩行者の影響がある場合の左折

車の実 1 時間当たりの処理量 c_L は、次式で与えられる。

$$c_L = s_{L0} \times \frac{G - G_p(1 - f_L)}{C_y} \quad (8)$$

ここで、 s_{L0} 、 G 、 C_y 、 G_p はそれぞれ、左折飽和交通流率の基本値 (台/青 1 時間)、青信号時間 (s)、サ

表 4 側方余裕の不足による補正率

側方余裕幅(m)	補正率	
	片側だけの不足	両側不足
0.75 以上	1.00	1.00
0.50	0.98	0.95
0.25	0.95	0.91
0.00	0.93	0.86

表 5 大型車混入による補正率

大型車混入率 (%)	補正率	大型車混入率 (%)	補正率
0	1.00	55	0.72
5	0.97	60	0.70
10	0.93	65	0.69
15	0.90	70	0.67
20	0.88	75	0.66
25	0.85	80	0.64
30	0.83	85	0.63
35	0.80	90	0.61
40	0.78	95	0.60
45	0.76	100	0.59
50	0.74		

表 2 車線幅員による補正率

車線幅員 (m)	補正率
2.50~3.00 未満	0.95
3.00~3.50 未満	1.00

表 3 縦断勾配による補正率

縦断勾配 (%)	補正率
-6	0.95
-5	0.96
-4	0.97
-3	0.98
-2	0.99
-1	1.00
0	1.00
1	1.00
2	0.95
3	0.90
4	0.85
5	0.80
6	0.75

イクル長 (s), 歩行者用青信号時間と青点滅時間の和 (s) を表す.

したがって, 横断歩行者による影響がある場合の左折車の直進乗用車換算係数 E_{Lr} は, 直進乗用車の実 1 時間の処理量と(8)式により算定される c_L との比として次式で与えられる.

$$E_{Lr} = 1.11 \times \frac{G}{G - G_p(1 - f_L)} \quad (9)$$

3. 3 周辺要因

交通容量に影響を及ぼす周辺要因として, 路線バスの停留所に関する補正について述べる.

対象信号交差点の流入路に路線バスの停留所があると, バスベイ等のバス以外の車両の通行の妨げにならない施設がある場合を除き, 流入路の外側車線の交通容量は低下する. このような場合の交通容量の低下は, バス停の位置 (停止線からの上流側の距離) とバスの運行頻度, 並びに路線バスのバス停留所での停車時間に関係している. バス停留所の停止線からの位置とバスの運行頻度による補正率を表 6 に示す. この補正率は, 最外側車線の交通容量の算定にのみ使用する.

3. 4 右左折要因

右折と左折の車線における交通容量は, 対向直進車や横断歩行者の影響を考慮して算定する.

3. 4. 1 右折専用車線

右折専用車線における交通容量 c_R の算定は, 右折に影響を与える要因が現示時間帯によって異なるため, 以下の 3 つの時間帯に分け, (10)式を用いて算定する.

- ① 対向直進車が存在する時間帯

- ② 右折専用現示中
- ③ 信号現示の切替時

$$c_R = c_{R1} + c_{R2} + c_{R3} \quad (10)$$

ここで, c_{R1} , c_{R2} , c_{R3} は, それぞれ対向直進車が存在する時間帯における右折処理量 (台/時), 右折専用現示中における右折処理量 (台/時), 信号現示の切替時における右折処理量 (台/時) を表す.

①の時間帯における右折は, 対向直進車の間隙を縫って行われる. この時間帯の右折処理量は次式で与えられる.

$$c_{R1} = s_{R0} \times \alpha \times \frac{s \cdot G - q \cdot C_y}{C_y(s - q)} \times f_R \quad (11)$$

ここで, s_{R0} , α , s , q , f_R は, それぞれ右折飽和交通流率の基本値 (台/青 1 時間), 3 つの要因 (道路要因, 交通要因, 周辺要因) に基づく補正係数, 対向直進車の飽和交通流率 (基本値), 対向直進車間隙を縫って右折できる確率をそれぞれ表す. 対向直進車の間隙を利用して右折車が右折できる確率は, 対向直進交通量が与えられた条件のもとで, 表 7 の f_R の値として与えられる.

②の時間帯における右折は, 対向直進車の影響を受けないので, この時間帯における右折処理量は次式で与えられる.

$$c_{R2} = s_{R0} \times \alpha \times \frac{G_R}{C_y} \quad (12)$$

ここで, G_R は右折専用現示の長さ (s) を表す.

表 6 路線バスについての補正率

バス停の位置	路線バスの運行頻度 (台/時)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
10m	1.00	0.90	0.79	0.59	0.48	0.44	0.41	0.40	0.38	0.37	0.36
30m	1.00	0.90	0.81	0.64	0.55	0.52	0.49	0.48	0.46	0.45	0.44
50m	1.00	0.90	0.83	0.77	0.74	0.70	0.66	0.63	0.59	0.57	0.54
70m	1.00	0.92	0.87	0.85	0.83	0.81	0.78	0.76	0.74	0.72	0.70

表 7 対向直進交通量と右折確率の関係

対向直進交通量 q (台/時)	0	200	400	600	800	1000
右折確率 f_R	1.00	0.81	0.65	0.54	0.45	0.37

③の時間帯においては、右折専用現示の有無にかかわらず、すでに交差点内に入っていた右折車が捌けることになる。この時間帯における右折処理量は、信号現示の切替回数に依存していることになり、次式で与えられる。

$$c_{R3} = P \times \frac{3600}{C_y} \tag{13}$$

ここで、 P は現示の変わり目に捌ける右折車台数であり、小規模信号交差点では2台、大規模信号交差点では3台が目安である。なお、この台数は、交差点の状況により異なる。

3. 4. 2 左折専用車線

左折専用車線における交通容量 c_L の算定は、左折に影響を与える要因が現示時間帯によって異なるため、以下の3つの時間帯に分け、(14)式を用いて算定する。

- ① 左折専用現示中
- ② 横断歩行者に通行権がある時間帯
- ③ 歩行者赤時間帯

$$c_L = c_{L1} + c_{L2} + c_{L3} \tag{14}$$

ここで、 c_{L1} 、 c_{L2} 、 c_{L3} は、それぞれ左折専用現示中における左折処理量(台/時)、歩行者青時間と青点滅時間帯における左折処理量(台/時)、歩行者赤時間帯における左折処理量(台/時)を表す。

①の時間帯における左折は、横断歩行者の影響を受けないので、この時間帯における左折処理量は次式で与えられる。

$$c_{L1} = s_{L0} \times \alpha \times \frac{G_L}{C_y} \tag{15}$$

ここで、 G_L は左折専用現示の長さ(s)を表す。

②の時間帯における左折は、横断歩行者の間隙を縫って行われるので、左折処理量は次式で与えられる。

$$c_{L2} = s_{L0} \times \alpha \times \frac{G_p}{C_y} \times f_L \tag{16}$$

③の時間帯における左折は、横断歩行者の影響を受けないので、左折処理量は次式で与えられる。

$$c_{L3} = s_{L0} \times \alpha \times \frac{G - G_p}{C_y} \tag{17}$$

4. 信号制御システムの開発

交通流の円滑化と安全化を交通流ダイナミクスのデジタル制御の観点から実現する信号制御システムの開発は、都市道路網の道路条件や交通条件が与えられていると仮定すると、図2に示される手順で行われる。

道路解析では、交通容量解析や信号制御に必要な都市道路網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、待ち車列長、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、必要な変数や定数の値を求め、前述した算定方法に基づいて交通容量を算出する。

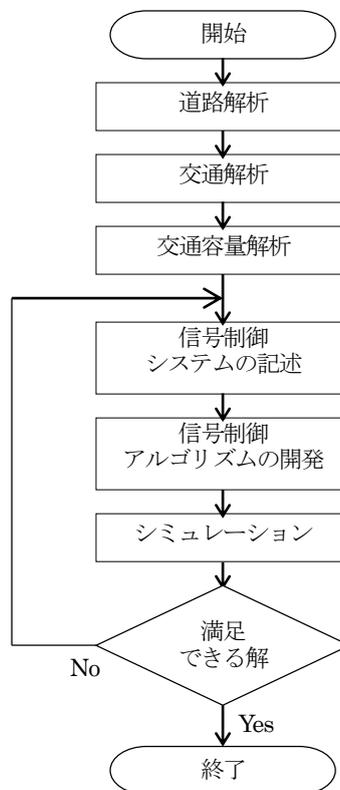


図2 信号制御システムの開発手順

信号制御システムの記述では、システムの記述や評価関数、構成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、都市道路網の各信号交差点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、対象とする道路網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。

5. まとめ

本稿では、信号制御システムで最も基礎となる交通流ダイナミクスで重要な役割を果たす交通処理量を算定するプログラムを開発するための第一段階として、交通処理量を時間変動する交通状況に応じて解析した。その結果を要約すると以下ようになる。

- i) 信号交差点の各流入路において成立する交通量収支に基づいて、交通流ダイナミクスが車線単位、サイクル長単位で記述された。
- ii) 交通量収支に基づいて渋滞の発生や継続、消滅のメカニズムが定量的に記述された。
- iii) 交通容量の算定で重要な要素となる道路要因や交通要因、周辺要因、右左折要因の補正法について具体的に述べ、その算定方法を記述した。
- iv) 道路解析から交通解析、交通容量解析、信号制御システムの記述、信号制御アルゴリズムの開発、シミュレーションを経て、解の判定に至る信号制御システムの開発手順について、体系的に示した。

今後の課題として、時間変動する交通状況を入力データとした交通処理量算定プログラムを作成し、より精度の高い信号制御システムを開発することが挙げられる。

参考文献

- [1] 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)
- [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] 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)
- [4] 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)
- [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] 社団法人 交通工学研究会 : 交通容量データブック 2006 (2007)
- [7] 社団法人 交通工学研究会 : 交通信号の手引 (1994)
- [8] 社団法人 交通工学研究会 : 改訂 交通信号の手引き (2006)