

車線運用と信号現示の組合せに基づく 交差点信号制御設計手法の提案

増井 啓太¹・白畑 健²・伊藤 昌毅³・大口 敬⁴

¹非会員 東京大学大学院 工学系研究科 (〒 153-8505 東京都目黒区駒場 4 丁目 6-1)
E-mail: masui-keita07@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

²学生会員 東京大学大学院 工学系研究科 (〒 153-8505 東京都目黒区駒場 4 丁目 6-1)
E-mail: shiraken@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

³正会員 東京大学大学院 情報理工学系系研究科 附属ソーシャル ICT 研究センター (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7 丁目 3-1)
E-mail: ito.masaki@sict.i.u-tokyo.ac.jp

⁴フェロー 東京大学生産技術研究所 (〒 153-8505 東京都目黒区駒場 4 丁目 6-1)
E-mail: takog@iis.u-tokyo.ac.jp

信号交差点の制御設計では、車線運用を所与に信号現示を設計し、交通需要が交通容量を上回らない限りは車線運用の検討に至らないことが多い。そのため、たとえ当初に設定した車線運用よりも交差点処理能力の高い車線運用が存在しても、現状の枠組みではこれを選定できない。本稿では、信号交差点において設定可能なすべての車線運用と信号現示を組合せとして列挙し、それぞれで生じる遅れや交通容量などを比較評価して制御設計する新たな手法を提案する。横断歩行者と左折車両の交錯が生じる信号交差点に対して提案手法を適用した結果、従来は原理上選定できなかった車線運用のなかには、より小さな遅れを実現するものが存在し得ることが明らかになった。

Key Words: Signalized Intersection, Lane Allocation, Signal Phasing, Delay, Crossing Pedestrians

1. はじめに

信号交差点は、一般道路において交通渋滞の原因となることの多い箇所である。そのため、信号交差点の制御設計は、道路交通の円滑性を保持する観点から非常に重要である。

現在の我が国の交差点設計については、「平面交差の計画と設計」¹⁾において体系的に整理されている。ここでは、特に、単独信号交差点の設計の手順および方法が次のようにまとめられている。

1. まず、現地の道路、交通状況を把握し、それに基づいて車線数や専用・混用の別など、車線運用を決定する。
2. 次に、どのような信号現示方式を設定するかを決定する。
3. その後、以下のような流れで信号制御パラメータの算出を行う。
 - (a) 損失時間を算定する。
 - (b) サイクル長および各現示の有効青時間を仮設定する。
 - (c) 観測または計算での推定により各流入路各車線の飽和交通流率を設定する。計算により推定する場合は、仮設定したサイクル長や有効青時間の値を用いる。
 - (d) ある現示において通行権が与えられる対象車

線それぞれの需要率、現示の需要率、交差点の需要率を求める。

- (e) 損失時間および交差点の需要率を用いて、サイクル長を計算し設定する。
 - (f) 各現示の有効青時間および青信号表示時間を設定する。
 - (g) 設定したサイクル長や有効青時間を適用した際に、横断歩行者への青表示時間や交通容量が十分であることを確認する。
4. 信号制御パラメータを決定した後、交差点内の横断歩道や路面標示などの詳細な幾何構造を決定する。
 5. 最後に、右左折車線長などの流入部の幾何構造を決定し、設計が終了する。

以上で示した信号制御設計の一連の流れにおいて注目すべき点は、車線運用をまず決定し、その後で信号現示を設定していることである。つまり、わが国における信号交差点の制御設計の枠組みの中では、車線運用と信号現示とを「合わせて考える」ことは行われておらず、基本的に、先に設定した車線運用のもとで、適用する信号現示方式が検討されている。実際に、信号現示方式の設定に関連する既往研究²⁾³⁾においても、車線運用は固定のものとして先に与えてから、あるいは明確に設定せずに信号現示方式の検討について議論しており、両者を組み合わせて考えることについては言及していない。

しかしながら、車線運用が異なると適用可能な信号現示方式の候補も異なる。現状の枠組みでは、適用する信号現示方式の選択肢が車線運用を設定した段階で限定され、より良い車線運用と信号現示方式の組合せが必ずしも選定されない。

これらの内容を踏まえ、本稿では、単独信号交差点の制御設計において、車線運用と信号現示方式を「組み合わせて」考える。そして、既存の方法では検討が不十分であると考えられるこれらの事項を制御設計の枠組みの中で評価する考え方を整理し、その必要性や有効性を示すことを通して、信号交差点のより良い制御設計の実現に寄与することを目指す。

本稿は全 4 章から構成される。第 2 章で本稿で提案する、車線運用と信号現示の設計を組合せた新たな信号制御設計手法を説明する。第 3 章では、横断歩行者と左折車両の交錯が生じる信号交差点に対して提案手法を適用し、提案手法の有効性を評価する。最後の第 4 章で、本稿で得られた結果をまとめ、結論を述べる。

2. 組合せ設計手法の提案

(1) 概要

単独交差点における信号制御設計の枠組みにおいて車線運用と信号現示を組み合わせるために、本稿では、信号交差点において設定可能なすべての車線運用と信号現示を組合せとして列挙し、それぞれで生じる遅れや交通容量などといった交差点処理能力を比較することによって制御設計を行う手法を取る。具体的には、ある車線運用と信号現示の組合せに対して、①この組合せを前提とした場合に信号制御によって被る遅れが最も小さくなるような信号切り替えタイミングを求めるとともに、②得られた信号切り替えタイミングに従って信号を切り替えた場合に期待される交差点処理能力を評価し、③ほかの組合せを前提とした場合に期待される交差点処理能力と比較する。このうち、特に①と②として行う計算方法について、以下で説明する。

(2) 信号切り替えタイミングの算出

信号切り替えタイミングは、一般的に、交通需要や交差点幾何構造などの条件に応じて変化するものである。このうち、ある信号現示の組合せに対して、事前に設定した順序のもとに一定の時間ごとに信号現示を切り替えていく「定周期制御」の枠組みでは、信号切り替えタイミングが信号制御パラメータ（サイクル長、青時間スプリット）によって規定される。

ここでは、定周期制御における信号制御パラメータの計算手順について整理するとともに、信号制御パラメータを算出するうえで特に留意すべき点として、「横断歩行者現示時間の確認」「交通容量の確認」について述

べる。

a) 定周期制御の信号制御パラメータの計算手順

我が国におけるマニュアルである「平面交差の計画と設計」¹⁾では、次の手順により定周期制御の信号制御パラメータを計算することとしている。

1. 損失時間の設定
2. サイクル長および有効青時間の仮設定
3. 飽和交通流率の算定
4. 現示の需要率と交差点の需要率の算定
5. サイクル長の算定
6. 青時間スプリット(各現示の有効青時間)および青信号表示時間の算定
7. 横断歩行者現示時間の確認
8. 交通容量の確認

b) 横断歩行者現示時間の確認

横断歩行者に対して青信号を表示する現示については、歩行者の横断に必要なだけ歩行者現示時間を確保する必要がある。歩行者への青信号表示時間 (PG) および青点滅表示時間 (PF) に関して、PG+PF および PF がそれぞれ少なくとも式 1 および式 2 の値以上になるように設定する。また、PG は少なくとも 5 秒以上確保することとする¹⁾。

$$PG + PF = \frac{w}{v} \quad (1)$$

$$PF = \frac{0.5w}{v} \quad (2)$$

ここに、

w : 横断歩道長 [m]

v : 歩行者の横断速度 [m/s]

である。青信号表示時間から PR(歩行者赤、車両青の時間)を減じた残りの時間が式 1 の値を下回っていないこと、および PF と PG についてもそれぞれ式 2 の値および 5 秒を下回っていないことを確認する。なお、ここでは PR は 3 秒と設定する。もし、いずれかがこれらの値を下回っている場合には、サイクル長を長くする必要がある。

c) 交通容量の確認

これまでに算定した信号制御パラメータを用いて、各流入路各車線の交通容量を計算する。交通容量は、当該車線に通行権が与えられる現示の有効青時間がサイクル長に占める割合を、当該車線の飽和交通流率に乗じることで求められる。求めた交通容量が、設計時間交通量(交通需要)を下回っていないことを確認する。

なお、交通容量が設計時間交通量を上回っていた場合、求めた信号制御パラメータで信号を切り替えたとしても、交差点に到着する交通需要を処理しきれなくなるため、渋滞が発生することになる。

(3) 交差点処理能力の評価

各組合せによって実現し得る交差点処理能力を評価することで、適切な信号制御設計を決定できる。交差点処理能力を評価するための指標は複数想定されるが、ここでは、「平均遅れ」および「捌け残り台数」に着目し、それらの計算手順を説明する。

a) 平均遅れ

信号制御により各車両が被る遅れは、それぞれの車両が信号交差点に到着した時刻（到着時刻）と交差点から流出した時刻（流出時刻）の差として表される。例えば到着時刻と流出時刻が一致する場合、信号交差点で止まることなく通過できたことを意味し、このときの遅れはゼロである。したがって、各流入路のある車線について、 n 番目の車両の到着時刻を $t_{arr,n}$ 、 n 番目の車両の流出時刻を $t_{dep,n}$ とすると、各車の遅れの平均 AD が式 3 で算出できる。

$$AD = \frac{\sum(t_{dep,n} - t_{arr,n})}{N} \quad (3)$$

ここに、

AD : 各車の遅れの平均 [秒]

$t_{dep,n}$: n 番目の車両の流出時刻 [秒]

$t_{arr,n}$: n 番目の車両の到着時刻 [秒]

N : 合計車両数

である。

一方で、定周期制御の場合、ある信号切り替えタイミングに対して、特定の流入路における車線から到着する車両の平均遅れを次式として求めることができる。

$$\bar{d} = \frac{(1 - \frac{G}{C})^2}{2(1 - \frac{q}{s})} C \quad (4)$$

ここに、

\bar{d} : 当該車線の 1 台あたり平均遅れ [秒]

G : 当該車線に通行権が与えられる現示の有効青時間 [秒]

C : サイクル長 [秒]

q : 当該車線の設計時間交通量 [台/時]

s : 当該車線の飽和交通流率 [台/時]

である。なお、この式は、交差点への到着交通流を一樣なものとし、待ち行列からの流出は飽和交通流率、待ち行列が解消された後は到着車両がそのままの流率で流出することを仮定し、交通量累積図から導出されるものである。

さらに、式 4 に対して、到着交通についてポアソン分布を仮定した場合の平均遅れを次式として求めることができる。

$$d = \frac{(1 - \frac{G}{C})^2}{2(1 - \frac{q}{s})} C + \frac{(\frac{qC}{sG})^2}{2q(1 - \frac{qC}{sG})} \quad (5)$$

ここに、

d : 当該車線の 1 台あたり平均遅れ [秒]

G : 当該車線に通行権が与えられる現示の有効青時間 [秒]

C : サイクル長 [秒]

q : 当該車線の設計時間交通量 [台/時]

s : 当該車線の飽和交通流率 [台/時]

である。

b) サイクルごとの捌け残り台数

サイクルごとの捌け残り台数について、第 i サイクルにおける流出台数と到着台数をそれぞれ D_i [台]、 A_i [台] とすると、第 i サイクルにおける捌け残り台数 R_i が式 6 で算出できる。

$$R_i = \begin{cases} A_i - D_i & \text{for } i = 1, \\ A_i + R_{(i-1)} - D_i & \text{for } 2 \leq i \leq I \end{cases} \quad (6)$$

これらを用いて、分析時間中の捌け残り台数の合計 N_{remain} を式 7 で計算する。

$$N_{remain} = \sum_{i=1}^I R_i \quad (7)$$

ここに、

R_i : 第 i サイクルにおける捌け残り台数 [台]

A_i : 第 i サイクルにおける到着台数 [台]

D_i : 第 i サイクルにおける流出台数 [台]

I : 分析対象サイクル数

N_{remain} : 捌け残り台数の合計 [台]

である。

3. 横断歩行者と左折車両の交錯現象に着目した組合せ設計手法の評価

本章では、提案する組合せ設計手法を実際に信号交差点へ適用させることにより、提案手法の有効性を評価する。特に今回は、横断歩行者と左折車両の交錯現象が生じる状況を想定しながら評価を行う。

横断歩行者と左折車両の交錯現象について、現在多くの信号交差点では、左折車両と横断歩行者に対して同時に青信号が表示されるような制御設計がなされている。この場合、両者の動線が交錯するため、左折車両は歩行者の横断を待つ必要がある。これにより後続車両の進行が妨げられ、あるサイクルにおいて交差点から流出できる車両の台数に非常に大きなバラつきが生じることで、信号交差点における交通処理性能がサイクルごとに大きく変動しうることが知られている⁸⁾。

横断歩行者と左折車両の交錯に関する検討として、Roshani ら⁴⁾ は、観測に基づいて、横断歩行者の交通量と左折車両の交通流率の関係を説明する回帰モデルを構築した。Chen ら⁵⁾ は、横断歩行者と左折車両の交錯を考慮して左直混用車線からの流出の飽和交通流率を評価し、現行の方法ではそれが過大評価されている可能性を指摘した。河合ら⁶⁾ や Chen ら⁷⁾ は、歩行者の横断

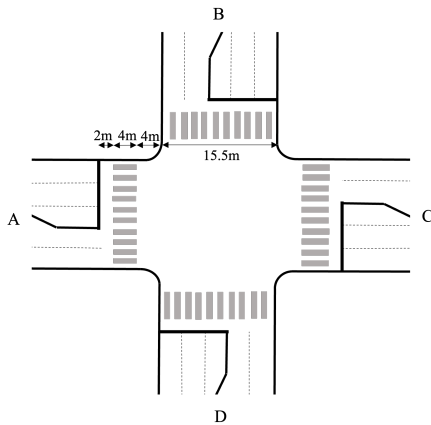


図-1 対称な3車線流入を有する交差点

状況によって歩行者青時間を複数の時間帯に分け、左折車混入率に基づいて各時間帯における流出流率および継続時間を計算することで、横断歩行者との交錯による左折車両の停止とそれが後続車両に及ぼす影響を表現した。しかし、これらの研究はいずれも横断歩行者と左折車両の交錯が交差点からの車両の流出を与える点に着目はしているが、あくまで車両の流出を「期待値」として考えた上で、その算出方法の見直し、改良を図ったものであり、サイクル毎に生じる変動を直接的に評価することはできない。

一方で、Huangら⁸⁾、鳥海ら⁹⁾は、左直混用車線において、左折車両と横断歩行者の交錯に起因してサイクルごとに車両の流出が期待値の周りで大きく変動することを評価できるシミュレーションモデルを構築した。このモデルは、各サイクルにおいて乱数を用いて左折車両と直進車両のランダムな到着順を再現し、横断歩行者との交錯により左折ができない時間帯を設定した上で、各車両の到着時刻と流出時刻を計算するものである。ある交通需要を与えて適用したところ、左折車両の流出が横断歩行者によってブロックされること、ならびに左折車両と直進車両の到着順が各サイクルでランダムであることが原因で、サイクルごとの捌け台数に変動が生じることを確認した。ただし、実際の制御設計の枠組みの中にこのような評価を位置付けることについて言及した研究は見られない。

(1) 実験シナリオの定義

今回は、「信号交差点」「車線運用と信号現示の組合せ」「交通需要条件」「横断歩行者の設定」のそれぞれについて次のように想定する。これらは実験シナリオの構成要素であり、このうち「信号交差点」「横断歩行者の設定」についてはすべてのシナリオで共通になる一方で、「車線運用と信号現示の組合せ」「交通需要条件」についてはシナリオごとに異なる。すなわち、「組合せの数 × 交通需要条件の数」だけの数のシナリオが定義

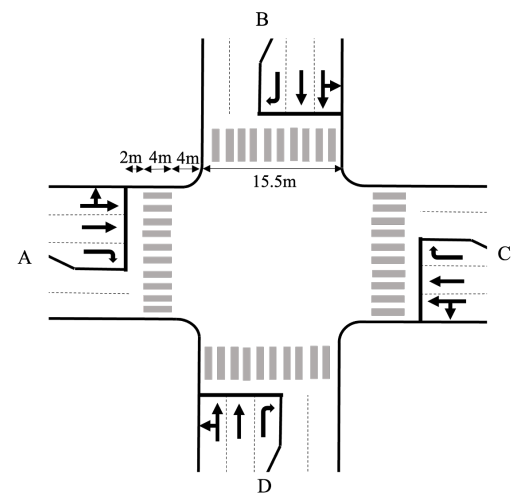


図-2 組合せ 1(左直混用車線+右直分離現示)

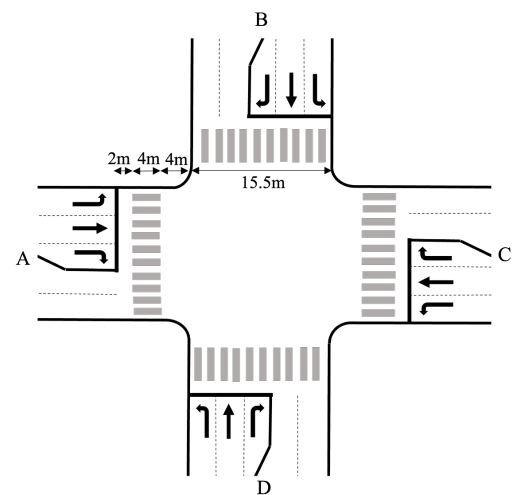


図-3 組合せ 1-2(左折専用車線+完全分離現示)

されることになる。ここで設定した組合せおよび交通需要条件が形成する各シナリオを「シナリオ群」と呼ぶことにする。

a) 信号交差点

「対称な3車線流入を有する交差点」として、共に単路部片側2車線、交差点流入部では3車線を有する2本の道路および流入路に対応する4つの横断歩道が交差する交差点を想定し、図1のような構造の信号交差点を考える。ここで、4つの流入路における幾何構造は対称である。

表-1 全赤および黄信号表示時間の設定

組合せ	切り替り	全赤表示時間 [s]	黄信号表示時間 [s]
1-1	1 φ → 2 φ	4	0
	2 φ → 3 φ	4	2
	3 φ → 4 φ	4	0
	4 φ → 1 φ	4	2
1-2	1 φ → 2 φ	4	2
	2 φ → 3 φ	4	2
	3 φ → 4 φ	4	2
	4 φ → 1 φ	4	2
1-3	1 φ → 2 φ	4	2
	2 φ → 3 φ	4	2
	3 φ → 4 φ	4	0
	4 φ → 1 φ	4	2

b) 車線運用と信号現示の組合せ

車線運用と信号現示方式の組合せとして、組合せ 1 (左直混用車線+右直分離現示, 図 2) と組合せ 2 (左折専用車線+完全分離現示, 図 3) の 2 つの組合せを設定し、両者の間での比較・評価を行う。今回、これら 2 つの組合せを設定した理由は、「左直混用車線を有し、左折車両と横断歩行者に同時に青信号が表示される」場合と、「左折専用車線を有し、横断歩行者に青信号が表示される現示は車両と分離されている」場合とで提案手法に基づく制御設計として得られる結果の違いを調べるためである。

組合せ 1 は、全ての流入路において第一車線を左直混用車線、第二車線を直進専用車線、第三車線を右折専用車線とした車線運用と、直進および左折車両と並行する横断歩行者に同時に青信号を表示した後に右折車両に矢印信号を表示する、いわゆる「右直分離型」の信号現示方式との組合せである。これは、実際の道路においても多くの信号交差点で用いられている方式である。組合せ 2 は、全ての流入路において第一車線を左折専用車線としている点が組合せ 1 と異なっており、信号現示方式として、直進車両および並行する横断歩行者に青信号を表示した後に右折車両に矢印信号を表示し、この際に交差する道路からの左折車両にも矢印信号により同時に通行権を与える、「完全分離型」を設定している。なお、この信号現示方式は全ての流入路が左折専用車線を有して初めて適用できる方式である。この組合せについては、実際に用いられている交差点は組合せ 1 と比較すると少数ではあるが、車両と歩行者の動線の交錯が全くない点が特徴である。

なお、全赤および黄信号表示時間については、以下の通りとする。組合せ 1, 2 において、各流入路における交差点への接近速度を 60[km/h] と仮定し、現行のマニュアル¹⁾を参考に、全赤および黄信号表示時間を表 1 のように設定する。

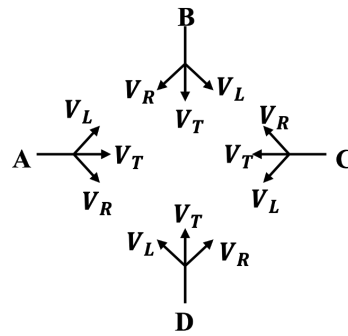


図-4 交通需要条件 α(均等) (対象：対称な 3 車線流入を有する交差点)

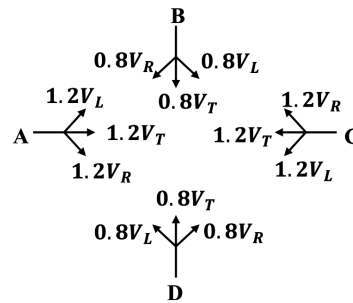


図-5 交通需要条件 β(AC 大) (対象：対称な 3 車線流入を有する交差点)

c) 交通需要条件

対称な 3 車線流入を有する交差点を対象とする「シナリオ群」において、次のように交通需要条件を与える。なお、流入路 A と C、ならびに B と D からの流入交通需要はそれぞれ同じとする。

まず、各流入路からの左折・直進・右折の時間当たりの交通需要の基本値をそれぞれ V_L, V_T, V_R [台/時] とする。次に、流入路 A および C からの流入交通需要 (以下、「AC」) と流入路 B および D からの流入交通需要 (以下、「BD」) との比率を変化させた、交通需要条件 α, β, γ の 3 つを次のように定義し設定する。

- 交通需要条件 α : 全ての流入路からの交通需要が基本値 V_L, V_T, V_R に等しい場合 (図 4)
- 交通需要条件 β : AC が基本値の 1.2 倍で BD が基本値の 0.8 倍の場合 (図 5)
- 交通需要条件 γ : AC が基本値の 0.8 倍で BD が基本値の 1.2 倍の場合 (図 6)

上記で設定した交通需要条件 α, β, γ のそれぞれのもとで、基本値 V_L, V_T, V_R を変化させる。 $V_T = 200, 400, 600$ [台/時] の場合を考え、各場合について、図 7 に示すように V_L と V_R をそれぞれ 100 [台/時] から 600 [台/時] まで 100 [台/時] 単位で変化させた 1~36 の 36 通りの組み合わせを設定する。すなわち、交通需要条件 α, β, γ それぞれに対し、 $36 \times 3 = 108$ 通りの基本値 V_L, V_T, V_R の組み合わせが設定される。

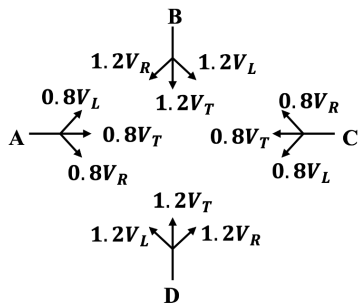


図-6 交通需要条件 γ (BD 大) (対象: 対称な 3 車線流入を有する交差点)

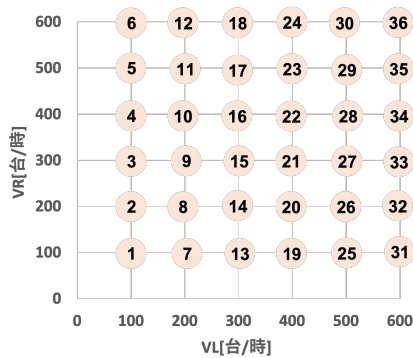


図-7 V_L と V_R の組合せ

d) 横断歩行者の設定

今回のシナリオでは、横断歩道を有する信号交差点を想定しており、それぞれの横断歩道に対する歩行者青信号開始時に一定数の横断待ち歩行者が存在していることとする。このとき、ある横断歩道に対して、それを横断する歩行者と交錯する左折車両の流入側から横断を開始する歩行者を「near 側からの歩行者」、それと逆方向に横断する歩行者を「far 側からの歩行者」としたとき、それぞれにおいて歩行者青表示開始時に横断を待っている歩行者の数を 10 人と設定する。

(2) 左折交通流率の低減を考慮した期待遅れに基づく評価

本節では、横断歩行者と車両の交錯がもたらしうる影響について、左折交通流率の低減という形で期待値的に考慮することを考え、この前提条件のもとに組合せ設計を行った場合に得られる制御設計の結果を示す。

a) 左折交通流率の低減の算定

現行のマニュアル¹⁾では、設計手順で用いる飽和交通流率において、式 8 のように飽和交通流率の基本値に対して各種要因による補正値を乗じることで交通流率の低減を推定する。

$$S_A = S_B \cdot \alpha_W \cdot \alpha_G \cdot \alpha_T \cdot \alpha_B \cdot \alpha_{RT} \cdot \alpha_{LT} \quad (8)$$

ここに、

S_A : 実際の車線飽和交通流率

表-2 飽和交通流率の基本値

車線の種類	飽和交通流率基本値 [台/青 1 時間]
直進車線	2000
左折車線	1800
右折車線	1800

S_B : 飽和交通流率の基本値

α_W : 車線幅員の補正率

α_G : 勾配の補正率

α_T : 大型車混入の補正率

α_B : バス停留所の補正率

α_{RT} : 右折車混入の補正率

α_{LT} : 左折車混入の補正率

である。

このうち、 α_{LT} の算出において横断歩行者と左折車両の交錯が生じることの影響が考慮されている。すなわち、考え方としては、飽和交通流率を計算で推定する際に一律の低減率を乗じることとどまっておらず、サイクルごとに交通処理性能に大きな変動が生じうることを直接的に考慮するような記述はないことがわかる。

なお、今回は、車線幅員、勾配、大型車混入およびバス停留所の影響は考えず、右折車両に対しては必ず十分な長さの右折専用車線を設けることとする。したがって、左折・直進・右折の専用車線については飽和交通流率の基本値を用い、左直混用車線に対しては式 9 のように、基本値に左折車混入による補正率を乗じることで飽和交通流率を算定する。

$$S_A = S_B \cdot \alpha_{LT} \quad (9)$$

ここで、飽和交通流率の基本値として、わが国でのこれまでの実測結果に基づいて定められた表 2 の値を設定する¹⁾。そのほか、車線運用によっては第 1 車線が左直混用車線となる場合があるが、そのときの混用車線の飽和交通流率については、マニュアル¹⁾に従い計算によって算定するものとする。

b) 計算結果

各交通需要条件のもとで、車線運用と信号現示方式の組合せのそれぞれについて、式 4 により平均遅れを計算した。また、今回は、各組合せにおける全車線 (流入路の数 (=4) × 流入車線数) について平均した「平均遅れの全車線平均」を求めている。図 8 は、組合せ 1 と 2 との間で「平均遅れの全車線平均」を比較した一例で、交通需要条件 α (全ての流入路からの交通需要が基本値に等しい) において、基本値 $V_T = 400$ [台/時] とした場合の結果である。

まず、この場合に想定した交通需要条件の組合せに対応する 36 の格子点 ($100 \leq V_L, V_R \leq 600$) のうち、黒枠の円として囲まれている点が 21 か所存在している。

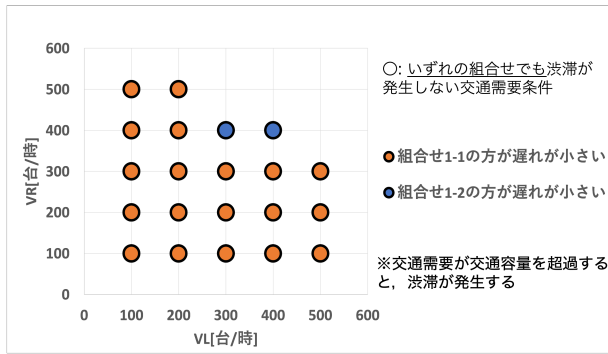


図-8 交通需要条件 α (均等)かつ基本交通需要 $V_T = 400$ における平均遅れの全車線平均

これは、組合せ 1 と 2 のいずれの場合にも、信号制御設計の結果として期待できる交通容量が設定した交通需要を上回っている、すなわち渋滞が発生しない領域であることを示している。一方で、これら 21 か所の点は、赤色で塗りつぶされている部分と青色で塗りつぶされている部分の 2 つに分類されている。これは、「平均遅れの全車線平均」の比較結果を表しており、前者は組合せ 1 のほうが期待される遅れが小さくなるもの、後者は組合せ 2 のほうが期待される遅れが小さくなるものに対応している。

このように、交通需要条件によって、遅れがより小さくなり得る車線運用と信号現示の組合せは異なることを確認できる。一方で、従来手法に従って信号制御設計を行うことを考えた場合、もし所与の車線運用を「左直混用車線」としてしまえば、たとえ図 8 において、青色で塗りつぶされている交通需要条件であっても渋滞が発生しないゆえに、より小さな遅れを実現し得る「左折専用車線」は原理的に選択されないことに注意が必要である。

(3) モンテカルロシミュレーションを活用した期待遅れと捌け台数に基づく評価

上で言及したように、横断歩行者と左折車両の交錯現象に関するこれまでの研究^{4)5) 6)7)}では、車両の流出について期待値を求める、あるいはその期待値の精度を向上させるという点に主眼が置かれている。ただし、左直混用車線に含まれるの左折車両と直進車両の並び順や混入率には変動があるなどの理由から、横断歩行者と左折車両の交錯が発生する場合の交通処理性能はサイクルごとに大きく変動することが知られている。このことは、期待値としては交通容量が不足していない場合でも捌け残りを生じさせる原因となるなど、交差点から流出する交通の円滑性に非常に大きな影響を及ぼしうる。

この横断歩行者と左折車両の交錯現象について、前節における検討では従来期待値に基づいた考慮を前

提として提案手法の評価を行った。これに対して、本節における検討では、交錯現象に起因する交通処理性能の変動を明示的に考慮しながら、提案手法の有効性を評価する。

a) シミュレーションモデルの構築

本稿では、交錯現象に起因する交通処理性能の変動を明示的に考慮するためのシミュレーションモデルを構築する。このとき、ある交通需要条件や信号切り替えタイミングに対してシミュレーションを実行することで、横断歩行者と左折車両の発生を考慮しながら、各車両の交差点への到着時刻および流出時刻を求めることができるようになる。具体的には、交差点の各流入部のうち左直混用車線に着目して、車両の到着と青表示時間中の流出を模擬し、各車両の到着時刻及び流出時刻を出力する。車両到着パターンを「ポアソン分布」として与えている点、到着車両に対して 1 台ずつ乱数を用いて進行方向（左折または直進）をランダムに与えている点、青表示時間の中で「横断歩行者との交錯により左折できない時間」（以下、「ブロック時間」とする）を設定している点が特徴である。これにより、左直混用車線における左折車両と直進車両の到着順のランダム性や左折車両と横断歩行者の交錯の発生が車両の流出に及ぼす影響を評価することが可能となっている。

なお、ここで用いるシミュレーションモデルは Huang⁸⁾、鳥海⁹⁾により提案されたものに準じている一方で、「ブロック時間」に関しては、実測データに基づいた算出方法への改良を行っている。詳細については付録を参照されたい。

b) 信号制御パラメータ算出方法の改良

横断歩行者と左折車両の交錯を明示的に考慮することに伴い、信号制御パラメータ算出方法を修正すべき点が生じる。

まず、歩行者の横断に必要な歩行者現示時間について、横断歩行者に関して本章での議論のように明示的に考える場合、実際に歩行者の横断に必要な時間は、 $\frac{w}{v}$ に先頭の歩行者が横断を開始してから最後尾の横断歩行者が横断を開始するまでの時間 Δ_t を加えた時間となる。よって、式 1 は、以下の式 10 に修正する必要がある。

$$PG + PF = \Delta_t + \frac{w}{v} \quad (10)$$

次に、横断歩行者と左折車両の交錯に起因する交通処理性能の変動を評価するために、シミュレーションモデルにおいて「ブロック時間」を設定した。これに伴い、当該現示の青信号表示時間が第一車線からの車両の流出に必要なだけ確保できているかを再確認する必要が生じる。具体的には、以下の手順で行う。

1. 第一車線の交通需要を第一車線の飽和交通流率で除することで、第一車線の車線需要率を計算する。

2. 上記の値を(サイクル長-損失時間)に乗じる。横断歩行者と左折車両の交錯を考慮しない場合でも、第一車線からの車両の流出にはこれだけの時間が必要である(※)。
3. 上記※の値を当該現示の有効青時間と比較する。後者の方が小さい場合は、※の値を新しい有効青時間とする。このときの有効青時間の増加分は PR (歩行者赤、車両青)として設定する。
4. 上記の有効青時間変更に伴って、サイクル長を修正する。

c) 計算結果

今回構築したシミュレーションの出力としては以下が得られる。

- 各車両の到着時刻
- 各車両の流出時刻

ここから、式 3 や式 6 を用いることで、各車両の遅れやサイクルごとの捌け台数、捌け残り台数などを算出できる。

なお、実際の計算結果については、研究発表会当日に報告することを予定している。

4. おわりに

本稿では、信号交差点において、車線運用と信号現示方式を「組合せ」として考えることによる新たな制御設計手法を提案するとともに、横断歩行者と左折車両の交錯が生じる信号交差点に提案手法を適用させることを通して、提案手法の効果を評価した。

まずは、現行のマニュアル¹⁾に示された、左折交通流率の低減を考慮する方法に基づいた平均遅れにより評価を行った。交通需要条件が異なると、最も小さな平均遅れを実現することのできる組合せが異なることが分かった。また、交通需要が大きく、ある車線運用と信号現示方式が適用できない場合においても、車線運用を先に固定せず両者を「組合せ」として考えることにより、他に適用可能な組合せが存在しうることが明らかになった。これらのことから、車線運用と信号現示方式を「組合せ」として考えることの必要性、有効性が示された。さらに、左折車両と横断歩行者の交錯を明示的に考慮したシミュレーションモデルを構築し、横断歩行者に関連して発生しうる交通処理性能の変動を適切に考慮しながら提案手法の評価を試みた。

研究発表会当日に向けて、後者の方法に基づく提案手法についても評価実験を進めるとともに、前者の方法についても、それぞれの実験シナリオから得られた結果を整理し、このような結果となったメカニズムや提案手法の特性についての考察を深めていければと考えている。適切な成果を得られた際には併せて報告したい。

なお、実験シナリオの設定について、今後は、現在では適用例が少ないものや、あまり一般的ではないような設定のもとで同様の分析を行うことで、より望ましい制御方式に関して新たな知見が得られる可能性があると考えられる。例えば、右折と直進の混用車線を設定する、左折導流路や横断島を設けて歩行者の横断を複数回に分けることのできる場合を考える、T 字路などの 4 枝ではない交差点も分析対象に含める、などの可能性が想定される。さらに、横断歩行者の設定についても、横断待ちの人数や横断速度のばらつきも考慮すると、交通処理性能の変動はさらに大きくなることが予想され、制御設計において本稿で示した考え方をを用いることの重要性がさらに増すと考える。

研究発表会当日は、今回の検討に関する一連の結果に基づいて、車線運用と信号現示方式を「組合せ」として考えることで適用可能な信号現示方式の選択肢の幅が広がり、より良い制御が実現できる可能性について議論できれば幸いである。

謝辞: 本研究は、国立研究開発法人情報通信研究機構(NICT)の支援による「行動変容と交通インフラの動的制御によるスマートな都市交通基盤技術の研究開発」の一部として、また、JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2108 の支援を受けて実施した。さらに、本研究を進めるにあたっては、シミュレーションの実行とデータ処理に関して東京大学生産技術研究所・助教の鳥海梓先生から多大な協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

付録 I 「ブロック時間」の算出

Huang ら⁸⁾、鳥海ら⁹⁾によるモデルにおいて改良が必要な点として、入力パラメータの一つであるブロック時間の設定方法が挙げられる。同モデルでは、ブロック時間について、20[s]という一律の値を仮定している。このことについて、鳥海ら⁹⁾には、「平面交差の計画と設計」¹⁾において、歩行者が多い場合、歩行者青+青点滅表示時間(PG+PF)中に歩行者の間隙を利用して左折できる確率 f_L が 0.5、すなわち左折できない確率が $(1 - f_L) = 0.5$ となることを参考にしたものである。」と記述されている。

しかし、実際には、ブロック時間は歩行者青表示開始時に横断歩道の手前で待っている歩行者の人数や横断歩道の長さなどに応じて決まるものであると考えられる。この観点から、同モデルにおけるブロック時間の設定方法について改良が必要であると考える。本稿では、実測調査に基づいたブロック時間の新たな算出方法を構築した。なお、ここでは、横断歩道の near 側と far 側ともに、歩行者青表示開始時には横断を待ってい

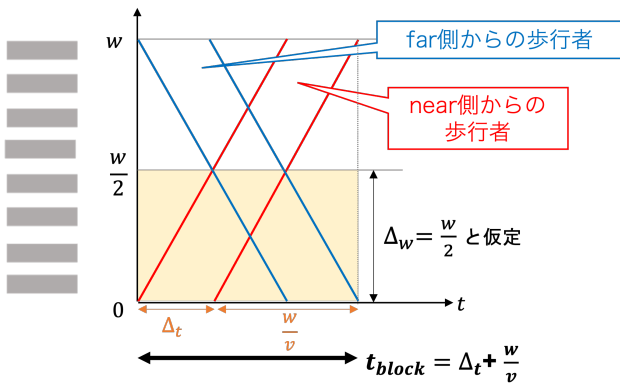


図-9 横断歩行者の挙動とブロック時間

る歩行者が存在する状況を仮定する。

まず、横断歩行者の挙動について簡単な図を用いて考える。図9は、横軸に時刻、縦軸に横断歩道上の位置 (near 側端からの距離) をとり、near 側及び far 側からの歩行者の横断の様子を模式的に表したものである。図中の2本の赤線は、near 側からの先頭及び最後尾の横断歩行者の軌跡を表している。2本の青線は far 側からの横断歩行者について同様である。歩行者青表示開始と同時に各方向からの先頭の歩行者が横断を開始してから、最後尾の横断歩行者が横断を開始するまでには時間差があり、その時間を Δ_t [秒] とする。また、 w は横断歩道長 [m] であり、near 側端から Δ_w [m] の範囲に歩行者がいると左折ができないとする。

ここで、 $\Delta_w = \frac{w}{2}$ (横断歩道のうち near 側半分の領域に歩行者が存在するとき左折車両は左折できない) と考えると、図9より、ブロック時間は式 I.1 によって算出できる。

$$t_{block} = \Delta_t + \frac{w}{v} \tag{I.1}$$

ここに、

t_{block} : ブロック時間 [秒]

Δ_t : 先頭の歩行者が横断を開始してから最後尾の横断歩行者が横断を開始するまでの時間 [秒]

w : 横断歩道長 [m]

v : 歩行者の横断速度 [m/s]

である。

次に、式 I.1 における Δ_t の値を定めるために、都内の複数の信号交差点の横断歩道において実測調査を行った。調査では歩行者が横断を開始の様子をビデオ撮影した。撮影した映像から歩行者青表示開始時に横断を待っている歩行者が存在するケースのみを抽出し、横断待ち歩行者 (自転車含む) の数 x と先頭の歩行者が横断を開始してから最後尾の横断歩行者が横断を開始するまでの時間 Δ_t について、合計 103 のサンプル数を得た。これらを対象に、 x と Δ_t の関係について線形回帰分析を行ったところ、式 I.2 に示す回帰式が得られた。

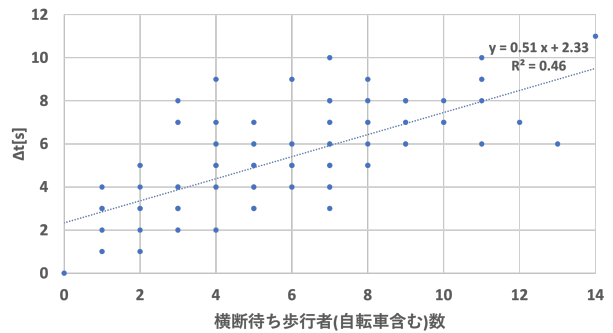


図-10 x と Δ_t の関係についての線形回帰分析の様子

なお図 10 に、線形回帰分析の様子を示す。

$$\Delta_t = 0.51x + 2.33 \tag{I.2}$$

ここに、

Δ_t : 先頭の歩行者が横断を開始してから最後尾の横断歩行者が横断を開始するまでの時間 [秒]

x : 横断待ち歩行者 (自転車含む) 数

である。

以上を踏まえ、本稿で構築するモデルにおいては、ブロック時間は以下のようにして算出することとする。左折車両と同時に横断歩行者に通行権が与えられる現示においては、こうして算出した t_{block} の値をシミュレーションへの入力値として用いる。

1. 歩行者青表示開始時の横断待ち歩行者数 x を与える。
2. 式 I.2 により、 Δ_t を計算する。ただし、歩行者の横断速度は「平面交差の計画と設計」¹⁾ を参考に $v = 1$ [m/s] とする。これは都内 12000 人を対象とした調査によって得られた値で、設計などに用いられることが多い¹⁾。
3. 式 I.1 により、ブロック時間 t_{block} を計算する。

参考文献

- 1) 一般社団法人交通工学研究会: 平面交差の計画と設計基礎編—計画・設計・交通信号制御の手引—, 丸善出版, 2020.
- 2) 張馨・中村英樹: 信号交差点における歩車分離の程度と交差点性能との関係に関する解析的研究, 交通工学論文集, Vol.3, pp.11-20, 2017.
- 3) 小川圭一・川居卓也: 歩車分離式信号による交差点の交通処理能力の変化に関する分析, 土木計画学研究・講演集 (CD-ROM), Vol.37, 2008.
- 4) M., R. and I., B.: Effect of pedestrians on the saturation flow rate of right turn movements at signalized intersection -case study from rasht city, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol.245, 2017.
- 5) Chen P., N. H. and M., A.: Saturation flow rate analysis for shared left-turn lane at signalized intersections in japan, Procedia-Social Behavioral Sciences, Vol.16, pp.548-559, 2011.
- 6) 河合芳之・鹿田成則・片倉正彦・大口敬: 横断歩行者等を考慮した最外側車線の流出率モデルと流入部の交通容量解析, 土木学会論文集, Vol.2005, pp.69-82, 2005.

- 7) Chen P., N. H. and M., A.: Lane utilization analysis of shared left-turn lane based on saturation flow rate modeling, *Procedia-Social Behavioral Sciences*, Vol.43, pp.178–191, 2012.
- 8) Huang S., T. A. and T., O.: Random nature of shared left-turn lanes at signalized intersections, *2020 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, pp. 3159–3166, 2020.
- 9) 鳥海梓・黄紹倫・大口敬: 左直混用車線におけるランダム性が遅れと過飽和の発生に与える影響, 第 40 回交通工学研究発表会論文集 (研究論文), Vol.54, pp.335–343, 2020.

(Received March 6, 2023)

**A Proposal of a Traffic Signal Control Design at an Intersection
Based on Combination of Lane Allocations and Signal Phasings**

Keita MASUI, Ken SHIRAHATA, Masaki ITO and Takashi OGUCHI