

信号交差点における損失時間の実証分析

大口 敬¹・山口智子²・鹿田成則³・小根山裕之³

¹正会員 東京大学 生産技術研究所 (153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

E-mail: takog@iis.u-tokyo.ac.jp

²正会員 中日本ハイウェイ・エンジニアリング東京(株) 土木技術部 (160-0023 東京都新宿区西新宿1-23-7)

³正会員 首都大学東京 大学院都市環境科学研究科 (192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

信号切替り時は、そこで生じる損失時間が信号交差点の円滑性指標である遅れに大きな影響を与えるばかりでなく、交通安全上も重要である。これまで、切替り時における損失時間の開始・終了、すなわち有効青時間の開始・終了タイミングは厳密に考えられてきていない。損失時間を厳密に把握することによって、より安全で効率的な信号制御を実現できる可能性がある。本研究では、青(丸)表示から右折矢印表示への切替り時に着目し、飽和交通流、最終車と先頭車の通過タイミングなどの実態、および青(丸)表示時の右折車が停止線を越えて交差点内に滞留する滞留スペースの大きさなどの交差点幾何構造を調査し、損失時間および有効青時間を算定する。大きさや形状の異なる5交差点を対象に実証分析した結果、右折専用現示前には損失時間ではなくむしろ有効青時間が重なる時間(ゲイン)が存在し、このゲイン時間の長さを交差点形状から推定できることを明らかにした。

Key Words : Signal change interval, Lost time, Saturation flow, Sneakers, Interchange geometric design

1. はじめに

(1) 交通信号制御における損失時間の重要性

信号制御は、安全性の確保を制約条件として、各利用者の遅れを最小化する制御設計が基本である。基本的に遅れはサイクル長に比例するため、長いサイクルは望ましくない。また、各方向に適切なスプリットを確保する必要があるが、信号切替りの際に安全確保のため必要に応じて黄・全赤表示がされるため、有効青時間として利用できない損失時間が発生する。損失時間の存在は、高い交通需要を捌くことのできるように交通容量を確保するためにはサイクルを長くする必要があるが生じる。

たとえば、一般的な4枝交差点の標準的な2現示制御において、サイクル長 $C=90$ 秒、1回の信号切替り時の損失時間を5秒とすると、1サイクル当たりの損失時間 $L=10$ 秒である。すなわちのべ有効青時間は $C-L=90-10=80$ 秒、1サイクルの有効青時間率 $Y=(C-L)/C=80/90=88.9\%$ である。仮に1回の信号切替り時の損失時間を1秒短い4秒で良いとすると $L=8$ 秒となる。この場合、有効青時間率 $Y=88.9\%$ を確保するサイクル長は $C=(1-Y)L=72$ 秒となり、サイクル長を18秒、すなわち20%も短縮できる。基本的に信号待ちによる平均遅れはサイクル長に比例する¹⁾ので、平均遅れも20%削減できる。また信号

による待ち行列長も短縮できるので、特にネットワークが密な場合には先詰まりや無駄青時間も生じにくくなる。

このように信号切替り時の損失時間がたった1秒違うだけでも、利用者の被る遅れ時間が20%も違う可能性があることがわかる。したがって損失時間を適切に評価することは遅れ最小化のために極めて重要であり、また信号の切替り時の動線交錯による交通事故防止の観点からも重要である。つまり、信号切替り時は交差点の円滑性・交通安全の両面から極めて重要な意味を持つ。

(2) 非優先右折滞留車の影響

ここで、通常の青(丸)表示では対向直進車に優先権があり、右折車は、図-1に示すように停止線(A-A'断面)よりも交差点の中に進入し、右折先頭車の交差点内停止位置(B-B'断面、以下、滞留スペース下流端)までの距離 D の滞留スペースに右折車が滞留停車する。図のC-C'断面の停止線で制御される対向直進交通の飽和交通流が青丸表示中ずっと継続するなら、この右折滞留車は次現示への切替り時から処理が開始される。この切替り時における右折先頭車の発進は、対向直進車の最終通過タイミングに依存する。図-2は、青丸表示後に右折専用現示がある典型的な場合の3現示制御における信号灯表示と累積交通量、および有効青時間と損失時間の関係を示

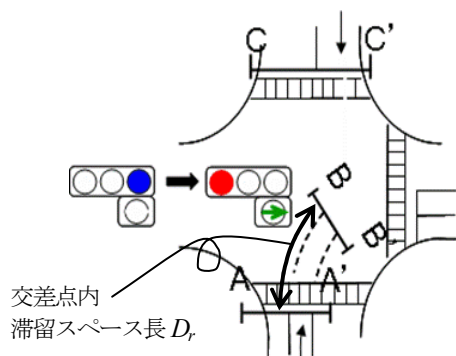


図-1 右折先頭車の交差点内進入停止位置(B-B' 断面, 滞留スペース下流端)と停止線(A-A'断面)

す。日本の交通信号の手引¹⁾では、右折専用現示開始前に滞留スペースに右折車が存在することで余分に処理される1サイクル当たり台数 K_{ER} は1~2台とされる。

一方大口²⁾は、この距離 D_r の滞留スペースに右折車が存在する影響を、1サイクル当たり処理台数 K_{ER} を用いる代わりに、飽和交通流率中の交通流の平均速度 v で距離 D_r の走行に要する時間 $R_d(=D_r/v)$ で有効青時間を補正すれば、 K_{ER} を用いずに適切に評価できることを衝撃波理論に基づいて明らかにした。図-3は、最も単純な線形の Q - K 関係基本図にもとづいて、この右折車の停止線と滞留スペース下流端に着目した車両軌跡を時間距離図上に示す。滞留スペース下流端における飽和交通流の開始タイミングが、右折専用現示の「実質有効青時間²⁾」の開始である。しかし停止線において実際に飽和交通流率が実現され始めるタイミング(「名目有効青時間²⁾」の開始)は、これよりも D_r/u だけ遅い(u は発進波伝播速度)。一方、青丸表示中に滞留スペースに存在していた右折車についても停止線における有効青時間で処理するように考えた「補正有効青時間²⁾」は、実質有効青時間の開始よりも D_r/v だけ早い、すなわち名目有効青時間の開始より $D_r/v + D_r/u = D_r k_j / s_r$ だけ早いタイミングで開始する²⁾。

(3) 青丸表示とその後右折専用現示の切替り損失時間

青丸表示とその後の右折専用現示との間の切替り時の損失時間は、日本の交通信号の手引¹⁾では明確には示されていない。時差式信号現示方式などによって2つの現示にわたって同一方向に連続して通行権が与えられる場合は、その切替りに損失時間はない¹⁾とされるが、前現示で非優先右折車で後現示で専用右折現示の場合はこの状況とは少し異なる。この場合、図-2のようにこの切替りには黄表示のみで全赤表示はない。対抗直進交通が飽和していると、右折車は切替り時以降の右折専用現示でのみ通行できる。この切替り時を通常の場合と同じように見なせば、切替り時黄時間が4秒未満なら損失時間は黄時間に等しく、4秒以上なら(黄時間-1秒)とされる¹⁾。一方米国のHCM2000では、こうした非優先現示と優先

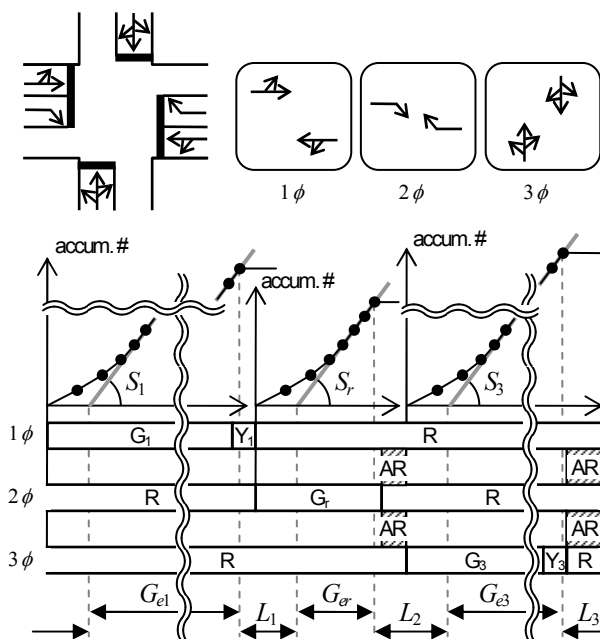


図-2 青丸後の右折専用現示の典型的3現示制御における信号表示に対する有効青時間と損失時間の関係例

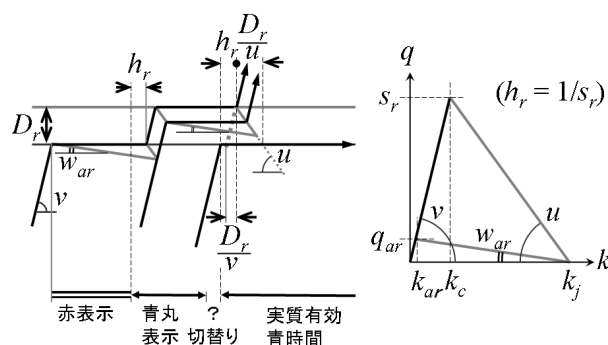


図-3 青丸後の右折専用現示で専用現示でのみ右折車が通行可能な場合の時間距離図

現示の間の切替り時の損失時間はゼロとしている³⁾。

青丸表示後の右折専用現示という表示方法は、日本では多くの交差点で適用される極めて一般的な方式であるが、その切替り時の損失時間について明確な整理がされておらず、実証研究例も極めて限られている^{4)~7)}。また、これらのいずれの実証分析や日本の交通信号の手引¹⁾、米国のHCM2000³⁾のいずれにおいても、損失時間の推定において K_{ER} の影響や補正有効青時間²⁾の概念を考慮した分析は十分とはいえない。

本研究は、青丸表示から右折専用現示への切替り時に着目し、その損失時間の実態を実証分析する。具体的には、対向直進交通の有効青時間の終了タイミングと、右折専用現示の(補正)有効青時間の開始タイミングを計測・算定する方法を示す。交差点形状の異なる5つの交差点において実交通流観測を行い、実測値にもとづいて損失時間を算定する。またこの損失時間を、各交差点の

幾何構造条件などを用いて推定する手法を提案する。

2. 実証分析手法の検討

(1) 損失時間の定義

信号切替り時の損失時間とは、切替り前現示の有効青時間の終了から切替り後現示の有効青時間の開始までの時間をいう。本研究で対象とするのは青丸表示からその後の右折専用現示との信号切替り時に着目しているので、図-2における1φの有効青時間 G_{e1} の終了から2φの有効青時間 G_{e2} の開始までの時間 L_1 を求めることに相当する。そのため、信号表示の青丸表示後、黄表示開始タイミングを時間軸の原点($t=0$)とし、 G_{e1} の終了タイミングを T_1 [秒]、 G_{e2} の開始タイミングを T_2 [秒]と置く。

通常は $T_2 > T_1$ とされ、したがって $(T_2 - T_1) = t_c$ [秒] > 0 となるため、この時間差 t_c [秒] = 損失時間 L_1 と解釈される。しかし実現現象の観測において常に $T_2 > T_1$ が成立するかどうかは定かではない。そこで本研究では、時間差 $(T_2 - T_1) = t_c$ が正負両方の符号を持つ可能性を前提に実証分析を行う。なお、ドイツの信号制御マニュアル(RiLSA)⁹⁾では、相前後する任意の2つの青表示の切替り時の t_c は正負両方の値を取り得ることが明記されている。

(2) 有効青時間

前節(1)の損失時間を求めるには、切替り前後現示の有効青時間の開始と終了のタイミングを知る必要がある。有効青時間とは、1回の青表示時間中最後まで一定の飽和交通流率で処理されたとした場合に、飽和交通流が継続したと見なせる時間を意味する。

有効時間の長さは処理台数を飽和交通流率で除すことで求められ、処理台数は停止線で通過台数を計測すればよいので、飽和交通流率を定めることができれば有効青時間長は比較的容易に計算できる。HCM2000には飽和交通流率を実測から求める手法が示されており³⁾、ここでは先頭車を1台目と数えて4台目以降の平均車頭時間を飽和車頭時間 h_s と見なして、その逆数として求められる。

しかし、HCM2000においても飽和交通流率と有効青時間の長さを求める方法は示されているが、有効青時間の開始と終了タイミングを決める方法は明示されていない。この点については日本の交通信号の手引¹⁾、ドイツのRiLSA⁹⁾など主な技術文献においても同様である。したがって、有効青時間の開始、終了タイミングを定める考え方は、本研究において新たに提案する必要がある。

(3) 有効青時間の終了タイミング

一般にある現示が飽和状態ならば、その現示で処理される交通の最終通過車まで飽和車頭時間とみなせるはずである。各車両の車頭時間はこの飽和車頭時間の周りに

分布すると考えるので、実際には4番目以降i番目の各通過タイミングはサイクル毎に異なる。また信号切替り時の最終通過車の通過タイミングは、黄表示時間帯における車両位置や運転者の判断によって異なるため、最終通過車は何番目になるか(=1回の青時間における交通処理量)は一般にサイクル毎に異なるものと考えられる。

本研究では、最終通過車まで飽和交通流状態にある場合の有効青時間の終了タイミングは、最終通過車の通過タイミングとしてサイクル毎に実測できるものとする。したがって、飽和交通流における各車両の車頭時間の分布と最終通過車の黄時間に対する通過タイミングの分布が、1回の青時間で処理される交通量に与える影響、および有効青時間の終了タイミングの統計的分布に与える影響の問題は大変興味深いものであるが、本研究では取り扱わずに今後の課題とする。

(4) 有効青時間の開始タイミング

本研究では、有効青時間の開始タイミングもサイクル毎に算定するものとする。ただし、有効青時間の開始タイミングとは仮想的な飽和交通流率の開始タイミングであり、直接的に実測することはできない。

まず、飽和交通流率 S_s を決める必要がある。実条件下の可能飽和交通流率 S_s は幾何構造などに応じて変わるが、交差点流入部方向別に一つの値と考える¹⁾。本研究では、(2)節に示したHCM2000の方法にもとづき、飽和交通流状態にある4台目以降の条件を満たす車頭時間を計測し、その期待値の逆数を飽和交通流率とする。

ここで、右折専用現示は一般には従現示であり、相対的に他の現示よりも青時間が短く、図-2に示すように右折専用現示の終了時には黄表示なしに全赤に移行する場合もある。青時間が短い右折専用現示では、現示終了間際の右折車は通常の飽和車頭時間よりさらに短い車頭時間で駆け込むことが考えられる。図-4は、ある交差点の右折専用現示を対象に、飽和交通流状態でかつ大型車と2輪車の影響を除いたサンプルについて、a) 先頭からの通過順番別の車頭時間分布と、b) 駆け込みからの順番で車頭時間分布との比較例である。図のb)における0番目とは右折青表示の後の全赤表示開始直前の停止線通過車であり、-1番目、-2番目、とはその前の通過車、1番目、2番目とは全赤表示開始後の停止線通過車である。

図のa)より、HCM2000と同様3台目までは車頭時間が大きい傾向があり、4台目以降で比較的安定することがわかる。一方図のb)では、全赤表示開始後に停止線を通じた車両の車頭時間は短くなる傾向があることが確認できる。こうした傾向は、本研究で対象とした複数の交差点、サイクルで確認することができた。

以上より、本研究では、4台目以降、最初に大型車または2輪車が到着するまで、かつ青矢印表示が終了する

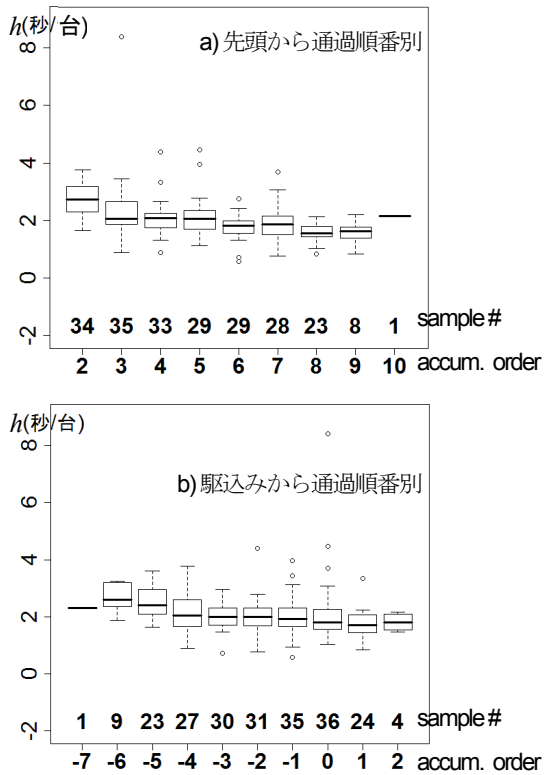


図4 B-B'断面の通過順番別車頭時間 h の分布の例

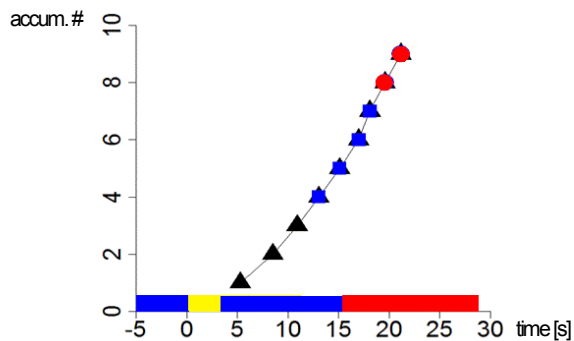


図5 滞留スペース下流端 B-B' 断面における右折車の交通量累積図の例

までに停止線を通過した小型車の車頭時間を飽和車頭時間のサンプルとし、これにより飽和交通流率を算定する。図-5は、ある交差点で観測されたあるサイクルにおける滞留スペース下流端(B-B' 断面)の交通量累積図の例である。この例では大型車と2輪車は含まないが、最後の2台は全赤開始後に停止線(A-A' 断面)を通過していたので、最初の3台とこの2台の車頭時間を除き、4~7台目の4台の車頭時間を飽和車頭時間のサンプルとする。

次に、算定された飽和交通流率 S_s と各サイクルにおける4台目以降の通過タイミングを用いて、そのサイクルの有効青時間の開始タイミングを決定する。本研究では、各サイクルについて、4台目以降の飽和交通流率算定に用いた車頭時間の車両サンプルを用い、その交通量累積図における時間方向の残差平方和を最小とする傾き S_r の

直線を推定し、その直線が時間軸を切るタイミングをこのサイクルにおける有効青時間の開始タイミングとする。

(5) 補正有効青時間の開始タイミング

前節(4)で求めた青丸表示後の右折専用現示の有効青時間は、停止線ではなく交差点内の右折滞留スペース下流端を対象に実測された車頭時間にもとづいて計算されている。したがってこれは実質有効青時間²⁾に相当し、滞留スペース下流端(B-B' 断面)における有効青時間開始タイミング T_s [秒]が求まったことになる。交差点内の滞留スペースの滞留車も含めた仮想的な飽和交通流の停止線(A-A' 断面)における補正有効青時間³⁾を考え、その開始タイミング T_e [秒]を求める必要がある。ここでは文献²⁾の知見にもとづき、前節(4)の有効青時間開始タイミング T_s よりも R_s [秒]($=D_r/h$)だけ早いタイミングとして算定する。ここで R_s とは、飽和交通流状態で滞留スペース D_r の走行に要する時間である。

R_s は、飽和交通流状態における各車両の停止線(A-A' 断面)と滞留スペース下流端(B-B' 断面)の実測された通過タイミング差の平均値である。しかし、計測している滞留スペース下流端では飽和交通流状態でも、その車両は右折専用現示開始前に停止線を通過して滞留スペースで停止していた場合もある。また停止位置が停止線の直近上流の場合は、停止線(A-A' 断面)通過時にはまだ一定速度、一定車頭時間に達していない可能性もある。こうした影響を考えると、 R_s 算定に用いるべきサンプルを厳密に決めることは簡単ではない。この点は今後の課題である。本研究では、便宜的に右折専用現示開始時に停止線をすでに通過している車両を除き、4台目以降大型車や2輪車が到着するまでの全ての小型車の停止線と滞留スペース下流端の通過タイミング差を用いて R_s を算定するものとする。

(6) 損失時間の算定

以上の手順で求められた T_e と T_l より、対象とする切替り時の損失時間 L_l は時間差 $t_e = T_e - T_l$ として計算される。ここで t_e が正の値として算定されれば、その交差点におけるこの対象切替り時には t_e [秒]の損失時間があることになる。一方、 t_e が負となる場合は、その交差点におけるこの対象切替り時において、前の青丸現示の有効青時間の終了 T_l より前に、次の右折専用現示の有効青時間が開始 T_e していることを意味する。これは、いわばこの切替り時には損失時間ではなく、むしろ $|t_e|$ [秒]だけのゲイン(利得)が存在することを意味する。つまり、1サイクル当たりの損失時間 L の算定においては、 $|t_e|$ [秒]だけ損失時間 L を短くする効果を持つことになる。

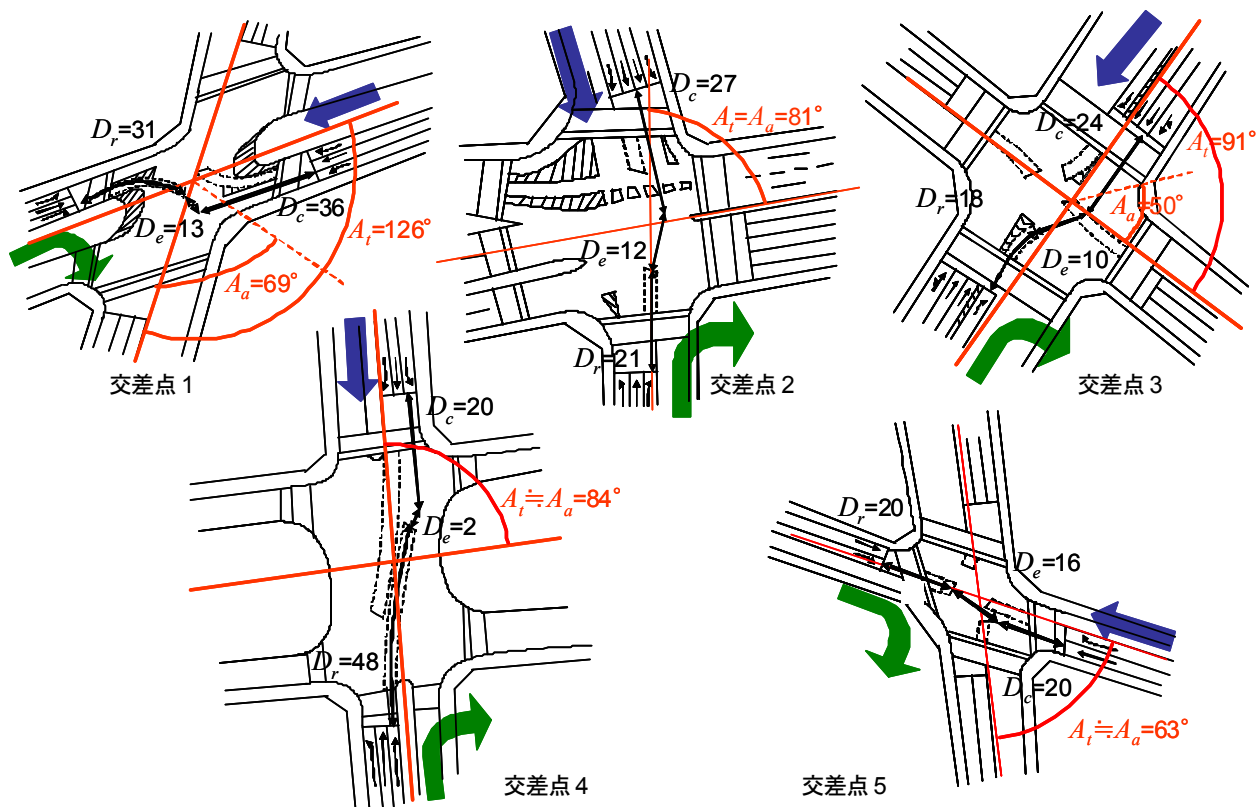


図-6 観測対象5交差点の概要

3. 交差点における実測と損失時間の算定

(1) 観測対象交差点

観測対象交差点の選定条件として以下を考慮する。

- ・青丸表示の後に右折専用青矢印表示となる方向がある
- ・この右折専用現示方向の対向直進交通が飽和しており、右折滞留車は青丸表示後の切替り時以降に初めて通行が可能となる状態を観測できる
- ・右折交通需要も多く、右折専用現示についても飽和もしくは近飽和状態を観測できる
- ・滞留スペース長 D_r 、停止線間距離、交差角など、交差点幾何構造条件が異なる複数箇所を対象とする

以上の条件を満たす交差点として、東京都内の5つの交差点を選定した。図-6に観測調査を行った交差点の概要を示す。図に右折矢印を示した方向を観測対象としている。表-1にこれらの交差点の形状諸元をまとめる。このうち、対象右折交通の停止線から滞留スペース下流端までの距離 D_r [m]、下流端から対向直進交通との交錯点(下流端から最も近い点)までの距離 D_e [m]、対向直進交通停止線から交錯点までの距離 D_c [m]、右折交通の流入方向と流出方向の交差角 A_r [度]、および滞留スペース下流端の右折車進行方向と流出方向の交差角 A_a [度]については、図-6にも示す。表の A_r [度] $=A_r - A_a$ であり、 r_R [m]は右折車の回転半径を推定したもの*[注]である。

表-1 観測交差点 No.1～5の形状諸元

No	D_c	A_r	A_r	A_a	D_r	D_e	r_R
No.1	36	126	57	69	31	13	15
No.2	27	81	0	81	21	12	15
No.3	24	91	41	50	18	10	16
No.4	20	84	0	84	48	2	11
No.5	20	63	0	63	20	16	27

(2) 直接観測量

各交差点では、それぞれ予備調査で条件を満たす可能性を確認した後、対向直進交通と対象右折交通が飽和する可能性が高い時間帯で、各の3時間のビデオ観測を行った。表-2にビデオ画像から直接読取りによって得られた7項目をまとめて示す。

T_i [秒]は対向直進有効青時間の終了タイミングであり、最終通過車の停止線通過タイミングの平均値を青丸表示後の黄開始からの経過時間で示している。対向直進が飽和と交通流状態にかつ下流交差点や停止車両などの影響なく観測できたサイクル数を()内に示す。

h_s [秒/台]は、対象右折交通流の飽和交通車頭時間であり、2章(4)節に示す条件を満たす車頭時間値の平均値である。分析対象の車頭時間のサンプル数を()内に示す。

R_s [秒]は、対象右折交通が飽和と交通流状態における停止線から滞留スペース下流端までに要した走行時間のうち、2章(5)節に示す条件を満たすものの平均値である。

表-2 観測交差点 No.1～5 における観測値

No	T_t	h_s	R_s	C	G_1	Y_1	G_r
No.1	1.8 (36)	2.09 (52)	5.3 (43)	120	49	4	9
No.2	1.5 (16)	1.88 (39)	4.3 (24)	158	58	3	9
No.3	2.1 (39)	1.99 (117)	3.4 (103)	156	53	3	13
No.4	1.5 (60)	1.90 (100)	7.3 (7)	98	30	4	5
No.5	1.4 (13)	2.08 (18)	4.7 (11)	112	37	3	6

分析対象の車両数を()に示す。

またこの表に、各交差点の観測時の標準的なサイクル長 C 、青丸表示時間 G_1 、および右折専用青矢印表示時間 G_r を示す。なお、交差点No.1とNo.5においては、実際には右折青矢印後にNo.1、No.5それぞれ4秒と3秒の黄表示時間があるが、ここでは黄表示時間も G_r に含めている。

表-2より、対向直進有効青時間の終了タイミング T_t は1.4～2.1 [秒]であり、これは $Y_1 = 2 \sim 4$ [秒]の1/2～1/3程度であり、右折飽和車頭時間 h_s の1.88～2.09 [秒/台]も飽和交通流率換算値で約1,720～1,920 [台/時]であり、いずれも妥当な値であることが確認できる。また滞留スペース走行時間 R_s [秒]と表-1の滞留スペース長 D_r [m]を比較すると、概ね正の相関が見られる。ここでNo.5交差点のサンプル数が少ないのは、飽和サイクルが少ないことと右折流出先すぐに別の信号交差点があり、この交差点で停止させられることで右折車が交差点を流出できずに先詰まりが生じるサイクルが多く生じたためである。

(3) 損失時間の算定

以上の観測量を用いて、2章(6)節に示す手順で時間差 t_c [秒]を算定する。表-3にこの手順にもとづいて算定される各変数も含めてまとめて示す。

T_s [秒]は、滞留スペース下流端における右折車の飽和交通流率と対象車両の通過タイミングを用いて回帰直線の切片として算定した実質有効青時間²⁾の開始タイミングの平均値である。これは、No.5を除いて約4秒程度で交差点によらずほぼ同程度となった。No.5が2秒程度と短い理由としては、下流端から交錯点までの距離 D_e が長いこととサンプル数が少ないことが考えられる。

実質有効青時間²⁾の開始タイミング T_s [秒]から滞留スペース走行時間 R_s [秒]を引いたものが、停止線位置における補正有効青時間²⁾の開始タイミング T_e [秒]である。 R_s が交差点形状により異なるため、 T_e も交差点により異なり、 $-2.7 \sim +1.0$ [秒]となった。これが負の値となる交差点では、青丸表示から右折専用現示への切替りの黄表示の開始タイミングよりも早いタイミングで補正有効青時間が開始すると計算されたことを意味する。

時間差 t_c [秒]は、補正有効青時間の開始タイミング T_e [秒]から対向直進有効青時間の終了タイミング T_t [秒]を引

表-3 観測交差点 No.1～5 における算定値

	T_s	T_e	t_c	t_h	V_r
No.1	4.4	-0.9	-2.7	2.6	5.85
No.2	4.2	-0.1	-1.6	2.7	4.88
No.3	4.4	1.0	-1.1	2.3	5.29
No.4	4.6	-2.7	-4.2	3.1	6.58
No.5	2.1	-2.6	-4.0	0.7	4.26

いたものである。この算定結果は $-4.2 \sim -1.1$ [秒]と、いずれも負の値となった。これは前現示の有効青時間終了よりも、次現示の有効青時間の開始のほうが早いことを意味する。5つの交差点すべて負の値を取ったことは、青丸表示の後に右折専用現示が来る場合の切替り時には、損失時間ではなく、むしろゲイン(利得)となる時間が生じるのが一般的であることを意味する。本来損失時間とは、サイクル中に有効青時間として活用されない時間を意味するが、青丸表示とその後の右折専用現示の間には前後の現示の両方の有効青時間が重なる時間帯が生じるので、その分サイクル長が長くなったのと同等の効果を発揮することがわかる。

たとえば図-2の3現示制御を考えた場合、損失時間 L_1 のかわりに t_c と書き、この t_c に負の値も認めれば、サイクル当たり損失時間 $L = t_c + L_2 + L_3$ と定式化できる。これまで一般に $L_1 > 0$ と考えてきたが、 t_c が負の値であれば、既存計算よりサイクル当たり損失時間 L は小さくなり、採用すべきサイクル長 C [秒]も短くなる可能性がある。ただし日本の交通信号の手引¹⁾では、滞留スペースに進入している車両を1サイクル当たり K_{ER} [台/サイクル]の処理台数として見込めることを、交通需要から単位時間当たり $(K_{ER} \times 3600 / C)$ [台/時]だけ交通需要を低減させることに反映させて、必要有効青時間率を計算している。したがって、この既存手法による需要低減効果と本研究で実証的に得られたゲイン t_c とが相殺するのであれば、サイクル長の計算結果には大きな違いは生じないはずである。このようにゲイン t_c が信号制御設計に与える影響は十分注意深く精査する必要がある、今後の課題とする。

(4) 算定値と交差点幾何構造の関係

前節では K_{ER} とゲイン t_c が相殺する可能性に言及したが、交通信号の手引では K_{ER} と交差点の大きさや形状との関係は必ずしも明確ではない。以下では、5交差点と交差点数のサンプルは少ないものの、ゲイン t_c と交差点形状パラメータとの関係を分析する。

表-3の t_h [秒]は、対向直進有効青時間終了タイミング T_t [秒]から右折滞留スペース下流端位置における実質飽和交通流の開始タイミング T_s [秒]までの時間である。また、 V_r [m/秒] = (滞留スペース長 D_r) ÷ (滞留スペース走行時間

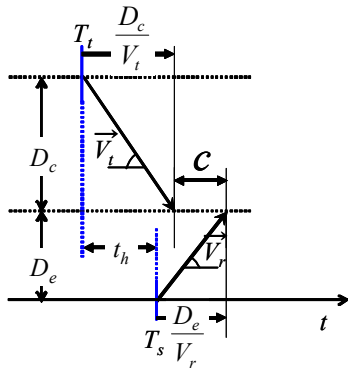


図-7 t_h と交差点安全性確保のための余裕 c との関係

R_s)は、飽和交通流状態の右折車による停止線から滞留スペース下流端までの平均走行速度である。

ここで、交差点における一定の安全性確保の観点から、交差点によらず対向直進最終通過車が交差点を通過してから右折先頭車がこの交差点に到着するまでの時間差は c [秒]で一定と仮定する。対向直進車の停止線から交差点までの走行速度を V_t [m/秒]、右折車の滞留スペース下流端から交差点までの走行速度を w [m/秒]とし、これらもそれぞれ交差点によらず一定とすると図-7に示す関係が成立する。この関係を定式化すると式(1)となる。

$$t_h - \frac{D_c}{V_t} = c - \frac{D_e}{w} \quad (1)$$

図-8には、 $V_t = 40$ [km/時] ≈ 11.1 [m/秒]とおき、実測値 D_c と計算値 t_h を用いて各交差点の左辺の値を計算し、実測値 D_e との関係を示す。両者が線形関係にあることから式(1)がほぼ成立することがわかり、図に記載した回帰式より、次式(2)で t_h を推定できることがわかる。

$$t_h = 1.74 - \frac{D_e}{6.06} + \frac{D_c}{11.1} \quad (2)$$

式(1)、(2)を比較すれば、右折車の滞留スペース下流端から交差点までの平均速度は、交差点によらず 6.06 [m/秒] (≈ 22 [km/時])とわかる。表-3の V_r [m/秒]の値の範囲をみると、これはだいたい妥当な値である。

一方、滞留スペース走行時間 R_s [秒]は D_r / V_r で与えられるので、 V_r が求まれば R_s を推定できる。 V_r は、走行距離 D_r 、右折車の回転半径 r_R 、回転角 A_r などに依存すると考えられる。そこでこれらの変数を説明変数として重回帰分析を行うと、次の推定式(3)が得られた。

$$V_r = 4.83 + 0.048D_r - 0.057r_R + 0.0086A_r \quad (3)$$

式(3)の各パラメータは有意に推計され、相関係数も高いが、サンプル数はわずかに5であり、また回転半径 r_R の係数の符号は物理的に整合していない。今後、より

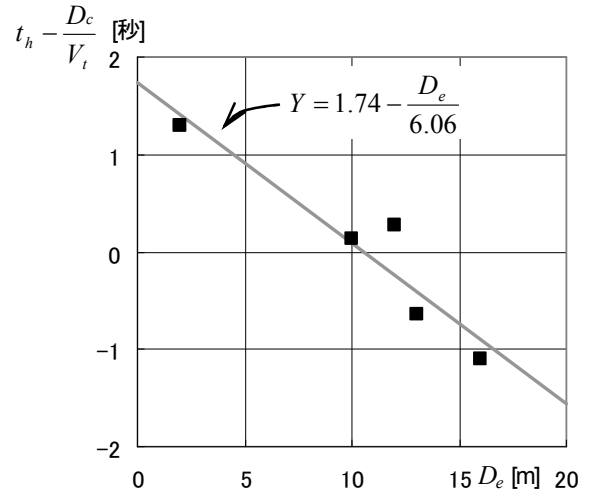


図-8 実測 D_e と式(1)の左辺の値との関係

多くの交差点構造条件下で滞留スペース平均走行速度 V_r を観測することができれば、平均走行速度 V_r を説明可能な適切なモデルを見出すことが可能だと考えられるが、基本的に V_r は関数 $V_r(D_r, r_R, A_r)$ で表現できるはずであろう

以上をまとめると、青丸表示とその後の右折専用現示との切替り時における有効青時間の時間差 t_c は、次式により、交差点幾何構造から推定できる。

$$t_c = t_h - R_s = \left(1.74 - \frac{D_e}{6.06} + \frac{D_c}{11.1} \right) - \frac{D_r}{V_r(D_r, r_R, A_r)} \quad (4)$$

モデル式(4)はまだ精査する余地はあるが、供用前の交差点であっても、幾何構造条件さえ得られればモデル式によって t_c を計算することが可能であり、これを用いて交差点全体のサイクル当たり損失時間を適切に推定することができれば、これまでより合理的に信号制御パラメータ(とくにサイクル長)を決定できる可能性がある。

4. 結論と今後の課題

本研究では、信号交差点において青丸表示中に交差点内の滞留スペースで待機する車両が生じ、その後右折専用現示で右折車が通行できる場合を対象に、5つの幾何構造の異なる交差点において損失時間の実証分析を行った。得られた主な成果は次のとおりである。

- ・損失時間を実証的に求めるには、前現示の有効青時間の終了と次現示の有効青時間の開始を定義する必要があり、これを実証的に観測・推定する手法を提案した。
- ・非優先右折車が交差点内で滞留することによる影響を特別扱いせず、これも含めて(有効青時間×飽和交通流率)で処理するように計算する「補正有効青時間²⁾」

の概念を適用して、青丸表示とその後の右折専用現示との損失時間を推定した結果、一般的にこの信号切替り時には損失時間よりむしろゲイン(利得)が生じると考えるべきであることを明らかにした。

- ・ゲインとは前現示の有効青時間と次現示の有効青時間が重複している時間であり、サイクル当たり損失時間はこのゲイン時間だけ短くできる。
- ・このゲイン時間の長さは、いくつかの交差点幾何構造条件によって推定できる可能性を示した。

本研究による実証分析は5つの交差点に限られており、今後は、より多くの交差点で同様の分析を蓄積して、本論文の提案手法の有効性を検証するとともに、2.章(3)節に示した有効青時間終了タイミング、同(4)節の飽和交通流率、同(5)節の滞留スペース走行時間の各算定手法については、より合理的な考え方と計算法を確立することも、本手法の実務での適用のためには必要である。

さらに、ゲイン時間長の道路幾何構造による推定モデル式にはまだ多くの改良余地があり、サンプル交差点を増やして実際の実務で適用できるモデル式を開発する必要がある。またゲイン時間長や、関連する多くのパラメータは確率的に変動するため、その変動の影響を適切に評価するために、モンテカルロ・シミュレーションを適用して分析できる可能性もある。

注

* 右折専用車線の車線中心線 l_e と右折流出先内側車線の

車線中心線の交点 P からこの交角 A_i を2等分する方向に直線 l_h を引く。右折停止線位置 Q で l_e に垂線 l_s を引いて、 l_s と l_h の交点 R を回転半径中心として $OS=r_R$ [m]

参考文献

- 1) (社)交通工学研究会編: 改訂 交通信号の手引, 丸善, p.150, 2006.
- 2) 大口敬: 非優先右折滞留車の影響を考慮した有効青時間の補正, 交通工学, Vol.45, No.2, pp.73-83, 2010.
- 3) Transportation Research Board: "Highway Capacity Manual", 2000.
- 4) 浅野陽介, 鹿田成則, 片倉正彦, 大口敬: 右折現示クリアランス時における右折車の走行実態と損失時間, 土木学会年次学術講演会概要集, No.55-4, CD-ROM, 2000.
- 5) 鹿田成則, 片倉正彦, 大口敬, 村井紀子: 右折信号現示切替時の損失時間分析, 交通工学研究発表会論文報告集, Vol.23, pp.57~60, 2003.
- 6) 小野剛志, 片岡源宗, 田中伸治, 桑原雅夫: 損失時間の適正な評価のための信号現示切り替わり時における車両挙動の分析, 土木計画学研究発表会講演集, No.38, CD-ROM, 2008.
- 7) 小野剛志, 片岡源宗, 田中伸治, 桑原雅夫: 信号切替り時ロスタイムの適正な評価のための実交通流の解析, 生産研究, Vol.60, No.3, pp.242~245, 2008.
- 8) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): RiLSA (Guidelines for Traffic Signals), Edition 1992, English Translation 2003.

EMPIRICAL STUDY FOR ESTIMATING THE LOST TIME AT SIGNALIZED INTERSECTIONS

Takashi OGUCHI, Tomoko YAMAGUCHI, Shigenori SHIKATA
and Hiroyuki ONEYAMA

Signal Change Intervals (SCIs) are mostly important not only because SCIs affect significantly on the users' delay, but also for keeping traffic safety. The beginning and end of the each 'effective green time' are not considered much enough before, but the proper evaluation of the beginning and end of the effective green time should be taken into account for determining the lost time. This study focuses on the SCI between (normal) green circle light and following protected right-turning green arrow. Saturation flow, first and last vehicle passing time under saturated condition, dimension of the waiting space inside a signalized intersection, and so on are surveyed and the lost time and effective green time are estimated. Five intersections with different geometric dimension and shape are surveyed and analyzed. It is revealed that not a 'lost time' but a 'gain time' exists at SCIs between green circle and right-turning green arrow. The traffic signal operation engineers should take into account the fact for signal timing design. The gain time can be estimated with the evaluation of the geometric conditions of the intersections.