

信号交差点における損失時間の実証推定手法*

Empirical analytic methods for estimating the lost time at signalized intersections

山口智子**・大口敬***・鹿田成則****・小根山裕之*****

By Tomoko YAMAGUCHI**・Takashi OGUCHI***・Shigenori SHIKATA****・Hiroyuki ONEYAMA*****

1. 背景と目的

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。原則として遅れはサイクル長に比例するため、長いサイクル長は望ましくない。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してしまう。損失時間の存在は、高い交通需要を捌くことのできる交通容量確保のために、長いサイクル長を必要としてしまう。例えば1秒であっても、1回の信号切替りに生じる損失時間の見積もりを間違えれば、サイクル長や遅れへの影響は数%にも及ぶ可能性がある¹⁾。従って、交差点信号制御の最適化には損失時間の的確な把握が必要となる。

図1は、飽和交通流率 ($s=1/h$, ここに h =飽和交通流における平均車頭時間) の概念を累積交通量図により整理したものである。現示1φの青表示時間 (G) 開始から1台目が通過するまでの時間、および2, 3台目の車頭時間は一般に h よりも長いとされる^{2), 3)}。十分な交通需要があれば、4台目以降青表示時間終了から黄時間 (Y) あたりまで通過する車両までは、車頭時間の期待値

は平均車頭時間 h に等しいものと考えられる。そこで、4台目以降の期待値として得られる一定の飽和交通流率 (s) の傾きを持つ累積交通量直線を、0台目にまで外挿して得られた時刻を有効青時間 (G_e) の開始時刻とする (このとき G の開始から G_e の開始までの時間を発進損失 (L) と呼ぶ)。

一方、個々の車頭時間は期待値に周りに散らばるため、飽和交通流の終了時刻の考え方は難しい。1回の青で最終的に通過する交通量が変動すると共に、その最終通過車の停止線通行タイミングもさまざまであるからである。ここでは、仮に図中の実線の累積交通量直線が期待値であると考えて、実線の最終通過車の通過時刻を有効青時間 G_e の終了時刻とする (この時刻から次の現示の青表示時間開始までの時間をクリアランス損失 (L_c) と呼ぶ)。

ここで改めて、有効青時間の最初の部分と終わりでは、損失の発生要因が異なることを再確認したい。前者は車両の加速状況に応じて生じる損失時間を、後者は現示切替り時の最終通過タイミングに応じて生じる期待値を意味しており、両者は飽和交通流が実現されない時間としては同じ損失時間だが、その性質は全く異なる。

青丸から右折青矢切替りでは、対向直進車に対する青表示の終了後黄表示となり、その後右折車に対して右折青矢表示が出る。従って、この切替り時には、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。日米の現行の信号制御マニュアルでは、青丸と右折青矢との切替りには損失時間は生じないとしている^{2), 4)}。

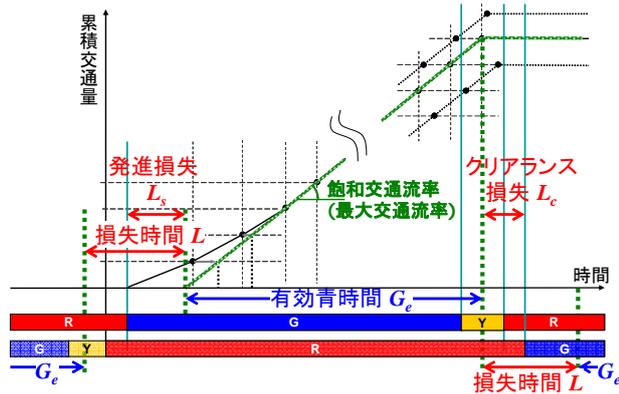


図1 飽和交通流率の概念図

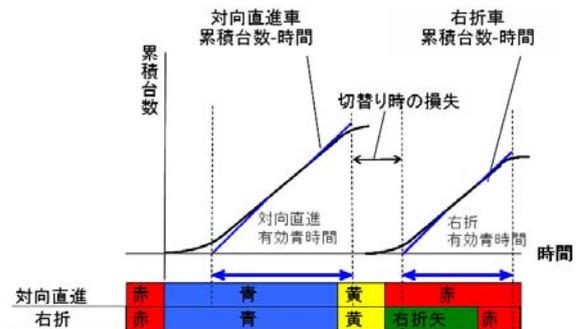


図2 青丸から右折青矢切替り時の概念図

*キーワード: 交通制御, 交通流, 交通容量, 信号交差点

**学生員, 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科

***正員, 博(工), 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科

(八王子市南大沢 1-1, TEL:042-677-2781, oguchi@tmu.ac.jp)

****正員, 工修, 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科

*****正員, 博(工), 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科

表1 分析対象交差点とその概要

| 観測交差点 | 青山三丁目 | 矢野口 |
|------------|---------------------------|-------------|
| 観測日時 | 2008/10(平日) | 2009/11(平日) |
| 観測時間 | 1h | 1h |
| サンプル数 | 15サイクル | 8サイクル |
| 滞留スペース L | 17m | 22m |
| 青丸後黄現示 | 3秒 | 3秒 |
| 右折青矢長 | 13秒 | 7秒 |
| データ化条件 | 右折車5台以上 直進車の需要が途切れていない | 右折車5台以上 |

しかし、これを立証した研究は見当たらず、交差点幾何構造によっては、(負の場合も含めて)損失時間が発生する可能性がある。

またこの現示条件では、青丸表示の間に停止線と右折指導線下流端の間(以下、滞留スペース)に停止滞留車両が発生する。この場合、右折青矢開始に伴う右折滞留先頭車から伝わる発進波が停止線到着に要する時間と、右折滞留先頭車がすでに停止線より前に出ている効果を勘案すると、一般に考えられている右折有効青時間の開始時刻は、右折飽和交通流状態の車両が滞留スペース(D)の走行に要する時間($Td=D/v_f$)だけ早いものとみなすべきである⁵⁾。

本研究では、青丸から右折青矢の切替りに着目し、損失時間の実証的な推定方法を検討する。実交差点における観測調査にもとづいて、対向直進と右折の2つの交通流に対して、それぞれ飽和流率、有効青時間の開始と終了のタイミングを計測・算定する方法を検討する。本論文では、表1に示す2交差点を例として取り上げる。図3は、あるサイクルに着目し、青丸表示における対向直進(第1車線と第2車線)と右折の累積台数、信号表示の各切替り時刻を1つの図にまとめた例である。

2. 課題整理

(1) 青丸表示後右折青矢表示の切替りの特徴

対象とする右折方向に対して、これに対向する直進交通需要が十分に多い場合、対向直進の最終通過車まで対向直進交通は基本的に飽和交通流となり、右折滞留先頭車は対向直進最終通過車との錯綜を回避するように発進を開始する。従って、右折滞留先頭車の最終的な発進タイミングの決定は、対向直進の停止線、および対向直進と右折の動線交錯点の通過タイミングに依存する。つまり、対向直進最終通過車の通過タイミングとその先頭停止車の停止タイミングが右折車の発進タイミングに影響を与える。

(2) 右折青矢の補正有効青時間⁵⁾

図4は、青丸表示後の右折青矢表示において、有効青時間 G_e と右折車両の通行状態との関係を、Time-Space図と交通量累積図で示したものである。ここに、 D は滞留スペースの長さ、 v_f は飽和交通流 s_r 時(需要交通状態も

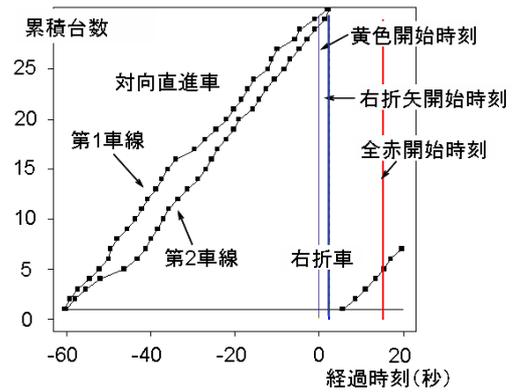
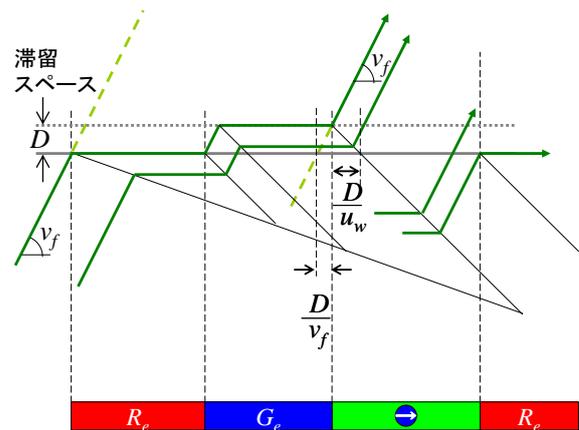
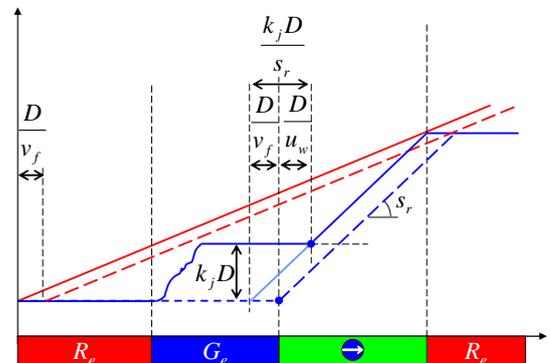


図3 累積台数と現示切替りの事例



a) Time-Space 図



b) 交通量累積図

図4 青丸後の右折青矢の有効青時間

同じ)の交通速度、 u_w は発進波の伝播速度である。ここで、図a)のように加減速を無視した一定速度のみに単純化したTime-Space軌跡モデルを用いる場合、これに対応する青時間は有効青時間でなければならないことがわかっている⁵⁾。図より、滞留スペース下流端より D/u_w 後に停止線に発進波が到達することが確認できる。図b)では、停止線の累積交通量を実線で、滞留スペース下流端の累積交通量を破線で示している。また赤を需要交通、青を流出交通とする。停止線の流出交通は、右折青矢有効青時間の開始から D/u_w 後に再開することがわかる。

右折青矢有効青時間の終了タイミングは、停止線を

基準に考える必要がある。一方で右折青矢有効青時間の開始タイミングは滞留スペース下流端で便宜的に考えてしまうことが一般的だと考えられる⁵⁾。しかし飽和交通流率を用いて正しく交通処理台数を評価し、損失時間を評価するためには、すべて停止線で評価した有効青時間を正しく定義しなければならない。そこでこれまで慣例的に考えられてきた有効青時間を補正する必要がある。これが「補正有効青時間⁹⁾」であり、滞留スペース下流端で考えた有効青時間開始タイミングを、 D/v_f だけ早く開始したように補正すればよい⁹⁾。

(3) 滞留スペース走行時間の推定法

D/v_f は、飽和交通流状態の車両が滞留スペースの走行に要する時間 T_d を意味するが、実測調査からこれを推定する方法を考える。図5は、表1の観測調査交差点を対象として観測を行った項目を示す。信号表示の切替り

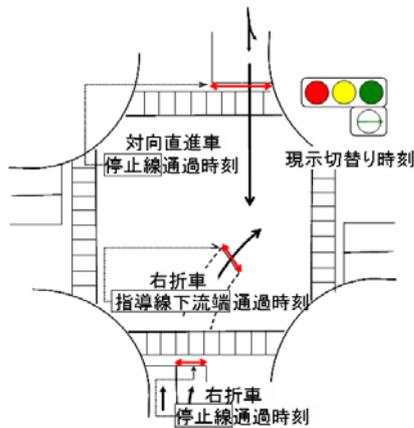


図5 交差点調査における観測箇所と観測項目

時刻、対向直進車の停止線通過時刻、右折車の停止線通過時刻と滞留スペース下流端通過時刻、を観測する（バイク・普通自動車・大型車の3車種に分類）。飽和交通流率と有効青時間の開始・終了タイミングを推定するため、各車両の車頭時間を通過順番と共に計測する。また、停止線通過と滞留スペース下流端通過の時間差が滞留スペース D の走行時間 T_d であるので、飽和交通流率時の交通速度 v_f を用いることなく、各車両について有効青時間の補正量 T_d のサンプル値が直接計測される。

(4) 飽和交通流率と有効青時間の推定方法

有効青時間を推定するためには、飽和交通流率の値を推定する必要がある。この値は、飽和交通流状態にあるとみなせる車両の平均車頭時間として与えられるべきである。しかし、ここにはどの車両の車頭時間計測値をどのように集計（平均）すべきかという問題がある。

a) 右折青矢の終了直前の交通状態

まず、右折青矢の終了タイミング直前の流率を図1に示すように飽和交通流率のまま一定と考えるのか、図2のように徐々に流率が低下すると考えるべきなのか、必ずしも明瞭にされているとはいえない。サイクルごとに図1の実線や破線のように状況が異なるため、そのサイクルで通過した累積交通量や、最終通過車の通過タイミングは異なる。その期待値を累積交通量図として描画したものが、図2のように一つの曲線として描けるものと解釈することができる。

十分な右折交通需要があってその現示が飽和している場合、右折青矢終了後、黄表示終了後でも停止線を通り過する場合がある。こうしたぎりぎりのタイミングのい

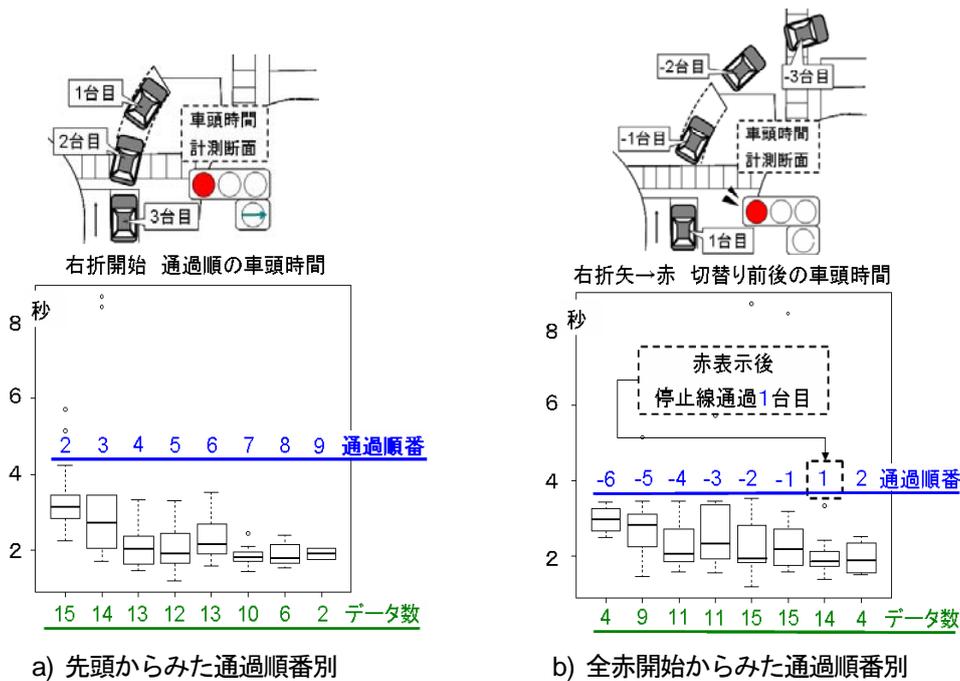


図6 右折車の先頭からおよび全赤開始からみた通過順番別の車頭時間分布

いわゆる「駆け込み」車両については、通常の飽和交通流状態の車頭時間よりもさらに短い車頭時間で駆け込んでいく可能性がある。

図 6 の a)は、分析対象サイクル全てについて、右折滞留スペース下流端の先頭車から通過順番別に車頭時間の分布を箱ひげ図により表現したものである。先頭車である 1 台目にはその前方車は存在しないため、車頭時間は定義できず、2 台目から集計している。図より既存知見^{2),3)}と同様に 3 台目までは平均車頭時間が長く、4 台目以降には有意な差は認められない。一方、図 6 の b)は、同じサンプルを対象として、右折青矢後の黄表示終了後の通過車を 1 台目とし、これ以前の車両を-1 台目、-2 台目と通過台数別に車頭時間分布を集計したものである。この図をみると、全赤開始後に滞留スペース下流端を通過している車両は、全赤開始前よりもわずかではあるが、車頭時間が短くなる傾向が見られる。すなわち、全赤開始後の交通流状態は、通常の飽和交通流の状態よりも短い車頭時間の交通状態であるものと解釈することができる。

以上より、飽和交通流率算定に用いる車頭時間は、

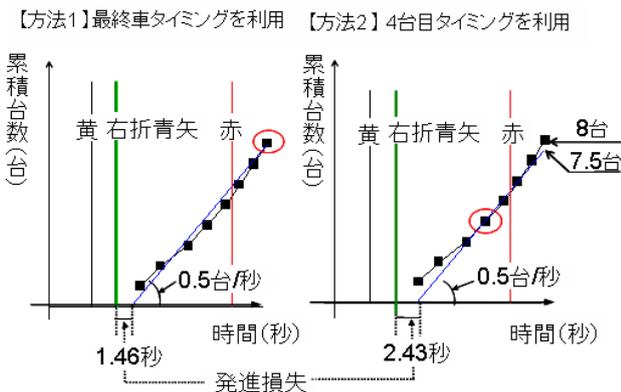


図 7 飽和流の配置方法による損失時間

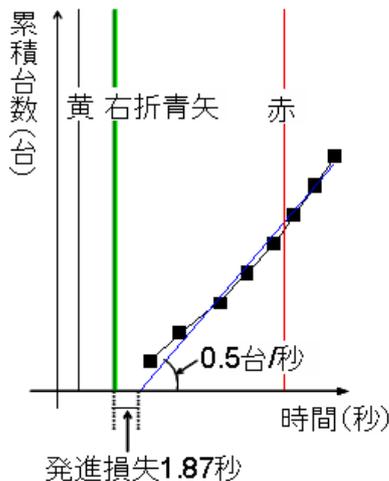


図 8 飽和車頭時間による損失時間の算定

全赤開始より前の車頭時間を用いるべきであると考え。一方で、有効青時間の終了タイミングを決めるためには、算定した飽和交通流率の傾きを持つ累積交通量直線を何台目まで適用するかで決まるが、ここでは有効青時間の本来の意味にもとづいて、実処理台数を飽和交通流で処理するのに要した時間まで、すなわち表 1 に記載のデータ化条件を満たす全サイクルの最終通過車両（全赤開始前後に関係なく）までの通過台数を用いて計算する。

b) 右折飽和交通流率の開始タイミング

各サイクルの有効青時間の開始、終了タイミング（＝飽和交通流状態が生じているとみなす時間＝飽和交通流率（平均車頭時間の逆数）の傾きの直線を交通量累積図上の時間軸上のどこに配置するか）の決め方にも注意しなければいけない。図 7 では、最終通過車の通過タイミングを当てはめた場合【方法 1】と、飽和交通流状態で最初に通過した 4 台目の通過タイミングに飽和交通流率（平均車頭時間の逆数）の傾きの直線を当てはめた場合【方法 2】を比較している。図には、左右ともに同じ交差点の同じサイクルで取得した右折車の累積台数にもとづいて、上記 2 つの方法で当てはめた飽和交通流率の直線も示している。飽和交通流率の直線の傾きは左右同じで、交差点平均車頭時間（飽和交通流と考えられる車頭時間サンプル全ての平均値の逆数）を用いている。図より、最終通過車や 4 台目のように、ある一台の通過タイミングを適用することで、損失時間が 1.47 秒と 2.43 秒と 1 秒ほど異なる場合があることがわかる。

そこで各サイクルの各車両の車頭時間に対して、飽和交通流状態で通過している車両の順番と通過タイミングの実測値を用いて、時間軸上の残差最小化により回帰直線（ただし傾きは固定）を求め、これが縦軸の 0 台目と交わるタイミングを有効青時間の開始、最終通過車（図 7 の例では 8 台目）通過するタイミングを有効青時間の終了とする方法を提案する（ただしこれは滞留スペース下流端で見た場合の有効青時間の開始、終了であることに注意）。この方法ならば、ある一台の車両の通過タイミングに左右されず、実測から期待される最も確からしい有効青時間のタイミングを決めることができる。

図 8 の青い直線は、図 7 の例と同じサイクルを対象に、4 台目以降全赤開始前までに停止線を通過した車両の通過時刻を用いて回帰直線を計算したものである。これによれば、このサイクルの発進損失時間は 1.87 秒と推定され、図 7 の方法の【方法 1】【方法 2】の中間値となる。

3. 事例分析

(1) 対向直進と右折車の通過タイミングの実態分析

青丸から右折青矢に切替る際の右折車通過タイミングは、2. の(1)に示すように、対向直進最終通過車の

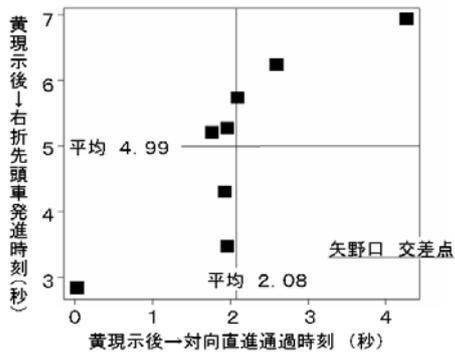
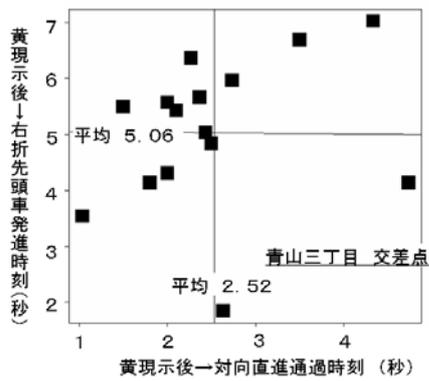


図9 右折先頭車発進と対向直進車最終通過の関係

タイミングに依存すると考えられる。図9は、これを確認するために、滞留スペース下流端の右折先頭車の発進タイミングを縦軸に、対向直進最終車の停止線通過タイミングを横軸に取って相関を調べたものである。いずれも青丸表示後の黄表示開始を基準時刻0秒としている。2交差点共に、対向直進の通過時刻が遅くなると、右折車の発進時刻も遅くなる傾向を確認することができる。

(2) 飽和交通流と有効青時間の推定

2. の(4)で考えたのは1サイクルを対象に、1つの参照地点（滞留スペース下流端）における有効青時間の分析の考え方であるが、この基本的考え方にもとづいて実際に有効青時間の推定を試みる。

同一交差点・流入路の青丸表示後の右折青矢現示における右折車の飽和交通流率については、分析対象の中から、滞留スペース下流端先頭車から4台目以降全赤表示前に停止線を通過した車頭時間サンプルのみをサイクルごとに取り出し、これらの「滞留スペース下流端」通過時の車頭時間を用いて平均車頭時間を求め、その逆数として飽和交通流率の値を算定する。

次に、サイクルごとに4台目以降全赤表示前に停止線を通過した車両の「滞留スペース下流端」の通過時刻に対して、この飽和交通流率の直線を当てはめて残差最小となる回帰直線を求め、この時間軸切片(0台目へ外挿した時刻)を有効青時間の開始タイミングとする。

一方、有効青時間終了タイミングを求めるには、同一車両群の「停止線」通過時刻に対して同じ s_r 値を用

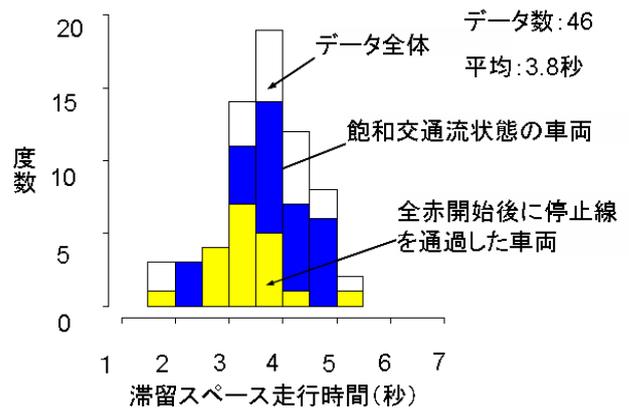


図10 滞留スペースの走行時間（青山三丁目）

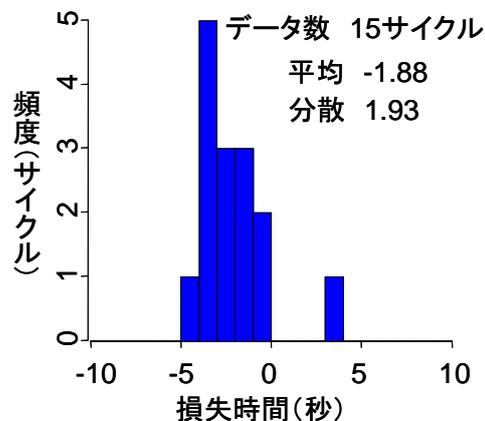


図11 青丸から右折青矢切り時の損失時間

いて残差最小となる回帰直線を求め、（全赤表示開始の前後によらず）そのサイクルに通過できた最終通過車のタイミングを有効青時間終了タイミングとする。

得られた開始・終了タイミングより求められる有効青時間は、実際の右折青矢表示に対応するものとしてこれまで慣例的に考えられてきた有効青時間である。この開始タイミングは停止線ではなく滞留スペース下流端で考えているので、これを停止線位置に時間的に前に外挿する必要がある。この外挿は、2. の(2)で論じたように、滞留スペース走行時間 $T_d=L/v_f$ だけ有効青時間開始タイミングを早めるように補正すればよい。

(3) 滞留スペース走行時間の推定

滞留スペース D の走行時間 $T_d=D/v_f$ を推定するために、停止線通過時刻と滞留スペース下流端通過時刻より、走行時間 T_d を分析する。図10は青山三丁目における T_d の頻度分布図である。青は車頭時間が飽和交通流状態を形成している車両、黄は全赤開始後に停止線を通過した車両、それ以外を白で表す。走行時間 T_d のサンプルには、滞留スペース下流端の先頭車が発進し始めてから停止線を通過した車両のみが含まれ、青丸開始から右折青矢開始までの時間帯に停止線位置を越えて滞留スペース

内に入っていた車両は含まれない。

図より、飽和交通流状態で走行している車両の T_d は全体の T_d とほぼ同じ分布に見えるが、全赤開始後に停止線を通過した車両は走行時間が全体的に小さく速度が速い傾向があるものと考えられる。

図 11 に、青山三丁目交差点において青丸から右折青矢切替り時の損失時間を、サイクルごとに推定した結果を示す。サイクルごとに損失時間の計算結果は変動するが、期待値としては約 -1.9 秒程度の負の損失時間となった。負の損失時間とは、その切替りに「損失」となる時間がない、というだけでなく、最小サイクルや最適サイクルの評価に用いられる 1 サイクルの総損失時間には、負の値として総損失時間を減少させる効果を持つことを意味する。なお、この結果はあくまでも対象交差点の対象サンプルの特性であり、一般的にこうした値が成立するかどうかは今後分析を深める必要がある。

また青山三丁目交差点において、対向直進の青丸表示後のクリアランス損失を単純に対向直進車の停止線最終通過車の通過タイミング以降と考えると、その平均は 0.34 秒となった。同様に右折青矢表示開始の発進損失の平均値は 1.58 秒となった。なお、この計算には実測から得られたこの右折青矢における飽和交通流率 1810 台/時を用いている。

したがってこの切替りにおける見かけ上の切替り損失時間は、約 1.9 秒 ($=0.34+1.58$) となり、青丸表示後の右折青矢表示の切替り損失をゼロとする日米のマニュアルにおける扱い^{2), 4)}は一見すると妥当であるように思われる。しかし、飽和交通流率で実際の右折処理量を捌くために必要な有効青時間を考えると、滞留スペース走行時間 (平均 3.8 秒) だけ有効青時間が早く開始する

ように補正する必要がある⁵⁾ので、真の切替り損失時間は約 -1.9 ($=0.34+1.58-3.8$ 秒) 秒となる。

4. まとめ

本研究では、滞留スペース走行時間による補正を行って切替り損失時間の推定を行った結果、約 -2 秒程度の損失時間となった。このような負の損失時間が試算されたことは大きな意義がある。すなわち、損失時間を正確に評価することによって、信号交差点のサイクル長が大きく影響を受ける可能性があり、こうした調査分析を深める必要性、意義を示唆するものと考えられる。

本研究はまだ端緒についたばかりであり、こうした損失時間推定の実証分析方法についての提案と、少数サンプルながら実際に提案手法による計算結果を提示して、その意義を問題提起するものである。今後、さらに考察を深めるとともに、実証データの蓄積を進め、信号表示の切替り損失時間を適切に評価できる枠組みを確立することが重要であると考えている。

参考文献

- 1) 大口 敬, 佐々木俊輔, 小根山 裕之, 鹿田 成則: 多車線交差点における信号切替り時の交通実態分析, 土木計画学研究・講演集, No.39, 2009 年
- 2) Transportation Research Board: Highway Capacity Manual, pp.16-122~125, 2000 年
- 3) 交通工学研究会: 交通容量データブック 2006, 2006 年
- 4) 交通工学研究会: 改訂 交通信号の手引, 2006 年
- 5) 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 年