

# 信号切り替わり時の交錯車両の挙動に基づいた インターグリーン設計に関する研究<sup>\*1</sup>

## Research on the Intergreen Design based on the Driver Behavior during Intergreen Intervals at Signalized Intersections<sup>\*1</sup>

太田代 有紀子<sup>\*2</sup>・桑原 雅夫<sup>\*3</sup>・唐 克双<sup>\*4</sup>  
By Yukiko OTASHIRO<sup>\*2</sup>, Masao KUWAHARA<sup>\*3</sup>, and Keshuang TANG<sup>\*4</sup>

### 1. はじめに

信号交差点は交通の安全・円滑上のボトルネックであり、このため道路構造と信号制御には慎重な設計が求められる。しかしながら、わが国の信号交差点はサイクル長が長く、必ずしも効率的でない上に、強引な駆け込み進入やフライング発進といった危険挙動を誘発し、安全性にも課題が残されている<sup>1)</sup>。この背景には、信号切り替わり時の車両挙動に見合ったインターグリーン(黄時間と全赤時間の和)の設定となっていない現状がある。同時に、インターグリーンは損失時間に直接関連し最適サイクル長を決める際に重要な要素となってくる。よって、インターグリーンの設計は信号交差点の安全性と効率性の両面からとても重要である。

わが国において、全赤時間は式(1)に示すクリアランス距離を接近速度  $V$  で除すことで計算される<sup>2)</sup>。従来まで  $W$  には停止線間距離が用いられてきたが、例えば右折専用現示後では横断歩行者との交錯が生じないため、必ずしも停止線間距離である必要はなく、停止線から交錯点までの距離とすることで短い全赤時間設定となる。

$$AR = WV \quad (1)$$

一方、ドイツでは、図-1 中のエンタリング時間  $t_e$  を考慮した式(2)で定義され、全赤時間を必要最小限の長さに設定している<sup>3)</sup>。

$$AR_{\text{germany}} = t_c - t_e \quad (2)$$

式(2)では損失時間を短くすることができ、わが国の設定方法に比べ効率的であるが、クリアランス車両がコンフ

リクトポイントを通り過ぎてから、すぐにエンタリング車両がコンフリクトポイントを通り過ぎる挙動を考慮しており、交錯の余裕時間が全くない。結果として、余分な発進損失や追突事故が生じる可能性があることが分かっており、安全性には課題が残っている<sup>4)5)</sup>。

実際には、図-1 に示すように車両の進入タイミング、通過速度、交差点内動線は交差点構造、車両ごとに異なると考えられ、 $t_c$  や  $t_e$  が確率的に変動することで必要な全赤時間長もまた変化すると考えられる。したがって、全赤時間設定の設定に際しては、交差点構造、信号制御方式に応じた信号切り替わり時の車両挙動の変化を適切に予測・評価し、ドライバーにとって必要十分な全赤時間長を慎重に検討することが重要といえる<sup>6)</sup>。

そこで本研究では、クリアランス車両(対象現示の最後尾車)とエンタリング車両(次現示の先頭車)との間で生じうる挙動について分析することで、安全性を評価しつつ効率的な全赤時間設定に及ぼす影響について検討する。さらに、安全性・円滑性両方を担保する全赤時間の設定モデルを提案し、実際の交差点に適用した場合の全赤時間短縮の可能性を検証する。

### 2. 交錯車両挙動の理論分析

図-2 は現示の切り替わり時における、仮想的なクリアランス車両とエンタリング車両の行動を示している。I の軌跡は残留時間が負の軌跡(全赤終了前にコンフリクトポイントを通り過ぎるクリアランス車両)を示しており、II の軌跡は残留時間が正の軌跡(全赤終了後に駆け込んでくるクリアランス車両)を示している。

エンタリング時間とは青時間開始からエンタリング車両がコンフリクトポイントを通り過ぎるまでの時間である。また、 $t_{e\text{min}}$  は残留が負の場合(I の軌跡)のエンタリング時間を示しており、発進反応時間  $\tau$  はエンタリング車両が動きだす時刻から青現示が表示された時刻を差し引いた時間の長さである。エンタリング時間とは青時間開始からエンタリング車両がコンフリクトポイントを通り過ぎるまでの時間である。また、 $t_{e\text{min}}$  は残留が負の場合(I

\*1キーワード: インターグリーン, コンフリクトポイント, 全赤時間, 残留時間, 交錯車両間の通過時間差 (PET)

\*2学生非会員, 東北大学大学院情報科学研究科人間社会情報科学専攻 (宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6番3号09,

E-mail: ootashiro@plan.civil.tohoku.ac.jp)

\*3正会員, Ph.D, 東北大学大学院情報科学研究科人間社会情報科学専攻

\*4正会員, 博(工), Tongji University

(Room 1015, Tongji Building Block A, No. 1 Zhangwu Road, Shanghai 200092, P. R. China, Email: tang@tongji.edu.cn)

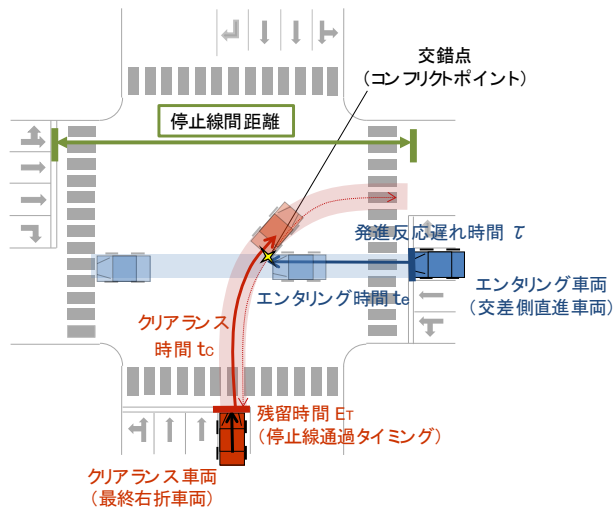


図-1 信号切り替わり時の交錯(右折矢終了後)

の軌跡)のエンタリング時間を示しており、発進反応時間  $\tau$  はエンタリング車両が動きだす時刻から青現示が表示された時刻を差し引いた時間の長さである。

安全性と円滑性の両方を考慮した場合、最適な全赤時間の設定には、クリアランス車両とエンタリング車両のコンフリクトポイントの通過時間差 (Post Encroachment Time, 以下 PET) を基に決めるべきというものは、一つの考え方である<sup>7)</sup>。

図-2 において、最適な全赤時間とは  $AR_{germany}$  に  $\Delta t$  を足し合わせたものである。ドイツ方式の全赤時間は前述したとおり、 $PET=0$  秒の場合を考えており、車両の交錯の際に余裕時間が全くない。

この図に示すとおり、実際の全赤時間が  $AR_{germany}$  によって制御されているとすると、クリアランス車両が青の実線 (残留が正) でコンフリクトポイントを通じた場合、エンタリング車両は緑の実線のように発進を遅らせた分  $\Delta t$  だけ余裕を持って発進する。つまり、この  $\Delta t$  を全赤時間の中に組み入れると、クリアランス車両は発進を遅らせることなく青開始とともにスムーズに動き出すことができる。したがって、 $\Delta t$  を  $AR_{germany}$  に足すことで、効率性だけでなく安全性も考慮した、最適な全赤時間を求めることができる。

すなわち、最適な全赤時間  $AR_{optimum}$  は式(3)で表現される。

$$AR_{optimum} = t_c - t_e + \Delta t \quad (3)$$

また、 $\Delta t$  は残留時間の正のときの発進遅れから評価するため、以下の式(4)で計算される。

$$\Delta t = PET_{E_T > \tau} - (t_{emin} - \tau) \quad (4)$$

ここで PET を残留が  $\tau$  以上のものに限定している理由は、それ以下の場合、エンタリング車両が発進する準備ができる頃には、クリアランス車両はコンフリクトポイントを通過しているため、考慮する必要がないと考えたからである。

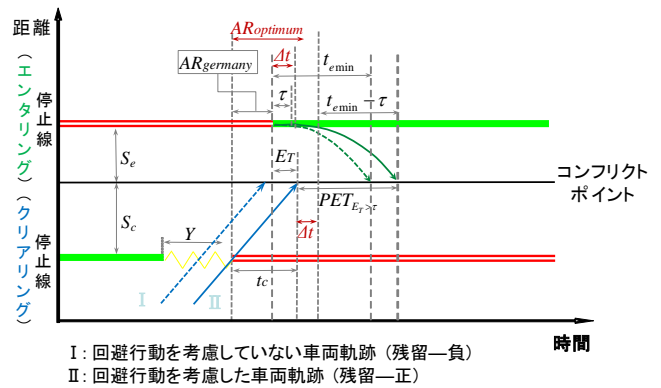


図-2 交錯車両挙動と  $\Delta t$  の考え方

### 3. 調査対象交差点および分析方法

#### 3-1 調査対象交差点の概要

道路構造および信号制御が異なる信号交差点 4 箇所を対象にビデオ観測調査を行った。調査対象交差点の幾何構造を表-1 に示す。なお、わが国では単純 4 現示制御 (青丸+右折矢) が一般的であることから、本研究では右折専用現示終了時の信号切り替わりを対象とし、最終右折車両と交差側直進車両との交錯に着目する。

なお、パークレー・仙台の制限速度は 40km/h、ブリスベン・東京の制限速度は 60km/h である。また交差点の幅について、コンフリクトポイントまでのクリアランス距離、エンタリング距離ともにパークレー・ブリスベンに比べ、仙台・東京交差点の方が倍近く大きい値となっている。

#### 3-2 車両挙動の分析方法

専用のビデオ画像処理システムにより、最終右折 (左折) 車両、対向先頭直進車両について停止線通過時刻、交錯点通過時刻、停止線から交錯点までの距離 ( $S_c$  および  $S_e$ )、交錯点通過までの所要時間 ( $t_c$  および  $t_e$ ) を求め、最終右折 (左折) 車両では、さらに残留時間 ( $E_T$ ) を計測した。また、PET の計測も行った。

### 4. 交錯車両の挙動分析と影響要因

#### 4-1 交錯車両の危険度の分析

この節では、残留が正の場合のみで分析を行っている。それは、エンタリング時間における車両挙動の調整に着目して分析を進めるためである。残留が負の場合、発進における車両挙動の調整は行われなため、残留が正のものを観測することで車両の挙動を知ることができる。ここでは、危険度の指標として、PET を用い、エンタリング距離、残留時間と PET の関係を分析している。

##### (1) エンタリング距離の影響

表-1 信号切り替わり時の交錯(右折矢終了後)

交差点名	対象流入部	車線数	停止線間距離 [m]	停止線セットバック [m]	サイクル長 [秒]	黄時間 [秒]	全赤時間 [秒]	制御方式	調査日時
パークレー	東	1	32	4.5	100~145	3	1	単 純 4 現 示 制 御	2010/03/01 8:30-11:30 15:00-17:30
	西	2		5.7					
仙台	西	1	78	28.6	115~158				2010/11/26 7:00-10:00
	南	2	70	17.7					
プリズベン	西	1	38	10.8	60~120				2011/08/12 10:20-10:50
	東	2		9.9					
東京	北	1	66	12.9	126~144			矢 印 制 御	2007/10/15 07:10-09:15
	西	3	68	15.2					

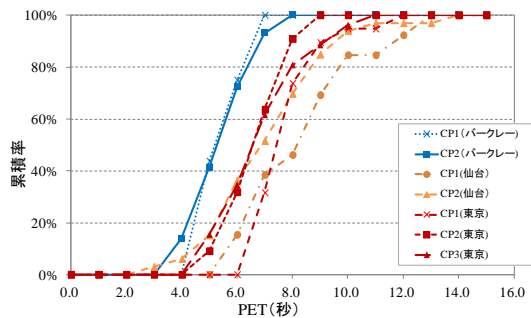


図-3 コンフリクトポイントごとのPET分布

観測された PET 分布について、クリアランス車両の観測データのうち、残留が正のものを抽出し累積図としたものを、図-3に示す。ここでは、それぞれコンフリクトポイント(CP)ごとの PET 分布を示している。

図-3より、PETの平均値はパークレーで5.4秒、仙台で7.4秒、東京で6.9秒である。これらの結果から、PETは仙台よりも東京の交差点の方が0.5秒、東京よりパークレーの交差点の方が1.5秒小さいということが分かる。これはコンフリクトポイントまでのエンタリング距離が仙台と東京では同程度であったのに対し、パークレーは倍近く大きい値であるため、PETはこの幾何構造の違いによって、長さが変わってくると予想される。PETの差においても、仙台と東京では幾何構造に大きな違いがないため、その差も小さい。

## (2) 残留時間の影響

残留時間とPETの関係を図-4に示す。残留時間が長くなるとPETが短くなる傾向が見て取れるが、その相関性は統計的に有意ではない。これは、全赤終了にも関わらず無理に駆け込んでくる車両があると、それだけエンタリング車両との間のコンフリクトポイントまでの時間差が短くなってしまいうためだと考えられる。

## 4-2 交錯点通過タイミング

クリアランス車両のコンフリクトポイント通過タイミングを見るため、残留時間の頻度分布を図-5に示す。

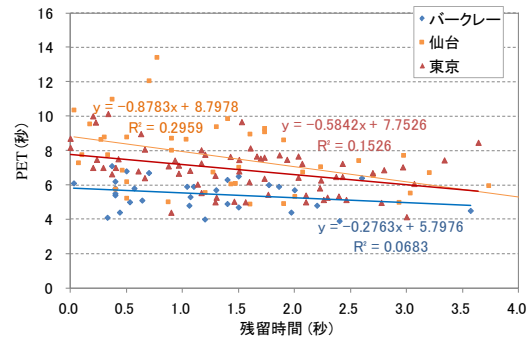


図-4 残留時間とPETの関係

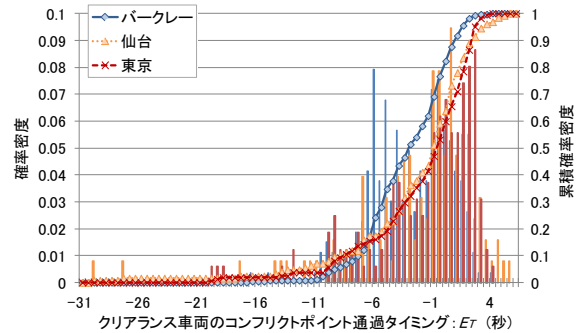


図-5 クリアランス車両の交錯点通過タイミング

仙台・東京の交差点では、残留が存在するケースが多い。また、残留が存在するクリアランス車両の交錯点通過タイミングの平均値を見ると、パークレーで0.23秒、仙台で0.68秒、東京で0.73秒という結果が得られた。結果、仙台・東京の交差点では、長時間クリアランス車両が残留するケースがあるということが分かる。だが一方で、図-5における-21秒から-11秒の範囲を見ると、分布の立ち上がりが仙台・東京の交差点では、パークレー交差点に比べて早いことから、交錯に余裕のある場合も多い。これは全赤時間の長さに依っていると考えられる。全赤時間が短いと残留する車両が少なくなるが、一方全赤時間が長くなると、これを見越した無理な駆け込みや、全赤が使用されず不必要に損失時間が発生するなど、ばらつきが生じる。

## 4-3 エンタリング車両の挙動

クリアランス車両のコンフリクトポイント通過時刻とエンタリング車両の動きだす瞬間の時刻の差を計測し、頻度分布としたものを図-6に示す。図中で、いくつかクリアランス車両がコンフリクトポイントを通過する前にエンタリング車両が動き出しているもの(その差が負のケース)も存在しているが、ほとんどのエンタリング車両は、クリアランス車両がコンフリクトポイントを通過したのを確認してから動き出している。つまり、ばらつきはあるものの、エンタリング車両はクリアランス車両の挙動を見ながら発進しているということが分かる。

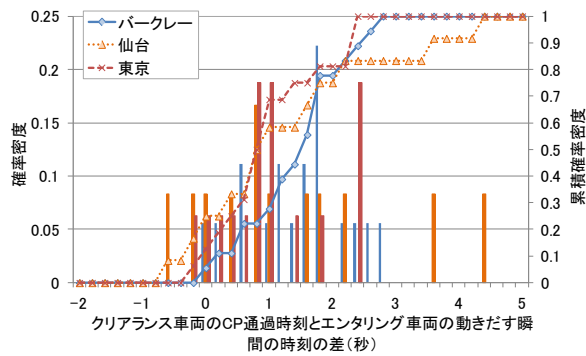


図-6 エンタリング車両の挙動の検証

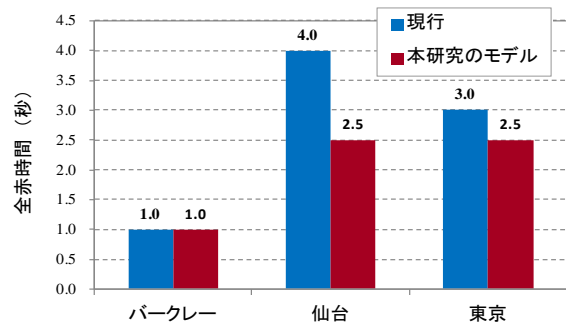


図-7 現行および本研究の全赤時間モデルの比較

## 5. 全赤時間設定に及ぼす影響の評価

### 5-1 全赤時間の算出方法

本研究では、2章で説明したとおり、式(3)および式(4)に従って全赤時間を計算する。式(3)、式(4)の変数のうちPET,  $t_{\text{mini}} - \tau$ ,  $t_c - t_e$ を確率変数として扱い、これらの確率分布を実測値から求めている。さらに、余裕時間  $\Delta t$ の確率分布は二つの確率変数PETと  $t_{\text{mini}} - \tau$ が独立であると仮定して、二つの確率密度の差を取った  $\Delta t$ の確率密度をたたみ込み積分を用いて計算した。全赤時間設定においても同様に、 $t_c - t_e$ と  $\Delta t$ の確率密度関数の和をたたみ込み積分で求めた。なお、たたみ込み積分を用いることができるのは、厳密にはそれぞれの確率密度関数が独立な場合だけであるため、上記の変数の独立性の吟味を行っている。一部の 변수について独立性が仮定できない場合は、たたみ込み積分を用いた確率変数の分布を求める代わりに、直接実測値から全赤時間を求め、その値を持って現行の全赤時間との比較を行っている。

### 5-2 計算結果

結果として全赤時間の累積確率分布において、仙台交差点の車線1で、たたみ込み積分による確率分布と実測値による確率分布で若干波形に違いが生じたため、この車線のみ、現行の全赤時間との比較の際に実測値によって算出された必要全赤時間を用いた。最後に、現行の全赤時間から短縮できる余地について検証したが、調整値も含めると図-7のようになり、パークレー交差点では短縮できる余地なし、仙台交差点では1.5秒、東京交差点では0.5秒全赤時間を短縮できる可能性が示された。

## 6. おわりに

本研究では、右折専用現示終了時の信号切り替わりにおける、交差点内を交錯する車両の挙動分析を行い、その分析をもとに発進遅れ時間を考慮した全赤時間設定モデルを提案した。その結果、幾何構造、残留時間と危険度との関係が明らかとなり、さらに全赤時間とクリアランス車両の残留との関係、クリアランス車両の挙動とエ

ンタリング車両の発進の関係が明らかとなった。また、本研究で提案したモデルを使用することによって、従来の全赤時間よりも、仙台の交差点では1.5秒、東京の交差点では0.5秒短縮できることが示された。

現状では、隣接する信号交差点との制御状況により、直進車が停止せずに走行状態のまま青開始を迎える場合については考慮しておらず、この影響についても今後検討すべきである。さらに、これらの観測データに基づいて、その指標のモデリングを行い、どの交差点でも適用可能な最適全赤時間設定モデルを構築することが今後の課題である。

### 謝辞

研究遂行に際し、ビデオ観測に快く承諾していただいた株式会社さくら野百貨店管理部の方々に謝意を表す。

### 参考文献

- 1) 鹿田成則、片倉正彦、大口敬、村井紀子：右折現示切り替り時の損失時間分析、交通工学研究発表会論文集、No.23, pp.57-60, 2003.
- 2) (社)交通工学研究会：改訂交通信号の手引き、丸善、2006.
- 3) Tang, K. and Kuwahara, M.: A review of intergreen time design and loss time estimation methods, Proceedings of Traffic Engineering Meeting, No. 29, pp. 109-112, 2009.
- 4) 萩田賢司、森健二、白石洋一：信号切替時に発生した車両相互事故に関する研究、第31回土木計画学研究発表会・講演集、2005.
- 5) 鈴木一史、後藤梓、中村英樹：信号切り替わり時のクリアランス車両との交錯を考慮した交差側車両の発進挙動、第31回土木計画学研究発表会・講演集、2010.
- 6) Tang, K., Kuwahara, M., and Tanaka, S.: Design of intergreen times based on safety reliability. Accepted by the 90th Annual Meeting of the Transportation Research Board, 2010.
- 7) Tang, K. and Nakamura, H.: Safety evaluation for intergreen intervals at signalized intersections based on probabilistic method, Transportation Research Record 2128, pp. 226-235, 2009.