

信号制御と交差点構造が利用者のリスク挙動に与える影響の評価手法

Evaluation Framework for Impacts of Traffic Signal Parameter Settings and Intersection Geometry on User's Risky Behavior*

山口 哲**・鈴木 弘司***・中村 英樹****・磯和 賢一**

By Satoshi YAMAGUCHI**, Koji SUZUKI***, Hideki NAKAMURA****, Kenichi ISOWA**

1. はじめに

信号交差点における信号切り替わり時の駆け込みや赤信号無視といった利用者のリスク挙動は、交通安全面だけでなく、交差点における交通流の円滑処理に悪影響を及ぼす。これらの挙動は、主として信号サイクル長とオフセットによって影響を受けると考えられる。系統制御される信号交差点間におけるオフセットについては、このような挙動を可能な限り回避すべくこれを設定すべきであることは当然であるが、あるオフセット条件下で下流交差点に到着した利用者がリスク挙動を取ろうとする動機づけの程度は、サイクル長によって異なってくると考えられる。

わが国では主として歩行者横断時間の十分な確保のために、非飽和時においてもサイクル長を長く設定しがちである。結果的に、信号交差点において赤信号により停止してしまうと大きな遅れを被ることとなるが、利用者はこれを回避するために上記のリスク挙動を取り易く、他者との交錯危険性は必然的に高くなる。このように、サイクル長の設定は、信号切り替わり時のリスク挙動の要因として考慮すべき、系統制御の有無にかかわらず信号交差点共通の課題である。

また、サイクル長を制約する歩行者青時間や青点滅時間の設定には横断歩道長が、また信号切り替わり(インターグリーン)時間を構成する全赤時間の設定には停止線間距離などの交差点構造が密接に関連している。このため、これらの信号制御パラメータ、交差点幾何構造の決定には、利用者のリスク挙動を考慮した評価を行うことが必要である。

そこで本研究では、信号交差点における利用者のリスク挙動をモデル化し、これらを考慮したサイクル長やインターグリーン時間、および幾何構造の評価フレームワークを構築することを目的とする。

2. 現示階段と利用者のリスク挙動・交錯危険性の関係

まず、四肢交差点において典型的な右折専用現示付4現示制御における現示階段(図-1)と、利用者のリスク挙動・交錯危険性との関連について検討する。ここでは、主方向の流入部のみに着目し、各利用主体に関連するリスク挙動を列挙する。

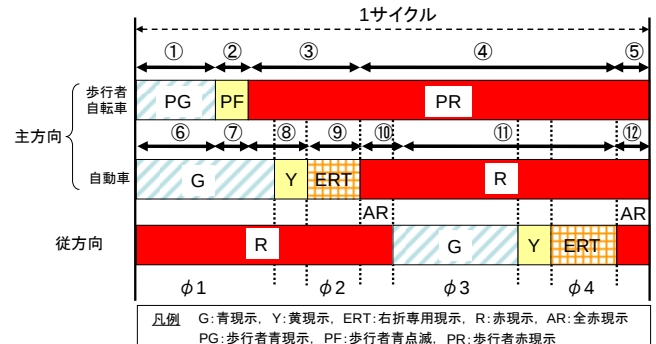


図-1 典型的な右折専用現示付き4現示制御における現示階段と利用者のリスク挙動の関係

(1) 現示階段と利用者のリスク挙動・交錯危険性との関連

現示階段と利用者のリスク挙動・交錯危険性について考えると、1サイクルは以下の8段階に分けることができる。

i) PG(①, ⑥)

歩行者・自転車は青信号に従って横断するとき、右・左折車が、歩行者・自転車の優先通行権を妨げて交差点に進入する場合に交錯が生じる。また、右折車については対向直進、左折車に対する優先通行権を妨げて交差点に進入することにより交錯を招く。

ii) PF(②, ⑦)

歩行者・自転車が駆け込み横断することで、右左折車両との交錯が生じる。また、右折車による対向直進、左折車に対する優先通行権の無視によって、交錯が生じる。

iii) PR(主方向車両青現示中) (③)

歩行者の赤信号無視により、右左折車との交錯危険性が生ずる。

iv) PR(従方向青現示)およびR(従方向青現示)(④, ⑪)

従方向の自動車交通量が少ない場合、歩行者・自転車および自動車の赤信号無視によって交錯の危険性が生ずる。

v) AR(PG開始前) (⑤, ⑫)

歩行者が青開始前にフライングをし、かつ、右左折車が同時にフライング、もしくは捌け残る従方向右折車が駆け込むことで交錯の危険性が生じる。また、直進車・右折車が青開始前のフライングを行うことで、駆け込み進入する従方向車両との交錯も起こりうる。

vi) PF後、Yまで (⑧)

右折車の対向直進あるいは左折車に対する優先通行権無視により交錯が生じる。

vii) ERT (⑨)

直進車、左折車の駆け込み進入あるいは赤信号無視によ

*キーワードズ: 信号制御, 交差点構造, リスク挙動

**学生会員, 名古屋大学大学院 工学研究科 博士課程前期課
Tel: 052-789-3828, FAX: 052-789-3837

***正会員, 修士(工学), 名古屋工業大学 都市社会工学科 助手

****正会員, 工博, 名古屋大学大学院 工学研究科 助教授

り、対向右折車との間に交錯が生じる。

viii) ERT後から従方向G開始直後まで (⑩)

右折車の駆け込み進入により交差方向フライング車両との間に交錯が生じ、また右折車の赤信号無視により、従方向車両との交錯も生ずる。

(2)利用者のリスク挙動の誘発・抑制要因の考察

上記のリスク挙動、それに伴い発生する交錯に影響を及ぼす要因として、交差点幾何構造および信号制御が挙げられる。ここでは、それらの設定について(a)丸青時間(歩行者青時間+歩行者青点減+青点減終了以降から黄色開始前)、(b)インターグリーン時間、の別に考察する。なお、本研究ではPR(交差方向青現示中)およびR(交差方向青現示中) (前節④、⑪)のリスク挙動については考慮しない。

(a)丸青時間 (図-1 : ①, ②, ⑥, ⑦, ⑧)

歩行者青時間は、歩行者自転車の交通量、歩行者の横断速度、横断歩道長・幅を考慮し、横断者が安全に横断できることを想定し決定される¹⁾。必要以上に歩行者青時間が長く設定される場合、歩行者青時間後半における横断者到着が少なくなる状況が発生しやすく、そのとき右左折車の横断者に対する意識が希薄になりがちなため、ランダムに到着する横断者と右左折車との交錯危険性が高くなると考えられる。また、このとき、右左折車が横断者を認知し、通過するまでに要する時間には、隅切りの形状や交差点の大きさが作用しているため、交錯危険性と関係がある。

また、歩行者青点減時間は、横断速度、横断歩道長によって規定され、点減開始以降進入した横断者が横断し終わるだけの十分な時間が設定されている¹⁾。横断者は青点減以降もすぐに交差方向が青にならないことを知っているため、停止することにより被る大きな遅れを回避するために駆け込み進入をしがちである。

(b)インターグリーン時間 (図-1 : ③, ⑤, ⑨, ⑩, ⑫)

一般にインターグリーン時間は、黄時間と全赤時間から構成される。黄表示時間は、黄信号に直面した車両がその時間内に無理なく停止できるように必要な時間であり、反応時間、黄開始時の速度、停止するまでの平均減速度で表現され、通常、黄信号時間は3~4秒となる¹⁾。

全赤時間は交差点の大きさと接近速度により決められ、通常1~4秒となる¹⁾。これは右折車も含めて交差点内の車両を一掃するとともに、現示の移行時に交差交通間での衝突事故及び車両の急停止による追突事故を防止するためのものである。このときに交差点へ進入する車両があると、他者との交錯が発生し危険である。ドライバーはインターグリーン時間が比較的長いこと、また、もし停止すれば、かなり待たされることを経験的に知っている可能性がある。このため、インターグリーン時間、サイクル長を過度に長く設定すると、かえって信号の切り替わり時の危険な行動を助長してしまうと考えられる。これらにより生じる車両

相互の交錯事象として、対向車との交錯、先行車への追突、後続車からの追突が挙げられる。

3. 利用者のリスク挙動分析にもとづく信号制御・幾何構造評価フレームワーク

著者らは、信号交差点における信号制御パラメータの設定および幾何構造の設定に起因する利用者のリスク挙動に着目し、これらをリスク概念にもとづき評価するフレームワークの検討を行っている²⁾。しかしながら、現段階ではインターグリーン時における実証分析³⁾に留まっており、1サイクルを通しての評価には至っていない。本稿では、2章で示した利用主体別の1サイクル中におけるリスク挙動とそれに伴う交錯に着目し、これらのモデル化の考え方を示す。

(1)リスク評価値推計モデルの概要

一般に、リスクは危険性の程度を表すものとして捉えられ、その評価値 R_i は、そのリスク事象が発生する確率 P とその強度 I の積により定義される⁴⁾。

信号交差点において、利用者のリスク挙動を誘発する、あるいは抑制する要因となるリスク事象として“a)他利用主体との交錯(以下交錯リスク)”, “b)遅れを被ること(以下遅れリスク)”, “交通違反検挙”の3つが考えられる。本研究では、データの入手と定量評価が困難な交通違反検挙を除くa), b)の2つのリスク事象について考える。

対象車両1台当りのリスク評価値算定に際して、両リスク事象の発生確率と強度との積の加重和を求め、ある現示の段階における利用主体に対するリスク評価値 R_i を、以下のよう

$$R_i = \sum_{j=1}^m \alpha_j \cdot P_{conij} \cdot I_{conij} + \beta \cdot P_{deli} \cdot I_{deli} \quad (1)$$

ここに、 P : リスク発生確率, I : リスク強度, i : 利用主体(自動車, 歩行者, 自転車), j : 交錯パターン($j=1, 2, \dots, m$), con : 交錯, del : 遅れ, $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m, \beta$: パラメータ, である。

式(1)において、 R_i は直接計量できないが、 P および I については計量可能であると考えられる。

また、リスク事象間の重みである各パラメータについては、後述する交錯・遅れの2つのリスク事象で説明されるリスク選択行動モデルより推定する。このモデルは利用者のリスクテイク/回避(通過/停止)判断の意思決定プロセスを反映したものである。

次に、丸青時間、インターグリーン時間ごとに求めた R_i の加重和を求める。さらに進行方向について重み付けを行うことで、1利用主体、1サイクルのリスク評価値が求められる。他利用主体についても同様に R_i を計量した後、利用主体間の重み付けを行い、これらと合成することで、1サイクル、複数利用主体に関するリスク評価値が推計可能となる。

以上をまとめた信号制御、交差点幾何構造、交通特性がリスク評価値に与える影響フローを図-2に示す。本稿では、

これらの中で自動車交通のみを対象として、各モデルの構造について論ずる。

(2) リスク強度の定量化

(a) 交錯リスク : I_{con}

交錯リスク強度 I_{con} を表す代表的な指標として、Hayward⁵⁾の提唱するTTC(Time to Collision)が挙げられる。この指標は、交差点の進入速度を考慮可能であるため、本研究では、丸青時、インターグリーン時ともに、TTCを利用する。また交差点評価を行うため、TTCと交差点の大きさや隅切り等、交差点の幾何構造特性との関係について分析する。

$$I_{con} = f(geo, v_{app}) \quad (2)$$

ここに、 geo : 幾何構造特性(交差点の大きさ、隅切りetc), v_{app} : 交差点進入速度, である。

(b) 遅れリスク : I_{del}

遅れは、赤現示中により被る停止遅れ I_{delred} 、青現示中の歩行者によるブロックや対向車両の通過待ちによる遅れ I_{delgrn} の2つに分けられる。前者はサイクル長の関数として表現可能であると考えられ(式(3)), 後者は青現示中に到着する歩行者あるいは対向車両のギャップが受入可能であるか否か、さらにはその車両が何台目に滞留しているかによって表現できると考える(図-3)。

$$I_{delred} = f(C) \quad (3)$$

$$I_{delgrnm} = I_{delgrnm-1} + \sum_{k=1}^{j-1} (1 - P_{acc}) \cdot g_k \quad (4)$$

ここに、 C : サイクル長, g_k : ギャップ, P_{acc} : ギャップアクセプタンス率, m : 滞留右折車両($1, \dots, n-1$), である。

(3) リスク確率の定量化

(a) 交錯発生確率 : P_{con}

車両間の交錯発生確率はi)直進・左折車両, ii)右折車両の大きく2つに分けられ、これらはリスク挙動率(駆け込み率, フライング率)で表現される。

i) 直進・左折車両についての交錯リスク発生確率

①進行方向車両(先行車, 後続車)との交錯発生確率 $P_{conrear}$

進行方向車両との交錯は、丸青時の先詰まりが生じている場合、あるいはインターグリーン時における先行車、後続車の意思疎通の齟齬により発生する追突が考えられる。本研究では、後者のみを取り扱う。

インターグリーンを n 分割し($j=1, \dots, n-1$), 各時間帯において、自車が停止し(駆け込み), 同時に後続車両(先行車)が駆け込む(停止する)確率を考え、それを積み上げたものを進行方向車両との交錯発生確率 $P_{conrear}$ とみなす。

$$P_{conrear} = \sum_{j=1}^{n-1} \{ (1 - RRI_{th/lrj}) \times RRI_{followerj} \} \quad (5)$$

ここに、 RRI : 駆け込み率(Rate of Rushing into Intersection), th/lr : 直進車/左折車, $follower$: 後続直進車/左折車, である。

②対向右折車両との交錯発生確率 P_{conopp}

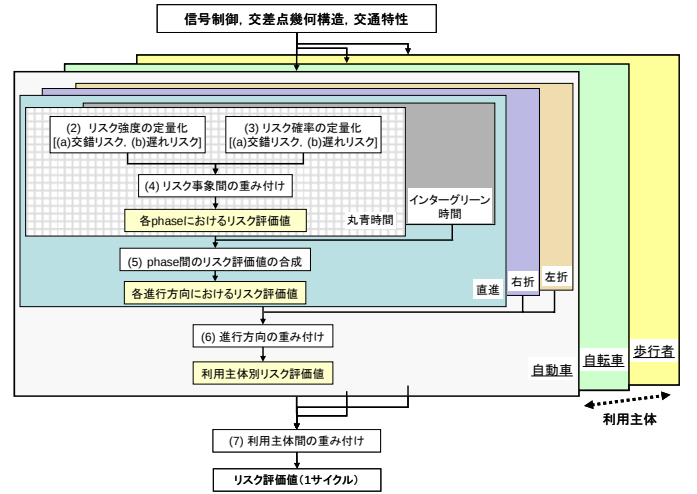


図-2 信号制御、交差点幾何構造、交通特性がリスク評価値に与える影響フロー

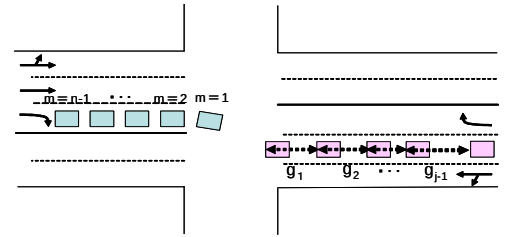


図-3 遅れリスク強度の計量イメージ(青現示中)

丸青中の交錯とインターグリーンにおける交錯の2つのパターンが考えられる。前者についてはii)で説明する。

後者については、インターグリーンを n 分割し($j=1, \dots, n-1$), 各時間帯において、自車が駆け込み、同时对向右折車両も駆け込む確率を積み上げた以下の式で表現される。

$$P_{conopp} = \sum_{j=1}^{n-1} (RRI_{th/lrj} \times RHS_{oppj}) \quad (6)$$

ここに、 RHS_{opp} : 対向右折車フライング率(Rate of Hurry Start ; 右折待ち車両がERT開始前に発進), である。

ii) 右折車両についての交錯リスク発生確率

丸青時の対向直進・左折車との交錯およびインターグリーンにおける交差方向車両との交錯がある。前者については、交差点に到着する対向直進車(あるいは左折車)のギャップをみつけ、右折車が通過を試みる確率(ギャップアクセプタンス率)である。ここで、ギャップの大きさは到着車群の特性に依存するものである。本研究では、実データを用いて、0.5秒単位で各ギャップにおける通過確率を定量化する。一方、後者の交錯発生確率 P_{concro} については、自車が駆け込み、かつ交差方向車両がフライングする確率を積み上げるにより表現する。

$$P_{concro} = \sum_{j=1}^{n-1} (RRI_{rtj} \times RHS_{croj}) \quad (7)$$

ここに、 rt : 右折車, cro : 交差方向車両, である。

(b) 遅れ発生確率 : P_{del}

遅れが生じる状況として、丸青時、インターグリーン時の2つのパターンが考えられる。前者の発生確率 P_{delgmi} は、

$$P_{delgmi} = 1 - P_{accgap} \quad (8)$$

ここに、 P_{accgap} ：対向ギャップアクセプタンス率、であり、後者 P_{delint} は

$$P_{delint} = 1 - RRI_i \quad (9)$$

と定義される。

(c) リスク挙動率のモデル化

上記の遅れ発生確率および交錯発生確率を評価フレームワークに組み込む際、利用者のリスク挙動(RI, HS)を交差点諸量でモデル化する必要がある。

RI については、黄色時間、全赤時間、車線数、見通しの良さ等、交差点幾何構造・信号制御パラメータのデータを用いて、 RRI を進行方向別に、回帰モデルで表現する。

$$RRI_k = \alpha X_{yt} + \beta X_{art} + \gamma X_{nol} + \delta X_{geo} + \varepsilon \quad (10)$$

ここに、 k :進行方向(直進, 右折, 左折), X_{yt} : 黄色時間, X_{art} : 全赤時間, X_{nol} :車線数, X_{geo} :交差点形状(見通しの良さ), $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon$:パラメータ, である。

一方、 HS については、信号待ち時間、全赤時間、停止線のセットバック量、交差方向車両リスクテイキング発生率、時間帯ダミー等、幾何構造や信号制御パラメータのデータを用いて、 RHS モデルを構築する。

$$RHS_i = \alpha X_{wt} + \beta X_{ar} + \gamma X_{stb} + \delta X_{crrt} + \varepsilon X_{com} + \zeta \quad (11)$$

ここに、 X_{wt} : 信号待ち時間, X_{ar} : 全赤時間, X_{stb} : 停止線のセットバック量, X_{crrt} : 交差方向車両 RRI , X_{com} : 時間帯ダミー(通勤時間帯:1), $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \zeta$: パラメータ, である。

(4) リスク事象間の重み付け

信号交差点におけるドライバーの通過(交錯リスク受容・遅れ回避), 停止(交錯リスク回避・遅れ受容)判断を次に示す非集計2項選択ロジットモデルで表現する。

$$p = \frac{\exp[u_k]}{1 + \exp[u_k]} \quad (12)$$

ここに、 U_k :効用差, k :車両の進行方向(直進・左折, 右折), であり、また効用差 U_k は以下のように示される。

$$U_k = V_{passk} - V_{stopk} = \alpha_1 X_{conrear} + \alpha_2 X_{conopp/cro} + \alpha_3 X_{confront} + \beta X_{del} + \varepsilon \quad (13)$$

ここに、 X_{del} :遅れ[sec], $X_{conrear}$:後続車とのTTCの逆数[sec⁻¹], $X_{confront}$:先行車とのTTCの逆数[sec⁻¹], $X_{conopp/cro}$:対向右折/交差方向直進車とのTTCの逆数[sec⁻¹] (直進/左折:対・対向右折, 右折:対・交差方向直進), α_j, β :パラメータ($j=1,2,3$), ε :定数項, である。

このようにして得られたパラメータを、リスク事象の重み付けに用いる。その際、進行方向やphaseごとにモデルの説明変数が異なる点に注意が必要である。そこで、説明変数の違いがリスク評価値に影響を与えないように、全説明変数のパラメータの和が1となるようにパラメータを再設定する。

$$\lambda_i = \frac{\alpha_i}{\sum_{i=1}^j \alpha_i + \beta} \quad (i=1 \cdots j) \quad (14)$$

(5) 各現示のリスク評価値の合成

丸青、インターグリーン別に、リスク挙動対象車両台数を求め、その値を用いて各進行方向の1サイクルあたりのリスク評価値とする。

$$R_k = q_{grn} \cdot R_{grn} + q_{int} \cdot R_{int} \quad (15)$$

ここに、 q :リスク挙動対象車両台数, である。

(6) 進行方向の重み付け

進行方向別のリスク評価値を統合するために、進行方向の重み付けを行う必要がある。ここでは、進行方向別の交通量の比率を用いて、重み付けを行う。

$$R_{veh} = \frac{q_{th}}{\sum_k q_k} R_{th} + \frac{q_{lt}}{\sum_k q_k} R_{lt} + \frac{q_{rt}}{\sum_k q_k} R_{rt} \quad (16)$$

ここに、 q :進行方向別交通量, である。

(7) 利用主体間の重み付け

交差点における利用者構成の違いによりリスク評価値は異なるものと考えられる。本稿では、それを利用主体別交通量により重み付けを行い、利用者構成の違いを考慮する。

$$R = \frac{Q_{ped}}{\sum Q_i} R_{ped} + \frac{Q_{bic}}{\sum Q_i} R_{bic} + \frac{Q_{veh}}{\sum Q_i} R_{veh} \quad (17)$$

ここに、 ped :歩行者, bic :自転車, veh :自動車, Q_i :利用主体別交通量, R_i :利用主体別リスク評価値, である。

以上の(2)から(7)までのプロセスを経て、複数利用主体の1サイクルあたりのリスク評価値が推計される。交差点間の比較を行う際には、得られたリスク評価値を1時間換算することによって、同次元でのリスク評価が可能となる。

4. おわりに

本稿では、リスク概念を利用してサイクル長やインターグリーン時間、および幾何構造の評価を可能とするフレームワークについて、紙面の都合上、モデルの概念を中心に論じた。各種モデルのパラメータの推定結果等、信号制御や幾何構造特性がリスク評価値に与える影響の定量化については講演時に報告する。

参考文献

- (1) (社)交通工学研究会：交通信号の手引き, p.157, 1994.
- (2) 鈴木 弘司・中村 英樹・山口 哲：リスク概念を用いた交通信号のサイクル長評価フレームワーク, 土木計画学研究・講演集28, CD-ROM, 土木学会, 2003.
- (3) Koji SUZUKI, Hideki NAKAMURA and Satoshi YAMAGUCHI: Behavior Risk Estimation Model for the Evaluation of Cycle Length Based on Driver's Perception at Signalized Intersection, Proceedings of the 8th AATT, ASCE, pp208-212, 2004.
- (4) 日本リスク研究学会：リスク学事典, TBSブリタニカ, 375p, 2000.
- (5) Hayward, J.C. Near-miss determination through use of a scale of danger, Highway Research Record, 24-34, 1972.