

# 交差点安全性評価を目的とした2D ナノシミュレーションにおける利用者挙動の表現<sup>\*1</sup>

## Representation of Road User Behavior in 2D Nanoscopic Traffic Simulation for Evaluating Intersection Safety Performance<sup>\*1</sup>

鈴木 一史<sup>\*2</sup>・中村 英樹<sup>\*3</sup>

By Kazufumi SUZUKI<sup>\*2</sup> and Hideki NAKAMURA<sup>\*3</sup>

### 1. はじめに

交差点の幾何構造と信号制御は利用者挙動に強い影響を与え、円滑性や安全性といった性能を大きく左右する。また、遅れの増大は利用者へ信号切り替わり時の危険挙動を誘発させ、これが交通処理能力にも影響するように、円滑性と安全性は互いに関連している。したがって、交差点構造設計と信号制御を一体的に捉える必要があるものの、安全性を設計段階で見極めることは難しく、安全を見越して必要以上に余裕を持たせた設計がなされることで、むしろ危険な状態を招く恐れもある。そのような事態を防ぐためにも、これら交差点の安全性を設計段階で定量的に評価する手法が求められる。

このように多様な利用者が交錯し複雑な挙動を示す信号交差点において、道路構造・信号制御の変更に伴う影響を遅れのみならず安全性についても事前かつ定量的に評価する際に、交通シミュレーションは有力な手法の一つと考えられる。交通シミュレーションによる安全性評価に関しては、これまでも高速道路の合流区間などで試みられており、交錯指標を用いて追突危険性を評価している研究は多い。しかしながら、信号交差点のような複雑な交錯が発生するケースでは適用例は僅かである。

秋山ら<sup>1)</sup>はビデオ画像観測から得られた交差点内車両軌跡を交通シミュレーションに入力し、事故発生件数を直接推計しているが、これらの車両軌跡はランダムに割り当てられており、制御や構造、交通状況に応じて変化するものではない。また、Gettmanら<sup>2)</sup>はシミュレーション上での交錯指標の算出方法を定義し、既存のマイクロシミュレーションモデルを用いた安全性評価の可能性について検討を行っている。しかし、既存のマイクロシミュレーションモデルから出力される位置データ等の利用は、交差点の場合には、その信頼性を考えると交錯指標の算出に耐えうるものかどうか疑問が残る。

従来までのマイクロシミュレーションモデルでは、車両は与えられたレーン軌道上を1次元的に移動し、走行軌跡は道路幾何構造や信号制御、車両の特性や走行状態に関わらず固定されている。また、信号切り替わり時に発生しやすい駆け込み進入などの危険挙動が考慮されおらず、さらに、利用者同士の交錯予測・回避といった挙動が精緻に再現されていないなど、安全性評価を行うには信頼性が十分とはいえない。

そこで本研究では、シミュレーションによる交差点での安全性評価を目指すべく、隅角部・路面標示をはじめとする幾何構造要素や信号制御などの交通運用に反応し、利用者の交差点内の2次元的な移動軌跡や信号切り替わり時挙動が変化する2D ナノシミュレーションモデルを開発することを目的とする。この2D ナノシミュレーションモデルから得られる利用者の位置、速度、姿勢などの詳細な状態量を基に、交差点での安全性評価を試みるものである。ここで評価対象として想定するシナリオには、交差点の新設や改良において、例えば隅角部半径の縮小と停止線位置の変更による交差点のコンパクト化、交通島を用いた導流化、それに合わせた信号現示設定(インターグリーン時間、現示の組み合わせ)などがあり、これら複数の設計代替案を円滑面・安全面から定量的に評価することを考えている。

本稿では、著者らが現在開発を進めている2D ナノシミュレーションモデルの基本コンセプトについて提示する。まず、シミュレーションによる安全性評価に重要な利用者挙動を挙げた上で、ここでは、ドライバー挙動によって異なる車両走行軌跡を再現する操舵モデルと車両運動モデルの概要を示す。さらに、このような2D ナノシミュレーションモデルをベースとした交差点安全性評価の可能性について議論する。

### 2. 交差点安全性評価に重要な利用者挙動と既存シミュレーションモデル

交差点構造や信号制御を変更したときの安全性評価に重要な要素として、(1)利用者動線、(2)信号切り替わり

\*1 キーワード: 交差点, 交通安全, シミュレーション

\*2 正会員, 修(工), 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (名古屋市千種区不老町, E-mail: kazu@genv.nagoya-u.ac.jp)

\*3 正会員, 工博, 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻

時挙動，そして，交通状況に応じて変化する(3)利用者間の交錯予測・回避挙動の大きく3つがあると考えられる。以下にその詳細と既存シミュレーションモデルでの再現状況について触れる。

### (1) 交差点内部における利用者動線

交差点内部における車両の走行軌跡や歩行者動線は，道路構造や路面標示，さらには周辺利用者からの影響を受け大きく変化する。これにより，利用者同士が交錯する領域も時々刻々と変化することで，安全性能に及ぼす影響も異なるものと予想される。

車両であれば移動自由度の高い大規模交差点では，旋回軌跡は大きく速度も高いが，導流島のようなデバイスが設置されているところでは動線が限定され，旋回速度は制約を受け低速で走行せざるを得ない。特に交差点コンパクト化などのように構造変更を伴う場合には，これら動線の忠実な再現は重要といえよう。

しかし，既存のマイクロシミュレーションモデルでは，車両の旋回挙動は円曲線やベジェ曲線などで決められた軌道上を走行状態に関係なく移動するだけで，実際の車両の運動に従ったものではない。また，交差点内部での速度を右左折時速度として一律に与えてしまうことが多い。すなわち，路面標示(右折待ち位置，指導線，導流標示)の有無や隅角部半径の大きさなどの道路幾何構造，あるいは設計車両の違いやその走行状態に応じて転回時の速度が変化するものではない。このように，既存のマイクロシミュレーションモデルでは，右左折車両の旋回軌跡と旋回速度との相互関係は十分考慮されていない。

### (2) 信号切り替わり時の利用者挙動

信号切り替わり時には，駆け込み進入や信号無視などの危険挙動の発生により，安全面のみならず交通処理能力にも多大な影響を与えることから，それら挙動の精緻な再現は必要不可欠である。

#### (a) ドライバー挙動

信号切り替わり時に発生する無理な駆け込み挙動は，道路構造による走行軌跡と自車両の走行状態および車両特性から，交錯位置を勘案しつつ行っていると考えられる。交錯位置は表示される信号現示の表示順序によって異なり，ドライバーが交差方向の信号灯火を見通すことができれば，切り替わりタイミングの予測を行うことで危険挙動の発生にも変化が生じる。構造とも関連するが，このような信号灯火の視認性も影響すると思われる。

既存のシミュレーションモデルでは，信号制御や交差点構造，交通状況に応じて駆け込み進入などの危険挙動の生じ方が変化する構造になってはいない。したがって，このような危険挙動が発生したときの車両の速度や軌跡の再現は不十分といえよう。

### (b) 横断歩行者挙動

信号切り替わり時の歩行者の駆け込みや信号無視は，実際には多くの交差点で見受けられる。これらは横断待ち時間，横断歩道長などを考慮した横断可能性と後述する車両との交錯危険性を勘案しつつ速度調整しながら横断していると考えられる。さらに，歩行者は横断前から信号の切り替わりを予測し，横断を判断していることもあるが，これら交差点での歩行者挙動を詳細に取り扱うシミュレーションモデルは少ない。

### (3) 利用者同士の交錯予測・回避挙動

交差点利用者はお互いの動きを予測しつつ，発生しうる交錯を事前に回避していると考えられる。

#### (a) 横断歩行者と右左折車両との交錯

一般的なマイクロシミュレーションモデルでは，与えられた歩行者交通量に従い歩行者を発生させ，歩行者横断中は右左折車両が停止するなどのモデル化がなされているものの，歩行者一人一人を明示的に表現しているモデルは少ない。現実には，ばらけた歩行者の隙間を縫って走り抜けたり，横断歩行者の将来の歩行位置を予測しながら避けるようにして転回したりする挙動が多く発生する。また，右左折車両は現在横断中の歩行者だけを見るのではなく，これから横断しようとする歩行者の将来の動きを予測し，速度を調整しながら右左折することがある。このような挙動の生じ方は，右左折車両の横断歩道への進入速度や角度，車両と歩行者との位置関係によって影響されると考えられる。また，歩行者側も右左折車両との交錯を意識して横断しており，これら横断歩道付近の挙動再現は重要と思われる。

#### (b) 右折車と対向直進車との交錯

右折挙動は右折専用現示の有無，対向直進車の見通し，走行あるいは停止のどの状態から右折を始めるかによって異なるほか，右折直後の横断歩行者との交錯も意識する必要があり，その判断は複雑である。既存のモデルでは，対向直進車とのギャップアクセプタンスと横断歩行者との交錯を簡易にモデル化することが多く，右折待ち位置といった路面標示や信号現示の組み合わせの影響が考慮されることは少ない。右折挙動はドライバーへの負荷が高いだけに，精緻に表現する必要があると思われる。

## 3. 2D ナノシミュレーションの基本コンセプトとその利用者挙動の表現

### (1) 基本コンセプト

安全性評価を視野に入れ，従来までのマイクロシミュレーションの再現要素に加えて，時間的・空間的にさらに微小な挙動を再現する2D ナノシミュレーションモデルを提示する。そのコンセプトとしては次の通りである。

### (a) レーンに拘束されない2次元挙動の再現

利用者の挙動はアクセル・ブレーキなどの前後方向の制御のみならず、ハンドル操作による横方向の2次元な動きを考慮していること。その位置座標もレーンに拘束されない2次元または3次元のベクトルで表現されていることが必要である。

### (b) 道路幾何構造要素の認識

路面標示・交通島などの道路幾何構造要素を明示的に取り扱うことができ、それを認識した利用者の挙動も再現できること。

### (c) 遅れや交錯を意識した信号切り替わり時挙動の表現

遅れの増大に伴う利用者の危険挙動の発生や、そのときの加減速挙動、さらには信号現示の組み合わせによっては現示切り替わりを利用者が予測する挙動も含まれる。

### (d) 利用者同士の交錯予測・回避判断

交差点構造や信号制御、周辺利用者との位置関係によって変化する交錯点を予測し、利用者同士の交錯に対して加減速による回避挙動を考慮していること。

### (e) 車両・利用者特性と交差点内見通しの考慮

設計車両の形状や走行特性の違いはもちろんのこと、利用者の反応遅れ、利用者から見た交差点での見通しの考慮が挙げられる。これには交差点内部での信号灯火の視認性、右折待ち時の対向車の見通しなどが含まれる。

### (f) 信頼性の高い交錯指標算出が可能なデータ解像度

時間的・空間的にも一般的なマイクロシミュレーションに比べ高い解像度でシミュレーション可能であること。

これら2D ナノシミュレーションモデルにおける再現要素をまとめると図-1 のようになる。

## (2) 利用者挙動の表現

前述の基本コンセプトのうち、その一部である走行軌跡を再現するための利用者挙動表現について概要を示す。

### (a) 車両挙動

ドライバーは、到達したいと考える軌跡上の目標点に向かうようハンドル操作を行うものと仮定する。この操舵角と車両の速度、ホイールベースに応じ、車両運動モデルによって走行軌跡が再現される。

#### i) 操舵モデル

操舵モデルは直近の目標に向かってハンドル操作を行うためのモデルである。自動車工学の分野では様々な操舵モデルが提案されているが、本研究では構造的にわかりやすい2次元予測による前方誤差補正モデル<sup>3)</sup>を参考にする。このモデルは、現在の車両の前輪舵角から旋回半径を考慮した円弧に基づき予測された将来位置と目標点との偏差を少なくするよう前輪舵角を調整しながら操舵を行うものである。走行速度によっては旋回軌跡が大き

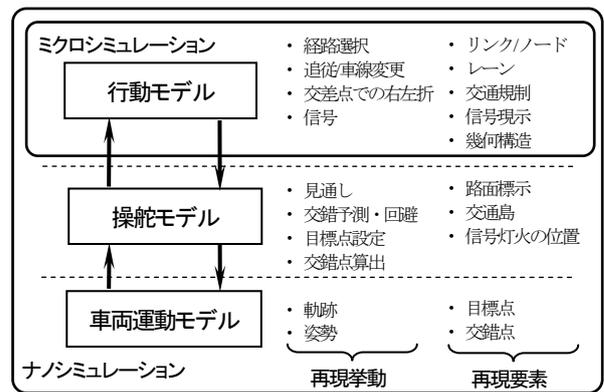


図-1 2D ナノシミュレーションの再現要素

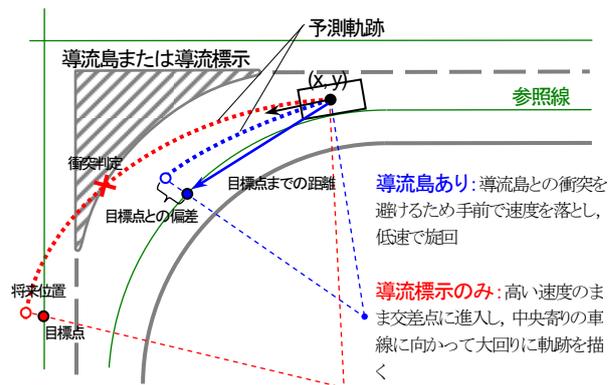


図-2 交差点構造に応じた目標点と操舵のイメージ

く変化するため、目標点に近づくよう旋回時には舵角のみならず速度も調整しつつ操舵が行われる。

この目標点は通常、自由走行時では車両から一定距離手前の参照線上に置かれる。この参照線はレーンの中心線に相当し、道路構造設計段階における車両の標準的な走行軌跡であり、シミュレーション上ではドライバーがこれを参照する。この目標点から車両までの距離は、自車の速度や線形、構造物の有無といった道路構造条件等に応じて変化する(図-2 参照)。

路面標示や導流島、横断歩行者などが走行軌跡に与える影響は、予測軌跡とこれらオブジェクト境界との衝突判定により回避判断を行うことで再現する。この予測軌跡が導流島などの縁石と衝突する恐れがあるときは、操舵量または速度の調整が行われる。これにより例えば、マーキングのみの導流化では、図-2 のように回避の優先度が低くなり目標点は遠方に置かれたままであるが、導流島などの構造物の場合では回避を優先し、導流路に沿って走行しようと目標点が車両の手前付近に設置され、操舵とともに速度を調整することで回避が行われる。

#### ii) 車両運動モデル

このモデルでは、操舵モデルから出力された前輪舵角から次のタイムステップにおける位置、速度、角速度(ヨーレート)を計算するとともに、操舵モデルが参照する将来の走行軌跡の予測が行われる。定常旋回時の車両重心点まわりのヨーレートを表す以下の関係式<sup>4)</sup>に基づ

き、設計車両の違いと現在の走行状態に応じて、軌跡が変化する様子を再現する。

$$r = \frac{1}{(1 + AV^2)} \frac{V}{l} \delta \quad (1)$$

ここに、 $r$ ：ヨーレート、 $A$ ：スタビリティファクタ、 $V$ ：速度、 $l$ ：ホイールベース、 $\delta$ ：前輪舵角、である。

#### (b) 歩行者挙動

歩行者挙動モデルは現在まで多数のモデルが提案されているが、本研究では主として車両からみた歩行者との交錯を扱うため、歩行者挙動は可能な限り簡易なモデルにより再現する。そこで、群衆挙動を少ないルールで再現可能な Reynolds<sup>9)</sup>が提案する Steering Behavior を参考に、右左折車両と横断歩行者との交錯を再現する。ここで、歩行者は希望速度、パーソナルスペース半径といった属性を持つ。横断歩道付近からランダムに発生した歩行者は、横断歩道付近に滞留、歩行者青開始とともに横断を開始する。横断歩行者は歩道および横断歩道内でパーソナルスペースを確保しつつ互いにぶつからないよう周辺歩行者を回避しながら横断する。信号切り替わり時の横断挙動については、現段階では希望速度を修正することで対応する。今後は、ビデオ画像観測等により分析を進め、特に歩行者青点滅・赤のときの歩行者の横断可能性と車両との交錯危険性を考慮しながら横断する挙動についてモデル化を考えている。

#### 4. 2D ナノシミュレーションによる交差点安全性評価の可能性

このような 2D ナノシミュレーションからの挙動データを用い、安全性評価手法の一つである交錯手法により評価を行うことがまず考えられるが、交差点においては交錯指標の選定に十分留意する必要があると思われる。

交差点での交錯危険性を評価するとき、Allen ら<sup>6)</sup>が提唱する PET(Post Encroachment Time)を用いた分析がなされることは多い。しかし、PET は通過時刻差として結果的に得られるものであり、同じ PET であったとしても安全性も同じであるとは限らない。実際にはそこに至るまでに加減速などによって回避挙動がとられていることもあり、このような回避挙動の有無を考慮できる指標が必要と思われる。とりわけ交差点のように車両の進行方向が大きく変化する場合には、交錯時の角度や速度差により衝撃の程度は異なる。2D ナノシミュレーションでは位置・速度のほか利用者の姿勢データが得られるため、これら物理的な衝撃の程度を考慮した新たな交錯指標の開発も考えられる。

また、2D ナノシミュレーションから出力される膨大な利用者挙動履歴をデータベース化し、軌跡の乱れや急

な加減速、回避挙動といった挙動イベントがどの場所で、どのようなタイミング(信号切り替わりなど)で発生したかを集計、その構成比を知ることによって安全上検討すべき箇所の優先順位が明らかになると期待される。さらに、これら交差点における空間的な分布をみることで、交差点のどの地点でどのような危険が起りやすいかの判断材料になると考えられる。なお、このような交錯指標と実際の危険性との関連については、シミュレーションの信頼性とともな十分な検証が必要であろう。

#### 5. おわりに

本稿では、シミュレーションによる交差点安全性評価で重要な利用者挙動を挙げ、現在開発を進めている 2D ナノシミュレーションモデルのコンセプトを提示した。また、ドライバー挙動の違いによって交差点内の走行軌跡が変化する様子を再現するための操舵モデルと車両運動モデルの概要を示した。さらに、このような 2D ナノシミュレーションをベースとした安全性評価の可能性について述べた。

本シミュレーションモデルは、現段階では車両の操舵モデルと運動モデルの実装に留まっているが、ミクロ・マクロ両面からこれらモデルの妥当性を検証するとともに、今後は、信号切り替わり時挙動、交錯の予測・回避判断といった上位のモデルについても、ビデオ画像観測をはじめとした実態観測データに基づきモデル化を進める予定である。

#### 参考文献

- 1) 秋山孝正・奥嶋政嗣：交通安全対策評価のための交差点交通シミュレーションの構築，第 26 回交通工学研究発表会論文報告集，pp.101-104，2006。
- 2) Gettman, D., Head, L.: Surrogate Safety Measures from Traffic Simulation Models. TRB Annual Meeting (CD-ROM), 2003.
- 3) 吉本堅一：予測を含む操舵モデルによる人間自動車系のシミュレーション，日本機械学会誌，Vol.51, No.596, pp.1181-1186, 1968.
- 4) 自動車技術会：自動車技術ハンドブック 改訂版 Vol.1 基礎・理論編，464p, 2004.
- 5) Reynolds, C. W.: Steering Behaviors for Autonomous Characters, in the proceedings of Game Developers Conference 1999. Pages 763-782, 1999.
- 6) Allen, B.L., Shin, B.T. and Cooper, D.J: Analysis of Traffic Conflicts and Collision, Transportation Research Record 677, pp.67-74, 1978.