

# ドライビングシミュレータを用いた 交差点における自転車・自動車錯綜分析

山田 一太<sup>1</sup>・山中 英生<sup>2</sup>・吉田 長裕<sup>3</sup>・松本 修一<sup>4</sup>

<sup>1</sup>学生会員 徳島大学大学院 創成科学研究科理工学専攻 (〒770-0841 徳島県徳島市南常三島2-1)

E-mail: takuna.xx@gmail.com

<sup>2</sup>正会員 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部 教授 (〒770-0841 徳島県徳島市南常三島2-1)

E-mail:yamanaka@ce.tokushima-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 大阪市立大学大学院 工学研究科 准教授 (〒558-8585 大阪府大阪市住吉区杉本3-3-138)

E-mail:yoshida@eng.osaka-cu.ac.jp

<sup>4</sup>正会員 文教大学 情報学部 准教授 (〒253-8550 神奈川県茅ヶ崎市行谷1100)

E-mail:shuichi@bunkyo.ac.jp

自転車関連事故は日本で発生する全事故の2割と高い割合を占め、その約7割が交差点とその付近で発生している。信号交差点では自動車右左折時の事故割合が高くなっており、交差点内の自動車右左折時における自転車との安全性確保の検討が必要となっている。本研究ではドライビングシミュレータを用いて左折自動車と錯綜が生じる自転車走行パターンに着目し、その潜在的な危険性と交差点の設計要素の影響を評価することを目的とした。既存研究で指摘された左折自動車と錯綜する自転車挙動として死角並走、廻り込み横断、逆走横断のパターンを抽出し、ドライビングシミュレータを用いて自転車通行空間、横断帯位置の異なる交差点において錯綜再現実験を行い、TTCおよび接近速度、ドライバー不安感を用いて比較評価した。この結果、自動車の左後方の死角内を並走する自転車の走行の危険性が高く、自転車通行空間の矢羽根整備は、並走自転車の危険性を軽減する効果があることが明らかになった。

**Key Words :** *bicycle, left turn conflict, cycling simulator experiments*

## 1. はじめに

我が国では世界的に見ても自転車利用率の高い国であるが、交通安全面において、自転車関連事故は日本で発生する全事故の2割と高い割合を占め、人口当たりの死者数においても、先進国と比較して安全とは言えないとされる。このため、2012年に発出された安全で快適な自転車利用環境創出ガイドライン<sup>1)</sup>以後、自転車の車道通行を前提とした自転車交通の整序化が進められ、自転車の車道走行を基本とした交差点の設計の手引き<sup>2)</sup>が発出されている。また、2017年には自転車活用推進法が施行され、同推進計画<sup>3)</sup>では都道府県や各自治体で地方版の計画策定が促進<sup>4)</sup>されており、環境、健康、観光政策のもとで、自治体の地方版計画では上記ガイドラインに沿った自転車ネットワーク計画の策定が指示されている。自転車交通の安全性に関しては、交通事故件数はこの10年で約53%まで減少したが、自転車関連事故の事故件数は全事故に比べて減少の傾向が大きくなく、全数の事

故に対する自転車関連事故の割合は先進国の中で依然として高くなっている。そして、歩行者とともに自転車の死者数が多いことがわが国の交通事故の特徴となっている。我が国の自転車事故は、約7割が交差点とその付近で発生している。信号交差点においては、自動車の右左折時の事故が多くを占めており、特に車道走行を促進する中で、自動車の左折時の安全性確保が着目されている。

このような背景を踏まえ、本研究では信号交差点における左折自動車と錯綜する自転車挙動に着目し、その潜在的危険性を明らかにすることを目的とした。

## 2. 既存研究と本研究の方法

自転車を考慮した信号交差点での安全性について、教習場構内での模擬実験や、マルチエージェントシミュレータを用いての交差点の自転車の整備方法を評価する研究が進められてきている。

小川ら<sup>8)</sup>は、左折自動車と直進自転車の交錯の実態を調査した上で、そのような交錯を緩和するための交差点整備方式を提案し、それらを再現するシミュレーションを構築している。この結果「混在」型を基本とすることが適切で、遅れ時間を短縮できる方式である直進自転車と左折自動車を交差点手間で交差させる「交差」方式、安全感が確保できる両者の通行空間を交差点流入部まで分離する「分離」方式、といった方式を使い分けるのが望ましいとしている。

溝口ら<sup>9)</sup>は自動車左折時に自動車と自転車が同レーンに存在しない分離方式と同レーンに存在する混在方式の安全性をドライビングシミュレータを用いて、自動車・自転車それぞれを被験者とする実験を行って安全性を評価した結果、混在方式が自転車の不安は大きくなるが、TTCや衝突発生率などの指標から安全面ではむしろ優位であるとしている。

白川ら<sup>7)</sup>はサイクリングシミュレータを用いて右左折自動車と自転車との錯綜を再現した実験を、自転車が両側通行するワールド、左側通行のみのワールド、車道左側通行のみのワールドを再現して実験を行なった結果、TTC、最接近距離、危険感全ての評価指標で両側通行が危険で、車道左側通行が安全であることを明らかにした。

以上のように、交通ルールに従った自動車左折時の交通状況については安全性の評価が明らかになっているが、実際の交差点では、その形状等によって、ルール外の自転車の挙動が発生することや、自動車の左折時速度なども変化することから、こうした特性を考慮した評価を行って、事故対策を進めていくことが必要となっている。

そこで、楠瀬<sup>8)</sup>らは自転車と自動車の事故が多い交差点で見られた自転車挙動として「車道左側通行」「ショートカット走行」「横断帯通行」をとりあげ、広視野サイクリングシミュレータを用いた実験により自転車挙動の潜在的危険性および被験者の不安感を分析した結果、ショートカット走行の危険性が高いこと、車道からシフトの大きな横断帯を通行する場合も、衝突時の危険性が高くなる可能性が明らかであることを示した。また、ドライブレコーダーを分析した研究<sup>9)</sup>や交差点を撮影した動画を解析した研究<sup>10)</sup>では、この他にも様々な左折自動車と自転車の錯綜現象があることが指摘されている。

このため、本研究ではこれらの研究で指摘されている自転車走行パターンに着目し、その潜在的な危険性と交差点の設計要素の影響を評価することを目的とした。すなわち、左折自動車と錯綜する自転車挙動として死角並走、廻り込み横断、逆走横断のパターンを抽出し、ドライビングシミュレータを用いて自転車通行空間、横断帯位置の異なる交差点において錯綜再現実験を行い、TTCおよび接近速度、ドライバー不安感を用いて比較評価する。



図-1 ドライビングシミュレータ

### 3. 実験方法

#### (1) ドライビングシミュレータ

錯綜の危険性を評価するには、実道路での社会実験、路外実験、地域間比較等が考えられるが、衝突発生の恐れのある実物実験は実施困難である。このため、本研究では、衝突や危険な錯綜を含む実験を実施可能なドライビングシミュレータを用いて、仮想空間上の再現実験を行った。図-1に実験に用いたドライビングシミュレータ(以下DS)を示す。車両前面180度のシリンダースクリーン、バックミラーに加えて、左サイドミラー、左後方窓に運転者へ再現映像が投影される改良がされている。

また今回用いたDSではFORUMS社製UC-win Road ver.15.02を改良して用いた。自動車が運転者となり、自転車は指示した軌跡を一定速度で走行するが、自転車の前方に障害物がある場合は一定ルールで減速するように改良されている。仮想空間上での対象交差点を模擬した道路モデルを作成している。また、自転車・自動車については、約30フレーム/秒の走行ログ(位置、速度、角度等)が記録され、そのデータから安全指標を算出している。

#### (2) 評価対象の自転車挙動と交差点モデルの作成

本研究では、調査研究プロジェクトで行った交差点のビデオ観測とヒヤリハット発生状況の分析<sup>9),10)</sup>をもとに、危険な自転車通行パターンとして図-2を抽出した。自動車左側後方の死角を直進し横断する「死角内自転車」(Aパターン)、車道から横断帯へ接続し直進する「廻り込み自転車」(Dパターン)、自転車が自動車の左折先の車線から横断帯へと進入する「逆横断自転車」(Hパターン)の3パターンである。

交差点形状のモデルは、既往研究で錯綜の多発が見られた東京都大森本町一丁目交差点(写真1)をベースに、表-1に示すように、自転車通行空間を拡幅・矢羽根設置したケース、横断歩道の交差点端からのシフト幅を変えた形状を比較対象として作成した。



写真1 実験対象交差点

表-1 交差点形状

| 道路形状 | 車線幅        | シフト   |
|------|------------|-------|
| J1   | 普通(3m)     | 小(2m) |
| J2   | 矢羽根(3.75m) | 小(2m) |
| J3   | 普通(3m)     | 大(4m) |

・A 死角内自転車 ・D 追い込み自転車 ・H 逆横断自転車

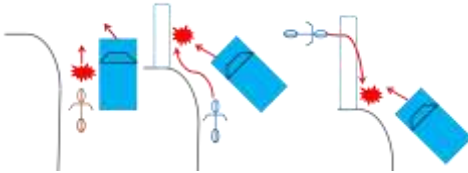


図-2 左折実験走行パターン

表-2 実験ケース組み合わせ

| ケース | 自転車走行 | 交差点形状 | 左後確認映像 |
|-----|-------|-------|--------|
| A11 | A     | J1    | なし     |
| A21 | A     | J2    | なし     |
| A10 | A     | J1    | あり     |
| A20 | A     | J2    | あり     |
| D11 | D     | J1    | なし     |
| D21 | D     | J2    | なし     |
| D10 | D     | J1    | あり     |
| D20 | D     | J2    | あり     |
| H11 | H     | J1    | なし     |
| H41 | H     | J3    | なし     |

### (3) DS実験の方法

DSによる実験では、3種類の自転車走行パターンと交差点形状、さらには錯綜時の安全確認をしない状態を再現するため、サイドミラー、左後方窓の映像を表示しないケースを加え、表-2 に示す 10 の組み合わせを実験ケースとした。このケースをランダムに繰り返し実験を行い、10 ケース各々4 回ずつデータを取り終えた時点で実験終了とした。なお、自動車ドライバーには、自転車への注意を散漫にするため、画面に数字を出し、足し算をさせる負荷実験を設けている。被験者は 10 名の若年者（男性7名、女性3名、年齢平均22.2歳、標準偏差1.16歳）である。

## 4. 実験結果

### (1) TTCによる安全性評価

安全性評価にはTTC（衝突前余裕時間、Time To Collision）を用いた。TTCは自転車と自動車と速度と進行方向を

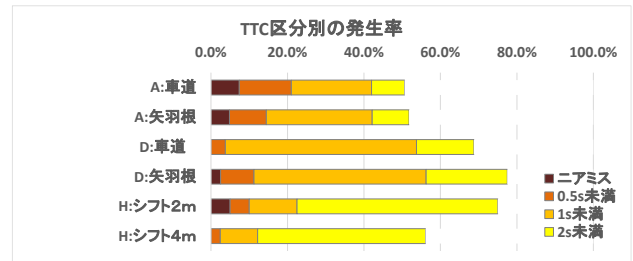


図-3 自転車走行パターンと道路形状別危険TTC発生状況

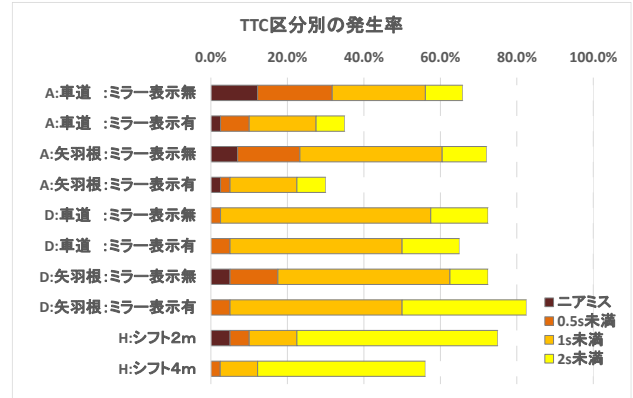


図-4 実験ケース別危険TTC発生状況

を維持した場合に衝突するまでに要する時間であり、値が小さいほど危険となる。TTC値は回避挙動開始までの余裕時間と関連し、運転者の反応時間を考慮した危険性判断が可能で、理解が容易な指標と言える。

図-3 に自転車走行パターンと道路形状別 TTC を、図-4 に走行パターン別 TTC を示す。走行パターンに注目すると、Aパターンが他の走行パターンと比べて衝突やそれに近い TTC の発生割合が最も高く危険であった。また、危険とされている 1.0s 以下の TTC の発生割合に着目すれば、どの走行パターンよりもDパターンが高く、この危険性も無視できない結果であった。最後にHパターンについて、これは他の走行パターンと比較すれば危険性はかなり劣るが、それでも 2.0s 以下の TTC 発生状況が過半数を超えているため、比較的危険な傾向の走行パターンであると考えられる。

また、道路形状に注目すると、J1 についてはDパターンにおける危険性は低かったが、Aパターンでの危険性が高いことが明らかになった。これは自動車と自転車の距離が近いために、Dパターンでは幅寄せをすることで安全に左折できたが、巻き込み事故の多いAパターンにおいては、自転車の発見から衝突までの時間が短いためだと推測される。そのため、車道幅の広がった J2 では、自転車を認識する時間が確保されていたことと、矢羽根によって自転車の存在を強く意識させられたためにAパターンでの危険性低かった。しかし、Dパターンにおいては車幅が広がったために幅寄せが不十分で、自転車の進入を許してしまい J1 よりも危険なケースが発生することが多かった。また、シフトは小さいほうが危険

TTC の発生割合は高かった。これは自動車が左折途中で一時停止するため、左折を行いながら再発進せねばならず、運転手にかかる負荷が多いことと、自転車発見と衝突のポイントが近くなるためだと考えられる。

さらに左後方の安全確認の有無に注目すると、Aパターンについては安全確認の有無で明らかに危険性が異なっていた。また、Dパターンについて安全確認ができない場合において危険性が異なったのは、矢羽根のある方において幅寄せが不十分で自転車が飛び出してくるケースが多かったためだと考えられる。

**(2) 接近速度・衝突方向による分析**

TTC 指標では、自転車を自動車が追従する状態などでは、自動車が加速した時などに小さな TTC が瞬間的に生じるが、実際には前方を注意していれば衝突の危険性は低くなる。これに対して、相手を発見しにくい側方からお互いが接近する場合には、同程度の TTC 値でもより危険性が高くなる。そこで、TTC 値が最小となる状態について、両者の接近方向と接近速度を確認して危険性を分析することとした。ここで、接近速度とは自転車と自動車間の最小距離の変化率を用いている。

図-5にAパターン、Dパターン、Hパターンの各自転車走行パターンのTTCと接近速度の分布と衝突方向を示している。TTCに着目すると、ここでもAパターン、Dパターンの危険性が高く、Hパターンは他より事故の危険性は低いことが分かる。これはHが自動車の前方に危険TTC危険値が生じているのに対し、Aパターン、Dパターンが自動車の側方や後方に自転車が存在している状態でのTTC危険値が生じていることから、視認性を考慮

するとAパターン、Dパターンの危険性が高いことは妥当である。

また、DパターンはAパターンと比較するとTTC値の高いものが多かったが、自動車側面でTTC危険値が生じている場合が多く、自転車が自動車の死角に位置していることが多いために、危険性が高いことが明らかになった。一方、接近速度に注目すると、Aパターン、Dパターンの走行パターンでの接近速度が概ね10km/h以下だったのに対し、Hパターンでは大半が15km/h以上となっており他の走行パターンに比べ非常に高い数値であり、この観点からではHパターンが最も危険であるといえる。またAパターン、Dパターンに注目すると、自動車側方よりも自動車後方からの接近の方において接近速度は高いことも明らかになった。

**(3) 不安感による分析**

安全に対する主観評価として、自動車ドライバーの不安感について確認した。実験ケース毎にドライバー、自転車運転者の被験者に不安感の体感を4件法(0:全く感じなかった~3:非常に感じた)で聞き取りを行なった。自動車ドライバーの不安感を集計した結果を自転車走行パターンと道路形状別(図-6)に、実験ケース別(図-7)に示す。

これらによるとDパターン、Hパターンの不安感が高いのに対してAパターンの不安感はかなり低かった。これはシナリオで実験を行った都合上、Dパターン、Hパターンでは自転車が急に現れたように感じてしまったことが原因の一つとして考えられる。

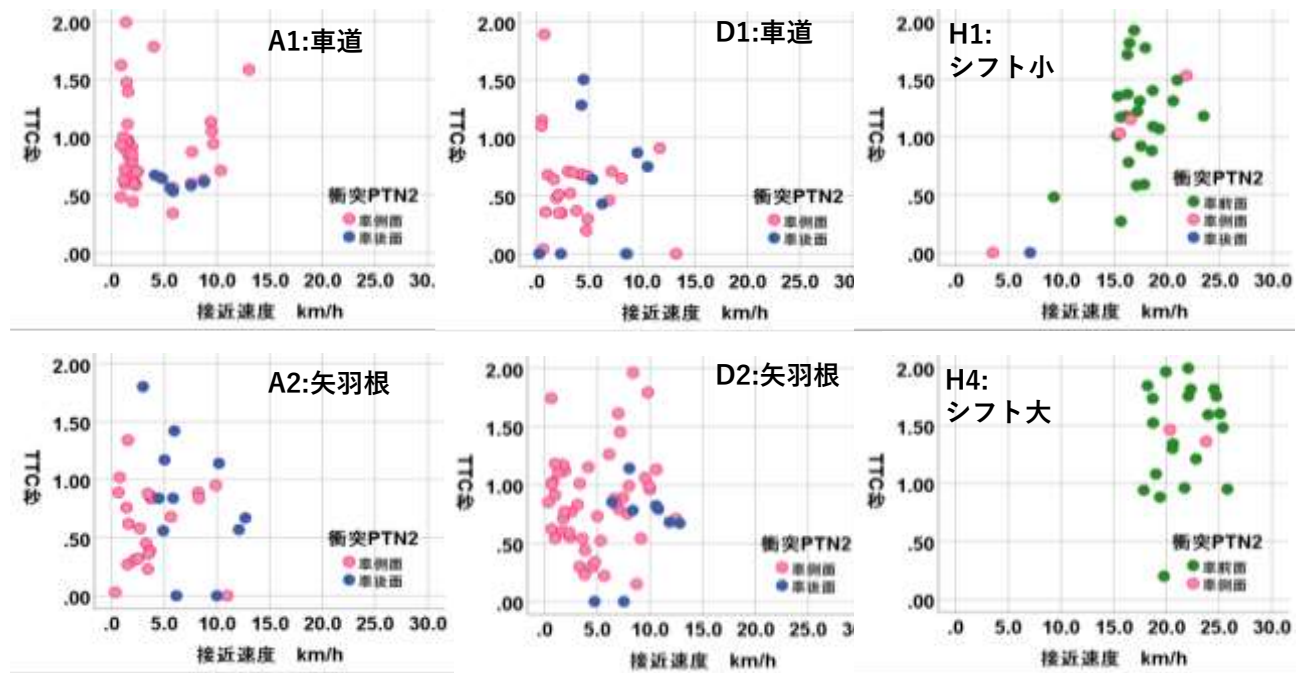


図-5 自転車走行パターン別のTTC値と接近速度、衝突方向の分布

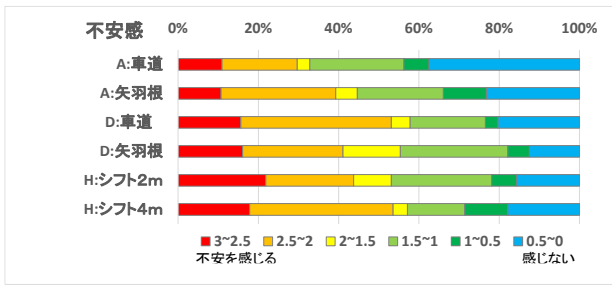


図-6 自転車走行パターンと道路形状別不安感の分布

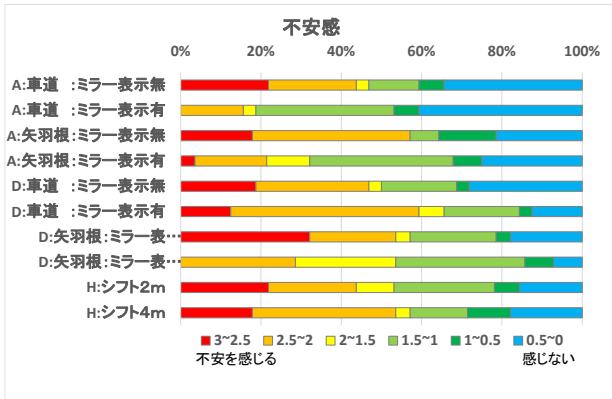


図-7 実験ケース別危険TTC発生状況

さらに、安全確認状況によってもミラー表示の有無等による自転車が見える場合と見えない場合では、不安感に大きな差異が生じる結果となった。また、ミラーや左後方ウィンドーでの確認が出来ない場合においては、確認が取れなかったために衝突を起こしても気づくことが出来ず、不安を感じないこともあった。実際、衝突や危険TTCの発生が多かったAパターンにおける不安感は低く、轆いていることに気づかず引きずってしまうような深刻な事故を起こす可能性を内包していると考えられる。

また、道路形状に注目しても同様の結果が現れており、衝突やそれに近いTTC値の発生割合の低かった形状のほうが不安感は高くなっていることから、これらの錯綜で生じる衝突に自転車の存在を認識できたかが大きく関わっていることが示唆される。

## 5. おわりに

TTCの観点からはAパターンの危険性が最も高く、接近速度の観点からはHパターンの危険性が、不安感ではDが最も高いと、各評価指標によって三者三様の結果となった。しかし、図-3のニアミスに見られるように事故発生率の高さからもAパターンが最も危険であり、Hパターンが最も安全であると考えられる。

Aパターンにおける危険な錯綜は、左折を行おうとした瞬間での巻き込みが多く、自転車の発見位置と衝

突位置が近くなり、衝突を回避することが難しいためである。それに対し、すり抜けが危険となっていたDパターンは幅寄せを行う事で自転車の進入を妨げることが出来、Hパターンは自転車を認識してからの急ブレーキが間に合う事が多いなど、DパターンやHパターンは事故を回避することが比較的容易であるため多少危険性が劣る結果となった。また、事故発生率の観点ではHパターンが最も安全であるが、仮に事故が発生した場合、接近速度が最も高いHパターンが深刻な事故になる可能性が高いと予想される。

さらに道路形状に注目すると、矢羽根のある方が自動車のドライバーに自転車の存在をより強く意識させるだけでなく、車道幅が広いために自転車を認識してから衝突までの時間が多少長引くために、Aパターンについては安全性が高まる事が明らかとなった。Dパターンにおいては車幅が広がったために幅寄せが充分に行えておらず、自転車の進入を許してしまいより危険なケースが発生することが多かったが、これは自動車のドライバーの意識を改善することで回避できるため、総合的には一般的な車道幅の道路よりも矢羽根のある道路の方が安全であるといえる。

また、シフトの形状に関しては、シフトが小さい方が再発進時にかかる負荷が多いことと、自転車発見と衝突地点が近いこと、TTC危険値の発生割合が高く危険であった。

本実験において、同じ道路形状でも走行パターンによって内包する危険性に差異が生じることが分かった。また、実験を行っていく過程で被験者が実験に慣れていき、Dパターンにおいて無意識下でAパターンを警戒するあまり、普段の走行では停止しないような場所で一時停止してしまうなど、実際の走行とことなる挙動が散見された。また、本研究はシナリオで自転車を操作して行ったため、自転車の挙動が一定となり、実際に起こる自転車の運転者の挙動が考慮できなかった。

したがって、今後は協調型CSを用いて複数の交差点や走行パターンで実験を行い、実際に起きうる自転車の様々な挙動も考慮しながら交差点形状と走行パターンがどのように錯綜に危険を及ぼしているのかを明らかにしていく必要がある。また、被験者が実際の走行と同じ挙動が出来るように実験の方法を見直す必要がある。

**謝辞：**本研究は国土交通省新道路技術会議、道路政策の質の向上に資する技術研究開発令和3年度の採択研究「車道基本の自転車通行環境整備による交通事故特性と新たな道路交通安全改善策に関する研究開発（研究代表者：吉田長裕）」において実施したものである。また、研究内容の一部は科学研究費基盤研究B

(20H02278) の一環としても実施している。記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省道路局, 警察庁交通局; 安全で快適な自転車利用環境創出ガイドライン, 平成24年11月, 平成28年7月改定
- 2) 交通工学研究会: 自転車通行を考慮した交差点設計の手引き, 平成27年, 令和元年改定
- 3) 国土交通省自転車活用推進本部: 自転車活用推進計画, 平成30年, [https://www.mlit.go.jp/road/bicycleuse/good-cycle-japan/assets/pdf/jitensha\\_katsuyo.pdf](https://www.mlit.go.jp/road/bicycleuse/good-cycle-japan/assets/pdf/jitensha_katsuyo.pdf)
- 4) 国土交通省自転車活用推進本部: 地方版自転車活用指針計画策定の手引き(案), 2018.8, [https://www.mlit.go.jp/road/bicycleuse/good-cycle-japan/assets/pdf/jitensha\\_katsuyo\\_local.pdf](https://www.mlit.go.jp/road/bicycleuse/good-cycle-japan/assets/pdf/jitensha_katsuyo_local.pdf)
- 5) 小川 倫, 高見 淳史, 大森 宣暁, 原田 昇: 自転車と左折自動車の交錯を考慮した交差点整備方式の評価—マルチエージェント・シミュレーションを用いて—, 交通工学研究発表会論文集, No. 34, pp. 531-536, 2014.
- 6) 白川 瑛一, 吉岡 宏晃, 山中 英生, 尾野 薫, 中川 諒一郎: 協調型DSを用いた信号交差点右左折時の自転車通行整序化の安全性評価, 土木計画学研究・講演集, Vol. 59, CD-ROM, 2019.
- 7) 山中 英生, 溝口 諒, 永松 啓伍: ドライビングシミュレータを用いた信号交差点左折時の自転車安全対策の評価実験: 土木学会論文集, Vol. 73, No5, pp. I-717-722, 2017.
- 8) 楠瀬 史浩, 山中 英生, 吉田 長裕, 松本 修一: 広視角協調型サイクリングシミュレータを用いた左折自動車との錯綜現象の安全性評価, 土木計画学研究・講演集, Vol. 64, CD-ROM, 2021.
- 9) 稲垣 具志, 吉田 長裕: ドライブレコーダデータを活用した車道における自転車と左折車の錯綜の類型化, 交通科学, Vol. 51, No. 2, pp. 28-33, 2020.
- 10) 吉田長裕, 澤田和樹, 瀧澤重志: 信号交差点における高速畳み込みニューラルネットワーク手法による軌跡データを用いた自転車と左折車の錯綜分析, 交通工学研究会, 交通工学論文集, Vol. 8, No. 2, pp. A\_273-A\_280, 2022

## SAFETY ANALYSIS ON THE CONFLICTS BETWEEN BICYCLES AND LEFT TURNING VEHICLES AT INTERSECTIONS USING DRIVING SIMULATOR

Itta YAMADA, Hideo YAMANAKA, Nagahiro YOSHIDA and Shuichi MATSUMOTO

Bicycle-related accidents account for as high as 20% of all accidents in Japan, and approximately 70% of these accidents occur at or near intersections. The percentage of accidents at signalized intersections is high when cars are turning left or right, and it is necessary to consider how to ensure the safety of bicycles when cars are turning left or right at intersections. The purpose of this study is to evaluate the potential hazards and the impact of intersection design elements by focusing on bicycle riding patterns that cause conflicts with left-turning vehicles using a driving simulator. The patterns of bicycle behavior that can cause the bicycle to cross left-turning vehicles were extracted from existing studies, including running alongside a blind spot, turning and crossing, and running in the opposite direction. The results showed that the danger of bicycles running side by side in the blind spot at the rear left of vehicle is high, and that the road markings for the bicycle traffic space are effective in reducing the danger of bicycles running side by side.