

# 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

山中 英生<sup>1</sup>・溝口 諒<sup>2</sup>・永松 啓伍<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部 (〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)

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

<sup>2</sup>正会員 若築建設(株) 技術開発部 (〒153-0064 東京都目黒区下目黒二丁目23番18号)

E-mail: mizoryo0822@yahoo.co.jp

<sup>3</sup>非会員 徳島県 商工労働観光部 (〒770-8570 徳島市万代町1-1)

E-mail: jyasutaway@docomo.ne.jp

自転車事故の約7割が交差点で発生しており、信号交差点では自動車右左折時の巻き込み事故がその約6割を占めている。平成24年度の「安全で快適な自転車利用環境創出ガイドライン」では自転車直進時の左折巻き込み防止のための交差点レイアウトを示している。今後自転車通行帯整備にあたっては、直進自転車と左折車の安全性を考慮した交差点処理方法が重要と考えられる。本研究では、信号交差点における車道走行の自転車を考慮した安全対策の評価を目的としている。施策として「分離方式」「混在方式」の2パターンをとりあげ、協調型ドライビングシミュレータを用いた実験により自転車と自動車の挙動、被験者の不安感を分析した。この結果、混在方式が安全性の面で優れているが、利用者の不安感の面では課題を残していることが明らかになった。

**Key Words :** intersection design, bicycle, left turn conflict, driving simulator experiments

## 1. はじめに

自転車事故は約7割が交差点で発生し、信号交差点では自転車の右左折時の事故の割合が6割となっている。平成24年11月に国土交通省と警視庁交通局より「安全で快適な自転車利用環境創出ガイドライン」<sup>1)</sup>が(以下、ガイドラインと略)発出された。ここでは、自転車レーンなどの自転車空間の走行遵守には、交差点部での直進性確保が重要であることが指摘され、車道左端の自転車レーンから自転車が進入する交差点について、自転車に直進性確保と左折巻き込み防止のための基本的な方針と法定外路面標示を含めたレイアウトを示している。

今後、自転車専用通行帯等を整備していくにあたり、交差点部は直進自転車と左折自動車の動線が交差する場所であり、安全性の観点から交差点の処理方法は極めて重要であると考えられる。しかし、現状では交差点の安全性評価を検証する研究は少なく、従来の評価方法には安全面やコスト面に課題が残っている。そこで、本研究では自転車・自動車を同時にかつ同一道路空間上で運転操作可能な自転車・自動車協調型ドライブシミュレーター(以下DS)の開発を行い、実空間では実験できない

多様な条件での交差点進入時の干渉型実験を可能とした。この協調型ドライビングシミュレータを用いて、車道を走行する自転車を考慮した信号交差点における自転車安全対策の評価を目的としている。

## 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レイアウトの安全性について、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ション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。

Rahimi<sup>2)</sup>は、複数の交差点整備パターンについて教習場校内の道路で模擬実験を行い、安全性を比較している。その結果、ガイドラインで提案されている左折自動車と合流する方式、すなわち交差点手前において自転車レーンをやめ、左折自動車と自転車を混在させる方式が、交差点での左折自動車と自転車との錯綜の減少可能性が高いと言える。ただし、この方式は自転車運転者から見た評価では、高くない結果となっており、自転車運転者への意識付けや走行方向の研修なども重要としている<sup>3)</sup>。

小川ら<sup>4)</sup>は、交差点整備方式の4案を対象にマルチエージェント・シミュレーションを用いて交錯危険度と遅れ時間の観点から各方式の評価を試みている。その結果、千石交差点で採用されている「現状方式」は、左折車や歩行者の交通量が増えると交錯が高まり、「混在方式」は「現状方式」に比べ交錯を起こしにくい、左折車が多いと交錯が高くなる傾向がある。さらに、専用信号による「分離方式」は遅れ時間が大きい、「交差方式」（交差点の手前で直進自転車と左折自動車の車線を入れ替える方式）は交錯が少なく、遅れ時間も小さく、安全上、円滑上も有効な方式としている。ただし「交差方式」は自転車が車線変更する抵抗を考慮に入れると、「混在方式」を基本として「交差方式」「分離方式」を使い分けるのが望ましいとしている。

また、海老澤・久保田<sup>5)</sup>は、都内においてガイドラインで示されている2つの方式で整備された千石一丁目、札の辻交差点を対象にビデオ観測、意識調査、事故を分析しており、意図した挙動が増加し、利用者の評価も高く、事故の増加も見られないことを明らかにしている。ただし、安全性の面で課題となる挙動も生じていることから、部分的な改善の必要性を指摘している。

以上のように、自転車に配慮した交差点の設計については、一定の評価が明らかになっているが、今後も多様な視点からの評価を進めることが必要となっている。特に、模擬実験やマルチエージェント・シミュレーションでは衝突現象の再現が難しいなどの課題が残っている。

近年、交通事故の要因抽出・安全評価にDSが用いられるようになってきている。DSは同一条件を繰り返し行えること、また、衝突再現実験などが可能になる等のメリットがある。ただし、従来のDSでは、自転車、自動車が同時に同一空間上で体験することが出来ず、自転車・自動車の関係性を踏まえたデータを得ることが出来ない。そこで、本研究では自転車・自動車を同時に同一空間上で運転操作可能な自転車・自動車協調型ドライビングシミュレータの開発を行った。このシミュレータを用いて自転車安全施策の評価を行った。

### 3. 実験方法

#### (1) 協調型ドライビングシミュレータ

走行実験に用いた自転車・自動車の協調型DSは、自転車と自動車の運転者は同一空間上で同時に操作が可能なもので、交差点等における自転車と自動車との錯綜条件下での、自転車・自動車運転者の挙動分析を行うことを目的としている（図-1）。Forum8社製のUC-WIN-ROAD Ver.9を改良したもので、自転車と自動車の2者が同時に操作できるようマルチユーザー・クラスターモードを改

良している。自転車は、幅2.0m高さ2.4mのパネルを正面から右回りに後ろ正面まで計4枚配置し、4台のプロジェクター（解像度1600×1200ピクセル）で投影して左右240度、上下45度の視野像を出力する。後輪回転・ハンドル操作に連動して映像が再現される。自動車は実物の軽自動車に60インチ（正面）、52インチ（側面）、50インチ（後面）の5台の液晶ディスプレイ（1920×1200ピクセル）で窓越の視野像を出力し、ハンドル・ブレーキ・アクセル・ウィンカーが映像に連動している。

このシミュレータでは、実験時の走行主体の刻々の位置、速度、加速度、進行方向などの挙動特性を容易に入手可能で、自動車・自転車の両者の挙動値を用いることで、多様な錯綜指標の算出が可能である。

#### (2) 評価対象とした交差点自転車安全対策

本研究では自転車安全施策として既存研究の成果を考慮して分離方式と混在方式（図-2）を対象とした。

分離方式は自転車と自動車の走行空間を交差点進入部まで完全に分離する方式である。混在方式とは、交差点手前で、左折する自動車を自転車レーンまで寄せることで、自転車と左折自動車を直列に並ばせ混在して交差点に進入する方式である。

#### (3) DS実験の方法

走行実験は図-3に示すケースシナリオで実施した。

##### a) 自転車が被験者の場合

自転車は前方の交差点に向かって直進し横断する。自動車は交差点を左折して追い越す。また、追い越し左折位置を(1)余裕のある自転車前(前余裕と記載)、(2)直前

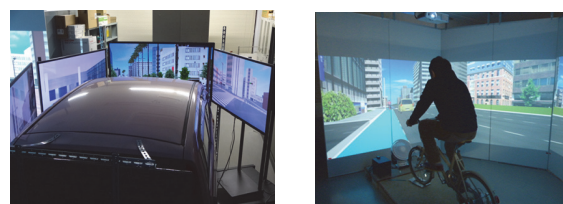
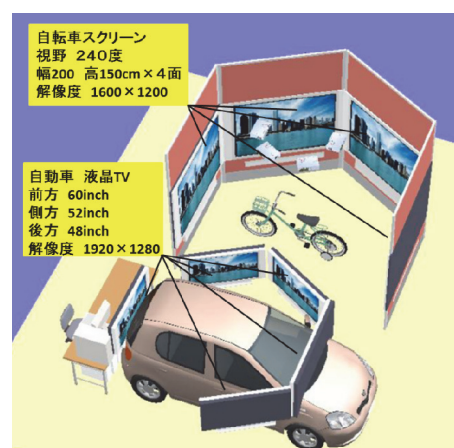


図-1 協調型DSの概要

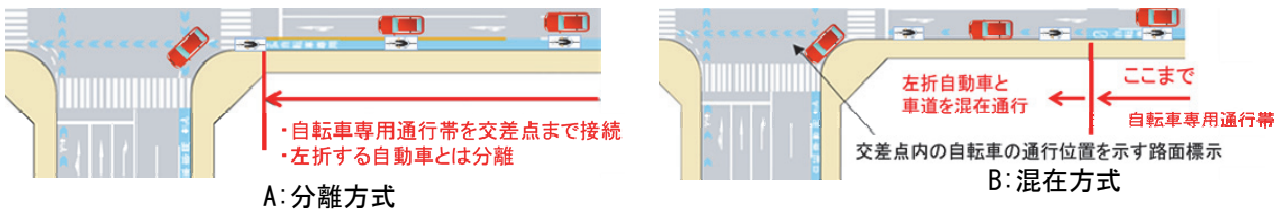
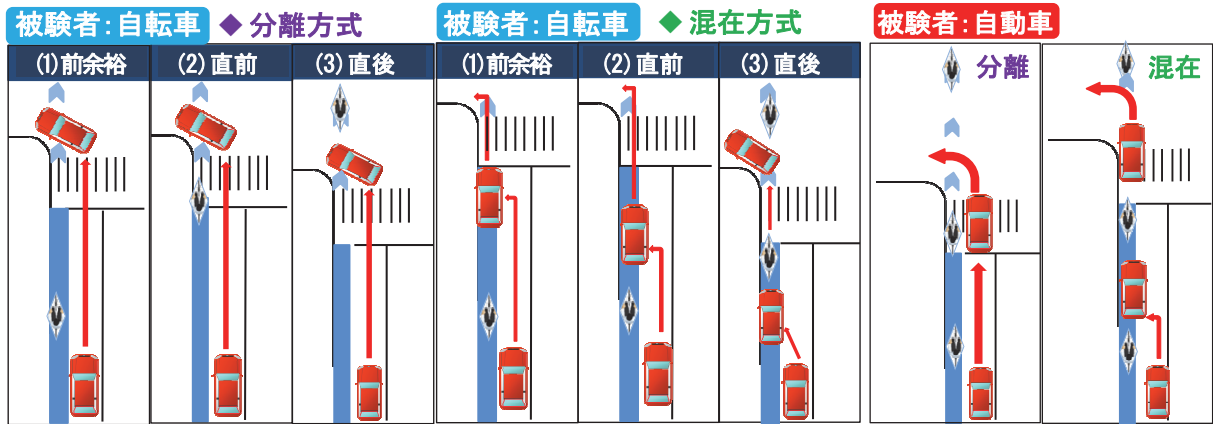


図-2 評価対象とした自転車安全対策



注：走行方式としての分離・混在を比較するため、レーン部の舗装は同一としている。

図-3 自転車被験者、自動車被験者の実験シナリオ

(3) 直後の3パターンとしている。追い越しして左折する位置は、前余裕は自転車の前約8mのところ、直前4mを目安としている。

自動車は分離方式の場合はシナリオ（ソフトで自動的に再現）で操作したが、混在方式の場合は、シナリオでの操作が不可能であったため、協調相手がテスターとして自動車シミュレータを操作する方式とした。シナリオ方式の場合は、自転車の走行位置をコンソールで刻々に確認し、タイミングを合わせて自動車の左折挙動を開始させ、定めたルート・速度で左折するようになっている。協調型でテスターが自動車を操作する場合は、自転車の走行位置に応じてテスターが指示した速度・ルートで追い抜く。いずれの場合も(1) 前余裕, (2) 直前, (3) 直後は目視で判断したタイミングであるため、距離には多少バラツキが発生するが、できるだけ一定した実験となるよう十分な練習を行った。このため、シナリオ方式とテスター方式の差異は大きくないと判断している。

b) 自動車が被験者の場合

自転車レーン上に自転車が5台同じ速度で、間隔を変えて進入してくるのに注意して左折させている。自転車の速度は12km/h, 18km/h, 自転車の間隔は速度12km/hでは5, 10, 15, 20, 18km/hでは7.5, 15, 22.5, 30mとしている。自転車はシナリオで自動走行しており、無理な割り込みで自動車が左折してきても、減速、回避挙動は生じず、衝突が生じる設定となっている。

c) 実験ケース

上記の組み合わせとして表-1に示す10ケースを各被験者

表-1 実験ケース

被験者	実験パターン	分離方式	混在方式
		自動車 追越左折位置	(1) 前余裕 (3) 直前 (5) 直後
自動車	自転車速度	12km/h 18km/h	(7) (8) (9) (10)

で実験した。すなわち、被験者が自転車の場合は追越左折位置と分離・混在の組み合わせで(1)~(6)の6ケース、被験者が自動車では自転車速度と分離・混在の(7)~(10)の4ケースである。このうち、(2)(4)(6)が協調型DSのテスター操作の実験である。なお、自動車運転の被験者には自転車に注意して左折すること、自転車運転者には自動車に注意して直進することのみを伝えている。

各ケースは合計で5回の繰り返し実験となっている。ただし、実験の順序はランダムにしている。1回の走行終了後、安全感を5件法で評価させた。被験者は若年者15名、高齢者10名の計25名である。また、視線挙動を計測するアイマークレコーダー(EMR-9)を装着させたが、眼球の状況などから装着不可やエラー発生等となって被験者以外で、若年者5名、高齢者4名の分析を行った。

(4) 分析に用いた評価指標

本研究では以下の評価指標を用いた。

a) 交通錯綜指標

従来より交通事故の発生リスクの評価方法として交通

主体同士の危険な状態（錯綜）を定義して、その頻度等を評価する手法が提案されている。例えばHayward<sup>6)</sup>によるTTC指標、Allenら<sup>7)</sup>によるPET指標が代表的で、これらを改良した宇野らによるPICUD指標<sup>8)</sup>、若林らによるPTTC指標<sup>9)</sup>などである。

TTC（衝突前余裕時間，time to collision）は自転車と自動車とが仮に速度と進行方向を維持した場合に衝突するまでに要する時間であり、小さな値ほど危険状態となる。両者の軌跡が交差しない場合、危険な接近が起きてもTTC値が無限大（安全と判断）となる問題が指摘されている。一方、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。PET（行動後到達時間，Post encroachment time）は、計測時点で車両1の存在した場所を衝突予想地点と考え、車両2がその場所に到達する予想時間で定義されている。衝突が生じないニアミス状況も危険と考え、その発生までの時間と考えられ、やはり小さな値ほど危険となる。PICUDは上記の衝突予測に車両の減速行動を考慮しているもので、車間距離を用いるため追突危険性評価などに適している。PTTCは同じく衝突予測に車両の減速行動を考慮して、2次元上の車両進行方向を用いており合流時の危険性評価などに用いられている。

本研究では、代表的で指標値の意味が理解しやすいTTC指標の概念を採用することとした。交差点の自転車安全性評価に用いた研究<sup>10)</sup>があることも採用の理由である。ただし、上記の欠点を補うため、本研究では、軌跡の交差を占有空間の重なりで衝突を定義して、さらに自動車の占有空間にバッファ空間を加えることで、ニアミスを考慮できるようにした。

具体的には図-4に示すように、自動車の占有空間として前後左右25cmのバッファを設け、自転車は変形菱形として、両者の速度、進行方向が変更しないとして占有空間が重なるまでの予測時間をTTC値として測定した。また、自動車、自転車被験者ともに自動車が走行開始し左折して交差点から10mの位置まで、0.1秒毎にTTC値を算出し、その間の最小値を実験ケースのTTC値とした。

全範囲で占有空間の重なりが予想されなかった場合はTTC値は無限大となる。このため、一定時間以下（運転者の反応時間を考慮して1,2,3秒を採用）のTTC値を危険状態として、その発生比率で評価することとした。

#### b) 衝突発生

DSの実験では、実道路と異なり衝突が発生しても安全なため、低い割合ではあるが実際に衝突が生じている。ここでは、この衝突の比率を比較した。

#### c) 自転車・自動車の視認

走行時に注意する相手を視認できているかは、安全性の面でも、あるいは左折時の安全感の確保の面でも重要

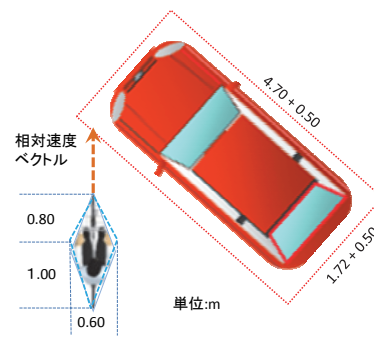


図-4 TTC算出のための占有空間の設定

と考えられることから、アイマーク装着被験者のみではあるが、その頻度を比較した。

#### d) 利用者の不安感

自転車が車道部を一方向に走行することで交差点の安全性が高まることが想定されているが、我が国では自転車や自動車から不安感が指摘され十分に浸透していない。このため方式の普及に関係する不安感についても評価することとした。

## 4. 実験結果

### (1) TTCによる安全性評価結果

各実験ケースでの最小TTCの頻度を集計した結果を図-5に示す。図中の線はカイ二乗検定で5%有意差のある関係を示している。

自転車被験者で、危険とされる2秒以下の割合で見ると、若年者・高齢者ともに混在方式の割合が高くなる傾向が見られた。さらに危険な1秒以下でみると、高齢者は分離方式の割合が高くなっていった。しかし3秒以上の割合は分離方式の方が全体として高く、分離方式の方が安全なケースの比率は多くなると言える。

一方、自動車被験者では、2秒以下の割合が自転車被験者同様に、混在方式で分離方式を上回っている。今回の実験の混在方式では5台連続する自転車の列に割り込み、しかも自転車は減速しない設定であることが、潜在的に危険な状態の発生を高めたことが考えられる。ただし、高齢者では1秒以下の割合が混在方式の方がやや小さくなっており、より慎重な運転をする傾向のある高齢者では危険性の高い状況は避けられていると考えられる。

図-6は自転車被験者について、自動車の追い越し場所別にTTCが1秒以下、2秒以下のケース割合を比較している。図中の線はカイ二乗検定で5%有意差がある関係を示している。若年者・高齢者とも前余裕、直前、直後の順に危険性が高まる。高齢者の混在方式直前でむしろ危険性が低くなっているが、これは高齢者は混在方式で自動車に道を譲る傾向があることが理由と考えられる。ま

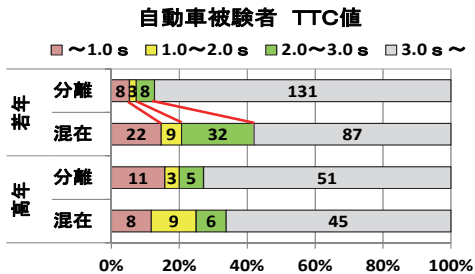
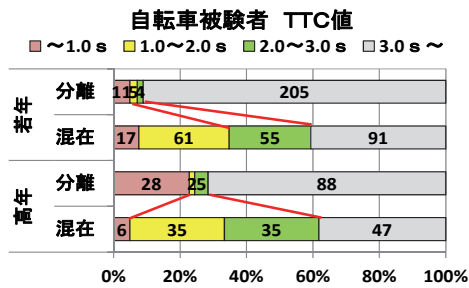


図-5 TTC値による安全性の比較

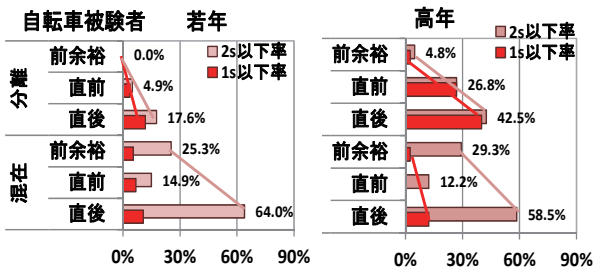


図-6 追い越し位置によるTTC値の比較(自転車被験者)

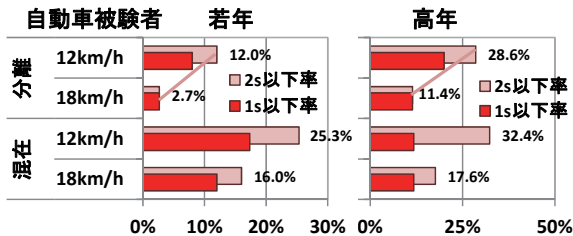


図-7 自転車速度別TTC値の比較(自動車被験者)

た、1秒以下の比率は若年者、高齢者ともに分離が混在より高くなっているが、2秒以下の割合でみると、特に前余裕や直後の場合で混在が分離より高い傾向が見られる。

図-7は自動車被験者で、自転車の速度別にTTCが1秒以下、2秒以下のケース割合を比較している。同様に図中の線は同様に有意差のある関係である。1秒以下率、2秒以下率ともに、自転車速度が18km/hの時よりも12km/hの時に高くなる傾向が見られる。特に分離方式の場合に若年者、高齢者ともに2秒以下率が自転車速度が12km/hで有意に高くなる。これは、速度の違い自転車を待ちきれず、無理な割り込みをすることが原因と考えられる。この集計でも、2秒以下の潜在的な危険状態の割合は混在方式で分離方式より高くなる傾向が見られる。

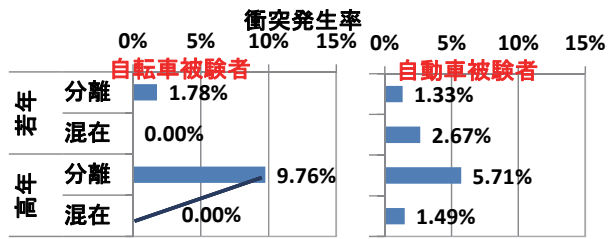


図-8 衝突発生率の比較

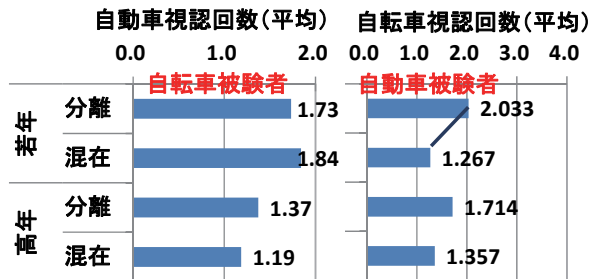


図-9 相手側視認回数の比較

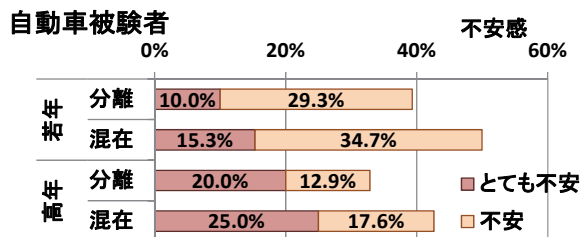
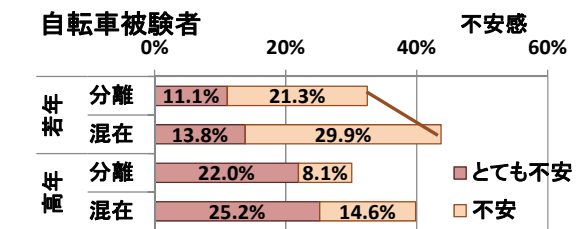


図-10 利用者の不安感の比較

## (2) 衝突発生

DS実験では実際に5%程度の衝突が発生している。図-8はその発生率を比較した結果である。図中の線は同様に有意差のある関係である。自転車被験者では、分離方式の場合のみで発生しており、特に高齢者が有意に高い。自動車被験者では、混在、分離ともに見られ、やはり高齢者の分離方式で高く、混在方式は低くなっている。

## (3) 自転車・自動車の視認

図-9はアイマークを装着した被験者について、相手方を視認した回数の平均を比較した結果である。図中の線は同様に有意差のある関係である。自転車被験者の自動車視認回数では、若年者は方式に差はなく確認回数が多く、高齢者は分離が多くなる。自動車被験者の自転車視認回数でも、若年者、高齢者ともに分離が多く、特に若年者では分離が有意に混在よりも視認回数が多くなっている。

#### (4) 利用者の不安感

実験ごとの事故を起こしそうな不安感を5件法で評価させた。図-10はその発生率を比較した結果である。若年者・高齢者、自転車・自動車、いずれも混在方式で不安感が高いことが分かる。

#### 5. おわりに

TTC 1秒以下の発生率や衝突発生率、視認回数などの指標から見ると、危険性の高い状況を発生する割合が少ないという点で、混在方式が分離方式よりも安全性の面で優れている傾向が見られた。ただし、TTC 2秒以下といった潜在的に危険な状況の発生状況や、利用者の不安感では、混在方式は分離方式より劣る傾向が見られている。このことは既存研究でも示されているように、混在方式は客観的安全性は高いものの、利用者への浸透には課題を残していることが想定されるという結果と言える。

ただし、実験結果の一部では、相手側挙動の設定の問題などが示唆されており、今後は、実験条件の検討が必要と言える。さらに、横断歩道上の自転車・歩行者の存在の影響、矢羽根上を走行しない自転車の存在などを考慮した詳細な分析も必要と言える。また、今回の実験では協調型DS機能は、ソフトのシナリオ機能不足を補う形で利用しているのみであり、自動車と自転車の両者の同時の自由な走行状態を再現可能な機能を活かした評価実験についても、今後の課題と考えている。

謝辞：本研究は科学研究費基盤研究(B) 25289166にて調査・分析を実施し、その後基盤研究(A) 16H02369にて分析を進めたものである。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省、警察庁：安全で快適な自転車利用環境創出ガイドライン，2011.
- 2) A. RAHIMI A. Rahman, 小嶋文, 久保田尚：交差点における自転車安全対策に関する研究，土木計画学研究発表会・講演集，No. 45 (CD-ROM), 2012.
- 3) 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，2015.
- 4) 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.
- 5) 海老澤綾一, 久保田博之：交差点における矢羽根型表示“自転車ナビライン”の試行について，交通工学研究発表会論文集，No. 34, pp. 523-526, 2014.
- 6) Hayward, J. C.: Near-miss determination through use of a scale of danger, *Highway Research Record, 51st Annual Meeting*, pp. 24-34, 1972.
- 7) Allen, B. L., Shin, B. T. and Cooper, D. J.: Analysis of traffic conflicts and collision, *Transportation Research Record*, No. 667, pp. 67-74, 1978.
- 8) Uno, N., Iida, Y., Itsubo, S. and Yasuhara, S.: A microscopic analysis of traffic conflict caused by lane-changing vehicle at weaving section, *Proc. of The 13th "Handling Uncertainty in Transportation Analysis of Traffic and Transportation Systems"*, pp. 143-148, 2002.
- 9) 若林拓史, 小嶋紀之, 大石理：交通流ビデオ解析システムの開発と交通コンフリクト解析への適用，土木計画学研究・論文集，No. 19, pp. 765-775, 2002.
- 10) 押川智亮, 小川圭一：自転車の錯綜現象に対する交通コンフリクト指標の適用可能性に関する検討，土木計画学研究・講演集，No. 29 (CD-ROM), 2004.

(2017. 2. 24 受付)

## EVALUATION OF THE BICYCLE SAFETY TREATMENTS OF LEFT-TURNING VEHICLES AT SIGNALIZED INTERSECTIONS USING DRIVING SIMULATOR

Hideo YAMANAKA, Ryou MIZOGUCHI and Keigo NAGAMATSU

Around 70% of bicycle accidents in Japan occur at intersections. At signalized intersections, 60% of bicycle accidents are crashes with left or right turn vehicles. The Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) and the National Police Agency (NPA) published “Guideline for creating a safe and comfortable bicycle friendly environment” on November 29th, 2012. This guideline mentioned basic strategy of the layout of intersections to consider the prevention of crashes of cycling on carriage way and vehicles turning left. In order to promote bicycle friendly streets, it becomes important to design intersections especially safe for the bicycles to left-turning vehicles in Japan. The aim of this study is to evaluate the bicycle safety treatments for left-turning vehicles at signalized intersections by employing the experiments in virtual reality of driving and cycling simulator. Comparing with junction layouts; segregation policy and mixture policy from viewpoints of vehicle and bicycle behavior, safety sense, and TTC, it is found that the mixture policy is safer but has disadvantage for keeping cyclists’ safety sense to the vehicles.